

İkili Tam Sayılı Lineer Programlama Kullanılarak SCADA Ölçümleri İçeren Sistemlere Optimum Fazör Ölçüm Ünitesi Yerleştirme Metodu

Optimal Phasor Measurement Unit Placement Method for Systems Having Already Installed SCADA Measurements Using Binary Integer Linear Programming

Murat Göl¹, Bulut Ertürk²

¹ODTÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
mgol@metu.edu.tr

²ODTÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
buluterturk@metu.edu.tr

Özet

Güç Sistemlerinde Fazör Ölçüm Üniteleri (FÖÜ) kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu cihazların kurulumunu kullanıcıya maliyet getirdiğinden, sistem gözlemlenebilirliğini en az yatırım maliyetiyle sağlamak, son derece önemlidir. Bu bildiriye ikili tam sayılı lineer programlamaya dayalı optimum FÖÜ yerleştirme yöntemi ayrıntılı olarak anlatılmaktadır. Önerilen yöntem, literatürdeki benzer çalışmalara göre optimum FÖÜ yerleştirme sürecini daha basit bir şekilde ifade etmeyi amaçlamıştır. Bahsi geçen problemde hat tipi FÖÜler kullanılmıştır. Önerilen yöntemde, sistemde hali hazırda bulunan SCADA ölçümlerinden yararlanılmıştır. Gözlemlenebilirlik analizi sonucu elde edilen sınır baralar, daha sonrasında süper baralara çevrilerek optimizasyon probleminin boyutu düşürülmüştür. Önerilen yöntem, örnek sistem üzerinde açıklanmış ve test edilerek sonuçlara ulaşılmıştır.

Abstract

Employment of PMUs (Phasor Measurement Units) gradually increase in power systems. Since the installation of these devices result in investment cost for the user, it is extremely important to provide system observability at the minimum investment cost. In this paper, optimal PMU placement method based on binary integer linear programming is explained in detail. Proposed method aims to express optimal PMU placement process simpler compared to other studies in the literature. In the regarding problem, branch type PMUs were employed. In the proposed method, already installed SCADA measurements in the system were taken into account as well. Boundary buses which were obtained after the observability analysis is performed, were reduced to super buses in order to reduce the size of the optimization problem. Proposed method was explained on a sample system and were also tested in a systems in order to obtain conclusions.

1. Giriş

Güç sistemlerinin normal koşullarda çalışmasının sağlanması için sistemin anlık olarak izlenmesi kritik öneme sahiptir. Durum kestirimciler sistemin anlık

durumunun operatör tarafından bilinmesine olanak sağlar. Durum kestiriminin tek bir çözüme ulaşması ve sistemin o anki gerçek bara voltajlarını bulabilmesi için sistemin gözlemlenebilir olması gereklidir.

Modern güç sistemlerinde SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) ve FÖÜ (Fazör Ölçüm Ünitesi) ölçümleri olmak üzere iki tip ölçüm çeşidi vardır. SCADA ölçümleri güç akışı, güç enjeksiyonu, akım büyüklüğü ve gerilim büyüklüğü ölçümleridir. FÖÜ ölçümleri ise akım ve gerilim fazör ölçümleridir.

SCADA ölçüm verileri yaklaşık 2-6 saniyede bir yenilenirken günümüzde FÖÜ ölçümleri saniyede yaklaşık 60 ölçüm alabilmekte ve kontrol merkezine gönderebilmektedir. SCADA ölçümlerini kullanarak güç sisteminin durumunu belirlerken bir referans bara atamak gereklidir. Belirlenen referans baranın faz açısı 0 kabul edilmekte ve diğer bara faz açıları bu değere göre bulunabilmektedir. FÖÜ ölçümleri ise GPS (Global Positioning System) kullanarak GPS saatiyle senkronize bir şekilde veri göndermekte ve elde edilen fazörler aynı referans sinyaline göre değerlendirilmektedir. Bu durum referans bara atama gerekliliğini ortadan kaldırmaktadır. Hem daha hızlı ölçüm alması hem de referans bara atanma gerekliliğini ortadan kaldırması, FÖÜ kullanımını cazip hale getirmektedir.

