

PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDE ZVT ve ZCT TEKNİKLERİNE GENEL BİR BAKIŞ

Prof.Dr. Hacı BODUR Arş.Gör. İsmail AKSOY Y.Doç.Dr. A.Faruk BAKAN

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34349 Beşiktaş, İstanbul

bodur@yildiz.edu.tr, iaksoy@yildiz.edu.tr, fbakan@yildiz.edu.tr

Anahtar sözcükler: Yumuşak Anahtarlama (SS), sıfır gerilim ve sıfır akımda anahtarlama (ZVS ve ZCS), sıfır gerilim ve sıfır akımda geçiş (ZVT ve ZCT), DC-DC Dönüştürücüler.

ÖZET

Bilindiği gibi, Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT) ve Sıfır Akımda Geçiş (ZCT) teknikleri, yüksek frekanslı dönüştürücülerde anahtarlama kayıplarını bastırmak için kullanılan, modern bastırma veya Yumuşak Anahtarlama (SS) teknikleridir. Prensip olarak, her iki teknikte de bir yardımcı anahtar ve bir kısa süreli veya kısmi rezonans devresi kullanılır. ZVT tekniğinde ana anahtarın iletme girme işlemindeki ve ZCT tekniğinde ana anahtarın kesime girme işlemindeki anahtarlama kayıplarının bastırılması veya sıfırlanması hedeflenir. Bu çalışmada, son yıllarda üzerinde çok çalışma yapılan ve tek tek incelendiğinde çok kafa karıştıran ZVT ve ZCT tekniklerine genel bir bakış açısının getirilmesi hedeflenmiştir.

1. GİRİŞ

Darbe Genişlik Modülasyonlu (PWM) DC-DC dönüştürücüler, yüksek güç yoğunluğu, hızlı geçiş cevabı ve kontrol kolaylığı nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha yüksek güç yoğunluğu ve daha hızlı geçiş cevabı, ancak anahtarlama frekansının artırılmasıyla elde edilebilmektedir. Fakat, frekans arttığında, anahtarlama kayıpları da artmaktadır. Frekansın artması, ancak sert anahtarlama (HS) yerine yumuşak anahtarlama (SS) tekniklerinin kullanılması ve böylece anahtarlama kayıplarının düşürülmesiyle mümkün olmaktadır. Bu nedenle, PWM DC-DC dönüştürücülerin gelişmesi, artık SS teknikleri ile sağlanabilmektedir. Bu düşünce, akademik ve endüstriyel çalışmalarda, yirmi yıldan beri gittikçe artan bir şekilde cazibesini sürdürmektedir [1]-[12].

Anahtarlama kayıpları, temel olarak, bir yarı iletken güç anahtarının iletim ve kesime girme işlemleri esnasında, gerilim ve akımın üst üste binmesi ile oluşan kayıplardır. İletime girme işlemi, parazitik kondansatörün deşarj enerji kaybı ile güç diyodunun ters toparlanma enerji kaybı da anahtarlama

kayıplarına eklenir. Genel olarak SS teknikleri, sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS), sıfır akımda anahtarlama (ZCS), sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ve sıfır akımda geçiş (ZCT) şeklinde sıralanabilir [7], [8].

Rezonanslı devrelerde, anahtarlama anlarında gerilim veya akımın sıfır olması nedeniyle, doğal ve mükemmel olarak SS sağlanır. Buna karşılık, bu devrelerde, güç yoğunluğu düşüktür, genellikle frekans değişkendir ve PWM yeteneği yoktur. Rezonans ve PWM tekniklerinin avantajlarının birleştirilmesi düşüncesinden yola çıkılarak, sadece anahtarlama işlemleri esnasında bir kısa süreli veya kısmi rezonans kullanılarak, mükemmel bir SS ve PWM yeteneğine sahip olan ZVT ve ZCT teknikleri geliştirilmiştir [1], [2], [4], [6]-[9]. Son yıllarda ZVT ve ZCT tekniklerinin birleştirilmesi konusunda da çalışmalar yapılmaktadır [5], [10].

