

DERLEME YAZISI

LİNEER OLMAYAN DEVRELERİN KOMPANZASYONUNDA OPTİMUM KAPASİTE SEÇİMİ

Uğur ARİFOĞLU, Kürşat AYAN

*Sakarya Üniversitesi Müh. Fak. Elk-Eln Müh.Böl
arifoglu@esentepe.sau.edu.tr kayan@esentepe.sau.edu.tr*

Geliş Tarihi: 26.10.2000

CHOOSING OPTIMAL CAPACITOR VALUE FOR REACTIVE POWER COMPENSATION IN NONLINEAR CIRCUITS

SUMMARY

If load is assumed linear but load or power source actually has harmonics, there will be errors for calculating reactive power compensation according to parallel connected capacitor's systems. It is impossible to make that power factor is unity using only one capacitor in nonlinear circuits. In this situation it is only referred to choosing optimal capacitor. Specially for automation systems using power electronics elements, reactive power compensation will only be success to know the reality which mentioned above. In this study, calculation of optimal capacitor for reactive power has been made for three situation and found equations in nonlinear circuits.

ÖZET

Yükün lineer kabul edilip, paralel kapasiteli kompanzasyon hesabı ile boyutlandırılan tesislerde gerek yükün, gerek kaynağın ya da her ikisinin harmonik içermesi durumunda hesaplama hataları ortaya çıkacaktır. Lineer olmayan devrelerde bir adet kapasite kullanımı ile güç faktörünün 1 yapılması imkansızdır. Tek kapasite kullanılan bu tür devrelerde ancak optimum kapasite seçiminden bahsedilebilir. Özellikle otomasyonun son derece yaygınlaştığı ve bu nedenle güç elektroniği devrelerinin sıkça kullanıldığı sistemlerde yukarıda bahsedilen gerçeği bilmeden yapılan kompanzasyon hedefine tam anlamı ile ulaşamayacaktır. Bu çalışmada reaktif güç kompanzasyonunda her üç durum için optimal kapasite hesabının nasıl yapılacağı anlatılmış ve lineer olmayan devreler için gerekli ifadeler çıkarılmıştır.

GİRİŞ

Klasik kompanzasyon sistemlerinde yükün ihtiyacına göre çeşitli anahtarlar yardımı ile reaktif güç üreten kaynaklar devreye alınır yada devreden çıkartılır. Yükün kaynaktan talep ettiği ara reaktif güç değerleri için uygun kaynak bulunması ise imkansızdır. Klasik yaklaşımın en önemli iki olumsuz yönü; hızlı çalışmaması ve hassasiyetinin az olmasıdır. Özellikle güç elektroniği devrelerinin kompanzasyonunda bu yetersizlik çok belirgin hale gelmektedir. Günümüzde lineer olmayan yükler hem sayıca artmış hem de enerjinin verimli kullanılması açısından kompanzasyonun önemi daha da büyümüştür. Güç elektroniği devrelerinin kompanzasyonunda, devrenin girişine konulan reaktif güç üreteçleri, güç elektroniği anahtar elemanları üzerinden sisteme bağlanırlar. Bu anahtar elemanların tetikleme açıları değiştirildikçe (reaktif güç üretici olarak kullanılan) bobin

yada kapasitenin değeri de etkin olarak değişeceğinden ($L(\alpha), C(\alpha)$) istenen reaktif güç değerine ulaşılmış olacaktır. Bu konuda yapılan bazı yayınlar incelendiğinde sistemin reaktif güç ihtiyacı, kaynak akımının reaktif bileşeni ölçülerek bulunmakta ve bu değeri verecek tetikleme açısı hesaplanıp uygun tetikleme yapılmaktadır [1,2,3].

Yukarıdaki yaklaşımın hangi şartlar altında geçerli olduğunu bilmeyen bir kontrolcü, kompanzasyon sonrası sistemin kaynaktan çektiği reaktif güç değeri için VAR-metre kullandığında sıfıra yakın bir reaktif güç ölçmesine rağmen (reaktif güç ölçü aletinin harmonik etkilerini göremeyecek yapıda olması durumunda) tam bir kompanzasyon yaptığını zannedecektir. Eğer sayaç da harmoniğe karşı duyarlı ise yapılamayan kompanzasyon yapılmış gibi algılanacak, eğer sayaç harmoniklere duyarlı ise bu durumda da yapılan hatanın (reaktif güç farkının) nereden kaynaklandığı anlaşılacaktır.

