

**T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OLASILIKSAL  
YÜK AKIŞI ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Rıfki TERZİOĞLU**

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Türker Fedai ÇAVUŞ**

**Haziran 2013**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OLASILIKSAL  
YÜK AKIŞI ANALİZİ**


**YÜKSEK LİSANS TEZİ**


**Elektrik-Elektronik Müh. Rıfki TERZİOĞLU**

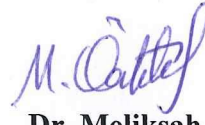
**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRİK**

**Bu tez 07 / 06 /2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.**

  
**Prof. Dr. Ertan  
YANIKOĞLU  
Jüri Başkanı**

  
**Yrd. Doç Dr. T. Fedai  
ÇAVUŞ  
Üye**

  
**Dr. Melikşah  
ÖZAKTÜRK  
Üye**

## ÖNSÖZ

Günümüzde elektrik enerjisinin yaşamımızın hemen hemen bütün alanlarında kullanılması güç sistemleri analizi ve planlanmasının önemini arttırmaktadır. Güç sistemleri planlanmasında amaç sabit gerilimde, sabit frekansta kesintisiz enerji sağlamaktır. Güç sistemlerinde sabit gerilim ve sabit frekans standardını analizi ve planlaması işlemi gerçekleştirilirken güç akışı yöntemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada klasik güç akışı yöntemleri dışında olasılıksal bir yaklaşım incelenmiştir. Bu yaklaşımda klasik yöntemlerin aksine gerçeklikte değişken olduğu bilinen fakat sistemde sabit kabul edilen değerler hesaba katılmaktadır. Bu yaklaşım, doğru ve alternatif akım sistemlerine uygulanmıştır.

Çalışmalarım boyunca beni destekleyen, bilgi ve birikimlerini paylaşan, tezin yazılması sırasında beni yönlendiren değerli tez danışmanı hocam Yrd. Doç. Dr. Türker Fedai ÇAVUŞ'a, yardımlarından ve fikirlerinden dolayı Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Ertan YANIKOĞLU'na, fikirleriyle beni yönlendiren Doç. Dr. Oğuz ÜSTÜN'e, KESKİN ailesine, mesai arkadaşlarıma ve her şeyimi borçlu olduğum, bugüne gelmemi sağlayan çok değerli annem Nurten TERZİOĞLU'na, babam Cabir TERZİOĞLU'na ve kardeşim Erdem TERZİOĞLU'na çok teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	ix
TABLolar LİSTESİ.....	x
ÖZET .....	xi
SUMMARY .....	xii
BÖLÜM.1.	
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM.2.	
GÜÇ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ .....	5
2.1. Üretim.....	6
2.2. İletim .....	7
2.2. Dağıtım.....	8
BÖLÜM.3.	
GÜÇ AKIŞI.....	10
3.1. Hat Parametreleri .....	11
3.2. Per-Unit Değerler .....	11
3.3. Bara Tipleri.....	13
3.4. Bara Admitans Matrisi ve Düğüm Denklemleri .....	13
3.5. Güç Akışı Hesaplamaları.....	14
3.6. İterasyon Metodları .....	16
3.6.1. Gauss-Seidell metodu.....	17
3.6.2. Newton-Raphson metodu .....	19

3.6.3. Hızlı Ayrışık Newton-Raphson metodu.....	23
3.6.4. Doğru akım güç akışı .....	24
3.7. Yük Akışı Analizinin Kullanıldığı Alanlar ve Metotların Karşılaştırılması .....	25
<b>BÖLÜM 4.</b>	
OLASILIKSAL YÜK AKIŞI ANALİZİ.....	27
4.1. Giriş.....	27
4.2. Temel Olasılık Kavramları .....	28
4.2.1. Beklenen değer ve varyans .....	28
4.2.2. Binom dağılım .....	30
4.2.3. Rastgele değişkenin konvolüsyonu .....	30
4.3. Doğru Akım Olasılık Yük Akışı .....	32
4.4. Alternatif Akım Sistemlerinde Olasılık Yük Akışı .....	35
4.4.1. Formülasyon 1 .....	36
4.4.2. Formülasyon 2 .....	38
4.4.3. Formülasyon 3 .....	40
4.4.3. Formülasyon 4 .....	44
<b>BÖLÜM.5.</b>	
WSCC (WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL) SİSTEMİNİN OLASILIKSAL YÜK AKIŞ ANALİZİ.....	46
5.1. 6 Baralı Örnek Bir Sistemin Doğru Akım Olasılıksal Yük Akışı Analizi.....	46
5.2. 9 Baralı WSCC Sisteminin Olasılıksal Yük Akışı Analizi.....	54
5.2.1. 9 baralı WSCC sisteminin verileri .....	54
5.2.2. Bara açıları ve hatlardaki aktif güç akışları.....	57
5.2.3. Bara gerilimleri ve reaktif güçler .....	61
<b>BÖLÜM.6.</b>	
SONUÇLAR .....	65
KAYNAKLAR .....	68

EKLER.....	72
ÖZGEÇMİŞ .....	78

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

DA	: Doğru akım
AA	: Alternatif akım
WSCC	: Western System Coordinating Council
$I_{BAZ}$	: Baz akımı
V	: Gerilim
$V_{BAZ}$	: Baz gerilimi
$V_1$	: Yük baralarına ait gerilim
$V_g$	: Üretim baralarına ait gerilim
$V_i$	: i. baraya ait gerilim
$Y_{BARA}$	: Bara admitansı
$V_{BARA}$	: Bara gerilimi
$T_1$	: 1 numaralı transformatör
$T_2$	: 2 numaralı transformatör
$T_3$	: 3 numaralı transformatör
$S_i$	: i. baranın görünür gücü
$P_i$	: i. baranın aktif gücü
$Q_i$	: i. baranın reaktif gücü
$I_i$	: i. baradaki akım
$I_i^*$	: i. baradaki akımın eşleniği
$P_{gi}$	: i. baraya bağlı jeneratörün aktif bileşeni
$P_{yi}$	: i. baraya bağlı yükünün aktif bileşeni
$Q_{ci}$	: i. baraya bağlı şönt reaktif üreticinin güç değeri
$Q_{yi}$	: i. baraya bağlı yükün reaktif bileşeni
[J]	: Jacobien matrisi
J1	: Jacobien matrisinin alt matrisi
J2	: Jacobien matrisinin alt matrisi

$J_3$	: Jacobien matrisinin alt matrisi
$J_4$	: Jacobien matrisinin alt matrisi
$S_{1\emptyset}$	: Tek faz görünür güç
$S_{3\emptyset}$	: Üç faz görünür güç
$P_{1\emptyset}$	: Tek faz aktif güç
$P_{3\emptyset}$	: Üç faz aktif güç
$Q_{1\emptyset}$	: Tek faz reaktif güç
$Q_{3\emptyset}$	: Üç faz reaktif güç
$Z$	: Empedans
$R$	: Rezistans
$X$	: Reaktans
$Y_{ij}$	: i ve j baraları arasındaki admitans
$Y_{ij}^*$	: i ve j baraları arasındaki admitansın eşleniği
$C_v$	: Gerilim yakınsama kriteri
$V_{\max}$	: Maksimum gerilim
$Q_{\min}$	: Minimum reaktif güç
$Q_{\max}$	: Maksimum reaktif güç
$P_{\min}$	: Minimum aktif güç
$P_{\max}$	: Maksimum aktif güç
$Q_l$	: Yük baralarının reaktif gücü
$Q_g$	: Jeneratör baralarının reaktif gücü
$S_l$	: Yük baralarının kompleks gücü
$S_g$	: Jeneratör baralarının kompleks gücü
$P_{\bar{u}}$	: Üretilen aktif güç
$Q_{\bar{u}}$	: Üretilen reaktif güç
$P_y$	: Tüketilen aktif güç
$Q_y$	: Tüketilen reaktif güç
$B$	: Suseptans
$E(X)$	: X değişkeninin beklenen değer
$F(x)$	: x değişkeninin dağılım fonksiyonu
$f(x)$	: x değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu
$\mu$	: Beklenen değer



$\sigma$	: Standart sapma
H	: Duyarlılık katsayısı
$B_{(sh)}$	: Şönt admitansın sanal kısmı
l	: Yük alt indisi
g	: Üretim alt indisi
$\wedge, *$	: İfadenin tersi
i,k,j,m,n	: Bara numaraları
Var(X)	: X değişkeninin varyansı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Genel bir güç sistemi şeması. ....	8
Şekil 3.1.	Genel amaçlı bir bara gösterimi. ....	16
Şekil 5.1.	6 baralı örnek sistem. ....	46
Şekil 5.2.	1 ve 3 numaralı düğümler arasındaki güç akışı. ....	51
Şekil 5.3.	2 ve 4 numaralı düğümler arasındaki güç akışı. ....	52
Şekil 5.4.	3 ve 5 numaralı düğümler arasındaki güç akışı. ....	52
Şekil 5.5.	1 ve 3 numaralı düğümler arasındaki güç akışı(1MW'lık aralıklarla) .	53
Şekil 5.6.	9 baralı WSCC test sistemi. ....	54
Şekil 5.7.	2 numaralı baradaki açının olasılık yoğunluk fonksiyonu .....	58
Şekil 5.8.	5 numaralı baradaki açının olasılık yoğunluk fonksiyonu .....	59
Şekil 5.9.	4 ve 6 numaralı baralar arasındaki aktif güç akışı .....	59
Şekil 5.10.	4 numaralı baradaki gerilimin olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	62
Şekil 5.11.	8 numaralı baradaki gerilimin olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	62
Şekil 5.12.	4 ve 1 numaralı baralar arasındaki reaktif güç akışı .....	64
Şekil 6.1.	4 ve 6 baraları arasındaki güç akışının kümülatif yoğunluk fonksiyonu.....	66

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1.	Örnek sistemde kullanılacak düğüm verileri. ....	47
Tablo 5.2.	Örnek sistem için kullanılacak hat parametreleri.....	47
Tablo 5.3.	Örnek sistemin güç akışı sonuçları. ....	50
Tablo 5.4.	1 ve 2 numaralı düğümler arasındaki hattın duyarlılık katsayıları...	50
Tablo 5.5.	1 ve 3 numaralı düğümler arasındaki hattın duyarlılık katsayıları...	50
Tablo 5.6.	2 ve 4 numaralı düğümler arasındaki hattın duyarlılık katsayıları...	51
Tablo 5.7.	9 baralı WSCC sistemine ait hat parametreleri.....	55
Tablo 5.8.	9 baralı WSCC sistemine ait deterministik veriler. ....	55
Tablo 5.9.	9 baralı WSCC sistemine ait olasılıksal veriler .....	56
Tablo 5.10.	2 numaralı baradaki jeneratörün kapasite olasılık tablosu. ....	56
Tablo 5.11.	3 numaralı baradaki jeneratörün kapasite olasılık tablosu. ....	57
Tablo 5.12.	Bara açılarının beklenen değerleri ve deterministik değerleri. ....	58
Tablo 5.13.	Hatlardaki aktif güç akışları.....	60
Tablo 5.14.	8 ve 9 numaralı düğümler arasındaki hattın duyarlılık katsayıları...	61
Tablo 5.15.	8 ve 9 numaralı düğümler arasındaki hattın duyarlılık katsayıları...	61
Tablo 5.16.	Yük baralarının gerilimleri ve standart sapmaları. ....	61
Tablo 5.17.	Jeneratör baralarının reaktif güçleri ve standart sapmaları.....	63
Tablo 5.18.	Hatlardaki reaktif güç akışları.....	63
Tablo 6.1.	4 ve 6 baraları arasındaki hattın aktif güç akışının verilen sınırın altında olma olasılığı. ....	66
Tablo 6.2.	4 ve 6 baraları arasındaki hattın aktif güç akışının verilen güç aralıklarında olma olasılığı. ....	67

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Olasılıksal Yük Akışı, Yük Dağılımı, Güç Sistemleri, Olasılık.

Yük akışı analizi, güç sistemleri analizinde kullanılan çok önemli araçlardan biridir. Deterministik yöntemlerde, sistem planlanmasında ve güvenilirlikte önemli olan bazı belirsizlikler ihmal edilmektedir. Bu çalışmada bir güç sisteminde güç akışı probleminin olasılıksal analiz tekniği anlatılmaktadır.

Bu çalışmanın amacı sistemin topolojisi sabit tutulurken, sistemdeki belirsizlikleri dikkate alarak çözüm yapmaktır. Her baranın gerilim genliği ve açısının, her hattın aktif ve reaktif güç akışının beklenen değeri ve standart sapması hesaplanmaktadır. Her hat için büyük bir öneme sahip olan duyarlılık katsayıları hesaplanmaktadır. Duyarlılık katsayıları bize düğüm verilerindeki değişikliklerin her hattaki güç akışını nasıl etkileyeceği hakkında bilgi vermektedir. Bu teknik, tüm olası güç akışlarını ve gerçekleşme olasılıklarını hesaplamaktadır.

Olasılıksal yaklaşım 9 baralı WSCC sistemine uygulanarak güç sistemlerinde, olasılıksal analizle deterministik analizden daha geniş bilgi sahibi olunduğu gösterilmiştir.

# **PROBABILISTIC ANALYSIS IN LOAD FLOW**

## **SUMMARY**

Key words: Probabilistic load flow, Load distribution, Power systems, Probability

Load flow analysis is one of the most important tools being used in analysing power systems. The significant uncertain parameters of the system planning and reliability are neglected in the deterministic method. In this study, the stochastic technique is proposed to examine the power flow issues in power systems

The main aim of this study is to provide a solid solution by considering the system uncertainties while keeping the system topology constant. The prospective values and the standard deviation of the power flow of each power line are estimated. The sensitivity coefficients which are quite significant for each power line are calculated as well. These coefficients tell us that how the changes occurring in the node data influence the power flow of each power line. This technique investigates the possibilities of all power flows taking place in the system.

Additionally, by applying the stochastic approach to 9 bus WSCC system it is verified that the probabilistic analysis method gives more detailed information in power systems than that the deterministic analysis does.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Güç sistemlerinin günümüz ve gelecekteki performanslarını analiz etmek için yük akışı hesaplamaları önemli bir araçtır. Yük akışı hesabını yapabilmek için çeşitli teknikler mevcuttur.

Deterministik (geleneksel) teknikler en çok kullanılan tekniklerdir. Deterministik kelime anlamı olarak, tahmini veya olasılığa dayalı olmayan, belirsizlik içermeyen bir matematik ifade kullanılarak kesin sonuca ulaşan hesaplama yöntemine verilen addır. Deterministik yöntemler, rutin olarak güç sistemlerinin planlama ve analizinde kullanılmaktadırlar. Bu yöntemle, seçilen sistemin güç akışı analizi için sistemin topolojisi, baralardaki yük ve üretim güç değerleri sabit olarak alınmaktadır. Bu nedenle deterministik yöntem güç sistemlerindeki belirsizlikleri (jeneratör zayıyatı, yük talebinin değişimi vb.) görmezden gelmektedir. Bu sebepten dolayı her barada verilen güç değerleri kullanılarak hesaplanan yük akışında bara gerilim ve açıların, hatlarda iletilen aktif ve reaktif güçlerin tek bir değeri mevcut olmaktadır. Sonuçlar ancak güç verileri kadar doğru olabilmektedir.

Baralardaki güç değerleri iki elemandan oluşmaktadır; yük değerleri ve üretim değerleri. Yük ve üretim güç değerleri gerçek hayatta sınırlı bir doğruluk ile belirlenebilirler, %100 doğru olduğu söylenemez. Aynı zamanda sistem elemanlarında oluşan beklenmeyen arızalar sonucunda güç değerlerinde belirsizlikler oluşmaktadır.

Güvenirliğin yüksek önem taşıdığı durumlarda, nükleer reaktörlerin analiz ve tasarımında, üretim ve iletim tesislerinin eklenmesinin planlandığı durumlarda güç sistemlerindeki belirsizlikler önem kazanmaktadır. Bu sebeple deterministik yaklaşım modern güç sistemlerinin analizi için yeterli olmamaktadır. Belirsizlikleri göz önünde bulundurmak için olasılıksal yaklaşım gibi değişik matematiksel

yaklaşımlara başvurulmaktadır. Olasılıksal yaklaşımlar kullanılarak yapılan yük akışı hesaplamalarına Olasılıksal Yük Akışı (Probabilistic Load Flow) adı verilmektedir.

Olasılıksal yük akışında incelenecek sistem, topolojisi ve hat parametrelerinin değişmediği düşünülerek baralarda güç giriş verilerini (yük ve üretim) değişken kabul edecek bir şekilde modellenmektedir. Bu çalışmanın amacı da bir güç sisteminde üretilen gücü ve talep edilen yükleri değişken parametreler olarak alarak hesaplanan bir yük akışı yöntemini açıklamak ve incelemektir. Böylelikle hesaplanan sonuçlar, deterministik yöntemde bulunan tek bir değer yerine olasılıksal olarak birçok değer olarak bulunacaktır. Bu şekilde tek bir sonucun bulunduğu yöntemin hataları ve sistemlerde var olduğu bilinen istatistiksel değişiklikleri hesaba katılmış olmaktadır. Olasılıksal yaklaşımı, yük akışı probleminin daha objektif ve güvenilirliğin daha nicel değerlendirilmesinin yapılmasını sağlamaktadır. Sistemde karşılaşılabilecek durumlar hakkında daha geniş bilgi edinilmektedir.

Olasılıksal yük akışı ile ilgili yapılan temel çalışmalar şunlardır:

1. 1974 yılında Olasılıksal Yük Akışı, Borkowska ve R.N. Allan tarafından ilk defa önerilmiş ve daha da geliştirilerek güç sistemleri analizlerinde kullanılmıştır [1,2].
2. 1976 yılında, R.N. Allan ve M.R.G. Al-Shakarchi tarafından yük akışına olasılıksal yaklaşım ilk defa AA sistemlerine uygulanmıştır [3].
3. 1976 yılında, R.N. Allan, C.H. Grigg ve M.R.G. Al-Shakarchi tarafından olasılıksal yük akışının nümerik tekniklerle çözümü anlatılmıştır [4].
4. 1976 yılında, R.N. Allan, C.H. Grigg, D.A. Newey ve R.F. Simmons tarafından, olasılıksal yük akışında değişkenlerin tamamen bağımsız varsayımı yerine kısmi korelasyon kullanılarak kısa vadeli yük taleplerinin yeni bir metotla modellenmesi yapılmıştır [5].
5. 1981 yılında, R.N. Allan ve A.M. Leite da Silva tarafından, yük akışı denklemlerinin doğrusal olmayışlarını hesaba katarak yapılan tamamen yeni bir algoritma gösterilmiştir [6].

6. 1984 yılında, A.M. Leite da Silva, V.L. Arienti ve R.N. Allan tarafından, yüklerdeki aktif ve reaktif güçlerin arasındaki ilişkinin doğrusal bir bağımlılık olduğunu kabul ederek olasılıksal yük akışlarının hesabı yapılmıştır [7].
7. 1985 yılında, M. Brucoli, F. Torelli ve R. Napoli tarafından, yük akışı denklemlerinin, Taylor serisi açılımındaki ihmal edilen ikinci dereceden terimlerinin dahil edilerek hesaplanmasına (kuadratik olasılıksal yük akışı) ve bu ikinci dereceden terimlerinin dahil edilmesinin katkısına yer verilmiştir [8].
8. 1985 yılında, A.M. Leite da Silva, R.N. Allan, S.M. Soares ve V.L. Arienti tarafından, ağ kesintilerini de göz önünde bulundurarak yeni bir olasılıksal yük akışı algoritmasına yer verilmiştir [9]. Ağ kesintilerini dikkate alarak başka metotlarla da çözümler yapılmıştır [10].
9. 1990 yılında, A.P.S. Meliopoulos, G.J. Cokkinides ve X.Y. Chao tarafından, yük akışı denklemlerindeki doğrusallaştırmalardan kaynaklanan hataları azaltmak için yeni bir yaklaşım sunulmuştur [11].
10. Olasılıksal yük akışında sistemin kontrol cihazlarıyla (kademe değiştirici trafo, anahtarlamalı kapasitör bankaları, statik VAR kompensatörler vb.) gerilim kontrolü konusu araştırılmış ve incelenmiştir [12-15].
11. Olasılıksal optimal güç akışının formülasyonu ve uygulamaları incelenmiştir [16,17].
12. Olasılıksal yük akışı analizi dengesiz üç faz durumunu dahil edecek ve harmonik yük akışına uygulanacak şekilde genişletilmiştir [18,19].
13. 2004 yılında, P. Zhang ve S.T. Lee tarafından, Olasılıksal yük akışı algoritmasının verimini arttırmak için Gram-Charlier Açılımı Teorisini uygulamıştır [20].

Günümüze kadar olasılıksal yük akışı konusunda çalışılmış birçok çalışma bulunmaktadır [21-25].

Bu tez çalışması toplam altı bölüm ve iki ekten oluşmaktadır.

Birinci bölümde; tezin genel olarak içeriği verilmiş ve konu ile ilgili yapılmış çalışmaların literatür özeti sunulmuştur.



İkinci bölümde; enterkonnekte sistemin günümüze gelişi ve elektrik güç sistemleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Üçüncü bölümde; per-unit sistemler, hat parametreleri, bara tipleri ve bara admitans matrisi gibi genel konulara değinilmiş, yük akışı ve yük akışında kullanılan iterasyon metotları anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde; olasılıksal terimler açıklanmış, DA ve AA'da olasılıksal yük akışı yöntemi ve olasılıksal modellemenin nasıl yapılacağı anlatılmıştır.

Beşinci bölümde; olasılıksal yük akışı analizinin uygulanacağı sistemler verileriyle birlikte verilmiştir. Verilerin nasıl indirgendiği ve kullanılan yöntem açıklanmıştır. Sistemdeki değişkenlerin olasılık yoğunluk fonksiyonları gösterilmiştir.

Altıncı bölümde; yük akışında olasılıksal yaklaşım ile elde edilen sonuçlar tartışılmış, kullanılabilceği durumlar ve sağladığı avantajlar hakkında bilgiler verilmiştir.

## **BÖLÜM 2. GÜÇ SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ**

Modern elektrik enerjisi sistemlerinin gelişiminin birkaç yüzyıl aldığı görülmektedir. 1800 yılından önce William Gilbert, CA de Coulomb, Luigi Galvani, Benjamin Franklin, Alessandro Volta gibi bilim adamları elektrik ve manyetik alan ilkeleri üzerinde çalıştı. Ancak, bu bilim adamlarının hiçbirinin zihninde herhangi bir uygulama yoktu, entelektüel merakları tarafından motive olmuş durumdaydılar.

1800 ve 1810 yılları arasında Sir Humphrey Davy, Andre Ampere, George Ohm ve Karl Gauss gibi bilim insanlarının araştırmalarıyla elektrik enerjisinin kullanılabilceği olasılığı tüm bilim dünyasının heyecanı olmuş durumdaydı.

İngiltere'de, Michael Faraday, 1821 ve 1831 yılları arasında indüksiyon prensibi üzerinde çalışmıştır. Faraday, gerilim üretmek için bir makine icat ederken indüksiyon prensibini kullanmıştır. Aynı zaman zarfında Amerikan mühendis Joseph Henry de indüksiyon prensibine bağlı olarak elektromanyetik ve telgraflar üzerine çalışmalar yapmıştır.

1840-1870 yılları arasında Charles Wheatstone, Alfred Varley, Siemens Kardeşler gibi mühendisler indüksiyon prensibini kullanarak ilkel jeneratörler inşa etmişlerdir.