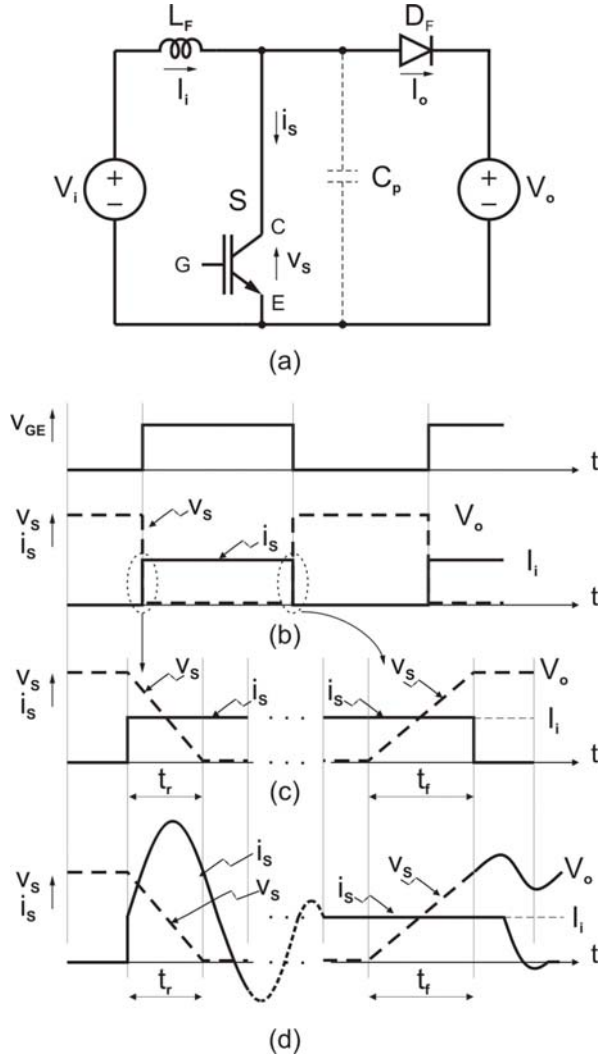
Bu çalışmada, son yıllarda yapılan akademik ve endüstriyel çalışmalarda çok yer alan ve tek tek incelendiğinde çok kafa karıştıran ZVT ve ZCT tekniklerine genel bir bakış açısının getirilmesi hedeflenmiştir.

2. ANAHTARLAMA KAYIPLARI ile ZVT ve ZCT KAVRAMI

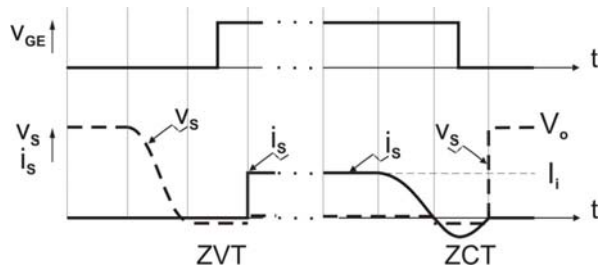
Şekil 1' de, örnek olarak alınan yükseltici bir dönüştürücüde, anahtarlama prensip olarak giriş akımı I_i altında gerçekleştiği ve yüksek değerlerde anahtarlama kayıplarının olduğu görülmektedir. Ayrıca, iletime girme işlemi, anahtar iletime girdiğinde diyot henüz kesime girmediğinden kısa süreli bir kısa devre oluşur ve eşdeğer parazitik kondansatör anahtar üzerinden deşarj olur, böylece gerçekte geçen aşırı akımdan dolayı aşırı bir kayıp oluşur.

Şekil 2' de, prensip olarak iletime girme işlemi ZVT ve kesime girme işlemi ZCT tekniği görülmektedir. Her iki teknikte de mükemmel bir

yumuşak anahtarlama sağlanır. ZVT tekniğinde, anahtar uçlarındaki gerilim önceden sıfıra düşürülür, bu gerilim bir süre sıfırda tutulur ve daha sonra sinyal verilerek anahtar ZVS altında iletme sokulur. ZCT tekniğinde, benzer şekilde, anahtar içinden geçen akım önceden sıfıra düşürülür, bu akım bir süre sıfırda tutulur ve daha sonra sinyal kesilerek anahtar ZCS altında kesime sokulur.



