

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

DAĞITIM SİSTEMLERİNE YEREL
ELEKTRİK SANTRALLERİNİN
YERLEŞTİRİLMESİ

Tuba GÖZEL
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2009

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

DAĞITIM SİSTEMLERİNE YEREL
ELEKTRİK SANTRALLERİNİN
YERLEŞTİRİLMESİ

Tuba GÖZEL
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU

GEBZE

2009

 GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ	MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ JÜRİ ONAY FORMU
--	---

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN) : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

ÜYE : Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU

ÜYE : Doç. Dr. Alp Er KONUKMAN

ÜYE : Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15/01/2009 tarih ve 2009/02 sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen 13/02/2009 tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Doktora öğrencisi Tuba GÖZEL'in çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu/...../..... tarih ve/..../..... sayılı kararıyla Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

Tezin Başlığı : Dağıtım Sistemlerine Yerel Elektrik Santrallerinin Yerleştirilmesi

Yazar Adı : Tuba GÖZEL

Son zamanlarda yenilenebilir kaynaklara olan ilgi hızla artmaktadır. Yenilenebilir kaynakları içine alan Yerel Elektrik Santraller (YES) ile ilgili çalışmalar da önem kazanmaktadır. YES'in, dağıtım sistemlerinin gerilim profilini düzeltmesi, kayıplarını azaltması, maliyeti düşürmesi, güvenilirliğini artırması gibi pek çok avantajı bulunmaktadır. Avantajlarından yararlanabilmek için YES'in en uygun yer ve büyüklükte olması gereklidir. Dağıtım sistemlerinin radyal yapısı, dengesiz dağılmış yükü çok sayıdaki düğümleri, geniş aralıklardaki direnç ve reaktans değerleri gibi özelliklerden dolayı iletim sistemleri için geliştirilen metotlar genellikle yeterli olmamaktadır.

Bu tezde dağıtım sistemlerine uygun eşdeğer akım enjeksiyon tekniği temelli iki kayıp duyarlılık ifadesi elde edilmiştir. Kayıp duyarlılık ifadesinden yararlanılarak radyal ve kapalı devre bulunan dağıtım sistemlerinde güç kayıplarını en aza indirmek amacı ile eklenecek YES'in yerleştirilmesi için güvenilir, kolay uygulanabilen ve sonuca hızlı ulaşılabilen iki metot geliştirilmiştir. Geliştirilen metotlar radyal sistemler ve kapalı devre bulunan dağıtım sistemler için Jacobian veya empedans matrisi kullanmayan YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü elde eden analitik metotlardır. Geliştirilen analitik metotlar dağıtım test sistemine ve gerçek radyal dağıtım sistemine uygulanarak ızgara arama metodu ile geçerliliği doğrulanmıştır.

Bununla birlikte, zamanla değişen yükleri göz önünde bulundurarak kapalı devre bulunabilen dağıtım sistemlerinin gerilim duyarlılık ifadesi elde edilmiştir. Gerilim duyarlılık ifadesini kullanarak gerilim profilini düzeltmesi amacıyla dağıtım sistemlerine yerleştirilecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü belirleyen analitik bir metot geliştirilmiştir. Geliştirilen üçüncü metot dağıtım sistemleri için Jacobian veya empedans matrisi kullanmadan bara gücü, gerilimi ve empedansı ile bara akımının ifadesine dayanmaktadır. Geliştirilen analitik metodun geçerliliği beş test sistemine uygulanarak ızgara arama metodu ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

SUMMARY

Thesis Title : Optimal allocation of distributed generators in distribution systems

Writer Name : Tuba GÖZEL

In recent years, great interests have been directed to integration of distributed resources to the grid with the aim of exploitation of the renewable resources. On account of achieving positive effects, distributed generator (DG) must be reliable, dispatchable, of the proper size and at the proper locations. On the other hand, some inherent features of distribution systems, such as radial structure, large number of nodes, a wide range of X/R ratios; the conventional techniques developed for the transmission systems generally fail on the determination of optimum size and location of distributed generations.

In this thesis, two loss sensitivity factors, based on the equivalent current injection technique, are formulated for radial or weakly meshed distribution systems. The formulated sensitivity factors are employed for the determination of the optimum size and location of distributed generation so as to minimize total power losses by an analytical method without use of admittance matrix, inverse of admittance matrix or Jacobian matrix. The optimum size of DG and placement for loss minimization are determined by two different proposed methods and validated against the results obtained by the classical grid search algorithm which is implemented by successive load flows for six distribution test systems and an actual large radial distribution system.

In addition to this, a voltage sensitivity factor is formulated with the equivalent current injection technique by taking into consideration time dependent nature of the loads. The developed sensitivity factor is employed for deriving an analytical expression to calculate the optimum size of DG to improve the voltage profile. Consequently, third analytical method is proposed to determine the optimum size and location of DG so as to maximize the voltage profile improvement of overall system. It is shown that, the proposed method is in close agreement with the classical grid search algorithm.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının danışmanlığını yürüten, benden hiç bir zaman yardımını ve hoşgörüsünü esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na,

çalışma süresince bana destek olan değerli hocalarım Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI ve Doç. Dr. AlpEr KONUKMAN'a,

bana her zaman destek olan ve hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan sevgili aileme özellikle annem Feride KOCAMAN'a, değerli eşim Alpaslan GÖZEL'e, çocuklarım Firuze Beyza ve Dide Begüm'e

ve her zaman yanımda olan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

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	6
2. DAĞITIM SİSTEMLERİ VE YEREL ELEKTRİK SANTRALLERİ	8
2.1. Dağıtım Sistemleri	8
2.2. Yerel Elektrik Santrali	13
2.3. Yerel Elektrik Santrallerin Dağıtım Sistemlerine Etkisi	18
2.4. Elektrik Enerji Talebi	20
2.5. Yerel Elektrik Santrali ile Dağıtım Sistemlerinde Güç Akış Analizi	22
2.6. Dağıtım Sistemlerine Yerel Elektrik Santrallerinin Yerleştirilmesi	25
2.6.1. Alt iletim hatları için geliştirilen metotlar	27
2.6.2. Dağıtım sistemlerinde aktif güç kayıplarını azaltmak için geliştirilen metotlar	34
2.6.3. Dağıtım sistemlerinin gerilim profilini düzeltmek için geliştirilen metotlar	40
2.6.4. Diğer amaçlar için geliştirilen metotlar	42
2.7. Sonuçlar ve Özet	42
3. DUYARLILIK ANALİZİ	48
3.1. Hat Kayıplarının Aktif Güç Değişimine Hassasiyeti	48
3.1.1. Duyarlılık İfadesi 1	49
3.1.2. Duyarlılık İfadesi 2	53

3.1.3. Duyarlılık İfadesi 3	56
3.2. Duyarlılık İndislerinin Değerlendirilmesi	58
3.3. Sonuç	59
4. YEREL ELEKTRİK SANTRALLERİN YERLEŞTİRİLMESİ	60
4.1. Radyal Sistemlerine YES'lerin Yerleştirilmesi	60
4.1.1. Teorik Analiz	61
4.1.2. Toplam Güç Kayıp İfadesi	65
4.1.3. Kayıp Duyarlılık İfadesi	67
4.1.4. En Uygun Büyüklük	70
4.1.5. En Uygun Yer	72
4.2. Kapalı Sistemlere YES'lerin Yerleştirilmesi	76
4.2.1. Teorik Analiz	76
4.2.2. Toplam Güç Kayıp İfadesi	80
4.2.3. Kayıp Duyarlılık İfadesi	84
4.2.4. En Uygun Büyüklük	86
4.2.5. En Uygun Yer	95
4.3. Sonuç	98
5. ZAMANLA DEĞİŞEN YÜKLERE SAHİP SİSTEMLERDE GERİLİM PROFİLİNİ DÜZELTECEK YES'İN YERLEŞTİRİLMESİ	99
5.1. Zamanla Değişen Yükler ile Dağıtım Sisteminin Gerilim Sapması	99
5.2. En Uygun Büyüklük	103
5.3. En Uygun Yer	111
5.4. Sonuç	114
6. GELİŞTİRİLEN ANALİTİK METOTLARIN UYGULANMASI	115
6.1. Giriş	115
6.2. Yeni Geliştirilen Analitik Metotların Karşılaştırılacağı Metotlar	116
6.3. Güç Kayıplarını Azaltmak için Yeni Geliştirilen Analitik Metotların Uygulanması	121
6.4. Gerilim Profilini Düzeltmek için Yeni Geliştirilen Analitik Metodun Uygulanması	133
6.5. Sonuç	146
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	147
7.1. Sonuç	147

7.2. Çalışma Konusu Önerileri	149
KAYNAKLAR	151
ÖZGEÇMİŞ	159
EK	160

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
P_{loss}	Aktif Güç Kaybı	Watt

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
YES	Yerel Elektrik Santrali
VDA	Zamanla değişen yükler ile dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapmasını

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Farklı gerilim seviyeleri ile iletim ve dağıtım sistemlerinden oluşan geleneksel güç sistemi [1]	9
2.2. Dağıtım sistemlerin beş farklı yapısı [27]	12
2.3. Farklı müşteri tiplerin yük profili [1]	21
3.1. Toplam güç kayıp eğrisindeki lineersizlik	58
4.1. Örnek radyal dağıtım sisteminin devre şeması	62
4.2. Radyal sistemin güç kaybını en aza indirecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden yeni analitik metodun akış diyagramı	75
4.3. Örnek tek gözlü dağıtım sisteminin devre şeması	77
4.4. Dağıtım sisteminin güç kaybını en aza indirecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden yeni analitik metodun akış diyagramı	97
5.1. Gerilim profilini düzeltecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden yeni analitik metodun akış diyagramı	113
6.1. YES'in yerleştirilmesine ait metotların akış diyagramları	119
6.2. Gerilim profilini düzeltecek YES'in yerleştirilmesine ait ızgara arama metodun akış diyagramı	120
6.3. 12 baralı radyal test sistemin güç kaybını azaltacak YES'in her bir bara için hesaplanan en uygun büyüklüğü	125

6.4. 12 baralı radyal test sistemin her bir barasına eklenecek en uygun büyüklükteki YES ile sistemin güç kaybı	125
6.5. 30 baralı radyal test sistemin güç kaybını azaltacak YES'in her bir bara için hesaplanan en uygun büyüklüğü	126
6.6. 30 baralı radyal test sisteminin her bir barasına eklenecek en uygun büyüklükteki YES ile sistemin güç kaybı	126
6.7. 33 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin güç kaybı	127
6.8. 69 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin güç kaybı	128
6.9. 229 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin güç kaybı	129
6.10. 30 baralı kapalı devreli dağıtım test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin güç kaybı	130
6.11. 69 baralı kapalı devreli dağıtım test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin güç kaybı	131
6.12. 12 baralı radyal test sistemin gerilim profilini düzeltecek YES'in her bir bara için hesaplanan en uygun büyüklüğü	136
6.13. 12 baralı radyal test sistemin her bir barasına eklenecek en uygun büyüklükteki YES ile sistemin ortalama gerilim sapması	136
6.14. 30 baralı radyal test sistemin gerilim profilini düzeltecek YES'in her bir bara için hesaplanan en uygun büyüklüğü	137
6.15. 30 baralı radyal test sistemin her bir barasına eklenecek en uygun büyüklükteki	

YES ile sistemin ortalama gerilim sapması	137
6.16. 33 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin ortalama gerilim sapması	139
6.17. 69 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin ortalama gerilim sapması	140
6.18. 229 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin ortalama gerilim sapması	142
6.19. Çeşitli yerlere yerleştirilen YES ile 69 baralı radyal sistemin düşük yük seviyesindeki bara gerilimleri	144
6.20. Çeşitli yerlere yerleştirilen YES ile 69 baralı radyal sistemin yüksek yük seviyesindeki bara gerilimleri	144
6.21. Farklı yük seviyelerinde YES ile ve YES'siz 69 baralı radyal sistemin minimum ve maksimum bara gerilimleri	145

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. YES'in kapasitesine göre sınıflandırılması	15
2.2. YES teknolojileri [36]	16
2.3. Çalışmalarda metodun uygulandığı yer ve metot tipi	43
2.4. Alt iletim hatlarına YES yerleşimi ile ilgili çalışmalar	44
2.5. Dağıtım sistemleri için yapılan çalışmalar	45
6.1. Radyal dağıtım test sistemlerin güç kaybını azaltacak YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü	122
6.2. Kapalı devreli dağıtım test sistemlerin güç kaybını azaltacak YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü	123
6.3. YES'li dağıtım test sistemlerin güç kaybı ve minimum gerilimleri	123
6.4. Dağıtım test sistemlerin gerilim profilini düzeltecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü	134
6.5. YES'li dağıtım test sistemlerin VDA, güç kaybı, minimum ve maksimum gerilimleri	134
6.6. 69 baralı test sisteminin bazı baralara yerleştirilen YES'in en uygun büyüklüğü ve %VDA	143

1. GİRİŞ

Geleneksel olarak elektrik enerjisi, büyük güçlü elektrik üretim birimlerinden iletim sistemlerine, iletim sistemlerinden dağıtım sistemlerini geçerek müşteriye ulaştırılmaktadır. Bu yapıya *merkezi üretim sistemi* denilmektedir [1]. Merkezi üretim sisteminde iletim sistemleri; enerji iletiminde sürekliliği ve güvenilirliği garantilemek üzere güç üretim birimleri ile tasarlanmaktadır. İletim sistemi özellikle uzun hatlardan meydana gelmektedir. Arıza durumunda alternatif başka hatları da kullanabilen şebeke ağlarıdır. Geleneksel güç sistemlerinde güç akışı, az sayıdaki büyük güçlü elektrik üretim birimlerinden çok sayıdaki son kullanıcıya doğrudur [1].

Son yıllardaki nüfus artışı ve sanayinin gelişmesi enerjiye olan ihtiyacı artırmaktadır. Sınırlı miktardaki fosil kökenli enerji kaynaklarının artan talebi karşılayamaması, çevreyi kirletmesi ilgili birimleri yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmektedir. Hidrolik, rüzgâr, güneş, jeotermal, biokütle, biyogaz, dalga, akıntı enerjisi ve gel-git gibi enerji kaynakları yenilenebilir enerji kaynakları olarak isimlendirilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerinde önemli rolünün olacağı tahmin edilmektedir. Bugünlerde yenilenebilir enerji kaynaklarını da içine alan Yerel Elektrik Santralleri (YES) ile ilgili çalışmalar yeniden ön plandadır. YES'in ön plana çıkmasındaki en önemli faktörler: teknolojinin gelişmesi, mevcut iletim hatların yetersizliği, iletim hatların yeniden yapılandırılmasındaki yetersizlikler, yüksek güvenilirliğe sahip elektrik enerjisi talebindeki artış, coğrafya ve çevre ile ilgili sınırlamalardır [2]. Merkezi üretim birimi olarak planlanmayan YES'ler; küçük güçlü üretim birimleri şeklinde, müşteriye yakın dağıtım sistemlerine yerleştirilmektedir. YES'in dağıtım sistemine yerleştirilmesi güç sisteminin işletiminde değişiklikler meydana getirmektedir [3].

YES'in şu anda kurulum maliyetinin yüksek olması, bazılarının tahmin edilemeyen güç üretimi, güç dalgalanmalarına ve salınımına sebep olması gibi dezavantajları bulunsa da dağıtım sistemlerinin gerilim profilini düzeltmesi, kayıplarını azaltması, güç kalitesini düzeltmesi, güvenilirliğini artırması, iletimi ve dağıtımını rahatlatması, gibi pek çok avantajı da bulunmaktadır. Bu avantajlardan en iyi biçimde yararlanmak YES'in dağıtım sistemleri içerisinde en uygun yerini ve

büyükliğini elde etmekle mümkündür.

Bu çalışmada YES'in yerleşimi ile ilgili metotlar ve optimal güç akışında ve kapasitör yerleşiminde kullanılan duyarlılık ifadeleri araştırılmıştır. Fider ve alt fiderlerden oluşan radyal sistemler için yeni kayıp duyarlılık ifadesi çıkartılması ve radyal sistemlerinin güç kaybını azaltmak amacıyla eklenecek YES'in yerleşimi için yeni metotlar geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra kapalı devreleri de bulunan dağıtım sistemler için yeni kayıp duyarlılık ifadelerinin çıkartılması ve YES yerleşimi ile ilgili yeni metot geliştirilmesi çalışmada ele alınan bir diğer konudur. Çalışmada son olarak dağıtım sistemlerin gerilim duyarlılığını veren gerilim duyarlılık ifadesi çıkartılması ve gerilim profilini düzeltmek amacıyla zamana bağlı yükleri dikkate alarak YES yerleşimini belirlenmesi için yeni bir metot geliştirilmiştir.

1.1. Konu Hakkında

YES kaynaklı enerjinin maliyeti geleneksel kaynaklar (fosil kökenli enerji kaynakları, hidrolik enerji kaynakları, vs.) ile karşılaştırıldığında sosyal, çevresel ve kullanım gibi unsurların fiyatlandırılmamasından dolayı yüksek olmaktadır. Dolayısıyla çalışmalarda genellikle toplam sistem kayıplarını en aza indirmek için eklenen YES'in en uygun yerini ve büyüklüğünü belirlemede üretim maliyeti hesaba katılmamaktadır [4].

YES'in en önemli avantajlarından biri hat kayıplarını azaltmasıdır. Hat kayıplarını en aza indirmek için literatürde dağıtım ve iletim sistemlerinde YES'in büyüklüğü ve yerleşeceği yeri belirlemek için birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan bazıları; klasik metotlardan: ikinci derece algoritma metodu [5], meta sezgisel (meta-heuristics) metotlardan: genetik algoritması ve Hereford ranch algoritması [6], bulanık-genetik algoritması [7], tabu arama algoritması [8], analitik metotlardan: 2/3 kuralı [9], yaklaşık en uygunu bulma algoritması [10], radyal sistemlerde ve şebekelerde analitik yaklaşım [11- 13] ile yapılmıştır. Literatürde gerilim profilini düzeltmek amacıyla YES'in en uygun yerini belirleyen çalışmalarda bulunmaktadır. Örneğin [14]'te genetik algoritma, [15]'te analitik metot ve [16]'da

çok amaçlı programlama ile gerilim profilini düzelten YES'in en uygun yeri elde edilmektedir. Bununla birlikte YES'in dağıtım sistemlerine sağladığı diğer avantajları dikkate alan çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalardan [17]'de güvenilirliği artırmak için YES'in yeri belirlenmektedir, [18]'de çok amaçlı evrimsel algoritma ile YES'in büyüklüğü ve yeri elde edilmektedir.

İletim sistemleri için yapılan çalışmalardan [5]'te; optimal yük akışı ile her bir yük barasında YES bulunduğu varsayılarak kaybı, hat yüklenmesi ve reaktif gücü minimum yapacak dağıtılmış YES'lerin en uygun büyüklüğü ve yerinin elde edilmesi için bir algoritma önerilmiştir. Kullanılan algoritmanın klasik optimal yük akışı algoritmalarından farkı; klasik optimal yük akış algoritmaların amaç fonksiyonunda temel olan maliyet, kullanılan algoritmanın amaç fonksiyonuna katılmamıştır. [6]'da optimal yük akışı metodu ile Genetik algoritma ve geliştirilmiş Hereford ranch algoritması karşılaştırılmış ve Hereford ranch algoritması ile en uygun sonuç elde edilmiştir. [5], [6]'da, iletim sistemlerinde YES'in en uygun yeri, her barada YES olduğu varsayılarak ve güç akış algoritması ile elde edilmiştir. Bu tür metotlarda çok sayıda güç akış analizi yapılmakta dolayısıyla sistem büyüdükçe yapılan güç akış analiz sayısı artmaktadır. Bu da büyük sistemler için verimli bir metot olmadığını göstermektedir.

İletim ve dağıtım sistemleri için geliştirilen meta heuristik metotlar [7], [8], [14], [16], [18] kayıpların, bara gerilim saptmasının, en küçük YES'lerle nerede ve kaç taneyle olacağını belirlenmesi gibi çok amaçlı problemlerin çözümü için uygundur, yaklaşık en uygun çözümü verirler. Dezavantajları ise işlem sayısının çok olması ve çözüme yavaş yakınsamasıdır.

Dağıtım sistemlerinde şönt kondansatörün yerleştirilmesinde kullanılan kural olan '2/3 kuralı' ile kaynak yerleştirilmesi [9]'da kullanılmaktadır. Bu metotta düzgün dağılmış yükü olan radyal sistemlere yerleştirilecek YES'in büyüklüğü üretim kapasitesinin üçte ikisi oranında ve hattın başından itibaren toplam uzunluğunun üçte ikisi kadar bir mesafeye yerleştirilmesi önerilmektedir. [10]'da ise dağıtım sistemlerindeki YES'lerin toplam sistem kayıplarına göre yaklaşık en uygun yerini bulan bir algoritma geliştirilmiş ve en uygun yere yerleştirilen YES'in dağıtım sistemleri üzerindeki etkileri anlatılmıştır. Bu çalışmada toplam sistem kayıplarını

üretim birimlerinin aktif çıkış güçleri ile ifade edilmesi ile elde edilen B katsayıları kullanılarak YES'lerin yerleri belirlenmiştir.

[11]'de radyal sistemde ve gözlü bir sistemde sistemin toplam kaybını minimum yapacak YES'in yerleştirileceği en uygun yeri belirleyen analitik bir metot anlatılmaktadır. [11]'de ağ şebekeler için bara admitans matrisine, üretim bilgisine ve sistemin yük dağılımına dayanarak geliştirilen bu metotta büyüklüğü önceden belirlenen YES'in sadece en uygun yeri belirlenmiştir.

Kapasitör yerleşiminde kullanılan analitik metotlardan yararlanan [9]-[11], dağıtım sistemlerinde çeşitli dağılmış yük profilleri için fazör akıma dayalı algoritma ile sabit büyüklükteki YES'in en uygun yerini bulmuştur. Bu analitik çalışmalara ek olarak [12]'de ise en uygun büyüklükteki YES'in en uygun yeri elde edilmiştir. Ayrıca statik yük modellerin etkisine bakılmıştır. [9]-[12]'deki yük tipleri dağıtım profili bakımından gerçeğe yakın yük tipleri değildir. YES'in büyüklüğü ve yerleşeceği yeri hakkında genel bir bilgi vermektedirler.

[13]'te, dağıtım sistemlerinde radyal ve gözlü sistem için sistem kayıplarını bara güçleri ile ifade eden tam kayıp formülü ile analitik çözüm yapılmıştır. Duyarlılık ifadesi yardımı ile bir algoritma geliştirerek tekrarlanan güç akış analizi ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada iki güç akışı ile kesin sonuç elde edilmektedir. Tam kayıp formülü, bara akımının bara gücü, gerilimi ve empedans ile ifade edilmesi ile elde edilen bir formüldür. Tam kayıp formülünde, bara admitans matrisin (Ybus) tersi ile bulunan bara empedans matrisi (Zbus) bulunmaktadır. Bu çalışmada dağıtım sistemlerinde hesaplanması zor olan bara empedans matrisin kullanılması en önemli dezavantajdır.

Gelişmekte olan ülkelerde en önemli güç kalitesi problemlerinden biri olan dağıtım sistemlerinin gerilim profilidir ve önemli oranda düzeltilmeye ihtiyacı vardır. Literatürde gerilim profilini düzeltmek için birçok çalışma bulunmaktadır. Gerilim profili probleminin klasik çözümü fider başında ya da müşteri tarafında kullanılan otomatik gerilim regülâtörleri ve aktif kompanzatörlerdir. Bu çözüm özellikle düşük yüklerde aşırı kompanzasyona ya da gerilim kararlılığı problemlerine sebep olmaktadır [19]. YES ile gerilim profilinin değişimini inceleyen çalışmalar da

bulunmaktadır [20]-[24]. [20]'de gerilim regülâtörleri ile YES'in birbirine etkisi, [21]'de YES'in büyüklüğünün gerilim profiline etkisi incelenmiştir. Ayrıca gerilim kontrolünü; YES'in gücünü sınırlayarak, yük kontrolü kullanarak veya YES ile gerilim regülâtörleri arasında koordinasyon yaparak sağlanabileceğini [22]-[24]'teki çalışmalar göstermiştir.

Birçok YES yerleştirme çalışmasında gerilim profilinin düzeltilmesi ana kısıt olarak alınmıştır. Gerilim profilini düzeltmek önemli bir kısıt olmasına rağmen YES yerleşiminde amaç olarak da alınabilmektedir. Dolayısıyla gerilim profilini düzeltmek amacıyla YES'in en uygun yerini belirleyen bazı çalışmalar da bulunmaktadır [14]-[16]. [14]'te genetik algoritma kullanılarak gerilim profili farkını en aza indirmek için YES'in en uygun yeri belirlenmiştir. Bilinmektedir ki, genetik algoritma gibi heuristik algoritmalar yaklaşık en uygun çözümü verir. [15]'te gerilim ile ilgili ifadeyi YES'in büyüklüğü fonksiyonu cinsinden yazarak YES'in en uygun büyüklüğü ve yeri tekrarlayan güç akış analizleri ile bulunmuştur. Büyük sistemlerde en uygun çözümü elde etmek çok sayıda güç akışı gerektiği için verimsiz bir metottur. [16]'da dağıtım sisteminin güç kaybını ve gerilim sapmalarını azaltacak YES'lerin yeri ve büyüklüğü elde edilmiştir. Bulanık amaç programlama (Fuzzy Goal Programming) yöntemi kullanılarak amaçlar ve kısıtlamalar çok amaçlı fonksiyona çevrilip genetik algoritma ile çözülmüştür.

Şimdiye kadar yapılan çalışmalar YES'in dağıtım sistemlerinin gerilim profilini pozitif veya negatif olarak etkileyebileceğini göstermiştir [4], [20]-[24]. İyi bir gerilim profili veya hat kayıplarını azaltmak için YES'in uygun bir büyüklükte ve uygun bir yerde olması gerektiği görülmektedir. YES'in yeri ve büyüklüğünü elde etmek için güvenilir, hızlı ve kolay uygulanabilen bir metot karar vericiler ve müşteriler için önemli bir ihtiyaçtır. Dağıtım sistemlerinin radyal yapısı, dengesiz dağılmış yükü çok sayıda düğümleri, geniş aralıklardaki direnç ve reaktans değerleri gibi doğasında bulunan bazı özelliklerden dolayı iletim sistemleri için geliştirilen metotlar genellikle dağıtım sistemlerinin problemini çözmede yeterli olmamaktadır. Dağıtım sistemleri için geliştirilmiş metotlarda da birçok eksikler bulunmaktadır, bunlar tezin ilerleyen bölümlerinde kritik edilecektir.

1.2. Tezin Amacı ve Sınırları

Bu çalışmada dağıtım sistemlerine güç kaybını azaltmak veya gerilim profilini düzeltmek için eklenecek YES'in yerleştirilmesi için güvenilir, kolay uygulanabilen ve sonuca hızlı ulaşılabilen metotların geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Fider ve alt fiderlerden oluşan radyal sistemler ve kapalı devreli dağıtım sistemleri için güç kayıplarına göre duyarlılığını veren iki kayıp duyarlılık ifadesi ve güç kayıplarını en aza indirmek amacıyla YES'in en uygun büyüklüğünü belirleyen iki ifade elde edilmiştir. Daha sonra radyal sistemlere ve kapalı devreli dağıtım sistemlerine eklenecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden yeni iki analitik metot geliştirilmiştir. Bunun için dağıtım sistemindeki yüklerin güçleri sabit olduğu, YES'in sisteme sabit aktif güç verdiği kabul edilmiştir.

Bu çalışmalara ilaveten kapalı devre bulunan dağıtım sistemlerinin gerilim profilini düzeltmek amacıyla eklenecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden yeni bir analitik metot geliştirilmiştir. Bu metodun geliştirilmesinde diğer yeni geliştirilen metotlardan farklı olarak yüklerin zamanla değiştiği kabul edilmiştir. Öncelikle dağıtım sistemleri için gerilim düşümünün bara güçlerine olan hassasiyetini veren bir gerilim duyarlılık ifadesi geliştirilmiş, bu ifade kullanılarak YES'in en uygun büyüklüğü hesaplanmıştır. Özetle zamanla değişen yüklere sahip dağıtım sistemleri için gerilim profilini düzeltecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden analitik yeni bir metotta burada verilmiştir.

Geliştirilen metotlar, içinde gerçek dağıtım sistemi de bulunan farklı dağıtım sistemleri üzerinde denenmiş elde edilen sonuçlar mevcut diğer metotlar ile karşılaştırılarak ve geçerlilikleri gösterilmiştir.

1.3. Tezin Bölümleri

Dağıtım sistemleri, YES'ler ve dağıtım sistemlerine etkisi, YES ile dağıtım sistemlerinde güç akış analizi ve dağıtım sistemlerine YES'lerin yerleştirilmesi ile ilgili çalışmalar detaylı olarak ikinci bölümde incelenmiştir.

Üçüncü bölümde optimal güç akışında ve kapasitör yerleşiminde kullanılan duyarlılık ifadeleri özetlenmiştir. Ayrıca duyarlılık ifadeleri ile elde edilen duyarlılık indekslerindeki zayıflıklar ve dağıtım sistemlerine uygulanabilirliği kritize edilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, radyal sistemler için bara akımının bara gücü, gerilimi ve empedansı ile ifade edilmesinden yararlanılarak güç kayıp ifadesi çıkartılmıştır. Yeni kayıp duyarlılık ifadesi ve güç kayıplarını azaltacak YES'in en uygun büyüklüğünü elde eden ifade geliştirilmiştir. Ayrıca YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü bulan yeni bir analitik metot teklif edilmiştir. Benzer şekilde kapalı devre bulunan dağıtım sistemleri için de yeni bir kayıp duyarlılık ifadesi ve YES'in en uygun büyüklüğünü elde eden bir ifade geliştirilip YES'in yeri ve büyüklüğünü veren ikinci bir analitik metot geliştirilmiştir.

Beşinci bölümde dağıtım sistemlerin gerilim profilini düzeltmek için eklenecek YES'in en uygun büyüklüğünü veren ifade geliştirilip, en uygun yer ve büyüklüğünü elde eden bir analitik metot önerilmiştir. Bu çalışmada zamanla değişen yükler göz önünde bulundurulmuştur.

Tezin altıncı bölümünde, geliştirilen üç yeni analitik metot, diğer metotlarla gerçek dağıtım sistemine ve çeşitli dağıtım test sistemlerine uygulanarak geçerlilikleri gösterilmiştir. Son bölüm sonuçlar ve gelecek çalışmalar için önerilerden oluşmuştur.

2. DAĞITIM SİSTEMLERİ VE YEREL ELEKTRİK SANTRALLERİ

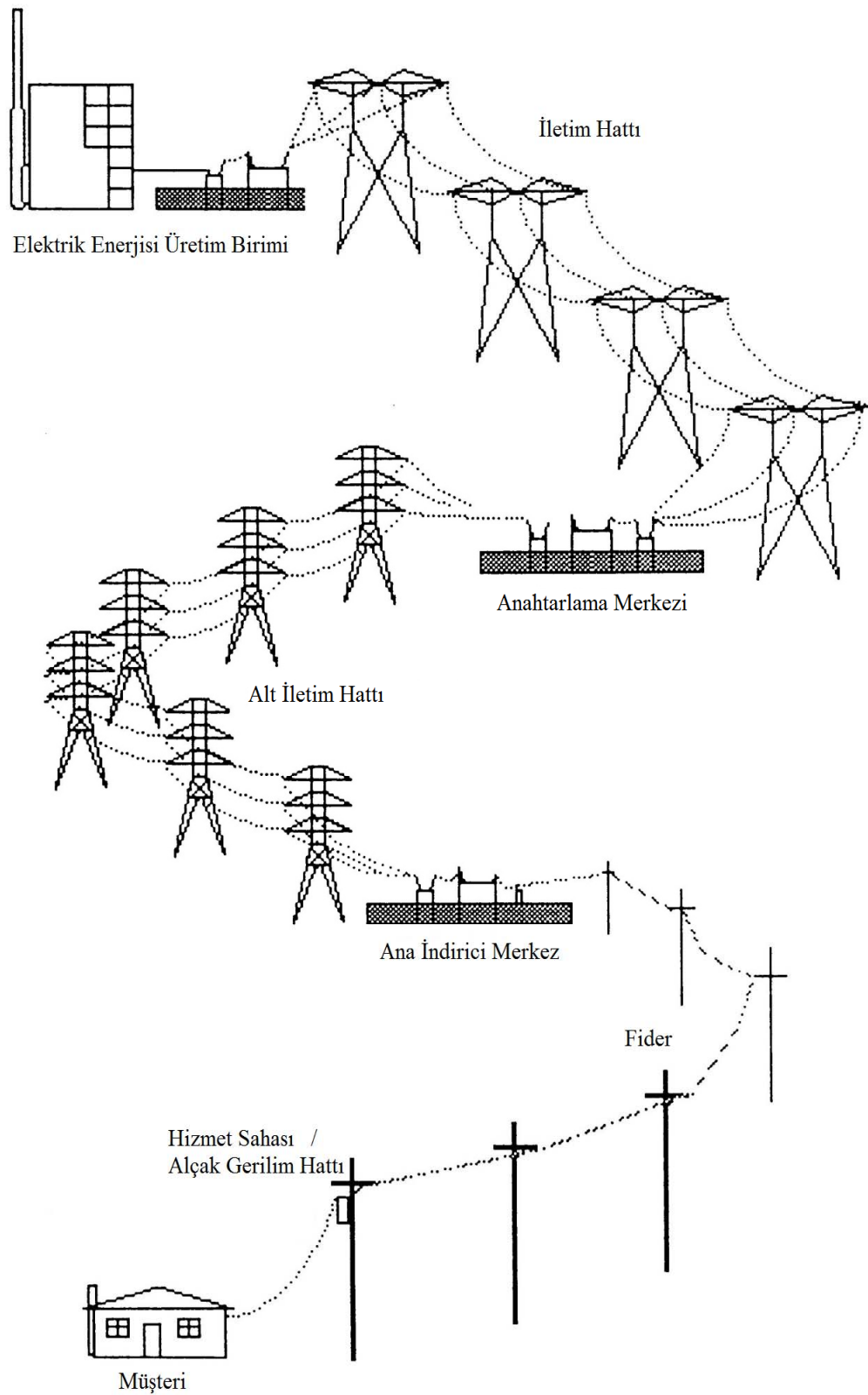
Bu bölümde tezin anlaşılmasına yardımcı olacak dağıtım sistemleri ve yerel elektrik santralleri ile ilgili genel bilgiler verilecektir. Yerel elektrik santralin dağıtım sistemine etkisi ve dağıtım sistemlerinde güç akış analizi hakkında bilgi verilecektir. Yerel elektrik santralin dağıtım sistemlerine yerleşimi ile ilgili çalışmalar incelenecektir.

2.1. Dağıtım Sistemleri

Geleneksel güç sistemlerinde; merkezi üretim birimlerinde üretilen güç, elektrik enerjisi olarak müşterinin tüketeyeceği yere iletim hatları ile nakledilmektedir. Geleneksel güç sistemleri birkaç farklı seviyelerde donanımlardan oluşmaktadır (Şekil 2.1). Her seviyede, aşağı yukarı aynı işi yapan ama sistemin farklı kısımlarında bulunan benzer donanım bulunmaktadır. Örneğin, transformatörlerin hepsi yaklaşık olarak aynı standartlarda aynı plan ile tasarlanır ve yerleştirilir.

Çoğu güç sistemlerinde elektrik enerjisi üretim birimlerinden müşteriye doğru farklı gerilim seviyelerindeki tesislerden geçerek iletilmektedir (Şekil 2.1). Elektrik enerjisi iletim sistemini oluşturan üretim birimlerinden itibaren dağıtım sistemine kadar olan iletim (transmission) ve alt iletim (sub transmission) seviyesinden ana indirici merkezlere (substation) sonra da dağıtım sistemini oluşturan orta gerilim (primary feeder) ve alçak gerilim (secondary service) seviyesine iletilir ve alçak gerilim seviyesinden müşteriye verilir.

İletim sistemi; genellikle 115kV ile 765kV arasındaki gerilim ile işletilen genellikle üç fazlı hatlardan oluşan bir ağıdır. Ağ terimi sistemdeki herhangi iki nokta arasında elektriği iletilecek birden fazla yol olduğunu ifade etmektedir. İletim sisteminin güvenilirliği ve güç akış sürekliliği ağ yapısı ile sağlamaktadır. İletim sistemi güç sisteminin ana omurgasını oluşturur. İletim sistemleri üretim birimleri arasındaki elektriksel bağlantıyı sağlar. Üretim birimlerinin birbirleri ve sistem ile senkronize çalışmasını sağlayabilmektedir. Bu da değişen yüklerden etkilenmeden,



Şekil 2.1. Farklı gerilim seviyeleri ile iletim ve dağıtım sistemlerinden oluşan geleneksel güç sistemi [1]

Üretim birim arızalarında yüklerin sisteme girerken problem çıkarmadan sistemin çalışması demektir [1].

İletim sistemindeki alt iletim hatları; indirici trafo merkezleri ve transformatör bulunmayan şalt sistemlerinden oluşan anahtarlama merkezlerinden veya üretim birimlerinden aldığı elektrik enerjisini ana indirici merkezlere iletir. Tipik bir alt iletim hattı üç veya daha fazla ana indirici merkezi besleyebilmektedir. Alt iletim, sistemin kararlı çalışması için tasarlanmaktadır. İletim ile alt iletim arasındaki fark belirsizdir [1].

Ana indirici merkezler, iki farklı yapının iletim sistemleri ve dağıtım sistemlerin birleştiği noktadır. İletim sistemleri genellikle ağ yapıdadır. Herhangi iki noktaya güç akışı birden fazla yol ile yapılabilir. Ana indirici merkezlerden müşteriye kadar bir ağ yapı kurmanın maliyeti çok yüksektir. Bir ana indirici merkezde güç akışı için yüksek ve orta gerilim kabinleri ve baralar, iletim ve dağıtım seviyeleri için kesiciler, röle, ölçüm ve kontrol cihazı bulunan kontrol odası bulunur. İletimin yüksek gerilim seviyesinden gelen g dağıtımın orta gerilim seviyesine dönüştüren trafolar ana indirici merkezin en önemli donanımlarıdır [1].

Çoğunlukla trafoların dönüştürme oranlarını değiştirmek için kademe değiştirici mekanizmaları ve kontrol donanımları bulunmaktadır. Böylelikle iletim tarafındaki büyük salınımlardan etkilenmeden dağıtım geriliminin çok küçük bant aralığı içinde kalması sağlanmaktadır [1].

Çoğu dağıtım sistemleri hem Orta Gerilim (OG) hem de Alçak Gerilim (AG) radyaldır. Radyal sistemlerin ağ yapısına göre birçok avantajı vardır:

- Arıza akım koruması kolaydır
- Çoğu sistemde arıza akımları düşüktür
- Gerilim kontrolü kolaydır
- Güç akışı kontrolü ve tahmini kolaydır
- Maliyeti düşüktür [1].

Dağıtım sistemindeki orta gerilim seviyesinde fiderler elektrik enerjisini havai hatlar veya yer altı kabloları ile ana indirici merkezden kendi hizmet sahasına (service area) kadar taşımaktadır. Fiderler orta gerilim seviyesinde çalıştırılmaktadır. Dünya genelinde orta gerilim seviyesi en düşük 1.1kV ve en yüksek 66kV'tur. Bazı dağıtım sistemleri çeşitli orta gerilim seviyeleri örneğin 23.9kV, 13.8kV ve 4.16kV gibi kullanmaktadır [1].

Fider, dağıtım gerilim seviyesine ve iletken büyüklüğü bağlı olarak 2MVA ile 30MVA arasında gücü dağıtabilen küçük bir iletim sistemidir. Normalde bir ana indirici merkezden iki ila on iki fider çıkmaktadır. Fider “dendrillic” denilen yapısı ile ana indirici merkezden çıkarak küçük dallarla müşteriye kadar gitmektedir. Güç sisteminde tüm fiderler radyal sistemi oluşturmaktadır. Ortalama bir ana indirici merkezden iki ila sekiz fider çıkmaktadır. Ama dünya genelinde bu rakam bir ila kırk arasında değişmektedir [1].

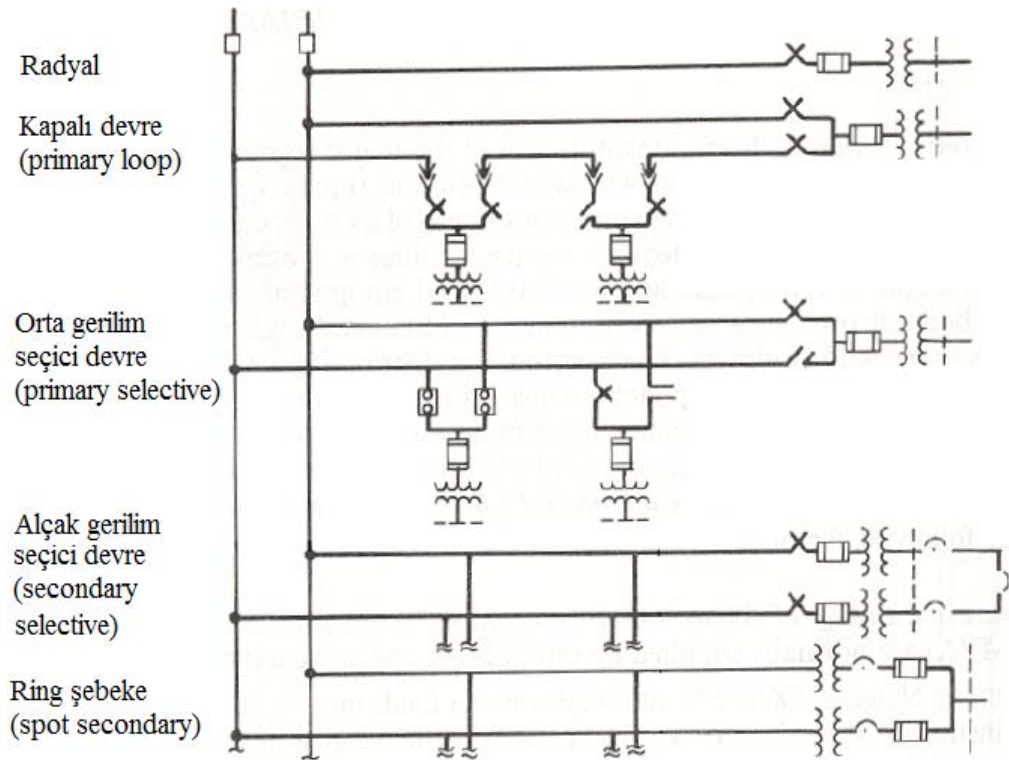
Fiderin üç faz devre grubunu (three-phase trunk) oluşturan ana hat (primary trunk) birçok ana yollara dallanır. Bu ana dallar, fiderin diğer fiderin sonu ile birleştiği nokta olan açık noktalarla (open point, tahliye noktası) sonlanır. Bu açık noktalarda iki fideri acil durumunda birbirine bağlayacak açık anahtar bulunur. Anahtarlar kapatılarak fiderler bölünebilir. Bu da acil durumlarda tehlikeli kısımdan anahtar yardımı ile diğer kısımları ayrılabilmeyi ve arızalı kısmın hizmet verdiği müşterilerin farklı yoldan enerji alabilmesini sağlar. Ayrıca anahtarlar kapatılarak kapalı devre de oluşturulabilir. Sistemdeki tüm düğüm noktalarının bir halka oluşturacak biçimde bağlanmışsa “kapalı devre şebeke” olarak tanımlanır [25]. Amerika’da çoğu dağıtım sistemleri radyal ya da zayıf gözlü sistem anlamına gelen ‘weakly meshed’ yapıdadır. Fiderlerin normalde açık bulunan bağlantı noktaları veya hat anahtarları ile birleştirilerek birkaç kapalı devreler oluşur. Bu birkaç kapalı devreden oluşan sisteme zayıf kapalı dağıtım sistemi anlamında ‘weakly meshed feeders’ denilmektedir [26].

Fider, tanım olarak ana indirici merkez ile açık nokta arasındaki tüm orta gerilim seviyesindeki kısımları içerir. Dağıtım seviyesindeki anahtarlanabilen üç fazlı, iki fazlı veya tek fazlı hatlar ana fiderin (primary feeder) parçası olarak dikkate alınır. Ana hatlar ve anahtarlanabilen kısımlar genellikle en geniş büyüklükteki

dağıtım iletkeni ile üç faz kullanılarak yapılır. Fider acil durumlarda diğer fiderleri yedekleyebilmesi için yüksek kapasiteye sahiptir. Dağıtım fiderlerin çok büyük bir çoğunluğu havai hat olarak yapılır. Sadece yoğunluğu fazla olan kent alanlarında veya estetiğin önemli olduğu durumlarda maliyeti havai hatlara göre üç ila on katı kadar yüksek olan yer altı kabloları kullanılabilir.

Alt fiderler (Lateral Level) ana fiderin yan dalları olan alt fiderler orta gerilim seviyesinin ana indirici merkezden müşteriye gücü taşıyan son kısmıdır. Alt fider ana hatta doğrudan bağlıdır ve aynı anma geriliminde çalışır [1].

Dağıtım sistemlerin radyalden başka birkaç farklı yapısı daha bulunmaktadır. Şekil 2.2’de dağıtım sistemlerin farklı yapıları gösterilmektedir. Yüksek güvenilirlik isteyen bölgelerde, örneğin hastaneler gibi kritik yüklerin bulunduğu bölgelerde dağıtım sistemi kapalı devre şebeke (primary loop) şeklinde yapılandırılabilir. Kapalı devre şebekelerde iletim hattı korumasında olduğu gibi anahtarlama tertibatının (şalt tesisatı) işletimi ve koruması için röle koordinasyonu gereklidir [27].



Şekil 2.2. Dağıtım sistemlerin beş farklı yapısı [28]

Kritik müşterilerin iki OG şebekesinden beslenerek daha güvenilir hizmet alabileceği kapalı devreden (primary loop) başka üç seçenek daha bulunmaktadır. Bu seçeneklerden; orta gerilim seçici devre (primary selective) ve alçak gerilim seçici devre (secondary selective) bir şebekeden beslenmektedirler. Bu seçici devreler radyal yapıdadır.

Alçak gerilim seçici devre (secondary selective) yapısında fazladan trafonun bulunması ve maliyeti artırması yüzünden orta gerilim seçici devre (primary selective) yapı esasen tercih edilmektedir. Orta gerilim şebekesi tarafındaki normalde kapalı olan anahtar gerilim düşüşünü algıladığında açılır [27].

Bazı dağıtım sistemleri radyal yapıda olmayıp ring şebeke (spot secondary) yapısındadır. Bu sistemlerde alçak gerilim şebekesi ağ şeklindedir ve birkaç orta gerilim şebekesinden beslenirler. Alçak gerilim ağı çok güvenilirdir. Orta gerilim şebekesi arızalandığında müşterilerin hizmeti kesilmeden yükler diğer şebekeye rahatlıkla taşınır [27].

Türkiye’de Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2006’da Alçak Gerilimi (AG); etkin şiddeti 1000 Volt ve altındaki gerilim seviyesi, Orta Gerilimi (OG); etkin şiddeti 1 ile 36 kV arasındaki (36 kV dahil) gerilim seviyesi, Yüksek Gerilimi (YG); etkin şiddeti 36 kV'un üzerinde olan gerilim seviyesi olarak tanımlamıştır. Dağıtım sistemi için izin verilen nominal OG seviyelerini 34,5; 33, 31,5; 15,8; 10,5 ve 6,3 kV olarak, AG seviyesini ise fazlar arası 400 V, faz nötr arası 230 V olarak belirlemiştir [29]. Türkiye’de Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği ile belirlenen iletim sisteminin nominal gerilim seviyeleri 380, 154 ve 66 kV’tur [30].

2.2. Yerel Elektrik Santrali

Geleneksel merkezi üretim sisteminde üretim birimlerinin kapasitesi arttıkça verimliliği arttığı ve benzer küçük kapasiteli üretim birimlerinden oluştuğu için büyük üretim birimlerin MW başına maliyeti düşüktür. Büyük üretim tesislerinde büyük miktarda yakıt depolanacak alanların bulunması avantajdır. Özellikle YES için depolama ve taşımadan dolayı ekonomik olmayan kömür; en verimli fosil

yakıttır, dünyanın her tarafında istikrarlı tedarikçisi vardır, petrol ve doğal gazı göre fiyatı değişimi daha azdır. Büyük üretim birimlerinin yedeklenmesi iletim sistemi ile en aza indirilebilmekte ve en verimli üretim birimi seçilebilmektedir. Ayrıca büyük üretim birimleri küçük bir ekiple işletilebilmektedir. Büyük üretim birimleri teknolojik gelişmelerini tamamladıkları ve küçük üretim birimleri halen teknolojik olarak geliştikleri için büyük üretim birimlerinin ekonomik olarak avantajı azalmaktadır.

Dünya nüfusunun artışı, teknolojinin yenilenmesi ve sanayinin gelişimi enerji talebini hızla artırmaktadır. Artan enerji talebini karşılamaya çalışan geleneksel merkezi üretim birimlerin çoğunlukla fosil kökenli yakıt kullanması çevre kirliliğini artırmaktadır. Ayrıca fosil kökenli enerji kaynakları azaldığı ve fiyatları da hızla arttığı için enerji maliyeti de artmaktadır. Bununla birlikte son yıllardaki çevre ile ilgili düzenlemeler, enerji verimliliğini artırma, yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı, enerji kaynaklarında dışa bağımlılığı azaltma gibi politikalar geleneksel güç sisteminde YES'lerin ön plana çıkmasına sebep olmaktadır.

Yerel Elektrik Santralin literatürde genel olarak kabul edilen bir tanımı bulunmamaktadır. YES ile ilgili çok sayıda terim ve tanımlama kullanılmaktadır. Örneğin, Anglo-Amerika ülkeleri “embedded generation” terimini, Kuzey Amerika ülkeleri “dispersed generation” terimini kullanmaktadır, Avrupa’da ve Asya’nın bazı kısımlarında “decentralised generation” terimi kullanılmaktadır [3]. “Distributed generation” veya “embedded generation” terimi dağıtım sistemlerine yerleştirilmiş elektrik üretim birimi için kullanılmaktayken “dispersed generation” terimi merkezi üretim biriminden ayrı olarak kullanılan üretim birimi için anlaşılmaktadır [31].

YES’in tanımlarında YES’in büyüklüğü (kapasitesi), konumu, gerilim seviyesi gibi konularda farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin; The International Council on Large Electricity Systems (CIGRE), YES’i merkezi üretim birimi olarak planlanmayan çoğunlukla dağıtım sistemlerine yerleştirilen büyüklüğü en fazla 50-100 MW olan tüm üretim birimleri olarak tanımlamıştır [32]. Bu tanımlamada YES’in iletim sisteminin kontrolü dışında olduğunu göstermektedir. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), YES’i iletim sistemine yakın herhangi bir yere yerleşebilen ve büyüklüğü merkezi üretim birimlerinden oldukça küçük

(1kW ile ~10MW aralığında) olarak tanımlamıştır [33]. International Energy Agency (IEA) 2002’de YES’i yerel dağıtım şebekesinde veya müşteri tarafında güç üreten birimler olarak tanımlamıştır [34]. IEA tanımında üretim biriminin büyüklüğünü belirtmemiştir [33]. Burada birkaçından bahsedilen çok sayıda YES ile ilgili tanım bulunmaktadır. Tanımlardan bazıları iletim sistemine bağlanacak kapasitesi büyük üretim birimlerini hesaba katarken diğerleri dağıtım sistemlerine bağlanacak küçük kapasiteli üretim birimleri üzerinde durmuşlardır. Tanımların hepsinde en azından dağıtım sistemlerine bağlanan küçük kapasiteli üretim birimlerinin YES’in bir parçası olarak saymışlardır [33].

Ackermann ve arkadaşları YES’i dağıtım sistemleri içinde veya şebekenin müşteri tarafında elektrik gücü üreten birim olarak genel bir tanım yapmışlar. YES’in tanımı üzerinde farklılık gösteren YES’in amacı, konumu, büyüklüğü, teknolojisi gibi konularda tartışmışlar [3]. Buna göre;

YES’in Amacı; YES’in amacı üzerinde fikir birliği vardır, YES’in amacı aktif elektrik gücü üretmektir.

