

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

DAĞITIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR GÜÇ
AKIŞI ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ

Ulaş EMİNOĞLU
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2007

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

DAĞITIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR GÜÇ
AKIŞI ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ

Ulaş EMİNOĞLU
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd. Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU

GEBZE
2007



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 11/06/2007 tarih ve 2007/20 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 11/07/2007 tarihinde tez savunma sınavı yapılan **Ulaş EMİNOĞLU'nun** tez çalışması **Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

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

ÜYE

: Prof. Dr. Mehmet TÜMAY

ÜYE

: Doç. Dr. Osman KILIÇ

ÜYE

: Doç. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ONAY

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

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Tezin Başlığı : Dağıtım Sistemleri İçin Yeni Bir Güç Akışı Algoritmasının Geliştirilmesi

Yazar Adı : Ulaş EMİNOĞLU

Dağıtım sistemlerinin iletim sistemlerinden farklı yapıya sahip olması sebebiyle iletim sistemleri için kullanılan geleneksel Newton-Raphson, Gauss-Seidel gibi güç akışı algoritmaları dağıtım sistemlerinin güç akışı hesabında yetersiz kalabilmektedir. Bu problem dağıtım sistemleri için yeni güç akışı algoritmalarının geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuştur. Bu çalışmada dengeli ve dengesiz dağıtım sistemleri için yeni bir güç akışı algoritması geliştirilmiştir. Ayrıca Yerel Enerji Üretim (YEÜ) birimleri, üç-fazlı transformatörler, ve gerilim regülatörleri gibi dağıtım sistemleri elemanları için yeni modeller geliştirilerek güç akışı analizlerine dahil edilmiştir. Algoritma, geniş olarak kullanılan diğer güç akışı algoritmaları ile birlikte farklı dağıtım sistemlerine uygulanarak performansı ve güvenilirliği sınanmıştır. Sonuçlar, geliştirilen algoritmanın hızlı yakınsama özelliğine sahip olduğunu, performansının farklı yüklenme durumu, hatların farklı R/X oranı ve farklı yük modelleri gibi sistem parametrelerinden çok az etkilendiğini göstermektedir.

Tezde son olarak, geliştirilen güç akışı algoritmasında gerilim hesabı için kullanılan ifadeden yararlanarak dağıtım sistemlerinde gerilim kararlılığı açısından kritik baranın belirlenmesi amacıyla yeni bir kararlılık indeksi geliştirilmiştir. Geliştirilen kararlılık indeksi farklı sistemler üzerinde test edilerek elde edilen sonuçlar diğer indekslerle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda geliştirilen kararlılık indeksinin güvenilir, dağıtım sistemlerine kolaylıkla uygulanabilir olduğu ve güç akışı analizi dışında ekstra uygulamalara ihtiyaç duymadığı görülmüştür. Bunun dışında sistemin yüklenme durumundan, farklı yük modellerinden, farklı güç faktörü ve farklı gerilim seviyesinden etkilenmediği görülmüştür.

SUMMARY

Thesis Title :Developing of a new power flow algorithm for radial distribution systems

Writer Name :Ulaş EMİNOĞLU

Due to different characteristics features of the distribution systems from the transmission systems, the conventional power flow algorithms such as; Newton Raphson and Gauss Seidel may become inefficient in the load flow solution of distribution systems. This problem required to develop new power flow algorithms for distribution systems. In this paper, a new power flow algorithm has been developed for balanced and unbalanced distribution systems. In addition, new modeling methods for distribution systems' components namely; Local Energy Generation Units, three-phase distribution transformers and Voltage Redulators have been developed and included to the load flow analysis. The performance and reliability of the developed load flow algorithm are evaluated on different distribution systems by comparing with other load flow algorithms which are widely used for load flow analysis. Results show that the developed algorithm has fast convergence ability and its performance is less affected by system's parameters such as; different loading condition, line R/X ratios and load models.

In the thesis, finally, to obtain the critical bus of the system to the voltage collapse a new voltage stability index is developed for radial distribution system by making use of the formulation which is used for the voltage calculation in the developed load flow algorithm. Developed stability index is tested on the different test systems and the obtained results are compared with the result of other stability indices. It is seen from the analyses that the developed stability index is robust and it can easily be implemented to the radial distribution systems, and does not require an extra work on the systems except load flow analysis, and can easily be applied to the radial networks. It is also seen that the proposed index is not affected from the different loading condition, load models, load power factor and voltage levels of the systems

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada danışmanlığı yürüten ve benden hiç bir zaman yardımını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na,

Çalışma süresince bana destek olan değerli hocalarım Doç. Dr. Osman KILIÇ ve Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI'ya,

Her zaman yanımda olan değerli Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma,

Bana her zaman destek olan ve güvenen değerli Aileme,

Doktora eğitimi için beni tevsik eden ve bana güvenen Niğde Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nün değerli Öğretim Elemanlarına,

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne, değerli Personeline ve diğer yardımcı olan tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Konu Hakkında	2
1.2. Tezin Amacı ve Sınırları	6
1.3. Tezin Bölümleri	7
2. DAĞITIM SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI ANALİZİ	10
2.1. Giriş	10
2.2. Geleneksel Güç Akışı Algoritmaları	11
2.2.1. Gauss-Seidell Metodu	11
2.2.2. Newton-Raphson Metodu	12
2.2.3. Fast-Decoupled Power Flow Metodu	13
2.3. Sweep-Temelli Güç Akışı Algoritmaları	14
2.3.1. Kirchoff Gerilim Kanunu Kullanılarak Geliştirilen Sweep-Temelli Algoritmalar	17
2.3.2. Kuadratik Denklem Kullanılarak Geliştirilen Sweep-Temelli Algoritmalar	24
2.4. Sonuç	32
3. DAĞITIM SİSTEMLERİ ELEMANLARININ MODELLENMESİ	34
3.1. Giriş	34
3.2. Dağıtım Sistemlerinde Yerel Enerji Üretim (YEÜ) Birimleri	35
3.3. FACTS Kompanzatörleri	37
3.3.1. Statik VAr Kompanzatör (SVC)	38
3.3.2. Statik Kompanzatör (Statcom)	38

3.4. YEÜ Birimleri ve Paralel Kompanzatörlerin Dağıtım Sistemlerinde Güç Akışına Dahil Edilmesi	40
3.5. Üç-Fazlı Transformatörler	43
3.6. Üç-Fazlı Gerilim Regülatörleri	51
3.7. Dağıtım Hatları	54
3.8. Reaktif Güç Kompanzatörleri	54
3.9. Yük Modelleri	55
3.9.1. Ekspansiyel (Üssel) Statik Yük Modeli	56
3.9.2. Polinom (Polynomial) Statik Yük Modeli	57
3.10. Sonuç	58
4. GERİLİM KARARLILIĞI VE KARARLILIK İNDEKSLERİ	59
4.1. Giriş	59
4.2. Sürekli Durum Gerilim Kararlılığı ve Gerilim Çökmesi	59
4.3. Gerilim Kararlılık İndeksleri	62
4.4. Yük Modellerinin Gerilim Kararlılığına Etkisinin İncelenmesi	66
4.5. Sonuç	67
5. DAĞITIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR GÜÇ AKIŞI ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ	69
5.1. Giriş	69
5.2. Dengeli Dağıtım Sistemleri İçin Yeni Bir Güç Akışı Algoritması	69
5.2.1. Geliştirilen Algoritmanın Dağıtım Sistemlerine Uygulanması	76
5.2.2. Geliştirilen Algoritmanın Performansının Değerlendirilmesi	79
5.3. Algoritmada YEÜ Birimlerinin ve Kompanzatörlerin PV-Bara (Gerilim Kontrollü Bara) Olarak Modellenmesi	87
5.3.1. Geliştirilen PV-Bara Modelleme Yönteminin Dağıtım Sistemlerine Uygulanması	90
5.3.2. Gerilim Bağımlı Yüklerin Güç Akışına Dahil Edilmesi	96
5.4. Sonuç	98
6. DENGESİZ DAĞITIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR GÜÇ AKIŞI ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ	99
6.1. Giriş	99

6.2. Dengesiz Dağıtım Sistemleri İçin Geniş Olarak Kullanılan Algoritmalar	99
6.3. Dengesiz Dağıtım Sistemleri İçin Yeni Bir Güç Akışı Algoritmasının Geliştirilmesi	100
6.4. Dağıtım Sistemleri Elemanlarının Algoritma İçerisinde Modellenmesi	104
6.4.1. Elektriksel Yüklerin Modellenmesi	104
6.4.2. Kompanzasyon Elemanlarının Modellenmesi	105
6.4.3. Gerilim Regülatörlerinin Modellenmesi	105
6.4.4. Üç-Fazlı Transformatörlerin Modellenmesi	107
6.5. Geliştirilen Trafo Modelleme Metodunun Geçerliliğinin Sınanması	111
6.6. Geliştirilen Yeni Güç Akışı Algoritmasının Güç Sistemlerine Uygulanması	115
6.7. YEÜ Birimleri ve Kompanzatörlerin Dengesiz Sistemlerde Güç Akışı Algoritmalarına Dahil Edilmesi	120
6.7.1. Sweep-temelli Algoritmalarda PV-Bara'nın Gerilim Kontrolü ve Reaktif Gücünün Belirlenmesi	121
6.7.2. Geliştirilen PV-Bara Modelleme Metodunun Sweep-temelli Algoritmalarda Sınanması	122
6.8. Sonuç	125
7. DAĞITIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR KARARLILIK İNDEKSİNİN GELİŞTİRİLMESİ	127
7.1. Giriş	127
7.2. Dağıtım Sistemleri İçin Yeni Bir Kararlılık İndeksi	127
7.3. Geliştirilen Kararlılık İndeksinin Dağıtım Sistemlerine Uygulanması	128
7.4. Geliştirilen Kararlılık İndeksinin Dağıtım Sistemlerinde Sınanması	132
7.5. Sonuç	140
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	141
8.1. Sonuç	141
8.2. Çalışma Konusu Önerileri	143
KAYNAKLAR	145
EK-I	
EK-II	
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>	<u>Birimi</u>
V	Gerilim	Volt
I	Akım	Amper
S	Görünür Güç	Volt Amper
P	Aktif Güç	Watt
Q	Reaktif Güç	Volt Amper reaktif
Z	Empedans	Ohm
R	Rezistans	Ohm
X	Reaktans	Ohm
δ	Faz Açısı	Derece

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
$p.u$	Birim Değer (per-unit)
SI	Kararlılık İndeksi (Stability Index)
YEÜ	Yerel Enerji Üretimi
$PV - Bara$	Gerilim Kontrollü bara
$PQ - Bara$	Yük barası
KVL	Kirchoff Gerilim Kanunu
KCL	Kirchoff Akım Kanunu

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 İki baralı basit dağıtım sistemi devre şeması	16
3.1 Yerel Enerji Üretim Teknolojileri	36
3.2 SVC temel devre şeması	38
3.3 Statcom'un temel devre şeması	39
3.4 Yg-Δ bağlı transformatör devre şeması	46
3.5 Yg-Δ transformatörlü basit bir dengesiz dağıtım sistemi devre şeması	47
3.6 Yg-Yg bağlı transformatör devre şeması	48
3.7 Δ-Yg bağlı transformatör devre şeması	49
3.8 Y-Δ bağlı transformatör devre şeması	50
3.9 Gerilim regülatörü tek-faz devre şeması	51
3.10 Gerilim regülatörlerinin kademe ayarına ilişkin akış diyagramı	53
3.11 Tek-fazlı ve üç-fazlı dağıtım hatlarına ait π -eşdeğer devre şeması	54
3.12 Tek-fazlı paralel kapasitör devre şeması	55
4.1 İki baralı bir radyal sistemi devre şeması	60
4.2 Radyal bir iletim hattı için P-V eğrisi	61
4.3 Radyal bir iletim hattı için Q-V eğrisi	61
4.4 İki baralı dağıtım sistemi devre şeması	66
4.5 İki baralı dağıtım sisteminin kararlı çalışma bölgesinde hat sonu geriliminin yük artışına göre değişimi	67
5.1 N Baralı bir dağıtım sisteminin tek faz devre şeması	70
5.2 Dağıtım hattı devre şeması	72
5.3 Geliştirilen algoritmaya ait akış diyagramı	74
5.4 69-baralı sistemde azami gerilim, akım ve güç farkının adım sayısının artışı ile değişimi	74

5.5	69-baralı sistemin farklı yüklenme durumu için sweep-temelli algoritmaların iterasyon sayılarının değişimi ($\lambda=1, 1.25, \dots, 2.5$)	81
5.6	69-baralı sistemde hatlarının farklı R/X oranları için sweep-temelli algoritmaların iterasyon sayılarının değişimi ($k=1, 1.25, \dots, 3$)	81
5.7	69-baralı sistemde farklı yük modelleri için sweep-temelli algoritmaların iterasyon sayılarının değişimi (CP:sabit güç, CI:sabit akım, CZ:sabit empedans)	84
5.8	69-baralı sistemde farklı tolerans değerleri için sweep-temelli algoritmaların iterasyon sayılarının değişimi ($\epsilon=10^{-5}, 10^{-6}, \dots, 10^{-10}$)	84
5.9	69-baralı sistemde azami bara gerilimi (a), yük akımı (b) ve yük gücü (c) farkının iterasyon sayısı ile KVL temelli algoritmalar (- - -) ve kuadratik denklem temelli algoritmalar (—) için değişimi	87
5.10	Dağıtım sisteminin iki-baralı eşdeğer devre şeması	89
5.11	Farklı aktif güçteki YEÜ biriminin sistemde farklı baraya yerleştirilerek geriliminin 1.0 pu. değerinde kontrol edilmesi durumunda farklı sweep temelli algoritmaların ve geliştirilen yeni algoritmanın iterasyon sayısının değişimi ($P_{YEÜ}=\%5-10-15-20 \times$ Sistemin Toplam Aktif Yüğü)	95
6.1	Dengesiz dağıtım hattı devre şeması	101
6.2	Geliştirilen yeni algoritma için akış diyagramı	104
6.3	İki baralı test sisteminin devre şeması	111
6.4	Farklı algoritmalar kullanılarak dengesiz yüklü trafonun çıkış gerilimi mutlak hata değerinin adım sayısı ile değişimi	115
6.5	Azami gerilim farkının (hatanın) iterasyon sayısı ile değişimi	119
6.6	Algoritmaların iterasyon sayısının yüklenme katsayısı (λ) ile değişimi	119
6.7	Dağıtım sisteminin iki-baralı eşdeğer devre şeması	122
7.1	Örnek dağıtım sisteminin devre şeması	130
7.2	Geliştirilen kararlılık indeksinin akış diyagramı	131

- 7.3 Farklı sistemler için kritik baranın kararlılık indeksinin ve geriliminin yük artışı ile değişimi 136
- 7.4 Farklı güç faktörü ile yük artışı durumunda kritik baraya ait indeks değerinin farklı yük modelleri ve besleme gerilimi için değişimi 138

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Geliştirilen sweep-temelli algoritmaların genel olarak yapısı	32
3.1 YEÜ Birimlerinin Karşılaştırılması	36
3.2 Transformatörün farklı bağlantı durumları için düğüm admitans matrisleri	45
3.3 Farklı üssel statik yük modelleri ve parametrelerinin değerleri	56
4.1 Geliştirilen kararlılık indekslerinin genel özellikleri	65
5.1 12-baralı dağıtım sistemi için elde edilen güç akışı sonuçları	77
5.2 33-baralı dağıtım sistemi için elde edilen güç akışı sonuçları	77
5.3 69-baralı dağıtım sistemi için elde edilen güç akışı sonuçları	78
5.4 Farklı sistemler için algoritmaların iterasyon sayıları	80
5.5 YEÜ birimlerinin PV-bara olarak modellenmesi durumunda güç akışı sonuçları	92
5.6 YEÜ birimlerinin PV ve PQ-bara olarak modellenmesi durumunda farklı sistemler için sweep temelli algoritmaların iterasyon sayıları	93
5.7 Farklı yük modelleri için 12-baralı sistemin gerilim büyüklükleri	97
6.1 Yg- Δ bağlantı için hat sonu faz gerilimleri (pu.)	112
6.2 Yg- Δ bağlantı için hat sonu faz gerilimlerinin faz açıları (derece)	112
6.3 Δ -Yg bağlantı için hat sonu faz gerilimleri (pu.)	112
6.4 Δ -Yg bağlantı için hat sonu faz gerilimlerinin faz açıları (derece)	113
6.5 Kullanılan test sistemleri için algoritmalara ait iterasyon sayıları	116
6.6 34-baralı sistem için elde edilen bara gerilimleri (pu.)	117
6.7 34-baralı sistem için elde edilen faz açıları (Derece)	118
6.8 12-baralı feederin eleman değerleri ve güç akışı sonuçları	120
6.9 Geliştirilen güç akışı algoritması ile elde edilen güç akışı sonuçları	123

6.10	F./B. Substitution [29] güç akışı algoritması ile elde edilen güç akışı sonuçları	124
6.11	Ladder Net. Theory [30] algoritması ile elde edilen güç akışı sonuçları	125
7.1	Geliştirilen indeks ile hesaplanan kararlılık indeks değerleri	133
7.2	Sabit güçlü yük için normal yüklenme durumuna ilişkin sonuçlar	134
7.3	Sabit akımlı yük için normal yüklenme durumuna ilişkin sonuçlar	134
7.4	Sabit empedans yük modeli için normal yüklenme durumuna ilişkin sonuçlar	134
7.5	69-baralı sistemde maksimum aktif güç ve temel reaktif güç yüklenme durumu için kritik bara ve kararlılık indeks değeri	139
7.6	69-baralı sistemde temel aktif güç ve maksimum reaktif güç yüklenme durumu için kritik bara ve kararlılık indeks değeri	139

1. GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyılda elektrikli güç sistemlerinde güç akışı için birden fazla etkili ve güvenilir güç akışı metotları (Newton-Raphson, Gauss-Saidel, Fast Decoupled Load Flow) geliştirilmiş [1-3] olup bunlar güç sistemlerinde planlama, işletim ve kontrolde geniş olarak kullanılmış ve kullanılmaktadır. 1980'lerin sonlarına kadar dağıtım sistemlerinde kısa devre hesaplamaları ve gerilim düşümü hesabı yapılmakta, güç akışına ihtiyaç duyulmamakta idi. Fakat dağıtım sistemlerinde bazı teknolojik gelişmeler ve uygulamalar bu sistemlerde de güç akışı hesabının yapılması ihtiyacını doğurmuştur. Bunlar;

- SCADA sistemlerinin kullanılması
- Kompanzasyon yapılması ve bunların en uygun yerinin belirlenme ihtiyacı
- FACTS cihazlarının geliştirilmesi ve dağıtım sistemlerinde de kullanılması
- YEÜ Birimlerinin dağıtım seviyesine yerleştirilmesi
- Sistem kayıplarını en aza indirmek için yeniden konfigüre edilmesi

gibi uygulamalardır.

Dağıtım sistemleri genellikle radyal bir yapıya sahiptir ve yeraltı kablolarının kullanılması nedeniyle hatların R/X oranları birden büyük değerli olabilmektedir. İletim sistemlerinde bu oran birden çok küçüktür. Bunun yanı sıra dağıtım sistemleri tek faz, iki faz ve üç fazlı dallara sahip olabildiğinden dengesiz yapıda olabilirler. Ayrıca sistem matrisleri genellikle ill conditioned matristir [4-5]. Yani matristeki çok az bir değişim, sistem çözümünde çok büyük değişikliklere neden olabilmektedir. Dağıtım sistemlerinin bu özelliklerinden dolayı iletim sistemleri için kullanılan geleneksel güç akışı algoritmaları dağıtım sistemlerinin güç akışı hesabında yetersiz kalabilmektedir. Bu nedenle dengeli ve dengesiz dağıtım sistemlerinde güç akışı için bir çok algoritma geliştirilmiştir [6-50]. Bu algoritmaları iki gruba ayırmak mümkündür.

Bunlar;

- Radyal sistemlere uygun şekilde geleneksel algoritmaların geliştirilmiş şekilleri [6-22].
- Kirchhoff Akım ve Gerilim kanununun veya hat parametreleri ve hattın transfer edilen aktif ve reaktif güçlerden oluşan gerilim denklemi (kuadratik denklem) kullanılarak radyal sistemde ileri ve/veya geri yönde hesaplamalara dayanan sweep-temelli algoritmalarıdır [23-50].

Bu çalışmada ikinci grup olarak verilen dağıtım sistemleri güç akışı algoritmaları incelenmekte olup dengeli ve dengesiz dağıtım sistemleri için yeni bir güç akışı algoritmasının geliştirilmesi konusu incelenmiştir. Bunun yanı sıra Yerel Enerji Üretim Birimleri, üç-fazlı transformatörler ve gerilim regülatörleri gibi dağıtım sistemleri elemanlarının sweep-temelli algoritmalarda modellenerek güç akışına dahil edilmesi çalışmada incelenen bir diğer konudur. Çalışmada son olarak sürekli durum gerilim kararlılığı açısından dağıtım sistemlerinde en kritik baranın belirlenmesi için yeni bir kararlılık indeksinin geliştirilmesi konusu incelenmiştir.

1.1. Konu Hakkında

Dağıtım sistemleri için geliştirilen algoritmalarından sistemde ileri ve/veya geri yönde gerilim hesabına dayalı (sweep-temelli) ikinci grup algoritmalar yüksek yakınsama özelliği, kısa surede hesaplama kabiliyeti ve sistem parametrelerinin değişiminden az etkilenen, güvenilir algoritmalar olup radyal dağıtım sistemlerinin analizinde geniş olarak kullanılmaktadır. Bu tür algoritmalar tek yönlü güç akışı esas alınarak geliştirilmiştir. Dolayısıyla radyal dağıtım sisteminde kaynaktan sona doğru ileri yönde gerilim hesabı, sondan başa doğru ise geri yönde hatlardan akan akım ve/veya güç hesabı yapılmaktadır. Geri yönde yapılan hesaplamalarda akım ve/veya güç hesabının yanı sıra gerilimin hesaplandığı algoritmalar da mevcuttur [30-31, 39, 45]. Geliştirilen bu sweep-temelli güç akışı algoritmalarının büyük bir çoğunluğunda bara gerilimleri hattın akan akım ve hat başı gerilimi kullanılarak Kirchhoff Gerilim Kanunu ile [23-34] veya hattın transfer edilen aktif ve reaktif güç, hat başı gerilimi kullanılarak oluşturulan kuadratik denklem ile [35-50] hat sonu bara gerilimleri hesaplanmaktadır. Mevcut algoritmaların hesaplama süresinin düşürülmesi, yakınsama özelliğinin iyileştirilmesi veya bu özelliklere sahip yeni güç akışı

algoritmalarının geliştirilmesine ilişkin çalışmalar her geçen gün artarak devam etmektedir.

Günümüzde dağıtım sistemlerinin güç ihtiyacını belli oranda karşılamak amacıyla YEÜ birimleri sisteme dahil edilmektedir. YEÜ birimlerinin yanı sıra son yıllarda FACTS elemanları olarak adlandırılan güç elektroniği elemanları ile geliştirilen Static Var Compansator (SVC), Static Compensator (Statcom) gibi aktif kompanzatörler kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu ile sistemde gerilim kontrolü yapılmaktadır [53]. Dolayısıyla bu tür dağıtım sistemleri radyallıktan uzaklaşmakta ve sistemdeki güç transferi kaynağa doğru da akabilmektedir. Yani her iki yönde güç akışı olabilmektedir. Bu durumda güç akışı analizine YEÜ birimlerinin ve/veya aktif kompanzatörlerin dahil edilmesi gerekmektedir. Bu tür elektriksel birimlerin aktif güçleri ve sisteme bağlantı noktası gerilimleri bilindiğinden güç akışı analizinde Gerilim Kontrollü bara (PV-bara) olarak seçilmektedir. Daha önce genel olarak sınıflandırılan güç akışı algoritmalarından Birinci grup güç akışı algoritmalarında (geleneksel güç akışı algoritmaları ve onların dağıtım sistemleri için geliştirilmiş şekilleri) bu birimler PV-bara olarak modellenerek dağıtım sisteminde güç akışı yapılabilmektedir. Yani PV-bara kolaylıkla algoritmalarda modellenmekte ve bilinmeyen büyüklükleri (Reaktif güç ve faz açısı) analiz esnasında hesaplanabilmektedir. Fakat bu tip algoritmalarda dağıtım sistemlerinin yapısı nedeniyle yakınsama problemi oluşabilmekte ve güç akışı analizi tamamlanamamaktadır.

İkinci grup olarak verilen sweep-temelli güç akışı algoritmaları dağıtım sistemleri için geliştirilmiştir. Algoritmalar tek yönlü güç akışını esas alarak geliştirildiğinden bunlara YEÜ birimleri veya aktif kompanzatörler PV-bara olarak doğrudan güç akışına dahil edilememekte genellikle sabit güçlü bara (PQ-bara) olarak modellenmektedir. Sabit PQ-bara olarak modellenmesi durumunda bu birimlerin bağlı olduğu bara gerilimleri kontrol edilememekte ve normal yük baraların da olduğu gibi güç değerlerine göre akımı hesaplanarak her bir iterasyonda gerilim ve akım değerleri hesaplanmaktadır. Dolayısıyla yük barası gibi güç akışına dahil edilmektedir. Bu birimlerin PV-bara olarak modellendiği bazı algoritmalar da mevcut olup sayıları sınırlıdır [23-25, 46-47, 51-52].

Dağıtım sistemlerinin dengesiz yapıya sahip olabilmesi nedeniyle üç fazlı transformatörlerin modellenmesi son derece önemlidir. Dengesiz sistemlerde transformatörlerin modellenmesi üzerine bazı çalışmalar [55-57]'de yapılmıştır. Yapılan bu modellemeler referans [54]'de verilen ve geniş olarak kullanılan klasik transformatör admitans matrisi modelinin farklı transformatör bağlantıları için geliştirilmiş modellemelerdir. Fakat dağıtım sistemlerinde ileri ve geri yönde gerilim ve akım hesabına dayalı algoritmaların geniş olarak kullanılması sebebiyle [54-57]'da verilen transformatör modelinin kullanılması bu tür algoritmaların performansının düşmesine, yakınsama probleminin oluşmasına ve uygulamalarda tekillik durumu gibi çeşitli zorluklara neden olmaktadır [60]. Bu nedenle sweep-temelli algoritmalarda doğrudan kullanılacak bazı modeller farklı transformatör bağlantıları için [59, 59]'da geliştirilmiştir. Dağıtım sistemlerinde geniş olarak kullanılan Yg-Yg, Yg- Δ ve Δ -Yg uç bağlantılı transformatörler için giriş ve çıkış uçlarındaki (primer ve sekonder uçları) akım ve gerilim denklemleri eşdeğer devreden yararlanarak kaynaktan sona doğru ileri yönde gerilim hesabının yapıldığı algoritmalar için [59]'de geliştirilmiştir. Benzer şekilde eşdeğer devreden yararlanılarak Yg- Δ bağlantılı transformatör için giriş ve çıkış uçlarındaki akım ve gerilim arasındaki bağıntı [59]'da dağıtım sistemlerinde sadece geri yönde gerilim hesabının yapıldığı algoritmalar için türetilmiştir. Referans [60]'da ise admitans matris modeli geliştirilerek dağıtım sistemleri için geliştirilen güç akışı algoritmalarına dahil edilmiştir.

Dağıtım sistemlerinde gerilim seviyesini belli sınırlar dahilinde tutmak amacı ile kullanılan gerilim regülatörler seri empedans ve buna bağlı kademe ayarlı ideal transformatör olarak modellenmektedir. Regülatörlerin kademe ayarı manuel veya otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Manuel olarak çalıştırılırken seçilen sabit kademe ayarına göre primer ve sekonder gerilimi arasındaki oran belirlenmekte ve gerilim dönüşümü yapılmaktadır. Otomatik ayarlama ise kademe pozisyonu bilinmediğinden güç akışı analizi esnasında hesaplanan gerilimler göz önünde bulundurularak uygun kademe pozisyonu belirlenmektedir. İkinci grup olarak verilen sweep-temelli güç akışı algoritmalarında üç-fazlı gerilim regülatörleri genellikle sabit kademeli olarak modellenmiş olup otomatik olarak kademe ayarı yalnızca [24]'de dengesiz sistemler için kaynaktan sona doğru ileri yönde gerilim hesabının yapıldığı güç akışı algoritmaları için yapılmıştır.

Gerilim kararlılığı statik analizler (yük akış analizleri) için bir sürekli durum problemi olarak tanımlanmaktadır. Sabit çalışma şartları esnasında üretim yerinden tüketim yerine güç transfer kabiliyeti gerilim kararlılığının konusudur. Gerilim kararlılığı yük kararlılığı olarak da adlandırılır [62]. Güç sistemlerinde yükteki değişimlere bağlı olarak değişen gerilim büyüklüğü ve sistemin güvenli çalışma durumu gerilim kararlılığı çalışmaları adı altında incelenmekte olup bu kararlılık analizi için literatürde birçok çalışmalar ve metotlar mevcuttur [63-73]. Bu çalışmalarda gerilim kararsızlığının olduğu ve sistemin analitik çözümünün olmadığı yüklenme durumunun olduğu baranın veya hattın belirlenmesi için bir çok farklı formülasyonlar geliştirilmiş olup bunlar kararlılık indeksi olarak tanımlanmaktadır.

Referans [64-66]'de verilen kararlılık indeksleri sistemin Jacobian matrisi esas alınarak geliştirilmiştir. Kritik bara bu matrisin elemanları kullanılarak belirlenmektedir. Chebbo [67], yeni bir kararlılık indeksi geliştirerek indeksinin eleman değerleri, sistemde bara empedans matrisinin yük empedansları da dahil edilerek hesaplanmasıyla belirlenmektedir. Geliştirilen diğer kararlılık indekslerinin büyük bir çoğunluğu [69-72], sistemin her bir barasına ait iki-baralı eşdeğer devresini oluşturarak hattan transfer edilen aktif ve reaktif güç ifadelerinin kullanılması sonucunda türetilmiştir. Dağıtım sistemlerinde kararlılık analizi için yeni bir kararlılık indeksi [73]'de Das tarafından geliştirilmiştir. Baraların kararlılık indeks değerleri için güç sistemlerinde güç akışı analizlerinde kullanılan kuadratik denklemin köklerinin ifadesinden yararlanılmıştır. Geliştirilen indekslerin büyük bir çoğunluğu güç akışı analizi dışında ekstra işler gerektirmektedir. Örneğin [64-66]'da geliştirilen metotlar sistem Jacobian matrisinin, [67]'de sistem bara empedans matrisinin oluşturulması gerekmekte ve bunlar kullanılarak bazı hesaplamalar yapılmaktadır. Bilindiği gibi dağıtım sistemleri radyal yapıda olduğundan Jacobian matriste ve bara empedans matrisinde teklik durumu oluşabileceğinden uygulamalarında problemler oluşmaktadır. Metotlardan bir kısmı ise [69-72] sistemde her bir bara için iki baralı eşdeğer devreye indirgenmesini gerektirmektedir. Bunun yanı sıra indirgenmiş devreler sadece hesaplandıkları sistem durumu veya sistemdeki küçük değişiklikler için geçerli olup sistemde büyük değerli güç değişimlerinde tekrar her bir bara için iki baralı eşdeğerinin oluşturularak kritik baranın belirlenmesini gerektirmektedir. Dolayısıyla bu hesaplama süresi ve işlem

sayısı açısından çok elverişsiz bir durum oluşturmaktadır. Ayrıca [72-72]'de verilen kararlılık indeksleri yalnızca aktif güç veya reaktif güç kullanılarak tanımlandığından sistemin yüksek yada düşük güç faktörlü yüklenme durumlarında hatalı sonuçlar vermekte, yetersiz kalabilmektedirler.

1.2. Tezin Amacı ve Sınırları

Bu çalışmada dengeli ve dengesiz dağıtım sistemlerinde güç akışı analizi için sweep-temelli yeni bir güç akışı algoritmasının geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için dağıtım sistemlerini yapı olarak iletim sistemlerinden ayıran en belirgin özelliği olan kaynaktan sona doğru tek yönlü güç akışından yararlanılması düşünülmektedir. Güç akışı analizlerinde kullanılan algoritmalarının hızlı yakınsama özelliğine sahip olması sistemlerin işletimi ve kontrolü açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle geliştirilmesi amaçlanan güç akışı algoritmasının performansı farklı dağıtım sistemleri üzerinde farklı parametrik analizler yapılarak değerlendirilecektir. Parametrik analizler için literatürde geniş olarak kullanılan sistemin farklı yüklenme durumu, hat empedanslarının farklı R/X oranları, sabit güç yük modelinin yanı sıra farklı gerilim bağımlı statik yük modellerinin kullanılması gibi durumlar göz önünde bulundurulacaktır.

Dağıtım sistemleri için geliştirilen sweep-temelli güç akışı algoritmaları sistemde kaynaktan sona doğru tek yönlü güç akışı göz önünde bulundurularak geliştirildiğinden bu tür algoritmalarda YEÜ birimleri veya gerilim kontrolörlerinin güç akışında ikinci bir kaynak yani PV-bara olarak doğrudan modellenememektedir. Bunun yanı sıra dağıtım sistemlerinin dengesiz yapıya sahip olması nedeniyle üç-fazlı transformatörlerin primer ve sekonder uçlarındaki akım gerilim ilişkileri doğrudan elde edilememektedir. Çalışmada YEÜ birimleri ve/veya gerilim kontrolörlerinin yanı sıra üç-fazlı transformatörler ve gerilim regülatörleri gibi dağıtım sistemleri elemanları modellenerek bütün sweep-temelli algoritmalara dahil edilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için PV-baranın reaktif gücünün belirlenmesi, dağıtım sistemlerinde geniş olarak kullanılan Yg-Yg, Yg- Δ ve Δ -Yg bağlı transformatörlerin primer ve sekonder uçlarındaki akım ve gerilimlerinin belirlenmesi, gerilim regülatörlerinin çıkış geriliminin istenilen sınırlarda tutulması

için kademe ayarının otomatik olarak algoritma içinde yapılmasına ilişkin yeni metotlar geliştirilecektir. Geliştirilen metotlar farklı dağıtım sistemleri üzerinde denenerek elde edilen sonuçlar mevcut diğer metotlar ile karşılaştırılacak ve geçerlilikleri test edilecektir. Dağıtım sistemleri için radyal yapılı sistemler göz önünde bulundurulacak mesh yapılı sistemler kullanılmayacaktır. Trafoların güç akışında modellenmesinde ise dengesiz sistemlerde simetrik bileşenler modelinin kullanılabileceği, sıfır bileşen akımının olduğu transformatör bağlantıları göz önünde bulundurulacaktır.

Çalışmada son olarak dağıtım sistemlerinin sürekli durum gerilim kararlılığı incelenecektir. Gerilim kararlılığı analizi sistemin sürekli çalışma durumunda yük değişimi ile gerilim çökmesinin meydana geleceği baranın ve/veya hattın belirlenmesi açısından incelenecektir. Bunun için gerilim kararlılığı analizi için kritik barayı yani gerilim çökmesine en yakın barayı tayin etmek amacıyla yeni bir kararlılık indeksi'nin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Geliştirilen bu yeni kararlılık indeksi farklı dağıtım sistemleri üzerinde sınanarak elde edilen sonuçlar diğer kararlılık indeksleri ile elde edilen sonuçlar la karşılaştırılacaktır. Test için dağıtım sistemlerine kolaylıkla uygulanabilirliği, sistemin yüklenme durumundan, farklı yük modellerinden, farklı güç faktörü durumundan ve farklı gerilim seviyesinden etkilenip etkilenmediği gibi kriterler göz önünde bulundurulacaktır.

1.3. Tezin Bölümleri

Dağıtım sistemleri için geliştirilen ileri ve/veya geri yönde gerilim hesabının yapıldığı sweep-temelli güç akışı algoritmaları ve bunlarda gerilim hesabında kullanılan formülasyonlar, sonlandırma kriterleri, dengesiz sistemlere uygulanabilirliği gibi özellikleri detaylı olarak ikinci bölümde incelenmiştir. Ayrıca algoritmalarda YEÜ birimleri ve/veya gerilim kontrolörlerinin, üç-fazlı transformatörlerin modellenip modellenmediği eğer bu birimler güç akışına dahil edildiyse nasıl modellendiği hakkında bilgi verilmektedir.

Üçüncü bölümde dağıtım sistemlerinde kullanılan Kompanzatörler, YEÜ birimleri, transformatörler, yük modelleri, gerilim regülatörleri gibi elemanların

kullanım amacı ve bunların güç akışı analizinde sweep temelli algoritmalarda nasıl modellendiği incelenmektedir. Ayrıca mevcut modellerin güç akışı analizine dahil edilmesinde karşılaşılan problemler ve/veya modellemelerdeki eksiklikler verilmektedir.

Çalışmada dördüncü bölümde, güç sistemlerinin sürekli durum kararlılığı ve gerilim çökmesi hakkında bilgi verilmektedir. Ayrıca gerilim çökmesinin oluştuğu bara veya bunu besleyen hatları belirlemek üzere tanımlanan kararlılık indeksleri ve formülasyonları detaylı olarak verilmekte ve geliştirilen indekslerin dağıtım sistemlerine uygulanmasında karşılaşılabilecek problemler ve yetersizlikleri hakkında bilgi verilmektedir.

Beşinci bölümde çalışmanın esasını teşkil eden dengeli dağıtım sistemleri için yeni bir güç akışı algoritması geliştirilmiş ve algoritma farklı dağıtım sistemlerine uygulanarak geçerliliği sınanmıştır. Ayrıca algoritmanın performansı sistemlerin farklı yüklenme durumu, hatların farklı R/X oranı, ve farklı statik yük modelleri için değerlendirilerek diğer algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Bunun yanı sıra YEÜ birimleri ve/veya gerilim kontrolörleri güç akışı analizinde PV-bara olarak modellenerek bara geriliminin istenilen değerde tutmak için gerekli reaktif güçlerinin nasıl hesaplanacağına dair yeni bir metot verilmiş ve sonuçlar diğer metotlar ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen bu yeni algoritma ve PV-bara modelleme metodu altıncı bölümde genişletilerek üç-fazlı sistemlerde güç akışı analizi için uygulanmıştır. Bunun yanı sıra dağıtım sistemlerinde geniş olarak kullanılan Yg-Yg, Yg- Δ ve Δ -Yg bağlı transformatörler için simetrik bileşenler metodu kullanılarak sweep-temelli algoritmalarda kullanılabilecek yeni bir model geliştirilerek farklı sistemler üzerinde geçerliliği sınanmıştır. Benzer şekilde dağıtım sistemlerinde gerilim ayarı için kullanılan gerilim regülatörleri bütün sweep-temelli algoritmalara dahil edilebilecek şekilde otomatik olarak kademe ayarının yapıldığı yeni bir algoritma bu bölümde verilen bir diğer çalışmadır.

Çalışmada son olarak yedinci bölümde dağıtım sistemleri için sistemde gerilim çökmesine en yakın barayı yani kritik barayı tayin edebilen yeni bir kararlılık indeksi geliştirilmiştir. Geliştirilen indeks birçok dağıtım sistemine uygulanarak sınanmıştır. Ayrıca sistemlerin farklı yüklenme durumları, farklı gerilim seviyeleri ve farklı statik

yük modelleri için indeksin geçerliliği sınanarak sonuçlar diğer kararlılık indeksleri ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmaktadır. Son bölüm sonuçlar ve gelecek çalışmalar için önerilerden oluşmaktadır.

2. DAĞITIM SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI ANALİZİ

2.1. Giriş

Mevcut güç sistemlerinin en iyi şekilde işletilmesi kadar, gelecekte sistemlerde meydana gelebilecek gelişmelerin planlanması yönünden de yük akış analizi çalışmaları çok önemlidir. Yük akışı analizinin çözümünde karşılaşılan zorluklar, değişik baralar için tarif edilen bilgilerin farklılığından ileri gelir. Yük akış problemlerinin sayısal çözümleri, bilinmeyen bara gerilimlerine tahmini değerler verip tarif edilen aktif ve reaktif güçler ve baralardaki tahmini değerlerden her bara için yeni bir gerilim değeri hesaplamak sureti ile yapılır. Sistemin tek hat diyagramından hareketle ve iletim hatlarının seri empedansları ve paralel admitansları dikkate alınarak elde edilen bara admitans matrisi (Y_{BARA}) kullanılmaktadır. Her analiz için daima çalışma şartları belirlenerek, bir bara hariç diğer bütün baralarda şebekeye giren aktif güç tarif edilmelidir. Diğer giriş güçleri ise jeneratörlerden ve sistem üzerinden gelen pozitif ve negatif güçlerdir. Ayrıca bu baraların her birinde sisteme akan reaktif güç veya gerilimin genliği de tarif edilmelidir. Yani, her barada reaktif güç akışı veya gerilimin genliğinden hangisinin sabit tutulacağına karar verilir. Genel olarak güç akış analizlerinde jeneratör baralarında gerilimin genliği, yük baralarında ise aktif ve reaktif güçler tarif edilir.

Hatlardaki kayıp güç nedeniyle şebekedeki bütün santrallerin aktif güç üretimleri sistemdeki baralardan birinde aktif güç bilinmeyen seçilerek, çözümün sonunda elde edilebilmektedir. Bu nedenle jeneratör baralarından birinde aktif güç bilinmeyen seçilir ki, bu baraya “salınım barası” denir. Güç akışı analizlerinde salınım barası geriliminin genliği ve faz açısı girilir. Salınım barasının aktif gücü değişkendir ve değeri diğer jeneratör baralarının aktif güçleri ile yüklerin aktif gücü ile kayıpların toplamı arasındaki farka eşitlenerek belirlenir. Bahsedilen bu güç akışı analizi iletim sistemleri için geleneksel güç akışı algoritmaları ile gerçekleştirilmekte, dağıtım sistemlerinde ise bu algoritmaların yanı sıra dağıtım sistemleri için geliştirilmiş güç akışı algoritmaları da kullanılmaktadır. Geliştirilen bu

algoritmaların büyük bir çoğunluğu sweep-temelli olup hızlı yakınsama özelliği, sistemlere kolay uygulanabilir olmaları nedeniyle dağıtım sistemlerinde güç akışı analizinde geniş olarak kullanılmaktadır.

2.2. Geleneksel Güç Akışı Algoritmaları

Daha önce 1. Bölümde bahsedildiği gibi geçtiğimiz yüzyılda elektrikli güç sistemlerinde güç akışı için birden fazla etkili ve güvenilir güç akışı metotları geliştirilmiştir. Bunlar;

- Newton-Raphson,
- Gauss-Saidel,
- Fast Decoupled Load Flow

olarak adlandırılarak, güç sistemlerinde planlama, işletim ve kontrolünde güç akışı analizi için geniş olarak kullanılmaktadır. Yakın geçmişe kadar dağıtım sistemleri için güç akışı analizine ihtiyaç duyulmamakta sadece iletim sistemlerinde güç akışı analizi yapılmakta idi. Bu nedenle geliştirilen bu geleneksel güç akışı algoritmaları iletim sistemlerinin yapısı esas alınarak oluşturulmuştur. Geliştirilen bu algoritmaların yapısı kısaca aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

2.2.1. Gauss-Seidell Metodu

N baralı bir sistemde Denklem (2.1)'de verilen ifade ile belirlenen yeni bara gerilimleri ile bir önceki adımda elde edilen bara gerilimleri arasındaki farkın kullanıcı tarafından saptanan bir hata değerinden küçük oluncaya kadar hesaplamaların sürdürülmesi esasına dayanır.

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left(\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right) \quad (2.1)$$

Burada $n \neq k$ ve denklemin sağ tarafındaki gerilim değerleri bara için hesaplanan en son değerlerdir. Y sistemin bara admitans matrisi olup yüklerin ve jeneratörlerin empedansları dahil edilmeden sistemin hat empedansları kullanılarak hesaplanmaktadır [74].

2.2.2. Newton-Raphson Metodu

İki veya daha fazla değişkenli fonksiyonların Taylor serisine açılımı, Newton-Raphson metodu ile yük akışı problemi çözümünün temelini teşkil eder. Taylor serisine açarken 1. dereceden büyük olan kısmi türevler ihmal edilmektedir [74]. Bu metot ile N baralı bir sistemde yük baralarına ait aktif ve reaktif güçler başlangıç gerilim değerleri ve faz açıları kullanılarak

$$P_k(i) = V_k(i) \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n(i) \cos(\delta_k(i) - \delta_n(i) - \theta_{kn}) \quad (2.2.a)$$

$$Q_k(i) = V_k(i) \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n(i) \sin(\delta_k(i) - \delta_n(i) - \theta_{kn}) \quad k=1,2,\dots,N \quad (2.2.b)$$

ifadeleri ile belirlenir. Bu baralara ait yeni gerilim ve faz açıları ise;

$$\begin{bmatrix} \delta_k(i+1) \\ V_k(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_k(i) \\ V_k(i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta_k(i) \\ \Delta V_k(i) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

ifadesi ile belirlenir. Burada

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta_k(i) \\ \Delta V_k(i) \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} P_k - P_k(i) \\ Q_k - Q_k(i) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

olup J, Jacobian matrisi olarak adlandırılır. N baralı bir sistem için Jacobian matrisi;

$$J = \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{d\delta_2} & \dots & \frac{dP_2}{d\delta_N} \frac{dP_2}{dV_2} & \dots & \frac{dP_2}{dV_N} \\ \vdots & & & & \\ \frac{dP_N}{d\delta_2} & \dots & \frac{dP_N}{d\delta_N} \frac{dP_N}{dV_2} & \dots & \frac{dP_N}{d\delta_N} \\ \frac{dQ_2}{d\delta_2} & \dots & \frac{dQ_2}{d\delta_N} \frac{dQ_2}{dV_2} & \dots & \frac{dQ_2}{dV_N} \\ \vdots & & & & \\ \frac{dQ_N}{d\delta_2} & \dots & \frac{dQ_N}{d\delta_N} \frac{dQ_N}{dV_2} & \dots & \frac{dQ_N}{d\delta_N} \end{bmatrix} \quad (2.5.a)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (2.5.b)$$

ifadesi ile oluşturulur. Yük baralarına ait gerilim ve faz açısı hesabı bir önceki adımda hesaplanan değerler ile aralarındaki fark belirlenen hatadan küçük oluncaya kadar hesaplama devam ettirilir.

2.2.3. Fast-Decoupled Power Flow Metodu

Diğer bir metot olan Fast-Decoupled Power Flow metodu, Newton-Raphson yük akış metodunda oluşturulan Jacobian matrisi üzerinde bazı ihmallerin yapılarak işlemin hızlandırılması esasına dayanır. Elektrik güç sistemlerinde yükün aktif gücü faz açısıyla, reaktif gücünün de gerilim ile daha çok değişmesi nedeniyle, Jacobian matriste, Denklem (2.5.b)'de, aktif gücün gerilime (J_2) ve reaktif gücün faz açısına bağlılığı (J_3) ihmal edilerek güç akışı hesabı yapılmaktadır. Bu durumda denklem sistemi

$$J_1(i)\Delta\delta(i) = \Delta P(i) \quad (2.6.a)$$

$$J_4(i)\Delta V(i) = \Delta Q(i) \quad (2.6.b)$$

şeklinde kullanılarak bilinmeyen büyüklükler hesaplanmaktadır. Algoritmanın hızını arttırmak ve hesaplama süresini düşürmek amacı ile bazı hesaplamalarda Jacobian matrisi başlangıç koşullarına göre, ($V_k=1pu$), oluşturulduktan sonra hesaplama süresince sabit tutulmaktadır. Bu ise sabit Jacobian'lı Fast-Decoupled Power Flow metodu olarak adlandırılmaktadır [74].

Son zamanlarda dağıtım sistemlerinde 1. Bölümde bahsedilen bazı teknolojik gelişmeler ve uygulamalar bu sistemlerde de güç akışı hesabının yapılmasına ihtiyaç doğurmuştur. Fakat dağıtım sistemleri;

- Hatlarda yeraltı kablolarının kullanılmasından dolayı R/X oranının yüksek olması nedeniyle admitans ve Jacobian matrislerinin ill-conditioned matris olabilmesi
- Hatlarda fazlar arasında çaprazlama yapılmaması nedeniyle dengesiz hat empedansı
- Fazların farklı yükleri beslemesi ve tek veya iki fazlı hatlarla elektrik enerjisinin dağıtılması nedenleriyle dengesiz yüklenme

gibi özelliklere sahiptir. Dağıtım sistemlerinin bu özelliklerinden dolayı iletim sistemleri için kullanılan geleneksel güç akışı metotları dağıtım sistemlerinin güç akışı hesabında yakınsama problemi nedeniyle yetersiz kalabilmektedirler [5]. Bu nedenle dengeli ve dengesiz dağıtım sistemlerinde güç akışı için ileri ve/veya geri yönde gerilim hesabına dayalı (sweep-temelli) bir çok güç akışı algoritması geliştirilmiştir [23-50].

2.3. Sweep-Temelli Güç Akışı Algoritmaları

Sweep temelli güç akışı algoritmaları, dağıtım sistemlerinin radyal yapısı esas alınarak geliştirildiğinden radyal sistemlerin güç akışı analizinde geleneksel metotlar ve onların dağıtım sistemleri için geliştirilmiş şeklindeki metotlara nazaran daha güvenilir olup performansları daha yüksektir [75]. Algoritmaların temelini oluşturan gerilim denklemlerinin Şekil 2.1'de verilen basit bir sistem için yazılarak yapılarının

anlatılması anlaşılmalari açısından kolaylık sağlayacaktır. Verilen devrede hattın transfer edilen aktif ve reaktif güç;

$$P = \frac{V_r V_s}{Z} \cos(\theta_Z - \delta) - \frac{V_r^2}{Z} \cos(\theta_Z) \quad (2.7.a)$$

$$Q = \frac{V_r V_s}{Z} \sin(\theta_Z - \delta) - \frac{V_r^2}{Z} \sin(\theta_Z) \quad (2.7.b)$$

şeklinde yazılabilir. Burada V_s ve V_r sırasıyla hat-başı ve hat-sonu gerilimlerinin büyüklüğü, $\delta = \delta_s - \delta_r$ gerilimler arasındaki faz farkını, Z hat empedansı büyüklüğü ve θ_Z ise hat empedansının faz açısını göstermektedir. Aktif ve reaktif güç ifadelerinden yararlanarak;

$$\cos(\theta_Z - \delta) = \frac{PZ}{V_r V_s} + \frac{V_r}{V_s} \cos(\theta_Z) \quad (2.8.a)$$

$$\sin(\theta_Z - \delta) = \frac{QZ}{V_r V_s} + \frac{V_r}{V_s} \sin(\theta_Z) \quad (2.8.b)$$

eşitlikleri yazılabilir.

$$\cos^2(\theta_Z - \delta) + \sin^2(\theta_Z - \delta) = 1 \quad (2.9)$$

Denklem (2.8)'de verilen eşitlikler Denklem (2.9)'da yerine yazılarak gerilim denklemi (kuadratik denklem) aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$V_r^4 + 2V_r^2(PR + QX) - V_s^2 V_r^2 + (P^2 + Q^2)Z^2 = 0 \quad (2.10.a)$$

Elde edilen bu polinomun, Denklem (2.10.a), pozitif köklerinden en büyüğü bize hat sonu geriliminin (V_r) genliğini vermektedir. Benzer şekilde hat başı aktif ve reaktif gücü kullanılarak elde edilen gerilim polinomunun kökü, Denklem (2.10.b), kullanılarak da hat sonu gerilimi hesaplanabilmektedir.

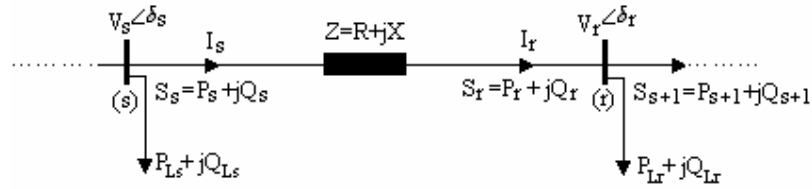
$$V_r = \sqrt{V_s^2 - 2(P_s R + Q_s X) + (P_s^2 + Q_s^2)Z^2 / V_s^2} \quad (2.10.b)$$

Bu gerilim denklemleri sweep-temelli algoritmalarda ileri veya geri yönde sisteme uygulanarak bara gerilimlerinin hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Şekil 2.1’de verilen dengeli sistem için hat sonu ve hat başı gerilimlerinin ifadesi Kirchoff Gerilim Yasası (KVL) kullanılarak;

$$\bar{V}_s = \bar{V}_r + \bar{I}_s \bar{Z} \quad (2.11.a)$$

$$\bar{V}_r = \bar{V}_s - \bar{I}_s \bar{Z} \quad (2.11.b)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $\bar{I}_s$ hattın akan toplam akımı, $\bar{Z}$ ise hattın seri empedansını göstermektedir.



