

Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinde Pasif Filtre ve Filtreli Kompanzasyonun Kullanımı ve Simülasyon Örnekleri

Koray TUNÇALP*, Mehmet SUCU**

*Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Mekatronik Eğitimi Bölümü

**Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü
34722 Göztepe Kadıköy-İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada, elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinde kullanılan pasif filtrelerin ve filtreli kompanzasyon sistemlerinin (seri endüktans bağlanmış kompanzasyon sistemi) yapıları ve uygulama şekilleri hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra örnek olarak ele alınmış harmonik içeren bir elektrik enerji sisteminin modeli MATLAB programı ile oluşturulmuştur. Bu sisteme, pasif filtre ve filtreli kompanzasyon sistemi uygulanarak bu filtrenin sistem üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiş, sonuçlar üzerinde yorumlar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Harmonik, Pasif Filtre, Kompanzasyon, Filtreli Kompanzasyon, Simülasyon

The Usage of Passive Filter and Filtered Compensation For Filtering Harmonics Occured in Electric Energy Systems and Simulation Samples

ABSTRACT

In this study; information has been given about structures of passive filters and filtered compensation systems used in electrical energy systems where the harmonics occurred. After that, a model of the electric system which includes harmonic has been simulated with MATLAB. Passive filter and filtered compensation systems are applied to this system and effects of filters are investigated and conclusions are discussed in detail.

Keywords: Harmonic, Passive Filter, Compensation, Filtered Compensation, Simulation

1. GİRİŞ

Vazgeçilmez bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların görevi; kesintisiz, ekonomik ve kaliteli bir elektriği tüketicilerine sunmaktır. Elektrik enerji sistemlerinde kalite söz konusu olunca, limitler dahilinde şebeke frekansında; limitler dahilinde ve sinüsoidal biçimli kullanıcı geriliminin sağlanması anlaşılmaktadır.

Ancak bu tür elektrik enerjisi pratikte bir takım zorluklara sahiptir. Güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların yol açtığı olaylar sebebiyle tam sinüsoidal dalga şeklinden sapmalar olabilmektedir. Tam sinüsoidal sapa, genellikle harmonik adı verilen bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir ve buna sebep olan etkenlerin başında ise manyetik ve elektrik devrelerindeki doğrusal olmayan değişimler (nonlineerlik) gelir.

Yarı iletken elemanların yapıları gereği ve sanayide kullanılan bazı doğrusal olmayan yüklerin (transformatör, ark fırınları, vb.) etkisiyle; akım ve gerilim

dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte temel sinüsoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki sinüsoidal dalgalara "harmonik" adı verilir. Elektrik enerji sistemleri üzerinde olumsuz etkileri görülen harmoniklerin yok edilmesi veya zararsız hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için iki farklı yöntem vardır. Bunlardan birincisi, harmonik üreten elemanların üretimi sırasında yapısının harmonik üretmeyecek veya çok az üretecek şekilde tasarlanması veya şebekeye bağlantılarının uygun şekilde yapılmasıdır. Bu yöntem tasarım sırasında alınabilecek önlemler olarak isimlendirilebilir. İkinci yöntem ise, harmoniklerin üretildikten sonra yok edilmesidir. Bu yöntem de, harmoniklerin filtrelenmesi olarak isimlendirilir (1).

2. HARMONİK FİLTRELERİ

Harmoniklerin oluşturduğu zararlı etkileri engelleyebilmek için tasarım sırasında alınabilecek tedbirler çoğu kez yeterli değildir. Tasarım sırasında alınabilecek tedbirlere ek olarak harmonik akımlarının şebe-

keye geçmesini engellemekte harmonikleri önlemenin bir diğer yöntemidir. Bunun için sisteme eklenmesi gereken ek devrelere gereksinim vardır. Elektrik enerji sistemine yerleştirilen ve istenilen harmonik akımlarının süzülmesini sağlayan bu devrelere “Harmonik Filtresi” denir (2). Harmonik filtrelerinin amacı akım veya gerilimdeki harmonik derecelerini etkilerini azaltmaktır. Pasif ve aktif filtre olarak iki çeşit harmonik filtresi bulunmaktadır.

Bu çalışmada pasif harmonik filtrelerinin çeşitleri ve yapıları açıklanarak simülasyon örnekleri verilmiştir. Harmoniklerin filtrelenmesinin diğer bir yönü olan ve son yıllarda oldukça sık kullanılan aktif filtreler ise ayrı bir çalışmanın konusu olacağından bu çalışmada incelenmeyecektir.

3. PASİF FİLTRELER

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına konulan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok etmek için tasarlanan, kondansatör (C), endüktans (L) ve bazı durumlarda direnç (R) elemanlarından oluşan devrelerdir (3).