YES’in Konumu; Elektrik güç üretim birimlerinin kurulumu ve işletimi dağıtım sistemlerine doğrudan bağlı veya müşteri sayacı üzerinden şebekeye bağlıdır. Bu tanımlama ile YES’in konumu elektrik güç üretiminin dağıtım seviyesinde olduğu belirtilmektedir.

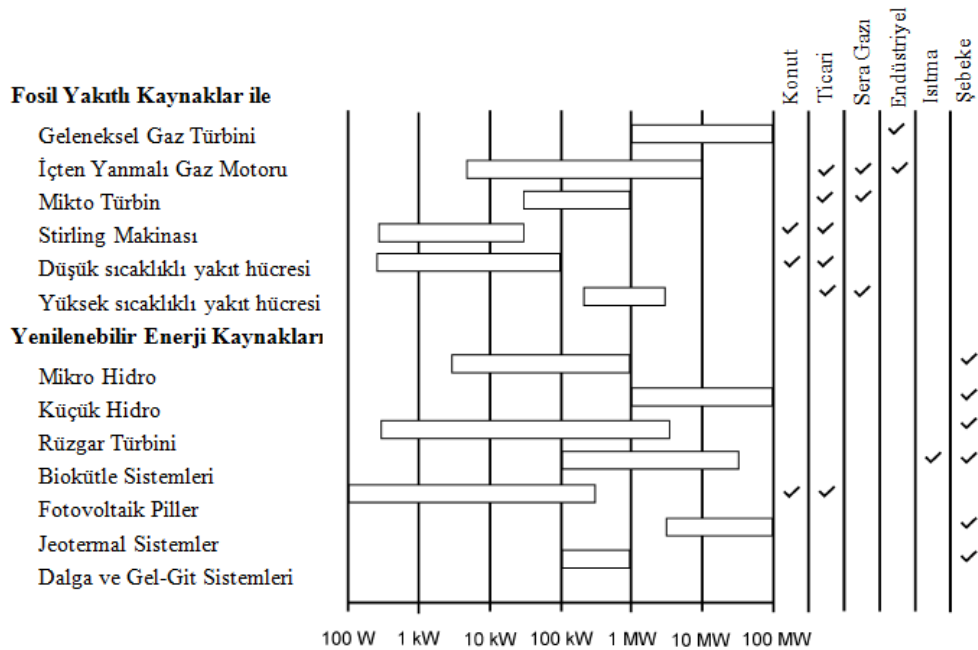
YES’in Kapasitesi; YES’in azami gücü yerel dağıtım şebekesinin şartlarına örneğin gerilim seviyesine, dağıtım sisteminin büyüklüğüne göre değişebilmektedir. YES’in kapasitesine göre sınıflandırılırsa;

Tablo 2.1. YES’in kapasitesine göre sınıflandırılması

Mikro YES:	~ 1W>5kW
Küçük YES:	5kW>5MW
Orta YES:	5MW>50MW
Büyük YES:	50MW<300MW

YES Teknolojileri; fosil yakıtlı ve yenilenebilir kaynaklar olarak sınıflandırılmaktadır. Fosil yakıtlı kaynaklar; geleneksel gaz tribünü, gaz motoru, mikro tribünü, yakıt pili gibi kaynaklar içermektedir. Yenilebilir kaynaklar ise mikro ve küçük hidrolik, rüzgâr tribünü, biyokütle, biyogaz, dalga, akıntı enerjisi ve gel-git gibi fosil olmayan kaynakları içermektedir [3]. Farklı YES teknolojileri sınıflandırılarak Tablo 2.2’de genel olarak listelenmiştir [35].

Tablo 2.2. YES teknolojileri [36]



YES’ler genellikle modüler ve küçük yapıdadırlar. YES’lerin modüler yapıda olması kurmayı kolaylaştırır, maliyeti düşürür. Bununla birlikte ihtiyaç olduğu takdirde YES kapasitesi artırılmak istendiğinde çok az zamanda ve uygun maliyetle artırılabilir. Mali açıdan modüler yapı düşük maliyet, azaltmış risk ve harcamayı ertelemek demektir. Ayrıca nüfus artışı ve sanayinin gelişimi dolayısıyla ortaya çıkan mevcut iletim hatların yetersizliğinde ve iletim hatların yeniden yapılandırılmasında karşılaşılan coğrafya ve maliyet açısından sınırlamalarda, aşırı yüklenmede, şebeke kayıplarını azaltmada YES çok büyük fayda sağlamaktadır. YES ile şebekelerin altyapı yatırımları ertelenebilmektedir, kesintisiz ve kaliteli enerji verilebilmektedir. Ayrıca müşterilerin yüksek güvenilirliğe sahip elektrik talebindeki artışı da karşılanabilmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan YES'ler fosil kökenli enerji kaynaklarına nispeten daha temiz enerji üretirler. Ayrıca yakıt fiyatlarından daha az etkilenirler. Bu sistemlerin en büyük dezavantajı ise diğer kaynaklara göre başlangıç yatırımları çok fazladır. Yenilenebilir enerji kaynakların bir diğer dezavantajı ise belirli coğrafik özelliklere sahip yere ihtiyaç göstermeleri ve ürettiklerin gücün önceden bilinmemesidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ürettiği güç bilinemediği için şebekeyi dengelemek ve şebekeyi belirli bir gerilim seviyesinde tutmak gerekir, bu da maliyeti yükseltir.

YES'lerin ekonomik olarak değerlendirilebilmesi için birçok değişkeni dikkate alarak elektrik üretim maliyetlerini hesaplamak gerekmektedir. Elektrik üretim maliyetleri; yatırım, işletme ve finansman maliyetlerinden oluşmaktadır. Yatırım maliyetinin mühendislik masrafları, santrallerin inşaatı, ruhsat parası ve MW başına şebekeye bağlanma masrafı gibi giderleri sabit giderler, MWh başına şebekeye bağlanma masrafı da değişen giderdir. İşletme maliyetinin tesisin işletilmesi, sabit vergiler, bakım masrafı, sigorta gideri ve MW başına enerji tarifi gibi giderleri sabit giderler; planlanmamış bakım masrafı, yakıt maliyeti, yakıt vergisi, MWh başına enerji tarifi de değişen giderlerdir. Finansman maliyeti de yatırımcı ve bankalara geri ödemededen oluşmaktadır [1].

YES'lerin özellikle de yenilenebilir olmayan enerji kaynaklarının mühendislik ve şebekeye bağlanma masrafları toplam maliyette önemli yer tutmaktadır. YES ile elektrik enerjisinin satılmasına ilave olarak şebeke yatırımlarının ertelenebilmesi, şebekedeki kayıpları azaltması, enerji güvenilirliğinin artması ve muhtelif faydalar mesela karbon vergisinden kaçınma gibi mali faydalarda sağlanabilmektedir. Çevre ile ilgili çeşitli mali destekler ve vergiler genellikle temiz elektrik üretimini teşvik etmek için konulmaktadır. Kyoto protokolünü imzalayan birçok ülke fosil kökenli yakıt kullanımını azaltarak yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını destekleyici politikalar geliştirmektedir. Örneğin hükümetler yenilenebilir enerjiye kaynak sağlayabilmekte ya da geleneksel enerji kaynaklarına ekstra vergiler uygulayabilmektedir. Para yardımı nakit bağış şeklinde yapılabilmekte veya yenilenebilir kaynaklar tarafından üretilen enerjinin satışında değerinden fazla fiyat uygulanabilmekte ya da gelir vergisinde kolaylık sağlanabilmektedir. Vergi

önlemleri, geleneksel yakıttan enerji üretilmesine veya yakıtın oksitlenmesi ile oluşan yan ürünlere (SO_x , NO_x , CO , CO_2 , ...) yönelik vergi uygulamayı (örneğin, enerjiye veya karbona) kapsayabilmektedir [37].

Henüz geleneksel merkezi üretim birimlerinden elde edilen elektrik maliyetine genellikle asit yağmurları, petrol sızıntılarının temizlenmesi, iklim değişikliğinin etkileri gibi çevre ile ilgili unsurları hesaba katılmamaktadır. Bunların hesaba dâhil edilmesi ile ilgili çalışmalar olmakla beraber henüz kabul edilmiş bir metot bulunmamaktadır. Yatırım maliyetine, doğal çevre ve insan sağlığına yapılan tahribatının ekonomik değeri olarak sosyal maliyet eklenmemektedir [1]. Sosyal, çevresel ve kullanım gibi unsurların fiyatlandırılmamasından dolayı YES'in maliyeti merkezi üretim birimleri ile karşılaştırıldığında yüksek olmaktadır.

2.3. Yerel Elektrik Santrallerin Dağıtım Sistemlerine Etkisi

Geleneksel güç sistemlerinde iletim sistemi enerji iletiminde sürekliliği ve güvenilirliği garantilemek üzere tasarlanmaktadır. İletim sistemi, güç üretim birimleri bulunan ve uzun hatlardan oluşan ağ yapısındadır. Dağıtım sistemleri ise enerji dağıtımında arızalardan sistemi korumak ve gerilimi düşümü ve kayıpları asgari seviyede tutmak üzere tasarlanmaktadır. Dağıtım sistemlerinde güç akışı, iletim sistemlerinden çok sayıdaki son kullanıcıya doğru tek yönlüdür. Dağıtım sistemleri iletim sistemleri gibi üretim birimleri içerecek şekilde tasarlanmamaktadır. Örneğin YES'in eklenmesi arıza akımının seviyesinde değişime sebep olabilmektedir. Bundan dolayı yerel arıza koruma cihazlarının yeniden tasarlanması gerekebilmektedir [3]. Ayrıca dağıtım sistemlerin çoğu fider ve alt fiderlerden oluşan radyal yapıda veya kapalı devre şebeke yapısındadır. İletim sistemi gibi şebeke ağı şeklinde olmayıp radyal yapıda olduğu için iletim sistemlerinde kullanılan güç akış analiz algoritmaları çoğu zaman cevap verememektedirler. Dağıtım sistemlerin yapısına uygun tek yönlü güç akışı özelliğini kullanan algoritmalar geliştirilmiştir [3]. Dolayısıyla YES'i de içine alan dağıtım sistem güç akış algoritmalarının yeniden yapılandırılması gerekmektedir.

İlave olarak, yüksek gerilim de genellikle kullanılan havai hatların rezistansı (R) reaktanstan (X) genellikle küçüktür ($X/R \sim 5$). Gerilim düşümünde hattın rezistansın etkisi azdır. Gerilim düşümünde ve hat kayıplarında hattın reaktansı etkilidir. Hâlbuki dağıtım sistemlerinde çoğunlukla hatların rezistansı reaktansından daha büyüktür [3]. Dolayısıyla hat kayıpları akımın karesi ile rezistansın çarpımının bir fonksiyonu (I^2R) olduğundan dağıtım hattının rezistansı önemli ölçüde hem hat kayıplarına hem de dağıtım hattı boyunca gerilim düşümüne sebep olmaktadır [27]. Bu nedenle YES'in yerleşimi yerel gerilim regülasyonunu önemli derecede etkilemektedir.

Ayrıca, genellikle, dağıtım sistemlerinin düşük gerilim seviyesinde SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sistemle genellikle kullanılmamaktadır. SCADA sistemleri; gerekli verileri toplayarak ve enerjinin üretim, iletim ve dağıtımını kontrol ederek sistemin güvenilir, emniyetli ve ekonomik çalışmasını sağlamaktadır [38]. Düşük gerilim seviyesinde SCADA'nın olmaması hem dağıtım sisteminin kontrolünü hem de YES için gerekli olan verileri toplamayı zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla merkezi üretim birimleri gibi YES'i kontrol etmek kolay değildir [3].

YES ile geleneksel merkezi üretim birimleri arasında hem yapı hem de şebekeye bağlanma teknolojisi olarak önemli farklılıklar bulunabilmektedir. Büyük güçlü üretim birimlerinde büyük oranda senkron jeneratörler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılmaktadır. Bu cihazlar yapı gereği hem aktif hem de reaktif güç üretebilmektedir. Dolayısıyla bağlandıkları baranın gerilimini de rahatlıkla kontrol edebilmektedir. Büyük güçlü YES'lerden doğal gazdan yararlananlarda mesela kojenerasyon tesislerinde de senkron jeneratör kullanılmaktadır. Dolayısıyla reaktif güç kontrolüne katkı yapmaları kolaydır [3].

Orta güçlü ve özellikle küçük güçlü YES'lerde elektrik enerjisine dönüşüm için çoğunlukla asenkron jeneratörler kullanılmaktadır. Asenkron jeneratörlerin işletim özellikleri senkron jeneratörlerden farklıdır. Örneğin doğrudan şebekeye bağlanan asenkron jeneratör, reaktif güç üretmediği gibi çalışmaya başladığı anda ve işletim sırasında şebekeden reaktif güç talep etmektedir. Şebekeye bağlanan asenkron jeneratörlerin dezavantajlarını gidermek için teknik olarak farklı seçenekler

bulunmaktadır. YES teknolojilerin üretiminde kapasitör, elektronik çeviriciler gibi birçok seçenekler kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu ek bir maliyet getirmektedir [3].

Son olarak fotovoltayik hücresi, batarya enerji depolama sistemleri, yakıt hücresi ve küçük hidro elektrik santralleri gibi kaynaklar doğru akım ürettiği için şebekeye bir arabirim ile bağlanmak zorundadır. Modern elektronik arabirimler, DC gerilimi istenen frekansta AC gerilim ve aktif/reaktif akıma çevirmek için farklı çözümler sağlamaktadır. Elektronik güç çeviriciler dağıtım şebekesinde gerilim kontrolü için de kullanılabilir. Bazı durumlarda dağıtım şebekesi ile dağılmış çeviriciler birbirlerini etkileyerek bir kontrol problemi meydana getirmektedirler. Bu da dağıtım sistemlerinde nadiren de olsa güç dalgalanmalarına ve salınımlarına sebep olabilmektedir [3].

YES'lerin dağıtım sistemlerine yerleşimindeki çok çeşitli bu seçenekler YES'lerin sisteme entegrasi ile ilgili analizleri karmaşık yapmaktadır. Bundan başka yerel şebekenin şartlarının da bu analizler üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır.

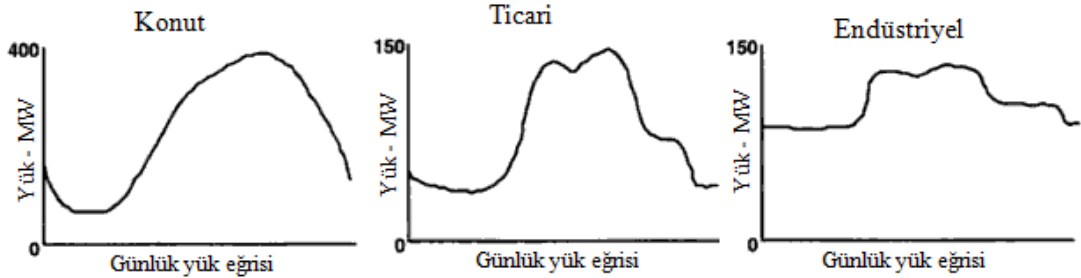
2.4. Elektrik Enerji Talebi

Elektrik müşterileri elektrik enerjisini elektrik şebekesinden ya da yakındaki yerel elektrik santralinden sağlamaktadır. Müşteri için ihtiyacı olan elektrik enerjinin sağlanması ve elektrik enerjinin kalitesi yani güvenilir ve sürekli olması önemlidir. Talep edilen elektrik enerji miktarı ve kalitesi müşterinin kendi ihtiyaçlarına bağlı olarak her müşteri için farklılık göstermektedir. Müşteriler elektrik enerji kullanım şekillerine göre müşteri tipi genellikle konut, ticari ve endüstriyel olarak üç ayrı sınıfa ayrılmaktadırlar [1].

Konutlarda su ısıtmada, ev ısıtmada, aydınlatmada ve bunun gibi işlerde elektrik enerji tüketilmektedir. Her konutta günlük aktivite, cihazlar ve markaları farklıdır. Talep edilen elektrik enerji miktarı zamana ve her eve göre elektrik enerji kalitesi de konutta kullanılan cihazlara göre değişmektedir. Ticari işyerleri konutlarda olduğu gibi ısıtma, soğutma ve aydınlatma için elektrik enerjisi

kullanılmaktadır. Ayrıca her işyeri özelliğine göre yazarkasa yürüyen merdiven, park alanını aydınlatma gibi ihtiyaçları için elektrik enerjisi tüketmektedir. Endüstriyel tesislerde ve fabrikalarda kompresör, taşıyıcı motor gibi çeşitli endüstriyel cihazlar kullanılmaktadır [1].

Müşteriler elektrik enerjisini hava sıcaklığına, tatil günlerine ve mevsimler gibi değişkenlere bağlı olarak değişik zamanlarda değişik miktarlarda talep etmektedirler. Müşterilerin talep ettiği güç bir zaman fonksiyonu olarak ifade edildiğinde görülmektedir ki talepler kendi sınıfı içinde benzerlik göstermektedir. Bu yüzden çoğu elektrik şirketleri yükü her bir sınıfın yük karakteristiği ile ayırmaktadır. Şekil 2.3'te görüldüğü üzere her bir sınıfın karakteristiği her sınıftaki müşterinin bir gün veya yıl boyunca ortalama yükün kullanımını zamana göre gösteren “yük eğrisi” ile belirlenebilmektedir. Yük eğrisine benzer olan “Yük süre eğrisi” de talep edilen gücü büyükten küçüğe doğru sıralanarak oluşturulmaktadır. Zamana göre değil yükün seviyesine göre çizilmektedir. Talep edilen azami ve asgari güç ve yıllık yük eğrisi altında kalan toplam alan ile hesaplanan enerji yük eğrisi ile aynıdır [1].



Şekil 2.3. Farklı müşteri tiplerinin yük profili [1]

Bir zaman dilimi içinde müşterinin talep ettiği gücü gösteren yük eğri analizi hem müşteri ihtiyacı hem de gereken kapasite belirlemede önemli araçtır. Dağıtım sistemlerinde yük profili güvenilir ve sürekli güç iletimi için çok önemlidir. Dağıtım planlayıcıları açısından yük eğri analizi ile ilgili en önemli bilgiler;

- Talep edilen azami güç, onun zamanı ve süresi
- Enerji kullanımı (yıllık yük eğrisi altında kalan toplam alan)
- Talep edilen asgari güç, onun zamanı ve süresidir.

Yük eğri analizi, elektrik üretim birimlerin seçiminde ve güç üretim planlamasında kullanılmaktadır. Ayrıca yük profili YES'lerin veya güç trafoların modellenmesinde, büyüklüğün ve yerinin tespit edilmesinde dikkate alınmaktadır [1].

2.5.Yerel Elektrik Santrali ile Dağıtım Sistemlerinde Güç Akış Analizi

Dağıtım sistemleri genellikle radyal bir yapıya sahiptir ve yeraltı kablolarının kullanılması nedeniyle hatların X/R oranları iletim hatlarının tersine birden küçük değerlidir. Bunun yanı sıra dağıtım sistemleri tek faz, 2 faz ve üç fazlı hatlara sahip olabildiğinden dengesiz bir yapıya sahip olabilirler. Ayrıca sistem matrisleri ill conditioned matrislerdir [39]. Yani matris elemanlarının değerlerindeki çok az bir değişim sistem çözümünde çok büyük değişikliklere sebep olmaktadır. Dağıtım sistemlerinin bu özelliklerinden dolayı iletim sistemleri için kullanılan geleneksel güç akış metotları olan Newton-Raphson, Gauss-Seidel, ve bunun gibi metotlar dağıtım sistemlerinin güç akışı hesabında yetersiz kalabilmektedirler [54]. Bu sebeple dengeli ve dengesiz dağıtım sistemlerinde güç akışı için birçok algoritma geliştirilmiştir [40], [41]-[60]. Bu algoritmaları iki gruba ayırmak mümkündür [40]. Bunlar;

- Radyal sistemler için geleneksel algoritmaların geliştirilmiş şekilleri [41]-[45].
- Kirchhoff Akım ve Gerilim kanununun, hat parametreleri ve hattın transfer edilen aktif ve reaktif güçlerden oluşan gerilim denklemi (kuadratik denklem) veya dağıtım hatları için farklı gerilim formülasyonları kullanılarak radyal sistemde ileri ve/veya geri yönde hesaplamalara dayanan algoritmalar olup bunlara Sweep-temelli algoritmalar denmektedir [40], [46]-[60], [61].

Dağıtım sistemleri için geliştirilen algoritmalarından sistemde ileri ve/veya geri yönde gerilim hesabına dayalı (sweep-temelli) ikinci grup algoritmalar yüksek yakınsama özelliği, kısa sürede 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 [51]-[52]. Geliştirilen bu sweep-temelli güç akış algoritmalarının büyük bir çoğunluğunda bara gerilimleri hattan akan akım ve hat başı gerilimi kullanılarak Kirchoff Gerilim Kanunu ile [46]-[54] veya hattan transfer edilen aktif ve reaktif güç, hat başı gerilimi kullanılarak oluşturulan kuadratik denklem ile [55]-[60] hat sonu bara gerilimleri hesaplanmaktadır. Mevcut algoritmaların hesaplama süresinin düşürülmesi, yakınsama özelliğinin iyileştirilmesi veya bu özelliklere sahip yeni güç akış algoritmalarının geliştirilmesine ilişkin çalışmalar her geçen gün artarak devam etmektedir [40].

Günümüzde dağıtım sistemlerinin güç ihtiyacını belli oranda karşılamak amacıyla YES birimleri sisteme dâhil edilmektedir. YES birimlerinin yanı sıra son yıllarda FACTS elemanları olarak adlandırılan güç elektroniği elemanları ile geliştirilen SVC, STATCOM gibi aktif kompanzatörler kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu ile sistemde gerilim kontrolü yapılmaktadır [62]. Dolayısıyla bu tür dağıtım sistemleri radyallıktan uzaklaşmakta ve sistemdeki güç kaynağına doğru da akabilmektedir. Yani her iki yönde güç akışı olabilmektedir. Bu durumda güç akış analizine YES birimlerinin ve/veya aktif kompanzatörlerin dâhil edilmesi gerekmektedir. Bu tür elektriksel birimlerin aktif güçleri ve sisteme bağlantı noktası gerilimleri bilindiğinden güç akış analizinde gerilim kontrollü bara (PV-bara) olarak seçilmektedir. Geleneksel güç akış algoritmaları ve dağıtım sistemleri için geliştirilmiş algoritmalar ile PV-bara olarak modellenerek dağıtım sisteminde güç akışı yapılabilmektedir. Fakat bu tip algoritmalarda dağıtım sistemlerinin yapısı nedeniyle yakınsama problemi oluşabilmekte ve güç akış analizi tamamlanamamaktadır [40].

İkinci grup olarak verilen sweep-temelli güç akış algoritmaları, dağıtım sistemleri için geliştirilmiştir. Algoritmalar tek yönlü güç akışını esas alarak

geliştirildiğinden bunlara YES birimleri veya aktif kompanzatörler PV-bara olarak doğrudan güç akışına dâhil 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 dâhil edilmektedir. Bu birimlerin PV-bara olarak modellendiği bazı algoritmalar da mevcut olup sayıları sınırlıdır [46]-[48], [58]-[59], [63]-[64], [40].

Güç sistemleri laboratuvarında veya derslerinde kullanılmak üzere güç akış analizi yapabilen Dağıtım Sistemleri Güç Akışı Analiz Paketi de bu tezde sunulan çalışmaların bir sonucu olarak geliştirilmiştir [65]. MATLAB programının grafik kullanıcı arabirimi oluşturma çevre birimi (GUIDE) ile geliştirilen bu analiz paketinde dağıtım sistemleri için sweep-temelli algoritmalar ve hem dağıtım hem de iletim sistemleri için geleneksel güç akış analiz algoritmaları bulunmaktadır. Analiz Paketinde, Kirchoff gerilim kanunu kullanılarak geliştirilen sweep-temelli algoritmalarından Shirmohammadi ve arkadaşlarının [46]'da, Thukaram ve arkadaşlarının [50]'de geliştirdikleri algoritmalar ve kuadratik denklem temelli güç akış algoritmalarından Haque'un [56]'da, Luo ve arkadaşlarının [58]'de ve Rajicic ve arkadaşlarının [59]'da geliştirdikleri algoritmalar kullanılmaktadır. Analiz Paketinde geleneksel algoritmalarından Newton-Raphson, Gauss-Seidel algoritmaları ile güç akış analizi yapılmaktadır.

Dağıtım Sistemleri Güç Akışı Analiz Paketinde, kullanıcı tarafından dağıtım sistemin hat ve yük bilgileri girilerek veya IEEE formatında alınarak yedi ayrı algoritma ile güç akış analizi yapılabilmekte ve analiz sonuçları arayüz birimde görülebilmektedir. Kullanıcı tarafından oluşturulan sistemlere ait bilgiler kayıt edilebilmekte ve daha sonra yüklenebilmektedir. Ayrıca analiz paketinde sistemdeki yükler statik yük (gerilim bağımlı yük) [66] olarak modellenerek analizlere dâhil edilebilmektedir.

Dağıtım Sistemleri Güç Akışı Analiz Paketi lisans ve lisansüstü güç sistemleri derslerinde dağıtım ve iletim sistemlerin güç akış analizinde kullanılarak öğrencilerin konuyu daha hızlı kavramalarına ve iletim ve dağıtım sistemlerin güç akış analizleri

hakkında bilgi sahibi olmalarına yardımcı olabilmektedir. Ayrıca dağıtım ve iletim sistemlerin farklı algoritmalarla analiz yapılmasını, algoritmaların test edilmesini ve yüklerin gerilim bağımlı yük olarak modellenmesini sağlayabilmektedir.

2.6. Dağıtım Sistemlerine Yerel Elektrik Santrallerinin Yerleştirilmesi

Dağıtım sistemine yerleştirilen YES, müşterileri ve dağıtım sisteminde bulunan ekipmanları önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu etkiler dağıtım sisteminin ve YES'in karakteristiğine bağlı olarak olumlu veya olumsuz olabilmektedir. YES'in sistem kayıplarını azaltması, gerilim profilini düzeltmesi, güç kalitesini düzeltmesi, sistem güvenilirliğini artırması, iletimi ve dağıtımı rahatlatması, yeni veya geliştirilecek iletim ve dağıtım altyapı yatırımlarını ertelenmesi dağıtım sistemine sağladığı olumlu etkilerdir. Uygulamalarda YES'in olumlu etkilerinden yararlanabilmek oldukça zordur. Dağıtım sisteminde YES'den olabildiğince yararlanabilmek için dağıtım sisteminin ve YES'in özellikleri dikkate alınarak YES'in uygun kapasite ile uygun yere yerleştirilmesi gerekmektedir [2], [67].

Güç sistemlerine yerleşecek YES'in yeri kadar kapasitesi de uygun olmadığı takdirde YES'in sağladığı avantajlar, gerilimin aşırı yükselmesi veya hat kapasitesinin aşılması gibi dezavantajlara dönüşebilmektedir. Örneğin YES ana indirici merkezine yerleştirildiğinde fiderin kapasite problemine faydası olmayacaktır [67]. Eğer YES gerilim regülatöründen sonra yerleştirilirse fider yükü düzgün ölçülemeyecek ve regülasyon kontrolü doğru yapılamayacak ve gerilim profilini kötü etkileyecektir [2]. Ayrıca YES, fiderin kapasitesini aşan büyüklükte güç verdiğinde fiderlerde bazı durumlarda gerilim problemi olmaksızın hatların termal sınırları aşabilecektir [2].

Referans [2] ve [67]'da YES'in yerini belirleme problemini kapasitörlerin yerleşimi problemine benzetilmektedirler. Dugan ve arkadaşları, YES'lerin yerini ve büyüklüğünü belirlemede hat kayıplarını en aza indirmek amacıyla yerleştirilen kapasitörlerin optimizasyon algoritmaları kullanmaktadır [67]. Kapasitörler sadece reaktif güce etki ederler. Çoğunlukla YES'ler aktif güç akışına etki ederler. Bazıları

güç faktörü 1 ile 0.85 (geride) arasında çalışabildiklerinden reaktif güç akışına da etki edebilirler. Kayıpları yüksek olan fiderlerde YES'lerin yeri ve kapasitesi belirlenerek yerleştirilirse önemli ölçüde sistem kayıpları azalabilmektedir. Maalesef çoğunlukla YES yerleşimi elektrik şirketlerin kontrolü dışında kalabilmektedir. Bağımsız güç üreticileri yasalardaki açıklardan yararlanarak şebekeye bağlanacak YES'in yerini zorla kabul ettirebilmektedirler. Elektrik şirket planlayıcılara çok fazla alternatif kalmayabilmektedir [67]. Bununla birlikte dağıtım sistemlerindeki problemleri azaltmak için planlayıcılar, dağıtım sistemindeki YES'in kapasitesini belirleyebilmektedirler. YES'in kapasitesini belirlemek için de optimal güç akışından yararlanabilmektedirler. Optimal güç akışı ile yeri belirlenmiş YES'in kapasitesi, arızaları da içerek şekilde şebeke kısıtları dikkate alınarak elde edilebilmektedir.

Optimal güç akışı; ilk olarak 1962'de Carpentier tarafından geliştirilen algoritma ile tartışılmaya başlanmıştır. Optimal güç akışı, sistemin güvenilirliği göz önüne alınarak optimum çözüm elde etmek için halen geliştirilmektedir [38]. Geleneksel optimal güç akışı; sistem yükünün maliyetini ve sistemin kaybını en aza indirmek amacıyla güç akışının dengede olması şartı altında üretim birimleri arasında ekonomik yük dağıtmak için çözülmektedir [68]. Optimal güç akışını esas alan YES ile ilgili çalışmalardan [5]'te ikinci derece algoritması ve [6]'da genetik algoritma ile alt iletim sistemine yerleştirilecek YES'in yeri belirlenmektedir.

Kapasitör yerleşimi, güç akışı kontrolü, kararlılığın düzeltilmesi, gerilim profilinin yönetimi, güç faktörünün düzeltilmesi, kayıpların azaltılması gibi konularda yapılmaktadır. Optimal kapasitör yerleşim problemi, dağıtım sistemlerine yerleştirilecek kapasitörlerin yeri, büyüklüğü ve sayısını belirlemek için çözülmektedir. Dağıtım sistemlerinde kayıpları azaltmak için optimal kapasitör yerleşimi ile ilgili analitik, dinamik, ve meta heuristik gibi birçok metot kullanılmıştır [69].

Kayıpları azaltmak için kapasitör yerleşimini esas alarak yapılan çalışmalardan meta sezgisel metotlar: Bulanık-Genetik algoritması [7], tabu arama algoritması [8], analitik metotlar: 2/3 kuralı [9], yaklaşık en uygunu bulma algoritması [10] ve son olarak radyallerde ve şebekelerde analitik yaklaşım [11]-[13] ile kayıpları azaltmak için YES'in yeri belirlenmektedir. Bununla birlikte gerilim profilini düzeltmek

amacıyla YES'in en uygun yerini belirleyen çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin [14]'te genetik algoritma, [15]'te analitik metot ve [16]'da çok amaçlı programlama ile gerilim profilini düzelten YES'in en uygun yeri elde edilmektedir. Ayrıca YES'in dağıtım sistemlerine sağladığı diğer avantajlarını dikkate alan çalışmalar da bulunmaktadır. Bunlardan biri olan [17]'de güvenilirliği artırmak için YES'in yeri belirlenmektedir.

Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi YES'in şu anda kurulum maliyetinin yüksek olması ve sosyal, çevresel ve kullanım gibi unsurların fiyatlandırılmamasından dolayı YES kaynaklı enerjinin maliyeti fosil kaynaklar ile karşılaştırıldığında yüksek olmaktadır [4]. Dolayısıyla çalışmaların çoğunluğunda YES'in en uygun yerini ve büyüklüğünü belirlemede maliyet hesaba katılamamaktadır.

Günümüzde maliyet hesabı zor olsa da ileride kullanılabilecek maliyet hesabı yapan çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan biri [18]'de sistem yenileme maliyeti, tedarik edilemeyen enerji maliyeti gibi çeşitli maliyetleri amaç fonksiyonuna ekleyerek çok amaçlı evrimsel algoritma ile YES'in büyüklüğü ve yeri elde edilmektedir.

Burada YES yerleşimi ile ilgili çalışmalar, YES'in yerleştirildiği sisteme ve amacına göre ayrılarak anlatılmaktadır. [5], [6], [10] ve [11]'deki çalışmalar alt iletim hatları için geliştirilen metotlar kısmında bulunmaktadır. [7]-[13], [16]'daki çalışmalar dağıtım sistemlerinde kayıpları azaltmak için geliştirilen metotlar kısmında anlatılmaktadır. [14]-[15]'teki çalışmalar dağıtım sistemlerinde gerilim profilini düzeltmek için geliştirilen metotlar kısmında ve [17], [18]'deki çalışmalar diğer amaçlar için geliştirilen metotlar kısmında açıklanmıştır.

2.6.1. Alt iletim hatları için geliştirilen metotlar

Referans [5]'te, optimal güç akışı metodundan yararlanarak YES'in en uygun yerini elde etmiştir. alt iletim sisteminde seçilen yük baralarına YES yerleştirip ve YES'lerin toplam kapasitesini belirleyip optimal güç akış metotlarından ikinci

$$Z^{k+1} = Z^k + [H(z^k)]^{-1} g(z^k) \quad (2.7)$$

ile elde edilmiştir. Burada

$$g(z) = \frac{\partial L(z)}{\partial z} \quad H_{ij} = \frac{\partial^2 L(z)}{\partial z_i \partial z_j} \quad (2.8)$$

dir.

Bilinmektedir ki, ikinci derece metodu, global optimizasyon metodu değildir. Metot kolaylıkla yerel çözümü yakınsayabilir. Bu metotta YES'lerin yerleşeceği yerler ve YES'lerin toplam büyüklüğü önceden belirlenmek zorundadır. Özellikle büyük sistemlerde çok sayıda baranın seçilmesi en uygun barayı tespit etmeyi zorlaştırır. Bu yüzden bu metodu uygulamak zor ve zaman alıcıdır, ayrıca sadece alt iletim sistemleri için geliştirilmiştir.

Genetik Algoritması ve Hereford ranch algoritması [6]'da alt iletim sisteminde YES'lerin en uygun büyüklüğünü bulmak için kullanılmıştır. Hat kayıplarını azaltmak için YES'lerin yerleşeceği yer ve toplam kapasitesi belirlenerek [5]'teki ikinci derece metodundaki amaç ve kısıt fonksiyonları ile problem tanımlanmıştır. Burada ikinci derece metodu, genetik algoritması, Hereford ranch algoritması altı baralı iletim sistemine uygulanmıştır.

Genetik algoritma, optimum çözümü kurlsız arama sonucu elde eden global optimizasyon metodudur. Fakat çözüme yakınsaması, çok zaman alması, en uygun çözüme ulaşmadan yakınsaması bazı dezavantajları olarak sıralanabilir. Daha iyi yakınsama için seçicilik hızının yüksekliği popülasyondaki çeşitliliği azaltır, en uygun çözüme ulaşmadan yakınsaması çeşitliliğin azalmasından dolayı olmaktadır. Hereford ranch algoritması, genetik popülasyonun her üretiminde nesil seçme ve cinsiyet ayırt etme kavramını kullanarak çeşitliliğin kayıp oranını azaltmaya ve genetik algoritmanın sağlamlılığını artırmaya çalışmaktadır.

[6]'da Hereford ranch algoritması operatörleri geliştirilerek yakınsama

zamanını ve kararlılığı iyileştirmek için kullanılmıştır. Global optimizasyon metodu olmayan ikinci derece metodu, global optimizasyon metodu olan fakat çözüme yakınsaması çok zaman alan genetik algoritma, optimal yük akışı ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilmiş Hereford ranch algoritması diğer algoritmalara göre en iyi sonucu vermiştir. Bu çalışma global çözümü kısa sürede verse de YES'lerin toplam büyüklüğü ve yerlerinin önceden seçilmesi, seçilmiş yerler içinden YES için en uygun yeri elde etmesi ve sadece iletim sistemlerine uygulanabilmesi dezavantajıdır.

[10]'da iletim ve dağıtım sistemlerinde sistem kayıplarına göre YES'lerin yaklaşık en uygun yerlerini bulan iki algoritma geliştirilmiştir. İletim sistemleri için geliştirilen metotta güç sistemin güç kayıpları Kron'un Kayıp formülü kullanılmıştır. Kron'un Kayıp formülü [38] ile kayıp duyarlılık indisi çıkartılmıştır. Duyarlılık indisi sırasına göre YES'ler yerleştirilerek sistem kayıpları en az oluncaya veya YES'lerin istenen toplam büyüklüğüne ulaşınca kadar YES'lerin büyüklüğünü artırılarak en uygun yer ve büyüklük elde edilmiştir.

Kron'un Kayıp formülü aşağıdaki verilmiştir.

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n P_i B_{i0} + B_{00} \quad (2.9)$$

Burada P_L , aktif güç kaybı; P_i , i. baradaki aktif gücü; B_{ij} , nxn boyutlu kuadratik kayıp katsayıları; B_{i0} , lineer kayıp katsayısı; B_{00} , sabit kayıp katsayısıdır. Bu kayıp katsayılar güç akışı denklemlerin çalışma noktası civarında lineerleştirilmesi ile bulunur. Bu yüzden Denklem (2.9) ile elde edilen güç kaybı, kayıp katsayılarının elde edildiği çalışma şartları için tam doğrudur. Üretilen gücün ve yük baraların gerilimin genliği ve güç faktörü sabit kaldığı sürece jeneratör baraların güç değişimi küçük olduğu için B genellikle sabit olduğu düşünülür. Bu yüzden yüklerde büyük bir değişme olmadığı ve ortalama çalışma şartları değişmediği sürece B kayıp katsayıları ile hesaplanan aktif güç kayıpları doğru hesaplanabilir. Dikkat edilmesi gereken nokta B katsayıları sadece jeneratör baralarında hesaplanmaktadır ve YES'ler sadece güç enjekte edebilen baralar yerleştirilebilmektedir.

iki metot anlatılmıştır. Network yapıdaki sistem için ise bara admitans matrisine, üretim bilgisine ve sistemin yük dağılımına dayanan bir metotla YES'in en uygun yeri belirlenmiştir. Bu çalışmada YES'in en uygun büyüklüğü belirlenmemiş, büyüklük toplam yük büyüklüğüne eşit alınmıştır.

Network yapıdaki sistemler için önerilen analitik metotta ise ilk önce sistemin admitans matrisi oluşturulmuştur. YES'in yerleşeceği baranın salınım barası ile kısa devre olduğu varsayılarak yeni admitans matrisi elde edilip tersi alınarak yeni empedans matrisi hesaplanmıştır. Daha sonra baralarda üretilen ve tüketilen güçler kullanılarak yük vektörü, S_L

$$S_L = [P_{L1} + jQ_{L1} \quad \cdots \quad P_{Ln} + jQ_{Ln}] \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} S_{Li} &= 0 \quad i = \text{salınım barası} \\ S_{Li} &= P_{Li} + jQ_{Li} \quad i = \text{yük barası} \\ S_{Li} &= \begin{cases} P_{Li} - P_{Gi} + j0, & P_{Li} > P_{Gi} \\ 0, & P_{Li} \leq P_{Gi} \end{cases} \quad i = PV \text{ barası} \end{aligned} \quad (2.12)$$

şeklinde oluşturulmuştur. YES'in yerleşeceği en uygun yeri elde etmek için amaç fonksiyonu oluşturulmuş ve j. baraya YES eklendiğinde amaç fonksiyonu

$$f_j = \sum_{i=1}^{j-1} R_{li}(j) |S_{Li}|^2 + \sum_{i=j+1}^n R_{li}(j) |S_{Li}|^2, \quad j = 2, \dots, n \quad (2.13)$$

ile ifade edilmiştir. Burada $R_{li}(j)$, j. baraya YES eklendiğinde salınım barası ile i. bara arasındaki eşdeğer dirençtir.

$$R_{li}(j) = \begin{cases} \text{real}(Z_{11} + Z_{ii} - 2Z_{1i}) & i < j \\ \text{real}(Z_{11} + Z_{(i-1)(i-1)} - 2Z_{i(i-1)}) & i > j \end{cases} \quad i = PV \text{ barası} \quad (2.14)$$

YES'in salınım barasına yerleşme durumunda amaç fonksiyonu;

$$f_1 = \sum_{i=1}^n R_{1i}(j) |S_{Li}|^2 \quad (2.15)$$

ile hesaplanmıştır. Amaç fonksiyonunu minimum yapan bara, en uygun yer olarak belirlenmiştir.

$$f_m = \min(f_j), \quad j = 1, \dots, n \quad (2.16)$$

Network yapıdaki sistemler için geliştirilen bu analitik metodun algoritması aşağıda verilmiştir:

Adım 1. Sistem bilgileri oku, empedans matrisini oluştur.

Adım 2. YES'in yerleştirileceği baraya göre yeni empedans matrisini elde edip admitans matrisini hesapla.

Adım 3. Denklem (2.14) ile eşdeğer dirençleri hesapla.

Adım 4. Denklem (2.13) ve (2.15) ile her bir bara için amaç fonksiyonunu hesapla.

Adım 5. Denklem (2.16) ile en uygun bara m'yi, elde et.

Adım 6. m barasına yerleştirilen YES ile gerilimlerin sınır değerlerinin içinde olup olmadığını kontrol et. Gerilimler sınır değerler içinde değilse YES'in büyüklüğünü değiştir.

Bu metot iteratif bir metot değildir. Yakınsama problemi yoktur ve sonuca çabucak ulaşılmaktadır. YES'in büyüklüğüne, sistem gerilimlerine bakılmadan sistemdeki yük baraları dikkate alınarak problem çözülmektedir. YES'in gücünü ve sistem gerilimini dikkate almaması metodun dezavantajıdır.

bulanık setler ile modellendikten sonra dağıtım sisteminin kayıp maliyeti, gerilim sapmalarını azaltacak, en az sayıdaki YES'lerin en uygun yerini ve büyüklüğünü genetik algoritma ile çözülmektedir. 12 baralı radyal fidere yerleşecek YES'lerin her yüklenme seviyesi için en uygun yeri ve kapasitesi elde edilmiştir. Önerilen metotta her yüklenme seviyesi için farklı yer ve büyüklük bulunmuştur.

[16]'da, [7]'deki optimizasyon problemi geliştirilmiştir. [7]'den farklı olarak çok amaçlı fonksiyonda gerilim sapması ile ilgili kısıt fonksiyonu çıkartılarak gerilim profilini düzeltmek için kullanılan gerilim sapmasını azaltan amaç fonksiyonu

$$\min \Delta U_j^i = \max \left[1 - U_j^i \right] \quad j = 1, 2, \dots, n \quad i = 1, 2, \dots, nt \quad (2.18)$$

eklenmiştir. Burada U_j^i i. yük seviyesinde j. bara gerilimini göstermektedir. n toplam bara sayısı ve nt toplam yük seviyesini göstermektedir. Kısıtlamalara eklenen YES'in sayısı ve hat limitleri aşağıdaki denklem ile amaç fonksiyonuna çevrilmiştir.

$$\min \Delta N_G^i = N_G^i - N_{G,\min}^i \quad i = 1, 2, \dots, nt \quad (2.19)$$

Burada N_G^i ve $N_{G,\min}^i$ i. yüklenme seviyesinde yerleştirilen YES sayısı ve yerleştirilebilecek minimum YES sayısını göstermektedir.

$$\min \Delta P_{flow,m}^i = P_{flow,m}^i - P_{flow,m,Rate}^i \quad m = 1, 2, \dots, nt \quad (2.20)$$

Burada $P_{flow,m}^i$ ve $P_{flow,m,Rate}^i$ i. yüklenme seviyesinde m hattının güç akışını ve hattın güç akış limitini göstermektedir.

[7]'de olduğu gibi amaç fonksiyonlarını ve kısıtlamaları çok amaçlı fonksiyonlara bulanık setler ile çevrilmiştir. Dağıtım sisteminin kayıplarını azaltacak ve gerilim profilini düzeltecek YES'lerin yerleri ve büyüklükleri genetik algoritma ile elde etmiştir. IEEE 34 baralı sistemine yerleşecek YES'lerin en uygun yerleri ve büyüklükleri gerilim bağımlı yük için ve sabit güç için bulunmuştur. [7]'de her

yüklenme seviyesi için ayrı çözüm elde ederken [16]'daki çalışmada tek çözüm edilmiş ve gerilim bağımlı yük için sabit güç için elde edilen çözümler farklı çıkmıştır.

[8]'de dağıtım sisteminde kayıpları azaltmak için yerleştirilen YES'lerin en uygun yer ve büyüklüklerini elde etmede Tabu Arama metodu kullanılmıştır. Tabu arama, daha önce incelenmiş belli sayıda çözümü, tabu listesi olarak adlandırılan bir listede tutarak o çözümlere geri dönmeyi bir müddet yasaklayan ve böylece aramayı çözüm uzayının daha iyi noktalarına yönlendiren bir arama metodudur [70]. Optimizasyon problemi bazı kabullerle oluşturulmuştur. Bu kabuller; daldaki yüklerin düzgün dağıldığı, dengeli sabit akım çektiği ve güç faktörünün bir olduğu kabullerdir. YES'in yeri, her fiderin dalı için belirlenen aday pozisyonlardan seçilmesi, YES'in kapasitesi verilen aday kapasite değerlerinden seçilmesi, bir aday pozisyonu için bir YES yerleştirilmesi, yerleştirilecek YES'lerin toplam kapasitesi ve maksimum sayılarının belirlenmesi gerekmektedir. Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu dağıtım sisteminin kayıplarını azaltmaktır. Kısıtları YES'lerin toplam kapasitesinin ve maksimum sayısının belirlenmesi, bir pozisyona bir YES yerleşebilmesi ve YES'in kapasitesi verilen aday kapasite değerlerinden seçilmesinden oluşmaktadır.

Önerilen metot endüstri, ticari ve konut yükleri bulunan iki dağıtım sisteminde test edilmiştir. Endüstri, ticari ve konut yüklerinin günlük yük eğrileri kullanarak zamana bağlı değişimi dikkate alınmıştır. Toplam YES'in kapasitesine ve maksimum sayısına göre farklı en uygun çözümler elde edilmiştir. Tabu arama metodu, yapay ısıtma işlemi (Simulated Annealing) algoritması ile karşılaştırılmıştır. Isıtma işlemi algoritması, problemten bağımsız, yerel minimumlardan uzaklaşmak için rastgele çıkış hareketleri kullanan modifiye edilmiş bir iteratif iniş algoritmasıdır [70]. Isıtma işlemi göre tabu arama algoritması çok kısa sürede hesaplayıp daha iyi sonuç elde etmiş. Bu çalışmada sadece YES'lerin yerleşiminde hat kayıpları, YES'lerin kapasitesi ve sayısı dikkate alınmıştır. Gerilimlerin limitleri aşıp aşmadığı kontrol edilmemiştir.

Dağıtım sistemlerinde şönt kondansatörün yerleştirilmesinde kullanılan kural olan '2/3 kuralı' ile [9]'da YES'in yeri ve büyüklüğü belirlenmiştir. Bu metotta

düzgün dağılmış yükü olan radyal sisteme için yerleştirilecek YES'in büyüklüğü toplam yükün $2/3$ oranında ve yeri de hat uzunluğunun $2/3$ olarak önerilmiştir. Birden fazla YES yerleşimi için de N tane kondansatörün yerleşimi için genelleştirilen ' $2/(2N+1)$ ' kuralı' kullanılabileceği belirtilmiş ve iki tane YES için en uygun büyüklükleri $2/5$ ve en uygun yerleri hattın $2/5$ ve $4/5$ 'ine yerleştirilmesi önerilmiştir.

[10]'da dağıtım sistemleri için geliştirilen analitik metotla radyal fiderin kayıplarını en aza indirecek YES'in en uygun yeri elde edilmiştir. Radyal fider boyunca düzgün ve artan dağılmış yükler olduğu kabul edilerek fiderlere YES yerleştirilmiştir. Yük dağılımının dağıtım sistemleri üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Geliştirilen analitik metotla yükün dağılımına ve YES'in büyüklüğüne göre en uygun yerin değiştiği ve YES'in radyal fidere yerleşimi ile fider kayıplarını önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir.

[11]'de radyal fiderin güç kaybını minimum yapmak için yerleştirilecek YES'in yerini belirleyen analitik metot, [10]'daki metot esas alınarak geliştirilmiştir. Düzgün ve artımlı dağılmış yük tipine ilaveten merkezi dağılmış yük ve zamanla değişen düzgün dağılmış yük için YES'in büyüklüğü toplam yük büyüklüğünde alınarak YES'in en uygun yeri elde edilmiştir.

[12]'de farklı yük tiplerindeki radyal fider için sistem kaybını minimum yapacak YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü [11]'deki metot geliştirerek elde edilmiştir. Fiderin herhangi bir yerine yerleştirilecek YES'in en uygun büyüklüğü ve herhangi bir büyüklükte YES'in en uygun yeri tespit edilmiştir. Farklı statik yük modeli için YES'in etkisine bakılmıştır. Analitik olarak elde edilen sonuçlar ızgara arama metodu ile teyit edilmiştir.

[13]'te tam kayıp formülüne dayanarak radyal ve 'weakly meshed' yapıdaki dağıtım sistemleri için eklenecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü elde eden analitik metot ve kayıp duyarlılık indisi metodu geliştirilmiştir. Geliştirilen iki metot ayrıntılı güç akışı metoduna göre karşılaştırılmıştır.

YES'in en uygun büyüklüğünü bulmada tam kayıp formülü kullanılmıştır.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[\alpha_{ij}(P_i P_j - Q_i Q_j) + \beta_{ij}(Q_i P_j - P_i Q_j) \right] \quad (2.21)$$

Burada P_j ve Q_j sırasıyla j . baranın aktif ve reaktif gücüdür; P_{load_i} ve Q_{load_i} sırasıyla i . baradaki yükün çektiği aktif ve reaktif güçtür; n bara sayısıdır; α , β aşağıdaki denklemlerle elde edilen katsayılardır.

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad \beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{V_i V_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (2.22)$$

Burada V_i , i . baranın gerilim büyüklüğü; δ_i , i . baranın gerilim açısı; r_{ij} , empedans matrisi, Z_{bus} 'ın ij . elemanının gerçekteki kısmıdır. Empedans matrisi admitans matrisinin tersini alarak elde edilmektedir ($Z_{bus} = Y_{bus}^{-1}$).

Geliştirilen kayıp duyarlılık indisi metodunda, toplam güç kaybının bara aktif gücüne göre değişimini veren kayıp duyarlılık ifadesi kullanılmıştır.

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = 2 \sum_{j=1}^n (\alpha_{ij} P_j - \beta_{ij} Q_j) \quad (2.23)$$

Kayıp duyarlılık indisi metodu adım adım aşağıda verilmiştir:

Adım 1. Sistem bilgilerini oku; güç akış analizi yap.

Adım 2. Kayıp duyarlılık indisi Denklem (2.23) ile elde et ve indisi büyükten küçüğe doğru yani en duyarlı baradan en az duyarlı baraya doğru sırala. Toplam bara sayısının %30'u ile öncelik listesi oluştur.

Adım 3. Öncelik listesindeki baraların her birisine YES ekleyerek ve büyüklüğünü küçük aralıkla artırıp güç akış analizi yaparak toplam güç kayıplarını hesapla.

Adım 4. Toplam güç kaybı en az olan YES'in büyüklüğünü en uygun büyüklük olarak belirle.

Tam kayıp formülü ile YES'in en uygun büyüklüğünü veren ifade, toplam güç kaybını bara aktif gücüne göre türevini sifıra eşitlenerek elde edilmiştir.

$$Pdg_i = Pload_i + \frac{1}{\alpha_{ii}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m (\alpha_{ij} P_j - \beta_{ij} Q_j) \quad (2.24)$$

Burada Pload_i, i. baradaki yükün aktif gücüdür.

