

HARMONİK FİLTRELERİN TASARIMINDA EKONOMİK YAKLAŞIMLAR

Mehmet ARGİN¹ Celal KOCATEPE²

^{1,2} Elektrik Mühendisliği Bölümü

Elektrik-Elektronik Fakültesi

Yıldız Teknik Üniversitesi, 80750, Beşiktaş, İstanbul

¹e-posta:argin@yildiz.edu.tr

²e-posta:kocatepe@yildiz.edu.tr

Anahtar sözcükler: Harmonikler, Nonlinear Yükler, Filtreler, Ekonomik Filtreler

ABSTRACT

Current and voltage waveform of the elements which are connected to power system is desired to be sinusoidal. Increasing number of nonlinear elements cause nonsinusoidal quantities in power systems. Existence of nonsinusoidal quantities mean the existence of harmonics in power system. In this study, filters which are used to eliminate the effects of harmonics are examined. Filters are examined in two ways: One of them is decreasing of distortion and the other is to provide the economic filter. By using these ideas, economic filter expression is given and at the end of the study design of the economic filter is performed with a numerical application.

1. GİRİŞ

Güç sistemine bağlanan elemanların akım ve gerilim şeklinin sinüsoidal olması istenir. Bu durum sisteme sinüsoidal kaynak ve lineer elemanların bağlanması sonucu elde edilebilir. Günümüzde gittikçe artan sayıdaki nonlineer elemanlar güç sisteminde nonsinüsoidal büyüklüklere sebep olurlar [1]. Nonsinüsoidal büyüklüklerin bulunması harmoniklerin güç sisteminde bulunması demektir. Harmoniklerin meydana çıkması enerji sistemleri için istenen bir durum olmamakla beraber çoğu işletmelerde önlem alınmazsa ortaya çıkması kaçınılmazdır. Harmonikler başlıca generatör ve şebeke geriliminin bozulmasına, gerilim düşümünün artmasına, enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artmasına ve özellikle de rezonans olaylarına sebep olmaktadır. Harmoniklerin sistemde oluşturduğu olumsuz etkilerini gidermek için çeşitli önlemler alınmaktadır. Bu alınan önlemler harmoniklerin sistem üzerindeki olumsuz etkilerini ya ortadan kaldırmakta ya da harmonik seviyesini en alt düzeye indirebilmektedir. İşletme öncesinde harmonik kaynaklarının tasarımı sırasında alınan önlemlerle ve sonrasında da filtreleme işlemiyle harmoniklerin bu olumsuz etkileri büyük ölçüde giderilmektedir.

2. HARMONİK SEVİYESİ

Harmonikler gerilim ve akımın dalga şeklini bozmaları sonucu enerji sistemlerinde çeşitli problemlere neden olmaktadır, bu nedenle harmoniklerin olması enerji sistemleri için istenen bir durum değildir. Bununla birlikte çoğu işletmelerde harmoniklerin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Harmonikler güç sistemlerinde başlıca generatör ve şebeke geriliminin bozulmasına, gerilim düşümünün artmasına, ek kayıplara, aşırı ısınmaya ve özellikle rezonans olaylarına sebep olurlar. Harmoniklerin şebekeler üzerindeki olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için harmonik seviyesini en alt düzeye indirmek gerekmektedir. Teknik ve ekonomik boyutu olan bu etkileri ortadan kaldırmak için çeşitli önlemler alınabilir. Filtreler bu konuda en önemli ve etkin elemanlardır.

Harmonik seviyesinin istenen sınır değerlere düşürülmesi için filtre devreleri kullanılmaktadır. Harmonik filtre tasarımı yapılırken harmonik içeren gerilim ve akım için harmonik seviyesinin belirlenmesinde 'toplam akım ve gerilim harmonik distorsiyonu' tanımları sırasıyla şu şekilde yapılır:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2)$$

Burada sırasıyla I_n ve V_n , n. harmonik bileşenlerin akım ve gerilimlerini göstermektedir.