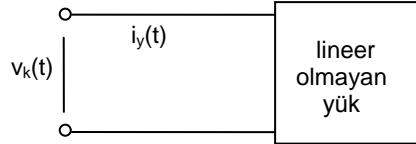
Bu yayının amacı ise yukarıda yapılan **faz başına bir kapasiteli kompanzasyon yönteminin** ancak ana harmonik etkisi ile oluşan reaktif güç ihtiyacını temin edeceğini, kaynağın şebekeden çektiği diğer harmonikler dolayısı ile tam bir kompanzasyonun mümkün olamayacağını ispatlanması ile birlikte, ayrıca her bir tetikleme açısı için kompanzasyonu bu şartlarda bile en verimli kılan ayrı bir (optimum) L yada C değerinin olduğunu vurgulamak ve bu optimum değerlerin nasıl bulunacağını göstermektir.

Eğer sistemin tümüyle kompanzasyonu isteniyor ise kaynaktan çekilen her bir harmonik değeri için ayrı bir kompanzasyon devresi (ve C değeri) oluşturulup her bir harmonik için ayrı bir tetikleme açısı bulunmalıdır.

1. SİNÜSOİDAL OLMAYAN KAYNAKTAN LİNEER OLMAYAN YÜKÜ BESLEYEN BİR DEVREDE GERİLİM VE AKIM EŞİTLİKLERİ

Şekil 1.1'de verilen devrede kaynak gerilimi sinüsoidal değil ise;

$$v_k(t) = \sqrt{2} \left[\sum_1^{h1} V_{h1} \sin(h1 * \omega t + \beta_{h1}) + \sum_1^{h2} V_{h2} \sin(h2 * \omega t + \beta_{h2}) \right] \quad (1.1)$$



Şekil 1.1. Sinüsoidal olmayan kaynaktan beslenen lineer olmayan yük modeli

olur. Yük lineer değil ise yük akımı;

$$i_y(t) = \sqrt{2} \left[\sum_1^{h1} I_{yh1} \sin(h1 * \omega t + \beta_{h1} - \varphi_{yh1}) + \sum_1^{h3} I_{yh3} \sin(h3 * \omega t + \beta_{h3} - \varphi_{yh3}) \right] \quad (1.2)$$

olacaktır. (1.1) eşitliğinden kaynak gerilimi etkin değerinin karesi;

$$V^2 = \sum_1^{h1} V_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \quad (1.3)$$

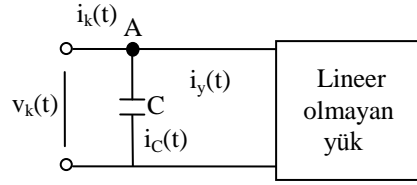
ve (1.2) eşitliğinden ise yük akımı etkin değerinin karesi;

$$I_y^2 = \sum_1^{h1} I_{yh1}^2 + \sum_1^{h3} I_{yh3}^2 \quad (1.4)$$

olacaktır. Yukarıda verilen eşitliklerde kullanılan;

h1; devreyi besleyen gerilim kaynağında ve yük akımında ortak olan harmonik numaraları,
h2; devreyi besleyen gerilim kaynağında olan fakat yük akımında olmayan harmonik numaraları,
h3; yük akımında olan fakat gerilim kaynağında olmayan harmonik numaralarıdır.

(1.2) ifadesindeki φ_{yh} açısı, aynı harmonik numaralı gerilim kaynağı ile yük akımı arasındaki faz farkını göstermektedir.



Şekil 1.2. Lineer olmayan yükün kompanzasyonu

Şekil 1.2'de sinüsoidal olmayan bir kaynaktan beslenen lineer olmayan bir yükü kompanze etmek için yerleştirilen C kapasitesi gösterilmiştir. C kapasitesi lineer özellikte bir eleman olduğu için kaynak geriliminde olan tüm harmonik frekansları kapasite akımında da bulunacağından kapasite akımı;

$$i_C(t) = \sqrt{2} \left[\sum_1^{h1} V_{h1} * h1 * w * C * \sin(h1 * wt + \beta_{h1} + \frac{\pi}{2}) + \sum_1^{h2} V_{h2} * h2 * w * C * \sin(h2 * wt + \beta_{h2} + \frac{\pi}{2}) \right] \quad (1.5)$$

olur. (1.5) ifadesinde verilen kapasite akımı etkin değerinin karesi;

$$I_C^2 = \sum_1^{h1} (V_{h1} * h1 * w * C)^2 + \sum_1^{h2} (V_{h2} * h2 * w * C)^2 \quad (1.6)$$

olur. Şekil 1.2'de A noktasına Kirchoff'un akım yasası uygulanırsa;

