

Güvenlik Kısıtlı Aktif ve Reaktif Güç Dağıtım Probleminin Uygulanabilir Değerler Üzerinde Çalışan Genişletilmiş Subgradyent Yöntemiyle Çözümü

Solution to Security Constrained Economic Active and Reactive Power Dispatch Problem by Using Modified Subgradient Algorithm Based on Feasible Values

Salih Fadıl¹, Burak Urazel²,

^{1,2}Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
sfadil@ogu.edu.tr, burazel@ogu.edu.tr

Özet

Makalede, uygulanabilir (feasible) değerler üzerinde çalışan genişletilmiş subgradyent (F-MSG) algoritmasının, bir elektrik enerji sisteminde optimal aktif ve reaktif güç dağıtım (ED) probleminin çözümüne uygulanması anlatılmaktadır. Bu çözüm tekniğinde üretim birimlerinin aktif ve reaktif güç alt ve üst üretim sınırları, iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri ve bara gerilim genliklerinin alt ve üst sınırları göz önüne alınmaktadır. Algoritmanın uygulanması 5 adet termal üretim birimine ve 14 baraya sahip bir elektrik enerji sisteminde gösterilmiştir. Bulunan sonuçların doğruluğunun karşılaştırılması için aynı dağıtım problemi MATPOWER® 3.2 programı ile de çözülmüştür. Bulunan sonuçların karşılaştırılması ile F-MSG algoritmasının, MATPOWER® 3.2 programı ile elde edilen sonuçlara benzer saat başına toplam maliyet değerleri verdiği görülmüştür.

Abstract

In this paper, the modified subgradient algorithm based on feasible values (F-MSG) is applied to a security constrained economic dispatch (ED) problem. The proposed technique considers the upper and the lower generation limits of the generation units, the maximum transmission capability of the transmission lines, and the upper and the lower limits of bus voltage magnitudes. Application of the algorithm is demonstrated on a lossy electric power system that contains 14 buses and 5 thermal units. The same dispatch problem is also solved via MATPOWER® 3.2 dispatch software for comparison purpose. From the results, we see that the proposed technique give the same optimal total cost rate value as the one given by MATPOWER® 3.2 dispatch software.

1. Giriş

Elektrik enerji sistemlerinde aktif ve reaktif güç dağıtımı (ED), doğrusal olmayan kısıtlı bir optimizasyon problemi olarak da tanımlanabilir. ED probleminin çözümü, toplam saat başına aktif güç üretim maliyet değerinin bazı elektrik ve iletim hattı güvenlik kısıtları altında minimize edilmesi ile gerçekleştirilir. Literatürde ED problemini çözmek için birçok yöntem geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu metodların bazıları;

genetik algoritma [2], parçacık sürü optimizasyonu [3], tabu arama tekniği [4], sözde spot maliyeti yöntemi [5], diferansiyel evrimsel algoritma [6], karma yöntemler [7] ve iç nokta yöntemleri [8] dir.

Bu çalışmada ED problemi, uygulanabilir değerler üzerinde çalışan genişletilmiş subgradient (F-MSG) algoritması kullanılarak çözülmüştür. F-MSG yöntemi Kasimbeyli tarafından 2009 da geliştirilmiştir [1].

2. ED Problemi

ED problemini matematiksel olarak aşağıdaki şekilde tanımlamak mümkündür;

$$\text{Min } F_T = \sum_{i \in N_G} F_i(P_{Gi}) = \sum_{i \in N_G} (b_i + c_i P_{Gi} + d_i P_{Gi}^2). \quad (1)$$

Elektriksel kısıtlar;

$$P_{Gi} - P_{yük, i} - \sum_{j \in N_{B_i}} p_{ij} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{yük, i} - \sum_{j \in N_{B_i}} q_{ij} = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$-P_l^{max} \leq p_l \leq P_l^{max}, \quad l \in L \quad (6)$$

$$U_i^{min} \leq U_i \leq U_i^{max}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad i \neq ref \quad (7)$$

Yukarıdaki denklemlerde kullanılan sembollerin anlamları, semboller listesi bölümünde verilmiştir.

