

Elektrik enerji piyasalarında iletim hat parametrelerinin tıkanıklık üzerine etkileri

Canan ZOBİ*, Canbolat UÇAK

İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Enerji iletim hatlarında oluşan tıkanıklık problemi, uzun süreli düzenleme yöntemleriyle çözümlenebilir. İletim hatlarının güçlendirilmesine karşı gelen bu durumda hat suseptansı ve kapasitesinde değişim olur. Bu çalışmada, hat suseptansı ve kapasitenin fonksiyonu olarak tıkanıklıktan uzaklaşma minimum üretim maliyetine dayandırılarak incelenmiştir. Öncelikle üretim maliyetlerinin hat suseptanslarına duyarlılığını belirlemek için matematiksel model oluşturulmuştur sonra hat parametrelerinin değişimiyle üretim maliyetlerinin değişimi ve ortaya çıkan tıkanıklık bölgeleri sequential quadratic programlama (SQP) ile belirlenmiştir. Bu çalışmada tıkanıklıktan uzaklaşmak için her hat suseptansının optimum bir aralığı olduğu ortaya çıkmıştır. Bu sonuç özellikle hattan akan güç kontrolünde gelecekte FACTS sistemlerinin (esnek alternatif akım iletim sistemleri) kullanılmasının yaygınlaşması ile birlikte önemli olmaktadır. Elde edilen diğer bulgular sonuçlar bölümünde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik enerji piyasaları, iletim tıkanıklığının düzenlenmesi, duyarlılık analizi.

The effects of transmission line parameters on congestion in competitive power markets

Abstract

Long-term management may eliminate the congestion problem emerging in the transmission lines. The long-term congestion management is based on planning to strengthen transmission grid in competitive power markets. This management will cause susceptance change and line capacity increase between the zones. In this paper, congestion relief as a function of line susceptance and line capacity is investigated based on the minimum generation cost. To achieve this goal, mathematical derivations are used to calculate sensitivities of the generation cost to the line susceptances are given, and numerical studies are done by using sequential quadratic optimization programming (SQP) to determine the congestion regions in terms of line parameters and the cost of generation when line capacities and line susceptances are changed. This study shows that there may be an optimum susceptance range which above and below values will increase the total cost when only the susceptance is varied and the line limit is kept constant. Optimum susceptance may be important when the line parameters are changed dynamically by using Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices widely in the future. The results are given in the conclusion section.

Keywords: Competitive power markets, transmission congestion management, sensitivity analysis.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Canan ZOBİ. zobi@elk.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 60 23.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Elektrik enerji piyasalarında iletim hat parametrelerinin tıkanıklık üzerine etkileri" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 15.07.2005 tarihinde dergiye ulaşmış, 14.10.2005 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2006 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

Elektrik endüstrisi tüm dünyada hızlı bir şekilde yeni bir yapılanmaya doğru gitmektedir. Bu yapılanma 1980'lerde İngiltere ve bazı Latin Amerika ülkelerinde başlamış ve 1990'larda daha da hız kazanarak yaygınlaşmıştır. Elektrik endüstrisini yeniden yapılanmaya sürükleyen nedenler ülkeden ülkeye farklılık gösterir (Rahimi ve Vojdani, 1999). Bazı ülkelerde yatırımların ağır yükünü devletten özel sektöre kaydırmak için özel sektörün ilgisini çekmek amaçlanmıştır. Özel sektörün enerji sektöründe sözkonusu olduğu sistemlerde ise amaç, rekabeti arttırmaktır.

Geleneksel sistemler üretim, iletim ve dağıtımın tek bir elde toplandığı dikey yapılı sistemlerdir. Elektrik sektöründe yeni yapılanmayla birlikte üretim, iletim ve dağıtım birbirlerinden ayrılır ve yeni yapılar yatay yapılı sistemler olarak isimlendirilir (Christie ve Bose, 1996). Yatay yapılı sistemler etkili rekabeti teşvik eder ve aynı zamanda güvenilirliği en iyi şekilde gerçekleştirmek için gerekli koordinasyonu sağlar. Üretim birimleri ürettikleri elektriği satmak için serbest piyasada rekabet eder. İletim sektörü doğal tekel özelliğini korur, üretim ve yük birimlerinin birbirleriyle güç alışverişini sağlama-ları için ayırım yapmadan eşit bir şekilde hizmet sunar. Müşteriler yerel dağıtım şirketlerinden güç satın almaya devam eder.

Elektrik enerji sistemlerinin yeniden yapılandırılması, iletim şebekesinin planlanması aşamasında tahmin edilemeyen, alışılmadık kullanımına yol açmıştır. Yeni yapılanmada generatörler ve yükler iletim sistemlerine ayırım gözetilmeden serbestçe erişebilirler. İletim sistemlerine serbest erişim, elektrik enerjisinde sağlıklı rekabet için oldukça önemlidir. Yeniden yapılandırılmış ortamlarda, üreticiler ve müşteriler bir elektrik piyasasında güç alışverişlerini alıp satabilirler. Bu alışverişler bazen elektrik şebekelerinde tıkanıklığa (enerji darboğazına) sebep olur. Tıkanıklık düzenleme bu yapıda güç alışverişlerinin sayısının ve miktarının artması nedeniyle daha önemli ve zor olmuştur. Bir elektrik piyasasında, üreticiler ve müşteriler arasındaki güç alışverişleri hat parametreleri tarafından sınırlandırılır ve bu sınırlamalar mevcut-

sa elektrik enerjisi üretim maliyeti artar. Aynı zamanda tıkanıklık nedeniyle bazı bölgelerde piyasa gücü de oluşabilir. Bu durumda üretici istediği fiyattan enerjisini satar ve rekabet koşulları sağlanamaz.