Pasif filtreler, seri pasif filtreler ve paralel (şönt) pasif filtreler olmak üzere kendi içerisinde iki tiptir. Ayrıca uygulamada çok karşılaşılan bir diğer pasif filtre türü de sistemde bulunan kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamaktır (filtreli kompanzasyon sistemleri) (2,3).

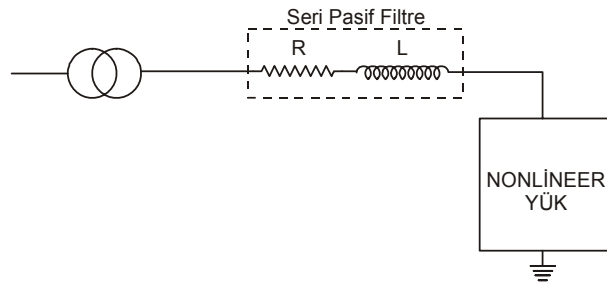
3.1. Seri Pasif Filtreler

Seri filtreler adından da anlaşılacağı gibi, kaynak ile harmonik üreten eleman arasına seri olarak bağlanan endüktans (L) elemanından oluşmaktadır. Seri bağlanan bu empedans,

$$X_L = 2\pi f L \quad (1)$$

formülüne göre harmonik frekanslarına yüksek empedans göstererek onların geçişlerini engeller. Temel frekansta ise düşük empedans gösterirler. Seri filtre uygulamasına örnek bir devre Şekil 1’de verilmiştir.

Seri filtreler uygulamada; AC motor sürücü devrelerinin ve yüksek güçlü AC/DC inverterlerin girişine bağlanır. Seri filtrelerin uygulanmasındaki zorluklar; tüm yük akımının filtre üzerinden geçmesi, tam hat gerilimleri için yalıtım zorunluluğu ve hatta gerilim düşümüne neden olması şeklinde sıralanabilir (3)



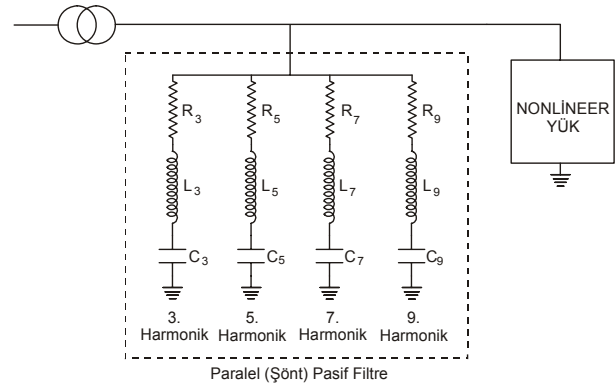
Şekil 1. Seri Pasif Filtre İçin Bir Örnek

3.2. Paralel (Şönt) Pasif Filtreler

Paralel (şönt) pasif filtreler, harmonik kaynağı ile şebeke arasına kondansatör (C), endüktans (L) ve bazı durumlarda direnç (R) elemanlarının paralel olarak bağlanmasından oluşan devrelerdir.

Paralel pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik frekansı için rezonans şartını sağlayacak L , C değerlerini hesaplayarak bu devreyi güç sistemine bağlamaktır. Her bir harmonik frekansı için ayrı rezonans kolları oluşturularak bu kolların güç sistemine bağlanması gerekmektedir. Ancak bu işlem en etkin şekilde diğer bir ifadeyle genlik değeri yüksek harmonik frekansları için yapılmalıdır. Her harmonik bileşeni için ayrı bir rezonans kolu oluşturmak optimum bir çözüm olmayacağından, sadece genlik değeri yüksek harmonik frekansları için rezonans kolu oluşturulur. Genliği yüksek olmayan harmonik frekansları için ise bunların etkinliğini azaltacak tek bir rezonans kolu oluşturmak yeterli olacaktır (3). Pasif filtre için örnek bir devre (Tek ayarlı paralel pasif filtre) Şekil 2’de görülmektedir (2).

Şönt filtrelerin kullanılmasının en büyük sakıncası, güç sistemiyle paralel rezonansa girebilmesidir. Bu yüzden güç sistemine paralel pasif filtre uygulanmadan önce sistemin ayrıntılı bir analizinin yapılması gerekmektedir. Tek ayarlı (bant geçiren) filtreler, çift ayarlı filtreler, otomatik ayarlı filtreler, yüksek geçiren sönümlü filtreler olmak üzere dört farklı paralel pasif filtre çeşidi vardır (3).



Şekil 2. Pasif Filtre İçin Bir Örnek (Tek Ayarlı Paralel Pasif Filtre)

Burada;

- R_n : n . harmonik mertebesi için rezonansa getirilen kapasite ve endüktans elemanının iç direnci (Ω),
- X_{L_n} : n . harmonik mertebesi için kapasite elemanı ile rezonansa sokulan endüktans (Ω),
- X_{C_n} : n . harmonik mertebesi için endüktans elemanı ile rezonansa sokulan kapasitanstır (Ω).

