

Akıllı Şebekelerde Durum Kestirimi için Fazör Ölçüm Birimlerinin Optimum Yerleştirilmesi

Optimal Placement of Phasor Measurement Units for State Estimation in Smart Grid

Hakan Var¹, Belgin Emre Türkay²

¹Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
var@itu.edu.tr

²Elektrik Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi
turkayb@itu.edu.tr

Özet

Ülkelerin elektrik enerji talepleri gün geçtikçe artış göstermektedir. Artan enerji talebi, iletim ve dağıtım şebekelerinin daha karmaşık bir hal almasına neden olmaktadır. Karmaşıklaşan şebekelerin izlenmesi klasik yöntemlerle oldukça güçtür. Bu sebeple klasik şebekeler yerine akıllı şebekelere geçilmesi ihtiyaç haline gelmiştir. Akıllı şebekeler sayesinde verilerin eş zamanlı olarak izlenmesi amaçlanmıştır. Fazör Ölçüm Birimleri (FÖB) sayesinde akım, gerilim ve faz açısı GPS'in de yardımıyla eş zamanlı olarak izlenebilmektedir. Fazör Ölçüm Birimleri pahalı olduğu için en az sayıda kullanılarak şebekeye yerleştirilmesi tercih edilmektedir. Bu çalışma da tam sayılı lineer programlama yöntemi kullanılarak FÖB'ler IEEE'nin 9 ve 14 baralı test sistemlerinde optimum şekilde yerleştirilmiştir.

Çalışma da geliştirilen matematiksel model ile az sayıda FÖB kullanılarak sistemlerin en ucuza ve gözlemlenebilmesi başarıyla sağlanmıştır

Abstract

Day by day, electrical energy demand increases in developing countries. Due to that increment, complexity of the transmission and distribution grids gets scaled up. Alternating the components of conventional grid with smart grid devices is required owing to the fact that monitoring more complex grids by conventional methods is hard. The purpose of this study is to monitor data synchronously. Phasor measurement units (PMU) and GPS enable to measure current, voltage and phasor angle simultaneously. Since PMUs are expensive, PMUs should be reasonably located to keep number of them low. In this study, optimum number of PMUs place at 9 and 14-bus IEEE test system.

In frame of the mathematical model offered in this study, it is achieved that all system is observed with the lowest cost by minimum number of PMU.

1. Giriş

Enerji sistemlerinin çok iyi bir şekilde izlenmesi sistemin güvenliği için son derece önemlidir. Sistemi izlemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan "Supervisory Control and Data Acquisition" olarak adlandırılan SCADA sistemidir. Zamanla bu ölçüm sisteminin de gerçek zamanlı ölçüm yapamaması, örnekleme sayısının az olması ve izlenmesi gereken her merkeze kurulma zorunluluğundan dolayı fazla kablolama gerektirdiğinden farklı bir cihaz ihtiyacını doğurmuştur.

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 Fazör Ölçüm Birimi (FÖB) olgusunun ortaya çıkmasını sağlamıştır. İlk FÖB'leri Virginia Technology 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 FÖB birimi standartını yayınlamış ve bu standart 2005 yılında güncellenmiştir. İlgili standart FÖB'leri güç sistemlerinin modern gözleme, koruma ve kontrol sistemlerinde kullanılan geniş alan ölçüm sistemleri olarak tanınmaktadır [1]

Fazör Ölçüm Birimleri gerçek zamanlı akım ve gerilim fazörlerini senkronize bir şekilde ölçme kabiliyetlerinden dolayı güç mühendisleri için çok önemlidir[2]. Fazör ölçüm birimleri, sistemin belirli zorlanma hallerinde ideal ölçümler sağlarlar. [3].

FÖB, SCADA'dan alınan geleneksel ölçümlere göre örnekleme sayısının fazla olması ve ölçüm doğruluğu bakımından çok daha üstündür.[4] Ayrıca, baraya yerleştirilen FÖB komşu baralardan da ölçüm alabilirler. [5]

Bu çalışmada fazörlerin optimum yerleştirilmesi bir optimizasyon problemi olarak ifade edilmiştir. Bu optimizasyon problemini tam sayılı lineer programlama ile çözülmüştür.