1870'lerde ark aydınlatmasının ticarileştirilmesi gerçekleşti. Ark lambaları sokak aydınlatmalarında kullanılmaya başlandı. 1878 yılında Joseph Swan ampülü bulmuştur. 1879 yılında Thomas Alva Edison ilk karbon filamanlı elektrik ampulünü tasarlamıştır.

Elektrik enerjisinin kullanımının başlamasıyla birlikte talep edilen elektrik enerjisi de arttı. Bu da elektrik motorlarının tasarımı geliştirmek için yeterli teşvik sağladı. Motorlar çok hızlı bir şekilde popüler oldu ve birçok uygulamada kullanılmaya

başlandı. Bu gelişmelerle elektrik enerjisi dönemi gerçekten başlamış oldu. Ancak talep edilen yükün artmasıyla bazı problem ve sıkıntıların meydana gelmesi tecrübe edildi. Özellikle üretim istasyonlarından uzak noktalarda mevcut DA ağlarının düşük regülasyon yetenekleri bu duruma örnek olmuştur. Bu sorunu gidermek amacıyla, iletimi yüksek gerilimlerde yaparken tüketimi düşük gerilimlerde gerçekleştirmek önerilmiştir. Bu gelişmeler AA'nın doğmasına ve gelişmesine yol açmıştır.

1890'larda yeni kurulan Westinghouse Şirket'i elektriğin yeni bir formu olan alternatif akım ile çalışmalarını sürdürdü. Bu çalışmalar sırasında jeneratör dönüşüyle senkronize olarak akımın yön değiştirmesi alternatif akım olarak adlandırıldı. Sırp mühendis Nicola Tesla Westinghouse Şirketinde çalışmaktaydı. Nicola Tesla çok fazlı asenkron motoru icat etmesinin yanında tüm çok fazlı elektrik güç sistemlerini de tasarlamıştır.

Tesla DA'nın savunucuları olan Edison ve sahip olduğu General Elektrik Şirketinin şiddetli itirazlarıyla birçok kez karşı karşıya kalmıştır. AA ve DA arasındaki kıyasta AA şu gerekçelerle üstünlük kurmuştur:

- Transformatörler, iletim için AA gerilimi arttırabilmekte ve dağıtım için düşürebilmesi,
- AA jeneratörlerin yapımının daha kolay olması,
- AA motorların yapımının daha kolay olması, DA motorlara göre daha sağlam ve ucuz olmaları.

AA teknolojisinin gelişiyle elektrik daha fazla insana ulaşabilir bir duruma geldi. Üreteç ve iletim gerilim seviyesi artmış oldu. Günümüzde modern sistemlerde yüzlerce jeneratör, binlerce bara mevcut ve büyük bir enterkonnekte ağıdır. Bir güç sisteminin ana bileşenleri jeneratörler, transformatörler ve iletim hatlarıdır [26].

Bir elektrik güç sistemi temel olarak üç ana bölüme ayırt edilebilir: Üretim, iletim, dağıtım.

## 2.1. Üretim

Güç sistemlerinin en temel bileşenlerinden biri senkron jeneratör veya alternatör olarak bilinen 3 fazlı AA jeneratörlerdir. Senkron jeneratörlerde 2 döner alan mevcuttur. Birincisi rotorun doğru akımla uyarılarak senkron hızda ürettiği alandır. İkincisi de stator sargılarından 3 faz dengeli akımın akmasıyla üretilen döner alandır. Senkron jeneratörler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren elektrik makineleridir. Mıknatıslı bir alan içinde dönen bir iletken endüksiyon yoluyla bir elektromotor kuvveti oluşması prensibine göre çalışmaktadırlar.

Elektrik enerjisi, elektrik üretim istasyonlarında genellikle buhar veya su türbinleri yoluyla tahrik edilen senkron alternatörler tarafından üretilmektedir. Üretilen gücün çoğu, üretim istasyonlarındaki birden fazla alternatör-türbin kombinasyonu ile gerçekleştirilmektedir.

Üretim istasyonları kullandıkları yakıt türlerine bağlı olarak termik, hidrolik, nükleer vb. olarak kategorize edilebilirler. Rüzgar ve güneş kullanılarak da enerji üretimi gerçekleştirilmektedir.

Bir güç istasyonunda jeneratörler talep edilen toplam gücü sağlayabilmek için elektrik şebekesine paralel olarak işletilmektedirler. Bara adı verilen ortak bir noktaya bağlanmaktadır [27].

Güç sistemlerinin önemli bir başka bileşeni de transformatörlerdir. Transformatörler yüksek bir verimlilikte belli bir gerilim seviyesinden başka bir gerilim seviyesine güç aktarımı yapmakta kullanılırlar. Transformatörün ikincil tarafına aktarılan güç neredeyse birincil ucundaki güçle aynıdır. Tam aynı olmamalarının sebebi trafodaki kayıplardır.

## 2.2. İletim

Üretim istasyonları genellikle şehir ve kasabalara uzak bölgelerde bulunmaktadır. Dolayısıyla böyle bir istasyonda üretilen elektrik enerjisini yük merkezlerine (şehir, kasaba) uzun mesafeler üzerinden aktarmak mecburiyetinde kalınır. Yükseltici

transformatörlerle gerilim seviyesi artırılıp akım azaltılır. Akımın azalmasıyla kayıplar azalmış olur. Böylelikle uzun mesafelerde gücün ekonomik iletimi sağlanmış olur.

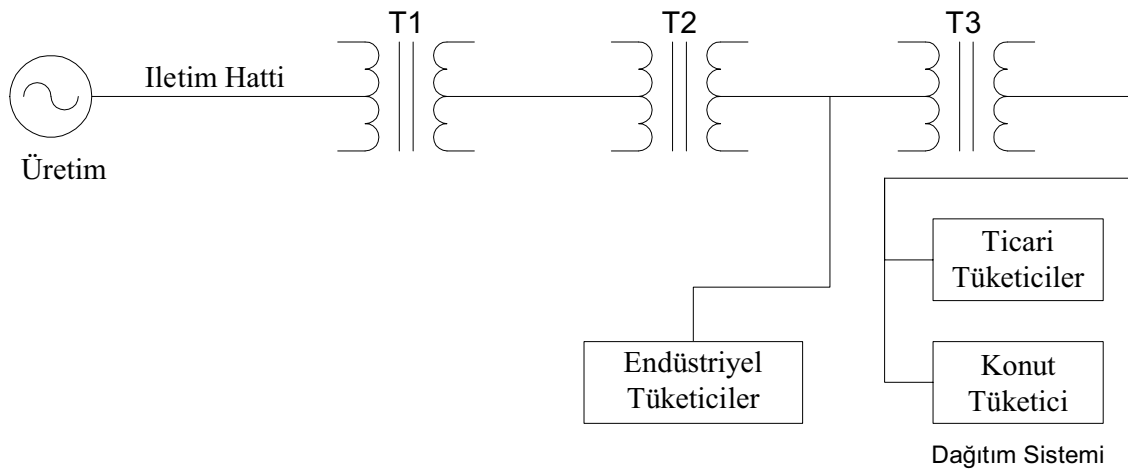
Üretim istasyonundan dağıtım sistemlerine güç iletimi havai yada yeraltı iletim hatları ile yapılmaktadır. Havai iletim hatlarının amacı üretim birimlerindeki elektrik enerjisini dağıtım sistemlerine transfer etmektir. Uzaklık ve transfer edilecek güç miktarı arttıkça iletim gerilimini de arttırmak gerekir. Zira elektriksel kayıplar sebebiyle uç gerilimi azalır. Diğer taraftan gerilim seviyesinin artması ile izolasyon problemleri ortaya çıkar. Bu da birçok ek maliyet getirir.

### 2.3. Dağıtım

Dağıtım sistemleri dağıtım trafolarını tüketicilere bağlayan kısımdır. Birincil dağıtım ağı gerilim seviyesi genellikle 4 ile 34.5 kV arasındadır.

Bazı endüstriyel müşteriler direkt olarak birincil dağıtım trafolarından beslenirler.

İkincil dağıtım ağı ticari ve konut tüketiciler için gerilimi azaltmaktadır. Dağıtım sistemleri havai ve yeraltı olarak bulunabilmektedirler [27].



Şekil 2.1. Genel bir güç sistemi şeması

Şekil 2.1.'de bir güç sisteminin temel yapısı gösterilmiştir. Şekildeki tipik sistem bir üretim birimi, iletim sistemi ve dağıtım sistemi içermektedir. Bu sistemler birbirlerine  $T_1$ ,  $T_2$  ve  $T_3$  transformatörleriyle bağlanmıştır. Güç sistemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için şu şekilde bir örnek verilebilir:

Elektrik enerjisi bir termik santralde 22 kV'luk (faz-faz) bir gerilim değeriyle üretilmektedir. Güç iletimi için  $T_1$  transformatörü yardımıyla 154 kV gibi seviyelere kadar arttırılır.  $T_2$  transformatörü bu gerilim seviyesini 34.5 kV'a indirgemektedir.

Birincil hattan direkt olarak beslenen yüksek gerilimli endüstriyel tüketiciler (yükler) bu noktadan şebekeye bağlanmaktadır. Bu gerilim seviyesindeki değişikliklerin sebebi, belli bir güç seviyesinde iletim hattının maliyetini düşürmek ve daha önce anlatıldığı gibi kayıpları en aza indirmek içindir.

Dağıtım sistemleri çok daha düşük güç seviyelerinde çalışmak üzere tasarlanmaktadır. Dağıtım sistemi gerilim seviyesinin 34.5 kV'tan 6.3 kV'a  $T_3$  transformatörüyle indirildiği noktada başlamaktadır. Dağıtım sisteminin bünyesinde ticari (ofis binaları, oteller vb.) ve konut tüketiciler bulunmaktadır. Ticari yükler 6.3 kV' la beslenirken, konut yükler 400 V (faz-faz) gerilim seviyesinde beslenmektedirler. Konut yükler tek fazla beslendiklerinden bu değer 230V civarındadır. Türkiye'de konut yükler 230V- 50 Hz ile beslenmektedirler.

## BÖLÜM 3. GÜÇ AKIŞI

Güç akışı çalışmaları, güç sistemleri analizinin çok önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Bu çalışmaların amacı; tasarım, planlama, kontrol ve ileriye dönük genişleme tahminleri için gerek duyulmasıdır. Güç akışı probleminde her bir barada gerilimin büyüklüğü ile açısının belirlenmesi ve her bir hattan geçecek aktif ve reaktif güçlerin bulunması istenmektedir.

Şebeke eşitlikleri sistematik bir şekilde çeşitli formlarda yazılabilir. En yaygın kullanılanı ise düğüm gerilimleri yöntemidir. Düğüm akımları belirlendiğinde düğüm gerilimleri için doğrusal eşitlik denklem takımları çözülebilir. Bir güç sisteminde akımlardan daha çok güçlere ilgi duyulur. Güç akışı eşitlikleri olarak bilinen doğrusal olmayan denklem takımları elde edilir ve iteratif yöntemlerle çözümlenir. Güç akışı çalışmaları güç sistem analizi ve tasarımında temel bir görev üstlenmektedir [27]. Güç akışı analizi ile ilgili olarak önemli çalışmalar yapılmıştır [28-32].

Herhangi bir yük akışı çalışmasının ana amaç ve hedefleri aşağıdaki gibidir:

1. Sistemdeki yük ve jeneratörlerin doğası ile ilgili bazı varsayımlara dayalı olarak iletim hatlarındaki aktif ve reaktif güçleri bulmak,
2. Güç sistemindeki tüm baraların gerilimlerini hesaplamak,
3. Hiçbir iletim hattı, trafo veya jeneratörün aşırı yüklenip yüklenmediğinin kontrol edilmesi,
4. İletim kayıplarını en aza indirmek için güç sisteminin optimum yapısını bulmaktır.

Bu bölümde öncelikle güç akışı hesaplamaları için gerekli olacak birkaç konu anlatıldıktan sonra güç akışı hesaplamaları ve iterasyon metotları anlatılmaktadır. Daha

sonra yöntemlerin karşılaştırılması ve yük akışı analizinin kullanıldığı yerler hakkında bilgi verilmektedir.

### 3.1. Hat Parametreleri

Hat parametreleri, güç sisteminde gerilim düşümü hesabı, yük akışı, kararlılık, kısa devre, geçici rejim (tranzient) analizlerinde ve hatların farklı yüklenme koşullarında performanslarını değerlendirmede kullanılır. Bu tür analizlerin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için enerji iletim hatlarının elektriksel karakteristiklerini ifade eden hat parametrelerinin doğru hesaplanması gerekir [33].

Enerji iletim hatlarının karakteristik performansını etkileyen elektriksel hat parametreleri direnç, endüktans, kapasitans ve kaçak geçirgenliktir. Kaçak geçirgenlik hatlarda uygulanan izolasyon sayesinde ihmal edilebilir. Hat parametreleri, tesis edilen hat ve direk tasarımı esas alınarak hesaplanır [33].

Hat parametrelerinin belirlenmesi hattın uzunluğuna, iletken tipine ve faz iletkenlerinin birbirlerine göre konumlarına bağlıdır [34].

### 3.2. Per-Unit Değerler

Devre hesapları gerçek değerlerle yapılabildiği gibi, bunları temsil eden Per-Unit değerlerle de yapılabilirler. Hesaplamaların herhangi bir kademesinde arzu edilirse gerçek değerlere dönmek her zaman için mümkündür [35].

Gerçek bir elektriksel değer, referans (baz) olarak seçilen bir değere oranı elektrik mühendisliğinde 'per-unit (pu)' ifadesi olarak kabul görmüş olup bunun 100 katı ise % olarak adlandırılmıştır [36].

$$\text{Per-unit} = \frac{\text{Gerçek Değer}}{\text{Baz Olarak Alınan Değer}} \quad (3.1)$$

$$\% \text{Değer} = 100 * (\text{per-unit}) \quad (3.2)$$



Elektrik sistemlerinin per-unit cinsinden hesaplanması, yapılan işi oldukça basitleştirir. Akım, gerilim, güç ve empedans büyüklüklerin birbirleri ile ilişkisi nedeniyle herhangi ikisinin (yaygın olarak gerilim ve güç) baz olarak alınması halinde, geriye kalan diğer ikisi kolaylıkla hesaplanabilir. Baz olarak seçilen büyüklükler kullanılarak, diğer baz değerler tek fazlı ve üç fazlı şebekeler için ayrı ayrı hesaplanabilir [36].

Tek fazlı ve üç fazlı şebekelerde yaygın kullanılan güç ve gerilim baz alınarak akım ve empedans hesaplanabilir.

Tek fazlı şebekeler için;

$$I_{BAZ} = \frac{(S_{1\phi})_{BAZ}}{V_{BAZ}} \quad [A] \quad (3.3)$$

$$Z_{BAZ} = \frac{(V_{BAZ})^2}{(S_{1\phi})_{BAZ}} \quad [\Omega] \quad (3.4)$$

olarak bulunur. Hesaplamalarda gerekmesi durumunda,

$$(S_{1\phi})_{BAZ} = (P_{1\phi})_{BAZ} = (Q_{1\phi})_{BAZ} \quad (3.5)$$

olarak alınabilir.

Üç fazlı şebekeler için;

$$I_{BAZ} = \frac{(S_{3\phi})_{BAZ}}{\sqrt{3}U_{BAZ}} \quad [A] \quad (3.6)$$

$$Z_{BAZ} = \frac{(U_{BAZ})^2}{(S_{3\phi})_{BAZ}} \quad [\Omega] \quad (3.7)$$

olarak bulunur. Tek fazlı şebekelerde olduğu gibi hesaplamalarda gerekmesi durumunda,

$$(S_{3\phi})_{BAZ} = (P_{3\phi})_{BAZ} = (Q_{3\phi})_{BAZ} \quad (3.8)$$

olarak alınabilir. İster tek fazlı ister üç fazlı şebekeler olsun, transformatörlerin primer ve sekonder tarafındaki empedanslarının per-unit değerleri birbirine eşittir. Şebekenin bütün elemanlarının per-unit değerleri aynı baz değerlerine göre hesaplanır.

### 3.3. Bara Tipleri

Yük akışı problemi ele alınırken, sistemin dengede ve sürekli hal koşulları altında çalıştığı varsayılmaktadır ve tek faz model kullanılmaktadır. Her bir baranın tüm özellikleri dört değişken yardımı ile belirlenmektedir. Bu değişkenler gerilim genliği  $|V|$ , faz açısı  $\delta$ , aktif güç  $P$  ve reaktif güç  $Q$ 'dur. Güç akışında bu değişkenlerden ikisinin bilindiği kabul edilerek diğer ikisi bulunmaktadır.

Sistem baraları genel olarak üçe ayrılmaktadır:

- a- Salınım (Slack) Barası: Yük akışında bu bara referans olarak alınmaktadır.  $|V|$  ve  $\delta$  değişkenleri bilinmekte olup, bilinmeyen  $P$  ve  $Q$  değişkenleri hesaplanarak bulunmaktadır.
- b- Jeneratör Barası veya Gerilim Kontrollü Bara: PV barası olarak adlandırılan bu barada  $P$  ve  $|V|$  bilinen değerler olup,  $Q$  ve  $\delta$  hesaplanmaktadır. Jeneratör, statik kapasitör vb. sistem elemanlarının bağlı olduğu bu baradaki  $Q$  limitleri ile veya otomatik gerilim regülatörleriyle gerilim sabit tutulabilir.
- c- Yük Barası: PQ barası olarak adlandırılan bu barada  $P$  ve  $Q$  değişkenleri bilinen,  $|V|$  ve  $\delta$  hesaplanacak olan değişkenlerdir.

### 3.4. Bara Admitans Matrisi ve Düğüm Denklemi

Bara admitans matrisi, devre kollarının admitans değerlerini kullanarak bir şebekenin içine ve dışına akan akımlarla düğüm noktası arasındaki bağıntıyı kuran denklemlerdir. Düğümler baraları temsil etmektedirler. Dallar iletim hattını ve transformatörleri temsil eder. Düğüm denklemi Kirchhoff'un akım yasasına

dayandığı için admitansa ihtiyaç duyulmaktadır. Bu sebepten empedansları admitansa çevirmektediriz. Empedansları admitansa çevirme işlemi:

$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \frac{r_{ij} - jx_{ij}}{r_{ij} - jx_{ij}} = \frac{r_{ij} - jx_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \quad (3.9)$$

şeklinde yapılmaktadır.

Düğüm denklemini yazmak istersek;

$$I_{\text{Bara}} = Y_{\text{Bara}} \cdot V_{\text{Bara}} \quad (3.10)$$

şeklinde yazılmaktadır. Bu eşitliği matris formda yazılırsa;

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

Burada  $I_{\text{Bara}}$  akım vektörünü,  $V_{\text{Bara}}$  gerilim vektörünü ifade etmektedir.  $Y_{\text{Bara}}$  bara admitans matrisi olarak adlandırılmaktadır.  $Y_{ii}$  self admitans,  $Y_{ij}$  ortak (transfer) admitanstır.  $[Y]$  matrisinin köşegen elemanlarını oluşturan self admitans, baraya bağlı tüm admitansların toplamına eşittir ve denklem 3.12 ile gösterilir.

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad j \neq i \quad (3.12)$$

$[Y]$  matrisinin köşegenleri dışındaki elemanları oluşturan ortak (transfer) admitansı ise baralar arasındaki admitansın negatif değerine eşittir [27].

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (3.13)$$

### 3.5. Güç Akışı Hesaplamaları

Bara sayısı  $n$  adet olan bir enerji sisteminde  $i$ . baradan alternatif akım hattına verilen kompleks güç birim değer olarak;

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (3.14)$$

ifadesiyle bulunabilir. Yukarıda verilen akım fazörü eşlenik değeri, bara gerilimleri ve sistem elemanlarının admitansları cinsinden yazılırsa;

$$I_i^* = \sum_{j=1}^n y_{ij}^* V_j^* \quad (i. \text{ bara için}) \quad (3.15)$$

olarak bulunur. (3.14) ifadesindeki  $V_i$  ifadesi yerine;

$$V_i \angle \delta_i = V_i (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (3.16)$$

yazılabilir.  $V_i$  ;i. baraya ilişkin karmaşık değerde bara gerilimidir.  $V_j^*$  ise j. baraya ilişkin eşlenik bara gerilim değeridir.  $\delta_i$ ; verilen bir referansa (genellikle salınım barasına) göre i. baranın gerilim faz açısıdır. (3.15) eşitliğinde kullanılan  $y_{ij}$  admitansı,  $[y_{bara}]$  admitansı matrisinin (i ,j) elemanı olup,

$$y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (3.17)$$

ifadesiyle verilebilir. (3.15), (3.16) ve (3.17) ifadesinde yerine konular ve ifade düzenlenirse;

$$S_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) + j V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (i=1, \dots, n) \quad (3.18)$$

elde edilir.  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$  değerinde olup, i. ve j. bara gerilim fazörlerinin açıları arasındaki faz farkıdır. (3.18) eşitliği reel ve sanal kısımlarına ayrılırsa, i. baradan alternatif akım hattına verilen aktif ve reaktif güç değerleri;

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.19)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3.20)$$

olur.

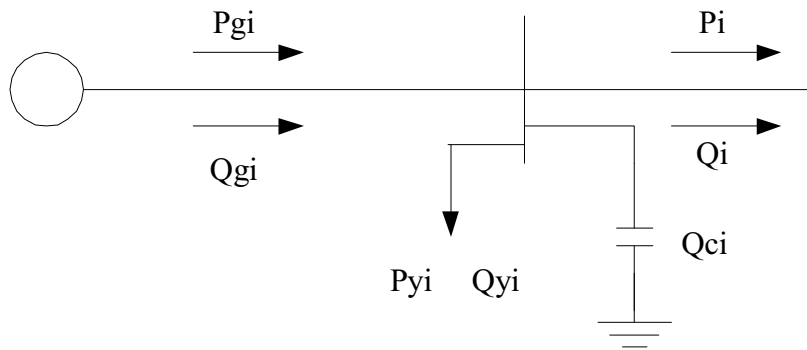
i. baraya bağlı jeneratör aktif gücü  $P_{gi}$ , i. baraya bağlı yükün aktif bileşeni  $P_{yi}$  ve i. baraya bağlı tüm hatlara verilen aktif güç değeri  $P_i$  ise, i. baradaki aktif güç dengesinden;

$$P_{gi} = P_{yi} + P_i \quad (3.21)$$

yazılabilir. i. baraya bağlı jeneratör reaktif gücü  $Q_{gi}$ , i. baraya bağlı kontrol edilebilen şönt reaktif üreteç güç değeri  $Q_{ci}$  (bu üreteç güç katsayısını düzeltici bir kapasite olabileceği gibi senkron makinede olabilir), i. baraya bağlı yükün reaktif bileşeni  $Q_{yi}$  ve i. baraya bağlı tüm hatlara verilen reaktif güç değeri  $Q_i$  ise, i. baradaki reaktif güç dengesinden,

$$Q_{gi} + Q_{ci} = Q_{yi} + Q_i \quad (3.22)$$

yazılabilir [32].



Şekil 3.1. Genel amaçlı bir bara gösterimi.

Şekil 3.1. genel amaçlı bir bara gösterimi verilmiştir. Güç akış algoritması,

$$P_i - (P_{gi} - P_{yi}) = P_i - P_{hati} = g_{pi} = 0 \quad (i=2, \dots, n) \quad (3.23)$$

$$Q_i - (Q_{ci} - Q_{yi}) = Q_i - Q_{hati} = g_{qi} = 0 \quad (i=ng+1, \dots, n) \quad (3.24)$$

ifadelerinin sağlanması durumunda son bulur [37]. (ng; sistem içindeki toplam jeneratör sayısını göstermektedir.)