Şekil 2.1. İki baralı basit dağıtım sistemi devre şeması

Denklem (2.10) ve (2.11)’de iki baralı sistem için yazılan gerilim ifadeleri dağıtım sistemleri için geliştirilen ve geniş olarak kullanılan sweep-temelli güç akışı algoritmalarının [23-52] temelini oluşturmaktadır. Genellikle bu algoritmalarda ileri yönde yani kaynaktan sona doğru gidilerek bara gerilimleri, sondan kaynağa doğru ise geri yönde hat akımları veya hatlardan transfer edilen güç hesaplanmaktadır. Bu nedenle sweep-temelli güç akışı algoritmalarını iki ana grupta incelemek mümkündür. Bunlar;

- Kirchoff Gerilim Kanunu kullanılarak geliştirilen sweep-temelli algoritmalar
- Gerilim polinomu (Kuadratik denklem) kullanılarak geliştirilen sweep-temelli algoritmalar şeklinde gruplanabilir.

2.3.1. Kirchoff Gerilim Kanunu Kullanılarak Geliştirilen Sweep-Temelli Algoritmalar

Dağıtım sistemlerinin radyal yapıda olması Kirchoff Gerilim Yasası kullanarak bara gerilimlerinin hesaplanmasına imkan sağlamaktadır. Bu nedenle literatürde KVL kullanarak bara gerilimlerinin hesaplandığı bir çok güç akışı algoritması geliştirilmiştir [23-34].

Shirmohammadi ve arkadaşları [23], dengeli dağıtım sistemleri için yeni bir güç akışı algoritması geliştirmiştir. Geliştirilen algoritmada sondan kaynağa doğru geri yönde hat akımları hesaplanmakta ve bu akımlar kullanılarak ileri yönde bara gerilimleri Kirchoff Gerilim Yasası ile hesaplanmaktadır. Algoritma dağıtım sistemlerinde güç akışı analizi için geniş olarak kullanılmakta olup aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

Adım 1. Sistemin bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle.

Adım 2. Bara akımlarını hesapla.

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad (2.12)$$

Adım 3. Bara akımlarını kullanarak sistemde sondan kaynağa doğru hat akımlarını hesapla.

$$\bar{I}_L^{(k)} = \sum_{i=k+1}^{n-1} \bar{I}_L^{(i)} + \bar{I}_y^{(k+1)}, \quad k = 1, \dots, n-1 \quad (2.13)$$

Burada n sistemin bara sayısı, I_L hat akımı I_y ise yük akımını göstermektedir.

Adım 4. Hesaplanan hat akımlarını kullanarak sistemde kaynaktan sona doğru ileri yönde Kirchoff Gerilim Yasası, Denklem (2.11.b) ile bara gerilimlerini hesapla.

Adım 5. Hesaplanan yeni bara gerilimi ve akımını kullanarak yüklerin yeni güçlerini hesapla ve gerçek değerleri ile karşılaştır. Eğer aktif ve reaktif güçlerdeki azami hata belirlenen hata değerinden küçük ise algoritmayı sonlandır, değil ise Adım 2'den hesaplamaya devam et.

Ayrıca algoritmada 3. Bölümde detayı verilecek olan bir metot ile YEÜ birimleri gerilim kontrollü bara (PV-bara) olarak modellenerek bara geriliminin istenilen değerde tutmak için gerekli reaktif gücün nasıl hesaplanacağına dair yeni bir metot geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma [24]'de dengesiz sistemlerde güç akışı analizi için kullanılmıştır. Aynı çözüm tekniği [25]'de YEÜ birimleri ve dengesiz transformatörler gibi elemanlar göz önünde bulundurularak dengesiz dağıtım sistemlerinin güç akışı analizinde kullanılmıştır. Yapılan güç akışı analizinde [25] YEÜ birimleri PV-bara olarak modellenmiş, gerilimi kontrol edilmiştir. Gerilim kontrolü PV baranın akımı ayarlanarak gerçekleştirilmektedir. Bunun yanı sıra dağıtım sistemlerinde geniş olarak kullanılan transformatör bağlantı şekillerinden Yg-Yg, Delta-Yg ve Y-Delta bağlantılı transformatörler [59]'de geliştirilen ve detayı 3. Bölümde verilecek olan transformatör modelleri kullanılarak güç akışı analizine dahil edilmiştir. Kirchhoff Gerilim Yasası, Denklem (2.11.b) kullanılarak ileri yönde gerilim, geri yönde hat akımı hesabı ile güç akışı [26-28]'de verilen güç akışı algoritmalarında da kullanılmıştır. Dengesiz dağıtım sistemleri için [26]'da geliştirilen algoritmada hat akımları diğerlerinden farklı olarak yük akımları yerine her bir hattın sonundaki bara gerilimi ve transfer edilen toplam güç kullanılarak hesaplanmakta olup algoritmaya ait adımlar aşağıda verilmiştir.

Adım 1. Sistemin bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle.

Adım 2. Her bir faz için hatlardan akan aktif ve reaktif gücü Denklem (2.14)'ü kullanarak hesapla.

$$P_{los_{ij}} + jQ_{los_{ij}} = V_i (I_{ij})^* - V_j (I_{ji})^*, \quad (2.14.a)$$

$$P_{ij}^{(k)} + jQ_{ij}^{(k)} = \sum_{i=k+1}^n P_y^{(k)} + jQ_y^{(k)} + \sum_{i=k+1}^{n-1} P_{los_{ij}}^{(k)} + jQ_{los_{ij}}^{(k)}, \quad k = 1, \dots, n-1 \quad (2.14.b)$$

Adım 3. Hesaplanan güçleri kullanarak hatlardan akan faz akımlarını sistemde sondan kaynağa doğru Denklem (2.15)'i ile hesapla.

$$\bar{I}_{ij}^{(f)} = \left[\frac{P_{ij}^{(f)} + jQ_{ij}^{(f)}}{V_j} \right]^*, \quad f = a, b, c \quad (2.15)$$

Adım 4. Hesaplanan hat akımlarını ve hat empedansını kullanarak Kirchoff Gerilim Yasası ile bara gerilimlerini sistemde kaynaktan sona doğru ileri yönde hesapla.

$$\begin{bmatrix} V_j^a \\ V_j^b \\ V_j^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i^a \\ V_i^b \\ V_i^c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{ij}^{aa} & Z_{ij}^{ab} & Z_{ij}^{ac} \\ Z_{ij}^{ba} & Z_{ij}^{bb} & Z_{ij}^{bc} \\ Z_{ij}^{ca} & Z_{ij}^{cb} & Z_{ij}^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ij}^a \\ I_{ij}^b \\ I_{ij}^c \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Adım 5. Bir önceki gerilim değerleri ile hesaplanan gerilimleri kullanarak gerilim hatalarını belirle. Eğer gerilimlere ait hata değerlerinden en büyüğü tanımlanan hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır. Değilse 2. Adıma geri dön.

Aynı gerilim ve akım hesaplama teknikleri [27-28]'de kullanılarak dengeli sistemler için güç akışı algoritmaları geliştirilmiştir. Ayrıca [27]'de verilen çalışmada hatlardan akan akımı ve dolayısıyla bu akımlar kullanılarak bara gerilimlerinin otomatik olarak hesaplanabileceği, bara ve hat bağlantılarının numaralandırılmasının otomatik olarak yapıldığı kodlama tekniği geliştirilmiştir. [28]'de ise geliştirilen algoritmada gerilim hesabında fider için uygulanan temel iterasyonun dışında alt-fiderler için de gerilim hesabı iteratif olarak hesaplanmaktadır.

Forward-Backward Substitution Metod'u [29], Kirchoff Gerilim ve Akım Kanunu'nun bara gerilimlerine ve hat akımlarına uygulanması esasına dayanmaktadır. Algoritma yapısı nedeniyle dengeli ve dengesiz dağıtım sistemlerinin güç akışı hesabında geniş olarak kullanılmakta olup aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

Adım 1. Bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini atayarak her bir yükün akımını hesapla.

Adım 2. En son yük barasından başlayarak yük ve hatların paralel kapasitör akımlarını kullanarak her bir hattan akan akımı Kirchoff Akım Kanunu ile hesapla.

- Adım 3. Kaynak gerilimi ve hesaplanan kaynaktan çekilen akımı kullanarak Kirchhoff Gerilim Kanunu, Denklem (2.16) ile sonraki bara gerilimini ve hesaplanan gerilim ile ilgili hattan çekilen akımı kullanarak diğer bara gerilimlerini hesapla.
- Adım 4. Bir önceki gerilim değerleri ile hesaplanan gerilimleri kullanarak gerilim hatalarını belirle. Eğer gerilimlere ait hata değerlerinden en büyüğü tanımlanan hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır. Değilse hesaplanan gerilimleri kullanarak yük akımlarını belirle ve 2. Adıma geri dön.

Bir diğer metot olan Ladder Network Theory [30] metodu Forward-Backward Substitution Metot [29] ile çok benzerdir. Bu metoda ilişkin adımlar;

- Adım 1. Bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini atayarak her bir yükün akımını hesapla.
- Adım 2. En son yük barasından başlayarak yük ve hatların paralel kapasitör akımlarını kullanarak her bir hattan akan akımı Kirchhoff Akım Kanunu'nu kullanarak hesapla.
- Adım 3. Hattaki akımları belirlerken aynı zamanda Kirchhoff Gerilim Kanununa göre, Denklem (2.17) ile bara gerilimlerini hesapla.

$$\begin{bmatrix} V_i^a \\ V_i^b \\ V_i^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_j^a \\ V_j^b \\ V_j^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{ij}^{aa} & Z_{ij}^{ab} & Z_{ij}^{ac} \\ Z_{ij}^{ba} & Z_{ij}^{bb} & Z_{ij}^{bc} \\ Z_{ij}^{ca} & Z_{ij}^{cb} & Z_{ij}^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ij}^a \\ I_{ij}^b \\ I_{ij}^c \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

- Adım 4. Kaynak geriliminin hesaplanan yeni gerilimi ile gerçek değeri arasındaki fark hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır. Değil ise 5. Adıma git.
- Adım 5. Kirchhoff Gerilim Kanununa göre, Denklem (2.16) ile kaynaktan sona doğru ileri yönde bara gerilimlerini hesaplayarak 2. Adıma git.

Mok ve Salama [31], dengeli dağıtım sistemleri için bir metot geliştirmiştir. Bu metot, Forward-Backward Substitution ve Ladder Network Theory metotları geliştirilerek oluşturulmuştur. Metoda ilişkin adımlar aşağıda verilmiştir.

- Adım 1. İterasyon sayıcıyı başlat ($i=1$), sistemdeki bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle.
- Adım 2. Yük akımlarını hesapla, eğer yükün gücü gerilime göre değişiyorsa gerilimi kullanarak yeni gücü bul.
- Adım 3. En son baradan başlayarak sondan kaynağa doğru hat akımlarını ve yeni bara gerilimlerini geri yönde Kirchhoff Gerilim Yasası'nı, Denklem (2.11.a)'yı kullanarak hesapla.
- Adım 4. Hesaplanan yeni bara gerilimlerini ve kaynak gerilimini kullanarak gerilim oranını belirle;
- $$V_{s_r} = \frac{V_s^{yeni}}{V_s} \quad (2.18)$$
- Adım 5. Kaynak için belirlenen gerilim oranını kullanarak yük gerilimlerini hesapla;
- $$V_k^{ayar} = \frac{V_k^{yeni}}{V_{s_r}} \quad (2.19)$$
- Adım 6. Yük akımlarını hesapla, eğer yükün gücü gerilime göre değişiyorsa gerilimi kullanarak yeni gücü bul.
- Adım 7. Kaynaktan başlayarak yeni bara gerilimlerini Kirchhoff Gerilim Yasası'nı, Denklem (2.11.b)'yi ileri yönde kullanarak hesapla.
- Adım 8. Hesaplanan gerilimler ve bir önceki gerilimleri kullanarak hatayı belirle, eğer en büyük hata değeri seçilen hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır değil ise iterasyon sayısını bir arttır ve 2. adımdan devam et.

Sistemde alt fiderlerin bulunması durumunda her bir fider iterasyonunda verilen adımlar alt-fiderler için de tekrarlanır. Bu durumda algoritmada verilen kaynak gerilimi yerine alt fiderlerin fidere bağlı olduğu baranın gerilimi kullanılır. Alt-fiderler için hesaplamalar tamamlandıktan sonra alt-fiderlerin toplam gücü ve akımı fidere bağlı oldukları baralara dahil edilerek algoritma fider için de uygulanmakta ve güç akışı tamamlanmaktadır. Ayrıca algoritmanın dengesiz sistemlere uygulanabilmesi mümkündür. Bu durumda 4. Adımda kaynak geriliminin faz bileşenleri kullanılarak her bir faz için gerilim oranı hesaplanarak gerilim ayarı her yapılmaktadır.

Kirchoff Gerilim Kanunu ile hatlar üzerindeki gerilim düşümünün matris formunda hesaplanarak bara gerilimlerinin belirlendiği güç akışı algoritmaları [32-34]'de geliştirilmiştir. Referans [32]'de dengesiz dağıtım sistemleri için yeni bir güç akışı algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada her bir hattan beslenen yük akımlarına ilişkin katsayı matrisi (BIBC) ve bu matrisle ilişkili hatların seri empedanslarından oluşan bir matris (BCBV) tanımlanmaktadır. Oluşturulan bu matrislerden yararlanılarak her bir bara ile kaynak arasındaki toplam gerilim düşümünün hesaplandığı DLF empedans matrisi oluşturulmakta, kaynak gerilimi ve bu matris kullanılarak gerilim düşümleri vasıtasıyla bara gerilimleri hesaplanmaktadır. Bu metoda ilişkin adımlar;

Adım 1. İterasyon sayıcıyı başlat ($i=1$), sistemdeki bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle (genellikle gerilim değeri için Kaynak gerilimi kullanılmaktadır).

Adım 2. Yük akımlarını hesapla.

Adım 3. *BIBC* ve *BCBV* matrislerini oluşturduktan sonra bunların çarpımı ile DLF matrisini hesapla.

$$[DLF] = [BCBV] * [BIBC] \quad (2.20)$$

Adım 4. Gerilim düşümü ΔV matrisini ve her bir bara gerilimini hesapla;

$$[\Delta V] = [DLF][I] \quad (2.21.a)$$

$$[V_i] = [V_s - \Delta V_{i-1}], \quad i = 2, \dots, n-1 \quad (2.21.b)$$

Adım 5. Hesaplanan bara akımları ve bir önceki akım değerlerini kullanarak mutlak hata değerlerini belirle, eğer en büyük hata değeri seçilen hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır değil ise iterasyon sayısını bir arttır ve 2. adımdan devam et.

şeklindedir. Algoritmanın en büyük avantajı sistemlere bilgisayar ortamında otomatik olarak uygulanabilmesidir. Yani bilgisayar ortamında yazılan algoritmayı farklı bir sisteme uygulamak için sistemin giriş (hat ve yük) bilgilerinin değiştirilmesi yeterlidir. Algoritma kapalı döngü içeren dağıtım sistemleri için

geliştirilerek bu tür sistemler için güç akışı analizi [33]'de yapılmıştır. Benzer bir algoritma dengeli sistemlerde güç akışı analizi için [34]'de geliştirilmiştir. Algoritmaya ait adımlar aşağıdaki gibidir.

Adım 1. Sistemdeki bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle. (Genellikle gerilim değeri için kaynak gerilimi kullanılmaktadır).

Adım 2. Yük akımlarını hesaplayarak, sistemin hat akımları vektörünü oluştur.

$$[i_b] = [C][I_y] \quad (2.22)$$

Burada verilen C matrisi her bir hattan akan akımı belirlemek üzere oluşturulan katsayı matrisidir.

Adım 3. Hatların seri empedansları ile oluşturulan hat empedansı matrisi ve hat akımları vektörünü kullanarak hatlar üzerindeki gerilim düşümünü aşağıdaki şekilde hesapla.

$$[v_b] = [z_b][i_b] \quad (2.23)$$

Burada Z_b hatların seri empedansları kullanılarak oluşturulmuş hat empedansı matrisidir.

Adım 4. Hesaplanan gerilim düşümlerini kullanarak her bir baranın gerilimini Denklem (2.24) ile hesapla.

$$[V_i] = V_s - \sum_j C_{ji} v_j \quad (2.24)$$

Adım 5. Hesaplanan yeni bara gerilimlerini bir önceki değeri ile karşılaştır. Eğer en büyük mutlak hata değeri seçilen hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır değil ise iterasyon sayısını bir arttır ve 2. adımdan devam et.

2.3.2. Kuadratik Denklem Kullanılarak Geliştirilen Sweep-Temelli Algoritmalar

Dağıtım hatları için geliştirilen kuadratik denklemin, Denklem (2.10-a), pozitif köklerinden en büyüğü bize hat sonu geriliminin (V_r) genliğini vermektedir. Elde edilen bu gerilim denklemi veya benzer şekilde hat başı aktif ve reaktif güç kullanılarak elde edilen kuadratik denklemin en büyük reel kökü, Denklem (2.10-b), radyal dağıtım sistemlerinde ileri veya geri yönde her bir hatta uygulanarak birden fazla güç akışı algoritması geliştirilmiştir [35-50].

Dengeli dağıtım sistemleri için yeni bir güç akışı algoritması [35]'de Cespedes tarafından geliştirilmiştir. Denklem (2.10-a)'da verilen kuadratik denklem kullanılarak geliştirilen algoritma;

- Adım 1. Sistemdeki bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle. (Genellikle gerilim değeri için kaynak gerilimi kullanılmaktadır).
- Adım 2. Eğer sistemde yükler gerilim bağımlı ise bara gerilimlerini kullanarak her bir yükün gücünü hesapla.
- Adım 3. Hesaplanan yük güçlerini ve hatların kayıp güçlerini kullanarak her bir hattan akan gücü hesapla.

$$P_{los_{ij}} + jQ_{los_{ij}} = \frac{R(P^2 + Q^2)}{V_j^2} + j \frac{X(P^2 + Q^2)}{V_j^2} \quad (2.25.a)$$

$$P_{ij}^{(k)} + jQ_{ij}^{(k)} = \sum_{i=k+1}^n P_y^{(k)} + jQ_y^{(k)} + \sum_{i=k+1}^{n-1} P_{los_{ij}}^{(k)} + jQ_{los_{ij}}^{(k)} \quad (2.25.b)$$

- Adım 4. Denklem (2.10.a)'da verilen kuadratik denklemi kaynaktan sona doğru gitmek suretiyle her bir hat için kullanarak hat sonu bara gerilimlerini hesapla.
- Adım 5. Hesaplanan yeni bara gerilimlerini kullanarak hatlardaki güç kayıplarını ve toplam güç kaybını hesaplayarak bir önceki değeri ile karşılaştır. Eğer mutlak hata değeri seçilen hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır değil ise iterasyon sayısını bir arttır ve 2. adımdan devam et.

Algoritma her ne kadar KVL temelli algoritmalara nazaran daha iyi performansa sahip olsa da güç akışı analizi ile sadece bara gerilimleri hesaplanmaktadır. Kullanılan kuadratik denklem bara geriliminin büyüklüğünü vermekte faz açısı

hesaplanamamaktadır. Bu nedenle Denklem (2.10-b) kullanılarak dengeli sistemler için bir güç akışı algoritması Haque tarafından [36]'da geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada bara gerilimlerinin yanısıra faz açıları da hesaplanabilmektedir. Algoritmaya ait adımlar;

- Adım 1. Sistemdeki bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle. (Genellikle gerilim değeri için kaynak gerilimi kullanılmaktadır).
- Adım 2. Eğer sistemde yükler gerilim bağımlı ise bara gerilimlerini kullanarak her bir yükün gücünü hesapla.
- Adım 3. Hesaplanan yük güçlerini ve hatların kayıp güçlerini kullanarak her bir hattan akan gücü Denklem (2.25) ile hesapla.
- Adım 4. Denklem (2.10.b)'de verilen kuadratik denklemi kaynaktan sona doğru gitmek suretiyle her bir hat için kullanarak hat sonu bara gerilimlerini hesapla.
- Adım 5. Hesaplanan yeni bara gerilimlerini daha önceki değerleri ile karşılaştırarak mutlak hata büyüklüklerini hesapla. Eğer en büyük hata seçilen hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır değil ise iterasyon sayısını bir arttır ve 2. adımdan devam et.
- Adım 6. Denklem (2.26)'yı kullanarak kaynaktan sona doğru ileri yönde gitmek suretiyle gerilimlerin faz açısını hesapla.

$$\delta_r = \delta_s - \tan^{-1} \left(\frac{(XP_s - RQ_s)/V_s}{V_s - (RP_s + XQ_s)/V_s} \right) \quad (2.26)$$

Ayrıca bu çalışmada [36] farklı gerilim bağımlı yük modellerinin güç akışı sonuçlarına ve algoritmanın performansına etkisi de incelenmiştir. Geliştirilen bu algoritma [37]'de radyal ve kapalı çevrimli dağıtım sistemleri için, [38]'de ise kapalı çevrimli ve birden fazla kaynaklı dağıtım sistemleri için genişletilerek güç akışı analizleri yapılmıştır.

Denklem (2.10.a)'da verilen kuadratik ifade kullanılarak dengeli dağıtım sistemleri için güç akışı algoritmaları [39-42]'de geliştirilmiştir. [39]'da verilen algoritmada bara gerilimleri sondan kaynağa doğru geri yönde hesaplanmaktadır. Yapılan hesaplama ile elde edilen yeni kaynak gerilimi ile gerçek değeri arasındaki

fark en son bara gerilimine eklenerek geri yönde bara gerilimi hesabı, bu fark belirlenen hata değerinden küçük oluncaya kadar sürdürülmektedir. Ayrıca bu hesaplama alt-fiderler içinde alt-iterasyonda uygulanarak alt-fiderlerin bara gerilimleri ve toplam aktif ve reaktif güçleri hesaplanmaktadır. Bu hesaplanan güç değerleri alt-fiderlerin fidere bağlı olduğu baraya eklenerek fider için uygulanan temel iterasyonda kullanılmaktadır.

Referans [40]'da verilen alitmada ise kuadratik denklem ile her bir hattın sonundaki bara gerilimi kaynaktan sona doğru ileri yönde hesaplanmaktadır. Bunun için gerekli olan her bir hattan transfer edilen aktif ve reaktif güç ise sondan kaynağa doğru geri yönde gidilerek hesaplanmakta ve bunlara yük güçlerinin yanı sıra hatlardaki güç kayıpları da dahil edilmektedir. Algoritmanın sonlandırılması bir önceki adımda hesaplanan kaynaktan çekilen toplam aktif ve reaktif güç değerleri ile bir sonraki adımdaki değerleri arasındaki farklardan en büyüğünün büyüklüğüne göre yapılmaktadır. Referans [41] ve [42]'de geliştirilen algoritmalarda da Denklem (2.10.a) her bir hat için çözümlenerek ileri yönde gerilim hesabı ve geri yönde hatlardan transfer edilen güç hesabı yapılmaktadır. Algoritmaların sonlandırılmasında hatlardaki güç kayıplarının bir önceki adımda hesaplanan değerleri ile farkının azami değeri [41]'de, kaynaktan transfer edilen toplam aktif ve reaktif güç değerleri ile bir önceki adımda hesaplanan değerleri arasındaki fark ise [42]'de kullanılmıştır.

Kuadratik denklemi çözmek amacıyla kullanılan bazı çözüm teknikleri algoritmalarda hesaplama süresini arttırabilmekte, algoritmaların uygulanabilirliğini zorlaştırabilmektedir. Bu nedenle kuadratik denklemin farklı formlarda oluşturularak kullanılması veya kuadratik denklemin oluşturulmasında kullanılan güç eşitliklerinin doğrudan kullanılması sonucunda geliştirilmiş bazı algoritmalar mevcuttur [43-50]. Baran ve Wu [43]'de dengeli sistemler için güç akışı algoritması geliştirmiştir. Algoritmaya ilişkin adımlar;

- Adım 1. Sistemdeki bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle. (Genellikle gerilim değeri için kaynak gerilimi kullanılmaktadır).
- Adım 2. Yük güçlerini ve hatların kayıp güçlerini kullanarak her bir hattan akan gücü Denklem (2.25)'i kullanarak hesapla.

Adım 3. Denklem (2.27)'de verilen denklem sistemini kaynaktan sona doğru gitmek suretiyle her bir hat için kullanarak hat sonu bara gerilimlerini ve bu baraya bağlı hattan transfer edilen aktif ve reaktif hesapla.

$$P_{s+1} = P_s - R \frac{P_s^2 + Q_s^2}{V_s^2} - P_{Lr} \quad (2.27.a)$$

$$Q_{s+1} = Q_s - X \frac{P_s^2 + Q_s^2}{V_s^2} - Q_{Lr} \quad (2.27.b)$$

$$V_r^2 = V_s^2 - \frac{2(P_s R + Q_s X) + (P_s^2 + Q_s^2) Z^2}{V_s^2} \quad (2.27.c)$$

Adım 4. Fider ve alt-fiderler üzerinde hesaplanan en son baralardan sonraya kalan transfer edilen güçlerin en büyüğü hata değerinden küçük oluncaya kadar hesaplamaya 2. Adımdan devam et. En son baralara bağlı herhangi bir hat olmadığı için normalde hesaplanan değerin sıfır olması gerekmektedir.

Algoritmada Jacobian matrisinin her bir hat için oluşturulması ve lineer olmayan denklem sisteminin çözümü hem algoritmanın uygulanabilirliğini zorlaştırmakta hem de hesaplama süresini arttırmaktadır. Bu problemler göz önüne alınarak algoritma [44]'de geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada yalnızca Denklem (2.27.c) kullanılarak ileri yönde gerilim hesabı yapılmıştır. Her bir hattan transfer edilen güç için Denklem (2.27.a) ve (2.27.b) ayrıca kullanılmıştır. Fider ve alt-fiderlerin en son baraları için hesaplanan transfer edilen güç değerleri kullanılarak kaynaktan transfer edilen toplam güç değeri her adımda yenilenmiştir. Algoritmanın sonlandırılması veya hesaplamaların sürdürülmesi [43]'de kullanılan sonlandırma kriteri ile yapılmaktadır. Baran ve Wu dengeli dağıtım sistemleri için farklı bir metod [45]'de geliştirmiştir. Bu metotta hem ileri yönde hem de geri yönde bara gerilimleri ve hatlardan transfer edilen güç hesabı yapılmaktadır. İleri yönde gerilim ve güç hesabında Denklem (2.27) sistemi Newton metodu ile çözülerek yapılmakta, geri yönde gerilim ve güç hesabında ise Denklem (2.28) sistemi kullanılmaktadır. Algoritmanın sonlandırılması ise geri yönde gerilim hesabı sonucunda belirlenen yeni kaynak gerilimi değeri ile gerçek değeri arasındaki farka göre yapılmaktadır.

$$P_s = P_{s+1} + R \frac{P_r^2 + Q_r^2}{V_r^2} + P_{Lr} \quad (2.28.a)$$

$$Q_s = Q_{s+1} + X \frac{P_r^2 + Q_r^2}{V_r^2} + Q_{Lr} \quad (2.28.b)$$

$$V_s^2 = V_r^2 + \frac{2(P_r R + Q_r X) + (P_r^2 + Q_r^2)Z^2}{V_r^2} \quad (2.28.c)$$

Dağıtım sistemleri için sweep-temelli bir güç akışı algoritması [46]'da verilmiştir. Denklem (2.10.a)'da verilen kuadratik denklemin çözümü için bir metodun gereksinimi ve kullanılan çözüm metotlarının hesaplama süresini arttırması nedeniyle denklem farklı bir forma dönüştürülerek bara gerilimi daha kısa sürede ve bir çözüm metodu gerektirmeksizin doğrudan hesaplanabilmektedir. Algoritmaya ait adımlar aşağıda verilmektedir.

- Adım 1. Sistemdeki bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle. (Genellikle gerilim değeri için kaynak gerilimi kullanılmaktadır).
- Adım 2. Yük güçlerini ve hatların kayıp güçlerini kullanarak her bir hattan akan gücü Denklem (2.25)'i kullanarak hesapla.
- Adım 3. Denklem (2.29)'u kaynaktan sona doğru gitmek suretiyle her bir hat için kullanarak hat sonu bara gerilimlerini hesapla.

$$\Delta V' = \frac{RP_s + XQ_s}{V_s} \quad (2.29.a)$$

$$\Delta V'' = \frac{XP_s - RQ_s}{V_s} \quad (2.29.b)$$

$$V_r = \sqrt{(V_s - \Delta V')^2 + \Delta V''^2} \quad (2.29.c)$$

$$\delta_r = \delta_s - \tan^{-1}\left(\frac{\Delta V''}{V_s - \Delta V'}\right) \quad (2.29.d)$$

- Adım 4. Bara gerilimlerinin bir önceki adımdaki değerleri ile arasındaki en büyük fark hata değerinden küçük oluncaya kadar hesaplamaya 2. Adımdan devam et.

Ayrıca algoritmada YEÜ birimleri PV-bara olarak modellenerek gerilimlerinin kontrolü için reaktif güçlerinin nasıl ayarlanabileceğine dair yeni bir metot geliştirilmiş olup 3. Bölümde detaylı olarak verilecektir. Benzer şekilde Rajicic ve arkadaşları, dengeli dağıtım sistemleri için sweep-temelli güç akışı algoritması geliştirmiştir [47]. Geliştirilen algoritmada bara gerilimlerinin hesaplanmasında kuadratik denklem farklı bir formda yazılarak hesaplama basitleştirilmiş ve süresi azaltılmıştır. Algoritmada bara gerilimleri kaynaktan sona doğru ileri yönde Denklem (2.30) kullanılarak hesaplanmaktadır. Her bir hattan transfer edilen aktif ve reaktif güçler ise sondan kaynağa doğru geri yönde yük güçleri ve hat kayıpları ile belirlenmektedir. Bunun yanı sıra YEÜ birimleri ve kompanzatorler için 3. Bölümde detaylı verilecek olan akım kaynağı modeli kullanılarak algoritmaya PV-bara olarak dahil edilmiştir.

$$\text{Re}(\bar{V}_r) = a \text{Re}(\bar{V}_s) - b \text{Im}(\bar{V}_s) \quad (2.30.a)$$

$$\text{Im}(\bar{V}_r) = b \text{Re}(\bar{V}_s) + a \text{Im}(\bar{V}_s) \quad (2.30.b)$$

$$a = 1 - \frac{RP_s + XQ_s}{V_s^2} \quad (2.30.c)$$

$$b = \frac{RQ_s - XP_s}{V_s^2} \quad (2.30.d)$$

Jasmon [48]'de yaptığı gerilim kararlılığı analizi çalışmasında dağıtım sistemleri için yeni bir güç akışı algoritması geliştirmiştir. Geliştirilen algoritmada sistemdeki her bir bara için sistemin iki baralı eşdeğer devresi oluşturularak bu baralardan çekilen aktif ve reaktif güç ifadeleri bara gerilimlerinden bağımsız olarak türetilmiştir. Denklem (2.31)'de verilen bu ifadeler kullanılarak her bir hattan transfer edilen güçlerin gerçek değerleri belirlenmekte ve bu değerler ile hesaplanan hatlardaki güç kayıpları ile hat sonu bara gerilimlerinin büyüklükleri hesaplanmaktadır. Algoritmanın sonlandırılması her bir hattan transfer edilen aktif güç değerlerinin bir önceki adımdaki değerleri arasındaki en büyük farka göre yapılmaktadır. Algoritmanın en büyük avantajı bara gerilimleri kullanılmadan hatlardan transfer edilen gücün belirlenebilmesi ve güçlerden yararlanılarak gerilimlerin kısa sürede hesaplanabilmesidir.

$$P_s = \frac{(2X^2P_r - 2RXQ_r + R)}{2(R^2 + X^2)} - \frac{\sqrt{(2X^2P_r - 2RXQ_r + R)^2 - 4(R^2 + X^2)(X^2P_r + R^2Q_r - 2RXP_rQ_r + RP_r)}}{2(R^2 + X^2)} \quad (2.31.a)$$

$$Q_s = \frac{(2R^2Q_r - 2RXP_r + X)}{2(R^2 + X^2)} - \frac{\sqrt{(2X^2P_r - 2RXQ_r + R)^2 - 4(R^2 + X^2)(X^2P_r + R^2Q_r - 2RXP_rQ_r + RP_r)}}{2(R^2 + X^2)} \quad (2.31.b)$$

Kuadratik denklemin çözümünü kolaylaştırmak ve hesaplama süresini azaltmak amacı ile farklı bir formda oluşturularak bara gerilimlerinin hesaplandığı bir algoritma ise [49]'da geliştirilmiştir. Algoritma adım adım olarak aşağıda verilmiştir.

- Adım 1. Sistemdeki bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle.
- Adım 2. Yük güçlerini ve hatların kayıp güçlerini kullanarak Denklem (2.25) ile her bir hattan akan aktif ve reaktif gücü hesapla.
- Adım 3. Hat sonu bara gerilimleri kaynaktan sona doğru ileri yönde Denklem (2.32) ile hesapla.

$$\phi_r = \tan^{-1}\left(\frac{Q_r}{P_r}\right) \quad (2.32.a)$$

$$K = V_s^2 - 2P_r(R + X \tan \phi_r) \quad (2.32.b)$$

$$V_r = \sqrt{\frac{K + \sqrt{K^2 - 4(R^2 + X^2)P_r^2 \sec^2 \phi_r}}{2}} \quad (2.32.c)$$

- Adım 4. Hesaplanan bara gerilimleri ile önceki değeri arasındaki farkı hesapla. Eğer en büyük mutlak fark seçilen hata değerinden küçük ise hesaplamayı sonlandır değil ise 2. Adımdan hesaplamaya devam et.

Newton Metodunun her bir hat için yazılan güç akışı denkleminde uygulanarak güç akışının yapıldığı bir diğer algoritma ise [50]'de verilmiştir. Algoritmada her bir hattan transfer edilen güç akışı denklemindeki V_s^2 , $V_s V_r \sin \theta_{sr}$ ve $V_s V_r \cos \theta_{sr}$ terimleri yerine sırasıyla U_s , I_{sr} ve R_{sr} terimleri kullanılarak Denklem (2.33)'de

verilen denklem sistemi çözülerek hatlardan transfer edilen güç ve hat sonu bara gerilimleri hesaplanmaktadır. Algoritmanın sonlandırılması ise hatlardan transfer edilen güçlerin bir önceki adımdaki değerleri arasındaki en büyük farka göre yapılmaktadır.

$$P_s = U_s G_{sr} + B_{sr} I_{sr} - G_{sr} R_{sr} \quad (2.33.a)$$

$$Q_s = U_s B_{sr} - B_{sr} R_{sr} - G_{sr} I_{sr} \quad (2.33.b)$$

$$U_s U_r - R_{sr}^2 - I_{sr}^2 = 0 \quad (2.33.c)$$

burada her bir hat için $G_{sr} - jB_{sr} = 1/Z$ eşitliği ile G ve B büyüklükleri belirlenmektedir.

Geliştirilen sweep-temelli algoritmaların genel olarak yapısı Tablo 2.1’de verilmiştir. Tabloda algoritmalara ait referans numaraları birinci sütunda verilmiştir. İkinci sütunda geliştirilen algoritmalarından dengesiz sistemlerde güç akışı analizi için kullanılabilecek olanlar belirtilmektedir. Dengesiz sistemler için kullanılan algoritmalarda farklı sargı bağlantılı üç-fazlı transformatörlerin modellenip modellenmediği 3. sütunda belirtilmektedir. 4. sütunda radyal sistemde gerilim hesabının ileri ve/veya geri yönde nasıl yapıldığı ve bunun için kullanılan formüller verilmektedir. Gerilim hesabında akımın veya gücün kullanılması mümkündür. Algoritmalarda bunlardan hangisinin kullanıldığı 5. sütunda belirtilmektedir. Algoritmalarda hesaplamaların hangi kritere göre sonlandırıldığı 6. sütunda, YEÜ birimlerinin PV-bara olarak modellenip modellenmediği 7. sütunda verilmektedir.

Tablo 2.1. Geliştirilen sweep-temelli algoritmaların genel olarak yapısı

Ref. No	Üç-faz	Tr.	Gerilim hesabı		Geri yönde		Sonlandırma kriteri	YEÜ (PV)
			İleri yönde	Geri yönde	akım	güç		
[23]	-	-	(2.11-b)	-	✓	-	Max. yüklerin aktif ve reaktif güç farkı	✓
[24]	✓	-	(2.11-b)	-	✓	-	Max. yüklerin aktif ve reaktif güç farkı	✓
[25]	✓	✓	(2.11-b)	-	✓	-	Max. yüklerin aktif ve reaktif güç farkı	✓
[26]	✓	-	(2.16)	-	-	✓	Max. gerilim farkı	-
[27]	-	-	(2.16)	-	✓	-	Max. gerilim farkı	-
[28]	-	-	(2.16)	-	✓	-	Max. gerilim farkı	-
[29]	✓	-	(2.16)	-	✓	-	Max. gerilim farkı	-
[30]	✓	-	(2.16)	(2.17)	✓	-	Kaynak gerilim farkı	-
[31]	-	-	(2.11-b)	(2.11-a)	✓	-	Max. gerilim farkı	-
[32]	✓	-	(2.21.b)	-	✓	-	Max. yük akımı farkı	-
[33]	✓	-	(2.21.b)	-	✓	-	Max. yük akımı farkı	-
[34]	-	-	(2.24)	-	✓	-	Max. gerilim farkı	-
[35]	-	-	(2.10-a)	-	-	✓	Toplam kayıp güç farkı	-
[36]	-	-	(2.10-b)	-	-	✓	Max. gerilim farkı	-
[37]	-	-	(2.10-b)	-	-	✓	Max. gerilim farkı	-
[38]	-	-	(2.10-b)	-	-	✓	Max. gerilim farkı	-
[39]	-	-	-	(2.10-a)	-	✓	Kaynak gerilim farkı	-
[40]	-	-	(2.10-a)	-	-	✓	Toplam aktif ve reaktif güç farkı	-
[41]	-	-	(2.10-a)	-	-	✓	Max. hatlardaki kayıp güç farkı	-
[42]	-	-	(2.10-a)	-	-	✓	Toplam aktif ve reaktif güç farkı	-
[43]	-	-	(2.27)	-	-	✓	En son baralardan transfer edilen max. güç	-
[44]	-	-	(2.27-c)	-	-	-	En son baralardan transfer edilen max. güç	-
[45]	-	-	(2.27)	(2.28)	-	✓	Kaynak gerilim farkı	-
[46]	-	-	(2.29)	-	-	✓	Max. gerilim farkı	✓
[47]	-	-	(2.30)	-	-	✓	Max. gerilim farkı	✓
[48]	-	-	(2.25.a)	-	-	✓	Max. hatlardan transfer edilen güç farkı	-
[49]	-	-	(2.32)	-	-	✓	Max. gerilim farkı	-
[50]	-	-	(2.33)	-	-	-	Max. hatlardan transfer edilen güç farkı	-

2.4. Sonuç

Dağıtım sistemlerinin yapılarının iletim sistemlerinden farklı olması geliştirilen geleneksel Newton-Raphson, Gauss-Seidel algoritmalarının bu sistemlerde performansını olumsuz yönde etkilemekte, algoritmalarda yakınsama probleminin oluşmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle dağıtım sistemlerinin yapısı göz

önünde bulundurularak yeni algoritmalar geliştirilmektedir. Geliştirilen bu algoritmalarda genellikle sistemde kaynaktan sona doğru ve/veya sondan kaynağa doğru bara gerilimleri hesaplandığından sweep-temelli algoritmalar olarak adlandırılmakta, gerilim hesabında ise Kirchoff Gerilim Yasası veya gerilim polinomu (kuadratik denklem) kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra kuadratik denklemin farklı formda oluşturularak kullanıldığı algoritmalar da mevcuttur. KVL temelli algoritmaların her ne kadar hesaplama süreleri kısa ve sistemlere kolaylıkla uygulanabilse de hızları kuadratik denklem temelli algoritmalarla kıyaslandığında daha yavaştır. Diğer taraftan kuadratik denklemin çözümü için farklı çözüm tekniklerinin kullanılması bu tip algoritmaların uygulanabilirliğini zorlaştırmakta ve hesaplama süresini arttırabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı mevcut algoritmaların performanslarının iyileştirilmesi ve performansı yüksek yeni algoritmaların geliştirilmesi üzerine çalışmalar sürdürülmektedir.

3. DAĞITIM SİSTEMLERİ ELEMANLARININ MODELLENMESİ

3.1. Giriş

Elektrik güç sistemleri büyük güçlü elektrik santralleri ile üretim, kilometrelerce uzunluktaki hatlarla sağlanan iletim, ve genellikle radyal yapıdaki dağıtım sistemlerinden oluşmaktadır. Bu yapı, merkezi üretim sistemi olarak adlandırılır. Dağıtım sistemleri, merkezi üretim sisteminde elektrik enerjisinin tüketiciye aktarıldığı (dağıtıldığı) bölüm olup genel olarak;

- Yerel Enerji Üretim Birimleri (YEÜ)
- Transformatörler
- SVC ve Statcom gibi güç elektroniği elemanlarının kullanıldığı kompanzatörler (FACTS gerilim kontrolörleri)
- Gerilim Regülatörleri
- Dağıtım Hatları
- Reaktif Güç Kompanzatörleri
- Yükler

gibi elemanlardan oluşmaktadır. Daha önce de bahsedildiği gibi dağıtım sistemlerinin güç akışı analizinde geleneksel güç akışı algoritmalarında yakınsama problemi oluşmakta ve bu sistemlerde yetersiz kalmalarına neden olabilmektedir. Bu nedenle dağıtım sistemleri için birden fazla güç akışı algoritması geliştirilmiştir. Fakat geliştirilen bu algoritmalar sistemin radyal yapısı göz önünde bulundurularak tek yönlü güç akışı durumu için (kaynaktan sona doğru) geliştirildiğinden verilen dağıtım sistemleri elemanlarının iletim sistemlerinde güç akışında kullanılan modelleri geçersiz kalabilmekte mevcut modellerin bu algoritmalarda doğrudan kullanımında bazı problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu problemleri gidermek için

bu elemanlara ait mevcut modeller dağıtım sistemleri güç akışı algoritmaları için yeniden düzenlenmekte veya yeni modeller geliştirilmektedir. Bu bölümde dağıtım sistemleri elemanlarına ait mevcut klasik modeller, bunların kullanımında ortaya çıkan problemler ve elemanları dağıtım sistemlerinde güç akışına dahil etmek için geliştirilmiş yeni metotlar incelenmektedir.

3.2. Dağıtım Sistemlerinde Yerel Enerji Üretim (YEÜ) Birimleri

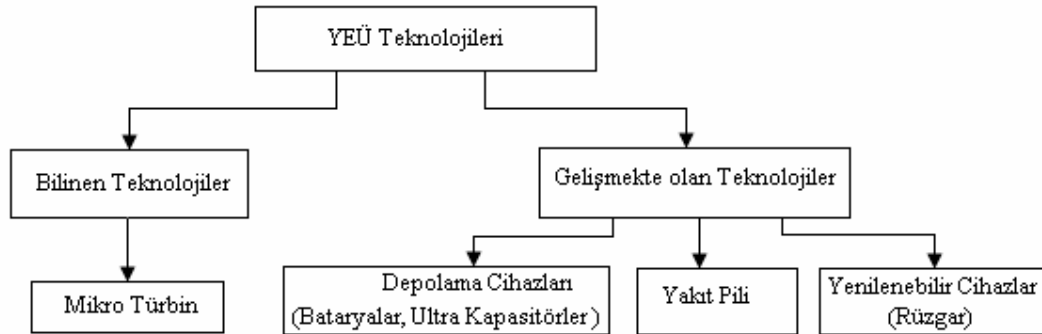
Yıllardır, büyük güçlü elektrik santralleri birincil enerji kaynaklarının (kömür, fuel oil gibi) yoğun olduğu bölgelerde kurulur, bu santrallerde üretilen elektrik enerjisi, kayıp ve gerilim düşümünü azaltmak için üretim bölgelerinden tüketim bölgelerine yüksek gerilimde uzun iletim hatları ile dağıtım bölgelerine iletilirdi. Bu yapı, bazı nedenlerden dolayı değişime zorlandı [76]. Söz konusu nedenlerden birkaçı Bölüm 1’de de kısaca bahsedildiği gibi;

- Sürekli artan elektrik enerji ihtiyacı ve var olan şebekenin ihtiyaca yeterli güvenlik aralığında cevap verememesi,
- Coğrafik ve çevresel sınırlamalar
- Kararlılık ve güvenlik problemleri
- Yeniden yapılanma

gibi gelişmelerdir. İşte bu nedenler, bir çok ülkenin tüketim merkezlerine yakın, alçak ya da orta gerilim seviyesinde elektrik enerjisi üretiminin gelişimi ve kullanımı yönünde adım atmalarını sağladı. Bazı araştırma merkezlerinin beklentileri 2010 yılına kadar elektrik enerjisi üretiminin %25-30’u YEÜ birimlerinden yapılacağı yönündedir [77-78].

YEÜ birimleri, düşük ya da orta gerilim seviyesinde (0,4-36kV) yapılan elektrik enerjisi üretimi ve enerji depolamadır. YEÜ, tüketici merkezlerine yakın

elektrik dağıtım şebekesine bağlı ya da tek başına çalışabilen, coğrafi olarak yayılmış kaynakları içerir. Küçük güçlü santrallerin yanında, rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları, yakıt pili ve enerji depolama birimleri yerel üretim kaynaklarıdır. Yerel üretim literatürde farklı güç değerlerinde ele alınmıştır. Genel olarak 100MW'dan küçük güçlü santraller olarak ele alınır. Bu bağlamda yerel üretim mikro ölçek (1-5kW) küçük ölçek (5kW- 5MW), orta ölçek (5MW-50MW) büyük ölçekte (>50MW) olmak üzere dört grupta sınıflandırılabilir. Genel olarak YEÜ küçük ölçekte, süreksiz üretim, kendi başına ya da dağıtım şebekesine bağlanan, tüketim merkezlerine yakınlık, enerji depolama ve tekrar dönüşüm imkanlarının olması gibi özelliklerden bir yada birkaçına sahiptir. YEÜ birimleri, modüler olarak istenilen yere çok kısa zaman için kurulabilir. Daha fazla modül eklenerek ya da çıkarılarak toplam kapasite arttırılabilir yada düşürülebilir. Uzak yerleşim yerlerinde kurulan birleşik ısı elektrik üretimi yapan YEÜ birimleri daha ekonomiktir. Ayrıca, küçük güçlü santrallerin kurulumu daha kolay, daha az yatırım maliyetlidir. YEÜ birimlerinin tüketim merkezlerine yakınlığı ile dağıtım ve iletim hat maliyetlerini ve hat kayıplarını düşürürken daha güvenilir bir elektrik enerjisi tüketiciye sağlanır. Bu birimler 4 grupta incelenmekte olup bu sınıflandırma Şekil 3.1'de, genel özellikleri ise Tablo 3.1'de özetlenmiştir [79].



Şekil 3.1. Yerel Enerji Üretim Teknolojileri

Tablo 3.1. YEÜ Birimlerinin Karşılaştırılması

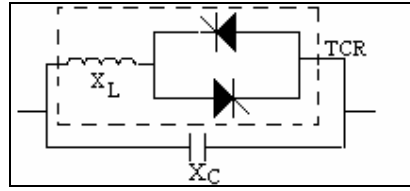
Enerji Tipi	Özellik, Uygulama Alanları ve modül başına güçleri
Mikro-Türbin	Hem aktif hem reaktif güç sağlar, uzun dönemli ve temel yükü karşılar. Kojenerasyon amaçlı kullanılabilir. (35kW-1MW)
Depolama elemanları	Hem aktif hem reaktif güç sağlayabilir. İhtiyaç olduğunda kısa bir süre için enerji sürekliliğini korumak amacıyla kullanılır. (1kW-100MW)
Yakıt Pili	Sadece aktif güç sağlar. Modüler tipleri uzun süreli temel yükü karşılayabilir. (1kW-5MW)
Yenilenebilir Enerji Kaynakları	Hava şartlarına bağlı olarak kesintili (sürekli) kaynaklardır. Sadece aktif güç sağlarlar, uzak yerleşim yerlerinde kendi başına kullanılabilen kaynaklardır. (20W-100MW)

3.3. FACTS Kompanzatorları

Günümüzün değişen enerji talebine bağlı olarak enerji sistemlerinde kontrol edilebilirlik ve sistem kapasitesinin artırılması konuları son derece önem kazanmıştır. Enerji sistemleri günümüzde mekanik veya elektro mekanik kontrol elemanları ile kumanda edilmektedir. Fakat gelişen yarı iletken teknolojisi ile büyük güçte güç elektroniği elemanları geliştirilmektedir. Bu elemanlar ile enerji sistemlerinin kontrolü “FACTS: Esnek AC İletim Sistemleri” adı verilen daha verimli, hızlı ve güvenilir bir teknolojinin oluşmasına olanak sağlamıştır [53]. FACTS kontrolörleri, Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) ve invertör temelli olmak üzere iki grupta incelenir. TCR temelli FACTS cihazlarından Statik VAR Kompanzator (SVC) ve invertör temelli FACTS cihazlarından Statik Kompanzator (Statcom), güç sistemlerinde daha hızlı ve güvenli olarak gerilim kontrolüne olanak sağlamaktadır [53].

3.3.1. Statik VAr Kompanzatör (SVC)

Statik VAr kompanzatör (SVC) güç sisteminde çekilen reaktif gücün kontrolü ile bağlı olduğu sistem geriliminin belirlenen sınırlarda kontrolüne imkan sağlamaktadır. Genel olarak SVC, Tristör kontrollü reaktör (TCR) ve buna paralel bir kondansatörden oluşur. SVC'ye ait temel devre şeması Şekil-3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. SVC temel devre şeması

Tristörler simetrik olarak 90° ile 180° arasında tetiklenerek SVC reaktansı X_L ile X_C arasında değiştirilmektedir. Azami kapasitif reaktif güç $\alpha = 180^\circ$ durumunda çekilir. SVC eşdeğer reaktansının tetikleme açısına bağlı ifadesi Denklem (3.1)'de verilmiş olup, TCR reaktansı ile kapasitör reaktansının paralel eşdeğerinden elde edilmektedir.

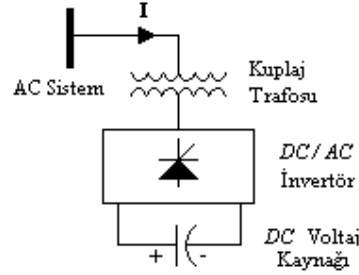
$$X_e = X_C \frac{\pi / r_x}{\sin 2\alpha - 2\alpha + \pi(2 - 1/r_x)} \quad (3.1)$$

Burada $r_x = X_C / X_L$ 'ye eşit olup kompanzatörün endüktif ve kapasitif çalışma aralığına göre belirlenir.

3.3.2. Statik Kompanzatör (Statcom)

İnvertör temelli FACTS cihazlarından Statcom, Tristör tetiklemeli SVC limitlerini aşmak amacıyla dizayn edilmiş olup reaktif güç kompanzasyonu ile bağlı bulunduğu sistem geriliminin belirli sınırlarda kontrolüne imkan sağlamaktadır.

Bağlı bulunduğu AC sistem gerilimi ile invertör çıkış geriliminin büyüklüğü Statcom reaktif gücünü tayin etmektedir. Genel olarak Statcom devre şeması Şekil 3.3’de verilmiştir.



