

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GENİŞ ALAN  
ÖLÇÜM SİSTEMİ VE FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ  
YERLEŞİMİNİN İNCELEMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elk. Müh. Mehmet Ali Murat İPEK**

**Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**EKİM 2008**

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GENİŞ ALAN  
ÖLÇÜM SİSTEMİ VE FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ  
YERLEŞİMİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Elk. Müh. Mehmet Ali Murat İPEK  
(504041036)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 7 Ekim 2008  
Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Ekim 2008**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Mustafa BAĞRIYANIK  
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Ömer USTA (İ.T.Ü.)  
Y.Doç.Dr. Mehmet BAYRAK (S.Ü.)**

**Ekim 2008**

## **ÖNSÖZ**

Tez çalışmam öncesinde ve çalışma sırasında beni yönlendirdiği, her konuda yol gösterdiği ve yapıcı önerileri ile çalışmamı tamamlamamı sağladığı için danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK'a teşekkür ederim

**Eylül 2008**

**Mehmet Ali Murat İPEK**

## İÇİNDEKİLER

<b>KISALTMALAR</b>	<b>v</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>vii</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>ix</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. GENİŞ ALAN ÖLÇÜM SİSTEMİ</b>	<b>2</b>
2.1 Faydaları	3
2.2 Karasızlık Tanımlamada Yeni Metotlar	4
2.3 Fazör Ölçüm Birimi Teknolojisi	5
2.3.1 Senkrofazör Tanımı	6
2.3.2 Ölçüm Hassasiyeti	7
2.3.3 İletişim Protokolü	8
2.3.4 Veri Biçimleri ve Mesajlar	9
2.3.5 Geçici Hallerde Ölçüm	11
2.3.6 Senkrofazör Uygulamaları	12
<b>3. GÜÇ SİSTEMİNE FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN YERLEŞİMİ</b>	<b>16</b>
3.1 Topolojik Gözlenebilirlik Tanımı	16
3.2 Graf Teorisi Yöntemi	17
3.3 İkincil Gerilim Kontrolü	18
3.4 Gerilim Kontrolü için Pilot Nokta Yerleşimi	19
3.5 FÖB'lerinin Yerleştirilmesi	19
3.5.1 FÖB Yerleşiminin Başlangıç Tahmini	20
3.5.2 FÖB'lerinin Sayısının Azaltılması	20
3.6 Benzetilmiş Tavlama Metodu	21
<b>4. FÖB'LERİNİN IEEE TEST SİSTEMLERİNE YERLEŞTİRİLMESİ VE BENZETİM SONUÇLARI</b>	<b>22</b>
4.1 IEEE 14 Baralı Test Sistemi	23
4.2 IEEE 30 Baralı Test Sistemi	28
4.3 IEEE 57 Baralı Test Sistemi	34
4.4 IEEE 118 Baralı Test Sistemi	40
4.5 Benzetim Sonuçlarının İncelenmesi	49
<b>5. SONUÇLAR VE ANALİZ</b>	<b>53</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>54</b>



## KISALTMALAR

<b>FÖB - PMU</b>	: Fazör Ölçüm Birimi – Phasor Measurement Unit
<b>WAP</b>	: Wide Area Protection
<b>WAMS</b>	: Wide Area Measurement System
<b>EYS</b>	: Enerji Yönetim Sistemi
<b>GPS</b>	: Global Position System – Global Konum Sistemi
<b>UTC</b>	: Coordinated Universal Time – Evrensel Zaman Birimi
<b>TVE</b>	: Toplam Vektör Hatası
<b>PDC</b>	: Phasor Data Concentrator - Fazör Veri Toplayıcısı
<b>İMA</b>	: İndirici Merkez Otomasyonu

## TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
<b>Tablo 4.1</b> : Derinlik metodu benzetim sonuçları (IEEE 14 bara).....	24
<b>Tablo 4.2</b> : Graf teorisi benzetim sonuçları (IEEE 14 bara).....	25
<b>Tablo 4.3</b> : Tavlama metodu benzetim sonuçları (IEEE 14 bara).....	26
<b>Tablo 4.4</b> : Minimum kapsayan ağaç metodu benzetim sonuçları (IEEE 14 bara).	27
<b>Tablo 4.5</b> : Derinlik metodu benzetim sonuçları (IEEE 30 bara).....	29
<b>Tablo 4.6</b> : Graf teorisi yöntemi benzetim sonuçları (IEEE 30 bara).....	30
<b>Tablo 4.7</b> : Tavlama metodu benzetim sonuçları (IEEE 30 bara).....	31
<b>Tablo 4.8</b> : Minimum kapsayan ağaç metodu benzetim sonuçları (IEEE 30 bara).	32
<b>Tablo 4.9</b> : Derinlik metodu benzetim sonuçları (IEEE 57 bara).....	34
<b>Tablo 4.10</b> : Graf teorisi yöntemi benzetim sonuçları (IEEE 57 bara).....	36
<b>Tablo 4.11</b> : Minimum kapsayan ağaç metodu (IEEE 57 bara).....	38
<b>Tablo 4.12</b> : Derinlik metodu benzetim sonuçları (IEEE 118 bara).....	40
<b>Tablo 4.13</b> : Graf teorisi yöntemi benzetim sonuçları (IEEE 118 bara).....	43
<b>Tablo 4.14</b> : Minimum kapsayan ağaç metodu benzetim sonuçları (IEEE 118 bara) .....	46
<b>Tablo 4.15</b> : Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması (IEEE 14 bara).....	50
<b>Tablo 4.16</b> : Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması (IEEE 30 bara).....	51
<b>Tablo 4.17</b> : Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması (IEEE 57 bara).....	51
<b>Tablo 4.18</b> : Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması (IEEE 57 bara).....	51
<b>Tablo 4.19</b> : Minimum kapsayan ağaç metodu benzetim sonuçları .....	52

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Geniş alan ölçekli kontrol sistemi genel yapısı .....	4
Şekil 2.2 : Geniş alan ölçekli koruma sistemi[11] .....	5
Şekil 2.3 : Fazör ölçüm birimi blok diyagramı [3] .....	6
Şekil 2.4 : Senkrofazör tanımı ve açış gösterimi. [16] .....	7
Şekil 2.5 : Elektriksel geçici halde fazör geçişi.[16] .....	11
Şekil 2.6 : Güç sistemine FÖB'lerinin yerleştirilmesi [16] .....	13
Şekil 2.7 : PV Eğrisi ile kararlı hal Sınırı[16].....	14
Şekil 3.1 : Gözlenebilir sistem .....	18
Şekil 4.1 : IEEE 14 baralı test sistemi.....	23
Şekil 4.2 : IEEE 30 baralı test sistemi.....	28



## SEMBOL LİSTESİ

$V_r$	:	Yük Gerilimi
$V_s$	:	Kaynak Gerilimi
$Z_{hat}$	:	Hat Empedansı
$\vec{X}_{MEAS(k)}$	:	Ölçülen Değer
$\vec{X}_{IDEAL}$	:	Beklenen Değer

# ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GENİŞ ALAN ÖLÇÜM SİSTEMİ VE FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN YERLEŞİMİNİN İNCELENMESİ

## ÖZET

Çevresel ve ekonomik kısıtlamalar sebebiyle, mevcut güç sistemleri ve iletim hatları kapasitelerine yakın değerlerde işletilmeye çalışılmaktadır. Bu durum güç sistemlerinde gerilim kararsızlığına yol açmakta ve güç sistemlerindeki muhtemel gerilim çökmesi olaylarına zemin hazırlamaktadır. Bu sebeple, güç sistemi izlenebilirliği ve kontrolü için gelişen teknolojilerin de yardımıyla yeni ölçüm ve kontrol sistemi araştırmaları hız kazanmıştır. Mevcut enerji yönetim sistemlerini tamamlayıcı veya onların yerine geçen ölçme ve kontrol yöntemlerinden biri olan geniş alan ölçüm sistemi bu tezin konusunu oluşturmaktadır.

Bu çalışmada öncelikle, bir izleme ve ölçüm yöntemi olarak geniş alan ölçüm sisteminin yapısı incelenmiştir. Geniş alan ölçümün nasıl yapıldığı, yerel gerilim ve akım fazör bilgilerinin FÖB'leri sayesinde merkezi kontrol noktasına iletilmesi ve merkezi kontrol noktasında gerekli algoritmalar çalıştırılarak, sistem kararsızlığı çökme boyutlarına ulaşmadan gerekli önlemlerin alınarak sistemin tekrar normal işletme koşullarına ulaştırılabilmesi anlatılmıştır. Geniş alan ölçüm sistemi, bozucu etki gerçekleşmeden önce bozucu etkiyi tanımlar ve gerekli önlemlerin alınmasını koordine ederek bozucu etkinin şiddetini azaltır veya bozucu etkiyi tamamen ortadan kaldırır. Ayrıca yine bu bölümde geniş alan ölçüm sisteminin mevcut izleme ve kontrol sistemlerine karşı olan üstünlüğü ve geniş alan ölçüm sisteminin en önemli unsuru olan fazör ölçüm birim teknolojisi mevcut senkrofazör standartları ışığında ayrıntıları ile anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde, güç sistemlerinde sistem topolojik gözlenebilirliği açısından FÖB'lerinin güç sisteminin gerekli baralarına yerleştirilmesi anlatılmıştır. Topolojik gözlenebilirlik tanımı verilmiş, graf teorisi ve benzetilmiş tavlama metodu gibi fazör ölçüm birimi yerleştirme metodlarından bahsedilmiştir. FÖB yerleşimine nasıl başlanacağı ve hangi kurallar ve adımlar ışığında sistemi gözlenebilir kılan minimum sayıdaki FÖB yerleşimine ulaşılabileceğinden bahsedilmiştir.

Son bölümde, derinlik metodu, graf teorisi yöntemi, tavlama metodu ve minimum kapsayan ağaç metodu gibi değişik yerleştirme metodları IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 ve IEEE 118 baralı test sistemlerine PSAT programı vasıtası ile uygulanmıştır. FÖB'lerinin sistemin hangi baralarına yerleştirilmesinin uygun olacağı araştırılmıştır. Elde edilen benzetim sonuçları karşılaştırılmış, yerleştirme metodlarının birbirlerine olan üstünlükleri ortaya koyulmuştur.

Yapılan çalışmada güç sistemlerinin en önemli problemlerinden biri olan gerilim kararsızlığı probleminin, geniş alan ölüm sistemi sayesinde nasıl önlenebileceği anlatılmıştır. Güç sisteminin gözlenebilir olması sistem durum yaklaşımı dolayısıyla sistem gerilim kararlılığının saptanmasında en önemli unsurdur. Bu sebeple artan kontrol sistemi maliyetleri de göz önünde bulundurarak, sistemi gözlenebilir kılan en az sayıdaki fazör ölüm biriminin saptanmasını sağlayan ve bu fazör ölüm birimlerinin hangi baralara yerleştirileceğine karar veren fazör ölüm birimi yerleştirme metodu çok önemlidir.

# **INVESTIGATION OF WIDE AREA MEASUREMENT SYSTEM AND PHASOR MEASUREMENT PLACEMENT IN POWER SYSTEMS**

## **SUMMARY**

Due to economical and environmental constraints, existing power systems and transmission lines are operated close to their limits. This situation causes voltage instability and possible voltage collapses. For this reason, by means of developing technology, the speed of researches on power system monitoring and measurement have increased. Wide area measurement system, which complements or replaces existing energy management systems, is the subject of this thesis.

In this study, firstly, the structure of wide area measurement system is investigated as a monitoring and measuring tool. How the wide area measurement is maintained, transmission of local voltage and current phasors to central protection by means of phasor measurement units, taking necessary actions early enough in order to prevent voltage collapse by running the necessary algorithms in the central protection point, are also explained in this section. Wide area measurement and protection systems limit the severity of disturbances by early recognition as well as proposition and execution of coordinated stabilizing actions. Also in this section the advantages of wide area measurement system over existing monitoring and measurement systems are stated and phasor measurement technology is detailed based on synchrophasor standards.

In the third section, phasor measurement placement for power system topological observability is summarized. The definition of topological observability is given and phasor measurement unit placement techniques like graph theoretic procedure and simulated annealing method are described. Initial placement, steps and criteria's of placement are explained in order to detect minimum number of PMU that makes the system observable.

In the last section, different PMU placement methods like depth first, graph theory, simulated annealing method and minimum spanning tree methods are applied to IEEE 14 bus, IEEE 30 bus, IEEE 57 bus, and IEEE 180 bus test systems by means of PSAT interface which runs in MATLAB. Appropriate PMU locations are investigated, simulation results are compared and advantages of these methods over each other are stated.

In this thesis, how the voltage instability problem, one of the power system major problems, can be prevented by the help of wide area measurement system is briefly described. Power system observability, consequently power system state estimation is the most important issue on detecting power system stability. For this reason,

finding minimum number of phasor measurement units and placement methods of this phasor measurement units in accordance with increasing costs are very significant.

## 1. GİRİŞ

Modern güç sistemleri çok hızlı gelişmekte ve birbirine bağımlı duruma gelmektedir. Güç sistemlerindeki bu hızlı gelişime ve artan güç talebine rağmen, ekonomik ve çevresel şartlar sebebiyle güç sistemlerine ve özellikle iletim hatlarına yeterince yatırım yapılamamakta ve sistemler limitlerine yakın değerlerde işletilmektedir. Özellikle ülkemiz gibi gelişmekte olan ülkelerde, güç sistemlerine binen yük her geçen gün artmakta ve mevcut enerji sistemleri bu yeni yükleri karşılayamaz hale gelmektedir. Buna bağlı olarak mevcut enerji sistemlerinin güvenilirliği azalmakta, geniş alan karasızlığı ve gerilim çökmeleri geçmişe oranla daha sıklıkla görülmeye başlanmaktadır.

Bu yüzden, güç sistemlerinin izlenmesi ve kontrolü çok daha önemli olmakla beraber aynı zamanda da karmaşıklaşmıştır. Bu sebeple, güç sisteminin değişen koşullar karşısında gerilim karalılığını koruyabilmesi ve herhangi bir bozucu etkiye maruz kaldığında gerekli önlemleri alarak tekrar bozucu etki öncesi çalışma koşullarına dönebilmesi için çeşitli izleme ve kontrol yöntemleri geliştirilmektedir. Güç sisteminde büyük bir bozucu etki olduğunda, ölçüm ve kontrol sistemi, etkiyi sınırlamalı, sistem dalgalanmasını durdurmalı ve gerekli acil durum önlemlerini devreye sokarak sistemi normal işletme koşullarına geri döndürebilmelidir.

Geniş alan ölçüm sistemi, bozucu etki gerçekleşmeden önce bozucu etkiyi tanımlar ve gerekli önlemlerin alınmasını koordine ederek bozucu etkinin şiddetini azaltır veya bozucu etkiyi tamamen ortadan kaldırır. Bu sistemler, mevcut, klasik koruma yöntemlerini ve SCADA/EMS sistemlerini tamamlayıcıdır ve sistem karalılığının bozulmaması için normal olmayan sistem durumlarını yeterince erken saptayarak gerekli önlemlerin alınmasını sağlarlar. [1,2,3]

## 2. GENİŞ ALAN ÖLÇÜM SİSTEMİ

Geniş alan ölçümleri altmış yılı aşkın bir süredir güç sistemi işletiminde önemli bir yere sahiptir. Bu ölçümler, hatlardaki yük akışının ve jeneratör çıkışlarının gerçek zamanlı ölçümlerini kullanan kontrol merkezlerinde kullanılırlar. 1960 yılının sonlarında, EYS'lerine güç sisteminin gerçek zamanlı durum yaklaşımı ölçümleri sağlamak için yeni bir tip geniş alan ölçme sistemi (SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition Sistem) kullanılmaya başlanmıştır. Yıllar geçtikçe, bu ölçüm sistemindeki “gerçek zamanlı ölçüm” tanımı belirli bir zaman aralığında ölçülen ve ölçümün yapıldığı zamana bağlı olmayan ölçümleri ifade eder duruma gelmiştir.

