

**T.C.  
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ  
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİK ÜRETEN YÜKLERİN  
BELİRLENMESİ VE OPTİMUM  
KOMPANZASYON İÇİN YENİ BİR GÜÇ İFADESİ**

**Murat Erhan BALCI**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANA BİLİM DALI**

**GEBZE**

**2009**

**T.C.**  
**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HARMONİK ÜRETEN YÜKLERİN**  
**BELİRLENMESİ VE OPTİMUM**  
**KOMPANZASYON İÇİN YENİ BİR GÜÇ İFADESİ**

**Murat Erhan BALCI**

**DOKTORA TEZİ**  
**ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANA BİLİM DALI**

**DANIŞMANI**  
**Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU**

**GEBZE**

**2009**



## DOKTORA TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29.09.2009 tarih ve 2009/29 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 22/10/2009 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Murat Erhan BALCI 'nın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Uğur ÜNVER

ÜYE

: Doç. Dr. Serkan AKSOY

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Mehmet BAYRAK

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI

### ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ...../...../20... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

**TEZİN BAŞLIĞI:** HARMONİK ÜRETEK YÜKLERİN BELİRLENMESİ VE OPTİMUM KOMPANZASYON İÇİN YENİ BİR GÜÇ İFADESİ

**YAZAR ADI:** Murat Erhan BALCI

Bu tezde; sinüzoidal olmayan dengeli ve dengesiz güç sistemleri için literatürde var olan görünür güç tanımları ve güç ifadeleri, gözden geçirilmiş ve en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından niceliksel biçimde analiz edilmiştir. Sonuçlar; sinüzoidal olmayan ve dengesiz şartlarda görünür güç tanımlarının ya sistem veriminin ölçülmesini dikkate aldığı ya da güç sistem elemanlarının boyutlandırılmasında araç olarak kullanılabilmeye uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon gücü hakkında bilgi veren ve güç sistemlerinde bulunan harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanılabilen bir güç ifadesinin gerekliliği görülmüştür.

Tezin ileriki bölümlerinde; bu ihtiyaçları gideren yeni bir güç ifadesi sinüzoidal olmayan-dengeli gerilim ile sinüzoidal olmayan-dengesiz akımların bulunduğu tek faz ve üç faz-üç iletkenli sistemler için önerilmiştir. Bu güç ifadesinin reaktif güç bileşeninin en iyi dengeli kapasitif kompanzasyonun çektiği gücü verdiği simülasyon temelli karşılaştırmalı analizlerle gösterilmiştir. Bunun yanında en iyi dengeli kapasitif kompanzasyonda bulunan özdeş kondansatörlere ait plaka gücünün seçimi için bir hesap metodu reaktif güç kontrol rölelerine uygulanmak üzere geliştirilmiştir. Bu geliştirilen güç faktörü iyileştirme metodunun reaktif güç rölelerinde uygulanan klasik metotlara göre avantajları örnek bir sistemde yapılan simülasyon temelli karşılaştırmalı analizlerle gösterilmiştir.

Yeni güç ifadesinin kaydırılmış iletkenlik güç bileşeninin harmonik üreten yüklerin tespit edilmesinde araç olarak kullanılabilirliği ölçüm temelli istatistiksel analizlerle gösterilmiştir. Bu sonuç tipik dağıtım sisteminde gerilim harmoniklerinin çeşitli açılış değerleri ile hattın çeşitli X/R oranları için diğer metot ve indislerinde dikkate alındığı karşılaştırmalı analizlerle desteklenmiştir.

## SUMMARY

**TITLE OF THE THESIS:** A NEW POWER RESOLUTION FOR OPTIMUM COMPENSATION AND DETECTION OF HARMONIC PRODUCING LOADS

**AUTHOR:** Murat Erhan BALCI

In this thesis, the apparent power definitions and their resolutions for nonsinusoidal balanced and unbalanced systems are reviewed and quantitatively analysed with respect to optimum balanced capacitive compensation. It is found that the apparent power definitions either consider to measure the system efficiency or are used to be a tool for the sizing of the power system equipment. It is also seen that there is a growing need for a power resolution of the apparent power that provides information on the optimum balanced capacitive compensator and aims to become a tool for the detection of harmonic producing loads of the system.

In the further chapters of the thesis, a power resolution, which fulfils these requirements, is proposed for the single-phase and three-phase & three-line systems, which contain nonsinusoidal & balanced voltages and nonsinusoidal & unbalanced currents. It is figured out from the comparative analysis based on simulations that the reactive power component of the new power resolution gives the power of the optimum balanced capacitive compensator. In addition to that, a calculation method of the name plate power of the identical capacitors of the optimum balanced capacitive compensator is proposed for the application to reactive power control relays. The advantages of the developed power factor improvement method against the classical methods, already implemented in the relays, are shown by means of a comparative analysis in a representative test system.

By using statistical analysis based on an actual measurements, it is pointed out that the scattered conductance power component of the new power resolution can be used as a tool for the detection of the harmonic producing loads. In a typical distribution system, this result is also consolidated by means of comparative analysis against other methods

and indices for the various phase angles of the voltage harmonics and X/R ratios of the line.

## TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimimin başlangıcından Doktora eğitimimin sonuna kadar bilgi ve tecrübelerini bana aktaran, engin hoşgörüsüyle beni yönlendiren, iyi bir bilim adamı ve öğretim üyesi olma yolunda örnek aldığım çok değerli sayın hocam Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na,

Benden madden ve manen hiçbir şeyi esirgemeyen, gösterdikleri destekle zorlarımı kolay eden sevgili aileme; babam Mehmet Can BALCI, annem Selma BALCI, ablam Zeynep Neslihan BALCI ve kardeşim Emine Nesrin BALCI'ya,

Teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	1
ŞEKİLLER DİZİNİ	6
TABLolar DİZİNİ	10
1 GİRİŞ	12
1.1 Arka Plan	13
1.2 Tezin Amacı	15
1.3 Tezin Sınırları	16
1.4 Tezin İçeriği	17
2 SİNÜZOİDAL OLMAYAN VE DENGESİZ SİSTEMLER İÇİN GÖRÜNÜR GÜÇ TANIMLARI VE GÜÇ İFADELERİ	19
2.1 Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Tek Fazlı Sistemler için Görünür Güç Tanımları ve Güç İfadeleri	19
2.1.1 Budeanu'nun Güç İfadesi	23
2.1.2 Fryze'nin Güç İfadesi	23
2.1.3 Kimbark'ın Güç İfadesi	24
2.1.4 Shepherd ve Zakikhani'nin Güç İfadesi	25
2.1.5 Sharon'nun Güç İfadesi	26
2.1.6 Depenbrock'un Güç İfadesi	26
2.1.7 Kusters ve Moore'un Güç İfadesi	28
2.1.8 Czarnecki'nin Güç İfadesi	30
2.1.9 IEEE std. 1459-2000 (Emanuel'in) Güç İfadesi	32
2.2 Sinüzoidal Olmayan ve Dengesiz Şartlarda Üç Fazlı Sistemler için Görünür Güç Tanımları ve Güç İfadeleri	34
2.2.1 Vektör Görünür Güç Tanımı ve Güç İfadesi	38
2.2.2 Aritmetik Görünür Güç Tanımı	38
2.2.3 Buchollz'un Görünür Güç Tanımı	39



2.2.4	IEEE std. 1459-2000 Görünür Güç Tanımı ve Güç İfadesi	45
2.3	Sonuçlar ve Tartışma	48
3	GÜÇ İFADELERİNİN DENGELİ KAPASİTİF KOMPANZASYON BAKIMINDAN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	50
3.1	Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Tek Fazlı Sistemler için Oluşturulmuş Güç İfadelerinin Karşılaştırması	50
3.2	Sinüzoidal Olmayan ve Dengesiz Üç Fazlı Sistemler için Oluşturulmuş Güç İfadelerinin Karşılaştırması	54
3.3	Sonuçlar ve Tartışma	59
4	SİNÜZOİDAL OLMAYAN VE DENGESİZ GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN YENİ GÜÇ İFADESİ	60
4.1	Sinüzoidal Olmayan Tek Fazlı Sistemler	60
4.2	Sinüzoidal Olmayan ve Dengesiz Üç Faz-Üç İletkenli Sistemler	66
4.3	Harmonik Üreten Yüklerin Tespitinde Kullanımı	77
4.4	Sonuçlar ve Tartışma	79
5	YENİ GÜÇ İFADESİNİN KOMPANZASYON BAKIMINDAN ANALİZİ VE REAKTİF GÜÇ KONTROL RÖLELERİNE UYGULAMASI	80
5.1	Sinüzoidal Olmayan Tek Fazlı Sistemde Analiz	80
5.2	Sinüzoidal Olmayan-Dengesiz Üç Faz-Üç İletkenli Sistemde Analiz	83
5.3	Reaktif Güç Kontrol Rölelerine Uygulama	87
5.3.1	Reaktif Güç Kontrol Rölelerine Ait Klasik Çalışma Prensipleri	87
5.3.2	Yeni Güç İfadesi Temelli Kondansatör Plaka Gücü Seçim Metodu	89
5.3.3	Analiz	92
5.4	Sonuçlar ve Tartışma	93
6	YENİ GÜÇ İFADESİ TEMELLİ HARMONİK ÜRETEN YÜK TESPİT METODUNUN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ	94
6.1	Test Sistemi	94
6.2	Analiz	95
6.3	Sonuçlar ve Tartışma	107
7	HARMONİK ÜRETEN YÜK TESPİT METOD VE İNDİSLERİNİN TİPİK DAĞITIM SİSTEMİNDE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	108

7.1	Aktif Güç Yönünü Dikkate Alan Metot ve İndisler	109
7.2	Süperpozisyon ve İzdüşüm Metodu	110
7.3	Uygun Akım Metodu	111
7.4	Lineer Akım Metodu	112
7.5	Aktif Olmayan Güç Metodu	113
7.6	Analiz	114
7.7	Sonuçlar ve Tartışma	126
8	SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR	128
9	KAYNAKÇA	130
	ÖZGEÇMİŞ	139

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$AOG_1, AOG_2$	Aktif olmayan güç metoduna ait göstergeler.
$B_{ne}, B_n, B_{mn}$	Çeşitli güç ifadelerinde kullanılan suseptans tanımları.
$B_{en}, B_{Bn}, B_{mn}''$	Yeni güç ifadesinde kullanılan suseptans tanımları.
$D_b, D_k, N, U, D_s, D_h, D_{Ve}, D_V, D_{eV}, D_I, D_{eI}$	Çeşitli güç ifadelerinde yer alan bozulma güç bileşenleri.
$D_{sc}, D_{ss}$	Yeni güç ifadesinde yer alan sırasıyla, kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans güç bileşenleri.
$D_u$	Czarnecki'nin üç faz güç ifadesinde tanımlı dengesizlik gücü.
$G_e, G_n, G_{nf}, G_{ne}, G_m, G_{mn}$	Çeşitli güç ifadelerinde kullanılan iletkenlik tanımları.
$G_{mn}'', G_{Bn}$	Yeni güç ifadesinde kullanılan suseptans tanımları.
$HG$	Harmonik global indisi.
$I_n, I, I_{mn}, I_m$	n. harmonik akımı, toplam akım, m iletkeninden akan n. harmonik akımı ve m iletkeninden akan toplam akım etkin değerleri.
$I_{ac}, I_{Re}$	Çeşitli güç ifadelerinde tanımlı aktif akım bileşenlerinin etkin değerleri.
$I_{fre}, I_{Im}, I_q, I_{qc}, I_{ql}, I_{qcr}, I_{qlr}, I_R$	Çeşitli güç ifadelerinde kullanılan reaktif akım bileşenlerine ait etkin değerler.
$I_d, I_{ge}, I_{ne}, I_{de}, I_s, I_h$	Çeşitli güç ifadelerinde kullanılan bozulma akım bileşenlerine ait etkin değerler.
$I_1^+, I_H$	Temel harmonik pozitif sıra ve temel olmayan akım etkin değerleri.
$I_{e1}, I_{eH}, I_e$	IEEE std. 1459-2000 güç tanımında kullanılan temel harmonik eşdeğer, temel olmayan eşdeğer ve eşdeğer akım etkin değerleri.
$I_\Sigma$	Buchholz'un görünür güç tanımında kullanılan kolektif akım etkin değeri.
$I_u, I_y$	Çeşitli üç faz güç ifadelerinde kullanılan dengesizlikten dolayı çekilen akım bileşenlerinin etkin değerleri.

$I_r, I_{sc}, I_{ss}, I_{up}, I_{uq}$  Yeni güç ifadesinin dayandığı akım ifadesinin reaktif, kaydırılmış iletkenlik, kaydırılmış suseptans, aynı faz dengesizlik ve dik faz dengesizlik akım bileşenlerinin etkin değerleri.

$\bar{I}_{Ny,n}, \bar{I}_{Nk,n}$  Yük ve kaynak tarafının n. harmonik Norton akım kaynakları.

$I_{Py,n}, I_{Pk,n}$  Sırasıyla yük tarafından basılan harmonik akımının ve kaynak tarafından basılan harmonik akımının ilgili harmonik hat akımı üzerine iz düşümleri.

$i_{ac}(t), i(t)$  Ortalama güç çeken ani aktif akım bileşeni ve toplam ani akım.

$i_{fre}(t), i_q(t), i_{qc}(t), i_{qi}(t), i_{qcr}(t), i_{qtr}(t), i_{\Sigma y}(t), i_{\Sigma x}(t)$  Çeşitli güç ifadelerinde tanımlı reaktif akım bileşenlerinin ani ve kolektif ani değerleri.

$i_g(t), i_{ge}(t), i_{nf}(t), i_{ne}(t), i_{de}(t)$  Çeşitli güç ifadelerinde tanımlı bozulma akım bileşenlerinin ani değerleri.

$i_{\Sigma ac}(t), i_{\Sigma p}(t), i_{\Sigma}(t)$  Kolektif ani akımın ortalama güç çekilmesine sebep olan aktif bileşeni, kolektif ani akımın aynı anlık gücü iletebilecek minimum etkin değere sahip bileşeni ve kolektif ani akım.

$i_u(t)$  Çeşitli üç faz güç ifadelerinde kullanılan dengesizlikten dolayı çekilen akım bileşenlerinin kolektif ani değeri.

$i_k(t)$  Kompanzasyon kapasitesinin çektiği akımın ani değeri.

$i_r(t), i_{sc}(t), i_{ss}(t)$  Yeni güç ifadesinin dayandığı akım ifadesinde yer alan reaktif, kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans akım bileşenlerinin ani değerleri.

$i_{\Sigma r}(t), i_{\Sigma sc}(t), i_{\Sigma ss}(t), i_{\Sigma up}(t), i_{\Sigma uq}(t)$  Yeni güç ifadesinin dayandığı akım ifadesinde yer alan reaktif, kaydırılmış iletkenlik, kaydırılmış suseptans, aynı faz dengesizlik ve dik faz dengesizlik akım bileşenlerinin kolektif ani değerleri.

$i_{co}(t), i_{nco}(t)$  Uygun akım metodunda tanımlanmış olan uygun ve uygun olmayan akım parçalarının ani değerleri.

$i_\ell(t), i_{n\ell}(t)$  Lineer akım metodunda tanımlanmış olan lineer (doğrusal) ve lineer olmayan akım parçalarının ani değerleri.

$KYK$  Kaynak-yük kalite indisi.

$LA$	Lineer (doğrusal) akım metoduna ait gösterge.
$m$	Çok fazlı sistemlerde a, b, c, ..., N gibi iletken ismi.
$n$	Harmonik numarası.
$n_1$	Gerilim ve akımda bulunan harmonik numaraları.
$n_2$	Gerilimde bulunup akımda bulunmayan harmonik numaraları.
$n_3$	Akımda bulunup gerilimde bulunmayan harmonik numaraları.
$p(t), p_a(t), p_r(t)$	Ani, ani aktif ve ani reaktif güçler.
$P_1^+, P_n, P_{nf}, P_m, P$	Temel harmonik pozitif sıra, n. harmonik, temel olmayan, m iletkeninden çekilen ve toplam aktif güçler.
$P_{Bn}$	Yeni güç ifadesinde tanımlı her bir hattan çekilen n. harmonik dengeli aktif gücü.
$Q$	Reaktif güç.
$Q_n, Q_1^+, Q_{mn}$	n. harmonik reaktif, temel harmonik pozitif sıra ve m iletkeninden çekilen n. harmonik reaktif güçleri.
$Q_b, Q_f, Q_k, Q_q, Q_{kus}, Q_{kusr}, Q_R, Q_{Ve}, Q_{tot\Sigma\perp}, Q_y$	Çeşitli güç ifadelerinde tanımlı reaktif güçler.
$Q_{tot\Sigma\parallel}, Q_x$	Çeşitli güç ifadelerinde tanımlı dengesizlikten dolayı çekilen güçler.
$Q_r$	Yeni güç ifadesinin reaktif güç bileşeni.
$Q_{Bn}$	Yeni güç ifadesinde tanımlı her bir hattan çekilen n. harmonik dengeli reaktif gücü.
$S$	Görünür güç.
$S_{Re}$	Shepherd ve Zakikhani'nin tanımladığı aktif görünür güç.
$S_{Im}, S_q$	Çeşitli tek faz güç ifadelerinde tanımlı reaktif görünür güçler.
$S_d, S_{qr}$	Çeşitli tek faz güç ifadelerinde tanımlı bozulma güçleri.
$S_I, S_N, S_H$	Tek fazlı sistemler için IEEE std. 1459-2000 güç ifadesinde tanımlanmış temel harmonik, temel olmayan ve harmonik görünür güçleri.

$S_1^+, S_{U1}, S_{e1}, S_{eN}, S_{eH}$  Üç fazlı sistemler için IEEE std. 1459-2000 güç ifadesinde tanımlanmış temel harmonik pozitif sıra, temel harmonik dengesizlik, temel harmonik efektif, temel olmayan efektif ve harmonik görünür güçler.

$S_m$	m iletkeninin görünür gücü.
$S_{Ve}, S_{Ar}, S_e, S_\Sigma$	Vektör, Aritmetik, IEEE std. 1459-2000, Buchollz'un tanımladığı görünür güçler.
$t$	Zaman.
$T$	Periyot.
$THD_V, THD_I$	Gerilim ve akıma ait toplam harmonik bozulmalar.
$UA$	Uygun akım metoduna ait gösterge.
$U_{mn}$	Yeni güç ifadesinde tanımlı gerilimle aynı fazda n. harmonik hat akımları sebebiyle m iletkeninden çekilen güç.
$V_0$	Gerilimin d.a. bileşeninin etkin değeri.
$V_1^+, V_n, V, V_{mn}, V_m$	Temel harmonik pozitif sıra gerilimi, n. harmonik gerilimi, toplam gerilim, m iletkeni ile nötr arası n. harmonik gerilimi, m iletkeni ile nötr arası toplam gerilim etkin değerleri.
$V_H$	Temel olmayan gerilim etkin değeri.
$V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$	Faz-faz arası gerilimlerin etkin değerleri.
$Ve_1, Ve_H, Ve$	IEEE std. 1459-2000 görünür gücünün hesabında kullanılan temel harmonik eşdeğer gerilim, temel olmayan harmonik eşdeğer gerilim ve eşdeğer gerilim etkin değerleri.
$V_\Sigma$	Buchollz'un görünür güç tanımının hesabında kullanılan kolektif gerilim etkin değeri.
$V_{m0}$	m iletkeni ile hayali yıldız noktası arası gerilimin etkin değeri.
$v_l(t), v_{nf}(t), v(t)$	Temel harmonik ani, temel olmayan harmonik ani ve ani gerilimler.
$v_\Sigma(t)$	Buchollz'un görünür güç tanımının hesabında kullanılan kolektif gerilim ani değeri.
$v_{m0}(t)$	m iletkeni ile hayali yıldız noktası arası gerilimin ani değeri.
$Y_n$	n. harmonik admittansı.

$\bar{Z}_{Ny,n}, \bar{Z}_{Nk,n}$	Sırasıyla yükün ve kaynağın n. harmonik Norton empedanslarının fazör değerleri.
$\omega, \omega_n$	Açısal frekans ve n. harmonik açısal frekansı.
$\varphi, \varphi_n$	Gerilim ve akım arasındaki, gerilimin ve akımın n. harmonik bileşenleri arasındaki faz farkları.
$\varphi_1^+, \varphi_m, \varphi_{mn}$	n. harmonik pozitif sıra gerilim ve akımı arasındaki, m iletkeni gerilim ve akımı arasındaki, m iletkeni n. harmonik gerilim ve akımı arasındaki faz farkları.
$\delta_n, \delta_{mn}$	Akımın n. harmonik bileşeninin ve m iletkeninden akan n. harmonik bileşeninin faz açıları.
$\theta_n, \theta_{mn}$	n. harmonik geriliminin ve m iletkeniyle ile nötür noktası arası ölçülen gerilimin n. harmonik bileşenine ait faz açıları.
$\Delta P$	Hat kayıpları.

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2-1: Ani, ani aktif ve ani reaktif güçlerin zamana göre değişimleri.	20
3-1: Sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler için tanımlanmış güç ifadelerinin en iyi kapasitif kompanzasyon bakımından analiz edildiği sistem.	50
3-2: Şekil 3-1’de verilen sistemde güç faktörünün azami olduğu durum için; terminal (yük barası) gerilimi ile hat ve yük akımlarına ait dalga şekilleri.	51
3-3: Şekil 3-1’de verilen sistemde; Budeanu, Fryze, Shepherd-Zakikhani, Sharon, Depenbrock, Kusters-Moore ve Czarnecki’nin tanımladığı reaktif güçlerin kompanzasyon kondansatörü gücüyle değişimi.	52
3-4: Şekil 3-1’de verilen sistemde; Budeanu’nun bozulma, Kusters-Moore’un artık reaktif, Sharon’un tamamlayıcı, Depenbrock’un aynı faz ile artık ve Czarnecki’nin kaydırılmış güçlerinin kompanzasyon kondansatörü gücüyle değişimi.	53
3-5: DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich’e ait güç ifadelerinin en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından analiz edildiği sistem.	55
3-6: Şekil 3-5’de verilen sistemin kompanzasyonsuz durumu için ortak bağlantı noktasında ölçülen faz-nötr gerilimlerinin dalga şekilleri.	56
3-7: Şekil 3-5’de verilen sistemde kompanzasyonsuz durum için kaynaktan çekilen faz akımlarının dalga şekilleri.	56
3-8: Şekil 3-5’de verilen sistemde; dengeli kondansatör grubu gücünün artışıyla ortak bağlantı noktasında ölçülen güç faktörü, aktif ve görünür güçlerin değişimi.	57
3-9: Şekil 3-5’de verilen sistemde; kompanzasyonsuz (NC) ve en iyi dengeli kapasitif kompanzasyonlu (OBC) durumlar için DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich'e ait güç ifadelerinde yer alan aktif olmayan güçlerin değerleri.	58
4-1: Yeni güç ifadesinde tanımlanan reaktif akım bileşeninin izahı için kullanılan sistem.	61
5-1: Yeni güç ifadesinin en iyi kapasitif kompanzasyon bakımından analiz edildiği tek fazlı sistem.	80



- 5-2: Şekil 5-1’de verilen sistemde kompanzasyonsuz durum için ortak bağlantı noktası gerilimi ve kaynaktan çekilen faz akımına ait dalga şekilleri. 81
- 5-3: Şekil 5-1’de verilen sistemde; NC, PC, AC ve HC durumları için ortak bağlantı noktasında ölçülen güç bileşenleri, görünür güç, güç faktörü ile aktif ve pasif kompenzatlara ait görünür güçler. 82
- 5-4: Yeni güç ifadesinin en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından analiz edildiği üç faz-üç iletkenli sistem. 83
- 5-5: Şekil 5-4’de verilen sistemde kompanzasyonsuz durum için ortak bağlantı noktasında ölçülen faz-nötür arası gerilimlere ait dalga şekilleri. 84
- 5-6: Şekil 5-4’de verilen sistemde kompanzasyonsuz durum için kaynaktan çekilen faz akımlarının dalga şekilleri. 85
- 5-7: Şekil 5-4’de verilen sistemde NC, OBC, AC ve HC durumları için ortak bağlantı noktasında ölçülen güç bileşenleri, görünür güç, güç faktörü ile aktif ve pasif kompenzatlara ait görünür güçler. 86
- 6-1: Yeni güç ifadesinin harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanılabilirliğinin test edildiği sistem. 94
- 6-2: Şekil 6-1’de verilen test sistemine ait iş akışı şeması. 95
- 6-3: R-L empedansın sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı. 96
- 6-4: R-L empedansın sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenleri. 96
- 6-5: R-L empedansın  $THD_V(\%)$ ’si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenlerine ait histogramlar. 97
- 6-6: Asenkron motorun (a) sabit devir ve (b) sabit moment çalışma durumlarının sinüzoidal besleme testinde kaynak çıkış gerilimi ve yük akımı. 98
- 6-7: Asenkron motorun (a) sabit devir ve (b) sabit moment çalışma durumları için sinüzoidal gerilim altında çekilen  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenleri. 99
- 6-8: Asenkron motorun (a) sabit devir ve (b) sabit moment çalışma durumları için  $THD_V(\%)$ ’si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çekilen  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerine ait histogramlar. 100

- 6-9: Kırpıcı devresiyle kontrol edilen R-L empedansın sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı. 101
- 6-10: Kırpıcı devresiyle kontrol edilen R-L empedansın sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenleri. 101
- 6-11: Kırpıcı devresiyle kontrol edilen R-L empedansın  $THD_V(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenlerine ait histogramlar. 102
- 6-12: Bilgisayar grubunun sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı. 103
- 6-13: Bilgisayar grubunun sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenleri. 103
- 6-14: Bilgisayar grubunun  $THD_V(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenlerine ait histogramlar. 104
- 6-15: Kompakt flüoresan lamba grubunun sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı. 105
- 6-16: Kompakt floresan lamba grubunun sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenleri. 105
- 6-17: Kompakt flüoresan lamba grubunun  $THD_V(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenlerine ait histogramlar. 106
- 7-1:  $S\dot{I}$  metodunun izah edildiği sistem. 110
- 7-2: Harmonik üreten yük tespit metotları ve indislerinin karşılaştırmalı analizi için kullanılan sistem. 115
- 7-3: Şekil 7-2'de verilen sistemde (a) ortak bağlantı noktası gerilimi ile 1, 2 ve 5 numaralı yüklerin çektiği akımlara ait harmoniklerin etkin değerleri (b) 4 numaralı yükün (harmonik üreten yükün) Norton eşdeğer devre modeline ait harmonik empedans genlikleri ve akım etkin değerleri ile bu yükün çektiği akıma ( $i_4$ ) ait harmonik etkin değerleri. 116
- 7-4: Şekil 7-2'de verilen sistemde  $X_S/R_S$  oranının 0.1-100 aralığı için ortak bağlantı noktası gerilimi ile 1, 2, 4 ve 5 numaralı yüklerle ait akımların  $THD(\%)$  değerlerinin değişimi. 117

7-5: Şekil 7-2’de verilen sistemde kaynak gerilimi harmoniklerine ait açılarının ( $\alpha$ )  $-150^\circ$ - $180^\circ$  aralığı için ortak bağlantı noktası gerilimi ile 1, 2, 4 ve 5 numaralı yüklere ait akımlarının  $THD(\%)$  değerlerinin değişimi.

## TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2-1: Sinüzoidal olmayan şartlarda tek fazlı sistemler için tanımlanmış güç ifadelerinin özellikleri.	33
2-2: Sinüzoidal olmayan-dengesiz üç fazlı sistemler için oluşturulmuş görünür güç tanımlarının özellikleri ve güç ifadeleri.	47
4-1: $D_{sc}$ gücünün çeşitli kaynak-yük durumlarında büyüklüğü.	78
5-1: Reaktif güç kontrol rölelerinde kompanzasyon kodansatörü plaka gücünün hesabında kullanılan klasik metodlar.	89
5-2: Şekil 5-4'de verilen sistemde her bir fazdan çekilen temel harmonik ve Fryze reaktif güçleri.	92
5-3: Şekil 5-4'de verilen sistemde yeni güç ifadesi temelli metot ve klasik metotlara göre yapılan kompanzasyonlara ilişkin sonuçlar.	93
6-1: Yeni güç ifadesi temelli harmonik üreten yük tespit metodunun istatistiksel analizinden elde edilen sonuçlar.	107
7-1: Tek noktadan eş zamanlı olmayan ölçümler temelli harmonik üreten yük tespit metodları ve indisleri.	108
7-2: $P_3(P_1\%)$ 'ün $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.	119
7-3: $P_3(P_1\%)$ 'ün $\alpha$ 'nın $-150^\circ - 180^\circ$ aralığı için değerleri.	119
7-4: $KYK$ indisinin $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.	120
7-5: $KYK$ indisinin $\alpha$ 'nın $-150^\circ - 180^\circ$ aralığı için değerleri.	120
7-6: $HG$ indisinin $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.	120
7-7: $HG$ indisinin $\alpha$ 'nın $-150^\circ - 180^\circ$ aralığı için değerleri.	121
7-8: $S\dot{I}$ metoduna ait göstergelerin $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.	121
7-9: $S\dot{I}$ metoduna ait göstergelerin $\alpha$ 'nın $-150^\circ$ ile $180^\circ$ aralığı için değerleri.	122
7-10: $UA(\%)$ metot göstergesinin $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.	122
7-11: $UA(\%)$ metot göstergesinin $\alpha$ 'nın $-150^\circ - 180^\circ$ aralığı için değerleri.	123
7-12: $LA(\%)$ metot göstergesinin $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.	123
7-13: $LA(\%)$ metot göstergesinin $\alpha$ 'nın $-150^\circ - 180^\circ$ aralığı için değerleri.	124

- 7-14: *AOG* metoduna ait göstergelerin  $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için normalize edilmiş değerleri. 124
- 7-15: *AOG* metoduna ait göstergelerin  $\alpha$ 'nın  $-150^\circ$  -  $180^\circ$  aralığı için normalize edilmiş değerleri. 125
- 7-16:  $D_{sc}$  gücünün  $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için normalize edilmiş değerleri. 125
- 7-17:  $D_{sc}$  gücünün  $\alpha$ 'nın  $-150^\circ$  ile  $180^\circ$  aralığı için normalize edilmiş değerleri. 126

# 1 GİRİŞ

Güç kalitesi, genel olarak gerilim ve akıma ait genlik, frekans ve dalga formunun standartlarda belirtilen toleranslar dâhilinde olması; böylece elektrik güç sistemlerinin mümkün olan en iyi performans ve ömürde işletilmesi manasına gelen bir kavramdır [1], [2].

Güç kalitesini etkileyen olaylardan önde gelenleri; geçici olaylar (transient), gerilim şişmesi, gerilim çökmesi, düşük gerilim, aşırı gerilim, kırpışma, frekans değişimleri, dengesizlik ve harmonik bozulma olarak sıralanabilir [1], [2]. Bunlardan özellikle dengesizlik ve harmonik bozulma; güç sistem elemanlarında ek ısı kayıplara, dönen makinelerde tork dalgalanmalarına, koruma cihazları ile güç elektroniği temelli cihazların hatalı çalışmasına, aşırı gerilim ve aşırı akımlara yol açmaktadır [3]-[6]. Bunlarla birlikte yüksek frekansa sahip harmonikler yayılım yoluyla iletişim hatlarındaki bilgi akışına da olumsuz etki etmektedir.

Diğer taraftan sinüzoidal ve dengeli güç sistemlerinde,

- Sistem elemanlarının boyutlandırılması,
- Sistem veriminin ölçülmesi ve iyileştirilmesi,
- Sistem elemanlarının ömür hesabı,

gibi güç sistemlerinin dizaynı ve işletimi için büyük önem arz eden konularda araç olarak kullanılan klasik görünür güç tanımı ( $S=VI$ ) ve güç ifadesi ( $S=P+jQ$ ), harmonik bozulma ve/veya dengesizliğe sahip gerilimlerin ve/veya akımların bulunduğu sistemlerde bu amaçların hepsinde birden araç olarak kullanılma özelliğine sahip değildir [7]-[9]. Bütün bunlar neticesinde harmoniklerin ve dengesizliğin bulunduğu sistemler için literatürde çeşitli konularda çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar;

- Güç sistem elemanlarının modellenmesi ve analizi [10]-[14],
- Güç sistem elemanlarının yeniden boyutlandırılması [15]-[17],
- Harmonik bozulma, dengesizlik ve reaktif güç kompanzasyonu [18]-[20],
- Dengesizliğe ve harmonik bozulmaya sebep olan yüklerin tespiti, sistem-müşteri arasında harmonik bozulma sorumluluğunun paylaşılması ve maliyet dağıtımı [21], [22],

- Görünür güç ile güç ifadelerinin analizi ve yeniden tanımlanması [23]-[29],

biçiminde ana başlıklar altında toplanabilir olup bu başlıkların her birinde gelişim süreci devam etmektedir.

Bu çalışmalara paralel olarak; harmonik bozulmanın sebep olduğu finansal kayıpların azaltılması amacıyla standartlar hazırlanmıştır. Bu standartlardan biri olan Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE)'nün düzenlediği IEEE std. 519-1992 [30]'de harmoniklerin kontrol edilmesine ilişkin uygulamalar, harmonik bozulma miktarını gösteren çeşitli indislerin hesabı ve ortak bağlantı noktasında (PCC) ölçülen gerilim ve akıma ait Toplam Harmonik Bozulma (*THD*) sınırlamaları tavsiye niteliğinde belirlenmiştir. Ayrıca Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC)'nin düzenlediği IEC 61000-3-2 [31], 61000-3-4 [32] ve 61000-3-6 [33] standartlarında yük akımına her bir harmonik numarası için ayrı sınırlamalar getirilmiştir. Bunun yanı sıra IEC Std. 61000-4-7 [34] ve 61000-4-30 [35] standartlarında harmonik bozulma miktarının ölçülmesine ilişkin metotlar tanımlanmıştır. Avrupada arz edilen elektrik kalitesini düzenlemek amacı taşıyan EN 50160 [36] standardında ise ortak bağlantı noktası gerilimine ait bozulma ve dalga şekli sınırlama altına alınmıştır. Türkiye'de ise elektrik şebekesindeki güç kalitesi ve verimliliğin Avrupa normlarına yükseltilmesi amacıyla Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) tarafından elektrik piyasası şebeke yönetmeliği [37] hazırlanmıştır.

Yukarıda belirtilen hususlar göstermektedir ki dengesizliğin ve harmoniklerin bulunduğu sistemlerde yapılan çalışmalar halen önemini koruyarak gelişim sürecini devam ettirmektedir.

## 1.1 Arka Plan

Alternatif akımın iletim ve dağıtım sistemlerinde kullanımıyla birlikte, kaynaktan çekilen akımın bir kısmının net enerjiyi taşıyan “aktif akım” diğer kısmının ise enerji taşımayan “reaktif akım” olduğu ve akımın reaktif bileşeninin hat kayıplarını arttırdığı görülmüştür [38]. Bu durum sistem veriminin ölçülmesi ve iyileştirilmesi ihtiyaçlarını doğurmuştur. Bu ihtiyacı karşılamak amacıyla gerilim ve akımın etkin değerlerinin çarpımı biçiminde klasik görünür güç ( $S=VI$ ) tanımlanmış, ayrıca tanımlanan görünür güç birbirine dik olan aktif ve reaktif güçlerine ayrılarak; görünür güç ifadesi ( $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ )

elde edilmiştir. Bu sayede aktif ve görünür güçlerin oranı olan güç faktörü ( $gf=P/S$ ) indisıyla sistem verimi ölçülmüş ve reaktif gücün kondansatör ya da bobin yardımıyla kompanzasyonu yöntemiyle sistem verimi iyileştirilmiştir.

Bunlara ek olarak sistem kayıplarının gerilim ve akımın etkin değerlerinin bir fonksiyonu olması görünür gücün sistem elemanlarının boyutlandırılması için bir araç olarak kullanılmasına yol açmıştır. Bu klasik tanımda, üç fazlı sistemler için görünür güç ve güç bileşenleri her bir fazın ayrı bir tek fazlı sistem olarak kabulüyle hesap edilmiştir. Bu yaklaşıma göre literatürde üç fazlı sistemler için tanımlanmış aritmetik ve vektör görünür güçler yaygın olarak kullanılmaktadır [39]-[41].

Diğer taraftan, sinüzoidal olmayan akımların ve gerilimlerin güç sistemlerinde bulunduğu durumlar için klasik görünür güce ait güç ifadesi ilk defa Budeanu tarafından önerilmiştir [42]. Ayrıca üç fazlı sistemlerde, dengesizliğin var olduğu durumlar için görünür gücün hesabında her bir fazın ayrı bir sistem olarak dikkate alınmasının doğru bir kabul olmadığı 1922 yılında Buchholz tarafından gösterilmiştir [43]. Böylece, sinüzoidal olmayan - dengesiz gerilim ile akım şartlarına sahip tek ve üç fazlı sistemler için çeşitli görünür güç tanımları ve güç ifadeleri oluşturulmuştur [42]-[61].

Bu görünür güç tanımları ve güç ifadeleri sistem elemanlarının boyutlandırılması, sistem veriminin ölçülmesi ile iyileştirilmesi ve harmonik bozulmanın ölçülmesi bakımından çeşitli niteliksel ve niceliksel analiz çalışmalarına konu olmuştur [7]-[9], [27]-[29], [62]-[70]. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar, görünür güç tanımları ve güç ifadelerinden herhangi biri üzerinde fikir birliğine varılmasına yeterli gelmemiştir. Ancak pratik sebeplerle standartlarda farklı görünür güç tanımları ve güç ifadeleri desteklenmiştir [57], [60]. Bu durum, pasif kompanzasyon sistemlerinin dizaynında, enerjinin ölçülmesinde ve fiyatlandırılmasında bir belirsizliğe yol açmaktadır. Ayrıca yine güç ifadelerinin kullanımındaki belirsizlik; klasik reaktif güç ölçüm yöntemi olan gerilimin çeyrek periyot ötelenmiş haliyle akımın çarpımına ait ortalamanın reaktif enerji ölçen sayaçlarda hala dikkate alınmasına yol açmıştır. Bu ise literatürde önerilen reaktif güç tanımlarından hiçbirisiyle aynı olmayan bir güce göre reaktif enerjinin ölçülmesine sebep olmaktadır [27].

Bunlara ek olarak, harmonik bozulmanın bulunduğu güç sistemlerinde ölçüm metodlarıyla alakalı standartlarda [34], [35] harmonik üreten yüklerin tespiti veya



harmonik bozulma sorumluluğunun paylaşılmasıyla alakalı herhangi bir metot ve indis bulunmamaktadır. Bu boşluğu doldurmak amacıyla dengesizlik ve harmonik bozulmaya sebep olan yüklerin tespiti, sistem-müşteri arasında harmonik bozulma sorumluluğunun paylaşılması ve maliyet dağıtımına yönelik metotlar ile indisler literatürde önerilmiştir [71]-[80]. Fakat bu metotlar ve indisler genellikle karmaşık hesaplar ve sistem bilgisi gerektirmektedir. Literatürde ki kaynak-yük kalite indisi [73] ve aktif olmayan güç metodu [81] ise harmonik üreten yüklerin tespiti için araç olarak güç ifadelerinde yer alan güç bileşenlerini kullanmıştır. Bu çalışmalar enerji faturalandırılması için yerleştirilen sayaçların kullanımıyla uygulanabilirlikleri dolayısıyla harmonik üreten yüklerin maliyet verimli biçimde tespit edilmesi bakımından literatüre önemli bir katkıda bulunmuştur. Fakat bu çalışmalarda dikkate alınan güç bileşenleri birden fazla güç ifadesinde yer alan güç bileşenleridir. Halbuki enerji faturalandırma stratejileri genellikle tek bir güç ifadesi üzerine kurulur. Bunun yanında genellikle indisler ve metot çıktılarının her bir periyot için hesap edilen değerlerinin integralinin bir manaya sahip olmadığı literatürde bilinmektedir [73]. Bu durumdan ötürü literatürde önerilmiş indisler ve metotların bir faturalandırma döneminde çok sayıda hesap edilen çıktısı olacak; dolayısıyla çıktıların depolanma ve değerlendirilme problemleri ortaya çıkacaktır. Böylece, harmonik üreten yüklerin tespit edilmesi ve harmonik bozulma sorumluluğunun paylaşılmasıyla alakalı indis ve metotların analiz çalışmaları dolayısıyla gelişim süreci devam etmektedir [82]-[87].

Buraya kadar verilen tez arka planından; frekans domeyni güç teorisinin analiz edilmesinin önemli bir iş olduğu ve analiz sonuçlarında görülen eksiklikleri gideren ayrıca teknolojik gelişimin getirdiği yeni ihtiyaçlara geleneksel yaklaşımla cevap verilmesine imkân sağlayan bir güç ifadesi ortaya koymanın literatüre dikkate değer bir katkı sağlayacağı anlaşılmaktadır.