Şekil 3.3. Statcom'un temel devre şeması

Reaktif güç, Statcom çıkış geriliminin değiştirilmesi ile kontrol edilmektedir. Eğer Statcom çıkış gerilimi AC sistem geriliminden büyük ise reaktif akım Statcom'dan AC sisteme doğru akmakta ve AC sisteme reaktif güç aktarılmaktadır. Bu durumda akım gerilimden yaklaşık olarak 90° ilerde olup aktarılan güç kapasitiftir. Eğer Statcom çıkış gerilimi sistem geriliminden küçük ise reaktif akım AC sistemden Statcom'a doğru akmakta ve sistemden reaktif güç çekilir. Bu durumda akım gerilimden yaklaşık olarak 90° geride olduğundan çekilen güç endüktiftir. Statcom çıkış geriliminin AC sistem gerilimine eşit olması durumunda reaktif akım ve reaktif güç sıfır olur. Kapasitör, invertör için gerekli DC gerilimi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. İnvörtör çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitör şarj veya deşarj olmaktadır. Transformator rezistansının ihmal edilmesi durumunda AC sistemden Statcom'a akan aktif güç ve invertör çıkış geriliminin etkin değeri;

$$P = 3 \frac{V_{ac} V_{inv}}{X} \sin \alpha \quad (3.2)$$

$$V_{inv} = \sqrt{\frac{3}{8}} m V_{DC} \quad (3.3)$$

olarak ifade edilir. Burada V_{ac} AC sistem geriliminin V_{inv} ise invertör çıkış geriliminin etkin değeri, X trafoların eşdeğer reaktansı, m invertörün modülasyon indeksi ve α gerilimler arası faz farkıdır. Bu durumda $\alpha > 0$ ise invertör çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazdadır. Çekilen aktif güç $P > 0$ olduğunda kapasitör şarj olur. Açının negatif olması durumunda çekilen aktif güç $P < 0$ olmakta ve kapasitör deşarj olmaktadır. Sürekli durumda invertör çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazda tutularak sistemden çekilen aktif güç trafo ve invertör kayıplarını karşılamaktadır.

3.4. YEÜ Birimleri ve Paralel Kompanzatörlerin Dağıtım Sistemlerinde Güç Akışına Dahil Edilmesi

İletim hatlarında güç akışı çift yönlü olabilirken dağıtım şebekeleri genellikle radyal yapıda olmasından dolayı güç akışı tek yönlüdür. Bu nedenle YEÜ birimlerinin dağıtım sistemlerine yerleştirilmesi yerel gerilim seviyelerinde önemli etkisi olmakla beraber uygun yerleştirildikleri taktirde sistem kayıplarını da önemli ölçüde azaltmaktadır. YEÜ birimlerinin yanı sıra SVC, Statcom gibi aktif kompanzatörler kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu ile sistemde gerilim kontrolü yapılmaktadır. Dolayısıyla bu tür dağıtım sistemleri radyallıktan uzaklaşmakta ve sistemdeki güç transferi kaynağa doğrudan akabilmektedir. Yani her iki yönde güç akışı olabilmektedir. Bu durumda güç akışı analizine YEÜ birimlerinin veya kompanzatörlerin dahil edilmesi gerekmektedir. Bu tür elemanların aktif güçleri ve sisteme bağlantı noktası gerilimleri bilindiğinden güç akışı analizinde PV-bara (Gerilim Kontrollü bara) olarak modellenmesi uygundur. Güç akışı algoritmalarından geleneksel güç akışı algoritmaları ve onların dağıtım sistemleri için geliştirilmiş şekilleri kullanılarak PV baralı dağıtım sisteminde güç akışı yapılabilmektedir. Yani PV-bara kolaylıkla algoritmalarda modellenmekte ve bilinmeyen büyüklükleri (Reaktif güç ve faz açısı) analiz esnasında hesaplanabilmektedir. Fakat daha öncede bahsedildiği gibi bu tip algoritmalarda dağıtım sistemlerinin yapısı nedeniyle yakınsama problemi görülebilmekte, sistemde radyallık arttıkça güç akışı analizi yapılamamaktadır. İkinci grup olarak verilen ve ileri ve/veya geri yönde gerilim hesabına dayalı sweep-temelli güç akışı algoritmaları dağıtım sistemleri için

geliştirilmiştir. Algoritmalar tek yönlü güç akışını esas alarak geliştirildiğinden bunlara YEÜ birimleri veya gerilim kontrolörleri PV-bara olarak doğrudan güç akışına dahil edilememekte genellikle sabit güçlü bara (PQ-bara) olarak modellenmektedir. Sabit PQ-bara olarak modellenmesi durumunda bu birimlerin bağlı olduğu bara gerilimleri kontrol edilememekte ve normal yük baralarında olduğu gibi güç değerlerine göre akımı hesaplanarak her bir iterasyonda gerilim değeri hesaplanmaktadır.

Bu birimlerin PV-bara olarak modellendiği bazı sweep-temelli algoritmalar da mevcut olup sayıları sınırlıdır [23-25, 46-47, 51-52]. Bunlardan [23], [46, 49] ve [51-52]'de geliştirilen metotlar dengeli dağıtım sistemleri için geliştirilmiştir. Referans [23]'de geliştirilen güç akışı algoritmasında YEÜ birimleri PV-bara olarak modellenerek baranın reaktif gücü Denklem (3.4)'de verilen Sekant metodu ile hesaplanmaktadır.

$$Q_{pv}^{(k)} = \frac{Q_{pv}^{(k-1)} - Q_{pv}^{(k-2)}}{\left|V_{pv}^{(k-1)}\right| - \left|V_{pv}^{(k-2)}\right|} \left(\left|V_{pv}^{(k)}\right| - \left|V_{pv}^{(k-1)}\right|\right) + Q_{pv}^{(k-1)} \quad (3.4)$$

İfadeden görüldüğü gibi hesaplanan reaktif güç başlangıç değerlerine bağlı olup uygun gerilim ve reaktif güç değerlerinin seçilememesi durumunda yakınsama problemi oluşabilmekte ve algoritmanın performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Gerekli reaktif gücün hesaplanmasında oluşan bu problemleri ortadan kaldırmak amacıyla referans [46]'da akım ile güç arasında lineerleştirme yapılmış, Denklem (3.5-a)'da verilen akım-gerilim ilişkisi yerine Denklem (3.5-b)'de verilen güç-gerilim ilişkisi kullanılarak gerekli reaktif güç farkı belirlenmekte ve baranın toplam reaktif gücüne eklenerek gerilimi istenilen değerde tutmak için gerekli reaktif güç hesaplanmaktadır.

$$\bar{Z} \Delta \bar{I} = \Delta \bar{V} \quad (3.5.a)$$

$$\bar{Z} \Delta \bar{S} = \Delta \bar{V} \quad (3.5.b)$$

Burada $\bar{Z}$; YEÜ biriminin bağlı olduğu baradan görülen eşdeğer empedans olup PV-bara duyarlılık matrisi (sensitivity matrix) olarak adlandırılmaktadır. $\Delta \bar{V}$ ise her bir adımda hesaplanan PV-bara gerilimi ile sabitlenmesi hedeflenen gerilim değeri arasındaki farktır. Bu metot referans [51]'de YEÜ birimleri dışında SVC ve Statcom gibi gerilim kontrolörleri ve senkron jeneratörler'in güç akışına dahil edilmesinde kullanılmıştır. Referans [52]'de verilen çalışmada bahsedilen bu birimlerin güç akışı analizinde PV-bara olarak modellenmesi için farklı bir metot geliştirilmiştir. Geliştirilen metotta bu birimler için eşdeğer reaktans modeli kullanılmış olup bara geriliminin istenilen değerde tutmak için gerekli reaktans değeri, sistemin o baradan görülen Thevenin eşdeğeri kullanılarak Denklem (3.6) ile hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu reaktans değeri bir önceki adımda hesaplanan reaktansa paralel olarak eklenerek bir sonraki adımda bara akımının belirlenmesinde kullanılmaktadır.

$$X_c = \frac{-X_{th} - \sqrt{X_{th}^2 + Z_{th}^2 \left(\frac{E_{th}^2}{V_{sp}^2} - 1 \right)}}{\frac{E_{th}^2}{V_{sp}^2} - 1} \quad (3.6)$$

Dengesiz güç sistemleri için geliştirilen güç akışı algoritmalarının büyük bir çoğunluğunda YEÜ birimleri için referans [55]'de verilen sabit güç modeli kullanılmıştır. Bu modelde YEÜ birimleri akım kaynağı olarak modellenmekte ve akım değeri her bir adımda hesaplanan bara gerilimi ve sabit güç değeri kullanılarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla bara gerilimi istenilen seviyede kontrol edilememektedir. YEÜ birimlerinin bağlı olduğu bara geriliminin istenilen seviyede kontrol edildiği metotlarda mevcuttur [24-25, 47]. Referans [24]'de üç-fazlı dağıtım sistemleri için geliştirilen algoritmada YEÜ birimleri PV-bara olarak modellenmiş, gerilim kontrolü için önce Denklem (3.5.a) kullanılarak akım farkı hesaplanmıştır. Hesaplanan akım farkı bara akımına eklenerek baranın toplam akımı hesaplanmakta ve toplam akım ve bara gerilimi kullanılarak baranın toplam reaktif gücü hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu güç bir sonraki adımda gerilim hesabında sabit PQ bara olarak dahil edilmektedir. Geliştirilen bu metot [25]'de verilen algoritmada da YEÜ birimlerinin bağlı olduğu bara geriliminin kontrolü için kullanılmıştır. Fakat

burada baranın reaktif gücü hesaplanmadan doğrudan akım kaynağı modeli kullanılmıştır. Akım değeri Denklem (3.5-a) ile hesaplanan akım farkı ile her bir adımda ayarlanmakta ve bir sonraki adımda gerilim hesabında akımın yönü değiştirilerek (işareti değiştirilerek) doğrudan kullanılmaktadır. Akım kaynağı modeli [47]'de geliştirilen algoritmada da kullanılmıştır. Geliştirilen metotta her bir adımda hesaplanan akım farkı kullanılmakta ve sistemdeki diğer kaynaklar devre dışı bırakılarak (akım kaynakları açık devre, gerilim kaynakları kısa devre) bara gerilimleri yeniden hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu gerilimler superpozisyon teoremine göre en son hesaplanan bara gerilimlerine eklenerek yeni bara gerilimleri belirlenmektedir.

Her ne kadar PV-bara gerilimi güç akışı analizinde istenilen değerde kontrol edilse de algoritmalar bazı olumsuzluklar içermektedir. Örneğin referans [23]'de YEÜ biriminin gerilimini istenilen seviyede tutmak için gerekli olan reaktif güç sekant metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Sekant metodunda hesaplanan reaktif güç başlangıç değerlerine bağlı olup uygun gerilim ve reaktif güç değerlerinin seçilememesi durumunda yakınsama problemi oluşabilmekte ve algoritmanın performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. [25] ve [49]'da verilen PV-bara modelinde gerilim kontrolü için bara akımı ayarlanarak yapılmakta, YEÜ birimleri akım kaynağı olarak modellenmektedir. Dolayısıyla akım hesabında her bir adımda hesaplanan bara gerilimi ve faz açısı kullanıldığından iterasyon sayısının artmasına neden olmaktadır. Diğer [46, 47]'de verilen çalışmalarda PV bara geriliminin 1 pu. olması durumu kabulüyle bara akımı yerine bara gücü kullanılarak lineerleştirme yapılmakta buda bara geriliminin 1'den farklı değerlerde seçilmesini kısıtlamaktadır.

3.5. Üç-Fazlı Transformatörler

Dağıtım sistemlerinde tek veya iki faz ile tüketiciye enerji aktarımı yapıldığından yapıları genellikle dengesizdir. Yani sistemin fazlarında güç dengesizliği oluşabilmektedir. Bu dengesizlik hatlarda farklı gerilim ve akım büyüklüklerine neden olmaktadır. Hatlardaki bu dengesizlikler ise dağıtım sistemlerinde kullanılan üç fazlı transformatörlerde faz ile hat büyüklükleri

arasındaki $\sqrt{3}$ bağıntısını geçersiz kılmaktadır. Dolayısıyla yıldız-üçgen (Y- Δ), üçgen-yıldız (Δ -Y) veya üçgen-üçgen (Δ - Δ) bağlı transformatörlerde hat-faz arasında geçiş yapılamadığından bu transformatörlerin uç gerilimleri ve uç akımları arasındaki bağıntılar (primer ve sekonder) doğrudan türetilmemektedir. Bu ise geliştirilen sweep-temelli algoritmalar ile dağıtım sistemlerinde güç akışı analizine transformatörlerin doğrudan dahil edilememesine neden olmaktadır.

Üç-fazlı transformatörlerin güç akışı analizinde modellenmesi için literatürde birden fazla metot mevcuttur [54-60]. Güç akışı analizinde genel olarak [54]'de geliştirilen düğüm admitans matris modeli kullanılmaktadır. Farklı bağlantılı transformatör için bu modele ilişkin akım gerilim ilişkisi Denklem (3.7)'de, kullanılan admitans matrisi elemanları ise Tablo 3.2'de verilmektedir [55]. Burada p indisi trafonun primer tarafını, s indisi ise trafonun sekonder tarafını göstermektedir.

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (3.7.a)$$

$$Y_1 = \begin{bmatrix} y_t & 0 & 0 \\ 0 & y_t & 0 \\ 0 & 0 & y_t \end{bmatrix} \quad (3.7.b)$$

$$Y_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2y_t & -y_t & -y_t \\ -y_t & 2y_t & -y_t \\ -y_t & -y_t & 2y_t \end{bmatrix} \quad (3.7.c)$$

$$Y_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -y_t & y_t & 0 \\ 0 & -y_t & y_t \\ y_t & 0 & -y_t \end{bmatrix} \quad (3.7.d)$$

Tablo 3.2. Transformatörün farklı bağlantıları için düğüm admitans matrisleri

Trafo Bağlantısı		Öz (Self) Admitans		Ortak (Mutual) Admitans	
Primer (p)	Sekonder (s)	Y_{pp}	Y_{ss}	Y_{ps}	Y_{sp}
Y_g	Y_g	Y_1	Y_1	$-Y_1$	$-Y_1$
Y_g	Y	Y_2	Y_2	$-Y_2$	Y_2
Y_g	Δ	Y_1	Y_2	Y_3	Y_3^T
Y	Y_g	Y_2	Y_2	$-Y_2$	$-Y_2$
Y	Δ	Y_2	Y_2	Y_3	Y_3^T
Δ	Y_g	Y_2	Y_1	Y_3^T	Y_3
Δ	Y	Y_2	Y_2	Y_3^T	Y_3
Δ	Δ	Y_2	Y_2	$-Y_2$	$-Y_2$

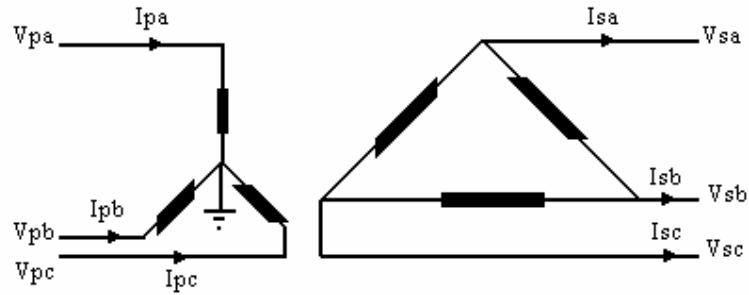
Burada y_t kaçak (leakage) admitans olup, trafonun $\alpha : \beta$ gerilim dönüştürme oranı için $Y_p = Y_p / \alpha^2$, $Y_s = Y_s / \beta^2$, $Y_{ps} = Y_{ps} / \alpha\beta$ ve $Y_{sp} = Y_{sp} / \alpha\beta$ işlemleri uygulanmaktadır.

Dengesiz dağıtım sistemlerinde transformatörlerin modellenmesi üzerine yapılan modellemeler [55-57], referans [54]'de verilen ve geniş olarak kullanılan klasik transformatör admitans matrisi modelinin kullanılarak farklı transformatör bağlantıları için geliştirilmiş modellemelerdir. İletim sistemlerinin genellikle dengeli yapıda olması ve bu sistemlerde güç akışında bara admitans matrisinin kullanılması nedeniyle bu model iletim sistemlerinde güç akışında kullanıma elverişlidir. Fakat daha öncede bahsedildiği gibi dağıtım sistemleri güç akışı algoritmaları ileri ve/veya geri yönde gerilim hesabı esasına göre geliştirilmiş olup hat akımları veya hatlardan transfer edilen güç doğrudan kullanılmaktadır. Dolayısıyla bu düğüm admitans matris modellerinin dağıtım sistemleri güç akışı algoritmalarında kullanımı hem uygulama açısından zorluklara sebep olmakta hem de algoritmaların performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca Y_2 ve Y_3 admitans matrisleri tekil matrislerdir. Denklem (3.7.a), transformatör uçlarındaki akım gerilim ilişkisini göstermekte olup primer veya sekonder gerilimlerinin diğer büyüklükler kullanılarak hesaplanmasını sağlamaktadır. Fakat Y_2 ve Y_3 matrisleri ile çarpım durumunda olan trafo çıkış gerilimi veya giriş gerilimi tekillik problemi nedeniyle hesaplanamamaktadır. Örnek olarak Tablo 3.2'de verilen transformatör bağlantılarından devre şeması Şekil 3.4'de verilen Y_g - Δ bağlı transformatör için sekonder gerilimi Denklem (3.7)'den yararlanarak;

$$I_p = Y_3^T V_p + Y_2 V_s \quad (3.8.a)$$

$$V_s = Y_2^{-1}(I_p - Y_3^T V_p) \quad (3.8.b)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (3.7.c)'den görüleceği üzere Y_2 admitans matrisi tekil matris olup admitans matris modeli, Denklem (3.8.b), kullanılarak dağıtım sisteminde trafonun çıkış (sekonder) gerilimi hesaplanamamaktadır. Bu nedenle Yg- Δ bağlı transformatör için bu model ileri yönde gerilim hesabının yapıldığı sweep-temelli güç akışı algoritmasında kullanılamamaktadır. Dolayısıyla sistemde bu tür bağlantılı transformatörlerin bulunması durumunda (Y_2 ve Y_3 admitans matrisi katsayılı gerilimler) ileri veya geri yönde gerilim hesabı yapılamadığından sweep-temelli algoritmalar ile güç akışı analizi yapılamamaktadır.



Şekil 3.4. Yg- Δ bağlı transformatör devre şeması

Bunun yanı sıra yük tarafı üçgen bağlı transformatörlerin yükte birbirinden farklı çift gerilim çözümüne neden olduğu [86]'da gösterilmektedir. Şekil 3.5'de verildiği gibi Yg- Δ bağlı transformatörün nötr ucu topraklanmamış yıldız bağlı dengesiz yükleri beslemesi durumunda nötr noktası geriliminin ifadesi aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$I_{sa} + I_{sb} + I_{sc} = 0 \quad (3.9.a)$$

$$\frac{S_a}{V_{sa} - V_n} + \frac{S_b}{V_{sb} - V_n} + \frac{S_c}{V_{sc} - V_n} = 0 \quad (3.9.b)$$

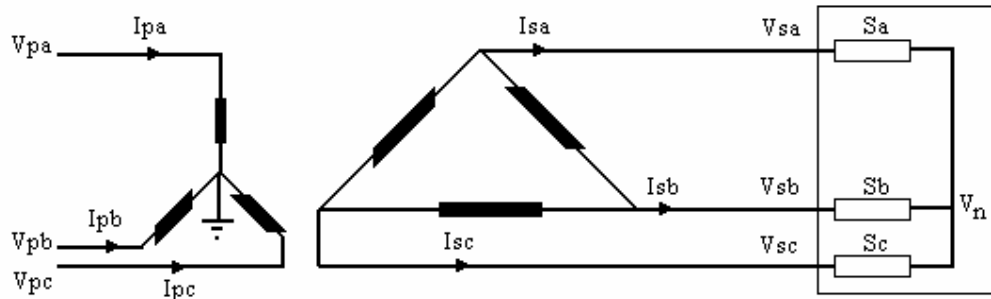
yük gerilimi büyüklüğünü 1 pu. ve yükteki dengesizliğin bir α katsayısı ile ifade edilmesi durumunda nötr gerilimi V_n ;

$$\frac{(1-\alpha)}{1-V_n} + \frac{1}{e^{-j120} - V_n} + \frac{1}{e^{-j240} - V_n} = 0 \quad (3.10.a)$$

$$(3-\alpha)V_n^2 - \alpha V_n - \alpha = 0 \quad (3.10.b)$$

$$V_n = \frac{\alpha \pm \sqrt{12\alpha - 3\alpha^2}}{2(3-\alpha)} \quad (3.10.c)$$

Elde edilen ifadeden görüldüğü gibi nötr geriliminin iki çözümü mevcuttur. Değerleri ise yük dengesizliği (α) ile değişmektedir. Ayrıca bu gerilimler α 'nın 0 ile 4 arasındaki değerleri için tanımlıdır. Dengeli durum için ($\alpha=0$) nötr gerilimi sıfır olmaktadır.



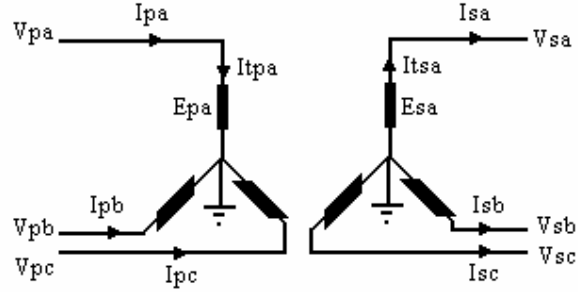
Şekil 3.5 Yg-Δ transformatörlü basit bir dengesiz dağıtım sistemi devre şeması

Bu tür yetersizlikler transformatörler ve yüklerin bağlantı durumu fark etmeksizin sweep-temelli güç akışı algoritmaları kolaylıkla dahil edilebileceği yeni modellerin geliştirilmesine yol açmaktadır. Bu nedenle dağıtım sistemleri güç akışı analizinde kullanılan sweep-temelli algoritmalarda doğrudan kullanılabilecek modeller farklı transformatör bağlantıları için [59-59]'da geliştirilmiştir. Referans [59]'de dağıtım sistemlerinde geniş olarak kullanılan Yg-Yg, Y-Δ ve Δ-Yg uç bağlantılı transformatörler için giriş ve çıkış uçlarındaki (primer ve sekonder uçları) akım ve gerilim denklemleri eşdeğer devreden yararlanarak türetilmiştir. Şekil 3.6.'da devre şeması verilen Yg-Yg (topraklı yıldız-topraklı yıldız) bağlantılı transformatör için türetilen uç akımları ve gerilimleri arasındaki bağıntı sırasıyla Denklem (3.11.a) ve (3.11.b)'de verilmiş olup bu bağlantı şekli için kolaylıkla elde edilebilmektedir.

$$I_{t\phi} = I_{s\phi}, \quad \phi = a, b, c \quad (3.11.a)$$

$$V_{s\phi} = E_{s\phi} = E_{p\phi} = V_{p\phi} - z_{t\phi} I_{t\phi} \quad (3.11.b)$$

Dolayısıyla dağıtım sistemlerinde güç akışı algoritmalarında ileri ve geri yönde her bir hattan akan akımlar belirlenirken transformatör primer ve sekonder uçlarındaki hat akımları birbirine eşit alınır. Transformatör faz gerilimleri ise Denklem (3.11.b) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmaktadır.



Şekil 3.6. Yg-Yg bağlı transformatör devre şeması

Benzer şekilde devre şeması Şekil 3.7’de verilen Δ -Yg bağlantısı için sistemdeki dengesizlik ihmal edilerek hat ve faz akımları arasında $\sqrt{3}$ bağıntısı ile transformatörün faz ve hat akımları arasındaki ilişki;

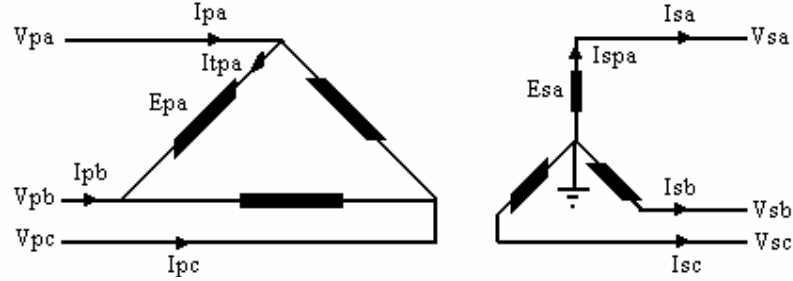
$$\begin{aligned} I_{pa} &= (I_{ta} - I_{tc}) / \sqrt{3} \\ I_{pb} &= (I_{tb} - I_{ta}) / \sqrt{3}, \\ I_{pc} &= (I_{tc} - I_{tb}) / \sqrt{3} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Faz gerilimleri arasındaki ilişki ise

$$\begin{aligned} E_{pa} &= (V_{pa} - V_{pb}) / \sqrt{3} - z_{ta} I_{ta} \\ E_{pb} &= (V_{pb} - V_{pc}) / \sqrt{3} - z_{tb} I_{tb} \\ E_{pc} &= (V_{pc} - V_{pa}) / \sqrt{3} - z_{tc} I_{tc} \end{aligned} \quad (3.13.a)$$

$$E_{s\phi} = E_{p\phi} = V_{s\phi} \quad \phi = a, b, c \quad (3.13.b)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Fakat verilen akim gerilim ilişkilerinden görüleceği üzere trafonun faz ve hat bağlantıları arasındaki ilişki dengesizlik ihmal edilerek kurulmuştur.



Şekil 3.7. Δ-Yg bağlı transformatör devre şeması

Aynı şekilde devre şeması Şekil 3.8’de verilen Y-Δ bağlantısı için de sistemdeki dengesizlik ihmal edilerek hat ve faz akımları arasında $\sqrt{3}$ bağıntısı ile transformatörün faz ve hat akımları arasındaki ilişki;

$$\begin{bmatrix} I_{ta} \\ I_{tb} \\ I_{tc} \end{bmatrix} = I_{to} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{Z_{to}\sqrt{3}} \begin{bmatrix} Z_{tc} & -Z_{tb} & 0 \\ 0 & Z_{ta} & -Z_{tc} \\ -Z_{ta} & 0 & Z_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.14.a)$$

$$I_{to} = E_{to} / Z_{to} \quad (3.14.b)$$

$$E_{to} = [(Z_{ta} - Z_{tc})I_{sa} + (Z_{tb} - Z_{ta})I_{sb} + (Z_{tc} - Z_{tb})I_{sc}] / 3\sqrt{3} \quad (3.14.c)$$

Faz gerilimleri arasındaki ilişki ise;

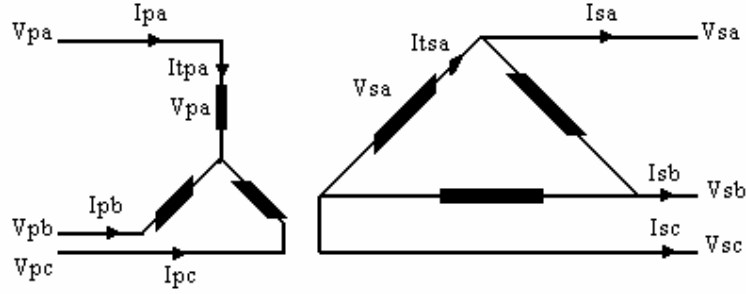
$$E_{p\phi} = V_{p\phi} - V_n, \phi = a, b, c \quad (3.15.a)$$

$$V_n = V_{po} - E_{to} \quad (3.15.b)$$

$$V_{po} = (V_{pa} + V_{pb} + V_{pc}) / 3 \quad (3.15.c)$$

$$V_{s\phi} = E_{p\phi} - Z_{t\phi} I_{t\phi} \quad (3.15.d)$$

olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.8. Y-Δ bağlı transformatör devre şeması

Eşdeğer devreden yararlanılarak Y-Δ bağlantılı transformatör için dengesizlik göz önünde bulundurularak hat ve faz gerilimleri arasında yeni bir bağıntı sweep-temelli güç akışı algoritmalarında kullanılmak amacı ile [59]'da türetilmiştir. Çalışmada primer sargılarındaki faz akımlarının toplamalarının sıfıra eşit olması durumundan yola çıkılarak çıkış uçlarındaki faz ve hat gerilimleri arasındaki ilişki;

$$V_{p\phi} = AV * E_{s\phi} + Z_{Dt} I_{s\phi}, \phi = a, b, c \quad (3.16.a)$$

$$E_{s\phi} = V_{s\phi} \quad (3.16.b)$$

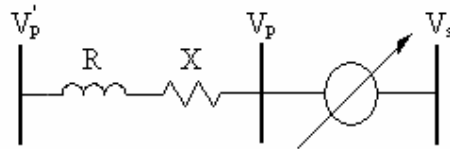
$$Z_{Dt} = \frac{a}{3} \begin{bmatrix} z_{ta} & -z_{ta} & 0 \\ z_{tb} & 2z_{tb} & 0 \\ -2z_{tc} & -z_{tc} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.16.c)$$

şeklinde türetilmiştir. Burada Denklem (3.16.a)'da kullanılan AV, trafonun primer ile sekonder uçları arasındaki gerilim dönüşüm oranı matrisidir. Denklem (3.8)'de verilen tekillik problemi, referans [60]'da transformatörün admitans matrisinde denklem sayısı artırılarak giderilmiş ve dağıtım sistemlerinde ileri yönde gerilim hesabında admitans matrisi modeli kullanılmıştır. Her ne kadar bu formülasyonlar dağıtım sistemleri güç akışı algoritmalarında kullanılmak için geliştirilmiş olsa da halen yeni modellemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun nedeni ise yukarda bahsedildiği gibi admitans matris modelleri algoritmaların iterasyon sayısını arttırmakta ve bazı bağlantı şekilleri için matriste tekillik problemi oluşabilmektedir. Referans [59]'de verilen modelde sistemdeki dengesizlik durumu ihmal edildiğinden sistemde dengesizliğin artması durumunda güç akışında hatalı sonuçların elde edilmesine yol açmaktadır. Referans [59]'da ise yalnızca transformatör sargılarının

Y- Δ bağlantı durumu için ifade türetilmiştir. Ayrıca bu ifade sweep-temelli algoritmalarından yalnızca geri yönde (sondan kaynağa doğru) gerilim hesabının yapıldığı güç akışı algoritmalarında kullanılabilmektedir. Daha öncede bahsedildiği üzere sweep-temelli algoritmalarla transformatörün admitans matris modelinin kullanımında tekillik probleminin yanı sıra, bu tür algoritmalarla uygulanması zor ve algoritmaların performansını önemli ölçüde etkilediğinden [60]'da verilen metodun kullanımı elverişli değildir.

3.6. Üç-Fazlı Gerilim Regülatörleri

Dağıtım sistemlerinde feeder gerilimleri sistemin büyüklüğüne ve yüklenme durumuna bağlı olarak gerilim regülatörü ile gerilim ayarı yapılmakta ve gerilim seviyesi belirli limitler arasında tutulmaktadır. Genel olarak gerilim ayarı için üst ve alt limit kaynak geriliminin $\pm \%10$ 'u olarak seçilmektedir [61]. Gerilim regülatörleri Şekil 3.9'da verildiği gibi seri empedans ve buna bağlı kademe ayarlı ideal transformatör olarak modellenmektedir. Regülatörlerin kademe ayarı manüel veya otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Manüel olarak çalıştırılırken seçilen sabit kademe ayarına göre primer ve sekonder gerilimi arasındaki oran belirlenerek gerilim dönüşümü yapılmaktadır. Otomatik ayarlanmada ise kademe pozisyonu bilinmediğinden güç akışı içerisinde hesaplanan gerilimler göz önünde bulundurularak uygun kademe pozisyonunun belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 3.9. Gerilim regülatörü tek-faz devre şeması

Güç akışı analizlerinde kademe ayarının analiz esnasında gerilim büyüklüğüne göre ayarlanarak regülatör çıkış geriliminin istenilen seviyede tutulması gerekmektedir. Dağıtım sistemleri için geliştirilen sweep-temelli güç akışı

algoritmalarında üç-fazlı gerilim regülatörleri genellikle sabit kademeli olarak modellenmektedir. Gerçekçi bir güç akışı analizi için çıkış geriliminin istenilen seviyede tutulması ve bunun için uygun kademenin analiz esnasında belirlenmesi gerekmektedir. Otomatik olarak kademe ayarı yalnızca [24]'de verilen dengesiz sistemler için güç akışı algoritmasında yapılmıştır. Algoritma dağıtım sistemlerinde kaynaktan sona doğru ileri yönde gerilim hesabı ve geri yönde hat akımı hesabına dayalı olup gerilim hesabında kademenin ayarı adım adım olarak aşağıdaki şekilde yapılmakta olup akış diyagramı Şekil 3.10'da verilmiştir.

İleri yönde kademe ayarı:

Adım 1. Her bir faz için regülatörün primer gerilimini (V_p) hesapla.

Adım 2. Regülatörün sekonder gerilimini (V_s) başlangıç kademe pozisyonuna göre hesapla ve hesaplanan gerilimin, limitler dahilinde olup olmadığını kontrol et;

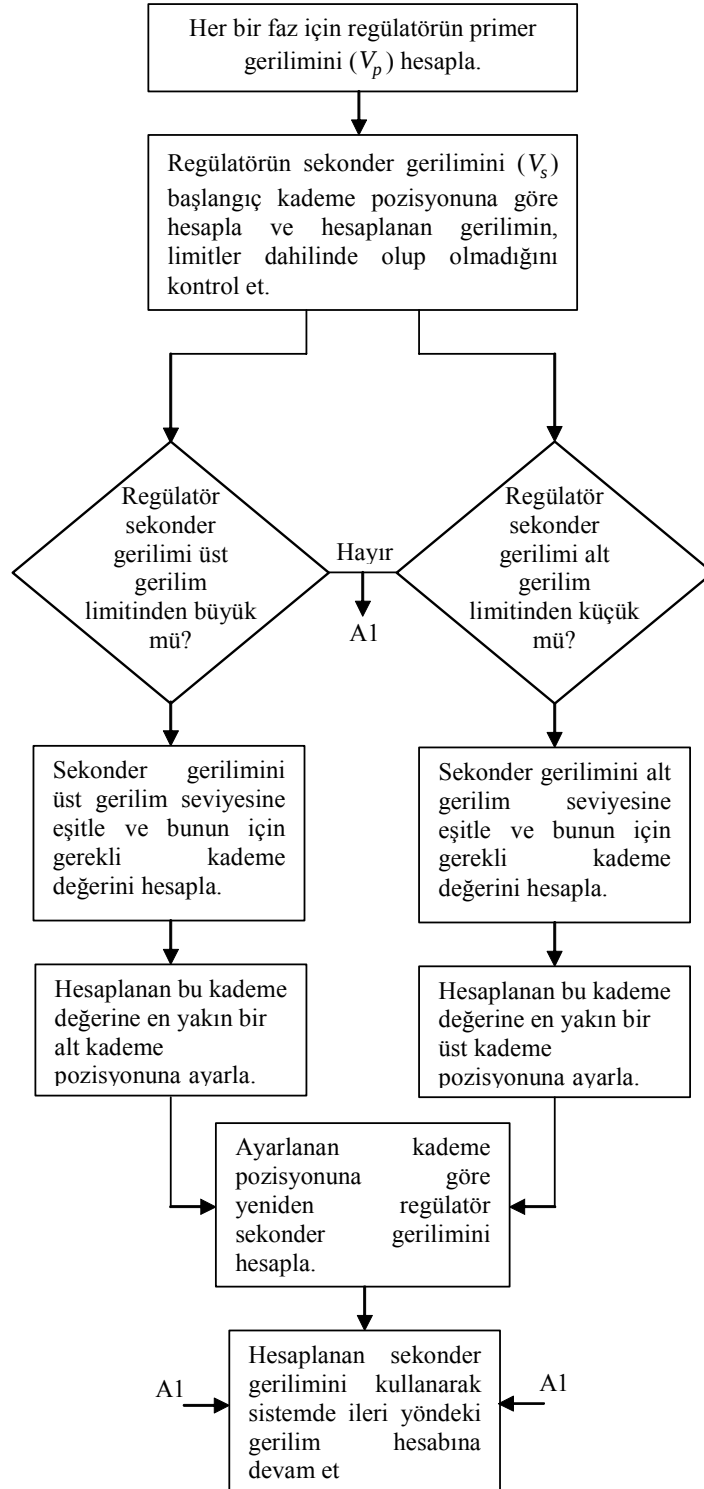
$$\left| V_s^{\min} \right| \leq \left| V_s \right| \leq \left| V_s^{\max} \right| \quad (3.17)$$

Eğer regülatör sekonder gerilimi üst gerilim limitinden büyükse sekonder gerilimini üst gerilim seviyesine eşitle ve bunun için gerekli kademe değerini hesapla, hesaplanan bu kademe değerine en yakın bir alt kademe pozisyonuna ayarla. Eğer regülatör sekonder gerilimi alt gerilim limitinden küçükse gerilimi alt gerilim seviyesine eşitleyerek gerekli kademe değerini hesapla ve hesaplanan bu kademe değerine en yakın bir üst kademe pozisyonuna ayarla.

Adım 3. Ayarlanan kademe pozisyonuna göre yeniden regülatör sekonder gerilimini hesapla ve bu gerilimi kullanarak sistemde ileri yöndeki gerilim hesabına devam et.

Kademe ayarı için verilen bu algoritma dağıtım sistemlerinde kullanılan sweep-temelli güç akışı algoritmalarından yalnızca ileri yönde gerilim hesabının yapıldığı algoritmalarda kullanılabilmektedir. Fakat 2. Bölümde detaylı olarak verildiği gibi dağıtım sistemlerinde yalnızca geri yönde gerilim hesabının yapıldığı veya hem ileri hem de geri yönde gerilim hesabının yapıldığı güç akışı algoritmaları da mevcuttur.

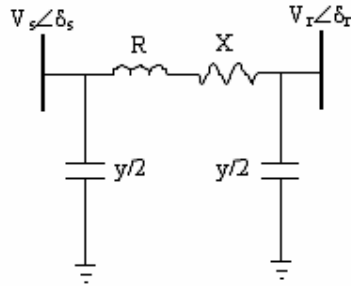
Dolayısıyla verilen bu kademe ayarlama metodunun bu tür algoritmalarda doğrudan kullanımı mümkün değildir.



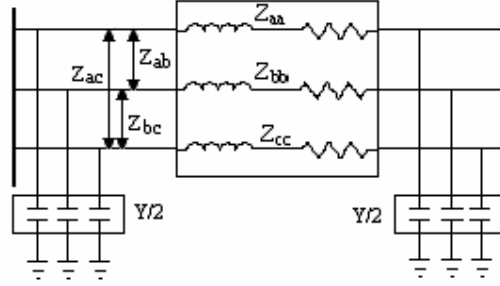
Şekil 3.10. Gerilim regülatörlerinin kademe ayarına ilişkin akış diyagramı

3.7. Dağıtım Hatları

Dengeli dağıtım sistemlerinin güç akışında çoğunlukta Şekil 3.11.(a)'da verilen π -eşdeğer hat modeli kullanılmaktadır. Dengesiz sistemlerin analizinde ise genellikle üç iletkenli π -eşdeğer hat modeli kullanılmakta olup fazlar arasındaki ortak kapasitanslar ihmal edilerek fazlar arası ortak empedanslar ve faz toprak arası paralel kapasitanslar güç akışına dahil edilmektedir. Sistemde dört iletkenli hatların olması durumunda bunlar üç iletkenli hat modeline dönüştürülerek güç akışına dahil edilebilmektedir. Hat uzunluğuna bağlı olarak paralel kapasitörler güç akışı analizlerinde ihmal edilebilmekte olup bu modellere ilişkin devre şeması ise Şekil 3.11.(b)'de verilmiştir.



Şekil 3.11.(a) Tek-fazlı hat şeması



Şekil 3.11.(b) Üç-fazlı hat şeması

Şekil 3.11. Tek-fazlı ve üç-fazlı dağıtım hatlarına ait π -eşdeğer devre şeması

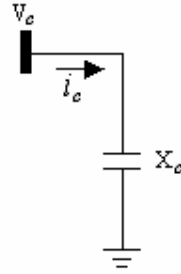
3.8 Reaktif Güç Kompanzatörleri

Dağıtım sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu için paralel kapasitörler veya reaktörler (bobinler) kullanılmaktadır. Paralel kompanzasyon ile sisteme reaktif güç enjekte edilmesi veya sistemden reaktif güç çekilmesi ile sistemin güç faktörü ayarlanmakta, ayrıca paralel kapasitörler ile sistem kayıpları azaltılmakta ve güç transferi arttırılmaktadır. Güç akışı algoritmalarında paralel kapasitörler Şekil 3.12'de verildiği gibi sabit empedans olarak modellenmekte ve her bir adımda bağlı

oldukları baranın yeni gerilimleri kullanılarak çektikleri reaktif güç ve akım Denklem (3.18.a) ve (3.18.b) ile hesaplanarak o baranın sırasıyla reaktif gücüne ve akımına dahil edilmektedir.

$$Q_c = \frac{V_c^2}{X_c} \quad (3.18.a)$$

$$I_c = \frac{V_c}{X_c} \quad (3.18.b)$$



Şekil 3.12 Tek-fazlı paralel kapasitör devre şeması

3.9. Yük Modelleri

Güç sistemlerinde yükün aktif ve reaktif gücü, gerilim ve/veya zamanın bir fonksiyonu olarak ifadesinde statik ve dinamik yük kavramları kullanılmaktadır. Elektriksel güç sistemlerinde güç akışı ve sürekli durum gerilim kararlılığı analizleri için statik yük modelleri kullanılmaktadır. Genel olarak statik yük modelleri iki formda incelenmektedir [83]. Bunlar;

- Ekspansiyel (Üssel) statik yük modeli
- Polinom (Polynomial) statik yük modeli

Her iki yük modelinde de aktif ve reaktif güç zamandan bağımsız olarak sadece gerilimle ve/veya frekansla değişmektedir [81].

3.9.1. Ekspansiyel (Üssel) Statik Yük Modeli

Güç sistemlerinde kullanılan yüklerin büyük bir çoğunluğu ekspansiyel karakteristiğe sahip olup aktif ve reaktif güç gerilimin üssel bir fonksiyonu olarak modellenmektedir. Bu yük modelleri için gücün gerilime göre genel ifadesi;

$$P = P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{np}, \quad Q = Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{nq} \quad (3.19)$$

şeklindedir. Burada P_o ve Q_o yükün nominal gücünü, np ve nq sırasıyla aktif ve reaktif gücün gerilim ile üssel katsayılarını, V_o referans gerilimi ve V ise sisteme bağlı olduğu durumdaki yük gerilimini göstermektedir. Besleme geriliminin 0.6 pu'den küçük değerleri için verilen ekspansiyel statik yük modellerinin karakteristikleri tamamen değişebileceğinden, besleme geriliminin 0.6 pu'den büyük değerde tutulması veya yükün devreden çıkartılması gerekir. Güncel hayatta çeşitli alanlarda kullanılan farklı yükler için üssel katsayılar Tablo 3.3'de verilmiştir [82, 82]. Bu katsayılar yükün aktif ve reaktif gücünün gerilime olan hassasiyetini göstermekte olup deneysel olarak belirlenmiş katsayılardır.

Tablo 3.3. Farklı üssel statik yük modelleri ve parametrelerinin değerleri

No	Statik yükler	np	nq
1	Batarya Şarjları	2.59	4.06
2	Flüoresan Lambalar	2.07	3.21
3	Sabit Empedanslı Yükler	2	2
4	Elektronik Flüoresanlar	0.95	0.31
5	Fan motorları	0.5	2.5
6	Sabit Akımlı Yükler	1	1
7	Rezistanslı Isıtıcılar	2	0
8	Pompa, Fan ve diğer Motorlar	0.08	1.6
9	Akkor tipi Lambalar	1.54	0
10	Küçük Flüoresan Lambalar	1	0.35
11	Küçük Endüstriyel Motorlar	0.1	0.6
12	Büyük Endüstriyel Motorlar	0.05	0.5
13	Sabit Güçlü Yükler	0	0
14	Buzdolabı	0.8	2.5
15	Kompresörler	0.2	2.5
16	Televizyon	2	5
17	Çamaşır Kurutma Makineleri	2	3.3

Tablodan görüleceği üzere dağıtım seviyesinde sistemin beslediği yükler farklı gerilim seviyesinde farklı güç talep etmektedir. Yani nominal gerilimden farklı değerli gerilimlerde talep güç yükün nominal gücünden farklıdır. Dağıtım sistemlerinde hatlardaki gerilim düşümü nedeniyle yük tarafında gerilim seviyesi düşmektedir. Sistemin bütün kollarında gerilim kontrolünün yapılmaması yüklerin nominal gücünden farklı güç talebine neden olmaktadır. Dolayısıyla dağıtım seviyesinde yapılacak analizlerde özellikle güç akışı analizlerinde yükler için sabit güçlü yük modelinin kullanılması analizlerde hatalı sonuçlara yol açmaktadır. Bu nedenle dağıtım seviyesinde yüklerin gerilim bağımlılığının göz önünde bulundurulması ve analizlere dahil edilmesi gerekmektedir.

3.9.2. Polinom (Polynomial) Statik Yük Modeli

Bu yük modelinde güç ve gerilim ilişkisi bir polinom şeklinde ifade edilir. Polinomun bağımsız değişkeni yükün gerilim büyüklüğü olup bazı yerlerde ZIP model olarak geçmektedir. Daha önceden verilen sabit empedans, sabit akım ve sabit güçlü yük modelleri kullanılarak genel ifadesi elde edilir. Aktif ve reaktif güç karakteristiği;

$$P = P_o \left[a_1 \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_o} \right) + a_3 \right] \quad (3.20.a)$$

$$Q = Q_o \left[a_4 \left(\frac{V}{V_o} \right)^2 + a_5 \left(\frac{V}{V_o} \right) + a_6 \right] \quad (3.20.b)$$

şeklinde değişir. Burada P_o ve Q_o yükün nominal gücünü, V_o referans gerilimi, V sisteme bağlı olduğu durumdaki yük gerilimini göstermektedir. a_1 den a_6 'ya kadar verilen katsayılar ise model parametreleri olup;

$$a_1 + a_2 + a_3 = a_4 + a_5 + a_6 = 1 \quad (3.21)$$

eşitliğine sahiptir. Gerilimin 0.6 pu'den küçük değerleri için verilen yük modeli geçersiz kalmaktadır [82].

3.10. Sonuç

Sonuç olarak iletim sistemlerinde kullanılan elektriksel büyüklüklerin büyük bir çoğunluğu dağıtım sistemlerinde de kullanılmaktadır. Gerçekçi bir güç akışı için bu elemanların modellenerek güç akışına dahil edilmesi gerekmektedir. Fakat bu elemanlar için iletim sistemlerinde güç akışı analizinde kullanılan modeller dağıtım sistemlerinin yapısı ve dolayısıyla güç akışı algoritmalarının farklı olması nedeniyle yetersiz kalabilmektedir. Bu elemanların mevcut modellerinin dağıtım sistemlerinde güç akışına dahil etmek için geliştirildiği veya yeni modellerin oluşturulduğu çalışmalar halen sürdürülmektedir.

4. GERİLİM KARARLILIĞI VE KARARLILIK İNDEKSLERİ

4.1. Giriş

Güç sistemlerinde yükteki değişimlere bağlı olarak değişen gerilim büyüklüğü ve sistemin güvenli çalışma durumu gerilim kararlılığı çalışmaları adı altında incelenmektedir. Yapılan çalışmalarda gerilim kararsızlığının olduğu yani sistemin analitik çözümünün olmadığı yüklenme durumunda gerilim çökmesinin meydana geldiği baranın belirlenmesi için bir çok yaklaşımlar geliştirilmiş olup bunlar kararlılık indeksi olarak tanımlanmıştır. Bu bölümde güç sistemlerinin sürekli-durum kararlılığı ve gerilim çökmesi durumu incelenerek gerilim çökmesinin olduğu bara veya bunu besleyen hatları belirlemek üzere tanımlanan kararlılık indeksleri hakkında bilgi verilmektedir. Geliştirilen indekslerin dağıtım sistemlerine uygulanabilirliği ve karşılaşılabilecek problemler analiz edilmektedir.

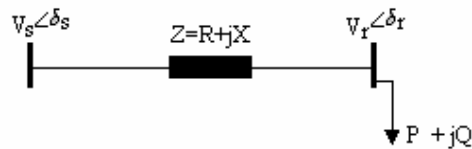
4.2. Sürekli Durum Gerilim Kararlılığı ve Gerilim Çökmesi

Gerilim kararlılığının statik analizler (yük akış analizleri) için bir sürekli durum problemi olarak görülmesi uygundur. Sabit çalışma şartları esnasında üretim yerinden tüketim yerine güç transfer kabiliyeti gerilim kararlılığının konusudur. Gerilim kararlılığı yük kararlılığı olarak da adlandırılır. Sistem ve gerilim kararlılığı dinamik olmasına rağmen statik analiz ile incelenebilir. Verilen bir çalışma noktası ve bozucu etki şartları altındaki bir güç sisteminde, eğer gerilimler, bozucu etki sonrası denge değerlerinde veya yakın bir değerde kalabiliyor ise bu güç sistemi gerilim kararlıdır [82]. Eğer bozucu etki sonrası gerilimler kabul edilebilir limitlerin altında ise sistem kararsız bölgededir ve gerilim çökmesi ortaya çıkabilir. Gerilim çökmesi, verilen çalışma durumundaki bir güç sisteminin durumu ve verilen bozucu etkilere katlanmanın konusu olarak tanımlanabilir [62].

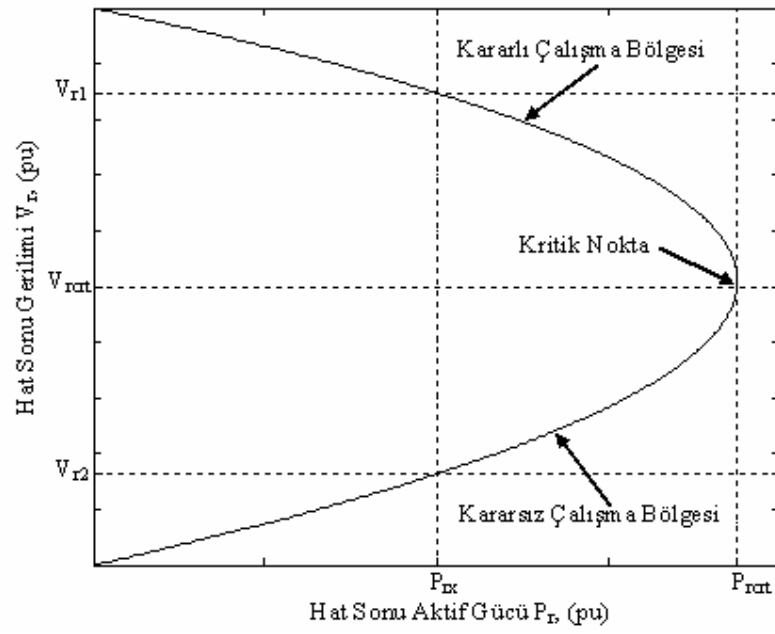
Gerilimde gittikçe artan ve kontrol edilemeyen bir düşmeye neden olan yük talebindeki artma veya sistem durumundaki değişme gibi bir bozucu etki olduğu zaman, sistem gerilim kararsızlığı durumuna girer. Kararsızlığa neden olan ana etken, reaktif güç talebini karşılamakta güç sisteminin yetersiz kalmasıdır. Gerilim kararsızlığı normal olarak ağır biçimde yüklenen sistemlerde meydana gelir. İletim şebekesi, güç iletim sınırlarına ilave olarak, gerilim çökmesine neden olan başlıca etkenler;

- Generator reaktif güç/gerilim kontrol sınırları,
- Yük karakteristikleri,
- Reaktif kompanzasyon aygıtlarının karakteristikleri,
- Yük altında kademe değiştirici transformatörlerdir.

