

RL yükünü besleyen 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici tasarımı Design of 6 switched 3-level inverter with RL load

Ali SAYGIN¹, Alper KEREM^{2*}

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
asaygin@gazi.edu.tr

²Elektrik ve Enerji Bölümü, KMYO, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, Türkiye.
alperkerem@osmaniye.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 25.02.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 23.10.2015

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2015.45822

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, çok-seviyeli evirici topolojilerine alternatif bir topoloji verilmiştir. Bu evirici topolojisinde 6 adet IGBT yarıiletken anahtar kullanılmış ve eviricinin her bir çıkış uçlarına çift sarımlı bobinler bağlanmıştır. Bobin gerilimleri kullanılarak 6 anahtar ile 3 seviyeli evirici elde edilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmasında Proportional Integral (PI) denetleyici kullanılmıştır. Denetleyiciden elde edilen veriler kullanılarak 6 anahtarlı 3-seviyeli eviricideki yarıiletken anahtarların çalışması için gerekli sinyaller üretilmiştir. Bu sinyaller, uzay vektör darbe genişlik modülasyon tekniği ile elde edilmiştir. Bilgisayar ortamında 10 Ω ve 0.2 H değerinde RL yük esas alınarak benzetim çalışmaları yapılmış ve evirici performansı incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici, Çift sarımlı bobin, Uzay vektör modülasyon, RL yük

Abstract

In this study, an alternative topology to multilevel inverter topologies is given. 6 IGBT semiconductor switches are used in this topology and coupled inductors are used in the output stage of the inverter. Using coupled inductors voltages, the 6 switched 3-level inverter has been obtained. In the simulation study, Proportional Integral (PI) controller has been used. By using the data taken from controller, the required switching signals have been produced for a 6 switched 3-level inverter. These signals have been taken by using space vector pulse width modulation technique. Using Computer Aided Design (CAD) analysis a RL load that have 10 Ω and 0.2 H values is simulated and inverter performance has been investigated.

Keywords: 6 switched 3-level Inverter, Coupled inductor, Space vector modulation, RL load

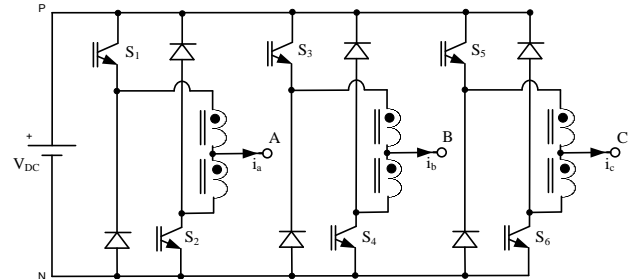
1 Giriş

Çok seviyeli evirici ilk olarak 1981 yılında Nabae ve arkadaşları tarafından nötr-nokta tutmalı evirici olarak önerilmiştir [1]. İlerleyen zamanlarda bu evirici topolojisi üç-seviyeli evirici kavramı olarak genişletilmiştir. Sonraki yıllarda çok seviyeli evirici topolojileri üzerine çalışmalar yapılmış ve literatürde yerini almıştır. Bu çalışmalar üç farklı model üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunlar; diyot-tutmalı çok-seviyeli eviriciler, kondansatör-tutmalı çok-seviyeli eviriciler ve seri bağlı tam köprü çok-seviyeli eviricilerdir [2],[3].

Bu topoloji standart eviricilerden farklı olarak girişine uygulanan DC kaynak aracılığı ile çıkışında 3-seviyeli Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) dalga şekli, filtre edilmiş çıkış akımı dalgalanması, azaltılmış gerilim stresi ve Elektromanyetik Parazitlenme (EMI) gibi üstünlükler sağlayarak, etkin çıkış anahtarlama frekansını iki katına çıkarmaktadır [4]. Bu topolojinin diğer üç-seviyeli eviriciler gibi aynı gerilim seviyesini üretirken yarı sayıda yarı iletken anahtar kullanması gibi üstünlükleri de bulunmaktadır. Topolojide yer alan bölünmüş sargılı çift sarımlı bobin, üst ve alt anahtarlar ile seri bağlanmıştır. Böylece kısa devre akımını önlemek için zorunlu olan ölü zaman koruması ihtiyacı bu topolojide ortadan kaldırılmıştır. Oysaki diğer çok seviyeli eviricilerin böyle bir özelliği bulunmamaktadır. Bütün bu özellikler, 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici topolojisini yüksek performanslı sürüşler için uygun kılmaktadır [4]-[6].

