

# Modern Güç Elektronikleri ile Yüksek Başarılı Enerji Denetimi

Y. Doç. Dr. Ahmet M. HAVA

ODTÜ Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü

*Elektrik enerjisinin şebekedeki biçimi, çoğu tüketici için kullanıma uygun değildir. Bu nedenle şebeke elektriğinin, kullanıcının gereksinimi olan akım ve gerilimin frekans ve şiddet değerine, sürekliliğine, gürültüden arındırılmışlık oranına bağlı olarak şartlandırılması gerekir. Bu işlem GED adı verilen güç elektronik dönüştürücü teknolojisine dayalı ürünler tarafından sağlanır.*

## 1. Güç Elektronikleri Dönüştürücülerin Temel Yapısı ve Uygulama Alanları

Elektrik enerjisi sanayide, ofislerde, evlerde, altyapı tesislerinde vb. modern yaşamın olduğu her yerde faydalı ve verimli bir kaynak olarak kullanılmaktadır. Ancak elektrik enerjisinin şebekedeki biçimi, çoğu tüketici için doğrudan kullanıma elverişli değildir. Kullanıcının gereksinimi olan akım ve gerilimin frekans ve şiddet değerine, sürekliliğine, gürültüden arındırılmışlık oranına bağlı olarak şebeke elektriğinin şartlandırılması gereklidir. Örneğin; elektrik motorları şebekeye doğrudan bağlanıp sürüldüğünde enerji verimleri düşük, hız ayar bölgeleri dar ve şebeke gerilimi bozulmalarına (salınım, çökme, harmonik vb.) duyarlılıkları yüksek olur. DC gerilim ve akım gerektiren kaynak makinesi; telekom güç kaynağı gibi uygulamalarda ise, zaten şebeke elektriği doğrudan kullanılmaz. Elektrik şebekesinden ya da yükten kaynaklı güç kalitesi problemlerinin yaşandığı uygulamalarda da yükler şebekeye

doğrudan bağlanamaz ve şartlandırıcı devrelere gereksinim duyulur. Tüm bu uygulamalarda şebeke ile yük arasına bağlanan şartlandırıcılar her iki tarafta da başarıyı yükseltecek yapıda olmalıdır. Güç elektronikleri dönüştürücü (GED) teknolojisine dayalı ürünler günümüzde modern şartlandırıcılar olarak yaygınca kullanılmaktadır.

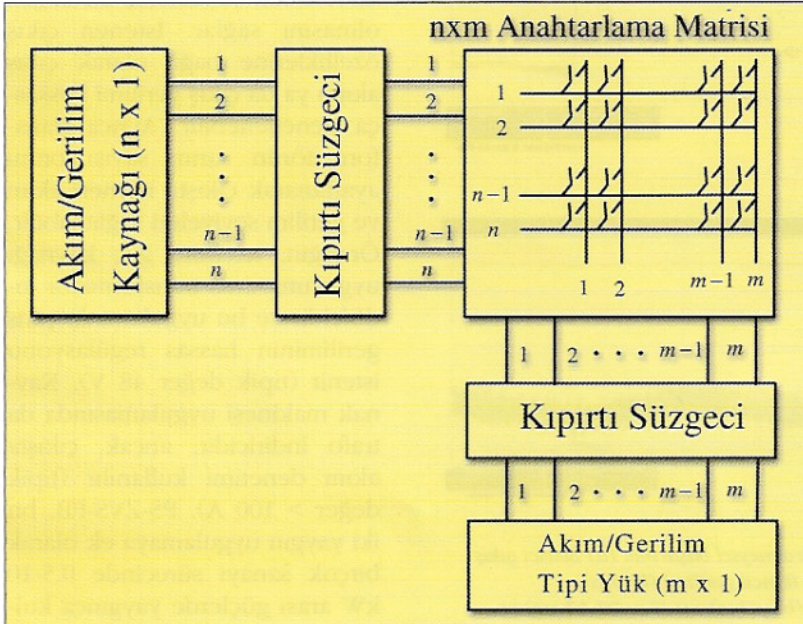
GED'ler IGBT, güç MOSFET'i ve hızlı güç diyotları gibi üstün nitelikli modern güç yarı-iletken anahtarlarını kHz-MHz mertebesinde frekanslarda açıp kapayarak elektrik enerjisini küçük, ama sıkı denetlenebilir parçalar halinde devreler arasında yüksek başarıyla aktarır. Anahtarların açılıp kapanması ve bu yolla enerji aktarımı için akıllı denetim ve anahtarlama yöntemleri kullanılarak istenilen akım ve gerilim regülasyonunun yapılması, enerjinin verimli ve en az gürültülü olarak taşınması (şartlandırılması) sağlanır. Bu üstün nitelikleri sayesinde GED teknolojisi, modern enerji sistemlerinin önemli ve kaçınılmaz bir parçasıdır. Üretimden nihai tüketime