Önerilen analitik metotta herhangi bir yerdeki YES'in en uygun büyüklüğünü hesaplamak için Denklem (2.24) kullanılmıştır. YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü aşağıda verilen algoritma ile elde edilmiştir.

Adım 1. Sistem bilgilerini oku; güç akış analizi yap.

Adım 2. Her bir bara için YES'in en uygun büyüklüğü Denklem (2.24) ile elde et.

Adım 3. Her bir bara için en uygun büyüklüğü elde edilen YES yaklaşık sistem hat kayıplarını Denklem (2.21) ile hesapla.

Adım 4. Yaklaşık sistem hat kayıplarının en az olduğu YES eklenen barayı en uygun yer olarak seç.

Adım 5. Elde edilen YES büyüklüğü ve yeri ile güç akış analizi yap, kesin sistem hat kayıplarını hesapla.

[13]'te YES'in dağıtım sistemlerine yerleştirilmesine ilişkin yukarıda anlatılan bu iki algoritma tekrarlan güç akış analizi ile üç farklı test sistemde karşılaştırılmıştır. Kayıp duyarlılık indis metodu bazı test sisteminde en uygun yeri ve büyüklüğü bulamamıştır. Burada duyarlılık indislerin çözüm arama alanını küçültürken en uygun çözümün bu alan içinde olmadığı da görülmüştür. Diğer önerilen analitik metotta iki güç akışı ile kesin sonuç elde edilmiştir. Bara admitans matrisi, Ybus'ın tersi ile bulunan bara empedans matrisi, Zbus tam kayıp formülünde bulunmaktadır. Dağıtım sistemlerinde bulunması zor olan bara empedans matrisi kullanılmıştır.

2.6.3. Dağıtım sistemlerinin gerilim profilini düzeltmek için geliştirilen metotlar

[14]'te dağıtım sisteminin gerilim profilini düzeltmek için YES'in en uygun yerini belirleyen genetik algoritma ile bir metot geliştirilmiştir. Metotta YES'lerin yerleşebileceği yerleri belirlemek için analitik duyarlılık analizi kullanılmıştır. Gerçek bir 11 fiderli dağıtım sistemine duyarlılık analizi ve optimizasyon uygulanmış ve YES'in yeri belirlenip gerilim profilini ne kadar etkilediğini gösterilmiştir.

İletim sistemlerinde gerilim kararsızlığı için çoğunlukla kullanılan sistemdeki baraların gerilime bağımlılığını veren duyarlılık indisinden [14]'te YES'in yerleşebileceği yeri belirleyen öncelik listesini oluşturmada yararlanılmıştır. Duyarlılık indisi bara gerilimin bara gücüne göre değişimi veren $\Delta V/\Delta P$ ve $\Delta V/\Delta Q$ gerilim bağımlılığı ifadesinden elde edilmiştir. Uygulanan dağıtım sisteminin duyarlılık indisinden radyal fiderin en uç kısımları gerilime daha fazla duyarlılığı olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada optimizasyon probleminde YES'lerin büyüklüğü sabit alınmıştır. Optimizasyon probleminde gerilim profilinin sapması ve YES'in sayısı amaç fonksiyonu olarak alınmıştır.

$$F(x) = K_1 \sum_i |U_i - U_0| + K_2 p \quad (2.25)$$

Burada x, gerilim, açı, aktif ve reaktif güçten oluşan durum değişkenidir. K_1 , K_2 iki amaç fonksiyonu arasındaki ağırlık katsayısıdır. U_0 , genellikle bir birime eşittir; U_i , i. baranın gerilimidir; p , YES'in sayısıdır. K_1 , K_2 katsayıların seçimi çok zordur ve optimizasyon probleminin çözümünü çok etkilemektedir. Seçilen K_1 , K_2 değerlerinden dolayı YES sayısı önemli ölçüde değişmektedir.

[15]'te radyal fiderin gerilimini desteklemek üzere yerleştirilecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü geliştirilen yeni bir analitik metotla belirlenmiştir.

Geliştirilen metotta YES'den sisteme sabit akım verildiği varsayılmıştır. YES'in sisteme verdiği akım büyüklüğü cinsinden fiderdeki baraların gerilim değişimini veren ifade çıkartılmıştır. Bu ifadeyi kullanarak YES'in büyüklüğü ve yeri değiştirilerek en uygun çözüm bulunmuştur. Geliştirilen metot gerçek bir sistem ile test edilmiştir.

Geliştirilen metotta, radyal fiderin N tane yük barası bulunduğu; N tane baranın 1. barası referans bara, N. barası da fiderin sonundaki bara olduğu kabul edilmiştir. En uygun yeri bulmak için radyal fidere bir YES eklenmiştir ve fider boyunca yeri değiştirilmiştir. YES'i, diğer baraların yerleşimini değiştirmeden sisteme dâhili bara, $N+1$, olarak eklenmiştir. YES'in sisteme verdiği akımdan, ΔI_{N+1} , dolayı sistemin gerilim değişimi hesaplanmıştır. YES eklendikten sonra sistemin gerilim sapma indeksindeki değişimi ise

$$\Delta TVD = \sum_{i=1}^N \left[|V_n - V_i|^2 - |V_n - (V_i + a_i \Delta I_{DG})|^2 \right] \quad (2.26)$$

ile bulunmuştur. Burada a , baralardaki gerilim değişimini veren katsayıdır. Bu denklemdeki YES akımı değiştirilerek gerilimi en fazla düzelten en uygun büyüklük elde edilmiştir. Gerilim sapma indeks değişiminin en az olduğu yer ve büyüklük en uygun çözüm olarak belirlenmiştir.

Bu geliştirilen metot, güç akış analizi yapmadan sistemin admitans matrisini ve YES'in akım büyüklüğünü değiştirmek suretiyle çözüm elde edebilen bir metottur. Sadece radyal fiderlere uygulanabilmektedir. Kapalı dağıtım sistemi ve alt fiderli sistem için uygun değildir. En uygun büyüklüğü elde etmede değişken değeri değiştirilerek çözüm bulunmaktadır. Hâlbuki gerilim sapma indis değişim denkleminde en uygun büyüklüğü veren ifade çıkarılabilirdi. İleriki çalışma olarak bu konu incelenecektir.

2.6.4. Diğer amaçlar için geliştirilen metotlar

Çok amaçlı evrimsel algoritma ile [18]'de dağıtım sistemlerinde sistem yenileme, sistem kayıp, tedarik edilemeyen enerji ve müşteriye sağlanan enerji maliyetleri arasındaki en iyi uzlaşmayı sağlayacak YES'in büyüklüğü ve yeri bulunmuştur. Çok amaçlı evrimsel algoritma ile genetik algoritma kullanılarak global çözüm elde edilmiştir. ϵ -kısıtlı optimizasyon tekniği ile çok amaçlı fonksiyonunun sırasıyla her bir kısmını esas amaç seçerek global çözüm seti oluşturulmaktadır. Çözüm setinden planlayıcının en uygun çözümü seçebilmektedir. Önerilen çok amaçlı algoritma ile planlayıcının kendisi için önemli olan amaçların etkisini çözümde artırabilmektedir. Günümüzde birçok YES teknolojileri için maliyetin yüksek oluşu, standartların ve haberleşme protokollerinin olmaması gibi engeller dolayısıyla maliyet hesabı zor olsa da ileride bu metotla, dağıtım sistem planlayıcıların kendi ihtiyaçları doğrultusunda doğru ve en kârlı çözümü bulmaları sağlanabilecektir.

[17]'de dağıtım sisteminin güvenilirliğini düzeltmek amacıyla YES'in en uygun yeri elde edilmiştir. fiderin güvenilirliği sistemdeki kesinti süresi indeksi (SAIDI) ile hesaplanmıştır. Fiderin her bir parçasındaki arıza oranı, ortalama tamir zamanı, arızadan dolayı enerji kesinti süresi ve müşteri sayısı dikkate alınarak indeks hesaplanmıştır. Zamana bağlı üreteceği enerji miktarı belli olan YES'i her bir bölüme yerleştirerek zamana bağlı yüklerle sistemin güvenilirliği hesaplanmıştır. Güvenilirliğin en fazla hesaplandığı bölüm YES'in en uygun yeri olarak bulunmuştur. Dağıtım sisteminin güvenilirliği maksimum yapacak YES'in yeri, hem en büyük yük ile hem de zamanla değişen yük ile elde edilmiştir. Aynı şekilde sistem kayıplarını azaltacak YES'in en uygun yeri her bir bölüme yerleştirilip güç akışı yapılarak elde edilmiştir.

2.7. Sonuçlar ve Özet

Literatür özetinde anlatılan çalışmalar, tablolar ile aşağıda özetlenmiştir. Tablo 2.3'te anlatılan çalışmalarda kullanılan metotlar ve metotların uygulandığı yer gösterilmiştir. Tablo 2.3'te çalışmalar beş bölüme ayrılmıştır. I. bölümde alt iletim

hatları için yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Dağıtım sistemlerinde hat kayıplarını azaltmak için meta heuristik ile yapılan çalışmalar II. bölümde, analitik çalışmalar da III. bölümde yer almaktadır. IV. bölümde dağıtım sisteminin gerilim profilini düzeltmek için yapılan çalışmalar ve V. bölümde de diğer çalışmalar bulunmaktadır.

Tablo 2.3. Çalışmalarda metodun uygulandığı yer ve metod tipi

	Referans numarası	Metodun uygulandığı yer	Metot tipi
I	[5]	Alt iletim hatları	İkinci derece algoritması
	[6]	Alt iletim hatları	Genetik algoritma
	[10]	Alt iletim hatları	Duyarlılık analizi
	[11]	Alt iletim hatları	Analitik
II	[7]	Dağıtım sistemi (radyal fiderve alt fiderler)	Fuzzy lineer olmayan amaç programlama
	[8]	Dağıtım sistemi (radyal fiderve alt fiderler)	Tabu arama
III	[9]	Dağıtım sistemi (radyal fider)	Analitik (2/3)
	[10]	Dağıtım sistemi (radyal fider)	Analitik (dağılmış yük tipi ile)
	[11]	Dağıtım sistemi (radyal fider)	Analitik (dağılmış yük tipi ile)
	[12]	Dağıtım sistemi (radyal fider)	Analitik (dağılmış yük tipi ile)
	[13]	Dağıtım sistemi (radyal fider, alt fiderler ve zayıf kapalı devre)	Analitik (tam kayıp formülü ile)
IV	[14]	Dağıtım sistemi (radyal fider ve alt fiderler)	Genetik algoritma
	[15]	Dağıtım sistemi (radyal fider)	Analitik
	[16]	Dağıtım sistemi (radyal fiderve alt fiderler)	Fuzzy lineer olmayan amaç programlama
V	[17]	Dağıtım sistemi (radyal fider)	Ayrıntılı arama
	[18]	Dağıtım sistemi (radyal fider ve alt fiderler)	Çok amaçlı evrimsel algoritma

Tablo 2.4'te alt iletim sistemi için ve Tablo 2.5'te dağıtım sistemi için geliştirilen metotları sınıflandırılarak amaç fonksiyonları, kısıtlamaları, optimum çözümde alınan kriterleri ve yük tipleri listelenmiştir. Tablolarda metod kısmında çalışmaların analitik veya meta heuristik metod olup olmadığı gösterilmiştir. Ayrıca klasik optimal güç akışından veya kapasitör yerleşim metodundan yararlanan çalışmalar belirlenmiştir. Amaçlar ve kısıtlamalar kısmından çalışmaların optimizasyon problem tanımlamaları görülmektedir. Optimum çözüm kısmında,

çalışmaların optimizasyon problem çözümündeki farklılıkları gösterilmiştir. Sadece YES'in en uygun yerini hesaplayan çalışmalar ile YES'in en uygun yer ve büyüklüğü hesaplayan çalışmalar ayrılmıştır. Problemi bir YES veya birden fazla YES için çözen çalışmalar belirlenmiştir. Ayrıca optimizasyon probleminde çözüm adayları seçilerek çözüm uzayını küçülten metotlar ve YES büyüklüğü sabit alarak optimum çözümü bulan metotlar işaretlenmiştir. Yük kısmında, zamanla değişen yükleri dikkate alan çalışmalar ile yükün güç faktörünü bir alarak sadece aktif güç çeken yüklerle çözüm yapan çalışmalar işaretlenmiştir.

Tablo 2.4. Alt iletim hatlarına YES yerleşimi ile ilgili çalışmalar

Kaynak Numarası		[5]	[6]	[10]	[11]
Metot	Analitik			*	*
	Meta heuristik		*		
	Klasik optimal güç akışı	*	*		
	Kapasitör yerleşimi			*	
Amaçlar	Aktif güç kayıpları	*	*	*	*
	VAr kayıpları	*			
	Hat yüklenmesi	*			
Kısıtlama	Gerilim sınırlamaları				*
	YES kapasitesi			*	*
	Güç dengesi	*	*		
Optimum Çözüm	Yer	*	*	*	*
	Yer ve büyüklük				
	Bir YES	*	*		*
	Birden fazla YES			*	
	Seçilen yerlerden (seçilmiş çözüm adayı)	*	*	*	
	Sabit YES büyüklüğü			*	*
	Yük güç faktörü $pf=1$			*	*
Yük	Zamanla değişen yük			*	

Tablo 2.4'ten görüldüğü üzere çalışmaların hepsi aktif güç kayıplarını azaltmayı amaç olarak almaktadır. Her bir çalışma farklı kısıtlama altında problemi çözmektedir. Bütün çalışmalarda YES'in en uygun yeri elde edilmektedir. Genellikle tek YES için seçilen çözüm adayları arasından en uygun yer belirlenmektedir.

YES yerleşimi ile ilgili ilk çalışmalar alt iletim sistemine optimal güç akışı yöntemi esas alarak yapılmıştır. Bu çalışmalarda esas amaç, hat kayıplarını azaltmak olup geleneksel optimal güç akışından farklı olarak maliyet hesaba katılmamaktadır. Seçilen baralara üretim birimi yerleştirilerek ve toplam üretim kapasitesi belirlenerek algoritmalar uygulanmaktadır. Algoritmalar sonucunda üretim birimlerinden en fazla gücü sisteme veren üretim biriminin olduğu bara, YES'in en uygun yeri olarak belirlenmektedir. Bu çalışmaların dağıtım sistemler için uygun olmaması ve seçilen yerlerden en uygun yerin belirlendiği için büyük alt iletim sistemler için verimli olmaması önemli dezavantajlarıdır.

Optimal güç akışı yönteminin iletim sistemleri için geliştirilmiş olması ve amacının jeneratörün en uygun yerini belirlemek olmaması YES yerleşimi için uygun bir yöntem olmadığını göstermiştir. Ancak sisteme yerleştirilmiş YES'in verimliliğini artırmak için optimal güç akış metotlarından dağıtım sistemlerine uygun hale getirilerek ileride yararlanılacağı görülmektedir.

Tablo 2.5'ten görüldüğü üzere genellikle çalışmalar, kapasitör yerleşim metotlarından yararlanmakta, aktif güç kayıplarını azaltmayı esas amaç almakta ve yer ve büyüklüğün en uygun çözümünü elde etmektedir. II. bölüm çalışmaları, meta heuristik algoritmalar kullandıkları için farklı kısıtlamaları probleme ekleyebilmektedirler. Seçilen çözüm adayları (yer ve büyüklük) arasından çözüm elde edilmektedir. Dağıtım sisteminde alt fiderleri ve zamanla değişen yükü göz önünde bulundurarak YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde etmektedirler.

III. bölümdeki çalışmalar analitik metot kullanarak aktif güç kayıplarını azaltacak tek YES'in en uygun yerini veya yer ve büyüklüğünü elde etmektedir. Bir çalışmada dağıtım sistemin radyal fider ve alt fiderleri ayrıca zayıf kapalı sistemleri göz önünde bulundurarak YES'in yeri ve büyüklüğü elde edilmektedir. Bu çalışma dışındaki diğer çalışmalarda, sadece radyal fiderde güç faktörü bir olan çeşitli

dağılmış yük profilleri için akıma dayalı algoritmalar kullanılmaktadır. IV. bölümde gerilim profilini düzeltmek için yapılan analitik ve meta heuristik ile yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Analitik çalışmada radyal fidere yerleşecek tek YES'in en uygun yer ve büyüklüğü elde edilmektedir. Meta heuristik çalışmalarda alt fiderli radyal fidere yerleşecek YES'ler için optimum çözüm bulunmaktadır. V. bölümdeki çalışmalar YES'in avantajlarından güvenilirliği ve güç kayıpları dikkate almaktadırlar. Bir çalışmada maliyet de hesaba katılmaktadır.

Güç sistemleri laboratuvarında veya derslerinde kullanılmak üzere MATLAB'ın grafik kullanıcı arabirimi kullanılarak gerilim kararlılığı ve optimizasyon (VS&OP) paketi de bu tezde sunulan çalışmaların bir sonucu olarak geliştirilmiştir [71]. Geliştirilen VS&OP paketinin optimizasyon bölümünde ise dağıtım sistemlerine yerleştirilecek olan YES veya kapasitörün en uygun yeri ve büyüklüğü belirlenmektedir. Bu programda YES veya kapasitörün en uygun yeri ve büyüklüğü sistem kayıplarını en aza indirmek amacıyla şimdilik iki farklı metot kullanılarak bulunmaktadır.

3. DUYARLILIK ANALİZİ

Gerçek bir güç sisteminin oldukça çok sayıda bara ve hatta sahip olması, sistemde bir hat veya baraya yeni bir eleman yerleştirileceği zaman bütün alternatifler için tek tek inceleme yapmayı güçleştirmektedir. Bu nedenle, sistemin temel çalışma koşullarını göz önüne alan amaçlar doğrultusunda duyarlılık incelemeleri yapılmaktadır.

Bu bölümde güç sistemindeki güç kayıplarının, bara aktif gücü değişimine karşı hassasiyetini veren duyarlılık ifadeleri incelenmiştir. İncelenen duyarlılık ifadelerinden elde edilecek duyarlılık indisleri değerlendirilmiştir.

3.1. Hat Kayıplarının Aktif Güç Değişimine Hassasiyeti

Duyarlılık analizi, başlangıç çalışma noktası civarında esasta lineer olmayan eşitliğin lineerleştirilmesi prensibine dayanır. Duyarlılık analizleri çözüm uzayındaki aday sayısını azaltmada yardımcı olur [13]. Güç sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu yapılacak yerleri belirlemekte [72] ve optimal güç akışında [38] birçok duyarlılık indisleri kullanılmaktadır. YES yerleşiminde de kullanılmaya başlanmıştır [10], [13].

Hat kayıplarının aktif güce göre değişimini veren çeşitli duyarlılık ifadeleri aşağıda listelenmiştir:

1971’de Olle I. Elgerd’in geliştirdiği bara gerilimleri sabit kabul edilerek çıkartılan duyarlılık ifadesi [73];

$$\frac{dP_{loss}}{dP_{Gi}} = \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gi}} = (1 + \alpha_i) \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (3.1)$$

1974’te H. Happ’ın geliştirdiği Jacobian matrisi kullanılarak elde edilen duyarlılık ifadesi [74];

$$\left[\frac{\partial P_{loss}}{\partial P} \right] = \begin{bmatrix} J_{L1} & J_{L2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Tam kayıp formülünü kullanarak elde edilen duyarlılık ifadesi [75].

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = 2 \sum_{j=1}^N \left[\alpha_{ij} P_j + \beta_{ij} Q_j \right] \quad (3.3)$$

Elgerd'in geliştirdiği duyarlılık ifadesi, gerilimin büyüklüğü sabit, faz açısı değişken kabul edilerek elde edilmiştir [73]. Happ'ın geliştirdiği ifade ise gerilimin hem büyüklüğü hem de faz açısını değişken alarak ve Jacobian matrisi kullanılarak elde edilmiştir [74]. Tam kayıp formülünü kullanarak elde edilen duyarlılık ifadesinde, aktif güç ve reaktif güç değişken alınarak elde edilmiştir [75]. Elgerd'in, Happ'ın geliştirdiği ve tam kayıp formülünden elde edilen bu ifadeler bundan sonra sırasıyla Duyarlılık İfadesi 1, Duyarlılık İfadesi 2 ve Duyarlılık İfadesi 3 olarak adlandırılacaktır.

3.1.1. Duyarlılık İfadesi 1

Toplam aktif güç kaybı P_{loss} , toplam üretim ile toplam yükün farkına eşittir. Bara güçlerin toplamı da toplam aktif güç kaybını verir. Toplam aktif güç kaybı aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanabilir.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^N (P_{Gi} - P_{Di}) = \sum_{i=1}^N P_i \quad (3.4)$$

Burada P_{Gi} , P_{Di} sırasıyla i. barada üretilen, talep edilen aktif güç, P_i 'de i. baradaki aktif güçtür. Toplam bara sayısı N 'dir. P_i klasik olarak Denklem (3.5)'teki gibi yazılabilir.

$$P_i = \sum_{k=1}^N |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_i - \varphi_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.5)$$

Burada Y_{ik} , i. ve k. baralar arasındaki hattın admitansı, φ_{ik} , Y_{ik} 'ın açısıdır. V_i ve δ_i ise i. baranın gerilimi ve faz açısıdır.

Denklem (3.5)'te gösterilen baranın gücü P_i , gerilim büyüklükleri sabit olduğu kabul edildiği için $n-1$ bara faz açılarının ($\delta_2 \dots \delta_N$) bir fonksiyonudur. Faz açıları (n-1) boyutlu vektör olarak tanımlanırsa

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_N \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

bara gücü, faz açılarının bir fonksiyonudur.

$$P_i = P_i(\delta) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.7)$$

Benzer şekilde aktif güç kaybı da faz açılarının bir fonksiyonudur.

$$P_L = P_L(\delta) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.8)$$

Denklem (3.4)'ün diferansiyeli Denklem (3.9)'daki gibidir.

$$dP_L = \sum_{i=1}^N dP_i = dP_1 + \sum_{i=2}^N dP_i \quad (3.9)$$

dP_i diferansiyeli, Denklem (3.5)'ten Denklem (3.10)'daki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
dP_1 &= \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} \partial \delta_2 + \dots + \frac{\partial P_1}{\partial \delta_N} \partial \delta_N \\
dP_2 &= \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \partial \delta_2 + \dots + \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} \partial \delta_N \\
&\vdots \\
dP_N &= \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} \partial \delta_2 + \dots + \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} \partial \delta_N
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Aşağıda (n-1) boyutlu üç vektör tanımlanmıştır.

$$dP = \begin{bmatrix} dP_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ dP_N \end{bmatrix} \quad \frac{\partial P_1}{\partial \delta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial P_1}{\partial \delta_N} \end{bmatrix} \quad d\delta = \begin{bmatrix} d\delta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ d\delta_N \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

Güç sistemlerinde kullanılan klasik Jacobian matrisinin üst parçası hatırlanacak olursa; (n-1)X(n-1) boyutlu bir matristir ve aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial P}{\partial \delta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \cdot & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & \cdot & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

Tanımlanan vektörler ve matris terimlerinden Denklem (3.10), Denklem (3.13)'te yeniden yazılmıştır.

$$\begin{aligned}
dP_1 &= \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta} \right)^T d\delta \\
dP &= \frac{\partial P}{\partial \delta} \partial \delta
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Son eşitlikten

$$d\delta = \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right)^{-1} dP \quad (3.14)$$

elde edilir. Denklem (3.13)'ün ilk eşitliğinde $d\delta$ yerine konursa Denklem (3.15) elde edilir.

$$dP_1 = \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta} \right)^T \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right)^{-1} dP = \alpha . dP \quad (3.15)$$

Matris çarpımı

$$\alpha = \left(\frac{\partial P_1}{\partial \delta} \right)^T \left(\frac{\partial P}{\partial \delta} \right)^{-1} \quad (3.16)$$

(n-1) boyutunda satır matristir. Aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$\alpha = [\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N] \quad (3.17)$$

Denklem (3.15), Denklem (3.9)'da yerine konulursa

$$dP_{loss} = \alpha . dP + \sum_{i=2}^N dP_i \quad (3.18)$$

veya

$$dP_{loss} = (1 + \alpha_2) dP_2 + (1 + \alpha_3) dP_3 + \dots + (1 + \alpha_N) dP_N \quad (3.19)$$

elde edilir. Toplam güç kaybı P_{loss} 'un bara güçlerine göre değişimini gösteren denklem Denklem (3.19)'dur. Özellikle i. bara dışında tüm jeneratör baralarının güçleri sabit tutulduğunda Denklem (3.19)'un kısmi türevinden

$$\frac{dP_{loss}}{dP_{Gi}} = \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_{Gi}} = (1 + \alpha_i) \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (3.20)$$

elde edilir [73]. Burada α Denklem (3.16) ile hesaplanır. Denklemdeki $\partial \mathcal{P}_1 / \partial \delta$ vektörün elemanları ve $\partial \mathcal{P} / \partial \delta$ matrisin diagonal olmayan elemanları Denklem (3.21), $\partial \mathcal{P} / \partial \delta$ matrisin diagonal elemanları da Denklem (3.22) ile hesaplanır.

$$i \neq k \quad \text{için} \quad \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (3.21)$$

$$i = k \quad \text{için} \quad \frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = |V_k| \sum_{k=1 \neq i}^N |Y_{ik}| |V_i| \sin(\delta_i - \delta_k - \theta_{ik}) \quad (3.22)$$

dP_{loss} , dP_{G1} den bağımsız olduğundan

$$\frac{dP_{loss}}{dP_{G1}} = 0 \quad (3.23)$$

olur [73].

Duyarlılık indis hesaplamalarında Denklem (3.16), Denklem (3.21) ve Denklem (3.22)'den yararlanarak Denklem (3.20) kullanılır. Duyarlılık indisi, güç kayıplarının bara aktif gücüne göre değişimini veren Denklem (3.20) ile oluşturulur.

3.1.2. Duyarlılık İfadesi 2

Toplam güç kaybı P_{loss} , bir güç sisteminde tüm bara güçlerinin toplamıdır (Denklem (3.4)). Bara aktif gücü P_i ve reaktif gücü Q_i , bara gerilim büyüklükleri ve gerilim faz açılarının fonksiyonudur, Denklem (3.5) ve (3.24) ile bulunur.

$$Q_i = \sum_{k=1}^N |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\delta_k - \delta_i - \phi_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3.24)$$

Toplam güç kaybı P_{loss} 'nın bara gücüne göre değişimi bulmak için $\partial P_{loss} / \partial P_j$ ve $\partial P_{loss} / \partial Q_j$ türevleri, gerilimin büyüklüğüne ve açısına $V(\delta, V)_j$ bağlı olarak alınır.

$$\frac{\partial Ploss}{\partial P_j} = \frac{\partial Ploss}{\partial \dot{V}(\delta, V)_k} \frac{\partial \dot{V}(\delta, V)_k}{\partial P_j} = \frac{\partial Ploss}{\partial V_k} \frac{\partial V_k}{\partial P_j} + \frac{\partial Ploss}{\partial \delta_k} \frac{\partial \delta_k}{\partial P_j} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial Ploss}{\partial Q_j} = \frac{\partial Ploss}{\partial \dot{V}(\delta, V)_k} \frac{\partial \dot{V}(\delta, V)_k}{\partial Q_j} = \frac{\partial Ploss}{\partial V_k} \frac{\partial V_k}{\partial Q_j} + \frac{\partial Ploss}{\partial \delta_k} \frac{\partial \delta_k}{\partial Q_j} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3.26)$$

Matris biçimde

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial Ploss}{\partial P} & \frac{\partial Ploss}{\partial Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Ploss}{\partial \delta} & \frac{\partial Ploss}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial \delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

ile yazılır. Yukarıdaki eşitlikten ters alma işlemi ile

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial Ploss}{\partial P} & \frac{\partial Ploss}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial \delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Ploss}{\partial \delta} & \frac{\partial Ploss}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial \delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \delta}{\partial P} & \frac{\partial \delta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix}^{-1} \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial Ploss}{\partial \delta} & \frac{\partial Ploss}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Ploss}{\partial P} & \frac{\partial Ploss}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

bulunur. Denklem (3.29)'un transpozesi alınır

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial Ploss}{\partial \delta} & \frac{\partial Ploss}{\partial V} \end{bmatrix}^T = \left(\begin{bmatrix} \frac{\partial Ploss}{\partial P} & \frac{\partial Ploss}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \right)^T \quad (3.30)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

elde edilir. İlk terimin Jacobian matrisinin transpozesi olduğu görülecek olursa, bağıl kayıp ile Jacobian matrisi arasındaki ilişki

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V} \end{bmatrix} = [J]^T \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial Q} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

ile verilir. Buradan bağıl kayıp;

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial P} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial Q} \end{bmatrix} = [J^T]^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{L1} & J_{L2} \\ J_{L3} & J_{L4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

elde edilir [74]. Burada $[J^T]^{-1}$ matrisi, Jacobian matrisin transpozelerinin tersidir, J_{L1} , J_{L2} , J_{L3} ve J_{L4} , alt matrisleridir.

Toplam güç kaybı P_{loss} 'un bara aktif güçlerine göre değişimi aşağıdaki denklem ile elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial P} \end{bmatrix} = [J_{L1} \quad J_{L2}] \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{loss}}{\partial \delta} \\ \frac{\partial P_{loss}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Baralardaki aktif güç değişimi ile elde edilen toplam aktif güç kaybı değişimi $\partial P_{loss}/\partial \mathcal{P}$ jeneratör gerilimleri sabit tutularak elde edilir. Bu toplam aktif güç kaybı değişimi duyarlılık indisini elde etmek için kullanılır. Duyarlılık indisi Denklem (3.34) ile elde edilir.

3.1.3. Duyarlılık İfadesi 3

Tam kayıp formülü baralardaki aktif ve reaktif güç ile ifade edilebilen bir formüldür [8]. Tam kayıp formülü Denklem (3.35)'te gösterilmiştir. Toplam güç kaybının aktif güce göre duyarlılık indisi bu formülden hesaplanabilir.

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\alpha_{kj} (P_k P_j + Q_k Q_j) + \beta_{kj} (Q_k P_j - P_k Q_j) \right] \quad (3.35)$$

Burada α_{kj} , β_{kj} katsayıları aşağıda tanımlanmıştır.

$$\alpha_{kj} = \frac{r_{kj}}{V_k V_j} \cos(\delta_k - \delta_j) \quad (3.36)$$

$$\beta_{kj} = \frac{r_{kj}}{V_k V_j} \sin(\delta_k - \delta_j) \quad (3.37)$$

Denklem (3.35)'teki $P_k + jQ_k$, k . baradaki kompleks gücü; Denklem (3.36)-(3.37)'deki r_{kj} , empedans matrisi, Z_{bus} 'ın (k,j) . elemanının gerçek kısmını göstermektedir.

$$r_{kj} = \text{real}(Z_{bus}(k, j)) \quad (3.38)$$

Tam kayıp güç formülü açılarak yazılıp

$$\begin{aligned} P_{loss} = & \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \left[\alpha_{kj} (P_k P_j + Q_k Q_j) + \beta_{kj} (Q_k P_j - P_k Q_j) \right] + \dots \\ & \quad k \neq i \quad j \neq i \\ & \dots + \sum_{k=1}^N \left[\alpha_{ki} (P_k P_i + Q_k Q_i) + \beta_{ki} (Q_k P_i - P_k Q_i) \right] + \dots \\ & \quad k \neq i \\ & \dots + \sum_{j=1}^N \left[\alpha_{ij} (P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{ij} (Q_i P_j - P_i Q_j) \right] + \dots \\ & \quad j \neq i \\ & \dots + \left[\alpha_{ii} (P_i P_i + Q_i Q_i) + \beta_{ii} (Q_i P_i - P_i Q_i) \right] \end{aligned} \quad (3.39)$$

toplam güç kaybı P_{loss} 'un bara gücü P_i 'ye göre değişimini bulmak için $\partial P_{loss}/\partial P_i$ türevi alınır.

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N [\alpha_{ki} P_k + \beta_{ki} Q_k] + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N [\alpha_{ij} P_j - \beta_{ij} Q_j] + 2[\alpha_{ii} P_i] \quad (3.40)$$

α_{ij} ve β_{ij} katsayısında bulunan r_{ij} , empedans matrisi elemanıdır ve empedans matrisi simetrik olduğu için $r_{ij}=r_{ji}$ 'dir. Kosinüs ve sinüs terimlerinin $\cos(x)=\cos(-x)$ ve $\sin(x)=-\sin(-x)$ özelliklerinden ve empedans matrisin simetrik özelliğinden yararlanarak α_{ij} ve β_{ij} katsayıları,

$$\begin{aligned} \alpha_{ij} &= \alpha_{ji} \\ \beta_{ij} &= -\beta_{ji} \end{aligned} \quad (3.41)$$

ile gösterilebilir. Buna göre $\partial P_{loss}/\partial P_i$ türevi

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = 2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N [\alpha_{ij} P_j - \beta_{ij} Q_j] + 2[\alpha_{ii} P_i] \quad (3.42)$$

şeklinde yazılabilir. Ayrıca β_{ii} katsayısı, sinüslü teriminden $(\sin(\delta_i - \delta_i))$ dolayı sıfıra eşittir. $\partial P_{loss}/\partial P_i$ türev ifadesi tekrar düzenlenirse,

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = 2 \sum_{j=1}^N [\alpha_{ij} P_j + \beta_{ij} Q_j] \quad (3.43)$$

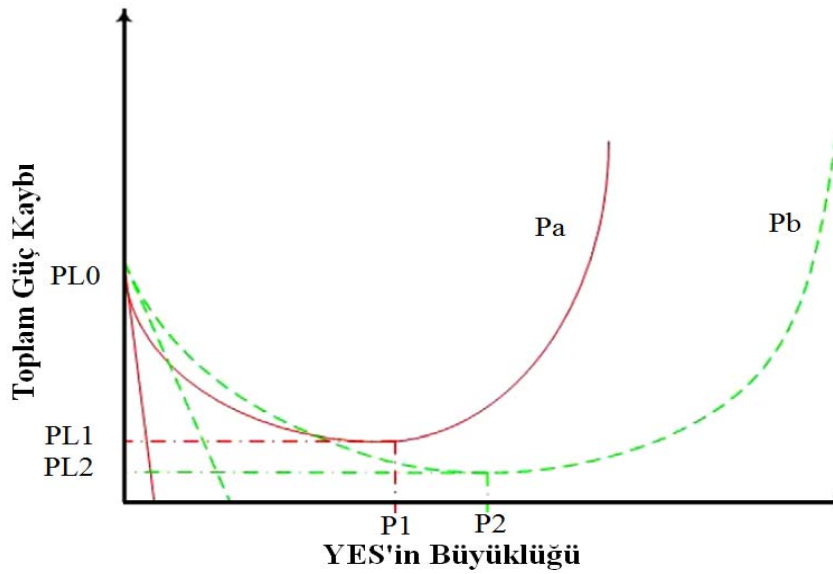
elde edilir. Elde edilen bu türev ifadesi tam kayıp güç formülünden çıkartılan duyarlılık ifadesidir.

Duyarlılık analizlerinde, duyarlılık indisi elde edilirken Denklem (3.43) kullanılır.

3.2. Duyarlılık İndislerinin Değerlendirilmesi

Klasik güç akış analizinden elde edilen değerler duyarlılık ifadelerinde kullanılarak her bir bara için duyarlılık faktörü hesaplanır. Duyarlılık faktörlerinin büyükten küçüğe doğru sıralanarak duyarlılık sıralaması oluşturulur. Duyarlılık sıralamasının en başındaki bara en duyarlı baradır. En duyarlı bara, başlangıç çalışma şartları civarında lineer olmayan eşitliğin lineerleştirilmesine dayanarak elde edilir ve toplam güç kayıp fonksiyonunda en fazla eğime sahip olan baradır. Bu da global en uygun çözümü belirlemeyebilir. Bu durum Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Bu yüzden duyarlılık indisi ancak en uygun çözümü elde etmek için aday çözümlerin öncelik listesini verilebilir [13].

Şekil 3.1’de P_a , a barasına YES yerleştirildiğinde ve büyüklüğü sıfırdan başlayarak artırıldığında sistemde ortaya çıkan toplam kayıpları, P_b ise b barasına YES yerleştirildiği durumdaki kayıpları vermektedir.



Şekil 3.1. Toplam güç kayıp eğrisindeki lineersizlik

Özetle Şekil 3.1’de bara aktif güç değişimine göre toplam güç kaybının olası bir eğrisini göstermektedir. Başlangıç çalışma şartlarında P_a eğrisinin eğimi, P_b eğrisinin eğimine göre daha büyük ve duyarlılık faktörü en yüksek olan eğridir. $PL1 > PL2$ olduğundan en az kaybı P_a eğrisi vermemektedir. Şekil 3.1’den eğimi

büyük olan Pa eğrisinin daha önce minimuma gitmediği görüldüğü üzere eğimin büyüklüğüne göre sıralanan duyarlılık indisi de en uygun çözümü veremeyebilir.

[76]'da duyarlılık indisi ile en uygun çözümü veremediği yukarıda anlatılan duyarlılık ifadeleri ile altı ve otuz baralı sistemlere uygulanarak gösterilmiştir. Çalışmada, duyarlılık ifadeleri ile oluşturulan duyarlılık indislerin farklı sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca kayıpları azaltacak YES'in en uygun yeri, ızgara arama metodu ile elde edilmiş ve en uygun çözümün duyarlılık indis sıralamalarında ilk sıralarda yer alması duyarlılık indislerinden en uygun yeri bulmada yararlanılabileceği gösterilmiştir. Duyarlılık indislerin büyük sistemler için arama alanını ve hesaplama süresini küçültmede kullanılabileceği ve dezavantajı en uygun çözümü eleme ihtimalinin olabileceği de görülmüştür.

3.3. Sonuç

Bu bölümde hat kayıplarının aktif güce göre değişimini veren üç farklı duyarlılık ifadesi özetlenmiştir. Duyarlılık ifadelerinden Duyarlılık İfadesi 1'de bara gerilim büyüklüğü sabit gerilim faz açısı değişken olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalarda Jacobian matrisinin birinci kısmı kullanılmaktadır. Duyarlılık İfadesi 2'de ikincisi bara gerilim büyüklüğü ve faz açısı değişken olarak kabul edilmiştir. Hesaplamalarda Jacobian matrisinin transpozisinin tersi kullanılmaktadır. Duyarlılık İfadesi 3'te bara aktif gücü değişken olarak alınabildiği için toplam güç kaybın aktif güce göre türevi doğrudan alınmıştır. Hesaplamalarda bara empedans matrisi Z_{bus} , admitans matrisinin tersi ile elde edilmektedir. Sadece Duyarlılık İfadesi 3 ile toplam güç kaybı bara aktif gücüne göre doğrudan türevi alınabilmektedir.

Yukarıda anlatılan duyarlılık ifadelerinde kullanılan Jacobian matrisi ve bara admitans matrisi; dağıtım sistemlerinin radyal yapısı, direnç ve reaktans değerleri gibi doğasında bulunan bazı özelliklerden dolayı elde etmek zordur [53]. Çünkü bu sistem matrisleri genellikle ill conditioned matrislerdir [39]. Matris elemanlarının değerlerdeki çok az bir değişim sistem çözümünde çok büyük değişikliklere sebep olmaktadır.

4. YEREL ELEKTRİK SANTRALLERİN YERLEŞTİRİLMESİ

Bu bölümün birinci kısmında, radyal sistemler için bara akımının bara gücü, gerilimi ve empedansı ile ifadesinden yararlanılarak güç kayıp ifadesi çıkartılmıştır. Güç kayıp ifadesi kullanılarak yeni kayıp duyarlılık ifadesi ve güç kayıplarını azaltacak YES'in en uygun büyüklüğünü elde eden ifade geliştirilmiştir. Daha sonra YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü bulan yeni bir analitik metot oluşturulmuştur.

İkinci kısmında, kapalı devre bulunan dağıtım sistemlerine uygun toplam güç kayıp ifadesi çıkartılıp yeni bir kayıp duyarlılık ifadesi, YES'in en uygun büyüklüğünü elde eden yeni bir ifade geliştirilmiştir. Radyal sistemler ve kapalı devre bulunan dağıtım sistemleri için YES'in yeri ve büyüklüğünü veren yeni bir analitik metot anlatılmıştır.

4.1. Radyal Sistemlerine YES'lerin Yerleştirilmesi

Bu bölümde; ilk olarak fider ve alt fiderlerden oluşan radyal dağıtım sistemleri için toplam güç kayıp ifadesi (Ploss), bara yükleri ve gerilimlerinin bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Dağıtım sistemlerinde baraya bağlı yüklerin gücü ve bara gerilimi ile baradan çekilen akım elde edilmekte ve hatlardan akan akımlar da bara akımları kullanılarak elde edilmektedir [53]. Toplam güç kayıp ifadesinde, baraya bağlı yüklerin gücü ve bara gerilimi ile elde edilen bara akımlarından yararlanılmıştır. Daha sonra toplam güç ifadesi ile dağıtım sistemlerin yapısına uygun kayıp duyarlılık ifadesi çıkartılmıştır. Kayıp duyarlılık ifadesini de kullanarak toplam güç kaybını en aza indirecek YES'in en uygun büyüklüğü veren ifade geliştirilmiştir. Son olarak çıkartılan analitik ifade ile de toplam güç kaybını en aza indirecek en uygun büyüklükteki YES'in yerleşeceği en uygun yeri veren bir algoritma geliştirilmiştir [77], [78].

Geliştirilen algoritma uygulanırken radyal sisteminde YES olmadığı durumda güç akış analizi yapılır. Analiz sonuçları kullanılarak sistemin her bir barasına eklenmiş YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin yaklaşık güç kaybı hesaplanır.

Yaklaşık güç kaybı en az olan bara en uygun yer olarak belirlenir. Esas olarak toplam güç kayıp ifadesinin çıkartılmasında eşdeğer akım enjeksiyon tekniği denilen bara akımının; bara gücü, empedansı ve gerilimi ile ifadesinden yararlanılmıştır.

4.1.1. Teorik Analiz

Dağıtım sistemlerinde hatlardan akan akım baradan çekilen akımın bir fonksiyonu olarak yazılabilir. Baradan çekilen akım da baradaki yükün gücü ve gerilimi ile elde edilebilir [53], [54], [58], [79]. Teng, dağıtım sistemlerinin topolojik yapısına dayanarak hat akımı ve bara gerilimini baradan çekilen akımlardan elde edebilen iki matris geliştirmiştir [53]. Birincisi bara akımlarından hat akımlarını elde etmeye yardımcı olan Bara Akımından Hat Akımı (BIBC - Bus-Injection to Branch-Current) matrisidir. İkincisi ise hat akımlarından bara gerilimlerini elde etmeye yardımcı olan Hat Akımından Bara Gerilim (BCBV - Branch-Current to Bus-Voltage) matrisidir. Burada BIBC matrisi kullanılarak toplam güç kayıp formülü çıkarılacaktır. Daha önce literatürde radyal dağıtım sistemleri için yazılmamış olan toplam güç kaybının matematiksel ifadesi aşağıda ilk defa çıkartılmıştır.

Radyal sistemlerde her bir baradaki kompleks güç, S_i ile belirtilirse;

$$S_i = P_i + jQ_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.1)$$

Baradan çekilen akım, baranın kompleks gücü ve gerilimi cinsinden yazılabilir ve her bir baradan çekilen akım Denklem (4.2) ile bulunur.

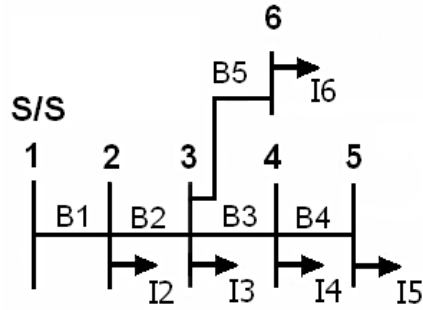
$$I_i = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^* \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.2)$$

Burada V_i i. baranın gerilimi, $P_i + jQ_i$ i. baranın kompleks gücü, n toplam bara sayısı, $*$ kompleks eşlenik operatörüdür. i. bara akımı gerçekte ve sanal kısımlarına ayrılacak olursa, bara akımının gerçekte ve sanal kısmı Denklem (4.3)'teki gibi elde edilir.

$$re(I_i) = \frac{P_i \cdot \cos(\theta_i) + Q_i \cdot \sin(\theta_i)}{|V_i|} \quad im(I_i) = \frac{P_i \cdot \sin(\theta_i) - Q_i \cdot \cos(\theta_i)}{|V_i|} \quad (4.3)$$

Burada θ_i i. bara geriliminin açısıdır.

Radyal sistemlerde hat akım denklemi, Kirchhoff'un akım kuralı yardımı ile bara akımlarının bir fonksiyonu olarak elde edilebilir. Buna göre hat akımları, hatta bağlı olan bara akımlarının toplamına eşittir. Örneğin; Şekil 4.1'deki örnek radyal sistemde B5, B3 ve B1 hatlardan akan akımlar,



Şekil 4.1. Örnek radyal dağıtım sisteminin devre şeması

$$\begin{aligned} B_5 &= I_6 \\ B_3 &= I_4 + I_5 \\ B_1 &= I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 \end{aligned} \quad (4.4)$$

şeklinde bulunur. Bundan başka hat akımları B, Bara Akımından Hat Akımı (BIBC) matris yardımı ile de edilebilir. Şöyle ki;

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Hat akımları da genel formda

$$[B]_{nb \times 1} = [BIBC]_{nb \times (n-1)} \cdot [I]_{(n-1) \times 1} \quad (4.6)$$

ile gösterilebilir. Burada $[B]$, hat akım vektörüdür; nb , hat sayısıdır. $[I]$, salınım barası dışındaki baraların oluşturduğu $(n-1)$ boyutundaki bara akım vektörüdür. $[BIBC]$, $nb \times (n-1)$ boyutunda, “0” ve “1” lerden meydana gelmiş, nb adet hattı n adet barası olan radyal sisteminin BIBC matrisidir. $[BIBC]$ matrisinin her bir satırı bir hattı temsil eder ve satırdaki “1” sayısı hattın bağlı olduğu barayı, “0” sayısı hattın bağlı olmadığı barayı gösterir. BIBC matrisi iyi bilinen incidence matrisine benzer bir matris olup, oluşturma prosedürü adım adım aşağıdaki gibi verilebilir:

Adım 1. $nb \times (n-1)$ boyutunda matris oluştur ve matrisin tüm elemanlarını “0” yap (matrisin sütunları salınım barası dışında diğer baraları temsil eder).

Adım 2. k 'ye 1 değerini ata.

Adım 3. k . hattın bağlı olduğu i . barayı ve j . barayı tespit et.

Adım 4. i . bara sütununu j . bara sütununa kopyala.

Adım 5. j . bara sütunun k . satırını “1” yap.

Adım 6. Sistemin her hattı için 3. adımdan 5. adıma kadar tekrarlayarak BIBC matrisini oluştur.

BIBC matrisi, herhangi bir radyal sistemin hat akımları, bara gerilimleri ve hat kayıpları gibi sistem ile ilgili birçok hesaplamaları kolaylaştırmaktadır.

Sistemdeki her bir bara gerilimi ile salınım bara gerilimi arasındaki gerilim düşümünü Hat Akımından Bara Gerilim (BCBV) matrisi kullanılarak ile Denklem (4.7) elde edilebilir.

$$[\Delta V]_{(n-1) \times 1} = [BCBV]_{(n-1) \times (n-1)} \cdot [B]_{(n-1) \times 1} \quad (4.7)$$

BCBV matrisi hat akımları ve bara gerilimleri arasındaki bağlantıyı sağlayan matristir. BCBV matris elemanları hat empedanslarını içerir. BCBV matrisinde her bir satır bir hattı, her bir sütun ise hat empedansını temsil eder.

BCBV matrisi oluşturma prosedürü:

Adım 1. $(n-1) \times nb$ boyutunda matris oluşturun.

Adım 2. Matrisin tüm elemanlarını “0” yap.

Adım 3. i 'ye 2 değerini ata, ($i=2$).

Adım 4. Salınım barası ile i . bara arasında bağlı hatları belirle. Belirlenen hatlara ait sütunlara hat empedansı değerleri yerleştir.

Adım 5. Sistemin salınım barası dışında her barası için 3. adım tekrarlanarak BCBV matrisini oluşturun.

Ayrıca BCBV matrisi, BIBC matrisini kullanılarak da elde edilebilir. BCBV matrisini BIBC matrisi ile oluşturma prosedürü şöyledir:

Adım 1. BIBC matrisi ve hat empedans vektörü, Z_b oluşturun.

Adım 2. Hat empedans vektörü, Z_b 'yi diagonal matrise dönüştür, primitive empedans matrisi, Z 'i elde et ($Z=\text{diag}(Z_b)$).

Adım 3. BCBV matrisini, BIBC matrisinin transpozesi ile primitive empedans matrisi, Z ile çarparak elde et (Denklem (4.8)).

$$[BCBV] = [BIBC]^T Z \quad (4.8)$$

Denklem (4.6) Denklem (4.7)'de yerine ile yazıldığında gerilim düşümü, bara akımları ve DLF matrisi ile hesaplanabilir.

$$[\Delta V] = [DLF] \cdot [I] \quad (4.9)$$

DLF matrisi, BCBV matrisi ile BIBC matrisin çarpımıdır.

$$DLF = [BCBV] \cdot [BIBC] \quad (4.10)$$

Şekil 4.1'deki örnek radyal sistemin BCBV matrisini, BIBC matrisi ile aşağıdaki gibi

oluşturulmaktadır. BCBV matris için örnek radyal sistemin hat empedans vektörü, Z_b diagonal matrise dönüştürülür ve primitive empedans matrisi, Z elde edilir.

$$Z_b = \begin{bmatrix} Z_{12} \\ Z_{23} \\ Z_{34} \\ Z_{45} \\ Z_{36} \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Örnek radyal sistemin BCBV matrisi Denklem (4.8) ile elde edilir.

$$BCBV = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Örnek radyal sistemin gerilim düşümü Denklem (4.9) ile hesaplanır.

$$\Delta V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

4.1.2. Toplam Güç Kayıp İfadesi

Geliştirilen metotta radyal sistemlerin toplam güç kayıp formülü, en uygun YES büyüklüğünü ve toplam güç kaybını hesaplamak için kullanılacaktır. Aşağıda toplam güç kayıp formülünün elde edilmesi gösterilmiştir: Toplam güç kaybı P_{loss} , bara akımları ile elde edilen hat akımları cinsinden yazılarak

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{nb} |B_i|^2 \cdot R_i = [R]^T \left[[BIBC] \cdot [I] \right]^2 \quad (4.14)$$

ile bulunur. Burada R_i , i. hattın direncidir ve $[R]$, hat direnç vektörüdür.

$$[R]_{nb \times 1} = [R_1 \quad R_2 \quad \dots \quad R_{nb}]^T \quad (4.15)$$

Toplam güç kaybı P_{loss} bara akımın gerçekte ve sanal kısımları ile yazılabilir.

$$P_{loss} = [R]^T \left\| [BIBC] \cdot [I] \right\|^2 = [R]^T \left\| [BIBC] \cdot [re(I)] + j[BIBC] \cdot [im(I)] \right\|^2 \quad (4.16)$$

Burada $[re(I)]$ ve $[im(I)]$ bara akımların gerçekte ve sanal kısmından oluşan vektörlerdir. Denklem (4.16)'daki mutlak değerinin içindeki ifade açılarak toplam güç kaybı P_{loss} yeniden yazılacak olursa

$$P_{loss} = [R]^T \left(\left([BIBC] \cdot [re(I)] \right)^2 + \left([BIBC] \cdot [im(I)] \right)^2 \right) \quad (4.17)$$

ile gösterilebilir. j. hattaki güç kaybı da

$$P_{loss_j} = R_j \left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, k-1) re(I_k) \right)^2 + R_j \left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, k-1) im(I_k) \right)^2 \quad (4.18)$$

yazılabilir. Denklem (4.18)'e Denklem (4.3) yerleştirilirse j. hattaki güç kaybı

$$P_{loss_j} = R_j \cdot \left[\left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, k-1) \frac{P_k \cos(\theta_k) + Q_k \sin(\theta_k)}{|V_k|} \right)^2 + \dots \right. \\ \left. \dots + \left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, k-1) \frac{P_k \sin(\theta_k) - Q_k \cos(\theta_k)}{|V_k|} \right)^2 \right] \quad (4.19)$$

ile bulunabilir. Toplam güç kaybı ise her bir hat kaybının toplamıdır. Toplam güç kaybı P_{loss} bu durumda bara gücü ve gerilimi cinsinden Denklem (4.18) ile ifade edilebilir.

$$P_{loss} = \sum_{j=1}^{nb} P_{loss_j} \quad (4.20)$$

$$P_{loss} = \sum_{j=1}^{nb} R_j \left[\left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, k-1) \frac{P_k \cos(\theta_k) + Q_k \sin(\theta_k)}{|V_k|} \right)^2 + \dots \right. \\ \left. \dots + \left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, k-1) \frac{P_k \sin(\theta_k) - Q_k \cos(\theta_k)}{|V_k|} \right)^2 \right] \quad (4.21)$$

Elde edilen toplam güç kayıp ifadesi, radyal sistemlerin toplam güç kayıp hesaplanmasında, radyal sistemlerin kayıp duyarlılık indislerin belirlenmesinde ve toplam güç kaybını en aza indirmek amacıyla radyal sisteme yerleştirilecek YES'in en uygun büyüklüğü belirlenmesinde kullanılacak ifadedir.