2. Fazör Ölçüm Birimlerinin Optimum Yerleştirilmesi

Fazör ölçüm birimleri tıpkı SCADA sistemi gibi her istasyona yerleştirilerek ölçümler alınabilir fakat fiyatları yüksek olduğu için minimum sayıda kullanılmalıdır ve sistem tamamen gözlemlenebilir olmalıdır. FÖB yerleşimi optimizasyonu yapılırken herhangi bir FÖB'ün arıza yapmadığı düşünülmüştür. [6]. Problemin matematiksel modeli aşağıdaki gibidir ve karar değişkenleri x_i "0" ve "1" değerlerini aşağıdaki kurala göre alırlar:

$$X_{i,j} = \begin{cases} 1 & i \text{ ve } j \text{ komşu ya da } i = j \text{ ise} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (1)$$

FÖB'lerin yerleştirilmesinde (1)'deki denklem dikkate alınır. Bu denkleme göre karar değişkenleri FÖB'lerin olması durumunda "1", FÖB'lerin olmaması durumunda ise "0" değerini alırlar.

FÖB'lerin yerleştirilmesi problemini optimizasyon problemine dönüştürmek için amaç ve kısıt fonksiyonları tanımlanmalıdır. Amaç fonksiyonu oluşturulurken FÖB'lerin fiyat bilgileri de dikkate alınmalıdır [7] fakat, bu çalışmada kullanılan FÖB'lerin aynı fiyatta olduğu düşünülerek problem çözülmüştür. Amaç ve kısıt fonksiyonları aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_i^n W_i \times X_i \\ \text{Amaç} \quad & f(x) \geq 1 \end{aligned} \quad (2)$$

Burada;

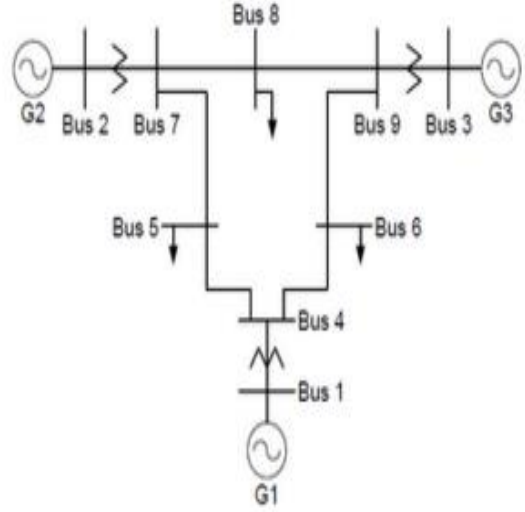
W_i : FÖB'ün fiyatı

$f(x)$: Kısıt fonksiyonu'dur.

3. IEEE Test Sistemleri İçin Uygulamalar

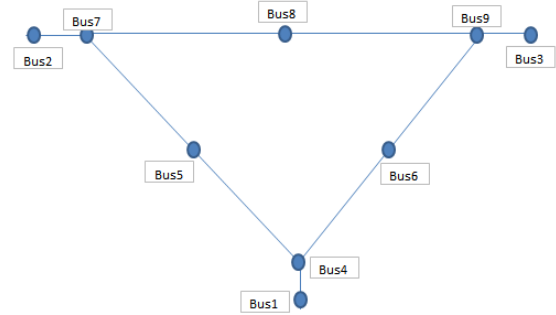
3.1. 9 –Baralı IEEE Test Sistemi İçin Uygulama

Şekil 1 'de IEEE 9-baralı test sistemi gösterilmektedir. Burada amaç, sistemi tamamen gözlemlenebilir yapan minimum FÖB sayısını bulmaktır. Test sisteminde seçilen tüm FÖB'lerin fiyatı aynı kabul edildiğinden amaç fonksiyonuna etkisi yoktur.



Şekil 1: IEEE 9-Baralı Test Sistemi'nin Tek Hat Şeması

IEEE 9 baralı sistemin basit hale çevrilmiş şekli aşağıdaki gibidir:



Şekil 2: IEEE 9-Baralı Test Sisteminin Basit Formu

Bus No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	1	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	1
4	1	0	0	1	1	1	0	0	0
5	0	0	0	1	1	0	1	0	0
6	0	0	0	1	0	1	0	0	1
7	0	1	0	0	1	0	1	1	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1	1
9	0	0	1	0	0	1	0	1	1

Şekil 3: IEEE 9-Baralı Test Sisteminin Matris Formu

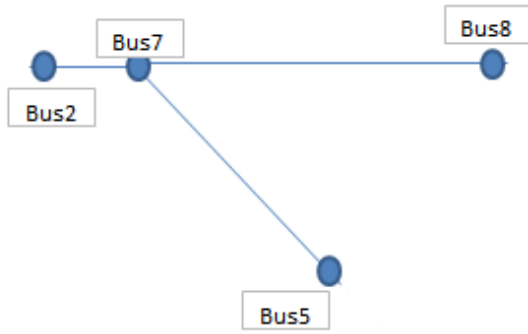
Sistem matris formuna çevrilirken Denklem 1'deki kural uygulanarak i. bara için kendine ve bağlı olduğu bir diğer istasyon için "1" değeri koyulur.

