

# ENERJİ DAĞITIM SİSTEMLERİNİN KONTROLÜNDE ORDİNAL OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI

Erkan ATMACA<sup>1</sup>

Didem ERSÖZ<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi,  
İstanbul Üniversitesi, 34320, Avcılar, İstanbul

<sup>1</sup>e-posta: erkana@istanbul.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: dideme@istanbul.edu.tr

## ÖZET

*Bu çalışmada enerji dağıtım sistemlerinin optimal kontrolünde Ordinal Optimizasyon (OO) kavramının kullanılabilirliği incelenmiştir. OO, geniş arama uzayına sahip bazı problemlerin çözümüne en doğru cevabı aramak yerine, yüksek olasılıklı yeterince iyi çözümü araştırma imkanı sağlar. Enerji dağıtım sistemlerinde kontrol, evrimsel araştırma teknikleri ile yakın optimal çözümün bulunabileceği bir problemdir. Bu makalede örnek bir dağıtım sistemi üzerinde yük altında kademe değiştirici (OLTC) ayarlamaları ve kapasitörlerin açık/kapalı durumlarına göre tüm olası sistem konfigürasyonları için düğüm gerilimleri ve güç kayıpları hesaplanmıştır. Tüm hesaplamalar klasik Newton-Raphson yük akışı algoritması ve OO yaklaşımı ile genetik algoritmaya dayanan yeni yük akışı algoritması ile yapılarak karşılaştırılmıştır. Her iki çözüm kümesine ait en iyi %1, %5 ve %10'luk altkümelerin uyum derecesi çok yüksektir, optimal çözümü bulma olasılığı ise iki durumda da neredeyse aynıdır. OO yaklaşımı toplam hesaplama zamanında da önemli ölçüde kazanç sağlar.*

*Anahtar sözcükler-Ordinal Optimizasyon (OO), Yük Altında Kademe Değiştirici (OLTC) , Optimal Kontrol, Enerji Dağıtım Sistemleri*

## I. GİRİŞ

Enerji dağıtım sistemlerindeki optimal kontrol stratejileri iki temel şekilde ifade edilebilir: Birincisi dağıtım sisteminde güvenilirlik ve yüksek performansa duyulan gereksinim, ikincisi ise yeni teknolojinin gelişimine bağlı olarak işletmelerin dağıtım şebekesini uzaktan kontrol imkanı. Her iki koşulda amaç güç kayıplarının minimize edilmesi ve gerilim profilinin değişken yüklenme koşullarında ayarlanmasıdır.

Enerji dağıtım sisteminde optimal kontrol problemi iki alt problemde incelenebilir. Birincisi, sistemdeki kapasitörlerin hangi büyüklükte olacağı ve nereye yerleştirileceğini belirleyerek değişken yüklenme koşulları altında OLTC ayarlarına ve kapasitörlerin anahtarlanmasına bağlı olarak optimal şebeke

konfigürasyonunun tasarımıdır. Diğer problem ise iki farklı şekilde ele alınan Volt/VAR kontrol problemidir: Gerçek zamanlı kontrol devamlı ölçümlere dayanır, teferruatlı cihaz ve yazılım kullanımı gereği vardır. Çevrimdışı kontrol de ise sistem konfigürasyonu, OLTC ayarları ve kapasitörlerin açık/kapalı durumu tahmini günlük yük ihtiyacına göre belirlenir.

OLTC ayarlanmasının asıl amacı sekonder bara gerilimlerini YG/OG yük merkezlerinde regüle ederek aynı zamanda güç kaybını azaltmaya katkıda bulunmaktadır. OG/AG yük merkezlerindeki kapasitörler ise reaktif yük akışını kontrol eder ve dolayısıyla güç kaybını azaltarak gerilim profilini düzenler.