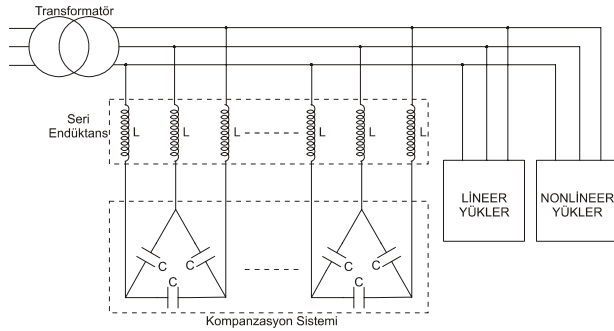
3.3. Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlamak (Filtreli Kompanzasyon Sistemleri)

Bu teknik, harmonikleri önlemede en etkisiz yöntemlerden biridir. Ancak en kullanışlı ve en ekono-

mik olanıdır. Tekniğin prensip şeması Şekil 3'te verilmiştir (2).

Harmoniklerin, elektrik enerji sistemlerindeki gözle görülen en büyük etkileri kompanzasyon sistemleri üzerinde meydana gelmektedir. Harmonikler kondansatörlerin kapasitesinde değişmelere yol açmakta ve ömürlerini azaltmaktadır. Bu etkileri azaltabilmenin en pratik ve en ekonomik yolu, kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlamaktır. Böylece, harmonikli akımlara karşı seri endüktans sayesinde yüksek empedans gösterilerek kompanzasyon sistemine geçmesi önlenmekte ve bu seri endüktansla kompanzasyon sisteminin kapasitansı bir filtre görevi görerek harmoniklerin etkinliğini azaltmaktadır (2).

Bu sistemler tesis edilirken seçilecek olan endüktanslara, her firmanın kendi endüktansları için hazırladığı tablolara bakılarak karar verilmektedir. Bu seçim için bazı kriterler vardır. Bunların en önemlisi p faktörüne karar vermektir. Bu faktör;



Şekil 3. Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlamak

$$p = \frac{X_L}{X_C} \quad (2)$$

formülünde belirlenmektedir. Burada;

X_L : Kompanzasyona seri bağlanacak olan endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansı (Ω),

X_C : Kompanzasyon sisteminin temel frekanstaki kapasitif reaktansıdır (Ω).

p faktörü sistemde etkin olan harmonik derecesine göre seçilmelidir. Örneğin; sistemde 3. harmonik baskın ise bu sistemi 189 Hz'de rezonansa getirecek (endüktans ve kompanzasyon sistemi arasındaki seri rezonans) p değeri % 7 olan endüktanslar seçilmelidir. Sistemde 5. harmonik baskın ise bu sistemi 210 Hz de rezonansa getirecek p değeri % 5,67 olan endüktanslar seçilmelidir. Yukarıda açıklanan, 3. harmonik için 189 Hz, 5. harmonik için 210 Hz değerleri zamanla uygulamadan kazanılan tecrübelerden elde edilmiş verilerdir (2,4). Burada amaç, örneğin 3. harmoniği baskın olan sistemde sistemi 3. harmoniğin frekansı olan 150 Hz de rezonansa getirirsek bu durumda 3. harmoniğin bütün

genliği kompanzasyon sistemine akacaktır. Bu da kompanzasyon sistemine zarar verecektir. Bu yüzden sistem, sistemde mevcut olan baskın harmoniğin frekansına yakın frekanslarda rezonansa getirilmekte ve böylece sistemde baskın olan harmoniğin genliği önemli ölçüde azaltılmaktadır. Bu, baskın olmayan diğer harmonik mertebeleri üzerinde de etki göstereceğinden sistemdeki THD (Total Harmonic Distortion – Toplam Harmonik Distorsiyonu) seviyesi önemli ölçüde düşecektir.

Kompanzasyon sistemine seri bağlanan endüktanslar, kompanzasyon uçlarındaki gerilimin bir miktar yükselmesine sebep olmaktadır. Bunun sebebi, gücün sabit kalması istendiği için kompanzasyon sisteminden akan akım sınırlandırıldığından azaldığı için uçlarındaki gerilimin yükselmesidir. Bu yüzden sistem için seçilen kapasitanslar şebeke geriliminden daha büyük gerilimlere dayanıklı olmalıdır (5). Bu;

$$U_C = \frac{U}{1-p} \quad (3)$$

ile hesaplanabilir. Burada;

U_C : Kapasitans gerilimi (V),

U : Şebeke gerilimi (V),

p : Formül 2'de tanımlanan sabit değerdir.