2.1. Güç Akış Denklemleri

Çözüm algoritmamızda baraların gerilim genlikleri ve faz açıları bağımsız değişkenler olarak alınmaktadır. Saat başı maliyet fonksiyonları birimlerin aktif çıkış güçlerine bağlı olup, üretim birimlerinin çıkış güçleri de baraların gerilim genlikleri ve faz açıları ile hesaplanmaktadır. Bundan dolayı gerilim genlikleri ve faz açılarına bağlı güç akış denklemlerinin verilmesi gerekmektedir.

i ve j baraları arasında yer alan bir iletim elemanı için aktif ve reaktif güç akış denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$p_{ij} = U_i^2 \left(\frac{g_{ij}}{a_i^2} + g_{shi} \right) - \frac{U_i U_j}{a_i} [g_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (8)$$

$$p_{ji} = U_j^2 (g_{ij} + g_{shj}) - \frac{U_i U_j}{a_i} [g_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i) + b_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i)] \quad (9)$$

$$q_{ij} = -U_i^2 \left(\frac{b_{ij}}{a_i^2} + b_{shi} \right) - \frac{U_i U_j}{a_i} [g_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (10)$$

$$q_{ji} = -U_j^2 (b_{ij} + b_{shj}) - \frac{U_i U_j}{a_i} [g_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i) - b_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i)] \quad (11)$$

Verilen bu güç akış denklemleri ile üretim birimlerinin aktif ve reaktif çıkış güçleri, sistemin toplam aktif güç kaybı aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilir.

i barasından sisteme enjekte edilen net aktif ve reaktif güçler;

$$P_i = \sum_{j \in N_{B_i}} p_{ij} \quad (12)$$

$$Q_i = \sum_{j \in N_{B_i}} q_{ij} \quad (13)$$

i barasına bağlı birimin ürettiği aktif ve reaktif güçler;

$$P_{Gi} = P_{yük,i} + \sum_{j \in N_{B_i}} p_{ij} \quad (14)$$

$$Q_{Gi} = Q_{yük,i} + \sum_{j \in N_{B_i}} q_{ij} \quad (15)$$

İletim hatlarındaki ve enerji sistemindeki güç kayıpları;

$$p_{ij} - p_{kayıp,ij} = -p_{ji} \quad (16)$$

$$p_{kayıp,ij} = p_{ij} + p_{ji} \quad (17)$$

$$P_{KAYIP} = \sum_{l \in L} p_{kayıp,l} = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} p_{ij} \quad (18)$$

Yukarıdaki denklemlerde kullanılan sembollerin anlamları, semboller listesi bölümünde verilmiştir.

2.2. Gevşek Yapay Değişkenler

F-MSG algoritmasının yalnızca eşitlik kısıtlarının kullanılmasından dolayı, ED probleminde yer alan eşitsizlik kısıtları, eşitlik kısıtları halinde yazılmalıdır. Bu da, aşağıda gösterildiği üzere, eşitsizlik kısıtlarına birer gevşek (slack) yapay değişken eklenmesi ile gerçekleştirilebilir.

$$h_i(x_i) = (x_i - x_i^+) \leq 0 \quad (19)$$

Yukarıda verilen eşitsizlik kısıtı pozitif bir değişken eklenmesiyle (20) nolu eşitlik kısıtına çevrilebilir.

$$h_i(x_i, S_i) = (x_i - x_i^+ + S_i^2) = 0 \quad (20)$$

burada S_i gevşek yapay değişken olup, denklemdeki değer pozitif olması gerektiğinden S_i^2 olarak kullanılmıştır. ED probleminde bulunan (4), (5), (6), (7) nolu eşitsizlik kısıtları, F-MSG algoritmasında kullanabilmek için, bu yöntemle birer eşitlik kısıtına dönüştürülmüştür.