kadarki aşamada, dünyada üretilen elektrik enerjisinin yarısından fazlası GED'ler üzerinden geçmekte ve şartlandırıldıktan sonra kullanılmaktadır.

GED'ler DC/DC, DC/AC, AC/AC ve AC/DC olmak üzere dört sınıfta toplanır. Uygulama gereksinimine bağlı olarak bu dönüştürücülerden en az biri ya da birkaçı ardışıl bağlanarak şartlandırma yapılır. Modern GED'lerin temel devresi, tipik olarak kHz üstü frekansta anahtarlanabilen Şekil 1'de gösterilen anahtarlama matrisidir ve bu devre enerji depolama birimleri içermez. Ancak matrisin giriş ve çıkışlarındaki darbeler halindeki akım ve gerilim dalgalarının yumuşatılması için devrenin giriş ve çıkış taraflarına pasif kırırtı süzgeçleri yerleştirilir. Anahtarlama en yaygın yöntem darbe genişlik modülasyonudur. (DGM) ve bu yöntemde, gerilim/akım darbe-

**GED'ler IGBT, güç MOSFET'i ve hızlı güç diyotları gibi üstün nitelikli modern güç yarı-iletken anahtarlarını kHz-MHz mertebesinde frekanslarda açıp kapayarak elektrik enerjisini küçük, ama sıkı denetlenebilir parçalar halinde devreler arasında yüksek başarımla aktarır**

lerinin şiddeti sabit olup sıklığı değiştirilerek devrede akım/gerilim regülasyonu yapılır. Anahtarlama frekansı ne kadar yüksek olursa süzgeç boyutu da o kadar küçülür. Ancak anahtarlama kayıpları da artar. Yüksek güçlerde, enerji verimi daha önemli hale geldiğinden güç arttıkça anahtarlama frekansı azalır (1 kW'ta 100 kHz, 100 kW'ta 10 kHz, 1 MW'ta 1 kHz'den az).



Şekil 1: Güç elektroniği dönüştürücülerinin anahtarlama matrisli temel yapısı

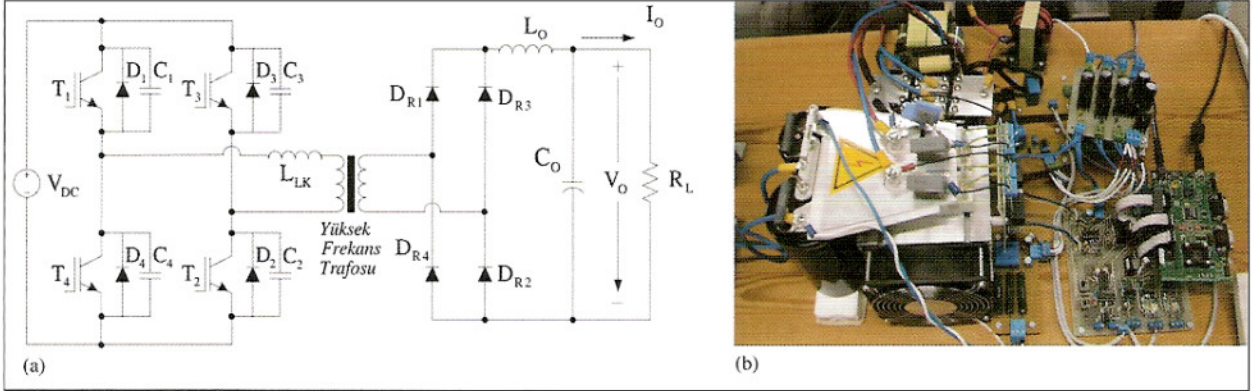
Böylece küçük boyutlu, ekonomik ve enerji verimi yüksek (tipik olarak 100 kW'ta yüzde 95'in üzerinde verim) güç şartlandırıcıları/kaynakları elde edilir.

