



## Tristör kontrollü seri kompanzatore ait eşdeğer reaktans parametresinin jacobian matrise kontrol değişkeni olarak sokulması

Faruk Yalçın<sup>1\*</sup>, Uğur Arifoğlu<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş., Sakarya

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Sakarya

04.06.2013 Geliş/Received, 01.07.2013 Kabul/Accepted

### ÖZET

Tristör kontrolü seri kompanzator (TCSC), enerji iletim sistemlerinde iletim hatlarına seri bağlanarak, bağlı oldukları hattın eşdeğer empedansını değiştiren FACTS cihazlarından biridir. TCSC'ye ait eşdeğer reaktans parametresindeki değişim, bağlı olduğu iletim hattının eşdeğer admitans değerini değiştireceğinden, sistemin bara admitans yapısı değişir. Bu çalışmada, güç akışı çalışmalarında TCSC eşdeğer reaktans parametresini Jacobian matrise kontrol değişkeni olarak sokarak, bara admitans matrisinin her iterasyonda yeniden oluşturulması zorunluluğunu ortadan kaldırarak, yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Bu yaklaşımın amacı; özellikle büyük boyutlu güç sistemlerinde yapılan güç akışı hesaplamalarında, her iterasyonda TCSC eşdeğer reaktans parametresi değişiminde, algoritma yakınsama süresinin azaltılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda TCSC'nin bağlı olduğu baralar için yeni güç denklemleri ve bu güç denklemlerine bağlı yeni Jacobian matris elemanı hesaplama denklemleri elde edilmiştir. Bu çalışma, TCSC eşdeğer reaktans parametresini, Jacobian matrise kontrol değişkeni olarak sokarak, literatürdeki ilk çalışma özelliğine sahiptir. Önerilen yaklaşım IEEE 57 baralı test sistemine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın doğruluğunu ve güç akışı algoritması yakınsama hızını arttırdığını ispatlamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tristör Kontrollü Seri Kompanzator, Jacobian Matris, Güç Akışı

## Inserting the equivalent reactance parameter of thyristor-controlled series compensator into the jacobian matrix as control variable

### ABSTRACT

Thyristor-controlled series compensator (TCSC) is one of the FACTS devices that changes the equivalent impedance value of the transmission line in energy transmission systems by series connecting to the line. As the equivalent reactance parameter value changing in TCSC changes the equivalent admittance value of the transmission line that the TCSC is connected to, the bus admittance matrix structure of the system is changed. In this paper, a new approach that includes the TCSC equivalent reactance parameter to the Jacobian matrix as control variable and prevents the need of rebuilding the bus admittance matrix in power flow studies is proposed. Thus, the speed increase of the power flow algorithm convergence when the TCSC equivalent reactance parameter is changed is intended. For this aim, new power equations for the buses that the TCSC is connected to and new equations for Jacobian matrix component calculation are obtained. This study is the first one that includes the TCSC equivalent reactance parameter to the Jacobian matrix as control variable in the literature. The proposed approach is applied on

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

IEEE 57 bus test system. The obtained results have proved that the approach is accurate and fast convergence for the power flow algorithm has been achieved.

**Keywords:** Thyristor-controlled Series Compensator, Jacobian Matrix, Power Flow

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tristör kontrollü seri kompanzátör (TCSC), reaktans değeri kontrol edilebilen "esnek alternatif akım iletim sistemi" (FACTS) cihazlarından bir tanesidir. Tristör tetikleme açısı uygun değerde seçilerek, endüktif ya da kapasitif olarak, hattın eşdeğer reaktans değerleri, geniş bir aralıkta (ideal olarak sonsuz değerde) ayarlanabilir. TCSC, enerji iletim sistemlerinde, iletim hatlarına seri bağlanır. Böylelikle, bağlı oldukları iletim hattının eşdeğer empedans değerine etki ederek, bu değeri değiştirirler. TCSC; AA sisteminde senkron altı rezonans risklerinin yok edilmesinde, aktif güç osilasyonlarının söndürülmesinde, kararlılığın iyileştirilmesinde ve dinamik güç akışının sağlanmasında etkin şekilde kullanılmaktadır [1-4].