Genellikle klasik optimizasyon teknikleri ile Volt/VAR kontrol problemini çözmek dağıtım sisteminin boyutları sebebiyle karmaşık ve zordur. Bu problem geniş arama uzayına sahip, değişkenleri trafo kademe oranları ve kapasitörlerin açık/kapalı durumları ve bağlantı anahtarlarının açık/kapalı pozisyonları olan ayrık çok amaçlı optimizasyon problemidir. Problemin büyüklüğü ve doğası gereği çözüm için genetik algoritma, tabu araştırması gibi buluşsal arama yöntemleri kullanılır [1-3].

Son yıllarda ki çalışmalarda ise bu yöntemler bulanık ve hücresel ağlar ile geliştirilmiştir [4-5].

Kullanılan tekniklerin tümü çok sayıda yük akışı tekrarını içeren yinelemeli bir prosedüre dayanır. Toplam hesaplama zamanı yük akışı tekrarı sayısına ve her bir tekrarın tamamlanma süresine göre belirlenir. Toplam hesaplama zamanını azaltmanın bir yolu, arama uzayını daraltarak yük akışı tekrar sayısını düşürmektir. Yük seviyelemeye bazı değişkenleri önceden belirlenmiş değişkenler olarak kabul etmek mümkündür. Bu sayede OLTC ayarlamaları, 24 saatlik günlük yük durumuna göre farklı yük seviyelerindeki tahmini değerler için düzenlenebilir [6]. Diğer taraftan referans [5]'de güç kaybı ve gerilim hassasiyet faktörü hangi kapasitörlerin anahtarlanacağına karar vermek için kullanılmıştır.

Bu çalışmada OO kavramının enerji dağıtım sisteminin optimal kontrol problemine

uygulanabilirliği araştırılmıştır. OO iki temele dayanır [7]: Birincisi problemin derecesini belirlemek, problemin cevabını belirlemekten daha kolay ve hızlıdır. Bir başka deyişle belirli sistem koşulları kümesindeki toplam güç kaybını belirlemek, o sistemin tümünün toplam güç kaybını belirlemekten daha kolaydır. İkincisi problemin amacını yumuşatmaktır. Bunun için tam çözümü araştırmak yerine yüksek olasılıklı yeterince iyi çözüm araştırılabilir. En iyi içindeki herhangi bir çözüm örneğin arama uzayının %1'lik altkümesi optimal çözüm olarak kabul edilebilir. Eğer arama uzayının kestirilmiş en iyi %1'lik altkümesi, tam çözümün en iyi %1'lik altkümesiyle hemen hemen örtüşüyorsa, optimal çözüm yaklaşık ve daha hızlı hesaplamalar ile araştırılabilir.

## II. METOD

### Güç Kayıpları ve Gerilim Sapmaları

Enerji kalitesinin yüksek olması için düğüm yükündeki gerilimin, istenilen değere olabildiğince yakın tutulması gerekmektedir. Bu nedenle o düğümüne bağlı tüm dallardan besleyici düğümüne giden kollarındaki toplam gerilim düşümü çok küçük olmalıdır:

$$\Delta V_i = \frac{1}{V} \sum_{j \in B_i} (P_j P_j + X_j Q_j)$$

$P_j, Q_j$ ; transformatör veya hattın  $j$ . dalındaki aktif ve reaktif güç akışı

$\Delta V_i$ ;  $i$ . düğümdeki gerilim düşümü

$V$ ; istenilen gerilim

$R_j, X_j$ ;  $j$ . daldaki direnç ve reaktans

$B_i$ ;  $i$ . düğümü OG besleme düğümüne bağlayan dalların kümesi

Besleyici şebeke üzerindeki toplam gerilim düşümü  $\Delta V_i$ , trafo reaktansı üzerindeki gerilim düşümüne göre belirlendiği için, tüm şebeke gerilimlerini üst ve alt limitlerinde tutmak için, trafonun sekonder gerilimini uygun değerinde tutmak yeterlidir. Primer taraf YG şebekesine bağlanır ve bu tüm yüklenme koşullarında hemen hemen aynıdır.