### 3.6. İterasyon Metodları

Yük akışı problemi çok sayıda doğrusal olmayan denklemlerden oluştuğundan, çözümleri için iterasyon metotlarının kullanılması gerekir. Yaygın olarak kullanılan metotlar Gauss-Seidel, Newton-Raphson ve Fast Decoupled (hızlı ayırık) Newton-Raphson metotlarıdır [36].

#### 3.6.1. Gauss-Seidel metodu

Bu metot ile bilinmeyenlerin değerleri tahmin edilir, birinci eşitlikte elde edilen değer  $V_1$ , ikinci eşitlikte yerine konularak  $V_2$ , üçüncü eşitlikte yerine konularak  $V_3$ 'ün hesaplanması için kullanılır. Bu işlem, her eşitlik için, yakınsama kriterini sağlayana kadar devam eder [36].

Denklem (3.10) eşitliklerindeki bilinmeyenlerin  $[V_{\text{bara}}]$  olduğunu kabul edelim. Gerilim değerleri yalnız bırakılırsa Gauss-Seidel iterasyon denklemleri,

$$V_1^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{11}} (I_1^{(i)} - Y_{12} V_2^{(i)} - \dots - Y_{1n} V_n^{(i)}) \quad (3.25)$$

$$V_2^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{22}} (I_2^{(i)} - Y_{21} V_1^{(i)} - \dots - Y_{2n} V_n^{(i)}) \quad (3.26)$$

$$V_n^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{nn}} (I_n^{(i)} - Y_{n1} V_1^{(i+1)} - \dots - Y_{nn-1} V_{n-1}^{(i+1)}) \quad (3.27)$$

elde edilir. Denklem 3.25-3.27 eşitliklerindeki  $I_n$  yerine,

$$I_n = \frac{P_n - jQ_n}{V_n^*} \quad (3.28)$$

yazılabilir.

Salınım baranın gerilimi bilindiği için onun geriliminin hesaplanmasına gerek yoktur. Denklem 3.27 ve 3.28 ile ifade edilen eşitlikler, sistemdeki tüm yük baraları için uygulanır. Yük baralarındaki P ve Q değerleri bilindiğinden V değerleri bulunmaya çalışılır. Güç sisteminde n bara olsun k. yük barası için Gauss-Seidel iterasyon denklemi,

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left( \frac{P_k - jQ_k}{V_k^{(i)*}} - Y_{n1} V_1^{(i+1)} - Y_{n2} V_2^{(i+1)} - \dots - Y_{n-1} V_{n-1}^{(i+1)} \right) \quad (3.29)$$

elde edilir. 3.29 eşitliği  $i=0$ 'dan başlayarak  $V_k^{(1)}$  hesaplanır [31]. Bu işlem,

$$\left| V_k^{(i+1)} - V_k^{(i)} \right| < C_v \quad (3.30)$$

sağlanana kadar devam eder.  $C_v$  gerilim yakınsama kriterini göstermektedir ve 0,001 ile 0,0001 arasında bir değer alınır.

Gauss-Seidel ile yük akışı çözümünde, sistemdeki jeneratör baraları için yük akışı çözümü farklıdır. Bunun sebebi jeneratör baralarında  $Q$  yerine  $V$  bilinmektedir. Bu yüzden  $Q$ 'nun hesaplanması gerekir. Bara sayısı  $n$  olan bir sistemde  $m$ . bara jeneratör barası olsun. Bu bara için verilen güç ifadesi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$S_m = V_m I_m^* = P_m + jQ_m \quad (3.31)$$

$$I_m = \frac{P_m - jQ_m}{V_m^*} = Y_{m1} V_1 + Y_{m2} V_2 + Y_{m3} V_3 + \dots + Y_{mn} V_n \quad (3.32)$$

$$P_m - jQ_m = V_m^{(i)*} \left( \sum_{j=1}^n Y_{mj} V_j^{(i)} \right) \quad (3.33)$$

(3.33) eşitliğinin sanal kısmı alındığında,

$$Q_m = -\text{Im} \left( V_m^{(i)*} \left( \sum_{j=1}^n Y_{mj} V_j^{(i)} \right) \right) \quad (3.34)$$

elde edilir. Bulunan tüm gerilim değerleri yerlerine konularak  $Q_m$  değerleri hesaplanır. Bulunan değerler  $Q_{\text{mak}}$  değerinden büyükse  $Q_m = Q_{\text{mak}}$ ,  $Q_{\text{min}}$  değerinden küçükse  $Q_m = Q_{\text{min}}$  değeri alınır. Hesaplanan  $Q_m$ , (3.29) eşitliğinde yerine konarak gerilim hesaplanır [36].

Jeneratör baralarının gerilim fazörlerinin hesaplanması yük baralarının gerilim fazörlerinin hesaplanması gibidir. Gerilim değeri jeneratörün maksimum gerilim değerinden büyükse jeneratörün maksimum gerilimi, minimum değerinden küçükse

minimum değeri alınır. Her iki durumda da açı değeri sabit tutulup bir sonraki iterasyonda kullanılır [37].

Tüm bara gerilim genlik ve açı değerleri bulunduktan sonra (3.19) ve (3.20) eşitliklerinde  $i=1$  konularak salınım barasına ilişkin jeneratör aktif ve reaktif güç değerleri elde edilir.

### 3.6.2. Newton-Raphson metodu

Newton-Raphson metodunda, bilinmeyenler için başlangıç değerleri tahmin edilir. Fonksiyonla ilişkilendirilmiş bağımsız değişkenler için hata düzeltmesi yapılarak, fonksiyondaki düzeltme sıfıra götürülür. Hatanın sıfıra gitmesi için, fonksiyon  $x_0$  civarında Taylor serisine açılarak, iterasyon ile çözüme ulaşılmaya çalışılır [36].

Doğrusal olmayan bir matris denklemi;

$$\begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} = [y] \quad (3.35)$$

olarak verilsin. Bu eşitlik Taylor serisine açılır, ikinci ve daha yüksek terimler ihmal edilir ise, (3.14) eşitliğini sağlayan  $x$  değerleri  $(i+1)$ . iterasyonda;

$$[x(i+1)] = [x(i)] + [j^{-1}(i)] * [y - f(x(i))] \quad (3.36)$$

denklemi kullanılarak bulunur. Bu eşitlikte geçen  $[y - f(x(i))]$  vektör matrisi, (3.23) ve (3.24) eşitliklerinde verilen iki alt vektör matrisin tek bir vektör matrisi olarak ifade edilmesiyle elde edilir. (3.23) ve (3.24) eşitliklerinde görüldüğü gibi  $[y]$  vektör matrisi iterasyon adımından bağımsızdır. Eğer her hangi bir iterasyon sonunda;

$$x(i+1) - x(i) \leq \varepsilon \quad (3.37)$$

sağlanırsa Newton-Raphson Algoritması sona erer, aksi halde en son iterasyondaki  $x$  değerleri bir sonraki iterasyonda başlangıç değeri olarak kullanılır ve algoritma



kaldığı yerden devam eder. (3.36) ifadesindeki  $[j]$ , Jacobien matris olarak adlandırılır ve  $(n \times n)$  boyutundadır;

$$[j(i)] = \left[ \frac{df}{dx} \right]_{x=x(i)} = \begin{bmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \frac{df_1}{dx_2} & \dots & \frac{df_1}{dx_n} \\ \frac{df_2}{dx_1} & \frac{df_2}{dx_2} & \dots & \frac{df_2}{dx_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{df_n}{dx_1} & \frac{df_n}{dx_2} & \dots & \frac{df_n}{dx_n} \end{bmatrix}_{x=x(i)} \quad (3.38)$$

Güç akışı algoritmasında yukarıda verilen kabuller altında Taylor açılımı kullanıldığı durumda;

$$[x]^T = [\delta_2 \quad \dots \quad \delta_n \quad V_{ng+1} \quad \dots \quad V_n] \quad (3.39)$$

$$[y]^T = [P_{hat2} \quad \dots \quad P_{hatn} \quad Q_{hat(ng+1)} \quad \dots \quad Q_{hatn}] \quad (3.40)$$

$$[f(x)]^T = [P_2 \quad \dots \quad P_n \quad Q_{(ng+1)} \quad \dots \quad Q_n] \quad (3.41)$$

olacaktır. Jacobien matris ifadesi (3.39)'de gösterilmiştir. Jacobien matris elemanları aktif ve reaktif güçlerin  $\Delta\delta_i^{(k)}$  ve  $\Delta|V_i^{(k)}|$  da hesaplanan kısmi türevleridir. Matrisin ana köşegen ve ana köşegen dışı elemanları için;

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = J1(i,i) = V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (-G_{ij} \sin\delta_{ij} + B_{ij} \cos\delta_{ij}) \quad (3.42)$$

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = J1(i,j) = V_i V_j (G_{ij} \sin\delta_{ij} - B_{ij} \cos\delta_{ij}) \quad (3.43)$$

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = J2(i,i) = V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) + 2V_i G_{ii} \quad (3.44)$$

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = J2(i,j) = V_i (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.45)$$

$$\frac{dP_i}{d\delta_i} = J3(i,i) = V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.46)$$

$$\frac{dQ_i}{d\delta_i} = J3(i,j) = -V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.47)$$

$$\frac{dQ_i}{d\delta_i} = J4(i,i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2V_i B_{ii} \quad (3.48)$$

$$\frac{dQ_i}{d\delta_i} = J4(i,i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) - 2V_i B_{ii} \quad (3.48)$$

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{dP_2}{d\delta_2} & \frac{dP_2}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dP_2}{d\delta_n} & \frac{dP_2}{dV_{ng+1}} & \frac{dP_2}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dP_2}{dV_n} \\ \frac{dP_3}{d\delta_2} & \frac{dP_3}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dP_3}{d\delta_n} & \frac{dP_3}{dV_{ng+1}} & \frac{dP_3}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dP_3}{dV_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \frac{dP_n}{d\delta_2} & \frac{dP_n}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dP_n}{d\delta_n} & \frac{dP_n}{dV_{ng+1}} & \frac{dP_n}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dP_n}{dV_n} \\ \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_2} & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_n} & \frac{dQ_{ng+1}}{dV_{ng+1}} & \frac{dQ_{ng+1}}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dQ_{ng+1}}{dV_n} \\ \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_2} & \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dQ_{ng+2}}{d\delta_n} & \frac{dQ_{ng+2}}{dV_{ng+1}} & \frac{dQ_{ng+2}}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dQ_{ng+2}}{dV_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \frac{dQ_n}{d\delta_2} & \frac{dQ_{ng+1}}{d\delta_3} & \dots & \dots & \frac{dQ_n}{d\delta_n} & \frac{dQ_n}{dV_{ng+1}} & \frac{dQ_n}{dV_{ng+2}} & \dots & \dots & \frac{dQ_n}{dV_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & J2 \\ J3 & J4 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

$$\frac{dQ_i}{dV_{ji}} = J4(i,j) = V_i (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3.50)$$

olur. Newton Raphson algoritması sona erdiğinde x durum değişkenleri vektörü elde edilmiş olur. PV baralarında  $Q_g$  değerleri bilinmediğinden tüm PV (salınım barası dahil) baraları için (3.20) eşitliği kullanılarak  $Q_i$  ( $i=1, \dots, ng$ ) değerleri bulunur. Sonra yine tüm PV baralarına (3.24) ifadesi uygulanarak bilinmeyen tüm  $Q_g$  (salınım barası dahil) değerleri elde edilir. Salınım barasına ilişkin  $p_{g1}$  jeneratör aktif gücünü bulmak için önce (3.19) eşitliğinde  $i=1$  için  $P_1$  elde edilir. Sonra bulunan bu değer (3.23) ifadesinde  $i=1$  için yerine konular ve  $P_{g1}$  elde edilir. Hatlarda kaybolan aktif güç değeri ise;

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{gi} - \sum_{j=1}^n P_{yj} = \text{Toplam aktif güç kaybı} \quad (3.51)$$

ifadesi ile bulunabilir.  $i$ . ve  $j$ . baraların arasındaki hattın admitansı  $y_{ij}$ , hattın  $\pi$  eşdeğer devresi kullanıldığında, her bir baraya bağlanan hattın şönt admitans değeri  $y_{ij}$  olarak alınır,  $i$ . ve  $j$ . baralar arasındaki hattın akan kompleks güç;

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i (V_i^* - V_j^*) y_{ij}^* + V_i V_i^* \left( \frac{y_{ij}}{2} \right)^* \quad (3.52)$$

olur.  $i$ . ve  $j$ . baralar arasındaki hattın akan aktif ve reaktif güç değeri;

$$P_{ij} = \text{Re} \left\{ V_i (V_i^* - V_j^*) y_{ij}^* + V_i V_i^* \left( \frac{y_{ij}}{2} \right)^* \right\} \quad (3.53)$$

$$Q_{ij} = \text{Imj} \left\{ V_i (V_i^* - V_j^*) y_{ij}^* + V_i V_i^* \left( \frac{y_{ij}}{2} \right)^* \right\} \quad (3.54)$$

eşitlikleri kullanılarak bulunur.

Eğer güç akışı sonunda bazı değişken değerleri kendilerine ilişkin minimum ve maksimum sınırları aşarsa, algoritmada bazı değişiklikler yapılması gerekir.

Güç akışı çalışması sonucunda PQ baralarından birisinde eğer bara gerilim genlik değeri sınır değerlerinden uzaklaşmış ise (alt sınırın altına düşmüş ya da üst sınırın üstüne çıkmış) bu bara için  $V=V_{\min}$  ya da  $V=V_{\max}$  alınıp  $Q_y$  (bu baradan çekilen reaktif güç) değeri serbest bırakılır. Bu durumda bara, yük barası olmaktan çıkarılıp PV barası yapılmaktadır. Bu baraya ilişkin aktif güç değeri ise  $P_y=P_{\text{gen}}$  alınıp ve bu yeni değerler kabul edilerek güç akışı algoritmasının yeniden hesaplanması gerekir.

Güç akışı çalışması sonucunda PV baralarından birisinde (bara gerilim genlik değeri sabit tutulmaya çalışılırken) bu baraya ilişkin reaktif güç değeri sınır değerlerinden uzaklaşmış ise (alt sınırın altına düşmüş ya da üst sınırın üstüne çıkmış) bu bara için  $Q=Q_{\min}$  ya da  $Q=Q_{\max}$  alınıp,  $V$  (bu baraya ilişkin bara gerilim genlik) değeri serbest bırakılır. Bu durumda bara, PV barası olmaktan çıkarılıp PQ barası yapılmaktadır. Bu baraya ilişkin aktif güç değeri ise  $P_{\text{gen}}=P_y$  alınıp ve bu yeni değerler kabul edilerek güç akışı algoritmasının yeniden başlatılması gerekir. Hesaplama sonunda bu baranın gerilim genlik değeri bulunur [37].

Güç akışı bitiminde eğer salınım barasından AA sistemine reaktif gücün sınır değeri aştığı görülür ise  $Q_1=Q_{1\min}$  ya da  $Q_1=Q_{1\max}$  alınarak salınım bara genlik değeri  $V_1$  sabit tutulmaz ve değişken yapılır. Bu durumda (1 numaralı) salınım barası PQ (yük barası) olarak hizmet görmeye başlar. Salınım barası olarak PV baralarından güçlü olan ( $P_{\text{gen}}$  değeri büyük olan) bir bara alınır [37].

### 3.6.3. Hızlı ayrışık Newton-Raphson metodu

Büyük boyutlu enerji iletim sistemlerinin izlenmesi ve kontrolü amacıyla ana bilgisayarda sık sık güç ve yük akışı hesabı yapılır. Gauss-Seidel metodu doğrusal denklemlerin, Newton-Raphson ise doğrusal olmayan denklemlerin çözümü için geliştirilseler de, bu metotlar yük akışı problemini çözmede de kullanılır. Algoritma olarak Newton-Raphson tercih edilmişse, sistemin büyümesi Jacobien matrisini de oldukça büyütür. Bu nedenle bilgisayar bellek gereksinimi artarak, algoritmanın yakınsaması uzar. Bu olumsuzlukları gidermek amacıyla hızlı ayrık güç akışı çalışmaları başlamıştır. Hızlı ayrışık metodu, güç sistemleri özelliklerinden yararlanılarak Newton-Raphson metodunun sadeleştirilmesiyle elde edilen bir çözüm yoludur.

Güç sistemlerinde, nominal işletme koşullarında bara gerilimlerindeki değişimler genellikle reaktif güç akışını, gerilim faz açılarındaki değişimler ise aktif güç akışını etkiler. Bu özellik kullanıldığında Jacobien matrisinin elemanları  $dP_i/dV_i$  ve  $dQ_i/d\delta_i$  ihmal edilmektedir. Bu şekilde güç akışı algoritması hem hızlandırılır, hem de bilgisayar bellek gereksinimi azaltılır. Algoritmanın daha da hızlandırılması için  $V_i \approx V_k \approx 1$  p.u. kabul edilip,  $\delta_i \approx \delta_k$  alınabilir. Bu son kabuller kullanılırsa  $J_1$  ve  $J_4$  sabit matris özelliği kazanır. Böylece her iterasyonda Jacobien matrisinin tekrar hesaplanmasına gerek kalmamaktadır. Dolayısıyla algoritmanın yakınsama hızı oldukça artar. Bu yaklaşım; zaman kazanmanın önemli olduğu yerlerde kullanılmakta olup, doğruya yaklaşık sonuçlar üretebilmektedir [37,38].

#### 3.6.4. Doğru akım yük akışı

DA yük akışı analizi yapmadan önce (3.19) ve (3.20) eşitliklerini tekrar ele alacak olursak:

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij})$$

DA yük akışı, sistemdeki hatlarda reaktif güç akışının bulunmadığını kabul eden, sadece gerilim açısı ve aktif güç analizi yapan yük akışıdır. Doğru akımla bir alakası yoktur. Doğru akım yük akışı yapılırken 3 önemli noktaya dikkat edilmesi gerekmektedir.

Bu noktaların birincisi; iletim sistemlerinde rezistansın değeri reaktans değerinden oldukça küçüktür. Genellikle reaktans/rezistans oranı 2 ila 10 arasındadır.

Rezistansın reaktansa kıyasla çok küçük olduğu düşünülürse (3.19) ve (3.20) eşitliklerindeki  $G$ 'nin  $B$ 'den çok küçük olacağını söylemek mümkün olacaktır.  $G=0$  ve  $B=-1/x$  kabulü yapıldığında, admitans matrisinin reel kısımlarının sıfır olacağını söylemek mümkündür. Bu bilgiyi de yük akışı denklemlerine ekleyecek olursak (3.19) ve (3.20) eşitlikleri;

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.55)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (-B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (3.56)$$

halini almaktadır.

Dikkat edilmesi gereken ikinci nokta; normal çalışma koşulları altında sistemde bağlantısı olan i ve j baralarının gerilim fazörlerinin açılarındaki fark ( $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ ) 10 ila 15 dereceden az olmaktadır. Bu durumda yapılan kabul, küçük bir açının sinüsü açının kendisine eşittir (açı radyan cinsinden). Bu durumda (3.55) ve (3.56) ifadeleri;

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (B_{ij} (\delta_i - \delta_j)) \quad (3.57)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (-B_{ij}) \quad (3.58)$$

şeklini almaktadır.

Üçüncü kabul ise per-unit değerlerde gerilim genliklerinin 1 olduğudur.  $|V_i| = |V_j| = 1 \text{ p.u.}$

### 3.7. Yük Akışı Analizinin Kullanıldığı Alanlar ve Metotlarının Karşılaştırılması

Gauss-Seidel metodunda her iterasyonda elde edilen değerler bir önceki iterasyona göre sabit kalmaktadır. Bu durum sonuca ulaşmak için çok sayıda iterasyon gerektirmektedir.

Newton-Raphson metodunda Gauss-Seidel metoduna göre daha fazla hesaba gerek vardır. Bunun sebebi her iterasyonda Jacobien matrisinin hesaplanması ve doğrusal denklemlerin çözülmesidir. Gerçeğe yakın çözüme ise Gauss-Seidel metoduna göre daha az iterasyon sayısı ile ulaşılır.

Bazı durumlarda birkaç metot kullanılarak çözüme ulaşılabilmektedir. Örneğin, başlangıç olarak seçilen tahmini gerilim değerleri çözümden uzak ise, öncelikle Gauss-Seidel metodunun kullanılması daha sonra elde edilen başlangıç değerlerinin Newton-Raphson metodu ile doğru sonuca ulaşmasını hızlandırmaktadır.

Yük akışı analizleri, güç sistemi planlanmasında ve işletilmesinde kullanılır. Sistem planlanmasında amaç, tüm tüketim tesislerine yeterli, güvenilir, kaliteli, ekonomik ve sürekli enerji sağlamaktır. Güç sistemi planlanması, iletim planlanması (iletim tesislerinin tasarımını, analizini ve iletim sisteminin gelişimini), güç sistemleri arasında enerji alış-verişini, üretimin yeterlilik çalışmasını ve sisteme yeni ilavelerin fayda-maliyet analizlerini içerir. Üretim planlaması da güç sistemi planlamasının bir parçasıdır [39].

Yük akışı analizlerinin yaygın olarak kullanıldığı alan iletim sistemi planlamasıdır. İletim sisteminin gelecekte alacağı modeller hazırlanarak, örneğin puant yük koşullarında oluşturulan modeller ile yük akışı analizleri yapılır. Bu analizlerle iletim sisteminde kullanılacak elemanların (iletkenlerin tipi ve kesiti, transformatörler, kapasiteler vb.) karakteristik özellikleri belirlenir.

Yük akışı analizleri ile iletim hatlarının yüklenme durumları, baralarda limitler dışında kalan gerilimler, üretim tesislerinde üretilen reaktif üretimler ve işletmede karşılaşılabilecek diğer parametreler belirlenir.

Güç sistemi işletmesinde, tüm baralardaki gerilimlerin tespiti, iletim sistemi elemanlarının yüklenme durumları, sistemdeki kayıplar ve kısıtlılık kontrollerinin yapılması gereklidir. Kısıtlılık kontrolü ile sistemdeki elemanlardan birinin veya bir kaçının devre dışı olmasının, sisteme olan etkisi belirlenir. Böyle bir durumda alınması gereken önlemler önceden tespit edilmeye çalışılır.

Kısıtlılık analizleri sistemin normal işletme koşullarında olduğu dikkate alınarak yapılır. Böyle bir durumda tüm hatların devrede olduğu varsayılır ve (n-1) kriterine göre sistemdeki elemanların her biri ayrı ayrı devre dışı edilerek sisteme etkisi belirlenir [33].

## **BÖLÜM 4. OLASILIKSAL YÜK AKIŞI ANALİZİ**

### **4.1. Giriş**

Son yüzyılda elektrik güç sistemlerinde, dünya çapındaki güç kesintileri güvenilirlik çalışmaları yapanların büyük ilgisini çekmiştir. Güç piyasası ortamında elektrik güç sistemlerinin çalışma modları hızla değişir. Bu yüzden operatörlerin; sistemin durumunu ve iletim hattını yakından takip etmesi, her türlü stokastik etkenleri düşünmesi, sistemin kritik çalışma noktalarından uzak tutması ve olası zincirleme arızalarını önlemesi gerekir. Bu durum için geleneksel deterministik güvenilirlik analiz yöntemlerinin sınırlamaları vardır. Deterministik güvenilirlik analizi yöntemlerine göre; sistem çeşitli öngörülen yükümlülükler altında, güvenilir bir şekilde çalışabilmelidir. Belirli yükümlülükler altında sistemde aşırı ve anormal gerilimler meydana geldiğinde, sisteminin çalışmasını sağlamak için önlemler alınması gerekir. Deterministik yöntemin avantajı teoreminin basit olmasıdır, ancak nesnel oluşu sistemin güvenlik seviyesini tutarsız yapar. Bu yöntem, yüksek risk taşıyabilecek bazı beklenmedik durumların oluşma olasılıklarını ve sonuçlarını dikkate almaz.