$$i_k(t) = i_C(t) + i_y(t) \quad (1.7)$$

elde edilir. Yük ve kapasite akımında bulunan aynı tür (h1) harmonikler (1.2) ve (1.5) eşitlikleri yardımı ile toplanırsa, kaynak akımında h1 harmoniklerine karşı gelen ani akım değeri;

$$i_{kh1}(t) = \sqrt{2} \left[\sum_1^{h1} V_{h1} * h1 * w * C * \sin(h1 * wt + \beta_{h1}) + \sum_1^{h1} I_{yh1} * \sin(h1 * wt + \beta_{h1} - \varphi_{yh1}) \right] \\ = \sqrt{2} \sum_1^{h1} I_{kh1} * \sin(h1 * wt + \beta_{h1} + \varphi_{yh1}) \quad (1.8)$$

elde edilir. (1.8) ifadesinde kullanılan I_{kh1} etkin akımının karesi;

$$I_{kh1}^2 = (V_{h1} * h1 * w * C)^2 + I_{yh1}^2 - 2V_{h1} * I_{yh1} * h1 * w * C * \sin \varphi_{yh1} \quad (1.9)$$

bulunur. Kaynak akımının h2 türü harmonik akımları (yük akımında h2 türü olmadığından) kapasitenin h2 türü akımından meydana geleceği için, kaynağın h2 türü harmonik akımının etkin değerinin karesi;

$$I_{kh2}^2 = (V_{h2} * h1 * w * C)^2 \quad (1.10)$$

bulunur. Kaynak akımının h3 türü harmonik akımları (kapasite akımında h3 türü akım yoktur) yükün h3 türü akımından meydana geleceği için kaynağın h3 türü harmonik akımının etkin değerinin karesi;

$$I_{kh3}^2 = I_{yh3}^2 \quad (1.11)$$

elde edilir. Sonuç olarak (her üç tür harmoniği de içerdiğinden) kaynak akımının etkin değerinin karesi;

$$I_k^2 = \sum_1^{h1} I_{kh1}^2 + \sum_1^{h2} I_{kh2}^2 + \sum_1^{h3} I_{kh3}^2 = \sum_1^{h1} \{ (V_{h1} * h1 * w * C)^2 + I_{yh1}^2 - 2V_{h1} * I_{yh1} * h1 * w * C * \sin \varphi_{h1} \} + \sum_1^{h2} (V_{h2} * h2 * w * C)^2 + \sum_1^{h3} I_{yh3}^2 \quad (1.12)$$

bulunur. Kaynağa ilişkin görünür güç değeri ise;

$$S_k^2 = V^2 * I_k^2 = (\sum_1^{h1} V_{kh1}^2 + \sum_1^{h2} V_{kh2}^2) (\sum_1^{h1} I_{kh1}^2 + \sum_1^{h2} I_{kh2}^2 + \sum_1^{h3} I_{kh3}^2) \quad (1.13)$$

elde edilir. Son ifade açık formda yazılırsa;

$$S_k^2 = (\sum_1^{h1} V_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2) (\sum_1^{h1} V_{h1}^2 * h1^2 * w^2 * C^2 + I_{yh1}^2 - 2V_{h1} * I_{yh1} * h1 * w * C * \sin \varphi_{yh1}) + \sum_1^{h2} (V_{h2} * h2 * w * C)^2 + \sum_1^{h3} I_{yh3}^2 \quad (1.14)$$

bulunur. Kaynaktan çekilen P_k aktif gücü ise aynı frekansa sahip akım ve gerilim bileşenleri tarafından taşınır. Hem kaynak geriliminde hem de yük akımında bulunan harmonikler h1 türü olduğundan (kapasitenin kayıpsız olduğu kabulü ile);

$$P_k = P_y = \sum_1^{h1} V_{h1} * I_{yh1} * \cos \varphi_{yh1} \quad (1.15)$$

elde edilir. Kaynağa ilişkin güç faktörü ise;

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{S_k} = \frac{P_k}{V * I_k} \quad (1.16)$$

bulunur. Son ifadede görülen aktif ve görünür güç değerleri için (1.14) ve (1.15) eşitliklerinden faydalanılır [4].

