

Harmonik Bozunum Kompanzasyonu için Melez ve Çift Ayarlı Pasif Güç Filtresi Tasarımı ve Performans Analizi

Design and Performance Analysis of Double Tuned and Hybrid Passive Power Filters for Harmonic Distortion Compensation

Ö. Fatih KEÇECİOĞLU¹, Hakan AÇIKGÖZ², Mustafa ŞEKKELİ¹

¹Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü
Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi

²Elektrik – Elektronik Bölümü
Kilis 7 Aralık Üniversitesi

fkececioglu@ksu.edu.tr, hakanacikgoz@kilis.edu.tr, msekkeli@ksu.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, çeşitli akım ve gerilim kaynaklı harmonikler içeren bir güç sistemi için melez ve çift ayarlı pasif filtre tasarımları yapılmıştır. Filtrelerin performans analizlerini ve benzetim çalışmalarını yapmak için MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır. Filtrelerin performans analizleri, güç sistemindeki toplam harmonik bozunum değerleri üzerinden yapılmıştır. Benzetim çalışmaları sonucunda melez pasif filtre çift ayarlı filtreye göre güç sisteminin harmonik bozunum kompanzasyonunu çok daha başarılı bir şekilde yapmıştır.

Abstract

In this study, a hybrid passive filter (HPF) and single tuned passive filter (STPF) are designed to power systems which consist of several current source type of nonlinear loads. The power and filter systems are implemented in MATLAB/Simulink environment. Simulation results, obtained from HPF and STPF. The simulation results show that the hybrid passive filter can compensate effectively all current source type harmonics of nonlinear loads.

1. Giriş

Elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların amacı; kesintisiz, ekonomik ve kaliteli bir hizmeti tüketicilerine sunmaktır. Elektrik enerji sistemlerinde kalite söz konusu olunca, sabit şebeke frekansında; sabit ve sinüsoidal biçimli uç geriliminin sağlanması anlaşılmaktadır. Ancak bu tür enerji pratikte bir takım zorluklarla sağlanabilir. Güç sistemine bağlanan bazı elemanlar ve bunların yol açtığı olaylar sebebiyle tam sinüsoidal dalga şeklinden sapmalar olabilmektedir. Tam sinüsoidal dalga şeklinden sapma, genellikle harmonik adı verilen bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir ve buna sebep olan etkenlerin başında ise manyetik ve elektrik devrelerindeki dengesizlikler gelir [1].

Elektrik güç sistemindeki doğrusal olmayan elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini olumsuz etkilemektedirler. Teknik ve ekonomik pek çok etkisi olan harmoniklerin bu etkilerinin bilinmesi ve işletmelerde analizlerinin yapılması hem enerji kalitesi açısından hem de

işletmenin sürekliliği açısından son derece önemlidir. Doğrusal olmayan yüklerin oluşturduğu harmonik akım bileşenleri, sistemde harmonik gerilimlerin oluşmasına neden olurlar. Harmonik gerilimler ise bu sisteme bağlı doğrusal ve doğrusal olmayan yükler üzerinden harmonik akımlar akıtır. Doğrusal olmayan yüklerin bulunması halinde çekilen harmonikli akımlarla, besleme noktası ile bu tip yükleri birbirine bağlayan baralar üzerinde harmonik gerilim düşümleri oluşacaktır. Harmonik bileşenlerin bu olumsuzluklarının incelenmesi ve giderilmesi bakımından harmonikli sistemlerde detaylı analizlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir [2].

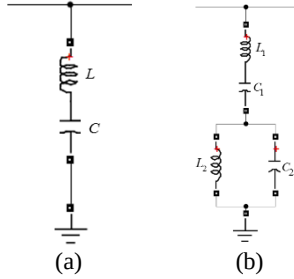
Elektrik enerji sistemleri üzerinde olumsuz etkileri görülen harmoniklerin yok edilmesi veya zararsız hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için iki farklı yöntem vardır. Bunlardan birincisi, harmonik üreten elemanların üretimi sırasında yapısının harmonik üretmeyecek veya çok az üretecek şekilde tasarlanması 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. [3-5]