Olasılıksal yük akışı yöntemi güç sistemlerinin kararlı durum çalışmasında kullanılan bir stokastik yöntemdir. Bu nedenle olasılıksal yük akışı yöntemi güç sistemlerinin çalışma karakteristiklerini klasik yöntemlere göre daha detaylı açıklar. Sistemde olası arıza verebilecek noktaları bulmamızı sağlar.

Elektrik enerji sistemlerinin planlanması yapılırken; uzun vadeli yük tahminleri, üretim kapasitesi ve dağıtım planlarında değişiklik gibi birçok belirsiz değişken mevcuttur. Bu değişkenlerin yük akışı üzerinde büyük etkileri vardır. Genel sistem performansını değerlendirmek için, ağ planlamacıları genellikle birçok olası sistem çalışma modları için yük akışı hesaplamaları yapmaktadırlar. Olasılıksal yük akışı



hesaplama yöntemi kullanımı; daha geniş bir bakışla planlama ve koruma cihazlarının seçimi gibi sorunları etkili bir şekilde çözer.

Olasılıksal yük akışı hesaplamalarında, yük akışı denklemlerinin doğrusallaştırılması ve konvolüsyon hesaplamaları önem taşımaktadır.

## 4.2. Temel Olasılık Kavramları

Bu bölümde, tez çalışmasında kullanılacak olasılık terimlerinden kısaca bahsedilecektir. Olasılık terimleri genellikle giriş güç değerlerinde ve yük akışı sonucunda gerilimler ve hatlardaki aktif-reaktif güç akış değerlerinde kullanılacaktır.

### 4.2.1. Beklenen değer ve varyans

Kesikli rastgele-ayrık (discrete) değişken için;

X rastgele değişkeni ayrık ise birikimli olasılık fonksiyonu veya dağılım fonksiyonu;

$$F(x) = \sum_{x_1 \leq x} P(x) \quad (4.1)$$

olur. Burada F(x) birikimli olasılık fonksiyonu ve P(x) olasılık fonksiyonudur. Bir olasılık fonksiyonunun beklenen değeri ve varyansı aşağıdaki ifadelerden hesaplanabilir.

$$E(X) = \mu_x = \sum_{i=1}^N x_i \cdot P(x_i) \quad (4.2)$$

$$\text{Var}(X) = \sigma_x^2 = E[(X - \mu_x)^2] = E[(X - E(X))^2] \quad (4.3)$$

$$\text{Var}(X) = \sigma_x^2 = \sum_x [X - E(X)]^2 \cdot P(X) \quad (4.4)$$

$$\text{Var}(X) = \sigma_x^2 = E(X^2) - [E(X)]^2 \quad (4.5)$$

(4.3)-(4.5) eşitliklerinde Var(X) X değişkeninin varyansıdır. E(X)=μ olduğu unutulmamalıdır.

Varyansın negatif olmayan kareköküne  $X$  rastgele değişkeninin standart sapması denir ve  $\sigma_x$  ile gösterilmektedir.

Sürekli rastgele değişken için; bir  $X$  rastgele değişkeni belli bir aralıkta verilmiş sonsuz sayıdaki değeri alabiliyorsa sürekli rastgele değişken adını alır. Ayrıca  $X \in (-\infty, +\infty)$  aralığında negatif olmayan bir  $f(x)$  fonksiyonu varsa bu fonksiyona olasılık yoğunluk fonksiyonu adı verilir.  $f(x)$  bir olasılık yoğunluk fonksiyonu ise aşağıdaki şartları sağlamalıdır.

i)  $f(x) \geq 0$  , tüm  $x$  değerleri için,

$$ii) \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$$

$$iii) P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f(x)dx$$

Birikimli olasılık yoğunluk fonksiyonunun (dağılım fonksiyonu) türevi olasılık yoğunluk fonksiyonuna eşit olmaktadır.

$$F'(x) = f(x) \tag{4.6}$$

Bu bilgiler doğrultusunda  $f(x)$  olasılık yoğunluk fonksiyonuna sahip olan bir  $X$  rastgele değişkeninin beklenen değeri;

$$E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x)dx \tag{4.7}$$

olur. Varyansı ise;

$$\text{Var}(X) = E(X - \mu)^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x)dx \tag{4.8}$$

denklem (4.8) ile bulunmaktadır. Beklenen değer ve standart sapma ifadeleri her baradaki aktif güç ifadelerinde, bara gerilimleri ve açılarında kullanılacaktır.

#### 4.2.2. Binom dağılım

$P(X=1)=p$  ve  $P(X=0)=1-p$  olsun. Bu durumda  $X$  rastgele değişkenimiz  $p$  parametresine sahip Bernoulli dağılıma sahip bir değişkendir. İki duruma sahip rastgele olayları açıklamak için kullanılmaktadır. Üretim jeneratörleri, trafolar ve iletim hatları gibi bileşenler iki duruma sahiptirler; çalışma durumları (1 olarak belirtilir) ve arıza durumları (0 olarak belirtilir). Bu dağılım üretim jeneratörlerinin çalışma ve arızalanma olasılıkları kısmında kullanılacaktır.

Sadece iki sonuç veren bir deneyin  $n$  kez tekrar edilmesiyle,  $A$  (başarı) durumunun ortaya çıkma sayısı  $r$  ve bu durumun olasılığı  $p^r$ , oluşmama sayısı (hata) ise  $(n-r)$  ve bu durumun olasılığı da  $(1-p)^{n-r}$  olmaktadır.  $X$  rastgele değişkeninin olasılığı ise denklem (4.9) ile gösterilmektedir;

$$P_r(n,p) = \binom{n}{r} p^r (1-p)^{n-r} \quad r = 0,1,2,\dots,n \quad (4.9)$$

$n$  ve  $p$  parametreleri bilinen binomal dağılımın beklenen değeri ve varyansı;

$$E(X) = np, \quad (4.10)$$

$$\sigma^2 = np(1-p) \quad (4.11)$$

(4.10) ve (4.11) eşitlikleri kullanılarak hesaplanır.

#### 4.2.3. Rastgele değişkenin konvolüsyonu

İki raslantısal değişken  $X$  ve  $Y$ 'nin birbirinden bağımsız olduğunu ve olasılık yoğunluk fonksiyonlarının  $f_1(x)$  ve  $f_2(y)$  olduğu varsayılmaktadır.  $X$  ve  $Y$  olasılıksal düğüm verilerinden iki veri kümesini temsil ettiği düşünülebilir. Bu durumda  $X$  ve  $Y$ 'nin olasılık dağılım fonksiyonları:

$$P_1(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f_1(x) dx \quad (4.12)$$

$$P_2(x) = P(Y \leq y) = \int_{-\infty}^y f_2(y) dy \quad (4.13)$$

Eğer  $Z$  başka rassal bir değişken (örneğin bir hattaki güç akışı) ve  $Z = X + Y$  ise,  $Z$ 'nin olasılığı;

$$P_3(z) = P(Z \leq z) = P(X+Y \leq z) = \int \int_{x+y < z} f_1(x)f_2(y)dx dy \quad (4.14)$$

$X$  ve  $Y$  birbirinden bağımsız olduğuna göre (4.14) eşitliği,

$$P_3(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y) \int_{-\infty}^{z-y} f_1(x)dx dy \quad (4.15)$$

ve (4.12) eşitliğini kullanarak, (4.15) eşitliği,

$$P_3(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y)P_1(z-y)dy \quad (4.16)$$

(4.16) halini alır. Bu nedenle (4.16) eşitliğinden ve  $Z$ 'nin olasılık yoğunluk

fonksiyonunun  $f_3(z) = \frac{dP_3}{dz}$  olduğu bilindiğinden,

$$f_3(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(y)f_1(z-y)dy \quad (4.17)$$

veya,

$$f_3(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x)f_2(z-x)dx \quad (4.18)$$

olur. Eşitlik (4.17) iki bağımsız rastgele değişkenin toplamının yoğunluk fonksiyonun elde edilmesini sağlar ve konvolüsyon olarak bilinir. Genel ifadesi;

$$f_3(z) = f_1(x)*f_2(y) \quad (4.19)$$

Denklem (4.19) olarak yazılır. Bu konvolüsyon tekniği herhangi bir sayıda bağımsız rassal değişkene uygulanabilir.

Belirli bir hattın güç akışını etkileyen  $R$  adet bağımsız rassal değişken olduğu düşünülürse,

$$Z_R = \sum_{r=1}^R X_r \quad (4.20)$$

ve buna bağılı olarak,

$$f_z(z) = f_1(x_1) * f_2(x_2) * \dots * f_R(x_R) \quad (4.21)$$

olmaktadır.  $X_r$  r.inci bağımsız değişken (düğüm verileri),  $Z_R$  toplamın net tutarı (hattaki güç akışı),  $f_r(x_r)$  r.inci değişkenin olasılık fonksiyonu ve  $f_z(z)$  ise net olasılık yoğunluk fonksiyonudur [2].

### 4.3. Doğru Akım Olasılıksal Yük Akışı

DA yük akışı, AA yük akışını doğrusal bir devre sorunu haline getirerek basitleştirir. Böylece, güç sisteminin kararlı durum analizi çok verimli hale getirilmiş olur. DA yük akış modelinin eksikliklerinden biri, gerilim sınırı ihlalleri denetlenirken kullanılamamasıdır.

DA yük akışı doğrusal bir model kullandığı için, hat kesintileri sorununu çözmek amacıyla etkin bir şekilde kullanılmakta olup, aynı zamanda doğrusal optimizasyon problemleri için uygun olmaktadır. Bu nedenle, DA yük akışı yöntemi güç sistemi planlama ve işletme problemlerinde yaygın olarak kullanılır.

Olasılıksal yaklaşımda ana hedef var olduğu bilinen ve hesaba katılmayan belirsizlikleri birer değişken olarak tanımlayıp yük akışı hesabına dahil etmektir. Var olan bu belirsizliklerin oluşma sebepleri;

- ölçme hatası veya tahmin belirsizlikleri,
- yükün tam bilinmemesi ve belirli limitlerde kabul edilmesi,
- beklenmeyen ve planlanmayan sistem elemanlarının devre dışı kalmalarıdır.

Bu belirsizlikler deterministik çözümlerdeki gibi sabit kabul etmek yerine değişken olarak tanımlanır. Bu değişkenler, verilerin değişim sıklıklarına göre birer olasılıksal dağılıma bağılı olarak tanımlanır. Yani giriş güç verileri değişken değerler göstermektedir ve bunun sonucunda yük akışlarında tek bir değer yerine değişkenlik izlenir.

Düğümlerdeki güç değerleri olasılık yoğunluk fonksiyonlarına bağlı olarak tanımlanır. Güç sistemlerinde olasılık yoğunluk fonksiyonlarını tanımlamak için birçok analitik model vardır. Örneğin; bir dizi özdeş jeneratör ünitesini temsil için binom dağılım, düğümde belirli bir yük tahmini varsa normal dağılım, bu iki dağılım uygun olmadığında ise ayrık değişken olarak tanımlanabilir. Bu değişkenler tanımlanırken beklenen değerleri ( $\mu$ ), deterministik değere eşit alınır. Bunun yanında diğer yöntemlere artı bir özellik olarak hatlardaki yük akışları hesaplandığında beklenen değerleri yanında standart sapmaları hakkında da bilgi sahibi olunur.

DA yük akışında hatlardaki yük akışları doğrusal bir şekilde düğümlerdeki net güce bağlı olmaktadır. Aktif ve reaktif güçler birbirinden bağımsızdır. Sistemdeki güç dengesi sadece referans bara (salınım bara) tarafından sağlanmaktadır ve kayıplar dikkate alınmamaktadır. Her yük akışı sırasında sistemin topolojisinin sabit tutulmaktadır.

DA yük akışı problemlerinde aşağıda belirtilen yapılan kabuller yapılır. Bunlar;

- $V_i = V_k = 1 \text{ p.u.}$  ,
- $G_{ik} = 0$  (sıfır hat direnci),
- $\sin \delta_{ik} = \delta_{ik}$  .

Bu kabuller altında düğümlerdeki aktif güç ve düğümler arası aktif güç akış eşitlikleri aşağıdaki şekilde olur:

$$P_i = \frac{1}{X_{ik}} \delta_{ik} \quad (4.22)$$

$X_{ik}$ , i ve k düğümleri arasındaki hattın reaktansı ve  $\delta_{ik}$  i ve k baraları arasında açı farkıdır. (4.22) eşitliğini matris formunda yazarsak ve tersini alırsak;

$$\delta = Y^{-1} P \quad (4.23)$$

denklem (4.23) elde edilir. Bu eşitlikte yer alan  $Y_{ii}$  ve  $Y_{ik}$  ifadeleri aşağıda gösterilmiştir.

$$Y_{ik} = \frac{-1}{X_{ik}} \text{ ve } Y_{ii} = \sum_{i \neq k} 1/X_{ik}$$

Salınım barasının satır ve sütununun silindiği unutulmamalıdır. Baralar arası yük akışı ise;

$$P_{ik} = \frac{\delta_i - \delta_k}{X_{ik}} \quad (4.24)$$

(4.24) eşitliğinden hesaplanır. (4.23) eşitliğinde  $\delta$  ifadesini bulurken  $P$  ifadesi değişkendir ve buna bağlı bir şekilde  $\delta$  değişkenlik göstermektedir. Bu bilgiler doğrultusunda  $P_{ik}$  ifadesi deterministik çözümdeki bir değer yerine oluşma olasılıklarıyla birden fazla değer içerir.

Baralar arasındaki aktif güç akışlarının ve sahip oldukları standart sapmalarının hesaplanmasında başka bir yöntem ise duyarlılık katsayılarının kullanılmasıdır. Duyarlılık katsayıları  $H_{(ik)j}$  matrisiyle gösterilir. Duyarlılık katsayısı,  $j$  barasına 1 MW'lık bir güç girildiğinde,  $i$  ve  $k$  düğümleri arasındaki hattan akacak güç miktarını gösterir. Bu sayede baralardaki güçlerin hatlara olan etkisi görülebilir ve sistem hakkında daha geniş bilgi sahibi olunabilir. Eğer  $j$  barası salınım barası ise  $H_{(ik)j} = 0$  olarak alınır.

$$H_{(ik)j} = \frac{Y_{ij}^{-1} - Y_{kj}^{-1}}{X_{ik}} \quad (4.25)$$

Duyarlılık katsayısıyla hatlardaki yük akışı;

$$P_{ik} = \sum_j H_{(ik)j} P_j \quad (4.26)$$

ifadesinden bulunur.

Hatlardaki yük akışlarının varyansı ise;

$$\text{Var}(P_{ik}) = \sum_j H_{(ik)j}^2 \text{Var}(P_j) \quad (4.27)$$

olur.

Duyarlılık katsayılarının hesaplanması için sistemin topolojisinin sabit olması ve hat parametrelerinin bilinmesi yeterlidir. Sadece duyarlılık katsayılarına bakılarak bile sistem hakkında genel yorumlar yapılabilir ve baralardaki güç miktarlarının birbirlerini nasıl etkiledikleri görülebilir.

#### 4.4. Alternatif Akım Sistemlerinde Olasılıksal Yük Akışı

1974 yılında Borkowska yük akışını olasılıksal bir yaklaşım ile incelemiştir [1]. Fakat bu yaklaşım sadece doğru akım sistemlerini içermekteydi. 1976 ve 1977 yıllarında R.N. Allan ve M.R.G. Al-Shakarchi olasılıksal yaklaşımı alternatif akım sistemlerine uygulamışlardır.

Alternatif akım sistemlerinde yük akışı analizi yapılırken (3.19) ve (3.20) eşitliklerindeki aktif ve reaktif güç ifadelerinin doğrusal olmamalarından dolayı Newton-Raphson ve Gauss-Seidel gibi iteratif metotlara yapılır. Olasılıksal analizde doğrusal yaklaşımlar tercih edilir.

OYA (Olasılıksal Yük Akışı) analizinin ilk adımı bara güç giriş ve çıkışlarının olasılıksal dağılımlarını elde etmektir. Her zaman açık olarak belirtilmiş olmasa da üretim ve yüklerin salınım barasında dengelendiği varsayımı yapılarak ve hat kayıplarını ihmal ederek salınım barasının gücü;

$$P_s = \sum_{i \neq s} P_i \quad (4.28)$$

şeklinde bulunmaktadır. Eğer üretim ve yük güçlerinin birbirlerinden bağımsız olduğu varsayılırsa (çoğu olasılıksal yük akışı analizinde bağımsız oldukları varsayılır)  $P_s$ 'nin varyansı;

$$\text{Var}(P_s) = \sum_{i \neq s} \text{Var}(P_i) \quad (4.29)$$

ifadesiyle hesaplanabilir. (4.29) eşitliğinden görüldüğü gibi salınım barasının varyansı oldukça büyüktür. Aynı şekilde salınım barasına bağlı hatların güç akışlarının varyansları da büyük olur. Salınım barasının değişimi tüm sistemdeki varyansları beraberinde değiştirir.



Bu bölümde R.N. Allan ve M.R.G. Al-Shakarchi tarafından geliştirilmiş ilk 4 temel formülasyon incelenmektedir. Bu formülasyonlar yük akışındaki güç ifadelerini çeşitli varsayımlarla doğrusallaştırarak elde edilmiş halidir. Genel yük akışı eşitlikleri (3.19) ve (3.20) ek olarak (4.30)-(4.32) denklemlerinin bilinmesi gerekmektedir.

$P_i$ ; i barasındaki aktif güç,  $Q_i$ ; i barasındaki reaktif güç,  $V_i$  ve  $V_k$ ; i ve k baralarının gerilim genliği,  $G_{ik}$ ; admitans matrisinin ik elemanının reel kısmı,  $B_{ik}$ ; admitans matrisinin ik elemanının imajiner kısmı,  $\delta_{ik}$ ; i ve k baraları arasında açı,  $t_{ik}$ ; transformatör kademe oranı,  $B_{ik}'$ ; i-k hattının suseptansının yarısı ve  $B_{i(sh)}$ ; i barasındaki şönt admitansın imajiner kısmı olmak üzere  $P_{ik}$ ; i ve k baraları arasındaki aktif güç akışı,  $Q_{i(sh)}$ ; i barasındaki şönt elemanın sağladığı reaktif güç ve  $Q_{ik}$ ; i ve k baraları arasındaki reaktif güç akışı Denklem (4.30), (4.31) ve (4.32)'de gösterilmektedir.

$$P_{ik} = -t_{ik} G_{ik} V_i^2 + V_i V_k (G_{ik} \cos \delta_{ik} + B_{ik} \sin \delta_{ik}) \quad (4.30)$$

$$Q_{ik} = t_{ik} B_{ik} V_i^2 - B_{ik}' V_i^2 + V_i V_k (G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}) \quad (4.31)$$

$$Q_{i(sh)} = V_i^2 B_{i(sh)} \quad (4.32)$$

Gösterilecek olan formülasyonlarda güç akışı denklemlerini doğrusal hale getirmek için belirli kabuller yapılacaktır. Bu kabuller ile yük akışı eşitlikleri doğrusal hale getirilmektedir. Bu sayede yük akışı problemi olasılıksal analiz için elverişli duruma getirilmiş olmaktadır.

#### 4.4.1. Formülasyon 1

Bu formülasyonda bara açıları ve aktif güç akışları doğru akım sistemlerindeki kabuller ve yöntemle yapılır. Yük bara sayısı  $n_1$  ve salınım barası dahil PV bara sayısı  $n_2$  olsun. Gerilim ve reaktif güçleri bulmak için  $V_i=1$  p.u. kabulü yapılırsa reaktif güç ifadesi,

$$Q_i = \sum_{k=1}^n A_{ik} V_k \quad (4.33)$$

denklem (4.33) şeklini alır. Bu ifadede yer alan  $A_{ik}$  ve  $A_{ii}$  ifadeleri aşağıda verilmiştir.

$$A_{ik} = G_{ik} \sin \delta_{ik} - B_{ik} \cos \delta_{ik}$$

$$A_{ii} = -B_{ii}$$

(4.33) eşitliğini matris formatında yazdığımızda  $Q=AV$  olmaktadır. Bu ifadeyi yük ve jeneratör şeklinde bölümlenirse,

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & L \\ N & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_g \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

halini alır.  $Q_1$ 'nin yük barası sayısı,  $Q_g$ 'nin ise jeneratör bara sayısı kadar elemanı bulunmaktadır. (4.34) eşitliğinden,

$$Q_1 = MV_1 + LV_g \quad (4.35)$$

denklem (4.35) olur ve bu ifadeden  $V_1$  ifadesini çekilirse,

$$V_1 = \hat{M}Q_1 + \hat{M}H \quad (4.36)$$

(4.36) eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte,

$H = -LV_g$ 'dir. Bu ifadede hesaplanan yük baralarının gerilim ifadeleri kullanılarak, jeneratör baralarının reaktif güçleri denklem (4.37)'den elde edilir.

$$Q_g = NV_1 + JV_g \quad (4.37)$$

Baralar arası reaktif güç akışını bulurken reaktif güç ifadesini doğrusallaştırmak için  $V_i^2 = V_i$  ve  $V_i V_k = V_k$  kabulü yapılır. Bu kabul sonucunda baralar arası reaktif güç akışı ifadesi,

$$Q_{ik} = \alpha_{ik} V_i + A_{ik} V_k \quad (4.38)$$

$$Q_{i(sh)} = V_i B_{i(sh)} \quad (4.39)$$

(4.38) ve (4.39) ifadeleriyle bulunur.

Bu ifade de  $\alpha_{ik} = t_{ik} B_{ik} - B_{ik}'$  şeklindedir.

Bu formülasyonda aktif güçleri değişken olarak bara açıları ve baralar arası aktif güç akış ifadelerinin değişken değerlerinin her bir durumu ve bu durumların oluşma olasılıklarıyla hesaplanır. Değişken açı değerleri ve sistemde verilecek olan değişken bara reaktif güçleri kullanılarak (4.34) eşitliği yardımıyla yük baralarının bilinmeyen gerilim değerleri ve jeneratör baralarının reaktif güç değerleri hesaplanır. Bu aşamadan sonra baralar arası reaktif güç akışlarını hesaplamak için bütün değişkenler bulunmuş olur. Bu değişkenleri kullanarak baralar arası reaktif güç akışlarının değişimi olasılıklarıyla birlikte hesaplanabilir.

#### 4.4.2. Formülasyon 2

Bu formülasyonda Formülasyon 1 deki gibi bara açıları ve aktif güç akışları doğru akım sistemlerindeki kabullerle ve yöntemle yapılır. Yük bara sayısı  $n_1$  ve salınım barası dahil PV bara sayısı  $n_2$  varsayımı bu formülasyonda da geçerlidir. Gerilim ve reaktif güçleri bulmak için (4.40)'daki kabul yapılır [3].

$$V_i = 1 + \Delta V_i$$

$$V_k = 1 + \Delta V_k$$

$$V_i V_k = (1 + \Delta V_i)(1 + \Delta V_k)$$

$$\cong 1 + \Delta V_i + \Delta V_k \quad (\Delta V_i \Delta V_k \text{ ihmal ediliyor})$$

$$= V_i + V_k - 1 \quad (4.40)$$

Aynı şekilde,

$$V_i^2 = 2V_i - 1 \quad (4.41)$$

Bu kabul yapıldığında reaktif güç ifadesi,

$$Q_i = \sum_{k=1}^n (V_i + V_k - 1) A_{ik} \quad (4.42)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n A'_{ik} V_k - W_i \quad (4.43)$$

Bu eşitliklerde,

$k \neq i$  için

$$A'_{ik} = A_{ik}$$

$$A'_{ii} = A_{ii} + W_i$$

$$W_i = \sum_{k=1}^n A_{ik}$$

halini alır.

