

Dört Bacaklı Eviricinin KGK Uygulamasında Modülasyon Yöntemleri

Eyyup Demirkutlu

Süleyman Çetinkaya

Ahmet M. Hava¹

ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
İnönü Bulvarı 06531 Ankara

edemirkutlu@yahoo.com suleyman.cetinkaya@gmail.com hava@metu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Dört bacaklı evirici, Kesintisiz güç kaynağı, KGK, PWM, DGM, modülasyon, dengesiz yük

ABSTRACT

In this paper¹ the four-leg inverter and its uninterruptible power supply (UPS) application are investigated. The standard three-leg inverter and the four-leg inverter are compared and the superiority of the latter is shown. Simple scalar modulation methods for the four-leg inverter are described and implemented. A 5-kVA, 220-V, 50-Hz UPS system employing the four-leg inverter is simulated and performance of the modulation methods for balanced and unbalanced loads is demonstrated. Experimental work supplements the theory and simulations.

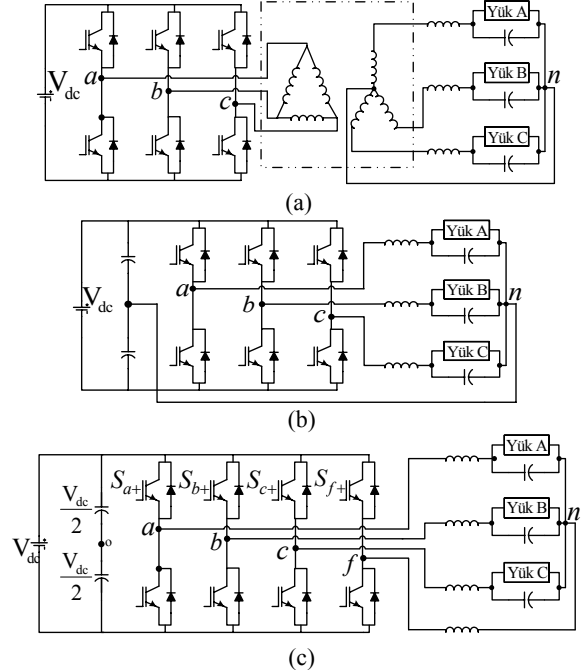
1. GİRİŞ

Eviriciler motor sürücü ve kesintisiz güç kaynağı (KGK) gibi DC/AC güç dönüşümü uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Üç-faz motor sürücü uygulamalarında genellikle standart üç-bacaklı ve iki-düzeltilmiş evirici (orta nokta bağlantısız) kullanılır. KGK uygulamalarında ise yük için nötr iletkeni de gerektiğinden üç-bacaklı evirici yetersiz kalır. Bu nedenle Δ/Y ya da Δ/Z transformatör kullanılıp ikincil sargıların ortak (yıldız) bağlantı noktasından yapay nötr oluşturulur (Şekil 1.a). Bazı uygulamalarda transformatörün galvanik yalıtım özelliğinden de faydalanılır. Ancak transformatör, boyutu, ısı kayıpları ve maliyeti nedeniyle istenmez. Bundan da öte, yükün faz-nötr dengesizlik akımlarını (sıfır bileşen akımını) üç bacaklı eviriciden karşılamak olanaksız olduğundan çıkış geriliminde kısmi bozulma kaçınılmazdır ve ancak pasif süzgeçlerin büyütülmesi yolu ile gerilim bozulması bastırılabilir. Dolayısıyla, üç bacaklı klasik evirici (Şekil 1.a) teknolojik olarak KGK uygulamaları için yetersizdir.

Üç-bacaklı orta nokta bağlantılı evirici esas olarak yarım köprü evirici özelliğini taşır (Şekil 1.b). Yükün yıldız noktası eviricinin DC bara orta noktasına doğrudan bağlanır ki, bu uygulamada galvanik yalıtım söz konusu değildir. Ancak yükün tek-faz dengesizlik akımı, yani nötr akımı artık orta nokta üzerinden yolunu kapatabilir. Ayrıca transformatörün olmaması da enerji verimi artışı, boyut ve maliyet azalmasını ve güvenilirliğin artmasını ifade eder. Bu yaklaşımda DC bara gerilimi çok yüksek olur (220Vrms çıkış için 2x400V DC bara gerilimi) ve dolayısıyla aşırı yarı-iletken anahtar gerilimi ve güç kaybı olur. Ek olarak nötr akımı dengesizlik durumunda kondansatörleri

yıpratır ve orta nokta gerilimini dalgalandırır. Dolayısıyla deneteci, modülatörü ve yapısı basit olan bu eviricinin de sakıncaları vardır.