## 1.2 Tezin Amacı

Sinüzoidal olmayan (harmoniklerin bulunduğu) ve dengesiz şartlar için tek ve üç fazlı sistemlerde;

- Literatürde önerilmiş olan güç ifadelerinin en iyi dengeli kapasitif kompanzator gücünün belirlenmesi ile harmonik üreten yüklerin tespit edilmesi için araç teşkil edemeyeceğini niteliksel ve niceliksel analizlerle izah etmek,
- Gösterilen bu boşluğu dolduran bir başka ifadeyle en iyi dengeli kapasitif kompanzator gücünü veren ve harmonik üreten yüklerin tespit edilmesi için araç teşkil edebilecek bir güç ifadesi önermek,
- Bu yeni güç ifadesinin en iyi dengeli kapasitif kompanzator gücünün belirlenmesinde kullanılabilirliğini ve maliyet verimli tam kompanzasyon bakımından önemini simülasyon temelli analizlerle göstermek,
- Reaktif güç kontrol rölelerinde kompanzasyon kondansatörü seçimi için yeni güç ifadesi temelli bir metot geliştirmek ve bu geliştirilen metodun klasik metotlara göre güç faktörünün iyileştirilmesi bakımından üstünlüğünü simülasyon temelli karşılaştırmalı analizlerle göstermek,
- Yeni güç ifadesinin harmonik üreten yüklerin tespit edilmesi için araç olarak kullanılabilirliğini ölçüm temelli istatistiksel analizlerle göstermek,
- Yeni güç ifadesine dayalı bu harmonik üreten yük tespit metodunun literatürde bulunan diğer indis ve metotlara göre güvenilirliğini simülasyon temelli analizlerle göstermek.

### 1.3 Tezin Sınırları

Tez içerisinde var olan sınırlar:

- Yeni güç ifadesi sinüzoidal olmayan gerilim ve akımların bulunduğu tek fazlı sistemler ile sinüzoidal olmayan-dengeli gerilimler ve sinüzoidal olmayan-dengesiz akımların bulunduğu üç faz-üç iletkenli sistemler için tanımlanmıştır,

- Yeni güç ifadesinin en iyi dengeli kapasitif kompanzator gücünün belirlenmesinde kullanımı; kompanzasyondan sonra sistem geriliminde meydana gelen değişimin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu sistemlerde test edilmiştir,
- Yeni güç ifadesinin harmonik üreten yüklerin tespit edilmesinde kullanımı gerilimin *THD*'sinin 5%'i geçmediği durumlarda test edilmiştir.

## 1.4 Tezin İçeriği

Tezin ikinci bölümünde; sırasıyla sinüzoidal olmayan şartlarda tek fazlı sistemler ve sinüzoidal olmayan-dengesiz şartlarda üç fazlı sistemler için oluşturulmuş görünür güç tanımları ile güç ifadelerine ilişkin literatür ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Üçüncü bölümde; bu literatür taramasında bulunan güç ifadelerinin sinüzoidal olmayan ve dengesiz sistemlerde en iyi dengeli kapasitif kompanzatorün sistemden çekeceği gücün belirlenmesinde araç teşkil edemeyecekleri niteliksel ve niceliksel olarak izah edilmiştir.

Dördüncü bölümde; ilk iki bölümde verilen sonuçlar doğrultusunda sinüzoidal olmayan gerilimler ve akımların bulunduğu tek fazlı sistemler ile sinüzoidal olmayan-dengeli gerilimler ve sinüzoidal olmayan-dengesiz akımların bulunduğu üç faz-üç iletkenli sistemlerde en iyi dengeli kapasitif kompanzatorün sistemden çekeceği gücü veren güç ifadesi önerilmiştir. Ayrıca bu güç ifadesinin güç sistemlerinde bulunan harmonik üreten yüklerin tespit edilmesinde kullanımı için bir metot önerilmiştir.

Beşinci bölümde; yeni güç ifadesinin en iyi dengeli kapasitif kompanzator gücünün belirlenmesinde kullanımı örnek bir sistemde yapılan simülasyon temelli analizlerle gösterilmiştir. Bununla birlikte, en iyi dengeli kapasitif kompanzator ile aktif kompanzatorün beraber kullanımının maliyet verimli tam kompanzasyon bakımından önemi karşılaştırmalı analizlerle vurgulanmıştır. Ayrıca yeni güç ifadesinin reaktif güç bileşenini çekecek en iyi dengeli kapasitif kompanzatorde bulunan özdeş kondansatörlere ait plaka gücünün seçimi için bir hesap metodu; reaktif güç kontrol rölelerine uygulanmak üzere geliştirilmiştir. Bu geliştirilen metodun reaktif güç kontrol rölelerinde uygulanan klasik metotlara göre güç faktörünün iyileştirilmesi bakımından üstünlüğü, örnek bir sistemde yapılan simülasyon temelli karşılaştırmalı analizlerle gösterilmiştir.

Altıncı bölümde; yeni güç ifadesinin harmonik üreten yüklerin tespit edilmesi için araç teşkil etme özelliği gerçek bir sistemde elde edilen ölçümsel verilere dayalı istatistiksel analizle test edilmiştir.

Yedinci bölümde ise yeni güç ifadesi temelli harmonik üreten yüklerin tespitine ilişkin metot ile literatürde bulunan diğer metotlar ve indisler; tipik bir dağıtım sisteminde gerilim harmoniklerinin çeşitli açı değerleri ile hattın çeşitli X/R oranları için yapılan simülasyonlarla karşılaştırmalı biçimde analiz edilmiştir.

Sonuç bölümünde ise daha önceki bölümlerde elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve tezde gerçekleştirilen çalışmanın devamında yapılabilecekler tartışılmıştır.

## 2 SİNÜZOİDAL OLMAYAN VE DENGESİZ SİSTEMLER İÇİN GÖRÜNÜR GÜÇ TANIMLARI VE GÜÇ İFADELERİ

Genel olarak elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımının belirli frekansta sinüzoidal gerilim ve akım ile yapıldığı kabul edilir. Fakat generatör, motor, transformatör gibi manyetik doyum karakteristiği olan elemanlar ile çeşitli güç elektroniği devrelerinden dolayı güç sistemlerinde akım ve gerilimler sinüzoidal değildirler [1], [2].

Bu sebeplerle sinüzoidal olmayan ve dengesiz şartlarda sistem veriminin ölçülmesi ve iyileştirilmesi için bir araç elde etmek amacıyla birçok görünür güç tanımı ve bu tanımlara ait güç ifadeleri oluşturulmuştur.

### 2.1 Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Tek Fazlı Sistemler için Görünür Güç Tanımları ve Güç İfadeleri

Sinüzoidal şartlarda ani gerilim,

$$v(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (2.1)$$

ve ani akım,

$$i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \delta) \quad (2.2)$$

biçiminde ifade edilerek ani güç hesaplanır:

$$p(t) = v(t)i(t) = 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \delta) \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'de verilen ani güç ifadesi yarım açı formülleri kullanılarak,

$$p(t) = VI \cos \delta (1 - \cos(2\omega t)) - VI \sin \delta \sin(2\omega t) \quad (2.4)$$

biçimine dönüştürülebilir. Bu ifadede;

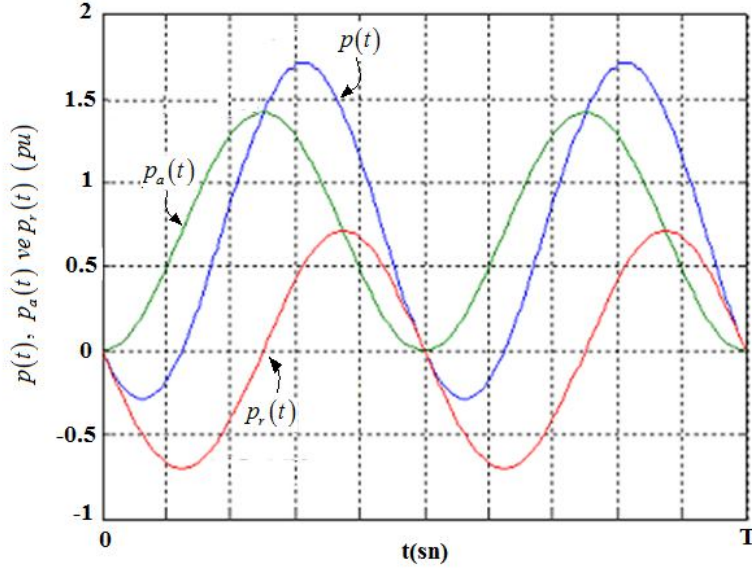
$$p_a(t) = VI \cos \delta (1 - \cos(2\omega t)) \quad (2.5)$$

terimi ani aktif güç,

$$p_r(t) = VI \sin \delta \sin(2\omega t) \quad (2.6)$$

terimi ise ani reaktif güçtür.

Denklem (2.4), (2.5) ve (2.6)'da verilmiş olan ani, ani aktif ve ani reaktif güçlerin zamana göre değişimleri Şekil 2-1'de çizdirilmiştir.



Şekil 2-1: Ani, ani aktif ve ani reaktif güçlerin zamana göre değişimleri.

Şekil 2-1'den görüldüğü gibi ani aktif gücün bir periyot boyunca işareti değişmez. Bu sebeple ani aktif gücün ortalama değeri pozitif olabilir. Diğer taraftan, ani reaktif gücün bir yarı periyottaki akış yönü diğer yarı periyottakinin tersi yönde olduğu için ortalama değeri sıfırdır. Ani aktif gücün ve yahut ani gücün ortalama değeri net enerjiye dönüşen aktif gücü verir:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p_a(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = VI \cos \delta \quad (2.7)$$

Ani reaktif gücün azami değeri ise reaktif güçtür:

$$Q = VI \sin \delta \quad (2.8)$$

Bunun yanında; geleneksel olarak reaktif güç ani gerilimin çeyrek periyot kaydırılmış hali ile ani akımın çarpımının ortalama değeri biçiminde hesap edilmiştir:

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v \left( t - \frac{T}{4} \right) i(t) dt \quad (2.9)$$

Böylece sinüzoidal şartlarda görünür güç aktif ve reaktif güçlerin vektör toplamı biçiminde ifade edilmiştir [23]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.10)$$

Diğer taraftan, doğrusal olmayan yüklerden dolayı kaynaktan çekilen sinüzoidal olmayan akım;

$$i(t) = I_0 + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} I_n \sin(\omega_n t + \delta_n) \quad (2.11)$$

ve bu akımdan dolayı ortak bağlantı noktasında meydana gelen sinüzoidal olmayan gerilim;

$$v(t) = V_0 + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) \quad (2.12)$$

biçiminde ifade edilebilir [3]. Böylece bu gerilim ve akım ifadelerinin çarpımından sinüzoidal olmayan şartlarda ani güç;

$$p(t) = V_0 I_0 + V_0 \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} I_n \sin(\omega_n t + \delta_n) + I_0 \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} I_n \sin(\omega_n t + \delta_n) \quad (2.13)$$

biçiminde yazılabilir. Sinüzoidal olmayan şartlarda ani gücün bileşenlerine ayrılması, gerilim ve akımın farklı harmonikleri arasındaki çapraz çarpımlar sebebiyle sinüzoidal şartlarda olduğu gibi açık bir işlem değildir. Bu sebeple literatürde farklı özelliklere sahip birçok güç ifadesi ortaya konmuştur.

Literatürde sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler için önerilmiş güç ifadelerinin analiz edildiği çok sayıda çalışma vardır. Bu çalışmalarda analizler genellikle kaynak empedansı ihmal edilerek ve sabit akım kaynağı gibi basit modeller kullanılarak yapılmıştır [23]-[25], [62], [63].

Bu çalışmaların önem sırasına göre önde gelenlerinden biri olan [23]'de Emanuel güç ifadelerini ve bu ifadelerin fiziksel manalarını yorumlamıştır. Bu çalışmada Budeanu'nun güç ifadesinin kapasitif kompanzasyon ile güç faktörünün azami hale getirilmesi için bir araç teşkil edemeyeceği belirtilmiştir. Ayrıca gerilim harmoniklerinin yük performansına etki etmediği durumlarda Fryze'nin reaktif gücünün kullanımı tavsiye edilmiştir.

Czamecki [24]'de güç ifadelerinin seçiminin karmaşık bir problem olduğunu işaret etmiş ve bu ifadelerin kullanımına uygulamanın amacına göre karar verilebileceğini ifade etmiştir.

Czamecki diğer bir çalışmasında literatürde yer alan iki önemli güç ifadesi olan Budeanu ve Fryze'nin güç ifadelerinin karşılaştırmasını yapmıştır [25]. Bu çalışmada Budeanu'nun güç ifadesinin reaktif güç kompanzasyonu için kullanımının hatalı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca Fryze'nin güç ifadesinin aktif harmonik filtrelerin kontrolünde kullanılan ani imajiner güç gibi birçok konseptin temeli olmasından dolayı çok önemli olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte Czamecki; Fryze'nin reaktif güç bileşeninin frekans domayninde bir ifadeye sahip olmaması ve aktif gücün yararlı işe dönüşen güç olarak hatalı açıklanması gibi sınırlarının olduğunu ifade etmiştir.

[63]'de Slonim-Van Wyk'ın tanımladığı bozulma [51] ve Czamecki'nin kaydırılmış [52], [53] güçleri niceliksel olarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar; akım dalga şeklinin gerilim dalga şekline göre bozulma miktarını, Czamecki'nin kaydırılmış güç bileşeninin daha hassas ölçtüğünü göstermiştir.

Diğer taraftan, sinüzoidal olmayan şartlarda ortaya konan güç ifadelerinde bulunan bileşenlerin manalarının tam olarak açıklanamayışı ve bu ifadelerden herhangi biri üzerinde ortak görüşün bulunmayışı sebebiyle; klasik görünür güç tanımı bazı araştırmacılar tarafından gözden geçirilmiş ve alternatif görünür güç tanımları ortaya konmuştur [7], [54], [55]. Bu alternatif görünür güç tanımları sistem kayıpları yerine ani güçteki dalgalanmayı dikkate almıştır. Bu sebeple klasik görünür güç tanımı tek fazlı sistemler için IEEE Std 1459-2000 ve DIN std. 41400 tarafından güçlendirilmiş ve hala alternatifler daha yararlı olarak kabul edilmemiştir. Kısaca özetlenen bu çalışmalar



frekans domeyni güç teorisinin tekrar yapılandırılması için ayrıntılı ve çok yönlü analizlerin yapılması gerekliliğini göstermiştir.

### 2.1.1 Budeanu'nun Güç İfadesi

Budeanu sinüzoidal şartlarda kullanılan görünür güç ifadesiyle aynı metodolojiyi kullanarak öncelikle her bir harmonik görünür gücünü  $n$ . harmonik aktif gücü ( $P_n$ ),

$$P_n = V_n I_n \cos(\varphi_n) \quad (2.14)$$

ve  $n$ . harmonik reaktif gücü ( $Q_n$ ),

$$Q_n = V_n I_n \sin(\varphi_n) \quad (2.15)$$

bileşenlerine ayırmıştır [42]. Böylece bunların kendi aralarında toplamı biçiminde aktif ( $P$ ),

$$P = \sum_{n \in N} P_n = V_0 I_0 + \sum_{n \in N^+} V_n I_n \cos \varphi_n \quad (2.16)$$

ve reaktif ( $Q_b$ ) güçleri,

$$Q_b = \sum_{n \in N^+} Q_n = \sum_{n \in N^+} V_n I_n \sin \varphi_n \quad (2.17)$$

olarak tanımlamıştır. Budeanu önerdiği güç ifadesinin son bileşeni olarak; görünür güç ile aktif ve reaktif güçlerin vektör farkından bozulma gücünü tanımlamıştır:

$$D_b = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_b^2} = \sqrt{\sum_{n \neq k} V_n^2 I_k^2 + V_k^2 I_n^2 - 2V_n V_k I_n I_k \cos(\varphi_n - \varphi_k)} \quad (2.18)$$

Budeanu'nun tanımladığı güç ifadesinde yer alan aktif güç fiziksel manası literatürde net enerjiye dönüşen güç bileşeni biçiminde açıklanmış olan ortalama güçtür. Bunun yanında aktif ve reaktif güçlerin; gerilim ve akımın aynı harmonik numaralarının çarpımından hesap edilmeleri sebebiyle bozulma güç bileşeni farklı harmonik numaralarına sahip gerilim ve akımların çapraz çarpımlarını içermektedir. Bundan dolayı bozulma güç bileşeninin basit bir kondansatörle tamamen kompanzasyonu mümkün değildir.

### 2.1.2 Fryze'nin Güç İfadesi

Budeanu'nun güç ifadesinin harmonik domeyninde tanımlanması sebebiyle bu güç ifadesinin ölçümü 1930'lu yıllardaki teknolojiye göre özel aletler gerektirmiştir. Bu durum karşısında zaman domeyninde bir güç ifadesi elde etmeyi tercih eden Fryze

öncelikle zaman domeyninde akımı aktif ve reaktif olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır [44]. Aktif akım, aktif (ortalama) güçle ilişkili olarak tanımlanmıştır:

$$i_{ac}(t) = \frac{P}{V^2} v(t) \quad (2.19)$$

Reaktif akım ise (2.20)'de verilen biçimde ifade edilmiştir:

$$i_{fre}(t) = i(t) - i_{ac}(t) \quad (2.20)$$

Böylece, Fryze gerilimin etkin değeriyle her iki akım bileşeninin etkin değerlerini çarparak aktif güç ( $P$ ),

$$P = VI_{ac} \quad (2.21)$$

ve reaktif güç ( $Q_f$ ),

$$Q_f = VI_{fre} \quad (2.22)$$

bileşenlerini elde etmiştir. Bunun sonucunda görünür gücü tanımladığı aktif ve reaktif güçlerin vektör toplamı olarak ifade etmiştir:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_f^2} \quad (2.23)$$

### 2.1.3 Kimbark'ın Güç İfadesi

Kimbark'ın güç ifadesi aktif, reaktif ve bozulma güçleri olmak üzere üç bileşene sahiptir [45]. Bunlardan aktif bileşen ortalama güçtür. Reaktif bileşen ise temel harmonik reaktif gücü olarak tanımlanmıştır:

$$Q_k = V_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (2.24)$$

Böylece reaktif güç yük plaka değerleriyle ilişkili hale getirilmiştir. Diğer taraftan temel harmonik dışındaki harmoniklere ait reaktif güçleri ve gerilim ile akımın farklı harmoniklerine ait çarpaz çarpımları içeren bozulma gücü,

$$D_k = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_k^2} \quad (2.25)$$

ifadesiyle tanımlanmıştır.

### 2.1.4 Shepherd ve Zakikhani'nin Güç İfadesi

Basit bir kondansatör ile güç faktörü azami yapıldığında minimum olan reaktif güç bileşenine sahip bir görünür güç ifadesi oluşturmak; Shepherd ve Zakikhani'nin çalışmasının ana motivasyonudur [46], [47]. Shepherd ve Zakikhani bu güç ifadesini tanımlarken öncelikle akımı üç dik bileşene bölmüştür. Bu akım bileşenlerinden aktif ( $I_{Re}$ ) ve reaktif ( $I_{Im}$ ) akımların etkin değerleri gerilim ve akımda bulunan ortak harmonik numaraları ( $n_1$ ) dikkate alınarak tanımlanmıştır:

$$I_{Re} = \sqrt{\sum_{n \in n_1} I_n^2 \cos^2 \varphi_n} \quad (2.26)$$

$$I_{Im} = \sqrt{\sum_{n \in n_1} I_n^2 \sin^2 \varphi_n} \quad (2.27)$$

Üçüncü bileşen olan bozulma akımı ( $I_d$ ) ise;

$$I_d = \sqrt{I^2 - I_{Re}^2 - I_{Im}^2} \quad (2.28)$$

biçiminde ifade edilmiştir.

Shepherd ve Zakikhani gerilim etkin değeri ile her bir akım bileşeninin etkin değerlerinin çarpımından;

aktif görünür güç ( $S_{Re}$ ),

$$S_{Re} = \sqrt{\sum_{n \in n_1 \cup n_2} V_n^2 I_{Re}} \quad (2.29)$$

reaktif görünür güç ( $S_{Im}$ ),

$$S_{Im} = \sqrt{\sum_{n \in n_1 \cup n_2} V_n^2 I_{Im}} \quad (2.30)$$

ve bozulma görünür gücü ( $S_d$ ),

$$S_d = \sqrt{S^2 - S_{Re}^2 - S_{Im}^2} = \sqrt{\sum_{n \in n_1} V_n^2 \sum_{n \in n_3} I_n^2 + \sum_{n \in n_2} V_n^2 \left( \sum_{n \in n_1} I_n^2 + \sum_{n \in n_3} I_n^2 \right)} \quad (2.31)$$

tanımlarını yapmıştır. Böylece görünür gücü;

$$S = \sqrt{S_{Re}^2 + S_{Im}^2 + S_d^2} \quad (2.32)$$

biçiminde bileşenlerine ayırmıştır. Denklem (2.31)'deki  $n_2$  gerilimde bulunup akımda bulunmayan,  $n_3$  ise akımda bulunup gerilimde bulunmayan harmonik numaralarıdır. Buradan bozulma görünür gücünün; gerilim ve akımın ortak olmayan harmonik numaralarına sahip olduğu durumlarda sıfırdan farklı bir değerde olacağı açıkça görülmektedir.

### 2.1.5 Sharon'nun Güç İfadesi

Shepherd ve Zakikhani'nin tanımladığı güç ifadesi basit kondansatör ile minimum yapılabilen reaktif gücü vermekle birlikte, ortalama güç ( $P$ ) yerine aktif görünür gücü ( $S_{Re}$ ) aktif bileşen olarak içermesi sebebiyle güç faktörünün hesabı için uygun değildir. Bu dezavantajdan dolayı; Sharon, Shepherd ve Zakikhani'nin güç ifadesindeki aktif görünür güç ile ortalama gücü yer değiştirmiştir [48]. Böylece, Sharon'un güç ifadesi;

$$S = \sqrt{P^2 + S_q^2 + S_{qr}^2} \quad (2.33)$$

olarak tanımlanmıştır. Bu ifadede; aktif ( $P$ ) ve reaktif görünür güç ( $S_q=S_{Im}$ ) dışındaki güç bileşeni tamamlayıcı görünür güç ( $S_{qr}$ ) olarak isimlendirilmiştir.

### 2.1.6 Depenbrock'un Güç İfadesi

Depenbrock kaynak geriliminin ve yük iletkenliğinin temel harmonik dışındaki kısımlarından dolayı çekilen güç bileşenlerini ölçmeyi amaçlamış ve bu sebeple güç ifadesini tanımlarken öncelikle gerilimi zaman domeyninde iki bileşene ayırmıştır [49]. Bunlar; temel harmonik gerilimi,

$$v_g(t) = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) \quad (2.34)$$

ve artık gerilimdir:

$$v_{nf}(t) = v(t) - v_g(t) \quad (2.35)$$

Daha sonra, aktif gücü temel harmonik aktif ( $P_g$ ) ve temel olmayan harmonik aktif ( $P_{nf}$ ) güçlerine ayırmıştır:

$$P = P_g + P_{nf} \quad (2.36)$$

Böylece bu gerilim ve aktif güç parçalarını kullanarak;

eşdeğer iletkenlik ( $G_e$ ),

$$G_e = \frac{P}{V^2} \quad (2.37)$$

temel harmonik iletkenlik ( $G_g$ ),

$$G_g = \frac{P_g}{V_g^2} \quad (2.38)$$

ve temel olmayan iletkenlik ( $G_{nf}$ ),

$$G_{nf} = \frac{P_{nf}}{V_{nf}^2} \quad (2.39)$$

tanımlarını yapmıştır. Depenbrock bu iletkenlik tanımlarını kullanarak bir akım ifadesi elde etmiştir. Bu akım ifadesindeki bileşenler; eşdeğer iletkenlik ve gerilimin temel harmonik bileşeninden kaynaklanan akım bileşeni,

$$i_g(t) = G_e v_g(t) \quad (2.40)$$

temel harmonik iletkenliği ile eşdeğer iletkenlik arasındaki fark ve gerilimin temel harmonik bileşeninden kaynaklanan akım bileşeni;

$$i_{ge}(t) = (G_g - G_e) v_g(t) \quad (2.41)$$

eşdeğer iletkenlik ve gerilimin artık bileşeninden kaynaklanan akım bileşeni,

$$i_{nf}(t) = G_e v_{nf}(t) \quad (2.42)$$

artık iletkenlik ile eşdeğer iletkenlik arasındaki fark ve gerilimin artık bileşeninden kaynaklanan akım bileşeni,

$$i_{ne}(t) = (G_{nf} - G_e) v_{nf}(t) \quad (2.43)$$

(2.44)'de verilen biçimde hesap edilen reaktif akım bileşeni,

$$i_q(t) = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) v_g(t - \frac{T}{4}) dt \quad (2.44)$$

ve deaktif akım bileşenidir:

$$i_{de}(t) = i(t) - i_g(t) - i_{ge}(t) - i_{nf}(t) - i_{ne}(t) - i_q(t) \quad (2.45)$$

Bu akım bileşenlerinden reaktif akım (2.44)'deki ortalama işleminden dolayı temel harmonik reaktif akımıdır.

Depenbrock bu akım bileşenleri yardımıyla, reaktif güç ( $Q_q$ );

$$Q_q = VI_q \quad (2.46)$$

iletkenlik değişiminden meydana gelen aynı faz gücü ( $U$ );

$$U = V\sqrt{I_{ge}^2 + I_{ne}^2} \quad (2.47)$$

ve artık güç ( $N$ );

$$N = VI_{de} \quad (2.48)$$

tanımlarını yapmış ve böylece görünür gücü,

$$S = \sqrt{P^2 + Q_q^2 + U^2 + N^2} \quad (2.49)$$

biçiminde ifade etmiştir.

### 2.1.7 Kusters ve Moore'un Güç İfadesi

Kusters ve Moore kondansatör veya bobin ile kompanze edilebilen reaktif gücü belirlemek amacıyla bir güç ifadesi oluşturmuştur [50]. Bu güç ifadesi elde edilirken akım üç dik bileşene ayrılmıştır. Bu akım bileşenleri sırasıyla; (2.19)'da verilen ifadeden hesap edilen aktif akım, indüktif özellikli yüklerde en iyi kompanzasyon kondansatörünün çekeceği reaktif akım,

$$i_{qc}(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt}{V^2} v(t) \quad (2.50)$$

ve artık reaktif akım,

$$i_{qcr}(t) = i(t) - i_{ac}(t) - i_{qc}(t) \quad (2.51)$$

olarak tanımlanmıştır. Bu ifadelerde  $\dot{v}(t)$  ani gerilimin zamana göre türevini;  $\dot{V}$  ani gerilimin türevinin etkin değerini belirtir.

Yük kapasitif özellikli ise reaktif akım bileşeni en iyi kompanzasyon indüktansının çekeceği akım;

$$i_{ql}(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T \bar{v}(t)i(t)dt}{\bar{V}^2} \bar{v}(t) \quad (2.52)$$

ve artık reaktif akım;

$$i_{qlr}(t) = i(t) - i_{ac}(t) - i_{ql}(t) \quad (2.53)$$

biçiminde ifade edilmiştir. Bu ifadelerde  $\bar{v}(t)$  ani gerilimin integralini;  $\bar{V}$  ani gerilimin integralinin etkin değerini belirtir. Böylece Kusters ve Moore, tanımladığı akım bileşenlerine göre görünür gücü bileşenlerine ayırmıştır:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_{kus}^2 + Q_{kusr}^2} \quad (2.54)$$

İndüktif özellikli yük için (2.54)'deki reaktif güç ( $Q_{kus}$ ),

$$Q_{kus} = VI_{qc} \quad (2.55)$$

ve artık reaktif güç ( $Q_{kusr}$ ),

$$Q_{kusr} = VI_{qcr} \quad (2.56)$$

biçiminde hesap edilmiştir. (2.54)'deki  $P$  ise aktif (ortalama) güç olup (2.21)'de verilen ifadeye sahiptir.

Eğer yük kapasitif özellikli ise (2.54)'de verilen güç ifadesindeki reaktif güç ( $Q_{kus}$ ),

$$Q_{kus} = VI_{ql} \quad (2.57)$$

ve artık reaktif güç ( $Q_{kusr}$ ),

$$Q_{kusr} = VI_{qlr} \quad (2.58)$$

olur.

Bununla birlikte (2.55)'de verilen ifade,

$$Q_{kus} = V \frac{\sum_{n \in N^+} n V_n I_n \sin \varphi_n}{\sqrt{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2}} \quad (2.59)$$

ve (2.57)'de verilen ifade,

$$Q_{kus} = V \frac{\sum_{n \in N^+} \frac{V_n I_n \sin \varphi_n}{n}}{\sqrt{\sum_{n \in N^+} \frac{V_n^2}{n^2}}} \quad (2.60)$$

biçiminde harmonik domeyninde hesap edilebilir.

### 2.1.8 Czarnecki'nin Güç İfadesi

Czarnecki gerilim ve akımın sinüzoidal olmayan dalga şekline sahip olması durumunda sistem verimindeki azalmayı izah etmek amacıyla bir güç ifadesi önermiştir [52], [53]. Czarnecki'nin güç ifadesi akımın bileşenlere ayrılması yoluyla elde edilmiştir. Buna göre; Czarnecki ilk olarak yük için eşdeğer iletkenlik ( $G_e$ ),

$$G_e = \frac{P}{V^2} \quad (2.61)$$

tanımını yapmış ve yüke ait n.harmonik admitansını hesaplamıştır:

$$Y_n = G_n - jB_n \quad (2.62)$$

Böylece hesap edilen iletkenlik ve suseptans terimleri yardımıyla akımın etkin değerini; aktif, reaktif, kaydırlmış ve üretilen harmonik akımları olmak üzere zaman domeyninde birbirine dik olan dört akım parçasının etkin değerlerinin vektör toplamı biçiminde ifade etmiştir:

$$I = \sqrt{I_{ac}^2 + I_R^2 + I_s^2 + I_h^2} \quad (2.63)$$

Bu akım bileşenlerinin etkin değerleri sırasıyla,

aktif akım için;

$$I_{ac} = G_e V \quad (2.64)$$



reaktif akım için;

$$I_R = \sqrt{\sum_{n \in n_1} B_n^2 V_n^2} \quad (2.65)$$

kaydırılmış akım için;

$$I_s = \sqrt{\sum_{n \in n_1} (G_n - G_e)^2 V_n^2} \quad (2.66)$$

ve üretilen harmonik akımı için;

$$I_h = \sqrt{\sum_{n \in n_3} I_n^2} \quad (2.67)$$

olarak hesap edilmiştir. Bu akım bileşenlerinden üretilen harmonik akımının etkin değeri akımda bulunup gerilimde bulunmayan harmonik numaralarına ( $n_3$ ) sahip akımların toplam etkin değeridir.

Czarnecki (2.63)'ün her iki tarafını gerilimin etkin değeriyle çarparak (2.68)'da verilen güç ifadesini elde etmiştir:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_R^2 + D_s^2 + D_h^2} \quad (2.68)$$

Bu ifadedeki reaktif güç ( $Q_R$ ),

$$Q_R = VI_R \quad (2.69)$$

kaydırılmış güç ( $D_s$ ),

$$D_s = VI_s \quad (2.70)$$

ve üretilen harmonik gücü ( $D_h$ ),

$$D_h = VI_h \quad (2.71)$$

ifadelerine sahiptir. Czarnecki'nin güç ifadesinde yer alan üretilen harmonik gücü de Shepherd ve Zakikhani'nin bozulma görünür gücü gibi gerilim ve akımın ortak olmayan harmonik numaralarına sahip olduğu durumlarda sıfırdan farklı bir değerde ölçülür.

### 2.1.9 IEEE std. 1459-2000 (Emanuel'in) Güç İfadesi

IEEE std. 1459-2000 [57]'de yer alan Emanuel'in güç ifadesi harmonik bozulmanın ölçülmesi ve harmonik maliyet paylaşımı için bir araç teşkil etmesi amacıyla önerilmiştir [82]. Bu ifade oluşturulurken görünür güç öncelikle temel harmonik görünür,

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (2.72)$$

ve temel olmayan harmonik görünür,

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (2.73)$$

güçlerine ayrılmıştır. Temel olmayan harmonik görünür gücü ise üç bileşene ayrılmıştır:

$$S_N = \sqrt{D_I^2 + D_V^2 + S_H^2} \quad (2.74)$$

Bunlar sırasıyla; akım bozulma gücü,

$$D_I = V_1 I_H = S_1 THD_I \quad (2.75)$$

gerilim bozulma gücü,

$$D_V = V_H I_1 = S_1 THD_V \quad (2.76)$$

harmonik görünür gücü,

$$S_H = V_H I_H = S_1 THD_V THD_I \quad (2.77)$$

olarak tanımlanmıştır.

Tablo 2-1: Sinüzoidal olmayan şartlarda tek fazlı sistemler için tanımlanmış güç ifadelerinin özellikleri.

Güç Bileşenleri	Özelliği
Budeanu	Aktif ve reaktif güç bileşenleri, sinüzoidal şartlardaki hesaba benzer bir biçimde; her bir harmonik için hesaplanan aktif ve reaktif güçlerin aritmetik toplamı olarak tanımlanmıştır.
Fryze	Zaman domeyninde hesaplamalara sahip güç ifadesidir. Bu sebeple harmonik domeyninde ölçüm yapan özel ölçüm aletlerini gerektirmez.
Kimbark	Reaktif bileşeni yük plaka değerlerinden hesap edilebilen temel harmonik reaktif gücüdür.
Shepherd-Zakikhani	Reaktif güç bileşeni basit bir kondansatörle güç faktörü azami yapıldığında minimum olan güç bileşenidir. Aktif güç bileşeni ise ortalama güç değildir. Bu sebeple güç faktörünün hesabına uygun değildir.
Sharon	Ortalama güç, Shepherd-Zakikhani'nin reaktif görünür gücü ve tamamlayıcı görünür güç bileşenlerine sahiptir.
Depenbrock	Kaynak geriliminin ve yük iletkenliğinin temel harmonik dışındaki kısımlarından dolayı çekilen güç bileşenlerini içerir. Reaktif güç bileşeni gerilim ve temel harmonik reaktif akımının etkin değerlerinin çarpımıdır.
Kusters-Moore	Kondansatör veya bobin ile tamamen kompanze edilebilen reaktif gücü belirlemek amacıyla oluşturulan güç ifadesidir.
Czarnecki	Gerilimin ve akımın sinüzoidal olmayan dalga şekline sahip olması durumunda sistem verimindeki azalmayı izah etmek amacıyla önerilmiştir.
IEEE std. 1459-2000 (Emanuel)	Harmonik bozulmanın ölçülmesi ve harmonik maliyet paylaşımı için bir araç teşkil etmesi amacıyla önerilmiştir.

Diğer taraftan yukarıda özetlenen güç ifadelerinin kullanımında belirsizlik devam etmektedir. Bu sebeple hala sayaçlar klasik reaktif güç hesabı olan (2.9)'da verilen ifadeye göre reaktif enerji ölçmektedir. Denklem (2.9)'da verilen ifadenin harmonik domeyninde eş değeri;

$$Q = \sum_{n \in N^+} V_n I_n \cos\left(\varphi_n - n \frac{\pi}{2}\right) \quad (2.78)$$

ifadesidir. Denklem (2.78)'den görülüyor ki sayaçın dikkate aldığı reaktif güç çift harmoniklerde kosinüslü bileşenler içermektedir; fakat buraya kadar anlatılan hiçbir reaktif güç tanımında kosinüslü bileşenler bulunmamaktadır. Bu durum klasik sayaçların

anlatılan reaktif güç tanımlarından hiçbirine göre reaktif enerjiyi ölçmediğini göstermektedir. Bununla birlikte yine kosinüslü bileşenlerin n. harmonik aktif güçleri olduğu literatürde net bir biçimde bilinmektedir.

## 2.2 Sinüzoidal Olmayan ve Dengesiz Şartlarda Üç Fazlı Sistemler için Görünür Güç Tanımları ve Güç İfadeleri

Geleneksel olarak üç fazlı sistemler için görünür güç her bir fazın ayrı birer tek fazlı sistem olarak kabul edilmesiyle hesaplanmaktadır. Bu yaklaşımla tanımlanan görünür güçlerden birincisi olan vektör görünür güç;

m fazının aktif gücünün ( $P_m$ ),

$$P_m = V_m I_m \cos \varphi_m \quad (2.79)$$

ve m fazının reaktif gücünün ( $Q_m$ ),

$$Q_m = V_m I_m \sin \varphi_m \quad (2.80)$$

biçiminde hesaplanmasıyla elde edilen her bir faza ait aktif ve reaktif güçlerin vektör toplamı olarak hesaplanır:

$$S_{Ve} = \sqrt{\left( \sum_{m=a,b,c} P_m \right)^2 + \left( \sum_{m=a,b,c} Q_m \right)^2} \quad (2.81)$$

Diğer tanım olan aritmetik görünür güç ise; m fazına ait görünür gücün ( $S_m$ ),

$$S_m = V_m I_m \quad (2.82)$$

biçiminde hesaplanmasıyla elde edilen her bir faza ait görünür güçlerin aritmetik toplamıdır:

$$S_{Ar} = \sum_{m=a,b,c} S_m \quad (2.83)$$

Bu iki görünür güç tanımı sinüzoidal ve dengeli şartlarda aynı sonucu verir:

$$S = 3VI \quad (V = V_a = V_b = V_c, \quad I = I_a = I_b = I_c) \quad (2.84)$$

Ayrıca sinüzoidal- dengeli sistemlerde aritmetik ve vektör görünür güçlerle toplam hat kaybı arasında,

$$\Delta P = 3r \left( \frac{S}{3V} \right)^2 \quad (2.85)$$

biçiminde doğrusal bir ilişki vardır ve bu durum bahsedilen görünür güçlerin toplam hat kaybı dolayısıyla sistem verimi hakkında doğru bilgi verdiğini gösterir. Fakat bu doğrusal ilişki dengesizlik şartları için geçerli olmaması sebebiyle; bu görünür güçler dengesizlik şartlarında sistem verimi hakkında doğru bilgi vermez [28]. Bu doğrusal olmayan ilişki dengesiz doğrusal yük, dengeli sinüzoidal gerilim ve özdeş hat dirençlerine sahip üç faz-üç iletkenli bir sistemde basit hesaplamalarla gösterilebilir. Bu örnek sistemde aritmetik görünür güç ( $S_{Ar}$ );

$$S_{Ar} = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (2.86)$$

ve toplam hat kaybı ( $\Delta P$ );

$$\Delta P = r (I_a^2 + I_b^2 + I_c^2) \quad (2.87)$$

biçiminde yazıldıktan sonra aritmetik görünür gücün karesi hat dirençleri üzerinde düşen gerilimlerin ihmal edilecek kadar küçük olduğu özdeş hat dirençleri ( $r$ ) için faz-nötr arası gerilimlerin dengeli kabul edilmesiyle ( $V_a=V_b=V_c=V$ ),

$$S_{Ar}^2 = V^2 \left[ \underbrace{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)}_{\Delta P \text{ ile doğrusal ilişkili kısım}} + \underbrace{2(I_a I_b + I_b I_c + I_a I_c)}_{\Delta P \text{ ile doğrusal olmayan ilişkili kısım}} \right] \quad (2.88)$$

olarak yazılabilir. Benzer yaklaşımla toplam aktif güç,

$$P = V (I_a \cos \varphi_a + I_b \cos \varphi_b + I_c \cos \varphi_c) \quad (2.89)$$

ve toplam reaktif güç,

$$Q_{Ve} = V (I_a \sin \varphi_a + I_b \sin \varphi_b + I_c \sin \varphi_c) \quad (2.90)$$

biçiminde hesaplanarak vektör görünür gücün karesi,

$$S_{V_e}^2 = V^2 \left[ (I_a \cos \varphi_a + I_b \cos \varphi_b + I_c \cos \varphi_c)^2 + (I_a \sin \varphi_a + I_b \sin \varphi_b + I_c \sin \varphi_c)^2 \right] \quad (2.91)$$

olarak ifade edilir. Daha sonra (2.91)'de verilen ifade,

$$S_{V_e}^2 = V^2 \left[ \underbrace{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)}_{\Delta P \text{ ile doğrusal ilişkili kısım}} + 2 \underbrace{(I_a I_b \cos \varphi_a \cos \varphi_b + I_b I_c \cos \varphi_b \cos \varphi_c + I_a I_c \cos \varphi_a \cos \varphi_c)}_{\Delta P \text{ ile doğrusal olmayan ilişkili kısım}} + \underbrace{2(I_a I_b \sin \varphi_a \sin \varphi_b + I_b I_c \sin \varphi_b \sin \varphi_c + I_a I_c \sin \varphi_a \sin \varphi_c)}_{\Delta P \text{ ile doğrusal olmayan ilişkili kısım}} \right] \quad (2.92)$$

biçiminde yazılabilir. Bu örnek hesaplamalardan her iki görünür gücün karesinin dengesiz sistemlerde toplam hat kaybı ile doğrusal olmayan ilişkide parçalar içerdiği görülmektedir.

