

Üç-Fazlı Üç-Düzeyle Nötr Noktası Bağlantılı Evirici ve Uygulamaları

Bülent Üstüntepe Ahmet M. Hava

ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
İnönü Bulvarı 06531 Ankara
bustuntepe@yahoo.com hava@metu.edu.tr

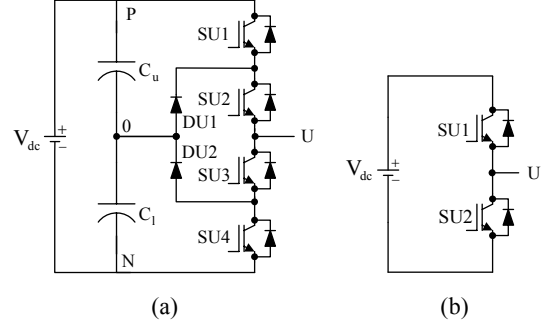
Anahtar sözcükler: Üç-düzeyle evirici, AC motor, sürücü, modülasyon, uzay vektörü, nötr noktası gerilimi

ABSTRACT

In this work, the three-level neutral-point-clamped inverter that has been generally utilized in industry for the 400V AC line and above voltage levels is investigated. The performance of the three-level inverter is compared with the classical two-level inverter. The modulation and neutral point potential control methods are investigated. The work is supported by experimental results.

1. GİRİŞ

Eviriciler sabit DC gerilimi AC gerilime dönüştürmekte kullanılan güç elektroniği devreleridir. Üç-fazlı AC motor sürücü ve kesintisiz güç kaynağı (KKG) uygulamaları eviricilerin temel kullanım alanlarıdır. Şekil 1.b’de bir fazı (bacağı) gösterilen iki-düzeyle evirici devre topolojisi ekonomikliği ve kullanım kolaylığı nedeni ile yaygın olarak kullanılır. Eviricide anahtarlama kayıplarını azaltmak amacıyla yarı-iletken anahtarların geçiş zamanı kısa tutulur. Ancak yüksek şebeke gerilimi seviyelerinde ($V_{LLrms} \geq 400$ V), iki-düzeyle eviricide anahtarlama sırasında yüksek dv/dt oranı oluşur. Örnek olarak 400 V şebeke geriliminde yaklaşık olarak 500 V DC bara gerilimi oluşur ve 100 ns anahtar geçiş zamanı değeri için dv/dt oranı 5kV/μs gibi yüksek bir değere ulaşır. Bu yüksek değer özellikle uzun kablolu motor sürücü uygulamalarında gerilim yansıması sonucu stator sargısı izolasyon delinmesi, boşalma akımları nedeniyle motor rulmanlarında aşınma ve çevre ile elektromanyetik girişim gibi sorunlar yaratır [1]. Sonuç olarak iki-düzeyle evirici yüksek gerilim ve güç uygulamalarında yetersiz kalır ve eviricide yapısal değişime gereksinim duyulur. En yaygın yaklaşımda çıkış gerilimi basamak sayısı artırılır ve dv/dt oranı düşürülür. İlk geliştirilen ve günümüzde 400 V ve üstü şebeke gerilimlerinde çok yaygın olarak kullanılan çok-düzeyle evirici devresi, Şekil 1.a’da bir fazı gösterilen ve 25 yıl önce icat edilen üç-düzeyle nötr noktası (“0”) bağlantılı eviricidir [2]. Bu topoloji, özellikle megavat ölçeğinde ve asenkron motor sürücülerinde havalandırıcı, pompa, cer (tren, lokomotif), vb. uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde de kullanımı önemli boyutta olan üç-düzeyle nötr noktası bağlantılı evirici ülkemizde iyi bilinmemekte ve dolayısıyla üretimi henüz yapılamamaktadır. Bu çalışmada bu eviricinin ana özelliklerinin tanıtımı amaçlanmaktadır.



Şekil 1 Evirici devre topolojileri bir faz diyagramları; (a) üç-düzeyle evirici, (b) iki-düzeyle evirici.

