

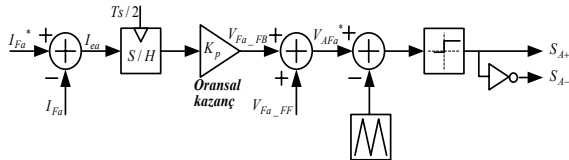
¹ Bu çalışma TÜBİTAK EEE Araştırma Grubu tarafından 104E141 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

2. AKIM DENETECİLERİ

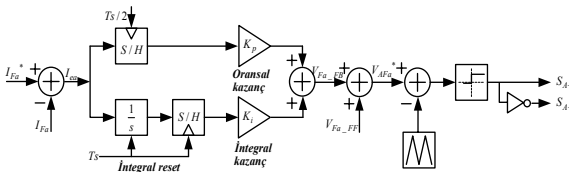
2.1 Doğrusal Akım Denetecileri: Bu deneteciler akım hatasını doğrusal deneteciler üzerinden gerilim işaretine dönüştürür ve evirici DGM ile bu gerilimi üretir. Taşıyıcı tabanlı DGM’de anahtarlama frekansı sabit ve yüksek olduğundan, anahtarlama dalgacıklarının ADS ile bastırılması kolaydır. Ayrıca anahtarlama frekansı ve dolayısıyla anahtarlama kayıpları sınırlandırıldığı için ısısal güvenilirlik sağlanır. PES uygulamalarında doğrusal oransal kazanç (OK) denetim ve doğrusal yük hata (YH) denetim yöntemleri kullanılmaktadır.

Yapısı basit olan oransal kazanç akım denetim diyagramı tek faz için ayrıntılı olarak Şekil 2’de gösterilmiştir. Bir anahtarlama periyodu $T_s/2$ ’de iki kere örneklenen akım hatası oransal kazanç K_p ile çarpılarak geribesleme gerilim referansı V_{Fa-FB} üretilir. V_{Fa-FB} ’nin ölçülen şebeke gerilim işareti V_{Fa-FF} ’ye (feedforward) eklenmesi ile evirici gerilim referansı V_{AFa}^* elde edilir [4]. V_{AFa}^* , taşıyıcı üçgen dalga ile karşılaştırılarak evirici anahtarları için aç/kapa komutu (S_{A+} ve S_{A-}) oluşturulur.

Yük hata deneteci [2] (Şekil 3), oransal kazanç kısmı ile oluşturduğu gerilim referansını her $T_s/2$ ’de yeniler. Denetecinin yük hata denetim kısmı, akım referansının her T_s ’de değişebilmesini ve hata akımının integralinin (yük hatasının) azaltılmasını amaçlar. Her anahtarlama periyodunun başında çıktısı oluşturulur ve hemen ardından integratör sıfırlanır. Oransal ve integral çıktıların toplamının V_{Fa-FF} ’ye eklenmesiyle evirici gerilim referansı elde edilir. Denetecinin yük hata kısmı, hata akımının integralini alır ve başarımı için analog uygulama şarttır ve yöntem ayrık zamanlı denetim için uygun değildir.



Şekil 2. PES’in tek faz oransal akım deneteci.



Şekil 3 PES’in tek faz yük hata deneteci.

2.2 Aç-kapa Akım Denetecileri: Bu deneteciler akım hatasını doğrudan değerlendirme mantığına dayanır. Aç-kapa yöntemlerinden histerezis yöntemi en basit ve en hızlı yöntem olup, yüksek bantgenişlikli denetecilerden dolayı tercih edilir. Histerezis akım denetecinde akım hatasının (I_e) alt ve üst sınırları (AI) tanımlanır. Hata sınırların altında ise anahtarın konumu korunur, hata sınırların üstünde ise anahtara hatayı azaltacak doğrultuda aç ya da kapa komutu verilir. Histerezis uygulaması iki şekilde olabilir. Uygulama kolaylığı olan skaler histereziste (Şekil 4) her faz birbirinden bağımsız olarak ele alınır.

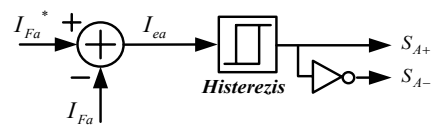
Histerezis akım denetimi uzay vektörü yaklaşımıyla vektör kordinatlarda da uygulanabilir [5], ancak yöntemin karmaşası nedeniyle uygulaması zordur.

