



Kademe ayarlı transformatörlere ait kademe ayar değerlerinin jacobian matrisine kontrol değişkeni olarak sokulması

Faruk Yalçın^{1*}, Uğur Arifoğlu²

^{1*}Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş., Sakarya

²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Sakarya

31.05.2013 Geliş/Received, 01.07.2013 Kabul/Accepted

ÖZET

Yük altında kademe değiştiren kademe ayarlı transformatörlere ait eşdeğer seri ve şönt admitans değerleri kademe değişimine bağlı olarak değer değiştirirler. Bu durum, bara admitans matrisi yapısını değiştireceğinden, güç akışı çalışmalarında, her kademe değişimi durumunda bara admitans matrisinin yeniden oluşturulmasını zorunlu kılar. Bu çalışmada, kademe ayarlı transformatörlerin kademe değişim etkilerini Jacobian matrisine sokan yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım ile, güç akışı çalışmalarında her kademe değişiminden sonra bara admitans matrisinin yeniden oluşturulması zorunluluğu ortadan kaldırılmıştır. Böylece güç akışı algoritmasının yakınsaması hızlandırılmıştır. Literatürde bu amaca yönelik benzer çalışmalar bulunmasına rağmen, bu çalışmalardan farklı olarak önerilen çalışma ile, aynı baraya birden çok ve farklı kombinasyonlarda kademe ayarlı transformatör bağlanması durumunda kademe değişim etkilerinin Jacobian matrisine dahil edilmesi sağlanmıştır. Bu amaçla yeni güç denklemleri ve yeni Jacobian matris elemanı hesaplama denklemleri elde edilmiştir. Önerilen yaklaşım IEEE 57 baralı test sistemine uygulanmış ve doğruluğu ispatlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kademe Ayarlı Transformatör, Jacobian Matris, Güç Akışı

Inserting the tap values of the tap changer transformers into the jacobian matrix as control variables

ABSTRACT

Series and shunt admittance values of under load tap changer transformers are changed according to tap changing. As this situation changes the structure of bus admittance matrix, it causes the need of rebuilding the bus admittance matrix at each tap changing case in power flow studies. In this paper, a new approach that includes the tap changing effects into the Jacobian matrix. By this approach, the need of rebuilding the bus admittance matrix at each tap changing case during power flow study is prevented. So, fast convergence is achieved for the power flow algorithm. Although there are similar studies for this aim in the literature, apart from these studies, including the tap changing effects to the Jacobian matrix when more than one under load tap changer transformers are connected to the same bus with different connection combinations is provided by the proposed approach. For this aim, new power equations and new Jacobian matrix component calculation equations are obtained. The proposed approach is tested on IEEE 57-bus test system and its accuracy is proved.

Keywords: Tap Changer Transformer, Jacobian Matrix, Power Flow

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerji sistemlerinde yapılan güç akışı çalışmaları, güç sistemlerinin güvenilir ve kararlı şekilde işletilmesinde oldukça önemlidir. Güç sistemini dengede tutacak parametrelerin, güç akışı algoritması ile, hem doğru hem de hızlı şekilde elde edilmesi önemlidir. Güç akışı çalışması için oluşturulan algoritmanın yakınsama hızını belirleyen temel iki etki; sistemin büyüklüğü ve algoritmanın dayandığı matematiksel alt yapısıdır.

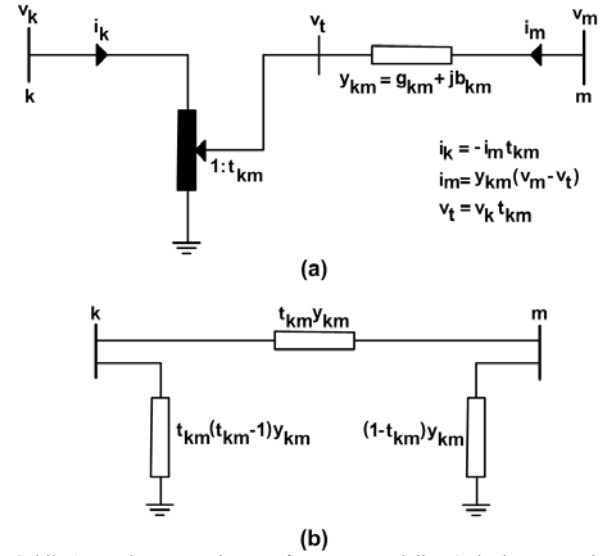
Güç sistemlerinde bulunan yük altında kademe değiştiren kademe ayarlı transformatörler, kademe değişimine bağlı olarak sistemdeki reaktif güç akışı ve gerilim kontrolü için kullanılmaktadır. Yapıları itibarıyla bu transformatörlere ait kademe ayarı değiştiğinde eşdeğer devrelere ait seri ve şönt admitans değerleri değişir [1-3]. Bu durum, kademe ayarlı transformatörün bağlı olduğu tüm güç sistemine ait bara admitans yapısını değiştirerek, sistemdeki tüm aktif ve reaktif güç akışını etkiler. Güç akışı çalışmalarında, sisteme ait hat yapısının değişmediği, sistemin bara admitans yapısını değiştiren elemanların sisteme bağlı olmadığı ya da bu elemanların değer değiştirerek sistemde değişikliğe neden olmadığı durumlarda, kullanılan güç akışı algoritması için bara admitans matrisinin algoritma boyunca bir kere oluşturulması yeterlidir. Ancak, kademe ayarlı transformatörde, kademe değişimi olduğu her durum için, algoritma içinde bara admitans matrisinin yeniden kurulması zaruri olur. Bu durum ise program boyutunun ve yakınsama süresinin artmasına neden olur [4].

Literatürde, kademe ayarlı transformatörlerin kademe değişim etkilerini bara admitans matrisine sokmayarak, bara admitans matrisinin sürekli kurulmasına gerek bırakmayan birçok çalışma bulunmaktadır. Newton-Raphson algoritması kullanılan bu çalışmalarda, kademe değişim etkileri Jacobian matrisine aktarılmaktadır [5,6]. Newton-Raphson yönteminde Jacobian matris her iterasyonda yeniden inşa edildiği için, bu yöntem algoritma yapısına ilave yük getirmez. Kademe değişimi olması durumunda, bara admitans matrisinin yeniden kurulmasına gerek kalmadığı için, yakınsama önemli ölçüde hızlanır. Ancak, mevcut çalışmalarda, kademe değişimi etkisinin Jacobian matrisine aktarılması işlemi dar kapsamlı olarak sunulmuş, bir baraya sadece bir adet ya da en fazla iki adet kademe ayarlı transformatörün bağlı olduğu durumlar için çözüm getirilmiştir. Aynı baraya iki adet kademe ayarlı transformatörün bağlı olduğu durum için ise, ilgili baraya transformatörlerin sadece giriş (kademe ayarının yapılmadığı) uçlarının bağlı olduğu kabulü yapılmıştır [7].