Uygulamada en yaygın kullanılan GED'ler, DC/DC güç kaynakları (switch mode power supply, SMPS), kesintisiz güç kaynakları (KGK), AC motor hız ayarlı sürücüler (HAS) ve güç kalitesi düzeltiminde kullanılan paralel etkin süzgeçlerdir (PES). Tüm bu GED'ler Türkiye'de yaygınca kullanılmakta ve bunlardan özellikle modern teknolojiye dayalı KGK'la Türkiye'de de üretilmektedir. Diğer GED'lerde kullanım boyutu büyük olmakla beraber yerli üretim ve teknoloji yeterince gelişmemiştir.

ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümündeki GED araştırma grubunda (GEDAG), modern GED'ler konusunda yoğun araştırmalar yapılmakta ve özgün teknolojiler geliştirilmektedir. Bu makalede GEDAG'da geliştirilen teknolojilerden kesitler verilecektir. Sanayide kullanım potansiyeli yüksek olan bu modern teknoloji dönüştürücülerin temel özellikleri, özgün yanları ve kullanım alanları anlatılacaktır.

## 2. ODTÜ-GEDAG Uygulamalı GED AR-GE Projelerinden Kesitler

**2.1 Faz-kaymalı, sıfır gerilimde anahtarlama, tamdenetimli köprü (PS-ZVS-FB) DC/DC dönüştürücü:** PS-ZVS-FB dönüştürücünün temel devre yapısı Şekil 2(a)'da gösterilmek-

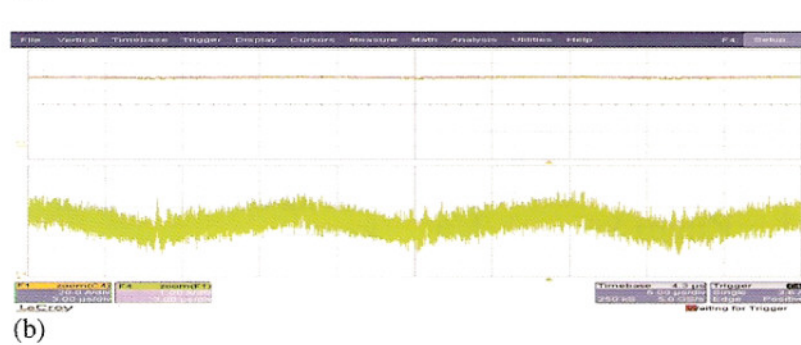
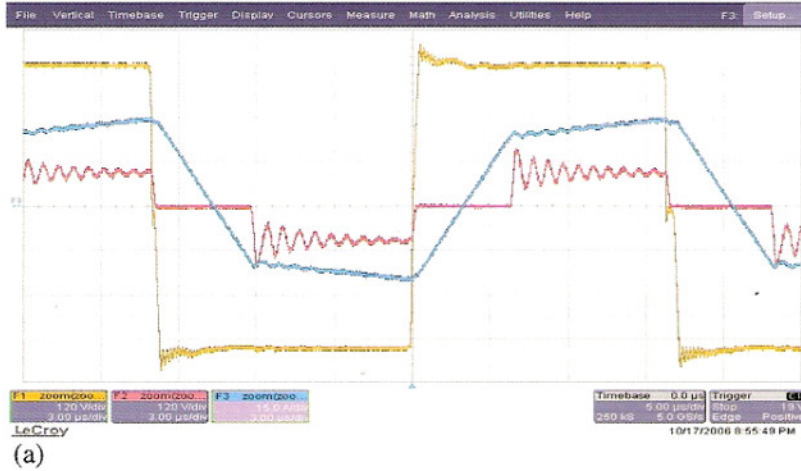