Güç kayıplarının en önemli iki bileşeni:

$$\Delta P_{tr} = \sum_{i=1}^{N_{tr}} R_i I_i^2$$

$$\Delta P_{line} = \sum_{j=1}^{N_B} R_j I_j^2$$

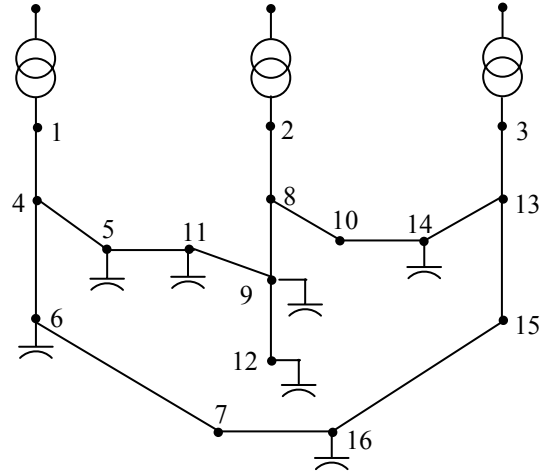
$$\Delta P = \Delta P_{tr} + \Delta P_{line}$$

Burada  $I_i, I_j, R_i$  ve  $R_j$ , dal akımları ve dirençleri;  $N_{tr}$  transformatörlerin sayısı,  $N_B$  ise hatların sayısıdır.

### Test Sistemi

Test amacıyla literatürde [8] sıkça rastlanan 115kV/23 kV'luk 16 düğüm, 3 transformatör ve 7 kapasitöre sahip bir sistem kullanılmıştır (Şekil 1).

Tablo 1'de sistem, yük ve kapasitörlerin bilgileri verilmiştir. Transformatör kademeleri %-8 ile %8 arasında %1'lik adımlarla değişmektedir. 5-11, 8-10, 10-14, 9-11 ve 7-16 düğümlerini birleştiren 5 adet bağlantı anahtarının var olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 1. Test sistemi

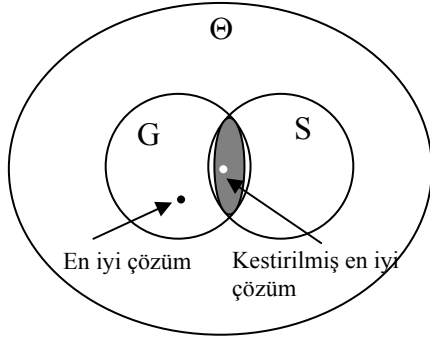
Tablo 1. Test sistemi verileri

| Bus  |    | Impedance (ohms) |        | Load at to bus (kVA) |      |      |
|------|----|------------------|--------|----------------------|------|------|
| From | To | R                | X      | P                    | Q    | Cap  |
| 1    | 4  | 0.3968           | 0.5290 | 2000                 | 1600 |      |
| 4    | 5  | 0.4232           | 0.5819 | 3000                 | 1500 | 1100 |
| 4    | 6  | 0.4761           | 0.9522 | 2000                 | 800  | 1200 |
| 6    | 7  | 0.2116           | 0.2116 | 1500                 | 1200 |      |
| 2    | 8  | 0.5819           | 0.5819 | 4000                 | 2700 |      |
| 8    | 9  | 0.5819           | 0.5819 | 5000                 | 3000 | 1200 |
| 8    | 10 | 0.4232           | 0.5819 | 1000                 | 900  |      |
| 9    | 11 | 0.5819           | 0.5819 | 600                  | 100  | 600  |
| 9    | 12 | 0.5819           | 0.5819 | 4500                 | 2000 | 3700 |
| 3    | 13 | 0.5819           | 0.5819 | 1000                 | 900  |      |
| 13   | 14 | 0.4761           | 0.6348 | 1000                 | 700  | 1800 |
| 13   | 15 | 0.2432           | 0.5819 | 1000                 | 900  |      |
| 15   | 16 | 0.2116           | 0.2116 | 2100                 | 1000 | 1800 |
| 5    | 11 | 0.2116           | 0.2116 |                      |      |      |
| 10   | 14 | 0.2116           | 0.2116 |                      |      |      |
| 7    | 16 | 0.4761           | 0.6348 |                      |      |      |