Bu çalışmada, bir güç sisteminde bulunan doğrusal olmayan yükler tarafından oluşturulan harmonikler için melez pasif ve çift ayarlı pasif olmak üzere iki farklı filtre tasarımı yapılmıştır. Her bir filtre ayrı ayrı sisteme uygulanmış ve filtrelerin harmonik bozulmalara olan etkisi incelenmiştir. Çalışmanın içeriği şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2’de pasif filtrelerin yapısı ve çift ayarlı filtrenin tasarımı özetlenmiştir. Bölüm 3’de melez pasif filtrenin yapısı ve tasarımı anlatılmıştır. Bölüm 4’de yapılan benzetim çalışmaları ve sonuçları verilmiştir. Filtrelerin performans analiz sonuçları ise Bölüm 5’de özetlenmiştir.

2. Çift Ayarlı Pasif Filtre

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. Pasif filtreler, seri pasif filtreler ve paralel (şönt) pasif filtreler olmak üzere kendi içerisinde iki tiptir. Paralel pasif filtreler, harmonikleri kompanze etmek için en çok kullanılan filtre yapılarıdır. Paralel

pasif filtrelerin, tek ayarlı, çift ayarlı, bant geçiren gibi birçok yapıları vardır. Bu genel olarak bir harmonik derecesine göre ayarlanırlar ve ayarlandıkları harmonik derecesi için düşük empedans gösterir ve harmonikleri güç sisteminden ayırırlar. Teorik olarak filtre ayarlanan frekansta sıfır empedans göstererek harmonikleri yok eder. En çok kullanılan paralel pasif filtre yapıları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Tek (a) ve Çift (b) ayarlı pasif filtre yapıları.

Çift ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı iki adet tek ayarlı filtrenin eşdeğer empedansı ile aynıdır. Çift ayarlı filtre iki farklı harmoniği yok edebilir. Çift ayarlı filtre Şekil 2(b)’de gösterilmiştir. Tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki güç kaybının az olması bu filtrelerin en önemli özelliğidir. Çift ayarlı filtre bir seri rezonans ve bir paralel rezonans devresinin birleşiminden oluşur [6]. Seri devrenin empedansı,

$$Z_s(\omega) = j \left(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \omega} \right) \quad (1)$$

olarak ifade edilir. Seri rezonans frekansı ise,

$$Z(\omega_s) = 0 \Rightarrow \omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (2)$$

ifadesi ile hesaplanır. Paralel devrenin empedansı ve rezonans frekansı,

$$Z_p(\omega) = \left(\frac{1}{jL_2 \omega} + jC_2 \omega \right)^{-1} \quad (3)$$

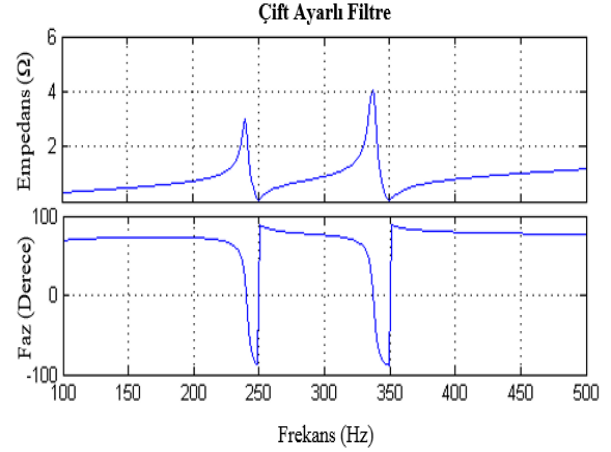
$$Z(\omega_p) = 0 \Rightarrow \omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (4)$$

olarak ifade edilir. Filtrenin toplam empedansı şu şekilde ifade edilir.

$$Z(\omega) = Z_s(\omega) + Z_p(\omega) \quad (5)$$

$$= j \left(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \omega} \right) + \left(\frac{1}{jL_2 \omega} + jC_2 \omega \right)^{-1} = 0 \quad (6)$$

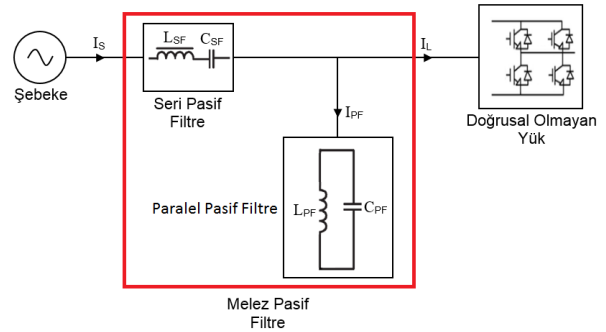
5. ve 7. Harmonik dereceleri için tasarlanmış bir çift ayarlı filtrenin frekans – empedans ilişkisi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2: Çift ayarlı filtrenin frekans – empedans ilişkisi.