3. F-MSG Algoritması

Lagrange temelli yöntemlerde, kısıtlı optimizasyon problemlerinin çözümündeki ilk adım, birincil (primal) problemin bir kısıtsız ikil (dual) probleme dönüştürülmesidir. Bu da Lagrange fonksiyonlarının kullanılması ile gerçekleştirilir [8]. Lagrange yöntemi ikil optimizasyon temelinde çözüm yaklaşımı sunar. Lagrange çarpanlarının değerleri bulunarak, ikil amaç fonksiyonu değeri maksimum yapılmaya çalışılır. Birincil problemin en iyi sonucu ile ikil problemin en iyi sonucu eşit olmalıdır. Aksi takdirde her iki problemin en iyi sonuçları arasında ikil aralık (dual gap) adı verilen bir fark oluşacaktır. Bu ikil aralık değeri, optimizasyon problemlerinde çözüm kalitesini belirlemekte, ikil aralık değeri azaldıkça çözümün kalitesi artmaktadır. Klasik Lagrange fonksiyonları sadece dışbükey problemler için sıfır ikil aralığı sağlarken, maliyet fonksiyonunun veya herhangi bir kısıtın içbükey olmaması durumunda sıfır ikil aralığın sağlanması için genişletilmiş Lagrange fonksiyonu kullanılmaktadır [9].

Uygulanabilir değerler üzerinde çalışan genişletilmiş subgradient (F-MSG) yöntemi Kasimbeyli tarafından 2009 da geliştirilmiştir [1]. Bu yöntemde, sıfır ikil aralığı sağlayan genişletilmiş Lagrange fonksiyonları kullanılmaktadır. Yöntemin temelinde maliyet fonksiyon değerinin gerçekleştirilebilir olup olmadığının kontrol edilebilmesi bulunmaktadır. Burada şu tanıımı yapmak mümkündür; “Bir maliyet fonksiyonu en iyi değerden büyükse ve bu değeri sağlayan bağımsız değişken seti problemde verilen tüm kısıtları da sağlıyor ise, bu maliyet fonksiyonu gerçekleştirilebilir bir değere sahiptir. Aksi takdirde gerçekleştirilebilir değildir” [1].

Aşağıda verilen genel optimizasyon problemi ifadesini ED problemine uyarlayabiliriz.

$$\begin{aligned} \text{Min } F(\mathbf{x}) \\ \text{Subject to } \begin{cases} \mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{0} \\ \mathbf{x} \in K \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

Burada $\mathbf{x}$ vektörü baraların gerilim genlikleri ve faz açıları ile gevşek yapay değişkenleri ve nominal dış çevrim oranlarını içeren bağımsız değişkenler vektörüdür. Referans baranın gerilim genliği ve faz açısı bağımsız değişken olmadığı, bu sebeple $\mathbf{x}$ vektörüne dahil edilemediği, belirlenen değerlerde sabit tutulacağı unutulmamalıdır. Maliyet fonksiyonu $F(\mathbf{x})$, (1) nolu denklemde verildiği gibi termal birimlerin saat başı maliyet fonksiyonlarının toplamıdır. $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ ise (2), (3) nolu eşitlik kısıtları ile (4), (5), (6), (7) nolu eşitsizliklerden gevşek

yapay değişkenler kullanılarak elde edilen eşitlik kısıtlarını içeren kısıt vektörüdür. K seti de bağımsız değişkenlerin alt ve üst sınırları ile belirlenmiş, olası x elemanlarını içeren set olarak tanımlanabilir.

3.1. F-MSG Algoritması Adımları

Başlangıç adımı: Başlangıçta kullanılacak değişkenleri hesaplamak için seçilen aktif ve reaktif güç üretimleri ile AC güç akışı çözümü yap. Bu üretimler için denklem (1) den F_T 'yi hesapla.

1.Adım: Pozitif ε_1 , ε_2 , Δ_1 ve M parametrelerini belirle.
 $H_n = F_T - \Delta_1$, $n = 1$, $p = 0$, $q = 0$ al.

