

ENDÜSTRİYEL GÜÇ SİSTEMLERİNDE OLUŞAN HARMONİKLERİN PASİF FİLTRELERLE YOK EDİLMESİ

M. Mustafa ERTAY¹, Bora ALBOYACI², H.Tarık DURU², E.Mustafa YEĞİN²

¹Düzce Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü

²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

mustafaertay@duzce.edu.tr, alboyaci@kocaeli.edu.tr, tduru@kocaeli.edu.tr, emy@kocaeli.edu.tr

Özet

Güç sistemlerindeki güç kalitesi problemlerini genelde harmonik bozulmalar oluşturur. Bu çalışmada MATLAB ortamında endüstriyel bir sistemde nonlineer yükler sebebiyle meydana gelen harmonik bozulmalara karşın pasif filtre tasarımı ve uygulanması gerçekleştirilmiştir. İlk önce sistemin harmonik özellikleri incelenmiş, daha sonra tek ayarlı filtre tasarımı için gerekli eşitlikler verilmiştir. Belirli harmonik dereceleri için pasif filtre tasarımı yapılmıştır. Herbir adımda dizayn edilen pasif filtrelerin harmonik bozulmalara ve sisteme olan etkileri incelenmiştir. Ayrıca sistemin kısa devre gücünün değişmesinin harmonik bozulmalar üzerine olan etkisinde yapılan simülasyonlarla incelenmiştir. Baskın harmoniklere filtre uygulandığında diğer harmonik genliklerinde azaldığı görülmüştür. Sonuçlar tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Güç kalitesi, Harmonik bozulma, Pasif filtreler, Tek ayarlı filtre.

1.Giriş

Elektrik güç sistemindeki nonlineer 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. Nonlineer yüklerin oluşturduğu harmonik akım bileşenleri, sistemde harmonik gerilimlerin oluşmasına neden olurlar. Harmonik gerilimler ise bu sisteme bağlı lineer ve nonlineer yükler üzerinden harmonik akımlar akıtırlar. Nonlineer 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 [1].

Harmonik problemlerini azaltmak ve güç kalitesi problemlerini iyileştirmek, için iki yaklaşım mevcuttur. Birinci yaklaşım yük şartlandırmadır. Bu, donanımın güç bozunumlarına karşı az hassas, olmak zorunda olmasını, belirgin gerilim veya akım bozunumları altında çalışmaya izin vermesini sağlamak anlamına gelmektedir. İkinci yaklaşım ise, güç sistemi bozunumlarını bastırmak için hat şartlandırma sistemleri kurmaktır. İkinci yaklaşım çok ilgi çekicidir [4]. Bunlar pasif ve aktif güç filtreleri olarak bilinir. Pasif filtreler endüstride en çok kullanılan filtrelerdir [2-3]. Diğer yöntemlerle kıyaslandığında daha ekonomiktir [3]. Endüstriyel güç sistemlerinde harmonik azaltma tekniklerinin incelendiği çalışmada aktif ve pasif güç filtreleri incelenmiştir. Pasif filtrelerin diğer yöntemlere göre daha ekonomik olduğu ancak özel harmonik bileşenleri için dizayn edildiğinden dolayı değişen harmonik durumlarına adapte edilebilir olmadığı ifade edilmiştir. Aktif filtrelerin iyi bir sistem performansı ve akım harmoniklerinde azaltma sağladığı, fakat güç elektroniği tabanlı bir cihaz olduğundan dolayı pasif filtrelere göre çok pahalı olduğu ve küçük tesislerdeki uygulamalar için uygun olmadığı ifade edilmiştir [5]. Endüstriyel bir güç sisteminde harmonik azaltma çalışmasının sunulduğu çalışmada, tek ayarlı ve çift ayarlı filtrelerin harmonik eliminasyonundaki etkinliği incelenmiştir. Ayrıca çalışmada filtrelerin yerleşimi, güç kapasitörleri ve yük değişimlerinin harmonik bozulmalara etkisi de incelenmiştir. Sonuç olarak çift ayarlı filtrelerin harmonik bozulmaları azaltmada daha iyi bir performans sergilediği ifade edilmiştir [6]. Tek ayarlı ve C-tipi harmonik filtreleri için etkili ve geniş kapsamlı dizayn prosedürlerinin önerildiği çalışmada, alçak güç uygulamaları için yeni bir yüksek geçiren filtre topolojisi önerilmiştir [7].