Enerji Yönetim Sistemlerinden bağımsız olarak, bilgisayar tabanlı koruma sistemleri üzerindeki araştırmalar 1970'lerde hızlanmaya başlamamıştır. Bilgisayar tabanlı uzak mesafe koruma sistemlerinin iletim hatlarındaki simetrik bileşen ölçümlerine ihtiyaç duymaları sebebiyle, röle yerleştirilmiş noktalardaki akım ve gerilim simetrik bileşenleri, bu işaretlerden elde edilen örneklenmiş senkronize verilerden elde edilmiştir. 1980'lerin ortalarında GPS sistemleri bütün kapasitesiyle kullanılmaya başlanmasıyla ve örneklenmiş senkronize uzak ölçüm verilerinin kullanılması gerçekleşmiştir. GPS'in senkronizasyon hassasiyetinin ve simetrik bileşenlerin ölçülebilme tekniğinin birleşimi FÖB olgusunun ortaya çıkmasını sağlamıştır. İlk FÖB'leri Vircinya Teknoloji tarafından 1990 yıllarında geliştirilmiş ve bu yeni ölçüm araçlarının kullanımında pratiksel olarak tecrübe kazanabilmek için birçok indirici merkeze monte edilmiştir. Yıllar sonra, bir çok üretici bu temel prensibe sahip ölçüm cihazları üretmeye başlamıştır. 1995 yılında IEEE ilk FÖB birimi standardını yayınlamış ve bu standart 2005 yılında günümüzdeki biçimine (C37.118) dönüştürülmüştür. FÖB'leri güç sistemlerinin modern gözleme, koruma ve kontrol sistemlerinde kullanılan geniş alan ölçüm sistemleri olarak tanınmaktadır.[4]

Güç sistemlerindeki geniş alan bozucu etkileri, güç sistemlerinin karmaşık yapısı ve sistem büyüklüğü sebebiyle, enerji endüstrisi açısından zorlayıcı bir sorundur. Güç sistemi önemli bir bozucu etkiye maruz kaldığında, güç sistemi bozulmasını durdurmak, sistemi normal işletme koşullarına geri döndürmek ve bozucu etkinin yol açtığı hasarları en az seviyeye indirmek için koruma ve kontrol yöntemleri gereklidir. Mevcut koruma ve kontrol yöntemleri hızla gelişen sistem bozulmalarına çözüm bulabilmek için geliştirilmemişler ve bunlar çok yavaş kalabilirler. Bununla

birlikte, dinamik benzetim yazılımları sadece çevrimdışı olarak uygulanabilirler. Bu yüzden operatörler çok karmaşık durumlarla baş etmek zorunda kalırlar ve sezgisel çözümlere baş vurmak zorunda kalırlar. Günümüzde, yerel otomatik yöntemler, sistemi hızla gelişen acil durumların yayılmasından korurlar. Buna karşın, yerel koruma yöntemleri, bozucu etkiye maruz kalan bölgelerinde etkilenmiş olabileceğini düşünemezler ve sistemi bir bütün olarak göremezler.

Geçmişte, sadece merkezi kontrol sistemleri gelişmiş analiz yöntemlerini uygulayabilirdi çünkü sadece bu yüksek seviyede bilgisayar ve iletişim teknolojisinin kullanımı teknik ve ekonomik olarak mümkündü. Bununla birlikte, ileri seviyeli işlemcilerle sahip bilgisayarların daha kullanılabilir olması, iletişim ve ölçüm teknolojilerindeki gelişmeler yerel seviye korumanın bundan böyle daha iyi bir şekilde yapılabilmesine olanak verdi. Modern Enerji Yönetim Sistemleri (EYS), durum yaklaşımı, yük akışı, güvenilirlik analizi, geçici hal kararlılık analizi, uzun dönem kararlılık analizi, vb optimizasyon programlarıyla desteklenmektedir. Bu programların koşturulma süresi, programların gerçek zamanlı olarak her hangi bir acil durumda uygulanabilirliğinde sınırlayıcı etkendir. [5,6,7,8,9,10]

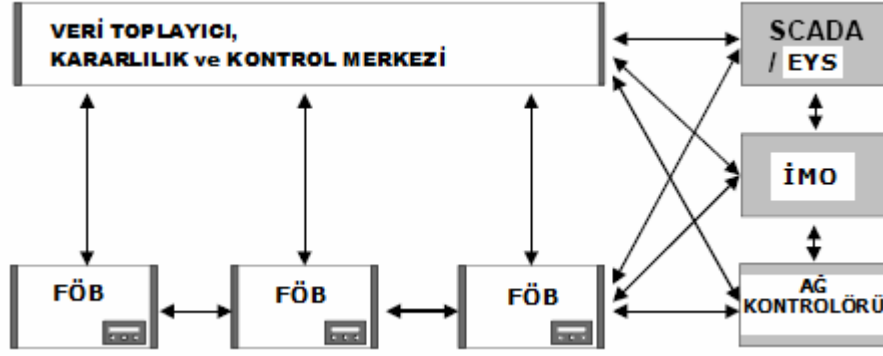
## 2.1 Faydaları

Geniş alan ölçüm ve koruma sistemlerinin en önemli avantajları:

- Dinamik geniş alan ölçümler,
- Yüksek ölçüm hassasiyeti,
- Ölçüm hızı ve veri paylaşım hızı,
- Hızlı koordine edilmiş kontrol ve eylemler için gelişmiş algoritmalarıdır.

Böyle bir sistemde ölçülen büyüklükler merkezi bir birimde toplanır. (Şekil 2.1) Burada, özel uygulamaları içeren algoritmalar (kararlılık durumu değerlendirmesi, gözlemlenme, geniş alan kontrol ve/veya koruma ) uygulanır. Merkez, SCADA/EYS, indirici merkez otomasyonu ve diğer sistem kontrol cihazları gibi diğer bileşenlerle yüksek performanslı iletişim hatlarıyla haberleşmeyi sağlar.[11]





**Şekil 2.1** : Geniş alan ölçekli kontrol sistemi genel yapısı

Geniş alan ölçüm ve kontrol sistemleri;

- Güç iletim kapasitesini artırırlar
- Sistem kararlılığını artırırlar, ya da
- İkisini birlikte artırırlar

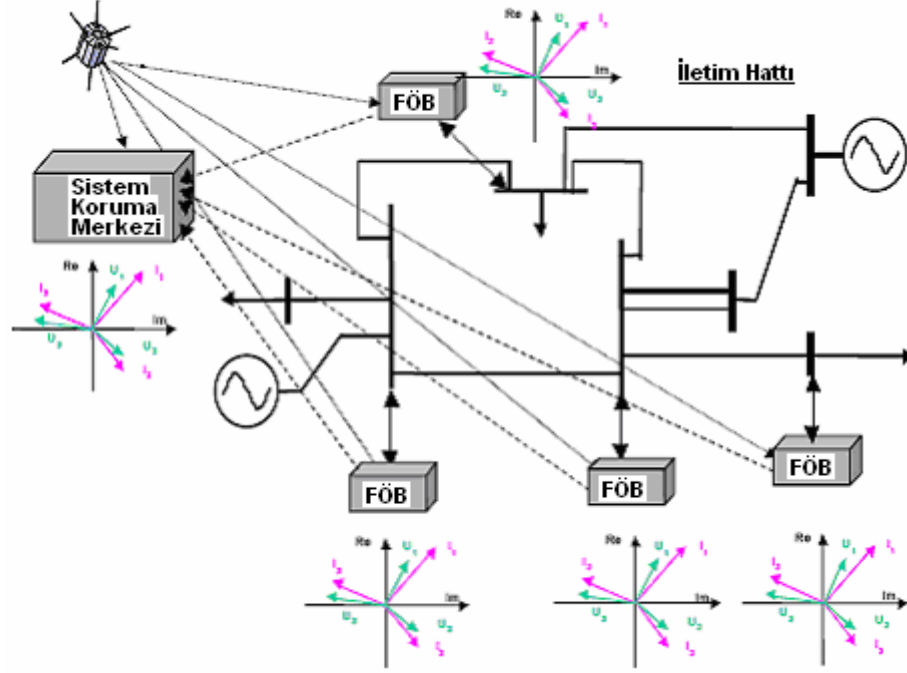
Geniş alan ölçüm ve koruma sistemleri tabi ki iletim hattının fiziksel kapasitesini arttıramazlar fakat iletim hattının kullanılabilir kapasitesini arttırabilirler. Geniş alan ölçüm ve koruma sisteminin kullanılması sistemdeki çökme ihtimalini düşüreceğinden sistemin limitlerine yakın bir şekilde işletilmesini sağlar ve böylece sistemin kullanılabilir kapasitesi arttırılmış olur. İletim kapasitesinin artışının değeri acil durumlarda alınan önlemlerin maliyetiyle karşılaştırıldığında daha iyi anlaşılabilir.[1]

## 2.2 Karasızlık Tanımlamada Yeni Metotlar

Geniş alan ölçüm ve koruma sistemlerinin temeli fazör ölçüm birimlerine dayanmaktadır. Bu birimler akım ve gerilim fazörlerinin doğrudan karşılaştırılabilir biçimde ölçümlerini sağlarlar. Bu ölçümler anlık olduğu için aynı zamanda sistem dinamiklerini de gösterirler.[11]

Güç sisteminin kararlılık durumunun doğru bir şekilde ve gerçek zamanlı olarak saptanabilmesi için gerilim ve akım ölçümlerini gerçekleştiren fazör ölçüm birimlerinin iletim ağı boyunca gerekli yerlere konumlandırılması gerekmektedir. FÖB'leri akım ve gerilim fazörlerinin ani değerlerini genlik ve rotor açısına bağlı olarak ölçerler. FÖB'leri fazörlerin ani değerlerini aynı anda saptayabilmek için GPS uyduları sayesinde senkronize olurlar. Bu verilerin işlenmesi sonucu elde edilen değerler tüm iletim ağı için sistem koruma merkezine farklı noktalardaki gerilim

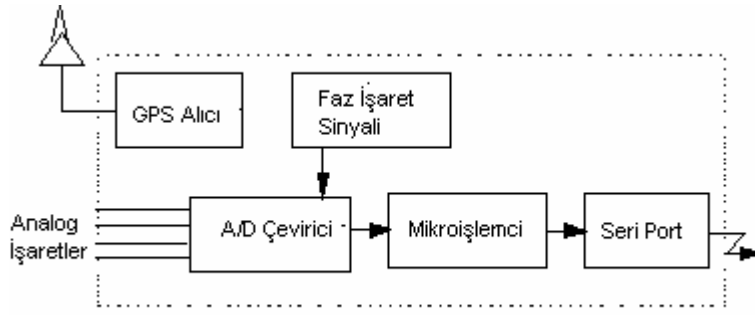
kararlılığı sınırı hakkında kesin değerler verir. Buradaki amaç gerekli önlemlerin alınması için henüz başlayan problemlerin yeterince erken bir şekilde saptanmasını sağlamaktır. [2] (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Geniş alan ölçekli koruma sistemi[11]

### 2.3 Fazör Ölçüm Birimi Teknolojisi

Fazör ölçüm birimleri (FÖB) sistemin belirli zorlanma durumlarında ideal ölçümler sağlarlar. Tekniğin en önemli özelliği, akım ve gerilim değerlerinin pozitif bileşenlerini (gerekirse negatif bileşenlerini ve sıfır bileşenlerini) yüksek bir hassasiyetle, gerçek zamanlı ve zaman senkronizasyonunu sağlayarak ölçebilmesidir. Bu durum, sistemin birbirlerinden uzak birçok noktasından alınan ölçümlerin yüksek bir kesinlikle karşılaştırılabilmesine ve gerçek zamanlı koruma eylemlerinin başlatılabilmesine olanak verir. Fazör hesaplamalarında genellikle hızlı tekrarlanabilir ayrık Fourier dönüşümünü kullanılır.



**Şekil 2.3** : Fazör ölçüm birimi blok diyagramı [3]

Güç sistemi kararlılık koşulları hakkında hassas ve gerçekçi bilgiyi alabilmek için, fazör ölçüm birimleri, iletim hattı boyunca kritik noktalara yerleştirilmelidir. Elde edilecek gerilim ve akım fazörleri ani genlikleri ve rotor açısı ile olan faz farklarını ortaya koymalıdır. Bu veriler GPS sayesinde senkronize edilirler. Daha sonra bu verilerin incelenmesi ile farklı noktalardaki ve sistemin geneli hakkında gerilim kararsızlığı güvenlik sınır değeri hakkında kesin değerler elde edilir. Buradaki amaç, muhtemel problemlere karşı gerekli koruma fonksiyonlarının sağlanabilmesi için sistem durumunun yeterince erken saptanabilmesidir. [2,12]

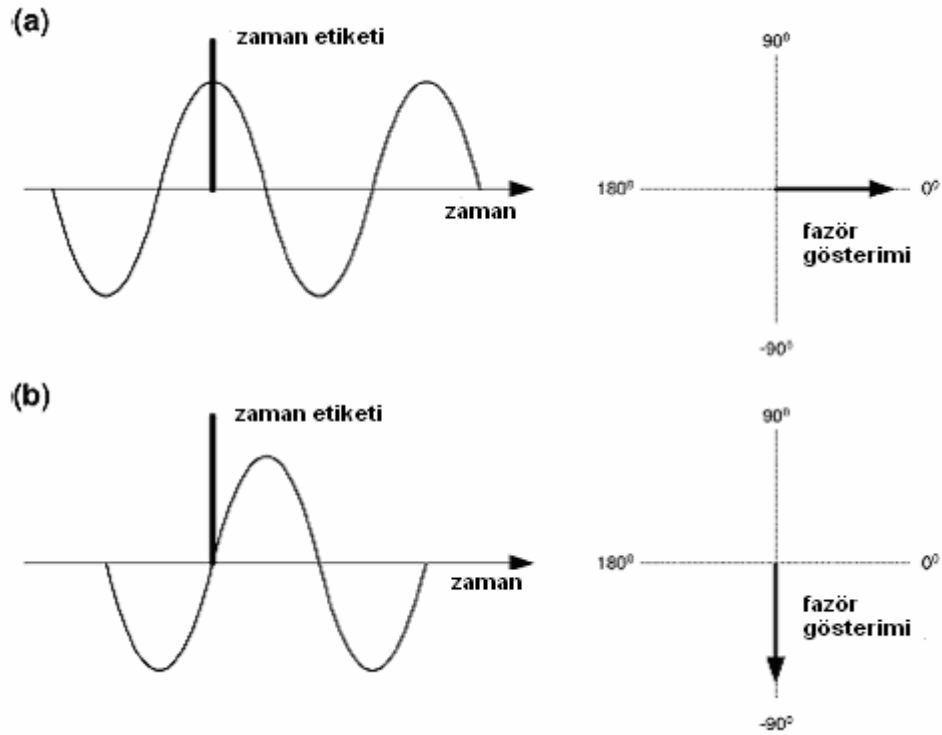
### 2.3.1 Senkrofazör Tanımı

Senkrofazörler veya senkronize edilmiş fazör ölçümleri, güç sisteminin mutlak bir zaman referansına göre tanımlanmış gerilim veya akım fazörlerinin ifadesidir. Bu mutlak referans, global konum sistemi (Global Position System - GPS) gibi bütün dünyaca kullanılan yüksek hassasiyetli zamanlayıcı tarafından koordine edilmiş evrensel zaman birimine (coordinated universal time - UTC) senkronize edilmiş ortak bir zamanlama sistemi sinyali tarafından sağlanır.

Global Konum Sistemi (GPS) IEEE standardı C37.118-2005’de [13] tanımlanan fazör ölçüm senkronizasyonundaki hassasiyetleri karşılar. GPS ABD Savunma Bakanlığının aynı anda en az 4 tanesi görülebilen toplamda 24 adet uydusundan oluşan radyo navigasyon sistemidir. Her bir uydu, her hangi bir alıcının zamanı evrensel zaman birimiyle 0,2  $\mu$ s hassasiyetle senkronize edebileceği navigasyon sinyali yayar. Kullanım kolaylığı, güvenilirliği, kararlılığı ve hassasiyeti GPS’in senkronize fazör ölçüm sistemlerinde kullanılmasının temel nedenleridir.

GPS fazör ölçümlerinde kullanılacak yegane senkronizasyon sinyali kaynağıdır. Standart zaman yayını sistemleri yeterli hassasiyete sahip değildirler. Radyo yayımları, iki yönlü radyo transferi, fiber optikler, UHF ya da mikrodalga sistemleri yeterli hassasiyete ve kesinliğe sahip değildirler.