Analog devrelerle gerçekleştirildiğinde, skaler histerezis akım denetecinin akım referansını takip edebilme başarımı yüksektir. Ancak, anahtarlama frekansının çalışma koşullarına bağlı olarak değişmesi (aşırı artması) nedeniyle aşırı sıcaklık hatası oluşabilir ve bir kilitlenme mekanizması ile aşırı anahtarlama engellenir. Dolayısıyla bantgenişliği de daralır. Ancak, sayısal işaret işleyici (DSP) kullanarak ayrık zamanlı histerezis deneteciler uygulaması yapıp akıllı kilitlenme mekanizmaları oluşturulabilir. Böylece hem ısısal güvenilirliğin, hem de bantgenişliğinin yüksek tutulması ve başarımın artması sağlanabilir. Ancak analog devrenin sürekli hata örnekleme özelliğinden yoksun olan DSP’nin ölçme gecikmesini azaltmak için aşırı örnekleme yapılmalıdır. Bu çalışmada skaler histerezis yöntemi için çeşitli ayrık zamanlı hata örnekleme ve anahtarlama işareti çıktısı üretme yöntemleri ayrıntılı olarak incelenecek ve başarımı yüksek olan yöntemler geliştirilecektir.

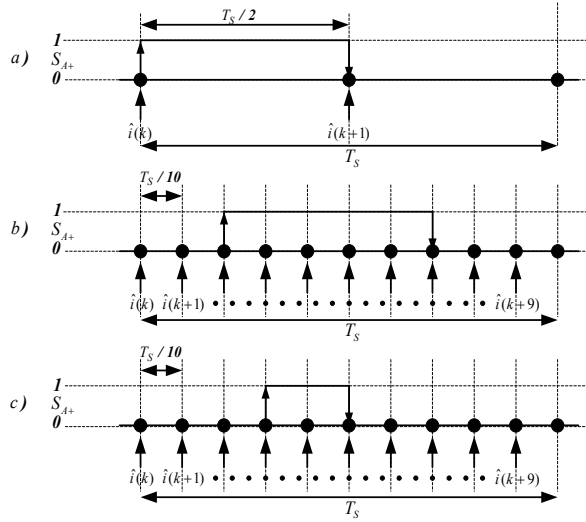
2.2.1 H1 Yöntemi: Ayrık zamanlı histerezis denetecilerin en ilkel olanıdır (Şekil 5.a). Her zaman diliminin başında ve ortasında örneklenen akımlar $\hat{i}(k)$ ve $\hat{i}(k+1)$ doğrultusunda hata akım bilgisi oluşturulur ve anahtarlara aç/kapa komutu verilir. Böylelikle en yüksek anahtarlama frekansı $1/T_s$ ile sınırlanmış olur ve gecikme $T_s/2$ ’dir. Şekil 5.a’da bu uygulamada oluşabilecek “a” fazı üst anahtarı için aç/kapa (1/0) komutu örnek olarak gösterilmiştir.

2.2.2 H2 Yöntemi: Yöntem, H1’in akım hatasının $T_s/2$ ölçme gecikmesini azaltmak için akım örnekleme sıklığının artırılmasına dayanır. H2’de T_s çok sayıda eşit parçaya, örneğin on eşit parçaya ($T_s/10$) bölünür (Şekil 5.b). Böylelikle ölçme gecikmesi $T_s/10$ ’a indirilmiş olur. En yüksek anahtarlama frekansını H1’de olduğu gibi $1/T_s$ frekansı ile sınırlamak için bir anahtara aç/kapa komutu gönderildikten sonra bir sonraki anahtarlamanın yapılabilmesi için $T_s/2$ zaman aralığı boyunca beklenir. Dolayısıyla, anahtarlama çıktısı gecikmesi H1 ile aynı olup $T_s/2$ ’dir.

2.2.3 H3 Yöntemi: H2’de olduğu gibi T_s çok sayıda eşit parçaya bölünür (Şekil 5.c) ve örnekleme sıklığı artırılır. Fakat H2’nin aksine bir anahtara aç ya da kapa komutu verildikten sonra $T_s/2$ zaman dilimi boyunca beklenmez, her $T_s/10$ ’da anahtarlama komutu yenilenebilir ve çıktı gecikmesi azaltılır. Ancak en yüksek anahtarlama frekansını $1/T_s$ ile sınırlandırmak için akım hatasına bağlı olarak anahtar T_s ’de en çok bir kere açılır ve bir kere kapanır. Böylece ideal analog histerezis deneteciler davranışına yaklaşılmış, ayrıca ısısal güvenilirlik artırılmış olur.