Fazör ölçüm üniteleri Phadke ve Thorp tarafından 1988 yılında [1,2] geliştirilmiştir. SCADA sistemlerine göre yukarıda bahsedilen üstünlüklerinden ötürü zamanla dünyanın değişik yerlerindeki sistem operatörleri tarafından yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum da FÖÜ yatırım maliyetinin endüstrideki şirketler tarafından incelenmesine neden olmuştur. Yapılan yatırımın en az maliyette sistem gözlemlenebilirliğini sağlaması gereklidir. FÖÜ yerleştirme maliyetini en aza indirmeye yönelik literatürde birçok çalışma bulunmaktadır.

İlk olarak [3] numaralı makalede grafik teorisi kullanarak FÖÜ yerleştirme yapılmış, [4] numaralı makalede ise lineer programlama yöntemiyle yerleştirme

yapılmıştır. Bu iki makalede de boş sisteme yerleştirme yapılmış ve sistemde bulunan SCADA ölçümleri dikkate alınmamıştır.

[5] numaralı makalede SCADA ölçümleri dikkate alınsa da FÖÜ'lerin sonsuz sayıda kanala sahip olduğu varsayımı yapılmıştır. [6] numaralı makalede lineer programlamayla hat tipi FÖÜ kullanılarak, [7] ve [8] numaralı makalelerde ise kanal limiti kullanılan FÖÜler kullanılarak yerleştirme yapılsa da SCADA ölçümler probleme dahil edilmemiştir. Bu yaklaşım hali hazırda SCADA ölçümleri bulunduran bir sistem için pratikte yüksek maliyetlere yol açmaktadır.

İkili tam sayılı lineer programlama kullanarak FÖÜ yerleştirme çalışması [9] ve [10] numaralı makalelerde incelenmiştir. Buna rağmen, önerilen metotları uygulamak özellikle büyük sistemler için zahmetlidir.

Bu bildirinin amacı, FÖÜ yerleştirme problemini daha basit ve daha verimli bir şekilde ifade etmektir. İkili tam sayılı programlama kullanılmış ve [6] numaralı makalede sunulan yöntem SCADA sistemlerini de içerecek şekilde genişletilmiştir. Bu modellemede endüstride yaygın bir şekilde kullanıldığından hat tipi FÖÜler kullanılmıştır.

Bu bildiride 2.bölümde baz alınarak geliştirilen metot anlatılmakta, 3.bölümde önerilen metot anlatılmakta, 4.bölümde örnek bir sisteme uygulaması gösterilmekte, 5.bölümde simülasyon sonuçları verilmekte ve 6.bölümde sonuç kısmı yer almaktadır.

2. İkili Tam Sayılı Lineer Programlamayla FÖÜ Yerleştirme Yöntemi [6]

Geleneksel ölçüm cihazı ve sıfır enjeksiyon barası (hiçbir yükün ya da üreticinin bağlı olmadığı bara) bulunmayan, N bara ve L tane hat içeren bir sistemde, FÖÜ yerleştirme problemi ikili tam sayılı lineer programlama problemi olarak aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir. Bu tanımlamada FÖÜ'nün bir kanala sahip olduğu (hat tipi) yani bağlı olduğu bara voltaj fazörü ve baraya bağlı bir hattın akım fazörünü ölçme kabiliyetinde olduğu kabul edilmiştir. Bu problem çözülürken sistem topolojisinin ve hat empedanslarının tamamen bilindiği varsayılmıştır.

$$\begin{aligned} \min c^T x \\ \text{s.t. } AX \geq b \end{aligned} \quad (1)$$

1) Maliyet vektörü [c] (L×1): Bu vektörün k'inci elemanı, k numaralı baraya tesis edilecek FÖÜ'nün maliyetini göstermektedir. Eğer, FÖÜ yerleştirme maliyeti bütün baralarda aynı ise c'nin bütün elemanları 1'e eşittir. Maliyetlerde değişiklik söz konusu ise, c'nin elemanları maliyetlerle orantılı bir şekilde seçilir. Sistemde halihazırda tesis edilmiş bir FÖÜ varsa, maliyeti 0 olarak atanır.

2) İkili çözüm vektörü [x] (L×1): Bu vektör problemin çözümünde elde edilen, 1'ler ve 0'lardan oluşan vektördür. Eğer k'inci eleman 1 ise, denk gelen baraya FÖÜ yerleştirilecektir, aksi halde bu eleman 0 olacaktır.

