

ÜÇ FAZLI DOĞRULTUCULARDA GÜÇ KALİTESİNİ DÜZELTİCİ FİLTRELERİN BAŞARIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Ahmet M. HAVA

Hazem ZUBİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik Fakültesi
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 06531, Balgat, Ankara
e-posta: hava@metu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Geniş Bantlı Harmonik Filtresi, Tuzak Filtresi, Akım Bozulması, Üç Fazlı Doğrultucu

ÖZET

Bu bildiride üç fazlı diyotlu doğrultucu girişli motor sürücülerinin girişinde güç kalitesini düzeltmek amacıyla kullanılan harmonik filtrelerinin başarımlarını karşılaştırılacaktır. İndüktans filtre, tuzak filtre ve geniş bantlı harmonik filtre değerlendirilecektir. Karşılaştırmada giriş akım bozulması, güç katsayısı, filtre gerilim düşümü, boşta giriş akımının anma akımına oranı ve verim büyüklükleri kapsanacaktır. Paralel ve seri rezonans problemleri incelenecek, ayrıca dengesiz kaynak ve dengesiz yük durumlarında başarımlar da değerlendirilecektir. Karşılaştırmalar bilgisayarla ayrıntılı modelleme ve benzetime dayalı olup sonuçlar deneysel çalışma ile doğrulanacaktır.

1. GİRİŞ

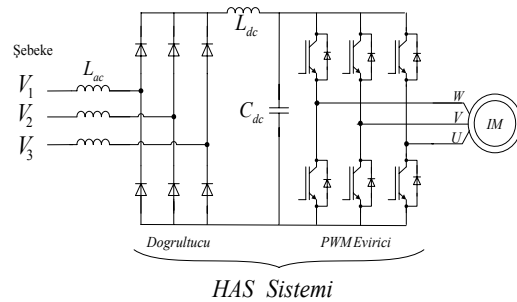
Hız ayarlı sürücüler (HAS) üstün statik ve dinamik başarımlarından dolayı asenkron ve sürekli mıknatıslı senkron motorların değişken hız uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek enerji verimi, hareket doğruluğu, yüksek kalkış momenti ve düşük kalkış akımı sağlayan PWM eviricili sürücüler motor tarafında başarımları önemli boyutta iyileştirmektedir. Ancak HAS'ların eviricisine doğru gerilimi sağlayan üç fazlı 6/12 darbeli diyotlu/tristörlü doğrultucular şebekeden baskın harmonikleri (5., 7., 11., 13., vb.) büyük miktarda olan bozuk akımlar çekerek şebeke güç kalitesini bozar. Harmonik kayıpları, ortak bağlanma noktasında (PCC) şebeke gerilimi bozulması, harmonik frekansında rezonansın dolaylı aşırı akımlar ve gerilimler vb. sorunlara neden olur. Harmoniklerin yarattığı önemli sorunlar nedeniyle elektrik şebekesi otoriteleri artık güç kalitesine ilişkin standart ve yönetmelikler belirlemekte ve şebekeden güç kalitesini bozucu nitelikte akım çeken müşterilere yaptırımlar uygulamayı planlamaktadır. Bu nedenle verimli, güvenilir ve ekonomik harmonik azaltıcı filtrelere olan gereksinim artmaktadır [1-6].

Doğrultucu harmoniklerini filtreleme yöntemleri aktif, pasif ve karma olmak üzere üçe ayrılır. Bu yöntemlerden pasif filtreleme yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Aktif ve karma filtreleme yöntemleri yüksek fiyat ve karmaşa nedeniyle henüz yaygınlaşmamıştır [3]. Pasif harmonik filtreleme

yöntemleri ise çeşitli olup herhangi bir uygulama için en uygun filtreleme yönteminin seçimini doğru yapabilmek için çeşitli filtrelerin başarımlarını ve ekonomik boyutlarının karşılaştırılması gereklidir. Bu çalışmada motor sürücü uygulamalarında yaygın olarak kullanılan pasif filtreler olan indüktans filtre, tuzak filtre ve yakın zamanda geliştirilmiş olan geniş bantlı filtrenin başarımları karşılaştırılacaktır. Filtre tipleri ve çalışma ilkeleri özetlenecek, başarımları ayrıntılı modellemenin yapıldığı bilgisayar benzetimleriyle değerlendirilecek ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle doğrulanacaktır.