4.1.3. Kayıp Duyarlılık İfadesi

Kayıp duyarlılık ifadesi, toplam güç kaybını herhangi bir bara aktif gücüne türevini ($\partial P_{loss}/\partial P_i$) veren ifadedir. Herhangi bir hat güç kaybının bara aktif gücüne göre türevi $\partial P_{loss_j}/\partial P_i$ yardımı ile kayıp duyarlılık ifadesi elde edilebilir.

j. hattın güç kaybının i. bara aktif gücüne göre türevi $\partial P_{loss_j}/\partial P_i$ Denklem (4.19)'dan aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\frac{\partial P_{loss_j}}{\partial P_i} = \frac{\partial}{\partial P_i} R_j \cdot \left[\left(\sum_{\substack{k=2 \\ k \neq i}}^n BIBC(j, k-1) \frac{P_k \cos(\theta_k) + Q_k \sin(\theta_k)}{|V_k|} + \dots \right)^2 + \dots \right. \\ \left. \dots + \left(\sum_{\substack{k=2 \\ k \neq i}}^n BIBC(j, k-1) \frac{P_k \sin(\theta_k) - Q_k \cos(\theta_k)}{|V_k|} + \dots \right)^2 \right. \\ \left. \dots + \left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, i-1) \frac{P_i \cos(\theta_i) + Q_i \sin(\theta_i)}{|V_i|} \right)^2 + \dots \right] \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{loss_j}}{\partial P_i} = & 2R_j \left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, k-1) \frac{P_k \cos(\theta_k) + Q_k \sin(\theta_k)}{|V_k|} \right) BIBC(j, i-1) \frac{\cos(\theta_i)}{|V_i|} + \dots \\ & \dots + 2R_j \left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, k-1) \frac{P_k \sin(\theta_k) - Q_k \cos(\theta_k)}{|V_k|} \right) BIBC(j, i-1) \frac{\sin(\theta_i)}{|V_i|} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Yukarıdaki ifadeyi kullanarak toplam güç kaybının i. bara aktif gücüne göre türevi $\partial P_{loss}/\partial P_i$ Denklem (4.24) ile ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = & 2 \sum_{j=1}^{nb} R_j \left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, k-1) \operatorname{re}(I_k) \right) BIBC(j, i-1) \frac{\cos(\theta_i)}{|V_i|} + \dots \\ & \dots + 2 \sum_{j=1}^{nb} R_j \left(\sum_{k=2}^n BIBC(j, k-1) \operatorname{im}(I_k) \right) BIBC(j, i-1) \frac{\sin(\theta_i)}{|V_i|} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Eğer j. hatta i. bara bağlı değil ise $BIBC(j, i-1)=0$ 'dır ve j. hat güç kaybının i. bara aktif gücüne türevi sıfır olur ($\partial P_{loss}/\partial P_i=0$). Bir örnekle de açıklamak gerekirse; örnek dağıtım sisteminde (Şekil 4.1) 3. hattın 2. baraya bağlı değildir. 3. hattın güç kayıp ifadesi, P_{loss_3} Denklem (4.25)'te verilmektedir.

$$P_{loss_3} = R_3 \cdot \left[\left(\frac{P_4 \cos(\theta_4) + Q_4 \sin(\theta_4)}{|V_4|} + \frac{P_5 \cos(\theta_5) + Q_5 \sin(\theta_5)}{|V_5|} \right)^2 + \dots \right. \\ \left. \dots + \left(\frac{P_4 \sin(\theta_4) - Q_4 \cos(\theta_4)}{|V_4|} + \frac{P_5 \sin(\theta_5) - Q_5 \cos(\theta_5)}{|V_5|} \right)^2 \right] \quad (4.25)$$

P_{loss_3} ifadesine bakıldığında 2. bara aktif gücüne, P_2 'ye ilişkin terimi olmadığı görülmektedir. 3. hattın güç kaybının 2. bara aktif gücüne göre türevinin ($\partial P_{loss_3}/\partial P_2$) sıfır olduğu görülmektedir.

$$\frac{\partial P_{loss_3}}{\partial P_2} = 0 \quad (4.26)$$

Buna göre toplam güç kaybının i. bara aktif gücüne göre türevi Denklem (4.27)'deki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = 2 \sum_{j=1}^{nb} R_j \sum_{k=2}^n dPBIBC_i(j, k-1) \cdot \left[\frac{\cos(\theta_i)}{|V_i|} \cdot re(I_k) + \frac{\sin(\theta_i)}{|V_i|} \cdot im(I_k) \right] \quad (4.27)$$

Burada $[dPBIBC_i]$ matrisi BIBC matrisinden oluşur, $[dPBIBC_i]$ matrisi yukarıda verilen bilgiler ışığında aşağıdaki prosedürle oluşturulabilir.

Adım 1. BIBC matrisi ve YES'in bağlanacağı bara numarası, i 'yi belirle.

Adım 2. $[dPBIBC_i]$ matrisi, BIBC matrisine eşitle.

Adım 3. BIBC matrisinin i . sütundaki "0" ların bulunduğu satırları tespit et.

Adım 4. Tespit edilen satırların sütunları sıfırlanarak $[dPBIBC_i]$ matrisi düzenle.

Örnek radyal sistemin $\partial P_{loss}/\partial P_4$ türevi için $[dPBIBC_4]$ matrisi aşağıdaki gibi oluşturulabilir. BIBC matrisinde I_4 bara akımına ait olan sütun belirlenir. Sütundaki sıfırlar tespit edilir. Sıfırların bulunduğu satırların tüm elemanları sıfırlanır (Denklem (4.28)).

$$BIBC = \begin{matrix} & I_2 & I_3 & \boxed{I_4} & I_5 & I_6 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{matrix} \end{matrix} \Rightarrow dBIBC_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

$[dPBIBC_2]$, $[dPBIBC_3]$, $[dPBIBC_5]$ ve $[dPBIBC_6]$ matrisleri de benzer şekilde oluşturulabilir.

$$\begin{aligned} dBIBC_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & dBIBC_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ dBIBC_5 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & dBIBC_6 &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.29)$$

Dağıtım sistemlerine uygun kayıp duyarlılık ifadesi Denklem (4.27) ile ve matris formu da Denklem (4.30) ile elde edilir.

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = 2[R]^T \left[[dPBIBC_i] \cdot [re(I)] \frac{\cos(\theta_i)}{|V_i|} + [dPBIBC_i] \cdot [im(I)] \frac{\sin(\theta_i)}{|V_i|} \right] \quad (4.30)$$

Dağıtım sistemlerine uygun kayıp duyarlılık ifadesi ile radyal sistemlerin güç kaybını en aza indirmek amacıyla yerleştirilecek YES'in en uygun büyüklüğü elde etmek için kullanılacaktır. Ayrıca elde edilen kayıp duyarlılık ifadesi ile duyarlılık indisi oluşturulabilir. Bu indis heuristik optimizasyon metotlarında yada benzer metotlarda arama uzayını küçültmek için kullanılabilir.

4.1.4. En Uygun Büyüklük

Bu bölümde, radyal sistemler için geliştirilen toplam güç kayıp ifadesi ile herhangi bir yere yerleştirilecek YES'in en uygun büyüklüğünü belirleyen ifade çıkartılacaktır.

$$\min_{P_{dg} \in \mathfrak{R}} f(P_{dg}) = P_{loss} = \sum_{k=1}^{nb} P_{loss_k} \quad (4.31)$$

Denklem (4.21)'de verilen radyal sistemin toplam güç kayıp ifadesinden oluşan $f(P_{dg})$ fonksiyonu $(-\infty, \infty)$ aralığında tam konvektir [80]. Bunun için $f(P_{dg})$ fonksiyonun birinci türevini sıfır yapan P_{dg} değeri $f(P_{dg})$ fonksiyonun minimum değerini verir. Dolayısıyla YES'in en uygun büyüklüğü; toplam güç kaybının YES'in bağlı olduğu baranın aktif gücüne göre türevini sıfır yapan değerdir.

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = \sum_{j=1}^{nb} \frac{\partial P_{loss_j}}{\partial P_i} = 0 \quad (4.32)$$

Denklem (4.24)'teki kayıp duyarlılık ifadesi açık şekilde yazılıp

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} &= 2 \sum_{j=1}^{nb} R_j \sum_{\substack{k=2 \\ k \neq i}}^n dPBIBC_i(j, k-1) \left[\frac{\cos(\theta_i)}{|V_i|} \cdot re(I_k) + \dots \right. \\
&\quad \left. \dots + \frac{\sin(\theta_i)}{|V_i|} \cdot im(I_k) \right] + \dots \\
&\quad \dots + 2 \sum_{j=1}^{nb} R_j dPBIBC_i(j, i-1) \left[\frac{\cos(\theta_i)}{|V_i|} \cdot \frac{P_i \cos(\theta_i) + Q_i \sin(\theta_i)}{|V_i|} + \dots \right. \\
&\quad \left. \dots + \frac{\sin(\theta_i)}{|V_i|} \cdot \frac{P_i \sin(\theta_i) - Q_i \cos(\theta_i)}{|V_i|} \right] \\
\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} &= 2 \sum_{j=1}^{nb} R_j \sum_{\substack{k=2 \\ k \neq i}}^n dPBIBC_i(j, k-1) \left[\frac{\cos(\theta_i)}{|V_i|} \cdot re(I_k) + \frac{\sin(\theta_i)}{|V_i|} \cdot im(I_k) \right] + \dots \\
&\quad \dots + 2 \sum_{j=1}^{nb} R_j dPBIBC_i(j, i-1) \left[\frac{P_i \cos^2(\theta_i) + Q_i \sin(\theta_i) \cos(\theta_i)}{|V_i|^2} + \dots \right. \\
&\quad \left. \dots + \frac{P_i \sin^2(\theta_i) - Q_i \cos(\theta_i) \sin(\theta_i)}{|V_i|^2} \right] \quad (4.33)
\end{aligned}$$

elde edilen ifade sadeleştirilip sıfıra eşitlenebilir.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} &= 2 \sum_{j=1}^{nb} R_j \sum_{\substack{k=2 \\ k \neq i}}^n dPBIBC_i(j, k-1) \left[\frac{\cos(\theta_i)}{|V_i|} \cdot re(I_k) + \frac{\sin(\theta_i)}{|V_i|} \cdot im(I_k) \right] + \dots \\
&\quad \dots + 2 \sum_{j=1}^{nb} R_j dPBIBC_i(j, i-1) \frac{P_i}{|V_i|^2} = 0 \quad (4.34)
\end{aligned}$$

i. bara aktif gücü denklemden çekildiğinde

$$P_i = - \frac{|V_i| \sum_{j=1}^{nb} R_j \sum_{\substack{k=2 \\ k \neq i}}^n dPBIBC_i(j, k-1) [\cos(\theta_i) \cdot re(I_k) + \sin(\theta_i) \cdot im(I_k)]}{\sum_{j=1}^{nb} R_j dPBIBC_i(j, i-1)} \quad (4.35)$$

elde edilir. Denklem (4.35)'teki güç ifadesinde “-” işareti sisteme verilen gücü göstermektedir. Toplam sistem kaybı en aza indirmek için i. baradan çekilecek aktif güç matris formda Denklem (4.36) ile bulunabilir.

$$P_i = \frac{|V_i| [R]^T [dPBIBC_i] (\cos(\theta_i) [redI_i] + \sin(\theta_i) [imdI_i])}{[R]^T dPBIBC_i(:, i-1)} \quad (4.36)$$

Burada $[redI_i]$ ve $[imdI_i]$ vektörleri, $[re(I)]$ and $[im(I)]$ vektörlerinin (i-1). elemanı “0” olan vektörlerdir. Örnek radyal sistemde $[redI_4]$ ve $[imdI_4]$ vektörü aşağıdaki gibi oluşturulabilir.

$$\begin{aligned} [redI_4] &= [reI_2 \quad reI_3 \quad 0 \quad reI_5 \quad reI_6]^T \\ [imdI_4] &= [imI_2 \quad imI_3 \quad 0 \quad imI_5 \quad imI_6]^T \end{aligned} \quad (4.37)$$

Toplam güç kaybını en aza indirmek amacıyla i. baraya yerleştirilecek YES’in en uygun büyüklüğü Denklem (4.38) ile elde edilir.

$$Pdg_i = P_i + Pload_i \quad (4.38)$$

Radyal sistemlerin güç kaybını en aza indirmek amacıyla i. baraya yerleştirilecek YES’in en uygun aktif gücü Denklem (4.36) ve (4.38) ile elde edilmektedir.

4.1.5. En Uygun Yer

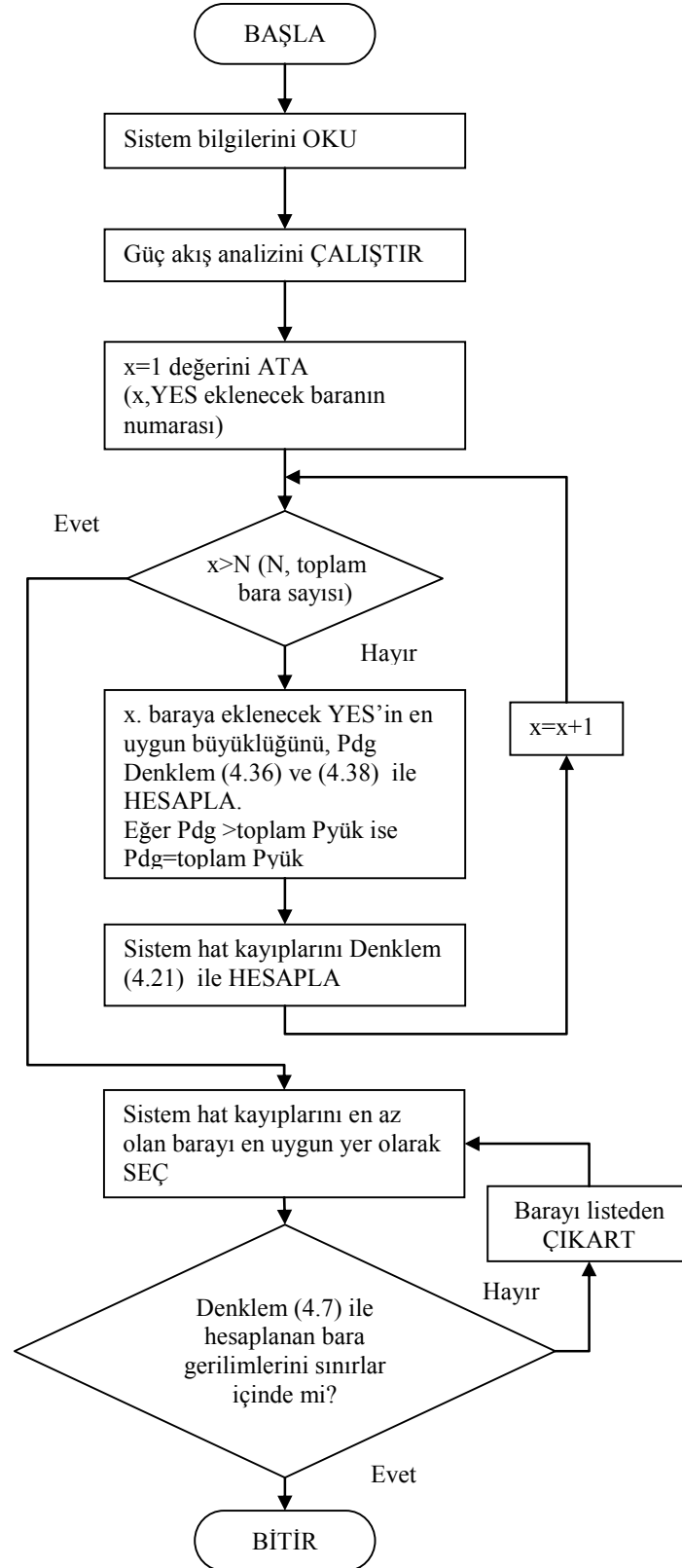
Bir önceki bölümde i. baraya yerleştirilecek YES’in en uygun büyüklüğünü veren analitik ifade elde edilmişti. YES’in en uygun yeri toplam güç kayıp ifadesi ile analitik olarak çıkartılamadığı için YES’in en uygun yerini belirleyen bir algoritma geliştirilmiştir. Bu bölümde YES’in en uygun yeri ve büyüklüğünü, toplam güç kayıp ifadesi ve YES’in en uygun büyüklüğünü veren analitik ifade ile elde etmek için geliştirilen algoritma anlatılacaktır.

YES’in en uygun yer ve büyüklüğü; radyal sistemin toplam güç kaybını en aza indirmek amacıyla, radyal sistem boyunca gerilim sapması ± 0.05 pu sınırları içinde olma ve YES’in aktif gücün toplam aktif yük gücünden büyük olmama şartı altında belirlenmiştir.

büyük olup olmadığını kontrol et.

Adım 7. En uygun büyüklükte ve yerdeki YES ile sistemin bara gerilimlerin sınırların içinde olup olmadığı Denklem (4.7) ile kontrol et.

Adım 8. Eğer bara gerilimleri sınırların içinde değilse en uygun yer olarak seçilen bara çıkartarak 4. adıma geri dön.



Şekil 4.2. Radyal sistemin güç kaybını en aza indirecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden yeni analitik metodun akış diyagramı

4.2. Kapalı Sistemlere YES'lerin Yerleştirilmesi

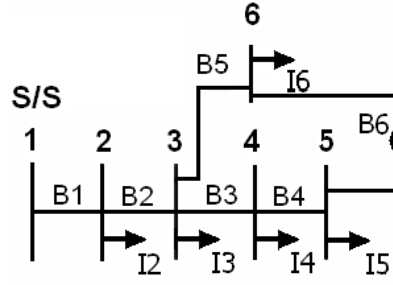
İkinci bölümde anlatıldığı üzere bazı dağıtım sistemlerin fiderleri normalde açık bulunan bağlantı noktaları birleştirilerek kapalı devre çalıştırılıyor olabilirler. Bu birkaç kapalı devreden oluşan zayıf kapalı dağıtım sisteminde kapalı fiderlerin akım yönü değişmektedir. Dolayısıyla kapalı fiderlerdeki hat akımları, Bölüm 4.1.1'de anlatılan metot ile elde edilemez. Zayıf kapalı dağıtım sistemlerine YES yerleştirmek için Bölüm 4.1'de anlatılan analitik metot geçerli olmadığı için bu sistemlere yerleştirilecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde edebilecek yeni geliştirilen bir metot burada anlatılacaktır.

Yeni metot, zayıf kapalı dağıtım sistemleri ve radyal sistemleri de içine alan fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemleri için sistemin güç kayıplarını en aza indirecek YES'in en uygun büyüklüğü ve yerini belirleyen analitik bir metottur. Analitik metot için Bölüm 4.1'deki gibi toplam güç kayıp ifadesi, kayıp duyarlılık ifadesi ve YES'in en uygun büyüklüğü veren ifade çıkartılmıştır.

4.2.1. Teorik Analiz

Bazı dağıtım sistemlerinde yükü fazla olan fiderin beslenebilmesi için başka bir fidere bağlayarak zayıf kapalı sistemler oluşturulur. Burada zayıf kapalı dağıtım sistemleri için [54]'te Teng'in yeniden geliştirdiği hat akımlarını ve bara gerilimlerini elde etmeye yarayan BIBC ve BCBV matrisleri kullanılarak bara gerilimlerini bara akımları ile elde etmeye yardımcı olan DLF matrisinin oluşturulması gösterilmektedir.

Zayıf kapalı dağıtım sistemleri için yeniden düzenlenen BIBC, BCBV ve DLF matrisleri dağıtım sistemin toplam güç kaybını, kayıp duyarlılık indisi ve YES'in en uygun büyüklüğünü elde etmede kullanılacaktır.



Şekil 4.3. Örnek tek gözlü dağıtım sisteminin devre şeması

Dağıtım sisteminde oluşturulan kapalı devreler ana baradan çekilen akımı etkilemez ama oluşturulan yeni hatlar da sisteme dâhil edilmeleri gerekir. Şekil 4.3'te görülen örnek dağıtım sisteminde tek kapalı devre bulunmaktadır. Yeni hattın akımı dikkate alınarak 5. bara ve 6. bara akımı yazılırsa;

$$\begin{aligned} I'_5 &= I_5 + B_6 \\ I'_6 &= I_6 - B_6 \end{aligned} \quad (4.40)$$

Hat akımları BIBC matrisi ile aşağıdaki gibi yazılır

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 + B_6 \\ I_6 - B_6 \end{bmatrix} \quad (4.41)$$

Denklem (4.41) yeniden düzenlenirse

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_6 \\ -B_6 \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

yeniden geliştirilen BIBC matris aşağıdaki denklem ile elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ B_6 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Yeniden geliştirilen BIBC matrisin genel şekli şöyledir;

$$\begin{bmatrix} B \\ B_{yeni} \end{bmatrix} = [BIBC] \cdot \begin{bmatrix} I \\ B_{yeni} \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

Bu matrisin oluşturulma prosedürü aşağıda adım adım verilmiştir.

Adım 1. nb x (n-1) boyutunda matris oluştur ve matrisin tüm elemanlarını “0” yap (matrisin sütunları salınım barası dışında diğer baraları temsil eder).

Adım 2. k’ye 1 değerini ata.

Adım 3. k. hattın bağlı olduğu i. barayı ve j. barayı tespit et.

Adım 4. Eğer k. hat, sistemi kapalı devre yapmıyorsa i. bara sütununu j. bara sütuna kopyala, j. bara sütunun k. satırını “1” yap.

Adım 5. Eğer k. hat, sistemi kapalı devre yapıyorsa i. bara sütununu j. bara sütundan çıkartarak k. sütununa kopyala, k. sütunun k. satırını “1” yap.

Adım 6. Sistemin her hattı için 3. adımdan 5. adıma kadar tekrarlayarak BIBC matrisini oluştur.

Şekil 4.2’deki sistemin kapalı devresinde Kirchoff’un gerilim kanunu uygulanırsa;

$$Z_{34}B_3 + Z_{45}B_4 + Z_{56}B_6 - Z_{36}B_5 = 0 \quad (4.45)$$

elde edilir. Denklem (4.13) ve Denklem (4.45) birleştirilirse yeni BCBV matrisi;

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ V_1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{34} & Z_{45} & -Z_{36} & Z_{56} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Yeniden geliştirilen BCBV matrisin genel şekli aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ 0 \end{bmatrix} = [BCBV] \cdot \begin{bmatrix} B \\ B_{yeni} \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

Bu matrisin oluşturulma prosedürü aşağıda verilmiştir.

Adım 1. (n-1) x nb boyutunda matris oluştur.

Adım 2. Matrisin tüm elemanlarını “0” yap.

Adım 3. i’ye 2 değerini ata, (i=2).

Adım 4. Salınım barası ile i. bara arasında bağlı hatları belirle. Belirlenen hatlara ait sütunlara hat empedans değerlerini yerleştir.

Adım 5. Eğer sistemi kapalı devre yapan hat varsa, Krichoff’un gerilim kanununu kapalı devreye uygula (Denklem (4.48)), matrise uygulanan denklemi ekle.

$$\sum_{t=1}^{nt} Z_t B_t = 0 \quad (4.48)$$

Burada nt , kapalı devredeki hat sayısı; Z_t , hattın empedansı; B_t , hattın akımıdır.

Adım 6. Sistemin salınım barası dışında her barası için 4. adımı ve 5. adımı tekrarla.

Denklem (4.44)’ü Denklem (4.47)’de yerine konulursa;

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ 0 \end{bmatrix} = [BCBV] \cdot [BIBC] \cdot \begin{bmatrix} I \\ B_{yeni} \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & M^T \\ M & N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ B_{yeni} \end{bmatrix}$$

bulunur. Denklem (4.49)'a Kron indirgemesi uygulanarak baraların gerilim düşümü matris formunda kolaylıkla elde edilir. Birinci bara dışındaki baraların gerilim düşümü, bara akımları ve yeniden düzenlenmiş DLF matrisi ile hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} [\Delta V] &= [A - M^T N^{-1} M] \cdot [I] \\ [\Delta V] &= [DLF] \cdot [I] \end{aligned} \quad (4.50)$$

Dağıtım sistemlerinde kapalı devre oluşturulduğunda hat akımlarını ve bara gerilim düşümlerini elde etmek için gerekli olan BIBC, BCBV ve DLF matrislerinin yeniden düzenlenmesi gösterilmiştir. Bu matrisler kapalı devre bulunan dağıtım sistemlerin toplam güç kaybı, kayıp duyarlılık ve YES'in en uygun büyüklüğünü veren ifadelerin çıkartılmasında yararlanılmaktadır.

4.2.2. Toplam Güç Kayıp İfadesi

İlk olarak bir hattaki güç kayıp ifadesini sonra toplam güç kayıp ifadesini elde edilirse;

i. bara ile j. bara arasında bulunan k. hattın güç kaybı P_{loss_k} , bara gerilimleri cinsinden

$$P_{loss_k} = G_k |V_i - V_j|^2 \quad (4.51)$$

yazılır. Burada V_i ve V_j , i. ve j. bara gerilimleridir. G_k ise k. hattın kondüktansıdır, k. hattın empedansın kompleks eşlenik tersinin gerçekte kısmına eşittir.

$$G_k = \text{reel}\left(1/Z_k^*\right) \quad (4.52)$$

V_i ve V_j gerilimlerini V_l gerilimi ve V_l gerilimine göre gerilim düşümleri cinsinden yazıldığında

$$P_{loss_k} = G_k \left| V_i - V_j \right|^2 = G_k \left| (V_l - \Delta V_i) - (V_l - \Delta V_j) \right|^2 = G_k \left| \Delta V_j - \Delta V_i \right|^2 \quad (4.53)$$

elde edilir. Radyal sistemler için Denklem (4.9) ile zayıf kapalı dağıtım sistemleri için Denklem (4.50) ile bara gerilim düşümleri, DLF matrisi ve bara akım vektörü kullanılarak elde edilir. i. ve j. baranın gerilim düşümü, DLF matrisi ve bara akım vektörü ile

$$\begin{aligned} \Delta V_i &= \sum_{m=1}^{n-1} DLF((i-1), m) I(m) \\ \Delta V_j &= \sum_{m=1}^{n-1} DLF((j-1), m) I(m) \end{aligned} \quad (4.54)$$

yazılabilir. i. baranın gerilim düşümü ile j. baranın gerilim düşümü arasındaki fark

$$\begin{aligned} \Delta V_j - \Delta V_i &= \sum_{m=1}^{n-1} DLF((i-1), m) I(m) - DLF((j-1), m) I(m) \\ \Delta V_j - \Delta V_i &= \sum_{m=1}^{n-1} (DLF((i-1), m) - DLF((j-1), m)) I(m) \end{aligned} \quad (4.55)$$

şeklinde ifade edilir. DLF matris elemanları ve akım vektör elemanları kompleks değerlidir. İfadedeki $(DLF((i-1), m) - DLF((j-1), m))$ çarpanı

$$DLF_{ij}(k, m) = (DLF((i-1), m) - DLF((j-1), m)) \quad (4.56)$$

ile tanımlanıp $DLF_{ij}(k, m)$ ve $I(m)$ elemanları gerçekte ve sanal kısımları

$$\begin{aligned} DLF_{ij}(k, m) &= reDLF_{ij}(k, m) + jimDLF_{ij}(k, m) \\ I(m) &= re(I_m) + jim(I_m) \end{aligned} \quad (4.57)$$

ile gösterilir. Denklem (4.55), Denklem (4.57) ile ifade edildiğinde

$$\Delta V_j - \Delta V_i = \sum_{m=1}^{n-1} (reDLF_{ij}(k, m) + jimDLF_{ij}(k, m))(re(I_m) + jim(I_m)) \quad (4.58)$$

elde edilir. Bu ifadenin gerçekte ve sanal kısımları bir araya toplanıp

$$\Delta V_j - \Delta V_i = \sum_{m=1}^{n-1} (reDLF_{ij}(k, m).reI(m) - imDLF_{ij}(k, m).imI(m)) + \dots \quad (4.59)$$

ayrı ayrı yazılır:

$$\begin{aligned} re\Delta V_m &= (reDLF_{ij}(k, m).re(I_m) - imDLF_{ij}(k, m).im(I_m)) \\ im\Delta V_m &= (reDLF_{ij}(k, m).im(I_m) + imDLF_{ij}(k, m).re(I_m)) \end{aligned} \quad (4.60)$$

Gerilim düşümü ifadesi bu durumda;

$$\Delta V_j - \Delta V_i = \sum_{m=1}^{n-1} re\Delta V_m + jim\Delta V_m \quad (4.61)$$

olur. k. hattın güç kaybını veren Denklem (4.53)'te yerine konulup mutlak değerinin içindeki ifade açılınca k. hattın güç kaybı

$$P_{loss_k} = G_k \left| \sum_{m=1}^{n-1} re\Delta V_m + jim\Delta V_m \right|^2 = G_k \left[\left(\sum_{m=1}^{n-1} re\Delta V_m \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{n-1} im\Delta V_m \right)^2 \right] \quad (4.62)$$

ile yazılabilir. k. hattın güç kayıp ifadesine Denklem (4.60) yerleştirilirse k. hattın güç kaybı

$$Ploss_k = G_k \left[\left(\sum_{m=1}^{n-1} (reDLFij(k, m).re(I_m) - imDLFij(k, m).im(I_m)) \right)^2 + \dots \right. \\ \left. \dots + \left(\sum_{m=1}^{n-1} (reDLFij(k, m).im(I_m) + imDLFij(k, m).re(I_m)) \right)^2 \right] \quad (4.63)$$

ile gösterilebilir. Ayrıca bara akımının gerçek ve sanal kısımları Denklem (4.3) ile yeniden yazılırsa

$$Ploss_k = G_k \left[\sum_{m=1}^{n-1} \left(\left(reDLFij(k, m). \frac{P_m \cdot \cos(\theta_m) + Q_m \cdot \sin(\theta_m)}{|V_m|} - \dots \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. \dots - imDLFij(k, m). \frac{P_m \cdot \sin(\theta_m) - Q_m \cdot \cos(\theta_m)}{|V_m|} \right)^2 + \dots \right. \\ \left. \dots + G_k \sum_{m=1}^{n-1} \left(\left(reDLFij(k, m). \frac{P_m \cdot \sin(\theta_m) - Q_m \cdot \cos(\theta_m)}{|V_m|} + \dots \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. \dots + imDLFij(k, m). \frac{P_m \cdot \cos(\theta_m) + Q_m \cdot \sin(\theta_m)}{|V_m|} \right)^2 \right] \quad (4.64)$$

elde edilir. Her bir hat kaybının toplamı olan toplam güç kaybı $Ploss$

$$Ploss = \sum_{k=1}^{nb} Ploss_k = \sum_{k=1}^{nb} G_k \left[\left(\sum_{m=1}^{n-1} re\Delta V_m \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^{n-1} im\Delta V_m \right)^2 \right] \quad (4.65)$$

ile ifade edilebilir. Toplam güç kayıp ifadesi Denklem (4.64) kullanılarak yeniden yazılabilir.

$$\begin{aligned}
P_{loss} = & \sum_{k=1}^{nb} G_k \left(\sum_{m=1}^{n-1} \left(\begin{aligned} & reDLF_{ij}(k, m) \cdot \frac{P_m \cdot \cos(\theta_m) + Q_m \cdot \sin(\theta_m)}{|V_m|} - \dots \\ & \dots - imDLF_{ij}(k, m) \cdot \frac{P_m \cdot \sin(\theta_m) - Q_m \cdot \cos(\theta_m)}{|V_m|} \end{aligned} \right) \right)^2 + \dots \\
& \dots + \sum_{k=1}^{nb} G_k \left(\sum_{m=1}^{n-1} \left(\begin{aligned} & reDLF_{ij}(k, m) \cdot \frac{P_m \cdot \sin(\theta_m) - Q_m \cdot \cos(\theta_m)}{|V_m|} + \dots \\ & \dots + imDLF_{ij}(k, m) \cdot \frac{P_m \cdot \cos(\theta_m) + Q_m \cdot \sin(\theta_m)}{|V_m|} \end{aligned} \right) \right)^2
\end{aligned} \tag{4.66}$$

Elde edilen ifade ile zayıf kapalı dağıtım sistemlerin ve radyal sistemlerin toplam güç kaybı kolaylıkla hesaplanabilir. Ayrıca radyal sistemler için Bölüm 4.1.2’de anlatılan toplam güç kayıp ifadesi gibi toplam güç kayıp hesaplanmasında, dağıtım sistemlerin kayıp duyarlılık indislerin belirlenmesinde ve toplam güç kaybını en aza indirmek amacıyla radyal sisteme ve zayıf kapalı dağıtım sisteme yerleştirilecek YES’in en uygun büyüklüğünün belirlenmesinde kullanılacak ifadedir.

4.2.3. Kayıp Duyarlılık İfadesi

Herhangi bir hat güç kaybının, bara aktif gücüne göre türev ifadesi ($\partial P_{loss}/\partial P_l$) yardımı ile kayıp duyarlılık ifadesi elde edilebilir.

k . hattın güç kayıp ifadesini Denklem (4.62) ve (4.64)’ten yararlanılarak sadece l . bara aktif gücü ile ilgili ifadeyi ayrıntılı olarak yazacak olursak;

$$\begin{aligned}
P_{loss_k} = G_k & \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta V_m + \left(reDLFij(k,l) \cdot \frac{P_l \cdot \cos(\theta_l) + Q_l \cdot \sin(\theta_l)}{|V_l|} - \dots \right) \right)^2 + \dots \\
& \dots + G_k \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta V_m + \left(reDLFij(k,l) \cdot \frac{P_l \cdot \sin(\theta_l) - Q_l \cdot \cos(\theta_l)}{|V_l|} + \dots \right) \right)^2 \quad (4.67)
\end{aligned}$$

k . hattın güç kaybının l . bara aktif gücüne göre türevi $\partial P_{loss_k} / \partial P_l$ aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_{loss_k}}{\partial P_l} = 2G_k & \left(reDLFij(k,l) \frac{\cos(\theta_l)}{|V_l|} - imDLFij(k,l) \frac{\sin(\theta_l)}{|V_l|} \right) \sum_{m=1}^{n-1} re\Delta V_m + \dots \\
& \dots + 2G_k \left(reDLFij(k,l) \frac{\sin(\theta_l)}{|V_l|} + imDLFij(k,l) \frac{\cos(\theta_l)}{|V_l|} \right) \sum_{m=1}^{n-1} im\Delta V_m \quad (4.68)
\end{aligned}$$

Yukarıdaki ifadeyi kullanarak toplam güç kaybının l . bara aktif gücüne göre türevi $\partial P_{loss} / \partial P_l$ bulunur.

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_l} = \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[\left(reDLFij(k,l) \frac{\cos(\theta_l)}{|V_l|} - imDLFij(k,l) \frac{\sin(\theta_l)}{|V_l|} \right) \sum_{m=1}^{n-1} re\Delta V_m + \dots \right. \\
\left. \dots + \left(reDLFij(k,l) \frac{\sin(\theta_l)}{|V_l|} + imDLFij(k,l) \frac{\cos(\theta_l)}{|V_l|} \right) \sum_{m=1}^{n-1} im\Delta V_m \right] \quad (4.69)$$

Fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemlerine uygun kayıp duyarlılık ifadesi Denklem (4.69) ile elde edilmiştir. Bu ifade ile zayıf kapalı dağıtım sistemlerin de güç kaybını en aza indirmek amacıyla yerleştirilecek YES'in en uygun büyüklüğünü veren ifade çıkartılacaktır.

4.2.4. En Uygun Büyüklük

Toplam güç kaybını en aza indirmek amacı ile YES'in en uygun büyüklüğünü elde eden ifade Denklem (4.70)'a dayalı olarak bulunacaktır.

$$\min_{P_{dg} \in \mathbb{R}} f(P_{dg}) = P_{loss} = \sum_{k=1}^{nb} P_{loss_k} \quad (4.70)$$

Denklem (4.66)'da verilen sistemin toplam güç kayıp ifadesinden oluşan $f(P_{dg})$ fonksiyonu $(-\infty, \infty)$ aralığında tam konvektir [80]. Bundan dolayı toplam güç kaybını minimum yapan bara aktif gücü, toplam güç kayıp ifadesinin birinci türevini sıfıra eşitleyerek elde edilebilir. Dolayısıyla YES'in en uygun büyüklüğünü veren ifadeyi Denklem (4.66)'daki toplam güç kayıp ifadesinin YES'in bağlı olduğu baranın aktif gücüne göre türevini sıfır yaparak elde edilecektir.

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_l} = \sum_{j=1}^{nb} \frac{\partial P_{loss_j}}{\partial P_l} = 0 \quad (4.71)$$

Toplam güç kayıp ifadesinin YES'in bağlı olduğu baranın aktif gücüne göre türevini gösteren Denklem (4.69)'daki kayıp duyarlılık ifadesi sadeleştirilip sıfıra eşitlenerek YES'in en uygun büyüklüğünü veren ifade çıkartılacaktır.

Öncelikle kayıp duyarlılık ifadesindeki l . bara akımı ile ilgili terimler açılarak ifade Denklem (4.72)'de tekrar yazılır.

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_l} = \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[\begin{aligned} & dlfc_s_k \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta V_m + \left(\frac{reDLF_{ij}(k,l) \frac{P_l \cos(\theta_l) + Q_l \sin(\theta_l)}{|V_l|} - \dots}{\dots - imDLF_{ij}(k,l) \frac{P_l \sin(\theta_l) - Q_l \cos(\theta_l)}{|V_l|}} \right) + \dots \right) \\ & \dots + dlfc_s_k \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta V_m + \left(\frac{reDLF_{ij}(k,l) \frac{P_l \sin(\theta_l) - Q_l \cos(\theta_l)}{|V_l|} + \dots}{\dots + imDLF_{ij}(k,l) \frac{P_l \cos(\theta_l) + Q_l \sin(\theta_l)}{|V_l|}} \right) \right) \end{aligned} \right] \quad (4.72)$$

Burada $dlfcs_k$ ve $dlfsc_k$, aşağıda Denklem (4.73)'te tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} dlfcs_k &= \left(reDLFij(k,l) \frac{\cos(\theta_l)}{|V_l|} - imDLFij(k,l) \frac{\sin(\theta_l)}{|V_l|} \right) \\ dlfsc_k &= \left(reDLFij(k,l) \frac{\sin(\theta_l)}{|V_l|} + imDLFij(k,l) \frac{\cos(\theta_l)}{|V_l|} \right) \end{aligned} \quad (4.73)$$

Kayıp duyarlılık ifadesindeki l . bara reaktif gücü ve aktif gücü ile ilgili terimler ayrılır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_l} &= \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[dlfcs_k \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm + \left(reDLFij(k,l) \frac{Q_l \sin(\theta_l)}{|V_l|} - \dots \right) \right) + \dots \right. \\ &\quad \left. \dots + dlfsc_k \left(\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm + \left(reDLFij(k,l) \frac{-Q_l \cos(\theta_l)}{|V_l|} + \dots \right) \right) \right] + \dots \\ &\quad \dots + \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[dlfcs_k \left(reDLFij(k,l) \frac{P_l \cos(\theta_l)}{|V_l|} - imDLFij(k,l) \frac{P_l \sin(\theta_l)}{|V_l|} \right) + \dots \right. \\ &\quad \left. \dots + dlfsc_k \left(reDLFij(k,l) \frac{P_l \sin(\theta_l)}{|V_l|} + imDLFij(k,l) \frac{P_l \cos(\theta_l)}{|V_l|} \right) \right] \end{aligned} \quad (4.74)$$

Bu ifade tekrar düzenlenerek

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_l} = & \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[\begin{aligned} & dlfcsc_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm + dlfcsc_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm + \dots \\ & \dots + dlfcsc_k \frac{Q_l}{|V_l|} \left(reDLFij(k,l)\sin(\theta_l) + \dots \right) + \dots + \dots \\ & \dots + dlfcsc_k \frac{Q_l}{|V_l|} \left(-reDLFij(k,l)\cos(\theta_l) + \dots \right) \end{aligned} \right] \\
& \dots + \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \frac{P_l}{|V_l|} \left[\begin{aligned} & dlfcsc_k \left(reDLFij(k,l)\cos(\theta_l) - \dots \right) + \dots \\ & \dots + dlfcsc_k \left(reDLFij(k,l)\sin(\theta_l) + \dots \right) \end{aligned} \right]
\end{aligned} \quad (4.75)$$

Q_l ile ilgili terimleri, a terimi ve b terimi altında toplanır.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_l} = & \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[\begin{aligned} & dlfcsc_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm + dlfcsc_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm + a + b \end{aligned} \right] + \dots \\
& \dots + \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \frac{P_l}{|V_l|} \left[\begin{aligned} & dlfcsc_k \left(reDLFij(k,l)\cos(\theta_l) - \dots \right) + \dots \\ & \dots + dlfcsc_k \left(reDLFij(k,l)\sin(\theta_l) + \dots \right) \end{aligned} \right]
\end{aligned} \quad (4.76)$$

Burada a ve b terimi Denklem (4.77) ile gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
a &= dlfcsc_k \frac{Q_l}{|V_l|} \left(reDLFij(k,l)\sin(\theta_l) + imDLFij(k,l)\cos(\theta_l) \right) \\
b &= dlfcsc_k \frac{Q_l}{|V_l|} \left(-reDLFij(k,l)\cos(\theta_l) + imDLFij(k,l)\sin(\theta_l) \right)
\end{aligned} \quad (4.77)$$

a terimi açılarak yazılırsa

$$\begin{aligned}
a &= \left(reDLFij(k,l) \frac{\cos(\theta_l)}{|V_l|} - imDLFij(k,l) \frac{\sin(\theta_l)}{|V_l|} \right) \dots \\
&\dots \frac{Q_l}{|V_l|} (reDLFij(k,l) \sin(\theta_l) + imDLFij(k,l) \cos(\theta_l)) \\
a &= \frac{Q_l}{|V_l|^2} \begin{pmatrix} reDLFij(k,l)^2 \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) - \dots \\ \dots - imDLFij(k,l)^2 \sin(\theta_l) \cos(\theta_l) + \dots \\ \dots + reDLFij(k,l) imDLFij(k,l) \cos(\theta_l)^2 - \dots \\ \dots - imDLFij(k,l) reDLFij(k,l) \sin(\theta_l)^2 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{4.78}$$

elde edilir. b terimi açılarak yazılırsa

$$\begin{aligned}
b &= \left(reDLFij(k,l) \frac{\sin(\theta_l)}{|V_l|} + imDLFij(k,l) \frac{\cos(\theta_l)}{|V_l|} \right) \frac{Q_l}{|V_l|} \dots \\
&\dots (-reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) + imDLFij(k,l) \sin(\theta_l)) \\
b &= \frac{Q_l}{|V_l|^2} \begin{pmatrix} -reDLFij(k,l)^2 \sin(\theta_l) \cos(\theta_l) + \dots \\ \dots + imDLFij(k,l)^2 \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) + \dots \\ \dots + reDLFij(k,l) imDLFij(k,l) \sin(\theta_l)^2 - \dots \\ \dots - imDLFij(k,l) reDLFij(k,l) \cos(\theta_l)^2 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{4.79}$$

elde edilir. a ve b terimleri toplandığında

$$\begin{aligned}
a + b &= \frac{Q_l}{|V_l|^2} \begin{pmatrix} reDLFij(k,l)^2 \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) - \dots \\ \dots - imDLFij(k,l)^2 \sin(\theta_l) \cos(\theta_l) + \dots \\ \dots + reDLFij(k,l) imDLFij(k,l) \cos(\theta_l)^2 - \dots \\ \dots - imDLFij(k,l) reDLFij(k,l) \sin(\theta_l)^2 \end{pmatrix} + \dots \\
&\dots + \frac{Q_l}{|V_l|^2} \begin{pmatrix} -reDLFij(k,l)^2 \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) + \dots \\ \dots + imDLFij(k,l)^2 \sin(\theta_l) \cos(\theta_l) - \dots \\ \dots - reDLFij(k,l) imDLFij(k,l) \cos(\theta_l)^2 + \dots \\ \dots + imDLFij(k,l) reDLFij(k,l) \sin(\theta_l)^2 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{4.80}$$

$$a + b = 0 \quad (4.81)$$

Q_l ile ilgili terimlerin birbirini yok ettiği görülür. Sadeleşen kayıp duyarlılık ifadesi sıfıra eşitlenir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_l} = & \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[dlfcs_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm + dlfsc_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm \right] + \dots \\ & \dots + \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \frac{P_l}{|V_l|} \left[dlfcs_k \left(reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) - \dots \right) + \dots \right. \\ & \left. \dots + dlfsc_k \left(reDLFij(k,l) \sin(\theta_l) + \dots \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (4.82)$$

l . bara aktif gücü ile ilgili terimler eşitliğin sol tarafına alınarak denklemden çıkartılır.

$$\begin{aligned} - \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \frac{P_l}{|V_l|} \left[dlfcs_k \left(reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) - imDLFij(k,l) \sin(\theta_l) \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + dlfsc_k \left(reDLFij(k,l) \sin(\theta_l) + imDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \right) \right] = \dots \\ \dots = \sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[dlfcs_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm + dlfsc_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm \right] \end{aligned} \quad (4.83)$$

l . bara aktif gücünü veren ifade elde edilir.

$$P_l = \frac{-1}{|V_l|} \frac{\sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[dlfcs_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm + dlfsc_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm \right]}{\sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[dlfcs_k \left(reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) - imDLFij(k,l) \sin(\theta_l) \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + dlfsc_k \left(reDLFij(k,l) \sin(\theta_l) + imDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \right) \right]} \quad (4.84)$$

l . bara aktif güç ifadesini

$$P_l = \frac{-1}{|V_l|} \frac{\sum_{k=1}^{nb} 2G_k [aa + bb]}{\sum_{k=1}^{nb} 2G_k [cc + dd]} \quad (4.85)$$

şeklinde yazılarak sadeleştirilmeye çalışılır. Burada aa , bb , cc ve dd terimleri aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} aa &= dlfcs_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm & bb &= dlfsc_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm \\ cc &= dlfcs_k (reDLFij(k,l)\cos(\theta_l) - imDLFij(k,l)\sin(\theta_l)) \\ dd &= dlfsc_k (reDLFij(k,l)\sin(\theta_l) + imDLFij(k,l)\cos(\theta_l)) \end{aligned} \quad (4.86)$$

aa terimi açılır

$$aa = dlfcs_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm = \frac{1}{|V_l|} \left(reDLFij(k,l)\cos(\theta_l) - \dots \right) \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm \quad (4.87)$$

bb terimi de açılırsa

$$bb = dlfsc_k \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm = \frac{1}{|V_l|} \left(reDLFij(k,l)\sin(\theta_l) + \dots \right) \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm \quad (4.88)$$

aa ve bb terimlerin toplamı

$$[aa + bb] = \frac{1}{|V_l|} \left(\begin{aligned} &(reDLFij(k,l)\cos(\theta_l) - imDLFij(k,l)\sin(\theta_l)) \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm + \dots \\ &\dots + (reDLFij(k,l)\sin(\theta_l) + imDLFij(k,l)\cos(\theta_l)) \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm \end{aligned} \right) \quad (4.89)$$

elde edilir. cc terimi açılarak yazılırsa

$$cc = \left(reDLFij(k,l) \frac{\cos(\theta_l)}{|V_l|} - imDLFij(k,l) \frac{\sin(\theta_l)}{|V_l|} \right) \dots \dots (reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) - imDLFij(k,l) \sin(\theta_l)) \quad (4.90)$$

$$cc = \frac{1}{|V_l|} \left(reDLFij(k,l)^2 \cos(\theta_l)^2 - \dots \dots - reDLFij(k,l) imDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) - \dots \dots - imDLFij(k,l) reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) + \dots \dots + imDLFij(k,l)^2 \sin(\theta_l)^2 \right) \quad (4.91)$$

elde edilir. dd terimi açılarak yazıldığında

$$dd = \left(reDLFij(k,l) \frac{\sin(\theta_l)}{|V_l|} + imDLFij(k,l) \frac{\cos(\theta_l)}{|V_l|} \right) \dots \dots (reDLFij(k,l) \sin(\theta_l) + imDLFij(k,l) \cos(\theta_l)) \quad (4.92)$$

$$dd = \frac{1}{|V_l|} \left(reDLFij(k,l)^2 \sin(\theta_l)^2 + \dots \dots + reDLFij(k,l) imDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) + \dots \dots + imDLFij(k,l) reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) + \dots \dots + imDLFij(k,l)^2 \cos(\theta_l)^2 \right) \quad (4.93)$$

elde edilir. cc ve dd terimleri toplandığında

$$\begin{aligned}
cc + dd = \frac{1}{|V_l|} & \left[\begin{aligned} & reDLFij(k,l)^2 \cos(\theta_l)^2 - \dots \\ & \dots - reDLFij(k,l)imDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) - \dots \\ & \dots - imDLFij(k,l)reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) + \dots \\ & \dots + imDLFij(k,l)^2 \sin(\theta_l)^2 \end{aligned} \right] + \dots \\
& \dots + \frac{1}{|V_l|} \left[\begin{aligned} & reDLFij(k,l)^2 \sin(\theta_l)^2 + \dots \\ & \dots + reDLFij(k,l)imDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) + \dots \\ & \dots + imDLFij(k,l)reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \sin(\theta_l) + \dots \\ & \dots + imDLFij(k,l)^2 \cos(\theta_l)^2 \end{aligned} \right]
\end{aligned} \quad (4.94)$$

$$cc + dd = \frac{1}{|V_l|} \left[\begin{aligned} & reDLFij(k,l)^2 \left(\cos(\theta_l)^2 + \sin(\theta_l)^2 \right) + \dots \\ & \dots + imDLFij(k,l)^2 \left(\cos(\theta_l)^2 + \sin(\theta_l)^2 \right) \end{aligned} \right] \quad (4.95)$$

elde edilir, sadeleştğinde ise

$$cc + dd = \frac{1}{|V_l|} \left(reDLFij(k,l)^2 + imDLFij(k,l)^2 \right) \quad (4.96)$$

bulunur. Denklem (4.89) ve Denklem (4.96) Denklem (4.85)'te yerine konulursa

$$P_l = \frac{-1}{|V_l|} \frac{\sum_{k=1}^{nb} 2G_k \left[\frac{1}{|V_l|} \left[\begin{aligned} & \left(reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) - imDLFij(k,l) \sin(\theta_l) \right) \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta V_m + \dots \\ & \dots + \left(reDLFij(k,l) \sin(\theta_l) + imDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \right) \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta V_m \end{aligned} \right] \right]}{\sum_{k=1}^{nb} 2G_k \frac{1}{|V_l|} \left(reDLFij(k,l)^2 + imDLFij(k,l)^2 \right)} \quad (4.97)$$

bulunur. Bu ifade sadeleştğinde l . bara aktif güç ifadesi

$$P_l = \frac{-1}{|V_l|} \frac{\sum_{k=1}^{nb} G_k \left(\begin{aligned} & \left(reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) - imDLFij(k,l) \sin(\theta_l) \right) \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm + \dots \\ & \dots + \left(reDLFij(k,l) \sin(\theta_l) + imDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \right) \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm \end{aligned} \right)}{\sum_{k=1}^{nb} G_k \left(reDLFij(k,l)^2 + imDLFij(k,l)^2 \right)} \quad (4.98)$$

elde edilir. Denklem (4.98)'deki güç ifadesinde “-” işareti sisteme verilen gücü göstermektedir. Toplam sistem kaybı en aza indirmek için l . baradan çekilecek aktif gücü Denklem (4.99) ile bulunur.

$$P_l = \frac{1}{|V_l|} \frac{\sum_{k=1}^{nb} G_k \left(\begin{aligned} & \left(reDLFij(k,l) \cos(\theta_l) - imDLFij(k,l) \sin(\theta_l) \right) \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} re\Delta Vm + \dots \\ & \dots + \left(reDLFij(k,l) \sin(\theta_l) + imDLFij(k,l) \cos(\theta_l) \right) \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq l}}^{n-1} im\Delta Vm \end{aligned} \right)}{\sum_{k=1}^{nb} G_k \left(reDLFij(k,l)^2 + imDLFij(k,l)^2 \right)} \quad (4.99)$$

Toplam güç kaybını en aza indirmek amacıyla l . baraya yerleştirilecek YES'in en uygun büyüklüğü

$$Pdg_l = P_l + Pload_l \quad (4.100)$$

elde edilir.

Fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemlerin güç kaybını en aza indirmek amacıyla l . baraya yerleştirilecek YES'in en uygun aktif gücü Denklem (4.99) ve Denklem (4.100) ile elde edilmektedir. YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü veren algorithmada bu denklemler kullanılacaktır.

4.2.5. En Uygun Yer

Fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemlerin güç kaybını en aza indirmek amacıyla, dağıtım sistemi boyunca gerilim sapması ± 0.05 pu sınırları içinde olma ve YES'in aktif gücün dağıtım sistemindeki toplam aktif yükü geçmemek şartıyla yerleştirilecek YES'in en uygun aktif gücü ve en uygun yeri belirlenir.

$$\begin{aligned} \min_{P_{dg} \in \mathbb{R}} \quad & f(P_{dg}) = P_{loss} = \sum_{k=1}^{nb} P_{loss_k} \\ & \Delta V_{\min} \leq \Delta V_i \leq \Delta V_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & \text{\textit{şartları altında}} \quad 0 \leq P_{dg} \leq \sum_{i=1}^n P_{yük_i} \end{aligned} \quad (4.101)$$

Burada $\Delta V_{\min}$, $\Delta V_{\max}$ alt ve üst gerilim sapma sınırlarıdır. ΔV_i , i . baradaki gerilimin salınım bara gerilimine göre sapması ve $P_{yük_i}$, i . baradaki aktif yük gücüdür.

YES'in en uygun aktif gücü ve en uygun yeri belirlemek için Bölüm 4.1.5'te anlatılan algoritma kullanılır. Sadece algoritmada kullanılan denklemler değişmektedir. Fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemlerinde YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü veren algoritma aşağıda verilmektedir. Akış diyagramı Şekil 4.4'te verilmektedir.

Dağıtım sisteminin güç kaybını en aza indirecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden yeni analitik metot:

Adım 1. Dağıtım sistemin YES olmadığı durumda güç akış analizi yap.

Adım 2. Salınım barası dışında sırayla her bir baraya YES ekleyerek Denklem (4.99) ve Denklem (4.100)'ü kullanarak YES'in en uygun büyüklüğünü hesapla.

Adım 3. Eğer YES'in büyüklüğü toplam aktif yük gücünden büyük ise YES'in büyüklüğünü toplam aktif yük gücü olarak al.

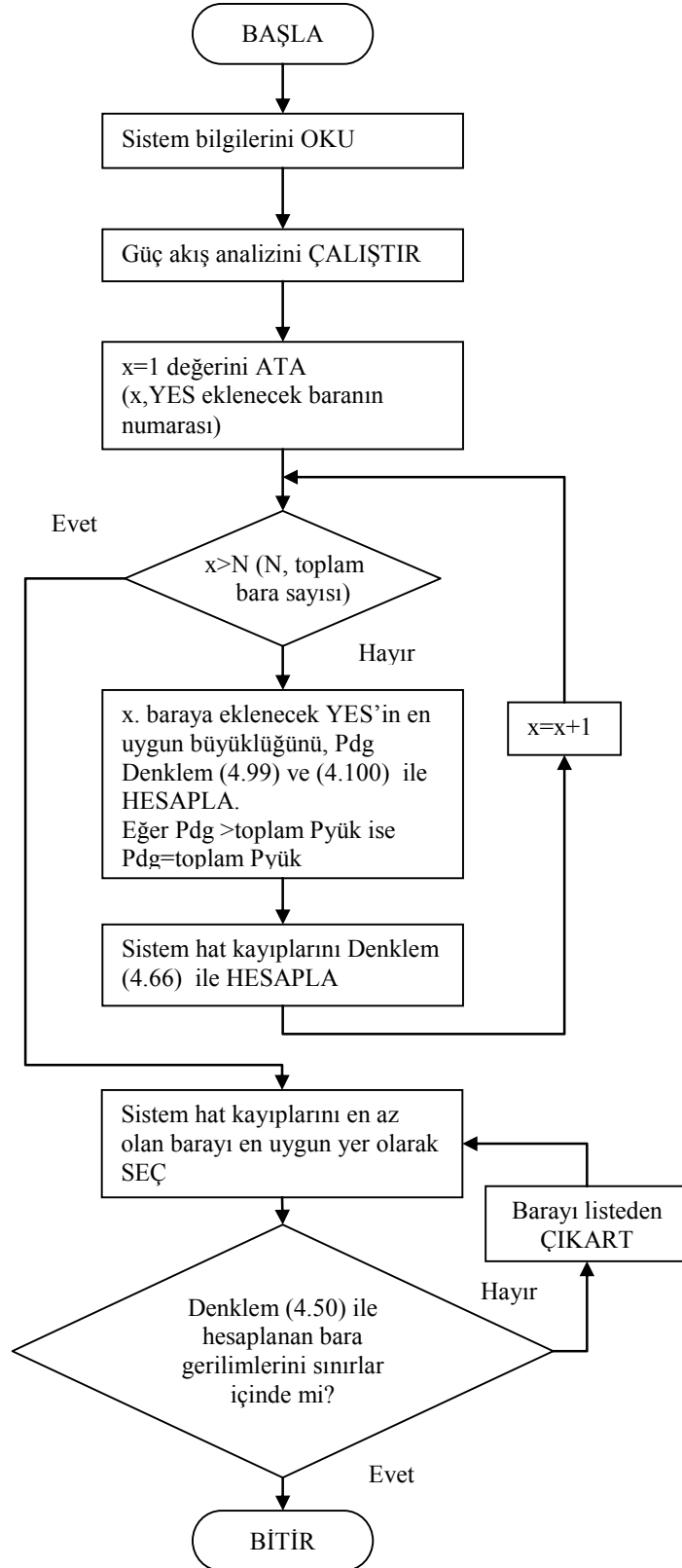
Adım 4. Sırasıyla her bir baraya yerleştirilen en uygun büyüklükteki YES ile yaklaşık toplam güç kaybını Denklem (4.66) ile hesapla.

Adım 5. YES eklenen baraların toplam güç kaybı en az olan bara en uygun yer olarak seç.

Adım 6. En uygun yerdeki YES'in büyüklüğü toplam aktif yük gücünden büyük olup olmadığını kontrol et.

Adım 7. En uygun büyüklükte ve yerdeki YES ile sistemin bara gerilimlerin sınırların içinde olup olmadığı Denklem (4.50) ile kontrol et.

Adım 8. Eğer bara gerilimleri sınırların içinde değilse bu barayı çıkartarak 4. adıma geri dön.



Şekil 4.4. Dağıtım sisteminin güç kaybını en aza indirecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden yeni analitik metodun akış diyagramı

4.3. Sonuç

Tezin bu bölümünde, radyal sistemler ve kapalı devre bulunabilen dağıtım sistemleri için güç kayıplarını azaltacak YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü belirleyen yeni iki analitik metot geliştirilmiştir. Radyal sistemlerin ve dağıtım sistemlerin yapısına uygun iki kayıp duyarlılık ifadesi çıkartılmış, güç kayıplarını azaltacak YES'in en uygun büyüklüğünü veren iki ifade ve YES'in en uygun büyüklük ve yerini veren iki algoritma geliştirilmiştir.

Geliştirilen yeni iki analitik metot, radyal sistemlerinin ve kapalı devre bulunabilen dağıtım sistemlerinin yapısına uygun, Jacobian veya empedans matrisi kullanmayan metotlardır.

5. ZAMANLA DEĞİŞEN YÜKLERE SAHİP SİSTEMLERDE GERİLİM PROFİLİNİ DÜZELTECEK YES'İN YERLEŞTİRİLMESİ

Güç sistemi için bara gerilimleri, elektrik enerjisinin sürekliliği ve güvenilirliği sağlamada önemli bir faktördür. YES yerleşim çalışmaların çoğunluğunda bara gerilimleri ana kısıt olarak alınmış ve sınırların içinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. Bu bölümde, fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemlerinde zamanla değişen yükleri göz önünde bulundurarak gerilim profilini düzeltmesi amacıyla yerleştirilecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü belirleyen yeni bir analitik metot geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni metot, dağıtım sistemleri için Jacobian veya empedans matrisi kullanmayan, dağıtım sistemlerin yapısına uygun, bara gücü, gerilimi ve empedansı ile bara akımının ifadesine dayanan bir metottur.

Analitik metotta, ilk olarak, karesi alınmış gerilim sapmalarının toplamı; bara güçlerinin bir fonksiyonu olarak zamana bağlı yükleri dikkate alarak elde edilmektedir. İkinci olarak gerilim duyarlılık ifadesi çıkartılmaktadır. Gerilim duyarlılık ifadesi, optimizasyon problemlerinde kullanılan toplam gerilim sapmasının kısmi türevi olarak tanımlanır. Gerilim duyarlılık ifadesini kullanarak gerilim profilini düzeltecek YES'in en uygun büyüklüğünü veren ifade geliştirilmektedir. Son olarak çıkartılacak analitik ifade ile de sistemin gerilim profilini düzeltecek en uygun büyüklükteki YES'in yerleşeceği en uygun yeri veren bir algoritma geliştirilmektedir.

5.1. Zamanla Değişen Yükler ile Dağıtım Sisteminin Gerilim Sapması

Bu bölümde, dağıtım sisteminde T_i zaman süresince bara gerilimleri ile salınım bara gerilimi arasındaki gerilim sapması, baradaki yük gücünün bir fonksiyonu olarak yazılmaktadır. Gerilim sapma ifadesi, ilerideki bölümlerde gerilim duyarlılık ifadesini ve YES'in en uygun büyüklüğünü elde etmek için kullanılmaktadır. T_i .

zaman süresindeki bara gerilimleri ile salınım bara gerilimi arasındaki gerilim sapması, ΔV_{T_t} , DLF matrisi ile akım vektörünün çarpımı ile elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{T_t} \end{bmatrix}_{n-1 \times 1} = \begin{bmatrix} DLF_{T_t} \end{bmatrix}_{n-1 \times n-1} \begin{bmatrix} I_{T_t} \end{bmatrix}_{n-1 \times 1} \quad (5.1)$$

Burada $[I_{T_t}]$, T_t . zaman süresindeki salınım barası dışındaki baralardan çekilen akım vektörüdür. DLF matrisinin oluşturulması ayrıntılı olarak radyal sistemler için Bölüm 4.1.1’de, fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemleri için Bölüm 4.2.1’de gösterilmiştir. Burada DLF matrisinin oluşturulması ile ilgili bilgi tekrar verilmeyecektir. T_t . zaman süresindeki i. baradan çekilen akım, baranın kompleks gücü ve gerilimi cinsinden yazılabilir ve her bir baradan çekilen akım

$$I_{i,T_t} = \left(\frac{P_{i,T_t} + jQ_{i,T_t}}{V_{i,T_t}} \right)^* \quad i = 2, \dots, n \quad (5.2)$$

ile bulunur. Burada V_{i,T_t} ve $P_{i,T_t} + jQ_{i,T_t}$ sırasıyla T_t . zaman süresindeki i. baranın gerilimi ve kompleks gücüdür; n, toplam bara sayısıdır; *, kompleks eşlenik operatörüdür.

DLF matris ve akım vektör elemanları kompleks değerlidir. T_t . zaman süresindeki DLF matrisi ve akım vektörünü gerçekte ve sanal kısımlara ayrılacak olursa, gerçekte ve sanal kısımları Denklem (5.3)’teki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} DLF_{T_t} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} reDLF_{T_t} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} imDLF_{T_t} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_{T_t} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} reI_{T_t} \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} imI_{T_t} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.3)$$

T_t . zaman süresindeki i. baradan çekilen akımın gerçekte ve sanal kısımları bara gücünün bir fonksiyonu olarak yazılabilir,

$$\begin{aligned}
reI_{i,T_t} &= \frac{P_{i,T_t} \cdot \cos(\theta_{i,T_t}) + Q_{i,T_t} \cdot \sin(\theta_{i,T_t})}{|V_{i,T_t}|} \\
imI_{i,T_t} &= \frac{P_{i,T_t} \cdot \sin(\theta_{i,T_t}) - Q_{i,T_t} \cdot \cos(\theta_{i,T_t})}{|V_{i,T_t}|}
\end{aligned} \tag{5.4}$$

burada θ_{i,T_t} , T_t . zaman süresindeki i. bara geriliminin açısıdır.

T_t . zaman süresindeki gerilim sapması, $[DLF_{T_t}]$ matrisin ve $[I_{T_t}]$ vektörün gerçekte ve sanal kısımları ile Denklem (5.5)'teki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned}
[\Delta V_{T_t}] &= \left([reDLF_{T_t}] [reI_{T_t}] - [imDLF_{T_t}] [imI_{T_t}] \right) + \\
&\quad j \left([reDLF_{T_t}] [imI_{T_t}] + [imDLF_{T_t}] [reI_{T_t}] \right)
\end{aligned} \tag{5.5}$$

T_t . zaman süresindeki i. hattaki gerilim sapması;

$$\begin{aligned}
\Delta V_{i,T_t} &= \sum_{k=1}^{n-1} DLF_{T_t}(i,k) \cdot I_{T_t}(k) \\
&= \sum_{k=1}^{n-1} \left(\left(reDLF_{T_t}(i,k) \cdot reI_{T_t}(k) - imDLF_{T_t}(i,k) \cdot imI_{T_t}(k) \right) + \right. \\
&\quad \left. j \left(reDLF_{T_t}(i,k) \cdot imI_{T_t}(k) + imDLF_{T_t}(i,k) \cdot reI_{T_t}(k) \right) \right)
\end{aligned} \tag{5.6}$$

ile yazılır. T_t . zaman süresindeki i. hattaki gerilim sapmasının mutlak değerinin karesi, VD_{i,T_t} ;

$$\begin{aligned}
VD_{i,T_t} &= |\Delta V_{i,T_t}|^2 \\
&= \left(\sum_{k=1}^{n-1} \left(reDLF_{T_t}(i,k).reI_{T_t}(k) - imDLF_{T_t}(i,k).imI_{T_t}(k) \right) \right)^2 + \\
&\quad \left(\sum_{k=1}^{n-1} \left(reDLF_{T_t}(i,k).imI_{T_t}(k) + imDLF_{T_t}(i,k).reI_{T_t}(k) \right) \right)^2 \\
&= \left(\sum_{k=1}^{n-1} \left(reDLF_{T_t}(i,k). \frac{P_{k,T_t} \cdot \cos(\theta_{k,T_t}) + Q_{k,T_t} \cdot \sin(\theta_{k,T_t})}{|V_{k,T_t}|} - \dots \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \dots - imDLF_{T_t}(i,k). \frac{P_{k,T_t} \cdot \sin(\theta_{k,T_t}) - Q_{k,T_t} \cdot \cos(\theta_{k,T_t})}{|V_{k,T_t}|} \right) \right)^2 + \\
&\quad \left(\sum_{k=1}^{n-1} \left(reDLF_{T_t}(i,k). \frac{P_{k,T_t} \cdot \sin(\theta_{k,T_t}) - Q_{k,T_t} \cdot \cos(\theta_{k,T_t})}{|V_{k,T_t}|} + \dots \right. \right. \\
&\quad \left. \left. \dots + imDLF_{T_t}(i,k). \frac{P_{k,T_t} \cdot \cos(\theta_{k,T_t}) + Q_{k,T_t} \cdot \sin(\theta_{k,T_t})}{|V_{k,T_t}|} \right) \right)^2
\end{aligned} \tag{5.7}$$

ile elde edilir. T_t . zaman süresindeki her hattın VD_{i,T_t} toplamı, VD_{T_t} ;

$$VD_{T_t} = \sum_{i=1}^{n-1} VD_{i,T_t} = \sum_{i=1}^{n-1} |\Delta V_{i,T_t}|^2 \tag{5.8}$$

ile hesaplanır; VD_{T_t} , bara akımların fonksiyonu olarak

$$\begin{aligned}
VD_{T_t} &= \sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{k=1}^{n-1} \left(reDLF_{T_t}(i,k).reI_{T_t}(k) - imDLF_{T_t}(i,k).imI_{T_t}(k) \right) \right)^2 + \\
&\quad \left(\sum_{k=1}^{n-1} \left(reDLF_{T_t}(i,k).imI_{T_t}(k) + imDLF_{T_t}(i,k).reI_{T_t}(k) \right) \right)^2
\end{aligned} \tag{5.9}$$

gösterilir. Verilen zaman periyodu içindeki VD_{T_t} 'nin ağırlıklı ortalaması, VDA;

$$VDA = \overline{VD} = \frac{1}{\sum_{t=1}^{N_t} T_t} \sum_{t=1}^{N_t} VD_{T_t} T_t = \frac{1}{\sum_{t=1}^{N_t} T_t} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{n-1} |\Delta V_{i,T_t}|^2 T_t \tag{5.10}$$

elde edilir. Burada N_t verilen zaman periyodu içindeki zaman süre sayısıdır.

VDA ifadesi, zamanla değişen yükleri göz önünde bulundurarak dağıtım sisteminin ortalama gerilim sapmasını vermektedir. VDA ifadesi ile yük süre eğrileri verilmiş dağıtım sitemlerin ortalama gerilim sapması hesaplanabilmektedir. Burada elde edilen VDA ifadesi, gerilim duyarlılık ifadesinin ve gerilim profilini düzeltmek için yerleştirilecek YES'in en uygun büyüklüğünü veren ifadenin çıkartılmasında kullanılacak ifadedir.

5.2. En Uygun Büyüklük

Dağıtım sistemlerinde herhangi bir yere yerleşecek YES'in en uygun büyüklüğünü elde etmede amaç, zamana bağlı yükler ile salınım bara geriliminden diğer bara gerilimleri arasındaki sapmanın (VDA) azalmasıdır. Ana kısıt, maksimum YES büyüklüğü toplam aktif yük gücü olarak alınmaktadır.

$$\min_{P_{dg} \in \mathfrak{R}} f(P_{dg}) = VDA = \frac{1}{\sum_{t=1}^{N_t} T_t} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{n-1} VD_{i,T_t} T_t \quad (5.11)$$

şartı altında $0 \leq P_{dg} \leq \sum_{k=1}^n Pyük_k$

$f(P_{dg})$ fonksiyonu $(-\infty, \infty)$ aralığında tam konvektir [80]. Bunun için $f(P_{dg})$ fonksiyonun birinci türevini sıfır yapan P_{dg} değeri $f(P_{dg})$ fonksiyonun minimum değerini verir. Dolayısıyla VDA ifadesini minimum yapacak YES'in en uygun büyüklüğünü elde etmek için Denklem (5.10)'da gösterilen VDA ifadesinin bara aktif gücüne göre türevi sıfıra eşitlenir.

$$\frac{\partial VDA}{\partial P_i} = 0 \quad (5.12)$$

i. baradaki T_t zaman süresi içindeki aktif gücü, yük seviyesi ($lv(T_t)$) ile sabit aktif gücü (P_i) çarparak hesaplanabilir.

$$P_{i,T_t} = lv(T_t).P_i \quad (5.13)$$

Denklem (5.10) ve (5.13)'ten yararlanılarak VDA'nın i. bara sabit aktif gücüne göre türevi

$$\frac{\partial VDA}{\partial P_i} = \frac{\partial}{\partial P_i} \left(\frac{1}{\sum_{t=1}^{N_t} T_t} \sum_{t=1}^{N_t} \left(\sum_{m=1}^{n-1} \left(\sum_{k=1}^{n-1} \left(reDLF_{T_t}(m,k).reI_{T_t}(k) - \dots \right)^2 + \left(\dots - imDLF_{T_t}(m,k).imI_{T_t}(k) \right)^2 \right) \right) \right) T_t \quad (5.14)$$

şeklinde yazılır. Gerilim duyarlılık ifadesi olarak tanımlanan VDA'nın, bara aktif gücüne göre türevi

$$\frac{\partial VDA}{\partial P_i} = \frac{2}{\sum_{t=1}^{N_t} T_t} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{m=1}^{n-1} \left(\left(\sum_{k=1}^{n-1} \left(\left(reDLF_{T_t}(m,k).reI_{T_t}(k) - imDLF_{T_t}(m,k).imI_{T_t}(k) \right) \dots \right) \right) + \dots \right) T_t \quad (5.15)$$

$$\dots + \left(\sum_{k=1}^{n-1} \left(\dots \left(reDLF_{T_t}(m,i-1). \frac{lv(t). \cos(\theta_{i,T_t})}{|V_{i,T_t}|} - \dots \right) \dots - imDLF_{T_t}(m,i-1). \frac{lv(t). \sin(\theta_{i,T_t})}{|V_{i,T_t}|} \right) \right)$$

$$\dots + \left(\sum_{k=1}^{n-1} \left(\dots \left(reDLF_{T_t}(m,i-1). \frac{lv(t). \sin(\theta_{i,T_t})}{|V_{i,T_t}|} + \dots \right) \dots + imDLF_{T_t}(m,i-1). \frac{lv(t). \cos(\theta_{i,T_t})}{|V_{i,T_t}|} \right) \right)$$

elde edilir. Bu ifadeyi sadeleştirmek için i. bara aktif yük gücü, P_i ile ilgili terimler ayrılır.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial VDA}{\partial P_i} &= \frac{2}{\sum_{t=1}^{Nt} T_t} \left(\sum_{t=1}^{Nt} T_t \sum_{m=1}^{n-1} \left(\sum_{k \neq i}^{n-1} aaz + qaz + paz \right) aad + \dots \right. \\
&\quad \left. \dots + \sum_{k \neq i}^{n-1} bbz + qbz + pbz \right) bbd \Bigg) \\
\frac{\partial VDA}{\partial P_i} &= \frac{2}{\sum_{t=1}^{Nt} T_t} \left(\sum_{t=1}^{Nt} T_t \sum_{m=1}^{n-1} \left(\sum_{k \neq i}^{n-1} aaz \right) aad + \left(\sum_{k \neq i}^{n-1} bbz \right) bbd + \dots \right. \\
&\quad \left. \dots + qaz.aad + paz.aad + qbz.bbd + pbz.bbd \right) \Bigg)
\end{aligned} \tag{5.16}$$

Buradaki aad , bbd , aaz , bbz , qaz , qbz , paz ve pbz terimleri aşağıda tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned}
aad &= \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} - imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right) \\
bbd &= \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right)
\end{aligned} \tag{5.17}$$

$$\begin{aligned}
aaz &= \left(reDLF_{T_t}(m, k) \cdot reI_{T_t}(k) - imDLF_{T_t}(m, k) \cdot imI_{T_t}(k) \right) \\
bbz &= \left(reDLF_{T_t}(m, k) \cdot imI_{T_t}(k) + imDLF_{T_t}(m, k) \cdot reI_{T_t}(k) \right)
\end{aligned} \tag{5.18}$$

$$\begin{aligned}
qaz &= \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{Q_{i, T_t} \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{Q_{i, T_t} \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right) \\
qbz &= \left(-reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{Q_{i, T_t} \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{Q_{i, T_t} \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right)
\end{aligned} \tag{5.19}$$

$$\begin{aligned}
paz &= \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{P_{i, T_t} \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} - imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{P_{i, T_t} \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right) \\
pbz &= \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{P_{i, T_t} \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{P_{i, T_t} \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right)
\end{aligned} \quad (5.20)$$

aaz'lı terim ile *aad* terimin çarpımı

$$\begin{aligned}
\left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} aaz \right) aad &= \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} \left(reDLF_{T_t}(m, k) \cdot reI_{T_t}(k) - imDLF_{T_t}(m, k) \cdot imI_{T_t}(k) \right) \right) \cdots \\
&\cdots \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} - imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right) \\
\left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} aaz \right) aad &= \frac{lv(t)}{|V_{i, T_t}|} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} \left(\left(reDLF_{T_t}(m, k) \cdot reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot reI_{T_t}(k) \cdot \cos(\theta_{i, T_t}) - \cdots \right) + \cdots \right. \\
&\left. \cdots + \left(-reDLF_{T_t}(m, k) \cdot imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot reI_{T_t}(k) \cdot \sin(\theta_{i, T_t}) + \cdots \right) \right. \\
&\left. \cdots + \left(\cdots + imDLF_{T_t}(m, k) \cdot imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot imI_{T_t}(k) \cdot \sin(\theta_{i, T_t}) \right) \right)
\end{aligned} \quad (5.21)$$

ve *bbz*'lı terim ile *bbd* terimin çarpımı

$$\begin{aligned}
\left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} bbz \right) bbd &= \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} \left(reDLF_{T_t}(m, k) \cdot imI_{T_t}(k) + imDLF_{T_t}(m, k) \cdot reI_{T_t}(k) \right) \right) \cdots \\
&\cdots \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right) \\
\left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} bbz \right) bbd &= \frac{lv(t)}{|V_{i, T_t}|} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} \left(\left(reDLF_{T_t}(m, k) \cdot reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot imI_{T_t}(k) \cdot \sin(\theta_{i, T_t}) + \cdots \right) + \cdots \right. \\
&\left. \cdots + \left(reDLF_{T_t}(m, k) \cdot imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot imI_{T_t}(k) \cdot \cos(\theta_{i, T_t}) + \cdots \right) \right. \\
&\left. \cdots + \left(\cdots + imDLF_{T_t}(m, k) \cdot imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot reI_{T_t}(k) \cdot \cos(\theta_{i, T_t}) \right) \right)
\end{aligned} \quad (5.22)$$

bulunur. Bu çarpımların toplamından

$$\begin{aligned}
& \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} aaz \right) aad + \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} bbz \right) bbd = \frac{lv(t)}{|V_{i,T_t}|} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} \left(\begin{aligned} & \left(reDLF_{T_t}(m,k)reDLF_{T_t}(m,i-1) + imDLF_{T_t}(m,k)imDLF_{T_t}(m,i-1) \right) \cdots \\ & \cdots reI_{T_t}(k) \cos(\theta_{i,T_t}) + \cdots \\ & \cdots + \left(reDLF_{T_t}(m,k)reDLF_{T_t}(m,i-1) + imDLF_{T_t}(m,k)imDLF_{T_t}(m,i-1) \right) \cdots \\ & \cdots imI_{T_t}(k) \sin(\theta_{i,T_t}) + \cdots \\ & \cdots + \left(reDLF_{T_t}(m,k)imDLF_{T_t}(m,i-1) - imDLF_{T_t}(m,k)reDLF_{T_t}(m,i-1) \right) \cdots \\ & \cdots (-reI_{T_t}(k) \sin(\theta_{i,T_t})) + \cdots \\ & \left(reDLF_{T_t}(m,k)imDLF_{T_t}(m,i-1) - imDLF_{T_t}(m,k)reDLF_{T_t}(m,i-1) \right) \cdots \\ & \cdots imI_{T_t}(k) \cos(\theta_{i,T_t}) \end{aligned} \right) \\
& \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} aaz \right) aad + \left(\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} bbz \right) bbd = \frac{lv(t)}{|V_{i,T_t}|} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n-1} \left(\begin{aligned} & \cos(\theta_{i,T_t}) \left(reVDF_{T_t}(m,k)reI_{T_t}(k) + imVDF_{T_t}(m,k)imI_{T_t}(k) \right) + \cdots \\ & \cdots + \sin(\theta_{i,T_t}) \left(reVDF_{T_t}(m,k)imI_{T_t}(k) - imVDF_{T_t}(m,k)reI_{T_t}(k) \right) \end{aligned} \right)
\end{aligned} \tag{5.23}$$

elde edilir. Burada $reVDF_{T_t}(m,k)$ ve $imVDF_{T_t}(m,k)$

$$\begin{aligned}
reVDF_{T_t}(m,k) &= \left(reDLF_{T_t}(m,k)reDLF_{T_t}(m,i-1) + imDLF_{T_t}(m,k)imDLF_{T_t}(m,i-1) \right) \\
imVDF_{T_t}(m,k) &= \left(reDLF_{T_t}(m,k)imDLF_{T_t}(m,i-1) - imDLF_{T_t}(m,k)reDLF_{T_t}(m,i-1) \right)
\end{aligned} \tag{5.24}$$

ile tanımlanmıştır. qaz ile aad terimlerin çarpımından

$$\begin{aligned}
qaz.aad &= \left(reDLF_{T_t}(m,i-1) \cdot \frac{Q_{i,T_t} \cdot \sin(\theta_{i,T_t})}{|V_{i,T_t}|} + imDLF_{T_t}(m,i-1) \cdot \frac{Q_{i,T_t} \cdot \cos(\theta_{i,T_t})}{|V_{i,T_t}|} \right) \cdots \\
&\cdots \left(reDLF_{T_t}(m,i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \cos(\theta_{i,T_t})}{|V_{i,T_t}|} - imDLF_{T_t}(m,i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \sin(\theta_{i,T_t})}{|V_{i,T_t}|} \right) \\
qaz.aad &= \frac{lv(t)}{|V_{i,T_t}|^2} \left(\begin{aligned} & reDLF_{T_t}(m,i-1)^2 \cdot Q_{i,T_t} \cdot \sin(\theta_{i,T_t}) \cos(\theta_{i,T_t}) + \cdots \\ & \cdots + imDLF_{T_t}(m,i-1) \cdot reDLF_{T_t}(m,i-1) Q_{i,T_t} \cdot \cos(\theta_{i,T_t})^2 \end{aligned} \right) - \cdots \\
&\cdots - \frac{1}{|V_{i,T_t}|^2} \left(\begin{aligned} & reDLF_{T_t}(m,i-1) \cdot imDLF_{T_t}(m,i-1) \cdot Q_{i,T_t} \cdot \sin(\theta_{i,T_t})^2 + \cdots \\ & \cdots + imDLF_{T_t}(m,i-1)^2 \cdot Q_{i,T_t} \cdot \cos(\theta_{i,T_t}) \sin(\theta_{i,T_t}) \end{aligned} \right)
\end{aligned} \tag{5.25}$$

ve qbz ile bbd terimlerin çarpımından

$$\begin{aligned}
qbz.bbd &= \left(-reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{Q_{i, T_t} \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{Q_{i, T_t} \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right) \dots \\
&\dots \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right) \quad (5.26) \\
qbz.bbd &= \frac{lv(t)}{|V_{i, T_t}|^2} \left(-reDLF_{T_t}(m, i-1)^2 \cdot Q_{i, T_t} \cdot \cos(\theta_{i, T_t}) \sin(\theta_{i, T_t}) + \dots \right. \\
&\left. \dots + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot Q_{i, T_t} \cdot \sin(\theta_{i, T_t})^2 \right) + \dots \\
&\dots + \frac{lv(t)}{|V_{i, T_t}|^2} \left(-reDLF_{T_t}(m, i-1) imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot Q_{i, T_t} \cdot \cos(\theta_{i, T_t})^2 + \dots \right. \\
&\left. \dots + imDLF_{T_t}(m, i-1)^2 \cdot Q_{i, T_t} \cdot \sin(\theta_{i, T_t}) \cos(\theta_{i, T_t}) \right)
\end{aligned}$$

bulunur. Bu terimlerin toplamı sıfıra eşittir.

$$qaz.aad + qbz.bbd = 0 \quad (5.27)$$

paz ile *aad* terimlerin çarpımından

$$\begin{aligned}
paz.aad &= \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{P_{i, T_t} \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} - imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{P_{i, T_t} \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right) \dots \\
&\dots \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} - imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right) \quad (5.28) \\
paz.aad &= \frac{P_{i, T_t} \cdot lv(t)}{|V_{i, T_t}|^2} \left(reDLF_{T_t}(m, i-1)^2 \cdot \cos(\theta_{i, T_t})^2 - \dots \right. \\
&\left. \dots - imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \sin(\theta_{i, T_t}) \cos(\theta_{i, T_t}) \right) - \dots \\
&\dots - \frac{P_{i, T_t} \cdot lv(t)}{|V_{i, T_t}|^2} \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) imDLF_{T_t}(m, i-1) \cos(\theta_{i, T_t}) \sin(\theta_{i, T_t}) - \dots \right. \\
&\left. \dots - imDLF_{T_t}(m, i-1)^2 \cdot \sin(\theta_{i, T_t})^2 \right)
\end{aligned}$$

ve *pbz* ile *bbd* terimlerin çarpımından

$$\begin{aligned}
pbz.bbd &= \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{P_{i, T_t} \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{P_{i, T_t} \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right), \dots \\
&\dots, \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \sin(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \frac{lv(t) \cdot \cos(\theta_{i, T_t})}{|V_{i, T_t}|} \right) \quad (5.29) \\
pbz.bbd &= \frac{P_{i, T_t} \cdot lv(t)}{|V_{i, T_t}|^2} \left(reDLF_{T_t}(m, i-1)^2 \sin^2(\theta_{i, T_t}) + \dots \right. \\
&\left. \dots + imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \sin(\theta_{i, T_t}) \cos(\theta_{i, T_t}) \right) + \dots \\
&\dots + \frac{P_{i, T_t} \cdot lv(t)}{|V_{i, T_t}|^2} \left(reDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot imDLF_{T_t}(m, i-1) \cdot \cos(\theta_{i, T_t}) \sin(\theta_{i, T_t}) + \dots \right. \\
&\left. \dots + imDLF_{T_t}(m, i-1)^2 \cdot \cos^2(\theta_{i, T_t}) \right)
\end{aligned}$$

elde edilir, toplamları ise

$$\begin{aligned}
paz.aad + pbz.bbd &= \frac{P_{i, T_t} \cdot lv(t)}{|V_{i, T_t}|^2} \left(reDLF_{T_t}(m, i-1)^2 \cdot (\cos^2(\theta_{i, T_t}) + \sin^2(\theta_{i, T_t})) + \dots \right. \\
&\left. \dots + imDLF_{T_t}(m, i-1)^2 \cdot (\cos^2(\theta_{i, T_t}) + \sin^2(\theta_{i, T_t})) \right) \quad (5.30) \\
paz.aad + pbz.bbd &= \frac{P_{i, T_t} \cdot lv(t)}{|V_{i, T_t}|^2} \left(reDLF_{T_t}(m, i-1)^2 + imDLF_{T_t}(m, i-1)^2 \right)
\end{aligned}$$

ile yazılır. Denklem (5.23), (5.27) ve (5.30)'dan elde edilen ifadeler Denklem (5.16)'da yerine konulursa sadeleşmiş VDA'nın bara aktif gücüne göre türevi olan gerilim duyarlılık ifadesi elde edilir.

$$\frac{\partial VDA}{\partial P_i} = \frac{2}{\sum_{t=1}^{N_t} T_t} \left(\sum_{t=1}^{N_t} T_t \sum_{m=1}^{n-1} \left[\frac{lv(t)}{|V_{i, T_t}|} \sum_{k=1}^{n-1} \left(c \cos(\theta_{i, T_t}) \left(reVDF_{T_t}(m, k) reI_{T_t}(k) + \dots \right) + \dots \right. \right. \right. \\
\left. \left. \dots + \sin(\theta_{i, T_t}) \left(reVDF_{T_t}(m, k) imI_{T_t}(k) - \dots \right) \right. \right. \left. \left. \dots - imVDF_{T_t}(m, k) reI_{T_t}(k) \right) \right] + \dots \right) \quad (5.31) \\
\left. \dots + \frac{P_{i, T_t} \cdot lv(t)^2}{|V_{i, T_t}|^2} \left(reDLF_{T_t}(m, i-1)^2 + imDLF_{T_t}(m, i-1)^2 \right) \right)$$

Gerilim duyarlılık ifadesi sıfıra eşitlenip i. bara aktif yük gücü, P_i ifadeden çekilir.

$$\frac{\partial VDA}{\partial P_i} = \frac{2}{\sum_{t=1}^{N_t} T_t} \left(\sum_{t=1}^{N_t} T_t \sum_{m=1}^{n-1} \frac{lv(t)}{|V_{i,T_t}|} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\cos(\theta_{i,T_t}) \left(reVDF_{T_t}(m,k)reI_{T_t}(k) + \dots \right) + \dots \right) + \dots \right) = 0 \quad (5.32)$$

$$\begin{aligned} & \frac{2.P_i}{\sum_{t=1}^{N_t} T_t} \left(\sum_{t=1}^{N_t} T_t \cdot \frac{lv(t)^2}{|V_{i,T_t}|^2} \sum_{m=1}^{n-1} \left(\left(reDLF_{T_t}(m,i-1)^2 + imDLF_{T_t}(m,i-1)^2 \right) \right) \right) = \dots \\ & \dots = \frac{-2}{\sum_{t=1}^{N_t} T_t} \left(\sum_{t=1}^{N_t} T_t \frac{lv(t)}{|V_{i,T_t}|} \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\cos(\theta_{i,T_t}) \left(reVDF_{T_t}(m,k)reI_{T_t}(k) + \dots \right) + \dots \right) + \dots \right) \end{aligned}$$

i. baranın aktif gücü, P_i

$$P_i = - \frac{\left(\sum_{t=1}^{N_t} T_t \frac{lv(t)}{|V_{i,T_t}|} \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\cos(\theta_{i,T_t}) \left(reVDF_{T_t}(m,k)reI_{T_t}(k) + \dots \right) + \dots \right) + \dots \right)}{\left(\sum_{t=1}^{N_t} T_t \cdot \frac{lv(t)^2}{|V_{i,T_t}|^2} \sum_{m=1}^{n-1} \left(\left(reDLF_{T_t}(m,i-1)^2 + imDLF_{T_t}(m,i-1)^2 \right) \right) \right)} \quad (5.33)$$

elde edilir. Denklem (5.33)'teki güç ifadesinde “-” işareti sisteme verilen gücü göstermektedir. Dağıtım sistemin gerilim profilini düzeltecek i. baradan çekilecek aktif gücü, P_i

$$P_i = \frac{\left(\sum_{t=1}^{N_t} T_t \frac{lv(t)}{|V_{i,T_t}|} \sum_{m=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \left(\cos(\theta_{i,T_t}) \left(reVDF_{T_t}(m,k)reI_{T_t}(k) + \dots \right) + \dots \right) + \dots \right)}{\left(\sum_{t=1}^{N_t} T_t \cdot \frac{lv(t)^2}{|V_{i,T_t}|^2} \sum_{m=1}^{n-1} \left(\left(reDLF_{T_t}(m,i-1)^2 + imDLF_{T_t}(m,i-1)^2 \right) \right) \right)} \quad (5.34)$$

ile bulunur. Burada $reVDF_{Tl}(m,k)$ ve $imVDF_{Tl}(m,k)$ Denklem (5.24) kullanılarak elde edilmiştir.

i. baraya yerleştirilecek YES'in en uygun büyüklüğü, Denklem (5.34) ve (5.35) ile hesaplanır.

$$P_{dg_i} = P_i + P_{load_i} \quad (5.35)$$

Dağıtım sisteminin gerilim profilini düzeltmek amacıyla zamanla değişen yükleri dikkate alarak i. baraya yerleştirilecek YES'in en uygun aktif gücü Denklem (5.34) ve (5.35) ile elde edilmektedir. YES'in en uygun yerini belirlemede çıkartılan ifadelerden yararlanılacaktır.

5.3. En Uygun Yer

YES'in en uygun yer ve büyüklüğü, dağıtım sisteminin gerilim profilini düzeltmek amacıyla, YES'in aktif gücün toplam aktif yük gücünden büyük olmama şartı altında belirlenmektedir.

$$\begin{aligned} \min_{P_{dg} \in \Re} \quad & f(P_{dg}) = VDA = \frac{1}{\sum_{t=1}^{N_t} T_t} \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{n-1} \left| \Delta V_{i,T_t} \right|^2 T_t \\ & \text{\textit{şartı altında}} \quad 0 \leq P_{dg} \leq \sum_{i=1}^n P_{yük_i} \end{aligned} \quad (5.36)$$

Burada T_t . zaman süresi, $\Delta V_{i,T_t}$ T_t . içindeki i. hattaki gerilim sapması, N_t zaman süre sayısı, n toplam bara sayısı, P_{dg} YES'in aktif gücü ve $P_{yük_i}$, i. baradaki aktif yük gücüdür.

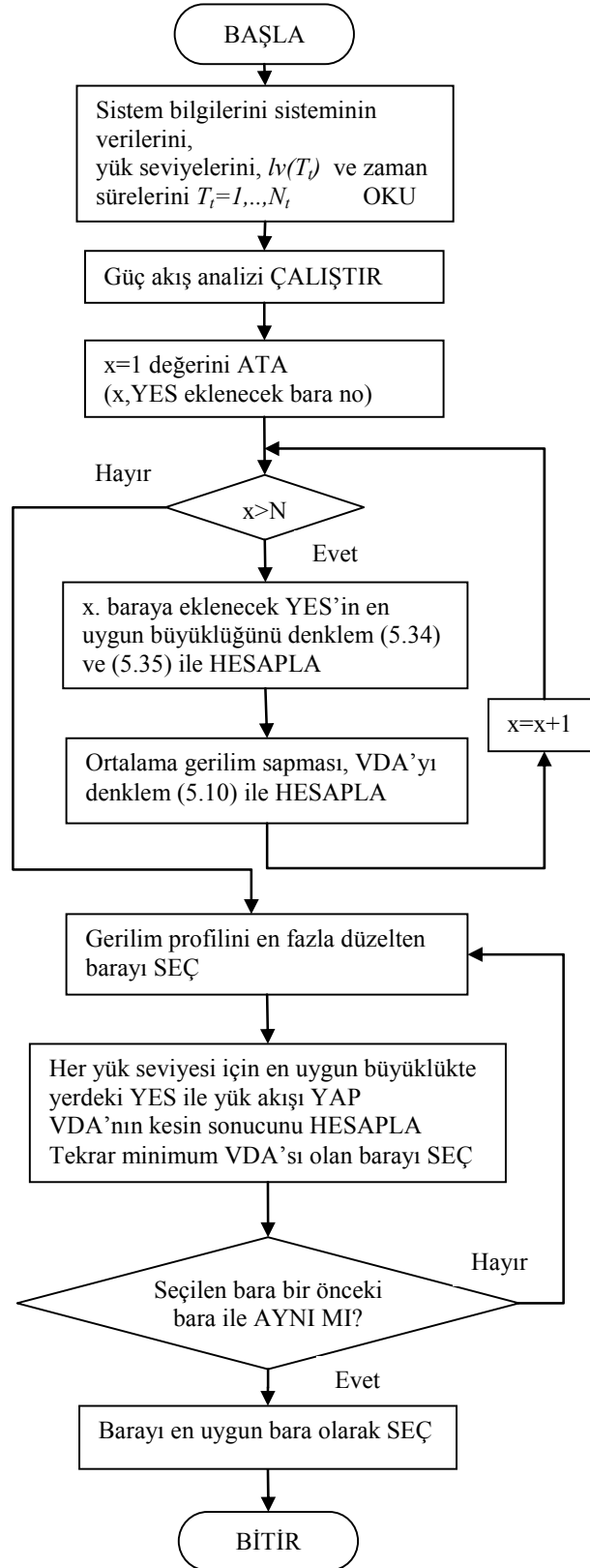
Zamanla değişen yükler ile dağıtım sisteminin gerilim sapmalarını en aza indiren YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü belirlenirken, dağıtım sistemin YES olmadığı temel durumda bir güç akış analizi yapılmakta, bu güç akış analizi sonuçları kullanarak YES'in en uygun büyüklüğü Denklem (5.34) ve (5.35) ile

hesaplanmaktadır. Daha sonra YES'li sistemin yaklaşık gerilim sapmasının ağırlıklı ortalaması (VDA) Denklem (5.10) ile hesaplanmaktadır. YES'li yaklaşık VDA'sı en az olan bara en uygun yer olarak seçilmektedir.

Yukarıda özetlenen algoritma aşağıda adım adım sunulmuştur. Algoritmanın akış diyagramı ise Şekil 5.1'de verilmektedir.

Dağıtım sisteminin gerilim profilini düzeltecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden yeni analitik metot:

- Adım 1.** Dağıtım sisteminin verilerini, yük seviyelerini, $lv(Tt)$ ve zaman sürelerini $Tt=1,...,Nt$ oku.
- Adım 2.** Dağıtım sisteminde YES olmadığı durumda güç akış analizi yap.
- Adım 3.** Salınım barası dışında sırayla her bir baraya YES ekleyerek Denklem (5.34) ve (5.35)'i kullanarak YES'in en uygun büyüklüğünü hesapla.
- Adım 4.** En uygun yerdeki YES'in büyüklüğü toplam aktif yük gücünden büyük olup olmadığını kontrol et.
- Adım 5.** Eğer YES'in büyüklüğü toplam aktif yük gücünden büyük ise YES'in büyüklüğünü toplam aktif yük gücü olarak al.
- Adım 6.** Sırasıyla her bir baraya yerleştirilen en uygun büyüklükteki YES ile yaklaşık dağıtım sisteminin gerilim sapmasının ağırlıklı ortalaması, VDA'yı Denklem (5.10) ile hesapla.
- Adım 7.** YES eklenen baralardan dağıtım sisteminin gerilim sapmasının ağırlıklı ortalaması, VDA en az olan barayı seç.
- Adım 8.** Her yük seviyesi için en uygun büyüklükte ve yerdeki YES ile güç akış analizi yap, dağıtım sisteminin gerilim sapmasının ağırlıklı ortalaması, VDA'nın kesin sonucunu hesapla.
- Adım 9.** Hesaplanan yeni VDA değeri ve diğer VDA değeri arasında en az olan barayı seç ve bir önceki bara ile aynı bara ise en uygun bara olarak belirle, değil ise Adım 7'ye git.



Şekil 5.1. Gerilim profilini düzeltecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden yeni analitik metodun akış diyagramı

5.4. Sonuç

Tezin bu bölümünde, fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemlerinde gerilim profilini düzeltecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü belirleyen yeni bir analitik metot geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni metotta zamanla değişen yükler dâhil edilmiştir. Yeni analitik metotta, dağıtım sistemlerin yapısına uygun gerilim duyarlılık ifadesi çıkartılmış, gerilim profilini düzeltecek YES'in en uygun büyüklüğünü veren ifade ve en uygun büyüklükteki YES'in en uygun yerini veren bir algoritma geliştirilmiştir. Yeni analitik metot, dağıtım sistemlerin yapısına uygun, Jacobian veya empedans matrisi kullanmayan bir metottur.

6. GELİŞTİRİLEN ANALİTİK METOTLARIN UYGULANMASI

6.1. Giriş

Dağıtım sistemlerine yerleşecek YES'in en uygun büyüklüğü ve yerini belirlemek amacıyla Bölüm 4 ve Bölüm 5'te yeni üç analitik metot geliştirilmiştir. Bölüm 4'te dağıtım sistemlerin güç kayıplarını azaltacak YES'in yeri ve büyüklüğünü belirleyen iki analitik metot anlatılmıştır. Birinci metot; fider, alt fiderden oluşan radyal sistemler için geliştirilmiştir. İkinci metot ise fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemleri için geliştirilmiştir. Bölüm 5'te geliştirilen analitik metot, dağıtım sistemlerin gerilim profilini düzeltecek YES'in yeri ve büyüklüğünü belirleyen metottur. Geliştirilen bu üçüncü metot ise fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemleri için geliştirilmiştir. Bu bölümde yeni geliştirilen üç analitik metot, çeşitli metotlarla karşılaştırılıp geçerliliği kontrol edilmektedir. Yeni geliştirilen analitik metotların çeşitli konfigürasyon ve boyuttaki dağıtım sistemlerine uygulanabileceği gösterilmektedir.

Test için 12, 30, 33 ve 69 baralı dağıtım test sistemi [81]-[84] ve 229 baralı gerçek dağıtım sistemi [85] kullanılmaktadır. Kullanılan test sistemleri fider ve alt fiderden oluşmuş radyal dağıtım sistemleridir. Ayrıca 30 ve 69 baralı dağıtım test sistemlerinde bazı alt fiderler birleştirilip kapalı devre oluşturularak iki ayrı kapalı devreli dağıtım test sistemi olarak kullanılmaktadır. 12, 30, 33, 69 ve 229 baralı dağıtım test sistemlerin devre şeması, hat ve yük bilgileri bilgileri Ek-I'de sunulmuştur. Dağıtım sistemlerinin gerilim profilini düzeltecek YES'in yerleşimini belirlemede zamanla değişen yükler dikkate alınmaktadır. Test sistemlerin zamanla değişen yüklerin bir yıl boyunca zamana göre üç farklı yük seviyesinde değiştiği kabul edilmiş ve yük süre bilgileri [86]'dan alınmıştır. Test sistemleri için kullanılan yük seviyeleri ve süreleri ile ilgili bilgiler de Ek-I'de verilmiştir.

Yeni geliştirilen analitik metotlar ve bu metotların karşılaştırılacağı diğer metotlar MATLAB 7.0'da kodlanmıştır. Metotların hepsinde radyal dağıtım test sistemleri için [50]'de geliştirilen sweep temelli güç akış analizi ve kapalı devreli

dağıtım test sistemleri için MATPOWER güç akış analiz programının [87] Newton-Raphson algoritması kullanılmıştır.

6.2. Yeni Geliştirilen Analitik Metotların Karşılaştırılacağı Metotlar

Güç kayıplarını azaltacak YES'in yeri ve büyüklüğünü belirleyen radyal sistemler için geliştirilen birinci metot ve fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemleri için geliştirilen ikinci metot, ızgara arama metodu ve [13]'te Acharya ve arkadaşlarının geliştirdiği analitik metot ile karşılaştırılıp geçerliliği kontrol edilmektedir. Dağıtım sistemlerin gerilim profilini düzeltmek için geliştirilen üçüncü analitik metot ise sadece ızgara arama metodu ile karşılaştırılıp geçerliliği kontrol edilmektedir.

[13]'te Acharya ve arkadaşlarının tam kayıp formülü ile geliştirdiği analitik metot iki güç akış analizi ile en uygun çözümü vermektedir. Tam kayıp formülünde bara admitans matrisi, Ybus'ın tersi ile bulunan bara empedans matrisi, Zbus bulunmaktadır. Bu analitik metotta dağıtım sistemlerinde bulunması zor olan bara empedans matrisi kullanılmaktadır. Bu sebeple bara empedans matrisi elde etmede sıkıntısı bulunan dağıtım sistemleri için bu metot çözüm vermeyebilir.

Izgara arama metodu, tekrarlanan güç akış analizine dayanmaktadır. Izgara arama metodu YES'in büyüklüğü toplam aktif gücün 0%'dan 100%'üne kadar 0.1MW aralıklarla değiştirilerek ve her bir baraya YES eklenerek uygulanmaktadır. Bilindiği üzere sistem ve güç hassasiyeti büyüdükçe ızgara arama metodu ile hesaplama zamanı katlanarak artar. Izgara arama metodu yerine adım büyüklüğü değiştirilerek ard arda güç akış analizi de yapılabilir. Bu durumda hesaplama zamanı önemli ölçüde azalacaktır.

Bu metotların algoritmaları sırasıyla adım adım aşağıda verilmektedir. Güç kayıplarını azaltılması ile ilgili metotların akış diyagramı Şekil 6.1'de, gerilim profilinin düzeltilmesi ile ilgili metodun akış diyagramı Şekil 6.2'de verilmiştir.