3. Melez Pasif Filtre Tasarımı

Melez pasif filtre bir seri pasif (SPF) ve paralel pasif filtre (PPF)’nin birleşiminden oluşmaktadır. Bu filtre yapısında seri pasif filtre bant geçiren filtre olarak; paralel pasif filtre ise bant durdurucu filtre olarak tasarlanmaktadır. Doğrusal olmayan yüklerin akım kaynaklı harmonikleri kompanze etmek için PPF, gerilim kaynaklı harmonikler için ise SPF kullanılmaktadır. Melez pasif filtrenin eşdeğer devresi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3: Melez pasif filtrenin yapısı.

3.1. Seri Pasif Bant Geçiren Filtre

Seri pasif filtre, seri bağlı bir kapasitör ve reaktörden oluşmaktadır. Bu filtrenin amacı, akım tipli harmoniklere tüm harmonik frekanslarda yüksek empedans göstererek bu harmoniklerin şebeke tarafına akmasını engellemektedir. Şebeke frekansı olan temel frekansta kapasitör ve reaktörün empedansları birbirlerine eşit olacak şekilde tasarlanır böylece filtre temel frekansta saf rezistif eleman gibi davranır. Filtrenin kritik frekansı f_c , şebeke frekansına çok yakın değerlerde seçilir. Kritik frekans,

$$f_c = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{SF} C_{SF}}} \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Filtre, kritik frekanstan daha düşük frekanslarda kapasitif etki, daha yüksek frekanslarda ise indüktif etki göstermektedir. Filtrenin empedansı transfer fonksiyonu olarak yazılır ise,

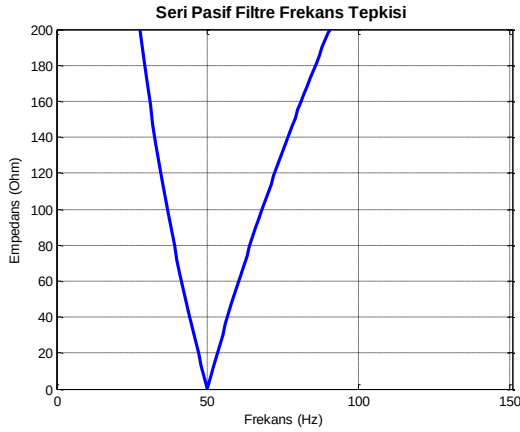
$$H_f(s) = \frac{1}{sC_{SF}} + sL_{SF} \quad (8)$$

ile ifade edilir. Burada güç sisteminin filtre üzerindeki etkisini de dikkate alınmalıdır. Bunun için filtrenin transfer fonksiyonu hesaplanırken hattın empedans değerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Hattın empedans değeri,

$$H_s(s) = sL_s \quad (9)$$

şeklindedir. Filtrenin ve hattın toplam empedansı, Denklem 10'da frekans tepkisi ise Şekil 4'te verilmiştir.