3) İkili bağlantı matrisi [A] (N×L):

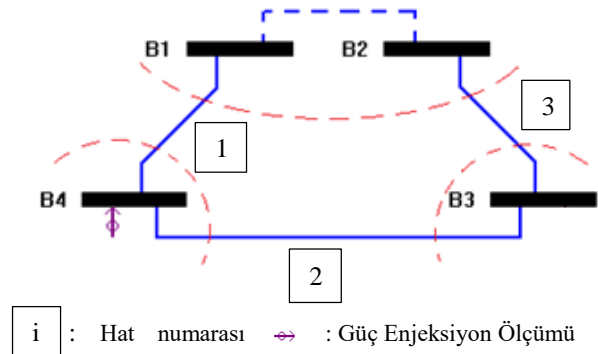
$$A_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ Hat - j ile Bara - i birbirine bağlı} \\ 0, \text{ aksi takdirde} \end{cases} \quad (2)$$

4) Endeks vektörü [b] (N×1): Bu vektör her bir baradan alınması gereken minimum sayıdaki gözlem sayısını ifade etmektedir. Gözlemlenebilirliğin sağlanması için bu sayı her bara için 1'dir.

3. Önerilen FÖÜ Yerleştirme Yöntemi

Önerilen yöntem ikili tam sayılı lineer programlamaya dayanmakta ve var olan SCADA ölçümlerini problemin içine dahil etmektedir. Bu yöntem, ilk önce gözlemlenebilirlik analizi yapmaktadır. Bu analiz sonucu gözlemlenemeyen hatlar bulunmakta ve bu hatlara komşu baralar belirlenmektedir. Bu baralara sınır baraları denilmektedir. Gözlemlenemeyen hatlara komşu baralar aynı gözlemlenebilir ada içerisindeyse bu baralar süper düğüm olarak adlandırılmaktadır. Bu baralarda güç enjeksiyon ölçümü bulunuyorsa bu ölçümler FÖÜ yerleştirme yöntemine dahil edilmektedir.

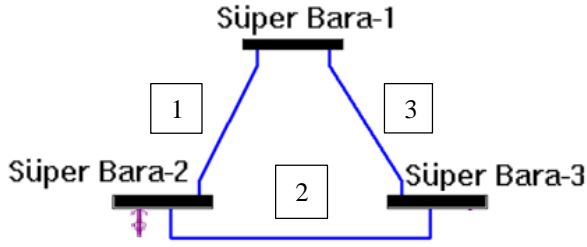
Şekil 1'de sınır baralar kullanılarak küçültülmüş sistem modeli gösterilmektedir. Sınır baraları gösterilmiş fakat sistemdeki diğer baralar gözlemlenemeyen hatlara komşu olmadıklarından probleme dahil edilmemişlerdir. Aynı gözlemlenebilir adaya ait olan B1 ve B2 baraları sanal bir hatla birbirine bağlanmıştır çünkü bu baraların aynı gözlemlenebilir adaya ait olmaları, bu baraların birbirlerine göre olan gerilim büyüklüğü ve faz açısı farklarının hesaplanmasını mümkün kılmaktadır.



Şekil 1. Sınır Baralarını İçeren Küçültülmüş Sistem Modeli

Giriş kısmında belirtildiği üzere bu bildiride hat tipi FÖÜler kullanılmakta ve bu durum her bir sınır barasının

ayrı ayrı gösterilmesinin önüne geçerek gözlemlenebilir adaları bir tane süper bara şeklinde göstermeye olanak sağlamaktadır. Şekil 2’de bu sistemin basitleştirilmiş hali gösterilmektedir.