[13]'te geliştirilen dağıtım sisteminin güç kaybını en aza indirecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden analitik metot:

Adım 1. Sistem bilgilerini oku; güç akış analizi yap.

Adım 2. Her bir bara için YES en uygun büyüklüğü Denklem (2.24) ile elde et.

Adım 3. Her bir bara için en uygun büyüklüğü elde edilen YES yaklaşık sistem hat kayıplarını Denklem (2.21) ile hesapla.

Adım 4. Yaklaşık sistem hat kayıplarından en az olan YES eklenen barayı en uygun yer olarak seç.

Adım 5. Elde edilen YES büyüklüğü ve yeri ile güç akış analizi yap, kesin sistem hat kayıplarını hesapla.

Dağıtım sisteminin güç kaybını en aza indirecek YES'in en uygun ve yer ve büyüklüğünü elde eden ızgara arama algoritması:

Adım 1. Sistem bilgilerini oku, bara sayısı, n 'yi hesapla.

Adım 2. YES'in ekleneceğini baranın numarası, x 'e "1" değerini ata, $x=1$.

Adım 3. YES'in büyüklüğünü "0" ata, ($P_{dg}=0$).

Adım 4. Güç akış analizi yap.

Adım 5. Sistem hat kayıplarını hesapla.

Adım 6. YES'in büyüklüğünü kontrol et. Eğer sınırlar içinde ise YES'in büyüklüğünü 0.01 artır ($P_{dg}=P_{dg}+0.01$) ve Adım 4'e git.

Adım 7. Sistem hat kaybını en aza indiren YES büyüklüğünü x . bara için en uygun büyüklük olarak seç.

Adım 8. Bara numarası x 'i kontrol et. Eğer x , n 'e eşit ($x=n$) değilse x 'in değeri "1" artır ($x=x+1$) ve Adım 3'e git.

Adım 9. Sistem hat kaybını en aza indiren en uygun büyüklükteki YES'in yerleştiği barayı en uygun yer olarak seç.

Adım 10. En uygun yer ve büyüklükteki YES ile sistem gerilimlerin sınırlar içinde olup olmadığını kontrol et. Eğer sınırlar içinde ise bitir, değilse en uygun yerdeki YES'i çıkartarak Adım 9'a git.

Zamanla değişen yükler ile dağıtım sistemin gerilim profilini düzeltecek YES'in en uygun yer ve büyüklüğünü elde eden ızgara arama algoritması:

Adım 1. Sistem bilgilerini, bara sayısı n , toplam zaman dilimi sayısı N_t , zaman sürelerini $T=1,...,N_t$ ve yük seviyelerini L_T oku.

Adım 2. YES'in ekleneceğini baranın numarası, x 'e "1" değerini ata, $x=1$.

Adım 3. YES'in büyüklüğünü "0" ata, ($P_{dg}=0$).

Adım 4. Zaman süresi T 'ye "1" ata, ilk yük seviyesini $L_{T=1}$ oku.

Adım 5. Yük seviyesine göre yük güçlerini $SL_T=L_T.SL$ hesapla.

Adım 6. Güç akış analizi yap.

Adım 7. Dağıtım sistemin toplam gerilim değişimini Denklem (5.8) ile hesapla.

Adım 8. Zaman süre dilimini kontrol et. Eğer $T=N_t$ eşit değil ise zaman süre dilimini bir artır ($T=T+1$), yük seviyesini $L_{T=1}$ oku ve Adım 5'e git.

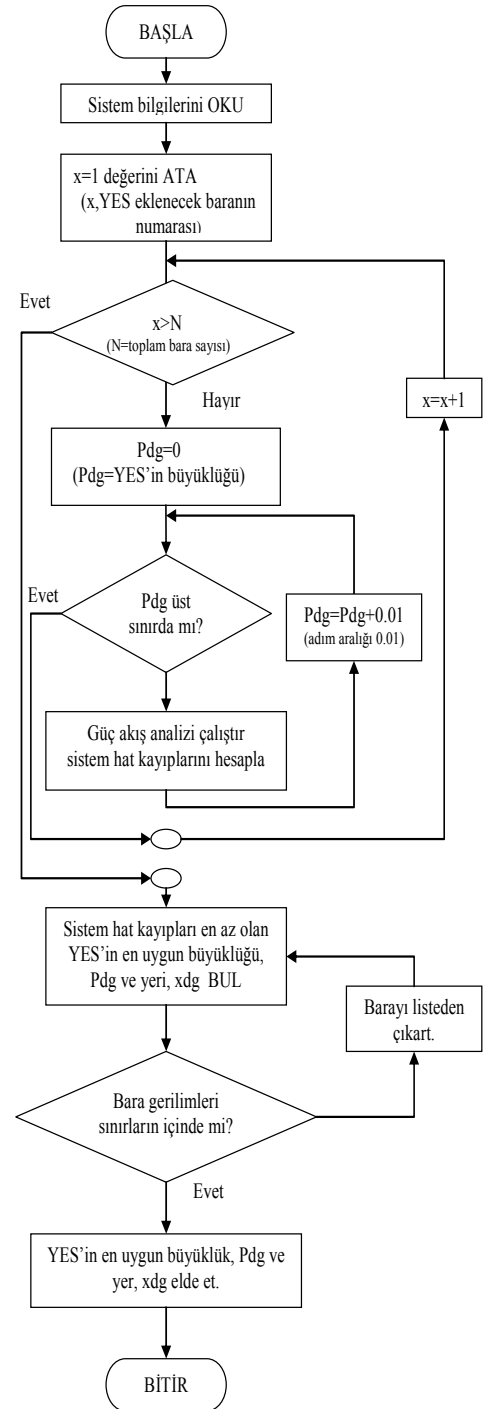
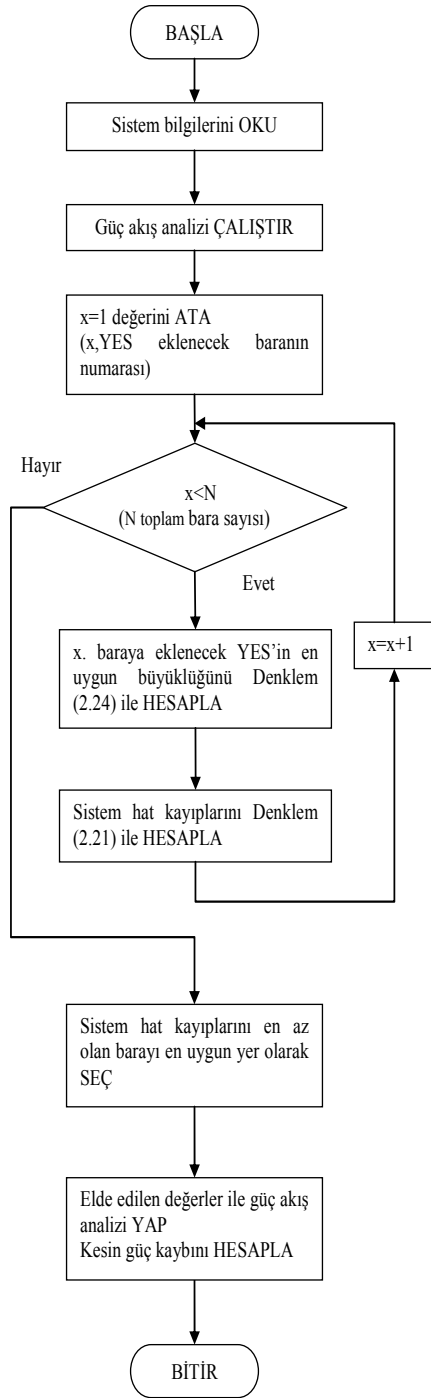
Adım 9. Sistemin ortalama gerilim sapması VDA'yı Denklem (5.10) ile hesapla.

Adım 10. YES'in büyüklüğünü kontrol et. Eğer sınırlar içinde ise YES'in büyüklüğünü 0.01 artır ($P_{dg}=P_{dg}+0.01$) ve Adım 6'ya git.

Adım 11. VDA'sı minimum olan YES büyüklüğünü x . bara için en uygun büyüklük olarak seç.

Adım 12. Bara numarası x 'i kontrol et. Eğer x , n 'ye eşit ($x=n$) değilse x 'in değeri "1" artır ($x=x+1$) ve Adım 3'e git.

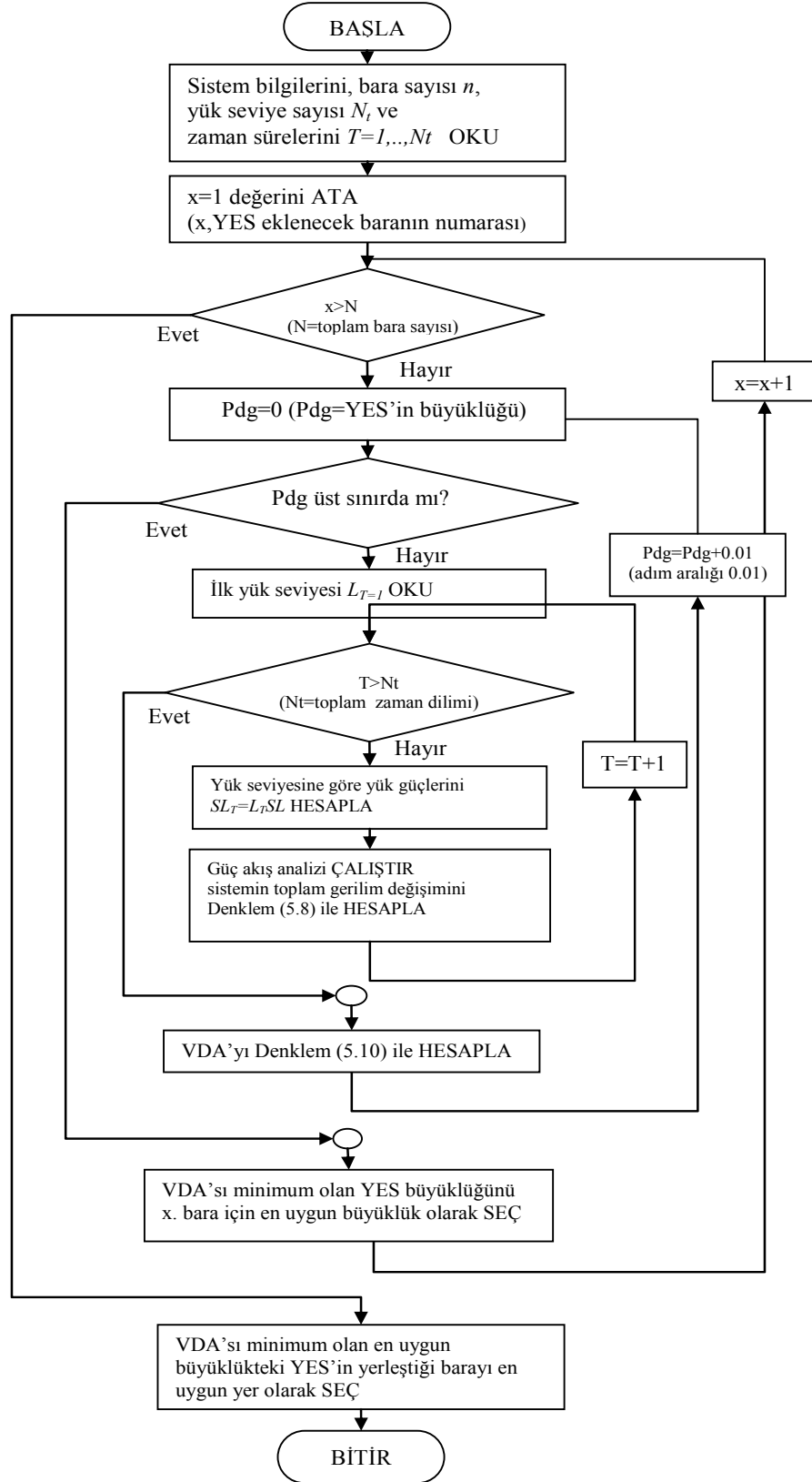
Adım 13. Sistemin ortalama gerilim sapması VDA'yı en aza indiren en uygun büyüklükteki YES'in yerleştiği barayı en uygun yer olarak seç.



Şekil 6.1. YES'in yerleştirilmesine ait metotların akış diyagramları

(a) [13]'te geliştirilen analitik metot

(b) I zgara arama metodu



Şekil 6.2. Gerilim profilini düzeltecek YES'in yerleştirilmesine ait ızgara arama metodun akış diyagramı

6.3. Güç Kayıplarını Azaltmak için Yeni Geliştirilen Analitik Metotların Uygulanması

Bu bölümde, kayıp azaltmak için geliştirilen iki yeni metot çeşitli dağıtım sistemlerine uygulanarak, ızgara arama metodu ve [13]'te geliştirilen analitik metot ile karşılaştırılıp geçerliliği kontrol edilmiştir. Metotların hepsi 12, 30, 33, 69 baralı radyal dağıtım test sistemlerine ve 229 baralı gerçek sisteme uygulanmıştır. Radyal sistemler için geliştirilen yeni metot dışındaki diğer metotlar 30 ve 69 baralı kapalı devreli dağıtım test sistemlerine uygulanmıştır. Bu test sistemlerinden elde edilen sonuçlar ile yeni geliştirilen metotların geçerliliği gösterilmiştir.

Radyal dağıtım test sistemi için güç kayıplarını azaltacak YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü için dört metotla elde edilen sonuçlar

Tablo 6.1'de verilmiştir. Kapalı devreli dağıtım test sistemi için güç kayıplarını azaltacak YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü üç metotla elde edilen sonuçlar Tablo 6.2'de verilmiştir. Tablolarda her metot ile elde edilen YES'in en uygun büyüklüğü ve yeri, eklenmeden önceki ve eklendikten sonraki sistem hat kayıpları ve işlem süresi görülmektedir. Dağıtım test sistemlerin YES ile ve YES'siz güç kaybı ve minimum gerilimleri Tablo 6.3'te gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Radyal dağıtım test sistemlerin güç kaybını azaltacak YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü

Test dağıtım sistemi	Toplam yük [MVA]	Metotlar	En Uygun Yer [bara no]	En uygun büyüklük [MW]	Toplam güç kaybı [MW]	İşlem süresi [saniye]
12 baralı	0,4350 + 0,4050i	1. Yeni Metot	9	0,2272	0,0113	0,0032
		2. Yeni Metot	9	0,2272	0,0113	0,0918
		Acharya'nın Metodu	9	0,2272	0,0113	0,0205
		Izgara Arama Metodu	9	0,2350	0,0108	0,9641
30 baralı	4,4085 + 2,7355i	1. Yeni Metot	21	2,7879	0,0859	0,0174
		2. Yeni Metot	21	2,7879	0,0859	0,1197
		Acharya'nın Metodu	21	2,7880	0,0858	0,0218
		Izgara Arama Metodu	21	2,8585	0,0813	47,4400
33 baralı	3,7150 + 2,3000i	1. Yeni Metot	6	2,4907	0,1186	0,0316
		2. Yeni Metot	6	2,4907	0,1186	0,1392
		Acharya'nın Metodu	6	2,4908	0,1186	0,015
		Izgara Arama Metodu	6	2,6005	0,1110	9,7566
69 baralı	3,8021 + 2,6945i	1. Yeni Metot	61	1,8078	0,0920	0,0858
		2. Yeni Metot	61	1,8078	0,0920	0,1529
		Acharya'nın Metodu	61	1,8078	0,0920	0,1153
		Izgara Arama Metodu	61	1,8630	0,0832	73,2070
229 baralı	0,7900 + 0,4869i	1. Yeni Metot	145	0,6397	0,0159	0,6777
		2. Yeni Metot	145	0,6397	0,0159	0,8559
		Acharya'nın Metodu	145	0,6397	0,0159	1,3224
		Izgara Arama Metodu	145	0,6557	0,0149	1811,1000

Tablo 6.2. Kapalı devreli dağıtım test sistemlerin güç kaybını azaltacak YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü

Test dağıtım sistemi	Toplam yük [MVA]	Metodlar	En Uygun Yer [bara no]	En uygun büyüklük [MW]	Toplam güç kaybı [MW]	İşlem süresi [saniye]
30 baralı kapalı devre	4,4085 + 2,7355i	2. Yeni Metot	12	3,5673	0,0457	0,1466
		Acharya'nın Metodu	12	3,5637	0,0457	0,2851
		Izgara Arama Metodu	12	3,6055	0,0445	49,7640
69 baralı kapalı devre	3,8021 + 2,6945i	2. Yeni Metot	61	1,8250	0,0356	0,2248
		Acharya'nın Metodu	61	1,8250	0,0356	2,7563
		Izgara Arama Metodu	61	1,8461	0,0346	160,6020

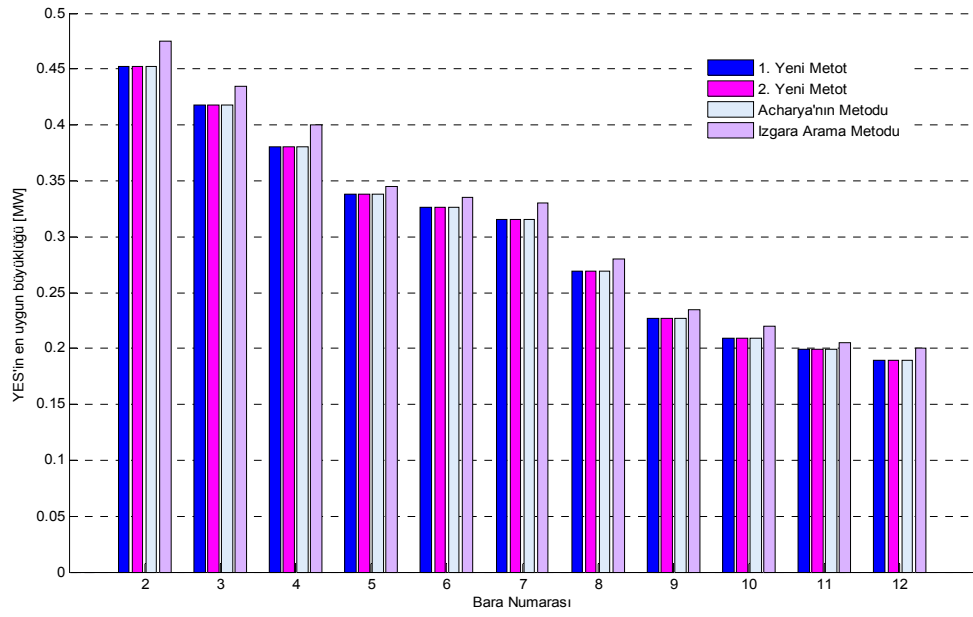
Tablo 6.3. YES'li dağıtım test sistemlerin güç kaybı ve minimum gerilimleri

Test dağıtım sistemi	YES'siz güç kaybı [MW]	YES'li güç kaybı [MW]	% Güç kayıp azalması	YES'siz en az gerilim [pu]	YES'li minimum gerilim [pu]
12 baralı	0,0207	0,0113	45,41%	0,9434	0,9823
30 baralı	0,2002	0,0859	57,09%	0,8825	0,9571
33 baralı	0,2111	0,1186	43,82%	0,9038	0,9410
69 baralı	0,2251	0,0920	59,13%	0,9092	0,9679
229 baralı	0,0430	0,0159	63,02%	0,9159	0,9483
30 baralı kapalı devre	0,1074	0,0457	57,45%	0,9746	0,9887
69 baralı kapalı devre	0,2249	0,0356	84,17%	0,9664	0,9865

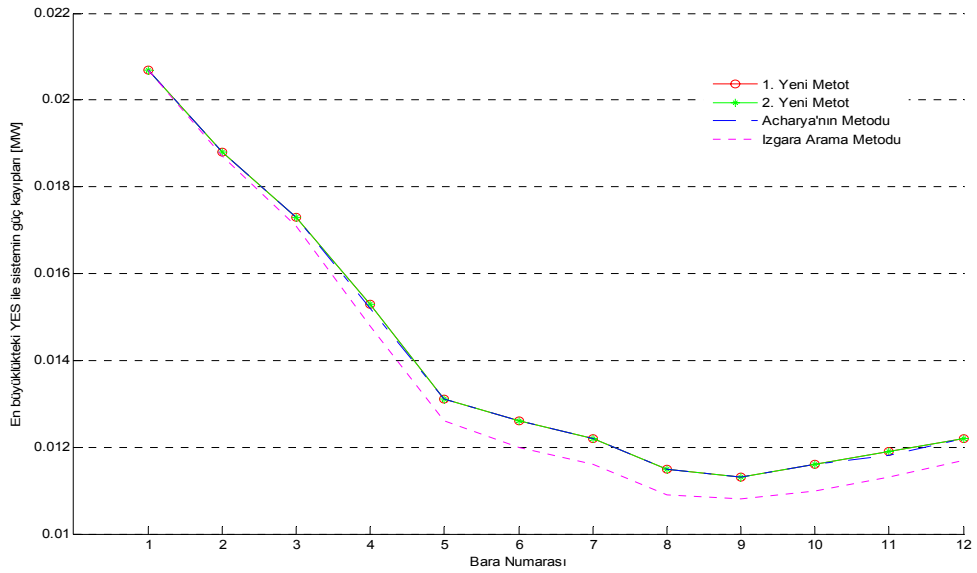
Tablo 6.1 ve Tablo 6.2’den görüldüğü üzere, tüm metotlarla, dağıtım sisteminin güç kayıplarını en aza indirmek için yerleştirilecek YES için en uygun yer olarak aynı sonuçlar elde edilmiştir. Bununla birlikte YES’lerin en uygun büyüklüğü yaklaşık olarak aynı elde edilmiştir. Ayrıca 33 baralı dağıtım sistemi için gerilim kısıdını sağlayan YES için en uygun yer hiçbir metot tarafından bulunamamıştır. Metotlarda gerilim kısıdı ihmal edildiğinde 6. bara, en uygun yer olarak tüm metotlar tarafından bulunmuştur. Metotları işlem süresine göre değerlendirildiğinde zaman alan metot ızgara arama metodu olup sistem büyüdükçe ızgara arama metodu daha uzun sürede sonuç vermiştir. Acharya ve arkadaşlarının geliştirdiği metotla yeni geliştirilen iki metodun işlem süresi oldukça küçük olduğu ve yeni geliştirilen birinci metodun işlem süresinin diğerlerine göre daha az olduğu görülmektedir. Büyük sistemlerde ve kapalı devreli sistemlerde Acharya’nın metodunun yeni geliştirilen metotlara göre işlem süresinin artmasının ana sebebi ikinci güç akış analizidir.

Tablo 6.3’te test sistemlerine YES eklendikten sonra güç kayıplarında %44 ile %84 arasında değişen oranda azalma olduğu görülmektedir. Uygun yer ve büyüklükteki YES’in tüm test sistemlerinin güç kayıplarını ortalama % 58 civarında azaltmaktadır. 30 baralı, 69 baralı test sistemlerinde YES, asgari gerilimi önemli ölçüde yükseltmektedir. 12 baralı, 30 baralı kapalı devre ve 69 baralı kapalı devre test sistemlerinde ise asgari gerilimi çok az etkilemektedir. Test sistemine eklenen YES, sistemin güç kayıplarını önemli ölçüde azalttığı gibi sistemin regülasyonunu düzeltici yönde etki yapmaktadır.

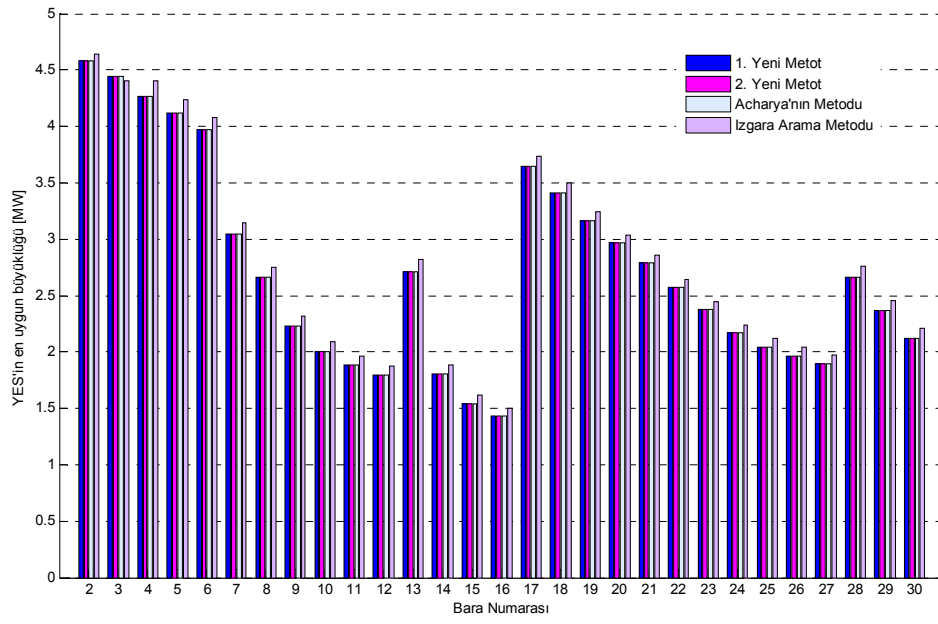
12 ve 30 baralı radyal dağıtım test sistemi için dört metotla her bir bara için elde edilen en uygun büyüklük Şekil 6.3 ve Şekil 6.5’te gösterilmiştir. Her bir bara için elde edilen YES’in en uygun büyüklüğü ile hesaplanan sistem güç kayıpları Şekil 6.4 ve Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Diğer test sistemleri için tüm metotlarla elde edilen YES’in en uygun büyüklükleri ve sistem güç kayıpları sırasıyla Şekil 6.7’den Şekil 6.11’e kadar gösterilmiştir.



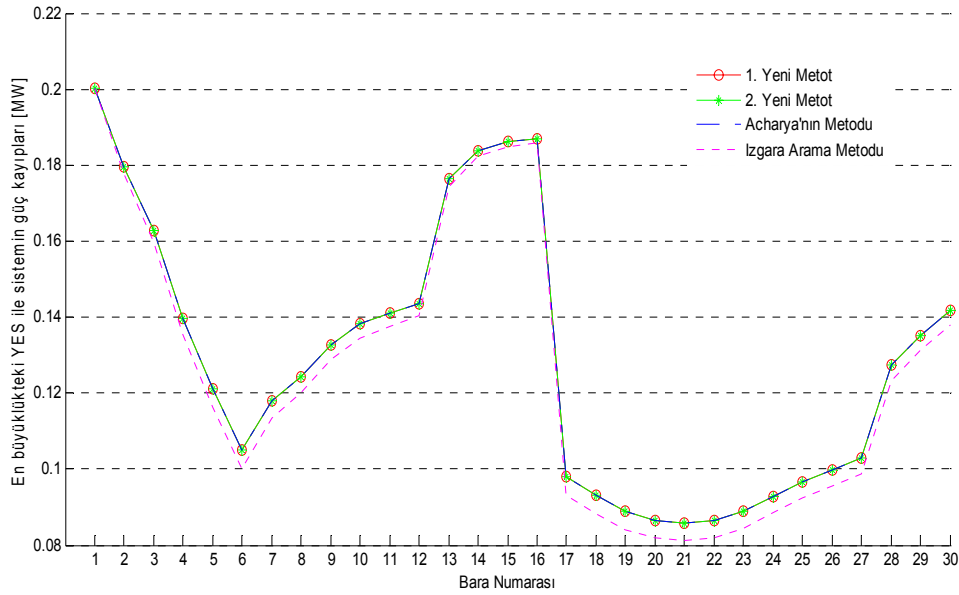
Şekil 6.3. 12 baralı radyal test sistemin güç kaybını azaltacak YES'in her bir bara için hesaplanan en uygun büyüklüğü



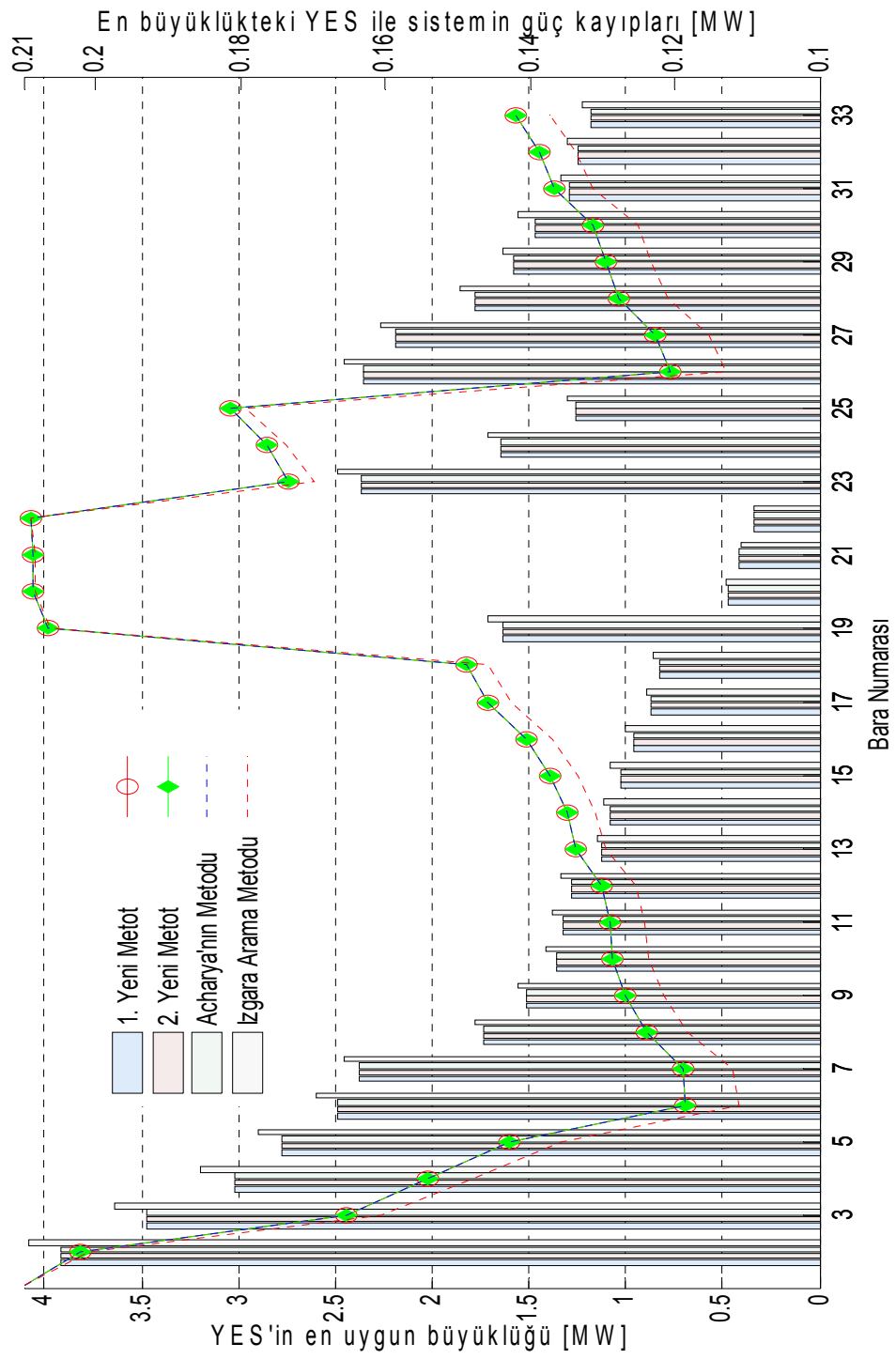
Şekil 6.4. 12 baralı radyal test sistemin her bir barasına eklenecek en uygun büyüklükteki YES ile sistemin güç kaybı



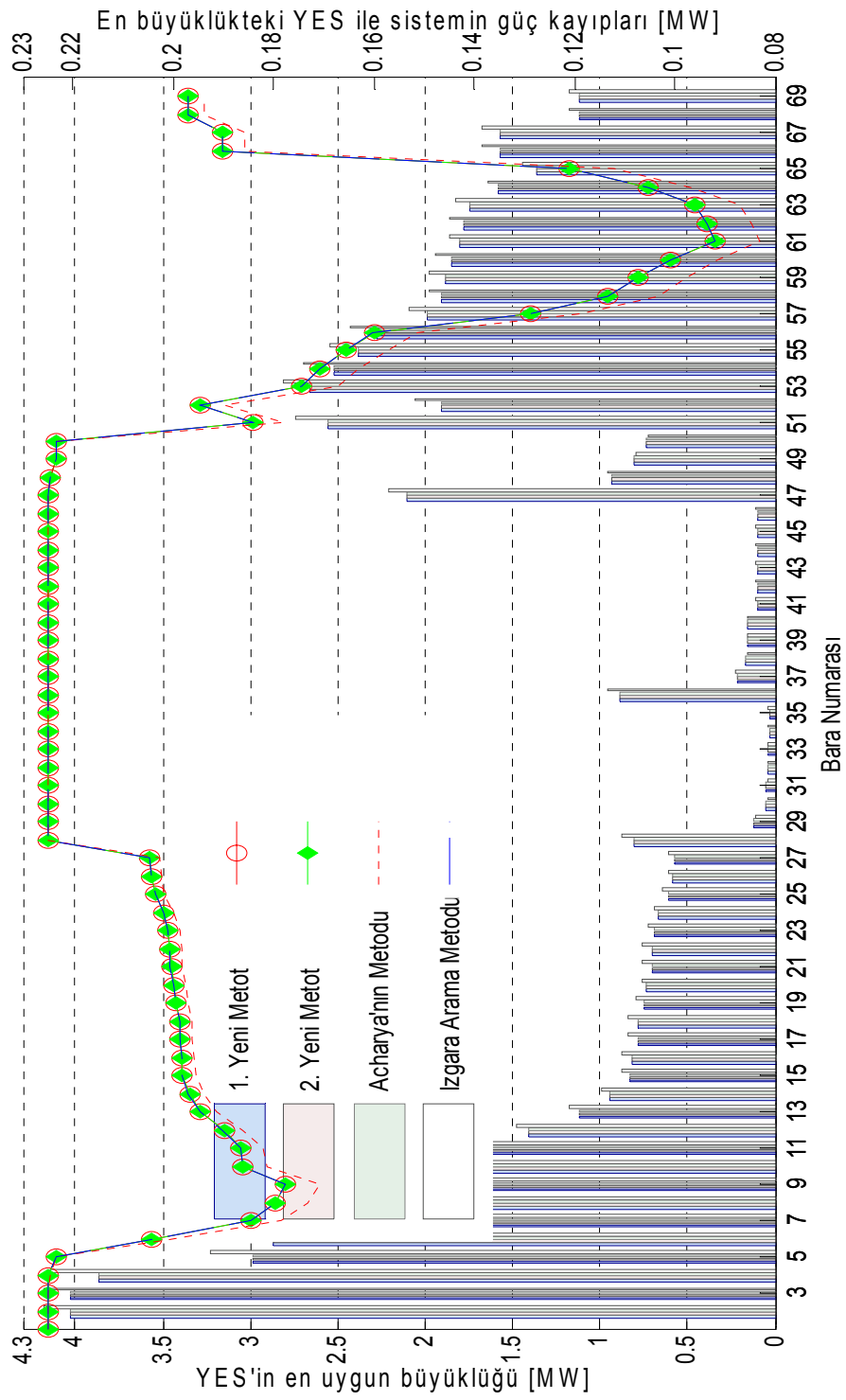
Şekil 6.5. 30 baralı radyal test sistemin güç kaybını azaltacak YES'in her bir bara için hesaplanan en uygun büyüklüğü



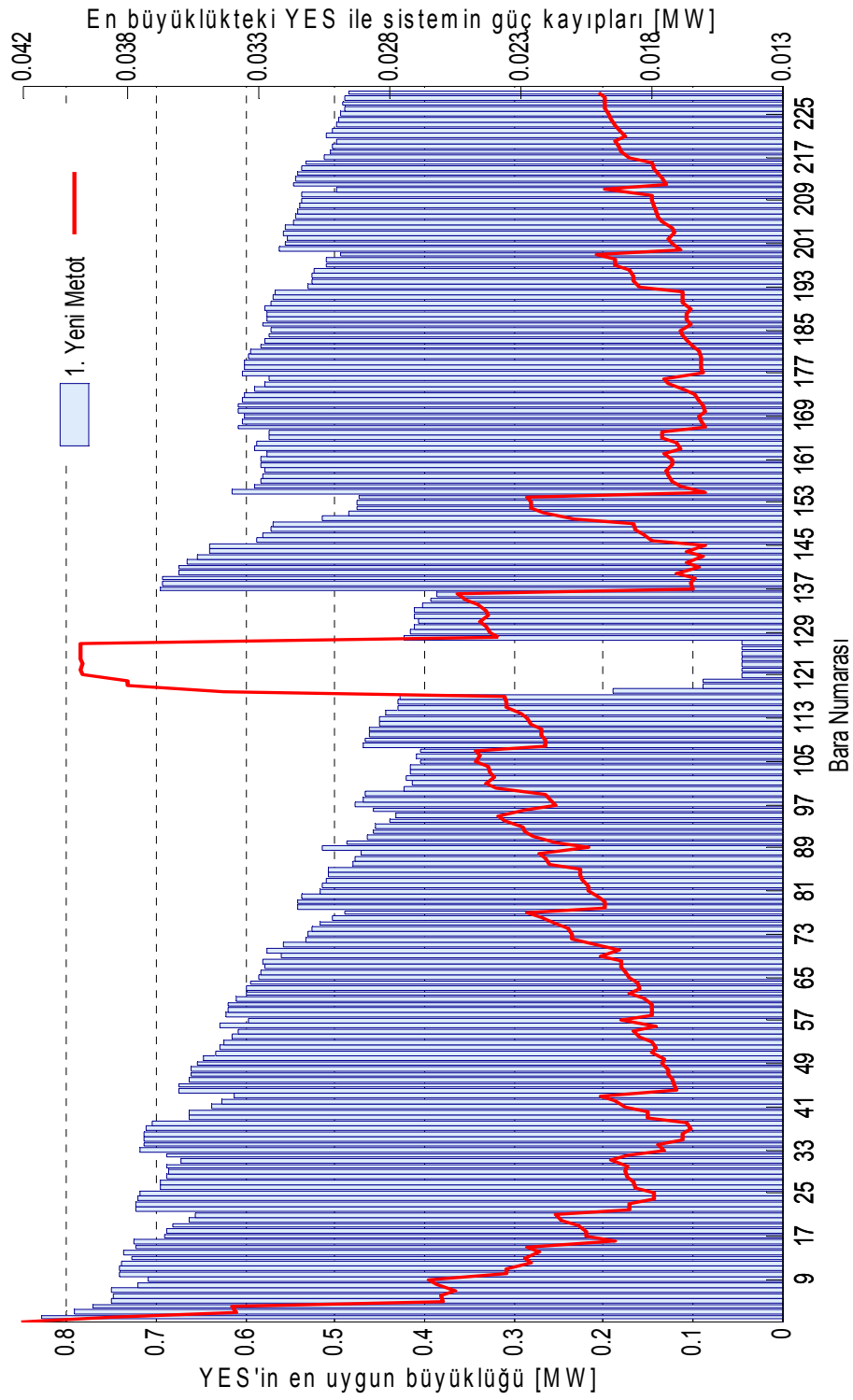
Şekil 6.6. 30 baralı radyal test sisteminin her bir barasına eklenecek en uygun büyüklükteki YES ile sistemin güç kaybı



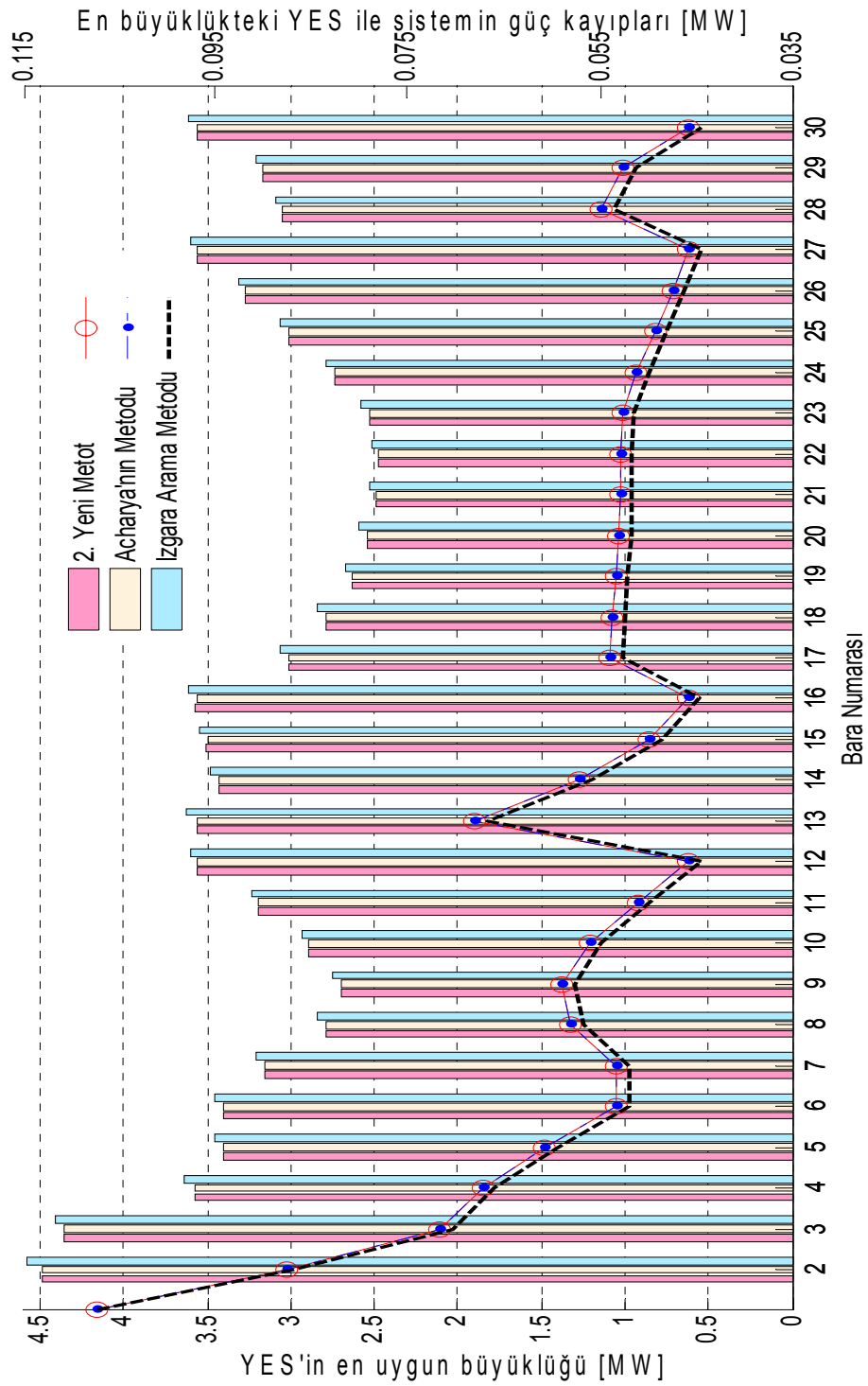
Şekil 6.7. 33 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin güç kaybı



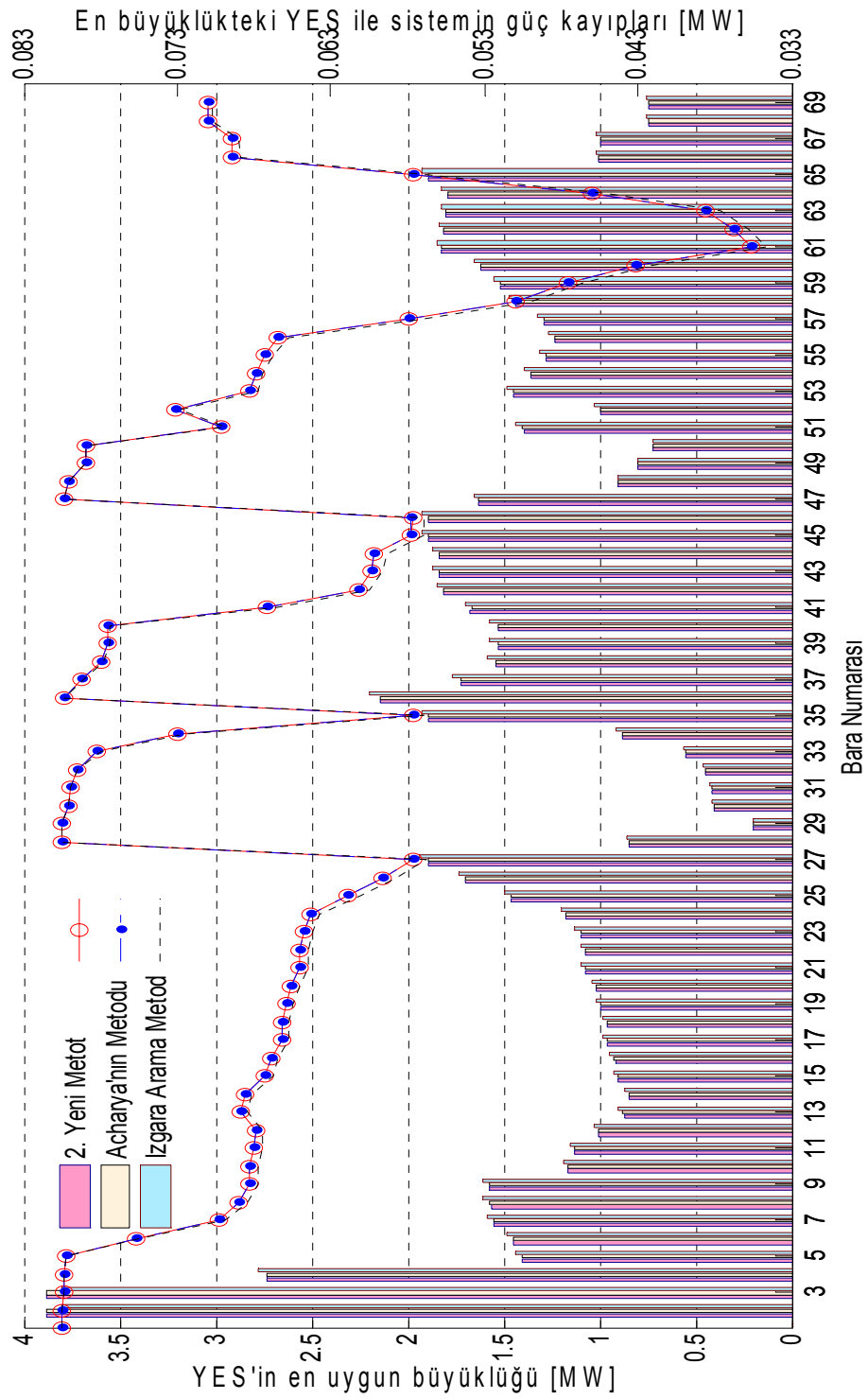
Şekil 6.8. 69 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin güç kaybı



Şekil 6.9. 229 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin güç kaybı



Şekil 6.10. 30 baralı kapalı devreli dağıtım test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin güç kaybı



Şekil 6.11. 69 baralı kapalı devreli dağıtım test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin güç kaybı

Şekil 6.3 ve Şekil 6.5' ten de görüldüğü üzere her bir bara için dört metotla elde edilen YES'in en uygun büyüklük değerleri kendi aralarında uyum içindedir. 12 baralı ve 30 baralı test sisteminde yeni geliştirilen iki metotla Acharya ve arkadaşların geliştirdiği metodun elde ettiği değerler aynı olup; ızgara arama metodu ile aralarındaki fark 12 baralı test sistemi için 0,022MW, 30 baralı test sistemi için 0.1431MW'tır. Sistemlerin toplam gücüne göre bu fark çok küçüktür.

Şekil 6.4 ve Şekil 6.6 incelendiğinde ızgara arama metodu dışındaki tüm metotların sistem güç kayıp değerlerinin uyum içinde olduğu, bu metotlar ile ızgara arama metodu arasında bazı sapmaların bulunduğu görülmektedir. 12 baralı test sisteminde hat başlarına YES eklendiği zaman güç kaybı 0,020MW civarında, hat sonuna doğru YES eklendiği zaman güç kaybı 0.011MW civarında olmaktadır. Hat sonuna eklenen YES ile güç kaybı, yaklaşık olarak %45 azalmaktadır. 12 baralı test sisteminde metotlar arası en fazla sapma 0,6kW'tır ve kaybın önemli ölçüde azaldığı noktalarda oluşmaktadır. 30 baralı test sisteminde de kayıp 0,2MW'tan 0,08MW'a kadar düşmektedir. Metotlar arasındaki sapmada en fazla 0,0046MW'tır. 12 baralı test sisteminde olduğu gibi 30 baralı sisteminde de metotlar arası sapmanın, kaybın azaldığı noktalarda arttığı görülmektedir. Bu sapmalar, her üç metotta yaklaşık sistem hat kayıpları hesaplandığı için oluşmaktadır. Ayrıca üç metotta da hemen hemen aynı değerlerin hesaplanmasının sebebi metotların aynı esasa dayanarak elde edilmesinden kaynaklanmaktadır. İki test sisteminde de YES'in en uygun büyüklüğün her bara için farklı olduğu ve her bir barada farklı oranda güç kaybını azalttığı görülmektedir.

33 ve 69 baralı test sistemleri için Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de, dört metotla elde edilen YES'in her bir bara için en uygun büyüklüğü ve YES ile güç kaybı gösterilmiştir. 229 baralı radyal sistemin büyük bir sistem olmasından dolayı sadece geliştirilen birinci metotla elde edilen sonuçlar Şekil 6.9'da gösterilmiştir. Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de 30 ve 69 baralı kapalı devreli dağıtım sistemin sonuçları görülmektedir. Tüm test sistemleri için gösterilen şekillerde benzer sonuçlar bulunmaktadır. Yeni geliştirilen iki metotla Acharya ve arkadaşlarının geliştirdiği metodun sonuçları uyum içinde ve ızgara arama metodunun sonuçları arasındaki farkında kabul edilebilir sayelerde olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla tablolardan ve şekillerden yedi test sistemi ile kontrol edilen yeni geliştirilen iki metot; ızgara arama ve Acharya ve arkadaşların geliştirdiği metotla da karşılaştırıldığında yeni geliştirilen iki metodun geçerliliği görülmektedir.

6.4. Gerilim Profilini Düzeltmek için Yeni Geliştirilen Analitik Metodun Uygulanması

Dağıtım sistemleri için gerilim profilini düzeltecek YES'in yerleşimini zamanla değişen yükleri dikkate alarak belirleyen yeni analitik metot geliştirilmişti. Bu bölümde, geliştirilen yeni metot çeşitli dağıtım sistemlerine uygulanarak, ızgara arama metodu ile karşılaştırılıp geçerliliği kontrol edilmiştir. Metotlar, 12, 30, 33, 69 ve 229 baralı radyal dağıtım test sistemlerine uygulanmıştır. Test sistemleri ile ilgili sistem bilgileri ve yük süre bilgileri Ek bölümünde verilmiştir.

Gerilim profilini düzeltmek amacıyla zamanla değişen yükler ile dağıtım test sistemlerine yerleştirilen YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü iki metotla elde edilmiştir. Tablo 6.4'te test sistemlerin temel durumdaki toplam yükü, iki metot ile elde edilen YES'in en uygun büyüklüğü ve yeri, sistemin ortalama gerilim sapması, VDA ve işlem süresi verilmiştir. Ayrıca Tablo 6.5'te en uygun büyüklükteki YES'in en uygun yere eklenmeden önceki ve eklendikten sonraki sistemin VDA'sı, VDA yüzdesi gösterilmiştir. Bununla birlikte temel durumdaki YES eklenmeden önceki ve sonraki güç kayıpları, güç kayıp yüzdesi, minimum bara gerilimleri de verilmiştir.