$$Z_{SF}(s) = \frac{s^2(L_s C_{SF} + L_{SF} C_{SF}) + 1}{sC_{SF}} \quad (10)$$



Şekil 4: Seri pasif filtre frekans tepkisi

3.2. Paralel Pasif Bant Durduran Filtre

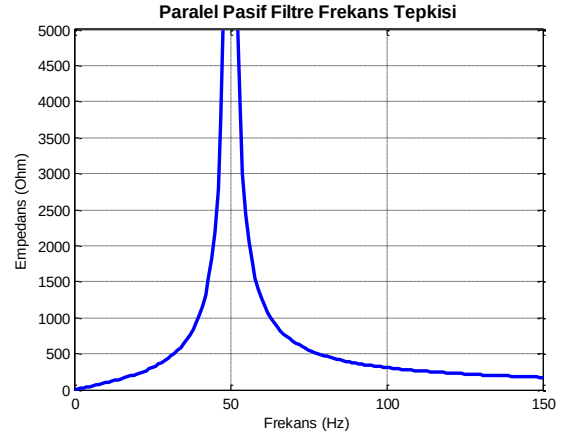
Melez pasif filtre tasarımında kullanılan paralel pasif bant durdurucu filtre, 2. dereceden sönümlü bir pasif filtredir. Bu filtre, bir reaktör ve bir kapasitörün paralel bağlanması ile oluşur. PPF, temel frekansta yüksek empedans, yüksek harmonik frekanslarında ise çok düşük empedans göstermektedir. PPF'nin harmonik frekanslarına düşük empedans göstermesi, harmoniklerin şebeke tarafına geçmeden bu filtre üzerinde sönümlenmesini sağlamaktadır. Filtre, temel frekansın altındaki frekanslarda endüktif etki, daha yüksek frekanslarda ise kapasitif etki göstermektedir. PPF'nin empedansı,

$$\frac{1}{H_f(s)} = \frac{1}{sL_{PF}} + sC_{PF} \quad (11)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem 11 düzenlenirse filtrenin frekans tepkisini veren transfer fonksiyonu,

$$Z_{PF}(s) = H_f(s) = \frac{sL_{PF}}{s^2 L_{PF} C_{PF} + 1} \quad (12)$$

olarak bulunur. Paralel pasif filtrenin frekans tepkisi Şekil 5'te gösterilmiştir.

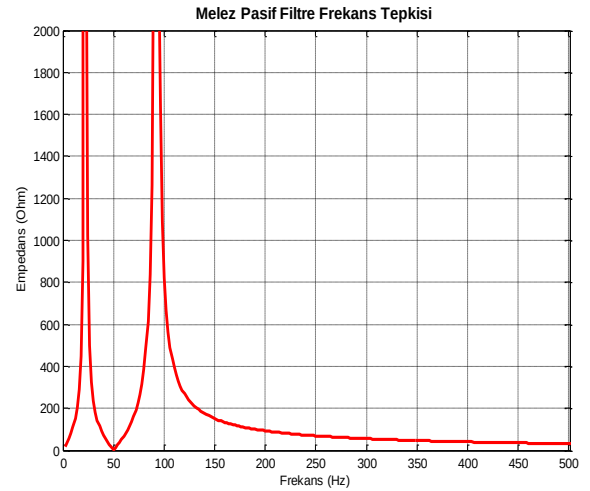


Şekil 5: Paralel pasif filtre frekans tepkisi.

Melez pasif filtrenin analizini yapmak, performansını incelemek ve filtrenin hangi kritik frekanslarda paralel ve seri rezonans problemleri ile karşı karşıya kalacağını tespit etmek için filtrenin çıkış empedans transfer fonksiyonunun analiz edilmesi gerekmektedir. Çıkış empedansı transfer fonksiyonu,

$$H_o(s) = Z_o(s) = \frac{1}{\frac{1}{Z_{PF}(s)} + \frac{1}{Z_{PF}(s) + Z_s(s)}} \quad (13)$$

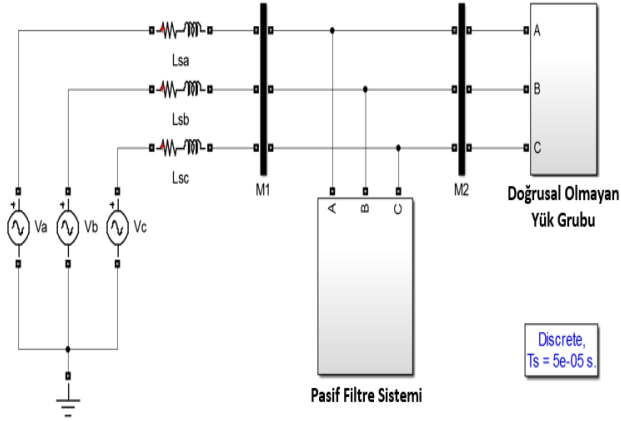
Melez pasif filtrenin Denklem 13'e göre elde edilen frekans – empedans ilişkisi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6: Melez pasif filtrenin frekans – empedans ilişkisi.