2 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici topolojisi

Bu bölümde Şekil 1'de görüldüğü üzere yeni bir evirici topolojisi olan bölünmüş sargılı çift sarımlı bobinden oluşan 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici topolojisi gösterilmektedir.

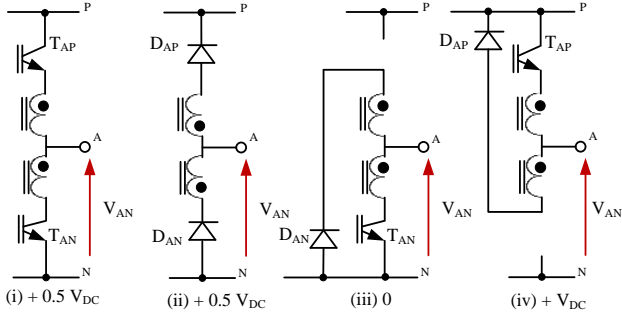


Şekil 1: 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici topolojisi [4].

Şekil 2'de gösterildiği gibi eviricinin çıkış terminal gerilimi olan V_{AN} 'den; $+1/2V_{DC}$, V_{DC} ve 0 gerilim değerleri elde edilmektedir. Literatürde yaygın olarak yer alan eviricilerde üst ve alt anahtarların açma ve kapanma zamanları DC bara kısa devresini önleyici şekilde tasarlanmıştır. Fakat 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici topolojisinde üst ve alt anahtarlar orta gerilim noktasını oluşturmak için birbirinden bağımsız davranmamak şartı ile aynı anda açılıp kapanabilme özelliğine sahiptir [4],[6].

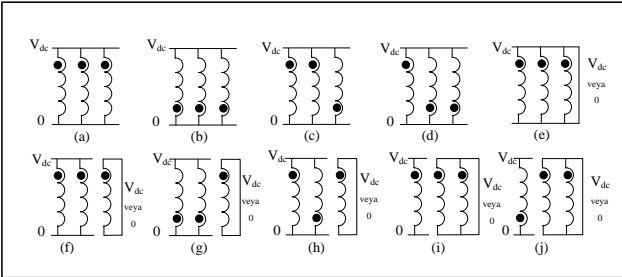
6 anahtarlı 3-seviyeli evirici topolojisi 3. gerilim seviyesine bölünmüş sargılı bobin üzerinde oluşan gerilim bölünmesi ile ulaşmaktadır, bu durum Şekil 2 (i) ve Şekil 2 (ii)'de gösterilmiştir. Her bir bacadaki üst ve alt anahtarların her ikisi de aynı anda iletme geçtiğinde ya da kesime gittiğinde, 3. gerilim seviyesi olan $1/2V_{DC}$ 'ye ulaşılır. Şekil 2 (i)'deki gibi anahtarların her ikisi de iletme gittiğinde, V_{DC} gerilimi bölünmüş sargılı bobin üzerinden geçmektedir. Bu iki bobin arasındaki bağlantı oranı bir olup her iki bobin de tasarım açısından aynı olduğundan, gerilim bobinler üzerinde eşit dağılır ve çıkış terminalinde $1/2V_{DC}$ elde edilir. Aynı şekilde, Şekil

2 (ii) deki gibi anahtarlar kesimde olduğunda, 6 anahtarlı 3-seviyeli sargı geriliminin aynı kutuplu olduğu kabul edilirse, bobin üzerinde $-V_{DC}$ oluşur. Bobin yönüne bağlı olarak iş çıkıştan $+1/2V_{DC}$ elde edilir [4].