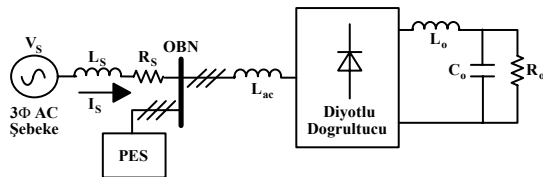
Şekil 4 PES’in tek faz skaler histerezis akım deneteci.



Şekil 5 Histerezis yöntemlerinde akım örnekleme ve aç-kapa komutları: a) H1, b) H2, c) H3.

3. BİLGİSAYARLA BENZETİM

Bu bölümde, yukarıda anlatılan akım denetçilerinin PES uygulamasında başarımları bilgisayar benzetimi ile incelenecek ve sonuçlar karşılaştırılacaktır. Şekil 6'da PES'in uygulanacağı sistemin devre diyagramı ve Çizelge 1'de ise yük ve şebeke parametreleri verilmiştir. PES'in bilgisayarla benzetiminde Ansoft-Simplorer-V7 yazılımı kullanılmıştır. Anlatılan tüm akım denetçilerinin kullanıldığı PES sistemi benzetimleri yapılmış, ancak yöntemlerin akım/gerilim vb. dalga biçimleri kabaca birbirine benzediği ve farklılıklar gözle ayırt edilemeyeceği için, dalga şekli olarak sadece H3 yönteminin sonuçları verilecektir. Ancak, yöntemlerin önemli başarımlar farklılıklarını yansıtan benzetim sonuçları çizelgede gösterilecektir. PES sisteminin bilgisayarla benzetiminde, akım denetçinin tipine göre ADS tipi değişeceğinden benzetimlerde ADS kullanılmamıştır.



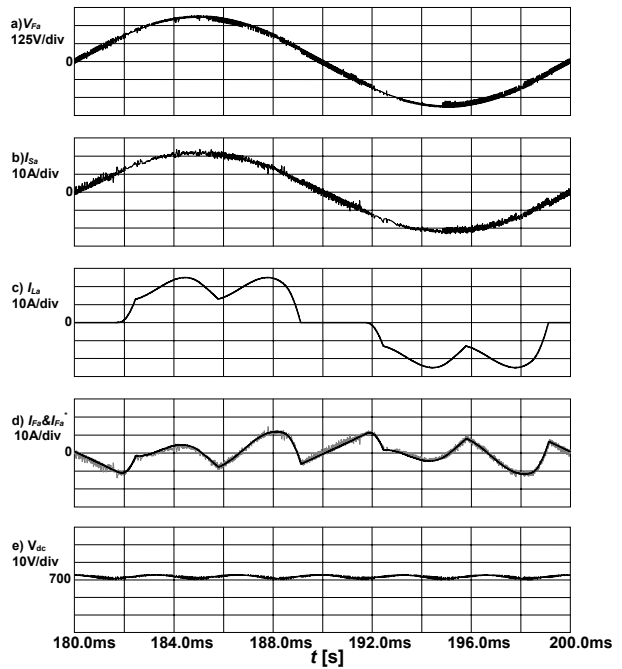
Şekil 6 PES'in uygulanacağı devre.

Çizelge 1.

Yük, Şebeke ve PES Parametreleri

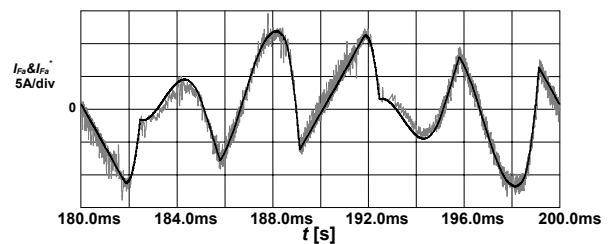
	Parametre	Değer
ŞEBEKE	L_s (Şebeke indüktansı)	100 μ H
	R_s (Şebeke direnci)	50 m Ω
	V_s (Şebeke gerilimi)	380 V
	f_e (Şebeke frekansı)	50 Hz
YÜK	P_o (Yük gücü)	10 kW
	R_o (Yük direnci)	25 Ω
	L_o (DC indüktans)	1.46 mH
	C_o (Yük DC bara kondansatörü)	1 mF
	L_{ac} (AC indüktans)	1.43 mH
PES	L_F (Süzgeç indüktansı)	2 mH
	C_{dc} (PES DC bara kondansatörü)	2.35 mF
	V_{dc} (PES DC bara gerilimi)	700 V
	f_{max} (Enyüksek anahtarlama frekansı)	20 kHz