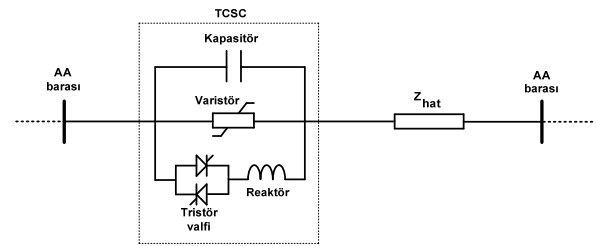
TCSC eşdeğer reaktans parametresi değeri, çalışma koşullarına bağlı olarak değiştirildiğinde, seri bağlı olduğu iletim hattının eşdeğer seri admitans değeri de değişir. Bu durumda, sistemin bara admitans yapısı değişeceğinden, sistemdeki tüm aktif ve reaktif güç akışı da değişecektir. İletim hatlarından akan güç değerlerinin değişmesi, yeni durum değişkenlerinin bulunması için güç akışı çalışmasının yeniden yapılmasını gerekli kılar. TCSC eşdeğer reaktans parametresi değişimi sebebiyle, bara admitans yapısı değişeceğinden, yapılacak güç akışı çalışması için bara admitans matrisinin yeniden kurulması gerekir. TCSC eşdeğer reaktans parametresindeki her yeni değer için bara admitans matrisinin yeniden kurulması ise, güç akışı algoritması yakınsama süresini arttıracaktır [5]. Büyük boyutlu bara admitans matrisine sahip, büyük enterkonnekte sistemler için yapılan güç akışı çalışmasının, mümkün olan en kısa sürede yakınsaması, sistemin kararlı ve doğru şekilde işletilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu sebeple, sürekli çalışan güç akışı algoritmalarında, bara admitans matrisinin sürekli yeniden kurulması, güç akışı algoritmasının hızlı yakınsamasını engeller.

Bu çalışmada, TCSC eşdeğer reaktans parametresi değişiminde, Newton-Raphson tabanlı güç akışı algoritması için, bara admitans matrisinin yeniden oluşturulma gereğini ortadan kaldıran yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşımda, TCSC eşdeğer reaktans parametresi değişim etkileri, Jacobian matrise aktarılmıştır. Newton-Raphson yönteminde, Jacobian

matris, her iterasyonda zaten oluşturulduğu için, önerilen yaklaşım Jacobian matris açısından algoritmaya ilave bir yük getirmemektedir. Bununla beraber, önerilen yaklaşım ile, TCSC eşdeğer reaktans parametresinin her değişim durumunda, bara admitans matrisinin yeniden kurulması gerekmediğinden, güç akışı algoritmasının hızlı yakınsaması sağlanmaktadır. TCSC eşdeğer reaktans parametresi değişikliği etkilerini Jacobian matrise aktarmak için, TCSC'nin bağlı olduğu baralar için yeni güç denklemleri elde edilmiştir. Yeni güç denklemlerine bağlı olarak, yeni Jacobian matris elemanı hesaplama denklemleri elde edilmiştir. Önerilen yaklaşım IEEE 57 baralı test sistemine uygulanmış, elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın doğruluğunu ve güç akışı algoritması yakınsama hızını arttırdığını ispatlamıştır.

## 2. TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KOMPANZATÖR (TCSC) MODELİ (THYRISTOR-CONTROLLED SERIES COMPENSATOR MODEL)

TCSC, Şekil 1'den görüleceği üzere dört temel elemandan oluşmaktadır: Sabit kapasitör, (her iki alternansta iletim sağlayabilen zıt yönlü paralel bağlanan iki adet tristörden oluşmuş) valf, bu tristör valfine seri bağlı reaktör ve varistör. Tristör valfi ve reaktörden oluşan bölüm tristör kontrollü reaktördür (TCR) [6].



Şekil 1. Tristör kontrollü seri kompanzátöre (TCSC) ait şematik gösterim (Schematic representation of thyristor-controlled series compensator)