4. Benzetim Çalışmaları

Tasarlanan melez ve çift ayarlı pasif filtrelerin benzetim çalışmalarını yapıp performanslarını analiz etmek için MATLAB/Simulink programı ve Sim Power System aracı kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları için tasarlanan güç sistemi üç bölümden meydana gelmektedir. Bunlar, ideal ve dengeli bir güç kaynağı, doğrusal olmayan yük grubu ve pasif filtre gruplarıdır. Benzetim çalışmalarında kullanılan güç sistemi Şekil 7’de verilmiştir.

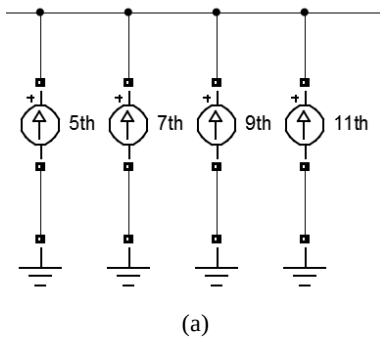


Şekil 7: Benzetim çalışmalarında kullanılan güç sisteminin yapısı.

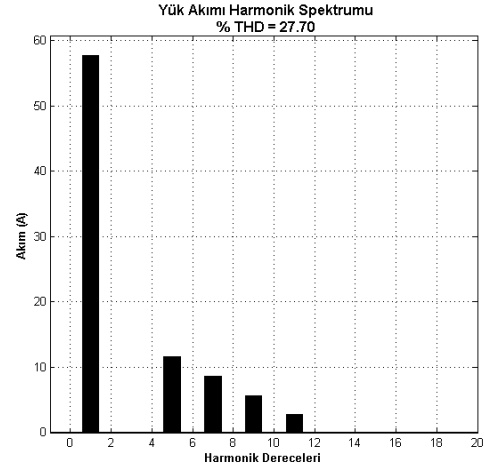
Tasarlanan filtrelerin performanslarını incelemek için benzetim çalışmalarında filtreler sisteme ayrı ayrı dahil edilmiş ve sonuçlar bu şekilde elde edilmiştir. Performans karşılaştırması için Şekil 7’de gösterilen şebeke tarafındaki M1 ölçüm barası kullanılmış ve M1 barasındaki akım ve gerilim harmoniklerine ait toplam bozunum seviyeleri incelenmiştir.

4.1. Doğrusal Olmayan Yük Grubu

Benzetim çalışmalarında kullanılan doğrusal olmayan yük grubu, 5.,7.,9.,ve 11. harmonik frekanslarında birer akım kaynağı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu yük grubunun tek faz eşdeğer devresi Şekil 8a’da, yük grubunun harmonik spektrumu ve toplam harmonik bozunum seviyesi Şekil 8b’de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8: Yük grubunun tek faz eşdeğer devresi (a) ve yük akımının harmonik spektrumu (b).

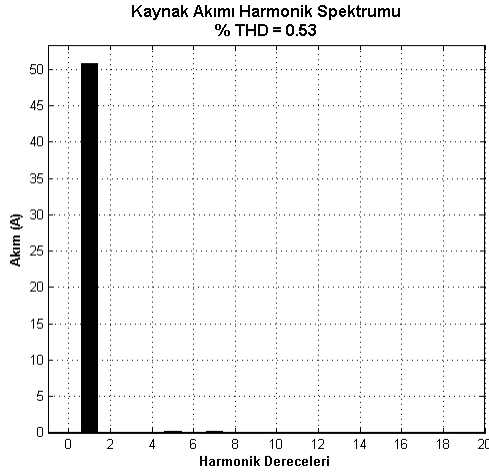
4.2. Çift Ayarlı Pasif Filtre Uygulaması

Benzetim çalışmasında kullanılan yük grubunu çift ayarlı filtreler kullanarak filtrelemek için iki tane çift ayarlı filtre kullanılmıştır. Birinci filtre, yük grubundaki 5. ve 7. harmonikleri kompanze etmek için diğer filtre ise yük grubundaki 9. ve 11. harmonikleri kompanze etmek için kullanılmıştır. Filtrelerin değerleri yük grubunun harmonik spektrumu incelenerek hesaplanmıştır. Hesaplanan filtre değerleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1: Çift ayarlı filtrelerin değerleri

