

**T.C**

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

**GERİLİM DENGESİZLİKLERİNİN ASENKRON**

**MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN**

**İNCELENMESİ**

**FUAT IŞIK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE**

**2011**

**T.C**

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

**GERİLİM DENGESİZLİKLERİNİN ASENKRON**

**MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN**

**İNCELENMESİ**

**FUAT IŞIK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU**

**GEBZE**

**2011**

## ÖZET

### TEZ BAŞLIĞI: GERİLİM DENGESİZLİKLERİNİN ASENKRON MOTOR PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

#### YAZAR ADI: FUAT IŞIK

Üç fazlı asenkron makineler genlikleri eşit ve aralarında  $120^0$  faz farkı olan gerilimler altında çalışmak üzere tasarlanıp imal edilirler. Ancak birçok pratik sebepten ötürü şebeke gerilimi genelde dengesizdir. Şebekelerde izin verilebilir dengesizlik miktarı muhtelif, ulusal, uluslararası ve endüstriyel standartlarca limitler altına alınmıştır. Şebekede istenmeyen ve önceden belirlenemeyen şekilde ortaya çıkan bu dengesizlikler asenkron motorların ısınmasına, veriminin düşmesine, titreşimli çalışmasına ve ömrünün azalmasına neden olur. Gerilim dengesizliği altındaki asenkron motorun veriminin azalması ciddi bir problemdir. Bu problemi çözmek için asenkron motorun çıkış gücünü gerilim dengesizliği değerine bağlı olarak derate etmek pratik, ucuz ve etkili bir metottür. Bu sayede asenkron motorun verimi yükseltilmiş olur.

Tezin ilk üç bölümünde deretasyon, asenkron motorun çalışma şekli, yapısı ve gerilim dengesizliği tanımlarından bahsedilmiştir. Belirli dengesizlik değerinde analitik ve dinamik olarak analizler yapılarak sonuçlar mukayese edilmiştir. Anma gücünde olmayan asenkron makinenin verimi de gerilim dengesizliğinden etkilenir. Bu problem tezde incelenmiş ve çeşitli yüklerde makinenin deretasyonu yapılmıştır. Simulasyon sonuçları belirli bir yüklenmeden sonra makinenin çıkış gücünün azaltılmasının verimin azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Bu değerden sonra deratasyon yapmanın pratik bir faydası olmadığı tespit edilmiştir.

## SUMMARY

### **TITLE OF THE THESIS: INVESTIGATION INTO THE PERFORMANCE OF THE INDUCTION MOTOR UNDER THE VOLTAGE UNBALANCE**

**AUTHOR: FUAT IŞIK**

A balanced three-phase voltage implies a situation in which the voltages are identical in magnitude and  $120^\circ$  out of phase between any two voltage phasors. Induction machines are designed and manufactured according to this situation. However, network voltage is usually unbalanced depending on many practical reasons. Allowable amount of unbalance in the network, was limited by the national, international and industrial standards. Induction motors are negatively effected by this undesirable and undetectable voltage unbalance. Operation of induction motors on unbalanced voltage can cause such serious ill effects as overheating, vibration and reduction in the efficiency. Reduction in the efficiency of induction motor under voltage unbalance is a serious problem. To solve this problem, induction motor output power is derated, depending on the value of the voltage unbalance. Derating is practical, inexpensive and effective method. In this way, the induction motor efficiency can be increased.

In the first three sections of the thesis, derating, the structure and operation of the induction motors and the definitions of voltage unbalance are discussed. For certain unbalance values static and dynamic analyses have been compared to validate the results. Voltage unbalance may effect the induction machines that are not fully loaded. This problem examined in the thesis and the machine was derated for the various load levels. Simulation results have shown that after a certain load, efficiency reduced depend on output power value of the machine. After this value derating has no benefits over the efficiency of the machine.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimime başladığımdan bu yana, sabırla yardımını ve desteğini benden esirgemeyen, hocam Sayın Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU`na, tez aşamasında yapmış olduğum deneysel çalışmalarda bana yardımcı olan Arş. Görevlisi Özgür KARACASU`ya ve Yrd. Doç. Dr. Bahtiyar DURSUN`a teşekkür ederim.

Bugüne kadar bana her türlü desteği veren, babam Mehmet Naci IŞIK, annem Zeynep IŞIK, ağabeyim Ali Fatih IŞIK`a, gerek iş yaşamımda gerekse yüksek lisans süresince her zaman yanımda olan Makine Yüksek Mühendisi İdris CEBİR`e ve, önceden çalışmış olduğum Arel Elektrik ile halen çalışmakta olduğum Suryapı End. San. Ve Tic. A.Ş çalışanlarına teşekkürü borç bilirim. Hazırlamış olduğum bu çalışmayı rahmetli babam Mehmet Naci IŞIK`a ithaf ediyorum.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET	IV
SUMMARY	V
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
TABLolar DİZİNİ	XIV
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Çalışmanın Amacı	6
1.2 Çalışmanın Sınırları	6
1.3 Çalışmanın İçeriği	6
<b>2. GERİLİM DENGESİZLİĞİ TANIMLARI</b>	<b>8</b>
2.1 Nema Tanımı	8
2.2 IEEE Tanımı	8
2.3. IEC Tanımı	9
2.4 Simetrik Bileşenler	9
2.5. Gerilim Dengesizliği Tipleri	11
2.5.1 Düşük Gerilim Dengesizliği (UVU Under Voltage Unbalance)	12
2.5.2 Yüksek Gerilim Dengesizliği (OVU Under Voltage Unbalance)	13
2.5.3 Açık Dengesizliği	13
2.5.4 Açık ve Genlik Dengesizliği	14
2.6 Deratasyon Faktörü	15
2.7 Dengesizlik Tanımlarının Karşılaştırılması	16
2.8 Sonuç ve Değerlendirme	18

<b>3. ASENKRON MAKİNELER</b>	<b>19</b>
3.1. Giriş	19
3.2 Asenkron Makinelerin Yapısı	19
3.2.1 Stator	20
3.2.2 Rotor	20
3.3. Asenkron Makinelerin Çalışma Prensibi	20
3.4. Asenkron Makinelerin Eşdeğer Devresi	23
3.5 Asenkron Makinenin Boşta Çalışması	24
3.6 Asenkron Makinenin Kısa Devre Çalışması	25
3.7 Asenkron Motorun Pozitif ve Negatif Eşdeğer Devreleri	26
3.8 Dinamik Eşdeğer Devre	28
3.9 Asenkron Motorlarda Gerilim Dengesizliği	30
3.10 Yıllık Enerji Tasarrufu	32
3.11 Sonuç ve Değerlendirme	33
<b>4. ÜÇ FAZLI ASENKRON MOTORUN DENGESİZ ŞARTLARDA STATİK ve DİNAMİK OLARAK ANALİZİNİN YAPILMASI</b>	<b>34</b>
4.1 Dinamik Model	34
4.1.1 Dialog Kutuları ve Parametreler	34
4.2 Statik (Yaklaşık Analiz) Model	38
4.3 Aynı Gerilim Dengesizliği Değerlerinde Asenkron Motorun Akım Güç ve Verim Değerlerinin İncelenmesi	39
4.4 Statik ve Dinamik Modelin Karşılaştırılması	40
4.5 2.2 kW'lık Deney Motorunun Dengesiz Gerilim Altında Boşta Çalışma Deneyi	41
4.6 Farklı Gerilim Dengesizliği Değerlerinde Asenkron Motorun Akım Güç ve Verim Değerlerinin İncelenmesi	43
4.7 Sonuç ve Değerlendirme	44
<b>5. GERİLİM DENGESİZLİĞİ ALTINDAKİ ASENKRON MOTORDA DERATASYON</b>	<b>45</b>
5.1 %3 Gerilim Dengesizliğinde Verimin Değişimi	45
5.2 %4.5 VUF Değerinde Sabit Açılarda Deratasyon Etkisinin İncelenmesi	48
5.3 Sonuç ve Değerlendirme	51

<b>6. SONUÇ</b>	<b>52</b>
Kaynaklar	54
Özgeçmiş	58
EK	59



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\cos\phi$	: Güç Katsayısı
CUF	: Akım Dengesizlik Faktörü
DF	: Deratasyon Faktörü
$f_s$	: Senkron Frekans (Hz)
$f_r$	: Rotor Frekans (Hz)
$I_{ds}$	: d Ekseni Stator Akımı (A)
$I'_{dr}$	: d Ekseni Rotor Akımı (A)
$I_{fe}$	: Faz Başına Demir Kaybı Akımı (A)
$I_m$	: Faz Başına Miknatıslama Akımı (A)
$I_n$	: Nötr Akımı (A)
$I_r$	: Faz Başına Rotor Sargı Akımı (A)
$I_s$	: Faz Başına Stator Sargı Akımı (A)
$I_{qs}$	: q Ekseni Stator Akımı (A)
$I'_{qr}$	: q Ekseni Rotor Akımı (A)
$I_0$	: Faz Başına Boşta Çalışma Akımı (A)
$I_o$	: Sıfır Dizi Devresi Akımı (A)
$I_1$	: Pozitif Dizi Devresi Akımı (A)
$I_2$	: Negatif Dizi Devresi Akımı (A)
$I_{1s}$	: Faz Başına Pozitif Dizi Devresi Stator Sargı Akımı (A)
$I_{1r}$	: Faz Başına Pozitif Dizi Devresi Rotor Sargı Akımı (A)
$I_{2s}$	: Faz Başına Negatif Dizi Devresi Stator Sargı Akımı (A)
$I_{2r}$	: Faz Başına Negatif Dizi Devresi Rotor Sargı Akımı (A)
KN	: Deratasyonun Kırılmaya Başladığı Güç Değeri (kW)
$n_s$	: Stator Sargısının Döner Alan Hızı (d/dk)
$n_r$	: Rotor Sargısının Döner Alan Hızı (d/dk)
p	: Kutup Çifti Sayısı
$P_{in}$	: Giriş Gücü (kW)
$P_K$	: Bakır Kayıpları (kW)
$P_{out}$	: Çıkış Gücü (kW)
$P_{st}$	: Sürtünme ve Ventilasyon Kayıpları (kW)
PVUR	: IEEE Tanımı Dengesizlik Faktörü

- $P_1$  : Pozitif Dizi Devresi Gücü (kW)  
 $P_2$  : Negatif Dizi Devresi Gücü (kW)  
 $R_{fe}$  : Faz Başına Demir Direnci ( $\Omega$ )  
 $R_s$  : Faz Başına Stator Sargı Direnci ( $\Omega$ )  
 $R_r$  : Faz Başına Rotor Sargı Direnci ( $\Omega$ )  
 $s$  : Kayma  
 $T_e$  : Elektriksel Moment (Nm)  
 $T_1$  : Pozitif Dizi Devresi Momenti (Nm)  
 $T_2$  : Negatif Dizi Devresi Momenti (Nm)  
 $V$  : Faz Başına Uygulanan Gerilim (V)  
 $V_{ds}$  : d Ekseni Stator Gerilimi (V)  
 $V'_{dr}$  : d Ekseni Rotor Gerilimi (V)  
 $V_{qs}$  : q Ekseni Stator Gerilimi (V)  
 $V'_{qr}$  : q Ekseni Rotor Gerilimi (V)  
VUF : IEC Tanımı Dengesizlik Faktörü  
VUP : Nema Tanımı Dengesizlik Faktörü  
 $V_1$  : Pozitif Dizi Devresi Gerilimi (V)  
 $V_2$  : Negatif Dizi Devresi Gerilimi (V)  
 $X_K$  : Kısa Devre Reaktansı ( $\Omega$ )  
 $X_m$  : Faz Başına Miknatıslama Reaktansı ( $\Omega$ )  
 $X_r$  : Faz Başına Rotor Sargı Kaçak Reaktansı ( $\Omega$ )  
 $X_s$  : Faz Başına Stator Sargısı Kaçak Reaktansı ( $\Omega$ )  
YO : Asenkron Motorun Yüklenme Oranı  
 $Z_1$  : Pozitif Dizi Eşdeğer Empedansı ( $\Omega$ )  
 $Z_2$  : Negatif Dizi Eşdeğer Empedansı ( $\Omega$ )  
 $\emptyset_{qs}$  : q Ekseni Stator Akısı (Wb)  
 $\emptyset_{ds}$  : d Ekseni Stator Akısı (Wb)  
 $\emptyset'_{qr}$  : q Ekseni Rotor Akısı (Wb)  
 $\emptyset'_{dr}$  : d Ekseni Rotor Akısı (Wb)  
 $n$  : Asenkron Motorun Verimi

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Deratasyon Faktörü İle VUF Arasındaki İlişkiyi Gösteren Grafik	2
2.1 Simetrik Bileşen Devrelerine İlişkin Gerilim Fazörü Gösterimi	9
2.2 Dengeli Durumda Gerilimlerin Zamanla Değişimi	12
2.3 UVU Durumunda Gerilimlerin Zamanla Değişimi	12
2.4 OVU Durumunda Gerilimlerin Zamanla Değişimi	13
2.5 Açık Dengesizliği İçin Gerilimlerin Zamanla Değişimi	14
2.6 Genlik ve Açık Dengesizliği İçin Gerilimlerin Zamanla Değişimi	14
2.7 Gerilim Dengesizliği İle Yüzde Yüklenme Arasındaki İlişkiyi Gösteren Grafik	15
2.8 IEC Standardına Göre %2 Gerilim Dengesizliğindeki Asenkron Motorun Faz Gerilimleri	17
2.9 NEMA Standardına Göre %2 Gerilim Dengesizliğindeki Asenkron Motorun Faz-Faz Gerilimleri	17
2.10 IEEE Standardına Göre %2 Gerilim Dengesizliğindeki Asenkron Motorun Faz Gerilimleri	18
3.1 Asenkron Makinenin Yapısı	19
3.2 Asenkron Makinenin Dört Bölge Çalışması	22
3.3 Asenkron Makinenin Bir Fazına Ait İndirgenmemiş Devre	23
3.4 Asenkron Makinenin Bir Fazının Statora İndirgenmiş T Eşdeğer Devresi	23
3.5 Asenkron Makinenin Bir Fazının Statora İndirgenmiş L Eşdeğer Devresi	23
3.6 Asenkron Makinenin Boşta Çalışma Esnasında Eşdeğer Devresi	24
3.7 Asenkron Makinenin Kilitli Rotor Deneyi Esnasında Eşdeğer Devresi	25
3.8 Pozitif Dizi Devresi	26
3.9 Negatif Dizi Devresi	26
3.10 Asenkron Makinenin q Eşdeğer Devresi	28
3.11 Asenkron Makinenin d Eşdeğer Devresi	29
3.12 Yüzde Gerilim Dengesizliği İle Yüzde Sıcaklık Yükselmesi Arasındaki İlişkiyi Gösteren Grafik	31
4.1 Simulink Model	35
4.2 Simulinkteki Motor Özellikleri	36
4.3 Simulinkteki Motorun Parametreleri	37

4.4 Simulinkteki Gerilim Penceresi	37
4.5 Gerilim Dengesizliği İle İlgili Mathcad`de Hazırlanan Örnek Program	38
4.6 Asenkron Motorun Boşta Çalışmasına Ait Bağlantı Şeması	42
5.1 Farklı VUF Değerlerinde Açık Dengesizliğinde Yüzde Yüklenme İle Verimin Değişimi	47
5.2 %4.5 VUF`da Farklı Gerilim Genliklerinde IEC Standardına Göre Yüzde Yüklenme İle Verimin Değişimi	48
5.3 %4.5 VUF`da Farklı Gerilim Genliklerinde Nema Standardına Göre Yüzde Yüklenme İle Verimin Değişimi	49
5.4 %4.5 VUF`da Farklı Gerilim Genliklerinde IEEE Standardına Göre Yüzde Yüklenme İle Verimin Değişimi	49

## TABLOLAR DİZİNİ

<b><u>Tablo</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
2.1 Asenkron Makinenin Kayma Değerlerine Göre Çalışma Şekilleri	16
3.1 Asenkron Makinenin Kayma Değerlerine Göre Çalışma Şekilleri	21
3.2 Gerilim Dengesizliği Şartlarında Motor Verimi	32
4.1 7.5 kW'lık Asenkron Motor Parametreleri	39
4.2 Aynı VUF Değeri İçin Statik Modelde Elde Edilen Sonuçlar	39
4.3 %3.5 Gerilim Dengesizliği İçin Statik ve Dinamik Analiz Sonuçları	41
4.4 Deney Motorunun Karakteristikleri	41
4.5 Deney Motoruna Ait Deneysel, Statik ve Dinamik Modelde Bulunan Akım Değerleri	42
4.6 Farklı VUF Değerleri İçin Hesaplanan Statik Analiz Sonuçları	43
5.1 %3 VUF İçin Açık Dengesizliğinde Statik Modelde Elde Edilen Sonuçlar	46
5.2 %3 VUF İçin Açık Ve Genlik Dengesizliğinde Statik Modelde Elde Edilen Sonuçlar.	47
5.3% 4.5 VUF İçin Farklı Dengesizlik Tanımları ve Farklı Gerilim Genliklerinde Kırılma Noktalarının Değişimi	50

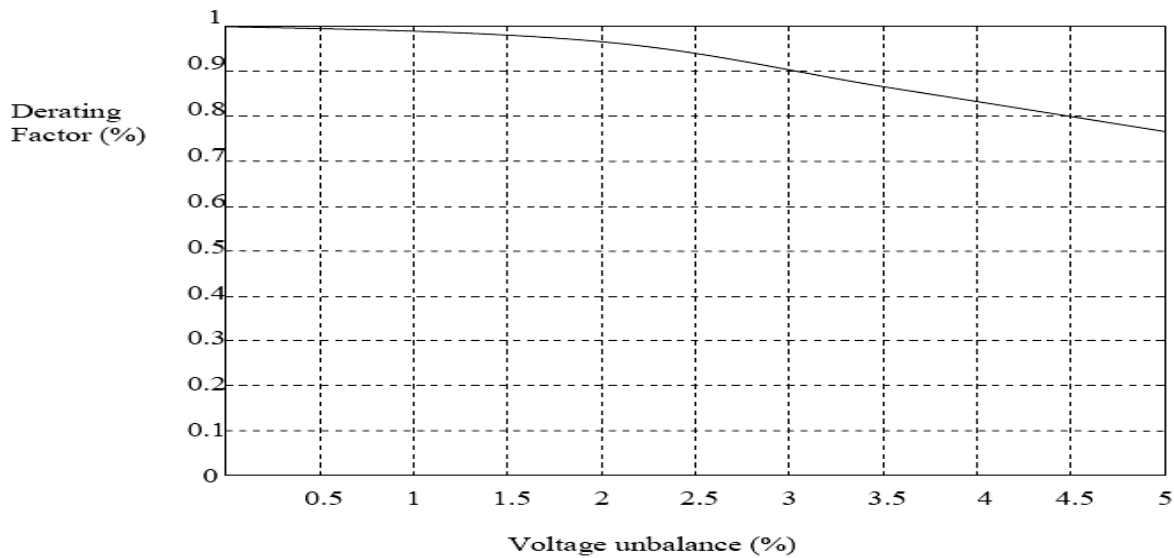
# 1.GİRİŞ

Asenkron motorlar ucuz olması, bakım gereksiniminin az ve yüksek moment değerlerinde çalışması sebebiyle endüstride en yaygın kullanılan elektrik motorlarıdır. Asenkron motorların verimli çalışması için motora uygulanan üç fazlı gerilimin dengeli olması gerekir. Yani üç fazın gerilim genlikleri birbirine eşit ve faz açıları arasında  $120^0$  açı farkı olmalıdır. Ancak pratikte birçok sebepten ötürü gerilimde dengesizlik meydana gelebilir. Gerilim dengesizliği sadece açı veya genlikler arasında olduğu gibi her ikisinde birden de oluşabilir. Sadece genlik dengesizliği yüksek gerilim dengesizliği (OVU Over Voltage Unbalance) ve düşük gerilim dengesizliği (UVU Under Voltage Unbalance) olmak üzere ikiye ayrılır. OVU ve UVU tek faz, iki faz ya da üç faz için de olabilir [1].

Nema [2], IEC [3] ve IEEE [4] olmak üzere üç farklı dengesizlik tanımı literatürde yaygın olarak bulunmaktadır. IEC tanımında, gerilim dengesizliği değeri simetrik bileşenler metodu ile hesaplanırken, Nema tanımında faz-faz gerilimlerin, IEEE tanımında ise faz-nötr gerilimlerin ortalama değerine bağlı olarak hesaplanır. EPDK tarafından 12.09.2006 tarihinde yayımlanan Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari Ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmeliğin 22. Maddesine göre “ölçüm periyodu boyunca (ölçüm periyodu standartta bir hafta olarak tanımlanmaktadır) ölçülen gerilim negatif bileşeni etkin değerlerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının en az %95'inin pozitif bileşenlere oranı en fazla % 2 olmalıdır ve tek fazlı veya iki fazlı yüklerin beslendiği noktalarda bu oran % 3'e kadar çıkabilir.” şeklinde tanımlanmıştır [5]. Temel olarak IEC tanımı esas alınmaktadır.

Dengeli olmayan gerilim altında çalışan asenkron motor çabuk ısınır, verimi düşer, ömrü azalır ve ekstra enerji maliyeti getirir. Dengesizlik durumunda ortaya çıkan olumsuzlukları azaltmak için motorun çıkış gücü azaltılabilir. Bu uygulamaya **deratasyon tekniği** adı verilmiştir. Deratasyon tekniği diğer alternatiflere göre ucuz, pratik ve etkin bir yöntemdir. Deratasyon, mekanik sistem ile alakalıdır. Motor miline yük tarafında uygulanan tork azaltılarak yapılır. Örneğin motor miline pompa bağlıysa pompaya bağlı vana kısılarak deratasyon yapılabilir.

Şekil 1.1`de Nema standardına göre deratasyon faktörü ile gerilim dengesizliği arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmektedir. Dengesizliğin nasıl ölçüleceği ulusal, uluslararası ve endüstriyel standartlarca tanımlanmıştır. Deratasyon işlemi motor tam yüklü durumdayken yapılmaktadır. Oysaki birçok uygulamada motorlar tam yüklü çalıştırılmadığından ötürü asenkron motora sadece anma gücü için değil her çıkış gücü için deratasyon yapılabilir. Deratasyonun verimi artırması beklenmektedir.



Şekil 1.1: Deratasyon Faktörü İle VUF Arasındaki İlişkiyi Gösteren Grafik [2]

Nema metoduna göre dengesizlik faktörü özel bir şekilde hesaplanmaktadır. Şekil 1.1`e bakıldığında herhangi bir gerilim değerinden deratasyon faktörü grafikten çıkartılabilir. Dolayısıyla hangi gerilim dengesizliği değerinde motorun çıkış gücünün ne kadar azaltılması gerektiği kolayca bulunmuş olur. Fakat motora belirli bir çıkış gücü değerinden sonra deratasyon yapılması verimi azaltmaktadır. Verimin azalmaya başladığı bu noktaya **deratasyonun kırılma noktası** adı verilmektedir. Bu çıkış gücü değerinden sonra motoru derate etmenin bir anlamı yoktur.

Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında asenkron motorların dengesiz gerilim altında çalışmasının sorunlara yol açtığı 1930`lu yıllarda fark edilmiştir. 1936 yılında H. R. Reed ve R. J. Koopman %10 gerilim dengesizliği altında çalışan bir asenkron motorun momentinin ve veriminin dengeli duruma göre azalma gösterdiğini belirtmiştir [6].

1954 yılında Williams, asenkron motorların gerilim dengesizliği altında çalıştığında kayıpların arttığı için ve motorun daha fazla ısındığını ve deratasyon yapılmasının gerekliliğini vurgulamıştır [7]. Gaffor, 1959 yılında gerilim dengesizliği altında çalışan asenkron motorun daha fazla ısındığını bu sebepten dolayı da ömrünün azaldığını vurgulamıştır [8]. Berndt, 1963 senesinde yapmış olduğu çalışmada dengesiz gerilim altında çalışan asenkron motorlara deratasyon yapılmasının gerektiğini belirtmiştir [9]. Ching- Yin Lee; çalışmasında IEC, IEEE ve Nema dengesizlik tanımlarını kullanıp dengesizlik hesabı yaparak % 4 dengesizlik için maliyet hesabı yapmıştır. Tayvan`da 3 HP`lik bir asenkron motorun %4 gerilim dengesizliğinde ekstra ne kadar güç çektiği ve ekstra ne kadar enerji maliyeti ortaya çıkardığı hesaplanmıştır [10].

Yaw-Juen Wang, makalesinde 7.5 kW`lık asenkron motor kullanarak IEC standardına göre statik olarak dengesizlik hesabı yapılmıştır. Düşük kayma değerlerinde gerilim ve akım dengesizliği arasında lineer ilişki olduğunu kayma arttıkça hassasiyetin azaldığını belirtmiştir. Belirli gerilim dengesizliğinde motoru verimli çalıştırmak için gerekli kayma değeri üzerinde inceleme yapmış ve kayma ile gerilim dengesizliğinin ters orantılı değiştiğini ifade etmiştir [11]. Pillay ve Hoffman aynı gerilim değerlerinde Nema ile IEC tanımına göre dengesizlik hesabı yapılırken hesaplanan değerlerin birbirine çok yakın olup aralarında %0.8`lik değer farkı olduğunu belirtmiştir. Nema ve IEEE tanımında ise %10 ile %20 arası değer farkı olduğunu ifade etmiştir. Nema`nın deratasyon eğrisinden bahsederek deratasyon grafiğinden deratasyon faktörü bulunarak kayıplar ve sıcaklık yükselmesini hesaplamıştır. %10 gerilim dengesizliğinde OVU durumunda moment ve verim azalır ve hız artarken, UVU halinde ise verim ile hız azalırken momentin arttığını belirtmiştir [12]. Enriqe Quispe çalışmasında dengesiz harmonik gerilimlerin motorun verimine ve bakır kayıplarına etkisini incelemiştir. Harmonik voltage faktor (HFV) ile derating faktör (DF) arasındaki ilişki irdelenmiştir. Makalede HVF değerinin %5`den fazla olması önerilmiyor. HVF değeri % 5`i aştığında motorun derate edilmesi gerektiği, HVF değeri % 11`den fazla ise motorun % 25 oranında derate edilmesi gerektiği ifade ediliyor [13].



J. Faiz ve H. Ebrahimpour ve P. Pillay hazırlamış oldukları çalışmada; Nema ve IEC dengesizlik tanımlarının moment ve verime etkisi kıyaslanmıştır. %6 gerilim dengesizliğinde UVU için verim ve moment değerlerinin Nema tanımında daha fazla azalma gösterdiği belirtilmektedir. Ayrıca bir fabrikanın soğutma sisteminde çalışan 15 kW gücündeki asenkron motorun bir haftalık çalışması boyunca gerilimleri ölçülerek Nema tanımı için bir haftada otuz nokta için gerilim dengesizliği grafiği oluşturulmuştur. %3 gerilim dengesizliği için dört farklı durumda moment ve verim değerleri azalma gösterdiği belirtilmiştir [14].

J. Faiz ve H. Ebrahimpour ve P. Pillay, diğer bir makalesinde verimin dengesizlik arttıkça azalma gösterdiğini bunun da ekstra enerji maliyetine neden olduğunu; bunu gidermek için de deratasyon yapılması gerektiğini ifade etmiştir. %1-%6 gerilim dengesizlik değer aralığında tüketilen ekstra enerji maliyeti hesaplanmıştır [15]. Davar Mirabbasi'nin çalışmasında 15 kW gücünde asenkron motorun dengeli durumda, açılar sabit, genlik dengesizliğinde; genlikler sabit, açı dengesizliğinde ve hem genlik hem de açı dengesizliğinde momentinin değişimi incelenmiştir. Her 3 durumda da moment azalma gösterdiği ifade edilmiştir [1]. Kanwarjit Singh Sandhu ve Vineet Chaudhary'nin makalesinde ise farklı VUF değerlerinde ve sabit momentte düşük gerilim (OVU) ve yüksek gerilim (UVU) dengesizliklerinde akım, güç verim ve kayıplar statik ve dinamik olarak hesaplanmıştır. Her iki durum için de verimin azaldığı vurgulanmıştır [16]. Ansari ve Deshpande çalışmasında gerilim dengesizliğinin moment, verim, güç faktörü, kayıplar ve hız etkisini analiz etmiştir. Gerilim dengesizliği sabit tutularak moment artırıldığında güç faktörü, akım, bakır kayıpları artarken, hız ve verim azalmıştır. Moment sabit tutularak gerilim dengesizliği değeri artırıldığında ise güç faktörü, verim, bakır kayıpları ve hız azalma gösterirken, akımın artış gösterdiği belirtilmiştir [17].

A. Jalilian ve R. Roshanfekar yapmış oldukları çalışmada aynı gerilim dengesizliği değerinde pozitif dizi geriliminin güç faktörü ile doğru orantılı olduğunu, negatif dizi geriliminin güç faktörünün değişiminde rol oynamadığı belirtilmiştir. Sabit yüklenmede ve sabit pozitif dizi geriliminde, gerilim dengesizliği artınca negatif dizi akımı artış gösterdiğinden ötürü akım dengesizlik faktörü ve kayıplar artarken verimin azalma gösterdiği ifade edilmiştir [18].

Vamsi Krishna'nın çalışmasında gerilim ve akım dengesizliğinden bahsedilmiş olup 7.5 kW gücünde 6 kutuplu asenkron motorun %7.03'lük gerilim dengesizliğinde akım değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalar incelendiğinde negatif dizi geriliminin açısı pozitif olması gerekirken negatif bulunduğundan akımlar hatalı hesaplandığı görülmüştür [19]. Reza Kianizedi'nin çalışmasında IEC, IEEE ve Nema dengesizlik tanımlarından bahsedilerek 15 kW gücündeki bir asenkron motor için deneysel ve dinamik olarak (Simulink) dengesizlik analizi yapılmıştır. Sonuç olarak VUF faktörünün artmasıyla bakır kayıpları artarken, momentin, OVU için arttığı UVU durumunda ise azaldığı vurgulanmıştır [20].

Ayang Hiendro makalesinde IEC standardında %6'lık sabit gerilim dengesizliğinde sabit momentte OVU ve UVU durumları için dengeli duruma göre akım ve kayıplar mukayese edilmiştir. OVU durumunda kayıplar ve stator akımları UVU'ya göre artış göstermiştir. Ayrıca ister OVU ister UVU durumu olsun akım ve kayıpların dengeli hale göre her zaman daha yüksek değerde olduğu belirtilmiştir [21]. Ali Ebadi yapmış olduğu çalışmada gerilim dengesizliğinin momente etkisini iki boyutlu sonlu elemanlar metodu ile simule etmiştir. Sıfır dizi devresi ile negatif dizi devresi momentini ayrı ayrı incelemiştir. İlk olarak aynı gerilim dengesizliği değerinde sekiz farklı durumda momentlerin değişimi incelenmiştir. Bu durumda hem sıfır dizi devresi hem de negatif dizi devresi momenti artış göstermiştir. İkinci durumda sabit pozitif dizi geriliminde yedi farklı gerilim dengesizliği değeri için momentler incelenmiş. Ve sıfır dizi devresi momenti sabitken negatif dizi devresi momenti artış göstermiştir [22].

Bu literatür özeti gösterir ki; asenkron motorlarda gerilim dengesizliği seksen seneye yakındır incelenmekte olan ve güncelliğini yitirmeyen bir konudur. Bunun başlıca nedeni asenkron motorların veriminin azalmasının ciddi bir ekonomik problem olmasıdır.

## 1.1 Çalışmanın Amacı

Literatür taraması VUF'a dayalı klasik deratasyon tekniklerinin yetersiz kaldığını göstermiştir. Yapmış olduğumuz çalışmada bu yetersizlikler vurgulanmıştır. Deratasyon işlemi motor tam yüklü durumdayken yapılmaktadır. Halbuki pratik bir çok uygulamada motorlar %100 yüklü çalıştırılmamaktadır. Az yüklü motorlarda verimi arttırmak için deratasyon yapılması gereklidir. Bu tezde literatürde ilk defa olarak hangi yüklenme durumlarında deratasyon yapılmasının gerekli olacağı incelenmiştir. Her bir dengesizlik durumu için deratasyonun nereye kadar verimi artırdığı böylece belirtilmektedir. Sonuçların genelleştirilerek endüstriyel kullanıcılar için bir rehber olması amaçlanmaktadır.

## 1.2 Çalışmanın Sınırları

Tez içerisinde incelenilen konular ve bu konularla alakalı analizlerde:

- Asenkron motor ile ilgili analizler; kullanımı basit ve verilerin kısa sürede elde edilebilmesinden dolayı statik model kullanılacaktır. Ancak statik modelin geçerliliği dinamik simülasyonlarla ve deneyle teyit edilecektir.
- Asenkron motor deratasyon analizleri deneysel olarak incelenmeyecektir.

## 1.2 Çalışmanın İçeriği

Çalışmanın ilk bölümünde genel olarak gerilim dengesizliği ve deratasyondan bahsedilmektedir.

2. bölümde gerilim dengesizliği tanımları ve simetrik bileşenlere değinilmektedir.

3. bölümde asenkron motorun çalışma şekli, kararlı hal ve dinamik eşdeğer devrelerinin güç, moment ve akım formülleri incelenmektedir.

4. bölümde gerilim dengesizliği tanımları dengesizliğin asenkron motora etkisi ve deratasyon faktörü üzerinden durulmuştur. Ayrıca 2.2 kW gücündeki asenkron motor deneysel olarak boşa çalıştırılarak dengesizliğin motoru ne şekilde etkilediği incelenmektedir. Statik olarak (Mathcad), ve dinamik olarak (Matlab Simulink) yapılan analiz sonuçları incelenmiş ve çıkan sonuçlar arasındaki farklılıkların sebebi araştırılmıştır. Aynı gerilim dengesizliği değerinde genlik ve açı ile yapılan dengesizlikte motorun veriminin nasıl değiştiği irdelenmiştir. Ayrıca farklı gerilim dengesizliklerinde dengesizliğin verim ile nasıl değiştiği incelenmektedir.

5. bölümde aynı gerilim dengesizliğinde sadece açı dengesizliğinde ve hem açı hem genlik dengesizliğinde deratasyon yapıldığında verimin değişimi sorgulanmıştır. Ayrıca yine sabit gerilim dengesizliğinde açılar sabit tutularak farklı gerilim genliklerinde motora deratasyon yapıldığında hangi güç değerinde deratasyonun anlamsız olduğunun üç farklı dengesizlik tanımı için (Nema, IEC ve IEEE) bulunarak kırılma noktası değerleri karşılaştırılmıştır. Farklı VUF değerlerinde UVU (Under Voltage Unbalance) ve OVU (Over Voltage Unbalance) durumları için verim ve akımdaki değişimler analiz edilmektedir.

Son bölüm olan ek kısmında 5. bölümde Tablo 5.3'deki değerlerin ayrıntılı dökümü verilmektedir.

## 2. GERİLİM DENGESİZLİĞİ TANIMLARI

NEMA [2] ve IEC [3] standardı olmak üzere iki türlü dengesizlik tanımı vardır. Nema tanımı National Electrical Manufacturer Association Motor and Generator Standard (NEMA MGI) tarafından tanımlanmış olup hat gerilimlerinin ortalama değerine bağlı olarak hesaplanır. Faz nötr gerilimlerinin ortalama değerine bağlı olarak hesaplanan dengesizlik tanımına ise IEEE dengesizlik tanımı adı verilir [4]. IEEE dengesizlik tanımı Nema tanımının farklı bir çeşididir. IEC standardı ise International Electro Technical Commission (IEC) simetrik bileşenler metodu kullanılarak negatif dizi geriliminin pozitif dizi gerilimine oranından hesaplanır. IEC standardı Avrupa ülkelerinde yaygın olarak kullanılır. Nema standardı ise daha çok Amerika`da kullanılan standarttır.

### 2.1 Nema Tanımı

Hat gerilimleri genliklerinin ortalamasının mutlak değerleri ile en düşük hat geriliminin mutlak değeri arasındaki farkın ortalama hat geriliminin mutlak değerine bölümünün yüzdesi olarak ifadesidir. Bir başka deyişle hat gerilimleri arasındaki dengesizliktir.

$$\%VUP = \frac{|\text{Hat Gerilimlerin Ortalaması}| - |\text{En Düşük Hat Gerilimi}|}{|\text{Ortalama Hat Gerilimi}|} \times 100 \quad (2.1)$$

### 2.2 IEEE Tanımı

Faz gerilimlerinin genliklerinin ortalamasının mutlak değerleri ile en düşük faz geriliminin mutlak değeri arasındaki farkın ortalama faz geriliminin mutlak değerine bölümünün yüzdesi olarak ifadesidir.

$$\%PVUR = \frac{|\text{Faz Gerilimlerin Ortalaması}| - |\text{En Düşük Faz Gerilimi}|}{|\text{Ortalama Faz Gerilimi}|} \times 100 \quad (2.2)$$

## 2.3 IEC Tanımı

IEC tanımına göre gerilim dengesizliği hesabı yapılırken simetrik bileşenler metodu kullanılır. Negatif dizi geriliminin ( $V_2$ ) pozitif dizi gerilimine ( $V_1$ ) oranı gerilim dengesizlik faktörünü verir. Gerilim dengesizlik faktörü (VUF) Denklem 2.3'deki gibi hesaplanır.

$$\%VUF = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (2.3)$$

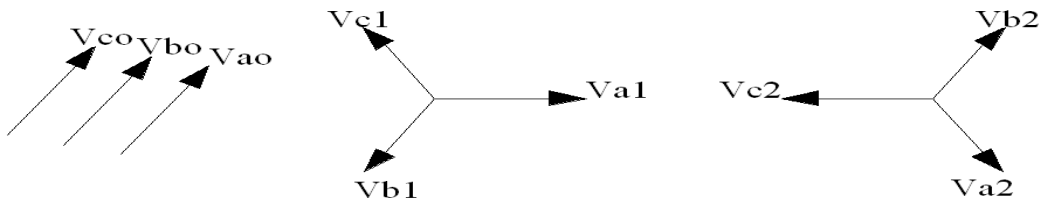
Gerilimlerde dengesizlik olduğunda akımlarda da dengesizlik meydana gelir. Akım dengesizlik faktörü (CUF) Denklem 2.4'deki gibi hesaplanır.

$$\%CUF = \frac{I_2}{I_1} \times 100 \quad (2.4)$$

Akım dengesizlik faktörü negatif dizi akımının ( $I_2$ ) pozitif dizi akımına ( $I_1$ ) oranıdır.

## 2.4 Simetrik Bileşenler

IEC tanımı ve asenkron makine modelleri simetrik bileşenler metodunu esas aldığından bu bölümde konuyla alakalı kısa bir hatırlatma sunulacaktır. Simetrik bileşenler metodu, üç fazlı dengesiz sistemlerin basitleştirilerek incelenmesini sağlar. Simetrik bileşenler metodu dengeli üç fazlı sistemlere uygulandığında sıfır, pozitif ve negatif olmak üzere üç adet bileşen devresi elde edilir. Sıfır bileşen devresine ilişkin vektörler arasında faz farkı yoktur. Pozitif ve negatif bileşen devre vektörlerinin arasında  $120^\circ$  faz farkı vardır. Pozitif ve negatif bileşen devre vektörlerinin yönleri farklıdır. Gerçek sistemdeki a,b,c fazlarına ilişkin gerilim ve akımlar; sıfır, pozitif ve negatif fazörleri kullanılarak elde edilebilir [23]. Şekil 2.1'de simetrik bileşen devrelerine ilişkin gerilim fazörleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Simetrik Bileşen Devrelerine İlişkin Gerilim Fazörü Gösterimi

Şekil 2.1`den görüldüğü gibi sıfır dizi gerilimlerinin faz açıları daima sıfırdır. Pozitif ve negatif dizi gerilimleri faz açıları arasında  $120^0$  açı farkı vardır.

Pozitif dizi geriliminin fazörleri:

$$V_a^+ = V_1 < 0$$

$$V_b^+ = V_1 < -120$$

$$V_c^+ = V_1 < 120$$

Negatif dizi geriliminin fazörleri:

$$V_a^- = V_2 < 0$$

$$V_b^- = V_2 < 120$$

$$V_c^- = V_2 < -120$$

Sıfır dizi geriliminin fazörleri:

$$\bar{V}_a^0 = V_0 < 0$$

$$\bar{V}_b^0 = V_0 < 0$$

$$\bar{V}_c^0 = V_0 < 0$$

$V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  faz gerilimleridir.  $V_0$ ,  $V_1$  ve  $V_2$  ise sıfır, pozitif ve negatif dizi gerilimleridir.

$$\bar{V}_a = \bar{V}_a^0 + \bar{V}_a^+ + \bar{V}_a^- = V_0 + V_1 + V_2 \quad (2.5)$$

$$\bar{V}_b = \bar{V}_b^0 + \bar{V}_b^+ + \bar{V}_b^- = V_0 + (V_1 < -120) + (V_2 < 120) \quad (2.6)$$

$$\bar{V}_c = \bar{V}_c^0 + \bar{V}_c^+ + \bar{V}_c^- = V_0 + (V_1 < 120) + (V_2 < -120) \quad (2.7)$$

Yukarıdaki denklemler matris haline getirilirse Denklem 2.8`deki matris elde edilir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 < -120 & 1 < 120 \\ 1 & 1 < 120 & 1 < -120 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Denklem 2.8`deki matriste  $1 < 120$  değerine  $a$ ,  $1 < -120$  değerine ise  $a^2$  verilirse matris Denklem 2.9`daki halini alır.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Benzer şekilde faz-nötr ve dizi akımları Denklem 2.11 ve Denklem 2.12'deki gibi hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Dengeli yıldız bağlı bir sistemde nötr akımı sıfırdır. Sistem dengesiz ise aşağıdaki ifade ile hesaplanır:

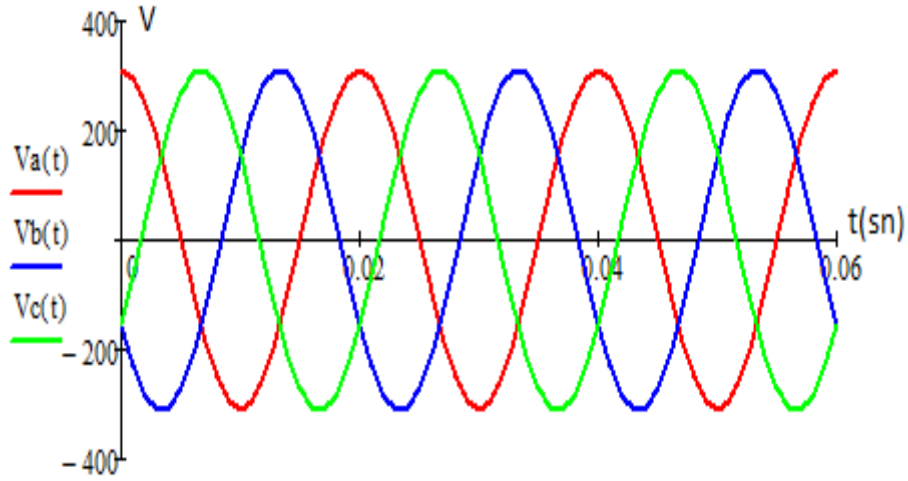
$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (2.13)$$

Dengeli yıldız bağlı bir sistemde nötrden akım akmadığından sıfır dizi akımı sıfırdır. Sistemde dengesizlik olduğu anda nötrden akım akmaya başlar ve sıfır dizi akımı sıfırdan farklı bir değer alır.

## 2.5 GERİLİM DENGESİZLİĞİ TİPLERİ

Bu bölümde gerilim dengesizliği çeşitleri belirtilmektedir. Gerilim dengesizliği açılar sabitken genlikler arasında, genlikler sabitken açılar arasında ya da açı ve genlik dengesizliği beraber olabilir. Sabit açılarda genlik dengesizliği yüksek gerilim dengesizliği (OVU Over Voltage Unbalance) ve düşük gerilim dengesizliği (UVU Under Voltage Unbalance) olmak üzere ikiye ayrılır. OVU ve UVU tek faz, iki faz ya da üç faz için de olabilir. Şekil 2.2'de dengeli durumda 220V faz-nötr rms gerilim değerinde gerilimlerin zamanla değişimi gösterilmektedir.