2. HARMONİK FİLTRE ÇEŞİTLERİ

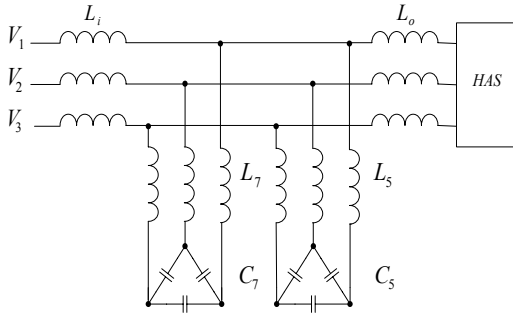
Pasif filtreleme yöntemlerinden en yaygın kullanılan Şekil-1'de gösterildiği gibi seri indüktans filtresi (SİF) ekleme yöntemidir. Bu yöntemde anma yük akımında üzerindeki RMS gerilim düşümü anma geriliminin %3-4'ü oranında olacak boyutta bir üç fazlı indüktans filtre (L_{ac}) sürücü girişi ile şebeke arasına seri bağlanır. En ekonomik harmonik filtresi çözümü olan bu yöntem şebekede oluşan aşırı gerilimleri soğurarak sürücüyü aşırı gerilimlere karşı da korur. Ancak akım bozulması (THD_1) başarımları sınırlıdır.



Şekil-1. Seri İndüktans Giriş Filtreli HAS Sistemi.

Şekil-1'de görüldüğü gibi, bazı HAS'ların içinde seri indüktans filtre (L_{dc}) kullanılarak doğrultucu akımı daha sürekli yapılmakta, böylece doğru gerilim bara kondansatörü üzerindeki stres azaltılmakta, kalkış akımı sınırlanmakta ve giriş akımının bozulması azaltılmaktadır. Ancak seri indüktans miktarı tipik olarak %1-2 olup (AC tarafı eşdeğeri) doğrultucu harmoniklerinin bastırılmasında tek başına (ya da seri L_{ac} ile birlikte) yeterli olmamaktadır.

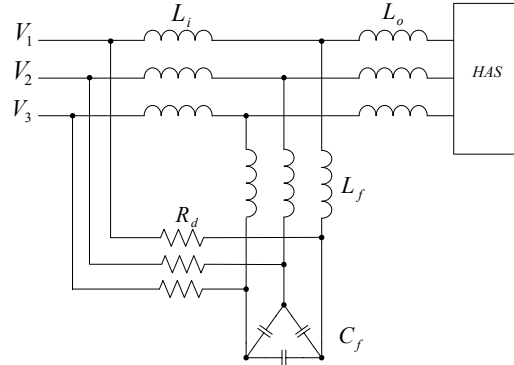
Tuzak filtre (TF) yöntemi ise özellikle onlarca kW ve daha büyük güçlerde kullanılır. Bu yöntem, doğrultucuların ürettiği akım harmoniklerini soğurmak üzere seri bir LC rezonans devresini doğrultucu ile şebeke arasına paralel bağlayarak doğrultucu harmoniklerini paralel kola yönlendirip (tuzağa düşürüp) şebekeye akımlarını önleme mantığına dayanır. Bastırılmak istenen her bir harmonik için ayrı bir filtreye gereksinim vardır. Filtreden aşırı akım geçmemesi ve parametrelerin değişmesi durumunda filtreleme özelliğinin zayıflamaması için filtrenin rezonans frekansı soğurulacak baskın harmonik frekansının 0.94-0.99 katı seçilir. Doğru bir tasarım için doğrultucunun bağlanacağı şebeke ile ilgili ayrıntılı bilgi gereklidir. TF'ler aynı zamanda ortak bağlanma noktasına bağlı diğer doğrusal olmayan yüklerden veya şebekeden de harmonik akımları çekebilir. Bu nedenle çoğu uygulamalarda şebeke ile filtre terminaleri arasında %3-6 arasında bir seri indüktans filtre (L_i) konulması kaçınılmazdır. Ayrıca büyük güçlerde etkin bir filtreleme için, TF'lere giden harmonik akımlarının şiddetini azaltmak amacıyla doğrultucu ile TF arasında da %3-6 arasında seri indüktans filtre (L_o) eklenir. Böylece Şekil-2'de görülen uygulamada kullanılan filtre yapısı oluşur. Ayrıca doğrultucu harmonik akımlarının frekansında bir paralel rezonans frekansı olmaması için, TF'lerinin tasarımında en düşük baskın harmonik frekansından (tipik olarak 5. harmonikten) başlanılarak filtreleme zorunluluğu vardır. Dolayısıyla TF yöntemi pahalı ve karmaşık bir yaklaşımdır.