Tablo 6.4. Dağıtım test sistemlerin gerilim profilini düzeltecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğü

Test dağıtım sistemi	Toplam yük (temel durumda) [MVA]	Metotlar	En uygun Yer [barano]	En uygun büyüklük [MW]	Ortalama gerilim sapması (VDA)	İşlem süresi [saniye]
12 baralı	0,4350 + 0,4050i	3. Yeni Metot	9	0,1752	0,0041	0,2169
		Izgara Arama Metodu	9	0,1850	0,0041	4,0560
30 baralı	4,4085 + 2,7355i	3. Yeni Metot	20	2,4595	0,0057	0,2492
		Izgara Arama Metodu	20	2,4685	0,0057	141,1180
33 baralı	3,7150 + 2,3000i	3. Yeni Metot	5	3,6301	0,0155	0,2555
		Izgara Arama Metodu	5	3,7150	0,0167	144,6750
69 baralı	3,8021 + 2,6945i	3. Yeni Metot	61	1,8936	0,0167	0,4233
		Izgara Arama Metodu	61	1,8061	0,0167	442,8520
229 baralı	0,7900 + 0,4869i	3. Yeni Metot	8	0,7894	0,0656	5,5000
		Izgara Arama Metodu	11	0,7900	0,0646	3928,7000

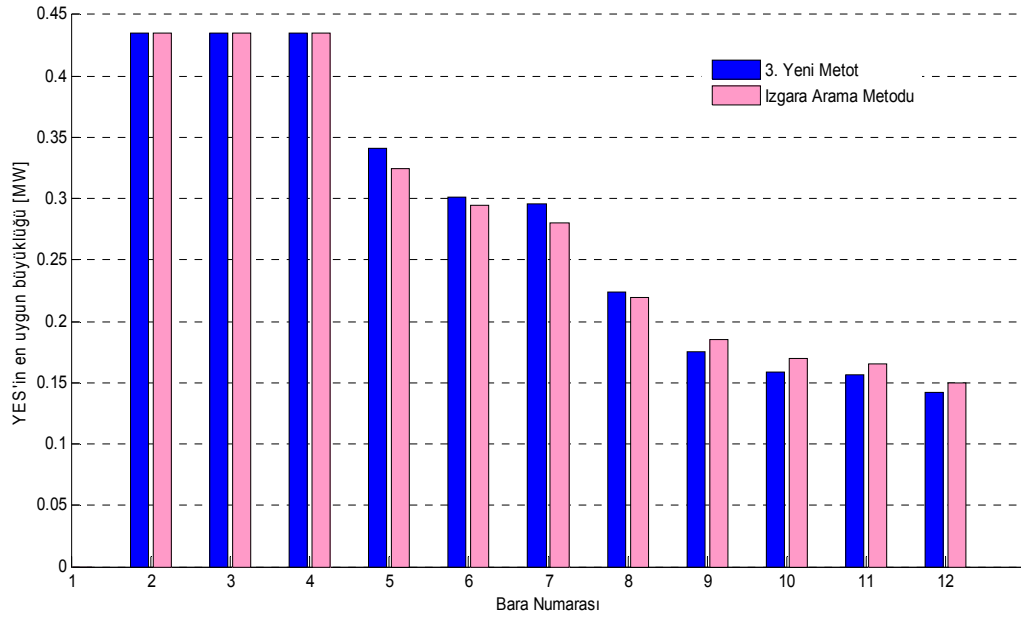
Tablo 6.5. YES'li dağıtım test sistemlerin VDA, güç kaybı, minimum ve maksimum gerilimleri

Test dağıtım sistemi	YES'siz VDA	YES'li VDA	% VDA azalması	YES'siz güç kaybı [MW]	YES'li güç kaybı [MW]	% Güç kaybı azalması	YES'siz Vmin [pu]	YES'li Vmin [pu]
12 baralı	0,0087	0,0041	52,87%	0,0207	0,0114	45,07%	0,9434	0,9737
30 baralı	0,0170	0,0057	66,47%	0,2002	0,0860	57,04%	0,8825	0,9740
33 baralı	0,0552	0,0155	71,92%	0,2111	0,1402	33,59%	0,9038	0,9370
69 baralı	0,0423	0,0167	60,52%	0,2251	0,0842	62,58%	0,9092	0,9684
229 baralı	0,2488	0,0656	73,63%	0,0430	0,0251	41,74%	0,9159	0,9412

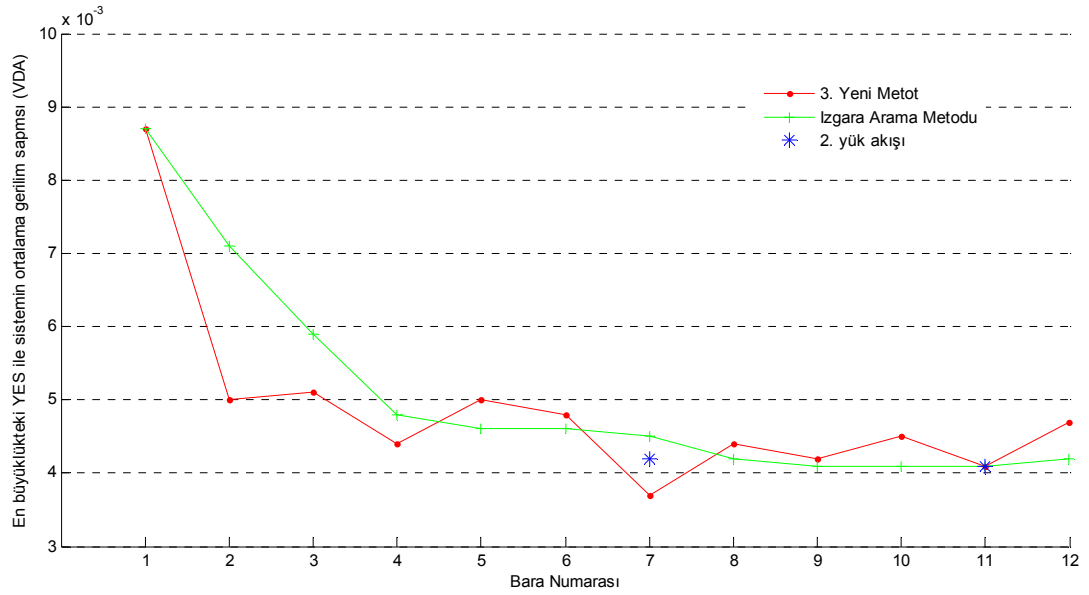
Tablo 6.4 'ten test sistemlerin 229 baralı test sistemi hariç diğer test sistemlerin yeni geliştirilen 3. metot ve ızgara arama metodu ile elde edilen YES'in en uygun yeri ve büyüklük sonuçları birbiriyle uyduğu görülmektedir. Her iki metotta gerilim profilini düzeltmek için eklenecek YES için en uygun yeri 12, 30, 33 ve 69 baralı radyal sistemler için sırasıyla 9., 20., 5., ve 61. bara olarak aynı sonuçları bulmuştur. Yeni geliştirilen 3. metot ve ızgara arama metodu ile elde edilen YES'in en uygun büyüklük değerleri yaklaşık olarak aynıdır. 12 baralı test sistemini ızgara arama metodun işlem süresi, geliştirilen 3. metodun işlem süresinin 18 katı iken 229 baralı test sisteminde ise işlem süresi 714 katıdır. yeni geliştirilen 3. metodun işlem süresi, ızgara arama metoduna göre oldukça kısa olduğu görülmektedir.

Tablo 6.5'te test sistemlerin özelliklerine göre YES sistemin ortalama gerilim sapmasını ve güç kayıplarını azalttığı görülmüştür. Test sistemlerine YES eklendikten sonra sistemlerin gerilim profilini ortalama olarak %65 düzelttiği, % 48 güç kayıplarını azalttığı tespit edilmiştir.

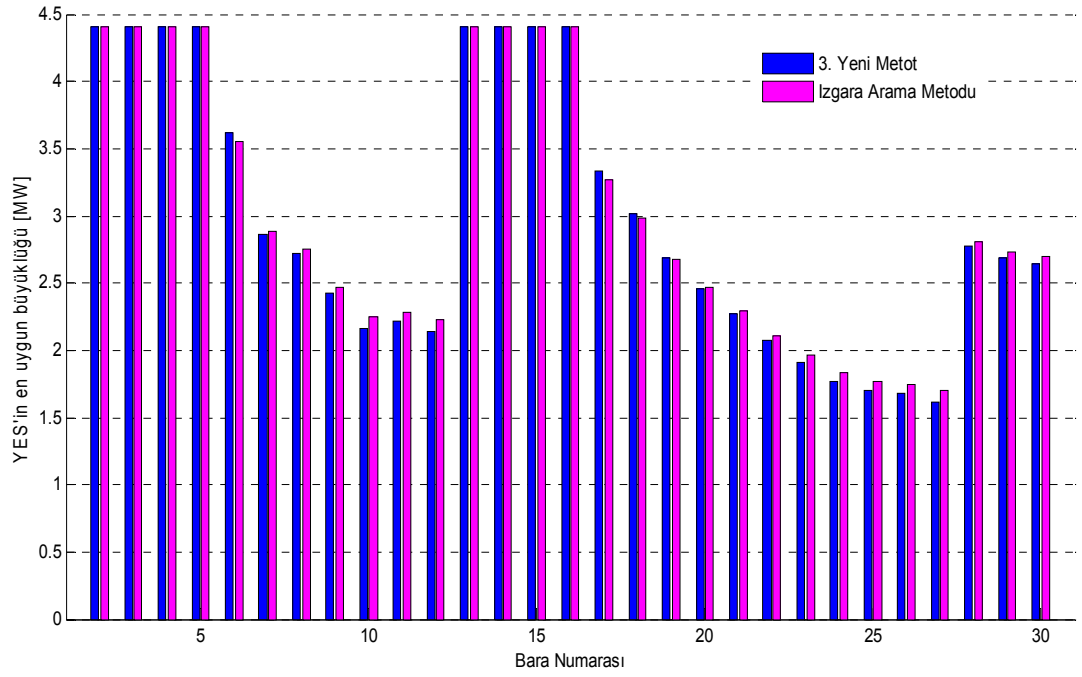
12 ve 30 baralı radyal dağıtım test sistemi için yeni geliştirilen 3. metot ile ızgara arama metodu ile elde edilen gerilim profilini düzeltecek YES'in her bir bara için en uygun büyüklük Şekil 6.12 ve Şekil 6.14'te gösterilmiştir. Elde edilen en uygun büyüklükteki YES sistemlere eklendiğinde sistemin ortalama gerilim sapmasını veren VDA indeksi Şekil 6.13 ve Şekil 6.15'te gösterilmiştir.



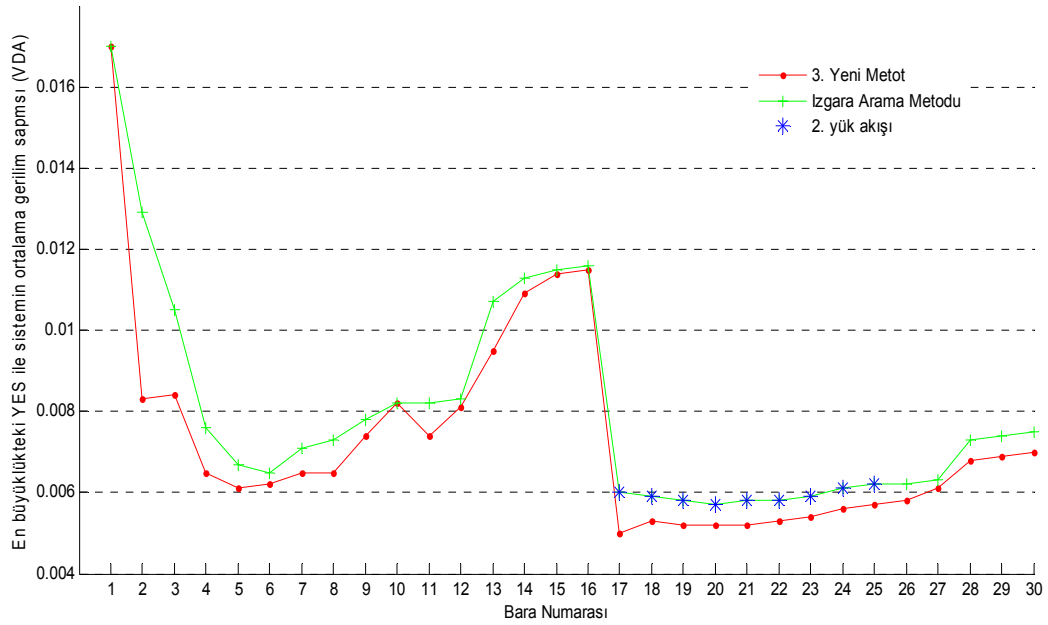
Şekil 6.12. 12 baralı radyal test sistemin gerilim profilini düzeltecek YES'in her bir bara için hesaplanan en uygun büyüklüğü



Şekil 6.13. 12 baralı radyal test sistemin her bir barasına eklenecek en uygun büyüklükteki YES ile sistemin ortalama gerilim sapması



Şekil 6.14. 30 baralı radyal test sistemin gerilim profilini düzletecek YES'in her bir bara için hesaplanan en uygun büyüklüğü



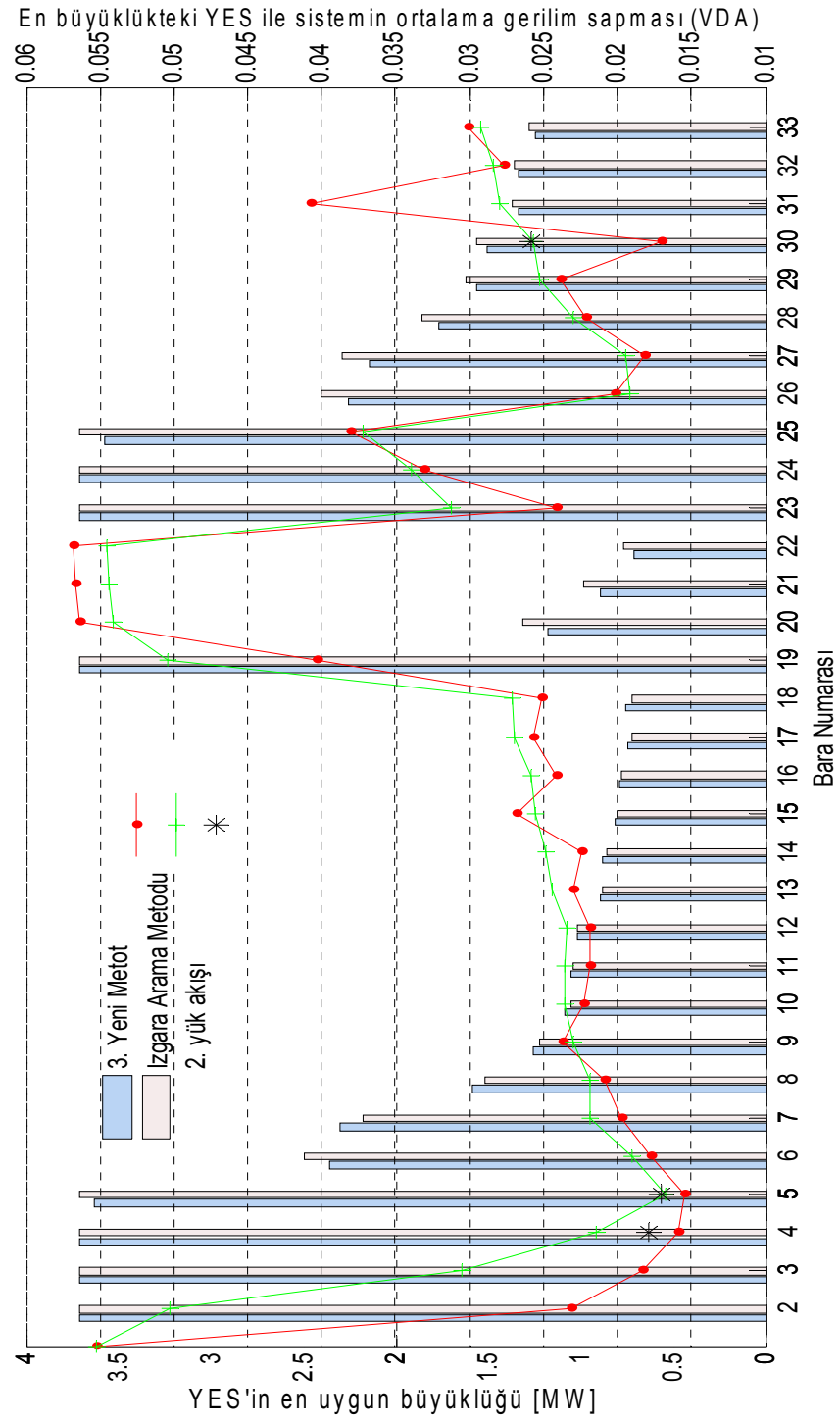
Şekil 6.15. 30 baralı radyal test sistemin her bir barasına eklenecek en uygun büyüklükteki YES ile sistemin ortalama gerilim sapması

Şekil 6.12 ve Şekil 6.14'te görüldüğü gibi her bir baraya eklenen YES'in en uygun büyüklüğü farklıdır. Yeni geliştirilen 3. metot ve ızgara arama metodu ile elde edilen sonuçlar uyum içindedir. 12 baralı sistemde 2. bara, 30 baralı sistemde 2. ve 3. bara gibi bazı baralara eklenen YES'in büyüklüğü, YES'in en uygun büyüklüğünü veren analitik ifade ile hesaplanan değer oldukça yüksektir. Bu baralara eklenen YES'in büyüklüğünü, yeni geliştirilen 3. metot toplam aktif yük değerine eşitlemiştir. YES büyüklüğü yüksek bulunan bu baralar genellikle hat başında bulunan baralar olup gerilim profilini düzeltmek için uygun çözüm adayı olmayan baralardır.

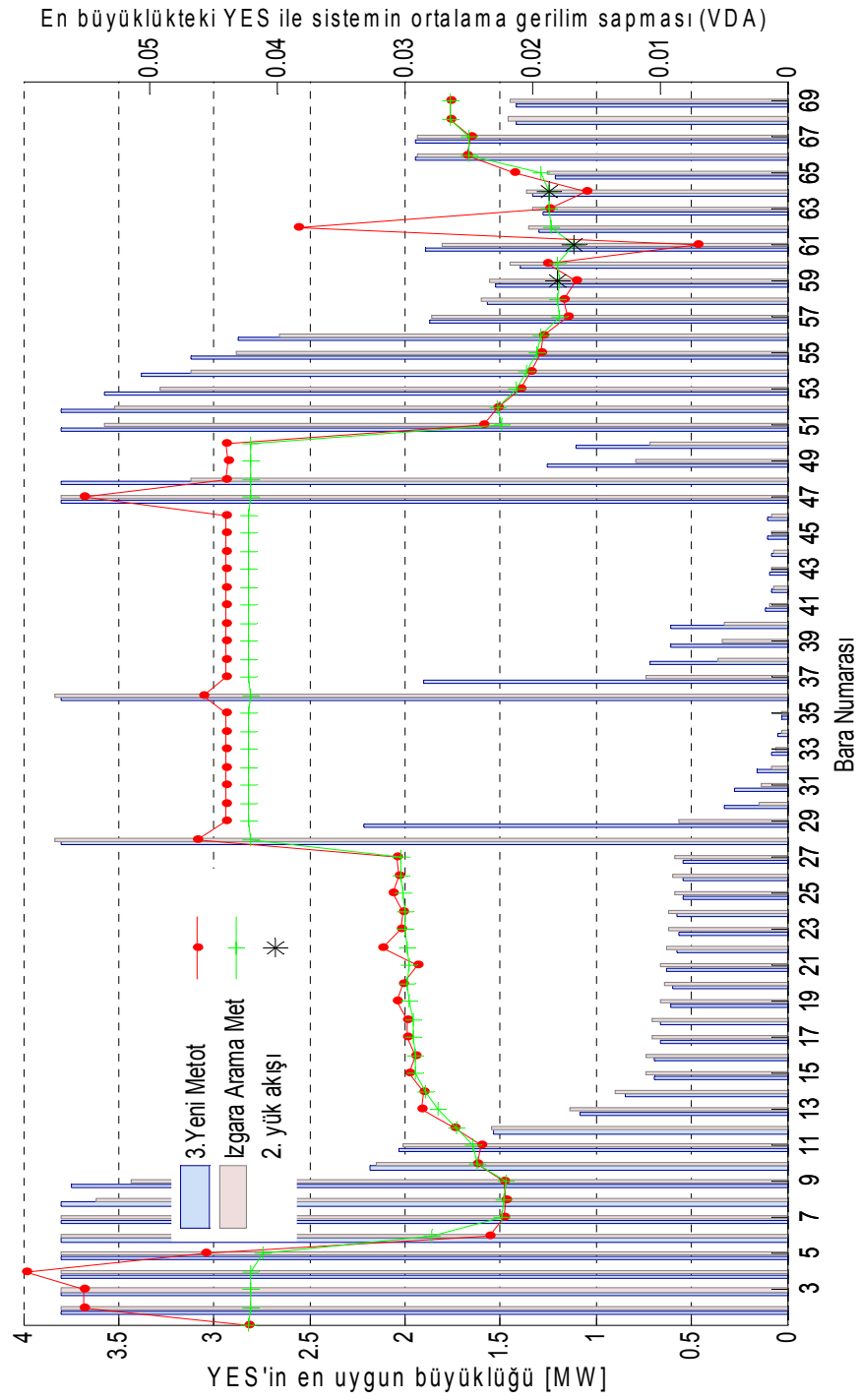
Şekil 6.13 ve Şekil 6.15'te ızgara arama metodun VDA indeks sonuçları ve yeni geliştirilen 3. metot ile hesaplanan VDA indeks sonuçları görülmektedir. Ayrıca yeni geliştirilen 3. metotta minimum VDA'yı bulmak için yapılan ikinci güç akış analizi ile elde edilen kesin sonuç da yıldız biçiminde şekillerde belirtilmektedir. Yeni geliştirilen 3. metot ile ızgara arama metodun elde ettiği VDA indeksleri arasında bazı baralarda belirgin bir farklılık bulunmaktadır. Örneğin 12 baralı sistemde 7. barada, 30 baralı sistemde 8., 11. ve 17. baralarda fark fazladır. Sistem bilgileri ayrıntılı incelendiğinde, bu baraların hat başına yakın, yükünün fazla olduğu veya yüklü baralara yakın olduğu görülmektedir. Bu yüzden bu baralardaki yüklenmenin azalması gerilim değişimine sebep olmaktadır. Bu baralara YES eklendikten sonra gerilim değişimi büyük olduğu için sonuçlar arasında fark oluşmaktadır.

Şekil 6.13 ve Şekil 6.15'te 12 ve 30 baralı sistemlerde çeşitli baralarda görülen yıldızlar, minimum VDA elde edilirken hesaplanan kesin VDA'ları göstermektedir. Şöyle ki, 12 baralı sistemde YES'in en uygun yerini elde ederken yeni geliştirilen 3. metotta, ilk olarak 7. barayı VDA'sı minimum olan bara olarak tespit edilmiş, güç akış analizi ile kesin VDA hesaplanmıştır. Tekrar minimum VDA'ya bakılarak 11. bara tespit edilmiş, kesin VDA hesaplanmış ve minimum VDA'yı veren 11. bara en uygun bara olarak elde edilmiştir.

33, 69 ve 229 baralı radyal test sistemleri için her iki metotla elde edilen YES'in en uygun büyüklükleri ve sistemin VDA indeksi Şekil 6.16, Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de gösterilmiştir.



Şekil 6.16. 33 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin ortalama gerilim sapması

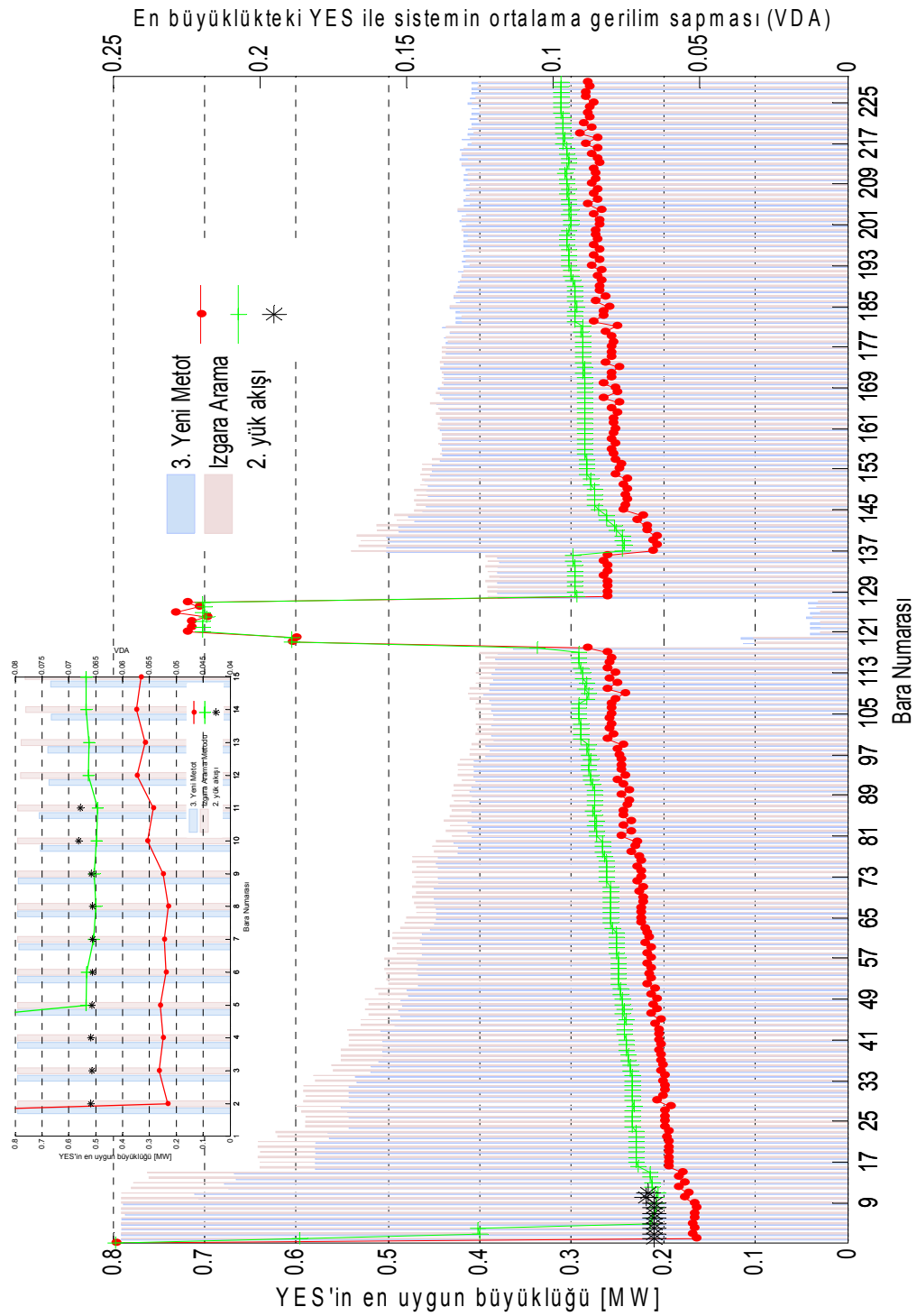


Şekil 6.17. 69 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin ortalama gerilim sapması

Şekillerden görüldüğü üzere 12 baralı ve 30 baralı test sistemlerinde olduğu gibi her iki metotla, 33 ve 69 baralı test sistemlerin YES'in en uygun büyüklüğü yaklaşık olarak aynı değerler elde edilmiştir. Diğer test sistemlerinde olduğu gibi yeni geliştirilen 3. metodun VDA indekslerinde ızgara arama metoduna göre bazı baralarda sapmalar görülmüştür. Şekil 6.16'daki VDA indeks eğrisinde 33 baralı test sisteminin 14., 23., 30. ve 31. bara gibi bazı baralarda sıçrama oluşmuştur. Sistem bilgilerinden 14. baranın aktif yük gücü, 30. baranın aktif ve reaktif yük gücü yüksek olduğu; 23. baranın hat başına yakın bir baraya bağlı olduğu ve 31. baranın yüklü baraya yakın olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 6.17'de de 69 baralı test sisteminin 21., 28., 36., 47., 61. ve 62. baralarda VDA indeksinde sapma vardır. Sistem bilgilerine bakıldığında, 21. ve 61. baranın yükünün yüksek olduğu 28., 36. ve 47. baraların hat başına yakın olduğu ve 62. baranın yüklü baranın yanında olduğu görülmüştür. 33 ve 69 baralı test sisteminde yeni geliştirilen 3. metodun en uygun yeri, üç kesin VDA hesapladıktan sonra bulunduğu gösterilmiştir.

229 baralı test sistemin her iki metotla elde edilen en uygun YES büyüklüğü ve VDA indeksi Şekil 6.18'de gösterilmiştir. Şekil 6.18'den yeni geliştirilen 3. metotla ızgara arama metot sonuçların uyumlu olduğu fakat hem YES büyüklüğünde hem de VDA indeksinde metotlar arasında farkın büyük olduğu görülmektedir. Yeni geliştirilen 3. metotla en uygun yer tespit edilirken kesin VDA hesaplamaları yapılan baraları incelemek için şekilde verilen inset ile yakınlaştırılmıştır. Yakınlaştırılan şekilden 5. bara ile 15. bara arasındaki VDA indeks değerinin değişiminin çok küçük olduğu ve 8. bara ile 11. baraya yerleştirilecek YES'in hemen hemen aynı ölçüde gerilim profilini düzelttiği görülmektedir. Geliştirilen metodun ızgara arama metodu ile aynı sonucu bulamamasında 229 baralı test sistemin büyük olduğu kadar $0,7900 + 0,4869i$ MVA olan toplam yükün küçük olması ve özellikle de YES için en uygun yerin hat başına yakın olması en önemli sebepleridir.



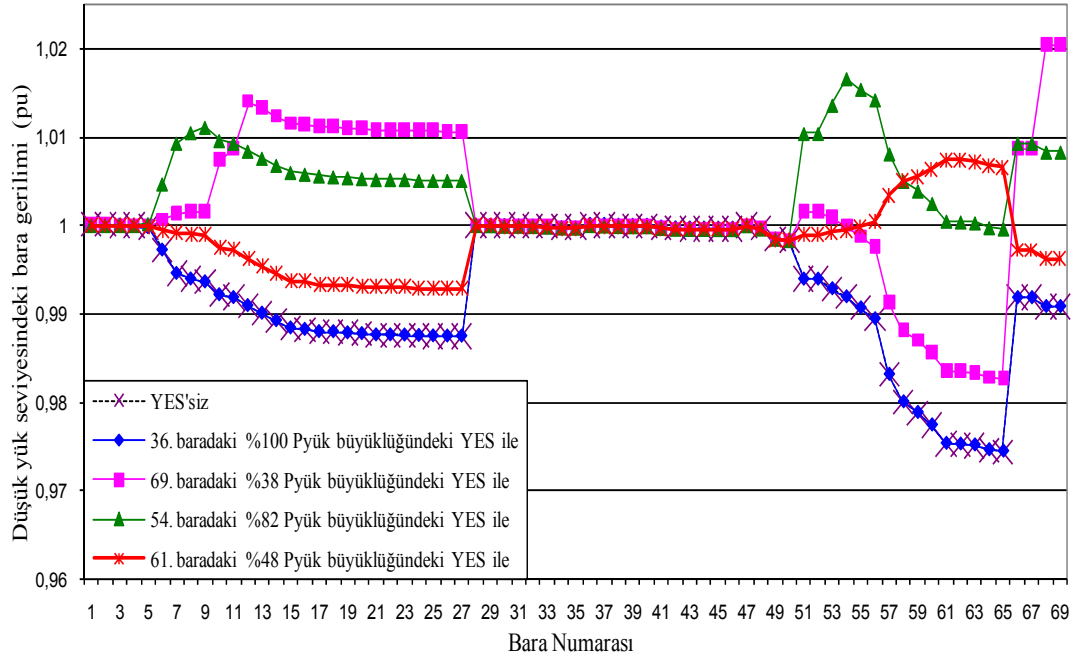
Şekil 6.18. 229 baralı radyal test sistemi için YES'in en uygun büyüklüğü ve sistemin ortalama gerilim sapması

Yeni geliştirilen 3. metotla her bir bara için YES'in en uygun büyüklüğü kolayca elde edilmektedir ve sistemin gerilim profili hakkında bilgi vermektedir. Bu durum, Tablo 6.6'da 69 baralı radyal test sistemin çeşitli baralarına yerleştirilen YES'in gerilim profilini ne ölçüde etkilediği görülmektedir. Tabloda 69 baralı test sistemin çeşitli baralara yerleştirilen YES'in büyüklüğünün toplam yüke göre yüzdesi ve ortalama gerilim sapma yüzdesi, %VDA gösterilmiştir.

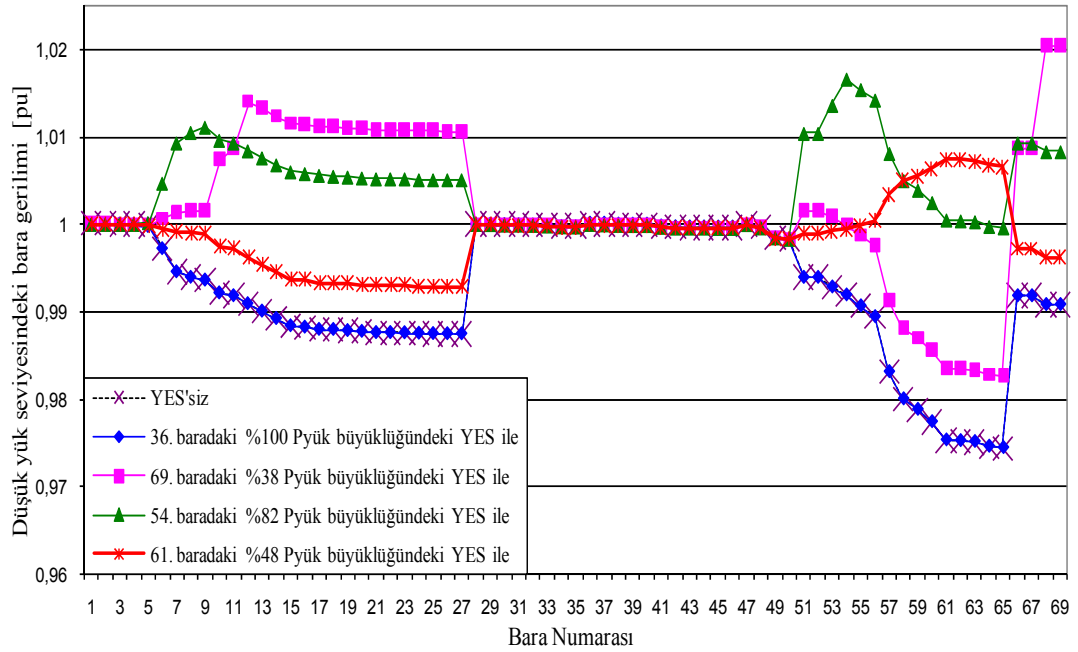
Tablo 6.6. 69 baralı test sisteminin bazı baralara yerleştirilen YES'in en uygun büyüklüğü ve %VDA

YES'in yerleştirildiği bara no	YES büyüklüğü [MW]	YES büyüklüğü (Toplam yüke göre yüzdesi)	Ortalama gerilim sapma yüzdesi (%VDA)
36	3,0821	%100	%100
69	1,4448	%38	%63
54	3,1170	%82	%48
61	1,8061	%48	%39

36. baraya yerleştirilen YES'in gerilim profiline etkisine bakarak en uygun büyüklükteki YES'in her zaman sistem gerilim profilini düzeltemediği, en uygun yerin elde edilmesinin önemli olduğu görülmektedir. Ayrıca 69 baralı radyal sistemin düşük ve yüksek yük seviyesindeki gerilim profili Şekil 6.19 ve Şekil 6.20'de gösterilmiştir.



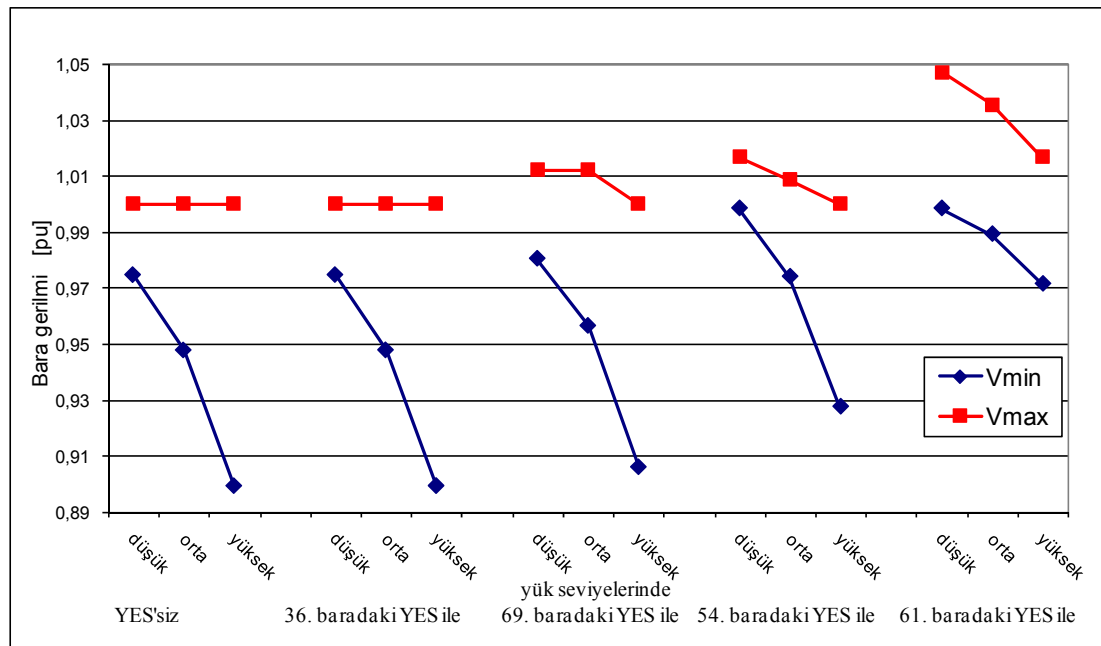
Şekil 6.19. Çeşitli yerlere yerleştirilen YES ile 69 baralı radyal sistemin düşük yük seviyesindeki bara gerilimleri



Şekil 6.20. Çeşitli yerlere yerleştirilen YES ile 69 baralı radyal sistemin yüksek yük seviyesindeki bara gerilimleri

Şekillerde en uygun büyüklük ile farklı yere yerleştirilen YES'in, düşük ve yüksek yük seviyesinde bara gerilimlerinin değişimi görülmektedir. Tabloda olduğu gibi 36. baraya yerleştirilen YES ile 69 baralı test sistemin gerilim profili, YES olmayan 69 baralı test sistemin gerilim profili ile aynı olduğu ve YES'in gerilim profiline hiçbir etkisinin olmadığı görülmektedir. Özellikle yüksek yük seviyesinde bara gerilimlerin önemli ölçüde azaldığı, çoğunda gerilim sınırının altına düştüğü; düşük yük seviyesinde bara gerilimlerin arttığı ve 61. baradaki YES ile bara gerilimlerin önemli ölçüde gerilimler arası farkın azaldığı görülmektedir.

69 baralı radyal sisteminde YES'in en uygun yer etkisini daha iyi göstermek için, farklı yük seviyelerinde minimum ve maksimum bara gerilimleri Şekil 6.21'de gösterilmiştir.



Şekil 6.21. Farklı yük seviyelerinde YES ile ve YES'siz 69 baralı radyal sistemin minimum ve maksimum bara gerilimleri

Yüksek yük seviyesindeki gerilim sapmasının, düşük yük seviyesindekinden daha büyük olduğu, özellikle düşük yük seviyesinde YES gerilim profilini artırdığı ve en uygun yer olan 61. baraya yerleşecek YES'in gerilim profilini yüksek yük seviyesinde önemli ölçüde düzelttiği görülmektedir. YES sırasıyla 69., 54. ve 61. baraya yerleştiğinde ortalama gerilim sapmasını, VDA'yı sırasıyla 37 %, 52 % ve

61 % azaltmaktadır. 69. ve 54. baraya yerleşen YES gerilim sapmasını önemli ölçüde azaltmasına rağmen fider boyunca bara gerilimleri 1 ± 0.05 pu sınırları içinde kalmamaktadır. 54. ve 36. baraya yerleşen YES ile, düşük yük seviyesinde gerilim profilinde belirgin bir artış olmakla birlikte yüksek yük seviyesinde özellikle sistemin uzak baralarında ciddi bir azalma bulunmaktadır.

Dolayısıyla dağıtım sistemlerin gerilim profilini düzeltmek için yerleştirilecek YES'in büyüklüğü ve yeri önemli olduğu kadar dağıtım sistemini yüklerinin zamana göre değişimi de çok önemli olmaktadır. Test sistemleri ile kontrol edilen yeni geliştirilen üçüncü metot; ızgara arama metoduyla da karşılaştırıldığında metodun geçerliliği görüldüğü gibi, zamanla değişen yükleri hesaba katıldığı için önemli bir avantaj sağladığı da görülmektedir.

6.5. Sonuç

Bu bölümde yeni geliştirilen üç metot çeşitli metotlarla karşılaştırılıp geçerliliği kontrol edilmiştir. Yeni geliştirilen iki metot, güç kayıplarını azaltmak amacıyla eklenecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü radyal sistemler ve kapalı devreler içine alan dağıtım sistemler için elde eden metotlardır. Bu metotları analitik ve ızgara arama metodu ile içinde gerçek dağıtım sistemi bulunan yedi farklı test sistemi kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen bütün sonuçlar geliştirilen metotların güvenilir olduğunu ve dağıtım sistemlerinde uygulanabileceğini göstermiştir.

Geliştirilen üçüncü metot, zamanla değişen yükleri hesaba katarak dağıtım sistemlerinin gerilim profilini düzeltmek amacıyla eklenecek YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü elde eden metottur. Bu metot, ızgara arama metodu ile içinde gerçek dağıtım sistemi bulunan beş farklı test sistem kullanılarak karşılaştırılmıştır. Metodun geçerliliği doğrulanmıştır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Sonuç

Bugünlerde yenilenebilir kaynaklarını da içine alan Yerel Elektrik Santralleri güç sistemlerine dâhil edilmektedir. YES'in, gerilim profilini düzeltmek, kayıpları azaltmak, maliyeti düşürmek, güvenilirliği artırmak gibi pek çok avantajı vardır. Bu avantajlardan dağıtım sistemlerinin yararlanabilmesi ve bu avantajların dezavantajlara dönüşmemesi için YES'in uygun büyüklükte ve uygun yerde olması gerekmektedir.

Literatürde dağıtım ve alt iletim sistemlerinde YES'in yerleştirileceği en uygun yeri ve büyüklüğü elde etmek için optimal güç akışı metotlarından ve kapasitör yerleşimi metotlarından yararlanmış bir çok çalışma bulunmaktadır. Optimal güç akışı yönteminin iletim sistemleri için geliştirilmiş olması ve amacının jeneratörün en uygun yerini belirlemek olmaması YES yerleştirilmesi için uygun bir yöntem olmadığını göstermiştir.

Dağıtım sistemlerine YES yerleşimi ile ilgili çalışmalarda genellikle kapasitör yerleşiminde kullanılan analitik ve meta heuristik metotlar kullanılmıştır. Meta heuristik metotlar, çok amaçlı problemler için uygundur, yaklaşık en uygun çözümü verir. Dezavantajı işlem sayısının çok olması ve çözüme yavaş yakınsamasıdır. Analitik metotlar genellikle radyal fiderde güç faktörü bir olan düzgün veya farklı dağılmış yüklerin bulunduğu varsayılarak yapılmaktadır. Analitik metotlarda problemin gerçeğe uygun modellenmesi ve çözümü zordur. Ancak problem modellenip çözülebilirse en uygun çözümü vermektedir.

Dağıtım sistemlerinin radyal yapısı, dengesiz dağılmış yükü çok sayıdaki düğümleri, geniş aralıklardaki direnç ve reaktans değerleri gibi tabiatında bulunan bazı özelliklerden dolayı Jacobian veya empedans matrisi gibi dağıtım sistemler için elde edilmesi zor olan unsurlara ihtiyaç duyan iletim sistemlerine uygun metotlar da genellikle yeterli gelmemektedir.

Bu çalışmada ilk olarak dağıtım sistemlerin güç kaybını azaltacak YES'in yeri ve büyüklüğünü belirlemek amacıyla analitik iki metot geliştirilmiştir. Birinci metot, fider ve alt fiderlerden oluşan radyal sistemler için ikinci metot ise kapalı devreler bulunan dağıtım sistemleri için geliştirilmiştir. Analitik metotlar geliştirilmeden önce dağıtım sistemlerin toplam güç kayıp ifadesi çıkartılmış ve dağıtım sistemlerin yapısına uygun kayıp duyarlılık ifadeleri elde edilmiştir. Duyarlılık ifadelerinden yararlanılarak dağıtım sistemlerin güç kaybını azaltacak YES'in en uygun büyüklüğünü veren ifadeler geliştirilmiştir. Bu ifadeler kullanılarak kayıpları en aza indirmek amacıyla dağıtım sistemlerine eklenecek YES'in yerleştirilmesi için güvenilir, kolay uygulanabilen ve sonuca hızlı ulaşılabilen analitik iki metot geliştirilmiştir. Geliştirilen analitik metotlar, aralarında gerçek radyal sistemin de bulunduğu farklı dağıtım sistemlerine uygulanarak analitik bir başka metot ve ızgara arama metodu ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen metotların geçerli ve güvenilir olduğunu göstermiştir. Geliştirilen birinci metodun, diğer metotlardan işlem süresinin daha az olduğu tespit edilmiştir.

Son olarak fider, alt fider ve/veya kapalı devreden oluşan dağıtım sistemleri için zamanla değişen yükleri dikkate alan gerilim duyarlılık ifadesi çıkartılmıştır. Gerilim duyarlılık ifadesi ile gerilim profilini düzeltmek amacıyla eklenecek YES'in en uygun büyüklüğünü belirleyen ifade geliştirilmiştir. Bununla birlikte YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünü belirleyen üçüncü bir analitik metot geliştirilmiştir. Geliştirilen üçüncü analitik metotta gerçek radyal sistemin de bulunduğu farklı dağıtım sistemlerine uygulanarak ızgara arama metodu ile sonuçları karşılaştırılmış ve metodun geçerliliği gösterilmiştir.

Geliştirilen bu üç analitik metot ve ifadeler, dağıtım sistemleri için Jacobian veya empedans matrisi kullanmadıkları için dağıtım sistemlerinin yapısına uygundur ve kolaylıkla uygulanabilmekte, güvenilir ve hızlı sonuç alınabilmektedir.

Geliştirilen analitik metodun hızlı sonuç vermesi bu metodun gerçek zamanlı olarak SCADA sistemleri ile birlikte kullanılma imkânını sağlamaktadır.

Bir yan cümle olarak bu tezdeki çalışmalar neticesinde elde edilen iki duyarlılık indisi ki bunlar sistem kayıplarının ve toplam gerilim saptmasının bara aktif gücüne

olan hassasiyetini vermektedir; çok farklı amaçlar için kullanılabilirler. Bu amaçların başında birinci indis için kayıp sorumluluklarının paylaştırılması gelmektedir. Geliştirilen ikinci indis ise gerilim değişimlerinde sistemdeki hangi kaynağın daha etkin olduğunu verebilecektir. Bu indisler sorumluluk ve maliyet paylaştırmada kullanılması ileriki çalışma konusu olarak düşünülmektedir.

7.2. Çalışma Konusu Önerileri

Yapılan çalışmada geliştirilen metotlar ve ifadeler, dağıtım sistemleri için çok önemli YES'in avantajlarından kayıpları azaltma veya gerilim profilini düzeltmesinden yararlanabilmeyi sağlamaktadır. Gerilim profilini düzeltmek için geliştirilen metotta zamana bağlı değişen yükleri göz önüne alınırken, kayıpları azaltmak için geliştirilen metotlarda ise alınmamıştır.

- Kayıpları azaltmak için geliştirilen metotlarda zamana bağlı yüklerin göz önünde bulundurulması
- Geliştirilen her metotta gerilim bağımlı yüklerin göz önünde bulundurulması
- Çok amaçlı programlama ile kayıpları azaltmak ve gerilim profilini düzeltmek amacıyla YES'in yeri ve büyüklüğünü elde edecek metot geliştirilmesi
- Birden fazla YES'in yeri ve büyüklüğünü belirlenmesi
- Elde edilen kayıp duyarlılık ifadelerini ve gerilim duyarlılık ifadesini dağıtım sistemleri ile ilgili farklı çalışmalarda çözüm adayların sayısının küçültülmesinde kullanılması
- [15]'te kullanılan gerilim sapma indis değişim denkleminde YES'in en uygun büyüklüğü veren ifadenin çıkartılması
- Yeniden yapılandırma için benzer metotların geliştirilmesi

- Dağıtım sistemlerinde bulunan diğer kontrol elemanların yerini belirlemede elde edilen ifadelerden yararlanılması
- Dağıtım sistemlerinde bulunan diğer kontrol elemanları ile birlikte YES'in en uygun yeri ve büyüklüğünün elde edilmesi

ileride çalışılabilecek konulardan bir kaçıdır.

Ayrıca özellikle ülkemizde yenilenebilir kaynakların herhangi bir düğüm noktasına bağlanmasında kullanılan %5 penetrasyon limiti bu bulgular ışığında yeniden değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] H. L. Willis, W. G. Scott, Distributed Power Generation, Marcel Dekker, New York, 2000.
- [2] P. P. Barker, R. W. de Mello, Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 – Radial Distribution Systems, in Proc. of IEEE PES Summer Meeting, vol. 3, pp.1645-1656, 2000.
- [3] T. Ackermann, G. Anderson, L. Söder, Distributed Generation: a Definition, Electric Power System Research, vol. 57, pp. 195-204, 2001.
- [4] N. Hadjsaid, J. F. Canard, and F. Dumas, Dispersed Generation Impact on Distribution Networks, IEEE Compt. Appl. Power, vol. 12, pp.22–28, Apr. 1999.
- [5] S. Rau and Y.H. Wan, Optimum Location of Resources in Distributed Planning, IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, pp. 2014–2020, Nov. 1994.
- [6] J. O. Kim, S. W. Nam, S. K. Park, and C. Singh, Dispersed Generation Planning Using Improved Hereford Ranch Algorithm, Electric Power System Research , vol. 47, no. 1, pp. 47–55, Oct. 1998.
- [7] K. H. Kim, Y. J. Lee, S. B. Rhee, S. K. Lee, and S.-K. You, Dispersed Generator Placement Using Fuzzy-GA in Distribution Systems, in Proc. of IEEE PES Summer Meeting, vol. 3, pp. 1148–1153, July 2002.
- [8] K. Nara, Y. Hayashi, K. Ikeda, and T. Ashizawa, Application of Tabu Search to Optimal Placement of Distributed Generators, IEEE PES Winter Meeting, vol. 2, pp. 918 – 923, 2001.
- [9] H. L. Willis, Analytical Methods and Rules of Thumb for Modeling DG-Distribution Interaction, in Proc. IEEE PES Summer Meeting, vol. 3, Seattle, WA, pp. 1643–1644, July 2000.
- [10] T. Griffin, K. Tomsovic, D. Secrest, and A. Law, Placement of Dispersed Generation Systems for Reduced Losses, in Proc. 33rd Annu. Hawaii Int. Conf. Systems Sciences, Maui, HI, pp.1-9, 2000.
- [11] C. Wang, M. H. Nehrir, Analytical Approaches For Optimal Placement Of DG Sources In Power Systems, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 19, no. 4, pp. 2068–2076, November 2004.
- [12] T. Gözel, M. H. Hocaoglu, U. Eminoglu, A.Balikci, Optimal placement and

sizing of distributed generation on radial feeder with different static load models, Future Power Systems, 2005 International Conference, Amsterdam, Nov. 2005.