2.Adım: $(u_1^n, c_1^n) \in R^{N_{EQ}} \times R_s$ olacak şekilde ikil değişkenleri belirle. Burada N_{EQ} , $h(x)$ vektörünün sahip olduğu eşitlik kısıtlarının sayısıdır. $k = 1$, $u_k = u_1^n$, $c_k = c_1^n$ al.

3.Adım: Seçilen ikincil değişkenler için aşağıdaki kısıt sağlama problemini (CSP) çöz.

$$F(x_k) + c_k \|h(x_k)\| - \langle u_k, h(x_k) \rangle \leq H_n \quad (22)$$

eşitsizliğini sağlayan bir $x_k \in K$ çözümü bul

Eğer (22) için bir çözüm yok ise 6.Adıma git. Eğer (22) için bir çözüm x_k bulunduysa $\|h(x_k)\| \leq \varepsilon_1$ doğruluğunu kontrol et. $\|h(x_k)\| \leq \varepsilon_1$ ise 5.Adıma git. Aksi takdirde 4.Adıma git.

4.Adım: ikil değişkenleri aşağıdaki şekilde yenile.

$$u_{k+1} = u_k - \alpha s_k h(x_k) \quad (23)$$

$$c_{k+1} = c_k + (1 + \alpha) s_k \|h(x_k)\| \quad (24)$$

Burada s_k pozitif adım boyutu olup aşağıdaki şekilde tanımlanabilir;

$$0 < s_k = \frac{\lambda \alpha (H_n - L(x_k, u_k, c_k))}{[\alpha^2 + (1 + \alpha)^2] \|h(x_k)\|^2} \quad (25)$$

Yukarıdaki denklemde α ve λ sabit parametreler olup $\alpha > 0$ ve $0 < \lambda < 2$ dir. Ayrıca mevcut ikil değişkenler için aşağıdaki eşitsizlik sağlanmalıdır.

$$(s_k \|h(x_k)\| + c_k - \|u_k\|) > \ell(k) \quad (26)$$

$k = k + 1$ yap, $\ell(k)$ fonksiyonunu $k \rightarrow +\infty$ iken $\ell(k) \rightarrow +\infty$ olacak şekilde yenile. Tekrar 3.Adıma git.

5.Adım: p yi kontrol et. Eğer $p = 0$ ise $\Delta_{n+1} = \Delta_n$ yap, aksi takdirde $\Delta_{n+1} = \frac{1}{2} \Delta_n$ yap. Sonrasında Δ_{n+1} 'i kontrol et. Eğer $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ ise burada dur. Son olası H_n değerini sağlayan x_k optimal birincil sonuçtur. $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ değilse

$H_{n+1} = \min\{F(x_k), H_n - \Delta_{n+1}\}$, $q = q + 1$, $n = n + 1$ yap ve 2.Adıma git.

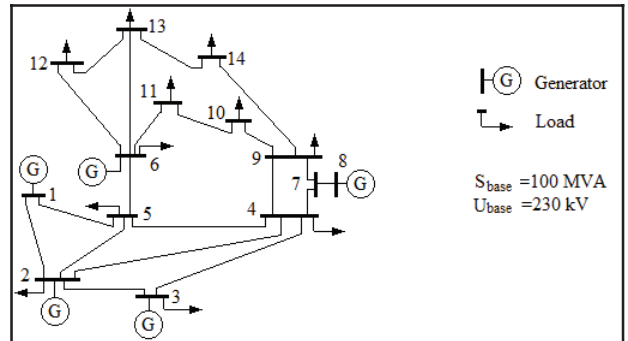
6.Adım: q yi kontrol et. Eğer $q = 0$ ise $\Delta_{n+1} = \Delta_n$ yap, aksi takdirde $\Delta_{n+1} = \frac{1}{2} \Delta_n$ yap. Sonrasında Δ_{n+1} 'i kontrol et. Eğer

$\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ ise burada dur. Son olası H_n değerini sağlayan x_k optimal birincil sonuçtur. $\Delta_{n+1} \leq \varepsilon_2$ değilse $H_{n+1} = H_n + \Delta_{n+1}$, $p = p + 1$, $n = n + 1$ yap ve 2.Adıma git.

