

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNDE AZAMI YÜKLENEBİLİRLİK NOKTASININ PARALEL KOMPAZASYON İLE DEĞİŞİMİNİN FARKLI YÜK MODELLERİ İÇİN İNCELENMESİ

Ulaş EMİNOĞLU M. Hakan HOCAOĞLU

E-posta: u.eminoglu@gyte.edu.tr hocaoglu@gyte.edu.tr

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze/Kocaeli

Anahtar sözcükler: Gerilim Kararlılığı, Azami Yüklenebilirlik, Paralel Kompanzasyon, Statik Yük Modelleri

ABSTRACT

In this paper, effect of shunt compensation on the maximum loadability limit of a transmission system is analysed for voltage dependent loads. For this purpose, firstly, determination of the maximum loadability limit is formulated with voltage dependency of static load and the reactance of shunt capacitor. Moreover the effect of load voltage dependency on the maximum loadability limit is tested on a two-bus transmission system for different shunt compensation levels. Results show that maximum active loadability limit of the transmission line is only related to voltage dependency of load reactive power. In contrast, maximum reactive loadability limit is related to voltage dependency of load active power.

1. GİRİŞ

İletim sistemlerinde güç akışı, gerilim, faz açısı gibi büyüklükler aktif veya pasif kompanzatörler ile kontrol edilmektedir. Aktif kompanzatörler, gelişen yarı iletken teknolojisi ile güç elektroniği elemanlarının kapasitesinin büyümesi ile geliştirilmiş olup literatürde "FACTS: Esnek AC İletim Sistemleri" olarak incelenmektedirler [1, 2].

Aktif kompanzatörlerin dışında pasif kompanzatörler de iletim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İletim sistemlerinde gerilim kontrolü yük açısından büyük öneme sahiptir. Sistemdeki gerilim düşümü veya gerilim yükselmesi beslenen yüklerde arızalara ve performans düşüşüne neden olmaktadır. Genellikle pasif paralel kompanzatör olarak kapasitörler veya bobinler kullanılmaktadır. Paralel kompanzasyon ile sisteme reaktif güç enjekte edilmesi veya sistemden reaktif güç çekilmesi sonucunda gerilim büyüklüğünün istenilen değerde tutulması, güç faktörünün iyileştirilmesi ile güç transferinin artırılması mümkündür. Bu çalışmalarda genellikle paralel kapasitörlerin etkisi sabit güç statik yük modeli için analiz edilmektedir [3,4].

Güç sistemlerinde yükteki değişimlere bağlı olarak değişen gerilim büyüklüğü ve sistemin güvenli çalışma durumu gerilim kararlılığı çalışmaları adı altında incelenmekte olup bu kararlılık analizi için literatürde birçok çalışmalar ve metotlar mevcuttur.

Bu çalışmalarda gerilim kararsızlığının oluştuğu ve sistemin analitik çözümünün olmadığı yüklenme durumu olan azami yüklenebilirlik noktası için bir çok farklı formülasyonlar geliştirilmiştir. [5-8]. Geliştirilen bu formülasyonlar, yükün aktif ve reaktif gücü ile bunların gerilim ve faz açısına göre türevlerinin bir fonksiyonudur [8].

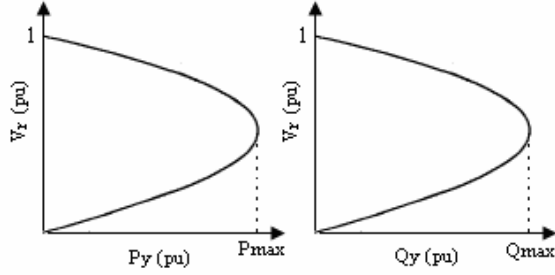
Güç sistemlerinde yük modellenmesi gerçekçi ve daha güvenilir çalışmaların yapılabilmesi açısından büyük öneme sahiptir. Elektriksel yükler statik ve dinamik olarak iki grupta incelenmekte olup farklı yük modelleri için güç akışı çalışmaları, yük karakteristiğinin belirlenmesi, farklı karakteristiğe sahip yüklerde gerilim kontrolü ve dinamik analizler gibi çalışmalar literatürde geniş olarak yer almıştır [9-13].