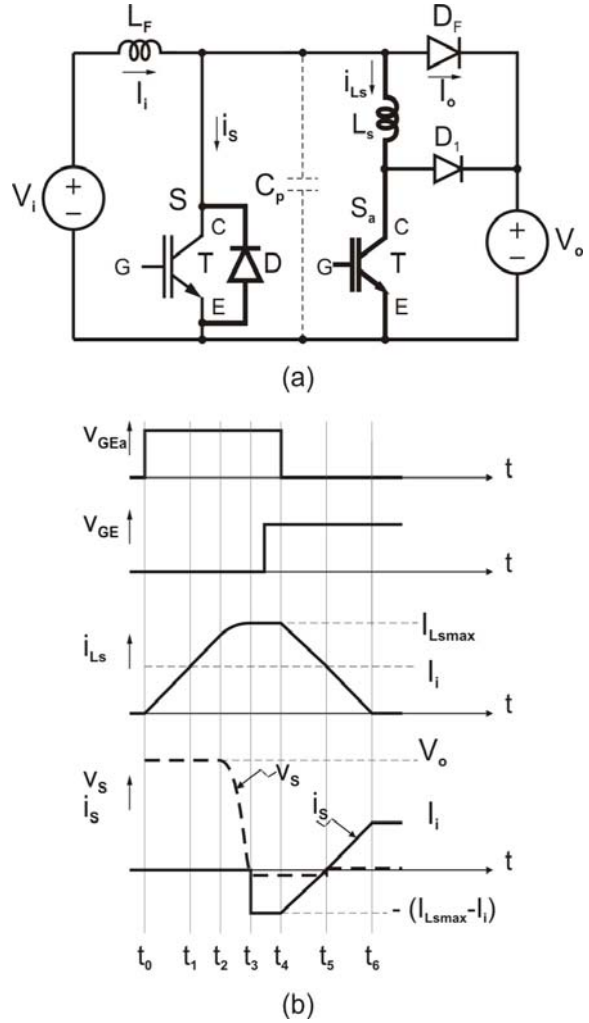
Şekil 1. Temel bir yükseltici dönüştürücüde (a), ideal (b), gerçeğe yakın (c) ve gerçek (d) çalışma durumunda ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri.



Şekil 2. İletime girme işleminde ZVT ve kesime girme işleminde ZCT tekniği.

3. ZVT TEKNİĞİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Temel [1] ve gelişmiş [4], [6] ZVT-PWM DC-DC dönüştürücülerde, ZVT tekniğinin gerçekleştirilmesi için, Şekil 3(a)'da görüldüğü gibi, ortak olarak bir yardımcı anahtar S_a ve ana anahtara ters-paralel bir diyot D ile bir bastırma endüktansı L_s kullanılır. Şekil 3(b)'de, devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 3. Temel ZVT sağlama devresi (a), ve bunun çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri (b).

t_0 - t_2 aralığında : t_1 anında S_a 'ya sinyal uygulanmasıyla, S_a anahtarı SS ile iletme girer. Lineer olarak i_{Ls} akımı artar ve D_F akımı düşer. t_2 anında, i_{Ls} akımı $I_i + I_{rr}$ değerine erişir, D_F akımı $-I_{rr}$ 'ye düşer ve D_F kesime girer. Bu aralıkta, S_a 'nın SS ile iletme ve D_F 'nin SS ile kesime girme veya ters toparlanma enerjileri L_s endüktansına aktarılmış olur.

$$i_{Ls} = \frac{V_o}{L_s} (t - t_0) \quad (3.1)$$

$$t_{02} = \frac{L_s}{V_o} (I_i + I_{rr}) \quad (3.2)$$

t_2 - t_3 aralığında : C_p kondansatörü L_s üzerinden deşarj olur. t_3 anında, C_p gerilimi 0'a düşer, i_{Ls} akımı maksimuma erişir ve D diyodu iletime girerek I_{Lsmax} - I_i akımını üstlenir. C_p 'deki enerji L_s 'ye aktarılmış olur.