TCSC'nin temel çalışma prensibi, sabit kapasitör reaktansına göre, reaktöre ait etkin reaktans değerini uygun şekilde ayarlayarak, eşdeğer reaktansın esnek bir şekilde kontrol edilmesi prensibi üzerine kurulmuştur. Reaktöre seri bağlı tristör valfinin tetikleme açıları uygun şekilde ayarlanıp, reaktör uçlarındaki gerilim ve reaktörden akan akım kontrol edilerek, reaktörün etkin

reaktans değeri arzu edilen değere getirilir. Varistör; genellikle metal oksitten yapılan, doğrusal olmayan bir dirençtir ve nominal çalışma durumunda, ideal olarak sonsuz dirence sahiptir. Herhangi bir arıza sebebiyle oluşan ve eşik geriliminin üzerinde maruz kaldığı aşırı gerilimlerde, varistör direnç değeri hızlı bir şekilde düşer, böylelikle TCSC, olası aşırı gerilimlere karşı korunur. Reaktör akımı ve reaktör gerilimi arasında  $90^\circ$  faz farkı olduğundan, reaktör akımı ancak  $\alpha_{TCSC}$  tristör tetikleme açısının  $90^\circ < \alpha_{TCSC} < 180^\circ$  olduğu aralıkta kontrol edilebilir. Şekil 1' de görüldüğü üzere, TCSC iletim hattına seri bağlanarak, hattın eşdeğer empedansı ( $z_{hat}$ ) etkin bir şekilde değiştirilebilir.

Tristör tetikleme açısı ( $\alpha_{TCSC}$ ) değerine bağlı olarak, sürekli çalışma koşullarında, TCSC' ye ait ana harmonik eşdeğer reaktans parametresi [7];

$$x_{TCSC} = -x_c + K_1 \{2(\pi - \alpha_{TCSC}) + \sin[2(\pi - \alpha_{TCSC})]\} + K_2 \cos^2(\pi - \alpha_{TCSC}) (\varpi \tan[\varpi(\pi - \alpha_{TCSC})]) - K_2 \cos^2(\pi - \alpha_{TCSC}) \tan(\pi - \alpha_{TCSC}) \quad (1)$$

eşitliği ile verilebilir. (1) eşitliğinde  $x_c$ ; TCSC' ye ait kapasitörün reaktans genliğini,  $\alpha_{TCSC}$ ; TCSC' ye ait tristör tetikleme açısını (radyan cinsinden) ifade etmektedir. (1) eşitliğinde kullanılan  $K_1$ ,  $K_2$  ve  $\varpi$  değerleri, (2)-(4) eşitlikleri ile verilmiştir;

$$K_1 = \frac{x_c + x_{LC}}{\pi} \quad (2)$$

$$K_2 = -\frac{4x_{LC}^2}{x_L \pi} \quad (3)$$

$$\varpi = \sqrt{\frac{x_c}{x_L}} \quad (4)$$

(4) eşitliğindeki  $x_L$  değeri, TCSC' ye ait reaktörün reaktans genliğidir. (2)-(3) eşitliklerinde görülen  $x_{LC}$  değeri ise;

$$x_{LC} = \frac{x_c x_L}{x_c - x_L} \quad (5)$$

eşitliği yardımı ile hesaplanır.  $x_{TCSC}$  reaktans parametresi, yukarıda bahsedilen  $x_c$  ve  $x_L$  reaktans genliklerinden farklı olarak, pozitif ve negatif değerler alabilir. (1)-(5) eşitliklerinde görülen tüm reaktans

değerleri, ana harmonik frekans değerine göre hesaplanır.

İdealde TCSC endüktif ya da kapasitif özelliktedir. Dolayısıyla TCSC eşdeğer empedansı, sadece (1) eşitliği ile verilen, eşdeğer reaktans parametresini içerir;

$$z_{TCSC} = jx_{TCSC} \quad (6)$$

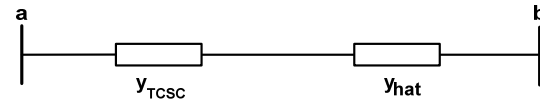
Böylelikle TCSC eşdeğer admitans değeri (7) eşitliği ile hesaplanabilir;

$$y_{TCSC} = 1/z_{TCSC} \quad (7)$$

### 3. ÖNERİLEN GÜÇ AKIŞI ALGORİTMASI (THE PROPOSED POWER FLOW ALGORITHM)

TCSC eşdeğer reaktans parametresini Jacobian matrisine kontrol değişkeni olarak sokan önerilen güç akışı yaklaşımı için bu bölüm içinde verilen eşitlikler, aşağıdaki kabuller altında geçerlidir:

- 1 numaralı bara salınım (slack) barası olarak kabul edilmiştir.
- $n_g$ ; sistemdeki jeneratör barası sayısını göstermek üzere, jeneratör baraları, 1 numaralı baradan başlamak üzere ardışıldır ( $1 \dots n_g$ ).
- Yük baralarına ait bara numaraları, jeneratör bara sayısının bir fazlasından başlamak üzere, toplam bara sayısına kadar ardışıldır ( $n_{g+1} \dots n_b$ ).