3. HARMONİK FİLTRELERİ

Harmonik akımlarının şebekeye geçmesini engelleyen ve bu akımların süzülmesini sağlayan devrelere harmonik filtresi adı verilmektedir.

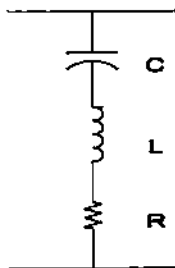
Harmonik filtrelerinin genel amacı bir ya da daha fazla frekanstaki akım veya gerilimlerin harmonik distorsiyonunu azaltmak veya yok etmektir. Harmonik filtreleri pasif ve aktif filtre olmak üzere ikiye ayrılır. Pasif filtreler kondansatör, endüktans ve bazı durumlarda dirençten meydana gelen elemanlar olup kaynak ile alıcı arasına yerleştirilerek temel frekans dışındaki bileşenleri yok ederler. Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen ile rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Herbir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu tasarımı gerekli olup bu işlem en etkin harmonik bileşenler için yapılır. Pasif filtreler kendi içinde seri ve şönt filtre olmak üzere ikiye ayrılır.

Seri filtreler harmonik kaynağıyla şebeke arasına seri olarak bağlanır ve harmonik akışına yüksek empedans gösterirler. Bu yüzden seri filtrelerin ayarlı frekanslarında yüksek empedansı vardır. Seri filtre belirli bir frekansa ayarlandığı için sadece o ayarlı frekans bileşeni için yüksek empedans gösterir.

Şönt filtreler harmonik kaynağıyla şebeke arasına paralel olarak bağlanırlar. Düşük bir şönt empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımların yönünün sapıtılması sağlanır [2]. Şönt filtreler harmonik akımlarına çok düşük bir empedans göstermek için tasarlanır. Ayrıca şönt filtreler temel frekansta reaktif güç sağlayarak güç faktörü düzeltiminde de kullanılır. Şönt filtre kullanımının en büyük sakıncası güç sistemiyle rezonansa girmesidir. Bu durum tasarım esnasında filtre bileşenlerinin değerlerinin ayarlanması ile ortadan kaldırılabilir. Şönt filtreler kendi içerisinde tek ayarlı, çift ayarlı ve yüksek geçiren sönümlü filtreler olmak üzere üç kısma ayrılır.

3.1 Tek Ayarlı Filtreler

Tek ayarlı filtreler, kısa devre yolu oluşturarak istenen özel bir frekanstaki harmonik akımın hattan sapıtılmasını sağlarlar. Bu işlemi genellikle tek bir frekans değeri için yaparlar. Tek ayarlı



Şekil 1 Tek Ayarlı Filtre Devresi

filtreler seri R-L-C devresinden meydana gelmektedirler (Şekil 1). Bazen R direnci ilave edilmeksizin filtreleme işlemi tek ayarlı L-C filtresiyle gerçekleştirilebilir.

Filtre bileşenlerinin tayinine geçmeden önce rezonans olayına kısaca değinmek gerekmektedir. Nonlineer yüklerin ürettiği harmonik frekanslarından birinde veya yakınında filtre bileşenlerinden kondansatör grubunun kapasitif reaktansı ile sistemin endüktif reaktansı eşit olduğunda paralel rezonans meydana gelir. Bu durum kondansatör uçlarındaki gerilimin aşırı yükselmesine sebep olmakta ve kondansatöre zarar vermektedir. Böyle bir olayın meydana gelmesini önlemek bakımından filtrenin seri rezonans frekansı veya ayarlı frekansı paralel rezonansın meydana geldiği harmonik frekansından %3 ile %10'dan daha düşük seçilir[3]. Örneğin 6 darbeli güç konverterinde 5. harmonik frekansında paralel rezonans meydana geliyorsa 60 Hz'lik sistemde 300 Hz'lik frekansa karşılık gelir. Bu sisteme uygulanan filtre 270 ile 290 Hz arasında ayarlı frekansa sahip olacaktır. Bu durumdaki filtrenin ayarlı frekansı 282 Hz'dir, yani 4,7. harmoniğe karşılık gelir.