$$i_{Ls} = I_i + I_{rr} \cos \omega(t - t_2) + \frac{V_o}{Z} \sin \omega(t - t_2) \quad (3.3)$$

$$v_{Cs} = V_o \cos \omega(t - t_2) - Z I_{rr} \sin \omega(t - t_2) \quad (3.4)$$

$$t_{23} = \sqrt{L_s C_p} \arctg \frac{V_o}{Z I_{rr}} \quad (3.5)$$

$$I_{Lsmax} = I_i + \sqrt{V_o^2 + Z^2 I_{rr}^2} / Z \quad (3.6)$$

$$\omega = \sqrt{L_s C_p} \quad (3.7)$$

$$Z = \sqrt{L_s / C_p} \quad (3.8)$$

t_3 - t_4 aralığında : D diyodu iletimini sürdürür ve S gerilimi sıfırda tutulur. Bu aralıkta S'nin sinyali uygulanır.

$$i_{Ls} = I_{Lsmax} \quad (3.9)$$

$$t_{34} = \text{seçilir} \quad (3.10)$$

t_4 - t_5 aralığında : t_4 anında, S_a sinyalinin kesilmesiyle, S_a sert olarak kesime ve D_i iletime girer. L_s 'de biriken SS enerjileri çıkışa aktarılmaya başlar. i_{Ls} lineer olarak azalır. t_5 anında, i_{Ls} akımı I_i 'ye ve D akımı 0'a düşer. D söner ve S anahtarı ZVS ile iletime girer.

$$i_{Ls} = I_{Lsmax} - \frac{V_o}{L_s} (t - t_4) \quad (3.11)$$

$$t_{45} = \frac{L_s}{V_o} (I_{Lsmax} - I_i) \quad (3.12)$$

t_5 - t_6 aralığında : Lineer olarak i_{Ls} akımı azalmaya devam eder ve i_s akımı I_i 'ye erişir ve i_{Ls} akımı 0'a düşer. L_s 'de biriken SS enerjilerinin çıkışa aktarılması tamamlanır.

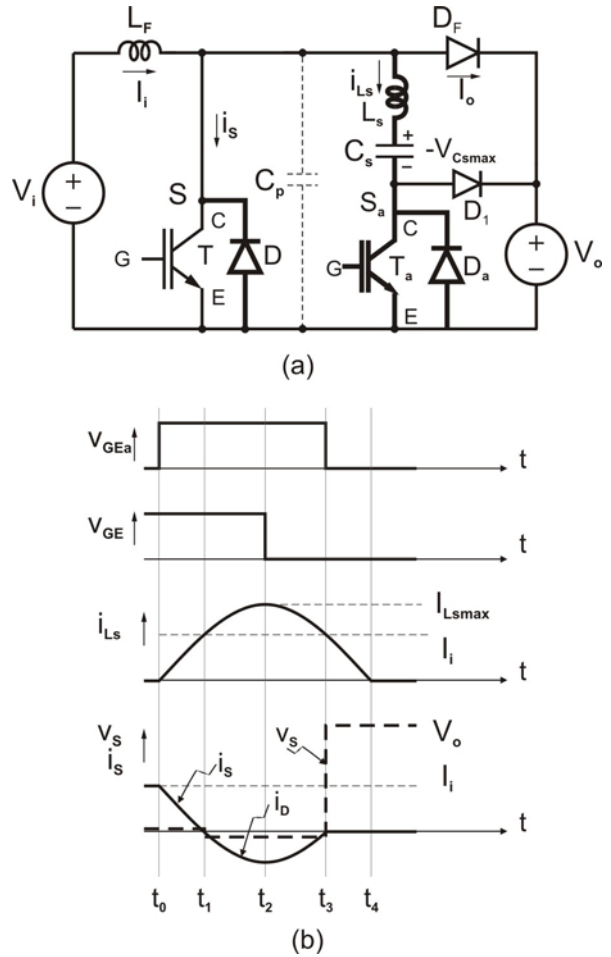
$$i_{Ls} = I_i - \frac{V_o}{L_s} (t - t_5) \quad (3.13)$$

$$t_{56} = \frac{L_s}{V_o} I_i \quad (3.14)$$

ZVT tekniği, modern ve mükemmel bir iletime girme işlemi sağlar. Ana ve yardımcı anahtarların kesime girme işlemlerinin iyileştirilmesi, gelişmiş ZVT devrelerinin [4], [6] temel konusudur. ZVT tekniğinde, ana anahtarın SS ile kesime girme enerjisi yanında, ana diyodun ters toparlanma ve parazitik kondansatörün deşarj enerjileri de geri kazanılır.