Şekil 2. Tristör kontrollü seri kompanzátör (TCSC) ve seri bağlı olduğu hatta ait eşdeğer devre gösterimi (Equivalent circuit representation of the thristor-controlled series compensator and the line that the TCSC is series connected to)

Şekil 2' de TCSC' nin seri olarak bağlı olduğu hatta ait eşdeğer devre gösterimi verilmiştir. Şekil 2'de  $y_{TCSC}$  ve  $y_{hat}$  sırasıyla, TCSC' ye ait eşdeğer admitans değerini ve hattın seri admitans değerini göstermektedir.  $a$  ve  $b$  ise sırasıyla TCSC' nin seri bağlı olduğu hattın bağlandığı baraları göstermektedir.

Önerilen yaklaşımda, Newton-Raphson yöntemi ile yapılacak güç akışı algoritmasında kullanılacak bara admitans matrisi ( $y_{bara}$ ) oluşturulurken, Şekil 2' deki eşdeğer devre üzerinde,  $a$  ve  $b$  baraları arasında

bulunan hatta ait seri admitans değeri  $y_{hat}$  olarak alınmıştır.

$$y_{bara_j} = g_{bara_j} + jb_{bara_j} \quad (8)$$

(8) eşitliği ile verilen bara admitans matrisi ifadesinde,  $g_{bara_j}$  ve  $b_{bara_j}$  ifadeleri sırasıyla, bara admitans matrisinin  $i$ . satır  $j$ . sütun elemanına ait kondüktans ve suseptans değerini göstermektedir.

TCSC' nin bağlı olmadığı baralardan, bu baralara bağlı AA hatlarına aktarılan aktif ve reaktif güç değerleri,

$$p_i = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j (g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij}) \quad (9)$$

$$q_i = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j (g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij}) \quad (10)$$

eşitlikleri ile bulunur. (9) ve (10) eşitliklerinde;  $v_i$ ;  $i$ . baraya ait gerilim genlik değerini,  $\delta_{ij}$ ;  $i$ . ve  $j$ . baralara ait gerilim açıları arasındaki farkı göstermektedir.

$$y_{fark} = g_{fark} + jb_{fark} = \frac{(-y_{bara_{ab}})^2}{-y_{bara_{ab}} + y_{TCSC}} \quad (11)$$

olarak gösterilmek üzere, TCSC' nin bağlı olduğu  $a$  ve  $b$  baralarından bu baralara bağlı AA hatlarına aktarılan aktif ve reaktif güç değerleri;

$$p_a = v_a \sum_{j=1}^{nb} v_j (g_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj}) + v_a v_b (g_{fark} \cos \delta_{ab} + b_{fark} \sin \delta_{ab}) - v_a^2 g_{fark} \quad (12)$$

$$q_a = v_a \sum_{j=1}^{nb} v_j (g_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} - b_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj}) + v_a v_b (g_{fark} \sin \delta_{ab} - b_{fark} \cos \delta_{ab}) + v_a^2 b_{fark} \quad (13)$$

$$p_b = v_b \sum_{j=1}^{nb} v_j (g_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj}) + v_b v_a (g_{fark} \cos \delta_{ba} + b_{fark} \sin \delta_{ba}) - v_b^2 g_{fark} \quad (14)$$

$$q_b = v_b \sum_{j=1}^{nb} v_j (g_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} - b_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj}) + v_b v_a (g_{fark} \sin \delta_{ba} - b_{fark} \cos \delta_{ba}) + v_b^2 b_{fark} \quad (15)$$

eşitlikleriyle hesaplanır. Newton-Raphson yöntemiyle yapılan güç akışı algoritmasına ait Jacobian matris genel yapısı;

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial \delta} & \frac{\partial p}{\partial v} \\ \frac{\partial q}{\partial \delta} & \frac{\partial q}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (16)$$

eşitliği ile verilebilir.