Şekil 2. PS-ZVS-FB DC/DC dönüştürücü temel devre diyagramı (a) ve 5 kW prototipi (b)

tedir. Devrenin temel özelliği yüksek frekansta kare dalga modunda çalışması ve sıfır gerilimde (yumuşak) anahtarlama yap-

masıdır. Temel güç elektroniği devresi, DC/AC dönüştürücü (evirici), transformator ve AC/DC dönüştürücüden (doğ-

rultucudan) oluşmaktadır. Dolayısıyla devre, iki anahtarlama matrisi ve aralarında galvanik yalıtım sağlamak için gerekli olan yüksek frekans transformatorü arka arkaya bağlanarak elde edilir. Transistörler yumuşak anahtarlандığından, hem anahtarlama kayıpları çok az (dolayısıyla verim çok yüksek) hem de elektromanyetik gürültü düşük olur. Anahtarlama frekansının yüksek olması, yalıtım transformatorünün boyutunun da küçük olmasını sağlar. İstenen çıkış özelliklerine bağlı olarak çıkış akımı ya da çıkış gerilimi hassasça denetlenebilir. Ayrıca transformatorün sarım sayısı oranı ayarlanarak çıkışta istenen akım ve gerilim seviyeleri sağlanabilir. Örneğin; telekom güç kaynağı uygulamasında transformator indiricidir ve bu uygulamada çıkış geriliminin hassas regülasyonu istenir (tipik değer 48 V). Kaynak makinesi uygulamasında da trafo indiricidir; ancak, çıkışta akım denetimi kullanılır (tipik değer > 100 A). PS-ZVS-FB, bu iki yaygın uygulamaya ek olarak birçok sanayi sürecinde 0.5-10 kW arası güçlerde yaygınca kullanılır. Bu teknolojiye dayalı 1-2



Şekil 3. PS-ZVS-FB DC/DC dönüştürücü tam yük deneysel başarımı: (a) Evirici çıkış gerilimi (sarı), trafo birincil akımı (mavi), trafo ikincil gerilimi (kırmızı), (120 V/kare, 15 A/kare, 120 V/kare, 3 µs/kare), (b) yük akımı (üst, 20 A/kare) ve ayrıntılı görünümü (alt, 1 A/kare, 3 µs/kare)

kW'lık güç kaynakları Türkiye'de üretilmektedir. Ancak artan güçlerde ve özellikle yumuşak anahtarlama teknolojisi, Türkiye'de henüz geliştirilmemiştir. ODTÜ-GEDAG'da portatif kaynak makineleri için tek fazlı şebekeye bağlı PFC devresinden sağlanan 400V DC baradan beslenen 5 kW, 100 A çıkışlı ve 50 kHz frekansta yumuşak anahtarlama bir PS-ZVS-FB DC/DC dönüştürücü geliştirilmiş ve deneysel başarımları değerlendirilmiştir. Çalışmada, ayrıca özgün bir tasarım yaklaşımı ile devrenin manyetik elemanları ve devrede sıfır gerilimde anahtarlama bölgesini tanımlandığı için, kritik olan kondansatörlerin kolayca boyutlandırılması olanaklı hale gelmiştir [1]. Geliştirilen analitik/algoritmik tasarım yöntemi, geleneksel deneme-yanılma yönteminden daha hızlı ve daha doğru sonuç vermektedir. Şekil 2(b)'de geliştirilen dönüştürücünün laboratuvar prototipi gösterilmektedir. Devrede çalışma akımı ve gerilim değerleri dikkate alınarak IGBT yarı-iletkenler kullanılmıştır.

Devre TMS320F2808 DSP yongası ile ayrı zamanlı denetlenmekte ve DGM işaretleri de EPWM birimi ile kolayca üretilebilmektedir. Şekil 3'te devrenin tam yükte çalışırken akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Geniş bir yük bölgesinde sıfır gerilimde anahtarlama sayesinde devre yüksek verimle çalışır. Deneylerde tam yükte yüzde 91, yarı yükte yüzde 85 verim ölçülmüştür. Devre akım regülasyonu yapıyorken, çıkış akımındaki kırıltı tam yükte yüzde

