

FARKLI YÜK MODELLERİNİN SERİ KOMPANZASYONA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ulaş EMİNOĞLU¹ Tankut YALÇINÖZ² M. Hakan HOCAOĞLU³

^{1,3}Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 41400, Gebze/Kocaeli

²Niğde Üniversitesi Müh-Mim. Fakültesi Elektrik Elektronik Bölümü 51200, Niğde

¹e-posta: u.eminoglu@gyte.edu.tr

²e-posta: tyalcinoz@nigde.edu.tr

³e-posta: hocaoglu@gyte.edu.tr

Anahtar sözcükler: Seri Kompanzasyon, Statik Yük Modelleri, Güç Transfери

ABSTRACT

This paper presents an analysis on the effects of series line compensations on system voltage profile, transferred power, and active and reactive power losses of transmission systems for exponential static load models. The effects of load characteristics on the compensation levels are demonstrated with a simple two-bus power system. Results show that the load types has a significant effects on the selection of the series compensation level.

1. GİRİŞ

İletim sistemlerinde güç akışı, gerilim, faz açısı gibi büyüklükler şu anda mekanik veya elektromekanik kontrol elemanları ile kumanda edilmektedir. Bunun yanı sıra gelişen yarı iletken teknolojisi ile güç elektroniği elemanlarının kapasitesi büyümektedir. Bu elemanlar ile enerji sistemlerinin kontrolü “FACTS: Esnek AC İletim Sistemleri” adı verilen bir teknolojinin ortaya çıkmasına neden olarak aktif kompanzatorlerin geliştirilmesine yol açmıştır [1-3].

Aktif kompanzatorlerin dışında pasif kompanzatorler de güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlardan seri kapasitörler, iletim sistemlerinde hat empedansının kompanzasyonu ile hattan transfer edilen gücün ve sistem kararlılığının artırılması, faz açısının kontrol edilmesi, gibi uygulamalarda kullanılmakta olup literatürde seri kompanzasyon çalışmaları geniş olarak yer almıştır [4-6]. Bu çalışmalarda genellikle seri kapasitörlerin etkisi sabit güç statik yük modeli için analiz edilmektedir. Seri kapasitörler, dağıtım sistemlerinde ve endüstriyel yüklerin olduğu sistemlerde gerilim regülasyonunun sınırlanması amacıyla da kullanılmaktadır. Hat üzerindeki gerilim düşümünün azaltılmasının dışında, yük akımında oluşabilecek büyük ani değişiklikleri

sınırlamak bu kondansatörlerin bir başka kullanım yeridir.

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 [7-10].

Bu çalışmada seri kompanzasyonun hat sonu (yük) gerilimi büyüklüğüne etkisi incelenmektedir. Farklı statik yük durumları için farklı oranda hat reaktansı kompanzasyonunun yüke aktarılan aktif ve reaktif güce ve hat üzerindeki aktif ve reaktif güç kayıplarına etkisi analitik olarak incelenmektedir. Gerilim seviyesinin 1 pu'den küçük ve büyük değerleri için analizler yapılarak, farklı gerilim bağımlılığına sahip yük durumlarında gerilim seviyesinin kompanzator büyüklüğünün değişimine etkisi incelenmiştir.

2. STATİK YÜK MODELLERİ VE SERİ KOMPANZASYON

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.

$$P = P_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{np} \quad (1)$$

$$Q = Q_o \left(\frac{V}{V_o} \right)^{nq} \quad (2)$$

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. Güncel hayatta çeşitli alanlarda kullanılan farklı yükler için üssel katsayılar Tablo 1’de verilmiştir [11,12].

Tablo 1. Farklı statik yük modelleri ve gerilim bağımlılık katsayıları

	Statik yükler	np	nq
1	Batarya Şarjları	2.59	4.06
2	Floresan Lambalar	2.07	3.21
3	Sabit Empedanslı Yükler	2	2
4	Klimalar	0.5	2.5
5	Sabit Akımlı Yükler	1	1
6	Küçük Floresan Lambalar	1	0.35
7	Pompa, Fan ve diğer Motorlar	0.08	1.6
8	Küçük Endüstriyel Motorlar	0.1	0.6
9	Sabit Güçlü Yükler	0	0

Şekil 1’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;

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

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

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

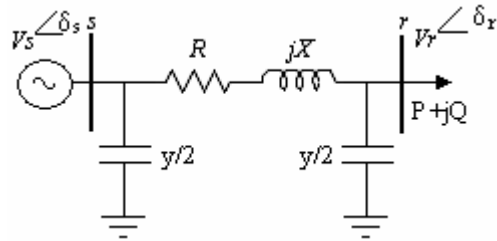
ifadeleri yazılabilir. Daha önce verilen 1-2 ve 7-9 denklemleri kullanılarak $V_o=1$ pu için yük geriliminin n_p ve n_q ’ya bağlı olarak ifadesi;

$$A^2 V_r^4 + 2A V_r^2 |Z| [(P_o V_r^{np} \cos(\theta_z - \delta_A) + Q_o V_r^{nq} \sin(\theta_z - \delta_A)) - V_s^2 V_r^2 + (P_o^2 V_r^{2np} + Q_o^2 V_r^{2nq}) |Z|^2] = 0 \dots \dots \dots (10)$$