1.1. GÜÇ FAKTÖRÜNÜN MAKSİMUM DEĞERİ

Şekil 1.2'de kaynaktan devreye aktarılan aktif güç (P_k) değeri C'nin aldığı değere bağlı değildir. Bu nedenle güç faktörünü maksimum kılmak için C değerinin uygun bir değere ayarlanması gerekir. C değerinin değiştirilmesi ile kaynaktan çekilen akımın etkin değeri minimum kılınmaya çalışılır (bu işlem aynı zamanda S_k değerinin de minimize edilmesi anlamına da gelir). Bu açıklamalara göre (1.16) ifadesinde güç faktörünün C'ye göre türevi alınıp sifıra eşitlenirse;

$$\frac{d(\cos \varphi_k)}{dC} = -\frac{P_k}{S_k^2} \frac{dS_k}{dC} = -\frac{P_k}{S_k^2} V \frac{dI_k}{dC} = -\frac{P_k}{VI_k^2} \frac{dI_k}{dC} = 0 \quad (1.17)$$

bulunur. Son ifadenin sıfır olabilmesi için;

$$\frac{dS_k}{dC} = \frac{dI_k}{dC} = 0 \quad (1.18)$$

olması yeterlidir. (1.14) ifadesinin C'ye göre türevi alınarak;

$$2S_k dS_k = 2V^2 \left(\sum_1^{h1} V_{h1}^2 * h1^2 * w^2 * C - V_{h1} * I_{yh1} * h1 * w * \sin \varphi_{yh1} \right) + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 * h2^2 * w^2 * C) dC \quad (1.19)$$

elde edilir. Son ifadeden $dS_k/dC=0$ olması için (bunu sağlayan kapasite değeri $C=C_{opt}$ kabul edilirse);

$$C_{opt} = \frac{\sum_1^{h1} V_{h1} * I_{yh1} * h1 * \sin \varphi_{yh1}}{w \left(\sum_1^{h1} V_{h1}^2 * h1^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 * h2^2 \right)} \quad (1.20)$$

bulunur. $d^2S_k / dC^2 > 0$ olduğundan $C=C_{opt}$ için S_k değeri minimum, yani $C=C_{opt}$ için $S_k = S_{kmin}$ yazılabilir;

$$S_{kmin}^2 = V^2 * I_{kmin}^2 = \left(\sum_1^{h1} V_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \right) \left(\sum_1^{h1} (V_{h1}^2 * h1^2 * w^2 * C_{opt}^2 + I_{yh1}^2 - 2V_{h1} * I_{yh1} * h1 * w * C_{opt} * \sin \varphi_{yh1}) + \sum_1^{h2} (V_{h2}^2 * h2^2 * w^2 * C_{opt}^2) + \sum_1^{h3} I_{yh3}^2 \right) \quad (1.21)$$

= C_{opt} için paralel kompanzasyonda kaynaktan bakıldığında görülen maksimum güç faktörü;

$$\cos \varphi_{kmaks} = \frac{\sum_1^{h1} V_{h1} * I_{yh1} * \cos \varphi_{yh1}}{S_{kmin}} = \frac{\sum_1^{h1} V_{h1} * I_{yh1} * \cos \varphi_{yh1}}{\sqrt{\left(\sum_1^{h1} V_{h1}^2 + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 \right) * I_{kmin}^2}} \quad (1.22)$$

bulunur. Son ifadede;

$$I_{kmin}^2 = \sum_1^{h1} (V_{h1}^2 * h1^2 * w^2 * C_{opt}^2 + I_{yh1}^2 - 2 * V_{yh1} * I_{yh1} * h1 * w * C_{opt} * \sin \varphi_{yh1}) + \sum_1^{h2} V_{h2}^2 * h2^2 * w^2 * C_{opt}^2 + \sum_1^{h3} I_{yh3}^2 \quad (1.23)$$

olur.

2. LİNEER OLMAYAN BİR YÜKÜN SİNÜSOİDAL BİR KAYNAKTAN BESLENMESİ DURUMUNDA OPTİMUM KAPASİTE HESABI

Sinüsoidal bir kaynağın lineer olmayan bir yükü beslemesi durumunda bir önceki bölümde verilen harmonik bileşen tanımlarına göre;

$$h_1=1, h_2=0, h_3=h_3 \quad (2.1)$$

olacaktır. (2.1)'de verilen değerler için optimum kapasite;

$$C_{opt} = \frac{I_{y1} * \sin \varphi_{y1}}{w * V_1} \quad (2.2)$$

bulunur. (2.1) ve (2.2) eşitlikleri için minimum kaynak akımı;

$$I_{kmin}^2 = I_{y1}^2 * \cos^2 \varphi_{y1} + \sum_1^{h_3} I_{yh3}^2 \quad (2.3)$$

elde edilir. Kaynak akımı kaynağa ilişkin görünür güç ifadesinde yerine konulursa;

$$S_{kmin} = V \sqrt{I_{y1}^2 * \cos^2 \varphi_{y1} + \sum_1^{h_3} I_{yh3}^2} \quad (2.4)$$

