

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAĞITIM SİSTEMLERİNDE HARMONİKLİ
GÜÇ AKIŞI ALGORİTMALARININ VE YÜK
MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ONUR ÖZTÜRK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE

2011

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DAĞITIM SİSTEMLERİNDE HARMONİKLİ
GÜÇ AKIŞI ALGORİTMALARININ VE YÜK
MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ONUR ÖZTÜRK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DOÇ. DR. M.HAKAN HOCAOĞLU

GEBZE

2011

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI :DAĞITIM SİSTEMLERİNDE HARMONİKLİ GÜÇ AKIŞI ALGORİTMALARININ VE YÜK MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

YAZAR ADI :ONUR ÖZTÜRK

Güç akışı analizi, güç sistemlerinde bilinmeyen gerilim ve\veya güç değerlerinin kısıtlamalar altında bulunmasını amaçlar. Böylece bulunan sonuçlara göre sistem planlanabilir ve en iyi şartlarda çalıştırılabilir. İletim sistemleri için kullanılan geleneksel güç akışı algoritmaları dağıtım sistemlerinin güç akışı hesabında yetersiz olabilmektedir. Diğer taraftan güç sistemlerinde harmonik üreten yüklerin artmasıyla birlikte güç akışı algoritmalarının yeniden ifade edilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu sebeplerden dolayı dağıtım sistemleri için harmonik güç akışı algoritmaları geliştirilmiştir. Bu algoritmalar, geleneksel güç akışının verilerine ek olarak sistemdeki akım ve gerilim harmonik bozulma miktarları, rezonans problemleri ve harmonik kaynaklarının yerleri hakkında da bilgi vermeleri açısından önemli araçlardır. Algoritmaların güvenilirliği sadece algoritmaların yapılarına değil harmonik üreten yük modelinin hassasiyetine de bağlıdır. Bu açıdan harmonik üreten yüklerin hassas bir şekilde modellenmesi önemli bir konudur.

Bu çalışmada literatürde bulunan harmonik güç akışı algoritmaları hakkında bilgi verilmiş ve laboratuvar şartlarında elde edilen çeşitli yük modelleri ile 3 baralı bir sistem için deneysel olarak uygulanmıştır. Analiz sonuçları ölçüm verileri ile karşılaştırılmış ve algoritmalar hata oranlarına göre değerlendirilmiştir. Ayrıca algoritmalar yük modellerine göre karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Analiz sonucunda hesaplanan temel harmonik gerilimleri ile ölçülen temel harmonik gerilim etkin değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Diğer taraftan elde edilen THD sonuçları karşılaştırıldığında algoritmalar arasında küçük değerlerde farkların olduğu tespit edilmiştir. 3 baralı test sistemi için algoritmalarından elde edilen sonuçların teyidi yapıldıktan sonra algoritmalar 10 ve 69 baralı radyal dağıtım test sistemleri için uygulanmış ve parametrik analizler yapılarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

SUMMARY

**TITLE OF THE THESIS : COMPARISON OF THE DISTRIBUTION
SYSTEM HARMONIC POWER FLOW
ALGORITHMS AND LOAD MODELS**

AUTHOR : ONUR ÖZTÜRK

A power flow study aims to obtain unknown voltages and/or power quantities under constraints of the systems. Thus, according to obtained results, the system can be planned and operated under optimal conditions. Conventional load flow algorithms used for transmission system may become inefficient in the load flow evaluation of the distribution system. On the other hand, with the continuous increase of the harmonic producing loads, the need of reformulation of conventional power flow algorithms have been arisen. Due to this fact, harmonic power flow algorithms for distribution systems are developed. The algorithms are very important tools due to the fact that they give information on the level of harmonic distortions of voltage and current waveforms, occurrence of resonance problems and location of the harmonic sources. Reliability of the algorithms depends on not only the structure of the algorithms but also sensitivity of the harmonic producing load models. In this respect, accurate modelling of harmonic producing loads is another important issue that is addressed in this thesis.

In this study, a detailed and critical review on the harmonic power flow algorithms is provided. In addition to that, the reviewed algorithms applied to an experimental 3 bus test system. The results are validated against the measured data. Furthermore the algorithms are examined comparatively through load models. It's seen that the fundamental harmonic voltages calculated after analysis and the effective values of measured fundamental harmonic voltages are similar. On the other hand when the THD results are compared it's determined that there are small discrepancies between the algorithms. After the verification process they are implemented to 10 and 69 bus radial distribution test systems and the results are discussed.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince bilgi ve tecrübeleriyle bana yardımcı olan ve yol gösteren değerli tez danışmanım Sayın Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na, tecrübesini ve mesaisini paylaşmaktan hiç çekinmeyerek bana her zaman ve her konuda yardımcı olan değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım. Değerli bilgilerini benden esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Erhan BALCI'ya, beni destekleyip kendime güvenmemi sağlayan Sayın Arş. Gör. Özgür KARACASU'ya, değerli görüş ve önerileri için Sayın Dr. Tuba GÖZEL'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Proje asistanı olarak görev aldığım, Tübitak tarafından desteklenen 106E132 nolu "*Harmonikli Sistemlerde Güç Akışı İçin Yeni Bir Yük Modeli Geliştirmek*" başlıklı projeye maddi yardımlarından dolayı teşekkür ederim.

Bitirme tezim için yaptığım çalışmalarda bana destek olan arkadaşlarım Ahmet YILMAZ, H. Arda ÜLKÜ, Ceyhun SEZENÖĞLU, Türev SARIKURT, M. Burak ÖZAKIN, Ahmet KÖKSOY'a, Dinçer ÖZTÜRK'e, Mustafa ÜNAL'a bana her zaman güvenen ve maddi-manevi anlamda destek olan değerli aileme ayrı ayrı teşekkür eder sevgilerimi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	İV
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	İX
TABLolar DİZİNİ	XIII
1 GİRİŞ	1
1.1 Arka Plan	2
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Tezin Sınırları	3
1.4 Tezin İçeriği	3
2 ENERJİ DAĞITIM SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI METODLARI	5
2.1 Dağıtım Sistemlerinde Güç Akışı Analizi	5
2.2 Sweep Temelli Güç Akışı Algoritmaları	6
2.2.1 Kirchoff Gerilim Yasası Kullanılarak Geliştirilen Sweep Temelli Algoritmalar	8
2.2.2 Kuadratik Denklem Kullanılarak Geliştirilen Sweep Temelli Algoritmalar	12
2.3 Uygulama	16
2.4 Sonuç ve Özet	20
3 HARMONİK YÜK MODELLERİ	21
3.1 Harmonik Üreten Yük Modelleri	21

3.1.1	Sabit Akım Kaynağı Modeli	22
3.1.2	Norton Eşdeğer Devre Modeli	23
3.1.3	Çapraz Frekans Admitans Matrisi Modeli	26
3.1.4	GYTE Harmonik Üreten Yük Modeli	28
3.2	Sayısal Uygulama	31
3.3	Sonuç ve Özet	34
4	DAĞITIM SİSTEMLERİNDE HARMONİKLİ GÜÇ AKIŞI	36
4.1	Harmonik Güç Akışı Algoritmaları	36
4.1.1	Harmonik Etkileşim Analizi	37
4.1.2	İteratif Harmonik Etkileşim Analizi	39
4.1.3	Basit Harmonik Güç Akışı	41
4.1.4	Tam Harmonik Güç Akışı	43
4.2	Gerçek Sistem Üzerinde Uygulama	45
4.3	Sonuç ve Özet	48
5	UYGULAMA	50
5.1	10 Baralı Sistem Üzerinde Uygulama	50
5.2	Büyük Sistem Üzerinde Uygulama	56
6	SONUÇLAR	61
	KAYNAKLAR	63
	ÖZGEÇMİŞ	72
	EK	73

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

THD _x	Akım (yada Gerilimin) toplam harmonik bozulma oranı.
HE	Harmonik Etkileşim
IHE	İteratif Harmonik Etkileşim
BHGA	Basit Harmonik Güç Akışı
THGA	Tam Harmonik Güç Akışı
HÜY	Harmonik Üreten Yük
SAK	Sabit Akım Kaynağı
NED	Norton Eşdeğer Devresi
ÇFAM	Çapraz Frekans Admitans Matrisi
GYTE	Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
KVL	Kirchoff Voltage Law
BIBC	Bus Injection to Branch Current
BCBV	Branch Current to Bus Voltage
TFGA	Temel Frekans Güç Akışı
HA	Harmonik Analiz
DG	Düğüm Gerilimleri
V_s	Hat başı bara gerilimi
V_r	Hat sonu bara gerilimi
I_s	Hat akımı
P_r	Hat sonu barasına transfer edilen net aktif güç
Q_r	Hat sonu barasına transfer edilen net reaktif güç
P_s	Hat başı barasındaki aktif gücü
Q_s	Hat başı barasındaki reaktif gücü
θ_z	Empedans açısı
δ	Bara gerilim açısı
I_k	k. baraya ait akım etkin değeri
S_k	k. baraya ait görünür güç
V_k	k. baraya ait bara gerilimi

I_L	Hat akımı
S	Görünür güç.
P	Aktif güç.
$P_{loss_{i,j}}$	i. ve j. baralar arasındaki kayıp aktif güç
$Q_{loss_{i,j}}$	i. ve j. baralar arasındaki kayıp reaktif güç
δ_r	Kaynak tarafındaki bara gerilim açısı
$I_{N,h}$	NED modelinde Norton Akım Kaynağının h. harmonik akım değerleri
$Z_{N,h}$	NED modelinde Norton empedansının h. harmonik değeri
V_h^N	N. Baranın h. harmonik gerilimi

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 İki baralı basit bir dağıtım sistemi devre şeması	7
2.2 Shirmohammadi'ye ait algoritmanın akış diyagramı	9
2.3 Thukaram'a ait algoritmanın program akış diyagramı	10
2.4 (a) BIBC (b)BCBV matrislerinin oluşturulmasına ait akış diyagramı	11
2.5 [45]' da verilen algoritmanın akış diyagramı	12
2.6 Haque'e ait algoritmanın akış diyagramı	14
2.7 [49] ve [50] çalışmalarına ait algoritmaların akış diyagramı	15
2.8 Sweep temelli güç akışı algoritmaları ile hesaplanan bara gerilimleri	19
3.1 Sabit akım kaynağı modeli	22
3.2 Norton Eşdeğer Devre Modeli	24
3.3 GYTE harmonik üreten yük modeli	30
3.4 Harmonik üreten yüklerin oluşturulduğu test sistemi	31
3.5 Yük modeli için oluşturulan devre şeması	32
3.6 Dimmer kontrollü yüke ait akım dalga şekli	32
4.1 HE analizinin program akış diyagramı	38
4.2 IHE analizine ait akış diyagramı	40

4.3 BHGA'ya ait akış diyagramı	42
4.4 THGA'ya ait algoritma akış diyagramı	44
4.5 üç baralı gerçek test sistemi	45
5.1 10 baralı radyal dağıtım sistemi	50
5.2 SAK modeli için harmonik güç akışı sonuçları	51
5.3 NED modeli için harmonik güç akışı sonuçları	52
5.4 HE analizi için tolerans değerine göre iterasyon sayısının değişimi	53
5.5 IHE analizi için HA bloğundaki iterasyon sayısının toleransa göre değişimi	54
5.6 BHGA algoritmasında iterasyon sayısının tolerans değerine göre değişimi	54
5.7 THGA algoritmasında tolerans değerine göre iterasyon sayısının değişimi	55
5.8 69 baralı sistemde SAK modeli için temel harmonik ve THD sonuçlarının algoritmalara göre grafiği	58
5.9 69 baralı sistemde NED modeli için temel harmonik ve THD sonuçlarının algoritmalara göre grafiği	59

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Geliştirilen sweep temelli algoritmaların genel yapısı	16
2.2 69 baralı radial test sistemi için algoritmaların iterasyon sayıları	17
2.3 12 baralı dağıtım sisteminin güç akışı analizlerinden elde edilen bara gerilimleri ve açıları	18
3.1 üç baralı sistemde farklı harmonik akım değerleri	32
3.2 250V kaynak geriliminde yük barasının gerilimi ve yük akımı	33
3.3 225V kaynak gerilimi altında yük barasının gerilimi ve yük akımı	33
3.4 NED modeli parametreleri harmonik değerleri	33
3.5 GYTE yük modeli için hesaplanan model parametreleri	34
4.1 Baralara ait temel harmonik gerilimi ve bozulma değerleri	45
4.2 iki numaralı baraya ait analiz sonuçları ve ölçülen değerler arasındaki hata oranı	47
4.3 üç numaralı baraya ait analiz sonuçları ve ölçülen değerler arasındaki hata oranı	47
5.1 10 baralı sisteme ait hat ve yük bilgileri	50
5.2 SAK ve NED model parametrelerine ait katsayılar	51

5.3 1. ve 2. durumlar için algoritmalara göre iterasyon sayıları	55
5.4 Model parametreleri için belirlenen katsayılar	56

1 GİRİŞ

Elektrik; kullanımı, üretimi ve iletimi kolay, yüksek verimli bir enerji türüdür. Su, rüzgâr, güneş gibi doğal ve yenilenebilir kaynaklardan üretilebildiği gibi fosil ya da nükleer yakıtlar kullanılarak da üretilebilmektedir. Teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesine paralel olarak elektrik enerjisine olan talep de gün geçtikçe artmaktadır. Günlük hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelen elektrik enerjisi birincil kaynağın bulunduğu yere bağlı olarak yerleşim yerlerinin uzağında bulunan kaynaklardan da üretilebilmektedir. Bu durumda uzun mesafelerden taşınan enerjinin iletim kayıplarını azaltmak amacıyla transformatörler ile yüksek değerlere çıkarılır. Bu yüksek gerilimler dağıtım noktasında tekrar transformatörler aracılığıyla küçük değerlere indirilerek son kullanıcılara dağıtılır. İletilen enerjiden azami yarar sağlamak için kaliteli olması gerekir. Kaliteli elektrik enerjisi, şebekenin tanımlanan bir noktasında, gerilimin genlik ve frekansının anma değerlerini koruması ve gerilim dalga formunun sinüs biçiminde olmasıdır. Günümüzde güç elektroniği elemanları, anahtarlamalı güç kaynakları, ark ocakları, motor sürücüleri gibi V-I karakteristiği açısından lineer olmayan yüklerin kullanımı artmıştır. Lineer olmayan yükler şebekeden dalga formu sinüzoidal olmayan akımlar çeker. Diğer bir deyişle bu yükler şebeke frekansından farklı frekanslarda akımlar çekmektedirler. Bu akımlar şebekede, şebeke frekansının dışındaki frekanslarda da gerilim düşümü oluşturarak şebekedeki gerilim ve akım dalga formlarını bozmaktadır. Sinüzoidal olmayan akım ve gerilimlerin, motor, transformatör, kompanzasyon kapasitesi ve bunun gibi güç sistemi elemanlarının çalışma verimlerini ve ömürlerini azalttığı literatürde var olan çalışmalarda belirtilmiştir [1]

Enerji sistemlerinde meydana gelebilecek değişimlerin öngörülmesi ve şebekenin en iyi şekilde uzun vadeli planlanması için büyük önem taşıyan güç akışı analizi, lineer olmayan yüklerin kullanıldığı durumlar için yetersiz kalmaktadır. Güç akışı analizleri, sistemde bilinmeyen gerilim ve güç değerlerini belirlemek için uygulanır. Geleneksel güç akışı algoritmaları sadece temel frekansta hesap algoritmalarına sahiptir. Fakat lineer olmayan yüklerin bulunduğu sistem için diğer frekanslar için de analiz yapılması gerekir. Literatürde lineer olmayan yüklerin de hesaba katıldığı harmonik güç akışı metotları geliştirilmiştir. Harmonik güç akışı

analizi, geleneksel güç akışından elde edilen verilere ek olarak akım ve gerilimlerdeki harmonik bozulma miktarı (THD) ve harmonik kaynakları hakkında da bilgi verir [2]-[3].

1.1 Arka Plan

Literatürde harmonik analiz metotları ile ilgili çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalar frekans domeyni harmonik analizleri ve zaman domeyni harmonik analiz yöntemleri olmak üzere iki ana başlık halinde [4]. Zaman domeyni harmonik analizleri doğruluk yönünden daha iyi sonuçlar vermelerine rağmen daha fazla işlem yükü gerektirdiğinden ve temel frekansta güç akışı kısıtlarına dahil edilemeyeşinden dolayı genellikle frekans domeyni harmonik analizleri tercih edilmektedir. Literatürde yer alan frekans domeyni harmonik güç akışı algoritmaları; Harmonik Etkileşim analizi (HE) [5]-[6], İteratif Harmonik Etkileşim Analizi (İHE) [7]-[8], Basitleştirilmiş Harmonik Güç Akışı (BHGA) ve Tam Harmonik Güç Akışı (THGA) [9]-[10] algoritmalarıdır. Bu algoritmalar iletim ve dağıtım için uygulanabilmektedir. Dağıtım sistemlerinin radyal yapısından dolayı güç akışı algoritmalarında yakınsama problemleri oluşabildiğinden dolayı dağıtım sistemleri için güç akışı konusu ayrı bir önem arz etmektedir. Harmonik güç akışı analiz sonuçlarının güvenilirliği sadece algoritmaların yapısına değil, aynı zamanda analizlerde kullanılan harmonik üreten yük (HÜY) modellerine de bağlıdır. HÜY modellerinin hassas biçimde modellenmesi harmonik güç akışı algoritmalarının doğruluklarını da arttıracaktır. Literatürde bulunan ve bu tezde incelenecek olan başlıca HÜY modelleri; Sabit Akım Kaynağı (SAK) modeli [4], [11]-[12], Norton Eşdeğer Devre (NED) modeli [13]-[16], Çapraz Frekans Admitans Matrisi (ÇFAM) modelidir [15]-[16].

1.2 Tezin Amacı

Harmonikler arası etkileşimin ve sistemde bulunan her bir baradaki harmonik gerilim genliklerinin ve THD oranının belirlenmesi için literatürde var olan dört algoritmanın elektrik dağıtım sistemleri için uyarlanması ve geliştirilen algoritmaların çeşitli harmonik üreten yük modelleri ile denenmesi bu tezde amaçlanmıştır.

1.3 Tezin Sınırları

Tez içerisindeki harmonik güç akışı algoritmaları, elektrik dağıtım sistemleri için geliştirilmiştir. Bu algoritmalar dağıtım sistemlerinin tek faz eşdeğeri göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Bu konu ile ilgili literatürde bulunan harmonik güç akışı metotlarından sadece HE, İHE, BHGA, THGA metotları ele alınmıştır. Ayrıca bu metotlar literatürde bulunan dört yük modeli için uygulanmıştır. Bu yük modelleri Sabit Akım Kaynağı (SAK) modeli, Norton Eşdeğer Devre (NED) modeli, Çapraz Frekans Admitans Matrisi (ÇFAM) modeli, GYTE yük modelidir.

1.4 Tezin İçeriği

Tez altı ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm, giriş bölümü olup tezin amacı ve kapsamı hakkında bilgiler verilmiştir.

Tezin ikinci bölümünde, literatürde bulunan güç akışı analiz metotları ele alınmış ve bu metotlardan dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan sweep temelli güç akışı metotları anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde HÜY modelleri incelenmiştir. Literatürde var olan modeller kısaca tanıtılmıştır. Bu bölümde dört farklı yük modeli üzerinde durulmuştur. Laboratuvar ortamında oluşturulan harmonik yük grubu, bu bölümde anlatılan esaslara göre modellenmiştir. Ayrıca yine laboratuvar ortamında kurulan harmonik yük grubunun bağlı olduğu üç baralı test sisteminde ölçülen değerler ile oluşturulan yük modellerinin HGA metotlarına uygulanması sonucunda elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Dördüncü bölümde HGA hakkında genel bir bilgi verilmiştir ve dört metot ele alınmıştır. Metotlar farklı yük modelleri kullanılarak on baralı radial dağıtım şebekesi için denenmiştir. Elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Beşinci bölümde, IEEE'nin temel harmonik güç akışı için oluşturduğu 69 baralı radial test sisteminde, bazı baralarda harmonik yük bulunduğu kabul edilerek

yukarıda bahsi geçen HGA metotları farklı yük modelleri için denenmiştir. Sonuçlar grafikler halinde verilmiştir.

Altıncı bölümde yapılan çalışmalar ışığında sonuçlar özetlenmiş ve gelecek çalışmalara ilişkin açıklamalar verilmiştir.

2 ENERJİ DAĞITIM SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI METODLARI

Bu bölümde dağıtım sistemlerinde güç akışı analizi ile ilgili literatür taraması ve literatürdeki algoritmalar hakkında genel bir bilgi verilmiştir. Sweep temelli algoritmalar iki ana başlık halinde incelenerek, sweep temelli algoritmaların geliştirilmesine ilişkin esaslar program akış diyagramları eşliğinde verilmiştir.

2.1 Dağıtım Sistemlerinde Güç Akışı Analizi

Son yıllarda elektrik enerjisine duyulan ihtiyacın gün geçtikçe teknolojik gelişmelere paralel olarak artması, devredeki enerji kaynaklarından en iyi biçimde faydalanmayı zorunlu hale getirmiştir. Kaynaklardan azami derecede faydalanabilmek için enerji sisteminin elektriksel parametrelerinin belirlenmesi ve gerekli durumlarda bu parametrelere göre sistemin optimizasyonu yapılmalıdır. Enerji sistemine ait elektriksel verilerin elde edilmesi için literatürde güç akışı analizleri geliştirilmiştir. 1980'lerin sonlarına kadar güç akışı analizi iletim sistemleri için gerçekleştirilmekte iken dağıtım sistemlerinde kısa devre ve gerilim düşümü hesabı yapılmakta, güç akışı analizine ihtiyaç duyulmamaktaydı. Fakat bazı teknolojik gelişmeler ve uygulamalar bu sistemlerde güç akışı hesabının yapılması ihtiyacını doğurmuştur. Bunlar:

- SCADA sistemlerinin kullanılması
- Kompanzasyon tesislerinin güçlerinin ve yerleştirilcekleri en uygun yerlerin belirlenmesi
- FACTS cihazlarının dağıtım sistemlerinde kullanılması
- Sistem kayıplarının en aza indirilmesi için yeniden yapılandırılması

gibi uygulamalardır.

Elektrik dağıtım sistemleri genellikle radyal yapıya sahip olduğundan güç akışı tek yönlüdür. İletim sistemlerinde ise güç akışı çift yönlü olabilir. Dağıtım sistemlerinde yer altı kablolarının daha çok kullanılması nedeni ile R/X oranı 1' den büyük olabilmektedir. İletim sistemlerinde bu oran genellikle 1'den çok küçüktür. Bu

oranın küçüklüğünden dolayı iletim sistemlerinde hat direnci, hat reaktansının yanında ihmal edilirken, dağıtım sistemlerinde R/X oranının büyük olması direnç gerilim düşümü ve hat kayıpları büyük önem taşımaktadır. Bunun yanı sıra dağıtım sistemleri tek faz, iki faz, üç fazlı hatlara sahip olabildiğinden dengesiz bir yapıya sahiptir. Bu dengesizlik ve çok büyük ve küçük değerlerin aynı matriste olmasından dolayı sistem matrisleri genellikle ill-conditioned'dır. Yani matristeki değerlerde çok az bir değişim nümerik adımlar arasında çok büyük değişikliklere neden olmaktadır. Dağıtım sistemlerinin bu özelliklerinden dolayı Newton-Raphson Gauss-Seidel gibi geleneksel güç akışı metotları dağıtım sistemlerinin güç akışı hesabında yetersiz olabilmektedir [19]-[20].

Dağıtım sistemlerinde güç akışı için bir çok algoritma geliştirilmiştir [21]-[53]. Bu algoritmaları iki gruba ayırmak mümkündür.

- Geleneksel algoritmaların radyal sistemlere uygun olarak geliştirilmiş şekli
- Kirchoff Akım ve Gerilim kanunu yada kuadratik denklem (hat parametreleri ve hattın transfer edilen güçlerden oluşan gerilim denklemi) kullanılarak radyal sistemlerde ileri yönde gerilimlerin, geri yönde akımların hesaplanmasına dayanan sweep temelli algoritmalarıdır.

2.2 Sweep Temelli Güç Akışı Algoritmaları

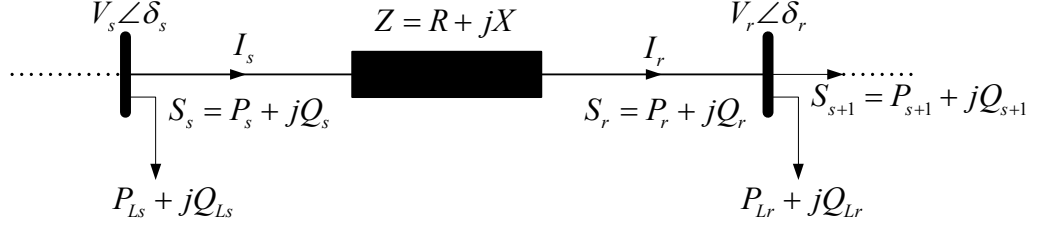
Sweep temelli algoritmalar, dağıtım sistemlerinin radyal yapısı esas alınarak geliştirilmiştir. Sweep temelli algoritmalar, geleneksel güç akışı algoritmalarına göre daha güvenilir olup performansları da daha yüksektir [37]. Literatürde bulunan sweep temelli algoritmalar iki grupta incelenebilir.

- Kirchhoff Gerilimler Kanunu (KVL) kullanılarak geliştirilen sweep temelli algoritmalar [38]-[48].
- Kuadratik denklem kullanılarak geliştirilen sweep temelli algoritmalar [49]-[52].

