

# Yenilenebilir Enerji Kaynakları Entegre Edilmiş Güç Sistemlerinde Şönt Kapasitörlerin Etkisi Effect of Shunt Capacitors on Power Systems Containing Renewable Energy Resources

Ozan Gül  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Bingöl Üniversitesi  
Bingöl, Türkiye  
ogul@bingol.edu.tr

Asım Kaygusuz, Nusret Tan  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
İnönü Üniversitesi  
Malatya, Türkiye  
{asim.kaygusuz, nusret.tan}@inonu.edu.tr

**Özetçe**—Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları entegre edilmiş elektrik şebekesinde şönt kapasitörlerin yük akışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, Matlab programı kullanılarak IEEE 39 bara güç sisteminde saat-bazlı günlük ortalama üretim profilleri ile modellenen yenilenebilir dağıtık kaynakların sisteme katıldığı durumlar için yük akışı analizi yapılmış, sistemde seçili yük baralarına şönt kapasitör bağlanarak gün içi baralardaki güç faktör değişimleri analiz edilerek değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler** — *Günlük saat bazlı yük akışı analizi; şönt kondansatör; yenilenebilir güç kaynak entegrasyonu; Matlab.*

**Abstract**—In this paper, the effects of shunt capacitor on electrical network integrated with renewable energy resources are investigated. For this proposes, we conduct 24-hours load flow analyses for IEEE 39 buses power system containing intermittent renewable sources modeled by hourly generation profiles during a day using Matlab program, and then shunt capacitor connected to the selected load buses on systems and power factor changes in buses are evaluated during a day.

**Keywords** — *Load flow analysis based on daily hours; shunt capacitor; the integration of renewable power sources; Matlab.*

## I. GİRİŞ

Son yıllarda dünyada karşı karşıya kalınan enerji krizi nedeniyle bir yanda günümüz elektrik şebekelerinde, yenilenebilir dağıtık enerji kaynaklarının güç sistemine entegrasyonu giderek yaygınlaşırken [1] diğer yandan da daha verimli sistemlerin tasarlanması ve boşa giden elektrik enerjisinin azaltılması yönünde yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır.

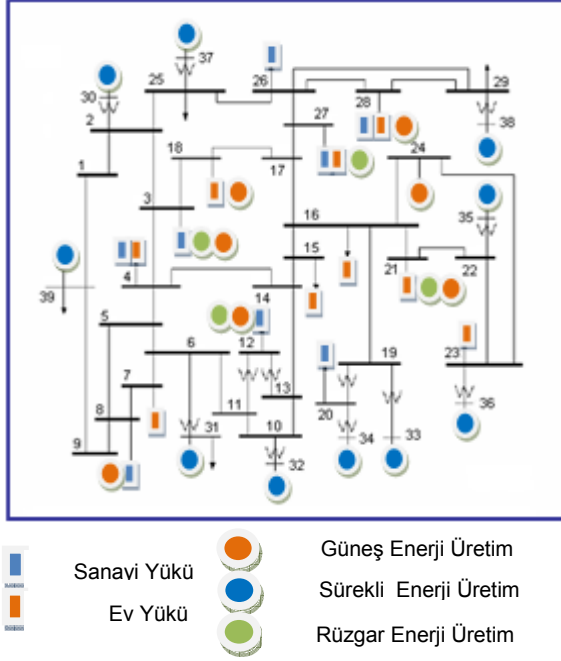
Mevcut güç sistemlerinin en iyi şekilde geliştirilmesi kadar, gelecekte sistemlerde meydana gelebilecek gelişmelerin planlanması da oldukça önemlidir, bu nedenle, yenilenebilir dağıtık kaynakların güç sistemlerinin yük akışı kararlılığına etkileri analiz edilmesi önem arz etmektedir [2]. Şebekelerdeki genel enerji durumunu tanıyabilme, hat kayıpları hakkında bilgi edinme, şebekelerin herhangi bir noktasındaki güç değerleri hakkında bilgi edinme için mutlak surette yük akışı hesaplarının yapılması gerekmektedir.