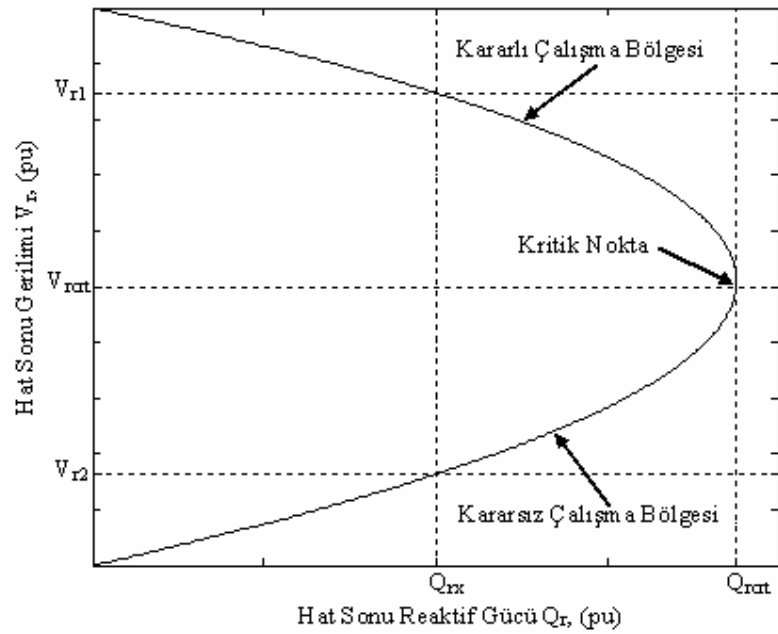
Gerçekte gerilim kararsızlığı güç (P , Q) ve gerilim (V) arasındaki ilişkilere bağlıdır. Bu ilişkileri gösteren karakteristikler radyal hat için (Şekil 4.1) analitik olarak elde edilebilirken, daha büyük baralı karmaşık sistemler için yük-akışı analizi kullanılarak belirlenebilir. İki-baralı iletim hattına ilişkin P - V eğrisi Şekil 4.2’de, Q - V eğrisi ise Şekil 4.3’de gösterilmektedir. Şekil 4.2’den görüleceği gibi her bir sabit P_r gücüne V_{r1} ve V_{r2} gibi iki farklı gerilim değeri karşılık düşmektedir. Sadece bir noktada belirli bir güce (P_{rcrt}), bir tek gerilim değeri (V_{rcrt}) karşılık düşmektedir. Bu nokta gerilim kararlılığı açısından taşınabilecek azami güç sınırını ve buna karşılık gelen kritik gerilim değerini göstermektedir. Bu nokta sistemin kritik yüklenme noktası olarak adlandırılmaktadır. Gösterilen P - V eğrisinin üst kısmı normal kararlı çalışma bölgesini yansıtmaktadır, alt bölge ise gerilim kararsızlığına karşılık gelen bölgedir. Kritik güçten daha fazla güç talebi sistemi kararsızlığa götürmektedir. Aynı durumlar Şekil 4.3’de verilen Q - V eğrisi içinde geçerlidir [83].



Şekil 4.1. İki baralı bir radyal sistemi devre şeması



Şekil 4.2. Radyal bir iletim hattı için P-V eğrisi



Şekil 4.3. Radyal bir iletim hattı için Q-V eğrisi

4.3. Gerilim Kararlılık İndeksleri

Güç sistemlerinde yükteki değişimlere bağlı olarak değişen gerilim büyüklüğü sistemin güvenli çalışması açısından büyük öneme sahiptir. Bu nedenle sistemde yük değişimi sonucunda gerilim çökmesinin meydana geleceği baranın belirlenmesi gerekmektedir. Bu yük artışı ile her bir baranın P-V ve Q-V eğrileri oluşturularak belirlenebilmektedir. Fakat bu durumda sistemler için her bir yüklenme durumunda güç akışı analizinin yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla bu işlem sayısını ve hesaplama süresini arttırmaktadır. Ayrıca sistem yükü kritik yüklenme noktasına yaklaştıkça yani gerilim çökmesinin olduğu yüklenme durumuna yaklaşıldıkça güç akışı analizinin yapılması zorlaşmakta, kullanılan güç akışı algoritmalarında yakınsama problemi görülmektedir. Bu nedenle birden fazla güç akışına ihtiyaç duymaksızın sistemlerdeki kritik baranın belirlenmesi için bir çok metot geliştirilmiş olup bunlar gerilim kararlılık indeksleri olarak adlandırılmaktadır [63-73]. Bu çalışmalarda gerilim kararsızlığının olduğu ve sistemin analitik çözümünün olmadığı yüklenme durumunda gerilim çökmesinin meydana geldiği baranın (Kritik bara) belirlenmesi için farklı formülasyonlar kullanılarak kararlılık indeksleri tanımlanmıştır.

Referans [63-66]'de verilen kararlılık indeksleri sistemin Jacobian matrisi esas alınarak geliştirilmiş olup kritik bara bu matrisin elemanları kullanılarak belirlenmektedir. Chebbo [67], bir kararlılık indeksi geliştirerek sistemde gerilim çökmesine en yakın (hassas) barayı belirlemiştir. Geliştirilen kararlılık indeksinin eleman değerleri, sistemde bara empedans matrisinin yük empedansları da dahil edilerek hesaplanması ve elde edilen matrisin köşegen elemanları ile o baraya ait yük empedansının oranı Denklem 4.1'de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$SI(i) = \frac{Z_{ii}}{Z_i} \quad (4.1)$$

Burada i bara numarasını Z_{ii} bara empedans matrisinin i . köşegen elemanlarını ve Z_i ise yük empedansını göstermektedir. Jasmon ve Lee [68], sistemdeki kritik hattı tayin etmek amacı ile farklı bir kararlılık indeksi geliştirmiştir. Bunun için sistemin her bir barası ile kaynak arasında iki-baralı eşdeğer devresi oluşturularak hattan transfer

edilen aktif ve reaktif güç ifadelerinin determinanı kullanılmaktadır. Şekil 2.1’de verilen iki baralı sistem için geliştirilen indeks ifadesi;

$$L = 4[(XP_r - RQ_r)^2 + XQ_r + RP_r] \quad (4.2)$$

şeklinde olup geliştirilen her iki indekste de [68, 68] en yüksek indeks değerine sahip hat en kritik hat olarak tahin edilmekte ve gerilim çökmesi durumunda bu indeks büyüklükleri 1’e çok yakın bir değere ulaşmaktadır. Benzer şekilde sistemi iki baraya indirgeyerek oluşturulan kararlılık indeksi [69]’de Moghavvemi ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Bu metotta iki baralı eşdeğer devredeki aktif ve reaktif güç denklemleri kullanılarak o hatta ait bir kararlılık indeks değeri hesaplanmaktadır. İki baraya indirgenmiş eşdeğer devrenin kullanıldığı bir diğer metot ise Gubina tarafından [70]’de geliştirilmiştir. İndirgenmiş devreye uygulanan Jacobian matrisinin determinanı sıfıra eşitlenerek elde edilen Denklem (4.3) ile o bara için indeks değeri hesaplanmaktadır. Minimum indeks değerli bara en kritik bara olarak tanımlanmakta olup indeks değeri sıfır olunca sistemde gerilim çökmesi oluşmaktadır.

$$SI(r) = 0.5V_s - V_r \cos(\delta_s - \delta_r) \quad (4.3)$$

Dağıtım sistemleri için kararlılık indeksleri Moghavvemi tarafından farklı yaklaşımlar kullanılarak [72, 72]’de geliştirmiştir. Referans [72]’de verilen çalışmada her bir hattın kararlılık indeks değeri o hattın transfer edilen reaktif güç ifadesinin kökü kullanılarak geliştirilmiş olup reaktif güç, hat empedansı ve bara gerilimlerine bağlı olarak indeks değeri Denklem (4.4.a) tüm hatlara uygulanarak hesaplanmaktadır. Benzer şekilde [72]’de verilen çalışmada ise hattın transfer edilen aktif güç ifadesinin diskriminantı kullanılarak aktif güce bağlı bir kararlılık indeksi Denklem (4.4.b)’de verilen ifade her bir hat için uygulanarak hesaplanmaktadır. Geliştirilen her iki metotta da en yüksek değerli indekse sahip hat en hassas hat ve bunun sonundaki bara ise en hassas bara olarak tanımlanmakta, hattın indeks değerleri 1’e eşit olduğunda gerilim çökmesi meydana gelmektedir.

$$L_{sr} = \frac{4XQ_r}{[V_s \sin(\theta - \delta_s + \delta_r)]^2} \quad (4.4.a)$$

$$L_{sr} = \frac{4RP_r}{[V_s \cos(\theta - \delta_s + \delta_r)]^2} \quad (4.4.b)$$

Dağıtım sistemlerinde kararlılık analizi için yeni bir kararlılık indeksi de [73]'de Das tarafından geliştirilmiştir. Baraların kararlılık indeks değerleri için güç sistemlerinde güç akışı analizlerinde kullanılan kuadratik denklemin köklerinin ifadesinden (Diskriminantından) yararlanılarak geliştirilmiştir. Şekil 2.1'de verilen sistem için indeksin ifadesi Denklem (4.5)'de verilmiştir. Hesaplanan en küçük değere sahip olan bara en hassas bara olup, gerilim çökmesi noktasında bu indeks değeri sıfıra çok yakın bir değere düşmektedir.

$$SI(r) = [V_s^4 - 4(P_r X - Q_r R)]^2 - 4V_r^2 (P_r R + Q_r X) \quad (4.5)$$

Geliştirilen kararlılık indekslerinin genel özellikleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Tabloda 1. sütunda indekslerin geliştirildiği çalışmaların referans numaraları verilmiştir. Geliştirilen indekslerin bazıları hem iletim hem de dağıtım sistemlerine uygulanabilmektedir. Bunların hangi sistemlere uygulanabileceği 2. sütunda gösterilmiştir. Son olarak indekslere ait ifadeler (formülasyonlar) 3. sütunda verilmektedir. Tabloda verilen kararlılık indekslerinin hepsi dağıtım sistemlerine uygulanabilir yapıya sahip olmasına rağmen uygulanmasında bazı problemler oluşabilmektedir. Örneğin [63-66]'da verilen kararlılık indeksleri iletim sistemleri göz önünde bulundurularak geliştirilmiş olup dağıtım sistemlerinin radyal yapılı olması nedeniyle bu metotlarda kullanılan Jacobian matris dağıtım sistemlerinde tekil olabilmekte ve geçerli sonuç elde edilememektedir. Benzer şekilde [67]'de verilen kararlılık indeksi de iletim sistemleri için geliştirilmiş olup kullanılan Thevenin eşdeğeri sistemin bara empedans matrisi kullanılarak oluşturulmaktadır. Sistemin bara empedans matrisi bara admitans matrisi oluşturularak elde edilmektedir. Dağıtım sistemlerinin radyal yapıda olması nedeniyle bara admitans matrisi tekil olabileceğinden bara empedans matrisi büyük radyal sistemler için elde edilememektedir. Dolayısıyla metot bu tür sistemlerde yetersiz kalabilmektedir. Sistemin iki baralı eşdeğer devresi hesaplanarak geliştirilen metotlar ise [68-72], yalnızca o yüklenme durumu için geçerli olup sistemin yüklenme durumundaki herhangi bir büyük değerli değişimden sonra tekrar her bir bara için sistemin iki

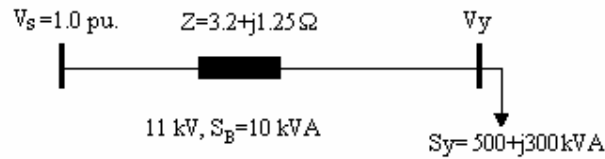
baralı eşdeğer devrelerinin hesaplanarak yeni indeks değerlerinin ve kritik bara veya hattın belirlenmesini gerektirmektedir. Bu büyük sistemler için yapılan analizlerde zorlaşmakta ve hatalı hesaplamalara neden olabilmektedir. Bunun yanı sıra [72, 72]'de geliştirilen kararlılık indeksleri yalnızca hattın reaktif gücü [72] ve aktif gücü [72] kullanılarak geliştirildiğinden sistemin yüksek güç faktörlü yüklenme durumunda [72] ve düşük güç faktörlü yüklenme durumunda ise [72]'de geliştirilen metot yetersiz kalmaktadır. Ayrıca [68-73]'de geliştirilen indekslerin dağıtım sistemlerine sistemin bağlantı durumu göz önünde bulundurularak bilgisayar ortamında otomatik olarak sonuçların elde edileceği bir algoritma gerekmektedir.

Tablo 4.1. Geliştirilen kararlılık indekslerinin genel özellikleri

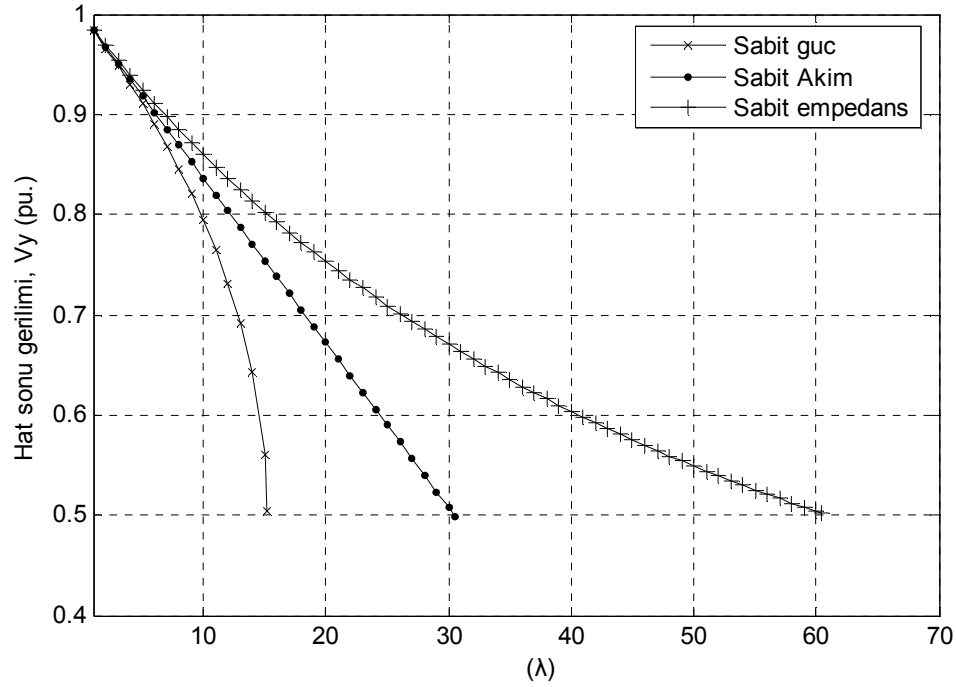
Ref. No	Uygulanabileceği Sistem		Kullanılan Bağın
	İletim Sistemleri	Dağıtım Sistemleri	
[64]	√	√	Jacobian Matris
[65]	√	√	Jacobian Matris
[66]	√	√	Jacobian Matris
[67]	√	√	Jacobian Matris
[68]	√	√	Denklem (4.1)
[69]	-	√	Denklem (4.2)
[70]	-	√	Denklem (4.4.a)
[70]	-	√	Denklem (4.3)
[72]	√	√	Denklem (4.4.a)
[73]	-	√	Denklem (4.4.b)
[73]	-	√	Denklem (4.5)

4.4. Yük Modellerinin Gerilim Kararlılığına Etkisinin İncelenmesi

Güç sistemlerinde farklı yük modellerinin sistem geriliminde farklılıklara neden olduğu bilinmektedir. Farklı yük modelleri için gerilim kararlılığı çalışmaları literatürde bir çok çalışmada incelenmiştir [33, 48, 82-83]. Elektriksel güç sistemlerinde güç akışı ve sürekli durum gerilim kararlılığı analizleri çalışmalarında statik yük modelleri kullanılmaktadır. Statik yük modellerinin farklı gerilim bağımlılıkları kaynaktan farklı g talebine ve farklı gerilim büyüklüklerine neden olduğundan sistemlerde güç akışı, sistem kararlılığını etkileyebilmektedir. Dolayısıyla farklı yük modellerinin güç sistemlerinin analizinde göz önünde bulundurulması gerçekçi bir analizin yapılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bölüm 3’de Tablo 3.2’de verilen statik yük modellerinden sabit güç, sabit akım ve sabit empedans yük modelleri gerilim kararlılığı analizlerinde geniş olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bir dağıtım sisteminde aktif ve reaktif gücün bir Lambda (λ) katsayısı ile $S=\lambda(S_r)$ şeklinde sabit güç faktörü ile arttırılması durumunda şekil 4.4’de verilen iki baralı radyal sistemde yük barasının geriliminin farklı yük modelleri için değişimi şekil 4.5’de verilmiştir. şekilden görüleceği üzere sistemin kararlı çalışma bölgesinde, farklı yük modelleri farklı gerilim büyüklüğüne neden olmaktadır. Ayrıca yk geriliminin büyüklüğü yükün gerilim bağımlılığı arttıķa artmaktadır. Yani sabit empedanslı yk modelinde gerilim seviyesi azami, sabit gcl yk modelinde ise gerilim büyüklüğü minimum değerlidir. Bunun yanı sıra farklı yük modellerinin farklı kritik yüklenme noktasına neden olduğu, yükün gerilim bağımlılığı arttıķa sistemin kritik yüklenme noktasının (azami yüklenme noktasının) arttığı görülmektedir.



şekil 4.4. İki baralı dağıtım sistemi devre şeması



Şekil 4.5. İki baralı dağıtım sisteminin kararlı çalışma bölgesinde hat sonu geriliminin yük artışına göre değişimi

4.5. Sonuç

Güç sistemlerinde yükteki değişimler sistemdeki gerilim seviyesini istenmeyen değerlere düşürmektedir. Gerilim büyüklüğü sistemin güvenli çalışması açısından büyük öneme sahiptir. Bu nedenle sistemde yük değişimi sonucunda gerilim çökmesinin meydana geleceği baranın belirlenmesi gerekmektedir. Bu yük artışı ile her bir baranın P-V ve Q-V eğrileri oluşturularak belirlenebilmektedir. Fakat bu durumda sistemler için her bir yüklenme durumunda güç akışı analizinin yapılması gerekmektedir. Ayrıca sistem yükü kritik yüklenme noktasına yaklaştıkça yani gerilim çökmesinin olduğu yüklenme durumuna yaklaşıldıkça güç akışı analizinin yapılması zorlaşmakta kullanılan güç akışı algoritmalarında yakınsama problemi görülmektedir. Bu nedenle birden fazla güç akışına ihtiyaç duymaksızın sistemlerdeki kritik baranın belirlenmesi için bir çok kararlılık indeksleri geliştirilmiştir. Fakat dağıtım sistemlerinin yapısının iletim sistemlerinden farklı olması, kararlılık analizlerinde kullanılan metotların bu sistemlerde yetersiz

kalmasına neden olabilmektedir. Bunun için dağıtım sistemlerde gerilim çökmesine en yakın baranın (kritik baranın) belirlenmesi amacıyla bu sistemlerin yapısı göz önünde bulundurularak kolaylıkla uygulanabilecek kararlılık indeksinin geliştirilmesi veya mevcut indekslerin dağıtım sistemlerine kolaylıkla uygulanabilecek şekilde geliştirilmesi çalışmaları devam etmektedir.

5. DAĞITIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR GÜÇ AKIŞI ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ

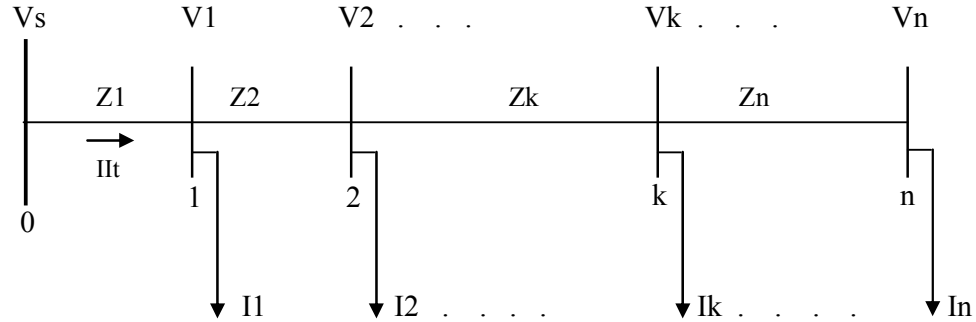
5.1. Giriş

Dağıtım sistemleri genel olarak fiderler ve bunlara bağlı alt-fiderlerden oluşmakta ve bölgesel olarak farklı özellikler göstermektedir. Bu bölümde dağıtım sistemlerinin bütün özelliklerini dahil ederek dengeli dağıtım sistemleri için güvenilir yeni bir güç akışı algoritması geliştirilmektedir. Geliştirilen algoritma bir den fazla dağıtım sisteminde test edilerek güvenilirliği sınanmıştır. Aynı zamanda Yerel Enerji Üretim birimleri dağıtım sistemlerine gerilim kontrollü bara olarak dahil edilerek gerekli reaktif güç hesabı için yeni bir metot verilmektedir. Algoritmanın performansı sistemlerin farklı yüklenme durumu, farklı R/X oranları, sonlandırılma için farklı hata değerleri ve farklı statik yük modelleri için değerlendirilerek literatürde mevcut diğer algoritmaların performansı ile karşılaştırılmaktadır.

5.2. Dengeli Dağıtım Sistemleri İçin Yeni Bir Güç Akışı Algoritması

Şekil 2.1’de verilen iletim hattı modeli için kayıpları dahil ederek hattan transfer edilen aktif ve reaktif güç ifadelerinden yararlanılarak kuadratik denklemin ifadesi Bölüm 2’de türetilmiş olup, aşağıda Denklem (5.2.d)’de tekrar verilmektedir. Elde edilen bu polinomun, Denklem (5.2.d), pozitif köklerinden en büyüğü bize hat sonu geriliminin (V_r) genliğini vermektedir. Bu denklemin dağıtım sistemlerinde her bir hat için kullanılması bize sistemdeki her bir bara geriliminin gerçek değerine çok yakın değerini verecektir. Buda güç akışını çok düşük adımda yapılmasına olanak sağlayacaktır. Ayrıca algoritmanın performansını yükseltmek ve düşük adımda sonuca ulaşabilmesini sağlamak amacı ile [31]’de verilen algorithma kullanılan gerilim ayarının yapılması ve algorithma Kirchoff Gerilim Yasası kullanılarak gerilimlerin faz açısının hesaplanması amaçlanmaktadır. Elde edilen Denklem (5.2.d)’yi dağıtım sistemlerinde kaynaktan sona doğru kullanarak geliştirilen yeni

algoritma Şekil 5.1’de verilen bir fider göz önünde bulundurularak dengeli sistemler için adım adım aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1. N Baralı bir dağıtım sisteminin tek faz devre şeması

Algoritma:

Adım 1 İterasyon sayıcısı başlat ($i=1$), sistemdeki bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle genellikle gerilim değeri için kaynak gerilimi kullanılmaktadır.

Adım 2 Hatlardan akan güçleri kayıpları dahil ederek sondan başa doğru hesapla. Kuadratik Denkleme kayıpların dahil edilmesi hesaplanan bara gerilimlerinin gerçek değere yakın olmasına ve dolayısıyla adım sayısının azalmasına neden olmaktadır

$$P_{los_{ij}} + jQ_{los_{ij}} = \frac{R(P^2 + Q^2)}{V_j^2} + j \frac{X(P^2 + Q^2)}{V_j^2} \quad (5.1.a)$$

$$P_{ij}^{(k)} + jQ_{ij}^{(k)} = \sum_{i=k+1}^n P_y^{(k)} + jQ_y^{(k)} + \sum_{i=k+1}^{n-1} P_{los_{ij}}^{(k)} + jQ_{los_{ij}}^{(k)} \quad (5.1.b)$$

Adım 3 Daha önce hatların paralel kapasitörlerinin ihmal edilmesi durumunda oluşturulan Kuadratik denklemi Şekil 5.2’de verilen dağıtım hattı için paralel kapasitörün göz önünde bulundurulması sonucunda aşağıdaki şekilde yeniden oluşturulması mümkündür. Verilen devrede yükün aktif ve reaktif güçlerinin ifadeleri hattın ABCD parametreleri cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
P &= \frac{V_r V_s}{|B|} \cos(\theta_B - \delta_s) - \frac{|A| V_r^2}{|B|} \cos(\theta_Z - \delta_A) \\
Q &= \frac{V_r V_s}{|B|} \sin(\theta_B - \delta_s) - \frac{|A| V_r^2}{|B|} \sin(\theta_Z - \delta_A)
\end{aligned} \tag{5.2.a}$$

Burada V_s ve V_r sırasıyla hat başı ve hat sonu gerilimleri, δ gerilimler arasındaki faz farkı, A ve B ise hat parametreleri olup farklı hat modelleri için değerleri kolaylıkla hesaplanabilmektedir. Bu denklemlerden yararlanarak;

$$\begin{aligned}
\cos(\theta_B - \delta) &= \frac{P|B|}{V_s V_r} + \frac{|A| V_r}{V_s} \cos(\theta_B - \delta_A) \\
\sin(\theta_B - \delta) &= \frac{Q|B|}{V_s V_r} + \frac{|A| V_r}{V_s} \sin(\theta_B - \delta_A)
\end{aligned} \tag{5.2.b}$$

ifadeleri yazılabilir. Bu ifadelerin aşağıda verilen trigonometrik eşitlikte kullanılması durumunda;

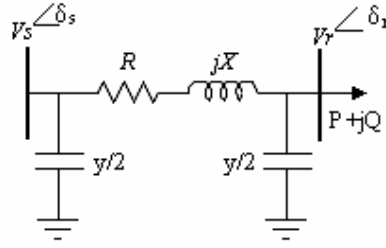
$$\cos^2(\theta_B - \delta) + \sin^2(\theta_B - \delta) = 1 \tag{5.2.c}$$

$$\begin{aligned}
&|A|^2 V_r^4 + 2|A| V_r^2 |B| (P \cos(\theta_B - \delta_A) + Q \sin(\theta_B - \delta_A)) \\
&- V_s^2 V_r^2 + (P^2 + Q^2) |B|^2 = 0
\end{aligned} \tag{5.2.d}$$

Kuadratik denklem hat parametreleri ve yük güçleri cinsinden Denklem (5.2.d)'deki şekilde elde edilir. Sistemde hattın paralel kapasitörlerinin ihmal edilmesi durumunda $A=1$ ve $B=Z$ eşitlikleri kullanılarak Kuadratik denklem;

$$V_r^4 + 2V_r^2 (PR + QX) - V_s^2 V_r^2 + (P^2 + Q^2) Z^2 = 0 \tag{5.2.e}$$

şeklinde elde edilir. Bu durumda Denklem (5.2.d)'yi veya kapasitörlerin ihmal edilmesi durumunda Denklem (5.2.e)'yi kullanarak kaynaktan sona doğru gitmek suretiyle bara gerilimlerini hesapla.



Şekil 5.2. Dağıtım hattı devre şeması

Adım 4 Hesaplanan yeni gerilim büyüklüklerini kullanarak gerilim bağımlı yüklerin yeni aktif ve reaktif güçlerini ve Denklem (5.3)'ü kullanarak yük akımlarını hesapla.

$$I_k = \left(\frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad (5.3)$$

Adım 5 Hesaplanan yeni yük akımlarını ve Denklem (5.4)'ü kullanarak sondan başa doğru yeni bara gerilimlerini V_k^{yeni} ve yeni kaynak gerilimini hesapla. İfadeden görüleceği akımın ve hat empedansının kullanılması bara gerilimlerinin faz açısının hesaplanmasına imkan sağlamaktadır.

$$\bar{V}_k = \bar{V}_{k+1} + \bar{I}_k \bar{Z}_k \quad (5.4)$$

Adım 6 Kaynak gerilim oranını hesapla ve bu oranı kullanarak bara gerilimlerini ayarla;

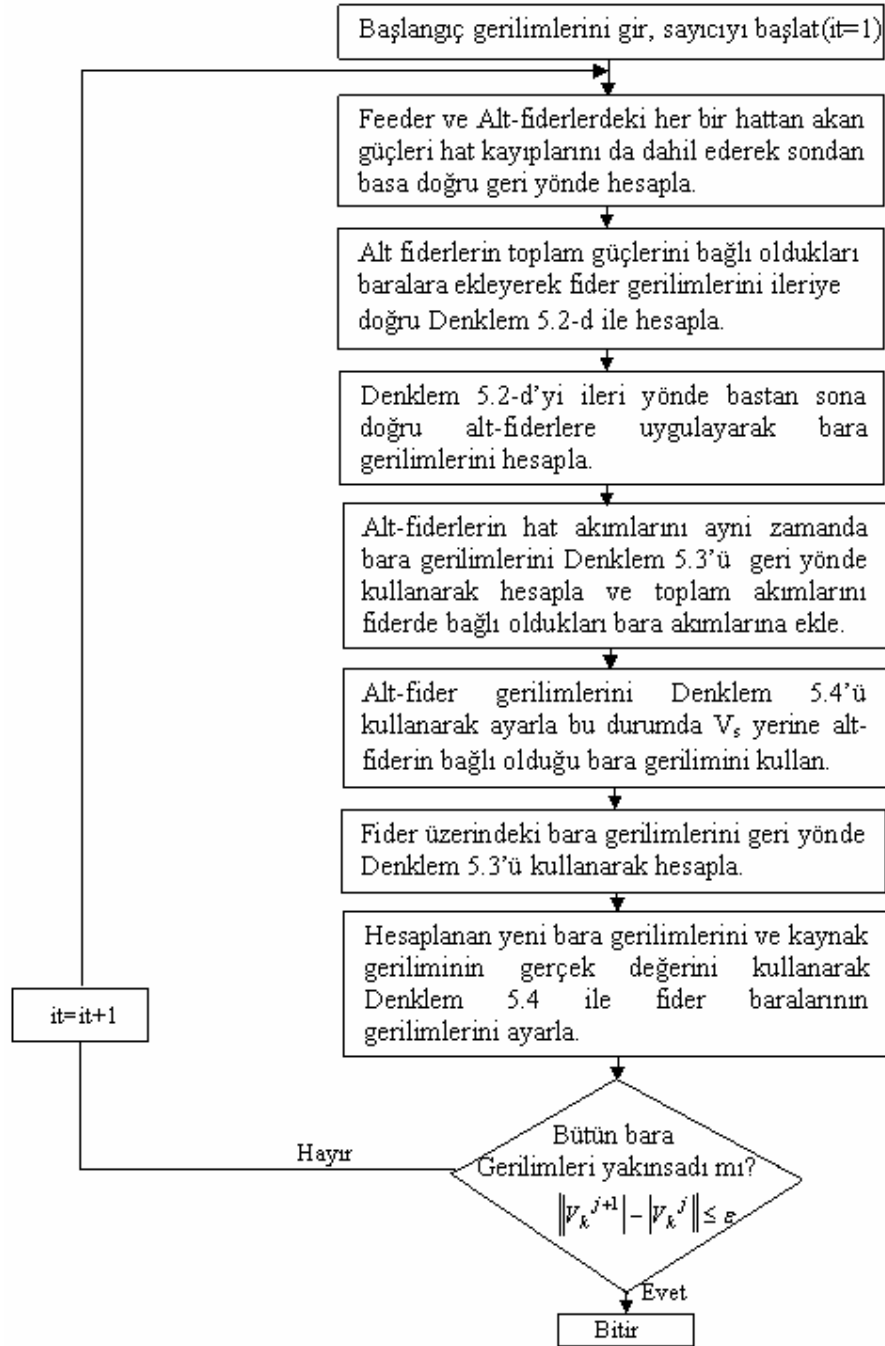
$$V_{s_r} = \frac{V_s^{\text{yeni}}}{V_s} \quad (5.5.a)$$

$$V_k^{\text{ayar}} = \frac{V_k^{\text{yeni}}}{V_{s_r}} \quad (5.5.b)$$

Daha öncede bahsedildiği üzere yapılan bu gerilim ayarı radyal sistemde kaynak gerilimini gerçek değerine çekmekle beraber diğer bara gerilimlerini gerçek değerine oldukça yaklaştıracaktır. Dolayısıyla algoritmanın hızını önemli ölçüde arttıracaktır.

Adım 7 Hesaplanan gerilimler ve bir önceki gerilimleri kullanarak hatayı belirle. Eğer bara gerilimlerinde en büyük hata değeri seçilen hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır değilse iterasyon sayısını bir arttır ve 2. Adımdan devam et.

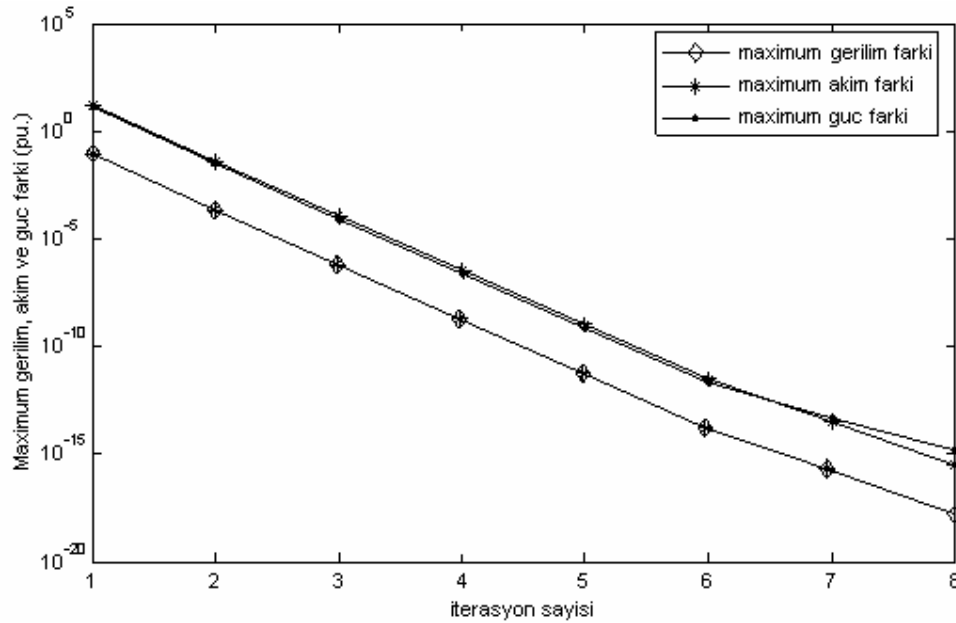
Sistemde alt fiderlerin bulunması durumunda her bir fider iterasyonunda verilen adımlar bir defaya mahsus alt-fiderler için de tekrarlanır. Bu durumda algoritmada verilen kaynak gerilimi yerine alt fiderlerin fidere bağı olduğu baranın gerilimi kullanılır. Alt-fiderler için hesaplamalar tamamlandıktan sonra alt-fiderlerin toplam gücü ve akımı fidere bağı oldukları baralara dahil edilerek algoritma fider için uygulanır. Bu işlem her bir fider iterasyonunda yapılarak güç akışı tamamlanır. Algoritmanın daha iyi anlaşılması açısından blok diyagramı Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Geliştirilen algoritmaya ait akış diyagramı

Daha önce 2. Bölümde verildiği gibi algoritmaların sonlandırılması için gerilim hatasının dışında birden fazla sonlandırma kriteri mevcuttur. Bunların en geçerlisini yani diğer kriterleri de kapsayan değişkenin sonlandırma kriteri olarak kullanılması, daha gerçekçi bir güç akışı analizinin yapılmasına olanak sağlayacaktır. En genel sonlandırma kriterini belirlemek amacı ile devre şeması ve güç akışı

sonuçları daha sonra verilecek olan 69-baralı radyal test sistemi için güç akışı yapılarak belirlenmiştir. Bunun için geliştirilen algoritma ile sistemde güç akışı analizi yapılmış ve her bir adımda farklı sonlandırma kriterleri için azami hata değerleri belirlenmiştir. Sonlandırma kriterleri olarak azami bara gerilimi, yük akımı ve yük gücü farkları dikkate alınmış olup güç akışı analizinde her bir adım sonrasında bu büyüklüklerin değişimi Şekil 5.4’de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere her bir adımda azami gerilim farkı en büyük değerli olup bunun sonlandırma kriteri olarak kullanılması en uygundur. Ayrıca sistemde akım ve güç hataları arasında önemli bir farkın olmadığı, küçük değerlide olsa akım hatasının güç hatasından büyük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla güç akışı analizi esnasında azami gerilim farkının seçilen hata değerinden küçük olması akım ve güç gibi diğer değişkenlere ait azami hata değerlerini de kapsamaktadır. Bu nedenle algoritmada sonlandırma kriteri olarak gerilim farkı seçilmiştir.



Şekil 5.4. 69-baralı sistemde azami gerilim, akım ve güç farkının adım sayısının artışı ile değişimi

5.2.1. Geliştirilen Algoritmanın Dağıtım Sistemlerine Uygulanması

Bu bölümde dengeli dağıtım sistemleri için daha önce algoritmaları verilen metotlar ile geliştirilen yeni metot farklı dağıtım sistemlerinde güç akış analizi yapılarak algoritmanın güvenilirliği sınanmakta ve performansı diğer metotlarla karşılaştırılmaktadır. Test için üç farklı dağıtım sistemi kullanılmıştır. 12 baralı 11 kV, 10 KVA temel (baz) gücünde sisteme ait bilgiler [41]'den alınmış olup devre şeması Ek-I bölümünde Şekil 1.1'de verilmiştir. Geliştirilen algoritma ile statik yük modellerinden sabit güç, sabit akım ve sabit empedans yük modelleri için güç akışı yapılarak sonuçlar Tablo 5.1'de verilmiştir. Bütün sistemlerde gerilim değerleri için hata (tolerans) 10^{-4} olarak seçilmiştir. 33-baralı ve 69-baralı 12.66 kV, 10 kVA temel (baz) gücünde sistemlere ait bilgiler [40]'dan alınmış olup devre şemaları Ek-I bölümünde sırasıyla Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'de verilmiştir. Ayrıca kullanılan test sistemlerine ait hat ve yük bilgileri 12-, 33- ve 69-baralı sistemler için Ek-I bölümünde sırasıyla Tablo 1.1-Tablo 1.3'de verilmiştir. Geliştirilen algoritma ile statik yük modelleri için güç akışı yapılarak sonuçlar 33- ve 69-baralı sistem için sırasıyla Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de verilmiştir. Bara gerilimlerinin büyüklüğü ve faz açılarından, geliştirilen metodun doğru sonuçlar verdiği, metodun güvenilir olduğu görülmektedir. Sistemler için elde edilen gerilim ve faz açıları, sistemin ilgili referanslarda verilen gerçek güç akışı çözümü ile tamamen uyuşmaktadır. Ayrıca dağıtım sistemleri için geliştirilen sweep-temelli algoritmalar ile güç akışı yapılarak elde edilen sonuçların geçerli olduğu, bara gerilimleri arasındaki farkın ihmal edilebilecek kadar küçük değerli olduğu görülmüştür. Örneğin algoritmanın geliştirilmesinde yararlanılan Ratio-Flow [31] olarak adlandırılan güç akışı algoritması ile bütün test sistemleri için elde edilen sonuçlarda azami farkın 0.9×10^{-4} pu. değerinde olduğu, dağıtım sistemlerinde geniş olarak kullanılan ve yalnızca KVL kullanılarak geliştirilen algoritma [29] ile elde edilen sonuçlar arasındaki azami farkın 0.1×10^{-4} pu. olduğu, kuadratik denklem kullanılarak geliştirilen algoritma [36] ile elde edilen sonuçlarda ise 0.13×10^{-4} pu. değerinde olduğu görülmüştür. Bu değerler 10^{-4} pu. değerli sonlandırma hatası için kabul edilebilir değerler olup geliştirilen güç akışı algoritmasının güvenilir olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra geliştirilen algoritma ile güç akışı sabit güçlü yük durumunda 12, 33 ve 69 baralı

sistemler için sırasıyla 2, 3, 3 gibi düşük adımda yapılmakta algoritmanın yakınsama özelliğinin yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 5.1. 12-baralı dağıtım sistemi için elde edilen güç akışı sonuçları

Bara No	Güç Akışı Sonuçları					
	Sabit Güç		Sabit Akım		Sabit Empedans	
	$ V $ (pu.)	δ (der.)	$ V $ (pu.)	δ (der.)	$ V $ (pu.)	δ (der.)
2	0.99433	0.116	0.99452	0.112	0.99469	0.109
3	0.98903	0.223	0.98943	0.215	0.98977	0.209
4	0.98057	0.402	0.98132	0.387	0.98198	0.374
5	0.96982	0.629	0.98132	0.604	0.97214	0.582
6	0.96653	0.698	0.96793	0.670	0.96915	0.645
7	0.96374	0.759	0.96528	0.727	0.96662	0.700
8	0.95530	1.012	0.95728	0.967	0.95900	0.928
9	0.94727	1.243	0.94969	1.185	0.95180	1.135
10	0.94445	1.319	0.94703	1.256	0.94928	1.202
11	0.94355	1.342	0.94618	1.279	0.94847	1.224
12	0.94334	1.349	0.94599	1.285	0.94829	1.230

Tablo 5.2. 33-baralı dağıtım sistemi için elde edilen güç akışı sonuçları

Bara No	Sabit Güç		Sabit Akım		Sabit Empedans	
	$ V $ (pu.)	δ (der.)	$ V $ (pu.)	δ (der.)	$ V $ (pu.)	δ (der.)
2	0.99703	0.0150	0.99719	0.0137	0.99732	0.0127
3	0.98293	0.0994	0.98394	0.0911	0.98475	0.0846
4	0.97545	0.1671	0.97700	0.1533	0.97825	0.1424
5	0.96805	0.2359	0.97015	0.2164	0.97185	0.2009
6	0.94958	0.1464	0.95310	0.1329	0.95593	0.1223
7	0.94603	-0.0852	0.94984	-0.0799	0.95289	-0.0756
8	0.93237	-0.2387	0.93732	-0.2201	0.94127	-0.2054
9	0.92603	-0.3132	0.93154	-0.2877	0.93593	-0.2678
10	0.92015	-0.3770	0.92619	-0.3454	0.93099	-0.3208
11	0.91929	-0.3696	0.92540	-0.3388	0.93026	-0.3146
12	0.91777	-0.3578	0.92402	-0.3282	0.92900	-0.3049
13	0.91159	-0.4510	0.91842	-0.4121	0.92384	-0.3818
14	0.90930	-0.5313	0.91634	-0.4844	0.92193	-0.4479
15	0.90787	-0.5697	0.91505	-0.5189	0.92074	-0.4795
16	0.90649	-0.5934	0.91380	-0.5402	0.91959	-0.4989
17	0.90444	-0.6723	0.91194	-0.6110	0.91789	-0.5634
18	0.90383	-0.6821	0.91139	-0.6197	0.91738	-0.5714
19	0.99650	0.0042	0.99666	0.0030	0.99679	0.0020
20	0.99292	-0.0628	0.99311	-0.0635	0.99327	-0.0639
21	0.99221	-0.0822	0.99241	-0.0827	0.99258	-0.0830
22	0.99158	-0.1025	0.99178	-0.1029	0.99195	-0.1030
23	0.97931	0.0685	0.98042	0.0611	0.98133	0.0553
24	0.97264	-0.0203	0.97394	-0.0250	0.97502	-0.0284
25	0.96931	-0.0640	0.97072	-0.0673	0.97189	-0.0695
26	0.94755	0.1859	0.95124	0.1692	0.95420	0.1560
27	0.94499	0.2421	0.94888	0.2208	0.95200	0.2040
28	0.93355	0.3250	0.93835	0.2972	0.94219	0.2751
29	0.92534	0.4030	0.93079	0.3689	0.93515	0.3419
30	0.92178	0.5083	0.92752	0.4654	0.93211	0.4314
31	0.91762	0.4238	0.92370	0.3884	0.92857	0.3603
32	0.91671	0.4008	0.92286	0.3674	0.92779	0.3410
33	0.91642	0.3931	0.92260	0.3604	0.92755	0.3345

Tablo 5.3. 69-baralı dağıtım sistemi için elde edilen güç akışı sonuçları

Bara No	$ V $ (pu.)	δ (der.)	$ V $ (pu.)	δ (der.)	$ V $ (pu.)	δ (der.)
2	0.99997	-0.0012	0.99997	-0.0012	0.99997	-0.0011
3	0.99993	-0.0025	0.99994	-0.0023	0.99994	-0.0022
4	0.99984	-0.0059	0.99985	-0.0056	0.99985	-0.0053
5	0.99902	-0.0182	0.99908	-0.0171	0.99913	-0.0162
6	0.99009	0.0525	0.99076	0.0490	0.99128	0.0462
7	0.98080	0.1274	0.98210	0.1189	0.98312	0.1121
8	0.97859	0.1453	0.98004	0.1356	0.98118	0.1279
9	0.97746	0.1546	0.97898	0.1442	0.98019	0.1360
10	0.97245	0.2387	0.97416	0.2253	0.97552	0.2144
11	0.97135	0.2574	0.97310	0.2433	0.97449	0.2318
12	0.96819	0.3100	0.97005	0.2938	0.97156	0.2806
13	0.96526	0.3564	0.96725	0.3381	0.96886	0.3232
14	0.96236	0.4025	0.96448	0.3822	0.96619	0.3656
15	0.95949	0.4484	0.96173	0.4261	0.96355	0.4076
16	0.95896	0.4569	0.96122	0.4342	0.96306	0.4155
17	0.95808	0.4711	0.96037	0.4477	0.96224	0.4284
18	0.95807	0.4712	0.96037	0.4479	0.96224	0.4286
19	0.95760	0.4798	0.95992	0.4560	0.96181	0.4364
20	0.95730	0.4852	0.95963	0.4613	0.96153	0.4414
21	0.95682	0.4941	0.95917	0.4697	0.96109	0.4495
22	0.95681	0.4942	0.95917	0.4698	0.96108	0.4496
23	0.95674	0.4956	0.95910	0.4711	0.96102	0.4509
24	0.95659	0.4985	0.95895	0.4739	0.96087	0.4535
25	0.95642	0.5016	0.95879	0.4769	0.96072	0.4564
26	0.95635	0.5029	0.95872	0.4781	0.96066	0.4576
27	0.95633	0.5033	0.95870	0.4785	0.96064	0.4579
28	0.99993	-0.0027	0.99993	-0.0026	0.99993	-0.0025
29	0.99985	-0.0053	0.99986	-0.0052	0.99986	-0.0051
30	0.99973	-0.0032	0.99974	-0.0031	0.99974	-0.0030
31	0.99971	-0.0028	0.99972	-0.0027	0.99972	-0.0026
32	0.99961	-0.0009	0.99961	-0.0008	0.99961	-0.0007
33	0.99935	0.0035	0.99935	0.0036	0.99936	0.0037
34	0.99901	0.0093	0.99902	0.0095	0.99902	0.0095
35	0.99895	0.0104	0.99895	0.0105	0.99895	0.0106
36	0.99992	-0.0030	0.99992	-0.0028	0.99993	-0.0027
37	0.99975	-0.0094	0.99975	-0.0092	0.99975	-0.0091
38	0.99959	-0.0118	0.99959	-0.0117	0.99960	-0.0115
39	0.99954	-0.0125	0.99955	-0.0124	0.99955	-0.0122
40	0.99954	-0.0125	0.99954	-0.0124	0.99955	-0.0123
41	0.99884	-0.0235	0.99885	-0.0234	0.99885	-0.0232
42	0.99855	-0.0281	0.99856	-0.0280	0.99856	-0.0279
43	0.99851	-0.0288	0.99852	-0.0286	0.99852	-0.0285
44	0.99850	-0.0289	0.99851	-0.0287	0.99851	-0.0286
45	0.99841	-0.0307	0.99841	-0.0305	0.99842	-0.0304
46	0.99841	-0.0307	0.99841	-0.0306	0.99842	-0.0304
47	0.99979	-0.0077	0.99980	-0.0074	0.99980	-0.0071
48	0.99854	-0.0525	0.99856	-0.0520	0.99857	-0.0515
49	0.99470	-0.1917	0.99473	-0.1903	0.99477	-0.1891
50	0.99415	-0.2115	0.99419	-0.2100	0.99423	-0.2087
51	0.97854	0.1456	0.97999	0.1359	0.98114	0.1282
52	0.97853	0.1458	0.97998	0.1361	0.98113	0.1284
53	0.97466	0.1770	0.97643	0.1648	0.97782	0.1552
54	0.97141	0.2031	0.97346	0.1889	0.97507	0.1776
55	0.96694	0.2394	0.96938	0.2223	0.97129	0.2087
56	0.96257	0.2751	0.96539	0.2550	0.96760	0.2391
57	0.94009	0.6755	0.94488	0.6199	0.94862	0.5766
58	0.92903	0.8800	0.93479	0.8057	0.93928	0.7480
59	0.92475	0.9617	0.93089	0.8799	0.93567	0.8163
60	0.91973	1.0671	0.92631	0.9753	0.93143	0.9041
61	0.91233	1.1375	0.91956	1.0390	0.92519	0.9626
62	0.91204	1.1403	0.91930	1.0415	0.92495	0.9649
63	0.91165	1.1440	0.91894	1.0448	0.92463	0.9680
64	0.90975	1.1622	0.91722	1.0612	0.92303	0.9830
65	0.90918	1.1677	0.91669	1.0662	0.92255	0.9875
66	0.97129	0.2586	0.97303	0.2444	0.97443	0.2329
67	0.97129	0.2586	0.97303	0.2444	0.97443	0.2329
68	0.96785	0.3161	0.96973	0.2997	0.97124	0.2863
69	0.96785	0.3162	0.96973	0.2997	0.97124	0.2863

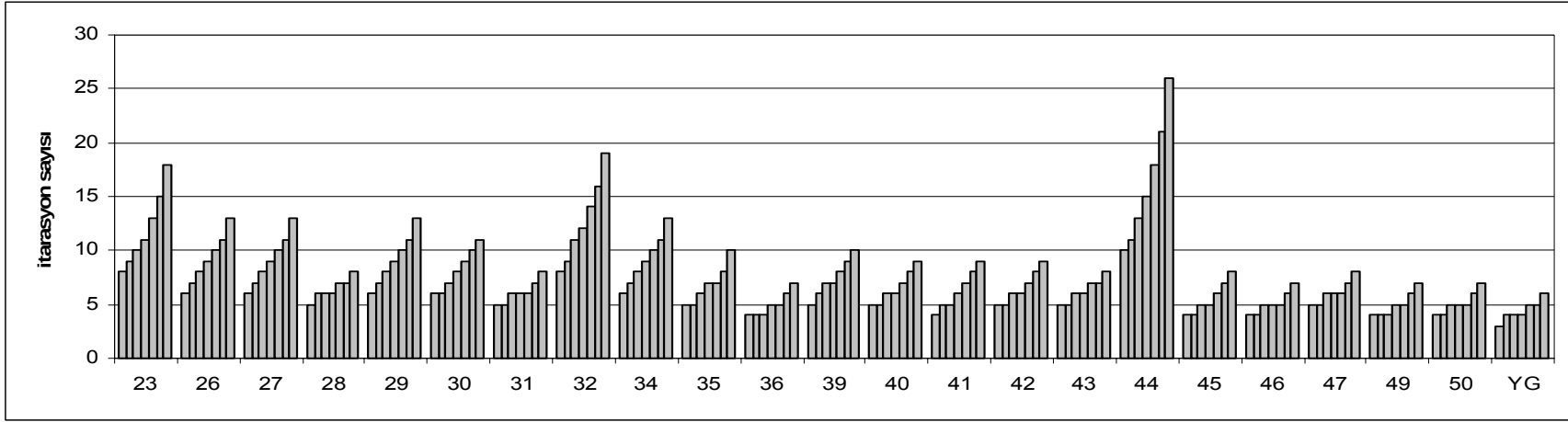
5.2.2 Geliştirilen Algoritmanın Performansının Değerlendirilmesi

Güç akışı algoritmalarının güvenilirliğinin yanı sıra sistemdeki bara sayısı empedans büyüklükleri ve sistemin farklı yüklenmesi gibi durumlarda göstereceği performanslar büyük öneme sahiptir. Yani kullanılan sistemin parametrelerinden az etkilenecek düşük adımda ve kısa zamanda güç akışını tamamlaması gerekir. Bu nedenle algoritmanın performansı, mevcut sweep-temelli algoritmalar, geleneksel Newton-Raphson, Gauss-Seidel güç akışı metotları ve standart güç akış programlarından PFLOW [84] kullanılarak karşılaştırılmıştır. Bütün algoritmalar Matlab programı kullanılarak kodlanmıştır. Bütün sistemlerde gerilim değerleri için hata (tolerans) 10^{-6} olarak seçilmiştir. 12 baralı, 33 baralı ve 69 baralı sistemler için güç akışı yapılarak bu sistemler için her bir algoritmaya ait iterasyon sayısı Tablo 5.4’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü gibi geliştirilen yeni algoritma diğer tüm algoritmalarından daha düşük adımda güç akışını tamamlamaktadır. Çözüme 11. adımda ulaşabilen algoritma mevcut iken geliştirilen algoritma sadece 3 adımda sonuca ulaşmaktadır. Diğer taraftan Tablodan görüleceği üzere Denklem (5.1)’de verilen kuadratik denklem temelli güç akışı algoritmalarının Kirchhoff Gerilim Kanunu kullanılarak geliştirilen algoritmalarından daha düşük adımda sonuca ulaştığını, performanslarının daha iyi olduğunu söylemek mümkündür. Newton Raphson ve PFLOW geleneksel algoritmaları her ne kadar küçük dağıtım sistemlerinde performansları yüksek olsa da sistem büyüdükçe performansları zayıflamakta ve yakınsama problemleri görülmektedir. Bu algoritmalar ile 69 baralı sistem için sonuç alınamamakta, yakınsama problemi oluşmaktadır. Bunun yanı sıra referans [43], [45] ve [50]’de verilen algoritmalar her ne kadar düşük adımda sonuç verseler de sistemde her bir hat için lineer olmayan denklemler kullanılarak Jacobian oluşturulup denklem sisteminin çözülmesi nedeniyle hesaplama süreleri yüksek ve uygulamaları zordur. Yapılan güç akışı analizlerinde Matlab kullanılması nedeniyle algoritmaların hesaplama süreleri tam olarak belirlenememiştir. Fakat mevcut bazı süre belirleme komutları kullanılarak yapılan analizlerde geliştirilen algoritmanın hesaplama süresinin genel olarak düşük değerli olduğu görülmüştür.