FÖB'ler, senkronize edilmiş zaman sinyallerini kullanarak, sabit bir sinüzoidal sinyalin fazör gösterimini (kompleks sayı) şekil 2.4'deki gibi ortaya çıkarırlar. Burada verinin iletildiği an zaman etiketi (time tag) olarak tanımlanır ve ölçülen sinüzoidal girişin fazör gösteriminin referansını ifade eder. Fazörün faz açısı, iletilen an ile sinüzoidin tepe noktası arasındaki açısal farkla ifade edilir. Örnek olarak şekil 2.4(a)'da, sinyalin tepe noktası ile zaman etiketi arasındaki fark  $0^\circ$  iken şekil 2.4(b)'de  $-90^\circ$ 'dir. [13,14,15,16].



**Şekil 2.4** : Senkrofazör tanımı ve açı gösterimi. [16]

Zaman referansına göre belirlenmiş olsa da faz açısının tek başına bir önemi yoktur. Ancak, bütün FÖB'leri aynı zaman referansını kullanıyorlarsa, ölçümleri karşılaştırılabilir ve fazörleri arasındaki faz farkları kesinlik içerir.

### 2.3.2 Ölçüm Hassasiyeti

IEEE standardı C37.118-2005 [13] ve daha önceki standart IEEE 1344 [14] senkronizasyon kaynağının UTC ile  $1 \mu\text{s}$  hassasiyette referanslaşmasını öngörür. Böylece FÖB'leri arasında mükemmel bir uyumluluk sağlanmış olur. Standart aynı zamanda %99.87'lik (Bir ayda en fazla 1 saatlik sapma) bir güvenilirlik ister. GPS

sayesinde bu 1  $\mu$ s'lik hassasiyet gerçekleştirilebilir. Bu 60 Hz'lik bir sistemde 0.022 derece, 50 Hz'lik bir sistemde ise 0.018 derecelik bir açısal hassasiyete karşılık gelir.

Fazör ölçüm birimlerinin hassasiyeti ve doğruluğu, verilen belirli bir zamanda(k) yapılan fazör ölçümlerinin ölçülen (MEAS) ve beklenen (IDEAL) değerleri arasındaki vektörel fark olarak tanımlanır ve toplam vektör hatası olarak ifade edilir (TVE);

$$TVE_{(k)} = \%100 \cdot \frac{|\vec{X}_{MEAS(k)} - \vec{X}_{IDEAL}|}{|\vec{X}_{IDEAL}|} \quad (2.1)$$

TVE üç adet muhtemel hatayı içinde barındırır, bunlar: genlik, açı ve zamandır. Örneğin, bir FÖB'i referans zamana göre mükemmel bir şekilde senkronize edilmiş ve açı hatası yok ise, genlikteki %1 hata, %1 TVE'ye karşılık gelir. Zaman hatası ve genlik hatası yokken, 0.573°'lik bir açı hatası %1 TVE'ye karşılık gelir. Bütün hata zaman senkronizasyonundan kaynaklanıyorsa, 50 Hz'lik sistemde 31.8  $\mu$ s ve 60 Hz'lik sistemde 26.5  $\mu$ s, %1 TVE'ye karşılık gelir.

C37.118-2005 standardında hassasiyet için iki seviye belirlenmiştir: Seviye 1 ve Seviye 0. İki seviyede de TVE'nin %1'in altında olması beklenirken, seviye 1 seviye 0'a nazaran frekans, genlik ve sinyal bozulması gibi test referans şartlarında daha sıklıdır.

FÖB'lerinin ölçüm metotları, örnekleme hızı, algoritmaları ya da senkronizasyon metodları standartlarda tanımlanmamıştır. Bunun yerine birbirinden farklı referans koşulları altında %1 TVE değerinin sağlanması istenmiştir. Bu durum üretimcilerin farklı ölçüm metotları kullanmalarına izin vererek standartta tanımlanan temel hata değerine ulaşmalarına olanak verir.

Frekans ölçüm hassasiyeti ve aynı zamanda frekans değişim hızı standartta tanımlı olmamasına rağmen, FÖB'lerinin birkaç çevrimlik ölçüm aralığında birkaç milihertzlik (genellikle 1-3mHZ) frekans hassasiyeti gösteren en iyi frekans çeviricileri arasında oldukları tecrübelerle kanıtlanmıştır.[13,14,15,16]

### 2.3.3 İletişim Protokolü

Fazör ölçüm birimlerinin iletişim protokolü, bir FÖB'nden fazör veri toplayıcısı (PDC) arasındaki senkrofazör ölçümlerinin gerçek zamanlı iletişim protokolünü tanımlar. Fazör veri toplayıcısı (PDC), FÖB verilerini arşivleyen ve farklı uygulamaların kullanımına sunan bir cihazdır.

Eğer FÖB gerçek zamanlı veri haberleşmesini destekleyen bir yapıya sahip ise, standartta tanımlanan dört çerçeve çeşidini gerçeklemesi gerekir. Bunlar: Veri Çerçevesi (ikilik); yapılandırma çerçevesi (ikilik); başlık çerçevesi (ASCII); komut çerçevesidir (ikilik).

Başla komutu ile birlikte veri çerçeveleri FÖB'nden ana bilgisayara sürekli olarak gönderilmeye başlanır. FÖB sayısal çıkışları ya 16-b tam sayı ya da 32-b değişken sayılar biçimindedir. Senkrofazör ve frekans ölçümlerinin yanı sıra, yük akışı değerleri gibi analog bilgiler ve kesici pozisyon bilgisi gibi sayısal durum bilgileri de opsiyon olarak veri çerçevesine eklenebilir.

Yapılandırma ve başlık çerçeveleri, FÖB'nin yapısını açıklar. Genellikle, sistem başlangıcı ve FÖB yapılandırma değişikliği durumlarında olmak üzere, ana bilgisayar tarafından talep geldiği her zaman bu bilgiler ana bilgisayara iletilir. Yapılandırma çerçevesi, makine tarafından okunabilmesi sayesinde otomatik sistem yapılandırmasını sağlayan, sabit ikilik yapıya sahiptir. Yapılandırma çerçevesi iki tip bilgiyi içerir: Birinci tipte FÖB'nin tüm yeteneklerini tanımlanırken, ikinci tipte birinci tip ile birlikte yetenekler belirli bir zamana göre yapılandırılır. Başlık çerçeveleri insan tarafından okunabilen yapıya sahiptirler.

İletimim başlatılması, durdurulması veya yapılandırma ya da başlık çerçevesi biçiminde yapılandırma verisi talebi için ana bilgisayardan FÖB'ne komut çerçevesi gönderilir. Bu komutlardaki kullanılmayan bitler gelecekteki komut bilgileri için ayrılmıştır.

FÖB iletişim protokolü RS 232-485 ve Ethernet gibi seri portları da içeren her hangi bir iletişim ortamını ya da sistemini kullanabilir.[13,14,15,16]

#### **2.3.4 Veri Biçimleri ve Mesajlar**

Dört çeşit çerçeve tipi tanımlanmıştır, bunlar: veri, yapılandırma, başlık ve komuttur. İlk üçü FÖB tarafından PDC'ye gönderilirken, sonuncusu (komut) FÖB tarafından alınır. Veri, durum, fazör ve ölçümlerden hesaplanan diğer bilgileri içerir. Yapılandırma, makine tarafından okunabilen, FÖB'inde depolanan ikilik türde dosyadır. kurulum ve işletme parametrelerini açıklar. Başlık konfigürasyon bilgisini de içeren bir ASCII dosyasıdır. Komutlar, kontrol veya yapılandırma için fazör ölçüm birimine gönderilen makine tarafından okunabilen kodlardır. Bilgi FÖB'nde uygun bir şekilde depolanır fakat, gönderileceği zaman standartlarda [13,14] ayrıntılı olarak tanımlanmış çerçeve biçimine dönüştürülmesi gerekmektedir.

Bütün çerçeve tipleri 2 baytlık SYNC kelimesi ile başlar, sırasıyla 2 baytlık FRAMESIZE, 2 baytlık IDCODE, 4 baytlık SOC(second-of-century)'den oluşan

zaman etiketi, 4 baytlık FRACSEC(fraction of second) ile takip edilir ve CHK kelimesi ile sona erer. SYNC kelimesi senkronizasyonu sağlar ve çerçeve tanımını yapar. IDCODE, birimin veriyi ilettiğini mi yoksa aldığı mı gösterir. SYNC kelimesi ilk önce iletilirken CHK en son iletilir. Tüm çerçeve tiplerinde aynı sıra ve yapı görülür.

a) Veri çerçevesi :

Veri çerçevesi, ölçülen verileri taşır ve SYNC kelimesindeki 4-6 bitlerinin 0'a ayarlanmasıyla tanımlanır. Veri çerçevesi zaman ve veri bölümlerinden oluşur. Veri bir FÖB'nden alınmış bir paket olabileceği gibi birden fazla FÖB'nden de alınmış olabilir.

b) Yapılandırma çerçevesi :

Yapılandırma çerçevesi, FÖB'nin işlemci bilgisini ve parametrelerini, ve mevcut gerçek zaman bilgisini içeren makine tarafından okunabilen ikilik veri kümesidir. İki tip yapılandırma çerçevesi vardır; CFG-1 ve CFG-2. CFG-1, FÖB'nin ölçüm yapabilme kabiliyetini gösterirken; CFG-2, ölçümlerin yapıldığını ve veri çerçevesinde iletiltiğini gösterir. Yapılandırma çerçevesi aşağıdaki bilgileri içerebilir;

- (1) indirici merkez ismi ve tanımı
- (2) fazör sayısı
- (3) sayısal kanal sayısı
- (4) kanal ve fazör isimleri, birimler ve dönüştürme faktörleri
- (5) nominal hat frekansı
- (6) veri hızı

c) Başlık çerçevesi :

Başlık çerçevesi, FÖB, veri kaynakları, ölçekleme, algoritmalar filtreleme ve diğer ilgili konulardaki insan tarafından okunabilen bilgilerdir. Sabit bir yapısı yoktur. Standartta tanımlandığı üzere isteğe bağlı olarak gönderilir.

d) Komut çerçevesi :

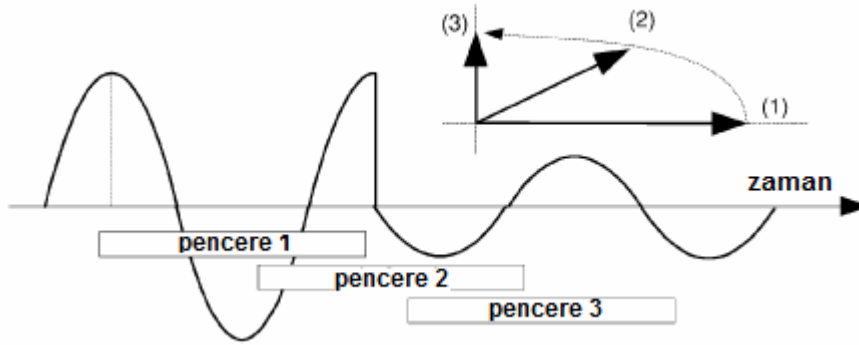
FÖB kontrol sisteminden gerekli komutları alabilmeli ve bunların ışığında gerekli aksiyonları gerçekleştirebilmelidir. Komut çerçevesinin yapısı da diğer çerçeveler gibidir.[13,14,15,16]

### 2.3.5 Geçici Hallerde Ölçüm

Geçici haller, bir güç sisteminde oluşabilen sabit olmayan durumlardır. Genel olarak şöyle sınıflandırılabilir. 1) Elektriksel geçici haller. 2) Elektro mekaniksel geçici haller. Elektriksel geçici haller, arıza ve anahtarlama olayları sonucu ortaya çıkarlarken, elektro mekaniksel geçici haller generatör rotorlarının hareketlerinden ve motorların sebep olduğu bozucu etkilerden kaynaklanır. Bu bölümde, iki durum altındaki fazör ölçümleri incelenmiştir.

a) Elektriksel geçici haller :

Bu tür geçici haller genellikle kısa sürelidir ve generatör rotor hızını etkilemezler. Fazör ölçüm veri penceresi, bozucu etki öncesi ve sonrası sinyalleri kapsadığında, ölçülen fazörler belirsizdir. Şekil 2.5'teki idealleştirilmiş elektriksel geçici hali ele alalım. Burada, giriş sinyalinde anahtarlama kaynaklı bir basamak değişimi olmuştur. Veri penceresi etki öncesi veya sonrası periyodu tamamen kapsıyorsa, ölçülen senkrofazörler sistemin iki durumunu da yansıtır. Bununla birlikte, veri penceresi geçici hal anını kapsıyorsa, fazör ölçümü iki durumun kombinasyonudur ve veri içeriği açıksa ifade edilemez.



Şekil 2.5 : Elektriksel geçici halde fazör geçişi.[16]

Geçici halde ölçülen fazörler genellikle faz açılarındaki basamak değişimini gösterirler. (örneğin şekil 2.5'te 1. ve 3. fazör arasında) Sistem frekansını faz açısının değişim hızı olarak kabul eden yaklaşımda, faz açısındaki bu ani değişimler frekans yaklaşımında keskin dalgalanmalara yol açar. Bu aslında dalga şeklindeki gözlemlenen frekanstır ve rotor hızındaki herhangi bir değişimi ifade etmeyebilir. Bu gerçek frekans yaklaşımı yapılırken akılda tutulmalıdır.

b) Elektro mekaniksel bozucu etkiler altında fazör ölçümü :

Aşağıdaki sinyal modeli göz önüne alındığında, elektro mekaniksel bozucu etkiler altında fazör ölçümleri daha iyi anlaşılabilir.



$$x_{(t)} = X_{(t)} \cdot \cos(\Theta_{(t)}) \quad (2.2)$$

Burada,  $X_{(t)}$  giriş sinyalinin genliği iken,  $\Theta_{(t)}$  faz açısıdır. Kararlı halde;

$$X_{(t)} = X_0,$$

$$\Theta_{(t)} = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \Theta_0 \quad (2.3)$$

Elektro mekaniksel geçici haller esnasında, fazör genliği ve açısı nominal sistem frekansına nazaran daha yavaş değişir. Bu yüzden, birkaç frekans periyodunu içeren kısa bir gözlem penceresinde, fazör genliği ve dönüş hızı neredeyse sabittir. Modern güç sistemlerinde, rotor hızı senkron hızdan 0,1 ila 5 Hz arasında bir sapma gösterdiğinde, fazör yaklaşım penceresindeki faz açısı davranışı lineerdir.

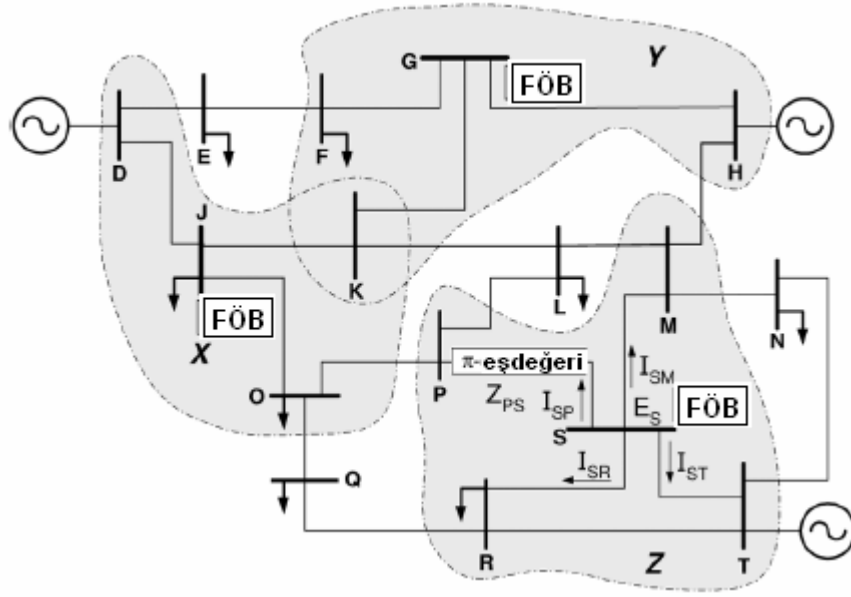
### 2.3.6 Senkrofazör Uygulamaları

Bu bölümde, güç sistemi işletimini geliştirmek için senkrofazörlerin nasıl kullanıldığına ilişkin birkaç uygulama anlatılmıştır. Uygulamalar, geniş alan ölçekli ölçüm ve koruma sistemlerinde kullanıldığı gibi yerel kontrol yöntemlerinde de kullanılabilir.

a) Durum yaklaşımı :

Durum yaklaşımı, sistem operatörüne kararsızlık durumunda sistem güvenliğini nasıl sağlayacağı konusunda karar vermesine yardımcı olan, sistemin durumunu açıklayan bir yaklaşımdır. FÖB uygulamaları, güç sistemi durum yaklaşımının doğruluğunun gelişimini sağlayan en önemli araçlardan biridir.

