T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİK KAYNAĞI TESPİT METOTLARININ KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ

MEHMET TÜRKER TAKCI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2015

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİK KAYNAĞI TESPİT METOTLARININ KARŞILAŞTIRMALI PERFORMANS ANALİZİ

MEHMET TÜRKER TAKCI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
YRD.DOÇ.DR. MURAT ERHAN BALCI

GEBZE
2015

T.R.

GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF THE HARMONIC SOURCE DETECTION METHOD

MEHMET TÜRKER TAKCI

A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF

MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF ELECTRONIC ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR

ASST.PROF. DR. MURAT ERHAN BALCI

GEBZE

2015

GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ	YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 21../..01./.2015 tarih ve 2015.../.05... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 26./..01./2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mehmet Türker TAKCI'nın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE
(TEZ DANIŞMANI) :Yrd.Doç.Dr.Murat Erhan BALCI

ÜYE : Prof.Dr.M.Hakan HOCAOĞLU

ÜYE : Doç.Dr. Abdülkadir BALIKÇI

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve ...../..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Doğrusal olmayan (harmonik üreten) yüklerin güç sistemlerinde yaygın şekilde yer alması neticesinde gerilim ve akım dalga şekillerinde meydana gelen harmonik bozulma, günümüz güç sistemlerinde birçok probleme sebep olmaktadır. Bu problemlerden en önemlileri tüketici ve servis sağlayıcısına ait elemanlarda kayıp artışı ve ömür azalmasıdır. Dolayısıyla harmonik kirliliğin sınırlandırılması, harmoniklere bağlı kayıpların azaltılması bakımından elzem hale gelmiştir. Bu amaçla çeşitli kılavuz, tavsiye edilmiş çalışma ve standartlar mühendislik organizasyonları ve enstitüler tarafından hazırlanmıştır. Ancak, bu standartlarda güç sistemlerine dağılmış harmonik üreten yüklerin tespiti ve harmonik sorumluluğun paylaştırılması için herhangi bir metot veya indis sunulmamıştır. Böylece, harmonik üreten yüklerin tespit edilmesi ve harmonik sorumluluğun paylaştırılması üzerine yapılan çeşitli çalışmalarla, standartların bıraktığı boşluk doldurulmaya çalışılmıştır.

Literatürde harmonik üreten yüklerin tespiti ve harmonik bozulma sorumluluğu paylaştırma metotları ölçüm stratejisine göre; "tek noktadan eş zamanlı olmayan"(TNEO) ve "çok noktadan eş zamanlı"(ÇNE) ölçüm temelli olmak üzere iki gruba ayrılabilir. ÇNE ölçümlere dayalı metotlar, TNEO ölçümlere dayalı metotlara göre daha güvenilir sonuçlar vermelerine rağmen birçok noktaya yerleştirilmiş eş zamanlı çalışabilen ölçüm aletleri gerektirdikleri için maliyetleri daha yüksektir.

Bu tez çalışmasında, öncelikle harmonik kaynağı tespiti için literatürde var olan TNEO ölçüm temelli indis/metotlar taranmıştır Bu tarama neticesinde bulunan metotların/indislerin başarım sınırları simüslasyon ve ölçüm temelli analizlerle çok çeşitli yük tipleri ve sistem durumları için karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca TNEO ölçüm temelli metotların/indislerin gerçek zamanlı uygulaması için Labview tabanlı prototip bir ölçüm cihazı geliştirilmiştir. Böylece Gebze Teknik Üniversitesi kampüsü dağıtım sisteminde gerçek zamanlı ve uzun süreli ölçümler alınmış, bu ölçüm sonuçları yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Görünür Güç Tanımları, Güç Faktörü, Harmonik İndisler, Harmonik Bozulma, Harmonik Kaynağı Tespiti, Harmonik Bozulma Sorumluluğunu Paylaştırma

SUMMARY

Harmonic distortion on the voltage and current waveforms, which are caused by the large proliferation of the nonlinear (harmonic producing) loads, result in several problems in present day's power systems. The most significant effects of the harmonic distortion are the increased losses and decreased life time of the customer and utility equipment. Therefore, harmonic pollution must be limited to decrease the failures depending on harmonic distortion. Accordingly, guidelines, recommended practices and standards have been prepared by several organizations and institutes. However, in these standards, there is no method and/or index defined for the detection of dominant harmonic sources embedded in the system. Thus, these standards are accompanied by the research leading to the methods and indices for the detection of the harmonic producing loads and the sharing harmonic responsibility between utility and consumer.

The harmonic source detection and sharing harmonic responsibility methods/ indices can be classified into two groups according to their measurement strategies, which are single-point asynchronous(SPA) and multi-point synchronous(MPS) measurements. The harmonic source detection methods based on MPS measurement strategy are more reliable than those based on SPA measurements; however, they have higher costs and also are hindered by the requirement of precise synchronization.

In this thesis, firstly, the literature about the SPA based methods/indices were investigated. And than, for several load types and system cases, the validity of methods/indices existent in the literature are tested by simulation and experimental analysis. Furthermore, for real-time implementation of the SPA based methods/indices, a prototype measurement device is developed by Labview program. Real-time measurements have been taken for long periods in GTU campus distribution system and these results are discussed comparatively.

Key Words: Power Definition, Power Decomposition, Nonsinüsoidal Conditions, Power Factor, Harmonic Distortion, Harmonic Source Detection, Sharing Harmonic Responsibility, Harmonic Source Quantification

TEŞEKKÜR

Bu tezin danışmanlığını yapan ve tüm çalışmalarım boyunca benden yardımını ve sabrını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç Dr. Murat Erhan BALCI'ya, çalışmalarım süresince bana destek olan değerli hocalarım Prof.Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU ve Dr. Özgür KARACASU'ya, tez kapsamında yapılan çalışmaların desteklendiği "Harmonik Üreten Yüklerin Tespit Edilmesi İçin Yeni Bir Metot Gelişirmek (Proje No:110E113)" isimli projeyi desteklerinden dolayı TUBİTAK'a, arkadaşlarım Araş.Gör. Ahmet KÖKSOY, Araş.Gör. Onur ÖZTÜRK, Araş.Gör. Aybike ŞEKER ve Araş.Gör. Murat CEYLAN ile bütün TAKCI ailesi üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Arka Plan	1
1.2. Tezin Amacı ve Sınırları	2
1.3. Tezin İçeriği	3
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1. Aktif Güç Yönünü Dikkate Alan Metotlar/İndisler	6
2.2. Süperpozisyon ve Projeksiyon (SP) Metodu	8
2.3. Lineer Akım (LA) Metodu	10
2.4. Uygun Akım (UA) Metodu	11
2.5. Aktif Olmayan Güç (AOG) Metodu	12
2.6. Ortiz ve Arkadaşlarının Önerdiği Güç İfadesi	15
2.7. Kaydırılmış İletkenlik Gücünün Ölçümüne Dayalı Metod	18
2.7.1. Sinüzoidal Olmayan Tek Fazlı ve Üç Fazlı Sistemler İçin Kaydırılmış Gücün Hesabı	19
2.7.2. Kaydırılmış İletkenlik Gücü Ölçümüne Dayalı Metodun Uygulama Esasları	21
2.8. Sonuç	22
3. SİMÜLASYON TEMELLİ ANALİZ	23
3.1. Analizlerde Dikkate Alınan Yük Modelleri	23
3.2. Analiz Sonuçları	25
3.2.1. Birinci Tip Analize Ait Sonuçlar	25
3.2.2. İkinci Tip Analize Ait Sonuçlar	32

3.2.2.1 Sinüs Gerilim Altında Sabit Güç Çeken Yük Modeli Simülasyon Sonuçları 32
3.2.2.2. Nonsinüs Gerilim Altında Sabit Güç Çeken Yük Modeli Simülasyon Sonuçları 33
3.3. Sonuç 35
4. KURULAN TEST SİSTEMİNDE YAPILAN ANALİZLER 36
4.1. Yük Tipleri 38
4.1.1. Sabit Empedans (RL) Yük Tipi 39
4.1.2. Kompanze Edilmiş Sabit Empedans (RLC) Yük Tipi 40
4.1.3. Kompakt Floresan Lamba (CFL) Yük Tipi 41
4.1.4. Monitör (M) Yük Tipi 42
4.1.5. Alternatif Akım Kıyıcı Devresi ile Beslenen Rezistans (KR) Yük Tipi 43
4.1.6. Sabit Güç Çeken Yük Tipi (Rezistans Besleyen AC/AC Dönüştürücü) 44
4.2. Kurulan Test Sisteminin Yapısı 45
4.2.1. Tek Baralı Küçük Test Sistemi 45
4.2.2. Üç Baralı Küçük Test Sistemi 46
4.3. Analiz Sonuçları 48
4.3.1. Tek Baralı Küçük Test Sisteminde Elde Edilen 1.Grup Analiz Sonuçları 48
4.3.2. Tek Baralı Küçük Test Sisteminde Elde Edilen 2.Grup Analiz Sonuçları 52
4.3.3. Üç Baralı Küçük Test Sisteminde Elde Edilen Analiz Sonuçları 58
4.4. Sonuç 65
5. GERÇEK BİR DAĞITIM SİSTEMİ İÇİN YAPILAN ANALİZ ÇALIŞMALARI 66
5.1. Ölçüm Noktaları ve Gerilim/Akım Ölçüm Aparatları 67
5.2. Labview Kodları 69
5.2.1. KYK İndisi 69
5.2.2. HG İndisi 71
5.2.3.UA Metodu 72

5.2.4.LA Metodu 74
5.2.5.Kaydırılmış İletkenlik Gücü (D_{sc}) Temelli Metot 75
5.3. Ölçüm Sonuçları 77
6. TARTIŞMA/SONUÇ 79

KAYNAKLAR 80
ÖZGEÇMİŞ 85

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Kısaltmalar		**Açıklamalar**
AOG_1, AOG_2	:	Aktif olmayan güç metoduna ait göstergeler.
AGY	:	Aktif güç yönü metodu.
ÇNE	:	Çok noktadan eş zamanlı.
EN	:	Avrupa Normları.
$D_{VS}, D_{IS}, D_{VC}, D_{IC}$	:	Ortiz ve arkadaşlarının önerdiği kaynak tarafının sorumlu olduğu gerlim ve akım bozulma güçleri, yük tarafının sorumlu olduğu gerilim ve akım bozulma güçleri.
D_V, D_I	:	Ortiz ve arkadaşlarının önerdiği gerilim ve akım bozulma gücü.
D_{SC}	:	Kaydırılmış iletkenlik gücü.
$G_e, G_n,$	:	Kaydırılmış iletkenlik gücü yüke ait eşdeğerlik iletkenlik ve n.harmonik iletkenlik.
G_{Bn}	:	Kaydırılmış İletkenlik Gücü ifadesinde kullanılansuseptans tanımı.
GYTE	:	Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
HG	:	Harmonik global indisi.
IEEE	:	Uluslararası Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü.
IEC	:	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu.
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_1^+, I_H	:	Temel harmonik pozitif sıra ve temel olmayan akım etkin değerleri.
I_{HS}, I_{HC}	:	Ortiz ve arkadaşlarının önerdiği güç ifadesinde tanımlı kaynağın sorumluluğundaki harmonik akım ve yükün sorumluluğundaki 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_{sc}	:	Kaydırılmış iletkenlik gücünün ölçümüne dayalı metodunun kaydırılmış iletkenlik akım bileşeninin etkin değeri.
$\bar{I}_{Ny,n}, \bar{I}_{Nk,n}$	:	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.
$i(t)$	:	Toplam ani akım.
$i_{sc}(t)$	:	Kaydırılmış iletkenlik gücünün ölçülmesi ifadesinin. dayandığı akım ifadesinde yer alan kaydırılmış iletkenlik akım bileşeninin ani değeri.
$I_{\sum sc}(t)$	:	Kaydırılmış iletkenlik gücünün ölçülmesi ifadesinin dayandığı akım ifadesinde yer alan kaydırılmış iletkenlik akım bileşeninin kolektif ani değeri.
$i_{co}(t), i_{nco}(t)$	:	Uygun akım metodunda tanı.mlanmış olan uygun ve uygun olmayan akım parçalarının ani değerleri.
$i_{\ell}(t), i_{n\ell}(t)$	:	Lineer akım metodunda tanımlanmış olan lineer 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.
$P_1^+, P_n, P_{nf}, P_m, P$	:	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 ve n.harmonik dengeli aktif gücü.
Q, S	:	Reaktif güç, Görünür güç.
$Q_{n,} Q_1^+, Q_{mn,}$	:	n.harmonik reaktif, temel harmonik pozitif sıra ve m iletkeninden çekilen n. harmonik reaktif güçleri.
Q_F	:	Fryze'nin reaktif gücü.
SP	:	Süperpozisyon ve projeksiyon metodu.

S_1, 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.
t,T	:	Zaman, Periyot.
THD_V, THD_I	:	Gerilim ve akıma ait toplam harmonik bozulmalar.
TNEO	:	Tek Noktadan Eş Zamanlı Olmayan .
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	:	Gerilim 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 nötür arası n. harmonik gerilimi, m iletkeni ile nötür arası toplam geirlim etkin değerleri.
V_H	:	Temel olmayan gerilim etkin değeri.
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	:	Faz-faz arası gerilimlerin etkin değeri.
V_{e1}, V_{eH}, V_e	:	IEEE std. 1459-2000 görünür gücünün hsabında kullanılan kollektif gerilim etkin değeri.
$v_1(t), v_{nf}(t), v(t)$	:	Temel harmonik ani, temel olmayan harmonik ani ve ani gerilimler.
$\bar{Z}_{Ny,n}$, $\bar{Z}_{Nk,n}$	:	Sırasıyla yükün ve kaynağın n. harmonik Norton empedanslarının fazör değerleri.
ω, ω_n	:	Açısal frekans ve n.harmonik açısal frekansı.
φ, φ_n	:	Gerilim ve akım arasındaki, gerilimin ve akımın n.harmonik bileşenleri arasındaki faz farkları.
δ_n, δ_{mn}	:	Akımın n. harmonik bileşeninin ve m iletkeninden akan n. harmonik bileşeninin faz açıları.
θ_n, θ_{mn}	:	n.harmonik geriliminin ve m iletkeniyle ile nötür noktası arası ölçülen gerilimin n.harmonik bileşenine ait faz açıları.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No:		Sayfa
2.1:	SP metodu hesaplamalarıyla alakalı sistem.	8
3.1:	Sabit RL empedans yük modeli.	22
3.2:	Basit kondansatörle kompanze edilmiş sabit RL yük modeli.	23
3.3:	Dimmerle kontrol edilen sabit rezistans yük modeli.	23
3.4:	Dimmer ile kontrol edilen sabit görünür güç çeken yük modeli.	23
3.5:	Yük 1-3 için THD_V %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan KYK histogramları.	26
3.6:	Yük 1-3 için THD_V %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan HG histogramları.	27
3.7:	Yük 1-3 için THD_V %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan UA histogramları.	28
3.8:	Yük 1-3 için THD_V %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan LA histogramları.	29
3.9:	Yük 1-3 için THD_V %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan D_{sc} histogramları.	30
3.10:	Sinüzoidal kaynak ile beslenen sabit güç çeken yük için indis sonuçları.	32
3.11:	a) %2 THDv, b) %5 THDv, c) %8 THDv kaynak gerilimleri için KYK, HG, UA, LA, D_{sc} indisleri.	34
4.1:	Rastgele gerilim dalga formu üreten koda ait akış diyagramı.	37
4.2:	Sabit empedans yük modeli.	39
4.3:	Kompanze edilmiş sabit empedans yük modeli.	40
4.4:	Kompakt floresan lamba yük grubu.	41
4.5:	Monitör yük grubu.	42
4.6:	Alternatif akım kıyıcı (Dimmer).	43
4.7:	Tek baralı küçük test sistemine ait şematik.	44
4.8:	Tek baralı küçük test sistemine ait şematik.	46
4.9:	Üç baralı küçük test sistemi.	46
4.10:	Gerçekleştirilen gerilim şartlandırıcılar.	47
4.11:	Kullanılan akım klempleri.	48

4.12: RL, RLC, SGY, KR, CFL ve M yükleri için, THDV %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan KYK, HG, UA, LA ve D_{sc} metotlarının/indislerinin histogramları. 51
4.13: THDV %3-5-7 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanan A.A. Kıyıcılı R Yükü için, tetikleme açısı değişimine bağlı olarak hesaplanan D_{SC} indisi histogramları. 53
4.14: THDV %3-5-7 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanan A.A. Kıyıcılı R Yükü için, tetikleme açısı değişimine bağlı olarak hesaplanan HG indisi histogramları. 54
4.15: THDV %3-5-7 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanan A.A. Kıyıcılı R Yükü için, tetikleme açısı değişimine bağlı olarak hesaplanan UA indisi histogramları. 55
4.16: THDV %3-5-7 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanan A.A. Kıyıcılı R Yükü için, tetikleme açısı değişimine bağlı olarak hesaplanan LA indisinin histogramları. 56
4.17: THD_V %3-5-7 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanan A.A. Kıyıcılı R Yükü için, tetikleme açısı değişimine bağlı olarak hesaplanan KYK indisi histogramları. 57
4.18: Senaryo 1 için Bara 2 ve Bara 3'e ait HG ve UA indisi ölçüm sonuçları. 59
4.19: Senaryo 1 için Bara 2 ve Bara 3'e ait LA ve KYK indisi ölçüm sonuçları. 60
4.20: Senaryo 1 için Bara 2 ve Bara 3'e ait D_{sc} ölçüm sonuçları. 61
4.21: Senaryo 2 için Bara 2 ve Bara 3'e ait HG ve UA indisi ölçüm sonuçları. 62
4.22: Senaryo 2 için Bara 2 ve Bara 3'e ait LA ve KYK indisi ölçüm sonuçları. 63
4.23: Senaryo 2 için Bara 2 ve Bara 3'e ait D_{sc} gücü ölçüm sonuçları. 64
5.1: Tek hat şeması üzerinde büyük test sistemi. 66
5.2: Ölçüm noktasına ait bir fotoğraf. 67
5.3: Kontrollü yük grubuna ait bir fotoğraf. 68
5.4: P_{1+} değerinin ölçümüne ilişkin Labview kodu. 70
5.5: P ölçümüne ait Labview kodu. 70

5.6: DC bileşen haricindeki harmonikler için I_l ve I_s akımlarının belirlenmesi. 71
5.7: HG İndisinin hesaplanmasına ilişkin Labview kodu. 72
5.8: Z_l empedansının genlik ve açı değerlerinin hesaplanmasına ilişkin Labview kodu. 73
5.9: Her bir harmonik numarası için I_{nco} akımını hesaplayan Labview kodu. 74
5.10: UA indisine ait Labview kodu. 74
5.11: R_l ve X_l değerlerini hesaplayan Labview kodu. 76
5.12: n. harmonik için I_{nl} akımın genlik değerini hesaplayan Labview kodu. 76
5.13: Her bir harmonik için G_{Bn} ve P_{Bn} değerlerini hesaplayan Labview kodu. 77
5.14: Labview programında D_{sc} ve S değerlerinin hesaplanması. 78
5.15: Hazırlanan Labview programının ön paneli. 78

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No:		Sayfa
2.1:	Tek noktadan eş zamanlı olmayan ölçüm temelli metotlar/indisler.	6
4.1:	Yüklerin saf sinüs gerilim altındaki THDI değerleri.	38
4.2:	Hat1 empedansları ve X/R oranları.	48
4.3:	Hat2 empedansları ve X/R oranları.	48
4.4:	Dengeli ve dengesiz yüklenme durumlarının incelendiği senaryolar.	58
5.1:	Metotlara ilişkin anlık ölçüm sonuçları.	79

1. GİRİŞ

Elektrik şebekesinde geleneksel olarak kullanıla gelen doğrusal yükler için akım dalga şekilleri sinüzoidal biçimdedir. Ancak günümüzde tüketiciler tarafından yaygın olarak kullanılan güç elektroniği temelli cihazların, doğrusal olmayan karakteristiğe sahip olması diğer bir ifadeyle akım dalga şekillerinin sinüzoidal formda olmaması sonucu dağıtım sistemlerinde bara gerilimleri ve hat akımları sinüzoidal formdan uzaklaşmıştır [1]. Doğrusal olmayan yüklerin güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılması neticesinde gerilim ve akım dalga şekillerinde meydana gelen bu bozulma harmonik bozulma olarak adlandırılmaktadır [2], [3].

Fourier Teoremine göre sinüzoidal olmayan periyodik bir sinyali, temel frekansta (şebeke frekansında) sinüzoidal bileşen ve onun katlarında frekanslara sahip sinüzoidal bileşenler toplamı olarak göstermek mümkündür. Böylece temel frekans dışında frekanslara sahip sinüzoidal dalgalar, elektrik güç sistemlerinde "hamonik bileşen" olarak tanımlanabilir [1], [2].

Harmonikler günümüzde en çok ilgi çeken ve üzerine en çok araştırma yapılan güç kalitesi problemidir [3].

1.1. Arka Plan

Elektrik güç sistemlerinde yer alan elemanlar temel frekansta ve anma etkin değerinde sinüzoidal gerilimler/akımlar altında çalışmak için tasarlandığı için harmoniklerin güç sistem elemanları üzerine birçok olumsuz etkisi vardır. Bunlar; transformatörlerde aşırı ısınma, asenkron motorlarda aşırı ısınma ve moment salınımları, kondansatörlerde aşırı ısınma ve dielektrik malzeme delinmeleri gibi etkilerdir [1]-[3]. Bu sebeple düzenleyici kuruluşlar harmonik kirliliğin sınırlanması için çeşitli çalışmalar yapmaktadır [4]-[10]. Birçok bakımdan harmonik bozulmanın iyileştirilmesi klasik reaktif güç düzeltme problemine benzemektedir. Ancak reaktif gücün düzeltilmesi problemini çözmek için uygulanan kompanzasyon yöntemlerinin harmonik bozulmanın iyileştirilmesi için geçerli herhangi bir fayda sağlamadığı literatürde iyi bilinmektedir. Dolayısıyla bazı çalışmalar klasik görünür gücü, kaynak ve/ veya yük tarafının ürettiği harmonik kirliğin (i) derecesinin ölçülmesi ve (ii) en iyi biçimde kompanzasyonu amacıyla çeşitli bileşenlere ayırmıştır [11]-[13]. Diğer

çalışmalarda ise; harmonik üretme sorumluluğunun tespiti için güç bileşenlerinin kullanımı yerine, gerilim/akım harmonikleri şebeke ve tüketici kaynaklı harmonik bileşenlere ayrılmıştır [14]-[20].

Ayrıca, bu harmonik üreten yük tespiti ve harmonik bozulma sorumluluğu paylaştırma metotları, ölçüm stratejisine göre "tek noktadan eş zamanlı olmayan" (TNEO) ve "çok noktadan eş zamanlı" (ÇNE) ölçüm temelli olmak üzere iki gruba ayrılabilir [39], [48]. ÇNE ölçümlere dayalı metotlar, TNEO ölçümlere dayalı metotlara göre daha güvenilir sonuçlar vermelerine rağmen birçok noktaya yerleştirilmiş eş zamanlı çalışabilen ölçüm aletleri gerektirdikleri için maliyetleri daha yüksektir.

1.2. Tezin Amacı ve Sınırları

Bu tez çalışmasında, TNEO ölçüm temelli harmonik kaynağı tespit ve harmonik sorumluluk paylaştırma metotlarının/indislerinin başarım sınırlarının, simüslasyon ve ölçüm temelli analizlerle çok çeşitli yük tipleri ve sistem durumları için karşılaştırmalı olarak incelenmesi öncelikli olarak amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmanın ikinci amacı ise; TNEO ölçüm temelli harmonik kaynağı tespit ve harmonik sorumluluk paylaştırma metotlarının/indislerinin gerçek zamanlı uygulaması için Labview tabanlı prototip bir ölçüm cihazı geliştirilmek ve böylece bir dağıtım sisteminde gerçek zamanlı ve uzun süreli ölçümler alıp, bu ölçüm sonuçlarını yorumlamaktır.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda var olan sınırlar aşağıda sıralanmıştır:

- Harmonik kaynaklarının tespiti ve harmonik sorumluluğun paylaştırılması iki ayrı problem şeklinde ele alınmış ve esas olarak harmonik kaynaklarının tespit edilmesi probleminin çözümüne odaklanılmıştır
- Bu tezde yapılan simülasyon ve ölçüme dayalı analiz çalışmalarında, standartlarda tanımlı sınırlara uyularak kaynak tarafı bozulma miktarı ve bileşenleri oluşturulmuştur. Daha açık bir ifadeyle, gerilime ait toplam harmonik bozulmasının azami değerlerinin (THDV) %2, %5 ve %8 sınırlarını aşmadığı, gerilim harmonik içeriğinin ise EN 50160 [10]'da verilen limitler dâhilinde olduğu kabul edilmiştir

- Uzun süreli ölçümler için Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünün bir bölümünde çalışılarak veriler alınmıştır.

1.3. Tezin İçeriği

Tezin ikinci bölümünde TNEO ölçüm temelli harmonik kaynağı tespit ve harmonik sorumluluk paylaştırılma metotları/indisleri üzerine yapılan literatür taraması detaylı bir şekilde verilmiştir. Aynı bölümde bu metotların zaafları niteliksel analizlerle ortaya konmuştur.

Tezin üçüncü bölümünde çeşitli yük tipleri Matlab-SIMULINK ortamında modellenmiş ve bu model tiplerinin sinüzoidal ve çeşitli toplam harmonik bozulma (THD_V) seviyelerinde sinüzoidal olmayan gerilimler altında beslenmesi durumlarında TNEO ölçüm temelli metotlar/indislerin verdiği cevaplar analiz edilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde simülasyona dayanan analizlerde elde edilen çıktıların teyidi amacıyla yapılan ölçüme dayalı analizler için kurulan test sistemleri ve testlerde dikkate alınan yükler tanıtılmıştır. Daha sonra, ölçüme dayalı analiz çıktıları yorumlanmıştır.

Tezin beşinci bölümünde TNEO ölçüm temelli metotlar/indislerin gerçek bir dağıtım sisteminde ölçümü için tasarlanan cihazın donanım ve yazılım yapısı sunulmuştur. Bu tasarlanan cihaz ile Gebze Teknik Üniversitesi kampüsü dağıtım sisteminin bir bölümünde alınan ölçümler anlık olarak yorumlanmıştır.

Son bölümde, tez neticesinde ulaşılan çıktılar detaylı bir şekilde tartışılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Harmonik kirliliğin sınırlandırılması harmoniklere bağlı olumsuz etkilerin azaltılması bakımından önemlidir. Bundan dolayı çeşitli kılavuz, tavsiye edilmiş çalışma ve standartlar mühendislik organizasyonları ile enstitüler tarafından hazırlanmıştır [4]-[10]. Bu standartlardan biri olan Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE)'nün düzenlediği IEEE std. 519-1992 [4]'de harmoniklerin kontrol edilmesine ilişkin uygulamalar, harmonik bozulma miktarını gösteren çeşitli indislerin hesabı ve ortak bağlantı noktasında ölçülen gerilim ve akıma ait harmonik içerik ve Toplam Harmonik Bozulma (THD) sınırlamaları tavsiye niteliğinde belirlenmiştir. Ayrıca Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC)'nin düzenlediği IEC 61000-3-2 [5], 3-4 [6] ve 3-6 [7] standartlarında çeşitli tipte yük akımlarının her bir harmonik numarası için ayrı ayrı sınırlamalar getirilmiştir. Bunun yanı sıra IEC Std. 61000-4-7 [8] ve 4-30 [9] standartlarında harmonik bozulma miktarının ölçülmesine ilişkin metotlar tanımlanmıştır. Avrupa Normlarına göre düzenlenen EN 50160 [10] standardında ise ortak bağlantı noktası gerilimine ait bozulma ve dalga şekli sınırlanmıştır.

Ancak bu standartlarda harmonik üreten yüklerin tespiti ve harmonik sorumluluğun paylaştırılması için herhangi bir indis veya metot sunulmamıştır. Bundan dolayı literatürdeki muhtelif çalışmalarda [13]-[44] harmonik üreten yüklerin tespit edilmesi ve harmonik sorumluluğun paylaştırılması için farklı indisler ve metotlar önerilmiş, önerilen metot ve indislerin de çeşitli analizleri yapılarak bahsedilen standartların eksik yönleri işaret edilmiştir. Bu metotlar ve indislerin başarımlarının sunumu genellikle simülasyon temelli analizlerle yapılmış, çok azında ise gerçek ölçüm verileri kullanılmıştır. Ancak bu analizlerde, metot ve indislerin başarım sınırları çeşitli sistem durumlarında; hattın X/R oranı, kaynak geriliminin THD'si ve harmonik spektrumu gibi parametreler dikkate alınarak kapsamlı bir biçimde belirlenmemiştir. Literaürdeki bu eksikliğin bu tez kapsamında kapatılması temel hedeflerdendir.

Literatürde harmonik üreten yüklerin tespiti ve harmonik bozulma sorumluluğunun paylaştırılması için önerilen metotlar/indisler ölçüm stratejisine göre tek noktadan eş zamanlı olmayan ve çok noktadan eş zamanlı ölçümlere dayalı olanlar başlıkları altında iki gruba ayrılabilir. ÇNE ölçümlere dayanan metotlar/indisler TEO

ölçümlere dayalı olanlara göre daha güvenilir sonuçlar vermelerine rağmen birçok noktaya yerleştirilmiş eş zamanlı çalışabilen ölçüm aletleri gerektirdikleri için maliyetleri daha yüksektir [29]. Ulaşılabilen literatürde önerilmiş olan tek noktadan ölçümlere dayalı metot ve indisler Tablo 2.1'de verilmiştir. Baskın harmonik kaynağının, ortak bağlantı noktasının hangi tarafında (kaynak veya yük tarafında) olduğunun belirlenmesi işi literatürde harmonik kaynaklarının tespiti biçiminde tarif edilmiştir [21]. Harmonik kaynağı tespiti özellikle sınırlı sayıda harmonik bozulma ölçü aleti ve harmonik filtresi gibi elemanların yerleştirileceği yerlerin belirlenmesi bakımından önemlidir. Harmonik sorumluluk paylaşımı ise ortak bağlantı noktasındaki gerilim veya akım harmonik bozulma miktarlarında kaynak ve yük tarafının katkı paylarının hesaplanması olarak ifade edilebilir. Harmonik sorumluluk paylaşımı üzerine yapılan çalışmalar harmoniklerin sebep olduğu mali yükün şebeke servis sağlayıcı ve müşteri arasında paylaştırılması bakımından önemlidir [29].

İlk bakışta hat akımının toplam harmonik bozulma (THD_I) değerini ölçmenin şebekeye bağlı yüklerin harmonik üretip üretmediğini belirlemek için yeterli olacağı düşünülse de özellikle pasif kapasite ile kompanze edilmiş doğrusal yüklerin harmonikli gerilimler altında yüksek THD_I'ya sahip akımlar çekmesi THD_I indisinin harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanımına engel oluşturmaktadır. Bununla birlikte hat akımı harmoniklerinin hem kaynak tarafı gerilim harmoniklerine hem de yük akımı harmoniklerine bağlı olması THD_I indisinin harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanımının diğer bir handikapıdır. Bu durum neticesinde Tablo 2.1'de sunulan metotlar önerilmiştir.

Tablo 2.1'de verilen metot 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,
- Harmonik sorumluluk paylaştırma amacıyla harmonik aktif güçlerinin akış yönü dikkate alınarak klasik görünür güç tanımının bileşenlerine ayrıldığı Ortiz ve arkadaşlarına ait çalışma,
- Kaynak ve yük tarafına ait modeller ve devre analizi yöntemlerinin kullanıldığı harmonik sorumluluk paylaştırma amaçlı SP ve KE metotları,

- Kendilerine özgü akım dekompozisyonuna göre harmonik sorumluluk paylaştıran UA ve LA metotları,
- Çeşitli güç ifadelerinde yer alan aktif olmayan güç bileşenlerinin karşılaştırılmasının dikkate alındığı AOG harmonik kaynağı tespit metodudur.

Tablo 2.1: Tek noktadan eş zamanlı olmayan ölçüm temelli metotlar/indisler.

Metot/İndis	**Amaç**
Aktif Güç Yönü (AGY) Metodu [30], [31]	Harmonik kaynağının tespit edilmesi
Kaynak-Yük Kalite (KYK) İndisi [32], [39]	
Harmonik Global (HG) İndisi [33], [39], [44]	
Aktif Olmayan Güç (AOG) Metodu [23]-[27]	
Kaydırılmış İletkenlik Gücü Ölçümü Temelli Metot (D_{sc}) [12],[39],[45],[48]	
Uygun Akım (UA) Metodu [14]	Harmonik sorumluluğun kaynak ve yük tarafına paylaştırılması.
Lineer Akım (LA) Metodu [15]	
Süperpozisyon ve Projeksiyon (SP) Metodu [17]	
Kritik Empedans Metodu [20]	
Ortiz ve arkadaşlarının metodu [13]	
Kaydırılmış İletkenlik Gücü Ölçümü Temelli Metot (Dsc) [12],[39],[45],[48]	

Sınıflandırılan bu indisler/metotlardan KE haricindekilerin ana hatları aşağıda özetlenmiştir. Diğer taraftan, KE metodu ile SP metodunun birbiriyle örtüşen sonuçlar verdiği [20]'de yapılan analitik ve nümerik analizlerle gösterilmiştir. Bu sebeple pratik sistemlerde uygulanabilirliği güç olan KE metodundan aşağıda bahsedilmemiştir.

2.1. Aktif Güç Yönünü Dikkate Alan Metotlar/İndisler

Aktif güç akış yönünü dikkate alan AGY metodu en eski harmonik kaynağı tespit metotlarından biridir [30], [31]. Bu metoda göre eğer ilgili harmonik numarası için hesaplanan aktif güç negatif ise o harmonik numarası için harmonik bozulma kaynağı yük, aksi durumda kaynak tarafı olarak tespit edilir.

