



**T.C.  
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI**

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN  
KRİTİK DEĞERLERE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**YUSUF ALAŞAHAN**

**ARALIK 2014**

**DÜZCE**

## KABUL VE ONAY BELGESİ

Yusuf ALAŞAHAN tarafından hazırlanan GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN KRİTİK DEĞERLERE ETKİSİ isimli lisansüstü tez çalışması, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15/12/2014. tarih ve 2014\1154 sayılı kararı ile oluşturulan jüri tarafından ELEKTRİK EĞİTİMİ Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Üye  
(Tez Danışmanı)  
Prof. Dr. İsmail ERCAN  
Düzce Üniversitesi

Üye  
Doç. Dr. Ali ÖZTÜRK  
Düzce Üniversitesi

Üye  
Yrd. Doç. Dr. Salih TOSUN  
Düzce Üniversitesi

Tezin Savunulduğu Tarih : 17/12/2014

### ONAY

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yusuf ALAŞAHAN'ın ELEKTRİK EĞİTİMİ Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans derecesini almasını onamıştır.

Prof. Dr. Haldun MÜDERRİSOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **BEYAN**

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

17.12.2014

Yusuf ALAŞAHAN

*Sevgili Eşime*

## **TEŐEKKÖR**

Öğrenim hayatım boyunca harcadıkları emekler için sevgili aileme, tez çalışmam boyunca tüm içtenliğiyle yanımda olan biricik eşime, değerli fikirleri ile her zaman beni yönlendiren çok kıymetli hocalarım Doç. Dr. Ali ÖZTÖRK ve Yrd. Doç. Dr. Salih TOSUN'a ayrıca alanımda yetişmemde emekleri olan bütün bölüm hocalarıma ve danışman hocam sayın Prof. Dr. İsmail ERCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

**22.11.2014**

**Yusuf ALAŞAHAN**

## İÇİNDEKİLER

## Sayfa

|   |      |
|---|------|
| TEŞEKKÜR SAYFASI .....                                      | I    |
| İÇİNDEKİLER .....   | II   |
| ŞEKİL LİSTESİ .....   | VIII |
| ÇİZELGE LİSTESİ .....                                       | X    |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....                       | XI   |
| ÖZET .....  | 1    |
| ABSTRACT .....  | 2    |
| EXTENDED ABSTRACT .....                                     | 3    |
| 1. GİRİŞ .....  | 5    |
| 1.1 HARMONİK TANIMI.....                                    | 5    |
| 1.2 HARMONİKLERİN MATEMATİKSEL ANALİZİ .....                | 6    |
| 1.2.1 Fourier Dönüşümü.....                                 | 7    |
| 1.2.2 Fourier Serilerinin İfade Şekli.....                  | 7    |
| 1.2.2.1 Trigonometrik Biçim.....                            | 8    |
| 1.2.2.2 Üstel Biçim.....                                    | 9    |
| Örnek.....  | 10   |
| 1.2.2.3 Fourier Serilerinin Grafiksel Olarak Bulunması..... | 11   |
| Örnek.....  | 13   |
| 1.3 HARMONİK BÜYÜKLÜKLERE AİT                               |      |
| TEMEL TANIM VE KAVRAMLAR .....                              | 14   |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.3.1. Toplam Harmonik (Distorsiyonu-THD) Bozulma.....            | 16        |
| 1.3.2. Toplam Talep(Distorsiyonu-TTD) Bozulması.....              | 16        |
| 1.3.3. Şekil (Form) Faktörü.....                                  | 17        |
| 1.3.4. Tepe(Crest) Faktörü.....                                   | 17        |
| 1.3.5. Telefon Etkileşim Faktörü (TEF).....                       | 17        |
| 1.3.6. Transformator K Faktörü.....                               | 18        |
| 1.3.7. Distorsiyon Güç Faktörü.....                               | 19        |
| <b>1.4. NONLİNEER ELEMANLAR VE</b>                                |           |
| <b>HARMONİK BİLEŞEN İÇEREN DEVRELER.....</b>                      | <b>20</b> |
| 1.4.1. Nonlinear Elemanın Tanımı.....                             | 20        |
| 1.4.2. Nonlinear Elemanın Harmonik Üretimi.....                   | 22        |
| 1.4.2.1. Devrenin Elektrik Lineersizliği.....                     | 23        |
| 1.4.2.2. Devrenin Magnetik Lineersizliği.....                     | 24        |
| 1.4.3. Sinüsoidal Beslemeli Nonlinear Devreler.....               | 25        |
| 1.4.4. Nonsinüsoidal Beslemeli Linear Devreler.....               | 27        |
| 1.4.5. Nonsinüsoidal Beslemeli Nonlinear Devreler.....            | 30        |
| <b>1.5. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR.....</b>                        | <b>32</b> |
| 1.5. 1. Konverterler.....   | 33        |
| 1.5. 2. Transformatorler.....                                     | 34        |
| 1.5. 3. Generatörler.....   | 35        |
| 1.5.4. Ark Fırınları.....   | 35        |
| 1.5.5. Gaz Deşarj prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları..... | 36        |
| 1.5.6. Statik VAR Kompanzatorleri.....                            | 36        |
| 1.5.7. Fotovoltaik Sistemler.....                                 | 36        |
| 1.5.8. Bilgisayarlar.....   | 36        |

|   |           |
|---|-----------|
| 1.5.9. Elektronik Balastlar.....                                    | 37        |
| 1.5.10. Yarı İletken Elemanların Kullanıldığı Cihazlar.....         | 37        |
| 1.5.11. Kaynak Makineleri.....                                      | 38        |
| 1.5.12. Yüksek Gerilimli DC ile Enerji İletim Sistemleri(HVDC)..... | 38        |
| 1.5.13. Elektrikli Ulaşım Sistemleri.....                           | 38        |
| <b>1.6. HARMONİKLERİN SİSTEME ETKİLERİ.....</b>                     | <b>38</b> |
| 1.6.1. İletkenler Üzerindeki Etki.....                              | 39        |
| 1.6.2. Direnç Üzerindeki Etki.....                                  | 41        |
| 1.6.3. Reaktanslar Üzerindeki Etki.....                             | 42        |
| 1.6.4. Kondansatörler Üzerindeki Etki.....                          | 42        |
| 1.6.5. Motorlar ve Generatörler Üzerindeki Etki.....                | 43        |
| 1.6.6. Transformatörler Üzerindeki Etki.....                        | 44        |
| 1.6.7. İletim Sistemleri Üzerindeki Etki.....                       | 45        |
| 1.6.8. Devre Kesiciler ve Sigortalar Üzerindeki Etki.....           | 45        |
| 1.6.9. Aydınlatma Elemanları Üzerindeki Etki.....                   | 45        |
| 1.6.10. Güç Faktörü Üzerindeki Etki.....                            | 46        |
| 1.6.11. Röleler üzerindeki Etki.....                                | 47        |
| 1.6.12. Ölçü Aletleri üzerindeki Etki.....                          | 47        |
| 1.6.13. Elektronik Elemanlar Üzerindeki Etki.....                   | 48        |
| 1.6.14 Rezonans Etkisi.....   | 48        |
| <b>1.7. GÜÇ SİSTEMLERİNDE LİNEER GÜÇ AKIŞI ANALİZİ.....</b>         | <b>50</b> |
| 1.7.1. Güç Akışı Hesaplamaları.....                                 | 51        |
| 1.7.2. Sistemin Bara Admitans Matrisinin Hesaplanması.....          | 55        |
| <b>2. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>                                  | <b>55</b> |



|  |           |
|--|-----------|
| <b>2.1. NEWTON RAPHSON YÖNTEMİ.....</b>  | <b>55</b> |
| <b>2.2. NEWTON RAPHSON YÖNTEMİNİN</b>  |           |
| <b>LİNEER GÜÇ SİSTEMLERİNE UYGULANMASI.....</b>  | <b>56</b> |
| <b>2.2.1. Jacobian Matris Elemanlarının Hesaplanması.....</b>  | <b>58</b> |
| <b>2.3 . GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK GÜÇ AKIŞI.....</b>   | <b>61</b> |
| <b>2.3.1. Harmonik Güç Akışı'nda Bilinmeyen Büyüklükler.....</b>   | <b>62</b> |
| <b>2.3.2. Harmonik Güç Akışı'nda Eşitlikler.....</b>   | <b>62</b> |
| <b>2.3.3. (X) Durum Değişken Vektörü.....</b>  | <b>62</b> |
| <b>2.3.4. (y-f(x)) Vektörü:.....</b>   | <b>63</b> |
| <b>2.3.5. <math>\Delta p</math> ve <math>\Delta q</math> Vektörleri .....</b>  | <b>64</b> |
| <b>2.3.6. <math>\Delta I_r^1</math> ve <math>\Delta I_i^1</math> Vektörleri.....</b>                                     | <b>64</b> |
| <b>2.3.7. <math>\Delta I_r^{(5)}, \Delta I_i^{(5)}, \dots, \Delta I_r^{(h)}, \Delta I_i^{(h)}</math> Vektörleri.....</b> | <b>65</b> |
| <b>2.3.8. Jacobian Matris:.....</b>  | <b>66</b> |
| <b>2.3.9. Lineer Baralarda Akım Eşitlikleri.....</b>   | <b>79</b> |
| <b>2.4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI.....</b>   | <b>80</b> |
| <b>2.4.1 Gerilim Kararlılığı'nın Tanımlanması.....</b>   | <b>81</b> |
| 2.4.1.1. <i>CIGRE( Conseil International des Grands Reseaux Electriques )</i>  |           |
| <i>Tanımlaması.....</i>  | <i>81</i> |
| 2.4.1.2. <i>IEEE Tanımlaması.....</i>  | <i>81</i> |
| 2.4.1.3. <i>IEEE ve CIGRE Birlikte Tanımlaması.....</i>  | <i>81</i> |
| 2.4.1.4. <i>Güç Sisteminde Kararlılığın Sınıflandırılması.....</i>   | <i>82</i> |
| 2.4.1.5. <i>Büyük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı(Large Disturbance).....</i>  | <i>83</i> |
| 2.4.1.6 <i>Küçük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı(Small Disturbance).....</i>   | <i>83</i> |
| 2.4.1.7 <i>Kısa Süreli Gerilim Kararlılığı(Short Term).....</i>  | <i>83</i> |

|   |            |
|---|------------|
| 2.4.1.8 Uzun Süreli Gerilim Kararlılığı(Long Term).....                     | 83         |
| <b>2.4.2 Gerilim Çökmesi.....</b>   | <b>83</b>  |
| 2.4.2.1 Dünyada Meydana Gelmiş Olan Gerilim Çökmeleri.....                  | 84         |
| <b>2.4.3. P-V Eğrisi Üzerinden Kritik Değerlerin Belirlenmesi.....</b>      | <b>86</b>  |
| <b>2.4.4. P-V Eğrilerinin Çizdirildiği Denklemlerin Elde Edilmesi.....</b>  | <b>86</b>  |
| <b>2.4.5. Bara İndirgeme Yöntemi.....</b>                                   | <b>91</b>  |
| <b>2.4.6. Güç Sistemine Ait Parametrelerin Kritik Değerlere Etkisi.....</b> | <b>91</b>  |
| 2.4.6.1. Güç Faktörünün Etkisi.....   | 92         |
| 2.4.6.2. Hat Uzunluğunun Etkisi.....  | 93         |
| 2.4.6.3. Hat Kayıp Faktörünün Etkisi.....                                   | 93         |
| 2.4.6.4. Hat Başı Geriliminin Etkisi.....                                   | 94         |
| 2.4.6.5. Paralel Hat Sayısının Etkisi.....                                  | 95         |
| 2.4.6.6. Seri Kompanzasyonun Etkisi.....                                    | 96         |
| 2.4.6.7. Şönt Kompanzasyonun Etkisi.....                                    | 97         |
| <b>3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>   | <b>97</b>  |
| <b>3.1. ÖRNEK UYGULAMALAR.....</b>  | <b>99</b>  |
| <b>3.1.1. İEEE 9 Baralı Sistemi için Temel Bileşen</b>                      |            |
| <b>Güç Akışı Uygulaması.....</b>  | <b>99</b>  |
| 3.1.1.1. Sisteme İlişkin Veriler.....                                       | 100        |
| 3.1.1.2. Bara Admitans Matrisinin Oluşturulması.....                        | 101        |
| <b>3.1.2. İEEE 9 Baralı Sistemi için Harmonik Güç Akışı Uygulaması.....</b> | <b>102</b> |
| <b>3.2. P-V EĞRİLERİ İLE KRİTİK DEĞERLERİN HESAPLANMASI.....</b>            | <b>107</b> |
| <b>3.2.1. İEEE 9 Baralı Sistem Ana Harmonik İçin Kritik Değerler .....</b>  | <b>107</b> |
| <b>3.2.2. İEEE 9 Baralı Sistem 5. Harmonik İçin Kritik Değerler.....</b>    | <b>112</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>                                       | <b>120</b> |
| <b>5. KAYNAKLAR .....</b>  | <b>121</b> |
| <b>6. EKLER.....</b>   | <b>124</b> |
| <b>EK-1. IEEE 9 Baralı Standart Sistemi</b>                                |            |
| <b>Temel Bileşen Güç Akışı Matlab Kodları.....</b>                         | <b>124</b> |
| <b>EK-2. Harmonik Güç Akışı</b>  |            |
| <b>Matlab Kodları (Nonlinear Yük 5. baraya Bağlı).....</b>                 | <b>129</b> |
| <b>EK-3. Harmonik Güç Akışı</b>  |            |
| <b>Matlab Kodları (Nonlinear Yük 7. baraya Bağlı).....</b>                 | <b>138</b> |
| <b>EK-4. Harmonik Güç Akışı</b>  |            |
| <b>Matlab Kodları (Nonlinear Yük 9. baraya Bağlı).....</b>                 | <b>147</b> |
| <b>EK-5. Bara İndirgeme İşlemi Yapan</b>                                   |            |
| <b>Matlab Kodları (5. Bara İçin).....</b>                                  | <b>156</b> |
| <b>EK-6. IEEE 9 Baralı Sistem Ana Harmonik İçin PV Eğrisi Kodları.....</b> | <b>157</b> |
| <b>EK-7. Bara İndirgeme İşlemi Yapan</b>                                   |            |
| <b>Matlab Kodları (5. Bara ve 5. Harmonik İçin).....</b>                   | <b>158</b> |
| <b>EK-8. IEEE 9 Baralı Sistem 5. Harmonik İçin PV Eğrisi Kodları.....</b>  | <b>159</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>  | <b>160</b> |

## ŞEKİL LİSTESİ

|             | <b><u>Sayfa No</u></b>   |     |
|-------------|--|-----|
| Şekil 3.2.  | 5 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin PV Eğrileri       | 116 |
| Şekil 2.6.  | Değişik Güç Katsayıları İçin P-V Eğrileri                          | 92  |
| Şekil 2.7.  | Değişik Hat Uzunlukları İçin P-V Eğrileri                          | 93  |
| Şekil 2.8.  | Değişik Hat Kayıp Faktörleri İçin P-V Eğrileri                     | 94  |
| Şekil 2.9.  | Değişik Hat Baş Gerilimleri İçin P-V Eğrileri                      | 95  |
| Şekil 2.11  | Değişik Seri Kompanzasyon Oranları için P-V Eğrileri               | 97  |
| Şekil 2.12  | Değişik Şönt Kompanzasyon Oranları İçin P-V Eğrileri               | 98  |
| Şekil 3.4.  | 9 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin PV Eğrileri       | 118 |
| Şekil 1.17. | Genel bir AA Barası Gösterimi                                      | 52  |
| Şekil 2.3   | Güç sistemi kararlılığının IEEE / CIGRE' ye göre sınıflandırılması | 82  |
| Şekil 1.13. | Harmonikli Baraya Bağlı Lineer Yük                                 | 27  |
| Şekil 1.1.  | Harmonik Bileşenler.   | 6   |
| Şekil 1.15. | Harmonikli Baraya Bağlı Nonlineer Yük.                             | 30  |
| Şekil 1.16. | Harmonikli Sistemde Nötr İletkeninin Aşırı Yüklenmesi              | 40  |
| Şekil 2.4.  | İletim Hattının İki Kapılı Devre Olarak Gösterilmesi               | 95  |
| Şekil 3.1.  | IEEE Standart 9 Baralı Sistemi.                                    | 99  |
| Şekil 1.4.  | Lineer Eleman Akım-Gerilim Karakteristiği                          | 20  |
| Şekil 1.6.  | Lineer Eleman Akım ve Gerilim Dalga Şekli(Faz farkı yok).          | 21  |
| Şekil 1.7.  | Lineer Eleman Akım ve Gerilim Dalga Şekli (Faz farkı var).         | 21  |
| Şekil 1.3.  | Nonsinüoidal Akım Dalgası  | 13  |
| Şekil 1.5.  | Nonlineer Eleman Akım-Gerilim Karakteristiği                       | 21  |
| Şekil 1.8.  | Nonlineer Eleman Akım ve Gerilim Dalga şekli (Faz farkı yok).      | 22  |
| Şekil 1.9.  | Nonlineer Eleman Akım ve Gerilim Dalga şekli (Faz farkı var).      | 22  |
| Şekil 1.10. | Nonlineer Devre Akım ve Gerilim Ölçüm Şeması                       | 23  |
| Şekil 1.12. | Nonsinüoidal Beslemeli Lineer Devre                                | 27  |
| Şekil 1.14. | Nonsinüoidal Beslemeli Nonlineer Devre.                            | 30  |
| Şekil 2.1.  | Newton-Raphson Yönteminin Matematiksel İfadesi                     | 55  |
| Şekil 2.2.  | Newton-Raphson Algoritması Akış Diyagramı                          | 60  |
| Şekil 1.18. | $\pi$ Eşdeğer Devresi Yardımıyla İki Bara Arasındaki Hat Gösterimi | 54  |
| Şekil 2.5.  | P-V Eğrisi(X=Kritik nokta).  | 90  |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Şekil 2.10  | Paralel Tek ve Çift Hattı Sahip Güç Sistemleri İçin P-V Eğrileri | 96  |
| Şekil 1.11. | Sinüoidal Beslemeli Nonlineer Devre                              | 25  |
| Şekil 3.3.  | 7 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin PV Eğrileri     | 117 |
| Şekil 1.2.  | Yarımdalga Doğrultulmuş Sinüs Dalgası                            | 10  |

## ÇİZELGE LİSTESİ

|   | <b><u>Sayfa No</u></b> |
|---|------------------------|
| Çizelge 3.11. Ana Harmonik İçin Hesaplanan Empedans Ve Admitans Değerleri.  | 108                    |
| Çizelge 3.5. 5 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları (Ana Harmonik).  | 104                    |
| Çizelge 3.6. 5 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları(5. Harmonik).  | 104                    |
| Çizelge 3.12. 5.Harmonik İçin Hesaplanan Empedans ve Admitans Değerleri.  | 112                    |
| Çizelge 3.13. 5 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin Kritik Değerler.   | 119                    |
| Çizelge 3.9. 9 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları (Ana Harmonik).  | 106                    |
| Çizelge 3.10. 9 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları(5. Harmonik).   | 106                    |
| Çizelge 3.15. 9 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin Kritik Değerler  | 119                    |
| Çizelge 1.1. Fonksiyona Ait Ölçülen Değerler.   | 13                     |
| Çizelge 2.1. Güç Sistemi Kararlılığının Genel Olarak Sınıflandırılması  | 82                     |
| Çizelge 3.1. İEEE Standart 9 Baralı Sistemi Hat Verileri.   | 100                    |
| Çizelge 3.2. İEEE Standart 9 Baralı Sistemi Generatör ve Yük Verileri.  | 100                    |
| Çizelge 3.3. İEEE 9 Baralı Sistemi Temel Bileşen Güç Akışı Sonuçları  | 102                    |
| Çizelge 1.3. Kompakt Floresant Lambaların(Enerji Tasarruflu) Elektronik<br>Balastlarından Şebekeye Enjekte edilen Harmonik Akımlar. | 37                     |
| Çizelge 1.2. Nonlinear Devrede Ölçülen Akım ve Gerilim Değerleri.   | 23                     |
| Çizelge 3.4. Nonlieer Yükün Harmonikli Akım Eşitlikleri   | 103                    |
| Çizelge 3.7. 7 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları (Ana Harmonik).  | 105                    |
| Çizelge 3.8. 7 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları(5. Harmonik).  | 105                    |
| Çizelge 3.14. 7 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin Kritik Değerler  | 119                    |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

|                       |   |
|-----------------------|---|
| $n$                   | Harmonik Mertebesi  |
| $h$                   | Harmonik Mertebesi  |
| $t$                   | Bağımsız Değişken   |
| $A_0$                 | Sabit Terim(doğru bileşen veya ortalama değer)                      |
| $A_1, A_2 \dots A_n$  | $f(t)$ Fonksiyonunun Harmonik Katsayıları                           |
| $B_1, B_2 \dots B_n$  | $f(t)$ Fonksiyonunun Harmonik Katsayıları                           |
| $\phi_1$              | Temel Dalganın Faz Açısı,   |
| $\phi_2 \dots \phi_n$ | Harmonik Bileşenlerin Faz Açısıdır.                                 |
| $D_{-n}$              | $D_n$ 'in Eşleniği  |
| $D_n^*$               | $D_n$ 'in Eşleniği  |
| $m$                   | Dalğanın Dikey Olarak Bölünme Adedi                                 |
| $\theta_i$            | Her Dikey parçanın X Ekseninde Aldığı Değer                         |
| $y_i$                 | Dikey Parçanın Her $\theta_i$ ye Karşılık y Ekseninde Aldığı Değer. |
| $V(t)$                | Gerilimin Ani Değeri  |
| $i(t)$                | Akımın Ani Değeri   |
| $v_n$                 | n. Harmonik Geriliminin Ani Değeri                                  |
| $i_n$                 | n. Harmonik Akımının Ani Değeri                                     |
| $V_0$                 | Gerilimin DC (doğru akım) Bileşeni                                  |
| $I_0$                 | Akımın DCc Bileşeni   |
| $V_n$                 | n. Harmonik Geriliminin Efektif Değeri                              |
| $I_n$                 | n. Harmonik Akımının Efektif Değeri                                 |
| $\omega_1$            | Temel Frekansa Ait Açısal Frekans                                   |
| $\theta_n$            | n. harmonik geriliminin faz açısı                                   |
| $\delta_n$            | n. Harmonik Akımının Faz Açısı                                      |
| P                     | Aktif Güç   |
| Q                     | Reaktif Güç   |
| S                     | Görünür Güç   |
| GF                    | Güç Faktörü   |

|               |   |
|---------------|---|
| $THD_V$       | Gerilimin Toplam Harmonik Distorsiyonu  |
| $THD_I$       | Akımın Toplam Harmonik Distorsiyonu   |
| $HD_V$        | Gerilim için Her Harmonik Bileşenin Tekil Harmonik Distorsiyonu   |
| $HD_I$        | Akım için Her Harmonik Bileşenin Tekil Harmonik Distorsiyonu  |
| TTD           | Toplam Talep Distorsiyonu   |
| $K_f$         | Şekil(Form) Faktörü   |
| $TEF_V$       | Gerilim için Telefon Etkileşim Faktörü  |
| $TEF_I$       | Akım İçin Telefon Etkileşim Faktörü   |
| $W_n$         | n. Harmonik Mertebesi İçin İşitsel ve Endüktif Kuplaj Etkisini Hesaplara Dahil Etmeyi Sağlayan Katsayı. |
| K             | Transformatör K Faktörü   |
| D             | Transformatör Gücündeki Azalma  |
| $S_N$         | Transformatörün Nominal Gücü  |
| $S_H$         | Transformatörün Verebileceği Maksimum Güç   |
| $GF_{Toplam}$ | Toplam Güç Faktörü  |
| $GF_{dist}$   | Distorsiyon Güç Faktörü   |
| W             | Transformatörün Sarım sayısı  |
| $e$           | E.M.K   |
| $\phi$        | Magnetik Akı  |
| B             | Magnetik Akı Yoğunluğu(Magnetik Endüksiyon)   |
| H             | Magnetik Alan Şiddeti   |
| $\mu$         | Magnetik Geçirgenlik Katsayısı  |
| S             | Nüve Kesiti   |
| $V_m$         | Gerilimin Maksimum Değeri   |
| $I_m$         | Akımın Efektif Değeri   |
| V             | Gerilimin Efektif Değeri  |
| I             | Akımın Maksimum Değeri  |
| $\psi_1$      | Besleme Gerilimi ile(V) Yük Akımının Temel Bileşeni Arasındaki Açık                                     |
| N             | Akım Yada Gerilimdeki Toplam Harmonik Sayısı  |



|                     |   |
|---------------------|---|
| $\alpha_n$          | n. Harmonik için Akım Harmoniği Oranı                         |
| $Z_n$               | n. Harmoniğin Empedans Genliği                                |
| $\alpha_n - \phi_n$ | n. Harmonik Akımının Faz Açısı                                |
| $\dot{I}$           | Akım Fazörü   |
| $\dot{Z}_n$         | Empedans Fazörü   |
| $P_k$               | Kayıp Aktif Güç   |
| $R_n$               | İletkenin n. Harmonik Mertebesindeki Omik Direnci             |
| $r_{dc}$            | Doğru Akım Direnci ( $\Omega/km$ )                            |
| $f_1$               | Temel Bileşen Frekansı(Hz)                                    |
| $r_{ac}$            | n. Harmonik İçin İletken Direnci                              |
| $X_L^1$             | Bobinin Temel Bileşen Frekansındaki Endüktif Reaktansı        |
| $X_L^n$             | Bobinin n. Harmonik Frekansındaki Endüktif Reaktansı          |
| $X_C^1$             | Kondansatörün Temel Bileşen Frekansındaki Kapasitif Reaktansı |
| $X_C^n$             | Kondansatörün n. Harmonik Frekansındaki Kapasitif Reaktansı   |
| $C$                 | Kondansatör Kapasitesi  |
| $V_n$               | n. Harmonik Geriliminin Efektif Değeridir.                    |
| $f_n$               | n. Harmonik Bileşenin Frekansı                                |
| $\tan \delta$       | Kayıp Faktörü   |
| $P_{Fe}$            | Demir Kayıpları   |
| $\beta_n$           | n. Harmonik İçin Gerilim Harmoniği Oranı                      |
| $P_{Fe1}$           | Temel Bileşen Frekansında Oluşan Demir Kayıpları              |
| $P_{FeH}$           | Harmonik Frekanslarında Oluşan Demir Kayıpları                |
| $X_{Lr}$            | Rezonans Frekansındaki Endüktif Reaktans                      |
| $X_{Cr}$            | Rezonans Frekansındaki Kapasitif Reaktans                     |
| $f_r$               | Rezonans Frekansı   |
| $\omega_r$          | Rezonans Frekansındaki Açısız Frekans                         |
| $P_{hat}$           | AA Hattına Aktarılan Aktif Güç                                |

|                          |   |
|--------------------------|---|
| $p_y$                    | Baraya Bağlı Yükün Çektiği Aktif Güç Değeri                     |
| $Q_{hat}$                | AA Hattına Aktarılan Reaktif Güç                                |
| $q_{hat}$                | Baraya Bağlı Yükün Çektiği Reaktif Güç Değeri                   |
| $g_{pi}$                 | i. Baraya Ait Aktif Güç Eşitliği                                |
| $g_{qi}$                 | i. Baraya Ait Reaktif Güç Eşitliği                              |
| $P_i$                    | i. Baranın Aktif Gücü   |
| $q_i$                    | i. Baranın Reaktif Gücü   |
| Y                        | İletim Hattının Şönt Admitansı                                  |
| $y_{ij}$                 | Bara Admitans Matrisinin (i,j) Elemanı                          |
| $\delta_{ij}$            | i. ve j. Bara Gerilimleri Arasındaki Faz farkı                  |
| $f'(x_i)$                | f Fonksiyonunun x Noktasındaki 1. Türevi                        |
| $x_{(i+1)}$              | (i+1). İterasyondaki x Değeri                                   |
| J                        | Jacobian Matris   |
| T                        | Matrisin Transpozesi  |
| $\frac{dp_i}{d\delta_i}$ | i. Bara Aktif Gücünün i. Bara Gerilim Faz Açısına Göre Türevi   |
| $\frac{dp_i}{d\delta_j}$ | i. Bara Aktif Gücünün j. Bara Gerilim Faz Açısına Göre Türevi   |
| $\frac{dp_i}{dv_i}$      | i. Bara Aktif Gücünün i. Bara Gerilim Genliğine Göre Türevi     |
| $\frac{dp_i}{dv_j}$      | i. Bara Aktif Gücünün j. Bara Gerilim Genliğine Göre Türevi     |
| $\frac{dq_i}{d\delta_i}$ | i. Bara Reaktif Gücünün i. Bara Gerilim Faz Açısına Göre Türevi |
| $\frac{dq_i}{d\delta_j}$ | i. Bara Reaktif Gücünün j. Bara Gerilim Faz Açısına Göre Türevi |
| $\frac{dq_i}{dv_i}$      | i. Bara Reaktif Gücünün i. Bara Gerilim Genliğine Göre Türevi   |
| $\frac{dq_i}{dv_j}$      | i. Bara Reaktif Gücünün j. Bara Gerilim Genliğine Göre Türevi   |

|                      |  |
|----------------------|--|
| X                    | Durum Değişken Vektörü   |
| $\Delta\delta^{(1)}$ | Ana Harmonik Gerilim Faz Açısı Vektörü   |
| $\Delta v^{(1)}$     | Ana Harmonik Gerilim Genlik Vektörü  |
| $\Delta\delta^{(5)}$ | 5. Harmonik Gerilim Faz Açısı Vektörü  |
| $\Delta v^{(5)}$     | 5. Harmonik Gerilim Genlik Vektörü   |
| $\Delta\delta^{(7)}$ | 7. Harmonik Gerilim Faz Açısı Vektörü  |
| $\Delta v^{(7)}$     | 7. Harmonik Gerilim Genlik Vektör  |
| $\Delta\phi$         | Nonlinear Eleman Parametreleri Vektörü   |
| $y - f(x)$           | Baraların Aktif ve Reaktif Güç Denge Denklemleri Vektörü   |
| $\Delta p$           | Baraların Aktif Güç Denge Denklemleri Vektörü  |
| $\Delta q$           | Baraların Reaktif Güç Denge Denklemleri Vektörü  |
| $\Delta I_r^{(1)}$   | Nonlinear Baranın Ana Harmonik Akımı Reel Bileşen Vektörü  |
| $\Delta I_i^{(1)}$   | Nonlinear Baranın Ana Harmonik Akımı İmajiner Bileşen Vektörü  |
| $\Delta I_r^{(h)}$   | Tüm Baralarda h. Harmonik Akımı Reel Bileşen Vektörü ( $h \neq 1$ )                                    |
| $\Delta I_i^{(h)}$   | Tüm Baralarda h. Harmonik Akımı İmajiner Bileşen Vektörü ( $h \neq 1$ )                                |
| N                    | Son Linear Bara Numarası   |
| M                    | İlk Nonlinear Bara Numarası  |
| k                    | Bara Numarası  |
| m                    | Bara Numarası  |
| $J_1^{(1)}$          | Baralara Ait Aktif Güçlerin Ana Harmonik Gerilim Faz Açıklarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris   |
| $J_1^{(h)}$          | Baralara Ait Aktif Güçlerin h. Harmonik Gerilim Faz Açıklarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris    |
| $J_2^{(1)}$          | Baralara Ait Aktif Güçlerin Ana Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris     |
| $J_2^{(h)}$          | Baralara Ait Aktif Güçlerin h. Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris      |
| $J_3^{(1)}$          | Baralara Ait Reaktif Güçlerin Ana Harmonik Gerilim Faz Açıklarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris |
| $J_3^{(h)}$          | Baralara Ait Reaktif Güçlerin h. Harmonik Gerilim Faz Açıklarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris  |

|                |  |
|----------------|--|
| $J_4^{(1)}$    | Baralara Ait Reaktif Güçlerin Ana Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris               |
| $J_4^{(h)}$    | Baralara Ait Reaktif Güçlerin h. Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris                |
| $TD_r^{(5,1)}$ | 5. Harmonik Akımı Reel Bileşenlerinin Ana Harmonik Gerilim Faz Açılarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris      |
| $TD_r^{(5,h)}$ | 5. Harmonik Akımı Reel Bileşenlerinin h. Harmonik Gerilim Faz Açılarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris       |
| $TV_r^{(5,1)}$ | 5. Harmonik Akımı Reel Bileşenlerinin Ana Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden oluşan Alt Matris       |
| $TV_r^{(5,h)}$ | 5. Harmonik Akımı Reel Bileşenlerinin h. Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris        |
| $TD_i^{(5,1)}$ | 5. Harmonik Akımı İmajiner Bileşenlerinin Ana Harmonik Gerilim Faz Açılarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris  |
| $TD_i^{(5,h)}$ | h. Harmonik Akımı İmajiner Bileşenlerinin Ana Harmonik Gerilim Faz Açılarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris  |
| $TV_i^{(5,1)}$ | 5. Harmonik Akımı İmajiner Bileşenlerinin Ana Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris   |
| $TV_i^{(5,h)}$ | 5. Harmonik Akımı İmajiner Bileşenlerinin h. Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris    |
| $TD_r^{(1,1)}$ | Ana Harmonik Akımı Reel Bileşenlerinin Ana Harmonik Gerilim Faz Açılarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris     |
| $TD_r^{(1,h)}$ | Ana Harmonik Akımı Reel Bileşenlerinin h. Harmonik Gerilim Faz Açılarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris      |
| $TV_r^{(1,1)}$ | Ana Harmonik Akımı Reel Bileşenlerinin Ana Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris      |
| $TV_r^{(1,h)}$ | Ana Harmonik Akımı Reel Bileşenlerinin h. Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris       |
| $TD_i^{(1,1)}$ | Ana Harmonik Akımı İmajiner Bileşenlerinin Ana Harmonik Gerilim Faz Açılarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris |
| $TD_i^{(1,h)}$ | Ana Harmonik Akımı İmajiner Bileşenlerinin h. Harmonik Gerilim Faz Açılarına Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris  |
| $TV_i^{(1,1)}$ | Ana Harmonik Akımı İmajiner Bileşenlerinin Ana Harmonik Gerilim  |

|  |  |
|--|--|
|  | Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris  |
| $TV_i^{(1,h)}$                           | Ana Harmonik Akımı İmajiner Bileşenlerinin h. Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevlerinden Oluşan Alt Matris                     |
| $I_k^{(h)}$                              | (h.) Harmonik Mertebesinde (k.) Baraya Ait Akım Fazörü   |
| $I_{r,k}^{(h)}$                          | (h.) Harmonik Mertebesinde (k.) Bara Akımının Reel Bileşeni  |
| $I_{i,k}^{(h)}$                          | (h.) Harmonik Mertebesinde (k.) Bara Akımının İmajiner Bileşeni  |
| $\frac{dI_{k,r}^{(h)}}{d\delta_m^{(h)}}$ | (h.) Harmonik Mertebesinde (k.) Bara Akımının Reel Bileşeninin h. Harmonik Gerilim Faz Açılarına Göre Türevi                         |
| $\frac{dI_{k,i}^{(h)}}{d\delta_m^{(h)}}$ | (n) Baralı Sistemde (h.) Harmonik Mertebesinde (k.) Bara Akımının İmajiner Bileşeninin h. Harmonik Gerilim Faz Açılarına Göre Türevi |
| $\frac{dI_{k,r}^{(h)}}{dv_m^{(h)}}$      | (n) Baralı Sistemde (h.) Harmonik Mertebesinde (k.) Bara Akımının Reel Bileşeninin h. Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevi      |
| $\frac{dI_{k,i}^{(h)}}{dv_m^{(h)}}$      | (n) Baralı Sistemde (h.) Harmonik Mertebesinde (k.) Bara Akımının İmajiner Bileşeninin h. Harmonik Gerilim Genliklerine Göre Türevi  |
| $V_s$                                    | Generatör Barası Gerilimi  |
| $I_s$                                    | Generatör Barası Akımı   |
| $V_r$                                    | Yük Barası Gerilimi  |
| $I_r$                                    | Yük Barası Akımı   |
| $A, B, C, D$                             | Uzun İletim Hattı Sabitleri  |
| $ A ^2$                                  | A'nın Mutlak Değerinin Karesi  |
| $ B ^2$                                  | B'nin Mutlak Değerinin Karesi  |

## ÖZET

### GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN KRİTİK DEĞERLERE ETKİSİ

Yusuf ALAŞAHAN  
Düzce Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı  
Yüksek Lisans Tezi  
Danışman: Prof. Dr. İsmail ERCAN  
Kasım 2014, 156 sayfa

Günümüz dünyasında gelişen teknoloji ile birlikte her geçen gün insan hayatına yeni cihazlar girmektedir. Bunun sonucunda ise enerji ihtiyacı gerek bireysel gerekse endüstriyel olarak artmaktadır. Bu artış “Enerji Kalitesi” kavramını ortaya çıkarmıştır. Enerji kalitesini etkileyen unsurlardan biri de “Harmonikler”dir. Bu tez çalışmasında “Güç Sisteminin Kritik Değerleri” dediğimiz sistemde taşınacak maksimum güç ve maksimum gerilim değerlerine harmoniklerin etkisi incelenecektir. Bu kapsamda örnek bir sistemde Harmonik Güç Akışı yapılacak; sonrada bu işlemin sonucunda bulunacak olan sistemdeki baralara ait aktif ve reaktif güç değerleri ile gerilim genlik ve faz açısı değerleri kullanılarak elde edilen PV eğrisi üzerinden sistemde harmonik bileşenlerin olması halinde kritik değerlerdeki değişim hakkında bir yargıya varılacaktır.

**Anahtar sözcükler:** Enerji Kalitesi, Güç Akışı, Harmonikler, Kritik Değerler

## **ABSTRACT**

### **THE EFFECTS OF HARMONICS TO CRITICAL VALUES AT THE POWER SYSTEMS**

Yusuf ALAŞAHAN

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical Education

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İsmail ERCAN

November 2014, 156 pages

At the today world, together technological development new devices to be inserted to the personal life. Of this result, the necessity of energy to be increased selfly or industrial. The concept of energy quality is to arise together this increase. In addition to effect factors of energy quality is “Harmonics”. In this study the effects of we saying “critical values to power system” maximum power and maximum voltage values are transmission to harmonics to power systems will be analysed. For this, basic power flow solution and harmonic power flow solution will be realized at a pattern system; than the values of active powers, the values of reactive powers, the values of voltages and the values of voltage angles will be found for all buses at the system. The curves of PV will be plotted using this values and the about effects of harmonics to critical values at power systems will be to draw a conclusion.

**Keywords:** Critical Values, Energy Quality, Harmonics, Power Flow Solution

## **EXTENDED ABSTRACT**

### **THE EFFECTS OF HARMONICS TO CRITICAL VALUES AT THE POWER SYSTEMS**

Yusuf ALAŞAHAN  
Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical Education  
Master of Science Thesis  
Supervisor: Prof. Dr. İsmail ERCAN  
August 2014, 156 pages

#### **1. INTRODUCTION:**

At the today world, together technological development new devices to be inserted to the personal life. Of this result, the necessity of energy to be increased selfly or industrial. The concept of energy quality is to arise together this increase. In addition to effect factors of energy quality is “Harmonics”. In this study the effects of we saying “critical values to power system” maximum power and maximum voltage values are transmission to harmonics to power systems will be analysed. For this, basic power flow solution and harmonic power flow solution will be realized at a pattern system; than the values of active powers, the values of reactive powers, the values of voltages and the values of voltage angles will be found for all buses at the system. The curves of PV will be plotted using this values and the about effects of harmonics to critical values at power systems will be to draw a conclusion.

#### **2. MATERIAL AND METHODS:**

At the this study was used Newton–Raphson Power Flow Algoritm. Newton–Raphson Power Flow Algoritm was applicationed to IEEE 9 Buses Test System. Main harmonic and fifth harmonic to be found were supposed at the system and power flow solution was realized for main harmonic and fifth harmonic. Power Flow Algoritms and drawing to PV Curves were realized at the Matlab Software.



### **3. RESULTS AND DISCUSSIONS:**

At the this study to be supposed a nonlinear load linked at the fift bus, seventh bus and ninth bus in retrun; than harmonic power flow solution was realized any time and PV curves were plotted for main harmonic and fift harmonic any time. The critical values of system were found via PV curves

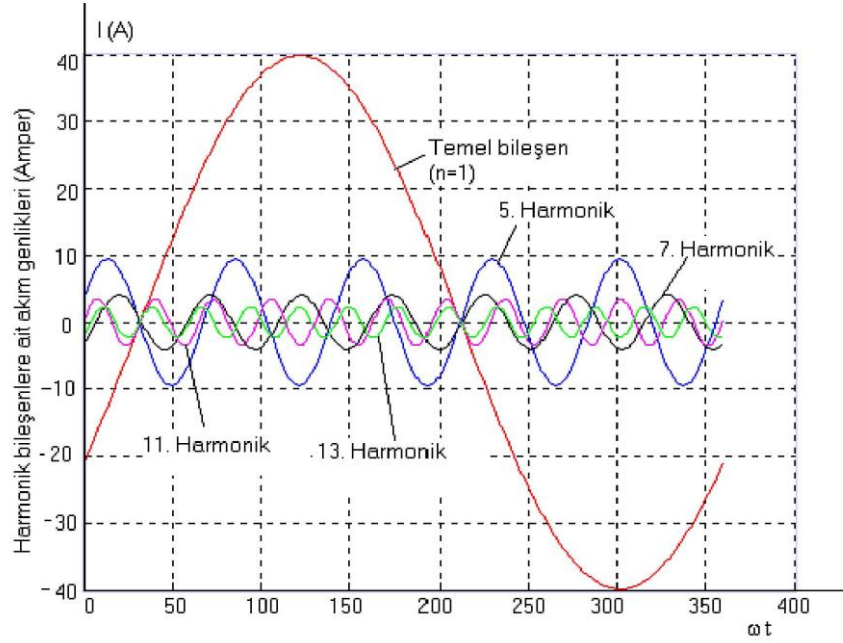
### **4. CONCLUSION AND OUTLOOK:**

Harmonics are to incrementing critical values of active power and voltage amplitute. incrementing critical values of active power is positive but incrementing critical values voltage amplitute negative for system stability. For this reason harmonics are must to be controlled at the power system to do.

## 1.GİRİŞ

### 1.1. HARMONİK TANIMI

Elektrik güç sistemlerinde enerjinin üretilmesi, iletilmesi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin 50 Hz frekansta salınan ve sinüsoidal dalga şeklinde olması istenir. Bu durum, elektrik enerjisinin kalitesini belirleyen ana faktörlerden biridir. Ancak işletmeden kaynaklanan bazı etkilerle (bu etkilerin başlıca nedeni, cihazların elektrik ve magnetik devrelerinde bulunan lineer olmayan elemanlardır) akım ve gerilim sinüs formundan uzaklaşır. Bu anlamda harmonik; Güç sistemlerinde akım veya gerilimin ya da her ikisinin dalga şeklinde meydana gelen periyodik sürekli hal bozulmaları olarak tanımlanabilir.[1] Harmonikler, devrede lineer olmayan elemanların veya sinüsoidal olmayan kaynakların bulunması veya bunların her ikisinin de olması durumunda meydana gelirler. Bu şekilde çeşitli elemanların veya olayların etkisi sonucunda enerji sistemindeki sinüsoidal dalga biçimi bozulur. Bu bozuk dalgalar “Nonlineer-lineer olmayan-dalga” olarak adlandırılır.[1] Sinüsoidal olmayan dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüsoidal dalga(Temel Dalga) ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından oluşmaktadır. Temel dalga dışındaki sinüzoidal dalgalara “harmonik bileşen” adı verilir.[1,2] Güç sistemlerinde sinüsoidal dalganın simetrisinden dolayı 3., 5., 7.,11,... gibi tek harmonik bileşenleri bulunur. Çift harmonikli bileşenler bulunmaz. Şekil 1.1’de yarı periyottaki temel bileşen ve harmonik bileşenler gösterilmiştir.[1]



Şekil 1.1. Harmonik Bileşenler.[1]

## 1.2. HARMONİKLERİN MATEMATİKSEL ANALİZİ

Güç sistemlerinde akım ve gerilim dalga şeklinin ideal olarak sinüsoidal olmasını isteriz. Ancak nonlinear elemanlar ve sistemdeki bazı olaylar nedeniyle bu her zaman mümkün olmaz ve dalga bozulur. Bozulmuş olan dalgaya Nonsinüsoidal Dalga (Sinüsoidal Olmayan Dalga) denir.[3] Nonsinüsoidal Dalgalar'ın analizi Fourier Serileri ile yapılır. Fransız Fizikçi ve Matematikçi Joseph Fourier nonsinüsoidal periyodik dalgaların genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalganın toplamından meydana geldiğini diğer bir ifadeyle bu tür dalgaların genlik ve frekansları farklı (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüsoidal dalgalara bölünebileceğini göstermiştir. periyodik dalganın fourier serisine açılabilmesi için "Dirichlet Koşulları" olarak bilinen koşulların sağlanması gereklidir.[3,4] Bu koşullar:

- 1)  $T$  periyodu içerisinde sonlu sayıda süreksizlik noktası bulunmalıdır.
- 2) Fonksiyonun  $T$  periyodu için ortalaması sonlu değer almalıdır.
- 3) Fonksiyonun sonlu sayıda minimum ve maksimum noktaları olmalıdır.