Dört bacaklı evirici (DBE) (Şekil 1.c) hem düşük DC bara gerilim gereksinimi, hem DC barada ortak bağlama noktasının olmaması ve kondansatör ve aküleri yıpratmaması sayesinde üstün özelliklere sahip olup KGK uygulamalarında yer bulmaktadır [1]. Dördüncü bacak nötr akımına yol sağlayıp, dengesiz yükte dahi KGK çıkış gerilimlerinin dengelenmesine olanak sağlanmaktadır. Ancak DBE’de yapı karmaşası nedeniyle modülasyon ve denetim zordur. Bu çalışmada DBE incelenerek, modülasyon yöntemleri ele alınacak, bilgisayar benzetimleri ile KGK uygulamasında başarımı ispatlanacak ve son olarak deneysel çalışmalarla sonuçlar doğrulanacaktır. Deneysel ortamda DSP tabanlı denetçi kullanılarak basit modülasyon ve denetim yöntemleri uygulayarak DBE’nin KGK sistemlerinde kolayca gerçekleştirilebilirliği ispatlanmış olacaktır.



Şekil 1 Üç fazlı dört çıkış iletkenli evirici devre topolojileri; (a) Δ/Y trafolu, (b) üç bacaklı, (c) dört bacaklı evirici.

2. MODÜLASYON YÖNTEMLERİ

Üç fazlı DBE’li KGK’nın denetiminde çıkış gerilimi deneteci, evirici referans gerilimlerini (V_{af}^* , V_{bf}^* , V_{cf}^*) üretir. Modülatör bu gerilimleri evirici çıkışında üretmek için gerekli anahtarlama komutlarını verir.

¹ Bu çalışma TÜBİTAK EEE Araştırma Grubu tarafından 104E009 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Gerilim kaynaklı eviricilerde, darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile yüksek frekanstaki gerilim darbelerinin sıklığı denetlenerek istenilen şiddet ve frekansta çıkış gerilimi üretilir. DGM’de temel kural, referans ve çıkış volt-saniye değerlerinin her anahtarlama periyodunda eşit yapılması ve harmoniği ve anahtarlama sayısı az olan bir darbe şablonunun uygulanmasıdır [2]. DGM skaler veya vektör yaklaşımıyla gerçekleştirilebilir. DBE’de DGM önce vektör yaklaşım [3] sonrasında ise daha basit yapıdaki skaler yaklaşım ile uygulanmıştır [4]. Bu çalışmada da önce vektör sonra skaler yaklaşım ele alınacaktır.

2.A. Vektör Modülasyon Yöntemi

Vektör yaklaşımında üç fazlı değişkenler (1) kullanılarak vektör büyüklüklere dönüştürülür ve (2)’deki gibi üç boyutlu α - β - γ koordinatlarındaki bir karmaşık sayı ile gösterilir. Burada j ve k sırasıyla β ve γ eksenlerinde birim sanal sayılardır.

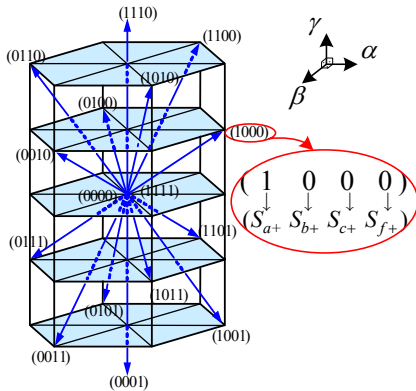
$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_\gamma \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{V} = V_\alpha + jV_\beta + kV_\gamma \quad (2)$$

DBE’de her bacak için iki anahtar durumu (0 ve 1) söz konusu olduğundan, karmaşık düzlemde evirici gerilim vektörlerinin sayısı $2^4=16$ olur. Bu vektörler Şekil 2’de α - β - γ koordinatlarında gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, 14 adet etkin vektör ve merkezde 2 adet sıfır vektör elde edilir. Evirici faz referans gerilimleri de aynı biçimde vektöre dönüştürülür. Vektör DGM yaparken referans ve çıkış volt-saniye değerlerinin eşitlenmesi gerekir. En az harmonik bozulmayı sağladıklarından uç noktaları referans vektöre en yakın komşu olan evirici gerilim vektörleri seçilir. Böylece referans ve çıkış volt-saniye değerlerini eşitleyen (3) karmaşık sayı denkleminde ve vektörlerin zaman kısıtlamasını belirleyen (4) skaler denkleminde vektörlerin çalışma süreleri bulunur.