Şebeke gerilimi 400 V olan bir sistemde p değeri % 5,67 olan endüktanslar seçilmişse, bu durumda kapasitansların gerilimi 425 V olarak seçilmelidir. Ancak, 425 V'ta çalışabilecek şekilde seçilen kapasitanslar üzerlerinde yazılı olan reaktif gücü bu gerilim altında verebilirler. Eğer kapasitanslar daha düşük gerilim ile çalışırlarsa yeni güçleri,

$$Q_2 = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 Q_1 \quad (4)$$

ile hesaplanmalıdır. Burada;

Q_1 : Kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi altında üreteceği reaktif güç (VAR),

Q_2 : Gerilimin değişmesi sonucunda kompanzasyon sisteminin üreteceği reaktif güç (VAR),

U_1 : Kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi (V),

U_2 : Değişen gerilimin değeridir (V).

Ayrıca, kompanzasyon sistemi seri bağlı reaktörlerin tükettiği

$$Q_L = 3I^2 X_L \quad (5)$$

reaktif güç kadar daha az reaktif güç sisteme verecektir (5). Burada;

Q_L : Seri endüktansların tükettiği reaktif güç (VAR),

I : Seri endüktans üzerinden akan akım (A),

X_L : Seri endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansıdır (Ω).

4. FİLTRELERE AİT SİMÜLASYON DEVRELERİ

Bu bölümde, örnek olarak alınan bir elektrik enerji sistemi üzerine, tek ayarlı (bant geçiren) pasif filtre ve kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlama işlemi uygulanarak sistemin bu filtre çeşitlerine karşı cevapları ayrı ayrı incelenmiştir. Bu inceleme; sistemin akıma ve gerilime ait FFT (Fast Fourier Transform – Hızlı Fourier Dönüşümü) değerleri, akıma ve gerilime ait THD değerleri üzerinde MATLAB v6.5 programı kullanılarak yapılmıştır (6).

4.1. Örnek Sistem

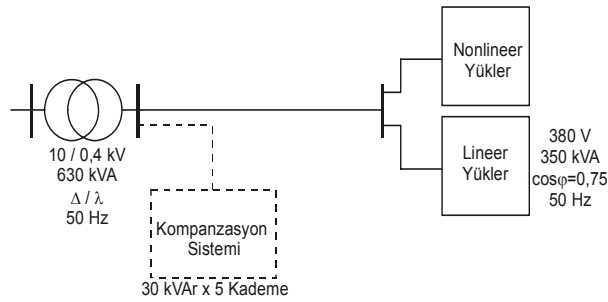
Simülasyonu yapılacak her iki filtre sistemi, Şekil 4'te tek hat şeması ve elektriksel büyüklükleri verilen sistem üzerine uygulanmıştır. Bu sistemdeki doğrusal olmayan yükler akım kaynağı ile modellenmiştir. Sistemde 3., 5., 7., 9., 11., ve 13. harmoniklerin olduğu kabul edilmiştir (Tablo 1).

Örnek olarak alınan elektrik enerji sisteminde yüklerin dengeli olarak fazlara dağıtıldığı kabul edilmiştir. Özetle sistem dengeli bir sistemdir.

Tablo 1. Örnek Elektrik Tesisindeki Doğrusal Olmayan Yüklerle Ait Akım Genlikleri

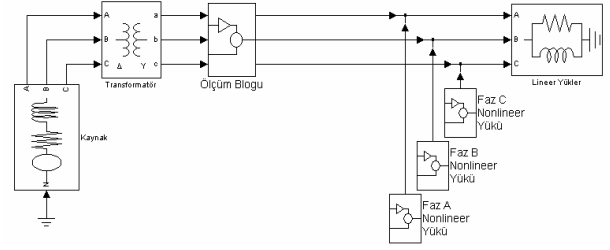
Akımdaki Harmonik Derecesi	Genliği (A)
I_3	250
I_5	150
I_7	95
I_9	60
I_{11}	25
I_{13}	5

Örnek elektrik enerji sisteminin MATLAB'ta hazırlanmış simülasyon devresi Şekil 5'te verilmiştir. Bu simülasyon devresinde, "Ölçüm Bloğu", "A Fazı Nonlineer Yükü", "B Fazı Nonlineer Yükü" ve "C Fazı Nonlineer Yükü" isimli bloklar birer kapalı bloktur. "Ölçüm Bloğu" isimli kapalı bloğun içerisinde gerekli olan bütün büyüklükleri (her fazın ayrı ayrı akımı ve gerilimi, akım ve gerilime ait THD büyüklükleri, akım ve gerilime ait FFT değerleri, vb.) ölçmek mümkündür. Bu blok istenildiği takdirde her türlü ölçümü yapacak şekilde geliştirilebilir.