Elektrik güç sistemlerindeki dalga şekilleri her zaman bu şartları sağlar dolayısı ile her

zaman fourier serileri elde edilebilir.[3]

### 1.2.1. Fourier Dönüşümü

Bir  $f(t)$  fonksiyonunun Fourier dönüşümü:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilir. [3]

$F(\omega)$ 'nın ters fourier dönüşümü:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{-j\omega t} dt \quad (1.2)$$

şeklindedir.[3]

Bu eşitliklere Fourier Dönüşüm çifti denir. Bu eşitlikler zaman veya frekans domeninin  $(-\infty, +\infty)$  aralığındaki herhangi bir fonksiyonun ters domende sürekli bir fonksiyona dönüştürülmesi için kullanılır. (1.1) eşitliği ile zaman domenindeki fonksiyon frekans domeninde ifade edilir. (1.2) eşitliği ile frekans domenindeki fonksiyon zaman domeninde ifade edilir.[3]

### 1.2.2. Fourier Serilerinin İfade Şekilleri

Nonsinüsoidal periyodik bir fonksiyonun Fourier Analizi sonrasında zaman domenindeki ifadesi aşağıdaki denklemlerden biri ile gösterilir.[3,4]

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n * \sin(nt) + B_n * \cos(nt)) \quad (1.3)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n * \sin(nt + \phi_n) \quad (1.4)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n * \cos(\omega t + \phi_n) \quad (1.5)$$

$C_1 * \sin(t + \omega t)$  terimine  $f(t)$  fonksiyonunun birinci harmoniği veya temel dalga denir. (Elektrik devrelerinde temel bileşen olarak ifade ederiz.) Bu durumda şu ifadeler yazılabilir.[3,4]

$$C_1 = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad \phi_1 = \tan^{-1}(B_1/A_1) \quad (1.6)$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \quad \phi_n = \tan^{-1}(B_n/A_n)$$

### 1.2.2.1. Trigonometrik Biçim

Bir  $f(t)$  fonksiyonunun Fourier serileri ile trigonometrik biçimde genel ifade şekli:

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(t) + A_2 \sin(2t) + \dots + A_n \sin(nt) + B_1 \cos(t) + B_2 \cos(2t) + \dots + B_n \cos(nt) \quad (1.7)$$

Şeklinde dir.[3-6] Bu ifadedeki katsayılar:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (1.8)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) * \sin(nt) dt \quad (1.9)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(t) * \cos(nt) dt \quad (1.10)$$

Denklemleri ile hesaplanır. [3-6]

### 1.2.2.2. Üstel Biçim

Üstel yazım bilgisayar destekli frekans domeni analizleri için kullanılır. Aşağıdaki eşitliklerin  $f(t)$  fonksiyonunda yerine yazılmasıyla elde edilen gösterim şeklidir.[3]

$$\sin(nt) = \frac{e^{jnt} - e^{-jnt}}{2j} \quad (1.11)$$

$$\cos(nt) = \frac{e^{jnt} + e^{-jnt}}{2} \quad (1.12)$$

Yukarıda verilen eşitlikler  $f(t)$  fonksiyonunda yerine yazıldığında  $f(t)$  fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilir.[3]

$$f(t) = \dots D_{-2} * e^{-j2t} + D_{-1} * e^{-jt} + A_0 + D_1 * e^{jt} + D_2 * e^{j2t} + \dots \quad (1.13)$$

$$D_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) * e^{-jnt} dt \quad (1.14)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ B_n \left( \frac{e^{jnt} + e^{-jnt}}{2} \right) - jA_n \left( \frac{e^{jnt} - e^{-jnt}}{2} \right) \right] \quad (1.15)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \frac{B_n - jA_n}{2} \right) e^{jnt} + \left( \frac{B_n + jA_n}{2} \right) e^{-jnt} \right] \quad (1.16)$$

Trigonometrik seri katsayıları ile üstel seri katsayıları arasında

$$B_n = D_n + D_{-n} \quad (1.17)$$

$$-jA_n = D_n - D_{-n} \Rightarrow A_n = j(D_n - D_{-n}) \quad (1.18)$$

eşitlikleri bulunur.[3] Sinüsoidal değişimin genliğini ( $C_n$ ) bulmak için:[3]

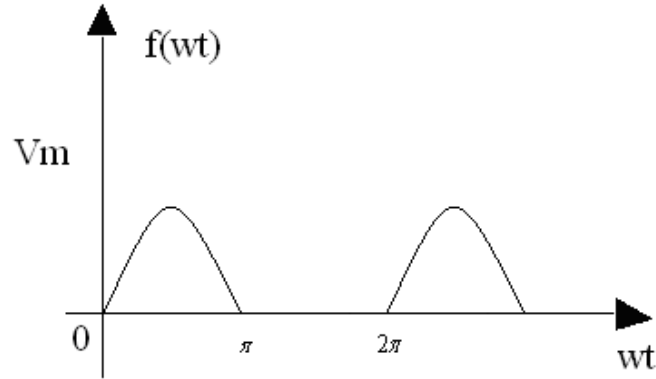
$$D_n = \frac{(B_n - jA_n)}{2} \quad D_{-n} = \frac{(B_n + jA_n)}{2} \Rightarrow D_n * D_{-n} = \frac{(A_n^2 + B_n^2)}{4} = |D_n|^2 \quad (1.19)$$

$$D_n = \frac{\sqrt{(A_n^2 + B_n^2)}}{2} \Rightarrow C_n = \sqrt{(A_n^2 + B_n^2)} = 2 * |D_n| \quad (1.20)$$

Nonsinüsoidal periyodik bir fonksiyon fourier serisine göre genellikle sonsuz sayıda harmoniklerin toplamına eşittir. Ancak pratikte sonsuz harmonik mertebesi daima sonlu değer alır. Uygulamada, serinin genellikle ilk 3 yada 4 terimi ele alınır. Böylece elde edilecek efektif değerler ideale çok az hata ile yaklaşmış olurlar ve hesaplar kolaylaşır.

*Örnek:*

Aşağıda Şekil 1.2 de verilen yarımdalga doğrultulmuş sinüs dalgasının trigonometrik ve üstel biçimde Fourier açılımı [3]



**Şekil 1.2.** Yarımdalga Doğrultulmuş Sinüs Dalgası[3]

*Çözüm:*

a) *Trigonometrik biçim*

$$f(\omega t) = \frac{V_m}{\pi} \left[ 1 + \frac{\pi}{2} \sin(\omega t) - \frac{2}{3} \cos(2\omega t) - \frac{2}{15} \cos(4\omega t) - \frac{2}{35} \cos(6\omega t) \dots \right]$$

b) Üstel Biçim:

$$V(\omega t) = \dots\dots\dots -\frac{V_m}{3\pi} e^{-j2\omega t} + \frac{jV_m}{4} e^{-j\omega t} + \frac{V_m}{\pi} + \frac{V_m}{j4} e^{j\omega t} - \frac{V_m}{3\pi} e^{j2\omega t} \dots\dots\dots \text{olarak bulunur. [3]}$$

### 1.2.2.3. Fourier Serilerinin Grafiksel Olarak Bulunması

Fourier Katsayıları grafiksel olarak elde edilebilir. Bunun için yapılması gereken işlem: dalgayı eşit aralıklı parçalara bölmek ve her birinin ortalama değerini hesaplamaktır. Daha sonra ölçülmüş değerlerle ilgili sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının toplamını içeren iki denklem kullanılır. Bu yöntemde sonucun yüksek derecede doğruluğa sahip olması isteniyorsa çok sayıda fonksiyon değeri tespit edilmelidir. Temel bileşen için katsayılar aşağıdaki ifadeler ile hesaplanır:[3,4]

$$A_1 = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \sin\theta_k \quad (1.21)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \cos\theta_k \quad (1.22)$$

Yukarıda verilen (1.21) ve (1.22) eşitlikleri

$$A_1 = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \sin\theta_k \quad (1.23)$$

$$B_1 = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \cos\theta_k \quad (1.24)$$

Şeklinde daha basit olarak ifade edilebilir. [3,4]

Aynı şekilde 3. harmonik için:



$$A_3 = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \sin(3\theta_k) \quad (1.25)$$

$$B_3 = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \cos(3\theta_k) \quad (1.26)$$

n. Harmonik için

$$A_n = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \sin(n\theta_k) \quad (1.27)$$

$$B_n = \frac{2}{m} \sum_{k=1}^m y_k \cos(n\theta_k) \quad (1.28)$$

biçiminde genel olarak ifade edilir. [3,4] Hesaplanan katsayılar

$$f(\theta) = A_1 \sin(\theta) + \dots + A_n \sin(n\theta) + B_1 \cos(\theta) + \dots + B_n \cos(n\theta) \quad (1.29)$$

Fonksiyonunda yazılır ve Fourier Serisi :[3,4]

$$f(\theta) = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \sin \left[ \theta + \tan^{-1} \left( \frac{B_1}{A_1} \right) \right] + \dots + \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \sin \left[ n\theta + \tan^{-1} \left( \frac{B_n}{A_n} \right) \right] \quad (1.30)$$

Denklemden elde edilir.[3,4] İstenilen doğruluk derecesine göre bölünme sayısı belirlenerek bölme işlemi yapıldıktan sonra herhangi bir harmonik mertebesi için sinüs ve kosinüs terimlerinin katsayılarının belirlenmesinde aşağıdaki adımlar uygulanır.[3,4]

- 1- Bir tablo hazırlanır ve orijinde itibaren dikey olarak bölünmüş kısımların orta noktaları için ölçülen açılar 1. sütuna yazılır.
- 2- Sinüs ve kosinüs işlemleri yardımı ile  $\sin n\theta$  ve  $\cos n\theta$  değerleri her açı için bulunup 2. ve 3. sütuna yazılır.
- 3- Bölünen parçaların y ekseninde aldıkları değerler ölçülerek 4. sütuna yazılır.
- 4- Sinüs terimlerinin katsayısı olan  $A_n$  'i bulmak için  $y \sin(n\theta)$  çarpımları 5. Sütuna yazılır.

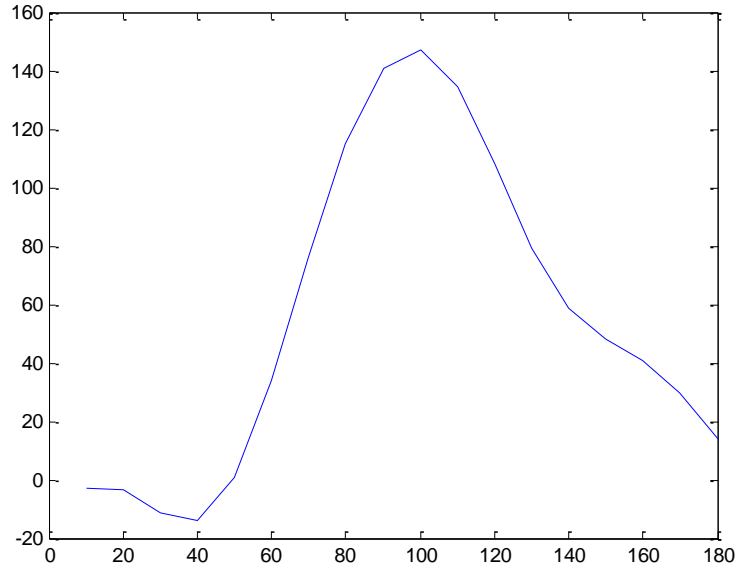
5-  $B_n$  'i bulmak için  $y \cos(n\theta)$  çarpımları 6. sütuna yazılır.

6- Hesaplanan  $y \sin(n\theta)$  ve  $y \cos(n\theta)$  çarpımları cebirsel olarak toplanır.

7- Verilen denklemler kullanılarak Fourier Serisi elde edilir.

*Örnek:*

Aşağıda Şekil 1.3 de verilen nonsinüsoidal akım dalgası için Çizelge 1.1. de verilen değerlere göre Fourier Serisi'ni Grafik Yöntem ile elde edelim.[3]



**Şekil 1.3.** Nonsinüsoidal Akım Dalgası.[3]

**Çizelge 1.1.** Fonksiyona Ait Ölçülen Değerler.[3]

| $\alpha$  | $y$      | $\alpha$   | $y$      | $\alpha$   | $y$     |
|-----------|----------|------------|----------|------------|---------|
| <b>10</b> | -3,0551  | <b>70</b>  | 76,2979  | <b>130</b> | 79,3529 |
| <b>20</b> | -3,2995  | <b>80</b>  | 115,2183 | <b>140</b> | 58,5178 |
| <b>30</b> | -11,2762 | <b>90</b>  | 140,6103 | <b>150</b> | 47,9634 |
| <b>40</b> | -13,8827 | <b>100</b> | 147,0965 | <b>160</b> | 40,9792 |
| <b>50</b> | 0,7427   | <b>110</b> | 134,3344 | <b>170</b> | 29,6687 |
| <b>60</b> | 33,8865  | <b>120</b> | 108,0885 | <b>180</b> | 14,2020 |

Çözüm:

10° Aralıklarla 18 noktada değer alınmıştır(m=18).

$i = 100 * \sin(\alpha - 20^0) + 40 * \sin(3\alpha + 150) + 15 * \sin(5\alpha) + 3 * \sin(7\alpha)$  Olarak bulunur. [3]

### 1.3. HARMONİK BÜYÜKLÜKLERE AİT TEMEL TANIM VE KAVRAMLAR

Güç sistem çalışmaları için tanımlanan elektrik büyüklükleri genellikle sinüsoidal sürekli haldeki işletim koşulları için tanımlanmıştır. Sistemde harmonikler söz konusu olduğunda bu büyüklüklerin yeniden tanımlanması gerekmektedir. Harmonikli gerilim ve akım büyüklüklerinin zamana bağlı fonksiyonları, Fourier Serileri yardımıyla aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.[1-5,7-9]

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} * V_n * \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (1.31)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} * I_n * \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (1.32)$$

Dc bileşenler ihmal edilmek şartıyla aktif güç:

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h * I_h * \cos(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (1.33)$$

Olarak hesaplanır. [1-5,7-9]

Eşitlikden anlaşılacağı gibi farklı harmonik mertebesindeki gerilim ve akımların ortalama güce etkisi yoktur. Örneğin 3. harmonik gerilimiyle 5. harmonik akımının oluşturduğu gücün ortalama güce katkısı yoktur. Eşitlik 1.1 ve 1.2 de verilen harmonikli gerilim ve akıma ait efektif değerler aşağıdaki gibi elde edilir:[1-8]

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (1.34)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (1.35)$$

Görünür güç;

$$S = V * I \quad (1.36)$$

eşitliği ile ifade edilir [1-8] ve yaygın olarak kabul edilen tanımı şöyledir;

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (1.37)$$

Burada D distorsiyon gücü olup

$$D = \sqrt{(S^2 - P^2 - Q^2)} \quad (1.38)$$

Eşitliği ile ifade edilir. [1-5,7-9]

Eşitlik (1.37)'de Q reaktif güç olup,

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h * I_h * \sin(\theta_h - \delta_h) \quad (1.39)$$

Biçiminde tanımlanır. [1-5,7-9]

Güç faktörü, alternatif akım sistemlerinde çekilen akımın ne kadar verimlilikle kullanıldığının bir göstergesidir. Sinüsoidal durum olup olmadığı önemli olmaksızın güç faktörü aşağıdaki gibi tanımlanır. [1-5,7-9]

$$GF = \frac{P}{S} \quad (1.40)$$

Sinüsoidal durumda GF aynı zamanda  $\cos \varphi$  olarak da adlandırılır. [1-5,7-9]

### 1.3.1. Toplam Harmonik (Distorsiyonu-THD) Bozulma

Harmoniklerle ilgili tanımlar arasında en çok kullanılan kavramlardan birisi olan Toplam Harmonik Bozulma (THD) ideal sinüs dalga formundan doğrusal olmayan dalga formunun net sapmasını tanımlar. Gerilim ve akım için THD ifadesi aşağıdaki gibidir. [1-5,7-9]

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (1.41)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (1.42)$$

Burada THD, harmonik bileşenlerin efektif değerleri ile temel bileşenlerin efektif değerleri arasındaki orandır ve çoğunlukla yüzde olarak ifade edilir. Her bir harmonik bileşenin bozulmuş dalga formuna katkısını gösteren tekil harmonik bozulması gerilim ve akım için sırasıyla,

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad (1.43)$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (1.44)$$

Olarak tanımlanır. [1-5,7,8]

### 1.3.2. Toplam Talep(Distorsiyonu-TTD) Bozulması

Yük akımı küçük olduğunda, harmonikli akımlar önemsenmeyecek kadar olsa dahi THD değeri büyük olabilir. Bu belirsizliği ve karışıklığı ortadan kaldırmak için Toplam Talep Bozulması (TTD) kavramı kullanılabilir. [1-5,7-9]

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (1.45)$$

Bu ifadede  $THD_I$  tanımına benzemekle beraber buradaki  $I_L$ , 12 ay boyunca belli periyotlarla tespit edilen ortak bağlantı noktasındaki temel frekanslı maksimum yük akımlarının ortalamasıdır. [1-5,7,8]

### 1.3.3. Şekil (Form) Faktörü

Bozulmuş sinüsoidal bir dalganın bozulma ölçütünü veren değerdir. [3,4,8]

$$K_f = \text{Etketif Değer} / \text{Ortalama Değer} \quad (1.46)$$

eşitliği ile hesaplanır. [3,4,8] Sinüsoidal bir dalga için  $K_f = 1.11$  dir.

### 1.3.4. Tepe(Crest) Faktörü

Harmonik bileşenlerin en basit biçimde ortaya konmasını sağlar. Nonsinüsoidal bir akım veya gerilimin tepe değeri ile temel bileşenin efektif değeri arasında tanımlanır. [3,4,8]

$$\text{Tepe Faktörü} = \text{Tepe Değer} / \text{Temel Bileşenin Etketif Değeri} \quad (1.47)$$

Eşitliği ile hesaplanır. [3,4,8] Sinüsoidal bir dalga için Tepe Faktörü  $= \sqrt{2}$  dir.

### 1.3.5. Telefon Etkileşim Faktörü (TEF)

Elektrik güç sisteminde harmonik bileşenlerden dolayı oluşan Telefon Gürültü Değeri'ni belirlemek için kullanılan büyüklüktür. TEF değeri telefon sisteminin ve insan kulağının farklı frekanslardaki gürültüye olan duyarlılığına göre ayarlanır. Gerilim ve Akım için matematiksel olarak: [3,4,8]

$$TEF_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (W_n * V_n)^2}}{V_{ef}} \quad (1.48)$$

$$TEF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (W_n * I_n)^2}}{I_{ef}} \quad (1.49)$$

Şeklinde ifade edilir. [3,4,8]

$W_n$  n. harmonik mertebesi için işitsel ve endüktif kuplaj etkisini hesaplara dahil etmeyi sağlayan katsayıdır.[3,8]

### 1.3.6. Transformatör K Faktörü

Transformatörlerin lineer olmayan yükler beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı, harmonik bileşenleri içerir.[2,3,8] Son yıllarda yapılan çalışmalara göre kuru tip transformatörlerin nonsinüoidal yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak kabul edilen ve Standart transformatörlerin harmonik akımlarına bağlı olarak nominal gerilim ve akım değerlerinde meydana gelen düşümlerin belirlenmesinde kullanılan bir büyüklüktür.[2,3,8] Diğer bir deyişle, transformatör K-faktörü, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır. Bu değer Anma gerilimi veya Anma Akımı gibi imalatçı tarafından belirlenen bir anma büyüklüğü olup anma gücü 500 KVA'nın altında olan transformatörler için tanımlanmıştır. Transformatör K faktörü diğer bir ifadeyle harmonik Akımlar mevcut olduğu zaman Standart Transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalmayı hesaplamak için kullanılan bir değerdir.[2,3,8]

Nonlinear yükleri besleyen bir transformatör için K-Faktörü

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} \left( n * \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \quad (1.50)$$

Şeklinde ifade edilir.[2,3,8] Transformatörün efektif akımına göre normlaştırılırsa transformatör K faktörü:

$$K = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}{I^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left( n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2}{\left( \frac{I}{I_1} \right)^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left( n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2}{1 + \text{THD}_I^2} \quad (1.51)$$

Şeklinde olur. [2,3,8] I efektif akımı,  $I_n$ , n. harmonik bileşen akımını belirtmektedir. Standart transformatör'ün anma değerindeki düşümün hesaplanması için IEEE C57.110-1986' da

$$D = \frac{1.15}{1 + (0.15 * K)} \quad (1.52)$$

Eşitliği verilmiştir. [2,3,8]

Bu ifade de D transformatör gücündeki azalmayı belirtir. Harmonikli Akım ile yüklenen transformatörün verebileceği maksimum güç değeri

$$S_H = D * S_N \quad (1.53)$$

İfadesi ile hesaplanır. [2,3,8]

### 1.3.7. Distorsiyon Güç Faktörü

Harmonikli gerilim ve akımın efektif değerleri aşağıdaki gibi de gösterilebilir.[3,8]

$$V = V_1 * \sqrt{1 + \left( \frac{\text{THD}_V}{100} \right)^2} \quad (1.54)$$

$$I = I_1 * \sqrt{1 + \left( \frac{\text{THD}_I}{100} \right)^2} \quad (1.55)$$

Buradan hareketle Toplam Güç faktörü:



$$GF_{Toplam} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V * I} = \frac{P}{V_1 * I_1 * \sqrt{1 + \left(\frac{THD_v}{100}\right)^2} * \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} \quad (1.56)$$

Şeklinde ifade edilir. [3,8] Bu eşitlik anı zamanda

$$GF_{Toplam} = \cos(\theta_1 - \delta_1) * GF_{dist} \quad (1.57)$$

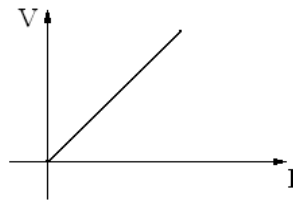
Eşitliği ile gösterilir.[3,8] Burada  $\cos(\theta_1 - \delta_1)$  ifadesi Kayma Güç Faktörü yani harmoniklerin olmadığı lineer durumdaki Güç Faktörü,  $GF_{dist}$  ise Distorsiyon Güç Faktörü dür. Kayma Güç faktörü 1 den büyük olamayacağından her zaman  $GF_{Toplam} \leq GF_{dist}$  olur. [3,8]

## 1.4. NONLINEER ELEMANLAR VE HARMONİK BİLEŞEN İÇEREN DEVRELER

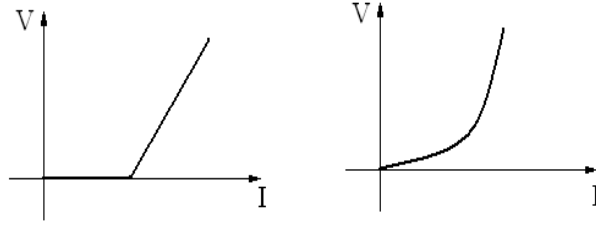
### 1.4.1. Nonlinear Elemanın Tanımı

Şebekeye bağlandığında harmonik bileşenlere sebep olan nonlinear elemanlar için farklı tanımlamalar yapılmaktadır.[3,9]

1-Nonlinear eleman uç karakteristiği yani akım-gerilim karakteristiği lineer olmayan elemandır. Linear elemanların uç karakteristiği orijinden geçen bir doğru şeklindedir. Nonlinear elemanlarda ise uç karakteristiği orijinden geçmeyen bir doğru ya da orijinden geçen bir eğri şeklindedir. Aşağıda Şekil 1.4 de Linear eleman için ve Şekil 1.5 de de Nonlinear eleman için grafiksel gösterim verilmiştir.[3,9]



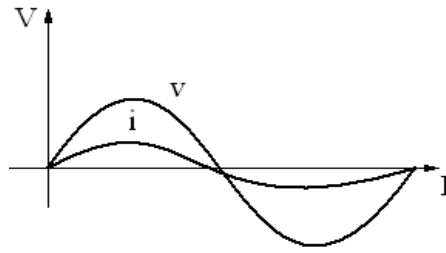
Şekil 1.4. Linear Eleman Akım-Gerilim Karakteristiği.[3]



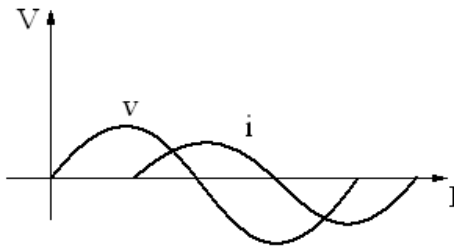
**Şekil 1.5.** Nonlinear Eleman Akım-Gerilim Karakteristiği.[3]

**2-** Nonlinear eleman uç karakteristiği Ohm Kanunu'nu sağlamayan elemandır. Ohm Kanunu gereği lineer elemanlarda gerilimin akıma oranı olan  $\frac{|V|}{|I|}$  değeri her zaman sabit bir skaler değerdir. Nonlinear elemanlarda ise gerilim değerindeki her değişime karşılık akımda aynı oranda bir değişim olmaz dolayısı ile  $\frac{|V|}{|I|}$  oranı gerçekleşmez.[3]

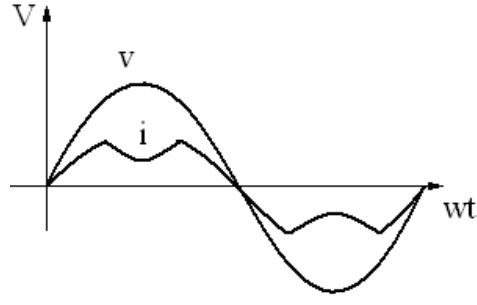
**3-**Nonlinear eleman akım dalga şekli gerilim dalga şeklinden bağımsız olan elemandır. Lineer elemanlarda arada faz farkı olsa da olmasa da akım ile gerilimin dalga şekli aynıdır. Nonlinear elemanlarda ise arada faz farkı olsa da olmasa da akım ve gerilimin dalga şekli farklı olur. Aşağıda Şekil 1.6 ve Şekil 1.7 de Lineer eleman için, şekil 1.8 ve şekil 1.9 da ise Nonlinear eleman için grafiksel gösterim verilmiştir.[3]



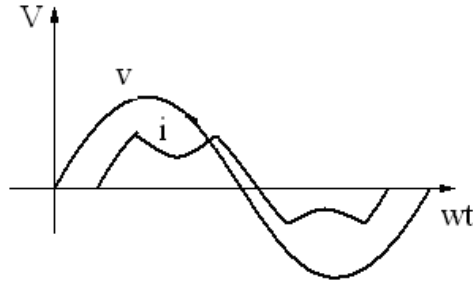
**Şekil 1.6.** Lineer Eleman Akım ve Gerilim Dalga Şekli(Faz Farkı Yok).[3]



**Şekil 1.7.** Lineer Eleman Akım ve Gerilim Dalga Şekli (Faz Farkı Var).[3]



**Şekil 1.8.** Nonlinear Eleman Akım ve Gerilim Dalga Şekli (Faz Farkı Yok).[3]



**Şekil 1.9.** Nonlinear Eleman Akım ve Gerilim Dalga Şekli (Faz Farkı Var).[3]

Nonlinear Elemanın akımı ile gerilimi arasındaki ilişki: [3]

$$I = a + b*U + c*U^2 + d*U_3 + \dots \quad (1.58)$$

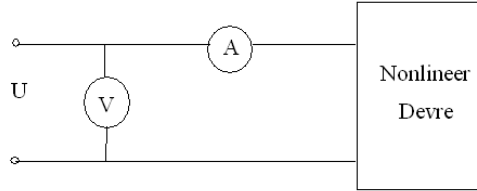
Eşitliği ile ifade edilir. Burada i=elemanın akımı U=elemanın gerilimidir. a,b,c,d.... ise sabit değerler olup her eleman için farklı değerler alırlar. Diyot, Transistör, Tristör Triyak gibi yarı iletken elemanlar, demir çekirdekli bobinler, sıcaklığın etkisi ile değeri değişen dirençler (NTC, PTC) nonlinear elemanlara örnektir. İçinde nonlinear eleman ya da elemanlar bulunan devrelere de Nonlinear Devreler denir.[3]

#### 1.4.2. Nonlinear Elemanın Harmonik Üretimi

Harmonik bileşenler besleme kaynağı haricinde devrenin elektrik ve magnetik lineersizliğinden oluşur.[3]

### 1.4.2. 1. Devrenin Elektrik Lineersizliği

Devredeki elemanların akımı ile geriliminin aynı oranda değişmemesi elektrik lineersizlik olarak tanımlanır. Bu durumu Şekil 1.10 daki örnekle inceleyelim. Nonlinear devreye uygulanan gerilim ve bu gerilime karşılık ölçölen akım değerleri Çizelge 1.7 de verilmiştir.[3]



Şekil 1.10. Nonlinear Devre Akım ve Gerilim Ölçüm Şeması.[3]

Çizelge 1.2. Nonlinear Devrede Ölçölen Akım ve Gerilim Değerleri.[3]

| Gerilim(V) | Akım(A) |
|------------|---------|
| 100        | 5,5     |
| 150        | 9       |
| 200        | 14,5    |
| 230        | 18      |

Burada akım Eşitlik. 1.56 daki gibi  $I = a + b*U + c*U^2 + d*U_3 + \dots$  şeklinde yazılabilir.[3] Her bir gerilim değerini için eşitliği düzenlersek: [3]

$$5,5 = a + 100*b + 100^2 * c + 100^3 * d$$

$$9 = a + 150*b + 150^2 * c + 150^3 * d$$

$$14,5 = a + 200*b + 200^2 * c + 200^3 * d$$

$$18 = a + 230*b + 230^2 * c + 230^3 * d$$

Şeklinde bir denklem takımı elde ederiz.[3] Bu ifadenin çözümlenmesi ile  $a = 11,81$  ,

$b = -0,19$   $c = 1,5 * 10^{-3}$  ,  $d = -2,44 * 10^{-6}$  olarak hesaplanır. Katsayıların yerine

yazılması ile akım

$I = 11,81 - 0,19U + 1,5 * 10^{-3} U^2 - 2,44 * 10^{-6} * U^3$  Olarak elde edilir. Uygulanan gerilim  $U = \sqrt{2} * 220 * \sin(\omega t)$  Şeklinde sinüsoidal bir gerilim ise

$$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} \quad \text{ve} \quad \sin^2 \alpha = \frac{3}{4} \sin \alpha - \frac{1}{4} \sin 3\alpha$$
 bağıntılarının kullanılması ile akım

$$I = 84,22 - 113,62 \sin(\omega t) - 72,42 \sin(2\omega t + 90^\circ) + 18,34 \sin(3\omega t)$$

Şeklinde olur.[3] Anlaşılacağı üzere devrede temel bileşene ek olarak harmonik bileşenler de oluşmuştur. Bunlar DC bileşen, 2. harmonik ve 3. harmonik bileşendir. [3]

#### 1.4.2.2. Devrenin Magnetik Lineersizliği

Magnetik devrede doyma olayı nedeniyle devreden geçen akım ile oluşan magnetik akı arasında nonlinear bir ilişki vardır.[3] Akım ne kadar artarsa artsın magnetik akı artmaz.

Bu durumu şöyle açıklayabiliriz: [3]

Sarım sayısı  $W$  olan yüksüz bir transformatöre  $v = v_m \sin \omega t$  şeklinde bir gerilim uygulanırsa Lenz kanununa göre uygulanan gerilime eşit ve zıt yönde bir e.m.k endüklenir. [3] Bu e.m.k

$$e = -v = -W \frac{d\phi}{dt} \quad (1.59)$$

Eşitliği ile hesaplanır. [3]

$$\text{Magnetik akı: } \phi = -\frac{1}{W} \int e dt = \frac{V_m}{W \cdot \omega} \cos \omega t \quad (1.60)$$

Eşitliği ile ifade edilir. [3]

$S$ =nüvenin kesiti olmak üzere Magnetik akı yoğunluğu (Magnetik Endüksiyon): [3]

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (1.61)$$

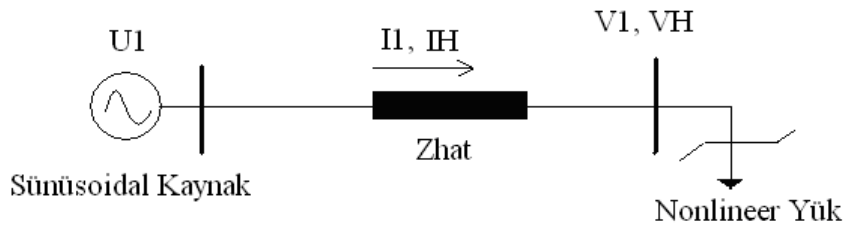
Olup magnetik akı şiddeti  $\phi$  ile aynı şekilde sinüsoidal bir değişime sahiptir.[3] Buna karşılık mıknatıslanma (B-H) eğrisinde magnetik endüksiyon B ile magnetikalan şiddeti H arasında

$$B = \mu H \quad (1.62)$$

İlişkisi vardır.[3] Bu ilişki nonlinear bir ilişkidir. İşte bu durumdan dolayı sinüsoidal bir magnetik akıya karşılık nonsinüsoidal bir mıknatıslanma akımı oluşur. Dolayısı ile sistemde harmonik bileşenler görülür. [3] Şimdi harmonikli devreleri sırayla inceleyelim.

### 1.4.3. Sinüsoidal Beslemeli Nonlinear Devreler

Sinüsoidal bir kaynağa bağlı nonlinear devrelerden oluşur. Uygulamada en çok bu devre tipi ile karşılaşılır. Aşağıda şekil 1.11 de devrenin genel gösterimi verilmiştir. [3,4]



Şekil 1.11. Sinüsoidal Beslemeli Nonlinear Devre.[3]

Böyle bir devreye

$$V = V_m * \sin \omega t = \sqrt{2} * V * \sin \omega t \quad (1.62)$$

Şeklinde bir gerilim uygulanırsa devreden

$$I = \sqrt{2} * \sum_{n=1}^N I_n * \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1.63)$$

Şeklinde N adet harmonik içeren bir akım geçer. [3,4] Bu durumda şebekeden çekilen Aktif (ortalama) güç

$$P = V * I_1 * \cos \psi_1 \quad (1.64)$$

Olarak ifade edilir. [3,4]

$\psi_1$ , besleme gerilimi ile (V) yük akımının temel bileşeni (besleme frekansındaki bileşeni) arasındaki açıdır. Besleme gerilimi sadece temel bileşeni içerdiğinden aktif güç sadece besleme gerilimi ve temel bileşenin akımı ile ifade edilir. Diğer akım bileşenlerinin etkisi yoktur. Devredeki akım ve gerilimin etkin(efektif) değerleri şöyle ifade edilir: [3,4]

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (1.65)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_n)^2} \quad (1.66)$$

Görünür güç: [3,4]

$$S = VI \quad (1.67)$$

Reaktif güç: [3,4]

$$Q = V * I_1 * \sin \varphi_1 \quad (1.68)$$

Güç faktörü: [3]

$$G = \frac{P}{S} = \frac{V * I_1 * \cos \varphi_1}{V * \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_n)^2}} = \frac{I_1}{I} * \cos \varphi_1 \quad (1.69)$$

Olur. [3] Burada  $\varphi_1$  kayma faktörüdür ve harmoniklerin olmadığı lineer durumdaki güç faktörüne eşittir.

Distorsiyon gücü: [3,4]

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = V * I_H \quad (1.70)$$

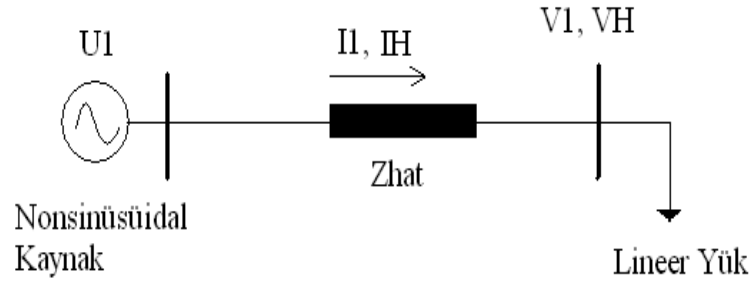
Şeklindedir.  $I_H$  Akımı

$$I_H = \sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2} \quad (1.71)$$

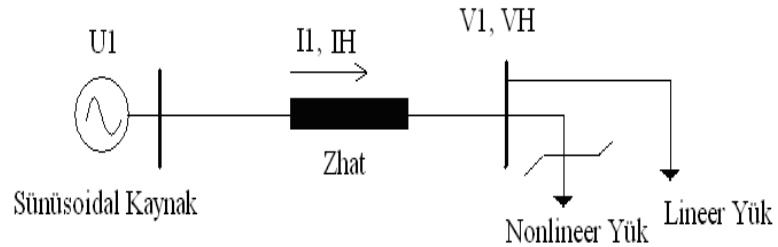
Olarak ifade edilir ve harmonik bileşenlerin akımıdır.[3,4] Yani distorsiyon gücü, harmonik akımlarının gerilim ile çarpımına eşittir ve harmoniklerin olmaması durumunda distorsiyon gücü 0'a eşit olur. [3,4]

#### 1.4.4. Nonsinüsoidal Beslemeli Lineer Devreler

Gerilim kaynağı nonsinüsoidal ve devreye bağlı elemanların lineer olduğu devrelerdir. Ayrıca harmonik bileşenler ihtiva eden bir dağıtım barasına bağlı lineer elemanlarda bu tip devreye örnektir. Aşağıda Şekil 1.12 ve Şekil 1.13 de devrenin genel gösterimi verilmiştir. [3,4]



Şekil 1.12. Nonsinüsoidal Beslemeli Lineer Devre.[3]



Şekil 1.13. Harmonikli Baraya Bağlı Lineer Yük.[3]



Bu devreye

$$V = \sqrt{2} * \sum_{n=1}^N V_n * \sin(n\omega t + \alpha_n) \quad (1.72)$$

Şeklinde DC bileşen içermeyen N. Mertebeden harmonik içeren bir gerilim uygulansın. Bu durumda yük empedansı lineer olduğu için devreden geçecek olan harmonikli akımlar sadece besleme gerilimine bağlı olur. Yani gerilimdeki harmonikler aynı dereceli olarak akımda da görülür. [3,4]

Devreden geçen akım: [3,4]

$$I = \sqrt{2} * \sum_{n=1}^N I_n * \sin(n\omega t + \alpha_n - \phi_n) \quad (1.73)$$

Şeklinde olacaktır. Bu ifade de

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}_n}{\dot{Z}_n} \quad (1.74)$$

$$\dot{Z}_n = Z_n \angle \phi_n \quad (1.75)$$

Olarak ifade edilir. [3,4]

$$Z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2} \quad (1.76)$$

$$\phi_n = \tan^{-1} \left( \frac{X_n}{R_n} \right) \quad (1.77)$$

Olarak ifade edilir. [3,4] Gerilim ve akımın efektif(etkin) değerleri:

$$V = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N V_n^2\right)} \quad (1.78)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} \quad (1.79)$$

Şeklindedir. [3,4]

Bu devrede aktif güç: [3,4]

$$P = \sum_{n=1}^N P_n = \sum_{n=1}^N (V_n * I_n * \cos\phi_n) \quad (1.80)$$

Görünür güç: [3,4]

$$S = \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N V_n^2\right)} * \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N I_n^2\right)} \quad (1.81)$$

Şeklinde hesaplanır. Burada

$$S^2 \neq \sum_{n=1}^N (V_n * I_n)^2 \quad (1.82)$$

Eşitsizliği olduğunu bilmemiz gereklidir.

Güç faktörü: [3,4]

$$GF = \frac{P}{S} = \frac{P}{VI} = \frac{\sum_{n=1}^N (V_n * I_n * \cos\phi_n)}{\sqrt{\left(\sum_{n=1}^N V_n^2\right)} * \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N I_n^2\right)}} \quad (1.83)$$

Olacaktır. Distorsiyon dâhil reaktif gücün karesel ifadesi:

$$S^2 - P^2 = \left[ \sum_{n=1}^N V_n * I_n * \sin \phi_n \right]^2 + \left[ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N V_n^2 * I_m^2 - V_n * V_m * I_n * I_m * \cos(\phi_n - \phi_m) \right] \quad (1.84)$$

Şeklinde olur. [3,4]

#### 1.4.5. Nonsinüsoidal Beslemeli Nonlinear Devreler

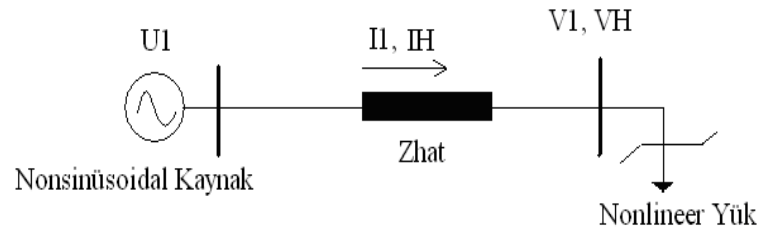
Nonlinear elemanların nonsinüsoidal bir kaynaktan beslenmesi ile bu tip devreler oluşur. Ayrıca harmoniklerin bulunduğu bir dağıtım barasına nonlinear elemanların bağlanması da bu devrelere örnektir. Bu tip devrelerde nonlinear elemanlardan dolayı gerilim kaynağındaki harmoniklerin dışında başka harmonik bileşenlerde oluşur. Bunlar şu şekilde ifade edilir: [3]

$n_1$  = Hem gerilim hemde akımda bulunan harmonik bileşenler

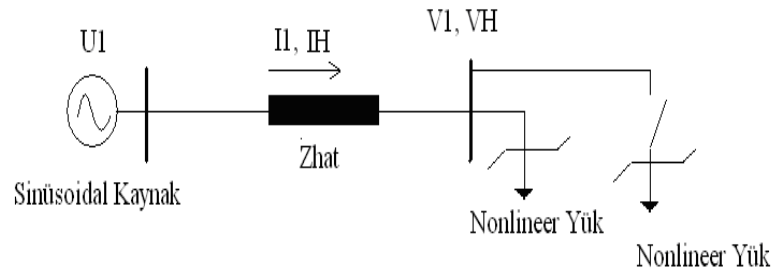
$n_2$  = Sadece gerilimde bulunan harmonik bileşenler

$n_3$  = Sadece akımda bulunan harmonik bileşenler

Aşağıda Şekil 1.14 ve Şekil 1.15 de devrenin genel gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.14. Nonsinüsoidal Beslemeli Nonlinear Devre.[3]



Şekil 1.15. Harmonikli Baraya Bağlı Nonlinear Yük.[3]

Devredeki elektriksel büyüklükler şöyle hesaplanır: [3]

Gerilimin ani değeri [3]

$$V = \sqrt{2} * \left[ \sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1} * \sin(n_1 \omega t + \alpha_{n_1}) + \sum_{n_2=1}^{N_2} V_{n_2} * \sin(n_2 \omega t + \alpha_{n_2}) \right] \quad (1.85)$$

Gerilimin Efektif değeri: [3]

$$V = \sqrt{\left( \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1}^2 \right) + \left( \sum_{n_2=1}^{N_2} V_{n_2}^2 \right) \right)} \quad (1.86)$$

Devreden çekilen akımın anideğeri: [3]

$$\dot{I} = \sqrt{2} * \left[ \sum_{n_1=1}^{N_1} I_{n_1} * \sin(n_1 \omega t + \alpha_{n_1} - \psi_{n_1}) + \sum_{n_3=1}^{N_3} I_{n_3} * \sin(n_3 \omega t + \alpha_{n_3} - \psi_{n_3}) \right] \quad (1.87)$$

Şeklinde olur.