Örnekle izah edilen bu eksiklik ilk defa Buchholz tarafından dikkate alınmıştır. Böylece, Buchholz kolektif gerilim ve akım tanımlarını yaparak üç faz-üç iletkenli bir sistemi tek bir sistem olarak ele alıp görünür gücü tanımlamıştır [43]. [43]'ü takip eden [56]'da ise Buchholz bu görünür güç tanımını  $m$  iletkenli sistemler için genelleştirmiştir. Diğer taraftan, Buchholz'un görünür gücünün karesinin kayıplarla doğrusal ilişkisi sadece özdeş hat dirençlerine sahip sistemler için geçerlidir. Bu sebeple Buchholz'un görünür gücü pratikte çok fazla karşılaşılan özdeş olmayan hat dirençlerine sahip güç sistemlerinde sistem verimini hassas biçimde ölçmek için yeterli değildir. Bu eksikliği doldurmak amacıyla Mayordomo ve Usaola [58] ile S. J. Jeon [59] tarafından görünür güç yeniden tanımlanmıştır. Fakat bu görünür güç tanımları hat iletkenlerinin dirençleri arasındaki dengesizliğin bilinmesi gibi pratikte mümkün olmayan veriler gerektirdikleri için standartlarda kabul görmemiştir. Buchholz'un görünür güç tanımına ait FBD teorisi [66] temelli ve DIN std. 40110'da yer alan güç ifadesi bu görünür güç tanımının "aynı gerilim dalga şekli ve aynı akım etkin değerinde iletilebilen azami aktif güç" olduğunu işaret etmiştir.

Yukarıda belirtilen görünür güç tanımlarına ek olarak IEEE std. 1459'da görünür güç "aynı etkin değerli sinüzoidal gerilim ve akımla iletilebilen azami aktif güç" biçiminde tanımlanmıştır [69]. Diğer taraftan tek fazlı sistemler için tanımlanmış ve ani güçteki dalgalanmayı dikkate alan görünür güç tanımının [55] üç fazlı sistemlere

genişletilmiş hali literatürde olmakla birlikte; bu görünür güç tanımı sistem verimini ölçmediği için tek fazlı sistemlerde olduğu gibi standartlarda kabul görmemiştir.

Bu görünür güç tanımları literatürde çeşitli çalışmalar tarafından niteliksel ve niceliksel olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmalardan biri olan [65]'da Buchollz'a ait görünür güç tanımı sinüzoidal fakat dengesiz sistemler için simetrik bileşenler kullanılarak aktif ve aktif olmayan güçlere ayrılmıştır. Bu güçler sistemde bulunan bir başka dengesiz yüke ait negatif ve sıfır sıra güçlerini kompanze etmedikçe faydasız olarak nitelendirilmiştir. Bu sonuç doğrultusunda güç faktörünün; pozitif sıra aktif ile Buchollz'un görünür güçlerinin oranı biçiminde tanımlanması gerektiği çalışmada en önemli sonuç olarak sunulmuştur.

[28] çalışmasında ise toplam hat kaybının aritmetik ve vektör görünür güçlerin kareleriyle doğrusal ilişkili olmadığı; bu özelliğin sadece Buchollz'un görünür güç tanımı tarafından sağlandığı sonucuna varılmıştır.

Diğer taraftan, Williems [8]'de görünür güç tanımını kavramsal olarak incelemiştir. Bu analiz, görünür gücün enerji transfer verimini ve ani güç dalgalanmasını dikkate alan iki farklı kavramsal tanıma sahip olduğunu işaret etmiştir.

Ayrıca Buchollz (veya DIN std. 40110) ve IEEE std. 1459 görünür güç tanımları arasında yapılan karşılaştırmalı analizler ise her iki görünür güç tanımının sadece gerilimin sıfır sıra birleşeni içerdiği sistemlerde farklı değerler vereceğini göstermiştir [70].

Emanuel ve Pajic [29]'da Buchollz'un görünür gücüne göre gerilimle aynı dalga şeklinde akım çeken bir başka ifadeyle iletken sayısı kadar yıldız bağlı-eşdeğer saf direnç biçiminde davranan yük için güç faktörünün bir olduğunu vurgulamıştır. Bununla beraber, IEEE std. 1459 tanımına göre sinüzoidal ve dengeli gerilim ile dengeli ve saf ohmik dirençlerden oluşan yük için güç faktörünün bir olduğu belirtilmiştir. Bu iki yaklaşımdan yola çıkılarak Buchollz'un tanımının teorik; IEEE std. 1459'un tanımının ise pratik temellere dayandığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca yapılan nümerik analizlerden hat dirençleri arasındaki dengesizlik ile gerilimin sıfır sıra bileşeninin pozitif sıra bileşenine oranla düşük olduğu sistemlerde her iki görünür güç tanımının yaklaşık olarak aynı sonuçları verdiği görülmüştür.

Son zamanlarda yapılan bir çalışma olan [9] ise frekans ve zaman domeyninde güç teorisini özetlemiş ve nitel analizler yardımıyla özetlenen literatürdeki hiçbir görünür güç tanımının kompanzasyon, ölçme ve faturalandırma amaçlarının hepsinde birden bir araç olarak kullanılamayacağı sonucuna varmıştır.

### 2.2.1 Vektör Görünür Güç Tanımı ve Güç İfadesi

Sinüzoidal-dengeli şartlarda her bir faza ait aktif ve reaktif güçlerin vektör toplamından hesaplanan vektör görünür gücün, sinüzoidal olmayan ve dengesiz şartlar için Budeanu'nun güç bileşenleri kullanılarak yapılan tanımı IEEE std. 1459-2000'de verilmiştir. Bu standarda göre; vektör görünür güç ( $S_{Ve}$ );

Toplam aktif güç ( $P$ ),

$$P = \sum_{m=a,b,c} P_m, \quad P_m = \sum_n V_{mn} I_{mn} \cos(\varphi_{mn}) \quad (2.93)$$

Toplam reaktif güç ( $Q_{Ve}$ ),

$$Q_{Ve} = \sum_{m=a,b,c} Q_m, \quad Q_m = \sum_n V_{mn} I_{mn} \sin(\varphi_{mn}) \quad (2.94)$$

ve toplam bozulma güçlerinin ( $D_{Ve}$ ),

$$D_{Ve} = \sum_{m=a,b,c} D_m, \quad D_m = \sqrt{S_m^2 - P_m^2 - Q_m^2} \quad (2.95)$$

vektör toplamıdır:

$$S_{Ve} = \sqrt{P^2 + Q_{Ve}^2 + D_{Ve}^2} \quad (2.96)$$

Vektör görünür güç tanımı daha önce de belirtildiği gibi her bir fazı ayrı bir sistem kabul eder bu sebeple her bir fazın ayrı kompanze edildiği durumda bu görünür güce göre hesaplanan güç faktörü bir olur.

### 2.2.2 Aritmetik Görünür Güç Tanımı

Aritmetik görünür güç, her bir faz için hesaplanan görünür güçlerin aritmetik toplamıdır [57]. Sinüzoidal veya sinüzoidal olmayan, dengeli veya dengesiz bütün sistem şartlarında (2.83)'de verilen ifadeyle hesaplanır. Aritmetik görünür güç de vektör görünür



güç gibi her bir fazı ayrı bir sistem olarak kabul eder. Bu sebeple aritmetik ve vektör görünür güçlerin tam kompanzasyon durumları aynıdır.

### 2.2.3 Buchollz'un Görünür Güç Tanımı

Buchollz  $m$  tane iletkenli sistem için; kolektif gerilim ve akım tanımlarını yaparak;

$$v_{\Sigma}(t) = \begin{bmatrix} v_{a0}(t) \\ v_{b0}(t) \\ \vdots \\ v_{m0}(t) \end{bmatrix}, \quad i_{\Sigma}(t) = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ \vdots \\ i_m(t) \end{bmatrix} \quad (2.97)$$

sistemi bir bütün olarak ele almıştır [56]. Denklem (2.97)'de yer alan  $v_{m0}(t)$   $m$  iletkeni ile hayali nötr noktası arası gerilimin ani değeri olup (2.98)'de verilen ifadeden hesaplanmıştır:

$$v_{m0}(t) = v_m(t) - \frac{1}{m} \sum_{m=a,b,c,\dots,N} v_m(t) \quad m=a,b,c,\dots,N \quad (2.98)$$

Böylece, Buchollz kolektif gerilim etkin değeri,

$$V_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{\Sigma}^{Tr}(t) v_{\Sigma}(t) dt} = \sqrt{\sum_{m=a,b,c,\dots,N} V_{m0}^2} \quad (2.99)$$

ve kolektif akım etkin değeri,

$$I_{\Sigma} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma}^{Tr}(t) i_{\Sigma}(t) dt} = \sqrt{\sum_{m=a,b,c,\dots,N} I_m^2} \quad (2.100)$$

tanımlarını yaptıktan sonra görünür gücü ( $S_{\Sigma}$ );

$$S_{\Sigma} = V_{\Sigma} I_{\Sigma} \quad (2.101)$$

olarak hesap etmiştir.

Bu görünür güç tanımı literatürde yaygın olarak bilinen üç farklı güç ifadesine sahiptir. Bunlar; FBD (Fryze-Buchollz-Depenbrock) teori temelli DIN std. 40110'da yer

alan güç ifadesiyle, Czarnecki [52], [53] ve Ari-Stankovich [61] tarafından önerilen güç ifadeleridir.

### 2.2.3.1 DIN std. 40110 Güç İfadesi

DIN std. 40110'da FBD teorisinde tanımlanmış olan akım ifadesine dayanan bir güç ifadesi desteklenmiştir. Bu güç ifadesinin ilk bileşeni,

$$P = \sum_{m=a,b,c,\dots,N} P_m, \quad P_m = \frac{1}{T} \int_0^T v_{m0}(t) i_m(t) dt \quad (2.102)$$

biçiminde tanımlanan aktif güç olup diğer güç bileşenleri  $m$  hat iletkenliği ( $G_m$ ),

$$G_m = P_m / V_{m0}^2 \quad (2.103)$$

ve eşdeğer iletkenlik ( $G_e$ ),

$$G_e = P / V_{\Sigma}^2 \quad (2.104)$$

kullanılarak hesap edilen aktif olmayan güçlerdir. Bu aktif olmayan güç bileşenleri sırasıyla gerilimle aynı fazda dengesiz akım parçasından kaynaklanan deaktif güç,

$$Q_{tot\Sigma\parallel} = V_{\Sigma} \sqrt{\sum_{m=a,b,c,\dots,N} (G_m - G_e)^2 V_{m0}^2} \quad (2.105)$$

ve gerilime dik akım parçasından kaynaklanan deaktif güçtür:

$$Q_{tot\Sigma\perp} = V_{\Sigma} \sqrt{\sum_{m=a,b,c,\dots,N} [I_m^2 - G_m^2 V_{m0}^2]} \quad (2.106)$$

Böylece Buchholz'un görünür gücü bu üç güç bileşeninin vektör toplamı olarak ifade edilmiştir:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P^2 + Q_{tot\Sigma\parallel}^2 + Q_{tot\Sigma\perp}^2} \quad (2.107)$$

Bu ifadeden hat akımları ile hat-hayali nötür noktası gerilimleri tıpatıp aynı dalga şekline sahip ise Buchholz görünür güç tanımına göre güç faktörünün bir olduğu anlaşılmaktadır. Böylece Buchholz görünür güç tanımına göre güç faktörünün bir olduğu halde akımın dengesizliğe ve harmonik bozulmaya sahip olabileceği dolayısıyla sistemde nötür akımı akabileceği anlaşılmaktadır.

### 2.2.3.2 Czarnecki'nin Güç İfadesi

Czarnecki gerilimin dengeli akımın dengesiz olduğu sinüzoidal olmayan üç faz- üç iletkenli sistemlerde Buchholz'un görünür güç tanımı için bir güç ifadesi önermiştir. Bu güç ifadesi önerilirken (2.104)'de verilen biçimde hesap edilen eşdeğer iletkenlik ( $G_e$ ) tanımı yapılmıştır. Ayrıca n. harmonik toplam aktif gücü ( $P_n$ ),

$$P_n = \sum_{m=a,b,c} V_{mn} I_{mn} \cos(\varphi_{mn}) \quad (2.108)$$

n. harmonik toplam reaktif gücü ( $Q_n$ ),

$$Q_n = \sum_{m=a,b,c} V_{mn} I_{mn} \sin(\varphi_{mn}) \quad (2.109)$$

ve n. harmonik kolektif gerilimi ( $V_{\Sigma n}$ ),

$$V_{\Sigma n}^2 = \sum_{m=a,b,c} V_{mn}^2 \quad (2.110)$$

kullanılarak n. harmonik dengeli yük eşdeğer iletkenliği ( $G_{ne}$ ),

$$G_{ne} = \frac{P_n}{V_{\Sigma n}^2} \quad (2.111)$$

ve n. harmonik dengeli yük eşdeğer suseptansı ( $B_{en}$ ),

$$B_{en} = \frac{Q_n}{V_{\Sigma n}^2} \quad (2.112)$$

biçiminde hesap edilmiştir. Bu terimler yardımıyla kolektif akım etkin değerini; aktif, reaktif, kaydırılmış, üretilen harmonik ve dengesizlik akımları olmak üzere zaman domeyninde birbirine dik olan beş akım parçasının etkin değerlerinin vektör toplamı biçiminde ifade etmiştir:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_{ac}^2 + I_R^2 + I_s^2 + I_h^2 + I_u^2} \quad (2.113)$$

Bu akım bileşenlerinin etkin değerleri,

aktif akım için;

$$I_{ac} = G_e V_{\Sigma} \quad (2.114)$$

reaktif akım için;

$$I_R = \sqrt{\sum_n [B_{ne}^2 V_{\Sigma n}^2]} \quad (2.115)$$

kaydırılmış akım için;

$$I_s = \sqrt{\sum_n [(G_{ne} - G_e)^2 V_{\Sigma n}^2]} \quad (2.116)$$

ve üretilen harmonik akımı için;

$$I_h = \sqrt{\sum_{n \in k} I_{\Sigma n}^2}, \quad I_{\Sigma n}^2 = \sum_{m=a,b,c} I_{mn}^2 \quad (2.117)$$

biçiminde ifade edilmiştir. Son akım bileşeni olan dengesizlik akımının etkin değeri ise kolektif akım ile diğer akım bileşenlerinin etkin değerlerinin vektör farkından hesaplanmıştır:

$$I_u = \sqrt{I_{\Sigma}^2 - I_{ac}^2 - I_R^2 - I_s^2 - I_h^2} \quad (2.118)$$

Ayrıca belirtilmesi gereken bir diğer husus ise gerilim dengeli olduğu için gerilim tarafında d.a. bileşeni ve sıfır sıra harmoniklerinin bulunmadığı kabul edilmiştir.

Czarnecki son adımda kolektif gerilimin etkin değeriyle akım bileşenlerinin etkin değerlerini çarparak,

aktif güç ( $P$ ),

$$P = V_{\Sigma} I_{ac} \quad (2.119)$$

reaktif güç ( $Q_R$ ),

$$Q_R = V_{\Sigma} I_R \quad (2.120)$$

kaydırılmış güç ( $D_s$ ),

$$D_s = V_{\Sigma} I_s \quad (2.121)$$

üretilen harmonik gücü ( $D_h$ ),

$$D_h = V_{\Sigma} I_h \quad (2.122)$$

ve dengesizlik gücü ( $D_u$ ),

$$D_u = V_\Sigma I_u \quad (2.123)$$

tanımlarını yapıp (2.124)'de verilen güç ifadesini önermiştir:

$$S_\Sigma = \sqrt{P^2 + Q_R^2 + D_s^2 + D_h^2 + D_u^2} \quad (2.124)$$

Bu güç ifadesinde yer alan aktif, reaktif, kaydırılmış ve üretilen harmonik güçleri Czamecki'nin tek fazlı sistemler için önermiş olduğu güç ifadesindeki fiziksel manalarını muhafaza etmişlerdir.

### 2.2.3.3 Ari ve Stankovich'in Güç İfadesi

Ari ve Stankovich bir kompanzasyon aracı elde etmek amacıyla Buchholz'un görünür gücüne ait bir güç ifadesi önermiştir. Bu güç ifadesi önerilirken Hilbert uzayı teknikleri kullanılarak akım üç dik bileşene ayrılmıştır. Bu akım bileşenleri;

Aynı ortalama güç iletilebilmesi için gereken minimum etkin değere sahip aktif akım,

$$i_{\Sigma ac}(t) = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i_\Sigma^{Tr}(t) v_\Sigma(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T v_\Sigma^{Tr}(t) v_\Sigma(t) dt} v_\Sigma(t) = \frac{P}{V_\Sigma^2} v_\Sigma(t) \quad (2.125)$$

geçici reaktif akım,

$$i_{\Sigma y}(t) = i_{\Sigma p}(t) - i_{\Sigma ac}(t) \quad (2.126)$$

ve dolanan reaktif akımdır:

$$i_{\Sigma x}(t) = i_\Sigma(t) - i_{\Sigma p}(t) \quad (2.127)$$

Denklem (2.126) ve (2.127)'deki  $i_{\Sigma p}(t)$  akımı ise,

$$i_{\Sigma p}(t) = \frac{i_\Sigma^{Tr}(t) v_\Sigma(t)}{v_\Sigma^{Tr}(t) v_\Sigma(t)} v_\Sigma(t) = \frac{p(t)}{v_\Sigma^{Tr}(t) v_\Sigma(t)} v_\Sigma(t) \quad (2.128)$$

biçiminde ifade edilmiş ve aynı ani gücü iletcek minimum etkin değere sahip akım olarak fiziksel manası açıklanmıştır. Tanımlanan  $i_{\Sigma ac}(t)$ ,  $i_{\Sigma x}(t)$  ve  $i_{\Sigma y}(t)$  akım bileşenleri zaman domeyninde birbirine diktir. Böylece kolektif akımın etkin değeri;

aktif akımın etkin değeri,

$$I_{ac} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma ac}^{Tr}(t) i_{\Sigma ac}(t) dt} \quad (2.129)$$

geçici reaktif akımın etkin değeri,

$$I_y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma y}^{Tr}(t) i_{\Sigma y}(t) dt} \quad (2.130)$$

ve dolanan reaktif akımın etkin değeri,

$$I_x = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma x}^{Tr}(t) i_{\Sigma x}(t) dt} \quad (2.131)$$

olmak üzere üç bileşene ayrılmıştır:

$$I_{\Sigma} = \sqrt{I_{ac}^2 + I_x^2 + I_y^2} \quad (2.132)$$

Bu akım ifadesinin her iki tarafı kolektif gerilimin etkin değeriyle çarpılarak görünür güç ifadesi,

$$S_{\Sigma} = \sqrt{P^2 + Q_x^2 + Q_y^2} \quad (2.133)$$

elde edilmiştir. Bu güç ifadesinde yer alan güç bileşenleri sırasıyla; (2.119)'da verilen ifadeyle hesap edilen aktif, geçici(temporal) reaktif ( $Q_y$ ),

$$Q_y = V_{\Sigma} I_y \quad (2.134)$$

ve dolanan (circulating) reaktif ( $Q_x$ ),

$$Q_x = V_{\Sigma} I_x \quad (2.135)$$

güçleridir.

Ari ve Stankovich'in tanımladığı güç ifadesinin özelliği iki farklı aktif kompanzasyon stratejisi için bir araç teşkil etmesidir. Bu kompanzasyon stratejilerinden birincisi  $Q_x$  ve  $Q_y$  nin kompanze edildiği tam kompanzasyon stratejisidir. İkincisi ise

sadece  $Q_x$  in kompanse edildiği ve böylece ani gücün korunduğu kompanzasyon stratejisidir.

#### 2.2.4 IEEE std. 1459-2000 Görünür Güç Tanımı ve Güç İfadesi

IEEE std. 1459-2000; faz-nötür arası ( $V_a, V_b, V_c$ ) ve faz-faz arası ( $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ ) gerilimlerinin etkin değerlerini kullanarak eşdeğer gerilim etkin değeri ( $V_e$ ),

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2]} \quad (\text{Üç faz-dört iletkenli sistemler için}) \quad (2.136)$$

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}} \quad (\text{Üç faz-üç iletkenli sistemler için}) \quad (2.137)$$

ve faz ile nötr iletkenlerinden çekilen akımların etkin değerlerini ( $I_a, I_b, I_c, I_N$ ) kullanarak eşdeğer akım etkin değeri ( $I_e$ ),

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_N^2}{3}} \quad (\text{Üç faz-dört iletkenli sistemler için}) \quad (2.138)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}} \quad (\text{Üç faz-üç iletkenli sistemler için}) \quad (2.139)$$

tanımlarını yaparak görünür gücü (efektif görünür güç),

$$S_e = 3V_e I_e \quad (2.140)$$

biçiminde hesap etmiştir. IEEE std. görünür güç tanımı iki ana bileşen içermektedir. Bunlardan ilki temel harmonik efektif görünür gücü olup bu güç bileşeni (2.136) veya (2.137) ve (2.138) veya (2.139)'da verilen ifadelerde sadece temel harmonik gerilimleri ve akımlarının kullanılmasıyla hesaplanan temel harmonik eşdeğer gerilim ( $V_{e1}$ ) ve temel harmonik eşdeğer akım ( $I_{e1}$ ) etkin değerleri kullanılarak,

$$S_{e1} = 3V_{e1} I_{e1} \quad (2.141)$$

biçiminde tanımlanmıştır. Diğer ise efektif görünür ile temel harmonik efektif görünür güçlerinin vektör farkı olan temel olmayan efektif görünür güçtür;

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2} \quad (2.142)$$

Temel harmonik efektif görünür güç, temel harmonik-pozitif sıra görünür gücü ve temel harmonik dengesizlik görünür gücünün vektör toplamıdır:

$$S_{e1} = \sqrt{(S_1^+)^2 + S_{U1}^2} \quad (2.143)$$

Temel harmonik-pozitif sıra görünür gücü ( $S_1^+$ ), temel harmonik pozitif sıra aktif ( $P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos\phi_1^+$ ) ve temel harmonik pozitif sıra reaktif ( $Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin\phi_1^+$ ) güçlerinin vektör toplamıdır:

$$S_1^+ = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2} \quad (2.144)$$

Bunlara ek olarak temel olmayan efektif görünür gücü ( $S_{eN}$ ), akım bozulma gücü ( $D_{eI}$ ),

$$D_{eI} = 3V_{e1} I_{eH} \quad (2.145)$$

gerilim bozulma gücü ( $D_{eV}$ ),

$$D_{eV} = 3V_{eH} I_{e1} \quad (2.146)$$

ve harmonik görünür gücü ( $S_{eH}$ ),

$$S_{eH} = 3V_{eH} I_{eH} \quad (2.147)$$

bileşenlerine ayrılmıştır:

$$S_{eN} = \sqrt{D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2} \quad (2.148)$$

IEEE 1459-2000 görünür gücü “ideal (sinüzoidal ve dengeli) şartlar altında, aynı gerilim ve akım etkin değerleriyle iletilebilen azami aktif güç” olarak tanımlamıştır. Bu sebeple IEEE 1459-2000 görünür güç tanımına göre güç faktörünün bir olduğu durumda gerilimin sinüzoidal ve dengeli dalga şekline sahip olması faz akımlarının da ilgili faz-nötr gerilimiyle aynı fazda olmaları lazımdır.

Buraya kadar verilen görünür güç tanımlarının özellikleri Tablo 2-2’de özetlenmiştir.



Tablo 2-2: Sinüzoidal olmayan-dengesiz üç fazlı sistemler için oluşturulmuş görünür güç tanımlarının özellikleri ve güç ifadeleri.

Görünür Güç Tanımı	Özelliği	Güç İfadesi
Aritmetik	Aritmetik görünür güç üç faza ait görünür güçlerin toplamı biçiminde tanımlanmıştır.	Yok
Vektör	Vektör görünür güç, her faz için hesaplanan aktif, Budeanu'nun reaktif ve Budeanu'nun bozulma güçlerinin vektör toplamı biçiminde tanımlanmıştır.	Güç ifadesi aktif, reaktif ve bozulma gücü olmak üzere üç güç bileşenine sahiptir.
Buchholz	Kavramsal olarak "aynı gerilim dalga şekli ve aynı akım etkin değerinde iletilebilen azami aktif güç" biçiminde tanımlanmıştır. Kolektif gerilim ve akım etkin değerlerinin çarpımı biçiminde hesaplanır ve böylece sistemi bütünüyle ele alır.	DIN std. 40110 tarafından desteklenen, Czarnecki ve Aristankovich tarafından önerilen üç farklı güç ifadesine sahiptir.
IEEE std.	Kavramsal olarak "ideal (sinüzoidal ve dengeli) şartlar altında, aynı gerilim ve akım etkin değerleriyle iletilebilen azami aktif güç" olarak tanımlanmıştır. Eşdeğer gerilim ve akım etkin değerlerinin çarpımının üç katı biçiminde hesaplanarak sistemi bütünüyle ele alır.	Temel harmonik pozitif sıra aktif, temel harmonik pozitif sıra reaktif, temel harmonik dengesizlik, akım bozulma, gerilim bozulma ve harmonik görünür güçlerini içeren bir güç ifadesine sahiptir.

## 2.3 Sonuçlar ve Tartışma

Literatürde sinüzoidal olmayan tek fazlı ve sinüzoidal olmayan-dengesiz üç fazlı sistemler için önerilmiş görünür güç tanımları ve güç ifadeleri üzerine yapılan çalışmalar üç başlık altında toplanabilir:

- Görünür gücün yeniden tanımlandığı çalışmalar,
- Görünür güç tanımlarına ait güç ifadelerinin elde edildiği çalışmalar,
- Ve görünür güç tanımları ile güç ifadelerinin manalarını analiz eden çalışmalar.

Bu sunulan çalışmalar hakkında yapılan niteliksel analizlerden aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler için gerilim ve akımın etkin değerlerinin çarpımı biçiminde tanımlanan klasik görünür gücün genel kabul görmesine rağmen sinüzoidal olmayan-dengesiz üç fazlı sistemlerde hala her hangi bir görünür güç tanımı üzerinde fikir birliğine varılamamıştır.
- Gerilim ve akımın etkin değerlerinin dikkate alındığı görünür güç tanımlarının frekans bilgisini dikkate almaması sebebiyle bu tanımlar sinüzoidal olmayan şartlarda sistem elemanlarının boyutlandırmasında yetersizdir. Diğer taraftan, gerilimin ve akımın tepe değerleri sinüzoidal olmayan şartlarda bunların etkin değeriyle ilişkili değildir. Bu sebeple tepe değerlerin elemanların çalışma ömrüne etki ettiği durumlarda gerilim ve akımın etkin değerinin dikkate alındığı görünür güç tanımları boyutlandırma için eksik kalmaktadır. Buna binaen ani güçteki dalgalanmayı dikkate alan görünür güç tanımları boyutlandırma bakımından avantajlı gözükmemektedir. Fakat bu görünür güç tanımları sistem verimini dikkate almaz. Böylece sinüzoidal olmayan şartlarda çalışacak elemanların boyutları sinüzoidal şartlardaki görünür güçlerinin yeniden boyutlandırma katsayılarıyla çarpılmasıyla literatürde hesaplanmıştır.

- Tek fazlı sistemlerde sadece Kusters ve Moore'un güç ifadesinin en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemden çektiği gücü ölçmeyi amaçladığı görülmüştür. Fakat üç fazlı sistemlerde en iyi kapasitif kompanzatör gücünü ölçmeyi amaçlayan bir güç ifadesi mevcut değildir.
- Diğer taraftan literatürde önerilmiş güç ifadelerinin hiçbiri harmonik üreten yüklerin tespiti için bir araç teşkil etmek amacıyla önerilmemiştir.

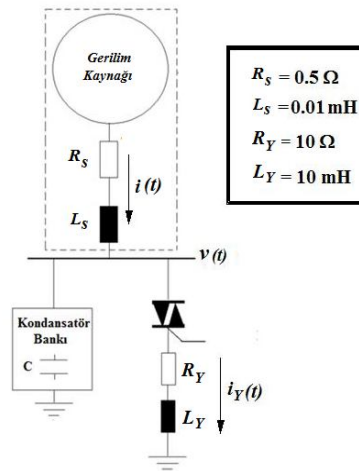
Yukarıda sıralanan durumlardan ötürü herhangi bir görünür güç tanımı ve güç ifadesi üzerinde fikir birliğine varılamamış ve bundan ötürü standartlarda çeşitli görünür güç tanımları ile güç ifadeleri desteklenmiştir. Bu durum, pratikte enerjinin ölçülmesi ve fiyatlandırılmasında bir belirsizliğe yol açmıştır.

### 3 GÜÇ İFADELERİNİN DENGELİ KAPASİTİF KOMPANZASYON BAKIMINDAN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Bu bölümde sinüzoidal olmayan tek fazlı ve sinüzoidal olmayan-dengesiz üç fazlı sistemler için literatürde var olan güç ifadelerinin dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından karşılaştırmalı analizi test sistemlerinde simüle edilerek yapılmıştır.

#### 3.1 Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Tek Fazlı Sistemler için Oluşturulmuş Güç İfadelerinin Karşılaştırması

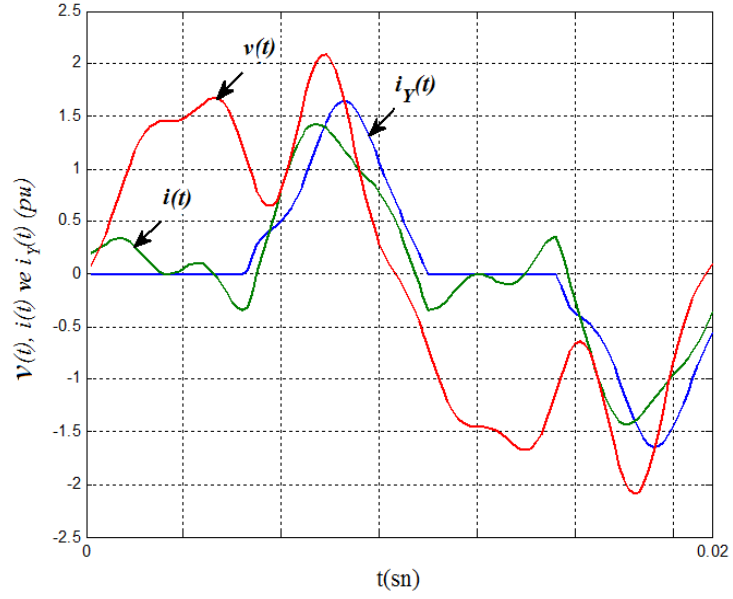
Bu kısımda sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler için literatürde var olan güç ifadeleri en iyi kapasitif kompanzasyon bakımından Şekil 3-1’de verilen sistemde analiz edilmiştir. Sahip oldukları reaktif güç bileşeninin temel harmonik reaktif gücü olmasından dolayı IEEE std. 1459-2000 (Emanuel) ve Kimbark’ın güç ifadeleri kompanzasyon analizine dahil edilmemiştir.



Şekil 3-1: Sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler için tanımlanmış güç ifadelerinin en iyi kapasitif kompanzasyon bakımından analiz edildiği sistem.

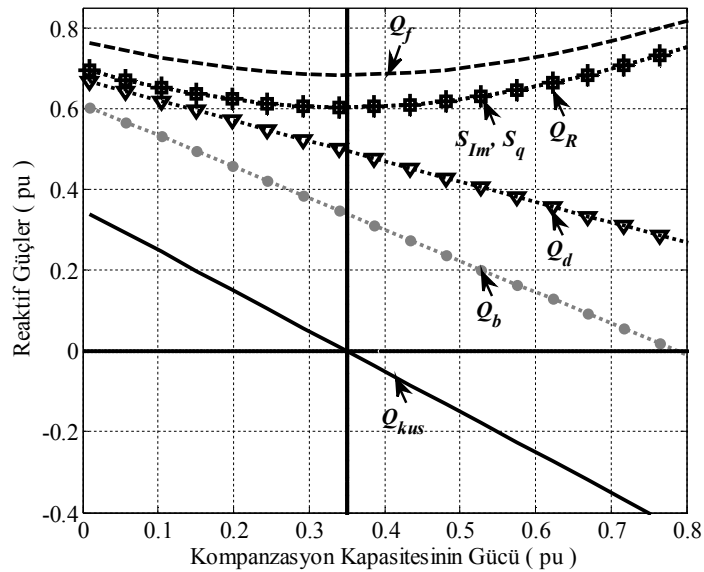
Test sisteminde gerilim ve akımlar [27]’de sunulmuş olan zaman domeyni model kullanılarak hesaplanmıştır. Analizlerde gerilim 3., 5. ve 7. harmoniklere sahip olup  $THD_V(\%)$ ’si 40’dır. Yükün triak tetikleme açıları ise  $90^\circ$ - $270^\circ$ ’dir. Bu sistemde güç faktörünün azami olduğu durum için; terminal (yük barası) gerilimi ile hat ve yük

akımlarına ait dalga şekilleri pu olarak Şekil 3-2’de verilmiştir.



Şekil 3-2: Şekil 3-1’de verilen sistemde güç faktörünün azami olduğu durum için; terminal (yük barası) gerilimi ile hat ve yük akımlarına ait dalga şekilleri.

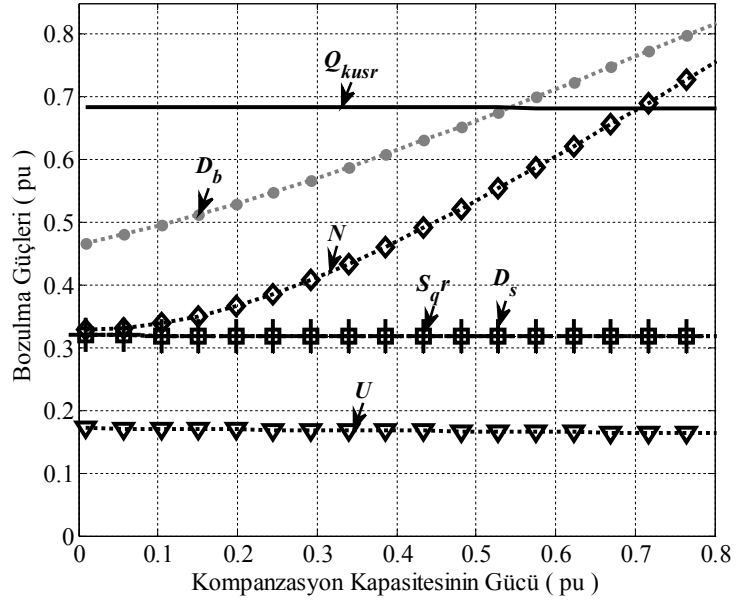
Budeanu ( $Q_b$ ), Fryze ( $Q_f$ ), Shepherd-Zakikhani ( $S_{Im}$ ), Sharon ( $S_q$ ), Depenbrock ( $Q_q$ ), Kusters-Moore ( $Q_{kus}$ ) ve Czarnecki ( $Q_R$ )’nin tanımladığı reaktif güçlerin kompanzasyon kondansatörü gücüyle değişimi Şekil 3-3’de verilmiştir. Bu şekilde güç faktörünün azami değerine ulaştığı durumda kompanzasyon kondansatörünün sistemden çektiği güç dikey çizgiyle işaretlenmiştir.



Şekil 3-3: Şekil 3-1’de verilen sistemde; Budeanu, Fryze, Shepherd-Zakikhani, Sharon, Depenbrock, Kusters-Moore ve Czarnecki’nin tanımladığı reaktif güçlerin kompanse kondansatörü gücüyle değişimi.

Şekil 3-3’den görüldüğü biçimde Shepherd-Zakikhani, Sharon ve Czarnecki’in tanımladığı reaktif güçler aynı değerlere sahiptir. Bu reaktif güçler ve Fryze’nin ortaya koyduğu reaktif güç, güç faktörü azami değerine ulaştığı durumda minimum değerlerine ulaşmaktadır. Bununla birlikte, Kusters-Moore’un reaktif gücü güç faktörü azami değerine ulaştığında tamamen kompanse edilmiştir. Diğer taraftan, Budeanu ve Depenbrock’un reaktif güçleri tamamen kompanse oldukları durumda güç faktörünün azami değerinde olmadığı görülmektedir. Ayrıca Kusters-Moore’un reaktif gücünün kompanse sız durumda hesap edilen değeri güç faktörünün azami olduğu durumda kompanse kondansatörünün sistemden çektiği güce eşittir. Shepherd-Zakikhani, Sharon, Fryze, Czarnecki’nin reaktif güçlerinin kompanse sız durumdaki değerleri ise en iyi kompanse kondansatörünün sistemden çektiği gücü direkt vermemiştir.

Budeanu’nun bozulma ( $D_b$ ), Kusters-Moore’un artık reaktif ( $Q_{kus}$ ), Sharon’un tamamlayıcı ( $S_{qr}$ ), Depenbrock’un aynı faz ile artık ( $U$  ve  $N$ ) ve Czarnecki’nin kaydırılmış ( $D_s$ ) güçlerinin kompanse kondansatörü gücüyle değişimi Şekil 3-4’de verilmiştir. Shepherd-Zakikhani’nin bozulma gücü ( $S_d$ ) ve Czarnecki’nin harmonik üreten gücü ( $D_h$ ) test sisteminde sıfır olduğu için Şekil 3-4’de verilmemiştir.



Şekil 3-4: Şekil 3-1’de verilen sistemde; Budeanu’nun bozulma, Kusters-Moore’un artık reaktif, Sharon’un tamamlayıcı, Depenbrock’un aynı faz ile artık ve Czarnecki’nin kaydırılmış güçlerinin kompanzasyon kondansatörü gücüyle değişimi.

Şekil 3-4’den Budeanu’nun bozulma ve Depenbrock’un artık güçlerinin kompanzasyon kondansatörünün gücüyle değiştiği görülmektedir. Kusters-Moore’un artık reaktif, Sharon’un tamamlayıcı, Depenbrock’un aynı faz ve Czarnecki’nin kaydırılmış güçleri ise kompanzasyon kondansatörü gücünün değişimi sırasında yaklaşık sabit kalmaktadır. Bununla beraber, Sharon’un tamamlayıcı ve Czarnecki’nin kaydırılmış güçlerinin aynı değerleri verdiği şekilden görülmektedir.

Yapılan analizlerden şu sonuçlar elde edilmiştir:

- Budeanu ve Depenbrock’a ait güç ifadeleri en iyi kompanzasyon kondansatörünün gücü hakkında doğru bilgi vermez.
- Fryze, Shepherd-Zakikhani, Sharon, Kusters-Moore ve Czarnecki’nin güç ifadeleri en iyi kompanzasyon kondansatörünün gücü hakkında doğru bilgi vermektedir.
- Bununla beraber, Fryze, Shepherd-Zakikhani, Sharon ve Czarnecki’nin güç ifadeleri en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemden çekeceği güç değerinin

hesabında eksta matematiksel işlemler gerektirir. Diğer taraftan, kompanzasyondan sonra sistem gerilimindeki değişimin ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu durumlarda Kusters-Moore'un güç ifadesi en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemden çekeceği gücü direkt verir.