Şekil 2: 6 anahtarlı 3-seviyeli eviricinin tek bacağındaki anahtarlama durumları [4],[6].

Şekil 3'te verilen çeşitli bobin konfigürasyonları, Şekil 2'de gösterilen her bir bacağına ait anahtarlama durumları aracılığı ile türetilmiştir. Her üç bobin de ortak bir üç-bacaklı nüve üzerine sarılı olduğundan herhangi bir bobindeki etkin endüktans değeri diğer iki bobinin bağlantısıyla ilişkilidir. Örneğin, Şekil 3'teki tüm evirici anahtarlarının hepsinin "iletimde" (a) ya da "kesimde" (b) olması durumunda, eviricinin tüm bacaklarında en düşük etkin sargı endüktansı üretilir [4].



Şekil 3: Çeşitli anahtarlama durumları için 3 faz çift sarımlı bobin konfigürasyonları [6]-[8].

3 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici topolojisi için uzay vektör darbe genişlik modülasyonu

Bu bölümde 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici için uzay vektör DGM anlatılmaktadır. 64 farklı anahtarlama durumu toplam 19 vektör ile üretilmektedir. Uzay vektör blok diyagramı $S_1 - S_2 - S_3 - S_4 - S_5 - S_6$ diye adlandırılan 6 adet 60° 'lik sektörler bölünmüştür. Her bir sektör ise $\Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3 - \Delta_4$ olmak üzere 4 üçgenden oluşmaktadır. Referans vektörünün ucu herhangi bir üçgen üzerinde konumlandırılabilirken her üçgenin tepesi bir anahtarlama vektörünü göstermektedir. Bu vektör, durumuna bağlı olarak bir veya birden fazla anahtarlama üretebilmektedir [9].

Şekil 4'te görüldüğü gibi gerilim vektörleri; sıfır vektör, küçük vektör, orta vektör ve büyük vektör olmak üzere 4 farklı kategoriye alınmıştır. Bu vektörlerden küçük vektör $V_{DC}/3$ büyüklüğündeki 1-6 vektörlerini, orta vektör $V_{DC}/\sqrt{3}$ büyüklüğündeki 7-12 vektörleri ve büyük vektör ise $2V_{DC}/3$ büyüklüğündeki 13-18 vektörlerini ifade etmektedir [9].

Eviriciyi üç fazlı ve dengeli kabul edersek; A, B ve C faz gerilimleri arasındaki ilişki Eş. 1'de verilmiştir:

$$V_{A0}(t) + V_{B0}(t) + V_{C0}(t) = 0 \quad (1)$$

Uzay vektör gerilimi birbirine 90° faz farklı α ve β düzlemi cinsinden ifade edilirse:

$$\vec{V}(t) = V_\alpha(t) + jV_\beta(t) \quad (2)$$

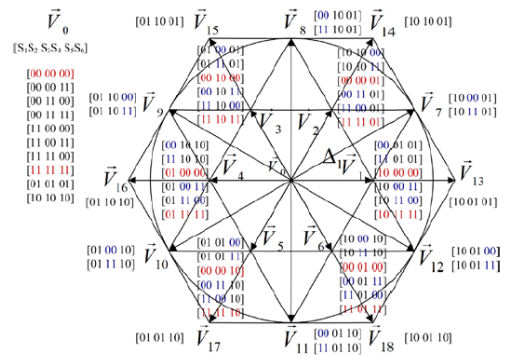
Üç fazlı değişkenler α ve β değişkenlerine dönüştürülürse:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha(t) \\ V_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A0}(t) \\ V_{B0}(t) \\ V_{C0}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Eş. 3, Eş. 2'ye aktarılırsa:

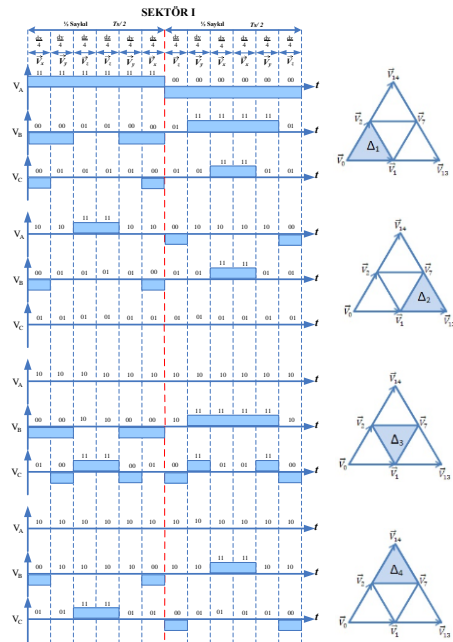
$$\vec{V}(t) = \frac{2}{3} (V_{A0}(t)e^{j0} + V_{B0}(t)e^{j2\pi/3} + V_{C0}(t)e^{j4\pi/3}) \quad (4)$$

Eş. 4 elde edilir [4].



Şekil 4: 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici için uzay vektör diyagramı [9].

Şekil 5'te Sektör I'e ait dört bölge ($\Delta_1 - \Delta_2 - \Delta_3 - \Delta_4$) için üç fazın DGM dalga şekilleri gösterilmektedir. Üç fazın DGM dalga şekilleri Şekil 4'ten yararlanarak oluşturulmuştur. Burada dalga şekilleri için simetrik dalga şekilleri kullanılmıştır [6].

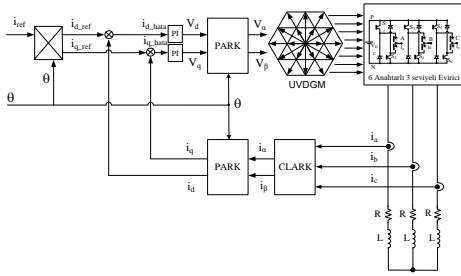


Şekil 5: Sektör I'e ait dört bölge için üç fazın DGM dalga şekilleri [6].

4 Simülasyon çalışmaları

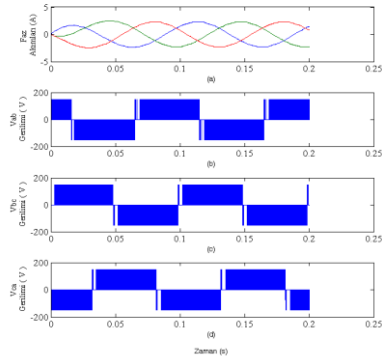
Yapılan benzetim çalışmalarında 10Ω ve 0.2 H değerlerine sahip RL yük kullanılmıştır. Bu benzetim çalışmaları Dev C++ programı kullanılarak yapılmış ve elde edilen verilere ait çizimler Matlab programı ile gerçekleştirilmiştir. Denetleyici olarak PI kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarında 10 kHz 'de anahtarlamalar yapılmış ve sonuçları verilmiştir. Girilen referans elektriksel açı ile geri beslemeden elde edilen elektriksel açı kıyaslanarak denetim yapılmıştır. Uygulamada giriş DC gerilimi olarak 300 V kullanılmıştır.

RL yük için çalışma yapısı verilmiş alan yönlendirmeli kontrol tekniğinin uygulama devre şeması Şekil 6'da verilmiştir.



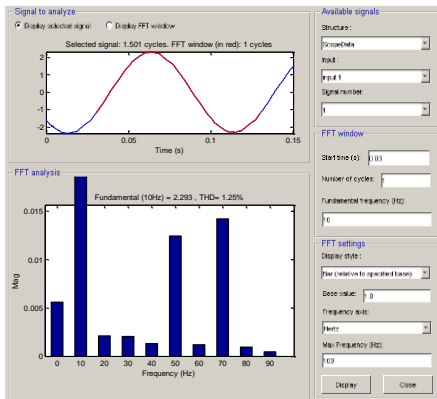
Şekil 6: RL yükün alan yönlendirmeli kontrol uygulamasının blok diyagramı [6].