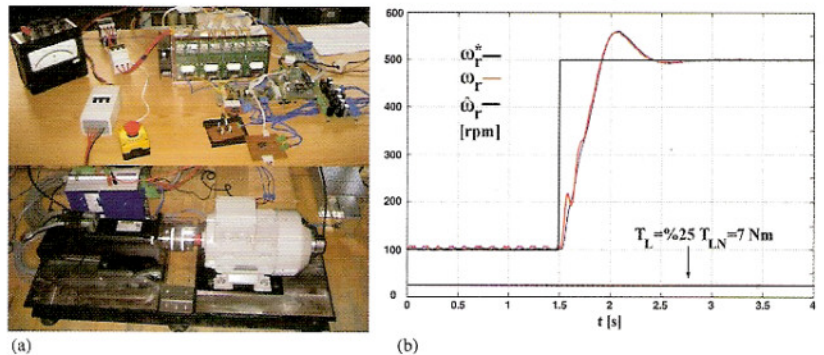
**ODTÜ-GEDAG'da portatif kaynak makineleri için tek fazlı şebekeye bağlı PFC devresinden sağlanan 400V DC baradan beslenen 5 kW, 100 A çıkışlı ve 50 kHz frekansta yumuşak anahtarlama bir PS-ZVS-FB DC/DC dönüştürücü geliştirilmiş ve deneysel başarımları değerlendirilmiştir**

1'den azdır. Yapılan AR-GE çalışmasında kazanılan bilgi ve edinilen deneyim, bu teknolojiye dayalı ürünlerin geliştirilmesini kolaylaştırıcıdır.

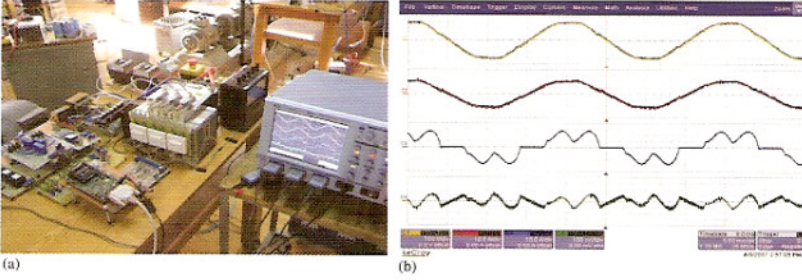
**2.2 AC motor hız ayarlı sürücüler (HAS):** Sanayide kullanılan elektrik enerjisinin yüzde 65'ten fazlası AC elektrik motorlarında tüketilir. AC motorların şebeke yerine HAS'lardan beslenme durumunda, hem enerji verimi hem de hareket denetim başarımları olağanüstü artar. Bu sebeple HAS'lar yaygınlaşmaktadır ve sadece Türkiye'deki pazarı yıllık 100 milyon YTL düzeyin-

dedir. HAS'ların çok büyük bir çoğunluğunun devresi, şebeke gerilimini diyotlu doğrultucu ile DC gerilime dönüştüren ve ardından bu DC gerilimi çıkış frekansı ve şiddeti serbestçe ayarlanabilen gerilim kaynaklı evirici ile AC'ye dönüştüren arka arkaya bağlanmış iki anahtarlama matrisinden oluşur. Türkiye'de HAS üreten yerli firmalar bulunmakla beraber, bunların sayıları azdır. Ticari hacimleri ise, yerli pazarın sadece küçük bir kısmını karşılayabilmektedir. HAS'ın donanım karmaşası ve zorluğundan çok, denetim algoritmaları teknolojisindeki bilgi yayıflığından dolayı, bu alanda yerli üretimde yeterince başarı sağlanamamıştır.

AC motorların hız duyargası (encoder) kullanmadan hassas hız ayarı yapması gereksinimini karşılamak, teknolojik zorluklar ifade eder. Sıfır hızda rotorda EMF olmadığından çoğu hız kestirim yöntemi başarısızdır. Dolayısıyla sıfır hızda duyargasız hassas hız kestirim yeteneği olan teknolojilerin AR-GE'sinin Türkiye'de yapılması, piyasadaki yerli ürünlerin payının artması için zorunlu-



Şekil 4: HAS prototipi (a) ve uyarılma kestirimli, vektör denetimli motorun hızlanması (b)