Akımın Efektif Değeri: [3]

$$\dot{I} = \sqrt{\left( \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} I_{n_1}^2 \right) + \left( \sum_{n_3=1}^{N_3} I_{n_3}^2 \right) \right)} \quad (1.88)$$

Şeklinde olur. Bu devrede zamandan bağımsız olarak Aktif güç ifadesi: [3]

$$P_y = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V * \dot{I}_y * d\omega t = \sum_{n=1}^{N_1} V_{n_1} * I_{n_1} * \cos(\psi_{n_1}) \quad (1.89)$$

Olarak ifade edilir. Aktif güç sadece aynı frekanslı bileşenlerden oluşmaktadır. Bu durum hem akım hemde gerilimde bulunan bileşenlerin aktif güç için etkin olduğunun göstergesidir. [3]

Görünen güç: [3]

$$S_y = V * I_y = \left[ \left( \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1}^2 \right) + \left( \sum_{n_2=1}^{N_2} V_{n_2}^2 \right) \right) * \left( \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} I_{n_1}^2 \right) + \left( \sum_{n_3=1}^{N_3} I_{n_3}^2 \right) \right) \right] \quad (1.90)$$

Şeklinde olur. Reaktif güç ise yine distorsiyon dahil karesel olarak:

$$Q^2 = S_y^2 - P_y^2 = \left[ \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1}^2 * \sum_{n_1=1}^{N_1} I_{n_1}^2 \right) - \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1} * I_{n_1} * \cos(\psi_{n_1}) \right)^2 \right] \\ + \left[ \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1}^2 \right) * \left( \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} I_{n_1}^2 \right) + \left( \sum_{n_3=1}^{N_3} I_{n_3}^2 \right) \right) + \left( \sum_{n_1=1}^{N_1} V_{n_1}^2 * \sum_{n_3=1}^{N_3} I_{n_3}^2 \right) \right] \quad (1.91)$$

Olarak ifade edilir. [3]

## 1.5. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR

Harmoniksiz saf sinüsoidal dalga gerçekçi olmayan teorik bir niceliktir. Generatörlerin uçlarında bile uyartım alanının ve stator sargılarının yerleşiminin düzgün olmamasından kaynaklanan harmonik bozulmalar vardır. Ancak üretim noktasındaki bozulma genellikle %1'den daha azdır ve bu nedenle gözönüne alınmayabilir. Bununla birlikte doğrusal olmayan yükler ve enerji sistemindeki bazı ekipmanlar harmonikli akım üretirler. Sistemde harmonik üreten bu doğrusal olmayan elemanlardan bazıları şu şekilde sıralanabilir:[1,3-9]

- Konverterler
- Transformatörler
- Generatörler
- Ark Fırınları
- Gaz Deşarj Prensibi İle Çalışan Aydınlatma Elemanları
- Statik VAR Kompanzatörleri
- Fotovoltaik Sistemler
- Bilgisayarlar

- Elektronik Balastlar
- Yarı İletken Elemanların Kullanıldığı Cihazlar
- Kaynak Makineleri
- Yüksek Gerilim ile Enerji İletim Sistemleri(HVDC)
- Elektrikli Ulaşım Sistemleri

Güç sistemlerinde harmonik üreten tüm elemanların harmonik kaynağı olarak ayrı ayrı incelenmesi gerekir. Güç sistemlerinde harmonik bileşenlerinin belirlenmesi ve sistemin harmonik simülasyonunun yapılabilmesi açısından harmonik kaynakları üç gruba ayrılabilir. [1,3-9]

- Sistemin içine dğılmış çok sayıdaki küçük güçlü nonlinear elemanlar
- Büyük güçlü, karakteristiği sürekli ama rastgele değişen nonlinear yükler
- Büyük güçlü statik konverteler ve iletim sistemlerindeki güç elektroniği düzenleri

Birinci gruptaki elemanlar TV, bilgisayar vb. yüklerin besleme kaynağı olan bir fazlı köprü tipi doğrultuculardır. Gaz deşarj prensibi ile çalışan lambalarda bir fazlı alçak gerilimde çalışmaları ve düşük güçlü olmalarından dolayı bu gruba dâhil edilebilirler. Bahsettiğimiz bu elemanlar tek tek ele alındıklarında güçleri düşük olsa da sistemde çok sayıda oldukları zaman hepsinin sistemde oluşturduğu harmonik distorsiyonu önemli boyutlara ulaşabilmektedir. İkinci gruptaki yüklere başlıca örnek: şebekeye doğrudan bağlanan gücü MW mertebesinde olan Ark Fırınları'dır. Bu fırınların empedansı dengesizdir ve zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımların da rastgele değişmesine sebep olur. Dolayısı ile sistemin modellemesini güçleştirmektedir. Üçüncü gruptaki büyük güçlü konverterlerin ve güç elektroniği düzenlerinin kontrol sistemlerinin karmaşık olması ve güçlerinin büyük olmasından dolayı simülasyonu zordur. Şimdi yukarıda ifade ettiğimiz harmonik kaynaklarının belli başlılarını inceleyelim: [1,3-9]

### **1.5. 1. Konverterler**

DC iletim sistemleri, Aküler ve fotovoltaik sistemler konverterler üzerinden beslenirler. Konverterlerin bir diğer kullanım alanı da elektrikli demiryolu ulaşım sistemidir. Üç fazlı ideal (dengeli) konverterler 3 ve 3'ün katı olan harmonikleri üretmez bu açıdan bir fazlı konverterlere göre avantajlıdır. Konverterler transformatörün primer tarafında

şebekeden çekilen A.C akımın dalga şeklinin içerdiği darbe sayısı ile ifade edilirler. Konverter de üretilen harmonik bileşenler  $n = k.p \pm 1$  bağıntısı ile gösterilir. Burada  $k = 1,2,3, \dots \in Z$ ,  $n$ =harmonik mertebesi ve  $P$  ise ( $P=6,12, \dots$ ) olarak darbe sayısıdır. [1,3-9] Darbe sayısı arttıkça düşük dereceli harmonik bileşenlerin oluşumu önlenmektedir. Örneğin transformatörü yıldız/yıldız bağlı 6 darbeleri dengeli bir konverterin bir faz hat akımı ani değeri:[3]

$$i(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_d \left( \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \dots \right) \quad (1.92)$$

Şeklinde olurken transformatör yıldız/üçgen bağlı iken:[3]

$$i(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} i_d \left( \cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \frac{1}{17} \cos 17\omega t - \dots \right) \quad (1.93)$$

Şeklinde hesaplanır. Görüldüğü üzere 6 darbeleri konverterde 5., 7., 11., 13., 17., 19., ... harmonikler oluşur. Harmonik mertebesi arttıkça harmonik bileşenlerin genliği azalır. 12 darbeleri bir konverterin bir faz hat akımı ani değeri:[3]

$$i(\omega t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} i_d \left( \cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{23} \cos 23\omega t + \frac{1}{25} \cos 25\omega t - \dots \right) \quad (1.94)$$

Şeklinde dir. Böylece 5., 7., 17., 19., ...harmoniklerin şebekeye geçmesi önlenmiş olur.[3]

### 1.5. 2. Transformatörler

Transformatörler en eski harmonik kaynağıdır. Transformatörün harmonik üretimi demir çekirdeğin(Nüve) doyuma gitmesinden yani mıknatıslanma karakteristiğinin nonlineer olmasından kaynaklanır. Doyma olayından dolayı akım ne kadar arttırılırsa arttırılsın magnetik akı aynı şekilde bir artış göstermez. İşte bu durumdan dolayı sinüsoidal bir magnetik akıya karşılık nonsinüsoidal bir mıknatıslanma akımı oluşur. Dolayısı ile sistemde harmonik bileşenler görülür. Bu şekilde harmonik üretimi devrenin magnetik lineersizliğinden kaynaklanmaktadır. Bölüm 2 de bu durum

açıklanmıştır. Mıknatıslanma akımındaki harmonik bileşenlerin şebekeye geçip geçmemesi

- Transformatörün bağlantı grubuna
- Primer yıldız bağlı ise yıldız noktasının şebekenin nötr hattına bağlı olup olmamasına
- Magnetik devrenin geometrisine

koşullarına bağlıdır. [1,3-9]

### 1.5.3. Generatörler

Generatörlerin harmonik üretmesi magnetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma gitmesinden, kaçak akımlardan, sönüm sargılarının sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilmesinden ve çıkıntılı kutuplu generatörde kutupların magnetik alan şeklinden, kaynaklanır. Dönen makinelerde oluşan harmonikler makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonudur. Generatörlerde oluşan harmonikleri etkileyen unsurlardan biri de bağlantı şekilleridir. Eğer stator yıldız bağlı ise 3 ve 3'ün katı olan harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunur fazlar arası gerilimlerde bulunmaz. Yıldız bağlı generatöre 3 fazlı dengeli bir yük bağlanır ve yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmaz ise 3 ve 3'ün katı olan harmonikli akımlar oluşmaz. Yıldız noktaları bağlandığında ise faz iletkenlerinden 3 ve 3'ün katı harmonikleri içeren  $I_0$  akımı geçer, yıldız noktasından da bunların toplamına eşit olan  $3I_0$  akımı geçer. Bu akımlar geçtikleri iletkenler üzerinde 3 ve 3'ün katı frekanslarda gerilim düşümü oluşturur. Generatör üçgen bağlı ise sargılarda 3 'ün katı frekanslarda sirkülasyon akımları oluşmaktadır. Bu akım yüke bağlı değildir ve sargılarda büyük kayıplar oluşturur. [1,3-9]

### 1.5.4. Ark Fırınları

Ark fırınları şebekeye bağlanan yüksek güçlü elemanlardır (güçleri MW mertebesindedir.) ve geniş spektrumlu bir harmonik kaynağıdır. Çalışması elektriksel ark oluşması esasına dayanır. Ark oluşumunda akım-gerilim karakteristiği nonlineerdir. Yani ark elektrotlarının direnci nonlineerdir. Bundan dolayı harmonik üretir. Ark'ın başlamasının ardından ark gerilimi azalır ve ark akımı artar. Bu sırada ark olayında Negatif Direnç Etkisi oluşur. Ark fırınlarının empedansı dengesizdir. Zamana göre



rastgele bir değişim gösterir. Bundan dolayı Şebekeye geöen harmonikli akımlarda rastgele değişim gösterir. Bir ark fırınında 2., 3., ....9. mertebeden harmonikler bulunur. En büyük dereceli harmonik temel bileşenin %30'u kadar olur. Ayrıca dengesizlik ark fırınlarının modellenmesini de zorlaştırmaktadır. [1,3-9]

#### **1.5.5. Gaz Deşarj Prensibi İle Çalışan Aydınlatma Elemanları**

Gaz deşarj lambaları civa buharlı lambalar, floresant lambalar, yüksek basınçlı sodyum lambaları, xenon lambalar, neon lambalar gibi elemanlardır. Bu cihazların çalışma prensibi bir tüp içerisindeki gazın deşarjı esasına dayanır. Akım-gerilim karakteristiği nonlineer olduğu için harmonik üretirler. Bu cihazlarda iletim sırasında negatif direnç özelliği görülür. Floresant lambalar aydınlatma tesislerinde çok kullanıldığından bu elemanların oluşturduğu tek harmonikler sistemi önemli oranda etkiler. Üç fazlı Şebekede faz-nötr gerilimi ile beslenen tesislerde fazlarda oluşun 3. harmonik akımları nötr iletkeninden geötiği için bu iletken ısınmaktadır. [1,3-9]

#### **1.5.6. Statik VAR Kompanzatörleri**

Statik VAR Kompanzatörleri reaktif güç kontrolü için kullanılmaktadır. Bu cihazlar sürekli ve hızlı reaktif güç ve gerilim kontrolü sağlamaktadır. Bundan dolayı sistemde hızlı değişen yüklerin bulunması halinde Statik VAR Kompanzatörler kullanılarak gereken reaktif güç çok hızlı birşekilde üretilebilir. Örneğin Ark Fırınları'nın çektiği reaktif güç çok hızlı değişir. Klasik kompanzasyon sistemleri ile reaktif güç kontrolü sağlanamaz ama Statik VAR Kompanzatörler ile tristörler fırının ihtiyaç duyduğu hızda devreye alınıp çıkarılarak reaktif güç ihtiyacı karşılanır. Bu cihazlar yapılarında bulunan nonlineer elemanlar(Tristör, Bobin v.s) nedeniyle harmonik bileşenler üretirler. Oluşun harmonik bileşenlerden herhangi biri sistemde Rezonans'a sebep olabilmektedir. [1,3-9]

#### **1.5.7. Fotovoltaik Sistemler**

Fotovoltaik Sistemler üzerlerine düşen güneş ışığından elektrik enerjisi üreten sistemlerdir. Üretilen gerilim DC gerilimdir; Şebekede kullanım için DC-AC konverterler kullanılarak AC gerilim elde edilir. Ayrıca Fotovoltaik tesisler Şebekeden bağımsız çalışacaksa sistemde Akü Bataryası ve Akü Şarj Ünitesi bulunur. Fotovoltaik Sistemler'in harmonik üretimi konverter ve akü şarj ünitesi gibi nonlineer eleman içeren bileşenlerden kaynaklanmaktadır. [1,3-9]

### 1.5.8. Bilgisayarlar

Bilgisayarlar şebekedeki hassas yüklerdendir. Sistemdeki bozucu etkilerden etkilenmekle beraber yapısında bulunan nonlineer elemanlar sebebiyle akım-gerilim karakteristiği nonlineer olup harmonik üretir. Bilgisayarlar Gaz Deşarj Lambaları gibi özellikle 3. harmonik oluşumuna sebep olurlar. [1,3-9]

### 1.5.9. Elektronik Balastlar

Fluoresant lambalarda kullanılan magnetik balastların bir magnetik devresi vardır ve bu devredeki magnetik lineerszlikten dolayı harmonik üretirler. Kompakt floresant lambalarda bulunan elektronik balastlar ise nonlineer özelliklerinden dolayı harmonik üretirler. Bu cihazlar filtrelili ve filtresiz olarak üretilmektedir. Filtrelili elektronik balastların harmonik distorsiyonu yok sayılır. Filtresiz elektronik balastlarda ise en fazla 3., 5., 7., ve 9. harmonikler etkindir. 13. harmonikten sonra temel bileşinin 1/3 'ünden daha küçük harmonikler oluşur. Enerji tasarruflu cihazlar olarak piyasada rağbet edilen kompakt floresant lambaların elektronik balastlarından dolayı şebekeye enjekte edilen harmonik akımlar ile ilgili İngiliz Eastern Electricity firmasının çeşitli kompakt floresant lambalar kullanarak yaptığı araştırma sonuçları aşağıda Çizelge 1.8 de verilmiştir. [1,3-9]

**Çizelge 1.3.** Kompakt Floresant (Enerji Tasarruflu) Lambaların Elektronik Balastlarından Şebekeye Enjekte Edilen Harmonik Akımlar.[4]

|              |       |       |        |        |      |
|--------------|-------|-------|--------|--------|------|
| 2. Harmonik  | 0.12  | 0.23  | 0.25   | 0.82   | 0.1  |
| 3. Harmonik  | 21.11 | 25.13 | 78.87  | 88.83  | 1.04 |
| 5. Harmonik  | 29.84 | 15.53 | 54.08  | 71.77  | 2.7  |
| 7. Harmonik  | 8.44  | 3.61  | 41.75  | 56.00  | 0.40 |
| 9. Harmonik  | 6.27  | 2.03  | 35.36  | 47.70  | 1.12 |
| 11. Harmonik | 12.11 | 6.33  | 24.39  | 45.03  | 0.01 |
| 13. Harmonik | 4.45  | 1.2   | 12.77  | 43.25  | 0.27 |
| THD          | 41.47 | 40.18 | 118.21 | 176.27 | 4.00 |

### **1.5.10. Yarı İletken Elemanların Kullanıldığı Cihazlar**

DC/AC , AC/DC konverterler, Frekans konverterleri ,Motor Sürücü devreleri, Motor hız kontrol devreleri, elektronik sensörler, elektronik röleler ve bu tür cihazların kullanıldığı kesintisiz güç kaynakları, endüstriyel kumanda ve otomasyon sistemleri v.s. yarı iletken elemanlardan dolayı nonlinear özellikte olup birer harmonik kaynağıdır. [1,3-9]

### **1.5.11. Kaynak Makineleri**

Kaynak makineleri ark fırınları gibi elektriksel ark oluşumu esasına göre çalışırlar. Ark oluşumunda akım-gerilim karakteristiği nonlineerdir. Yani ark elektrotlarının direnci nonlineerdir. Bundan dolayı harmonik üretir. [1,3-9]

### **1.5.12. Yüksek Gerilimli DC ile Enerji İletim Sistemleri(HVDC)**

Yüksek gerilimli DC iletim hatları hattın bir tarafında AC-DC konverter karşı tarafında da DC-AC konverter bulunan sistemlerdir. Bu cihazlar nonlinear özellikte olduğundan DC iletim sistemleri de harmoniklere sebep olur. [1,3-9]

### **1.5.13. Elektrikli Ulaşım Sistemleri**

Bu sistemler ihtiva ettikleri konverterler, Motor Sürücü devreleri gibi cihazlardan dolayı harmoniklere sebep olurlar. [1,3-9]

## **1.6. HARMONİKLERİN SİSTEME ETKİLERİ**

Harmonikler güç sistemlerindeki tüm elemanları etkilerler. Dolayısı ile güç sistemleri bundan olumsuz yönde etkilenir. Harmoniklerin gerilim ve akımın dalga şeklini bozmaları sonucu enerji sistemlerinde meydana getirdikleri etkiler genel olarak şöyle sıralanabilir.[1-9]

1. Enerji sistemindeki elemanlarda kayıpların artması
2. Transformatörlerin aşırı ısınması
3. Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının oluşması sebebiyle aşırı ısınmalar

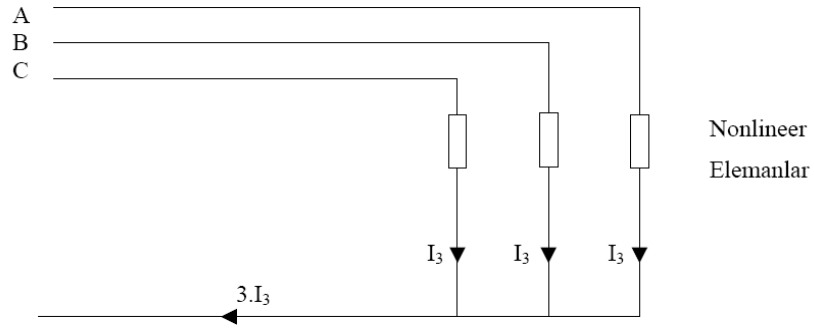
4. Gerilim düşümlerinin artması
5. Generatör ve şebeke gerilimi dalga şeklinin bozulması
6. Kompanzasyon tesislerinde kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermesinden dolayı aşırı yüklenmeleri ve yalıtkanlarının zorlanmasından dolayı hasar görmeleri
7. Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler
8. Şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilim ve akımlar
9. Kontrol devrelerinde çalışma bozuklukları
10. Koruma sistemlerinde hatalı çalışma
11. Dielektrik malzemesinin delinmesi
12. Mikroişlemcilerin hatalı çalışması
13. Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma
14. Güç faktörü değişimi
15. Enerji üretim, iletim ve dağıtımında verimin düşmesi
16. Toprak Kısa devre akımlarının değerinin artması
17. Elektrik cihazlarında ek gürültülere sebep olması
18. Elektrik cihazlarının ömrünün azalması

Bunlar arasında teknik ve ekonomik olarak en önemlileri sistemde kayıpların artması ve ölçü cihazlarında hata paylarının artmasıdır. Şimdi harmoniklerin enerji sistemlerindeki bazı elemanlar üzerinde yaptığı etkileri inceleyelim. [1-9]

#### **1.6.1. İletkenler Üzerindeki Etki**

Harmonikler iletkenler üzerinde kayıpların artmasına bunun sonunda da aşırı ısınmalara neden olur. İletkenlerde ısınma iki şekilde olur: Birincisi “Skin Effect” olarak bilinen deri etkisi olayı sonucunda harmonik frekanslarındaki artış ile akımın iletken yüzeyine yakın yerlere doğru yoğunlaşması ve buna bağlı olarak iletken direncinin artması, ikincisi ise tek fazlı yüklerin üç fazlı dört iletkenli sistemler üzerinden beslendiği tesislerde harmonik akımlarının nötr iletkenini aşırı yüklemesidir. Üç fazlı dengeli lineer sistemlerde faz akımlarının toplamı 0 olduğu için nötr hattından akım geçmez Bazı nonlinear elemanlar 3 ve 3’ün katı harmonikleri üretir. n harmonik mertebesi olmak üzere fazlar arasında  $n \cdot 120^\circ$  lik faz farkı olur. Dolayısı ile 3 ve 3’ün katı harmonik mertebelerinde harmonik bileşenler arasında  $360^\circ$  faz farkı vardır. Yani akımlar birbirinin üzerine eklenir. Dolayısı ile nötr iletkeni fazla yüklenerek aşırı ısınır.

Aşağıda şekil 1.16 da nötr iletkeninin aşırı yüklenmesine ilişkin şema verilmiştir. [1-9]



**Şekil 1.16.** Harmonikli Sistemde Nötr İletkeninin Aşırı Yüklenmesi.[3]

Bir omik dirençte oluşan kayıp güç, elemandan geçen akım ile ilgilidir.

Omik direnci  $R$  olan iletkenen geçen ve  $N$  tane harmonik içeren bir akımın ani ve etkin değeri sırasıyla aşağıdaki gibidir. [1-9]

Ani değer: [1-9]

$$i(t) = \sum_{n=1}^N i(t)_n \quad (1.95)$$

efektif değeri ise: [1-9]

$$I = \sqrt{\left( \sum_{n=1}^N (I_n)^2 \right)} \quad (1.96)$$

Burada  $n$ . harmonik için akım harmoniği oranı: [1-9]

$$HD_i = \frac{I_n}{I_1} \quad (1.97)$$

olarak tanımlandığında sistemde oluşacak toplam omik kayıplar: [1-9]

$$P_k = 3 * \sum_{n=1}^N (R_n * I_n^2) \quad (1.98)$$

Olur. Direncin frekans ile değişimi yani deri etkisi ihmal edilirse iletkende oluşan toplam kayıp güç: [1-9]

$$P_K = 3 * R * I^2 = 3 * R * I_1^2 \left( 1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 \right) = P_{K1} \left( 1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 \right) = P_{K1} + P_{KH} \quad (1.99)$$

olacaktır.[1-9] Anlaşılabacağı üzere harmonikli sistemde sinüsoidal gerilimin oluşturduğu kayıplara ilave kayıplar ortaya çıkmaktadır ve akım harmonik distorsiyonu arttıkça bu ek kayıplar artmaktadır. [1-9]

### 1.6.2. Direnç Üzerindeki Etki

Harmonik mertebesi arttıkça frekans da aynı oranda artar frekans artışı ile akım iletkenin yüzeyine yakın bölgelerden geçme eğilimi gösterir ve akım iletken yüzeyinde homojen bir dağılım göstermez. Deri Etkisi “Skin-Effect” dediğimiz bu olayın sonucunda iletkenin AC direnci DC direncine göre artar, endüktansı ise azalır. Sistemde harmonik bileşenlerin bulunması halinde deri etkisi daha fazla olur ve iletkenin AC direnci daha fazla artar. İletkenin temel bileşendeki direnç değerine harmonikli sistemde her harmonik bileşen için bir  $R_n$  direnci eklenir. Deri etkisi ile oluşan direnç Arnold formülü olarak bilinen ve literatürde yaygın kabul gören formül ile hesaplanabilir. [1-9]

Önce bir  $X(n)$  değişkeni hesaplanır.

$$X(n) = 0,050132 \sqrt{\left( \frac{n * f_1}{r_{dc}} \right)} \quad (1.200)$$

Eşitliği ile bulunur. [1-9] n. harmonik için iletken direnci:

$$r_{ac} = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{X(n)^4}{48}} \right] * r_{dc} & 0 \leq X(n) \leq 3 \\ \left[ 0,26 + \frac{X(n)}{2,828} \right] * r_{dc} & X(n) > 3 \end{array} \right\} \quad (1.201)$$

Şeklinde olur. [1-9]

### 1.6.3. Reaktanslar Üzerindeki Etki

Endüktif ve kapasitif reaktanslar enerji sistemlerindeki modellemelerde çok kullanılmaktadır. Temel bileşen frekansındaki değeri  $X_L^1$  olan bir bobinin n. harmonikteki reaktansı : [1-9]

$$X_L^n = \omega L = 2\pi f L = n \underbrace{2\pi f_1 L}_{X_L^1} = n X_L^1 \quad (1.202)$$

Olur. Benzer şekilde Temel bileşen frekansındaki değeri  $X_C^1$  olan bir kondansatörün n. harmonikteki reaktansı : [1-9]

$$X_C^n = \frac{1}{2\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{n 2\pi f_1 C} = \frac{1}{n} * X_C^1 = \frac{X_C^1}{n} \quad (1.203)$$

Olacaktır. Görüldüğü gibi harmonik mertebesi arttıkça endüktif reaktans artmakta; kapasitif reaktans ise azalmaktadır. [1-9]

### 1.6.4. Kondansatörler Üzerindeki Etki

Kondansatörler harmonik bileşenlerden yüksek oranda etkilenirler. Harmonik bileşenlerden dolayı oluşan problemler ilk olarak paralel bağlı kondansatör gruplarında görülür. Yani diğer bir ifadeyle sistemde harmonik bileşenlerin varlığı ilk olarak kondansatörlerdeki olumsuzluklardan anlaşılır. [1-9] Kondansatörlerin reaktansı frekans arttıkça azalır bunun sonucunda kondansatörden geçen akım artar ve kondansatör aşırı ısınır. Harmonikli bir sistemde kondansatörün kapasitif reaktansı Eşitlik 1.203 deki gibi

$$X_C^n = \frac{1}{2\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{n 2\pi f_1 C} = \frac{1}{n} * X_C^1 = \frac{X_C^1}{n} \text{ şeklinde olur. Yani harmonik mertebesi}$$

arttikça reaktans küçülür. Bunun sonucunda kondansatörden geçen akım artar, eleman aşırı yüklenir ve aşırı ısınma meydana gelir. Harmonikli bir sistemde kondansatörün n. harmonik için akımı: [1-9]

$$I_n = 2\pi f_n C V_n = n\omega_1 C V_n \quad (1.204)$$

Şeklinde hesaplanır. Anlaşılacağı üzere harmonik mertebesi arttikça kondansatörden geçen akım artmaktadır. Kondansatörlerdeki reaktif güç ve kayıp güç uygulanan gerilime göre değişmektedir. Gerilim harmonikleri kondansatör üzerine düşen gerilimi artırır. Gerilim artışı ise elemanın gücünü artırır. Güçteki bu artış kondansatörün yalıtkanında zorlanmaya yani dielektrik zorlanmaya neden olur. Reaktif gücü Q olan bir kondansatöre harmonikli gerilim uygulandığında toplam reaktif güç: [1-9]

$$Q_T = Q + \sum_{n=2}^N \omega_n C V_n^2 \quad (1.205)$$

Olur. Kondansatör ideal olmayan, eşdeğer devresinde paralel R omik direnci bulunan bir eleman olarak kabul edilirse kayıp aktif güç: [1-9]

$$P_K = \sum_{n=1}^N C(\tan \delta) \omega_n V_n^2 \quad (1.206)$$

Olur. [1-9] Bu bağıntıda

$$\tan \delta = R \left( \frac{1}{\omega C} \right) \quad (1.207)$$

Olarak ifade ettiğimiz kayıp faktörüdür.  $\omega_n = 2\pi f_n$  Yani n. harmonik için açısıl frekans,  $V_n$  ise n. harmonik geriliminin efektif değeridir. Görüldüğü gibi harmonikli durumda kondansatörün gücü artmakta ve eleman aşırı reaktif yüklenmektedir. [1-9]

### 1.6.5. Motorlar ve Generatörler Üzerindeki Etki

Harmoniklerin motor ve generatörler de en büyük etkisi demir ve bakır kayıplarının artması ve makinede ısı artışı oluşmasıdır. Harmonik gerilim bileşenlerinin her biri



statorda bir akım endükler, bunun sonucunda stator sargılarında fazla ısınmaya sebep olur. Harmonik bileşenler döner makinelerde moment ve verimin düşmesine ve makinenin sinüsoidal beslemeli makineye göre daha gürültülü çalışmasına sebep olur. Endüksiyon motorlarında hava aralığında bileşke akı oluşmasından dolayı motor kalkış yapamayabilir yada limitlerin çok altındaki düşük hızlarda çalışabilir. [1-9]

### 1.6.6. Transformatörler Üzerindeki Etki

Transformatörler harmonik kaynağı olmakla birlikte harmoniklerden etkilenmektedirler. Harmonikli akımlar bakır kayıplarında, kaçak akı kayıplarında artışa ve haberleşme sistemlerinde problemlere neden olur, Harmonikli gerilimler ise demir kayıplarının artmasına ve yalıtımın zorlanmasına sebep olur. Bu kayıplardan dolayı transformatörde ek ısı ve gürültü oluşur. Transformatörde kayıplar frekansa bağlıdır. Frekans artarsa kayıplarda artar, bu yüzden yüksek mertebeli harmonikler düşük mertebeli harmoniklerden daha fazla etki yaparlar. Magnetik çekirdekli bir elemanda oluşan demir kayıpları gerilimin dalga şekline bağlıdır. Bu durumu matematiksel olarak göstermek gerekirse: Gerilim N adet harmonik içeriyorsa gerilimin ani değeri: [1-9]

$$v(t) = \sum_{n=1}^N v_n(t) \quad (1.208)$$

Şeklindedir. Gerilimin efektif değeri: [1-9]

$$V = \sqrt{\left( \sum_{n=1}^N V_n^2 \right)} \quad (1.209)$$

Şeklinde olur. Demir kayıpları: [1-9]

$$P_{Fe} \cong K_m V^2 = K_m \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (1.210)$$

Olacaktır.  $K_m$  = makinenin yapısı ile ilgili olan sabit bir değerdir. n. harmonik için gerilim harmoniği oranı olan

$$\beta_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (n=2,3,\dots,N) \quad (1.211)$$

ifadesini kullanarak demir kayıplarını yeniden yazarsak: [1-9]

$$P_{Fe} \cong K_m V_1^2 \left( 1 + \sum_{n=1}^N \beta_n^2 \right) = P_{Fe1} + P_{FeH} \quad (1.212)$$

Olarak hesaplanacaktır. Görüldüğü gibi sistemde harmoniklerin bulunması durumunda temel bileşenin oluşturduğu kayıplara ek olarak kayıplar oluşmaktadır. Harmonikler ayrıca transformatörlerde transformatörün endüktansı ile transformatöre bağlı yüklerin kapasitansı arasında rezonans olayına sebep olabilmektedir. [1-9]

#### 1.6.7. İletim Sistemleri Üzerindeki Etki

Harmonik bileşenler enerji iletim sistemleri üzerinde (hava hatları, yer altı kabloları) ek kayıp güçler ve sisteme bağlı elemanlar üzerinde gerilim düşümleri olmak üzere iki temel etkiye sebep olurlar. Ek kayıp güç: [1-9]

$$P_k = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (1.213)$$

Şeklinde ifade edilir. Devre elemanları üzerindeki gerilim düşümü ise: [1-9]

$$|\Delta V_n| = |I_n| |Z_n| \quad (1.214)$$

Olarak yazılır. İletim hattının kablolu olması halinde (örneğin yeraltı hatları) harmonik gerilimler gerilimin tepe değeri ile orantılı olarak dielektrik zorlanmayı arttırmalar ve kablunun ömrü kısalmır. Ayrıca kablolarda aşırı gerilimlerden dolayı delinme görülebilir. [1-9]

#### 1.6.8. Devre Kesiciler ve Sigortalar Üzerindeki Etki

Harmonikli akımlar kesicilerin hatalı çalışmasına sebep olur. Şöyle ki kesicilerde oluşan ark endüksiyon bobin tarafından oluşturulan magnetik alan tarafından ark hücrelerine sürüklenir. Akımda harmonikler olduğunda bobinin çalışmasında anormallikler oluşur.

Bu anormallikler arkın yeniden oluşmasına ve kesicinin tekrar kapanmasına sebep olur. Ayrıca harmonikler ek ısınmalara neden olur bunun sonucunda sigortaların karakteristikleri değişir. Sistemde zamansız açmalar görülür. [1-9]

### 1.6.9. Aydınlatma Elemanları Üzerindeki Etki

Harmonikli gerilimler floresant lambalarda balastın demir kayıplarının artmasına sebep olur ayrıca insan kulağının duyabileceği derecede gürültü meydana getirir. Özellikle tek dereceli harmoniklerin floresant aydınlatma cihazlarında etkisi yüksektir. Akkor Flamanlı lambalarda ise harmonikli gerilimler lamba ömrünün kısılmasına sebep olur. harmonik distorsiyonu düşük olsa bile lamba ömrü önemli ölçüde kısalır. Örneğin temel bileşen geriliminin %5 üzerindeki harmonikli gerilimle çalışan akkor Flamanlı lambanın ömrü %50 oranında azalabilmektedir. [1-9]

### 1.6.10. Güç Faktörü Üzerindeki Etki

Güç faktörü genel olarak yükün AC güç sisteminden çektiği akımın ne kadar verimlilikle kullanıldığının ölçütüdür. Devredeki aktif güç ile görünür güç arasında tanımlanmıştır. [1-9]

$$GF = \cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (1.215)$$

Şeklinde yazılır. Güç faktörünün düzeltilmesi dediğimiz uygulama devreden çekilen aktif gücün devre elemanlarının yüklenmesinde esas olan görünür güç değerine yaklaştırılmasıdır.  $P=S$  olursa güç faktörü,  $\varphi=1$  olacaktır. Sistemde harmonik bileşenlerin olması durumunda güç faktörü de değişir. Enerji sistemlerinde en çok karşılaştığımız durum sinüsoidal şebekeye nonsinüsoidal yük bağlanmasıdır. Bu durumda güç faktörünün formülize edilişi aşağıdaki gibidir: [1-9]

Harmonik bileşenler içeren gerilimin ve akımın efektif değerleri sırasıyla: [1-9]

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (1.216)$$

$$\dot{I} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_n)^2} \quad (1.217)$$

Şeklindedir. Güç faktörü ise: [1-9]

Aktif güç: [1-9]

$$P = V * I_1 * \sin \varphi_1 \quad (1.218)$$

Görünür Güç:[1-9]

$$S = VI \quad (1.219)$$

olup buradan Güç Faktörü: [1-9]

$$G = \frac{P}{S} = \frac{V * I_1 * \cos \varphi_1}{V * \sqrt{\sum_{n=1}^N (I_n)^2}} = \frac{I_1}{I} * \cos \varphi_1 \quad (1.220)$$

Olur. Burada  $\frac{I_1}{I}$  = akımın harmonik distorsiyonu,  $\cos \varphi_1$  ise kayma faktörüdür. Kayma faktörü dediğimiz bu değer aynı zamanda harmoniksiz durumdaki güç faktörüne eşittir. Akımın harmonik distorsiyonu daima 1'den küçük olur, bundan dolayı harmonikli durumdaki güç faktörü sinüsoidal durumdakinden daha küçük olacaktır. [1-9]

### 1.6.11. Röleler üzerindeki Etki

Güç sistemlerinin önemli parçalarından olan röleler harmonikli gerilimden etkilenmektedir. Literatürde bu konuda yapılan çalışmalar olmakla birlikte yeterli çalışmalar yapılmamıştır. Röleler harmonikli gerilimle beslendiğinde arıza durumunda devreyi açmama ya da normal koşulda devreyi açma gibi durumlar görülebilir. Bununla birlikte harmonik distorsiyonunun %10 - %20 seviyelerine kadar rölelerde bir çalışma problemi olmadığı gözlemlenmiştir. Ama diğer bir çalışma da indüksiyon diskli aşırı akım rölesinin harmonik seviyesi 3. harmonikten 9. harmoniğe kadar arttığında çalışma değerinin arttığı gözlemlenmiştir.[3] Termik aşırı akım

rölesinde sinüsoidal ve nonsinüsoidal besleme durumunda röle aynı zamanda devreyi açmıştır. Bu röle içindeki bimetal parçanın ısınması esasına göre çalıştığından efektif değerleri aynı olan sinüsoidal ve nonsinüsoidal akımlarda çalışması değişmemiştir. Ama akımın efektif değeri harmonik mertebesi arttıkça arttığı için harmonik mertebesi artıkça açma zamanı değişecektir. [1-9]

#### **1.6.12. Ölçü Aletleri üzerindeki Etki**

Özellikle yüksek mertebeli harmonik akım ve gerilimler sistemde rezonans oluşturarak ölçü aletlerinin hatalı çalışmasına sebep olurlar. Yapılan çalışmalarda hataların sayaç türüne ve harmoniklerin durumuna bağlı olarak hem pozitif hem de negatif yönde olabileceği görülmüştür.[3] Ölçü aletleri imalat sırasında temel frekansta çalışacak şekilde kalibre edilirler. Gerilimin karesi ile orantılı olan döndürme momentine göre ölçüm yapan sayaçlarda gerilim harmonikleri kayıt hatalarına sebep olur. Elektrik sayaçları ve aşırı akım röleleri gibi endüksiyon diskli cihazlarda diske etkiyen moment magnetik akı ile girdap akımlarının çarpımına eşittir. Magnetik Akı da Girdap Akımları da yüksek frekanslarda nonlineer olarak değişir, dolayısı ile harmonik mertebeleri arttıkça ölçü aleti hatalı çalışır. Ayrıca harmonik distorsiyonlarından kaynaklanan faz dengesizlikleri de bu cihazların hatalı ölçüm yapmasına sebep olur. [1-9]

#### **1.6.13. Elektronik Elemanlar Üzerindeki Etki**

Elektronik elemanlar harmonikli gerilimlere maruz kaldığında gerilimin sıfır geçişleri kayabilir ayrıca harmonik distorsiyonları sonucu bir noktadaki fazlar arası gerilim diğer noktadakinden büyük olabilir bu durumlar sonucunda da eleman hatalı çalışır. Örnek olarak tristörlü devrelerde tristörlerin ateşleme anları değişmektedir. [1-9]

#### **1.6.14 Rezonans Etkisi**

Devrede endüktif ve kapasitif reaktans değerlerinin eşit olması durumunda rezonans olayı oluşur. R, L ve C elemanlarının bulunduğu bir devrede kaynaktan çekilen akım ile kaynak gerilimi aynı fazda ise yani devre L ve C elemanlarına rağmen omik karakterde ise bu devrede rezonans vardır. devre seri RLC devresi ise buna Seri Rezonans; paralel RLC devresi ise paralel rezonans denir. [1-9] Seri rezonans devresinde empedans düşüktür. Düşük genlikte bir gerilim uygulansada devreden büyük akımlar akar. Devredeki empedans ifadesi:

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j(X_L - X_C) \quad (1.221)$$

Şeklindedir. [1-9]  $\omega$  =kaynak geriliminin açısal frekansı olmak üzere

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (1.222)$$

Şeklinde olup buradan

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \quad (1.223)$$

Olur. [1-9] Rezonans oluştuğunda

$$X_{L_r} = X_{C_r} \Rightarrow \omega_r L = \frac{1}{\omega_r C} \quad (1.224)$$

Olur. [1-9] Rezonans frekansı:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{\omega\sqrt{LC}} = f \sqrt{\left(\frac{X_C}{X_L}\right)} \quad (1.225)$$

Olacaktır. [1-9] Seri rezonans devresine harmonikli bir gerilim uygulandığında devreden harmonikli akım akar. Devrenin her harmonik bileşen için ayrı olarak incelenmesi gerekir. Harmonikli sistemde devre elemanlarının değeri:

$$R_n = R_0 + R \quad (1.226)$$

$$X_L = nX_L \quad (1.227)$$

$$X_C = \frac{X_C}{n} \quad (1.228)$$

olur.[1-9] Harmonikli durumda eşdeğer empedans:

$$Z_n = R_n + j(X_{L_n} - X_{C_n}) = R + j(nX_L - \frac{X_C}{n}) \quad (1.229)$$

Şeklinde olacaktır. Paralel Rezonans Devresi'nde empedans çok büyüktür. Devreden düşük genlikli bir akım geçse de devre elemanlarının uçlarında büyük genlikte gerilimler oluşur. [1-9]

Paralel RLC devresi için empedans: [1-9]

$$Z = \frac{-jRX_L X_C}{R(X_L - X_C) - jX_L X_C} \quad (1.230)$$

Şeklinde yazılır Rezonans durumunda  $X_L = X_C$  olacağından Rezonans Frekansı:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.231)$$

Olur. [1-9] Yukarıda ifade ettiğimiz gibi devre elemanlarının harmonikli durum ifadesi:

$$R_n = R_0 + R \quad (1.232)$$

$$X_L = nX_L \quad (1.233)$$

$$X_C = \frac{X_C}{n} \quad (1.234)$$

Olur. [1-9] Herhangi bir harmonik bileşen için empedans:

$$Z = \frac{-jRX_L X_C}{R(nX_L - \frac{X_C}{n}) - jX_L X_C} \quad (1.235)$$

olarak ifade edilir. [1-9] Her iki rezonans durumundada devrenin empedansı sadece dirençten oluşur. Rezonans durumunda L ve C elemanlarının gerilimleri yükselir dolayısı ile elemanlar üzerinden aşırı akımlar geçer. Özellikle kondansatörlerde izolasyon zorlanmaları ve dielektrik malzemenin delinmesi olayları görülür. Seri Rezonans nadir olarak oluşur. Seri Rezonans durumunda devrede büyük akımlar oluşur

bu akımlar devre elemanlarına zarar verir. Aynı şekilde Paralel Rezonans da devrede Nonlinear Yükler dolayısı ile harmonikli akımların atmasına sebep olur ve devre elemanlarını etkiler. Rezonans sonucunda tüketiciye verilen gerilimin dalga şekli bozulur. [1-9]

## **1.7. GÜÇ SİSTEMLERİNDE LİNEER GÜÇ AKIŞI ANALİZİ**

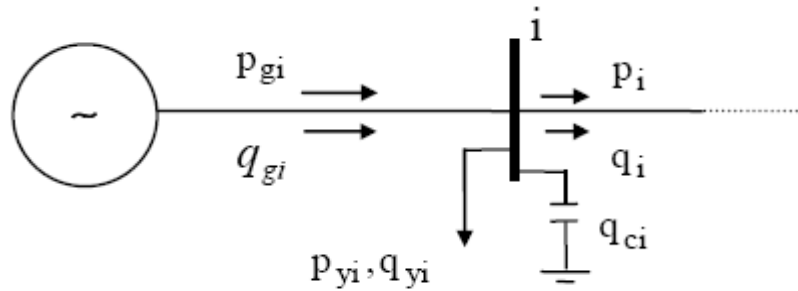
Enerji iletim sistemleri normal koşullar altında kararlı ve sürekli hal modunda işletilirler. Yük akışı analizi olarak da nitelendirilen güç akışı analizinin amacı, baraların gerilim ve faz açılarını en yakın biçimde hesaplamaktır. Analizde yükler aktif ve reaktif güç talepleri ile tanımlı olup, sürekli işletme süresi boyunca bu güç değerlerinin küçük gerilim değişimlerinden etkilenmediği varsayılır. Güç akışı analizi sonunda elde edilmesi istenen büyüklükler, bara gerilimlerinin genlik ve faz açısı değerleri, sistemdeki aktif ve reaktif güç değerleridir. Hatlardaki güç kayıpları ile gerilim kontrollü baraların reaktif güç değerleri ve bu baraların gerilimlerinin faz açıları güç akışı hesaplamaları sonunda elde edilir. Enerji iletim sistemlerinde baraların özellikleri 4 değişken ile belirlenir. Bunlar;  $P_{hat}$ (Bir hattan akan aktif güç),  $Q_{hat}$  (Bir hattan akan reaktif güç),  $V$  (Bara gerilim genliği) ve  $\delta$  (Bara faz açısı) değerleridir. Her bir AA barası için bu 4 değerden 2 tanesinin bilindiği kabul edilir. Güç akışı hesaplamaları ile diğer iki değişken bulunmaya çalışılır. Bilinen değişkenlere göre AA baraları üç farklı biçimde isimlendirilir; Salınım barası (Slack Bus) ya da serbest bara, PV barası ya da gerilim kontrollü bara, PQ barası ya da yük barası. Salınım barasında  $V$  ve  $\delta$  değerleri bilinir ve sabittir. Yani kontrol değişkenleri kullanılarak bu iki değişkenin değeri sabit tutulmaya çalışılır.  $P_{hat}$  ve  $Q_{hat}$  değerleri hesaplanır. PQ yük barasında ise  $P_{hat}$  ve  $Q_{hat}$  değerleri bilinir ve bu değerlere dayanarak  $V$  ve  $\delta$  değerleri hesaplanır. Bu tür baralar şehir ve sanayi tesislerinin bağlı olduğu baralar yani tüketici barası olarak kullanılan baralardır.[10-12]

### **1.7.1. Güç Akışı Hesaplamaları**

Güç Akışı hesaplamalarında kontrol değişkenleri(u) sabit tutularak, durum değişkenleri(x) hesaplanır. Yani veri dosyalarında bulunan kontrol değişken değerlerine karşı gelen durum değişkenleri hesaplanır. Veri dosyasında bulunan kontrol değişken değerleri güç akışı algoritması boyunca sabit kalırlar. Durum değişkenlerine ise ilk iterasyon başlangıcında belirlediğimiz tahmini değerler verilir. İlk iterasyon sonunda



tahmini olarak verilen durum değişkenleri ile iterasyon sonunda bulunan durum değişken değerleri arasındaki fark hesaplanır. Eğer aralarındaki fark 0 (sıfır) ya da belirlenen tolerans değerimizden( $\varepsilon$ ) küçük (mutlak değer olarak) ise iterasyon sona erdirilir. Eğer fark küçük değil ise(çeşitli yöntemlerle hesaplanan) yeni durum değişkenleri ile hesaplamalara baştan başlanır. Güç akışı algoritması yakınsayınca yani iterasyon sonucu tolerans değerimiz içinde ise hesaplama sonunda bulunan değişken değerleri yardımı ile hatlardan akan aktif ve reaktif güç değerleri hesaplanır. Güç akışı hesaplamaları, kullanılan hatların seçiminde, cihazların elektriksel anlamda boyutlandırılmasında, koruyucu aletlerin(sigorta, röle) seçiminde ve SCADA sisteminde önemli rol üstlenir. Güç akışı hesaplamalarının birim değerler kullanılarak yapılması hesaplamalar açısından kolaylıklar sağlar. Birim değer kullanımı ile sistemin değişik yük kollarında çalışması durumunda yeni hesaplamalara ihtiyaç duyulmaz. Ayrıca transformatör gibi önemli bir elemanın sistem içinde gösterimi kolaylaşır. Hesaplama sonunda bulunan değerler de birim değer cinsinden olacağından yorum yapmak daha da kolaylaşır. Örneğin gerilim değerinin 1.1 birim olması, gerilimin nominal değerinden %10 daha fazla olduğunu gösterir. Şekil 1.17 de Genel bir AA barası gösterimi verilmiştir.[10-12]



**Şekil 1.17.** Genel bir AA Barası Gösterimi.[11]

Şekil 1.17 de verilen bara için aktif güçlerin eşitliğinde  $p_{hat}$  ; AA hattına aktarılan aktif güç değerini,  $p_g$  ; generatörün ürettiği aktif güç değerini,  $p_y$  ; baraya bağlı yükün çektiği aktif güç değerini göstermektedir. Baradaki aktif ve reaktif güç eşitliğinden;

$$P_{hat} = P_g - P_y \quad (1.236)$$

$$Q_{hat} = q_g + q_c - q_y \quad (1.237)$$

Yazılabilir. [10-12] Eğer bir sistem de her bir bara için (1.236) ve (1.237) eşitlikleri sağlanır ise güç akışı hesabına gerek kalmaz. Fakat herhangi bir nedenden dolayı sistem içinde değişkenlerden bazıları değer değiştirirse (1.236) ve (1.237) eşitlikleri sağlanamaz hale gelir. Örnek olarak  $p_y$  veya  $q_y$  değerleri değişirse, herhangi bir bara da ki gerilim genlik değeri ve ya açısı değişebilir. Bu durumda  $p_{hat}$  ve ya  $q_{hat}$  değişeceğinden (1.236) ve (1.237) eşitlikleri sağlanamaz zira  $p_{hat}$  ve  $q_{hat}$  aşağıda da gösterildiği gibi x ve u'nun fonksiyonudurlar. Yani x veya u'da meydana gelebilecek değişiklikler  $p_{hat}$  ve  $q_{hat}$  değerlerinin değişmesini sağlar ve böylelikle baradaki güç eşitliği bozulmuş olur.