Görüleceği üzere algoritma iki döngüden oluşmaktadır. 3. ve 4. adımlar CSP probleminin (22) çözüldüğü ve ikil değişkenlerin yenilendiği iç döngüyü oluşturmaktadır. Uygulanabilir olup olmadığına bağlı olarak, kontrol edilen H_n değerinin yenilendiği dış döngü ise 2., 5. ve 6. adımlardan meydana gelmektedir. Bu döngülerde yer alan q ve p parametreleri, sırasıyla, algoritma boyunca elde edilen uygulanabilir (feasible) ve uygulanamaz (infeasible) değerler sayısıdır. ε_1 iç döngüde eşitlik kısıtlarını içeren $h(x)$ vektörünün sağlanması için bir kontrol kriteri, ε_2 de algoritma için durma kriteridir. H_n değeri için dış döngüde yapılacak değişim miktarı Δ_n 'dir. M değeri ise iç döngü için bir limit değer olup, bu limit aşıldığında kontrol edilen H_n değeri uygulanamaz olarak kabul edilebilir.

4. Sayısal Örnek

F-MSG algoritmasının ED problemine uygulanmasında örnek sistem olarak 14 baralı IEEE test sistemi kullanılmıştır. Bu test sistemine ait bir hat diyagramı Şekil.1'de verilmiştir. Kullanılan sistemdeki iletim hatlarının pu seri empedans ve pu şönt admittans değerleri Referans [11]'den elde edilebilir. Birimlere ait saat başına maliyeti fonksiyonu katsayıları, üretim birimlerinin aktif ve reaktif güç üretim sınırları ile baralardaki aktif ve reaktif yük değerleri Ek A'da verilmiştir. Bu test sisteminde 1 nolu bara referans bara olarak kabul edilmiş ve bu baranın gerilim genliği 1.06 pu, faz açısı ise 0.0 rad olarak alınmıştır. Diğer baraların gerilim genliklerine ait sınırlar ise $0.9 \leq U_i \leq 1.1$ olarak seçilmiştir. Ayrıca bütün iletim hatları için aktif güç taşıma kapasitesi 200 MW olarak belirlenmiştir. F-MSG algoritmasında kullanılan diğer parametreler ise; $\alpha = 1$, $\lambda = 1$, $\varepsilon_1 = 2.5 \times 10^{-5}$, $\varepsilon_2 = 0.05$, $\Delta_1 = 100$ R/h olarak seçilmiştir.



Şekil 1: Örnek elektrik enerji sistemine ait bir hat diyagramı.

4.1. ED Probleminin F-MSG Metodu İle Çözülmesi

Verilen yük değerleri için ED problemini F-MSG algoritması uygulayarak çözdüğümüzde en düşük maliyetli çözüm $F_T = 8081.664 \text{ R/h}$ olarak elde edilmiştir. Bu maliyeti veren elektriksel değerler Tablo.1'de verilmiştir. Ayrıca algoritma tarafından oluşturulan uygulanabilir ve uygulanamaz değerler ile diğer çeşitli parametreler Tablo.2'de verilmiştir. Aynı ED problemini MATPOWER 3.2 yazılımı ile çözdüğümüzde, en düşük maliyetli çözüm $F_T = 8081.530 \text{ R/h}$ olarak bulunmuştur. Görüleceği üzere MATPOWER 3.2 ile bulunan sonuçlar F-MSG algoritması ile elde edilen sonuçların doğruluğunu kanıtlamaktadır.