Elektrik enerji piyasalarında iletim tıkanıklığını düzenleme, kısa süreli ve uzun süreli düzenleme olarak ikiye ayrılabilir. Kısa süreli tıkanıklık düzenleme kurallara ve fiyatlandırmaya dayalı olarak gerçekleştirilir (Singh vd., 1998; Glavitsch ve Alvarado, 1998; Fang ve David, 1999; Gribik vd., 1999). Tıkanıklık daima elektrik enerjisi maliyetini artırır ve iletim hatlarının benzer baraları arasında sürekli oluşan tıkanıklıklar uzun süreli olarak kaldırılmalıdır aksi takdirde amaçlanan rekabetçi enerji piyasası sağlanamaz. Literatürde mevcut olan istatistiksel metodlar uzun süreli planlama için tıkanıklık çalışmalarında kullanılabilir (Deladreau vd., 2003). Şebeke planlaması gelecekte şebekenin hangi kısmının geliştirileceğini belirlemek için karar mekanizmalarına ihtiyaç duyan uzun süreli bir yaklaşımdır. Deladreau ve diğerlerinde (2003) amaç, eş zamanlı olarak hangi hattın tıkanabileceğini tahmin etmektir. Elektrik piyasaları iletim planlayıcılarını yeni belirsizlikler ile karşı karşıya bırakır. Bu belirsizliklere katkının miktarını belirleyen ve riski en aza indiren bir karar-analiz yaklaşımı kullanılarak ele alınır (De la Torre vd., 1999) Geleneksel dikey yapılı sistemlerde iletim planlaması için birçok yöntem kullanılmıştır (Kaltenbach vd., 1970; Villasana vd., 1985; Santos Jr. vd., 1989). Bu çalışmalarda iletim planlaması yük ve üretim artışlarına cevap vermek için gerçekleştirilir. Ancak bu çalışmada, elektrik enerjisi piyasaları için tıkanıklıktan uzaklaşma incelenmiştir.

Elektrik enerji sistemlerinde uzun süreli tıkanıklık düzenleme iletim hatlarını güçlendirerek gerçekleştirilir (Zobi ve Uçak, 2004). İletim hatlarının güçlendirilmesi ya tıkanan bölgeler arasına yeni bir hat inşa ederek yada mevcut hattın kapasitesini esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) ile artırarak sağlanır. Her ikisi de baralar arasında suseptans değişimine ve hat kapasitesi artışına sebep olur. Hat suseptansı, reaktif güç değişimi, yük modeli parametre değişimi

gibi sistem parametre ve kontrollerinin değişiminin yüklenme marjini üzerindeki etkisi bir başka çalışmada incelenmiştir (Greene vd., 1997). Yüklenme marjini ile gerilim çökmesi arasında yakın bir ilişki vardır. Burada seri ve/veya şönt kompanzasyon aygıtlarıyla suseptans ayarlanarak gerilim çökme aralığının maksimize edilebileceği belirtilmiştir.

Bu çalışmada ise, hat suseptansı ve hat kapasitesinin fonksiyonu olarak tıkanıklıktan uzaklaşma minimum üretim maliyetine dayandırılarak incelenmiştir. Öncelikle üretim maliyetlerinin hat suseptanslarına duyarlılığını belirlemek için gerekli matematiksel model oluşturulmuştur sonra hat parametrelerinin değişimiyle üretim maliyetlerinin değişimi ve ortaya çıkan tıkanıklık bölgeleri sequential quadratic programlama (SQP) ile belirlenmiştir.

İleri enerji düzenleme sistemlerinden FACTS aygıtları iletim akışlarını kontrol eder ve yeni hat inşa etmeye gerek kalmadan sistemin kapasitesini genişletir (Shahidehpour, 2004). Birçok farklı FACTS kontrolörü vardır (Song ve Johns, 1999). Bu kontrolörlerden her biri güç iletimi için etkili olan üç parametreden biri üzerinde baskındır. Gerilim üzerinde seri Var kompanzator (SVC), iletim empedansı üzerinde tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC) ve iletim açısı üzerinde de faz kaydırıcı etkilidir. Tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC) aktif güç akışını kontrol etmek için hattın empedansını sürekli olarak azaltıp artırarak değiştirebilir. Bu özelliği nedeniyle TCSC bu çalışmada tercih edilmiştir.

Hat suseptanslarının duyarlılığı

Üretim maliyetlerinin hat suseptanslarına duyarlılığı Gedra (1999) ve Gribik vd. (1990) tarafından önerilen yol izlenerek bulunmuştur. Güç akış çalışmalarındaki çoğu sayısal incelemeler tıkanıklık düzenlenmesi ve iletim fiyatlandırılması çalışmalarında da olduğu gibi DC güç akışının kullanımı üzerine yoğunlaşır, çünkü parametrelerdeki değişimler için sistem durumu hakkında açık gözlemler verir, büyük boyutlu güç sistemlerinin analizinde hesaplama zamanı daha azdır (Alomoush, 2003). DC güç akışında aktif güç kayıpları ihmal edilir, bara gerilim büyüklükleri yaklaşık olarak 1.0 p.u. olarak alınır.

Bu kabuller altında reaktif güç akışı her hat üzerinde sıfırdır. Baraları birbirine bağlayan her iletim hattı b_{ij} suseptansı ve P_{ij}^{mak} maksimum güç akış kapasitesi ile belirlenir. Hat ij üzerindeki aktif güç akışı,

$$P_{ij} = b_{ij}(\theta_i - \theta_j) \quad (1)$$

ve burada θ_i , (i) barasındaki gerilim açısıdır. Yine (i) barasından toplam enjekte edilen güç,

$$P_i = \sum_j P_{ij} + P_{yük_i} \quad (2)$$

olarak ifade edilir. Üretim-yük dengesi,

$$\sum P_i = \sum P_{yük} \quad (3)$$

şeklinde dir. Amaç, havuz modelinde üretim maliyetini minimum yapmaktır.

$$\text{Min } C(P_1, P_2, \dots, P_{n_{bara}}) = \sum_{i=1}^{n_{bara}} C_i(P_i) \quad (4)$$

Kısıtlamalar,

$$h(P_i, \theta_{ij}, b_{ij}, P_{yük_i}) = 0 \quad (5)$$

$$|P_{ij}| \leq P_{ij}^{mak} \quad (6)$$

Burada eşitlik kısıtlama denklemleri, düğüm denklemleri ve üretim - yük dengesi denklemlerinden oluşur. Eşitsizlik denklemleri ise hat akış kısıtlamalarından oluşur. Optimizasyon için Lagrange fonksiyonu aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$L = \sum_{i=1}^{n_{bara}} C_i(P_i) + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{n_{dal}} \lambda_i h_i(P_i, \theta_{ij}, b_{ij}, P_{yük_i}) + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^{n_{dal}} \mu_{ij} (P_{ij} - P_{ij}^{mak}) \quad (7)$$

Değişkenler ve Lagrange çarpanları aşağıdaki gibi vektörel olarak gösterilir.

$$z = [P_1 \dots P_{n_{bara}} \theta_2 \dots \theta_{n_{bara}} \lambda_1 \dots \lambda_{n_{bara}} \mu_1 \dots \mu_{n_{dal}}]^T \quad (8)$$

$z^*(b_{ij})$ ile problem ifadesinde açıkça b_{ij} 'yi kapsayan ve verilen bir b_{ij} için optimal çözüm gösteren bir tanımlama yapılır. Optimal olmanın birinci koşulu,

$$g(z^*(b_{ij})) = \frac{\partial L}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