Bu çalışmada, kademe ayarlı transformatörlerin kademe değişim etkilerini Jacobian matrisine aktaran yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bu yaklaşım ile, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak, aynı baraya n adet kademe ayarlı transformatörün bağlı olması durumunda da çalışabilen çözüm önerilmiştir. Bu yeni yaklaşımda, aynı baraya birden fazla transformatörün farklı bağlanma kombinasyonları (giriş ya da çıkış uçlarının aynı baraya bağlanması ya da seri bağlanması) için de çözüm sunulmaktadır. Önerilen yaklaşımda, kademe ayarlı transformatörlerin bağlı olduğu baralar için yeni güç denklemleri üretilmiş ve bu denklemlere bağlı olarak, yeni Jacobian matris elemanı hesaplama denklemleri elde edilmiş, önerilen yaklaşım, IEEE 57 baralı test sistemine başarı ile uygulanmış ve elde edilen sonuçlar, kademe değişim etkilerinin bara admitans matrisine dahil edildiği klasik yaklaşım sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve doğruluğu test edilmiştir.

2. KADEME AYARLI TRANSFORMATÖR MODELİ (TAP CHANGER TRANSFORMER MODEL)

Yük altında kademe değiştiren kademe ayarlı transformatör modeline ait gösterim ve eşdeğer devre, Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kademe ayarlı transformatör modeli a-) kademe ayarlı transformatör gösterimi b-) kademe ayarlı transformatör eşdeğer devresi (Tap changer transformer model a-) representation of tap changer transformer b-) equivalent circuit of tap changer)[8]

Şekil 1(b)'de verilen kademe ayarlı transformatör eşdeğer devre gösteriminde; k , m , t_{km} ve y_{km} sırasıyla kademe ayarlı transformatörün girişinin bağlı olduğu barayı, çıkışının bağlı olduğu barayı, kademe ayar değerini ve transformatöre ait seri admitans değerini göstermektedir.

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

Kademe ayar değerlerini Jacobian matrise 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 ardışıdır ($1 \dots n_g$).
- Yük baralarına ait bara numaraları, jeneratör bara sayısının bir fazlasından başlamak üzere, toplam bara sayısına kadar ardışıdır ($n_{g+1} \dots n_b$).

Şekil 1(b)'de, kademe ayarlı transformatör için verilen eşdeğer devreden görüleceği üzere, transformatörün bağlı olduğu baralar arasında oluşan seri admitans ve baralarda oluşan şönt admitans değerleri, kademe ayar değerine (t_{km}) göre değişmektedir. y_{km} ; transformatörün seri admitans değeridir. Önerilen yaklaşımda, Newton-Raphson yöntemi ile yapılacak güç akışı algoritmasında kullanılacak bara admitans matrisi (y_{bara}) oluşturulurken, Şekil 1(b)'deki eşdeğer devre üzerinden, aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- k ve m barası arasında bulunan seri admitans değeri, kademe değişiminden bağımsız gerçek seri admitans değeri y_{km} dir.
- k ve m barasına bağlı olan şönt admitans değerleri sıfırdır.

$$y_{bara_j} = g_{bara_j} + jb_{bara_j} \quad (1)$$

(1) 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.

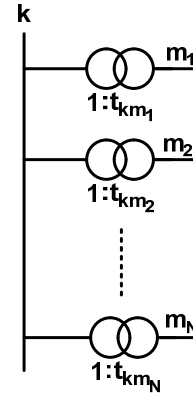
Kademe ayarlı transformatörlerin bağlı olmadığı baralardan, diğer AA hatlarına aktarılan aktif ve reaktif güç değerleri,

$$p_i = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right) \quad (2)$$

$$q_i = v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right) \quad (3)$$

eşitlikleri ile bulunur. (2-3) eşitliklerinde; v_i ; i . baraya ait gerilim genlik değerini, δ_{ij} ; i . ve j . baralara ait gerilim açıları arasındaki farkı göstermektedir.

Şekil 2' de gösterildiği gibi, aynı baraya N adet ($N = 1, 2, 3, \dots$) kademe ayarlı transformatörün giriş uçları bağlı ise, bu tür baralardan, diğer AA hatlarına aktarılan aktif ve reaktif güç değerleri ise;



Şekil 2. Aynı baraya N adet kademe ayarlı transformatöre ait giriş uçlarının bağlanması (Connection of the input terminals of N tap changer transformers to the same bus)

$$p_k = v_k \sum_{j=1, j \neq k, m_1, m_2, \dots, m_N}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} \right) + v_k \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} \left(g_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} + b_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n} \right) + v_k^2 \left[g_{bara_{kk}} - \sum_{n=1}^N (t_{km_n}^2 - 1) g_{bara_{km_n}} \right] \quad (4)$$

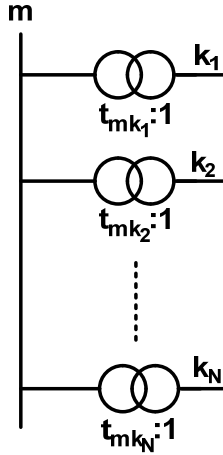
$$q_k = v_k \sum_{j=1, j \neq k, m_1, m_2, \dots, m_N}^{nb} v_j \left(g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} \right) + v_k \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} \left(g_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n} - b_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} \right) + v_k^2 \left[-b_{bara_{kk}} + \sum_{n=1}^N (t_{km_n}^2 - 1) b_{bara_{km_n}} \right] \quad (5)$$

eşitlikleri kullanılarak bulunur. (4-5) eşitlikleri ile verilen ifadeler, Şekil 2'deki transformatörlerin çıkış uçlarının bağlı olduğu bara türlerinden bağımsızdır.

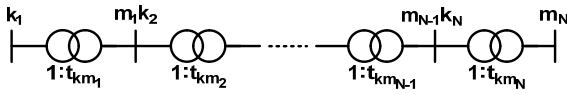
Şekil 3' te gösterildiği gibi, aynı baraya N adet ($N = 1, 2, 3, \dots$) kademe ayarlı transformatörün çıkış uçları bağlı ise, bu tür baralardan diğer AA hatlarına aktarılan aktif ve reaktif güç değerleri;

$$\begin{aligned}
 p_m &= v_m \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \\
 &+ v_m \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} \left(g_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} + b_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} \right) \quad (6) \\
 &+ v_m^2 g_{bara_{mm}} \\
 q_m &= v_m \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \\
 &+ v_m \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} \left(g_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} - b_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} \right) \quad (7) \\
 &- v_m^2 b_{bara_{mm}}
 \end{aligned}$$

eşitlikleri ile bulunur. (6-7) eşitlikleri ile verilen ifadeler, Şekil 2’deki transformatörlerin giriş uçlarının bağlı olduğu bara türlerinden bağımsızdır.