Durum yaklaşımı teknolojisi, güç sisteminin durumunu tahmin etmek için, uzun bir aralıkta toplanmış aktif ve reaktif güç akışı ölçümleri, gerilim genliği vb. gibi ortak bir referansa ihtiyaç duymayan ölçümleri kullanır. Yaklaşım, sayısal iterasyon yöntemleriyle lineer olmayan denklemleri çözerek sistem değişkenlerini bulmak için ölçümlerle sistem modelini birleştirir. Durum yaklaşımı metoduna senkronize fazör ölçüm birimlerinin uygulanması, durum yaklaşımı işleminin durum ölçümlerinden biri haline gelmesini sağlayarak, durum yaklaşımı çözümlerinin daha hassas ve kesinlik içeren bir şekle dönüştürür. Şekil 2.6 (a)'da FÖB'lerinin  $G$ ,  $J$  ve  $S$  baralarına yerleştirildiğini düşünelim.[17]



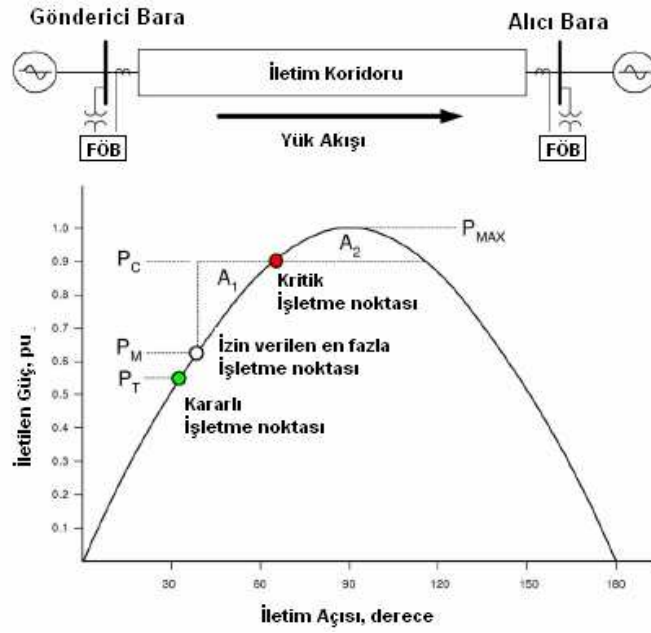
**Şekil 2.6** : Güç sistemine FÖB'lerinin yerleştirilmesi [16]

$S$  barasındaki FÖB  $E_S$  gerilim fazörünü (genlik ve açı),  $I_{SP}$ ,  $I_{SM}$ ,  $I_{SR}$  ve  $I_{ST}$  akım fazörlerini ölçer. Bu fazör değerleri ve gerçek bir sistem modeli ile birlikte;  $M$ ,  $P$ ,  $R$  ve  $T$  uzak baralarındaki gerilim fazörleri lineer denklemlerle hesaplanabilir (endirekt ölçüm). Bu yüzden bu baralar  $S$  barasına göre gözlenebilirdir. Buna benzer olarak,  $J$  ve  $G$  baralarına FÖB'lerinin yerleştirilmesi  $X$  ve  $Y$  bölgelerinin durumlarının direkt veya endirekt olarak ölçülmesini sağlar. Geriye kalan  $E$ ,  $N$ ,  $L$  ve  $Q$  baraları FÖB'lerinin yerleşimi açısından ölçülebilir değildir. Ölçülemeyen baraların sayısı sistemin gözlenebilirlik derecesini gösterirken, örnekteki sistem için gözlenebilirlik derecesi 1'dir. Gözlenemeyen baralardaki akım ve gerilim fazörleri lineer interpolasyon yöntemi ile hatırı sayılır bir yaklaşıklıkla tahmin edilebilir.

FÖB ölçümleriyle güç sisteminin durum-vektörlerinin belirlenmesi, güç sisteminin durumu hakkındaki gerçek zamanlı, durağan ve dinamik bilgilerin elde edilmesinde en uygun ve en çok doğruluk içeren yöntemdir.[17]

b) Gerilim kararsızlığı :

Sistemin güvensiz bir gerilim seviyesine yaklaşması durumu senkrofazör verileri sayesinde izlenebilir. Şekil 2.7 iletim hattı ve yük empedans değerlerine göre hesaplanmış tipik bir PV eğrisini gösterir. PV eğrisi, iletilen güç  $P_D$  ve en fazla iletilen güç  $P_{MAX}$  için, biri kararlı diğeri kararsız olmak üzere  $V_R$  işletme noktası geriliminin iki olası çözümü ile karakterize edilir.



**Şekil 2.7** : PV Eğrisi ile kararlı hal Sınırı[16]

İletim koridoru ve yük empedansı değiştikçe PV eğrisinin şekli, en fazla iletelebilen güç  $P_{MAX}$ 'ı da etkileyerek, değişir. Bu durum, iletilen güç  $P_D$  için işletme noktasını  $P_{MAX}$ 'a yaklaştırabilir. Öyle ki, bu alt sistem değişimi veya yük değişimi gerilim çökmesine yol açabilir. PV eğrisi ve işletme noktasının gerçek zamanlı gözlenebilirliği, iletim hattının iki ucundaki gerilim ve akım senkrofazörlerinin ölçülebilmesi ve iletim hattı modeli yardımı ile sağlanır. Bu mükemmel bir iletim koridoru görüşü sağlar ve reaktif güç kompanzasyonu, yük atımı veya diğer acil durum önlemleri ile sistem gerilim kararlılığının sağlanmasında operatörlere yol gösterir.[18]

c) Gerçek zamanlı kontrol ve koruma sistemleri :

Senkrofazörler gerçek zamanlı kontrol ve koruma yöntemlerine ideal ölçüm sonuçları sağlayarak daha önce de belirtildiği üzere, gerilim kararlılığı incelemesinde çok önemli bir gösterge olan sistem faz açısının doğrudan ölçüm bilgisini sistem işletmecilerine kullanımına sunarlar. Bir fazlı veya pozitif dizi gerilim fazör ölçümlerinin yanı sıra, FÖB'leri aynı zamanda kontrol uygulamalarında kullanılan akım fazörleri, frekans ve frekans değişim bilgilerini de sağlarlar. Ölçümler 1-2 çevrim süresi boyunca, standart iletişim sistemleri ile uzun mesafelere gönderilebilir. Bu birçok koruma sistemi için yeterince hızlı bir uygulamadır. Referans [19]'da koruma sisteminin güvenliği ve kararlılığı için fazör gerilim genliği ölçümünü gösterge olarak kullanan bir prototip kontrol yöntemi öne sürülmüştür. Aynı projede, gerilim ve akım fazörlerinden

hesaplanan alternatif bir VAR akış metodunun sistem güvenliğini nasıl arttırdığından bahsedilmektedir. Faz açısı bu tip uygulamalar için ideal bir ölçüm olarak gözükmektedir.

Şekil 2.7’de gösterildiği gibi, baralar arasındaki faz açısı, gerilim, yük açısı ve iletim hattı empedansı yardımıyla hesaplanır. Yük akışının belirlenmesi göz önüne alındığında, faz açısı aynı zamanda kontrol önlemlerine ihtiyaç duyan topoloji değişimlerini de gösterir. Bu yaklaşım [20]’deki kontrol yönteminde kullanılmaktadır.

### 3. GÜÇ SİSTEMİNE FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN YERLEŞİMİ

Mikrobilgisayar donanımları ve senkronizasyon tekniklerindeki gelişmeler sayesinde, günümüzde güç sistemindeki akım ve gerilim fazörlerini ölçen fazör ölçüm birimlerinin (FÖB) dizaynı hız kazanmıştır. Bu birimlerin en önemli özelliği sistemde oluşabilecek geçici durumları yakalayabilmeleridir. Sonuç olarak, dinamik güvenlik analizi sadece bilgisayar tabanlı raporlama aracı olarak değil aynı zamanda sistemin otomatik gözlemlenmesi ve kontrolü için de mümkün olmuştur. Bu sistem öyle bir şekilde çalışır ki, önemli bir kısa devre durumu gibi sistemde oluşabilecek her hangi bir bozucu etkiyi yeterince erken saptayarak, sistemi gerilim çökmesi veya geçici hal kararsızlığından uzaklaştırır.

#### 3.1 Topolojik Gözlenebilirlik Tanımı

Bu bölüm, sistem gözlenebilirliği ve kontrolü için gerekli şart olan sistem durum yaklaşımının tahmini için FÖB'lerinin kullanımı üzerinde durmaktadır. Sistemin topolojik olarak gözlenebilir kılınması bir başka deyişle sistem durum vektörü yaklaşımının sağlanabilmesi için bir yöntem bütün indirici merkezlere birer FÖB yerleştirmektir. Bu ölçüm kararlılığını arttırmakla beraber maliyet bakımından yüksek olduğu için çok etkili bir yöntem olarak kabul görmez. FÖB'leri yerleştirildikleri baralardaki akım ve gerilim fazör ölçümlerini sağladıkları için burada amaç verilen kısıtlamalar altında sistemi topolojik olarak gözlenebilir kılacak yerleştirilmesi gereken en az sayıdaki FÖB'nin sayısının ve bu FÖB'lerinin hangi baralara yerleştirilmesi gerektiğinin bulunmasıdır. Bu tipik bir optimizasyon problemidir. Literatürde bu konuyla ilgili bir çok yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar; Begovic ve Phadke [21,22] tarafından önerilen, sistemdeki uyumlu bölgelerin Doğrudan Vektör Tanımlanması (Collinear Vector Identification - CVI) metodu; Schlueter [23,24] tarafından savunulan Zayıf Dal Eliminasyon (Weak Branch Elimination - WBE) metodu, Ilic [25,26] tarafından önerilen ikincil gerilim kontrolü metodudur. [32]'de yazarlar optimum FÖB yerlerini saptamak için graf teorisi yöntemine benzetilmiş tavlama metodunu uygularlar. [33]'de FÖB yerleşimi için genetik algoritma yöntemi kullanılırken, [34]'de lineer programlama yöntemi kullanılmıştır.

FÖB'lerine atanan diğer bir uygulama da sistem durumu yaklaşımıdır. Bu uygulama, gerilim karalılığı indislerinin saptanmasında ön koşuldur. Bu amaçla Phadke [7] sistemdeki bütün baralara FÖB'lerinin yerleştirilmesini önermiştir ki günümüzde FÖB'lerinin yüksek maliyetleri sebebiyle bu öneri uygulanamamaktadır. Burada amaç sistemi gözlenebilir kılan en az sayıda FÖB'nin yerleşiminin araştırılmasıdır. Tezin 4. bölümünde farklı benzetim yöntemleri ile bulunmuş sistemi gözlenebilir kılan en az sayıdaki FÖB sayısı ve bu FÖB'lerinin hangi baralara yerleştirilmesi gerektiğine ilişkin sonuçlar verilmiştir.

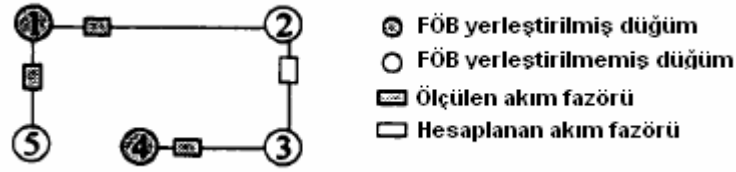
### 3.2 Graf Teorisi Yöntemi

Topolojik gözlenebilirlik, FÖB yerleşimi ile sistem topolojisi arasındaki ilişkiyi inceler ve bu yüzden graf teorisi yöntemi ile incelenebilir.  $n$  düğüme sahip bir sistem  $G = (V,E)$  grafi ile gösterilsin; burada  $V$ ,  $i=1, \dots, n$ 'e kadar olan bütün düğümlerin graf köşelerinin (düğümlerinin) kümesi ve  $E$ ,  $V$ 'nin eleman çiftlerini biri birine bağlayan  $e=1, \dots, n/2$ 'ye kadar olan graf kenarlarının (dallarının) kümesidir. Eğer  $G$ 'nin bütün köşe çiftleri arasında yalnızca bir dal bulunuyorsa,  $G$ 'ye bağlanmış veya bağlantılı graf denir.

Eğer bir grafın iki köşesi veya düğüm noktası yalnızca bir dal ile bağlı ise bu grafa ağaç (tree) denir.  $G$ 'nin ağaç oluşturan bir alt grafi eğer  $V$ 'nin bütün noktalarına ulaşıyorsa bu alt grafa uzanan ağaç (spanning tree) denir. Eğer  $G$  bir ağaç ise,  $G$ 'nin yalnızca bir tane uzanan ağacı vardır ve bu kendisidir, aksi takdirde birden fazla uzanan ağaç olur.

Dallarında akım ölçümleri veya hesaplanan ölçümler olan alt grafa ölçüm grafi denir. FÖB yerleştirilmiş olan bir baranın dallarının akım fazör ölçümleri yapılıyorken, gerilim değeri bilinen iki barayı birbirine bağlayan dalın akım fazör değerleri hesaplanır ve bunlara hesaplanan akım fazör ölçümü (pseudo-current phasor measurement) denir.

Eğer sistemin uzanan ağacının bütün dallarının ve düğümlerinin akım ve gerilim fazörleri biliniyorsa sistem topolojik olarak gözlenebilirdir. Şekil 3.1 topolojik olarak gözlenebilir bir sistemi göstermektedir. Şekil 3.1'deki bütün dalların ve düğümlerin fazörleri ya ölçülen ya da hesaplanan değerlerdir. Burada, 1. ve 4. baraya FÖB yerleştirilmiştir ve böylece 1. ve 4. baradaki gerilim fazörleri ile 1-2, 1-5, 4-3 dallarındaki akım fazörleri ölçülebilirken 2. ve 3. baradaki gerilim fazörleri ile 2-3 dalındaki akım fazörleri hesaplanabilmektedir.



Şekil 3.1 : Gözlenebilir sistem

$V_m$  gerilim fazörü ölçümü ve  $I_n$  akım fazörü ölçümüne dayanarak sistemdeki diğer baraların gerilim fazörleri ve dalların akım fazörleri hesaplanabiliyorsa, sistem topolojik olarak gözlenebilirdir denir.

### 3.3 İkincil Gerilim Kontrolü

Bu yöntem, FÖB'lerinin pilot noktalar olarak kullanıldığı ikincil gerilim kontrolünden oluşur. Bu kontrol yöntemi güç sistemini birbiriyle uyumlu davranış gösteren bölgelere ayırarak her birine tek bir FÖB yerleştirir. Burada amaç, FÖB'lerinin yerleştirilmesi gereken anahtar baraların saptanmasıdır. İkincil gerilim kontrolü birincil gerilim kontrolüne oranla yavaştır ve merkezciidir. İkincil gerilim kontrolü, kontrol merkezinden yönetilir ve sistem performansını istenen seviyede tutabilmek için birincil korumanın durumunu koordine eder. Daha belirgin olarak, ikincil kontrol, hızlı geçici haller geçtikten sonra oluşan yavaş gerilim dalgalanmalarının sönümlenmesini ve gerilimin profilinin verilen bir ayar noktasında kalmasını sağlar.

Sistemin istenen gerilim profilini karakterize eden ikincil kontrolün ayar noktaları operatörler tarafından yük akışı yazılımlarının yardımıyla ayarlanırlar. Bu lineer kontrol sistemi, sistemin bütün baralarındaki yüklerin gözlemlenebildiği varsayımına dayanır. Bununla birlikte, [27] ve [28]'de savunulduğu gibi sistem, pilot nokta diye adlandırılan bazı önemli yük baraları sayesinde başarılı bir şekilde denetlenebilir. Pilot noktası, gerçek zamanlı olarak ölçülen ve kontrol önlemlerinde kullanılan bir yük barası gerilimidir. Burada gerekli olan, pilot nokta geriliminin bulunduğu bölgedeki bütün gerilimleri temsil edebilmesidir. Bu demektir ki, pilot nokta gerilim bilgisi o bölgenin gerilim profilinin kontrolü için yeterlidir.