şeklinde dir. b_{ij} 'de küçük bir değişim için, eşitsizlik kısıtlamaları kümesinde değişim olmayacağı kabul edilir. Zincir kuralını uygulayarak b_{ij} 'ye göre türetilirse,

$$\frac{\partial g(z^*(b_{ij}))}{\partial z} \frac{dz^*(b_{ij})}{db_{ij}} + \frac{\partial g(z^*(b_{ij}))}{\partial b_{ij}} = 0 \quad (10)$$

elde edilir. Her z için,

$$\frac{\partial g}{\partial z} = W(b_{ij}) \quad (11)$$

olarak tanımlanır ve bu ifadenin integrali alınırsa,

$$g(z, b_{ij}) = W(b_{ij}) \cdot z + g_0(b_{ij}) \quad (12)$$

olduğu görülür. (11) ve (12) ifadeleri (10)'da yerlerine konulursa,

$$\begin{aligned} W(b_{ij}) \frac{dz^*}{db_{ij}} &= - \frac{\partial g(z^*, b_{ij})}{\partial b_{ij}} \\ &= - \frac{\partial W(b_{ij})}{\partial b_{ij}} z^*(b_{ij}) - \frac{\partial g_0(b_{ij})}{\partial b_{ij}} \end{aligned} \quad (13)$$

$\frac{dz^*(b_{ij})}{db_{ij}}$ duyarlılığı (13) ifadesinden elde edilir.

Burada $g_0 = \frac{\partial}{\partial z} L|_{z=0}$ sabit değerlerden oluşur ve

$$\frac{\partial g_0(b_{ij})}{\partial b_{ij}} = 0 \text{ dır ve (13) ifadesinde yerine konursa,}$$

$$W(b_{ij}) \cdot \frac{dz^*}{db_{ij}} = - \frac{\partial W(b_{ij})}{\partial b_{ij}} z^*(b_{ij}) \quad (14)$$

olur. $\frac{dz^*(b_{ij})}{db_{ij}}$ duyarlılık ifadesi eşitliğin sol tarafında bırakılarak yeniden düzenlenirse,

$$\frac{dz^*(b_{ij})}{db_{ij}} = W^{-1}(b_{ij}) \left(- \frac{\partial W(b_{ij})}{\partial b_{ij}} \right) z^*(b_{ij}) \quad (15)$$

tüm değişkenlerin suseptanslara göre duyarlılığı (15) ifadesiyle bulunabilir. b_{ij} deki değişimden dolayı toplam sistem maliyetindeki değişimi hesaplayabilmek için $\frac{dz^*(b_{ij})}{db_{ij}}$ de güç enjeksiyo-

nuna karşı düşen $\frac{dP^*(b_{ij})}{db_{ij}}$ ile marjinal maliyet-

lere karşılık gelen λ^* çarpanını çarpmak gerekir. (16) ifadesiyle suseptansların değişiminin toplam maliyete duyarlılığı tüm hatlar için bulunabilir.

$$\frac{dT M}{db_{ij}} = (\lambda^*)^T \frac{dP^*}{db_{ij}} \quad (16)$$

Hat suseptansı ve kapasitesini birlikte artırarak bir hattı güçlendirmenin toplam sistem maliyeti üzerindeki etkisini incelemek için her ikisinin duyarlılıkları birleştirilmiştir. Bunun için hat kapasitesinin aynı artış oranında hat suseptansı artırılmıştır. Hat kapasitesi ε MW kadar artırılır-

sa suseptanstaki artış $\varepsilon \frac{b_{ij}}{P_{ij}^{mak}}$ kadar olacaktır.

Tıkanıklık oluşan hat için toplam maliyetteki değişim, ε ile bölünerek,

$$\frac{\partial T M}{\partial P_{ij}^{mak}} = -\mu_{ij} - \left(\frac{-b_{ij}}{P_{ij}^{mak}} \right) \frac{dT M}{db_{ij}} \quad (17)$$

bulunur. Benzer hesaplamalar diğer hatlar için de yapılabilir.

$$\frac{\partial T M}{\partial P_{ij}^{mak}} = \left(\frac{-b_{ij}}{P_{ij}^{mak}} \right) \frac{dT M}{db_{ij}} \quad (18)$$

Örnek sistemde duyarlılık analizi

Duyarlılık analizi, altı baralı örnek bir sisteme uygulanmıştır. Bu sistemde amaç, üretim maliyetinin minimum olmasıdır. Örnek sistem için generatörlerin maliyet fonksiyonları ve üretim kapasitelerine ait veriler Tablo 1’de görülür. Her barada 100 MW’lık sabit bir yük vardır. İletim hatlarından en fazla akabilecek güç değeri 100 MW’dır.

Tablo 1. Örnek sistemdeki generatörlerin maliyet ve üretim sınırları için veriler

Üretim barası	Maliyet Fonksiyonu			Min. Üretim	Mak. Üretim
	$C_i(P_i) = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i$	a	b		
1	0.0120	12.0	105	50	170
2	0.0096	9.6	96	50	250
3	0.0130	13.0	105	50	170
4	0.0094	9.4	94	50	250

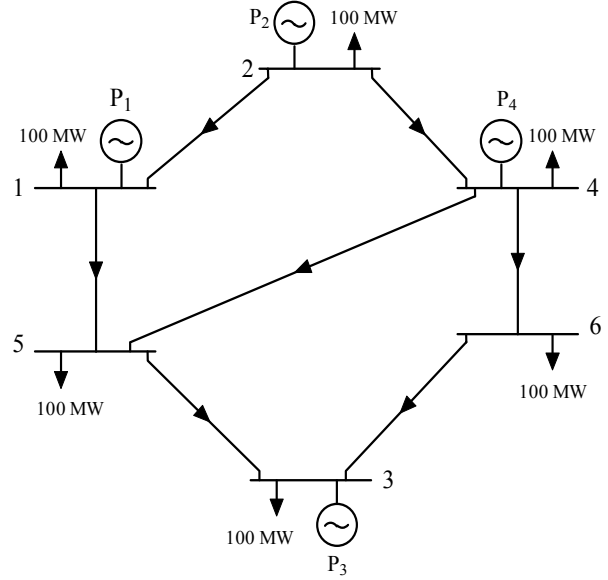
Birinci baraya ait gerilimin açısı referans alınarak düğüm denklemlerinden oluşan eşitlik kısıtlamaları aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned}
 -P_1 - b_{12}\theta_2 - b_{15}\theta_5 + 100 &= 0, \\
 -P_2 + b_{12}\theta_2 + b_{24}(\theta_2 - \theta_4) + 100 &= 0, \\
 -P_3 + b_{35}(\theta_3 - \theta_5) + b_{36}(\theta_3 - \theta_6) + 100 &= 0, \\
 -P_4 - b_{24}(\theta_2 - \theta_4) + b_{45}(\theta_4 - \theta_5) + b_{46}(\theta_4 - \theta_6) + 100 &= 0, \\
 b_{15}\theta_5 - b_{45}(\theta_4 - \theta_5) - b_{35}(\theta_3 - \theta_5) + 100 &= 0, \\
 -b_{46}(\theta_4 - \theta_6) - b_{36}(\theta_3 - \theta_6) + 100 &= 0.
 \end{aligned} \tag{19}$$