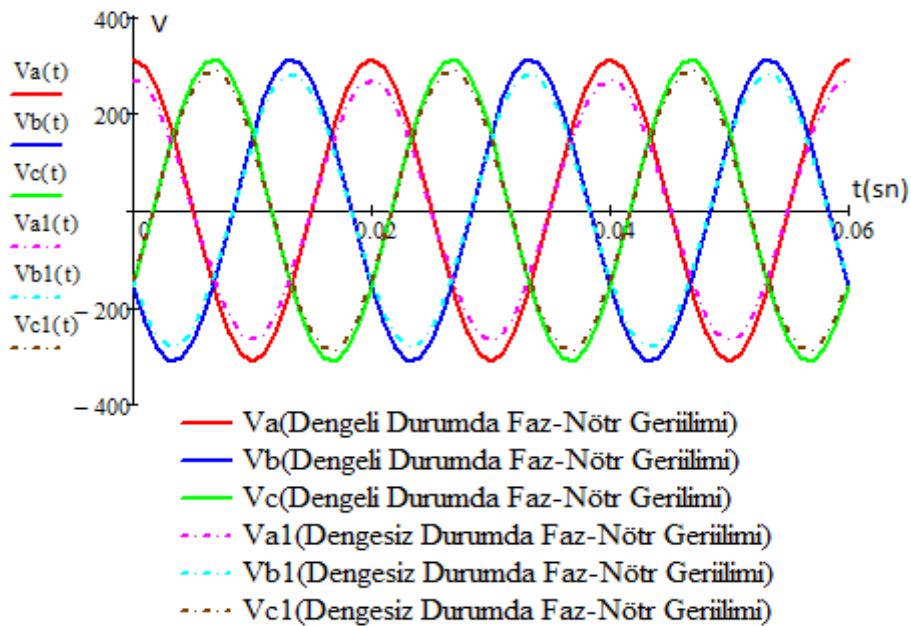




Şekil 2.2: Dengeli Durumda Gerilimlerin Zamanla Değişimi

### 2.5.1 Düşük Gerilim Dengesizliği (UVU Under Voltage Unbalance)

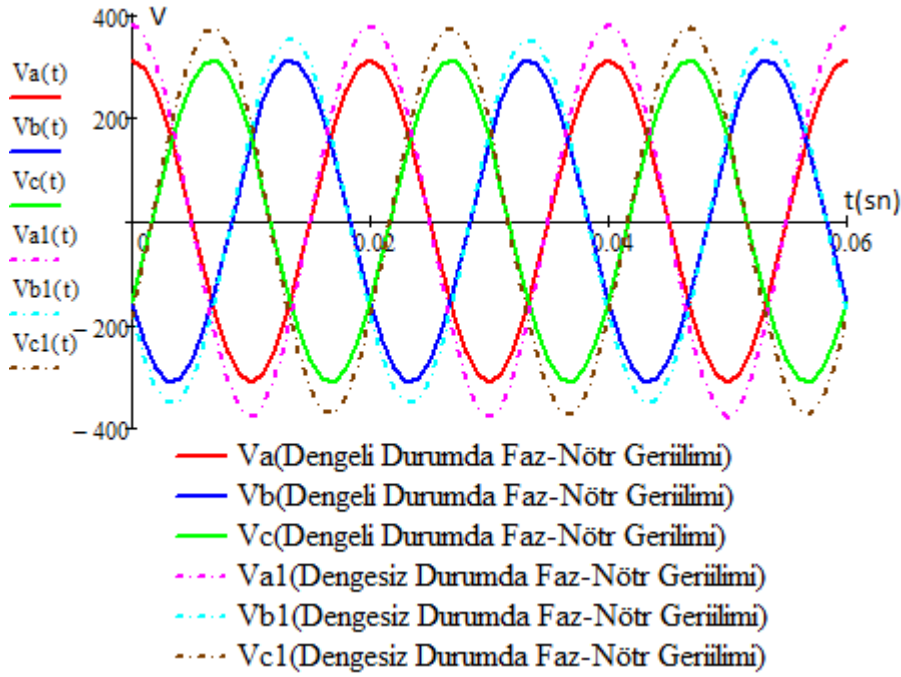
Nominal çalışma geriliminin altındaki gerilim genliklerinde oluşan dengesizliktir. Herhangi bir güçteki üç fazlı bir asenkron motorun faz nötr rms gerilimi 220 V olduğu kabul edildiğinde 220V'un altındaki gerilim değerlerinde meydana gelen dengesizliktir. Şekil 2.3`de  $V_{a1}=190V$ ,  $V_{b1}=200V$ ,  $V_{c1}=205V$  rms gerilimler ve dengeli ( $V_a=V_b=V_c=220$  V) durum için sabit açılarda gerilimlerin zamanla değişimi verilmektedir.



Şekil 2.3: UVU Durumunda Gerilimlerin Zamanla Değişimi

### 2.5.2 Yüksek Gerilim Dengesizliği (OVU Over Voltage Unbalance)

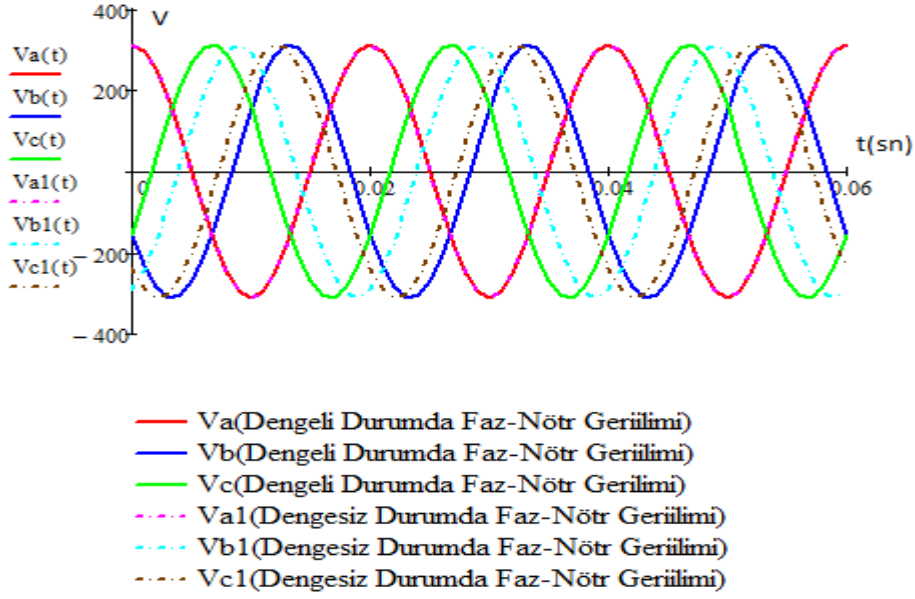
Nominal çalışma geriliminin üstündeki gerilim genliklerinde oluşan dengesizliktir. Herhangi bir güçteki üç fazlı bir asenkron motorun faz nötr gerilimi 220 V olduğu kabul edildiğinde 220 V'un üstündeki gerilim değerlerinde meydana gelen dengesizliktir. Şekil 2.4'de  $V_{a1}=270$  V,  $V_{b1}=250$  V,  $V_{c1}=265$  V rms gerilimler ve dengeli durum için sabit açılarda gerilimlerin zamanla değişimi verilmektedir.



Şekil 2.4: OVU Durumunda Gerilimlerin Zamanla Değişimi

### 2.5.3 Açık Dengesizliği

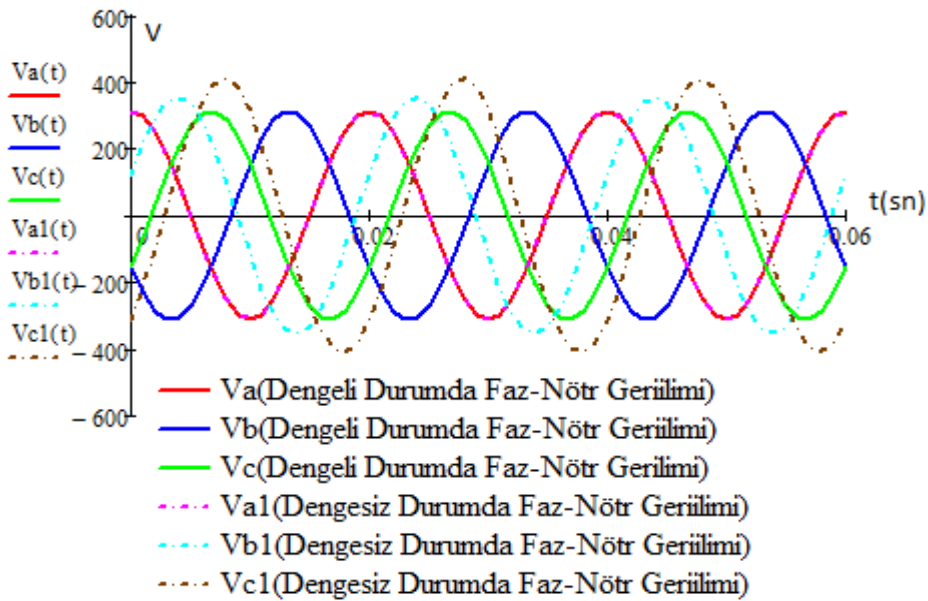
Dengeli bir sistemde üç faz gerilimlerinin açıları arasında  $120^\circ$  faz farkı olması gerekir. Eğer motorun üç faz geriliminde açı dengesizliği olursa faz açıları arasında  $120^\circ$  açı farkı olmaz. Şekil 2.5'de  $V_{a1}=220 < 0$  V,  $V_{b1}=220 < 200$  V,  $V_{c1}=220 < 140$  V rms gerilimler ve dengeli durum için sabit genliklerde açı dengesizliği gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Açık Dengersizliği İçin Gerilimlerin Zamanla Değişimi

#### 2.5.4 Açık ve Genlik Dengersizliği

Sabit genliklerde açı dengersizliği olduğu gibi hem genlik hem de açı dengersizliği durumu olabilir. Şekil 2.6'da  $V_{a1}=220 < 0$  V,  $V_{b1}=250 < 290$  V,  $V_{c1}=290 < 140$  V rms gerilimler ve dengeli durumda genlik ve açı dengersizliğinde gerilimlerin zamanla değişimi gösterilmektedir.



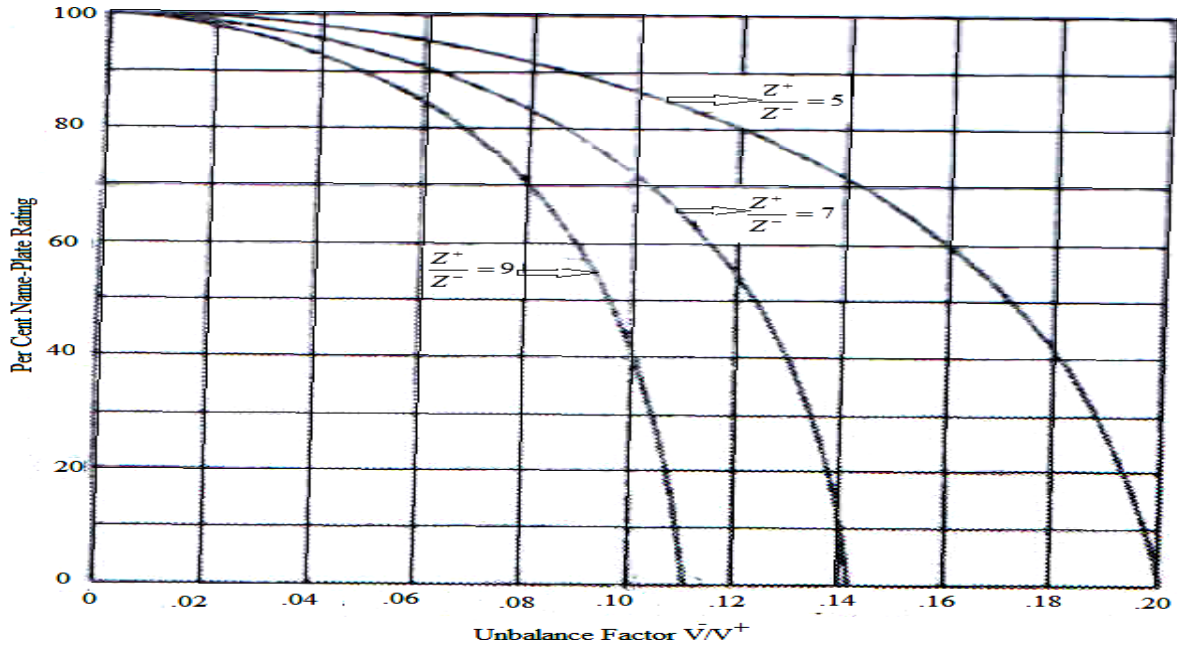
Şekil 2.6: Açık Genlik ve Dengersizliği İçin Gerilimlerin Zamanla Değişimi

## 2.6 Deratasyon Faktörü

Deratasyon faktörü dengesiz gerilim altında verimsiz çalışan bir asenkron motorun verimini artırmak için çıkış gücünün yüzde kaç oranında azaltılması gerektiğini veren bir katsayıdır. Giriş bölümünde Nema'nın oluşturmuş olduğu yüzde gerilim dengesizliği ile yüzde deratasyon faktörü arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmektedir. Williams, 1954 yılında yapmış olduğu çalışmada gerilim dengesizliği altında çalışan asenkron motorun çıkış gücünün ne kadar azaltılması gerektiğine dair bir çalışma yapmıştır [7].

$$DF = \sqrt{1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right)^2} \cdot \text{YüklenmeOranı} = \sqrt{1 - \left( \frac{I_2}{I_s} \right)^2} \cdot \text{YüklenmeOranı} \quad (2.14)$$

Denklem 2.14'de  $I_2$  negatif dizi akımı,  $I_s$  ise motorun nominal stator akımıdır.  $V_2/V_1$  ifadesi IEC standardına göre gerilim dengesizliği değerini verir. Deratasyon faktörü pozitif ve negatif dizi akımları cinsinden ya da pozitif, negatif dizi empedansları ve gerilimleri cinsinden hesaplanabilir. Karekök içerisindeki ifade ile motorun yüklenme oranı çarpılırsa deratasyon değeri elde edilmiş olur.



Şekil 2.7: Gerilim Dengesizliği İle Yüzde Yüklenme Arasındaki İlişkiyi Gösteren Grafik [7]

Şekil 2.7`de üç ayrı motor için yüzde yüklenme oranı ile gerilim dengesizliği faktörü arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmektedir. Grafikteki eğriler pozitif dizi empedansının negatif dizi empedansına oranıdır. Örneğin  $Z_1/Z_2=7$  için, %6 gerilim dengesizliğinde %90 yüklenmede deratasyon faktörü 0.819 çıkar.

## 2.7 Dengesizlik Tanımlarının Karşılaştırılması

Aynı genlik ve açılarda gerilim dengesizliği hesabı yapılırken dengesizlik değeri IEC, Nema ve IEEE tanımlarına göre değişim gösterir. Bununla ilgili olarak Tablo 2.1`de faz-nötr gerilim değerlerine göre farklı dengesizlik tanımları için dengesizlik değerleri hesaplanmaktadır.

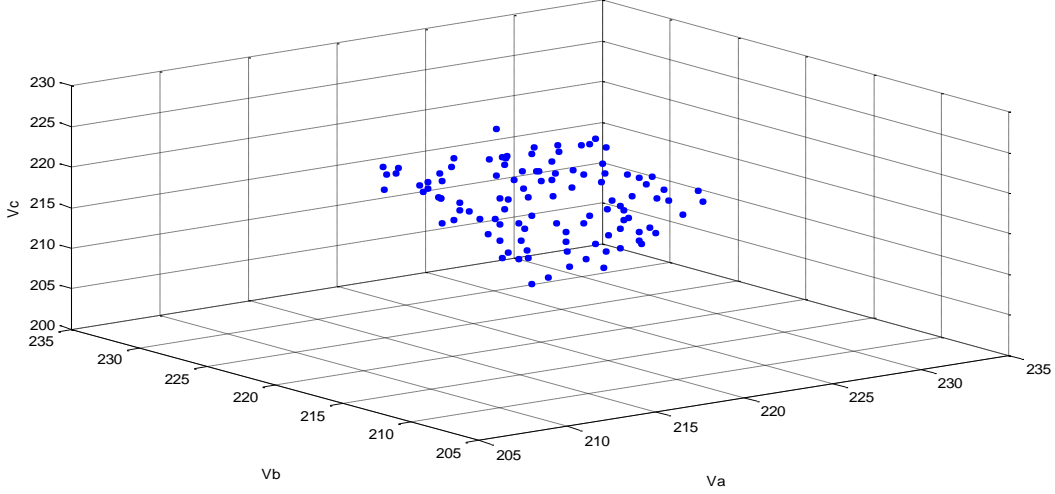
**Tablo 2.1:** Asenkron Makinenin Kayma Değerlerine Göre Çalışma Şekilleri

Dengesizlik Türü	GERİLİMLER			GERİLİM DENGESİZLİĞİ		
	V <sub>a</sub> (V)	V <sub>b</sub> (V)	V <sub>c</sub> (V)	NEMA	IEC	IEEE
Genlik	224.27<0	220<240	209.24<120	% 1.96	%2.1	%3.95
Açı	220<0	220<231.9	220<116	%3.96	%4.0	0

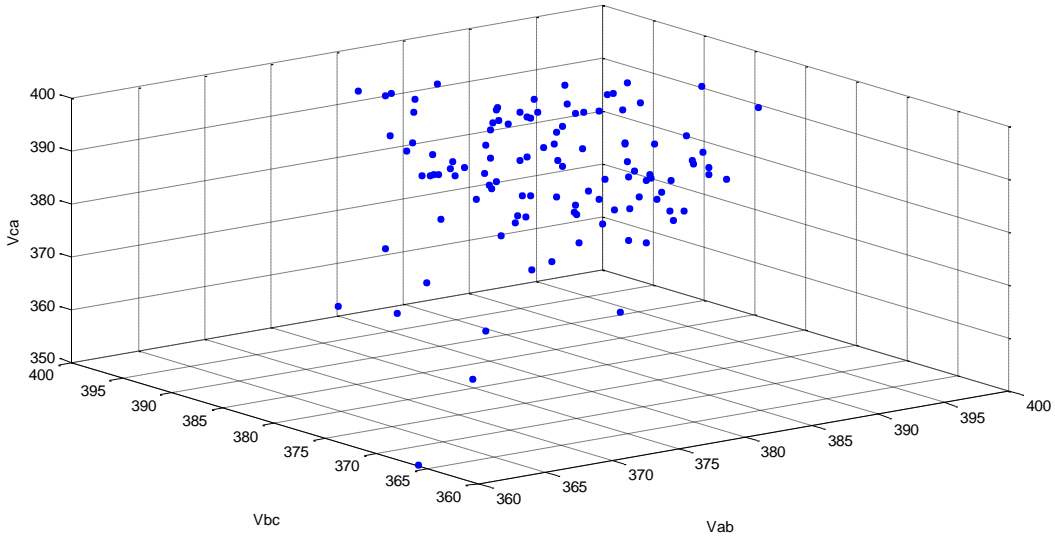
Nema dengesizlik tanımı faz-faz gerilimleri arasındaki dengesizlik olduğundan gerilimlerin açısı dengesizlik değerini etkiler. IEEE ise faz-nötr gerilimleri arasındaki dengesizlik olduğundan gerilimlerin açıları dengesizlik değerini etkilemez. Her iki standartta da dengesizlik hesabı yapılırken gerilimlerin ortalaması hesaba katılır. IEC standardına göre dengesizlik hesabında simetrik bileşenler metodu kullanılır. Dengesizlik değeri gerilimlerin genlikleri ve açılarına bağlı olarak değişir.

Tablo 2.1`de faz-nötr gerilimleri verilmektedir. Nema tanımında dengesizlik hesabı yapılırken faz-nötr gerilimleri faz-faz gerilimlere dönüştürülerek hesaplama yapılmıştır. Nema, IEC ve IEEE tanımına göre dengesizlik değerleri birbirinden farklı çıkar. IEEE tanımı açılara bağlı olmadığından genliklerin sabit, açıların farklı olduğu 2. durumda dengesizlik sıfır çıkar. Aynı gerilim dengesizliği çok değişik gerilimler üretebilir. Bunların her birinin motor verimine etkisi de farklı olacaktır.

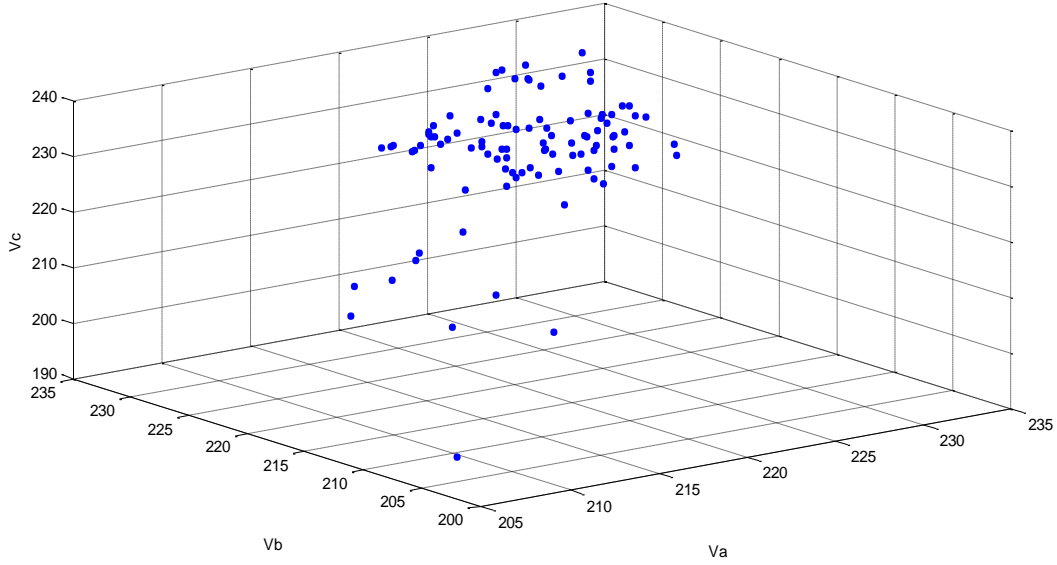
Aşağıdaki şekillerde IEC, Nema ve IEEE standardına göre %2'lik sabit gerilim dengesizliğinde açılardan dengeli olduğu durumda farklı gerilim değerlerine göre oluşturulmuş olan grafikler sunulmuştur. Bu grafikler farklı gerilim genliklerinde aynı gerilim dengesizliğinin elde edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 2.8: IEC Standardına Göre %2 Gerilim Dengesizliğindeki Asenkron Motorun Faz Gerilimleri



Şekil 2.9: NEMA Standardına Göre %2 Gerilim Dengesizliğindeki Asenkron Motorun Faz- Faz Gerilimleri



Şekil 2.10: IEEE Standardına Göre %2 Gerilim Dengesizliğindeki Asenkron Motorun Faz Gerilimleri

Şekil 2.8-2.9 ve 2.10`da %2 gerilim dengesizliği için açılar dengeli tutulup gerilim genlikleri değiştirilerek istenen dengesizlik değeri elde edilmektedir. Nema standardı faz-faz gerilimleri arasındaki dengesizlik olduğundan Şekil 2.9`da gerilimler faz-faz gerilimleridir. IEEE ve IEC standardında dengesizlik hesabı yapılırken faz-nötr gerilimleri kullanılacağından Şekil 2.8 ve Şekil 2.10`da gerilimler faz-nötr gerilimleridir.