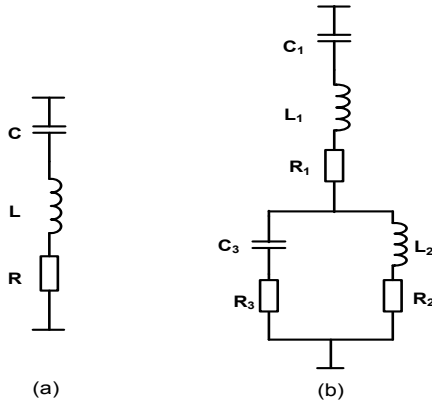
Orta gerilim seviyesinde olan endüstriyel bir sistem için kurulan farklı filtrelerin performansının karşılaştırıldığı çalışmada, farklı filtreler için hassaslık çalışmaları yapılmıştır [8].

Bu çalışmada orta gerilim seviyesinde olan endüstriyel bir sistem için harmonik analizi ve tek ayarlı pasif filtre dizaynı yapılmıştır. Sistemde bulunan nonlineer yük tarafından oluşturulan harmonikler için 2 farklı tek ayarlı filtre tasarımı yapılmıştır. Herbir filtre ayrı ayrı sisteme uygulanmış ve filtrenin harmonik bozulmalara olan etkisi incelenmiştir.

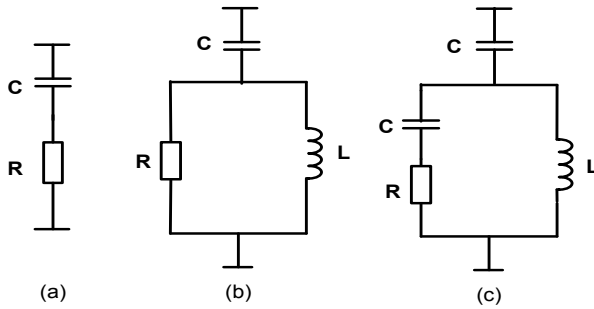
2. Pasif Filtreler

A. Devre Konfigürasyonları

Pasif filtreler R-L-C elemanlarından oluşmaktadır. Pasif filtrelerde amaç yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir [1]. Şekil 1 ve 2’de pasif filtrelerle ilişkin devre konfigürasyonları görülmektedir.



Şekil 1: Pasif ayarlı filtreler; a) Tek ayarlı b) çift ayarlı [9].



Şekil 2: Pasif yüksek geçiren filtreler; a) Birinci derece b) İkinci derece c) Üçüncü derece [9].

B. Tek Ayarlı Filtreler

Tek ayarlı filtreler ayarlandığı harmonik akımlarını etkin bir şekilde bastırmak için düşük bir empedans yolu olarak rol oynarlar [2]. Filtre empedansı aşağıdaki gibi ifade edilir [2].

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (1)$$

X_L ve X_C kapasitör ve indüktörün temel frekanstaki

reaktansları olmak üzere filtre boyutu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$S = \frac{V_s^2}{X_C - X_L} \quad (2)$$

n. harmonik için ayarlanmış filtrenin endüktif ve kapasitif reaktansları aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$X_o = n.X_L = \frac{X_C}{n} \quad (3)$$

Buradan, $X_L = \frac{X_C}{n^2}$ olur.

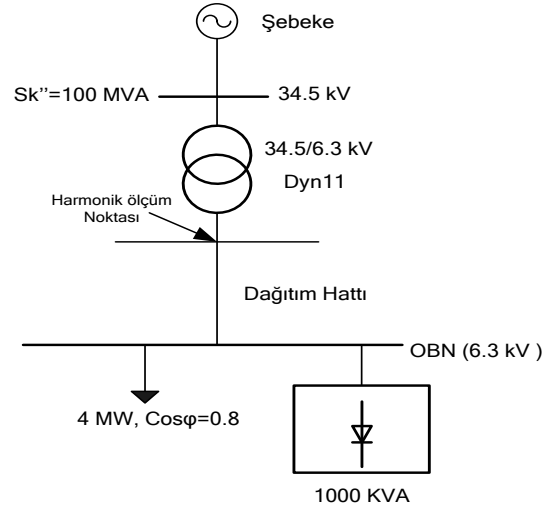
Filtre boyutu yeniden düzenlenirse;

$$S = \frac{V_s^2}{X_C(1 - \frac{1}{n^2})} \quad (4)$$

Filtrenin kalite faktörü (Q) ayar keskinliğini belirler. Bu açıdan filtreler düşük Q veya yüksek Q filtresi tipinde olabilir. Tek ayarlı filtrenin kalite faktörü denklem 5’teki gibi verilir [1,10].