Matris formda yük ve jeneratör baraları ayrıştırılarak yazılacak olursa,

$$Q = A'V + W$$

$$\begin{pmatrix} Q_1 \\ \dots \\ Q_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M' & \vdots & L' \\ \dots & \dots & \dots \\ N' & \vdots & J' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_g \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} W_1 \\ \dots \\ W_g \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

$$V_{i(l)} = \sum_{j=1}^{n_1} \hat{M}'_{ij} Q_{j(l)} + \sum_{j=1}^{n_1} \hat{M}'_{ij} H'_j \quad i=1, \dots, n_1 \quad (4.45)$$

$$Q_{i(g)} = \sum_{j=1}^{n_1} D'_{ij} Q_{j(l)} + E'_i \quad i=1, \dots, n_2 \quad (4.46)$$

Bu ifadelerde,

$$H' = W_1 - L'V_g$$

$$D' = N' \hat{M}'$$

$$E' = D'H' + J'V_g - W_g$$

Şeklinde kullanılmaktadır. (4.40) ve (4.41) eşitlikleri baralar arası reaktif güç ifadesinde kullanıldığında,

$$Q_{ik} = \beta_{ik} V_i + A_{ik} V_k + \gamma_{ik} \quad (4.47)$$

(4.47) denklemi elde edilir. (4.47) denkleminde yer alan ifadeler;

$$\beta_{ik} = 2\alpha_{ik} + A_{ik}$$

$$\alpha_{ik} = t_{ik} B_{ik} - B_{ik}$$

$$\gamma_{ik} = -\alpha_{ik} - A_{ik}$$

olarak verilebilir. Baralardaki şönt elemanın reaktif güce olan etkisi denklem (4.48)'de verilmiştir.

$$Q_{i(sh)} = 2B_{i(sh)} V_i - B_{i(sh)} \quad (4.48)$$

Bu halde yük akışı denklemleri doğrusal hale getirilerek olasılıksal olarak incelenmektedir.

#### 4.4.3. Formülasyon 3

Formülasyon 1 ve Formülasyon 2'de bara açıları ve aktif güç akışları bulunurken, doğru akım sistemlerinde kullanılan denklemler kullanılmıştır. Formülasyon 3 ve Formülasyon 4'de bara açıları ve aktif güç akış ifadeleri bulunurken farklı bir yol izlenecektir.

Bu bölümdeki tekniği daha iyi algılamak için, hesaplamanın bir aşamasında birbirleriyle çarpılarak üçüncü bir değişken elde edilecek olan X ve Y diye iki rastgele değişken tanımlanır. X ve Y'nin beklenen değerleri  $X_0$  ve  $Y_0$  olarak verilir.  $\Delta X$  ve  $\Delta Y$  ise X ve Y'nin beklenen değerleri etrafında rastgele değişimleridir. Bu bilgiler doğrultusunda;

$$Z = XY \quad (4.49)$$

$$X = X_0 + \Delta X \quad (4.50)$$

$$Y = Y_0 + \Delta Y \quad (4.51)$$

$$Z = (X_0 + \Delta X)(Y_0 + \Delta Y) \quad (4.52)$$

(4.52) ifadesinde  $\Delta X \Delta Y$  çarpımını ihmal edildiğinde,

$$Z=X_0Y+Y_0X-X_0Y_0 \quad (4.53)$$

olur. Beklenen değerler etrafında değişimler küçük ise Z doğrusal hale getirilebilir. Bu ifade bir güç sisteminin bara açılarına ve gerilimlerine, değişimlerinin çok küçük olmasından dolayı uygulanabilir. Bu teknik gerilimlere uygulandığında aşağıdaki eşitlikler ortaya çıkar.

$$V_i V_k = V_{i0} V_k + V_{k0} V_i - V_{i0} V_{k0} \quad (4.54)$$

$$V_i^2 = 2V_{i0} V_i - V_{i0}^2 \quad (4.55)$$

Aynı zamanda McLaurin serisini de kullanılırsa;

$$\sin \delta_{ik} \cong \delta_{ik} - \frac{\delta_{ik}^3}{6} \quad \text{ve} \quad \cos \delta_{ik} \cong 1 - \frac{\delta_{ik}^2}{2} \quad (4.56)$$

olur ve (4.53) eşitliğini (4.56) eşitliğine uyguladığımızda;

$$\cos \delta_{ik} = a_{ik} + b_{ik} \delta_{ik} \quad \text{ve} \quad \sin \delta_{ik} = c_{ik} + d_{ik} \delta_{ik} \quad (4.57)$$

haline gelir. (4.57) eşitliğindeki değerler aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$a_{ik} = 1 + \frac{\delta_{ik0}^2}{2} \quad b_{ik} = -\delta_{ik0}$$

$$c_{ik} = \frac{\delta_{ik0}^3}{3} \quad d_{ik} = 1 - \frac{\delta_{ik0}^2}{2}$$

Böylece gerilimler ve açılar beklenen değerleri etrafında doğrusal hale getirilmiş olur. Bu eşitlikler Formülasyon 3 ve Formülasyon 4'de kullanılacaktır.

Bu formülasyonda aktif ve reaktif güçler ayrışık kabul edilir. Gerilimin, aktif güç ve açılar üzerinde etkisi olmadığı ve açılarında gerilim ve reaktif güçlere bir etkisi olmadığı varsayılır. Bu varsayımlarla yük akışı denklemlerindeki  $V_i$  ve  $V_k$  yerine  $V_{i0}$  ve  $V_{k0}$  yazılır.

$$P_i = V_{i0} \sum_{k=1}^n V_{k0} (f_{ik} \delta_i - f_{ik} \delta_k + e_{ik}) \quad (4.58)$$

Bu denklemde yer alan ifadeler,

$$e_{ik} = a_{ik} G_{ik} + c_{ik} B_{ik}$$

$$f_{ik} = b_{ik} G_{ik} + d_{ik} B_{ik}$$

dır. (4.58) eşitliğini kullanarak aktif güç ve bara açıları ifadeleri çıkarılabilir.

$$P_i = \sum_{k=0}^n Y_{ik} \delta_k + R_i \quad (4.59)$$

(4.59) eşitliğinde yer alan ifadeler,

$$R_i = V_{i0} \sum_{k=1}^n V_{k0} e_{ik}$$

$$Y_{ik} = -V_{i0} V_{k0} f_{ik}$$

$$Y_{ii} = V_{i0} \sum_{k=1, k \neq i}^n V_{k0} f_{ik}$$

olur. (4.59) ifadesini matris formunda yazıldığında (salınım barasının bulunduğu satır ve sütunu silindiğinde)  $P=Y\delta+R$  olur. Buradan  $\delta$  ifadesi çekildiğinde,

$$\delta = Y^{-1}P - Y^{-1}R = \hat{Y}P - \hat{Y}R \quad (4.60)$$

ifadesi elde edilir. (4.56) eşitliğini baralar arası aktif güç ifadesinde kullanıldığında (4.61) eşitliğine ulaşılır.

$$P_{ik} = g_{ik} \delta_i - g_{ik} \delta_k + h_{ik} \quad (4.61)$$

$$g_{ik} = V_{i0} V_{k0} f_{ik}$$

$$h_{ik} = -t_{ik} G_{ik} V_{i0}^2 + V_{i0} V_{k0} e_{ik}$$

Bu ifadeyle  $P_{ki}$  de aynı şekilde bulunabilir.  $P_{ik}+P_{ki}$  toplamını elde ederek i-k hattındaki aktif güç kaybı bulunabilir. Salınım barasındaki aktif gücü bulmak için (4.59) eşitliği göz önüne alınır. Salınım barasının açısı  $\delta_s=0$  olduğu bilindiğine göre;

$$P_s = \sum_{i=1, i \neq s}^n Y_{si} \delta_i + R_s, \text{ matris formda; } P_s = K\delta + R_s \quad (4.62)$$

(4.60) eşitliğini yerine yazarsak,

$$P_s = K\hat{Y}P - K\hat{Y}R + R_s \quad (4.63)$$

Böylece salınım barasındaki aktif güç ifadesi bulunmuş olur. Gerilim ve reaktif güçleri bulmak için ise aynı şekilde  $\delta_{ik}$  ifadesi yerine  $\delta_{ik0} = \delta_{i0} - \delta_{k0}$  yazıldığında (4.43) eşitliği aynı kalır fakat;

$$k \neq i \text{ için } A'_{ik} = A_{ik} V_{i0}$$

$$A'_{ii} = A_{ii} V_{i0} + \sum_{k=1}^n A_{ik} V_{k0}$$

$$W_i = V_{i0} \sum_{k=1}^n A_{ik} V_{k0}$$

halini alır.

$$Q_i = \sum_{k=1}^n A'_{ik} V_k - W_i \quad (4.64)$$

(4.64) denklemini yük ( $Q_l$ ) ve üretim ( $Q_g$ ) olarak bölümlenmiş matris formunda yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir,

$$\begin{pmatrix} Q_l \\ Q_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M & L \\ N & J \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_l \\ V_g \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} W_l \\ W_g \end{pmatrix} \quad (4.65)$$

(4.65) eşitliğinden  $V_l$  ve  $Q_g$  ifadeleri bulunacak olursa ( $H = W_l - LV_g$ );

$$Q_l = MV_l + LV_g - W_l \Rightarrow V_l = \hat{M}Q_l + \hat{M}H \quad (4.66)$$

$Q_g = NV_l + JV_g - W_g$  ve (4.63)'deki  $V_l$  ifadesi yerine yazılırsa,

$$Q_g = DQ_l + E \quad (4.67)$$

reaktif güç ifadesi bulunmuş olmaktadır. Bu ifadede  $D = N\hat{M}$  ve  $E = DH + JV_g - W_g$  alınmaktadır. (4.54) ve (4.55) ifadeleri baralar arası reaktif güç akışı ifadesinde kullanılırsa hatlardaki reaktif güç akış ifadesi (4.68) eşitliği halini almaktadır.

$$Q_{ik} = \alpha_{ik} V_i + \beta_{ik} V_k + \gamma_{ik} \quad (4.68)$$



$$Q_{i(sh)} = 2V_{i0} B_{i(sh)} V_i - V_{i0}^2 B_{i(sh)} \quad (4.69)$$

$$(4.68) \quad \text{eşitliğindeki} \quad \alpha_{ik} = 2V_{i0} (t_{ik} B_{ik} - B'_{ik}) + A_{ik} V_{k0},$$

$\gamma_{ik} = -V_{i0}^2 (t_{ik} B_{ik} - B'_{ik}) - A_{ik} V_{i0} V_{k0}$  ve  $\beta = A_{ik} V_{i0}$  'dır. Hatlardaki reaktif güç kayıplarını bulmak için  $Q_{ik} + Q_{ki}$  toplamları bulunur.

#### 4.4.4. Formülasyon 4

Formülasyon 4'ün diğerlerinden en büyük farkı diğer yöntemlerdeki gibi aktif ve reaktif güç ayrışık kabul edilmemiştir. Formülasyon 3'deki kabuller artık kullanılmayacaktır ve daha genelleştirilmiş kabuller yapılacaktır. (4.49)-(4.53) eşitliklerinden yararlanılarak  $V_i V_k \sin \delta_{ik}$  ve  $V_i V_k \cos \delta_{ik}$  ifadelerinin doğrusallaştırılmış halleri bulunur.

$$V_i V_k \sin \delta_{ik} = a'_{ik} + b'_{ik} \delta_{ik} + c'_{ik} V_i + d'_{ik} V_k \quad (4.70)$$

$$V_i V_k \cos \delta_{ik} = a''_{ik} + b''_{ik} \delta_{ik} + c''_{ik} V_i + d''_{ik} V_k \quad (4.71)$$

(4.70) ve (4.71) denklemlerinde yer alan ifadeler aşağıdaki şekildedirler:

$$a' = 2V_{i0} V_{k0} \delta_{ik0} \left( \frac{1}{3} \delta_{ik0}^2 - 1 \right), \quad a'' = V_{i0} V_{k0} \left( \frac{3}{2} \delta_{ik0}^2 - 1 \right),$$

$$b' = V_{i0} V_{k0} \left( 1 - \frac{1}{2} \delta_{ik0}^2 \right), \quad b'' = -V_{i0} V_{k0} \delta_{ik0},$$

$$c' = V_{k0} \left( \delta_{ik0} - \frac{1}{6} \delta_{ik0}^3 \right), \quad c'' = V_{k0} \left( 1 - \frac{1}{2} \delta_{ik0}^2 \right),$$

$$d' = V_{i0} \left( \delta_{ik0} - \frac{1}{6} \delta_{ik0}^3 \right), \quad d'' = V_{i0} \left( 1 - \frac{1}{2} \delta_{ik0}^2 \right).$$

(4.70) ve (4.71) eşitlikleri genel yük akışı denklemlerinden aktif güç ifadesinde kullanıldığında  $P_i$ ,

$$P_i = \sum_{k=1}^n f'_{ik} \delta_i - f'_{ik} \delta_k + g'_{ik} V_i + h'_{ik} V_k + e'_{ik} \quad (4.72)$$

(4.72) denkleminde yer alan ifadeler aşağıdaki şekildedirler:

$$e'_{ik} = a''_{ik} G_{ik} + a'_{ik} B_{ik},$$

$$f'_{ik} = b''_{ik} G_{ik} + b'_{ik} B_{ik},$$

$$g'_{ik} = c''_{ik} G_{ik} + c'_{ik} B_{ik}$$

$$h'_{ik} = d''_{ik} G_{ik} + d'_{ik} B_{ik}$$

$$\begin{pmatrix} P \\ \dots \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M' & \vdots & L' \\ \dots & \dots & \dots \\ N' & \vdots & J' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta \\ \dots \\ V \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R' \\ \dots \\ H' \end{pmatrix} \quad (4.73)$$

P ve Q'nun n adet elemanı mevcuttur.  $n_1$  adet yük barası ve  $n_2$  adet jeneratör barası olsun.

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ \dots \\ S_g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M'' & \vdots & L'' \\ \dots & \dots & \dots \\ N'' & \vdots & J'' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ \dots \\ X_g \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} W'_1 \\ \dots \\ W'_g \end{pmatrix} \quad (4.74)$$

$$S_1 = \begin{pmatrix} P \\ \dots \\ Q_1 \end{pmatrix}, \quad X_1 = \begin{pmatrix} \delta \\ \dots \\ V_1 \end{pmatrix},$$

$$S_g = \begin{pmatrix} Q_g \\ \dots \\ P_s \end{pmatrix}, \quad X_g = \begin{pmatrix} V_g \\ \dots \\ \delta_s \end{pmatrix}.$$

P ve  $\delta$  salınım barası hariç her barayı ( $n-1$  adet) kapsamaktadır.  $Q_1$  ve  $V_1$  bütün yük baralarını ( $n_1$  adet) kapsamaktadır ve  $Q_g$  ve  $V_g$  bütün jeneratör baralarını ( $n_2$  adet) kapsamaktadır.  $P_s$  ve  $\delta_s$  salınım barası içindir. Güç akışı denklemleri bu hale getirildikten sonra (4.74) eşitliği açılı, gerilim, aktif ve reaktif güç akışı ifadelerinin ilgili denklemlerini anlamak için kullanılabilir [40].

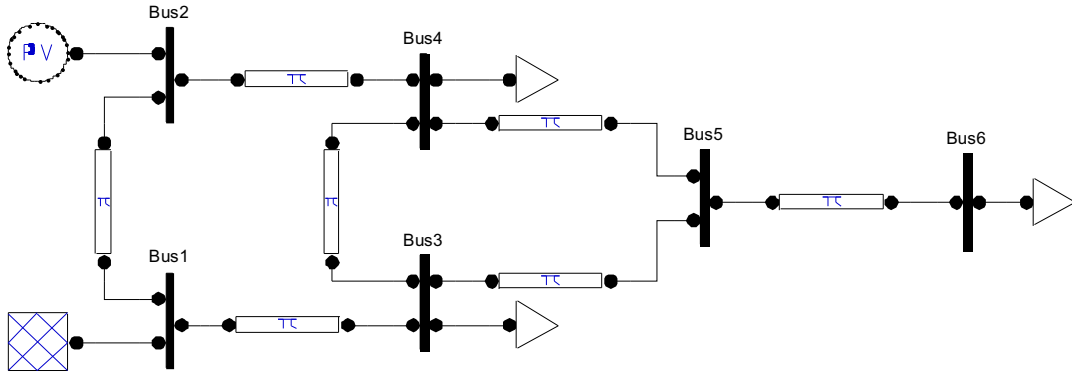
Formülasyon 3 ve Formülasyon 4'ün detaylı anlatımı ve IEEE 14 Bara sistemine uygulanarak, Formülasyon 1 ve Formülasyon 2 ile karşılaştırılması R.N. Allan ve M.R.G. Al-Shakarchi tarafından 1977 yılında "Probabilistic Techniques in A.C. Load-Flow Analysis" isimli makalede incelenmiştir [40].

## BÖLÜM 5. WSCC (WESTERN SYSTEM COORDINATING COUNCIL) SİSTEMİNİN OLASILIKSAL YÜK AKIŞ ANALİZİ

Bu bölümde önceki bölümlerde anlatılmış olan doğru akım olasılıksal yük akış tekniğinin 6 baralı bir sistemde uygulamasını ve alternatif akım sistemlerinde olasılıksal yük akış tekniğinin 9 baralı WSCC sistemine olan uygulaması anlatılmıştır. Doğru akım sistemlerinden kastedilmek istenen sadece aktif güç analizinin yapılacağıdır.

### 5.1. 6 Baralı Örnek Bir Sistemin Doğru Akım Olasılıksal Yük Akışı Analizi

6 baralı örnek bir sistem Şekil 5.1. de gösterilmektedir. Bu sistemde 6 düğüm ve 7 hat bulunmaktadır. 1 numaralı bara salınım barası seçilmektedir. Bölüm 4.3. de anlatılmış teknik ile bu örnek sistemin olasılıksal yük akışı analizi yapılacaktır. Bu analiz yapılırken duyarlılık katsayıları kullanılacaktır.



Şekil 5.1. 6 baralı örnek sistem

Şekil 5.1.'de gösterilen örnek sisteme ilişkin baralardaki düğüm güç verileri Tablo 5.1.'de gösterilmektedir. Bu tabloya bakıldığında 1 ve 2 numaralı baralara bağlı bulunmakta olan jeneratörlerin binom dağılıma sahip oldukları görülmektedir. 1 numaralı bara salınım barası olmaktadır. 2 numaralı bara da ise 10 adet 9 MW'lık jeneratör bağlı bulunmaktadır. Bu baranın beklenen güç değeri ve standart sapması,

binom dağılıma sahip olduğu için,  $\mu=n(1-q)R$ ,  $\sigma^2=nq(1-q)R^2$  ifadeleriyle bulunacaktır. Bu ifadeye  $n$ =ünite sayısı,  $q$ =kesinti katsayısı ve  $R$ =her ünitenin güç değeridir. 3,4 ve 5 numaralı baralar ise ayrık dağılıma sahip yüklerdir. Ayrık yüklerin beklenen değerleri ve varyansları aşağıda gösterilmiştir. Örnek sisteme ait hat parametreleri Tablo 5.2.'de gösterilmiştir.

$$\mu = \sum_{i=1}^m x_i p_i \text{ ve } \sigma^2 = \sum_{i=1}^m (x_i - \mu)^2 p_i$$

Tablo 5.1. Örnek sistemde kullanılacak düğüm verileri

<b>Düğüm</b>	<b>Olasılık Fonksiyonu</b>	<b>Ünite Sayısı</b>	<b>Güç (MW)</b>	
				<b><u>Kesinti Katsayısı</u></b>
<b>1</b>	Binom	10	10	0.0148
<b>2</b>	Binom	10	9	0.12
				<b><u>Oluşma Olasılığı</u></b>
<b>3</b>	Ayrık		-60	0.2
			-63	0.2
			-65	0.2
			-68	0.2
			-70	0.2
<b>4</b>	Ayrık		-24	0.1
			-26	0.15
			-30	0.5
			-34	0.15
			-36	0.1
<b>6</b>	Ayrık		-74.7	0.15
			-76.7	0.45
			-80	0.2
			-82.8	0.1
			-85	0.1

Tablo 5.2. Örnek sistem için kullanılacak hat parametreleri

<b>Hat Numarası</b>	<b>Düğüm Numarası</b>		<b>Reaktans (<math>\Omega</math>)</b>	<b>Suseptans (<math>\times 10^{-3}</math>)</b>
	Gönderen Düğüm	Alıcı Düğüm		
<b>1</b>	1	3	15	0.05
<b>2</b>	2	4	8	0.15
<b>3</b>	1	2	5	0.25
<b>4</b>	3	4	10	0.075
<b>5</b>	3	5	16	0.075
<b>6</b>	4	5	16	0.075
<b>7</b>	5	6	10	0.075

Doğru akım sistemlerinde yük akışında yapılan kabuller;

- $V_i=V_k=1\text{p.u.}$ ,
- $G_{ik}=0$  (sıfır hat direnci),
- $\sin\delta_{ik} \approx \delta_{ik}$ .

Bu kabulleri de göz önünde bulundurarak ve Tablo 5.2. de verilen hat parametrelerini kullanarak bara admitans matrisi aşağıdaki gibi yazılır:

$$Y_{\text{bara}} = \begin{pmatrix} 0.2667 & -0.2 & -0.0667 & 0 & 0 & 0 \\ -0.200 & 0.325 & 0 & -0.125 & 0 & 0 \\ -0.0667 & 0 & 0.2292 & -0.1 & -0.0625 & 0 \\ 0 & -0.1250 & -0.1 & 0.2875 & -0.0625 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0625 & -0.0625 & 0.225 & -0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.100 & 0.100 \end{pmatrix},$$

Salınım barasının (1 numaralı bara) bulunduğu satırı ve sütunu sildiğimizde,

$$Y'_{\text{bara}} = \begin{pmatrix} 0.325 & 0 & -0.125 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2292 & -0.1 & -0.0625 & 0 \\ -0.1250 & -0.1 & 0.2875 & -0.0625 & 0 \\ 0 & -0.0625 & -0.0625 & 0.225 & -0.1 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1 & 0.1 \end{pmatrix}$$

olur. (4.23) eşitliğindeki  $\delta=Y^{-1}P$  ifadesiyle bara açıları bulunur. Bara açıları bulunduktan sonra (4.24) eşitliği yardımıyla hatlarda mevcut olan aktif güç akışı değerleri ve standart sapmaları bulunur.

$$\hat{Y}'_{\text{bara}} = \begin{pmatrix} 4.2981 & 2.1056 & 3.1751 & 2.6404 & 2.6404 \\ 2.1056 & 8.6832 & 5.4746 & 7.0789 & 7.0789 \\ 3.1751 & 5.4746 & 8.2553 & 6.8650 & 6.8650 \\ 2.6404 & 7.0789 & 6.8650 & 14.9719 & 14.9719 \\ 2.6404 & 7.0789 & 6.8650 & 14.9719 & 24.9719 \end{pmatrix}$$

$$\delta=Y^{-1}P \Rightarrow P_{ik} = \frac{\delta_i - \delta_k}{X_{ik}}$$

$$P_{13} = \frac{\delta_1 - \delta_3}{X_{13}} = 74.505\text{MW} \Rightarrow \sqrt{\text{Var}(P_{13})} = \sigma_{13} = \%3.7542$$

$$P_{24} = \frac{\delta_2 - \delta_4}{X_{24}} = 98.997 \text{ MW} \Rightarrow \sqrt{\text{Var}(P_{24})} = \sigma_{24} = \%3.1629$$

$$P_{12} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{X_{12}} = 19.795 \text{ MW} \Rightarrow \sqrt{\text{Var}(P_{12})} = \sigma_{12} = \%17.964$$

$$P_{34} = \frac{\delta_3 - \delta_4}{X_{34}} = -22.663 \text{ MW} \Rightarrow \sqrt{\text{Var}(P_{34})} = \sigma_{34} = \%6.5029$$

$$P_{35} = \frac{\delta_3 - \delta_5}{X_{35}} = 32.168 \text{ MW} \Rightarrow \sqrt{\text{Var}(P_{35})} = \sigma_{35} = \%5.0904$$

$$P_{45} = \frac{\delta_4 - \delta_5}{X_{45}} = 46.332 \text{ MW} \Rightarrow \sqrt{\text{Var}(P_{45})} = \sigma_{45} = \%3.6225$$

$$P_{56} = \frac{\delta_5 - \delta_6}{X_{56}} = 78.5 \text{ MW} \Rightarrow \sqrt{\text{Var}(P_{56})} = \sigma_{56} = \%4.0581$$

Standart sapmalar yüzde (%) cinsinden bulunmuştur.