## 2.8 Sonuç ve Değerlendirme

IEC ve Nema standardı olmak üzere başlıca iki türlü dengesizlik tanımı vardır. IEEE dengesizlik tanımı Nema tanımının farklı bir çeşididir. Aynı gerilim değerlerinde dengesizlik hesabı yapılırken üç farklı dengesizlik tanımı için gerilim dengesizliği değerleri farklı çıkar. Gerilim dengesizliği açı ve genliklerde ayrı ayrı olduğu gibi açı ve genlik dengesizliği bir arada olabilir. Genlik dengesizliği yüksek gerilim dengesizliği (OVU) ve düşük gerilim dengesizliği (UVU) olmak üzere ikiye ayrılır. Deratasyon faktörü gerilim dengesizliğinden dolayı verimi azalan bir asenkron motorun verimini artırmak için çıkış gücünün yüzde kaç oranında azaltılması gerektiğini veren bir katsayıdır.

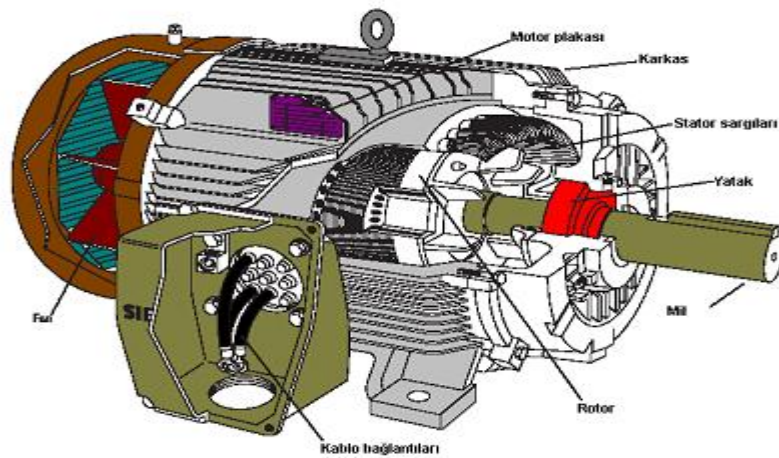
## 3. ASENKRON MAKİNELER

### 3.1 Giriş

Bu bölümde konunun daha iyi anlaşılması için asenkron makinelerin çalışması ve yapısı hakkında genel bilgiler verilecektir. Elektrik makineleri, transformatörler gibi hareket etmeyen makineler ile, girişine uygulanan enerjinin şeklini değiştirerek veren, yani hareket eden makinelerin geneli için yapılan tanımlamadır. Hareket eden elektrik makineleri girişine uygulanan enerji şekline göre motor ve generatör olmak üzere ikiye ayrılır. Girişinde aldığı mekanik enerjiyi çıkışta elektrik enerjisi olarak veriyorsa **generatör çalışma**, girişinde aldığı elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürüyorsa buna **motor çalışma** denir. Enerjilerin birbirine çevrildiği duruma **elektromekanik enerji dönüşümü** denir. Asenkron makineler motor olarak piyasada en çok kullanılan motor tipidir. Bunun nedeni olarak ucuz ve bakım gereksiniminin az olması gösterilebilir.

### 3.2 Asenkron Makinelerin Yapısı

Asenkron makineler genel olarak sabit duran stator ve kendi çevresinde dönen rotor başta olmak üzere gövde, mil, kapaklar, pervane gibi parçalardan oluşur.



Şekil 3.1 Asenkron Makinenin Yapısı [24]



### 3.2.1 Stator

Stator, asenkron makinenin duran parçasıdır. Statorun görevi manyetik alanı üretecek sargıyı barındırması ve manyetik akının rotora iletilmesini sağlamaktır. Stator sargıları statora açılan oluklarda bulunur.

### 3.2.2 Rotor

Elektrik motorlarının dönen parçalarına **rotor** denir. Asenkron makineler rotor yapısına göre sincap kafesli ve bilezikli olmak üzere ikiye ayrılır. Sincap kafesli asenkron makinede oluklara yerleştirilen iletkenler rotor silindirin her iki ucundan kısa devre edilir. Bilezikli asenkron makinede rotorda kafes yerine sargılar vardır. Büyük güçlü vinçlerde kompresör ve fanlarda ağır kalkış koşullarında çalışan yüksek eylemsizlikli yüklerde kullanılır.

## 3.3 Asenkron Makinelerin Çalışma Prensibi

Asenkron makineler döner alan prensibine göre çalışırlar. Rotoru sabit mıknatıslı olduğu için senkron makinede olduğu gibi uyarma kaynağına gereksinimleri yoktur. Asenkron makinenin stator sargılarına üç faz uygulandığı zaman makinede döner alan oluşur. Oluşan döner alan hızına **senkron hız** ( $n_s$ ) denir. Denklem 3.1 ile hesaplanır.

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1`de  $f_s$  motorun senkron hızına özdeş olan frekans,  $p$  ise kutup çifti sayısıdır. Döner alanın rotor iletkenlerini kesmesiyle Faraday yasasına göre gerilim endüklenir. Endüklenen gerilimle birlikte rotorda akım akışı meydana gelir. Biot-Savart yasasına göre manyetik alan içerisinde iletkende akım akması sonucu iletkene bir kuvvet etki eder. İletkene kuvvet etki etmesiyle beraber dönme momenti üretilmiş oluşur. Rotor hızı ile senkron hız arasındaki farkın senkron hıza oranına **kayma** denir. Tablo 3.1`de asenkron makinenin kayma değerlerine göre çalışma şekilleri verilmektedir.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (3.2)$$

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad (3.3)$$

$$f_r = s \cdot f_s \quad (3.4)$$

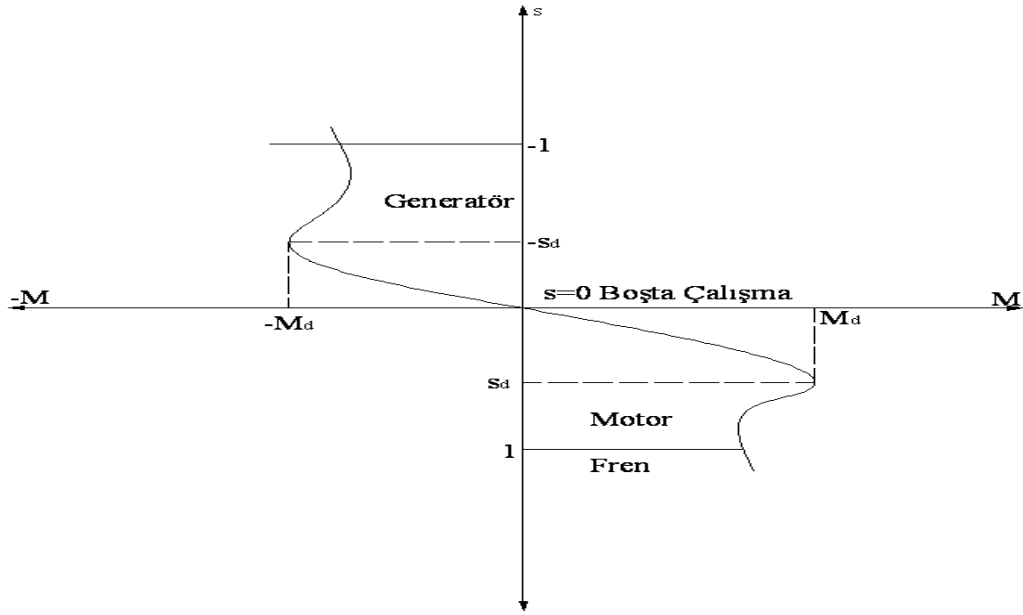
Kayma, hıza bağılı olarak değiştiği gibi frekanslara bağılı olarak da değişebilir. Frekans değeri ( $f_s$ ) genelde 60 Hz ya da 50 Hz alınır. Rotor frekansı kayma ile senkron frekansın çarpımına eşittir. Rotor hızı frekans ile doğru, kutup çifti sayısı ile ters orantılıdır.

**Tablo 3.1:** Asenkron Makinenin Kayma Değerlerine Göre Çalışma Şekilleri

Ns	N	s	Çalışma Şekli
$n_s$	$n_r < n_s$	$0 < s < 1$	Motor Çalışma
$n_s$	$n_r > n_s$	$s < 0$	Generatör Çalışma
$n_s$	N	$s > 1$	Fren Çalışma
$n_s$	$n_r = n_s$	$s = 0$	Boşta Çalışma
$n_s$	$n_r = 0$	$s = 1$	Kısa Devre Çalışma

Tablo 3.1'e bakıldığında asenkron makine ilk kalkışa başladığı esnada ( $s=1$ ) sekonderi kısa devre olan bir transformatör gibi çalışır. Boşta çalışma modunda makine senkron hıza ulaşmıştır. Dolayısıyla rotor sargısındaki gerilim sıfır olacaktır. Bu durumda makine güç üretmez. Harekete başladıktan sonra, sürekli çalışma noktasına ulaşmaya kadar ve ulaştığında, çalışma şekli motor çalışma olarak nitelendirilir. Asenkron makine ancak dışarıdan bir tahrik makinası ile döndürüldüğünde senkron hızın üzerine çıkar. Makine senkron hızı geçtiği zaman kayma negatif değer olacaktır ve generatör olarak çalışacaktır.

Son olarak, motor modunda çalışan bir makinenin döner alanı saat yönünde ve üç faz akımları a,b,c sırası ile bağlı olduğu kabul edilsin. Üç faz akımının iki fazının yeri değiştirilecek olursa döner alanın yönü değişir. Dolayısıyla rotor da döner alana uyarak yavaşlamaya başlar. Böylece rotorun devir yönü değişir [25]. Rotor hızı senkron hızın üzerine çıkarsa kayma değeri birin üzerine çıkar ve motor fren çalışma moduna geçer. Şekil 3.2`de asenkron makinenin dört bölgeli çalışması gösterilmektedir.

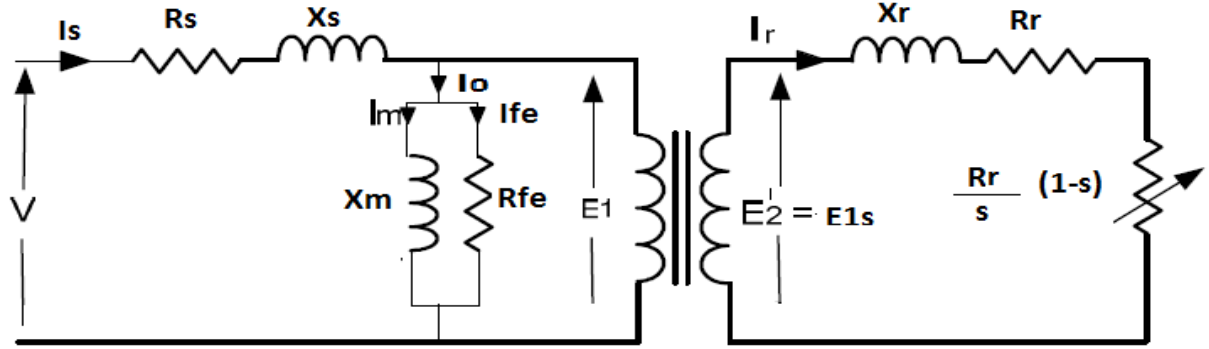


Şekil 3.2:Asenkron Makinenin Dört Bölgeli Çalışması

Şekil 3.2`deki makinenin dört bölgeli çalışma grafiğine bakıldığında  $M_d$ , devrilme momentidir ve momentin maksimum olduğu değere tekabül eder. Aynı şekilde devrilme momentine karşılık gelen kaymaya **devrilme kayması** ( $s_d$ ) adı verilir. Moment ifadesinin türevi alınıp sifira eşitlenirse devrilme kayması elde edilmiş olur.

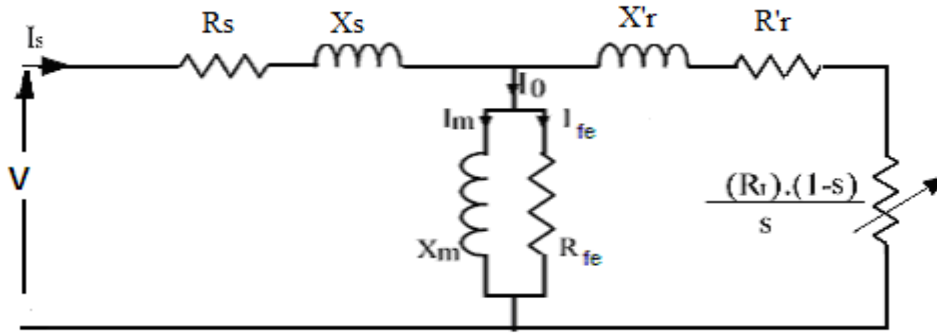
### 3.4 Asenkron Makinelerin Eşdeğer Devresi

Şekil 3.3'de asenkron makinenin bir fazına ait indirgenmemiş eşdeğer devresi ve devre parametreleri verilmektedir.

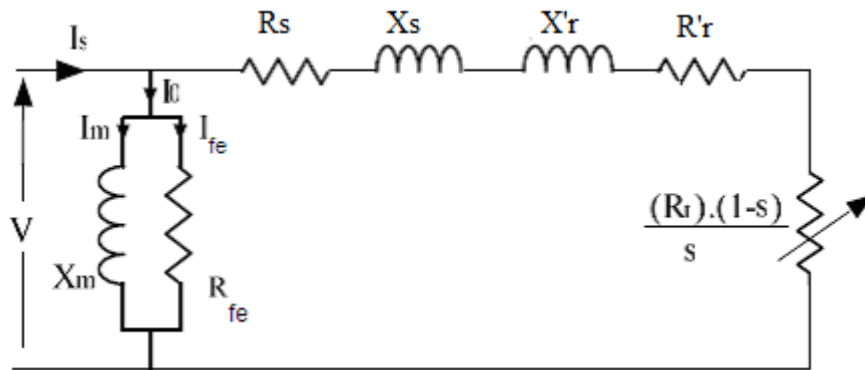


Şekil 3.3: Asenkron Makinenin Bir Fazına Ait İndirgenmemiş Devre

Şekil 3.4'de asenkron makinenin bir fazının statora indirgenmiş T eşdeğer devresi, Şekil 3.3'de verilen iki sargılı devrenin birleştirilmiş halidir.



Şekil 3.4: Asenkron Makinenin Bir Fazının Statora İndirgenmiş T Eşdeğer Devresi



Şekil 3.5: Asenkron Makinenin Bir Fazının Statora İndirgenmiş L Eşdeğer Devresi

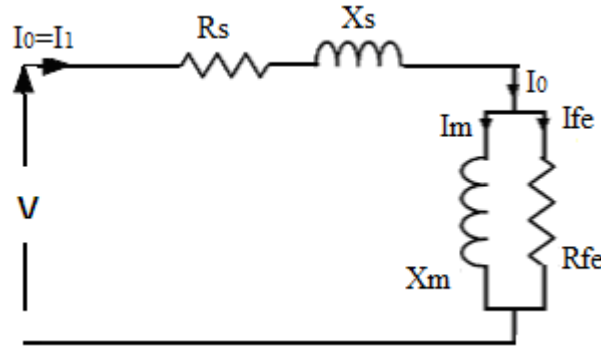
Şekil 3.5`de asenkron makinenin L eşdeğer devre modeli gösterilmektedir. L eşdeğer devreyi elde etmek için T eşdeğer devrenin ortasında bulunan mıknatıslama reaktansını ve demir direncini kapsayan paralel devre, makinenin giriş uçlarına taşınır. Böylece stator ve rotor parametreleri birbirine seri bağlanmış olur. Eşdeğer devre parametreleri transformatör eşdeğer devresine benzetilerek analizi kolaylaştırabilir. Bu sayede asenkron makine, aynı

parametrelere sahip bir transformatörün çıkışına  $\frac{R'_r \cdot (1-s)}{s}$  değerinde bir yük bağlanmış gibi analiz edilebilir. Bu yük, mekanik güç oluşumunu temsil eden direnci,  $R'_r$  ise rotor bakır kayıplarını oluşturan direnci gösterir.

### 3.5 Asenkron Makinenin Boşta Çalışması

Asenkron makine yardımcı tahrik makinesi ile senkron hıza ulaştırıldığında rotorda akım akışı olmaz. Dolayısıyla Şekil 3.6`dan da görüldüğü gibi eşdeğer devrede rotor açık devre

olur. Bu durumda  $s=0$  ve  $\frac{R'_r \cdot (1-s)}{s} = \infty$  olur. Makine şebekeden sadece boşta çalışma akımı çeker.



Şekil 3.6: Asenkron Makinenin Boşta Çalışma Esnasında Eşdeğer Devresi

Boşta çalışma esnasında kayıplar aktif ve reaktif olmak üzere ikiye ayrılır. Boşta çalışma esnasında şebekeden çekilen aktif güç ( $P_0$ ), ısı enerjisi olarak primer sargı direncinde ve demir kaybı olarak demir direncinde sarf edilir.

$$P_0 = P_{cu0} + P_{fe} + P_{st} + P_v = I^2_0 \cdot R_s + \frac{E^2_1}{R_{fe}} \quad (3.5)$$

$P_{st}$  sürtünme,  $P_v$  ise vantilatör kayıplarıdır.

$$P_{cu0} = I_0^2 \cdot R_s \quad (3.6)$$

Boşta çalışma akımı çok küçük bir değer olduğundan boşta çalışma esnasındaki bakır kayıpları ( $P_{cu0}$ ) ihmal edilebilir. Bu durumda sadece demir kayıpları hesaba katılır.

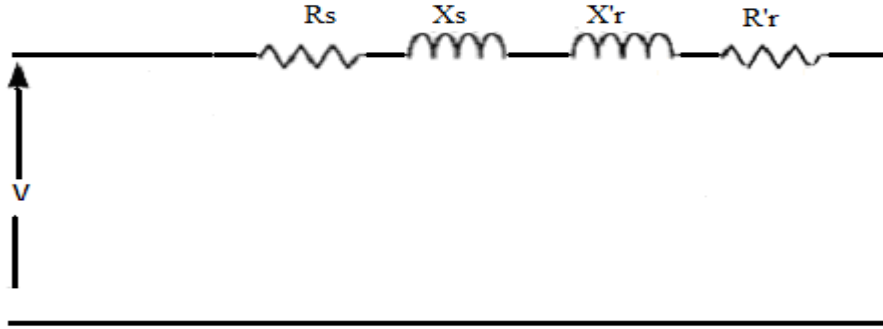
$$P_{fe} = \frac{E_1^2}{R_{fe}} = V_0 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (3.7)$$

Boşta çalışma esnasında oluşan reaktif kayıplar mıknatıslama reaktansı ile boşta çalışma akımının kaçak reaktans üzerinde oluşturduğu kayıplardır ve Denklem 3.8 ile hesaplanır.

$$Q_0 = I_0^2 \cdot X_s + I_m \cdot X_m \quad (3.8)$$

### 3.6 Asenkron Makinenin Kısa Devre (Kilitli Rotor) Çalışması

Kilitli rotor deneyinde asenkron motor sekonderi kısa devre edilmiş trafoya benzer, ve  $\frac{R'_r \cdot (1-s)}{s} = 0$  olur. Bu da  $s=1$  olduğu durumda sağlanmaktadır. Kaymanın bir olduğu durumda  $n_r=0$  olur. Şekil 3.7`de asenkron makinenin kilitli rotor deneyi esnasındaki eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Şekil 3.7: Asenkron Makinenin Kilitli Rotor Deneyi Esnasında Eşdeğer Devresi

Şekil 3.7`deki eşdeğer devreye bakıldığı zaman mıknatıslama reaktansını ve demir direncini kapsayan paralel devre ihmal edilmiştir.

$$P_K = V_K \cdot I_K \cdot \cos \phi_K \quad (3.9)$$

$P_K$ ,  $V_K$  ve  $I_K$  kısa devre esnasındaki gerilim, akım ve güç değerleridir. Kısa devre çalışma esnasında stator ve rotor dirençleri birbirine seri bağlı olduğundan oluşan kısa devre direnci aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R_K = R_s + R_r' \quad (3.10)$$

$$P_K = I_K^2 \cdot (R_s + R_r') \quad (3.11)$$

$$Q_K = V_K \cdot I_K \cdot \sin \phi_K \quad (3.12)$$

Kısa devre çalışma esnasında oluşan reaktif güç kısa devre reaktansına bağlıdır. Kısa devre reaktansı stator ve rotor reaktanslarının toplamına eşittir.

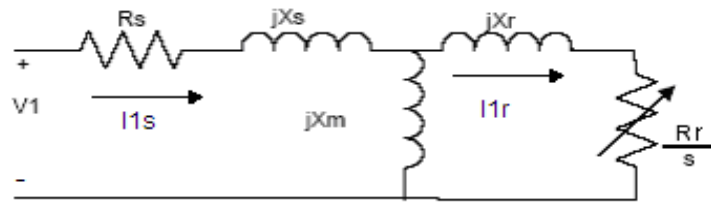
$$X_K = X_s + X_r' \quad (3.13)$$

$$Q_K = I_1^2 \cdot (X_s + X_r') \quad (3.14)$$

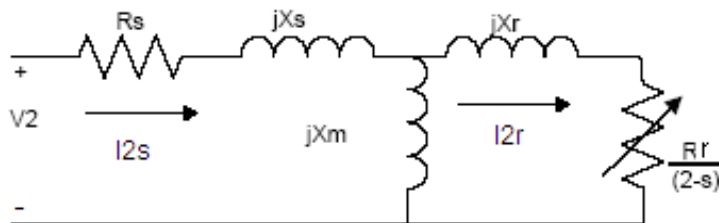
$$X_s = X_r' = \frac{X_K}{2} \quad (3.15)$$

### 3.7 Asenkron Motorun Pozitif ve Negatif Eşdeğer Devreleri

Makineye uygulanan gerilim, dengesiz olduğunda makinenin analizi dengeli durumda olduğu kadar basit değildir. Bu durumda analiz yapmak için simetrik bileşenler metodu kullanılabilir. Dolayısıyla simetrik bileşenler eşdeğer devresine ihtiyaç vardır. Dengeli bir sistemde pozitif dizi gerilimi faz gerilimlerine eşittir. Fazlar arasında gerilim dengesizliği olduğunda negatif dizi gerilimi oluşur. Pozitif dizi devresinde rotor direnci  $R_r/s$  olarak gösterilmektedir. Negatif dizi devresinde  $R_r/2-s$  olarak gösterilmesinin sebebi negatif dizi akımı ters manyetik alan oluşturmasıdır [26].



Şekil 3.8: Pozitif Dizi Devresi



Şekil 3.9: Negatif Dizi Devresi

Pozitif ve negatif dizi gerilimleri simetrik bileşenler matrisi yardımıyla bulunur.