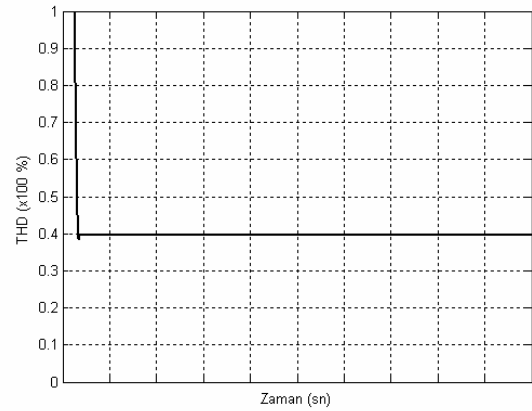


Şekil 4. Örnek Elektrik Enerji Sistemi

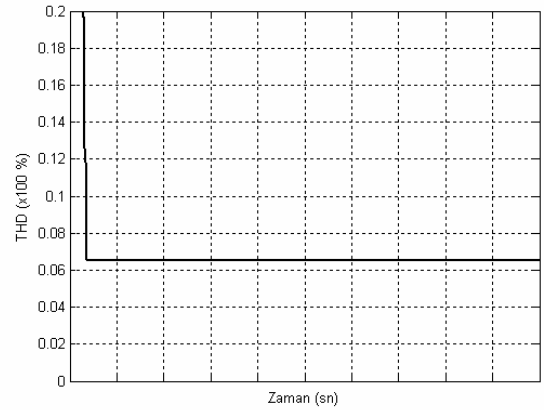
Sistemin, akım için THD grafiği Şekil 6'da ve gerilim için THD grafiği Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 5. Örnek Elektrik Enerji Sisteminin MATLAB'ta Hazırlanan Simülasyon Devresi



Şekil 6. A Fazı Akımının THD Değeri



Şekil 7. A Fazı Faz-Nötr Geriliminin THD Değeri

Şekil 6 ve Şekil 7'de akıma ve gerilime ait THD değerleri görülmektedir. Buna göre; akımdaki THD değeri % 40 mertebelerinde, gerilimdeki THD değerleri ise % 6,5 mertebelerindedir. Bu kabul edilebilir sınırların oldukça üstündedir. Bu sebepten sisteme filtre uygulanarak THD seviyelerinin düşürülmesi gerekmektedir.

4.2. Örnek Sisteme Tek Ayarlı Pasif Filtrenin Uygulanması

Burada Şekil 5'te simülasyonu hazırlanan sisteme tek ayarlı pasif filtre uygulanarak sistemin buna olan cevabı incelenecektir. Bu filtre uygulanırken filtre içinde kullanılan kapasite elemanlarının, sisteme gerekli

olan kompanzasyon gücünü de karşılaması gerekmektedir.

Sistemin mevcut güç katsayısı 0,75 olup bu değeri 0,95'e çıkartabilmek için gerekli olan kondansatör gücü, 145,223 kVAr olarak hesaplanmıştır. Bu değer, standart kondansatör güç değerleri gözönüne alındığından bundan sonraki hesaplamalarda 150 kVAr olarak alınmıştır. Bu reaktif güç değerine göre sisteme bağlanması gereken kondansatörlerin kapasitif reaktansları, 0,9626 Ω olarak bulunur. Buradan sisteme bağlanacak toplam kapasite değeri ise 3306,7 μ F olarak hesaplanır.

Örnek sistemimizde, 3., 5., 7., 9. ve 11. harmonikler etkili genlik değerlerine sahip olduklarından bu harmonikler süzülecektir. Her bir harmonik derecesi için L ve C elemanlarından oluşan paralel kollar tasarlanacaktır. Ancak her harmonik derecesinin genlik değeri farklı olduğundan her bir paralel kol, tasarlandığı harmonik derecesinin genlik değerindeki akımı taşıyabilecek kapasitede tasarlanmalıdır. Bu sebepten sisteme bağlanması gereken toplam C değerinin kollara paylaştırılması;

$$C_n = C \frac{I_n}{I_{Th}} \quad (6)$$

formülüne göre yapılmıştır. Burada;

C_n : n . harmoniği süzecek olun kolun kapasitesi (μ F),

C : Sisteme bağlanacak olan toplam kapasite değeri (μ F),

I_n : n . harmonik akımının genlik değeri (A),

I_{Th} : Sistemdeki bütün harmonik akımlarının toplamı (A)'dır.