Bütün sistemin gerilim kontrolü pilot nokta gerilimleri gözlemlenerek yapıldığı için, bu noktaların seçimi kullanılması düşünülen kontrolör tipine göre yapılmalıdır. Bu bağlamda [25,26]'de pilot noktalar gerilim dalgalanmalarının minimum olduğu baralar olarak seçilmiştir.

### 3.4 Gerilim Kontrolü için Pilot Nokta Yerleşimi

Literatürde pilot nokta yerleşimi için üç kriterden bahsedilmektedir. Bunlar; i) en küçük hassasiyete sahip bara,  $\partial V/\partial Q$ , ii) elektriksel merkez, iii) en yüklü bara, kriterleridir. Bu kriterler aşağıda kısaca açıklanmıştır.

*Kriter 1 : Uyumlu bölgedeki en küçük hassasiyet*

En yüksek üç-faz kısa devre akımının en düşük gerilim dalgalanmasına sebep olduğu baralar, en küçük hassasiyete sahip pilot noktalar olarak kabul edilir. Bu yaklaşımla bu baralar sistemdeki en güçlü baralardır.

*Kriter 2 : Gerilim uyumlu bölgesinin merkezi*

Gerilim uyumlu bölgenin elektriksel olarak merkezi kabul edilen baralar, pilot nokta olarak kabul edilir. [29]'da bu ölçüm noktalarının uyumlu bölgelerdeki gerilim değişimleri hakkında iyi sonuçlar ortaya koyduğu savunulmaktadır.

*Kriter 3 : Bölgedeki en geniş yük barası*

[25]'de en yüklü baranın FÖB yerleşimi için uygun olduğundan bahsedilmektedir. Böyle bir seçime karşı olarak savunulan tez, yüklü baradaki her hangi bir yük değişiminin bölgedeki bütün gerilim seviyelerinde dalgalanmaya sebep olacaktır.

Değişik test sistemlerine uygulanan benzetim sonuçlarına göre ilk iki kriter birbirine denktir. Bu demektir ki; bölgenin merkezine konumlanmış yük barası yük değişimlerine karşı en güçlü baradır ve en büyük üç-faz kısa devre akımına sahiptir.

Pilot nokta yaklaşımını gerçekleştirmeden önce, ölçüm amaçlarının tanımlanması gerekmektedir. Daha önce iki amaçtan bahsedilmiştir. Bunlar, ikincil gerilim kontrolü ve gerilim kararlılığı sınırının tespitidir.

### 3.5 FÖB'lerinin Yerleştirilmesi

Gerilim kararlılığı sınırının bulunabilmesi için sistem durum yaklaşımı gereklidir. Durum değişkenleri, gözlenebilirliğin sağlandığı uygun bir yol ile yerleştirilmiş minimum sayıdaki FÖB sayesinde tahmin edilebilir. Bu amaç için iki yaklaşım incelenmiştir. Birinci yaklaşım, sabit kabul edilen PQ yüklerine sahip baralardaki FÖB verileri ile SCADA değerlerinin birleştirilmesinden oluşmaktadır. Ölçümlerde her hangi bir kısıtlama olmaması sebebiyle, bu yaklaşım gerçek zamanlı lineer yük akışı hesaplamalarına yol gösterir.

İkinci yaklaşım, sistem gözlenebilirliğini sadece FÖB ölçümleriyle sağlar. Bununla birlikte, bu yaklaşım durum yaklaşımının belirli bir seviyedeki fazla ölçüm ile



yapmamıza neden olur. Bu fazladan yapılan ölçümler sayesinde verilerdeki muhtemel hatalar tanımlanır ve bu durum ikinci yaklaşıma birincisi karşısında büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Uygulanan algoritma bütün bara gerilimlerinin tahmin edilebileceği minimum sayıdaki FÖB'ni bulur. Bu iki adımda sağlanır. İlk olarak, graf teorisi metodu ile minimum olmayan fakat sistemi gözlenebilir kılan FÖB sayısı saptanır. Daha sonra bu sayı benzetim prosedürü ile azaltılır.

### 3.5.1 FÖB Yerleşiminin Başlangıç Tahmini

İlk tahmin, sistemde tam rank ağacı oluşturan graf teorisi prosedürü ile ortaya konur.[30] Bu ağaç bütün düğüm noktalarını, aşağıdaki kurallara göre ölçülmüş veya hesaplanmış olarak tanımlanan akım fazörlerini içeren dallarla, birbirine bağlar.

Kural 1 : FÖB bağlanmış her dala bir akım fazör ölçümü ata,

Kural 2 : Bilinen gerilim değerine sahip iki barayı birbirine bağlayan her dala hesaplanmış akım fazörü ata.

Bu kurallar ile, prosedür sistemin gözlenebilir kısmından geriye kalan gözlenemeyen kısmına bir ağaç oluşturarak adım adım genişler. Prosedür şu şekilde ilerler; FÖB yerleştirilmiş kök olarak tanımlanan bir baradan başlanır ve bir düğümden diğer bir komşu düğüme ilerlenir.[31] Her adımda, gözlenemeyen kısımda en fazla dalı olan baraya bir FÖB eklenerek sistemin gözlenebilir kısmı genişletilir. Bu durum FÖB'nin o baraya bağlı bütün hatlardaki akım fazörlerini ölçebilmesi avantajını ortaya çıkarır. Ağaç, verilen bir yol boyunca daha fazla genişletilemiyorsa bir önceki düğüm noktasına dönülerek yeni bir yol seçilir. Prosedür tamamlandığında yani sistemin bütünü gözlenebilir olduğunda, yerleştirilen FÖB'leri sayılır. Bu FÖB kümesi başlangıç tahmini olarak kabul edilir ve benzetim yolları ile bu kümenin büyüklüğü azaltılmaya çalışılır.

### 3.5.2 FÖB'lerinin Sayısının Azaltılması

FÖB kümesinin minimize edilmesi, ikiye bölme tekniği ve benzetilmiş tavlama (simulated annealing) metodlarını kullanan bir algoritma vasıtası ile gerçekleştirilir. Beş temel adımdan oluşur, bunlar;

Adım 1 : Başlangıç koşulu olarak  $i = 1$  alınır,  $m' = 1$  ve  $m'' = m$  atanır.

Adım 2 :  $i = i + 1$  atanır.  $m_i$ ,  $[m', m'']$  aralığının orta noktası olarak kabul edilir.

Adım 3 :  $m_i$  graf teorisi ile elde edilmiş ilk FÖB yerleşimleri olarak düşünülür. Bu yerleşim için sistem henüz tümüyle gözlenebilir değildir.

Adım 4 : Benzetilmiş tavlama metodu çalıştırılır. Bu işlem  $m_i$  FÖB'ni rastlantısal olarak yerleştirerek gözlenebilir bir sistem yaratmaya çalışır.

Adım 5 : Eğer yöntem başarılı ise  $m'' = m_i$  olarak seçilerek düşük yarıda işlemler tekrarlanır. Yöntem başarısız ise  $m' = m_i$  olarak seçilerek yüksek yarıda işlemler tekrarlanır.

Referans [28]'de belirtildiği üzere, bu prosedür tarafından ihtiyaç duyulan yeniden yerleştirme sayısı  $\log_2 m$  ile artar. Sonuç olarak, işlemsel yük sistemin büyüklüğüyle birden artış göstermez. Örneğin, 200 baralı ve başlangıç olarak  $m=80$  FÖB seçilmiş bir sistemde, algoritma 7 yeniden yerleştirmeye ihtiyaç duyarken; 1000 baralı ve  $m=300$  FÖB seçilmiş bir sistemde algoritma 9 yeniden yerleştirmeye ihtiyaç duyar.

### 3.6 Benzetilmiş Tavlama Metodu

Adım 4'teki optimizasyon prosedürü, verilen bir sayıdaki FÖB ile sistemin gözlenebilirliğini maksimum yapmaya çalışır. Bu işlem benzetilmiş tavlama metodunu kullanır.

Bizi ilgilendiren problemde, E objektif fonksiyonu sistemin gözlenemeyen kısmındaki bara sayısı olarak seçilebilir. Algoritma şu şekilde ilerler. Graf teorisi ile yerleştirilmiş ilk  $m_i$  FÖB yerleşiminden ( $m_i < m$ ) başlayarak, algoritma, gözlenebilir alanı maksimum yapmak ve böylece objektif fonksiyonu minimum yapmak için, bu FÖB'lerini tekrar yerleştirir. Bu yeniden yerleştirme, bir FÖB'ni rasgele bir baradan alıp başka bir baraya yerleştirmekten oluşur. Daha sonra, objektif fonksiyonu yeniden değerlendirilir. Fonksiyon sıfıra ulaştığında, bütün sistemin gözlenebilir olduğu saptanarak prosedür durur.

#### **4. FÖB'LERİNİN IEEE TEST SİSTEMLERİNE YERLEŞTİRİLMESİ VE BENZETİM SONUÇLARI**

Fazör ölçüm teknikleri son on yılda büyük gelişme göstermiştir. FÖB güç sistemindeki akım ve gerilim fazörlerini ölçme, GPS sayesinde bunları senkronize ederek merkezi bilgisayara aktarma yeteneğine sahip cihazlardır. Bu açıdan FÖB ölçümleri durum yaklaşımı ve dolayısıyla gerilim karasızlığı tahmininde gerçek zamanlı sonuçlar vermeleri bakımından önemlidirler. Her bir indirici merkezdeki FÖB, sistemin durumunun doğrudan ölçümüne izin verir ve böylece sistemin gerilim kararlılığından ne kadar uzakta olduğu anlaşılır. Bununla birlikte, güç sistemindeki mevcut bulunan ölçüm cihazlarından kurtulmak ve onları FÖB'leri ile değiştirmek mantıklı değildir. Burada amaç, sistemin durumu hakkında en fazla bilginin alınabileceği en az sayıdaki FÖB'ni sisteme yerleştirmektir.

Literatürde birçok FÖB yerleştirme tekniğinden bahsedilmektedir. Derinlik metodu, graf teorisi yöntemi, tavlama metodu ve genetik algoritmalar gibi teknikler, sistemi gözlenebilir kılan en az sayıdaki FÖB kümesinin belirlenmesi için önerilmektedir.[32]

FÖB yerleştirme tekniklerinin kullandığı bazı temel kurallar mevcuttur. Bu kurallar aşağıdaki şekilde genellenebilir.

Kural 1: FÖB'nin yerleştirildiği baranın gerilim ölçümü ve o baraya bağlı her hattın akım ölçümünü biliniyordur(ölçülen değerler).

Kural 2: FÖB'nin yerleştirildiği baraya gelen her bir hattın diğer ucundaki gerilim değeri biliniyordur (hesaplanan değer).

Kural 3: Gerilim değeri bilinen iki bara arasındaki hattın akım değeri biliniyordur (hesaplanan değer).

Kural 4 : Kirşofun akım yasası ile dolaylı olarak hesaplanabilen, her hattın akım değeri biliniyordur (hesaplanan değer). Bu durum, bir düğüm noktasına (baraya) gelen hatlardan yalnızca birinin akım değeri bilinmiyorsa, gerçekleşir.

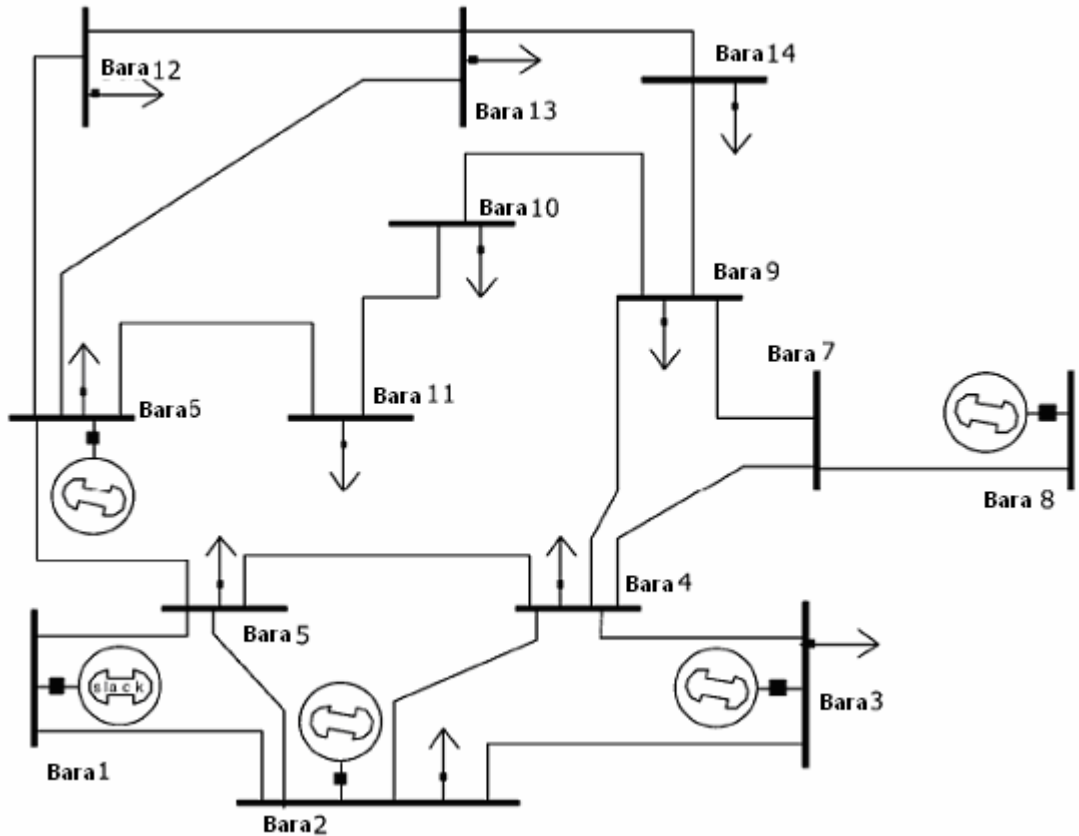
Derinlik metodu 1'den 3'e kadar olan kuralları kullanır. Birinci FÖB en fazla dala sahip baraya yerleştirilir. Eğer bu karakteristikte birden fazla bara varsa, biri rasgele seçilir. Daha sonra, aynı kriterle sistemin tamamı gözlenebilir oluncaya kadar

FÖB'leri yerleştirilir. Graf teorisi yöntemi derinlik metoduna benzemekle beraber, derinlik metodundan farklı olarak 4. kuralı da hesaba katarak yerleştirme yapar. Benzetilmiş tavlama metodu bir çok optimizasyon probleminde kullanılan bir yöntemdir. Bununla birlikte, bir çok durumda çözümü bulmasına rağmen, çok fazla zamana ihtiyaç duyan bir yöntem olması, dezavantajıdır.[33]

Benzetimler MATLAB üzerinde çalışan PSAT (Power System Analysis Toolbox – Version 2.0.0-beta) programı ile gerçekleştirilmiştir.

#### 4.1 IEEE 14 Baralı Test Sistemi

İlk olarak şekil 4.1'deki IEEE 14 baralı test sistemi üzerinde benzetim yapılmıştır. Kullanılan FÖB yerleştirme metotları sırası ile; Derinlik metodu, graf teorisi yöntemi, tavlama metodu ve minimum kapsayan ağaç metodudur. Benzetim sonuçları tablo 4.1-4.4'de verilmektedir.