Şekil 3. Aynı baraya N adet kademe ayarlı transformatöre ait çıkış uçlarının bağlanması (Connection of the output terminals of N tap changer transformers to the same bus)



Şekil 4. N adet kademe ayarlı transformatörün seri bağlanması (Series connection of N tap changer transformers)

Şekil 4’de gösterildiği gibi, N adet kademe ayarlı transformatörün birinin çıkış ucunun diğerinin giriş ucuna bağlanması suretiyle seri bağlı olduğu genel durum için, bu seri bara setine ait her bir baradan, diğer AA hatlarına aktarılan aktif ve reaktif güç değerleri;

Kademe ayarlı transformatörlere ait kademe ayar değerlerinin jacobian matrise kontrol değişkeni olarak sokulması

$$\begin{aligned}
 p_{k_1} &= v_{k_1} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{k_1j}} \cos \delta_{k_1j} + b_{bara_{k_1j}} \sin \delta_{k_1j} \right) \\
 &+ v_{k_1} v_{(m_1, k_2)} t_{km_1} \left(g_{bara_{k_1(m_1, k_2)}} \cos \delta_{k_1(m_1, k_2)} + b_{bara_{k_1(m_1, k_2)}} \sin \delta_{k_1(m_1, k_2)} \right) \quad (8) \\
 &+ v_{k_1}^2 \left[g_{bara_{k_1k_1}} - (t_{km_1}^2 - 1) g_{bara_{k_1(m_1, k_2)}} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{k_1} &= v_{k_1} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{k_1j}} \sin \delta_{k_1j} - b_{bara_{k_1j}} \cos \delta_{k_1j} \right) \\
 &+ v_{k_1} v_{(m_1, k_2)} t_{km_1} \left(g_{bara_{k_1(m_1, k_2)}} \sin \delta_{k_1(m_1, k_2)} - b_{bara_{k_1(m_1, k_2)}} \cos \delta_{k_1(m_1, k_2)} \right) \quad (9) \\
 &+ v_{k_1}^2 \left[-b_{bara_{k_1k_1}} + (t_{km_1}^2 - 1) b_{bara_{k_1(m_1, k_2)}} \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_{m_N} &= v_{m_N} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{m_Nj}} \cos \delta_{m_Nj} + b_{bara_{m_Nj}} \sin \delta_{m_Nj} \right) \\
 &+ v_{m_N} v_{(m_{N-1}, k_N)} t_{km_N} \left(g_{bara_{m_N(m_{N-1}, k_N)}} \cos \delta_{m_N(m_{N-1}, k_N)} \right) \quad (10) \\
 &+ v_{m_N} v_{(m_{N-1}, k_N)} t_{km_N} \left(b_{bara_{m_N(m_{N-1}, k_N)}} \sin \delta_{m_N(m_{N-1}, k_N)} \right) \\
 &+ v_{m_N}^2 g_{bara_{m_Nm_N}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{m_N} &= v_{m_N} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{m_Nj}} \sin \delta_{m_Nj} - b_{bara_{m_Nj}} \cos \delta_{m_Nj} \right) \\
 &+ v_{m_N} v_{(m_{N-1}, k_N)} t_{km_N} \left(g_{bara_{m_N(m_{N-1}, k_N)}} \sin \delta_{m_N(m_{N-1}, k_N)} \right) \quad (11) \\
 &- v_{m_N} v_{(m_{N-1}, k_N)} t_{km_N} \left(b_{bara_{m_N(m_{N-1}, k_N)}} \cos \delta_{m_N(m_{N-1}, k_N)} \right) \\
 &- v_{m_N}^2 b_{bara_{m_Nm_N}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{(m_n, k_{n+1})} &= v_{(m_n, k_{n+1})} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{(m_n, k_{n+1})j}} \cos \delta_{(m_n, k_{n+1})j} \right) \\
 &+ v_{(m_n, k_{n+1})} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(b_{bara_{(m_n, k_{n+1})j}} \sin \delta_{(m_n, k_{n+1})j} \right) \\
 &+ v_{(m_n, k_{n+1})} v_{(m_{n-1}, k_n)} t_{km_n} \left(g_{bara_{(m_n, k_{n+1})(m_{n-1}, k_n)}} \cos \delta_{(m_n, k_{n+1})(m_{n-1}, k_n)} \right) \quad (12) \\
 &+ v_{(m_n, k_{n+1})} v_{(m_{n-1}, k_n)} t_{km_n} \left(b_{bara_{(m_n, k_{n+1})(m_{n-1}, k_n)}} \sin \delta_{(m_n, k_{n+1})(m_{n-1}, k_n)} \right) \\
 &+ v_{(m_n, k_{n+1})} v_{(m_{n+1}, k_{n+2})} t_{km_{n+1}} \left(g_{bara_{(m_n, k_{n+1})(m_{n+1}, k_{n+2})}} \cos \delta_{(m_n, k_{n+1})(m_{n+1}, k_{n+2})} \right) \\
 &+ v_{(m_n, k_{n+1})} v_{(m_{n+1}, k_{n+2})} t_{km_{n+1}} \left(b_{bara_{(m_n, k_{n+1})(m_{n+1}, k_{n+2})}} \sin \delta_{(m_n, k_{n+1})(m_{n+1}, k_{n+2})} \right) \\
 &+ v_{(m_n, k_{n+1})}^2 \left[g_{bara_{(m_n, k_{n+1})(m_n, k_{n+1})}} - (t_{km_{n+1}}^2 - 1) g_{bara_{(m_n, k_{n+1})(m_{n+1}, k_{n+2})}} \right] \\
 &\quad (n = 1 \dots N - 1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{m_n k_{n+1}} &= v_{(m_n k_{n+1})} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})j}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})j} \right) \\
 &- v_{(m_n k_{n+1})} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})j}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})j} \right) \\
 &+ v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n-1} k_n)} t_{km_n} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \\
 &- v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n-1} k_n)} t_{km_n} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \\
 &+ v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{km_{n+1}} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \\
 &- v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{km_{n+1}} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \\
 &+ v_{(m_n k_{n+1})}^2 \left[-b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_n k_{n+1})}} + (t_{km_{n+1}})^2 - 1 \right] b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \\
 &\quad (n=1 \dots N-1)
 \end{aligned} \tag{13}$$

eşitlikleri yardımı ile bulunur. Özel bir durum olarak; (12-13) eşitliklerinde, $(m_{n-1} k_n)$ alt indisi yerine, $n=1$ için (k_1) indisi kullanılırken, $(m_{n+1} k_{n+2})$ alt indisi yerine $n=N-1$ değeri için (m_N) indisi kullanılmalıdır.

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

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p}{\partial \delta} & \frac{\partial p}{\partial v} \\ \frac{\partial q}{\partial \delta} & \frac{\partial q}{\partial v} \end{bmatrix} \tag{14}$$

eşitliği ile verilebilir.

Kademe ayarlı transformatörlerin bağlı olmadığı baralara ait güç denklemlerinin kullanıldığı Jacobian matris elemanları, (2-3) eşitlikleri yardımı ile elde edilen;

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p_i}{\partial \delta_i} &= J_1(i-1, i-1) \\
 &= v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right)
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p_i}{\partial \delta_j} &= J_1(i-1, j-1) \\
 &= v_i v_j \left(g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right)
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p_i}{\partial v_i} &= J_2(i-1, i-n_g) \\
 &= \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right) + 2v_i g_{bara_{ii}}
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p_i}{\partial v_j} &= J_2(i-1, j-n_g) \\
 &= v_i \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right)
 \end{aligned} \tag{18}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial q_i}{\partial \delta_i} &= J_3(i-n_g, i-1) \\
 &= v_i \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right)
 \end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial q_i}{\partial \delta_j} &= J_3(i-n_g, j-1) \\
 &= -v_i v_j \left(g_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} + b_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} \right)
 \end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial q_i}{\partial v_i} &= J_4(i-n_g, i-n_g) \\
 &= \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right) - 2v_i b_{bara_{ii}}
 \end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial q_i}{\partial v_j} &= J_4(i-n_g, j-n_g) \\
 &= v_i \left(g_{bara_{ij}} \sin \delta_{ij} - b_{bara_{ij}} \cos \delta_{ij} \right)
 \end{aligned} \tag{22}$$

ifadeleri kullanılarak hesaplanır.