şeklinde elde edilir. Elde edilen polinomda, aynı sistem için yük geriliminin n_p ve n_q ’ya bağlı olarak değiştiği açıkça görülmektedir. Seri kompanzasyonla eklenen seri kapasitörün yük gerilimine etkisi denklemde hattın yeni seri empedansı için;

$$Z = R + j(X - X_C) \quad (11)$$

ifadesi kullanılarak incelenebilir.



Şekil 1. İki baralı sisteme ait tek hat devre şeması

3. ANALİZ SONUÇLARI

Bu çalışmada seri kompanzasyonun hat sonu gerilimine, transfer edilen gücün büyüklüğüne ve hat üzerindeki aktif ve reaktif güç kayıplarına etkisi, hattın Tablo 1’de verilen farklı karakteristikteki statik yükleri beslemesi durumu için incelenmiştir. Şekil 1’de verilen sisteme ait eleman değerleri 100MVA’lık baz gücü için birim-değer (pu) olarak Tablo 2’de verilmiş olup hat kapasitansı ihmal edilmiştir ($A=1$).

Tablo 2. İki baralı sistem için eleman değerleri (pu)

Bara	s	r
P	-	1.0
Q	-	0.3
V	1.05	-
Z	0.033+j0.18	

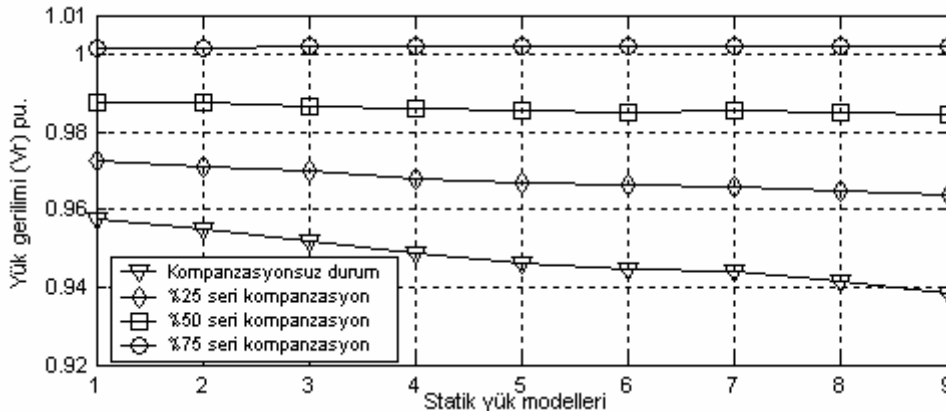
Seri kompanzasyonun etkisi hattın %25-50-75 oranında kompanzasyonlu ve kompanzasyonsuz durumlarına göre incelenerek gerilimin değişimi Şekil 2’de verilmiştir. Her bir yük modeli için hattın kompanzasyonu hat üzerindeki gerilim düşümünün azalmasına ve buda hat sonu geriliminin artmasına neden olmaktadır. Gerilimin 1 pu’den küçük değerlerinde, gerilim bağımlılığı zayıf olan yüklerde güç talebinin daha yüksek olması çekilen akımın büyük olmasına ve bu da hat reaktansı üzerindeki gerilim düşümünün artmasına neden olmaktadır. Kapasitör gerilimi ile bu gerilim düşümü kompanze

edilerek, seri kapasitör büyüklüğünün artışı ile gerilim bağımlılığı zayıf olan yüklerde hat sonu gerilimi diğer yük durumlarına göre daha büyük oranda artmaktadır. Yük geriliminin 1 pu değerine eşit veya yakın değerleri için yük modelinin etkisi azalmaktadır. Şekil 3'de transfer edilen aktif ve reaktif gücün seri kompanzasyon oranı ile ve farklı yük modelleri ile değişimi gösterilmektedir. Şekil 4'de güç faktörünün seri kompanzasyon oranı ile ve farklı yük modelleri ile değişimi verilmiştir.