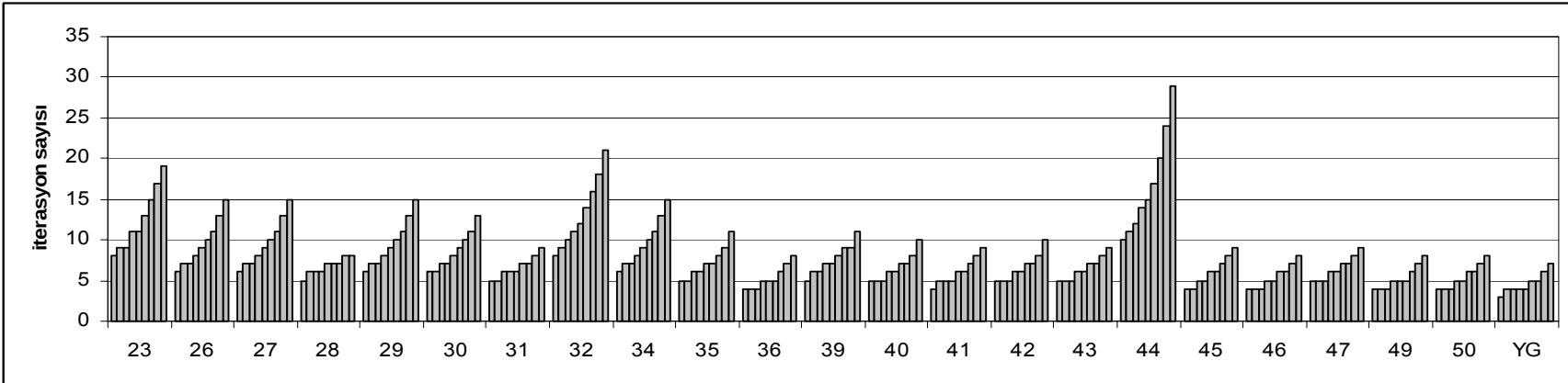
Tablo 5.4. Farklı sistemler için algoritmaların iterasyon sayıları

No	Algoritma tipi	Ref. No	Radyal test sistem		
			12-baralı [40]	33- baralı [43]	69- baralı [39]
1	Geleneksel algoritmalar	G-S.	530	-	-
2		N-R.	4	5	-
3		PFLOW	4	5	-
4	KVL temelli sweep Algoritmalar	[23]	5	8	8
5		[24]	5	8	8
6		[25]	5	8	8
7		[26]	5	6	6
8		[27]	5	6	6
9		[28]	5	6	5
10		[29]	5	6	6
11		[30]	5	6	6
12		[31]	4	6	5
13		[32]	6	8	8
14		[33]	6	8	8
15		[34]	5	6	6
16	Kuadratik denklem temelli sweep algoritmalar	[35]	4	5	5
17		[36]	3	4	4
18		[37]	3	4	4
19		[38]	3	4	4
20		[39]	5	6	5
21		[40]	4	5	5
22		[41]	3	4	4
23		[42]	4	5	5
24		[43]	4	4	5
25		[44]	8	11	10
26		[45]	4	4	4
27		[46]	3	4	4
28		[47]	3	4	5
29		[49]	3	4	4
30		[50]	3	4	4
31		Geliştirilen	2	3	3

Verilen yeni güç akışı algoritmasının performansı 69-baralı sistemin parametreleri değiştirilerek diğer metotlar ile karşılaştırılmış, metotlar için iterasyon sayısının değişimi incelenmiştir. Farklı parametrik analizler, sistemin yük güçleri ve hatların R/X oranları değiştirilerek, farklı statik yük modelleri kullanılarak ve hata (tolerans) değerleri değiştirilerek yapılmıştır. Farklı yüklenme durumu bütün yüklerin aktif ve reaktif güçlerinin bir λ katsayısı ile çarpılması sonucunda elde edilmiştir. Bu durumda iterasyon sayısının farklı yüklenme durumlarında yük artışına göre değişimi bütün metotlar için Şekil 5.5’de verilmiştir. Benzer şekilde sistemde hat empedansları için R/X oranı her bir hat direncinin bir k katsayısı ile çarpılarak değiştirilmiş ve iterasyon sayısının değişimi Şekil 5.6’da verilmiştir.



Şekil 5.5. 69-baralı sistemin farklı yüklenme durumu için sweep-temelli algoritmaların iterasyon sayılarının değişimi ($\lambda=1, 1.25, \dots, 2.5$)



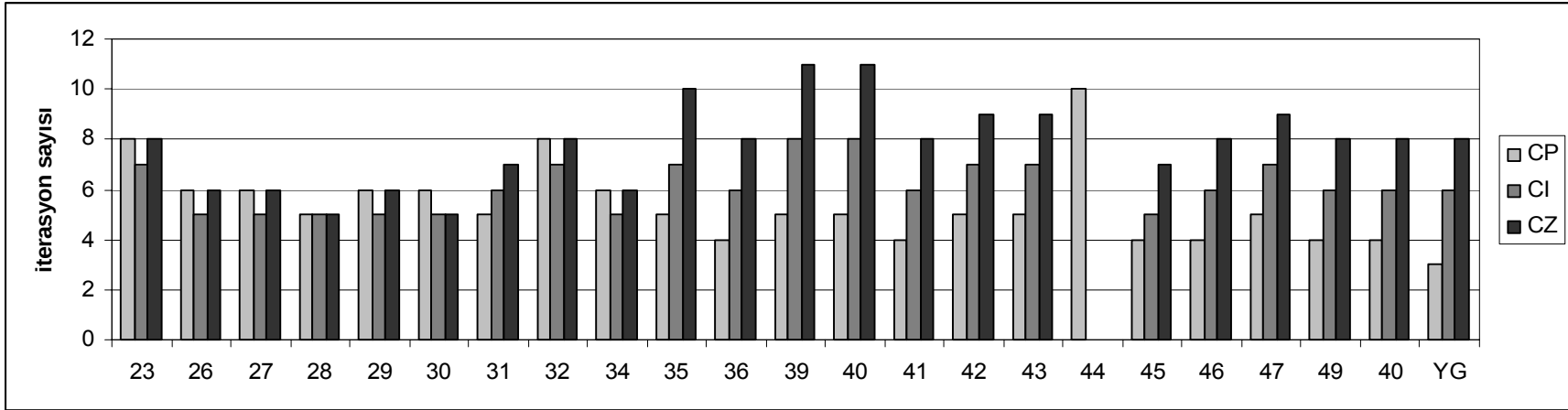
Şekil 5.6. 69-baralı sistemde hatlarının farklı R/X oranları için sweep-temelli algoritmaların iterasyon sayılarının değişimi ($k=1, 1.25, \dots, 3$)

Tablo 5.4’de verilen algoritmalar yapı olarak birbirine çok benzer dolayısıyla adım sayıları çok yakın veya eşit olan algoritmalar da parametrik analizde kullanılmamıştır. Şekillerde satırlarda gösterilen numaralar algoritmaların Tablo 5.4’de verilen referans numaralarını, sütunlar ise algoritmaların iterasyon sayılarını göstermektedir. Şekil 5.5’den görüleceği gibi azami yüklenme durumu ($\lambda=2.5$) için yeni metot ile 6 iterasyonda sonuca ulaşılırken diğer metotlarda 26 iterasyonda sonuca ulaşan algoritma mevcuttur. Bu durumda verilen metodun performansının sistemin yüklenme oranından çok az etkilendiğini söylemek mümkündür. Aynı zamanda kuadratik denklemin kullanıldığı algoritmaların Kirchhoff Gerilim Kanunu kullanılarak geliştirilen algoritmalarla göre her bir yüklenme durumu için daha düşük adımda sonuca ulaştığını ve yüklenme durumunun artışı ile performanslarının daha az etkilendiğini söylemek mümkündür. Benzer durum Şekil 5.6’da, sistemde hatların R/X oranının değiştirilmesi durumunda da görülmektedir. Geliştirilen algoritma sistemde hatların R/X oranlarının azami oranda arttırılması durumunda ($k=3$) sonuca 7 adımda ulaşabilirken diğer algoritmalar 29 adımda ve 21 adımda sonuca ulaşanlar görülmektedir. Algoritmanın performansının hat empedansı büyüklüğü ve R/X oranlarının değişiminden de çok az etkilendiğini ayrıca diğer kuadratik denklem temelli algoritmaların da Kirchhoff temelli algoritmalarla nazaran performanslarının daha az etkilendiğini söylemek mümkündür.

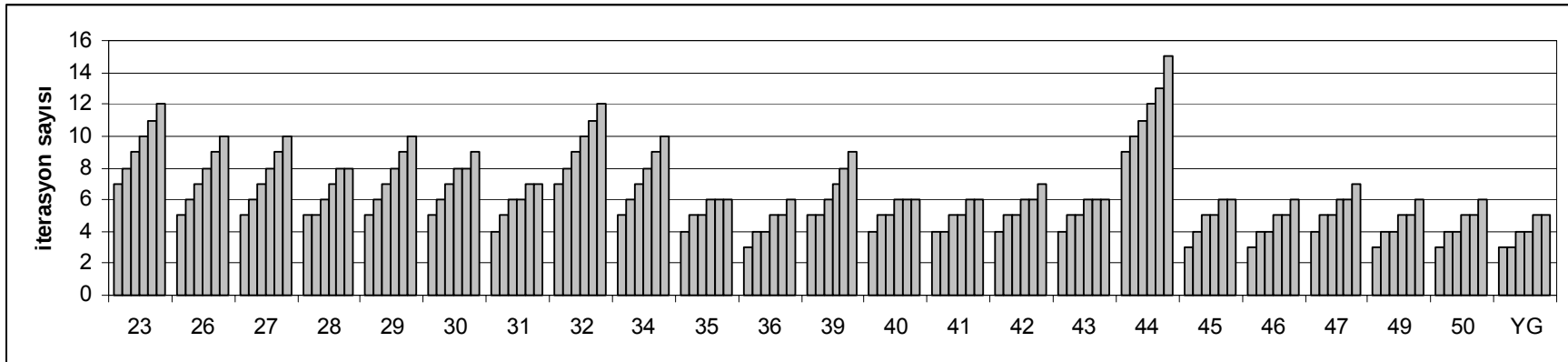
Sistemde sabit güç (CP) yük modelinin dışında yüklerin gerilim bağımlılığı arttırılarak sabit akım (CI) ve sabit empedanslı (CZ) yük modelinin kullanılması durumunda yapılan güç akışı ile elde edilen algoritmalarla ait iterasyon sayıları Şekil 5.7’de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere Kirchhoff gerilim yasası kullanılarak geliştirilen algoritmaların iterasyon sayılarının daha düşük olduğu performanslarının yükün gerilim bağımlılığının artısından daha az etkilendiği görülmektedir. Bunun nedeni bu tür algoritmalarda yük gücü yerine yük akımının kullanılmasıdır. Yüklerin sabit akımlı yük olarak modellenmesi durumunda bu algoritmaların iterasyon sayısı minimum değerdedir. Diğer taraftan Kuadratik denklem kullanılarak geliştirilen algoritmalarla hattan aktarılan güç esas alınarak bara gerilimlerinin hesaplanması nedeniyle yükün gerilim bağımlı olması durumunda her bir adımda hatlardan aktarılan gücün gerilimle değişmesidir. Her ne kadar gücün gerilimle değişimi kuadratik denklem kullanılarak geliştirilen algoritmaların dolayısıyla yeni geliştirilen algoritmanın performansını etkilese de geliştirilen yeni algoritmanın diğer kuadratik

denklem temelli algoritmalarından daha düşük adımda sonuç verdiğini performansının bunlara nazaran yükün gerilim bağımlılığı ile daha az etkilendiğini söyleyebilmek mümkündür. Farklı tolerans değerlerinde, Şekil 5.8’de, kuadratik denklem temelli algoritmaların Kirchhoff kanunu esas alınarak geliştirilen algoritmalarından daha düşük iterasyonda sonuç vermek olup tolerans değerinin artması ile iterasyon sayılarının daha az değiştiği görülmektedir. Geliştirilen yeni metodun ise en iyi performansa sahip olduğu ve her bir tolerans değerinde minimum adımda sonuç verdiği görülmektedir.

Benzer şekilde referans [43], [45] ve [50]’de verilen algoritmalar da düşük adımda sonuç vermektedir. Fakat daha öncede bahsedildiği gibi bu algoritmalar da her bir hat için yazılan denklem sistemlerinin Newton metodu ile çözülmesi nedeniyle sistemlere uygulanması zor ve hesaplama süreleri diğer metotlara nazaran yüksektir. Geleneksel güç akışı algoritmalarında (N-R, G-S) 69-baralı sistem için yakınsama problemi olduğundan parametrik analizde kullanılamamıştır.



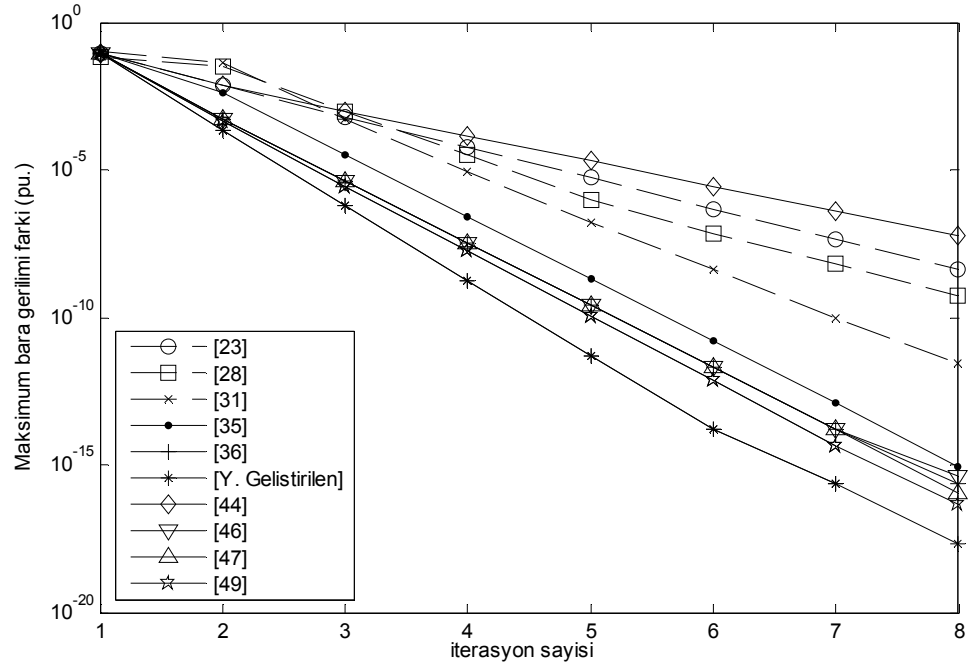
Şekil 5.7. 69-baralı sistemde farklı yük modelleri için sweep-temelli algoritmaların iterasyon sayılarının değişimi (CP:sabit güç, CI:sabit akım, CZ:sabit empedans)



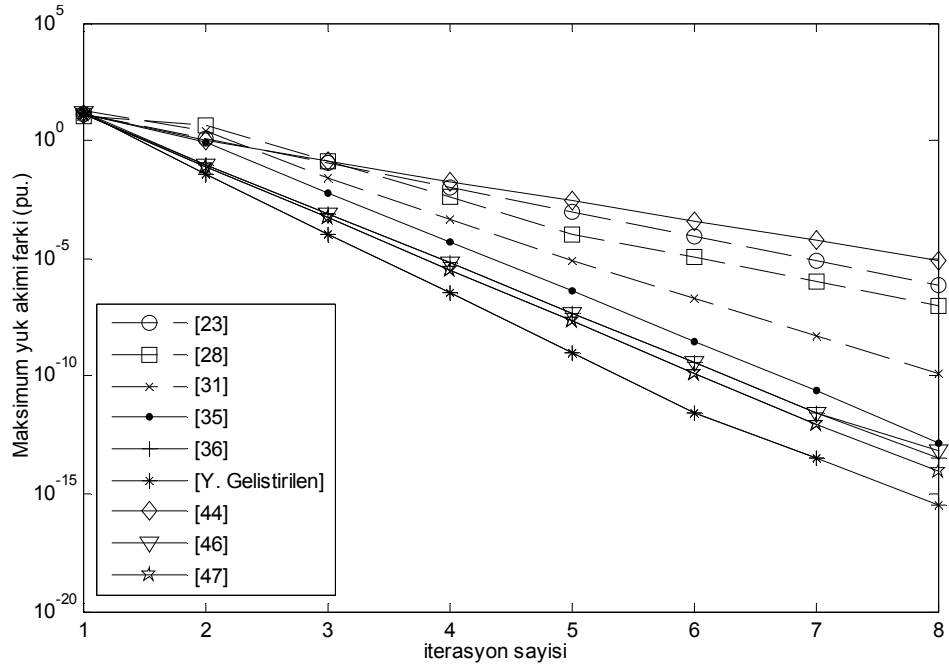
Şekil 5.8. 69-baralı sistemde farklı tolerans değerleri için sweep-temelli algoritmaların iterasyon sayılarının değişimi (eps= 10^{-5} , 10^{-6} , ..., 10^{-10})

Bölüm 2’de detaylı olarak verildiği gibi dağıtım sistemleri için geliştirilen sweep-temelli algoritmaların sonlandırılmasında ardı ardına her iki adımda azami bara gerilimi, yük akımı, hat kaybı veya sistemin toplam aktif ve reaktif güç farkı gibi farklı sonlandırma kriteri kullanılarak bu kriterin kullanıcı tarafından belirlenen belirli bir hata değerinden küçük olması durumunda güç akışı hesabı sonlandırılmaktadır. Bu farklı sonlandırma kriterleri algoritmaların performansının karşılaştırılmasında hatalı değerlendirmelere neden olabilir. Yani gerçekçi bir performans analizi için algoritmalarda aynı sonlandırma kriterinin kullanılması gerekir.

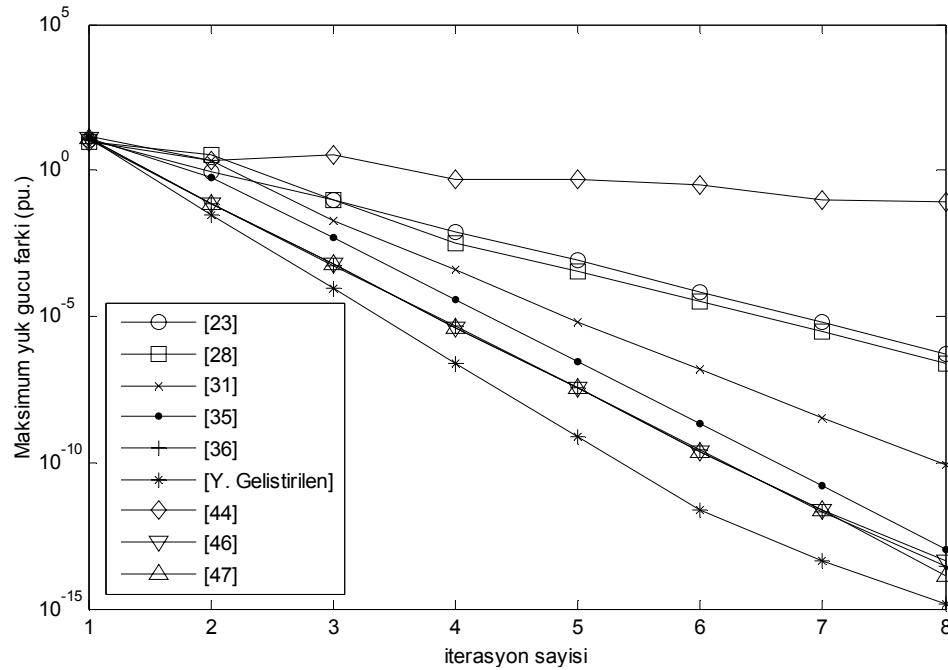
Çalışmanın bu bölümünde algoritmaların yakınsama özellikleri aynı sonlandırma kriterleri göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Bunun için sonlandırma kriterlerinden geniş olarak kullanılan azami bara gerilimi farkı, azami yük akımı farkı ve azami yük gücü farkı kullanılmıştır. İlk olarak algoritmalar için azami gerilim farkının iterasyon sayısı ile değişimi 69-baralı sistem için analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.9.(a)’da verilmiştir. Yapılan analizlerde KVL temelli algoritmaların büyük bir çoğunluğunun referans [23]’de verilen algoritma ile yakın sonuçlar verdiğinden bu algoritmalara ait sonuçlar şekilde verilmemiş, farklı özelliklerdeki KVL temelli algoritmalar göz önünde bulundurulmuştur. Aynı şekilde bir çok kuadratik temelli algoritmalar aynı yakınsama kriteri durumu için referans [36], [46] ve [47]’deki algoritmalar ile benzer sonuçlar verdiğinden bu algoritmalara ait sonuçlarda şekilde verilmemiştir. Şekilden görüleceği üzere referans [44]’de verilen kuadratik denklem temelli algoritmanın dışındaki tüm kuadratik denklem temelli algoritmalar KVL temelli algoritmalarından daha hızlı yakınsama özelliğine sahip olduğu iterasyon sayısı arttıkça bara gerilimleri arasındaki farkın daha fazla azaldığı görülmektedir. Benzer durum Şekil 5.9.(b)’de azami yük akımı ve Şekil 5.9.(c)’de azami yük gücü farkı için de görülmektedir. Buna ek olarak geliştirilen yeni algoritmanın KVL temelli algoritmaların yanı sıra diğer kuadratik denklem temelli algoritmalarından da daha hızlı yakınsadığı, her üç sonlandırma kriteri için de bütün adımlar da hatanın diğer bütün algoritmalar için hesaplanan hata değerinden daha küçük değerli olduğu görülmektedir.



Şekil 5.9.(a) Azami bara gerilimi farkının değişimi



Şekil 5.9.(b) Azami yük akımı farkının değişimi



Şekil 5.9.(c) Azami yük gücü farkının değişimi

Şekil 5.9. 69-baralı sistemde azami bara gerilimi (a), yük akımı (b) ve yük gücü (c) farkının iterasyon sayısı ile KVL temelli algoritmalar (- - -) ve kuadratik denklem temelli algoritmalar (—) için değişimi

5.3. Algoritmalarla YEÜ Birimlerinin ve Kompanzatorlerin PV-Bara (Gerilim Kontrollü Bara) Olarak Modellenmesi

Daha önce 3. Bölümde YEÜ birimlerinin ve gerilim kontrolörlerinin dağıtım sistemlerindeki önemi geniş olarak bahsedilmişti. Dağıtım şebekelerinin genellikle radyal yapıda olmasından dolayı güç akışı tek yönlüdür. Bu nedenle YEÜ birimlerinin dağıtım sistemlerine yerleştirilmesi yerel gerilim seviyelerinde önemli etkisi olmakla beraber sistem kayıplarını da önemli ölçüde azaltmaktadır. YEÜ birimlerinin yanı sıra son yıllarda FACTS elemanları olarak adlandırılan güç elektroniği elemanları ile geliştirilen SVC ve Statcom gibi aktif kompanzatorler kullanılarak sistemde gerilim kontrolü yapılmaktadır [53]. Dolayısıyla bu tür dağıtım sistemleri radyallıktan uzaklaşmakta ve sistemdeki güç transferi kaynağa doğru da

akabilmektedir. Yani her iki yönde güç akışı olabilmektedir. Bu durumda güç akışı analizine YEÜ birimlerinin veya aktif kompanzatörlerin uygun bir şekilde dahil edilmesi gerekmektedir.

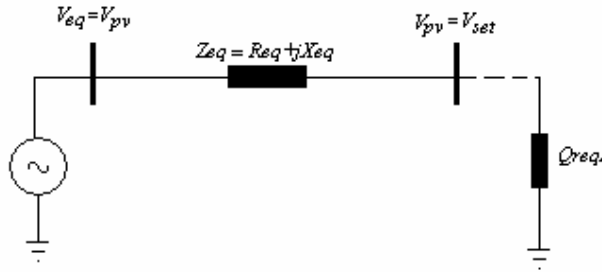
Bu tür elektriksel birimlerin aktif güçleri ve sisteme bağlantı noktası gerilimleri bilindiğinden güç akışı analizinde PV-bara olarak seçilmektedir. Güç akışı algoritmalarından geleneksel güç akışı algoritmaları ve onların dağıtım sistemleri için geliştirilmiş şekilleri kullanılarak PV baralı dağıtım sisteminde güç akışı yapılabilir. Yani PV-bara kolaylıkla algoritmalarda modellenmekte ve bilinmeyen büyüklükleri (Reaktif güç ve faz açısı) analiz esnasında hesaplanabilmektedir. Fakat daha öncede bahsedildiği gibi bu tip algoritmalarda dağıtım sistemlerinin yapısı nedeniyle yakınsama problemi görülmekte ve güç akışı analizi tamamlanamamaktadır. İkinci grup olarak verilen ve ileri ve/veya geri yönde gerilim hesabına dayalı sweep-temelli güç akışı algoritmaları dağıtım sistemleri için geliştirilmiştir. Algoritmalar tek yönlü güç akışını esas alarak geliştirildiğinden bunlara YEÜ birimleri veya aktif kompanzatörler PV-bara olarak doğrudan güç akışına dahil edilememekte genellikle sabit güçlü bara (PQ-bara) olarak modellenmektedir. Sabit PQ-bara olarak modellenmesi durumunda bu birimlerin bağlı olduğu bara gerilimleri kontrol edilememekte ve normal yük baralarında olduğu gibi güç değerlerine göre akımı hesaplanarak her bir iterasyonda gerilim değeri hesaplanmaktadır. Dolayısıyla yük barası gibi güç akışına dahil edilmektedir. Bu bölümde YEÜ birimlerinin ve diğer gerilim kontrolü amacı ile kullanılan reaktif güç kaynaklarının geliştirilen yeni güç akışı algoritmasına ve diğer bütün sweep-temelli güç akışı algoritmalarına PV-bara olarak modellenmesi için yeni bir metod verilmektedir. Bütün sweep-temelli güç akışı algoritmalarında YEÜ birimleri ve diğer gerilim kontrollü reaktif güç kaynaklarını PV-bara olarak modellenerek gerilimini istenilen seviyede kontrol edilmesi için geliştirilen metod aşağıda verilmiştir.

Sweep-Temelli Algoritmalarda PV-bara'nın Gerilim kontrolü ve reaktif gücünün belirlenmesi;

Adım 1: PV-bara gerilimi ve gücünün başlangıç değerlerini ata; $V_{pv}=V_{set}$, $P_{pv}=P_{set}$ ve $Q_{pv}=0$.

Adım 2: Belirlenen bu değerlere göre barayı PQ-bara olarak modelleyerek baraların akım ve gerilimlerini hesapla.

Adım 3: Sistemi, bu birimlerin uçlarından görülen iki baralı eşdeğer devresine indirge. Eşdeğer devre empedansını belirlerken salınım barasını sabit gerilim kaynağı, yük ve PV baralarını ise sabit akım kaynağı olarak modelle. Şekil 5.10'dan görüleceği üzere uçlardan görülen eşdeğer gerilim PV-bara gerilimine eşittir; $V_{eq} = V_{pv}$.



Şekil 5.10. Dağıtım sisteminin iki-baralı eşdeğer devre şeması

Adım 4: PV-bara gerilimini (V_{pv}) istenilen değerde (V_{set}) tutmak için gerekli reaktif gücü hesapla. Gerekli reaktif güç, kuadratik denklem Şekil 5.10'da gösterilen eşdeğer devre için kullanarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$|Z_{eq}|^2 Q_{req}^2 + 2|V_{set}|^2 X_{eq} Q_{req} + |V_{set}|^4 - |V_{eq}|^2 |V_{set}|^2 = 0 \quad (5.6.a)$$

$$Q_{req1} = \frac{-2|V_{set}|^2 X_{eq} + \sqrt{4|V_{set}|^4 X_{eq}^2 + 4|Z_{eq}|^2 (|V_{set}|^4 - |V_{eq}|^2 |V_{set}|^2)}}{2|Z_{eq}|^2} \quad (5.6.b)$$

$$Q_{req2} = \frac{-2|V_{set}|^2 X_{eq} - \sqrt{4|V_{set}|^4 X_{eq}^2 + 4|Z_{eq}|^2 (|V_{set}|^4 - |V_{eq}|^2 |V_{set}|^2)}}{2|Z_{eq}|^2} \quad (5.6.c)$$

Çözümlerden biri olan Q_{req2} 'nin ifadesinden görüleceği üzere değeri sürekli negatif olup reaktif güç ayarlanmasında kullanılamaz. Diğer taraftan Q_{req1} 'in hem pozitif hemde negatif değer alabileceği Denklem (5.6.b)'den açıkça görülmektedir. Bu

nedenle Q_{req1} , PV-bara'nın reaktif gücünün ayarlanmasında büyük kolaylık sağlamaktadır. Elde edilen bu reaktif güç ifadesinin en önemli avantajları; başlangıç değerlerinden ve PV-bara'nın faz açısından bağımsız olmasıdır.

Adım 5: PV-bara'nın toplam gücünü hesapla;

$$Q_{pv} = Q_{pv} + Q_{req1} \quad (5.7)$$

Adım 6: Hesaplanan toplam reaktif gücün büyüklüğünü kontrol et, eğer sınırların dışında ise sınır değere sabitleyerek sabit güçlü bara (PQ-bara) olarak işleme devam et.

2. Adımdan 6. Adıma kadar olan işlemleri güç akışı analizinde her bir adımda tekrar edilerek gerilimi istenilen sınırdaki tutmak için reaktif güç ayarı yapılmalıdır. Bu işlemler sırasında sistemin eşdeğer empedansı yalnızca hat empedansları kullanılarak hesaplandığından sabit olup her bir iterasyonda tekrar hesaplanmasına gerek yoktur. Ayrıca eğer sistemde birden fazla YEÜ birimi var ise bu işlemler aynı zamanda diğerleri içinde gerçekleştirilmelidir. SVC veya Statcom FACTS kontrolörlerinin aktif güçleri sadece kayıp güçler olduğundan bunların modellenmesinde bu küçük değerli aktif güç sıfır alınarak algoritma aynı şekilde uygulanabilir.

5.3.1. Geliştirilen PV-Bara Modelleme Yönteminin Dağıtım Sistemlerine Uygulanması

Metodun geçerliliğini göstermek amacıyla 12, 30, 33, ve 69-baralı radyal dağıtım sistemleri için güç akışı analizi yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Güç akışı için farklı sweep-temelli güç akışı algoritması ve geleneksel güç akışı algoritmaları (N-R ve G-S) ve PFLOW [84] programı kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Test sistemlerinde farklı yerlere farklı aktif güç değerinde YEÜ birimleri yerleştirilerek güç akışı sonuçları karşılaştırılmıştır. 12-baralı sistem için YEÜ biriminin 10. baraya, 33-baralı sistemde 9. baraya, 69-baralı sistemde ise 15. baraya yerleştirilmesi durumu için geliştirilen yeni algoritma ve diğer geleneksel algoritmalar ile elde edilen sonuçlar Tablo 5.5'de verilmiştir. YEÜ birimleri için

aktif güç değerleri sistemlerdeki yüklerin toplam aktif güç değerinin belli bir oranını karşılayacak şekilde seçilmiş olup, yerleştirildikleri baraların gerilimleri 1.0 pu. değerinde tutulmuştur. Sweep-temelli algoritmalar PV-bara modellemesinde hesaplanan gerekli reaktif güçler kullanılarak bu birimlerin bağlı olduğu baraların PQ-bara olarak modellenmesi ve aynı zamanda PV-bara durumu için algoritmaların iterasyon sayıları Tablo 5.6'da verilmiştir.

Sweep-temelli ve geleneksel algoritmalar kullanılarak yapılan güç akışı sonucunda elde edilen gerilim büyüklükleri yapılan PV-bara modellemesinin güvenilir olduğunu göstermektedir. Farklı algoritmalar kullanılarak elde edilen gerilim büyüklüklerinin büyük oranda aynı olduğu aralarındaki azami farkın 0.0001 pu. değerinden küçük olduğu görülmektedir. Ayrıca daha öncede belirtildiği gibi geleneksel güç akışı algoritmaları (N.R, G.S) ve yapı olarak bunlara yakın PFLOW güç akışı algoritması 69-baralı dağıtım sisteminde güç akışını tamamlayamadığı, yakınsama probleminin olduğu görülmektedir. Dolayısıyla dağıtım sistemleri radyal şekilde büyüdükçe bu tür algoritmalar yetersiz kaldığından sweep-temelli algoritmaların kullanılması zorunlu hale gelmektedir. Eğer sistemlerde YEÜ birimleri ve/veya kompanzasyon temelli gerilim kontrolörleri var ise gerçekçi bir güç akışı analizi için bunların PV-bara olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu nedenle geliştirilen bu modellemenin bu türlü sistemlerde sweep-temelli algoritmalar kullanılarak daha gerçekçi bir güç akışının yapılmasına olanak sağladığını söylemek mümkündür. Tablo 5.6'dan görüldüğü gibi YEÜ birimlerinin sweep-temelli algoritmalar PV-bara olarak modellenmesi ile güç akışı analizi kolaylıkla yapılabilmekte ve algoritmaların performansı çok az etkilenmektedir. Yani verilen PV-bara modellenmesi ile YEÜ birimli dağıtım sistemlerinde sweep-temelli algoritmalar düşük iterasyonda güç akışını tamamlayabilmektedir. Buna ek olarak dengeli dağıtım sistemleri için geliştirilen yeni güç akışı algoritmasının diğer geliştirilen sweep-temelli algoritmalarla nazaran performansının genel olarak daha iyi olduğunu, daha düşük adımda güç akışını tamamlayabildiğini söylemek mümkündür.

Tablo 5.5. YEÜ birimlerinin PV-bara olarak modellenmesi durumunda güç akışı sonuçları

Sistem	12-baralı sistem			33- baralı sistem			69- baralı sistem	
Bara No	Geliştirilen	N-R	PFLOW	Geliştirilen	N-R	PFLOW	Geliştirilen	N-R, PFLOW
2	0.99719	0.99719	0.99720	0.99831	0.99831	0.99833	0.99997	Yakınsama problemi oluştuğundan çözüm elde edilememiştir.
3	0.99498	0.99498	0.99502	0.99107	0.99105	0.99109	0.99994	
4	0.99199	0.99199	0.99203	0.98864	0.98864	0.98867	0.99987	
5	0.98951	0.98951	0.98954	0.98651	0.98652	0.98655	0.99926	
6	0.98905	0.98905	0.98908	0.98042	0.98042	0.98044	0.99305	
7	0.98885	0.98885	0.98888	0.98110	0.98109	0.98111	0.98660	
8	0.99083	0.99083	0.99085	0.99178	0.99178	0.99178	0.98507	
9	0.99608	0.99608	0.99609	1.00000	1.00000	1.00000	0.98430	
10	1.00000	1.00000	1.00000	0.99457	0.99458	0.99458	0.98501	
11	0.99915	0.99915	0.99915	0.99377	0.99377	0.99377	0.98522	
12	0.99895	0.99895	0.99896	0.99237	0.99237	0.99237	0.98700	
13				0.98667	0.98667	0.98667	0.99121	
14				0.98455	0.98455	0.98455	0.99554	
15				0.98323	0.98324	0.98324	1.00000	
16				0.98196	0.98196	0.98196	0.99949	
17				0.98007	0.98007	0.98007	0.99864	
18				0.97950	0.97951	0.97951	0.99863	
19				0.99778	0.99778	0.99780	0.99819	
20				0.99421	0.99421	0.99423	0.99790	
21				0.99351	0.99351	0.99353	0.99744	
22				0.99287	0.99287	0.99288	0.99743	
23				0.98750	0.98750	0.98753	0.99736	
24				0.98089	0.98089	0.98092	0.99721	
25				0.97759	0.97759	0.97762	0.99705	
26				0.97851	0.97855	0.97857	0.99698	
27				0.97603	0.97608	0.97610	0.99697	
28				0.96498	0.96501	0.96503	0.99994	
29				0.95704	0.95707	0.95709	0.99987	
30				0.95360	0.95363	0.95366	0.99974	
31				0.94958	0.94961	0.94964	0.99972	
32				0.94870	0.94872	0.94877	0.99962	
33				0.94842	0.94845	0.94850	0.99936	
34							0.99902	
35							0.99896	
36							0.99993	
37							0.99976	
38							0.99960	
39							0.99955	
40							0.99955	
41							0.99885	
42							0.99856	
43							0.99852	
44							0.99852	
45							0.99842	
46							0.99842	
47							0.99982	
48							0.99857	
49							0.99473	
50							0.99418	
51							0.98503	
52							0.98502	
53							0.98153	
54							0.97831	
55							0.97388	
56							0.96954	
57							0.94724	
58							0.93627	
59							0.93203	
60							0.92704	
61							0.91970	
62							0.91942	
63							0.91903	
64							0.91715	
65							0.91658	
66							0.98516	
67							0.98516	
68							0.98668	
69							0.98668	

Tablo 5.6. YEÜ birimlerinin PV-bara ve PQ-bara olarak modellenmesi durumunda farklı sistemler için sweep-temelli algoritmaların iterasyon sayıları

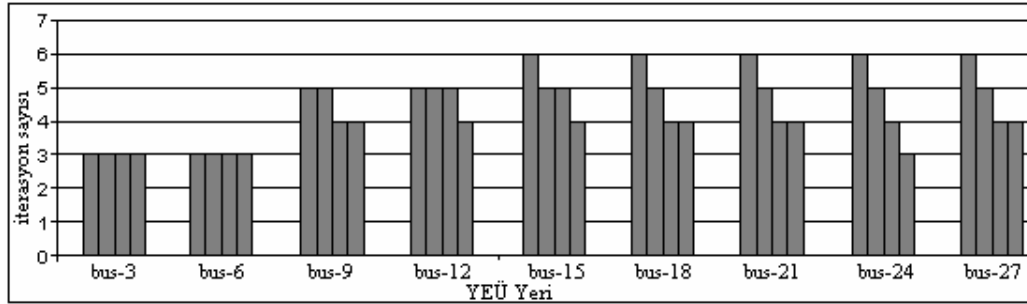
Algoritma türü	Sistem	12-baralı		33-baralı		69-baralı	
	YEÜ aktif gücü (% Toplam yük gücü)	45% bus-10		40% bus-9		25% bus-15	
	Bara Tipi	PQ-bara	PV-bara	PQ-bara	PV-bara	PQ-bara	PV-bara
KVL temelli sweep algoritmalar	Ranjan [26]	3	5	4	5	4	5
	Mok [28]	3	5	4	6	4	5
	Thukaram [29]	3	5	4	5	4	5
	Kersting [30]	3	5	4	5	4	5
	Salama [31]	2	4	4	5	4	5
	Teng [32]	4	6	6	7	6	7
Kuadratik denklem temelli sweep algoritmalar	Cespedes [35]	3	5	4	6	4	5
	Haque [36]	2	4	3	4	3	3
	Ranjan [40]	3	5	4	6	4	5
	Baran [43]	3	5	3	4	3	3
	Luo [46]	2	4	3	4	3	3
	Rajicic [47]	2	4	3	4	4	4
Geleneksel algoritmalar	Yeni Geliştirilen	2	4	3	4	3	4
	N-R	4	3	4	4	-	-
	G-S	358	473	921	824	-	-
	PFLOW	3	3	4	4	-	-

Son olarak 69-baralı sistemde farklı aktif güç değerli YEÜ biriminin farklı baralara yerleştirilmesi durumu için güç akışı analizi geliştirilen algoritma ve diğer sweep-temelli algoritmalar ile yapılarak, bu birimlerin farklı yer ve büyüklüklerinin algoritmaların performansına etkisi analiz edilmiştir. Yapılan güç akışı analizleri sonucunda yeni geliştirilen algoritmanın ve diğer sweep-temelli algoritmaların iterasyon sayısının değişimi Şekil 5.11’de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere;

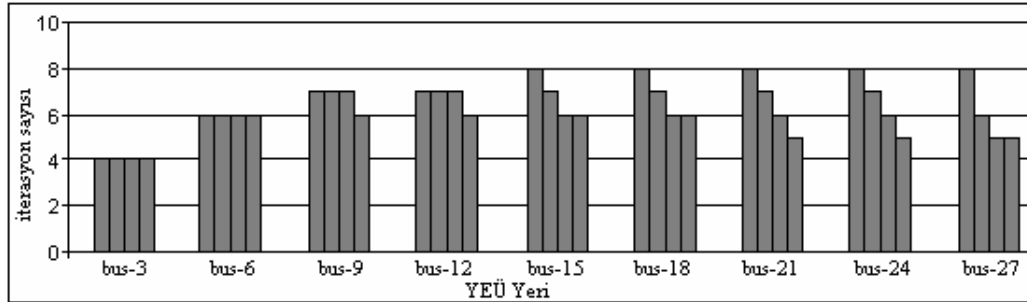
- YEÜ biriminin aktif güç değeri arttıkça algoritmaların iterasyon sayısının ve yerinin algoritmaların iterasyon sayısı üzerindeki etkisinin azaldığı, algoritmaların performansının YEÜ biriminin yerinden çok az etkilendiği görülmektedir.
- YEÜ biriminin küçük aktif güç değerleri için yeri kaynaktan uzaklaştıkça iterasyon sayısının arttığı görülmektedir.

Sonuç olarak YEÜ biriminin PV-bara olarak modellenmesinde bu birimin yeri ve aktif güç değeri her ne kadar algoritmaların performansını etkilese de bu etki çok küçük değerlidir. Performansı diğer algoritmalara nazaran daha zayıf olan KVL

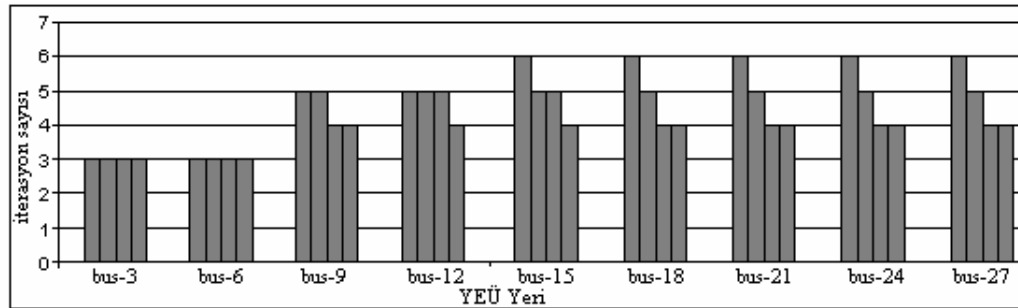
temelli algoritmada dahi azami iterasyon sayısı 8 olup bu 1 fider ve 7 alt-fiderden oluşan 69-baralı sistem için küçük bir değerdir.



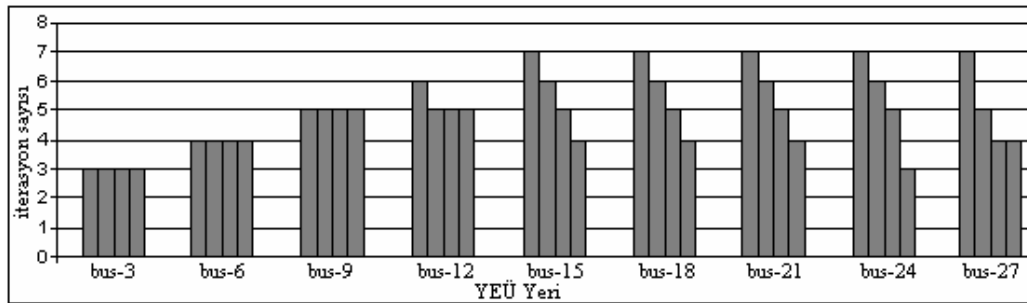
Şekil 5.11.(a) Geliştirilen algoritmaya ait iterasyon sayısı



Şekil 5.11.(b) KVL temelli algoritmaya ait iterasyon sayısı[31]



Şekil 5.11.(c) Hattın güç denklemleri ile geliştirilen algoritmanın iterasyon sayısı [43]



Şekil 5.11.(d) Geliştirilmiş kuadratik denklemlili algoritmaya ait iterasyon sayısı [46]

Şekil 5.11. Farklı aktif güçteki YEÜ biriminin sistemde farklı baraya yerleştirilerek geriliminin 1.0 pu. değerinde kontrol edilmesi durumunda farklı sweep temelli algoritmaların ve geliştirilen yeni algoritmanın iterasyon sayısının değişimi ($P_{YEÜ} = \%5-10-15-20 \times$ Sistemin Toplam Aktif Yüğü)

5.3.2. Gerilim Bağımlı Yüklerin Güç Akışına Dahil Edilmesi

Güç sistemlerinde farklı güç modellerinin sistem geriliminde farklılıklara neden olduğu bilinmekte olup farklı yük modelleri için güç akışı analizi literatürde bazı çalışmalarda incelenmiştir [31, 36]. Yükün aktif ve reaktif gücü, gerilim ve/veya zamanın bir fonksiyonu olarak ifadesinde statik ve dinamik yük kavramları kullanılmaktadır. Elektriksel güç sistemlerinde güç akış analizleri için statik yük modelleri geniş olarak kullanılmaktadır. Kullanılan yüklerin büyük bir çoğunluğu eksponansiyel karakteristiğe sahip olup aktif ve reaktif güç gerilimin üssel bir fonksiyonu olarak modellenmektedir. Bu bölümde statik yük modellerinden sabit güç, sabit akım ve sabit empedans yük modelleri kullanılarak 12-baralı test sistemi için güç akışı yapılmıştır. Her bir yük modeli için sweep-temelli güç akışı algoritmaları ile elde edilen gerilim büyüklükleri Tablo 5.7’de verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere sistem bara gerilimleri büyük oranda uyuşmakta olup aralarındaki fark ihmal edilebilir derecede küçük değerlidir. Ayrıca yükün gerilim bağımlılığı arttıkça gerilim seviyesi yükselmektedir. Yapılan analizlerden, radyal dağıtım sistemleri için geliştirilen sweep-temelli güç akışı algoritmalarında YEÜ birimleri ve/veya gerilim kontrolü amacıyla kullanılan aktif kompanzatorlerin güç akışında PV-bara olarak modellemek amacıyla verilen metodun farklı yapıda ve büyüklükteki sistemlerin yanı sıra farklı yük modelleri için de geçerli olduğu, tam ve gerçekçi bir güç akışı analizine imkan sağladığını söylemek mümkündür.

Tablo 5.7 Farklı yük modelleri için 12-baralı sistemin gerilim büyüklükleri

Bara	Sabit Güç Yük Modeli				Sabit Akım Yük Modeli				Sabit Empedans Yük Modeli			
	Y. metot	[29]	[30]	[31]	Y. metot	[29]	[30]	[31]	Y. metot	[29]	[30]	[31]
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
2	0.9979	0.9979	0.9979	0.9979	0.9986	0.9985	0.9986	0.9986	0.9988	0.9988	0.9988	0.9988
3	0.9965	0.9965	0.9965	0.9965	0.9976	0.9976	0.9976	0.9976	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980
4	0.9949	0.9949	0.9949	0.9949	0.9966	0.9965	0.9966	0.9966	0.9971	0.9971	0.9971	0.9971
5	0.9945	0.9945	0.9945	0.9945	0.9961	0.9960	0.9961	0.9961	0.9966	0.9965	0.9966	0.9966
6	0.9948	0.9948	0.9948	0.9948	0.9961	0.9960	0.9961	0.9961	0.9965	0.9965	0.9965	0.9965
7	0.9952	0.9953	0.9953	0.9953	0.9962	0.9962	0.9962	0.9962	0.9966	0.9966	0.9966	0.9966
8	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
9	0.9923	0.9923	0.9923	0.9923	0.9973	0.9972	0.9973	0.9973	0.9982	0.9981	0.9982	0.9982
10	0.9897	0.9896	0.9896	0.9896	0.9965	0.9963	0.9965	0.9965	0.9976	0.9975	0.9976	0.9976
11	0.9888	0.9888	0.9888	0.9888	0.9962	0.9961	0.9962	0.9962	0.9974	0.9973	0.9974	0.9974
12	0.9886	0.9886	0.9886	0.9886	0.9961	0.9960	0.9961	0.9961	0.9974	0.9973	0.9974	0.9974

5.4. Sonuç

Çalışmanın bu bölümünde yeni bir sweep-temelli güç akışı algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma farklı radyal dağıtım sistemlerine uygulanarak sınanmıştır. Sonuçlar geliştirilen algoritmanın güvenilir olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda geliştirilen algoritmanın performansı sistemlerin farklı yüklenme durumu, hatlarda farklı R/X oranları, farklı statik yük modelleri ve farklı tolerans (hata) değerleri için diğer algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen algoritmanın performansının diğer algoritmalara nazaran sistem parametrelerinden daha az etkilendiğini, daha düşük adımda sonuca ulaştığını göstermektedir.

YEÜ Birimleri ve/veya gerilim kontrolü amacıyla kullanılan aktif kompanzatörlerin tam ve gerçekçi güç akışı analizi için gerilim kontrollü bara (PV-bara) olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ayrıca dengeli radyal dağıtım sistemlerinde güç akışı analizi için kullanılan sweep-temelli güç akışı algoritmalarında PV-bara'nın modellenmesine ilişkin yeni bir metot verilmiştir. Geliştirilen metot farklı algoritmalar üzerinde farklı dağıtım sistemleri için test edilerek sonuçlar geleneksel güç akışı algoritmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen bütün sonuçlar verilen metodun güvenilir olduğunu ve dağıtım sistemlerinde gerçekçi güç akışı analizinin yapılabilmesine olanak sağladığını göstermiştir. Ayrıca geliştirilen PV-bara modelleme metodunu farklı gerilim bağımlı statik yük modelleri içinde uygulanarak sonuçlar sınanmıştır. Yapılan analizlerde geliştirilen PV-bara modelleme metodunu algoritmaların performansını çok az etkilediğini, iterasyon sayılarında çok küçük değerli artışa neden olduğu görülmüştür.