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) \quad (3.16)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c) \quad (3.17)$$

Pozitif ve negatif dizi gerilimleri kullanılarak dizi gerilimleri, eşdeğer empedanslar ve akımlar hesaplanabilir.

$$Z_1 = \left[ \frac{i \cdot X_m \cdot (i \cdot X_r + \frac{R_r}{s})}{(i \cdot X_m + i \cdot X_r + \frac{R_r}{s})} \right] + (R_s + i \cdot X_s) \quad (3.18)$$

$Z_1$  pozitif dizi devresi eşdeğer empedansıdır. Şekil 3.8'e bakıldığında rotor direnci ile rotor reaktansı seri olup miknatıslama reaktansına paraleldir. Bu durumda oluşan eşdeğer empedans stator reaktansı ve stator direncine seridir.  $Z_2$  negatif dizi devresi eşdeğer empedansı da aynı şekilde negatif dizi devresi yardımıyla bulunur.

$$Z_2 = \left[ \frac{i \cdot X_m \cdot (i \cdot X_r + \frac{R_r}{2-s})}{(i \cdot X_m + i \cdot X_r + \frac{R_r}{2-s})} \right] + (R_s + i \cdot X_s) \quad (3.19)$$

$$I_{1s} = \frac{V_1}{Z_1} \quad (3.20)$$

$$I_{2s} = \frac{V_2}{Z_2} \quad (3.21)$$

$I_{1s}$  pozitif dizi devresinden geçen stator akımı,  $I_{2s}$  ise negatif dizi devresinden geçen stator akımıdır. Faz akımları hesaplanırken sıfır dizi devresi akımı sıfır kabul edilerek simetrik bileşenler matrisi kullanılır.

$$I_a = I_{1s} + I_{2s} \quad (3.22)$$

$$I_b = a^2 \cdot I_{1s} + a \cdot I_{2s} \quad (3.23)$$

$$I_c = a \cdot I_{1s} + a^2 \cdot I_{2s} \quad (3.24)$$

Dengeli bir sistemde nötrden akım akmaz. Sistem dengesiz çalışmaya başladığında nötr noktasından akım akmaya başlar. Dengesizlik durumunda nötr akımı sıfır dizi devresi akımının üç katına eşittir.



$$I_n = I_a + I_b + I_c = 3I_0 \quad (3.25)$$

$$P_1 = 3 \cdot \left[ |I_{1r}|^2 \left( \frac{1-s}{s} \right) \cdot R_r \right] \quad (3.26)$$

$$P_2 = 3 \cdot \left[ |I_{2r}|^2 \left( \frac{s-1}{2-s} \right) \cdot R_r \right] \quad (3.27)$$

Çıkış gücü pozitif dizi devresi gücü ( $P_1$ ) ile negatif dizi devresi gücünün ( $P_2$ ) toplamına eşittir.

$$P_{out} = P_1 + P_2 \quad (3.28)$$

$$P_{in} = \text{Re} \left[ V_1 \cdot \overline{I_{1s}} + V_2 \cdot \overline{I_{2s}} \right] = \text{Re} \left[ V_a \cdot \overline{I_a} + V_b \cdot \overline{I_b} + V_c \cdot \overline{I_c} \right] \quad (3.29)$$

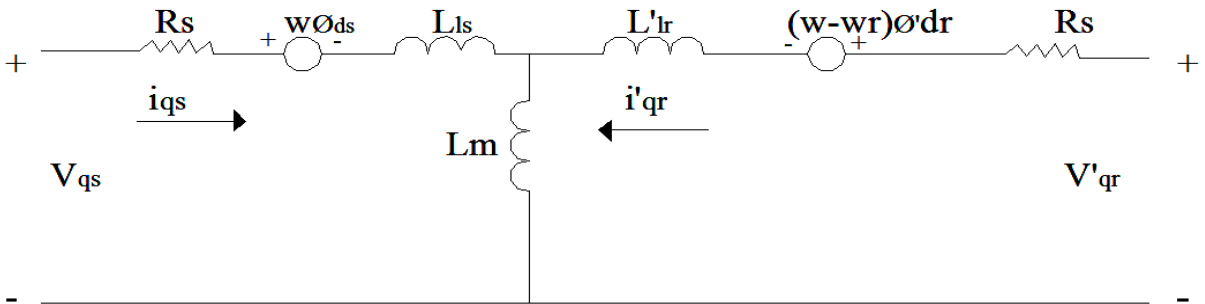
Giriş gücü faz akımları cinsinden ya da dizi devresi akımları cinsinden hesaplanabilir. Verim çıkış gücünün giriş gücüne oranıdır.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.30)$$

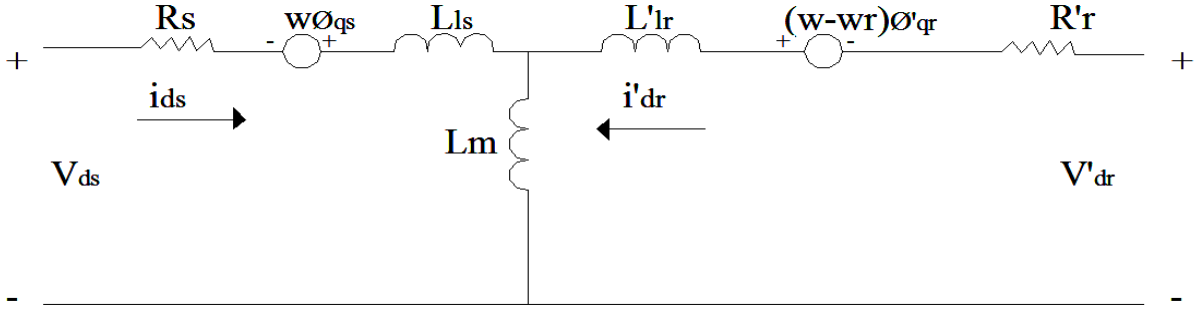
Gerilimler arasında dengesizlik olduğunda motorun güç, moment ve akım değerleri negatif dizi devresi bileşenlerine bağlı olarak değişir. Motorun akım, güç ve moment hesabı yapılırken negatif dizi bileşenlerinin hesaba katılması gereklidir.

### 3.8 Dinamik Eşdeğer Devre

Bölüm 3.7'de asenkron makinenin basit modeli yani kalıcı hal (steady state) durumu anlatıldı. Kararlı halde değişkenler zamana bağlı olmadığından hız daima sabittir. Dinamik modelde ise değişkenler zamanla değiştiğinden ötürü hız da değişkenlik gösterir. Bu sebepten dolayı dinamik modelde basit modelde kullanılan eşdeğer devre kullanılmaz. Dinamik modelde Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de gösterilen d ve q eşdeğer devreleri kullanılır. [27]



Şekil 3.10: Asenkron Makinenin q Eşdeğer Devresi



Şekil 3.11: Asenkron Makinenin d Eşdeğer Devresi

Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'deki eşdeğer devreler yardımıyla Kirchoof kanunu kullanılarak gerilim formülleri yazılır.  $V_{qs}$ ,  $\dot{V}'_{qr}$  q eksenli stator ile rotor gerilimi,  $V_{ds}$  ve  $\dot{V}'_{dr}$  ise d eksenli stator ve rotor gerilimidir.  $\omega_r$  açısal hızı ifade eder. Aynı şekilde  $I_{qs}$ ,  $\dot{I}'_{qr}$  q eksenli stator ile rotor akımını,  $I_{ds}$  ve  $\dot{I}'_{dr}$  ise d eksenli stator ve rotor akımlarını ifade eder.

$$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \quad (3.31)$$

$$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs} \quad (3.32)$$

$$V'_{dr} = R'_r \cdot i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr} \quad (3.33)$$

$$V'_{qr} = R'_r \cdot i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr} \quad (3.34)$$

d ve q eksenli manyetik akıları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\varphi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i'_{qr} \quad (3.35)$$

$$\varphi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i'_{dr} \quad (3.36)$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r \cdot i'_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (3.37)$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r \cdot i'_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (3.38)$$

$L_m$  karşılıklı (mutual) endüktanstır.  $L'_s$   $L'_r$  stator ve rotor kaçak endüktanslarıdır. Manyetik endüktans ile stator ve rotor kaçak endüktanslarının toplamı stator ve rotor endüktanslarını verir.  $\dot{\varphi}_{qs}$  ve  $\dot{\varphi}_{ds}$  q ve d eksenli stator akıları,  $\dot{\varphi}'_{qr}$  ve  $\dot{\varphi}'_{dr}$  q ve d eksenli rotor akılarıdır.

$$L_s = L_{ls} + L_m \quad (3.39)$$

$$L'_r = L_{lr} + L_m \quad (3.40)$$

$$T_e = 1.5 \cdot p(\varphi_{ds} \cdot i_{qs} - \varphi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (3.41)$$

$T_e$  elektriksel momenttir. Kutup çifti sayısına ( $p$ ), manyetik akılara ve akımlara bağlıdır. Kirchoof kanununa göre denklemler yazıldıktan sonra katsayıları zamana bağlı değişmeyen (sabit katsayılı) bir sisteme dönüştürmek için park ya da clarke dönüşümü kullanılır. D, q eksen gerilimleri ve akımları clarke dönüşümü kullanılarak a, b, c fazları için rotor ile stator akım ve gerilimlerine dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 \cos \Theta & \cos \Theta + \sqrt{3} \sin \Theta \\ 2 \sin \Theta & \sin \Theta - \sqrt{3} \cos \Theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{abs} \\ V_{bcs} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

$$\begin{bmatrix} V'_{qr} \\ V'_{dr} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 \cos \beta & \cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta \\ 2 \sin \beta & \sin \beta - \sqrt{3} \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V'_{abr} \\ V'_{bcr} \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$\begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta & \sin \Theta \\ -\cos \Theta + \sqrt{3} \sin \Theta & -\sqrt{3} \cos \Theta - \sin \Theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$\begin{bmatrix} I'_{ar} \\ I'_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta & -\sqrt{3} \cos \beta - \sin \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I'_{qr} \\ I'_{dr} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

$\Theta$ ,  $\beta$  stator ve rotor açılarıdır. C fazına ait stator ve rotor akımları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_{cs} = -I_{as} - I_{bs} \quad (3.46)$$

$$I'_{cr} = -I'_{ar} - I'_{br} \quad (3.47)$$

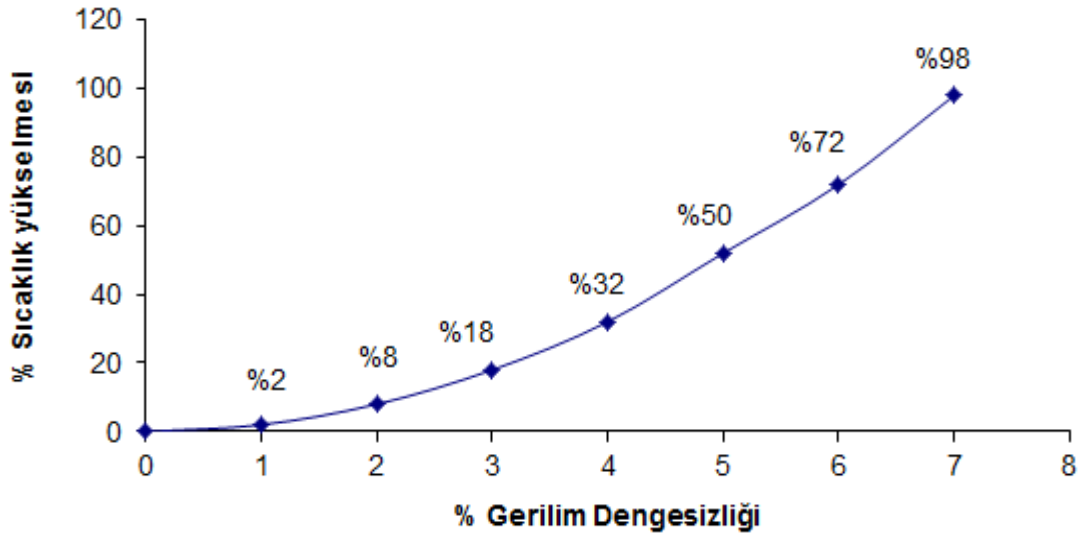
### 3.9 Asenkron Motorlarda Gerilim Dengesizliği

EPDK tarafından 10.11.2004 tarihinde yayımlanan ve 09.01.2007 tarihinde bazı maddeleri değiştirilen Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği ile 12.09.2006 tarihinde yayımlanan Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari Ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik ile Elektrik Dağıtım şirketlerinin ve Müşterilerinin Türkiye genelinde uymakla yükümlü oldukları güç kalitesi ve güç faktörü kriterleri yeniden belirlenmiştir.

Anılan Yönetmelikler ile dağıtım şirketleri ve müşterileri güç kalitesi ve sağlamaları gereken güç faktörü değerleri bazında bir dizi yükümlülükler altına girmişlerdir. 12.09.2006 tarihinde yayımlanan Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari Ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmeliğin 22. Maddesinde dağıtım sisteminin iletilmesinde, AG seviyesi için kararlı durumlarda gerilim dengesizlikleri TS-EN 50160:2001 (şu anda TS-EN 50160:2008 standardı geçerlidir) standardında tanımlanan aşağıdaki değerlere uygun olmasını şart koşmaktadır.

Ölçüm periyodu boyunca (ölçüm periyodu standartta bir hafta olarak tanımlanmaktadır) ölçülen gerilim negatif bileşeni etkin değerlerinin onar dakikalık ortalamalarının en az %95'inin pozitif bileşenlere oranı en fazla % 2 olmalıdır. Tek fazlı veya iki fazlı yüklerin beslendiği noktalarda bu oran % 3'e kadar çıkabilir.

Gerilim dengesizliğinin yukarıda bahsedilen standartlardaki değerlerin üzerine çıkması üç fazlı motorlarda performans düşmesine ve motor ömrünün kışalmasına neden olur. Motor terminallerindeki gerilim dengesizliği ise faz akımlarının dengesizliğine sebep olur. Akım dengesizliği dönme momentini azaltır, titreşimleri arttırır, mekanik vuruntular artar, kayıplar artar ve motor aşırı ısınır, bunlara bağlı olarak da motorun veriminin düşmesine sebep olur.



Şekil 3.12: Yüzde Gerilim Dengesizliği İle Yüzde Sıcaklık Yükselmesi Arasındaki İlişkiyi Gösteren Grafik [28]

Şekil 3.12`de yüzde gerilim dengesizliği ile yüzde sıcaklık yükselmesi arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmektedir. Motorun sıcaklığı, gerilim dengesizlik faktörünün karesinin iki katı kadar artış gösterir. Örneğin %2 gerilim dengesizliğinde sıcaklık %8 artış gösterir. Nema standardına göre motora, etiketinde belirtilen nominal gerilim seviyesinden sadece %10 farklı bir gerilim uygulanabilir. Ancak bu limit %10 limit dahilinde olsa bile motorun nominal gerilim altında bir gerilimde çalıştırılması durumunda gerekli yük momentini üretebilmek için daha fazla akım çekecektir. Bu durumda bakır kayıpları artacak ve verim azalacaktır.

### 3.10 Yıllık Enerji Tasarrufu

Gerilim dengesizliğinin asenkron motorlarda verimin azalmasına neden olduğu daha önceden belirtilmişti. Verimin azalmasıyla beraber ilave enerji sarfiyatı olduğu için buna bağlı olarak enerji maliyetinde artış meydana gelir. Tablo 3.2`de 1800 Devir 100 HP bir motorun gerilim dengesizliğinden kaynaklanan verimin değişim tablosu gösterilmektedir.

**Tablo 3.2:** Gerilim Dengesizliği Şartlarında Motor Verimi [29]

Motor Yük Akımı (%)	Motor Verimliliği %		
	Gerilim Dengesizliği %		
	Nominal	1	%2.5
100	94.4	94.4	93.0
75	95.2	95.1	93.9
50	96.1	95.5	94.1

Tablo 3.2`de görüldüğü gibi bir motorun tam yükte ve %2.5 gerilim dengesizliğinde yılda 8640 saat çalıştığı varsayıldığında yıllık ekstra enerji sarfiyatı;

$$100Hp * 0.746kW / Hp * 8640saat / yıl * (100 / 93 - 100 / 94.4) = 10278,4 kWh \text{ olacaktır [30].}$$

2011 Nisan ayı endeksine göre 1kWh 15.306 kuruştur. Buna göre verim düştüğü için  $10278,4 kWh \cdot 0,153TL / kWh = 1572,6TL$  `lik ekstra enerji maliyetine neden olmaktadır. Sanayi elektrik tüketiminin yaklaşık %70'i üç fazlı asenkron motorda olmaktadır. Gerekli önlemler alındığında elde edilecek enerji tasarrufu ve maddi kazanç oldukça önemli olacaktır.

### 3.11 Sonuç ve Değerlendirme

Asenkron makineler stator ve rotor olmak üzere başlıca iki parçadan oluşan ve döner alan prensibine göre çalışan makinelerdir. Kayma değerlerine göre asenkron makinenin çalışma şekli değişim gösterir. Gerilim dengesizliği asenkron makinede ısınma, verim düşmesi, titreşimli çalışma, ilave enerji sarfıyatı gibi olumsuz etkilere neden olduğu için dengesizliğin motorun akımını, gücünü ve verimi nasıl etkilediğinin analiz edilmesi gereklidir. Bu noktada makinenin eşdeğer devreleri kullanılarak analiz yapılır. Kalıcı halde analiz yapılırken pozitif ve negatif dizi eşdeğer devreleri kullanılır. Eğer zamana bağlı olarak analiz yapılacaksa; yani geçici hal durumunda dinamik eşdeğer devre kullanılmalıdır.

## **4. ÜÇ FAZLI ASENKRON MAKİNENİN DENGESİZ ŞARTLARDA ANALİZİNİN YAPILMASI**

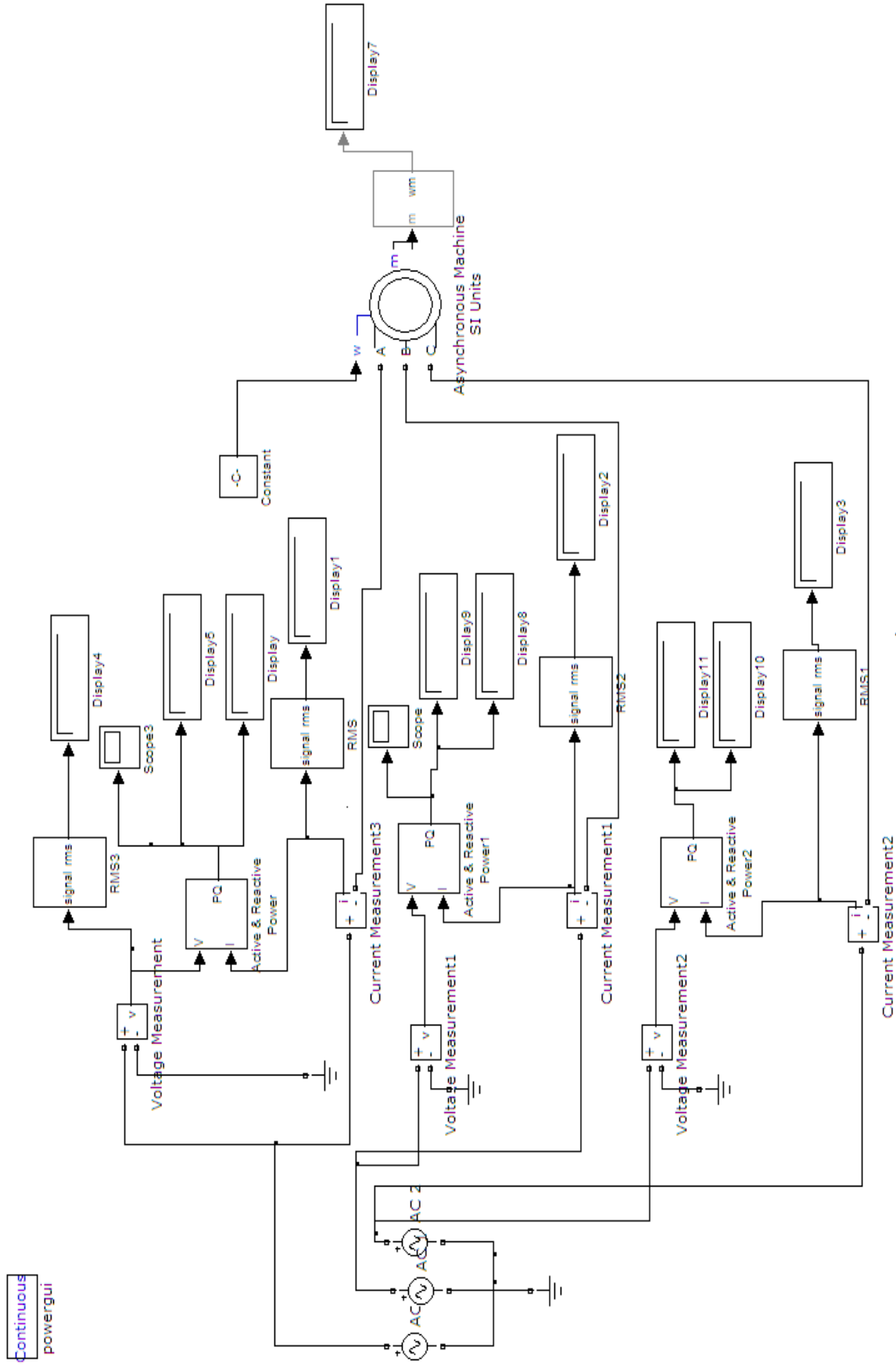
Asenkron motorlarda dengesizliğin etkisi deneysel, dinamik (Matlab, EMTP programları ile) ya da statik (yaklaşık analiz) yöntem ile incelenebilir. Analizlerin uzun zaman almasından ötürü deneysel yöntem tercih edilmemiştir. Dinamik model olarak Matlab Simulink programında güç sistemleri kütüphanesindeki bloklar kullanılarak Şekil 4.1`deki geliştirilen model oluşturularak analizler yapılmıştır. Statik analiz hesabında ise Mathcad programı kullanılmıştır. Her iki metot kullanılarak gerilim dengesizliğinin asenkron motora etkisi incelenerek analiz sonuçları arasında karşılaştırma yapıлып bulunan değerler arasındaki farklar ve bunların sebepleri sorgulanmaktadır.

### **4.1 Dinamik Model (Matlab Simulink)**

Matlab; (Matrix Laboratory); ilk defa 1985`de C.B Moler tarafından matematiksel hesaplamalar için geliştirilmiş bir programlama dilidir. İlk sürümleri Fortran diliyle yazılmış olmakla beraber son sürümleri C dilinde hazırlanmıştır. Matlab mühendislik alanında; sayısal hesaplama, veri çözümleri ve grafik işlemlerinde kullanılacak genel amaçlı bir program olmakla beraber özel amaçlı modüler paketlere de sahiptir. Control Toolbox, Signal Toolbox gibi paket programlar (bilgisayar destekli denetim sistemi tasarımı) olup bunlar denetim sistemlerinin tasarımında çok etkili araçlardır [31].