### Ordinal Optimizasyon

OO ilk olarak 1997 yılında Ho tarafından çalışılmıştır [8]. OO kavramı iki fikre dayandırılır: 1) Dereceyi belirlemek gerçek değeri belirlemekten daha kolaydır. Yani A'nın B'den büyük yada küçük olduğunu belirlemek, A ve B'nin ne olduğunu belirlemekten daha kolaydır. 2) Optimizasyonun amacını yumuşatmak problemi daha da kolaylaştırır. 'En iyi kesin' cevabı araştırmak yerine 'yüksek olasılıklı yeterince iyi' cevabı araştırmak önerilebilir. Örneğin çözüm arama uzayı  $\Theta$  olan bir problem gözönüne alınsın. Bu arama uzayının 'yeterince iyi' alt kümesi ilk %1'lik küme olarak tanımlanabilir,  $G/\Theta$ . Rasgele seçimlerden ya da tam hesaplanmış ve ya ölçülmüş

örneklerden oluşan küme ise ‘seçilmiş’ alt küme olsun, S/Θ. Uyum olasılığını arttırmak amacıyla arama uzayı Θ kümesinden S kümesine daraltılabilir (Şekil 2).



Şekil 3. Olası tüm çözümlerin kümesi

G kümesi, amaç fonksiyonu değerlerine göre bulunan çözümlerin ilk % m’lik kısmı olsun. N ise S kümesindeki toplam çözüm sayısı olarak kabul edilsin. Bu durumda seçilmiş çözümlerden en az bir tanesinin G kümesinin üyesi olma olasılığı şöyle ifade edilebilir:

$$P=1-(1-m)^N$$

P güvenilirlik derecesi ve m çözüm kalitesi olarak kabul edilirse bu ifadeden P güvenilirliğinde en iyi %m’lik kümeden en az bir çözümün bulunduğu minimum çözüm sayısı şöyle elde edilebilir:

$$N = \frac{\ln(1 - P)}{\ln(1 - m)}$$

Böylece yeterince iyi kümenin boyutu operatörden ve problemenden bağımsız olarak bulunabilir.

### Ordinal Optimizasyon Uygulaması

Sistem ağ şeklinde tasarlanmış fakat radyal-operated olduğundan bağlantı anahtarlarının pozisyonuna bağlı olarak  $2^5=32$  yerine toplam 17 farklı sistem konfigürasyonu mevcuttur.

Her bir transformatör için 17 tane olası OLTC ayarı söz konusu ise 3 adet transformatör için toplam  $(17)^3$  durum vardır. Pratikte önceden tahmin edilmiş OLTC ayarlarından başlanarak yeni çözümler bu ayarlar değiştirilerek araştırılır

Bu çalışmada ilk koşullar simülasyon ile belirlenmiştir. Verilen sistem konfigürasyonunda, yük faktöründe ve kompanzasyon olmadan transformatörün sekonder düğüm gerilimi 1.0 pu değerinde tutmak için gerekli kademe oranları hesaplanmıştır. OLTC ayarları ilk değerlerin  $\pm 1\%$ ’i civarında değiştirilerek arama uzayı daraltılmıştır. Aynı zamanda düğüm gerilimlerinin gerilim kısıtları gerçekleştirilmiştir :