4. ZCT TEKNİĞİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Temel [2] ve gelişmiş [3], [9] ZCT-PWM DC-DC dönüştürücülerde, ZCT tekniğinin gerçekleştirilmesi için, Şekil 4(a)' da görüldüğü gibi, ortak olarak bir yardımcı anahtar S_a ve her iki anahtara ters-paralel 2 diyot D ve D_a ile bir bastırma endüktansı L_s ve bir bastırma kondansatörü C_s kullanılır. Şekil 4(b)' de, devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 4. Temel ZVT sağlama devresi (a) ve bunun çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri (b).

t_0 - t_1 aralığında : t_1 anında S_a 'ya sinyal uygulanmasıyla, S_a anahtarı SS ile iletime girer. L_s - C_s - S_a -S yolu ile L_s ve C_s arasında bir rezonans oluşur. Sinüsoidal olarak i_{Ls} artar ve i_s akımı düşer. t_1 anında, i_{Ls} akımı I_i 'ye erişir ve i_s akımı 0'a düşer. T ana transistörü kesime ve D diyodu iletime girer.

$$i_{Ls} = \frac{V_{Csmax}}{Z} \sin \omega(t - t_0) \quad (4.1)$$

$$v_{Cs} = -V_{Csmax} \cos \omega(t - t_0) \quad (4.2)$$

$$t_{01} = \sqrt{L_s C_s} \arcsin \frac{Z I_i}{V_{Csmax}} \quad (4.3)$$

$$\omega = \sqrt{L_s C_s} \quad (4.4)$$

$$Z = \sqrt{L_s / C_s} \quad (4.5)$$

t₁-t₃ aralığında : Rezonans akımının sinüsoidal değişimi sürer. D diyodu i_{LS}-I_i akımını üstlenir. t₂ anında, i_{LS} akımı maksimum olur, bu anda S'nin sinyali kesilir. t₃ anında, i_{LS} akımı I_i'ye geri düşer, D akımı 0 olur, D kesime girer ve S_a'nın sinyali kesilir. Aynı anda, S_a sert olarak kesime ve D₁ ile D_F iletime girer. v_S gerilimi V_o olur.

$$i_{LS} = \frac{V_{Cs \max}}{Z} \sin \omega(t - t_1) \quad (4.6)$$

$$v_{Cs} = -V_{Cs \max} \cos \omega(t - t_1) \quad (4.7)$$

$$t_{13} = \sqrt{L_s C_s} (\pi - 2 \arcsin \frac{Z I_i}{V_{Cs \max}}) \quad (4.8)$$

$$i_{LS \max} = \frac{V_{Cs \max}}{Z} \quad (4.9)$$

t₃-t₄ aralığında : L_s ve C_s arasındaki rezonans, L_s-C_s-D₁-D_F yolu ile devam eder. t₄ anında, i_{LS} akımının sıfır olmasıyla D₁ kesime girer. v_{Cs} gerilimi V_{Csmax}'a erişir. S ana anahtarı iletime girdiğinde, C_s'in gerilimi yön değiştirerek -V_{Csmax} olur ve devre başlangıç koşuluna geri döner.

$$i_{LS} = \frac{V_{Cs \max}}{Z} \sin \omega(t - t_3) \quad (4.10)$$

$$v_{Cs} = -V_{Cs \max} \cos \omega(t - t_3) \quad (4.11)$$

$$t_{34} = \sqrt{L_s C_s} \arcsin \frac{Z I_i}{V_{Cs \max}} \quad (4.12)$$

ZCT tekniği, modern ve mükemmel bir kesime girme işlemi sağlar. Ana anahtarların iletime ve yardımcı anahtarın kesime girme işlemlerinin iyileştirilmesi, gelişmiş ZCT devrelerinin [3], [9] temel konusudur. ZCT tekniğinde, rezonans devresi S_a'nın SS ile iletime ve S'nin ZCS ile kesime girmesini sağlar. Ancak, sonuç olarak rezonans devresi ile ana devre arasında hiçbir enerji aktarımı olmaz.