İlk gruptaki algoritmalarda denklem (2.1) ve (2.2)'deki KVL denklemleri kullanılarak hat sonu bara gerilimleri hesaplanır.

$$\vec{V}_s = \vec{V}_r + \vec{I}_s \vec{Z} \quad (2.1)$$

$$\vec{V}_r = \vec{V}_s - \vec{I}_s \vec{Z} \quad (2.2)$$



Şekil 2.1 İki baralı basit bir dağıtım sistemi devre şeması

İkinci gruptaki algoritmalar sweep temelli algoritmalar ise Şekil 2.1’de verilen basit bir sistem için devrede hattan transfer edilen aktif ve reaktif güç ifadelerini kullanarak elde edilen 4. Dereceden polinom (kuadratik) denklemlerinden yararlanırlar. Hattar transfer edilen aktif ve reaktif güçlere ilişkin denklemler (2.3) ve (2.4)’de verilmiştir.

$$P_r = \frac{V_r V_s}{Z} \cos(\theta_z - \delta) - \frac{V_r^2}{Z} \cos(\theta_z) \quad (2.3)$$

$$Q_r = \frac{V_r V_s}{Z} \sin(\theta_z - \delta) - \frac{V_r^2}{Z} \sin(\theta_z) \quad (2.4)$$

Burada V_r ve V_s sırasıyla hat sonu ve hat başı gerilimlerinin genliklerini, δ ise hat sonu ve hat başı gerilimleri arasındaki faz farkını, Z hat empedansının genliğini ve θ_z ise hat empedansının faz açısını göstermektedir. (2.3)ve (2.4) denklemlerinden yararlanarak aşağıdaki ifadeler elde edilebilir.

$$\cos(\theta_z - \delta) = \frac{P_r Z}{V_r V_s} + \frac{V_r}{V_s} \cos(\theta_z) \quad (2.5)$$

$$\sin(\theta_z - \delta) = \frac{Q_r Z}{V_r V_s} + \frac{V_r}{V_s} \sin(\theta_z) \quad (2.6)$$

$$\sin^2(\theta_z - \delta) + \cos^2(\theta_z - \delta) = 1 \quad (2.7)$$

Denklem (2.5) ve (2.6)’ de verilen denklemler, (2.7)’ de yerine yazılacak olursa aşağıdaki kuadratik denklem elde edilir. Bu denklemin pozitif kökleri arasından en büyüğü hat sonu gerilimini verir.

$$V_r^4 + V_r^2[2(P_r R + Q_r X) - V_s^2] + (P_r^2 + Q_r^2)Z^2 = 0 \quad (2.8)$$

Benzer şekilde hat başı aktif ve reaktif güç değerleri kullanılarak farklı bir hat sonu gerilim ifadesi elde edilebilir. Diğer bir deyişle denklem (2.8)' da V_r yerine V_s , V_s yerine V_r ve hat üzerinden aktarılan P_r ve Q_r güç değerleri yerine $-P_s$ ve $-Q_s$ güç değerleri yazılacak olursa;

$$V_s^4 + V_s^2[-2(P_s R + Q_s X) - V_r^2] + (P_s^2 + Q_s^2)Z^2 = 0 \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'da V_r yalnız bırakılırsa hat sonu gerilim ifadesi denklem (2.10)'deki gibi olur.

$$V_r = \sqrt{\left[V_s^2 - 2(P_s R + Q_s X) + \frac{(P_s^2 + Q_s^2)Z^2}{V_s^2} \right]} \quad (2.10)$$

Hat başı ve hat sonu ile ilgili bu ifadeler dağıtım sistemleri için geliştirilen sweep temelli algoritmaların temelini oluşturmaktadır. Genellikle ileri yönde yani kaynaktan sona doğru gidilerek bara gerilimleri, sondan kaynağa doğru geri yönde gidilerek hat akımları ve hatlardan transfer edilen güçler hesaplanabilir.

2.2.1 Kirchhoff Gerilim Yasası Kullanılarak Geliştirilen Sweep Temelli Algoritmalar

Dağıtım sistemleri genelde radyal yapıya sahip olduğu için KVL kullanılarak bara gerilimlerinin hesaplanmasına imkan sağlamaktadır. Literatürde KVL denklemleri kullanılarak bara gerilimlerinin hesaplandığı birçok çalışma vardır [38]-[48].

Shirmohammadi'nin dengeli dağıtım sistemleri için geliştirdiği güç akışı algoritması, sondan kaynağa doğru geri yönde hat akımlarını hesaplamakta ve bu akımlar kullanılarak ileri yöne doğru bara gerilimleri hesaplanmaktadır [38]. Algoritmanın akış diyagramı Şekil 2.2 verilmiştir.

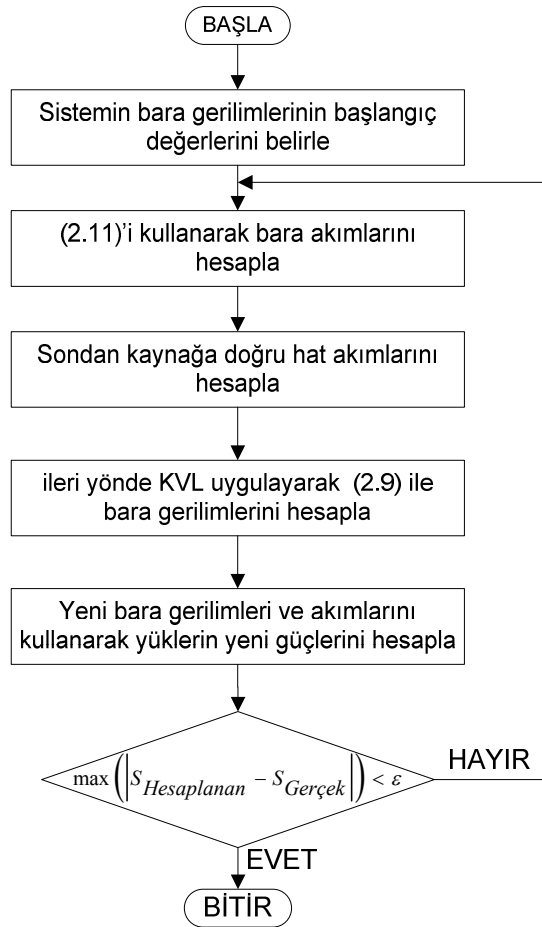
Aşağıdaki algoritma akış diyagramında 2. adımdaki bara akımları (2.11)'deki gibi hesaplanır.

$$\vec{I}_k = \left(\frac{\vec{S}_k}{\vec{V}_k} \right)^* \quad (2.11)$$

Akış diyagramında sondan kaynağa doğru hesaplanan hat akımları (2.12)'deki gibi hesaplanır.

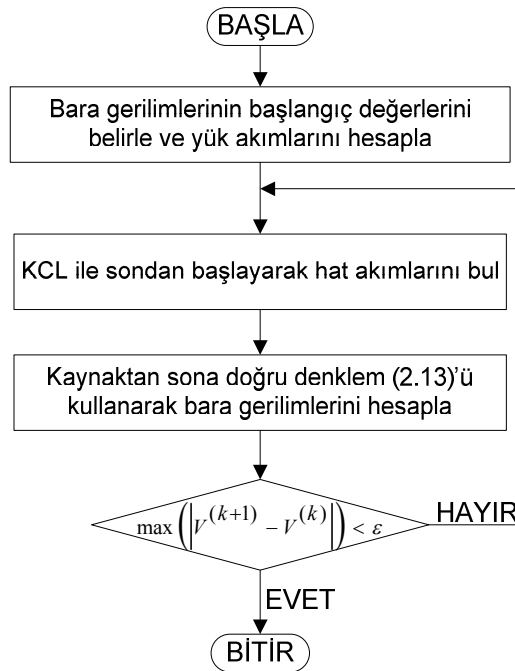
$$\vec{I}_L^k = \sum_{i=k+1}^{n-1} \vec{I}_L^i + \vec{I}_y^{(k+1)}, \quad k = 1, \dots, n-1 \quad (2.12)$$

Denklem (2.12)'de n sistemin bara sayısını, I_L hat akımını, I_y ise yük akımını belirtmektedir.



Şekil 2.2 Shirmohammadi'ye ait algoritmanın akış diyagramı

Bu algoritma dengesiz sistemlerde güç akışı için geliştirilmiştir [39]-[41]. Ayrıca bu algoritma YEÜ birimleri ve dengesiz transformatörler gibi elemanlar göz önünde bulundurularak dengesiz dağıtım sistemlerinin güç akışı analizi için kullanılmıştır [40]. Bu çalışmada YEÜ birimleri PV bara olarak modellenmiş gerilimi kontrol edilmiştir. PV baranın akımları ayarlanarak gerilim kontrolü sağlanmıştır. Diğer algoritmalarda hat akımları yük akımları kullanılarak hesaplanırken, dengesiz dağıtım sistemleri için [41]'de geliştirilen algoritmada hat akımları, hat sonu bara gücü ve hattan aktarılan toplam güç kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı gerilim ve akım hesaplama teknikleri kullanılarak dengeli sistemler için de güç akışı algoritması geliştirilmiştir [43]-[44]. [43]'de gerçekleştirilen algoritmada temel iterasyonun dışında alt fiderler için gerilim hesabı iteratif olarak hesaplanmıştır. Thukaram'ın algoritmasında KVL ve Kirchoff Akım Kanunları kullanılarak bara gerilimleri ve hat akımları bulunur. Algoritma yapısı gereği dengeli ve dengesiz dağıtım sistemlerinin güç akışı hesabında geniş olarak kullanılmaktadır. Algoritmanın akış diyagramı Şekil 2.3'te verilmiştir.

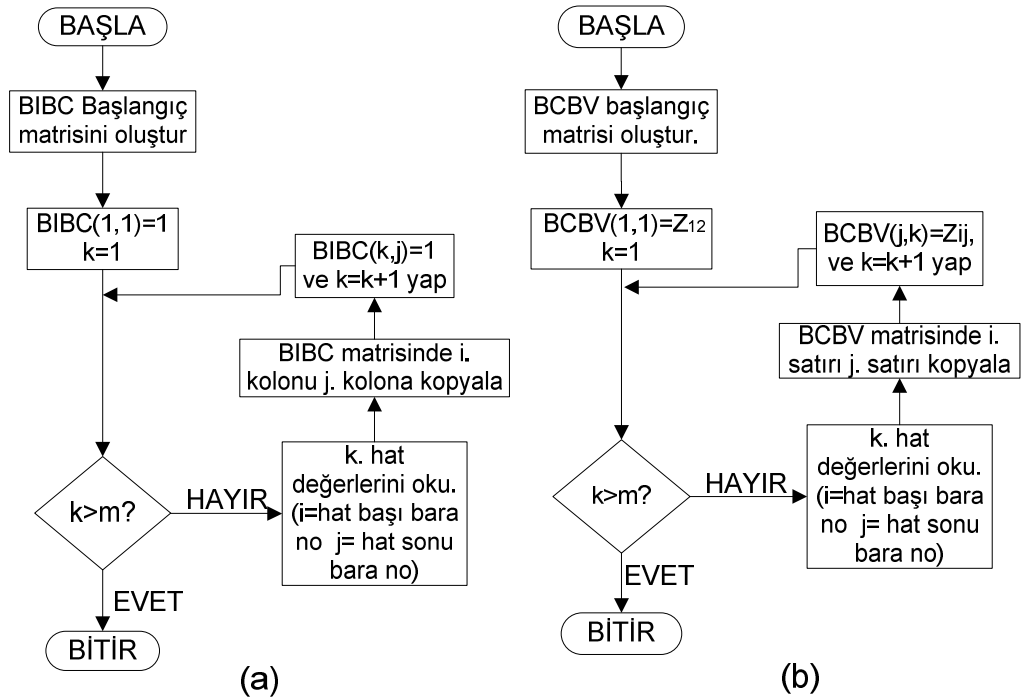


Şekil 2.3 Thukaram'a ait algoritmanın program akış diyagramı

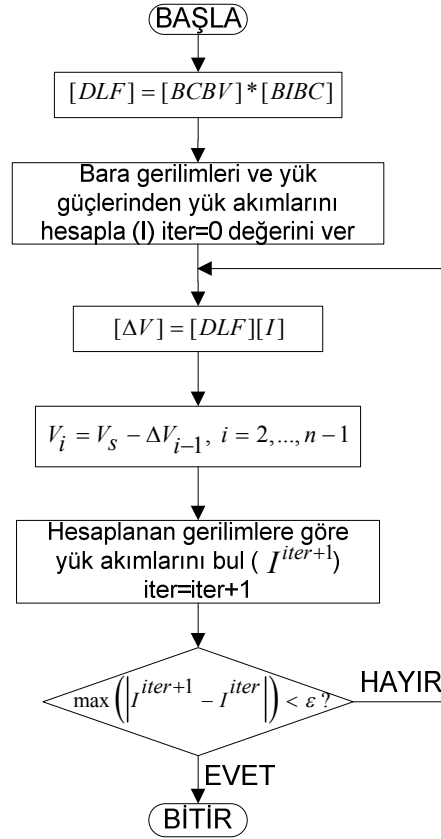
3. adımda hesaplanan kaynaktan sona doğru bara gerilimleri denklem (2.13) 'deki gibi hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} V_j^a \\ V_j^b \\ V_j^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i^a \\ V_i^b \\ V_i^c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{ij}^{aa} & Z_{ij}^{ab} & Z_{ij}^{ac} \\ Z_{ij}^{ba} & Z_{ij}^{bb} & Z_{ij}^{bc} \\ Z_{ij}^{ca} & Z_{ij}^{cb} & Z_{ij}^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ij}^a \\ I_{ij}^b \\ I_{ij}^c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Literatürde, hatlar üzerindeki gerilim düşümlerinin matris formunda hesaplandığı güç akışı algoritmaları geliştirilmiştir [45]-[47]. [45]'da dengesiz dağıtım sistemleri için yeni bir güç akışı algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada hatlar üzerindeki gerilim düşümü, yük akımları ile BIBC adı verilen yük akımlarına ilişkin katsayı matrisi ve BCBV adı verilen hatların seri empedanslarından oluşan katsayı matrisi kullanılarak hesaplanır. Bu çalışmada kullanılan BIBC, BCBV matrislerinin oluşturulmasına ilişkin akış diyagramları sırası ile Şekil 2.4' de verilmiştir. Algoritmaya ilişkin program akış diyagramı Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.4 (a) BIBC (b)BCBV matrislerinin oluşturulmasına ait akış diyagramı



Şekil 2.5 [45]' da verilen algoritmanın akış diyagramı

M adet hatta ve N adet baraya sahip olan radyal bir dağıtım sisteminde başlangıç için BIBC matrisi $M \times (N-1)$ boyutunda, BCBV matrisi $(N-1) \times M$ boyutunda sıfırlardan oluşan bir matris olarak tanımlanır.

Algoritmanın en büyük avantajı algoritmayı farklı sistemlere uygulayabilmek için baralara ve hatlara ait bilgilerin değiştirilmesinin yeterli olmasıdır. Ayrıca algoritma kapalı döngü içeren dağıtım sistemlerine uygulanabilecek şekilde de geliştirilmiştir [46].

2.2.2 Kuadratik Denklemler Kullanılarak Geliştirilen Sweep Temelli Algoritmalar

Dağıtım sistemleri için geliştirilen (2.8)' daki kuadratik denklemin en büyük pozitif kökü hat sonu geriliminin genliğini vermektedir. Aynı şekilde denklem (2.7)' nin en büyük reel kökü de hat sonu gerilim değerinin bulunduğu bir çok algoritma vardır [49]-[52]. Bu algoritmalarından biri dengeli sistemler için Haque tarafından

geliştirilmiş algoritmadır. Radyal ya da kapalı çevrimli dağıtım sistemleri için uygulanabilir. Algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 2.6'da verilmiştir.

3. adımda hesaplanan hatlardan akan akımların hesaplamaları denklem (2.14) 'de ve (2.15) 'de verilmiştir.

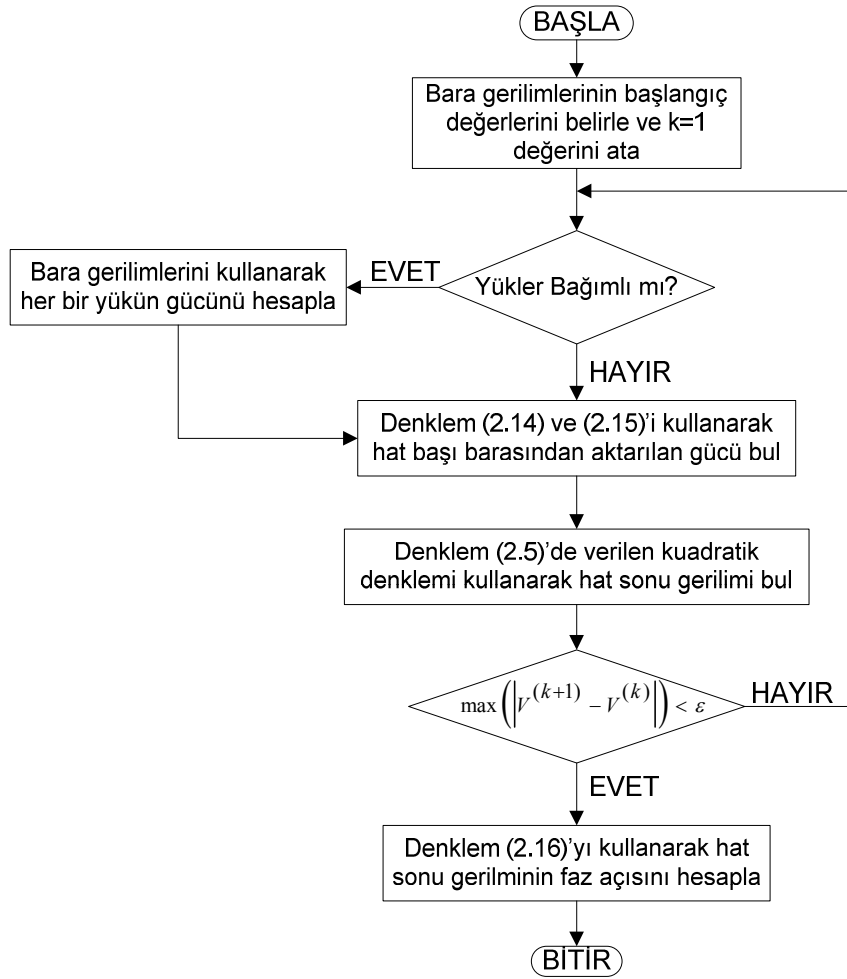
$$P_{loss_{ij}} + jQ_{loss_{ij}} = \frac{R(P^2 + Q^2)}{V_j^2} + \frac{jX(P^2 + Q^2)}{V_j^2} \quad (2.14)$$

$$P_{ij}^{(k)} + jQ_{ij}^{(k)} = \sum_{i=k+1}^n P_y^{(k)} + jQ_y^{(k)} + \sum_{i=k+1}^{n+1} P_{loss_{ij}}^{(k)} + jQ_{loss_{ij}}^{(k)} \quad (2.15)$$

Son adımda hesaplanan hat sonu gerilim açısı denklem (2.16) 'den elde edilir.

$$\delta_r = \delta_s - \tan^{-1} \left(\frac{\frac{XP_s - RQ_s}{V_s}}{V_s - \frac{RP_s + XQ_s}{V_s}} \right) \quad (2.16)$$

[48] çalışmasında gerilim bağımlı yük modellerinin güç akışı sonuçlarına ve algoritmanın performansına etkisi incelenmiştir.



Şekil 2.6 Haque'e ait algoritmanın akış diyagramı

Denklem (2.8)' da verilen kuadratik denklemin kullanıldığı metodların hesaplama sürelerinin arttırılması amacı ile Luo tarafından bir algoritma geliştirilmiştir. Benzer yapıdaki diğer algoritmalarından farkı, kuadratik denklem farklı bir forma dönüştürülerek bara geriliminin daha kısa sürede hesaplanması ve ayrı bir çözüm metodunun gerektirmemesidir [49]. Algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 2.7'de verilmiştir.

Algoritmada hat sonu gerilimlerinin ve açılarının bulunması için oluşturulan denklemler, denklem (2.17) - (2.20)' de verilmiştir.

$$\Delta V' = \frac{RP_s + XQ_s}{V_s} \quad (2.17)$$

$$\Delta V'' = \frac{XP_s - RQ_s}{V_s} \quad (2.18)$$

$$V_r = \sqrt{(V_s - \Delta V')^2 + \Delta V''^2} \quad (2.19)$$

$$\delta_r = \delta_s - \tan^{-1} \left(\frac{\Delta V''}{V_s - \Delta V'} \right) \quad (2.20)$$

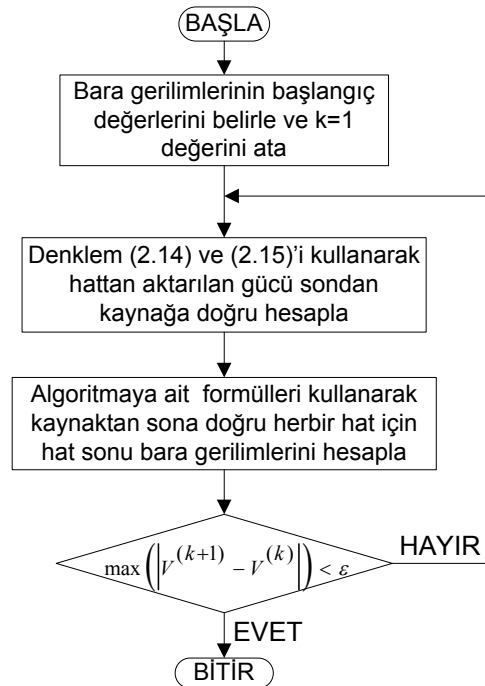
Dengeli dağıtım sistemleri için kuadratik denklemin farklı bir formda yazılarak hesaplamının basitleştirildiği ve hesaplama süresinin azaltıldığı bir diğer algoritma da Rajicic ve arkadaşlarına aittir [50]. Bara gerilimleri kaynaktan sona doğru denklem (2.21)-(2.25) arası denklemler kullanılarak hesaplanır. Hatlardan aktarılan aktif ve reaktif güçler ise sondan kaynağa doğru yük güçleri ve hat kayıpları ile belirlenmektedir. Algoritma akış diyagramı Şekil 2.7’de verilmiştir.

$$a = 1 - \frac{RP_s + XQ_s}{V_s^2} \quad (2.21)$$

$$b = \frac{RQ_s - XP_s}{V_s^2} \quad (2.22)$$

$$Re(\vec{V}_r) = aRe(\vec{V}_s) - bIm(\vec{V}_s) \quad (2.23)$$

$$Im(\vec{V}_r) = bRe(\vec{V}_s) + aIm(\vec{V}_s) \quad (2.24)$$



Şekil 2.7 [49] ve [50] çalışmalarına ait algoritmaların akış diyagramı

Bu bölümde anlatılan algoritmaların genel olarak yapısı Tablo 2.1’ de verilmiştir. Tabloda algoritmaları gerçekleştirilenler, referans no, algoritmanın dengesiz sistemler için uygulanıp uygulanamayacağı sırası ile 1., 2. ve 3. sütunda verilmiştir. İkinci sütunda ileri yönde hesaplanan gerilimlerin hat sonu gerilimi için kullanılan denklem numaraları verilmiştir. Geri yönde akımların veya güçlerin kullanıldığı algoritmalar üçüncü ve dördüncü sütunda belirtilmiştir. Altıncı sütunda algoritmalarda kullanılan iterasyon sonlandırma kriteri belirtilmektedir. Yedinci sütunda ise PV baranın modellendiği algoritmalar verilmiştir.

Tablo 2.1 Geliştirilen sweep temelli algoritmaların genel yapısı

Ref No.	Üç Faz	Gerilim Hesabı		Geri Yönde		Sonlandırma Kriteri	PV Bara
		İleri Yönde	Geri Yönde	Akım	Güç		
[38]	-	(2.9)	-	✓	-	Max. Yüklerin aktif ve reaktif farkı	✓
[44]	✓	(2.13)	-	✓	-	Max. Gerilim farkı	-
[48]	-	(2.7)	-	-	✓	Max. Gerilim farkı	-
[49]	-	(2.17)-(2.20)	-	-	✓	Max. Gerilim farkı	✓
[50]	-	(2.21)-(2.24)	-	-	✓	Max. Gerilim farkı	✓

2.3 Uygulama

Bu bölümde incelenen beş algoritma 12 baralı radial test sistemine uygulanmıştır. Test sistemine ait hat ve yük bilgileri [53] çalışmasından alınmış ve Tablo Ek 1’de verilmiştir. Test sisteminde baz gerilimi 11 kV ve baz gücü 0.01 MVA olarak seçilmiştir. 12-baralı test sistemi çeşitli algoritmalarla denenmiş ve sonuçları’de verilmiştir. Algoritmalarda hesaplanan bara gerilimlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür. Sweep temelli algoritmalarından Hauqe’a ait algoritmada ([48]) algoritmanın yapısı gereği bara gerilimlerinin açıları hesaplanmamıştır. Geleneksel algoritmalarından olan Gauss-Seidel algoritması yakınsamamıştır. Sonuçlar iterasyon sayısı açısından ele alınacak olursa sweep temelli algoritmalarından Hauqe ([48]), Thukaram ([44]), ve Rajicic’ e ([50]), ait algoritmalar, geleneksel algoritmalarından Newton-Raphson algoritması diğerlerine göre daha iyi sonuç vermektedir. Ayrıca sonuçların SINCAL ve UWPFLOW programından elde edilen sonuçlara yakın olduğu görülmüştür.