$$Q = \frac{X_o}{R} \quad (5)$$

3. Benzetimi Yapılan Endüstriyel Sistem



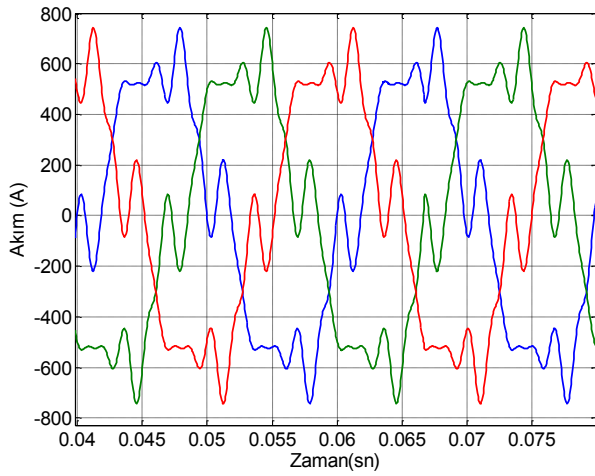
Şekil 3: Filtre uygulanan sistem

Bu çalışmada şekil 3’te yer alan sistem, MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. Sistemin filtre uygulanmadan önceki güç faktörü 0,8’dir. Filtresiz sistemin harmonik genlikleri tablo 1’de verilmiştir. Burada akımın harmonik

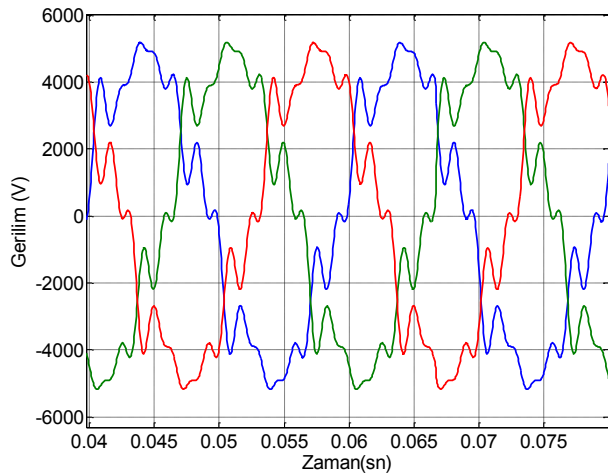
bozulununun %27.45, gerilim harmoniklerinin ise %19.67 olduğu görülmektedir. Ayrıca sistemin akım ve gerilim dalga şekilleri şekil 4 ve 5'te akım ve gerilim harmoniklerine ilişkin bar grafikleri ise şekil 6 ve şekil 7 'de, verilmiştir.

Tablo 1: Filtrelemeden önceki harmonik genlikleri ve THD

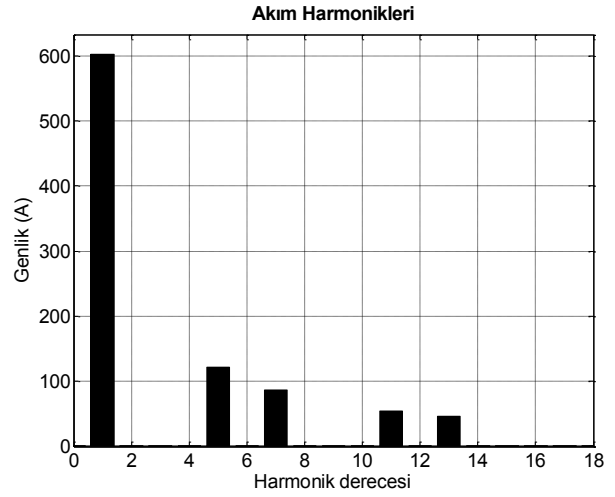
Harmonik	1	5	7	11	13	THD%
Akım (A)	602.75	121.31	86.34	55.13	46.49	27.45
Gerilim (V)	4784.63	471.04	469.43	471.61	470.50	19.67



