

OPTİMAL GÜÇ AKIŞI ÇÖZÜMLERİNDE LİNEER PROGRAMLAMA ve İÇ NOKTA ALGORİTMASI YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Rengin İdil CABADAĞ, Belgin Emre TÜRKAY, Abdullah TUNÇ

İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi,
Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul
rengincabadag@gmail.com, turkayb@itu.edu.tr, atunc87@gmail.com

ÖZET

Güç sistemleri göz önüne alındığında, düşük maliyetle yük talebinin karşılanması için minimum maliyetle üretim yapılması önemlidir. Üretim maliyetinin minimize edilmesi, Optimal Güç Akışı (OGA) probleminin amaç fonksiyonlarından bir tanesidir. Kısıtlamalar ve koşullar dikkate alınarak formüle edilen OGA probleminin çözümü ile amaç fonksiyonunun minimum değeri ve bu değere ulaşabilmek için uygun olan çalışma koşulları belirlenir. OGA problemi çözümüne lineer veya lineer olmayan çeşitli programlama teknikleriyle ulaşılabilir. Bu çalışmada yaygın kullanımı ve daha doğru sonuçlar vermesi bakımından geleneksel yöntemlerden ayrılan Lineer Programlama (LP) ve İç Nokta Algoritması (İNA) üzerinde durulmuştur. MATPOWER'da geliştirilen yazılımlarla IEEE'nin 9,14,24,30 ve 57 baralı test sistemleri LP ve İNA yöntemleriyle çözümlenmiş, sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optimal Güç Akışı, Lineer Programlama, İç Nokta Algoritması, MATPOWER

1. GİRİŞ

OGA, elektrik güç sistemlerinin belirlenen amaç çerçevesinde iyileştirilmesi, bu sistemlerin daha verimli çalışma koşullarına ulaşabilmesi ve gelecekte kurulacak olan sistemlerin doğru planlanması için önemlidir. Ayrıca OGA, elektrik kullanıcıları için enerji sistemlerinin daha güvenli ve ekonomik çalışma koşullarının önceden belirlenmesine de yardımcı olur. [1]

OGA ile ilgili ilk çalışmalar Carpentier tarafından 1962 yılında yapılmıştır ve günümüzde kullanılabilen başarılı bir algoritma haline dönüşmesi uzun zaman almıştır. OGA problemi, lambda iterasyon yöntemi, Newton yöntemi, Gradyent yöntem, lineer programlama ve iç nokta algoritması gibi geleneksel yöntemlerle çözülebilmektedir [2].

Matematiksel olarak OGA problemi, belirlenen amaç fonksiyonu ve koşullar altında formüle edilir [3].

Genel olarak OGA, normal işletme koşullarında, güç akışı sonuçlarını işletme limitleri içerisinde tutarak minimum üretim

maliyetini karşılamak amacıyla kullanılır. OGA problemi amaç fonksiyonu, üretim maliyetini minimize etmenin yanında başka formlarda da karşımıza çıkabilir: İletim hattı kayıplarını minimize etmek ve gerilim profilini kabul edilebilir limitler için de tutmak da amaçlardan biri olabilir [4]. Böylece enerji sistemi güç akışı eşitlikleri ve belirlenen sınırlamalar altında hat kayıplarını minimum yapan kontrol değişkenleri hesaplanır [5].

Bu çalışmada, IEEE'nin 9, 14, 24, 30 ve 57 baralı test sistemlerine günümüzde kullanımı yaygın olan OGA problemi çözüm yöntemlerinden lineer programlama ve iç nokta algoritması uygulanarak sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Yapılan optimizasyon neticesinde, iç nokta algoritması ve lineer programlama yöntemlerinin yakınsama süresine, maliyete ve kayıplara olan etkisi kıyaslanmıştır. Analizler yapılırken OGA problemini çözebilmek için MATPOWER programında geliştirilen yazılımlar kullanılmıştır.

2. OPTİMAL GÜÇ AKIŞI (OGA)

Yapılan çalışmalarda, optimal güç akışı problemi sınırlı ve lineer olmayan bir optimizasyon problemi olarak formüle edilmiştir. OGA problemini çözmek için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. OGA'nın amacı bir dizi eşitlik ve eşitsizlik sınır denklemini sağlayan amaç fonksiyonunu optimize etmektir [6].

amaç fonksiyonu (minimizasyon): $f(x,u)$

sınır koşulları: $g(x,u) = 0$

$$h(x,u) \leq 0$$

$f(x,u)$, minimum değeri bulunmak istenen amaç fonksiyonudur. $g(x,u)$ güç/yük akışı eşitliklerini göstermekte olup $h(x,u)$ ise güvenlik limit değerlerini temsil etmektedir. x ve u sırasıyla durum ve kontrol değişkenlerini göstermektedir [7]. Enerji sistemlerindeki kontrol değişkenleri, salınım barası hariç diğer generatör baralarının aktif çıkış güçleri, generatör baralarının gerilim genlik değerleri, transformatör kademe değerleri ve şönt kapasite değerleridir [8].