$$V_{min} < V_i < V_{max} ; V_{min}=0.95 \text{ pu}; V_{max}=1.05 \text{ pu}$$

Problemin herhangi bir çözümü OLTC ayarlarına, kapasitörlerin açık/kapalı durumuna ve bağlantı anahtarlarının pozisyonunun tümüne birden bağlıdır. O halde  $N_{tap}$  OLTC ayar sayısı,  $N_{cap}$  kapasitörlerin sayısı ve  $N_{tie}$  bağlantı anahtarlarının sayısı olarak kabul edilirse teorik olarak  $(N_{tap})^{N_{tr}} \times 2^{N_{cap}} \times 2^{N_{tie}}$  olası çözüm vardır. Kalite indeksi olarak toplam güç kaybı alınabilir. Bu yüzden her bir transformatör için  $N_{tap}=3$  kabul edilecek olursa çözüm sayısı  $3^3 \times 2^7 \times 17=58752$  olur. Bu sayıda çözüm aşırı bellek kapasitesi gerektirir. Dolayısıyla test amacıyla sadece tek bir sistem konfigürasyonu için yaklaşık ve tam çözüm hesaplamaları, büyüklüğü  $3^3 \times 2^7 =3456$  olan yeni arama uzayında tekrarlanarak her iki çözümün en iyi %m’lik alt kümeleri incelenmiştir..

### III. BULGULAR

Yakınsama toleransı 0,01 MW yada  $1e-4$  kabul edilmiştir. Tam hesaplamalar için maksimum yineleme sayısı 20, yaklaşık hesaplamalar için 2 seçilmiştir.

Tablo 2’de 3456 çözümün en iyi %1, %5 ve %10’luk alt kümelerinin uyum dereceleri verilerek iki farklı sistem konfigürasyonunun 3 ayrı yüklenme koşulunda (%100, %70 ve %40) karşılaştırılmıştır. Tüm şebeke gerilimleri her iki yineleme sayısı için gerilim sınır koşullarını sağlamıştır ve tüm çözümlerin performans ölçütlerini sıralamak için kalite indeksi olarak toplam güç kayıpları kullanılmıştır. Tabloda uyum derecelerinin, sistem konfigürasyonu ve yük faktörlerine göre değiştiği görülmektedir.

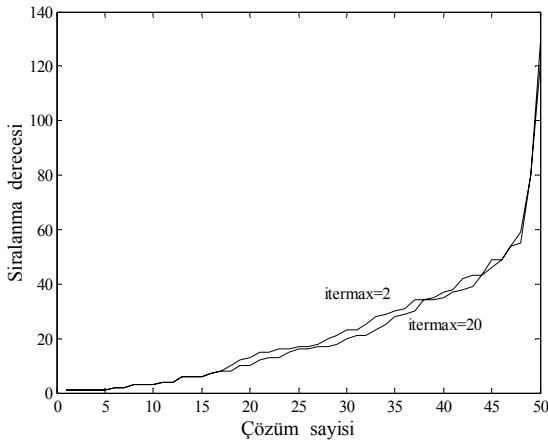
Tablo 2. Uyum dereceleri

| Yük Faktörü | (% ) m | Sistem konfg. # 1           |    | Sistem konfg. # 11          |    |
|-------------|--------|-----------------------------|----|-----------------------------|----|
|             |        | Rastlantısal çözüm sayıları | %  | Rastlantısal çözüm sayıları | %  |
| 1.0         | 1      | 31/35                       | 89 | 33/35                       | 95 |
|             | 5      | 156/173                     | 90 | 169/173                     | 98 |
|             | 10     | 313/346                     | 91 | 330/346                     | 95 |
| 0.7         | 1      | 25/35                       | 71 | 31/35                       | 89 |
|             | 5      | 133/173                     | 77 | 163/173                     | 94 |
|             | 10     | 270/346                     | 78 | 327/346                     | 95 |
| 0.4         | 1      | 18/35                       | 51 | 31/35                       | 89 |
|             | 5      | 99/173                      | 57 | 140/173                     | 81 |
|             | 10     | 202/346                     | 58 | 319/346                     | 92 |

Kullanılan yöntem genetik algoritma esas alınarak geliştirilmiş ve sonuçlar iyileştirilmiştir.