Üretim- yük dengesi,

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 600 \tag{20}$$

şeklindedir. Tüm hatlar için hat suseptansları 5 p.u. alınarak yukarıdaki veriler doğrultusunda sistemin duyarlılık analizinden önce DC güç akışında analizi yapılmıştır. Bunun sonucunda 4 ile 6 baraları arasındaki hatta tıkanıklık oluştuğu ve sistem maliyetinin 7651.4 \$/h olduğu görülmüştür. Örnek sistem Şekil 1’de görülmektedir (Weber vd., 1999).



Şekil 1. Altı baralı örnek sistem

Örnek sistem için değişkenler ve Lagrange çarpanları vektörü,

$$z = [P_1 \dots P_4 \quad \theta_2 \dots \theta_6 \quad \lambda_1 \dots \lambda_6 \quad \mu_{46}]^T \tag{21}$$

şeklindedir. Örnek sistemde eşitsizlik kısıtlamalarından sadece 4-6 hattına ait olan limitinde yüklendiği için ona ait eşitsizlik kısıtlama denklemi ve μ_{46} Lagrange çarpanı alınıp diğer hatlara ait olanlar ihmal edilmiştir. Diğer hatlara ait olan eşitsizlik kısıtlama denklemlerini ihmal etmeden yapılan incelemenin çözüme bir etkisi olmadığı görülmüştür. Bu nedenle parametreleri azaltmak amacıyla gözönüne alınmamıştır. Altı baralı örnek sistem için tüm değişkenlere ve Lagrange çarpanlarına optimal olmanın ilk koşulu uygulanıp $Wz = -g_0$ şeklinde ifade edilir. W matrisi, suseptanslara bağlı bir matristir. Tıkanıklık olan 4-6 hattının suseptans değişimine göre duyarlılığını bulmak için 4-6 hattı dışındaki diğer hatlar için 5 p.u. lik suseptans değerleri yerlerine konulup 4-6 hattı suseptansı b_{46} göre matris ifade edilir.

$W(b_{46})$ matrisel olarak bulunur ve $\frac{\partial W}{\partial b_{46}}$ y1 hesaplamak için (22) ifadesinin suseptans b_{46} 'ya göre türevi alınır.

$$W(b_{46}) = \begin{bmatrix} 0.024 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0192 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.026 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0188 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 10 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 & -5 & -5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 10+b_{46} & -5 & -b_{46} & b_{46} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & -5 & -5 & 15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & -b_{46} & 0 & 5+b_{46} & -b_{46} \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 10 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 10 & 0 & -5 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -5 & 0 & 10+b_{46} & -5 & -b_{46} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & -5 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & -b_{46} & 0 & 5+b_{46} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & b_{46} & 0 & -b_{46} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\frac{\partial W}{\partial b_{46}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\frac{dT M}{d b_{46}} = (\lambda^*)^T \frac{dP^*}{d b_{46}} = [\lambda_1 \quad \lambda_2 \quad \lambda_3 \quad \lambda_4] \begin{bmatrix} \frac{dP_1}{d b_{46}} \\ \frac{dP_2}{d b_{46}} \\ \frac{dP_3}{d b_{46}} \\ \frac{dP_4}{d b_{46}} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$= 14.75(\$/h) / pu$$

Diğer hatlar için benzer hesaplamalar yapılırsa tüm hatların suseptans değişimlerinin toplam maliyete etkisi hesaplanmış olur.

W matrisinin tersi alınıp aşağıdaki (24) eşitliğinde yerine konulursa, tüm değişkenlerin b₄₆ suseptanslarına göre duyarlılığı bulunur.

$$\frac{dz^*}{db_{46}} = W^{-1}(b_{46}) \left(-\frac{\partial W}{\partial b_{46}}(b_{46}) \right) z^*(b_{46}) \quad (24)$$

Suseptans b₄₆ daki değişimden dolayı toplam sistem maliyetindeki değişimi hesaplayabilmek için $\frac{d}{db_{46}} z^*(b_{46})$ da güç enjeksiyonuna karşı düşen $\frac{d}{db_{46}} P^*(b_{46})$ ile marjinal maliyetlere karşılık gelen λ^* çarpımını çarpmak gerekir.

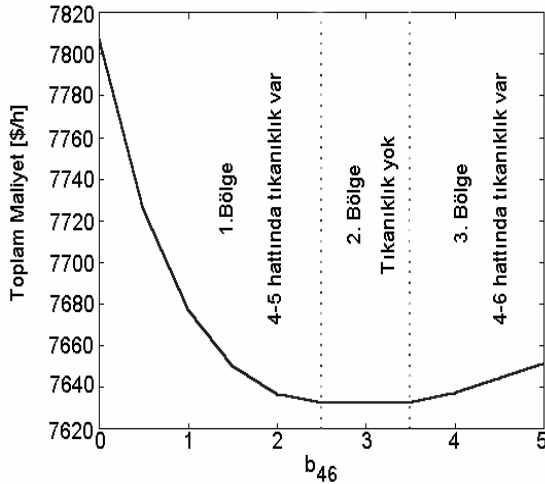
$$\begin{bmatrix} \frac{dT M}{d b_{12}} \\ \frac{dT M}{d b_{15}} \\ \frac{dT M}{d b_{24}} \\ \frac{dT M}{d b_{35}} \\ \frac{dT M}{d b_{36}} \\ \frac{dT M}{d b_{45}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.57 \\ -1.95 \\ 1.81 \\ -3.9 \\ 0 \\ -8.13 \end{bmatrix} (\$/h) / pu \quad (26)$$

Buradan çıkan sonuca göre suseptans değişimi-ne en duyarlı hat, 4-6 hattıdır. Bu hat, tıkanıklık

olan hattır ve onun suseptansı sistemin toplam maliyeti üzerinde en büyük etkiye sahiptir.