Aynı baraya N adet ($N=1,2,3\dots$) kademe ayarlı transformatörün giriş uçlarının bağlı olduğu baralara ait güç denklemlerinin kullanıldığı Jacobian matris elemanları; (4- 5) eşitlikleri yardımı ile elde edilen (23-34) eşitlikleri ile hesaplanır. Bu eşitliklerde j alt indisi, kademe ayarlı transformatörün (ya da transformatörlerin) bağlı olduğu k ve m baraları haricindeki baraları ifade etmektedir:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p_k}{\partial \delta_k} &= J_1(k-1, k-1) \\
 &= v_k \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} \right) \\
 &\quad j \neq k, m_1, m_2, \dots, m_N \\
 &+ v_k \sum_{n=1}^N v_n t_{km_n} \left(-g_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n} + b_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} \right)
 \end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial p_k}{\partial \delta_m} &= J_1(k-1, m-1) \\
 &= v_k v_m t_{km} \left(g_{bara_{km}} \sin \delta_{km} - b_{bara_{km}} \cos \delta_{km} \right)
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial \delta_j} = J_1(k-1, j-1) \tag{25}$$

$$= v_k v_j (g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj})$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial v_k} = J_2(k-1, k-n_g) \tag{26}$$

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

$$+ \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} (g_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} + b_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n})$$

$$+ 2v_k \left[g_{bara_{kk}} - \sum_{n=1}^N (t_{km_n}^2 - 1) g_{bara_{km_n}} \right]$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial v_m} = J_2(k-1, m-n_g) \tag{27}$$

$$= v_k t_{km} (g_{bara_{km}} \cos \delta_{km} + b_{bara_{km}} \sin \delta_{km})$$

$$\frac{\partial p_k}{\partial v_j} = J_2(k-1, j-n_g) \tag{28}$$

$$= v_k (g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj})$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial \delta_k} = J_3(k-n_g, k-1) \tag{29}$$

$$= v_k \sum_{j=1}^{nb} v_j (g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} + b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj})$$

$$+ v_k \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} (g_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n} + b_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n})$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial \delta_m} = J_3(k-n_g, m-1) \tag{30}$$

$$= v_k v_m t_{km} (-g_{bara_{km}} \cos \delta_{km} - b_{bara_{km}} \sin \delta_{km})$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial \delta_j} = J_3(k-n_g, j-1) \tag{31}$$

$$= v_k v_j (-g_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj})$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial v_k} = J_4(k-n_g, k-n_g) \tag{32}$$

$$= \sum_{j=1}^{nb} v_j (g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj})$$

$$+ \sum_{n=1}^N v_{m_n} t_{km_n} (g_{bara_{km_n}} \sin \delta_{km_n} - b_{bara_{km_n}} \cos \delta_{km_n})$$

$$+ 2v_k \left[-b_{bara_{kk}} + \sum_{n=1}^N (t_{km_n}^2 - 1) b_{bara_{km_n}} \right]$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial v_m} = J_4(k-n_g, m-n_g) \tag{33}$$

$$= v_k t_{km} (g_{bara_{km}} \sin \delta_{km} - b_{bara_{km}} \cos \delta_{km})$$

$$\frac{\partial q_k}{\partial v_j} = J_4(k-n_g, j-n_g) \tag{34}$$

$$= v_k (g_{bara_{kj}} \sin \delta_{kj} - b_{bara_{kj}} \cos \delta_{kj})$$

Aynı baraya N adet (N=1,2,3...) kademe ayarlı transformatörün çıkış uçlarının bağlı olduğu baralara ait güç denklemlerinin kullanıldığı Jacobian matris elemanları, (6-7) eşitlikleri ile verilen ifadeler yardımı elde edilen, (35-46) eşitlikleri ile hesaplanır. Bu eşitliklerde j alt indisi, kademe ayarlı transformatörün (ya da transformatörlerin) bağlı olduğu k ve m baraları haricindeki baraları ifade etmektedir:

$$\frac{\partial p_m}{\partial \delta_m} = J_1(m-1, m-1) \tag{35}$$

$$= v_m \sum_{j=1}^{nb} v_j (-g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj})$$

$$+ v_m \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} (-g_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} + b_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n})$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial \delta_k} = J_1(m-1, k-1) \tag{36}$$

$$= v_m v_k t_{mk} (g_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} - b_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk})$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial \delta_j} = J_1(m-1, j-1) \tag{37}$$

$$= v_m v_j (g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj})$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial v_m} = J_2(m-1, m-n_g) \tag{38}$$

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

$$+ \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} (g_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} + b_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n})$$

$$+ 2v_m g_{bara_{mm}}$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial v_k} = J_2(m-1, k-n_g) \tag{39}$$

$$= v_m t_{mk} (g_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} + b_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk})$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial v_j} = J_2(m-1, j-n_g) \tag{40}$$

$$= v_m (g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial \delta_m} &= J_3(m - n_g, m - 1) \\ &= v_m \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} + b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \\ &\quad + v_m \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} \left(g_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} + b_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} \right) \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial \delta_k} &= J_3(m - n_g, k - 1) \\ &= v_m v_k t_{mk} \left(-g_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} - b_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} \right) \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial \delta_j} &= J_3(m - n_g, j - 1) \\ &= v_m v_j \left(-g_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} \right) \end{aligned} \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial v_m} &= J_4(m - n_g, m - n_g) \\ &= \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \\ &\quad + \sum_{n=1}^N v_{k_n} t_{mk_n} \left(g_{bara_{mk_n}} \sin \delta_{mk_n} - b_{bara_{mk_n}} \cos \delta_{mk_n} \right) \\ &\quad - 2v_m b_{bara_{mm}} \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial v_k} &= J_4(m - n_g, k - n_g) \\ &= v_m t_{mk} \left(g_{bara_{mk}} \sin \delta_{mk} - b_{bara_{mk}} \cos \delta_{mk} \right) \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_m}{\partial v_j} &= J_4(m - n_g, j - n_g) \\ &= v_m \left(g_{bara_{mj}} \sin \delta_{mj} - b_{bara_{mj}} \cos \delta_{mj} \right) \end{aligned} \quad (46)$$