Şekil 2. Basitleştirilmiş Sistem Modeli

Şekil 2’de görüldüğü gibi, güç enjeksiyon ölçümü probleme dahil edilmiştir çünkü enjeksiyon ölçümleri eğer sınır barasında bulunuyorsa FÖÜ yerleştirme sırasında yerleştiren FÖÜ sayısını azaltıcı etki yapabilmektedir. Eğer hatlardaki akımlardan yalnızca biri bilinmiyorsa var olan güç enjeksiyon ölçümü bilgisi kullanılarak Kirchhoff Akım Yasası yardımıyla kalan hattaki akım bulunabilmektedir. Bundan dolayı, sınır baralarında bulunan güç enjeksiyon ölçümleri, gözlemlenebilirliğin sağlanması için yerleştirilen FÖÜ sayısını azaltabilmektedir. Buradan çıkarılabileceği üzere, güç enjeksiyon ölçümleri yalnızca bir baranın gerilimi için bilgi sağlayabilmektedir. Güç akış ölçümleri gözlemlenebilirlik analizi esnasında hesaba daha önce katıldığından küçültülmüş modelde etkisinin incelenmesine gerek yoktur. Sıfır enjeksiyon baraları da güç enjeksiyon baralarıyla aynı şekilde değerlendirilmektedir. Yukarıda ifade edilen bilgiler hesaba katıldığında önerilen yöntem aşağıdaki gibidir:

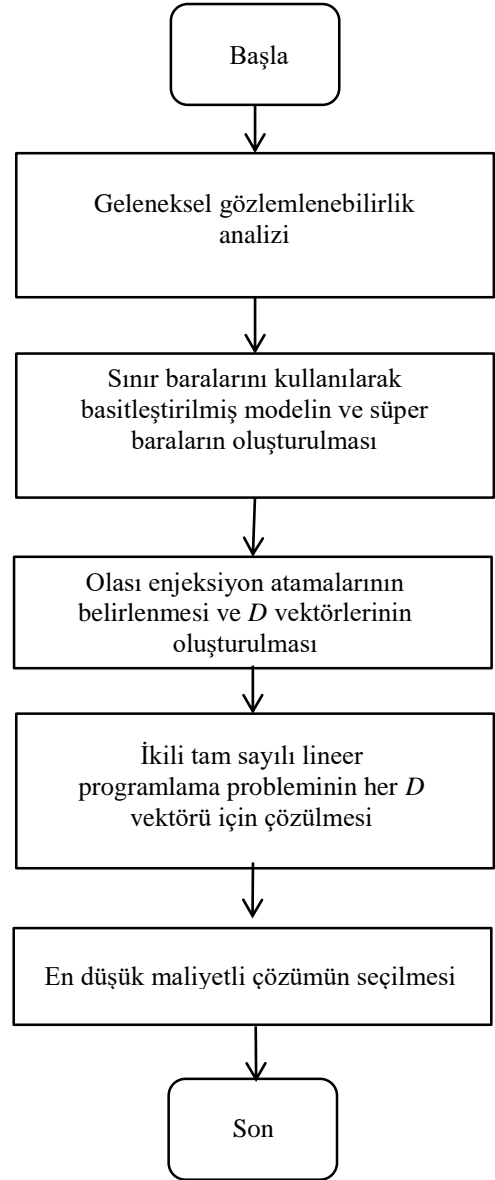
$$\begin{aligned} \min c^T x \\ \text{s.t. } D + AX \geq b \end{aligned} \quad (3)$$

(1)’de verilen A, b, c, ve x matris ve vektörleri daha önce tanımlanmışken, probleme yeni bir D vektörü ($N \times 1$) eklenmiştir.

Enjeksiyon ölçümü atama vektörü [D]: Bu vektör, sınır enjeksiyon ölçümüne ait olası atamalardan birini gösterecektir. Enjeksiyon ölçümü atan baralara denk gelen elemanlar 1’e eşitlenirken, kalanlar 0 olacaktır. Her bir atama olasılığı için farklı bir D vektörü kurulacak ve problem her bir D için tekrar çözülecektir. Enjeksiyon ölçümü atama vektörünün atanabileceği baralar, bağlı olduğu bara ve komşu olduğu diğer baralardır.

Birden çok olası D vektörünün olması, (3)’te gösterilen optimizasyon probleminin her bir D vektörü için ayrı ayrı çözümlerini gerektirmektedir. Her bir çözüm için ayrı bir ikili çözüm vektörü (x) elde edilecektir. Elde edilen çözümler arasından en düşük maliyetli çözüm seçilerek minimum maliyetle güç

sisteminin gözlemlenebilirliği sağlanacaktır. Önerilen yöntemin akış şeması Şekil 3’te gösterilmektedir.