Literatürde bu metottan türemiş indisler de mevcuttur. Bunlardan biri olan KYK indisi [32], [39] gerilim ve akımın,

$$v(t) = V_o + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2}\, V_n \sin(\omega_n t + \theta_n) \tag{2.1}$$

$$i(t) = I_o + \sum_{n \in N^+} \sqrt{2}\, I_n \sin(\omega_n t + \delta_n) \tag{2.2}$$

biçiminde ifade edildiği durumda aktif (P) ve temel harmonik aktif (P_1) güçleri cinsinden,

$$P = \sum_{n} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n)\,, \qquad P_1 = V_1 I_1 \cos(\theta_1 - \delta_1)\,, \qquad KYK = \frac{P}{P_1} \tag{2.3}$$

biçiminde tanımlanmıştır. KYK indisi 1'den küçük değerde olduğu durumlarda baskın harmonik kaynağı yük tarafı 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 [32].

AGY metodundan türemiş diğer indis olan HG [33], [39] indisi ise; aktif gücün negatif olduğu harmonik numaralarındaki (ℓ) 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:

$$HG = \sqrt{\sum_{n \epsilon \ell} I_n^2} \Big/ \sqrt{\sum_{n \epsilon s} I_n^2} \tag{2.4}$$

HG'nin sıfırdan büyük olduğu durumlarda baskın harmonik kaynağı yük tarafıdır. Bir başka ifadeyle yük harmonik üreten yüktür.

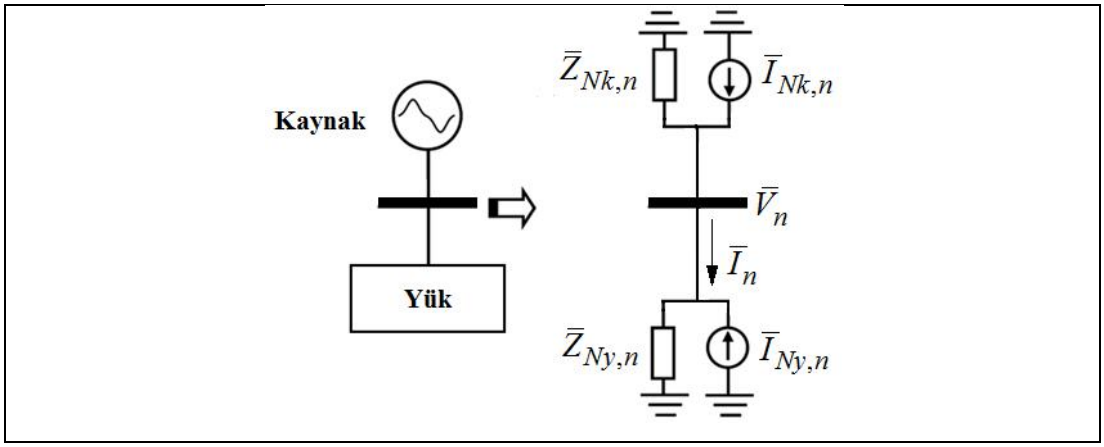
Bu indisin üç fazlı sistemler için hesabında ise her bir fazdan çekilen harmonik aktif güçlerinin toplamının işareti kontrol edilerek ℓ ve s harmonik numaraları

belirlenir. Üç fazlı sistemlerde HG indisi hesap edilirken, akım etkin değeri güç ifadeleriyle alakalı bölümde verilecek olan kolektif etkin değer tanımına göre hesap edilir [33],[44].

Aktif gücün akış yönünün kaynak ve yük tarafı harmonik kaynaklarının faz açılarının bir fonksiyonu olduğu bu sebeple AGY metodunun her şart altında güvenilir olmadığı literatürde çeşitli çalışmalarda [21],[36] gösterilmiştir. Ancak bu metod sistem modeli üzerine herhangi bir bilgiye ihtiyaç duymadan geleneksel ölçü aletleri ile uygulanabilir olması sebebiyle halen önemini korumaktadır [37],[38].

2.2. Süperpozisyon ve Projeksiyon(SP) Metodu

SP metodu her bir harmonik için kaynak ve yük tarafının sebep olduğu akım veya gerilim parçalarının bulunmasını böylece harmonik sorumluluğun paylaştırılmasını amaçlayan bir metottur[17]. Bu metotta kaynak ve yük tarafı Şekil 2.1'de verildiği gibi her bir harmonik için Norton eşdeğer devre biçiminde modellenir.



Şekil 2.1: SP metodu hesaplamalarıyla alakalı sistem.

Bu modelleme işlemi yapıldıktan sonra akım bölme kuralı yardımıyla her bir harmonik için yükün verdiği akım,

$$\bar{I}_{y,n} = \bar{Z}_{Ny,n}\bar{I}_{Ny,n} \,/\, (\bar{Z}_{Ny,n} + \bar{Z}_{Nk,n}) \tag{2.5}$$

ve kaynaktan dolayı akan akım,

$$\bar{I}_{k,n} = \bar{I}_n - \bar{I}_{y,n} \tag{2.6}$$

ifadelerinden hesaplanır. Burada önemli olan Norton modellerdeki empedans ve akım değerlerinin fazör değerler olduğudur. Son olarak, yük tarafından 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 projeksiyonu,

$$I_{Py,n} = I_{y,n}\cos(\delta_{y,n} - \delta_n) \tag{2.7}$$

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

$$I_{Pk,n} = I_n - I_{Py,n} \tag{2.8}$$

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

Ancak SP metodu kaynak ve yük tarafının Norton harmonik empedansı gibi sistem bilgilerini gerektirmektedir. Bu modelleme çalışmalarında, kaynak tarafının Norton empedansının sistemin kısa devre empedansıyla aynı olduğu kabul edilebilir diğer taraftan 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 [18],[19].

SP metodu kaynak ve yük tarafının harmonik numaralarına ait Thevenin eşdeğeri belirlendikten sonra, Süperpozisyon yöntemiyle her iki tarafın ortak bağlantı noktasında oluşturduğu harmonik gerilim düşümleri hesap edilip bu bileşenlerin ortak bağlantı noktası harmonik gerilimi üzerindeki projeksiyonu bulunarak da gerçekleştirilebilir [19],[41].

Diğer taraftan 2012 yılında yayınlanmış bir çalışma [42] SP metodunu özellikle Dağıtılmış Üretim Birimlerinin sisteme girip çıkması sebebiyle kaynak ve yük tarafı Norton empedanslarının sıklıkla değiştiği radyal dağıtım sistemlerinde harmonik sorumluluğun paylaştırılması için uygulamıştır. Bu uygulama algoritmasında, kaynak ve yük tarafı Norton empedanslarında meydana gelen değişimler de yeni birer Norton akım kaynağı olarak modellenerek hesaba katılmıştır.

2.3. Lineer Akım (LA) Metodu

Lineer Akım (LA) metodunda yük akımı lineer (doğrusal) eşdeğer empedansın çektiği lineer akım ve geriye kalan akım olan lineer olmayan akım olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır[15]. Bu eşdeğer empedansın direnci (2.1) ve (2.2)'de verilen anlık gerilim ve akım ifadeleri dikkate alınarak,

$$R = \frac{V_1}{I_1}\cos(\theta_1 - \delta_1) \tag{2.9}$$

ve n. harmonik indüktif reaktansı,

$$X_n = n\frac{V_1}{I_1}\sin(\theta_1 - \delta_1) \tag{2.10}$$

olarak hesaplanır. Böylece yükün çektiği akımın lineer (doğrusal) parçası,

$$i_\ell(t) = \sum_n \frac{\sqrt{2}V_n}{\sqrt{R^2 + X_n^2}}\sin(\omega_n t + \theta_n - \arctan(\frac{X_n}{R})) \tag{2.11}$$

ve geriye kalan bir başka ifadeyle lineer olmayan parçası,

$$i_{n\ell}(t) = i(t) - i_\ell(t) \tag{2.12}$$

biçiminde ifade edilmiştir. LA metoduna ait gösterge ise lineer olmayan akım parçasının ve toplam akımın etkin değerlerinin yüzde oranı biçiminde ifade edilmiştir:

$$LA(\%) = \frac{i_{n\ell}}{I}100 \tag{2.13}$$

Bu metodun üç fazlı sistemlere uygulamasında ise eşdeğer doğrusal empedansın direnç ve n.harmonik indüktif reaktansı fazlardan herhangi birinin temel harmonik gerilimi ve akımına göre (2.9) ve (2.10)'dan bulunur. Bu eşdeğer empedans ile her fazın kendine ait gerilimi ve akımı dikkate alınarak her bir fazdan çekilen lineer ve

lineer olmayan akım parçaları (2.11) ve (2.12)'den hesaplanır[15]. Metodun üç faz uygulamasında bu akım parçalarının etkin değerlerinin hesabı ise kolektif akım etkin değer [49],[50] tanımına göre yapılır. Fakat bu yaklaşımda dengesizlik durumu indisin performansına etki edecektir. Örnek vermek gerekirse; sinüzoidal ve dengesiz sistemler için bu yaklaşıma göre hesaplanan LA indisi sistemde harmonik kaynağı olmamasına rağmen sıfırdan büyük bir değer alacaktır. Bahsedilen dezavantajı önlemek amacıyla tez kapsamında yapılan çalışmalarda LA metodunun üç fazlı sistemlere uygulaması sırasında eşdeğer doğrusal empedans her faz için ayrı hesaplanmıştır. Böylece fazlara ait eşdeğer doğrusal empedans ile ilgili faz gerilimi ve faz akımı dikkate alınarak her bir fazdan çekilen lineer ve lineer olmayan akım parçaları hesaplanmıştır.

Basit kapasite ile kompanzasyonu yapılmış doğrusal yükleri LA indisinin harmonik kaynağı olarak hatalı tespiti literatürde çeşitli çalışmalarda [16], [39]'da sunulmuş bir problemdir. Bu problemi çözmek amacıyla 2012 yılında yayınlanan bir çalışmada [40] yük tarafının doğrusal empedans parçası rezistans, indüktans ve kapasitans parametreleri cinsinden ifade edilmiştir. Buna göre metodun aslına uygun olarak; yük akımıyla yükün doğrusal empedans parçası arasındaki fark akım, yükün sebep olduğu harmonik akımı olarak belirlenmiştir. Böylece yükün sebep olduğu harmonik akım parçası ile yük akımının etkin değerlerinin oranından, LA indisinin gelişmiş bir versiyonu olan; "Yük Karakterizasyon İndisi" tanımlanmıştır. Fakat bu metod önemli derecede iteratif çözüm iş yüküyle uygulanabildiği için gerçek zamanlı kullanıma uygun değildir.

2.4. Uygun Akım (UA) 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 [14]. Buna göre (2.1) ve (2.2)'de verilen anlık gerilim ve akım ifadeleri dikkate alınarak;

$$Z_n = \frac{V_1}{I_1}\angle \mathrm{n}(\theta_1 - \delta_1) \tag{2.14}$$

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

$$i_{co}(t) = \sum_{n} \frac{I_1}{V_1} V_n \sin(\omega_n t + \theta_n + n(\delta_1 - \theta_1)) \tag{2.15}$$

Böylece uygun olmayan akım parçası,

$$i_{nco}(t) = i(t) - i_{co}(t) \tag{2.16}$$

biçiminde ifade edilmiştir. Yükün harmonik bozulma sorumluluğunu gösteren UA metoduna ait gösterge ise uygun olmayan akım parçasının ve toplam akımın etkin değerlerinin yüzde oranı biçiminde [15] çalışmasında hesap edilmiştir:

$$UA(\%) = \frac{i_{nco}}{I} 100 \tag{2.17}$$

Bu metodun üç fazlı sistemlere uygulaması LA metodunun üç fazlı sistemlere uygulanması gibi yapılabilir [15]. Buna göre metodun üç fazlı sistemlere uygulamasında her faz için (14)'den eşdeğer empedans bulunur. Fazlara ait eşdeğer empedanslar ile ilgili faz gerilimi ve faz akımı dikkate alınarak her bir fazdan çekilen uygun ve uygun olmayan akım parçaları (2.15) ve (2.16)'dan hesaplanır. Bu akım parçalarının etkin değerlerinin hesabı ise kolektif akım etkin değer tanımına göre yapılır.

2.5. Aktif Olmayan Güç (AOG) Metodu

Cataliotti ve arkadaşları, [23] ve [24]'de baskın harmonik kaynağının belirlenmesi için tek noktadan eş zamanlı olmayan ölçüm temelli AOG metodunu sunmuştur. AOG metodu; temel harmonik reaktif güç (reaktif gücün alabileceği en küçük değer), Sharon'un tanımladığı reaktif güç ve Fryze'nin tanımladığı reaktif gücün (reaktif gücün alabileceği en büyük değer) karşılaştırması temellidir. Bu güçlerin ifadeleri;

- Temel harmonik reaktif gücü;

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\theta_1) \tag{2.18}$$

- Sharon'un reaktif gücü;

$$S_q = V\sqrt{I_k^2 sin^2(\theta_k)} \tag{2.19}$$

- Fryze'nin reaktif gücü;

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} \quad P = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)i(t)dt \tag{2.20}$$

biçiminde olup Sharon'un ifadesinde yer alan k akım ve gerilimde bulunan ortak harmoniklerin sembolüdür [11].

[23] ve [24] çalışmalarında yapılan niteliksel analizlerle,

- Sinüzoidal gerilim ve doğrusal yük durumunda üç farklı reaktif güç tanımının birbirine eşit olduğu,
- Sinüzoidal olmayan gerilim ve doğrusal yük için akım harmonik bozulmasının çok küçük olduğu ve gerilim ile akıma ait ortak harmoniklerin büyük ölçüde temel harmonikten oluştuğu belirtilmiştir. Böylece bu şartlar altında Sharon'un reaktif gücünün Fryze'nin reaktif gücüne göre temel harmonik reaktif güce daha yakın olduğu,
- Sinüzoidal gerilim ve doğrusal olmayan yük durumunda ise; akım harmonik bozulmasının yüksek olduğu ve akımın önemli miktarda ortak harmonik içerdiği belirtilerek bu durum için Sharon'un reaktif gücünün temel harmonik reaktif gücüne göre Fryze'nin reaktif gücüne daha yakın olduğu,
- Son olarak, sinüzoidal olmayan gerilim ve doğrusal olmayan yük durumunda ise; Sharon'un reaktif gücü temel harmonik ve Fryze'nin reaktif güçlerine yaklaşık olarak eşit mesafede olduğu,

sonuçlarına ulaşılmıştır. Bu niteliksel analizlere göre $\mathrm{AOG}_1 = S_q - Q_1$ ve $\mathrm{AOG}_2 = Q_f - S_q$ifadeleri yardımıyla AOG metodunun ana hatları aşağıda verilen biçimde özetlenebilir:

$$\mathrm{AOG}_1 \cong \mathrm{AOG}_2 \cong 0 \Rightarrow \text{Sinüzoidal gerilim ve doğrusal yük durumu} \tag{2.21}$$

$$\mathrm{AOG}_1 < \mathrm{AOG}_2 \Rightarrow \text{Sinüzoidal olmayan gerilim ve doğrusal yük durumu} \tag{2.22}$$

$$\mathrm{AOG}_1 > \mathrm{AOG}_2 \Rightarrow \text{Sinüzoidal gerilim ve doğrusal olmayan yük durumu} \tag{2.23}$$

$$\mathrm{AOG}_1 \cong \mathrm{AOG}_2 > 0 \Rightarrow \text{Sinüzoidal olmayan gerilim ve doğrusal olmayan yük durumu} \tag{2.24}$$

Yukarıda bahsedilen metodun reaktif güç karşılaştırma temelli olması özellikle basit kapasiteyle kompanze edilmiş lineer yükler için büyük bir problemdir. Zira basit kapasite temel harmonik reaktif gücünü minimize ederken diğer harmonikleri dolayısıyla S_q ve $Q_f{}'yi$ arttıracaktır. Bu durumda (2.22)'de verilen ifade hatalı olacaktır. Diğer taraftan, Sharon ve Fryze'nin güç bileşenlerinin sadece tek fazlı sistemler için tanımlanmış olması sebebiyle [23] ve [24]'de üç fazlı sistemler için yapılan nümerik analizlerde AOG metodu uygulanırken her faz için hesap edilen güçlerin toplamları karşılaştırılmıştır. Bu sebeple aynı çalışmalarda metodun dengesiz sistemlerde harmonik kaynaklarının belirlenmesi için faydalı bilgiler verdiği fakat dengesizlik altında kullanıma tam olarak uygun olmadığı vurgulanmıştır.

Cataliotti ve Cosentino [25] ve [26] çalışmalarında AOG metodunda dikkate alınan reaktif güç bileşenlerini, IEEE stadard 1459'da tanımlı gerilim, akım ve güç bileşeni ifadelerini kullanarak spektral analiz gerektirmeden zaman domeyninde hesaplamışlardır. Böylece metodun bir önceki haline göre donanımsal bakımdan daha basit bir ölçüm sistemiyle uygulaması yapılmıştır.

Aynı araştırmacıların konu üzerine en son çalışmasında [27] ise AOG metodunun dengesiz sistemlerde kullanıma uygun bir versiyonu, yine IEEE standard 1459'da tanımlı gerilim, akım ve güç bileşeni ifadeleri kullanılarak geliştirilmiştir.

2.6. Ortiz ve Arkadaşlarının Önerdiği Güç İfadesi

Harmonik sorumluluğun paylaştırılmasında bir araç olarak kullanılmak üzere önerilen bu güç ifadesinin tanımlanmasında, AGY metodunda olduğu gibi pozitif işaretli aktif güçlere ait harmonik numaraları (N_S) kaynağın sorumluluğu ve negatif işaretli aktif güçlere ait harmonik numaraları (N_C) yükün sorumluluğu altında kabul edilmiştir[13]. Buna göre kaynağın sorumluluğundaki harmonik gerilim ve akım etkin değerleri (V_{HS} ve I_{HS}) ile yükün sorumluluğundaki harmonik gerilim ve akım etkin değerleri (V_{HC} ve I_{HC}) hesap edilmiştir:

$$V_{HS} = \sqrt{\sum_{n \epsilon N_s} V_n^2}\,, \qquad V_{HC} = \sqrt{\sum_{n \epsilon N_c} V_n^2} \tag{2.25}$$

$$I_{HS} = \sqrt{\sum_{n \epsilon N_s} I_n^2}\,, \qquad I_{HC} = \sqrt{\sum_{n \epsilon N_c} I_n^2} \tag{2.26}$$

Böylece gerilim ve akım etkin değerleri dekompoze edilmiştir:

$$V^2 = V_1^2 + V_{HS}^2 + V_{HC}^2 \tag{2.27}$$

$$I^2 = I_1^2 + I_{HS}^2 + I_{HC}^2 \tag{2.28}$$

Daha sonra sırasıyla, kaynak tarafının sorumluluğundaki harmonik görünür güç;

$$S_{HS} = V_{HS} I_{HS} \tag{2.29}$$

Yük tarafının sorumluluğundaki harmonik görünür güç;

$$S_{HC} = V_{HC} I_{HC} \tag{2.30}$$

Kaynak ve yük tarafının ortak sorumlu olduğu harmonik görünür güçler;

$$S_{HCS} = V_{HC} I_{HS} \, , S_{HSC} = V_{HS} I_{HC} \tag{2.31}$$

Kaynak tarafının sorumlu olduğu gerilim ve akım bozulma güçleri;

$$D_{VS} = V_{HS} I_1 \, , \qquad D_{IS} = V_1 I_{HS} \tag{2.32}$$

Yük tarafının sorumlu olduğu gerilim ve akım bozulma güçleri;

$$D_{VC} = V_{HC} I_1 \, , \qquad D_{IC} = V_1 I_{HC} \tag{2.33}$$

tanımlanmıştır.

Bu güç bileşenleri yarımıyla gerilim bozulma gücü ($D_V = \sqrt{D_{VS}^2 + D_{VC}^2}$), akım bozulma gücü ($D_I = \sqrt{D_{IS}^2 + D_{IC}^2}$) ve harmonik görünür gücü ($S = \sqrt{S_{HS}^2 + S_{HC}^2 + S_{HSC}^2 + S_{HCS}^2}$) hesap edilmiş ve tek fazlı sistemler için görünür güç;

$$S = \sqrt{S_1^2 + D_V^2 + D_1^2 + S_H^2} \tag{2.34}$$

biçiminde ifade edilmiştir. Bu güç ifadesinde yer alan D_{VS}, D_{IS} ve S_{HS} vektör toplamından kaynak tarafının sorumluluğundaki temel olmayan görünür güç;

$$S_{NS} = \sqrt{D_{VS}^2 + D_{IS}^2 + D_{HS}^2} \tag{2.35}$$

ile yük tarafının sorumluluğundaki temel olmayan görünür güç;

$$S_{NC} = \sqrt{D_{VC}^2 + D_{IC}^2 + S_{HC}^2} \tag{2.36}$$

tanımlanmıştır. Bunlara ek olarak kaynağın ürettiği harmonik aktif gücü ($P_{HS} = \sum_{n \epsilon N_s} P_n$), yükün ürettiği harmonik aktif gücü ($P_{HC} = \sum_{n \epsilon N_C} P_n$) hesap edilmiştir. Yukarıda ifade edilen güç bileşenleri yardımıyla çeşitli güç faktörü tanımları [13]0'de yapılmıştır. Ancak nihai olarak iki güç faktörü tanımı sunulmuştur. Bunlar; kaynak

tarafı için temel olmayan harmonik güç faktörü (PF_{NS}) ve yük tarafı için temel olmayan harmonik güç faktörüdür (PF_{NC}):

$$PF_{NS} = \frac{P_{HS}}{S_{NS}} \quad ve \quad PF_{NC} = \frac{P_{HC}}{S_{NC}} \tag{2.37}$$

Üç fazlı sistemler için efektif gerilim $V_e = \sqrt{(1/8)\left[3\left(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2\right) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2\right]}$ ve efektif akım ($I_e = \sqrt{(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2)/3}$ etkin değerleri ile efektif görünür güç ($S_e = 3V_eI_e$)[46] tanımları kullanılarak, kaynak ve yük harmonik sorumluluğu paylaşımı için bir güç ifadesi ve çeşitli indisler önerilmiştir. Buna göre efektif gerilim ve efektif akım etkin değerleri sırasıyla temel harmonik (V_{e1}, I_{e1}), kaynağın sorumluluğunda olan harmonikler (V_{eHS}, I_{eHS}) ve yükün sorumluluğundaki harmonikler (V_{eHC}, I_{eHC}) için hesaplanmıştır. Böylece aşağıdaki gerilim ve akım dekompozisyonları yapılmıştır:

$$V_e^2 = V_{e1}^2 + V_{eHS}^2 + V_{eHC}^2 \tag{2.38}$$

$$I_e^2 = I_{e1}^2 + I_{eHS}^2 + I_{eHC}^2 \tag{2.39}$$

Bu gerilim akım bileşenleri yardımıyla kaynak sorumluluğundaki gerilim ve akım bozulma güçleri,

$$D_{eVS} = 3V_{eHS}I_{e1}, \quad D_{eIS} = 3V_{e1}I_{eHS} \tag{2.40}$$

$$D_{eVC} = 3V_{eHC}I_{e1}, \quad D_{eIC} = 3V_{e1}I_{eHC} \tag{2.41}$$

olarak hesap edilmiştir. Harmonik görünür güçleri ise sırasıyla, kaynak tarafı sorumluluğundaki harmonik görünür güç;

$$S_{eHS} = 3V_{eHS}I_{eHS} \tag{2.42}$$

yük tarafı sorumluluğundaki harmonik görünür güç,

$$S_{eHC} = 3V_{eHC}I_{eHC} \tag{2.43}$$

ve kaynak ile yük tarafının ortak sorumluluğundaki harmonik görünür güçler,

$$S_{eHCS} = 3V_{eHC}I_{eHS}\,, \qquad S_{eHSC} = 3V_{eHC}I_{eHC} \tag{2.44}$$

biçiminde ifade edilmiştir. Bu tanımlanan güç bileşenleri ile efektif görünür güç aşağıda verilen biçimde dekompoze edilmiştir:

$$\begin{aligned} S_E &= \sqrt{S_{e1}^2 + D_{eVS}^2 + D_{eIS}^2 + D_{eVC}^2 + D_{eIC}^2 + S_{eHS}^2 + S_{eHC}^2 + S_{eHSC}^2 + S_{eHCS}^2} \\ &= \sqrt{S_{e1}^2 + D_{eV}^2 + D_{eI}^2 + S_{eH}^2} \\ &= \sqrt{S_{e1}^2 + S_{eN}^2} \end{aligned} \tag{2.45}$$

Böylece tek fazlı sistemler için (2.37)'de verilen ifadelerde harmonik aktif güçleri ile aktif olmayan görünür güçler ($P_{HS} = \sum_{n\epsilon N_s}(P_{an} + P_{bn} + P_{cn})$, $P_{HC} = \sum_{n\epsilon N_c}(P_{an} + P_{bn} + P_{cn})$, $S_{eNS} = \sqrt{D_{eVS}^2 + D_{eIS}^2 + S_{eHS}^2}$ ve $S_{eNC} = \sqrt{D_{eVC}^2 + D_{eIC}^2 + S_{eHC}^2}$) yerlerine konarak üç fazlı sistemler için kaynak tarafı ve yük tarafına ait temel olmayan harmonik güç faktörleri hesap edilmiştir.

2.7. Kaydırılmış İletkenlik Gücünün Ölçümüne Dayalı Metod

Bu bölümde, [48]'de tanımlanmış olan güç ifadesi bileşenlerinden olan "kaydırılmış iletkenlik gücü" ölçümüne dayanan harmonik kaynağı tespit metodu kısaca özetlenmiştir.

2.7.1. Sinüzoidal Olmayan Tek Fazlı ve Üç Fazlı Sistemler İçin Kaydırılmış Gücün Hesabı

[48]'de sinüzoidal olmayan tek fazlı sistem şartlarında optimal kapasitif kompanzatör gücünün belirlenmesi ve harmonik kaynağı tespiti için bir görünür güç ifadesi önerilmiştir. Bu önerilen güç ifadesinde yer alan kaydırılmış güç bileşeni, yüke ait eşdeğer iletkenlik,

$$G_e = \frac{\sum_{n\epsilon N} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n)}{\sum_{n\epsilon N} V_n^2} \tag{2.46}$$

n.harmonik iletkenlik,

$$G_n = \frac{V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n)}{V_n^2} \tag{2.47}$$

ve d.a. iletkenlik,

$$G_0 = I_0 / V_0 \tag{2.48}$$

parametreleri cinsinden aşağıda verilen biçimde tanımlıdır:

$$D_{sc} = V I_{sc} = \sqrt{\sum_n V_n^2} \sqrt{\sum_n (G_n - G_e)^2 V_n^2} \tag{2.49}$$

Yine aynı çalışmalarda tek fazlı sistemler için önerilen güç ifadesi, sinüzoidal olmayan-dengeli gerilimlerin ve sinüzoidal olmayan-dengesiz akımların bulunduğu üç faz-üç iletkenli sistemlere genişletilmiştir. Bu üç fazlı güç güç ifadesinde yer alan kaydırılmış iletkenlik gücünün hesabını izah etmek için üç faza ait gerilimler ve akımlar,

$$v_{\Sigma}(t)=\begin{bmatrix}\sum_n \sqrt{2}V_n sin(\omega_n t+\theta_{an})\\ \sum_n \sqrt{2}V_n sin(\omega_n t+\theta_{bn})\\ \sum_n \sqrt{2}V_n sin(\omega_n t+\theta_{cn})\end{bmatrix},\ i_{\Sigma}(t)=\begin{bmatrix}\sum_n \sqrt{2}I_{an} sin(\omega_n t+\delta_{an})\\ \sum_n \sqrt{2}I_{bn} sin(\omega_n t+\delta_{bn})\\ \sum_n \sqrt{2}I_{cn} sin(\omega_n t+\delta_{cn})\end{bmatrix} \tag{2.50}$$

biçiminde ifade edilebilir. Burada, (2.50)'deki verilen gerilimler ve akımların tipik dağıtım sistemlerinde olduğu gibi d.a. bileşeni ve sıfır sıra harmonikleri içermediği önemle belirtilmelidir.

Kaydırılmış gücün hesabı için öncelikle gerilimle aynı fazda n. harmonik hat akımları sebebiyle çekilen güçler (U_{mn}),

$$U_{mn} = V_n I_{mn} \cos(\theta_{mn} - \delta_{mn}) \qquad (m = a, b, c) \tag{2.51}$$

ve her bir hattan çekilen n. harmonik dengeli aktif güçleri,

$$P_{Bn} = \frac{1}{3}(U_{an} + U_{bn} + U_{cn}) \tag{2.52}$$

cinsinden yüke ait n. harmonik dengeli iletkenlik,

$$G_{Bn} = \frac{P_{Bn}}{V_n^2} \tag{2.53}$$

ve eşdeğer iletkenlik,

$$G_e = \frac{\sum_n P_{Bn}}{\sum_n V_n^2} \tag{2.54}$$

parametreleri bulunur. Böylece, üç fazlı sistemler için kaydırılmış iletkenlik gücü,

$$D_{sc} = V_{\Sigma} I_{sc} = 3\sqrt{\sum_n V_n^2}\sqrt{\sum_n (G_{Bn} - G_e)^2 V_n^2} \tag{2.55}$$

ifadesinden hesap edilir.

2.7.2. Kaydırılmış İletkenlik Gücü Ölçümüne Dayalı Metodun Uygulama Esasları

Kaydırılmış iletkenlik gücü sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan gerilimler altında harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanımı aşağıda iki madde halinde verilmiştir[48]:

- **Sinüzoidal (veya İhmal 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} sıfıra 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 D_{sc} gücü önemli miktarda büyük olur.

- **IEEE std. 519-1992'de Belirtilen Azami Bozulma Sınırında (THD_V'si %5 değerini aşmayan) Gerilim:** 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. Ayrıca [53] çalışmasında tüketicilere ait elemanları korumak için %5 THD_V değerinin aşılmaması işaret edilmiştir. Sonuç olarak; THD_V = %5 sınırına uyan gerilimlerden yükün iletkenlik temelli akım bileşeninin dolayısıyla kaydırılmış iletkenlik gücünün (D_{sc}) önemli derecede etkilenmeyeceği beklenmektedir. Bu sebeple THD_V = %5 sınırına uyan gerilimler altında doğrusal yüklerin çektiği D_{sc} gücünün ihmal edilebilir olduğu, aynı gerilim şartları altında

harmonik üreten yüklerin çektiği D_{sc} gücünün ise önemli derecede büyük olduğu [48]' istatistiksel analizler sonucunda görülmüştür.

2.8. Sonuç

Bu bölümde ulaşılabilen literatürde var olan harmonik kaynağı tespit ve harmonik sorumluluk paylaştırma metotları ve indisleri incelenmiştir. Bu incelemeden aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılmıştır:

- SP metodunun detaylı bir sistem bilgisi gerektirdiği dolayısıyla pratikte kullanıma müsait değildir.
- AGY, KYK, HG ile Ortiz ve arkadaşlarının güç ifadesi harmonik aktif güçlerinin akış yönünü dikkate alan harmonik kaynağı tespit metotlarıdır. Bu metotlardan basit bir şekilde uygulanabilir olanları KYK ve HG indisleridir.
- LA ve UA indisleri ile D_{sc} metodu yük empedansının frekansa bağımlılığını dikkate alan harmonik kaynağı tespit yöntemleridir.
- AOG birden fazla güç ifadesine ait güç bileşenlerinin karşılaştırmalı analizine dayanan bir harmonik kaynağı tespit metodur. Bu bakımdan pratik uygulamaya müsait görülmemiştir.

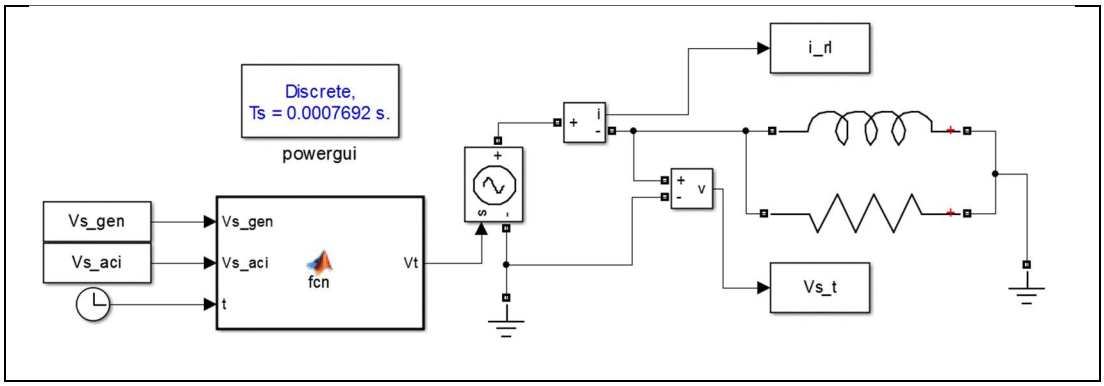
Yukarıda sıralanan sonuçlar doğrultusunda, pratik uygulamaya müsait KYK, HG, UA ve LA indisleri ile D_{sc} metodunun başarım sınırları, ileriki bölümlerde simülasyon ve ölçüm temelli analizlerle karşılaştırmalı olarak incelenecektir.