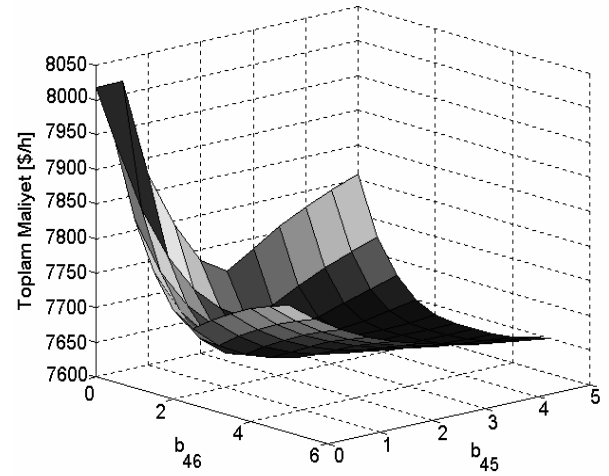
SQP ile hat parametre değişiminin maliyete etkisinin belirlenmesi

Suseptansın belirli aralıktaki değişiminin üretim maliyetine etkisi sequential quadratic programlama (SQP) kullanılarak belirlenmiş ve sonuçlar grafiksel olarak verilmiştir. Öncelikle tıkanıklık olan 4-6 hat suseptansı 0 ile 5 pu. arasında değiştirilerek üretim maliyetinin değişimi Şekil 2’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. Şekil 2’den 4-6 hattının suseptansı 0 ile 2.5 p.u. arasında değişiyorken sistemin incelenen hattı dışındaki başka bir hattı olan 4-5 hattında tıkanıklık olduğu görülür. Yine 4-6 hattının suseptansı 3.5 ile 5 pu. arasındayken 4-6 hattında tıkanıklık görülür ve sistem maliyeti artar. Suseptansın 2.5 ile 3.5 arasındaki değerinde ise hiçbir hatta tıkanıklık görülmez, toplam maliyet en düşük değerindedir. Bu aralık, optimum suseptans aralığıdır. Bu aralığın altındaki ve üstündeki suseptans değerlerinde incelenen hatta veya sistemdeki diğer hatlarda tıkanıklık görülebilir. Bu sonuçtan bir hattı güçlendirmek için suseptansını belirli bir değerden daha ileri bir değere ayarlamamanın ters etkilere sebep olacağı ve toplam maliyetin artacağı görülür. Sistemde kullanılacak TCSC bu belirlenmiş aralığa hattın suseptansını ayarlamalıdır ki sistemde tıkanıklık olmasın ve toplam maliyet düşünülmüş yüklenme koşulları altında en düşük değerde olsun.



Şekil 2. Suseptans değişiminin maliyete etkisi

Şekil 2’de tıkanıklık oluşan hat dışında başka bir hat olan 4-5 hattında da suseptans değişimiyle birlikte tıkanıklık oluştuğu görülmüştür. Bu nedenle her iki hattın suseptansını değiştirerek tıkanıklık değişimini görmek ilginç olacaktır. Tablo 2’de hem 4-5 hattı hemde 4-6 hattının suseptansı 0 ile 5 p.u. arasında değiştirilirken toplam maliyet değişimi görülmektedir. Tablo 2’de koyu renk ile belirtilen 7632.4 \$/h değeri toplam maliyetin minimum değeridir, hiçbir hat limitinde yüklenmemektedir, dolayısıyla sistemde tıkanıklık yoktur ve bütün baralarda fiyatlar aynıdır. Her iki suseptansın 0 p.u. değerlerinde sistem kısıtlamaları sağlanamamaktadır ve gerçekleştirilebilir bir çözüm bulunamamaktadır. Hat 4-5 ve 4-6 ’nın açık devre olmasına karşı gelen bu durumda birden fazla hat akışı limitinde yüklendiğinden üretim- yük dengesi sağlanamamakta ve bir çözüm bulunamamaktadır. Sonuçlar aynı zamanda grafiksel olarak Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. İki hattın suseptansının 0 ile 5 pu. arasındaki değişimine göre toplam maliyet değişimi

Tablo 2’de ve Şekil 3’teki veriler incelenirse, toplam maliyetin değeri, b_{46} suseptansının 0 p.u. ve b_{45} suseptansının 0.5 p.u. olduğu durumda en büyük olmaktadır. Çünkü bu hatlardan yeterli güç akışı olamamasıyla diğer hatlardaki akışlar artmakta bara fiyatları yükselmektedir. Hem 4-5 hemde 4-6 hattından 5 p.u. lik suseptansla birlikte en fazla güç akabildiği durumda sistem maliyeti beklenildiği gibi en düşük değerinde olmamaktadır ve değeri 7651.4 \$/h tir. Her iki

hat içinde suseptansın en büyük olduğu değerde değilde yine belirli bir aralıkta maliyet en düşük olmakta, sistemde tıkanıklık oluşmamaktadır.

Tablo 2’de koyu renk ile görülen 7632.4 \$/h maliyetine karşılık gelen suseptans değerlerinde tıkanıklık oluşmamaktadır. Yine kullanılacak TCSC suseptans değerlerini Tablo 2’de görülen bu değerlere ayarlamalıdır. Diğer deyişle, toplam maliyet minimum değerlerini b_{46} ’nin 1.5 - 3.5 p.u. ve b_{45} ’in 2.5 - 5 p.u. arasındaki değerlerinde almaktadır. Bu değerler b_{45} ve b_{46} suseptansları için optimum değerlerdir.

Şekil 4’te b_{45} ve b_{46} suseptanslarının değişim aralığı 0 ile 15 p.u. arasında alınıp daha geniş bir aralıkta inceleme yapılmıştır. Şekil 4’ten toplam maliyet değerinin minimum olduğu ortadaki bölge daha iyi görülmektedir. Bu bölgede hiç bir hatta tıkanıklık olmamaktadır. Bütün hatlar limitlerinin altında yüklenmektedir ve tüm baralarda fiyatlar aynı olmaktadır. Hem 4-5 hemde 4-6 hattında suseptans değeri 15 p.u. lik en yüksek değerini alsa bile bu hatların limitlerinden dolayı daha fazla güç akışı olamayacağından bu hatlarda tıkanıklık oluşur ve toplam maliyet değeri minimum değerinden yüksek çıkar. Bu inceleme ile yine suseptansın belirli bir optimum aralığı olduğu görülür. Suseptans ister