Bu çalışmada, iletim sistemlerinin azami yüklenebilirlik noktasının yük modelinin dahil edilmesi durumunda belirlenmesi analitik olarak gerçekleştirilmiştir. Paralel kompanzasyon yapılması durumunda hattın azami yüklenebilirlik noktasının yükün gerilim bağımlılıklarına bağlı olarak değişimi iki baralı iletim sisteminde farklı kapasitör değerleri için incelenmiştir. Sonuçta hattın yüklenebileceği azami aktif gücün statik yüklerde yalnızca reaktif gücün gerilim bağımlılığı ile, azami reaktif gücün ise yükün aktif gücünün gerilim bağımlılığı ile değiştiği görülmüştür.

2. GERİLİM KARARLILIĞI VE AZAMI YÜKLENEBİLİRLİK NOKTASI

Gerilim kararlılığının statik analizler (yük akış analizleri) için bir sürekli durum problemi olarak görülmesi uygundur. Sabit çalışma şartları esnasında üretim yerinden tüketim yerine reaktif güç transfer kabiliyeti gerilim kararlılığının konusudur. Şebekenin azami güç transfer limiti ile gerilim kararlılığı limiti aynı şeyler değildir. Gerilim kararlılığı veya çöküşü bir dinamik prosestir. Kararlılık kelimesi bir dinamik sistem ifade eder. Gerilim kararlılığı yük kararlılığı olarak da adlandırılır [14]. Verilen bir çalışma noktası ve bozucu etki şartları altındaki bir güç sistemi, eğer gerilimlere yakın yükler, bozucu etki sonrası denge değerlerine yakın ise bu güç sistemi gerilim kararlıdır. Eğer bozucu etki sonrası gerilimler kabul edilebilir

limitlerin altında ise verilen çalışma durumundaki bir güç sisteminin durumu ve verilen bozucu etkilere katlanmanın konusu gerilim çökmesidir. Kararlılık analizi için kullanılan herhangi bir baranın P-V ve Q-V eğrileri şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1 Güç sisteminde herhangi bir bara için P-V ve Q-V eğrileri

P-V ve Q-V eğrileri gerilim kararlılığının kavramsal analizleri ve radyal sistem çalışmaları için yararlıdır. Büyük sistemler için bir seri güç akış simülasyonu ile elde edilebilir. Buradaki P_{max} ve Q_{max} bara yükünün azami değerini göstermektedir. Bundan büyük yük değerlerinde sistemde gerilim kararsızlığı oluşmakta ve yükte olabilecek herhangi bir değişim sistemi çökmeye götürecektir.

3. STATİK YÜK MODELLERİ VE İLETİM HATLARINDA AZAMI YÜKLENEBİLİRLİK NOKTASININ BELİRLENMESİ

Güç sistemlerinde farklı yük modellerinin sistem geriliminde farklılıklara sebep olduğu bilinmektedir. Yükün aktif ve reaktif gücünün, gerilim ve/veya zamanın bir fonksiyonu olarak ifadesinde statik ve dinamik yük kavramları kullanılmaktadır. Statik yük modelleri zamandan bağımsız olup aktif ve reaktif güç, gerilim ve/veya frekansın fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Güç sistemlerinde kullanılan yüklerin büyük bir çoğunluğu eksponansiyel (üssel) karakteristiğe sahip olup aktif ve reaktif güç gerilimin üssel bir fonksiyonu olarak modellenmektedir [11]. Bu yük modelleri için gücün gerilime göre genel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$P = P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{n_p}, Q = Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{n_q} \quad (1, 2)$$

Burada P_o ve Q_o yükün nominal gücünü, n_p ve n_q sırasıyla aktif ve reaktif gücün gerilim ile üssel katsayılarını, V_o referans gerilimi ve V ise yük gerilimini göstermektedir.