Benzer bir şekilde (4.25)-(4.27) eşitliklerindeki duyarlılık katsayılarını kullanarak bulunacak olursa,

$$P_{ik} = \sum_j H_{(ik)j} P_j \text{ ifadesiyle bulunur.}$$

Hatlardaki yük akışlarının varyansı ise (4.26) eşitliğiyle;

$$\text{Var}(P_{ik}) = \sum_j H_{(ik)j}^2 \text{Var}(P_j)$$

bulunur. Bu eşitliklerde  $P_j$  değişken olarak tanımlanır. Bu tanımlama yapılırken  $P_j$  için güç verilerinde verilen dağılımlar dikkate alınır. Hatlardaki güç akışı değişimleri bulunurken program Matlab'de yazılmıştır.

Örnek sistem için her hattaki deterministik ve olasılıksal yük akışı sonuçlarının beklenen değerleri Tablo 5.3.'de gösterilmiştir. Deterministik çözümde kullanılan değerler, olasılıksal çözümde kullanılan beklenen değerler alınmıştır. Böylelikle deterministik çözüm ile olasılıksal çözüm değerleri karşılaştırılmıştır. Olasılıksal çözüm sonucunda hatlardaki güç akış değerlerinin yanında standart sapmaları

hakkında da bilgi edinilir. Genelde standart sapma %5'in altında kalmaktadır fakat 1 ile 2 numaralı baralar arasındaki hattın standart sapması %18 e yakın bir değerdir. Standart sapmaların küçük değerler olmasının sebebi girişteki düğüm güç değerlerinin varyanslarının küçük olmasıdır. Beklenen değerleri sabit tutacak şekilde giriş verilerinin varyansları daha büyük verilmiş olsaydı, sonuçlardaki beklenen değerde bir değişim olmamasına rağmen standart sapma ve hatlardaki güçlerin olasılık yoğunluk grafikleri değişiklik gösterecekti. Bu yüzden giriş verilerinin doğruluğu çok büyük önem taşımaktadır.

Tablo 5.3. Örnek sistemin güç akışı sonuçları

Düğüm i-j	Deterministik Güç Akışı (MW)	Olasılıksal Güç Akışı (MW)	Standart Sapma (%)	Sonuçlar Arası Fark (MW)
1-3	75	74.505	3.7542	0.495
2-4	99.547	98.997	3.1629	0.55
1-2	20.388	19.795	17.964	0.593
3-4	-22.668	-22.663	6.5029	-0.005
3-5	32.442	32.168	5.0904	0.274
4-5	46.61	46.332	3.6225	0.278
5-6	78.682	78.5	4.0581	0.182

Bölüm 4.3.'de anlatılan duyarlılık katsayılarının genel ifadesi aşağıda yazılmıştır ve Tablo 5.4, Tablo5.5 ve Tablo5.6'da hatlara ilişkin duyarlılık katsayıları yazılmıştır. Duyarlılık katsayılarının genel ifadesi denklem (4.25):

$$H_{(ik)j} = \frac{Y_{ij}^{-1} - Y_{kj}^{-1}}{X_{ik}}$$

Tablo 5.4. 1 ve 2 numaralı düğümler arasındaki hattın duyarlılık katsayıları

	2	3	4	5	6
<b>Duyarlılık Katsayısı</b>	-0.8596	-0.4211	-0.6350	-0.5281	-0.5281

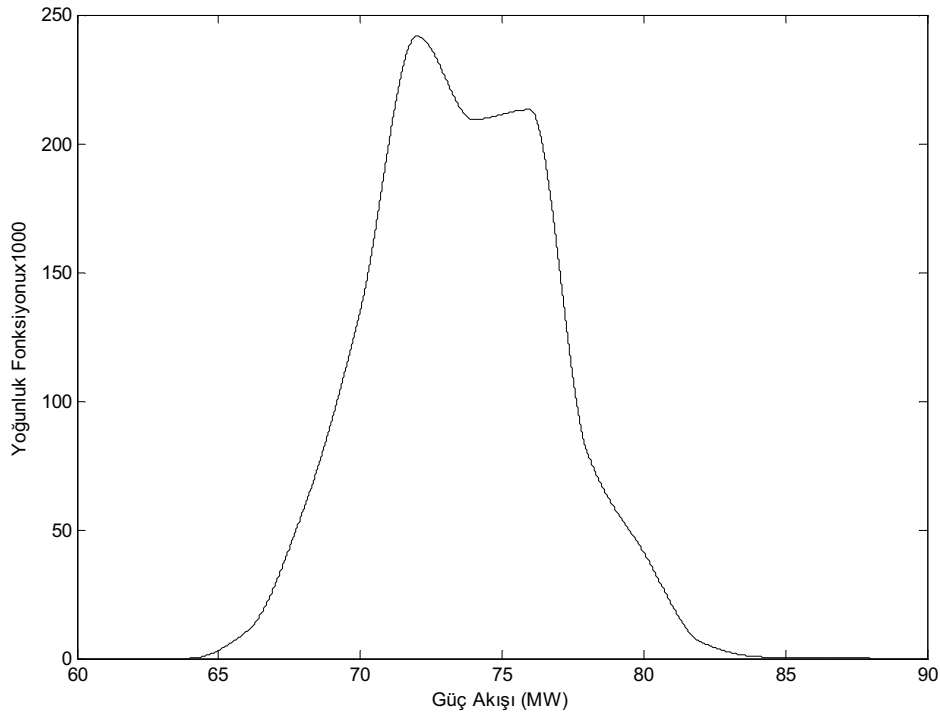
Tablo 5.5. 1 ve 3 numaralı düğümler arasındaki hattın duyarlılık katsayıları

	2	3	4	5	6
<b>Duyarlılık Katsayısı</b>	-0.1404	-0.5789	-0.3650	-0.4719	-0.4719

Tablo 5.6. 2 ve 4 numaralı düğümler arasındaki hattın duyarlılık katsayıları

	2	3	4	5	6
<b>Duyarlılık Katsayısı</b>	0.1404	-0.4211	-0.6350	-0.5281	-0.5281

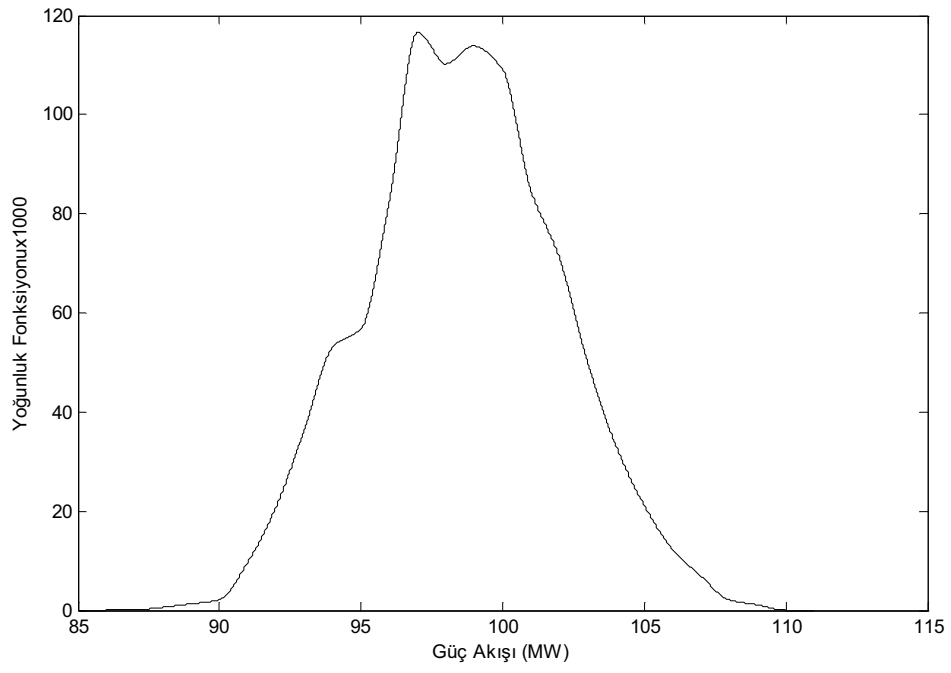
Duyarlılık katsayısını içeren tablolar sayesinde, giriş değerlerindeki değişikliklerinin her bir hattı nasıl değiştireceği hakkında bilgi sahibi olunur. Böyle bilgiler elektrik enerji sistemlerinin güvenilirliği, korunması ve planlanması gibi durumlarda büyük önem taşımaktadırlar. Duyarlılık katsayılarını kullanarak yapılacak güç akışında, aktif güç akışı hakkında deterministik yöntemden daha fazla bilgi edinilir.



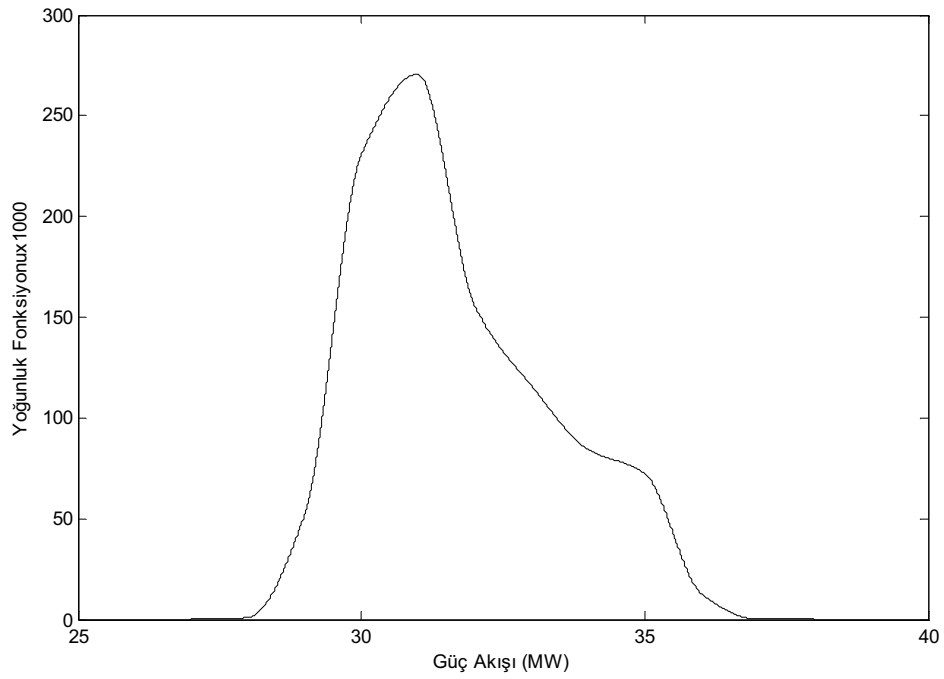
Şekil 5.2. 1 ve 3 numaralı düğümler arasındaki güç akışı

Şekil 5.2, 1 numaralı hattın ve Şekil 5.3'de 2 numaralı hattın olasılık yoğunluk fonksiyonları gösterilmiştir. 1 numaralı hattın güç akışı hesaplanırken dikkate alınan aralık 60-90 MW'lık aralıktır. 2 ve 4 numaralı düğümler arasındaki hattın aktif güç akışı ise 85-115 MW değerleri arasında incelenmiştir.

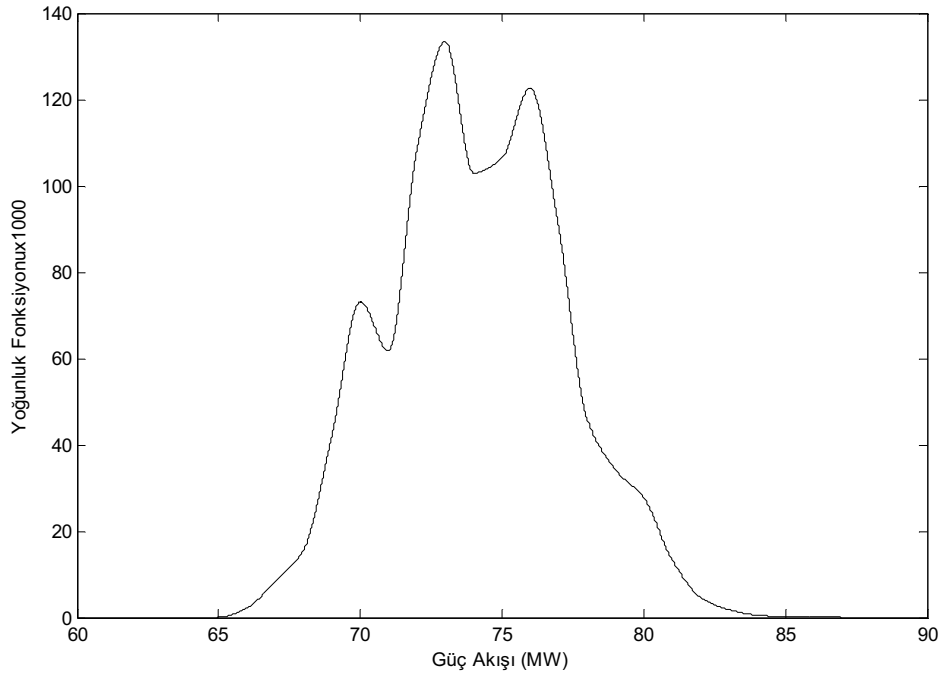




Şekil 5.3. 2 ve 4 numaralı düğümler arasındaki güç akışı



Şekil 5.4. 3 ve 5 numaralı düğümler arasındaki güç akışı



Şekil 5.5. 1 ve 3 numaralı düğümler arasındaki güç akışı (1 MW'lık aralıklarla)

Yukarda gösterilen 1 numaralı hattın güç akışı-olasılık grafiğinde güç için alınan aralıklar 2 MW'tır. Aralık değişimine bağlı olarak daha hassas çizimlerde elde edilebilir. Aralıklar 1 MW şeklinde alınırsa 1 numaralı hattın olasılıklarına bağlı olarak güç akışı Şekil 5.4.'de gösterilmiştir.

Binom dağılıma sahip 2 numaralı baranın verileri kullanılırken en yüksek 5 olasılıklı durumu göz önünde bulundurulmuştur. En yüksek 5 değerın olasılığı tüm değerlerin %99'unu kapsamaktadır. Örnek sistem için kullanılan veriler ile bütün hatlarda akan aktif güç değerleri bulunmuştur fakat çalışmada bir kısmı sunulmaktadır.

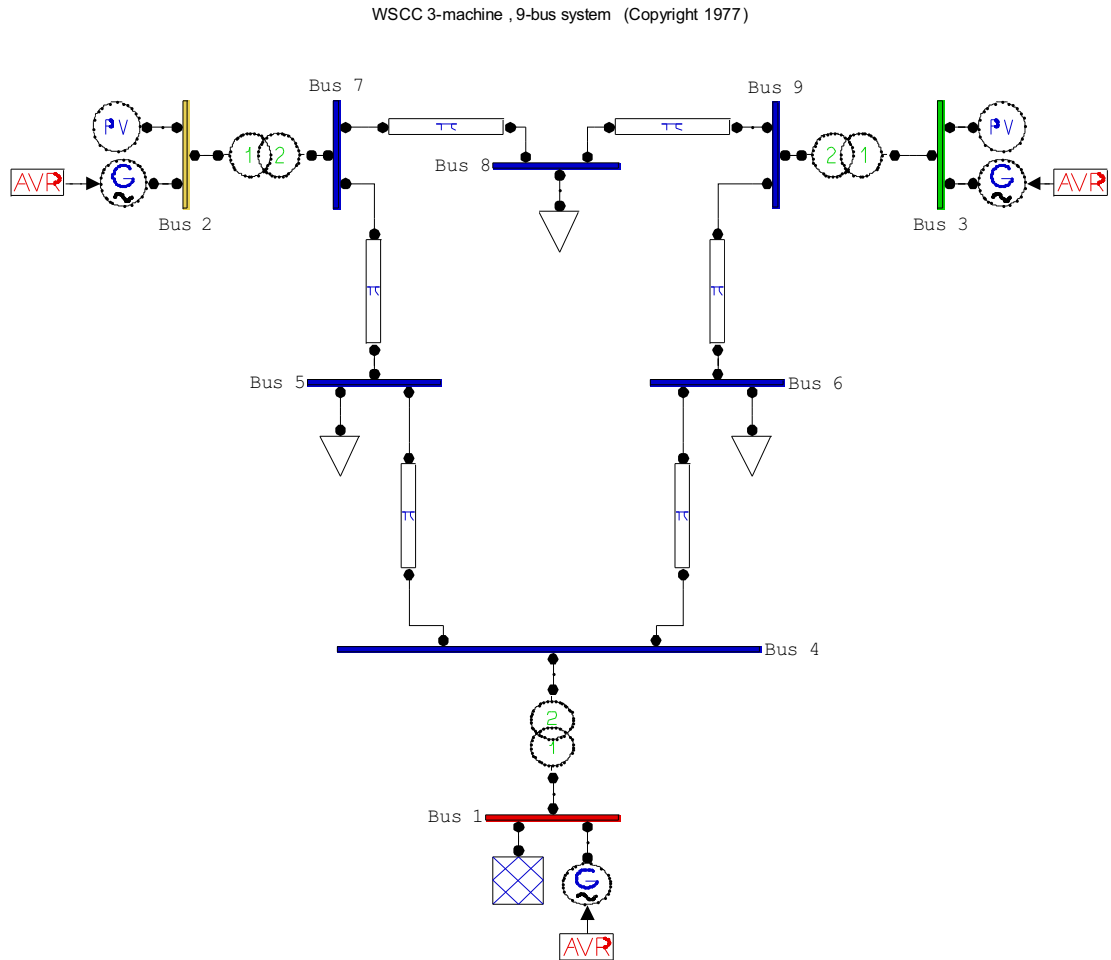
Bu analiz sonucunda MW cinsinden yük akışlarının beklenen değerleri, yüzde (%) cinsinden standart sapmaları, hatların duyarlılık katsayıları ve hatlardaki aktif güç akışlarının olasılık yoğunluk fonksiyonları sunulmuştur.

## 5.2. 9 Baralı WSCC Sisteminin Olasılıksal Yük Akışı Analizi

### 5.2.1. 9 baralı WSCC sisteminin verileri

Bu bölümde Western System Coordinating Council (WSCC) 3 makine 9 baralı sisteminin bara gerilimleri, baralar arası aktif ve reaktif güç akışlarının olasılıksal analizi yapılmıştır.

WSCC sistemi 3 makine 9 baralı sisteminde 3 jeneratör barası, 6 yük barası ve 9 iletim hattı mevcuttur. Bu sistemde 1 numaralı bara salınım barası, 2 ve 3 numaralı baralar ise jeneratör baralarıdır. 9 baralı WSCC sisteminin tek hat şeması Şekil 5.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 5.6. 9 baralı WSCC test sistemi

9 baralı WSCC sistemine ait hat parametreleri Tablo 5.7’de gösterilmiştir. Sistemdeki mevcut baraların tipleri, salınım barasının gerilim ve açısı, jeneratör baralarının gerilimleri, tüm baralardaki aktif ve reaktif güçlerin deterministik değerleri Tablo 5.8’de verilmiştir.

Tablo 5.7. 9 baralı WSCC sistemine ait hat parametreleri

Düğümden	Düğüme	R (p.u.)	X (p.u.)	Y (p.u.)	Transformatör Kademe Oranı
2	7	0.0000	0.0625	0.0000	1.00
7	8	0.0085	0.0720	0.0745*2	1.00
7	5	0.0320	0.1610	0.1530*2	1.00
5	4	0.0100	0.0850	0.0880*2	1.00
4	1	0.0000	0.0576	0.0000	1.00
4	6	0.0170	0.0920	0.0790*2	1.00
6	9	0.0390	0.1700	0.1790*2	1.00
9	3	0.0000	0.0586	0.0000	1.00
9	8	0.0119	0.1008	0.1045*2	1.00

Tablo 5.8. 9 baralı WSCC sistemine ait deterministik veriler

Düğüm Numarası	V (p.u.)	$\delta$	$P_i$ (p.u.)	$Q_i$ (p.u.)	$P_y$ (p.u.)	$Q_y$ (p.u.)	Bara Tipi*
1	1.04	0	0.000	0.000	0.000	0.000	1
2	1.025	0	1.63	0.000	0.000	0.000	2
3	1.025	0	0.850	0.000	0.000	0.000	2
4	1	0	0.000	0.000	0.000	0.000	3
5	1	0	0.000	0.000	1.250	0.500	3
6	1	0	0.000	0.000	0.900	0.300	3
7	1	0	0.000	0.000	0.000	0.000	3
8	1	0	0.000	0.000	1.000	0.350	3
9	1	0	0.000	0.000	0.000	0.000	3

\*Bara tipi 1: Salınım barası, 2: Jeneratör barası, 3: Yük barası

Sistemin olasılıksal analizi yapılmadan önce klasik yöntem ile yük akışı sonuçları ile karşılaştırabilmek için yük akışı Matlab PSAT programıyla yapılmıştır. Analiz sonuçları Ek-A’da gösterilmiştir.

9 baralı WSCC sisteminin olasılıksal yük akışı analizinin yapılması için bu çalışmada kullanılan olasılıksal veriler Tablo 5.9’da verilmiştir. Karşılaştırma yaparken sonuçların objektif değerlendirilebilmesi için olasılıksal verilerin beklenen değerleri deterministik verilere eşit alınacak şekilde alınır.

Sistemin olasılıksal analizini yaparken yöntem olarak önceki bölümde anlatılan Formülasyon 1 kullanılacaktır.