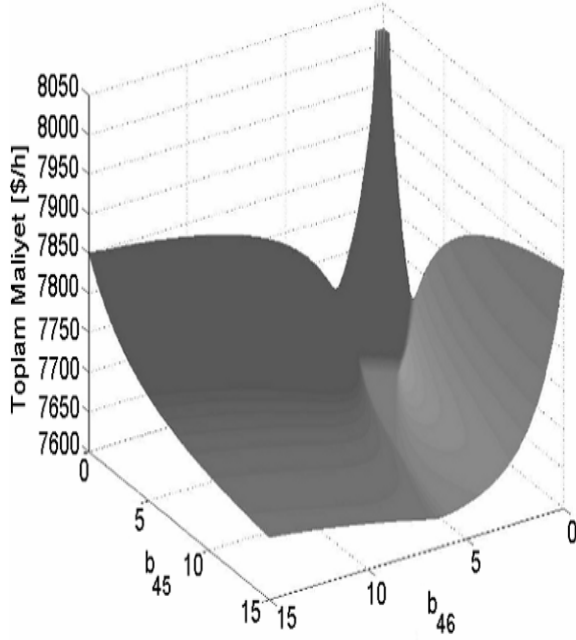
5 pu’e ister 15 pu’e kadar artırılınsın suseptansın bu optimum aralığı değişmez.

Şekil 5’te, 4-5 ve 4-6 hattı suseptansları 0 ile 15 p.u. arasında değişirken ortaya çıkan tıkanıklılık bölgeleri ve tıkanan hatlar görülmektedir. Her iki hattın suseptansının 0 ile 15 p.u. arasında değişen değerlerine karşılık olarak farklı hat veya hatlar limitlerinde yüklenerek bu hatlarda tıkanıklık oluşmaktadır. Ayrıca hiçbir hatta tıkanıklık oluşmadığı diğer deyişle toplam maliyet değerinin minimum olduğu ‘tıkanıklık yok’ diye adlandırılan bölgede şekilde görülmektedir. Bu bölgenin dışında maliyet daima yüksektir.

Şekil 5 aynı zamanda TCSC aygıtını kontrol etmek için nasıl bir kontrol algoritması oluşturulması gerektiği konusunda da önemli bir bilgiye sahiptir. Örneğin, bir kontrol algoritması bir zamanda sadece bir hatta bakarsa ve diğer kontrol edilebilen hatlara dikkat etmeden suseptansı ayarlamaya çalışırsa optimal çözüm bulamaz. Oysa Şekil 5’te b_{46} suseptansı 5 pu’in üzerinde değerler alırsa b_{45} suseptansı ne değer alırsa alsın tıkanıklık daima olacağı görülmektedir. Böylece algoritmalar iterasyonun her adımında bütün kontrol edilebilen hatları dikkate alarak optimal çözümü daha hızlı ve daha iyi bir şekilde bulma şansına sahip olurlar.

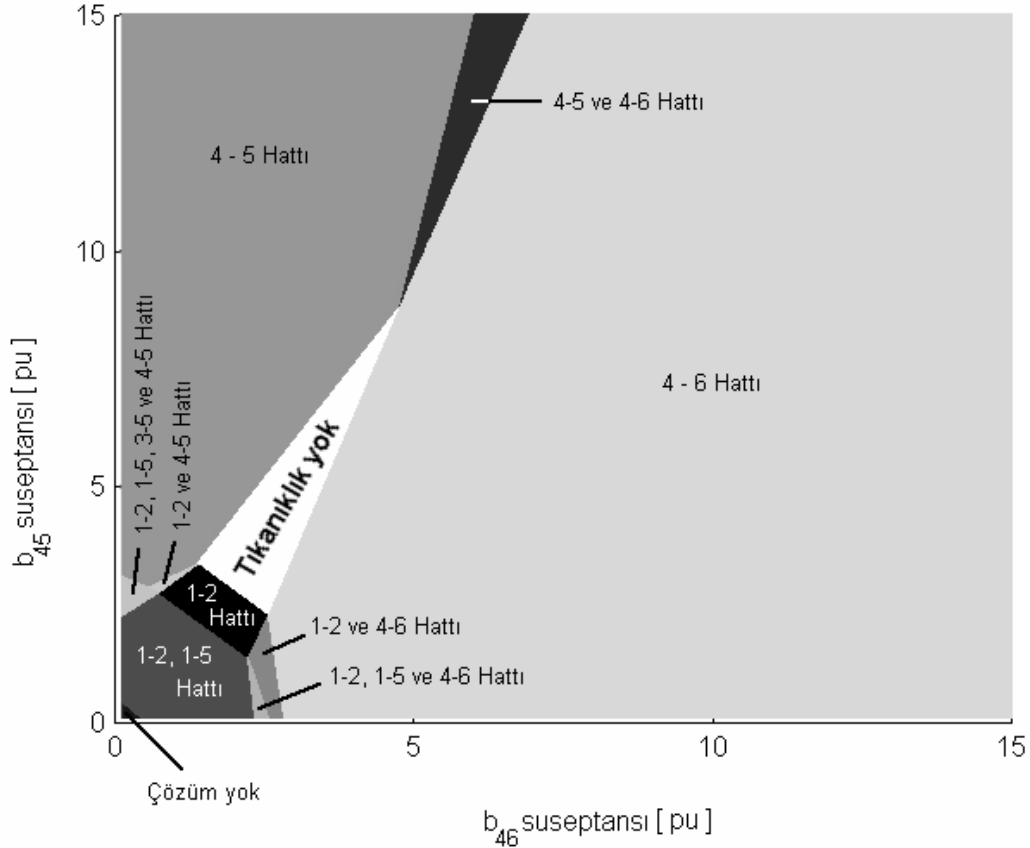
Tablo 2. Hat 4-5 ve 4-6 suseptanslarının değişimine göre toplam maliyet değişimi

b_{46}		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
b_{45}	0	Çözüm yok	7949.8	7844	7775.4	7729.9	7709.9	7730.6	7748.6	7763	7774.8	7784.6
	0.5	8020.9	7841.9	7759.6	7709.7	7678.9	7677	7698.5	7716.7	7731.8	7744.4	7755
	1	7874.4	7763.4	7702.6	7668.8	7650.2	7655.9	7675.4	7692.9	7707.9	7720.6	7731.5
	1.5	7793.7	7708.8	7666.6	7646	7637.5	7642.6	7659	7675	7689.4	7702	7712.8
	2	7734.8	7672.8	7646	7636.5	7633.5	7635	7647.7	7661.8	7675.2	7687.2	7697.8
	2.5	7709.9	7650.8	7636.8	7633.2	7632.4	7632.4	7640	7652	7664	7675.5	7685.7
	3	7734	7661	7633.6	7632.4	7632.4	7632.4	7635	7644.7	7655.6	7666	7675.9
	3.5	7758.2	7679.9	7643.2	7632.4	7632.4	7632.4	7632.4	7639.5	7648.9	7658.6	7667.8
	4	7777.9	7697	7654.7	7635.6	7632.4	7632.4	7632.4	7635.8	7643.8	7652.6	7661.2
	4.5	7794.2	7712.2	7666.3	7642.5	7632.8	7632.4	7632.4	7632.4	7639.9	7647.8	7655.8
	5	7807.8	7725.3	7677	7650	7636	7632.4	7632.4	7632.4	7637	7644	7651.4