Şekil 7, H3 yöntemi uygulanarak aç-kapa akım deneteci kullanılan PES sisteminin diyotlu doğrultucu yükünün harmonik kompanzasyonunu yaparken ve tepkin güç gereksinimini karşılarken, bilgisayarla benzetim sonuçlarını bir temel şebeke periyodunda göstermektedir. Şekilde sırasıyla "a" fazı için şebeke gerilimi (V_{Fa}), şebeke akımı (I_{Sa}), yük akımı (I_{La}), süzgeç akım referansı (I_{Fa}^*) ve süzgeç akımı (I_{Fa}) ve DC bara gerilimi (V_{dc}) gösterilmektedir. PES'in tanımlanan işlevini gerçekleştirdiği benzetim sonuçlarından görülmektedir. Şekil 8'den anlaşılacağı gibi PES sistemi referans akımını ani değişim bölgeleri dışında iyi takip edebilmekte, böylelikle yükün harmonik kompanzasyonunu yapabilmekte ve tepkin güç gereksinimini karşılayabilmektedir. Şebeke akımının üzerindeki çentiklerin nedeni, denetecin ani değişim bölgelerindeki takip yetersizliğidir. Bu sorun ise evirici DC bara geriliminin bu bölgelerde yetersiz kalmasından ve eviricinin doymasından kaynaklanmaktadır. Diğer incelenen akım denetçileri durumunda da sonuçlar benzerdir. Ancak akım takip ve dolayısıyla harmonik kompanzasyonu başarımında farklılıklar söz konusudur.



Şekil 7 H3'lü PES'in bir periyotta benzetim sonuçları:

a) "a" fazı şebeke gerilimi, b) "a" fazı şebeke akımı, c) "a" fazı yük akımı, d) "a" fazı süzgeç akım referansı (I_{Fa}^*) (siyah) ve süzgeç akımı (I_{Fa}) (gri), e) DC bara gerilimi.



Şekil 8 H3 akım deneteci için ayrıntılı "a" fazı süzgeç akım referansı (I_{Fa}^*) (siyah) ve süzgeç akımı (I_{Fa}) (gri).

Benzetimle incelenen akım denetçileri için PES'in başarımı Çizelge 2'de özetlenmiştir. Çizelgede, şebeke akımı toplam harmonik bozulması (THD_i), OBN'de şebeke gerilimi toplam harmonik bozulması (THD_v), güç katasıysı (PF), ve eviricinin ortalama anahtarlama frekansı (f_{AVG}) değerleri gösterilmiştir.

Doğrusal akım denetçilerinin bilgisayarla benzetim sonuçlarına genel olarak bakıldığında, bu denetçilerin akım takibini başarıyla yapmakta olduğu ve PES çalıştırılmadan önce %32.68 olan yük akımı THD_i değerini %12 olan IEEE 519 sınırlarının iyice altına çekmekte olduğu görülür. YH deneteci için THD_i %4.72 olup OK denetçektekinden daha azdır. Bu düzelme denetecinin yük hatasını azaltan bileşeninden kaynaklanmaktadır. Doğrusal denetçilerde OBN'de gerilim bozulmasının belirtilen sınırın üstünde olmasının nedeni ise gerilimin üzerinde anahtarlama kaynağının olmasıdır. THD_v değerleri sistem için ADS tasarımı ile IEEE 519 sınırının altına çekilebilir. Benzetimde doğrusal akım denetçileri için kesikli modülasyon tekniği [6] kullanılmış, böylece taşıyıcı frekansı 20 kHz iken ortalama anahtarlama frekansı (f_{AVG}) 13.33 kHz'e düşürülmüş ve anahtarlama kayıpları azaltılarak ısıl güvenilirlik artırılmıştır.