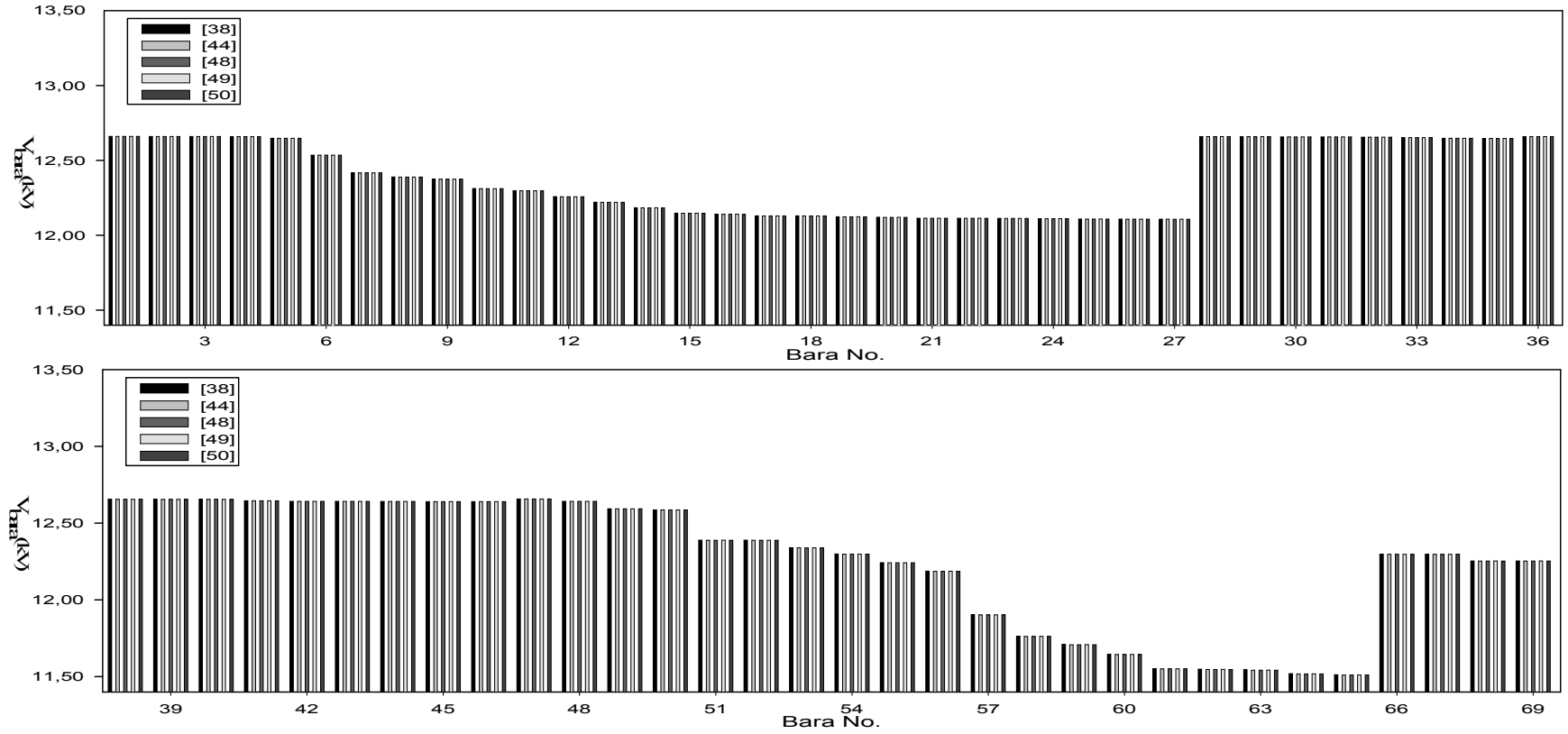
Algoritmalar son olarak [54] çalışmasındaki 69 baralı radial test sistemi için denenmiştir. Test sistemine ait yük ve hat bilgileri sırasıyla Tablo Ek 2 ve Tablo Ek 3’de, devre şeması Şekil Ek 1’de ve analiz sonuçları Şekil 2.8’de verilmiştir. Sonlandırma kriterleri için hata oranı 0,0001 olarak alınmıştır. Algoritmaların iterasyon sayıları verilen Tablo 2.2’deki sonuçlardan Shirmohammedi ve Newton-Raphson algoritmalarının iterasyon sayılarının diğerlerine göre daha az olduğu görülmektedir.

Tablo 2.2 69 baralı radial test sistemi için algoritmaların iterasyon sayıları

	Hauge	Luo	Thukaram	Shirmohammedi	Rajicic	Newton-Raphson
İterasyon Sayısı	4	5	4	3	4	3

Tablo 2.3 12 baralı dağıtım sisteminin güç akışı analizlerinden elde edilen bara gerilimleri ve açıları

Bara No	SWEEP ALGORİTMALARI										KLASİK ALGORİTMALAR			SINCAL		UWPFLOW	
	Hauge		Luo		Thukaram		Shirmohammedi		Rajicic		Newton-Raphson		Gauss Seidel				
	V (pu)	Açı (°)	V (pu)	Açı (°)	V (pu)	Açı (°)	V (pu)	Açı (°)	V (pu)	Açı (°)	V (pu)	Açı (°)		V (pu)	Açı (°)	V (pu)	Açı (°)
1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	Y	1	0	1	0
2	0,9944	0	0,9943	0,1144	0,9943	0,1144	0,9943	0,1144	0,9943	0,1144	0,9943	0,1144	A	0,9944	0,1144	0,9943	0,1144
3	0,9891	0	0,9890	0,2215	0,9890	0,2215	0,9890	0,2215	0,9890	0,2215	0,9890	0,2215	K	0,9891	0,2211	0,9890	0,2215
4	0,9807	0	0,9806	0,4004	0,9806	0,4004	0,9806	0,4004	0,9806	0,4004	0,9806	0,4004	I	0,9808	0,3990	0,9806	0,4004
5	0,9699	0	0,9698	0,6259	0,9698	0,6258	0,9698	0,6258	0,9698	0,6259	0,9698	0,6258	N	0,9701	0,6222	0,9698	0,6258
6	0,9667	0	0,9665	0,6940	0,9665	0,6939	0,9665	0,6939	0,9665	0,6940	0,9665	0,6939	S	0,9669	0,6894	0,9665	0,6939
7	0,9639	0	0,9638	0,7554	0,9638	0,7553	0,9638	0,7553	0,9638	0,7554	0,9638	0,7553	A	0,9641	0,7499	0,9638	0,7553
8	0,9555	0	0,9553	1,0090	0,9553	1,0089	0,9553	1,0089	0,9553	1,0090	0,9553	1,0089	M	0,9558	0,9988	0,9553	1,0089
9	0,9474	0	0,9473	1,2396	0,9473	1,2395	0,9473	1,2395	0,9473	1,2396	0,9473	1,2395	A	0,9479	1,2244	0,9473	1,2395
10	0,9446	0	0,9445	1,3152	0,9445	1,3151	0,9445	1,3151	0,9445	1,3152	0,9445	1,3151	D	0,9451	1,2981	0,9445	1,3151
11	0,9437	0	0,9436	1,3390	0,9436	1,3389	0,9436	1,3389	0,9436	1,3390	0,9436	1,3389	I	0,9442	1,3212	0,9436	1,3389
12	0,9435	0	0,9434	1,3461	0,9434	1,3459	0,9434	1,3459	0,9434	1,3461	0,9434	1,3460	---	0,9440	1,3281	0,9434	1,3459
İterasyon Sayısı	3		4		3		4		3		3		---	3		4	



Şekil 2.8 Sweep temelli güç akışı algoritmaları ile hesaplanan bara gerilimleri

2.4 Sonuç ve Özet

İletim sistemlerinde güç akışı için kullanılan Newton-Raphson, Gauss-Seidel gibi geleneksel algoritmalar dağıtım sistemlerine uygulandığında sistemin yapısından dolayı performans olumsuz yönde etkilenmekte ve yakınsama sorununun oluşmaktadır. Bundan dolayı dağıtım sistemlerine göre uyarlanmış sweep temelli algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmalarda bara gerilimleri genellikle kaynaktan sona doğru hesaplanmaktadır. Bara gerilimleri KVL yada gerilim polinomu (kuadratik denklem) kullanılarak hesaplanır.

Bu algoritmalarda bara sayısı, empedans büyüklükleri ve sistemin büyümesi gibi durumlarda göstereceği performanslar çok önemlidir. Diğer bir deyişle algoritmaların, sistemin parametrelerinden asgari düzeyde etkilenerek en az adımda ve en kısa sürede güç akışını icra etmesi önemlidir. Çalışmalar sonucunda kuadratik denklem ile gerilim hesabının yapıldığı algoritmalar KVL kullanılarak geliştirilen algoritmalarından genelde daha düşük adımda sonuca ulaşmıştır. Ayrıca sistem parametrelerinin ve hat değerinin değişiminden daha az etkilendiği belirlenmiştir. Newton-Raphson ve Gauss-Seidel algoritmalarının küçük dağıtım sistemlerinde performanslarının iyi olduğu fakat sistem büyüdükçe iterasyon sayısının arttığı görülmüştür.

3 HARMONİK YÜK MODELLERİ

Bu bölümde harmonik yük modelleri hakkında genel bir giriş yapılarak harmonik yük modelleri kısaca anlatılacaktır. Sonra harmonik güç akışı metodlarına adapte edilen dört farklı harmonik yük modeli ele alınacaktır. Bu modeller, Sabit akım kaynağı modeli, Norton eşdeğer devre modeli, Çapraz Frekans Admitans Matrisi modeli ve yeni bir yük modeli olan GYTE harmonik üreten yük modelidir.

3.1 Harmonik Üreten Yük Modelleri

Son yıllarda güç sistemlerinde güç elektroniği elemanlarının kullanımının artması, bir takım sorunları da beraberinde getirmiştir. Doğrusal karakteristiğe sahip olmayan güç elektroniği elemanları ile sinüs dalga biçimine sahip olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından dolayı sistemde harmonik akımları oluşacaktır. Oluşan bu harmonikli akımların; güç sistemi elemanlarında ve yüklerde kayıpların oluşması, güç üretiminde, iletiminde ve dağıtımında verimin düşmesi, koruma sistemlerinin hatalı çalışması gibi bir takım olumsuz etkileri vardır [1]. Bundan dolayı harmonik analizin yapılması ve analiz sonuçlarına göre standartlarla belirlenen tedbirlerin alınması, harmoniklere bağlı sorunların giderilmesi ve finansal kayıpların en aza indirilmesi bakımından önemlidir. Bu amaçla literatürde bazı harmonik analiz metodları önerilmiştir. Önerilen bu harmonik analiz metodlarının doğrulukları, harmonik üreten yüklerin hassas ve doğru biçimde modellenmesine bağlıdır.

Literatürde harmonik analiz metodları üç ana başlık halinde incelenmiştir. Bu metodlar Frekans Tarama, Harmonik İterasyon ve zaman domeyninde analiz yöntemleridir [4].

Literatürde, Frekans Tarama ve Harmonik İterasyon modelleri için geliştirilen frekans domeyni harmonik yük modelleri bulunmaktadır. Bunların başlıcaları sabit akım kaynağı modeli, Norton eşdeğer devre modeli ve çapraz frekans admitans matrisi modelidir.

Frekans domeyni yük modeline ek olarak, zaman domeyninde analiz için önerilen, diferansiyel durum denklem takımlarının analitik çözümü ile elde edilen modeller de bulunmaktadır [55]-[56]. Bu modeller daha hassas sonuçlar vermelerine karşılık frekans domeyni modellere göre daha fazla işlem yükü getirmektedir.

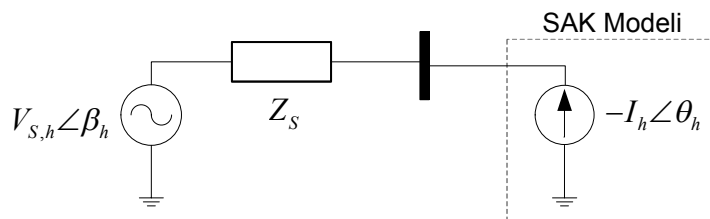
Literatürde çevirici yüklerinin (a.a-a.a veya a.a-d.a) giriş ve çıkışlarına ait gerilim ve akım bilgileri arasındaki ilişkinin transfer fonksiyonu şeklinde ifade edildiği yük modelleri de önerilmiştir. Anahtarlama fonksiyonu yardımıyla giriş ve çıkış arasında transfer empedansları oluşturulmuştur. Bu empedanslar gerilim ve akımın farklı harmonik numaraları arasındaki ilişkiyi dikkate alırlar [57].

Literatürde yer alan bir başka model ise polinom temelli modellerdir. Bu modeller, harmonikleri tek tek incelemek yerine toplam harmonik bozulmayı dikkate alınarak oluşturulmuştur [58]-[59].

3.1.1 Sabit Akım Kaynağı Modeli

Harmonik analiz metotları içinde, diğer analiz metotlarına göre daha basit yapıda olması ve daha az veri gerektirmesi sebebiyle en çok tercih edilen yöntem Frekans Tarama metodudur [4],[11]. Frekans Tarama metodunda yükler sabit akım kaynağı olarak modellenir [4], [12]-[13].

Sabit akım kaynağı modelinde, harmonik üreten yük her bir harmonik numarası için sabit akım kaynağı olarak ifade edilir. Modelin sistemle birlikte gösterilimi Şekil 3.1’de verilen biçimdedir.



Şekil 3.1 Sabit akım kaynağı modeli

Bu model gerilim değişim aralığının büyük olduğu durumlarda hatalı sonuçlar verebilmektedir. Bu aralığın daha küçük olduğu durumlarda ise daha hassas sonuçlar elde edebilmek için bu model iteratif harmonik analizlerinde kullanılabilir. Yükün sinüzoidal besleme şartlarındaki karakteristik akım etkin değeri ve faz açıları $(I'_1, I'_h, \theta'_1, \theta'_h)$ ile temel harmonik güç akışı analizinde hesaplanan akımın etkin değeri ve faz açıları olan I_1 ve θ_1 denklem (3.1) ve (3.2)'de verilen ifadelerde yerlerine konulur. Böylece model yeniden belirlenir.

$$I_h = I_1 \left(\frac{I'_h}{I'_1} \right) \quad (3.1)$$

$$\theta_h = \theta'_h - h(\theta'_1 - \theta_1) \quad (3.2)$$

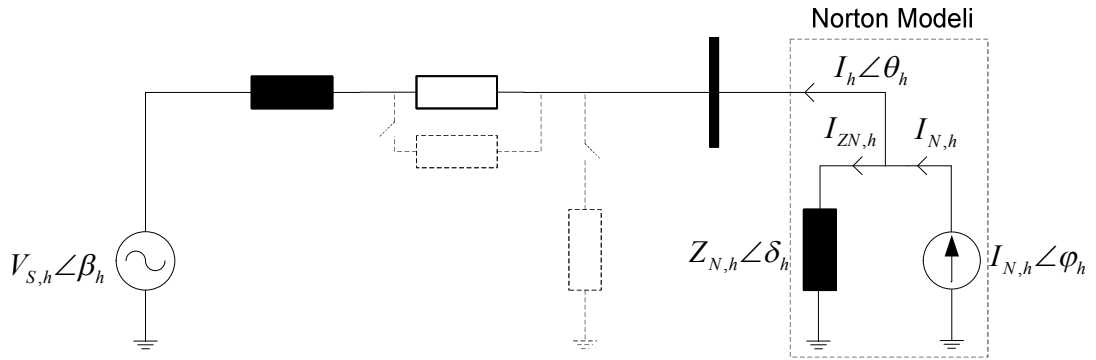
Literatürde birçok çalışmada çeşitli yüklerin karakteristik akım harmonikleri verilmiştir. Bundan dolayı ek bir çalışma gerekmeden doğrudan harmonik analizlerinde kullanılabilir. Fakat sinüzoidal olmayan kaynak gerilimi altında yükün üretebileceği karakteristik olmayan harmonik akımları hakkında bilgi vermemesi dezavantajdır. Temel harmonik geriliminin büyük değişim gösterdiği ve gerilime duyarlı yüklerin bulunduğu şebekelerde hatalı sonuçlar verebilir [62].

3.1.2 Norton Eşdeğer Devre Modeli

Temel harmonik geriliminin değişimine bağlı olarak, harmonik üreten yüklerin akım spektrumunun önemli ölçüde değiştii durumlarda, yüklerin gerilim bağımlılığının hesaba katılması daha doğru sonuçların elde edilmesini sağlayacaktır [62]. Bu gereksinim Harmonik İterasyon yöntemi ile karşılanmıştır [7], [9]-[11]. Bu analiz yönteminde harmonik üreten yükler gerilim bağımlı akım kaynağı olarak modellenmiştir [62]. Literatürde gerilim bağımlı akım kaynağı modelleri çeşitli şekillerde sunulmuştur. Bunlardan biri de Norton modelidir [14]-[20]

Norton Modelinde yük her bir frekansta paralel bağlı empedans ve akım kaynağı olarak modellenmiştir. Bu model, analitik ifadelerin nümerik yöntemler ile çözümünü harmonik analizlerine uyarlanmıştır [9]-[11]. Fakat literatürde ölçüm verileri kullanılarak Norton eşdeğer devre teoremine göre model öneren başka çalışmalar da vardır [13].

[13] çalışmasında Şekil 3.2'de verilen yük modeli iki farklı çalışma gerilimi altında harmonik akım ve geriliminin ölçülmesi ile oluşturulmuştur. Kaynağın çalışma geriliminin değişimi, şönt kapasitörün anahtarlanması, paralel transformatörün devreden çıkarılması ya da kaynak harmonik empedansını önemli ölçüde değiştirebilecek işlemlerle sağlanabilir.



Şekil 3.2 Norton Eşdeğer Devre Modeli

Şekil 3.2'deki devrede $\vec{Z}_{N,h}$ ile sistemin dahili empedansı birbirlerine paraleldir. $\vec{Z}_{N,h}$ sistemin toplam empedansına göre büyük olduğundan yük tarafından üretilen $\vec{I}_{N,h}$ akımının büyük bir çoğunluğu kaynağa doğru akacaktır. Fakat çalışma gerilimi değiştiğinde $\vec{Z}_{N,h}$ üzerinden geçen akım da değişecektir. Dolayısıyla kaynağa giden akım azalacaktır. Şekil 3.2'deki akımların değişik çalışma gerilimi altındaki hesapları aşağıdaki gibidir. Aşağıdaki formüllerde $\vec{I}_{h,1}$ ve $\vec{V}_{h,1}$ 1. duruma ait h. harmonik akım ve gerilim fazör değerleri, $\vec{I}_{h,2}$ ve $\vec{V}_{h,2}$ 2. duruma ait akım ve gerilim bilgileridir. Bu akımların, norton akımları ve norton empedansı üzerinden geçen akım cinsinden ifadeleri denklem (3.3) ve (3.4)'de verilmiştir.

$$\vec{I}_{h,1} = \vec{I}_{N,h} - \vec{I}_{ZN,h1} \quad (3.3)$$

$$\vec{I}_{h,2} = \vec{I}_{N,h} - \vec{I}_{ZN,h2} \quad (3.4)$$

Kaynağın çalışma gerilimi değişiminin öncesinde ve sonrasında harmonik norton empedansı üzerinden akan akım denklem (3.5) ve (3.6)'da hesaplanmıştır.

$$\vec{I}_{ZN,h1} = \frac{\vec{V}_{h,1}}{\vec{Z}_{N,h}} \quad (3.5)$$

$$\vec{I}_{ZN,h2} = \frac{\vec{V}_{h,2}}{\vec{Z}_{N,h}} \quad (3.6)$$

(3.5) ve (3.6) denklemleri, sırasıyla (3.3) ve (3.4)'de yerine koyulursa;

$$\vec{I}_{h,1} = \vec{I}_{N,h} - \frac{\vec{V}_{h,1}}{\vec{Z}_{N,h}} \quad (3.7)$$

$$\vec{I}_{h,2} = \vec{I}_{N,h} - \frac{\vec{V}_{h,2}}{\vec{Z}_{N,h}} \quad (3.8)$$

$\vec{I}_{h,1}$ akımından $\vec{I}_{h,2}$ akımı çıkarılırsa;

$$\vec{I}_{h,2} - \vec{I}_{h,1} = \frac{\vec{V}_{h,2} - \vec{V}_{h,1}}{\vec{Z}_{N,h}} \quad (3.9)$$

$$\vec{Z}_{N,h} = \frac{\vec{V}_{h,1} - \vec{V}_{h,2}}{\vec{I}_{h,1} - \vec{I}_{h,2}} \quad (3.10)$$

Harmonik Norton akım kaynağı akım değerleri denklem (3.11)'deki gibi hesaplanır.

$$\vec{I}_{N,h} = \vec{I}_{h,1} + \frac{\vec{V}_{h,1}}{\vec{Z}_{N,h}} \quad (3.11)$$

Farklı çalışma gerilimleri altında ölçüm yapıldığı için akım ve gerilim faz açılarının aynı referansa göre ölçülmesi gerekir. Bu referans sistem gerilimi değiştiğinde faz açısı değişmeyen bara geriliminin açısı olabilir. Bu durum her sistem için geçerli olmayabilir. Böyle durumlarda kaynak tarafının Thevenin eşdeğerinin temel harmonik gerilimi referans olarak alınabilir.

Norton modeli gerilim değişimini dikkate alması nedeniyle direk çözümlerde (iteratif olmayan analizlerde) sabit akım kaynağına göre hassas sonuçlar vermesi bakımından avantajlıdır. Fakat farklı harmonik numaralarına sahip gerilim ve akımlar arasındaki etkileşim ihmal edilmektedir. Bu eksiklik Çapraz Frekans Admitans Matrisi modeli ile giderilmiştir [16]-[20].

3.1.3 Çapraz Frekans Admitans Matrisi Modeli

Norton eşdeğer devre modeli dışında literatürde bulunan gerilim bağımlı akım kaynağı modellerinden biri de çapraz frekans admitans matrisi modelidir.

Bir sisteme süperpozisyon prensibi uygulanabildiği takdirde o sistem lineer olarak tanımlanabilir. Harmonik çalışmalar için, bir elektrik sisteminde akımın n. harmonik bileşeni, kaynak geriliminin sadece n. harmonik bileşeni tarafından belirleniyorsa o elektrik sistem lineer olarak tanımlanabilir. Lineer yük harmonikli gerilim altında, sadece gerilimin sahip olduğu harmoniklerde akım çekecektir.

Buna karşılık non-lineer yük, gerilimde bulunmayan harmoniklerde de akım çekebilmektedir. Bu yüzden akımın ve kaynak geriliminin dalga şekilleri farklı olacaktır. Özellikle non-lineer bir yük temel frekanstaki sinüs gerilimi altında, temel frekansa ilaveten yükün karakteristiğine bağlı olarak başka frekanslarda da harmonikli akım çekecektir. Bu harmonikli akımlar da besleme hattında empedansın üzerine düşen harmonikli gerilimleri artıracaktır. Hat ve kaynak empedansları üzerindeki harmonik gerilimler, kaynağın non-sinuzoidal olması durumunda daha da artacaktır.

ÇFAM Modelinde yük, aynı harmonik numarasına sahip gerilim ve akım harmonikleri arasındaki ilişkinin yanı sıra farklı harmonik numaralarına sahip gerilim ve akımlar arasındaki ilişkiyi de yer veren admitans matrisi biçiminde ifade edilmiştir [16]-[20].

Yük tarafından çekilen akım bileşenleri uygulanan harmonik gerilimlerin ve aralarındaki ilişkinin fonksiyonu aşağıdaki gibi kısa bir şekilde gösterilebilir.

$$[I] = [Y][V] \quad (3.12)$$

Denklem (3.12)'deki $[Y]$ fonksiyonu bu modelde admitans matrisi olup $N \times N$ boyutundadır. Bu matris çapraz frekans admitans matrisi olarak adlandırılır. Farklı harmonik numaralarındaki gerilim ve akım bileşenleri arasındaki bağıntıyı temsil etmektedir.

Genel gösterilimi denklem (3.13)'teki gibidir.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Lineer yük olması durumunda farklı harmonik numaralarına sahip akım ve gerilim harmonikleri arasında etkileşim olmaz. Bundan dolayı çapraz frekans admitans matrisi $[Y]$ diagonal hale gelir ve terimleri sabittir ($[V]$ 'den bağımsız). Gösterilimi denklem (3.14)'teki gibidir.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Y_{22} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & Y_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \dots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Çapraz frekans admitans matrisi iki adımda oluşturulur.

1. İlk adımda yük saf sinüs gerilim ile beslenir. Ölçülen akım harmonikleri ve temel harmonik geriliminin fazör değerleri kullanılarak matrisin ilk sütun elemanları oluşturulur.

$$[I] = [Y][V] \Rightarrow \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} \\ Y_{21} \\ Y_{31} \\ \dots \\ Y_{N1} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$Y_{k1} = \frac{I_k}{V_1} \quad (k = 1 \dots N) \quad (3.16)$$

2. ikinci adımda non-lineer yükün temel frekans gerilimi sabit tutulur. Yük temel harmonik gerilimine ilave olarak bir tane de temel olmayan harmonik gerilimi ile beslenir. Bu testte ölçülen akım ve gerilim fazör değerleri ile elemanları hesaplanır.

$$Y_{kj} = \frac{I_k - Y_{k1} V_1}{V_j} \quad (j = 2 \dots N) \quad (3.17)$$

Y_{kj} elemanlarının hesaplanması ile j . harmonikteki gerilim ile i . harmonikteki yük akımı arasındaki ilişki ortaya koyulmaktadır. Hesaplamalar sırasında gerilim ve akımların faz açılarının aynı referansa göre düzenlenmesi hususunda dikkat edilmesi gerekir.

ÇFAM modeli; Tam Harmonik Güç Akışı (THGA) algoritması dışındaki algoritmaların harmonikler arası etkileşimi öngörmemesi sebebiyle sadece THGA algoritmasına uyarlanabilmektedir. ÇFAM için yapılan THGA analizinde, her bir iterasyon için sabit Y matrisi ile o iterasyonda hesaplanan harmonik gerilim vektörü, denklem (3.12)'de yerine koyularak bir sonraki iterasyon için harmonik akım değerleri bulunur.

ÇFAM modelini gerilim harmonikleri ile akım harmonikleri arasındaki etkileşimleri hesaba katmasından dolayı diğer yük modellerine göre avantajlıdır. Bu modelin dezavantajı ise çok fazla detay içermesi ve gerçek sistemlere uygulanabilirliğinin düşük olmasıdır.

3.1.4 GYTE Harmonik Üreten Yük Modeli

Son yıllarda kaynak ile yük arasındaki harmonik sorumluluk paylaşımı için çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Harmonik sorumluluk paylaşımı için önerilen yöntemlerin bazıları yük modellemesi üzerine kurulmuştur [62]-[63]. Bu bölümde anlatılan yük modellerinde böyle bir paylaşım söz konusu değildir. Bu eksikliği gidermek amacıyla [64] çalışmasında ölçüm verileri kullanılarak yeni bir yük modeli olan GYTE yük modeli önerilmiştir. Bu çalışmada, yük modeli, [62] çalışmasında önerilen tek fazlı sistemler için tanımlanmış görünür güç ifadesinde hesaplanan yük parametrelerine dayanmaktadır.