[10-12]

$$g_{pi} = p_i - (p_{gi} - p_{yi}) = p_i - p_{hati} \quad (1.238)$$

$$g_{qi} = q_i - (q_{ci} - q_{yi}) = q_i - q_{hati} \quad (1.239)$$

Bir AA barasından bu bara ya bağlı AA iletim hatlarına verilen aktif güç değeri;[10,11]

$$P_i = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (1.240)$$

Olarak, reaktif güç değeri ise;

$$q_i = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (1.241)$$

Eşitliği kullanarak hesaplanabilir. [10-12]

### 1.7.2. Sistemin Bara Admitans Matrisinin Hesaplanması

Enerji sistemlerinde devre çözümleri (genel olarak) düğüm yöntemleri ile yapılır. Her bir baradan AA hatlarına enjekte edilen akım değerleri (birim);

$$[Y] = [Y] \quad (1.242)$$

Matris eşitliği ile hesaplanmaktadır.[10,11] Bu ifadede kullanılan  $[Y]$  matrisi, AA sisteminin bara admitans matrisi olarak adlandırılır. Şekil 1.18'de i. ve j. baralar arasında bağlanan bir hat gösterimi verilmiştir.  $\frac{y'_{ij}}{2}$ ; hattın şönt admitansı olmaktadır ( $\pi$  eşdeğer devre kullanılmıştır). Bara admitans matrisi oluşturulurken ana köşegen elemanları;

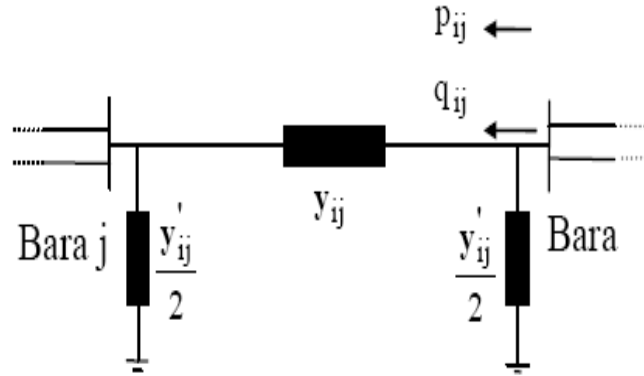
$$y_{ii} = y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in} + \frac{y'_{i1}}{2} + \frac{y'_{i2}}{2} + \dots + \frac{y'_{in}}{2} \quad (1.243)$$

Eşitliği ile bulunabilir. [10,11] Ana köşegen dışındaki elemanlar ise;

$$y_{ij} = -z_{ij}^{-1} \quad (1.244)$$

Eşitliği ile hesaplanabilir. [10,11]

Şekil 1.18 de  $\pi$  eşdeğer devresi yardımıyla iki bara arasındaki hat gösterimi verilmiştir.

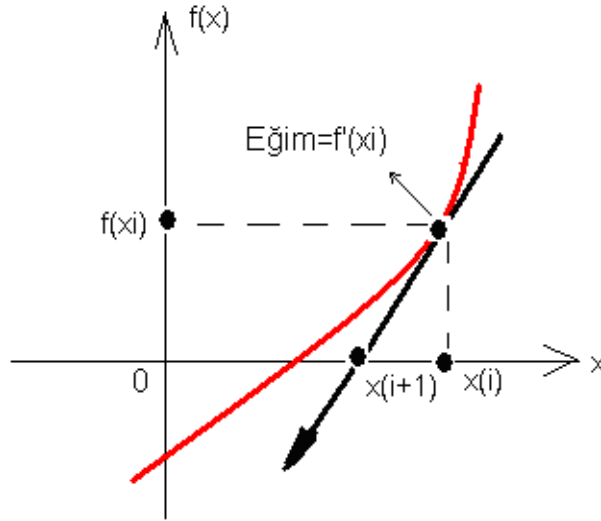


**Şekil 1.18.**  $\pi$  Eşdeğer Devresi Yardımıyla İki Bara Arasındaki Hat Gösterimi.[11]

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

### 2.1. NEWTON RAPHSON YÖNTEMİ:

Bir  $f(x)$  fonksiyonunun kökünün ilk tahmini  $x_i$  ise fonksiyonun eğrisine  $(x_i, f(x_i))$  noktasında teget olan doğru uzatılabilir. Tegetin (x) eksenini kestiği nokta kökün daha iyi bir tahminidir. Bu durum matematiksel olarak şekil 2.1’de ki gibi ifade edilir:[13]



Şekil 2.1. Newton-Raphson Yönteminin Matematiksel İfadesi.[13]

X noktasındaki birinci türev

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i) - 0}{x_i - x_{i+1}} \quad (2.1)$$

Şeklinde olur. [13] Bu ifade düzenlenirse (i+1). İterasyondaki x değerleri

$$x_{(i+1)} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (2.2)$$

İfadesi ile hesaplanır. [13]

Eğer birden fazla sayıda fonksiyon varsa bu durumda matrisel çözüm yapılır. Matrisel çözümün yapılışını da güç sistemlerindeki uygulama ile görelim: [13]

## 2.2. NEWTON RAPHSON YÖNTEMİNİN LİNEER GÜÇ SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

Nonlinear bir matris denklemini

$$\begin{bmatrix} f1(x) \\ f2(x) \\ f3(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ fn(x) \end{bmatrix} = \mathbf{f} \quad (2.3)$$

Şeklinde verilsin.[10,11] Bu eşitlik Taylor Serisi'ne açılıp 2. ve daha yüksek dereceli terimler ihmal edilirse (i+1). iterasyonda bu eşitliği sağlayan x değerleri: [10,11]

$$\mathbf{x}(i+1) = \mathbf{x}(i) + \mathbf{J}(i)^{-1} * \mathbf{y} - f(\mathbf{x}(i)) \quad (2.4)$$

Eşitliği ile hesaplanır. [10,11] Herhangi bir iterasyonda

$$(\mathbf{x}_{(i+1)} - \mathbf{x}_{(i)}) \leq \varepsilon \quad (2.5)$$

Eşitsizliği sağlanırsa algoritma durur; sağlanmazsa bir önceki iterasyonda bulunan x değerleri başlangıç değerleri olarak alınır ve yeniden (i+1). İterasyonda ki x değerleri hesaplanır. [10,11]

x ,y ve f(x) vektörleri : [10,11]

$$\mathbf{x} = [\delta_2, \delta_3, \delta_4, \dots, \delta_n, v_{ng+1}, v_{ng+2}, \dots, v_n]^T \quad (2.6)$$

$$\mathbf{y} = [phat_2, phat_3, phat_4, \dots, phat_n, qhat_{ng+1}, qhat_{ng+2}, \dots, qhat_n]^T \quad (2.7)$$

$$f(x) = [p_2, p_3, p_4, \dots, p_n, q_{ng+1}, q_{ng+2}, \dots, q_n]^T \quad (2.8)$$

Şeklindedir. [10,11] Burada vektörlerin üzerindeki (T) simgesi transpozeyi gösterir. Yani bu vektörler normalde sütun vektörüdür. x vektörü sistemdeki bara gerilim genlikleri ve faz açılarından, y vektörü hatlardan akan aktif ve reaktif güçlerden, f(x) vektörü ise baraların aktif ve reaktif güçlerinden oluşmaktadır. y-f(x) vektörü baralara ait aktif ve reaktif güç denge denklemlerinin sonuçlarından oluşmaktadır. J vektörü Jacobian Matris olup bara sayısı (n) olmak üzere (n\*n) boyutunda bir matristir. Jacobian Matris'in genel ifadesi aşağıdaki şekildedir: [10,11]

$$J(i) = \left[ \frac{df}{dx} \right]_{x=x(i)} = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \frac{df_1}{dx_2} & \dots & \frac{df_1}{dx_n} \\ \frac{df_2}{dx_1} & \frac{df_2}{dx_2} & \dots & \frac{df_2}{dx_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{df_n}{dx_1} & \frac{df_n}{dx_2} & \dots & \frac{df_n}{dx_n} \end{bmatrix}_{x=x(i)} \quad (2.9)$$

Jacobian Matris, matris denklemini oluşturan her bir fonksiyonun, hesaplanması istenen değişkenlerin her birine göre kısmi türevlerinden oluşur. Güç Sistemleri için hesaplanan Jacobian Matris ise aşağıdaki şekildedir: [10,11]

$$\mathbf{f} = \begin{bmatrix} \frac{dp_2}{d\delta_2} & \frac{dp_2}{d\delta_3} & \dots & \frac{dp_2}{d\delta_n} & \frac{dp_2}{dv_{ng+1}} & \frac{dp_2}{dv_{ng+2}} & \dots & \frac{dp_2}{dv_n} \\ \frac{dp_3}{d\delta_2} & \frac{dp_3}{d\delta_3} & \dots & \frac{dp_3}{d\delta_n} & \frac{dp_3}{dv_{ng+1}} & \frac{dp_3}{dv_{ng+2}} & \dots & \frac{dp_3}{dv_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dp_n}{d\delta_2} & \frac{dp_n}{d\delta_3} & \dots & \frac{dp_n}{d\delta_n} & \frac{dp_n}{dv_{ng+1}} & \frac{dp_n}{dv_{ng+2}} & \dots & \frac{dp_n}{dv_n} \\ \hline \frac{dq_{ng+1}}{d\delta_2} & \frac{dq_{ng+1}}{d\delta_3} & \dots & \frac{dq_{ng+1}}{d\delta_n} & \frac{dq_{ng+1}}{dv_{ng+1}} & \frac{dq_{ng+1}}{dv_{ng+2}} & \dots & \frac{dq_{ng+1}}{dv_n} \\ \frac{dq_{ng+2}}{d\delta_2} & \frac{dq_{ng+2}}{d\delta_3} & \dots & \frac{dq_{ng+2}}{d\delta_n} & \frac{dq_{ng+2}}{dv_{ng+1}} & \frac{dq_{ng+2}}{dv_{ng+2}} & \dots & \frac{dq_{ng+2}}{dv_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{dq_n}{d\delta_2} & \frac{dq_n}{d\delta_3} & \dots & \frac{dq_n}{d\delta_n} & \frac{dq_n}{dv_{ng+1}} & \frac{dq_n}{dv_{ng+2}} & \dots & \frac{dq_n}{dv_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

### 2.2.1. Jacobian Matris Elemanlarının Hesaplanması:

J1 Alt Matrisi'nin ana köşegen elemanları: [10,11]

$$\frac{dp_i}{d\delta_i} = J1(i, i) = v_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n v_j (-g_{ij} \sin \delta_{ij} + b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2.11)$$

J1 Alt Matrisi'nin köşegen dışı elemanları: [10,11]

$$\frac{dp_i}{d\delta_j} = J1(i, j) = v_i v_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2.12)$$

J2 Alt Matrisi'nin ana köşegen elemanları: [10,11]

$$\frac{dp_i}{dv_i} = J2(i, i) = v_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n v_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) + 2v_i g_{ii} \quad (2.13)$$

J2 Alt Matrisi'nin köşegen dışı elemanları: [10,11]

$$\frac{dp_i}{dv_j} = J2(i, j) = v_i (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.14)$$

J3 Alt Matrisi'nin ana köşegen elemanları: [10,11]

$$\frac{dq_i}{d\delta_i} = J3(i, i) = v_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n v_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.15)$$

J3 Alt Matrisi'nin köşegen dışı elemanları: [10,11]

$$\frac{dp_i}{d\delta_j} = J3(i, j) = -v_i v_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (2.16)$$

J4 Alt Matrisi'nin ana köşegen elemanları: [10,11]

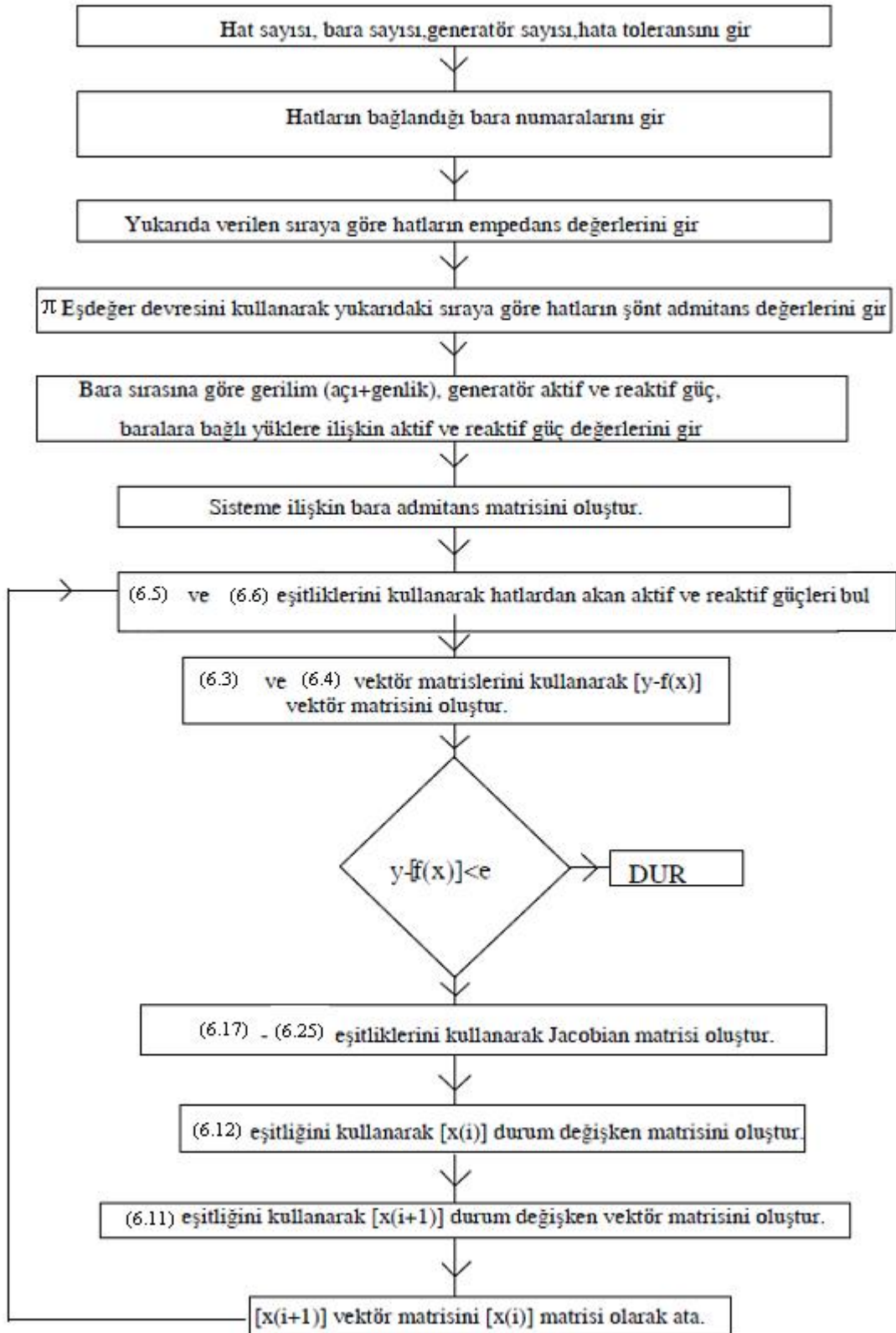
$$\frac{dq_i}{dv_i} = J4(i, i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n v_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2v_i b_{ii} \quad (2.17)$$

J4 Alt Matrisi'nin köşegen dışı elemanları: [10,11]

$$\frac{dq_i}{dv_j} = J4(i, j) = v_i (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2.18)$$

Eşitlikleri ile hesaplanır. Newton Raphson Algoritması'nın akış diyagramı aşağıda Şekil 2i2 de gösterilmiştir. Bu diyagramın 6. Adımındaki bara admitans matrisinin hesaplanması Örnek Uygulamalar içerisinde (Bölüm-3) anlatılmıştır. [10,11]





Şekil 2.2. Newton-Raphson Algoritması Akış Diyagramı[11].

Newton Raphson Algoritması sona erdiğinde yani  $(x(i+1) - x(i)) \leq \epsilon$  eşitsizliği sağlandığında  $x$  durum değişken vektörünün elemanları elde edilmiş olur. Generatör(PV) baralarında  $qg$  değerleri yani generatör reaktif güç değerleri bilinmediği için salınım barası da dâhil tüm generatör baralarında (1.241) eşitliği kullanılarak generatör reaktif güç değerleri ( $qi$ ) bulunur. ( $i=1 \dots ng$ ) Daha sonra aynı şekilde salınım barası da dâhil tüm generatör baralarında (1.239) eşitliği kullanılarak generatör reaktif güç değerleri ( $qg$ ) hesaplanır. Salınım barası aktif gücünü hesaplamak için ise öncelikle (1.240) eşitliği kullanılarak ( $i=1$ ) için  $p1$  hesaplanır, daha sonra da  $p1$  değeri (1.238) eşitliğinde yerine konularak Salınım barası aktif gücü ( $pg1$ ) hesaplanmış olur. [10,11]

### 2.3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK GÜÇ AKIŞI

Harmonik güç akışı çalışması, hatlardaki ve baralardaki akım ve gerilimlerin temel bileşen ve harmonik bileşenlerinin hesaplandığı bir analizdir. Harmonik güç akışında şebeke gerilim ve akımları Fourier serileri formunda ifade edilir veya grafik şeklinde bilinen yük akımı Fast Fourier Transformu (FFT) yardımıyla elde edilir. Harmonik güç akışı analizindeki bilinmeyenlerin ve eşitliklerin incelenmesinde kolaylık sağlaması bakımından sistemdeki tüm baraların sınıflandırılması gerekir. Harmonik güç akışı işleminde akım-gerilim karakteristiği lineer olan elemanların bağlı olduğu baralar "Lineer Baralar" olarak tanımlanır[1]. Bölüm 2'de açıklanan lineer yüklü sistemlerde güç akışı için tanımlanan üretim (PV) baraları ve yük (PQ) baraları harmonik güç akışında lineer baralar olarak göz önüne alınır. Bir üretim barası olan salınım barası da lineer baradır. Nonlineer karakteristikli elemanların bulunduğu baralar ise "Nonlineer Baralar" (doğrusal olmayan bara) olarak adlandırılır. Harmonik Güç Akışı Hesaplamaları'nda Newton Raphson Yöntemi kullanılabilir ancak algoritmada ve matrislerin yapısında bazı değişikliklerin yapılması gerekir. Harmonik Güç Akışı'nda bilinmeyen büyüklükler ile bilinen değerler ve gerekli eşitliklerin neler olduğuna bakalım: [3,11]

#### 2.3.1. Harmonik Güç Akışı'nda Bilinmeyen Büyüklükler:

- 1- Salınım barası dışındaki baralar için ana harmonik bara gerilim genlik ve faz açısı değerleri.
- 2- Tüm baralarda ana harmonik dışındaki harmonikler için bara gerilim genlik ve faz açısı değerleri.

- 3- Salınım barasında ana harmonik aktif güç ve reaktif güç değerleri.
- 4- Nonlinear (Linear olmayan) her bara için 2 adet parametre.

### 2.3.2. Harmonik Güç Akışı'nda Eşitlikler:

- 1- Salınım barası dışındaki linear baralarda ana harmonik aktif güç ve reaktif güç eşitlikleri.
- 2- Salınım barası ana harmonik bara gerilim genlik ve faz açısı değerleri.
- 3- Nonlinear baralarda ana harmonik akımının reel ve imajiner bileşen eşitlikleri.
- 4- Tüm baralarda ana harmonik dışındaki harmonikler için akımın reel ve imajiner bileşen eşitlikleri
- 5- Nonlinear baralarda toplam aktif güç ve toplam reaktif güç eşitlikleri.

Harmonik güç akışında Newton-Raphson algoritmasındaki matris yapılarında da değişiklikler oluşur. Şimdi bunların neler olduğunu görelim: Newton-Raphson Metodu'nun genel ifadesinin (2.4) eşitliğinde gösterildiği gibi  $\mathbf{x}(i+1) = \mathbf{x}(i) + \mathbf{J}(i)^{-1} * [\mathbf{y} - f(\mathbf{x}(i))]$  şeklinde olduğu daha önce belirtilmişti. Harmonikli sistemde bu ifadedeki matrislerin yapısı aşağıdaki şekilde olur. [3,11]

### 2.3.3. (X) Durum Değişken Vektörü:

X vektörü bara gerilim genlik ve faz açıları ile nonlinear eleman parametrelerinden oluşur. Genel gösterimi aşağıdaki şekildedir. Gösterimlerdeki (T) simgesi transpozeyi gösterir. Yani bu vektörler normalde sütun matrisidir. [3,11]

$$\mathbf{x} = [\delta^{(1)}, \Delta v^{(1)}, \Delta \delta^{(5)}, \Delta v^{(5)}, \Delta \delta^{(7)}, \Delta v^{(7)}, \dots, \Delta \delta^{(h)}, \Delta v^{(h)}, \Delta \phi^T] \quad (2.19)$$

Bu vektörü oluşturan alt vektörlerin açılımını yaparsak: [3,11]

$$\Delta \delta^{(1)} = [\delta_2^{(1)}, \delta_3^{(1)}, \dots, \delta_n^{(1)}]^T \quad (2.20)$$

$$\Delta v^{(1)} = [v_{ng+1}^{(1)}, v_{ng+2}^{(1)}, \dots, v_n^{(1)}]^T \quad (2.21)$$

$\Delta\delta^{(1)}$  ve  $\Delta v^{(1)}$  vektörleri ana harmonik bara gerilim genlik ve faz açılarından oluşur.

$$\Delta\delta^{(5)} = \begin{bmatrix} \delta_1^{(5)}, \delta_2^{(5)}, \dots, \delta_n^{(5)} \end{bmatrix}^T \quad (2.22)$$

$$\Delta v^{(5)} = \begin{bmatrix} v_1^{(5)}, v_2^{(5)}, \dots, v_n^{(5)} \end{bmatrix}^T \quad (2.23)$$

$$\Delta\delta^{(7)} = \begin{bmatrix} \delta_1^{(7)}, \delta_2^{(7)}, \dots, \delta_n^{(7)} \end{bmatrix}^T \quad (2.24)$$

$$\Delta v^{(7)} = \begin{bmatrix} v_1^{(7)}, v_2^{(7)}, \dots, v_n^{(7)} \end{bmatrix}^T \quad (2.25)$$

$\Delta\delta^{(5)}$ ,  $\Delta v^{(5)}$ ,  $\Delta\delta^{(7)}$ ,  $\Delta v^{(7)}$  ...  $\Delta\delta^{(h)}$ ,  $\Delta v^{(h)}$  vektörleri ise ana harmonik dışında göz önüne alınan yani hesaplamaya konu olan harmonik mertebelerindeki bara gerilim genlik ve faz açılarından oluşur.  $\Delta\Phi$  Vektörü ise her nonlinear bara için tanımlanan nonlinear eleman parametrelerinden oluşur. Örneğin bir invertör için bu paramtereler tetikleme açısı ( $\alpha$ ) ve yük direnci (R) değerleri olabilir. [3,11]

$$\Delta\phi = \begin{bmatrix} \alpha_m, \Delta R_m, \dots, \alpha_n, \Delta R_n \end{bmatrix}^T \quad (2.26)$$

#### 2.3.4. (y-f(x)) Vektörü:

$$y - f(x) = \begin{bmatrix} p, \Delta q, \Delta I_r^{(5)}, \Delta I_i^{(5)}, \dots, \Delta I_r^{(h)}, \Delta I_i^{(h)}, \Delta I_r^{(1)}, \Delta I_i^{(1)} \end{bmatrix}^T \quad (2.27)$$

Bu vektörü oluşturan alt vektörlerin açılımını yaparsak: [3,11]

#### 2.3.5. $\Delta p$ ve $\Delta q$ Vektörleri:

$$\Delta p = \begin{bmatrix} p_{hat2} - (p_{g2} - p_{y2}), p_{hat3} - (p_{g3} - p_{y3}), \dots, p_{hatn} - (p_{gn} - p_{yn}) \end{bmatrix}^T \quad (2.28)$$

$$\Delta q = \begin{bmatrix} q_{hat2} - (q_{g2} - q_{y2}), q_{hat3} - (q_{g3} - q_{y3}), \dots, q_{hatn} - (q_{gn} - q_{yn}) \end{bmatrix}^T \quad (2.29)$$

Burada aktif ve reaktif güçler lineer baralar için ana harmonik güçleridir, nonlinear baralar da ise ana harmonik ile göz önüne alınan diğer harmoniklere ait güçlerin toplamıdır. [3,11]

Örneğin:

2 nolu bara lineer bara ise

$$p_2 = p_2^{(1)} \quad (2.30)$$

3 nolu bara nonlinear ise

$$p_4 = p_4^{(1)} + p_4^{(5)} + p_4^{(7)} + \dots + p_4^{(h)} \quad (2.31)$$

Olur. [3,11]

(h = harmonik mertebesi)

### 2.3.6. $\Delta I_r^1$ ve $\Delta I_i^1$ Vektörleri:

Bu vektörler nonlinear baralarda ana harmonik akımının reel ve imajiner bileşenlerini hesaplamak için gerekli olan eşitliklerden oluşur. Genel gösterimi aşağıdaki gibidir:

$$\Delta I_r^{(1)} = \left[ I_{r,M}^{(1)} + g_{r,M}^{(1)}, I_{r,M+1}^{(1)} + g_{r,M+1}^{(1)}, \dots, I_{r,n}^{(1)} + g_{r,n}^{(1)} \right]^T \quad (2.32)$$

$$\Delta I_i^{(1)} = \left[ I_{r,M}^{(1)} + g_{r,M}^{(1)}, I_{r,M+1}^{(1)} + g_{r,M+1}^{(1)}, \dots, I_{r,n}^{(1)} + g_{r,n}^{(1)} \right]^T \quad (2.33)$$

Bu gösterimlerde  $\mathbf{M}$ =ilk nonlinear bara numarası  $\mathbf{n}$ = sistemdeki bara sayısıdır. Yani buradaki gösterimde  $\mathbf{M}$ . Baradan  $\mathbf{n}$ .Baraya kadar olan barlar nonlinear baralardır. [3,11]

### 2.3.7. $\Delta I_r^{(5)}, \Delta I_i^{(5)}, \dots, \Delta I_r^{(h)}, \Delta I_i^{(h)}$ Vektörleri

Bu vektörler salınım barası dâhil tüm baralarda ana harmonik dışındaki harmoniklere ait akımların reel ve imajiner bileşenlerini hesaplamak için gerekli olan eşitliklerden

oluşur. Genel gösterimi aşağıdaki gibidir: [3,11]

$$\Delta I_r^{(h)} = \left[ I_{r,1}^{(h)}, I_{r,2}^{(h)}, \dots, I_{r,N}^{(h)}, (I_{r,M}^{(h)} + g_{r,M}^{(h)}), (I_{r,M+1}^{(h)} + g_{r,M+1}^{(h)}), \dots, (I_{r,n}^{(h)} + g_{r,n}^{(h)}) \right]^T \quad (2.34)$$

$$\Delta I_i^{(h)} = \left[ I_{i,1}^{(h)}, I_{i,2}^{(h)}, \dots, I_{i,N}^{(h)}, (I_{i,M}^{(h)} + g_{i,M}^{(h)}), (I_{i,M+1}^{(h)} + g_{i,M+1}^{(h)}), \dots, (I_{i,n}^{(h)} + g_{i,n}^{(h)}) \right]^T \quad (2.35)$$

Bu gösterimlerde

**1**=İlk lineer bara numarası

**N**= son lineer bara numarası

**M**=ilk nonlinear bara numarası

**n**= sistemdeki bara sayısı

Olarak kullanılmaktadır. [3,11] Yani buradaki gösterimde **1**. baradan **N**. baraya kadar olan baralar lineer baralar, **M**. baradan **n**. baraya kadar olan baralar ise nonlinear baralardır. [3,11]

### 2.3.8. Jacobian Matris:

Genel gösterim aşağıdaki şekildedir: [3,11]

$$J = \begin{bmatrix} J1^{(1)} & J2^{(1)} & J1^{(5)} & J2^{(1)} & J1^{(7)} & J2^{(7)} & \dots & J1^{(h)} & J2^{(h)} & 0 \\ J3^{(1)} & J4^{(1)} & J3^{(5)} & J4^{(5)} & J3^{(7)} & J4^{(7)} & \dots & J3^{(h)} & J4^{(h)} & 0 \\ TDr^{(5,1)} & TVr^{(5,1)} & TDr^{(5,5)} & TVr^{(5,5)} & TDr^{(5,7)} & TVr^{(5,7)} & \dots & TDr^{(5,h)} & TVr^{(5,h)} & Hr^{(5)} \\ TDi^{(5,1)} & TVi^{(5,1)} & TDi^{(5,5)} & TVi^{(5,5)} & TDi^{(5,7)} & TVi^{(5,7)} & \dots & TDi^{(5,h)} & TVi^{(5,h)} & Hi^{(5)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot & \cdot & \cdot \\ TDr^{(h,1)} & TVr^{(h,1)} & TDr^{(h,5)} & TVr^{(h,5)} & TDr^{(h,7)} & TVr^{(h,7)} & \dots & TDr^{(h,h)} & TVr^{(h,h)} & Hr^{(h)} \\ TDi^{(h,1)} & TVi^{(h,1)} & TDi^{(h,5)} & TVi^{(h,5)} & TDi^{(h,7)} & TVi^{(h,7)} & \dots & TDi^{(h,h)} & TVi^{(h,h)} & Hi^{(i)} \\ TDr^{(1,1)} & TVr^{(1,1)} & TDr^{(1,5)} & TVr^{(1,5)} & TDr^{(1,7)} & TVr^{(1,7)} & \dots & TDr^{(1,h)} & TVr^{(1,h)} & Hr^{(1)} \\ TDi^{(1,1)} & TVi^{(1,1)} & TDi^{(1,5)} & TVi^{(1,5)} & TDi^{(1,7)} & TVi^{(1,7)} & \dots & TDi^{(1,h)} & TVi^{(1,h)} & Hi^{(h)} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Şimdi de Jacobian Matris'i oluşturan alt matrisleri inceleyelim: [3,11]

Bu gösterimlerde

**k** ve **m** bara numarası

**M**=ilk nonlinear bara numarası

**n**= sistemdeki bara sayısı olarak kullanılmaktadır. [3,11]

$$J1^{(1)} = \frac{dP_k}{d\delta_m^{(1)}} = \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dP_2}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dP_2}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{dP_3}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dP_3}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dP_3}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{dP}_M}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{\dot{dP}_M}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{dP}_M}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{dP}_n}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{\dot{dP}_n}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{dP}_n}{d\delta_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$J2^{(1)} = \frac{dP_k}{dv_m^{(1)}} = \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{dv_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dP_2}{dv_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dP_2}{dv_n^{(1)}} \\ \frac{dP_3}{dv_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dP_3}{dv_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dP_3}{dv_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{dP}_M}{dv_{ng+1}^{(1)}} & \frac{\dot{dP}_M}{dv_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{dP}_M}{dv_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{dP}_n}{dv_{ng+1}^{(1)}} & \frac{\dot{dP}_n}{dv_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{dP}_n}{dv_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$J1^{(5)} = \frac{dP_k}{d\delta_m^{(5)}} = \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{dP_2}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dP_2}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{dP_3}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{dP_3}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dP_3}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{\dot{dP}_M}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{\dot{dP}_M}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{\dot{dP}_M}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{\dot{dP}_n}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{\dot{dP}_n}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{\dot{dP}_n}{d\delta_n^{(5)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\dot{dP}_M}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{\dot{dP}_M}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{\dot{dP}_M}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{\dot{dP}_n}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{\dot{dP}_n}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{\dot{dP}_n}{d\delta_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$J2^{(5)} = \frac{dP_k}{dv_m^{(5)}} = \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{dv_1^{(5)}} & \frac{dP_2}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dP_2}{dv_n^{(5)}} \\ \frac{dP_3}{dv_1^{(5)}} & \frac{dP_3}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dP_3}{dv_n^{(5)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_M}{dv_1^{(5)}} & \frac{d\dot{P}_M}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_M}{dv_n^{(5)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_n}{dv_1^{(5)}} & \frac{d\dot{P}_n}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_n}{dv_n^{(5)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_M}{dv_1^{(5)}} & \frac{d\dot{P}_M}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_M}{dv_n^{(5)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_n}{dv_1^{(5)}} & \frac{d\dot{P}_n}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_n}{dv_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$J1^{(h)} = \frac{dP_k}{d\delta_m^{(h)}} = \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dP_2}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dP_2}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{dP_3}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dP_3}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dP_3}{d\delta_n^{(h)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_M}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d\dot{P}_M}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_M}{d\delta_n^{(h)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_n}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d\dot{P}_n}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_n}{d\delta_n^{(h)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_M}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d\dot{P}_M}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_M}{d\delta_n^{(h)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_n}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d\dot{P}_n}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_n}{d\delta_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$J2^{(h)} = \frac{dP_k}{dv_m^{(h)}} = \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{dv_1^{(h)}} & \frac{dP_2}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dP_2}{dv_n^{(h)}} \\ \frac{dP_3}{dv_1^{(h)}} & \frac{dP_3}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dP_3}{dv_n^{(h)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_M}{dv_1^{(h)}} & \frac{d\dot{P}_M}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_M}{dv_n^{(h)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_n}{dv_1^{(h)}} & \frac{d\dot{P}_n}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_n}{dv_n^{(h)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_M}{dv_1^{(h)}} & \frac{d\dot{P}_M}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_M}{dv_n^{(h)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d\dot{P}_n}{dv_1^{(h)}} & \frac{d\dot{P}_n}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{P}_n}{dv_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.42)$$



$$J3^{(1)} = \frac{dQ_k}{d\delta_m^{(1)}} = \begin{bmatrix} \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{d\dot{P}Q_M}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{d\dot{Q}_M}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_M}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

$$J4^{(1)} = \frac{QP_k}{dv_m^{(1)}} = \begin{bmatrix} \frac{dQ_{ng+1}}{dv_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dQ_{ng+1}}{dv_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+1}}{dv_n^{(1)}} \\ \frac{dQ_{ng+2}}{dv_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dQ_{ng+2}}{dv_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+2}}{dv_n^{(1)}} \\ \frac{d\dot{Q}_M}{dv_{ng+1}^{(1)}} & \frac{d\dot{Q}_M}{dv_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_M}{dv_n^{(1)}} \\ \frac{d\dot{Q}_n}{dv_{ng+1}^{(1)}} & \frac{d\dot{Q}_n}{dv_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_n}{dv_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

$$J3^{(5)} = \frac{dQ_k}{d\delta_m^{(5)}} = \begin{bmatrix} \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{d\dot{P}Q_M}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{d\dot{Q}_M}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_M}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_n^{(5)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{d\dot{Q}_M}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{d\dot{Q}_M}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_M}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$J4^{(5)} = \frac{QP_k}{dv_m^{(5)}} = \begin{bmatrix} \frac{dQ_{ng+1}}{dv_1^{(5)}} & \frac{dQ_{ng+1}}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+1}}{dv_n^{(5)}} \\ \frac{dQ_{ng+2}}{dv_1^{(5)}} & \frac{dQ_{ng+2}}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+2}}{dv_n^{(5)}} \\ \frac{d\dot{Q}_M}{dv_1^{(5)}} & \frac{d\dot{Q}_M}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_M}{dv_n^{(5)}} \\ \frac{d\dot{Q}_n}{dv_1^{(5)}} & \frac{d\dot{Q}_n}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_n}{dv_n^{(5)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{dQ_M}{dv_1^{(5)}} & \frac{dQ_M}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dQ_M}{dv_n^{(5)}} \\ \frac{d\dot{Q}_n}{dv_1^{(5)}} & \frac{d\dot{Q}_n}{dv_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_n}{dv_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$J3^{(h)} = \frac{dQ_k}{d\delta_m^{(h)}} = \begin{bmatrix} \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{d\dot{P}Q_M}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d\dot{Q}_M}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_M}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_n^{(h)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{dQ_M}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dQ_M}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dQ_M}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_n}{d\delta_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$$J4^{(h)} = \frac{QP_k}{dv_m^{(h)}} = \begin{bmatrix} \frac{dQ_{ng+1}}{dv_1^{(h)}} & \frac{dQ_{ng+1}}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+1}}{dv_n^{(h)}} \\ \frac{dQ_{ng+2}}{dv_1^{(h)}} & \frac{dQ_{ng+2}}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dQ_{ng+2}}{dv_n^{(h)}} \\ \frac{d\dot{Q}_M}{dv_1^{(h)}} & \frac{d\dot{Q}_M}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_M}{dv_n^{(h)}} \\ \frac{d\dot{Q}_n}{dv_1^{(h)}} & \frac{d\dot{Q}_n}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_n}{dv_n^{(h)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{dQ_M}{dv_1^{(h)}} & \frac{dQ_M}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dQ_M}{dv_n^{(h)}} \\ \frac{d\dot{Q}_n}{dv_1^{(h)}} & \frac{d\dot{Q}_n}{dv_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d\dot{Q}_n}{dv_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$$TD_r^{(5,1)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{d\delta_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$TV_r^{(5,1)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{dV_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

$$TD_r^{(5,5)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{d\delta_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

$$TVr^{(5,5)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{dV_1^{(5)}} & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{dV_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{dV_1^{(5)}} & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{dV_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{dV_1^{(5)}} & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{dV_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{dV_1^{(5)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{dV_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{dV_1^{(5)}} & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{dV_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{dV_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

$$TDr^{(5,h)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{d\delta_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

$$TVr^{(5,h)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{dV_1^{(h)}} & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{dV_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(5)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{dV_1^{(h)}} & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{dV_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(5)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{dV_1^{(h)}} & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{dV_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,r}^{(5)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{dV_1^{(h)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{dV_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(5)} + g_{M,r}^{(5)})}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{dV_1^{(h)}} & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{dV_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,r}^{(5)} + g_{n,r}^{(5)})}{dV_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

$$TDi^{(5,1)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{d\delta_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

$$TVi^{(5,1)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{dV_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

$$TDi^{(5,5)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{d\delta_1^{(5)}} & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{d\delta_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{d\delta_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

$$TVi^{(5,5)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{dV_1^{(5)}} & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{dV_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{dV_1^{(5)}} & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{dV_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{dV_n^{(5)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{dV_1^{(5)}} & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{dV_2^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{dV_1^{(5)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{dV_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{dV_n^{(5)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{dV_1^{(5)}} & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{dV_2^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{dV_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

$$TDi^{(5,h)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{d\delta_n^{(h)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{d\delta_1^{(h)}} & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{d\delta_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{d\delta_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

$$TVi^{(5,h)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{dV_1^{(h)}} & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{dV_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(5)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{dV_1^{(h)}} & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{dV_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(5)}}{dV_n^{(h)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{dV_1^{(h)}} & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{dV_2^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,i}^{(5)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{dV_1^{(h)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{dV_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(5)} + g_{M,i}^{(5)})}{dV_n^{(h)}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{dV_1^{(h)}} & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{dV_2^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,i}^{(5)} + g_{n,i}^{(5)})}{dV_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

$$\begin{aligned}
TD_r^{(1,1)} = & \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{d}I_{M-1,r}^{(1)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{\dot{d}I_{M-1,r}^{(1)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{d}I_{M-1,r}^{(1)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{d}(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{\dot{d}(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{d}(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{d\delta_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.61)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
TV_r^{(1,1)} = & \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{d}I_{M-1,r}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{\dot{d}I_{M-1,r}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{d}I_{M-1,r}^{(1)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{d}(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{\dot{d}(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{d}(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{dV_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.62)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
TD_r^{(1,5)} = & \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{d\delta_2^{(5)}} & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{d\delta_3^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{d\delta_2^{(5)}} & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{d\delta_3^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{\dot{d}I_{M-1,r}^{(1)}}{d\delta_2^{(5)}} & \frac{\dot{d}I_{M-1,r}^{(1)}}{d\delta_3^{(5)}} & \cdots & \frac{\dot{d}I_{M-1,r}^{(1)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{d\delta_2^{(5)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{d\delta_3^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{\dot{d}(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{d\delta_2^{(5)}} & \frac{\dot{d}(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{d\delta_3^{(5)}} & \cdots & \frac{\dot{d}(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{d\delta_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.63)
\end{aligned}$$

$$TVr^{(1,5)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(5)}} & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(5)}} & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{M-1,r}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(5)}} & \frac{dI_{M-1,r}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,r}^{(1)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(5)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(5)}} & \frac{d(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{dV_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

$$TDr^{(1,h)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{d\delta_2^{(h)}} & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{d\delta_3^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{d\delta_2^{(h)}} & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{d\delta_3^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{M-1,r}^{(1)}}{d\delta_2^{(h)}} & \frac{dI_{M-1,r}^{(1)}}{d\delta_3^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,r}^{(1)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{d\delta_2^{(h)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{d\delta_3^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{d\delta_2^{(h)}} & \frac{d(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{d\delta_3^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{d\delta_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.65)$$

$$TVr^{(1,h)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(h)}} & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{1,r}^{(1)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(h)}} & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{2,r}^{(1)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{M-1,r}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(h)}} & \frac{dI_{M-1,r}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{M-1,r}^{(1)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(h)}} & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,r}^{(1)} + g_{M,r}^{(1)})}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(h)}} & \frac{d(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{n,r}^{(1)} + g_{n,r}^{(1)})}{dV_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.66)$$



$$TDi^{(1,1)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{d\delta_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{d(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}}{d\delta_2^{(1)}} & \frac{\dot{d(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}}{d\delta_3^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{d(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}}{d\delta_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

$$TVi^{(1,1)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{dV_n^{(1)}} \\ \frac{\dot{d(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}}{dV_{ng+1}^{(1)}} & \frac{\dot{d(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}}{dV_{ng+2}^{(1)}} & \cdots & \frac{\dot{d(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}}{dV_n^{(1)}} \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

$$TDi^{(1,5)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{d\delta_2^{(5)}} & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{d\delta_3^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{d\delta_2^{(5)}} & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{d\delta_3^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{d\delta_2^{(5)}} & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{d\delta_3^{(5)}} & \cdots & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{d\delta_2^{(5)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{d\delta_3^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{d\delta_n^{(5)}} \\ \frac{\dot{d(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}}{d\delta_2^{(5)}} & \frac{\dot{d(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}}{d\delta_3^{(5)}} & \cdots & \frac{\dot{d(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}}{d\delta_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.69)$$

$$TVi^{(1,5)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(5)}} & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(5)}} & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(5)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(5)}} & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(5)}} & \cdots & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(5)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(5)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{dV_n^{(5)}} \\ \frac{\dot{d}(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(5)}} & \frac{\dot{d}(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(5)}} & \cdots & \frac{\dot{d}(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}{dV_n^{(5)}} \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

$$TDi^{(1,h)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{d\delta_2^{(h)}} & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{d\delta_3^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{d\delta_2^{(h)}} & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{d\delta_3^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{d\delta_2^{(h)}} & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{d\delta_3^{(h)}} & \cdots & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{d\delta_2^{(h)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{d\delta_3^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{d\delta_n^{(h)}} \\ \frac{\dot{d}(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}{d\delta_2^{(h)}} & \frac{\dot{d}(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}{d\delta_3^{(h)}} & \cdots & \frac{\dot{d}(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}{d\delta_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.71)$$

$$TVi^{(1,h)} = \begin{bmatrix} \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(h)}} & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{1,i}^{(1)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(h)}} & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(h)}} & \cdots & \frac{dI_{2,i}^{(1)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{dV_{ng+1}^{(h)}} & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{dV_{ng+2}^{(h)}} & \cdots & \frac{\dot{dI}_{M-1,i}^{(1)}}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(h)}} & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(h)}} & \cdots & \frac{d(I_{M,i}^{(1)} + g_{M,i}^{(1)})}{dV_n^{(h)}} \\ \frac{\dot{d}(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}{dV_{ng+1}^{(h)}} & \frac{\dot{d}(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}{dV_{ng+2}^{(h)}} & \cdots & \frac{\dot{d}(I_{n,i}^{(1)} + g_{n,i}^{(1)})}{dV_n^{(h)}} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

### 2.3.9. Lineer Baralarda Akım Eşitlikleri:

Lineer baralarda ana harmonik dışındaki harmonikler için akım eşitlikleri gereklidir.