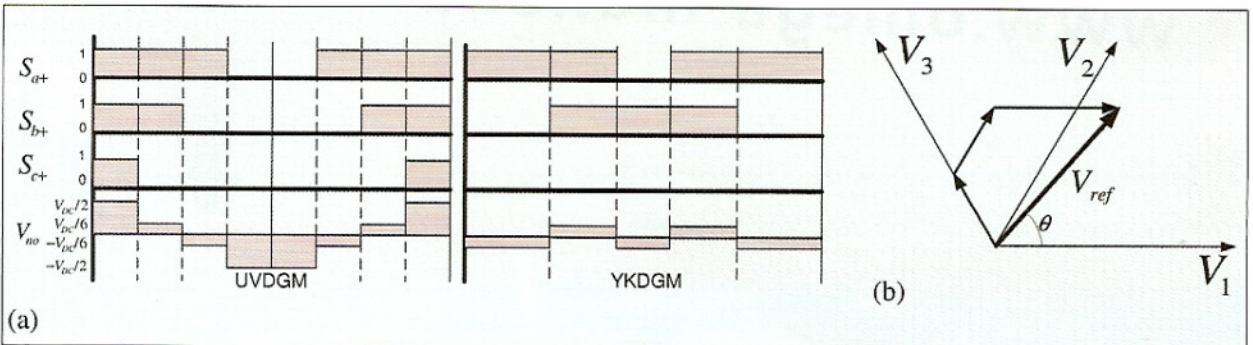


Şekil 5: PES prototipi (a) ve tek-faz deneysel dalga şekilleri (yukarıdan aşağıya: şebeke gerilimi, şebeke akımı, yük akımı, PES akımı, 100V/kare, 10A/kare, 5ms/kare) (b)

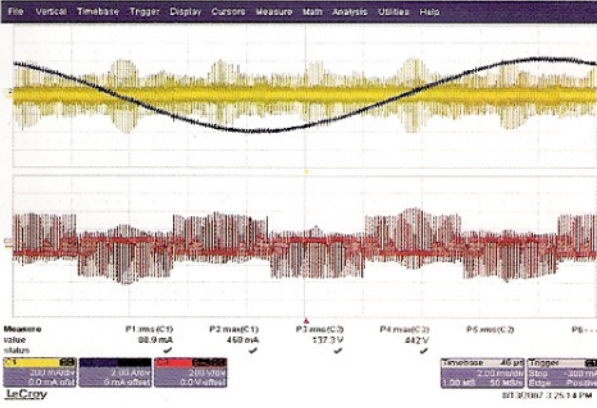
dur. Bu amaçla ODTÜ-GEDAG hız duyargasız motor hız kestirimi ve hız denetimi konusunda araştırmalar yapmaktadır. Araştırmada, asenkron ve sürekli mıknatıslı senkron motorlar için düşük hızda (anma hızının yaklaşık yüzde 10'u) hız kestirimi için yüksek frekansla uyarma yöntemi; yüksek hızda da uyarlamalı (adaptive) hız kestirim yöntemi kullanılmaktadır. Hız denetiminde vektör denetim yöntemi uygulanmakta ve DSP ile denetim yapılmaktadır. Şekil 4(a)'da 4 kW HAS sistemi laboratuvar prototipi görülmektedir. Şekil 4(b)'de ise, AC motorun sabit ivme (basamak hız) isteğine hız tepkisi ve uyarlamalı yöntemle hız kestiriminin yüksek başarımı görülmektedir. Ölçülen hız ve kestirilen hız üstüste olup, hata sifıra yakındır.

**2.3 Harmonikli yükler için paralel etkin süzgeç (PES):** HAS, KGK ve SMPS gibi elektronik yüklerin giriş katlarındaki diyotlu/tristörlü doğrultucular, harmonik akımları ve tepkin güç çeker. Şebekeye ortak bağlanma noktasında (OBN), gerilim bozulması ve dağıtım hatlarında gerilim düşümü/enerji kayıpları yaratıp, komşu yüklerle etkileşerek kendinin ya da komşu yüklerin işlevlerini kaybettirecek kadar güç kalitesini bozarlar. Bu sorunların en modern çözümü, harmonik akım kaynaklı yükün harmoniklerini ve temel frekansdaki tepkin gücünü karşılayan PES'tir. PES'in güç devresinde, genellikle DC barasında kondansatör kullanılan gerilim kaynaklı evirici kullanılır. Evirici çıkışı OBN'ye seri indüktans süzgeç üzerinden bağlanır. Dene-