Gerilim ve akımın zaman domeynindeki ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$v(t) = V_0 + \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} V_h \sin(\omega_h t + \theta_h) \quad (3.18)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} I_h \sin(\omega_h t + \delta_h) \quad (3.19)$$

Aktif ve reaktif güç ifadeleri;

$$P_0 = V_0 I_0 \quad (3.20)$$

$$P_h = V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) \quad (3.21)$$

$$P = V_0 I_0 + \sum_{h \in N^+} P_h \quad (3.22)$$

$$Q_h = V_h I_h \sin(\theta_h - \delta_h) \quad (3.23)$$

Yukarıda hesaplanan d.a. aktif, h. harmonik aktif, toplam aktif ve h. harmonik reaktif güçleri kullanılarak aşağıdaki gibi yük parametreleri hesaplanır.

$$G_e = \frac{P}{V^2} \quad (3.24)$$

$$B_{eh} = \frac{h \sum_{h \in N^+} h Q_h}{\sum_{h \in N^+} h^2 V_h^2} \quad (3.25)$$

$$Y_h = G_h - j B_h = \frac{P_h}{V_h^2} - j \frac{Q_h}{V_h^2} \quad (3.26)$$

Bu parametrelere bağlı olarak akımın aktif ve reaktif bileşenleri;

$$i_a(t) = G_e v(t) = G_e V_0 + \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} G_e V_h \sin(\omega_h t + \theta_h) \quad (3.27)$$

$$i_r(t) = \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} B_{eh} V_h \sin\left(\omega_h t + \theta_h - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.28)$$

Kaydırılmış iletkenlik i_{sc} ve kaydırılmış süseptans i_{ss} akımları;

$$i_{sc}(t) = (G_0 - G_e) V_0 + \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} (G_h - G_e) V_h \sin\left(\omega_h t + \theta - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.29)$$

$$i_{ss}(t) = \sum_{h \in N^+} \sqrt{2} (B_e - B_{eh}) V_h \sin\left(\omega_h + \theta_h - \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.30)$$

Yukarıda ifade edilen yükün çektiği dört akım bileşeninden, reaktif akım ve kaydırılmış süseptans akımı ile aktif akım ve kaydırılmış iletkenlik akımları

birbirlerine diktir [62]. Bu akımların zaman domeyninde toplamaları yükün çektiği toplam akımdır.

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_{sc}(t) + i_{ss}(t) \quad (3.31)$$

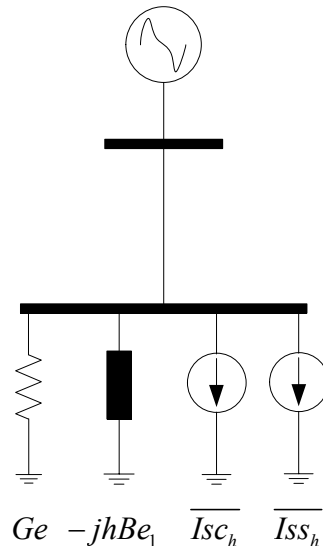
Bu akım bileşenlerine göre klasik görünür güç ifadesi aşağıdaki gibidir;

$$S^2 = (VI_a)^2 + (VI_r)^2 + (VI_{sc})^2 + (VI_{ss})^2 \quad (3.32)$$

$$S^2 = P^2 + Q_r^2 + D_{sc}^2 + D_{ss}^2 \quad (3.33)$$

Kaydırılmış iletkenlik ve kaydırılmış suseptans güçleri frekansla lineer olarak değişmeyen kısımlardan dolayı çekilen güçlerdir. Çekilen harmonik akımlardan dolayı oluşan bozulma güçlerini ifade eder. D_{sc} ve D_{ss} bozulma güçleri hem kaynaktan dolayı hem de yükten dolayı oluşan bozulma güçleridir. Fakat yükten dolayı oluşan bozulmanın, D_{sc} bozulma gücü üzerindeki etkisi daha fazladır.

Yukarıda hesaplanan parametrelerle oluşturulan yük modeli Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3 GYTE harmonik üreten yük modeli

İleriki bölümlerde anlatılacak olan harmonik güç akışı algoritmaları ile birlikte kullanıldığında elde edilen sonuçların diğer yük modellerine yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. GYTE yük modeli harmonik analizlerinde ek matematiksel

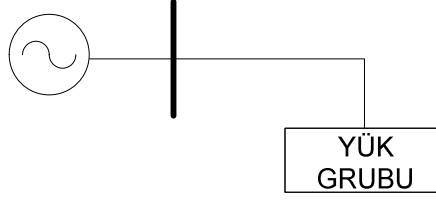
aba gerektirmeden, ölçüm verileri ile en iyi pasif kompanzasyon kapasitesi hakkında bilgi vermesi ve harmonik kaynakların belirlenmesi açısından diğerk yk modellerine göre avantajlıdır.

3.2 Sayısal Uygulama

Ŗekil 3.5’de verilen test sistemi, eŖitli gerilim dalga Ŗekillerinde yükü besleyebilen programlanabilir güç kaynağı, yüksek örnekleme oranına sahip veri toplama kartı, programlanabilir güç kaynağını kontrol eden ve toplanan veriyi iŖleyen bir bilgisayar ve HY’den oluŖur. Test sisteminde HY olarak faz kontrol devresiyle beslenen lineer empedans kullanılmıŖtır. Yük 349.86W aktif ve 552VA görünür güç değerlerine sahiptir. Ŗekil 3.5’de devrenin Ŗeması verilmiŖtir.

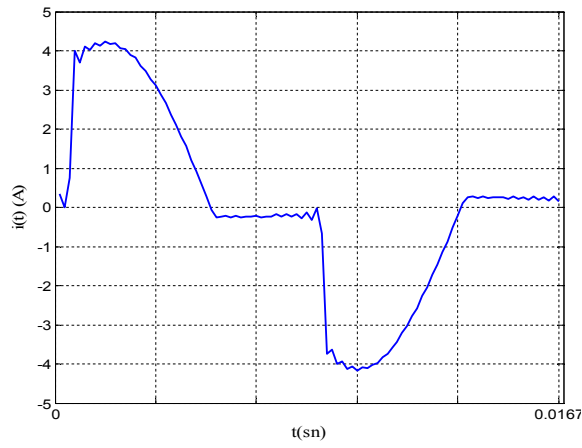


Ŗekil 3.4 Harmonik üreten yüklerin oluŖturulduėu test sistemi



Şekil 3.5 Yük modeli için oluşturulan devre şeması

Yüke Sinüzoidal gerilim uygulandığında çekmiş olduğu akımın dalga şekli Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.6 Dimmer kontrollü yüke ait akım dalga şekli

Yükün nominal çalışma gerilimi olan 220 V değerindedir.

Yük, temel ve temel olmayan harmonik frekanslarda sabit bir akım kaynağı olarak modellenir. SAK modelinin akım değerleri için saf sinüzoidal besleme altında sistemde ölçümü ve FFT analizi yapılan akım dalga formunun frekans domeynindeki değerleri kullanılmaktadır. Yapılan ölçüm ve analizler sonucunda yük akımı için Tablo 3.1’deki değerler elde edilmiştir.

Tablo 3.1 üç baralı sistemde farklı harmonik akım değerleri

	Harmonik No			
	1	3	5	7
Genlik (A)	6,7235	3,7622	0,6574	0,6708
Açı°	-64,8	-12,8	67,2	-119,5

Yük bağı olduğu baranın gerilimi ve çektiği akım, 250V ve 225V gerilim altında ölçülmüş, yük barasındaki gerilim ve yükün çektiği akım Tablo 3.2 ve Tablo 3.3’de verilmiştir.

Tablo 3.2 250V kaynak geriliminde yük barasının gerilimi ve yük akımı

		Harmonik No			
		1	3	5	7
V	Genlik (V)	245,54	10,230	2,960	4,2200
	Açı°	-0,11	-109,96	-26,91	147,43
I	Genlik (A)	7,645	2,2760	0,747	0,7620
	Açı°	-64,8	-12,8	67,2	-119,6

Tablo 3.3 225V kaynak gerilimi altında yük barasının gerilimi ve yük akımı

		Harmonik No			
		1	3	5	7
V	Genlik (V)	223,64	9,0100	2,610	3,7200
	Açı°	-0,26	-110,08	-27,11	147,4
I	Genlik (A)	6,7235	3,7622	0,658	0,6708
	Açı°	-64,8	-12,8	67,2	-119,5

Bu veriler ışığında NED modeli parametreleri olan Norton empedansı ($Z_{N,h}$) ve Norton akım kaynağı ($I_{N,h}$) sırasıyla denklem (3.10) ve (3.11)’deki gibi hesaplanır. $Z_{N,h}$ ve $I_{N,h}$ değerleri Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4 NED modeli parametreleri harmonik değerleri

		Harmonik No			
		1	3	5	7
$Z_{N,h}$	Genlik	23,77	0,82	3,93	5,48
	Açı°	66,22	83,73	-92,62	-92,01
$I_{N,h}$	Genlik (A)	16,13	7,21	1,32	1,35
	Açı°	-65,78	165,67	66,35	-120,05

Test sisteminde ölçüm sonuçlarından yararlanılarak oluşturulan GYTE yük modeline ait parametrelerden $G_e = 0,0251$ olarak hesaplanmıştır. Harmonik numaralarına göre hesaplanan diğer parametreler Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5 GYTE yük modeli için hesaplanan model parametreleri

		Harmonik No			
		1	3	5	7
I_{sc}	Genlik (A)	0,015	0,603	0,293	0,154
	Açı°	0,000	5,410	1,124	-0,379
I_{ss}	Genlik (A)	0,346	0,570	0,252	0,489
	Açı°	-90,000	-84,590	91,124	-90,379
B_e		0,009	0,026	0,043	0,060

ÇFAM modelinde öncelikle 225V değerinde saf sinusoidal besleme altında ölçülen yük akımı ve bara gerilimleri kullanılarak admitans matrisinin ilk sütunu denklem (3.16)'daki gibi hesaplanmıştır. Daha sonra denklem (3.17)'deki gibi matrisin diğer elemanları hesaplanmıştır. Admitans matrisi elemanlarının gerçek ve sanal değerleri sırasıyla denklem (3.34) ve (3.35)'de verilmiştir.

$$Y_{CFAM}(Reel) = \begin{bmatrix} 0,0252 & -0,0002 & -0,0023 & 0,0090 \\ 0,0031 & 0,0243 & 0,0044 & 0,0277 \\ 0,0021 & 0,0104 & 0,0312 & 0,0524 \\ 0,0011 & 0,0102 & 0,0174 & 0,0843 \end{bmatrix} \Omega \quad (3.34)$$

$$Y_{CFAM}(İmajiner) = \begin{bmatrix} -0,0103 & 0,0007 & -0,0052 & -0,0022 \\ -0,0023 & -0,0115 & -0,0039 & -0,0058 \\ 0,0005 & -0,0059 & -0,0082 & 0,0080 \\ 0,0002 & 0,0048 & -0,0044 & 0,0185 \end{bmatrix} \Omega \quad (3.35)$$

3.3 Sonuç ve Özet

Nonlinear yüklerin artması ile harmonik analizi önemiyet kazanmıştır. Harmonik analizinin doğruluğu ise harmonik üreten yüklerin hassas bir biçimde modellenmesine bağlıdır. Bu bölümde mevcut yük modelleri kısaca tanıtılmıştır. Bu modeller içinden dört farklı harmonik üreten yük modeli ele alınmıştır.

Bu modeller içinde en basit yapıya sahip olan model sabit akım kaynağı modelidir. Nonlinear yükün sabit akım kaynağı olarak modellenebilmesi için yük karakteristiğinin sahip olduğu harmonik akımların bilinmesi yeterlidir. Literatürde pek çok yüke ait harmonik akım karakteristiği bulunmaktadır. Bu özelliği diğer modellere göre başka bir avantajıdır. Fakat sistemde sinüzoidal gerilime sahip

olmayan kaynakların bulunması ya da sistemin gerilim değişim aralığının geniş olması durumunda bu yük modeli hatalı sonuç verebilmektedir. Bu sorun Norton eşdeğer devre modeli ile giderilmiştir.

Norton eşdeğer devre modeli geniş gerilim aralıklarını da hesaba kattığı için iteratif olmayan analiz metotların da sabit akım kaynağı modeline göre daha hassas sonuçlar vermektedir. Fakat gerilim ile akım harmonikleri arasındaki etkileşimi dikkate almaması modelin bir dezavantajıdır.

ÇFAM modeli gerilim ile akım harmonikleri arasındaki ilişkiyi incelemek motivasyonu sonucu oluşturulmuş bir modeldir. Çok fazla detay içermesi ve gerçek sistemlere uygulanabilirliğinin az olması dezavantajları arasında yer almaktadır. Yapılan analizlere göre sabit akım kaynağı modelinin, bu modeller için de en fazla detaya sahip olmasına rağmen, ÇFAM göre daha hassas sonuçlar vermektedir [68].

GYTE harmonik üreten yük modeli, diğer üç modelin ele almadığı kaynak ile yük arasındaki harmonik sorumluluk paylaşımını belirlemesi açısından avantajlı konumdadır. Modelin tamamen ölçülebilir parametrelerden oluşturulması diğer bir avantajıdır.

Bu bölümde laboratuarda yapılan ölçümler ile harmonik üreten bir yük dört değişik yöntemle modellenmiş ve model parametreleri belirlenmiştir. Bu modeller ileriki bölümlerde harmonikli güç akışı hesaplarında kullanılacaktır.

4 DAĞITIM SİSTEMLERİNDE HARMONİKLİ GÜÇ AKIŞI

Bu bölümde harmonik güç akışı hakkında genel bir bilgi verilecektir. Sonra literatürde yer alan dört farklı harmonik güç akışı algoritması incelenecektir. Bu algoritmalar, Harmonik Etkileşim Analizi (HE), İteratif Harmonik Etkileşim analizi (IHE), Tam Harmonik Güç Akışı analizi (THGA) ve Basit Harmonik Güç Akışı (BHGA) analizidir. Bu algoritmalar, öncelikle çeşitli yük modelleri kullanılarak gerçek ölçüm verileri ile karşılaştırılacak ve geçerlilikleri incelenecektir.

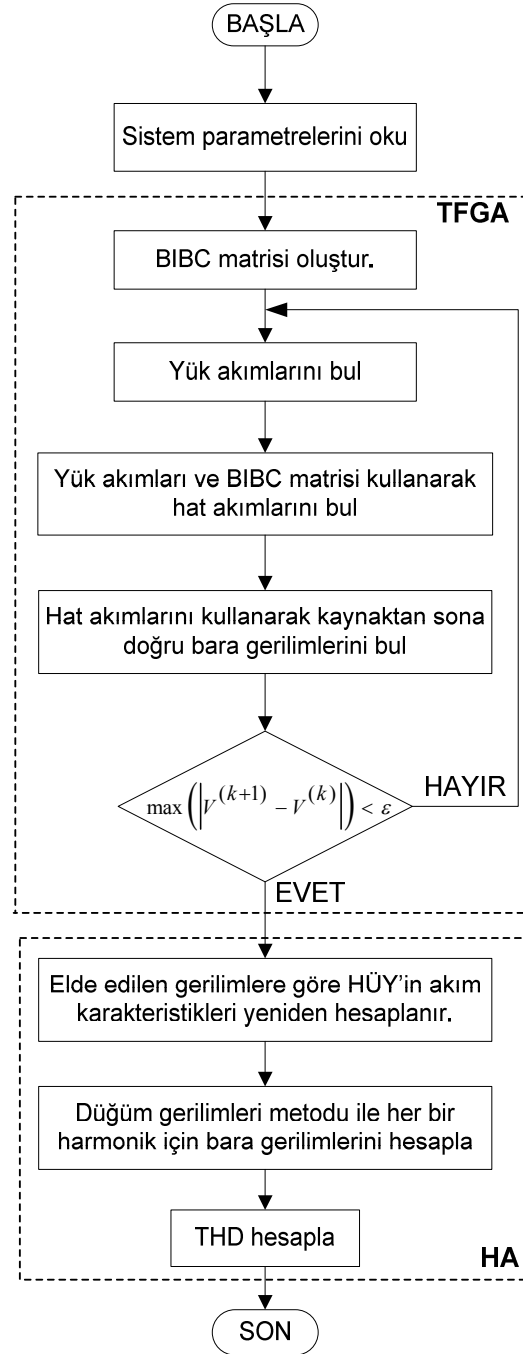
4.1 Harmonik Güç Akışı Algoritmaları

Bölüm 2.1’de, güç akışı analizlerinin, güç sistemlerinde planlama, işletim ve kontrol bakımından büyük bir öneme sahip olduğu belirtilmiş ve analiz sonuçlarının kullanıldığı durumlardan bazıları verilmiştir. Lineer olmayan (harmonik üreten) elemanların kullanımının artmasıyla birlikte temel frekansta gerçekleştirilen güç akışı algoritmaları bara gerilimlerinin ve çekilen güçlerin belirlenmesinde yetersiz kalmıştır. Bu eksikliği gidermek amacı ile literatürde sistemdeki akım ve gerilimlerin THD değerleri, temel harmonik ve temel harmonik dışındaki akım ve gerilim değerleri, rezonans problemleri ve harmonik kaynakları hakkında bilgi veren çeşitli harmonik güç akışı algoritmaları önerilmiştir [4]-[10], [65]-[67]. Literatüre geçmiş algoritmalar temel olarak frekans domeyni ve zaman domeyni olmak üzere iki kısımda incelenebilir. Zaman domeyninde geliştirilen harmonik güç akışı algoritmaları doğruluk yönünden daha iyi sonuç vermesine rağmen getirdiği işlem yükü nedeni ile frekans domeyninde yapılan analizlere göre yavaş çalışmaktadır. Ayrıca zaman domeyni analizlerin temel harmonik güç kısıtlarına dâhil edilemeyeşi bir dezavantajdır. Bu nedenle literatürdeki çalışmalarda frekans domeyni harmonik analizleri daha fazla tercih edilmiştir. Harmonikli sistemlerde bilinmeyen sayısının daha fazla olması, çözümü zorlaştırmaktadır. Bu zorluğu gidermek amacı ile harmonikli sistemler için frekans domeyninde birbirinden farklı birçok çözüm teknikleri geliştirilmiştir [2], [5]-[11]. Bu bölümde frekans domeyni harmonik güç akışı algoritmalarından dört tanesi detaylı olarak anlatılacaktır. Bu algoritmalar

ilki harmonik etkileşim analizidir. Harmonik Etkileşim Analizi iteratif bir metot değildir ve genel olarak sistemde rezonans probleminin var olup olmadığının incelenmesinde kullanılmaktadır [5]-[6]. Harmonik etkileşim analizinde gerilimin harmonik bileşenlerinin temel frekans bileşenine etkisi ihmal edilmiştir. Bu etkiyi hesaba katmak için literatürde birbirinden farklı iteratif parçalar içeren harmonik güç akışı algoritmaları bulunmaktadır. Bu algoritmalarından İHE analizinde harmonik analiz temel frekansın da hesaplandığı iteratif bir yapıya sahiptir [3], [7]-[8]. Böylece harmoniklerin temel frekans bileşenine etkisi de göz önünde bulundurulmuş olur. Fakat harmonik analiz kısmında değişen HÜY karakteristiği temel frekans güç akışında (TFGA) hesaba katılmaması bir dezavantajdır. Bu durum karşısında BHGA ve THGA algoritmaları oluşturulmuştur [3], [9]-[11].

4.1.1 Harmonik Etkileşim Analizi

Basit bir metot olan HE analizinde sistemle harmonik üreten yük arasında doğrudan bir etkileşimin olmadığı varsayılarak, harmonik gerilimlerin HÜY'e etkisi ihmal edilmektedir. HÜY'ün harmonik gerilimlerden etkilenmemesi yaklaşımı bu yüklerin TFGA algoritmalarına dahil edilmesini kolaylaştırır. Şekil 4.1'de verilen HE analizine ait akış diyagramı verilmiştir. Akış diyagramında görüldüğü gibi öncelikle TFGA yapılarak her bir baraya ait temel harmonik gerilimleri hesaplanır. TFGA'dan elde edilen temel harmonik gerilimine ve yük gücü kullanılarak HÜY'lerin temel harmonik yük akımı elde edilir. Harmonik akım genliklerinin temel harmonik akım genliğine oranı sabit kalacak şekilde HÜY'lere ait akım harmonikleri yeniden belirlenir. HÜY'lere ait harmonik akımların yeniden belirlenmesine ilişkin ifadeler denklem (4.1) ve (4.2)'de verilmiştir. Daha sonra her bir baraya bağlı harmonik üretmeyen (lineer) yüklerin admitansları ve generatörlerin iç admitanslarının temel harmonikteki değerleri TFGA analizinden elde edilen bara güçleri ve temel harmonik bara gerilimleri kullanılarak (4.3)'deki gibi elde edilir. Her bir harmonik için admitans modelleme esaslarına bağlı olarak (4.4)'deki gibi hesaplanır. Düğüm Gerilimleri (DG) yöntemiyle TFGA'dan elde edilen temel harmonik gerilimleri ve sistem harmonik admitansları kullanılarak her bir harmonik için bara gerilimleri kullanılır.



Şekil 4.1 HE analizinin program akış diyagramı

Denklem (4.1) ve (4.2)'de S , V ve I_1 güç akışından elde edilen değerlerdir. I'_1 ve I'_h ise HÜY'ün sinüzoidal kaynak gerilimindeki harmonik karakteristik akım etkin değerleridir.

$$I_1 = \left(\frac{S}{V} \right)^* \quad (4.1)$$

$$I_h = I_1 \left(\frac{I_h'}{I_1'} \right) \quad (4.2)$$

$$Y_i^1 = \frac{S_i^*}{(V_i^1)^2} \quad (4.3)$$

$$Y_i^h = f_i(Y_i^1, h) \quad (h = 2, 3 \dots n) \quad (4.4)$$

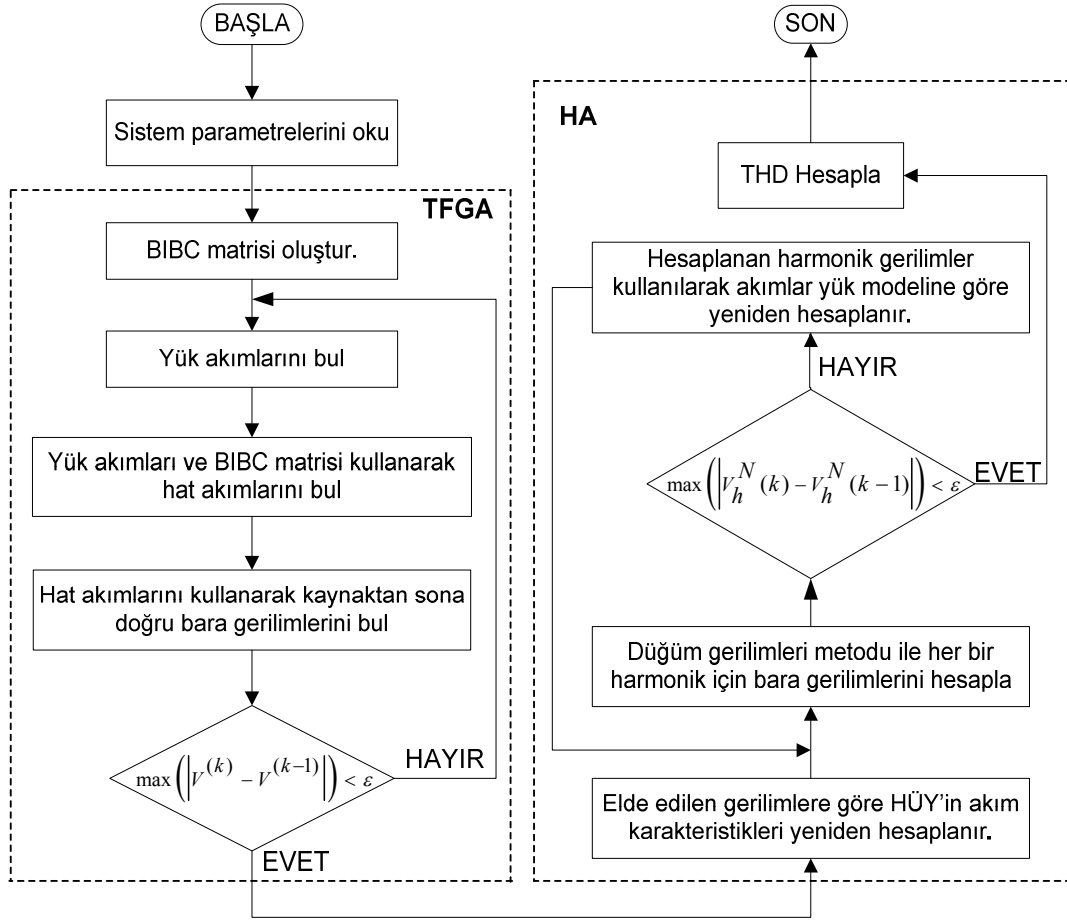
Bu ve bundan sonraki anlatılacak olan algoritmalarda TFGA için Bölüm 2.2’de anlatılan sweep temelli güç akışı algoritmalarından Thukaram’ın algoritması kullanılmıştır.

4.1.2 İteratif Harmonik Etkileşim Analizi

IHE analizi temel olarak iki iteratif yapıdan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi TFGA’dır. TFGA, HE analizindeki ile aynı yapıdadır. İkincisi ise harmonik analiz (HA) kısmıdır. Şekil 4.2’deki akış diyagramından anlaşılacağı gibi HA kısmı da iteratif yapıdadır.

Öncelikle TFGA’dan elde edilen temel frekans gerilim ve güç değerleri ile HÜY’lere ait temel harmonik akım etkin değerleri hesaplanır ve HÜY karakteristiği değişmeyecek şekilde akım harmonikleri (4.1) ve (4.2)’deki gibi yeniden düzenlenir. Sonrasında harmonik analiz için iterasyonlar başlatılır. HE analizinde olduğu gibi sistemin harmoniklere bağlı admitans modeli oluşturulur ve her bir harmonik için DG metodu uygulanarak her bir bara ya ait harmonik gerilimler hesaplanır.