10 Hz frekans değeri için RL yük değişkenlerinin zaman içerisinde aldığı değerler Şekil 7'de verilmiştir.



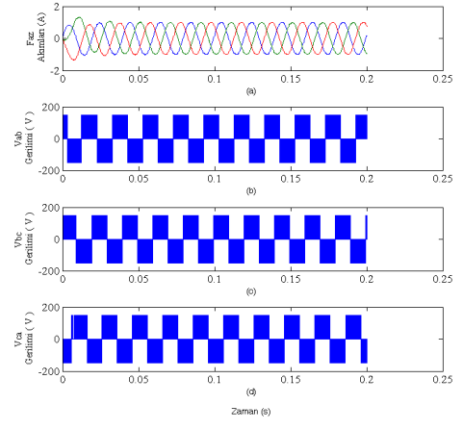
Şekil 7: $10 \text{ Hz}/300 \text{ V}$ PI denetleyicili RL yük değişkenleri.

RL yükün 10 Hz frekans değerinde çektiği üç faz akımlarından biri olan i_a akımına ait harmonik spektrumu Şekil 8'de verilmiştir.



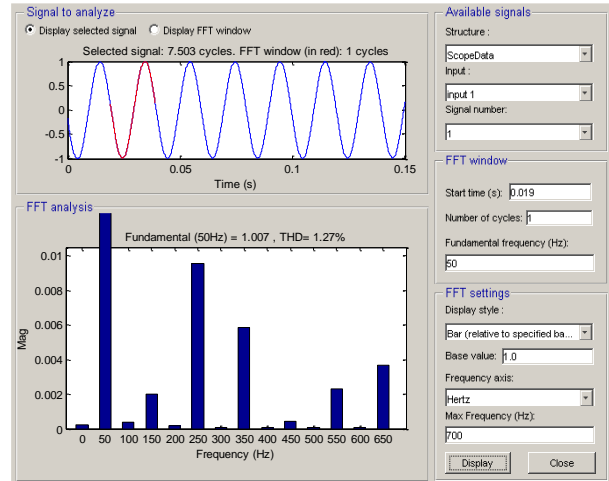
Şekil 8: $10 \text{ Hz}/300 \text{ V}$ PI denetleyicili RL yükü ait i_a akımı harmonik spektrumu.

50 Hz frekans değeri için RL yük değişkenlerinin zaman içerisinde aldığı değerler Şekil 9'da verilmiştir.



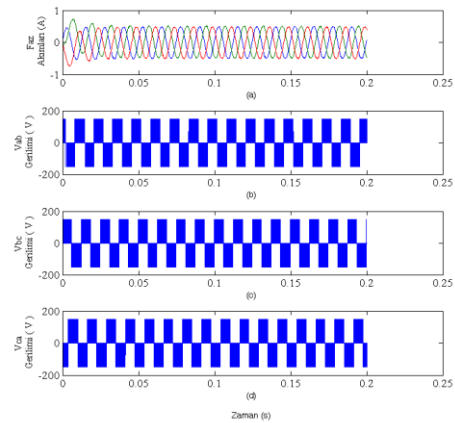
Şekil 9: $50 \text{ Hz}/300 \text{ V}$ PI denetleyicili RL yük değişkenleri.

RL yükün 50 Hz frekans değerinde çektiği üç faz akımlarından biri olan i_a akımına ait harmonik spektrumu Şekil 10'da verilmiştir.