6. DENGESİZ DAĞITIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR GÜÇ AKIŞI ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ

6.1. Giriş

Dengesiz dağıtım sistemlerinde hatlarda fazlar arasında çaprazlama yapılmaması nedeniyle dengesiz hat empedansı, fazların farklı yükleri beslemesi ve tek veya iki fazlı hatlarla elektrik enerjisinin dağıtılması nedenleriyle dengesiz yüklenme gibi durumlar, bu sistemlerde güç akışı analizini zorlaştırmaktadır. Bunun için geliştirilen güç akışı algoritmaları detaylı olarak 2. bölümde verilmiştir. Bu bölümde daha önce dengeli dağıtım sistemleri için geliştirilen güç akışı algoritması dengesiz dağıtım sistemleri için geliştirilmekte ve farklı sistemler üzerinde farklı sweep-temelli algoritmalar ile karşılaştırılarak performansı ve güvenilirliği sınanmaktadır. Ayrıca üç fazlı transformatörler, gerilim regülatörleri, yerel enerji üretim birimleri ve/veya gerilim kontrolörleri için yeni modeller geliştirilerek algoritmaya dahil edilmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

6.2. Dengesiz Dağıtım Sistemleri İçin Geniş Olarak Kullanılan Algoritmalar

Dağıtım sistemlerinde gücün kaynaktan sona doğru tek yönlü olarak akması nedeniyle ileri ve/veya geri yönde gerilim hesabı ile güç akışının yapılmasına olanak sağlamaktadır. İkinci bölümde verilen sweep-temelli algoritmalarından Forward-Backward Substitution Method [29], Ladder Network Theory [30], Ratio-Flow [31] ve Network Topology Based Algorithm [32] metotları yapı olarak basit olmaları ve hızlı yakınsama özelliğine sahip olmaları nedeniyle dengesiz dağıtım sistemlerinde güç akışı analizi için geniş olarak kullanılmaktadır [75]. Bu bölümde geliştirilen yeni algoritmanın güvenilirliği bu algoritmalar ile elde edilen sonuçlardan yararlanılarak test edilecektir.

6.3. Dengesiz Dağıtım Sistemleri İçin Yeni Bir Güç Akışı Algoritmasının Geliştirilmesi

Dağıtım sistemleri genel olarak ağaç şekline sahip olup fiderler ve bunlara bağlı alt fiderlerden oluşmakta ve bölgesel olarak farklı özellikler göstermektedir. Burada amaç bütün bu farklı özellikleri dahil ederek dengeli ve dengesiz dengesiz dağıtım sistemleri için güvenilir, performansı sistem yapısından çok az etkilenen yeni bir güç akışı algoritması geliştirmektir. Şekil 6.1’de verilen dengesiz bir iletim hattı için aktif ve reaktif güç ifadelerinin türetimi Ek-II bölümünde Denklem (2.1.14)’de verilmektedir. Elde edilen bu denklem 5. Bölümde dengeli sistemlerde olduğu gibi kuadratik forma dönüştürülememektedir. Bunun nedeni ise matriste fazlar arasındaki ortak empedanslardan dolayı oluşan bileşenlerdir. Denklemin Kuadratik forma dönüştürülemeden doğrudan çözülerek hat sonu barasına ait gerilimlerin hesaplanabilmesi mümkündür. Fakat bu 6 adet 6 bilinmeyenli lineer olmayan denklemin dağıtım sisteminde her bir hat için çözümü güç akışı analizini zorlaştırmakta ve hesaplama süresinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenlerle elde edilen denklem sisteminde fazlar arası ortak empedansların ihmal edilmesi durumunda kuadratik denklem sisteminin oluşturulması mümkündür. Böylece denklem sistemi her bir faz için birbirinden bağımsız kuadratik denklemlerden oluşmaktadır. Bu denklemler ise 5. Bölümde dengeli sistemlerde elde edilen kuadratik denklemin her bir faz için yazılması sonucunda oluşturularak Denklem (6.1)’de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_{ra}^4 + 2V_{ra}^2(P_a R_a + Q_a X_a) - V_{sa}^2 V_{ra}^2 + (P_a^2 + Q_a^2)Z_a^2 \\ V_{rb}^4 + 2V_{rb}^2(P_b R_b + Q_b X_b) - V_{sb}^2 V_{rb}^2 + (P_b^2 + Q_b^2)Z_b^2 \\ V_{rc}^4 + 2V_{rc}^2(P_c R_c + Q_c X_c) - V_{sc}^2 V_{rc}^2 + (P_c^2 + Q_c^2)Z_c^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

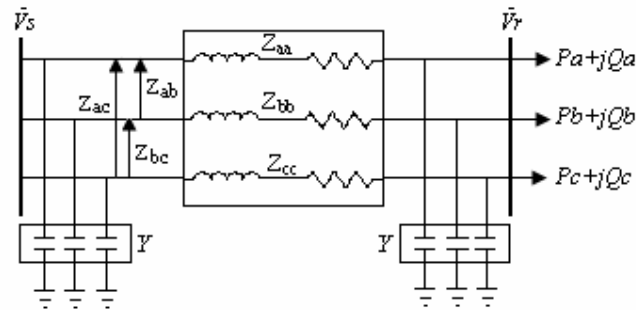
Elde edilen denklem sisteminde 4. dereceden polinomlarının en büyük reel kökü bize iki baralı bir dengesiz sistemde her bir faz için hat sonu bara geriliminin yaklaşık olarak büyüklüğünü vermektedir. Denklem (6.1), dağıtım sistemlerinde hat sonu geriliminin gerçek değerine çok yakın bir çözüm vereceğinden bu denklemin geliştirilen algoritmada her bir hat için ileri yönde gerilim hesabında kullanılması algoritmanın hızını arttıracaktır. Şekil 6.1’de verilen herhangi bir n numaralı dağıtım

hattı için hat sonu ve hat başı gerilimi Kirchhoff Gerilim Kanunu uygulanarak aşağıdaki şekilde hesaplanması mümkündür.

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_n^{aa} & Z_n^{ab} & Z_n^{ac} \\ Z_n^{ba} & Z_n^{bb} & Z_n^{bc} \\ Z_n^{ca} & Z_n^{cb} & Z_n^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n^a \\ I_n^b \\ I_n^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_n^{aa} & 0 & 0 \\ 0 & Y_n^{bb} & 0 \\ 0 & 0 & Y_n^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad (6.2.a)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_n^{aa} & Z_n^{ab} & Z_n^{ac} \\ Z_n^{ba} & Z_n^{bb} & Z_n^{bc} \\ Z_n^{ca} & Z_n^{cb} & Z_n^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_n^a \\ I_n^b \\ I_n^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_n^{aa} & 0 & 0 \\ 0 & Y_n^{bb} & 0 \\ 0 & 0 & Y_n^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad (6.2.b)$$

Burada, V_s ve V_r sırasıyla hat başı ve hat sonu gerilim vektörü, Z_n hattın empedans matrisi, I_n yük akımı vektörü ve Y_n hattın paralel kapasitörlerinden oluşan admitans matrisidir. Radyal dağıtım sistemlerinde verilen bu gerilim ifadeleri kullanılarak ileri ve geri yönde bara gerilimleri hesaplanabilir. Geliştirilen algoritmanın daha kolay anlaşılması açısından N baralı bir feeder için adım adım uygulaması aşağıda ve akış diyagramı ise Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.1. Dengesiz dağıtım hattı devre şeması

Algoritma:

Adım 1 İterasyon sayıcısı başlat ($i=1$), sistemdeki bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle (genellikle gerilim değeri için kaynak gerilimi kullanılmaktadır).

Adım 2 Denklem 6.1'i sistemde her bir hat için kullanarak kaynaktan sona doğru ileri yönde hat sonu gerilimlerini hesapla. Bu durumda her bir faz için hat sonu aktif ve reaktif güçlerini o hattın beslediği bütün yüklerin aktif ve reaktif güçlerini ve hatların paralel kapasitanslarının çekmiş olduğu reaktif güçleri toplayarak belirle. Eğer sistemde transformatör var ise transformatör primer ve sekonder tarafındaki toplam gücü gerilim ve akımlarını kullanarak hesapla.

$$P_i = \sum_{k=i+1}^n P_k + \sum_{k=i}^{n-1} P_{loss_k} \quad (6.3.a)$$

$$Q_i = \sum_{k=i+1}^n Q_k + \sum_{k=i}^{n-1} Q_{loss_k} \quad (6.3.b)$$

Adım 3 Eğer yükler gerilim bağımlı ise hesaplanan yeni gerilimleri kullanarak yüklerin aktif ve reaktif güçlerini ve bu gerilim ve güçleri kullanarak yük akımlarını hesapla.

Adım 4 Denklem (6.2.b)'yi kullanarak sondan başa doğru yeni bara gerilimlerini (V_k^{yeni}) ve yeni kaynak gerilimini (V_s^{yeni}) hesapla. Bu durumda hat akımı için o hattan akan bütün yük akımlarının toplamını kullan.

Adım 5 Kaynak gerilimini gerçek değerine çekmek için gerilim oranını ve bu oranı kullanarak yeni bara gerilimlerini ayarla;

$$V_{s_r} = \frac{V_s^{yeni}}{V_s} \quad (6.4.a)$$

$$V_k^{Ayar} = \frac{V_k^{yeni}}{V_{s_r}} \quad (6.4.b)$$

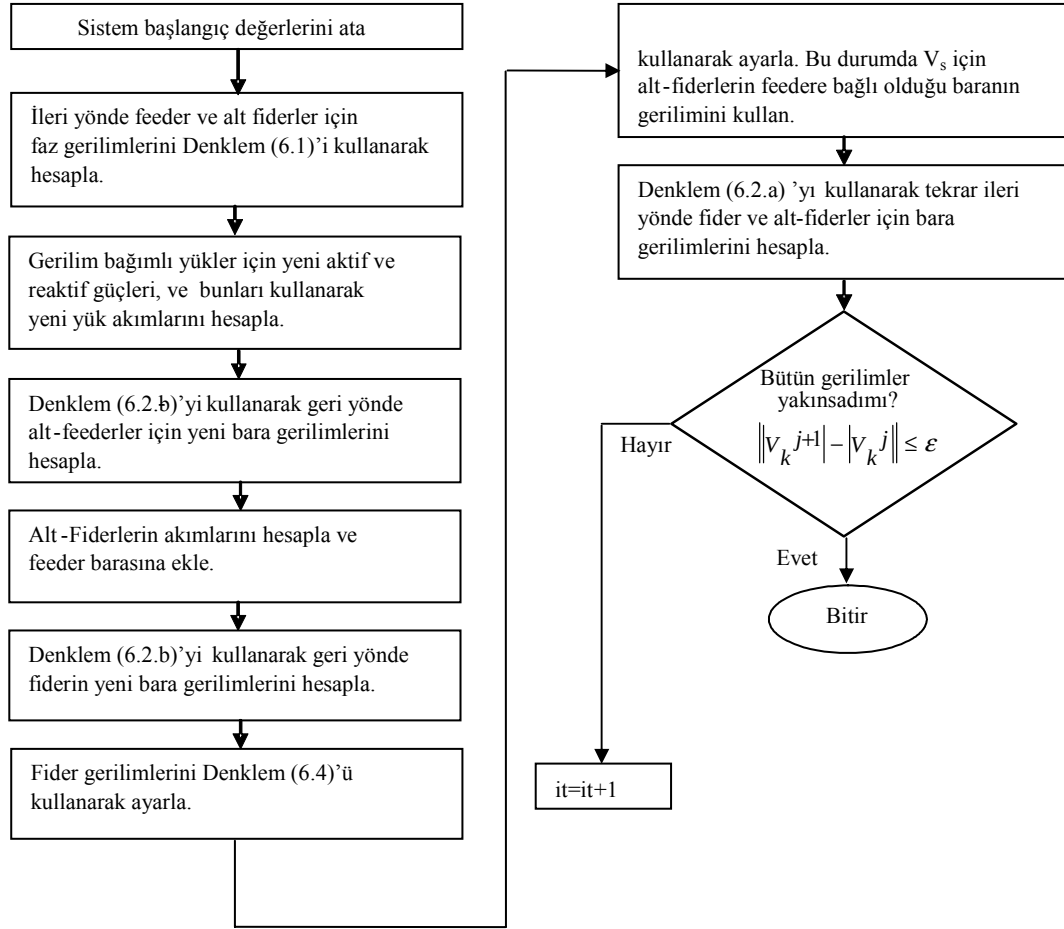
Adım 6 Eğer yükler gerilim bağımlı ise hesaplanan yeni gerilimleri kullanarak yüklerin aktif ve reaktif güçlerini ve bu gerilim ve güçleri kullanarak yük akımlarını hesapla.

Adım 7 Kaynaktan başlayarak sona doğru her bir hat için Denklem (6.2.a)'yı kullanarak bara gerilimlerini hesapla ve hat akımı için o hattan akan bütün yük akımlarının toplamını kullan.

Adım 8 Hesaplanan gerilimler ve bir önceki gerilimleri kullanarak Denklem 6.5 ile hatayı belirle, eğer en büyük hata değeri seçilen hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır değilse iterasyon sayısını bir arttır ve 2. adımdan devam et.

$$\left\| V_k^{j+1} - V_k^j \right\| \leq \varepsilon \quad (6.5)$$

Algoritmayı sistemde alt-fiderlerin (dallanmaların) olması durumunda genişleterek güç akışının yapılması mümkündür. Bu durumda 4. adımda fider için geri yönde gerilim hesabı yapılmadan önce her bir alt fider için geri yönde gerilim hesabı 4. adımda verildiği gibi alt fiderler içinde yapılarak bunların yeni gerilimleri ve toplam akımları belirlenip bu akımlar fider için geri yönde gerilim hesabında kullanılmalıdır. Buna ek olarak 5. adımda fider üzerindeki bara gerilimleri ayarlandıktan sonra her bir alt fiderin bağlı olduğu fider barasının yeni gerilimi ve alt fider için geri yönde gerilim hesabı yapılarak bulunan yeni gerilimler Denklem (6.4)'de verildiği gibi alt-fider gerilimleri de belirlenen gerilim oranı ile ayarlanmalıdır.



Şekil 6.2. Geliştirilen yeni algoritma için akış diyagramı

6.4. Dağıtım Sistemleri Elemanlarının Algoritma İçerisinde Modellenmesi

6.4.1. Elektriksel Yüklerin Modellenmesi

Güç sistemlerinde kullanılan yüklerin büyük bir çoğunluğu exponansiyel karakteristiğe sahip olup aktif ve reaktif güç gerilimin üssel bir fonksiyonu olarak değiştiğinden güç akışı analizinde daha önce Bölüm 4’de verilen statik yük modeli kullanılmıştır.

6.4.2. Kompanzasyon Elemanlarının Modellenmesi

Algoritmada kompanzasyon elemanları olarak paralel kondansatörler, sabit bir empedans olarak modellenmiş ve her bir adımda bağlı oldukları baranın yeni gerilimleri ile çektiği reaktif güç hesaplanarak o baranın reaktif gücüne dahil edilmiştir.

6.4.3. Gerilim Regülatörlerinin Modellenmesi

Dağıtım sistemlerinde fider gerilimleri sistemin büyüklüğüne ve yüklenme durumuna bağlı olarak gerilim regülatörü ile gerilim ayarı yapılmakta ve gerilim seviyesi belirli limitler arasında tutulmaktadır. Genel olarak gerilim ayarı için üst ve alt limit kaynak geriliminin $\pm \%10$ 'u olarak seçilmektedir. Üç fazlı regülatörler seri empedans ve buna bağlı kademe ayarlı ideal transformatör olarak modellenmektedir. Regülatörlerin kademe ayarı manüel veya otomatik olarak yapılabilir. Manuel olarak çalıştırılırken seçilen sabit kademe ayarına göre primer ve sekonder gerilimi arasındaki oran belirlenerek gerilim dönüşümü yapılmaktadır. Otomatik modda ise kademe pozisyonu bilinmediğinden güç akışı içerisinde hesaplanan gerilimler göz önünde bulundurularak uygun kademe pozisyonunun belirlenmesi gerekmektedir. Otomatik gerilim regülatörleri algoritmaya aşağıdaki şekilde dahil edilmiştir.

A-İleri yönde gerilim hesabı için;

İleri yönde kademe ayarı referans [24]'de verilen regülatör kademe ayarlama metodundan yararlanılarak aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

A.1 Her bir faz için regülatörün primer gerilimini hesapla.

A.2 Regülatörün sekonder gerilimini (V_s) başlangıç kademe pozisyonuna göre hesapla ve hesaplanan gerilimin, limitler dahilinde olup olmadığını kontrol et;

$$\left|V_s^{\min}\right| \leq \left|V_s\right| \leq \left|V_s^{\max}\right| \quad (6.6)$$

Eğer regülatör sekonder gerilimi üst gerilim limitinden büyük ise sekonder gerilimini üst gerilim seviyesine eşitle ve bunun için gerekli kademe değerini Denklem (6.7)'yi kullanarak hesapla, hesaplanan bu kademe değerine en yakın bir alt kademe pozisyonuna ayarla. Eğer regülatör sekonder gerilimi alt gerilim limitinden küçükse gerilimi alt gerilim seviyesine eşitleyerek gerekli kademe değerini Denklem (6.7)'yi kullanarak hesapla ve hesaplanan bu kademe değerine en yakın bir üst kademe pozisyonuna ayarla. Eğer sekonder gerilimi için hedeflenen gerilim seviyesi var ise (V_s^{set}) çıkış gerilimini bu değerde tutmak için regülatör kademelerini Denklem (6.7) ile belirleyerek kademeyi ayarla.

$$at = \frac{V_s^{set}}{V_p} \quad (6.7.a)$$

$$tk = \frac{at - V_s^{set}}{V_k} \quad (6.7.b)$$

burada at regülatörün gerilim dönüşüm oranı, V_k regülatörün kademe gerilimini, V_p ise regülatör primer gerilimini göstermektedir.

A.3 Ayarlanan tap pozisyonuna göre yeniden regülatör sekonder gerilimini Denklem (6.8)'i kullanarak hesapla ve bu gerilimi kullanarak sistemde ileri yöndeki gerilim hesabına devam et.

$$at_{yeni} = V_s^{set} + tk * V_k \quad (6.8.a)$$

$$V_s = at_{yeni} * V_p \quad (6.8.b)$$

B-Geri yönde gerilim hesabı için;

B.1 Her bir faz için regülatörün yeni sekonder gerilimini (V_s^{yeni}) hesapla.

B.2 Regülatör sekonder gerilim oranını Denklem (6.9-a)'yı kullanarak hesapla ve Denklem (6.9.b)'yi kullanarak sekonder geriliminden itibaren sona doğru bara gerilimlerini ayarla;

$$V_{s_r} = \frac{V_s^{yeni}}{V_s} \quad (6.9.a)$$

$$V_k^{Ayar} = \frac{V_k^{yeni}}{V_{s_r}} \quad (6.9.b)$$

B.3 İleri yönde gerilim hesabında belirlenen kademe oranına (at_{yeni}) göre regülatör primer gerilimini hesapla ve kaynağa doğru geri yönde gerilim hesabına devam et. Bu durumda algoritmada 5. adımda verilen Denklem (6.4) ile gerilim ayarı kaynak geriliminden başlayarak regülatör primer gerilimine kadar uygulanması gerekir. Buna ek olarak eğer sistemde birden fazla gerilim regülatörü varsa Denklem (6.9)'da verilen regülatör gerilim oranı ve ayarı ikinci regülatör için sekonder geriliminden başlayarak feeder sonuna kadar olan bütün baralara, birinci regülatör için ise sekonder geriliminden başlayarak ikinci regülatörün primer gerilimine kadar olan tüm baralara uygulanarak gerilim ayarı yapılmalıdır. Bu durumda 5. adımdaki gerilim ayarı kaynak geriliminden birinci regülatör primer gerilimi aralığı için yapılır. Algoritma için verilen regülatör modellemesi diğer ileri ve geri yönde gerilim hesabı temelli algoritmalar içinde kullanılabilir.

6.4.4. Üç-Fazlı Transformatörlerin Modellenmesi

Dağıtım sistemlerinde geniş olarak kullanılan Yg-Yg, Yg-Δ ve Δ-Yg bağlantılı transformatörlerin ileri ve geri yönde akım gerilim hesabına dayalı algoritmalarda kullanımı için Simetrik bileşenler modeli kullanılmıştır. Simetrik bileşenler modeli ilk kez 1918 yılında Fortescue [85] tarafından dengesiz sistemlerin analizi için geliştirilmiştir. Akım ve gerilim için faz bileşenlerinden simetrik bileşenlere geçiş;

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

Matrisi ile ve bu bileşenler arasındaki ilişki ise

$$U = AU' \text{ ve } I = AI' \quad (6.11)$$

eşitlikleri ile belirlenmektedir. Burada $a = \exp[j\frac{2\pi}{3}]$, U' ve I' ise sırasıyla gerilim ve akımın simetrik bileşenler vektörünü göstermektedir. Sweep-temelli algoritmalara Yg-Yg bağlı transformatörün dahil edilmesi oldukça kolaydır. Bu bağlantı için trafonun indirgenmiş eşdeğer devresi kullanılarak üç adet birbirinden bağımsız seri RL devresi olarak modellenip algoritmalara dahil edilebilir. Diğer geniş olarak kullanılan Yg-Δ ve Δ-Yg trafo bağlantılarının güç akışı algoritmaları için simetrik bileşenler modelinin ileri ve geri yönde akım/gerilim hesaplamalarda kullanımı adım adım olarak aşağıda verilmiştir.

A.1 Yg-Δ bağlı transformatörün geri yönde akım ve gerilim hesaplamalarına dahil edilmesi;

1. Sekonder barasının simetrik bileşenler akımı ve gerilimini (V_s', I_s') Denklem (6.11) ile hesapla.
2. Faz kaydırması yaparak ($V_s' = V_s' * e^{j\frac{\pi}{6}}, I_s' = I_s' * e^{j\frac{\pi}{6}}$) sıfır bileşenleri sıfırla ($V_s^o = 0, I_s^o = 0$).
3. Trafo primer ucunun simetrik bileşenler gerilimini hesapla (V_p') ve Denklem (6.12)'yi kullanarak yeni sıfır bileşen akımını (I_p^o) hesapla.

$$I_p^o = \frac{V_p^o}{Z_o} \quad (6.12)$$

4. Primer ucu faz akımlarını (I_p), I_p^+ ve I_p^- yerine sırasıyla I_s^+ ve I_s^- 'yi kullanarak Denklem (6.11) ile hesapla.

5. Denklem (6.13)'ü kullanarak simetrik bileşen gerilimi (V_p') ve Denklem (6.11)'i kullanarak faz gerilimini (V_p) hesapla. Hesaplanan primer gerilimini kullanarak gerilim ve akım hesabına geri yönde devam et.

$$\begin{bmatrix} V_p^o \\ V_p^+ \\ V_p^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s^o \\ V_s^+ \\ V_s^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p^o \\ I_p^+ \\ I_p^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_p^o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.13)$$

A.2 Yg-Δ bağlı transformatörün ileri yönde akım ve gerilim hesaplamalarına dahil edilmesi;

1. Kaynaktan başlayarak ileri yönde trafo primer tarafına kadar bara gerilimlerini hesapla.

2. Primer barası simetrik bileşenler gerilimini (V_p') hesapla ve sıfır bileşeni sıfırla ($V_p^o = 0$).

3. Denklem (6.14)'ü kullanarak sekonder barası simetrik bileşenler gerilimini hesapla.

$$\begin{bmatrix} V_s^o \\ V_s^+ \\ V_s^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_p^o \\ V_p^+ \\ V_p^- \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s^o \\ I_s^+ \\ I_s^- \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_s^o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.14)$$

4. Faz kaymasını uygula ($V_s' = V_s * e^{-j\frac{\pi}{6}}$) ve V_s sekonder bara gerilimini hesaplayarak ileri yönde gerilim hesabına devam et.

B.1 Δ-Yg bağlı transformatörün geri yönde akım ve gerilim hesaplamalarına dahil edilmesi;

1. Sekonder barasının simetrik bileşenler akımı ve gerilimini (V_s', I_s') Denklem (6.11) ile hesapla.
2. Sıfır bileşen akımını kaydet ($I_s^0 = I_o$) ve faz kaymasını uygulayarak ($I_s' = I_s^0 * e^{-j\frac{\pi}{6}}$) sıfır bileşenleri sıfırla ($V_s^0 = 0, I_s^0 = 0$).
3. Primer ucu faz akımlarını (I_p) I_p^+ ve I_p^- yerine sırasıyla I_s^+ ve I_s^- 'yi kullanarak Denklem (6.11) ile hesapla.
4. Denklem (6.13)'ü kullanarak simetrik bileşen gerilimini (V_p'), daha sonra faz gerilimini (V_p) hesaplayarak geri yönde gerilim hesabına devam et.

B.2 Δ-Yg bağlı transformatörün ileri yönde akım ve gerilim hesaplamalarına dahil edilmesi:

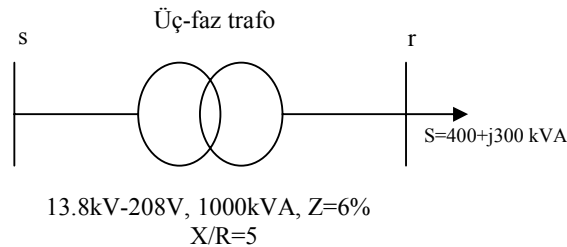
1. Kaynaktan başlayarak ileri yönde trafo primer tarafına kadar bara gerilimlerini hesapla.
2. Primer barası simetrik bileşenler gerilimini (V_p') hesapla ve sıfır bileşeni sıfırla ($V_p^0 = 0$)
3. Denklem (6.15)'i kullanarak sekonder barası simetrik bileşenler gerilimini hesapla.

$$\begin{bmatrix} V_s^0 \\ V_s^+ \\ V_s^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_p^0 \\ V_p^+ \\ V_p^- \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s^0 \\ I_s^+ \\ I_s^- \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_o Z_o \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

4. Faz kaymasını uygula ($V_s' = V_s^0 * e^{j\frac{\pi}{6}}$) ve simetrik bileşenler gerilimini kullanarak V_s' 'yi hesapla. Bu gerilimi kullanarak ileri yönde gerilim hesabına devam et.

6.5. Geliştirilen Trafo Modelleme Metodunun Geçerliliğinin Sınanması

Geliştirilen trafo modelleme metodu Şekil 6.3’de verilen 2-baralı sistem üzerinde sınanmıştır. Bunun için ilk olarak [29]’da geliştirilen ve dengesiz sistemlerde güç akışı analizi için geniş olarak kullanılan algoritma kullanılarak güç akışı yapılmış, sonuçlar 3. Bölümde detayı verilen ve dengesiz sistemlerde geniş olarak kullanılan admitans matris modeli [55] sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İlk olarak $S=400+j300$ kVA lık dengeli yük durumu için Yg- Δ transformatör bağlantısı için güç akışı yapılmış her bir adımda elde edilen gerilim büyüklükleri ve faz açıları sırasıyla Tablo 6.1 ve 6.2’de verilmiştir. Daha sonra dengesiz yük durumu A fazının yükü %50 oranında arttırılıp B fazı %30 ve C fazı ise %20 oranında azaltılarak oluşturulup, Δ -Yg transformatör bağlantısı için güç akışı yapılmış her bir adımda elde edilen gerilim büyüklükleri ve faz açıları sırasıyla Tablo 6.3 ve 6.4’de verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere trafo sargılarının farklı bağlanması durumunda ve farklı yük değerlerinde geliştirilen trafo modelleme metodunun sadece ileri yönde gerilim hesabının yapıldığı [29] algoritma ile elde edilen bara gerilimi ve faz açılarının [55]’de elde edilen sonuçlarla büyük uyum içinde olduğu görülmektedir. Ayrıca sweep-temelli algoritmanın geliştirilen yeni trafo modelleme metodu ile daha çabuk yakınsayarak sonuca ulaştığı görülmektedir. Kullanılan iki baralı test sisteminin yanı sıra transformatör modelleme metodu, geliştirilen yeni güç akışı algoritmasının bölümün ilerleyen kısmında geçerliliğinin sınanması esnasında yeniden değerlendirilmektedir.



Şekil 6.3. İki baralı test sisteminin devre şeması

Tablo 6.1. Yg-Δ bağlantı için hat sonu faz gerilimleri (pu.)

İter. No	Hat sonu gerilimi					
	Faz A		Faz B		Faz C	
	Sweep [29]	Chen [55]	Sweep [29]	Chen [55]	Sweep [29]	Chen [55]
0	1.000000	1.00000	1.000000	1.00000	1.000000	1.00000
1	0.977786	0.99668	0.977786	0.99671	0.977786	0.99672
2	0.976860	0.97590	0.976860	0.97591	0.976860	0.97596
3	0.976838	0.97685	0.976838	0.97684	0.976838	0.97691
4	0.976838	0.97688	0.976838	0.97685	0.976838	0.97680
5	0.976838	0.97680	0.976838	0.97680	0.976838	0.97680

Tablo 6.2. Yg-Δ bağlantı için hat sonu faz gerilimlerinin faz açıları (derece)

İter. No	Hat sonu geriliminin faz açısı					
	Faz A		Faz B		Faz C	
	Sweep [29]	Chen [55]	Sweep [29]	Chen [55]	Sweep [29]	Chen [55]
0	0.000	0.000	-120.000	-120	120.000	120.0
1	-31.176	-32.84	-151.176	-152.84	88.824	87.16
2	-31.176	-31.05	-151.176	-151.04	88.824	88.96
3	-31.177	-31.18	-151.177	-151.19	88.823	88.82
4	-31.177	-31.18	-151.177	-151.17	88.823	88.83
5	-31.177	-31.18	-151.177	-151.18	88.823	88.82

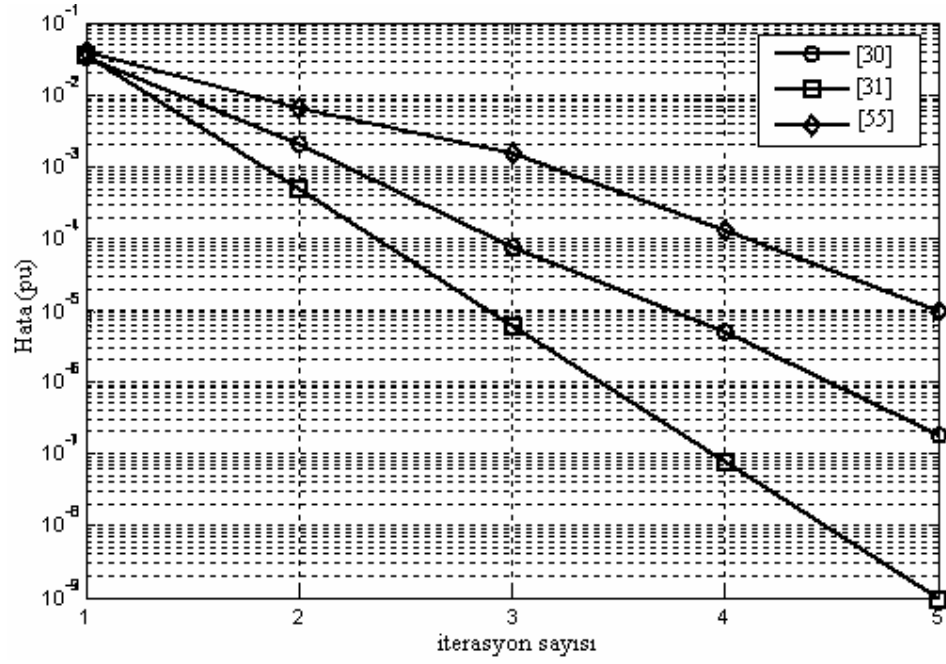
Tablo 6.3. Δ-Yg bağlantı için hat sonu faz gerilimleri (pu.)

İter. No	Hat sonu gerilimi					
	Faz A		Faz B		Faz C	
	Sweep [29]	Chen [55]	Sweep [29]	Chen [55]	Sweep [29]	Chen [55]
0	1.000000	1.00000	1.000000	1.00000	1.000000	1.00000
1	0.966838	0.95950	0.979988	0.97780	0.986621	0.98697
2	0.964732	0.96612	0.979240	0.97990	0.986291	0.98655
3	0.964656	0.96460	0.979225	0.97916	0.986287	0.98621
4	0.964651	0.96473	0.979224	0.97917	0.986286	0.98626
5	0.964651	0.96473	0.979224	0.97917	0.986286	0.98602

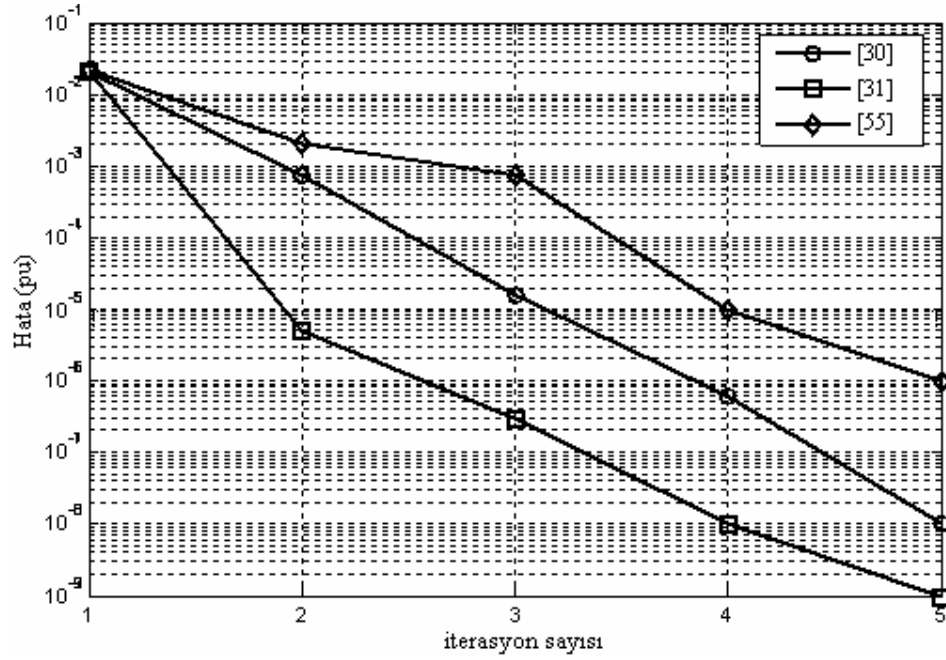
Tablo 6.4. Δ -Yg bağlantı için hat sonu faz gerilimlerinin faz açıları (derece)

İter. No	Hat sonu geriliminin faz açısı					
	Faz A		Faz B		Faz C	
	Sweep [29]	Chen [55]	Sweep [29]	Chen [55]	Sweep [29]	Chen [55]
0	0.0000	0.000	-120.00	-120.0	120.000	120.00
1	28.217	30.60	-91.056	-89.19	149.301	150.91
2	28.217	28.03	-91.056	-91.17	149.301	149.21
3	28.213	28.24	-91.056	-91.05	149.301	149.30
4	28.213	28.21	-91.056	-91.06	149.301	149.30
5	28.213	28.21	-91.056	-91.06	149.301	149.30

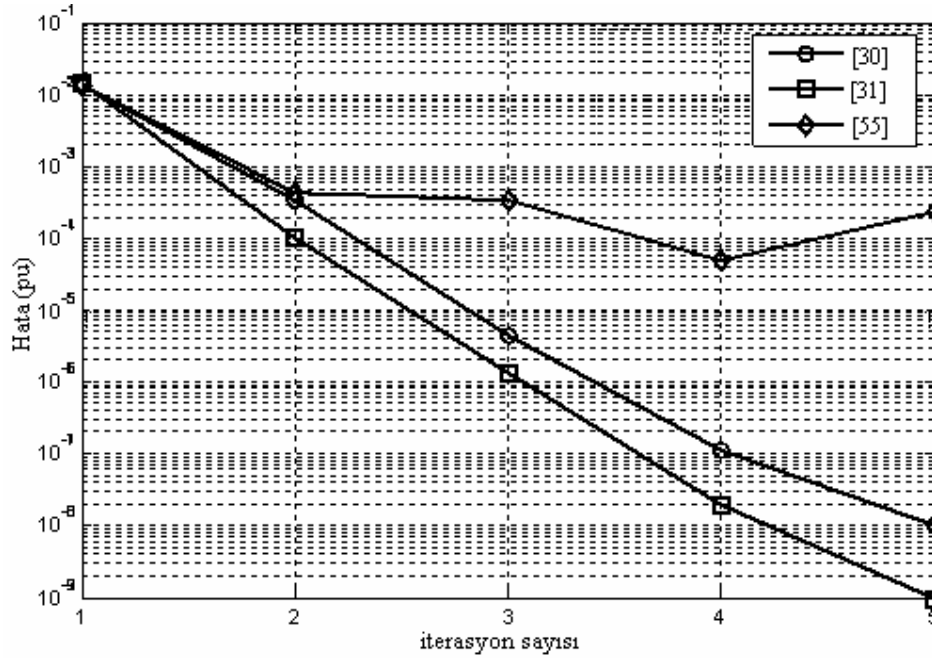
Tek yönlü gerilim hesabının yapıldığı güç akışı algoritmalarının yanı sıra, geliştirilen trafo modelleme metodu farklı sweep-temelli algoritmalarla uygulanarak geçerliliği sınanmıştır. Bunun için ileri ve geri yönde gerilim hesabının yapıldığı [30], ileri ve geri yönde gerilim hesabının yanı sıra bara gerilimlerinin algoritma içinde belirlenen bir katsayı ile her adımda ayarlandığı [31] algoritmalar kullanılarak sistemin dengesiz yüklenmesi durumu için güç akışı analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda yükün her bir fazı için gerilimin bir önceki adımda hesaplanan değeri arasındaki mutlak farkın (gerilim hatasının) iterasyon sayısına göre değişimi logaritmik olarak Şekil 6.4’de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere dengesiz sistemde her iki sweep-temelli algoritma için yükün faz gerilimlerine ait gerilim hata değeri, [55]’de verilen metot ile elde edilen hata değerlerine nazaran daha küçük değerli olup sweep-temelli algoritmalar daha çabuk yakınsamaktadır. Bunun yanı sıra 10^{-4} hata değeri için sweep algoritmalar 3 adımda sonuca ulaşırken [55]’de verilen trafo modelleme metodunun 5. adımında bu hata değerine ulaşamadığı görülmektedir. Ayrıca [31]’de geliştirilen güç akışı algoritmasında gerilim ayarının yapılması nedeniyle [30]’da geliştirilen ve güç akışı analizlerinde geniş olarak kullanılan algoritmadan daha hızlı yakınsadığı hatanın bütün adımlarda daha küçük değerli olduğu görülmektedir.



Şekil 6.4.(a) A fazı için mutlak hata değerinin adım sayısı ile değişimi



Şekil 6.4.(b) B fazı için mutlak hata değerinin adım sayısı ile değişimi



Şekil 6.4.(c) C fazı için mutlak hata değerinin adım sayısı ile değişimi

Şekil 6.4. Farklı algoritmalar kullanılarak dengesiz yüklü trafonun çıkış gerilimi mutlak hata değerinin adım sayısı ile değişimi

6.6. Geliştirilen Yeni Güç Akışı Algoritmasının Güç Sistemlerine Uygulanması

Yeni geliştirilen güç akışı algoritması 25 baralı gerçek bir dağıtım sistemi [26], IEEE 13-bus ve IEEE 34-bus dengesiz test sistemleri üzerinde denenmiştir. Aynı zamanda sonuçları karşılaştırmak ve algoritmanın performansını sınamak için [29-32]'de verilen diğer algoritmalar da kullanılarak güç akışı yapılmıştır. Devre şemaları Ek-II bölümünde Şekil 2.1 ve Şekil 2.2'de verilen 13- ve 34-baralı test sistemlerinin bilgileri bilgiler [87]'den alınmıştır. Güç akışı analizi için bütün yükler yıldız bağlı olarak alınmış, hatların fazlar arası ortak kapasitörleri ihmal edilmiştir. Her bir metot için gerekli iterasyon sayısı Tablo 6.5'de, 34-baralı sistem için güç akışı analizi sonuçları Tablo 6.6 ve Tablo 6.7'de verilmiştir. Kullanılan sistemler için geliştirilen algoritma ile elde edilen güç akışı sonuçlarının diğer algoritmalar ile elde edilen sonuçlar ile uyduğu, bara gerilimleri arasındaki azami farkın ihmal edilebilir

büyüklikte olduğu görülmüştür. Aynı durumun faz açıları içinde geçerli olduğu görülmektedir. Dolayısıyla üç-fazlı dağıtım sistemleri için geliştirilen yeni algoritmanın ve algortmada kullanılan üç-fazlı trafo ve gerilim regülatörü modellerinin geçerli ve güvenilir olduğunu söylemek mümkündür. Diğer taraftan Tablo 6.5’den geliştirilen yeni algoritmanın kullanılan bütün sistemlerde 10^{-5} gerilim hatası değeri için diğer algoritmalarından daha düşük iterasyonda çözüme ulaştığı görülmektedir. Yapılan güç akışı analizlerinden geliştirilen algoritmanın güvenilir ve performansının da diğer algoritmalara nazaran daha iyi olduğunu söylemek mümkündür. Ayrıca geliştirilen algortmada 34-baralı sistem üzerinde logaritmik olarak her bir iterasyon sonrası bara gerilimleri arasındaki azami farkın (hatanın) değişimi Şekil 6.5’de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere geliştirilen algortmada her bir adımdaki azami hata değerinin diğer algoritmalarındaki azami hata değerinden küçük olduğu ve daha düşük iterasyonda gerilimlerin yakınsadığı görülmektedir. Bunların yanı sıra algoritmanın performansı sistem yükünün artması durumu için ayrıca değerlendirilerek, diğer algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Farklı yüklenme durumu her bir bara yükünün λ katsayısı ile çarpılarak oluşturulmuş olup algoritmaların iterasyon sayısının λ ile değişimi Şekil 6.6’da verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere geliştirilen yeni algoritma tüm yüklenme durumları için diğer algoritmalarından daha düşük adımda sonuç vermekte olup performansı yük artışından çok az etkilenmektedir. Diğer taraftan yük artışı ile diğer algoritmaların performansının önemli ölçüde etkilendiği görülmektedir.

Tablo 6.5. Kullanılan test sistemleri için algoritmalara ait iterasyon sayıları

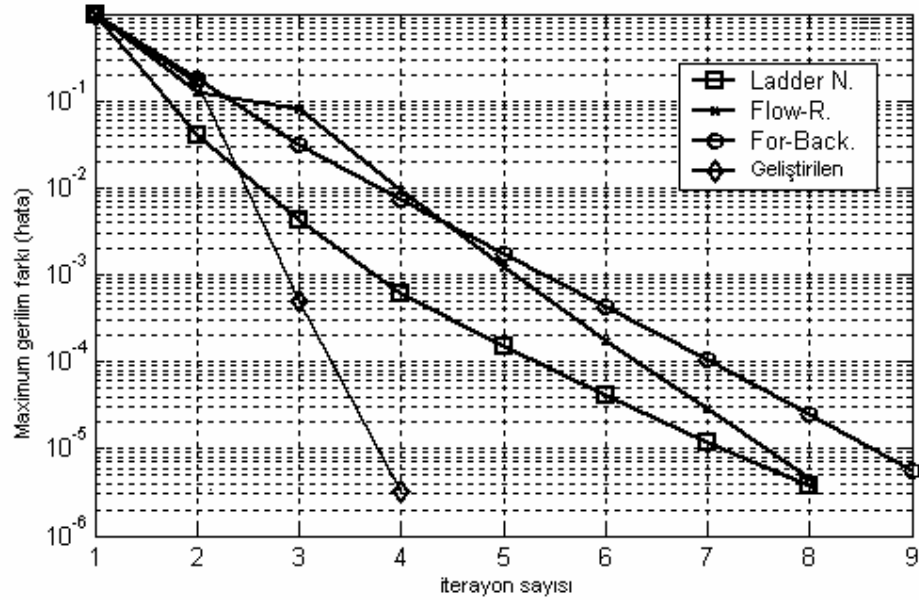
Metotlar	İterasyon sayısı		
	IEEE 13-bara	25-bara [26]	IEEE 34-bara
Geliştirilen	4	3	3
Forward/Backward Sub. [29]	6	4	8
Ladder Network Theory [30]	6	4	7
Ratio-Flow [31]	7	5	7
Network Tophology [32]	6	4	8

Tablo 6.6. 34-baralı sistem için elde edilen bara gerilimleri (pu.)

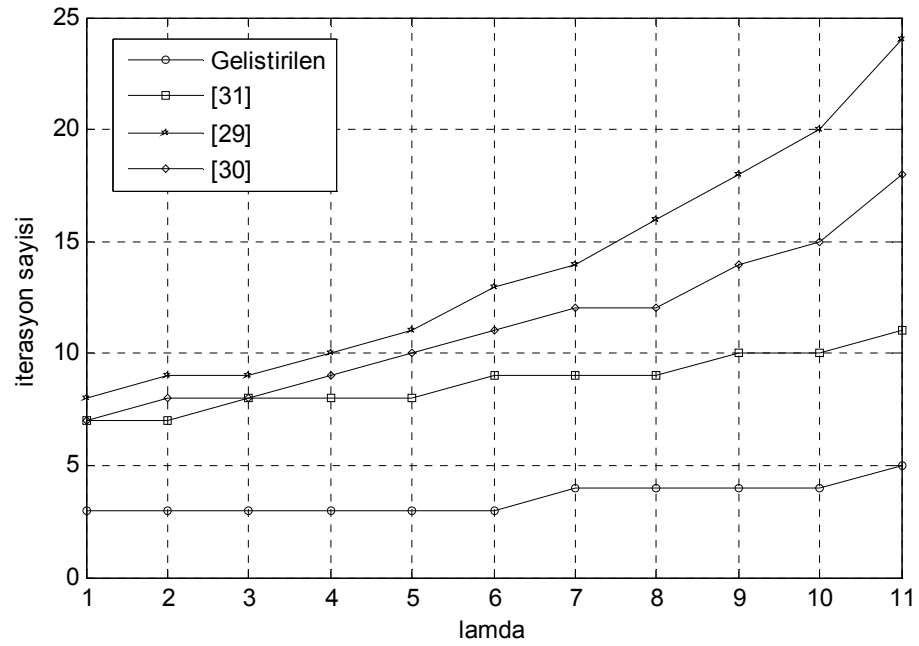
Metot	Yeni Geliştirilen			Forward/Backward Sub. [29]			Ratio-Flow [31]		
Bara No	Faz A	Faz B	Faz C	Faz A	Faz B	Faz C	Faz A	Faz B	Faz C
800	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500
802	1.0482	1.0486	1.0483	1.0482	1.0486	1.0483	1.0482	1.0486	1.0483
806	1.0469	1.0476	1.0471	1.0470	1.0477	1.0471	1.0470	1.0477	1.0471
808	1.0237	1.0316	1.0262	1.0238	1.0317	1.0264	1.0238	1.0317	1.0264
812	0.9966	1.0137	1.0014	0.9968	1.0140	1.0017	0.9968	1.0140	1.0017
814	0.9749	0.9994	0.9816	0.9753	0.9997	0.9820	0.9753	0.9997	0.9820
850	1.0176	1.0256	1.0203	1.0176	1.0255	1.0203	1.0176	1.0255	1.0203
816	1.0173	1.0253	1.0200	1.0173	1.0253	1.0201	1.0173	1.0253	1.0200
824	1.0106	1.0164	1.0105	1.0106	1.0164	1.0105	1.0106	1.0164	1.0105
828	1.0100	1.0158	1.0096	1.0100	1.0158	1.0097	1.0100	1.0158	1.0097
830	0.9965	1.0000	0.9901	0.9966	1.0001	0.9903	0.9966	1.0001	0.9903
854	0.9962	0.9996	0.9897	0.9963	0.9997	0.9898	0.9963	0.9997	0.9898
852	0.9729	0.9716	0.9562	0.9731	0.9718	0.9565	0.9731	0.9718	0.9565
832	1.0360	1.0346	1.0360	1.0359	1.0345	1.0360	1.0359	1.0345	1.0360
858	1.0343	1.0321	1.0330	1.0342	1.0321	1.0330	1.0342	1.0321	1.0330
834	1.0324	1.0293	1.0295	1.0323	1.0293	1.0296	1.0323	1.0293	1.0295
860	1.0321	1.0288	1.0287	1.0321	1.0288	1.0287	1.0321	1.0288	1.0287
836	1.0318	1.0285	1.0284	1.0317	1.0285	1.0285	1.0317	1.0285	1.0285
862	1.0318	1.0284	1.0284	1.0317	1.0284	1.0285	1.0317	1.0284	1.0285
838	-	1.0281	-	-	1.0281	-	-	1.0281	-
810	-	1.0313	-	-	1.0314	-	-	1.0314	-
818	1.0164	-	-	1.0164	-	-	1.0164	-	-
820	0.9905	-	-	0.9905	-	-	0.9904	-	-
822	0.9844	-	-	0.9844	-	-	0.9842	-	-
826	-	1.0160	-	-	1.0160	-	-	1.0160	-
856	-	0.9995	-	-	0.9995	-	-	0.9995	-
888	1.0005	0.9989	1.0003	1.0008	0.9992	1.0007	1.0008	0.9992	1.0007
890	0.9183	0.9245	0.9180	0.9187	0.9250	0.9185	0.9187	0.9250	0.9185
864	1.0343	-	-	1.0342	-	-	1.0342	-	-
842	1.0323	1.0292	1.0294	1.0323	1.0292	1.0295	1.0323	1.0292	1.0295
844	1.0321	1.0289	1.0292	1.0321	1.0289	1.0293	1.0320	1.0289	1.0293
846	1.0323	1.0287	1.0294	1.0323	1.0287	1.0295	1.0323	1.0287	1.0294
848	1.0323	1.0287	1.0294	1.0323	1.0287	1.0295	1.0323	1.0287	1.0295
840	1.0317	1.0284	1.0284	1.0317	1.0284	1.0285	1.0317	1.0284	1.0285

Tablo 6.7. 34-baralı sistem için elde edilen faz açıları (Derece)

Metot	Yeni Geliştirilen			Forward/Backward Sub. [29]			Ratio-Flow [31]		
Bara No	Faz A	Faz B	Faz C	Faz A	Faz B	Faz C	Faz A	Faz B	Faz C
800	0.000	-120.00	120.00	0	-120.00	120.00	0	-120.00	120.00
802	-0.057	-120.05	119.94	-0.058	-120.05	119.94	-0.058	-120.05	119.94
806	-0.095	-120.09	119.91	-0.097	-120.09	119.91	-0.097	-120.09	119.91
808	-0.836	-120.79	119.30	-0.847	-120.80	119.29	-0.847	-120.80	119.29
812	-1.725	-121.57	118.59	-1.748	-121.59	118.56	-1.748	-121.59	118.56
814	-2.438	-122.19	118.02	-2.470	-122.22	117.99	-2.470	-122.22	117.99
850	-2.438	-122.19	118.02	-2.470	-122.22	117.99	-2.471	-122.22	117.99
816	-2.445	-122.20	118.02	-2.477	-122.23	117.98	-2.478	-122.23	117.98
824	-2.607	-122.38	117.80	-2.643	-122.41	117.76	-2.644	-122.41	117.76
828	-2.622	-122.39	117.78	-2.658	-122.43	117.74	-2.659	-122.43	117.74
830	-2.976	-122.73	117.34	-3.019	-122.78	117.29	-3.020	-122.78	117.29
854	-2.985	-122.74	117.33	-3.028	-122.78	117.28	-3.029	-122.78	117.28
852	-3.596	-123.32	116.55	-3.652	-123.39	116.48	-3.652	-123.39	116.48
832	-3.596	-123.32	116.55	-3.652	-123.39	116.48	-3.653	-123.39	116.48
858	-3.675	-123.40	116.45	-3.732	-123.46	116.38	-3.733	-123.46	116.38
834	-3.767	-123.48	116.33	-3.825	-123.55	116.26	-3.826	-123.55	116.26
860	-3.766	-123.48	116.33	-3.824	-123.54	116.26	-3.825	-123.54	116.26
836	-3.764	-123.48	116.33	-3.822	-123.55	116.26	-3.823	-123.55	116.26
862	-3.763	-123.48	116.33	-3.822	-123.55	116.26	-3.822	-123.55	116.26
838	-	-123.48	-	-	-123.55	-	-	-123.55	-
810	-	-120.79	-	-	-120.80	-	-	-120.80	-
818	-2.451	-	-	-2.483	-	-	-2.483	-	-
820	-2.564	-	-	-2.605	-	-	-2.588	-	-
822	-2.575	-	-	-2.618	-	-	-2.596	-	-
826	-	-122.38	-	-	-122.41	-	-	-122.41	-
856	-	-122.75	-	-	-122.80	-	-	-122.80	-
888	-5.139	-124.85	115.02	-5.215	-124.94	114.93	-5.216	-124.94	114.93
890	-5.738	-125.83	114.19	-5.865	-125.97	114.04	-5.866	-125.97	114.04
864	-3.675	-	-	-3.732	-	-	-3.733	-	-
842	-3.772	-123.49	116.33	-3.830	-123.55	116.25	-3.830	-123.55	116.25
844	-3.794	-123.51	116.30	-3.852	-123.58	116.23	-3.853	-123.58	116.23
846	-3.834	-123.56	116.25	-3.892	-123.62	116.18	-3.893	-123.62	116.18
848	-3.840	-123.56	116.25	-3.898	-123.63	116.17	-3.899	-123.63	116.17
840	-3.763	-123.48	116.33	-3.821	-123.55	116.26	-3.822	-123.55	116.26



Şekil 6.5. Azami gerilim farkının (hatanın) iterasyon sayısı ile değişimi



Şekil 6.6. Algoritmaların iterasyon sayısının yüklenme katsayısı (λ) ile değişimi

Son olarak geliştirilen algoritmanın geçerliliği ve güvenilirliğini göstermek amacıyla 12-baralı bir fider için Matlap/simulink ile güç akışı yapılmıştır. Sistem elemanlarının değerleri ve güç akışı sonuçları Tablo 6.8’de verilmiştir. Güç akışı

sonuçlarından, mevcut metotların ve geliştirilen metodun Matlab/Simulink sonuçları ile büyük uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bara gerilimleri arasındaki azami fark 0.00002 pu. olup çok küçük değerlidir. Buna ek olarak algoritmalarından F./B. Substitution [29] ve Ladder Network Theory [30] metotları 4 iterasyonda sonuca ulaşırken, Ratio-Flow [31] metodu ile geliştirilen algoritma 2 iterasyonda sonuca ulaşmıştır.