Tüm enerji sisteminin toplam üretim maliyeti aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır:

$$F_{maliyet} = F_m = \sum_{i=1}^N a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 \quad (1)$$

Sağlanması gereken generatör aktif güç, generatör reaktif güç, bara gerilim genlik, transformatör kademe değeri ve şönt kapasite limit değerleri aşağıda gösterilmiştir:

$$P_{gi} - P_{li} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{gi} - Q_{ci} - Q_{li} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0$$

$$i = 1 \dots N \quad (3)$$

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \quad i = 1 \dots N_g \quad (4)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max} \quad i = 1 \dots N_g \quad (5)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad i = 1 \dots N \quad (6)$$

$$T_i^{min} \leq T_i \leq T_i^{max} \quad i = 1 \dots N_T \quad (7)$$

$$Q_{ci}^{min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{max} \quad i = 1 \dots N_c \quad (8)$$

3. OGA PROBLEMİNİ ÇÖZMEK İÇİN KULLANILAN BAŞLICA YÖNTEMLER

Optimal güç akışı yöntemi ilk olarak Carpentier tarafından bulunmuştur. Bu yöntem, lineer olmayan çok büyük bir matematiksel programlama problemidir ve algoritmalar geliştirilerek bu problemin çözümü gerçekleştirilir. Bunun için, birbirinden farklı bir dizi matematiksel yöntem kullanılır. Literatürde kullanılan en önemli beş yöntem aşağıda verilmiştir:

- **Lambda Öteleme Yöntemi** - Eşit artan yakıt kriteri olarak da adlandırılır (EICC) (Wood ve Wollenberg, 1996). Kayıplar [B] matrisi ile gösterilir. Ekonomik dağıtım yöntemini temel alır.

- **Gradient Yöntemi** - Bağımlı kısıtlamalar için, penaltı fonksiyonlarını belirler (Dommel ve Tinney, 1968). Bu yöntem çok yavaş yakınsar ve eşitsizlikleri çözmek zordur.

- **Newton Yöntemi** - Çok hızlı yakınsayan bir yöntemdir. (Sun ve ark., 1984).

- **Lineer Programlama Yöntemi** - Lineer olmayan yakıt maliyeti eğrisinin doğru denklemleri haline getirilmesi ile çözüme ulaşılır (Alsac ve ark., 1990).

- **İç Nokta Algoritması Yöntemi** - Bu yöntemde eşitsizlik kısıtlamaları kolayca hesaplanabilir (Wu ve ark., 1993) [9].

Bu çalışmada daha doğru sonuçlar verdiği ve daha hızlı yakınsadığından dolayı OGA probleminin çözümü için Lineer Programlama ve İç Nokta Algoritması yöntemleri kullanılmıştır.

4. LİNEER PROGRAMLAMA (LP)

LP, lineer olmayan güç sistemi OGA problemini lineerleştirmek suretiyle çözme tekniğine dayanır. Yani amaç fonksiyonu ve sınır koşulları lineer bir form alır. LP problemlerini çözmeye simplex yöntemi etkin bir rol oynar [10].

LP tabanlı OGA'nın Avantajları:

- Optimizasyonun güvenilirliği
- Problemin çözülemeyeceğini hızlıca anlama kabiliyeti, dolayısıyla uygun stratejilerin ortaya konulabilmesi
- Acil durum koşullarını da kapsayan bir dizi birbiri ile uyumlu ve kolayca üstesinden gelenebilen işletme limitleri
- Kontrol değişkenlerinde küçük değişimler olduğu sürece, hızlı yakınsaması ve sonuçların kabul edilebilirliği [11]

5. İÇ NOKTA ALGORİTMASI (İNA)

Karmarkar tarafından yeniden gündeme getirilen bu yöntemin simplex yöntemle çözülen LP'ye göre daha hızlı yakınsadığı ve daha iyi bir performans sergilediği ileri sürülmüştür [12]. Dolayısıyla bu yöntem LP'ye yeni bir çözüm algoritması olarak ortaya çıkmıştır. Büyük ölçekli lineer programlama gerektiren OGA problemlerini çözmek için kullanılır. Bazı amaç fonksiyonlarının (sistem kayıplarının minimizasyonu) parçalı formda yazılmasından kaynaklanan sıkıntılar da İNA yöntemini daha avantajlı hale sokmuştur. Bu algoritmada kontrol değişkenleri ve durum değişkenleri tek bir x vektörü olarak ifade edilir. Sınır denklemleri de eşitlik ve eşitsizlik durumundaki denklemler olarak yazılır. Problemi çözümedeki ilk aşama, eşitsizlik durumundaki sınır denklemlerini gevşek değişken ekleyerek eşitlik haline getirmektir. Logaritmik bariyer fonksiyonu amaç fonksiyonuna eklenir ve amaç fonksiyonu Lagrange formda yazılır. Lagrange fonksiyonunun gradyenti sıfıra eşitlenir. Lineer olmayan eşitlikler iteratif

olarak Newton Yöntemi ile çözülür ve bariyer parametresi sıfıra ayarlanır [13].