Şekil 4.1 : IEEE 14 baralı test sistemi

**Tablo 4.1** : Derinlik metodu benzetim sonuçları (IEEE 14 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta	
Date: 04-Aug-2008 21:28:02	
Placement Method: Depth First	
Elapsed Time: 0h 0m 0.089328s	
STATISTICS	
Buses	14
Lines	20
PMUs	6
PMU Sets	1
Meas. Currents	16
Pseudo-Meas. Currents	0
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Bus 1 H	1
Bus 2 H	0
Bus 3 H	0
Bus 4 H	1
Bus 5 H	0
Bus 6 L	1
Bus 7 Z	0
Bus 8 T	1
Bus 9 L	0
Bus 10 L	1
Bus 11 L	0
Bus 12 L	0
Bus 13 L	0
Bus 14 L	1

**Tablo 4.2** : Graf teorisi benzetim sonuçları (IEEE 14 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta	
Date: 04-Aug-2008 21:29:13	
Placement Method: Graph Theoretic Procedure	
Elapsed Time: 0h 0m 0.11141s	
STATISTICS	
Buses	14
Lines	20
PMUs	5
PMU Sets	1
Meas. Currents	15
Pseudo-Meas. Currents	5
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Bus 1 H	1
Bus 2 H	0
Bus 3 H	0
Bus 4 H	1
Bus 5 H	0
Bus 6 L	1
Bus 7 Z	0
Bus 8 T	0
Bus 9 L	0
Bus 10 L	1
Bus 11 L	0
Bus 12 L	0
Bus 13 L	0
Bus 14 L	1

**Tablo 4.3** : Tavlama metodu benzetim sonuçları (IEEE 14 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta	
Date: 04-Aug-2008 21:29:30	
Placement Method: Annealing Method	
Elapsed Time: 0h 0m 0.42344s	
STATISTICS	
Buses	14
Lines	20
PMUs	4
PMU Sets	1
Meas. Currents	14
Pseudo-Meas. Currents	20
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Bus 1 H	1
Bus 2 H	1
Bus 3 H	0
Bus 4 H	0
Bus 5 H	0
Bus 6 L	1
Bus 7 Z	0
Bus 8 T	0
Bus 9 L	1
Bus 10 L	0
Bus 11 L	0
Bus 12 L	0
Bus 13 L	0
Bus 14 L	0

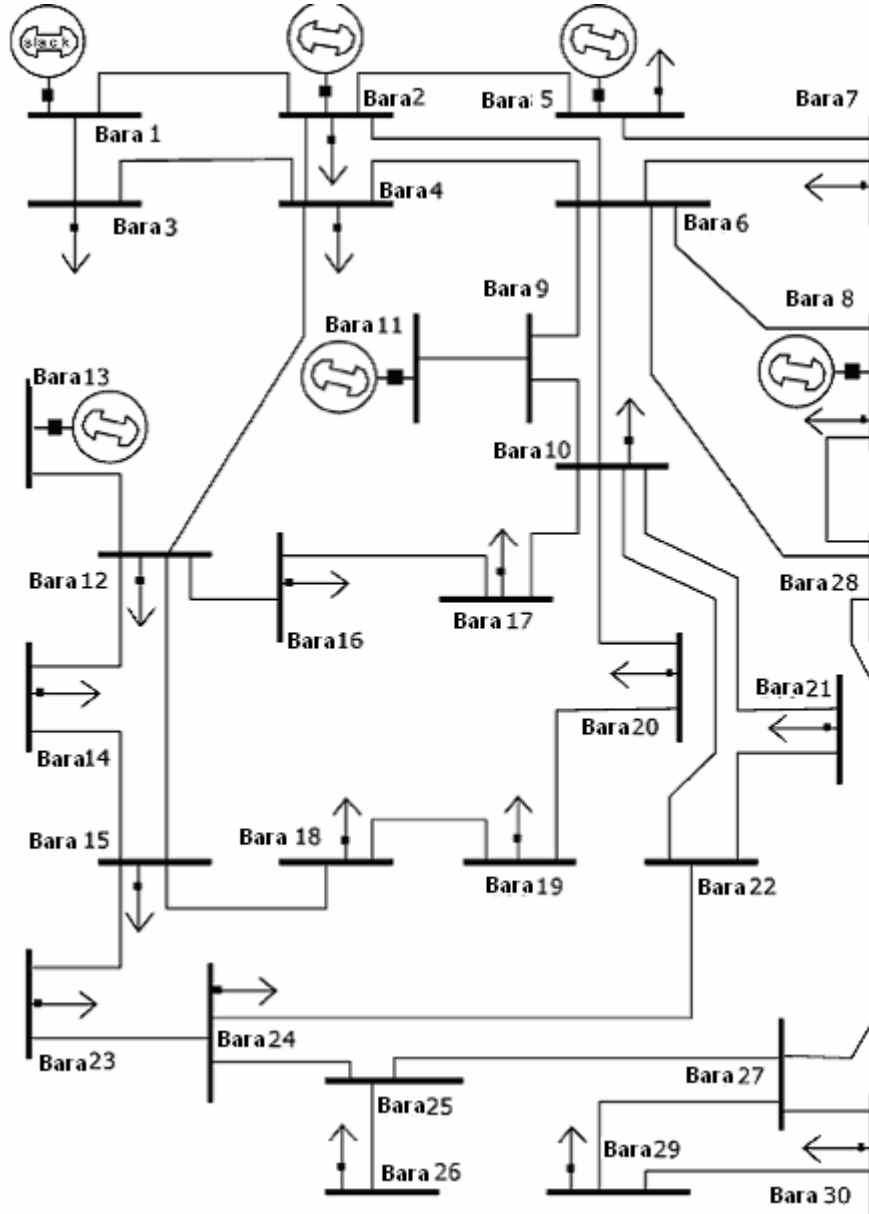
**Tablo 4.4** : Minimum kapsayan ağaç metodu benzetim sonuçları (IEEE 14 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta	
Date: 04-Aug-2008 21:29:52	
Placement Method: Minimum Spanning Tree	
Elapsed Time: 0h 0m 0.85011s	
STATISTICS	
Buses	14
Lines	20
PMUs	3
PMU Sets	1
Meas. Currents	12
Pseudo-Meas. Currents	8
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Bus 1 H	0
Bus 2 H	1
Bus 3 H	0
Bus 4 H	0
Bus 5 H	0
Bus 6 L	1
Bus 7 Z	0
Bus 8 T	0
Bus 9 L	1
Bus 10 L	0
Bus 11 L	0
Bus 12 L	0
Bus 13 L	0
Bus 14 L	0



## 4.2 IEEE 30 Baralı Test Sistemi

İkinci olarak şekil 4.2’deki IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde benzetim yapılmıştır. Kullanılan FÖB yerleştirme metotları sırası ile; Derinlik metodu, graf teorisi yöntemi, tavlama metodu ve minimum kapsayan ağaç metodudur. Benzetim sonuçları tablo 4.5-4.8’de verilmektedir.



Şekil 4.2 : IEEE 30 baralı test sistemi

**Tablo 4.5** : Derinlik metodu benzetim sonuçları (IEEE 30 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta Date: 04-Aug-2008 21:08:03  Placement Method: Depth First Elapsed Time: 0h 0m 0.21717s	
STATISTICS	
Buses	30
Lines	41
PMUs	12
PMU Sets	1
Meas. Currents	33
Pseudo-Meas. Currents	0
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Glen Lyn 13	0
Claytor 13	0
Kumis 13	1
Hancock 13	0
Fieldale 13	1
Roanoke 13	1
Blaine 13	0
Reusens 13	0
Roanoke 1.	0
Roanoke 3	0
Roanoke 1	1
Hancock 3	1
Hancock 1	0
Bus 14 3	0
Bus 15 3	0
Bus 16 3	0
Bus 17 3	1
Bus 18 3	1
Bus 19 3	0
Bus 20 3	1
Bus 21 3	1
Bus 22 3	0
Bus 23 3	0
Bus 24 3	1
Bus 25 3	0
Bus 26 3	1
Cloverdle 3	1
Cloverdle13	0

**Tablo 4.5 (devamı) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Bus 29 3	0
Bus 30 3	0

**Tablo 4.6 :** Graf teorisi yöntemi benzetim sonuçları (IEEE 30 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta Date: 04-Aug-2008 21:08:18 Placement Method: Graph Theoretic Procedure Elapsed Time: 0h 0m 0.35088s	
STATISTICS	
Buses	30
Lines	41
PMUs	11
PMU Sets	1
Meas. Currents	32
Pseudo-Meas. Currents	10
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Glen Lyn 13	0
Claytor 13	0
Kumis 13	1
Hancock 13	0
Fieldale 13	1
Roanoke 13	1
Blaine 13	0
Reusens 13	0
Roanoke 1.	0
Roanoke 3	0
Roanoke 1	0
Hancock 3	1
Hancock 1	0
Bus 14 3	0
Bus 15 3	0
Bus 16 3	0
Bus 17 3	1

**Tablo 4.6 (Devamı) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Bus 18 3	1
Bus 19 3	0
Bus 20 3	1
Bus 21 3	0
Bus 22 3	1
Bus 23 3	1
Bus 24 3	0
Bus 25 3	1
Bus 26 3	0
Cloverdle 3	0
Cloverdle13	0
Bus 29 3	0
Bus 30 3	1

**Tablo 4.7 :** Tavlama metodu benzetim sonuçları (IEEE 30 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta Date: 04-Aug-2008 21:14:15 Placement Method: Annealing Method Elapsed Time: 0h 0m 18.6164s	
STATISTICS	
Buses	30
Lines	41
PMUs	7
PMU Sets	1
Meas. Currents	24
Pseudo-Meas. Currents	41
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Glen Lyn 13	1
Claytor 13	0
Kumis 13	0
Hancock 13	0
Fieldale 13	0
Roanoke 13	0

**Tablo 4.7 (Devamı) :**

PMU PLACEMENT	
Blaine 13	1
Reusens 13	0
Roanoke 1.	0
Roanoke 3	1
Roanoke 1	0
Hancock 3	1
Hancock 1	0
Bus 14 3	0
Bus 15 3	0
Bus 16 3	0
Bus 17 3	0
Bus 18 3	0
Bus 19 3	1
Bus 20 3	0
Bus 21 3	0
Bus 22 3	0
Bus 23 3	0
Bus 24 3	1
Bus 25 3	0
Bus 26 3	0
Cloverdle 3	1
Cloverdle13	0
Bus 29 3	0
Bus 30 3	0

**Tablo 4.8** : Minimum kapsayan ağaç metodu benzetim sonuçları (IEEE 30 bara)

PMU PLACEMENT REPORT									
P S A T 2.0.0-beta Date: 04-Aug-2008 21:09:16									
Placement Method: Minimum Spanning Tree Elapsed Time: 0h 0m 5.4605s									
STATISTICS									
Buses	30								
Lines	41								
PMUs	7								
PMU Sets	9								
PMU PLACEMENT									
Bus Name	Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6	Set 7	Set 8	Set 9
Glen Lyn 13	1	1	1	1	1	1	0	1	1

**Tablo 4.8 (Devamı) :**

PMU PLACEMENT									
Claytor 13	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Kumis 13	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Hancock 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fieldale 13	1	1	1	1	1	0	1	0	1
Roanoke 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Blaine 13	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Reusens 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Roanoke 1.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Roanoke 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Roanoke 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hancock 3	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Hancock 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bus 14 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bus 15 3	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Bus 16 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bus 17 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bus 18 3	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Bus 19 3	1	1	0	0	1	1	1	1	1
Bus 20 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Bus 21 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bus 22 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bus 23 3	0	0	0	1	0	1	1	1	1
Bus 24 3	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Bus 25 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bus 26 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cloverdle 3	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Cloverdle13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bus 29 3	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Bus 30 3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>MC</b>	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>PMC</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>43</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>41</b>	<b>41</b>	<b>42</b>	<b>41</b>

### 4.3 IEEE 57 Baralı Test Sistemi

Üçüncü olarak IEEE 57 baralı test sistemi üzerinde benzetim yapılmıştır. Kullanılan FÖB yerleştirme metotları sırası ile; Derinlik metodu, graf teorisi yöntemi ve minimum kapsayan ağaç metodudur. Benzetim sonuçları tablo 4.9-4.11’de verilmektedir.

**Tablo 4.9** : Derinlik metodu benzetim sonuçları (IEEE 57 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta Date: 04-Aug-2008 20:37:41 Placement Method: Depth First Elapsed Time: 0h 0m 0.29336s	
STATISTICS	
Buses	57
Lines	80
PMUs	22
PMU Sets	1
Meas. Currents	65
Pseudo-Meas. Currents	0
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Kanawha V	1
Turner V	0
Logan V	0
Sprigg V	1
Bus 5 V	0
Beaver Ck V	0
Bus 7 V	0
Clinch Rv V	1
Saltville V	0
Bus 10 V	1
Tazewell V	0
Glen Lyn V	0
Bus 13 V	1
Bus 14 V	0
Bus 15 V	0
Bus 16 V	0
Bus 17 V	0
Sprigg V	0
Bus 19 V	1

**Tablo 4.9 (Devamı) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Bus 20 V	0
Bus 21 V	1
Bus 22 V	0
Bus 23 V	0
Bus 24 V	1
Bus 25 V	0
Bus 26 V	0
Bus 27 V	1
Bus 28 V	0
Bus 29 V	1
Bus 30 V	1
Bus 31 V	0
Bus 32 V	1
Bus 33 V	0
Bus 34 V	0
Bus 35 V	0
Bus 36 V	1
Bus 37 V	0
Bus 38 V	1
Bus 39 V	1
Bus 40 V	0
Tazewell V	0
Bus 42 V	0
Tazewell V	1
Bus 44 V	0
Bus 45 V	1
Bus 46 V	0
Bus 47 V	1
Bus 48 V	0
Bus 49 V	0
Bus 50 V	1
Bus 51 V	0
Bus 52 V	0
Bus 53 V	1
Bus 54 V	0
Saltville V	1
Bus 56 V	1
Bus 57 V	0



**Tablo 4.10** : Graf teorisi yöntemi benzetim sonuçları (IEEE 57 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta Date: 04-Aug-2008 20:38:22  Placement Method: Graph Theoretic Procedure Elapsed Time: 0h 0m 0.97108s	
STATISTICS	
Buses	57
Lines	80
PMUs	16
PMU Sets	1
Meas. Currents	51
Pseudo-Meas. Currents	30
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Kanawha V	1
Turner V	0
Logan V	0
Sprigg V	1
Bus 5 V	0
Beaver Ck V	0
Bus 7 V	0
Clinch Rv V	0
Saltville V	0
Bus 10 V	1
Tazewell V	0
Glen Lyn V	0
Bus 13 V	1
Bus 14 V	0
Bus 15 V	0
Bus 16 V	0
Bus 17 V	0
Sprigg V	0
Bus 19 V	1
Bus 20 V	0
Bus 21 V	0
Bus 22 V	0
Bus 23 V	0
Bus 24 V	1
Bus 25 V	0
Bus 26 V	0
Bus 27 V	0

**Tablo 4.10 (Devamı) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Bus 28 V	0
Bus 29 V	1
Bus 30 V	1
Bus 31 V	0
Bus 32 V	1
Bus 33 V	0
Bus 34 V	0
Bus 35 V	0
Bus 36 V	0
Bus 37 V	0
Bus 38 V	1
Bus 39 V	0
Bus 40 V	0
Tazewell V	0
Bus 42 V	0
Tazewell V	0
Bus 44 V	0
Bus 45 V	1
Bus 46 V	1
Bus 47 V	0
Bus 48 V	0
Bus 49 V	0
Bus 50 V	1
Bus 51 V	0
Bus 52 V	0
Bus 53 V	1
Bus 54 V	0
Saltville V	1
Bus 56 V	1
Bus 57 V	0

**Tablo 4.11** : Minimum kapsayan ağaç metodu (IEEE 57 bara)

PMU PLACEMENT REPORT		
P S A T 2.0.0-beta Date: 04-Aug-2008 20:48:39  Placement Method: Minimum Spanning Tree Elapsed Time: 0h 2m 13.1074s		
STATISTICS		
Buses	57	
Lines	80	
PMUs	12	
PMU Sets	2	
PMU PLACEMENT		
Bus Name	Set 1	Set 2
Kanawha V	1	1
Turner V	0	0
Logan V	0	0
Sprigg V	1	1
Bus 5 V	0	0
Beaver Ck V	0	0
Bus 7 V	0	0
Clinch Rv V	0	0
Saltville V	1	0
Bus 10 V	0	0
Tazewell V	0	0
Glen Lyn V	0	0
Bus 13 V	0	1
Bus 14 V	0	0
Bus 15 V	0	0
Bus 16 V	0	0
Bus 17 V	0	0
Sprigg V	0	0
Bus 19 V	0	0
Bus 20 V	1	1
Bus 21 V	0	0
Bus 22 V	0	0
Bus 23 V	0	0
Bus 24 V	0	0
Bus 25 V	1	1
Bus 26 V	0	0
Bus 27 V	0	0
Bus 28 V	0	0
Bus 29 V	1	1

**Tablo 4.11 (Devamı) :**

PMU PLACEMENT		
Bus Name	Set 1	Set 2
Bus 30 V	0	0
Bus 31 V	0	0
Bus 32 V	1	1
Bus 33 V	0	0
Bus 34 V	0	0
Bus 35 V	0	0
Bus 36 V	0	0
Bus 37 V	0	0
Bus 38 V	0	0
Bus 39 V	0	0
Bus 40 V	0	0
Tazewell V	0	0
Bus 42 V	0	0
Tazewell V	0	0
Bus 44 V	1	1
Bus 45 V	0	0
Bus 46 V	0	0
Bus 47 V	1	1
Bus 48 V	0	0
Bus 49 V	0	0
Bus 50 V	0	0
Bus 51 V	1	1
Bus 52 V	0	0
Bus 53 V	0	0
Bus 54 V	1	1
Saltville V	0	0
Bus 56 V	1	1
Bus 57 V	0	0
MC	26	25
PMC	85	86

#### 4.4 IEEE 118 Baralı Test Sistemi

Dördüncü olarak IEEE 118 baralı test sistemi üzerinde benzetim yapılmıştır. Kullanılan FÖB yerleştirme metotları sırası ile; Derinlik metodu, graf teorisi yöntemi ve minimum kapsayan ağaç metodudur. Benzetim sonuçları tablo 4.12-4.14'de verilmektedir.