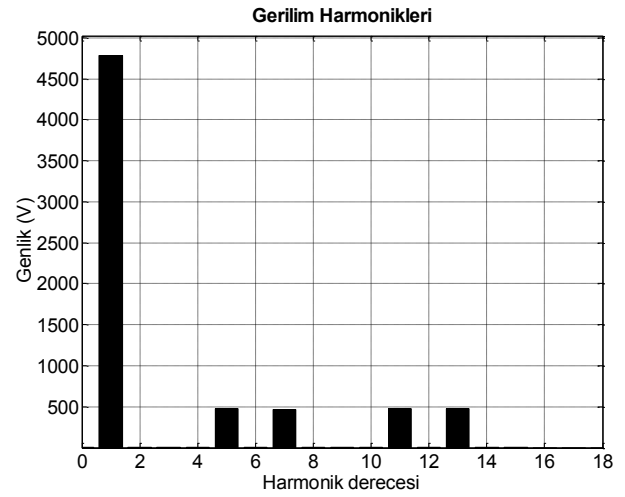
Şekil 4: Filtresiz sistemin akım dalga şekli



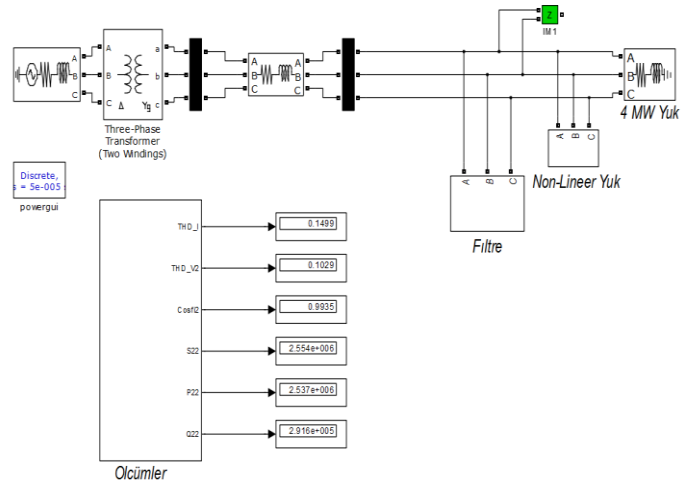
Şekil 5: Filtresiz sistemin gerilim dalga şekli



Şekil 6: Sistemin Akım Harmonikleri



Şekil 7: Sistemin Gerilim Harmonikleri



Şekil 8: Endüstriyel Sistemin Simulink Modeli

Endüstriyel sistemin simulink modeli şekil 8'de verilmektedir. Modelde yer alan non-linear yük akım kaynaklarıyla modellenmiştir. Ölçümler bloğunda sisteme ilişkin THD, $\cos\phi$ ve güç değerleri görülebilmektedir.

4. Tek Ayarlı Filtre Tasarımı Ve Uygulanması

Filtre tasarımı için ilk önce sistemin reaktif güç gereksinimi belirlenmelidir. Çünkü filtreler temel frekansta reaktif güç kompanzasyonunda kullanılmaktadırlar [1,2]. Reaktif güç gereksinimi aşağıdaki gibi hesaplanır [2].

$$Q_C = P(\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (6)$$

Sisteme ilişkin güç faktörü 0.8'dir. Bu değer 0.95'e yükseltilecektir. Denklem 6'ya göre sistemin reaktif güç gereksinimi 1686 kVAR olarak hesaplanır. Reaktif güç değeri 1700 kVAR olarak alınmıştır.