6 numaralı formül baz alınarak yapılan hesaplara göre sisteme bağlanacak her bir paralel kolun kapasite değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Sisteme Bağlanacak Her Bir Paralel Kolun Kapasite Değeri

C_3 (μ F)	C_5 (μ F)	C_7 (μ F)	C_9 (μ F)	C_{11} (μ F)
1413,1	847,8	536,8	339,14	141,31

Paralel kollar için hesaplanan kapasite değerleri ve paralel kolların ayar edilmek istendiği harmonik mertebesinin frekansı referans alınarak kolların endüktans değerleri ise,

$$L_n = \frac{1}{2^2 \pi^2 f_n^2 C_n} \quad (7)$$

formülüne göre hesaplanabilir. Burada;

L_n : n . harmoniği süzecek olun kolun endüktansı (mH),

f_n : n . harmoniğin frekansı (Hz),

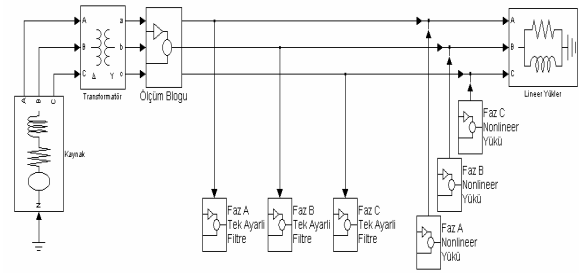
C_n : n . harmoniği süzecek olun kolun kapasitesi (μ F)'dir.

7 numaralı formül baz alınarak yapılan hesaplara göre sisteme bağlanacak her bir paralel kolun endüktans değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Sisteme Bağlanacak Her Bir Paralel Kolun Endüktans Değeri

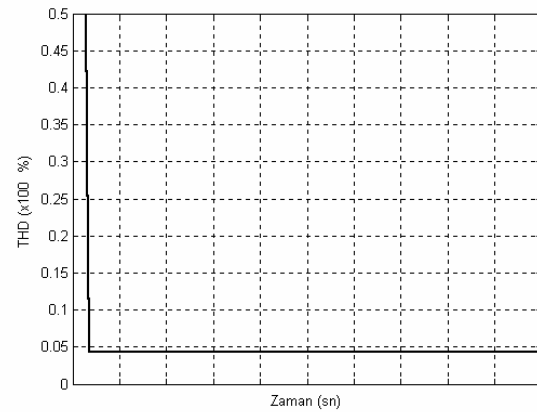
L_3 (mH)	L_5 (mH)	L_7 (mH)	L_9 (mH)	L_{11} (mH)
0,7966	0,478	0,3852	0,3688	0,5925

Her paralel kol için hesaplanan L ve C değerlerine göre oluşturulan sistemin MATLAB'te hazırlanan simülasyon devresi Şekil 8'de görülmektedir.

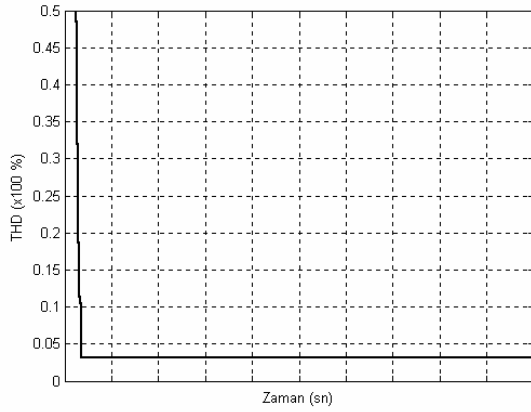


Şekil 8. Örnek Elektrik Enerji Tesisine Tek Ayarlı Filtrenin Uygulanması

Şekil 8'deki simülasyon devresinin çalıştırılması sonucunda sistemin filtre uygulandıktan sonra, akım için THD grafiği Şekil 9'da ve gerilim için THD grafiği Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 9. Tek Ayarlı Filtre Uygulandıktan Sonra A Fazı Akımının THD Değeri



Şekil 10. Tek Ayarlı Filtre Uygulandıktan Sonra A Fazı Faz-Nötr Geriliminin THD Değeri

Tek ayarlı filtre uygulanmadan önce akımdaki THD değeri % 40 mertebelerinde iken, tek ayarlı filtre uygulandıktan sonra bu değer % 4 mertebelerine düşmüştür. Gerilimin THD değeri ise % 6,5 değerinden % 3 mertebelerine düşmüştür. Akım ve gerilimdeki bu THD değerleri kabul edilebilir seviyededir. Buradan görülmektedir ki her bir harmonik mertebesi için ayar edilen paralel kollar, ayar edildikleri frekanslarda elemanların iç dirençleri ihmal edilirse sifıra yakın empedans göstermişlerdir.

Sonuçta tek ayarlı filtrenin performansının oldukça iyi olduğu sonucuna varılır. Ancak bu filtrelerin bazı dezavantajları vardır. Öncelikle, hassas yapılan hesaplama ve ayarlardan dolayı, filtreyi oluşturan elemanların değerinde zamanla oluşan değişimlere karşı oldukça duyarlı olmaları en önemli sorundur. Ayrıca tek ayarlı filtreler sadece gücü sabit olan doğrusal olmayan yüklü sistemlerde kullanılabilir. Çünkü, üzerlerindeki kapasite değerleri değişken olmadığından sistemdeki endüktif yükler kalktığından kondansatörler devrede kalmaya devam edeceğinden bu durumda aşırı kompanzasyon oluşabilir. Veya doğrusal olmayan yüklerden bir kısmı devreden çıktığında, örneğin sistemdeki 5. harmoniğin büyük bir kısmını oluşturan yük devreden çıktığında 5. harmoniği süzen tek ayarlı filtre kolu sistemde kalacağından bu kol enerji kaybına yol açacaktır. Bu yüzden bu filtreler sabit doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu sistemlerde kullanılmalıdır. Sabit yük devre-

den çıktığında tek ayarlı filtrelerde devreden çıkarılmaktadır.