Tablo 5.9. 9 baralı WSCC sistemine ait olasılıksal veriler

<u>Düğüm</u>	<u>Olasılık Fonksiyonu</u>	<u>Ünite Sayısı</u>	<u>Aktif Güç (MW)</u>	<u>Reaktif Güç (MVAR)</u>	<u>Kesinti Katsayısı</u>
					<u>Oluşma Olasılığı</u>
2	Binom	10	17.1589		0.05
3	Binom	10	10		0.15
4	-	-	0	0	1
5	Ayrık		-123	-45	0.2
			-124	-47	0.2
			-125	-50	0.2
			-126	-53	0.2
			-127	-55	0.2
6	Ayrık		-88	-22	0.2
			-89	-26	0.2
			-90	-30	0.2
			-91	-34	0.2
			-92	-38	0.2
7	-	-	0	0	1
8			-100	-35	1
9	-	-	0	0	1

2 ve 3 numaralı baralardaki jeneratörlerin binom dağılıma sahip oldukları Tablo 5.9’da gösterilmektedir. Jeneratörlerin kapasite olasılık tabloları Ek-B’de anlatılan ‘Generator\_COPT’ matlab programıyla elde edilmiştir. Elde edilen veriler Tablo 5.10. ve Tablo 5.11.’de gösterilmiştir.

Tablo 5.10. 2 numaralı baradaki jeneratörün kapasite olasılık tablosu

<b>Mevcut Kapasite (MW)</b>	<b>Kullanılmayan Kapasite (MW)</b>	<b>Durum Olasılığı</b>	<b>Kümülatif Olasılık</b>
171.1589	0	0.59873694	1.00000000
154.4301	17.1589	0.31512470	0.40126306
137.2712	34.3178	0.07463480	0.08613836
120.1123	51.4767	0.01047506	0.01150356
102.9534	68.6356	0.00096481	0.00102850
85.7945	85.7945	0.00006094	0.00006369
68.6356	102.9534	0.00000267	0.00000275
51.4767	120.1123	0.00000008	0.00000008
34.3178	137.2712	0.00000000	0.00000000
17.1589	154.4301	0.00000000	0.00000000
0	171.1589	0.00000000	0.00000000

Tablo 5.11. 3 numaralı baradaki jeneratörün kapasite olasılık tablosu

Mevcut Kapasite (MW)	Kullanılmayan Kapasite (MW)	Durum Olasılığı	Kümülatif Olasılık
100	0	0.19687440	1.00000000
90	10	0.34742542	0.80312560
80	20	0.27589666	0.45570018
70	30	0.12983372	0.17980352
60	40	0.04009571	0.04996980
50	50	0.00849086	0.00987409
40	60	0.00124866	0.00138324
30	70	0.00012591	0.00013458
20	80	0.00000833	0.00000867
10	90	0.00000033	0.00000033
0	100	0.00000001	0.00000001

2 ve 3 numaralı baralardaki jeneratör kapasitelerinin ilk 5 durumlarının olasılıkları toplamı sırasıyla 0.99993631 ve 0.990126'dır. Olasılıklarının %99'unu ilk 5 durum içerdiğinden bu çalışmada 2 ve 3 numaralı baralardaki üretilen aktif güç değişimi için 10 durum yerine 5 durum alınmıştır. 5 ve 6 numaralı baralardaki güçlerin değerleri ve olasılıkları ise ayrık dağılıma sahip olduklarını göstermektedir.

### 5.2.2. Bara açıları ve hatlardaki aktif güç akışları

Formülasyon 1 ile sistemin bara açılarını ve hatlardaki aktif güç akışlarını bulurken DA sistemlerinde olasılıksal yük akışı analizi denklemleri geçerli olur. Öncelikle salınım barasının satır ve sütununun silinerek bara admitans matrisi yazılır.

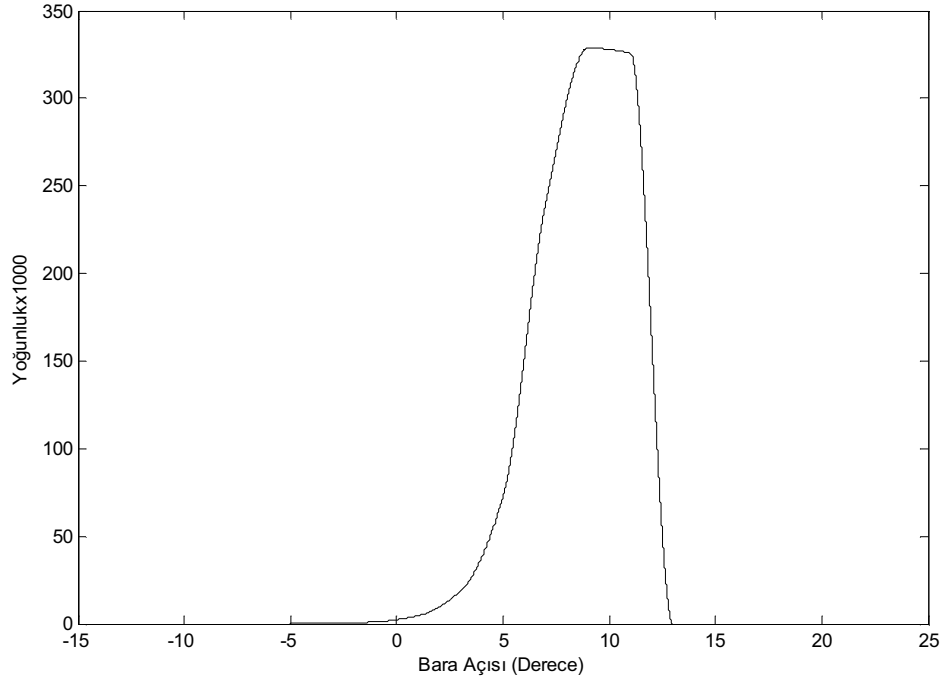
$$Y = \begin{pmatrix} 16 & 0 & 0 & 0 & 0 & -16 & 0 & 0 \\ 0 & 17.0648 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -17.0648 \\ 0 & 0 & 39.9954 & -11.7647 & -10.8696 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -11.7647 & 17.9759 & 0 & -6.2112 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -10.8696 & 0 & 16.7519 & 0 & 0.0 & -5.8824 \\ -16 & 0 & 0 & -6.2112 & 0 & 36.1001 & -13.8889 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -13.8889 & 23.8095 & -9.9206 \\ 0 & -17.0648 & 0 & 0 & -5.8824 & 0 & -9.9206 & 32.8678 \end{pmatrix}$$

(4.23) denklemini kullanılarak baralara ait açıların beklenen değerleri bulunur. Tablo 5.13.'de bara açıları ve standart sapmaları derece olarak gösterilmiştir.

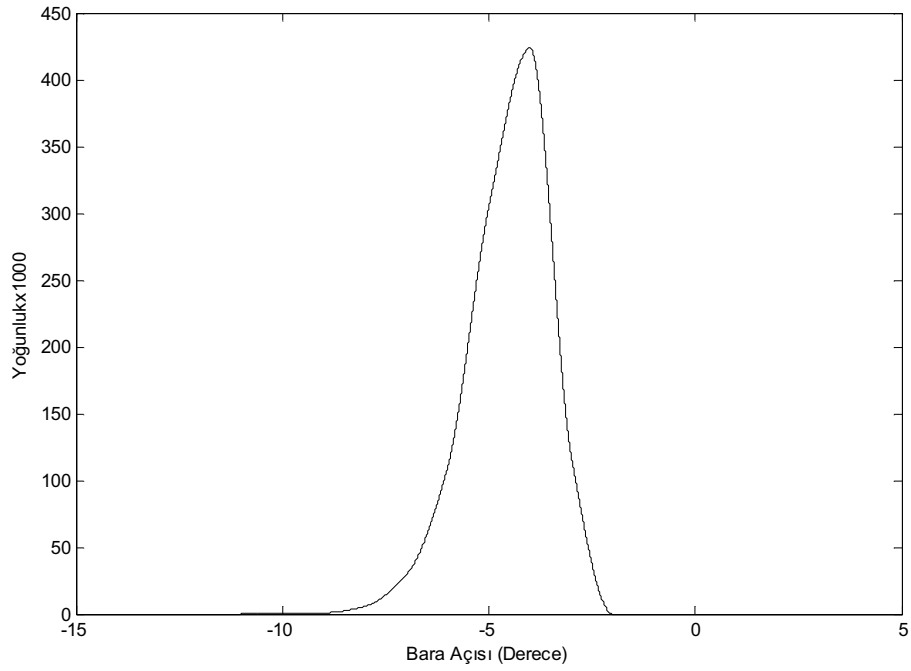
Tablo 5.12. Bara açılarının beklenen değerleri ve deterministik değerleri

Bara Numarası	$\mu$ (Derece)	$\sigma$ (Derece)	Deterministik Sonuç (Derece)	Sonuçlar Arası Fark (Derece)
1	0	-	0	0
2	9.7960	2.1245	9.28	-0.516
3	5.0606	2.0734	4.6648	4.6648
4	-2.2112	0.5437	-2.2168	-2.2168
5	-4.0634	0.9648	-3.9888	-3.9888
6	-3.7381	0.9697	-3.6874	-3.6874
7	3.9590	1.7611	3.7197	3.7197
8	0.8224	1.7334	0.72754	0.72754
9	2.2067	1.7556	1.9667	1.9667

(4.23) denklemi kullanılırken güç verilerinin değişken verilmesinden dolayı P ifadesi değişken alınır. Bunun sonucunda açılarda değişken değerler içerir. 2 ve 5 numaralı baralardaki açılardan yoğunluklarına göre değerleri Şekil 5.7 ve 5.8’de gösterilmiştir.

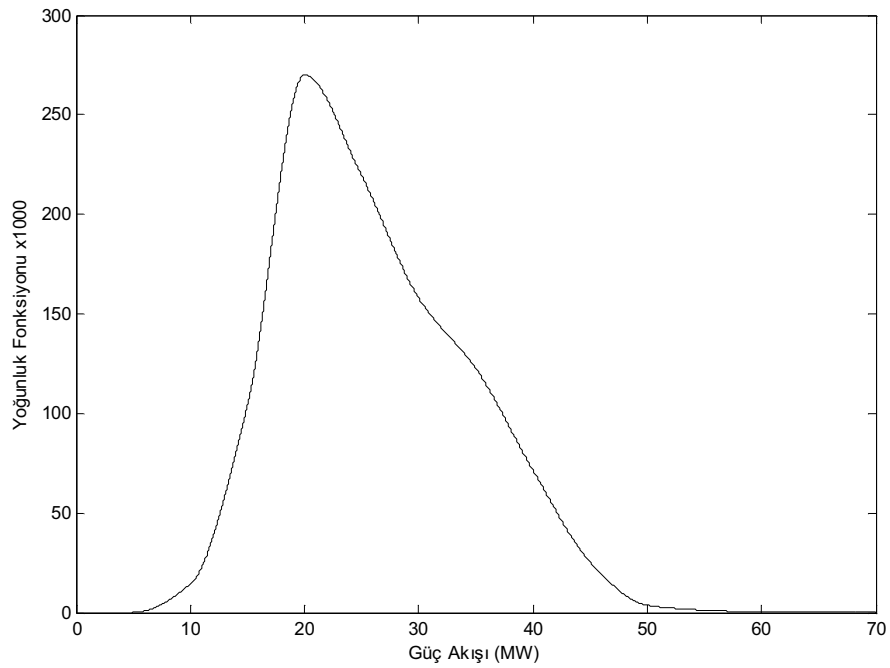


Şekil 5.7. 2 numaralı baradaki açının olasılık yoğunluk fonksiyonu



Şekil 5.8. 5 numaralı baradaki açının olasılık yoğunluk fonksiyonu

Şekillerde görüldüğü gibi 2 ve 5 numaralı baralardaki açılarının sahip olduğu dağılım normal dağılıma çok yakındır. Bundan sonraki aşamalarda tüm bara açıları normal dağılıma sahip kabul edilecektir. Şekil 5.9'da 4 ve 6 numaralı baralar arasındaki aktif güç akışının yoğunluk fonksiyonu gösterilmiştir.



Şekil 5.9. 4 ve 6 numaralı baralar arasındaki aktif güç akışı



(4.24) denklemi yardımıyla hatlardaki aktif güç akışlarının beklenen değerleri ve standart sapmaları bulunur. Bulunan sonuçlar ve deterministik yöntemle bulunan sonuçlar Tablo 5.13'de gösterilmiştir.

$$E(P_{27}) = \frac{\delta_2 - \delta_7}{X_{27}} = 163 \text{ MW} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\text{Var}(P_{27})} = \sigma_{27} = 7.2552$$

$$E(P_{78}) = \frac{\delta_7 - \delta_8}{X_{78}} = 76.036 \text{ MW} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\text{Var}(P_{78})} = \sigma_{78} = 8.0234$$

$$E(P_{75}) = \frac{\delta_7 - \delta_5}{X_{75}} = 86.9656 \text{ MW} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\text{Var}(P_{57})} = \sigma_{57} = 10.0237$$

$$E(P_{45}) = \frac{\delta_4 - \delta_5}{X_{45}} = 38.0318 \text{ MW} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\text{Var}(P_{45})} = \sigma_{45} = 23.1482$$

$$E(P_{14}) = \frac{\delta_1 - \delta_4}{X_{14}} = 67.7053 \text{ MW} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\text{Var}(P_{14})} = \sigma_{14} = 24.5863$$

$$E(P_{46}) = \frac{\delta_4 - \delta_6}{X_{46}} = 28.9706 \text{ MW} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\text{Var}(P_{46})} = \sigma_{46} = 28.4699$$

$$E(P_{96}) = \frac{\delta_9 - \delta_6}{X_{96}} = 61.0344 \text{ MW} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\text{Var}(P_{69})} = \sigma_{69} = 13.3688$$

$$E(P_{39}) = \frac{\delta_3 - \delta_9}{X_{39}} = 85 \text{ MW} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\text{Var}(P_{39})} = \sigma_{39} = 13.2842$$

$$E(P_{89}) = \frac{\delta_8 - \delta_9}{X_{89}} = -23.9721 \text{ MW} \quad \Rightarrow \quad \sqrt{\text{Var}(P_{89})} = \sigma_{89} = 25.4448$$

Tablo 5.13. Hatlardaki aktif güç akışları

Düğümler Arası Hat	Beklenen Değeri $\mu$ (MW)	Standart Sapması $\sigma$ (%)	Deterministik Sonuç (MW)	Sonuçlar Arası Fark (MW)
2-7	163	7.2552	163	0
7-8	76.036	8.0234	76.4	0.364
7-5	86.9656	10.0237	86.6	-0.3656
4-5	38.0318	23.1482	40.9	2.8682
1-4	67.7053	24.5863	71.6	3.8947
4-6	28.9706	28.4699	30.7	1.7294
9-6	61.0344	13.3688	60.8	-0.2344
3-9	85	13.2842	85	0
8-9	-23.9721	25.4448	-24.1	-0.1279

Hatlara ait duyarlılık katsayıları (4.25) denklemi kullanılarak bulunur. Tablo 5.14 ve Tablo 5.15’de iki hat için duyarlılık katsayıları yazılmıştır.

Tablo 5.14. 8 ve 9 numaralı düğümler arasındaki hattın duyarlılık katsayıları

	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Duyarlılık Katsayısı</b>	0.3613	-0.3848	0	0.1249	-0.1351	0.3613	0.4671	-0.3848

Tablo 5.15. 6 ve 9 numaralı düğümler arasındaki hattın duyarlılık katsayıları

	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Duyarlılık Katsayısı</b>	0.3613	0.6152	0	0.1249	-0.1351	0.3613	0.4671	0.6152

### 5.2.3. Bara gerilimleri ve reaktif güçler

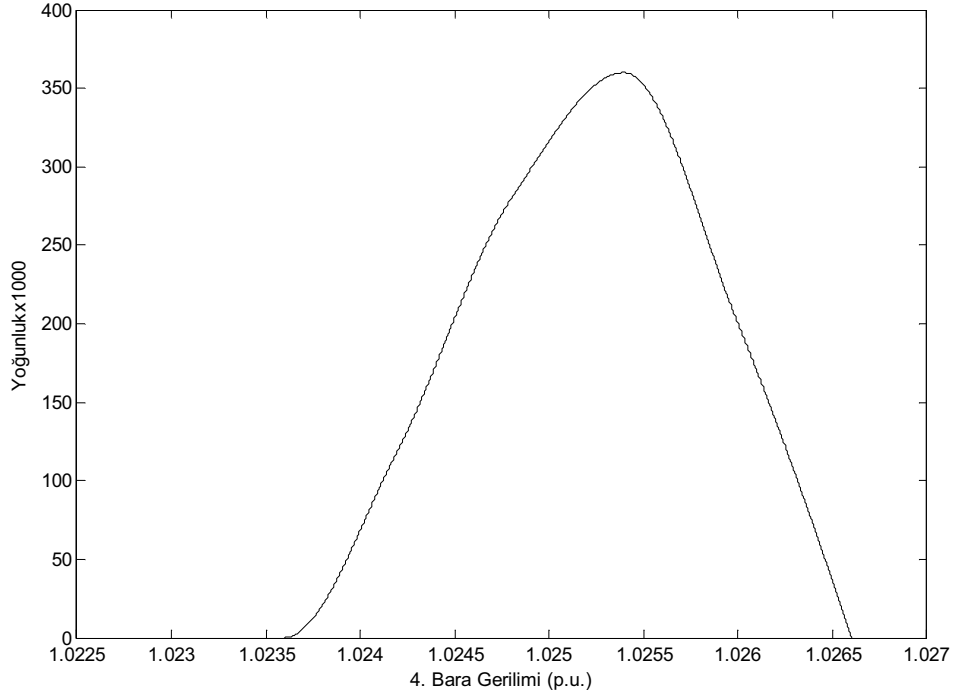
9 Baralı WSCC sisteminin yük baralarına ait gerilimlerin ( $V_i$ ) beklenen değerlerini bulunma işlemi sırasında (4.33) ve (4.36) denklemleri kullanılır. (4.33) denklemindeki matris elemanlarının sıralaması yük ve üretim şeklinde bölünüp öyle işlem yapılır. Önce (4.34) denkleminde bulunan M, L, N ve J matrisleri bulunur. Sonrasında (4.36) denklemindeki değişken olan yük baralarının reaktif güçleri tanımlanır.

Tablo 5.16. Yük baralarının gerilimleri ve standart sapmaları

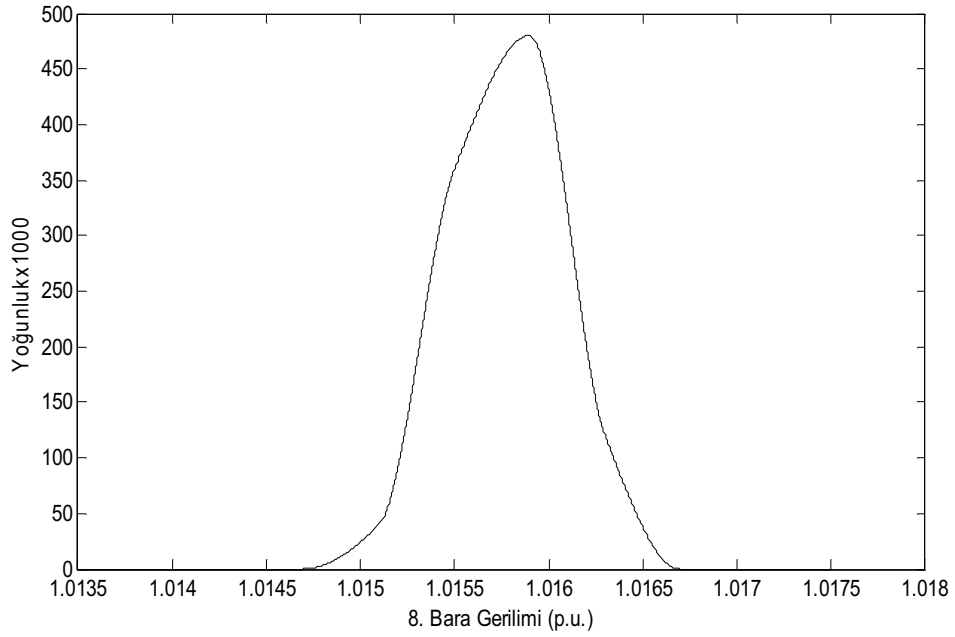
<b>Yük Barası</b>	<b>Gerilimin Beklenen Değeri <math>\mu</math> (p.u.)</b>	<b>Standart Sapması <math>\sigma</math> (p.u.)</b>	<b>Deterministik Sonuç (p.u.)</b>	<b>Sonuçlar Arası Fark (p.u.)</b>
4	1.0255	$2.5136 \times 10^{-4}$	1.0258	$3 \times 10^{-4}$
5	0.9982	$2.9155 \times 10^{-4}$	0.99563	$-2.57 \times 10^{-3}$
6	1.0092	$3.784 \times 10^{-4}$	1.0127	$3.5 \times 10^{-3}$
7	1.0337	$1.595 \times 10^{-4}$	1.0258	$-7.9 \times 10^{-3}$
8	0.9905	$1.745 \times 10^{-4}$	1.0159	$25.4 \times 10^{-3}$
9	1.0238	$1.8464 \times 10^{-4}$	1.0324	$8.6 \times 10^{-3}$

Gerilimlere ait olasılık yoğunluk fonksiyonları gösterilirken, grafikleri beklenen değeri deterministik sonuca gelecek şekilde ötelenir. Deterministik yöntemler beklenen değer bulma anlamında olasılıksal yaklaşımdan daha sağlıklı sonuçlar

bulur. Olasılıksal yaklaşımın faydası gerilimin hangi aralıklarda hangi olasılıklarda meydana geleceğini göstermesidir.



Şekil 5.10. 4 numaralı baradaki gerilimin olasılık yoğunluk fonksiyonu



Şekil 5.11. 8 numaralı baradaki gerilimin olasılık yoğunluk fonksiyonu

Jeneratör baralarının reaktif güçleri ( $Q_g$ ) ise (4.37) denklemiyle hesaplanır. Tablo 5.16'da yük bara gerilimlerinin beklenen değerleri ve standart sapmaları tablo halinde verilmiştir. Tablo 5.17'de ise üretim baralarındaki reaktif güçlerin beklenen değerleri ve standart sapmaları verilmiştir.