### 3.2 Sinüzoidal Olmayan ve Dengesiz Üç Fazlı Sistemler için Oluşturulmuş Güç İfadelerinin Karşılaştırması

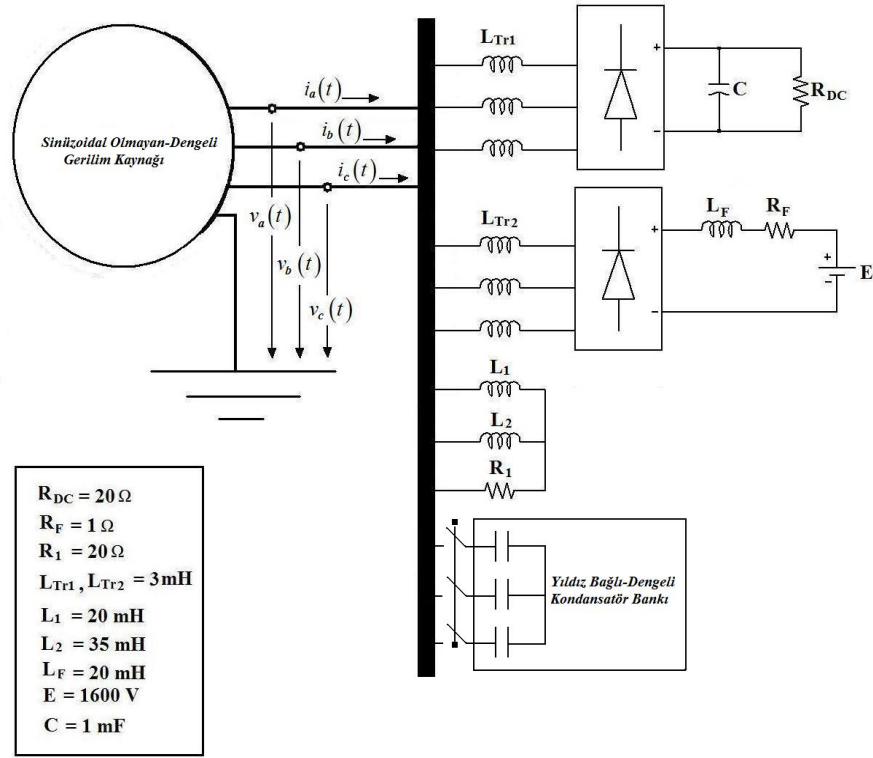
Literatürde bulunan sinüzoidal olmayan ve dengesiz üç fazlı sistemler için önerilmiş görünür güç tanımları ve bu tanımlara ait güç ifadeleri en iyi dengeli kapasitif kompenzatorünün belirlenmesi için araç olarak kullanılabilirlikleri bakımından kısa bir niteliksel analize tabii tutulursa aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

- Czarnecki'nin üç fazlı sistemler için oluşturduğu güç ifadesinin reaktif bileşeni yine Czarnecki'nin tek fazlı sistemler için oluşturduğu güç ifadesinde tanımlanmış olan reaktif gücün üç fazlı sistemlere açılımıdır. Bununla beraber tek fazlı sistemler için verilen analizden Czarnecki'nin güç ifadesinin en iyi kompanzasyon kondansatörünün gücünü direkt olarak vermediği görülmüştür. Bu sebeple Czarnecki'nin üç fazlı sistemler için oluşturduğu güç ifadesinin reaktif güç bileşeni en iyi dengeli kapasitif kompenzatorünün gücünü direkt vermeyecektir.
- Aynı durum IEEE std. 1459-2000 güç ifadesi ve vektör görünür güce ait güç ifadesi için de geçerlidir.
- Bunlara ek olarak literatürde tanımlanmış aritmetik görünür güç bileşen ifadesine sahip değildir.

Yukarıda verilen çözümlerden sonra geriye DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich'e ait güç ifadeleri kalmıştır. Bu iki güç ifadesinin sinüzoidal olmayan-dengesiz üç fazlı sistemlerde en iyi dengeli kapasitif kompenzatorünün sistemden çektiği gücün belirlenmesinde araç teşkil edemeyeceği aşağıda niceliksel analizlerle gösterilmiştir.

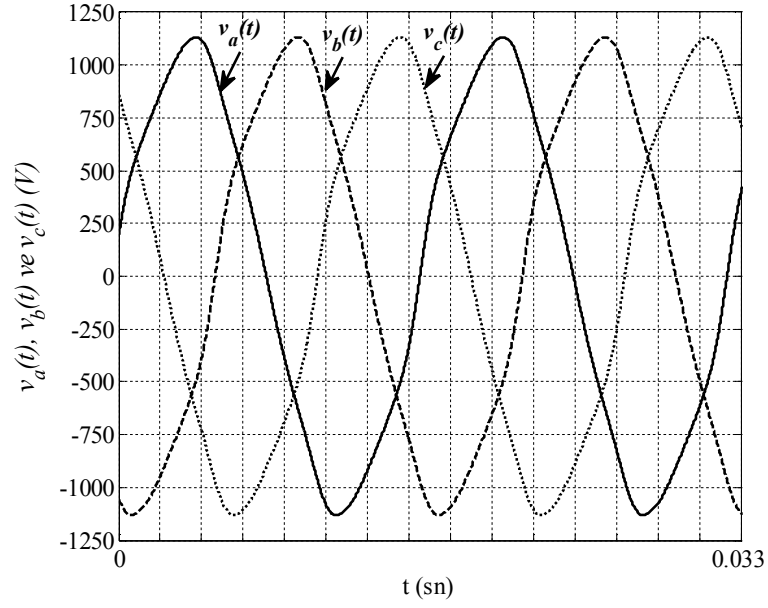
DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich'e ait güç ifadelerinin en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından analizi Şekil 3-5'de verilen sistemde yapılmıştır.





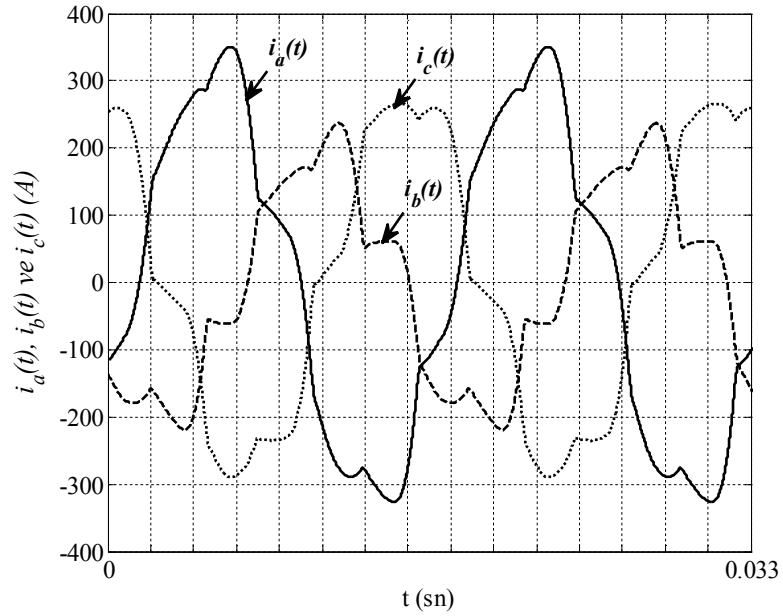
Şekil 3-5: DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich'e ait güç ifadelerinin en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından analiz edildiği sistem.

Şekil 3-5'de verilen analiz sistemi üç çeşit yük tipine sahiptir; bunlar, saf direnç besleyen 6 darbeleri doğrultucu, d.a. motor besleyen 6 darbeleri doğrultucu ve dengersiz R-L empedanstır. Analiz sisteminde kompanzasyonsuz durum için ortak bağlantı noktasında ölçülen faz-nötr arası gerilimleri ile kaynaktan çekilen faz akımlarına ait dalga şekilleri sırasıyla Şekil 3-6 ve Şekil 3-7'de verilmiştir.



Şekil 3-6: Şekil 3-5’de verilen sistemin kompanzasyonsuz durumu için ortak bağlantı noktasında ölçülen faz-nötr gerilimlerinin dalga şekilleri.

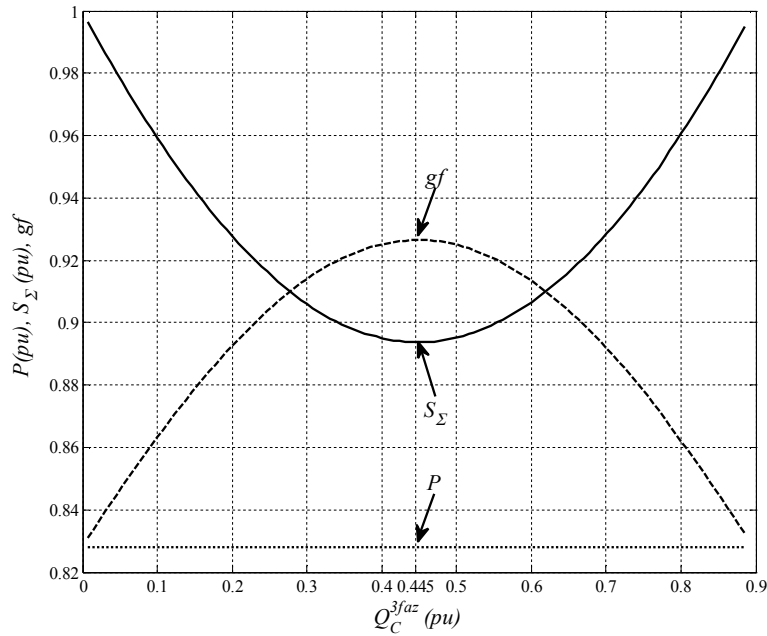
Şekil 3-6’dan faz-nötr gerilimlerinin dengeli fakat bozulmuş dalga şekillerine sahip olduğu görülmektedir. Bu harmonik bozulmanın miktarı  $THD_V(\%)$  olarak 5 değerinde ölçülmüştür.



Şekil 3-7: Şekil 3-5’de verilen sistemde kompanzasyonsuz durum için kaynaktan çekilen faz akımlarının dalga şekilleri.

Şekil 3-7'den sistemin kompanzasyonsuz durumu için kaynaktan çekilen faz akımlarının dengesiz ve bozulmaya uğramış dalga şekillerine sahip olduğu görülmektedir. Dengesizlik miktarları temel harmonik akımı için  $I_1^-/I_1^+$  (%) olarak 26.35 değerinde ölçülmüştür. Diğer taraftan bozulma miktarları a, b ve c fazları için sırasıyla  $THD_1$ (%) olarak 14, 22 ve 16 değerlerinde ölçülmüştür.

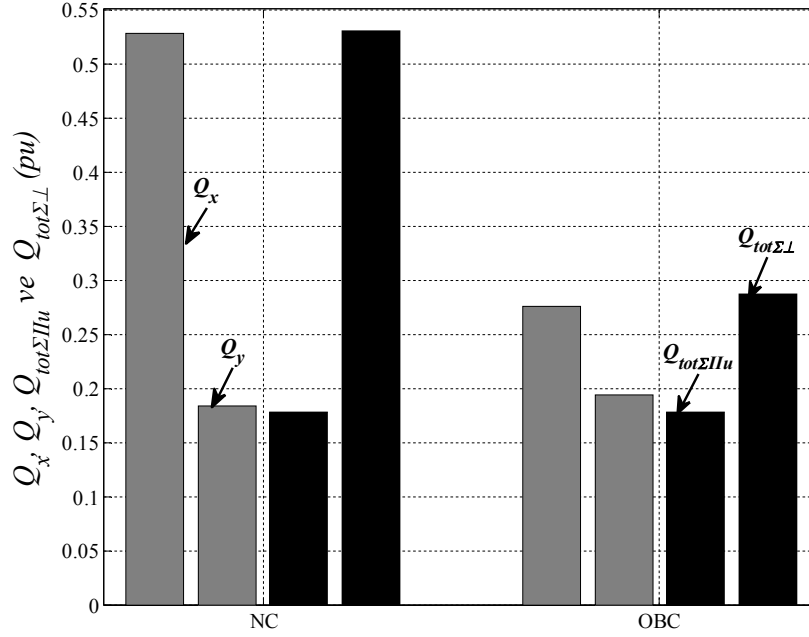
Ortak bağlantı noktasına bağlanmış yıldız bağlı dengeli kondansatör grubunun Buchholz tanımına göre hesaplanan görünür gücü ( $Q_C^{3faz}$ )'nün artışıyla güç faktörü ( $gf=P/S_\Sigma$ ), aktif ( $P$ ) ve görünür ( $S_\Sigma$ ) güçlerin değişimi Şekil 3-8'de verilmiştir.



Şekil 3-8: Şekil 3-5'de verilen sistemde; dengeli kondansatör grubu gücünün artışıyla ortak bağlantı noktasında ölçülen güç faktörü, aktif ve görünür güçlerin değişimi.

Şekil 3-8'den kompanzasyonsuz durumda ölçülen güç faktörü ( $gf$ ), aktif ( $P$ ) ve görünür ( $S_\Sigma$ ) güçlerin sırasıyla 0.82, 0.82 pu ve 1 pu olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, güç faktörünün 0.92'ye ulaştığı durum olan en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon durumunda görünür güç 0.89 pu olup kompanzator gücü ( $Q_C^{3faz}$ ) 0.445 pu değerindedir.

Diğer taraftan kompanzasyonsuz ve en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon yapılmış sistem durumlarında DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich'e ait aktif olmayan güç bileşenlerinin ölçülen değerleri Şekil 3-9'da verilmiştir.



Şekil 3-9: Şekil 3-5'de verilen sistemde; kompanzasyonsuz (NC) ve en iyi dengeli kapasitif kompanzasyonlu (OBC) durumlar için DIN std. 40110 ve Ari-Stankovich'e ait güç ifadelerinde yer alan aktif olmayan güçlerin değerleri.

Şekil 3-9'da verilen sonuçlardan kompanzasyonsuz durum (NC) için DIN std. güç ifadesinin  $Q_{tot\Sigma IIu}$  ve  $Q_{tot\Sigma L}$  güç bileşenlerinin sırasıyla 0.177 pu ve 0.531 pu, Ari-Stankovich'in tanımladığı  $Q_x$  ve  $Q_y$  güçlerinin ise sırasıyla 0.529 pu ve 0.184 pu değerlerinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon durumunda  $Q_{tot\Sigma IIu}$  ve  $Q_{tot\Sigma L}$  güçleri 0.177 pu ve 0.288 pu;  $Q_x$  ve  $Q_y$  güçleri ise 0.275 pu ve 0.184 pu değerlerinde hesap edilmiştir. Böylece, her iki ifadede tanımlanan aktif olmayan güçlerin en iyi dengeli kapasitif kompanzatorün sistemden çektiği güç olan 0.445 pu değerini vermediği görülmüştür.

### 3.3 Sonuçlar ve Tartışma

Sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemlerde kompanzasyonla gerilimin değişmediği durumda en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemde var olan gerilim şartlarında çektiği gücü direkt veren güç ifadesinin sadece Kusters ve Moore'un güç ifadesi olduğu yapılan simülasyon temelli analizden görölmüştür.

Sinüzoidal olmayan ve dengesiz üç fazlı sistemlerde ise en iyi dengeli kapasitif kompanzatorün sistemden çektiği gücü veren bir güç ifadesinin bulunmadığı yapılan niteliksel ve simülasyon temelli analizlerle gösterilmiştir.

## 4 SİNÜZOİDAL OLMAYAN VE DENGESİZ GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN YENİ GÜÇ İFADESİ

Önceki bölümlerde yapılan niteliksel ve niceliksel analizlerden frekans domeyni güç teorisinde sinüzoidal olmayan ve dengesiz şartlarda dengeli kapasitif kompanzator gücünü veren herhangi bir güç ifadesinin bulunmadığı dolayısıyla literatürün bu yönden eksik olduğu görülmüştür.

Bu boşluğu doldurmak amacıyla tek ve üç faz-üç iletkenli sistemler için bir güç ifadesi bu kısımda sunulmuştur. Bu güç ifadesinde ayrıca günümüz güç sistemleri için önemli bir iş olan harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanılabilecek güç bileşenleri tanımlanmıştır.

### 4.1 Sinüzoidal Olmayan Tek Fazlı Sistemler

Sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler için yeni güç ifadesinin tanımlanmasında aktif akım bileşeni literatürde açıkça bilindiği için öncelikle akım; aktif ve aktif olmayan olmak üzere iki dik bileşene bölünmüştür. Bu ayırma işlemi gerilim referans işaret kabul edilerek Gram-Schmidt dikleştirme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Böylece akımın ve gerilimin sırasıyla (2.11) ve (2.12)'de verilen biçimde ifade edildiği durumda  $G_e = P/V^2$  olarak hesap edilen eşdeğer iletkenlik tanımı yapılarak akımın aktif bileşeni,

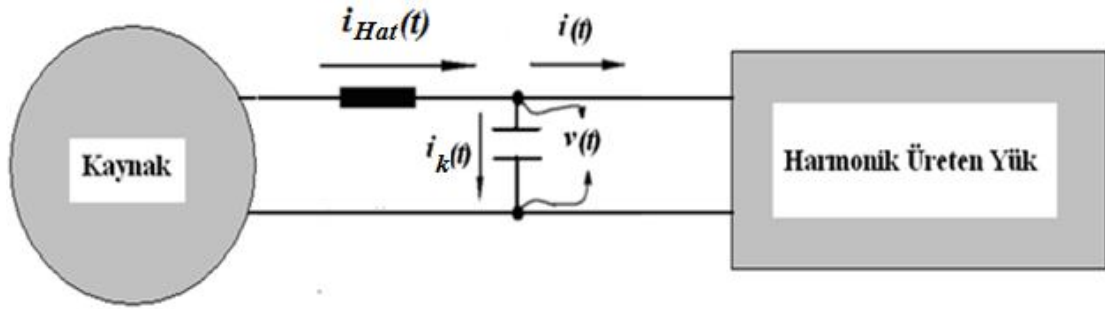
$$i_{ac}(t) = G_e v(t) \quad (4.1)$$

şeklinde yazılmıştır. Buna göre, akımın aktif olmayan (deaktif) bileşeni ise;

$$i_{de}(t) = i(t) - i_{ac}(t) \quad (4.2)$$

biçiminde olur.

Daha sonraki adımda aktif olmayan akım ( $i_{de}(t)$ ); reaktif ve kaydırılmış akım bileşenleri olmak üzere iki dik bileşene ayrılır. Bu iki bileşenden reaktif akım Şekil 4-1'de verilen örnek sistemde güç faktörünü azami değerine ulaştıran kondansatörün kompanze ettiği akımdır.



Şekil 4-1: Yeni güç ifadesinde tanımlanan reaktif akım bileşeninin izahı için kullanılan sistem.

Buna göre kondansatör sisteme bağlandıktan sonra hat akımının etkin değeri; gerilimin ihmal edilebilecek kadar küçük değerde değiştiği varsayımıyla (4.3)'den bulunur.

$$I_{Hat} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{Hat}^2(t) dt}, \quad i_{Hat}(t) = i(t) + i_k(t) \quad (4.3)$$

Gerilim değişiminin ihmal edilebilme durumu; sistemde rezonans olmadığı ve kaynak empedansının yük empedansına göre çok küçük olduğu, güç sistemlerinde genellikle geçerli olan şartlar düşünülerek varsayılmıştır. Bu şartlarda, kondansatör akımının ani ifadesi;

$$i_k(t) = \sum_{n \in N^+} \frac{\sqrt{2}nV_n}{Xc_1} \sin\left(\omega_n t + \theta_n + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.4)$$

biçiminde yazılabilir. Denklem (4.4)'de verilen ifade (4.3)'de yerine konulup,

$$\frac{dI_{Hat}}{dXc_1} = 0 \quad (4.5)$$

işlemi yapılırsa en iyi kompanzasyon kondansatörünün temel harmonik kapasitesinin değeri;

$$Xc_1 = \frac{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2}{\sum_{n \in N^+} n V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n)} = \frac{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2}{\sum_{n \in N^+} n Q_n} \quad (4.6)$$

olarak bulunur. Hesap edilen en iyi kompanzasyon kondansatörünün temel harmonik kapasitansı (4.4)'de yerine konulduktan sonra elde edilen ifadenin ters işaretlisi yük akımının basit bir kondansatör ile kompanze edilebilir kısmının ani ifadesini verir:

$$i_r(t) = -i_k(t) = \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} \frac{nV_n}{\left( \sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2 / \sum_{n \in N^+} nQ_n \right)} \sin\left( \omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.7)$$

Yükün n. harmonik eşdeğer suseptans değeri ( $B_{en}$ ),

$$B_{en} = nB_{el} = \frac{n}{Xc_l} = \frac{n \sum_{n \in N^+} nQ_n}{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2} \quad (4.8)$$

olarak ifade edilerek (4.7)'de verilen ani reaktif akım daha basit biçimde yazılabilir:

$$i_r(t) = \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} B_{en} V_n \sin\left( \omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.9)$$

Bu işlemlerden sonra yük akımının ifadesi (4.10)'da verilen hale gelir:

$$i(t) = G_e v(t) + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} B_{en} V_n \sin\left( \omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2} \right) + i_s(t) \quad (4.10)$$

Diğer taraftan yükün n.harmonik admittansı,

$$Y_n = G_n - jB_n = \frac{I_n \cos(\theta_n - \delta_n)}{V_n} - j \frac{I_n \sin(\theta_n - \delta_n)}{V_n} \quad (4.11)$$

ve d.a. iletkenlik değeri,

$$G_0 = I_0 / V_0 \quad (4.12)$$

kullanılarak yük akımı,

$$i(t) = G_0 V_0 + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} G_n V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2} B_n V_n \sin\left( \omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.13)$$

biçiminde yazılır. Böylece (4.13) ve (4.10) taraf tarafa çıkarılırsa kaydırılmış akım bileşeni ( $i_s(t)$ )'nin (4.14)'de verilen ifadeye sahip olduğu görülür:



$$i_s(t) = (G_0 - G_e)V_0 + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2}(G_n - G_e)V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2}(B_n - B_{en})V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.14)$$

Bulunan kaydırılmış akım bileşeninin iletkenlikle ilgili kısmı kaydırılmış iletkenlik akımı olup (4.15)'de verilen ani ifadeye sahiptir:

$$i_{sc}(t) = (G_0 - G_e)V_0 + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2}(G_n - G_e)V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) \quad (4.15)$$

Kaydırılmış akım içindeki suseptansla ilgili parça ise kaydırılmış suseptans akımı olup (4.16)'da verilen ani ifadeye sahiptir:

$$i_{ss}(t) = \sum_{n \in N^+} \sqrt{2}(B_n - B_{en})V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_n - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4.16)$$

Böylece yük akımı zaman domeyninde dört bileşene ayrılmış olur:

$$i(t) = i_{ac}(t) + i_r(t) + i_{sc}(t) + i_{ss}(t) \quad (4.17)$$

Bu akım bileşenlerinden iletkenlik temelli olanlar gerilimle aynı fazda ve suseptans temelli olanlar gerilime dik fazda olmaları sebebiyle; bu iki akım grubuna dahil bileşenler arasında diklik durumu mevcuttur. Diğer bileşenler arasındaki diklik durumları ise aşağıda gösterilmiştir:

Aralarındaki diklik durumu gösterilen ilk akım çifti; aktif ve kaydırılmış iletkenlik akım bileşenleridir. Diklik durumunun gösterimi için bu akım bileşenlerinin bir periyot boyunca zaman domeyninde çarpımlarının integrali alınır;

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_{ac}(t) i_{sc}(t) dt = TG_e \left[ \sum_{n \in N} (G_n - G_e) V_n^2 \right] \quad (4.18)$$

ve (4.18) düzenlenerek (4.19) elde edilir;

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_{ac}(t) i_{sc}(t) dt = TG_e \left[ \sum_{n \in N} G_n V_n^2 - G_e \sum_{n \in N} V_n^2 \right] \quad (4.19)$$

Son olarak;  $P = \sum_{n \in N} G_n V_n^2$  ve  $P = G_e \sum_{n \in N} V_n^2$  (4.19)'da yerlerine konularak; aktif ve kaydırılmış iletkenlik akımları arasındaki diklik durumu gösterilmiş olur:

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_{ac}(t) i_{sc}(t) dt = TG_e [P - P] = 0 \quad (4.20)$$

Aralarındaki diklik durumu gösterilen ikinci akım çifti reaktif ve kaydırılmış suseptans akım bileşenleridir. Diklik durumunun gösterimi için bu akım bileşenlerinin bir periyot boyunca zaman domeyninde çarpımlarının integrali alınır;

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_r(t) i_{ss}(t) dt = T \sum_{n \in N^+} (B_n - B_{en}) B_{en} V_n^2 \quad (4.21)$$

ve  $B_{en}$  ile  $B_n$ 'nin sırasıyla (4.8) ve (4.11)'de verilen ifadeleri (4.21)'de yerine konulup düzenlenerek (4.22) bulunur:

$$\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_r(t) i_{ss}(t) dt = T \left( \frac{\sum_{n \in N^+} n Q_n}{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2} \right) \sum_{n \in N^+} \left[ \left( \frac{Q_n}{V_n^2} - \frac{n \sum_{n \in N^+} n Q_n}{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2} \right) n V_n^2 \right] \quad (4.22)$$

Son olarak, (4.22) düzenlenip reaktif ve kaydırılmış suseptans akımları arasındaki diklik durumu gösterilmiş olur:

$$\begin{aligned} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_r(t) i_{ss}(t) dt &= T \left( \frac{\sum_{n \in N^+} n Q_n}{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2} \right) \left[ \sum_{n \in N^+} n Q_n - \frac{\sum_{n \in N^+} n Q_n}{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2} \sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2 \right] \\ &= T \left( \frac{\sum_{n \in N^+} n Q_n}{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2} \right) \left[ \sum_{n \in N^+} n Q_n - \sum_{n \in N^+} n Q_n \right] = 0 \end{aligned} \quad (4.23)$$

Tanımlanan bütün akım bileşenleri arasında diklik durumu mevcut olduğundan dolayı; bu akım bileşenlerinin etkin değerlerinin vektör toplamı yük akımının etkin değerine eşittir:

$$I^2 = I_{ac}^2 + I_r^2 + I_{sc}^2 + I_{ss}^2 \quad (4.24)$$

Bu akım bileşenlerinin etkin değerleri; sırasıyla aktif akım için,

$$I_{ac} = G_e \sqrt{\sum_{n \in N} V_n^2} \quad (4.25)$$

reaktif akım için,

$$I_r = \sqrt{\sum_{n \in N^+} B_{en}^2 V_n^2} \quad (4.26)$$

kaydırılmış iletkenlik akımı için,

$$I_{sc} = \sqrt{\sum_{n \in N} (G_n - G_e)^2 V_n^2} \quad (4.27)$$

ve kaydırılmış suseptans akımı için,

$$I_{ss} = \sqrt{\sum_{n \in N^+} (B_n - B_{en})^2 V_n^2} \quad (4.28)$$

ifadeleriyle hesaplanabilir.

Böylece (4.24)'de verilen akım ifadesinin her iki tarafı gerilimin etkin değerinin karesiyle çarpılarak sinüzoidal olmayan şartlarda tek fazlı sistemler için güç ifadesi,

$$\begin{aligned} S^2 &= (VI_{ac})^2 + (VI_r)^2 + (VI_{sc})^2 + (VI_{ss})^2 \\ &= P^2 + Q_r^2 + D_{sc}^2 + D_{ss}^2 \end{aligned} \quad (4.29)$$

biçiminde önerilir. Bu güç ifadesinde yer alan güç bileşenleri ise;

aktif ( $P$ ),

$$P = VI_{ac} \quad (4.30)$$

reaktif ( $Q_r$ ),

$$Q_r = VI_r = V \frac{\sum_{n \in N^+} nQ_n}{\sqrt{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2}} \quad (4.31)$$

kaydırılmış iletkenlik ( $D_{sc}$ ),

$$D_{sc} = VI_{sc} \quad (4.32)$$

ve kaydırılmış süseptans ( $D_{ss}$ ),

$$D_{ss} = VI_{ss} \quad (4.33)$$

güçleridir.

## 4.2 Sinüzoidal Olmayan ve Dengesiz Üç Faz-Üç İletkenli Sistemler

Üç fazlı sistemlerin özel bir durumu olan; sinüzoidal olmayan-dengeli gerilimler ve sinüzoidal olmayan-dengesiz akımların bulunduğu sistemlerde, en iyi dengeli kapasitif kompanzator gücünün belirlenmesinde araç teşkil edebilecek güç ifadesinin tanımlanması için öncelikle üç faza ait gerilimler ve akımlar,

$$v_{\Sigma}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2}V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2}V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2}V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix}, \quad i_{\Sigma}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2}I_{an} \sin(\omega_n t + \delta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2}I_{bn} \sin(\omega_n t + \delta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2}I_{cn} \sin(\omega_n t + \delta_{cn}) \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

biçiminde ifade edilmiştir. Bu ifadedeki  $n$  harmonik numarası, gerilim tarafı dengeli olduğu için d.a. bileşeni ve sıfır sıra harmonikleri içermez.

Buna göre, bileşenlere ayırma işleminde ilk olarak yük akımı dengeli ve dengesiz akım bileşenlerine ayrılmıştır:

$$i_{\Sigma}(t) = i_{\Sigma B}(t) + i_{\Sigma u}(t) \quad (4.35)$$

Bu ifadede bulunan dengeli yük akımını ( $i_{\Sigma B}(t)$ ) bulmak için; gerilimle aynı fazda  $n$ . harmonik hat akımları sebebiyle çekilen güçler ( $U_{mn}$ ),

$$U_{mn} = V_n I_{mn} \cos(\theta_{mn} - \delta_{mn}) \quad (m = a, b, c) \quad (4.36)$$

ve gerilime dik fazda  $n$ . harmonik hat akımları sebebiyle çekilen güçler ( $Q_{mn}$ );

$$Q_{mn} = V_n I_{mn} \sin(\theta_{mn} - \delta_{mn}) \quad (m = a, b, c) \quad (4.37)$$

ifadelerinden hesaplanır. Bu güçler her bir hatta eşit olarak paylaştırılırsa; gerilim tarafı dengeli olması sebebiyle her bir hattan çekilen  $n$ . harmonik dengeli aktif gücü,

$$P_{Bn} = \frac{1}{3}(U_{an} + U_{bn} + U_{cn}) \quad (4.38)$$

ve  $n$ . harmonik dengeli reaktif gücü,

$$Q_{Bn} = \frac{1}{3}(Q_{an} + Q_{bn} + Q_{cn}) \quad (4.39)$$

bulunur. Denklem (4.38) ve (4.39)'da verilen, n. harmonik dengeli aktif ve n. harmonik dengeli reaktif güçleri; yükün n. harmonik empedansının dengeli kısmından dolayı her bir hattan çekilen güçlerdir. Bu güçler kullanılarak, n. harmonik dengeli iletkenlik;

$$G_{Bn} = \frac{P_{Bn}}{V_n^2} \quad (4.40)$$

ve n.harmonik dengeli suseptansı;

$$B_{Bn} = \frac{Q_{Bn}}{V_n^2} \quad (4.41)$$

olarak hesaplanır. Böylece her bir hattan çekilen n. harmonik dengeli iletkenlik,

$$i_{\Sigma Bx}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} G_{Bn} V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{Bn} V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{Bn} V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

ve n. harmonik dengeli suseptans,

$$i_{\Sigma By}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} B_{Bn} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{Bn} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{Bn} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

akım bileşenleri bulunur. Denklem (4.42) ve (4.43)'deki akım ifadelerinin toplamı yük akımının dengeli bileşenini verir:

$$\begin{aligned}
i_{\Sigma B}(t) &= i_{\Sigma Bx}(t) + i_{\Sigma By}(t) \\
&= \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} G_{Bn} V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{Bn} V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{Bn} V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} B_{Bn} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{Bn} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{Bn} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (4.44)
\end{aligned}$$

Diğer taraftan (4.35)'de yer alan dengesizlik akım bileşenine ait ifadenin elde edilmesinde öncelikle her bir hat için n. harmonik iletkenlikleri,

$$G_{mn} = \frac{U_{mn}}{V_n^2} \quad (4.45)$$

ve n. harmonik suseptansları,

$$B_{mn} = \frac{Q_{mn}}{V_n^2} \quad (4.46)$$

hesap edilir. Böylece, her hat için n. harmonik dengesiz iletkenlikleri,

$$G_{mn}^u = G_{mn} - G_{Bn} \quad (4.47)$$

ve n. harmonik dengesiz suseptansları,

$$B_{mn}^u = B_{mn} - B_{Bn} \quad (4.48)$$

hesap edilerek gerilimle aynı fazda dengesizlik akımı;

$$i_{\Sigma up}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} G_{an}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{bn}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{cn}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

ve gerilime dik fazda dengesizlik akımı;

$$i_{\Sigma uq}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} B_{an}^u V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{bn}^u V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{cn}^u V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

tanımları yapılır. Bu tanımlanan akım bileşenlerinin toplamı dengesizlik akımını verir:

$$\begin{aligned} i_{\Sigma u}(t) &= i_{\Sigma up}(t) + i_{\Sigma uq}(t) \\ &= \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} G_{an}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{bn}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{cn}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} B_{an}^u V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{bn}^u V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{cn}^u V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.51)$$

Buraya kadar yapılanlar sonucu yük akımı; dengeli, gerilimle aynı fazda dengesizlik ve gerilime dik fazda dengesizlik akımlarına ayrılmıştır. Daha sonraki adımda dengeli akım, her bir fazın ayrı bir tek fazlı sistem olarak kabul edilmesiyle tek fazlı güç ifadesinde yer alan; aktif, reaktif, kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans akımlarına ayrılır.

Bu akım bileşenlerinden aktif akım; her hat için eşdeğer iletkenliğin,

$$G_e = \frac{\sum_n P_{Bn}}{\sum_n V_n^2} \quad (4.52)$$

olarak ifade edilmesiyle; (4.53)'de verilen biçimde tanımlanmıştır:

$$i_{\Sigma ac}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} G_e V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_e V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_e V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Reaktif akım ise yine her hat için n. hamonik eşdeğer suseptansın,

$$B_{en} = nB_{e1} = \frac{n}{Xc_1} = \frac{n \sum_n nQ_{Bn}}{\sum_n n^2V_n^2}, \quad Xc_1 = \frac{\sum_n n^2V_n^2}{\sum_n nQ_{Bn}} \quad (4.54)$$

biçiminde hesap edilmesiyle;

$$i_{\Sigma r}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2}B_{en}V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2}B_{en}V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2}B_{en}V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

olarak ifade edilebilir. Bu bileşenlere ayrılma işlemlerinden sonra dengeli yük akımının ifadesi (4.56)'da verilen hale gelir:

$$i_{\Sigma B}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2}G_eV_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2}G_eV_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2}G_eV_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2}B_{en}V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2}B_{en}V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2}B_{en}V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} + i_{\Sigma s}(t) \quad (4.56)$$

Böylece tek fazlı sistemlere ait güç ifadesinin tanımlanmasında olduğu gibi (4.44) ve (4.56) taraf tarafa çıkartılarak kaydırılmış akım bileşeni bulunur:

$$i_{\Sigma s}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2}(G_{Bn} - G_e)V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2}(G_{Bn} - G_e)V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2}(G_{Bn} - G_e)V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2}(B_{Bn} - B_{en})V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2}(B_{Bn} - B_{en})V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2}(B_{Bn} - B_{en})V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

Bu ifadenin iletkenlikle alakalı parçası kaydırılmış iletkenlik akımı,



$$i_{\Sigma sc}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} (G_{Bn} - G_e) V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2} (G_{Bn} - G_e) V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2} (G_{Bn} - G_e) V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix} \quad (4.58)$$

ve suseptans ile alakalı parçası kaydırılmış suseptans akımı,

$$i_{\Sigma ss}(t) = \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} (B_{Bn} - B_{en}) V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} (B_{Bn} - B_{en}) V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} (B_{Bn} - B_{en}) V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (4.59)$$

olarak tanımlanmıştır. Sonuç olarak; yük akımı zaman domeyninde (4.60)'da verilen son halini alır:

$$i_{\Sigma}(t) = i_{\Sigma ac}(t) + i_{\Sigma r}(t) + i_{\Sigma sc}(t) + i_{\Sigma ss}(t) + i_{\Sigma up}(t) + i_{\Sigma uq}(t) \quad (4.60)$$

Bu akım bileşenlerinden iletkenlik temelli olanlar gerilimle aynı fazda ve suseptans temelli olanlar gerilime dik fazda olmaları sebebiyle; bu iki akım grubuna dahil bileşenler arasında diklik durumu mevcuttur. Dengeli akım bileşenleri arasında diklik durumu tek faz gücü ifadesinde olduğu gibidir. Diğer bileşenler arasındaki diklik durumları ise aşağıda gösterilmiştir:

Aralarındaki diklik durumu gösterilen ilk akım çifti aktif ve aynı faz dengesizlik akım bileşenleridir. Diklik durumunun gösterimi için ilk olarak, bu akım bileşenlerinin bir periyot boyunca zaman domeyninde çarpımlarının integrali alınır;

$$\begin{aligned} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_{\Sigma ac}^{Tr}(t) i_{\Sigma up}(t) dt &= \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} G_e V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_e V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_e V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix}^{Tr} \cdot \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} G_{an}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{bn}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{cn}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{bmatrix} dt \\ &= T \sum_n G_e G_{an}^u V_n^2 + T \sum_n G_e G_{bn}^u V_n^2 + T \sum_n G_e G_{cn}^u V_n^2 \end{aligned} \quad (4.61)$$

İkinci adımda  $G_{mn}^u$ 'in (4.47)'de verilen ifadesi (4.61)'de yerine konulup elde edilen ifade düzenlenirse (4.62) bulunur:

$$\begin{aligned} &= T \sum_n G_e (G_{an} - G_{Bn}) V_n^2 + T \sum_n G_e (G_{bn} - G_{Bn}) V_n^2 + T \sum_n G_e (G_{cn} - G_{Bn}) V_n^2 \\ &= TG_e \left[ \sum_n (G_{an} + G_{bn} + G_{cn}) V_n^2 - 3 \sum_n G_{Bn} V_n^2 \right] \end{aligned} \quad (4.62)$$

Daha sonra  $G_{Bn}$  ve  $G_{mn}$ 'in sırasıyla (4.40) ve (4.45)'de verilen ifadeleri (4.62)'de yerlerine konularak,

$$= TG_e \left[ \sum_n (U_{an} + U_{bn} + U_{cn}) - 3 \sum_n P_{Bn} \right] \quad (4.63)$$

ifadesi bulunur.

Son olarak,  $P_{Bn}$ 'in (4.38)'de verilen ifadesi (4.63)'de yerine konulur ve böylece aktif ile aynı faz dengesizlik akım bileşenleri arasındaki diklik durumu gösterilir:

$$= TG_e \left[ \sum_n (U_{an} + U_{bn} + U_{cn}) - \sum_n (U_{an} + U_{bn} + U_{cn}) \right] = 0 \quad (4.64)$$

Aralarındaki diklik durumu gösterilen ikinci akım çifti kaydırılmış iletkenlik ve gerilimle aynı fazda dengesizlik akım bileşenleridir. Diklik durumunun gösterimi için ilk olarak, bu akım bileşenlerinin bir periyot boyunca zaman domeyninde çarpımlarının integrali alınır;

$$\begin{aligned} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_{\Sigma sc}^{Tr}(t) i_{\Sigma up}(t) dt &= \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \left[ \begin{array}{c} \sum_n \sqrt{2} (G_{Bn} - G_e) V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2} (G_{Bn} - G_e) V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2} (G_{Bn} - G_e) V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{array} \right]^{Tr} \cdot \left[ \begin{array}{c} \sum_n \sqrt{2} G_{an}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{an}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{bn}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{bn}) \\ \sum_n \sqrt{2} G_{cn}^u V_n \sin(\omega_n t + \theta_{cn}) \end{array} \right] dt \\ &= T \sum_n (G_{Bn} - G_e) G_{an}^u V_n^2 + T \sum_n (G_{Bn} - G_e) G_{bn}^u V_n^2 + T \sum_n (G_{Bn} - G_e) G_{cn}^u V_n^2 \end{aligned} \quad (4.65)$$

İkinci olarak  $G_{mn}^u$ 'in (4.47)'de verilen ifadesi (4.65)'de yerine konulup elde edilen ifade düzenlenerek (4.66) bulunur:

$$\begin{aligned}
&= T \sum_n (G_{Bn} - G_e)(G_{an} - G_{Bn})V_n^2 + T \sum_n (G_{Bn} - G_e)(G_{bn} - G_{Bn})V_n^2 + T \sum_n (G_{Bn} - G_e)(G_{cn} - G_{Bn})V_n^2 \\
&= T \sum_n [(G_{Bn} - G_e)(G_{an} + G_{bn} + G_{cn} - 3G_{Bn})V_n^2] \tag{4.66}
\end{aligned}$$

Daha sonra  $G_{Bn}$  ve  $G_{mn}$ 'in sırasıyla (4.40) ve (4.45)'de verilen ifadeleri (4.66)'da yerlerine konularak;

$$= T \sum_n \left[ \left( \frac{P_{Bn}}{V_n^2} - G_e \right) (U_{an} + U_{bn} + U_{cn} - 3P_{Bn}) \right] \tag{4.67}$$

ifadesi bulunur.