Tablo 6.8. 12-baralı feederin eleman değerleri ve güç akışı sonuçları

Hat	$Z (\Omega)$	$S=P+jQ$ (MVA)	Yeni metot	Ratio Flow [31]	F./B. Sub. [29]	Ladder N. Th. [30]	Matlap Simulink
1-2	0.1170+j0.048	0.42+j0.26	0.98992	0.98992	0.98992	0.98992	0.98994
2-3	0.1073+0.0440	0.36+j0.23	0.98115	0.98114	0.98114	0.98114	0.98116
3-4	0.1645+0.0457	0.42+j0.26	0.96914	0.96913	0.96913	0.96913	0.96914
4-5	0.1495+0.0415	0.42+j0.26	0.95881	0.95880	0.95880	0.95880	0.95881
5-6	0.1495+0.0415	4.69+j2.90	0.94908	0.94906	0.94906	0.94906	0.94906
6-7	0.3144+0.0540	0.50+j0.32	0.94255	0.94254	0.94254	0.94254	0.94255
7-8	0.2096+0.0360	0.42+j0.26	0.93912	0.93910	0.93910	0.93910	0.93912
8-9	0.3144+0.0540	0.42+j0.26	0.93509	0.93508	0.93508	0.93508	0.93509
9-10	0.2096+0.0360	0.41+j0.25	0.93317	0.93315	0.93315	0.93315	0.93316
10-11	0.1310+0.0225	0.42+j0.26	0.93242	0.93240	0.93240	0.93240	0.93242
11-12	0.1048+0.0225	0.25+j0.15	0.93220	0.93218	0.93218	0.93218	0.93219

6.7. YEÜ Birimleri ve Kompanzatörlerin Dengesiz Sistemlerde Güç Akışı Algoritmalarına Dahil Edilmesi

YEÜ birimleri ve diğer gerilim kontrollü reaktif güç kaynaklarının (aktif kompanzatörler) dağıtım sistemlerinde geniş olarak kullanılması nedeniyle gerçekçi bir güç akışı analizi için bu kaynakların analizlerde PV-bara olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu bölümde YEÜ birimleri ve/veya gerilim kontrolörlerinin sweep-temelli dengesiz sistemler için geliştirilen güç akışı algoritmalarında PV-bara olarak modellenmesi için yeni bir metot verilmektedir. Dengesiz sistemler için geliştirilmiş bütün sweep-temelli güç akışı algoritmalarında YEÜ birimleri ve diğer gerilim

kontrollü reaktif güç kaynakları PV-bara olarak modellenerek gerilimini istenilen seviyede kontrol edilmesi için daha önce Bölüm 5’de dengeli sistemler için verilen metot dengesiz sistemler için geliştirilerek gerekli reaktif güç belirlenmektedir.

6.7.1. Sweep-Temelli Algoritmelerde PV-Bara’nın Gerilim Kontrolü ve Reaktif Gücünün Belirlenmesi

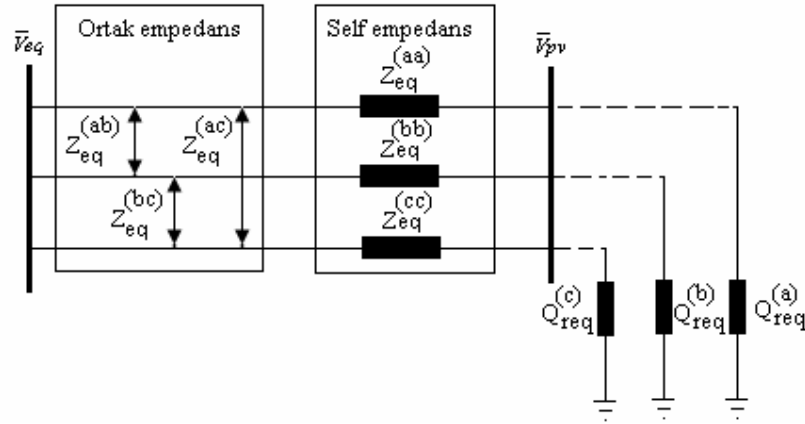
Daha önce Bölüm 5’de dengeli sistemler için verilen PV-bara reaktif gücü her bir fazın reaktif gücünün hesaplanması için kullanılarak belirlenebilir. Bunun için Şekil 6.7’de verilen sistemin PV-bara’dan görülen iki baralı eşdeğer devresinde PV-bara gerilimini (V_{pv}) istenilen değerde (V_{set}) tutmak için gerekli reaktif gücü her bir faz için daha önce dengeli hat için geliştirilen kuadratik denklemi, Denklem (6.16.b), kullanarak hesaplanabilir. Bu durumda her bir faz için kuadratik denklemi uygularken hattın eşdeğer empedans matrisinde ortak empedansları ihmal ederek öz (self) empedansları kullanılmıştır.

$$\begin{bmatrix} |Z_{eq}^{aa}|^2 Q_{reqaa}^2 + 2|V_{set}^{aa}|^2 X_{eq}^{aa} Q_{reqaa} + |V_{set}^{aa}|^4 - |V_{eq}^{aa}|^2 |V_{set}^{aa}|^2 \\ |Z_{eq}^{bb}|^2 Q_{reqbb}^2 + 2|V_{set}^{bb}|^2 X_{eq}^{bb} Q_{reqbb} + |V_{set}^{bb}|^4 - |V_{eq}^{bb}|^2 |V_{set}^{bb}|^2 \\ |Z_{eq}^{cc}|^2 Q_{reqcc}^2 + 2|V_{set}^{cc}|^2 X_{eq}^{cc} Q_{reqcc} + |V_{set}^{cc}|^4 - |V_{eq}^{cc}|^2 |V_{set}^{cc}|^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6.16.a)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{reqaa} \\ Q_{reqbb} \\ Q_{reqcc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-2|V_{set}^{aa}|^2 X_{eq}^{aa} + \sqrt{4|V_{set}^{aa}|^4 (X_{eq}^{aa})^2 + 4|Z_{eq}^{aa}|^2 (|V_{set}^{aa}|^4 - |V_{eq}^{aa}|^2 |V_{set}^{aa}|^2)}}{2|Z_{eq}^{aa}|^2} \\ \frac{-2|V_{set}^{bb}|^2 X_{eq}^{bb} + \sqrt{4|V_{set}^{bb}|^4 (X_{eq}^{bb})^2 + 4|Z_{eq}^{bb}|^2 (|V_{set}^{bb}|^4 - |V_{eq}^{bb}|^2 |V_{set}^{bb}|^2)}}{2|Z_{eq}^{bb}|^2} \\ \frac{-2|V_{set}^{cc}|^2 X_{eq}^{cc} + \sqrt{4|V_{set}^{cc}|^4 (X_{eq}^{cc})^2 + 4|Z_{eq}^{cc}|^2 (|V_{set}^{cc}|^4 - |V_{eq}^{cc}|^2 |V_{set}^{cc}|^2)}}{2|Z_{eq}^{cc}|^2} \end{bmatrix} \quad (6.16.b)$$

Daha sonra ise Denklem 6.17 kullanılarak PV-bara’nın her bir fazına ait toplam gücü hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} Q_{pv}^{aa} \\ Q_{pv}^{bb} \\ Q_{pv}^{aa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{pv}^{aa} \\ Q_{pv}^{bb} \\ Q_{pv}^{aa} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{reqaa} \\ Q_{reqbb} \\ Q_{reqcc} \end{bmatrix} \quad (6.17)$$



Şekil 6.7. Dağıtım sisteminin iki-baralı eşdeğer devre şeması

6.7.2. Geliştirilen PV-Bara Modelleme Metodunun Sweep-Temelli Algoritmelerde Sınanması

Verilen gerilim kontrollü bara modellenmesi metodu farklı sweep-temelli güç akışı algoritmaları ve dengesiz sistemler için geliştirilen güç akışı algoritmasına uygulanarak IEEE-34 baralı test sistemi üzerinde sınanmıştır. 34-baralı sistem için güç akışı sonucunda bara gerilimlerinin büyüklükleri Tablo 6.9-6.11’de geliştirilen yeni metot ve diğer güç akışı metotları için verilmiştir. Güç akışı sonuçları geliştirilen algoritmanın güvenilir olduğunu bütün metotlarla elde edilen sonuçların uyuyuşunu göstermektedir. Tabloda ikinci sütunda verilen bara gerilimleri, gerilim kontrollü bara için güç akışı sonucunda elde edilen reaktif gücün kullanılması durumunda elde edilmiştir. Bu baranın PQ-bara olarak modellenmesi ile elde edilen gerilim büyüklükleri olup gerilim kontrollü bara modellemesinin geçerli ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan her ne kadar sweep-temelli algoritmalara gerilim kontrollü baranın dahil edilmesi durumunda geliştirilen algoritma 9, F./B. Substitution [29] algoritması 10 ve Ladder Network Theory [30] algoritması ise 12

iterasyonda sonuca ulaşırsa da, bu modelleme YEÜ birimli ve/veya gerilim kontrolörlü dengesiz sistemlerde tam olarak güç akışı analizine olanak sağladığı görülmüştür.

Tablo 6.9. Geliştirilen güç akışı algoritması ile elde edilen güç akışı sonuçları

Metot	PV-bara (PV=10, Pa=Pb=Pc=0.5 pu.) (Qa=0.177, Qb=0.110,Qc=0.190 pu.)			PQ-bara (PV=10, Pa=Pb=Pc=-0.5 pu.) (Qa=-0.177, Qb=-0.110,Qc=-0.190 pu.)		
Bara No	Faz A	Faz B	Faz C	Faz A	Faz B	Faz C
800	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500
802	1.0500	1.0499	1.0500	1.0500	1.0499	1.0500
806	1.0500	1.0498	1.0500	1.0500	1.0498	1.0500
808	1.0492	1.0501	1.0505	1.0492	1.0501	1.0505
812	1.0481	1.0510	1.0506	1.0481	1.0510	1.0506
814	1.0470	1.0514	1.0504	1.0470	1.0514	1.0504
850	1.0470	1.0514	1.0504	1.0470	1.0514	1.0504
816	1.0470	1.0514	1.0503	1.0470	1.0514	1.0503
824	1.0497	1.0500	1.0500	1.0497	1.0500	1.0500
828	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500
830	1.0365	1.0344	1.0304	1.0365	1.0344	1.0304
854	1.0362	1.0340	1.0300	1.0362	1.0340	1.0300
852	1.0128	1.0063	0.9966	1.0128	1.0063	0.9966
832	1.0359	1.0346	1.0361	1.0359	1.0346	1.0361
858	1.0342	1.0322	1.0330	1.0342	1.0322	1.0330
834	1.0323	1.0293	1.0295	1.0323	1.0293	1.0295
860	1.0321	1.0289	1.0287	1.0320	1.0289	1.0287
836	1.0317	1.0285	1.0285	1.0317	1.0285	1.0285
862	1.0317	1.0285	1.0285	1.0317	1.0285	1.0285
838	-	1.0282	-	-	1.0282	-
810	-	1.0498	-	-	1.0498	-
818	1.0461	-	-	1.0461	-	-
820	1.0206	-	-	1.0206	-	-
822	1.0147	-	-	1.0147	-	-
826	-	1.0496	-	-	1.0496	-
856	-	1.0338	-	-	1.0338	-
888	1.0007	0.9991	1.0006	1.0007	0.9991	1.0006
890	0.9181	0.9252	0.9183	0.9181	0.9252	0.9183
864	1.0342	1.0322	1.0330	1.0342	1.0322	1.0330
842	1.0323	1.0293	1.0295	1.0323	1.0293	1.0295
844	1.0320	1.0289	1.0293	1.0320	1.0289	1.0293
846	1.0323	1.0288	1.0294	1.0323	1.0288	1.0294
848	1.0323	1.0288	1.0295	1.0323	1.0288	1.0295
840	1.0317	1.0285	1.0285	1.0317	1.0285	1.0285

Tablo 6.10. F/B Sub. [29] algoritması ile elde edilen güç akışı sonuçları

Metot	PV-bara (PV=10, Pa=Pb=Pc=0.5 pu.) (Qa=0.183, Qb=0.111,Qc=0.189 pu.)			PQ-bara (PQ=10, Pa=Pb=Pc=-0.5 pu.) (Qa=-0.183, Qb=-0.111,Qc=-0.189 pu.)		
Bara No	Faz A	Faz B	Faz C	Faz A	Faz B	Faz C
800	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500
802	1.0500	1.0499	1.0500	1.0500	1.0499	1.0500
806	1.0500	1.0498	1.0500	1.0500	1.0498	1.0500
808	1.0492	1.0501	1.0505	1.0492	1.0501	1.0505
812	1.0482	1.0510	1.0506	1.0482	1.0510	1.0506
814	1.0470	1.0514	1.0503	1.0470	1.0514	1.0503
850	1.0470	1.0514	1.0503	1.0470	1.0514	1.0503
816	1.0470	1.0514	1.0503	1.0470	1.0514	1.0503
824	1.0498	1.0500	1.0500	1.0498	1.0500	1.0500
828	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500
830	1.0365	1.0344	1.0305	1.0365	1.0344	1.0305
854	1.0362	1.0340	1.0300	1.0362	1.0340	1.0300
852	1.0128	1.0063	0.9967	1.0128	1.0063	0.9967
832	1.0360	1.0345	1.0360	1.0360	1.0345	1.0360
858	1.0343	1.0321	1.0330	1.0343	1.0321	1.0330
834	1.0324	1.0293	1.0295	1.0324	1.0293	1.0295
860	1.0321	1.0289	1.0287	1.0321	1.0289	1.0287
836	1.0318	1.0285	1.0285	1.0318	1.0285	1.0285
862	1.0318	1.0285	1.0285	1.0318	1.0285	1.0285
838	-	1.0282	-	-	1.0282	-
810	-	1.0498	-	-	1.0498	-
818	1.0461	-	-	1.0461	-	-
820	1.0207	-	-	1.0207	-	-
822	1.0148	-	-	1.0148	-	-
826	-	1.0496	-	-	1.0496	-
856	-	1.0339	-	-	1.0339	-
888	1.0008	0.9992	1.0007	1.0008	0.9992	1.0007
890	0.9183	0.9254	0.9186	0.9183	0.9254	0.9186
864	1.0343	-	-	1.0343	-	-
842	1.0323	1.0292	1.0295	1.0323	1.0292	1.0295
844	1.0321	1.0289	1.0292	1.0321	1.0289	1.0292
846	1.0323	1.0288	1.0294	1.0323	1.0288	1.0294
848	1.0324	1.0288	1.0295	1.0324	1.0288	1.0295
840	1.0317	1.0285	1.0284	1.0317	1.0285	1.0285

Tablo 6.11. Ladder Network Th. [30] algoritması ile elde edilen güç akışı sonuçları

Metot	PV-bara (PV=10, Pa=Pb=Pc=0.5 pu.) (Qa=0.183, Qb=0.111,Qc=0.192 pu.)			PQ-bara (PQ=10, Pa=Pb=Pc=-0.5 pu.) (Qa=-0.183, Qb=-0.111,Qc=-0.192 pu.)		
Bara No	Faz A	Faz B	Faz C	Faz A	Faz B	Faz C
800	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500
802	1.0500	1.0499	1.0500	1.0500	1.0499	1.0500
806	1.0500	1.0498	1.0500	1.0500	1.0498	1.0500
808	1.0492	1.0501	1.0505	1.0492	1.0501	1.0505
812	1.0482	1.0510	1.0506	1.0482	1.0510	1.0506
814	1.0471	1.0514	1.0504	1.0470	1.0514	1.0504
850	1.0471	1.0514	1.0504	1.0470	1.0514	1.0504
816	1.0470	1.0513	1.0503	1.0470	1.0514	1.0503
824	1.0498	1.0500	1.0501	1.0498	1.0500	1.0500
828	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500	1.0500
830	1.0365	1.0344	1.0305	1.0365	1.0344	1.0305
854	1.0362	1.0340	1.0301	1.0362	1.0340	1.0300
852	1.0129	1.0063	0.9968	1.0129	1.0063	0.9968
832	1.0359	1.0345	1.0360	1.0359	1.0345	1.0360
858	1.0342	1.0321	1.0330	1.0342	1.0321	1.0330
834	1.0323	1.0293	1.0295	1.0323	1.0293	1.0295
860	1.0321	1.0288	1.0287	1.0320	1.0288	1.0287
836	1.0317	1.0285	1.0285	1.0317	1.0285	1.0285
862	1.0317	1.0285	1.0285	1.0317	1.0285	1.0285
838	-	1.0281	-	-	1.0282	-
810	-	1.0498	-	-	1.0498	-
818	1.0461	-	-	1.0461	-	-
820	1.0207	-	-	1.0208	-	-
822	1.0148	-	-	1.0149	-	-
826	-	1.0496	-	-	1.0496	-
856	-	1.0339	-	-	1.0339	-
888	1.0008	0.9991	1.0007	1.0008	0.9992	1.0007
890	0.9182	0.9253	0.9186	0.9182	0.9254	0.9186
864	1.0342	-	-	1.0342	-	-
842	1.0323	1.0292	1.0295	1.0323	1.0292	1.0295
844	1.0320	1.0289	1.0293	1.0320	1.0289	1.0293
846	1.0323	1.0288	1.0294	1.0323	1.0288	1.0294
848	1.0323	1.0288	1.0295	1.0323	1.0288	1.0295
840	1.0317	1.0284	1.0285	1.0317	1.0284	1.0285

6.8. Sonuç

Bu bölümde dengesiz dağıtım sistemleri için yeni bir güç akışı algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma farklı dağıtım sistemlerine uygulanarak güvenilirliği ve performansı sınanmıştır. Aynı zamanda bahsedilen dağıtım sistemleri elemanlarından gerilim regülatörleri, üç fazlı trafolar, Yerel Enerji Üretim birimleri ve/veya üç-fazlı gerilim kontrolörleri algoritmada modellenerek bu elemanların

bulunduğu dağıtım sistemlerinde güç akışı analizleri yapılmış ve sonuçlar diğerk algoritmalar ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Sonuçlar geliştirilen algoritmanın yanı sıra gerilim regülatörü, üç fazlı trafo ve YEÜ birimleri için geliştirilen modellerin güvenilir olduğunu göstermiştir. Ayrıca geliştirilen algoritmanın güvenilir olmasının yanı sıra dengesiz dağıtım sistemlerinde geniş olarak kullanılan diğerk algoritmalara nazaran performansının yüksek olduğu görölmüştür. Örneğin IEEE-34 baralı dengesiz dağıtım sistemi için literatürde performansı yüksek olarak nitelendirilen diğerk algoritmalar 7 ve 8 adımda sonuca ulaşırken geliştirilen algoritma ile sonuca 3 adımda ulaşılmaktadır. Dolayısıyla geliştirilen algoritmanın diğerk algoritmalarından daha hızlı yakınsadığını söylemek mümkündür.

7. DAĞITIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR KARARLILIK İNDEKSİNİN GELİŞTİRİLMESİ

7.1. Giriş

Bu bölümde radyal dağıtım sistemleri için yeni bir kararlılık indeksi geliştirilmektedir. Bunun için hat sonu aktif ve reaktif güç ifadelerinden yararlanılmıştır. Geliştirilen kararlılık indeksi ile her bir bara için gerilim kararlılık indeksi hesaplanarak en küçük değere sahip bara en kritik bara yani gerilim çökmesine en yakın bara olarak tayin edilmektedir. Geliştirilen kararlılık indeksi sistemde güç akışı çözümü dışında herhangi bir ekstra iş gerektirmemekle birlikte kolaylıkla dağıtım sistemlerini uygulanabilir niteliktedir. Geliştirilen indeks bir çok dağıtım sistemine uygulanmıştır. Ayrıca sistemlerin farklı yüklenme durumları, farklı gerilim seviyeleri ve farklı statik yük modelleri için indeksin geçerliliği sınanarak sonuçlar diğer kararlılık indeksleri ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmaktadır.

7.2. Dağıtım Sistemleri İçin Yeni Bir Kararlılık İndeksi

Genel olarak dağıtım sistemlerinde kullanılan herhangi bir basit iki-baralı hat modeli Şekil 2.1’de verilmiştir. Hat sonu aktif ve reaktif güçlerinin ifadesinden yararlanarak bu hat için tanımlanan gerilim denkleminde, Denklem (2.10.a), yararlanılarak hat sonu aktif ve reaktif güçleri yeniden

$$P = \frac{-\cos(\theta_z)V_r^2 \pm \sqrt{\cos^2(\theta_z)V_r^4 - V_r^4 - Z^2Q^2 - 2V_r^2QX + V_s^2V_r^2}}{Z} \quad (7.1.a)$$

$$Q = \frac{-\sin(\theta_z)V_r^2 \pm \sqrt{\sin^2(\theta_z)V_r^4 - V_r^4 - Z^2P^2 - 2V_r^2PR + V_s^2V_r^2}}{Z} \quad (7.1.b)$$

şeklinde yazılabilir. Elde edilen aktif ve reaktif güç ifadelerinden açıkça görüleceği üzere güçlerin büyüklüklerinin gerçek sayı olabilmesi için;

$$\cos^2(\theta_z)V_r^4 - V_r^4 - Z^2Q^2 - 2V_r^2QX + V_s^2V_r^2 \geq 0 \quad (7.2.a)$$

$$\sin^2(\theta_z)V_r^4 - V_r^4 - Z^2P^2 - 2V_r^2PR + V_s^2V_r^2 \geq 0 \quad (7.2.b)$$

koşullarını sağlaması gerekir. Denklem (7.2.a) ve (7.2.b)'yi taraf tarafa toplarsak

$$2V_s^2V_r^2 - V_r^4 - 2V_r^2(PR + QX) - Z^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (7.3)$$

eşitsizliği elde edilir. Elde edilen eşitsizliğin sol tarafı aktif ve/veya reaktif güç artışı ile sifıra yaklaşmaktadır. Güç artışına devam edilmesi durumunda ise belli bir değerde ifade sifıra eşit olacaktır. Bu ifadeyi sifır yapan güç değeri sistemin taşıyabileceği gücün azami değeri olup bundan büyük değerli yüklerde sistem kararlılık sınırları dışına çıkacak ve sistemde gerilim çökmesi meydana gelecektir. Dolayısıyla bu ifade radyal dağıtım sistemlerinde bara için kararlılık indeksi olarak;

$$SI(r) = 2V_s^2V_r^2 - V_r^4 - 2V_r^2(PR + QX) - |Z|^2(P^2 + Q^2) \quad (7.4)$$

şeklinde kullanılabilir. Elde edilen indeks ifadesinden görüleceği üzere herhangi bir dağıtım sistemine kolaylıkla uygulanabilir nitelikte olup sistemde her bir hattan transfer edilen güç ve bara gerilimlerini yani güç akışı analizinin dışında hiç bir hesaplama veya uygulama gerektirmemektedir.

7.3. Geliştirilen Kararlılık İndeksinin Dağıtım Sistemlerine Uygulanması

Denklem (7.4)'de verilen indeks ifadesinin sistemdeki bütün hatlara uygulanabilmesi için hatlardan transfer edilen gücün belirlenmesi gerekir. Güç akışı analizi sonucunda sistemdeki bara gerilimleri ve bu baralara bağlı yüklerin çektiği akımlar bilindiğinden hatlardan akan akımlar yük akımları kullanılarak elde edilebilir. Dolayısıyla hattan transfer edilen güç hat sonu gerilimi ve hattan akan toplam akım kullanılarak belirlenebilir. Hatların seri empedansları ve güç akışı

analizi ile bara gerilimleri de bilindiğinden Denklem (7.4)'de yerine konarak sistemdeki her bir baranın kararlılık indeks değeri kolaylıkla hesaplanabilir. Hatlardan akan toplam akım [32]'de verilen güç akışı algoritmasında kullanılan *BIBC* matrisi (Bus Injection to Branch Current) kullanılarak bilgisayar ortamında otomatik olarak oluşturulabilir. Şekil 7.1'de verilen 5 dağıtım hattı ($m=5$) ve 6 baralı ($n=6$) örnek bir dağıtım sistemi için *BIBC* matrisi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (7.5.a)$$

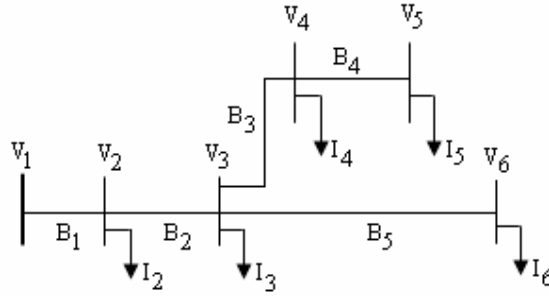
$$[B] = [BIBC][I] \quad (7.5.b)$$

Burada B vektörü her bir hattan akan akımlardan oluşan akım vektörü, I ise yük akımları vektörüdür. Bu durumda hatlardan transfer edilen aktif ve reaktif güç;

$$\begin{bmatrix} P_1 + jQ_1 \\ P_2 + jQ_2 \\ P_3 + jQ_3 \\ P_4 + jQ_4 \\ P_5 + jQ_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_1^* \\ B_2^* \\ B_3^* \\ B_4^* \\ B_5^* \end{bmatrix} \quad (7.6.a)$$

$$[S] = [V][B]^* \quad (7.6.b)$$

ifadesi ile hesaplanabilir. Oluşturulan *BIBC* matrisi sistemde her bir hattan aktarılan aktif ve reaktif gücün bilgisayar ortamında otomatik olarak belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu matris oluşturulduktan sonra her bir baranın kararlılık indeks değeri sistem için IEEE common data formatında verilen hat bilgileri matrisinden yararlanılarak Denklem (7.4) ile kolaylıkla hesaplanabilir. Geliştirilen indeksin dağıtım sistemine uygulanması adım adım aşağıda verilmiş olup buna ilişkin akış diyagramı Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 7.1. Örnek dağıtım sisteminin devre şeması

Algoritma:

Adım 1. Güç akışı sonuçlarından yararlanarak bara gerilimleri vektörü V ve yük akımları vektörü I' yı oluştur.

Adım 2. BIBC matrisini oluşturarak Denklem (7.5.b) ile hat akımları vektörü B 'yi hesapla. BIBC matrisi, sistemin hat bilgileri matrisinden yararlanılarak istenilen şekilde bir yazılımın geliştirilmesi ile oluşturulabileceği gibi literatürde mevcut yöntemlerin örneğin [32]'de verilen prosedür kullanılarakta belirlenebilmektedir.

Adım 3. B vektörü ve bara gerilimleri vektörü V 'yi kullanarak Denklem (7.6) ile her bir hattan transfer edilen güçleri hesapla.

Adım 4. Sistem için IEEE common data formatında verilen hat bilgileri matrisinden (rx) yararlanarak her bir baraya ait indeks değerini belirlemek için sayıcıyı başlat ($i=1$).

Adım 5. Sayıcının gösterdiği satırdaki hattın bara numaralarını ve hattın direnç ve reaktansını belirle ($s=rx(i, j)$, $r=rx(i, j1)$, $R=rx(i, j2)$, $X=rx(i, j3)$). Hat bilgileri matrisinde (rx 'de) j ve $j1$ sütunları sırasıyla hat başı ve hat sonu baralarını, $j2$ ve $j3$ sütunları ise sırasıyla hatların direnç ve reaktanslarını göstermektedir.

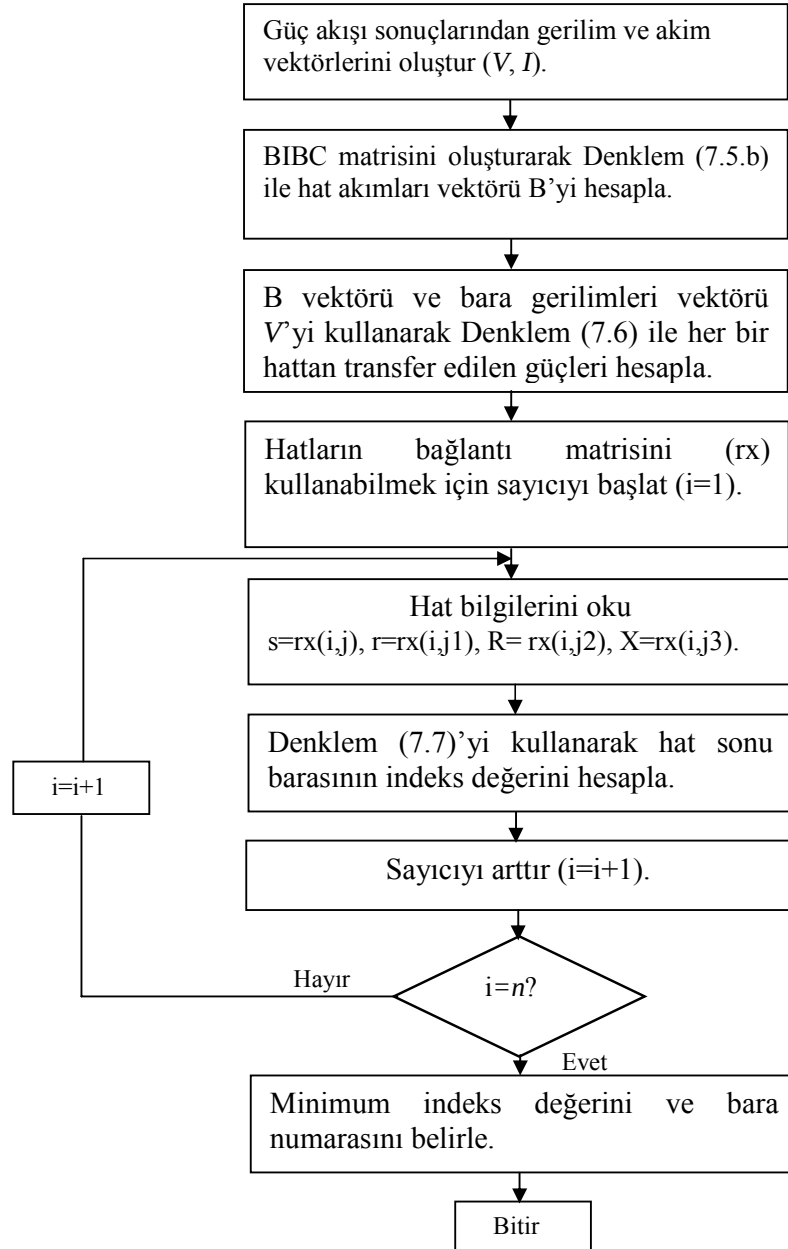
Adım 6. Bu baraların gerilimleri, hat empedansı ve hattan transfer edilen gücü Denklem (7.4)'de kullanarak Denklem (7.7)'de verildiği gibi hat sonu barasına ait kararlılık indeksinin değerini hesapla.

$$SI(r) = 2|V(s)|^2|V(r)|^2 - |V(r)|^4 - 2|V(r)|^2(P(r)R + Q(r)X) - (R^2 + X^2)(P^2(r) + Q^2(r)) \quad (7.7)$$

Adım 7. Sayıcıyı arttır ($i=i+1$), eğer $i=n$ (n :bara sayısı) ise Adım 8'e, değil ise Adım 5'e git.

Adım 8. Hesaplanan indeks değerlerinden en küçüğünü ve hangi baraya ait olduğunu belirle.

Adım 9. Bitir.



Şekil 7.2 Geliştirilen kararlılık indeksinin akış diyagramı

7.4. Geliştirilen Kararlılık İndeksinin Dağıtım Sistemlerinde Sınanması

Geliştirilen indeksin güvenilirliği farklı dağıtım sistemleri üzerinde sınanmıştır. Bunun için güç sistemleri analizinde geniş olarak kullanılan ve Bölüm 5’de devre şemaları ve eleman değerleri verilen dengeli 12, 30, 33, ve 69-baralı radyal dağıtım sistemleri kullanılmıştır. Ayrıca kararlılık analizlerinde geniş olarak kullanılan diğer kararlılık indeksleri ve azami yüklenme noktasına kadar yük artışı yapılarak güç akışı analizi ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

İlk olarak sabit güç yük modeli için dağıtım sistemlerinin normal yüklenme durumunda her bir baraya ait kararlılık indeks değerleri hesaplanarak sistemdeki en kritik bara tayin edilmiştir. Yapılan hesaplamalar ile elde edilen sonuçlar Tablo 7.1’de verilmiştir. Tablodan görüleceği üzere sistemlerde en düşük indeks değerine sahip olan baralar sistemler için sırasıyla 12, 27, 18 ve 65. baralar olup bu baralar sistemler için en kritik bara olarak işaret edilmektedir. Bu baralara ait kararlılık indeks değerleri ve diğer kararlılık indekslerinin gösterdiği kritik bara veya bunları besleyen hatlara ait indeks değerleri Tablo 7.2’de verilmiştir. Kararlılık indekslerinin yanı sıra sistem yükü artırılarak güç akışı analizi yapılmış ve kritik yüklenme durumunda minimum gerilimli bara (kritik bara) güç akışı analizi ile belirlenmiştir. Tablodan görüleceği üzere sistemler için [70] ve [73]’de verilen kararlılık indeksleri ile geliştirilen indeks sonuçlarının uyumunu kritik bara olarak aynı baraların işaret edildiğini söylemek mümkündür. Belirlenen kritik baraların birden fazla güç akışı analizi yapılarak elde edilen sonuçlarla da uyumunu görmektedir. Dolayısıyla geliştirilen indeksin güvenilir olduğunu, dağıtım sistemlerinde kritik baranın belirlenmesinde kullanılabileceğini söylemek mümkündür. Ayrıca referans [67]’de geliştirilen ve genellikle iletim sistemlerinde kritik barayı belirlemek amacıyla kullanılan kararlılık indeksinin dağıtım sistemlerinde yetersiz kaldığını ve bu sistemlerde kullanılması durumunda en hassas bara olarak farklı barayı gösterdiği görülmektedir. Benzer durum [71]’de geliştirilen bir diğer kararlılık indeksinde de görülmektedir.

Sabit güçlü yük modelinin yanı sıra sistemlerde sabit akımlı ve sabit empedanslı yük durumları kullanılarak ta geliştirilen indeksin geçerliliği sınanmış, sonuçlar Tablo 7.3 ve 7.4’de verilmiştir. Sonuçlardan yararlanarak geliştirilen indeksin uygulanan bütün test sistemlerinde farklı yük modelleri durumlarından da etkilenmediğini ve sistemlerin farklı yük modelleri için doğru barayı işaret ettiğini söylemek mümkündür. Ayrıca yapılan hesaplamalar, yüklerin gerilim bağımlılığı arttıkça kritik yüklenme değerinin arttığını ve gerilim çökmesinin meydana geldiği baraya ait gerilim değerinin arttığını göstermektedir.

Tablo 7.1 Geliştirilen indeks ile hesaplanan kararlılık indeks değerleri

Bara No	12-baralı	30-baralı	33-baralı	69-baralı	Bara No	69-baralı
2	0.9887	0.9771	0.9940	0.9999	36	0.9997
3	0.9671	0.9353	0.9602	0.9998	37	0.9993
4	0.9406	0.8905	0.9138	0.9995	38	0.9987
5	0.9044	0.8440	0.8812	0.9977	39	0.9983
6	0.8787	0.8036	0.8349	0.9783	40	0.9982
7	0.8677	0.7721	0.7974	0.9430	41	0.9968
8	0.8477	0.7535	0.7834	0.9212	42	0.9948
9	0.8189	0.7396	0.7649	0.9149	43	0.9941
10	0.8004	0.7287	0.7453	0.9035	44	0.9940
11	0.7942	0.7238	0.7346	0.8922	45	0.9938
12	0.7923	0.7221	0.7309	0.8844	46	0.9936
13		0.9153	0.7189	0.8734	47	0.9993
14		0.9134	0.7058	0.8629	48	0.9967
15		0.9122	0.7002	0.8526	49	0.9865
16		0.9119	0.6959	0.8466	50	0.9779
17		0.7696	0.6907	0.8441	51	0.9170
18		0.7426	0.6867	0.8425	52	0.9169
19		0.7175	0.9871	0.8417	53	0.9076
20		0.6943	0.9790	0.8403	54	0.8964
21		0.6753	0.9706	0.8390	55	0.8823
22		0.6568	0.9680	0.8381	56	0.8663
23		0.6392	0.8881	0.8380	57	0.8189
24		0.6241	0.8693	0.8376	58	0.7628
25		0.6134	0.8513	0.8370	59	0.7381
26		0.6086	0.8000	0.8366	60	0.7234
27		0.6069	0.7924	0.8364	61	0.7041
28		0.7586	0.7690	0.9997	62	0.6924
29		0.7565	0.7372	0.9996	63	0.6914
30		0.7553	0.7186	0.9992	64	0.6879
31			0.7066	0.9989	65	0.6842
32			0.6987	0.9986	66	0.8901
33			0.6969	0.9979	67	0.8900
34				0.9967	68	0.8781
35				0.9959	69	0.8775

Tablo 7.2. Sabit güçlü yük için normal yüklenme durumuna ilişkin sonuçlar

Sistem	Geliştirilen İndeks (SI _{min})	İndeks [67] (SI _{min})	İndeks [71] (SI _{min})	İndeks [71] (SI _{max})	İndeks [73] (SI _{min})	Güç akışı analizleri sonucu (V _{min})
12-baralı	0.7923 Bara 12	0.0114 Bara 11	0.4675 Bara 12	0.1606 Hat 8/8-9	0.7920 Bara 12	0.4364 Bara-12
30- baralı	0.6069 Bara 27	0.0147 Bara 26	0.4250 Bara 27	0.2109 Hat 23/23-24	0.6065 Bara 27	0.4167 Bara-27
33- baralı	0.6867 Bara 18	0.0274 Bara 30	0.4458 Bara 18	0.1132 Hat 27/27-28	0.6858 Bara 18	0.4192 Bara-18
69- baralı	0.6842 Bara 65	0.0587 Bara 61	0.4512 Bara 65	0.1876 Hat 56/56-57	0.6833 Bara 65	0.4709 Bara-65

Tablo 7.3. Sabit akımlı yük için normal yüklenme durumuna ilişkin sonuçlar

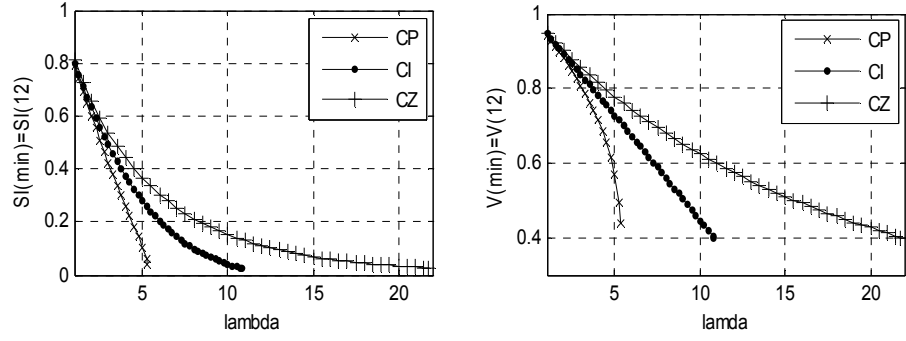
Sistem	Geliştirilen İndeks (SI _{min})	İndeks [73] (SI _{min})	İndeks [71] (SI _{min})
12- baralı	0.8012 Bara 12	0.8008 Bara 12	0.4692 Bara 12
30- baralı	0.6388 Bara 27	0.6384 Bara 27	0.4326 Bara 27
33- baralı	0.7072 Bara 18	0.7063 Bara 18	0.4501 Bara 18
69- baralı	0.7070 Bara 65	0.7061 Bara 65	0.4560 Bara 65

Tablo 7.4. Sabit empedans yük modeli için normal yüklenme durumuna ilişkin sonuçlar

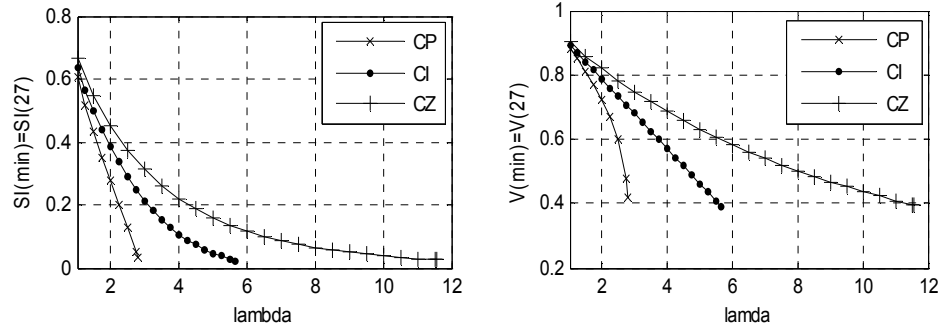
Sistem	Geliştirilen İndeks (SI _{min})	İndeks [73] (SI _{min})	İndeks [71] (SI _{min})
12- baralı	0.8090 Bara 12	0.8086 Bara 12	0.4707 Bara 12
30- baralı	0.6636 Bara 27	0.6632 Bara 27	0.4382 Bara 27
33- baralı	0.7239 Bara 18	0.7231 Bara 18	0.4536 Bara 18
69- baralı	0.7252 Bara 65	0.7244 Bara 65	0.4597 Bara 65

Kararlılık indekslerinin sistemdeki yük değişimine hassas olması yani yük artışı ile değerinin değişmesi ve her bir farklı yüklenme durumları için gerilim çökmesine en yakın barayı veya hattı tayin edebilmesi gerekmektedir. Kullanılan test sistemlerinde kritik baranın indeks değerinin ve geriliminin her bir yükün λ

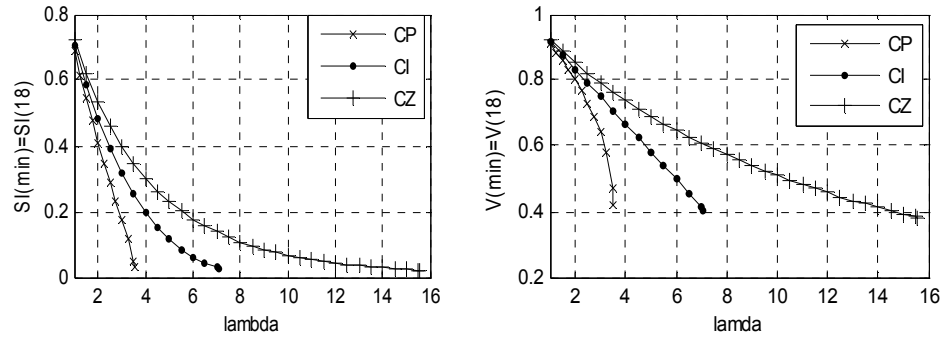
katsayısı ile çarpılarak arttırılması ile değişimi sabit güç (CP), sabit akım (CI) ve sabit empedans (CZ) statik yük modelleri için Şekil 7.3’de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere her bir sistem için kritik baraya ait indeks değeri ve gerilim büyüklüğü yük artışıyla azalmakta kritik yüklenme durumunda kritik baranın indeks değeri sıfıra çok yakın bir değere ulaşmaktadır. Dolayısıyla yük değişimi ile indeks değeri doğrudan değişmekte ve farklı yüklenme durumunda da geliştirilen indeksin güvenilir olduğu görülmektedir. Ayrıca normal yüklenme ile kritik yüklenme durumlarındaki indeks değerleri arasındaki fark büyük değerlidir. Dolayısıyla herhangi bir yüklenme durumunda kritik baraya ait indeks değerinin büyüklüğü, örneğin sıfıra çok yakın değerli olması, bize dolaylı olarak gerilim çökmesi noktasına çok yaklaşıldığını da işaret etmektedir.



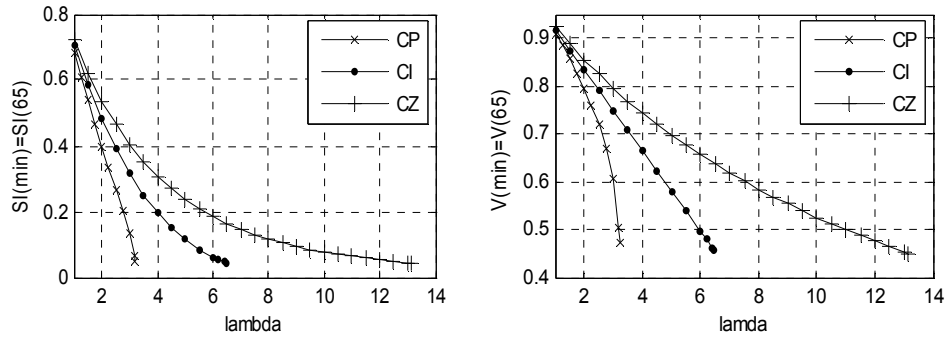
Şekil 7.3.(a) 12-baralı sistem



Şekil 7.3.(b) 30-baralı sistem



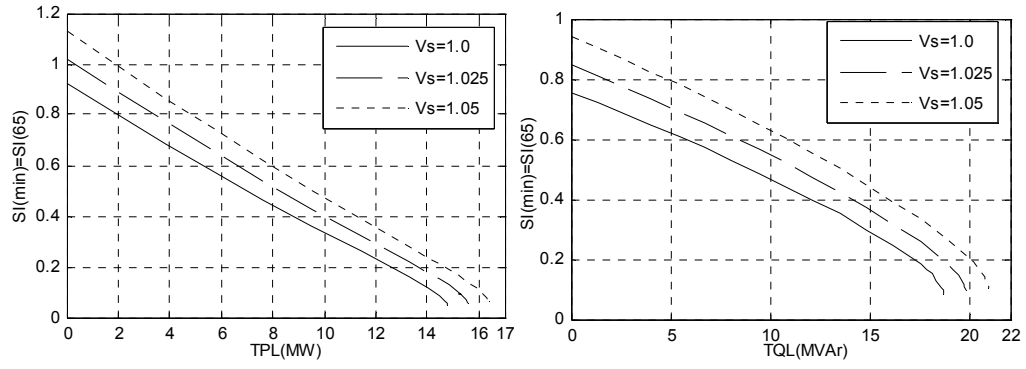
Şekil 7.3.(c) 33-baralı sistem



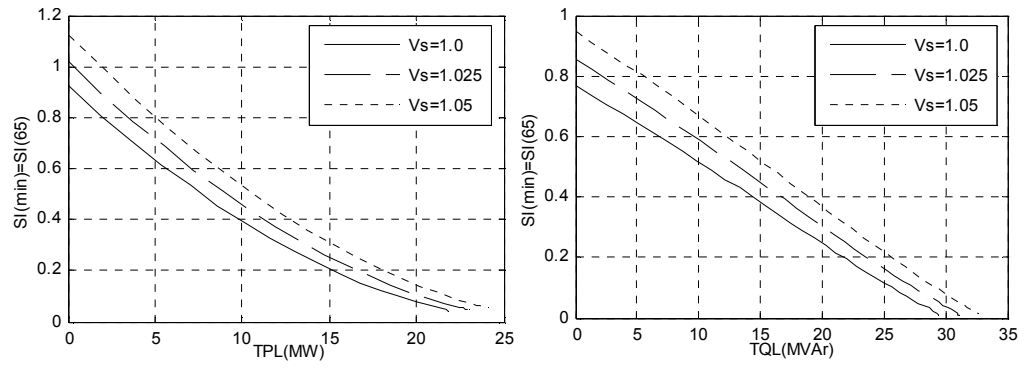
Şekil 7.3.(d) 69-baralı sistem

Şekil 7.3. Farklı sistemler için kritik baranın kararlılık indeksinin ve geriliminin yük artışı ile değişimi

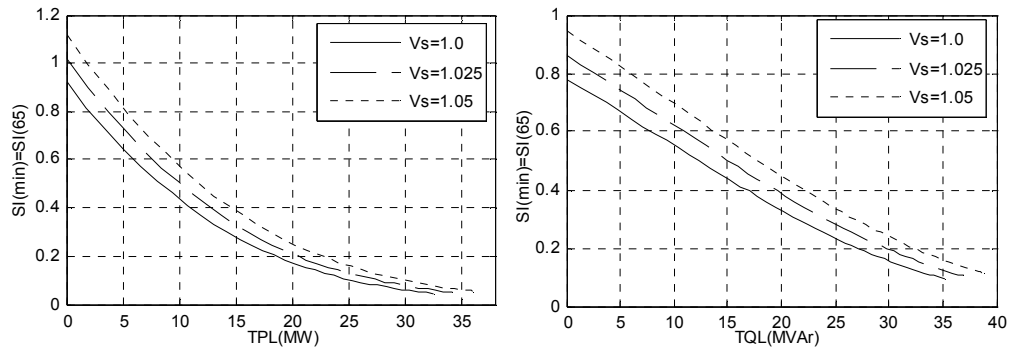
Son olarak geliştirilen kararlılık indeksinin geçerliliği, farklı besleme gerilimlerinde 69-baralı sistemin farklı güç faktörü ile yüklenmesi durumları için değerlendirilmiştir. Farklı güç faktörü ile yüklenme durumu için sistemin aktif ve reaktif güçleri ayrı ayrı arttırılarak minimum indeks değeri ve dolayısıyla kritik bara belirlenmiştir. İlk olarak sistemde yüklerin reaktif güçleri sabit tutularak aktif güçleri sıfırdan azami yüklenme noktasına kadar arttırılmıştır. Bu durumda sistemdeki en kritik baranın indeks değerinin değişimi Şekil 7.4’de birinci sütunda verilmektedir. Ayrıca sistemin temel reaktif güç değeri ve azami aktif güç değeri durumu için kritik baranın indeks değerleri Tablo 7.5’de verilmiştir. Benzer şekilde sistemde yüklerin aktif güçleri sabit tutularak reaktif güçleri sıfırdan azami yüklenme noktasına kadar arttırılmıştır. Bu durumda sistemdeki en kritik baranın indeks değerinin değişimi Şekil 7.4’de ikinci sütunda, ve ayrıca sistemin temel aktif güç değeri ve azami reaktif güç değeri için kritik baranın indeks değeri Tablo 7.6’da verilmiştir. Yapılan analizler sistemdeki kritik baranın besleme geriliminin değişmesi durumunda değişmediğini, kritik baranın sistemde gerilim seviyesinden bağımsız olduğunu göstermektedir. Ayrıca Tablo 7.5 ve 7.6’dan görüleceği üzere geliştirilen indeksin her bir besleme gerilimi değeri için güvenilir sonuç verdiğini gerilim seviyesinden etkilenmediğini söylemek mümkündür. Buna ek olarak geliştirilen indeksin ifadesinin aktif ve reaktif güce doğrudan bağlı olması nedeniyle farklı güç faktörü ile sistemin yüklenmesi durumunda da güvenilir olduğunu, güç faktörünün performansını etkilemediğini Şekil 7.4’den yararlanarak söylemek mümkündür.