4.3. Örnek Sisteme Filtreli Kompanzasyon Sisteminin Uygulanması

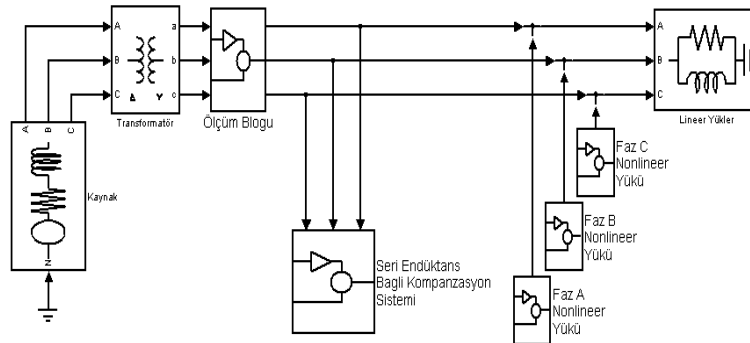
Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlama işlemi uygulamada en çok karşılaşılan uygulamalardan birisidir. Bunun en önemli sebebi, maliyetinin düşük olmasıdır.

Harmonikli bir sistemde harmoniklerin varlığı çoğu zaman kompanzasyon sistemine verdiği zararlarla anlaşılır. O yüzden bu yöntem, harmoniklerin kompanzasyon sistemi üzerindeki etkilerini de azalttığından oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde göre; sistemde bağlı bulunan kompanzasyon ünitelerinin değerlerine bakılarak firmalar tarafından oluşturulan endüktans seçim tablolarından uygun endüktans değerleri seçilerek, kompanzasyon sistemine seri bağlanmalıdır.

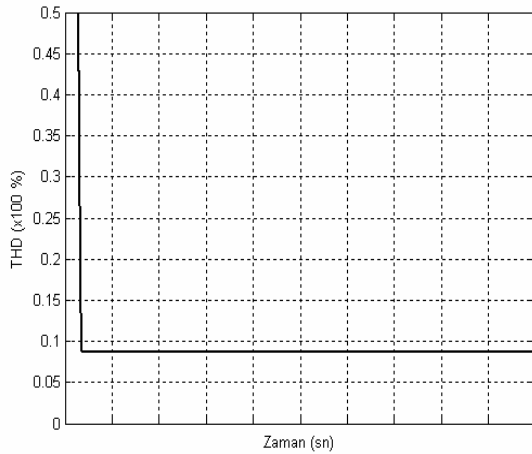
Örnek sistemin kapasitif güç ihtiyacı 145,223 kVAR değerindedir. Bu değer, standart kondansatör güçlerinin tam katı olan 150 kVAR değerine tamamlanarak 5 kademeli bir kompanzasyon sistemi kurulmuştur. Bu kompanzasyon sistemi, reaktif güç kontrol rölesi ile kumanda edilmektedir. Buna göre her bir kademenin kondansatör gücü 30 kVAR'dır. Örnek sistem tam yük durumu için modellendiğinden kompanzasyon sistemindeki tüm kademelerin devrede olduğu duruma göre filtre uygulanmıştır.

Örnek sistemdeki harmonik mertebelerinden genlik değeri en yüksek olan harmonik 3. harmonik olduğundan bu sistem için p değeri % 7 olan endüktanslar seçilmelidir. Sistemdeki kondansatörler 440 V'ta çalışacak şekilde seçilmiştir. Buna göre endüktansların değeri 1,53 mH olmaktadır. Bu değerdeki endüktanslar, her bir faz için ayrı olmak üzere kompanzasyon sistemine seri bağlandığında bu filtre gerçekleştirilmiş olur. Bu sisteme ait MATLAB programında hazırlanmış simülasyon devresi Şekil 11'de verilmiştir.

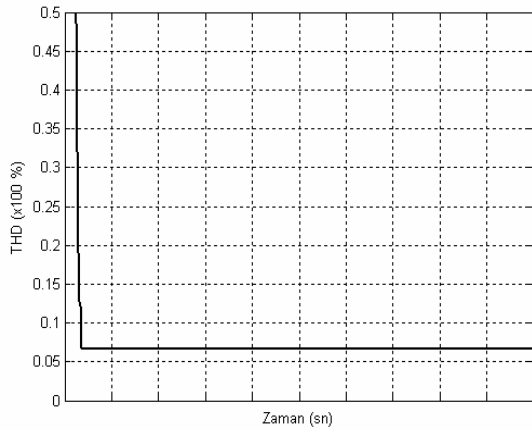
Şekil 11'deki simülasyon devresinin çalıştırılması sonucunda sistemin filtre uygulandıktan sonra, akım için THD grafiği Şekil 12'de ve gerilim için THD grafiği Şekil 13'te verilmiştir.