Tek ayarlı filtre için filtre bileşenlerinin tayininde şu eşitlikleri verebiliriz.

$$w_n = 2\pi f_n \quad (3)$$

$$w_n = 2\pi(nf_0) \quad (4)$$

Burada,

w_n : n. harmonik açısal frekansı,

f_0 : Güç sisteminin temel frekansı,

f_n : Filtrenin n. harmoniğe ayarlı frekansıdır.

C_f filtrenin kapasitesi ve L_f filtrenin endüktansı olmak üzere, ayarlanmış frekansta filtrenin kapasitif ve endüktif reaktansları eşit olacaktır.

$$\frac{X_{Cf}}{n} = n.X_{Lf} \quad (5)$$

Buradan w_0 sistemin açısal frekansı olmak üzere

$$\frac{1}{n.w_0.C_f} = n.w_0.L_f \quad (6)$$

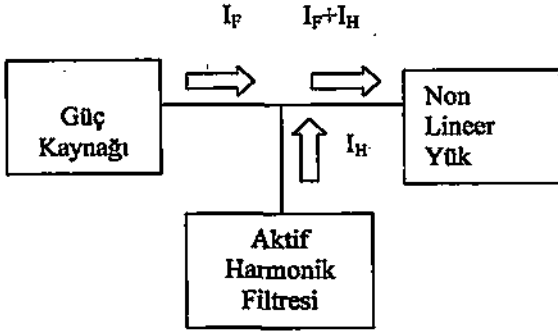
yazılabilir. Bu eşitlik kullanılarak filtrenin L_f ve C_f değerleri belirlenebilir.

Çift ayarlı filtrenin empedansı rezonans frekansları yakınında iki tek ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı ile pratik olarak aynıdır. Çift ayarlı filtre iki harmoniği elimine edebilir. Tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki güç kaybının azlığı bu filtrelerin en önemli özelliğidir.

Yüksek geçiren sönümlü filtreler birinci, ikinci, üçüncü dereceden ve C tipi filtre devreleri olmak üzere dört çeşittir. Bu tip filtrelerde harmonik derecesi (frekans değeri) arttıkça empedans değerleri düşüş gösterir.

3.2 Aktif Filtreler

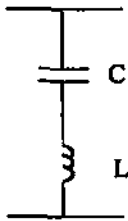
Harmoniklerin filtrelenmesi için pasif filtrelerin kullanılmasında karşılaşılan en önemli iki problem vardır: birincisi, pasif filtrelerin mevcut dağıtım şebekesi için özel olması sebebiyle mevcut dağıtım ekler gelmesi veya yüklerin artması durumunda ilk yatırımı geçersiz kılması; ikincisi ise, sisteme montajlarının oldukça zor olmasıdır. Pasif filtrelerin bu olumsuzluklarının giderilmesi için tercih edilen aktif filtreler yük tarafından çekilen harmonikleri analiz ederler ve uygun bir fazda yüke aynı harmoniği ters fazda enjekte ederler. Böylece istenilen noktada harmonik akımların sınırlanmasına yani harmoniklerin şebekeden çekilmemesine yararlar. Aktif filtrenin çalışma prensibi Şekil 2’de verilmiştir. Şekilde I_f kaynaktan çekilen akımı, I_H harmonik akımını göstermektedir. Güç elektroniği elemanları ve uygulamaları geliştikçe aktif filtreler de gelişmektedir. Bununla birlikte aktif filtreler içerisinde kullanılan güç elektroniği elemanlarının pahalı olmasından dolayı pasif filtrelere nazaran ekonomik değildir.