7. istasyonun matris formu Şekil 4'teki gibi yazılır:

0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0

Şekil 4: IEEE 9 Baralı Test Sistemdeki 7. Baranın Bağlantı Matrisi

Burada 7. İstasyon 7,2,5,8. istasyonlarına bağlıdır. Diğer bir deyişle, 7. İstasyona koyulan bir FÖB ile 7,2,5,8. istasyonlarındaki akım , gerilim ve faz açıları gözlemlenebilir.

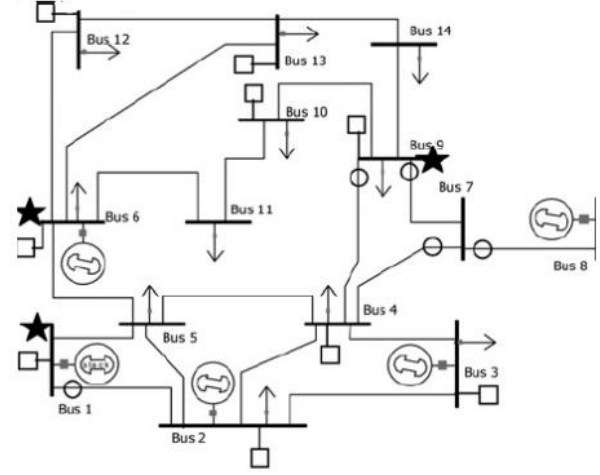


Şekil 4: 7. Baranın bağlantılı olduğu baralar

Matris formunun kısıt fonksiyonuna çevrilmiş hali aşağıdaki gibidir:

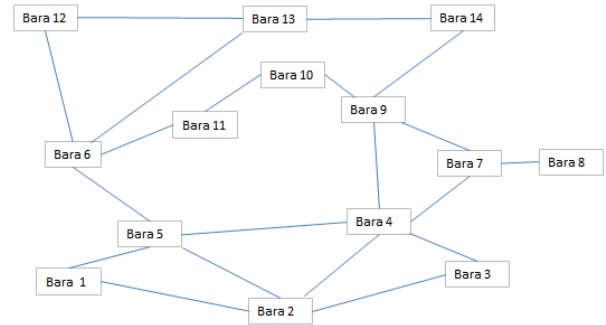
$$\begin{aligned}
 f(x_1) &= f_1 + f_4 & \geq 1 \\
 f(x_2) &= f_2 + f_7 & \geq 1 \\
 f(x_3) &= f_3 + f_9 & \geq 1 \\
 f(x_4) &= f_1 + f_4 + f_5 + f_6 & \geq 1 \\
 f(x_5) &= f_4 + f_5 + f_7 & \geq 1 \\
 f(x_6) &= f_4 + f_6 + f_9 & \geq 1 \\
 f(x_7) &= f_2 + f_5 + f_7 + f_8 & \geq 1 \\
 f(x_8) &= f_7 + f_8 + f_9 & \geq 1 \\
 f(x_9) &= f_3 + f_6 + f_8 + f_9 & \geq 1
 \end{aligned} \quad (3)$$

3.2. 14-Baralı IEEE Test Sistemi İçin Uygulama



Şekil 5: IEEE 14-Baralı Test Sistemi'nin Tek Hat Şeması

Burada da 9 baralı test sisteminde olduğu gibi FÖB'leri yerleştirirken FÖB'lerin aynı fiyat olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 6: IEEE 14-Baralı Test Sisteminin Basit Formu

Bus No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
5	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0
7	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
11	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1