Şekil 11. Örnek Elektrik Enerji Tesisinin Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktansın Uygulanması



Şekil 12. Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlandıktan Sonra A Fazı Akımının THD Değeri



Şekil 13. Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlandıktan Sonra A Fazı Faz-Nötr Geriliminin THD Değeri

Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlandıktan sonra sistem akımının THD değeri % 8 mertebelerine, gerilimin THD değeri % 6 mertebelerine düşmüştür. Bu değerlere göre filtrenin performansı, tek ayarlı filtreye göre kötüdür. Ancak bu tür filtrelerin avantajları, maliyetlerinin düşük olması, uygulanmasının kolay olması ve sonuçlarının tatminkar olmasıdır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Simülasyonu yapılan filtre çeşitleri içerisinde en iyi sonucu tek ayarlı pasif filtrenin verdiği görülmüştür. Ancak, harmonik filtrelerinin sadece filtreleme performansları göz önüne alınarak bunlar hakkında yorum yapmak yanlış olur. Bu filtrelerin çeşitli açılardan bakıldığında birbirlerine karşı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Tek ayarlı pasif filtrenin olumlu yanlarını; ayarlanan harmonik frekansı için harmonik akımına sifıra yakın bir empedans göstermesi, filtre edilecek birden fazla harmonik akımı için birden fazla filtrenin paralel kullanılabilmesi, eğer istenerek eklenmiş bir direnç yoksa, kayıplarının çok az olması şeklinde sıralamak

mümkündür. Olumsuz yanı ise; hassas yapılan hesaplamalar sonucunda hassas olarak ayarlanan filtre elemanlarının değerlerinde zamanla oluşan değişmelere karşı oldukça duyarlı olmasıdır. Bu durum ek kondansatör ve direnç değerleri ile giderilebilir. Tek ayarlı filtrelerde sadece gücü sabit doğrusal olmayan yüke sahip sistemlerde kullanılabilir. Çünkü üzerlerindeki kapasite değerleri değişken olmadığından, sistemdeki endüktif yükler kalkınca kondansatörler devrede kalmaya devam edeceğinden bu durumda aşırı kompanzasyon oluşabilir. Veya doğrusal olmayan yüklerden bir kısmı devreden çıktığında, örneğin sistemdeki 5. harmoniğin büyük bir kısmını oluşturan yük devreden çıktığında 5. harmoniği süzen tek ayarlı filtre kolu sistemde kalacağından bu kol enerji kaybına yol açacaktır. Bu yüzden bu filtreler sabit doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu sistemlerde kullanılmalıdır. Sabit yük devreden çıktığında tek ayarlı filtrelerde devreden çıkarılmalıdır.

Filtreleme performansı kötü olan kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlama (filtreli kompanzasyon) işleminin söylenebilecek en olumsuz yanı, tek ayarlı pasif filtre ile kıyaslandığında filtreleme performansının düşük olmasıdır. Diğer bir olumsuz yanı ise bu endüktanslar kompanzasyon sisteminin uçlarındaki gerilimin yükselmesine sebep olmaktadır. Bu sebepten sistem için seçilen kapasitanslar şebeke geriliminden daha büyük gerilim değerlerine dayanıklı olmalıdır. Bu filtrelerin olumlu yanları ise; öncelikle maliyetlerinin çok düşük olması, mevcut sistemlere kolayca monte edilebilmeleri, sistemdeki rezonans riskini azaltmalarıdır. Bu yöntem literatürde bulunmayan ancak uygulamada çok sık kullanılan bir yöntemdir.

Harmonik filtreleme yöntemlerinden en kolay uygulanan ve en ekonomik olan kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlama işleminin, kompanzasyon tesisi kurma zorunluluğu gibi zorunlu hale getirilmesi uygun görülmektedir. Eğer bu filtre sistemdeki harmonikler için yeterli olmuyorsa sistem incelenerek diğer filtre çeşitleri seçilebilir.

KAYNAKLAR

1. Kocatepe, C., Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1994.
2. Sucu, M., Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bil, Enst., 2003.
3. Argın, M., Güç Sistem Harmonik Filtreleri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bil, Ens, 2000.
4. <http://www.hilkar.com>, Hilkar Elektroteknik Ltd. Şti., (Erişim Tarihi : Mart 2004).
5. Erkan, E., Nonlinear Yüklerde Güç Faktörünün İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1996.
6. <http://www.mathworks.com>, MATLAB, (Erişim Tarihi: Mart 2004).