Şekil 2 Aktif Harmonik Filtrenin Çalışma Prensibi

4 EKONOMİK FİLTRE

Güç sistemine yerleştirilen filtreler distorsiyonu azaltmanın yanında maliyet bakımından da ekonomik olmalıdırlar. Bu yüzden filtre tasarımında ekonomik filtre kavramı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bakımdan filtreler için belirlenen maliyet, filtre tasarımında önemli bir kriterdir. Şekil 3’teki tek ayarlı L-C filtresi göz önüne alınırsa Makram tarafından toplam maliyet(TM) ifadesi şu şekilde verilmiştir.[4].



Şekil 3 Tek Ayarlı Filtre

$$TM = Q_f \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \left\{ \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{Q_f \cdot n} \right\} \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \frac{Q_f}{n^2} \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} + \left\{ \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{Q_f \cdot n} \right\} \cdot \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (7)$$

$$TM = Q_f \cdot \left\{ J_C + \frac{J_L}{n^2} \right\} + \frac{1}{Q_f} \cdot \left\{ \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{n} \cdot (J_C + J_L) \right\} \quad (8)$$

$$TM = K \cdot Q_f + \frac{G}{Q_f} \quad (9)$$

Burada J_C ve J_L sırasıyla kapasitör ve endüktansın TL/kVar olarak birim maliyetini, n filtrenin ayarlandığı harmonik derecesini, Q_f ise filtrenin vereceği reaktif gücü belirtmektedir.

Bu ifadede,

$$Q_f \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} : \text{Temel frekans endüktif reaktif}$$

güç maliyeti,

$$\frac{Q_f}{n^2} \cdot \left\{ \frac{n^2}{n^2 - 1} \right\} : \text{Temel frekans kapasitif reaktif}$$

güç maliyeti,

$$\left\{ \frac{I_{fn}^2 \cdot |V|^2}{Q_f \cdot n} \right\} \cdot \frac{n^2}{n^2 - 1} : \text{Harmonik frekanstaki}$$

kapasitif ve endüktif reaktif güç maliyetleridir.

Maliyet olarak incelenen filtreler arasında ekonomik filtre olarak minimum maliyetli filtre tanımlanır. Bu filtreler tasarım esnasında reaktif güç kompanzasyonunun önemli olmadığı zamanlarda kullanılır. Ekonomik filtre şu şekilde elde edilir[4]:

$$\frac{d(TM)}{dQ_f} = K - \frac{G}{Q_f^2} = 0 \quad (10)$$

Böylece

$$Q_f^2 = \frac{G}{K}, Q_f = \sqrt{\frac{G}{K}} \quad (11)$$

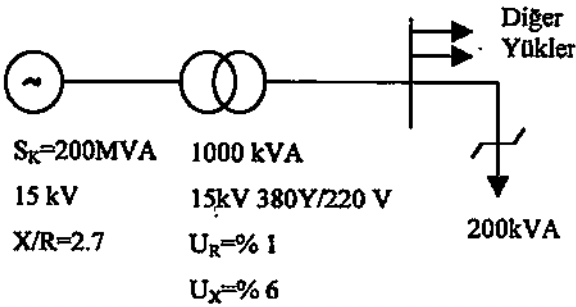
olur. Bu eşitlik toplam maliyet eşitliğinde yerine konulursa, toplam minimum maliyet

$$TM_{\min} = 2\sqrt{KG} \quad (12)$$

olarak elde edilir. Bununla birlikte ekonomik açıdan ideal gözüken filtre için gerilim veya akım distorsiyonunun belirtilen sınırların altına inip inmediğinin mutlaka kontrol edilmesi gerekmektedir.