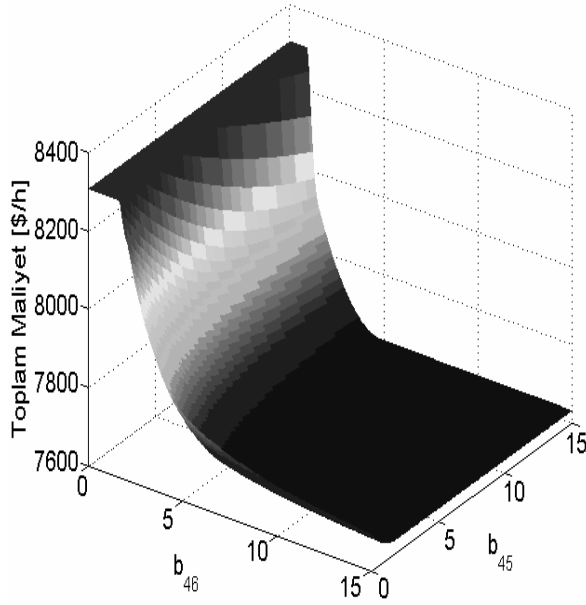
Şekil 4. Hat 4-5 ve 4-6 suseptanslarının 0 ile 15 pu arasındaki değişimine göre maliyet değişimi

Hat kapasiteleri değişmediği sürece suseptansın değişimi çok geniş bir aralıkta maliyet fonksiyonunu düşürmeye yetmeyebilir. Suseptansın artırılması o hattan daha fazla güç akıtılmasına sebep olacak fakat bu artış hattın kapasitesine kadar mümkün olacaktır. Hat kapasitesinde yüklendiğinde bu hattın suseptansı artırılrsa bile bu hattan akacak güçte değişiklik olmayacak dolayısıyla sistemde tıkanıklık olacak ve üretim – yük dengesini sağlamak için akış başka hatlardan sağlanacaktır. Hat kapasitesi sabitse bir hatta suseptans değiştirilirken başka hatların akışlarının değişmesi gerilim açısının (θ) değişiminden kaynaklanmaktadır. Bir baraya bağlı bir hattın gerilim açısının değişimi o baraya bağlı diğer hattın gerilim açısının da değişimi olduğundan tüm sistem akışları değişecektir. Suseptans ve hat kapasitesi genellikle birbirlerinden bağımsız değildir. Suseptansın artması hat kapasitesinde de aynı zamanda artışa sebep olur. Bu nedenle hem 4-5 ve 4-6 hatlarının hem suseptansı hemde kapasitesinin aynı oranda artırılmasının toplam maliyete etkisi incelenmiştir.



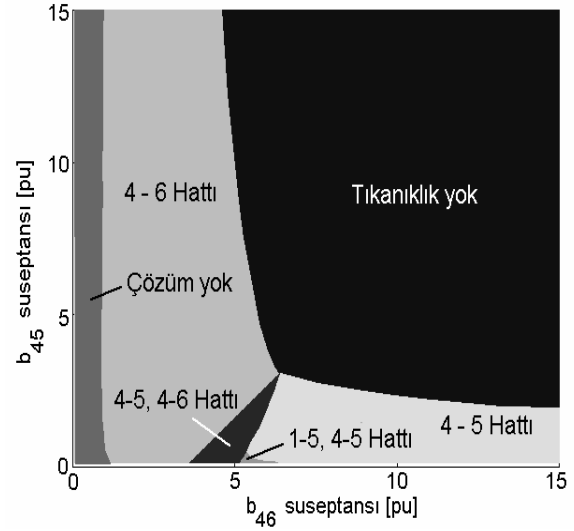
Şekil 5. Tıkanıklık bölgeleri ve tıkanmış hatlar

Şekil 6’da tıkanan hattın suseptansla birlikte hat kapasitesinin de artırılarak yapılan çözümünde oldukça geniş bir bölgede sistemin toplam maliyetinin minimum olduğu, dolayısıyla bu bölgede tıkanıklığın olmadığı görülür. Sadece suseptansın değişimine göre toplam maliyetin değişiminin incelendiği Şekil 4 ile suseptans ve hat kapasitesinin beraber değiştirilmesinden elde edilen Şekil 6 kıyaslanırsa Şekil 6’da toplam maliyet değerinin minimum olduğu, dolayısıyla tıkanıklığın olmadığı bölgenin daha geniş olduğu görülür. Hem suseptansın hem de kapasitenin artırılarak hattın güçlendirildiği durum her zaman tıkanıklıktan çıkmak için daha iyi bir çözümdür.



Şekil 6. Suseptansla birlikte hat kapasitesi değişiminin toplam maliyete etkisi

Şekil 7’de ise 4-5 ile 4-6 hattı suseptans ve kapasitesinin aynı oranda değişimi sırasında hangi hatlarda tıkanıklık olduğu görülür. Tıkanıklığın olmadığı bölge oldukça geniştir. Çünkü suseptansla birlikte hat kapasitesi de arttığından bu hatta tıkanıklık oluşmaz ve bu hat kapasitesi yeterli olduğundan akış, başka hatlara kayıp bu hatları yüklediği için başka hatlarda da tıkanıklık oluşmaz. Böylece hem suseptansı hemde kapasiteyi artırmak tıkanıklık için daha iyi bir çözüm sağlar.