$n$  baralı bir sistemde  $i$ . baradan sisteme aktarılan akım fazörü sistem elemanlarının admitansları ve bara gerilimleri cinsinden ifade edilirse: [3,11]

$$\dot{I}_i = \sum_{j=1}^n y_{ij} * v_j \quad (2.73)$$

Şeklindedir. Admitansın açık ifadesi : [3,11]

$$y_{ij} = g_{ij} + j b_{ij} \quad (2.74)$$

Şeklindedir. Gerilimin açık ifadesi ise

$$v_j = v_j * (\cos \delta_j + j \sin \delta_j) \quad (2.75)$$

Şeklindedir. [3,11] ( $\delta_j$ = gerilimin faz açısı) bu ifadeler yerlerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında ( $n$ ) baralı sistemde ( $k$ .) baradan sisteme aktarılan akım fazörü: ( $h$ )=harmonik mertebesi olmak üzere: [3,11]

$$I_k^{(h)} = \sum_{m=1}^n (g_{km}^{(h)} + j b_{km}^{(h)}) v_m^{(h)} = \sum_{m=1}^n (g_{km}^{(h)} + j b_{km}^{(h)}) (\cos \delta_m^{(h)} + j \sin \delta_m^{(h)}) v_m^{(h)} \quad (2.76)$$

$$I_k^{(h)} = \sum_{m=1}^n v_m^{(h)} \left[ g_{km}^{(h)} \cos \delta_m^{(h)} - b_{km}^{(h)} \sin \delta_m^{(h)} + j (g_{km}^{(h)} \sin \delta_m^{(h)} + b_{km}^{(h)} \cos \delta_m^{(h)}) \right] \quad (2.77)$$

Bu ifade reel ve imajiner kısımlarına ayrılırsa: [3,11]

$$I_{r,k}^{(h)} = \sum_{m=1}^n v_m^{(h)} (g_{km}^{(h)} \cos \delta_m^{(h)} - b_{km}^{(h)} \sin \delta_m^{(h)}) \quad (2.78)$$

$$I_{i,k}^{(h)} = \sum_{m=1}^n v_m^{(h)} (g_{km}^{(h)} \sin \delta_m^{(h)} + b_{km}^{(h)} \cos \delta_m^{(h)}) \quad (2.79)$$

Şeklinde olur. Akım bileşenlerinin bara gerilim genliklerine ve faz açılarına göre

türevleri ise yine (**h**)= harmonik mertebesi ve (**k**)= bara numarası olmak üzere aşağıdaki şekildedir: [3,11]

$$\frac{dI_{k,r}^{(h)}}{d\delta_m^{(h)}} = -v_m^{(h)} (g_{km}^{(h)} \sin \delta_m^{(h)} + b_{km}^{(h)} \cos \delta_m^{(h)}) \quad (2.80)$$

$$\frac{dI_{k,i}^{(h)}}{d\delta_m^{(h)}} = v_m^{(h)} (g_{km}^{(h)} \cos \delta_m^{(h)} - b_{km}^{(h)} \sin \delta_m^{(h)}) \quad (2.81)$$

$$\frac{dI_{k,r}^{(h)}}{dv_m^{(h)}} = (g_{km}^{(h)} \cos \delta_m^{(h)} - b_{km}^{(h)} \sin \delta_m^{(h)}) \quad (2.82)$$

$$\frac{dI_{k,i}^{(h)}}{dv_m^{(h)}} = (g_{km}^{(h)} \sin \delta_m^{(h)} + b_{km}^{(h)} \cos \delta_m^{(h)}) \quad (2.83)$$

Nonlineer elemanların akım ifadeleri ise elemanın türüne ve özelliklerine göre ayrıca belirlenir. Bu çalışmada kullanılan nonlineer akım ifadeleri Uygulama kısmında (Bölüm-3) açıklanmıştır. [3,11]

## 2.4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI

Güç sistemlerinin üretimin azalması, hat arızaları, aşırı yüklenme veya paralel hatlarda açmaların olması gibi bozucu etkilere maruz kaldıktan sonra bozucu etki öncesindeki çalışma koşullarına geri dönebilmesi kabiliyetine “Kararlılık” denir. [14] Güç sistemlerinde değişen yük taleplerine göre yük baralarının gerilimleri sürekli değişir. Yük arttığında bara gerilimi azalır. Gerilim azaldıkça sistemin çalışması zorlaşır. Dolayısıyla bara geriliminin belirli bir sınır değerinin altına düşmemesi gerekir. Bu sınır değere “Gerilimin Kritik Değeri” denir.[14] İşte bara gerilimi ile yük arasındaki bu ilişki “Gerilim Kararlılığı” kavramını ortaya çıkarmaktadır. Güç sistemlerinde yük baralarının gerilimlerinin her koşulda belirli işletme sınırları içerisinde tutulabilmesi

kabiliyetine “Gerilim Kararlılığı” denilmektedir. [14] Gerilim kararsızlığının birinci sebebi: herhangi bir nedenle bazı yük baralarının gerilimlerinin azalması ve bu gerilim düşümünü karşılayacak miktarda reaktif gücün sisteme verilememesidir. [14] Yük baralarının gerilimleri önceden belirlenen sınır değerlerin altına düşer ve bu durum giderilemezse gerilim belirli bir bölgede ardışık olarak düşer ama bu durum bir bölge ile sınırlı kalmaz. Tüm sistemde gerilim çökmesine sebep olabilir[14]. Güç sistemlerinde sistemin gerilim kararlılığı bozulmadan yük baralarının alabileceği en yüksek gerilim genlikleri ile bu gerilimlerin faz açıları ve bu değerlere karşılık yük baralarının sahip olduğu aktif güç değerlerine ( $V_{krt}$ ,  $\delta_{krt}$ ,  $P_{krt}$ ) “**Kritik Değerler**” denir. [14] Gerilim çökmelerinin önlenmesi için kritik değerlerin bilinmesi gerekir. Güç sisteminde bir bozucu etkiden sonra yük barası gerilimleri normal çalışma sınırları içerisinde kalıyorsa sistem kararlıdır. Gerilim için kabuledilebilir sınır değerler, nominal gerilimin %6 eksigi veya fazlasıdır. [14]

#### **2.4.1. Gerilim Kararlılığının Tanımlanması**

##### *2.4.1.1. CIGRE( Conseil International des Grands Reseaux Electriques ) Tanımlaması*

Güç Sisteminde verilen çalışma şartlarında küçük bir bozucu etki sonrası yük üzerindeki gerilim değerlerinin bozucu etki öncesindeki değerlere yakın veya aynı olması küçük bozucu etki gerilim kararlılığı olarak tanımlanır. Bozucu etki sonrasındaki gerilim değerleri sınır değerlerin altında ise sistem Gerilim Çökmesi’ne doğru gider. [14]

##### *2.4.1.2. IEEE Tanımlaması*

Yük gücü artığında gerilim değeri azalır. Böyle bir durumda sistem gerilimini belirli sınırlar içinde tutabilme yeteneğine gerilim kararlılığı denir. Böyle durumlarda gücün ve gerilimin her ikisinin birlikte kontrol edilmesi gerekir. Sistemde gerilim düşümleri gerilim kararsızlığı oluşturur, bu durum da gerilim çökmesine sebep olur. Gerilim güvenliği sadece kararlı durumda kalmak değil, sistemde oluşan değişikliklerde kararlı durumu koruyabilmektir. [14]

##### *2.4.1.3. IEEE ve CIGRE Birlikte Tanımlaması*

Gerilim kararlılığı, güç sisteminde bir bozucu etki sonrasında tüm baraların başlangıçtaki çalışma şartlarına dönebilmeleri kabiliyetidir. Sistemin belirli bir bölgesinde anormal şekilde bir gerilim düşmesinin oluşması ve bu durumun devam

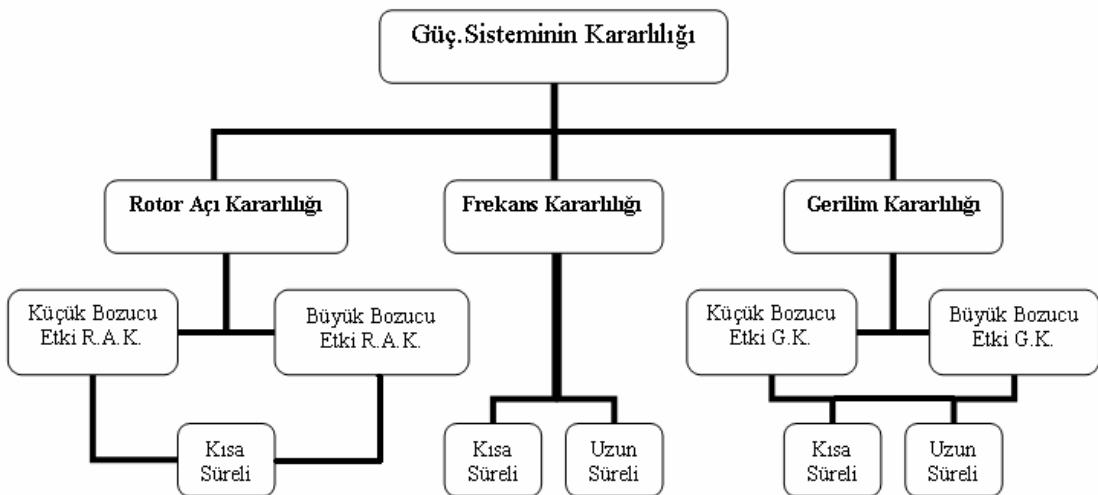
etmesi sistemde Gerilim Çökmesi'ne sebep olur. [14]

#### 2.4.1.4. Güç Sisteminde Kararlılığın Sınıflandırılması

Kararlılık genel olarak senkron çalışmanın korunması olarak ifade edilir. Bu durum senkron makinelerin senkronizmada kalmaları ile sağlanır. Senkronizmanın korunmasına “Rotor Açılı Kararlılığı” denir. [14] Güç sistemlerinde senkronizma bozulmadan da kararsızlık oluşabilir. Böyle durumlarda senkronizmanın korunması yerine gerilim kararlılığı önceliklidir. Güç sistemlerinde kararlılık genel olarak “Rotor Açılı Kararlılığı” ve “Gerilim Kararlılığı” olarak sınıflandırılabilir. [14] Kararsızlık generatör kaynaklı veya yük kaynaklı olabilir. Zaman açısından da kısa süreli ve uzun süreli olabilir. Bu açılarından kararlılık “Generatör Kaynaklı” ve “Yük Kaynaklı” olarak zaman açısından da “Uzun Süreli” ve “Kısa Süreli” olarak sınıflandırılır. Kararlılığın Genel olarak Sınıflandırılması aşağıda Çizelge 2.1’de, IEEE/CIGRE’ye göre sınıflandırılması ise Şekil 2.3’de verilmiştir. [14]

**Çizelge 2.1.** Güç Sistemi Kararlılığının Genel Olarak Sınıflandırılması[14]

| Zaman Ölçüsü | Generatör Kaynaklı       | Yük kaynaklı                          |
|--------------|--------------------------|---------------------------------------|
| Kısa Süreli  | Rotor Açılı Kararlılığı  | Kısa Süreli Gerilim Kararlılığı       |
|              | Küçük Sinyal   Transient |                                       |
| Uzun Süreli  | Frekans Kararlılığı      | Uzun Süreli Gerilim Kararlılığı       |
|              |                          | Küçük Bozucu Etki   Büyük Bozucu etki |



**Şekil 2.3** Güç sistemi kararlılığının IEEE / CIGRE’ ye göre sınıflandırılması[14]

#### *2.4.1.5 Büyük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı(Large Disturbance)*

Sistemde hat arızalarının oluşması, üretimin durması gibi büyük bir bozucu etki sonrasında gerilimin kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutulabilmesi yeteneğidir. Koruma ve kontrol cihazlarının lineer olmayan özelliklerinin bilinmesi büyük bozucu etki gerilim kararlılığının incelenmesinde önemlidir. büyük bozucu etki gerilim kararlılığında süre 10-30 saniye bazende 1 dakika olabilmektedir. [14]

#### *2.4.1.6 Küçük Bozucu Etki Gerilim Kararlılığı(Small Disturbance)*

Sistemde yüklerin değişmesi gibi küçük bir bozucu etki sonrasında gerilimin kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutulabilmesi yeteneğidir. Küçük bozucu Etki Gerilim Kararlılığı dakikaklarca sürebilir hatta süre saatleri de bulabilir. [14]

#### *2.4.1.7 Kısa Süreli Gerilim Kararlılığı(Short Term)*

Elektronik kontrollü yükler, endüksiyon motorları, yüksek doğru gerilim dönüştürücüleri(HVDC) gibi Değişim zamanları çok hızlı olan yüklerin etkisi ile oluşan kararlılık problemidir. Rotor açısı kararlılığına benzer. Yüklerin dinamik olarak modellenmesi ve hazırlanan diferansiyel denklemlerin çözülmesi gerekir. Çalışma zamanı birkaç saniyedir. [14]

#### *2.4.1.8 Uzun Süreli Gerilim Kararlılığı(Long Term)*

Yük altında kademe değiştiren yükler, Generatör akım sınırları, termostatik Kontrollü yükler(ısıtıcı özellikli omik yük) gibi daha yavaş çalışma özelliğine sahip yani değişim zamanları daha uzun olan yüklerin oluşturduğu kararlılık problemidir. [14] Çalışma periyodu birkaç dakikaya kadar çıkabilir(2-3 dakika) Uzun süreli gerilim kararlılığı P-V eğrileri ile de analiz edilebilir. [14] P-V eğrileri ile analiz yük artırımını şeklinde olur. Aşırı veya düşük uyartım(enbüyük veya enküçük reaktif güç sınırları), kademe değiştirme ve anahtarlanabilir şönt elemanların durumları göz önüne alınır. [14] Yükün en yüksek aktif güç sınır değeri ve bu güce ulaştığı andaki gerilim değeri yani en düşük gerilim sınır değeri elde edilir. Bu değerlerin dışına çıktığında sistemde “Gerilim Çökmesi” Meydana gelebilir. [14]

### **2.4.2 Gerilim Çökmesi**

Güç sisteminin bir kısmında gerilim kararsızlığı sonucunda gerilimin olağan dışı bir şekilde düşmesi olayına gerilim çökmesi denir. Gerilim çökmeleri aşırı yük, arızalar ve reaktif güç eksikliği ile oluşur. Gerilim çökmeleri zaman bakımından birkaç saniye

olabildiği gibi saatlerce de sürebilir. Güç sistemlerinde gerilim çökmesi açısından riskli durumlar: iletim hattı üzerinde aşırı yük artışı, gerilim kaynaklarının üretim gerilimlerinin çok düşmesi, gerilim kaynaklarının yük merkezlerinden çok uzakta olması, trafo kademe değiştiricilerinin etkisiz kalması, koruma kontrol sisteminin yetersiz kalması, yetersiz reaktif güç kompanzasyonu ve yük ile üretim arasında büyük oran oluşması şeklinde belirtilebilir. Gerilim çökmelerini önlemek için yapılan işlemler: Reaktif güç kompanzasyonu, ihtiyaç fazlası reaktif güç talebinin önlenmesi, gerilim ve reaktif güç kontrolü, trafo kademe değiştirici kontrolü, koruma ve kontrol koordinasyonu, düşük gerilim koruyucularının kullanılması ve kararlılık sınırlarının önceden belirlenmesi şeklindedir. Gerilim çökmelerine sebep olabilecek çeşitli durumlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1- İletim hatlarında bakım v.s. nedeniyle reaktif güç üretiminin azalması nedeni ile hattın aşırı yüklenmesi sonucu gerilim çökmesi oluşabilir.
- 2- Sistemin aşırı yüklenmesi sonucunda kayıplar meydana gelir. Aşırı yüklenme ve kayıpların artması ile reaktif güç talebi artar bu talep karşılanamaz ise gerilim çökmesi oluşabilir.
- 3- Kontrol sistemi tarafından uyarımın arttırılması ve generatör çıkış gerilimlerinin ayarlanması ile gerilimdeki azalma giderilir. Bu durumda reaktif güç de artma meydana gelir ve artan reaktif güç nedeni ile hatlarda ve tafolarda Gerilim düşümleri oluşur. [14]
- 4- Yük değişimi nedeniyle bozulan şebeke gerilimleri karşısında trafoların kademesi değiştirilerek düzeltme yoluna gidilir. Gerilim arttığında yük talebide artar, iletim kayıpları da artar. Bu durumda hatlarda daha büyük gerilim düşümlerine sebep olur.[14]
- 5- Reaktif güç talebinin artması generatörlerin reaktif çıkışını arttırır. Generatörler reaktif güç sınır değerlerine ulaşınca gerilimleri azalır. Bu durumda kritik bölgenin uzağındaki başka bir generatörden reaktif güç sağlanır. Bunun sonucunda generatörler aşırı yüklenir. Şönt kapasitelerin sistemde etkilerinin azalması ile gerilim de azalır. Sistem önce gerilim kararsızlığına sonrada gerilim çökmesine gider. [14]

#### *2.4.2.1 Dünyada Meydana Gelmiş Olan Gerilim Çökmeleri*

Fransa 1978, öğleden önce saat 7-8 arasında bir önceki gün talep edilen güçten 1600 MW daha fazla güç talebi olması neticesinde 400 KV'luk şebeke 342 KV'a düştü. Gerilim 12:30'da normal seviyeye getirilebildi. Bu durum 20 dakika sürdü. 29MW güç ve 100GWh enerji kesintiye uğradı. [14]



Belçika 1982, test çalışması sırasında 700 MW güç bağlanamadığı için 4 dakika kadar toplam gerilim çökmesi oluştu. [14]

Güney İsveç 1983, Bir nükleer santral çıkışında oluşan arıza nedeniyle Güney İsveç 1 dakika süreyle sistemden ayrıldı. [14]

Amerika Florida 1985, firçaların yanması sonucu 500 KV'luk hatta gerilim düşmesi ve birkaç saniye içinde gerilim çökmesi oluştu. [14]

Batı Fransa 1987, aşırı uyartım koruma sistemindeki hata nedeniyle gerilim 0.5-0.8 b seviyelerine kadar azaldı 6 dakika süreyle gerilim çökmesi yaşandı. [14]

Güney Finlandiya 1992, kritik noktalara yakın değerlerde çalışmakta olan sistemde bakım sırasında 700 MW'lık yükün etkisi ile 400 KV'luk hattın gerilimi 344 KV seviyesine düştü. Gerilim, gaz türbinleri yük koruyucuları ile çalıştırılarak reaktif güç üretiminin arttırılması ile normal seviyesine getirilebildi. [14]

Amerika 1996, 345 KV'luk hatta kısa devre olması nedeniyle Kuzey Batı Amerika sistemi kesintiye uğradı. Hızlı bir şekilde gerilim ve açı kararsızlığı oluştu. [14]

Amerika-Kanada 14 Ağustos 2003, Amerika-Kanada arasında yaşanan gerilim çökmesinde iki ülkeden toplam 50 milyon insan etkilendi, 63000 MW kayıp oluştu. 400 iletim hattı ve 531 üretim birimi zarar gördü. Tahmini 10 Milyar dolar zarar oluştu. [14]

Yaşanan bu örnek olaylar nedeniyle günümüzde güç sisteminin kritik değerleri belirlenerek gerilim kararlılığı'nın kontrolü ve kararlılık problemlerinin düzeltilmesi konusundaki araştırmalar önemli hale gelmiştir. Güç sistemlerinde kiritik değerlerin hesaplanması için kullanılan yöntemleri aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür. [14]

- 1- P-V Eğrileri Yöntemi
- 2- Formül Yöntemi
- 3- Yük akışı yöntemi
- 4- Genetik algoritma yöntemi

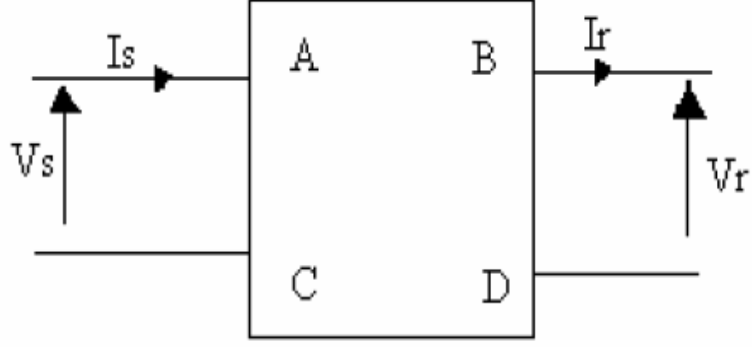
Bu çalışmada "P-V Eğrileri Yöntemi" kullanılmış ve yöntemin açıklaması bölüm 2.4.3'de yapılmıştır.

### 2.4.3. P-V Eğrisi Üzerinden Kritik Değerlerin Belirlenmesi

Sabit güç katsayısı altında hat başı gerilimi belirli bir değerde sabit tutularak, hat sonunda yük barasından çekilen aktif güç değerinin sıfırdan itibaren kademe arttırılması ile hat sonu yük barasının gerilim genlik değerinin değişiminin gözlemlendiği, P-V eğrisi sayesinde güç sisteminin kritik değerleri belirlenebilir. [14] Bu yöntemin amacı, güç sisteminde yük baraları için P-V eğrilerinin elde edilmesi ve bunun neticesinde sistemin kritik değerlerinin eğri üzerinde en büyük aktif güç değerinin işaretlenmesi yoluyla belirlenmesidir. P-V eğrilerinin çizdirilebilmesi için hat sonu gerilimi ile hat sonu aktif güç değeri arasındaki ilişki:  $ax^2 + bx + c = 0$  şeklinde ikinci dereceden bir denklem olarak elde edilmeye çalışılır. [14] Bu denklemin hazırlanması için gerekli hat parametreleri hesaplanır ve sabit kabul edilir. Ayrıca bazı parametre değerleri de yük akışı verilerinden alınır. Denklemin belirlenmesi neticesinde bu denklem uygun bir bilgisayar programlama dili ile yazılan program sayesinde, eğri şeklinde çizdirilir. Elde edilen P-V eğrisi üzerinde artık gerekli yorumlar yapılabilir. [14] P-V Eğrilerinin elde edildiği denklemlerin uygulanması için sistemin salınım barası ve kritik değerleri incelenen yük barasından oluşan iki baralı ve tek hatlı bir sisteme indirgenmesi gereklidir. Şekil 4 de gösterildiği gibi iletim hattı iki kapılı bir devre olarak göz önüne alındığında, P-V eğrilerinin elde edilmesi için hat sonu yük barasının aktif gücü ile gerilim genlik değeri arasındaki ilişkiyi ifade eden denklemin elde edilmesi ve sistemin iki baralı hale indirgenmesi gerekir. Bu işleme “Bara İndirgeme Yöntemi” denilmektedir.[14] Bara İndirgeme Yöntemi aşağıda genel olarak anlatılmıştır. Bulgular ve Tartışma başlıklı 3. bölümde ise Örnek Uygulamalar içerisinde detaylar verilmiştir.[14]

### 2.4.4. P-V Eğrilerinin Çizdirildiği Denklemlerin Elde Edilmesi

İletim hattının iki kapılı devre olarak gösterimi Şekil 2.3 deki gibidir.



**Şekil- 2.4.** İletim Hattının İki Kapılı Devre Olarak Gösterilmesi.[14]

$V_s$  ,  $I_s$  : Generatör barası gerilimi ve akımı

$V_r$  ,  $I_r$  : Yük barası gerilimi ve akımı

A , B, C,D : Uzun iletim hattı sabitleri olmak üzere

$$A = a_1 + ja_2 \quad (2.84)$$

$$B = b_1 + jb_2 \quad (2.85)$$

$$C = c_1 + jc_2 \quad (2.86)$$

$$D = d_1 + jd_2 \quad (2.87)$$

$$|A|^2 = a_1^2 + a_2^2 \quad (2.88)$$

$$|B|^2 = b_1^2 + b_2^2 \quad (2.89)$$

$$V_r = V_{r1} + jV_{r2} \quad (2.90)$$

$$V_r^* = V_{r1} - jV_{r2} \quad (2.91)$$

$$|V_r|^2 = V_{r1}^2 + V_{r2}^2 \quad (2.92)$$

Olarak ifade edilirler. [14]

Şekil 2.3 'de gösterilen modele göre güç sisteminin bilinen,

$$V_s = A * V_r + B * I_r \quad (2.93)$$

Denklemleri elde edilir. [14]  $S_r$ ,  $P_r$ ,  $Q_r$  güç sisteminin görünür aktif ve reaktif güç değerlerini ifade etmek üzere,

$$S_r = P_r + jQ_r = V_r * I_r^* \quad (2.94)$$

$$I_r = \frac{P_r + jQ_r}{V_r} \quad (2.95)$$

Şeklinde belirtilir. [14]

$P_r$  ve  $Q_r$  yükün aktif ve reaktif gücünü sembolize eder. (2.93) denkleminde eşitliğin sağ tarafındaki ifadelerin açık halleri yazılır ise,

$$V_s = (a_1 + ja_2) * (V_{r1} + jV_{r2}) + (b_1 + jb_2) * \left( \frac{P_r - jQ_r}{V_r^*} \right) \quad (2.96)$$

Denklemleri elde edilir. [14] Bu denklemin her iki tarafı  $V_r^*$  ile çarpılır ve

$$|V_r|^2 = V_{r1}^2 + V_{r2}^2 \quad (2.97)$$

Bilinen denklemleri göz önüne alınırsa

$$V_s * V_r^* = (a_1 + ja_2) * |V_r|^2 + (b_1 + jb_2) * (P_r - jQ_r) \quad (2.98)$$

İfadesi elde edilir. [14] Ve bu ifadenin düzenlenmesiyle de

$$V_s * V_r^* = (a_1 * |V_r|^2 + b_1 * P_r + b_2 * Q_r) + j(a_2 |V_r|^2 + b_2 * P_r - b_1 * Q_r) \quad (2.99)$$

Denklemini elde ederiz. [14] Eşitliğin her iki tarafı eşleniği ile çarpılır ise sonuç değişmez . Buna göre eşitliğin iki tarafı da eşleniği ile çarpıldığında,

$$|V_s|^2 * |V_r|^2 = (a_1 * |V_r|^2 + b_1 * P_r + b_2 * Q_r)^2 + (a_2 |V_r|^2 + b_2 * P_r - b_1 * Q_r)^2 \quad (2.100)$$

İfadesi elde edilir. [14] Bu denklemde eşitliğin sağ tarafında bulunan parantezlerin kareleri alındığında,

$$|V_s|^2 * |V_r|^2 = (a_1^2 + a_2^2) * |V_r|^4 + [2 * P_r * (a_1 * b_1 + a_2 * b_2) + 2 * Q_r * (a_1 * b_2 - a_2 * b_1)] * |V_r|^2 + (b_1^2 + b_2^2)(P_r^2 + Q_r^2) \quad (2.101)$$

Denklemini elde edilir. [14]

$$a_1^2 + a_2^2 = |A|^2 \quad (2.102)$$

$$b_1^2 + b_2^2 = |B|^2 \quad (2.103)$$

Eşitlikleri 4.18 denklemde yerine yazılır ve denklem yeniden düzenlenirse

$$|A|^2 * |V_r|^4 + [2 * P_r * (a_1 * b_1 + a_2 * b_2) + 2 * Q_r * (a_1 * b_2 - a_2 * b_1)] * |V_r|^2 + |B|^2 * (P_r^2 + Q_r^2) = 0 \quad (2.104)$$

İfadesini elde ederiz. [14] Bu denklemde  $\varphi$  güç açısı olmak üzere,  $Q_r = P_r * \tan \varphi$  denklemi (2.104) eşitliğinde yerine yazıldığında

$$|A|^2 * |V_r|^4 + [2 * P_r * (a_1 * b_1 + a_2 * b_2) + 2 * ((P_r * \tan \varphi)^2) * (a_1 * b_2 - a_2 * b_1)] * |V_r|^2 + |B|^2 * (P_r^2 + (P_r * \tan \varphi)^2) = 0 \quad (2.105)$$

Denklemini elde edilir. [14]

Bu ifadede  $|V_r|^2 = X$  olarak düşünüldüğünde 2.105 denklemi  $ax^2 + bx + c = 0$

Şeklinde ifade edilebilen 2. dereceden bir denklem haline gelmiş olur. [14] Güç sisteminin uzun iletim hattı sabitlerinin bulunması ile  $a_1, a_2, b_1, b_2, A, B$  katsayıları elde edilir. Çalışmalar sabit güç katsayısı altında yapıldığından, yükün güç açısı olan  $\varphi$  değeri de bellidir. Yük barasının aktif gücü  $P_r$  'nin sıfırdan itibaren adım adım artırılması ile her defasında ikinci dereceden denklem çözülerek denklemin bilinmeyen olan  $|V_r|$  hesaplanır. [14]  $|V_r|$  'nin hesaplanması için denklemler: [14]

$$a = |A|^2 \quad (2.106)$$

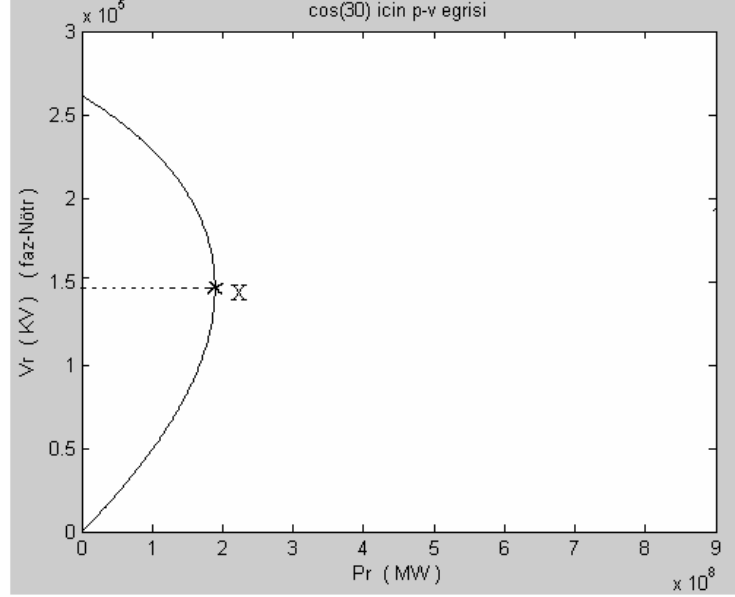
$$b = [2 * P_r * (a_1 * b_1 + a_2 * b_2) + 2 * ((P_r * \tan \varphi)^2) * (a_1 * b_2 - a_2 * b_1)] * |V_r|^2 \quad (2.107)$$

$$c = |B|^2 * (P_r^2 + (P_r * \tan \varphi)^2) \quad (2.108)$$

$$\Delta = b^2 - 4 * a * c \quad (2.109)$$

$$V_{r1,2} = \sqrt{\left( \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2 * a} \right)} \quad (2.109)$$

Olarak ifade edilir. [14] Güç sisteminde yük barasının aktif güç değerinin düzenli olarak kademeli bir şekilde artırılması ile ikinci dereceden denklem her defasında çözülerek denklemin  $V_{r1}$  ve  $V_{r2}$  kökleri hesaplanır. [14] Bu değerlerin bir bilgisayar programı ile eksenlerden biri aktif güç değerini diğeri gerilim genlik değerini göstermesi şartı ile bir eğri şeklinde çizdirilmesi sonucunda yük barasının P-V eğrisi elde edilmiş olur. [14] Bu eğri üzerinden güç sisteminin kritik değerleri belirlenebilir. [14] Yük barasının aktif güç artımları ile  $V_{r1}$  ve  $V_{r2}$  değerleri hesaplanırken  $V_{r1} = V_{r2}$  durumu söz konusu olduğu durumda, yük barasının çekebileceği en büyük aktif güç değeri bulunmuş olur. Yük barasının en büyük aktif güç değeri ile bu değeri aldığı andaki gerilim genlik değeri bir güç sisteminin kararlılık sınırları olan kritik değerleridir. [14] PV Eğrisi örneği şekil 2.4 de görülmektedir. [14]



**Şekil 2.5.** P-V Eğrisi(X=Kritik nokta).[1]

#### 2.4.5. Bara İndirgeme Yöntemi

Bu yöntemde  $n$  bara sayısı olmak üzere sistemde salınım barası ve kritik değerleri incelenen yük barası dışındaki tüm baralara ait aktif ve reaktif güçler admitans değerlerine çevrilir ve sistemin Bara Admitans Matrisi 'ne eklenir. Elde edilen yeni Bara Admitans Matrisi üzerinde bara indirgeme işlemi yapılarak admitans matrisi  $2 \times 2$  boyutuna indirgenir. Daha sonra Bölüm 2.4'de verilen Kritik Değer Denklemleri kullanılarak sistemin P-V eğrisi elde edilir. Bara indirgeme Yöntemi'nin işlem adımları aşağıdaki gibidir. [14]

- 1- Sistemin herhangi bir andaki değerler ile güç akışı yapılarak baralara ait aktif güç, reaktif güç ve gerilim genlik değerleri elde edilir.
- 2- Salınım barası ve kritik değerleri incelenen yük barası dışındaki tüm baraların aktif ve reaktif güçleri admitans değerlerine dönüştürülür.
- 3- Hesaplanan admitans değerleri bağlı olduğu bara generatör barası ise (-) işaretli, yük barası ise(+) işaretli olarak bara admitans matrisinin ilgili ana köşegen elemanına eklenir.

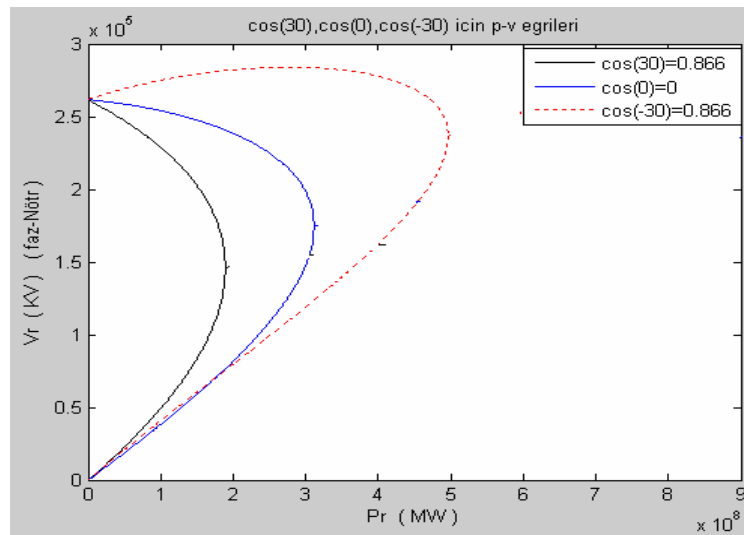
- 4- Elde edilen yeni bara admitans matrisinde kritik değerleri incelenen baranın 1.satır ve 1. Sütunda, salınım barasının 2. Satır ve 2. Sütunda ve Y11, Y22, Y33 gibi ana köşegen elemanlarının da yine ana köşegen üzerinde kalması için satır ve sütunlar arasında yer değiştirme işlemi yapılır.
- 5- Matris indiregeme işlemi yapılarak yeni bara admitans matrisi 2x2 boyutuna indirgenir.
- 6- Elde edilen 2x2 lik matrisin elemanları ve Bölüm 2.4 de açıklanan P-V eğrileri denklemleri kullanılarak kritik değerleri incelenen baranın P-V eğrisi elde edilir.

#### 2.4.6. Güç Sistemine Ait Parametrelerin Kritik Değerlere Etkisi

Güç sistemime ait Güç Faktörü, Hat Uzunluğu, Hat Başı Gerilimi, Paralel Hat Sayısı Seri Kompansasyon ve Şönt Kompansasyon ve Hat Kayıp Faktörü gibi parametreler sistemin kritik değerleri üzerinde etkilidir. Bu parametreler aynı zamanda P-V Eğrilerinin çizdirilmesi için oluşturulan denklemlerde de bulunmaktadır ve Bu parametrelerin kritik değerlere etkisi P-V eğrileri üzerinde rahatlıkla görülebilir. Bu parametrelerden Keban-kayseri-Ankara 380 KV iletim hattı verileri kullanılarak gerçekleştirilen örnek bir çalışma üzerinde bahsedelim. [14]

##### 2.4.6.1. Güç Faktörünün Etkisi

$\cos\varphi=1$ (omik),  $\cos\varphi=0.86$ ( endüktif) ve  $\cos\varphi=0.86$ (kapasitif) değerleri için elde edilen yük barası P-V eğrileri aşağıda Şekil 2.6'da verilmiştir.



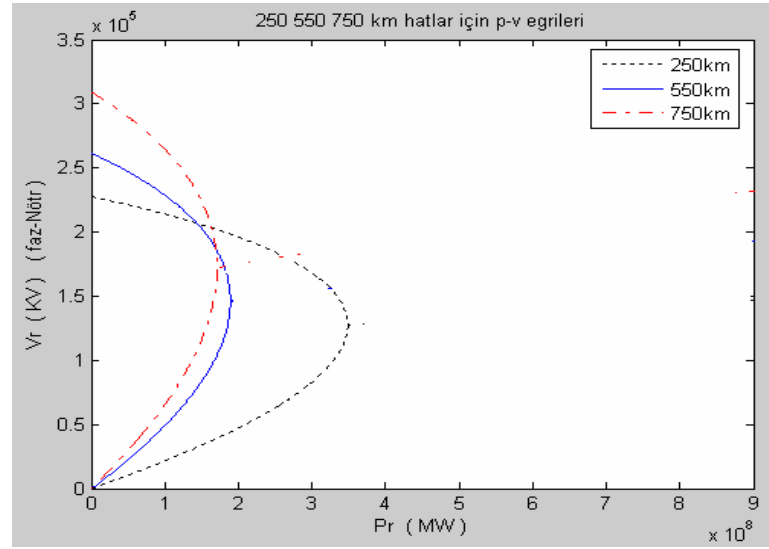
Şekil 2.6 Değişik Güç Katsayıları İçin P-V Eğrileri. [14]



Güç Katsayısının endüktüfden Kapasitif duruma doğru gitmesiyle kritik güç ve kritik gerilim değerleri artmaktadır. Bu durum hattan iletilebilecek aktif gücün artması olumlu bir durum olsa da kritik gerilim değerinin de artması gerilim kararlılığı açısından olumsuz bir durumdur. [14]

#### 2.4.6.2. Hat Uzunluğunun Etkisi

Hat uzunluğunun değişmesi hattın omik ve Endüktif reaktanslarının (ohm/km) ve süseptansının (S/km) değişmesine sebep olur. Dolayısı ile hattın A,B,C,D sabitleri değişir; bunun sonucunda da kritik değerler değişir. Güç katsayısı  $\cos\varphi = 0.866$  (Endüktif) olarak sabit olmak üzere üç farklı hat uzunluğu için elde edilen P-V Eğrileri aşağıda Şekil 2.7’de verilmiştir. [14]

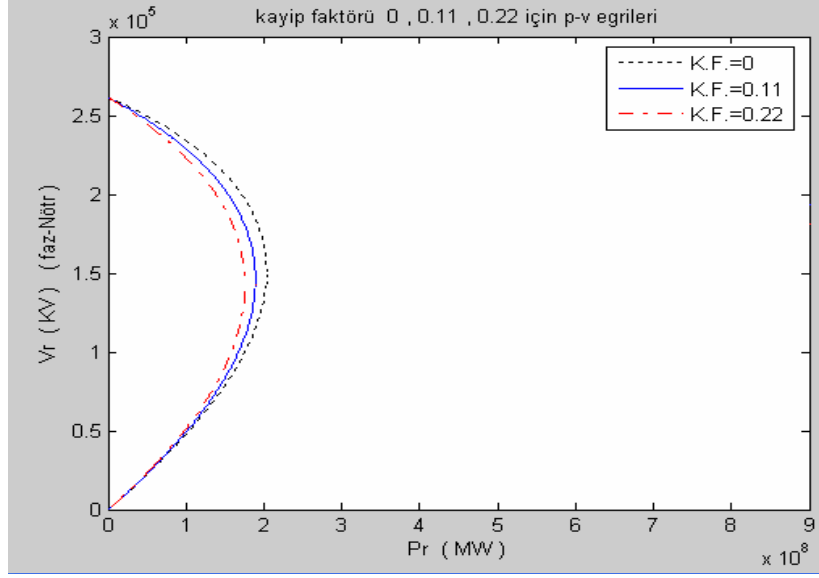


Şekil 2.7. Değişik Hat Uzunlukları İçin P-V Eğrileri. [14]

Hat uzunluğu arttıkça kritik gerilim değeri artmakta; kritik güç değeri ise azalmaktadır. Dolayısı ile budurm kararlılık açısından olumsuz bir durumdur. [14]

#### 2.4.6.3. Hat Kayıp Faktörünün Etkisi

Hattın omik direncinin Endüktif direncine oranı “Hat Kayıp Faktörü” dür. Hattın kayıp faktörünün değişmesi A,B,C,D sabitlerinin değişmesine sebep olur; dolayısı ile kritik değerler değişir. Hat kayıp Faktörü’nün 0,0.11 ve 0.22 olması durumlarındaki P-V eğrileri aşağıda Şekil 2.8’de verilmiştir[14]

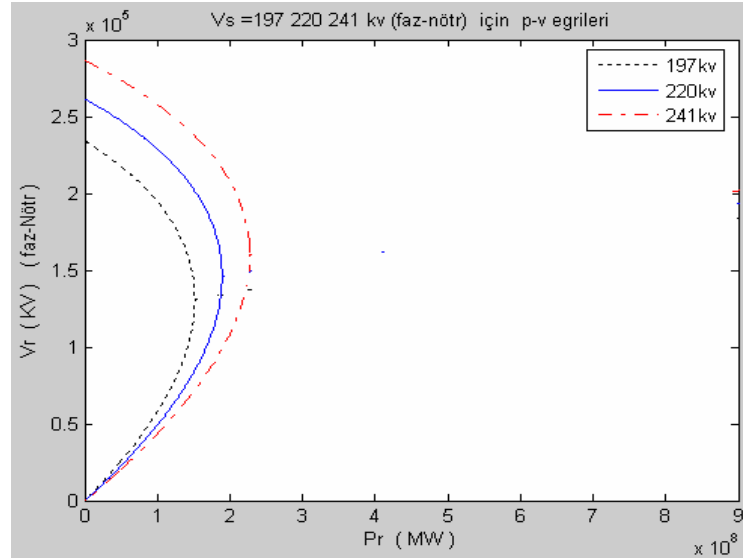


**Şekil 2.8.** Değişik Hat Kayıp Faktörleri İçin P-V Eğrileri. [14]

Kayıp Faktörünün artması kritik gerilim değeri için olumlu bir durum olmasına rağmen kritik güç için olumsuzdur. [14]

#### 2.4.6.4. Hat Başı Geriliminin Etkisi

Hat Başı Gerilimi'nin %10 adımlarla arttırılması ile elde edilen P-V Eğrileri aşağıda Şekil 2.9'da verilmiştir. [14]

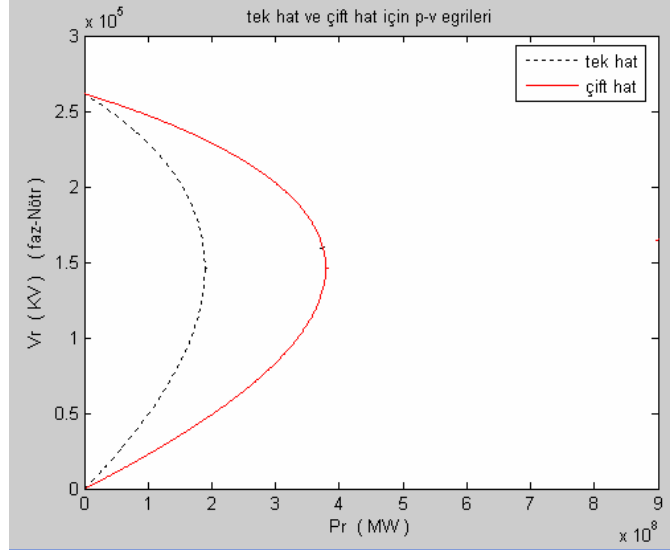


**Şekil 2.9.** Değişik Hat Başı Gerilimleri İçin P-V Eğrileri. [14]

Hat Başı Gerilimi'nin artması kritik değerlerin artmasına sebep olmaktadır. Gücün artması olumlu olsa da gerilimin artması olumsuz bir durumdur.