5. SAYISAL UYGULAMA

Nonlineer yüklerin bulunduğu enerji sistemlerinde meydana gelen distorsiyonun giderilmesinde kullanılacak ekonomik filtrenin tespiti amacıyla Şekil 4'teki örnek sistem üzerinde bir sayısal uygulama gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4 Örnek Sistemin Tek Hat Diyagramı

Örnek sistemde 15 kV'luk 50 Hz frekanslı şebekeye 200 kVA gücünde 380 volt gerilim altında nonlineer bir yük bağlanmıştır. Nonlineer yükün harmonik akım değerleri Çizelge 1'de harmonik akım dalga şekli de Şekil 5'de verilmiştir.

Çizelge 1 Nonlineer Yüke Ait Harmonik Akım Değerleri

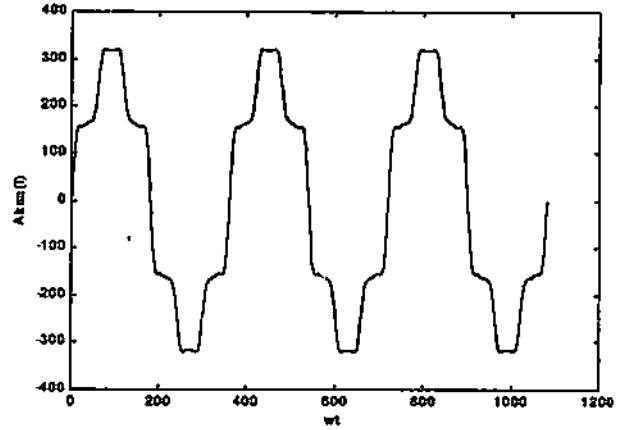
Harmonik Derecesi, [n]	I_n [A]
5	50
7	30
11	15
13	7
17	3

Öncelikle harmoniklerin sebep olduğu distorsiyon seviyesini belirleyelim. Denklem 1 ve 2 kullanılarak akım ve gerilime ait toplam harmonik distorsiyon değerleri sırasıyla

$$THD_i = \% 19.97$$

$$THD_v = \% 1.62$$

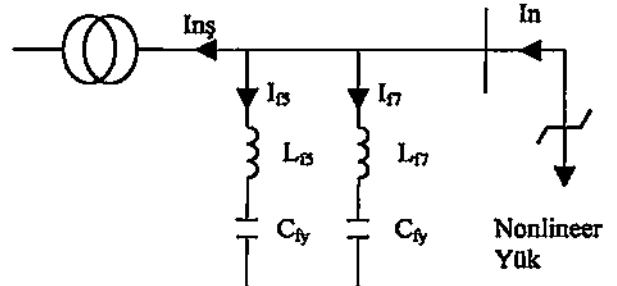
olarak hesaplanır.



Şekil 5 Nonlineer Yüke Ait Harmonik Akım Dalga Şekli

Gerilime ait toplam harmonik distorsiyonu harmonik standardı IEEE'nin standartlarına göre % 3 olan en büyük sınır değerinin altına olmasına rağmen, akıma ait toplam harmonik distorsiyonu % 8'lik istenen limitlerin çok üzerindedir[3].

Ayrıca 5. ve 7. harmonik bileşenlerin baskın harmonikler olduğu kolaylıkla tespit edilebilir. Baskın harmoniklerin sistemdeki bozucu etkisini gidermek ve distorsiyonları istenen sınır değerlerin altına indirebilmek için Şekil 6'daki gibi tek ayarlı şönt filtre kullanımı tercih edilebilir.



Şekil 6 Filtrelerin Örnek Sisteme Bağlanması

5.1 Normal filtre tasarımı

Filtrelleme işlemi yapılırken sistem için gereken reaktif gücün bir kısmının filtre elemanlarından karşılanmasına çalışılmıştır. Filtrelerin sağlanması gereken reaktif güç değeri 0.6 MVar alındığında 7. harmonik frekansı civarında paralel rezonans meydana gelmektedir. Bu durumda rezonansın oluşmaması için 7. harmonik filtresi 6.7 ye 5. harmonik filtreside 5 e ayarlanmıştır [5]. Filtrelerin sağlanması gereken reaktif gücün her iki kola eşit bölündüğü göz önünde bulundurularak ve 5 ile 6 nolu denklemler kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda filtrelerin kapasite ve özenduktans değerleri şu şekilde bulunur.