Son olarak,  $P_{Bn}$ 'in (4.38)'de verilen ifadesi (4.67)'de yerine konulur ve böylece kaydırılmış iletkenlik ile gerilimle aynı fazda dengesizlik akım bileşenleri arasındaki diklik durumu gösterilir:

$$= T \sum_n \left[ \left( \frac{\frac{1}{3}(U_{an} + U_{bn} + U_{cn})}{V_n^2} - G_e \right) (U_{an} + U_{bn} + U_{cn} - U_{an} - U_{bn} - U_{cn}) \right] = 0 \tag{4.68}$$

Aralarındaki diklik durumu gösterilen diğer bir akım çifti ise reaktif ve gerilime dik fazda dengesizlik akım bileşenleridir. Diklik durumunun gösterimi için ilk olarak, bu akım bileşenlerinin bir periyot boyunca zaman domeyninde çarpımlarının integrali alınır;

$$\begin{aligned}
\int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_{\Sigma r}^{Tr}(t) i_{\Sigma uq}(t) dt &= \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} B_{en} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{en} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{en} V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix}^{Tr} \cdot \begin{bmatrix} \sum_n \sqrt{2} B_{an}^u V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{bn}^u V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2}\right) \\ \sum_n \sqrt{2} B_{cn}^u V_n \sin\left(\omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} dt \\
&= T \sum_n B_{en} B_{an}^u V_n^2 + T \sum_n B_{en} B_{bn}^u V_n^2 + T \sum_n B_{en} B_{cn}^u V_n^2 \tag{4.69}
\end{aligned}$$

İkinci olarak  $B_{mn}^u$ 'in (4.48)'de verilen ifadesi (4.69)'da yerine konulup elde edilen ifade düzenlenerek (4.70) bulunur:

$$\begin{aligned}
&= T \sum_n B_{en} (B_{an} - B_{Bn})V_n^2 + T \sum_n B_{en} (B_{bn} - B_{Bn})V_n^2 + T \sum_n B_{en} (B_{cn} - B_{Bn})V_n^2 \\
&= T \sum_n [B_{en} (B_{an} + B_{bn} + B_{cn} - 3B_{Bn})V_n^2] \tag{4.70}
\end{aligned}$$

Daha sonra  $B_{Bn}$  ve  $B_{mn}$  'in sırasıyla (4.41) ve (4.46)'da verilen ifadeleri (4.70)'de yerlerine konularak;

$$= T \sum_n \left[ B_{en} (Q_{an} + Q_{bn} + Q_{cn} - 3Q_{Bn}) \right] \quad (4.71)$$

ifadesi bulunur.

Son olarak,  $Q_{Bn}$ 'in (4.39)'da verilen ifadesi (4.71)'de yerine konulur ve böylece reaktif ile gerilime dik fazda dengesizlik akım bileşenleri arasındaki diklik durumu gösterilir:

$$= T \sum_n \left[ B_{en} (Q_{an} + Q_{bn} + Q_{cn} - Q_{an} - Q_{bn} - Q_{cn}) \right] = 0 \quad (4.72)$$

Aralarındaki diklik durumu gösterilen son akım çifti kaydırılmış suseptans ve gerilime dik fazda dengesizlik akım bileşenleridir. Diklik durumunun gösterimi için ilk olarak, bu akım bileşenlerinin bir periyot boyunca zaman domeyninde çarpımlarının integrali alınır;

$$\begin{aligned} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} i_{\Sigma ss}^{Tr}(t) i_{\Sigma uq}(t) dt &= \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \left[ \sum_n \sqrt{2} (B_{Bn} - B_{en}) V_n \sin \left( \omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2} \right) \right]^{Tr} \left[ \sum_n \sqrt{2} B_{an}^u V_n \sin \left( \omega_n t + \theta_{an} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \\ &\quad \cdot \left[ \sum_n \sqrt{2} B_{bn}^u V_n \sin \left( \omega_n t + \theta_{bn} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \left[ \sum_n \sqrt{2} B_{cn}^u V_n \sin \left( \omega_n t + \theta_{cn} - \frac{\pi}{2} \right) \right] dt \quad (4.73) \\ &= T \sum_n (B_{Bn} - B_{en}) B_{an}^u V_n^2 + T \sum_n (B_{Bn} - B_{en}) B_{bn}^u V_n^2 + T \sum_n (B_{Bn} - B_{en}) B_{cn}^u V_n^2 \end{aligned}$$

İkinci olarak  $B_{mn}^u$  'in (4.48)'de verilen ifadesi (4.73)'de yerine konulup elde edilen ifade düzenlenerek (4.74) bulunur:

$$\begin{aligned} &= T \sum_n (B_{Bn} - B_{en}) (B_{an} - B_{Bn}) V_n^2 + T \sum_n (B_{Bn} - B_{en}) (B_{bn} - B_{Bn}) V_n^2 + T \sum_n (B_{Bn} - B_{en}) (B_{cn} - B_{Bn}) V_n^2 \\ &= T \sum_n \left[ (B_{Bn} - B_{en}) (B_{an} + B_{bn} + B_{cn} - 3B_{Bn}) V_n^2 \right] \quad (4.74) \end{aligned}$$

Daha sonra  $B_{Bn}$  ve  $B_{mn}$  'in sırasıyla (4.41) ve (4.46)'da verilen ifadeleri (4.74)'de yerlerine konularak;

$$= T \sum_n \left[ \left( \frac{Q_{Bn}}{V_n^2} - B_{en} \right) (Q_{an} + Q_{bn} + Q_{cn} - 3Q_{Bn}) \right] \quad (4.75)$$

ifadesi bulunur.

Son olarak,  $Q_{Bn}$ 'in (4.39)'da verilen ifadesi (4.75)'de yerine konulur ve böylece kaydırılmış suseptans ile gerilime dik fazda dengesizlik akım bileşenleri arasındaki diklik durumu gösterilir:

$$= T \sum_n \left[ \left( \frac{\frac{1}{3}(Q_{an} + Q_{bn} + Q_{cn})}{V_n^2} - B_{en} \right) (Q_{an} + Q_{bn} + Q_{cn} - Q_{an} - Q_{bn} - Q_{cn}) \right] = 0 \quad (4.76)$$

Akım bileşenlerinin hepsi arasında diklik şartının sağlanmasından dolayı, kolektif akım etkin değeri her bir akım bileşenin etkin değerlerinin vektör toplamıdır:

$$I_{\Sigma}^2 = I_{ac}^2 + I_r^2 + I_{sc}^2 + I_{ss}^2 + I_{up}^2 + I_{uq}^2 \quad (4.77)$$

Bu akım bileşenlerinin etkin değerleri sırasıyla, aktif akım için;

$$I_{ac} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma ac}^{Tr}(t) i_{\Sigma ac}(t) dt} = \sqrt{3G_e^2 \sum_n V_n^2} \quad (4.78)$$

reaktif akım için;

$$I_r = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma r}^{Tr}(t) i_{\Sigma r}(t) dt} = \sqrt{\sum_n 3B_{en}^2 V_n^2} \quad (4.79)$$

kaydırılmış iletkenlik akımı için;

$$I_{sc} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma sc}^{Tr}(t) i_{\Sigma sc}(t) dt} = \sqrt{3 \sum_n (G_{Bn} - G_e)^2 V_n^2} \quad (4.80)$$

kaydırılmış suseptans akımı için;

$$I_{ss} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma ss}^{Tr}(t) i_{\Sigma ss}(t) dt} = \sqrt{3 \sum_n (B_{Bn} - B_{en})^2 V_n^2} \quad (4.81)$$

gerilimle aynı fazda dengesizlik akımı için;

$$I_{up} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma up}^{Tr}(t) i_{\Sigma up}(t) dt} = \sqrt{\sum_n \left[ \sum_{m=a,b,c} (G_{mn}^u)^2 \right] V_n^2} \quad (4.82)$$

ve gerilime dik fazda dengesizlik akımı için;

$$I_{uq} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{\Sigma uq}^{Tr}(t) i_{\Sigma uq}(t) dt} = \sqrt{\sum_n \left[ \sum_{m=a,b,c} (B_{mn}^u)^2 \right] V_n^2} \quad (4.83)$$

ifadeleriyle hesaplanabilir.

(4.77)'de verilen akım ifadesinin her iki tarafı (2.99)'da verilen kolektif gerilim etkin değerinin karesiyle çarpılarak Buchholz'un görünür güç tanımı bileşenlerine ayrılmış olur:

$$\begin{aligned} S_{\Sigma}^2 &= V_{\Sigma}^2 I_{\Sigma}^2 = (V_{\Sigma} I_{ac})^2 + (V_{\Sigma} I_r)^2 + (V_{\Sigma} I_{sc})^2 + (V_{\Sigma} I_{ss})^2 + (V_{\Sigma} I_{up})^2 + (V_{\Sigma} I_{uq})^2 \\ &= P^2 + Q_r^2 + D_{sc}^2 + D_{ss}^2 + D_{up}^2 + D_{uq}^2 \end{aligned} \quad (4.84)$$

Elde edilen güç ifadesinin geçerli olduğu sistem şartlarında gerilimler dengeli olduğu için kolektif gerilim etkin değeri,

$$V_{\Sigma} = \sqrt{3}V, \quad V = \sqrt{\sum_n V_n^2} \quad (4.85)$$

ifadesinden basitçe hesap edilebilir.

Denklem (4.84)'de verilen güç ifadesinde bulunan güç bileşenleri sırasıyla; aktif ( $P$ ),

$$P = V_{\Sigma} I_{ac} \quad (4.86)$$

reaktif ( $Q_r$ ),

$$Q_r = V_{\Sigma} I_r = 3V \frac{\sum_n n Q_{Bn}}{\sqrt{\sum_n n^2 V_n^2}} \quad (4.87)$$

kayırlımsız iletkenlik ( $D_{sc}$ ),

$$D_{sc} = V_{\Sigma} I_{sc} \quad (4.88)$$

kaydırılmış suseptans ( $D_{ss}$ ),

$$D_{ss} = V_{\Sigma} I_{ss} \quad (4.89)$$

aynı faz dengesizlik ( $D_{up}$ ),

$$D_{up} = V_{\Sigma} I_{up} \quad (4.90)$$

ve dik faz dengesizlik ( $D_{uq}$ ),

$$D_{uq} = V_{\Sigma} I_{uq} \quad (4.91)$$

güçleridir. Diğer taraftan; sıfır sıra geriliminin bulunmadığı sistemlerde IEEE 1459-2000 ve Buchollz'un görünür güç tanımları aynı değeri verirler. Bu sebeple, elde edilen güç ifadesiyle; aynı zamanda IEEE std. 1459-2000 görünür güç tanımı bileşenlerine ayrılmıştır.

### 4.3 Harmonik Üreten Yüklerin Tespitinde Kullanımı

Buraya kadar sunulan yeni önerilen güç ifadesinin ana hatlarından bu güç ifadesinin iki bileşeninin harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanılabilme ihtimalinin olduğu görülmektedir. Bunlardan biri n. harmonik iletkenliği ile eşdeğer iletkenlik arasındaki farktan kaynaklanan kaydırılmış iletkenlik gücü değeri ise n. harmonik suseptansı ile n. harmonik eşdeğer suseptansı arasındaki farktan kaynaklanan kaydırılmış suseptans gücüdür. Fakat kaydırılmış suseptans gücü gerilimdeki harmonik bozulmaya oldukça hassastır. Dolayısıyla bu güç bileşeninin harmonik üreten yüklerin tespiti için kullanımı problemlili olabilir. Diğer taraftan kaydırılmış iletkenlik gücü için böyle bir durum yoktur ve bu güç bileşeninin değeri çeşitli kaynak-yük durumları için Tablo 4-1'de verilen biçimde sınıflandırılabilir.

**Tablo 4-1:  $D_{sc}$  gücünün çeşitli kaynak-yük durumlarında büyüklüğü.**

	Doğrusal Yük	Harmonik Üreten Yük
Sinüzoidal (veya ihmal edilebilir $THD_V$ 'ye sahip) Gerilim	$D_{sc}$ ihmal edilebilecek değere sahiptir.	$D_{sc}$ dikkate değer büyüklüğe sahiptir.
Sinüzoidal Olmayan Gerilim (Makul $THD_V$ değerinde)		

Tablo 4-1'den  $D_{sc}$  güç bileşeninin çeşitli kaynak-yük durumları için aşağıda verilen özelliklere sahip olduğu görülmektedir:

- Sinüzoidal (veya ihmal edilebilir  $THD_V$  değerine sahip) gerilim: Sinüzoidal (veya ihmal edilebilir  $THD_V$  değerine sahip) gerilimle beslenen doğrusal yük durumunda gerilim ve akım harmonikleri ihmal edilebilir değerde olduğundan görünür güç temel harmonik görünür gücüne çok yakın değerdedir. Böylece ihmal edilebilir  $THD_V$  değerine sahip gerilim ve doğrusal yük durumunda  $D_{sc}$  sifıra çok yakındır. Diğer taraftan aynı gerilim şartlarında harmonik üreten yük için akım harmoniklerinin gerilim harmoniklerine göre büyük olması sebebiyle temel olmayan harmoniklere ait iletkenlik değerleri dikkate değer miktarda büyüktür. Bu durumda n. harmonik iletkenliği ve eşdeğer iletkenlik arasındaki farktan dolayı akan n. harmonik kaydırılmış iletkenlik akımlarına ait etkin değerler büyük olur. Bu sebeple ihmal edilebilir  $THD_V$  değerine sahip gerilim ve harmonik üreten yük durumunda kaydırılmış iletkenlik gücü dikkate değer miktarda büyüktür.
- Sinüzoidal olmayan gerilim kaynağı (makul  $THD_V$  değerine sahip): IEEE std. 519-1992'de ortak bağlantı noktasının gerilimine ait  $THD_V$  değeri 69kV'dan küçük gerilimler için 5%, 69kV ile 161kV arası gerilimler için 2.5% ve 161kV'dan büyük gerilimler için 1.5% olarak belirlenmiştir. Diğer taraftan, IEC



61000-3-6'da ortak bağlantı noktasının gerilimine ait  $THD_V$  sınırlamaları; alçak gerilim seviyesi için 8%, orta gerilim seviyesi için 6.5% ve yüksek gerilim seviyesi için 3% olarak belirlenmiştir. Ayrıca, [88] çalışmasında tüketicilere ait elemanları korumak için  $THD_V$ 'nin 5%'i aşmaması gerektiği işaret edilmiştir. Sonuç olarak; ortak bağlantı noktasının makul  $THD_V$  değerlerine sınır olarak 5%'in belirlenmesi gerek bahsedilen standartlara riayet gerekse tüketiciye ait elemanların emniyet altında çalışması bakımından uygundur. Böylece makul  $THD_V$  değeri olarak kabul edilen 5%'i geçmeyen bozulmaya sahip gerilimlerin yükün çalışma karakteristiğine dolayısıyla akım karakteristiğine genellikle dikkate değer bir etkide bulunmayacağı düşünüldüğünde; ihmal edilebilir  $THD_V$ 'ye sahip gerilim ile beslenen yükler için izah edilen  $D_{sc}$  sınıflandırmasının makul  $THD_V$ 'ye sahip gerilim ile beslenen yükler için de geçerli olacağı sonucuna varılır.

#### 4.4 Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler ve sinüzoidal olmayan-dengeli gerilimler ile sinüzoidal olmayan-dengesiz akımların bulunduğu üç faz- üç iletkenli sistemlerde,

- En iyi dengeli kapasitif kompanzatör gücünü veren,
- Ve harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanılabilirlik,

yeni bir güç ifadesi sunulmuştur.

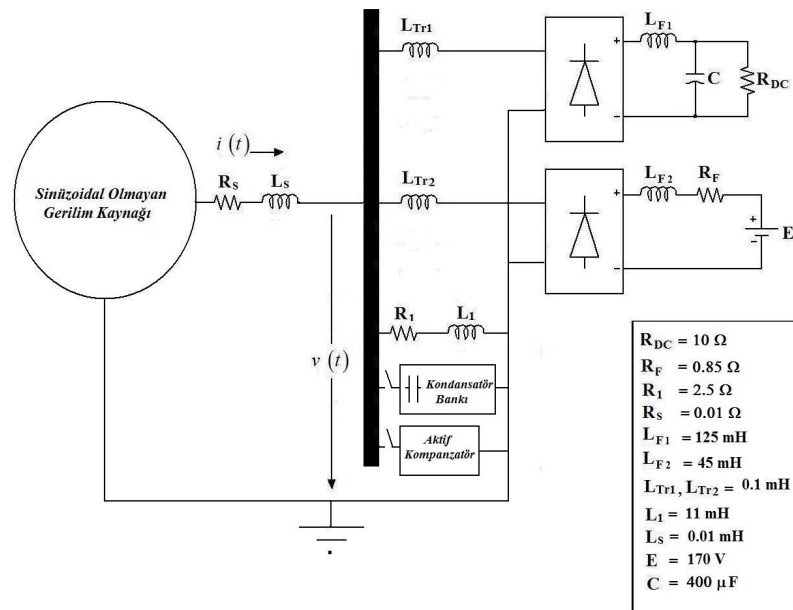
Yeni güç ifadesinin dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından getirdiği avantajlar ve harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanılabilirliği niteliksel analizlerle açıklanmıştır. İleriki bölümlerde yeni güç ifadesine ait bu özellikler örnek test sistemlerinde niceliksel analizlerle ele alınacaktır.

## 5 YENİ GÜÇ İFADESİNİN KOMPANZASYON BAKIMINDAN ANALİZİ VE REAKTİF GÜÇ KONTROL RÖLELERİNE UYGULAMASI

Bu bölümde, yeni güç ifadesinin tek ve üç fazlı sistemler için en iyi dengeli kapasitif kompanzator gücünün belirlenmesinde kullanılabilirliği simülasyon temelli analizlerle incelenecektir. Bununla birlikte en iyi dengeli kapasitif kompanzatorün belirlenmesi işinin maliyet verimli tam kompanzasyon bakımından önemi çeşitli kompanzasyon stratejileri arasında yapılan karşılaştırmalı analizlerle gösterilecektir.

### 5.1 Sinüzoidal Olmayan Tek Fazlı Sistemde Analiz

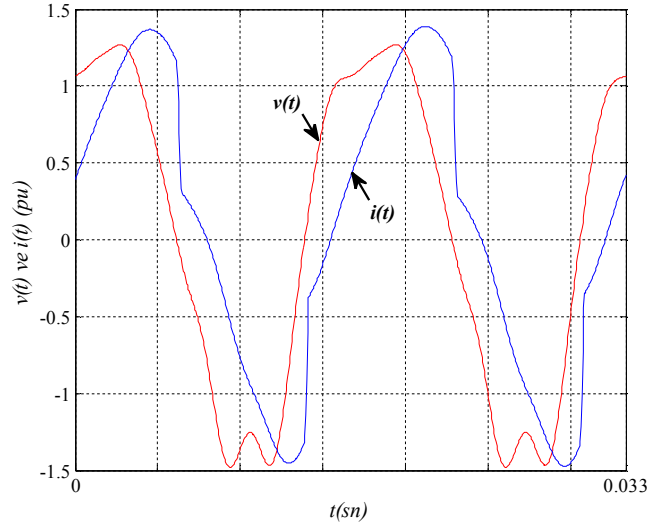
Yeni güç ifadesinin tek fazlı sistemler için en iyi kapasitif kompanzasyon bakımından analizi Şekil 5-1’de verilen sistemde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5-1: Yeni güç ifadesinin en iyi kapasitif kompanzasyon bakımından analiz edildiği tek fazlı sistem.

Şekil 5-1’de verilen sistemde doğrusal R-L empedans, köprü doğrultucu ve d.a. motor eşdeğeri besleyen doğrultucu bulunmakta olup kaynak gerilimi bozulmaya sahiptir.

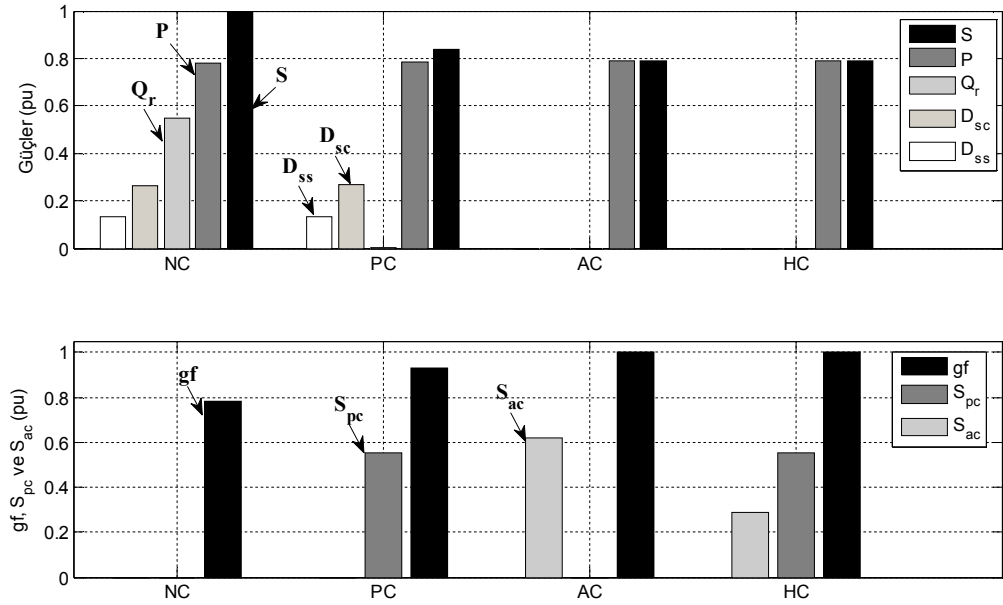
Sistemin kompanzasyonsuz durumu için ortak bağlantı noktasında ölçülen gerilim ve kaynaktan çekilen akıma ait dalga şekilleri Şekil 5-2’de verilmiştir.



Şekil 5-2: Şekil 5-1’de verilen sistemde kompanzasyonsuz durum için ortak bağlantı noktası gerilimi ve kaynaktan çekilen faz akımına ait dalga şekilleri.

Şekil 5-2’den ortak bağlantı noktası gerilimi ve kaynak akımının yüksek değerlerde harmonik bozulmaya sahip olduğu görülmekte olup bu gerilim ve akımlara ait  $THD(\%)$  değerleri sırasıyla 18 ve 25’dir.

Bu test sisteminde sırasıyla; basit kapasitif (PC), aktif (AC) ve hibrit ( $HC=PC+AC$ ) kompanzasyonlar gerçekleştirilmiştir. Basit kapasitif ve hibrit kompanzasyonda yeni güç ifadesi kullanılarak hesap edilen temel harmonik kapasite değerindeki basit kondansatör kullanılmıştır. Bu prensiplere göre yapılan simülasyonlardan sonra, ortak bağlantı noktasında ölçülen güç bileşenleri ( $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$ ,  $D_{ss}$ ), görünür güç ( $S$ ), güç faktörü ( $gf$ ) ile aktif ve pasif kompenzatlara ait görünür ( $S_{ac}$  ve  $S_{pc}$ ) güçler kompanzasyonsuz (NC) ve kompanzasyonlu durumlar (PC, AC ve HC) için Şekil 5-3’de verilmiştir.



Şekil 5-3: Şekil 5-1’de verilen sistemde; NC, PC, AC ve HC durumları için ortak bağlantı noktasında ölçülen güç bileşenleri, görünür güç, güç faktörü ile aktif ve pasif kompenzatlara ait görünür güçler.

Şekil 5-3’den kompanzasyonsuz (NC) durumda; güç faktörü, reaktif güç ve görünür gücün sırasıyla 0.78, 0.550 pu ve 1 pu olduğu görülmektedir. Reaktif gücü 0.550 pu olan kondansatör ile yapılan pasif kompanzasyon (PC) sayesinde reaktif güç tamamen kompanze edilmiş ve böylece güç faktörü 0.78’den 0.93’e yükseltilmiştir. Fakat, hala güç faktörü birden küçüktür. Görünür gücü 0.620 pu olan aktif kompenzator kullanılarak yapılan aktif kompanzasyondan (AC) sonra ise; görünür güç 0.788 pu değerine inmiş ve güç faktörü bir değerine yükselmiştir. Bununla birlikte, reaktif gücü 0.550 pu olan basit kondansatör ve görünür gücü 0.287 pu olan aktif kompenzator kullanılarak gerçekleştirilen hibrit kompanzasyon (HC) sayesinde güç faktörü bir değerine yükseltilmiştir. Böylece, sadece aktif kompanzasyonda kullanılan kompenzator gücünün 46%’sına sahip aktif kompenzator kullanılarak güç faktörü bir yapılmıştır.

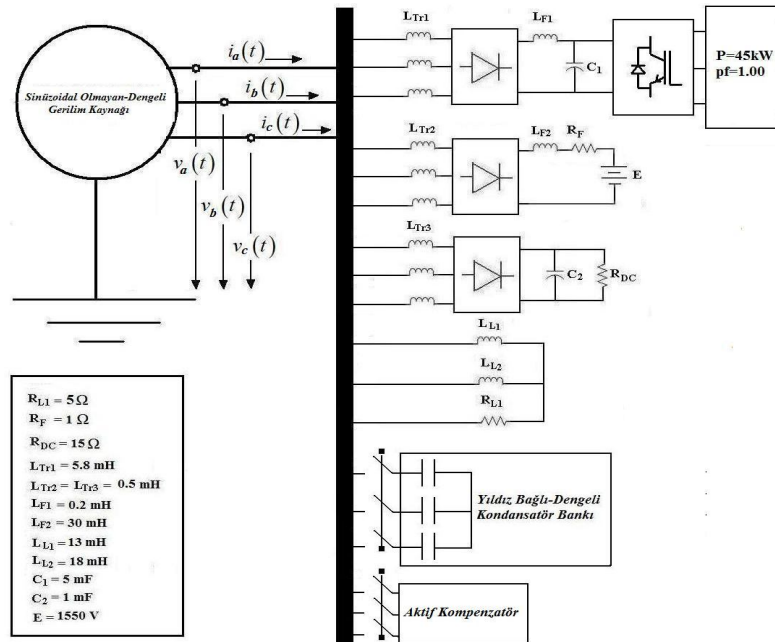
Diğer taraftan hibrit kompanzasyonda yeni güç ifadesinin ekonomik katkısının karşılaştırmalı olarak görülebilmesi amacıyla hibrit kompanzasyon geleneksel pasif kompanzasyon yaklaşımı olan temel harmonik reaktif gücünü kompanze eden kondansatör ve aktif kompenzatorle tekrarlanmıştır. Buna göre 0.578 pu temel harmonik reaktif gücü çeken kondansatör ve 0.317 pu görünür güce sahip aktif kompenzatorle güç

faktörü bir yapılmıştır. Bir başka ifadeyle temel harmonik reaktif gücünü kompanse eden kondansatörlü hibrit kompanzasyonda sadece aktif kompanzasyonda kullanılan kompenzator gücünün 51%'ine sahip aktif kompenzator kullanılarak güç faktörü bir yapılmıştır.

Yukarıda sonuçları verilen her iki hibrit kompanzasyonda kullanılan aktif kompenzator güçlerinin karşılaştırmasından ise yeni güç ifadesiyle gerçekleştirilen hibrit kompanzasyonda geleneksel yaklaşımla gerçekleştirilen hibrit kompanzasyona göre 5% daha küçük güçte aktif kompenzator kullanıldığı görülmektedir. Buradan maliyeti basit kondansatöre göre daha yüksek olan aktif kompenzator gücünün daha küçük değerde kullanımına dolayısıyla maliyet verimli tam kompanzasyona imkan vermesi bakımından yeni güç ifadesinin önemi ortaya çıkmıştır.

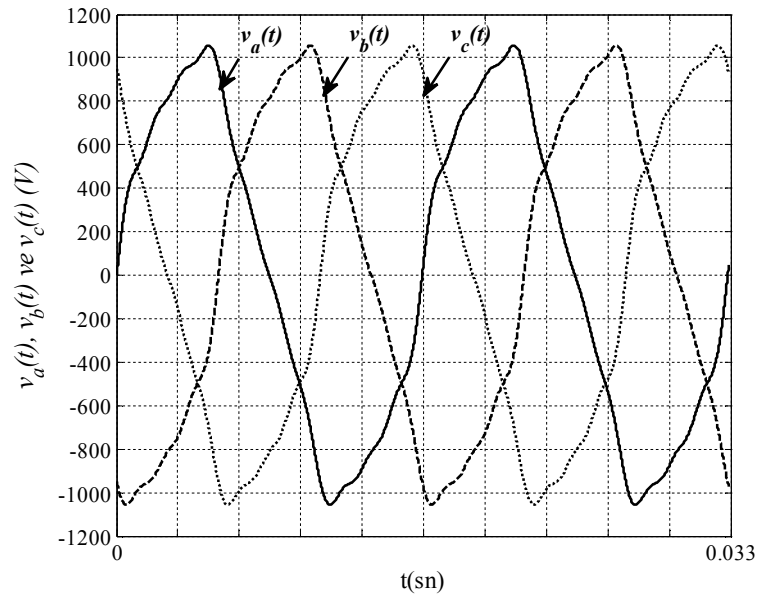
## 5.2 Sinüzoidal Olmayan-Dengesiz Üç Faz-Üç İletkenli Sistemde Analiz

Yeni güç ifadesinin en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından analizi Şekil 5-4'de verilen sistemde yapılmıştır.



Şekil 5-4: Yeni güç ifadesinin en iyi dengeli kapasitif kompanzasyon bakımından analiz edildiği üç faz-üç iletkenli sistem.

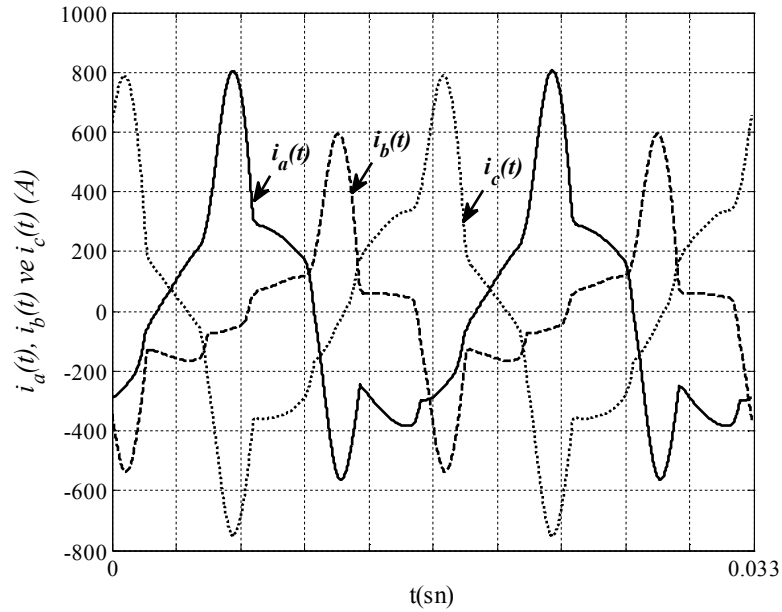
Şekil 5-4’de verilen analiz sisteminde sabit aktif güçte resistif yükü besleyen a.a.-a.a. dönüştürücü, d.a. motor eşdeğeri besleyen 6 darbeli doğrultucu, saf direnç besleyen 6 darbeli doğrultucu ve dengesiz R-L empedans bulunmaktadır. Bu sistemde kompanzasyonsuz durum (NC) için ortak bağlantı noktasında ölçülen faz-nötr arası gerilimlerin dalga şekilleri Şekil 5-5’de verilmiştir.



Şekil 5-5: Şekil 5-4’de verilen sistemde kompanzasyonsuz durum için ortak bağlantı noktasında ölçülen faz-nötr arası gerilimlere ait dalga şekilleri.

Şekil 5-5’den sistemin NC durumunda ortak bağlantı noktasında ölçülen faz-nötr arası gerilimlerin bozulmaya sahip fakat dengeli olduğu görülmektedir. Bu bozulma miktarı  $THD_V$  (%) olarak 10 değerinde ölçülmüştür.

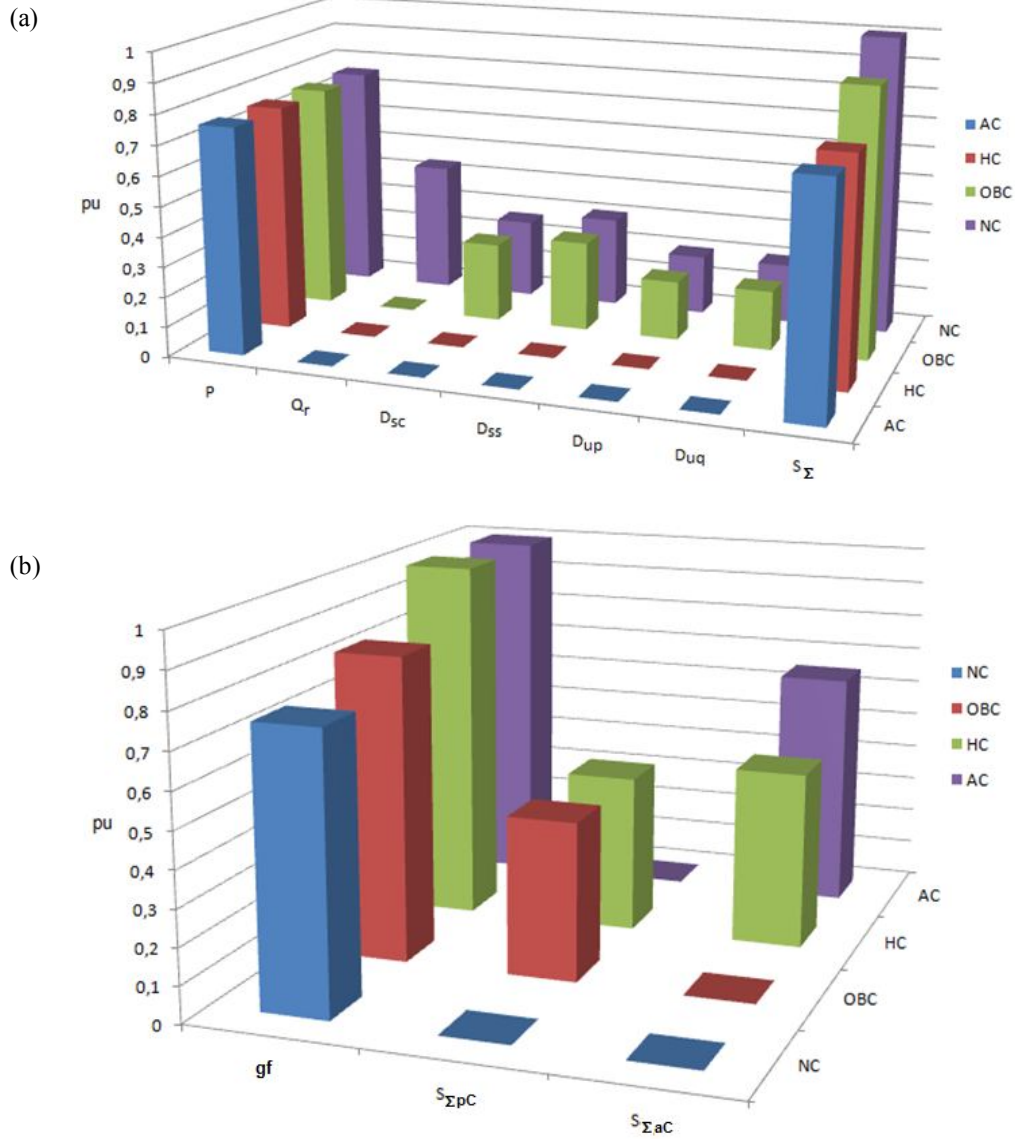
Sistemde NC durumunda kaynaktan çekilen faz akımlarının dalga şekilleri ise Şekil 5-6’da verilmiştir.



Şekil 5-6: Şekil 5-4’de verilen sistemde kompanzasyonsuz durum için kaynaktan çekilen faz akımlarının dalga şekilleri.

Şekil 5-6’dan sistemin NC durumunda kaynaktan çekilen faz akımlarının dengesiz ve bozulmaya uğramış dalga şekillerine sahip olduğu görülmektedir. Dengesizlik miktarları temel harmonik akımı için  $I_1^-/I_1^+$  (%) olarak 32.3 değerinde ölçülmüştür. Diğer taraftan bozulma miktarları a, b ve c fazları için sırasıyla  $THD_I$  (%) olarak 42, 70 ve 39 değerlerinde ölçülmüştür.

Sistemde sırasıyla; en iyi dengeli kapasitif (OBC), aktif (AC) ve hibrit (HC=OBC+AC) kompanzasyonlar gerçekleştirilmiştir. OBC ve HC’de yeni güç ifadesi kullanılarak hesap edilen temel harmonik kapasite değerine sahip üç özdeş kondansatör yıldız bağlı biçimde kullanılmıştır. Diğer taraftan, aktif ve hibrit kompanzasyonlarda, aktif kompanzator FBD kompanzasyon metoduna göre kompanzasyon yapmıştır. Bu prensiplere göre yapılan simülasyonlardan sonra, ortak bağlantı noktasında ölçülen güç bileşenleri ( $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$ ,  $D_{ss}$ ,  $D_{up}$  ve  $D_{uq}$ ), görünür güç ( $S_\Sigma$ ), güç faktörü ( $gf=P/S_\Sigma$ ) ile aktif ve pasif kompenzatorlara ait görünür ( $S_{\Sigma aC}$  ve  $S_{\Sigma pC}$ ) güçler Şekil 5-7’de verilmiştir.



Şekil 5-7: Şekil 5-4’de verilen sistemde NC, OBC, AC ve HC durumları için ortak bağlantı noktasında ölçülen güç bileşenleri, görünür güç, güç faktörü ile aktif ve pasif kompenzatlara ait görünür güçler.

Şekil 5-7’den kompanzasyonsuz durumda (NC); güç faktörü, reaktif güç ve görünür gücün sırasıyla 0.756, 0.435 pu ve 1 pu olduğu görülmektedir. Üç faz reaktif gücü 0.435 pu olan üç özdeş yıldız bağlı kondansatör ile yapılan en iyi dengeli kompanzasyon (OBC) sayesinde reaktif güç tamamen kompanze edilmiş ve böylece güç faktörü 0.756’dan 0.840’a yükseltilmiştir. Fakat, hala güç faktörü birden küçüktür. Üç faz görünür gücü 0.654 pu olan aktif kompenzator kullanılarak yapılan aktif kompanzasyondan (AC) sonra ise; görünür güç 0.756 pu değerine inmiş ve güç faktörü bir değerine yükselmiştir. Üç faz



reaktif gücü 0.435 pu olan dengeli kapasitif kompenzator ve 0.489 pu olan aktif kompenzator kullanılarak gerçekleştirilen hibrit kompanzasyon (HC) sayesinde güç faktörü bir değerine yükseltilmiştir. Böylece, aktif kompanzasyonda kullanılan aktif kompenzator gücünün 74.8 %'sine sahip aktif kompenzator kullanılarak güç faktörü bir yapılmıştır.

Diğer taraftan hibrit kompanzasyonda yeni güç ifadesinin ekonomik katkısının karşılaştırmalı olarak görülebilmesi amacıyla hibrit kompanzasyon geleneksel pasif kompanzasyon yaklaşımı olan ve hala reaktif güç rölelerinde [89] kullanılan bir fazdan çekilen temel harmonik reaktif gücüne göre seçilmiş üç özdeş yıldız bağlı kondansatör grubu ve aktif kompenzatorle tekrarlanmıştır. Buna göre 0.232 pu temel harmonik reaktif gücü çeken kondansatörlerden oluşan kapasitif kompenzator ve 0.601 pu görünür güce sahip aktif kompenzatorle güç faktörü bir yapılmıştır. Bir başka ifadeyle klasik kapasitif kompanzasyonun yer aldığı hibrit kompanzasyonda, aktif kompanzasyonda kullanılan aktif kompenzator gücünün 91.9 %'una sahip aktif kompenzator kullanılarak güç faktörü bir yapılmıştır.

Yukarıda sonuçları verilen her iki hibrit kompanzasyonda kullanılan aktif kompenzator güçlerinin karşılaştırmasından ise; yeni güç ifadesiyle gerçekleştirilen hibrit kompanzasyonda geleneksel yaklaşımla gerçekleştirilen hibrit kompanzasyona göre 17.1 % daha küçük güçte aktif kompenzator kullanıldığı görülmektedir.

### **5.3 Reaktif Güç Kontrol Rölelerine Uygulama**

Bu kısımda yeni güç ifadesinin reaktif güç bileşenini kompanze edecek biçimde kompanzasyon kondansatörü plaka gücünü seçen pratik bir hesap metodu reaktif güç kontrol rölelerine uygulanmak üzere sunulmuştur. Yeni metodun reaktif güç kontrol rölelerinde uygulanan klasik metodlara göre güç faktörünün azami hale getirilmesi bakımından üstünlüğü karşılaştırmalı niteliksel ve niceliksel analizlerle gösterilmiştir.

#### **5.3.1 Reaktif Güç Kontrol Rölelerine Ait Klasik Çalışma Prensipleri**

Sinüzoidal şartlarda klasik güç ifadesi ( $S^2=P^2+Q^2$ ) minimum kayıplarla aynı aktif ( $P$ ) gücün iletilebilmesi bir başka ifadeyle güç faktörü ( $gf=P/S$ )'nün bir yapılması için

gerekli kompanzasyon kondansatörü gücü hakkında bilgi verir. Bu ifadeye göre güç faktörünü bir yapmak için; reaktif güç kontrol rölesi  $Q$  gücüne sahip kompanzasyon kondansatörünü seçer ve seçilen kondansatör yüke paralel biçimde sisteme girer [90].

Sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler için reaktif güç kontrol rölelerinde iki farklı çalışma prensibi uygulanmaktadır [91]. Bunlardan ilki gerilim ve akımın temel harmonik bileşenleri kullanılarak hesaplanan güç faktörünün ( $gf_1 = P_1/S_1$ ) dikkate alındığı dolayısıyla temel harmonik reaktif güce ( $Q_1$ ) göre kompanzasyon kondansatörünün seçildiği çalışma prensibidir. İkincisi ise gerilim ve akımın toplam etkin değeri kullanılarak hesap edilen güç faktörünün ( $gf=P/S$ ) dikkate alındığı dolayısıyla Fryze'nin tanımladığı reaktif güce göre kompanzasyon kondansatörü gücünün seçildiği çalışma prensibidir.

Sinüzoidal olmayan ve dengesiz üç fazlı sistemlerde ise reaktif güç rölelerinin ayrıca iki farklı çalışma prensibi vardır [89], [92]. Bunlardan ilki tek bir fazdan ölçülen gerilim ve akım değerlerine göre hesap edilen temel harmonik reaktif gücü veya Fryze'nin tanımladığı güçte kondansatörlerin her faz için sisteme alınmasıdır [89]. İkinci çalışma prensibi ise fazların ayrı ayrı kompanze edilmesi amacıyla her bir faz için hesap edilen temel harmonik veya Fryze'nin tanımladığı reaktif güce eşit güçte kondansatörlerin sisteme alınması biçimindedir [92].

Yukarıda verilenlere göre kompanzasyon kondansatörü plaka gücünün seçimine ait metodlar tek ve üç fazlı sistemler için Tablo 5-1'de özetlenmiştir.

Tablo 5-1: Reaktif güç kontrol rölelerinde kompanzasyon kodansatörü plaka gücünün hesabında kullanılan klasik metodlar.

	<b>Metot I</b>	<b>Metot II</b>	<b>Metot III</b>	<b>Metot IV</b>
<b>Tek fazlı sistemler</b>	Temel harmonik reaktif gücüne göre kompanzasyon kondansatörünün seçimi.	Fryze'nin reaktif gücüne göre kompanzasyon kondansatörünün seçimi.	-	-
<b>Üç fazlı sistemler</b>	Tek bir fazdan ölçülen gerilim ve akım değerlerine göre hesap edilen temel harmonik reaktif gücüne eşit güçte kondansatörlerin her faz için sisteme alınmasıdır.	Tek bir fazdan ölçülen gerilim ve akım değerlerine göre hesap edilen Fryze'nin reaktif gücüne eşit güçte kondansatörlerin her faz için sisteme alınmasıdır.	Her bir faz için hesap edilen temel harmonik reaktif gücüne eşit güçte kondansatörlerin sisteme alınmasıdır.	Her bir faz için hesap edilen Fryze'nin reaktif gücüne eşit güçte kondansatörlerin sisteme alınmasıdır.

Fakat üç faz-üç iletkenli sistemlerde fazlar dengesiz ise her bir fazı ayrı kompanze edecek biçimde seçilen yıldız bağlı kondansatör grubunda bulunan kondansatörlerin eşit güçte olmaması sebebiyle kondansatörler üzerinde aynı gerilim düşümü olmaz. Bu durumda kondansatör üzerindeki gerilim etkin değeri nominal gerilime göre aşırı büyüklükte olabilir ve kondansatörler zarar görebilir. Kondansatör grubu için üçgen bağlantı kullanıldığında ise her bir fazın ayrı değerlendirilmesi mümkün değildir. Bu sebeple Tablo 5-1'de verilen metotlardan 1 ve 2 numaralı olanları ile yeni güç ifadesi temelli kondansatör plaka gücü seçim metodu arasında performans karşılaştırması bir sonraki kısımda yapılacaktır.

### 5.3.2 Yeni Güç İfadesi Temelli Kondansatör Plaka Gücü Seçim Metodu

Yeni güç ifadesinin reaktif güç bileşeni en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemde var olan gerilim şartlarında çekeceği gücü verir. Bununla birlikte kompanzasyon

kondansatörleri temel frekans ve nominal gerilim değeri için belli bir plaka gücünde üretilirler. Bu sebeple yeni güç ifadesinin reaktif güç bileşenini sistem gerilim şartlarında çekecek kompanzasyon kondansatörüne ait plaka gücünün seçimi için bir hesap metoduna ihtiyaç vardır. Bu metot tek fazlı sistemler için aşağıda elde edilmiştir:

Metodun elde edilmesinde ilk olarak en iyi kompanzasyon kondansatörünün (4.6)'da verilen temel harmonik kapasitans değeri ( $X_C$ ) (5.1)'de yerine konur;

$$Q_C = \frac{V_{Nom}^2}{X_C} \quad (5.1)$$

ve böylece en iyi kompanzasyon kondansatörünün temel frekans ve nominal gerilim değerinde plaka gücü,

$$Q_C = V_{Nom}^2 \frac{\sum_{n \in N^+} n Q_n}{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2} \quad (5.2)$$

biçiminde yazılır. Nominal gerilim pratikte sistemde ölçülen temel harmonik geriliminin etkin değeri olarak kabul edilebilir.

İkinci adımda (4.31)'in her iki tarafı  $V \sqrt{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2}$  terimine bölünür,

$$\frac{1}{V \sqrt{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2}} Q_C = \frac{\sum_{n \in N^+} n Q_n}{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2} \quad (5.3)$$

ve elde edilen ifadedeki eşitliğin sol tarafı (5.2)'de yerine konulur;

$$Q_C = V_{Nom}^2 \frac{1}{V \sqrt{\sum_{n \in N^+} n^2 V_n^2}} Q_r \quad (5.4)$$

Böylece sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemlerde en iyi kompanzasyon kondansatörünün plaka değerleri temel frekans ve nominal gerilim değerinde  $Q_C$  gücü olarak belirlenir.

Üç fazlı sistemlerin özel bir durumu olan gerilimlerin sinüzoidal olmayan-dengeli ve akımların sinüzoidal olmayan-dengesiz olduğu üç faz-üç iletkenli sistemler için yeni

güç ifadesinin reaktif güç bileşeni kullanılarak; en iyi dengeli kompanzasyon kondansatörü grubunda her bir faza bağlanan kondansatörlerin plaka güçlerinin hesabı aşağıda verilen sıralı adımlarla gerçekleştirilebilir:

İlk adımda (4.54)'de verilen bir faza bağlanması gereken en iyi kompanzasyon kondansatörünün temel harmonik kapasitansı (5.1)'de yerine konularak bu kondansatörün temel frekans ve nominal gerilim değerinde plaka gücü,

$$Q_C = V_{Nom}^2 \frac{\sum_n n Q_{Bn}}{\sum_n n^2 V_n^2} \quad (5.5)$$

biçiminde yazılır.

İkinci adımda (4.87)'den bulunan reaktif gücün faz sayısına göre aritmetik ortalaması alınarak her bir faz için en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemde var olan gerilim şartlarında çektiği güç bulunur;

$$\frac{Q_r}{3} = V \frac{\sum_n n Q_{Bn}}{\sqrt{\sum_n n^2 V_n^2}} \quad (5.6)$$

Daha sonra (5.6)'nın her iki tarafı  $V \sqrt{\sum_n n^2 V_n^2}$  terimine bölünür,

$$\frac{Q_r}{3V \sqrt{\sum_n n^2 V_n^2}} = \frac{\sum_n n Q_{Bn}}{\sum_n n^2 V_n^2} \quad (5.7)$$

ve elde edilen ifade de eşitliğin sol tarafı (5.5)'de yerine konular;

$$Q_C = V_{Nom}^2 \frac{Q_r}{3V \sqrt{\sum_n n^2 V_n^2}} \quad (5.8)$$

Böylece üç fazlı sistemlerin özel bir durumu olan gerilimlerin sinüzoidal olmayan-dengeli ve akımların sinüzoidal olmayan-dengesiz olduğu üç faz-üç iletkenli sistemlerde, her bir faza bağlanması gereken en iyi kompanzasyon kondansatörünün plaka değerleri temel frekans ve nominal gerilim değerinde  $Q_C$  gücü olarak belirlenir.

### 5.3.3 Analiz

Reaktif güç kontrol rölelerinde sinüzoidal olmayan ve dengesiz şartlarda kullanılan klasik kondansatör plaka gücü seçim metotlarıyla yeni güç ifadesi temelli metodun elde edilen güç faktörü bakımından karşılaştırması Şekil 5-4'de verilen sistemde gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde her bir fazdan çekilen temel harmonik ve Fryze reaktif güçleri Tablo 5-2'de verilmiştir.

Tablo 5-2: Şekil 5-4'de verilen sistemde her bir fazdan çekilen temel harmonik ve Fryze reaktif güçleri.

Faz\Reaktif Güçler	Temel Harmonik Reaktif Gücü (pu)	Fryze Reaktif Gücü (pu)
A	0.232	0.270
B	0.080	0.158
C	0.110	0.177

Tablo 5-2'den fazlardan çekilen temel harmonik reaktif güçlerinin ve Fryze reaktif güçlerinin dengesiz olduğu görülmektedir. Bununla birlikte yeni güç ifadesinin reaktif güç bileşeni 0.435pu değerinde ölçülmüştür. Ayrıca sistemin kompanzasyonsuz durumdaki güç faktörü 0.756'dır.

Tablo 5-1'de verilen klasik metotlar ve yeni güç ifadesi temelli metoda göre yapılan kompanzasyonlarda kullanılan kompanzasyon kondansatörü plaka güçleri ve kompanzasyondan sonraki güç faktörü değerleri Tablo 5-3'de verilmiştir.

Tablo 5-3: Şekil 5-4’de verilen sistemde yeni güç ifadesi temelli metot ve klasik metotlara göre yapılan kompanzasyonlara ilişkin sonuçlar.

	Kompanzasyon Kondansatörü Plaka Güçleri (pu)	Kompanzasyo ndan Sonra Güç Faktörü
Metot 1	$Q_{Ca}=Q_{Cb}=Q_{Cc}= 0.232$	0.782
Metot 2	$Q_{Ca}=Q_{Cb}=Q_{Cc}= 0.270$	0.741
Yeni Metot	$Q_{Ca}=Q_{Cb}=Q_{Cc}= 0.128$	0.840

Tablo 5-3’den metot 1 ve 2’ye göre yapılan kompanzasyonlar sonucunda ulaşılan güç faktörlerinin sırasıyla 0.782 ve 0.741 olduğu ve yeni metoda göre yapılan kompanzasyon sonucunda ise güç faktörünün 0.840 olduğu görülmektedir. Bununla beraber kompanzasyondan önceki güç faktörünün 0.756 olduğu dikkate alındığında, 0.741 güç faktörünün elde edildiği metot 2’ye göre yapılan kompanzasyonun; güç faktörünü arttırmadığı bilakis azalttığı anlaşılmaktadır.

## 5.4 Sonuçlar ve Tartışma

Yapılan niceliksel analizler, sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler ile sinüzoidal olmayan-dengeli gerilim ve sinüzoidal olmayan-dengesiz akım şartlarına sahip üç faz-üç iletkenli sistemler için tanımlanan güç ifadesinin reaktif güç bileşeninin; kompanzasyonla terminal geriliminin değişmediği ve rezonans olayının meydana gelmediği durumlarda en iyi dengeli kapasitif kompenzatorün sistemden çektiği gücü direkt verdiğini göstermiştir.

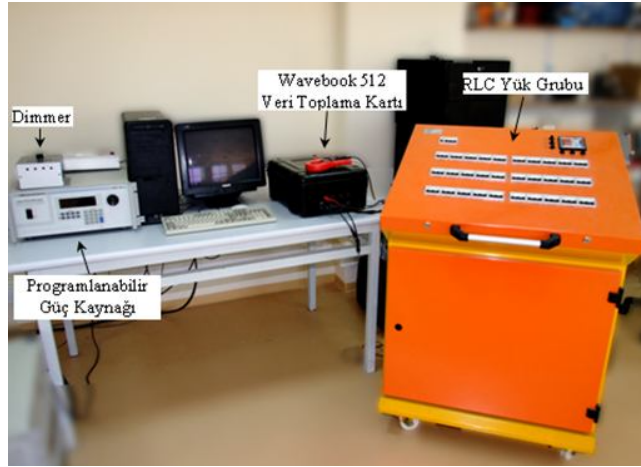
Diğer taraftan yeni güç ifadesinde tanımlı olan reaktif güç bileşenini çekecek kompanzasyon kondansatörünün plaka gücünün seçimi için bir hesap metodu reaktif güç kontrol rölelerine uygulanmak üzere sunulmuş ve yeni önerilen metodun klasik metotlara göre güç faktörünün azami hale getirilmesi bakımından üstünlüğü gösterilmiştir.

## 6 YENİ GÜÇ İFADESİ TEMELLİ HARMONİK ÜRETEN YÜK TESPİT METODUNUN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

Bu kısımda, yeni güç ifadesinin harmonik üreten yüklerin tespit edilmesinde kullanılabilirliği; bir test sisteminden elde edilen gerçek ölçüm verilerine dayalı olarak istatistiksel biçimde analiz edilmiştir.

### 6.1 Test Sistemi

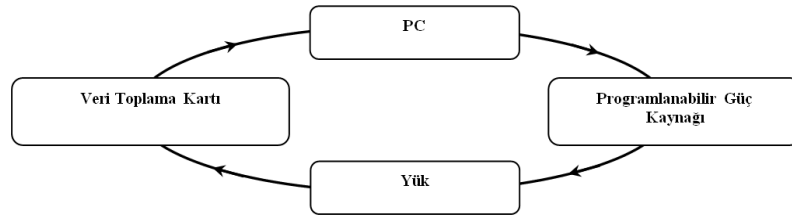
Yeni güç ifadesinin harmonik üreten yüklerin tespiti için kullanılabilirliği; çeşitli gerilim dalga şekilleri ve çeşitli yük tiplerinin kullanıldığı Şekil 6-1'de verilen test sisteminde yapılan ölçümler yardımıyla analiz edilmiştir.



Şekil 6-1: Yeni güç ifadesinin harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanılabilirliğinin test edildiği sistem.

Şekil 6-1'de verilen test sistemini oluşturan parçalar; çeşitli gerilim dalga şekillerinde yükü besleyebilen California Instruments 3001ix [93] programlanabilir güç kaynağı, gerilim-akım verisini yüksek örnekleme sayısında toplayabilen IOtech Wavebook 512 [94] veri toplama kartı ve testlerde kullanılan yüklerdir. Testlerde kullanılan yükler günümüzde güç sistemlerinde yaygın olarak yer alan doğrusal ve doğrusal olmayan (harmonik üreten) yüklerdir. Bu bahsedilen parçalardan oluşan test sisteminin iş akış şeması Şekil 6-2'de verilmiştir.





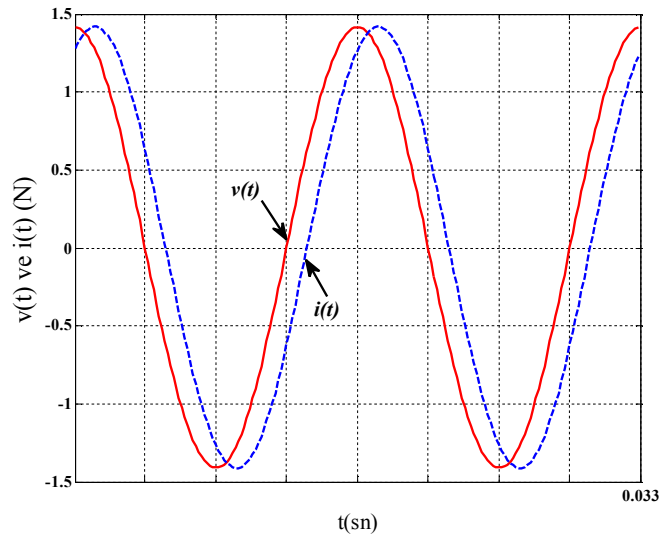
Şekil 6-2: Şekil 6-1’de verilen test sistemine ait iş akışı şeması.

Şekil 6-2’de verilen iş akış şemasında bulunan PC (bilgisayar)’de çalıştırılan LabVIEW [95] programıyla hazırlanmış kod tarafından gerilimin dalga şeklinin seçilmesi gerçekleştirilmektedir. Seçilen gerilim dalga şeklinin yüke uygulanması, LabVIEW kodu ile kontrol edilen California Instruments 3001ix programlanabilir güç kaynağı sayesinde gerçekleştirilmiştir. Gerilim ve akım verisinin ölçülmesi ise IOtech Wavebook 512 veri toplama kartıyla toplanan verinin PC’ye aktarılmasıyla sağlanmaktadır. Verinin PC’ye aktarılması ve daha sonra ani gerilim-ani akım verisinin DFT (ayrık fourier dönüşümü) hesabı LabVIEW’de hazırlanmış kod aracılığıyla yapılmaktadır. Diğer taraftan LabVIEW ile kontrol edilen programlanabilir güç kaynağının oluşturacağı gerilim dalga şekilleri tek numaralı harmoniklerden oluşturulmuş ve bu dalga şekillerinin *THD*’leri ise 5% olarak belirlenmiştir. Ayrıca bütün gerilim dalga şekilleri her bir harmonik için IEC 61000-3-6’da belirlenen sınırlara uygun olarak seçilmiştir.

## 6.2 Analiz

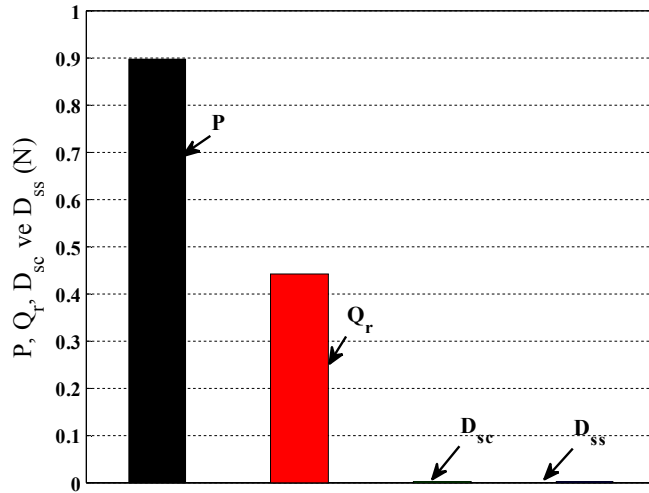
Yukarıda ayrıntılı tanıtılan test sisteminde; 1 adet sinüzoidal ve *THD*(%)’si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çeşitli yüklere ait gerilim ve akım ölçümleri alınmıştır. Bu yükler doğrusal R-L empedans, sabit momentte çalışan asenkron motor, sabit devirde çalışan asenkron motor, kırpıcı devresiyle kontrol edilen doğrusal R-L empedans, bilgisayar grubu ve kompakt flüoresan lamba grubudur. Bu gerilim ve akım ölçümleri kullanılarak; yeni güç ifadesine ait hesap edilen güçler istatistiksel olarak her bir yük tipi için aşağıda verilmiştir:

Test edilen yüklerden ilki olan R-L empedansın R/Z oranı 0.89 olup; bu yükün sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı Şekil 6-3’de verilmiştir.



Şekil 6-3: R-L empedansın sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı.

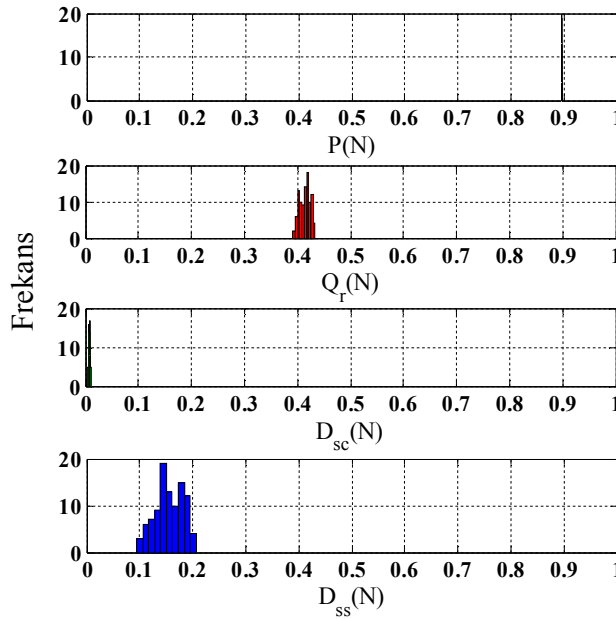
Şekil 6-3'den yükün sinüzoidal besleme testi için sinüzoidal akım çektiği görülmektedir. Sinüzoidal gerilim altında R-L empedansın çektiği yeni güç ifadesine ait aktif ( $P$ ), reaktif ( $Q_r$ ), kaydırılmış iletkenlik ( $D_{sc}$ ) ve kaydırılmış suseptans ( $D_{ss}$ ) güçlerinin normalize değerleri Şekil 6-4'de verilmiştir.



Şekil 6-4: R-L empedansın sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenleri.

Şekil 6-4'den sinüzoidal gerilim altında R-L empedansın çektiği  $P$  ve  $Q_r$  güçlerinin sırasıyla 0.89 ve 0.44 normalize değerlerinde olduğu diğer iki güç bileşeni olan  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerinin ise yaklaşık olarak sıfır normalize değerinde olduğu görülmektedir.

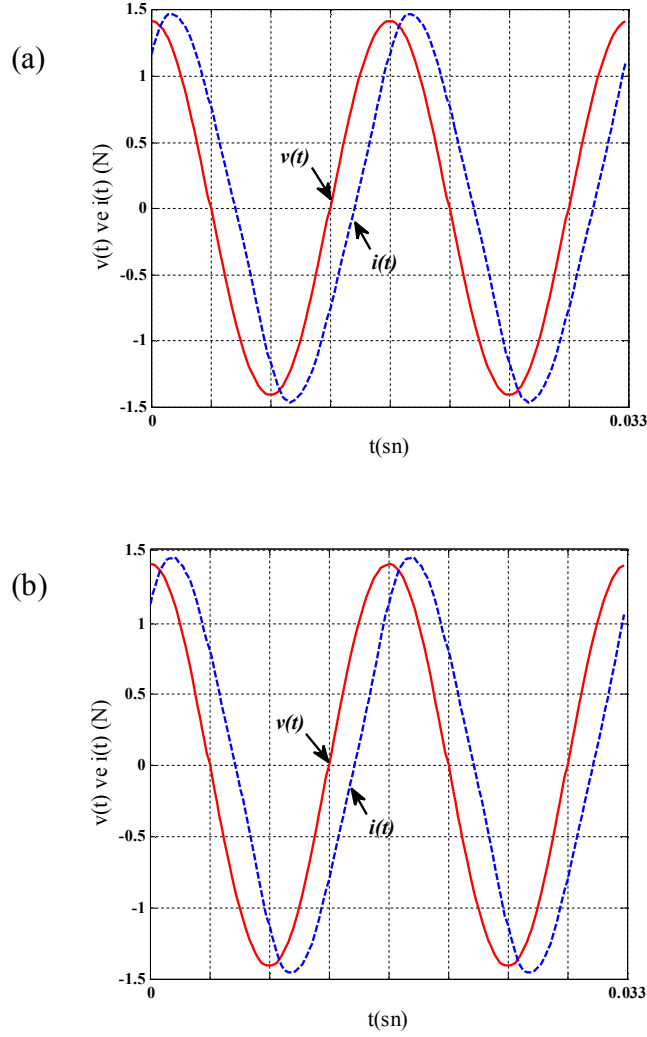
$THD_V(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında bu yükün çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerinin normalize değerlerine ait histogramlar Şekil 6-5'de verilmiştir.



Şekil 6-5: R-L empedansın  $THD_V(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenlerine ait histogramlar.

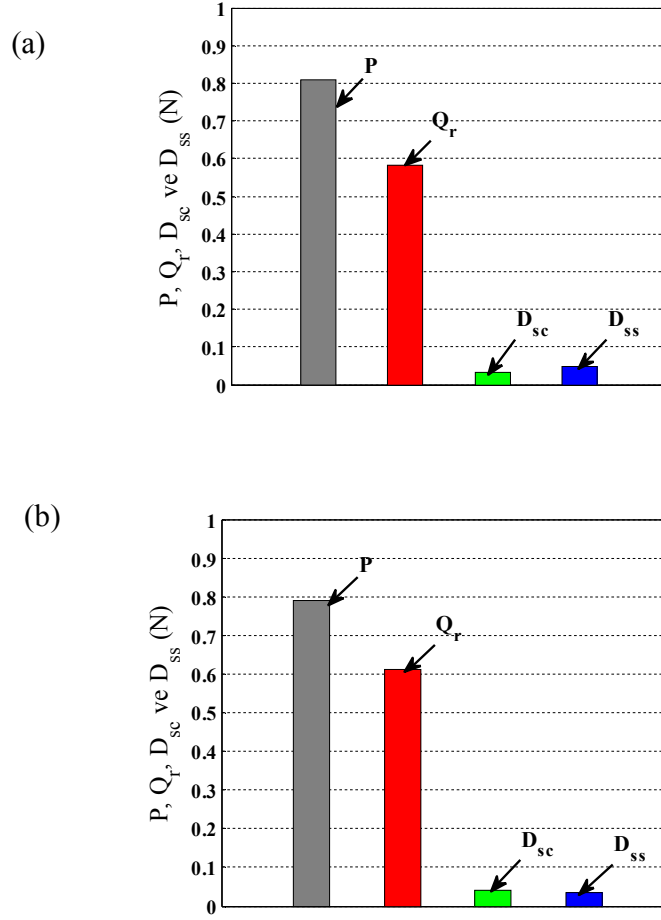
Şekil 6-5'den R-L empedansın bozulmuş test gerilimleri altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$  ve  $D_{sc}$  güçlerinin sinüzoidal gerilim altında çekilen değerlerle yaklaşık olarak aynı olduğu; diğer taraftan  $D_{ss}$ 'nin bozulmuş test gerilimleri altında 0.1 ile 0.2 normalize değerleri arasında değiştiği görülmektedir.

Diğer bir yük olan; asenkron motorun sabit devir ve sabit moment çalışma durumlarının sinüzoidal besleme testinde, kaynak çıkış gerilimi ve yük akımları sırasıyla Şekil 6-6 (a) ve (b)'de verilmiştir.



Şekil 6-6: Asenkron motorun (a) sabit devir ve (b) sabit moment çalışma durumlarının sinüzoidal besleme testinde kaynak çıkış gerilimi ve yük akımı.

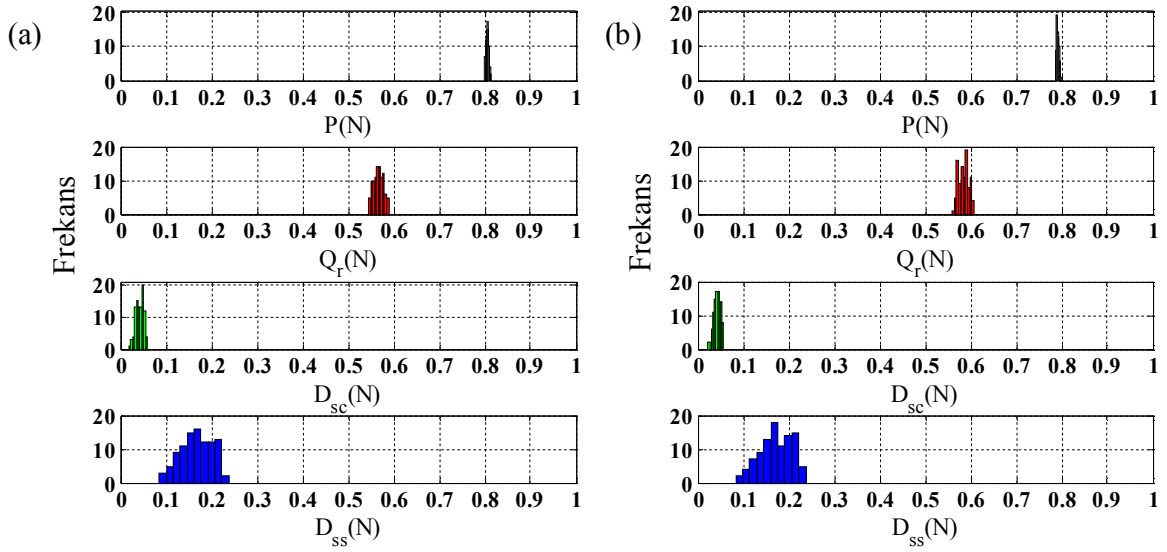
Şekil 6-6 (a) ve (b)'den asenkron motorun her iki çalışma durumunda sinüzoidal gerilim altında hafif bozulmuş akım çektiği görülmektedir. Bu bozulmuş akımların  $THD_I(\%)$  değerleri yaklaşık olarak 5'dir. Sinüzoidal gerilim altında asenkron motorun sabit devir ve sabit moment çalışma durumlarında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerinin normalize değerleri sırasıyla Şekil 6-7 (a) ve (b)'de verilmiştir.



Şekil 6-7: Asenkron motorun (a) sabit devir ve (b) sabit moment çalışma durumları için sinüzoidal gerilim altında çekilen  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenleri.

Şekil 6-7 (a)'dan sinüzoidal gerilim altında sabit devirde çalışan asenkron motorun çektiği  $P$ 'nin 0.81,  $Q_r$ 'nin 0.58,  $D_{sc}$ 'nin 0.03 ve  $D_{ss}$ 'nin 0.04 normalize değerlerinde olduğu görülmektedir. Diğer taraftan Şekil 6-7 (b)'den sinüzoidal gerilim altında sabit momentte çalışan asenkron motorun çektiği  $P$ 'nin 0.79,  $Q_r$ 'nin 0.60,  $D_{sc}$ 'nin 0.03 ve  $D_{ss}$ 'nin 0.04 normalize değerlerinde olduğu görülmektedir.

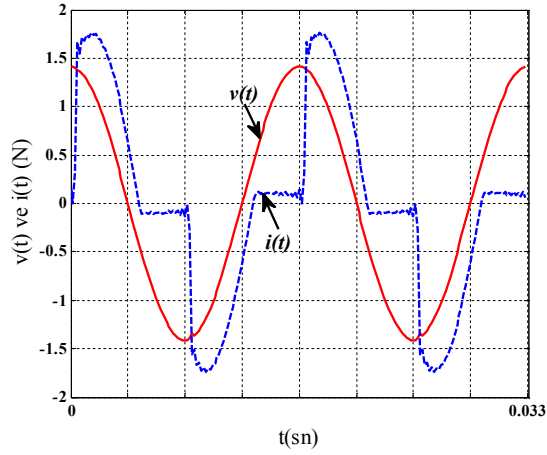
$THD_r(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında asenkron motorun sabit devirde ve sabit momentte çalışırken çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerinin normalize değerlerine ait histogramlar Şekil 6-8 (a) ve (b)'de verilmiştir.



Şekil 6-8: Asenkron motorun (a) sabit devir ve (b) sabit moment çalışma durumları için  $THD_V(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çekilen  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerine ait histogramlar.

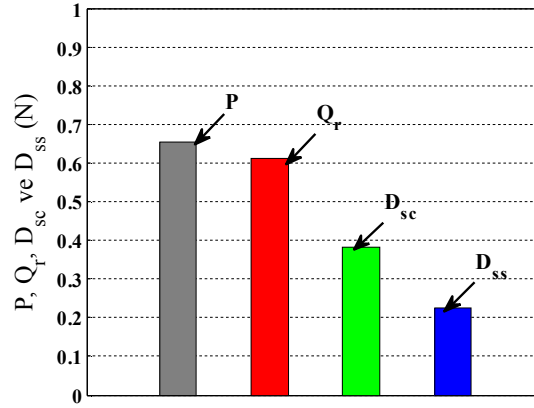
Şekil 6-8 (a) ve (b)'den asenkron motorun bozulmuş test gerilimleri altında sabit devir ve sabit momentte çalışırken çektiği  $P$ ,  $Q_r$  ve  $D_{sc}$  güçlerinin sinüzoidal gerilim altında çekilen değerlerle yaklaşık olarak aynı olduğu; diğer taraftan  $D_{ss}$ 'nin bozulmuş test gerilimleri altında 0.1 ile 0.2 normalize değerleri arasında değiştiği görülmektedir.

Tetikleme açısı  $90^\circ$ - $270^\circ$  olarak ayarlanmış kırıcı devresiyle kontrol edilen R/Z oranı 0.89 olan R-L empedansın sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı Şekil 6-9'da verilmiştir.



Şekil 6-9: Kırpıcı devresiyle kontrol edilen R-L empedansın sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı.

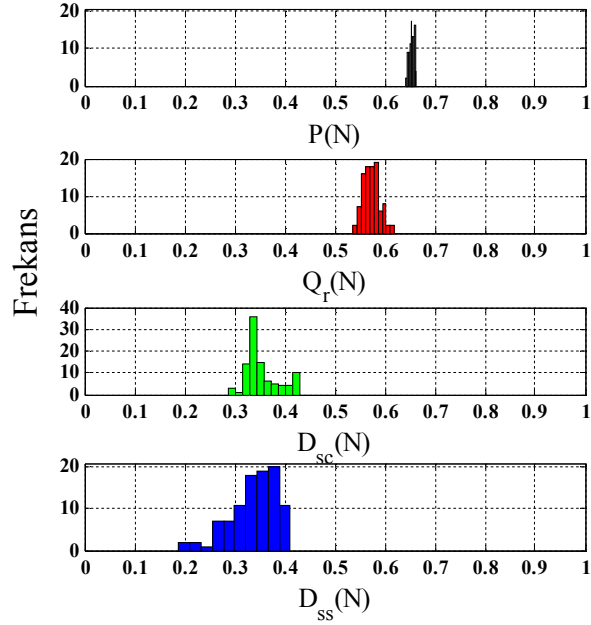
Şekil 6-9'dan kırpıcı devresiyle kontrol edilen R-L empedansın sinüzoidal gerilim altında çektiği akımın dikkate değer miktarda bozulmaya sahip olduğu görülmektedir. Bu akıma ait bozulma miktarının  $THD_1(\%)$  cinsinden değeri 50'dir. Sinüzoidal gerilim altında, bu yükün çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerinin normalize değerleri Şekil 6-10'da verilmiştir.



Şekil 6-10: Kırpıcı devresiyle kontrol edilen R-L empedansın sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenleri.

Şekil 6-10'dan kırpıcı devresiyle kontrol edilen R-L empedansın sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ 'nin 0.65,  $Q_r$ 'nin 0.61,  $D_{sc}$ 'nin 0.38 ve  $D_{ss}$ 'nin 0.23 normalize değerlerinde olduğu görülmektedir.

$THD_r(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında bu yükün çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerinin normalize değerlerine ait histogramlar ise Şekil 6-11'de verilmiştir.

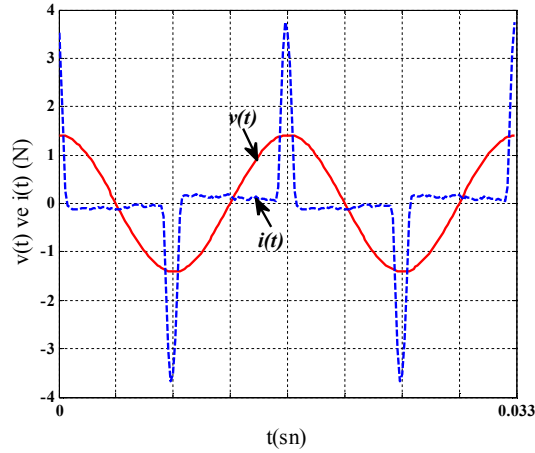


Şekil 6-11: Kırpıcı devresiyle kontrol edilen R-L empedansın  $THD_r(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenlerine ait histogramlar.

Şekil 6-11'den kırpıcı devresiyle kontrol edilen R-L empedansın bozulmuş test gerilimleri altında çektiği  $P$ 'nin sinüzoidal gerilim altında çekilen değerle yaklaşık olarak aynı olduğu; diğer taraftan bozulmuş test gerilimleri altında  $Q_r$ 'nin 0.5 ile 0.6,  $D_{sc}$ 'nin 0.3 ile 0.4 ve  $D_{ss}$ 'nin 0.2 ile 0.4 normalize değerleri arasında değiştiği görülmektedir.

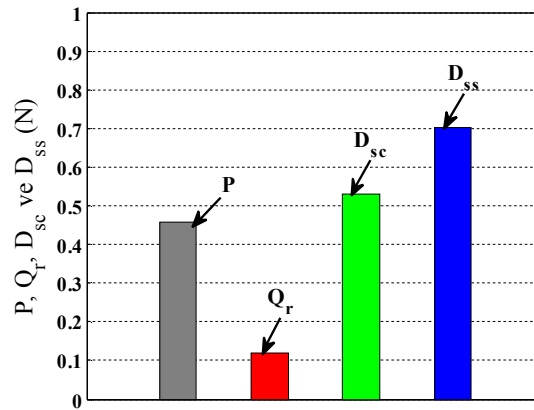
Bilgisayar grubunun sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı Şekil 6-12'de verilmiştir.





Şekil 6-12: Bilgisayar grubunun sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı.

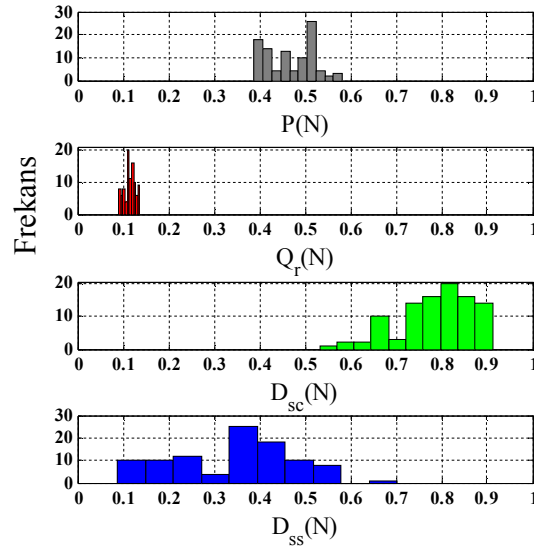
Şekil 6-12'den bilgisayar grubunun sinüzoidal gerilim altında çektiği akımın yüksek miktarda bozulmaya sahip olduğu görülmektedir. Bu akıma ait bozulma miktarının  $THD_r(\%)$  cinsinden değeri 185'dir. Sinüzoidal gerilim altında bu yükün çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerinin normalize değerleri Şekil 6-13'de verilmiştir.



Şekil 6-13: Bilgisayar grubunun sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenleri.

Şekil 6-13'den bilgisayar grubunun sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ 'nin 0.45,  $Q_r$ 'nin 0.11,  $D_{sc}$ 'nin 0.53 ve  $D_{ss}$ 'nin 0.7 normalize değerlerinde olduğu görülmektedir.

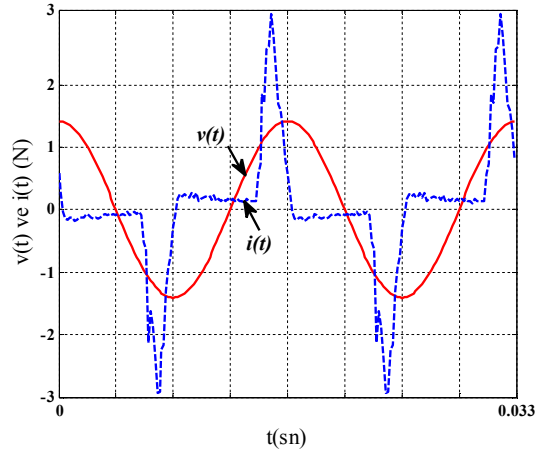
$THD_r(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında bu yükün çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerinin normalize değerlerine ait histogramlar ise Şekil 6-14'de verilmiştir.



Şekil 6-14: Bilgisayar grubunun  $THD_V(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenlerine ait histogramlar.

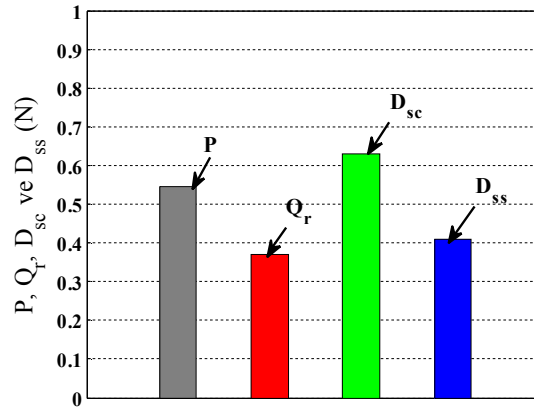
Şekil 6-14'den bilgisayar grubunun bozulmuş test gerilimleri altında çektiği  $Q_r$ 'nin sinüzoidal gerilim altında çekilen değerle yaklaşık olarak aynı olduğu; diğer taraftan bozulmuş test gerilimleri altında  $P$ 'nin 0.4 ile 0.6,  $D_{sc}$ 'nin 0.5 ile 0.9 ve  $D_{ss}$ 'nin 0.1 ile 0.7 normalize değerleri arasında değiştiği görülmektedir.