3. SİMÜLASYON TEMELLİ ANALİZ

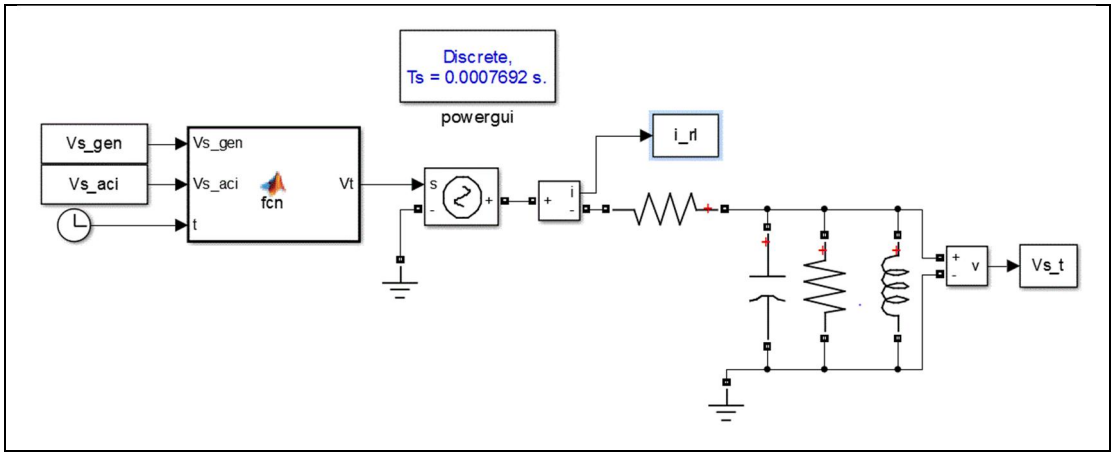
Bu bölümde KYK, HG, UA ve LA indisleri ile D_{SC} metodunun geçerlilikleri, Matlab-SIMULINK ortamında hazırlanmış sistemlerde test edilmiştir. İlk test sisteminde yükler, kaynak geriliminin çeşitli harmonik bozulma seviyelerinde (THDv) ayarlanan kaynak ile beslenmiştir. Gerilim kaynağı modellenmesi IEC 61000-3-6 standardına uygun rastgele harmonik içerik üreten bir Matlab kodu yazılması ile gerçekleştirilmiştir.

3.1 Analizlerde Dikkate Alınan Yük Modelleri

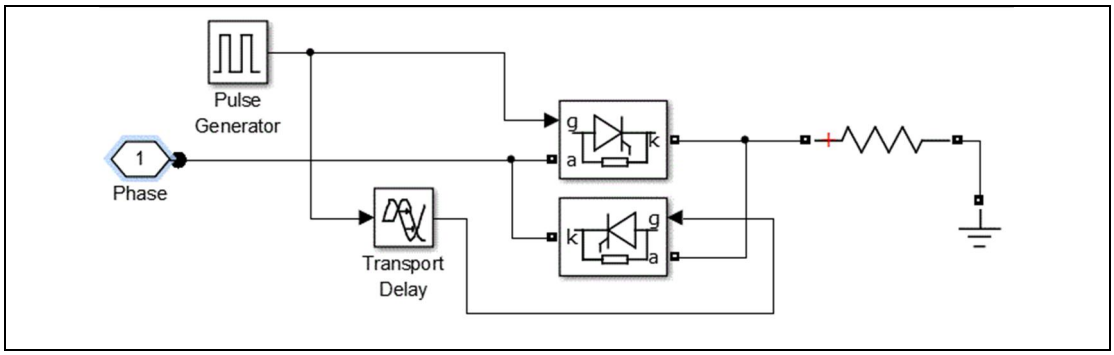
Tek baralı ve tek fazlı simülasyon sisteminde yükler bozulmuş gerilim kaynağına doğrudan bağlanmıştır. Test edilen durumlar; sabit RL empedans yük modeli, basit konsatörle kompanze edilmiş sabit RL empedans yük modeli, dimmer ile kontrol edilen sabit rezistans modeli ve dimmer ile kontrol edilen sabit aktif güç çeken yük modelidir. Bu test durumlarının SIMULINK blokları sırasıyla Şekil 3.1-3.4 arasında verilmiştir.



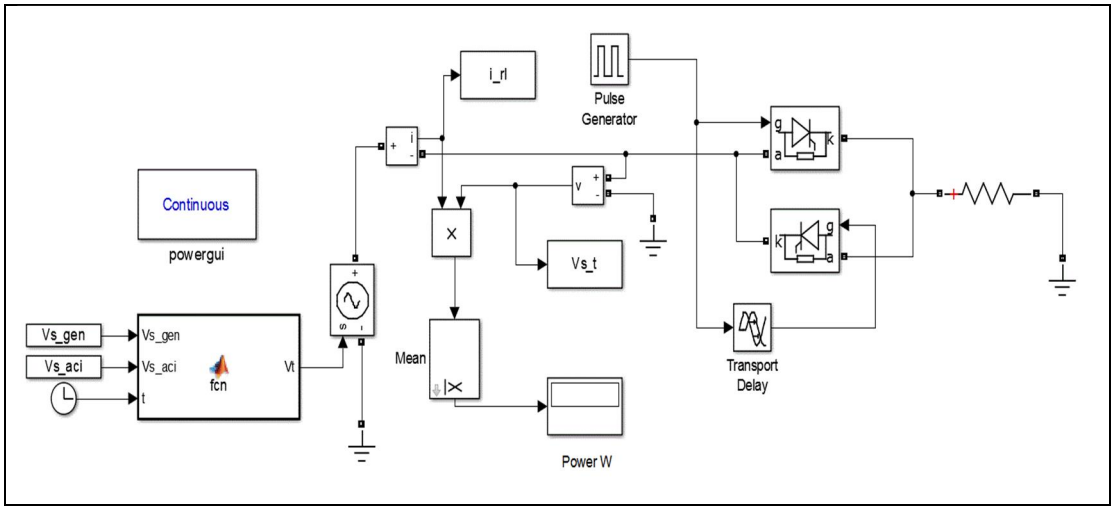
Şekil 3.1: Sabit RL empedans yük modeli



Şekil 3.2: Basit kondansatörle kompanze edilmiş sabit RL yük modeli.



Şekil 3.3: Dimmerle kontrol edilen sabit rezistans yük modeli.



Şekil 3.4: Dimmer ile kontrol edilen sabit aktif güç çeken yük modeli.

Yukarıda belirtilen yük modelleri yardımıyla aşağıda sonuçları verilen iki tip analiz yapılmıştır. Birinci tipte ilk üç yük modeli çok sayıda bozulmuş gerilim altında beslenmiş ve bu durumlar için metotların/indislerin harmonik kaynağı tespiti noktasında geçerlilikleri istatistiksel olarak analiz edilmiştir. İkinci tip analizde dördüncü yük modeli için sinüzoidal kaynak ve nonsinüzoidal kaynak geriliminde dimmer tetikleme açısı arttırılarak THDI'nın artışıyla indis değerlerinin değişim trendleri incelenmiştir.

3.2. Analiz Sonuçları

Bu kısımda tek baralı küçük test sistemi için gerçekleştirilen simülasyonların sonuçları karşılaştırılacaktır.

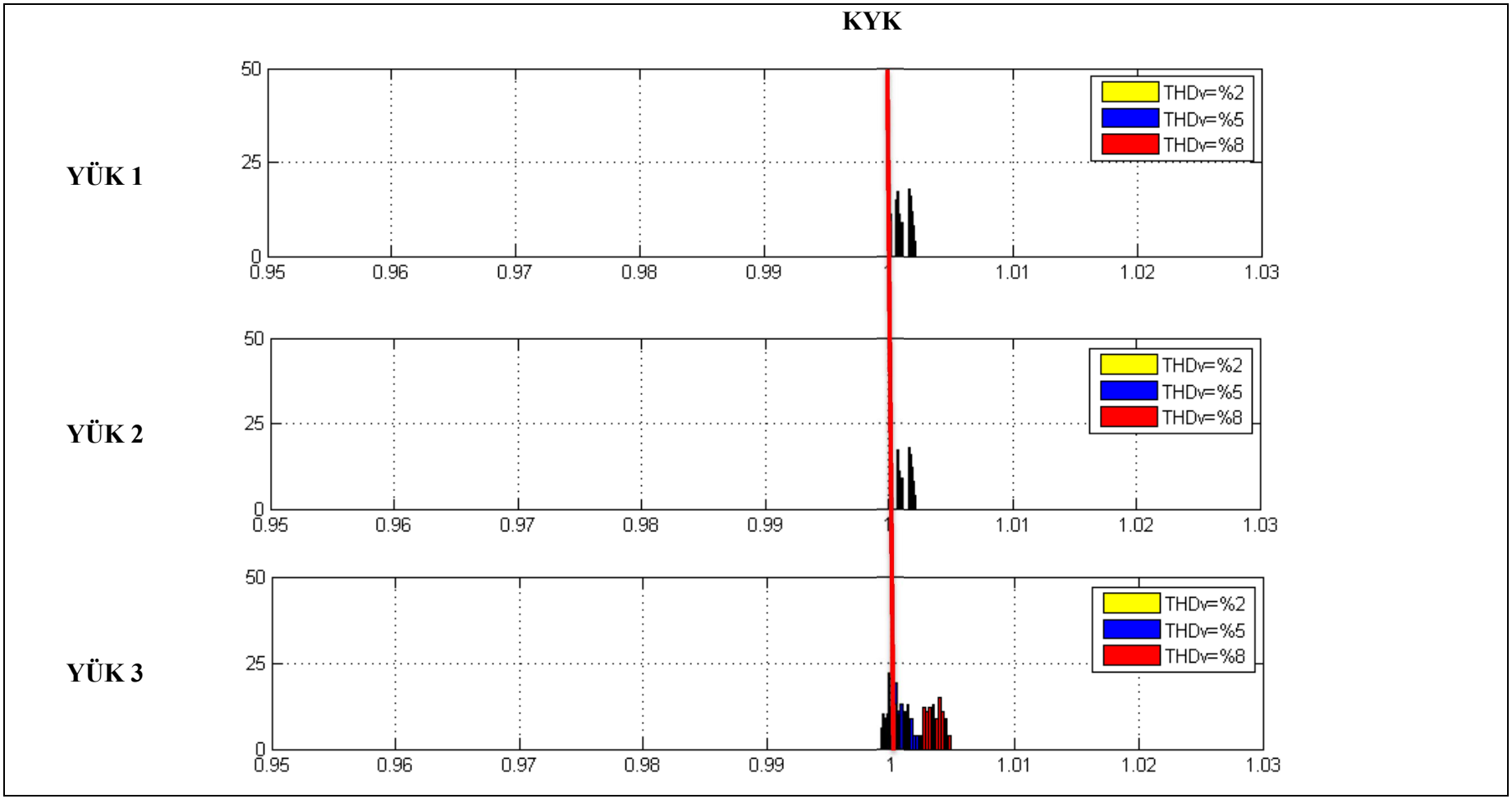
3.2.1. Birinci Tip Analize Ait Sonuçlar

Bu kısımda sabit RL empedans yük modeli (Yük 1), basit konsatörle kompanze edilmiş sabit RL empedans yük modeli (Yük 2) ve dimmerle kontrol edilen sabit rezistans yük modeli (Yük 3), THDv miktarı %2, %5 ve %8 olan 100'er farklı gerilim dalga formu altında simüle edilmiştir. Her bir durum için akım ve gerilim verisi ölçülerek KYK, HG, UA, LA ve normalize edilmiş D_{sc} (D_{sc}/S) değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlere ait histogramlar Şekil 3.5- 3.9'de verilmiştir.

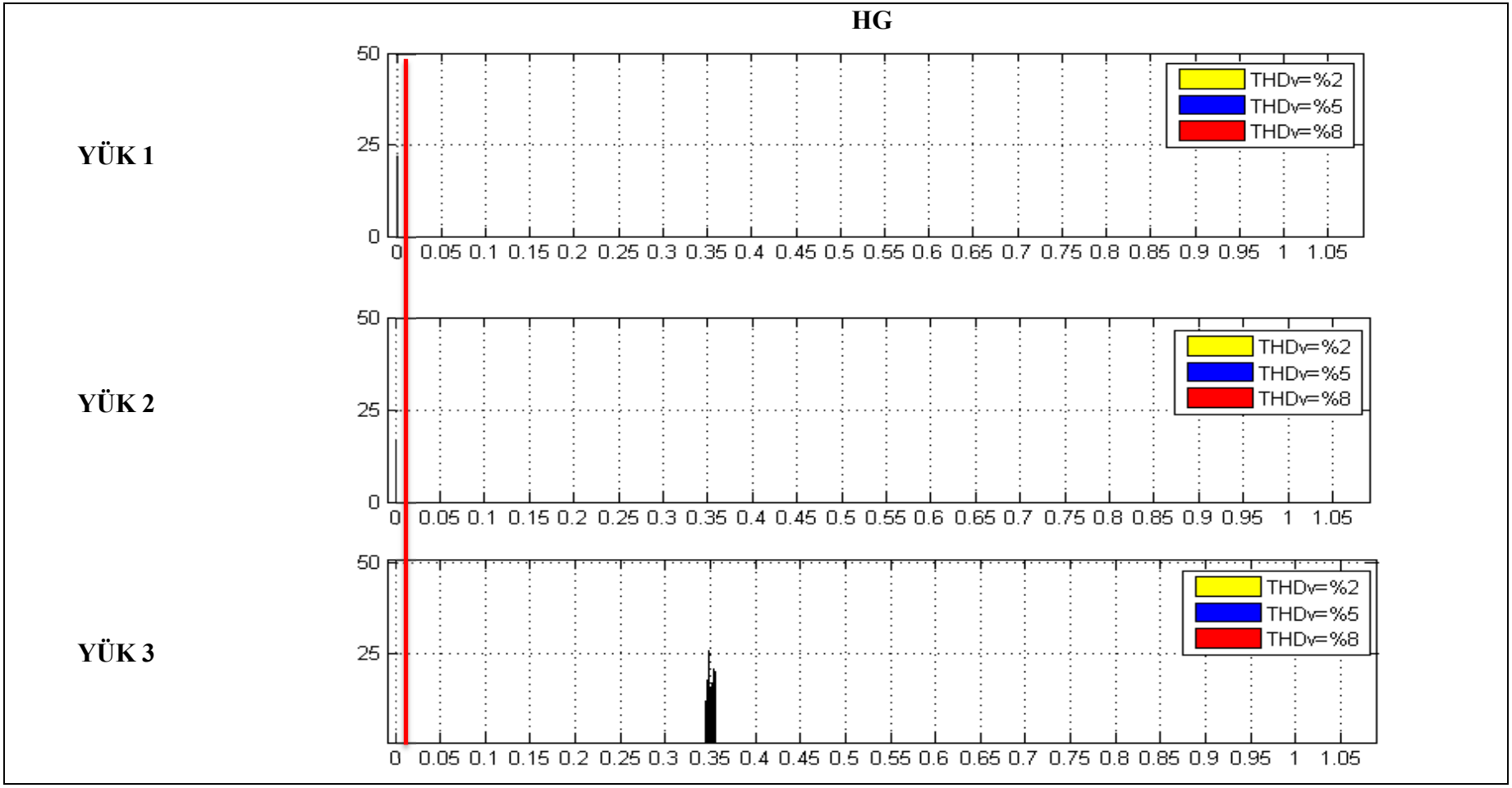
Bu şekiller incelendiğinde;

- KYK indisinin Yük 1 ve 2 için bütün gerilim durumlarında 1'den büyük değer aldığı, dolayısıyla bu iki yük tipini doğrusal yük olarak doğru bir biçimde tespit ettiği görülmektedir. Ancak, yük 3 için KYK indisi gerilim dalga durumlarının çok büyük kısmında yine 1'den büyük değer almış ve bu yük tipini hatalı biçimde doğrusal yük olarak tespit etme ihtimalinin yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.
- UA ve LA indislerinin Yük 1 ve 2 için THDV değerindeki değişimden çok fazla etkilendikleri anlaşılmıştır. Ayrıca, UA ve LA indislerinin, gerilim harmonik bozulmasının olduğu durumlarda Yük 2 (kompanze edilmiş RL yük) için hesaplanan değerlerinin Yük 3 için hesaplanan değerlerine çok yakın olduğu görülmektedir.

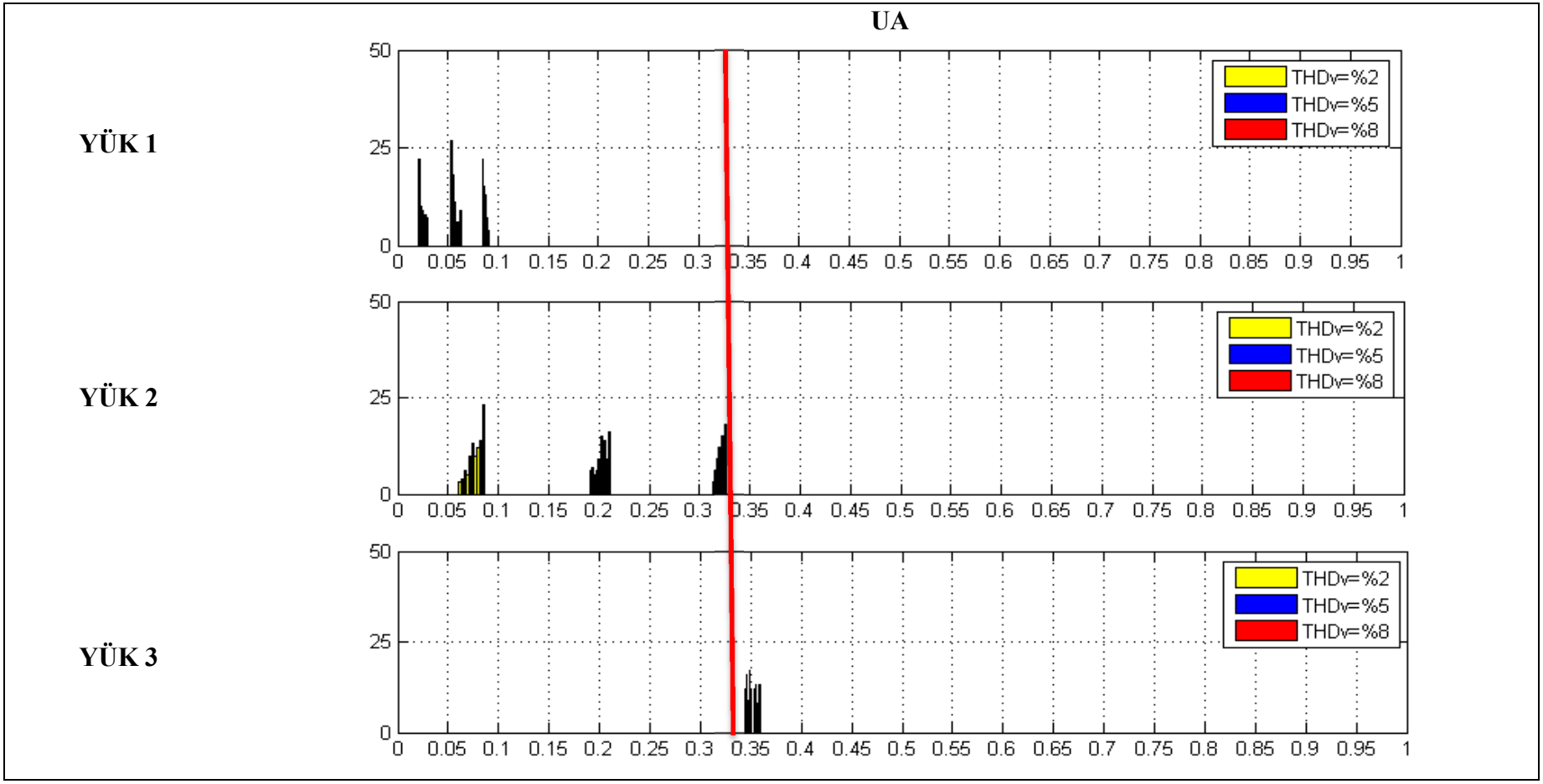
- HG ve D_{sc} indislerinin Yük 3'in hesaplanan değerleri Yük 1 ve 2 için hesaplanan değerlerine göre çok büyük olduğu görülmüştür. Her iki indis, yük tipinden bağımsız olarak, THDV değerindeki değişimden çok az etkilenmektedir. Bu iki önemli husus, her iki indisin doğrusal yükler için önceden tanımlı bir eşik değeri belirlemek suretiyle, harmonik üreten yüklerin tespitinde kullanılabileceğini göstermektedir.



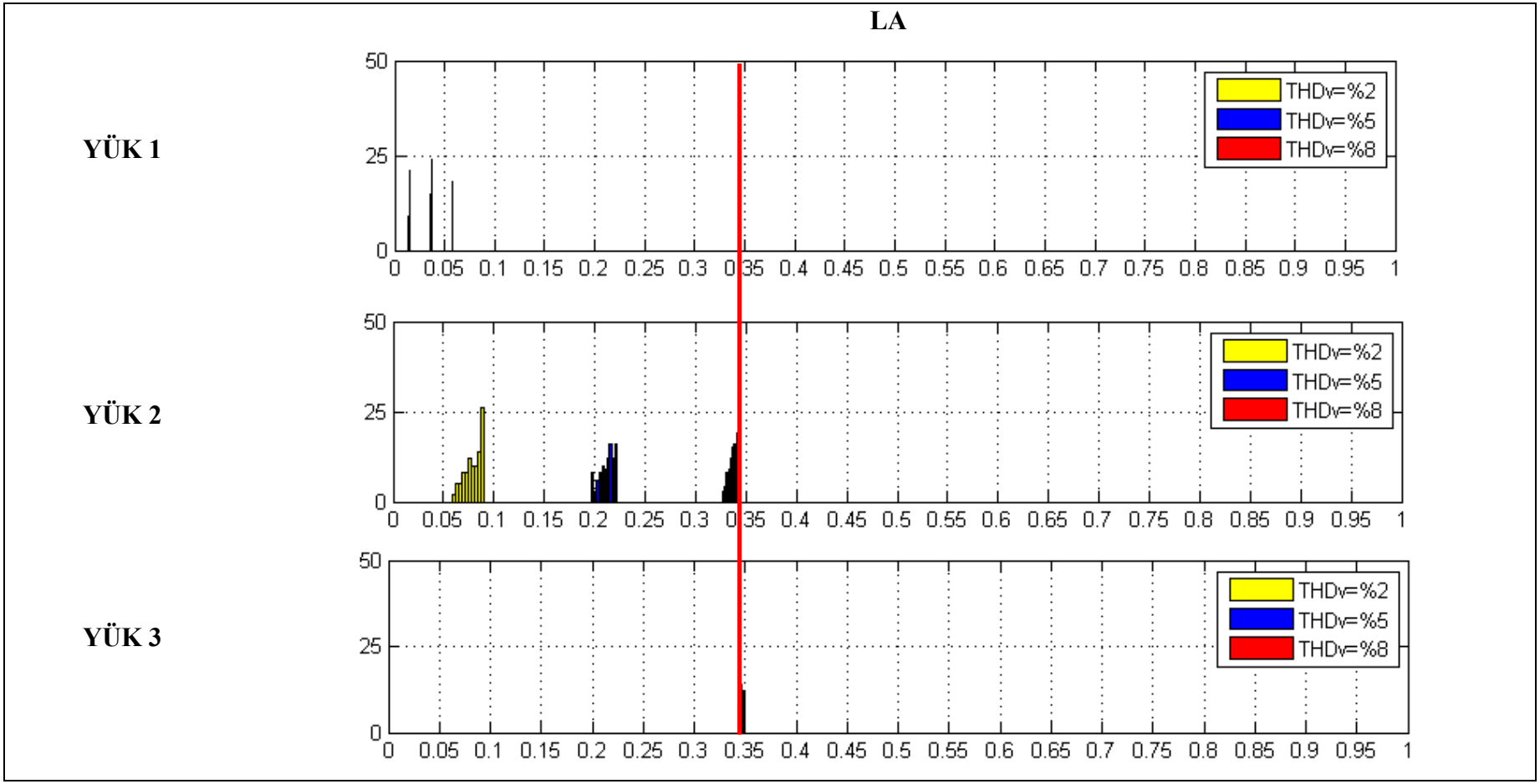
Şekil 3.5: Yük 1-3 için THD_V %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan KYK histogramları.



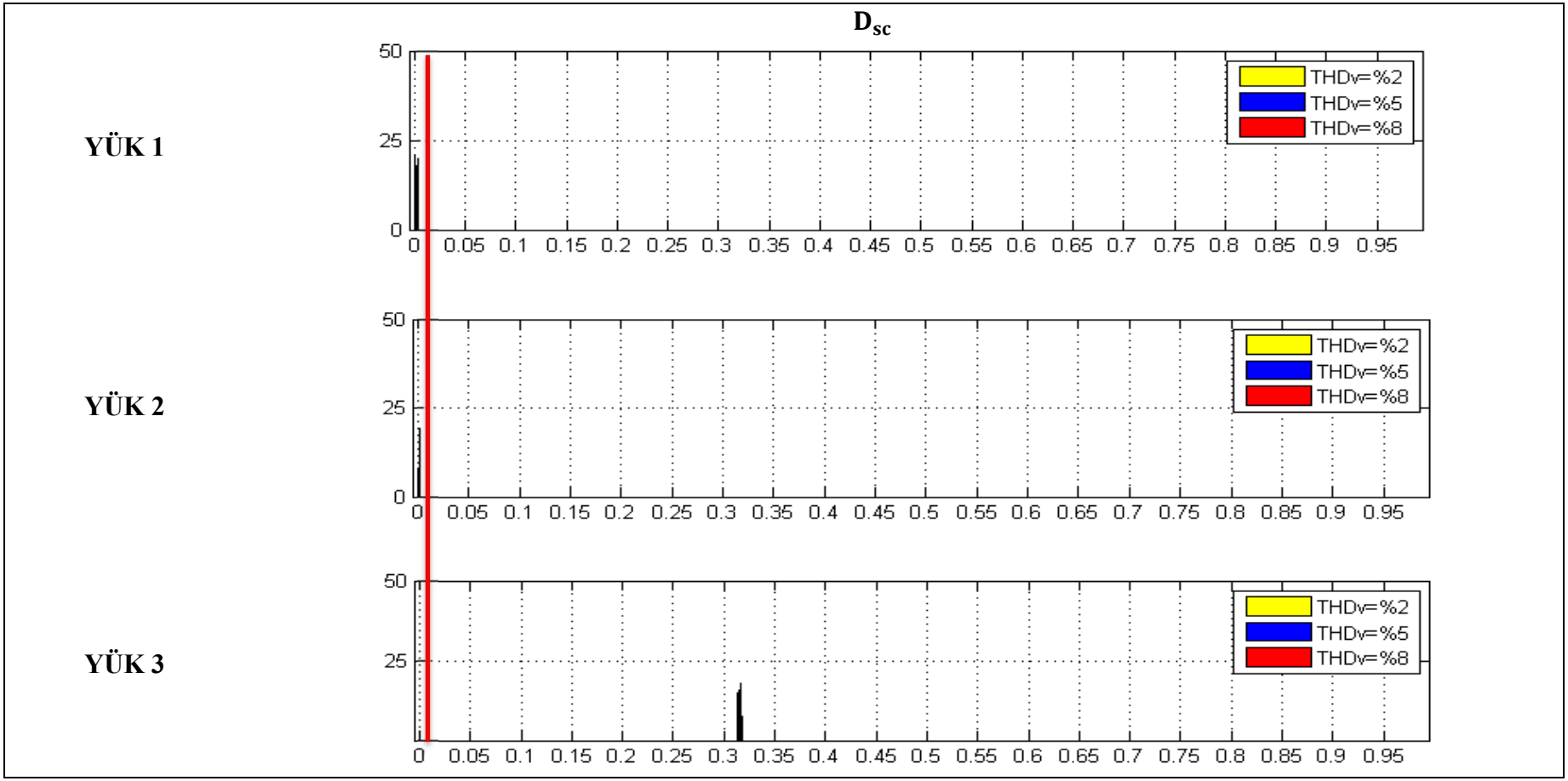
Şekil 3.6: Yük 1-3 için THD_V %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan HG histogramları.



Şekil 3.7: Yük 1-3 için THDv %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan UA histogramları.



Şekil 3.8: Yük 1-3 için THDv %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan LA histogramları.



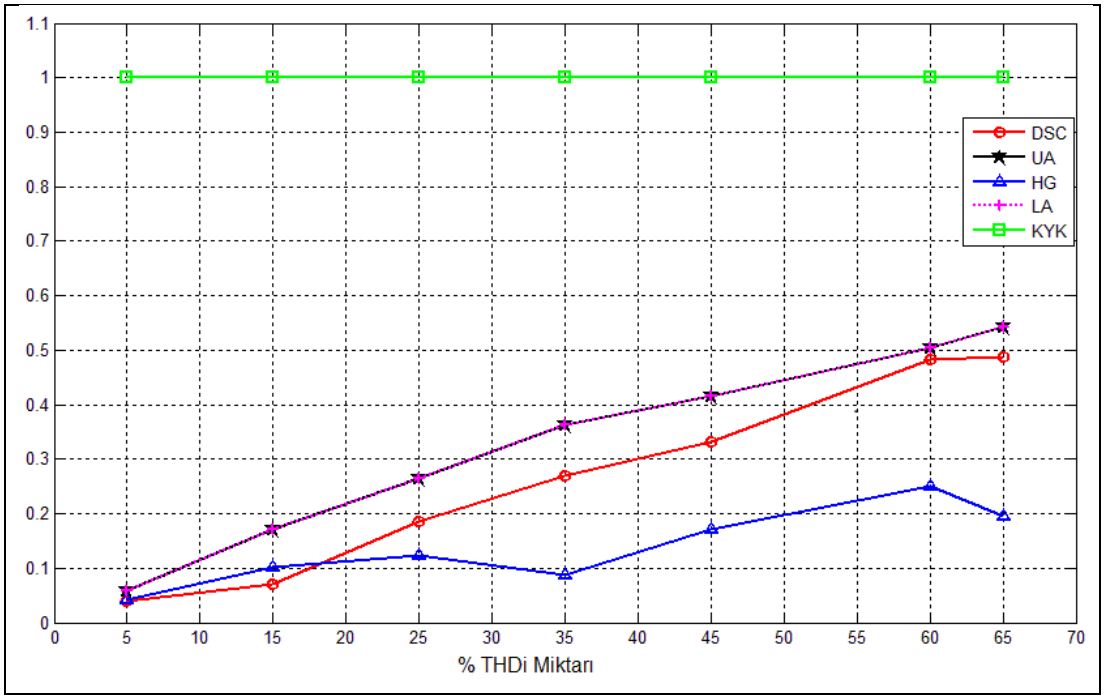
Şekil 3.9: Yük 1-3 için THD_V %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan Dsc

3.2.2. İkinci Tip Analize Ait Sonuçlar

Şebekeye herhangi bir noktadan bakıldığınında harmonik bozulma sorumluluğunun paylaştırılabilirliğinin test edildiği bu çalışmada, iki farklı durum incelenmiştir. Birinci durumda harmonik üreten yük, farklı THDi miktarlarında aynı gücü çekebilecek şekilde sinüzoidal kaynak ile beslenmiştir. İkinci durumda ise harmonik üreten yük; farklı THDi miktarlarına sahip durumlar için nonsinüzoidal kaynak ile beslenmiştir.

3.2.2.1. Sinüzoidal Gerilim Altında Sabit Güç Çeken Yük Modeli Simülasyon Sonuçları

Akımın toplam harmonik bozulma miktarı küçükten büyüğe sıralanarak yedi farklı durum için ölçümler alınmış olup, sinüzoidal gerilim altında KYK, UA, LA, HG ve D_{sc} indis/metotlarının, THDI ile değişimleri Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde KYK indisinin formülü gereği 1'den küçük ve 1'den büyük durumlar için yükün harmonik üretip üretmediği bilgisi verebileceği anlaşılmakta ancak harmonik sorumluluğun paylaştırılması konusunda kullanılamayacağı açıkça görülmektedir.



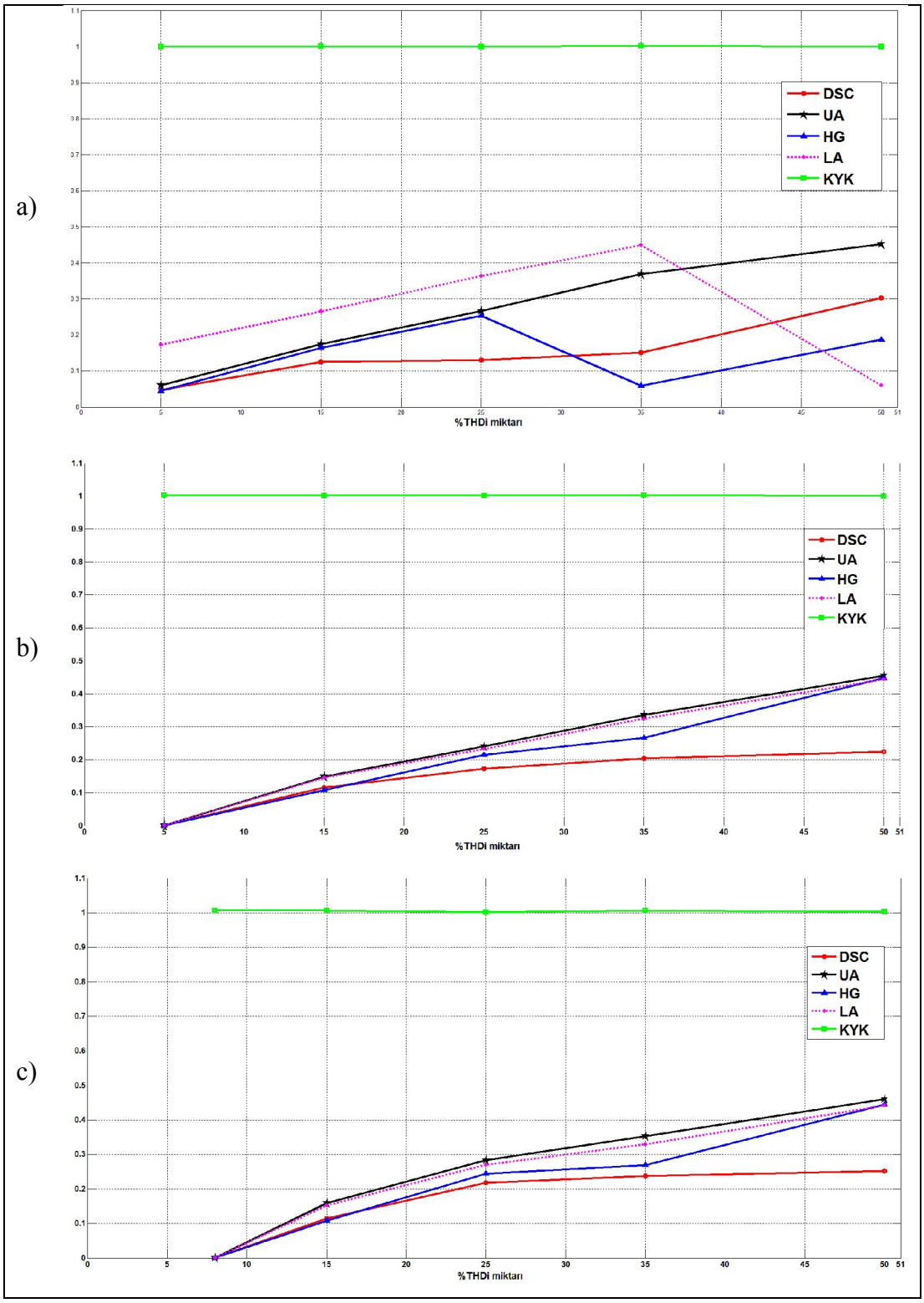
Şekil 3.10: Sinüzoidal kaynak ile beslenen sabit güç çeken yük için indis sonuçları.