DG yöntemiyle harmonik gerilimler hesaplandıktan sonra harmonik analiz çözümünün yakınsama durumu kontrol edilir. HÜY’ler için bir önceki iterasyonda elde edilen harmonik gerilimler ile geçerli iterasyonda hesaplanan harmonik gerilimler karşılaştırılır. Eğer gerilimlerin mutlak fark değeri tolerans değerinin altında ise çözüm yakınsamıştır ve analiz sonlandırılır. Bara gerilimlerinin THD oranları hesaplanır. Böylece IHE analizi icra edilmiş olur. IHE analizine ait akış diyagramı Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 IHE analizine ait akış diyagramı

Eğer çözüm yakınsamadıysa DG yöntemiyle elde edilen harmonik gerilimler kullanılarak yük modeline göre harmonik akım karakteristikleri yeniden belirlenir. SAK modeli için (3.1) ve (3.2) kullanılarak harmonik akımlar yeniden düzenlenir.

NED modeli için sabit norton akım kaynağı değerleri (I_{NED}^h) değiştirilmez. HA'de geçerli iterasyon için hesaplanan harmonik gerilimlere göre norton empedansı (Z_{hNED}^N) üzerinden geçen akım yeniden hesaplanır. Norton empedansı üzerinden geçen akım ile norton akım kaynağı akım değerleri vektörel olarak toplanarak bir sonraki iterasyon için kullanılacak harmonik akım değerleri ($I_h^N(i+1)$) hesaplanmış olur. NED modeli için HÜY'e ait harmonik akımların yeniden düzenlenmesine ilişkin ifade (4.5)'de verilmiştir. Denklemden yer alan N bara numarasını, h harmonik numarasını ve i iterasyon numarasını ifade etmektedir.

$$I_h^N(i+1) = I_{NED}^h + \frac{V_h^N}{Z_{hNED}^N} \quad (4.5)$$

ÇFAM modelinde HÜY'e ait model parametresi olan ÇFAM ile iterasyon sonucu elde edilen harmonik gerilimler kullanılarak (4.6) gibi bir sonraki iterasyon için harmonik akım değerleri elde edilmiş olur.

$$I_h^N = Y_{CFAM}^N V_h^N \quad (4.6)$$

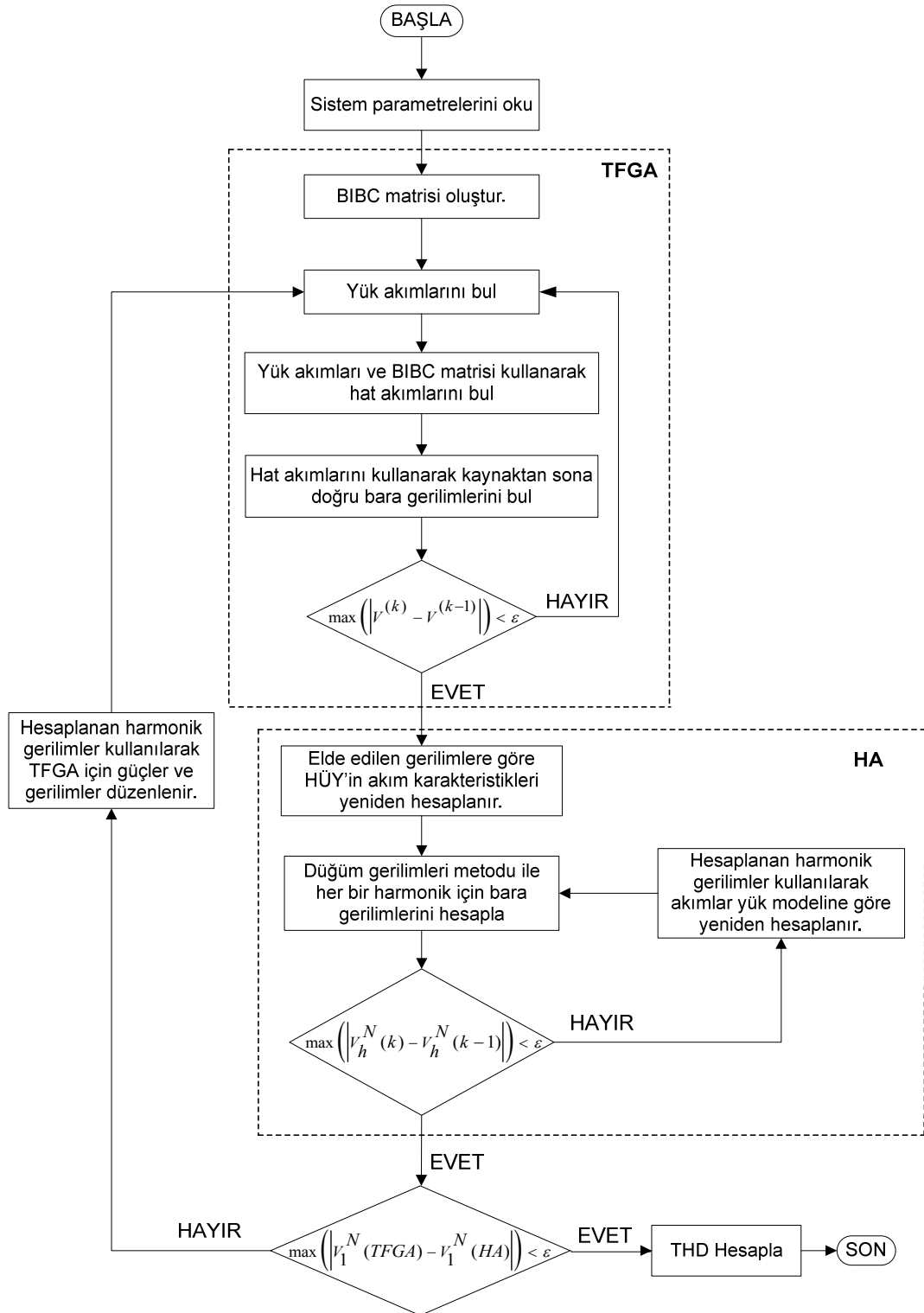
GYTE modelinde, bir sonraki iterasyon için HÜY'e ait harmonik akımlar yeniden hesaplanırken modelin yapısında bulunan I_{sc} ve I_{ss} harmonik akım değerleri sabit tutulur. NED modelinde olduğu gibi GYTE modelinde bulunan G_e ve B_e üzerinden geçen akım, iterasyonda hesaplanan harmonik gerilimlere bağlı olarak hesaplanır. Hesaplanan akım değeri I_{sc} ve I_{ss} harmonik akım değerleri ile vektörel olarak toplanarak bir sonraki iterasyon için GYTE modeline ait akım harmonikleri hesaplanmış olur. GYTE modeline ait akım harmoniklerinin yeniden belirlenmesine ilişkin ifade (4.7)'de verilmiştir.

$$I_h^N = i_{sc} + i_{ss} + (G_e - jhB_e)V_h \quad (4.7)$$

4.1.3 Basit Harmonik Güç Akışı

IHE analizinde olduğu gibi BHGA algoritmasında da iki iteratif yapı mevcuttur. IHE analizinde ihmal edilen HÜY karakteristiğindeki değişimin TFGA'na olan etkisi, bu algoritmada dikkate alınmıştır. Bu etkiyi hesaplamak için bu iki iteratif yapının haricinde, bu yapıların içinde bulunduğu üçüncü bir iteratif yapı bulunmaktadır. Algoritmanın TFGA kısmı, yukarıda anlatılan diğer iki algoritmada bulunan TFGA yapısı ile aynıdır. HA kısmı IHE analizindeki yapı ile aynı hesaplama adımlarına sahiptir. HA'da hesaplanan baraların temel frekans gerilim değerleri ile TFGA'da hesaplanan temel frekans gerilim değerleri arasındaki fark tolerans değerinin altında olması durumunda algoritma sonlandırılır. Eğer istenen tolerans değeri sağlanamamışsa bir sonraki iterasyona geçilir. Bir sonraki iterasyonda TFGA için HA kısmında hesaplanan baraların temel frekans gerilim ve akım değerleri

kullanılarak hesaplanan görünür güç ile temel frekans gerilim değerleri kullanılır. BHGA'ya ait akış diyagramı Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3 BHGA'ya ait akış diyagramı

4.1.4 Tam Harmonik Güç Akışı

Bu bölüme kadar anlatılan algoritmalarda temel harmonik dışındaki harmonikler temel frekans güç akışı analizine dâhil edilmemiştir. Bu metot geleneksel güç akışının lineer olmayan yüklerin ve gerilim harmoniklerinin hesabını da içeren yeniden yapılandırılmış halidir.

Şekil 4.4'deki THGA'ya ait algoritma akış diyagramından anlaşıldığı gibi sistem diğer algoritmalarla benzer yapıdadır. THGA algoritması da iki ayrı bloktan oluşmaktadır [2].

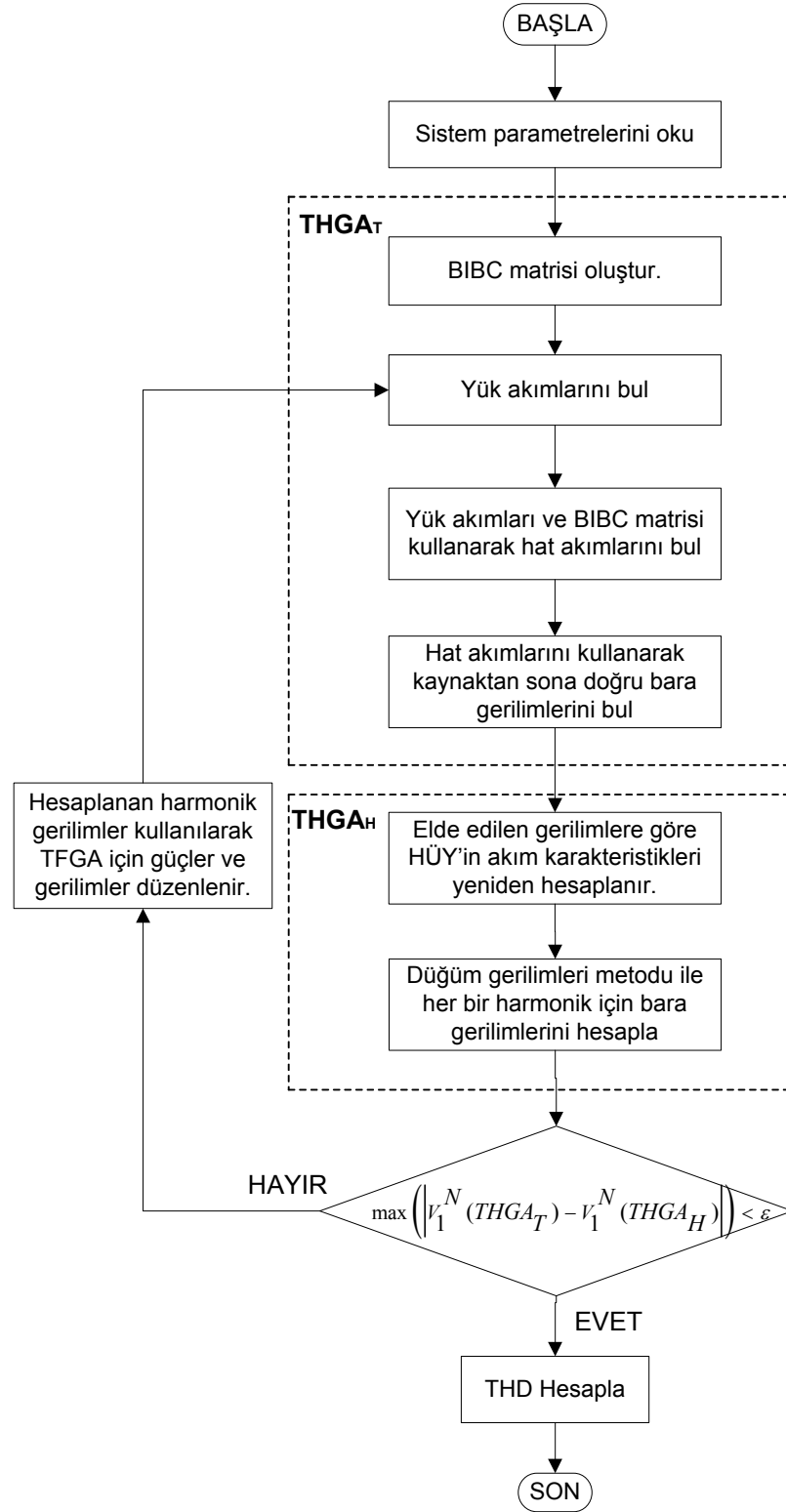
- Temel frekans gerilimlerin hesaplandığı $THGA_T$ bloğu
- Temel frekans gerilimlerinin haricinde diğer harmoniklerin de hesaplandığı $THGA_H$ bloğu

$THGA_T$ bloğundaki hesaplamalar diğer algoritmalarındaki TFGA bloğu ile benzerdir. Farklı olarak temel frekanstaki gerilimler kendi içinde bir kere hesaplanır. Diğer bir deyişle iteratif yapıda değildir. Aynı şekilde $THGA_H$ bloğu diğer algoritmalarındaki HA ile aynı adımlara sahiptir. HA bloğundan farklı olarak iteratif değildir ve BHGA'daki gibi temel harmonik dahil bütün harmonikler için analiz yapılır.

THGA algoritmasında bu iki blokta baralara ait gerilimler hesaplandıktan sonra $THGA_H$ bloğunda hesaplanan değerlerden yararlanarak (4.8) bara güçleri yeniden hesaplanır.

$$S_i = \sum_{k=1}^N V_i^h (I_i^h)^* \quad (4.8)$$

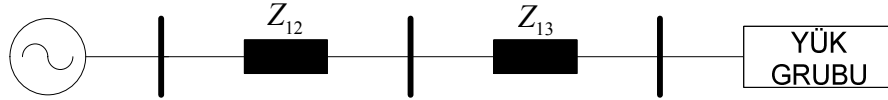
Hesaplanan bara güçleri ve $THGA_H$ 'da hesaplanan temel frekans gerilimleri kullanılarak bir sonraki iterasyonda $THGA_T$ bloğundaki hesaplamalar yeniden yapılır. Eğer $THGA_T$ ve $THGA_H$ bloğunda hesaplanan temel frekans gerilim değerleri arasındaki fark belirtilen tolerans değerinin altında ise algoritma sonlandırılır.



Şekil 4.4 THGA'ya ait algoritma akış diyagramı

4.2 Gerçek Sistem Üzerinde Uygulama

Bu bölümde; laboratuvar ortamında 3 baralı bir sistem oluşturulmuştur. Bölüm 3’ de oluşturulan yük modelleri, şeması verilen Şekil 4.5’deki devre içinbu bölümde anlatılan harmonik güç akışı algoritmalarına uyarlanmıştır.



Şekil 4.5 üç baralı gerçek test sistemi

Test sisteminde yapılan ölçüm sonuçları Şekil 3.6’de görüldüğü gibi yük akımı harmonik bozulmaya sahiptir. ve toplam harmonik bozulma oranı (THD) %50 olarak ölçülmüştür. 1. baraya bağlı olan gerilim kaynağı sinüzoidal olup $225\angle 0^\circ$ V değerinde seçilmiştir. Hat empedansları temel harmonikte $Z_{12} = 0.1 + j0.6283$ ve $Z_{23} = 0.2 + j1.5708$ değerlerindedir. Sistemde baralardan ölçülen temel harmonik gerilimi ve bozulma miktarları Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Baralara ait temel harmonik gerilimi ve bozulma değerleri

Bara No	Temel Harmonik Gerilimi	Harmonik Bozulma Miktarı (THD)
2	$223.64\angle -0.26$	1.46%
3	$220.31\angle -0.95$	5.21%

Tablo 4.1’de 2 nolu barada %1.46 ve 3 nolu barada %5.21 değerinde THD’nin varolduğu görülmektedir. Ayrıca 3 nolu barada temel harmonik gerilimi yükün nominal çalışma gerilimi olan 220 V değerindedir.

Yük, temel ve temel olmayan harmonik frekanslarda sabit bir akım kaynağı olarak modellenir. SAK modelinin akım değerleri için saf sinüzoidal besleme altında sistemde ölçümü ve FFT analizi yapılan akım dalga formunun frekans domeynindeki değerleri kullanılmaktadır. Yapılan ölçüm ve analizler sonucunda yük akımı için Tablo 3.1’deki değerler elde edilmiştir.

Bölüm 3.2’de tanıtılan test ortamında oluşturulan yükler esas alınarak oluşturulan HÜY modelleri kullanılarak üç baralı sistem için harmonik güç akışı algoritmaları denenmiş ve analiz sonucu elde edilen temel harmonik gerilimleri ve THD (%) oranları Tablo 4.1’de verilen gerçek değerler ile karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçları ve gerçek değerler ile karşılaştırılarak hesaplanan hata oranları iki ve üç numaralı baralar için sırasıyla Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’de verilmiştir. Hata oranları Temel harmonik gerilimi ve THD oranı için sırasıyla denklem (4.9) ve (4.10)’deki gibi hesaplanmıştır.

$$\%E_V = \frac{|V_g - V_a|}{V_g} * 100 \quad (4.9)$$

$$\%E_{THDv} = \frac{|THDv_g - THDv_a|}{THDv_g} * 100 \quad (4.10)$$

Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’de, gerçek sistemde baralarda ölçülen temel harmonik gerilimleri ile harmonik güç akışı analizi sonuçlarından elde edilen baraların temel harmonik gerilimlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. THD değerlerindeki hata oranları göz önünde bulundurulduğunda en iyi sonucu SAK modeli için THGA algoritması, NED modeli için BHGA algoritması, GYTE yük modeli için BHGA algoritması vermektedir. THD değerlerinin hata oranları model-algoritma çifti için ele alındığında en iyi sonucu, THD hata oranı en küçük olan SAK-THGA çiftinin verdiği görülmektedir. Diğer taraftan en kötü sonuç veren çift ise NED-IHE çiftidir. Ayrıca yeni geliştirilen GYTE yük modelinin güç akışına uygulanması ile elde edilen sonuçlar diğer yük modellerinin sonuçları ile karşılaştırıldığında büyük farklar olmadığı görülmektedir.

Harmonik güç akışı algoritmalarında hesaplanan baraların 3. harmonik gerilimlerine ait sonuçlar Tablo Ek 4’de, 5. harmonik gerilimlerine ait sonuçlar Tablo Ek 5’de ve 7. harmonik gerilimlerine ait sonuçlar Tablo Ek 6’da verilmiştir. Bu tablolardaki hata değerlerine bakarak analiz sonuçlarının ölçülen değerlere yakın olduğunu ve en iyi sonucu SAK-THGA model algoritma çiftinin verdiğini söyleyebiliriz.

Tablo 4.2 iki numaralı baraya ait analiz sonuçları ve ölçülen değerler arasındaki hata oranı

Model- Algoritma	Temel Harmonik Gerilimi	Temel Harmonik Hata Oranı	% THD	THD Hata Oranı
SAK-HE	224,52∠ – 0,03°	%0,3935	1,30	%10,9589
SAK-IHE	224,52∠ – 0,03°	%0,3935	1,30	%10,9589
SAK-BHGA	223,63∠ – 0,26°	%0,0045	1,31	%10,2740
SAK-THGA	223,55∠ – 0,29°	%0,0402	1,42	%2,7397
NED-HE	224,58∠ – 0,04°	%0,4203	1,78	%21,9178
NED-IHE	224,52∠ – 0,03°	%0,3935	2,22	%52,0548
NED-BHGA	223,66∠ – 0,25°	%0,0089	1,69	%15,7534
NED-THGA	223,70∠ – 0,25°	%0,0268	2,21	%51,3699
GYTE-HE	---	---	---	---
GYTE-IHE	224,52∠ – 0,03°	%0,3935	1,78	%21,9178
GYTE- BHGA	223,66∠ – 0,25°	%0,0089	1,59	%8,9041
GYTE- THGA	223,70∠ – 0,25°	%0,0268	1,82	%24,6575
ÇFAM- THGA	223,68∠ – 0,25°	%0,0179	1,87	%28,0822

Tablo 4.3 üç numaralı baraya ait analiz sonuçları ve ölçülen değerler arasındaki hata oranı

Model- Algoritma	Temel Harmonik Gerilimi	Temel Harmonik Hata Oranı	% THD	THD Hata Oranı
SAK-HE	220,33∠ – 0,50°	%0,0091	4,64	%10,9405
SAK-IHE	220,33∠ – 0,50°	%0,0091	4,67	%10,3647
SAK-BHGA	220,32∠ – 0,94°	%0,0045	4,67	%10,3647
SAK-THGA	220,05∠ – 0,01°	%0,1180	5,05	%3,0710
NED-HE	220,42∠ – 0,57°	%0,0499	7,22	%38,5797
NED-IHE	220,33∠ – 0,50°	%0,0091	7,94	%52,3992
NED-BHGA	220,41∠ – 0,92°	%0,0454	6,54	%25,5278
NED-THGA	220,55∠ – 0,89°	%0,1089	7,87	%51,0557
GYTE-HE	---	---	---	---
GYTE-IHE	220,33∠ – 0,50°	%0,0091	6,37	%22,2649
GYTE- BHGA	220,41∠ – 0,92°	%0,0454	5,63	%8,0614
GYTE- THGA	220,55∠ – 0,89°	%0,1089	6,38	%22,4568
ÇFAM- THGA	220,57∠ – 0,82°	%0,1180	6,14	%17,8503

4.3 Sonuç ve Özet

Bu bölümde mevcut harmonik güç akışı algoritmaları kısaca tanıtılmıştır. Bu algoritmalarından frekans domeyni harmonik güç akışı analizlerinden dört farklı algoritma ele alınmıştır.

Bu algoritmalar içinde en basit yapıya sahip olan algoritma HE analizidir. Bu algoritma TFGA ve HA adımlarının hesaplandığı iki bloktan oluşmaktadır. TFGA bloğu iteratif hesaplama adımlarına sahiptir. HA işlemleri ise bir kez hesaplanmaktadır. İki blok arasında herhangi bir etkileşim söz konusu değildir. Bu özelliği ile daha az işlem yüküne sahip olması diğer algoritmalara göre avantaj sağlarken, TFGA’da gerilim harmoniklerinin yük akımına etkisinin ihmal edilmesi dezavantajı da beraberinde getirmektedir.

IHE analizinin, HE analizinden farkı HA iteratif olarak yapılmaktadır. HA’nin iteratif olması harmonik içeriklerin dolayısıyla THD oranının daha doğru hesaplanmasını sağlamaktadır. IHE analizinin dezavantajı, ilk aşamada yapılan TFGA sonuçları daha sonraki aşamalarda yapılan harmonik bileşenlerin belirlenmesinde yetersiz kalabilmekte ve hatalı sonuçlar elde edilebilmektedir. Diğer bir dezavantajı ise harmonik akım karakteristiğindeki değişimin güç akışı sonuçlarına yansıtılmamasıdır. Bundan dolayı TFGA ve HA arasında bir iteratif çözümün yapılmasına gerek duyulmuştur.

BHGA algoritması, IHE analizinde olduğu gibi HA ve TFGA iteratif çözüm içermektedir. HÜY’lere ait harmonik akım karakteristiğindeki değişimin TFGA’ya etkisi hesaba katılarak IHE analizindeki eksiklik giderilmiştir. BHGA algoritmasının dezavantajı diğer algoritmalara göre daha fazla işlem yüküne sahip olmasıdır.

Son olarak THGA algoritmasında diğer algoritmalarından farklı olarak harmonik gerilimlerin hesabı güç akışı analizinin içine dâhil edilmiştir. Böylece harmonik güç akışı algoritması, tek iteratif çözüm yöntemi kullanılarak hesaplanan bir denklem sistemi haline gelmiştir.

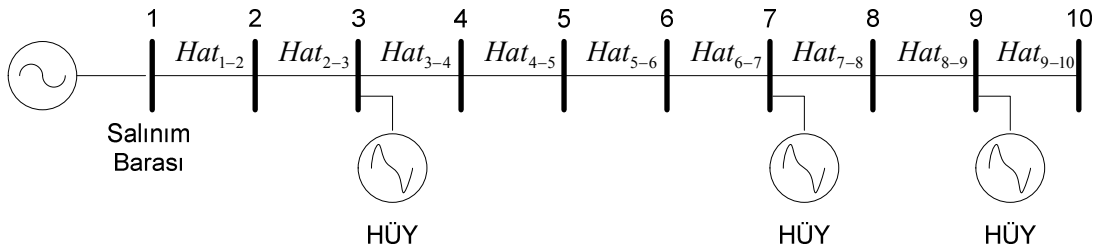
Bu algoritmalar 3 baralı laboratuarda oluşturulan gerçek bir sistem üzerinde SAK ve NED modeli kullanılarak denenen algoritmalar karşılaştırmalı olarak incelenmiş ve sonuçların birbirine yakın olduğu gözlemlenmiştir. Ölçüm değerlerine en uygun sonucu SAK-THGA model algoritma çiftinin verdiği belirlenmiştir.

5 UYGULAMA

Bu bölümde, 4. Bölümde anlatılan ve 3 baralı test sistemi için doğrulanan dağıtım sistemi harmonikli güç akışı algoritmaları literatürde bulunan 10 baralı ve 69 baralı radial test sistemleri için denenecek ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Ayrıca 10 baralı radyal test sisteminde algoritmaların parametrik analizleri yapılacak ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır.

5.1 10 Baralı Sistem Üzerinde Uygulama

Harmonik güç akışı algoritmaları 3 baralı sistem için doğrulandıktan sonra [69] çalışmasındaki Şekil 5.1’de verilen 10 baralı radyal dağıtım sistemi için uygulanmıştır.