$$C_f = 0.0132'' [F]$$

$$C_{f2} = C_f/2 = 0.0066 [F]$$

$$L_B = 6,1285 \cdot 10^{-5} \text{ [H]}$$

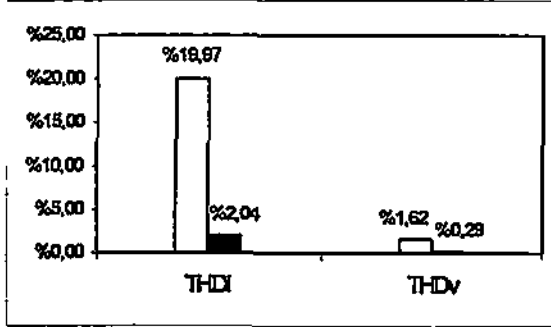
$$L_T = 3,4131 \cdot 10^{-5} \text{ [H]}$$

Değerleri belirlenen bu filtre elemanları güç sistemine yerleştirildikten sonraki akım ve gerilimin toplam harmonik distorsiyonu tekrar hesaplandığında,

$$THD_i = \% 2,04$$

$$THD_v = \% 0,29$$

olarak tespit edilir. Filtrelerin bağlanmasından önceki ve sonraki duruma ait toplam harmonik distorsiyonu değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7 Filtrelemeden Önce ve Sonraki THD Değerleri

Şekilde boş olan kısım filtrelemeden önceki değerleri koyu olan ise filtrelemeden sonraki değerleri göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi filtre elemanı işlevini gerçekleştirerek filtreleme işleminden sonra akım distorsiyonunu %19,97'den % 2,04'e gerilim distorsiyonunu ise % 1,62'den % 0,29'a düşürmüştür.

5.2 Ekonomik filtre tasarımı

Normal filtre tasarımıdaki $Q_f = 0,6$ MVar için tasarlanan 5. ve 7. harmonik filtrelerinin değerleri referans alarak minimum maliyetli filtrenin tespiti gerçekleştirilmiştir. Minimum maliyetli ekonomik filtreyi belirlemekteki amaç minimum filtreyi sağlayacak reaktif güç değerinin belirlenmesidir. Hesaplama için denklem no 7-11 kullanılarak sonuçta 5. harmonik filtresini minimum yapan reaktif güç değeri 0,1 MVar, 7. harmonik filtresini minimum yapan reaktif güç değeri ise 0,085 MVar olarak bulunmuş olur.

Yeni Q_f değerleri kullanılarak 5. ve 7. harmonik filtre kollarının yeni endüktans ve kapasite değerleri hesaplandığında

$$C_f = 0,0022'' \text{ [F]}$$

$$L_B = 1,83 \cdot 10^{-4} \text{ [H]}$$

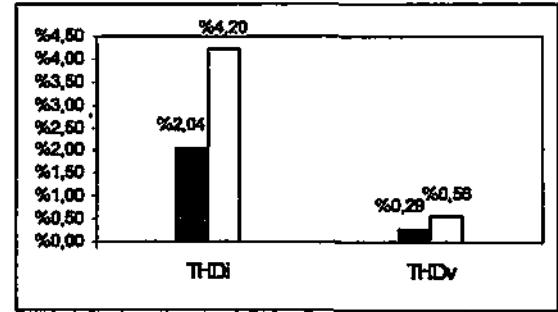
$$L_T = 1,198 \cdot 10^{-4} \text{ [H]}$$

sonuçları elde edilir. Bu filtre elemanları örnek sisteme yerleştirilerek toplam akım ve gerilim harmonik distorsiyonları yeniden hesaplandığında,

$$THD_i = \% 4,2$$

$$THD_v = \% 0,56$$

değerleri bulunur.