$$V_{ref} \cdot T = V_1 \cdot t_1 + V_2 \cdot t_2 + V_3 \cdot t_3 + V_s \cdot t_s \quad (3)$$

$$T_S = t_1 + t_2 + t_3 + t_s \quad (4)$$

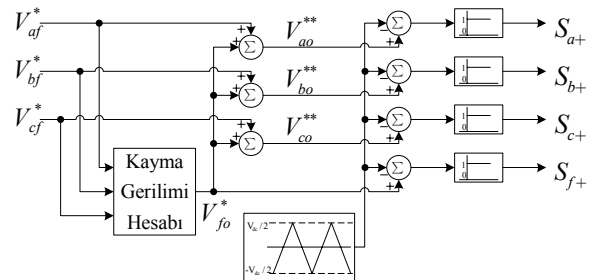


Şekil 2 α - β - γ koordinatlarında anahtarlama vektörleri.

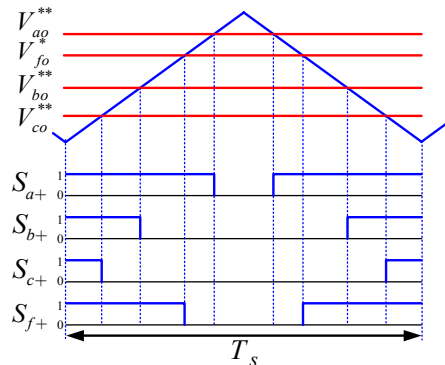
Eşitlik (3)’te ve (4)’te V_{ref} ve T_S referans gerilim vektörü ve DGM periyodu, V_1, V_2, V_3 seçilen etkin evirici vektörleri ve V_s sıfır gerilim vektörüdür. Bunlara karşılık olan t_1, t_2, t_3 ve t_s çalışma zamanlarının belirlenmesinden sonra vektörlerin uygulanış sıraları en az anahtarlama ve en az harmonik üretme ölçütleriyle eniyileştirilir. Vektör seçiminde komşu vektörlerin belirlenmesinde ilk adım evirici altıgen prizmasının 60° ’lik dilimlerinin tanımlanmasıdır. Her dilim dört adet düzgün dörtüzlüden oluşur (toplam 24 adet). Referans gerilim vektörü hangi düzgün dörtüzlünün içinde ise o dörtüzlünün üç etkin vektörü ve sıfır vektörleri kullanılır [3]. Bu süreç çok işlem gerektirdiğinden uygulanması zorluklar içerir. Bu nedenle DBE’nin uygulanması için daha pratik yaklaşımlar gereklidir ve skaler yöntem bu bakımdan üstündür.

2.B. Skaler Modülasyon Yöntemi

Skaler modülasyon yönteminde sistem deneteci tarafından üretilen $V_{af}^*, V_{bf}^*, V_{cf}^*$ referans gerilimleri DC baranın orta noktası olan “o” noktasına göre faz başına $V_{ao}^{**}, V_{bo}^{**}, V_{co}^{**}$ ve V_{fo}^* referans gerilimlerine dönüştürülerek tepe değerleri $\pm V_{dc}/2$ olan üçgen taşıyıcı dalga ile karşılaştırılır ve kesişme noktalarında anahtarlama yapılır. $V_{af}^*, V_{bf}^*, V_{cf}^*$ referans gerilimleri a, b ve c noktalarının f noktasına göre gerilim değerleri olduğundan, bu noktaların gerilimlerinin f ’ye göre değerlerini değiştirmemek koşuluyla, f ’nin gerilimi V_{fo} özgürce seçilebilir. Dolayısıyla V_{fo}^* özgürce kaydırılabilir (Şekil 3) ve anahtarlama şablonu belirlenir (Şekil 4). Ancak V_{fo}^* kaydırılırken çıkış gerilimi doğrusallığının korunması gerekir ve bunun için V_{fo}^* ’nun değeri $V_{af}^*, V_{bf}^*, V_{cf}^*$ ’ye eklendiğinde elde edilen V_{ao}^{**}, V_{bo}^{**} ve V_{co}^{**} değerleri $\pm V_{dc}/2$ sınırlarını aşmamalıdır.



Şekil 3 DBE’de skaler modülasyon blok diyagramı.



Şekil 4 DBE’de anahtarlama diyagramı.