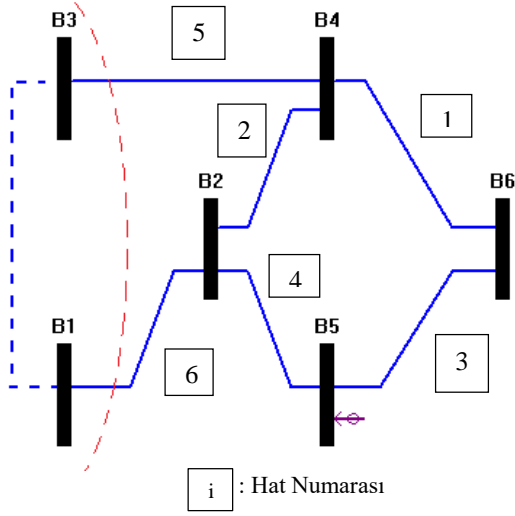


Şekil 3. Önerilen Yöntemin Akış Şeması

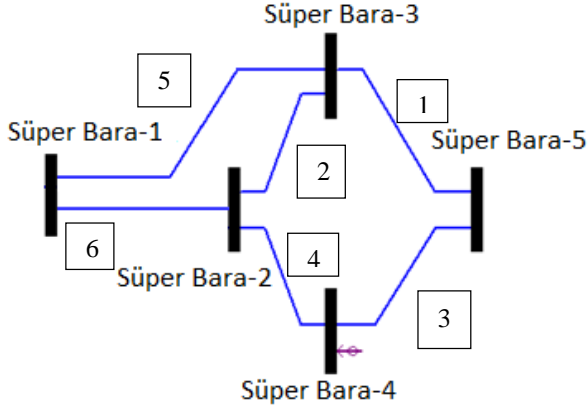
4. Önerilen FÖÜ Yerleştirme Yönteminin Örnek Bir Sistemde Uygulanması

Şekil 4’te 6 sınır baralı bir örnek sistem gösterilmektedir. Önerilen yöntem, SCADA ölçümleri içeren ilgili güç sistemini gözlemlenebilir hale getirmek için FÖÜ yerleştirme yapmak için uygulanacaktır. Şekil 4’te görüldüğü gibi, B1 ve B3 aynı gözlemlenebilir adada bulunmaktadır. Bundan dolayı, iki bara arasındaki faz açısı farkı aynı referansa göre bilinmektedir. Bundan dolayı, bu baralar tek bir süper bara şeklinde

gösterilebilir. Şekil 5'te süper baralardan oluşan sistem gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Sınır baralı örnek sistem



Şekil 5. Süper baralardan oluşan örnek sistem

Şekil 5'te gösterilen örnek sistem (3)'te formüle edilecektir. Burada elde edilen matrisler aşağıdaki gibidir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$c = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \quad (5)$$

$$D_1 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (6)$$

$$D_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T \quad (7)$$

$$D_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (8)$$

Geliştirilen FÖÜ yerleştirme problemi her üç D vektörü için çözüldüğünde D_2 için üç FÖÜ yerleştirilmesi gerektiği sonucu çıkarken D_1 ve D_3 için iki FÖÜ yerleştirilmesi gerekmektedir. Maliyet daha düşük olduğu için D_1 ve D_3 için elde edilen çözümler optimum çözümlerdir. D_1 ve D_3 için elde edilen ikili çözüm vektörleri aşağıdaki gibidir.

$$x_1 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]^T \quad (9)$$

$$x_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]^T \quad (10)$$

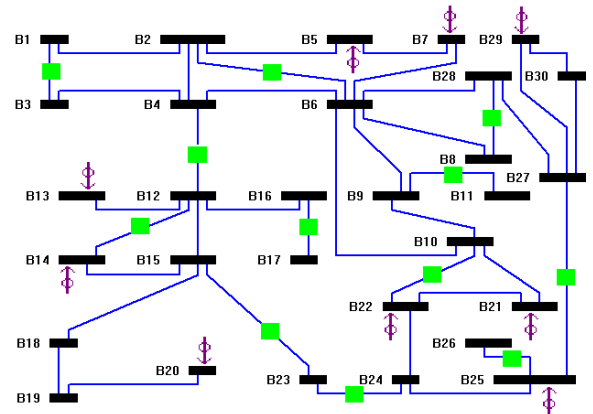
Bu sonuçlara göre, 3 ve 5 veya 4 ve 5 nolu hatlara hat tipi FÖÜ yerleştirilirse sistem gözlemlenebilir hale gelmektedir.