**Tablo 4.12** : Derinlik metodu benzetim sonuçları (IEEE 118 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
Date: 04-Aug-2008 20:32:26 Placement Method: Depth First Elapsed Time: 0h 0m 0.33408s	
STATISTICS	
Buses	118
Lines	186
PMUs	41
PMU Sets	1
Meas. Currents	152
Pseudo-Meas. Currents	0
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Riversde V	1
Pokagon V	0
HickryCk V	0
NwCarlsl V	0
Olive V	1
Kankakee V	0
JacksnRd V	0
Olive V	0
Bequine V	1
Breed V	0
SouthBnd V	0
TwinBrch V	1
Concord V	1
GoshenJt V	0
FtWayne V	0
N. E. V	0
Sorenson V	1
McKinley V	0
Lincoln V	1
Adams V	0
Jay V	0

**Tablo 4.12 (Devami) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Randolph V	1
CollCrrr V	0
Trenton V	1
TannrsCk V	1
TannrsCk V	0
Madison V	0
Mullin V	0
Grant V	1
Sorenson V	0
DeerCrk V	0
Delaware V	1
Haviland	0
Rockhill V	0
WestLima	0
Sterling V	1
EastLima V	1
EastLima V	0
NwLibrty V	0
West End V	0
S.Tiffin V	1
Howard V	0
S.Kenton V	0
WMVernon V	1
N.Newark V	0
W.Lancst V	1
Crooksvl V	0
Zanesvll V	0
Philo V	1
WCambrdg V	0
Newcmrst V	0
SCoshoct V	0
Wooster V	1
Torrey V	0
Wagenhls V	0
Sunnysde V	0
WNwPhil1 V	1
WNwPhil2 V	1
Tidd V	1
SWKammer V	0
W.Kammer V	0
Natrium V	1
Tidd V	0
Kammer V	1
Muskngum V	0
Muskngum V	0
Summerfl V	0
Sporn V	1

**Tablo 4.12 (Devamı) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Sporn V	0
Portsmth V	0
NPortsmt V	1
Hillsbro V	0
Sargents V	0
Bellefnt V	0
SthPoint V	1
Darrah V	1
Turner V	0
Chemical V	1
CapitlHI V	0
CabinCrk V	1
Kanawha V	0
Logan V	0
Sprigg V	1
BetsyLne V	0
BeaverCk V	0
Hazard V	1
Pineville V	0
Fremont V	0
ClinchRv V	1
Holston V	0
HolstonT V	1
Saltville V	0
Tazewell V	1
Switchbk V	0
Caldwell V	1
Baileysv V	0
Sundial V	0
Bradley V	0
Hinton V	0
Glen Lyn V	1
Wythe V	0
Smythe V	1
Claytor V	0
Hancock V	0
Roanoke V	1
Cloverdl V	0
Reusens V	0
Blaine V	0
Franklin V	0
Fieldale V	1
DanRiver V	0
Danville V	0
Deer Crk V	0
WMedford V	0
Medford V	1

**Tablo 4.12 (Devamı) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
KygerCrk V	0
Corey V	0
WHuntngd V	0

**Tablo 4.13 :** Graf teorisi yöntemi benzetim sonuçları (IEEE 118 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta Date: 04-Aug-2008 20:31:00	
Placement Method: Graph Theoretic Procedure Elapsed Time: 0h 0m 9.4149s	
STATISTICS	
Buses	118
Lines	186
PMUs	39
PMU Sets	1
Meas. Currents	145
Pseudo-Meas. Currents	49
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Riversde V	1
Pokagon V	0
HickryCk V	0
NwCarlsl V	0
Olive V	1
Kankakee V	0
JacksnRd V	0
Olive V	0
Bequine V	1
Breed V	0
SouthBnd V	0
TwinBrch V	1
Concord V	1
GoshenJt V	0
FtWayne V	0
N. E. V	0
Sorenson V	1
McKinley V	0
Lincoln V	1



**Tablo 4.13 (Devami) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Adams V	0
Jay V	0
Randolph V	1
CollCmr V	0
Trenton V	1
TannrsCk V	1
TannrsCk V	0
Madison V	0
Mullin V	0
Grant V	1
Sorenson V	0
DeerCrk V	0
Delaware V	1
Haviland	0
Rockhill V	0
WestLima	0
Sterling V	1
EastLima V	1
EastLima V	0
NwLibrty V	0
West End V	0
S.Tiffin V	1
Howard V	0
S.Kenton V	0
WMVernon V	1
N.Newark V	0
W.Lancst V	1
Crooksvl V	0
Zanesvll V	0
Philo V	1
WCambrdg V	0
Newcmrst V	0
SCoshoct V	0
Wooster V	1
Torrey V	0
Wagenhls V	0
Sunnysde V	0
WNwPhil1 V	1
WNwPhil2 V	1
Tidd V	1
SWKammer V	0
W.Kammer V	0
Natrium V	1
Tidd V	0
Kammer V	0
Muskngum V	0
Muskngum V	0

**Tablo 4.13 (Devami) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Summerfl V	0
Sporn V	0
Sporn V	0
Portsmth V	0
NPortsmt V	1
Hillsbro V	0
Sargents V	0
Bellefnt V	0
SthPoint V	1
Darrah V	1
Turner V	0
Chemical V	1
CapitlHI V	0
CabinCrk V	1
Kanawha V	0
Logan V	0
Sprigg V	1
BetsyLne V	0
BeaverCk V	0
Hazard V	1
Pineville V	0
Fremont V	0
ClinchRv V	1
Holston V	0
HolstonT V	1
Saltville V	0
Tazewell V	1
Switchbk V	0
Caldwell V	1
Baileysv V	0
Sundial V	0
Bradley V	0
Hinton V	0
Glen Lyn V	1
Wythe V	0
Smythe V	1
Claytor V	0
Hancock V	0
Roanoke V	1
Cloverdl V	0
Reusens V	0
Blaine V	0
Franklin V	0
Fieldale V	1
DanRiver V	0
Danville V	0
Deer Crk V	0

**Tablo 4.13 (Devamı) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
WMedford V	0
Medford V	1
KygerCrk V	0
Corey V	0
WHuntngd V	0

**Tablo 4.14 :** Minimum kapsayan ağaç metodu benzetim sonuçları (IEEE 118 bara)

PMU PLACEMENT REPORT	
P S A T 2.0.0-beta Date: 04-Aug-2008 20:33:51 Placement Method: Minimum Spanning Tree Elapsed Time: 0h 0m 3.1803s	
STATISTICS	
Buses	118
Lines	186
PMUs	38
PMU Sets	1
Meas. Currents	125
Pseudo-Meas. Currents	186
PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Riversde V	1
Pokagon V	0
HickryCk V	0
NwCarlsI V	0
Olive V	1
Kankakee V	0
JacksnRd V	0
Olive V	0
Bequine V	1
Breed V	0
SouthBnd V	0
TwinBrch V	1
Concord V	0
GoshenJt V	0

**Tablo 4.14 (Devami) :**

Bus Name	Set 1
FtWayne V	1
N. E. V	0
Sorenson V	0
McKinley V	1
Lincoln V	0
Adams V	0
Jay V	1
Randolph V	0
CollCrrr V	0
Trenton V	1
TannrsCk V	0
TannrsCk V	1
Madison V	0
Mullin V	0
Grant V	1
Sorenson V	0
DeerCrk V	0
Delaware V	1
Haviland	0
Rockhill V	0
WestLima	0
Sterling V	1
EastLima V	1
EastLima V	0
NwLibrty V	0
West End V	0
S.Tiffin V	0
Howard V	1
S.Kenton V	0
WMVernon V	1
N.Newark V	0
W.Lancst V	1
Crooksvl V	0
Zanesvll V	0
Philo V	0
WCambrdg V	0
Newcmrst V	1
SCoshoct V	0
Wooster V	0
Torrey V	1
Wagenhls V	0
Sunnysde V	0
WNwPhil1 V	1
WNwPhil2 V	0
Tidd V	0
SWKammer V	0
W.Kammer V	0
Natrium V	1

**Tablo 4.14 (Devami) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Tidd V	0
Kammer V	1
Muskngum V	0
Muskngum V	0
Summerfl V	0
Sporn V	1
Sporn V	0
Portsmth V	0
NPortsmt V	1
Hillsbro V	0
Sargents V	0
Bellefnt V	0
SthPoint V	1
Darrah V	1
Turner V	0
Chemical V	0
CapitlHI V	1
CabinCrk V	0
Kanawha V	0
Logan V	0
Sprigg V	1
BetsyLne V	0
BeaverCk V	0
Hazard V	1
Pineville V	0
Fremont V	0
ClinchRv V	1
Holston V	0
HolstonT V	1
Saltvll V	0
Tazewell V	0
Switchbk V	1
Caldwell V	0
Baileysv V	0
Sundial V	1
Bradley V	1
Hinton V	1
Glen Lyn V	0
Wythe V	0
Smythe V	1
Claytor V	0
Hancock V	0
Roanoke V	1
Cloverdl V	0
Reusens V	0
Blaine V	0
Franklin V	0

**Tablo 4.14 (Devamı) :**

PMU PLACEMENT	
Bus Name	Set 1
Fieldale V	1
DanRiver V	0
Danville V	0
Deer Crk V	0
WMedford V	0
Medford V	1
KygerCrk V	0
Corey V	0
WHuntngd V	0

#### **4.5 Benzetim Sonuçlarının İncelenmesi**

Sistemi gözlenebilir kılan en az sayıdaki FÖB yerleşimi, derinlik metodu, graf teorisi yöntemi, tavlama metodu ve minimum kapsayan ağaç metodu gibi algoritmalarla IEEE 14, IEEE 30, IEEE 57 ve IEEE 118 baralı test sistemlerine uygulanmıştır. IEEE 14 ve IEEE 30 baralı test sistemlerinin tek hat şemaları şekil 4.1 ve şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Benzetimler MATLAB yazılımı üzerinde çalışan PSAT (Power System Analysis Toolbox – Version 2.0.0-beta) arayüzü ile gerçekleştirilmiştir.[46]

Tablo 4.1’de görüldüğü üzere, derinlik metodu IEEE 14 baralı test sistemini, 0,089 saniye sürelik benzetim koşturulma süresi ve toplam altı FÖB yerleşimi ile gözlenebilir yapmıştır. Bu altı FÖB 1., 4., 6., 8., 10. ve 14. baralara yerleştirilerek bu baralara ait gerilim fazör ölçümlerini sağlamakla beraber toplam onaltı akım fazör ölçümü de gerçekleştirmektedir. Bu yerleşimde hesaplanan akım fazörü sayısı sıfırdır.

Tablo 4.2’de, graf teorisi yöntemi IEEE 14 baralı test sistemini, 0,111 saniye sürelik benzetim koşturulma süresi ve toplam beş FÖB yerleşimi ile gözlenebilir yapmıştır. Bu beş FÖB 1., 4., 6., 10. ve 14. baralara yerleştirilerek bu baralara ait gerilim fazör ölçümlerini sağlamakla beraber toplam onbeş akım fazör ölçümü de gerçekleştirmektedir. Bu yerleşimde hesaplanan akım fazörü sayısı beştir.

Tablo 4.3’deki benzetim sonuçlarında görüldüğü üzere, tavlama metodu IEEE 14 baralı test sistemini, 0,423 saniye sürelik benzetim koşturulma süresi ve toplam dört FÖB yerleşimi ile gözlenebilir yapmıştır. Bu dört FÖB 1., 2., 6., ve 9. baralara yerleştirilerek bu baralara ait gerilim fazör ölçümlerini sağlamakla beraber toplam

ondört akım fazör ölçümü de gerçekleştirmektedir. Bu yerleşimde hesaplanan akım fazörü sayısı yirmidir.

Tablo 4.4’de minimum kapsayan ağaç metodunun IEEE 14 baralı test sisteminde gerçekleştirdiği benzetim sonuçları görülmektedir, Benzetim koşturulma süresi 0,850 saniyedir ve sistem toplam üç FÖB yerleşimi ile gözlenebilir yapılmıştır. Bu üç FÖB 2., 6., ve 9. baralara yerleştirilerek bu baralara ait gerilim fazör ölçümlerini sağlamakla beraber toplam oniki akım fazör ölçümü de gerçekleştirmektedir. Bu yerleşimde hesaplanan akım fazörü sayısı sekizdir.

**Tablo 4.15** : Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması (IEEE 14 bara)

Benzetim Metodu	Benzetim Süresi (s)	Bara Sayısı	Hat Sayısı	FÖB Sayısı	Ölçülen Akım Sayısı	Hesaplanan Akım Sayısı
Derinlik Metodu	0,089	14	20	6	16	0
Graf Teorisi	0,111	14	20	5	15	5
Tavlama Metodu	0,423	14	20	4	14	20
Minimum Kapsayan Ağaç Metodu	0,850	14	20	3	12	8

Tablo 4.15’de IEEE 14 baralı test sistemine uygulanan benzetim metotlarının karşılaştırılması görülmektedir. En uzun benzetim süresine sahip minimum kapsayan ağaç metodu en az sayıda FÖB birimi ile sistemi gözlenebilir kılmıştır. Sisteme yerleştirilen FÖB sayısının azalması ile birlikte, ölçülebilen akım fazörü sayısının azaldığı aşikardır.

Tablolar 4.5-4.8’de görüldüğü üzere, derinlik metodu IEEE 30 baralı test sistemini; 0,217 saniye süreli benzetim koşturulma süresi ve toplam on iki FÖB yerleşimi ile, graf teorisi yöntemi 0,350 saniye süreli benzetim koşturulma süresi ve toplam on bir FÖB yerleşimi ile, tavlama metodu 18,616 saniye süreli benzetim koşturulma süresi ve toplam yedi FÖB yerleşimi ile ve minimum kapsayan ağaç metodu 5,460 saniye süreli benzetim koşturulma süresi ve toplam yedi FÖB yerleşimi ile gözlenebilir yapmıştır. Minimum kapsayan ağaç metodu yedi FÖB’ni dokuz farklı biçimde sisteme yerleştirerek sistemi gözlenebilir yapabilmektedir. Bu dokuz farklı yerleştirme kümesinin hangisinin en uygun olduğuna ölçülen akım fazörlerinin sayısına ve hangi kümede daha çok kritik baranın kapsandığına bakılarak karar vermek mümkündür.

**Tablo 4.16** : Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması (IEEE 30 bara)

Benzetim Metodu	Benzetim Süresi (s)	Bara Sayısı	Hat Sayısı	FÖB Sayısı	Ölçülen Akım Sayısı	Hesaplanan Akım Sayısı
Derinlik Metodu	0,217	30	41	12	33	0
Graf Teorisi	0,351	30	41	11	32	10
Tavlama Metodu	18,616	30	41	7	24	41
Minimum Kapsayan Ağaç Metodu	5,460	30	41	7	19	41

Tablo 4.16’da IEEE 30 baralı test sistemine uygulanan benzetim metotlarının karşılaştırılması görülmektedir. 30 baralı sistem için tavlama metodu ve minimum kapsayan ağaç metodu yedi FÖB yerleşimi ve kırk bir ölçülen akım değeri ile aynı sonucu vermesine rağmen, minimum kapsayan ağaç metodunun sonuca daha çabuk ulaşmış olması ve dokuz farklı yerleşim kümesi vermiş olması, minimum kapsayan ağaç metodunu tavlama metoduna oranla daha üstün kılmaktadır.