6. TEST SİSTEMİ VERİLERİ

Bu çalışmada IEEE'nin 9, 14, 24, 30 ve 57 baralı standart test sistemleri kullanılmıştır. Bu beş sistemden ilk ikisi (9 ve 14 baralı sistemler) küçük boyutlu sistemler ve diğerleri ise (24,30 ve 57 baralı sistemler) daha karmaşık sistemler olarak düşünülmüştür.

Tablo.1 Test sistemleriyle ilgili veriler [14]

| Test Sistemi Verileri | | | | | |
|-----------------------|------|----|-----|-------------|-------------|
| Bara Sayısı | Bara | | | Yük | |
| | PV | PQ | Hat | ΣPd | ΣQd |
| 9 | 2 | 6 | 9 | 315 | 115 |
| 14 | 4 | 9 | 20 | 259 | 73.5 |
| 24 | 10 | 13 | 38 | 2850 | 580 |
| 30 | 5 | 24 | 41 | 283.4 | 126.2 |
| 57 | 6 | 50 | 80 | 1251 | 336 |

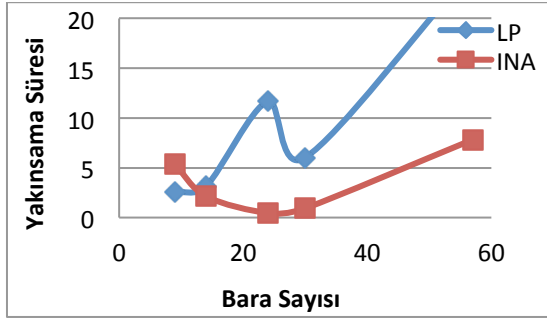
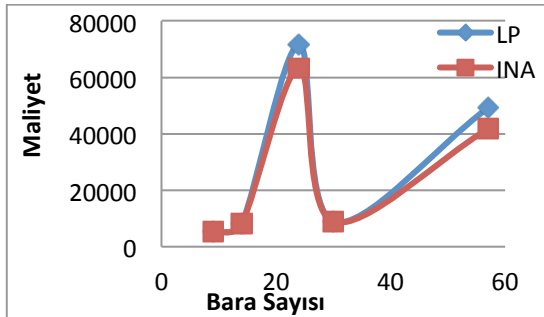
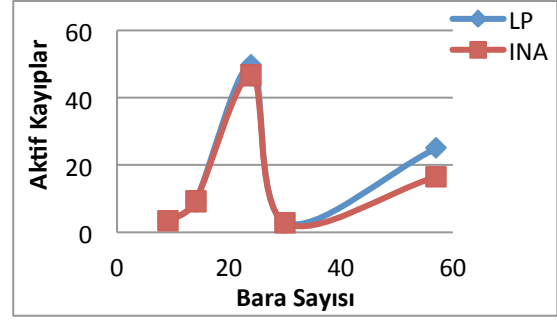
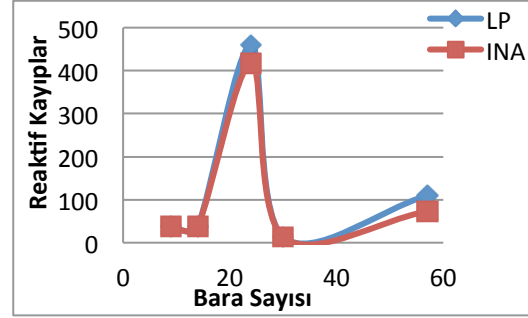
Tablo.1

7. SONUÇ

Yukarıda bahsedilen bilgiler ışığında, seçilen test sistemlerinin her birine sırasıyla iç nokta algoritması ve lineer programlama yöntemleri uygulanmıştır. Yöntemler uygulanırken basit sistemlerden karmaşık sistemlere doğru gidilmiş, amaç fonksiyonunun aldığı değerler ve yakınsama süreleri karşılıklı olarak analiz edilmiştir. Dolayısıyla hangi yöntemin, hangi boyuttaki sistemi çözmeye diğerine göre daha üstün olduğu gösterilmeye çalışılmıştır.