Şekil-2. Tuzak Filtre (5. ve 7. harmonikler için).

Yakın zamanda geliştirilen geniş bantlı filtrelerin (GBF) [4] çalışma ilkesi ise tuzak filtre yaklaşımından farklı olarak her frekans için ayrı bir filtre yerine tek bir paralel L-C filtre ile doğrultucu baskın harmoniklerini soğurmak ve ayrıca şebeke ile doğrultucu arasında harmonik yalıtımı sağlamak üzere girişe büyük bir indüktans filtre (L_i) bağlamak mantığına dayanır. TF'de olduğu gibi, GBF'de de doğrultucu harmoniklerinin şiddetini azaltmak için doğrultucu terminallerine seri indüktans filtresi (L_o) bağlanır. Filtre yapısı Şekil-3'te görülmektedir. GBF şebekeden HAS'a doğru temel frekansta geçiren olacak, ancak şebeke tarafındaki (PCC'deki doğrusal olmayan yüklerden ya da generatörden kaynaklanan) baskın gerilim/akım harmoniklerinin frekanslarında geçiren olmayacak biçimde tasarlanır. GBF HAS'tan

şebekeye doğru temel frekansta geçiren olmalıdır. Ancak doğrultucunun baskın harmonik frekanslarında doğrultucudan şebekeye doğru olan geçirgenlik, doğrultucudan paralel kol L_f - C_f seri filtresine doğru olan geçirgenliğe göre zayıf olacak biçimde tasarlanır. Bu görecelik impedans oranı olarak tanımlanır ve filtre tasarımında anahtar özelliğidir [7]. Dolayısıyla, TF'den farklı olarak, filtre başarımı tuzak frekansına bağımlı olmamakta ve geniş bir frekans bandında doğrultucu harmonik akımları ağırlıklı olarak filtreye doğru akmaktadır. Böylece GBF, şebeke ile HAS arasında harmonik yalıtım devresi işlevi görür ve hem şebekenin harmonik problemlerini yüke yansıtma, hem de yük harmonik akımlarını şebekeye yansıtma.



Şekil-3. Geniş Bantlı Harmonik Filtresi.

GBF'nin tasarımında paralel kolun rezonans frekansı 5. ile 7. harmonikler arasında seçilir. Boşta giriş (şebeke) akımının nominal akıma oranı, filtre gerilim düşümü, şebeke tarafındaki güç katsayısı ve akım bozulması tasarımda ölçüt olarak kullanılır. Geliştirilen bir analitik yöntemle bilgisayar destekli tasarım yapılabilmekte ve optimal filtre parametreleri hızlıca ve yüksek doğrulukla belirlenebilmektedir [7].

3. FİLTRE BOYUTLANDIRMASI

Filtre boyutlandırmasında uygulamanın gerektirdiği başarımlar ölçütleri belirlendikten sonra filtre parametreleri analitik olarak hesaplanabilir, bilgisayar benzetimi yaparak deneme-yanılma yöntemiyle belirlenebilir ya da deneyime dayalı olarak veri çizelgesinden belirlenebilir. Genellikle tam yükte giriş güç katsayısı (PF), giriş akım bozulması, verim, filtre gerilim düşümü, boyut (dolayısıyla fiyat), vb. ölçütler filtre parametrelerinin belirlenmesinde önemli rol oynar. Boşta çalışma verimi ve güç katsayısı da filtre tipine bağlı olarak ek ölçüt olarak uygulanır.

Bu çalışmada filtre parametreleri analitik yaklaşımla tasarlanmıştır. Çalışmada 50 Hz, 380 V uygulamalarında 5.5 kW, 55 kW ve 500 kW olmak üzere üç değişik güç düzeyi için tasarım yapılmıştır. Tasarımda uygulamada kullanılan filtre boyutları ölçüt alınmış olup filtrenin ekonomikliği böylece öncelikle dikkate alınmıştır. Seri indüktans filtre için %3 seri indüktans seçilmiştir. TF'de giriş indüktansı %6, çıkış indüktansı %3 değerlerinde seçilmiş ve geri kalan filtre parametreleri de anma yükünde giriş

güçkatsayısı 1 olacak biçimde seçilmiştir. Geniş bantlı filtrede parametreler anma girişi akımı bozulması %10, anma güç katsayısı 1 olacak biçimde belirlenmiştir. GBF'nin tasarımı karmaşık bir süreç olup geliştirilen bir analitik yöntemle bu süreç kolaylaştırılmıştır [7]. 5.5 kW için parametreler Çizelge-1'de görülmektedir.