Şekil 7.4.(a) Sabit güçlü yük durumu



Şekil 7.4.(b) Sabit akımlı yük durumu



Şekil 7.4.(c) Sabit empedanslı yük durumu

Şekil 7.4 Farklı güç faktörü ile yük artışı durumunda kritik baraya ait indeks değerinin farklı yük modelleri ve besleme gerilimi için değişimi

Tablo 7.5. 69-baralı sistemde azami aktif güç ve temel reaktif güç yüklenme durumu için kritik bara ve kararlılık indeks değeri

Yük modeli	Besleme Gerilimi (pu)	Toplam aktif güç (MW)	Toplam reaktif güç (MVar)	Geliştirilen indeks (SI_{min})	İndeks/[73] (SI_{min})	Güç akışı analizleri sonucu (V_{min})
CP	1	14.757	2.694	0.0499 Bara 65	0.0494 Bara 65	0.4733 Bara 65
	1.025	15.546	2.694	0.0552 Bara 65	0.0548 Bara 65	0.4836 Bara 65
	1.05	16.353	2.694	0.0611 Bara 65	0.0605 Bara 65	0.4952 Bara 65
CI	1	21.832	1.918	0.0432 Bara 65	0.0429 Bara 65	0.4551 Bara 65
	1.025	22.958	1.965	0.0475 Bara 65	0.0470 Bara 65	0.4662 Bara 65
	1.05	24.087	2.014	0.0526 Bara 65	0.0519 Bara 65	0.4773 Bara 65
CZ	1	32.594	1.44	0.0454 Bara 65	0.0450 Bara 65	0.4610 Bara 65
	1.025	34.327	1.51	0.0496 Bara 65	0.0490 Bara 65	0.4712 Bara 65
	1.05	36.066	1.58	0.0544 Bara 65	0.0537 Bara 65	0.4825 Bara 65

Tablo 7.6. 69-baralı sistemde temel aktif güç ve azami reaktif güç yüklenme durumu için kritik bara ve kararlılık indeks değeri

Yük modeli	Besleme Gerilimi (pu)	Toplam aktif güç (MW)	Toplam reaktif güç (MVar)	Geliştirilen indeks (SI_{min})	İndeks/[73] (SI_{min})	Güç akışı analizleri sonucu (V_{min})
CP	1	3.802	18.645	0.0853 Bara 65	0.0850 Bara 65	0.5397 Bara 65
	1.025	3.802	19.751	0.0950 Bara 65	0.0945 Bara 65	0.5554 Bara 65
	1.05	3.802	20.883	0.1061 Bara 65	0.1054 Bara 65	0.5703 Bara 65
CI	1	2.415	29.519	0.0105 Bara 65	0.0103 Bara 65	0.3235 Bara 65
	1.025	2.473	31.050	0.0114 Bara 65	0.0112 Bara 65	0.3285 Bara 65
	1.05	2.532	32.614	0.0126 Bara 65	0.0123 Bara 65	0.3334 Bara 65
CZ	1	2.2	35.202	0.0941 Bara 65	0.0934 Bara 65	0.5534 Bara 65
	1.025	2.315	36.981	0.1031 Bara 65	0.1024 Bara 65	0.5663 Bara 65
	1.05	2.43	38.919	0.1132 Bara 65	0.1128 Bara 65	0.5788 Bara 65

7.5. Sonuç

Çalışmanın bu bölümünde güç akışı analizinde geniş olarak kullanılan ve kuadratik denklem olarak bilinen gerilim polinomu kullanılarak dağıtım sistemlerinde gerilim kararlılığı analizi için kritik barayı, gerilim çökmesine en yakın barayı tayin etmek amacıyla yeni bir kararlılık indeksi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni kararlılık indeksi farklı dağıtım sistemleri üzerinde sınanarak elde edilen sonuçlar diğer indekslerle ve sistemlerin yükü arttırılarak yapılan güç akışı analizleri sonucu ile karşılaştırılmıştır. Analizler sonucunda geliştirilen kararlılık indeksinin güvenilir, iki baraya indirgeme, Jacobian matrisinin oluşturulması veya bara empedans/admitans matrisinin oluşturulması gibi ekstra hesaplamalar gerektirmeksizin dağıtım sistemlerine herhangi bir yüklenme durumu için güç akışı analizi sonrasında doğrudan uygulanabilir olduğu görülmüştür. Bunun dışında sistemin yüklenme durumundan, farklı yük modellerinden, farklı güç faktörü durumundan ve farklı gerilim seviyesinden etkilenmediği tüm durumlarda geçerli sonuç verdiğini söylemek mümkündür.

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuç

Dağıtım sistemlerinin iletim sistemlerinden farklı yapıya sahip olmasından dolayı iletim sistemleri için kullanılan ve geleneksel Newton Raphson, Gauss Seidel gibi güç akış metotları dağıtım sistemlerinin güç akışı hesabında yetersiz kalabilmektedirler. Bu yetersizlik problemi dağıtım sistemleri için yeni güç akışı algoritmalarının geliştirilmesi ihtiyacını doğurmuş, ve radyal dağıtım sistemleri için bir den fazla güç akışı algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmaların büyük bir çoğunluğu sweep-temelli algoritmalar. Yani dağıtım sistemlerinin radyal yapısı göz önünde bulundurularak kaynak barasından sona doğru ileri ve/veya geri yönde bara gerilimi hesabının yapıldığı algoritmalar. Gerilim hesabında ise Kirchhoff Gerilim Yasası veya gerilim polinomu (kuadratik denklemin) kullanılarak yapılmaktadır.

Bu çalışmada dengeli ve dengesiz dağıtım sistemlerinde güç akışı analizi için hızlı yakınsama özelliği ve kısa sürede hesaplama yeteneğine sahip yeni bir güç akışı algoritması geliştirilmiştir. Algoritma ileri yönde gerilim hesabı için kuadratik denklem, geri yönde gerilim hesabında ise Kirchhoff Gerilim Kanunu kullanılarak oluşturulmuştur. Geliştirilen algoritma farklı dağıtım sistemlerine uygulanarak mevcut diğer algoritmalar ile sonuçlar karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen algoritmanın geçerli ve güvenilir olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda geliştirilen algoritmanın performansı, sistemin farklı yüklenme durumu, hatlarda farklı R/X oranları, farklı statik yük modellerinin kullanılması ve farklı tolerans değerleri için mevcut diğer sweep-temelli algoritmalar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda geliştirilen algoritmanın diğer algoritmalarından daha hızlı yakınsadığı, performansının diğer algoritmalara nazaran sistem parametrelerinden çok az etkilendiği görülmüştür.

Günümüzde dağıtım sistemlerinde artan enerji ihtiyacının karşılanması veya çok çeşitli enerji üretim birimlerinin sisteme dahil edilmesi dağıtım sistemlerinde tek yönlü güç akışını bozmakta dolayısıyla sistemde kaynağa doğru enerji aktarımı söz

konusu olabilmektedir. Bu gibi Yerel Enerji Üretim (YEÜ) birimleri veya gerilim kontrolü amacıyla kullanılan aktif kompanzatörlerin tam ve gerçekçi güç akışı analizi için gerilim kontrollü bara (PV-bara) olarak modellenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada ikinci olarak dengeli ve dengesiz radyal dağıtım sistemlerinde güç akışı analizi için kullanılan sweep-temelli güç akışı algoritmalarında PV-bara'nın modellenmesine ilişkin bir metot verilmiştir. Geliştirilen metot farklı algoritmalar üzerinde farklı dengeli dağıtım sistemleri için sınanarak sonuçlar geleneksel güç akışı algoritmalarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca dengesiz sistemler için verilen metot test sistemleri üzerinde farklı algoritmalara uygulanarak güvenilirliği sınanmıştır. Elde edilen bütün sonuçlar verilen metodun güvenilir olduğunu ve dağıtım sistemlerinde gerçekçi güç akışı analizinin yapılabilmesine olanak sağladığını göstermiştir. Dengesiz sistemler için geliştirilen güç akışı algoritmasında gerilim regülatörleri ve üç fazlı transformatörler dahil edilerek bu birimlerin kullanıldığı sistemler için güç akışı analizi yapılmış ve geçerliliği sınanmıştır. Yapılan analizler geliştirilen üç fazlı transformatör ve gerilim regülatörü modelinin geçerli olduğunu ve bu birimlerin kullanıldığı sistemlerde gerçekçi bir güç akışı analizinin yapılmasına olanak sağladığını göstermektedir. Fakat dengesiz sistemler için geliştirilen algoritmada fazlar arası ortak empedansın ihmal edilerek kuadratik denklem her bir faza uygulanması algoritmanın iterasyon sayısı ve hesaplama süresinin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, kuadratik denklemin hattın ortak empedansları dahil edilerek oluşturulması ile giderilip, algoritmanın performansı artırılabilir. Ayrıca üç-fazlı transformatörlerin güç akışı algoritmalarında modellenmesinde simetrik bileşenler modeli kullanılmıştır. Bu model yalnızca simetrik bileşenlerde sıfır-sıra akımının aktığı transformatör bağlantıları için geçerlidir. Dolayısıyla tüm transformatör bağlantı durumlarına uygulanamamaktadır.

Çalışmanın son bölümünde ise kuadratik denklem olarak bilinen gerilim polinomu kullanılarak dağıtım sistemlerinde gerilim kararlılığı analizi için kritik barayı yani gerilim çökmesine en yakın barayı tayin etmek amacıyla yeni bir kararlılık indeksi geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yeni kararlılık indeksi farklı dağıtım sistemleri üzerinde sınanarak elde edilen sonuçlar diğer indekslerle elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda geliştirilen kararlılık indeksinin güvenilir, dağıtım sistemlerine kolaylıkla uygulanabilir olduğu ve güç

akışı dışında ekstra uygulamalara ihtiyaç duymadığını söylemek mümkündür. Bunun dışında sistemin yüklenme durumundan, farklı yük modellerinden, farklı güç faktörü durumundan ve farklı gerilim seviyesinden etkilenmediği tüm durumlarda geçerli sonuç verdiği görülmüştür.

8.2. Çalışma Konusu Önerileri

Yapılan çalışmalarda dengeli hat için oluşturulan kuadratik denklemin dağıtım sistemlerinde güç akışı analizlerinde bara gerilimlerinin hesaplanmasında çok büyük avantaj sağladığı, güç akışı analizinin düşük adımda tamamlanmasına yani algoritmaların hızının artmasına imkan sağladığı görülmüştür. Dengeli sistemler için oluşturulan bu kuadratik denklemin dengesiz sistemlerde fazlar arası ortak empedanslarda göz önüne alınarak yeniden oluşturulması ile;

- Dengesiz dağıtım sistemlerinde yüksek performanslı yeni bir güç akışı algoritması
- Kuadratik denklemden yararlanarak dengesiz sistemlerde kritik baranın veya hattın belirlenmesi amacıyla yeni bir kararlılık indeksinin geliştirilmesi düşünülebilir.

Kuadratik denklem kullanılarak dengeli dağıtım sistemleri için geliştirilen kararlılık indeksinin iletim sistemlerine uyarlanarak sistemlerde kritik baranın veya hattın belirlenmesi için yeni bir kararlılık indeksinin geliştirilmesi ileride düşünülebilecek bir diğer çalışma konusudur.

Daha önce 3. Bölümde de bahsedildiği gibi dengesiz dağıtım sistemlerinde yıldız bağlı yüklerin nötr noktasının topraklanmaması durumunda nötr geriliminin çift çözümünün olması sistemde güç akışı analizinde çift çözümün oluşmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra yük tarafı üçgen bağlı transformatörlerin sistemde bulunması durumunda da yük geriliminde çift çözüme neden olmakta ve bu gerilim çözümleri arasındaki fark sistemdeki dengesizliğe bağlı olarak artmaktadır. Bu çözümlerin geçerliliğinin test edilmesi amacıyla pratik uygulamaların yapılması,

sonuçların teorik analizler ile karşılaştırılması ve problemin çözümüne ilişkin yeni metot veya metotların geliştirilmesi ileride çalışılabilecek konulardan birisidir.

KAYNAKLAR

-
- [1] Stevenson WD, Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill, 1982.
 - [2] Tinney WG, Hart CE, Power flow solutions by Newton's Method, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-86, pp.1449-1457, 1967.
 - [3] Stott B, Alsac O, Fast decoupled load flow, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-93 (3), pp. 859-869, 1974.
 - [4] Tripathy SC, Prasad GD, Malik OP, and Hope GS, Load flow solutions for ill-conditioned power systems by a Newton-like method, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-101 (10), pp. 3648-3657, 1982.
 - [5] Iwamoto S, Tamura Y, A load flow calculation method for ill-conditioned power systems, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-100(4), pp. 1736-1743, 1981.
 - [6] Arrillaga J, Arnold CP, Fast decoupled three-phase load flow, Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib., Vol. 125, no.8, pp.734-740, August 1978.
 - [7] 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.
 - [8] Chen TH, Chen MS, Hwang KJ, Kotas P, Chebli EA, Distribution system power flow analysis-A rigid approach, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, no.3, pp. 1146-1152, July 1991.
 - [9] Lo KL, and Zhang C, Decomposed three-phase power flow solution using the sequence component frame, Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Trans., Distrib., Vol. 140, no.3, pp.181-188, May 1993.
 - [10] Zhang XP, Chen H, Asymmetrical three-phase load flow based on symmetrical component theory, Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Trans., Distrib., Vol. 141, no.3, pp.248-252, May 1994.
 - [11] Zhang XP, Fast three-phase load flow methods, IEEE Trans. on Power System, Vol. 11, no.3, pp. 1547-1553, August 1996.
 - [12] Lin WM, Teng JH, Phase-decoupled load flow method for radial and weakly-meshed distribution systems, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.143, no.1, pp.39-42, January 1996.

-
- [13] Zhang XP, Chu WJ, Chen H, Decoupled asymmetrical three-phase load flow study by parallel processing, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.143, no.1, pp.61-65, January 1996.
 - [14] Le Nguyen H, Newton-Raphson method in complex form, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, no.33, pp.1355–1359, August 1997.
 - [15] Zhang F, Cheng CS, A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis, IEEE Trans. on Power System, Vol. 12, no.1, pp.389–397, February 1997.
 - [16] Da Costa VM, Martins N, and Pereira JL, Development in the Newton Raphson power flow formulation based on current injections, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, no. 4, pp.1320-1326, November 1999.
 - [17] Lin WM, Su YS, Chin HC, Teng JH, Three-phase unbalanced distribution power flow solutions with minimum data preparation, IEEE Trans. on Power System, Vol. 14, no.3, pp.1178–1183, August 1999.
 - [18] Garcia PAN, Pereira JLR, Carneiro S, Da Kosta WM, Martins N, Three-phase power flow calculations using the current injection method, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 15, no.2, pp.508-514, May 2000.
 - [19] Whei-Min Lin, Jen-Hao Teng, Three-phase distribution network fast-decoupled power flow solutions, Electrical Power and Energy Systems, Vol.22, no.5, pp.375-380, June 2000.
 - [20] Teng JH, A modified Gauss-Seidel algorithm of three-phase power flow analysis in distribution networks, Electrical Power and Energy Systems, Vol.24, no.2, pp.97-102, February 2002.
 - [21] Vieira JCM, Freitas W, Morelato A, Phase-decoupled method for three-phase power-flow analysis of unbalanced distribution systems, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.151, no.5, pp.568-574, September 2004.
 - [22] Abdel-Akher M, Mohamed Nor K, Abdul Rashid AH, Improved three-phase power-flow methods using sequence components, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, no.3, pp.1389-1397, August 2005.
 - [23] Shirmohammadi D, Hong HW, Semlyen A, Luo GX, A Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks, IEEE Trans. on Power System, Vol. 3 (2), pp.753–762, May 1988.

-
- [24] Cheng CS, Shirmohammadi D, A three-phase power flow method for real time distribution system analysis, IEEE Trans. on Power System, Vol. 10 (2), pp. 671–679, May 1995.
 - [25] Zhu Y, Tomsovic K, Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 17(3), pp.822-827, July 2002.
 - [26] 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.
 - [27] Ghosh S, Das D, Method for load-flow solution of radial distribution networks, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol.146 (6), pp.641-648, November 1996.
 - [28] 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.
 - [29] 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.
 - [30] Kersting WH, Distribution system modeling and analysis, Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
 - [31] Liu J, Salama MMA, Mansour RR, An efficient power flow algorithm for distribution systems with polynomial load, International Journal of Electrical Engineering Education, Vol.39 (4), pp.371-386, October 2002.
 - [32] 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.
 - [33] Teng JH, A direct approach for distribution system load flow solutions, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.18 (3), pp.882-887, July 2003.
 - [34] 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.
 - [35] Cespedes GR, New method for the analysis of distribution networks, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5 (1), pp. 391-396, January 1990.

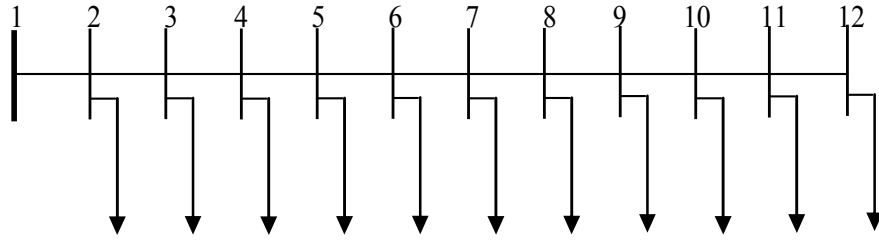
-
- [36] Haque MH, Load flow solution of distribution systems with voltage dependent load models, *Electrical Power Systems Research*, Vol. 36 (3), pp.151-156, March 1996.
 - [37] Haque MH, Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol.143 (1), pp.33-38, January 1996.
 - [38] Haque MH, A general load flow method for distribution systems, *Electric Power System Research*, Vol. 54 (1), pp.106-114, April 2000.
 - [39] Asfari M, Singh SP, Raju GS, Rao GK, A fast power flow solution of radial distribution networks, *Electric Power Components and Systems*, Vol.30 (3), pp.1065-1074, 2002.
 - [40] Ranjan R, Das D, Simple and efficient computer algorithm to solve radial distribution networks, *Electric Power Components and Systems*, Vol.31 (1), pp. 95-107, January 2003.
 - [41] Das D, Nagi HS, Kothari DP, Novel method for solving radial distribution networks, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol.141(4), pp.291-298, July 1994.
 - [42] 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.
 - [43] Baran ME, Wu FF, Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4 (1), pp.735-742, January 1989.
 - [44] Mekhamer SF, Soliman SA, Moustafa MA, El-Hawary ME, Load flow solution of radial distribution feeders: a new contribution, *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 24 (9), pp.701-707, November 2002.
 - [45] 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.
 - [46] 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.
 - [47] Rajicic D, Ackovski R, Taleski R, Voltage correction power flow, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 9 (2), pp. 1056–1062, April 1994.

-
- [48] Jasmon GB, Lee LHC, Distribution network reduction for voltage stability analysis and load flow calculations, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol.13 (1), pp. 9-13, February 1991.
- [49] Satyanarayana S, Ramana T, Sivanagaraju S, Rao GK, An efficient load flow solution for radial distribution network including Voltage dependent load models, *Electric Power Components and Systems*, Vol. 35 (5), pp.539-551, 2007.
- [50] Exposito G, Ramos ER, Reliable load flow technique for radial distribution networks, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol.14 (3), pp.1063-1069, August 1999.
- [51] 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.
- [52] Augugliaro A, Dusonchet L, Favuzza S, Ippolito MG, Sanseverino ER, A new backward/forward method for solving radial distribution network with PV-nodes, *Electric Power System Research*, Article in press, online at: www.sciencedirect.com, March 2007.
- [53] Song YH, Johns AT, Flexible AC transmission systems (FACTS), *IEE Power Energy Series*; Chapter 4, pp. 146-166, 1999.
- [54] Chen MS, Dillon WE, Power system modeling, *Proc. IEEE*, Vol. 62, pp. 901–915, July 1974.
- [55] Chen TH, Chen MS, Inoue T, Kotas P, Chebli EA, Three-phase co-generator and transformer models for distribution system analysis, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 6, no.4, pp. 1671–1681, October 1991.
- [56] Michael J. Gorman, John J. Grainger, Transformer Modelling for Distribution System Studies Part 2: Addition of Models to YBUS and ZBUS, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 7, no. 2, pp. 575-580, April 1992.
- [57] Irving MR, Al-Othman AK, Admittance matrix models of three-phase transformers with various neutral grounding configurations, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 18, no. 3, pp. 1210–1212, August 2003.
- [58] Baran ME, Staton EA, Distribution transformer models for branch current based feeder analysis, *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 12, no.2, pp. 698–703, May 1997.

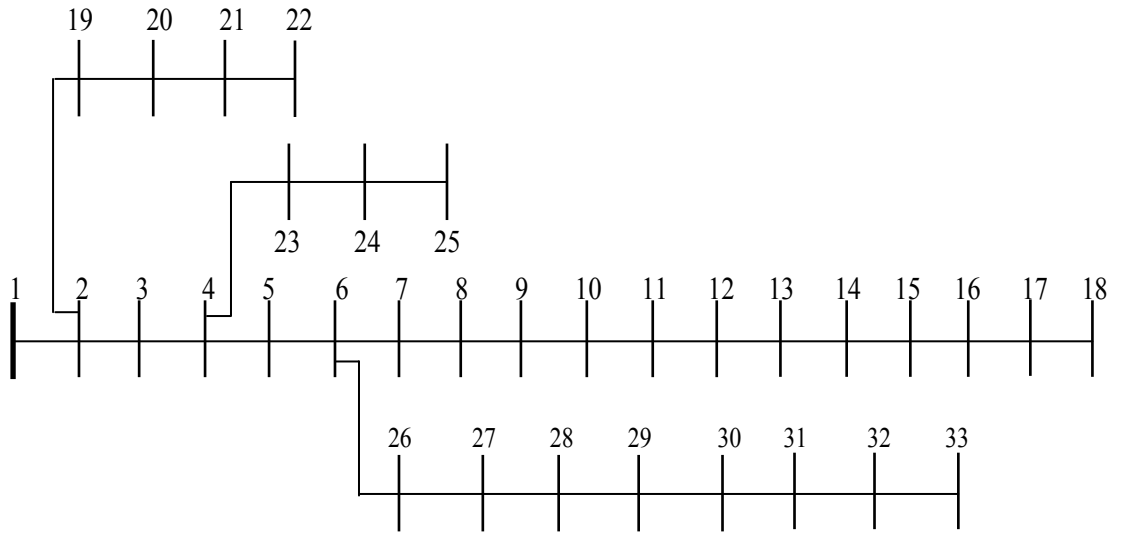
-
- [59] Kersting WH, Phillips WH, Carr W, A new approach to modeling three-phase transformer connections, IEEE Trans. Ind. Application, Vol. 35, no.1, pp. 169–175, Jan./Feb. 1999.
 - [60] Wang Z, Chen F, Li J, Implementing transformer nodal admittance matrices into backward/forward sweep-based power flow analysis for unbalanced radial distribution systems, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, no. 4, pp. 1831–1836, November 2004.
 - [61] Heydt GT, Electric Power Quality, Second edition Stars in Circle Publications, West LaFayette, IN, 1991.
 - [62] Mustafa Bağrıyanık, Enerji iletiminde gerilim kararlı en uygun reaktif güç desteklemelerinin incelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 161 Sayfa, 1997.
 - [63] Venikov VA, Stroeve VA, Idelchick VI, Tarasov VI, Estimation of electrical power system steady-state stability in load flow calculations, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, no.3, pp.1034-1041, 1975.
 - [64] Thomas RJ, Tiranuchit A, Voltage instabilities in electric power networks, Proceedings of the 18th South-Eastern Symposium on System Theory, Knoxville, Tennessee, pp.359-363, 1986.
 - [65] P-A Lof, Andersson G, Hill DJ, Voltage stability indices for stressed power systems, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, no.1, pp.326-334, 1993.
 - [66] Schlueter RA, Hu I, Chang MW, Costi A., Methods for determining proximity to voltage collapse, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, no. 1, pp.285–292, 1991.
 - [67] Chebbo AM, Irwing MR, and Sterling MJH, Voltage collapse proximity indicator: behavior and implications, IEE Proc.-C, Vol.139, no.3, pp.241-252, 1992.
 - [68] Jasmon GB, Lee LHCC, New contingency ranking technique incorporating a voltage stability criterion, IEE Proc.-C, Vol.140, no.2, pp.87-90, 1993.
 - [69] Moghavvemi M, New method for indicating voltage stability condition in power system, In: Proceedings of IEE International Power Engineering Conference, IPEC 97, Singapore, pp.223-227, 1997.

-
- [70] Gubina F, Strmcnik B, A simple approach to voltage stability assessment in radial networks, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.12, no.3, pp.1121-1128, August 1997.
 - [71] Moghavvemi M, and Faruque MO, Power system security and voltage collapse: a line outage based indicator for prediction, Electric Power and Energy System, Vol.21, no.6, pp.455-461, 1999.
 - [72] Moghavvemi M, and Faruque MO, Technique for assessment of voltage stability in ill-conditioned radial distribution network, IEEE Power Eng. Review, pp.58-60, 2001.
 - [73] Chakravorty M, and Das D, Voltage stability analysis of radial distribution networks, Electric Power and Energy System, Vol.23, no.2, pp.129-135, 2001.
 - [74] Glover JD, Sarma M, Power system analysis and design, PWS Publishing Company, Secon Edition, Chapter 7, pp.252-292, 1994.
 - [75] Ray D. Zimmerman, Comprehensive Distribution Power Flow: Modeling, Formulation, Solution Algorithms and Analysis, Ph. D Thesis, Cornell University, January 1995.
 - [76] Hadjsaid N, Canard JF, Dumas F, Dispersed generation impacts on distribution networks, IEEE Computer Applications in Power, Vol. 12, No.2, pp.22-28, April 1999.
 - [77] Ackermann T, Andersson G, Söder L, Distributed Generation, A definition, Electric Power Systems Research ,Vol. 57, pp. 195-204, 2001.
 - [78] EL-Kattam W, Salama MMA, Distributed Generation Technologies, definitions and Benefits, Electric Power Systems Research, vol. 71, pp. 119-128, 2004.
 - [79] Willis HL, Scott WG, Distributed Power Generation; Planning and Evaluation, Power Engineering Series, Newyork 2000.
 - [80] Ribeiro PF, Johnson BK, Crow ML, Arsoy A, Liu Y, Energy storage systems for advanced power applications, Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No.12 pp. 1744-1756.
 - [81] Mithulananthan M, Salama MMA, Canizares CA, and Reeve J, Distribution system voltage regulation and VAR compensation for different static load models, International Journal of Electrical Engineering Education, Vol.37, no.4, pp.384-395, 2000.

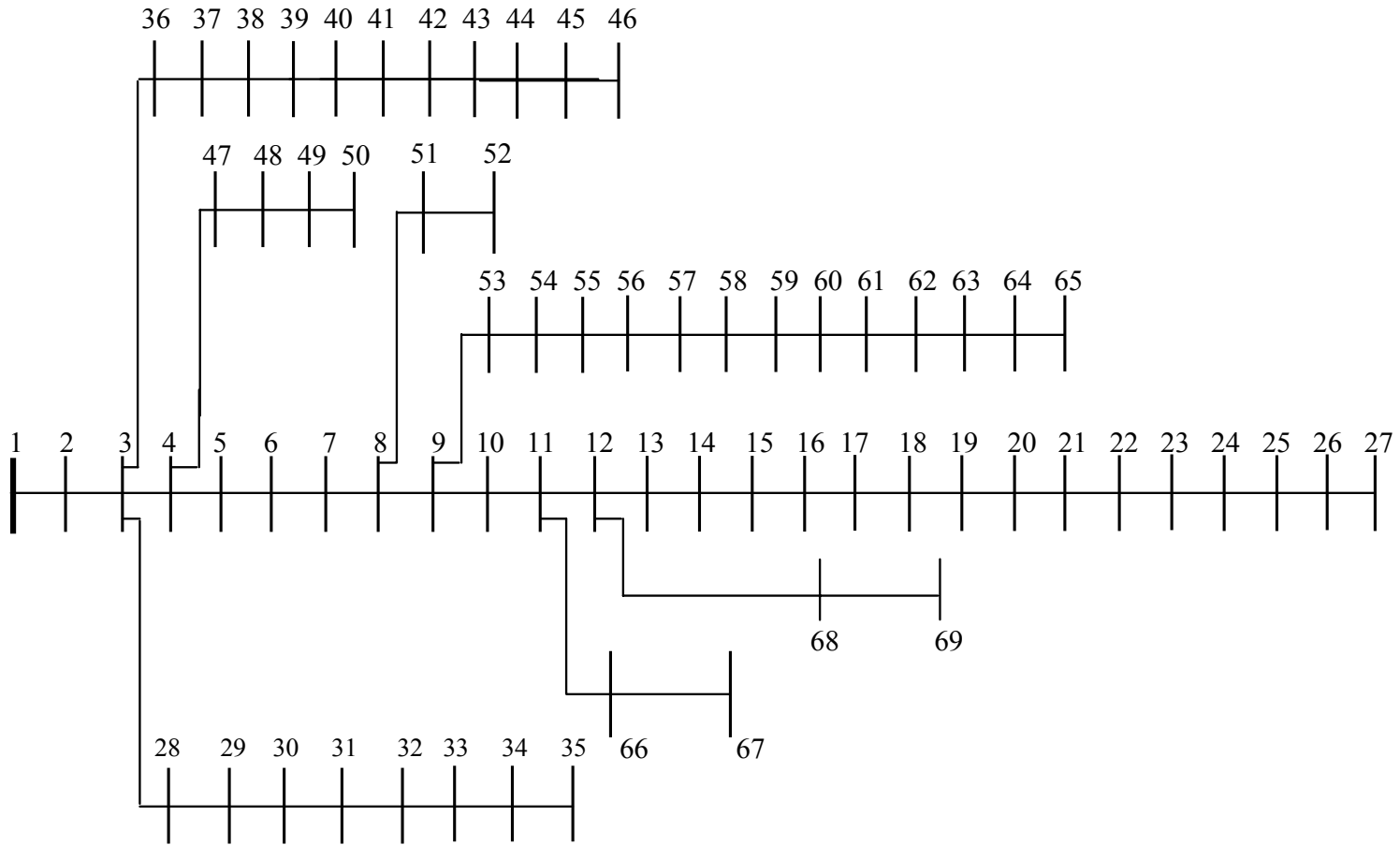
-
- [82] Cutsem TV, Vournas C, Voltage Stability of Electric Power Systems, Power Electronics and Power System Series, Kluwer, 1998.
 - [83] Prabha Kunder, Power system stability and control, Power System Engineering Series, Mc Graw Hill, 1993.
 - [84] Canizares CA, PFLOW : Continuation and direct methods to locate fold bifurcations in AC/DC/FACTS Power Systems, Universty of Waterloo, August 1998. available at: <http://www.power.uwaterloo.ca>.
 - [85] Fortescue L, Method of symmetrical coordinates applied to the solution of poly phase networks, Trans. AIEE, pt. II, Vol.37 , pp.1027-1140, 1918.
 - [86] Wang Y, Xu W, The existence of multiple power flow solutions in unbalanced three-phase circuits, IEEE Trans. on Power Systems, Vol.18, no.2, pp.605-610, May 2003.
 - [87] Radial Test Feeders-IEEE Distribution System Analysis Subcommittee, available at:www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders.html.

EK-I

Şekil 1.1. 12-baralı sistemin devre şeması



Şekil 1.2. 33-baralı sistemin devre şeması



Şekil 1.3. 69-baralı sistemin devre şeması

Tablo 1.1. 12-baralı sistemin hat ve yük bilgileri

Hat	Hat empedansı		Yük gücü	
	R (Ω)	X (Ω)	Aktif güç (kW)	Reaktif güç (kVAr)
1-2	1.0930	0.4550	60	60
2-3	1.1840	0.4940	40	30
3-4	2.0950	0.8730	55	55
4-5	3.1880	1.3290	30	30
5-6	1.0930	0.4550	20	15
6-7	1.0020	0.4170	55	55
7-8	4.4030	1.2150	45	45
8-9	5.6420	1.5970	40	40
9-10	2.8900	0.8180	35	30
10-11	1.5140	0.4280	40	30
11-12	1.2380	0.3510	15	15

Tablo 1.2. 33-baralı sistemin hat ve yük bilgileri

Hat	Hat empedansı		Yük gücü	
	R (Ω)	X (Ω)	Aktif güç (kW)	Reaktif güç (kVAr)
1-2	0.0922	0.0470	100	60
2-3	0.4930	0.2510	90	40
3-4	0.3660	0.1864	120	80
4-5	0.3811	0.1941	60	30
5-6	0.8190	0.7070	60	20
6-7	0.1872	0.6188	200	100
7-8	0.7114	0.2351	200	100
8-9	1.0300	0.7400	60	20
9-10	1.0440	0.7400	60	20
10-11	0.1966	0.0650	45	30
11-12	0.3744	0.1238	60	35
12-13	1.4680	1.1550	60	35
13-14	0.5416	0.7129	120	80
14-15	0.5910	0.5260	60	10
15-16	0.7463	0.5450	60	20
16-17	1.2890	1.7210	60	20
17-18	0.7320	0.5740	90	40
2-19	0.1640	0.1565	90	40
19-20	1.5042	1.3554	90	40
20-21	0.4095	0.4784	90	40
21-22	0.7089	0.9373	90	40
4-23	0.4512	0.3083	90	50
23-24	0.8980	0.7091	420	200
24-25	0.8960	0.7011	420	200
6-26	0.2030	0.1034	60	25
26-27	0.2842	0.1447	60	25
27-28	1.0590	0.9337	60	20
28-29	0.8042	0.7006	120	70
29-30	0.5075	0.2585	200	600
30-31	0.9744	0.9630	150	70
31-32	0.3105	0.3619	210	100
32-33	0.3410	0.5302	60	40

Tablo 1.3. 69-baralı sistemin hat ve yük bilgileri

Hat	Hat empedansı		Yük gücü		Hat	Hat empedansı		Yük gücü	
	R (Ω)	X (Ω)	Aktif güç (kW)	Reaktif güç (kVAr)		R (Ω)	X (Ω)	Aktif güç (kW)	Reaktif güç (kVAr)
1-2	0.0005	0.0012	0	0	3-36	0.0044	0.0108	26	18.6
2-3	0.0005	0.0012	0	0	36-37	0.0640	0.1565	26	18.6
3-4	0.0015	0.0036	0	0	37-38	0.1053	0.1230	0	0
4-5	0.0251	0.0294	0	0	38-39	0.0304	0.0355	24	17
5-6	0.3660	0.1864	2.6	2.2	39-40	0.0018	0.0021	24	17
6-7	0.3811	0.1941	40.4	30	40-41	0.7283	0.8509	1.2	1
7-8	0.0922	0.0470	75	54	41-42	0.3100	0.3623	0	0
8-9	0.0493	0.0251	30	22	42-43	0.0410	0.0478	6	4.3
9-10	0.8190	0.2707	28	19	43-44	0.0092	0.0116	0	0
10-11	0.1872	0.0619	145	104	44-45	0.1089	0.1373	39.2	26.3
11-12	0.7114	0.2351	145	104	45-46	0.0009	0.0012	39.2	26.3
12-13	1.0300	0.3400	8	5.5	4-47	0.0034	0.0084	0	0
13-14	1.0440	0.3450	8	5.5	47-48	0.0851	0.2083	79	56.4
14-15	1.0580	0.3496	0	0	48-49	0.2898	0.7091	384.7	274.5
15-16	0.1966	0.0650	45.5	30	49-50	0.0822	0.2011	384.7	274.5
16-17	0.3744	0.1238	60	35	8-51	0.0928	0.0473	40.5	28.3
17-18	0.0047	0.0016	60	35	51-52	0.3319	0.1114	3.6	2.7
18-19	0.3276	0.1083	0	0	9-53	0.1740	0.0886	4.3	3.5
19-20	0.2106	0.0696	1	0.6	53-54	0.2030	0.1034	26.4	19
20-21	0.3416	0.1129	114	81	54-55	0.2842	0.1447	24	17.2
21-22	0.0140	0.0046	5.3	3.5	55-56	0.2813	0.1433	0	0
22-23	0.1591	0.0526	0	0	56-57	1.5900	0.5337	0	0
23-24	0.3463	0.1145	28	20	57-58	0.7837	0.2630	0	0
24-25	0.7488	0.2475	0	0	58-59	0.3042	0.1006	100	72
25-26	0.3089	0.1021	14	10	59-60	0.3861	0.1172	0	0
26-27	0.1732	0.0572	14	10	60-61	0.5075	0.2585	1244	888
3-28	0.0044	0.0108	26	18.5	61-62	0.0974	0.0496	32	23
28-29	0.0640	0.1565	26	18.5	62-63	0.1450	0.0738	0	0
29-30	0.3978	0.1315	0	0	63-64	0.7105	0.3619	227	162
30-31	0.0702	0.0232	0	0	64-65	1.0410	0.5302	59	42
31-32	0.3510	0.1160	0	0	11-66	0.2012	0.0611	18	13
32-33	0.8390	0.2816	14	10	66-67	0.0047	0.0014	18	13
33-34	1.7080	0.5646	19.5	14	12-68	0.7394	0.2444	28	20
34-35	1.4740	0.4873	6	14	68-69	0.0047	0.0016	28	20

EK-II

2.1 Üç Fazlı Bir Dağıtım Hattında, Hat Sonu Aktif ve Reaktif Güç İfadesinin Türetilmesi

Hat sonu gücünün ifadesi

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ra}(i_{ra})^* \\ v_{rb}(i_{rb})^* \\ v_{rc}(i_{rc})^* \end{bmatrix} \quad (2.1.1)$$

şeklinde yazılabilir. Burada v_r hat sonu bara gerilimleri vektörü, i_r ise hat sonu akım vektörü olup ifadesi

$$\begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} - v_{ra} \\ v_{sb} - v_{rb} \\ v_{sc} - v_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.1.2)$$

Burada y matrisi hattın admitans matrisidir. Denklem (2.1.2)'yi (2.1.1)'de yerine yazılarak gücün gerilime bağlı ifadesi;

$$\begin{bmatrix} S_{ra} \\ S_{rb} \\ S_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (v_{sa})^* v_{ra} \\ (v_{sb})^* v_{rb} \\ (v_{sc})^* v_{rc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |v_{ra}|^2 \\ |v_{rb}|^2 \\ |v_{rc}|^2 \end{bmatrix} \quad (2.1.3)$$

şeklinde elde edilir. Elde edilen denklemin trigonometrik forma dönüşümü;

$$[S] = [A] + [B] \quad (2.1.4)$$

$$[A] = [A_x] + j[A_y] \quad (2.1.5)$$

$$Ax = \begin{bmatrix} Y_{11}V_{ra}V_{sa}\cos(\theta_{11}+\delta_{ra}-\delta_{sa}) & Y_{12}V_{rb}V_{sc}\cos(\theta_{12}+\delta_{rb}-\delta_{sb}) & Y_{13}V_{rc}V_{sc}\cos(\theta_{13}+\delta_{rc}-\delta_{sc}) \\ Y_{21}V_{ra}V_{sa}\cos(\theta_{21}+\delta_{ra}-\delta_{sa}) & Y_{22}V_{rb}V_{sb}\cos(\theta_{22}+\delta_{rb}-\delta_{sb}) & Y_{23}V_{rc}V_{sc}\cos(\theta_{23}+\delta_{rc}-\delta_{sc}) \\ Y_{31}V_{ra}V_{sa}\cos(\theta_{31}+\delta_{ra}-\delta_{sa}) & Y_{32}V_{rb}V_{sb}\cos(\theta_{32}+\delta_{rb}-\delta_{sb}) & Y_{33}V_{rc}V_{sc}\cos(\theta_{33}+\delta_{rc}-\delta_{sc}) \end{bmatrix} \quad (2.1.6)$$

$$Ay = \begin{bmatrix} Y_{11}V_{ra}V_{sa}\sin(\theta_{11}+\delta_{ra}-\delta_{sa}) & Y_{12}V_{rb}V_{sc}\sin(\theta_{12}+\delta_{rb}-\delta_{sb}) & Y_{13}V_{rc}V_{sc}\sin(\theta_{13}+\delta_{rc}-\delta_{sc}) \\ Y_{21}V_{ra}V_{sa}\sin(\theta_{21}+\delta_{ra}-\delta_{sa}) & Y_{22}V_{rb}V_{sb}\sin(\theta_{22}+\delta_{rb}-\delta_{sb}) & Y_{23}V_{rc}V_{sc}\sin(\theta_{23}+\delta_{rc}-\delta_{sc}) \\ Y_{31}V_{ra}V_{sa}\sin(\theta_{31}+\delta_{ra}-\delta_{sa}) & Y_{32}V_{rb}V_{sb}\sin(\theta_{32}+\delta_{rb}-\delta_{sb}) & Y_{33}V_{rc}V_{sc}\sin(\theta_{33}+\delta_{rc}-\delta_{sc}) \end{bmatrix} \quad (2.1.7)$$

$$[B] = [Bx] + j[By] \quad (2.1.8)$$

$$Bx = \begin{bmatrix} Y_{11}V_{ra}^2\cos(\theta_{11}) & Y_{12}V_{rb}^2\cos(\theta_{12}) & Y_{13}V_{rc}^2\cos(\theta_{13}) \\ Y_{21}V_{ra}^2\cos(\theta_{21}) & Y_{22}V_{rb}^2\cos(\theta_{22}) & Y_{23}V_{rc}^2\cos(\theta_{23}) \\ Y_{31}V_{ra}^2\cos(\theta_{31}) & Y_{32}V_{rb}^2\cos(\theta_{32}) & Y_{33}V_{rc}^2\cos(\theta_{33}) \end{bmatrix} \quad (2.1.9)$$

$$By = \begin{bmatrix} Y_{11}V_{ra}^2\sin(\theta_{11}) & Y_{12}V_{rb}^2\sin(\theta_{12}) & Y_{13}V_{rc}^2\sin(\theta_{13}) \\ Y_{21}V_{ra}^2\sin(\theta_{21}) & Y_{22}V_{rb}^2\sin(\theta_{22}) & Y_{23}V_{rc}^2\sin(\theta_{23}) \\ Y_{31}V_{ra}^2\sin(\theta_{31}) & Y_{32}V_{rb}^2\sin(\theta_{32}) & Y_{33}V_{rc}^2\sin(\theta_{33}) \end{bmatrix} \quad (2.1.10)$$

A ve B matrislerinin Denklem (2.1.4)'de yerine konulması durumunda

$$[P + jQ] = [Ax] + j[Ay] + [Bx] + j[By] \quad (2.1.11)$$

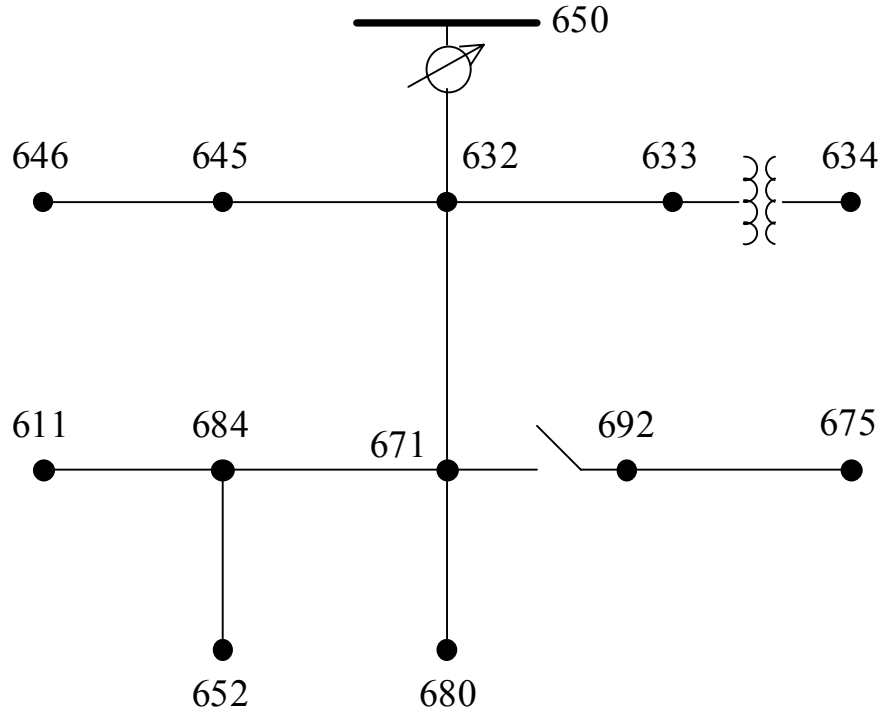
$$[P] = [Ax] + [Bx] \quad (2.1.12)$$

$$[Q] = [Ay] + [By] \quad (2.1.13)$$

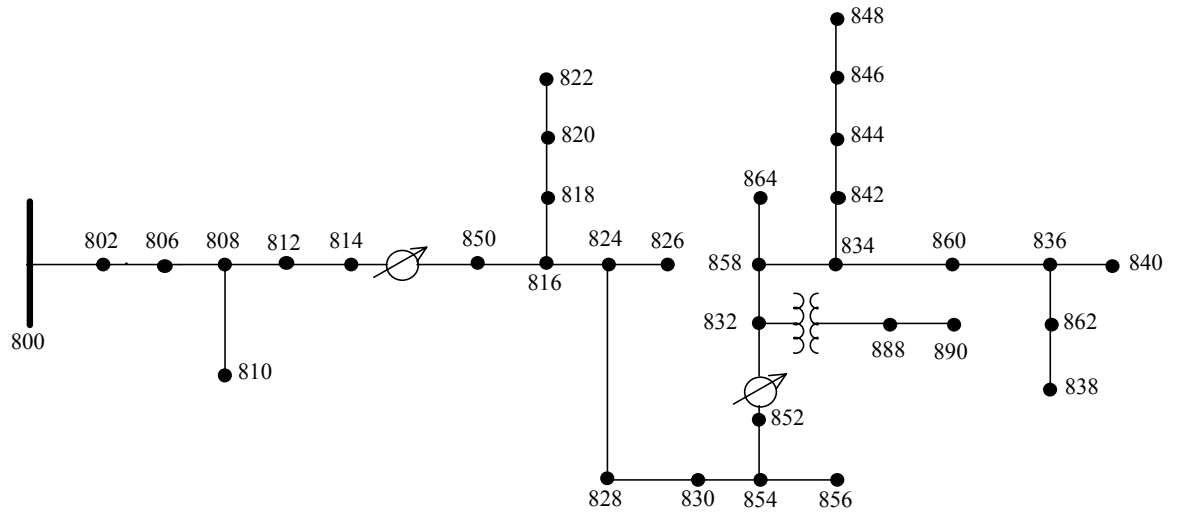
eşitlikleri elde edilir. Elde edilen aktif ve reaktif güç ifadelerinin açık ifadesi Denklem (2.1.14)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} P_a \\ P_b \\ P_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{11}V_{ra}V_{sa} \cos(\theta_{11} + \delta_{ra} - \delta_{sa}) & Y_{12}V_{rb}V_{sc} \cos(\theta_{12} + \delta_{rb} - \delta_{sb}) & Y_{13}V_{rc}V_{sc} \cos(\theta_{13} + \delta_{rc} - \delta_{sc}) \\ Y_{21}V_{ra}V_{sa} \cos(\theta_{21} + \delta_{ra} - \delta_{sa}) & Y_{22}V_{rb}V_{sb} \cos(\theta_{22} + \delta_{rb} - \delta_{sb}) & Y_{23}V_{rc}V_{sc} \cos(\theta_{23} + \delta_{rc} - \delta_{sc}) \\ Y_{31}V_{ra}V_{sa} \cos(\theta_{31} + \delta_{ra} - \delta_{sa}) & Y_{32}V_{rb}V_{sb} \cos(\theta_{32} + \delta_{rb} - \delta_{sb}) & Y_{33}V_{rc}V_{sc} \cos(\theta_{33} + \delta_{rc} - \delta_{sc}) \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} Y_{11}V_{ra}^2 \cos(\theta_{11}) & Y_{12}V_{rb}^2 \cos(\theta_{12}) & Y_{13}V_{rc}^2 \cos(\theta_{13}) \\ Y_{21}V_{ra}^2 \cos(\theta_{21}) & Y_{22}V_{rb}^2 \cos(\theta_{22}) & Y_{23}V_{rc}^2 \cos(\theta_{23}) \\ Y_{31}V_{ra}^2 \cos(\theta_{31}) & Y_{32}V_{rb}^2 \cos(\theta_{32}) & Y_{33}V_{rc}^2 \cos(\theta_{33}) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.1.14.a}$$

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Y_{11}V_{ra}V_{sa} \sin(\theta_{11} + \delta_{ra} - \delta_{sa}) & Y_{12}V_{rb}V_{sc} \sin(\theta_{12} + \delta_{rb} - \delta_{sb}) & Y_{13}V_{rc}V_{sc} \sin(\theta_{13} + \delta_{rc} - \delta_{sc}) \\ Y_{21}V_{ra}V_{sa} \sin(\theta_{21} + \delta_{ra} - \delta_{sa}) & Y_{22}V_{rb}V_{sb} \sin(\theta_{22} + \delta_{rb} - \delta_{sb}) & Y_{23}V_{rc}V_{sc} \sin(\theta_{23} + \delta_{rc} - \delta_{sc}) \\ Y_{31}V_{ra}V_{sa} \sin(\theta_{31} + \delta_{ra} - \delta_{sa}) & Y_{32}V_{rb}V_{sb} \sin(\theta_{32} + \delta_{rb} - \delta_{sb}) & Y_{33}V_{rc}V_{sc} \sin(\theta_{33} + \delta_{rc} - \delta_{sc}) \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} Y_{11}V_{ra}^2 \sin(\theta_{11}) & Y_{12}V_{rb}^2 \sin(\theta_{12}) & Y_{13}V_{rc}^2 \sin(\theta_{13}) \\ Y_{21}V_{ra}^2 \sin(\theta_{21}) & Y_{22}V_{rb}^2 \sin(\theta_{22}) & Y_{23}V_{rc}^2 \sin(\theta_{23}) \\ Y_{31}V_{ra}^2 \sin(\theta_{31}) & Y_{32}V_{rb}^2 \sin(\theta_{32}) & Y_{33}V_{rc}^2 \sin(\theta_{33}) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.1.14.b}$$



Şekil 2.1. IEEE 13-bus dengesiz test sisteminin devre şeması



Şekil 2.2. IEEE 34-bus dengesiz test sistemin devre şeması

ÖZGEÇMİŞ

Ulaş EMİNOĞLU, 1978 yılında Kars'ın Susuz ilçesinin Kızıroğlu Köyünde doğdu. İlköğrenimini burada tamamladıktan sonra orta ve lise öğrenimini sırasıyla Kars ŞAİKO orta okulu ve Kars Cumhuriyet Lisesinde tamamladı. 1996 yılında Malatya İnönü Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümüne kayıt yaptırdı. 2000 yılında üniversite öğrenimini tamamladıktan sonra Malatya İPAS Anateks fabrikasında Elektrik bakım mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2001 yılında İnönü Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisansa başladı. 2002 yılında Niğde Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başlaması nedeniyle çalıştığı üniversiteye yatay geçiş yaparak Yüksek Lisansı 2003 yılında Niğde Üniversitesinde tamamladı. Aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora öğrenimine başlaması nedeniyle 2004 yılında bu üniversiteye görevlendirilen Ulaş EMİNOĞLU halen aynı bölümde Araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.