TCSC' nin bağlı olmadığı baralara ait güç denklemlerinin kullanıldığı Jacobian matris elemanları, (17)-(24) yardımı ile elde edilen;

$$\frac{\partial p_i}{\partial \delta_i} = J_1(i-1, i-1) = v_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j (-g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij}) \quad (17)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial \delta_j} = J_1(i-1, j-1) = v_i v_j (g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij}) \quad (18)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial v_i} = J_2(i-1, i-n_g) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j (g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij}) + 2v_i g_{bara_{ii}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial v_j} = J_2(i-1, j-n_g) = v_i (g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij}) \quad (20)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial \delta_i} = J_3(i-n_g, i-1) = v_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j (g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij}) \quad (21)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial \delta_j} = J_3(i - n_g, j - 1) \quad (22)$$

$$= -v_i v_j (g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij})$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial v_i} = J_4(i - n_g, i - n_g) \quad (23)$$

$$= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{nb} v_j (g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij}) - 2v_i b_{bara_{ii}}$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial v_j} = J_4(i - n_g, j - n_g) \quad (24)$$

$$= v_i (g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij})$$

ifadeleri kullanılarak hesaplanır.

TCSC'nin bağlı olduğu baralara ait güç denklemlerinin kullanıldığı Jacobian matris elemanları (25)-(48) eşitlikleri ile bulunabilir. Bu eşitliklerde  $j$  alt indisi, TCSC'nin bağlı olduğu  $a$  ve  $b$  baraları haricindeki baraları ifade etmektedir:

$$\frac{\partial p_a}{\partial \delta_a} = J_1(a - 1, a - 1) \quad (25)$$

$$= v_a \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq a}}^{nb} v_j (-g_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj})$$

$$+ v_a v_b (-g_{fark} \sin \delta_{ab} + b_{fark} \cos \delta_{ab})$$

$$\frac{\partial p_a}{\partial \delta_b} = J_1(a - 1, b - 1) \quad (26)$$

$$= v_a v_b (g_{bara_{ab}} \sin \delta_{ab} - b_{bara_{ab}} \cos \delta_{ab})$$

$$+ v_a v_b (g_{fark} \sin \delta_{ab} - b_{fark} \cos \delta_{ab})$$

$$\frac{\partial p_a}{\partial \delta_j} = J_1(a - 1, j - 1) \quad (27)$$

$$= v_a v_j (g_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} - b_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj})$$

$$\frac{\partial p_b}{\partial \delta_b} = J_1(b - 1, b - 1) \quad (28)$$

$$= v_b \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq b}}^{nb} v_j (-g_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj})$$

$$+ v_b v_a (-g_{fark} \sin \delta_{ba} + b_{fark} \cos \delta_{ba})$$

$$\frac{\partial p_b}{\partial \delta_a} = J_1(b - 1, a - 1) \quad (29)$$

$$= v_b v_a (g_{bara_{ba}} \sin \delta_{ba} - b_{bara_{ba}} \cos \delta_{ba})$$

$$+ v_b v_a (g_{fark} \sin \delta_{ba} - b_{fark} \cos \delta_{ba})$$

$$\frac{\partial p_b}{\partial \delta_j} = J_1(b - 1, j - 1) \quad (30)$$

$$= v_b v_j (g_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} - b_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj})$$

$$\frac{\partial p_a}{\partial v_a} = J_2(a - 1, a - n_g) \quad (31)$$

$$= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq a}}^{nb} v_j (g_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj})$$

$$+ v_b (g_{fark} \cos \delta_{ab} + b_{fark} \sin \delta_{ab})$$

$$+ 2v_a (g_{bara_{aa}} - g_{fark})$$

$$\frac{\partial p_a}{\partial v_b} = J_2(a - 1, b - n_g) \quad (32)$$

$$= v_a (g_{bara_{ab}} \cos \delta_{ab} + b_{bara_{ab}} \sin \delta_{ab})$$

$$+ v_a (g_{fark} \cos \delta_{ab} + b_{fark} \sin \delta_{ab})$$

$$\frac{\partial p_a}{\partial v_j} = J_2(a - 1, j - n_g) \quad (33)$$

$$= v_a (g_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj})$$

$$\frac{\partial p_b}{\partial v_b} = J_2(b - 1, b - n_g) \quad (34)$$

$$= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq b}}^{nb} v_j (g_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj})$$