Sadece gerilim doğrusallığı sınırlaması uygulandığında V_{fo}^* 'nın gerçekleştirilebilirlik bölgesi geniş olur. Dolayısıyla V_{fo}^* seçenekleri sonsuzdur ve bu seçenekler evirici başarımının eniyileştirilmesi için kullanılabilir. Kayma geriliminin sıfır yapılması ile faz başına gerilim $V_{dc}/2$ ile sınırlı olacağından KGK uygulamasında bu seçenek evirici kullanımının zayıf olması anlamına gelip tercih edilmez. Bu yöntemde sinüsoidal DGM (SDGM) yöntemi denir. Pratikte iki seçenek iki farklı önemli ölçüte göre eniyi sonucu vermektedir ve bu nedenle ayrıntılı inceleneceklerdir.

2.B.1. Sürekli Modülasyon ve Uzay Vektör Modülasyon Yöntemi (UVDGM): Bu yöntemde V_{fo}^* karşılaştırma yapılarak üretilir ve V_{af}^* , V_{bf}^* , V_{cf}^* arasında en dıştaki ikisinin toplamının tersinin yarısıdır; $V_{fo}^* = -(V_{min}^* + V_{max}^*)/2$. Elde edilen modülasyon dalgaları V_{ao}^{**} , V_{bo}^{**} ve V_{co}^{**} sürekli olup [3]'te önerilen uzay vektör yaklaşımındaki anahtarlama şablonun aynısını üretirler. Dolayısıyla yöntem UVDGM yöntemi denir. UVDGM'de kararlı periyodik halde V_{fo}^* üçgensel dalga biçimlidir. UVDGM'nin özelliği çıkış geriliminin ve dolayısıyla çıkış akımının dalgacığının en az olmasıdır. Ayrıca yöntem, gerilim doğrusallık bölgesini de SDGM'ye göre yaklaşık %15 genişletir.

2.B.2. Kesintili Modülasyon Yöntemi (KDGM): Bu yöntemde V_{af}^* , V_{bf}^* , V_{cf}^* arasında en dıştaki iki gerilim dalgasından birini kendisiyle aynı işaretteki DC bara tarafına kaydırmak ve bu kayma miktarını da bu fazın modülasyon dalgasını tam olarak $V_{dc}/2$ değerine getirecek miktarda seçmek, böylece bu fazın bu DGM periyodunda anahtarlama engellemenin hedeflenir. En dıştaki faz V_{xf}^* ise kayma gerilimi $V_{fo}^* = \text{sgn}(V_{xf}^*)(V_{dc}/2) - V_{xf}^*$ olarak hesaplanır. Kayma gerilimi V_{fo}^* her faza eklendiğinde bir faz kilitlenirken diğer iki fazda ve dördüncü bacakta anahtarlama gerçekleşir. Dolayısıyla her evirici fazının bacağına modülasyon ve anahtarlama sırayla kesintiye uğrar ve bu nedenle yöntem kesintili modülasyon adını alır. Seçilen tarafın en büyük şiddetli gerilim tarafı olması (KDGM1 yöntemi) ve evirici yükünün de direnç olması durumunda anahtarlamanın kesintiye uğradığı $2 \times 60^\circ$ aralıklarda akımlar en büyük değerindedir, dolayısıyla anahtarlamanın kesintiye uğramasına ek olarak anahtarlama kayıplarında ayrıca bir azalmaya neden olur. Bu yöntemle, üç fazlı ve dengeli yük durumunda anahtarlama kayıpları faz başına en az %33 ve tipik olarak %50 oranında azaltılabilir [2]. Yöntem yüksek modülasyon indeksi değerlerinde dalgacık gerilim ve akımları bakımından UVDGM ile karşılaştırılabilir olduğundan ve KGK uygulaması da yüksek modülasyon indeksi değerlerinde çalışmayı gerektirdiğinden KDGM1 doğal çözüm olup tercih edilmelidir. Bu yöntem de UVDGM gibi gerilim doğrusallık bölgesini genişletmekte, ayrıca anahtarların boşa zamanından kaynaklanan gerilim bozulmaları ve diyotların ters toparlanmalarından kaynaklanan gürültü ve kayıplar da azalan anahtarlama sayısı ile azalmaktadır.