Şekil 5.1 10 baralı radyal dağıtım sistemi

Kullanılan sisteme ait hat ve yük bilgileri Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 10 baralı sisteme ait hat ve yük bilgileri

Bara No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P(kW)	0	0	803	1606	1338	1427	714	1026	847	1427
Q(kVar)	0	0	407	814	678	723	362	520	429	723
Nonlinear %	0	0	100	100	100	100	100	100	100	100
Hat No		1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
Hat Direnci (pu)		0,023	0,003	0,141	0,13	0,375	0,171	0,389	0,907	1,01
Hat Reaktansı (pu)		0,078	0,114	0,228	0,12	0,327	0,149	0,22	0,513	0,57

Sistemde var olan harmonik yükler için, Bölüm 3.2’de oluşturulan HÜY modelleri kullanılmıştır. Bu yük grubu çeşitli güçlerde sistemdeki baralara dağıtılmıştır. 10

baralı sistemde HÜY'lerin 3,7 ve 9 numaralı baralara bağlı olduğu varsayılmıştır. Bölüm 3.2'de verilen model parametreleri, 10 baralı radyal sistemdeki baraların gerilimleri ve yük güçleri kullanılarak elde edilen bir katsayı ile çarpılmıştır. Bu katsayılar modellerin 10 baralı sistemdeki güç ve gerilim seviyelerine uyarlanması için hesaplanmıştır. Model parametrelerine göre katsayılar Tablo 5.2'de verilmiştir.

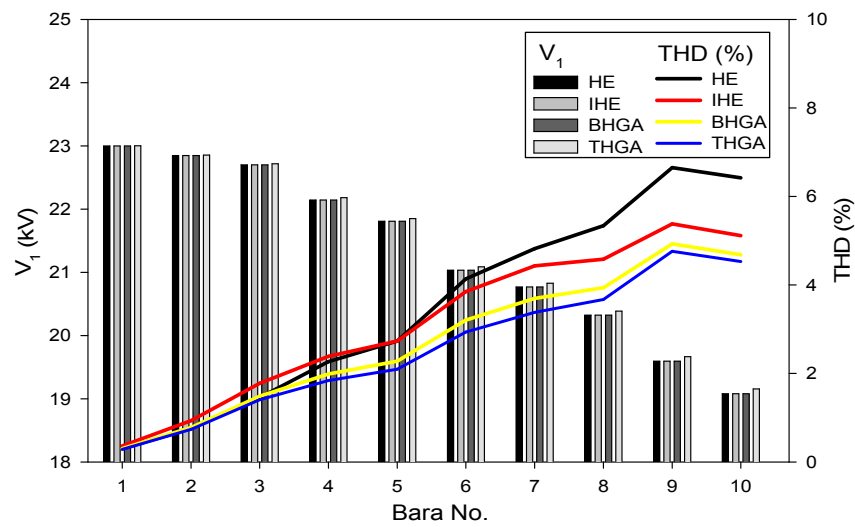
Tablo 5.2 SAK ve NED model parametrelerine ait katsayılar

Bara No	3	7	9
NED Admitansı	0,0575	0,0511	0,0607
NAK ve SAK	5,7524	5,1151	6,0667

Diğer baralarda harmonik üreten yük bulunmadığı için katsayılar sıfır olarak kabul edilmiştir.

Algoritmalar MATLAB ortamında hazırlanmıştır. TFGA için [44] referans alınmıştır. 10 baralı sistemde 100 MVA ve 23 kV baz değerleri kullanılmıştır. Yapılan güç akışı analizlerinde başlangıç gerilim değerleri temel frekans için 1 pu ve algoritmaların sonlandırılması için tolerans değeri 10^{-4} olarak seçilmiştir.

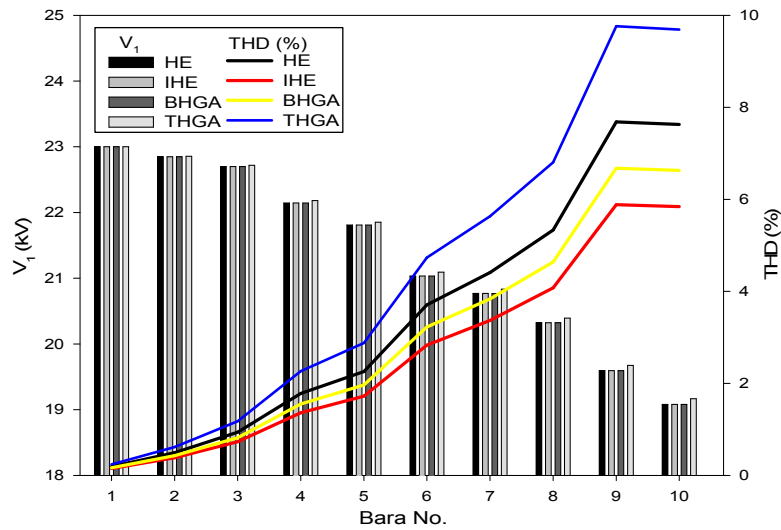
SAK modeli için harmonik güç akışı algoritmalarından elde edilen temel harmonik gerilimleri ve THD oranları Şekil 5.2'da verilmiştir.



Şekil 5.2 SAK modeli için harmonik güç akışı sonuçları

Şekil 5.2’de SAK modeli için HE, IHE, BHGA elde edilen temel harmonik gerilimlerinin etkin değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. THGA algoritmasında ise temel harmonik gerilim etkin değerleri ile diğer algoritmalarda elde edilen sonuçlar arasındaki çok az bir fark vardır ve baralardaki THD oranı büyüdükçe aradaki bu fark belirgin bir hal almaktadır. Bu küçük farkın sebebi harmonik analiz sonuçlarının güç akışına dahil edilmesidir. Bununla birlikte algoritmalar THD sonuçlarına göre karşılaştırıldığında IHE, BHGA ve THGA algoritmalarının birbirine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. HE analizinden elde edilen THD sonucu ise diğer algoritmalarla göre daha büyük değerdedir. Dolayısıyla HE analizinde hesaplanan harmonik bileşenler diğer algoritmalarla göre daha büyük bir değer olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.3’de NED modeli kullanılarak analizi yapılan harmonik güç akışı algoritmalarında hesaplanan temel harmonik gerilimleri ve THD oranları verilmiştir. HÜY’ün NED olarak modellendiği harmonik güç akışı algoritmalarından elde edilen temel harmonik gerilim etkin değerlerinin yaklaşık aynı olduğu fakat hesap edilen THD değerleri arasında fark olduğu görülmektedir. IHE ve THGA algoritmalarında hesaplanan harmonik gerilim etkin değerleri ve THD oranları birbirine yakın değerlerdedir. THD oranının büyük olduğu baralarda bu fark artmaktadır. THGA algoritmasında ise bu değerleri diğer algoritmalarla göre daha büyük değerdedir.

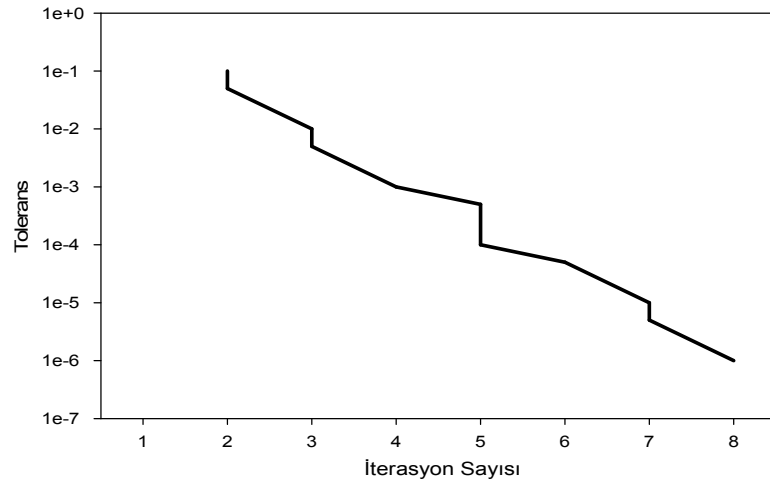


Şekil 5.3 NED modeli için harmonik güç akışı sonuçları

Son olarak Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'deki grafiklerden yola çıkarak modeller arasında kıyaslama yapmak gerekirse hesaplanan harmonik içerikleri ve THD açısından NED modeli kullanılarak yapılan analizlerinden elde edilen sonuçlar, SAK modeli kullanılarak yapılan analizlerden elde edilen sonuçlardan daha büyük Diğer değerlerdedir. Diğer taraftan her iki modelde hesaplanan temel harmonik gerilim etkin değerleri yaklaşık olarak aynıdır.

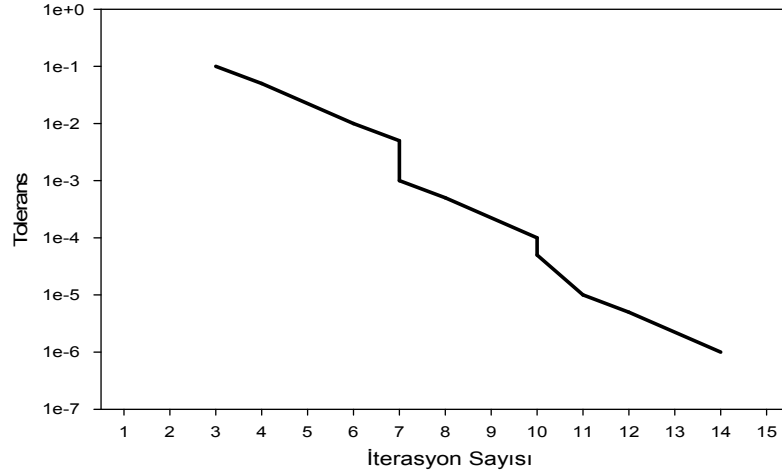
10 baralı test sistemi için SAK ve NED modelleri için hesaplanan bara gerilimlerinin 3., 5. Ve 7. harmonik değerleri Şekil Ek 2 - Şekil Ek 7 arasında verilmiştir.

Harmonik güç akışı algoritmalarındaki tolerans değerlerine göre iterasyon sayılarının değişimi SAK modeli için incelenmiştir. HE analizinde sadece TFGA iteratif olduğu için TFGA'daki tolerans değerine göre değişen iterasyon sayıları incelenmiştir. HE analizinde iterasyon sayılarının değişimi Şekil 5.4'te verilmiştir.



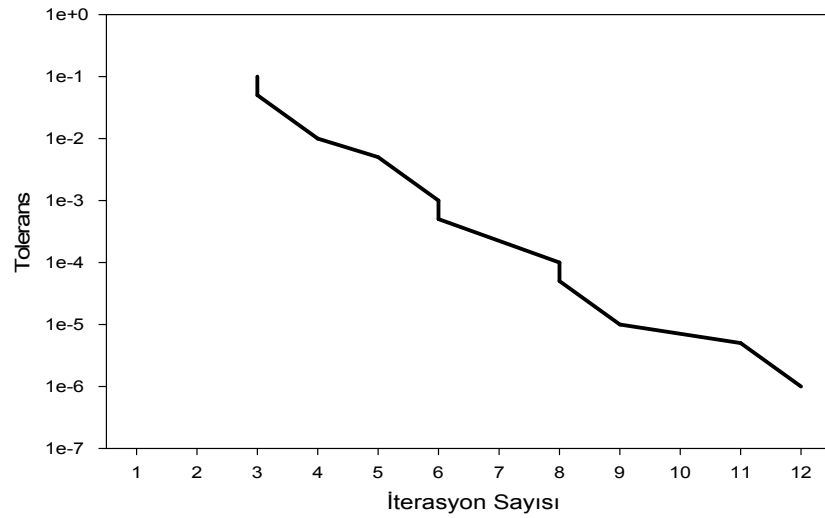
Şekil 5.4 HE analizi için tolerans değerine göre iterasyon sayısının değişimi

IHE analizinde iteratif yapıdaki HA bloğunda iterasyon sayısının tolerans değerine göre değişimi Şekil 5.5'de verilmiştir.



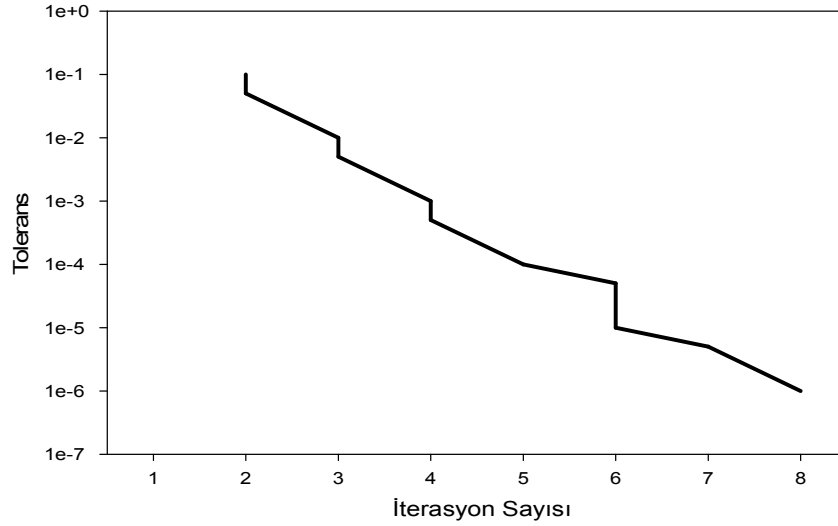
Şekil 5.5 IHE analizi için HA bloğundaki iterasyon sayısının toleransa göre değişimi

BHGA algoritmasında, TFGA ve HA bloklarındaki iterasyon sayısının değişimleri incelenmemiştir. Sadece bu blokları içine alan genel döngünün iterasyon sayısının toleransa göre değişimi incelenmiştir. Değişimin grafiği Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.6 BHGA algoritmasında iterasyon sayısının tolerans değerine göre değişimi

THGA algoritmasının iterasyon sayısının tolerans değerine göre değişimi Şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7 THGA algoritmasında tolerans değerine göre iterasyon sayısının değişimi

İterasyon sayısının değişimini gösteren grafiklerden, tolerans değeri azalırken iterasyon sayısının genellikle arttığı anlaşılmıştır. Ayrıca Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'deki grafiklerden aynı tolerans değeri için THGA algoritmasındaki iterasyon sayısının BHGA algoritmasındaki iterasyon sayısından daha küçük olduğu görülmektedir.

SAK modeli için iterasyon sayısının HÜY'ün bulunduğu bara sayısı ile ilişkisi de incelenmiştir. Bölüm 5.1'in başında HÜY'lerin 3., 7. ve 9. baraya bağlı olduğu durum ile 3., 5., 7. ve 9. baralara bağlı olduğu durumdaki iterasyon sayıları incelenmiştir. İkinci durumda 5. baraya ait SAK model katsayısı 9,584 olarak hesaplanmıştır. Diğer baralara ait katsayılar ilk durumdaki katsayılar ile aynı değerdedir. Her iki durum için tolerans değerleri 10^{-4} olarak alınmıştır. Durumlara ilişkin iterasyon sayıları Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.3 1. ve 2. durumlar için algoritmalara göre iterasyon sayıları

		HE	IHE		BHGA	THGA
		TFGA	TFGA	HA	GENEL	GENEL
İterasyon Sayısı	1.Durum (3 barada HÜY bulunmakta)	5	5	10	8	5
	2.Durum (4 barada HÜY bulunmakta)	5	5	12	9	8

Tablo 5.3’den anlaşıldığı gibi HÜY’ün bağlı olduğu bara sayısının artması HE ve IHE analizinde TFGA’daki iterasyon sayısını etkilememektedir. Bunun sebebi TFGA bloğunda yüklerin hepsinin lineer kabul edilmesi ve HÜY ile ilgili bir hesaplamanın olmamasıdır. IHE analizinde HA bloğuna ait iterasyon sayısı artmıştır. BHGA ve THGA algoritmalarında da aynı durum söz konusudur.

5.2 Büyük Sistem Üzerinde Uygulama

Bu bölümde harmonik güç akışı algoritmaları 69 baralı sisteme uygulanmıştır. [54]. Sistemin devre şeması Şekil Ek 1’de verilmiştir. Algoritmalar SAK ve NED modeli için denenmiştir. Bu sisteme ait yük bilgileri Tablo Ek 2’de ve hat bilgileri Tablo Ek 3’de verilmiştir.

Bu yükler modellenirken önceki bölümlerde 3 baralı sistem için kullanılan SAK ve NED model karakteristikleri kullanılmıştır. Model parametreleri belirlenen katsayılarla çarpılarak 69 baralı sistemdeki güç ve gerilim seviyelerine uyarlanmıştır. Sistemde 8 barada HÜY, diğer baralarda ise lineer yük olduğu varsayılmıştır. HÜY bulunduran baraların numaraları ve model parametreleri için belirlenen katsayılar Tablo 5.4’de verilmiştir.

Tablo 5.4 Model parametreleri için belirlenen katsayılar

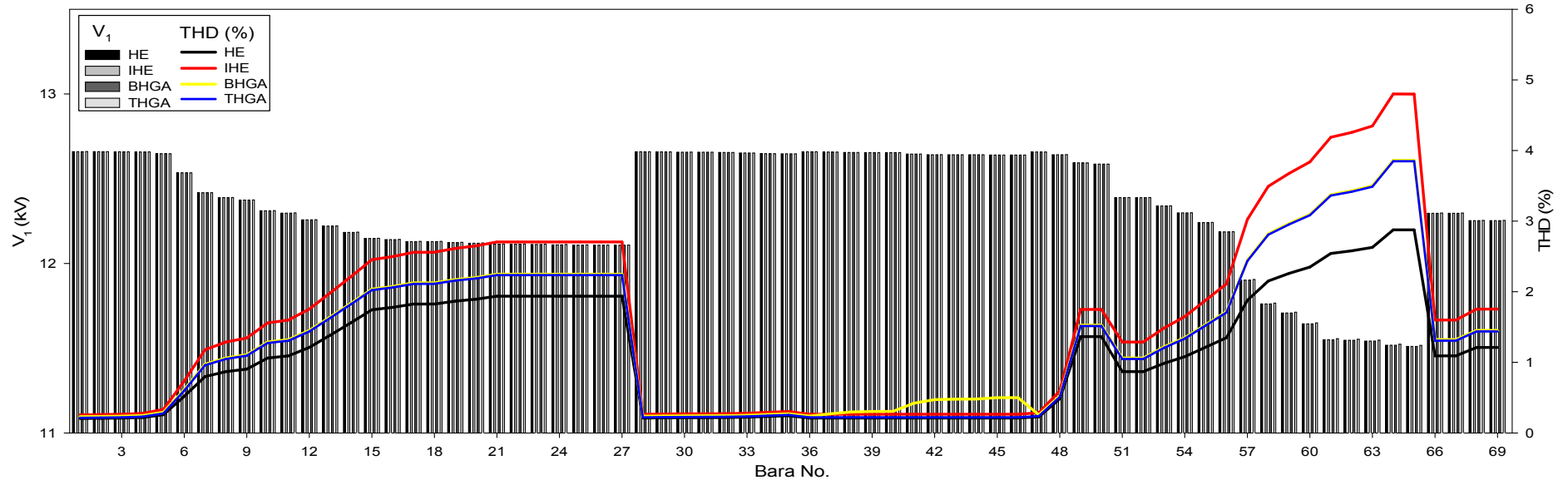
Bara No	I_{NAK} ve I_{SAK} için katsayılar	Z_{NAK} için katsayılar
10	0,3928	0,0071
16	0,6327	0,0115
21	1,6234	0,0295
35	0,0837	0,0015
49	5,4861	0,0997
59	1,4305	0,0260
62	0,4575	0,0083
64	3,2374	0,0588

69 baralı sistemde SAK modelinin kullanıldığı harmonik güç akışı algoritmalarının karşılaştırmalı sonuçları Şekil 5.8’deki grafikte verilmiştir.

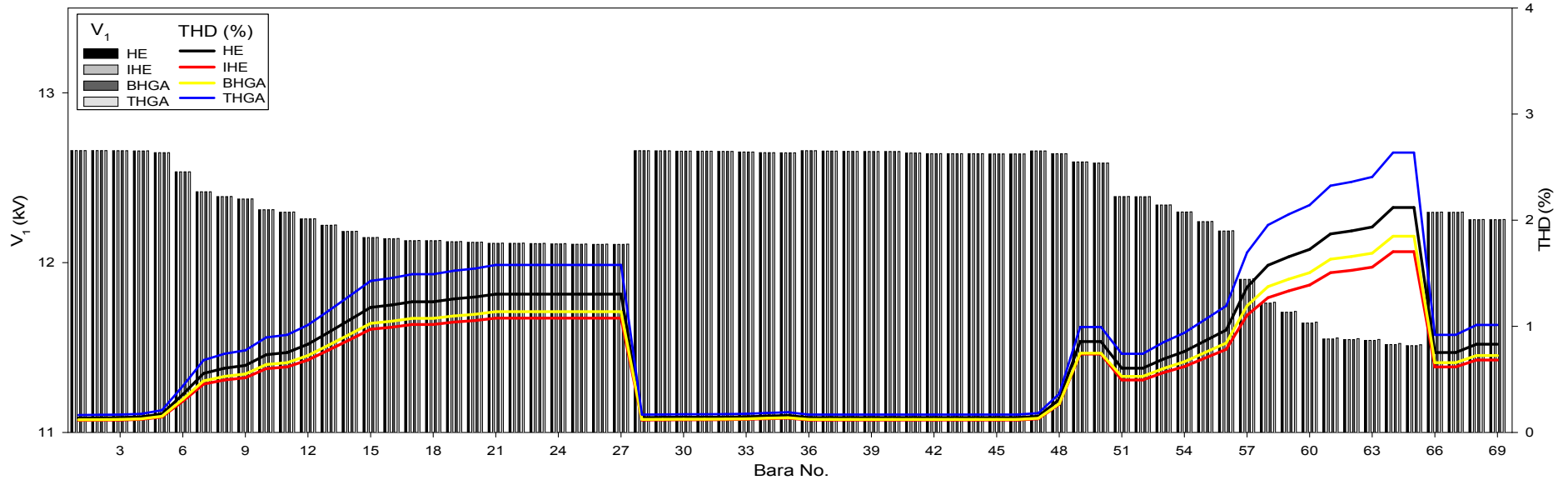
Şekil 5.8’deki grafikten analiz sonucu elde edilen temel harmonik gerilimlerinin etkin değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bununla birlikte

algoritmalar THD sonuçlarına göre karşılaştırıldığında sonuçlar arasındaki farkların küçük olduğu görülmektedir. Bu fark THD'nin büyük olduğu baralarda daha artmaktadır. THGA ile BHGA algoritmalarında hesaplanan THD oranları birbirine yakındır. HE analizinden elde edilen THD sonucu diğer algoritmalara göre daha büyük değerdedir. Diğer bir deyişle HE algoritmasında hesaplanan harmonik bileşenler diğer algoritmalara göre daha büyük bir değer olarak hesaplanmıştır.

Bu sistem için hesaplanan bara gerilimlerinin 3., 5. Ve 7. harmonik değerleri Şekil Ek 8 - Şekil Ek 13 arasında verilmiştir. Buradaki grafiklerden dört algoritma ile aynı model için hesaplanan harmonik gerilim genliklerinin birbirine yakın değerde olduğu görülmüştür.



Şekil 5.8 69 baralı sistemde SAK modeli için temel harmonik ve THD sonuçlarının algoritmalara göre grafiği



Şekil 5.9 69 baralı sistemde NED modeli için temel harmonik ve THD sonuçlarının algoritmalara göre grafiği

NED modeli kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen temel harmonik gerilimleri ve THD oranları Şekil 5.9'deki grafikte algoritmalara göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafik temel harmonik gerilimlerinin etkin değerleri açısından ele alındığında bu değerlerin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bununla birlikte algoritmalar THD sonuçlarına göre karşılaştırıldığında hesaplanan THD değerleri arasında çok küçük farklar olduğu ve bu farkların, harmonik bileşenlerin büyük olduğu baralarda arttığı tespit edilmiştir. THGA algoritmasında hesaplanan THD oranlarının diğer algoritmalara göre daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Analiz sonuçları yük modellerine göre karşılaştırıldığında bara gerilimlerinin temel harmonik etkin değerlerinin yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Diğer taraftan NED modeli kullanılarak yapılan analizlerde hesaplanan THD oranları, SAK modeli kullanılarak hesaplanan THD oranlarından daha büyük değerdedir.

6 SONUÇLAR VE İLERİYE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Güç akışı analizi, güç sistemlerinde verilmiş olan bara yüklenme koşulları için bilinmeyen gerilim ve güç değerlerinin hesaplanmasını amaçlar. Geleneksel güç akışı algoritmaları iletim sistemleri için uygulanmasına karşın dağıtım sistemlerinde bu algoritmalar sistem yapısından dolayı genellikle yakınsama problemi ile karşılaşmaktadır. Bu sebepten dağıtım sistemlerinde güç akışı analizi için geleneksel güç akışı algoritmalarından farklı algoritmaların oluşturulması gerekmektedir. Diğer taraftan teknolojinin gelişmesiyle birlikte HÜY'lerin kullanımının artmasından dolayı şebekelerdeki enerji kalitesi ve verimliliği düşmektedir. Enerji kalitesi ve verimliliği açısından HÜY'lerin hesaba katıldığı harmonik güç akışı algoritmaları büyük önem arz etmektedir. HÜY'lerin iletim sistemlerinden çok, dağıtım sistemlerinde kullanılması, dağıtım sistemlerinde harmonikli güç akışı algoritmalarının önemini artırmaktadır. Bu sebeplerden dolayı dağıtım sistemleri için HÜY'lerin hesaba katıldığı yeni güç akışı algoritmalarına ihtiyaç duyulmuştur.

Bu çalışmada literatürde var olan harmonik güç akışı algoritmaları ele alınmış ve bu algoritmalarından bazıları dağıtım sistemlerinde uygulanabilecek şekilde geliştirilmiştir. Ayrıca literatürde bulunan çeşitli yük modelleri ilk defa harmonikli güç akışında kullanılmıştır. Algoritmalar laboratuvar ortamında gerçekleştirilen 3 baralı bir sistem için çeşitli yük modellerinden yararlanılarak uygulanmıştır. Analiz sonuçları ölçüm verileri ile karşılaştırılmış ve algoritmalar hata oranlarına göre değerlendirilmiştir. Analiz sonucunda hesaplanan temel harmonik gerilimleri ile ölçülen temel harmonik gerilim etkin değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Diğer taraftan elde edilen THD sonuçları karşılaştırıldığında algoritmalar arasında küçük farkların olduğu tespit edilmiştir. THD değerlerindeki hata oranları göz önünde bulundurulduğunda en iyi sonucu SAK modeli için THGA algoritması, NED modeli için BHGA algoritması, GYTE yük modeli için BHGA algoritması vermektedir. THD değerlerinin hata oranları model-algoritma çifti için ele alındığında en iyi sonucu SAK-THGA çiftinin verdiği görülmektedir.