$$+ v_a (g_{fark} \cos \delta_{ba} + b_{fark} \sin \delta_{ba})$$

$$+ 2v_b (g_{bara_{bb}} - g_{fark})$$

$$\frac{\partial p_b}{\partial v_a} = J_2(b - 1, a - n_g) \quad (35)$$

$$= v_b (g_{bara_{ba}} \cos \delta_{ba} + b_{bara_{ba}} \sin \delta_{ba})$$

$$+ v_b (g_{fark} \cos \delta_{ba} + b_{fark} \sin \delta_{ba})$$

$$\frac{\partial p_b}{\partial v_j} = J_2(b - 1, j - n_g) \quad (36)$$

$$= v_b (g_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj})$$

$$\frac{\partial q_a}{\partial \delta_a} = J_3(a - n_g, a - 1) = v_a \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq a}}^{nb} v_j (g_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj}) + v_a v_b (g_{fark} \cos \delta_{ab} + b_{fark} \sin \delta_{ab}) \quad (37)$$

$$\frac{\partial q_a}{\partial \delta_b} = J_3(a - n_g, b - 1) = -v_a v_b (g_{bara_{ab}} \cos \delta_{ab} + b_{bara_{ab}} \sin \delta_{ab}) - v_a v_b (g_{fark} \cos \delta_{ab} + b_{fark} \sin \delta_{ab}) \quad (38)$$

$$\frac{\partial q_a}{\partial \delta_j} = J_3(a - n_g, j - 1) = -v_a v_j (g_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj} + b_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj}) \quad (39)$$

$$\frac{\partial q_b}{\partial \delta_b} = J_3(b - n_g, b - 1) = v_b \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq b}}^{nb} v_j (g_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj}) + v_b v_a (g_{fark} \cos \delta_{ba} + b_{fark} \sin \delta_{ba}) \quad (40)$$

$$\frac{\partial q_b}{\partial \delta_a} = J_3(b - n_g, a - 1) = -v_b v_a (g_{bara_{ba}} \cos \delta_{ba} + b_{bara_{ba}} \sin \delta_{ba}) - v_b v_a (g_{fark} \cos \delta_{ba} + b_{fark} \sin \delta_{ba}) \quad (41)$$

$$\frac{\partial q_b}{\partial \delta_j} = J_3(b - n_g, j - 1) = -v_b v_j (g_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj} + b_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj}) \quad (42)$$

$$\frac{\partial q_a}{\partial v_a} = J_4(a - n_g, a - n_g) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq a}}^{nb} v_j (g_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} - b_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj}) + v_b (g_{fark} \sin \delta_{ab} - b_{fark} \cos \delta_{ab}) - 2v_a (b_{bara_{aa}} - b_{fark}) \quad (43)$$

$$\frac{\partial q_a}{\partial v_b} = J_4(a - n_g, b - n_g) = v_a (g_{bara_{ab}} \sin \delta_{ab} - b_{bara_{ab}} \cos \delta_{ab}) + v_a (g_{fark} \sin \delta_{ab} - b_{fark} \cos \delta_{ab}) \quad (44)$$

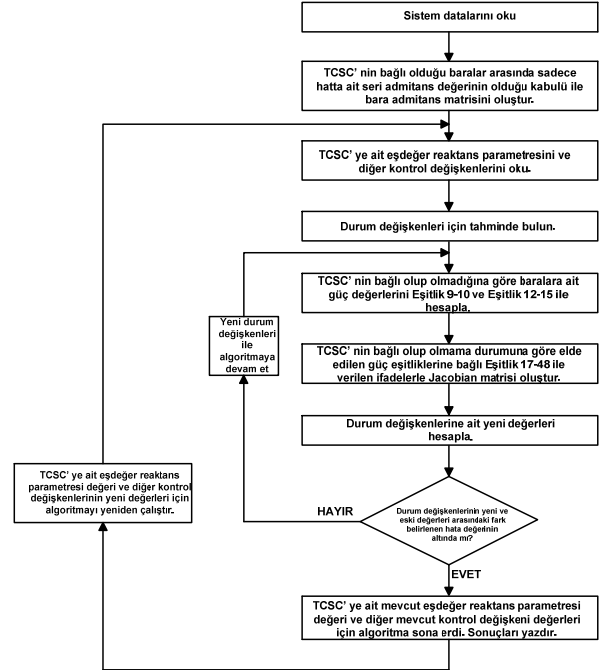
$$\frac{\partial q_a}{\partial v_j} = J_4(a - n_g, j - n_g) = v_a (g_{bara_{aj}} \sin \delta_{aj} - b_{bara_{aj}} \cos \delta_{aj}) \quad (45)$$