Şekil 2’de verilen devrede yükün aktif ve reaktif güçlerinin ifadeleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$P = \frac{|V_r||V_s|}{|Z|} \cos(\theta_z - \delta_s) - \frac{|A||V_r|^2}{|Z|} \cos(\theta_z - \delta_A) \quad (3)$$

$$Q = \frac{|V_r||V_s|}{|Z|} \sin(\theta_z - \delta_s) - \frac{|A||V_r|^2}{|Z|} \sin(\theta_z - \delta_A) \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{zy} \quad (5)$$

$$A = \cosh(\gamma) \quad (6)$$

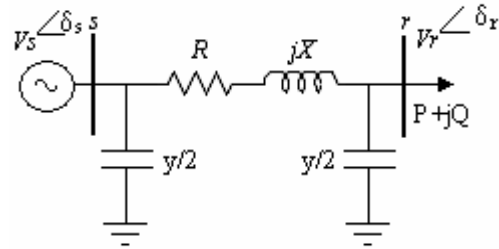
Burada V_s ve V_r sırasıyla hat başı ve hat sonu gerilimleri, Z hattın seri empedansı, θ_z , δ_s ve δ_A ise sırasıyla hattın seri empedansının, hat başı geriliminin ve A parametresinin faz açılarıdır. Bu denklemlerden ve trigonometrik eşitliklerden yararlanarak;

$$\cos(\theta_z - \delta_s) = \frac{P|Z|}{|V_s||V_r|} + \frac{|A||V_r|}{|V_s|} \cos(\theta_z - \delta_A) \quad (7)$$

$$\sin(\theta_z - \delta_s) = \frac{Q|Z|}{|V_s||V_r|} + \frac{|A||V_r|}{|V_s|} \sin(\theta_z - \delta_A) \quad (8)$$

$$\cos^2(\theta_z - \delta_s) + \sin^2(\theta_z - \delta_s) = 1 \quad (9)$$

ifadeleri yazılabilir.



Şekil 2. İki baralı sisteme ait tek hat devre şeması

Daha önce verilen 1-2 ve 7-9 denklemleri kullanılarak $V_o=1$ pu için yük geriliminin n_p ve n_q 'ya bağlı olarak ifadesi;

$$\begin{aligned} &|A|^2 V_r^4 + 2|A||V_r|^2 |Z| (P \cos(\theta_z - \delta_A) + Q \sin(\theta_z - \delta_A)) \\ &- V_s^2 V_r^2 + (P^2 + Q^2) |Z|^2 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

şeklinde elde edilir. Elde edilen polinomda, aynı sistem için yük geriliminin n_p ve n_q 'ya bağlı olarak değiştiği açıkça görülmektedir. Buradan yükün aktif ve reaktif gücünün ifadesi yükün gerilim bağımlılığı cinsinden;

$$\begin{aligned} P = &[-|A| \cos(\theta_z - \delta_A) V_r^2 + (\cos^2(\theta_z - \delta_A) V_r^4 A^2 \\ &- V_r^4 A^2 - |Z|^2 Q_o^2 V_r^{2n_q} - 2AV_r^2 |Z| Q_o V_r^{n_q} \sin(\theta_z - \delta_A) \\ &+ V_s^2 V_r^2)^{1/2}] / |Z| \dots \dots \dots (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q = &[-|A| \sin(\theta_z - \delta_A) V_r^2 + (\sin^2(\theta_z - \delta_A) V_r^4 A^2 \\ &- V_r^4 A^2 - |Z|^2 P_o^2 V_r^{2n_p} - 2AV_r^2 |Z| P_o V_r^{n_p} \cos(\theta_z - \delta_A) \\ &+ V_s^2 V_r^2)^{1/2}] / |Z| \dots \dots \dots (12) \end{aligned}$$

şeklinde elde edilir. Aktif ve reaktif gücün yük gerilimine göre türevinin alınıp sıfıra eşitlenmesi ile gücü azami yapan gerilim değeri belirlenebilir.