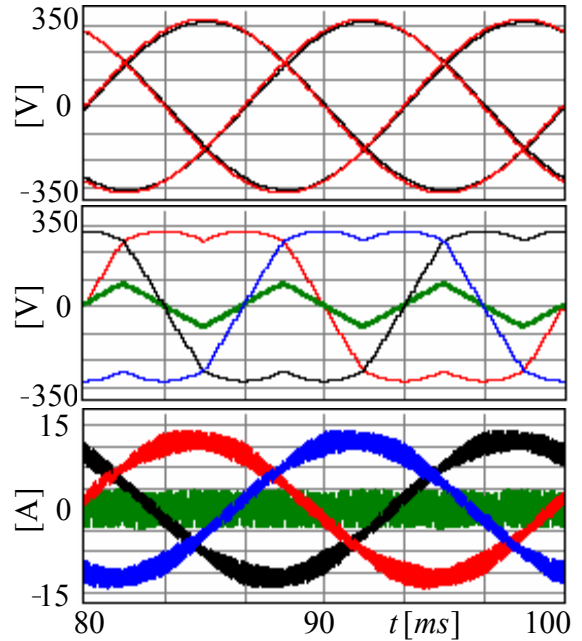
3. BİLGİSAYARLA BENZETİM

DBE ile sürülen 5kVA, 220Vrms, 50Hz'lik bir KGK sisteminin benzetimi Ansoft-Simplorer yazılımıyla yapılmıştır. UVDGM ve KDGM1 yöntemleri ele alınmış ve Çizelge 1'deki dengeli ve dengesiz doğrusal yükte çalışmada (7.5Arms anma akımı) KGK davranışı incelenmiştir. KGK çıkış gerilimi rezonans deneteçle denetlenmiştir [5]. LC süzgeç parametreleri faz başına 2.5mH ve 20µF'dir. Dördüncü bacakta 1mH indüktans kullanılmıştır. DC bara gerilimi 700V ve anahtarlama frekansı 10kHz'dir.

Çizelge 1. Benzetimde Yük Tipleri

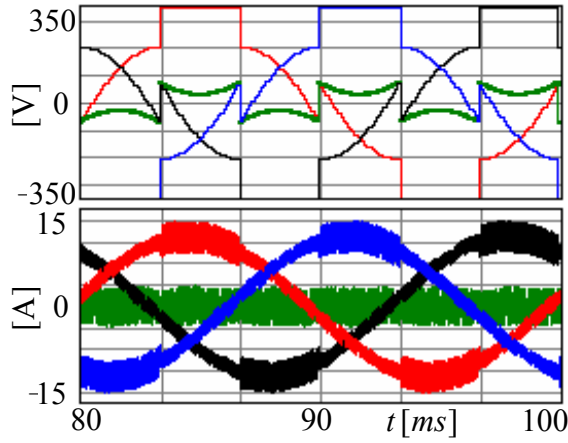
Dengeli Yük	Dengesiz Yük	
	Tek Faz	Fazarası
$Z_a = R_a = 29\Omega$	$Z_a = \infty$	$Z_{ab} = R_{ab} = 50\Omega$
$Z_b = R_b = 29\Omega$	$Z_b = R_b = 29\Omega$	$Z_{bc} = \infty$
$Z_c = R_c = 29\Omega$	$Z_c = \infty$	$Z_{ca} = \infty$

Şekil 5 KGK'nın dengeli yüklemeye UVDGM için kararlı hal benzetimlerini göstermektedir. KGK çıkış ve evirici referans gerilimleri dengeli ve sinüs biçimlidir. Yöntemde 3x50Hz'de periyodik olan V_{fo}^* (yeşil) faz referanslarına eklendiğinde faz gerilimlerinin tepesi azalmakta ve çıkış geriliminin doğrusallık bölgesi genişlemektedir. Dengeli yüklemeye dolayı dördüncü bacaktan sadece dalgacık akımı akar. Evirici akımları sinüsoidal temel bileşen ve 10 kHz ve katlarında DGM harmoniklerini içeren dalgacıktan oluşmaktadır. Şekil 6'da aynı durumda KDGM1 incelenmektedir. Aynı oldukları için çıkış ve referans gerilimleri tekrar gösterilmemiştir. UVDGM'den temel farklılık modülasyon dalgalarının kesintili bir şekil alması ve dolayısıyla evirici akımı dalgacıklarının da kesinti bölgesinde genişlemesi olarak görülmektedir.