Bu bildiriye şönt kapasitörün güç sistemine etkisini incelemek amacıyla şönt kapasitörün baralardaki gün içi güç faktörü değişkenliğine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, güç üretim belirsizliği ve süreksizliği sergileyen yenilenebilir enerji kaynakları Şekil 1'deki gibi IEEE 39-bus test sistemine dağılarak, güç sisteminin yük akışı analizi saatlik bazda Newton-Raphson nümerik çözümleri temelinde günlük olarak incelenmiş, çalışmanın daha sonraki aşamasında örnek güç sistemimizde örnek senaryolarımıza bağlı olarak güç sistemine şönt kapasitör bağlanarak, şönt kapasitör banklarının [4] şebekede ki güç kalitesi açısından büyük önem arz eden gün içindeki güç faktörü değişimine etkisi analiz edilmiştir.

## II. NÜMERİK ANALİZ METODU

Güç sistemlerinin analizinde karşılaşılan problemlerin çözümünde lineer olmayan denklemlerle karşılaşılır. Bu denklemleri çözmek için nümerik yöntemler kullanılır. Yük akışı analizinin temel amacı verilen bir güç sisteminde, üretim ve tüketim değerleri için, baralar üzerindeki kompleks gerilim ve hatlar üzerinde akan kompleks güç değerlerini bulmaktır [5].

Yük akışı probleminin çözümü, her bir baradaki gerilimin genliği ve faz açısının, her bir hatta akan aktif ve reaktif gücün belirlenmesini sağlar. Bir yük akışı problemi



Şekil 1: Örnek uygulama için IEEE 39-bus test sistemi

çözülürken sistemin normal, dengeli şartlar altında çalıştığı ve tek hat diyagramıyla temsil edildiği kabul edilir. Her bir barada ele alınması gereken değişkenler, gerilim genliği ( $|V|$ ), gerilim faz açısı ( $\delta$ ), aktif güç ( $P$ ) ve reaktif güç ( $Q$ ). Bazı baralar jeneratörlerle beslenir ve üretim barası olarak isimlendirilir. Bu baralarda gerilim genliğinin ve aktif gücün bilindiği (sabit) kabul edilir. Jeneratöre bağlı olmayan diğer baralar yük barası olarak adlandırılır. Tüm baralarda kompleks yük gücünün bilindiği kabul edilir.

#### A. Newton-Raphson Metodu

Newton metotları yük akışı denklemlerinin çözümü için iteratif metotlara (Gauss, Gauss-Seidel ...) göre kuadratik yakınsama karakteristiğine sahiptir [6]. Özellikle büyük çaplı güç sistemleri için Newton-Raphson metodu çok daha verimli ve uygulanabilir. En belirgin üstünlüklerinden birisi de çözüme ulaşmak için gereken adım sayısının sistemin boyutundan bağımsız olmasıdır. Fakat bu sırada çözümü elde ederken adım başına harcanan işlem yükü fazladır. Yük akışı analizinde gerilim kontrollü baralar için aktif güç ve gerilim genliği bilindiğinden yük akışı denklemleri kutupsal formda ifade edilir. Newton-Raphson yük akışı analiz metodunu burada kısaca özetlemek gerekirse [7]:

Bir  $i$  barası ve bu baraya bağlı hatlar dikkate alınarak Kirchoff Akım Yasası'ndan

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle_{ij} + \delta_j \quad (1)$$

ifadesi kutupsal formda elde edilir. Bara  $i$ 'deki kompleks güç,

$$P_i - jQ_i = A = V_i I_i \quad (2)$$

olarak ifade edilir. Denklem (1) ve denklem (2) kullanılırsa

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta_i) \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle_{ij} + \delta_j \quad (3)$$

elde edilir. Burada,  $Y_{ij}$   $i$  ve  $j$  baraları arasındaki admitans değeridir. Baralar arasındaki admitans değerleri, bara admitans matrisinde ( $Y_{BARA}$ ) tanımlanarak, güç sistemi, yük akışı analizi için tanımlanır. Denklem (3)'de görülen kompleks güç ifadesi gerçek ve sanal kısımlarına ayrılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\angle_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (4)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\angle_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (5)$$

Elde edilen (4) ve (5) denklemleri, bağımsız değişkenler (gerilim genliği ve gerilim faz açısı) içeren çözülecek olan nonlinear denklem sistemini oluşturur. Her bir yük barası için  $P_i$  ve  $Q_i$  denklemleri, her bir jeneratör barası için  $P_i$  denklemi kullanılır. Bu iki denklem yüksek dereceli terimler ihmal edilerek başlangıç değeri civarında Taylor serisine açılmak sureti ile (6) ile temsil edilen lineer bir denklem sistemine dönüştürülür.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & & & & \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & & & & \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (6)$$

Aşağıdaki denklemde  $J$ , Jacobian matrisi olarak adlandırılır. Burada Jacobian matrisi gerilim faz açısı ve gerilim genliğindeki değişim oranıyla aktif ve reaktif güçteki değişim oranı arasındaki ilişkiyi belirler. Jacobian matrisi bir üstteki aktif ve reaktif güç denklemlerinin açı ve genlik değişimlerine göre kısmi türevlerinden oluşur.