$$\frac{dP}{dV_r} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{dQ}{dV_r} = 0 \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & -4|A|\cos(\theta_z - \delta_A)V_r(\cos^2(\theta_z - \delta_A)V_r^4|A|^2 - V_r^4|A|^2) \\ & -|Z|^2Q_o^2V_r^{2nq} - 2|A||Z|Q_oV_r^{2+nq}\sin(\theta_z - \delta_A) + V_s^2V_r^2)^{1/2} \\ & + 4\cos^2(\theta_z - \delta_A)V_r^3|A|^2 - 4V_r^3|A|^2 - 2nq|Z|^2Q_o^2V_r^{2nq-1} \\ & - 2(2+nq)|A||Z|Q_oV_r^{1+nq}\sin(\theta_z - \delta_A) + 2V_s^2V = 0 \dots\dots (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -4|A|\sin(\theta_z - \delta_A)V_r(\sin^2(\theta_z - \delta_A)V_r^4|A|^2 - V_r^4|A|^2) \\ & -|Z|^2P_o^2V_r^{2np} - 2|A||Z|P_oV_r^{2+np}\cos(\theta_z - \delta_A) + V_s^2V_r^2)^{1/2} \\ & + 4\sin^2(\theta_z - \delta_A)V_r^3|A|^2 - 4V_r^3|A|^2 - 2np|Z|^2P_o^2V_r^{2np-1} \\ & - 2(2+np)|A||Z|P_oV_r^{1+np}\cos(\theta_z - \delta_A) + 2V_s^2V = 0 \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

Elde edilen 15 ve 16 denklemlerinin çözümü sonucunda elde edilen pozitif reel kökler bize sistemde gerilim kararsızlığının ve sistemin analitik çözümünün olmadığı azami yüklenebilirlik noktasındaki yük gerilimini vermektedir. Hattın yüklenebileceği azami aktif ve reaktif güç değerleri ise 15 ve 16 Denklemlerinin çözümü ile elde edilen gerilimlerin 11 ve 12 denklemlerinde kullanılması sonucunda elde edilebilir. Hattın sonunda paralel kompanzasyon yapılması durumunda bu ifadeler ise hat sonunda yük uçlarından görülen Thevenin eşdeğer devresinden yararlanarak elde edilebilir. Bu durumda Thevenin

eşdeğer gerilimi ve empedansı hattın paralel kapasitanslarının ihmal edilmesi durumunda;