Aynı grafikten HG indisinin ise THDi miktarıyla doğrusal olmayan bir değişime sahip olduğu görülmektedir. UA, LA ve D_{sc} indis/metotlarının değerleri ise, THDi miktarındaki artışla doğrusal bir artış trendi göstermektedir. Dolayısı ile sinüzoidal şartlarda harmonik sorumluluğun paylaştırılması amacıyla UA, LA ve D_{sc} indisinin kullanılabileceği sonucuna varılabilmektedir

3.2.2.2. Sinüzoidal Olmayan Gerilim Altında Sabit Güç Çeken Yük Modeli Simülasyon Sonuçları

Harmonik üreten yük, THDv miktarı %2, %5 ve %8 olan 100'er farklı gerilim dalga formu ile beslenmiş olup, elde edilen indis/metodların sayısal sonuçlarının ortalaması alınmıştır. Üç farklı THDv miktarı için ayrı ayrı yapılan ölçümlerde artan THDi oranlarına karşılık indislerin grafikleri Şekil 3.11'de verilmiştir.

Şekil 3.11'deki grafikler incelendiğinde her üç kaynak bozulma durumu için HG ve LA dışındaki indislerin THDi ile doğrusal artış gösterdiği dolayısıyla harmonik sorumluluk paylaştırma için uygun oldukları görülmektedir. Farklı seviyelerde THDv'ler altında, aynı THDi değerine denk gelen UA değerlerine bakıldığında bu indisin kaynak gerilimindeki bozulma miktarından çok az etkilendiği anlaşılmaktadır. Bu durum diğer indisler için geçerli değildir. KYK indisi ise denklem (2.3)'ki formülünden de anlaşılacağı üzere yalnızca harmonik içeren yük tespiti yöntemi olarak kullanılabilecek olup, Şekil 3.11'deki sonuçlardan harmonik sorumluluğun paylaştırılması konusunda yorum yapılamamaktadır.



Şekil 3.11: a) %2 THDv, b) %5 THDv, c) %8 THDv kaynak gerilimleri için KYK, HG, UA, LA, D_{sc} İndisleri.

3.3. Sonuç

Bu bölümde Simulink ortamında tek baralı sistemler için sabit empedans, kompanze edilmiş sabit empedans, harmonik üreten yük ve sabit güç çeken yük modellenerek, literatürde var olan indis/metotların harmonik üreten yük tespit etme performansları incelenmiştir. Ayrıca sabit güç çeken yük modeli ile gerçekleştirilen simülasyonlarla harmonik sorumluluğun paylaştırılması işi için indis/metotlar test edilmiştir.

Yapılan simülasyon sonuçlarından KYK dışındaki metot/indislerin harmonik üreten yüklerin tespitinde doğru sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır.

Harmonik sorumluluğun paylaştırılması bakımından ise; KYK, LA ve HG indislerinin kullanımının uygun olmadığı görülmüştür. Harmonik sorumluluk payalşatıma işi için D_{sc} ve UA metot/indislerinin kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

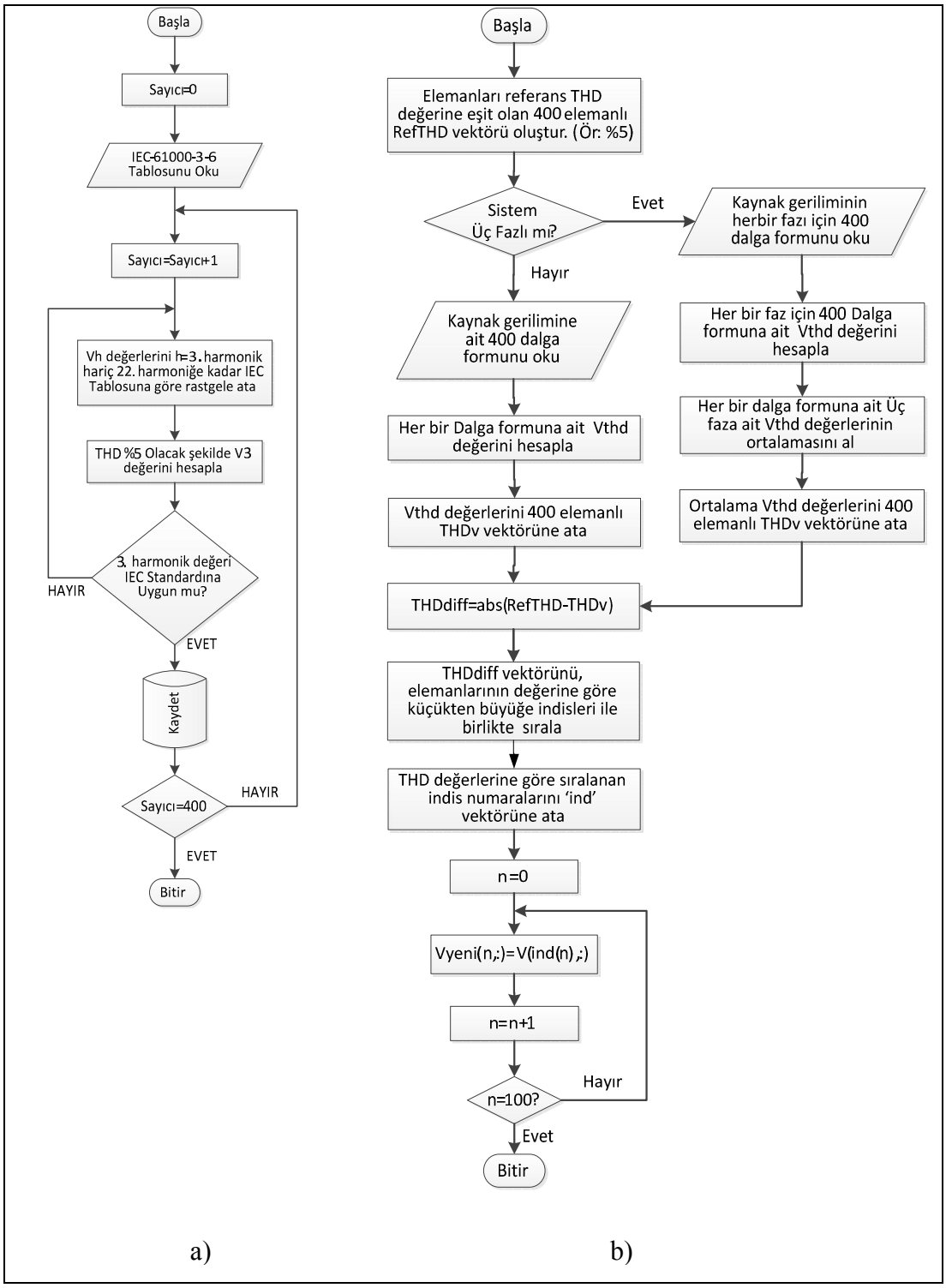
4. KURULAN TEST SİSTEMİNDE YAPILAN ANALİZLER

Tezin bu bölümünde KYK, UA, LA, HG ve D_{sc} metodunun doğrulukları; iki farklı küçük test sisteminde, çok sayıda bozulmuş gerilim altında çeşitli yük tipleri için elde edilen ölçümlere göre analiz edilmiştir. Analiz sonuçları verilmeden önce analizlerde dikkate alınan doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan (nonlineer) yük tipleri ve kurulan küçük test sistemleri sırasıyla tanıtılacaktır.

İlk test sisteminde yükler doğrudan programlanabilir güç kaynağı (PGK) ile beslenmiştir. Böylece kaynak geriliminin çeşitli harmonik bozulma seviyelerinde (THDV) ve harmonik bileşen kombinasyonlarında yükler beslenmiş ve metotlar/indislerin yaptıkları hatalar istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

İkinci test sistemi gerçek bir dağıtım sistemini simüle etmek; böylece yükler arası etkileşimin ve hat parametrelerinin, metotların doğruluğuna etkisini incelemek amacıyla kurulmuştur. Testler sırasında bu sistemde yer alan kaynak barası PGK ile beslenmiş olup kalan iki baraya test yükleri çeşitli kombinasyonlarla yerleştirilmiştir. Bu test siteminde harmonikli akımlar sebebiyle oluşan gerilim düşümleri ilgili baranın gerilimlerini daha fazla fakat yük ile uyumlu bir biçimde bozmuştur.

PGK istenilen dalga şeklini sentezleyerek yüke uygulayabilecek yetenekte olmasına rağmen sentezlenen dalga şekli bazen makine limitleri dışına çıkabilmektedir. Bu sebeple anlamlı bir istatiksel analiz yapabilmek için çok fazla sayıda (400) dalga formu PGK vasıtasıyla sentezlenmiş ve sentezlenen dalga şekillerinden limitler içinde kalan yüz tanesi ile işlem yapılmıştır. Cihazın farklı dalga formları sentezlemesi için kulanılan rasgele harmonik içeriği üreten bir kod IEC 61000-3-6 standardına göre geliştirilmiş ve bu koda ait akış diyagramı Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1: Rasgele gerilim dalga formu üreten koda ait akış diyagramı. a) İstenilen THD değerinde 400 dalga formu oluşturmak için kullanılan kod akışı b) İstenilen THD değerine en yakın 100 gerilim dalga formunu seçmek için kullanılan kod akışı.

4.1. Yük Tipleri

Bu kısımda, küçük test sisteminde kullanılan 6 farklı yük tipi tanıtılacaktır. Bu yükler sırasıyla;

- Sabit Empedans (RL),
- Kompanze Edilmiş Sabit Empedans (RLC),
- Kompakt Floresan Lamba (CFL),
- Monitör (M),
- Alternatif Akım Kıyıcı Devresi ile Beslenen Rezistans (KR),
- Sabit Güç Çeken Yük (AC\AC dönüştürücü ile beslenen Rezistans)'dır.

Yukarıda verilen her bir yük grubunun saf sinüs altında çektikleri akımın THDI değerleri Tablo 4.1 verilmiştir.

Aşağıda küçük test sisteminde yer alan her bir yük tipi sırasıyla tanıtılmıştır. Yükler tanıtılırken, her bir yük tipine ait prensip şeması ve fotoğraf, yükün sinuzoidal gerilim altında çektiği akım dalga formu ve harmonik bileşenleri verilmiştir. Sinüzoidal gerilim altında çekilen akım karakteristiği yüklerin lineer karakterli olup olmadığını göstermektedir.

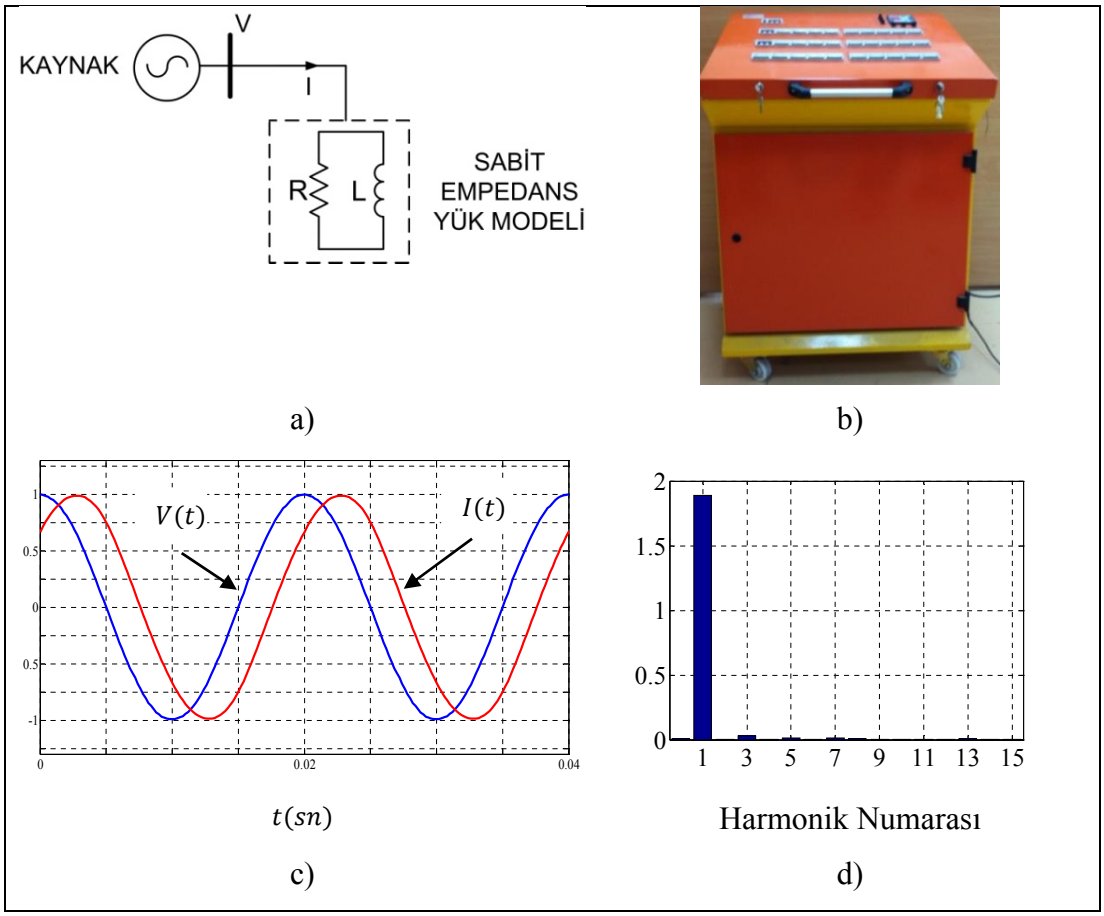
Tablo 4.1: Yüklerin saf sinüs altındaki THDI değerleri.

Yük adı	THDI
RL Yükü	% 1.62
Kompanze edilmiş RL yükü	% 2.19
Sabit güç çeken yük (AC\DC-DC\AC dönüştürücü ile beslenen R yükü)	% 11.52
A.A. kıyıcı devresi ile beslenen R yükü (Tetikleme açısı 90°)	% 40.81
Kompakt floresan lamba yükü	% 99.80
Monitör yükü	%151.51

4.1.1. Sabit Empedans (RL) YükTipi

Bu yük modeli günlük hayatta sıklıkla karşılaştığımız aktif ve indüktif yükleri esas alan yük modelidir. Yapılan ölçümlerde Sabit Empedans Yük olarak Hilkar marka Yük Seti kullanılmıştır. Bu yük seti firma tarafından 10 adet 1 kW, 10 adet 1 KVAr İndüktif ve 10 adet 1 KVAr Kapasitif 3 Fazlı kademeli yük sağlayabilir özellikte pazara sunulmaktadır. Yük setinde gerekli değişiklikler yapılarak, birbirinden bağımsız kontrol edilebilen iki yük grubu elde edilmiştir. Her bir bağımsız yük grubu ölçümler sırasında kullanıcıya 5adet 1 kW, 5 adet 1 KVAr İndüktif ve 5 adet 1 KVAr Kapasitif 3 Fazlı kademeli yük sağlayabilmektedir.

Bu yükün tek faz eşdeğer devresi, yüke ait bir fotoğraf, yükün sinüzoidal gerilim altında çektiği akım dalga şekli ve harmonik bileşenleri Şekil 4.2'de verilmiştir.

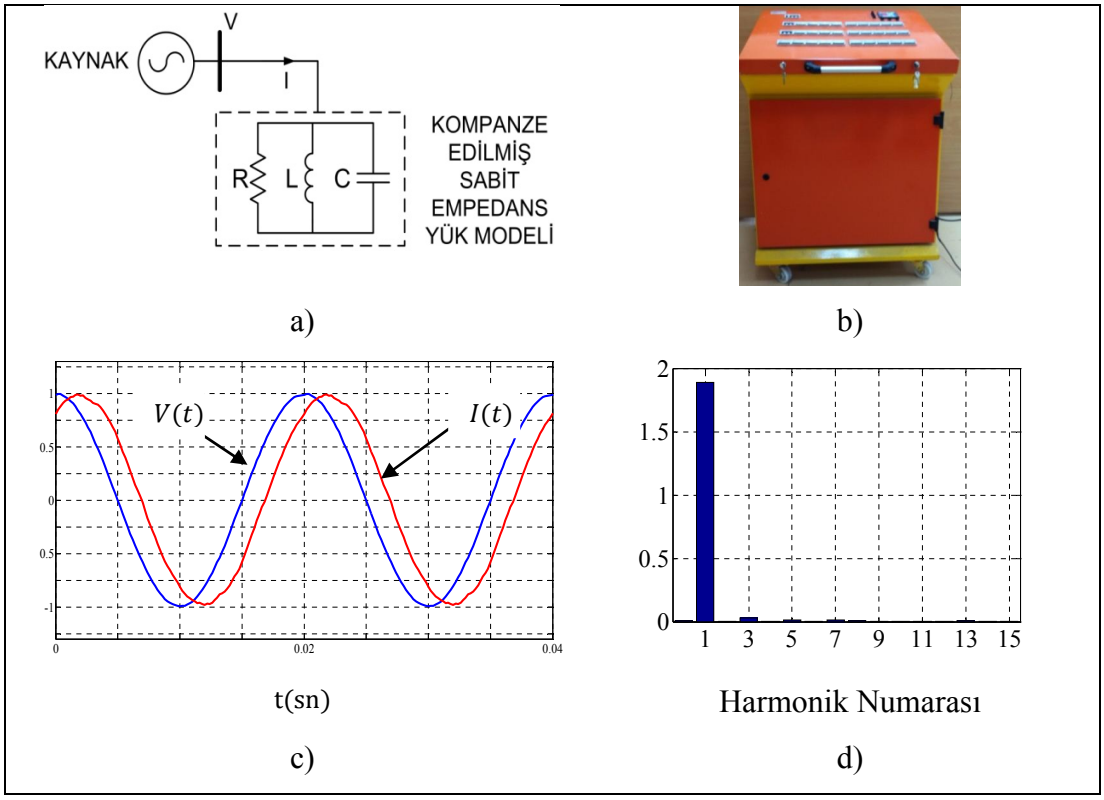


Şekil 4.2: Sabit empedans yük modeli. a) Tek faz eşdeğer devresi, b) Yük setine ait bir fotoğraf, c) Sinüzoidal gerilim altında akım dalga şekli, d) Sinüzoidal gerilim altında akım harmonik içeriği.

Şekil 4.2 c ve d'den bu yük tipinin sinüzoidal gerilim altında ihmal edilebilecek harmonik bileşenler çektiği görülmektedir. Bu harmonik bileşenler ölçüm sistemindeki gürültüden kaynaklanmaktadır.

4.1.2. Kompanze Edilmiş Sabit Empedans (RLC) Yük Tipi

Kompanze Edilmiş Sabit Empedans Yük, Sabit Empedans Yükü başlığı altında verilen yük seti kullanılarak elde edilmiştir. Bu yükün tek faz eşdeğer devresi, yüke ait bir fotoğraf, yükün sinüzoidal gerilim altında çektiği akım dalga şekli ve harmonik bileşenleri Şekil 4.3'te verilmiştir.



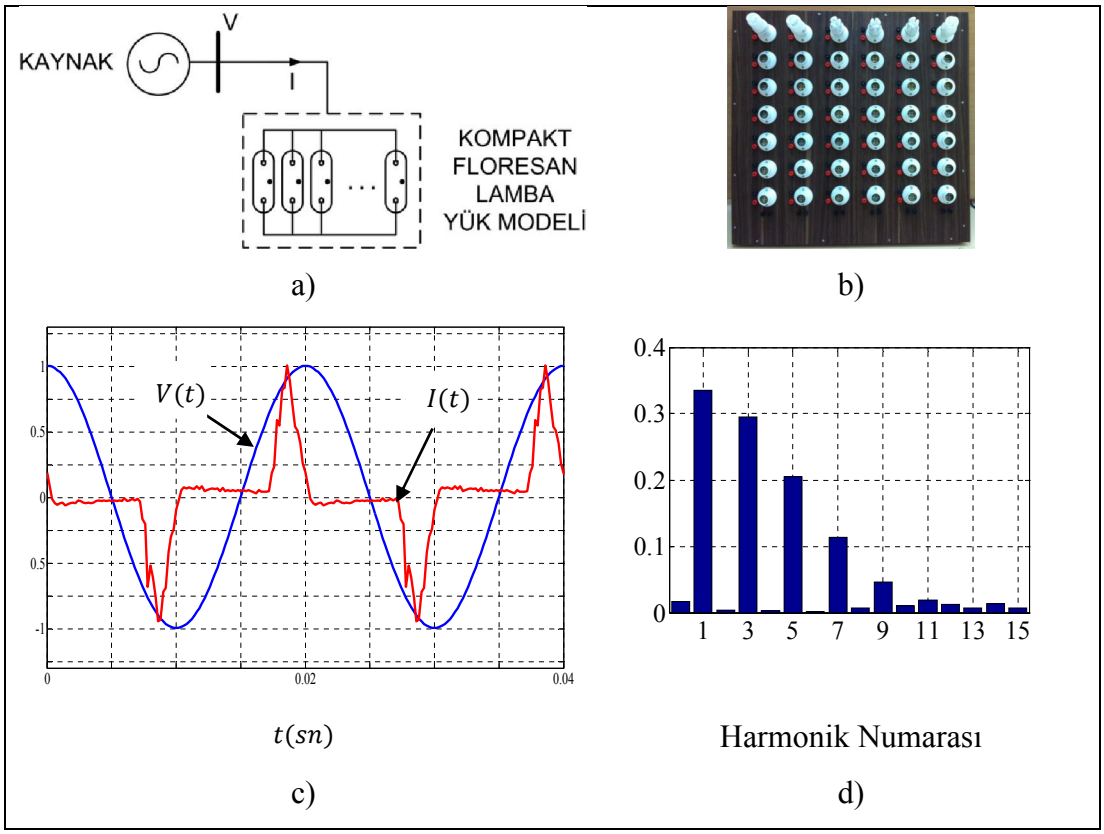
Şekil 4.3: Kompanze edilmiş sabit empedans yük modeli. a) Tek faz eşdeğer devresi, b)Yük setine ait bir fotoğraf, c) Sinüzoidal gerilim altında akım dalga şekli, d) Sinüzoidal gerilim altında akım harmonik içeriği.

Bölüm 2'de verilen literatür taraması ve simülasyon temelli analiz göstermektedir ki, bu tip yükler bozulmuş gerilim durumlarında hatalı biçimde harmonik kaynağı olarak tespit edilebilen lineer yüklerdir. Bu durumun temel sebebi paralel bağlı kompanzasyon kapasitesinin yüksek frekanslı gerilim harmoniklerinin bulunduğu sistemlerde yüksek harmonik akımları çekmesidir.

Şekil 4.3 c ve d'den bu yük tipinin sinüzoidal gerilim altında ihmal edilebilecek harmonik bileşenler çektiği görülmektedir. Bu harmonik bileşenler ölçüm sistemindeki gürültüden kaynaklanmaktadır.

4.1.3. Kompakt Floresan Lamba (CFL) YükTipi

Kompakt Floresan Lamba Yük Modeli olarak çeşitli markalara ait, 15 W gücünde enerji tasarruflu ampuller kullanılmıştır. Akım ölçümlerinde kullanılan akım klamplerinin alt akım ölçüm sınırı 100mV/1A olması sebebiyle, birden fazla enerji tasarruflu lambanın paralel bağlanabilmesine olanak sağlayan bir düzenek oluşturulmuş ve test sistemine dâhil edilmiştir. Böylece yük tarafından çekilen akım, akım klamplerince ölçülebilecek seviyeye çıkarılmıştır. Bu yükün bağlantı şeması, yüke ait bir fotoğraf, yükün sinüzoidal gerilim altında çektiği akım dalga şekli ve harmonik bileşenleri Şekil 4.4'te verilmiştir.

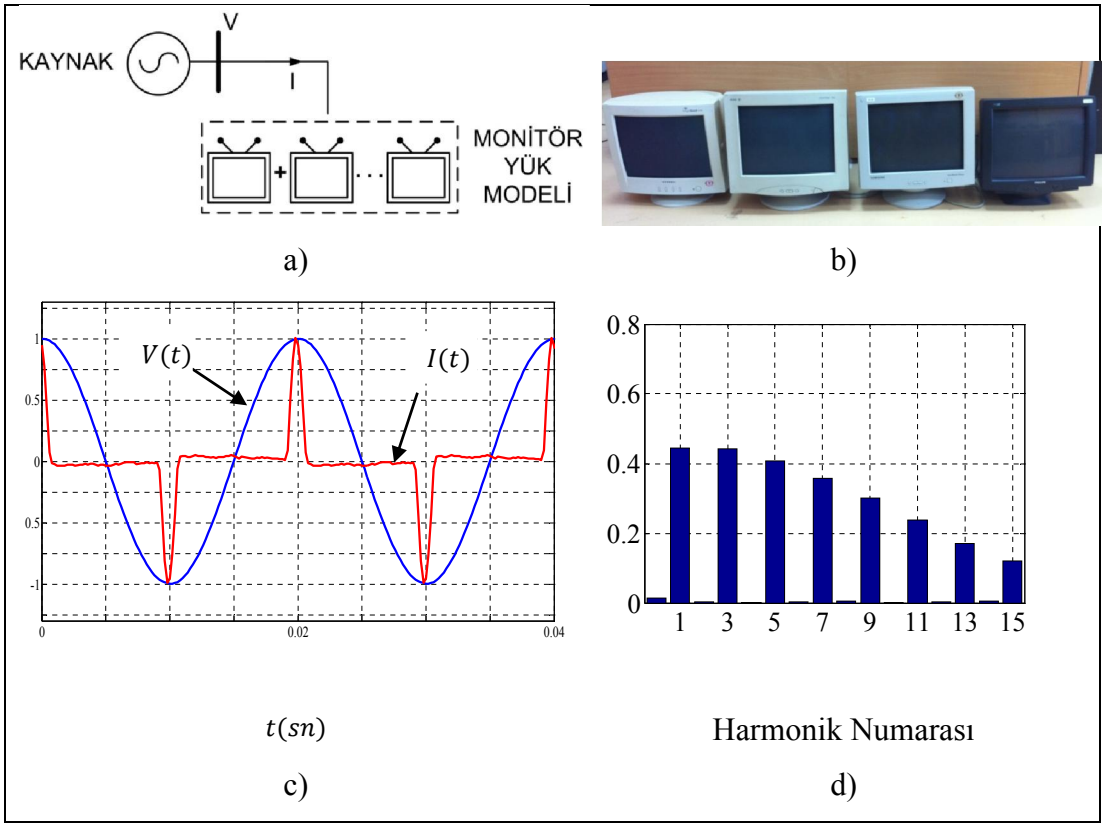


Şekil 4.4: Kompakt floresan lamba yük grubu .a)Yükün paralel bağlantı şeması, b)Yüke ait bir fotoğraf, c) Sinüzoidal gerilim altında akım dalga şekli, d) Sinüzoidal gerilim altında akım harmonik içeriği.

Şekil 4.4 c ve d'den kompakt floresan lambaların sinüzoidal gerilim altında sinüzoidal olmayan veya harmonik bozulma içeren akım çektiği görülmektedir. Dolayısıyla bu yük tipi nonlineer veya harmonik üreten yük olarak testlerde dikkate alınmıştır.

4.1.4. Monitör (M) Yük Tipi

Monitör Yük olarak çeşitli markalarda CRT Monitörler kullanılmıştır. Kompakt floresan lambada olduğu akım klampinin ölçüm sınırlarına ulaşabilmek için çok sayıda monitör testler sırasında paralel bağlanmıştır. Bu yükün tek faz eşdeğer devresi, yüke ait bir fotoğraf, yükün sinüzoidal gerilim altında çektiği akım dalga şekli ve harmonik bileşenleri Şekil 4.5'te verilmiştir.

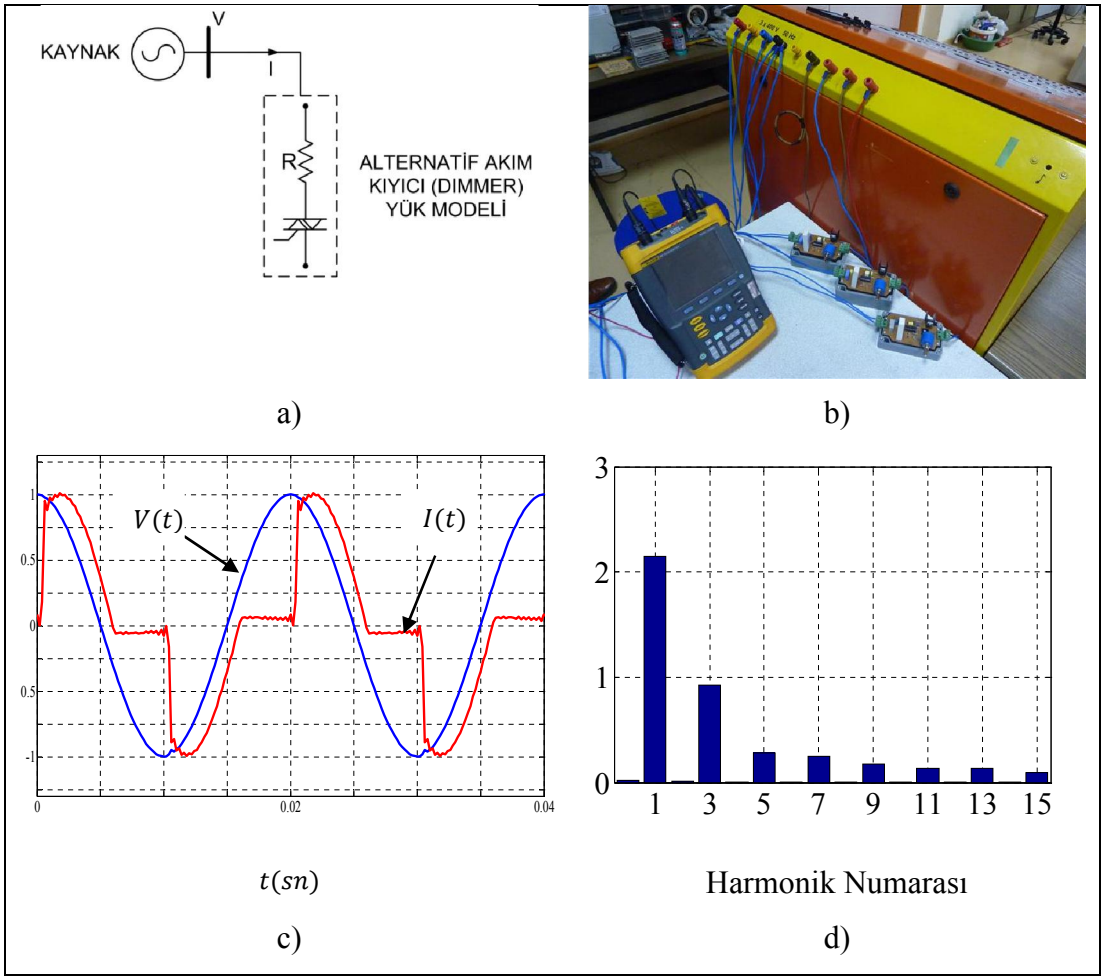


Şekil 4.5: Monitör yük grubu.a) Yükün bağlantı şeması, b)Yüke ait bir fotoğraf, c) Sinüzoidal gerilim altında akım dalga şekli, d) Sinüzoidal gerilim altında akım harmonik içeriği.

Şekil 4.5 c ve d'den monitörlerin sinüzoidal gerilim altında harmonik bozulma içeren akım çektiği ve bu yük tipinin harmonik üreten yük olarak testlerde dikkate alınması gerektiği görülmüştür

4.1.5. Alternatif Akım Kıyıcı Devresi ile Beslenen Rezistans (KR) Yük Tipi

Alternatif Akım Kıyıcı (Dimmer) ile beslenen rezistif yük grubu devresi ve ölçüm anında alınan fotoğraf, bu devrenin sinüzoidal gerilim altında çektiği akım dalga şekli ve akım harmonikleri Şekil 4.6'da sunulmuştur.