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (8)$$

Denklem (8) ile ifade edilen lineer denklem sistemi, iteratif olarak aşağıdaki çözüm adımları ile hesaplanır.

$$\delta^{m+1} = \delta^m + \Delta \delta \quad (9)$$

$$|V|^{m+1} = |V|^m + \Delta V \quad (10)$$

Hesaplamalar, bir  $m$  iterasyon adımında, gerilim ve faz açısındaki değişim ( $\Delta V$  ve  $\Delta \delta$ ) önceden belirlenmiş bir hata eşiğinden küçük oluncaya kadar devam ettirilir.

#### B. Newton-Raphson Metodu Temelinde 24-Saatlik Dinamik Yük Akış Analizi

24-saatlik dinamik yük akışı analizlerini gerçekleştirmek için bir önceki bölümde kısaca özetlenen Newton-Raphson yük akış analiz metodundan faydalanılmıştır. Bu amaçla, dağıtık kaynaklar sürekli ve süreksiz kaynaklar olmak üzere iki farklı tipte modellenmiştir. Sürekli kaynakların, aktif ve reaktif güç değerlerinin 24 saat boyunca bir ortalama değer civarında nerede ise sabit kalabildiği varsayılmıştır. Süreksiz kaynaklar ise kaynak tipine (Rüzgar, güneş..vs) göre aktif ve reaktif güç değerlerinin 24 saat boyunca değişkenlik gösterdiği varsayılmıştır. Benzer yaklaşımla, bara yükleri az değişken ve değişken güç talep profillerine uygun olarak iki farklı tipte modellenmiştir. Az değişken yükler, sanayi bölgeleri gibi, gece vardiyaları nedeni ile 24 saat boyunca yüksek salınım göstermeyen yük modelleri için kullanılmıştır. Değişken güç talebi profilleri ise hane tüketicileri gibi 24 saatlik zaman dilimi içinde ciddi salınımlar gösteren yük modelleri için kullanılmıştır [5].

Bara güç faktörü kararlılıklarının değerlendirilmesi için dinamik yük akış analizleri sonucunda her yük barasına ait güç faktörü ( $\cos \theta_d$ ) saatlik bazda elde edilmiştir. Yük baralarındaki, gün içinde gerçekleşen güç faktörü değişkenliği, istatistiki değişkenlik katsayısı  $\cos \theta_\sigma$  (Coefficient of Variation) hesaplanması ile değerlendirilmiştir [5].

$$\cos \theta_\sigma = \sigma(\cos \theta_d) / \mu(\cos \theta_d) \quad (11)$$

Burada  $\sigma(\cdot)$  bara güç faktörü günlük standart sapması ve  $\mu(\cdot)$  ise bara güç faktörünün günlük ortalama değeridir.  $\cos \theta_\sigma$  değişkenlik faktörü, baralardaki günlük

güç faktörü dalgalılığı hakkında karşılaştırılabilir bir istatistiki veri sunmuştur.

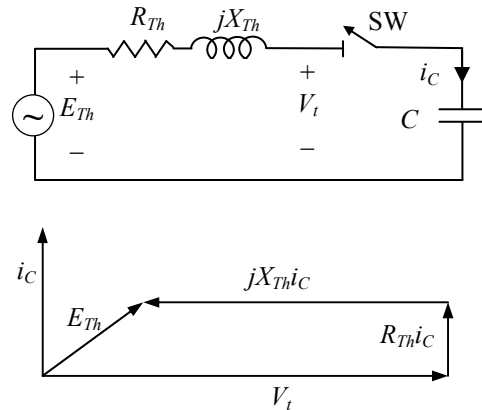
### III. ŞÖNT KAPASİTÖR

Şönt kapasitör bankları öncelikle şebekedeki güç faktörünü düzeltmek için kullanılır ve baralara paralel bağlanır. Ayrıca şebekede gerilim kararlılığını artırırlar ve hat kayıplarını azaltırlar. Güç faktörünün iyileşmesi daha yüksek güç iletim yeteneği ve artan güç akışı kontrolü anlamına gelir [5].