N adet kademe ayarlı transformatörün birinin çıkış ucunun diğerinin girişine ucuna bağlanması suretiyle oluşan seri bağlı yapıya ait baralara ait güç denklemlerinin kullanıldığı Jacobian matris elemanları, (8-13) eşitlikleri ile verilen ifadeler yardımı ile elde edilen, (47-86) eşitlikleri ile hesaplanır. Bu eşitliklerde j alt indisi, kademe ayarlı transformatörün ya da transformatörlerin bağlı olduğu k ve m baraları haricindeki baraları ifade etmektedir. Daha önce belirtildiği üzere, (47-86) eşitlikleri ile verilen ifadelerde, $(m_{n-1}k_n)$ alt indisi yerine, $n = 1$ için (k_1) indisi kullanılırken, $(m_{n+1}k_{n+2})$ alt indisi yerine $n = N - 1$ değeri için (m_N) indisi kullanılmalıdır:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{k_1}}{\partial \delta_{k_1}} &= J_1(k_1 - 1, k_1 - 1) \\ &= v_{k_1} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{k_1j}} \sin \delta_{k_1j} + b_{bara_{k_1j}} \cos \delta_{k_1j} \right) \\ &\quad - v_{k_1} v_{(m_1k_2)} t_{km_1} \left(g_{bara_{k_1(m_1k_2)}} \sin \delta_{k_1(m_1k_2)} \right) \\ &\quad + v_{k_1} v_{(m_1k_2)} t_{km_1} \left(b_{bara_{k_1(m_1k_2)}} \cos \delta_{k_1(m_1k_2)} \right) \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{k_1}}{\partial \delta_{(m_1k_2)}} &= J_1(k_1 - 1, (m_1k_2) - 1) \\ &= v_{k_1} v_{(m_1k_2)} t_{km_1} \left(g_{bara_{k_1(m_1k_2)}} \sin \delta_{k_1(m_1k_2)} \right) \\ &\quad - v_{k_1} v_{(m_1k_2)} t_{km_1} \left(b_{bara_{k_1(m_1k_2)}} \cos \delta_{k_1(m_1k_2)} \right) \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{k_1}}{\partial \delta_j} &= J_1(k_1 - 1, j - 1) \\ &= v_{k_1} v_j \left(g_{bara_{k_1j}} \sin \delta_{k_1j} - b_{bara_{k_1j}} \cos \delta_{k_1j} \right) \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{m_N}}{\partial \delta_{m_N}} &= J_1(m_N - 1, m_N - 1) \\ &= v_{m_N} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(-g_{bara_{m_Nj}} \sin \delta_{m_Nj} + b_{bara_{m_Nj}} \cos \delta_{m_Nj} \right) \\ &\quad - v_{m_N} v_{(m_{N-1}k_N)} t_{mk_N} \left(g_{bara_{m_N(m_{N-1}k_N)}} \sin \delta_{m_N(m_{N-1}k_N)} \right) \\ &\quad + v_{m_N} v_{(m_{N-1}k_N)} t_{mk_N} \left(b_{bara_{m_N(m_{N-1}k_N)}} \cos \delta_{m_N(m_{N-1}k_N)} \right) \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{m_N}}{\partial \delta_{(m_{N-1}k_N)}} &= J_1(m_N - 1, (m_{N-1}k_N) - 1) \\ &= v_{m_N} v_{(m_{N-1}k_N)} t_{mk_N} \left(g_{bara_{m_N(m_{N-1}k_N)}} \sin \delta_{m_N(m_{N-1}k_N)} \right) \\ &\quad - v_{m_N} v_{(m_{N-1}k_N)} t_{mk_N} \left(b_{bara_{m_N(m_{N-1}k_N)}} \cos \delta_{m_N(m_{N-1}k_N)} \right) \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{m_N}}{\partial \delta_j} &= J_1(m_N - 1, j - 1) \\ &= v_{m_N} v_j \left(g_{bara_{m_Nj}} \sin \delta_{m_Nj} - b_{bara_{m_Nj}} \cos \delta_{m_Nj} \right) \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{(m_nk_{n+1})}}{\partial \delta_{(m_nk_{n+1})}} &= J_1((m_nk_{n+1}) - 1, (m_nk_{n+1}) - 1) \\ &= -v_{(m_nk_{n+1})} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{(m_nk_{n+1})j}} \sin \delta_{(m_nk_{n+1})j} \right) \\ &\quad + v_{(m_nk_{n+1})} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(b_{bara_{(m_nk_{n+1})j}} \cos \delta_{(m_nk_{n+1})j} \right) \\ &\quad - v_{(m_nk_{n+1})} v_{(m_{n-1}k_n)} t_{km_n} \left(g_{bara_{(m_nk_{n+1})(m_{n-1}k_n)}} \sin \delta_{(m_nk_{n+1})(m_{n-1}k_n)} \right) \\ &\quad + v_{(m_nk_{n+1})} v_{(m_{n-1}k_n)} t_{km_n} \left(b_{bara_{(m_nk_{n+1})(m_{n-1}k_n)}} \cos \delta_{(m_nk_{n+1})(m_{n-1}k_n)} \right) \\ &\quad - v_{(m_nk_{n+1})} v_{(m_{n+1}k_{n+2})} t_{km_{(n+1)}} \left(g_{bara_{(m_nk_{n+1})(m_{n+1}k_{n+2})}} \sin \delta_{(m_nk_{n+1})(m_{n+1}k_{n+2})} \right) \\ &\quad + v_{(m_nk_{n+1})} v_{(m_{n+1}k_{n+2})} t_{km_{(n+1)}} \left(b_{bara_{(m_nk_{n+1})(m_{n+1}k_{n+2})}} \cos \delta_{(m_nk_{n+1})(m_{n+1}k_{n+2})} \right) \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{(m_n k_{n+1})}}{\partial \delta_{(m_{n-1} k_n)}} &= J_1 \left((m_n k_{n+1}) - 1, (m_{n-1} k_n) - 1 \right) \\ &= v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n-1} k_n)} t_{km_n} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \\ &\quad - v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n-1} k_n)} t_{km_n} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{(m_n k_{n+1})}}{\partial \delta_{(m_{n+1} k_{n+2})}} &= J_1 \left((m_n k_{n+1}) - 1, (m_{n+1} k_{n+2}) - 1 \right) \\ &= v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{km_{n+1}} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \\ &\quad - v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{km_{n+1}} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \end{aligned} \quad (55)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{(m_n k_{n+1})}}{\partial \delta_j} &= J_1 \left((m_n k_{n+1}) - 1, j - 1 \right) \\ &= v_{(m_n k_{n+1})} v_j \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})j}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})j} - b_{bara_{(m_n k_{n+1})j}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})j} \right) \end{aligned} \quad (56)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{k_1}}{\partial v_{k_1}} &= J_2 \left(k_1 - 1, k_1 - n_g \right) \\ &= \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{k_1 j}} \cos \delta_{k_1 j} + b_{bara_{k_1 j}} \sin \delta_{k_1 j} \right) \\ &\quad + v_{(m_1 k_2)} t_{km_1} \left(g_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \cos \delta_{k_1(m_1 k_2)} + b_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \sin \delta_{k_1(m_1 k_2)} \right) \\ &\quad + 2v_{k_1} \left[g_{bara_{k_1 k_1}} - (t_{km_1}^2 - 1) g_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \right] \end{aligned} \quad (57)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{k_1}}{\partial v_{(m_1 k_2)}} &= J_2 \left(k_1 - 1, (m_1 k_2) - n_g \right) \\ &= v_{k_1} t_{km_1} \left(g_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \cos \delta_{k_1(m_1 k_2)} + b_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \sin \delta_{k_1(m_1 k_2)} \right) \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{k_1}}{\partial v_j} &= J_2 \left(k_1 - 1, j - n_g \right) \\ &= v_{k_1} \left(g_{bara_{k_1 j}} \cos \delta_{k_1 j} + b_{bara_{k_1 j}} \sin \delta_{k_1 j} \right) \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{m_N}}{\partial v_{m_N}} &= J_2 \left(m_N - 1, m_N - n_g \right) \\ &= \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{m_N j}} \cos \delta_{m_N j} + b_{bara_{m_N j}} \sin \delta_{m_N j} \right) \\ &\quad + v_{(m_{N-1} k_N)} t_{km_N} \left(g_{bara_{m_N(m_{N-1} k_N)}} \cos \delta_{m_N(m_{N-1} k_N)} \right) \\ &\quad + v_{(m_{N-1} k_N)} t_{km_N} \left(b_{bara_{m_N(m_{N-1} k_N)}} \sin \delta_{m_N(m_{N-1} k_N)} \right) \\ &\quad + 2v_{m_N} g_{bara_{m_N m_N}} \end{aligned} \quad (60)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{m_N}}{\partial v_{(m_{N-1} k_N)}} &= J_2 \left(m_N - 1, (m_{N-1} k_N) - n_g \right) \\ &= v_{m_N} t_{km_N} \left(g_{bara_{m_N(m_{N-1} k_N)}} \cos \delta_{m_N(m_{N-1} k_N)} \right) \\ &\quad + v_{m_N} t_{km_N} \left(b_{bara_{m_N(m_{N-1} k_N)}} \sin \delta_{m_N(m_{N-1} k_N)} \right) \end{aligned} \quad (61)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{m_N}}{\partial v_j} &= J_2 \left(m_N - 1, j - n_g \right) \\ &= v_{m_N} \left(g_{bara_{m_N j}} \cos \delta_{m_N j} + b_{bara_{m_N j}} \sin \delta_{m_N j} \right) \end{aligned} \quad (62)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{(m_n k_{n+1})}}{\partial v_{(m_n k_{n+1})}} &= J_2 \left((m_n k_{n+1}) - 1, (m_n k_{n+1}) - n_g \right) \\ &= \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})j}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})j} \right) \\ &\quad + \sum_{j \neq (m_{n-1} k_n), (m_n k_{n+1}), (m_{n+1} k_{n+2})} v_j \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})j}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})j} \right) \\ &\quad + v_{(m_{n-1} k_n)} t_{km_n} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \\ &\quad + v_{(m_{n-1} k_n)} t_{km_n} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \\ &\quad + v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{km_{n+1}} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \\ &\quad + v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{km_{n+1}} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \\ &\quad + 2v_{(m_n k_{n+1})} \left[g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_n k_{n+1})}} \right] \\ &\quad - 2v_{(m_n