Çizelge-1. HAS Sistemi Filtre Parametre Değerleri
(P=5.5 kW, Birimler: L: mH, C: µF (Δ))

SİF		TF		GBF	
L _{ac}	2.30	L _i	4.60	L _i	10.8
L _{dc}	1.50	L _o	2.30	L _o	3.1
		L ₅	29.6	L _r	4.9
		C ₅	4.94	C _r	20.6
		L ₇	18.5	L _{dc}	1.5
		C ₇	4.04		
		L _{dc}	1.50		

4. MODELLEME VE BENZETİMLER

Tasarlanan filtrelerin başarımını çeşitli çalışma koşullarında değerlendirmek amacıyla filtre ve HAS sisteminin ayrıntılı modellemesi yapılmış ve Ansoft-Simplorer V7.0 (SV) güç elektroniği benzetim yazılımı [8] kullanılarak sistemin bilgisayarla benzetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetimde filtre kayıpları da eşdeğer dirençlerle kapsanmış ve böylece filtre verimi de yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Boşta, yarım ve tam yükte çalışma, devreye girip çıkma (dolayısı ile geçici haller), şebekede harmonik ve dengesizlik varken çalışma ve son olarakta üç fazdan birinin kesilmesiyle doğrultucunun tek faza kalması durumunda çalışma değerlendirilmiştir.

Çeşitli çalışma koşullarında başarımlar Çizelge-2'de özetlenmiş olup GBF'nin akım bozulması ve güç katsayısı bakımından diğer filtreler göre üstünlüğü sergilenmektedir. Dengeli şebeke koşullarında tam yükte SİF akım bozulması indüktans filtreye rağmen %36 olup modern standartları karşılayamayacak boyuttadır. TF ve GBF çözümleri karşılaştırıldığında GBF'nin %10 sınırının altında kaldığı, böylece üstün başarımlar sergilediği görülmüştür. Şebekenin bir fazının geriliminin şiddetinin %5 azalmasıyla oluşan yaklaşık %2.5 dengesizlik durumunda SİF'li sistemde giriş akımında bozulma %10.6, TF'li sistemde %3.2 ve GBF'li sistemde %1.5 boyutunda artmaktadır. Doğrultucu çıkış DC geriliminde de benzer biçimde GBF'de değişim en azdır. Dolayısıyla GBF şebeke gerilimi dengesizliğine duyarlıdır.

Çizelge-2. Tam Yük Filtre Başarımı (5.5 kW)

	Dengeli Şebeke			%2.5 Dengesiz Şebeke				
	SİF	TF	GBF	SİF	TF	GBF		
THD _i (%)	36	11.6	6.8	T H D _i (%)	a	45.2	13.1	7.5
I _{nl} /I _{fl}	0.0	0.22	0.54		b	46.6	14.8	8.3
V _{dc} (V)	502	495	521		c	31.4	11.7	8.0
PF	0.92	0.98	0.97	ΔV _{dc} (%)	3.2	1.3	1.0	

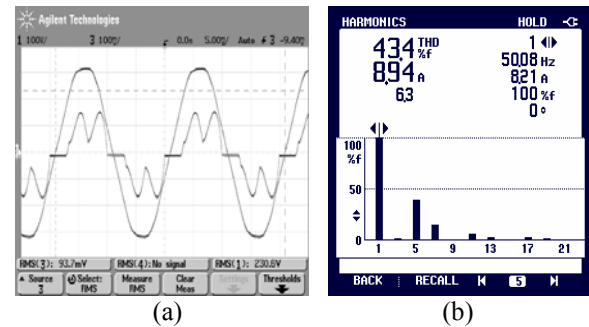
Bilgisayar benzetimi ile yapılan çalışmalarda GBF'nin şebeke ya da yük tarafındaki harmoniklere ve geçici hallerde duyarlı olmadığı, seri ya da paralel rezonansa girme riskinin olmadığı gözlenmiştir.