Tablo 5.17. Jeneratör baralarının reaktif güçleri ve standart sapmaları

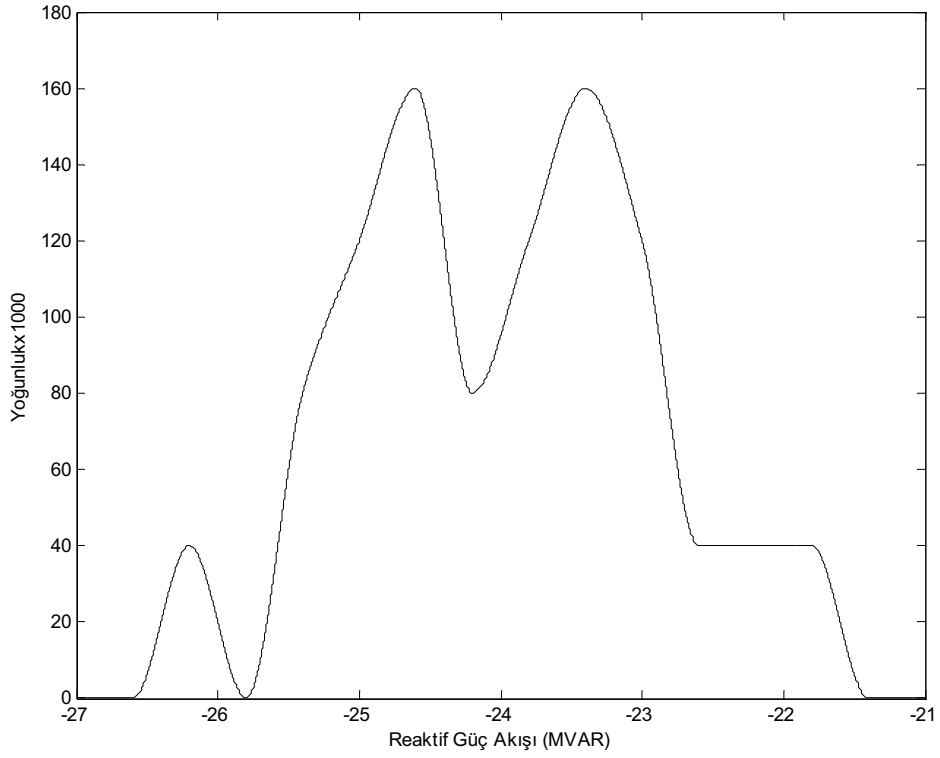
Jeneratör Barası	Beklenen Değeri $\mu$ (MVAR)	Standart Sapması $\sigma$ (MVAR)	Deterministik Sonuç (MVAR)
1	26.48	4.9	27.046
2	6.14	2.9	6.654
3	4.03	3.5	-10.8

Tablo 5.18. Hatlardaki reaktif güç akışları

Düğüm Arası Hat	Beklenen Değeri $\mu$ (MVAR)	Standart Sapması $\sigma$ (MVAR)	Deterministik Sonuç (MVAR)
2-7	6.434	2.98623	6.7
7-5	-5.165	3.825	-8.3
5-4	-38.868	6.1318	-38.6
4-1	-23.31	2.9124	-23.7
4-6	0.9663	6.9105	0.9
7-8	-24.94	2.7075	-0.8
6-9	-13.421	4.595	-13.5
9-3	14.565	3.5775	14.9
9-8	3.232	3.7193	3.1

Hesaplanan üretim baralarının reaktif güçleri ve tüketim baralarının gerilimleri kullanılarak baralar arası reaktif güçlerin beklenen değerleri (4.38) denklemi kullanılarak bulunur. Bu sistemde transformatör kademe oranları bütün baralarda 1 olduğundan (4.38) denklemi (4.75) halini alır.

$$Q_{ik} = (B_{ik} - B_{ik}') V_i + A_{ik} V_k \quad (4.75)$$



Şekil 5.12. 4 ve 1 numaralı baralar arasındaki reaktif güç akışı

Şekil 5.12’de 4 ve 1 baraları arasındaki reaktif güç akışının değişimi gösterilmiştir. Bu hatta iletilen reaktif gücün beklenen değeri -23.31 MVAR, deterministik değeri ise -23.7 MVAR’dır.

## BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Olasılıksal yük akışı analizi sonucunda sistemdeki hatların aktif ve reaktif güç akışlarının, sistemdeki bara gerilimlerinin ve bara açılarının beklenen değerleri bulunmuştur. Beklenen değerleri bulunurken standart sapmaları da hesaplanmıştır. Deterministik yöntemlerde sisteme ait bir sonucun standart sapması hakkında bilgi alınamamaktadır.

Olasılıksal analiz yapılırken giriş verilerinin birçoğu normal dağılıma sahip olsa dahi sistemde var olan binom ve ayrık dağılıma sahip değişkenlerin, sonuçların normal dağılımdan uzaklaşmalarına sebep olmuştur.

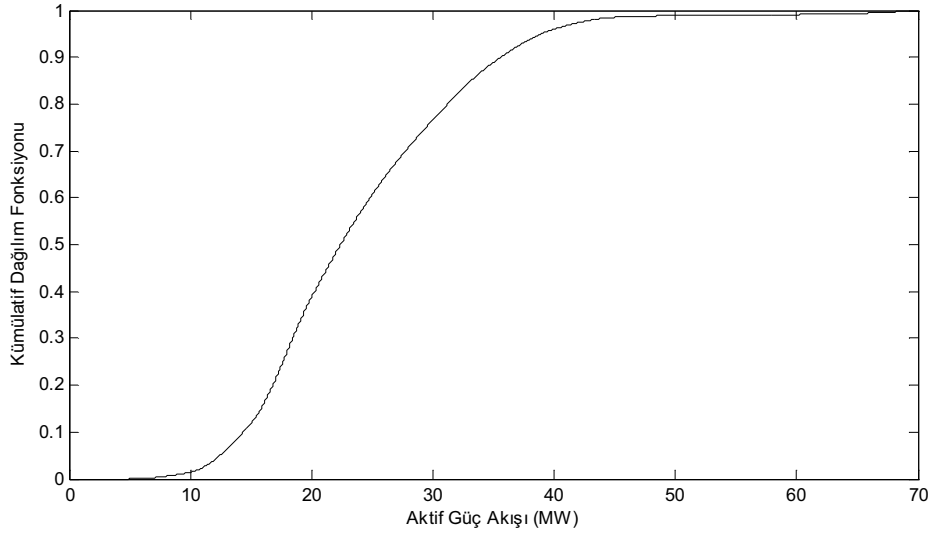
Olasılıksal analiz sonucunda duyarlılık katsayıları gibi parametreler bulunarak sistemdeki hatların giriş güç değerlerinin değişimlere verecekleri tepkiler hakkında bilgi edinilmektedir.

Olasılık yoğunluk fonksiyonları bir sistemin davranış veya performansının olasılıklarını anlamamanın temelini oluştururlar.  $f(x)$  bir değişkenin olasılık yoğunluk fonksiyonu olmak üzere; sistemdeki bir değişkenin  $X_1$  ve  $X_2$  sınırları arasında olma olasılığı aşağıda gösterilmiştir.

$$p(X_1 \leq x < X_2) = \int_{X_1}^{X_2} f(x) dx$$

Uygun  $X_1$  ve  $X_2$  değerleri ile bu denklem sistemdeki bütün değişkenlere uygulanabilir. Bu ifade ile birlikte sistemin üretim eksikliğinin, hatların aşırı yüklenmesinin, belirtilen sınırlar dışındaki bara gerilimlerinin ve reaktif güç sınır ihlalleri durumlarının olasılıkları bulunabilir. Şekil 6.1.'de 9 baralı WSCC sisteminin

4 ve 6 numaralı baralar arasındaki aktif güç akışının kümülatif dağılım fonksiyonu verilmiştir.



Şekil 6.1. 4 ve 6 baraları arasındaki güç akışının kümülatif yoğunluk fonksiyonu

Güç akışlarının olasılık yoğunluk fonksiyonlarının bulunması planlama, koruma ve güvenilirlik gibi konularda önem kazanmaktadır. Bu güç akışlarının olasılık yoğunluk fonksiyonları sayesinde hattın akacak gücün beklenen değerinin dışında ulaşabileceği maksimum değer, minimum değer ve tüm bu değerler arasındaki değerlere hangi olasılıkla sahip olabileceği görülebilmektedir.

Kümülatif dağılım fonksiyonu kullanılarak Tablo 6.1.'de 4 ve 6 numaralı baralar arasındaki aktif güç akışının verilen bir sınırı aşmama olasılıkları gösterilmiştir.

Tablo 6.1. 4 ve 6 baraları arasındaki hattın aktif güç akışının verilen sınırın altında olma olasılığı

Sınır (MW)	Sınırı Aşmama Olasılığı
20	0.4287
25	0.6480
30	0.8059
35	0.8978
40	0.9693
45	0.9948
50	0.9985
55	0.9997
60	0

Tablo 6.2.'de ise 4 ve 6 numaralı baralar arasındaki hattın aktif güç akışının hangi aralıklarda hangi olasılıklarda meydana gelebilecekleri gösterilmektedir.

Tablo 6.2. 4 ve 6 baraları arasındaki hattın aktif güç akışının verilen güç aralıklarında olma olasılığı

Aralık (MW)	Verilen Aralıkta Olma Olasılığı
$60 \leq P_{46} \leq 70$	0
$55 \leq P_{46} < 60$	$30 \times 10^{-5}$
$50 \leq P_{46} < 55$	$1.2 \times 10^{-3}$
$45 \leq P_{46} < 50$	$3.7 \times 10^{-3}$
$40 \leq P_{46} < 45$	$25.5 \times 10^{-3}$
$35 \leq P_{46} < 40$	$71.5 \times 10^{-3}$

Olasılık yük akışı sonuçları uzun vadede güvenilirlik marjlarını değerlendirmek için çok yararlıdır.

Sistemde var olduğu bilinen değişkenlerin hesaba katılmasıyla yapılan analiz sonucunda elde edilen olasılık yoğunluk fonksiyonları güvenilirliğin ve korumanın önemli olduğu durumlarda, sistem planlanması yapılacak durumlarda kullanarak sistemin günümüzde ve gelecekteki performansı hakkında geniş bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır. Deterministik analiz sonucunda sadece beklenen değerler hakkında bilgi alınabilmekte ve değerler stabil kabul edilmektedir.

Olasılıksal yaklaşım kullanılarak sistemi tek bir durum altında incelemek yerine sistemde oluşabilecek tüm durumların incelenmesi yapılmaktadır.



## KAYNAKLAR

- [1] BORKOWSKA, B., Probabilistic Load Flow, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no.3, pp 752-755, 1974.
- [2] ALLAN, R.N., BORKOWSKA, B. and GRIGG, C.H., Probabilistic Analysis of Power Flows, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers (London), vol. 121, no. 12, pp. 1551-1556, 1974.
- [3] ALLAN, R.N., AND AL-SHAKARCHI, M.R.G., Probabilistic AC Load Flow, Proc. IEE, 1976, 123, (6), pp. 531-536.
- [4] ALLAN, R.N., GRIGG, C.H. and AL-SHAKARCHI, M.R.G., Numerical Techniques in Probabilistic Load Flow Problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 10, pp. 853-860, 1976.
- [5] ALLAN, R.N., GRIGG, C.H., NEWAY, D.A. and SIMMONS, R.F., Probabilistic Power-Flow Techniques Extended and Applied to Operational Decision Making, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 123, no. 12, pp. 1317-1324, 1976.
- [6] ALLAN, R.N. and LEITE DA SILVA, A.M., Probabilistic Load Flow Using Multilinearisations, IEE Proc., Part C: Generation, Transmission and Distribution, vol. 128, no. 5, pp. 280-287, 1981.
- [7] LEITE DA SILVA, A.M., ARIENTI, V.L. and ALLAN, R.N., Probabilistic Load Flow Considering Dependence Between Input Nodal Powers, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no.6, 1984.
- [8] BRUCOLI, M., TORELLI, F. and NAPOLI, R., Quadratic Probabilistic Load Flow with Linearly Modelled Dispatch, Electrical Power & Energy Systems, vol. 7, no. 3, pp. 138-146, 1985.
- [9] LEITE DA SILVA, A.M., ALLAN, R.N., SOARES, S.M. and ARIENTI, V.L., Probabilistic Load Flow Considering Network Outages, IEE Proc., Part C: Generation, Transmission and Distribution, vol. 132, no. 3, pp. 139-145, 1985.
- [10] HU, Z. and WANG, X., A Probabilistic Load Flow Method Considering Branch Outages, IEEE Trans. Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 507-514, 2006.

- [11] MELIOPOULOS, A.P.S., COKKINIDES, G.J. and CHAO, X.Y., A New Probabilistic Power Flow Analysis Method, IEEE Trans. Power Systems, , vol.5, no.1, pp.182-190, 1990.
- [12] N. D. HATZIARGYRIOU and T. S. KARAKATSANIS, A Probabilistic Approach to Control Variable Adjustment for Power System Planning Applications, International Conference on Control, vol. 1, pp.733-738, 1994.
- [13] T. S. KARAKATSANIS and N. D. HATZIARGYRIOU, Probabilistic Constrained Load Flow Based on Sensitivity Analysis, IEEE Trans. Power Systems, vol.9, no.4, pp.1853-1860, 1994.
- [14] N. D. HATZIARGYRIOU and T. S. KARAKATSANIS, Distribution system voltage and reactive power control based on probabilistic load flow analysis, IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, vol.144, no.4, pp.363-369, Jul. 1997.
- [15] C. L. SU, Distribution probabilistic load flow solution considering network reconfiguration and voltage control devices, 15<sup>th</sup> Power Systems Computation Conference, Liege, 2005.
- [16] M. MADRIGAL, K. PONNAMBALAM, V. H. QUINTANA, Probabilistic optimal power flow, IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1998. vol.1, pp.385-388, 1998.
- [17] G. VERBIC, A. SCHELLENBERG, W. ROSEHART, and C. A. CANIZARES, Probabilistic optimal power flow applications to electricity markets, International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, 2006. PMAPS 2006., pp.1-6, 2006.
- [18] P. CARAMIA, G. CARPINELLI, M. PAGANO and P. VARILONE, Probabilistic three-phase load flow for unbalanced electrical distribution systems with wind farms, IET Renewable Power Generation, vol.1, no.2, pp.115-122, 2007.
- [19] G. CARPINELLI, T. ESPOSITO, P. VARILONE and P. VERDE, First-order probabilistic harmonic power flow, IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, vol.148, no.6, pp.541-548, 2001.
- [20] P. ZHANG and S.T. LEE, Probabilistic load flow computation using the method of combined cumulants and Gram-Charlier expansion, IEEE Trans. Power Systems, vol.19, no.1, pp. 676-682, Feb. 2004.
- [21] H. ZHANG, P. LI, Probabilistic Analysis for Optimal Power Flow Under Uncertainty. IET Generation, Transmission & Distribution 4(5), 553–561 (2010)
- [22] J.M. MORALES, L. BARINGO, A.J. CONEJO, R. MINGUZE, Probabilistic Power Flow with Correlated Wind Sources. IET Generation, Transmission, & Distribution 4(5), 641–651 (2010)

- [23] X. Lİ, J. CAO, D.J. DU, Comparison of Levenberg-Marquardt Method and Path Following Interior Point Method for the Solution of Optimal Power Flow Problem. *International Journal of Emerging Electric Power Systems* 13(3), 1–21 (2012)
- [21] O.A. OKE, D.W.P. THOMAS, G.M. ASHER, A new probabilistic load flow method for system with wind penetration, *Conf Rec IEEE Int Conf Power Tech* (2011), pp. 1–6.
- [21] F.J. RUIZ-RODRIGUEZ, J.C. HERNANDEZ, F. JURADO, Probabilistic load flow for photovoltaic distributed generation using the Cornish–Fisher expansion, *Electr Power Syst Res*, 89 (2012), pp. 129–138
- [26] NPTEL (National Programme on Technology Enhanced Learning) Electrical Engineering, Power System Analysis, Prof. Dr. Arindam Ghosh internet sitesi:[http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT\\_KANPUR/power-system/ui/TOC.htm](http://nptel.iitm.ac.in/courses/Webcourse-contents/IIT_KANPUR/power-system/ui/TOC.htm). Erişim Tarihi: 23.10.2012
- [27] HADI SAADAT, *Power System Analysis*, McGraw Hill, 1999.
- [28] TINNEY, W.F., HART, C.E., Power Flow Solution by Newton’s Method, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp.86, 1967.
- [29] DOMMEL, H.W., TINNEY, W.F., Optimal Power Flow Solutions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp.87, 1968.
- [30] SUN, D.I., ASHLEY, B., BREWER, B., HUGHES, A., TINNEY, W.F., Optimal Power Flow by Newton Approach, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp.103, 1984.
- [31] LUKMAN, D., BLACKBURN, T.R., Modified Algorithm of Load Flow Simulation for Loss Minimization in Power Systems, *Australian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2001*, Curtin University, pp.1, 2001.
- [32] ZHIQIANG, Y., ZHIJIAN, H., CHUANWEN, J., Economic Dispatch and Optimal Power Flow Based on Chaotic Optimization, *IEEE*, 2002.
- [33] CHOUSEIN KIOSE, O., *KKTC Elektrik Üretim İletim Sisteminde Yük Akışı ve Gelişim Planı (2006-2010)*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2006.
- [34] RAMASAMY N., *Computer-Aided Power System Analysis*, Marcel Dekker, Inc., New York, 2002.
- [35] ÇAKIR, H., *Elektrik Güç Sistemleri Analizi*, Y.T.Ü. Mühendislik Fakültesi, İstanbul, 1986.
- [36] PAMUK, N., *380 ve 154 KV’luk Kuzeybatı Anadolu Şebekesi Güç Akışı Benzetimleri*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2009.
- [37] ARİFOĞLU, U., *Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi*, Alfa Basım Yayım Dağıtım Ltd. Şti., İstanbul, 2002.

- [38] SOYSAL, S., Bolu-Düzce Bölgesi 154 kV/34,5 kV İletim ve Dağıtım Şebekesinin Bilgisayar Ortamında Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2008.
- [39] JAMES, A.M., Electric Power System Applications of Optimization, Marcel Dekker, Inc., pp.65-90, NewYork, USA, 2001.
- [40] ALLAN, R.N., and AL-SHAKARCHI, M.R.G., Probabilistic Techniques in A.C. Load-Flow Analysis Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 124, no. 2, pp. 154–160, Feb. 1977.

## **EKLER**

### **EK A Psat Analizinin Sonucu**

#### POWER FLOW REPORT

P S A T 2.1.6

Author: Federico Milano, (c) 2002-2010

e-mail: Federico.Milano@uclm.es

website: <http://www.uclm.es/area/gsee/Web/Federico>

File: C:\Users\casper\Desktop\psat\tests\d\_009.mdl

Date: 14-Apr-2013 21:49:08

#### NETWORK STATISTICS

Buses: 9

Lines: 6

Transformers: 3

Generators: 3

Loads: 3

#### SOLUTION STATISTICS

Number of Iterations: 4

Maximum P mismatch [p.u.] 0

Maximum Q mismatch [p.u.]      0  
 Power rate [MVA]                    100

#### POWER FLOW RESULTS

Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Bus 1	1.04	0	0.71641	0.27046	0	0
Bus 2	1.025	0.16197	1.63	0.06654	0	0
Bus 3	1.025	0.08142	0.85	-0.1086	0	0
Bus 4	1.0258	-0.03869	0	0	0	0
Bus 5	0.99563	-0.06962	0	0	1.25	0.5
Bus 6	1.0127	-0.06436	0	0	0.9	0.3
Bus 7	1.0258	0.06492	0	0	0	0
Bus 8	1.0159	0.0127	0	0	1	0.35
Bus 9	1.0324	0.03433	0	0	0	0

#### LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow	Q Flow	P Loss	Q Loss
			[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Bus 9	Bus 8	1	0.24183	0.0312	0.00088	-0.21176
Bus 7	Bus 8	2	0.7638	-0.00797	0.00475	-0.11502
Bus 9	Bus 6	3	0.60817	-0.18075	0.01354	-0.31531
Bus 7	Bus 5	4	0.8662	-0.08381	0.023	-0.19694
Bus 5	Bus 4	5	-0.4068	-0.38687	0.00258	-0.15794
Bus 6	Bus 4	6	-0.30537	-0.16543	0.00166	-0.15513
Bus 2	Bus 7	7	1.63	0.06654	0	0.15832

Bus 3	Bus 9	8	0.85	-0.1086	0	0.04096
Bus 1	Bus 4	9	0.71641	0.27046	0	0.03123

#### LINE FLOWS

From Bus	To Bus	Line	P Flow [p.u.]	Q Flow [p.u.]	P Loss [p.u.]	Q Loss [p.u.]
Bus 8	Bus 9	1	-0.24095	-0.24296	0.00088	-0.21176
Bus 8	Bus 7	2	-0.75905	-0.10704	0.00475	-0.11502
Bus 6	Bus 9	3	-0.59463	-0.13457	0.01354	-0.31531
Bus 5	Bus 7	4	-0.8432	-0.11313	0.023	-0.19694
Bus 4	Bus 5	5	0.40937	0.22893	0.00258	-0.15794
Bus 4	Bus 6	6	0.30704	0.0103	0.00166	-0.15513
Bus 7	Bus 2	7	-1.63	0.09178	0	0.15832
Bus 9	Bus 3	8	-0.85	0.14955	0	0.04096
Bus 4	Bus 1	9	-0.71641	-0.23923	0	0.03123

#### GLOBAL SUMMARY REPORT

##### TOTAL GENERATION

REAL POWER [p.u.] 3.1964

REACTIVE POWER [p.u.] 0.2284

##### TOTAL LOAD

REAL POWER [p.u.] 3.15

REACTIVE POWER [p.u.] 1.15

##### TOTAL LOSSES

REAL POWER [p.u.] 0.04641

REACTIVE POWER [p.u.] -0.9216

## EK B Jeneratör Kapasite Olasılık Tablosu Programı

```
% This is a function file: GeneratorCOPT(G,PR,A)
% This calculates the 'Outage Probability' for a single Power
% GeneratorCOPTMatrixion
% G stands for number of generating unit
% PR stands for Power Ratings of each unit (in Array form)
% A stands for Availability of each unit (in Array form)
%
%
% By: Abhishek Chakraborty
% email: abhishek.piku@gmail.com
%G generator sayisi, PR gen degeri, AV olasılık

function Generator_COPT(G,PR,A)

format short g

X=ff2n(G);

InitiationMatrix=[zeros(1,2^G);zeros(1,2^G);ones(1,2^G);zeros(1,2^G)
];
GeneratorCOPTMatrixTemp=InitiationMatrix';

for j=1:2^G

for i=1:G

if (X(j,i)==0)

GeneratorCOPTMatrixTemp(j,1)=GeneratorCOPTMatrixTemp(j,1)+PR(i,1);

GeneratorCOPTMatrixTemp(j,3)=GeneratorCOPTMatrixTemp(j,3)*A(i,1);

else

GeneratorCOPTMatrixTemp(j,2)=GeneratorCOPTMatrixTemp(j,2)+PR(i,1);

GeneratorCOPTMatrixTemp(j,3)=GeneratorCOPTMatrixTemp(j,3)*(1-
A(i,1));
end
end

end

TemporaryMatrix=GeneratorCOPTMatrixTemp;
for m=1:(2^G)
for n=1:(2^G)
if (GeneratorCOPTMatrixTemp(m,1)==GeneratorCOPTMatrixTemp(n,1) &&
m~=n && n>m)

GeneratorCOPTMatrixTemp(m,3)=GeneratorCOPTMatrixTemp(m,3)+GeneratorC
OPTMatrixTemp(n,3);
```





'G' jeneratör sayısı, 'PR' jeneratörler ünitelerinin kapasitesi, 'AV' jeneratörün çalışıyor olma olasılığıdır. 9 baralı WSCC sisteminin 3 numaralı barasındaki jeneratörün kapasite olasılık tablosu aşağıdadır:

<b>Mevcut Kapasite (MW)</b>	<b>Kullanılmayan Kapasite (MW)</b>	<b>Durum Olasılığı</b>	<b>Kümülatif Olasılık</b>
100	0	0.19687440	1.00000000
90	10	0.34742542	0.80312560
80	20	0.27589666	0.45570018
70	30	0.12983372	0.17980352
60	40	0.04009571	0.04996980
50	50	0.00849086	0.00987409
40	60	0.00124866	0.00138324
30	70	0.00012591	0.00013458
20	80	0.00000833	0.00000867
10	90	0.00000033	0.00000033
0	100	0.00000001	0.00000001

## ÖZGEÇMİŞ

Rıfıkı Terzioğlu, 31.05.1989 da Trabzon'da doğdu. İlkokul eğitimini Amerika'da, orta ve lise eğitimini ise Bolu'da tamamladı. 2006 yılında Bolu İzzet Baysal Anadolu Lisesi'nden mezun oldu. 2011 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünü bitirdi. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda yüksek lisans çalışmalarına başladı. 2012 yılında Abant İzzet Baysal Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2012 yılının ikinci yarısında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı görevi sürdürmektedir.