k_{n+1})} \left[(t_{km_{n+1}}^2 - 1) g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \right] \end{aligned} \quad (63)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{(m_n k_{n+1})}}{\partial v_{(m_{n-1} k_n)}} &= J_2 \left((m_n k_{n+1}) - 1, (m_{n-1} k_n) - n_g \right) \\ &= v_{(m_n k_{n+1})} t_{km_n} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \\ &\quad + v_{(m_n k_{n+1})} t_{km_n} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \end{aligned} \quad (64)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{(m_n k_{n+1})}}{\partial v_{(m_{n+1} k_{n+2})}} &= J_2 \left((m_n k_{n+1}) - 1, (m_{n+1} k_{n+2}) - n_g \right) \\ &= v_{(m_n k_{n+1})} t_{km_{n+1}} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \\ &\quad + v_{(m_n k_{n+1})} t_{km_{n+1}} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \end{aligned} \quad (65)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_{(m_n k_{n+1})}}{\partial v_j} &= J_2 \left((m_n k_{n+1}) - 1, j - n_g \right) \\ &= v_{(m_n k_{n+1})} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})j}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})j} + b_{bara_{(m_n k_{n+1})j}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})j} \right) \end{aligned} \quad (66)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{k_1}}{\partial \delta_{k_1}} &= J_3 \left(k_1 - n_g, k_1 - 1 \right) \\ &= v_{k_1} \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{k_1 j}} \cos \delta_{k_1 j} + b_{bara_{k_1 j}} \sin \delta_{k_1 j} \right) \\ &\quad + v_{k_1} v_{(m_1 k_2)} t_{km_1} \left(g_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \cos \delta_{k_1(m_1 k_2)} \right) \\ &\quad + v_{k_1} v_{(m_1 k_2)} t_{km_1} \left(b_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \sin \delta_{k_1(m_1 k_2)} \right) \end{aligned} \quad (67)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{k_1}}{\partial \delta_{(m_1 k_2)}} &= J_3 (k_1 - n_g, (m_1 k_2) - 1) \\ &= -v_{k_1} v_{(m_1 k_2)} t_{km_1} \left(g_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \cos \delta_{k_1(m_1 k_2)} \right) \\ &\quad - v_{k_1} v_{(m_1 k_2)} t_{km_1} \left(b_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \sin \delta_{k_1(m_1 k_2)} \right) \end{aligned} \quad (68)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{k_1}}{\partial \delta_j} &= J_3 (k_1 - n_g, j - 1) \\ &= v_{k_1} v_j \left(-g_{bara_{k_1 j}} \cos \delta_{k_1 j} - b_{bara_{k_1 j}} \sin \delta_{k_1 j} \right) \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{m_N}}{\partial \delta_{m_N}} &= J_3 (m_N - n_g, m_N - 1) \\ &= v_{m_N} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m_N, (m_{N-1} k_N)}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{m_N j}} \cos \delta_{m_N j} + b_{bara_{m_N j}} \sin \delta_{m_N j} \right) \\ &\quad + v_{m_N} v_{(m_{N-1} k_N)} t_{km_N} \left(g_{bara_{m_N(m_{N-1} k_N)}} \cos \delta_{m_N(m_{N-1} k_N)} \right) \\ &\quad + v_{m_N} v_{(m_{N-1} k_N)} t_{km_N} \left(b_{bara_{m_N(m_{N-1} k_N)}} \sin \delta_{m_N(m_{N-1} k_N)} \right) \end{aligned} \quad (70)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{m_N}}{\partial \delta_{(m_{N-1} k_N)}} &= J_3 (m_N - n_g, (m_{N-1} k_N) - 1) \\ &= -v_{m_N} v_{(m_{N-1} k_N)} t_{km_N} \left(g_{bara_{m_N(m_{N-1} k_N)}} \cos \delta_{m_N(m_{N-1} k_N)} \right) \\ &\quad - v_{m_N} v_{(m_{N-1} k_N)} t_{km_N} \left(b_{bara_{m_N(m_{N-1} k_N)}} \sin \delta_{m_N(m_{N-1} k_N)} \right) \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{m_N}}{\partial \delta_j} &= J_3 (m_N - n_g, j - 1) \\ &= v_{m_N} v_j \left(-g_{bara_{m_N j}} \cos \delta_{m_N j} - b_{bara_{m_N j}} \sin \delta_{m_N j} \right) \end{aligned} \quad (72)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{(m_n k_{n+1})}}{\partial \delta_{(m_n k_{n+1})}} &= J_3 ((m_n k_{n+1}) - n_g, (m_n k_{n+1}) - 1) \\ &= v_{(m_n k_{n+1})} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq (m_{n-1} k_n), (m_n k_{n+1}), (m_{n+1} k_{n+2})}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1}) j}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1}) j} \right) \\ &\quad + v_{(m_n k_{n+1})} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq (m_{n-1} k_n), (m_n k_{n+1}), (m_{n+1} k_{n+2})}}^{nb} v_j \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1}) j}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1}) j} \right) \\ &\quad + v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n-1} k_n)} t_{km_n} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \\ &\quad + v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n-1} k_n)} t_{km_n} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \\ &\quad + v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{km_{(n+1)}} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \\ &\quad + v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{km_{(n+1)}} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \end{aligned} \quad (73)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{(m_n k_{n+1})}}{\partial \delta_{(m_{n-1} k_n)}} &= J_3 ((m_n k_{n+1}) - n_g, (m_{n-1} k_n) - 1) \\ &= -v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n-1} k_n)} t_{km_n} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \\ &\quad - v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n-1} k_n)} t_{km_n} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) \end{aligned} \quad (74)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{(m_n k_{n+1})}}{\partial \delta_{(m_{n+1} k_{n+2})}} &= J_3 ((m_n k_{n+1}) - n_g, (m_{n+1} k_{n+2}) - 1) \\ &= -v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{km_{(n+1)}} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \\ &\quad - v_{(m_n k_{n+1})} v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{km_{(n+1)}} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) \end{aligned} \quad (75)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{(m_n k_{n+1})}}{\partial \delta_j} &= J_3 ((m_n k_{n+1}) - n_g, j - 1) \\ &= -v_{(m_n k_{n+1})} v_j \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1}) j}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1}) j} \right) \\ &\quad - v_{(m_n k_{n+1})} v_j \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1}) j}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1}) j} \right) \end{aligned} \quad (76)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{k_1}}{\partial v_{k_1}} &= J_4 (k_1 - n_g, k_1 - n_g) \\ &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k_1, (m_1 k_2)}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{k_1 j}} \sin \delta_{k_1 j} - b_{bara_{k_1 j}} \cos \delta_{k_1 j} \right) \\ &\quad + v_{(m_1 k_2)} t_{km_1} \left(g_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \sin \delta_{k_1(m_1 k_2)} \right) \\ &\quad - v_{(m_1 k_2)} t_{km_1} \left(b_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \cos \delta_{k_1(m_1 k_2)} \right) \\ &\quad + 2v_{k_1} \left[-b_{bara_{k_1 k_1}} + (t_{km_1}^2 - 1) b_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \right] \end{aligned} \quad (77)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{k_1}}{\partial v_{(m_1 k_2)}} &= J_4 (k_1 - n_g, (m_1 k_2) - n_g) \\ &= v_{k_1} t_{km_1} \left(g_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \sin \delta_{k_1(m_1 k_2)} - b_{bara_{k_1(m_1 k_2)}} \cos \delta_{k_1(m_1 k_2)} \right) \end{aligned} \quad (78)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{k_1}}{\partial v_j} &= J_4 (k_1 - n_g, j - n_g) \\ &= v_{k_1} \left(g_{bara_{k_1 j}} \sin \delta_{k_1 j} - b_{bara_{k_1 j}} \cos \delta_{k_1 j} \right) \end{aligned} \quad (79)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{m_N}}{\partial v_{m_N}} &= J_4 (m_N - n_g, m_N - n_g) \\ &= \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m_N, (m_{N-1} k_N)}}^{nb} v_j \left(g_{bara_{m_N j}} \sin \delta_{m_N j} - b_{bara_{m_N j}} \cos \delta_{m_N j} \right) \\ &\quad + v_{(m_{N-1} k_N)} t_{km_N} \left(g_{bara_{m_N(m_{N-1} k_N)}} \sin \delta_{m_N(m_{N-1} k_N)} \right) \\ &\quad - v_{(m_{N-1} k_N)} t_{km_N} \left(b_{bara_{m_N(m_{N-1} k_N)}} \cos \delta_{m_N(m_{N-1} k_N)} \right) \\ &\quad - 2v_{m_N} b_{bara_{m_N m_N}} \end{aligned} \quad (80)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_{m_N}}{\partial v_{(m_{N-1} k_N)}} &= J_4 (m_N - n_g, (m_{N-1} k_N) - n_g) \\ &= v_{m_N} t_{km_N} \left(g_{bara_{m_N k}} \sin \delta_{m_N k} - b_{bara_{m_N k}} \cos \delta_{m_N k} \right) \end{aligned} \quad (81)$$