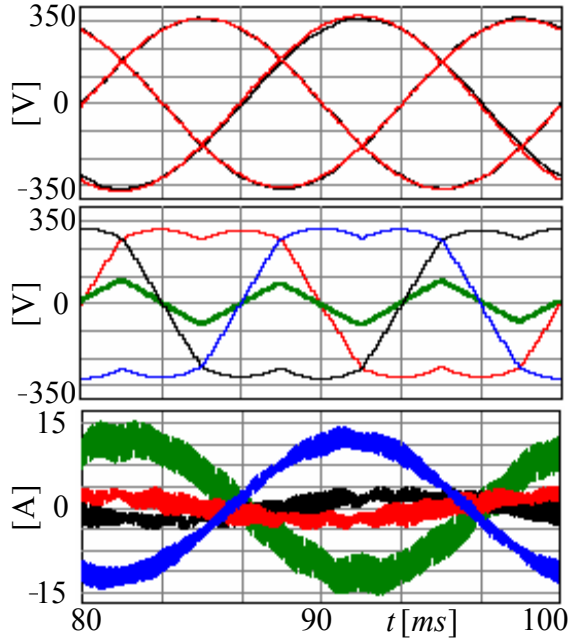


Şekil 5 DBE'de dengeli yük UVDGM benzetimi: Üst; çıkış gerilimleri (siyah), evirici referans gerilimleri (kırmızı), orta; modülasyon işaretleri, alt; evirici bacak akımları.

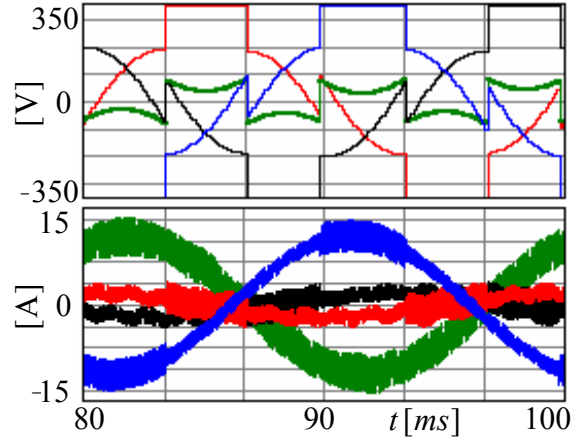
Şekil 7'deki UVDGM tek fazlı dengesiz yük benzetiminden görüldüğü gibi, sistem deneteci çıkış gerilimlerinin dengeli olmasını sağlamak için dengesiz yük miktarı arttıkça asimetrisi artan evirici referans gerilimleri üretir. Denetec, tek faz dengesizlik akımını eviricinin yüklü fazı ile dördüncü bacak arasından akıtır. UVDGM sayesinde çıkış gerilimi sinüs olup eviricinin yüklü fazdaki dalgacık akımı da dengeli durumdakiyle aynıdır. Dördüncü bacağın indüktansı küçük olduğundan dalgacık akımı daha fazladır. Şekil 8'de aynı durumda KDGM1 incelenmektedir ve kesintili modülasyonun dalgacık etkisi ve kesintilerin 60° 'den sapması temel farklılıktır. Şekil 9'da fazarası dengesiz yük incelenmiştir. Yine az da olsa modülasyon dalgalarında asimetri söz konusudur. Ayrıca KDGM1 uygulandığından bu durumda kesintiler dengesizlikten dolayı 60° 'den saptmaktadır. Bu durumda yük akımı bir fazdan girip diğerinden çıktığından dördüncü bacak etkin değildir.



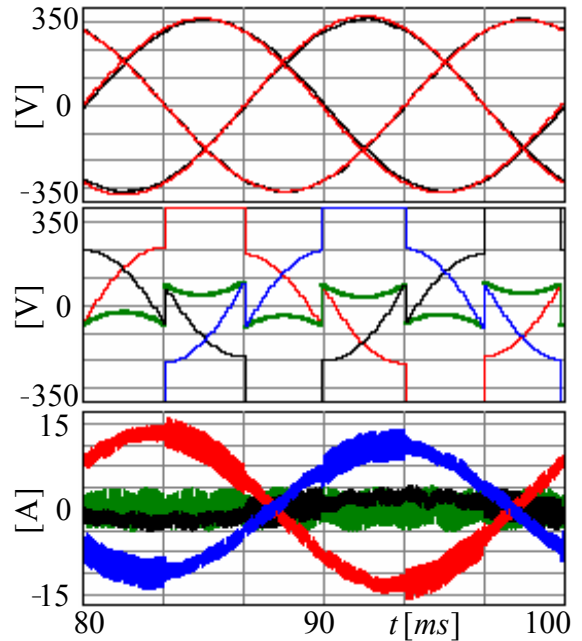
Şekil 6 DBE'de dengeli yük KDGM1 benzetimi: modülasyon işaretleri (üst), evirici bacak akımları (alt).