#### **4.1.1 Dialog Kutuları ve Parametreler**

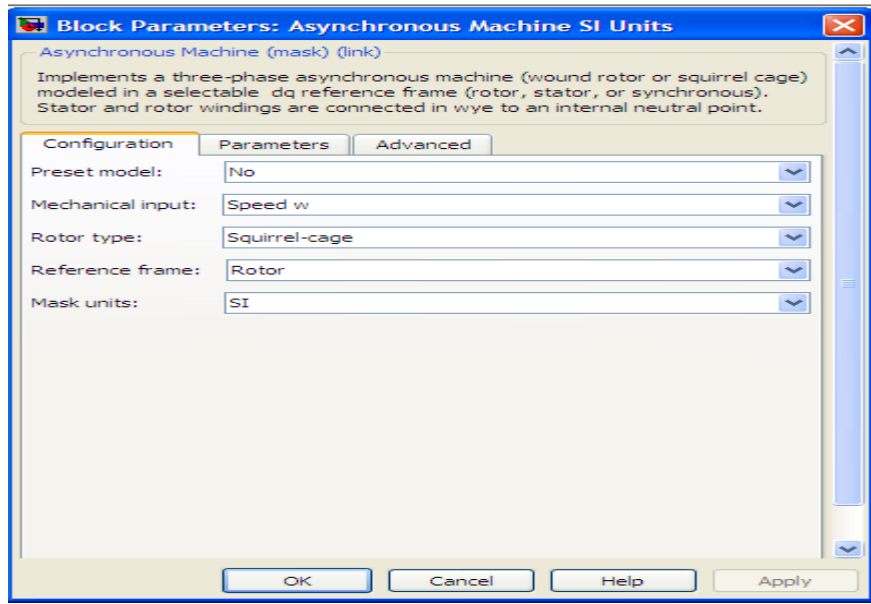
Matlab Simulink`de simulasyon yapılırken asenkron motorun karakteristikleri, gücü ve gerilim değerleri girilmelidir. Simülasyon sonuçları display kutucuğunda görülmektedir. Displayden sadece genlikler okunur. Grafikler scope yardımıyla görülür. Şekil 4.1`de dinamik analize ait Simulink model gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Simulink Program İle Geliştirilen Model

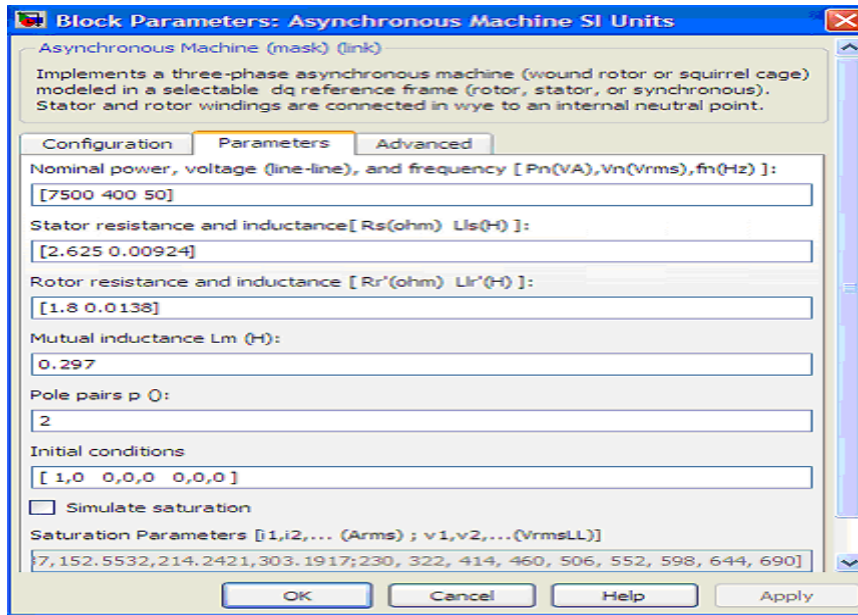


Şekil 4.1`deki Simulink modelden görüldüğü üzere akım ölçümü yapmak için gerilim kaynağına current measurement kutucuğu seri bağlanır. Current measurement kutucuğunun çıkışına signal rms kutucuğu bağlanarak akımın rms değeri 1,2,3 nolu displaylerden görülür. Makede sabit (constant) olan kutucuğa moment ya da açısal hız girilir. Simulasyon yapılırken açısal hız değeri girilmiştir. Display 7`den açısal hız değeri görülebilir. Değerler grafik olarak incelenmek istenirse scope kutucuğu displye seri bağlanarak grafik sonuçları elde edilir. Güç ölçümü yapılacak olursa voltage ve current measurement kutucuklarının çıkışları active& reactive power kutucuğunun girişine bağlanarak güç değerleri elde edilebilir. Aktif ve reaktif güç değerleri ilgili display kutucuklarından görülebilir.



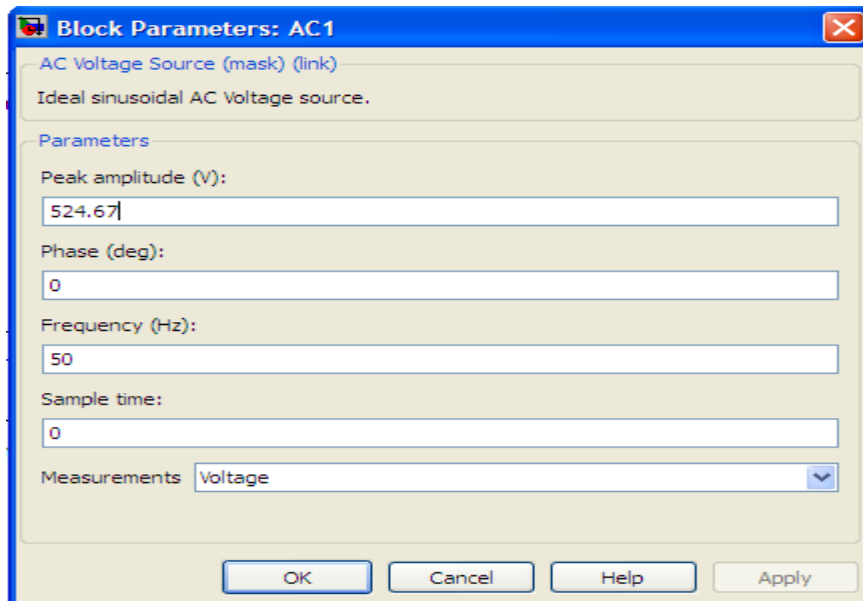
Şekil 4.2: Simulinkteki Motorun Özellikleri

Motor tiplerine göre hazır modeller vardır. Eğer simulasyon yapılacak motor, Simulink`de yoksa; Şekil 4.2`de gösterilen kutucukta karakteristikler ve güç değeri elle girilir. Motorun mekanik girişi açısal hız ya da moment cinsinden verilir. Rotor tipi sincap kafesli mi yoksa bilezikli mi olduğu belirtilmelidir. Deratasyon işlemi yapılırken açısal hız azaltılacağından girişi açısal hız cinsinden verilmektedir. Açısal hız değiştirildiğinden kayma değeri de değişim gösterecektir.



Şekil 4.3: Simulinkteki Motor Parametreleri

Motorun gücü kW cinsinden girilmelidir. Stator ve rotor dirençleri Ohm cinsinden, endüktanslar ise Henry cinsinden yazılır.



Şekil 4.4: Simulinkteki Gerilim Penceresi

Simulink`de gerilimler pik değer cinsinden girilir. Gerilimin faz açısı ve frekansı da kutucuğa yazılmalıdır.

## 4.2 Statik (Yaklaşık Analiz) Model

Statik analiz modeli Mathcad programı yardımıyla yapılmıştır. Mathcad programında simetrik bileşenler metodu kullanılarak Bölüm 3.7'deki formüller yazıldıktan sonra motor parametreleri girilir. Gerilim değerleri değiştirilerek gerilim dengesizliğinin akımı, momenti ve gücü nasıl etkilediği görülebilir. Deratasyon yapılırken kayma değeri ile oynanarak çıkış gücü istenilen değere ayarlanır. Matchad matematiksel bir program olduğu için kullanımı son derece basittir. Şekil 4.5`de gerilim dengesizliği ile ilgili olarak Matchad`de hazırlanan program gösterilmektedir.

The screenshot shows the Mathcad software interface with a program for calculating unbalanced voltage effects. The program includes the following sections:

- Input Parameters:**
  - $i := \sqrt{-1}$
  - $R_s := 2.625$ ,  $s_m := 0.03$ ,  $R_r := 1.8$ ,  $X_m := 93.368$ ,  $X_s := 2.903$ ,  $X_r := 4.355$
  - $w := 2 \cdot \pi \cdot \frac{50}{2}$ ,  $w = 157.08$
  - $R_{fe} := 1579.4$ ,  $Z_m := \frac{i \cdot X_m \cdot R_{fe}}{i \cdot X_m + R_{fe}}$ ,  $Z_m = 5.5 + 93.043i$
- Phase Sequence Impedances:**
  - $Z_1 := \frac{Z_m \cdot (i \cdot X_r + \frac{R_r}{s})}{Z_m + i \cdot X_r + \frac{R_r}{s}} + (R_s + i \cdot X_s)$
  - $Z_1 = 41.904 + 30.09i$  Pozitif dizi devresi eşdeğer empedansı
  - $Z_2 := \frac{Z_m \cdot (i \cdot X_r + \frac{R_r}{2-s})}{(i \cdot X_r + Z_m) + \frac{R_r}{2-s}} + (R_s + i \cdot X_s)$
  - $Z_2 = 3.47 + 7.067i$  Negatif dizi devresi eşdeğer empedansı
- Stator Akımlarının Hesaplanması:**
  - $I_{1s} := \frac{V_1}{Z_1}$ ,  $I_{2s} := \frac{V_2}{Z_2}$
  - $I_{1s} = 5.574 - 4.791i$ ,  $I_{2s} = 2.181 + 0.106i$
  - $|I_{1s}| = 7.35$ ,  $|I_{2s}| = 2.183$
  - $\phi_m := \arg(I_{1s}) \cdot \frac{180}{\pi}$ ,  $n := \arg(I_{2s}) \cdot \frac{180}{\pi}$
  - $\phi_m = -10.682$ ,  $n = 2.77$
- NEMA Standardı:**
  - $V_a := 380$ ,  $V_b := 380 \left( \cos\left(\frac{231\pi}{180}\right) + i \sin\left(\frac{231\pi}{180}\right) \right)$ ,  $V_c := 380 \left( \cos\left(\frac{114\pi}{180}\right) + i \sin\left(\frac{114\pi}{180}\right) \right)$
  - $a := \cos\left(2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) + i \sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{3}\right)$
  - $\begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$
  - $\begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.567 + 17.277i \\ 377.747 - 33.055i \\ 6.821 + 15.778i \end{pmatrix}$ ,  $|V_0| = 17.871$ ,  $|V_1| = 379.19$ ,  $|V_2| = 17.189$
  - $V_{ab} := V_a - V_b$ ,  $V_{ca} := V_c - V_a$ ,  $V_{bc} := V_b - V_c$
  - $V_{ort} := \frac{|V_{ab}| + |V_{bc}| + |V_{ca}|}{3}$ ,  $|V_{ort}| = 657.12$
  - $NEMA := \frac{|V_{ca}| - |V_{ort}|}{|V_{ort}|}$ ,  $NEMA = 0.03$

Şekil 4.5: Gerilim Dengesizliği İle İlgili Matchad`de Hazırlanan Örnek Program

Şekil 4.5`den görüldüğü gibi gerekli formüller yazılıp motor karakteristikleri ve gerilim değerleri yazıldıktan sonra akım, güç ve moment değerleri bulunabilir.

### 4.3 Aynı Gerilim Dengesizliği Değerlerinde Asenkron Motorun Akım Güç ve Verim Değerlerinin İncelenmesi

Tablo 4.1`deki asenkron motor parametreleri kullanılarak aynı gerilim dengesizliği değerinde açılar dengeliyken farklı gerilim genliklerinde; genlikler sabitken açı dengesizliği durumunda üç farklı dengesizlik tanımına göre verimin değişimi incelenmektedir.

**Tablo 4.1:** 7.5 kW`lık Asenkron Motor Parametreleri [1]

$R_s$ ( $\Omega$ )	$R_r$ ( $\Omega$ )	$X_s$ ( $\Omega$ )	$X_r$ ( $\Omega$ )	$X_m$ ( $\Omega$ )	s
0.7384	0.7422	0.9566	0.9566	39.9872	0.04

Asenkron motorlarda dengesizlik ile ilgili yapılan literatür çalışmalarında kullanılan asenkron motor karakteristikleri Tablo 4.1`de gösterilmektedir.

**Tablo 4.2:** Aynı VUF Değeri İçin Statik Modelde Elde Edilen Sonuçlar

s=0.04	$V_a$ (V)	$V_b$ (V)	$V_c$ (V)	IEC	NEMA	IEEE	Verim %
Dengeli	220<0	220<240	220<120	0	0	0	91.360
3 $\phi$ UVU	190.52<0	195.20<240	216.50<120	4	3.96	7.85	90.465
2 $\phi$ UVU	193.64<0	197.97<240	220<120	4	3.99	7.90	90.459
1 $\phi$ UVU	194.68<0	220<240	220<120	4	3.94	7.94	90.429
2 $\phi$ A	220<0	220<231.9	220<116	4	3.96	0	90.457
1 $\phi$ A	220<0	220<240	220<113.1	4	3.41	0	90.450
1 $\phi$ OVU	247.51<0	220<240	220<120	4	4.04	8.01	90.455
2 $\phi$ OVU	252.70<0	239.54<240	220<120	4	3.64	7.37	90.476
3 $\phi$ OVU	256.69<0	241.96<240	223.43<120	4	3.55	7.19	90.456
3 $\phi$ UVU	178.74<0	185.67<240	216.50<120	6	6.0	11.81	89.350
2 $\phi$ UVU	181.86<0	188.10<240	220<120	6	6.0	11.89	89.310
1 $\phi$ UVU	182.55<0	220<240	220<120	6	5.91	12.02	89.300
2 $\phi$ A	220<0	220<227.7	220<113.9	6	5.91	0	89.330
1 $\phi$ A	220<0	220<240	220<109.7	6	5.33	0	89.340
1 $\phi$ OVU	262.05<0	220<240	220<120	6	6.07	11.99	89.380
2 $\phi$ OVU	271.06<0	250.62<240	220<120	6	5.44	11.0	89.370
3 $\phi$ OVU	275.39<0	253.22<240	223.43<120	6	5.35	10.85	89.340

Tablo 4.2`de %4 ve %6 gerilim dengesizlikleri için farklı gerilim değerlerinde IEC, IEEE ve Nema standardına göre verimin değişimi gösterilmektedir. Kayma değeri nominal değerde ( $s=0.04$ ) sabit tutulmuştur. IEEE, faz gerilimleri dengesizliği olduğundan sabit genliklerde, farklı açılarda gerilim dengesizliği sıfır çıkar. Nema standardı hat gerilimleri dengesizliği olduğundan sabit genliklerde farklı açılarda dengesizlik sıfırdan farklı bir değer alır. Aynı gerilim değerlerinde dengesizlik hesabı yapılırken dengesizlik değeri IEEE standardında en yüksek, Nema standardında da en düşük çıkmaktadır.

Motor dengeli durumda maksimum verimde çalışır. UVU, OVU ve açılı dengesizlikleri her bir faz için ayrı ayrı analiz edilmiştir. Aynı gerilim dengesizliğinde farklı gerilim genliklerinde verimler birbirinden farklı çıkmaktadır. Bunun nedeni aynı gerilim dengesizliğini elde etmek için gerilim genlikleri değiştirildiğinden akımlara bağlı olarak giriş ve çıkış güçleri değişeceği için verimler de değişme göstermektedir. Açılı ile yapılan dengesizlik durumunda ise iki fazda açılı dengesizliği olduğunda iki fazın akımı artıp tek fazın akımı düşerken; tek faz dengesizliğinde iki fazın akımı azalır, tek fazın akımı artış göstermektedir. Akımlarda değişme olduğundan verim değerleri de etkilenmektedir. Aynı gerilim dengesizliğinde farklı genlik ve açılarda verim değerleri farklı çıktığından deratasyon yapıldığında verim değerlerinde aynı derecede artış olmayacaktır. Bir başka deyişle; deratasyon yapıldığında aynı derecede iyileştirme olmayacaktır.

#### 4.4 Statik ve Dinamik Modelin Karşılaştırılması

Tablo 4.1`deki asenkron motor parametreleri kullanılarak  $V_a: 225V, V_b: 230V, V_c: 252V$  için Nema standardına göre % 3.5 gerilim dengesizliğinde nominal kayma değerinden başlanarak motor derate edildiğinde statik olarak Matchad`de, dinamik olarak da Matlab`da verim, ve akım değerlerinin incelenerek bulunan sonuçlar arasındaki farklar mukayese edilmiştir. % 3.5 gerilim dengesizliğinde deratasyon faktörü Şekil 1.1`deki Nema eğrisinden görüldüğü gibi 0.85`dir.

**Tablo 4.3:** %3.5 Gerilim Dengesizliği İçin Statik ve Dinamik Analiz Sonuçları

Kayma	P <sub>out</sub> (kW)	P <sub>in</sub> (kW)		Verim		I <sub>as</sub> (A)		I <sub>bs</sub> (A)		I <sub>cs</sub> (A)	
		Stat.	Din.	Stat.	Din.	Stat.	Din.	Stat.	Din.	Stat.	Din.
0.04	7.50	8.30	8.22	0.903	0.912	9.94	9.23	14.59	13.16	16.49	16.69
0.0331	6.37	6.95	6.77	0.916	0.916	8.29	7.70	12.67	11.09	14.84	15.05
0.0276	5.41	5.85	5.81	0.923	0.930	7.10	6.67	11.13	9.65	13.60	13.98
0.0231	4.60	4.94	4.94	0.931	0.931	6.26	5.59	9.87	8.41	12.64	12.88

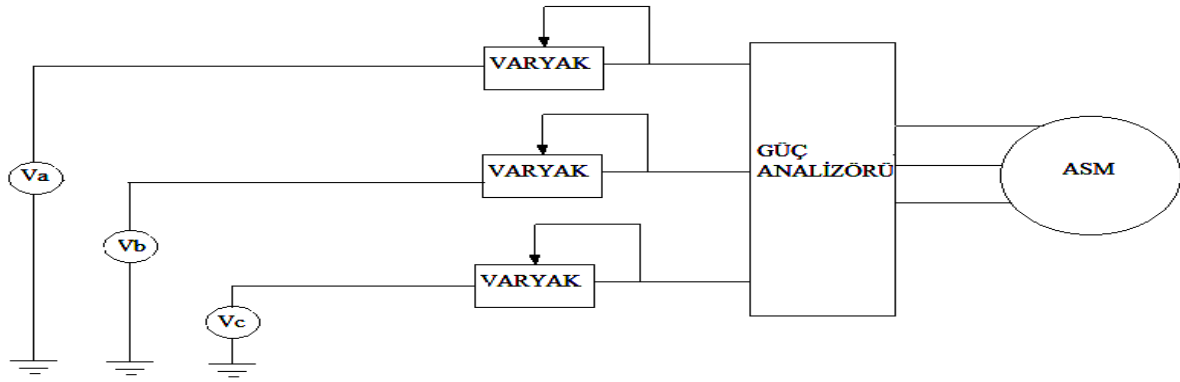
Tablo 4.3'e bakıldığında Simulink'de ve Matchad'de bulunan akım, giriş gücü ve verimde; maksimum %15'lik, minimum da %1'lik fark olduğu görülmektedir. Her iki metotta bulunan değerler arasındaki farkın sebebi Matlab Simulink uygulamasının daha hassas sonuçlar vermesidir. Ayrıca Simulink'de değerler zamana bağlı değişmektedir. Matchad uygulamasının avantajı daha pratik olması ve daha kısa sürede sonuçların hesaplanabilmesidir. Örneğin Tablo 4.3 oluşturulurken statik olarak hesaplanan sonuçlar Simulink'de yapılan simülasyonun yarı süresinde bulunmuştur. Bu sebepten dolayı bundan sonraki analizlerin hepsi Mathcad programı ile yapılacaktır.

## 4.5 2.2 kW'lık Deney Motorunun Dengesiz Gerilim Altında Boşta Çalışma Deneyi

Tablo 4.4'de karakteristikleri verilen 2.2kW gücündeki asenkron motora boşta çalışma esnasında dengesiz gerilimler verilip akımlar ölçülerek gerilim dengesizliğinin boşta çalışan bir asenkron motoru nasıl etkilediği incelenmiştir. Deneysel olarak ölçülen değerler ile statik model (Mathcad) ve dinamik modelde (Matlab Simulink) hesaplanan değerler Tablo 4.5'de kıyaslanmaktadır.

**Tablo 4.4:** Deney Motorunun Karakteristikleri

R <sub>s</sub> (Ω)	R <sub>r</sub> (Ω)	X <sub>s</sub> (Ω)	X <sub>r</sub> (Ω)	X <sub>m</sub> (Ω)	R <sub>fe</sub> (Ω)	n <sub>r</sub> (d/dk)
3.26	3.26	4.61	4.61	67.84	302.2	1400



Şekil 4.6: Asenkron Motorun Boşta Çalışmasına Ait Bağlantı Şeması

Şekil 4.6'da deney sisteminin bağlantı şeması gösterilmektedir. Asenkron motorun faz- nötr gerilimleri varyak tarafından değiştirilerek motora dengesiz gerilimler verilir. Akım ve güç değerleri fluke cihazı yardımıyla ölçülür.