5. DENEYSEL SONUÇLAR

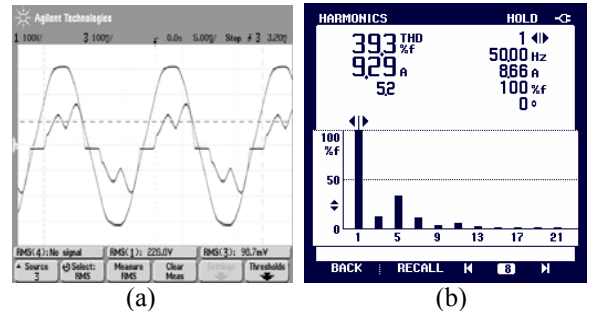
Deneysel çalışmada 5.5 kW gücünde bir HAS sistemi için SİF, TF ve GBF filtreleri tasarlanmış, imal edilip, laboratuvarında denenmiştir. Tam yükte çalışmada başarımlar verileri Çizelge-3'te gösterilmiştir. Veriler benzetim verilerini doğrulamakta ve GBF'nin üstün başarımlarını ispatlamaktadır. Şekil-4. – Şekil-7. arası osilogramlar filtrelerin dalga biçimlerini göstermektedir. Şekil-4'teki %3 indüktans yerine Şekil-5'teki %6 indüktans kullanılması durumunda bile SİF'li çözümde THD_i'da dikkate değer bir azalma görülmemiş, ancak doğru gerilim barasında ciddi bir düşüş kaydedilmiştir (indüktans artırmak THD_i'yı azaltmada çözüm değildir). TF'li çözümde de Şekil-6'da görüldüğü gibi, giriş akımı dalga şekli sinusoidal olmayıp harmonik bileşenler kuvvetlidir. Şekil-7'de görüldüğü gibi GBF'li çözüm ise şebekeden çekilen saf sinüs akımı itibarı ile üstün niteliktedir.

Çizelge-3. Tam-Yük Deneysel Filtre Başarım Verileri
(5.5 kW, Şebeke gerilim bozulması THD_v = %3.0)

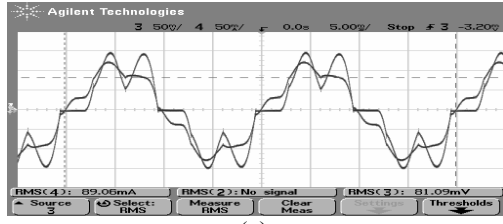
	THD _i (%)	PF	V _{dc} (V)	Verim (%)	ΔV _{ac} (%)
SİF	43	0.90-	526	99.4	2.1
TF	17.5	0.98-	514	98.8	3.0
GBF	4.28	0.95+	545	99.0	3.7



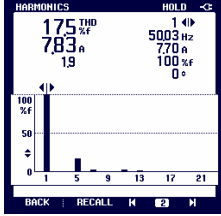
Şekil-4. Seri İndüktans (%3) Filtreli HAS Sistemi. (a) Şebeke akım ve gerilimi, 5A/div, 100V/div, 5ms/div, (b) Şebeke akımı harmonik spektrumu.



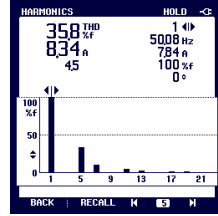
Şekil-5. Seri İndüktans (%6) Filtreli HAS Sistemi. (a) Şebeke akım ve gerilimi, 5A/div, 100V/div, 5ms/div, (b) Şebeke akımı harmonik spektrumu.



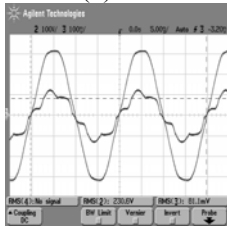
(a)



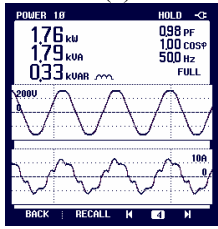
(b)



(c)

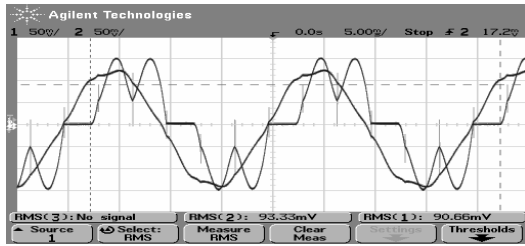


(d)

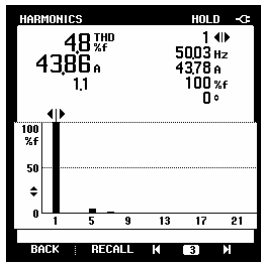


(e)

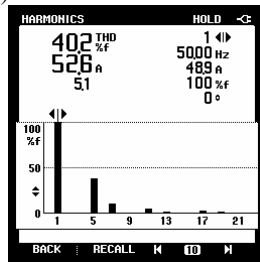
Şekil-6. Tuzak Filtre. (a) Şebeke ve HAS akımı, 5A/div, 5ms/div, (b), (c) Şebeke ve HAS akımı harmonik spektrumu, (d) Şebeke akım ve gerilimi, 5A/div, 100V/div, 5ms/div, (e) Şebeke güç verileri.