4.2. Çözüm Noktasında Birimlerin Üretim Sınırlarına Ve İletim Hatlarının Taşıma Kapasitelerine Vurması

Bölüm 4.1'de bulmuş olduğumuz en düşük maliyetli çözüm için $P_{G2} = 36.989 \text{ MW}$ ve $p_{12} = 129.551 \text{ MW}$ olarak hesaplanmıştır. $P_{G2}^{max} = 30 \text{ MW}$ ve $p_{12}^{max} = 120 \text{ MW}$ olacak şekilde değiştirilirse; 2 nolu baraya bağlı birim aktif güç üretim üst sınırının üzerine çıkmış, 1 ve 2 nolu baralar arasında yer alan iletim hattı da aktif güç taşıma kapasitesini aşmış olacaktır. Bu durum fiziksel olarak imkânsız olduğundan bu sonuç artık en düşük maliyetli gerçekleştirilebilir sonuç olmayacaktır.

Yukarıda belirtilen bu değişiklikler sonrasında ED problemini F-MSG algoritmasını uygulayarak çözdüğümüzde en düşük maliyetli çözüm $F_T = 8109.0575 \text{ R/h}$ olarak elde edilmiştir. Bu en düşük maliyetli sonuçta $P_{G2} = 29.99 \text{ MW}$ ve $p_{12} = 119.99 \text{ MW}$ olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere P_{G2} ve p_{12} yeni sınır değerlerinde bulunmuştur. Bu maliyeti veren elektriksel değerler de Tablo.1'de verilmiştir. Aynı ED problemini MATPOWER 3.2 yazılımı ile çözdüğümüzde ise en düşük maliyetli çözüm $F_T = 8108.620 \text{ R/h}$ olarak bulunmuştur. Görüleceği üzere MATPOWER 3.2 ile bulunan sonuçlar ile F-MSG algoritması ile elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır.

5. Sonuç Ve Öneriler

Makalede termik birimlerden oluşan bir elektrik enerji sisteminde optimal aktif ve reaktif güç dağıtım (ED) probleminin uygulanabilir değerlere dayanan genişletilmiş subgradient (F-MSG) algoritması ile çözülmesi anlatılmıştır. Bu çözüm tekniği ile termal birimlerin aktif ve reaktif güç alt ve üst üretim sınırları, iletim hatlarının aktif güç taşıma kapasiteleri ve bara gerilim genliklerinin alt ve üst sınırları kolaylıkla kontrol edilebilmektedir. Bağımsız değişkenler olarak bara gerilim genlikleri ve faz açıları alındığından çözüm yönteminde güç akış çözümü ve/veya ekstra bir reaktif güç optimizasyonu yapılmasına gerek yoktur. Güç akışı çözümü sadece bağımsız değişkenlerin ilk değerlerini belirlemek için seçilen aktif ve reaktif güç değerleriyle bir kere yapılmaktadır. Sayılan bu avantajlarından dolayı F-MSG yönteminin ED probleminin çözümünde kullanılması uygundur. Anılan yöntemin diğer optimal elektrik enerji sistem işletimi problemlerine uygulanmasının araştırılması tarafımızdan halen devam etmektedir.

Tablo 1: Başlangıç durumu olarak seçilen ve Bölüm 4.1 ile 4.2 de bulunan en düşük maliyeti veren elektriksel büyüklükler.

	Başlangıç	Bölüm 4.1	Bölüm 4.2
P_{G1}	144.9547	193.7189	179.0099
Q_{G1}	-5.5691	-4.8682	-9.7236
P_{G2}	10.00	36.9890	29.9979
Q_{G2}	25.00	29.6061	37.6567
P_{G3}	10.00	25.5956	38.9167
Q_{G3}	14.00	24.6149	17.6830
P_{G6}	50.00	0.4788	1.9062
Q_{G6}	17.00	10.8207	9.1823
P_{G8}	50.00	11.4959	16.8533
Q_{G8}	3.50	8.0273	7.2370
p_{12}	105.379	129.551	119.9993
P_{LOSS}	5.9547	9.2782	7.684
F_T	8463.9888	8081.6640	8109.0575

$$P_{Gi}(\text{MW}), Q_{Gi}(\text{MVAR}), P_{LOSS}(\text{MW}), F_T(\text{R/h})$$

Tablo 2: Bölüm 4.1 için algoritma tarafından oluşturulan çeşitli parametreler.