**Tablo 4.5:** Deney Motoruna Ait Deneysel, Statik ve Dinamik Modelde Bulunan Akım Değerleri

$V_a(V)$	$V_b(V)$	$V_c(V)$	VUF	Deneysel Sonuçlar			Statik Sonuçlar			Dinamik Sonuçlar		
				$I_{as}$ (A)	$I_{bs}$ (A)	$I_{cs}$ (A)	$I_{as}$ (A)	$I_{bs}$ (A)	$I_{cs}$ (A)	$I_{as}$ (A)	$I_{bs}$ (A)	$I_{cs}$ (A)
231.1	212.6	216.3	0.025	2.61	2.15	2.47	2.621	2.902	2.807	2.55	2.93	2.56
219.3	205.4	208.4	0.020	2.06	2.64	2.21	2.372	2.781	2.757	2.28	2.80	2.58
222.9	212	214.7	0.017	2.25	2.91	2.53	2.392	2.88	2.86	2.31	2.91	2.66
207	218.6	209.7	0.017	2.67	2.03	2.29	2.682	2.279	2.963	2.57	2.18	2.93
212.8	230.9	216.4	0.024	2.44	2.58	2.13	2.69	2.57	2.05	2.53	2.46	3.0

Tablo 4.5'de deney motoruna ait deneysel, Mathcad ve Simulink'de bulunan akım değerleri belirtilmektedir. % 1.7 gerilim dengesizliğinde farklı gerilim genliklerinde akımlara bakıldığında gerilim genliği yüksek olan fazın akımı da yüksektir. Mathcad ve Simulink'de bulunan akım değerleri deneysel olarak bulunan akım değerlerine yakın çıkmaktadır. Deneysel olarak bulunan sonuçlar ile Mathcad ve Simulink olarak bulunan sonuçlar arasında maksimum %8'lik fark vardır. Motor yüklü çalışmadığından verimden söz etmenin bir anlamı yoktur. Deneysel çalışmaların uzun zaman almasından dolayı sonraki analizlerde deneysel çalışmalar tercih edilmemiştir.

## 4.6 Farklı Gerilim Dengesizliği Değerlerinde Asenkron Motorun Akım Güç ve Verim Değerlerinin İncelenmesi

Tablo 4.1`de karakteristikleri verilen asenkron motorun sabit kayma değerinde 230V faz-nötr çalışma geriliminde farklı gerilim dengesizliklerinde üç faz OVU ve üç faz UVU durumları için akım, güç ve verimlerin değişimi incelenmiştir.

**Tablo 4.6:** Farklı VUF Değerleri İçin Hesaplanan Statik Analiz Sonuçları

	V <sub>a</sub> (V)	V <sub>b</sub> (V)	V <sub>c</sub> (V)	VUF	CUF	I <sub>as</sub> (A)	I <sub>bs</sub> (A)	I <sub>cs</sub> (A)	P <sub>in</sub> (kW)	P <sub>out</sub> (kW)	P <sub>K</sub> (kW)	T <sub>ç</sub> (Nm)	Verim
	230	230	230	0	0	12.135	12.135	12.135	7.892	7.209	0.683	47.834	0.913
UVU	216	222	228	1.56	0.125	11.096	12.548	12.529	7.361	6.713	0.648	44.547	0.912
	202	214	226	2.24	0.259	9.057	14.09	14.055	6.865	6.23	0.635	41.341	0.907
	188	206	224	5.04	0.403	7.018	14.747	14.70	6.405	5.759	0.646	38.217	0.899
	174	198	222	7.00	0.560	4.980	15.504	15.445	5.981	5.301	0.680	35.173	0.886
	160	190	220	9.12	0.729	2.941	16.347	16.28	5.592	4.854	0.738	32.211	0.868
OVU	244	238	232	1.46	0.116	15.174	12.863	12.884	8.46	7.71	0.75	51.202	0.912
	258	246	235	2.70	0.216	17.10	12.73	12.917	9.083	8.259	0.824	54.806	0.909
	272	254	237	2.97	0.318	19.139	12.747	12.962	9.721	8.792	0.929	58.344	0.905
	286	262	239	5.17	0.414	21.17	12.918	12.16	10.39	9.338	1.052	61.963	0.898
	300	270	241	6.30	0.504	22.21	12.23	12.503	11.10	9.89	1.21	65.664	0.891
	314	278	243	7.36	0.589	25.25	12.69	12.98	11.85	10.47	1.38	69.446	0.883
	328	286	244	8.48	0.678	27.407	14.361	14.52	12.61	11.02	1.59	72.117	0.874

Sabit kayma değerinde OVU ve UVU için Tablo 4.6`dan görüldüğü gibi gerilim dengesizliği arttıkça verim düşmektedir. UVU`da dengesizlik arttıkça b ve c fazının akımları artmaktadır. A fazının akımının düşmesinin sebebi düşük gerilim dengesizliğinde (UVU) a fazının gerilimi b ve c fazı gerilimlerine göre da %10-20 arasında daha düşük olmasındandır. Dolayısıyla giriş ve çıkış güçleri de azalmakta ve verim düşmektedir. OVU`da ise gerilim genlikleri yüksek olduğundan üç faz akımı da dengesizliğin yükselmesiyle artmaktadır. A fazının b ve c fazlarına göre daha yüksek olmasının sebebi a fazının gerilim genliğinin b ve c fazlarına göre daha yüksek olmasıdır.



Faz akımları arttığı için giriş ve çıkış güçleri artış göstermektedir. OVU durumunda giriş gücü maksimum %7.36, minimum da %6.4 artış gösterirken; çıkış gücü giriş gücüne göre daha az artış (maksimum %7.1, minimum da %5.2) gösterdiği için verim azalmaktadır. OVU ve UVU durumları için moment ile gerilim dengesizliği faktörünün değişimi incelendiğinde UVU`da gerilim genlikleri nominal gerilim değerlerinden düşük olduğundan rotor akımı azalma gösterdiği için çıkış momenti de azalma göstermektedir. OVU`da ise UVU`nun tersi olarak gerilim genlikleri nominal gerilim değerlerinden yüksek olduğundan çekilen akım yükseldiği için moment artış göstermektedir. Akım dengesizlik faktörü (CUF) OVU ve UVU durumları için gerilim dengesizliği arttıkça artmaktadır. Dengesizliğin artmasıyla birlikte negatif dizi stator akımları da artış gösterdiğinden akım dengesizliği her iki durumda da artmaktadır.

## 4.7 Sonuç ve Değerlendirme

Gerilim dengesizliğinin asenkron motorlarda verimi düşürdüğü yapılan analizler ile teyit edildi. Sabit kayma değerinde dengesizlik arttıkça verim dengesizlikle ters orantılı olarak azalır. Aynı gerilim dengesizliğinde kayma sabitken genlik ve açı ile dengesizlik yapıldığında ise verimin dengeli duruma göre azaldığı görülmektedir. Asenkron motorun gerilim dengesizliğinde verimi azaldığı için motorun verimini yükseltmek için çıkış gücünün derate edilmesi gereklidir. Asenkron motor dengesiz gerilim altında çalışırken aynı işi yapmak için daha fazla enerji tüketilmesine neden olur, bu da elektrik maliyetinin artması anlamına gelir. Ayrıca motor; dengesiz gerilim altında boşa çalıştırıldığında deneysel, statik ve dinamik sonuçlar mukayese edilerek bulunan sonuçlar arasında maksimum %8`lik fark çıktığı görülmektedir.

## **5. GERİLİM DENGESİZLİĞİ ALTINDAKİ ASENKRON MOTORDA DERATASYON**

Gerilim dengesizliği asenkron motorlarda verimin düşmesine sebep olduğundan çıkış gücü azaltılarak (derate edilerek) verim artırılabilir. Deratasyon işlemi motor tam yüklü durumdayken yapılmaktadır. Uygulamada ise motorlar nominal yüklenmede (%100) çalıştırılmamaktadır. Bu nedenden ötürü nominal yüklenmenin altında yüklenen motorlarda verimi arttırmak için deratasyon yapılması gereklidir. Asenkron motorun belirli bir gerilim dengesizliği değerinde Nema eğrisinden deratasyon faktörü elde edilir. Grafikten bulunan deratasyon faktörüne göre statik analiz yapılırken motorun kayma değeri azaltılarak çıkış gücü düşürülür. Sabit VUF değerinde Nema standardına göre farklı gerilim genliklerinde statik model ile analiz yapıldığında açılar sabitken kayma ile oynanarak motorun çıkış gücü derate edilip verimin değişimi analiz edilerek aynı VUF değerinde genlikler sabitken, açı dengesizliğinde deratasyon yapılarak verimi nasıl etkilediği incelenmektedir. Ayrıca genlik ve açı dengesizliğinin bir arada olduğu durum için de deratasyon yapıp her üç durum için hangi güçten sonra deratasyonun işe yaramadığı, çıkış gücü ile verimin değişimi sorgulanmaktadır.

### **5.1 %3 Gerilim Dengesizliğinde Verimin Değişimi**

Tablo 4.1`de karakteristikleri belirtilen 7.5 kW gücündeki asenkron motorun faz-nötr gerilimleri 220V değerinde sabit tutularak %3 gerilim dengesizliğinde dengesiz açılarda kayma değeri değiştirilip deratasyon yapılarak açı dengesizliğinde deratasyon yapıldığında verimin nasıl değiştiği sorgulanmaktadır. Verimin hangi çıkış gücünden sonra düşmeye başladığı irdelenmektedir. Tablo 5.1`de aynı gerilim dengesizliği değerinde sabit genliklerde iki farklı dengesiz açı durumunda deratasyon yapılarak iki ayrı durum için deratasyonun etkisi mukayese edilmektedir. Ayrıca Tablo 5.2`de açı ve genlik dengesizliğinde deratasyon yapılmaktadır. Her iki durum için verim değişimi analiz edilerek deratasyonun gerekli olup olmadığı sorusuna cevap aranmaktadır.

**Tablo 5.1:** %3 VUF İçin Açılı Dengesizliğinde Statik Modelde Elde Edilen Sonuçlar

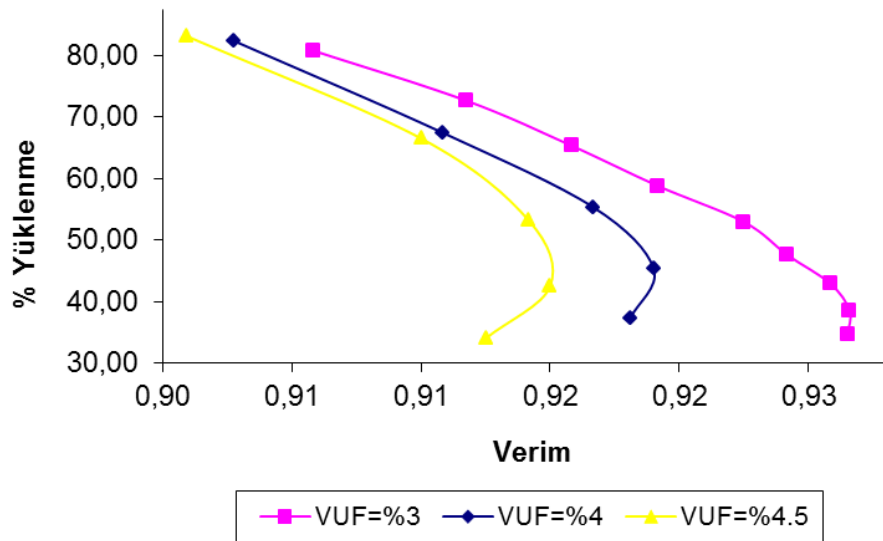
VUF	V <sub>a</sub> (V)	V <sub>b</sub> (V)	V <sub>c</sub> (V)	P <sub>in</sub> (kW)	P <sub>out</sub> (kW)	Verim
Dengeli	220<0	220<240	220<120	8.32	7.50	0.913
%3	220<0	220<231	220<114	7.23	6.52	0.902
	220<0	220<231	220<114	6.45	5.86	0.908
	220<0	220<231	220<114	5.78	5.28	0.912
	220<0	220<231	220<114	5.18	4.75	0.916
	220<0	220<231	220<114	4.65	4.27	0.918
	220<0	220<231	220<114	4.18	3.84	0.920
	220<0	220<231	220<114	3.75	3.46	0.9205
	220<0	220<231	220<114	3.38	3.11	0.920
	220<0	220<231	220<114	3.05	2.80	0.918
%3	220<0	220<280	220<200	7.98	3.78	0.473
	220<0	220<280	220<200	7.54	3.40	0.450

Tablo 5.1`de ilk olarak kayma nominal değerindeyken ( $s=0.04$ ) dengeli durumda güç ve verim değerleri bulunduktan sonra Nema`ya göre %3 dengesizlik durumu için nominal kayma değeri azaltılarak motor derate edilmeye başlanmıştır. 3.46 kW`lık çıkış gücüne kadar verim artış göstermekte, 3.46 ile 3.11 kW aralığında verim azalmaya başlamaktadır. Motor 3.3 kW çıkış gücünden sonra verim değeri düşmeye başlamaktadır. Dolayısıyla bu güçten sonra deratasyon yapmak bir anlam ifade etmemektedir. Yani deratasyonun kırılmaya başladığı güç değeri 3.3 kW`dır. Motor %44 yüklenmeden sonra verimsiz çalışmaktadır. Motorun deratasyon yapıldığında ulaşabileceği maksimum verim 0.9205`dir. Dengeli durumda a fazının açısı  $0^0$  b fazının  $120^0$  c fazının ise  $240^0$  `dir. Birinci durumda a fazının açısı sabit tutularak b ve c fazlarının açıları azaltılarak deratasyon yapıldığında verimlerin arttığı görülmektedir. İkinci durumda ise a fazının açısı sabit tutulup b ve c fazlarının açıları arttırılarak deratasyon yapıldığında verim değerlerinin azalma gösterdiği görülmektedir. Açılarda dengesizlik olduğundan akımlar da azalma göstermektedir.

**Tablo 5.2:** %3 VUF İçin Açık Ve Genlik Dengesizliğinde Statik Modelde Elde Edilen Sonuçlar

VUF	V <sub>a</sub> (V)	V <sub>b</sub> (V)	V <sub>c</sub> (V)	P <sub>in</sub> (kW)	P <sub>out</sub> (kW)	Verim
%3	227<0	214<230	223<110	7.31	6.58	0.900
	227<0	214<230	223<110	6.54	5.92	0.9060
	227<0	214<230	223<110	5.86	5.33	0.9100
	227<0	214<230	223<110	5.25	4.80	0.9140
	227<0	214<230	223<110	4.71	4.32	0.9160
	227<0	214<230	223<110	4.24	3.89	0.9172
	227<0	214<230	223<110	3.81	3.50	0.9174
	227<0	214<230	223<110	3.44	3.15	0.9160
	227<0	214<230	223<110	3.10	2.83	0.9140

Tablo 5.2`de Nema standardına göre %3 gerilim dengesizliği için hem genlik hem de açı dengesizliği durumunda deratasyon yapıldığında verimin nasıl değiştiği analiz edilmektedir. 3.34 kW çıkış gücünden sonra verimde azalma meydana gelmektedir. Deratasyonun kırılmaya başladığı güç değeri 3.34 kW`dır. Tablo 5.1 ve Tablo 5.2`de elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında hem açı hem de genlik dengesizliğinde deratasyon yapılabileceği ortaya çıkar.

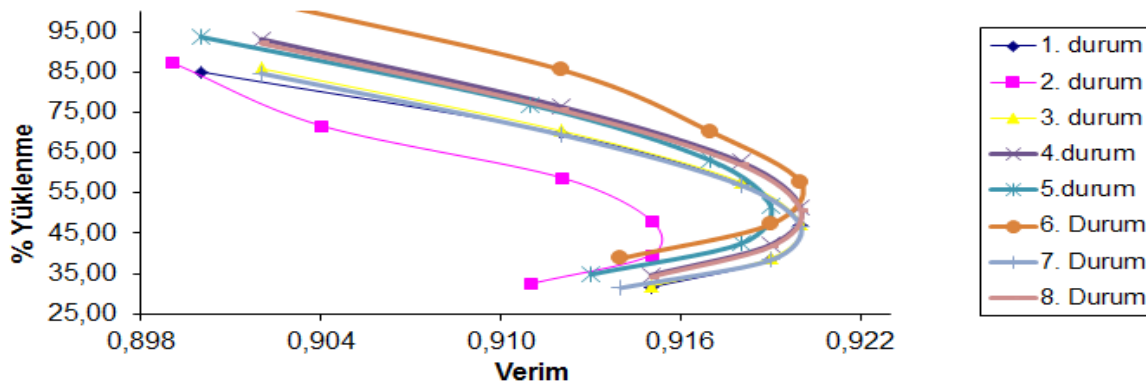


Şekil 5.1: Farklı VUF Değerlerinde Açık Dengesizliğinde Yüzde Yüklenme İle Verimin Değişimi

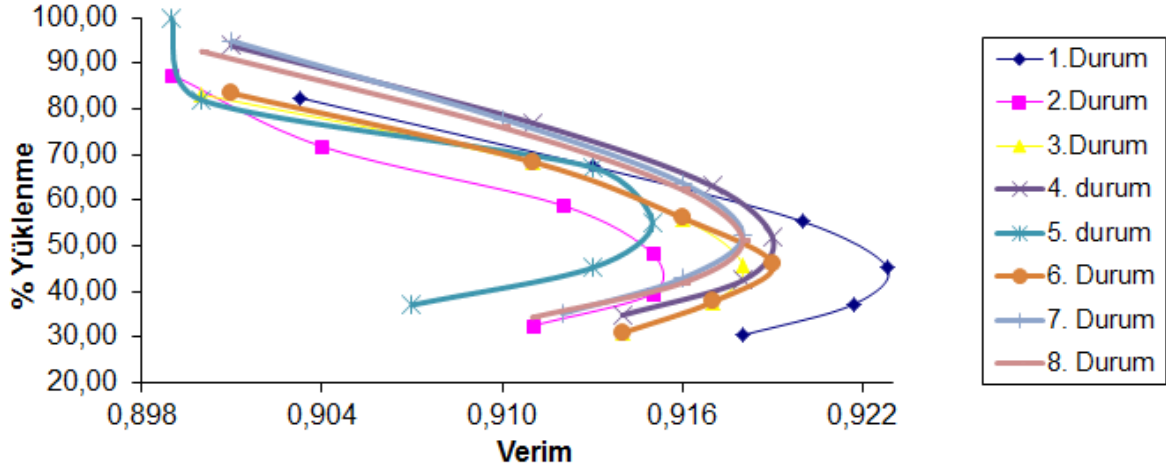
%3, %4 ve %4.5 gerilim dengesizliği değerleri için 7.5 kW gücündeki asenkron motora nominal kayma değerinden başlayıp deratasyon yapılarak verimin hangi noktadan itibaren azalmaya başladığı yüklenme oranı ile verimin değişimi incelenerek Şekil 5.1'deki grafik elde edilmektedir. Her bir gerilim dengesizliği için deratasyon faktörü farklı olduğundan kırılma noktaları da farklılık gösterir. %3 gerilim dengesizliğinde deratasyonun kırılmaya başladığı nokta 2.65kW, % 4'de 2.91 kW, % 4.5'de ise 2.95 kW'dır. Bu güç değerleri de %3 gerilim dengesizliği için % 35.3, %4 gerilim dengesizliği için % 38.8 ve %4.5 gerilim dengesizliği için de %39.3 yüklenme oranına tekabül etmektedir. Dolayısıyla gerilim dengesizliği arttıkça deratasyonun kırılmaya başladığı güç değeri buna bağlı olarak da motorun yüklenme oranı artış göstermektedir. Bu durumda motora küçük güçlerde deratasyon yapmak bir anlam ifade etmez.

## 5.2 %4.5 VUF Değerinde Sabit Açılarda Deratasyonun Etkisinin İncelenmesi

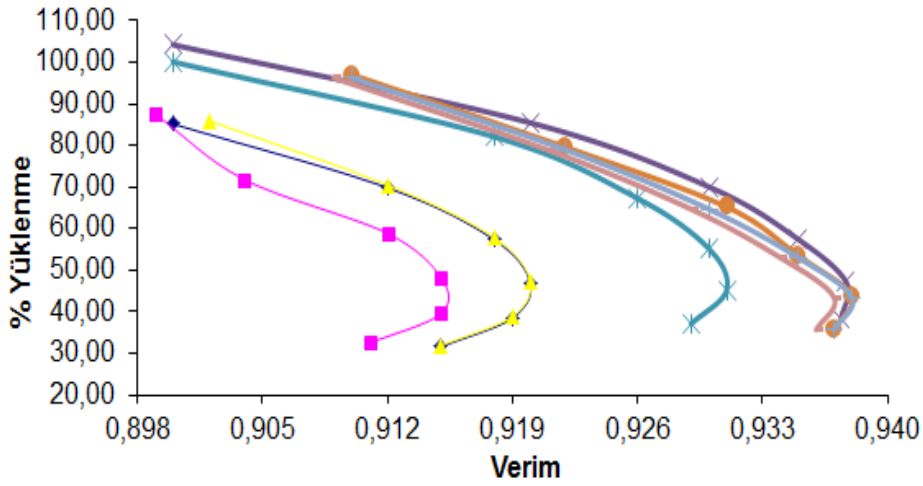
% 4.5 VUF değerinde Nema, IEC ve IEEE standartlarına göre farklı gerilim genliklerinde, açılar dengeli durumda iken motor derate edilerek verim değerleri incelenmektedir. Üç farklı gerilim dengesizliği standardı için deratasyon yapılmasının amacı deratasyonun kırılmaya başladığı noktanın farklı dengesizlik standartlarına göre nasıl değiştiğinin irdelenmesidir. Ayrıca aynı gerilim dengesizliği değerinde farklı gerilim değerlerinde deratasyon yapılarak motorun hangi çıkış gücü değerinden sonra deratasyonun anlamsız hale geldiği incelendi.



Şekil 5.2: % 4.5 VUF'da Farklı Gerilim Genliklerinde IEC Standardına Göre Yüzde Yüklenme İle Verimin Değişimi



Şekil 5.3 % 4.5 VUF'da Farklı Gerilim Genliklerinde Nema Standardına Göre Yüzde Yüklenme İle Verimin Değişimi



Şekil 5.4: % 4.5 VUF'da Farklı Gerilim Genliklerinde IEEE Standardına Göre Yüzde Yüklenme İle Verimin Değişimi

**Tablo 5.3:** % 4.5 VUF İçin Farklı Dengesizlik Tanımları ve Farklı Gerilim Genliklerinde Kırılma Noktalarının Değişimi

No	IEC				NEMA				IEEE			
	V <sub>a</sub> (V)	V <sub>b</sub> (V)	V <sub>c</sub> (V)	%YO	V <sub>a</sub> (V)	V <sub>b</sub> (V)	V <sub>c</sub> (V)	%YO	V <sub>a</sub> (V)	V <sub>b</sub> (V)	V <sub>c</sub> (V)	%YO
1	237	208	207	36.67	231	200	210	31.20	227	210	215	28.00
2	226	211	190	37.33	226	211	190	36.00	220	211	200	31.20
3	238	210	207	40.27	234	210	200	32.80	223	210	207	32.00
4	240	235	207	42.67	240	237	207	44.40	230	251	239	41.60
5	240	207	237	43.20	214	255	237	46.67	227	246	240	38.53
6	260	240	222	50.67	234	200	211	33.33	240	234	221	36.27
7	200	234	216	38.67	250	225	213	47.33	230	241	221	36.67
8	210	245	223	42.67	210	247	223	48.27	220	231	241	37.47

Tablo 5.3'deki gerilim değerleri faz-nötr gerilimleridir. Yükleme oranı (YO) ile ifade edilmektedir. Asenkron motor öncelikle nominal kayma ( $s=0.04$ ) değerinde çalıştırılarak derate edilmeye başlandı. Tablo 5.2'ye bakıldığı zaman 7.5 kW gücündeki asenkron motor % 4.5 gerilim dengesizliği değerinde üç farklı dengesizlik tanımı için de genel olarak % 28-45 yüklenme oranı aralığında bir güç değerinden sonra verimsiz bölgede çalışmaktadır. UVU (Under Voltage Unbalance) durumu olduğunda motor nominal gerilim değerinin altındaki gerilim değerlerinde çalıştığından kırılma noktası (KN) değeri daha küçüktür. UVU durumunda motor daha geç kırılma noktasına ulaşır. Genlikler yüksek olduğu durumda ise OVU (Over Voltage Unbalance) deratasyonun kırıldığı güç değeri daha yüksek çıkar. Örneğin IEC standardı için altıncı durumda motor 3.8 kW gücünde yani % 50.67 yüklenme oranından sonra verimsiz çalışmaktadır. IEC, NEMA ve IEEE standartlarının hepsinde ister OVU ister UVU durumunda olsun kayıplar deratasyon yapıldıkça azalma göstermektedir. Verim de belirli bir güç değerine kadar artar daha sonra azalma gösterir. Tablo 5.3 ile ilgili güç ve verim değerlerinin ayrıntılı dökümü ek kısmında gösterilmektedir.