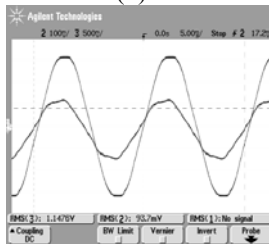
(a)



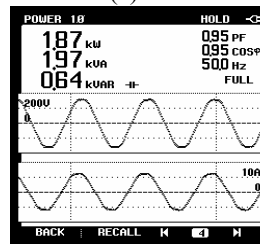
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil-7. GBF Sistemi. (a) Şebeke ve HAS akımı, 5A/div, 5ms/div, (b), (c) Şebeke ve HAS akımı harmonik spektrumu, (d) Şebeke akım ve gerilimi, 5A/div, 100V/div, 5ms/div, (e) Şebeke faz güç verileri.

6. SONUÇ

Bu çalışmada HAS'ların diyotlu doğrultucu girişlerinde kullanılan çeşitli pasif harmonik filtrelerin başarımı karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada giriş akım bozulması, güç katsayısı, çıkış gerilim regülasyonu, boşa akımın anma akımına oranı, verim ve boyut dikkate alınmıştır. Paralel ve/veya seri rezonans kaynaklanan aşırı akımlar/gerilimler, dengesiz şebeke ve dengesiz yüklemde oluşacak bozulmalar incelenmiştir. Karşılaştırmada bilgisayar benzetimi ve deneysel yaklaşımlar kullanılmış ve deneysel sonuçlar teorik ve benzetimdeki bulguları doğrulamıştır.

Geniş bantlı harmonik filtresi ile güç kalitesi iyileştirme yönteminin diğer yöntemlere göre daha etkin bir yöntem olduğu saptanmıştır. GBF hem giriş hem de doğrultucu harmoniklerinin karşı tarafa etkimesini engelleyerek her iki tarafta da güç kalitesini yüksek tutmaktadır. Aynı boyut ve fiyattaki tuzak filtre ile karşılaştırıldığında, GBF hem giriş akım bozulmasının çok daha az oluşu hem de harmonik rezonans problemi olmaması bakımından daha üstündür. Bu nedenle GBF özellikle onlarca kW basamağında güçlerde etkin çözüm oluşturmaktadır. Şebekeden çekilen akımın bozulmasının %10 ve altı değerinde tutulması için en uygun pasif filtreleme yönteminin GBF olduğu (yeni güç kalitesi standartlarına göre tipik sınır THD₁ değeri %5-10 arasındadır), diğer yöntemlerin başarım ve ekonomik boyutları itibari ile yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Dolayısıyla aktif filtrelerin ekonomikleşmesi sürecine kadar GBF'lerin kullanımının yaygınlaşması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems."
- [2] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, "Electrical Power Systems Quality," 2nd Edition, McGraw-Hill, 2002.
- [3] B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra, "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement," IEEE Trans. on Ind. Elect., Vol. 46, No. 5, October, 1999, pp. 960-971.
- [4] MTE firması, matris filtre ürün broşürü, <http://www.mtecorp.com/matrix.html>
- [5] S. Hansen, P. Nielsen, P. Thogersen, F. Blaabjerg "Line Side Harmonic Reduction Techniques of PWM Adjustable Speed Drives-A Cost-Benefit Analysis," Proc. of NORPIE Conf., 2000, pp. 271-277.
- [6] J.C. Das, "Passive Filters – Potentialities and Limitations," IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 40. No.1 Jan./Feb 2004, pp.232-241.
- [7] A.M. Hava, H. Zubi, "Improved Broadband Harmonic Filter Design for Adjustable Speed Drives," PEDS 2005, Kuala Lumpur, Malezya, Kasım 2005.
- [8] Ansoft-Simplorer, V7.0 (SV), 2004.