Tablolar 4.9-4.11’de görüldüğü üzere, derinlik metodu IEEE 57 baralı test sistemini; 0,293 saniye sürelik benzetim koşturulma süresi ve toplam yirmi iki FÖB yerleşimi ile, graf teorisi yöntemi 0,971 saniye sürelik benzetim koşturulma süresi ve toplam on altı FÖB yerleşimi ile ve minimum kapsayan ağaç metodu 13,107 saniye sürelik benzetim koşturulma süresi ve toplam on iki FÖB yerleşimi ile gözlenebilir yapmıştır. Minimum kapsayan ağaç metodu on iki FÖB’ni iki farklı biçimde sisteme yerleştirerek sistemi gözlenebilir yapabilmektedir.

**Tablo 4.17** : Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması (IEEE 57 bara)

Benzetim Metodu	Benzetim Süresi (s)	Bara Sayısı	Hat Sayısı	FÖB Sayısı	Ölçülen Akım Sayısı	Hesaplanan Akım Sayısı
Derinlik Metodu	0,293	57	80	22	65	0
Graf Teorisi	0,971	57	80	16	51	30
Minimum Kapsayan Ağaç Metodu	13,107	57	80	12	26	85

**Tablo 4.18** : Benzetim sonuçlarının karşılaştırılması (IEEE 118 bara)

Benzetim Metodu	Benzetim Süresi (s)	Bara Sayısı	Hat Sayısı	FÖB Sayısı	Ölçülen Akım Sayısı	Hesaplanan Akım Sayısı
Derinlik Metodu	0,334	118	186	41	152	0
Graf Teorisi	9,415	118	186	39	145	49
Minimum Kapsayan Ağaç Metodu	3,180	118	186	38	125	186

Tablo 4.17’de IEEE 57 baralı ve tablo 4.18’de IEEE 118 baralı test sistemine uygulanan benzetim metotlarının karşılaştırılması görülmektedir.



**Tablo 4.19** : Minimum kapsayan ağaç metodu benzetim sonuçları

<b>Benzetim Metodu</b>	<b>Benzetim Süresi (s)</b>	<b>Bara Sayısı</b>	<b>Hat Sayısı</b>	<b>FÖB Sayısı</b>	<b>Ölçülen Akım Sayısı</b>	<b>Hesaplanan Akım Sayısı</b>
Minimum Kapsayan Ağaç Metodu	0,850	14	20	3	12	8
Minimum Kapsayan Ağaç Metodu	5,460	30	41	7	19	41
Minimum Kapsayan Ağaç Metodu	13,107	57	80	12	26	85
Minimum Kapsayan Ağaç Metodu	3,180	118	186	38	125	186

Tablo 4.19’da minimum kapsayan ağaç metodunun farklı test sistemlerine uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

Bu bölümde ortaya çıkan sayısal değerler farklı büyüklükteki sistemlerde farklı benzetim metotlarının koşturulması sonucunda elde edilmiştir. Temelde bütün benzetim metotlarının graf teorisinden ortaya çıktığını ve geliştirilen farklı algoritmalarla sonuca gittiğini söylersek yanlış bir kanıya varmış olmayız. Tüm benzetim metotları için genel olarak sistemdeki bara sayısının artması ile birlikte benzetim süresinin arttığını söyleyebiliriz. Sisteme yerleştirilen FÖB sayısı yaklaşık olarak bara sayısının dörtte birine eşittir.

Ele aldığımız fazör ölçüm birimi yerleşimi optimizasyon yöntemleri sistemi kararlı halde kabul eden ve sistemde her hangi bir bozucu etki olmadığını varsayan yaklaşıma dayanmaktadır. Gelecekte, her hangi bir hat kopması veya FÖB bozulması durumlarında sistem gözlenebilirliğinin bozulmamasının sağlayacak minimum sayıda FÖB yerleşimi metotları üzerine çalışılacaktır. Bununla birlikte, sistemi alt sistemlere bölerek, her bir alt sistemde FÖB yerleşimini yapmak, yazılımların koşturulma sürelerinde hatırı sayılır bir düşüşe neden olacağı düşünülmektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ANALİZ

Daha önceki bölümlerde anlatıldığı gibi güç sistemlerinin en önemli problemi, sistemlerin çevrim-içi bir şekilde izlenememesidir. İzlenebildiği durumlarda ise sistem büyüklüğü ve bir çok çevresel, ekonomik şart sebebiyle, sistemin değişik noktalarından elde edilen verilen belirli bir zaman referansına oturtulamadığı için sistemin bütünü hakkında doğru ve hatasız bilgilere ulaşamıyordu.

Geniş alan ölçüm sistemi bu noktada devreye girerek, GPS ile senkronize edilmiş fazör ölçümleri sayesinde sistemin farklı noktalarından aynı zaman referansındaki akım ve gerilim fazör ölçümlerini merkezi bilgisayara aktararak, operatörlere sistemin tamamının durumu hakkında gerçekçi ve yüksek hassasiyette bilgiler verirler.

Bu anlık bilgiler sistemin durumunu, gerilim kararsızlığına ne kadar yaklaştığını ve muhtemel gerilim çökmesi olayının gerçekleşme olasılığı hakkında veriler içerir. Böylece geniş alan ölçüm sistemi sayesinde sistem her hangi bir kararsızlık durumuna gelmeden gerekli önlemler alınarak sistem kararlılığı ve güvenilirliği sağlanmış olur. Bunun için sistem durum yaklaşım verilerinin elde edilmesini sağlayan fazör ölçüm birimlerinin sistemi gözlenebilir kılan optimum noktalara yerleştirilmesi gerekmektedir.

Burada amaç, bu koruma sistemini minimum maliyetle gerçekleştirebilmektir. Minimum maliyetle gerçekleştirmek demek, sisteme yerleştirilecek FÖB sayısını minimumda tutmak demektir. Bu sebeple, sistemdeki bütün gerilim ve akım fazör bilgilerini ölçebilen veya hesaplayabilen, kısacası sistemin bütünü gözlenebilir kılan minimum sayıdaki FÖB sayısını veren yöntem önem kazanmıştır. Bu bağlamda bir çok fazör ölçüm birimi yerleştirme metodu geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam etmektedir. Gelecekte, sistem korkuma maliyetleri de göz önünde bulundurularak güç sistemi bozucu etkilerini de hesaba katan yeni fazör ölçüm birimi yerleştirme yöntemlerine yönelik çalışmalara devam edileceği aşikardır..

## KAYNAKLAR

- [1] **Rehtanz, C.; Bertsch, J.**, “*Wide area measurement and protection system for emergency voltage stability control*” Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE Volume 2, p.842 - 847
- [2] **Lohmann, V.**, “*Advances in power system management*” ABB Power Automation Ltd, Baden, Switzerland.
- [3] **Jian, X.; Wen, F, Chung, C.Y.**, “*Wide Area Protection and its Applications – A Bibliographical Survey*” , Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES.
- [4] **Phadke, A.G.**, System of Choice, “*Phasor Measurements for Real Time Applications*” IEEE Power and Energy Magazine, Vol.6, Issue 5, p. 20-22, 2008.
- [5] **IEEE Power Engineering Society** – Power System Relaying Committee – System Protection Subcommittee - Working Group C-6 “*Wide Area Protection and Emergency Control*” Final Report, 2002.
- [6] **Adamiak, M. G., Novosel, D., Kasztenny, B., Madani, V., Sykes, J., Phadke, A.G.**, “*Wide Area Protection and Control – Today and Tomorrow*”, Proceedings of the IEEE, 2006.
- [7] **Bertsch, J., Carnal, C., Mcdaniel, J., Vu, K.**, “*Wide Area Protection and Power System Utilization*”, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 5, May 2005.
- [8] **Lohmann, V.**, “*Wide Area Protection – A Strategy to Counteract Large Area Disturbances*” ABB Power Automation Ltd, Baden, Switzerland, 2003.
- [9] **Rehtanz, C.; Bertsch, J.**, “*A New Wide Area Protection System*” Power Tech Conference, Porto, Portugal, 2001.
- [10] **Bertsch, J., Zima, M., Suranyi, A.**, “*Experiences with and Perspectives of the System for Wide Area Monitoring of Power Systems*”, CIGRE/IEEE-PES International Symposium Quality and Security of Electric Power delivery Systems, Montreal, Canada, October, 2003.

- [11] **Rehtanz, C.; Westermann, D.**, “*Wide area measurement and control system for increasing transmission capacity in deregulated energy markets*” 14<sup>th</sup> PSCC, Sevilla, 24-28June 2002.
- [12] **Benmouyal, G., Guzman, A.**, “*Synchronized Phasor Measurement in Protective Relays for Protection, Control and Analysis of Electric Power Systems*”, Western Protective Relay Conference, Washington, 2002.
- [13] **IEEE Standart for Synchrophasors for Power Systems**, “*IEEE Std C37.118-2005*”.
- [14] **IEEE Standart for Synchrophasors for Power Systems**, “*IEEE Std 1344-1995(R2001)*”.
- [15] **Martin, K.E., Benmouyal, G., Adamiak, M.G., Begovic, M., Burnett, R.O., Carr, K.R., Cobb, A., Kusters, J.A., Horowitz, S.H.**, “*IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No. 1, January 1998.
- [16] **Martin, K.E., Hamai, D., Adamiak, M.G., Anderson, S., Begovic, M., Benmouyal, G.**, “*Exploring the IEEE Standard C37.118-2005 Synchrophasors for Power Systems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, 2008.
- [17] **A. G. Phadke, J. S. Thorp, and K. Karimi**, “*State estimation with phasor measurements,*” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. PWRD-1, no. 1, pp. 233–241, Feb. 1986.
- [18] **M. Larsson, C. Rehtanz, and J. Bertsch**, “*Real-time voltage stability assessment for transmission corridors,*” presented at the IFAC Power Plants and Power Systems Control Conf., Seoul, Korea, 2003.
- [19] **C. W. Taylor, D. C. Erickson, K. E. Martin, R. W. Wilson, and V. Venkatasubramanian**, “*WACS—Wide-area stability and voltage control system:R&Dand online demonstration,*” in *Proc. IEEE*, May 2005, vol. 93, no. 5, pp. 892–906.
- [20] **E. Martinez, N. Juarez, A. Guzman, G. Zweigle, and J. Leon**, “*Using synchronized phase angle difference for wide-area protection and control,*” presented at the Western Protective Relay Conf., Spokane, WA, Oct. 2006.

- [21] **M. M. Begovic**, “*Analysis Monitoring and Control of Voltage Stability in Electric Power Systems*”, Ph.D. Thesis Virginia Polytechnic Institute and State University, July 1989.
- [22] **M. M. Begovic, and A. G. Phadke**, “*Voltage Stability Assessment through Measurement of a Reduced State Vector*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-5, No. 1, Feb. 1990, pp. 198-203.
- [23] **R. A. Schlueter, I. Hu, M. W. Chang, J. C. Lo, A. Costi**, “*Methods for Determining Proximity to Voltage Collapse*”, Paper No. 90 WM 096-8 PWRS, Presented at the 1990 IEEE Winter Meeting, Atlanta, GA, Feb. 4-9, 1990.
- [24] **R. A. Schlueter**, “*Voltage Collapse Dynamic Security Assessment using Structural Stability Analysis*”, Proceedings of the 1988 EPRI/CRIEPI Symposium on Dynamics and Control, May 1989
- [25] **M. Ilic, and A. Stankovic**, “*Innovative Power System Control Concepts*”, EPRI Final Report, Sept. 9, 1989.
- [26] **A. Stankovic, M. Ilic, and D. Maratukulam**, “*Recent Results in Secondary Voltage Control of Power Systems*”, Paper No. 90 WM 255-0 PWRS, Presented at the 1990 IEEE Winter Meeting, Atlanta, GA, Feb. 4-9, 1990.
- [27] **J. P. Paul, J. Y. LCost, and J. M. Tesseron**, “*Survey of the Secondary Voltage control in France: Present Realization and Investigations*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. PWRS-2, No. 2, May 1987, pp. 505-511.
- [28] **Mili, L., Baldwin, T., Adapa, R.**, “*Phasor Measurement Placement for Voltage Stability Analysis of Power systems*”, Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control Honolulu, Hawaii, December 1990.
- [29] **P. Lagonotte, J. C. Sabonnadi&e, J. Y. Lbst, and J. P. Paul**, “*Structural Analysis of the Electrical System: Application to Secondary Voltage Control in France*”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 4, No. 2, May 1989.
- [30] **G. R. Krumpholz, K. A. Clements, and P. W. Davis**, “*Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology*”,

IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 99,  
July/Aug. 1980,

- [31] **Dongjie, X., Renmu, H., Pen, W., Tao, X.**, “*Comparison of Several PMU Placement Algorithms for State Estimation*” North China Electric Power University, China, 2004.
- [32] **Phadke, A.G., Nuqui, R. F.**, “*Phasor Measurement Unit Placement Based on Incomplete Observability*” IEEE Transactions on Power, p. 888-893, 2002.
- [33] **Begovic, M.; Milosevic, B.**, “*Nondominated Sorting Genetic Algorithm for Optimal Phasor Measurement Placement* ” IEEE Transactions on Power, Vol.18, No.1, p. 69-75, 2003.
- [34] **Chakrabati, S., Kyriakides, E.**, “*Optimal Placement of Phasor Measurement Units for Power System Observability*” IEEE Transactions on Power, p. 1-7, 2008.
- [35] **Jain, A. K., Murty, M. N. and Flynn, P. J.**, 1999. *Data Clustering: A Systems*, Melbourne, Australia, December 2003.
- [36] **Rosales, R.; Giri, J.**, “*Wide Area Monitoring and Control For Power system grid Security*” , 15<sup>th</sup> PSCC, Liege, 22-26 August 2005.
- [37] **IEEE Power Engineering Society – Power System Relaying Committee – System Protection Subcommittee - Working Group C-6** “*Wide Area Protection and Emergency Control*” Final Report, 2002.
- [38] **Begovic, M.; Novosel, D.**, “*On Wide Area Protection*” , Power Engineering Society General Meeting,, IEEE, 24-28 June 2007 Page(s):1 - 5.
- [39] **Jian, X.; Wen, F, Chung, C.Y.**, “*Wide Area Protection and its Applications – A Bibliographical Survey*” , Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES.
- [40] **Karlsson, D.; Messing, L.**, “*Wide Area Protection and Emergency Control*”, *Developments in Power System Protection*, 2004. Eighth IEE International Conference, Volume 2, 5-8 April 2004 Page(s):746 - 751.
- [41] **Begovic, M.; Novosel, D.; Karlsson, D.; Henville, C.; Michel, G.**, “*Wide Area Protection and Emergency Control*” , Proceedings of the IEEE, Vol.93, No.5, May 2005.

- [42] **Cai, J.Y., Huang, Z., Hauer, J., Martin, K.**, “*Current Status and Experience of WAMS Implementation in North America*”, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, Dalian, China, 2005.
- [43] **Guzman, A., Tziouvara, D.**, “*Load and Wide Area Network Protection System to Improve Power System Reliability*”, IEEE Transactions on Power Systems, April 2005.
- [44] **Wilson, R.E., Taylor, C.W.**, “*Using Dynamic Simulations to Design the Wide Area Stability and Voltage Control System (WACS)*”, IEEE Transactions on Power Systems, 2004.
- [45] **M. Crow**, “*Computational methods for electric power systems*”, CRC Press, 2002.
- [46] **Milano, F.** “*PSAT – Power System Analysis Toolbox*”, <http://www.power.uwaterloo.ca/~fmilano/psat.htm>

## **ÖZGEÇMİŞ**

1981 İstanbul doğumlu olan Mehmet Ali Murat İPEK; lise öğrenimini İstanbul Atatürk Fen Lisesi 'nde tamamlamıştır. 1999 yılında lise mezuniyeti sonrasında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümünü kazanmış ve 2004 yılında bu bölümden lisans derecesini almıştır. 2004 yılında Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programı'na kaydolmuş ve Eylül 2008 itibariyle yüksek lisans tezini sunmaktadır.