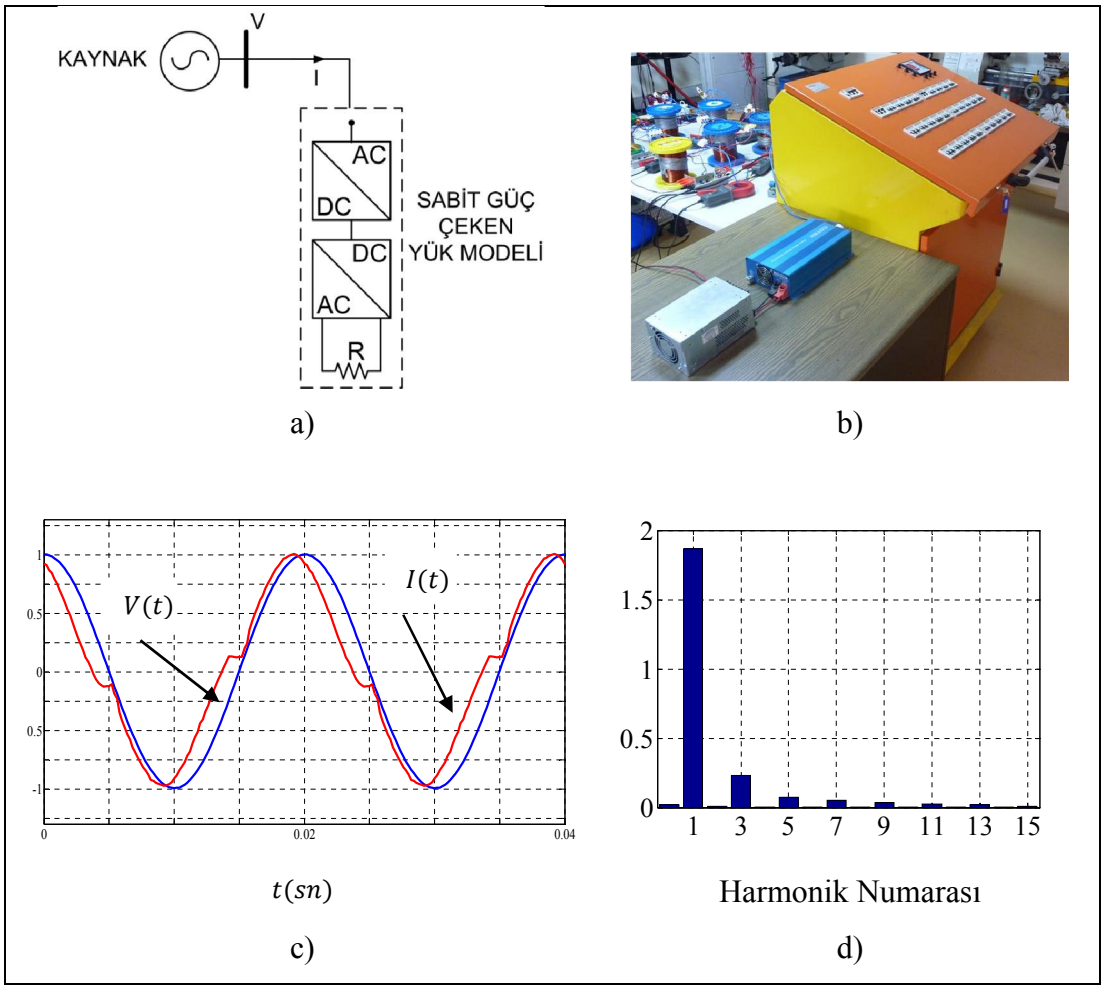


Şekil 4.6: Alternatif akım kıyıcı (dimmer).a) Tek faz dimmer devresi, b)Yük setine ait bir fotoğraf, c) Sinüzoidal gerilim altında akım dalga şekli, d) Sinüzoidal gerilim altında akım harmonik içeriği.

Şekil 4.6 c ve d'den dimmer devresiyle beslenen rezistans yükünün sinüzoidal gerilim altında harmonik bozulma içeren akım çektiği dolayısıyla bu yük tipinin harmonik üreten yük olarak testlerde dikkate alınması gerektiği görülmüştür.

4.1.6. Sabit Güç Çeken Yük Tipi (Rezistans Besleyen AC/AC Dönüştürücü

Bu yük AC-AC dönüştürücüden beslenen rezistanstandır. Özellikle son yıllarda güç elektroniği uygulamalarının artmasına paralel olarak bu tip yükler sistem içinde ağırlık kazanmaktadır. Bu yükün eşdeğer devre yapısı ve fotoğrafı, sinüzoidal gerilim altında çektiği akım dalga şekli ve akım harmonikleri Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7: Sabit güç çeken yük modeli .a) Tek faz eşdeğer devresi, b)Yük setine ait bir fotoğraf, c) Sinüzoidal gerilim altında akım dalga şekli, d) Sinüzoidal gerilim altında akım harmonik içeriği.

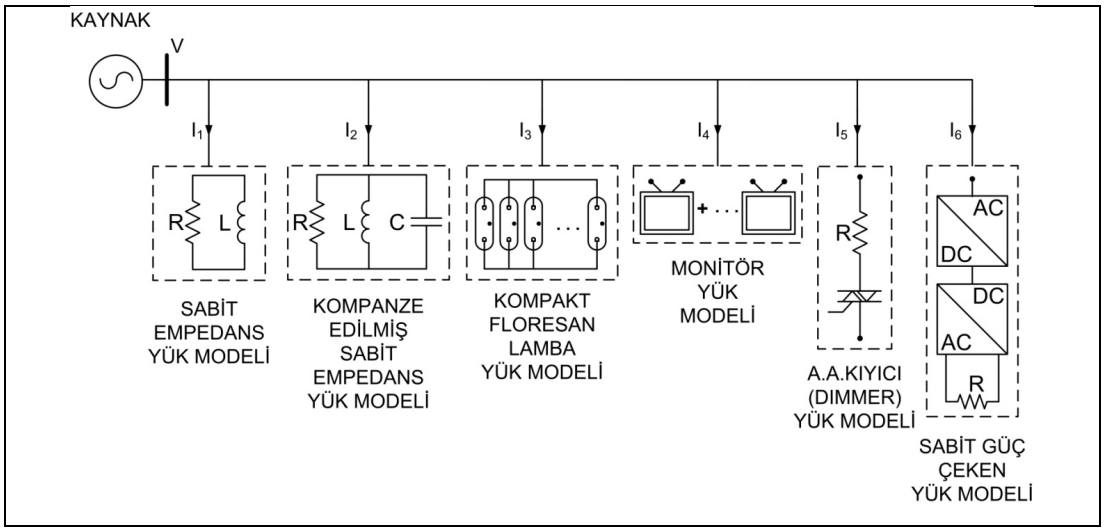
Bu yük tipi yaygın olarak kullanılan bir güç faktörü düzeltme ve filitrasyon topolojisine sahiptir. Böylece Şekil 4.7'den görüldüğü üzere yükün çektiği harmonik akımları çok küçük değerlerde kalmaktadır. Neticede bu yükün lineer olmama karakteristiğinin önemli derecede olmadığı görülmektedir.

4.2. Kurulan Test Sistemlerinin Yapısı

Ölçüm temelli analizlerin gerçekleştirilmesi amacıyla yukarıda tanıtılan yükleri içeren iki farklı küçük test sistemi kurulmuştur. Bu iki sistemden biri tek baralı diğeri ise üç baralıdır. Tek baralı sistem ile her bir yükün şebekeden kaynaklanan harmoniklere karşı tepkisi ve indislerin bunları ölçme derecesi belirlenecektir. Üç baralı sistem ile hem dengesizlik durumları hemde ortak bağlantı noktasında bulunan harmonikler ile yük akım harmoniklerinin benzer olduğu gerçekçi senaryolar incelenebilecektir.

4.2.1. Tek Baralı Küçük Test Sistemi

Tek baralı ve tek fazlı küçük test sisteminde yükler doğrudan programlanabilir güç kaynağına (California Instruments 9003 ix programlanabilir güç kaynağı) bağlanmıştır. Programlanabilir güç kaynağına üreteceği bozulmuş gerilimlere ait harmonik bileşenler girilmiştir.



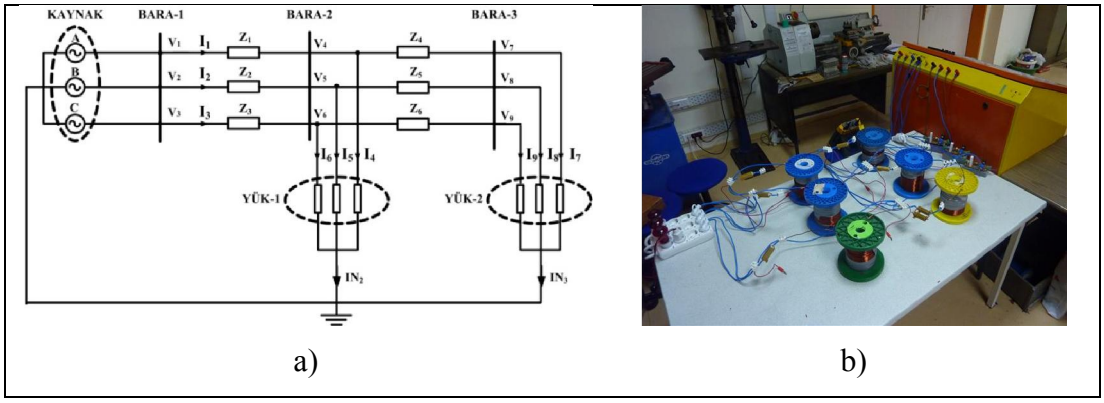
Şekil 4.8: Tek baralı küçük test sistemine ait şematik.

Böylece her bir yük programlanabilir güç kaynağının ürettiği çeşitli harmonik bileşenlere sahip çok sayıda gerilim dalga şekli altında beslenmiş ve bu durumlar için akım-gerilim ölçümleri alınmıştır. Bu sistemin şeması Şekil 4.8'de verilmiştir.

Test sistemden gerilim ve akım verisi yüksek örnekleme çözünürlüğüne sahip IOtech Wavebook 512 veri toplama kartıyla alınmıştır. Veri toplama kartına bilgilerin aktarılması için kullanılacak gerilim ve akım şartlandırıcılar tez kapsamında tasarlanmış ve kullanılmıştır. Kartı kullanmak için Labview yazılımı kullanılmış ve bu yazılım içinde geliştirilen modüller ilgili bölümde detaylı bir şekilde anlatılmıştır

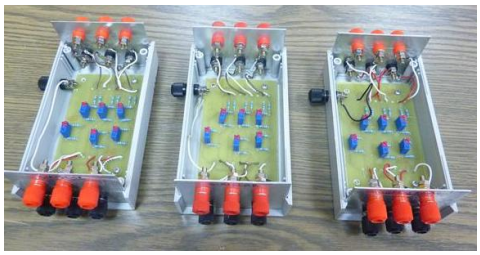
4.2.2. Üç Baralı Küçük Test Sistemi

Analizlerde kullanılmak üzere kurulan üç baralı ve üç fazlı küçük test sistemine ait şematik ve fotoğraf Şekil 4.9'dan görülmektedir.



Şekil 4.9: Üç baralı küçük test sistemi. a)Şematik, b) Fotoğraf

Üç baralı küçük test sisteminde toplam 9 noktadan gerilim ölçümü yapılmıştır. Gerilim verileri National Instruments firmasına ait ±10V giriş gerilimi sınırı olan NI DAQ 9205 model veri toplama kartı üzerinden alınmıştır. Gerilim bilgisinin veri toplama kartının girişlerine uygun hale getirilmesi amacıyla, ihtiyaç duyulan gerilim şartlandırıcılar tasarlanmıştır. Gerçekleştirilen gerilim şartlandırıcılarına ait fotoğraf Şekil 4.10'da sunulmuştur.



Şekil 4.10: Gerçekleştirilen gerilim şartlandırıcılar.

Aynı sistemde 11 noktadan akım ölçümü yapılmıştır. Akım verisi Fluke firmasına ait muhtelif modellerdeki akım klempleri ile veri toplama kartına aktarılmıştır. Akım ölçümlerinde kullanılan akım klempleri Şekil 4.11'den görülmektedir. Akım klemplerinin çıkışı herhangi bir ek devreye ihtiyaç duyulmadan veri toplama kartına bağlanabilmektedir.

Şekil 4.11: Kullanılan akım klempleri.

Baralar arası hatlar boş makaralara 2,5 mm^2 çapında galvanizli bakır tel sarılarak gerçeklenmiştir. Bu makaralara seri dirençler eklenerek hatların X/R oranının 1'den büyük ve 1'den küçük olduğu iki durum sağlanmıştır. Bu durumlar tipik dağıtım (X/R<1) ve tipik iletim sistemlerini (X/R>1) temsil edecek şekilde seçilmiştir.

Baralar arası hatlar (Hat1 ve Hat2) için faz başına R ve X değerleri Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'de verilmiştir

Tablo 4.2: Hat 1 empedanları ve X/R oranları.

X/R Durumu	Hat 1 Faz A			Hat 1 Faz B			Hat 1 Faz C		
	R (Ω)	L (mH)	X/R	R (Ω)	L(mH)	X/R	R (Ω)	L (mH)	X/R
X/R >1	0.247	1.643	2.089	0.252	1.648	2.054	0.244	1.644	2.116
X/R <1	0.717	1.643	0.719	0.722	1.648	0.717	0.714	1.644	0.723

Tablo 4.3: Hat 2 empedanları ve X/R oranları.

X/R Durumu	Hat 2 Faz A			Hat 2 Faz B			Hat 2 Faz C		
	R (Ω)	L (mH)	X/R	R (Ω)	L (mH)	X/R	R (Ω)	L (mH)	X/R
X/R >1	0.246	1.642	2.096	0.244	1.649	2.123	0.244	1.649	2.123
X/R <1	0.716	1.642	0.720	0.714	1.649	0.725	0.714	1.649	0.725

4.3. Analiz Sonuçları

Bu kısımda tek baralı ve üç baralı küçük test sistemlerinde çok sayıda ölçümler neticesinde elde edilen istatistiksel analiz sonuçları sırasıyla sunulacaktır

4.3.1. Tek Baralı Küçük Test Sisteminde Elde Edilen I. Grup Analiz Sonuçları

Tek baralı küçük test sisteminde yukarıda tanıtılan her bir yük grubuna, hazırlanan test düzeneği vasıtasıyla, Gerilim Toplam Harmonik Bozulma (TDHV) miktarının %2, %5 ve %8 olduğu 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanmıştır. Uygulanan 100 dalga formu sonucunda her bir yükün akım gerilim bilgisi kaydedilmiş ve bu veriler kullanılarak KYK, HG, UA, LA, D_{sc} metotları/ indisleri hesaplanmıştır. Her bir metoda/ indise göre gruplanmış histogramlar toplu olarak Şekil 4.12'de verilmiştir. Bu histogramlarda kırmızı çizgiyle her bir indis/metot için bir eşik değer belirlenmiştir. KYK indisi için bu eşik değerden (KYK=1.00) yüksek değerler

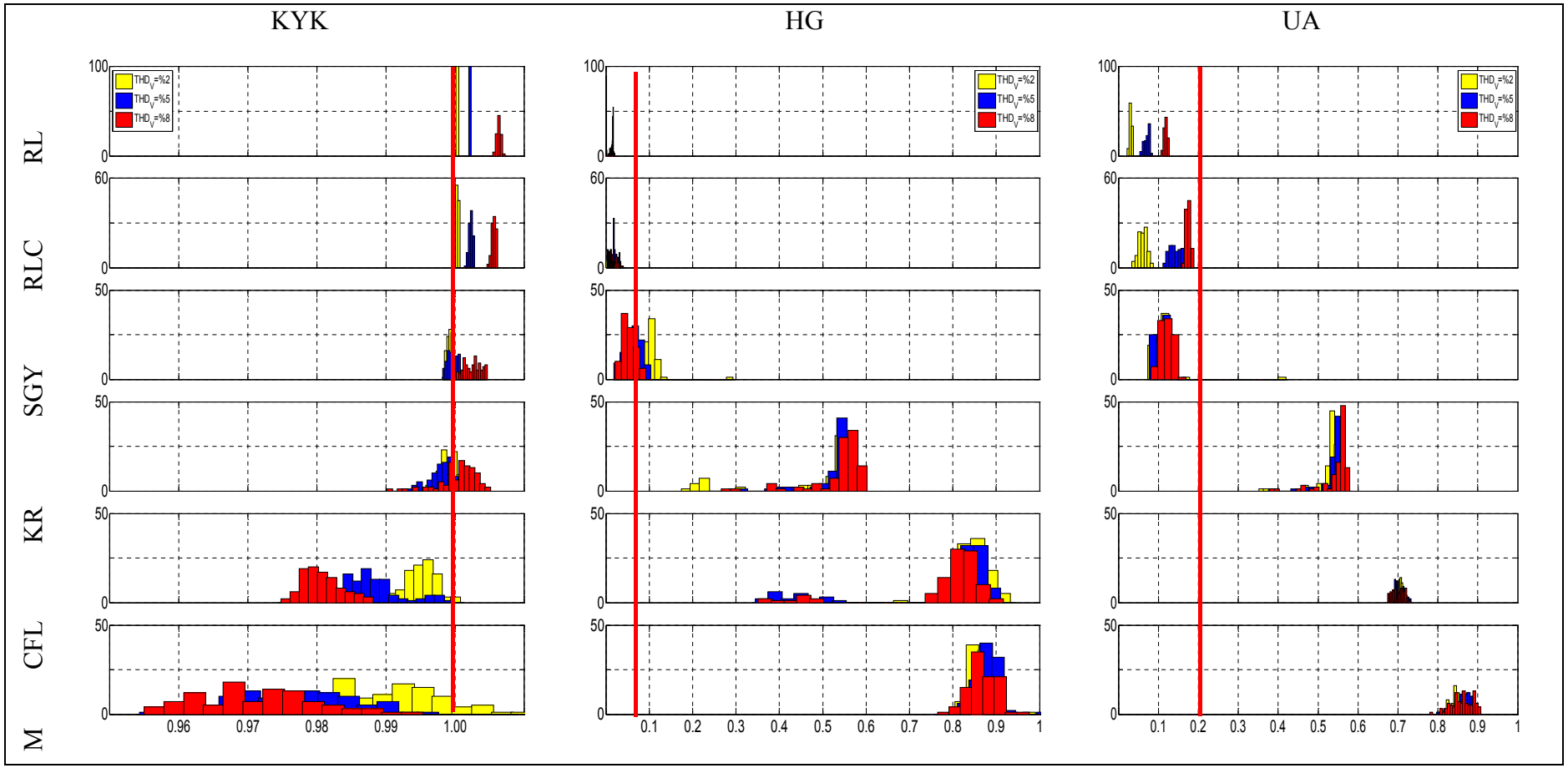
doğrusal yük bölgesi, düşük değerler ise harmonik üreten yük bölgesidir. Diğer indisler/metotlar için eşik değerlerinin üstünde kalan değerler harmonik üreten yük bölgesi, düşük değerler ise doğrusal yük bölgesidir.

KYK indisinin, doğrusal (harmonik üretmeyen yükler) için bütün test gerilimleri altında 1'den büyük değerler aldığı, dolayısıyla bu yüklerin tespitinde doğru çalıştığı Şekil 4.12'den görülmektedir. Bununla birlikte bazı test gerilimleri altında harmonik üreten yükler (SGY, KR, CFL ve M) için de 1'den büyük değerler alarak bu yüklerin tespitinde hatalı sonuçlar verdiği anlaşılmaktadır. Bu durum KYK metodunun kaynak geriliminin THDV değerinden etkilendiğini göstermektedir.

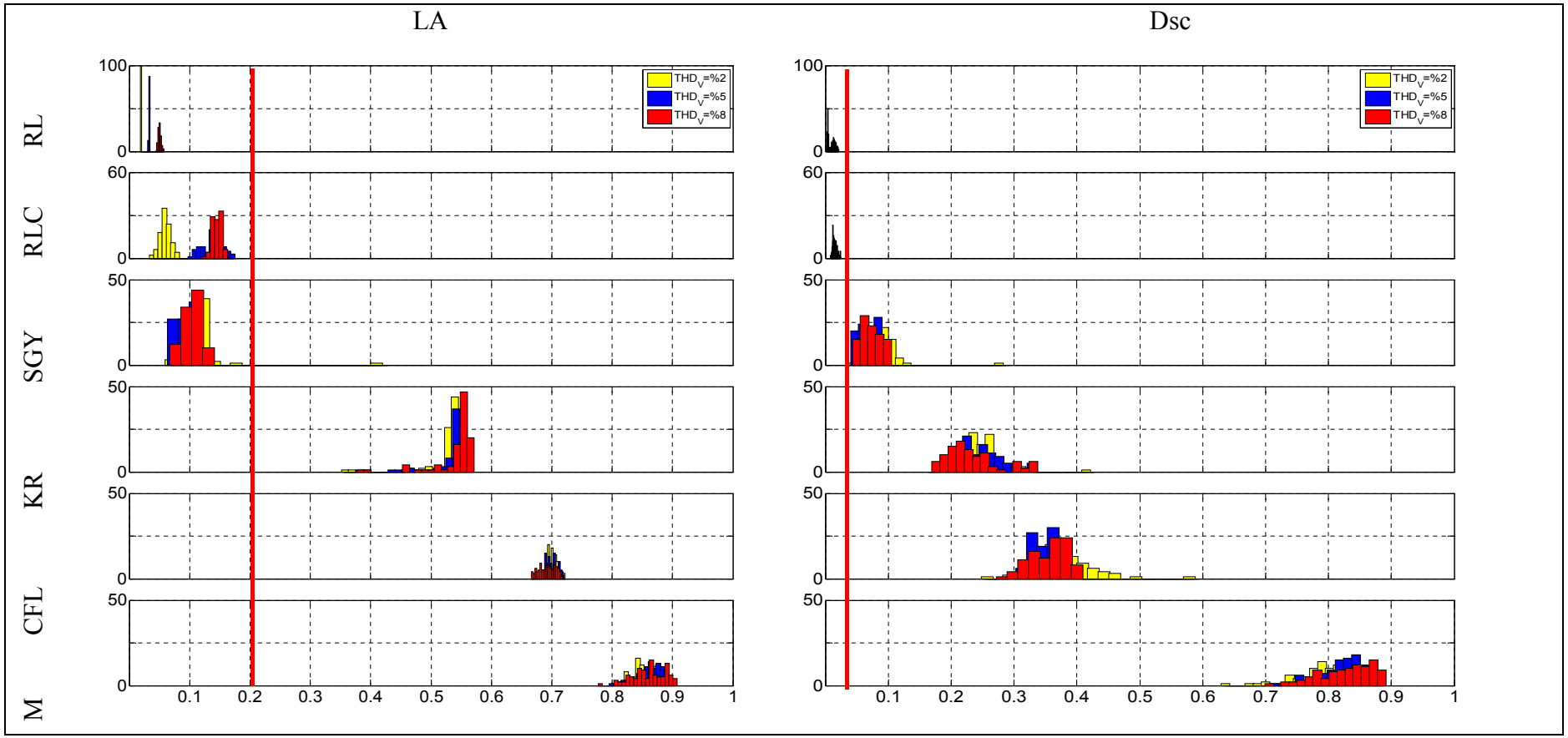
HGI indisinin sabit güç çeken yükü sınıflandırmada sorun yaşadığı Şekil 4.12'den görülebilmektedir. Düşük THDV değerinde bu yükü harmonik üreten yük olarak doğru sınıfladığı, bununla birlikte THDV değerindeki artışa bağlı olarak hata yaptığı anlaşılmaktadır. Sınıflama hatasının, kendisini %10 gibi düşük THDI değerinde gösterdiği, yüksek değerli THDI değerine sahip yüklerde sınıflama hatası yapılmadığı görülmektedir. Sabit güç çeken yükü özel karakterli bir yüktür. Bu yüklerin besleme girişinde aktif güç faktörü düzeltme devresi bulunmaktadır. Bu tip yükler sistem içinde UPS, motor kontrol devreleri, tüketici elektroniği yükleri şeklinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif güç faktörü düzeltme devresine sahip yüklerin enerji sistemi içindeki ağırlığının, bu cihazlarla ilgili standartlarda Elektromanyetik Uyumluluk (EMC) zorunluluklarının artmasına paralel olarak, artması beklenmektedir. Dolayısıyla bu tip yüklerin harmonik karakterinin belirlenmesi özel önem arz etmektedir.

UA ve LA metotlarının tüm yük grupları için benzer davranış sergilediği görülmektedir. Her iki metotta, HG indisi gibi, yüksek THDI değerine sahip yükleri başarılı sınıflandırdığı, bununla birlikte düşük THDI değerine sahip sabit güç çeken yükte sınıflama hatası yaptığı görülmektedir. Harmonik üretmeyen RL ve RLC yükü için histogramlar incelendiğinde özellikle bu yük grupları için metotların THDV değerindeki değişimden çok fazla etkilendikleri anlaşılmaktadır. THDV değerindeki artış sebebiyle kompanze edilmiş RL yük grubunun harmonik üreten yük olarak algılanabileceği görülmektedir.

D_{sc} indisinin yükleri, önceden tanımlı bir eşik değeri ile kıyaslama yaparak, harmonik üreten veya üretmeyen olarak sınıflayabildiği görülmektedir. D_{sc} gücünün, yük tipinden bağımsız olarak, THDV değerindeki değişimden çok az etkilendiği Şekil 4.12'den görülebilmektedir



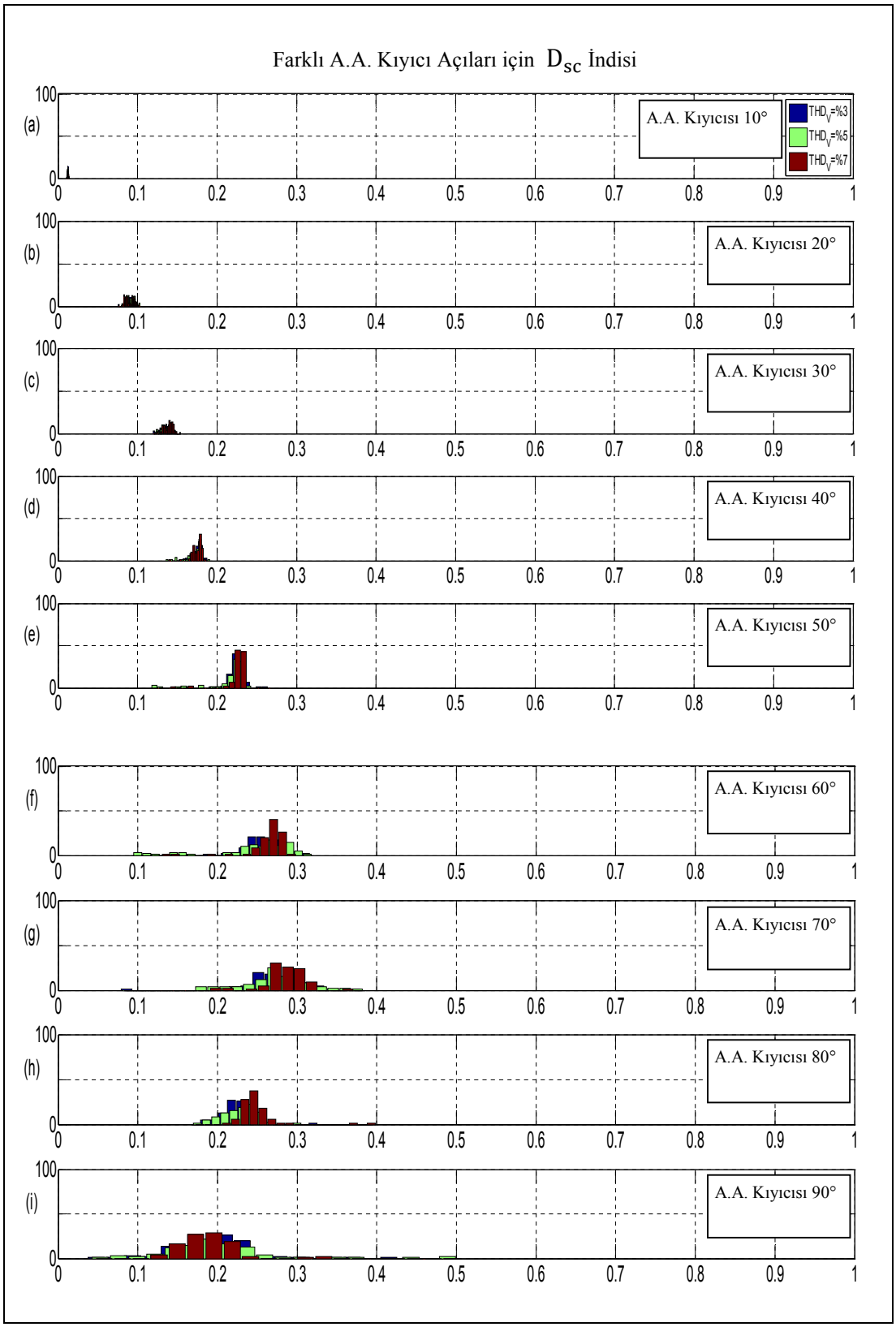
Şekil 4.12: RL, RLC, SGY, KR, CFL ve M yükleri için, THDV %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan KYK, HG, UA metotlarının/indislerinin histogramları



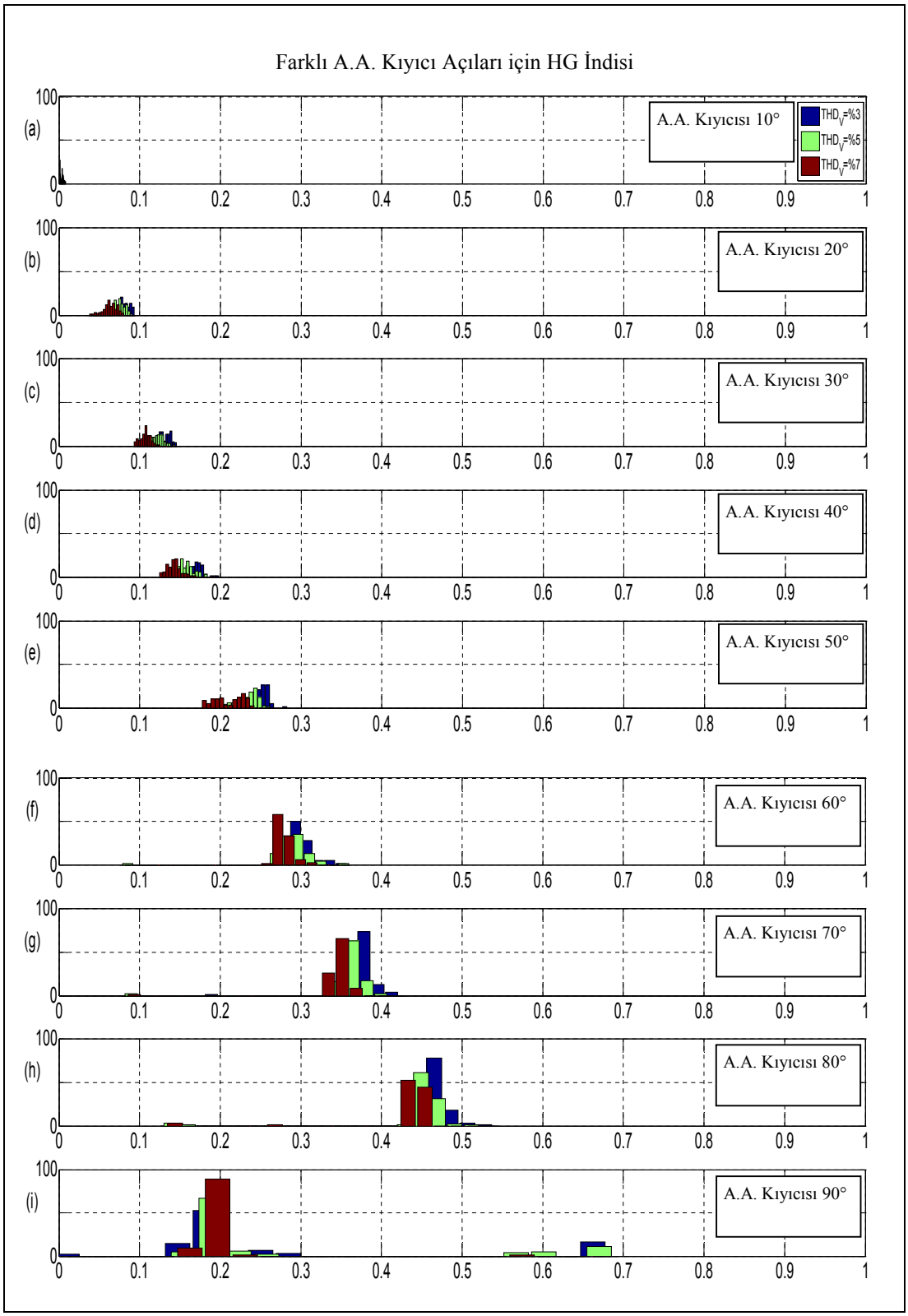
Şekil 4.12 Devam: RL, RLC, SGY, KR, CFL ve M yükleri için, THDV %2-5-8 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formunda hesaplanan LA ve D_{SC} metotlarının/indislerinin histogramları.