bulunur. Kaynak tarafından devreye bakıldığında elde edilebilecek güç faktörünün maksimum değeri;

$$\cos \varphi_{kmaks} = \frac{V * I_{y1} * \cos \varphi_{y1}}{V \sqrt{I_{y1}^2 * \cos^2 \varphi_{y1} + \sum_1^{h_3} I_{yh3}^2}} \quad (2.5)$$

elde edilir. Son ifade tekrar düzenlenirse;

$$\cos \varphi_{kmaks} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\sum_1^{h_3} I_{yh3}^2}{I_{y1}^2 * \cos^2 \varphi_{y1}}}} \quad (2.6)$$

bulunur. Son ifade de görüldüğü gibi yükün lineer olmaması dolayısı ile kaynağa ilişkin maksimum güç faktörü 1 değerinin altında kalmaktadır.

3. SİNÜSOİDAL OLMAYAN BİR KAYNAĞIN LİNEER BİR YÜKÜ BESLEMESİ DURUMUNDA OPTİMUM KAPASİTE HESABI

3.1. YÜK AKIMI BÜYÜKLÜKLERİ CİNSİNDEN

Sinüsoidal olmayan bir kaynağın lineer bir yükü beslemesi durumunda bir önceki bölümde verilen harmonik bileşen tanımlarına göre;

$$h_1=h_1, h_2=0, h_3=0 \quad (3.1)$$

olacaktır. (3.1)'de verilen değerler için optimum kapasite;

$$C_{opt} = \frac{\sum_1^{h_1} V_{h1} * I_{yh1} * h_1 * \sin \varphi_{yh1}}{w \sum_1^{h_1} h_1^2 * V_{h1}^2} \quad (3.2)$$

elde edilir. (3.2) eşitliği için kaynaktan bakıldığında görülen maksimum güç faktörü;

$$\cos \varphi_{k\max} = \frac{P_k}{V * I_{k\min}} = \frac{\sum_1^{h1} V_{h1} * I_{yh1} * \cos \varphi_{yh1}}{\sqrt{\sum_1^{h1} V_{h1}^2 * \left[\sum_1^{h1} I_{yh1}^2 * \cos^2 \varphi_{yh1} + \sum_1^{h1} f(h1) \right]}} \quad (3.3)$$

bulunur. Son eşitlikte kullanılan;

$$f(h1) = \left[\frac{h1 * V_{h1} * \sum_1^{h1} V_{h1} * I_{yh1} * h1 * \sin \varphi_{yh1}}{\sum_1^{h1} h1^2 * V_{h1}^2} - \frac{I_{yh1} * \sin \varphi_{yh1} * \sum_1^{h1} h1^2 * V_{h1}^2}{\sum_1^{h1} h1^2 * V_{h1}^2} \right]^2 \quad (3.4)$$

$$\cos \varphi_{y1} = R / |Z_{h1}| \quad (3.5)$$

$$\sin \varphi_{y1} = X_{h1} / |Z_{h1}| = h1 * w * L / |Z_{h1}| \quad (3.6)$$

elde edilir. (3.1), (3.5) ve (3.6) eşitlikleri (3.2)'de yerine konulursa güç faktörünü maksimum kılacak optimum kapasite değeri;

$$C_{opt} = \frac{L * \sum_1^{h1} h1^2 * V_{h1}^2 / |Z_{h1}|^2}{\sum_1^{h1} h1^2 * V_{h1}^2} \quad (3.7)$$

bulunur.

3.2 YÜK EMPEDANSI CİNSİNDEN

Yük empedansı (lineer) seri empedans olarak modellenirse;

$$V_{h1} / I_{yh1} = Z_{h1} = R_{h1} + jX_{h1} \quad (3.8)$$

elde edilir. Eğer yük seri R-L devresi ise;

$$R_{h1} = R ; \text{ tüm } h1 \text{ harmonik bileşenleri için} \quad (3.9)$$

$$X_{h1} = h1 * X = h1 * w * L \quad (3.10)$$

olacaktır. Yukarıdaki ifadelerden; (3.1) ve (3.10) eşitlikleri için kaynağa ilişkin minimum görünür güç değeri;

$$S_{k\min}^2 = \sum_1^{h1} V_{h1}^2 * \left[R^2 * \sum_1^{h1} \frac{|V_{h1}|^2}{|Z_{h1}|^4} + (wL)^2 * \sum_1^{h1} \left(\frac{h1 * V_{h1} \sum_1^{h1} h1^2 * V_{h1}^2 / |Z_{h1}|^2}{\sum_1^{h1} h1^2 * V_{h1}^2} - \frac{h1 * V_{h1}}{|Z_{h1}|^2} \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