3 baralı test sistemi için algoritmalarından elde edilen sonuçların teyidi yapıldıktan sonra 10 ve 69 baralı radyal dağıtım sistemi için uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. 3 baralı sistemde olduğu gibi bu analizler sonucunda elde edilen temel harmonik gerilimlerinin birbirine yakın olduğu ve THD değerleri arasında küçük farkların olduğu görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda, algoritmalarla ilgili daha fazla parametrik çalışmalar yapılabilir. Ayrıca büyük bir dağıtım sistemi için harmonikli güç akışı algoritmalarının sonuçları ile bu iş için geliştirilen simülasyon yazılımlarının sonuçları karşılaştırılabilir ve performans analizleri yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Kocatepe C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O.; *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, Birsen Yayınevi, Kasım 2003
- [2] Herraiz S.; Sainz L.; Clua J.; , "Review of harmonic load flow formulations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.18, no.3, pp. 1079- 1087, July 2003
- [3] M. H. Hoccoğlu, A. Balıkçı, U. Eminoğlu, M. E. Balci, "Harmonikli Sistemlerde Güç Akışı İçin Yeni Bir Yük Modeli Geliştirmek.", Tübitak Projesi Proje No: 106E132
- [4] Task Force Harmonic Modeling and Simulation, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.11, No.1, pp. 452-465, January, 1996.
- [5] Densen TJ, Bodger PS, and Arrillaga J, "Three-phase Transmission System for Harmonic Penetration Studies", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems.*, vol. PAS-103, 310–317, 1984.
- [6] A. A. Mahmoud and R. D. Shultz, "A Method for Analyzing Harmonic Distribution in AC Power Systems", *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, pp. 1815–1824, June 1982.
- [7] B. C. Smith, J. Arrillaga, A. R. Wood, and N. R. Watson, "A Review of Iterative Harmonic Analysis for AC-DC Power Systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, pp. 180–185, Jan. 1998.
- [8] J. Arrillaga and C. D. Callaghan, "Three phase AC/DC load and harmonic load flows," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, pp. 238–244, Jan. 1991.
- [9] Valcárcel M, and Mayordomo JG, Harmonic power flow for unbalanced systems, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 8, 2052–2059, 1993.

- [10] Xia D, and Heydt GT, Harmonic power flow studies. Part I and II, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, 1257–1270, 1982.
- [11] Arrillaga, J., Bradley, D.A., and BODGER, P.S.: *Power system harmonics* (John Wiley and Sons, 1985)
- [12] Xu, Wilsun; , "Component Modeling Issues for Power Quality Assessment," *IEEE Power Engineering Review*, , vol.21, no.11, pp.12-17, Nov. 2001
- [13] Thunberg, E.; Soder, L.; , "A Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies," *IEEE Transactions on Power Delivery*, , vol.14, no.1, pp.272-277, Jan 1999.
- [14] Thunberg, E.; Soder, L.; , "On the performance of a distribution network harmonic Norton model ," *Proceedings. Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000.*, vol.3, no., pp.932-937 vol.3, 2000.
- [15] Fauri, M.; , "Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix," *IEEE Transactions on Power Systems*, , vol.12, no.4, pp.1632-1638, Nov 1997.
- [16] Fuentes, J.A.; Gabaldon, A.; Canovas, F.J.; Molina, A.; , "Harmonic model of electronically controlled loads," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000.*, vol.3, no., pp.1805-1810 vol. 3, 2000.
- [17] U. Eminoğlu, and M. H. Hoccoğlu, "Distribution Systems Forward/Backward Sweep Based Power Flow Algorithms: A Review and Comparison Study", *Electric Power Components and Systems*, 37:1, pp 91-110, 2009
- [18] M. H. Hoccoğlu, A. Balıkçı, U. Eminoğlu, M. E. Balci, "Güç Akışı, Kararlılık ve Optimizasyon Analizlerinin Yapılabileceği Bir Dağıtım Sistemleri Analiz Paket (DSAP) Programının geliştirilmesi", Tübitak Projesi Proje No: 107E242

- [19] U. Eminoğlu, Dağıtım Sistemleri İçin Yeni Bir Güç Akışı Algoritmasının Geliştirilmesi, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 176 Sayfa, 2007
- [20] Das D., Kothari D.P., Kalam A. Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution Networks (1995) *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 17 (5), pp. 335-346.
- [21] Iwamoto, S.; Tamura, Y.; , "A Load Flow Calculation Method for Ill-Conditioned Power Systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.PAS-100, no.4, pp.1736-1743, April 1981.
- [22] Nagendra Rao PS, Deekshit RS, "Radial load flow for systems having distributed generation and controlled q sources", *Electric Power Components and Systems*, Vol.33 (6), pp.641-655, June 2005.
- [23] Arrillaga, J., and Harker, B.J.: 'Fast-decoupled three-phase load flow', *Proc. Inst. Electr. Eng.*, 1978, 125, (8), pp. 734–740.
- [24] Chen BK, Chen MS, Shoults RR, Liang CC, Hybrid three-phase load flow, *Proc. Inst. Elect. Eng.*, Gen., Transm., Distrib., Vol. 137, no.3, pp.177-185, May 1990.
- [25] Chen, T.-H.; Chen, M.-S.; Hwang, K.-J.; Kotas, P.; Chebli, E.A.; , "Distribution system power flow analysis-a rigid approach," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.6, no.3, pp.1146-1152, Jul 1991.
- [26] Lo, K.L.; Zhang, C.; , "Decomposed three-phase power flow solution using the sequence component frame," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol.140, no.3, pp.181-188, May 1993.

- [27] Zhang, X.-P.; Chen, H.; , "Asymmetrical three-phase load-flow study based on symmetrical component theory," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol.141, no.3, pp.248-252, May 1994.
- [28] Xiao-Ping Zhang; , "Fast three phase load flow methods," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.11, no.3, pp.1547-1554, Aug 1996.
- [29] Lin, W.M.; Teng, J.H.; , "Phase-decoupled load flow method for radial and weakly-meshed distribution networks," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol.143, no.1, pp.39-42, Jan 1996.
- [30] Zhang, X.-P.; Chu, W.-J.; Chen, H.; , "Decoupled asymmetrical three-phase load flow study by parallel processing," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol.143, no.1, pp.61-65, Jan 1996.
- [31] Hieu Le Nguyen; , "Newton-Raphson method in complex form [power flow analysis]," *IEEE Proceedings Transmission and Distribution Conference*, vol., no., pp.591-595, 15-20 Sep 1996.
- [32] Fan Zhang; Cheng, C.S.; , "A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.12, no.1, pp.389-397, Feb 1997.
- [33] da Costa, V.M.; Martins, N.; Pereira, J.L.R.; , "Developments in the Newton Raphson power flow formulation based on current injections," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.14, no.4, pp.1320-1326, Nov 1999.
- [34] Whei-Min Lin; Yuh-Sheng Su; Hong-Chan Chin; Jen-Hao Teng; , "Three-phase unbalanced distribution power flow solutions with minimum data preparation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.14, no.3, pp.1178-1183, Aug 1999.

- [35] Garcia, P.A.N.; Pereira, J.L.R.; Carneiro, S., Jr.; da Costa, V.M.; Martins, N.; , "Three-phase power flow calculations using the current injection method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.15, no.2, pp.508-514, May 2000
- [36] Stott, B.; , "Review of load-flow calculation methods," *Proceedings of the IEEE* , vol.62, no.7, pp. 916- 929, July 1974
- [37] R. D. Zimmerman, *Comprehensive Distribution Power Flow: Modeling, Formulation, Solution Algorithm and Analysis*, Ph.D. dissertation, Cornell University, Ithaca, NY, Jan. 1995.
- [38] Shirmohammadi, D.; Hong, H.W.; Semlyen, A.; Luo, G.X.; , "A compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.3, no.2, pp.753-762, May
- [39] Cheng, C.S.; Shirmohammadi, D.; , "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, , vol.10, no.2, pp.671-679, May 1995.
- [40] Zhu, Y.; Tomsovic, K.; , "Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.17, no.3, pp. 822- 827, Jul 2002
- [41] Ranjan R, Venkatesh B, Chaturvedi A, Das D, "Power flow solution of three-phase unbalanced radial distribution network," *Electric Power Components and Systems*, Vol.32 (4) , pp.421-433, April 2004
- [42] Ghosh, S.; Das, D.; , "Method for load-flow solution of radial distribution networks," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol.146, no.6, pp.641-648, Nov 1999

- [43] Mok S, Elangovan S, Longjian C, Salama M, “A new approach for power flow analysis of balanced radial distribution systems”, *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 28, pp.325-340, 2000
- [44] Thukaram D, Banda HMW, Jerome J, “A robust three-phase power flow algorithm for radial distribution systems,” *Electric Power Systems Research*, Vol.50 (3), pp.227-236, June 1999
- [45] Teng JH, “A network-topology based three-phase load flow for distribution systems,” *Proceedings of National Science Council ROC (A)*, Vol.24 (4), pp.259-264, 2000
- [46] Teng JH, A direct approach for distribution system load flow solutions, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol.18 (3), pp.882-887, July 2003
- [47] Aravindhabuba P, Ganapathy S, Nayar KR, “A novel technique for the analysis of radial distribution systems”, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol.23 (3), pp.167-171, March 2001
- [48] Haque MH, Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol.143 (1), pp.33-38, January 1996.
- [49] Luo GX, Semlyen A, “Efficient load flow for large weakly meshed networks,” *IEEE Trans. on Power System*, Vol. 5 (4), pp. 1309–1316, November 1990
- [50] Rajicic D, Ackovski R, Taleski R, “Voltage correction power flow,” *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 9 (2), pp. 1056–1062, April 1994
- [51] Baran ME, Wu FF, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4 (2), pp.1401-1407, April 1989

- [52] Das D, Kothari DP, Kalam A, “Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks,” *Electrical Power & Energy Systems*, Vol.17 (5), pp.335-346,1995
- [53] Das D., Nagi H. S., and Kothari D. P., “Novel Method for Solving Radial Distribution Networks,” *IEE Proc.-Gener. Transm. Dist.*, vol. 141, no. 4, pp. 291-298, July 1994
- [54] M. Baran, F. F. Wu, “Optimal Capacitor Placement on Radial Distributions Systems”, *IEEE Trans on Power Delivery*, vol 4, no 1, pp 723-734, Jan. 1989
- [55] Task Force Harmonic Modeling and Simulation, “Real-Time Digital Time-Varying Harmonic Modeling and Simulation Techniques”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.22, No.2, pp. 1218-1227, Apr. 2007
- [56] G. Carpinelli, F. Iacovone, A. Russo, P. Varilone, P. Verde, “Analytical modelling for harmonic analysis of line current of VSI-Fed drives”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, pp. 1212 – 1224, July 2004
- [57] Mollerstedt E., Bernhardsson B.; “A Harmonic Transfer Function Model for a Diode Converter Train”, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting 2000*, Vol. 2, pp. 957 – 962, 23-27 Jan. 2000
- [58] A. Mansoor, W.M. Grady, R.S.Thallam, M.T. Doyle, S.D. Krein, M.J. Samotyj, “Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier loads”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 3, pp. 1416 – 1422, July 1995
- [59] Y.G. Hegazy, M.M.A. Salama, “Identifying the Relationship between Voltage Harmonic Distortion and the Load of Harmonic Producing Devices in Distribution Networks,” *IEEE CCECE 1994*, pp. 669-672, Halifax, NS, CA, 25-28 Sep 1994

- [60] A. Dellapos Aquila, M. Marinelli, V. G. Monopoli and P. Zanchetta, "New power-quality assessment criteria for supply systems under unbalanced and nonsinusoidal conditions", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp.1284-1290, 2004
- [61] A. Dellapos Aquila, M. Marinelli, V. G. Monopoli and P. Zanchetta, "New power-quality assessment criteria for supply systems under unbalanced and nonsinusoidal conditions", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp.1284-1290, 2004
- [62] M. E. Balci and M. H. Hocaoglu, "New Power Decomposition for Sinusoidal Nonsinusoidal Conditions," *IEEE ICHQP 2006*, Portugal, Sept. 2006
- [63] Sergio Ferreira de Paula Silva, and Jose Carlos de Oliveira, "The Sharing of Responsibility between the Supplier and the Consumer for Harmonic Voltage Distortion: A Case Study", *EPSR*. (2 June 2008)
- [64] Balci, M. E., Karacasu, O., Ozturk, S. D., Hocaoglu, M. H.: "Harmonik Üreten Yükler için Yeni Bir Model", *ELECO'08*, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Konferansı, pp.115-120, Kasım 2008, Bursa
- [65] W. Xu, J. R. Marti, and H. W. Dommel, "A multiphase harmonic load flow solution technique", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 6, pp. 174–182, Feb. 1991
- [66] Whei-Min Lin; Tung-Sheng Zhan; Ming-Tong Tsay; , "Multiple-frequency three-phase load flow for harmonic analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, , vol.19, no.2, pp. 897- 904, May 2004
- [67] Cristaldi, L.; Ferrero, A.; , "Harmonic power flow analysis for the measurement of the electric power quality," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.44, no.3, pp.683-685, Jun 1995

- [68] M. E. Balci, D. Ozturk, O. Karacasu, M. H. Hocaoglu, "Experimental Verification of Harmonic Load Models", 43rd UPEC Padova Italy, Spetember 2008.

- [69] T. S. Chung and H. C. Leung, "A genetic algorithm approach in optimal capacitor selection with harmonic distortion considerations", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol 21, no 8, pp. 561-569, 1999

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında İstanbul-Kadıköy’de doğdu. Lise öğrenimini Haydarpaşa Anadolu Lisesinde tamamladı. 2003 yılında girmeye hak kazandığı Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden Ağustos 2007’de mezun oldu. Şubat 2008’de Gebze Yüksek teknoloji Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans öğrenimine başladı.

EK

Tablo Ek 1. 12 baralı test sistemine ait bara ve yük bilgileri

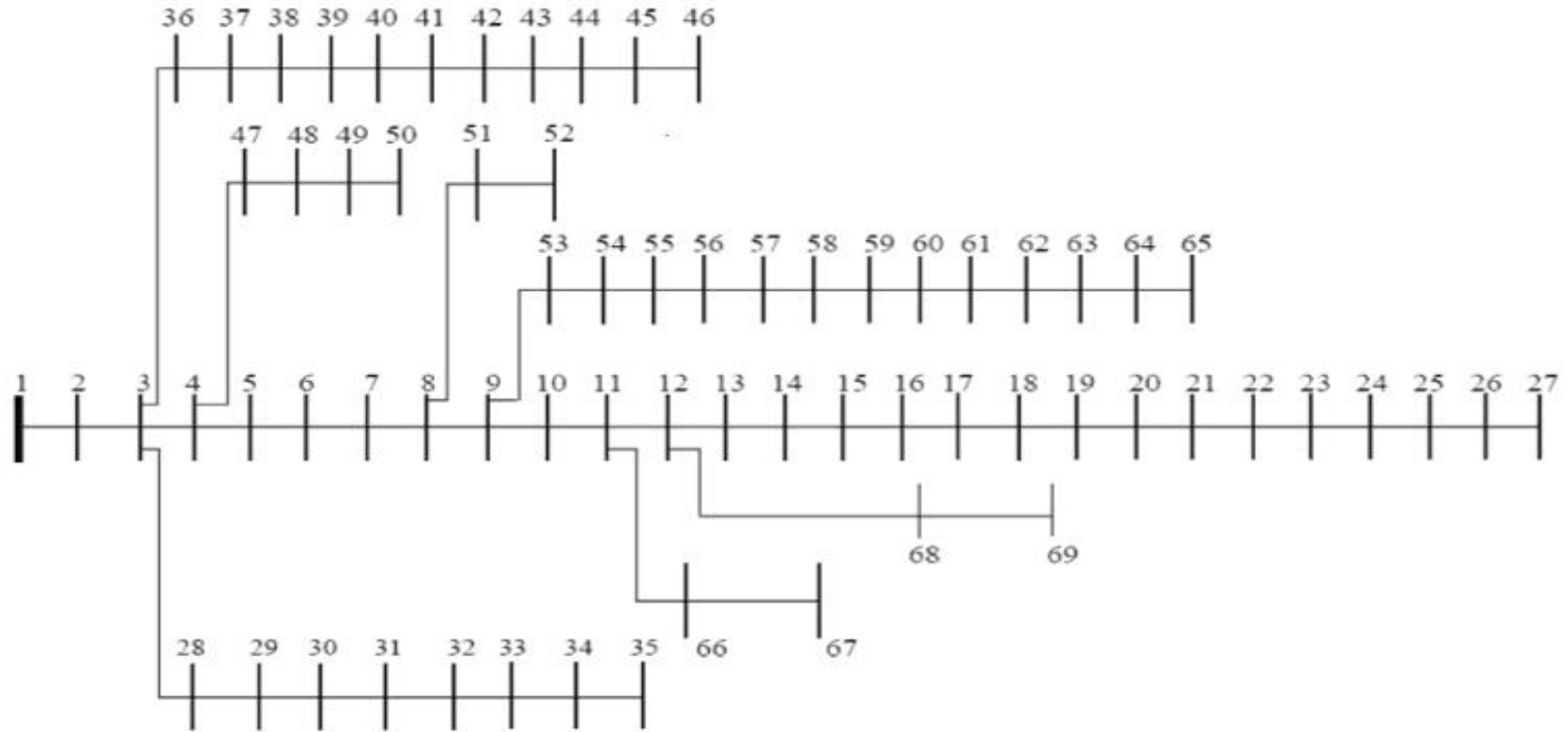
Yük Bilgileri			Hat Bilgileri				
Bara No.	P (kW)	Q (kVAR)	Hat No	Hat Başı Bara No.	Hat Sonu Bara No.	R (Ohm)	X (Ohm)
1	0	0	1	1	2	1,089	0,4598
2	60	60	2	2	3	1,1858	0,4961
3	40	30	3	3	4	2,0933	0,8712
4	55	55	4	4	5	3,1823	1,331
5	30	30	5	5	6	1,089	0,4598
6	20	15	6	6	7	1,0043	0,4114
7	55	55	7	7	8	4,4044	1,21
8	45	45	8	8	9	5,6386	1,5972
9	40	40	9	9	10	2,8919	0,8228
10	35	30	10	10	11	1,5125	0,4235
11	40	30	11	11	12	1,2342	0,3509
12	15	15	-	-	-	-	-

Tablo Ek 2. 69 baralı test sistemine ait yük bilgileri

Bara No.	P (MW)	Q (MVar)	Bara No.	P (MW)	Q (MVar)
1	0	0	36	0,026	0,0186
2	0	0	37	0,026	0,0186
3	0	0	38	0	0
4	0	0	39	0,024	0,017
5	0	0	40	0,024	0,017
6	0,0026	0,0022	41	0,0012	0,001
7	0,0404	0,03	42	0	0
8	0,075	0,054	43	0,006	0,0043
9	0,03	0,022	44	0	0
10	0,028	0,019	45	0,0392	0,0263
11	0,145	0,104	46	0,0392	0,0263
12	0,145	0,104	47	0	0
13	0,008	0,0055	48	0,079	0,0564
14	0,008	0,0055	49	0,3847	0,2745
15	0	0	50	0,3847	0,2745
16	0,0455	0,03	51	0,0405	0,0283
17	0,06	0,035	52	0,0036	0,0027
18	0,06	0,035	53	0,0043	0,0035
19	0	0	54	0,0264	0,019
20	0,001	0,0006	55	0,024	0,0172
21	0,114	0,081	56	0	0
22	0,0053	0,0035	57	0	0
23	0	0	58	0	0
24	0,028	0,02	59	0,1	0,072
25	0	0	60	0	0
26	0,014	0,01	61	1,244	0,888
27	0,014	0,01	62	0,032	0,023
28	0,026	0,0185	63	0	0
29	0,026	0,0185	64	0,227	0,162
30	0	0	65	0,059	0,042
31	0	0	66	0,018	0,013
32	0	0	67	0,018	0,013
33	0,014	0,01	68	0,028	0,02
34	0,0195	0,014	69	0,028	0,02
35	0,006	0,004			

Tablo Ek 3. 69 baralı test sistemine ait hat bilgileri

Hat No.	Gönderici Bara	Alıcı Bara	R (Ohm)	X (Ohm)	Hat No.	Gönderici Bara	Alıcı Bara	R(Ohm)	X (Ohm)
1	1	2	0,0005	0,0011	36	3	36	0,0043	0,0106
2	2	3	0,0005	0,0011	37	36	37	0,0633	0,1549
3	3	4	0,0014	0,0035	38	37	38	0,1043	0,1218
4	4	5	0,0249	0,0291	39	38	39	0,0302	0,0351
5	5	6	0,3626	0,1846	40	39	40	0,0017	0,0021
6	6	7	0,3775	0,1923	41	40	41	0,7214	0,8429
7	7	8	0,0913	0,0465	42	41	42	0,3070	0,3588
8	8	9	0,0489	0,0249	43	42	43	0,0406	0,0473
9	9	10	0,8113	0,2681	44	43	44	0,0090	0,0114
10	10	11	0,1854	0,0613	45	44	45	0,1078	0,1361
11	11	12	0,7046	0,2329	46	45	46	0,0010	0,0011
12	12	13	1,0202	0,3367	47	4	47	0,0033	0,0083
13	13	14	1,0342	0,3417	48	47	48	0,0843	0,2064
14	14	15	1,0480	0,3463	49	48	49	0,2870	0,7024
15	15	16	0,1948	0,0645	50	49	50	0,0814	0,1992
16	16	17	0,3709	0,1226	51	8	51	0,0919	0,0468
17	17	18	0,0046	0,0016	52	51	52	0,3288	0,1103
18	18	19	0,3245	0,1073	53	9	53	0,1724	0,0878
19	19	20	0,2086	0,0689	54	53	54	0,2011	0,1024
20	20	21	0,3383	0,1118	55	54	55	0,2815	0,1434
21	21	22	0,0138	0,0046	56	55	56	0,2786	0,1419
22	22	23	0,1576	0,0521	57	56	57	1,5749	0,5287
23	23	24	0,3431	0,1134	58	57	58	0,7763	0,2605
24	24	25	0,7417	0,2451	59	58	59	0,3013	0,0997
25	25	26	0,3059	0,1011	60	59	60	0,3825	0,1161
26	26	27	0,1716	0,0567	61	60	61	0,5026	0,2561
27	3	28	0,0043	0,0106	62	61	62	0,0965	0,0491
28	28	29	0,0633	0,1549	63	62	63	0,1437	0,0730
29	29	30	0,3940	0,1302	64	63	64	0,7038	0,3585
30	30	31	0,0695	0,0230	65	64	65	1,0311	0,5252
31	31	32	0,3477	0,1149	66	11	66	0,1992	0,0605
32	32	33	0,8311	0,2789	67	66	67	0,0046	0,0014
33	33	34	1,6917	0,5593	68	12	68	0,7324	0,2421
34	34	35	1,4600	0,4826	69	68	69	0,0046	0,0016



Şekil Ek 1. 69 baralı radial test sistemine ait devre şeması

Tablo Ek 4. Üç baralı sistemde bara gerilimlerinin 3. harmonik değerleri için analiz sonuçları

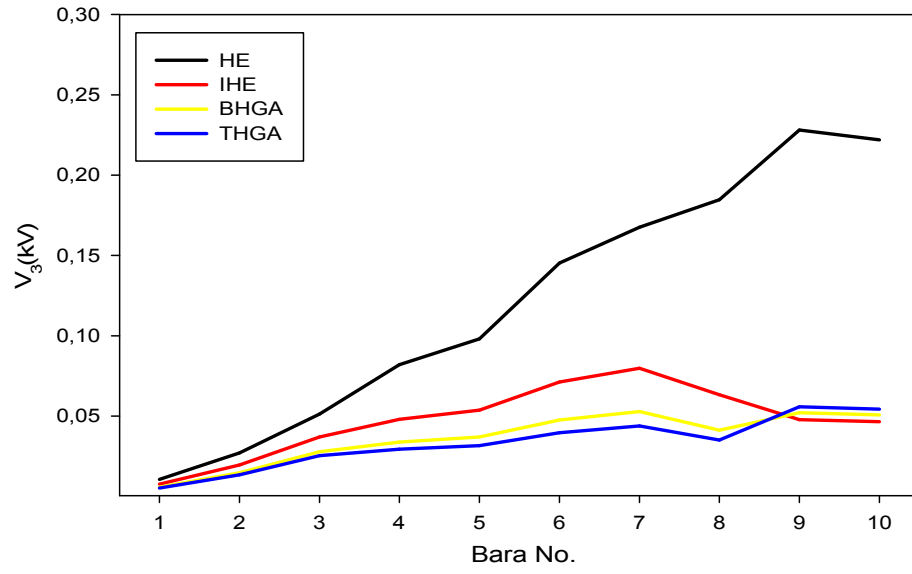
Model- Algoritma	2. BARA (ölçülen $V_3 = 2,68$)		3. BARA (ölçülen $V_3 = 9,21$)	
	3. Harmonik Gerilim Genliği	3. harmonik Hata Oranı	3. Harmonik Gerilim Genliği	3. harmonik Hata Oranı
SAK-HE	2,30	14,25%	8,20	10,94%
SAK-IHE	2,30	14,25%	8,26	10,36%
SAK-BHGA	2,32	13,59%	8,26	10,36%
SAK-THGA	2,51	6,34%	8,93	3,07%
NED-HE	3,15	17,41%	12,76	38,58%
NED-IHE	3,92	46,43%	14,04	52,40%
NED-BHGA	2,99	11,47%	11,56	25,53%
NED-THGA	3,91	45,77%	13,91	51,06%
GYTE-HE	---	---	---	---
GYTE-IHE	3,15	17,41%	11,26	22,26%
GYTE-BHGA	2,81	4,88%	9,95	8,06%
GYTE-THGA	3,22	20,05%	11,28	22,46%
ÇFAM-THGA	3,31	23,35%	10,85	17,85%

Tablo Ek 5 Üç baralı sistemde bara gerilimlerinin 5. harmonik değerleri için analiz sonuçları