Şekil 8 Ekonomik Filtreleme İşlemi Sonucu THD Değerleri

Şekildeki gösterimde dolu kısım 0,6 MVar'lık filtre kullanıldığında toplam harmonik distorsiyon değerlerini, boş kısım ise minimum filtre durumundaki değerleri göstermektedir. Ekonomik filtreye ait distorsiyon değerleri istenen sınır değerlerin altında olduğundan 0,1 MVar ve 0,085 MVar kondansatör gruplarının kullanılmasıyla en düşük maliyetli filtre tasarımı gerçekleştirilmiş olur. Normal filtreleme işlemi sonucu gereken kapasite değeri 5. ve 7. harmonik filtre kolu için 0,0066 F iken ekonomik filtre için kapasite değeri 5. ve 7. harmonik filtre kolu için 0,0022 F olmaktadır.

Kullanılacak filtre kolu ekonomik filtre için yaklaşık 3 kat daha az kapasite değerine sahip olmaktadır. Filtrelere ait ilk tesis maliyeti ve kayıp enerji maliyeti hesaplanabilir; Bunun için ilk tesis maliyetlerinin filtre elemanları için endüktansla 17 DM/kVar kapasitede 14 DM/kVar birim değerleri kullanılabilir [6]. Bu şekilde normal filtrenin ilk maliyetinin ekonomik filtrenin ilk maliyetine oranı 3,15 bulunmuştur. Yine aynı çalışma süresinde normal filtredeki kayıp enerjinin ekonomik filtredeki kayıp enerjiye oranı yine 3,15 olarak bulunmuştur. Sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2 Ekonomik Filtre ile Normal Filtrenin Çeşitli Oranları

Oranlama	Elde edilen değer
Kapasiteler	$C_{opt}/C \approx 1/3$
İlk Tesis Maliyetleri	$M_{opt}/M \approx 1/3,15$
Kayıp Enerji	$W_{opt}/W \approx 1/3,15$

6. SONUÇ

Güç sistemine yerleştirilen filtrelerden beklenen en önemli işlev harmonik distorsiyonunu azaltması veya tamamen elimine etmesidir. Bu işlevi gerçekleştirirken beklenen diğer bir husus maliyet bakımından da ekonomik olmasıdır. Bu çalışmada, filtre tasarımı ekonomik filtre kullanımı göz önünde bulundurulmuş ve ekonomik filtre tasarımı

gerçekleştirilerek distorsiyon istenen sınır değerlerin altına düşürülürken, minimum maliyetli filtre kullanılmıştır.

Gerçekleştirilen sayısal uygulamada normal yöntemlerle yapılan pasif filtre tasarımı ile ekonomik filtre tasarımı birbiri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre ekonomik filtre ile daha az kapasiteli kondansatör, daha az tesis maliyeti ve daha az kayıp söz konusu olmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., POWER SYSTEM HARMONICS, John Wiley & Sons New York, 1985.
- [2] Gonzales, D.A ve McCall, J.C., Design of Filters to Reduce Harmonic Distribution in Industrial Power Systems, IEEE TRANSACTIONS ON POWER INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. IA-23, No 3, pp 504-511, 1987.
- [3] Bosela, T.R., INTRODUCTION TO ELECTRICAL POWER SYSTEM TECHNOLOGY, Youngstown State University.
- [4] Makram, E.B., Subramaniam, E.V., Girgis, A.A. ve Catoe, R., Harmonic Filter Design Using Actual Recorded data, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. 29, No 6, pp 1176-1183, 1993.
- [5] Argın, M., Güç Sistem Harmonik Filtreleri, Master Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2000.
- [6] İnan, A., Lineer Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Kayıpların Yapay Sınır Ağları ile Analizi ve Filtre Maliyetlerinin Kestirimi, Doktora Tezi, Y.T.Ü, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.