Şekil 7 DBE'de tek-faz dengesiz yük UVDGM benzetimi: Üst; çıkış gerilimleri (siyah), evirici referans gerilimleri (kırmızı), orta; modülasyon işaretleri, alt; evirici akımları.



Şekil 8 DBE'de tek-faz dengesiz yük KDGM1 benzetimi: modülasyon işaretleri (üst), evirici bacak akımları (alt).



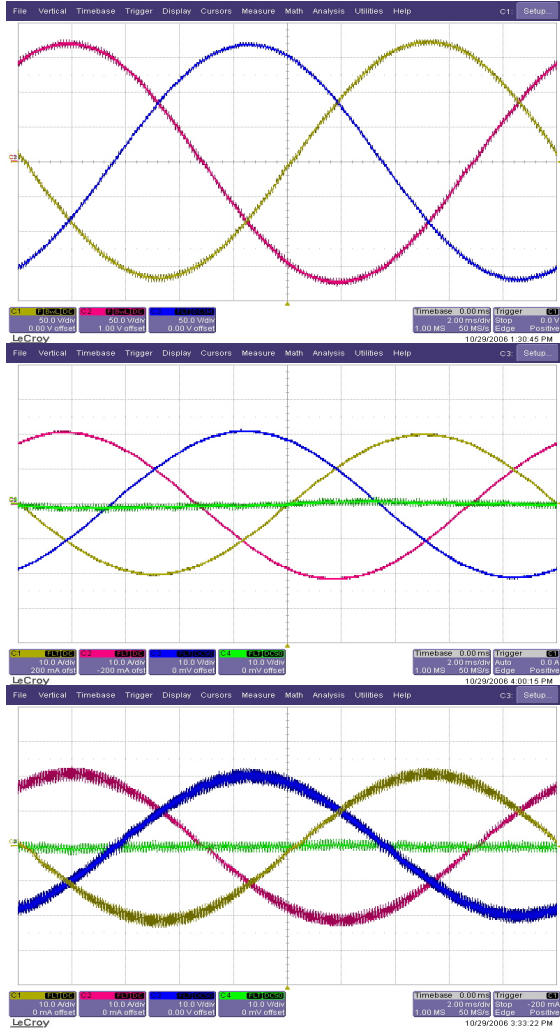
Şekil 9 DBE'de fazarası dengesiz yük KDGM1 benzetimi: Üst; çıkış gerilimleri (siyah), evirici referans gerilimleri (kırmızı), orta; modülasyon işaretleri, alt; evirici akımları.

4. DENEY SONUÇLARI

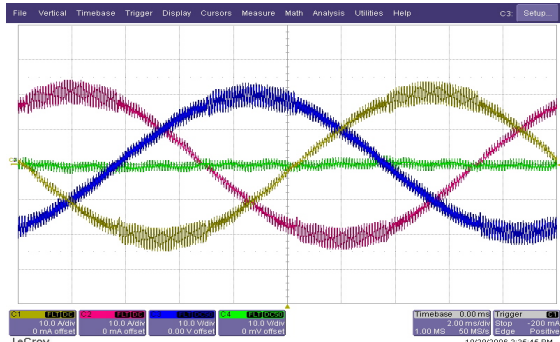
ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Makinaları-Güç Elektroniği Laboratuvarında 5kVA'lık DBE'li bir KGK tasarlanıp üretilmiştir. Denetim ortamı TMS320C2812 DSP tabanlıdır. Anahtarlama frekansı 10kHz olarak seçilmiştir. LC süzgeç parametreleri faz başına 1.5mH ve $30\mu\text{F}$ 'dir. Dördüncü bacağın indüktansı da $500\mu\text{H}$ 'dir. Deneysel ortamda DC bara gerilim seviyesi 540V ile sınırlandırıldığından KGK çıkışı 120Vrms ve 50Hz'dir. KGK çıkış gerilimi rezonans deneteci ile denetlenmiştir. Dengeli ve dengesiz yük akımı anma değerleri için (14 Arms) UVDGM ve KDGM1 yöntemleri deneysel olarak incelenmiştir.