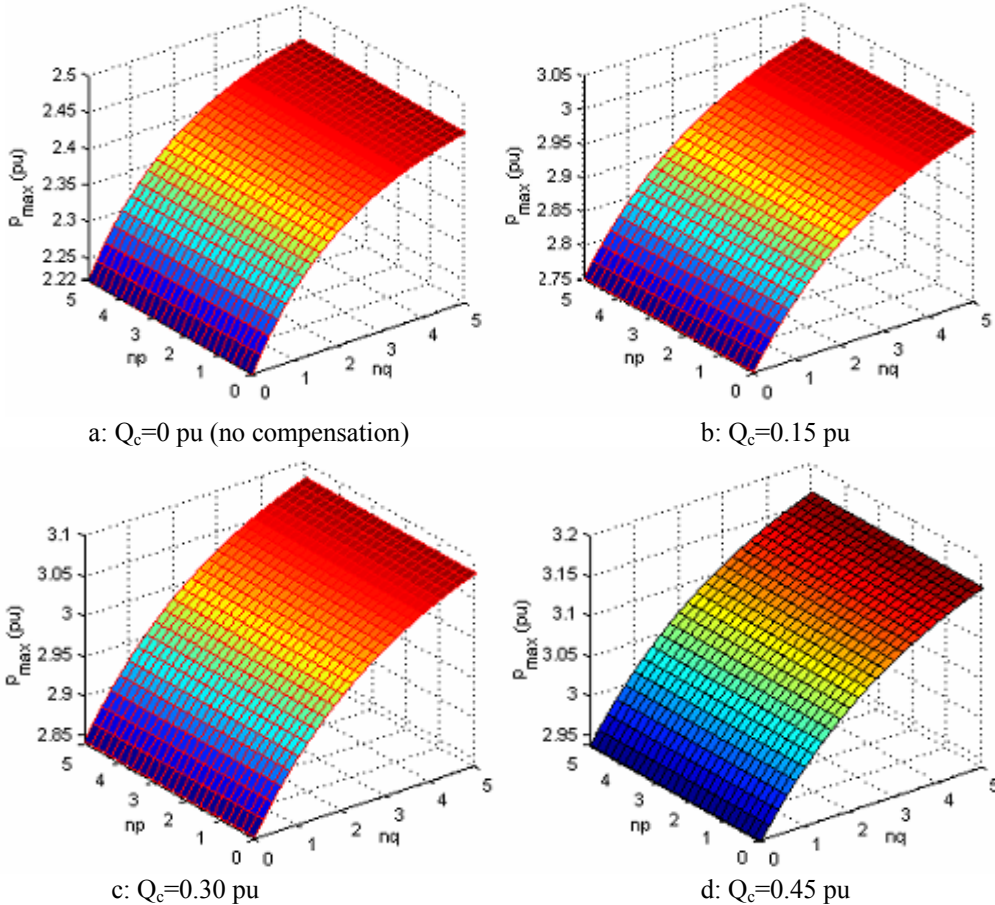
$$V_{th} = \left(\frac{X - X_C}{R^2 + (X - X_C)^2} - j \frac{RX_C}{R^2 + (X - X_C)^2} \right) V_s \quad (17)$$

$$Z_{th} = \frac{RX_C^2}{R^2 + (X - X_C)^2} - j \frac{RX_C + X_C X_L^2 - X_C^2 X_L}{R^2 + (X - X_C)^2} \quad (18)$$

Burada X_C , paralel kapasitörün reaktansını göstermektedir. Elde edilen V_{th} ve Z_{th} değerlerinin 11-16 Denklemlerinde sırasıyla V_s ve Z' 'nin yerine kullanılması durumunda paralel kompanzasyonun maksimum güce etkisi elde edilmiş olur.

4. ANALİZ SONUÇLARI

Bu çalışmada paralel kompanzasyonun maksimum yüklenebilirlik noktasına etkisi yükün gerilim bağımlılığının değişmesi durumu için incelenmiştir. Şekil 2'de verilen sisteme ait eleman değerleri 100MVA'lık baz gücü için birim-değer (pu) olarak $Z=0.033+j0.18$ pu, $V_s=1.05$ pu ve $P=1$ pu, $Q=0.3$ pu alınmış olup hat kapasitansı ihmal edilmiştir ($A=1$). Paralel kompanzasyonun etkisi hat sonuna reaktif gücü 0.15, 0.3, 0.45 pu luk paralel kapasitörün bağlanması durumları için incelenerek kompanzasyonsuz duruma göre karşılaştırılmıştır. Farklı reaktif güç durumları için hattın besleyebileceği azami aktif güç değerinin yükün gerilim bağımlılığına göre değişimi Şekil 3'de verilmiştir.



Şekil 3. Farklı kompanzasyon durumlarında maksimum aktif güç değerinin gerilim bağımlılığına göre değişimi