$$\frac{\partial q_{m_N}}{\partial v_j} = J_4 (m_N - n_g, j - n_g) \quad (82)$$

$$= v_{m_N} \left(g_{bara_{m_N j}} \sin \delta_{m_N j} - b_{bara_{m_N j}} \cos \delta_{m_N j} \right)$$

$$\frac{\partial q_{(m_n k_{n+1})}}{\partial v_{(m_n k_{n+1})}} = J_4 \left((m_n k_{n+1}) - n_g, (m_n k_{n+1}) - n_g \right) \quad (83)$$

$$= \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1}) j}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1}) j} \right) - \sum_{j=1}^{nb} v_j \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1}) j}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1}) j} \right) + v_{(m_{n-1} k_n)} t_{mk_n} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) - v_{(m_{n-1} k_n)} t_{mk_n} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) + v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{mk_{(n+1)}} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) - v_{(m_{n+1} k_{n+2})} t_{mk_{(n+1)}} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) + 2v_{(m_n k_{n+1})} \left[-b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_n k_{n+1})}} \right] + 2v_{(m_n k_{n+1})} \left[\left(t_{km_{(n+1)}}^2 - 1 \right) b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \right]$$

$$\frac{\partial q_{(m_n k_{n+1})}}{\partial v_{(m_{n-1} k_n)}} = J_4 \left((m_n k_{n+1}) - n_g, (m_{n-1} k_n) - n_g \right) \quad (84)$$

$$= v_{(m_n k_{n+1})} t_{mk_n} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right) - v_{(m_n k_{n+1})} t_{mk_n} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n-1} k_n)} \right)$$