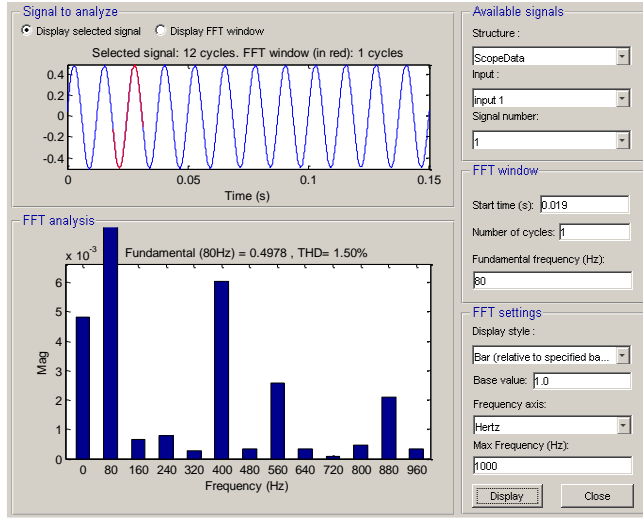
Şekil 10: $50 \text{ Hz}/300 \text{ V}$ PI denetleyicili RL yükü ait i_a akımı harmonik spektrumu.

80 Hz frekans değeri için RL yük değişkenlerinin zaman içerisinde aldığı değerler Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 11: $80 \text{ Hz}/300 \text{ V}$ PI denetleyicili RL yük değişkenleri.

RL yükün 80 Hz frekans değerinde çektiği üç faz akımlarından biri olan i_a akımına ait harmonik spektrumu Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12: 80 Hz/300 V PI denetleyicili RL yüke ait i_a akımı harmonik spektrumu.

5 Sonuç

Yapılan bu çalışmada, son zamanlarda literatürde yerini alarak çok seviyeli evirici topolojilerine alternatif olan yeni bir evirici topolojisi geliştirilmiştir. Çalışma içeriğinde öncelikle 6 anahtarlı 3-seviyeli evirici topolojisi için toplam anahtarlama durumları ve sıralamaları belirlenmiştir. Her bir anahtarlama durumu için farklı bobin konfigürasyonları türetilmiş ve tüm sektörlere ait her üç fazın DGM dalga şekilleri oluşturulmuştur.

Elde edilen matematiksel ifadeler yazılıma aktarılarak, bilgisayarda benzetim çalışmaları yapılmış ve evirici performansı RL yük üzerinde incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında oluşan harmoniklerin Fast Fourier Transform (FFT) analiz sonuçları incelendiğinde Total Harmonic Distortion (THD) değerlerinin küçük olması sebebiyle bu evirici

topolojisinin ileriki dönemlerde endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceği gösterilmiştir.

6 Kaynaklar

- [1] Nabae A, Takahashi I, Akagi H. "A new neutral-point-clamped PWM inverter". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 17(5), 518-523, 1981.
- [2] Lai JS, Peng FZ. "Multilevel converters-a new breed of power converters". *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32(3), 509-517, 1996.
- [3] Teodorescu R, Baabjerg F, Pedersen JK, Cengcelci E, Sulistijo SU. "Multilevel converters-a survey". *Processing EPE'99*, 1999.
- [4] Vafakhah B. Multilevel Space Vector PWM for Multilevel Coupled Inductor Inverters. PhD Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, 2010.
- [5] Ewanchuk J. A Six-Switch Multi-level Inverter Topology for Three Phase High Speed Machine Applications. MSc Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, 2008.
- [6] Kerem A. 6 Anahtarlı 3-Seviyeli Evirici Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [7] Vafakhah B, Salmon J, Knight AM. "Interleaved discontinuous space-vector PWM for a multi-level PWM VSI using a 3-phase split-wound coupled inductor". *Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009.
- [8] Vafakhah B, Salmon J, Knight AM. "A new space-vector PWM with optimal switching selection for multilevel coupled inductor inverters". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(7), 2354-2364, 2009.
- [9] Vafakhah B, Masiala M, Salmon J, Knight AM. "Space-vector PWM for inverters with split-wound coupled inductors". *International Electric Machines & Drives Conference*, Miami, FL, 03-06 May 2009.
- [10] Vafakhah B, Knight A, Salmon J. "Reducing losses in multilevel coupled inductor inverters using interleaved discontinuous SVPWM". *Twenty-Fifth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Palm, Springs, CA, 21-25 February 2010.