elde edilir. Kaynaktan çekilen aktif güç değeri ise;

$$P_k = \sum_1^{h1} V_{h1} * I_{yh1} * \cos \varphi_{yh1} = R * \sum_1^{h1} V_{h1}^2 / |Z_{h1}|^2 \quad (3.12)$$

bulunur. Kaynağa ilişkin maksimum güç faktörü ise (3.11) ve (3.12) eşitliklerinden yararlanarak;

$$\cos \varphi_{kmax} = \frac{P_k}{S_{kmin}} \quad (3.13)$$

ifadesi kullanılarak bulunur.

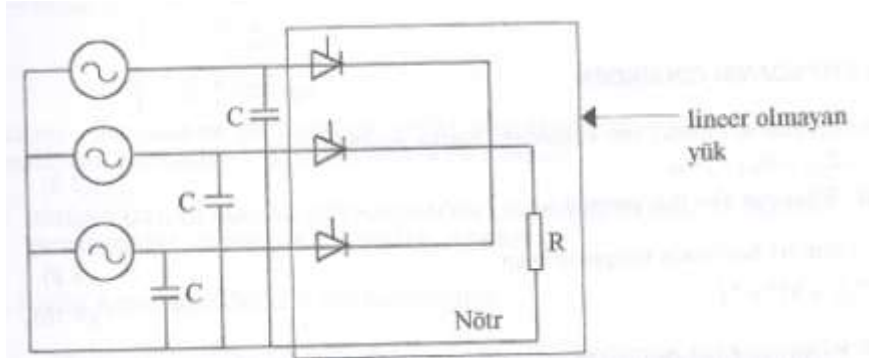
4. ÖRNEK SİSTEM 1

Örnek olarak seçilen sistem şekil 4.1'de gösterildiği gibi üç fazlı yarım dalga kontrollü bir doğrultucu devresi olup, çıkışına R direnci bağlanmıştır. Kaynak gerilimi sinüsoidal olup maksimum değeri V_m ile gösterilmiştir. Şekil 4.1'de kaynak tarafından yüke doğru bakıldığında ölçülen S_k **görünür güç değeri** (4.1) ile verilmiştir.

$$S_k = \frac{V_m^2}{2R} \sqrt{\frac{R^2}{X_C^2} + \left(\frac{4\pi + 3\sqrt{3} \cdot \cos 2\alpha}{12\pi} \right) - \frac{\sqrt{3}R}{2\pi X_C} \sin 2\alpha} \quad 0 \leq \alpha \leq \pi/6$$

$$S_k = \frac{V_m^2}{2R} \sqrt{\frac{R^2}{X_C^2} + \left(\frac{5\pi/3 - 2\alpha + \sin(2\alpha + \pi/3)}{4\pi} \right) - A} \quad (4.1)$$

$$A = \frac{R}{2\pi X_C} (1 - \cos(\pi/3 + 2\alpha)) ; \quad \pi/6 \leq \alpha \leq 5\pi/6$$



Şekil

4.1. R ile yüklenen üç fazlı yarım dalga kontrollü doğrultucu devrenin kompanzasyonu.

olur. Şekil 4.1'de kaynaktan çekilen **aktif güç değeri**;

$$P_k = \frac{V_m^2}{2R} \left(\frac{4\pi + 3\sqrt{3} \cdot \cos 2\alpha}{12\pi} \right) ; 0 \leq \alpha \leq \pi/6$$

$$P_k = \frac{V_m^2}{2R} \left(\frac{5\pi/3 - 2\alpha + \sin(2\alpha + \pi/2)}{4\pi} \right) ; \pi/6 \leq \alpha \leq 5\pi/6 \quad (4.2)$$

elde edilir. Şekil 4.1'te güç faktörünü maksimum kılan **optimum C değeri** ise (3.17-19) eşitliklerinden;

$$C_{opt} = \frac{\sqrt{3} \sin 2\alpha}{4\pi * w * R}; \quad 0 \leq \alpha \leq \pi / 6$$