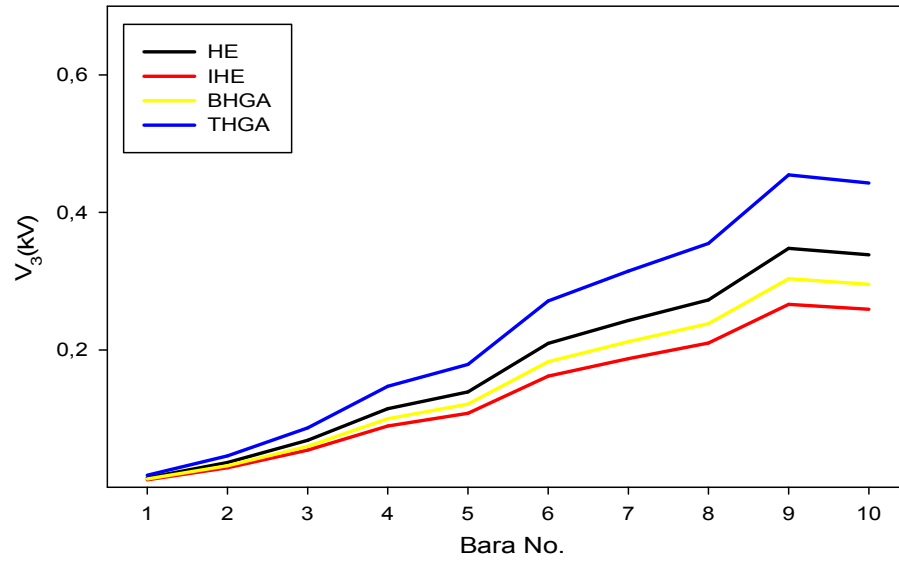
Model- Algoritma	2. BARA (ölçülen $V_5 = 0,72$)		3. BARA (ölçülen $V_5 = 2,66$)	
	5. Harmonik Gerilim Genliği	5. harmonik Hata Oranı	5. Harmonik Gerilim Genliği	5. harmonik Hata Oranı
SAK-HE	0,66	10,31%	2,37	11,61%
SAK-IHE	0,66	10,31%	2,38	11,03%
SAK-BHGA	0,67	9,62%	2,38	11,03%
SAK-THGA	0,72	2,03%	2,58	3,79%
NED-HE	0,91	22,81%	3,69	37,55%
NED-IHE	1,13	53,17%	4,05	51,26%
NED-BHGA	0,86	16,60%	3,34	24,59%
NED-THGA	1,13	52,48%	4,02	49,93%
GYTE-HE	---	---	---	---
GYTE-IHE	0,91	22,81%	3,25	21,35%
GYTE-BHGA	0,81	9,70%	2,87	7,25%
GYTE-THGA	0,93	25,57%	3,26	21,54%
ÇFAM-THGA	0,95	29,02%	3,13	16,97%

Tablo Ek 6. Üç baralı sistemde bara gerilimlerinin 7. harmonik değeri için analiz sonuçları

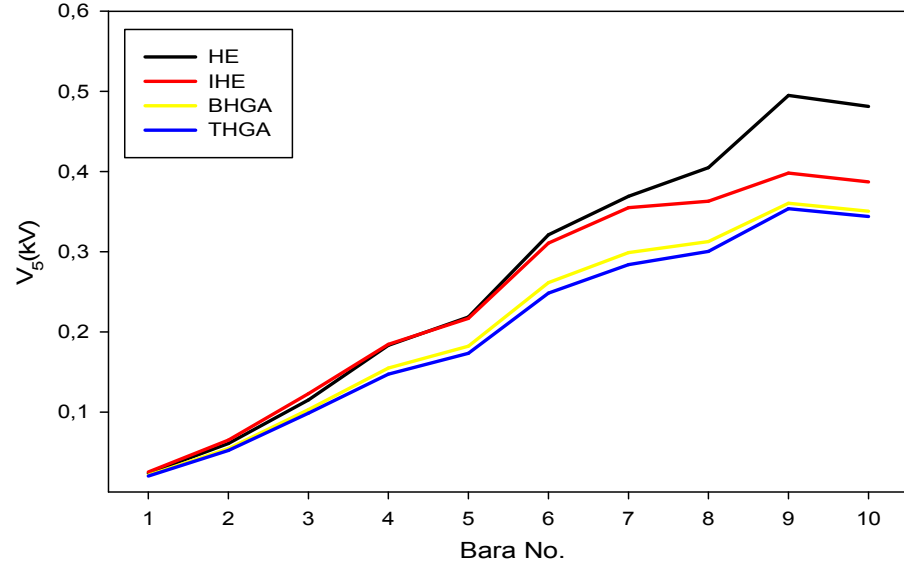
	2. BARA (ölçülen $V_7 = 1,19$)		3. BARA (ölçülen $V_7 = 3,88$)	
Model- Algoritma	3. Harmonik Gerilim Genliği	3. harmonik Hata Oranı	3. Harmonik Gerilim Genliği	3. harmonik Hata Oranı
SAK-HE	0,97	19,99%	3,46	11,40%
SAK-IHE	0,97	19,99%	3,48	10,82%
SAK-BHGA	0,98	19,37%	3,48	10,82%
SAK-THGA	1,06	12,60%	3,76	3,57%
NED-HE	1,33	9,55%	5,38	37,87%
NED-IHE	1,65	36,63%	5,91	51,62%
NED-BHGA	1,26	4,01%	4,87	24,88%
NED-THGA	1,65	36,02%	5,86	50,28%
GYTE-HE	---	---	---	---
GYTE-IHE	1,33	9,55%	4,74	21,64%
GYTE-BHGA	1,18	2,14%	4,19	7,51%
GYTE-THGA	1,36	12,02%	4,75	21,83%
ÇFAM-THGA	1,39	15,09%	4,57	17,25%



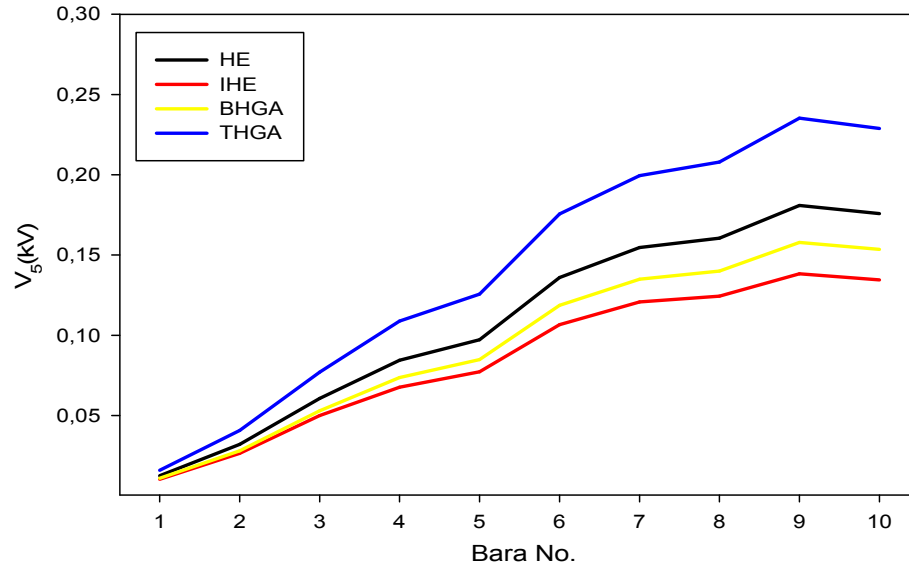
Şekil Ek 2. 10 baralı sistemde SAK modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 3. harmonik değerleri



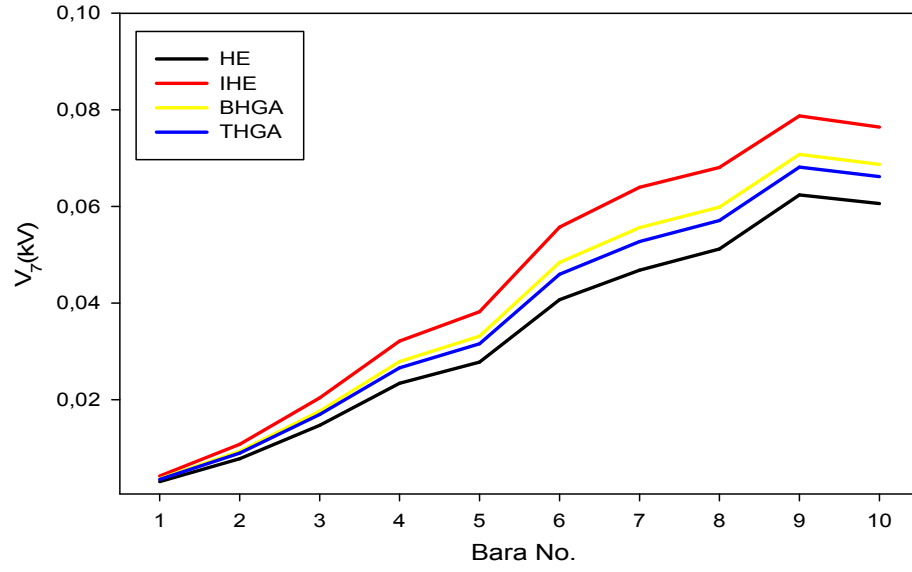
Şekil Ek 3.10 baralı sistemde NED modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 3. harmonik değerleri



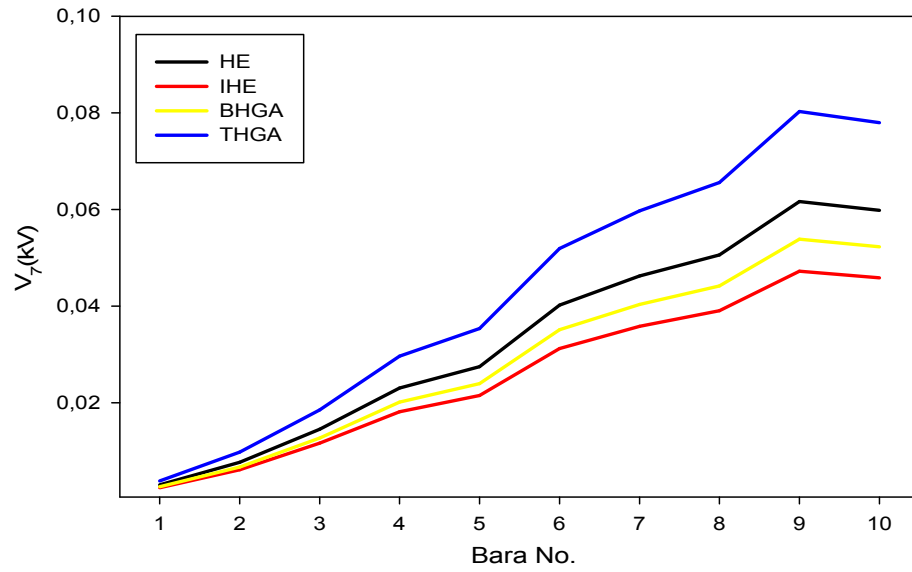
Şekil Ek 4. 10 baralı sistemde SAK modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 5. harmonik değerleri



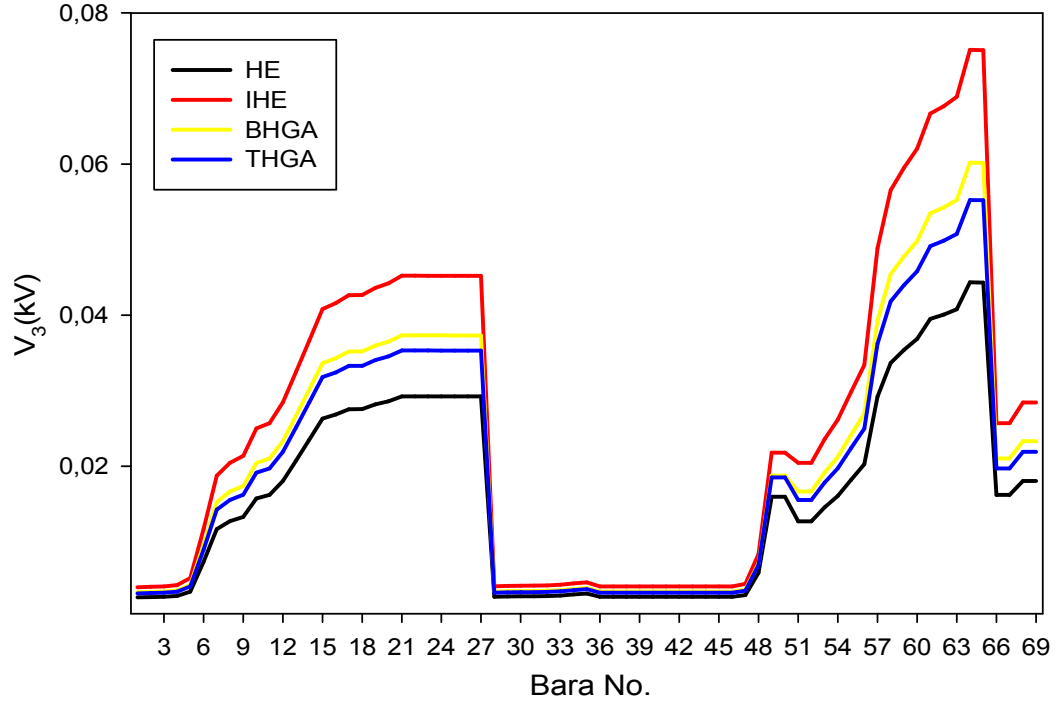
Şekil Ek 5. 10 baralı sistemde NED modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 5. harmonik değerleri



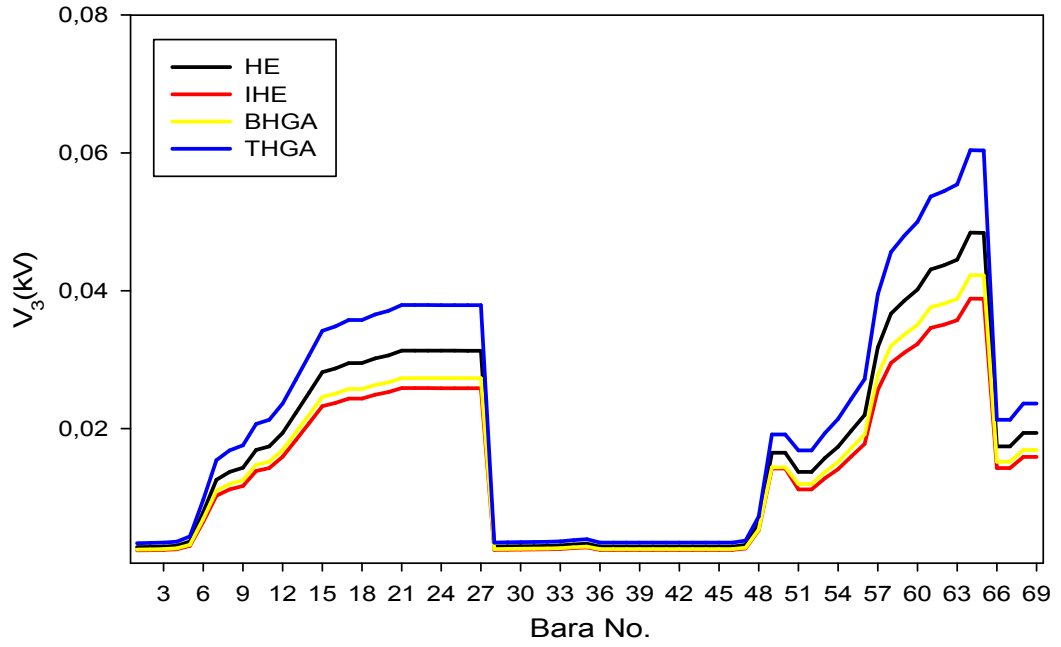
Şekil Ek 6. 10 baralı sistemde SAK modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 7. harmonik değerleri



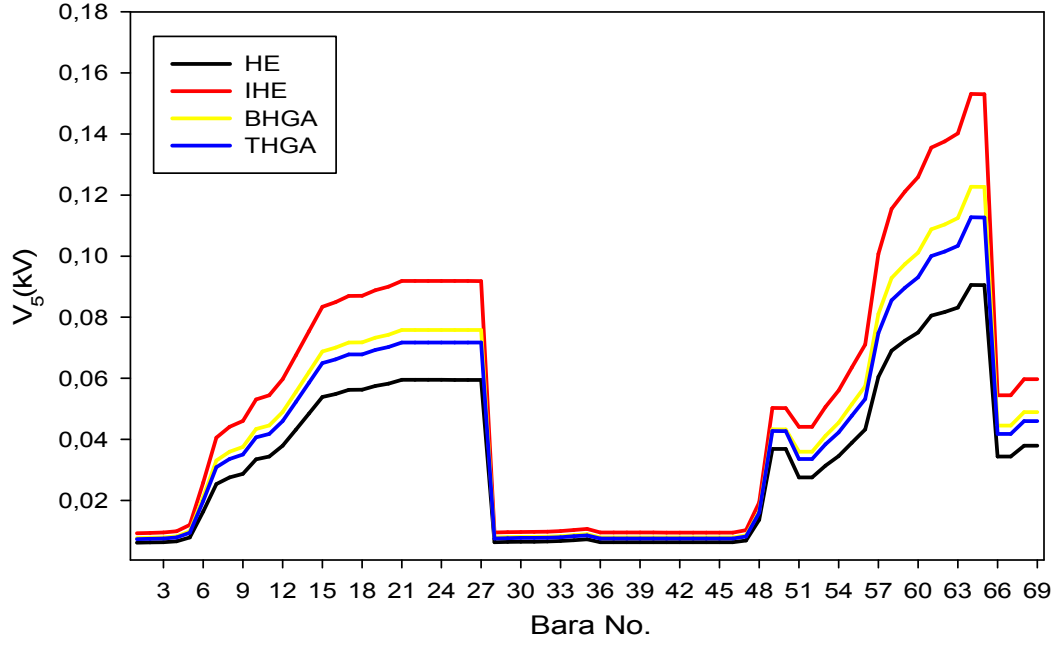
Şekil Ek 7. 10 baralı sistemde NED modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 7. harmonik değerleri



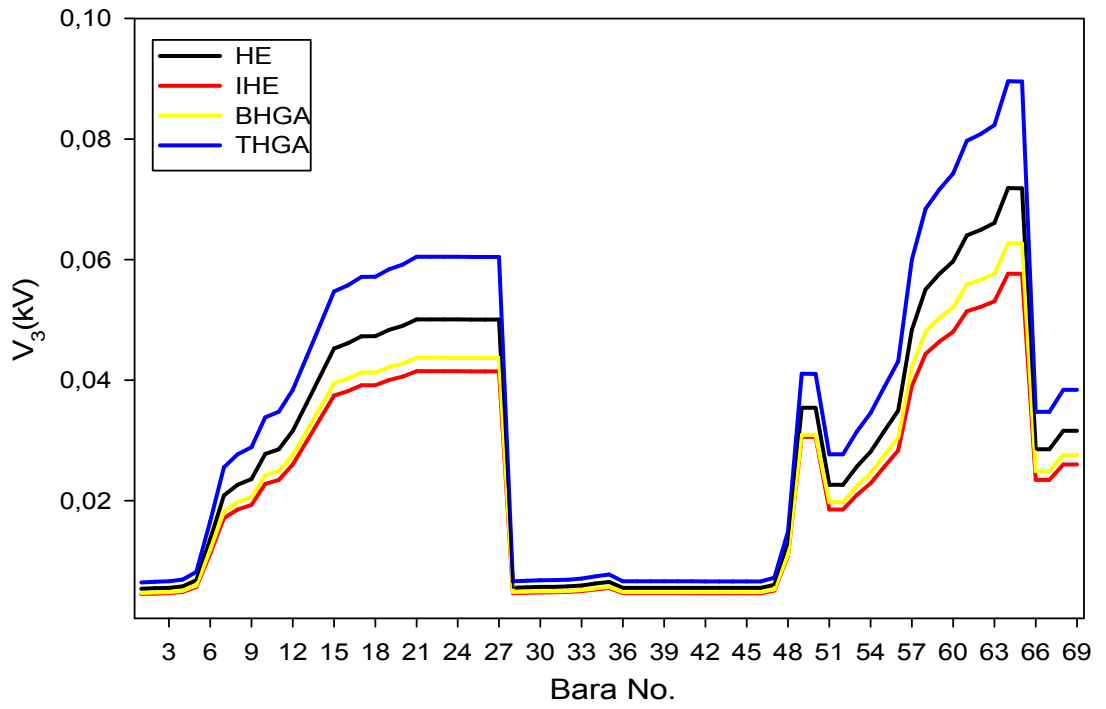
Şekil Ek 8. 69 baralı sistemde SAK modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 3. harmonik değerleri



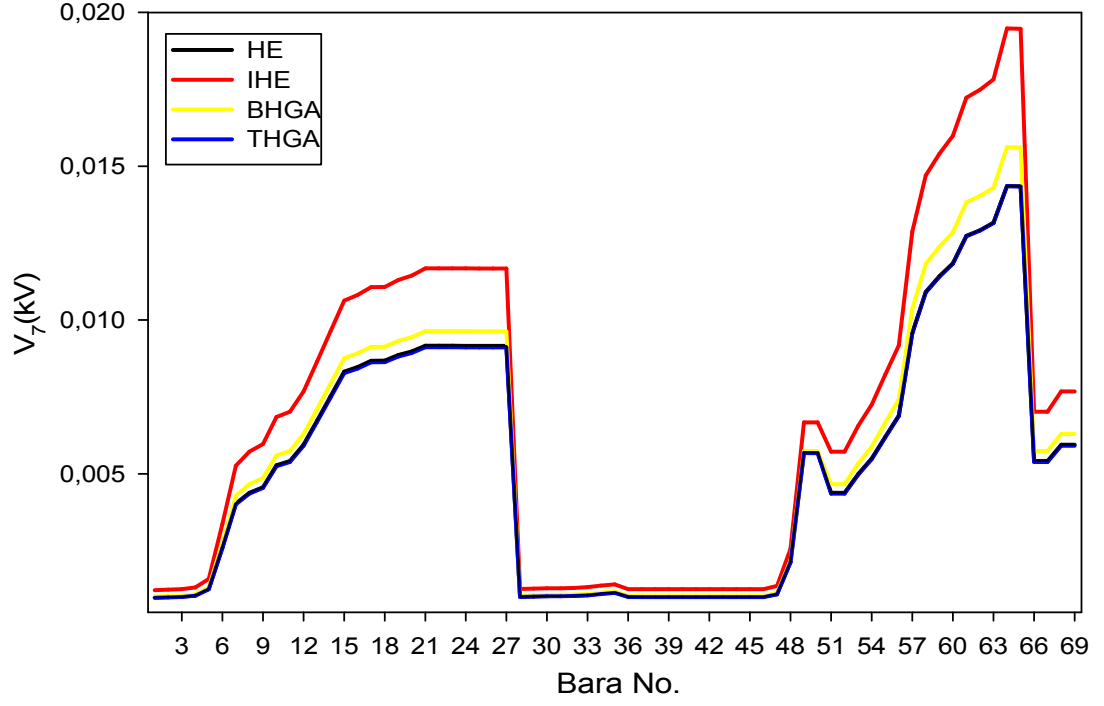
Şekil Ek 9. 69 baralı sistemde NED modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 3. harmonik değerleri



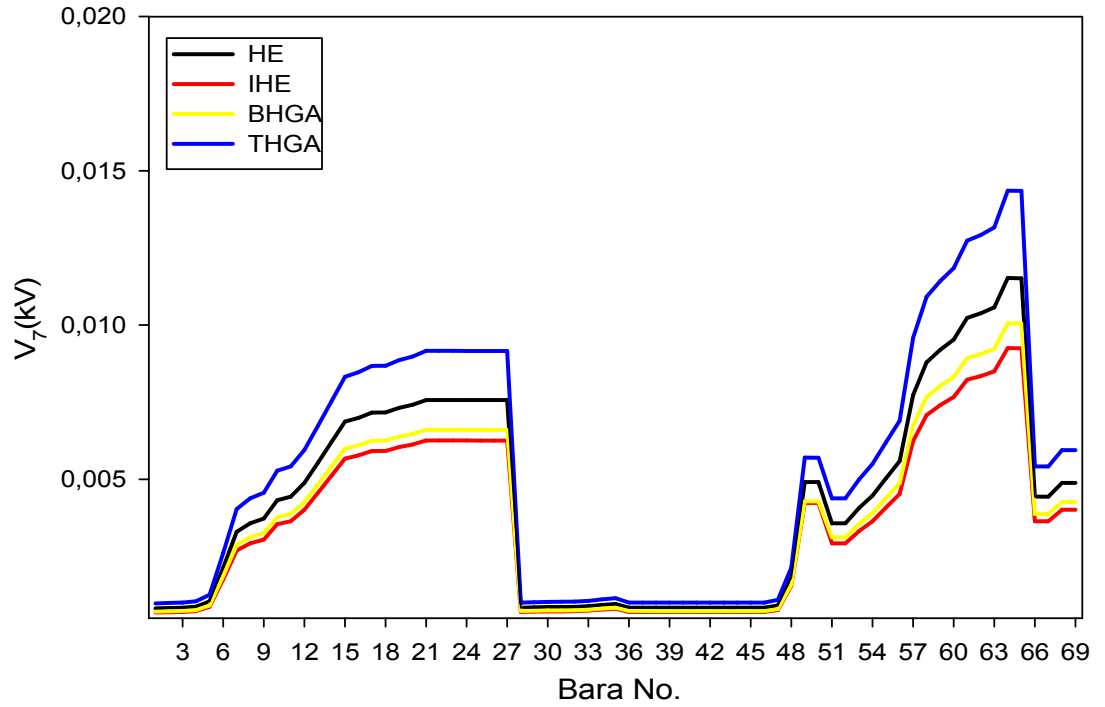
Şekil Ek 10. 69 baralı sistemde SAK modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 5. harmonik değerleri



Şekil Ek 11. 69 baralı sistemde NED modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 5. harmonik değerleri



Şekil Ek 12. 69 baralı sistemde SAK modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 7. harmonik değerleri



Şekil Ek 13. 69 baralı sistemde NED modeli için algoritmalarla hesaplanan bara gerilimlerinin 7. harmonik değerleri