#### 2.4.6.5. Paralel Hat Sayısının Etkisi

Çeşitli nedenlerle üretim ve tüketim merkezleri arasında birden fazla sayıda hat kullanılması gerekli olmaktadır. Aynı özelliklere sahip iki hat için elde edilen P-V eğrileri aşağıda şekil 2.10'da verilmiştir. [14]



**Şekil 2.10.** Paralel Tek ve Çift Hattın Sahip Güç Sistemleri İçin P-V Eğrileri. [14]

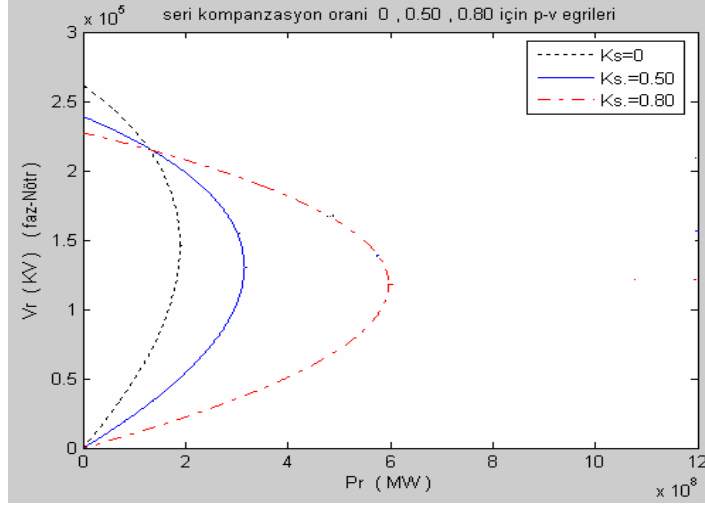
Sistem tek yerine çift hatlı olursa kritik gerilim pek değişmezken kritik gücün neredeyse iki katına çıktığı görülmektedir. Budurum kritik değerler açısından olumlu olsa da herhangi bir nedenle hatlardan birinin devre dışı kalması durumunda sistemde aşırı yüklenme olabilir. [14]

#### 2.4.6.6. Seri Kompanzasyonun Etkisi

Sisteme seri kapasite bağlanarak hattın Endüktif reaktansının hat gerilimi üzerindeki etkisi azaltılmak ya da tamamen yok edilmek istenir. Ks seri kompanzasyon oranı olmak üzere seri kompanzasyonda hattın empedansı: [14]

$$Z = R + J(1 - K_s) * X \quad (2.110)$$

Şeklinde olur. [14] Hattın empedansının değişmesi A,B,C,D sabitlerinin değişmesine; dolayısıyla kritik değerlerin değişmesine sebep olur. Farklı seri kompanzasyon oranları için elde edilen P-V eğrileri aşağıda Şekil 2.11'de verilmiştir. [14]



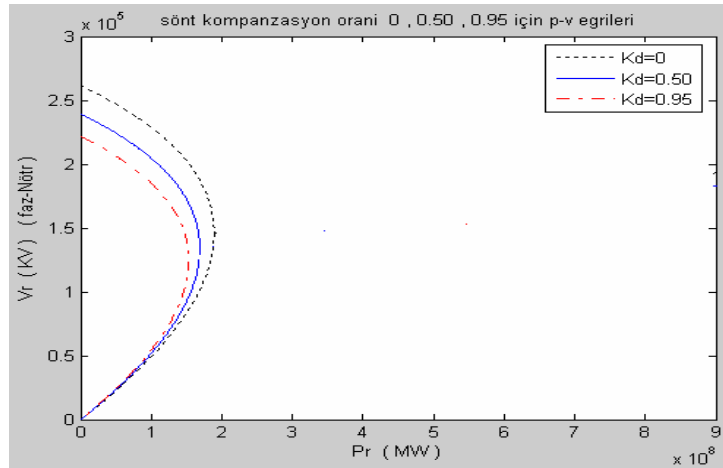
**Şekil 2.11.** Değişik Seri Kompanzasyon Oranları için P-V Eğrileri

#### 2.4.6.7. Şönt Kompanzasyonunun Etkisi

Şönt kompanzasyon yapılmazsa iletim hattı boşta çalışırken yük barası gerilimi kararlı halde enyüksek değere çıkar; açma kapama olaylarında da aşırı gerilimler oluşur. Yeterli kompanzasyon olmazsa sistemde oluşacak Kapasitif akımlar sisteme bağlı cihazlarda aşırı gerilimler oluşturur. Bu yüzden sistemde uygun noktalara şönt reaktörler koyulur. Reaktörler hatların faz-nötr arasına bağlanır. Kd şönt kompanzasyon oranı olmak üzere şönt kompanzasyonda hattın şönt kapasitesi: [14]

$$Y_y = (1 - K_d) * Y \quad (2.111)$$

Şeklinde olur.[14] Hattın şönt kapasitesinin değişmesi A,B,C,D sabitlerinin değişmesine; dolayısıyla kritik değerlerin değişmesine sebep olur. [14] Farklı şönt kompanzasyon oranları için elde edilen P-V eğrileri aşağıda Şekil 212'de verilmiştir.



**Şekil 2.12.** Değişik Şönt Kompanzasyon Oranları İçin P-V Eğrileri. [14]

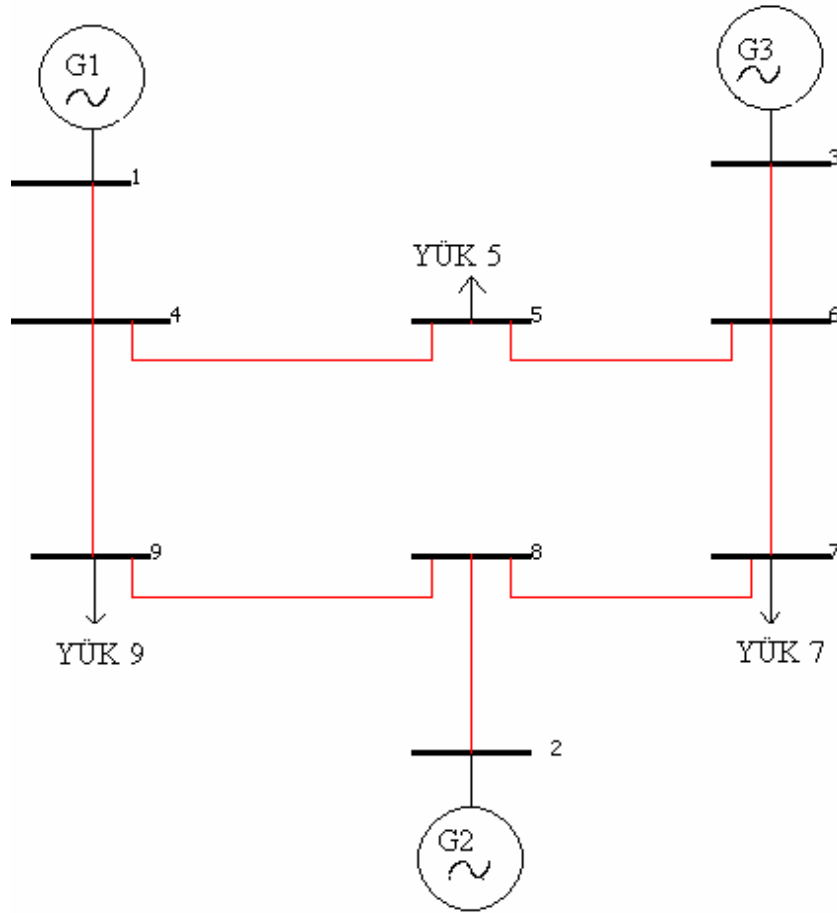
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. ÖRNEK UYGULAMALAR

Bu bölümde İEEE'nin 9 Baralı Sistemi için öncelikle sistemin standart verileri ile açıklamalı bir şekilde Temel Bileşen Güç Akışı yapılmıştır. Daha sonra da bu çalışmanın konusunu oluşturan harmonikli durum için Harmonik Güç Akışı ve elde edilen sonuçlara göre de kritik değerlerin PV eğrileri ile tespiti uygulamaları yapılmıştır. Nonlineer yüke ait harmonikli akım ifadeleri Bölüm 3.1.2'de verilmiştir. Sistemin tek hat şeması Şekil 3.1'de ve sisteme ilişkin hat verileri ile generatör ve yük verileri ise sırasıyla Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

##### 3.1.1. İEEE 9 Baralı Sistemi için Temel Bileşen Güç Akışı Uygulaması:

Bu sistemde 1, 2, ve 3 nolu baralar generatör barası diğer baralar ise yük barasıdır. Generatör baralarından (1) nolu generatör barası salınım barası olarak alınmıştır.



Şekil 3.1. İEEE Standart 9 Baralı Sistemi.[14]

### 3.1.1.1. Sisteme İlişkin Veriler

Sisteme ilişkin hat verileri Çizelge 3.1 de, generatör ve yük verileri ise Çizelge 3.2 de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** IEEE Standart 9 Baralı Sistemi Hat Verileri.[14]

| HAT NO | R(pu)  | X(pu)  | B(pu) |
|--------|--------|--------|-------|
| 1.-4   | 0      | 0.0576 | 0     |
| 4.-5   | 0.017  | 0.092  | 0.158 |
| 6.-5   | 0.039  | 0.17   | 0.358 |
| 3.-6   | 0      | 0.1008 | 0     |
| 6.-7   | 0.0119 | 0.072  | 0.149 |
| 8.-7   | 0.0085 | 0.072  | 0.149 |
| 2.-8   | 0      | 0.0625 | 0     |
| 8.-9   | 0.032  | 0.161  | 0.306 |
| 4.-9   | 0.01   | 0.085  | 0.176 |

**Çizelge 3.2.** IEEE Standart 9 Baralı Sistemi Generatör Ve Yük Verileri.[14]

| BARA NO | BARA TİPİ | ÜRETİM         |         | YÜK   |         | GERİLİM<br>( b ) | REAKTİF GÜÇ<br>LİMİTLERİ |                         |
|---------|-----------|----------------|---------|-------|---------|------------------|--------------------------|-------------------------|
|         |           | P(MW)          | Q(MVAr) | P(MW) | Q(MVAr) |                  | Q <sub>min</sub> (MVAr)  | Q <sub>max</sub> (MVAr) |
| 1       | PV        | SALINIM BARASI |         |       |         | 1.04             |                          |                         |
| 2       | PV        | 163            | 0       |       |         | 1.03             | -40                      | 40                      |
| 3       | PV        | 85             | 0       |       |         | 1.04             | -40                      | 40                      |
| 4       | PQ        |                |         |       |         |                  |                          |                         |
| 5       | PQ        |                |         | 90    | 30      |                  |                          |                         |
| 6       | PQ        |                |         |       |         |                  |                          |                         |
| 7       | PQ        |                |         | 100   | 35      |                  |                          |                         |
| 8       | PQ        |                |         |       |         |                  |                          |                         |
| 9       | PQ        |                |         | 125   | 50      |                  |                          |                         |

Burada hesapamalarda kullanacağımız X durum değişken vektörü aşağıdaki şekildedir:

$$X = \left[ \delta_2^{(1)} \quad \delta_3^{(1)} \quad \delta_4^{(1)} \quad \delta_5^{(1)} \quad \delta_6^{(1)} \quad \delta_7^{(1)} \quad \delta_8^{(1)} \quad \delta_9^{(1)} \quad V_4^{(1)} \quad V_5^{(1)} \quad V_6^{(1)} \quad V_7^{(1)} \quad V_8^{(1)} \quad V_9^{(1)T} \right]$$

Burada 1 nolu bara salınım (slack) barası olarak alındığından bu baraya ait gerilim genlik ve açı değerleri olan  $\delta_1$  ve  $V_1$  değerleri ile 2 ve 3 nolu generatör baralarına ait olan  $V_2$  ve  $V_3$  gerilim genlik değerleri bilinen değerlerdir.  $\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6, \delta_7, \delta_8$  değerleri ile  $V_4, V_5, V_6, V_7, V_8$  ve  $V_9$  değerleri de bilinmeyen değerlerdir. Bilinmeyen değerlere birer başlangıç değeri verilerek hesaplamalara başlanır. Bu uygulamada açılar için başlangıç değeri  $0^0$ , gerilimler için başlangıç değeri 1 pu alınmıştır.

### 3.1.1.2. Bara Admitans Matrisinin Oluşturulması

Bara Admitans Matrisi'nin genel ifadesi aşağıdaki şekilde olur.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{19} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{29} \\ Y_{31} & Y_{32} & \cdots & Y_{39} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{91} & Y_{92} & Y_{93} & Y_{94} \end{bmatrix}_{9 \times 9} = \begin{bmatrix} g_{11} + jb_{11} & g_{12} + jb_{12} & \cdots & g_{19} + jb_{19} \\ g_{21} + jb_{21} & g_{22} + jb_{22} & \cdots & g_{19} + jb_{19} \\ g_{31} + jb_{31} & g_{32} + jb_{32} & \cdots & g_{39} + jb_{39} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{91} + jb_{91} & g_{92} + jb_{92} & g_{93} + jb_{93} & g_{99} + jb_{99} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (3.1)$$

Bu şekilde genel olarak ifade edilen Bara Admitans Matrisi bara sayısı  $n=9$  olduğu için  $9 \times 9$  boyutundadır.

$$Y_{11} = \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{0 + j0.0576} = 0 - j17.3611$$

$$Y_{12} = 0$$

$$Y_{13} = 0$$

$$Y_{14} = -\left(\frac{1}{Z_1}\right) = -\left(\frac{1}{0 + j0.0576}\right) = 0 + j17.3611$$

.

.

.

$$Y_{99} = 2.5528 - j17.3382$$

Bu şekilde işlemlere devam edilerek Bara Admitans Matrisi hesaplanır. Sistem 9 baralı olduğundan Bara Admitans Matrisi  $9 \times 9 = 81$  elemanlı olur. Bara admitans Matrisi güç akışı algoritması içinde hesaplanmaktadır. Örnek sistem için Temel Bileşen Güç Akışı Matlab Kodları **EK-1**'de verilmiştir. Bu kodlar çalıştırıldığında alınacak sonuçlar aşağıda Çizelge 3.3'de verilmiştir.

**Çizelge 3.3.** IEEE 9 Baralı Sistemi Temel Bileşen Güç Akışı Sonuçları.

| Bara Numarası | Gerilim Genliği V (PU) | Gerilim Faz Açısı $\delta$ (Derece) | Generatör Aktif Güçleri (PU) | Generatör Reaktif Güçleri (PU) | Hatlardan Akan Aktif Güçler (PU) | Hatlardan Akan Reaktif Güçler (PU) |
|---------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 1             | 1.0400                 | 0                                   | 0.7160                       | 0.2244                         | 0.7160                           | 0.2244                             |
| 2             | 1.0300                 | 9.2667                              | 1.6300                       | 0.0454                         | 1.6300                           | 0.0454                             |
| 3             | 1.0400                 | 6.2313                              | 0.8500                       | 0.0248                         | 0.8500                           | 0.0248                             |
| 4             | 1.0283                 | -2.2100                             |                              |                                | -0.00001362                      | 0.000003045                        |
| 5             | 1.0176                 | -3.7448                             |                              |                                | -0.9000                          | -0.3000                            |
| 6             | 1.0409                 | 1.6916                              |                              |                                | -0.00002338                      | 0.0000005893                       |
| 7             | 1.0243                 | 0.8434                              |                              |                                | -1.0000                          | -0.3500                            |
| 8             | 1.0320                 | 3.7669                              |                              |                                | -0.000016744                     | 0.0000010287                       |
| 9             | 0.9996                 | -3.9315                             |                              |                                | -1.2500                          | -0.5000                            |

### 3.1.2. IEEE 9 Baralı Sistemi için Harmonik Güç Akışı Uygulaması

Bu uygulamada sistemde sırasıyla 5, 7 ve 9 numaralı yük baralarındaki yüklerin kaldırılarak bu yüklerin yerine her seferinde ana harmonikte çektiği aktif güç 0.60 pu ve ana harmonikte çektiği reaktif güç ise 0.70 pu olan bir nonlineer yükün bağlandığı kabul edilmiştir. Sistemde Ana Harmonik ile birlikte 5. Harmonik bileşen göz önüne alınmıştır. Güç Akışı Algoritması'nda kolaylık sağlaması açısından Ana Harmonik Akımları ve Nonlineer Eleman Parametreleri ihmal edilmiştir. Yani Jacobian Matris'te Ana Harmonik Akımları'na ve Nonlineer Eleman Parametreleri'ne göre türevler ihmal edilmiştir. Nonlineer Eleman'nın akım eşitlikleri aşağıda Çizelge 3.4 'de verilmiştir.



**Çizelge 3.4** Nonliier Yükün Harmonikli Akım Eşitlikleri

|  |  |
|--|--|
| <b>Nonliener Yük</b><br><b>5. Baraya Bağlı</b> | $g_r^{(5)} = 0,25 * (v_5^{(1)})^3 * \cos(3 * \delta_5^{(1)}) + 0,15 * (v_5^{(5)})^2 * \cos(2 * \delta_5^{(5)})$<br>$g_i^{(5)} = 0,25 * (v_5^{(1)})^3 * \sin(3 * \delta_5^{(1)}) + 0,15 * (v_5^{(5)})^2 * \sin(2 * \delta_5^{(5)})$ |
| <b>Nonliener Yük</b><br><b>7. Baraya Bağlı</b> | $g_r^{(5)} = 0,25 * (v_7^{(1)})^3 * \cos(3 * \delta_7^{(1)}) + 0,15 * (v_7^{(5)})^2 * \cos(2 * \delta_7^{(5)})$<br>$g_i^{(5)} = 0,25 * (v_7^{(1)})^3 * \sin(3 * \delta_7^{(1)}) + 0,15 * (v_7^{(5)})^2 * \sin(2 * \delta_7^{(5)})$ |
| <b>Nonliener Yük</b><br><b>9. Baraya Bağlı</b> | $g_r^{(5)} = 0,25 * (v_9^{(1)})^3 * \cos(3 * \delta_9^{(1)}) + 0,15 * (v_9^{(5)})^2 * \cos(2 * \delta_9^{(5)})$<br>$g_i^{(5)} = 0,25 * (v_9^{(1)})^3 * \sin(3 * \delta_9^{(1)}) + 0,15 * (v_9^{(5)})^2 * \sin(2 * \delta_9^{(5)})$ |

Burada hesapamalarda kullanacağımız X durum değişken vektörü aşağıdaki şekildedir:

$$\begin{bmatrix} \delta_2^{(1)} \delta_3^{(1)} \dots \delta_9^{(1)} V_4^{(1)} V_5^{(1)} \dots V_9^{(1)} \delta_1^{(5)} \delta_2^{(5)} \dots \delta_9^{(5)} V_1^{(5)} V_2^{(5)} \dots V_9^{(5)} \end{bmatrix}^T$$

B matrisin yapısı hakkındaki ayrıntılı açıklama Bölüm 2.3.3'de verilmiştir. Bara Admitans Matrisi'nin hesaplanması lineer sistemdeki ile aynı olmakla beraber. Hattın empedansı, harmonik mertebesi (n) olmak üzere ana harmonikteki empedansın imajiner bileşeni harmonik mertebesi ile çarpılmak suretiyle  $Z = R + j(n * X)$  şeklinde olur; hattın şönt admitansı ise ana harmonikteki admitans harmonik mertebesine bölünmek suretiyle  $Y = \frac{Y}{n}$  şeklinde olur. Nonlineer yükün 5. baraya bağlandığı durum için

Harmonik güç Akışı Algoritması kodları **EK-2**'de, bu kodlar çalıştırıldığında alınacak sonuçlar ise Ana Harmonik ve 5. Harmonik için sırasıyla Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da verilmiştir. Nonlineer yükün 7. baraya bağlandığı durum için Harmonik güç Akışı Algoritması kodları **EK-3**'de, bu kodlar çalıştırıldığında alınacak sonuçlar ise Ana Harmonik ve 5. Harmonik için sırasıyla Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de verilmiştir. Nonlineer yükün 9. baraya bağlandığı durum için Harmonik güç Akışı Algoritması kodları **EK-4**'de, bu kodlar çalıştırıldığında alınacak sonuçlar ise Ana Harmonik ve 5. Harmonik için sırasıyla Çizelge 3.9 ve Çizelge 3.10'da verilmiştir.

**Çizelge 3.5.** 5 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları (Ana Harmonik).

| ANA HARMONİK  |                         |                                   |              |                              |                                |                                  |                                    |
|---------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Bara Numarası | Gerilim Genliği V1 (PU) | Gerilim Faz Açısı Delta1 (Derece) |              | Generatör Aktif Güçleri (PU) | Generatör Reaktif Güçleri (PU) | Hatlardan Akan Aktif Güçler (PU) | Hatlardan Akan Reaktif Güçler (PU) |
|               |                         | Gerçek Değerler                   | Esas Ölçüler |                              |                                |                                  |                                    |
| 1             | 1.0400                  | 0                                 | 0            | 0.4192                       | 0.4840                         | 0.4192                           | 0.4840                             |
| 2             | 1.0300                  | 10.8295                           | 10.8295      | 1.6300                       | 0.1389                         | 1.6300                           | 0.1389                             |
| 3             | 1.0400                  | 8.2033                            | 8.2033       | 0.8500                       | 0.1435                         | 0.8500                           | 0.1435                             |
| 4             | 1.0135                  | -1.3126                           | 358.6874     |                              |                                | -0.1186e-006                     | 0.6307e-008                        |
| 5             | 0.9804                  | -1.3013                           | 358.6987     |                              |                                | -0.6000                          | -0.7000                            |
| 6             | 1.0294                  | 3.6129                            | 3.6129       |                              |                                | 0.0000                           | -2.0e-15                           |
| 7             | 1.0155                  | 2.5376                            | 2.5376       |                              |                                | -1.0000                          | -0.3500                            |
| 8             | 1.0264                  | 5.2994                            | 5.2994       |                              |                                | -1.0e-15                         | 3.0e-15                            |
| 9             | 0.9867                  | -2.8864                           | 357.1136     |                              |                                | -1.2500                          | -0.5000                            |

**Çizelge 3.6.** 5 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları(5. Harmonik).

| 5. HARMONİK   |                         |                                  |              |                              |                                |                                     |                                       |
|---------------|-------------------------|----------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Bara Numarası | Gerilim Genliği V5 (PU) | Gerilim Faz Açısı Delta5(Derece) |              | Generatör Aktif Güçleri (PU) | Generatör Reaktif Güçleri (PU) | Hatlardan Akan Aktif Güçler P5 (PU) | Hatlardan Akan Reaktif Güçler Q5 (PU) |
|               |                         | Gerçek Değerler (1.0e+004 *)     | Esas Ölçüler |                              |                                |                                     |                                       |
| 1             | -0.0001                 | 0.1166                           | 85.7720      | 0.4192                       | 0.4840                         |                                     |                                       |
| 2             | 0.00002323              | 0.2427                           | 267.0243     | 1.6300                       | 0.1389                         |                                     |                                       |
| 3             | -0.00003253             | 0.0446                           | 86.1563      | 0.8500                       | 0.1435                         |                                     |                                       |
| 4             | 0.0386                  | 0.1346                           | 265.7720     |                              |                                |                                     |                                       |
| 5             | 0.1081                  | 0.0265                           | 264.5119     |                              |                                | 7.2217e-004                         | 0.0253                                |
| 6             | -0.0328                 | 0.0806                           | 86.1563      |                              |                                |                                     |                                       |
| 7             | 0.0238                  | 0.1707                           | 266.5184     |                              |                                |                                     |                                       |
| 8             | -0.0145                 | -1.6833                          | 87.0243      |                              |                                |                                     |                                       |
| 9             | 0.0307                  | 0.0266                           | 265.7903     |                              |                                |                                     |                                       |

**Çizelge 3.7.** 7 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları (Ana Harmonik).

| ANA HARMONİK  |                         |                                   |              |                              |                                |                                  |                                    |
|---------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Bara Numarası | Gerilim Genliği V1 (PU) | Gerilim Faz Açısı Delta1 (Derece) |              | Generatör Aktif Güçleri (PU) | Generatör Reaktif Güçleri (PU) | Hatlardan Akan Aktif Güçler (PU) | Hatlardan Akan Reaktif Güçler (PU) |
|               |                         | Gerçek Değerler                   | Esas Ölçüler |                              |                                |                                  |                                    |
| 1             | 1.0400                  | 0                                 | 0            | 0.3368                       | 0.3608                         | 0.3368                           | 0.3608                             |
| 2             | 1.0300                  | 13.5711                           | 13.5711      | 1.6300                       | 0.2441                         | 1.6300                           | 0.2441                             |
| 3             | 1.0400                  | 10.5031                           | 10.5031      | 0.8500                       | 0.1748                         | 0.8500                           | 0.1748                             |
| 4             | 1.0202                  | -1.0477                           | 358.9523     |                              |                                | -0.114e-11                       | 0.71e-12                           |
| 5             | 1.0050                  | -1.5931                           | 358.4069     |                              |                                | -0.9000                          | -0.3000                            |
| 6             | 1.0264                  | 5.8991                            | 5.8991       |                              |                                | -0.884e-11                       | 0.84e-12                           |
| 7             | 0.9996                  | 5.9093                            | 5.9093       |                              |                                | -0.6000                          | -0.7000                            |
| 8             | 1.0200                  | 8.0065                            | 8.0065       |                              |                                | 0.188408e-06                     | 0.12859e-07                        |
| 9             | 0.9869                  | -1.8199                           | 358.1801     |                              |                                | -1.2500                          | -0.5000                            |

**Çizelge 3.8.** 7 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları(5. Harmonik).

| 5. HARMONİK   |                         |                                  |              |                              |                                |                                     |                                       |
|---------------|-------------------------|----------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Bara Numarası | Gerilim Genliği V5 (PU) | Gerilim Faz Açısı Delta5(Derece) |              | Generatör Aktif Güçleri (PU) | Generatör Reaktif Güçleri (PU) | Hatlardan Akan Aktif Güçler P5 (PU) | Hatlardan Akan Reaktif Güçler Q5 (PU) |
|               |                         | Gerçek Değerler (1.0e+003 *)     | Esas Ölçüler |                              |                                |                                     |                                       |
| 1             | 0.0000233               | -0.0711                          | 288.8717     | 0.3368                       | 0.3608                         |                                     |                                       |
| 2             | 0.0001                  | 0.6474                           | 287.3712     | 1.6300                       | 0.2441                         |                                     |                                       |
| 3             | 0.00004574              | 1.0074                           | 287.3924     | 0.8500                       | 0.1748                         |                                     |                                       |
| 4             | -0.0134                 | -0.2511                          | 108.8717     |                              |                                |                                     |                                       |
| 5             | -0.0253                 | -0.2520                          | 108.0267     |                              |                                |                                     |                                       |
| 6             | 0.0462                  | -0.0726                          | 287.3924     |                              |                                |                                     |                                       |
| 7             | 0.0871                  | -0.0733                          | 286.6907     |                              |                                | 3.6516e-004                         | 0.0216                                |
| 8             | 0.0376                  | -0.0726                          | 287.3712     |                              |                                |                                     |                                       |
| 9             | -0.0221                 | -0.2518                          | 108.1874     |                              |                                |                                     |                                       |

**Çizelge 3.9.** 9 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları (Ana Harmonik).

| ANA HARMONİK  |                         |                                   |              |                              |                                |                                  |                                    |
|---------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Bara Numarası | Gerilim Genliği V1 (PU) | Gerilim Faz Açısı Delta1 (Derece) |              | Generatör Aktif Güçleri (PU) | Generatör Reaktif Güçleri (PU) | Hatlardan Akan Aktif Güçler (PU) | Hatlardan Akan Reaktif Güçler (PU) |
|               |                         | Gerçek Değerler                   | Esas Ölçüler |                              |                                |                                  |                                    |
| 1             | 1.0400                  | 0                                 | 0            | 1.3411                       | 0.8224                         | 1.3411                           | 0.8224                             |
| 2             | 1.0300                  | 5.4848                            | 5.4848       | 1.6300                       | 0.3958                         | 1.6300                           | 0.3958                             |
| 3             | 1.0400                  | 2.9031                            | 2.9031       | 0.8500                       | 0.1637                         | 0.8500                           | 0.1637                             |
| 4             | 0.9972                  | -4.2716                           | 355.7284     |                              |                                | -0.0000                          | 0.0000                             |
| 5             | 0.9920                  | -6.3908                           | 353.6092     |                              |                                | -0.9000                          | -0.3000                            |
| 6             | 1.0274                  | -1.6961                           | 358.3039     |                              |                                | 0.0000                           | 0.0000                             |
| 7             | 1.0066                  | -2.8614                           | 357.1386     |                              |                                | -1.0000                          | -0.3500                            |
| 8             | 1.0108                  | -0.1305                           | 359.8695     |                              |                                | 0.0000                           | 0.0000                             |
| 9             | 0.9167                  | -8.7690                           | 351.2310     |                              |                                | -1.8500                          | -1.2000                            |

**Çizelge 3.10.** 9 Numaralı Bara İçin Harmonik Güç Akışı Sonuçları(5. Harmonik).

| 5. HARMONİK   |                         |                                  |              |                              |                                |                                     |                                       |
|---------------|-------------------------|----------------------------------|--------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Bara Numarası | Gerilim Genliği V5 (PU) | Gerilim Faz Açısı Delta5(Derece) |              | Generatör Aktif Güçleri (PU) | Generatör Reaktif Güçleri (PU) | Hatlardan Akan Aktif Güçler P5 (PU) | Hatlardan Akan Reaktif Güçler Q5 (PU) |
|               |                         | Gerçek Değerler                  | Esas Ölçüler |                              |                                |                                     |                                       |
| 1             | -0.0001                 | 63.3300                          | 63.3300      | 1.3411                       | 0.8224                         |                                     |                                       |
| 2             | -0.00005391             | 64.2210                          | 64.2210      | 1.6300                       | 0.3958                         |                                     |                                       |
| 3             | -0.000033215            | 64.7822                          | 64.7822      | 0.8500                       | 0.1637                         |                                     |                                       |
| 4             | 0.0311                  | -116.6700                        | 243.3300     |                              |                                |                                     |                                       |
| 5             | -0.0252                 | 63.4781                          | 63.4781      |                              |                                |                                     |                                       |
| 6             | -0.0131                 | 64.7822                          | 64.7822      |                              |                                |                                     |                                       |
| 7             | 0.0170                  | 604.3669                         | 244.3669     |                              |                                |                                     |                                       |
| 8             | -0.0208                 | -295.7790                        | 64.2210      |                              |                                |                                     |                                       |
| 9             | -0.0820                 | 62.5934                          | 62.5934      |                              |                                | 3.4107e-004                         | 0.0157                                |

### 3.2. P-V EĞRİLERİ İLE KRİTİK DEĞERLERİN HESAPLANMASI

Bu bölümde, Bölüm 3.1.2'de belirtilen nonlineer yük, IEEE Standart 9 Baralı Sistemi'nde sırasıyla 5, 7 ve 9 numaralı yük baralarına bağlanarak elde edilen P-V Eğrileri üzerinden bir yargıya varılmıştır. İşlemler, 5 numaralı yük barası üzerinde ayrıntılı olarak açıklanmış; diğer yük baraları için ise doğrudan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

#### 3.2.1. Ana Harmonik İçin Kritik Değerler

Kritik değerleri aranan bara 5 numaralı bara ve 1 numaralı bara salınım barası olduğundan 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 numaralı baraların güç akışı sonucunda elde edilen güçleri admitansa dönüştürülüp bara admitans matrisine eklenecek.

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (3.2)$$

$$\varphi_i = \tan^{-1}\left(\frac{Q_i}{P_i}\right) \quad (3.3)$$

$$Z_i = \frac{v_i}{I_i} * e^{j*\varphi} = \frac{v_i^2}{v_i * I_i} * e^{j*\varphi} = \frac{v_i^2}{S_i} * e^{j*\varphi} \quad (3.4)$$

$$y_i = \frac{1}{Z_i} \quad (3.5)$$

Eşitlikleri kullanılarak baralara ait güçler admitansa çevrilir. Güç akışı sonuçları ve yukarıdaki eşitlikler kullanıldığında sırasıyla 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 numaralı baralar için Çizelge 3.11 deki sonuçlar hesaplanır.

**Çizelge 3.11.** Ana Harmonik İçin Hesaplanan Empedans Ve Admitans Değerleri.

| <b>z</b>           | <b>yy</b>          |
|--------------------|--------------------|
| 1.0e+006 *         |                    |
| 0.000000375527336  | 2.662921987056606  |
| 0.000000523161803  | 1.911454533676190  |
| 6.015866759501303  | 0.000000166227086  |
| -0.093587854665401 | -0.000010685147165 |
| -0.000000248804189 | -4.019224938312695 |
| -0.161863799349184 | -0.000006178033656 |
| -0.000000169589896 | -5.896577692010359 |

Sistemin bara admitans matrisi:

$$\begin{bmatrix}
 0 & -17.3611i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -16.0000i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +16.0000i \\
 0 & 0 & 0 & -9.9206i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & +17.3611i & 0 & 0 & 3.3074 & -39.3089i & -1.9422 & +10.5107i & 0 & 0 & -1.3652 & +11.6041i \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1.9422 & +10.5107i & 3.2242 & -15.8409i & -1.2820 & +5.5882i & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.2820 & +5.5882i & 3.5165 & -28.7750i & -2.2345 & +13.5196i \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.2345 & +13.5196i & 3.8516 & -27.0686i & -1.6171 & +13.6980i \\
 0 & 0 & +16.0000i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.6171 & +13.6980i & 2.8047 & -35.4456i & -1.1876 & +5.9751i \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -1.3652 & +11.6041i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.1876 & +5.9751i & 2.5528 & -17.3382i
 \end{bmatrix}$$

(3.6)

Sistemin bara admitans matrisinin yeni köşegen elemanları aşağıdaki gibi olur.

$$y_{22}=y_{bus1(2,2)}-yy(2)= (0 -16.0000i) - (2.662921987056606)$$

$$y_{33}=y_{bus1(3,3)}-yy(3)= (0 -9.9206i) - (1.911454533676190)$$

$$y_{44}=y_{bus1(4,4)}+yy(4)= (3.3074 -39.3089i)+(0.000000166227086)$$

$$y_{66}=y_{bus1(6,6)}+yy(6)= (3.5165 -28.7750i)+(-0.000010685147165)$$

$$y_{77}=y_{bus1(7,7)}+yy(7)= (3.8516 -27.0686i)+(-4.019224938312695)$$

$$y_{88}=y_{bus1}(8,8)+yy(8)= (2.8047 -35.4456i)+(-0.000006178033656)$$

$$y_{99}=y_{bus1}(9,9)+yy(9)= (2.5528 -17.3382i)+(-5.896577692010359)$$

$$y_{22} = -2.6629 -16.0000i \quad y_{77} = -0.1676 -27.0686i$$

$$y_{33} = -1.9115 - 9.9206i \quad y_{88} = 2.8047 -35.4456i$$

$$y_{44} = 3.3074 -39.3089i \quad y_{99} = -3.3438 -17.3382i$$

$$y_{66} = 3.5165 -28.7750i$$

Şeklinde hesaplanır. Sistemin bara admitans matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} & Y_{17} & Y_{18} & Y_{19} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} & Y_{27} & Y_{28} & Y_{29} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} & Y_{37} & Y_{38} & Y_{39} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} & Y_{47} & Y_{48} & Y_{49} \\ Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} & Y_{57} & Y_{58} & Y_{59} \\ Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} & Y_{67} & Y_{68} & Y_{69} \\ Y_{71} & Y_{72} & Y_{73} & Y_{74} & Y_{75} & Y_{76} & Y_{77} & Y_{78} & Y_{79} \\ Y_{81} & Y_{82} & Y_{83} & Y_{84} & Y_{85} & Y_{86} & Y_{87} & Y_{88} & Y_{89} \\ Y_{91} & Y_{92} & Y_{93} & Y_{94} & Y_{95} & Y_{96} & Y_{97} & Y_{98} & Y_{99} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Bara admitans matrisinde satırlar ve sütunlar üzerinde aşağıdaki değişiklik işlemleri yapılır:

- 1- 1. satır ile 5. satır yer değiştirir.
- 2- 1.sütun ile 5. sütun yer değiştirir.
- 3- 2.sütun ile 5. sütun yer değiştirir.
- 4- 2.satır ile 5. satır yer değiştirir.

Elde edilen yeni bara admitans matrisi

$$\begin{bmatrix}
 Y55 & Y51 & Y53 & Y54 & Y52 & Y56 & Y57 & Y58 & Y59 \\
 Y15 & Y11 & Y13 & Y14 & Y12 & Y16 & Y17 & Y18 & Y19 \\
 Y35 & Y31 & Y33 & Y34 & Y32 & Y36 & Y37 & Y38 & Y39 \\
 Y45 & Y41 & Y43 & Y44 & Y42 & Y46 & Y47 & Y48 & Y49 \\
 Y25 & Y21 & Y23 & Y24 & Y22 & Y26 & Y27 & Y28 & Y29 \\
 Y65 & Y61 & Y63 & Y64 & Y62 & Y66 & Y67 & Y68 & Y69 \\
 Y75 & Y71 & Y73 & Y74 & Y72 & Y76 & Y77 & Y78 & Y79 \\
 Y85 & Y81 & Y83 & Y84 & Y82 & Y86 & Y87 & Y88 & Y89 \\
 Y95 & Y91 & Y93 & Y94 & Y92 & Y96 & Y97 & Y98 & Y99
 \end{bmatrix}$$

(3.8)

Şeklinde olacaktır. Burada hesaplanan yeni ana köşegen elemanlarının ve diğer elemanların yerlerine yazılmasıyla sisteme ilişkin yeni bara admitans matrisi :

$$\begin{bmatrix}
 3.2242 -15.8409i & 0 & 0 & -1.9422 +10.5107i & 0 & -1.2820 + 5.5882i & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 -17.3611i & 0 & 0 +17.3611i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 1.9115 - 9.9206i & 0 & 0 & 0 + 9.9206i & 0 & 0 & 0 \\
 -1.9422 +10.5107i & 0 +17.3611i & 0 & 3.3074 -39.3089i & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.3652 +11.6041i \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6629 -16.0000i & 0 & 0 & 0 +16.0000i & 0 \\
 -1.2820 + 5.5882i & 0 & 0 + 9.9206i & 0 & 0 & 3.5165 -28.7750i & -2.2345 +13.5196i & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2.2345 +13.5196i & -0.1676 -27.0686i & -1.6171 +13.6980i & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 +16.0000i & 0 & -1.6171 +13.6980i & 2.8047 -35.4456i & -1.1876 + 5.9751i \\
 0 & 0 & 0 & -1.3652 +11.6041i & 0 & 0 & 0 & -1.1876 + 5.9751i & -3.3438 -17.3382i
 \end{bmatrix}$$

(3.9)

Şeklinde hesaplanır. Burada Bara admitans matrisi aşağıdaki gibi alt matislere ayrılır:



$$\begin{array}{c}
\begin{array}{cc}
K & L \\
\hline
\begin{array}{c}
Y55 \ Y51 \\
Y15 \ Y11 \\
\hline
Y35 \ Y31 \\
Y45 \ Y41 \\
Y25 \ Y21 \\
Y65 \ Y61 \\
Y75 \ Y71 \\
Y85 \ Y81 \\
Y95 \ Y91
\end{array}
&
\begin{array}{c}
Y53 \ Y54 \ Y52 \ Y56 \ Y57 \ Y58 \ Y59 \\
Y13 \ Y14 \ Y12 \ Y16 \ Y17 \ Y18 \ Y19 \\
\hline
Y33 \ Y34 \ Y32 \ Y36 \ Y37 \ Y38 \ Y39 \\
Y43 \ Y44 \ Y42 \ Y46 \ Y47 \ Y48 \ Y49 \\
Y23 \ Y24 \ Y22 \ Y26 \ Y27 \ Y28 \ Y29 \\
Y63 \ Y64 \ Y62 \ Y66 \ Y67 \ Y68 \ Y69 \\
Y73 \ Y74 \ Y72 \ Y76 \ Y77 \ Y78 \ Y79 \\
Y83 \ Y84 \ Y82 \ Y86 \ Y87 \ Y88 \ Y89 \\
Y93 \ Y94 \ Y92 \ Y96 \ Y97 \ Y98 \ Y99
\end{array}
\end{array} \\
L^T \\
M
\end{array}
\quad (3.10)$$

$$Y_{2 \times 2} = K - (L * M^{-1} * L^T) \quad (3.11)$$

Eşitliği kullanılarak sisteme ilişkin 2x2 boyutundaki matris elde edilir. Burada hesaplanan 2x2 lik matris aşağıdaki gibidir:

$$y_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} -0.1096 - 8.1194i & -1.8965 + 6.5471i \\ -1.8965 + 6.5471i & -0.4454 - 7.6224i \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Çizelge 3.11’de verilen empedans ve admitans değerlerini hesaplayarak bara indirgeme işlemini yapan ve sistemin 2x2 boyutundaki indirgenmiş bara admitans matrisini (y2x2) hesaplayan matlab programı kodları **EK-5**’de verilmiştir. Bu kodlar Ana Harmonik için ve göz önüne alınan diğer harmonikler için ayrı ayrı düzenlenerek her defasında güç akışı algoritmasının sonuna eklenmek suretiyle çalıştırılmaktadır. Program, güç akışında hesaplanan aktif güç, reaktif güç ve gerilim genlik değerlerini okuyarak güçleri admitansa dönüştürmekte ve sistemin yeni bara admitans matrisini hesaplayarak bara indirgeme işlemini yapmaktadır. Elde edilen 2x2 boyutundaki matrisin (y2x2) elemanlarını kullanarak hattın empedans(zh) ve admitans(Y) değerlerini hesaplamaktadır. Hesaplanan empedans ve admitans değerlerini kullanarak P-V eğrisinin çizdirildiği matlab program kodları **EK-6**’de verilmiştir. Bu kodlar çalıştırıldığında elde edilen PV Eğrisi Şekil 3.2 deki gibi olacaktır. Kritik Değerler ise Çizelge 3.13 de verilmiştir.

### 3.2.2. İEEE 9 Baralı Sistem 5. Harmonik İçin Kritik Değerler

Aynı işlemler sistemde 5. Harmonik olması durumu için de yapıldığında **EK-5**'de verilen kodlar yeni duruma göre düzenlenerek çalıştırıldığında elde edilen değerler aşağıdadır. Sırasıyla 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9 numaralı baralar için Çizelge 3.12 deki sonuçlar hesaplanır. Harmonikli durumda P-V eğrisinin elde edilebilmesi açısından hattın admitansı için 5, 7 ve 9 mumaralı baralar üzerindeki uygulamalarda aşağıda açıklanan kabule göre işlem yapılmıştır:

Programda hattın empedansına ait **Y/2** değeri 2x2'lik matrisin  $y_{11}$  ve  $y_{22}$  elemanları üzerinden sırasıyla **y1y** ve **y2y** olarak; admitans ise **Y=y1y+y2y** şeklinde hesaplanmaktadır. Burada **Y/2= y1y** olarak alınmış ve **Y=2\*y1y** olarak kabul edilmiştir.

**Çizelge 3.12.** 5.Harmonik İçin Hesaplanan Empedans ve Admitans Değerleri.

| <b>z =</b>         | <b>yy =</b>        |
|--------------------|--------------------|
| 1.0e+013 *         |                    |
| 0.000000000000037  | 2.714362494253601  |
| 0.000000000000051  | 1.979882838345071  |
| -0.000016641304347 | -0.000000006009144 |
| -6.629564411295256 | -0.000000000000015 |
| -0.000000000000025 | -4.021708804422862 |
| 4.424118486252184  | 0.000000000000023  |
| -0.000000000000017 | -5.900309950722769 |

Şeklinde olacaktır. Sistemin bara admitans matrisinin yeni köşegen elemanları aşağıdaki gibi olur.

$$y_{22}=y_{bus5(2,2)}-yy(2)= (0 - 2.6667i) - (2.714362494253601)$$

$$y_{33}=y_{bus5(3,3)}-yy(3)= (0 - 1.6534i) - (1.979882838345071)$$

$$y_{44}=y_{bus5(4,4)}+yy(4)= (0.1879 - 6.4556i) + (-0.000000006009144)$$

$$y_{66}=y_{bus5(6,6)}+yy(6)= (0.2017 - 4.6317i) + (-0.000000000000015)$$

$$y_{77}=y_{bus5(7,7)}+yy(7)= (0.2181 - 4.4402i) + (-4.021708804422862)$$

$$y_{88}=y_{bus5(8,8)}+yy(8)= (0.1592 - 5.7356i) + (0.000000000000023)$$

$$y_{99}=y_{bus5(9,9)}+yy(9)= (0.1451 - 2.6992i) + (-5.900309950722769)$$

$$\begin{aligned}
y_{22} &= -2.7144 - 2.6667i & y_{77} &= -3.8036 - 4.4402i \\
y_{33} &= -1.9799 - 1.6534i & y_{88} &= 0.1592 - 5.7356i \\
y_{44} &= 0.1879 - 6.4556i & y_{99} &= -5.7552 - 2.6992i \\
y_{66} &= 0.2017 - 4.6317i
\end{aligned}$$

Şeklinde hesaplanır. Sistemin bara admitans matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix}
Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} & Y_{15} & Y_{16} & Y_{17} & Y_{18} & Y_{19} \\
Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} & Y_{25} & Y_{26} & Y_{27} & Y_{28} & Y_{29} \\
Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} & Y_{35} & Y_{36} & Y_{37} & Y_{38} & Y_{39} \\
Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} & Y_{45} & Y_{46} & Y_{47} & Y_{48} & Y_{49} \\
Y_{51} & Y_{52} & Y_{53} & Y_{54} & Y_{55} & Y_{56} & Y_{57} & Y_{58} & Y_{59} \\
Y_{61} & Y_{62} & Y_{63} & Y_{64} & Y_{65} & Y_{66} & Y_{67} & Y_{68} & Y_{69} \\
Y_{71} & Y_{72} & Y_{73} & Y_{74} & Y_{75} & Y_{76} & Y_{77} & Y_{78} & Y_{79} \\
Y_{81} & Y_{82} & Y_{83} & Y_{84} & Y_{85} & Y_{86} & Y_{87} & Y_{88} & Y_{89} \\
Y_{91} & Y_{92} & Y_{93} & Y_{94} & Y_{95} & Y_{96} & Y_{97} & Y_{98} & Y_{99}
\end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Bara admitans matrisinde satırlar ve sütunlar üzerinde aşağıdaki değişiklik işlemleri yapılır:

- 1- 1. satır ile 5. satır yer değiştirir.
- 2- 1.sütun ile 5. sütun yer değiştirir.
- 3- 2.sütun ile 5. sütun yer değiştirir.
- 4- 2.satır ile 5. satır yer değiştirir.