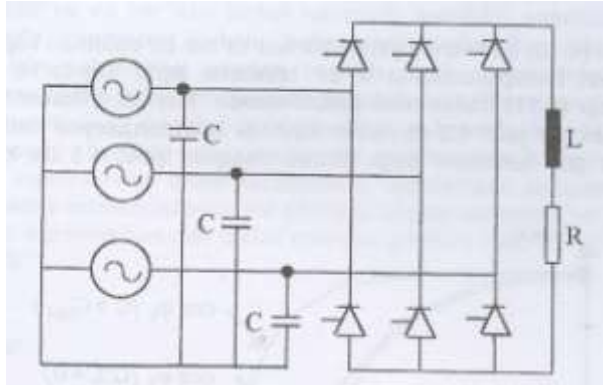
$$C_{opt} = \frac{(1 - \cos(\pi / 3 + 2\alpha))}{4\pi * w * R}; \quad \pi / 6 \leq \alpha \leq 5\pi / 6 \quad (4.3)$$

bulunur. Kaynaktan bakıldığında görülen **maksimum güç faktörü** ise (4.1) ve (4.2) eşitliklerinde $C=C_{opt}$ yazılarak;

$$\cos \varphi_{kmax} = \frac{P_k}{S_k} \quad (4.4)$$

ifadesine uygulanması ile elde edilir.

ÖRNEK SİSTEM 2



Şekil 4.2. L, R yüklü üç fazlı tam dalga tam kontrollü köprü doğrultucu devresi

Şekil 4.2 de verilen üç fazlı tam dalga tam kontrollü köprü doğrultucu devresi çıkışına L,R yükü bağlanmıştır. Kaynak gerilimi sinüsoidal olarak verilmektedir. Yük akımının $L \gg R$ için düzgün olduğu kabülü ile yük uçları arasındaki ortalama gerilim değeri;

$$V_{Lort} = (3\sqrt{3}V_m \cos \alpha) / \pi \quad (4.5)$$

bulunur. Yük akımının ortalama değeri I_{Lort} olarak alınırsa, yükün çektiği ortalama güç;

$$P_k = V_{Lort} I_{Lort} = (3\sqrt{3}V_m I_{Lort} \cos \alpha) / \pi \quad (4.6)$$

olur. Kaynak akımı etkin değeri;

$$I_k = I_{Lort} \sqrt{2/3} \quad (4.7)$$

olacaktır. Dengeli kaynak gerilim değerleri için 3 faza ilişkin toplam görünür güç değeri;

$$S_k = 3V_m I_k / \sqrt{2} = \sqrt{3}V_m I_{Lort} \quad (4.8)$$

bulunur. Şekil 4.2 de verilen devrede **kompanzasyonsuz durum** için güç faktörü;

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{S_k} = (3 \cos \alpha) / \pi \quad (4.9)$$

bulunur. Şekil 4.2 de verilen devrede [5] **kompanzasyonsuz durum (C devre dışı)** için yükün saf omik ($R=8$ ohm) ve yükün $L \gg R$ durumunda çeşitli tetikleme açılarında karşı gelen güç faktörü değişimleri, şekil 4.3 de düz çizgi kullanılarak gösterilmiştir.

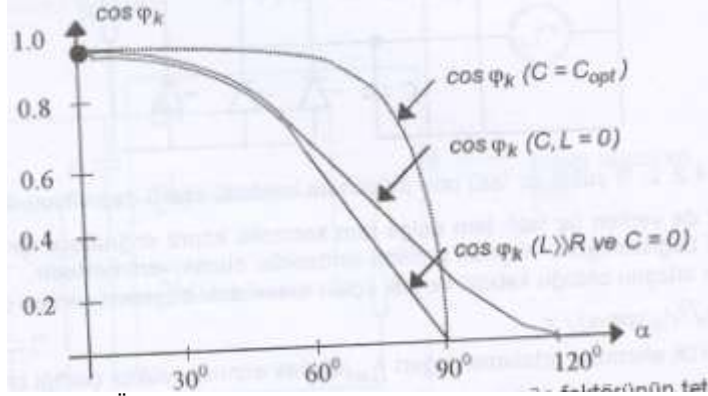
Şekil 4.2 de gösterildiği gibi kaynak çıkışlarına yıldız bağlı kapasite konularak **kompanzasyon yapıldığında** örnek 1 de yapılan hesaplamalara benzer işlemler yapıldığında kaynak tarafına ilişkin güç faktörü;