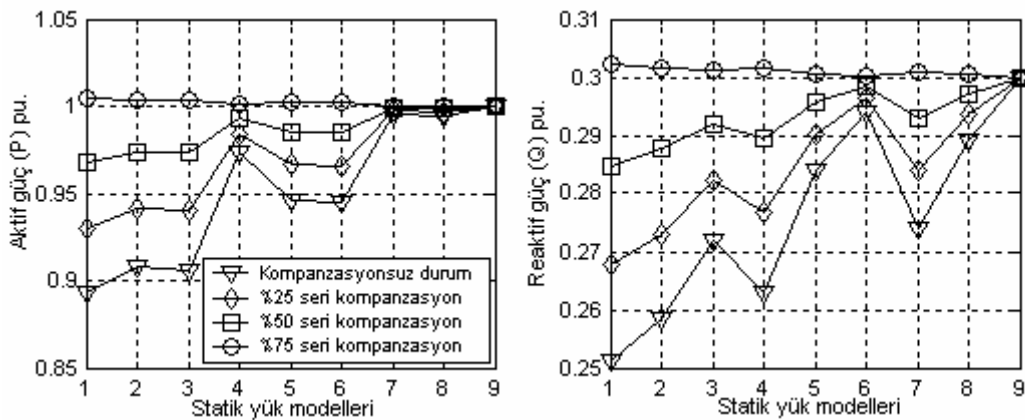
Gerilimin 1 pu'den küçük değerleri için yükün aktif ve reaktif gücü gerilim bağımlılığı azaldıkça artmakta, bağımlılık arttıkça aktarılan güç azalmaktadır. Seri kompanzasyonla yük geriliminin artışı transfer edilen gücün artmasına neden olmakta ve gerilimin 1 pu değeri için yük karakteristiği değişse dahi yük aktif ve reaktif gücü aynı kalmaktadır. Gerilimin 1 pu'den büyük değeri için transfer edilen aktif ve reaktif güç yükün gerilim bağımlılığı ile artmaktadır. Kullanılan yük modellerinde gerilim bağımlılığı eşit olan yüklerde seri kompanzasyon büyüklüğü ile gerilim değişimi güç faktörünü etkilememektedir.

Gerilim bağımlılığı farklı olan yüklerde, $n_p > n_q$ durumunda güç faktörü kompanzasyonla artmakta, $n_p < n_q$ durumunda ise güç faktörü kompanzasyonla azalmaktadır. Seri kompanzasyonla farklı statik yükler için hat üzerindeki aktif ve reaktif güç kayıplarının değişimi Şekil 5'de verilmiştir.

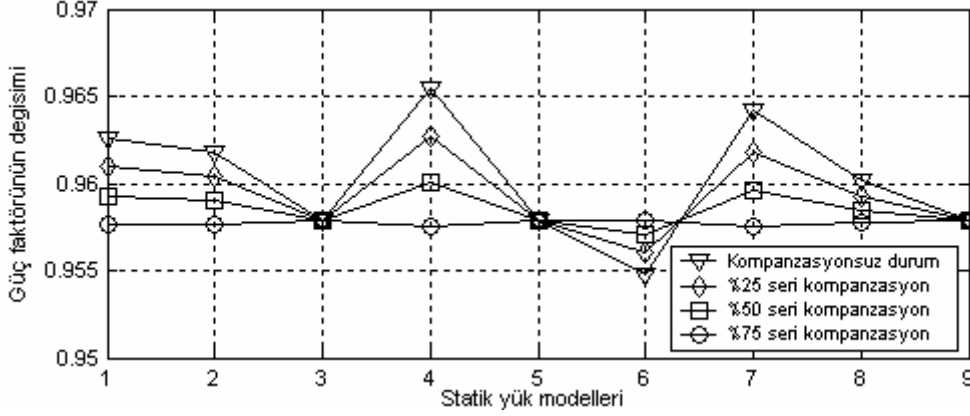
Şekil 5-a'dan görüldüğü gibi gücün gerilim bağımlılığı büyük olan yükler için kompanzasyonla gerilim artışı akımın artmasına dolayısıyla aktif güç kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Gerilim bağımlılığı zayıf olan yüklerde ise çekilen akım daha yüksek olup seri kompanzasyon ile gerilimin artışı sonucunda yük akımı azalmakta ve bunun sonucu olarak hattaki aktif güç kaybı azalmaktadır. Hat üzerindeki reaktif güç kayıpları Şekil 5-b'de verilmiştir. Akımın kompanzasyonla gerilim bağımlılığı zayıf yüklerde azalıp, bağımlılığın güçlü olduğu yüklerde artmasına rağmen hat reaktansının azalması ile bütün yük modelleri için reaktif güç kayıpları seri kompanzasyonla azalmaktadır. Gerilimin 1 pu değeri veya buna yakın değerleri için hattaki aktif ve reaktif güç kayıpları bütün yük modelleri için birbirine eşit veya yakın büyüklüktedir.