	Filtre 1 (5. ve 7. Harmonikler)	Filtre 2 (9. ve 11. Harmonikler)
L_1	3mH	0.985mH
C_1	100μF	105μF
L_2	0.326mH	39.326μH
C_2	861.3μF	2.6mF

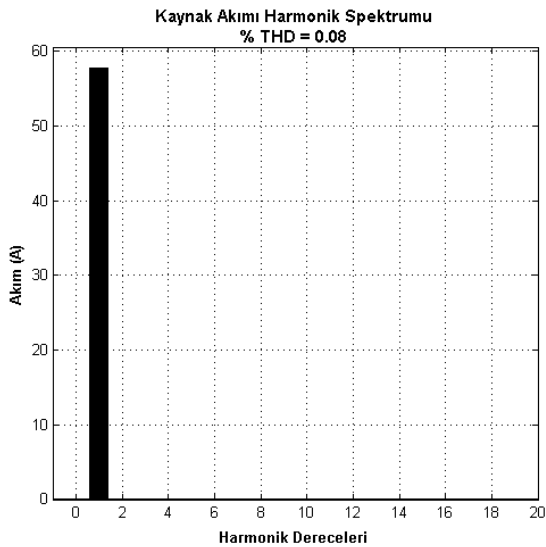
Çift ayarlı filtre güç sistemine uygulandıktan sonra sistemdeki M1 ve M2 barasından ölçülen akım ve gerilimin dalga şekilleri ve filtre akımının dalga şekli EK A’da verilmiştir. Bununla birlikte yine M1 barasından ölçülen akımın harmonik spektrumu Şekil 9’da verilmiştir. Şekil 9’da görüldüğü üzere filtre öncesi güç sisteminin % 27.70 olan toplam harmonik bozunum değeri, filtre sonrası % 0.53 olarak hesaplanmıştır. Filtreleme sonrası elde edilen bu değer, IEEE 519 – 1992 harmonik standartlarına uymaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda tasarlanan çift ayarlı filtre güç sisteminin harmoniklerini başarılı bir şekilde kompanze etmiştir.



Şekil 9: Çift ayarlı filtreli kaynak akımının harmonik spektrumu.

4.3. Melez Pasif Filtre Uygulaması

Benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere tasarlanan melez pasif filtreye ait değerler Çizelge 2’de verilmiştir. Filtre sisteme dahil edildikten sonra M1 ve M2 barasından ölçülen akım ve gerilimin dalga şekilleri EK B’de verilmiştir. Yine M1 barasından ölçülen kaynak akımının harmonik spektrumu ve toplam harmonik bozunum değeri Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 10: Melez pasif filtreli kaynak akımının harmonik spektrumu.

Çizelge 2: Melez pasif filtre değerleri

	SPF	PPF
L_1	506.6 mH	129.8mH
C_1	20 μ F	78 μ F

Şekil 10’da görüldüğü üzere filtre öncesi güç sisteminin % 27.70 olan toplam harmonik bozunum değeri, filtre sonrası % 0.08 olarak hesaplanmıştır. Filtreleme sonrası elde edilen bu

değer, IEEE 519 – 1992 harmonik standartlarına uymaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda tasarlanan melez pasif filtre güç sisteminin harmoniklerini çift ayarlı pasif filtreden daha iyi bir şekilde kompanze etmiştir.