Şekil 2'de güç sistemi barasına şönt kapasitör bankının eklenmesinin etkisi gösterilmiştir. Sistem Thevenin eşdeğer devresi ile modellenmiştir. Kapasitör eklenmeden önce anahtar SW açık ve bara voltajı  $E_{Th}$ 'ya eşittir. Kapasitör bankı bağlandıktan sonra kapasitör akımı  $I_C$  bara gerilimi  $V_t$ 'den  $90^\circ$  derece önde gittiği görülmektedir. Şekil 2'deki fazör diagramında görüldüğü üzere SW anahtarı kapalı olduğu zaman  $V_t$ ,  $E_{Th}$ 'dan daha büyük olur [8].

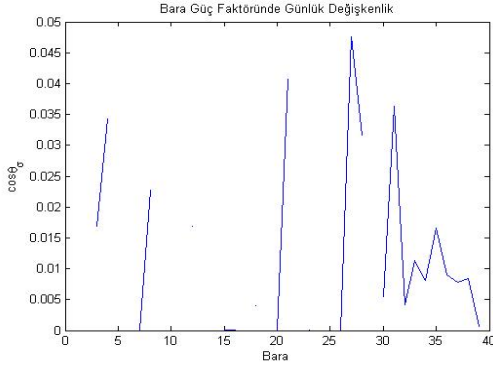
### IV. ŞÖNT KAPASİTÖR BANKLARININ GÜÇ SİSTEMİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Örnek uygulama için IEEE 39-bus test sistemi üzerinde saatlik yük akış analizi testleri yapılmıştır. Şekil 1'deki örnek güç sistemimizde bara numarası 30 ve daha yüksek baralar sadece üretim baralarıdır, daha küçük numaralı baralarda ise yük baraları ve yüke bağlı olmayan geçiş baraları mevcuttur. Şekil 3'de görüldüğü üzere geçiş baralarında, yük veya kaynak bağlı olmadığı için, güç faktörleri hesaplanmamıştır. Şönt kapasitör banklarının etkisini incelemek amacıyla senaryo 1 de bara 10, 11, 17, 19'ye 10, 20, 30 ve 40 MVar'lık, senaryo 2'de bara 7, 12 ve 4'e 10, 20 ve 30 MVar'lık, senaryo 3'de bara 7, 12, 4, 18 ve 24'e 10, 20, 30, 40 ve 50 MVar'lık şönt kapasitör eklenerek, gün içi güç faktörü değişkenliğine üzerindeki etkisi incelenmiştir.

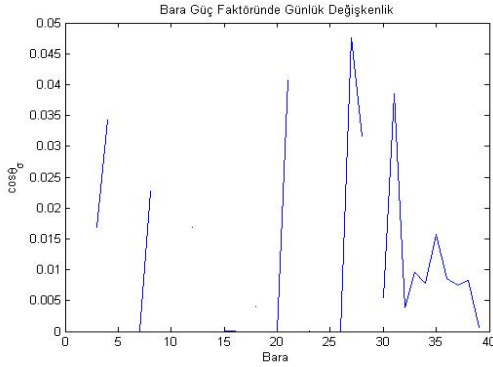


Şekil 2: Güç sistemi barasına şönt kapasitör bankının eklenmesinin etkisini gösteren devre ve fazör diyagramı.

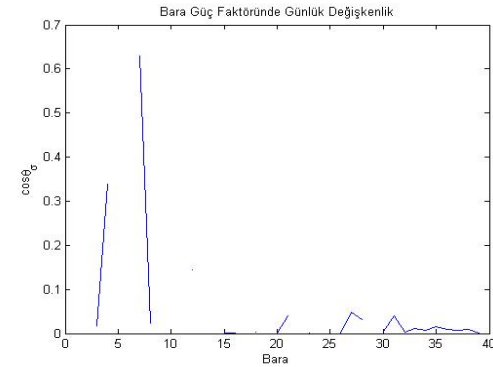
Şekil 4’de gösterildiği üzere senaryo 1’de geçiş baralarına şönt kapasitör yerleştirmenin baralardaki gün içi güç faktörü değişimine etki etmediği analiz edilmiştir. Şekil 5 ve Şekil 6’yı incelediğimiz zaman ev yükü bağlı bara 7, sanayi yükü bağlı bara 4 ve sadece güneş ve rüzgar enerjisi bağlı bara 24’deki gün içi güç faktöründeki değişim dikkat çekicidir. Ayrıca sanayi yükü, rüzgar ve güneş enerjisi bağlı bara 12 ve bara 18’de bağlanan şönt kapasitörlerin gün içi güç faktörüne değişimine etki etmediği gözlemlenmiştir. Bağlanan şönt kapasitörlerin sistemin genelinde baralardaki gün içi güç faktörü değişimine etkisinin olmadığı görülmüştür.