Şekil 3'de, kompanzasyosuz sistemin ve farklı değerlerde kompanzasyonun yapılması durumları için azami aktif güç değerinin yükün gerilim bağımlılıklarına göre değişimi görülmektedir. Yükün azami aktif gücünün yalnızca yükün reaktif gücünün gerilim bağımlılığı ile değiştiği ve aktif güç gerilim bağımlılığı değişiminin azami aktif güç üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı açıkça görülmektedir. Bunun yanı sıra paralel kompanzasyon ile azami yüklenebilirlik noktası artmakta, kompanzasyon büyüklüğünün artması durumunda yükün gerilim bağımlılığının azami güç değerine etkisinin azaldığı görülmektedir. Yükün reaktif güç gerilim bağımlılığının 0 dan 5 çıkması durumunda azami aktif güç değeri kompanzasyosuz durumda 2.22 pu dan 2.46 pu ya çıkararak azami gücün %10.81'i oranında artarken, %100 reaktif kompanzasyonda bu 2.85 pu dan 3.08 pu ya çıkararak azami gücün % 8'i civarında bir artış görülmektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada enerji iletim sistemlerinde gerilim kararsızlığı olayının oluştuğu azami yüklenebilirlik durumu incelenmiştir. Hattın besleyebileceği azami aktif ve reaktif gücün yükün gerilim bağımlılığına bağlı olarak değişiminin belirlenmesi için kullanılacak analitik ifadeler çıkarılmıştır. Azami güç değerinin paralel kompanzasyonun yapılması durumunda belirlenmesi analitik olarak iki baralı bir sistem için incelenmiştir.

Elde edilen ifadelerden, gerilim kararsızlığı oluşmadan yükün azami aktif gücünün yükün reaktif gücünün gerilim bağımlılığı ve benzer şekilde reaktif gücün ise yükün aktif gücünün gerilim bağımlılığı ile değiştiği görülmüştür. Paralel kompanzasyon ile azami yüklenebilirlik noktasının arttığı, kompanzasyon büyüklüğünün artması durumunda yükün gerilim bağımlılığının azami güç değerine etkisinin azaldığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Hingorani N. G., Flexible AC Transmission System, IEEE SPECTRUM, pp. 40 – 45, April 1993.
- [2] Edris A., FACTS Technology Development: An Update, IEEE POWER ENGINEERING REVIEW, pp. 4-9, March 2000.
- [3] IEEE/CIGRE, FACTS Overview, IEEE SERVICE CENTER, IEEE 95-TP-108, 1995.
- [4] Song Y. H., Johns A. T., Flexible AC transmission systems (FACTS), IEE Power Energy Ser. 1999; 30.
- [5] Weedy P. M., Cox B. R., Voltage Stability of Radial Power Links, PROC. IEE, London 115 (4), 528-536, April 1968.
- [6] El-Sadek M. Z., Abdel-Salam M. S., Ibrahim A. A., Hussien A. A., Criteria for Detection of

- [7] Kessel P., Glavitsch H., Estimating the Voltage Stability of A Power Systems, IEEE TRANS. ON POWER DELIVERY, PWRD-1 (3), pp. 346-354, 1986
- [8] El-Sadek M. Z., Dessouky M. M., Mahmoud G. A., Rashed W.I., Improvement of Steady-State Voltage Stability Criteria Results, FIFTH INT. MIDDLE EAST POWER CONFERENCE, MEP-CON'97, Alexandria University, January 1997, Egypt.
- [9] IEEE Task Force Report, 'Load Representation for Dynamic Performance Analysis,' IEEE TRANS. ON POWER SYSTEMS, Vol. 8, No. 2, pp. 472-482, May 1993.
- [10] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance. Bibliography on Load Models for Power Flow and Dynamic Simulation. IEEE TRANS. POWER SYST, Vol 10, pp.525-538, 1995.
- [11] Haque M. H., 'Load Flow Solution of Distribution Systems with Voltage Dependent Load Models', INT. J ELECTRIC POWER SYSTEM RES., Vol.36, pp.151-156, 1996.
- [12] Power System Load Modelling for Stability Studies, FINAL REPORT ON THE EPSRC GRANT GR/M38179/01.
- [13] Mithulanathan M., Salama M. A., Canizares C. A., and Reeve J., Distribution System Voltage Regulation and VAr Compensation for Different Static Load Models, INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING EDUCATION, PROQUEST EDUCATION JOURNALS, Vol.37, iss. 4, pp:384-395, 2000.
- [14] Phillip C. L., Harbo R. D., Feedback Control Systems, Second Edition, Prentice-Hall, International Edition, pp. 598-614.