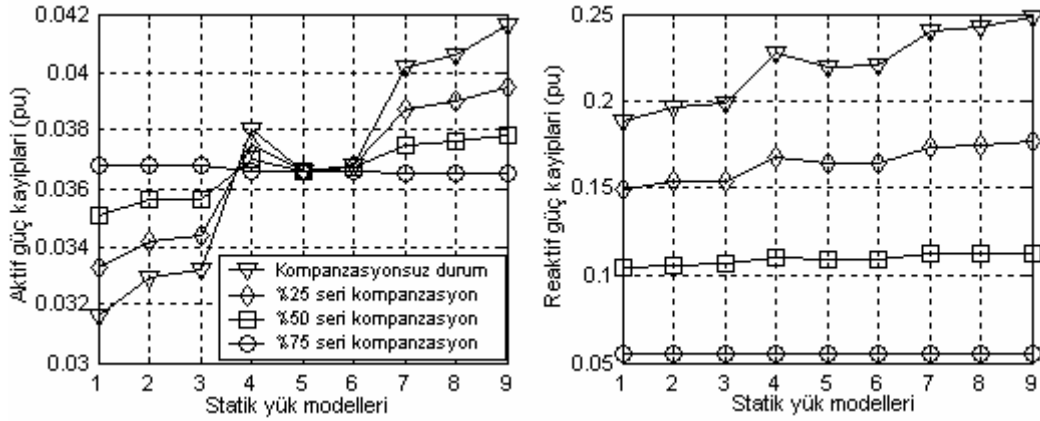
Şekil 2. Farklı yük modeli için yük geriliminin seri kompanzasyon büyüklüğüne göre değişimi



Şekil 3. Transfer edilen aktif ve reaktif gücün seri kompanzasyon oranı ile ve farklı yük modelleri ile değişimi



Şekil 4. Güç faktörünün ($\cos\phi$ 'nin) seri kompanzasyon oranı ile ve farklı yük modelleri ile değişimi



Şekil 5. Hat üzerindeki aktif ve reaktif güç kayıplarının farklı yük modelleri ile ve kompanzasyon oranıyla değişimleri

4. SONUÇ

Bu çalışmada farklı gerilim bağımlılığına sahip yüklerin, gerilim büyüklüğü ve hattan transfer edilen güce etkisi ve bunların seri kapasitör büyüklüğü ile değişimi incelenmiştir. İlk olarak iki baralı sistemde hat sonu geriliminin hattın beslediği yükün gerilim bağımlılık katsayılarına bağlı (n_p ve n_q 'ya) olarak ifade edilmiştir. Elde edilen bu ifadeye seri kapasitör büyüklüğü dahil edilerek hattın seri empedansının farklı oranlarda kompanzasyonunun: hat sonu gerilimine, hattan taşınan aktif ve reaktif gücün büyüklüğüne, hat üzerinde harcanan aktif ve reaktif güç kayıplarına ve yükün güç faktörüne etkisi dokuz farklı statik yük modeli için incelenmiştir.

Seri kapasitör büyüklüğünün hat sonu gerilimine etkisinin gerilim bağımlılığı düşük olan yüklerde daha fazla olduğu görülmüştür. Gerilim seviyesinin seri kapasitör büyüklüğü ile artışı yükün aktif ve reaktif gücünün de artmasına neden olduğu, hattaki aktif güç kayıplarının, gerilim bağımlılığının yüksek olduğu yüklerde seri kapasitör büyüklüğü ile arttığı, bağımlılığın zayıf olduğu yüklerde ise kompanzasyonla azaldığı görülmüştür. Aynı şekilde hat empedansının kompanzasyonunda hattaki reaktif

güç kayıplarının seri kapasitör büyüklüğü ile bütün yükler için azaldığı görülmüştür.

Daha sonraki çalışmalarda, farklı karakteristiğe sahip yüklerden oluşan sistemlerde seri ve paralel kapasitörlerin en uygun yerinin belirlenmesi düşünülmektedir.

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] Butler J. W. and Concordia C., Analysis of Series Capacitor Application Problems, AIEE TRANS. Vol.56, pp.975, 1937.
- [5] Starr E. C. and Evans R.D., Series Capacitors for Transmission Circuits, AIEE TRANS., Vol. 61, pp. 963, 1942.
- [6] Ashok Kumar B. S., Parthasarathy K., Prabhakara F. S., and Kincha H.P., Effectiveness of Series Capacitors in Long

- distance Transmission Lines, IEEE TRANS., Vol. PAS-89, pp.941-950, May/June 1970.
- [7] IEEE Task Force Report, 'Load Representation for Dynamic Performance Analysis,' IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, Vol. 8, No. 2, pp. 472-482, May 1993.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 'Power System Load Modelling for Stability Studies', FINAL REPORT ON THE EPSRC GRANT GR/M38179/01.
- [11] Mithulananthan 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.
- [12] Cutsem T. V. and Vournas C., 'Voltage Stability of Electric Power Systems', POWER ELECTRONICS AND POWER SYSTEM SERIES, Kluwer, 1998.