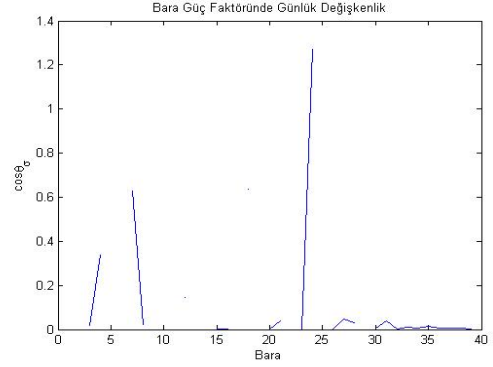
Şekil 3: Baraların günlük güç faktörü değişkenlikleri



Şekil 4: Senaryo 1’de baraların günlük güç faktörü değişkenlikleri



Şekil 5: Senaryo 2’de baraların günlük güç faktörü değişkenlikleri



Şekil 6: Senaryo 3’de baraların günlük güç faktörü değişkenlikleri

## V. SONUÇLAR

Bu çalışmada, süreksiz dağıtık üretim ve değişken güç talep durumları altında gün içi dinamik yük akış analizleri gerçekleştirilmiş şönt kapasitörlerin eklendiği durumda baraların güç faktörleri kararlılığına etkileri analiz edilebilmiştir. Analizler sonucunda herhangi yük ve üretim kaynakları bağlanmamış baralara şönt kapasitör bağlamanın güç sisteminde baralardaki gün içi güç faktörüne değişimine etkisinin olmadığı, aynı şekilde ev veya sanayi yükü ve sürekli veya süreksiz üretim kaynağı eklenmiş baralara şönt kapasitör eklemenin de baralardaki gün içi güç faktörü değişimine etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Sadece ev, sanayi yükü veya sadece sürekli, süreksiz kaynaklar bağlanmış baralarda şönt kapasitörlerin eklendiği baradaki gün içi güç faktörü değişkenliğini yükselttiği ve güç sistemindeki diğer baralardaki güç faktöründeki günlük değişkenliği etkilemediği analiz sonucunda görülmüştür.

## KAYNAKÇA

- [1] Pecos Lopes, J. A., Hatziairgiou, N., Mutale, J., Djapic, P. and Jenkins, N. "Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities", *Electric Power Systems Research*, 77, 1189–1203, 2007.
- [2] Abdelhay A. S., Mohamed D. and Hussien D., "Shunt Capacitor Effect on Electrical Distribution System Reliability", *IEEE Transactions On Reliability*, 43(1), 1994.
- [3] Asuka O., Fei Z., Takafumi F. and Naoyuki N., "Development of 200-Mvar Class Thyristor Switched Capacitor Supporting Fault Ride-Through" *International Power Electronics Conference*, 2014.
- [4] Somsai, K. and Kulworawanichpong T., "Instantaneous Power Control of D-STATCOM with Consideration of Power Factor Correction" *ETCI-CON International Conference* 2010.
- [5] Kaygusuz A., Gül O., Alagöz B. B., "Yenilenebilir Dağıtık Üretim Koşullarının Güç Sistemleri Yük Akış Kararlılığına Etkilerinin Analizi", *EMO Bilimsel Dergi: Elektrik, Elektronik, Bilgisayar, Biyomedikal Mühendisliği Bilimsel Dergi*, 2(4):77-85, 2012.
- [6] Abacı K., Yalçın M. A., Uyarlıoğlu Y., "Güç Sistemlerinde Farklı Salınım Barası Seçiminin Gerilim Kararlılığı Açısından İncelenmesi", *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 2004.
- [7] Saadat, H., *Power Systems Analysis*, McGraw Hill, Boston, 1999.
- [8] Glover, J. D., Sarma, M. S. and Overbye T. J., *Power System Analysis And Design*, Cengage Learning, 2008.