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{S_k} = \frac{3\sqrt{2}X_C \cos^2 \alpha}{\pi R} \sqrt{\frac{2X_C^2}{R^2} \cos^2 \alpha - \frac{X_C}{R} \sin 2\alpha + \frac{\pi^2}{18}} \quad (4.10)$$

olarak bulunur. Şekil 4.3 de verilen devrede optimum kompanzasyon kapasitesinin hesaplanması için (4.10) ifadesi C kapasitesine göre türevi alınıp sıfıra eşitlenirse optimum kapasite değeri;

$$C_{opt} = \frac{9}{w\pi^2 R} \sin 2\alpha \quad (4.11)$$

olur. (4.11) ifadesi (4.10) ifadesinde yerine konulursa her bir optimum kapasiteye karşı gelen güç faktörleri hesaplanabilir. Her bir tetikleme açısı için farklı bir optimum kapasite bulunacağı (4.11) ifadesinden görülmektedir. Kaynak frekansı 50 hz ve yük direnci R=8 ohm için şekil 4.2 de verilen devrede **kompanzasyon varken** tetikleme açısının kaynağın güç faktörüne bağlı olarak değişimi şekil 4.3 de kesik çizgi ile gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Üç fazlı tam dalga kontrollü köprü doğrultucunun güç faktörünün tetikleme açısına bağlı olarak değişimi (kaynak sinüsoidal).

Şekil 4.3 de görüldüğü gibi **her faza bir tek kapasite kullanıldığı** kompanzasyon sisteminde her farklı tetikleme açısı için **optimum kapasite kullanımında bile** güç faktörü 1 değerine ulaşamamakla fakat bu değere yakın değerler alabilmektedir. Eğer kaynak sinüsoidal değilse şekil 4.3 de verilen değişimlerden çok daha kötü değerlerle karşılaşılacaktır.

5.SONUÇ

Bu çalışmada kimi kompanzasyon uygulamalarında görülen bir probleme işaret edilmekte ve çözüm önerilmektedir. Pratikte yükün çektiği reaktif güce bakılarak kompanzasyon hesaplamaları yapılmakta ve bazen bu hesaplamalara göre bulunan C

değerine rağmen şebekeden önemli değerlerde reaktif güç çekilmeye devam edildiği görülmektedir. Böylesi bir durumla karşılaşıldığında;

- Devrede harmonik analizi yapılarak elde edilen her bir harmonik için ayrı ayrı kompanzasyon yapılabilir veya bu amaca hizmet eden devreler tasarlanabilir [6,7] .
- Öncelikle ölçü aletlerinin harmonik güç değerlerini ölçebilecek özellikte olup olmadığı araştırılmalıdır. Ana frekans dışındaki harmonikleri göremeyen bir alet ile yapılan ölçümler hatalı olacaktır [8]. Yalnızca birinci harmonik değerlerine duyarlı ve dolayısı ile hatalı ölçüm yapan ölçü aleti ile ölçülen güç değerlerine dayanılarak hesaplanan kapasite değerleri de kompanzasyonu verimli kılamayacaktır.
- Bu çalışmada gösterildiği gibi **bir adet kapasite kullanılarak yapılan kompanzasyonda** bu amaçla kullanılan **kapasite değeri ne olursa olsun** harmonikli bir çalışmada (kaynak gerilimi harmonikli olabileceği gibi, yükte lineer olmayabilir ya da her ikisi birden harmonik üretebilir) **şebekeden çekilen reaktif gücü sıfır yapmanın imkanı bulunmamaktadır**. Buradaki çalışmada her üç durum için **şebekeden çekilen reaktif gücü ancak mevcut şartlar altında minimum kılan** (optimum) kapasite değerinin nasıl hesaplanacağını gösterilmiş ve bazı güç elektroniği devreleri üzerinde optimum kapasite hesabı yapılmıştır.

Bu sonuç özellikle güç elektroniği devrelerinin kullanımının yaygınlaştığı otomasyon sistemlerinde önem kazanmakta, uygulamada kompanzasyon problemi ile uğraşan elektrik mühendislerine yol gösterici bilgiler vermekte ve bu tesislerde reaktif güç akışının düzenlenmesinde dikkat edilmesi gereken noktaları açıklamakta ve çözüm önermektedir.

6. Kaynaklar

- [1]. T. Peterson, "Reactive power compensation", ASEA publication NK, 02-305 E, May 1983
- [2]. R.Gutman, et all. "Application and operation of static var system on a power system", IEEE Trans.vol.PAS-104,pp.1868-1881,July 1985
- [3]. P.Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1993
- [4]. Stepheer W. 'Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits', Cambridge University Press, 1979
- [5]. Vithayathil J. 'Power Electronics -Principles and Applications', McGraw-Hill, 1995
- [6]. Sharon D., 'Reactive Power Definitions and Power Factor Improvement in Nonlinear System', Proc. IEE,120,6,704-706, 1973
- [7]. Steeper D., Stratford R., 'Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power Systems Using Thyristor Converters', Trans. IEEE,12,3,232-54,1976
- [8]. Arrillaga J., Bradley D.,Bodger P. 'Power System Harmonics', John Wiley and Sons, 1985