Dengeli yük UVDGM deney sonuçları Şekil 10'da gösterilmiştir. KGK çıkış gerilimleri ideale yakın olup gerilim bozulması (THD_v) % 0.7'dir. İndüktans akımları da sinüs biçimlidir ve sadece 10 kHz

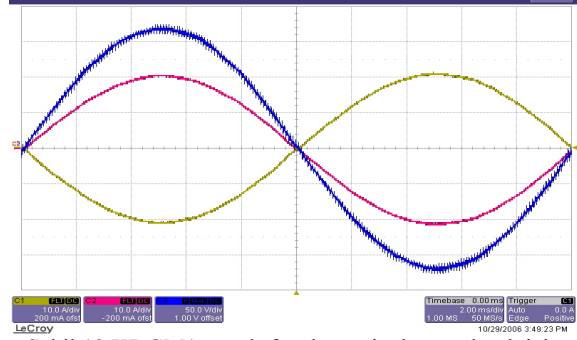
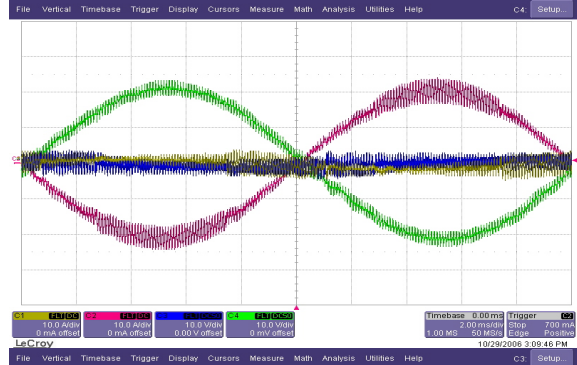
anahtarlama dalgacık bileşenini içermektedir. KDGM1 uygulandığında çıkış gerilimleri/akımları UVDGM ile aynıdır. Şekil 11’de gösterildiği gibi sadece evirici akımları üzerindeki dalgacıklar beklediği gibi orta 60°’lik bölgelerde kısmi artış göstermiştir. Buna karşın anahtarlama kayıpları yaklaşık %50 azalmıştır. Şekil 12’de tek fazlı dengesiz yükte davranış görülmektedir. Yük akımı dördüncü bacak üzerinden yol bulmakta ve çıkış gerilimi başarılı bir biçimde denetlenmektedir.



Şekil 10 UVDGM ve dengeli doğrusal yük için KGK çıkış gerilimleri (üst), akımları (orta) ve evirici akımları (alt), ölçek: 10A/kare, 50V/kare, 2ms/kare.



Şekil 11 KDGM1 ve dengeli doğrusal yük için evirici akımları, ölçek: 10A/kare, 2ms/kare.



Şekil 12 KDGM1 ve tek-faz dengesiz doğrusal yük için evirici akımları (üst), yüklü fazın çıkış gerilimi (mavi) ve akımı (kırmızı) ve dördüncü bacak akımı (sarı) (alt), ölçek: 10A/kare, 50V/kare, 2ms/kare.

5. SONUÇ

Dört bacaklı evirici yalıtım transformatörü gerektirmeyen uygulamalarda yüksek DC bara gerilimi gerektirmemesi ve dengesizlik akımlarının dördüncü baktan dolaştırılabilmesi özellikleri ile diğer topolojilerden üstündür. DBE’de skaler modülasyon uygulaması modern DSP’ler ile kolayca gerçekleştirilebilir. KDGM1 yöntemiyle anahtarlama kayıpları yaklaşık %50 oranında azaltılabilir. KGK uygulamasında DBE ve KDGM1 doğal eniyi çözümü oluşturmaktadır. KGK uygulamasında DBE’nin ve skaler kesintili modülasyon yönteminin başarılı dengeli ve dengesiz doğrusal yüklerle bilgisayar benzetimi ve deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] J.G. Tracy, H.E. Pfitzer, “Achieving High Efficiency in a Double Conversion Transformerless UPS,” IEEE-IECON Conf., N.C., USA, Nov. 2005, pp. 942-945.
- [2] 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, January 1999, pp. 49-61.
- [3] R. Zhang, V.H. Prasad, D. Boroyevich, F.C. Lee, “Three-Dimensional Space Vector Modulation for Four Leg Voltage Source Converters,” IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.17, May 2002, pp. 314-326.
- [4] J. Kim, S. Sul, H. Kim, J. Ji, “A PWM Strategy for Four-Leg Voltage Source Converters and Applications to a Novel Line Interactive UPS in a Three Phase Four Wire System,” IEEE-IAS Conf., Seattle, October 2004.
- [5] D.N. Zmood, D.G. Holmes, “Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters with Zero Steady-State Error,” IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 18, May 2003, pp. 814-822.