5. SONUÇ

ZVT ve ZCT teknikleri, rezonans ve PWM tekniklerinin iyi yönlerinin birleştirilmesi düşüncesi ile ortaya çıkmıştır. Her iki teknikte de bir yardımcı anahtar ve bir kısa süreli rezonans devresi kullanılır. ZVT ile iletime girme ve ZCT ile kesime girme işlemlerinde mükemmel bir SS sağlanır.

ZVT tekniğinin temeli, kısa süreli bir rezonans ile anahtar uçlarındaki gerilimin önceden sıfıra düşürülmesi, bu gerilimin bir süre sıfırda tutulması, sonra sinyal verilerek anahtarın ZVS ile iletime sokulmasıdır.

ZCT tekniğinin temeli ise, yine kısa süreli bir rezonans ile anahtar içinden geçen akımın önceden sıfıra düşürülmesi, bu akımın bir süre sıfırda tutulması, sonra sinyal kesilerek anahtarın ZCS altında kesime sokulmasıdır.

Son yıllarda ZVT ve ZCT tekniklerinin de birleştirilmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Hua G., Leu C. S., Jiang Y., Lee F. C. , "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters", IEEE Trans. on Power Electron., vol.9, no.2, pp.213-219, March 1994.
- [2] Hua G., Yang E. X., Jiang Y., Lee F. C., "Novel Zero-Current-Transition PWM Converters", IEEE Trans. on Power Electron., vol.9, no.6, pp.601-606, November 1994.
- [3] Mao H., Lee F. C., Zhou X., Dai H., Cosan M., and Boroyevich D., "Improved zero-current-transition converters for high-power applications", IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 33, pp.1220-1232, Sept./Oct. 1997.
- [4] Tseng C. J., Chen C. L., "Novel ZVT-PWM converters with active snubbers", IEEE Trans. on Power Electron., vol. 13, pp.861-869, Sept. 1998.
- [5] Stein C. M. de O., Hey H. L., "A true ZCZVT commutation cell for PWM converters", IEEE Trans. on Power Electron., vol. 15, pp.185-193, Jan. 2000.
- [6] Bodur H., Bakan A. F., "A new ZVT-PWM DC-DC converter", IEEE Trans. on Power Electron., vol. 17, pp.40-47, Jan. 2002.
- [7] Bodur H., Aksoy İ., Akın B., "DC-DC dönüştürücülerde yumuşak anahtarlama teknikleri", Kaynak Elektrik, Haziran 2002, Sayı 158, Sayfa 100-108.
- [8] Bodur H., Bakan A.F., Baysal M., "A detailed analytical analysis of a passive resonant snubber cell perfectly constructed for a pulse width modulated DC-DC buck converter", Electrical Engineering, Springer-Verlag, Berlin, vol.85, no.1, pp.45-52, February 2003.
- [9] Bodur H., Bakan A.F., "An improved ZCT-PWM DC-DC converter for high-power and frequency applications", IEEE Trans. on Ind. Electron., vol.51, no.1, pp.89-95, February 2004.
- [10] Bodur H., Bakan A.F., "A new ZVT-ZCT-PWM DC-DC converter", IEEE Trans. on Power Electron., vol.19, no.3, pp.676-684, May 2004.
- [11] Obdan H., Bodur H., Aksoy İ., Bekiroğlu N., Yıldırım G., "A new parallel resonant DC link for soft switching inverters", Electric Power Components and Systems, vol.33, no.2, pp.159-169, Feb 2005.
- [12] Aksoy İ., Bodur H., Obdan H., Bekiroğlu N., "Analysis and simulation of active clamped quasi-resonant DC link inverter", Applications of Electrical Engineering (AEE'05), Prague (Czech Republic), March 13-15, 2005, pp.225-230.