Kompakt flüoresan lamba grubunun sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı Şekil 6-15'de verilmiştir.



Şekil 6-15: Kompakt flüoresan lamba grubunun sinüzoidal besleme testi için güç kaynağı çıkış gerilimi ve yük akımı.

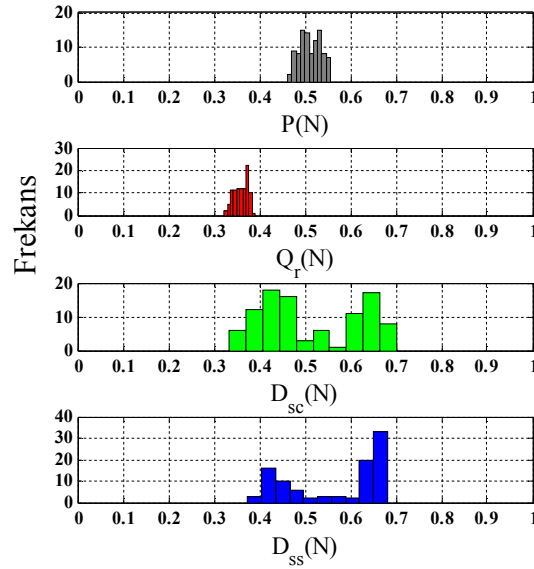
Şekil 6-15'den kompakt flüoresan lamba grubunun sinüzoidal gerilim altında çektiği akımın yüksek miktarda bozulmaya sahip olduğu görülmektedir. Bu akıma ait bozulma miktarının  $THD_I(\%)$  cinsinden değeri 115'dir. Sinüzoidal gerilim altında bu yükün çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerinin normalize değerleri Şekil 6-16'da verilmiştir.



Şekil 6-16: Kompakt floresan lamba grubunun sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenleri.

Şekil 6-16'dan kompakt flüoresan lamba grubunun sinüzoidal gerilim altında çektiği  $P$ 'nin 0.54,  $Q_r$ 'nin 0.37,  $D_{sc}$ 'nin 0.63 ve  $D_{ss}$ 'nin 0.41 normalize değerlerinde olduğu görülmektedir.

$THD_V(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında bu yükün çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güçlerinin normalize değerlerine ait histogramlar ise Şekil 6-17'de verilmiştir.



Şekil 6-17: Kompakt flüoresan lamba grubunun  $THD_V(\%)$ 'si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında çektiği  $P$ ,  $Q_r$ ,  $D_{sc}$  ve  $D_{ss}$  güç bileşenlerine ait histogramlar.

Şekil 6-17'den kompakt flüoresan lamba grubunun bozulmuş test gerilimleri altında çektiği  $P$ 'nin 0.4 ile 0.6,  $Q_r$ 'nin 0.3 ile 0.4,  $D_{sc}$ 'nin 0.3 ile 0.7 ve  $D_{ss}$ 'nin 0.3 ile 0.7 normalize değerleri arasında değiştiği görülmektedir.

Yukarıda sıralanmış çeşitli yük ve kaynak durumları için elde edilen istatistiksel sonuçlar Tablo 6-1'de verilen biçimde özetlenebilir.

Tablo 6-1: Yeni güç ifadesi temelli harmonik üreten yük tespit metodunun istatistiksel analizinden elde edilen sonuçlar.

	Kaydırılmış İletkenlik Gücü
R-L empedans	Kaydırılmış iletkenlik gücünün normalize değeri yaklaşık olarak sıfırdır. Bu durum yükün doğrusal yük olduğunu göstermektedir.
Sabit devirde çalışan asenkron motor	Kaydırılmış iletkenlik gücünün normalize değeri sıfıra çok yakındır. Bu durum yükün doğrusal yük olarak kabul edilebilir olduğunu göstermektedir.
Sabit momentte çalışan asenkron motor	
Kırpıcı devre kontrollü R-L empedans	Kaydırılmış iletkenlik gücünün normalize değeri çok büyüktür. Bu durum yükün doğrusal olmayan veya harmonik üreten yük olduğunu göstermektedir.
Bilgisayar grubu	
Kompakt floresan lamba	

Tablo 6-1’de özetlenenler doğrultusunda yeni güç ifadesinin kaydırılmış iletkenlik güç bileşeni dikkate alınarak R-L empedans ve asenkron motorun doğrusal yük; kırpıcı devre kontrollü R-L empedans, bilgisayar grubu ve kompakt floresan lamba grubunun ise doğrusal olmayan veya harmonik üreten yük olarak tespit edildiği sonucuna varılır.

### 6.3 Sonuçlar ve Tartışma

Yeni güç ifadesinin kaydırılmış iletkenlik güç bileşeninin harmonik üreten yüklerin tespit edilmesinde araç olarak kullanılabilirliği gerçek bir test sisteminde; terminal geriliminin 1 adet sinüzoidal ve  $THD_V(\%)$ ’si 5 olan 100 farklı gerilim dalga şekli altında, çeşitli doğrusal ve doğrusal olmayan yükler için istatistiksel biçimde analiz edilmiştir.

Analizde yer alan doğrusal yükler arasında R-L empedansın yanında sabit moment ve sabit devirde çalışan asenkron motorlar vardır. Diğer taraftan analizde yer alan doğrusal olmayan yükler ise güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan yüklerden seçilmiştir.

Analizden elde edilen sonuçlar yeni güç ifadesinin terminal geriliminin  $THD_V(\%)$  değerinin 5’i geçmediği gerilim şartlarında harmonik kaynaklarının belirlenmesi için kullanılabileceğini göstermiştir.

## 7 HARMONİK ÜRETEK YÜK TESPİT METOD VE İNDİSLERİNİN TİPİK DAĞITIM SİSTEMİNDE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Literatürde harmonik üreten yüklerin tespiti ve harmonik bozulma sorumluluğunun paylaşılması için önerilen metotlar ile indisler ölçüm stratejisine göre tek noktadan eş zamanlı olmayan ve çok noktadan eş zamanlı ölçümlere dayalı olanlar başlıklarıyla iki gruba ayrılabilir [82]. Çok noktadan eş zamanlı ölçümlere dayalı metotlar ile indisler tek noktadan eş zamanlı olmayanlara göre daha güvenilir sonuçlar vermelerine rağmen; birçok noktaya yerleştirilmiş eş zamanlı çalışabilen ölçüm aletleri gerektirdikleri için maliyetleri daha yüksektir. Ulaşılabilen literatürde önerilmiş olan tek noktadan eş zamanlı olmayan ölçümlere dayalı metot ve indisler Tablo 7-1’de verilmiştir.

Tablo 7-1: Tek noktadan eş zamanlı olmayan ölçümler temelli harmonik üreten yük tespit metotları ve indisleri.

Metot/ İndis	Gerekli Veri	Amaç
Aktif Güç Yönu ( <i>AGY</i> ) Metodu	Gerilim ve akım verisi	Harmonik üreten yükün tespit edilmesi
Kaynak-Yük Kalite ( <i>KYK</i> ) İndisi		
Harmonik Global ( <i>HG</i> ) İndisi		
Aktif Olmayan Güç ( <i>AOG</i> ) Metodu		
Uygun Akım ( <i>UA</i> ) Metodu	Gerilim ve akım verisi	Harmonik bozulma sorumluluğunun kaynak ve yük arasında paylaşılması.
Lineer Akım ( <i>LA</i> ) Metodu		
Süperpozisyon ve İz Düşüm ( <i>Sİ</i> ) Metodu	Kaynak ve Yük taraflarının Norton Eşdeğer Modelleri	
Kritik Empedans ( <i>KE</i> ) Metodu	Kaynak ve Yük taraflarının Thevenin Eşdeğer Modelleri	

Tablo 7-1’de verilen metotlar ve indisler çalışma prensiplerine göre dört ana gruba ayrılabilir:

- Harmonik aktif güçlerinin akış yönünün dikkate alındığı *AGY*, *KYK* ve *HG* harmonik kaynağı tespit metot ve indisleri,
- Kaynak ve yük tarafına ait modeller ve devre analizi yöntemlerinin kullanıldığı harmonik sorumluluk paylaşırma amaçlı *Sİ* ve *KE* metotları,

- Kendilerine özgü akım dekompozisyonuna göre harmonik sorumluluk paylaşımın  $UA$  ve  $LA$  metotları,
- Çeşitli güç ifadelerinde yer alan aktif olmayan güç bileşenlerinin karşılaştırmasına dayanan  $AOG$  metodudur.

Sınıflandırılan  $AGY$ ,  $Sİ$ ,  $UA$ ,  $LA$  ve  $AOG$  metotları ile  $HG$  ve  $KYK$  indislerinin ana hatları aşağıda özetlenmiştir. Diğer taraftan,  $KE$  ile  $Sİ$  metotlarının aynı sonuçları verdiği [78]'da yapılan analitik ve nümerik analizlerle gösterilmiştir. Bu sebeple pratik sistemlerde uygulanabilirliği güçlü olan  $KE$  metodundan aşağıda bahsedilmemiştir.

## 7.1 Aktif Güç Yönünü Dikkate Alan Metot ve İndisler

Aktif güç akış yönünü dikkate alan  $AGY$  metodu en eski harmonik üreten yük tespit metotlarından biridir [71], [72]. Bu metoda göre eğer ilgili harmonik numarası için hesaplanan aktif güç negatif ise o harmonik numarası için baskın harmonik kaynağı yüküdür; aksi durumda kaynak tarafıdır.

Literatürde bu metottan türemiş indislerde mevcuttur [21], [73]. Bunlardan biri olan  $KYK$  indisi [73] aktif ( $P$ ) ve temel harmonik aktif ( $P_1$ ) güçlerinin oranı biçiminde tanımlanmıştır:

$$KYK = P/P_1 \quad (7.1)$$

$KYK$  indisi birden küçük değerlerde olduğu durumlarda baskın harmonik kaynağı yük olup aksi durumda gerilim kaynağı tarafıdır. Bu indisin üç fazlı sistemlere uygulanmasında ise aktif güç fazlardan çekilen aktif güçler toplamından hesap edilir bununla birlikte temel harmonik aktif gücü yerine temel harmonik pozitif sıra aktif gücü kullanılır.

$AGY$  metodundan türemiş diğer indis olan  $HG$  indisi ise; aktif gücün negatif olduğu harmonik numaralarındaki ( $\ell$ ) harmonik akımları dikkate alınarak hesaplanan akım etkin değerinin, aktif gücün pozitif olduğu harmonik numaralarındaki ( $s$ ) harmonik akımları dikkate alınarak hesaplanan akım etkin değerine oranı biçiminde tanımlanmıştır [21]:

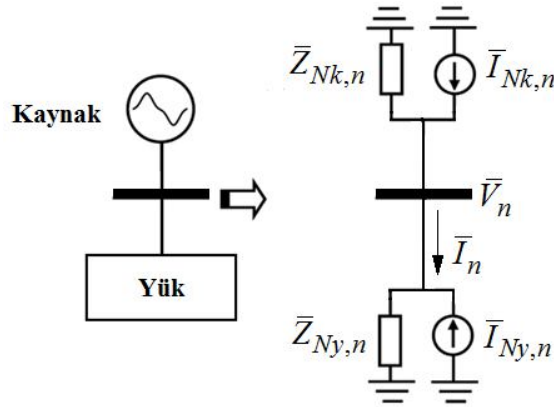
$$HG = \sqrt{\sum_{n \in \ell} I_n^2} / \sqrt{\sum_{n \in s} I_n^2} \quad (7.2)$$

$HG$  indisinin sıfırdan büyük olduğu durumlarda baskın harmonik kaynağı yük tarafı bir başka ifadeyle yük harmonik üreten yüküdür.

Bu indisin üç fazlı sistemler için hesabında ise her bir fazdan çekilen harmonik aktif güçlerinin toplamının işareti kontrol edilerek  $\ell$  ve  $s$  harmonik numaraları belirlenir. Akım etkin değeri ise kolektif akımın etkin değeridir.

## 7.2 Süperpozisyon ve İzdüşüm Metodu

$SI$  metodu her bir harmonik için kaynak ve yük tarafının sebep olduğu akım veya gerilim parçalarının bulunmasını; böylece harmonik sorumluluğun paylaşılmasını amaçlayan bir metottur [75]. Bu metotta kaynak ve yük tarafı Şekil 7-1’de verildiği gibi her bir harmonik için Norton eşdeğer devre biçiminde modellenir.



Şekil 7-1:  $SI$  metodunun izah edildiği sistem.

Bu modelleme işlemi yapıldıktan sonra Süperpozisyon teoremi ve akım bölme kuralı yardımıyla her bir harmonik için yükün sisteme bastığı akım ( $\bar{I}_{y,n}$ ),

$$\bar{I}_{y,n} = \bar{Z}_{Ny,n} \bar{I}_{Ny,n} / (\bar{Z}_{Ny,n} + \bar{Z}_{Nk,n}) \quad (7.3)$$

ve kaynaktan dolayı hattan akan akım ( $\bar{I}_{k,n}$ ),

$$\bar{I}_{k,n} = \bar{I}_n - \bar{I}_{y,n} \quad (7.4)$$

ifadelerinden hesaplanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus; Norton modelindeki empedans ve akım değerlerinin fazör değerler olduğudur. Son olarak, yük tarafından



sisteme basılan harmonik akımının ( $\bar{I}_{y,n} = I_{y,n} \angle \delta_{y,n}$ ) ilgili harmonik hat akımı ( $\bar{I}_n = I_n \angle \delta_n$ ) üzerine izdüşümü,

$$I_{Py,n} = I_{y,n} \cos(\delta_{y,n} - \delta_n) \quad (7.5)$$

ve kaynaktan dolayı akan harmonik akımının ilgili harmonik hat akımı üzerine izdüşümü,

$$I_{Pk,n} = I_n - I_{Py,n} \quad (7.6)$$

olarak hesaplanır. Bu değerler pozitif veya negatif olabilirler; negatif değer ait olduğu tarafın harmonik bozulmayı azalttığını, pozitif değer ise ait olduğu tarafın harmonik bozulmayı arttırdığını gösterir.

Ancak bu metot kaynak ve yük tarafının Norton harmonik empedansı gibi sistem bilgilerini gerektirmektedir. Metodun pratik uygulamalarında kaynak tarafının Norton empedansının sistemin kısa devre empedansı ile aynı olduğu kabul edilebilir. Fakat yük tarafı için Norton empedansının bulunması güçtür. Dolayısıyla literatürde bazı çalışmalar yük tarafı Norton empedansı yerine kullanılmak üzere pratik biçimde hesap edilebilecek eşdeğer yük empedansları önermiştir [76], [77]. Tezde yapılan analiz çalışmalarında ise  $S\bar{I}$  metodunun uygulanmasında Norton eşdeğer empedansı [76]'de verilen biçimde hesap edilmiştir.

### 7.3 Uygun Akım Metodu

Bu metotta akım gerilimle aynı miktarda harmonik bozulmaya sahip olan uygun (conformity) akım ve geriye kalan akım parçası olan uygun olmayan (non-conformity) akım parçalarına ayrılmıştır [79]. Buna göre (2.11) ve (2.12)'de verilen ani akım ve gerilim ifadeleri dikkate alınarak;

$$Z_n = \frac{V_1}{I_1} \angle n(\theta_1 - \delta_1) \quad (7.7)$$

biçiminde hesaplanan n.harmonik yük empedansı üzerinden akan akım yük akımının uygun akım parçasıdır:

$$i_{co}(t) = \sum_n \frac{I_1}{V_1} V_n \sin(\omega_n t + \theta_n + n(\delta_1 - \theta_1)) \quad (7.8)$$

Böylece uygun olmayan akım parçası,

$$i_{nco}(t) = i(t) - i_{co}(t) \quad (7.9)$$

biçiminde ifade edilmiştir. Yükün harmonik bozulma sorumluluğunu gösteren  $UA$  metoduna ait gösterge ise uygun olmayan akım parçası ve toplam akım etkin değerlerinin yüzde oranı biçiminde [80] çalışmasında hesap edilmiştir:

$$UA(\%) = \frac{I_{nco}}{I} 100 \quad (7.10)$$

Bu metodun üç fazlı sistemlere uygulamasında (7.7)'de verilen empedans hesabı gerilim ve akımın temel harmonik pozitif sıra bileşenleri kullanılarak yapılır. Böylece hesaplanan bu empedans değeri ile her fazın kendine ait gerilimi ve akımı dikkate alınarak; her bir fazdan çekilen uygun ve uygun olmayan akım parçaları (7.8) ve (7.9)'dan bulunur. Böylece her hat için hesaplanan uygun olmayan akım parçaları ve hat akımlarının kolektif etkin değerleri (7.10)'da yerlerine konularak  $UA(\%)$  metot göstergesi hesap edilir.

## 7.4 Lineer Akım Metodu

$LA$  metodunda yük akımı doğrusal eşdeğer empedansın çektiği doğrusal (lineer) akım ve geriye kalan akım olan doğrusal olmayan akım olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır [80]. Bu eşdeğer empedansın direnci,

$$R = \frac{V_1}{I_1} \cos(\theta_1 - \delta_1) \quad (7.11)$$

ve  $n$ . harmonik indüktif reaktansı,

$$X_n = n \frac{V_1}{I_1} \sin(\theta_1 - \delta_1) \quad (7.12)$$

olarak hesaplanır. Böylece yükün çektiği akımın doğrusal parçası,

$$i_\ell(t) = \sum_n \frac{\sqrt{2}V_n}{\sqrt{R^2 + X_n^2}} \sin\left(n\omega_1 t + \theta_n - \arctan\left(\frac{X_n}{R}\right)\right) \quad (7.13)$$

ve geriye kalan bir başka ifadeyle doğrusal olmayan parçası,

$$i_{n\ell}(t) = i(t) - i_{\ell}(t) \quad (7.14)$$

biçiminde ifade edilmiştir. Böylece yükün harmonik bozulmadaki sorumluluğunu gösteren  $LA$  metoduna ait gösterge ise doğrusal olmayan akım parçasının ve toplam akımın etkin değerlerinin yüzde oranı biçiminde ifade edilmiştir:

$$LA(\%) = \frac{I_{n\ell}}{I} 100 \quad (7.15)$$

Bu metodun üç fazlı sistemlere uygulamasında ise eşdeğer empedansın direnç ve  $n$ .harmonik indüktif reaktansı fazlardan her hangi birinin temel harmonik gerilimi ve akımına göre (7.11) ve (7.12)'den bulunur. Bu eşdeğer empedans ile her fazın kendine ait gerilimi ve akımı kullanılarak; her bir fazdan çekilen doğrusal ve doğrusal olmayan akım parçaları (7.13) ve (7.14)'den bulunur. Böylece her hat için hesaplanan doğrusal olmayan akım parçaları ve hat akımlarının kolektif etkin değerleri (7.15)'de yerlerine konularak  $LA(\%)$  metot göstergesi hesap edilir.

## 7.5 Aktif Olmayan Güç Metodu

[81]'de sunulan  $AOG$  metodunda temel harmonik reaktif, Sharon'un tanımladığı reaktif ve Fryze'nin tanımladığı reaktif güçlerin karşılaştırmasına göre baskın harmonik bozulma kaynağının gerilim kaynağı tarafı mı yoksa yük mü olduğu belirlenir.

Bu metod dört farklı kaynak ve yük durumu için şöyledir:

- Sinüzoidal olmayan gerilim ve doğrusal yük durumunda Sharon'un reaktif gücü Fryze'nin reaktif gücüne göre temel harmonik reaktif güce daha yakındır. Bir başka ifadeyle Sharon'un reaktif gücü ile temel harmonik reaktif gücü arasındaki fark,

$$AOG_1 = S_q - Q_1 \quad (7.16)$$

ve Fryze'nin reaktif gücü ile Sharon'un reaktif gücü arasındaki fark,

$$AOG_2 = Q_f - S_q \quad (7.17)$$

olarak ifade edilirse; sinüzoidal olmayan gerilim ve doğrusal yük durumunda (7.16) ve (7.17) arasında,

$$AOG_2 > AOG_1 \quad (7.18)$$

biçiminde bir ilişki vardır.

- Sinüzoidal gerilim ve doğrusal olmayan yük durumunda ise; Sharon'un reaktif gücü temel harmonik reaktif güce göre Fryze'nin reaktif gücüne daha yakındır. Buna göre sinüzoidal gerilim ve doğrusal olmayan yük durumunda (7.16) ve (7.17) arasında,

$$AOG_1 > AOG_2 \quad (7.19)$$

biçiminde bir ilişki yazılabilir.

- Sinüzoidal olmayan gerilim ve doğrusal olmayan yük durumunda ise; Sharon'un reaktif gücü temel harmonik ve Fryze'nin reaktif güçlerine yaklaşık aynı mesafededir:

$$AOG_1 \cong AOG_2 > 0 \quad (7.20)$$

- Sinüzoidal gerilim ve doğrusal yük durumunda ise; üç reaktif güç ihmal edilebilecek degerdedir:

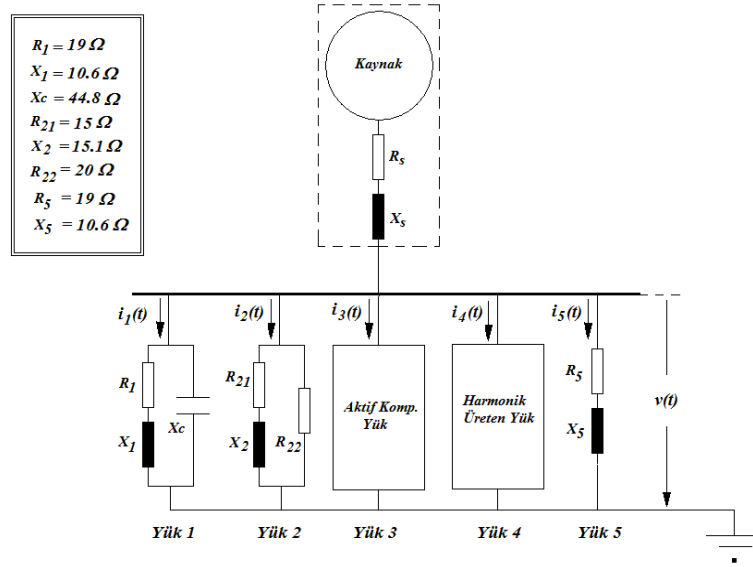
$$AOG_1 \cong AOG_2 \cong 0 \quad (7.21)$$

Diğer taraftan, metodun üç fazlı sistemlerde uygulamasında; temel harmonik pozitif sıra gücü ile her bir faza ait Sharon ve Fryze'nin reaktif güçlerinin toplamı karşılaştırılır.

## 7.6 Analiz

Ayrıntılı bir biçimde yapılan niteliksel analizden, harmonik üreten yük tespit ve harmonik bozulma sorumluluk paylaşırma metotları ile indislerinin genellikle yükün modellenmesiyle alakalı kabuller içerdiği görülmektedir. Dolayısıyla bu metotlar ve indisler basit kondansatör ile temel harmonik reaktif gücü kompanze edilmiş doğrusal empedans, çeşitli güç faktörlerine sahip doğrusal empedanslardan oluşan yük ve sinüzoidal akım kompanzasyonu uygulanmış yük durumlarında hatalı sonuçlar verebilir. Diğer taraftan yeni güç ifadesi temelli metodun yük modellenmesine ilişkin bir kısım içermemesi sebebiyle diğer metotlar ve indislerin hatalı sonuçlar verebileceği yük durumlarında doğru biçimde çalışması muhtemeldir.

Yukarıda bahsedilen durum Şekil 7-2’de verilen tipik dağıtım sisteminde analiz edilmiştir.



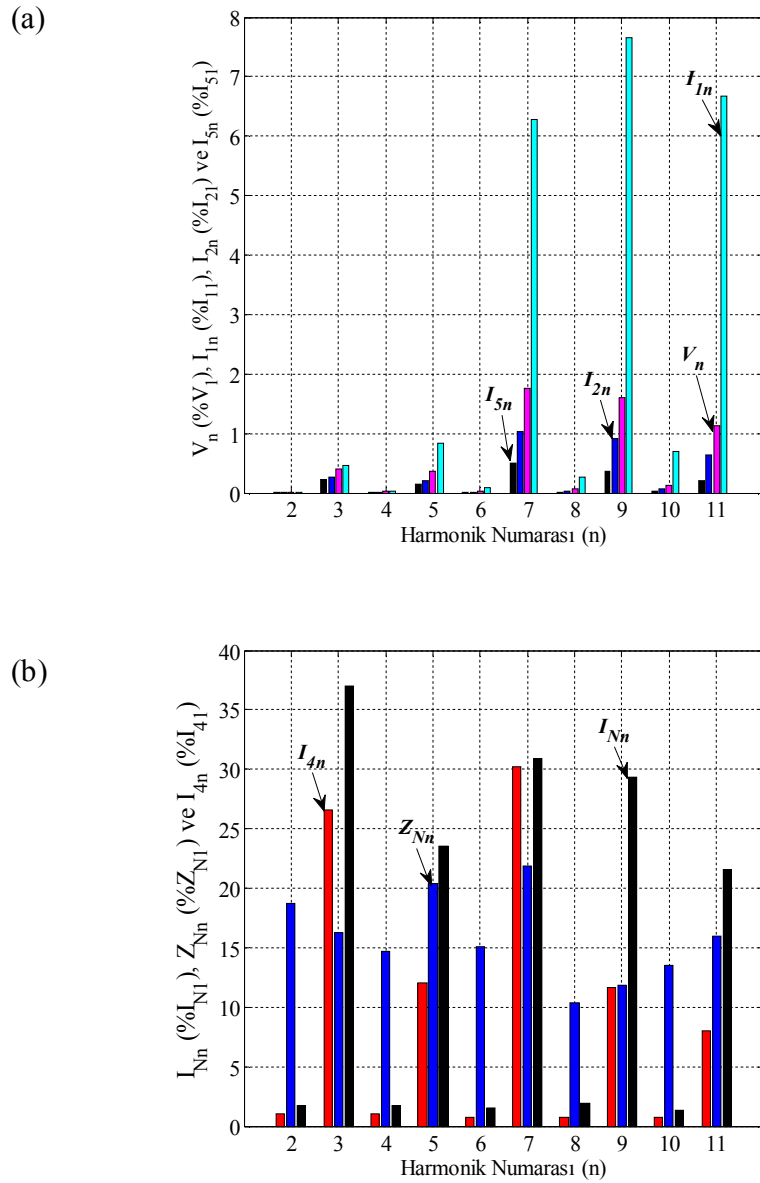
Şekil 7-2: Harmonik üreten yük tespit metotları ve indislerinin karşılaştırmalı analizi için kullanılan sistem.

Şekil 7-2’de verilen analiz sisteminde;

- Yük 1: basit kondansatörle temel hamonik reaktif gücü kompanze edilmiş R-L empedans,
- Yük 2: R/Z oranları farklı seçilmiş iki R-L empedansın paralel bağlı hali,
- Yük 3: sinüzoidal akım kompanzasyonu uygulanmış yük,
- Yük 4: kırpıcı devresiyle kontrol edilen R-L empedans,
- Yük 5: R-L empedans,

olarak belirlenmiştir. Altıncı bölümde test edilen kırpıcı devresiyle kontrol edilmiş R-L empedansa ait ölçümlere göre hesap edilen Norton eşdeğer devre modeli analizlerde yük 4’ün modellenmesinde kullanılmıştır. Buna ek olarak sistemde gerilim kaynağının sinüzoidal ve etkin değerinin 220V olduğu ayrıca hattın  $X_5/R_5$  oranının 0.1 olduğu durum için; her bir yükün temel harmonik akımı etkin değerleri 8.5 A, 18.9 A, 8.5 A, 2 A ve 9.7 A’dır. Bu durumda ortak bağlantı noktası geriliminin temel harmonik etkin değeri 211.8V’dır. Bu şartlar için ortak bağlantı noktası gerilimi ile 1, 2 ve 5 numaralı yüklerin

çektığı akımlara ait harmoniklerin etkin değerleri temel harmonik etkin değerlerinin %'si cinsinden Şekil 7-3 (a)'da verilmiştir. Ayrıca 4 numaralı yükün (harmonik üreten yükün) Norton eşdeğer devre modeline ait harmonik empedans genlikleri ve akım etkin değerleri ile bu yükün çektiği akıma ( $i_4$ ) ait harmonik etkin değerleri; temel harmonik etkin değerlerinin %'si cinsinden Şekil 7-3 (b)'de verilmiştir.



Şekil 7-3: Şekil 7-2'de verilen sistemde (a) ortak bağlantı noktası gerilimi ile 1, 2 ve 5 numaralı yüklerin çektiği akımlara ait harmoniklerin etkin değerleri (b) 4 numaralı yükün (harmonik üreten yükün) Norton eşdeğer devre modeline ait harmonik empedans genlikleri ve akım etkin değerleri ile bu yükün çektiği akıma ( $i_4$ ) ait harmonik etkin değerleri.

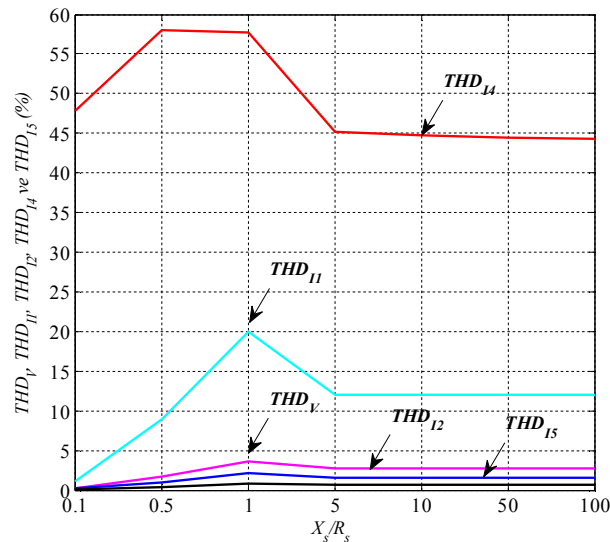
Şekil 7-3 (a) ve (b)'den sadece yük 4'ün yüksek değerlerde harmonik bileşenlere sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte; gerilim ile yük 1, 2, 4 ve 5 numaralı yük akımlarına ait  $THD(\%)$  değerleri sırasıyla 0.2, 1.1, 0.1, 47.8 ve 0.1'dir.

Bu sistemde;

- Gerilim kaynağının sinüzoidal olduğu durumda hattın  $X_S/R_S$  oranının 0.1 ile 100 aralığı için metotlar ve indislerin,
- Harmonik bileşenlerine ait genlikler ve açılar özdeş olarak seçilerek elde edilmiş sinüzoidal olmayan gerilim kaynağının bulunduğu sistem durumunda gerilim harmoniklerinin açılarının  $-150^\circ$  ile  $180^\circ$  aralığı için metotlar ve indislerin,

parametrik analizi yapılmıştır. Böylece çeşitli yük tipleri ve kaynak tarafı parametreleri dikkate alınarak, harmonik üreten yük tespit ve harmonik bozulma sorumluluk paylaşım metotları ve indislerinin başarımları analiz edilecektir.

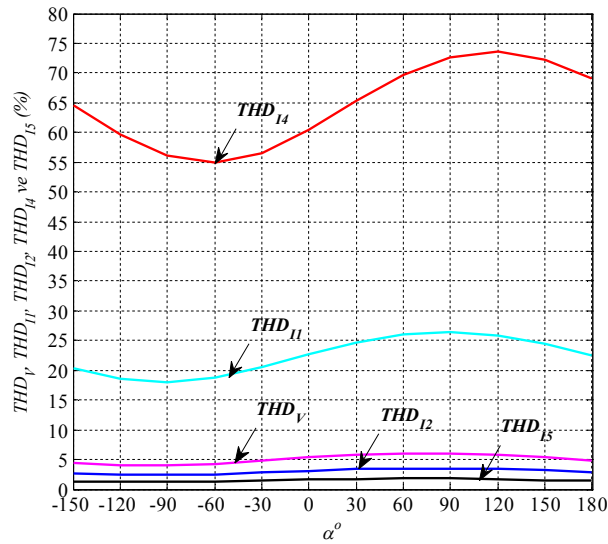
İlk analiz durumunda sistemde  $X_S/R_S$  oranının 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50 ve 100 değerleri için metot göstergeleri ve indisler hesaplanmıştır. Bu  $X_S/R_S$  aralığı için ortak bağlantı noktası gerilimi ve 1, 2, 4 ve 5 numaralı yüklere ait akımların  $THD(\%)$  değerlerinin değişimi Şekil 7-4'de verilmiştir.



Şekil 7-4: Şekil 7-2'de verilen sistemde  $X_S/R_S$  oranının 0.1-100 aralığı için ortak bağlantı noktası gerilimi ile 1, 2, 4 ve 5 numaralı yüklere ait akımların  $THD(\%)$  değerlerinin değişimi.

Şekil 7-4'den  $THD_{I4}(\%)$ 'ün 47.8 ile 58,  $THD_{II}(\%)$ 'in 1.1 ile 19.9 ve  $THD_V(\%)$ 'nin 0.2 ile 3.6 arasında değerler aldığı görülmektedir. Bununla birlikte,  $THD_{I2}$  ve  $THD_{I5}$  ise bütün  $X_S/R_S$  oranları için  $THD_V$ 'den küçük değerlerde hesap edilmiştir.

İkinci analizde ise kaynak gerilimi harmoniklerine ait özdeş açılarının ( $\alpha$ )  $-150^\circ$  ile  $180^\circ$  aralığı için metot göstergeleri ve indisler hesaplanmıştır. Bu analiz sırasında hattın  $X_S/R_S$  oranı 100 olarak belirlenmiştir. Bu  $\alpha$  aralığı için ortak bağlantı noktası gerilimi ve 1, 2, 4 ve 5 numaralı yüklere ait akımların  $THD(\%)$  değerlerinin değişimi Şekil 7-5'de verilmiştir.



Şekil 7-5: Şekil 7-2'de verilen sistemde kaynak gerilimi harmoniklerine ait açılarının ( $\alpha$ )  $-150^\circ$ -  $180^\circ$  aralığı için ortak bağlantı noktası gerilimi ile 1, 2, 4 ve 5 numaralı yüklere ait akımların  $THD(\%)$  değerlerinin değişimi.

Şekil 7-5'  $THD_{I4}(\%)$ 'ün 54.9 ile 73.6,  $THD_{II}(\%)$ 'in 18.1 ile 26.4 ve  $THD_V(\%)$ 'nin 4 ile 6 arasında değerler aldığı görülmektedir. Bununla birlikte,  $THD_{I2}$  ve  $THD_{I5}$  ise bütün  $\alpha$  değerleri için  $THD_V$ 'den küçük değerlerde hesap edilmiştir.

Birinci ve ikinci analizlerde AGY metoduna göre harmonik üreten yüklerin tespiti için 3. harmonik aktif gücünün ( $P_3$ ) temel harmonik aktif gücünün yüzdesi cinsinden değeri ( $P_1\%$ ) sırasıyla Tablo 7-2 ve Tablo 7-3'de verilmiştir.



Tablo 7-2:  $P_3(P_1\%)$  'ün  $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.

$X_S/R_S$ \Yük No	1	2	3	4	5
0.1	0.00	0.00	0.00	-0.04	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	-0.05	0.00
1	0.00	0.00	0.00	-0.05	0.00
5	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00
10	0.00	0.00	0.00	-0.03	0.00
50	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00
100	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00

Tablo 7-3:  $P_3(P_1\%)$  'ün  $\alpha$ 'nın  $-150^\circ - 180^\circ$  aralığı için değerleri.

$\alpha$ \Yük No	1	2	3	4	5
$-150^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00
$-120^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00
$-90^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
$-60^\circ$	0.00	0.00	0.00	-0.12	0.00
$-30^\circ$	0.00	0.00	0.00	-0.24	0.00
$0^\circ$	0.00	0.01	0.00	-0.28	0.00
$30^\circ$	0.00	0.01	0.00	-0.24	0.00
$60^\circ$	0.01	0.01	0.00	-0.13	0.01
$90^\circ$	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
$120^\circ$	0.01	0.01	0.00	0.18	0.01
$150^\circ$	0.00	0.01	0.00	0.29	0.00
$180^\circ$	0.00	0.01	0.00	0.34	0.00

Tablo 7-2 ve Tablo 7-3'de verilen sonuçlardan her iki analizde sadece yük 1, 2, 3 ve 5 için  $P_3$  değerlerinin pozitif olduğu görülmektedir. Bu sebeple 3. harmonik aktif gücü dikkate alınarak uygulanan *AGY* metoduna göre; bu yükler her iki analiz şartlarında doğrusal yük olarak tespit edilmiştir. Bununla birlikte Tablo 7-2'de verilen  $P_3$  değerlerinin negatif olması sebebiyle analiz 1'e ait şartlarda *AGY* metoduna göre; yük 4 harmonik üreten yük olarak tespit edilmiştir. Diğer taraftan, Tablo 7-3'de verilen yük 4'e ait  $P_3$ 'ün  $\alpha$ 'nın  $-60^\circ$  ile  $60^\circ$  aralığı için hesaplanan değerlerinin negatif olması dolayısıyla bu  $\alpha$  aralığı için *AGY* metoduna göre; yük 4 harmonik üreten yük olarak tespit edilmiştir.

Birinci ve ikinci analizlerde hesaplanan *KYK* indisi değerleri sırasıyla Tablo 7-4 ve Tablo 7-5'de verilmiştir.

Tablo 7-4:  $KYK$  indisinin  $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.

$X_S/R_S$ \Yük No	1	2	3	4	5
0.1	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
0.5	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
1	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00
5	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
10	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
50	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00
100	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00

Tablo 7-5:  $KYK$  indisinin  $\alpha$ 'nın  $-150^\circ$  -  $180^\circ$  aralığı için değerleri.

$\alpha$ \Yük No	1	2	3	4	5
$-150^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00
$-120^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00
$-90^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00
$-60^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00
$-30^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00
$0^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00
$30^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.97	1.00
$60^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00
$90^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00
$120^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00
$150^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00
$180^\circ$	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00

Tablo 7-4 ve Tablo 7-5'de verilen sonuçlardan her iki analizde sadece yük 4 için hesaplanan  $KYK$  değerlerinin birden küçük olduğu görülmektedir. Diğer yükler için  $KYK$  değerleri ise birdir. Böylece  $KYK$  indisine göre; yük 4 harmonik üreten yük, diğer yükler ise doğrusal yük olarak tespit edilmiştir.

Birinci ve ikinci analizlerde hesaplanan  $HG$  indisi değerleri sırasıyla Tablo 7-6 ve Tablo 7-7'de verilmiştir.

Tablo 7-6:  $HG$  indisinin  $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.

$X_S/R_S$ \Yük No	1	2	3	4	5
0.1	0.00	0.00	0.00	0.48	0.00
0.5	0.00	0.00	0.00	0.58	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.58	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00
50	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00
100	0.00	0.00	0.00	0.44	0.00

Tablo 7-7:  $HG$  indisinin  $\alpha$ 'nın  $-150^\circ - 180^\circ$  aralığı için değerleri.

$\alpha$ \Yük No	1	2	3	4	5
$-150^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.48	0.00
$-120^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.52	0.00
$-90^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.51	0.00
$-60^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00
$-30^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00
$0^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.59	0.00
$30^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.64	0.00
$60^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.68	0.00
$90^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00
$120^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00
$150^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.45	0.00
$180^\circ$	0.00	0.00	0.00	0.47	0.00

Tablo 7-6 ve Tablo 7-7 verilen sonuçlardan her iki analizde  $HG$  değerlerinin; yük 4 için sıfırdan büyük olduğu, diğer yükler içinse sıfır olduğu görülmektedir. Böylece  $HG$  indisine göre; yük 4 harmonik üreten yük, diğer yükler doğrusal yük olarak tespit edilmiştir.

Birinci ve ikinci analizlerde  $S\dot{I}$  metoduna göre 3. harmonik akımındaki kaynak ve yük sorumluluklarını paylaşmak için hesaplanan  $I_{Py,3}$  ve  $I_{Pk,3}$  değerleri sırasıyla Tablo 7-14 ve Tablo 7-15'de verilmiştir.

Tablo 7-8:  $S\dot{I}$  metoduna ait göstergelerin  $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.

$X_S/R_S$ \Yük No	1		2		3		4		5	
	$I_{Py,3}$	$I_{Pk,3}$	$I_{Py,3}$	$I_{Pk,3}$	$I_{Py,3}$	$I_{Pk,3}$	$I_{Py,3}$	$I_{Pk,3}$	$I_{Py,3}$	$I_{Pk,3}$
0.1	0.01	0.00	0.00	0.02	-0.01	0.01	0.48	0.00	0.00	0.01
0.5	0.01	0.00	-0.01	0.03	-0.01	0.01	0.50	0.00	0.00	0.01
1	0.02	0.01	-0.01	0.05	-0.01	0.01	0.52	0.00	0.00	0.01
5	0.03	0.01	-0.02	0.07	-0.01	0.01	0.55	0.00	0.00	0.02
10	0.03	0.01	-0.02	0.07	-0.01	0.01	0.55	0.00	0.00	0.02
50	0.03	0.01	-0.02	0.07	-0.01	0.01	0.55	0.00	0.00	0.02
100	0.03	0.01	-0.02	0.07	-0.01	0.01	0.55	0.00	0.00	0.02

Tablo 7-9:  $S\dot{I}$  metoduna ait göstergelerin  $\alpha$ 'nın  $-150^\circ$  ile  $180^\circ$  aralığı için değerleri.