4.3.2. Tek Baralı Küçük Test Sisteminde Elde Edilen II. Grup Analiz Sonuçları

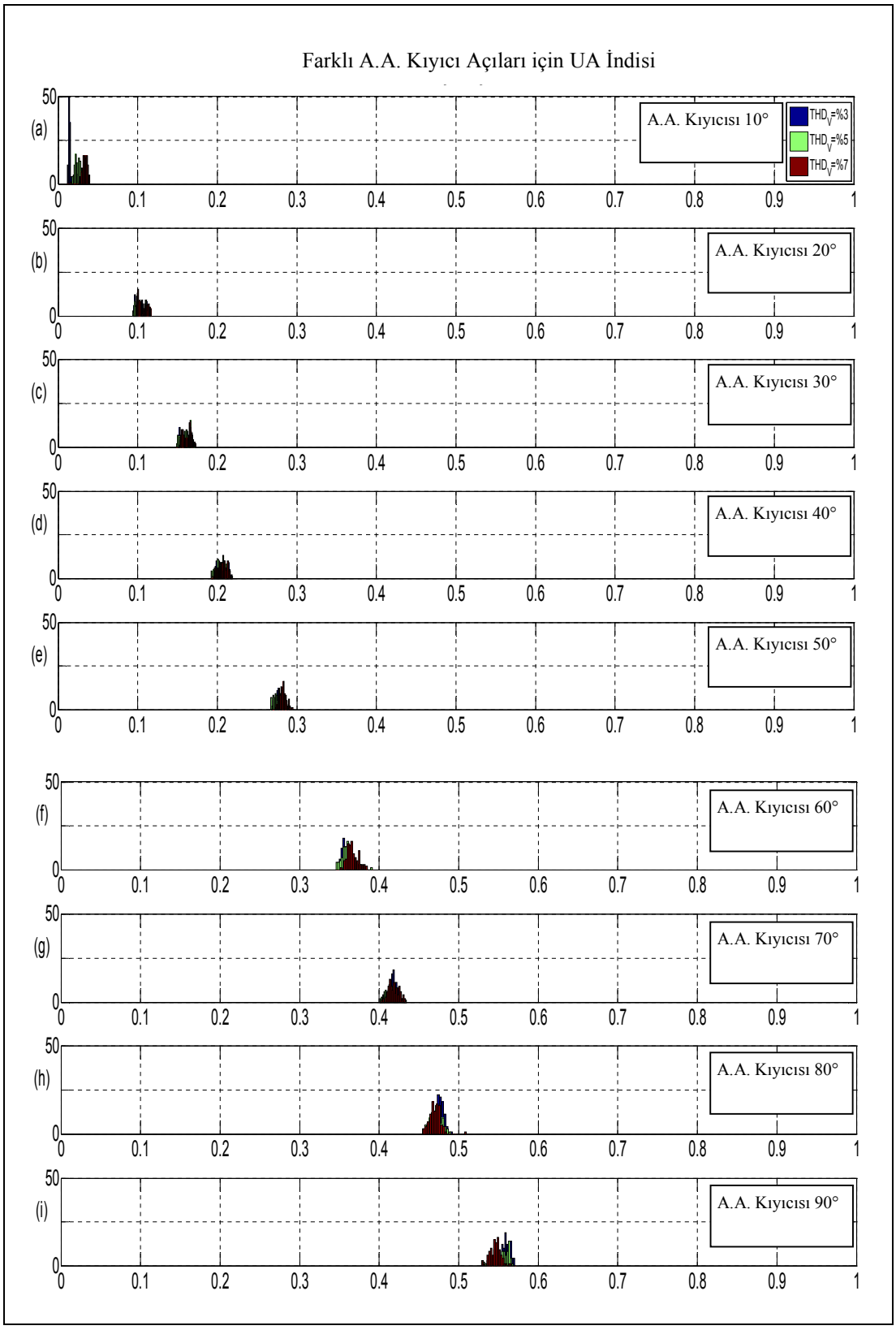
Bir önceki kısımda, "tek baralı küçük test sisteminde I. grup analiz sonuçları" başlığı altında; metotlar/ indislerin harmonik üreten yüklerin tespiti üzerine yeteneği çok sayıda gerilim dalga şekli ve yük tipi için yapılan ölçümlerle istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Bu kısımda ise kurulan küçük test sisteminde, THDV=%3, %5, %7 harmonik bozulma seviyelerinde farklı harmonik içeriklere sahip çok sayıda gerilim altında kırpıcı devresi üzerinden beslenen rezistans yükün triak tetikleme açısı ilk periyot için 10° ile 90° arasında 10'ar derece aralıklarla değiştirilmiştir. Her bir durum için D_{sc} gücü ve diğer metotlar/ indisler ölçülmüş, elde edilen ölçüm sonuçları triakın her bir tetikleme açısı için histogram biçiminde aşağıda sıralanan şekillerde sunulmuştur. Böylece ölçüm sonuçlarının kırpıcı devresinin açı değişimiyle gösterdiği trendin bahsedilen metotlar/ indislerin harmonik sorumluluk paylaştırmada yeteneğini göstereceği düşünülmüştür.



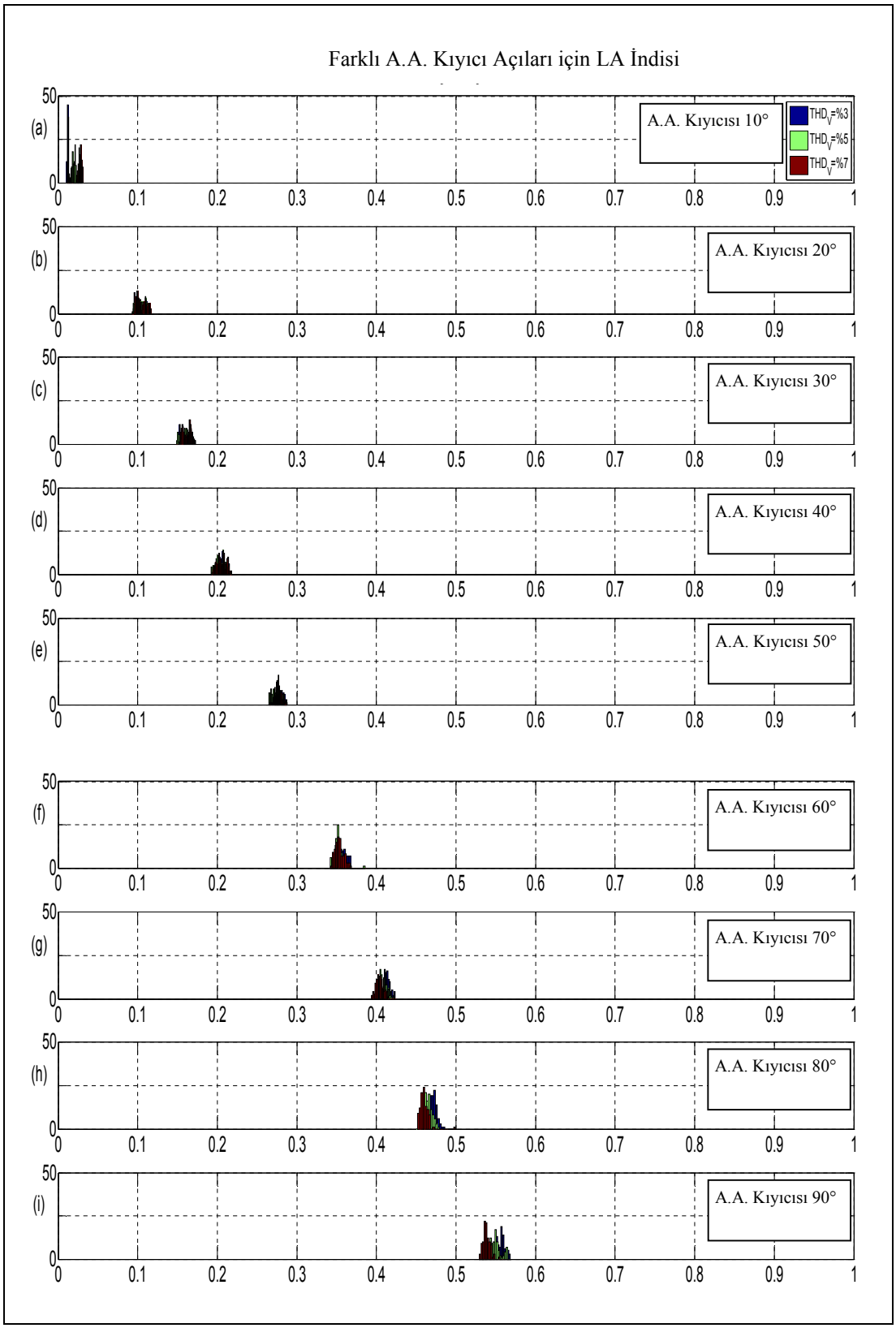
Şekil 4.13: THDV %3-5-7 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanan A.A. Kıyıcılı R Yükü için, tetikleme açısı değişimine bağlı olarak hesaplanan D_{sc} indisi histogramları.



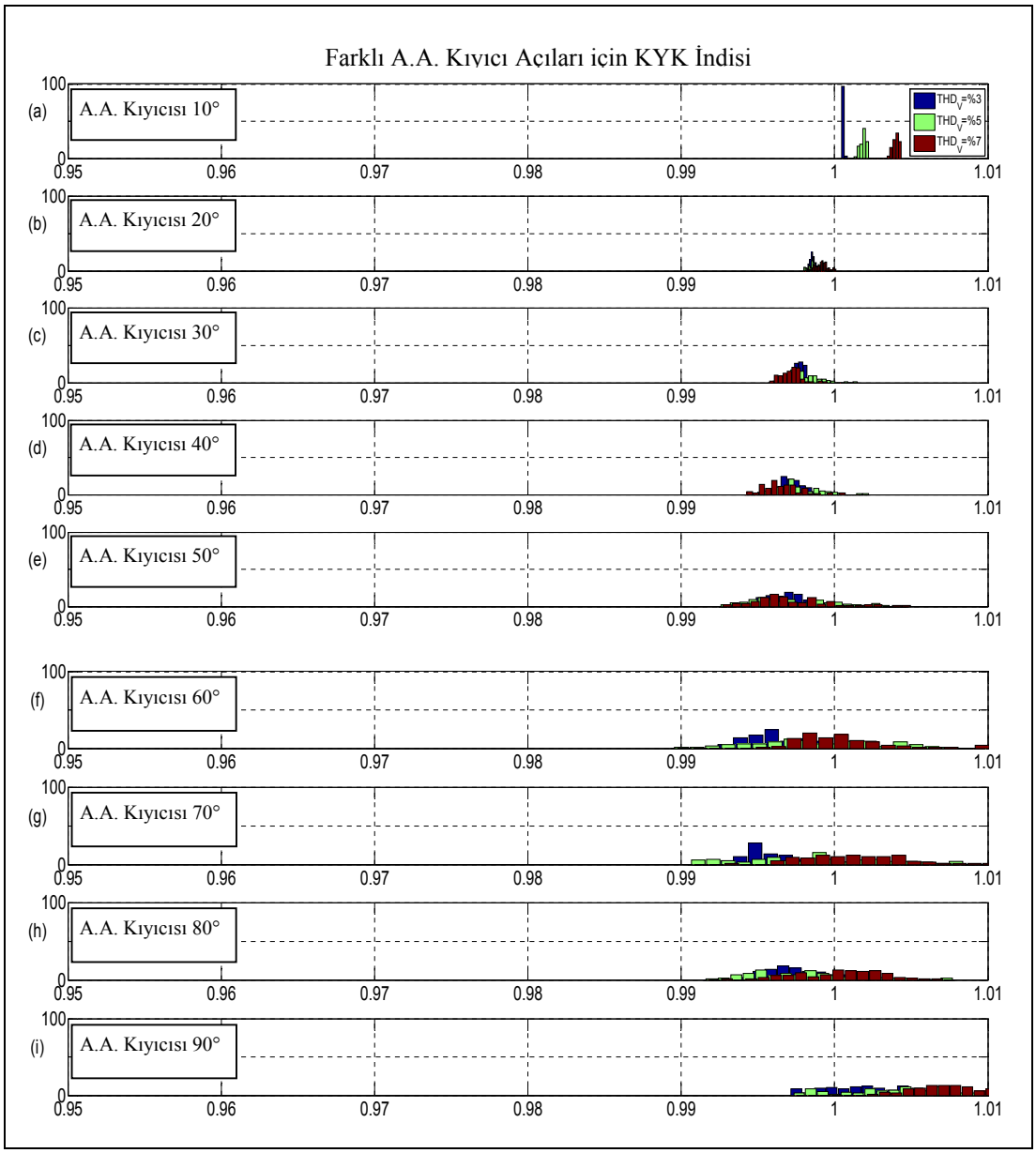
Şekil 4.14: THDV %3-5-7 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanan A.A. Kıyıcılı R Yükü için, tetikleme açısı değişimine bağlı olarak hesaplanan HG indisi histogramları.



Şekil 4.15: THDV %3-5-7 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanan A.A. Kıyıcılı R Yükü için, tetikleme açısı değişimine bağlı olarak hesaplanan UA indisi histogramları.



Şekil 4. 16: THDV %3-5-7 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanan A.A. Kıyıcılı R Yükü için, tetikleme açısı değişimine bağlı olarak hesaplanan LA indisinin histogramları.



Şekil 4.17: THDv %3-5-7 değerlerine sahip 100'er farklı gerilim dalga formu uygulanan A.A. Kıyıcılı R Yükü için, tetikleme açısı değişimine bağlı olarak hesaplanan KYK indisi histogramları.

Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'dan UA ve LA indislerinin triak tetikleme açısının artışıyla doğrusal bir atış gösterdiği görülmektedir. Triak tetikleme açısının artışının, bu yükün akım dalga şeklindeki bozulmanın artışı olduğuna göre sonuçlar UA ve LA indislerinin harmonik sorumluluğun ölçülmesinde kullanımını destekler niteliktedir.

Şekil 4.13'den D_{sc} gücünün normalize değerinin tetikleme açısının 10°-70° aralığında artış eğiliminde olduğu, fakat tetikleme açısının 70°'den sonraki değerlerinde artış eğiliminin bozulduğu görülmüştür. Şekil 4.14'te sunulan HG indisine ait değişim D_{sc} gücünün normalize değerinin değişimine benzemektedir. Son

olarak; Şekil 4.17 KYK indisinin dimmer tetikleme açısının artışıyla manalı bir değişim göstermediğini göstermektedir.

4.3.3. Üç Baralı Küçük Test Sisteminde Elde Edilen Analiz Sonuçları

Kurulan üç baralı küçük test sisteminin, dengeli ve dengesiz yüklenme durumlarının literatürde var olan metotlar ve indisler üzerindeki etkisinin değerlendirilmesine imkân sağlaması amacıyla her 3 faz yükü birbirinden bağımsız akım harmoniği oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Her faz için, direnç yükünü besleyen, tetikleme açısı hassas bir şekilde ayarlanabilen AA kıyıcıları kullanılmıştır.

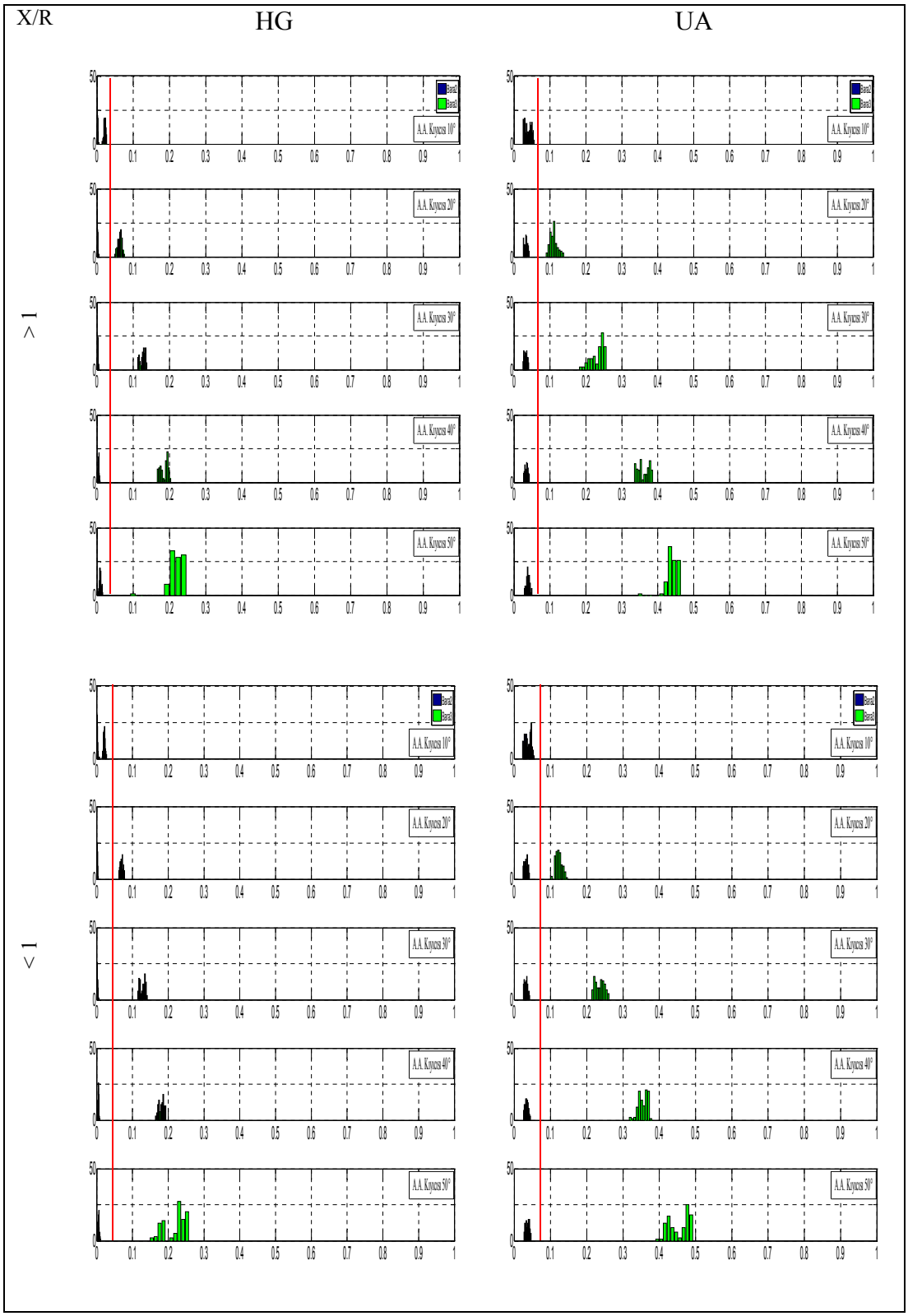
Bu sistemde dengeli ve dengesiz yüklenme durumlarının incelenmesi için 2 senaryo gerçeklenmiştir. Senaryo – 1'de 3. barada yer alan harmonik üreten yüklerin eşit tetikleme açılarında eşit yükleri sürmesi sağlanmıştır. Her üç A.A. kıyıcısının da tetikleme açıları 10°'den 50°'ye 10°'lik adımlarla değiştirilmiştir. Bu sayede dengeli bir harmonik üreten yük grubu oluşturulmuştur.

Senaryo-2'de ise 3. baranın sadece A fazı A.A. kıyıcı yükü ile yüklenmiştir. Senaryolar için yük ve tetikleme açısı değerleri Tablo 4.4'te verilmektedir. Tüm senaryolarda 2. baraya bağlı lineer yük grubu rezistif yapıdadır ve faz başına 330W güç çekmektedir.

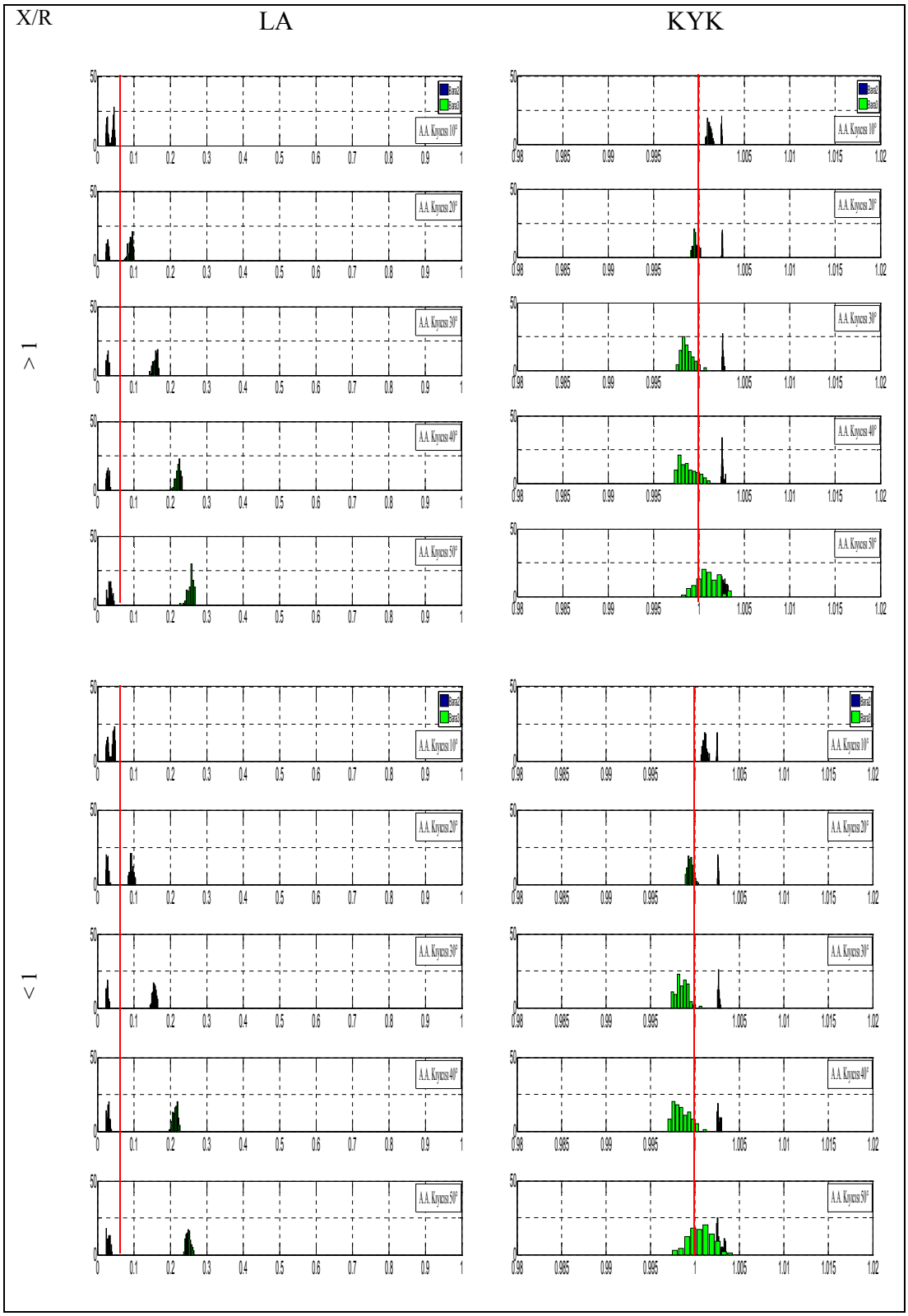
Tablo 4.4: Dengeli ve dengesiz yüklenme durumlarının incelendiği senaryolar.

Senaryo	FAZ A		FAZ B		FAZ C		Durum
	GÜÇ (W)	AÇI (°)	GÜÇ (W)	AÇI (°)	GÜÇ (W)	AÇI (°)	
1	330	10:10:50	330	10:10:50	330	10:10:50	Dengeli
2	330	10:10:50	0	0	0	0	Yük Dengesizliği

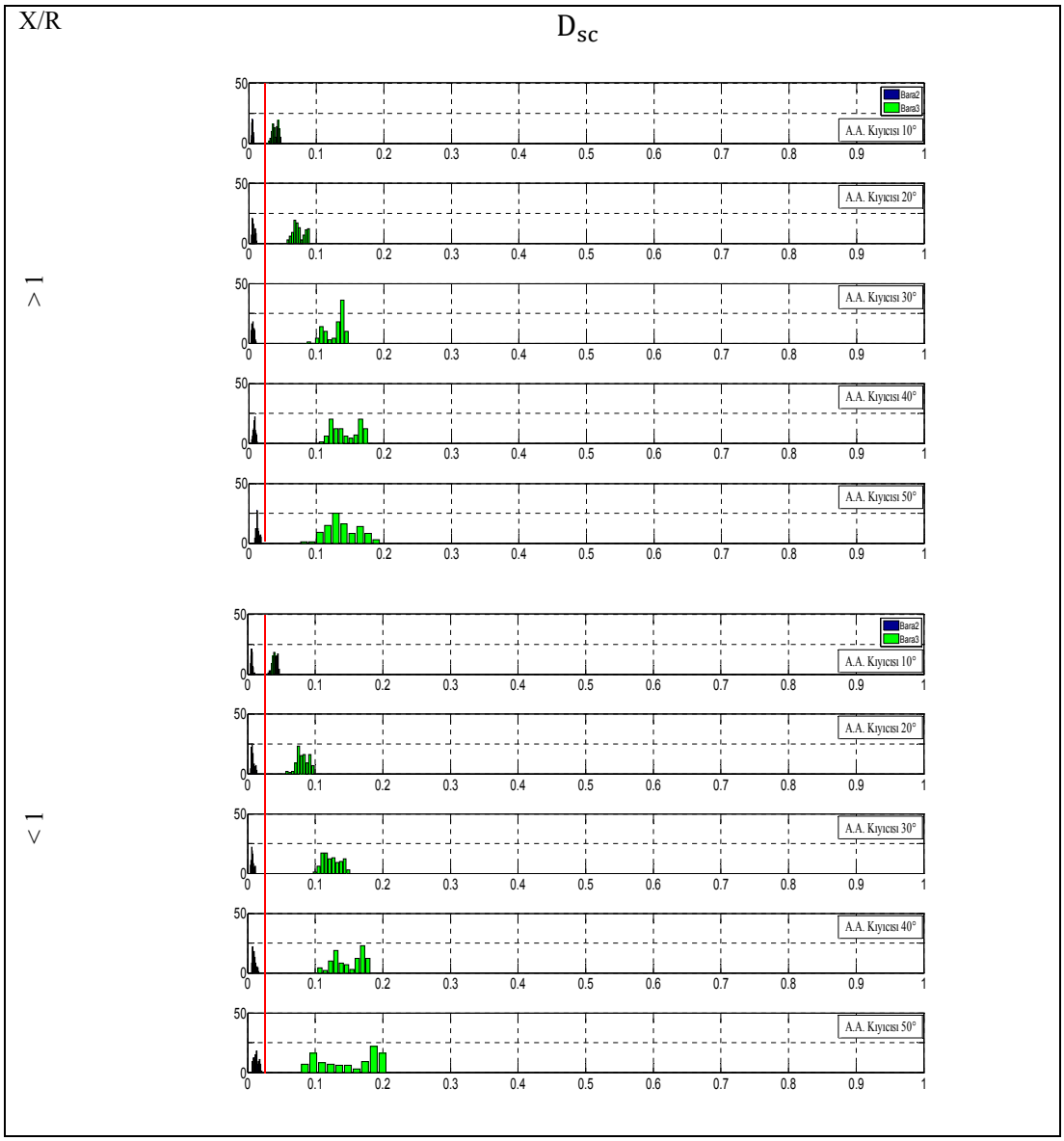
Büyük test sisteminde bu iki senaryoda programlanabilir gerilim kaynağı sayesinde 1 nolu baraya THDV değeri %5 olan çeşitli harmonik bileşenlere sahip çok sayıda gerilim dalga şekli uygulanmıştır. Elde edilen istatistiksel olarak sınıflandırılmış ölçüm sonuçları, senaryo sırasına bağlı olarak sırasıyla aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.18: Senaryo 1 için Bara 2 ve Bara 3'e ait HG ve UA indisi ölçüm sonuçları.

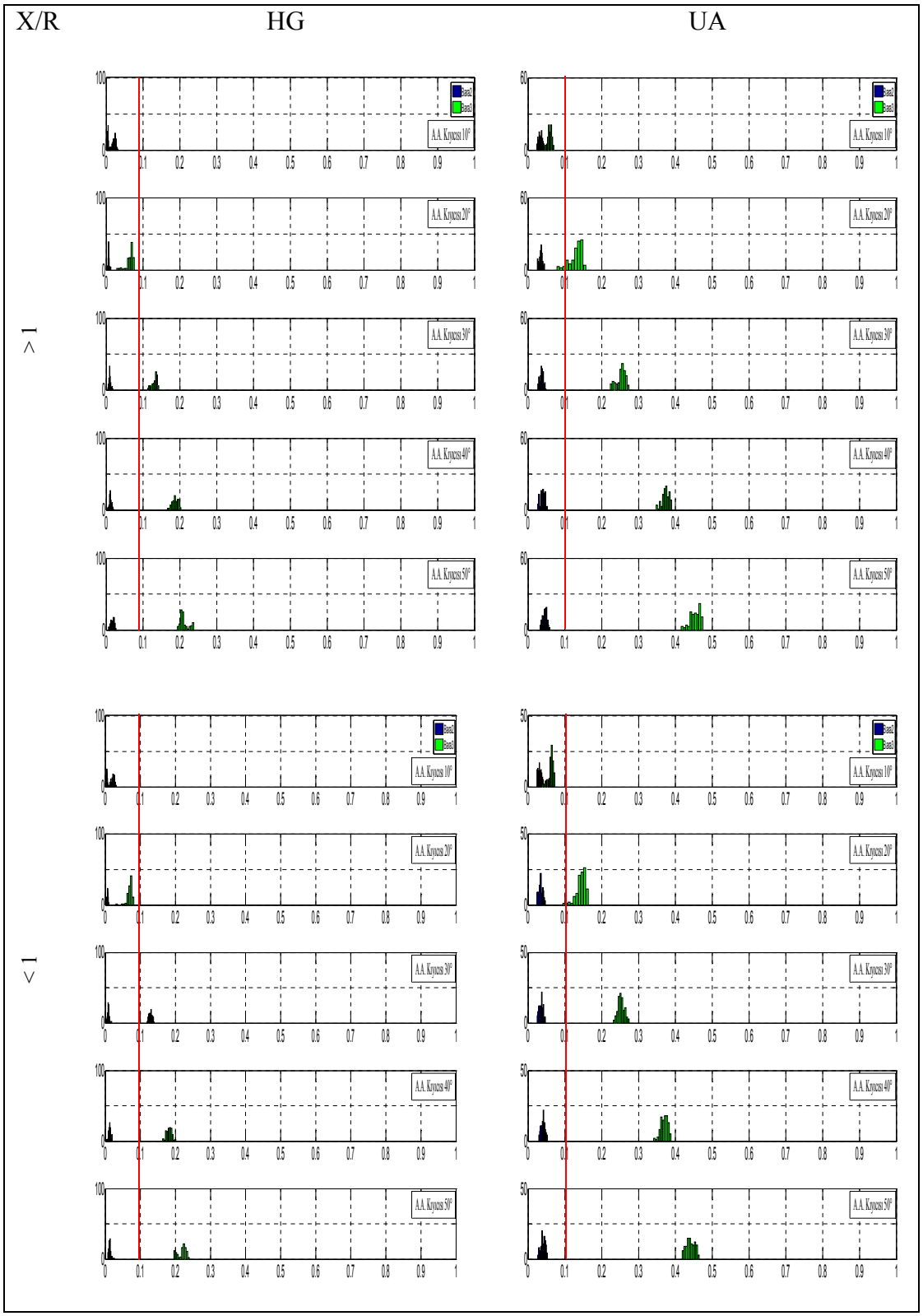


Şekil 4.19: Senaryo 1 için Bara 2 ve Bara 3'e ait LA ve KYK indisi ölçüm sonuçları.

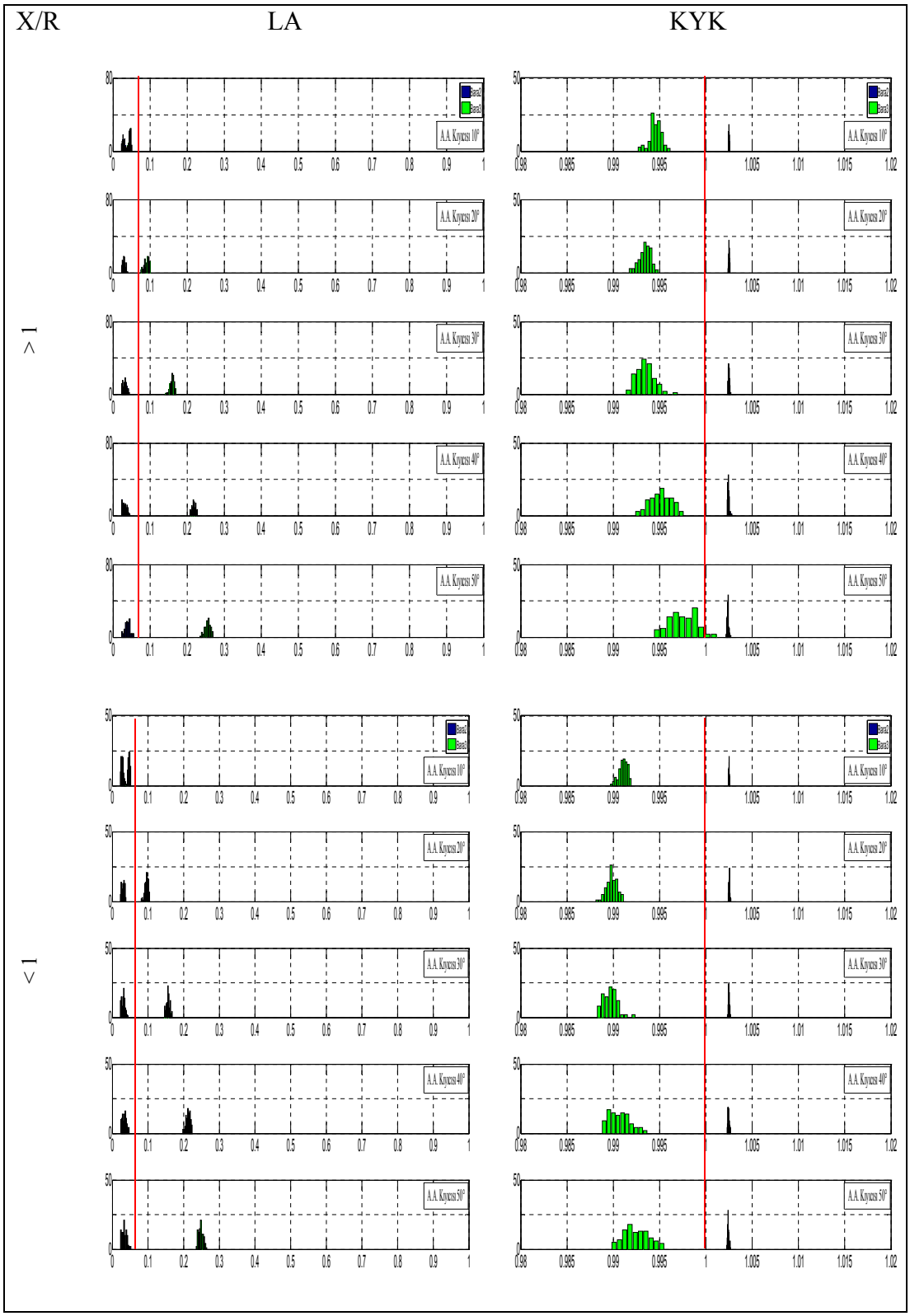


Şekil 4.20: Senaryo 1 için Bara 2 ve Bara 3'e ait D_{sc} ölçüm sonuçları.