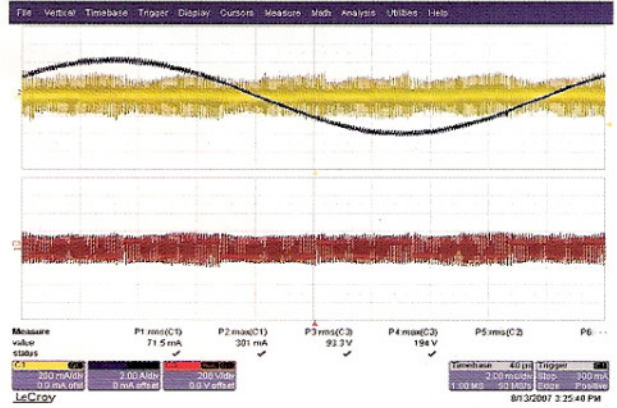
teç, ölçülen yük akımından bozucu işaretleri ayrıştırma birimi ile akım programlama biriminden oluşur. Ayrıştırıcıda FFT veya senkron eksenlerde süzme yöntemleri kullanılarak akımın bozucu bileşenleri hesaplanır ve PES akım denetecine referans değer olur. Hızlı algoritmalarla donanmış olan akım deneteci, gerilim kaynaklı eviriciye DGM işaretleri uygulayarak, eviricinin IGBT anahtarlarını sürer ve bu referans değerini sağlar. Böylece yük akımının bozucu bileşenleri PES tarafından sentezlenip OBN'ye uygulanır ve şebekeden bir güç katsayılı sinüs akım çekilerek şebekede güç kalitesi yükseltilir. GEDAG'da etkin süzgeçler konusunda araştırmalar yapılmakta ve özgün işaret ayrıştırma ve akım denetim yöntemleri geliştirilmektedir. PES için geliştirilen DHCR3 hızlı akım denetim algoritmasını [2] doğrulamak amacıyla, üç fazlı 10 kW'lık diyotlu doğrultucu girişli yük (harmonik akım kaynağı) için bir PES prototipi tasarlanmış, imal edilmiş ve deneysel başarımı incelenmiştir. Şekil 5(a)'da gösterilen, DC bara gerilimi, 700 V ve anahtarlama frekansı 20 kHz olan IGBT eviricili PES TMS320F2812 DSP ile denetlen-



Şekil 6: UVDGM ve YKDG M darbe şablonu (üst) ve OMG (alt) (a) ve YKDG M vektör diyagramı (b)



(a)



(b)

Şekil 7: UVDGM (a) ve YKDGM (b) ile motor faz akımı (mavi, 2 A/kare) ve OMA (üst, 200 mA/kare), OMG (alt, 200 V/kare) (2 ms/kare)

miştir. Şekil 5(b)'deki dalga şekilleri, harmonikli yük tam yük değerinde çalışırken PES'in yüksek başarımla düzeltim yaptığını göstermektedir. Şebeke akımı, gerilimle aynı fazdadır (güç katsayısı 0.997) ve saf sinüse yakın dalga şekli ile akımın toplam harmonik bozulması yüzde 4,1 olup, IEEE-519 gibi güç kalitesi standartlarındaki en sıkı sınır olan yüzde 5'ten azdır.

**2.4. HAS'larda ortak mod gürültüsünün azaltımı:** HAS'lar da evircinin ürettiği DGM gerilimler, yüksek frekanslı ve dik uçlu darbelerden oluşur. Bu darbeler motor üzerinde olumsuz etkiler yaratır. Uygulamada, anahtarlama anında değişim hızı yüksek olan ortak mod gerilimi (OMG), motorda büyük şiddette kaçak akımlara [ortak mod akımı (OMA)] sebep olur. OMG ve OMA; motor rulmanlarında bozulmalara, HAS'ın elektronik devrelerinin girişim sonucu aldığı hatalı işaretlerden kaynaklı hatalı HAS kesilmelerine; benzer biçimde çevredeki elektronik yüklerin bu gürültüleri kapması sonucu bozulmalarına, işlev kayıplarına vb. sorunlara yol açar.