5. Önerilen Yöntemin Test Sistemine Uygulanması

Önerilen yöntem, Şekil 6'da gösterilen IEEE 30 baralık sisteme uygulanmıştır ve sistem gözlemlenebilirliği yerleştirilen FÖÜler yardımıyla sağlanmıştır. Bu sistemde 2, 16, 18 ve 27 numaralı baralar sıfır enjeksiyon baralarıdır. Elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmektedir.

FÖÜ numarası	Yerleştirildiği Hat
1	B6-B9
2	B6-B10
3	B6-B28
4	B18-B19
5	B27-B29

Tablo1. IEEE30 Bara Sistemi için Optimum Hat Tipi FÖÜ Noktaları



Şekil 6. IEEE 30 Baralık Güç Sistemi

↔ : Güç Enjeksiyon Ölçümü
■ : Güç Akışı Ölçümü

6. Sonuçlar

Bu bildiri de ikili tam sayılı lineer programlamaya dayalı optimum FÖÜ yerleştirme yöntemi geliştirilmiştir. Önerilen yöntem literatürdeki yöntemlere göre uygulama açısından kolaylık sağlamaktadır.

Önerilen yöntem, şebekede bulunan güç akışı ve güç enjeksiyonu ölçümlerini FÖÜ yerleştirme problemine dahil etmekte ve FÖÜ yerleştirme sürecinde maliyeti en aza indirmeyi hedeflemektedir. Bu süreçte gözlemlenebilirlik analizi kullanılmakta ve gözlemlenebilir adalar daha basit bir şekilde ifade edilerek süper bara olarak ifade edilmektedir. Bu ifade optimizasyon problemlerinin boyutunu düşürmüş ve yöntemin uygulanmasını basitleştirilmiştir.

Uygulanan yöntem, günümüzdeki güç sistemlerine uygulanabilir bir yöntemdir ve yapılan testlerde sistem gözlenebilirliği açısından olumlu sonuçlar alınmıştır.

Bu bildiri, bazı farklılıklar içerse de bu bildirinin yazarları tarafından [11]'de İngilizce olarak sunulmuştur.

7. Teřekkür

Bu alışma TÜBİTAK tarafından 115E402 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

8. Kaynaklar

- [1] G. Phadke, J. S. Thorp, K. J. Karimi, "State estimation with phasor measurements," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 1, no. 1, pp. 233-241, February 1986.
- [2] G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," IEEE Computer Applications in Power, vol. 6, issue 2, pp. 10-15, April 1993.
- [3] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen, R. Adapa, "Power system observability with minimal phasor measurement placement," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 8, no. 2, pp. 707-715, May 1993.
- [4] B. Xu, A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs," Proc. 2004 IEEE Power Eng. Soc. Conf. & Expo., New York, vol. 2, pp. 943-946, October 1013, 2004.
- [5] Bei Gou, "Optimal Placement of PMUs by Integer Linear Programming", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 23 (3), pp. 1525 – 1526, Aug, 2008.
- [6] Emami, R.; Abur, A., "Robust Measurement Design by Placing Synchronized Phasor Measurements on Network Branches," in Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems, vol.25, no.1, pp.38-43, Feb. 2010
- [7] M. Korkali and A. Abur, "Placement of PMUs with channel limits," IEEE PES General Meeting, 2009.
- [8] M. Korkali and A. Abur, "Impact of network sparsity on strategic placement of phasor measurement units with fixed channel capacity," IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2010, pp. 3445–3448.
- [9] Azizi, S.; Gharehpetian, G.B.; Dobakhshari, A.S., "Optimal Integration of Phasor Measurement Units in Power Systems Considering Conventional Measurements," IEEE Transactions on Smart Grid, vol.4, no.2, pp.1113-1121, June 2013

- [10] S. Billakanti and C. Venkaiah, "An effective binary integer linear programmed approach for optimal placement of PMUs in power systems," Smart Electric Grid (ISEG), 2014 International Conference on, Guntur, 2014, pp. 1-8.
- [11] B. Ertürk, M. Göl "Binary Integer Programming Based PMU Placement in the Presence of Conventional Measurements", ISGT – Europe, Ekim 2016, Slovenya.