### 5.3 Sonuç ve Değerlendirme

Asenkron motorlarda gerilim genlikleri sabitken dengesiz açılarda, açılar dengeliyken farklı gerilim genliklerinde veya hem açı hem de genlik dengesizliğinde deratasyon yapılabilir. Her üç durum için de verim belirli bir güç değerinden sonra azalmaya başlar. Genlik dengesizliğinde ise OVU ve UVU durumlarına göre kırılma noktası farklılık gösterir. Açı dengesizliğinde deratasyon yapıldığında gerilim açıları mutlaka nominal değerlerinin altında olmalıdır. Tablo 5.1`de görüldüğü gibi açı değerleri yükseltilecek deratasyon yapıldığında verimde azalma meydana gelmektedir. Bu durumda da deratasyon yapmanın bir anlamı kalmayacaktır. Sadece açı dengesizliğinde ve hem açı hem de genlik dengesizliği durumu için kırılma noktalarının çok yakın çıktığı görülmektedir. Her iki durumda da gerilim dengesizlik değeri %3 olduğundan kırılma noktalarının çok yakın çıkması normaldir. Aynı gerilim dengesizliği değerinde Nema, IEC ve IEEE tanımları için açılar sabit tutularak, farklı gerilim genliklerinde deratasyon yapıldığında deratasyonun kırılmaya başladığı güç değerlerinin dengesizlik tanımlarına göre farklılık gösterdiği görülmektedir. Ayrıca gerilim dengesizliği artıkça deratasyonun kırılmaya başladığı güç değeri de artış göstermektedir.



## 6. SONUÇ

Asenkron motorlarda gerilim dengesizliği günümüzde hala güncelliğini yitirmeyen önemli bir konudur. Gerilim dengesizliği şebekede elde olmayan sebeplerden dolayı ortaya çıkar. Bu ortaya çıkış açısı ve genlik ile ayrı ayrı olduğu gibi açısı ve genlik bir arada iken de tezahür edebilir. Bu çalışmada gerilim dengesizliğinin motoru nasıl etkilediği ve dengesiz gerilim altında çalışan motorun azalan veriminin nasıl yükseltilebileceği sorularına cevap aranmıştır. Dengesiz gerilim altında çalışan motorun verimi düştüğü için motoru verimli bölgede çalıştırmak için çıkış gücü azaltılır (deratasyon). Deratasyon için kullanılan en yaygın metot Nema'nın önerdiği metottur. Herhangi bir gerilim dengesizliği değerinde Nema eğrisinden deratasyon faktörü bulunur. Deratasyon faktörü motorun çıkış gücünün yüzde kaç oranında azaltılması gerektiğini veren bir katsayıdır. Deratasyon ile alakalı literatürde başka metotlar da vardır. Nema metodu en yaygın standart olduğu ve çok kullanıldığı için analizlerde bu metot tercih edilmiştir.

Nema eğrisinde deratasyon faktörü belirlendikten sonra statik modelde kayma değeri dinamik modelde ise hız değeri azaltılarak motor derate edilir. Analizlerin ağırlıklı olarak statik (yaklaşık analiz) model kullanılarak Matchad'de yapılmasının sebebi Matchad'in kullanımının basit ve verilerin kısa sürede elde edilebilmesidir. Sabit dengesizlik değerinde, gerilim genlikleri sabitken, açı dengesizliğinde, açılar sabitken genlik dengesizliğinde ya da hem genlik hem de açı dengesizliğinde deratasyon yapıldığında verim belirli bir çıkış gücüne kadar artıktan sonra azalmaya başlar. Verimin düşmeye başladığı çıkış gücü değerine **kırılma noktası** adı verilmektedir. Kırılma noktası aynı gerilim dengesizliği için farklı genliklerde değişkenlik gösterdiği gibi farklı dengesizlik tanımları için de değişkendir.

Bu çalışmada ilk olarak gerilim dengesizliğinin akım, güç ve verime etkisi incelenmiştir. Sabit gerilim dengesizlik değerinde gerilim genlikleri sabitken, açı dengesizliğinde, açılar sabitken de genlik dengesizliğinin verime etkisi incelenmiştir. Farklı gerilim dengesizliklerinde kayma sabit tutularak UVU ve OVU durumları için verimin değişimi analiz edilmiştir. UVU durumunda dengesizlik nominal çalışma geriliminin altında yapıldığı için akımlar azalma gösterirken; OVU durumunda nominal çalışma geriliminin üstünde yapıldığı için akımlar gerilimler orantılı olarak artış göstermektedir.

2.2 kW`lık bir deney motoru boŖta alıŖtırılıp dengesizlik yapılarak deneysel, statik ve dinamik modelde bulunan sonular karŖılaŖtırılmıŖtır. Deneysel olarak bulunan sonular ile statik ve dinamik modelde bulunan sonular arasında maksimum %8`lik fark ıkmaktadır.

Bir sonraki aŖamada motora deratasyon yapılarak verimin nasıl deėiŖtiėi sorgulanmıŖtır. Dengesiz gerilim altında alıŖan motorun verimi dıŖtđėu iin motoru verimli bđlgede alıŖtırmak iin ıkıŖ gđcđ derate edilerek deratasyonun kırılmaya baŖladıėı nokta incelenmiŖtir. Genel olarak OVU (Over Voltage Unbalance) durumunda motor daha kısa sđrede diğer bir deyiŖle daha yđksek gđten itibaren kırılmaya baŖlar. UVU (Under Voltage Unbalance) durumunda ise deratasyonun kırılmaya baŖladıėı gđ değeri daha dđŖdđktđr. Dolayısıyla OVU durumu iin dđŖđk gđlerde deratasyon yapılmasının bir anlamı yoktur. Genlik ve aı dengesizliği ile sadece aı dengesizliği iin deratasyon yapıldığında motorun veriminin belirli bir ıkıŖ gđcđ değerinden sonra azalma gđsterdiėi gđrđlmektedir. Yani kđk gđlerde deratasyon yapmak gerekli değildir. Aynı gerilim dengesizliği değerinde Nema, IEC ve IEEE tanımları iin aılar sabit tutulup, farklı gerilim genliklerinde deratasyon yapılarak deratasyonun kırılmaya baŖladıėı gđ değerlerinin dengesizlik tanımlarına gđre farklılık gđsterdiėi anlaŖılmaktadır. Gerilim dengesizlik değeri yđkseldike deratasyonun kırılmaya baŖladıėı değer artıŖ gđstermektedir.

Literatđr alıŖmaları incelendiğinde genel anlamda gerilim dengesizliği standartlarından bahsedilmiŖ olup genlik ve aı dengesizliğinin akım, gđ ve verime etkisi incelenmiŖtir. Her bir dengesizlik durumu iin deratasyonun nereye kadar verimi artırdığı belirtilmiŖtir. Bu alıŖmada literatđrde daha nceden bahsedilmeyen bir kavram olan kırılma noktasına deėinilmiŖ olup deratasyonun belirli bir gđ değeri aralığında yapılması gerektiği ifade edilmektedir. İlk defa olarak hangi yđklenme durumlarında deratasyon yapılmasının gerekli olacağı vurgulanmaktadır. Sonuların genelleŖtirilerek endđstriyel kullanıcılar iin bir rehber olması amalanmaktadır.

Gelecek alıŖmada farklı motor tipleri kullanılarak deneysel alıŖmalara ağırlık verilecektir. Ayrıca generatđr alıŖma modunda dengesizlik durumunda ne olacağının cevabı verilecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] Mirabbasi, D., Seisfossadat, G., Heidari, M., “Effect of Unbalanced Voltage on Operation of Induction Motors and its Detection” Elektrik, Elektronik, Otomasyon, Aydınlatma Ve İletişim Fuarı Sempozyumu, pp. 189-192, Eleco, Bursa 2009
- [2] National Electrical Manufacturers Association NEMA MG-1-2006 Motors and Generators Standart
- [3] International Electrotechnical Commission IEC 60034-26, Effects on Unbalanced Voltages on the Performance of Induction Motors, 2002
- [4] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std. 1159-1995, 1995.
- [5] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, <http://www.epdk.gov.tr> Erişim Tarihi: 15.02.2011
- [6] Reed, H. R., Koopman, R. J., “Induction Motors on Unbalance Voltages” AIEE Transactions, Vol. 55, pp. 387-393, November 1936
- [7] Williams, J. E. “Operation of Three-Phase Induction Motors On Unbalance Voltages” AIEE Transactions, pt. III-A, Power Apparatus and Systems, Vol. 73, pp. 125-133, April 1954
- [8] Gafford, B.N., Duesterhoefl, W. C. and Mosher, C. C., “Heating of Induction Motors on Unbalanced Voltages,” AIEE Transactions, pt. III-A, Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-78, pp. 282-297, June, 1959
- [9] Berndt, M.M. and Schmitz, N. L., “Derating of Polyphase Induction Motors Operated with Unbalanced Line Voltage,” AIEE Transactions. Vol. PAS-84, pp. 471-479, February, 1964

- [10] Lee, C.-Y. "Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No.2, pp 202-208, June 1999
- [11] Wang, Y.-J., "An Analytical Study on Steady-State Performance of an Induction Motor Connected to Unbalanced Three-phase Voltage" IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol.1, pp 159-164, 2000
- [12] Pillay, P., Hofmann, P., and Manyage, M. "Derating of Induction Motors Operating With a Combination of Unbalanced Voltages and Over or Undervoltages" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No.4, pp 485-491, December 2002
- [13] Quispe, E., Gonzalez, G., Aguado, J., "Influence of Unbalance and Waveform Voltage on the Performance Characteristics of Three-Phase Induction Motors", Proceedings of International Conference on Renewable Energy and Power Quality Applications, ISBN 8460798870. Barcelona, Ispanya 2004
- [14] Faiz, J., Ebrahimpour, H. And Pillay, P. "Influence of Unbalanced Voltage on the Steady State Performance of a Three Phase Squirrel-Cage Induction Motor", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 19, No. 4, pp 657-662, December 2004
- [15] Faiz, J., Ebrahimpour, H. And Pillay, P. "Influence of Unbalanced Voltage Supply on Efficiency of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor and Economic Analysis", Energy Conversion and Management Vol.47, pp 289-302, June 2005
- [16] Sandhu, K. S., Chaudry, V. "Steady State Modelling of Induction Motor Operating with Unbalanced Supply System" WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Vol. 8, pp 197-206, February 2009
- [17] Ansari, A. A, Deshpande, D. M. "Investigation of Performance of 3-Phase Asynchronous Machine Under Voltage Unbalance" Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol.6. No.1, pp 021-026, 2005

- [18] Jalilian, A., Roshanfekar, R., "Analysis of Three-phase Induction Motor Performance Under Different Voltage Unbalance Conditions Using Simulation and Experimental Results" *Electric Power Components and Systems* Vol. 3, No. 10, pp 300-319, October 2005
- [19] Krishna, K.V. V., "Effects of Unbalance Voltage on Induction Motor Current and its Operation Performance" *Lecon Systems*, <http://www.leconsystems.com>, Erişim Tarihi: 12.03.2011
- [20] Kianinezhad, R., Seifossadat, G., Heidari, M. and Monadi, M., "Effects of Distribution Network Unbalance Voltage Types in Respect to Identical Unbalance Factor on the Induction Motors" *Elektrik, Elektronik, Otomasyon, Aydınlatma Ve İletişim Fuarı Sempozyumu Eleco Bursa*, pp 193-196, 2009
- [21] Hiendro, A. "Quantities Method of Induction Motor Under Unbalanced Voltage Conditions" *Indonesian Journal of Electrical Engineering*, Vol.8, No.2, pp 73-80, 2010
- [22] Ebadi, A., Mirzaie, M., Gholamian, S. A. "Torque Analysis of Three-Phase Induction Motor Under Voltage Unbalance Using 2D Fem" *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, Vol. 3, No 2, pp 871-876, February 2011
- [23] Arifoğlu, U. "Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi" *Alfa Yayınevi, İstanbul* 2002
- [24] Siemens Motor Kataloğu, [www.siemens.com](http://www.siemens.com), Erişim Tarihi: 01.03.2011
- [25] Sarıoğlu, M. K., Gökaşan M., Boğosyan S. "Asenkron Makineler Ve Kontrolü" *Birsen Yayınevi, İstanbul*, 2003
- [26] Sarma, G. "Power System Analysis & Design" Second Edition, Boston, 1994
- [27] Matlab Programı, [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com) Erişim Tarihi: 10.01.2011
- [28] PGE Company, [www.pge.com](http://www.pge.com) Erişim Tarihi: 20.03.2011

[29] Önel, İ. Y. “3 Fazlı Asenkron Motorlarda Arızalar ve Verime Etkileri” Elektrik Port, <http://www.elektrikport.com>, 2009, Erişim Tarihi: 03.04.2011

[30] US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Motor Tip Sheet #5. “Replace V-Belts with Cogged or Synchronous Belt Drives”, September 2005

[31] Bezek, Ç. “Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Asenkron Motor Analizinin Matlabda Gerçekleştirilmesi” Fırat Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Aralık 2009

## ÖZGEÇMİŞ

Fuat IŞIK, 29.10.1983 yılında İstanbul'da doğdu. 2000 yılında Beşiktaş Lisesi'nden mezun oldu. 2001 yılında girmeye hak kazandığı Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2006 yılında mezun oldu. 2008 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Enerji Sistemleri Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. Şubat 2010'dan beri Suryapı End. San. ve Tic. A.Ş`de çalışmaktadır.

## EK

### TABLO 5.3' DEKİ SONUÇLARIN DETAYLI DÖKÜMÜ

#### NEMA STANDARDI

V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>	P <sub>in</sub> (kW)	P <sub>out</sub> (kW)	P <sub>K</sub> (kW)	Verim
<b>1</b>						
231<0	200<240	210<120	6.842	6.18	0.66	0.903
			5.542	5.06	0.48	0.913
			4.511	4.15	0.36	0.920
		KN=2.34	3.684	3.40	0.28	0.923
			3.027	2.79	0.24	0.922
			2.484	2.28	0.20	0.918
<b>2</b>						
226<0	211<240	190<120	7.308	6.57	0.74	0.899
			5.960	5.39	0.57	0.904
			4.844	4.42	0.43	0.912
			3.959	3.62	0.34	0.915
		KN=2.7	3.246	2.97	0.28	0.915
			2.674	2.44	0.24	0.911
<b>3</b>						
234<0	210<240	200<120	6.933	6.24	0.69	0.900
			5.617	5.12	0.50	0.911
			4.581	4.20	0.38	0.916
			3.748	3.44	0.31	0.918
		KN=2.46	3.077	2.82	0.26	0.917
			2.531	2.31	0.22	0.914
<b>4</b>						
240<0	237<240	207<120	7.814	7.04	0.77	0.901
			6.337	5.77	0.56	0.911
		KN=3.33	5.162	4.73	0.43	0.917
			4.224	3.88	0.34	0.919
			3.467	3.18	0.28	0.918
			2.856	2.61	0.25	0.914
<b>5</b>						
214<0	255<240	237<120	8.343	7.50	0.84	0.899
			6.833	6.15	0.68	0.900
		KN=3.50	5.524	5.04	0.48	0.913
			4.519	4.14	0.38	0.915
			3.714	3.39	0.32	0.913
			3.066	2.78	0.29	0.907



6

234<0	200<240	211<120				
			6.948	6.26	0.69	0.901
			5.635	5.13	0.50	0.911
			4.595	4.21	0.39	0.916
		KN=2.50	3.756	3.45	0.30	0.919
			3.086	2.83	0.26	0.917
			2.539	2.32	0.22	0.914

7

250<0	225<240	213<120				
			7.902	7.12	0.78	0.901
			6.416	5.84	0.58	0.910
			5.227	4.79	0.44	0.916
		KN=3.55	4.276	3.93	0.35	0.918
			3.514	3.22	0.30	0.916
			2.894	2.64	0.25	0.912

8

210<0	247<240	223<120				
			7.722	6.95	0.77	0.900
			6.263	5.70	0.56	0.910
			5.102	4.67	0.43	0.916
		KN=3.62	4.174	3.83	0.34	0.918
			3.430	3.14	0.29	0.916
			2.828	2.58	0.25	0.911

## IEC STANDARDI

V <sub>a</sub>	V <sub>b</sub>	V <sub>c</sub>	P <sub>in</sub> (kW)	P <sub>out</sub> (kW)	P <sub>K</sub> (kW)	Verim
<b>1</b>						
237<0	208<240	207<120	7.100	6.39	0.71	0.900
			5.745	5.24	0.51	0.912
			4.680	4.30	0.38	0.918
		KN=2.75	3.830	3.52	0.31	0.920
			3.144	2.89	0.25	0.919
			2.589	2.37	0.22	0.915
<b>2</b>						
226<0	211<240	190<120	7.308	6.57	0.74	0.899
			5.960	5.39	0.57	0.904
			4.844	4.42	0.43	0.912
			3.959	3.62	0.34	0.915
		KN=2.80	3.246	2.97	0.28	0.915
			2.674	2.44	0.24	0.911

3

238<0	210<240	207<120	7.151	6.45	0.70	0.902
			5.799	5.29	0.51	0.912
			4.724	4.34	0.39	0.918
			3.866	3.56	0.31	0.920
		KN=3.02	3.173	2.92	0.26	0.919
			2.613	2.39	0.22	0.915

4

240<0	235<240	207<120	7.761	7.0	0.76	0.902
			6.294	5.74	0.55	0.912
		KN=3.20	5.127	4.71	0.42	0.918
			4.195	3.86	0.34	0.920
			3.444	3.16	0.28	0.919
			2.836	2.60	0.24	0.915

5

240<0	207<240	237<120	7.822	7.04	0.78	0.900
			6.337	5.77	0.56	0.911
		KN=3.24	5.162	4.73	0.43	0.917
			4.224	3.88	0.34	0.919
			3.467	3.18	0.28	0.918
			2.859	2.61	0.25	0.913

6

260<0	240<240	222<120	8.701	7.84	0.86	0.901
			7.049	6.43	0.62	0.912
		KN=3.80	5.749	5.27	0.48	0.917
			4.699	4.32	0.38	0.920
			3.857	3.54	0.31	0.919
			3.180	2.91	0.27	0.914

7

200<0	234<240	216<120	7.051	6.36	0.69	0.902
			5.718	5.22	0.50	0.912
		KN=2.90	4.658	4.28	0.38	0.918
			3.812	3.51	0.30	0.920
			3.129	2.88	0.25	0.919
			2.580	2.36	0.22	0.914

8

210<0	245<240	223<120	7.672	6.92	0.75	0.902
			6.222	5.67	0.55	0.912
		KN=3.20	5.069	4.65	0.42	0.918
			4.147	3.82	0.33	0.920
			3.404	3.13	0.28	0.919
			2.804	2.57	0.24	0.915

## IEEE STANDARDI

$V_a$	$V_b$	$V_c$	$P_{in}$ (kW)	$P_{out}$ (kW)	$P_K$ (kW)	Verim
<b>1</b>						
227<0	210<240	215<120	7.047	6.413	0.63	0.910
			5.704	5.26	0.44	0.922
			4.632	4.31	0.32	0.931
		KN=2.10	3.778	3.54	0.24	0.936
			3.094	2.90	0.19	0.937
			2.532	2.38	0.15	0.939
			2.08	1.95	0.13	0.936
<b>2</b>						
220<0	211<240	200<120	6.601	6.0	0.60	0.909
			5.342	4.92	0.42	0.921
			4.343	4.03	0.31	0.929
			3.542	3.31	0.23	0.934
		KN=2.34	2.898	2.71	0.19	0.936
			2.379	2.22	0.15	0.935
<b>3</b>						
223<0	210<240	207<120	6.791	6.18	0.61	0.910
			5.496	5.07	0.43	0.922
			4.463	4.16	0.31	0.931
			3.640	3.41	0.23	0.936
		KN=2.4	2.976	2.79	0.18	0.939
			2.443	2.29	0.15	0.938
<b>4</b>						
230<0	251<240	239<120	8.689	7.82	0.87	0.900
			6.970	6.41	0.56	0.920
			5.654	5.26	0.40	0.930
		KN=3.12	4.611	4.31	0.30	0.935
			3.770	3.54	0.23	0.938
			3.093	2.90	0.19	0.937
<b>5</b>						
227<0	246<240	240<120	8.462	7.70	0.76	0.910
			6.848	6.31	0.53	0.922
			5.561	5.18	0.38	0.931
		KN=2.89	4.536	4.25	0.29	0.936
			3.707	3.48	0.23	0.939
			3.043	2.85	0.19	0.938
<b>6</b>						
240<0	234<240	221<120	8.000	7.28	0.72	0.910
			6.475	5.97	0.51	0.922
			5.258	4.90	0.36	0.931
		KN=2.72	4.293	4.01	0.28	0.935
			3.509	3.29	0.22	0.938
			2.880	2.70	0.18	0.937

7

230<0	241<240	221<120				
			7.934	7.22	0.71	0.910
			6.421	5.92	0.50	0.922
			5.220	4.85	0.37	0.930
		KN=2.75	4.258	3.98	0.28	0.935
			3.480	3.26	0.22	0.938
			2.857	2.68	0.18	0.937

8

220<0	231<240	241<120				
			7.943	7.22	0.72	0.909
			6.428	5.92	0.51	0.921
			5.226	4.85	0.37	0.929
		KN=2.81	4.262	3.98	0.28	0.934
			3.484	3.26	0.22	0.937
			2.860	2.68	0.18	0.936