ODTÜ-GEDAG, HAS'larda OMG ve dolayısıyla OMA'yı azaltıcı yakın komşu DGM (YKDGM) yöntemini geliştirmiştir. YKDGM bir süreksiz DGM yöntemi olup, yöntemde her DGM periyodunda fazlardan biri DC baranın artı ya da eksi terminaline kilitlenirken; diğer iki fazda anahtarlama yapılır. Her 60°'de bir kilitlenen fazın sırası değişir. Bu yöntemin bir DGM periyodundaki anahtar işaretleri ve karşılık gelen OMG Şekil 6(a)'da verilmiştir (karşılaştırma amacıyla geleneksel Uzak Vektör DGM (UVDGM) işaretleri de gösterilmiştir). Şekil 6(b)'de aktif uzay vektörleri V1V2V3 setinden YKDGM'nin üretilişi gösterilmektedir. Gerilim doğrusalık bölgesinde YKDGM'de anahtarlama kayıpları (süreksiz DGM'den dolayı) ve anahtarlama kıpırtıları azdır.

YKDGM'de  $OMG \pm V_{dc}/6$  değerlerini almaktayken, UVDGM yönteminde  $\pm V_{dc}/2$  değerli yüksek OMG oluşmaktadır. Şekil 7'de UVDGM ve YKDGM yöntemlerinin akım ve gerilim dalga şekilleri gösterilmiştir. YKDGM, OMG ve OMA'yı belirgin biçimde azaltmaktadır.

### 3. Sonuç

Modern yüksek frekans anahtarlama güç elektroniği dönüştürücüleri, enerjinin yüksek verim ve başarımla şartlandırılmasını sağlar. Hızla gelişen bu teknoloji, Türkiye'de de yaygın kullanım bulmaktadır. Bu çalışmada, güç elektroniği dönüştürücüleri alanında, ODTÜ-GEDAG'ın araştırmalarından kesitler sunulmuştur. GEDAG, sanayi ile işbirliği yaparak bu teknolojileri geliştirip ürüne dönüştürmeyi hedeflemektedir. Grubun araştırmaları hakkında ayrıntılı bilgilere [4]'den ulaşılabilir.

### Kaynakça

- [1] M. Uslu, "Analysis, Design, and Implementation of a 5 kW Zero Voltage Switching Phase-shifted Full-bridge DC/DC Converter Based Power Supply for Arc Welding Machines," Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2006.
- [2] H. Özkaya, O. S. Şentürk, A. M. Hava, "Performance Enhancement and Comparison of Discrete Time Current Regulators for Parallel Active Filters," EPE 2007 Conference, Aalborg, Denmark, September 2007, ISBN: 9789075815108.
- [3] E. Ün ve A. M. Hava, "A Near State PWM Method with Reduced Switching Frequency and Reduced Common Mode Voltage For Three-phase Voltage Source Inverters," IEEE-IEMDC 2007 Conference, Antalya, Turkey, May 3-5 2007, Vol.1, pp. 235-240.
- [4] ODTÜ-GEDAG websitesi: [www.eee.metu.edu.tr/~hava/gedag.html](http://www.eee.metu.edu.tr/~hava/gedag.html).



# 3e ELECTROTECH

SAYI: 169 AYLIK ENERJİ, ELEKTRİK, ELEKTRONİK TEKNOLOJİLERİ DERGİSİ

TEMMUZ 2008/07 FİYATI: 5 YTL

**DOSYA**  
**JENERATÖR**

**Elektrikte**  
**Otomatik Zam**  
**Uygulaması**

**PRİZ**  
**deyip**  
**geçmeyin**

**Yüksek**  
**Verimli**  
**AC Motorlar**

**elektronik-elektrik** **DOSYA**  
**sayaçlar**

**BİLESİM**  
YAYINCILIK A.Ş.

**WIN**  
World of Industry  
**ELECTROTECH'09**  
10. Enerji, Elektrik ve Elektronik Teknolojileri Fuarı  
**26 Şubat-1 Mart 2009**  
Tüyap Fuar ve Kongre Merkezi Beylikdüzü-İstanbul