Buna göre gerekli kapasitörün reaktansı denklem 7'deki gibi hesaplanır [2,11].

$$X_C = \frac{V_S^2}{Q_C} \quad (7)$$

Denklem 3'ten ise filtrenin rezonans anındaki reaktansı hesaplanır. Tablo 1'de yer alan harmonik akım derecelerinin 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 paylaşılması denklem 8'deki gibi olacaktır [12].

$$C_n = C \cdot \frac{I_n}{I_h} \quad (8)$$

Tablo 3: Harmonik Analizi

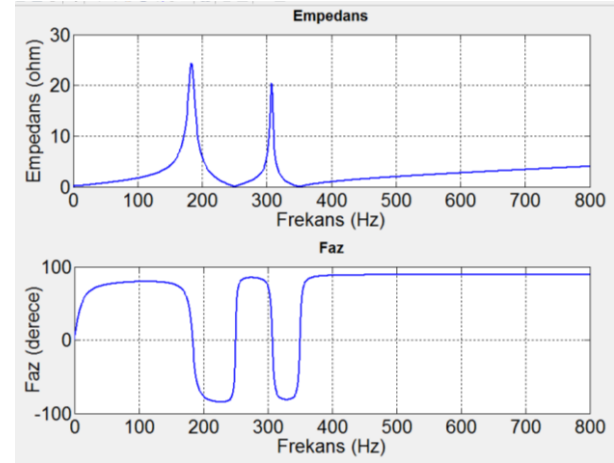
Harmonikler		1	5	7	11	13	THD	Cosφ
Filtresiz	Akım	602.75	121.31	86.34	55.13	46.49	%27.45	0.8
	Gerilim	4784.63	471.04	469.43	471.61	470.50	%19.67	
5th	Akım	521.42	1.69	35.08	29.01	25.29	%9.99	0.95
	Gerilim	4941.42	6.57	190.75	248.15	255.96	%8.18	
5th-7th	Akım	509.64	2.08	1.06	17.80	16.46	%4.78	0.99
	Gerilim	5004.18	8.07	5.79	152.34	166.58	%4.51	

Filtreler sisteme uygulandıktan sonra elde edilen harmonik genlikleri, THD değerleri ve güç faktörü değerleri tablo 3'te verilmiştir. Benzetimi yapılan sisteme filtre uygulamaları adım adım yapılmıştır. Sistemde filtre yokken akım harmoniklerinin THD değeri %27.45'tir. 5th filtresi sisteme uygulandığında bu değer %9.99'a düştüğü görülmektedir. Bununla beraber filtre uygulanmayan harmonik genliklerinde, filtresiz sisteme göre azaldığı gözlenmektedir.

Orta gerilim seviyesindeki bu endüstriyel güç sistemine sırasıyla 5th, 5th-7th harmonik filtreleri tasarlanmıştır. Buna göre tasarlanan filtre değerleri tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: Filtre değerleri

Filtre	R(Ω)	L (H)	C (F)
5th	0.0467	0.0030	1.3634x10-4
5th-7th	0.0573	0.0036	1.1108 x10-4
	0.0575	0.0026	7.9057 x10-5

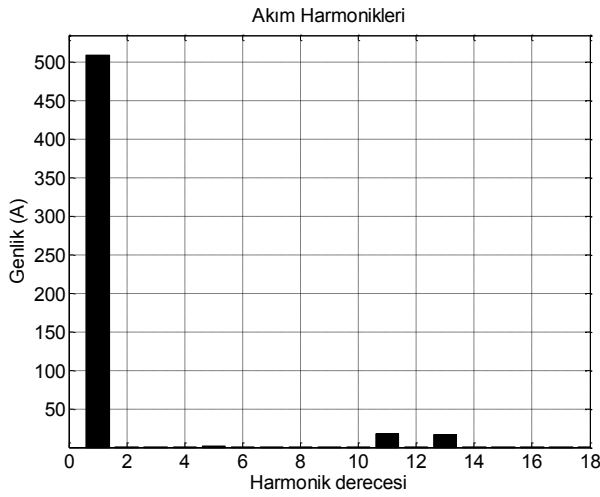


Şekil 9: Sisteme 5th-7th filtresi uygulandıktan sonra elde edilen empedans-frekans değişimi