Şekil 7: IEEE 9-Baralı Test Sisteminin Matris Formu

14 baralı sistemin kısıt fonksiyonuna çevrilmiş halleri aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
f(x_1) &= f_1 + f_2 + f_5 & \geq 1 \\
f(x_2) &= f_1 + f_2 + f_3 + f_5 & \geq 1 \\
f(x_3) &= f_2 + f_3 + f_4 & \geq 1 \\
f(x_4) &= f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_7 + f_9 & \geq 1 \\
f(x_5) &= f_1 + f_2 + f_4 + f_5 + f_6 & \geq 1 \\
f(x_6) &= f_5 + f_6 + f_{11} + f_{12} + f_{13} & \geq 1 \\
f(x_7) &= f_4 + f_7 + f_8 + f_9 & \geq 1 \\
f(x_8) &= f_7 + f_8 & \geq 1 \\
f(x_9) &= f_4 + f_7 + f_9 + f_{10} + f_{14} & \geq 1 \\
f(x_{10}) &= f_9 + f_{10} + f_{11} & \geq 1 \\
f(x_{11}) &= f_6 + f_{10} + f_{11} & \geq 1 \\
f(x_{12}) &= f_6 + f_{12} + f_{13} & \geq 1 \\
f(x_{13}) &= f_6 + f_{12} + f_{13} + f_{14} & \geq 1 \\
f(x_{14}) &= f_9 + f_{13} + f_{14} & \geq 1 \quad (4)
\end{aligned}$$

4. Sonuçlar

Yapılan analizler sonucunda 9-baralı IEEE test sistemi için sonuçlar Tablo 1’de gösterilmiştir. Analiz sonuçlar Basit Doğrusal Programlama (Simplex LP) metodu ile 0.063 saniyede 15 iterasyon sonucunda elde edilmiştir.

Name	Original Value	Final Value	Integer
Values: x1	1	0	Integer
Values: x2	1	0	Integer
Values: x3	1	1	Integer
Values: x4	1	1	Integer
Values: x5	1	0	Integer
Values: x6	1	0	Integer
Values: x7	1	1	Integer
Values: x8	1	0	Integer
Values: x9	1	0	Integer

Tablo 1: 9- Baralı IEEE Test Sistemi için Sonuçlar

Tabloya göre 3,4 ve 7 numaralı baralara FÖB’ler yerleştirildiğinde sistem tam olarak gözlemlenebilir olmaktadır.

14-baralı IEEE test sisteminde ise 0.094 saniyede, 18 iterasyon sonucu Bassit Doğrusal Programlama ile Tablo 2’deki sonuçlara ulaşılmıştır.

Name	Original Value	Final Value	Integer
Values: x1	1	0	Integer
Values: x2	1	1	Integer
Values: x3	1	0	Integer
Values: x4	1	0	Integer
Values: x5	1	0	Integer
Values: x6	1	1	Integer
Values: x7	1	1	Integer
Values: x8	1	0	Integer
Values: x9	1	1	Integer
Values: x10	1	0	Integer
Values: x11	1	0	Integer
Values: x12	1	0	Integer
Values: x13	1	0	Integer
Values: x14	1	0	Integer

Tablo 2: 14- Baralı IEEE Test Sistemi için Sonuçlar

Tablo 2’deki sonuçlara göre 14-baralı IEEE test sisteminin tamamen gözlemlenebilir yapmak 2,6,7 ve 9 numaralı baralara FÖB’leri yerleştirmek yeterlidir. Çalışma da geliştirilen matematiksel model ile 9 ve 14-baralı IEEE test sistemlerinde az sayıda FÖB kullanılarak sistemin tamamen gözlemlenebilmesi başarıyla sağlanmıştır. Bu analiz

yöntemi kullanılarak diğer iletim/dağıtım sistemlerinde kolayca uygulanabilmesi mümkündür.

5. Kaynaklar

- [1] 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.
- [2] Rani G. Sandhya, "Optimal PMU Placement Using Lineer Integer Programming Technique" IJISET – International Journal of Innovative Science, Engineerin & Technology, Vol. 2 Issue 4, April 2015.
- [3] İpek, M.A.M , "Elektrik Güç Sistemlerinde Geniş Alan Ölçüm Sistemi ve Fazör Ölçüm Birimi Yerleşiminin İncelemesi", Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 5-20, (2008).
- [4] Paudel, Jyoti, "Phasor Measurement Unit Deployment Approach for Maximum Observability Considering Vulnerability Analysis"(2015). pp. 4.
- [5] K..Deebiga, A. Raqib Hussain, "Optimal Placement of Phasor Measurement Unit for Better Power System Observability", TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering, Vol. 14, No. 2, May 15
- [6] Ganga Reddy Tankasala, Sridhar Sanisetty, Varun Kumar Vala, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units for State Estimation using Artificial Intelligence Techniques", International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 3, Issue 2, February-2012 1 ISSN 2229-5518
- [7] Bei Xu., Yoon, Y.J. ,A. Abur "Optimal Placement and Utilization of Phasor Measurement for State Estimation" Power Systems Engineering Research Center, October 2005, Pserc Publication 05-58.