$$\frac{\partial q_b}{\partial v_b} = J_4(b - n_g, b - n_g) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq b}}^{nb} v_j (g_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} - b_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj}) + v_a (g_{fark} \sin \delta_{ba} - b_{fark} \cos \delta_{ba}) - 2v_b (b_{bara_{bb}} - b_{fark}) \quad (46)$$

$$\frac{\partial q_b}{\partial v_a} = J_4(b - n_g, a - n_g) = v_b (g_{bara_{ba}} \sin \delta_{ba} - b_{bara_{ba}} \cos \delta_{ba}) + v_b (g_{fark} \sin \delta_{ba} - b_{fark} \cos \delta_{ba}) \quad (47)$$

$$\frac{\partial q_b}{\partial v_j} = J_4(b - n_g, j - n_g) = v_b (g_{bara_{bj}} \sin \delta_{bj} - b_{bara_{bj}} \cos \delta_{bj}) \quad (48)$$

TCSC' ye ait eşdeğer reaktans parametresinin Jacobian matrisine sokulması için, önerilen yaklaşıma ait Newton-Raphson tabanlı güç akışı algoritması genel işaret akış şeması, Şekil 3' de verilmiştir.



Şekil 3. Önerilen güç akışı algoritmasına ait işaret akış şeması (Flow chart of the proposed power flow algorithm)

#### 4. UYGULAMA SONUÇLARI (APPLICATION RESULTS)

TCSC eşdeğer reaktans parametresi değerinin Jacobian matrisine sokulması için Bölüm 3’de önerilen yaklaşım, IEEE 57 baralı test sistemine uygulanmıştır. Uygulama, önerilen yaklaşımın doğruluğunu ve güç akışı algoritmasının yakınsama süresini (klasik yaklaşımlara göre) azalttığını göstermek için, iki farklı şekilde yapılmıştır:

Öncelikle, standart IEEE 57 baralı test sistemi TCSC içermediğinden, 6 ve 7 numaralı baralar arasındaki hatta seri TCSC eklenerek test sistemi değiştirilmiştir. TCSC eşdeğer reaktans parametresi için belirlenen değer için önerilen yaklaşım, bu test sistemine uygulanarak, güç akışı sonuçları elde edilmiştir. Daha sonra ise, önerilen yaklaşım ile elde edilen sonuçların doğruluğunu teyit etmek için, değiştirilmiş test sistemine klasik yöntem uygulanmıştır. Klasik yöntemde, TCSC eşdeğer reaktans parametresi değeri, bağlı olduğu hattın eşdeğer empedansına ilave edilerek bara admitans matrisine sokulmuştur. TCSC eşdeğer reaktans parametresi değeri Jacobian matrisine sokulmadığından, güç denklemleri ve Jacobian matris elemanı hesaplama denklemleri olarak, TCSC’ nin bağlı olmadığı baralar için verilen eşitlikler kullanılmıştır. Bu çalışmalardan sonra, TCSC eşdeğer reaktans parametresi değerini Jacobian matrisine sokan önerilen yaklaşımla elde edilen güç akışı sonuçları ile, TCSC eşdeğer reaktans parametresi değerini bara admitans matrisine sokan klasik yöntem ile yapılan güç akışı sonuçları karşılaştırılmış ve her iki yaklaşım sonuçlarının da aynı olduğu görülerek, önerilen yaklaşımın doğruluğu teyit edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen önerilen yaklaşım ve klasik yöntem ile yapılan güç akışı çalışmaları tamamlandıktan sonra, mevcut TCSC eşdeğer reaktans parametresi değeri değiştirilerek güç akışı çalışmaları yeniden yapılmıştır. Önerilen yaklaşım ile yapılan yeni güç akışı çalışmasında, TCSC’ ye ait yeni eşdeğer reaktans parametresi değeri Jacobian matrisine sokulduğu için, bara admitans matrisi yeniden kurulmadan başlamış ve güç akışı tamamlanmıştır. Klasik yöntem ile yapılan yeni güç akışı çalışmasının başlangıcında ise, yeni TCSC eşdeğer reaktans parametresi değerine göre bara admitans matrisi yeniden kurulmuş ve daha sonra güç akışı tamamlanmıştır. TCSC eşdeğer reaktans parametresi değeri değişiminden sonra, önerilen yaklaşım ve klasik yöntem ile yapılan güç akışı çalışmalarına ait yakınsama sonuçları Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Önerilen yaklaşım ve klasik yöntem ile yapılan güç akışı algoritmasına ait yakınsama sonuçlarının karşılaştırılması (Comparasion of the convergence results obtained from the proposed and conventional power flow algorithm)