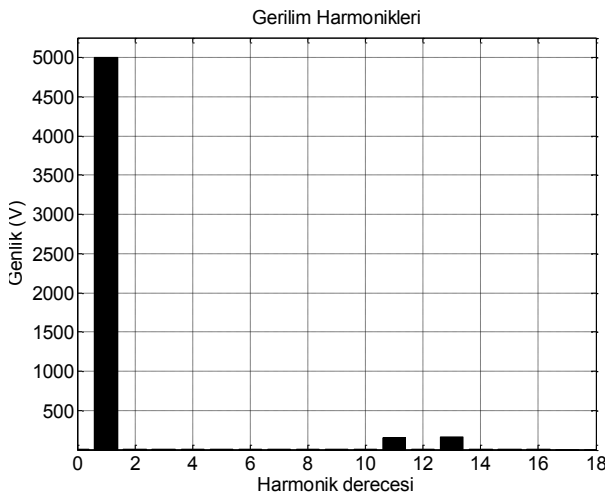
Örneğin 7th akım harmonik genliği filtresiz sistemde 86.34 A iken 5th filtresi uygulandığında bu değer 35.08'e düşmüştür. Gerilim harmonikleri içinde aynı şey söz konusudur. 5th-7th filtresi uygulandığında elde edilen empedans frekans değişimi şekil 9'da görülmektedir.

Tek ayarlı filtrenin temel frekansta yaptığı kompanzasyon etkisi tabloda net bir biçimde görülmektedir. Filtresiz sistemde akım değeri 602.75 A iken 5th filtresi uygulandıktan sonra bu değer

521.42 A olmaktadır. Kompanzasyonla beraber beklenildiği gibi akımın azaldığı, görülmektedir. Gerilimin temel bileşen değerinin ise 4784.63 V değerinden 4941.42 V değerine yükseldiği görülmektedir. Bununla beraber filtresiz sistemde 0.8 olan güç faktörü değeri artarak 0.95 olmuştur. Sisteme filtre eklendikçe akım ve gerilim harmonik genlikleri giderek azalmıştır. Sisteme 5th-7th filtresi uygulandığında akım harmoniklerinin THD değeri %4.78 olmuştur. Gerilim harmoniklerinin THD değeri ise %4.51'e düşmüştür. 5th filtresi uygulandıktan sonra temel bileşen gerilim değeri 4941.42 V (maksimum değer) iken 5th-7th filtresi uygulandıktan sonraki temel bileşen gerilim değeri 5004.18 V olmaktadır. Aradaki farkın harmonikler nedeniyle meydana gelen gerilim düşümünden kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 10 ve 11'de 5th-7th filtresi uygulandıktan sonraki harmonik genlikleri görülmektedir.



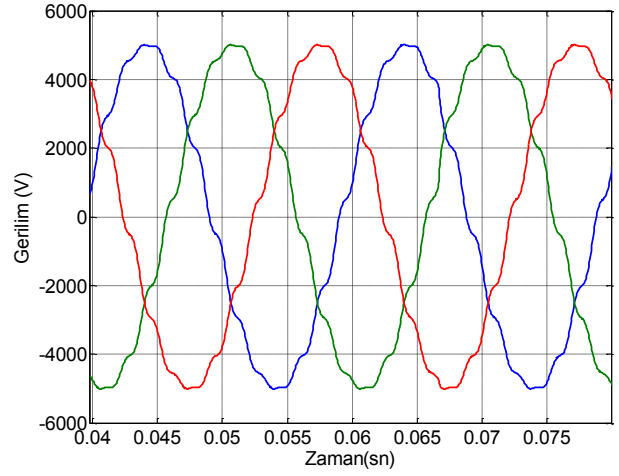
Şekil 10: 5th-7th filtresi uygulandıktan sonra sistemin akım harmonik genlikleri



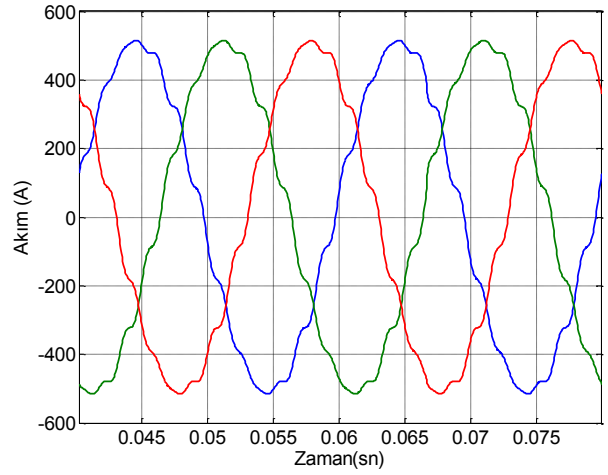
Şekil 11: 5th-7th filtresi uygulandıktan sonra sistemin gerilim harmonik genlikleri.