5. Sonuçlar

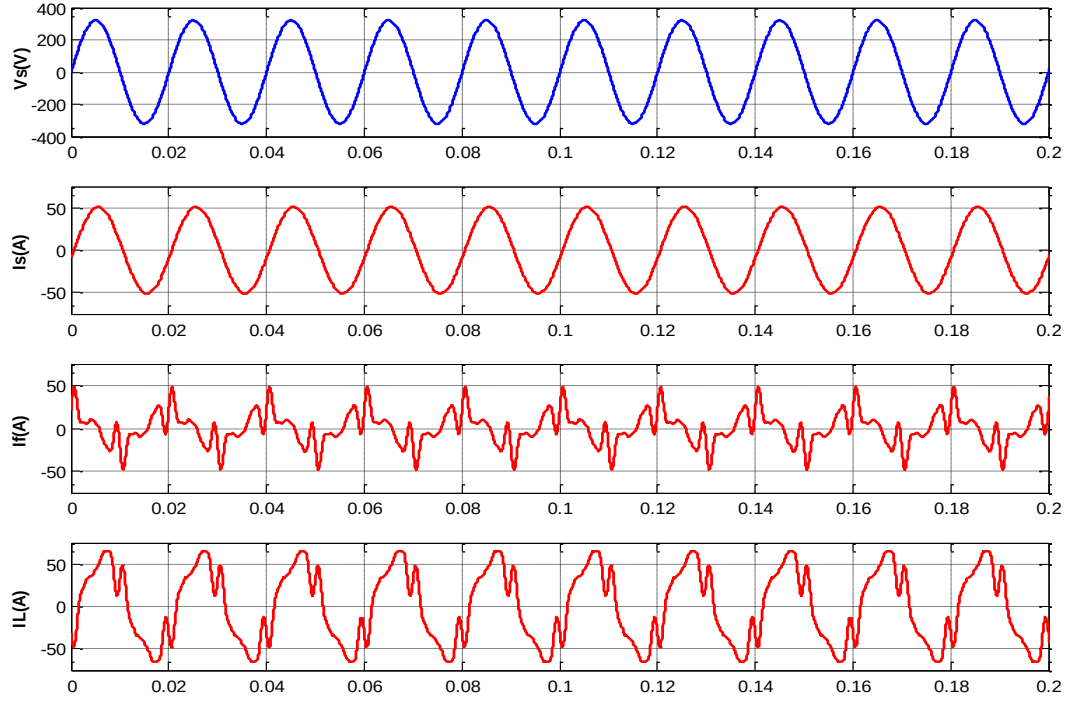
Bu çalışmada, akım ve gerilim tipli harmonikler içeren bir güç sistemi oluşturulmuştur. Tasarlanan bu güç sistemi için iki filtre konfigürasyonu tasarlanmış ve uygulanmıştır. Birinci filtre yapısı çift ayarlı filtre, ikinci filtre yapısı ise bir seri ve paralel filtreden oluşan melez pasif filtre yapısıdır. Filtre öncesi güç sistemine ait kaynak akımının toplam harmonik bozunum değeri %27.70 olarak hesaplanmıştır. Çift ayarlı filtre bu güç sistemine dahil edildikten sonra kaynak akımının toplam harmonik bozunum değeri % 0.53 olarak; melez pasif filtre sistemi uygulandıktan sonra ise %0.08 olarak hesaplanmıştır. Güç sistemine ait benzetim çalışmalarının sonuçları incelendiğinde her iki filtrenin performansının da IEEE 519-1992 standardını karşılamakta yeterli olduğu ve melez pasif filtrenin performansının çift ayarlı filtreye göre daha iyi olduğu görülmüştür.

6. Kaynaklar

- [1] Kakilli, A., Tunçalp, K. ve Sucu, M., “Harmoniklerin Reaktif Güç Kompanzasyon Sistemlerine Etkilerinin İncelenmesi ve Simülasyonu”, *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi*, 20(1), 109-115, 2008.
- [2] Ertay, M.M., Alboyacı, B., Duru, H.T., Yeğin, E.M., “Endüstriyel Güç Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Pasif Filtrelerle Yok Edilmesi”, *4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, 58-63, 2011, Kocaeli.
- [3] Tunçalp, K., Sucu, M., “Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinde Pasif Filtre ve Filtreli Kompanzasyonun Kullanımı ve Simülasyon Örnekleri”, *Politeknik Dergisi*, 9(4), 263-269, 2006.
- [4] Arrillaga, J., Smith, B.C., Watson, N.R., Wood, A.R. *Power System Harmonics*. John Wiley&Sons, USA, 1997.
- [5] Kecioğlu, O.F., Acikgoz, H., Sekkeli, M., “Analysis and Comparison of Hybrid and Single Tuned Passive Power Filters”, *2’nd International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 349-357, 2014, Karabük.
- [6] Zamani, M.A., Mohseni, M., “Damped-Type Double Tuned Filters Design for HVDC Systems”, *9th International Conference Electrical Power Quality and Utilisation*, 2007, Barcelona.

Ek A

Güç Sistemi Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri
Çift Ayarlı Filtre



Ek B

Güç Sistemi Akım ve Gerilim Dalga Şekilleri
Melez Pasif Filtre