Tablo.2 Simülasyon sonuçları

| Bara Sayısı | M | Süre [s] | Fm [\$sa] | Pk [MW] | Qk [MVar] |
|-------------|-----|----------|-----------|---------|-----------|
| 9 | İNA | 5.38 | 5296.69 | 3.307 | 36.46 |
| | LP | 2.61 | 5296.69 | 3.307 | 36.46 |
| 14 | İNA | 2.14 | 8081.53 | 9.287 | 39.16 |
| | LP | 3.14 | 8081.53 | 9.287 | 39.16 |
| 24 | İNA | 0.45 | 63352.2 | 46.766 | 416.6 |
| | LP | 11.67 | 71646.3 | 49.739 | 460.22 |
| 30 | İNA | 0.94 | 8906.15 | 2.86 | 13.33 |
| | LP | 6.03 | 8906.16 | 2.957 | 13.41 |
| 57 | İNA | 7.83 | 41737.8 | 16.513 | 72.97 |
| | LP | - | 49181.2 | 24.985 | 109.6 |

Tablo.2**Şekil.1.** LP ve İNA yöntemlerinin yakınsama süresine etkileri**Şekil.2.** LP ve İNP yöntemlerinin maliyete (amaç fonksiyonuna) etkileri**Şekil.3.** Aktif Kayıp Değişimleri**Şekil.4.** Reaktif Kayıp Değişimleri

Sonuç olarak, kullanılan yöntemlerin yakınsama süresine etkisi göz önüne alındığında sistem büyüdükçe (karmaşıklıklaştıkça) LP'nin İNA'ya göre daha fazla zorlandığı, yani OGA problemini daha uzun sürede çözdüğü gözlemlenmiştir. Amaç fonksiyonuna göre bir değerlendirme yapıldığında, yine İNA'nın daha avantajlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca İNA ile çözülen sistemlerde LP kullanılarak çözülen sistemlere göre aktif ve reaktif kayıplar daha az miktarda olmuştur. Özetle, yapılan çalışmada her iki yöntem yakınsama süresine etkisi, minimum maliyeti sağlaması ve kayıplara etkisi açısından kıyaslandığında İNA yönteminin LP'ye göre daha üstün olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

[1]Kaur H., Brar Y.S. and Randhawa J.S., *Optimal Power Flow Using Power World Simulator*, IEEE Electrical Power & Energy Conference , (2010)

[2]Sayah S., Zehar K., *Modified differential evolution algorithm for optimal power flow with non-smooth cost functions*, Energy conversion and management 49, s. 3036-3042, Algeria, (2008)

[3]Geidl M. and Anderson G., *Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 22, No.1, s. 145-155, February 2007

[4]Rajasekar N., Soravana Ilango G., Edward Belwin J. and Rajendra K., *A Novel Approach Using Particle Swarm Optimization Technique for Optimum Power Flow Problem with Reduced Control Variables*, Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol.37, ISSN 2070-3740, January 2009

[5]El-Hawary M. E. *Optimal Power Flow, Power System Stability and Control*, Chapter 20, s. 2-14, Dalhousie University, (2006)

[6]Huneault M. and Galiona F.D., *A Survey of the Optimal Power Flow Literature*, IEEE Trans. on Power Systems Vol.6, No.2, PWRS-6, s. 762-770, May 1991

[7]Pandya K.S., Joshi S.K., *A Survey of Optimal Power Flow Methods* , Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol.4, No.5 s. 450-458, India, 2005- 2008

[8]Ayan K., Kılıç U., *Optimal Reaktif Güç Akışının Kaotik Yapay Arı Kolonisi ile Çözümü*, Sakarya Üniversitesi, Sakarya (2011)

[9]Kurban M., *Türkiye'deki 22 Baralı 380 kV'luk Güç Sistemi İçin Ekonomik Dağıtım ve Optimal Güç Akışı Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Analizi*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, (2004)

[10]Casanova R. and Lopez G., *An LP-Based Optimal Power Flow for Transmission Losses and Generator Reactive Margins Minimization*, IEEE Porto Power Tech Conference, Member ZEEE, Porto, Portuga, 10th-13th September 2011

[11] Zhu J., *Optimization of Power System Operation*, IEEE Press on Power Engineering, A John Wiley&Sons INC., Publication, s. 315-317, 2009

[12]Momoh J. A, El-Hawary M.E. and Adapa R., *A Review of Selected Optimal Power Flow Literature to 1993 Part I: NonLinear and Quadratic Programming Approaches*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 1, s.96-98, February 1999

[13] Wood Allen J., Wollenberg B., *Optimal Power Flow, Power Generation Operation and Control*, A

Wiley-Interscience Publication, s. 551-553, New York, (1999)

[14] Zimmerman R.D. and Murillo-Sanchez C.E., *Matpower 4.0, User Manual*, 2010-2011 Power Systems Engineering Research Center (Pserc), Second Revision, March 14, 2011