Şekil 12 ve 13'te 5th-7th filtresinin uygulanması

sonrasındaki akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Görüldüğü gibi filtresiz sisteme göre akım ve gerilim dalga şekli düzelmiştir.



Şekil 12: 5th-7th harmoniklere uygulanan filtreden sonra gerilimin dalga şekli



Şekil 13: 5th-7th harmoniklere uygulanan filtreden sonra akımın dalga şekli

Tablo 4: Kısa devre gücünün harmonik bozulmalar üzerindeki etkisi

Kısa Devre Gücü (MVA)	THD _i (%)	THD _v (%)
50	26.98	24.52
100	27.45	19.67
300	27.78	16.35
500	27.85	15.68
700	27.88	15.39
900	27.9	15.23
1000	27.9	15.17

Filtresiz durum için kısa devre gücü değiştirildiğinde tablo 4'teki sonuçlar elde edilmiştir. Görüldüğü gibi kısa devre gücü arttıkça gerilim THD değeri yaklaşık %9 kadar bir azalma göstermiştir. Kısa devre gücünün artması sistemin gerilim profilini iyileştirmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada endüstriyel bir güç sistemi için harmonik analizi, tek ayarlı pasif filtre tasarımı ve MATLAB ortamında uygulanması gerçekleştirilmiştir. Tek ayarlı filtreler sisteme adım adım uygulanmıştır. Bunun sonucunda filtre uygulanmayan harmonik genliklerinde azaldığı görülmüştür. Filtrelerin uygulanması ile akım ve gerilim THD değerleri kabul edilebilir seviyelere gelmiştir. Tek ayarlı filtreler baskın olan harmonik derecelerine uygulanmalıdır. Ayrıca bu filtreler kompanzasyon işlemi içinde kullanılmaktadırlar. Tasarım eşitliklerinde sistemin kompanzasyon gereksiniminden faydalanılmaktadır. Tek ayarlı filtreler orta gerilim seviyesi için en ekonomik filtrelerdir. Sistemin kısa devre gücünün artması gerilimin THD değerini iyileştirmektedir.

Eklr

Güç Sistemine ilişkin parametreler

Kaynak Gerilimi	34.5 kV
Frekans	50 Hz
Transformatör Gücü	20 MVA
Dağıtım Hattı Empedansı	$R+jX=0.02+j0.04 \Omega$
Lineer Yük	4 MW
Non-lineer Yük	1000 KVA

Kaynaklar

- [1] C.Kocatepe, M.Uzunoğlu, R.Yumurtacı, A.Karakaş, O.Arıkan, *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 2003.
- [2] F. C. De La Rosa, *Harmonics And Power Systems*, Missouri, U.S.A. ,Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [3] R.C.Dugan, M.F.McGranaghan,S. Santoso,H.W. Beaty "*Electrical Power Systems Quality, Second Edition*",. McGraw-Hill,2004
- [4] M.Izhar, C.M.Hadzer, Syafrudin M, S.Taib and S.Idris,"Performance for Passive and Active Power Filter in Reducing Harmonics in the Distribution System", National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia.,104-108

- [5] P.P. Win "Harmonic Mitigation Techniques in Industrial Power System",GMSARN International Conference on Sustainable Development: Issues and Prospects for the GMS 12-14 Nov. 2008
- [6] S.N. Yousif,M.Z.C. Wanik, A.,Mohamed,"Implementation Of Different Passive Filter Designs For Harmonic Mitigation", ", National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur, Malaysia.,229-234
- [7] E. Pashajavid, M. A. A. Golkar, "Efficient procedures to design and characterize passive harmonic filters in low power applications", Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on Bari,809-814
- [8] A. B. Nassif ,W.,Xu" Passive Harmonic Filters for Medium-Voltage Industrial Systems: Practical Considerations and Topology Analysis"Power Symposium, 2007. NAPS '07. 39th North American, Las Cruces,NM,301-307
- [9] H. Akagi," Modern active filters and traditional passive filters",Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences Technical Sciences Vol. 54, No. 3, 2006,255-269
- [10] J.Arrillaga,N.R. Watson, *Power System Harmonics second edition*,John Wiley,2003.
- [11] J. C. Das,"Passive Filters—Potentialities and Limitations",IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 40, No. 1, January/February 2004, 232-241
- [12] M. Sucu, Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi Ve Simülasyonu Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.