Elde edilen yeni bara admitans matrisi

$$\begin{bmatrix}
 Y55 & Y51 & Y53 & Y54 & Y52 & Y56 & Y57 & Y58 & Y59 \\
 Y15 & Y11 & Y13 & Y14 & Y12 & Y16 & Y17 & Y18 & Y19 \\
 Y35 & Y31 & Y33 & Y34 & Y32 & Y36 & Y37 & Y38 & Y39 \\
 Y45 & Y41 & Y43 & Y44 & Y42 & Y46 & Y47 & Y48 & Y49 \\
 Y25 & Y21 & Y23 & Y24 & Y22 & Y26 & Y27 & Y28 & Y29 \\
 Y65 & Y61 & Y63 & Y64 & Y62 & Y66 & Y67 & Y68 & Y69 \\
 Y75 & Y71 & Y73 & Y74 & Y72 & Y76 & Y77 & Y78 & Y79 \\
 Y85 & Y81 & Y83 & Y84 & Y82 & Y86 & Y87 & Y88 & Y89 \\
 Y95 & Y91 & Y93 & Y94 & Y92 & Y96 & Y97 & Y98 & Y99
 \end{bmatrix}
 \quad (3.15)$$

Şeklinde olacaktır. Burada hesaplanan yeni ana köşegen elemanlarının ve diğer elemanların yerlerine yazılmasıyla sisteme ilişkin yeni bara admitans matrisi :

$$\begin{matrix}
 1.0e+003 * \\
 \begin{bmatrix}
 0.0001 - 0.0033i & 0 & 0 & -0.0001 + 0.0022i & 0 & -0.0001 + 0.0012i & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 - 2.0035i & 0 & 0 + 0.0035i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0.0020 - 2.0020i & 0 & 0 & 0 + 0.0020i & 0 & 0 & 0 \\
 -0.0001 + 0.0022i & 0 + 0.0035i & 0 & 0.0001 - 0.0080i & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0001 + 0.0024i \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0027 - 2.0032i & 0 & 0 & 0 + 0.0032i & 0 \\
 -0.0001 + 0.0012i & 0 & 0 + 0.0020i & 0 & 0 & 0.0001 - 0.0059i & -0.0001 + 0.0028i & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0001 + 0.0028i & -0.0039 - 0.0055i & -0.0001 + 0.0028i & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 + 0.0032i & 0 & -0.0001 + 0.0028i & 0.0001 - 0.0072i & -0.0000 + 0.0012i \\
 0 & 0 & 0 & -0.0001 + 0.0024i & 0 & 0 & 0 & -0.0000 + 0.0012i & -0.0058 - 0.0035i
 \end{bmatrix}
 \end{matrix}
 \quad (3.16)$$

Şeklinde hesaplanır. Burada Bara admitans matrisi aşağıdaki gibi alt matrislere ayrılır:

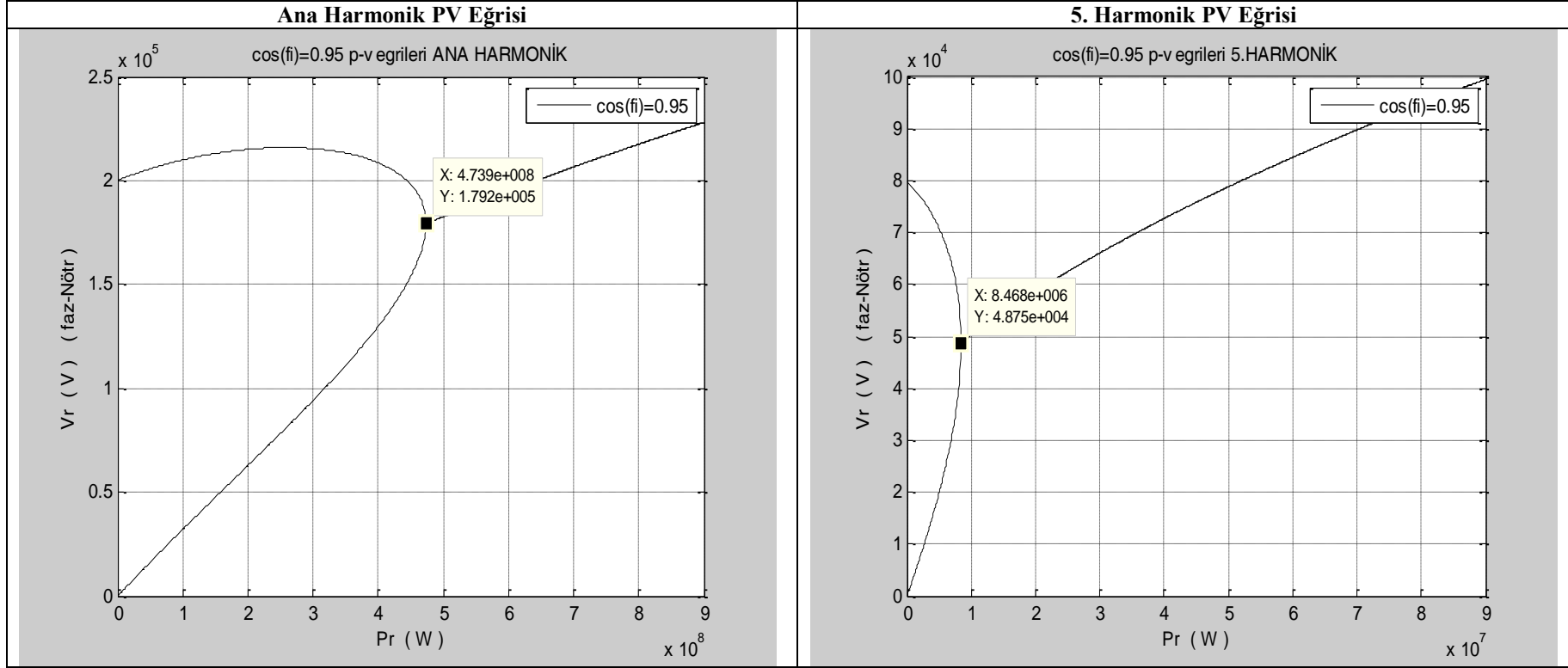
$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c} K \\ \hline Y55 \ Y51 \\ Y15 \ Y11 \\ \hline Y35 \ Y31 \\ Y45 \ Y41 \\ Y25 \ Y21 \\ Y65 \ Y61 \\ Y75 \ Y71 \\ Y85 \ Y81 \\ Y95 \ Y91 \end{array} \\
L^T \\
\begin{array}{c} L \\ \hline Y53 \ Y54 \ Y52 \ Y56 \ Y57 \ Y58 \ Y59 \\ Y13 \ Y14 \ Y12 \ Y16 \ Y17 \ Y18 \ Y19 \\ \hline Y33 \ Y34 \ Y32 \ Y36 \ Y37 \ Y38 \ Y39 \\ Y43 \ Y44 \ Y42 \ Y46 \ Y47 \ Y48 \ Y49 \\ Y23 \ Y24 \ Y22 \ Y26 \ Y27 \ Y28 \ Y29 \\ Y63 \ Y64 \ Y62 \ Y66 \ Y67 \ Y68 \ Y69 \\ Y73 \ Y74 \ Y72 \ Y76 \ Y77 \ Y78 \ Y79 \\ Y83 \ Y84 \ Y82 \ Y86 \ Y87 \ Y88 \ Y89 \\ Y93 \ Y94 \ Y92 \ Y96 \ Y97 \ Y98 \ Y99 \end{array} \\
M
\end{array}
\quad (3.17)$$

$$Y_{2 \times 2} = K - (L * M^{-1} * L^T) \quad (3.18)$$

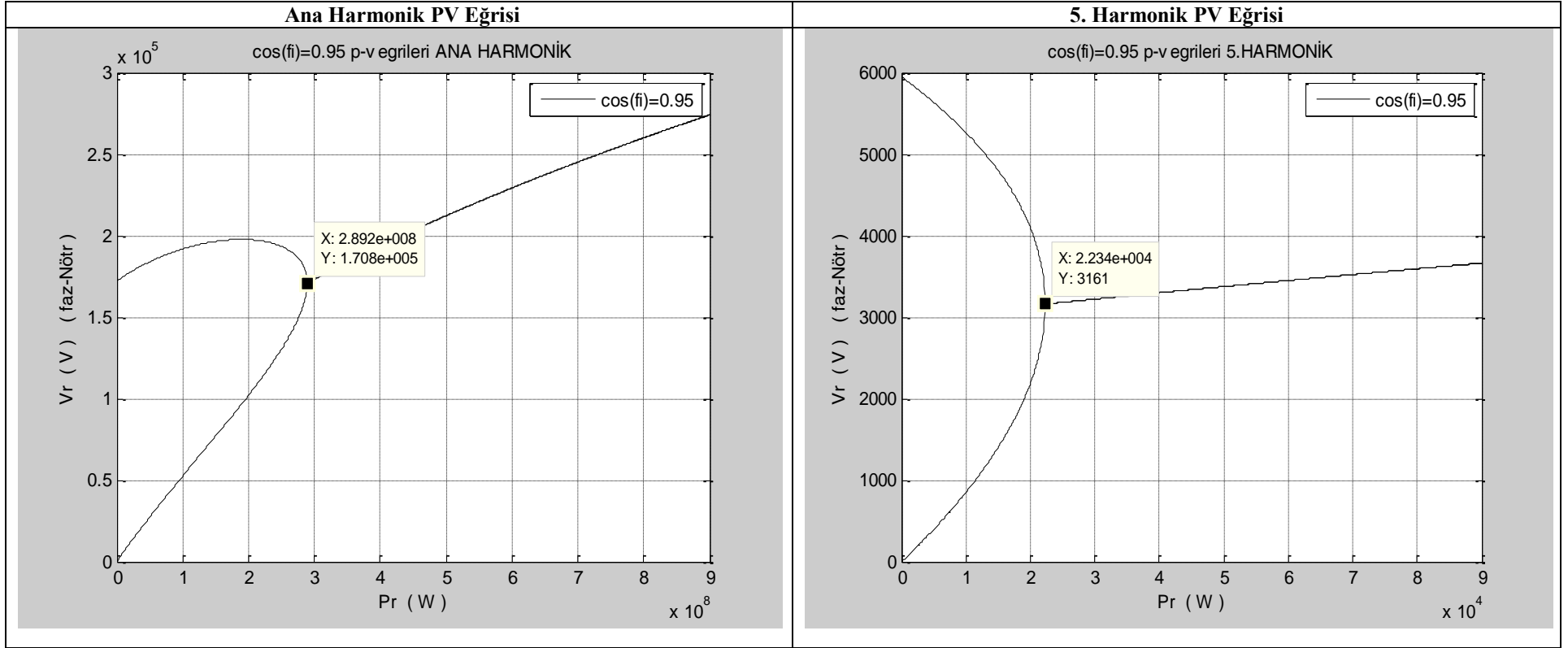
Eşitliği kullanılarak sisteme ilişkin 2x2 boyutundaki matris elde edilir. Burada hesaplanan 2x2 lik matris aşağıdaki gibidir:

$$y_{2 \times 2} = 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -0.0000 - 0.0024i & -0.0001 + 0.0010i \\ -0.0001 + 0.0010i & -0.0001 - 2.0019i \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

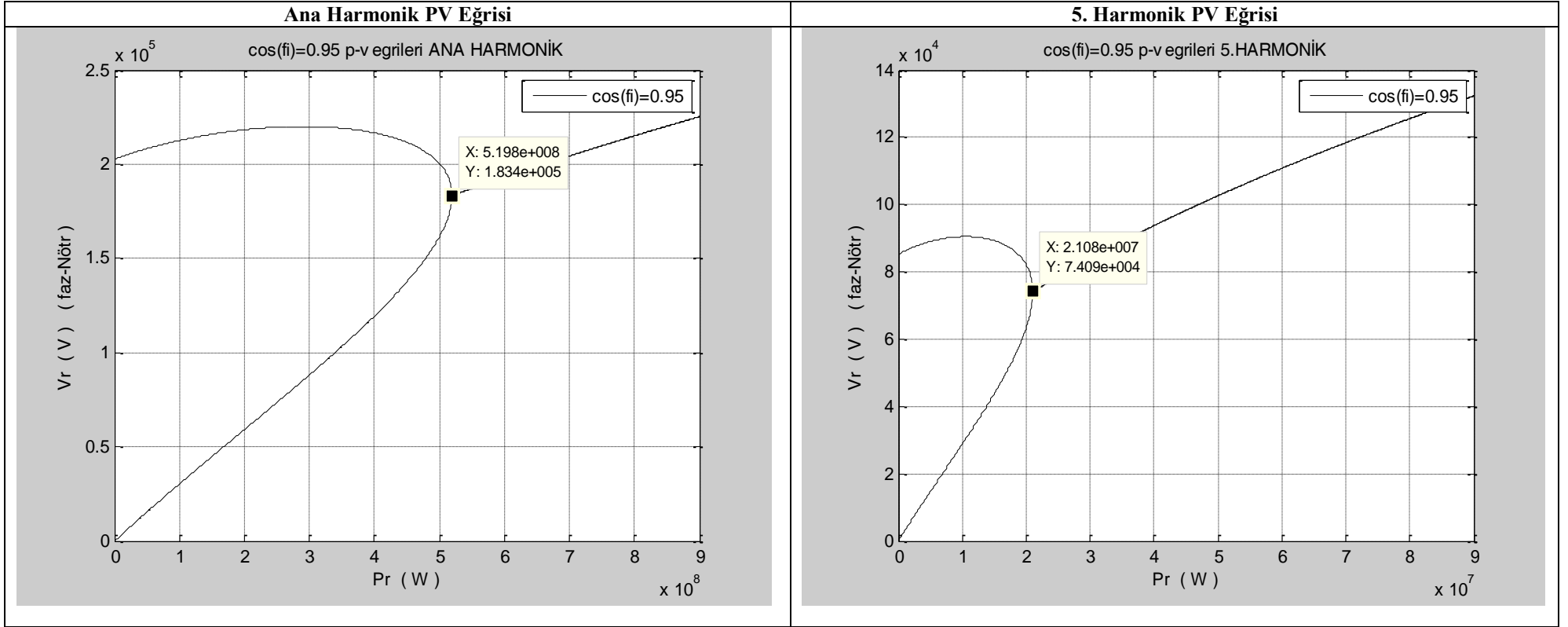
Çizelge 3.12’de verilen empedans ve admitans değerlerini hesaplayarak bara indirgeme işlemini yapan ve sistemin 2x2 boyutundaki indirgenmiş bara admitans matrisini (y<sub>2x2</sub>) hesaplayan matlab programı kodları **EK-7**’de verilmiştir. Bu kodların çalıştırılması ile hesaplanan empedans ve admitans değerlerini kullanarak P-V eğrisinin çizdirildiği matlab program kodları **EK-8**’de verilmiştir. Bu kodlar çalıştırıldığında elde edilecek PV eğrisi Şekil 3.2 deki gibi olacaktır. Kritik Değerler ise Çizelge 3.13 de verilmiştir. Aynı şekilde 7 ve 9 numaralı yük baraları için elde edilen PV eğriler sırasıyla Şekil 3.13 ve Şekil 3.4’de, Kritik Değerler ise sırasıyla Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15’de verilmiştir.



Şekil 3.2. 5 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin PV Eğrileri



**Şekil 3.3.** 7 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin PV Eğrileri



**Şekil 3.4.** 9 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin PV Eğrileri



**Çizelge 3.13.** 5 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin Kritik Değerler.

|                | <b>Ana Harmonik</b> | <b>5.Harmonik</b> | <b>Ana Harmonik+5.Harmonik Birlikte Etkisi</b>    |
|----------------|---------------------|-------------------|---|
| <b>Pkritik</b> | 473.9 MW            | 8.468 MW          | $\sqrt{((473.9)^2 + (8.468)^2)} = 473.9756502$ MW |
| <b>Vkritik</b> | 179.2 KV            | 48.75 KV          | $\sqrt{((179.2)^2 + (48.75)^2)} = 185.712688$ KV  |

**Çizelge 3.14** 7 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin Kritik Değerler

|                | <b>Ana Harmonik</b> | <b>5.Harmonik</b> | <b>Ana Harmonik+5.Harmonik Birlikte Etkisi</b>     |
|----------------|---------------------|-------------------|--|
| <b>Pkritik</b> | 289.2 MW            | 0.2234 MW         | $\sqrt{((289.2)^2 + (0.2234)^2)} = 289.2000863$ MW |
| <b>Vkritik</b> | 170.8 KV            | 3.161 KV          | $\sqrt{((170.8)^2 + (3.161)^2)} = 170.8292479$ KV  |

**Çizelge 3.15.** 9 Numaralı Bara Ana Harmonik ve 5. Harmonik İçin Kritik Değerler

|                | <b>Ana Harmonik</b> | <b>5.Harmonik</b> | <b>Ana Harmonik+5.Harmonik Birlikte Etkisi</b>    |
|----------------|---------------------|-------------------|---|
| <b>Pkritik</b> | 519.8 MW            | 21.08 MW          | $\sqrt{((519.8)^2 + (21.08)^2)} = 520.2272642$ MW |
| <b>Vkritik</b> | 183.4 Kv            | 74.09 Kv          | $\sqrt{((183.4)^2 + (74.09)^2)} = 197.8001216$ KV |

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Harmonik bileşenlerin güç sisteminde kararlılık kritik değerleri üzerinde olumsuz etkilere sebep olduğu görülmektedir. Harmonikli durumda sistemdeki kritik gerilim ve kritik güç değerlerinin her ikisi de artmaktadır. Artış oranı nonlineer yükün bağlandığı baraya bağlı olarak değişmekle birlikte sonuçta her iki değerde de artış gözlenmektedir. Kritik gücün artması olumlu olsa da kritik gerilimin artması kararlılık açısından olumsuzdur. Günümüzde hızlı teknolojik gelişmeler neticesinde neredeyse her geçen gün insan hayatına yeni cihazlar girmektedir. Bu cihazlar yarı iletkenler (örneğin diyot, transistör, entegreler v.s.), bobinler gibi nonlineer elemanlar içerdiği için güç sistemlerinde oluşan harmonik bileşenler artmaktadır. Dolayısı ile güç sistemlerinde harmonik bileşenlerin mutlaka kontrol altında tutulması gereklidir. Bu iş için güç sisteminin harmonik analizinin yapılması gerekir. Elde edilen veriler ışığında sistemin özelliklerine uygun olarak tasarlanan harmonik filtreleri ile harmonik distorsiyonu azaltılabilir. Harmonik Filtre tasarımları yapılarak bu çalışma bir adım daha ileri götürülebilir.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] : BİLGE M. Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Eliminasyonu *Yüksek Lisans Tezi*, Kahraman Maraş Sütçü İmam Üniversitesi, (2008)
- [2] : İLASLANER İ. Güç Kalitesinde Harmonikler Ve Filtrelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, (2006).
- [3] : KOCATEPE C., UZUNOĞLU M., YUMURTACI R., KARAKAŞ A., ARIKAN O., *Elektrik Tesislerinde Harmonikler* , 1.Baskı, Birsen Yayınevi (2003).
- [4] : CANER F. Güç Sistemlerinde Harmonikler Ve Filtrelemelerin İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi, (2006).
- [5] : ÇELİK Ç. Dağıtım Sistemlerinde Enerji Kalitesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, (2008).
- [6] : ÖZSÜREKÇİ O. Filtreli Dinamik Kompanzasyon, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, (2008).
- [7] : BAYSAL M., Harmonik İçeren Güç Sistemlerinin Gerilim Kararlılığının Yük Modellemeleri Ve Facts Elemanları Bakımından İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi , (2008).
- [8] : Efe S. B. Güç Sistemlerinde Harmonikler Ve Harmoniklerin Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi, (2006).
- [9] : ŞENYURT Ö., Elektrik Tesislerinde Harmonikler, *Gazi Üniversitesi Yüksek Lisans Semineri* , (2005).
- [10] : UĞUROĞLU A., *Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi*,1.Baskı, Alfa Basım Yayım Dağıtım Ltd.Şti., (2002).
- [11] : AYDEMİR E. O., Elektrik Sistemlerinde Harmonik Güç Akışı , *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, (2009)
- [12] : BAŞARAN Ü. Türkiye'deki 380 Kv' Luk Enterkonnekte Güç Sisteminde Çeşitli Güç Akışı Ve Ekonomik Dağıtım Analizleri, *Yüksek Lisans Tezi*, Anadolu Üniv.,(2004).
- [13] : STEVEN C .C, CANALE R.P., Çevirenler (HEPERKAN H., KESGİN U.), *Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler*, 4. Baskı, Literatür Yayıncılık (2008).

- [14] : ÖZTÜRK A., Güç Sistemlerindeki Gerilim Kararlılığının Genetik Algoritma İle İncelenmesi, *Doktora Tezi* , Sakarya Üniversitesi, (2007).
- [15] : ÖZTÜRK O., Dağıtım Sistemlerinde Harmonikli Güç akışı Algoritmalarının ve Yük Modellerinin Karşılaştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yük. Tek. Ens., (2011).
- [16] : BAYRAK M. Elektrik Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi
- [17] : ERTAY M., ALBOYACI B., DURU H.T., VE YEĞİN E.M. Endüstriyel Güç Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Yok Edilmesi, *IV Enerji Verimliliği Sempozyumu EVK(2011)*, (2011), 58-63.
- [18] : TUNÇALP K., KAKİLLİ A., SUCU M. Bir Alçak Gerilim Elektrik Enerji Tesisinde Harmonik Ölçüm Sonuçlarının Matlab’de Simülasyonu Ve Pasif Filtre Uygulaması, *Türkiye 9. Enerji Kongresi*, (2003).
- [19] : NİL MUSTAFA, DEMİR M., NİL METİN, ÇAKIR B. Eviricilerde Yumuşak Geçiş Tekniklerinin İncelenmesi MTBF Analizi Ve Harmoniklerin Azaltılmasında Kullanılan Yöntemler, *Tmmob Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, (2011), 30-35.
- [20] : KAKİLLİ A. TUNÇALP K. VE SUCU M. Harmoniklerin Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemlerine Etkilerinin İncelenmesi Ve Simülasyonu, *Fırat Üniv. Fen Ve Müh. Bil. Dergisi* 20 (1), (2008), 109-115.
- [21] : DEMİRBAŞ Ş., BAYHAN S., Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Gerçek Zamanlı Ölçüm Ve Analizi *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Cilt 24, No 3, (2009), 461-468.
- [22] : TUNÇALP K. ve SUCU M., Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinde Pasif Filtre Ve Filtreli Kompanzasyonun Kullanımı Ve Simülasyon Örnekleri, *Politeknik Dergisi*, Cilt: 9, Sayı: 4 , (2006), 263-269.
- [23] : DAĞ O. USTA Ö., UÇAK C., Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Kaynaklarının Yerinin Saptanması, *İtü dergisi/D Mühendislik*, Cilt:10, Sayı:1,(2011), 111-122 .
- [24] : SEVGİ L., EMC Güç kalitesi ve Harmonik Analizi, *Endüstriyel & Otomasyon*, (2005)
- [25] : KOCATEPE C., KÖROĞLU S., ARIKAN O., Nonsinusoidal Şartlar Altında Güç Faktörünün Ve Güç Tanımlarının İncelenmesi, *Sigma Müh. ve Fen Bil. Dergisi*, 2005(2) (2005) 117-126.

## 6.EKLER

### EK-1. IEEE 9 Baralı Standart Sistemi Temel Bileşen Güç Akışı Matlab Kodları

```
clc
clear all
format short
nh=9; % hat bağlantı sayısı
nb=9;
ng=3;
epsi=1.0e-4; % programı durdurma toleransı
blt=[1 4 6 3 6 8 2 8 4;4 5 5 6 7 7 8 9 9];
zh1=[0+0.0576i 0.017+0.092i 0.039+0.17i 0+0.1008i 0.0119+0.072i 0.0085+0.072i 0+0.0625i
0.032+0.161i 0.01+0.085i];
ys1=[0 0.079i 0.179i 0 0.0745i 0.0745i 0 0.153i 0.088i];
v1=[1.04 1.03 1.04 1 1 1 1 1]; % ana harmonik genlik değerleri
delta1=[0 0 0 0 0 0 0 0]; % ana harmonik faz açısı değerleri
pg=[0 1.63 0.85 0 0 0 0 0]; % generatör aktif güçleri
py=[0 0 0 0 0.9 0 1 0 1.25]; % aktif yükler
qc=[0 0 0 0 0 0 0 0]; % Şönt reaktif üreteç güçleri
qy=[0 0 0 0 0.3 0 0.35 0 0.5]; % reaktif yükler
qg=[0 0 0 0 0 0 0 0]; % generatör reaktif güç değerleri
nn=2*nb-ng-1; % X vektöründeki eleman sayısı
%ANA HARMONİK (50 Hz)BARA ADMİTANS MATRİSİ HESAPLAMASI
ybus1=zeros(9,9);
for k=1:nb
    %Ana Köşegen Elemanlarının Hesabı
    for f=1:nh
        if blt(1,f)==k||blt(2,f)==k
            t=(1/zh1(f))+ys1(f);
            ybus1(k,k)=ybus1(k,k)+t ;
        end
    end
    %Ana Köşegen Dışındaki Elemanların Hesabı
    for d=1:nh
        for p=1:nb
            if blt(1,d)==k&blt(2,d)==p
                t=(-1/zh1(d));
                ybus1(k,p)=ybus1(k,p)+t;
                ybus1(p,k)=ybus1(k,p);
            end
        end
    end
end
end
end
%BARA ADMİTANS MATRİSİ ELEMENLARININ g VE b DEĞERLERİ HESAPLANIYOR
for k=1:nb
    for l=1:nb
        g1(k,l)=real(ybus1(k,l));
        b1(k,l)=imag(ybus1(k,l));
    end
end
end
%%% X DURUM DEĞİŞKEN VEKTÖRÜ OLUŞTURULUYOR%%%
x=zeros(14,1);
for k=2:9
    x(k-1)=delta1(k)*pi/180;
end
for k=9:14
    x(k)=v1(k-5);
end
```

```

end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%İTERASYON BAŞLIYOR%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
iter=0;
z=1;
while(z~=0);
iter=iter+1;
p=zeros(9,1);
q=zeros(9,1);
% delta P vektörü (P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9) HESAPLANIYOR%
delta=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
delta(i,j)=delta1(i)-delta1(j);
end
end
for i=2:nb
for j=1:nb
p(i)=p(i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
p(i)=v1(i)*p(i);
end
% delta q vektörü(Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9)HESAPLANIYOR
for i=4:nb
for j=1:nb
q(i)=q(i)+(v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
q(i)=v1(i)*q(i);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% fark güç ve akım değerleri hesaplanıyor%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
deltag=zeros(14,1);
for k=1:8
deltag(k)=p(k+1)-pg(k+1)+py(k+1);
end
for k=9:14
deltag(k)=q(k-5)-qc(k-5)+qy(k-5);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% JACOBIAN ALT MATRİS HESAPLAMALARI BAŞLADI
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% j1 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta1(k)-delta1(n);
end
end
j1=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j1(i,i)=j1(i,i)+(v1(j)*(-g1(i,j)*sin(delta(i,j))+b1(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
end
j1(i,i)=v1(i)*j1(i,i);
end
for i=1:9
for j=1:9
if (i~=j)
j1(i,j)=v1(i)*v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j1=j1(2:9,2:9);

```

```

%%%%%% j2 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j2=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j2(i,i)=j2(i,i)+(v1(i)*v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
j2(i,i)=(j2(i,i))+(2*v1(i)*g1(i,i));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j2(i,j)=v1(i)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j2=j2(2:9,4:9);
%%%%%%%% j3 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta1(k)-delta1(n);
end
end
j3=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j3(i,i)=j3(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
j3(i,i)=v1(i)*j3(i,i);
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j3(i,j)=-v1(i)*v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j3=j3(4:9,2:9);
%%%%%%%% j4 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j4=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j4(i,i)=j4(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
end
j4(i,i)=j4(i,i)-(2*v1(i)*b1(i,i));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j4(i,j)=v1(i)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j4=j4(4:9,4:9);
%%%%%%%% JACOBIAN OLUSTURULUYOR %%%%%%%%%

```

```

jac=[j1 j2;j3 j4 ];
%%%%%%Jacobian Matrisin tersi Hesapaniyor%%%%%%%%
jacters=inv(jac);
%%%%%%X vektörünün yeni değerleri hesaplaniyor%%%%%%%%
kontrol=abs(deltag)
x2=x-(jacters*deltag)
t=zeros(14,1);
h=zeros(14,1);
z=0;
for i=1:14
    if kontrol(i)>epsi
        t(i)=kontrol(i);
    else
        h(i)=kontrol(i);
    end
end
for i=1:14
    z=z+t(i);
end
x=x2
for k=2:9
    delta1(k)=x(k-1);
end
for k=4:9
    v1(k)=x(k+5);
end
disp('güç akısı programı'),disp(iter),disp('adımda sona ermistir')
end%%%%%While'nin end'i%%%%%%%%
format long
%%%%%% Bulunan değerlerin ekrana yazdırılması %%%%%%%%%
disp('*****')
disp('* SISTEM SONUÇLARI *')
disp('*****')
disp(' acilar (derece olarak) ')
disp('=====')
for k=1:nb;
    delta1(k)=delta1(k)*180/pi;
end;
delta1
disp(' gerilim genlikleri (birim olarak) ')
disp('=====')
v1
i=1;
p1=0;
for k=1:nb;
    delta1(k)=delta1(k)*pi/180;
end;
for j=1:nb
    p1=p1+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta1(i)-delta1(j))+b1(i,j)*sin(delta1(i)-delta1(j))));
end
p1=v1(i)*p1;
pg(1)=p1+py(1);
q1=0;
q2=0;
q3=0;
for j=1:nb
    q1=q1+(v1(j)*(g1(1,j)*sin(delta1(1)-delta1(j))-b1(1,j)*cos(delta1(1)-delta1(j))));
    q2=q2+(v1(j)*(g1(2,j)*sin(delta1(2)-delta1(j))-b1(2,j)*cos(delta1(2)-delta1(j))));
    q3=q3+(v1(j)*(g1(3,j)*sin(delta1(3)-delta1(j))-b1(3,j)*cos(delta1(3)-delta1(j))));
end
end

```



```

q1=v1(1)*q1;
q2=v1(2)*q2;
q3=v1(3)*q3;
qg(1)=q1+qy(1);
qg(2)=q2+qy(2);
qg(3)=q3+qy(3);
disp(' generatör aktif güçleri (birim olarak) ')
disp('=====')
pg
disp(' generatör reaktif güçleri (birim olarak) ')
disp('=====')
qg
disp(' hatlardan akan aktif güçler (birim olarak) ')
disp('=====')
p(1)=p1;
p
disp(' hatlardan akan reaktif güçler (birim olarak) ')
disp('=====')
q(1)=q1;
q(2)=q2;
q(3)=q3;
q
disp('iterasyon sayısı')
disp('=====')
iter

```

## EK-2. Harmonik Güç Akışı Matlab Kodları(Nonlinear Yük 5. Baraya Bağlı)

```
clc
clear all
format short
nh=9; % hat bağlantı sayısı
nb=9;%Bara sayısı
ng=3;%generatör sayısı
epsi=1.0e-4; % programı durdurma toleransı
blt=[1 4 6 3 6 8 2 8 4;4 5 5 6 7 7 8 9 9];
zh1=[0+0.0576i 0.017+0.092i 0.039+0.17i 0+0.1008i 0.0119+0.072i 0.0085+0.072i 0+0.0625i
0.032+0.161i 0.01+0.085i];
ys1=[0 0.079i 0.179i 0 0.0745i 0.0745i 0 0.153i 0.088i];
zh5=[0+(5*0.0576i) 0.017+(5*0.092i) 0.039+(5*0.17i) 0+(5*0.1008i) 0.0119+(5*0.072i)
0.0085+(5*0.072i) 0+(5*0.0625i) 0.032+(5*0.161i) 0.01+(5*0.085i)];
ys5=[0 (0.079i/5) (0.179i/5) 0 (0.0745i/5) (0.0745i/5) 0 (0.153i/5) (0.088i/5)];
v1=[1.04 1.03 1.04 1 1 1 1 1]; % ana harmonik genlik değerleri
delta1=[0 0 0 0 0 0 0 0];
v5=[0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1];
delta5=[0 0 0 0 0 0 0 0];
pg=[0 1.63 0.85 0 0 0 0 0]; % generatör aktif güçleri
py=[0 0 0 0 0.6 0 1 0 1.25]; % aktif yükler
qc=[0 0 0 0 0 0 0 0];%Şönt reaktif üreteç güçleri
qy=[0 0 0 0 0.7 0 0.35 0 0.5]; % reaktif yükler
qg=[0 0 0 0 0 0 0 0]; % generatör reaktif güç değerleri
nn=2*nb-ng-1;
%ANA HARMONİK (50 Hz)BARA ADMİTANS MATRİSİ HESAPLAMASI
ybus1=zeros(9,9);
for k=1:nb
    %Ana Köşegen Elemanlarının Hesabı
    for f=1:nh
        if blt(1,f)==k||blt(2,f)==k
            t=(1/zh1(f))+ys1(f);
            ybus1(k,k)=ybus1(k,k)+t ;
        end
    end
    %Ana Köşegen Dışındaki Elemanların Hesabı
    for d=1:nh
        for p=1:nb
            if blt(1,d)==k&blt(2,d)==p
                t=(-1/zh1(d));
                ybus1(k,p)=ybus1(k,p)+t;
                ybus1(p,k)=ybus1(k,p);
            end
        end
    end
end
end
end
%5. HARMONİK (250 Hz)BARA ADMİTANS MATRİSİ HESAPLAMASI
ybus5=zeros(9,9);
for k=1:nb
    %Ana Köşegen Elemanlarının Hesabı
    for f=1:nh
        if blt(1,f)==k||blt(2,f)==k
            t=(1/zh5(f))+ys5(f);
            ybus5(k,k)=ybus5(k,k)+t ;
        end
    end
end
%Ana Köşegen Dışındaki Elemanların Hesabı
```

```

for d=1:nh
for p=1:nb
if blt(1,d)==k&blt(2,d)==p
t=(-1/zh5(d));
ybus5(k,p)=ybus5(k,p)+t;
ybus5(p,k)=ybus5(k,p);
end
end
end
end
ybus5(1,1)=ybus5(1,1)+inv(1e-4*j*5);
ybus5(2,2)=ybus5(2,2)+inv(1e-4*j*5);
ybus5(3,3)=ybus5(3,3)+inv(1e-4*j*5);
%BARA ADMİTANS MATRİSİ ELEMANLARININ g VE b DEĞERLERİ HESAPLANIYOR
for k=1:nb
for l=1:nb
g1(k,l)=real(ybus1(k,l));
b1(k,l)=imag(ybus1(k,l));
g5(k,l)=real(ybus5(k,l));
b5(k,l)=imag(ybus5(k,l));
end
end
ybus1
ybus5
g1
b1
g5;
b5;
%%%%%%%%%% X DURUM DEĞİŞKEN VEKTÖRÜ OLUŞTURULUYOR %%%%%%%%%%
x=zeros(32,1);
for k=2:9
x(k-1)=delta1(k);
end
for k=9:14
x(k)=v1(k-5);
end
for k=1:9
x(k+14)=delta5(k);
x(k+23)=v5(k);
end
x
%%%%%%%%%%İTERASYON BAŞLIYOR%%%%%%%%%%
iter=0;
z=1;
while(z~=0);
iter=iter+1;
p=zeros(9,1);
q=zeros(9,1);
Ir5=zeros(9,1);
li5=zeros(9,1);
gr5=zeros(9,1);
gi5=zeros(9,1);
% delta P vektörü (P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9) HESAPLANIYOR%
delta=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
delta(i,j)=delta1(i)-delta1(j);
end
end
for i=2:nb

```

```

for j=1:nb
p(i)=p(i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
p(i)=v1(i)*p(i);
end
% deltaq vektörü(Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9)HESAPLANIYOR
for i=4:nb
for j=1:nb
q(i)=q(i)+(v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
q(i)=v1(i)*q(i);
end
% 5. harmonik aktif gücü hesaplanıyor
delta=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
delta(i,j)=delta5(i)-delta5(j);
end
end
i=5;
p5=0;
for j=1:nb
p5=p5+(v5(j)*(g5(i,j)*cos(delta(i,j))+b5(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
p5=v5(i)*p5;
p(5)=p(5)+p5; % 5. baradaki tüm harmonik aktif güç değerleri
% 5. harmonik reaktif gücü hesaplanıyor
delta=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
delta(i,j)=delta5(i)-delta5(j);
end
end
i=5;
q5=0;
for j=1:nb
q5=q5+(v5(j)*(g5(i,j)*sin(delta(i,j))-b5(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
q5=v5(i)*q5;
q(5)=q(5)+q5; % 7. baradaki tüm harmonik reaktif güç değerleri
% 5. harmonik reel akımları hesaplanıyor
for i=1:nb
for j=1:nb
Ir5(i)=Ir5(i)+(v5(j)*(g5(i,j)*cos(delta5(j))-b5(i,j)*sin(delta5(j))));
end
end
% 5. harmonik unreel akımları hesaplanıyor
for i=1:nb
for j=1:nb
Ii5(i)=Ii5(i)+(v5(j)*(g5(i,j)*sin(delta5(j))+b5(i,j)*cos(delta5(j))));
end
end
% 5. baradaki nonlinear akımlar hesaplanıyor
gr5(5)=0.25*((v1(5))^3)*cos(3*delta1(5))+0.15*((v5(5))^2)*cos(2*delta5(5));
gi5(5)=0.25*((v1(5))^3)*sin(3*delta1(5))+0.15*((v5(5))^2)*sin(2*delta5(5));
%%%%%%%%%%%% fark güç ve akım değerleri hesaplanıyor%%%%%%%%%%%%
deltag=zeros(32,1);
for k=1:8
deltag(k)=p(k+1)-pg(k+1)+py(k+1);
end

```

```

for k=9:14
deltag(k)=q(k-5)-qc(k-5)+qy(k-5);
end
for k=1:9
deltag(k+14)=Ir5(k)+gr5(k);
deltag(k+23)=li5(k)+gi5(k);
end
%%%%%% JACOBIAN ALT MATRIS HESAPLAMALARI BASLADI%%%%%
%%%%%%%%% j1 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta1(k)-delta1(n);
end
end
j1=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j1(i,i)=j1(i,i)+(v1(j)*(-g1(i,j)*sin(delta(i,j))+b1(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
end
j1(i,i)=v1(i)*j1(i,i);
end
for i=1:9
for j=1:9
if (i~=j)
j1(i,j)=v1(i)*v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j1=j1(2:9,2:9);
%%%%%%%%% j2 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%% OK
j2=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j2(i,i)=j2(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
j2(i,i)=(j2(i,i))+(2*v1(i)*g1(i,i));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j2(i,j)=v1(i)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j2=j2(2:9,4:9);
%%%%%%%%% j3 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta5(k)-delta5(n);
end
end
j3=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j3(i,i)=j3(i,i)+(v5(j)*(-g5(i,j)*sin(delta(i,j))+b5(i,j)*cos(delta(i,j))));

```

```

end
end
j3(i,i)=v5(i)*j3(i,i);
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j3(i,j)=v5(i)*v5(j)*(g5(i,j)*sin(delta(i,j))-b5(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j3=j3(2:9,1:9);
%%%%%% j4 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j4=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j4(i,i)=j4(i,i)+(v5(j)*(g5(i,j)*cos(delta(i,j))+b5(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
j4(i,i)=(j4(i,i)+(2*v5(i)*g5(i,i)));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j4(i,j)=v5(i)*(g5(i,j)*cos(delta(i,j))+b5(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j4=j4(2:9,1:9);
%%%%%% j5 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta1(k)-delta1(n);
end
end
j5=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j5(i,i)=j5(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
j5(i,i)=v1(i)*j5(i,i);
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j5(i,j)=-v1(i)*v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j5=j5(4:9,2:9);
%%%%%% j6 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j6=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j6(i,i)=j6(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j))));
end

```

```

end
j6(i,i)=j6(i,i)-(2*v1(i)*b1(i,i));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j6(i,j)=v1(i)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j6=j6(4:9,4:9);
%%%%%% j7 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta5(k)-delta5(n);
end
end
j7=zeros(9,9);
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j7(k,k)=j7(k,k)+(v5(n)*(g5(k,n)*cos(delta(k,n))+b5(k,n)*sin(delta(k,n))));
end
end
j7(k,k)=v5(k)*j7(k,k);
end
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j7(k,n)=-v5(k)*v5(n)*(g5(k,n)*cos(delta(k,n))+b5(k,n)*sin(delta(k,n)));
end
end
end
j7=j7(4:9,1:9);
%%%%%% j8 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j8=zeros(9,9);
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j8(k,k)=j8(k,k)+(v5(n)*(g5(k,n)*sin(delta(k,n))-b5(k,n)*cos(delta(k,n))));
end
end
j8(k,k)=j8(k,k)-(2*v5(k)*b5(k,k));
end
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j8(k,n)=v5(k)*(g5(k,n)*sin(delta(k,n))-b5(k,n)*cos(delta(k,n)));
end
end
end
j8=j8(4:9,1:9);
%%%%%% j9 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j9=zeros(9,8);
j9(5,4)=j9(5,4)-0.75*((v1(5))^3)*sin(3*delta1(5));
%%%%%% j10 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j10=zeros(9,6);
j10(5,2)=j10(5,2)+0.75*((v1(5))^2)*cos(3*delta1(5));
%%%%%% j11 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j11=zeros(9,9);

```

```

for k=1:9
for m=1:9
j11(k,m)=-v5(m)*(g5(k,m)*sin(delta5(m))+b5(k,m)*cos(delta5(m)));
end
end
j11(5,5)=j11(5,5)-0.30*((v5(5))^2)*sin(2*delta5(5));
%%%%%% j12 HESAPLANIYOR %%%%%%%
j12=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j12(k,m)=g5(k,m)*cos(delta5(m))-b5(k,m)*sin(delta5(m));
end
end
j12(5,5)=j12(5,5)+0.30*(v5(5))*cos(2*delta5(5));
%%%%%% j13 HESAPLANIYOR %%%%%%%
j13=zeros(9,8);
j13(5,4)=j13(5,4)+0.75*((v1(5))^3)*cos(3*delta1(5));
%%%%%% j14 HESAPLANIYOR %%%%%%%
j14=zeros(9,6);
j14(5,2)=j14(5,2)+0.75*((v1(5))^2)*sin(3*delta1(5));
%%%%%% j15 HESAPLANIYOR %%%%%%%
j15=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j15(k,m)=v5(m)*(g5(k,m)*cos(delta5(m))-b5(k,m)*sin(delta5(m)));
end
end
j15(5,5)=j15(5,5)+0.30*((v5(5))^2)*cos(2*delta5(5));
%%%%%% j16 HESAPLANIYOR %%%%%%%
j16=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j16(k,m)=g5(k,m)*sin(delta5(m))+b5(k,m)*cos(delta5(m));
end
end
j16(5,5)=j16(5,5)+0.30*(v5(5))*sin(2*delta5(5));
%%%%%% JACOBIAN OLUSTURULUYOR %%%%%%%
jac=[j1 j2 j3 j4 ;
j5 j6 j7 j8 ;
j9 j10 j11 j12 ;
j13 j14 j15 j16];
%%%%%% Jacobian Matrisin Tersisi Hesaplanıyor %%%%%%%
jacters=inv(jac);
%%%%%% X vektörünün yeni değerleri hesaplanıyor %%%%%%%
kontrol=abs(deltag)
x2=x-(jacters*deltag)
t=zeros(50,1);
h=zeros(50,1);
z=0;
for i=1:32
if kontrol(i)>epsi
t(i)=kontrol(i);
else
h(i)=kontrol(i);
end
end
for i=1:32
z=z+t(i);
end
x=x2

```



```

for k=2:9
delta1(k)=x(k-1);
end
for k=4:9
v1(k)=x(k+5);
end
for k=1:9
delta5(k)=x(k+14);
v5(k)=x(k+23);
end
disp('güç akısı programı'),disp(iter),disp('adımda sona ermistir')
end%%%%% While'nin end'i%% %% %% %%
%% %% %% %% Bulunan değerlerin ekrana yazdırılması%% %% %%
disp('*****')
disp('* SISTEM SONUÇLARI *')
disp('*****')
disp(' açılar (derece olarak) ')
disp('=====')
% Açılar Dereceye Çevriliyor
for k=1:nb;
delta1(k)=delta1(k)*180/pi;
delta5(k)=delta5(k)*180/pi;
end;
delta1
delta5
disp(' Açıların Esas Ölçüleri')
disp('=====')
% açılar 0-2? arasına çekiliyor(Esas ölçüleri hesaplanıyor)
for i=1:nb
if (delta1(i)>0&delta1(i)>360)
delta1(i)=mod(delta1(i),360);
end
if (delta1(i)<0 & abs(delta1(i))<360)
delta1(i)=360-abs(delta1(i));
end
if (delta1(i)<0 & abs(delta1(i))>360)
delta1(i)=360-(mod(abs(delta1(i),360)));
end
end
for i=1:nb
if (delta5(i)>0&delta5(i)>360)
delta5(i)=mod(delta5(i),360);
end
if (delta5(i)<0 & abs(delta5(i))<360)
delta5(i)=360-abs(delta5(i));
end
if (delta5(i)<0 & abs(delta5(i))>360)
delta5(i)=360-(mod(abs(delta5(i),360)));
end
end
delta1
delta5
disp(' gerilim genlikleri (birim olarak) ')
disp('=====')
v1
v5
i=1;
p1=0;
for k=1:nb;
delta1(k)=delta1(k)*pi/180;

```

```

end;
for j=1:nb
p1=p1+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta1(i)-delta1(j))+b1(i,j)*sin(delta1(i)-delta1(j))));
end
p1=v1(i)*p1;
pg(1)=p1+py(1);
q1=0;
q2=0;
q3=0;
for j=1:nb
q1=q1+(v1(j)*(g1(1,j)*sin(delta1(1)-delta1(j))-b1(1,j)*cos(delta1(1)-delta1(j))));
q2=q2+(v1(j)*(g1(2,j)*sin(delta1(2)-delta1(j))-b1(2,j)*cos(delta1(2)-delta1(j))));
q3=q3+(v1(j)*(g1(3,j)*sin(delta1(3)-delta1(j))-b1(3,j)*cos(delta1(3)-delta1(j))));
end
q1=v1(1)*q1;
q2=v1(2)*q2;
q3=v1(3)*q3;
qg(1)=q1+qy(1);
qg(2)=q2+qy(2);
qg(3)=q3+qy(3);
disp(' generatör aktif güçleri (birim olarak) ')
disp('=====')
pg
disp(' generatör reaktif güçleri (birim olarak) ')
disp('=====')
qg
disp(' hatlardan akan aktif güçler (birim olarak) ')
disp('=====')
p(1)=p1;
p
p5
disp(' hatlardan akan reaktif güçler (birim olarak) ')
disp('=====')
q(1)=q1;
q(2)=q2;
q(3)=q3;
q
q5
disp('iterasyon sayısı')
disp('=====')
iter