n	H_n	F / I	F_n^{hesap}	Δ_n	p	q
0	8463.988		-	100	0	0
1	8363.988	F	8268.679	100	0	1
2	8263.988	F	8243.609	100	0	2
3	8163.988	F	8122.955	100	0	3
4	8063.988	I	-	50	1	3
5	8113.988	F	8101.434	25	1	4
6	8088.988	F	8085.314	12.5	1	5
7	8076.488	I	-	6.25	2	5
8	8082.738	F	8082.138	3.125	2	6
9	8079.613	I	-	1.562	3	6
10	8081.175	I	-	0.781	4	6
11	8081.956	F	8081.826	0.391	4	7
12	8081.565	I	-	0.195	5	7
13	8081.760	F	8081.664	0.098	5	8
14	8081.662	I	-	0.049	6	8

F : uygulanabilir değer,

I : uygulanamaz değer

F_n^{hesap} : denklem (22)'nin çözülmesi ile bulunan $x_k \in K$ çözümü ile hesaplanan saat başı maliyet değeri

6. Makalede Kullanılan Semboller

$F_i(P_{Gi})$: i . termik biriminin P_{Gi} aktif gücünü veriyorken saat başına maliyeti (R/h). Burada R hayali bir para birimini göstermektedir.

P_{Gi}, Q_{Gi} : i barasına bağlı termik birimin ürettiği, sırasıyla, aktif ve reaktif güçler.

$P_{Gi}^{min}, P_{Gi}^{max}$: i barasına bağlı termik birimin, sırasıyla, aktif güç alt ve üst üretim sınırları.

$Q_{Gi}^{min}, Q_{Gi}^{max}$: i barasına bağlı termik birimin, sırasıyla, reaktif güç alt ve üst üretim sınırları.

p_i : i . iletim hattından akan aktif güç.

$p_i^{\max}$: i . iletim hattının aktif güç taşıma kapasitesi.

$g_{ij} + jb_{ij}$: i ve j baraları arasında yer alan iletim hattının seri admitans değeri. Bu admitans değeri, $r_{ij} + jx_{ij}$ seri empedansına sahip iletim hattı için $g_{ij} + jb_{ij} = 1/(r_{ij} + jx_{ij})$ şeklinde hesaplanabilir.

$g_{shi} + jb_{shi}$: i ve j baraları arasına bağlı olan hattın i . bara tarafındaki yarı kapasitif süseptans değerleri ile bu baraya dışarıdan bağlı şönt admitans değerinin (eğer varsa) toplamı.

a_i : i ve j baraları arasına bağlı olan hattın i . bara tarafına nominal dışı çevirme oranına sahip bir trafonun bağlı olması durumunda, bu trafoya ait nominal dışı çevirim oranı.

p_{ij} , q_{ij} : i ve j baraları arasına bağlı olan hat üzerinden i barasından j barasına akan, sırasıyla, aktif ve reaktif güçlerin i barası sınırındaki değerleri.

$-p_{ji}$, $-q_{ji}$: i ve j baraları arasına bağlı olan hat üzerinden i barasından j barasına akan, sırasıyla, aktif ve reaktif güçlerin j barası sınırındaki değerleri.

$p_{kayp,i,j}$: i ve j baraları arasında yer alan iletim hattındaki aktif güç kaybı.

$p_{kayp,i}$: i . iletim hattındaki aktif güç kaybı.

P_{KAYIP} : elektrik enerji sistemindeki toplam aktif güç kaybı.

U_i , δ_i : i barasının, sırasıyla, gerilim genliği ve faz açısı.