$\alpha \setminus$ Yük No	1		2		3		4		5	
	$I_{Py,3}$	$I_{Pk,3}$	$I_{Py,3}$	$I_{Pk,3}$	$I_{Py,3}$	$I_{Pk,3}$	$I_{Py,3}$	$I_{Pk,3}$	$I_{Py,3}$	$I_{Pk,3}$
$-150^\circ$	0.06	0.02	-0.03	0.13	0.06	-0.06	0.56	0.01	0.01	0.04
$-120^\circ$	0.04	0.01	-0.03	0.10	0.04	-0.04	0.47	0.01	0.01	0.03
$-90^\circ$	0.04	0.01	-0.02	0.09	0.01	-0.01	0.40	0.00	0.00	0.02
$-60^\circ$	0.05	0.01	-0.03	0.11	-0.03	0.03	0.37	-0.01	0.01	0.03
$-30^\circ$	0.06	0.02	-0.04	0.14	-0.06	0.06	0.42	-0.01	0.01	0.04
$0^\circ$	0.08	0.02	-0.05	0.17	-0.09	0.09	0.51	-0.01	0.01	0.05
$30^\circ$	0.09	0.02	-0.05	0.20	-0.09	0.09	0.60	-0.01	0.01	0.06
$60^\circ$	0.10	0.03	-0.06	0.22	-0.07	0.07	0.67	0.00	0.01	0.06
$90^\circ$	0.10	0.03	-0.06	0.23	-0.03	0.03	0.72	0.00	0.01	0.06
$120^\circ$	0.10	0.03	-0.06	0.22	0.01	-0.01	0.73	0.00	0.01	0.06
$150^\circ$	0.09	0.02	-0.05	0.20	0.04	-0.04	0.71	0.01	0.01	0.06
$180^\circ$	0.07	0.02	-0.04	0.17	0.06	-0.06	0.65	0.01	0.01	0.05

Tablo 7-8 ve Tablo 7-9'de verilen sonuçlardan her iki analiz durumu için yük 5 için hesaplanan  $I_{Py,3}$  değerlerinin  $I_{Pk,3}$  değerlerinden küçük olması sebebiyle  $S\dot{I}$  metoduna göre 3.harmonik akımında sorumluluk bakımından baskın olan taraf kaynaktır. Her iki analiz şartlarında yük 2 için hesaplanan  $I_{Py,3}$  değerlerinin negatif  $I_{Pk,3}$  değerlerinin ise pozitif olması sebebiyle; 3. harmonik akımında kaynak tarafının harmonik bozulmanın kaynağı olduğu görülmektedir. Yük 1 ve yük 4 için her iki analizde hesaplanan  $I_{Py,3}$  değerleri  $I_{Pk,3}$  değerlerinden büyüktür; bu sebeple her iki yükün 3. harmonik akımında sorumluluğunun kaynak tarafından fazla olduğu görülmektedir. Yük 3 için  $I_{Py,3}$  ve  $I_{Pk,3}$  değerleri her iki analizde aynı büyüklüğe fakat ters işarete sahiptir. Bu durum yük 3'ün 3. harmonikte akım çekmediğini göstermektedir.

Birinci ve ikinci analizlerde hesaplanan  $UA(\%)$  metot göstergesine ait değerler sırasıyla Tablo 7-10 ve Tablo 7-11'de verilmiştir.

Tablo 7-10:  $UA(\%)$  metot göstergesinin  $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.

$X_S/R_S \setminus$ Yük No	1	2	3	4	5
0.1	1.18	0.38	0.28	43.21	0.30
0.5	9.04	2.39	1.65	50.52	1.88
1	19.83	5.28	3.63	50.02	4.13
5	12.26	3.99	2.67	41.41	3.14
10	12.18	4.01	2.68	41.03	3.16
50	12.17	4.03	2.69	40.73	3.17
100	12.17	4.03	2.70	40.69	3.17

Tablo 7-11:  $UA(\%)$  metot göstergesinin  $\alpha$ 'nın  $-150^\circ - 180^\circ$  aralığı için değerleri.

$\alpha$ \Yük No	1	2	3	4	5
$-150^\circ$	20.33	6.48	4.39	55.16	5.06
$-120^\circ$	18.68	5.97	4.06	52.28	4.66
$-90^\circ$	18.10	5.87	4.03	49.65	4.60
$-60^\circ$	18.85	6.24	4.32	48.29	4.91
$-30^\circ$	20.60	6.91	4.81	48.79	5.45
$0^\circ$	22.69	7.65	5.33	50.88	6.04
$30^\circ$	24.53	8.28	5.75	53.68	6.53
$60^\circ$	25.75	8.66	5.99	56.31	6.82
$90^\circ$	26.13	8.72	6.01	58.22	6.86
$120^\circ$	25.63	8.46	5.80	59.11	6.65
$150^\circ$	24.31	7.93	5.40	58.87	6.21
$180^\circ$	22.41	7.21	4.89	57.50	5.64

Tablo 7-10 ve Tablo 7-11'de verilen sonuçlardan her iki analiz durumu için bütün yüklerin dikkate değer miktarda uygun olmayan akım çektiği görülmektedir. Bu sebeple her bir yük için hesaplanan  $UA(\%)$  değerlerinin büyükten küçüğe sıralamasına göre; yükler harmonik bozulma sorumluluğu en büyükten en küçüğe doğru 4, 1, 2, 5 ve 3 numaralı yükler biçiminde sıralanabilir. Buradan görülmektedir ki,  $UA$  metoduna göre 1, 2 ve 5 numaralı doğrusal yükleri ile sinüzoidal aktif akım çeken yük 3 harmonik bozulmadan sorumlu tutulmaktadır.

Birinci ve ikinci analizlerde hesaplanan  $LA(\%)$  metot göstergesinin değerleri sırasıyla Tablo 7-12 ve Tablo 7-13'de verilmiştir.

Tablo 7-12:  $LA(\%)$  metot göstergesinin  $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için değerleri.

$X_S/R_S$ \Yük No	1	2	3	4	5
0.1	1.18	0.14	0.28	43.23	0.00
0.5	9.04	0.88	1.65	50.41	0.00
1	19.83	1.93	3.63	50.32	0.00
5	12.26	1.39	2.67	41.55	0.00
10	12.18	1.39	2.68	41.20	0.00
50	12.17	1.40	2.69	40.93	0.00
100	12.17	1.40	2.70	40.89	0.00

Tablo 7-13:  $LA(\%)$  metot göstergesinin  $\alpha$ 'nın  $-150^\circ - 180^\circ$  aralığı için değerleri.

$\alpha$ \Yük No	1	2	3	4	5
$-150^\circ$	20.33	2.25	4.39	54.35	0.00
$-120^\circ$	18.68	2.08	4.06	51.33	0.00
$-90^\circ$	18.10	2.05	4.03	48.97	0.00
$-60^\circ$	18.85	2.19	4.32	48.25	0.00
$-30^\circ$	20.60	2.44	4.81	49.54	0.00
$0^\circ$	22.69	2.70	5.33	52.23	0.00
$30^\circ$	24.53	2.92	5.75	55.27	0.00
$60^\circ$	25.75	3.05	5.99	57.82	0.00
$90^\circ$	26.13	3.06	6.01	59.39	0.00
$120^\circ$	25.63	2.96	5.80	59.80	0.00
$150^\circ$	24.31	2.77	5.40	59.01	0.00
$180^\circ$	22.41	2.51	4.89	57.10	0.00

Tablo 7-12 ve Tablo 7-13'da verilen sonuçlardan her iki analizde yük 1, 2, 3 ve 4 için hesaplanan  $LA(\%)$  değerlerinin sıfırdan büyük olduğu görülmektedir. Yük 5 için  $LA(\%)$  değerleri ise sıfırdır. Böylece  $LA$  metoduna göre yük 5 doğrusal yük, diğer yükler ise harmonik üreten yük olarak tespit edilmiştir.

Birinci ve ikinci analizlerde hesaplanan  $AOG$  metoduna ait  $AOG_1$  ve  $AOG_2$  göstergelerinin değerleri sırasıyla Tablo 7-14 ve Tablo 7-15'de verilmiştir.

Tablo 7-14:  $AOG$  metoduna ait göstergelerin  $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için normalize edilmiş değerleri.

$X_S/R_S$ \Yük No	1		2		3		4		5	
	$AOG_1$	$AOG_2$	$AOG_1$	$AOG_2$	$AOG_1$	$AOG_2$	$AOG_1$	$AOG_2$	$AOG_1$	$AOG_2$
0.1	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.10	0.00	0.00
0.5	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.13	0.05	0.00	0.00
1	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.12	0.06	0.00	0.00
5	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.10	0.02	0.00	0.00
10	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.10	0.02	0.00	0.00
50	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.10	0.02	0.00	0.00
100	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.10	0.02	0.00	0.00

Tablo 7-15: *AOG* metoduna ait göstergelerin  $\alpha$ 'nın  $-150^\circ$  -  $180^\circ$  aralığı için normalize edilmiş değerleri.

$\alpha$ \Yük No	1		2		3		4		5	
	$AOG_1$	$AOG_2$	$AOG_1$	$AOG_2$	$AOG_1$	$AOG_2$	$AOG_1$	$AOG_2$	$AOG_1$	$AOG_2$
$-150^\circ$	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.08	0.13	0.00	0.00
$-120^\circ$	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.08	0.11	0.00	0.00
$-90^\circ$	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.07	0.10	0.00	0.00
$-60^\circ$	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.06	0.11	0.00	0.00
$-30^\circ$	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.06	0.12	0.00	0.00
$0^\circ$	0.22	0.01	0.00	0.00	0.00	0.05	0.10	0.10	0.00	0.00
$30^\circ$	0.24	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.13	0.08	0.00	0.00
$60^\circ$	0.25	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.16	0.08	0.00	0.00
$90^\circ$	0.26	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.17	0.08	0.00	0.00
$120^\circ$	0.25	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.17	0.09	0.00	0.00
$150^\circ$	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.14	0.10	0.00	0.00
$180^\circ$	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.11	0.12	0.00	0.00

Tablo 7-14 ve Tablo 7-15'den her iki analiz durumu için yük 1'in  $AOG_1 > AOG_2$  ilişkisine sahip olduğu görülmektedir. Buna göre *AOG* metodu yük 1'i harmonik üreten yük olarak işaret etmektedir. Diğer taraftan, yine her iki analiz durumu için 2, 3 ve 5 numaralı yüklerin  $AOG_1 < AOG_2$  ve  $AOG_1 = AOG_2 \cong 0$  ilişkileri var olduğu için bu yükler doğrusal yük olarak tespit edilmiştir. İlk analizde  $X_S/R_S$  oranının 0.1 değeri için  $AOG_1 < AOG_2$  ilişkisine, 0.5 ile 100 aralığı içinse  $AOG_1 > AOG_2$  ilişkisine sahip olduğundan dolayı; yük 4  $X_S/R_S$  oranının 0.5 ile 100 aralığı için harmonik üreten yük olarak tespit edilmiştir. Diğer taraftan, aynı yük ikinci analizde  $\alpha$ 'nın  $0^\circ$  ile  $180^\circ$  arasındaki değerleri için  $AOG_1 \cong AOG_2 > 0$  ve  $AOG_1 > AOG_2$  ilişkilerine sahiptir ve böylece bu  $\alpha$  aralığında harmonik üreten yük olarak tespit edilmiştir. Yük 4 geriye kalan  $\alpha$  değerlerinde ise  $AOG_1 < AOG_2$  ilişkisine sahip olduğundan dolayı doğrusal yük olarak tespit edilmiştir.

Son olarak; birinci ve ikinci analizlerde hesaplanan normalize edilmiş  $D_{sc}$  değerleri sırasıyla Tablo 7-16 ve Tablo 7-17'de verilmiştir.

Tablo 7-16:  $D_{sc}$  gücünün  $X_S/R_S$ 'nin 0.1- 100 aralığı için normalize edilmiş değerleri.

$X_S/R_S$ \Yük No	1	2	3	4	5
0.1	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00
0.5	0.02	0.01	0.02	0.28	0.01
1	0.03	0.01	0.04	0.31	0.03
5	0.02	0.01	0.03	0.18	0.02
10	0.02	0.01	0.03	0.17	0.02
50	0.02	0.01	0.03	0.16	0.02
100	0.02	0.01	0.03	0.16	0.02

Tablo 7-17:  $D_{sc}$  gücünün  $\alpha$ 'nın  $-150^\circ$  ile  $180^\circ$  aralığı için normalize edilmiş değerleri.

$\alpha$ \Yük No	1	2	3	4	5
$-150^\circ$	0.04	0.02	0.04	0.45	0.04
$-120^\circ$	0.04	0.01	0.04	0.41	0.03
$-90^\circ$	0.04	0.01	0.04	0.40	0.03
$-60^\circ$	0.04	0.02	0.04	0.42	0.03
$-30^\circ$	0.04	0.02	0.05	0.43	0.04
$0^\circ$	0.05	0.02	0.05	0.39	0.04
$30^\circ$	0.05	0.02	0.06	0.37	0.05
$60^\circ$	0.05	0.02	0.06	0.35	0.05
$90^\circ$	0.05	0.02	0.06	0.35	0.05
$120^\circ$	0.05	0.02	0.06	0.37	0.05
$150^\circ$	0.05	0.02	0.05	0.41	0.04
$180^\circ$	0.04	0.02	0.05	0.44	0.04

Tablo 7-16 ve Tablo 7-17'de verilen sonuçlardan her iki analizde yük 4 için hesaplanan  $D_{sc}$  değerlerinin 0.18 ile 0.50 arasında değiştiği bir başka ifadeyle dikkate değer miktarda büyük olduğu görülmektedir. Diğer yükler için hesaplanan  $D_{sc}$  değerlerinin azami değeri ise 0.07'dir. Bu sonuçlar dikkate alındığında yeni metoda göre yük 4 harmonik üreten yük; diğer yükler doğrusal yük olarak tespit edilmiştir.

## 7.7 Sonuçlar ve Tartışma

Bu bölümde literatürde var olan harmonik üreten yük tespit ve harmonik sorumluluk paylaşırma metotları niteliksel olarak incelenmiş ve bu metotlar yeni güç ifadesi temelli harmonik üreten yük tespit metoduyla örnek bir sistemde karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiştir. Örnek sistemdeki yükler; basit kondansatör ile temel harmonik reaktif gücü kompanze edilmiş doğrusal R-L empedans, çeşitli güç faktörlerine sahip doğrusal R-L empedanslar ve sinüzoidal aktif akım kompanzasyonu uygulanmış yük, dimmer devresiyle kontrol edilen doğrusal R-L empedans ve doğrusal R-L empedansdır.

Analiz sırasında kaynak tarafının iki durumu dikkate alınmıştır:

- Thevenin eşdeğer gerilimi sinüzoidal iken Thevenin eşdeğer empedansına ait X/R oranı değiştirilmiştir. Bu sırada Thevenin eşdeğer empedansı temel harmonik için sabit tutulmuştur.
- Ayrıca kaynak tarafı Thevenin eşdeğer geriliminin bozulmaya sahip olduğu durumda gerilim harmoniklerine ait açılar değiştirilmiştir.



Bu iki tip analiz durumundan elde edilen sonuçlardan önemli olanları aşağıda sıralanmıştır:

- *AOG* metodu basit kondansatör ile temel harmonik reaktif gücü kompanze edilmiş doğrusal yüklerde hatalı sonuç verebilir,
- Yükün doğrusal kısmını modelleme biçimlerinden ötürü *UA* metoduna göre hesaplanan gösterge yukarıda sayılan bütün doğrusal yük veya harmonik üretmeyen yük durumlarında dikkate değer büyüklüktedir. Bu sebeple kullanımı sorunludur,
- *Sİ* metodu teorik olarak eksiksiz bir metottur fakat sonuçları yükün modelleme biçimine göre değişir. Bu sebeple özellikle basit kondansatör ile temel harmonik reaktif gücü kompanze edilmiş doğrusal yüklerde hatalı sonuç verebilir,
- *HG* ve *KYK* indisleri ile yeni önerilen metot ise analizde yer alan doğrusal (harmonik üretmeyen) ve harmonik üreten yükleri doğru olarak tespit etmişlerdir.

Yeni metodun basit kondansatör ile kompanze edilmiş doğrusal yükleri bozulmuş gerilimler altında harmonik üreten yük olarak tespit etmemesi önemlidir. Zira bu tip yükler güç sistemlerinde yaygın biçimde bulunmaktadır. Bu durum niteliksel olarak irdelenirse; bahsedilen sistem şartlarında yük suseptansındaki frekansa bağlı değişimden dolayı harmonik akımlarının suseptanstan kaynaklanan kısımları bir başka ifadeyle yük akımının *THD*'sinin büyümesine rağmen, harmonik akımlarının iletkenlikle alakalı veya reel kısımları değişmez. Bu sebeple doğrusal yüklerin genel durumlarında olduğu gibi harmonik akımlarının iletkenlikten kaynaklanan kısımları gerilim harmoniklerine göre küçük değerde kalır ve böylece kaydırılmış iletkenlik gücünü ( $D_{sc}$ ) dikkate alan yeni metot bu durumlarda hatalı tespit yapmaz.

## 8 SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında sinüzoidal olmayan ve dengesiz güç sistemlerinde görünür güç tanımları ile güç ifadelerine ilişkin literatür incelenmiş ve bu inceleme neticesinde bulunan görünür güç ifadelerinden sadece Kusters ve Moore'un tek fazlı sistemler için oluşturduğu güç ifadesinin en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemde var olan gerilim şartlarında çekeceği gücü direkt verdiği üç fazlı sistemlerde ise bu özelliğe sahip herhangi bir güç ifadesinin bulunmadığı niteliksel ve niceliksel analizlerden görülmüştür. Diğer taraftan incelenen güç ifadelerinden hiçbirinin harmonik üreten yüklerin tespit edilmesini amaçlamadığı sonucuna varılmıştır. Bununla beraber harmonik üreten yüklerin tespit edilmesi ve harmonik bozulma sorumluluğunun paylaşılmasına ilişkin literatür incelenmiş; böylece harmonik üreten yüklerin tespiti için tek başına bir güç ifadesinin kullanılmadığı görülmüştür. Ayrıca Kusters ve Moore'un güç ifadesi sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemlerde en iyi kompanzasyon kondansatörünün sistemden çekeceği gücü verir fakat bu kondansatörün plaka gücünün seçilmesinde eksiktir.

Bu bahsedilen boşlukları sinüzoidal olmayan tek fazlı sistemler ile sinüzoidal olmayan-dengeli gerilim ve sinüzoidal olmayan-dengesiz akıma sahip üç faz üç iletkenli sistemlerde dolduran yeni bir güç ifadesi tanımlanmıştır.

Yeni önerilen güç ifadesinin en iyi kapasitif dengeli kompanzator gücünün tespit edilmesinde kullanılabilirliği simülasyon temelli analizlerle doğrulanmıştır. Bununla birlikte en iyi kapasitif kompanzatorün belirlenmesinin maliyet verimli tam kompanzasyon bakımından önemi çeşitli kompanzasyon stratejileri arasındaki karşılaştırmalı analizlerle vurgulanmıştır.

Ayrıca yeni güç ifadesinin reaktif güç bileşenini çekecek en iyi dengeli kapasitif kompanzatorde bulunan özdeş kondansatörlere ait plaka gücünün seçimi için bir hesap metodu reaktif güç kontrol rölelerine uygulanmak üzere geliştirilmiştir. Bu geliştirilen metodun reaktif güç rölelerinde uygulanan klasik metotlara göre güç faktörünün iyileştirilmesi bakımından üstünlüğü örnek bir sistemde yapılan simülasyon temelli karşılaştırmalı analizlerle gösterilmiştir.

Bununla beraber, yeni güç ifadesinin harmonik üreten yüklerin tespit edilmesi için araç teşkil etme özelliği gerçek bir sistemde elde edilen ölçümsel verilere dayalı istatistiksel analizlerle doğrulanmıştır. Sonuçlar, gerilim harmoniklerinin çeşitli açı değerleri ve hattın çeşitli  $X/R$  oranları için diğer metotlar ile indislerinde dahil edildiği simülasyon temelli karşılaştırmalı analizlerle desteklenmiştir.

İleriki çalışmalarda; bu tezde tanımlanan güç ifadesinin sinüzoidal olmayan ve dengesiz üç faz-dört iletkenli sistemlere açılımının yapılması planlanmaktadır.

## 9 KAYNAKÇA

- [1] Kennedy B. W.; ‘‘Power Quality Primer’’, McGraw-Hill Comp., New York, 2000.
- [2] Arrilaga, J., Watson, N. R., Chen, S.; ‘‘Power System Quality Assessment’’, John Wiley & Sons, West Sussex, 2000.
- [3] Kocatepe, C., Uzunođlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O.; ‘‘Elektrik Tesislerinde Harmonikler’’, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [4] Singh, G. K.; ‘‘Power System Harmonics Research: a Survey’’, ETEP, vol. 19, no. 2, pp. 151–172, 2009.
- [5] Von Jouanne A., Banerjee B.; ‘‘Assessment of Voltage Unbalance,’’ IEEE Trans. on Power Del., vol. 16, no. 4, pp. 782-790, 2001.
- [6] Gnacinski, P.; ‘‘Effect of Unbalanced Voltage on Windings Temperature, Operational Life and Load Carrying Capacity of Induction Machine,’’ Energy Conversion and Management, vol. 49, no. 4, pp. 761-770, 2008.
- [7] Filipski, P. S.; ‘‘Apparent Power—a Misleading Quantity in the Non-sinusoidal Power Theory: Are all Non-sinusoidal Power Theories Doomed to Fail?’’, ETEP, vol. 3, no. 1, pp. 21–26, 1993.
- [8] Willems, J. L.; ‘‘Reflections on Apparent Power and Power Factor in Nonsinusoidal and Polyphase Situations’’, IEEE Trans. on Power Del., vol. 19, no. 2, pp. 835 –840, 2004.
- [9] Morsi, W. G., El-Hawary, M. E.; ‘‘Defining Power Components in Nonsinusoidal Unbalanced Polyphase Systems: The Issues’’, IEEE Trans. on Power Del., vol. 22, no. 4, pp. 2428-2438, 2007.
- [10] Xia, D., Heydt, G.T.; ‘‘Harmonic Power Flow Studies Part I’’, IEEE Trans. on Power App. and Syst., vol. PAS-101, no. 6, pp. 1257–1265, 1982.
- [11] Task Force Harmonic Modeling and Simulation; ‘‘Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Systems Part I: Concepts, Models, and Simulation Techniques’’, IEEE Trans. on Power Del., vol. 11, pp. 452, 1996.
- [12] Watson N. R.; ‘‘Harmonic Assessment of Electrical Power Systems’’, Int. Jour. of Energy Tech. and Policy, vol. 4, no. 1-2, pp. 60-73, 2006.

- [13] Task Force Harmonic Modeling and Simulation; “Real-Time Digital Time-Varying Harmonic Modeling and Simulation Techniques”, IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 2, pp. 1218-1227, 2007.
- [14] Balci, M. E., Ozturk, D., Karacasu, O., Hocaoglu, M. H.; “An Experimental Verification of Harmonic Load Models”, 43<sup>rd</sup> UPEC, pp. 1-4, Padova, Italy, 1-4 Sept. 2008.
- [15] Sen, P. K., Landa, H. A.; “Derating of Induction Motors Due to Waveform Distortion”, IEEE Trans. on Industry Appl., vol. 26, no. 6, pp. 1102-1107, 1990.
- [16] Demoulias, C., Labridis, D. P., Dokopoulos, P. S., Gouramanis, K.; “Ampacity of Low Voltage Power Cables under Nonsinusoidal Currents”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 22, no.1, pp.584-594, 2007.
- [17] Masoum, M., Moses, P. S., Masoum, A. S.; “Derating of Asymmetric Three-Phase Transformers Serving Unbalanced Nonlinear Loads”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 23, no. 4, pp. 2033-2041, 2008.
- [18] Salmerón, P., Montaña, J. C., Vázquez, J. R., Prieto, J., Pérez, A.; “Compensation in Nonsinusoidal, Unbalanced Three-phase Four-wire Systems with Active Power-line Conditioner”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 19, no. 4, pp. 1968-1974, 2004.
- [19] Sekara, T. B., Mikulovic, J. C., Djuricic, Z. R.; “Optimal Reactive Compensators in Power Systems Under Asymmetrical and Nonsinusoidal Conditions”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 23, no. 2, pp.974-984, 2008.
- [20] Singh, B., Verma, V., Chandra, A., Al-Haddad, K.; “Hybrid Filters for Power Quality Improvement”, IEE Proc. on Gener., Transm. and Distrib., vol. 152, no. 3, pp. 365- 378, 2005.
- [21] Muscas, C.; “Assessment of Electric Power Quality: Indices for Identifying Disturbing Loads”, ETEP, vol. 8, no. 4, pp. 287–292, 1998.
- [22] Sasdelli, R., Muscas, C., Peretto, L.; “A VI-based Measurement System for Sharing the Customer and Supply Responsibility for Harmonic Distortion”, IEEE Trans. on Instrum. and Meas., vol. 47, no. 5, pp. 1335-1340, 1998.
- [23] Emanuel, A. E.; “Powers in Nonsinusoidal Situations a Review of Definitions and Physical Meaning”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 5, no. 3, pp. 1377-1389, 1990.

- [24] Czarnecki, L. S.; “Comparison of Power Definitions for Circuits with Nonsinusoidal Waveforms”, IEEE Tutorial Course 90EH0327-7-PWR, pp. 43-50, 1990.
- [25] Czarnecki, L. S.; “Budeanu and Fryze: Two Frameworks for Interpreting Power Properties of Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents”, Electrical Engineering, vol. 80, no. 6, pp. 359-367, 1997.
- [26] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effect of Meter Performance and Definitions of Power; “Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion”, IEEE Trans. on Power Del., vol.11, no.1, pp.79-101, Jan. 1996.
- [27] Balci, M. E., Hocaoglu, M. H.; “Quantitative Comparison of Power Decompositions”, EPSR, vol. 78, no. 3, pp. 318-329, 2008.
- [28] Emanuel, A. E.; “Apparent Power Definitions for Three-phase Systems”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 14, no. 3, pp. 767 – 772, 1999.
- [29] Pajic, S., Emanuel, A. E.; “Modern Apparent Power Definitions: Theoretical Versus Practical Approach-the General Case”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 21, no. 4, pp. 1787-1792, 2006.
- [30] IEEE Std. 519-1992; “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- [31] IEC 61000 3-2; “Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Less Than 16A”, International Electrotechnical Commission, 2000.
- [32] IEC 61000 3-4; “Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Greater Than 16A”, International Electrotechnical Commission, 1998.
- [33] IEC 61000 3-6; “Assesment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems”, International Electrotechnical Commission, 1996.
- [34] IEC Standard 61000-4-7, “Testing and Measurement Techniques – General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation for Power

- Supply Systems and Equipment Connected Thereto,” International Electrotechnical Commission, 2000.
- [35] IEC Standard 61000-4-30; “Testing and Measurement Techniques-Power Quality Measurement Methods”, International Electrotechnical Commission, 2000.
- [36] EN 50160; “Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems”, CENELEC, 1999.
- [37] EPDK; “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”, <http://www.epdk.org.tr/mevzuat/yonetmelik/elektrik/sebeke/sebeke.pdf>, En son erişim: Eylül 2009.
- [38] Houston, E. J., Kennelly, A. E.; “On the Causes Producing Phase Differences in AC”, *Electrical World*, pp.651, 1895.
- [39] Special AIEE Joint Committee; “Power Factor in Polyphase Circuits,” *AIEE Trans.*, vol. 39, pp.1449-1520, Jul. 1920.
- [40] Curtis, H. L., Silsbee, F. B.; “Definitions of Power and Related Quantities”, *AIEE Trans.* vol. 54, no. 4, pp. 394-404, 1935.
- [41] AIEE, American Standard Definitions of Electrical Terms, 1941.
- [42] Budeanu, C. I.; “Reactive and Fictitious Powers”, Publication No.2 of the Rumanian National Inst. Bucuresti, 1927.
- [43] Buchholz, F.; “Die Drehstrom - Scheinleistung bei Ungleichmassiger Belastung der drei Zweige”, *Licht und Kraft*, vol. 2, pp. 9-11, 1922.
- [44] Fryze, S.; “Wirk-, Blind-, und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen Mit Nichtsinusoidalformigem Verlauf von Strom und Spannung”, *Elektrotechnische Zeitschriji*, vol. 53, no. 25, pp. 596-599, 1932.
- [45] Kimbark, E. W.; “Direct Current Transmission”, John Wiley & Sons, New York, 1971.
- [46] Shepherd, W., Zakikhani, P.; “Power Factor Correction in Nonsinusoidal Systems by the Use of Capacitance”, *Jour. of Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 6, p.p. 1850-1861, 1973.
- [47] Shepherd, W., Zand, P.; “Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits”, Cambridge University Press, New York, 1979.

- [48] Sharon, D.; "Reactive Power Definition and Power-Factor Improvement in Nonlinear Systems", Proc. IEE, vol. 120, no. 6, pp. 704-706, 1973.
- [49] Depenbrock, M.; "Wirk- und Blindleistung", ETG-Fachtagung Blindleistung, Aachen, 1979.
- [50] Kusters, N. L., Moore, W. J. M.; "On the Definition of Reactive Power under Nonsinusoidal Conditions", IEEE Trans. on Power App. and Syst, vol. 99, no. 5, pp. 1845-1854, 1980.
- [51] Slonim, M. A., Van Wyk, J. D.; "Power Components in a System with Sinusoidal and Nonsinusoidal Voltages and / or Currents", IEE Proc. Electric Power Appl., vol. 135, no. 2, pp. 76-84, 1988.
- [52] Czarniecki, L. S.; "Powers in Nonsinusoidal Networks: Their Interpretation, Analysis and Measurement", IEEE Trans. on Instrum. and Meas., vol. 39, no. 2, pp. 340-345, 1990.
- [53] Czarniecki, L. S.; "Physical Reasons of Currents RMS Value Increase in Power Systems with Nonsinusoidal Voltage", IEEE Trans. on Power Del., vol. 8, no. 1, pp. 437-447, 1993.
- [54] Wilczynski, E.; "Total Apparent Power of the Electrical System for Periodic, Deformed Waveforms", IEE Proc. Electric Power Appl., vol. 147, no. 4, pp. 281-285, 2000.
- [55] Ghassemi, F.; "New Concept in AC Power Theory", IEE Proc. Gen., Trans. and Distrib., vol. 147, no. 6, pp. 417-424, 2000.
- [56] Buchholz, F.; "Das Begriffssystem Rechteistung, Wirkleistung, totale Blindleistung", Selbstverlan Miincheq, 1950.
- [57] IEEE Std. 1459-2000; "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions", IEEE, 2002.
- [58] Majordomo, J. G., Usaola, J.; "Apparent Power and Power Factor Definitions for Polyphase Non-Linear Loads when Supply Conductors Present Different Resistances", ETEP, vol. 3, no. 6, pp. 415-420, 1993.



- [59] Seong-Jeub Jeon; “Definitions of Apparent Power and Power Factor in a Power System Having Transmission Lines With Unequal Resistances”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 20, no. 3, pp. 1806- 1811, 2005.
- [60] AC Quantities, DIN 40110, Part 1: Single-Phase Circuits March 1994, Part 2: Polyphase Circuits, November 2002. (in German).
- [61] Lev-Ari, H., Stankovich, A. M.; “Hilbert Space Techniques for Modelling and Compensation of Reactive Power in Energy Processing Systems”, IEEE Trans. on Circ. and Syst.—I: Fund. Theory and Appl., vol. 50, no. 4, pp. 540-556, 2003.
- [62] Czarniecki, L. S.; “Distortion Power in Systems with Nonsinusoidal Voltage”, IEE Proc. Electric Power Appl., vol. 139, no. 3, pp. 276-280, 1992.
- [63] Sun, S. Q., Xiang, Q. R.; “Waveform Distortion and Distortion Power”, IEE Proc. Electric Power Appl., vol. 139, no. 4, pp. 303-306, 1992.
- [64] Filipski, P. S.; “Polyphase Apparent Power and Power Factor under Distorted Waveform Conditions”, IEEE Trans. on Power Del., vol. PWRD-6, pp. 1161-1165, 1991.
- [65] Emanuel, A. E.; “On the Definition of Power Factor and Apparent Power in Unbalanced Polyphase Circuits with Sinusoidal Voltage and Currents”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 8, no. 3, pp. 841 – 852, 1993.
- [66] Depenbrock, M.; “The FBD method: a Generally Applicable Tool for Analyzing Power Relations”, IEEE Trans. on Power Syst., vol. 8, no. 2, pp. 381–387, 1993.
- [67] Filipski, P. S., Baghmuz, Y., Cox, M. D.; “Discussion of Power Definitions Contained in the IEEE Dictionary”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 9, no. 3, pp. 1237-1244, 1994.
- [68] Emanuel, A. E.; “The Buchholz-Goodhue Apparent Power Definition: the Practical Approach for Nonsinusoidal and Unbalanced Systems”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 13, no. 2, pp. 344 – 350, 1998.
- [69] Willems, J. L., Ghijselen, J. A., Emanuel, A. E.; “The Apparent Power Concept and the IEEE Standard 1459-2000”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 20, no. 2, p.p. 876 – 884, 2005.

- [70] Willems, J. L., Ghijselen, J. A., Emanuel, A. E.; “Addendum to the Apparent Power Concept and the IEEE Standard 1459-2000”, *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 20, no. 2, p.p. 885 – 886, 2005.
- [71] Crstaldi, L., Ferrero, A.; “Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality”, *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.*, vol. 44, no. 3, pp. 683–685, 1995.
- [72] Aiello, M., Cataliotti, A., Cosentino, V., Nuccio, S.; “A Self-Synchronizing Instrument for Harmonic Source Detection in Power Systems”, *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.*, vol. 54, no. 1, pp. 15–23, 2005.
- [73] Ferrero, A., Menchetti, A., Sasdelli, R.; “Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems”, *ETEP*, vol. 6, no. 6, pp. 401–406, 1996.
- [74] Crstaldi, L., Ferrero, A., Salicone, S.; “A Distributed System for Electric Power Quality Measurement”, *IEEE Trans. on Instrum. and Meas.*, vol. 51, no. 4, pp. 776-781, 2002.
- [75] Xu, W., Liu, Y.; “A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling”, *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 15, pp. 804–811, 2000.
- [76] de Paula Silva, S. F., de Oliveira, J. C.; “The Sharing of Responsibility between the Supplier and the Consumer for Harmonic Voltage Distortion: A Case Study”, *EPSR*, vol. 78, pp. 1959-1968, 2008.
- [77] Pfajfar, T., Blažič, B., Papič, I.; “Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method”, *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 23, no. 1, pp. 425-433, 2008.
- [78] Chaoying, C., Xiuling, L., Koval, D., Xu, W., Tayjasant, T.; “Critical Impedance Method - a New Detecting Harmonic Sources Method in Distribution Systems”, *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 19, no. 1, pp. 288- 297, 2004.
- [79] Srinivasan, K., Jutras, R.; “Conforming and Non-Conforming Current for Attributing Steady State Power Quality Problems”, *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 13, no. 1, pp. 212-217, 1998.
- [80] Dellapos Aquila, A., Marinelli, M., Monopoli, V. G., Zanchetta, P.; “New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Systems under Unbalanced and

- Nonsinusoidal Conditions”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 19, no. 3, pp. 1284-1290, 2004.
- [81] Barbaro, P. V., Cataliotti, A., Cosentino, V., Nucci, S.; “A Novel Approach Based on Nonactive Power for the Identification of Disturbing Loads in Power Systems”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 22, no. 3, p.p. 1782-1789, 2007.
- [82] Davis, E. J., Emanuel, A. E., Pileggi, D. J.; “Evaluation of Single-Point Measurements Method for Harmonic Pollution Cost Allocation”, IEEE Trans. on Power Del., vol. 15, no. 1, p.p. 14-18, 2000.
- [83] Locci, N., Muscas, C., Sulis, S.; “Investigation on the Accuracy of Harmonic Pollution Metering Techniques”, IEEE Trans. on Instrum. and Meas., vol. 53, no. 4, p.p. 1140-1145, 2004.
- [84] Cataliotti, A., Cosentino, V., Ippolito, M. G., Morana, G., Nuccio, S.; “Single-point Strategies for the Detection of Harmonic Sources in Power Systems”, 9<sup>th</sup> Int. Conf. on EPQU, Barcelona, Spain, 9-11 Oct. 2007.
- [85] Locci, N., Muscas, C., Sulis, S.; “On the Measurement of Power-Quality Indexes for Harmonic Distortion in the Presence of Capacitors”, IEEE Trans. on Instrum. and Meas., vol. 56, no. 5, pp. 1871-1876, 2007.
- [86] Locci, N., Muscas, C., Sulis, S.; “Multi-point Measurement Techniques for Harmonic Pollution Monitoring: a Comparative Analysis”, 6<sup>th</sup> Int. Workshop Power Def. and Meas. Under Non-sinusoidal Cond., pp. 103-107, Milano, Italy, 13-15 Oct. 2003.
- [87] Muscas, C., Peretto, L., Sulis, S., Tinarelli, R.; “Implementation of Multi-point Measurement Techniques for PQ Monitoring”, IEEE Instrum. Meas. Technology Conf., p.p. 1626–1631, Como, Italy, 18-20 May 2004.
- [88] Ribeiro, P. F.; “Common Misapplications of the IEEE 519 Harmonic Standard: Voltage or Current Limits”, IEEE Power and Energy Society General Meeting 2008, pp. 1-3, Pittsburgh, USA, 20-24 Jul. 2008.
- [89] ENTES Elek. Cih. Imal. ve Tic. AŞ.; “RG-12T Reaktif Güç Kontrol Rölesi Kullanım Kılavuzu”, [http://www.entes.com.tr/pdf/RG-T\\_TR.pdf](http://www.entes.com.tr/pdf/RG-T_TR.pdf), En son erişim: Temmuz 2009.

- [90] Arifođlu, U.; “Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi”, Alfa Bas. Dađ., İstanbul, 2002.
- [91] Şekkeli, M.; “Hassas Bir Reaktif Güç Kompanzasyonu İçin Gerekli Güçlerin Hesabında Temel Bileşenlerin Kullanılması”, KSU, Journal of Science and Engineering, vol. 9, no. 2, pp. 66-70, 2006.
- [92] FEDERAL Elektrik; “FX Serisi Reaktif Güç Kontrol Röleleri Kullanım Kılavuzu”, [http://www.federal.com.tr/tr/v2/Katalog/17-Reaktif\\_roleler.pdf](http://www.federal.com.tr/tr/v2/Katalog/17-Reaktif_roleler.pdf), En son erişim: Temmuz 2009.
- [93] California Instruments; “California Instruments 3001ix Technical Specifications”, [www.californiainstruments.com/downloads/iX%20Series%20II.pdf](http://www.californiainstruments.com/downloads/iX%20Series%20II.pdf), En son erişim: Temmuz 2009.
- [94] IO Tech; “Wavebook 512 User Manuel”, [http://support.elmark.com.pl/iotech/portable/WaveBook\\_512A\\_516\\_Series\\_Users\\_Manual.pdf](http://support.elmark.com.pl/iotech/portable/WaveBook_512A_516_Series_Users_Manual.pdf), En son erişim: Temmuz 2009.
- [95] National Instruments; “LabVIEW User Manuel”, <http://www.ni.com/pdf/manuals/320999e.pdf>, En son erişim: Temmuz 2009.

## ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında İstanbul-Üsküdar'da doğdu. Lise öğrenimini Balıkesir Lisesi'nde tamamladı. 1996 yılında girmeye hak kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden Temmuz 2001'de mezun oldu. Eylül 2001'de Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. Özel bir şirkette şantiye mühendisi olarak çalıştı. Aralık 2002'de Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi oldu. Temmuz 2004'de Yüksek Lisansını bitirip aynı bölümde Doktora öğrenimine başladı. Doktora süresinde iki defa ABD'nin Worcester Polytechnic Institute'den Prof. Dr. Alexander E. Emanuel ile Ziyaretçi Araştırmacı olarak çalışmak üzere davet aldı. İkinci periyot çalışmalarını kazanmış olduğu TÜBİTAK yurtdışı araştırma bursu desteğiyle gerçekleştirdi.