- [13] N. Acharya, P. Mahat, N. Mithulanathan, An analytical approach for DG allocation in primary distribution network, *Int. Journal of Elec. Power & Energy Systems*, vol. 28, Iss. 10, pp. 669-678, December 2006.
- [14] R. Caire, N. Retiere, E. Morin, M. Fontela, and N. Hadjsaid, Voltage management of distributed generation in distribution networks, *IEEE PES General Meeting*, vol. 1, pp. 282–287, 2003.
- [15] An D.T. Le, M.A. Kashem, M. Negnevitsky and G. Ledwich, Minimising voltage deviation in distribution feeders by optimising size and location of distributed generation, *AUPEC 2005 Conference*, Tasmania, Australia, vol. 2, Sept. 2005.
- [16] K. H. Kim, K. B. Song, SK Joo, YJ Lee, JO Kim, Multiobjective distributed generation placement using fuzzy goal programming with genetic algorithm, *European Transactions On Electrical Power*, 18, pp. 217-230, 2008.
- [17] D. Zhu, P. Broadwater, K. Tam, R. Seguin, and H. Asgeirsson, Impact of DG Placement on Reliability and Efficiency With Time-Varying Loads, *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 419-427, February 2006.
- [18] G. Celli, E. Ghiani, S. Mocci and F. Pilo, A Multiobjective Evolutionary Algorithm for the Sizing and Siting of Distributed Generation, *IEEE Trans. on Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 750-757 May 2005.
- [19] C. W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [20] J. Choi and J. Kim, Advanced voltage regulation method of power distribution systems interconnected with dispersed storage and generation systems, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 16, pp. 329-334, Apr. 2001.
- [21] L. Kojovic, Impact of DG on voltage regulation, *Proc., IEEE PES Summer Meeting*, Chicago, IL., 2002.
- [22] C. Dai and Y. Baghzouz, On the voltage profile of distribution feeders with distributed generation, *IEEE PES Summer Meeting*, Toronto, Ontario Canada, July 2003.
- [23] N.C. Scott, D.J. Atkinson, and J.E. Morrell, Use of load control to regulate

- voltage on distribution networks with embedded generation, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 17, no. 2, pp. 510-515, May 2002.
- [24] M. A. Kashem, and G. Ledwich, Distributed generation as voltage support for single wire earth return systems, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 19, no. 3, July 2004.
 - [25] P. A. Laptante, Electrical Engineering Dictionary, C.R.C. press LLC, Boca Raton, 2000.
 - [26] M. E. Baran, A. W. Kelley, A Branch-Current-Based State Estimation Method For Distribution Systems, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp.483-491, February 1995.
 - [27] T. A. Short, Electric Power Distribution Handbook, CRC Press, 2004
 - [28] IEEE Standards Coordinating Committee, IEEE Std 141-1993: IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, (The Red Book), NewYork, 1993.
 - [29] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği Ticari Ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete, Sayı:26287, 12/09/2006.
 - [30] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği, Resmi Gazete, Sayı:25001, 22/01/2003.
 - [31] N. Jenkins, R. Allan, P. Crossley, D. Kirschen, G. Strbac, Embedded Generation, IEE, London, pp. 245, 2000.
 - [32] CIGRE, Impact of increasing contribution of dispersed generation on the power system, CIGRE Study Committee no 37, Final Report, September 1998.
 - [33] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans and W. D'haeseleer, Distributed generation: definition, benefits and issues, Energy Policy vol. 33 no.6, pp. 787–798, 2005.
 - [34] IEA (International Energy Agency), Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets, Paris, p. 128, 2002.
 - [35] M. J. N. Van Werven, M J J Scheepers, DISPOWER, The Changing Role of Energy Suppliers and Distribution System Operators in the Deployment of Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets, Report ECN-C-05-048, June 2005 (<http://www.ecn.nl/library/reports/index.html>).
 - [36] R.Gerwent, Distribution Generation and Renewables, Power Quality and

Utilisation Guide, Leonardo, 2006.

- [37] Conference report The 19th World Energy Congress Sydney (Australia)5–9 September 2004 Energy Policy, 34, pp. 892–893, 2006.
- [38] Allen J. Wood; Bruce F. Wollenberg, Power Generation Operation and Control, John Wiley, NY, 2nd ed,1996.
- [39] S.C. Tripathy, G.D. Prasad, O.P. Malik, and G.S. Hope, Load Flow Solutions for Ill-Conditioned Power Systems by a Newton-Like Method, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-101, no. 10, pp. 3648-3657, 1982.
- [40] U. Eminoglu, Dağıtım sistemleri için yeni bir güç akışı algoritmasının geliştirilmesi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 176 Sayfa, 2007.
- [41] F. Zhang and C. S. Cheng, A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 12, no.1, pp. 389–397, 1997.
- [42] V. M. Da Costa, N. Martins, and J. L. Pereira, Development in the Newton Raphson Power Flow Formulation Based on Current Injections, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 14, no. 4, pp. 1320-1326, 1999.
- [43] P. A. N. Garcia, J. L. R. Pereira, S. Carneiro, V. M. Da Kosta and N. Martins, Three-Phase Power Flow Calculations Using the Current Injection Method, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15 no.2, pp. 508-514, 2000.
- [44] W. M. Lin, J. H. Teng, Three-Phase Distribution Network Fast-Decoupled Power Flow Solutions, Electrical Power and Energy Systems, vol. 22, no.5, pp. 375-380, 2000.
- [45] J. H. Teng, 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, 2002.
- [46] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G. X. Luo, 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.
- [47] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, 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.

- [48] Y. Zhu, K. Tomsovic, Adaptive Power Flow Method for Distribution Systems with Dispersed Generation, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17(3), pp.822-827, July 2002.
- [49] R. Ranjan, B. Venkatesh, A. Chaturvedi, D. Das, Power Flow Solution of Three-Phase Unbalanced Radial Distribution Network, Electric Power Components and Systems, vol. 32 (4) , pp. 421-433, April 2004.
- [50] D. Thukaram, H. M. W. Banda, and J. Jerome, A Robust Three-Phase Power Flow Algorithm for Radial Distribution Systems, Electric Power Systems Research, vol. 50 (3), pp. 227-236, June 1999.
- [51] W. H. Kersting, Distribution System Modeling and Analysis. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002.
- [52] J. Liu, M.M.A. Salama and R.R. Mansour, 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.
- [53] J. H. Teng, 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.
- [54] J. H. Teng, A direct approach for distribution system load flow solutions, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18 (3), pp. 882-887, July 2003.
- [55] G. R. Cespedes, New Method for the Analysis of Distribution Networks, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5 (1), pp. 391-396, January 1990.
- [56] M.H. Haque, A General Load Flow Method for Distribution Systems, Electric Power System Research, vol. 54 (1), pp.106-114, April 2000.
- [57] U. Eminoglu and M. H. Hocaoglu, A New Power Flow Method for Radial Distribution Systems Including Voltage Dependent Load Models, Electric Power System Research, vol. 76 (2), pp. 106-114, August 2005.
- [58] G. X. Luo and A. Semlyen, Efficient Load Flow for Large Weakly Meshed Networks, IEEE Trans. on Power System, vol. 5 (4), pp. 1309–1316, November 1990.
- [59] D. Rajicic, R. Ackovski, and R. Taleski, Voltage correction power flow, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 9 (2), pp. 1056–1062, April 1994.
- [60] S. Satyanarayana, T. Ramana, S. Sivanagaraju, G. K. Rao, 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.
- [61] U. Eminoglu, and M. H. Hocaoglu, Distribution Systems Forward/Backward Sweep-based Power Flow Algorithms: A Review and Comparison Study, *Electric Power Components and Systems*, 37:1, pp. 91-110, 2009.
 - [62] Song YH, Johns AT, Flexible AC transmission systems (FACTS), *IEE Power Energy Series*; Chapter 4, pp. 146-166, 1999.
 - [63] 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.
 - [64] 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.
 - [65] U. Eminoglu, T. Gözel, M. H. Hocaoglu, DSPFAP: Distribution Systems Power Flow Analysis Package Using MATLAB Graphical User Interface (GUI), *Computer Applications in Engineering Education*, accepted at 05/10/2007, in press.
 - [66] Prabha Kunder, Power system stability and control, *Power System Engineering Series*, Mc Graw Hill, 1993.
 - [67] R. C. Dugan, T. E. McDermott and G. J. Ball, Distribution Planning for Distributed Generation, *Rural Electric Power Conference*, pp. C4.1-C4.7, May 2000.
 - [68] H.W. Dommel, W.F. Tinney, Optimal Power Flow Solutions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-87, pp 1866-1876, October 1968.
 - [69] J.C.Carlisle, A.A.El-Keib, D.Boyd, K.Nolan, A Review of Capacitor Placement Techniques on Distribution Feeders, *Proceedings of the 29th Symposium on System Theory*, Cookeville, Tennessee, Mar. 11997.
 - [70] Derviş Karaboğa, *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, Atlas, 2004.
 - [71] T. Gözel, U. Eminoglu and M.H. Hocaoglu, A tool for voltage stability and optimization (VS&OP) in radial distribution systems using matlab graphical user interface (GUI), *Simulation Modelling Practice and Theory* vol. 16, Issue

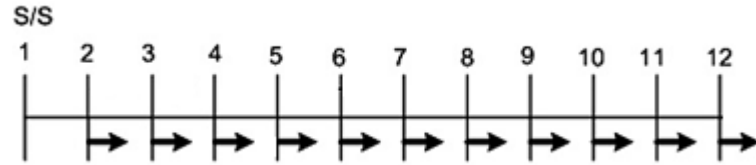
- 5, pp 505-518, Mayıs 2008.
- [72] J. L. Bala, P. A. Kuntz, M. N. Pebles, Optimum capacitor allocation using a distribution-analyzer-recorder, IEEE Trans PWRD, vol. 12(1), pp.464–469, 1997.
 - [73] O. I. Elgerd, Electric Energy System Theory-An Introduction, McGraw-Hill, New York, 1971.
 - [74] H.H. Happ, Optimal Power Dispatch, IEEE transaction on Power Apparatus and Systems, vol. 93, pp. 820-830, 1974.
 - [75] P. Preedavichit, S.C. Srivastava, Optimal Reactive Power Dispatch Considering FACTS Devices, Electric Power Systems Research, 46, pp. 251–257, 1998.
 - [76] T. Gözel, M. H. Hocaoglu, Güç Sistemlerine Yerel Elektrik Santrallerin Yerleşiminde Duyarlılık İfadelerinin Kullanımı, EVK'2007 Kocaeli, Türkiye, pp. 41-45, Mayıs 2007.
 - [77] T. Gözel, M. H. Hocaoglu, Optimal Placement and Sizing of Distributed Generators in Radial System, 5th Int. Conf. on Electrical And Electronics Engineering Eleco 2007, Bursa, Turkey, 5-9 December 2007.
 - [78] T. Gözel, M. H. Hocaoglu, An Analytical Method For The Sizing and Sitting of Distributed Generator In Radial System, Electric Power Systems Research, accepted at: 16/12/2008.
 - [79] T. H. Chen, M. S. Chen, T. Inoue, P. Kotas, E. A. Chebli, 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.
 - [80] S. S. Rao, Engineering Optimization: Theory and Practice, 3rd Edition, Wiley-Interscience, New York, 1996.
 - [81] D. Das, H. S. Nagi, and D. P. Kothari, Novel Method for Solving Radial Distribution Networks, IEE Proc.-Gener. Transm. Dist., vol. 141, no. 4, pp. 291-298, July 1994.
 - [82] N. Mithulanathan, Oo Than, Van Phu Le, Distributed generator placement in power distribution system using genetic algorithm to reduce losses, TIJSAT, vol. 9, no. 3, pp. 55–62, 2004.
 - [83] M. E. Baran, F. F. Wu, Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4,

- no. 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [84] M. Baran, F. F. Wu, Optimal Capacitor Placement on Radial Distributions Systems, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 725-734, Jan. 1989.
- [85] A. S. Safigianni, G. J. Salis, Optimum voltage regulator placement in a radial power distribution network, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, no. 2, pp. 879-886, May 2000.
- [86] M. E. Baran, F. F. Wu, Optimal capacitor placement on radial distributions systems, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 725-734, Jan. 1989.
- [87] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, D. Gan, MATPOWER A MATLAB Power System Simulation Package, www.pserc.cornell.edu/matpower/matpower.htm erişim tarihi: 01/01/2008

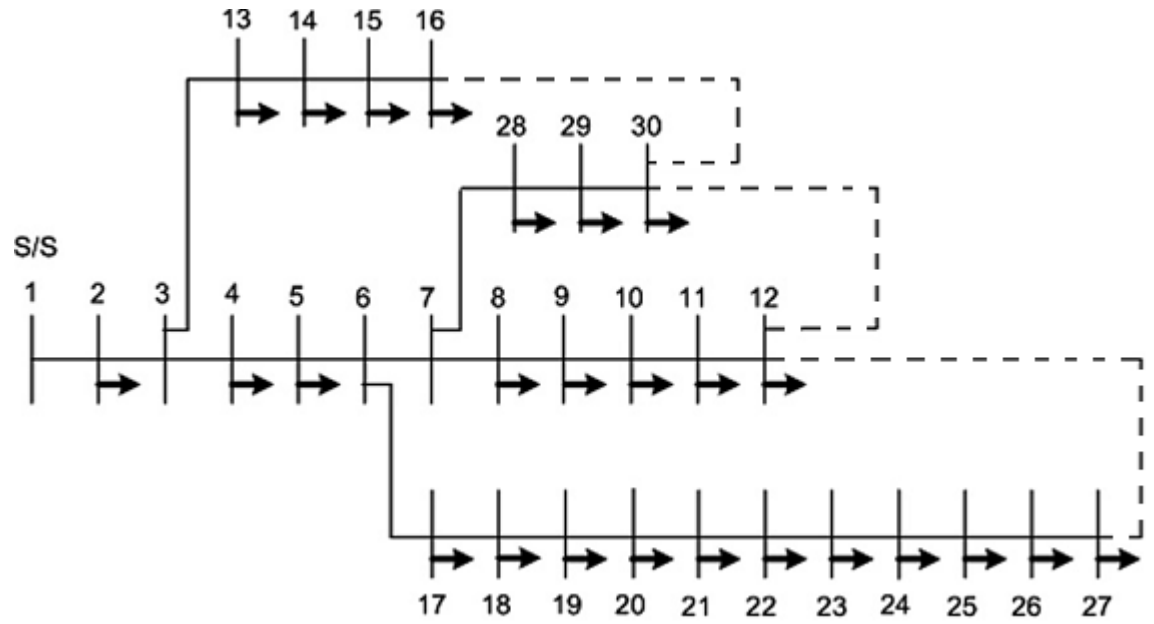
ÖZGEÇMİŞ

Tuba GÖZEL, 1971 yılında Konya’da doğdu. İlköğrenimini Devrim İlkokulu, orta ve lise öğrenimini Gündoğdu Lisesi’nde tamamladı. Lisansını Selçuk Üniversitesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümünde 1994 yılında tamamladı. 1994 ile 1996 yılı arasında Diba İç ve Dış Ticaret A.Ş.’de yazılım müdürü olarak çalıştı. 1996 yılında Onat Pazarlama ve Otomasyon Sistemleri A.Ş.’de şirket ortağı ve otomasyon müdürü olarak çalıştı. 1997 ile 2000 yılı arasında Selçuk Üniversitesinde öğretim görevlisi olarak çalıştı. 1999 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansa başladı. Yüksek lisansı 2002 yılında tamamlayarak doktora öğrenimine başladı. Tuba GÖZEL 2001 yılından beri aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

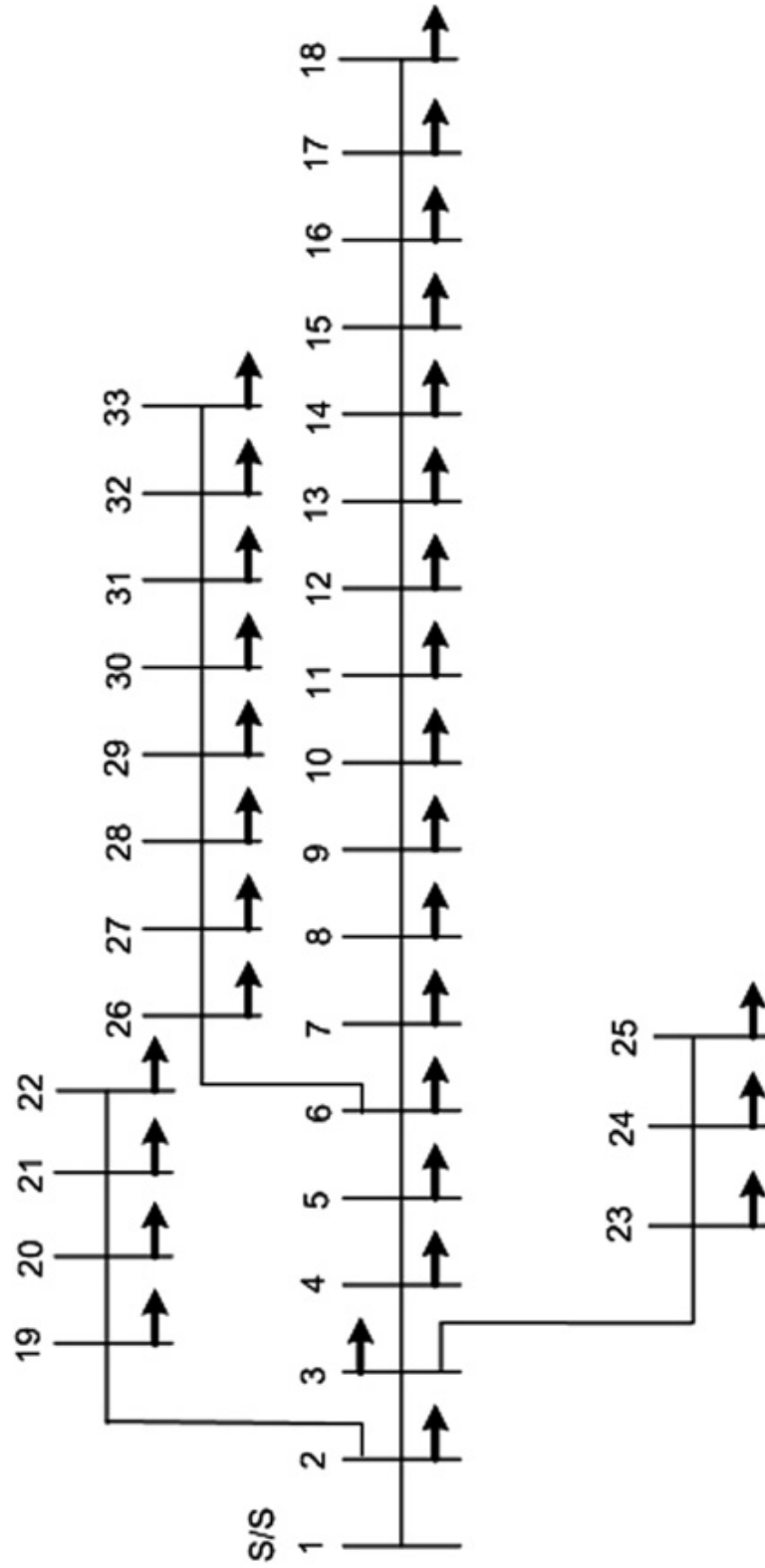
EK



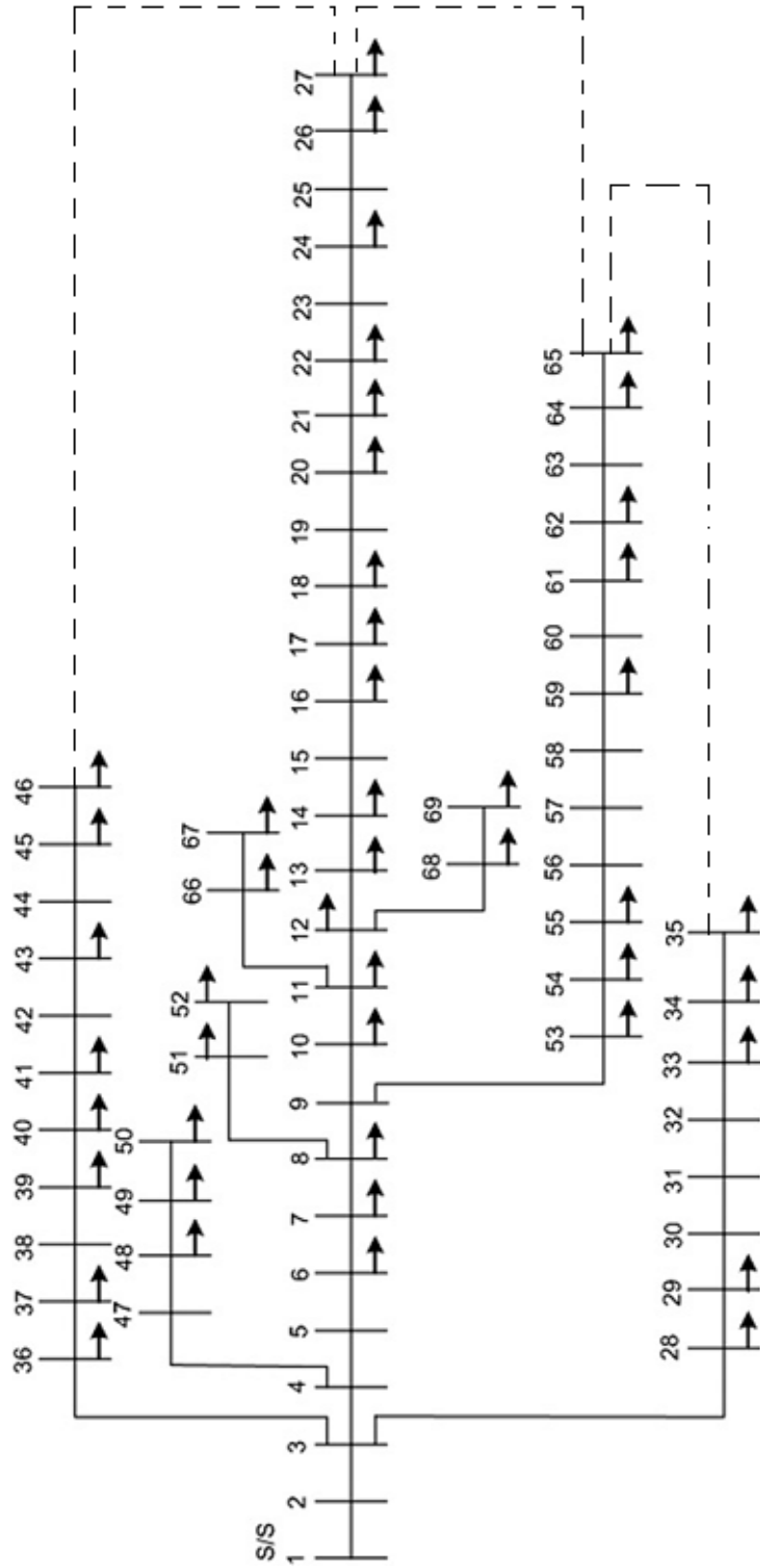
Şekil Ek-1. 12-baralı sistemin devre şeması



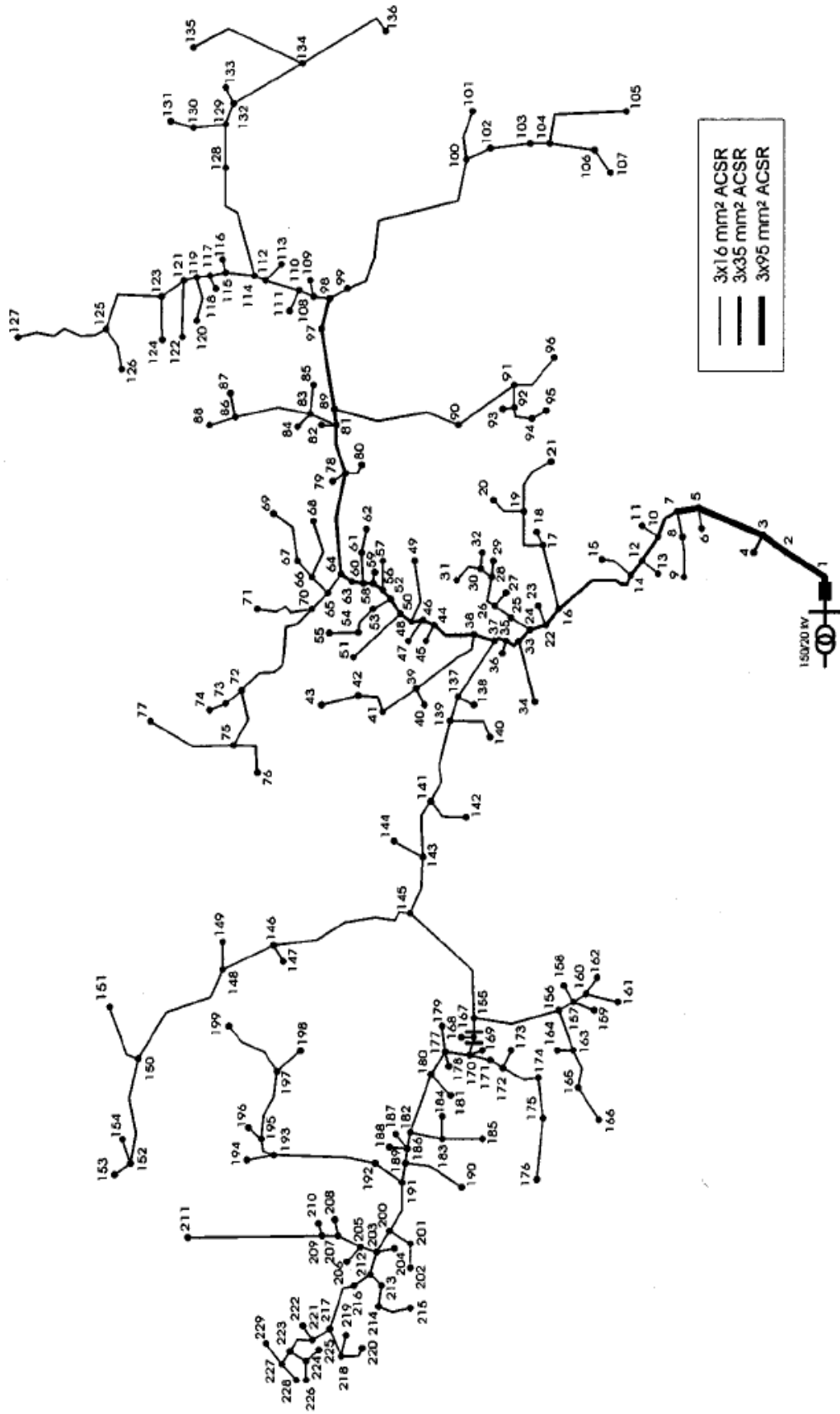
Şekil Ek-2. 30 baralı dağıtım test sistemin devre şeması



Şekil Ek-3. 33-baralı dağıtım test sistemin devre şeması



Şekil Ek-4. 69 baralı dağıtım test sistemin devre şeması



Şekil Ek-5. 229 baralı dağıtım sistemin devre şeması

Tablo Ek 1. 12 baralı dağıtım test sistemin hat ve yük bilgileri [81]

Hat No	İlk Bara No	Son Bara No	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük	
			R (pu)	X (pu)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1	2	0,9033	0,3760	0,0600	0,0600
2	2	3	0,9785	0,4083	0,0400	0,0300
3	3	4	1,7314	0,7215	0,0550	0,0550
4	4	5	2,6347	1,0983	0,0300	0,0300
5	5	6	0,9033	0,3760	0,0200	0,0150
6	6	7	0,8281	0,3446	0,0550	0,0550
7	7	8	3,6388	1,0041	0,0450	0,0450
8	8	9	4,6628	1,3198	0,0400	0,0400
9	9	10	2,3884	0,6760	0,0350	0,0300
10	10	11	1,2512	0,3537	0,0400	0,0300
11	11	12	1,0231	0,2901	0,0150	0,0150

Tablo Ek 2. 30 baralı dağıtım test sistemin hat ve yük bilgileri [82]

Hat No	İlk Bara No	Son Bara No	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük	
			R (pu)	X (pu)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1	2	0,0967	0,0397	0,2300	0,1425
2	2	3	0,0886	0,0364	0,0000	0,0000
3	3	4	0,1359	0,0377	0,2300	0,1425
4	4	5	0,1236	0,0343	0,2300	0,1425
5	5	6	0,1236	0,0343	0,0000	0,0000
6	6	7	0,2598	0,0446	0,0000	0,0000
7	7	8	0,1732	0,0298	0,2300	0,1425
8	8	9	0,2598	0,0446	0,2300	0,1425
9	9	10	0,1732	0,0298	0,0000	0,0000
10	10	11	0,1083	0,0186	0,2300	0,1425
11	11	12	0,0866	0,0149	0,1370	0,0840
12	3	13	0,1299	0,0223	0,0720	0,0450
13	13	14	0,1732	0,0298	0,0720	0,0450
14	14	15	0,0866	0,0149	0,0720	0,0450
15	15	16	0,0433	0,0074	0,0135	0,0075
16	6	17	0,1483	0,0412	0,2300	0,1425
17	17	18	0,1359	0,0377	0,2300	0,1425
18	18	19	0,1718	0,0391	0,2300	0,1425
19	19	20	0,1562	0,0355	0,2300	0,1425
20	20	21	0,1562	0,0355	0,2300	0,1425
21	21	22	0,2165	0,0372	0,2300	0,1425
22	22	23	0,2165	0,0372	0,2300	0,1425
23	23	24	0,2598	0,0446	0,2300	0,1425
24	24	25	0,1732	0,0298	0,2300	0,1425
25	25	26	0,1083	0,0186	0,2300	0,1425
26	26	27	0,0866	0,0149	0,1370	0,0850
27	7	28	0,1299	0,0223	0,0750	0,0480
28	28	29	0,1299	0,0223	0,0750	0,0480
29	29	30	0,1299	0,0223	0,0750	0,0480
30	30	12	0,0012	0,0004		
31	12	27	0,0012	0,0004		
32	16	30	0,0012	0,0004		

Tablo Ek 3. 33 baralı dağıtım test sistemin hat ve yük bilgileri [83]

Hat No	İlk Bara No	Son Bara No	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük	
			R (pu)	X (pu)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1	2	0,0575	0,0293	0,1000	0,0600
2	2	3	0,3076	0,1566	0,0900	0,0400
3	3	4	0,2284	0,1163	0,1200	0,0800
4	4	5	0,2378	0,1211	0,0600	0,0300
5	5	6	0,5110	0,4411	0,0600	0,0200
6	6	7	0,1168	0,3861	0,2000	0,1000
7	7	8	1,0680	0,7710	0,2000	0,1000
8	8	9	0,6426	0,4617	0,0600	0,0200
9	9	10	0,6514	0,4617	0,0600	0,0200
10	10	11	0,1227	0,0406	0,0450	0,0300
11	11	12	0,2336	0,0772	0,0600	0,0350
12	12	13	0,9159	0,7206	0,0600	0,0350
13	13	14	0,3379	0,4448	0,1200	0,0800
14	14	15	0,3687	0,3282	0,0600	0,0100
15	15	16	0,4656	0,3400	0,0600	0,0200
16	16	17	0,8042	1,0738	0,0600	0,0200
17	17	18	0,4567	0,3581	0,0900	0,0400
18	2	19	0,1023	0,0976	0,0900	0,0400
19	19	20	0,9385	0,8457	0,0900	0,0400
20	20	21	0,2555	0,2985	0,0900	0,0400
21	21	22	0,4423	0,5848	0,0900	0,0400
22	3	23	0,2815	0,1924	0,0900	0,0500
23	23	24	0,5603	0,4424	0,4200	0,2000
24	24	25	0,5590	0,4374	0,4200	0,2000
25	6	26	0,1267	0,0645	0,0600	0,0250
26	26	27	0,1773	0,0903	0,0600	0,0250
27	27	28	0,6607	0,5826	0,0600	0,0200
28	28	29	0,5018	0,4371	0,1200	0,0700
29	29	30	0,3166	0,1613	0,2000	0,6000
30	30	31	0,6080	0,6008	0,1500	0,0700
31	31	32	0,1937	0,2258	0,2100	0,1000
32	32	33	0,2128	0,3308	0,0600	0,0400

Tablo Ek 4. 69 baralı dağıtım test sistemin hat ve yük bilgileri [84]

Hat No	İlk Bara No	Son Bara No	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük		Hat No	İlk Bara No	Son Bara No	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük	
			R (pu)	X (pu)	P (MW)	Q (MVar)				R (pu)	X (pu)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	0,0003	0,0007	0,0000	0,0000	37	37	38	0,0657	0,0767	0,0000	0,0000
2	2	3	0,0003	0,0007	0,0000	0,0000	38	38	39	0,0190	0,0221	0,0240	0,0170
3	3	4	0,0009	0,0022	0,0000	0,0000	39	39	40	0,0011	0,0013	0,0240	0,0170
4	4	5	0,0157	0,0183	0,0000	0,0000	40	40	41	0,4544	0,5309	0,0012	0,0010
5	5	6	0,2284	0,1163	0,0026	0,0022	41	41	42	0,1934	0,2260	0,0000	0,0000
6	6	7	0,2378	0,1211	0,0404	0,0300	42	42	43	0,0256	0,0298	0,0060	0,0043
7	7	8	0,0575	0,0293	0,0750	0,0540	43	43	44	0,0057	0,0072	0,0000	0,0000
8	8	9	0,0308	0,0157	0,0300	0,0220	44	44	45	0,0679	0,0857	0,0392	0,0263
9	9	10	0,5110	0,1689	0,0280	0,0190	45	45	46	0,0006	0,0007	0,0392	0,0263
10	10	11	0,1168	0,0386	0,1450	0,1040	46	4	47	0,0021	0,0052	0,0000	0,0000
11	11	12	0,4438	0,1467	0,1450	0,1040	47	47	48	0,0531	0,1300	0,0790	0,0564
12	12	13	0,6426	0,2121	0,0080	0,0055	48	48	49	0,1808	0,4424	0,3847	0,2745
13	13	14	0,6514	0,2152	0,0080	0,0055	49	49	50	0,0513	0,1255	0,3847	0,2745
14	14	15	0,6601	0,2181	0,0000	0,0000	50	8	51	0,0579	0,0295	0,0405	0,0283
15	15	16	0,1227	0,0406	0,0455	0,0300	51	51	52	0,2071	0,0695	0,0036	0,0027
16	16	17	0,2336	0,0772	0,0600	0,0350	52	9	53	0,1086	0,0553	0,0043	0,0035
17	17	18	0,0029	0,0010	0,0600	0,0350	53	53	54	0,1267	0,0645	0,0264	0,0190
18	18	19	0,2044	0,0676	0,0000	0,0000	54	54	55	0,1773	0,0903	0,0240	0,0172
19	19	20	0,1314	0,0434	0,0010	0,0006	55	55	56	0,1755	0,0894	0,0000	0,0000
20	20	21	0,2131	0,0704	0,1140	0,0810	56	56	57	0,9920	0,3330	0,0000	0,0000
21	21	22	0,0087	0,0029	0,0053	0,0035	57	57	58	0,4890	0,1641	0,0000	0,0000
22	22	23	0,0993	0,0328	0,0000	0,0000	58	58	59	0,1898	0,0628	0,1000	0,0720
23	23	24	0,2161	0,0714	0,0280	0,0200	59	59	60	0,2409	0,0731	0,0000	0,0000
24	24	25	0,4672	0,1544	0,0000	0,0000	60	60	61	0,3166	0,1613	1,2440	0,8880
25	25	26	0,1927	0,0637	0,0140	0,0100	61	61	62	0,0608	0,0309	0,0320	0,0230
26	26	27	0,1081	0,0357	0,0140	0,0100	62	62	63	0,0905	0,0460	0,0000	0,0000
27	3	28	0,0027	0,0067	0,0260	0,0185	63	63	64	0,4433	0,2258	0,2270	0,1620
28	28	29	0,0399	0,0976	0,0260	0,0185	64	64	65	0,6495	0,3308	0,0590	0,0420
29	29	30	0,2482	0,0820	0,0000	0,0000	65	11	66	0,1255	0,0381	0,0180	0,0130
30	30	31	0,0438	0,0145	0,0000	0,0000	66	66	67	0,0029	0,0009	0,0180	0,0130
31	31	32	0,2190	0,0724	0,0000	0,0000	67	12	68	0,4613	0,1525	0,0280	0,0200
32	32	33	0,5235	0,1757	0,0140	0,0100	68	68	69	0,0029	0,0010	0,0280	0,0200
33	33	34	1,0656	0,3523	0,0195	0,0140	69	46	27	0,0012	0,0004		
34	34	35	0,9196	0,3040	0,0060	0,0040	70	27	65	0,0012	0,0004		
35	3	36	0,0027	0,0067	0,0260	0,0186	71	65	35	0,0012	0,0004		
36	36	37	0,0399	0,0976	0,0260	0,0186							

Tablo Ek 5. 229 baralı dağıtım sistemin hat ve yük bilgileri [85]

Hat No	İlk Bara No	Son Bara No	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük		Hat No	İlk Bara No	Son Bara No	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük	
			R (pu)	X (pu)	P(MW)	Q (MVA _r)				R (pu)	X (pu)	P (MW)	Q (MVA _r)
1	1	2	0,0607	0,0127	0,0510	0,0316	39	39	40	0,0005	0,0005	0,0021	0,0013
2	2	3	0,0811	0,0170	0,0213	0,0132	40	39	41	0,0203	0,0190	0,0021	0,0013
3	3	4	0,0038	0,0019	0,0136	0,0084	41	41	42	0,0102	0,0096	0,0021	0,0013
4	3	5	0,1434	0,0301	0,0000	0,0000	42	42	43	0,0112	0,0105	0,0043	0,0026
5	5	6	0,0011	0,0005	0,0021	0,0013	43	38	44	0,0316	0,0157	0,0000	0,0000
6	5	7	0,0079	0,0017	0,0000	0,0000	44	44	45	0,0004	0,0003	0,0085	0,0053
7	7	8	0,0121	0,0060	0,0085	0,0053	45	44	46	0,0134	0,0066	0,0000	0,0000
8	8	9	0,0051	0,0048	0,0043	0,0026	46	46	47	0,0026	0,0024	0,0043	0,0026
9	7	10	0,0388	0,0192	0,0000	0,0000	47	46	48	0,0043	0,0021	0,0000	0,0000
10	10	11	0,0009	0,0009	0,0085	0,0053	48	48	49	0,0060	0,0056	0,0043	0,0026
11	10	12	0,0181	0,0090	0,0000	0,0000	49	48	50	0,0173	0,0086	0,0000	0,0000
12	12	13	0,0049	0,0046	0,0064	0,0040	50	50	51	0,0113	0,0106	0,0043	0,0026
13	12	14	0,0050	0,0025	0,0000	0,0000	51	50	52	0,0233	0,0115	0,0000	0,0000
14	14	15	0,0076	0,0071	0,0021	0,0013	52	52	53	0,0053	0,0050	0,0021	0,0013
15	14	16	0,0590	0,0292	0,0000	0,0000	53	53	54	0,0089	0,0083	0,0021	0,0013
16	16	17	0,0213	0,0200	0,0000	0,0000	54	54	55	0,0067	0,0062	0,0043	0,0026
17	17	18	0,0007	0,0006	0,0021	0,0013	55	52	56	0,0019	0,0009	0,0000	0,0000
18	17	19	0,0060	0,0056	0,0000	0,0000	56	56	57	0,0302	0,0150	0,0043	0,0026
19	19	20	0,0114	0,0106	0,0021	0,0013	57	56	58	0,0091	0,0045	0,0000	0,0000
20	19	21	0,0160	0,0150	0,0021	0,0013	58	58	59	0,0005	0,0004	0,0043	0,0026
21	16	22	0,0120	0,0059	0,0000	0,0000	59	58	60	0,0030	0,0028	0,0000	0,0000
22	22	23	0,0003	0,0003	0,0021	0,0013	60	60	61	0,0077	0,0072	0,0043	0,0026
23	22	24	0,0192	0,0095	0,0000	0,0000	61	61	62	0,0130	0,0122	0,0043	0,0026
24	24	25	0,0009	0,0008	0,0000	0,0000	62	60	63	0,0288	0,0142	0,0064	0,0040
25	25	26	0,0149	0,0139	0,0000	0,0000	63	63	64	0,0081	0,0040	0,0013	0,0008
26	26	27	0,0004	0,0004	0,0043	0,0026	64	64	65	0,0089	0,0083	0,0000	0,0000
27	26	28	0,0050	0,0047	0,0213	0,0132	65	65	66	0,0036	0,0034	0,0000	0,0000
28	28	29	0,0015	0,0014	0,0021	0,0013	66	66	67	0,0040	0,0038	0,0000	0,0000
29	28	30	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	67	66	68	0,0030	0,0028	0,0021	0,0013
30	30	31	0,0119	0,0112	0,0021	0,0013	68	67	69	0,0223	0,0209	0,0043	0,0026
31	30	32	0,0005	0,0004	0,0021	0,0013	69	65	70	0,0116	0,0109	0,0000	0,0000
32	24	33	0,0080	0,0040	0,0000	0,0000	70	70	71	0,0214	0,0200	0,0043	0,0026
33	33	34	0,0030	0,0028	0,0013	0,0008	71	70	72	0,0538	0,0503	0,0000	0,0000
34	33	35	0,0163	0,0081	0,0000	0,0000	72	72	73	0,0028	0,0026	0,0013	0,0008
35	35	36	0,0004	0,0004	0,0021	0,0013	73	73	74	0,0059	0,0056	0,0043	0,0026
36	35	37	0,0081	0,0040	0,0000	0,0000	74	72	75	0,0233	0,0218	0,0000	0,0000
37	37	38	0,0087	0,0043	0,0000	0,0000	75	75	76	0,0183	0,0171	0,0043	0,0026
38	38	39	0,0304	0,0284	0,0000	0,0000	76	75	77	0,0378	0,0354	0,0043	0,0026

Hat	İlk Bara	Son Bara	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük		Hat	İlk Bara	Son Bara	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük	
No	No	No	R (pu)	X (pu)	P(MW)	Q(MVAr)	No	No	No	R (pu)	X (pu)	P (MW)	Q (MVAr)
77	64	78	0,0860	0,0426	0,0000	0,0000	115	115	116	0,0009	0,0008	0,0043	0,0026
78	78	79	0,0006	0,0005	0,0021	0,0013	116	115	117	0,0101	0,0094	0,0000	0,0000
79	78	80	0,0066	0,0062	0,0085	0,0053	117	117	118	1,1972	1,1209	0,0013	0,0008
80	78	81	0,0496	0,0245	0,0000	0,0000	118	117	119	4,3818	4,1026	0,0000	0,0000
81	81	82	0,0006	0,0005	0,0064	0,0040	119	119	120	0,0203	0,0190	0,0021	0,0013
82	81	83	0,0091	0,0086	0,0013	0,0008	120	119	121	7,4346	6,9610	0,0000	0,0000
83	83	84	0,0034	0,0032	0,0085	0,0053	121	121	122	0,0174	0,0163	0,0000	0,0000
84	83	85	0,0040	0,0037	0,0021	0,0013	122	121	123	0,0144	0,0135	0,0000	0,0000
85	83	86	0,0507	0,0475	0,0000	0,0000	123	123	124	0,0166	0,0156	0,0085	0,0053
86	86	87	0,0019	0,0018	0,0021	0,0013	124	123	125	0,0431	0,0403	0,0000	0,0000
87	86	88	0,0158	0,0148	0,0085	0,0053	125	125	126	0,0318	0,0298	0,0043	0,0026
88	81	89	0,0032	0,0016	0,0000	0,0000	126	125	127	0,0176	0,0164	0,0021	0,0013
89	89	90	0,0467	0,0437	0,0085	0,0053	127	114	128	0,0455	0,0426	0,0013	0,0008
90	90	91	0,0401	0,0376	0,0085	0,0053	128	128	129	0,0180	0,0168	0,0021	0,0013
91	91	92	0,0131	0,0123	0,0000	0,0000	129	129	130	0,0108	0,0101	0,0021	0,0013
92	92	93	0,0062	0,0058	0,0043	0,0026	130	130	131	0,0109	0,0102	0,0043	0,0026
93	92	94	0,0379	0,0355	0,0043	0,0026	131	129	132	0,0068	0,0064	0,0000	0,0000
94	94	95	0,0126	0,0118	0,0043	0,0026	132	132	133	0,0015	0,0014	0,0013	0,0008
95	91	96	0,0157	0,0147	0,0021	0,0013	133	132	134	0,0230	0,0215	0,0043	0,0026
96	89	97	0,0700	0,0346	0,0000	0,0000	134	134	135	0,0243	0,0227	0,0021	0,0013
97	97	98	0,0203	0,0100	0,0000	0,0000	135	134	136	0,0454	0,0426	0,0043	0,0026
98	98	99	0,0066	0,0062	0,0085	0,0053	136	37	137	0,0239	0,0224	0,0000	0,0000
99	99	100	0,0934	0,0874	0,0000	0,0000	137	137	138	0,0019	0,0018	0,0021	0,0013
100	100	101	0,0229	0,0214	0,0043	0,0026	138	137	139	0,0038	0,0036	0,0000	0,0000
101	100	102	0,0039	0,0037	0,0021	0,0013	139	139	140	0,0133	0,0125	0,0043	0,0026
102	102	103	0,0095	0,0089	0,0043	0,0026	140	139	141	0,0277	0,0259	0,0021	0,0013
103	103	104	0,0018	0,0017	0,0000	0,0000	141	141	142	0,0078	0,0073	0,0013	0,0008
104	104	105	0,0265	0,0249	0,0021	0,0013	142	141	143	0,0360	0,0337	0,0000	0,0000
105	104	106	0,0179	0,0168	0,0043	0,0026	143	143	144	0,0125	0,0117	0,0128	0,0079
106	106	107	0,0095	0,0089	0,0043	0,0026	144	143	145	0,0257	0,0241	0,0021	0,0013
107	98	108	0,0037	0,0034	0,0000	0,0000	145	145	146	0,0552	0,0517	0,0000	0,0000
108	108	109	0,0021	0,0019	0,0128	0,0079	146	146	147	0,0081	0,0076	0,0013	0,0008
109	108	110	0,0108	0,0101	0,0000	0,0000	147	146	148	0,0179	0,0167	0,0000	0,0000
110	110	111	0,0010	0,0009	0,0043	0,0026	148	148	149	0,0034	0,0032	0,0021	0,0013
111	110	112	0,0243	0,0227	0,0000	0,0000	149	148	150	0,0795	0,0745	0,0043	0,0026
112	112	113	0,0019	0,0018	0,0043	0,0026	150	150	151	0,0459	0,0430	0,0136	0,0084
113	112	114	0,0194	0,0181	0,0000	0,0000	151	150	152	0,0627	0,0587	0,0043	0,0026
114	114	115	0,0261	0,0244	0,0000	0,0000	152	152	153	0,0014	0,0013	0,0021	0,0013

Hat	İlk Bara	Son Bara	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük		Hat	İlk Bara	Son Bara	Hat Parametreleri		Son Baradaki Yük	
No	No	No	R (pu)	X (pu)	P(MW)	Q(MVAr)	No	No	No	R (pu)	X (pu)	P (MW)	Q (MVAr)
153	152	154	0,0046	0,0043	0,0021	0,0013	191	191	192	0,0014	0,0013	0,0064	0,0040
154	145	155	0,0462	0,0433	0,0021	0,0013	192	192	193	0,0502	0,0470	0,0000	0,0000
155	155	156	0,0279	0,0261	0,0021	0,0013	193	193	194	0,0081	0,0076	0,0043	0,0026
156	156	157	0,0092	0,0086	0,0000	0,0000	194	193	195	0,0083	0,0078	0,0000	0,0000
157	157	158	0,0021	0,0019	0,0043	0,0026	195	195	196	0,0036	0,0034	0,0043	0,0026
158	157	159	0,0054	0,0050	0,0013	0,0008	196	195	197	0,0239	0,0224	0,0000	0,0000
159	157	160	0,0006	0,0006	0,0000	0,0000	197	197	198	0,0007	0,0007	0,0021	0,0013
160	160	161	0,0004	0,0004	0,0043	0,0026	198	197	199	0,0261	0,0244	0,0021	0,0013
161	160	162	0,0085	0,0079	0,0043	0,0026	199	191	200	0,0102	0,0095	0,0000	0,0000
162	156	163	0,0003	0,0003	0,0021	0,0013	200	200	201	0,0079	0,0074	0,0043	0,0026
163	163	164	0,0029	0,0027	0,0064	0,0040	201	201	202	0,0034	0,0032	0,0085	0,0053
164	163	165	0,0207	0,0194	0,0043	0,0026	202	200	203	0,0084	0,0079	0,0043	0,0026
165	165	166	0,0008	0,0008	0,0136	0,0084	203	203	204	0,0034	0,0032	0,0128	0,0079
166	155	167	0,0119	0,0112	0,0000	0,0000	204	203	205	0,0160	0,0150	0,0000	0,0000
167	167	168	0,0041	0,0038	0,0085	0,0053	205	205	206	0,0039	0,0036	0,0043	0,0026
168	167	169	0,0077	0,0072	0,0136	0,0084	206	205	207	0,0073	0,0068	0,0000	0,0000
169	167	170	0,0003	0,0003	0,0000	0,0000	207	207	208	0,0020	0,0018	0,0043	0,0026
170	170	171	0,0003	0,0003	0,0000	0,0000	208	207	209	0,0046	0,0043	0,0000	0,0000
171	171	172	0,0060	0,0056	0,0000	0,0000	209	209	210	0,0011	0,0011	0,0021	0,0013
172	172	173	0,0016	0,0015	0,0128	0,0079	210	209	211	0,0620	0,0581	0,0021	0,0013
173	172	174	0,0141	0,0132	0,0021	0,0013	211	203	212	0,0175	0,0163	0,0000	0,0000
174	174	175	0,0138	0,0129	0,0000	0,0000	212	212	213	0,0046	0,0043	0,0085	0,0053
175	175	176	0,0056	0,0052	0,0000	0,0000	213	213	214	0,0029	0,0027	0,0136	0,0084
176	170	177	0,0085	0,0080	0,0000	0,0000	214	214	215	0,0081	0,0076	0,0085	0,0053
177	177	178	0,0010	0,0009	0,0043	0,0026	215	212	216	0,0239	0,0224	0,0170	0,0105
178	177	179	0,0016	0,0015	0,0064	0,0040	216	216	217	0,0359	0,0336	0,0085	0,0053
179	177	180	0,0120	0,0112	0,0021	0,0013	217	217	218	0,0125	0,0117	0,0213	0,0132
180	180	181	0,0029	0,0028	0,0170	0,0105	218	218	219	0,0009	0,0008	0,0064	0,0040
181	180	182	0,0239	0,0224	0,0000	0,0000	219	218	220	0,0115	0,0108	0,0085	0,0053
182	182	183	0,0060	0,0056	0,0000	0,0000	220	217	221	0,0050	0,0047	0,0000	0,0000
183	183	184	0,0057	0,0053	0,0021	0,0013	221	221	222	0,0093	0,0087	0,0013	0,0008
184	183	185	0,0074	0,0069	0,0128	0,0079	222	221	223	0,0183	0,0172	0,0000	0,0000
185	182	186	0,0042	0,0040	0,0021	0,0013	223	223	224	0,0018	0,0017	0,0000	0,0000
186	186	187	0,0038	0,0036	0,0085	0,0053	224	224	225	0,0050	0,0047	0,0085	0,0053
187	186	188	0,0049	0,0046	0,0043	0,0026	225	224	226	0,0120	0,0112	0,0043	0,0026
188	186	189	0,0045	0,0042	0,0013	0,0008	226	223	227	0,0120	0,0112	0,0000	0,0000
189	189	190	0,0084	0,0078	0,0021	0,0013	227	227	228	0,0031	0,0029	0,0021	0,0013
190	189	191	0,0160	0,0150	0,0000	0,0000	228	227	229	0,0102	0,0096	0,0013	0,0008

Tablo Ek 6. Test sistemleri için yük süre bilgisi

Zaman süresi (saat)	$T_1=1000$	$T_2=6760$	$T_3=1000$
Yük seviyesi (pu)	$SL_1=1,1SL$	$SL_2=0,6SL$	$SL_3=0,3SL$