Şekil 7. Suseptansla birlikte hat kapasitesi de değişirse hatların tıkanıklık durumları

Sonuçlar

Bu çalışmada iletim hat suseptanslarının ve hat kapasitelerinin değişiminin tıkanıklık üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hat suseptanslarındaki ve kapasitelerindeki değişimin etkilerini görmek için ilk aşamada matematiksel model kurulup duyarlılık analizi yapılmıştır. İkinci aşamada hat parametresi değişimine göre üretim değişimi ve hatların tıkanıklık durumları kısıtlamalı optimizasyon ile belirlenmiştir. Bu çalışmalar elektrik enerji piyasalarını planlayan ve çalıştıran mühendisler için önem taşımaktadır. Yapılan incelemelerde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Sistem maliyetinin en duyarlı olduğu hat suseptansı, tıkanıklık olan hattın suseptansıdır.
2. Hat kapasitesi sabit tutulup sadece hat suseptansı artırılırken her hattın suseptansı için optimum bir aralık bulunabilir. Suseptansın bu değer aralığında tıkanıklık oluşmazken bu aralığın altındaki ve üstündeki değerlerde tıkanıklık oluşabilir. Bu sonuç özellikle hattan akan güç kontrolünde gelecekte FACTS sistemlerinin (esnek alternatif akım iletim sistemleri) kullanılmasının yaygınlaşması ile birlikte önemli olmaktadır. Optimum çözüm için hat parametrelerinin

hangi aralıkta değişmesi gerektiğinin bilinmesi ve bu aralıklara göre FACTS cihazlarının kontrolünün sağlanması gerekir.

3. Hem hat suseptansı hem de hat kapasitesi aralarındaki oran aynı kalacak şekilde artırırsa akışın başka hatlara kaymasına gerek kalmadan sistemin tamamen tıkanıklıktan çıktığı görülmüştür.
4. Bir kontrol algoritması bir zamanda sadece bir hatta bakarsa ve diğer kontrol edilebilen hatlara dikkat etmeden suseptansı ayarlamaya çalışırsa optimal çözüm bulamayabilir. Oysa bu inceleme de tıkanıklığı ortadan kaldırmak için sadece bir hat suseptansını değiştirmenin yeterli olmadığı, diğer hatların suseptansına da dikkat etmek gerektiği görülmüştür. Böylece algoritmalar iterasyonun her adımında bütün kontrol edilebilen hatları dikkate alarak optimal çözümü daha hızlı ve daha iyi bir şekilde bulma şansına sahip olurlar.
5. Tıkanıklığın uzun süreli düzenlenmesi, hat parametrelerine maliyet duyarlılığının dikkatli bir analizini gerektirir. Bu analizler tıkanıklığı uzun süreli olarak verimli bir şekilde ortadan kaldırmak için hangi hatların öncelikli olarak güçlendirilmesi gerektiği konusunda planlayıcılara rehberlik eder.

Semboller

P_{ij}	: Hat ij üzerindeki aktif güç akışı (MW)
P_{ij}^{mak}	: Hattan akan maksimum aktif güç (MW)
b_{ij}	: Hat ij 'nin suseptansı (pu.)
n_{bara}	: Bara sayısı
n_{dal}	: Hat sayısı
λ	: Eşitlik kısıtlamaları Lagrange çarpanı
μ	: Eşitsizlik kısıtlamaları Lagrange çarpanı
C_i	: i barasındaki maliyet fonksiyonu
z	: Değişkenler ve Lagrange çarpanı vektörü
TM	: Toplam üretim maliyeti (\$/h)
W	: Lagrange ifadesinin z 'ye göre ikinci türevinin katsayı matrisi

Kaynaklar

Alomoush, M.I., (2003). Derivation of UPFC DC load flow model with examples of its use in

- restructured power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, **18**, 3, 1173-1180.
- Christie, R.D. ve Bose, A., (1996). Load frequency control issues in power system operations after deregulation, *IEEE Transactions on Power Systems*, **11**, 3, 1191-1200.
- Deladreue, S., Brouaye, F., Bastard, P. ve Peligry, L., (2003). Using two multivariate methods for line congestion study in transmission systems under uncertainty, *IEEE Transactions on Power Systems*, **18**, 1, 353-358.
- De la Torre, T., Feltes, J.W., San Roman, T.G. ve Merrill H.M., (1999). Deregulation, privatization and competition: transmission planning under uncertainty, *IEEE Transactions on Power Systems*, **14**, 2, 460-465.
- Fang, R.S. ve David, A. K., (1999). Transmission congestion management in an electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*, **14**, 3, 877- 883.
- Gedra, T.W., (1999). On transmission congestion and pricing, *IEEE Transactions on Power Systems*, **14**, 1, 241-248.
- Glavitsch, H. ve Alvarado, F., (1998). Management of multiple congested conditions in unbundled operation of a power system, *IEEE Transactions on Power Systems*; **13**, 3; 1013-1019.
- Greene, S., Dobson, I., Alvarado, F. L., (1997). Sensitivity of the loading margin to voltage collapse with respect to arbitrary parameters, *IEEE transactions on Power Systems*, **12**, 1, 262-272.
- Gribik, P. R., Angelidis, G. A. ve Kovacs, R. R., (1999). Transmission access and pricing with multiple separate energy forward markets, *IEEE Transactions on Power Systems*, **14**, 3, 865-876.
- Gribik, P. R., Shirmohammadi, D., Hao, S., Thomas C.L. ve Little A.D., (1990). Optimal power flow sensitivity analysis, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 969-976.
- Kaltenbach, J. C., Peschon, J. ve Gehrig, E. H., (1970). A mathematical optimization technique for the expansion of electric power transmission systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **Pas-89**, 1, 113-119.
- Rahimi, F.A. ve Vojdani, A., (1999). Meet the emerging transmission market segments, *IEEE Computer Applications in Power*, **12**, 1, 26-32.
- Santos Jr., A., França, P.M. ve Said, A., (1989). An optimization model for long - range transmission expansion planning, *IEEE Transactions on Power Systems*, **4**, 1, 94-101.

- Shahidehpour, M., (2004). Investing in expansion the many issues that cloud transmission planning, *IEEE Power&Energy Magazine*, **2**, 1, 14-18.
- Singh, H., Hao, S. ve Papalexopoulos, A., (1998). Transmission congestion management in competitive electricity markets, *IEEE Transactions on Power Systems*, **13**, 2, 672-680.
- Song, Y.H. ve Johns, A.T., (1999). Flexible ac transmission systems (FACTS), *The Institution of Electrical Engineers*, London, 29-39.
- Villasana, R. , Garver, L. L. ve Salon, S. J., (1985). Transmission network planning using linear programming, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **Pas-104**, 2, 349-356.
- Weber, J.D., Overbye, T.J. and DeMarco, C.L., (1999). Modeling the consumer benefit in the optimal power flow, *Decision Support Systems*, **24**, 279-296.
- Zobi, C. K. ve Uçak, C., 2004, Investigation of transmission line parameter sensitivities in congested power systems, *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, **6**, 3, 1463-1468.