$U_i^{\min}$, $U_i^{\max}$: i barasının gerilim genliğinin, sırasıyla, alt ve üst sınırları

N : elektrik enerji sisteminin bara sayısı

N_G : üretim birimlerinin bağlı olduğu baraları içeren set

N_{Bi} : i barasına doğrudan bağlı baraları içeren set

L : elektrik enerji sistemindeki tüm iletim hatlarını içeren set

7. Kaynaklar

- [1] Kasimbeyli R., Ustun O., Rubinov A.M., "The Modified Subgradient Algorithm Based On Feasible Values", *Optimization*, 2009, 58, (5), pp. 535-560.
- [2] Chiang C.L., "Genetic-Based Algorithm For Power Economic Load Dispatch", *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2007, 1, (2), pp. 261-269.
- [3] Selvakumar A.I., Thanushkodi K., "A New Particle Swarm Optimization Solution To Nonconvex Economic Dispatch Problems", *IEEE Transactions On Power Systems* 2007, 22, (1), pp. 42-51.
- [4] Pothiya S., Ngamroo I., Kongprawechnon W., "Application Of Multiple Tabu Search Algorithm To Solve Dynamic Economic Dispatch Considering Generator Constraints", *Energy Conversion And Management*, 2008, 49, pp. 506-516.
- [5] Fadil S, Sarioglu GR. "An active and reactive power dispatch technique using pseudo spot price of electricity", *Electrical Machines and Power Systems* 1998;26, (4):87-9.
- [6] Coelho L.S., Mariani V.C., "Improved Differential Evolution Algorithms For Handling Economic Dispatch

Optimization With Generator Constraints", *Energy Conversion And Management*, 2007, 48, pp.1631-1639.

- [7] Somasundaram P., Lakshmiraman R., Kuppusamy K., "Hybrid Algorithm Based On EP And LP For Security Constrained Economic Dispatch Problem", *Electric Power Systems Research*, 2005, 76, pp.77-85.
- [8] Farhat IA, El-Hawary ME. Interior point methods application in optimum operational scheduling of electric power systems. *IET Gener. Transm. Distrib.* 2009;3, (11):1020-10.
- [9] Gasimov R.N., "Augmented Lagrangian Duality and Nondifferentiable Optimization Methods in Nonconvex Programming", *Journal of Global Optimization*, 2002, 24, pp. 187-203.
- [10] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, *Power Generation Operation & Control*, Second Edition, John Wiley & Sons, 1996.
- [11] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

Ek A

Tablo 3: Üretim birimlerine ait veriler

Bara No (i)	$P_{Gi}^{\max}$	$P_{Gi}^{\min}$	$Q_{Gi}^{\max}$	$Q_{Gi}^{\min}$	b_i	c_i	d_i
1	332.4	0	10	-10	0	20	0.043
2	140	0	50	-40	0	20	0.25
3	100	0	40	0	0	40	0.01
6	100	0	24	-6	0	40	0.01
8	100	0	24	-6	0	40	0.01

$P_{Gi}^{\max}$ (MW), $P_{Gi}^{\min}$ (MW), $Q_{Gi}^{\max}$ (MVAR), $Q_{Gi}^{\min}$ (MVAR),

b_i (R/h), c_i (R/MWh), d_i (R/MW²h)

Tablo 4: Baralardaki aktif ve reaktif güçler ile şönt kapasitans değerleri.

Bara no (i)	$P_{Load,i}$	$Q_{Load,i}$	$Q_{shunt,i}$
1	0.0	0.0	0
2	21.7	12.7	0
3	94.2	19	0
4	47.8	-3.9	0
5	7.6	1.6	0
6	11.2	7.5	0
7	0.0	0.0	0
8	0.0	0.0	0
9	29.5	16.6	19
10	9	5.8	0
11	3.5	1.8	0
12	6.1	1.6	0
13	13.5	5.8	0
14	14.9	5	0

$P_{Load,i}$ (MW), $Q_{Load,i}$ (MVAR), $Q_{shunt,i}$ (MVAR enjekte)