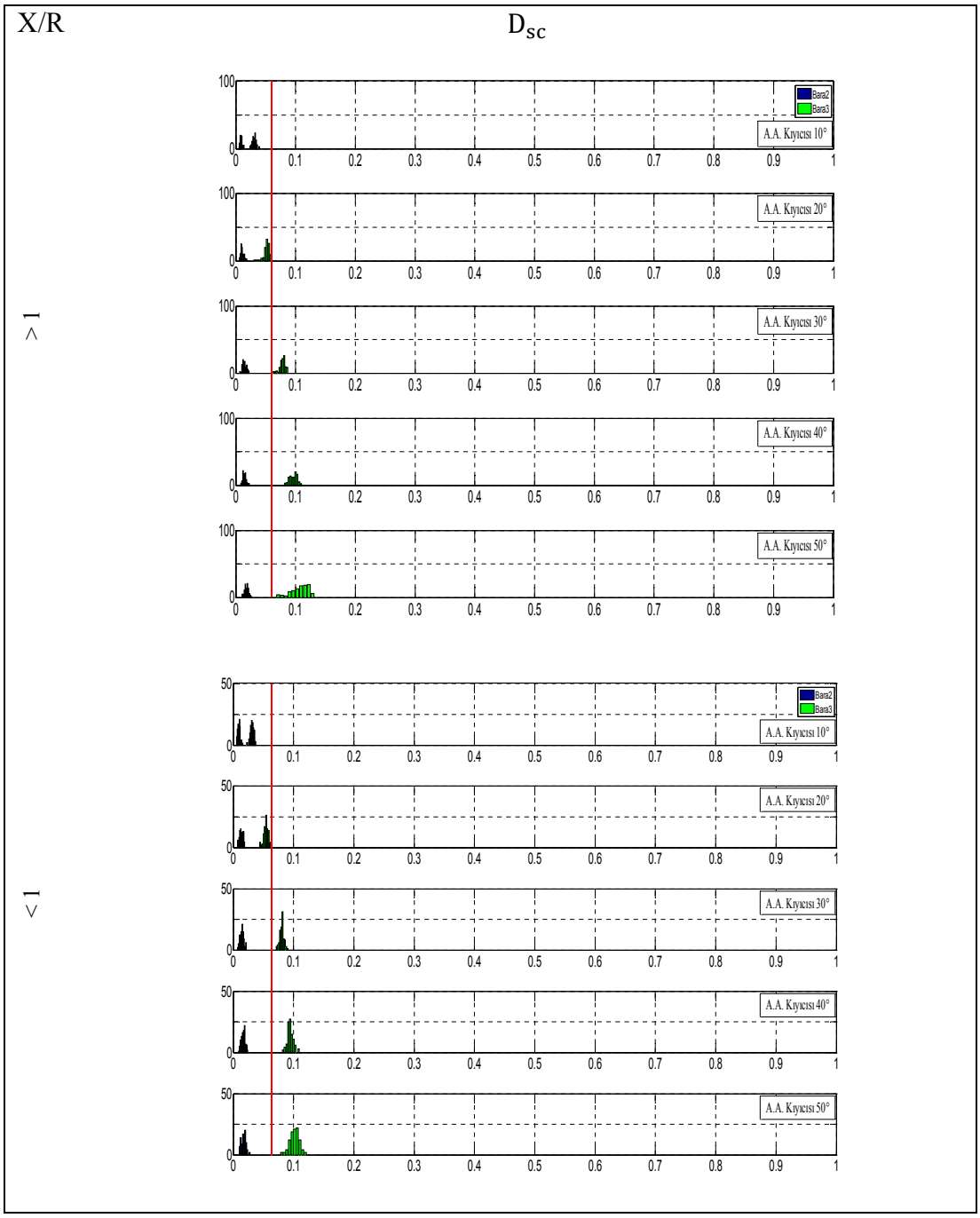
Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'den dengeli yük durumunda X/R'nin 1'den büyük ve 1'den küçük olmasının harmonik kaynağı belirleme indislerinin doğruluğunu önemli bir etki yapmadığı görülmektedir. Bununla birlikte yine aynı şekillerden D_{sc} gücünün ölçümü temelli metot haricindeki indislerin, Bara 3'e bağlı a.a. kırpıcı devresinin 10 'de tetiklendiği (tetikleme açısının 10º olduğu) durumda Bara 2'deki doğrusal empedans ile Bara 3'deki a.a. kırpıcı yükünü ayırt edemediği bir başka ifadeyle Bara 3'deki A.A. kırpıcı devresini doğrusal yük olarak gördüğü anlaşılmaktadır. Bu sonuç düşük akım harmonik bozulmaya sahip doğrusal olmayan -harmonik üreten- yüklerin tespitinde D_{sc} haricindeki indislerin yetersiz kaldığını işaret etmektedir.



Şekil 4.21: Senaryo 2 için Bara 2 ve Bara 3'e ait HG ve UA indisi ölçüm sonuçları.



Şekil 4.22: Senaryo 2 için Bara 2 ve Bara 3'e ait LA ve KYK indisi ölçüm sonuçları.



Şekil 4.23: Senaryo 2 için Bara 2 ve Bara 3'e ait D_{sc} gücü ölçüm sonuçları.

Şekil 4.18-Şekil 4.23'den D_{sc} metodunun dayandığı güç ifadesinin dengeli gerilim şartları için önerilmesi sebebiyle dengesizlik durumundan olumsuz yönde etkilendiği görülmektedir. Fakat aynı şekillerden diğer indislerinde dengesizlik durumundan olumsuz yönde etkilendiğini işaret etmektedir. Böylece D_{sc} metodunun dengesiz sistemlerde diğer indislere göre bir dezavantajının olmadığı sonucuna varılmıştır

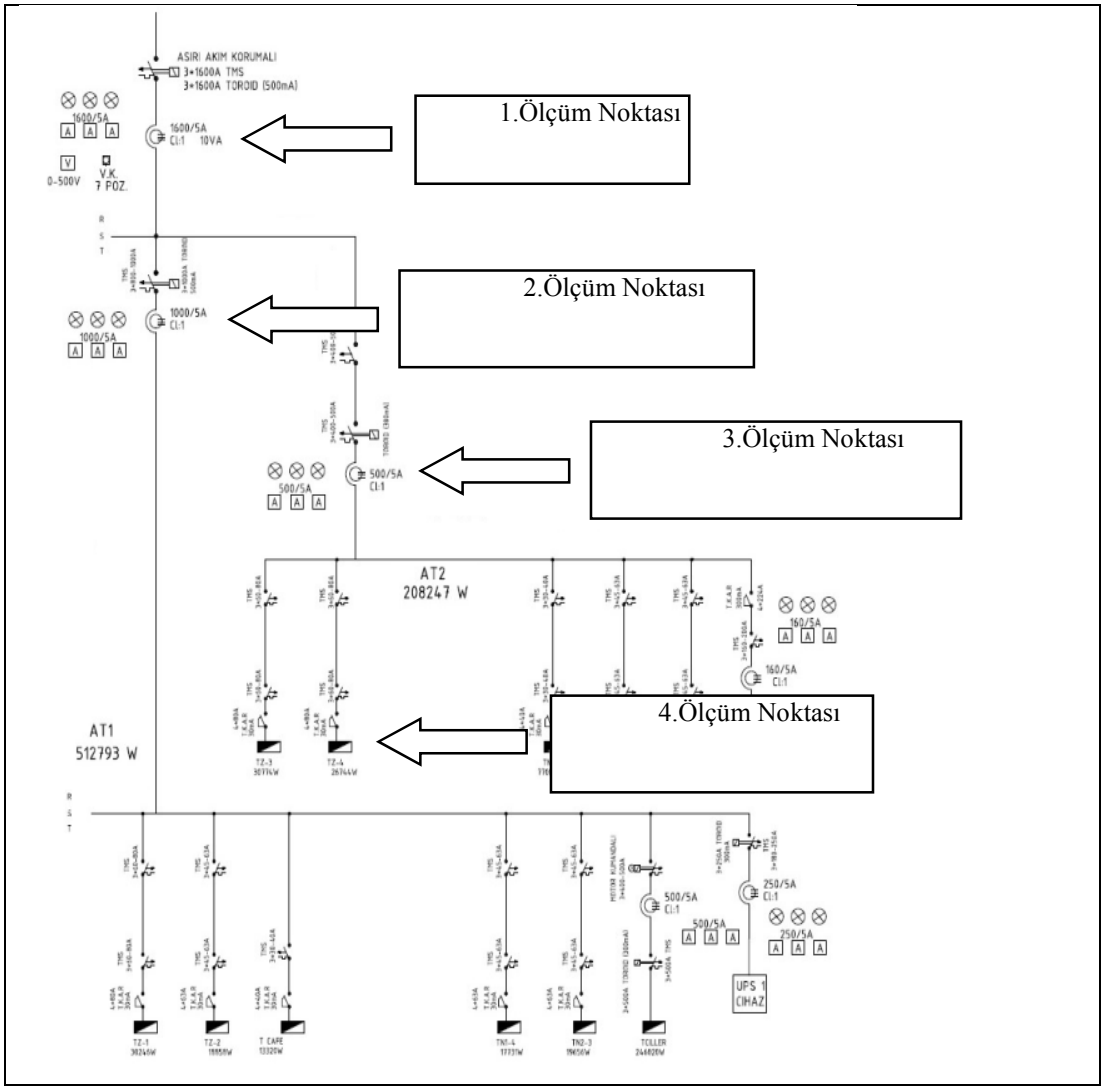
4.4. Sonuç

Bu bölümde tek baralı ve üç baralı küçük test sistemlerinde yapılan ölçümler kullanılarak harmonik kaynağı tespit indislerinin doğrulukları çeşitli bozulmuş gerilim durumları ve çeşitli yük tipleri için istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Üç baralı test sisteminde yapılan ölçümler sırasında ayrıca dengesizlik ve hat empedansı X/R oranının metotlar/indislerin doğruluğuna etkisi incelenmiştir.

Diğer taraftan küçük test sisteminde dimmer tetikleme açısının artışıyla indisler/ metotların değişimleri incelenmiştir. Sonuçlar sadece LA ve UA indislerinin harmonik sorumluluk paylaştırma bakımından kullanımını destekler nitelikte bulunmuştur.

5. GERÇEK BİR DAĞITIM SİSTEMİ İÇİN YAPILAN ANALİZ ÇALIŞMALARI

Bu bölümde HG, UA, LA, KYK indisleri ile D_{sc} metodunun gerçek zamanlı ölçümü için dizayn edilen sistemin yazılım ve donanım kısmı tanıtılmıştır. Ayrıca dizayn edilen ölçüm sistemi ile gerçek bir dağıtım sisteminde (GYTE dağıtım sisteminin bir parçasında) alınan ölçüm sonuçlarının bir kısmına ait analiz çıktıları sunulmuştur. Ölçümün yapıldığı dağıtım sisteminin tek hat şeması Şekil 5.1'de verilmiştir.



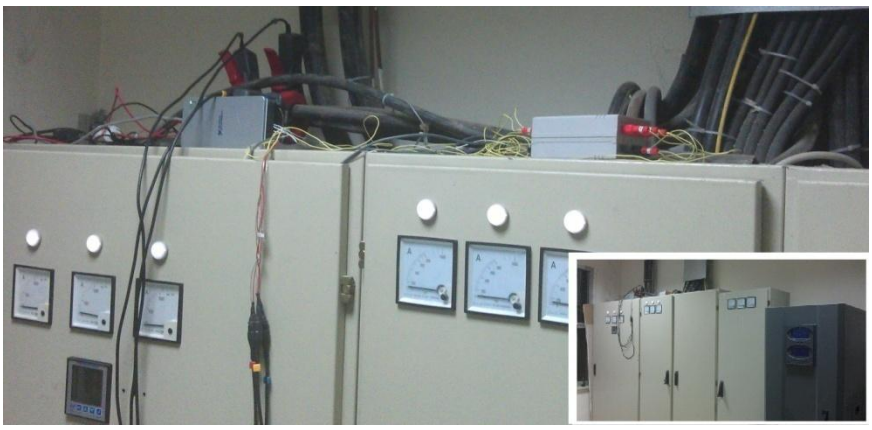
Şekil 5.1:Tek hat şeması üzerinde büyük test sistemi.

Böyle bir sistemde uzun süreli gerçek zamanlı ölçüm alınabilmesi için LabVIEW tabanlı bir ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Bu ölçüm sisteminde yer alan akım/

gerilim ölçüm aparatları ve cihazın LabVIEW tabanlı indis hesap blokları aşağıda sırasıyla tanıtılmıştır.

5.1. Ölçüm Noktaları ve Gerilim/Akım Ölçüm Aparatları

Şekil 5.1'de"1.ÖLÇÜM NOKTASI" adıyla gösterilen ölçüm noktası, Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Binası Ana Dağıtım Panosuna yerleştirilmiş ölçüm düzeneğini işaret etmektedir. Bu ölçüm noktasında Akım örnekleri Circutor CP5 model 5A/2V dönüştürme oranına sahip akım klemperi ile sağlanmaktadır. Bu noktada kullanılan akım klempleri göstergeler için pano içerisine yerleştirilmiş akım trafolarının sekonder uçlarına bağlıdır. Gerilim örneklemeleri ise 1/80 oranıyla gerilim işaretini şartlandıran gerilim bölücüler ile sağlanmaktadır. Gerilim bölücülerden ve akım klemplerinden alınan veriler NI cDAQ 9181 model etherrnet şaseye bağlı kanal başına 2Ms/sn örnekleme hızına,16 bit örnekleme çözünürlüğüne sahip 16 kanal farksal ölçüm yapabilen NI-DAQ 9205 veri toplama kartına iletilmektedir. Şekil 5.2'de 1.Ölçüm noktasına ait bir fotoğraf görülmektedir.



Şekil 5.2: Ölçüm noktasına ait bir fotoğraf.

Şekil 5.1'de "2.ÖLÇÜM NOKTASI" adıyla gösterilen ölçüm noktası Elektronik Mühendisliği Bölümü Dağıtım Panosuna yerleştirilmiş ölçüm düzeneğini işaret etmektedir. Bu ölçüm noktasında akım örnekleri Fluke i1000s marka akım klempleri ile ölçülmektedir. 1.Ölçüm Noktası ile 2.Ölçüm noktasının aynı gerilim barasında olmaları sebebiyle bu ölçüm noktasından gerilim örnekleri alınmamıştır. Elektronik Mühendisliği Bölümü Dağıtım Panosunun Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği

Binası Ana Dağıtım Pano Dairesinde yer alması sebebiyle 2.Ölçüm noktasından elde edilen akım ve gerilim verileri 1.Ölçüm Noktasında kullanılan NI-DAQ 9205 veri toplama kartının boşta kalan veri giriş kanallarına bağlanmıştır.

Şekil 5.1'de "3.ÖLÇÜM NOKTASI" adıyla gösterilen ölçüm noktası Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Dağıtım Panosuna yerleştirilmiş ölçüm düzeneğini işaret etmektedir. Bu ölçüm noktasında akım örnekleri Fluke i1000s marka akım klempleri ile ölçülmektedir. 1.ve 2. Ölçüm Noktası ile 3.Ölçüm noktasının aynı gerilim barasında olmaları sebebiyle bu ölçüm noktasından gerilim örnekleri alınmamıştır. Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Dağıtım Panosunun Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Binası Ana Dağıtım Pano Dairesinde yer alması sebebiyle 3.Ölçüm noktasından elde edilen akım ve gerilim verileri 1.Ölçüm Noktasında kullanılan NI-DAQ 9205 veri toplama kartının boşta kalan veri giriş kanallarına bağlanmıştır.

Şekil 5.3: Kontrollü yük grubuna ait bir fotoğraf.

Şekil 5.1’de "4. ÖLÇÜM NOKTASI" adıyla gösterilen ölçüm noktası Elektronik Mühendisliği Bölümü Devre Laboratuarına yerleştirilmiş kontrollü yük grubunu ve ölçüm düzeneğini işaret etmektedir. Bu ölçüm noktasında Hilkar Marka 3 fazlı 2x5 kW, 2x5 kVAr (kapasitif) ve 2x5 kVAr (Endüktif) yük seti konumlandırılmıştır. Bu ölçüm noktasında akım örneklemeleri Fluke i1000s marka akım klempleri ile gerilim örneklemeleri ise 1/80 oranıyla gerilim işaretini şartlandıran gerilim bölücüler ile sağlanmıştır. Diğer ölçüm noktalarından farklı olarak bu ölçüm noktasında NI-USBX

6366 veri toplama kartı kullanılmıştır. Ölçüm noktalarından elde edilen verilerin kaydedildiği ve işlendiği bir bilgisayarda bu ölçüm noktasına yerleştirilmiştir. Şekil 5.3'te Kontrollü yük grubu ölçüm noktasına konulan Hilkar Yük Seti ve Kayıt Bilgisayarına ait bir fotoğraf görülmektedir.

5.2. Labview Kodları

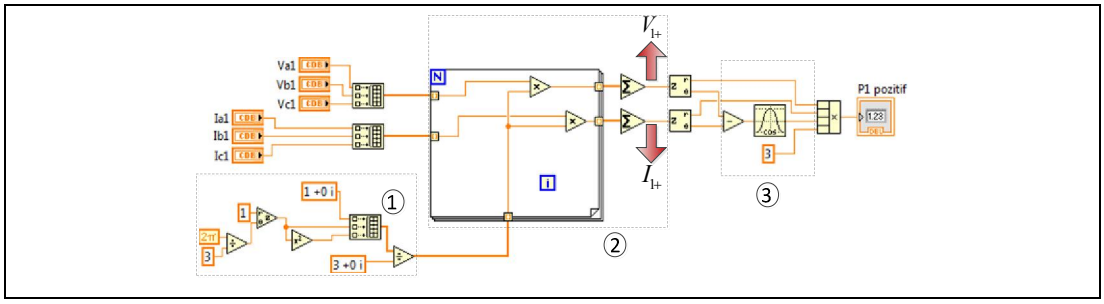
Bu bölümde, üç fazlı sistemler için hazırlanan HG, UA, LA, KYK ve Dsc olmak üzere beş metoda ilişkin LabVIEW kodları verilmiştir. Bu metotların Labview programı oluşturulurken harmonik sorumluluk hesabıyla ilgili metotlar alt program (SubVI) halinde hazırlanmıştır. Bütün indis hesaplamalarına ait alt programlarda, giriş bilgisi olarak gerilim ve akımların FFT analizinden elde edilen genlik ve açı değerleri kullanılmaktadır.

5.2.1. KYK İndisi

Bu indis üç fazlı sistemlere uygulanırken aktif güç, fazlardan çekilen aktif güçlerin aritmetik toplamıdır. Bununla birlikte temel harmonik aktif gücü yerine temel harmonik pozitif sıra aktif gücü dikkate (5.1) alınmıştır.

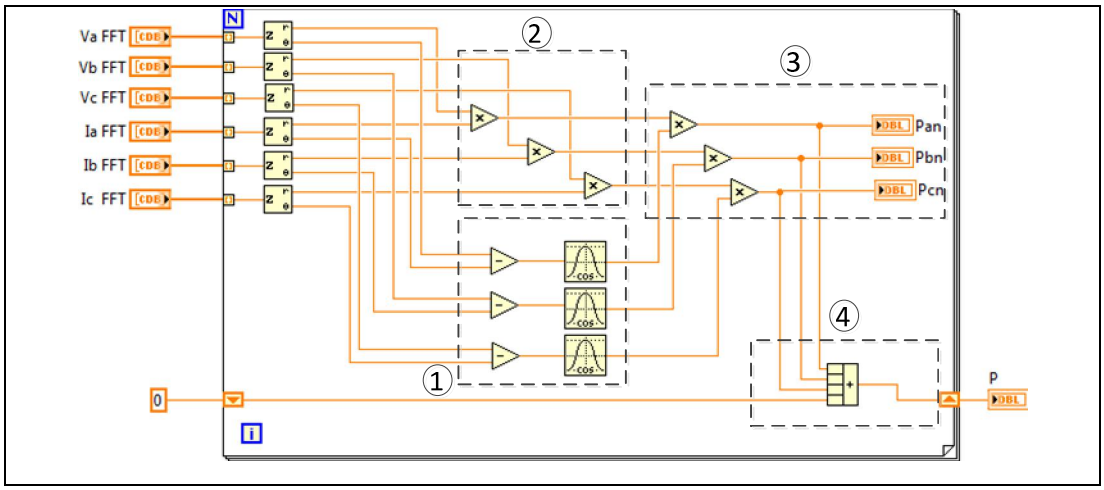
$$P_{1+} = 3V_{1+}I_{1+}\cos(\theta_{1+} - \delta_{1+}) \tag{5.1}$$

Şekil 5.4'de verilen Labview kodunda, temel harmonik pozitif sıra faz-nötr gerilimi ile temel harmonik pozitif sıra hat akımının fazör değerleri bulunduktan sonra P_{1+} hesaplanmıştır.



Şekil 5.4: P_{1+} değerinin ölçümüne ilişkin Labview kodu.

Şekil 5.4'de 1 numaralı kod bloğu ile simetrili bileşenlere dönüşümü sağlayan A dönüşüm matrisinin tersi hesaplanmaktadır. 2 numara ile gösterilen kod bloğunda, A dönüşüm matrisinin tersi kullanılarak yüke ait temel harmonik faz-nötr gerilimleri ve faz akımlarından, pozitif sıra gerilim ve akım değerleri elde edilmektedir. (5.1) numaralı denklem, Labview kodunun 3 numaralı bölümünde gerçekleştirilerek temel harmonik pozitif sıra aktif gücü ölçülmektedir.



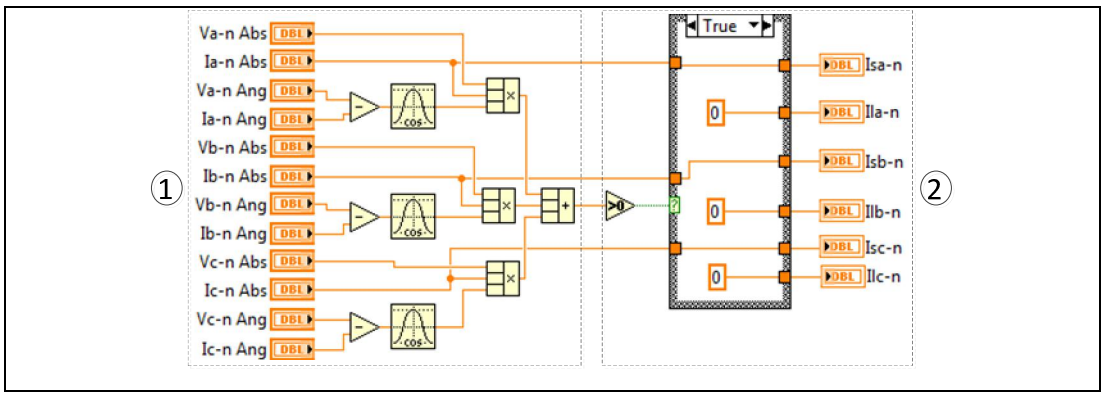
Şekil 5.5: P ölçümüne ait Labview kodu.

(2.3)'e uygun olarak her bir faz için harmonik aktif güçleri hesaplanmış ve "for döngüsü" içinde bu değerler toplanarak toplam aktif güce ulaşılmıştır. Toplam aktif gücü ölçen Labview kodu Şekil 5.5'te verilmiştir. Şekil 5.5'te kesikli çizgilerle gösterilen 1 numaralı kod bloğu ile geçerli harmonik frekansında her bir faz için cos Ø değeri hesaplanırken, 2 numara ile gösterilen bölümde her bir faz için yükün üstündeki faz-nötr gerilimlerinin ve fazhat akımlarının etkin değerlerinin çarpımı elde edilmektedir. 1 ve 2 numaralı alan blok içerisindeki işlemlerden elde edilen sonuçlar kullanılarak her bir faz için n. harmonik numarasında aktif güç değerleri ölçülmektedir. Toplam aktif güç, n. harmonik numarasında elde edilen bu aktif güç değerleri toplanarak 4 numaralı kod bloğunda görüldüğü gibi toplam aktif güç değeri artımsal olarak hesaplanmaktadır. Son olarak P değeri, P_{1+} değerine oranlanarak KYK indisi belirlenmiş olur.

5.2.2. HG İndisi

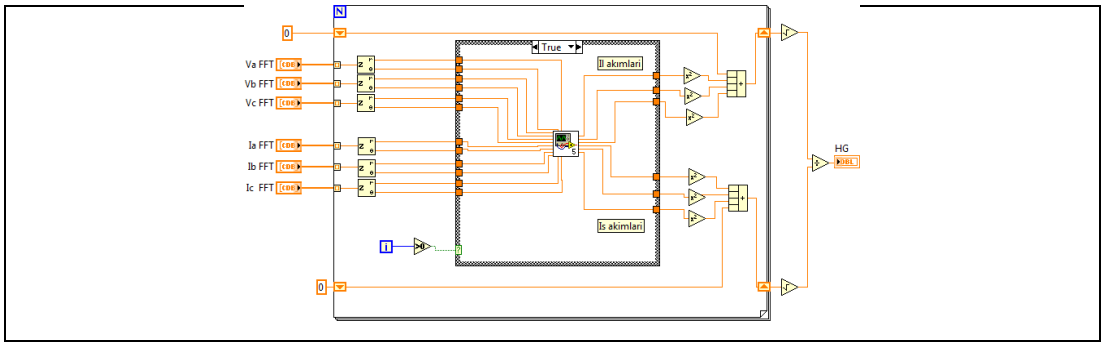
Bölüm 2.1'de HG indisinin tek fazlı sistemler için uygulamasında, l ve s harmonik numaralarının çekilen aktif gücün yönüne bakılarak belirlendiğine değinilmişti. Bu indisin üç fazlı sistemlere uygulamasında, l ve s harmonik numaraları her bir fazdan çekilen harmonik aktif güçlerin toplamının işaretine bakılarak belirlenir. Ayrıca üç fazlı sistemlerde HG indisi hesaplanırken kollektif etkin değer tanımı dikkate alınır.

Şekil 5.6'da verilen Labview kodunda, herbir harmonik numarası için fazlardan çekilen toplam aktif güçlerin hesabı 1 numaralı blok grubunda yapılmıştır. Bu hesaplanan harmonik aktif güçlerin pozitif veya negatif olmasına göre i_ℓ ve i_s akımlarının belirlenmesi ise 2 numaralı blok grubunun çıktısıdır.



Şekil 5.6: DC bileşen haricindeki harmonikler için I_l ve I_s akımlarının belirlenmesi.

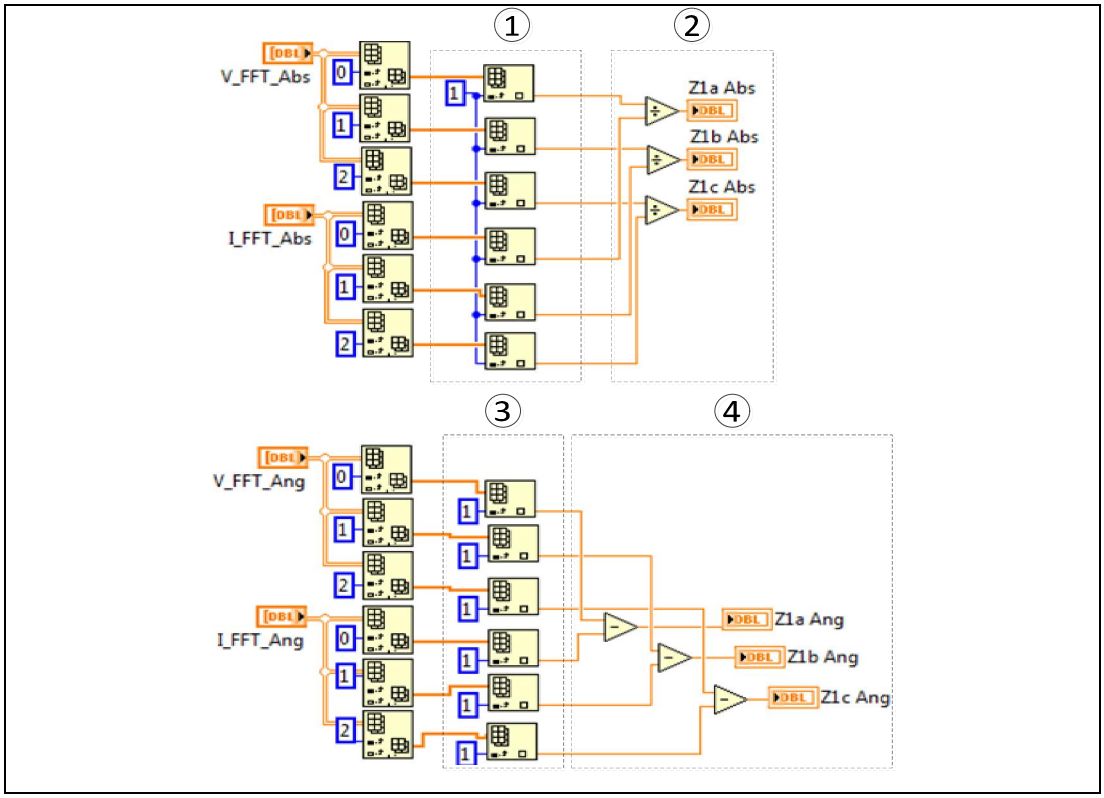
Ayrıca Şekil 5.7'de verilen for döngüsü içinde, her bir harmonik numarası için i_ℓ ve i_s akımlarının kollektif etkin değerleri elde edilir. Döngü bittikten sonra bu değerler (2.4) denklemine uygun bir biçimde oranlanarak HG indisi hesaplanır.



Şekil 5.7: HG İndisinin hesaplanmasına ilişkin Labview kodu.

5.2.3. UA Metodu

UA metodunun üç fazlı sistemlerde uygulanmasına ilişkin Labview alt programı hazırlanırken (2.14)'te verilen empedans değeri her bir faz için hesaplanmış ve bu empedanslara göre bütün fazlara ait uygun ve uygun olmayan akım parçaları belirlenmiştir. Üç faza ait uygun olmayan akımların ve faz akımlarının kollektif etkin değerlerinin oranından ise UA indisi hesaplanmıştır. Her bir fazda (2.14)'te verilen ifadeye göre temel harmonik için eşdeğer empedans hesabı Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

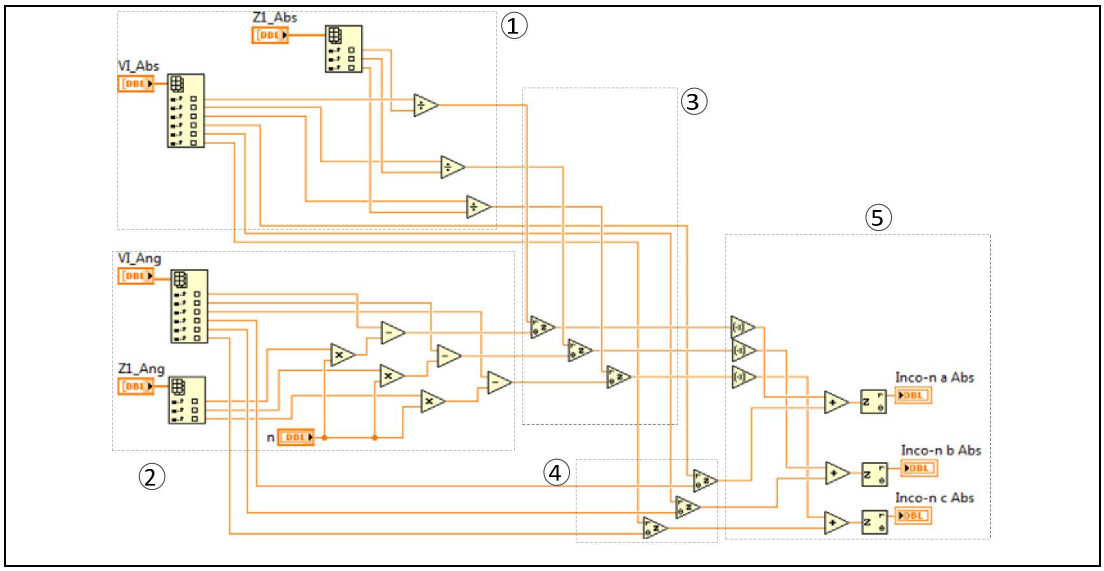


Şekil 5.8: Z_1 empedansının genlik ve açı değerlerinin hesaplanmasına ilişkin Labview kodu.