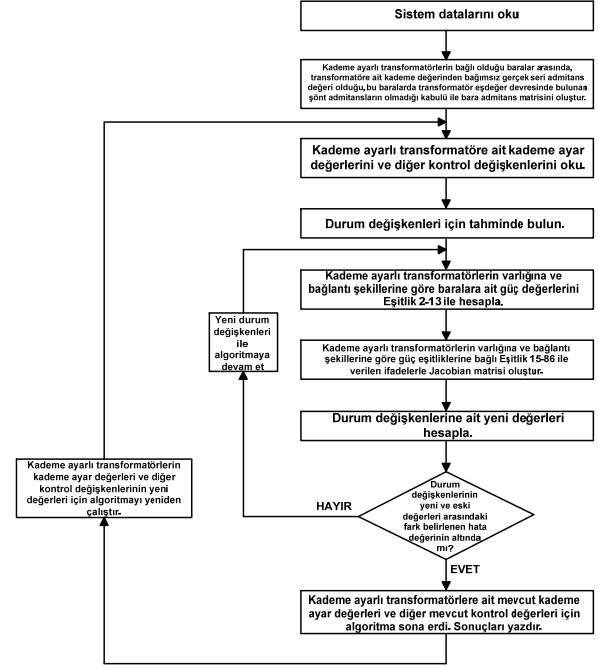
$$\frac{\partial q_{(m_n k_{n+1})}}{\partial v_{(m_{n+1} k_{n+2})}} = J_4 \left((m_n k_{n+1}) - n_g, (m_{n+1} k_{n+2}) - n_g \right) \quad (85)$$

$$= v_{(m_n k_{n+1})} t_{mk_{(n+1)}} \left(g_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \sin \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right) - v_{(m_n k_{n+1})} t_{mk_{(n+1)}} \left(b_{bara_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})}} \cos \delta_{(m_n k_{n+1})(m_{n+1} k_{n+2})} \right)$$

$$\frac{\partial q_{m_N}}{\partial v_j} = J_4 (m_N - n_g, j - n_g) \quad (86)$$

$$= v_{m_N} \left(g_{bara_{m_N j}} \sin \delta_{m_N j} - b_{bara_{m_N j}} \cos \delta_{m_N j} \right)$$

Kademe ayarlı transformatörlere ait kademe ayar değerlerinin, Jacobian matrise sokulması için, önerilen yaklaşıma ait Newton-Raphson tabanlı güç akışı algoritması genel işaret akış şeması, Şekil 5' de verilmiştir.



Şekil 5. Önerilen güç akışı algoritmasına ait işaret akış şeması (Flow chart of the proposed power flow algorithm)

4. UYGULAMA SONUÇLARI (APPLICATION RESULTS)

Kademe ayarlı transformatörlerin kademe ayar değerlerinin Jacobian matrise sokulması için Bölüm 3'de önerilen yaklaşım, IEEE 57 baralı test sistemine uygulanmıştır. Uygulama, önerilen yaklaşımın doğruluğunu ve güç akışına kazandırdığı hızlı yakınsamayı göstermek için, iki farklı şekilde yapılmıştır:

Öncelikle, standart IEEE 57 baralı test sistemi, Bölüm 3' te verilen kademe ayarlı transformatörlerin farklı bağlanma kombinasyonlarının tamamını içermediği için, bu kombinasyonları içerecek şekilde test sistemi değiştirilmiş ve bu test sistemine önerilen yaklaşım 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, kademe ayarlı transformatöre ait Şekil 1 ile verilen gerçek eşdeğer devrede bulunan (kademe ayar değeri ile değeri değişen) seri ve şönt admitans değerleri, bara admitans matrisine sokulmuştur. Kademe ayar değerleri Jacobian matrise sokulmadığından, güç denklemleri ve Jacobian matris elemanı hesaplama denklemleri olarak, kademe ayarlı transformatörlerin bağlı olmadığı baralar için verilen eşitlikler kullanılmıştır. Bu çalışmalardan sonra, kademe ayar

değerlerini Jacobian matrisine sokan önerilen yaklaşımla elde edilen güç akışı sonuçları ile kademe ayar değerlerini 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 kademe ayar değerleri değiştirilerek güç akışı çalışmaları yeniden yapılmıştır. Önerilen yaklaşım ile yapılan yeni güç akışı çalışmasında, kademe ayar değerleri 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 kademe ayar değerlerine göre bara admitans matrisi yeniden kurulmuş ve daha sonra güç akışı tamamlanmıştır. Kademe ayar değerleri 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 (Comparison of the convergence results obtained from the proposed and conventional power flow algorithm)

	Önerilen Yaklaşım	Klasik Yöntem
İterasyon Sayısı	5	5
Yakınsama Zamanı (sn)	0.486375	0.490563

Tablo 1' den görüldüğü üzere, önerilen yaklaşım ile yapılan güç akışı algoritması, yakınsama iterasyon sayısını artırmamıştır. Bunun ötesinde, önerilen yaklaşım ile kademe ayarlı transformatör kademe değişim etkilerinin 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 baraya sahip gerçek enterkonekte 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 2850 baralı büyük bir test sistemine önerilen yaklaşımın uygulanması durumunda, 57 baralı test sistemi için elde edilen 0.004 sn lik süre yaklaşık olarak 10 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, kademe ayarlı transformatörlere ait kademe ayar değişimi etkilerini Jacobian matrisine aktaran yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Böylelikle güç akışı çalışmalarında kademe ayar değişimi sebebiyle bara admitans matrisinin yeniden kurulması gerekliliği ortadan kaldırılmıştır. Önerilen bu yaklaşım ile, literatürde aynı amaca yönelik benzer çalışmadan farklı olarak, çok sayıda ve farklı bağlanma şekline sahip kademe ayarlı transformatör içeren sistemlerde, kademe değişimi etkisinin Jacobian matrisine sokulması sağlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yeni güç denklemleri ve Jacobian matris elemanı hesaplamaları elde edilmiştir. Elde edilen uygulama sonuçları, önerilen yaklaşımın, klasik yaklaşıma göre iterasyon sayısını arttırmadığını ve yakınsama süresini azalttığını göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Jimenez, J.C., Nwankpa, C.O., 'Analysis of Reconfigurable Tap Changing Transformer Model Through Analog Emulation', IEEE International Symposium on Circuits and System, Taipei, 2009.
- [2] Okyere, H.K., Nouri, H., Moradi, H., Zhenbiao, L., 'Statcom and Load Tap Changing Transformer (LTC) in Newton Raphson Power Flow: Bus Voltage Constraint and Losses', 42nd International Universities Power Engineering Conference, Brighton, 2007.
- [3] Fan, J., Bo, Z., 'Modelling of On-load Tap-changer Transformer with Variable Impedance and Its Applications', International Conference on Energy Management and Power Delivery, Vol. 2, 491-494, 1998.
- [4] 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.
- [5] Heydt, G.T., 'Computer analysis methods for power systems', Macmillan Publishing Company, NY, 1986.
- [6] Lu, C.N., Chen, S.S., Ong, C.M., 'The Incorporation of HVDC Equations in Optimal Power Flow Methods Using Sequential Quadratic Programming Techniques', IEEE

- Transactions on Power Systems, Vol. 3-3, 1005-1011, 1988.
- [7] Arifođlu, U., 'Inserting the Tap Values of the Tap Changing Under Load Transformers to the Jacobian Matrix as the State Variables', Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 1997.
- [8] Arifođlu, U., 'Alternatif Akım-Doğru Akım Sisteminde Ayrık Yöntem Kullanımı ile Optimal Güç Dağılımı Hesabı İçin Yeni Bir Yaklaşım', Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1993.