Histerezis akım denetçilerinin PES uygulamasında başarıma genel olarak bakıldığında, sistemin THD_i'si H1'den H3'e doğru iyileşmektedir. H3'ün THD_i başarımı doğrusal denetçilerle karşılaştırılabilir düzeydedir. Bunun nedeni ise teori kısmında anlatıldığı gibi H3 yönteminde enyüksük anahtarlama frekansı dışında bir sınırlama getirilmemesidir. Böylece H3'ün anahtarlama frekansı 13.75 kHz'e yükselip frekansı 13.33 kHz olan doğrusal denetçilere anahtarlama frekansı bakımından da yakınsamaktadır. Çizelgede görüldüğü gibi histerezis akım denetçilerinde THD_v değerleri doğrusal akım denetçilerine göre biraz daha yüksektir. Bunun nedeni ise histerezis uygulamasında anahtarlama dalgacık akımlarının geniş bir frekans aralığında yer almasıdır. Bu değerler, histerezis akım deneteci için uygun ADS tasarımı ile IEEE 519 sınırının altına çekilebilir [7].

Çizelge 2.

PES'in Akım Denetçilerine Göre Başarımı (f_{max}=20 kHz)

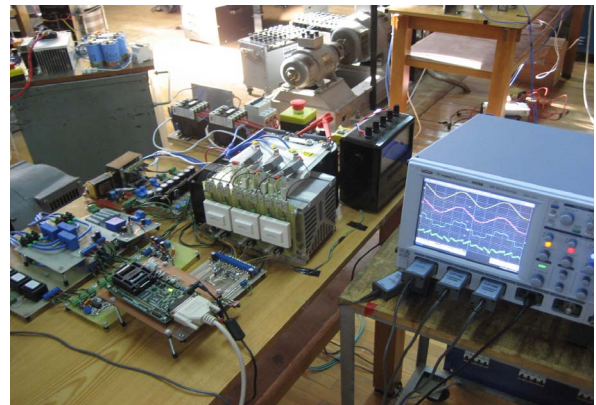
	THD _i (%)	THD _v (%)	PF	f _{AVG} (kHz)
PES'siz	32.68	0.49	0.93	
OK	5.86	3.78	1	13.33
YH	4.72	3.77	1	13.33
H1	10.19	5.14	1	7.50
H2	8.63	4.87	1	8.75
H3	5.89	4.90	1	13.75
IEEE 519	12.00	3.00		

4. DENEY SONUÇLARI

ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Laboratuvarında Şekil 9'da görülen PAF tasarlanıp üretilmiş, çıkış gücü 10 kW olan diyot doğrultucu yükünde denenmiş ve histerezis ve OK akım denetçileri kullanılarak sistemin deneysel başarımı incelenmiştir. Şebeke, yük ve PES deneysel düzenek

parametreleri Çizelge 2'deki bilgisayarla benzetim sistem parametreleriyle aynıdır. Denetim ortamı TMS320C2812 DSP tabanlıdır. Enyüksük anahtarlama frekansı 20 kHz olarak seçilmiştir.

Akım deneteci olarak H3 yöntemi kullanılan PES çalışmaya başladıktan sonra sistemin başarımını gösteren dalga şekilleri "a" fazı ve bir temel şebeke periyodu için Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekillerden PES'in doğrultucu yükün harmonik akım ve tepkin güç gereksinimini karşılamakta olduğu ve DC bara gerilimini 700 V referans değerinde tutabildiği görülmektedir. Sistemin THD_v'si, THD_i'si ve PF'si, PES devreye girmeden önce ve sonra harmonik analizörü ile incelenmiştir. Çizelge 3, PES çalıştırılmadan önce ve PES çalıştırıldıktan sonra OK, H2 ve H3 yöntemleriyle denetleniyorken, harmonik analizör çıktılarını özetlemektedir. H1 yöntemi deneysel çalışmalar sırasında gözlemlenen yüksek dalgacık akımı nedeniyle yetersiz bulunup elenmiştir. Çizelge 3'deki THD_i ve THD_v değerlerinin Çizelge 2'den yüksek olmasının nedeni kullanılan harmonik analizörün yüksek frekanstaki bileşenleri ölçememesidir. Buna göre, PES'in çalıştırılmasıyla THD_i %36.2'ten %3.75'e düşmüş, THD_v %2.35'ten %2.53'e yükselmiş ve PF 0.92 (indüktif) değerinden "1" değerine yükselmiştir. Bu da, diyot doğrultuculu yükte PES'in işlevlerini yerine getirdiğini gösterir. H3'ün THD_i başarımı diğer denetecilerle karşılaştırıldığında, H3'ün başarımının benzetim sonuçlarına paralellik gösterdiği, H2'ninkinden daha iyi olduğu, OK denetecinininkiyle hemen hemen aynı olduğu çizelgeden anlaşılabılır. THD_v değerleri üç deneteciler için de hemen hemen aynıdır. Fakat H3'ü OK denetecinden üstün yapan özelliği ortalama anahtarlama frekansının OK'ninkinden %25 daha az olmasıdır. Bu da H3 yöntemini akım referansı takip ve verimlilik açısından diğer yöntemlerden üstün kılar.