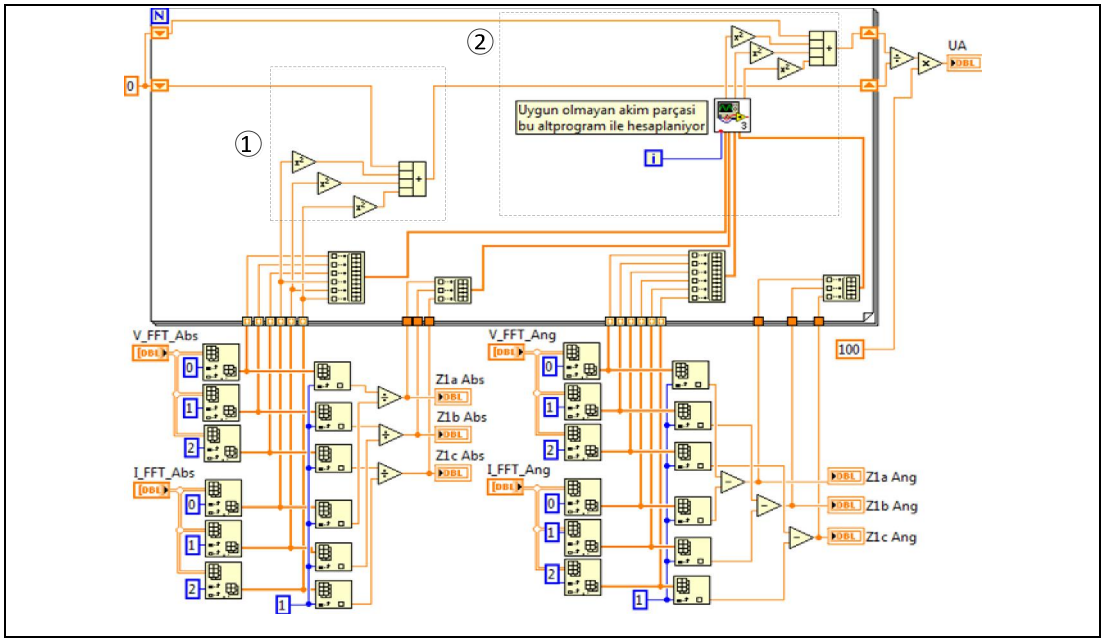
Şekil 5.8'deki Labview kodunun 1 ve 3 numaralı kod bloğunda, gerilim ve faz akımlarının FFT analizi sonuçlarından temel harmonik genlik ve açı değerlerini elde etmektedir. Her bir faz için z_1 empedansının genlik ve açı değerleri sırası ile Şekil 5.8'de 2 ve 4 numara ile belirtilen bölümlerde hesaplanmaktadır.

Şekil 5.9'da verilen 1 numaralı kodlarla, her bir faz için gerilim harmoniklerinin etkin değerleri temel harmonik eşdeğer empedans değerine bölünerek uygun akım bileşeninin harmoniklerine ait etkin değerler hesaplanmıştır. Uygun Akımın n.

harmoniğine ait açı değeri (2.15)'te sinüs fonksiyonu içinde yer alan $\theta_n + n(\delta_1 - \theta_1)$ ifadesine göre Şekil 5.9'da 2 numaralı kod bloğu ile hesaplanmıştır. 3 ve 4 numara ile gösterilen kısımlarda sırası ile uygun akım parçasının ve yük akımının her bir faz için fazör değerleri elde edilmiştir. Son olarak, 5 numara ile gösterilen kodlarda yük akımı ile uygun akım parçasının n. harmonik bileşenlerinin fazör farkının etkin değeri; uygun olmayan akım parçasının n. harmonik etkin değeri vermektedir.



Şekil 5.9: Her bir harmonik numarası için I_{nco} akımını hesaplayan Labview kodu.



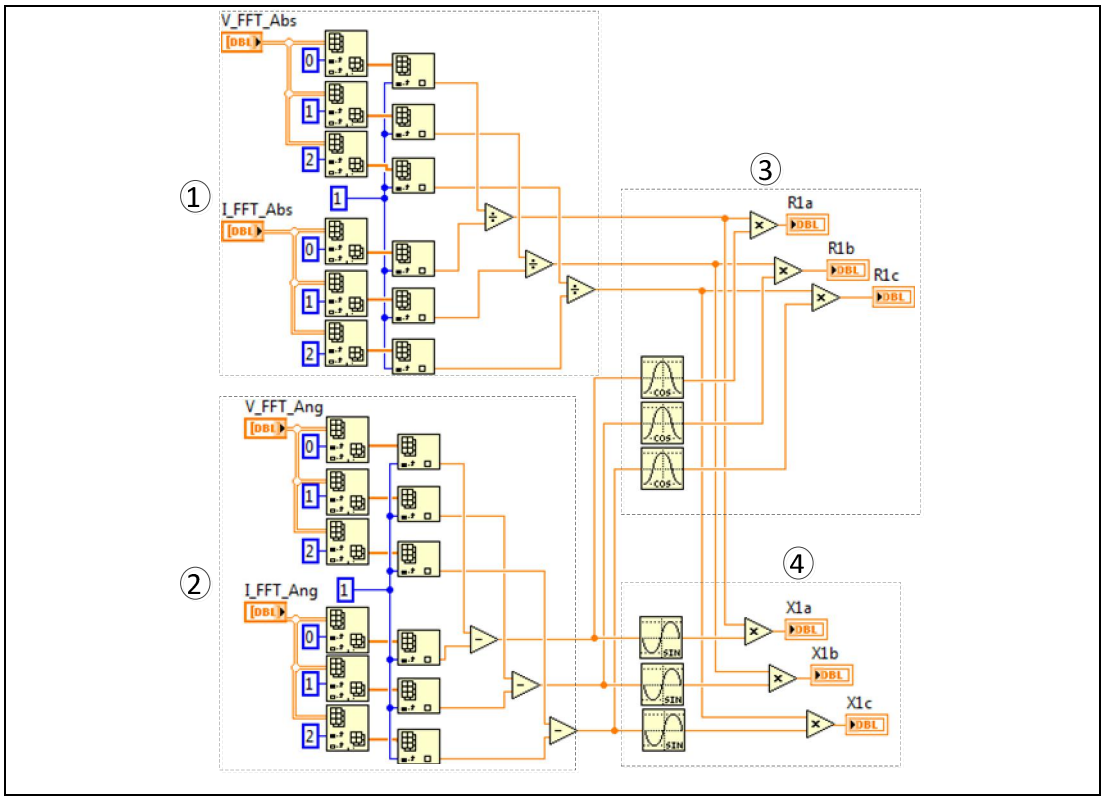
Şekil 5.10: UA indisine ait Labview kodu.

Şekil 5.10'da verilen programın 2 numara ile gösterilen bölümünde üç faz için elde edilen uygun olmayan akım parçalarının kollektif etkin değeri hesaplanır. Aynı şekilde 1 numaralı kod bloğunda yük akımının kollektif etkin değeri elde edilir. Böylece uygun olmayan akım parçasının kollektif etkin değerinin, akımın kollektif etkin değerine oranı, (2.17)'deki ifadeye uygun olarak hesaplanır.

5.2.4. LA Metodu

Bu metodun üç fazlı sistemlere uygulanmasında ise her bir faz için doğrusal olmayan akım parçaları hesaplanır. Üç faza ait doğrusal olmayan akımların ve faz akımlarının etkin değer hesapları ise kollektif etkin değer tanımı dikkate alınarak yapılır.

Şekil 5.11'de verilen Labview kodlarında her bir faz için (2.9) ve (2.10) denklemleri kullanılarak sırasıyla R ve X değerleri belirlenmiştir.

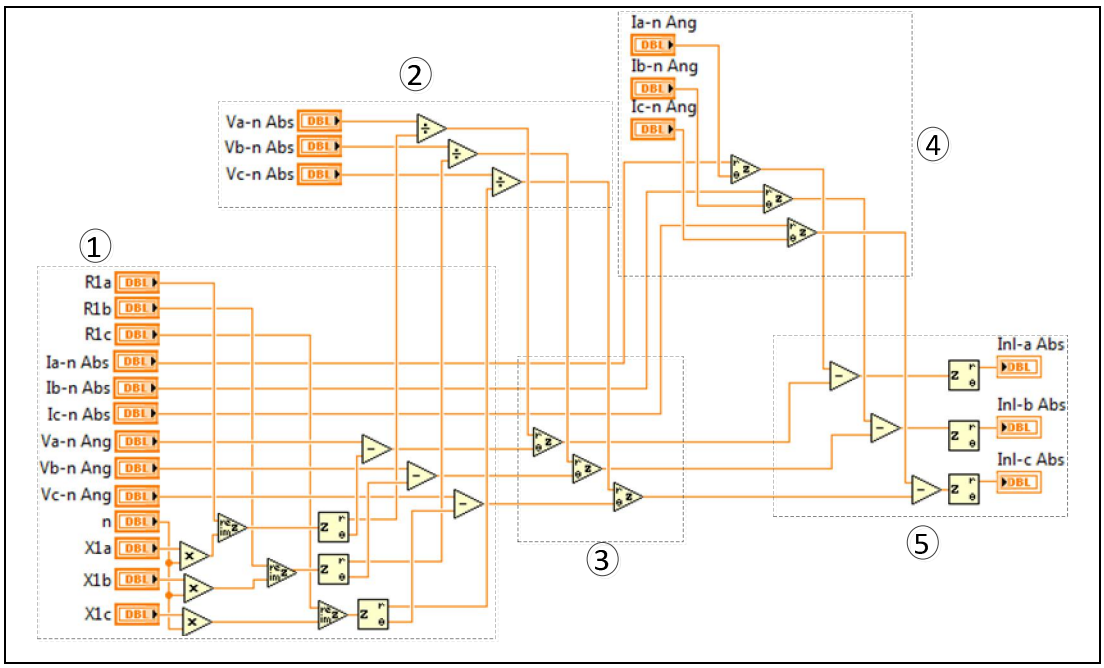


Şekil 5.11: R_1 ve X_1 değerlerini hesaplayan Labview kodu.

UA metoduna ait altprogramdaki gibi Şekil 5.11'de gösterilen kodun 1 ve 2 numaralı kısımlarında FFT sonuçlarından her bir faz için faz-nötr gerilimleri ve yük

akımlarına ait genlik ve açı değerleri elde edilmektedir. 3 ve 4 numaralı kod bloklarında ise (2.9) ve (2.10)'daki ifadelerden yararlanarak sırası ile R_1 ve X_1 değerleri hesaplanmaktadır.

Doğrusal olmayan akım parçasını hesaplayan labview kodu Şekil 5.12'de verilmiştir. Şekildeki 1 numaralı kod bloğunda n. harmonik için R_n ve X_n değerleri (2.14)'e göre hesaplanmış ve akabinde (2.15)'deki ifadeden yararlanılarak lineer akım parçasının açı değeri elde edilmiştir. Lineer akım parçasının genlik değeri ise şekilde verilen Labview kodunun 2 numaralı bölümünde hesaplanmaktadır. Etkin değer ve açısı hesaplanan doğrusal akım parçası kopmpleks formda yük akımından çıkarılarak, 5 numaralı kod bloğunda doğrusal olmayan akım parçası elde edilmiştir. LA indisi, (2.17)'de belirtildiği gibi doğrusal olmayan akım parçasının kollektif etkin değeri ile yük akımının kollektif etkin değerine oranı şeklinde hesaplanmıştır

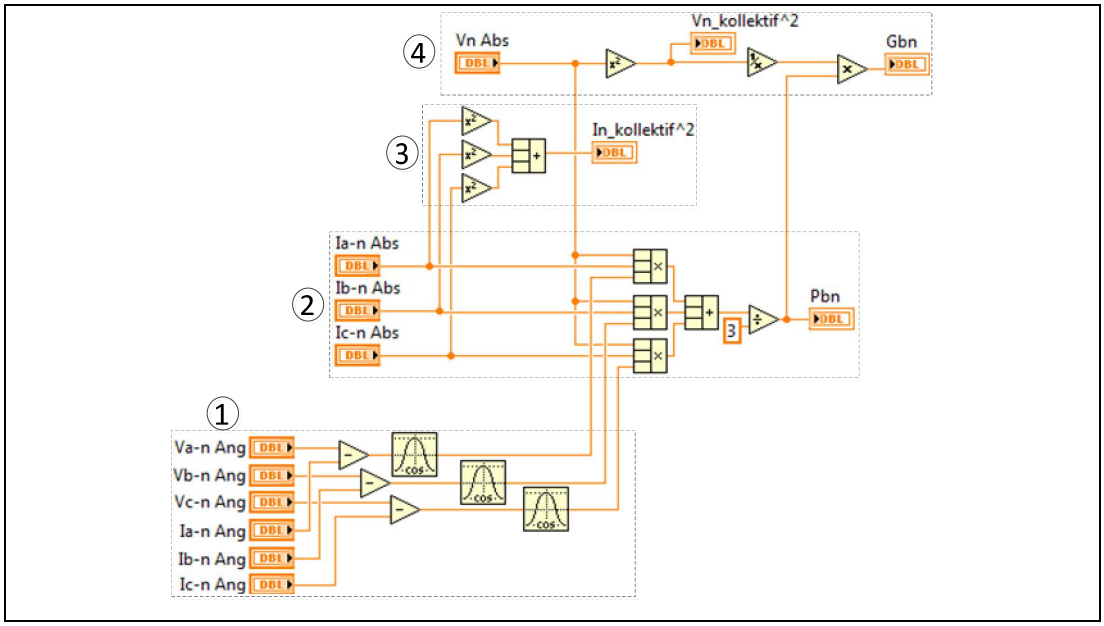


Şekil 5.12: n. harmonik için I_{nl} akımın genlik değerini hesaplayan Labview kodu.

5.2.5. Kaydırılmış İletkenlik Gücü (DSC) Temelli Metot

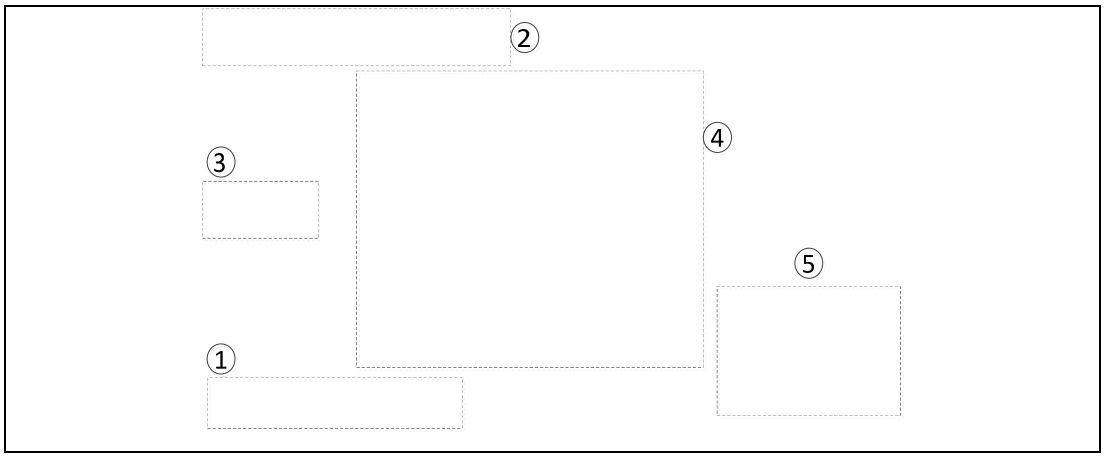
Bu metot, önceki bölümlerde yer alan Kaydırılmış İletkenlik gücünün (D_{sc}) ölçümüne dayanan bir metottur. D_{sc} gücünün ölçümü için bulunması gerekli olan dengeli aktif güç (P_{bn}) ve n. harmonik dengeli iletkenlik (G_{bn}) değerlerinin hesabına ait Labview kodları Şekil 5.13'de sunulmuştur. Bu şekilde 1 nolu kod bloğunda n.

harmonik için her bir faz gerilim ve akımlarına ait cos(∅) değerleri hesaplanmaktadır. 2 numaralı kod bloğunda ise (2.52)'de verilen ifadeye göre n. harmonik dengeli aktif gücü hesaplanır. Nihayetinde 4 numaralı kod bloğunda (2.53)'daki ifadeye uygun olarak n. harmonik dengeli iletkenlik değeri elde edilmektedir.



Şekil 5.13:Her bir harmonik için G_{Bn} ve P_{Bn} değerlerini hesaplayan Labview kodu.

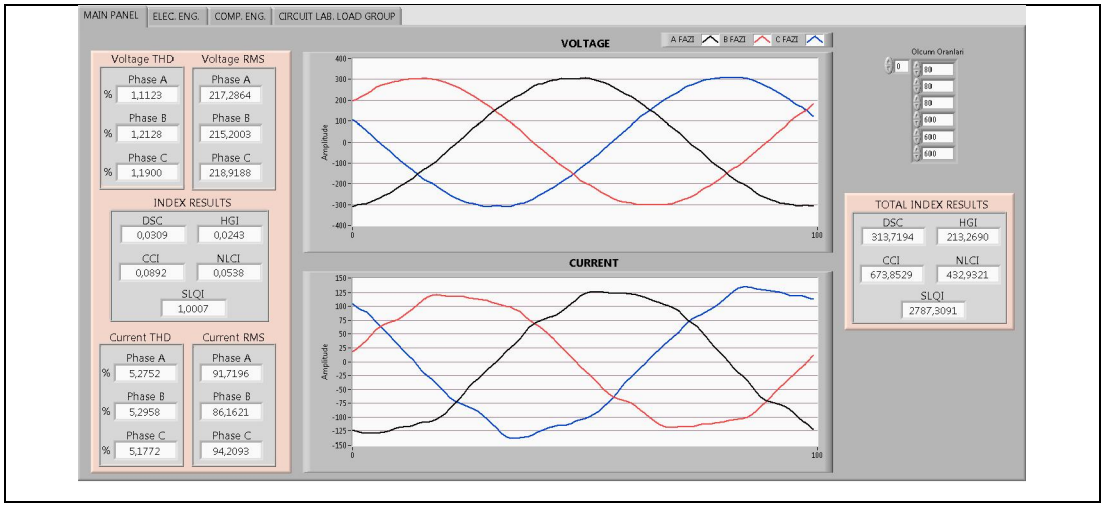
Bu büyüklüklere ek olarak, Şekil 5.14'de 3 numaralı işlem ile eşdeğer iletkenlik (G_e) değeri elde edilmiştir. 4 numaralı kod bloğunda yer alan döngü ve akabinde 5 numaralı blokta gösterilen işlemler ile D_{sc} gücü hesaplanmıştır. Şekil 5.14'de 2 numara ile gösterilen işlemler ile yüke ait görünür güç ölçülmektedir.



Şekil 5.14: Labview programında D_{sc} ve S değerlerinin hesaplanması.

5.3. Ölçüm Sonuçları

Ölçüm sisteminin arayüzü Şekil 5.15'de verilmiştir. Bu arayüzde belirlenen dört ölçüm noktası için akım ve gerilim Toplam Harmonik Bozulma (THD) miktarı, etkin değerleri ve metotlara/indislere ait değerler gösterilmiştir. Aynı zamanda ölçüm sonuçları kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.15: Hazırlanan Labview programının ön paneli.

Ölçüm noktaları için metotlara/indislere ait anlık sonuçlar ve faz-nötr gerilimleri ile faz akımlarının ortalama THD değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1: Metotlara ilişkin anlık ölçüm sonuçları.

Metotlar	1.Ölçüm Noktası Ana Pano	2. Ölçüm Noktası Bil. Müh.	3. Ölçüm Noktası Elk.Müh.	4.Ölçüm Noktası KYG
HGI	0.0603	0.1664	0.1018	0.0170
KYK	1.003	0.9998	1.0010	1.0001
UA(%)	14.9400	18.2700	17.7600	4.2600
LA(%)	10.1900	14.8300	12.2800	3.0900
Dsc (N)	0.0784	0.1181	0.0649	0.0256
$Ort.\%THD_I$	10.2562	15.3368	12.3224	3.1825
$Ort.\%THD_V$	1.1759	1.1759	1.1759	2.1407

Tablo 5.1'den tüm ölçüm noktaları için ölçülen THDV değerlerinin test sistemine ait gerilim seviyesi için IEEE standart 512-1992'de tanımlı %5 sınır değerin altında olduğu görülmektedir. Harmonik üreten yüklerin bağlı olduğu 1., 2. ve 3.

ölçüm noktalarından çekilen akımların dikkate değer büyüklükte THD_I değerlerine sahip olduğu yine aynı tablodan anlaşılmaktadır. Doğrusal yüklerin bağlı olduğu 4. ölçüm noktası için ölçülen THD_I ve THD_V değerleri ise birbirine çok yakındır.

Ölçüm sonuçlarından KYK indisinin 2. ve 4. ölçüm noktaları için 1'den büyük değerde olduğu dolayısıyla bu noktalara bağlı yükleri sırasıyla harmonik üreten ve doğrusal yük olarak doğru sınıflandırdığı, bununla birlikte 1. ve 3. ölçüm noktalarında bu indisin hata yaptığı Tablo 5.1'den görülmektedir.

HG, UA ve LA metotları/indisleri 1., 2. ve 3. ölçüm noktaları için sıfırdan büyük değerlerde ölçülmüş dolayısıyla bu noktalara bağlı harmonik üreten yüklerin varlığını tespit etmiştir. Ayrıca aynı metot ve indisler, 4. ölçüm noktası için diğer ölçüm noktaları ile karşılaştırıldığında dikkate değer miktarda küçük ancak ölçülebilen değerlere sahiptir. Bu durum HG, UA ve LA metotları/indislerinin pratik sistemlerde başarılı bir şekilde kullanılabilmesi için eşik değer tanımlama gerekliliğini işaret etmektedir.

Son olarak 1., 2. ve 3. ölçüm noktarı için gözlenen normalize edilmiş D_{sc} değerleri daha önceki bölümlerde yapılan analizlerde doğrusal yükler için ölçülen eşik değerin (0.05 N) üzerindedir. Bu sebeple bu noktalara bağlı yükler D_{sc} metodu tarafından harmonik üreten yük olarak doğru tespit edilmiştir. 4. ölçüm noktası için gözlenen normalize edilmiş D_{sc} değeri ise bu eşik değerin altında kaldığı için bu noktaya bağlı yük D_{sc} metodu tarafından doğrusal yük olarak hatasız bir şekilde tespit edilmiştir.

6. TARTIŞMA/SONUÇ

Harmonik bozulmanın ölçümüne ilişkin geleneksel metot olan gerilim ve akım toplam harmonik bozulma indisleri (THDV ve THDI) harmonik kaynaklarının tespiti için yeterli değildir. Bunun sebebi özellikle pasif kapasite ile kompanze edilmiş doğrusal yüklerin harmonikli gerilimler altında yüksek THDI'ya sahip akımlar çekmesidir. Ayrıca hat akımı harmoniklerinin hem kaynak tarafı gerilim harmoniklerine hem de yük akımı harmoniklerine bağlı olması THDI indisinin harmonik üreten yüklerin tespitinde diğer bir engeldir. Bu sebeple literatürde harmonik kaynağı tespiti ve harmonik sorumluluk paylaşımı için çeşitli metotlar/indisler tanımlanmıştır. Bunlardan bir kısmı detaylı sistem modeline ihtiyaç duymaları sebebiyle pratik kullanıma uygun değildirler. Diğer kısmının doğruluğu ise kaynak tarafı gerilim harmonik bozulmasından ve reaktif güç kompanzasyonundan etkilenmektedir. Bu problemlerden dolayı konuyla ilgili literatürde hala bir boşluk mevcuttur.

Kaydırılmış iletkenlik gücünün gerilim harmoniklerine karşı hassas olmaması ve reaktif güç kompanzasyonundan etkilenmemesi D_{sc}'nin literatürde var olan tek noktadan eş zamanlı olmayan ölçümler (TNEOÖ) temelli harmonik üreten yük (HÜY) tespit metotları ve indislerine göre en büyük avantajıdır.

Diğer taraftan kaydırılmış iletkenlik gücünün ölçümüne dayanan metodun, güç ölçümüne dayanması sebebiyle tüketicilere ait özel dizayn edilmiş enerji sayaçlarının çıktısı harmonik üreten yüklerin tespit edilmesi için kâfidir. Bundan dolayı bu metot büyük dağıtım sistemlerinde pratik bir şekilde uygulanmaya müsaittir.

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, literatürde ulaşılan TNEOÖ temelli HÜY tespit metotlarının başarım sınırları çok çeşitli yük tiplerinin bulunduğu küçük bir test sisteminde hattın çeşitli X/R oranları, kaynak geriliminin farklı THD seviyeleri ve harmonik spektrumları için istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Ayrıca TNEOÖ temelli metotların gerçek saha uygulaması için Labview tabanlı prototip bir ölçüm cihazı geliştirilmiştir. Böylece büyük bir test sisteminde literatürde var olan metotlar/indisler için gerçek zamanlı ve uzun süreli ölçümler alınmış, bu ölçüm sonuçları karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

KAYNAKLAR

[1] Arrilaga J., Watson N. R., Chen S., (2000), "Power System Quality Assessment", 1th Edition, John Wiley &Sons.

[2] Kocatepe C., Uzunoğlu M., Yumurtacı R., Karakaş A., Arıkan O., (2003), "Elektrik Tesislerinde Harmonikler", 1.Baskı, Birsen Yayınevi.

[3] Singh G. K., (2009), "Power System Harmonics Research: a Survey", European Transaction On Electrical Power, 19, (2), 151–172.

[4] IEEE, (1993), "Recommended Practices and Requirements for Harrmonic Control in Electrical Power Systems", Standard 519-1992, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

[5] IEC, (2000), "Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Less Than 16A", 61000 3-2, International Electrotechnical Commission.

[6] IEC, (1998), "Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current Greater Than 16A", 61000 3-4, International Electrotechnical Commission.

[7] IEC, (1996), "Assesment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems", 61000 3-6, International Electrotechnical Commission.

[8] EC, (2000), "Testing and Measurement Techniques – General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto", Standard 61000-4-7, International Electrotechnical Commission.

[9] IEC, (2000), "Testing and Measurement Techniques-Power Quality Measurement Methods", Standard 61000-4-30, International Electrotechnical Commission.

[10] EN, (2000), Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, 50160, European Norms.

[11] Balci M. E., Hocaoglu M. H., (2008), "Quantitative Comparison of Power Decompositions", Electric Power Systems Research, 78, (3), 318-329.

[12] Balci M. E., Hocaoglu M. H., (2006), "New Power Decomposition for Sinusoidal and Nonsinusoidal Conditions", The 12th International Conference on Power Harmonics & Quality of Power, 141-147, Cascais, Portugal, September.

[13] Ortiz A., Manana M., Renedo C. J., Perez S., Delgado F., (2011), "A New pproach to Frequency Domain Power Measurement Based on Distortion Responsibility", Electric Power System Research, 81, 202-208.

[14] Srinivasan K., Jutras R., (1998), "Conforming and Non-Conforming Current for Attributing Steady State Power Quality Problems", IEEE Transaction on Power Delivery, 13, (1), 212-217.

[15] Dell'Aquila A., Marinelli M., Monopoli V. G., Zanchetta P., (2004), "New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Systems under Unbalanced and Nonsinusoidal Conditions", IEEE Transaction on Power Delivery, 19, (3), 1284-1290.

[16] Locci N., Muscas C., Sulis S., (2007), "On the Measurement of Power-Quality Indexes for Harmonic Distortion in the Presence of Capacitors", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 56, (5), 1871-1876.

[17] Xu W., Liu Y., (2000), "A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling", IEEE Transaction on Power Delivery, 15, (2), 804–811.

[18] Silva S. F. P, Olivera J. C., (2008), "The Sharing of Responsibility between the Supplier and the Consumer for Harmonic Voltage Distortion: A Case Study", Electric Power Systems Research, 78, 1959-1964.

[19] Pfajfar T., Blažič B., Papič I., (2008), "Harmonic Contributions Evaluation with the Harmonic Current Vector Method", IEEE Transaction on Power Delivery, 23, (1), 425-433.

[20] Chaoying C., Xiuling L., Koval D., Xu W., Tayjasanant, T., (2004), "Critical Impedance Method - a New Detecting Harmonic Sources Method in Distribution Systems", IEEE Transaction on Power Delivery, 19, (1), 288- 297.

[21] Xu W., Liu X., Liu Y., (2003), "An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination," IEEE Transaction on Power Delivery, 18, (1), 214-219.

[22] Cataliotti A., Cosentino V., Ippolito M. G., Morana G., Nuccio S., (2007), "Single-point Strategies for the Detection of Harmonic Sources in Power Systems", 9th International Conference on Electric Power Quality and Utilisation, 431-443, Barcelona, Spain, 9-11 October.

[23] Barbaro P. V., Cataliotti A., Cosentino V., Nucci S., (2007), "A Novel Approach Based on Nonactive Power for the Identification of Disturbing Loads in Power Systems", IEEE Transaction on Power Delivery, 22, (3), 1782-1789.

[24] Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S., (2008), "Comparison of Nonactive Powers for the Detection of Dominant Harmonic Sources in Power Systems," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 57, (8), 1554-1561.

[25] Cataliotti A., Cosentino V., (2009), "Disturbing Load Identification in Power Systems: A Single-Point Time-Domain Method Based on IEEE 1459-2000", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 58, (5), 1436-1445

[26] Cataliotti A., Cosentino V., (2010), “A New Measurement Method for the Detection of Harmonic Sources in Power Systems Based on the Approach of the IEEE Std 1459-2000”, IEEE Transaction on Power Delivery, 25, (1), 332-340.

[27] Cataliotti A., Cosentino V., (2010), “Disturbing Load Detection in Three-Wire and Four-Wire Systems Based on Novel Nonactive Powers From IEEE 1459-2000”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 59, (5), 1082-1092.

[28] Perera S., Gosbel V. J., Sneddon B., (2002), “A Study on the identification of Major Harmonic Sources in Power Systems” , Australasian Universities Power Engineering Conference, 39-49, Melbourne, Australia, 26-29 October

[29] Davis E. J., Emanuel A. E., Pileggi D. J., (2000), “Evaluation of Single-Point Measurements Method for Harmonic Pollution Cost Allocation”, IEEE Transaction on Power Delivery, 15, (1), 14-18.

[30] Cristaldi L., Ferrero A., (1995), “Harmonic Power Flow Analysis for the Measurement of the Electric Power Quality”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 44, (3), 683–685.

[31] Aiello M., Cataliotti A., Cosentino V., Nuccio S., (2005), “A Self-Synchronizing Instrument for Harmonic Source Detection in Power Systems”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 54, (1), 15–23.

[32] Ferrero A., Menchetti A., Sasdelli R., (1996),”Measurement of the Electric Power Quality and Related Problems”, European Transactions on Electrical Power, 6, (6), 401–406.

[33] Muscas C., (1998), “Assessment of Electric Power Quality: Indices for Identifying Disturbing Loads”, European Transactions on Electrical Power, 8, (4), 287–292.

[34] Crstaldi L., Ferrero A., Salicone S., (2002), “A Distributed System for Electric Power Quality Measurement”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 51, (4), 776-781.

[35] Omran W.M., (2009), “Identification and Measurement of Harmonic Pollution for Radial and Nonradial Systems”, IEEE Transaction on Power Delivery, 24, (3), 1642-1650.

[36] Santos N. I., de Oliveira J. C., de Paula Silva S. F., (2011), “Critical analysis of the harmonic power flow method to determine the dominant distortion source,” Power Electronics Conference (COBEP), 136-141, Brazil, 11-15 September.

[37] Czarnecki L. S., (2011), “Working, reflected and detrimental active Powers”, IET Generation, Transmission & Distribution, 6, (3), 233-239.

[38] Nath S., Sinha P., Goswami S. K, (2012), "A wavelet based novel method for the detection of harmonic sources in power systems", International Journal Electrical Power &Energy Systems, 40, (1), 54–61.

[39] Balci M. E., Hocaoglu M. H.,(2010), "On the validity of harmonic source detection methods and indices", 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 1-5, Bursa, Turkey, 26-29 September.

[40] Reyes S., Herrera P. S, (2012), "Harmonic disturbance identification in electrical systems with capacitor banks", Electric Power Systems Research, 82, (1), 18-26

[41] De Andrade G. V., Naidu S. R., Neri M., da costa E. G., (2009), "Estimation of the Utility's and Consumer's Contribution to Harmonic Distortion", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 58, (11), 3817-3823.

[42] Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayandehroodi H., (2012), "An enhanced method for contribution assessment of utility and customer harmonic distortions in radial and weakly meshed distribution systems", International Journal Electrical Power &Energy Systems, 43, (1), 222–229.

[43] Cataliotti A., Cosentino V., (2010), "A New Measurement Method for the Detection of Harmonic Sources in Power Systems Based on the Approach of the IEEE Standard 1459–2000", IEEE Transaction on Power Delivery, 25, (1), 332-340.

[44] Ferrero A., (2008), "Measuring electric power quality: Problems and perspectives", Measurement,41, (2), 121 -129.

[45] Balcı M. E., Karacasu Ö., Öztürk D., Hocaoğlu M. H., (2009), "Harmonik Üreten Yükler için Yeni Bir Model", 3e Electrotech 177, 194-202.

[46] IEEE, (2002), "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions", Standard 1459-2010, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

[47] Proakis J. G., (2001), "Digital Communications",1th Edition, Mc Graw Hill Higher Education,.

[48] Balci M. E., (2009), "Harmonik Üreten Yüklerin Belirlenmesi ve Optimum Kompanzasyon için Yeni Bir Güç İfadesi", Doktora Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

[49] DIN, (1994-2002), "Part 1: Single-Phase Circuits March, and Part 2: Polyphase Circuits", 40110, German Standard.

[50] Buchholz F., (1950), "Das Begriffsystem Rechtleistung, Wirkleistung, totale Blindleistung",1th Ausgabe, Selbstuerlag

[51] Willems J. L., Ghijselen J. A., Emanuel A. E., (2005), ‘‘The Apparent Power Concept and the IEEE Standard 1459-2000’’, IEEE Transaction on Power Delivery, 20, (2), 876 – 884.

[52] Willems J. L., Ghijselen J. A., Emanuel A. E., (2005), ‘‘Addendum to the Apparent Power Concept and the IEEE Standard 1459-2000’’, IEEE Transaction on Power Delivery , 20, (2), 885 – 886.

[53] Ribeiro P.F., (2008), ‘‘Common Misapplications of the IEEE 519 Harmonic Standard: Voltage or Current Limits’’, IEEE Power and Energy Society General Meeting, 21,(4), 931-934

[54] Stevanovic D., Petkovic P., (2014), “A Single-Point Method Based On Distortion Power For The Detection Of Harmonic Sources In A Power System”,Metrology And Measurement Systems, 21, (1), 3-14.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Türker TAKCI 1988 yılında Hatay'da doğmuştur. İlk öğrenimini Hatay'da, orta öğrenimini Edirne Süleyman Demirel Fen Lisesinde tamamlayıp, lisans eğitimini Gebze YüksekTeknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliğinde almıştır. 2012 yılından itibaren Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde yüksek lisans öğrencisi olup, 2013 Şubat ayından itibaren aynı yerde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.