Toplam güç kaybını minimum tutmak amacıyla farklı yüklenme koşullarındaki OLTC’ leri uygun değerlere ayarlamak ve kapasitörlerin açık/kapalı durumlarını belirlemek için genetik algoritma kullanılarak kod geliştirilmiş ve PIII 600 MHz işlemcili kişisel bilgisayarda çalıştırılmıştır. MATLAB rutini yüklenme faktörü 1.0 olan 1 numaralı sistem konfigürasyonunda, 20 yinelemede 13.07 saniyede

yakınsamış ve 469 kW toplam güç kaybı üretilmiştir. 2 yineleme için ise 11.04 saniyede yakınsamış ve toplam 462 kW güç kaybı üretilmiştir. Hesaplama zamanında %16 oranında kazanç sağlanmıştır. İkinci test de kod, maksimum yineleme sayısı 20 ve 2 olmak üzere 50 kez gerçekleştirilmiştir. 20 yinelemede toplam hesaplama zamanı 649 saniye iken 2 yinelemede 545 saniyedir. İlk durumda kodun 40 kez koşulması ile performans ölçütü 3456 çözümün ilk %1'inde olan çözümler üretilirken ikinci durumda 39 kez koşulması ile aynı sonuç elde edilmiştir. Yani her iki yineleme durumu %90 olasılıklı en iyi %1'lik çözümleri üretmiştir. Yine her iki durumda sonuç %100 olasılıkla en iyi %3'lük çözüm içerisindedir (Şekil 3). Güç kaybındaki maksimum hata ilk algoritmada %1,3 iken genetik algoritmaya dayanan algoritmada %0,53 oranındadır.



Şekil 3. Çözümlerin performans dağılımı

#### IV. SONUÇ

Enerji dağıtım sistemlerinde genetik algoritmaya dayanan optimizasyon yönteminde sınırlı yineleme ile yapılan bir güç akışı rutini, daha kısa hesaplama zamanında yaklaşık güç kaybı ve düğüm gerilimlerini hesaplayabilir. Yaklaşık hesaplamadan elde edilen en iyi %1, %5 ve %10'luk altkümeler, gerçek çözüm altkümeleriyle önemli derecede uyumludur. Dolayısıyla rasgele seçilmiş çözümler altkümelerinin en iyi %1'lik kümeden en az bir çözümü içerme olasılığı, bu çözümler yaklaşık ya da tam olsa da değişmez. Maksimum 2 yinelemede yapılan tek bir güç akışının zamanda %16'lık bir kazanç sağladığı ve yeterince doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Daha karmaşık yapılar için kazanç oldukça artabilir. Tüm bu sonuçlardan anlaşılıyor ki OO kavramı enerji dağıtım sisteminin kontrol probleminde kullanılabilir.

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından 450/27122005 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### KAYNAKLAR

- [1] P.Caseau, "Evolution of computer technology and its impact on power systems", *Electric Power Energy Systems*, pp. 131-135, 1994.
- [2] G.J. Peponis, M.P. Papadopoulos, N.D. Hatzargy, "Optimal operation of distribution networks", *IEEE Trans. On Power Syst.*, pp.59-67, 1996.
- [3] V. Miranda, D. Srinivasan, L.M. Proença, "Evolutionary computation in power systems", *Electric Power Energy Systems*, pp. 89-98, 1998.
- [4] A. Augugliaro, L.Dusonchet, S. Favuzzo, E.R. Sanseverino, "Voltage regulation and power losses minimization in automated distribution networks by an evolutionary multiobjective approach", *IEEE Trans. On Power Systems*, Vol. 19, No:3, pp. 1516 – 1527, August 2004
- [5] G. Ramakrishna, N.D. Rao, "Adaptive neuro-fuzzy inference system for volt/var control in distribution systems", *Electric Power System Research*, No. 49, pp. 87-97, 1999
- [6] Z. Hu, X. Wang, H. Chen, G.A. Taylor, "Volt/var control in distribution systems using a time-interval based approach", *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, No.5, pp. 548–554, 2003.
- [7] D.Kas, D.P.Kothari, A.Kalan, "Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks", *Elec.Power Energy Syst.*, vol.17, pp.335-346, 1995.
- [8] T.W.Edward Lau, Y.C.Ho, "Universal Alignment Probabilities and Subset Selection for Ordinal Optimization", *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol.93, No.3, pp455-489, 1997.