	Önerilen Yaklaşım	Klasik Yöntem
İterasyon Sayısı	5	5
Yakınsama Zamanı (sn)	0.487178	0.491341

Tablo 1’ den görüldüğü üzere, önerilen yaklaşım ile yapılan güç akışı algoritması, yakınsama iterasyon sayısını artırmamış, bunun ötesinde, önerilen yaklaşım ile TCSC eşdeğer reaktans parametresinin aldığı her yeni değer Jacobian matrisine sokularak, bara admitans matrisinin yeniden kurulmaması, algoritmanın yakınsama süresini azaltmıştır.

57 baralı test sistemi için, önerilen yaklaşımın yaklaşık 0.004 sn lik erken yakınsama süresi sağladığı görülmüştür. Bu süre ilk bakışta ihmal edilebilir ve önemsiz seviyede görünmesine rağmen, çok sayıda bara sahip gerçek enterkonnekte sistemler için önerilen yaklaşımla yapılacak güç akışı çalışmalarında önemli erken yakınsama zamanı elde edilebilir. Bara sayısındaki  $n$  katlı bir artış, bara admitans matrisi eleman sayısında  $n^2$  katlı bir artışa neden olur. Bu durumda, bara admitans matrisinin oluşturulması için güç akışında gereken süre  $n^2$  kat artar. Örneğin 3420 baralı büyük bir test sistemine önerilen yaklaşımın uygulanması durumunda, 57 baralı test sistemi için elde edilen 0.004 sn lik süre yaklaşık olarak 14.4 sn süreye çıkacaktır. Bu sürenin erken yakınsama sağlanması açısından önemli bir değerde olacağı aşikardır.

#### 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND CONCLUSION)

Sunulan bu çalışma ile, literatürde ilk kez TCSC eşdeğer reaktans parametresi değeri değişimi etkilerini Jacobian matrisine aktaran yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Böylelikle güç akışı çalışmalarında TCSC eşdeğer reaktans parametre değeri değişimi sebebiyle, bara admitans matrisinin yeniden kurulması gerekliliği ortadan kaldırılmıştır. Bu amaç doğrultusunda yeni güç denklemleri ve Jacobian matris elemanı hesaplama denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen uygulama sonuçları, önerilen yaklaşımın klasik yaklaşıma göre iterasyon sayısını arttırmadığını ve algoritmanın yakınsama süresini azalttığını göstermiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] Piwko, R.J., Larsen, E.V., Damsky, B.L., Furumasa, B.C., Mittlestadt, W., Eden, J.D., 'Thyristor controlled series compensation prototype installation at the Slatt 500 kV substation', IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8-3, 1460-1469, 1993.
- [2] Son, K.M., Park, J.K., 'On the robust LQG control of TCSC for damping power system oscillations', IEEE Transactions on Power Systems", Vol. 15-4, 1306-1312, 2000.
- [3] Del Rosso, A.D., Canizares, C.A., Dona, V.M., 'A study of TCSC controller design for power system stability improvement', IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18-4, 1487-1496, 2003.
- [4] [www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/dfd0b019e1fe08a48325771f002dbfc5/\\$file/a02-0158.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/dfd0b019e1fe08a48325771f002dbfc5/$file/a02-0158.pdf) (Erişim Tarihi: Ocak 2013)
- [5] Yalçın, F., 'FACTS Cihazları İçeren AA-DA Sisteminde Optimal Güç Akışı Hesabı İçin Yeni Bir Yaklaşım', Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2013.
- [6] Fuerte-Esquivel, C.R., Acha, E., Ambriz-Perez, H., 'A thyristor controlled series compensator model for the power flow solution of practical power networks', IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15-1, 58-64, 2000.
- [7] Acha, E., Fuerte-Esquivel, C.R., Ambriz-Perez, H., Angeles-Camacho, C., 'FACTS: Modelling and simulation in power networks', John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, 2004.