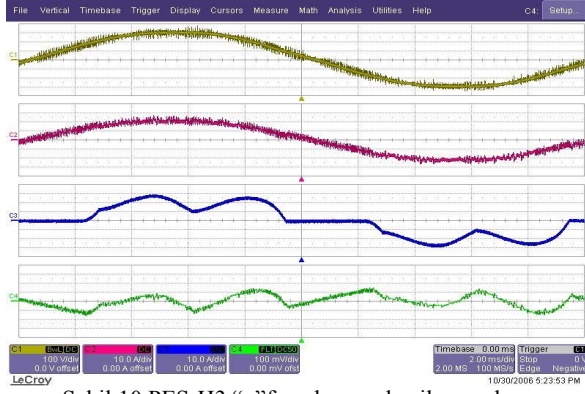


Şekil 9 PES deney düzeneği.

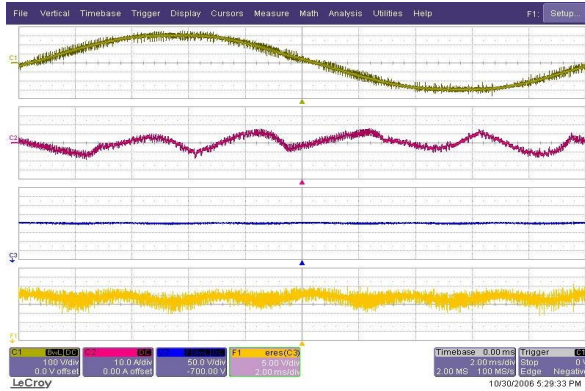
Çizelge 3.

PES Sistemi Deneysel Başarım Sonuçları (f_{max}=20 kHz)

	THD _i (%)	THD _v (%)	PF	f _{AVG} (kHz)
PES'siz	36.20	2.35	0.92	
OK	4.14	2.45	1	13.33
H2	5.35	2.57	0.99	8.35
H3	3.75	2.53	1	10.30
IEEE 519	12.00	3.00		



Şekil 10 PES-H3 “a” fazı deneysel osilogramları:
şebeke gerilimi (sarı), şebeke akımı (kırmızı),
yük akımı (mavi) ve süzgeç akımı (yeşil).

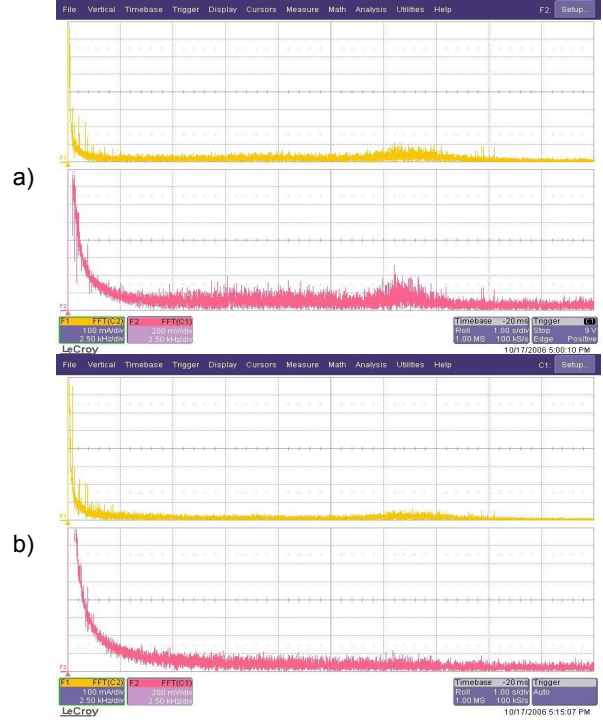


Şekil 11 PES-H3 “a” fazı deneysel osilogramları:
şebeke gerilimi (sarı), süzgeç akımı (kırmızı), DC bara
gerilimi (mavi) ve DC bara dalgacık gerilimi (açık sarı).