```

### EK-3. Harmonik Güç Akışı Matlab Kodları(Nonlinear Yük 7. Baraya Bağlı)

```
clc
clear all
format short
nh=9; % hat bağlantı sayısı
nb=9;%Bara sayısı
ng=3;%generatör sayısı
epsi=1.0e-4; % programı durdurma toleransı
blt=[1 4 6 3 6 8 2 8 4;4 5 5 6 7 7 8 9 9];
zh1=[0+0.0576i 0.017+0.092i 0.039+0.17i 0+0.1008i 0.0119+0.072i 0.0085+0.072i 0+0.0625i
0.032+0.161i 0.01+0.085i];
ys1=[0 0.079i 0.179i 0 0.0745i 0.0745i 0 0.153i 0.088i];
zh5=[0+(5*0.0576i) 0.017+(5*0.092i) 0.039+(5*0.17i) 0+(5*0.1008i) 0.0119+(5*0.072i)
0.0085+(5*0.072i) 0+(5*0.0625i) 0.032+(5*0.161i) 0.01+(5*0.085i)];
ys5=[0 (0.079i/5) (0.179i/5) 0 (0.0745i/5) (0.0745i/5) 0 (0.153i/5) (0.088i/5)];
v1=[1.04 1.03 1.04 1 1 1 1 1]; % ana harmonik genlik değerleri
delta1=[0 0 0 0 0 0 0 0];
v5=[0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1];
delta5=[0 0 0 0 0 0 0 0];
pg=[0 1.63 0.85 0 0 0 0 0]; % generatör aktif güçleri
py=[0 0 0 0 0.9 0.6 0 1.25]; % aktif yükler
qc=[0 0 0 0 0 0 0 0];%Şönt reaktif üreteç güçleri
qy=[0 0 0 0 0.3 0.7 0 0.5]; % reaktif yükler
qg=[0 0 0 0 0 0 0 0]; % generatör reaktif güç değerleri
nn=2*nb-ng-1;
%ANA HARMONİK (50 Hz)BARA ADMİTANS MATRİSİ HESAPLAMASI
ybus1=zeros(9,9);
for k=1:nb
    %Ana Köşegen Elemanlarının Hesabı
    for f=1:nh
        if blt(1,f)==k||blt(2,f)==k
            t=(1/zh1(f))+ys1(f);
            ybus1(k,k)=ybus1(k,k)+t ;
        end
    end
    %Ana Köşegen Dışındaki Elemanların Hesabı
    for d=1:nh
        for p=1:nb
            if blt(1,d)==k&&blt(2,d)==p
                t=(-1/zh1(d));
                ybus1(k,p)=ybus1(k,p)+t;
                ybus1(p,k)=ybus1(k,p);
            end
        end
    end
end
end
end
%5. HARMONİK (250 Hz)BARA ADMİTANS MATRİSİ HESAPLAMASI
ybus5=zeros(9,9);
for k=1:nb
    %Ana Köşegen Elemanlarının Hesabı
    for f=1:nh
        if blt(1,f)==k||blt(2,f)==k
            t=(1/zh5(f))+ys5(f);
            ybus5(k,k)=ybus5(k,k)+t ;
        end
    end
end
```

```

%Ana Köşegen Dışındaki Elemanların Hesabı
for d=1:nh
for p=1:nb
if blt(1,d)==k&blt(2,d)==p
t=(-1/zh5(d));
ybus5(k,p)=ybus5(k,p)+t;
ybus5(p,k)=ybus5(k,p);
end
end
end
end
ybus5(1,1)=ybus5(1,1)+inv(1e-4*j*5);
ybus5(2,2)=ybus5(2,2)+inv(1e-4*j*5);
ybus5(3,3)=ybus5(3,3)+inv(1e-4*j*5);
%BARA ADMİTANS MATRİSİ ELEMANLARININ g VE b DEĞERLERİ HESAPLANIYOR
for k=1:nb
for l=1:nb
g1(k,l)=real(ybus1(k,l));
b1(k,l)=imag(ybus1(k,l));
g5(k,l)=real(ybus5(k,l));
b5(k,l)=imag(ybus5(k,l));
end
end
ybus1
ybus5
g1
b1
g5;
b5;
%%%%%%%%%% X DURUM DEĞİŞKEN VEKTÖRÜ OLUŞTURULUYOR %%%%%%%%%%
x=zeros(32,1);
for k=2:9
x(k-1)=delta1(k);
end
for k=9:14
x(k)=v1(k-5);
end
for k=1:9
x(k+14)=delta5(k);
x(k+23)=v5(k);
end
x
%%%%%%%%%% İTERASYON BAŞLIYOR%%%%%%%%%%
iter=0;
z=1;
while(z~=0);
iter=iter+1;
p=zeros(9,1);
q=zeros(9,1);
lr5=zeros(9,1);
li5=zeros(9,1);
gr5=zeros(9,1);
gi5=zeros(9,1);
% delta P vektörü (P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9) HESAPLANIYOR%
delta=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
delta(i,j)=delta1(i)-delta1(j);
end
end

```

```

for i=2:nb
for j=1:nb
p(i)=p(i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
p(i)=v1(i)*p(i);
end
% deltaq vektörü(Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9)HESAPLANIYOR
for i=4:nb
for j=1:nb
q(i)=q(i)+(v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
q(i)=v1(i)*q(i);
end
% 5. harmonik aktif gücü hesaplanıyor
delta=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
delta(i,j)=delta5(i)-delta5(j);
end
end
i=7;
p5=0;
for j=1:nb
p5=p5+(v5(j)*(g5(i,j)*cos(delta(i,j))+b5(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
p5=v5(i)*p5;
p(7)=p(7)+p5; % 5.baradaki tüm harmonik aktif güçdeğerleri
% 5. harmonik reaktif gücü hesaplanıyor
delta=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
delta(i,j)=delta5(i)-delta5(j);
end
end
i=7;
q5=0;
for j=1:nb
q5=q5+(v5(j)*(g5(i,j)*sin(delta(i,j))-b5(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
q5=v5(i)*q5;
q(7)=q(7)+q5; % 7.baradaki tüm harmonik reaktif güç değerleri
% 5. harmonik reel akımları hesaplanıyor
for i=1:nb
for j=1:nb
Ir5(i)=Ir5(i)+(v5(j)*(g5(i,j)*cos(delta5(j))-b5(i,j)*sin(delta5(j))));
end
end
% 5. harmonik unreel akımları hesaplanıyor
for i=1:nb
for j=1:nb
Ii5(i)=Ii5(i)+(v5(j)*(g5(i,j)*sin(delta5(j))+b5(i,j)*cos(delta5(j))));
end
end
% 5.baradaki nonlinear akımlar hesaplanıyor
gr5(7)=0.25*((v1(7))^3)*cos(3*delta1(7))+0.15*((v5(7))^2)*cos(2*delta5(7));
gi5(7)=0.25*((v1(7))^3)*sin(3*delta1(7))+0.15*((v5(7))^2)*sin(2*delta5(7));
%%%%%%%%%%%% fark güç ve akım değerleri hesaplanıyor%%%%%%%%%%%%
deltag=zeros(32,1);
for k=1:8
deltag(k)=p(k+1)-pg(k+1)+py(k+1);

```

```

end
for k=9:14
deltag(k)=q(k-5)-qc(k-5)+qy(k-5);
end
for k=1:9
deltag(k+14)=lr5(k)+gr5(k);
deltag(k+23)=li5(k)+gi5(k);
end
%%%%%% JACOBIAN ALT MATRIS HESAPLAMALARI BASLADI %%%
%%%%%%%%% j1 HESAPLANIYOR %%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta1(k)-delta1(n);
end
end
j1=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j1(i,i)=j1(i,i)+(v1(j)*(-g1(i,j)*sin(delta(i,j))+b1(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
end
j1(i,i)=v1(i)*j1(i,i);
end
for i=1:9
for j=1:9
if (i~=j)
j1(i,j)=v1(i)*v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j1=j1(2:9,2:9);
%%%%%%%%% j2 HESAPLANIYOR %%%
j2=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j2(i,i)=j2(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
j2(i,i)=(j2(i,i))+(2*v1(i)*g1(i,i));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j2(i,j)=v1(i)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j2=j2(2:9,4:9);
%%%%%%%%% j3 HESAPLANIYOR %%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta5(k)-delta5(n);
end
end
j3=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)

```

```

j3(i,i)=j3(i,i)+(v5(j)*(-g5(i,j)*sin(delta(i,j))+b5(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
end
j3(i,i)=v5(i)*j3(i,i);
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j3(i,j)=v5(i)*v5(j)*(g5(i,j)*sin(delta(i,j))-b5(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j3=j3(2:9,1:9);
%%%%%% j4 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j4=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j4(i,i)=j4(i,i)+(v5(j)*(g5(i,j)*cos(delta(i,j))+b5(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
end
j4(i,i)=(j4(i,i)+(2*v5(i)*g5(i,i)));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j4(i,j)=v5(i)*(g5(i,j)*cos(delta(i,j))+b5(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j4=j4(2:9,1:9);
%%%%%% j5 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta1(k)-delta1(n);
end
end
j5=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j5(i,i)=j5(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
end
j5(i,i)=v1(i)*j5(i,i);
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j5(i,j)=-v1(i)*v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j5=j5(4:9,2:9);
%%%%%% j6 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j6=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j6(i,i)=j6(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j))));

```

```

end
end
j6(i,i)=j6(i,i)-(2*v1(i)*b1(i,i));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j6(i,j)=v1(i)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j6=j6(4:9,4:9);
%%%%%% j7 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta5(k)-delta5(n);
end
end
j7=zeros(9,9);
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j7(k,k)=j7(k,k)+(v5(n)*(g5(k,n)*cos(delta(k,n))+b5(k,n)*sin(delta(k,n))));
end
end
j7(k,k)=v5(k)*j7(k,k);
end
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j7(k,n)=-v5(k)*v5(n)*(g5(k,n)*cos(delta(k,n))+b5(k,n)*sin(delta(k,n)));
end
end
end
j7=j7(4:9,1:9);
%%%%%% j8 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%
j8=zeros(9,9);
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j8(k,k)=j8(k,k)+(v5(n)*(g5(k,n)*sin(delta(k,n))-b5(k,n)*cos(delta(k,n))));
end
end
j8(k,k)=j8(k,k)-(2*v5(k)*b5(k,k));
end
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j8(k,n)=v5(k)*(g5(k,n)*sin(delta(k,n))-b5(k,n)*cos(delta(k,n)));
end
end
end
j8=j8(4:9,1:9);
%%%%%% j9 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%
j9=zeros(9,8);
j9(7,6)=j9(7,6)-0.75*((v1(7))^3)*sin(3*delta1(7));
%%%%%% j10 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%
j10=zeros(9,6);
j10(7,4)=j10(7,4)+0.75*((v1(7))^2)*cos(3*delta1(7));
%%%%%% j11 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%

```



```

j11=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j11(k,m)=-v5(m)*(g5(k,m)*sin(delta5(m))+b5(k,m)*cos(delta5(m)));
end
end
j11(7,7)=j11(7,7)-0.30*((v5(7))^2)*sin(2*delta5(7));
%%%%%% j12 HESAPLANIYOR %%%%%%
j12=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j12(k,m)=g5(k,m)*cos(delta5(m))-b5(k,m)*sin(delta5(m));
end
end
j12(7,7)=j12(7,7)+0.30*(v5(7))*cos(2*delta5(7));
%%%%%% j13 HESAPLANIYOR %%%%%%
j13=zeros(9,8);
j13(7,6)=j13(7,6)+0.75*((v1(7))^3)*cos(3*delta1(7));
%%%%%% j14 HESAPLANIYOR %%%%%%
j14=zeros(9,6);
j14(7,4)=j14(7,4)+0.75*((v1(7))^2)*sin(3*delta1(7));
%%%%%% j15 HESAPLANIYOR %%%%%%
j15=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j15(k,m)=v5(m)*(g5(k,m)*cos(delta5(m))-b5(k,m)*sin(delta5(m)));
end
end
j15(7,7)=j15(7,7)+0.30*((v5(7))^2)*cos(2*delta5(7));
%%%%%% j16 HESAPLANIYOR %%%%%%
j16=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j16(k,m)=g5(k,m)*sin(delta5(m))+b5(k,m)*cos(delta5(m));
end
end
j16(7,7)=j16(7,7)+0.30*(v5(7))*sin(2*delta5(7));
%%%%%% JACOBIAN OLUSTURULUYOR %%%%%%
jac=[j1 j2 j3 j4 ;
j5 j6 j7 j8 ;
j9 j10 j11 j12 ;
j13 j14 j15 j16];
%%%%%% Jacobian Matrisin Tersisi Hesaplanıyor %%%%%%
jacters=inv(jac);
%%%%%% X vektörünün yeni değerleri hesaplanıyor %%%%%%
kontrol=abs(deltag)
x2=x-(jacters*deltag)
t=zeros(50,1);
h=zeros(50,1);
z=0;
for i=1:32
if kontrol(i)>epsi
t(i)=kontrol(i);
else
h(i)=kontrol(i);
end
end
for i=1:32
z=z+t(i);
end

```

```

x=x2
for k=2:9
delta1(k)=x(k-1);
end
for k=4:9
v1(k)=x(k+5);
end
for k=1:9
delta5(k)=x(k+14);
v5(k)=x(k+23);
end
disp('güç akısı programı'),disp(iter),disp('adımında sona ermistir')
end%% %% While'nin end'i%% %% %% %% %%
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% Bulunan değerlerin ekrana yazdırılması%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
disp('*****')
disp('* SISTEM SONUÇLARI *')
disp('*****')
disp(' açılar (derece olarak) ')
disp('=====')
% Açılar Dereceye Çevriliyor
for k=1:nb;
delta1(k)=delta1(k)*180/pi;
delta5(k)=delta5(k)*180/pi;
end;
delta1
delta5
disp(' Açıların Esas Ölçüleri')
disp('=====')
% açılar 0-2? arasına çekiliyor(Esas ölçüleri hesaplanıyor)
for i=1:nb
if (delta1(i)>0&delta1(i)>360)
delta1(i)=mod(delta1(i),360);
end
if (delta1(i)<0 & abs(delta1(i))<360)
delta1(i)=360-abs(delta1(i));
end
if (delta1(i)<0 & abs(delta1(i))>360)
delta1(i)=360-(mod(abs(delta1(i),360)));
end
end
for i=1:nb
if (delta5(i)>0&delta5(i)>360)
delta5(i)=mod(delta5(i),360);
end
if (delta5(i)<0 & abs(delta5(i))<360)
delta5(i)=360-abs(delta5(i));
end
if (delta5(i)<0 & abs(delta5(i))>360)
delta5(i)=360-(mod(abs(delta5(i),360)));
end
end
delta1
delta5
disp(' gerilim genlikleri (birim olarak) ')
disp('=====')
v1
v5
i=1;
p1=0;

```

```

for k=1:nb;
delta1(k)=delta1(k)*pi/180;
end;
for j=1:nb
p1=p1+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta1(i)-delta1(j))+b1(i,j)*sin(delta1(i)-delta1(j))));
end
p1=v1(i)*p1;
pg(1)=p1+py(1);
q1=0;
q2=0;
q3=0;
for j=1:nb
q1=q1+(v1(j)*(g1(1,j)*sin(delta1(1)-delta1(j))-b1(1,j)*cos(delta1(1)-delta1(j))));
q2=q2+(v1(j)*(g1(2,j)*sin(delta1(2)-delta1(j))-b1(2,j)*cos(delta1(2)-delta1(j))));
q3=q3+(v1(j)*(g1(3,j)*sin(delta1(3)-delta1(j))-b1(3,j)*cos(delta1(3)-delta1(j))));
end
q1=v1(1)*q1;
q2=v1(2)*q2;
q3=v1(3)*q3;
qg(1)=q1+qy(1);
qg(2)=q2+qy(2);
qg(3)=q3+qy(3);
disp(' generatör aktif güçleri (birim olarak) ')
disp('=====')
pg
disp(' generatör reaktif güçleri (birim olarak) ')
disp('=====')
qg
disp(' hatlardan akan aktif güçler (birim olarak) ')
disp('=====')
p(1)=p1;
p
p5
disp(' hatlardan akan reaktif güçler (birim olarak) ')
disp('=====')
q(1)=q1;
q(2)=q2;
q(3)=q3;
q
q5
disp('iterasyon sayısı')
disp('=====')
iter

```

#### EK-4. Harmonik Güç Akışı Matlab Kodları(Nonlineer Yük 9. Baraya Bağlı)

```
clc
clear all
format short
nh=9; % hat bağlantı sayısı
nb=9;%Bara sayısı
ng=3;%generatör sayısı
epsi=1.0e-4; % programı durdurma toleransı
harm=[1 5];
blt=[1 4 6 3 6 8 2 8 4;4 5 5 6 7 7 8 9 9];
zh1=[0+0.0576i 0.017+0.092i 0.039+0.17i 0+0.1008i 0.0119+0.072i 0.0085+0.072i 0+0.0625i
0.032+0.161i 0.01+0.085i];
ys1=[0 0.079i 0.179i 0 0.0745i 0.0745i 0 0.153i 0.088i];
zh5=[0+(5*0.0576i) 0.017+(5*0.092i) 0.039+(5*0.17i) 0+(5*0.1008i) 0.0119+(5*0.072i)
0.0085+(5*0.072i) 0+(5*0.0625i) 0.032+(5*0.161i) 0.01+(5*0.085i)];
ys5=[0 (0.079i/5) (0.179i/5) 0 (0.0745i/5) (0.0745i/5) 0 (0.153i/5) (0.088i/5)];
v1=[1.04 1.03 1.04 1 1 1 1 1]; % ana harmonik genlik değerleri
delta1=[0 0 0 0 0 0 0 0];
v5=[0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1 0.1];
delta5=[0 0 0 0 0 0 0 0];
pg=[0 1.63 0.85 0 0 0 0 0]; % generatör aktif güçleri
py=[0 0 0 0 0.9 0 1 0 1.85]; % aktif yükler
qc=[0 0 0 0 0 0 0 0];%Şönt reaktif üreteç güçleri
qy=[0 0 0 0 0.3 0 0.35 0 1.2]; % reaktif yükler
qg=[0 0 0 0 0 0 0 0]; % generatör reaktif güç değerleri
nn=2*nb-ng-1;
%ANA HARMONİK (50 Hz)BARA ADMİTANS MATRİSİ HESAPLAMASI
ybus1=zeros(9,9);
for k=1:nb
    %Ana Köşegen Elemanlarının Hesabı
    for f=1:nh
        if blt(1,f)==k||blt(2,f)==k
            t=(1/zh1(f))+ys1(f);
            ybus1(k,k)=ybus1(k,k)+t ;
        end
    end
    %Ana Köşegen Dışındaki Elemanların Hesabı
    for d=1:nh
        for p=1:nb
            if blt(1,d)==k&&blt(2,d)==p
                t=(-1/zh1(d));
                ybus1(k,p)=ybus1(k,p)+t;
                ybus1(p,k)=ybus1(k,p);
            end
        end
    end
end
end
end
%5. HARMONİK (250 Hz)BARA ADMİTANS MATRİSİ HESAPLAMASI
ybus5=zeros(9,9);
for k=1:nb
    %Ana Köşegen Elemanlarının Hesabı
    for f=1:nh
        if blt(1,f)==k||blt(2,f)==k
            t=(1/zh5(f))+ys5(f);
            ybus5(k,k)=ybus5(k,k)+t ;
        end
    end
end
end
```

```

%Ana Köşegen Dışındaki Elemanların Hesabı
for d=1:nh
for p=1:nb
if blt(1,d)==k&blt(2,d)==p
t=(-1/zh5(d));
ybus5(k,p)=ybus5(k,p)+t;
ybus5(p,k)=ybus5(k,p);
end
end
end
end
ybus5(1,1)=ybus5(1,1)+inv(1e-4*j*5);
ybus5(2,2)=ybus5(2,2)+inv(1e-4*j*5);
ybus5(3,3)=ybus5(3,3)+inv(1e-4*j*5);
%BARA ADMİTANS MATRİSİ ELEMANLARININ g VE b DEĞERLERİ HESAPLANIYOR
for k=1:nb
for l=1:nb
g1(k,l)=real(ybus1(k,l));
b1(k,l)=imag(ybus1(k,l));
g5(k,l)=real(ybus5(k,l));
b5(k,l)=imag(ybus5(k,l));
end
end
ybus1
ybus5
g1
b1
g5;
b5;
%%%%%%%%%% X DURUM DEĞİŞKEN VEKTÖRÜ OLUŞTURULUYOR %%%%%%%%%%
x=zeros(32,1);
for k=2:9
x(k-1)=delta1(k);
end
for k=9:14
x(k)=v1(k-5);
end
for k=1:9
x(k+14)=delta5(k);
x(k+23)=v5(k);
end
x
%%%%%%%%%% İTERASYON BAŞLIYOR %%%%%%%%%%
iter=0;
z=1;
while(z~=0);
iter=iter+1;
p=zeros(9,1);
q=zeros(9,1);
lr5=zeros(9,1);
li5=zeros(9,1);
gr5=zeros(9,1);
gi5=zeros(9,1);
% delta P vektörü (P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9) HESAPLANIYOR%
delta=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
delta(i,j)=delta1(i)-delta1(j);
end
end

```

```

for i=2:nb
for j=1:nb
p(i)=p(i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
p(i)=v1(i)*p(i);
end
% deltaq vektörü(Q4,Q5,Q6,Q7,Q8,Q9)HESAPLANIYOR
for i=4:nb
for j=1:nb
q(i)=q(i)+(v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
q(i)=v1(i)*q(i);
end
% 5. harmonik aktif gücü hesaplanıyor
delta=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
delta(i,j)=delta5(i)-delta5(j);
end
end
i=9;
p5=0;
for j=1:nb
p5=p5+(v5(j)*(g5(i,j)*cos(delta(i,j))+b5(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
p5=v5(i)*p5;
p(9)=p(9)+p5; % 5.baradaki tüm harmonik aktif güçdeğerleri
% 5. harmonik reaktif gücü hesaplanıyor
delta=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
delta(i,j)=delta5(i)-delta5(j);
end
end
i=9;
q5=0;
for j=1:nb
q5=q5+(v5(j)*(g5(i,j)*sin(delta(i,j))-b5(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
q5=v5(i)*q5;
q(9)=q(9)+q5; % 7.baradaki tüm harmonik reaktif güç değerleri
% 5. harmonik reel akımları hesaplanıyor
for i=1:nb
for j=1:nb
Ir5(i)=Ir5(i)+(v5(j)*(g5(i,j)*cos(delta5(j))-b5(i,j)*sin(delta5(j))));
end
end
% 5. harmonik unreel akımları hesaplanıyor
for i=1:nb
for j=1:nb
Ii5(i)=Ii5(i)+(v5(j)*(g5(i,j)*sin(delta5(j))+b5(i,j)*cos(delta5(j))));
end
end
% 5.baradaki nonlinear akımlar hesaplanıyor
gr5(9)=0.25*((v1(9))^3)*cos(3*delta1(9))+0.15*((v5(9))^2)*cos(2*delta5(9));
gi5(9)=0.25*((v1(9))^3)*sin(3*delta1(9))+0.15*((v5(9))^2)*sin(2*delta5(9));
%%%%%%%%%%%%%% fark güç ve akım değerleri hesaplanıyor%%%%%%%%%%%%%%
deltag=zeros(32,1);
for k=1:8
deltag(k)=p(k+1)-pg(k+1)+py(k+1);

```

```

end
for k=9:14
deltag(k)=q(k-5)-qc(k-5)+qy(k-5);
end
for k=1:9
deltag(k+14)=lr5(k)+gr5(k);
deltag(k+23)=li5(k)+gi5(k);
end
%%%%%% JACOBIAN ALT MATRIS HESAPLAMALARI BASLADI %%%
%%%%%%%%% j1 HESAPLANIYOR %%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta1(k)-delta1(n);
end
end
j1=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j1(i,i)=j1(i,i)+(v1(j)*(-g1(i,j)*sin(delta(i,j))+b1(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
end
j1(i,i)=v1(i)*j1(i,i);
end
for i=1:9
for j=1:9
if (i~=j)
j1(i,j)=v1(i)*v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j1=j1(2:9,2:9);
%%%%%%%%% j2 HESAPLANIYOR %%%
j2=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j2(i,i)=j2(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
j2(i,i)=(j2(i,i))+(2*v1(i)*g1(i,i));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j2(i,j)=v1(i)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j2=j2(2:9,4:9);
%%%%%%%%% j3 HESAPLANIYOR %%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta5(k)-delta5(n);
end
end
j3=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)

```

```

j3(i,i)=j3(i,i)+(v5(j)*(-g5(i,j)*sin(delta(i,j))+b5(i,j)*cos(delta(i,j))));
end
end
j3(i,i)=v5(i)*j3(i,i);
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j3(i,j)=v5(i)*v5(j)*(g5(i,j)*sin(delta(i,j))-b5(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j3=j3(2:9,1:9);
%%%%%% j4 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j4=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j4(i,i)=j4(i,i)+(v5(j)*(g5(i,j)*cos(delta(i,j))+b5(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
end
j4(i,i)=(j4(i,i)+(2*v5(i)*g5(i,i)));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j4(i,j)=v5(i)*(g5(i,j)*cos(delta(i,j))+b5(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j4=j4(2:9,1:9);
%%%%%% j5 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta1(k)-delta1(n);
end
end
j5=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j5(i,i)=j5(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j))));
end
end
end
j5(i,i)=v1(i)*j5(i,i);
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j5(i,j)=-v1(i)*v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta(i,j))+b1(i,j)*sin(delta(i,j)));
end
end
end
j5=j5(4:9,2:9);
%%%%%% j6 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%
j6=zeros(9,9);
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j6(i,i)=j6(i,i)+(v1(j)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j))));

```



```

end
end
j6(i,i)=j6(i,i)-(2*v1(i)*b1(i,i));
end
for i=1:nb
for j=1:nb
if (i~=j)
j6(i,j)=v1(i)*(g1(i,j)*sin(delta(i,j))-b1(i,j)*cos(delta(i,j)));
end
end
end
j6=j6(4:9,4:9);
%%%%%% j7 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%
for k=1:nb
for n=1:nb
delta(k,n)=delta5(k)-delta5(n);
end
end
j7=zeros(9,9);
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j7(k,k)=j7(k,k)+(v5(n)*(g5(k,n)*cos(delta(k,n))+b5(k,n)*sin(delta(k,n))));
end
end
j7(k,k)=v5(k)*j7(k,k);
end
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j7(k,n)=-v5(k)*v5(n)*(g5(k,n)*cos(delta(k,n))+b5(k,n)*sin(delta(k,n)));
end
end
end
j7=j7(4:9,1:9);
%%%%%% j8 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%
j8=zeros(9,9);
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j8(k,k)=j8(k,k)+(v5(n)*(g5(k,n)*sin(delta(k,n))-b5(k,n)*cos(delta(k,n))));
end
end
j8(k,k)=j8(k,k)-(2*v5(k)*b5(k,k));
end
for k=1:nb
for n=1:nb
if (k~=n)
j8(k,n)=v5(k)*(g5(k,n)*sin(delta(k,n))-b5(k,n)*cos(delta(k,n)));
end
end
end
j8=j8(4:9,1:9);
%%%%%% j9 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%
j9=zeros(9,8);
j9(9,8)=j9(9,8)-0.75*((v1(9))^3)*sin(3*delta1(9));
%%%%%% j10 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%
j10=zeros(9,6);
j10(9,6)=j10(9,6)+0.75*((v1(9))^2)*cos(3*delta1(9));
%%%%%% j11 HESAPLANIYOR %%%%%%%%%%

```

```

j11=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j11(k,m)=-v5(m)*(g5(k,m)*sin(delta5(m))+b5(k,m)*cos(delta5(m)));
end
end
j11(9,9)=j11(9,9)-0.30*((v5(9))^2)*sin(2*delta5(9));
%%%%%% j12 HESAPLANIYOR %%%%%%
j12=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j12(k,m)=g5(k,m)*cos(delta5(m))-b5(k,m)*sin(delta5(m));
end
end
j12(9,9)=j12(9,9)+0.30*(v5(9))*cos(2*delta5(9));
%%%%%% j13 HESAPLANIYOR %%%%%%
j13=zeros(9,8);
j13(9,8)=j13(9,8)+0.75*((v1(9))^3)*cos(3*delta1(9));
%%%%%% j14 HESAPLANIYOR %%%%%%
j14=zeros(9,6);
j14(9,6)=j14(9,6)+0.75*((v1(9))^2)*sin(3*delta1(9));
%%%%%% j15 HESAPLANIYOR %%%%%%
j15=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j15(k,m)=v5(m)*(g5(k,m)*cos(delta5(m))-b5(k,m)*sin(delta5(m)));
end
end
j15(9,9)=j15(9,9)+0.30*((v5(9))^2)*cos(2*delta5(9));
%%%%%% j16 HESAPLANIYOR %%%%%%
j16=zeros(9,9);
for k=1:9
for m=1:9
j16(k,m)=g5(k,m)*sin(delta5(m))+b5(k,m)*cos(delta5(m));
end
end
j16(9,9)=j16(9,9)+0.30*(v5(9))*sin(2*delta5(9));
%%%%%% JACOBIAN OLUSTURULUYOR %%%%%%
jac=[j1 j2 j3 j4 ;
j5 j6 j7 j8 ;
j9 j10 j11 j12 ;
j13 j14 j15 j16];
%%%%%% Jacobian Matrisin Tersini Hesaplanıyor %%%%%%
jacters=inv(jac);
%%%%%% X vektörünün yeni değerleri hesaplanıyor %%%%%%
kontrol=abs(deltag)
x2=x-(jacters*deltag)
t=zeros(50,1);
h=zeros(50,1);
z=0;
for i=1:32
if kontrol(i)>epsi
t(i)=kontrol(i);
else
h(i)=kontrol(i);
end
end
for i=1:32
z=z+t(i);
end

```

```

x=x2
for k=2:9
delta1(k)=x(k-1);
end
for k=4:9
v1(k)=x(k+5);
end
for k=1:9
delta5(k)=x(k+14);
v5(k)=x(k+23);
end
disp('güç akısı programı'),disp(iter),disp('adımda sona ermistir')
end%% %% %% While'nin end'i %% %% %% %%
%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
% Bulunan değerlerin ekrana yazdırılması%% %% %% %% %% %% %% %% %% %%
disp('*****')
disp('* SISTEM SONUÇLARI *')
disp('*****')
disp(' açılar (derece olarak) ')
disp('=====')
% Açılar Dereceye Çevriliyor
for k=1:nb;
delta1(k)=delta1(k)*180/pi;
delta5(k)=delta5(k)*180/pi;
end;
delta1
delta5
disp(' Açıların Esas Ölçüleri')
disp('=====')
% açılar 0-2? arasına çekiliyor(Esas ölçüleri hesaplanıyor)
for i=1:nb
if (delta1(i)>0&delta1(i)>360)
delta1(i)=mod(delta1(i),360);
end
if (delta1(i)<0 & abs(delta1(i))<360)
delta1(i)=360-abs(delta1(i));
end
if (delta1(i)<0 & abs(delta1(i))>360)
delta1(i)=360-(mod(abs(delta1(i),360)));
end
end
for i=1:nb
if (delta5(i)>0&delta5(i)>360)
delta5(i)=mod(delta5(i),360);
end
if (delta5(i)<0 & abs(delta5(i))<360)
delta5(i)=360-abs(delta5(i));
end
if (delta5(i)<0 & abs(delta5(i))>360)
delta5(i)=360-(mod(abs(delta5(i),360)));
end
end
delta1
delta5
disp(' gerilim genlikleri (birim olarak) ')
disp('=====')
v1
v5
i=1;
p1=0;

```

```

for k=1:nb;
delta1(k)=delta1(k)*pi/180;
end;
for j=1:nb
p1=p1+(v1(j)*(g1(i,j)*cos(delta1(i)-delta1(j))+b1(i,j)*sin(delta1(i)-delta1(j))));
end
p1=v1(i)*p1;
pg(1)=p1+py(1);
q1=0;
q2=0;
q3=0;
for j=1:nb
q1=q1+(v1(j)*(g1(1,j)*sin(delta1(1)-delta1(j))-b1(1,j)*cos(delta1(1)-delta1(j))));
q2=q2+(v1(j)*(g1(2,j)*sin(delta1(2)-delta1(j))-b1(2,j)*cos(delta1(2)-delta1(j))));
q3=q3+(v1(j)*(g1(3,j)*sin(delta1(3)-delta1(j))-b1(3,j)*cos(delta1(3)-delta1(j))));
end
q1=v1(1)*q1;
q2=v1(2)*q2;
q3=v1(3)*q3;
qg(1)=q1+qy(1);
qg(2)=q2+qy(2);
qg(3)=q3+qy(3);
disp(' generatör aktif güçleri (birim olarak) ')
disp('=====')
pg
disp(' generatör reaktif güçleri (birim olarak) ')
disp('=====')
qg
disp(' hatlardan akan aktif güçler (birim olarak) ')
disp('=====')
p(1)=p1;
p
p5
disp(' hatlardan akan reaktif güçler (birim olarak) ')
disp('=====')
q(1)=q1;
q(2)=q2;
q(3)=q3;
q
q5
disp('iterasyon sayısı')
disp('=====')
iter

```

### EK-5. Bara İndirgeme İşlemi Yapan Matlab Kodları(5. Bara İçin)

```
s=zeros(9,1);
fi=zeros(9,1);
z=zeros(9,1);
y=zeros(9,1);
v=zeros(9,1);
ybus=ybus1
for i=1:9
    if (i~=1 & i~=5)
        s(i)=p(i)+j*q(i);
        fi(i)=(180/pi)*atan(q(i)/p(i));
        z(i)=(v1(i))^2/s(i);
        y(i)=1/(z(i));
    end
end
s
fi
z
y
ybus(2,2)=ybus(2,2)+y(2);
ybus(3,3)=ybus(3,3)+y(3);
ybus(4,4)=ybus(4,4)+y(4);
ybus(6,6)=ybus(6,6)+y(6);
ybus(7,7)=ybus(7,7)+y(7);
ybus(8,8)=ybus(8,8)+y(8);
ybus(9,9)=ybus(9,9)+y(9);
yyeni=[ybus(5,5) ybus(5,1) ybus(5,3) ybus(5,4) ybus(5,2) ybus(5,6) ybus(5,7) ybus(5,8) ybus(5,9)
        ybus(1,5) ybus(1,1) ybus(1,3) ybus(1,4) ybus(1,2) ybus(1,6) ybus(1,7) ybus(1,8) ybus(1,9)
        ybus(3,5) ybus(3,1) ybus(3,3) ybus(3,4) ybus(3,2) ybus(3,6) ybus(3,7) ybus(3,8) ybus(3,9)
        ybus(4,5) ybus(4,1) ybus(4,3) ybus(4,4) ybus(4,2) ybus(4,6) ybus(4,7) ybus(4,8) ybus(4,9)
        ybus(2,5) ybus(2,1) ybus(2,3) ybus(2,4) ybus(2,2) ybus(2,6) ybus(2,7) ybus(2,8) ybus(2,9)
        ybus(6,5) ybus(6,1) ybus(6,3) ybus(6,4) ybus(6,2) ybus(6,6) ybus(6,7) ybus(6,8) ybus(6,9)
        ybus(7,5) ybus(7,1) ybus(7,3) ybus(7,4) ybus(7,2) ybus(7,6) ybus(7,7) ybus(7,8) ybus(7,9)
        ybus(8,5) ybus(8,1) ybus(8,3) ybus(8,4) ybus(8,2) ybus(8,6) ybus(8,7) ybus(8,8) ybus(8,9)
        ybus(9,5) ybus(9,1) ybus(9,3) ybus(9,4) ybus(9,2) ybus(9,6) ybus(9,7) ybus(9,8) ybus(9,9)]
k=yyeni(1:2,1:2)
L=yyeni(1:2,3:9)
LT=yyeni(3:9,1:2)
M=yyeni(3:9,3:9)
y2x2=k-(L*inv(M)*LT)
y12=-1*y2x2(1,2)
zh=1/y12%%Hattın Empedansı%%
y1y=y2x2(1,1)-y12%%Hattın admitansı için Y/2 Değeri%%
y2y=y2x2(2,2)-y12%%Hattın admitansı için Y/2 Değeri%%
y=y1y+y2y%%Hattın Admitansı%%
```

## EK-6. İEEE 9 Baralı Sistem Ana Harmonik İçin PV Eğrisi Kodları

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%cos(fi) = 0.95 için pv eğrilerinin aynı eksen takımında gösterilmesi
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
clc
vs=228800;
z=(0.0406 + 0.1410i)*484/550; %ohm/km
y=(-4.2678 - 2.6491i)*0.0021/550; %s/km
l=550; % km olarak hat uzunluğu
gm=sqrt(z*y); % gm:gama yayılma sabiti
%alfa=real(gm);
%beta=imag(gm);
zc=sqrt(z/y); % karakteristik empedans değeri
A=cosh(gm*l)
B=zc*sinh(gm*l)
C=(1/zc)*sinh(gm*l);
D=A;
a1=real(A);
a2=imag(A);
b1=real(B);
b2=imag(B);
A2=(a1.^2+a2.^2);
B2=b1.^2 +b2.^2;
%+++++
% cos(30) için p-v gerçek değerler ile eğrisi
%tanfi=beta
beta=0.33;
pdn=linspace(0, 9e+8 ,1000);
b=2*pdn*(a1*b1+a2*b2)+2*pdn*beta*(a1*b2-a2*b1)-vs.^2;
delta=b.^2- (4*A2*B2*pdn.^2)*(1+beta.^2);
%v2n=sqrt(3)*(sqrt(-b+sqrt(delta))/(2*A2));
v2n=sqrt((-b+sqrt(delta))/(2*A2));
%+++++
pdp=linspace(9e+8 , 0 , 1000);
by=2*pdp*(a1*b1+a2*b2)+2*pdp*beta*(a1*b2-a2*b1)-vs.^2;
deltay=by.^2-4*A2*B2*pdp.^2*(1+beta.^2);
%v2p=sqrt(3)*((sqrt(-by-sqrt(deltay))/(2*A2)));
v2p=sqrt((-by-sqrt(deltay))/(2*A2));
pd1=[pdn pdp];
v21=[v2n v2p];
%p-v eğrilerinin çizdirilmesi
plot(pd1,v21,'k-');
%plot(pd1,v21,'k',pd2,v22,'w-',pd3,v23,'w-');
%title('P - V EGRISI');
title('cos(fi)=0.95 p-v egrileri ANA HARMONİK');
legend('cos(fi)=0.95')
xlabel('Pr ( W )');
ylabel('Vr ( V ) ( faz-Nötr )');
grid on
```

## EK-7. Bara İndirgeme İşlemi Yapan Matlab Kodları(5. Bara ve 5. Harmonik İçin)

```
s=zeros(9,1);
fi=zeros(9,1);
z=zeros(9,1);
y=zeros(9,1);
v=zeros(9,1);
ybus=ybus5
for i=1:nb
    v(i)=sqrt((v1(i)^2)+(v5(i)^2));
end
for i=1:9
    if (i~=1 & i~=5)
        s(i)=p(i)+j*q(i);
        fi(i)=(180/pi)*atan(q(i)/p(i));
        z(i)=(v(i)^2)/s(i);
        y(i)=1/(z(i));
    end
end
format long
s
fi
z
y
ybus(2,2)=ybus(2,2)+y(2);
ybus(3,3)=ybus(3,3)+y(3);
ybus(4,4)=ybus(4,4)+y(4);
ybus(6,6)=ybus(6,6)+y(6);
ybus(7,7)=ybus(7,7)+y(7);
ybus(8,8)=ybus(8,8)+y(8);
ybus(9,9)=ybus(9,9)+y(9);
yyeni=[ybus(5,5) ybus(5,1) ybus(5,3) ybus(5,4) ybus(5,2) ybus(5,6)
ybus(5,7) ybus(5,8) ybus(5,9)
    ybus(1,5) ybus(1,1) ybus(1,3) ybus(1,4) ybus(1,2) ybus(1,6)
ybus(1,7) ybus(1,8) ybus(1,9)
    ybus(3,5) ybus(3,1) ybus(3,3) ybus(3,4) ybus(3,2) ybus(3,6)
ybus(3,7) ybus(3,8) ybus(3,9)
    ybus(4,5) ybus(4,1) ybus(4,3) ybus(4,4) ybus(4,2) ybus(4,6)
ybus(4,7) ybus(4,8) ybus(4,9)
    ybus(2,5) ybus(2,1) ybus(2,3) ybus(2,4) ybus(2,2) ybus(2,6)
ybus(2,7) ybus(2,8) ybus(2,9)
    ybus(6,5) ybus(6,1) ybus(6,3) ybus(6,4) ybus(6,2) ybus(6,6)
ybus(6,7) ybus(6,8) ybus(6,9)
    ybus(7,5) ybus(7,1) ybus(7,3) ybus(7,4) ybus(7,2) ybus(7,6)
ybus(7,7) ybus(7,8) ybus(7,9)
    ybus(8,5) ybus(8,1) ybus(8,3) ybus(8,4) ybus(8,2) ybus(8,6)
ybus(8,7) ybus(8,8) ybus(8,9)
    ybus(9,5) ybus(9,1) ybus(9,3) ybus(9,4) ybus(9,2) ybus(9,6)
ybus(9,7) ybus(9,8) ybus(9,9)]
k=yyeni(1:2,1:2)
L=yyeni(1:2,3:9)
LT=yyeni(3:9,1:2)
M=yyeni(3:9,3:9)
format short
y2x2=k-(L*inv(M)*LT)
y12=-1*y2x2(1,2)
zh=1/y12
y1y=y2x2(1,1)-y12
```

```
y2y=y2x2(2,2)-y12
y=y1y+y2y
```

### EK-8. IEEE 9 Baralı Sistem 5. Harmonik İçin PV Eğrisi Kodları

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%cos(fi) = 0.95 için 5. Harmonik pv eğrilerinin aynı eksen takımında
gösterilmesi
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
clc
vs=228800;
z=(0.1248 + 1.0056i)*484/550; %ohm/km
y=(-0.3152 - 2.8824i)*0.0021/550; %s/km
l=550; % km olarak hat uzunluğu
gm=sqrt(z*y); % gm:gama yayılma sabiti
%alfa=real(gm);
%beta=imag(gm);
zc=sqrt(z/y); % karakteristik empedans değeri
A=cosh(gm*l)
B=zc*sinh(gm*l)
C=(1/zc)*sinh(gm*l);
D=A;
a1=real(A);
a2=imag(A);
b1=real(B);
b2=imag(B);
A2=(a1.^2+a2.^2);
B2=b1.^2 +b2.^2;
%++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
% cos(30) için p-v gerçek değerler ile eğrisi
%tanfi=beta
beta=0.33;
pdn=linspace(0, 9e7 ,1000);
b=2*pdn*(a1*b1+a2*b2)+2*pdn*beta*(a1*b2-a2*b1)-vs.^2;
delta=b.^2- (4*A2*B2*pdn.^2)*(1+beta.^2);
%v2n=sqrt(3)*(sqrt(-b+sqrt(delta)/(2*A2)));
v2n=sqrt((-b+sqrt(delta))/(2*A2));
%++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
pdp=linspace(9e7, 0 , 1000);
by=2*pdp*(a1*b1+a2*b2)+2*pdp*beta*(a1*b2-a2*b1)-vs.^2;
deltay=by.^2-4*A2*B2*pdp.^2*(1+beta.^2);
%v2p=sqrt(3)*((sqrt(-by-sqrt(deltay)/(2*A2))));
v2p=sqrt((-by-sqrt(deltay))/(2*A2));
pd1=[pdn pdp];
v21=[v2n v2p];
%p-v eğrilerinin çizdirilmesi
plot(pd1,v21,'k-');
%plot(pd1,v21,'k',pd2,v22,'w-',pd3,v23,'.w-.');
%title('P - V EGRISI');
title('cos(fi)=0.95 p-v egrileri 5.HARMONİK');
legend('cos(fi)=0.95')
xlabel('Pr ( W )');
ylabel('Vr ( V ) ( faz-Nötr )');
grid on
```



## ÖZGEÇMİŞ

### *Kişisel Bilgiler*

Soyadı, adı : Yusuf ALAŞAHAN  
Uyruğu : TC  
Doğum tarihi ve yeri : Osmaniye 20.02.1981  
Telefon : 0507 472 35 81  
Faks : 0380 542 11 34  
E-posta : yusufalalahan@duzce.edu.tr cukurova80@hotmail.com

### *Eğitim*

| <b>Derece</b> | <b>Eğitim Birimi</b>                    | <b>Mezuniyet tarihi</b> |
|---------------|---|-------------------------|
| Yüksek Lisans | Düzce Üniv. Fen Bil. Ens.               | Halen                   |
| Lisans        | Abant İzzet B. Ü. Düzce Tek. Eğit. Fak. | 2009                    |
| Lise          | Osmaniye Tek. ve End. Mes. Lisesi       | 1998                    |

### *İş Deneyimi*

| <b>Yıl</b> | <b>Yer</b>                  | <b>Görev</b> |
|------------|-----------------------------|--------------|
| 2007-2009  | Düzce Üniv. Tek. Eğit. Fak. | Memur        |
| 2009-Halen | Düzce Üniv. Tek. Eğit. Fak. | Teknisyen    |

### *Yabancı Dil*

İngilizce (ÜDS/KPDS/TOEFL : .....)

### *Yayınlar*

- 1.
- 2.
- 3.