PES’in H3 uygulamasında, anahtarlama dalgacık gerilim ve akımlarını süzmek amacıyla histerezis akım denetçileri için en uygun ADS çözümü olan RC tipi bir ADS tasarlanmıştır [7]. Enyüksek anahtarlama frekansı 20 kHz olan H3 için bantgenişliği 2.5 kHz’dir. Bu frekansı ADS’nin kesme frekansı seçerek ve şebeke indüktansını 100 μ H alarak ADS’nin kondansatör değeri $C_V=30 \mu$ F/faz bulunmuştur. Bilgisayar benzetimi yapılarak iteratif yöntemle de sönüm direnci $R_V=2.8 \Omega$ /faz olarak belirlenmiştir. ADS, OBN’ye bağlanmış ve deneysel başarımlar incelenmiştir. Şekil 12, ADS’li ve ADS’siz durumda FFT analizörü ile elde edilen şebeke akım ve geriliminin harmonik spektrumunu göstermektedir. ADS’nin özellikle 12.5-20 kHz arasında yoğun olan yüksek frekans dalgacık akım harmoniklerini başarılı biçimde süzdüğü, böylece OBN’de gerilim üzerinde oluşan yüksek frekans bozulmalarını azalttığı görülmektedir. Bu da tasarlanan ADS’nin görevini yerine getirdiğinin bir göstergesidir.

5. SONUÇ

PES’in yük akımı harmoniklerinin ve yükün temel frekanstaki tepkin güç gereksiniminin kompanzasyon başarımını, onun en temel altbirimi olan akım denetçisinin başarımı belirler. Bu doğrultuda doğrusal ve histerezis akım denetçileri teorik olarak incelenmiştir. Sistemin başarımını eniyileştirmek için



Şekil 12 PES-H3 “a” fazı deneysel FFT osilogramları:
a) ADS’siz sistem şebeke akımı (sarı, 100mA/div) ve
şebeke gerilimi (kırmızı, 200mV/div), b) ADS’li sistem
şebeke akımı (sarı, 100mA/div) ve şebeke gerilimi
(kırmızı, 200mV/div), (yatay eksen 2.5 kHz/div).

histerezis denetçilerde ayrı zamanlı uygulamaya ve bu yaklaşımda yeniliklere gidilmiştir. Önerilen yöntemlerin başarımı PES sisteminin bilgisayarla benzetimiyle incelenmiş, akım denetçilerinin başarımı karşılaştırılmıştır. H3 yönteminin başarımının uygulamada yaygınca kullanılan doğrusal denetçiler ile karşılaştırılabilir nitelikte olduğu ancak daha verimli ve sayısal işaret işleyicide uygulamasının daha basit olduğu gösterilmiştir. PES’in ve önerilen yöntemin başarımı deneysel olarak doğrulanmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] H. Akagi, “Active Filters for Power Conditioning,” *The Electric Power Eng. Handbook*, pp. 14. 45-63.
- [2] S. Bhattacharya, T.M. Frank, D.M. Divan, B. Banerjee, “Active Filter System Implementation,” *IEEE Ind. Appl. Mag.*, pp. 47-63, Sep./Oct. 1998.
- [3] F.Z. Peng, “Application Issues of Active Power Filters,” *IEEE Ind. Appl. Mag.*, pp. 21-30, Sep./Oct. 1998.
- [4] H. Akagi, “Active Harmonic Filters,” *Proc. of the IEEE*, Vol. 93, Issue 12, pp. 2128-2141, Dec.2005.
- [5] A. Nabae, S. Ogasawara, H. Akagi, “A Novel Control Scheme for Current Controlled PWM Inverters,” *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. IA-22, No. 4, pp. 697-701, July/August 1986.
- [6] A.M. Hava, R.J. Kerkman, T.A. Lipo, “Simple Analytical and Graphical Methods for Carrier-Based PWM-VSI Drives,” *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 14, No. 1, pp. 49-61, January 1999.
- [7] A.M. Hava, H. Özkaya, O.S. Şentürk, M. Uslu, “Tübitak Araştırma Projesi, 2. Gelişme Raporu,” Proje No: 104E141, 31 Temmuz 2006.