2. ÜÇ-DÜZEYLE NÖTR NOKTASI BAĞLANTILI EVİRİCİ

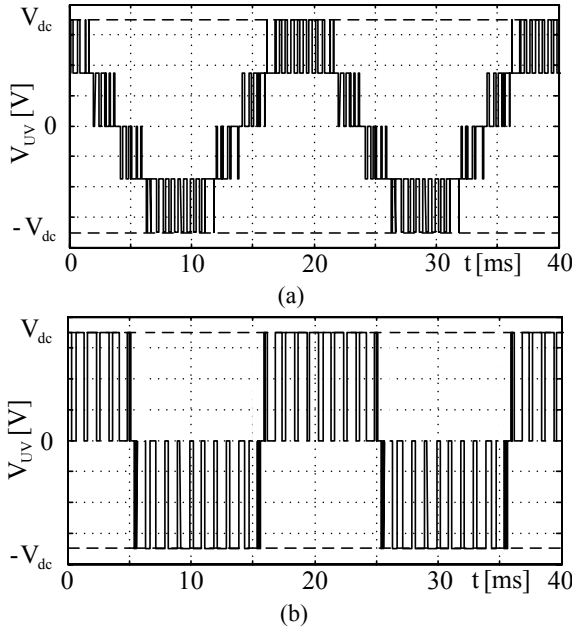
Üç-düzeyle evirici faz başına ters-paralel diyotlarıyla birlikte dört adet kapıdan kesime sürülebilir yarı-iletken anahtar ve iki adet nötr noktası bağlantı diyotu kullanılmaktadır. Üç-fazlı üç-düzeyle evirici toplam oniki adet kontrol edilebilir yarı-iletken anahtar ve altı adet nötr noktası bağlantı diyotundan oluşmaktadır. Şekil 1.a’da gösterilen bir faz diyagramında SU1 ve SU4 anahtarları “dış anahtarlar,” SU2 ve SU3 ise “iç anahtarlar” olarak adlandırılır. DU1 ve DU2 ise nötr noktası bağlantı diyotlarıdır. Tablo 1, üç-düzeyle eviricide anahtarlama durumlarını ve bunlara göre oluşan faz-nötr arası çıkış gerilimini göstermektedir. Üç-düzeyle eviricide SU1 ile SU3 ve SU2 ile SU4 anahtarları birbirlerinin tersi olarak ilettime ve kesime girmektedir (SU1 ilettime ise SU3 kesimde olmalıdır). Üç-düzeyle eviricide yarı-iletken anahtarlama elemanları anahtarlanırken uyulması gereken iki önemli kural vardır. Bunlardan birincisi; dıştaki anahtarlar sadece içteki yakın anahtar ilettime iken ilettime sokulabilir. Örnek olarak, SU1 sadece SU2 anahtarı ilettime ise ilettime sokulabilir. SU4 ise SU3 ilettime ise ilettime sokulabilir. İkinci kural; içteki yarı-iletken anahtarlar ilgili dıştaki anahtar kesimde ise kesime sokulabilir. Örneğin SU2 anahtarı sadece SU1 anahtarı kesimde iken kesime sokulabilir. SU3 anahtarı sadece SU4 anahtarı kesimde ise kesime sokulabilir.

Tablo 1 Üç-düzeyle evirici anahtarlama durumları (“1”: İlettime ve “0”: Kesimde)

Anahtarlama durumu	Faz gerilimi (V_{U0})
SU1=1, SU2=1 (SU3=0, SU4=0)	$+V_{dc}/2$
SU2=1, SU3=1 (SU1=0, SU4=0)	0
SU3=1, SU4=1 (SU1=0, SU2=0)	$-V_{dc}/2$

Anahtarlama kurallarına uygun olarak ve ayrıca iyi bir darbe genişlik modülasyonu (DGM) darbe şablonu kullanılarak gerilim üretildiğinde üç-düzeyle evirici ve iki-düzeyle evirici faz arası çıkış gerilimleri sırasıyla Şekil 2.a ve Şekil 2.b'de gösterilmektedir. Şekil 2.a'da görüldüğü gibi, üç-düzeyle evirici faz arası çıkış gerilimi beş farklı gerilim seviyesinden oluşur ($-V_{dc}$, $-V_{dc}/2$, 0 , $V_{dc}/2$, V_{dc}). İki-düzeyle evirici faz arası çıkış gerilimi ise üç farklı gerilim seviyesinden oluşur ($-V_{dc}$, 0 , V_{dc}). Böylece üç-düzeyle eviricide iki-düzeyle eviriciye göre daha sinüse yakın (harmonisi az) çıkış gerilimi elde edilir. Çıkış gerilim harmonikleri anahtarlama frekansının iki katı ve üstünde belirir ve şiddetleri de iki-düzeyle eviricidekinin yarısıdır. Bu nedenle üç-düzeyle evirici yük akımının DGM dalgacıkları daha yüksek frekans ve küçük şiddettedir. Ancak artan anahtar sayısı dolayısıyla denetim karmaşası iki-düzeyle eviriciye göre daha yüksektir.

Üç-düzeyle eviricinin donanımı iki-düzeyle eviriciye göre daha karmaşık ve pahalıdır. Kullanılan yarı-iletken anahtar ve sürücü devrelerinin sayısı iki-düzeyle eviricidekinin iki katıdır. Ayrıca nötr noktası bağlantısında altı adet hızlı diyot kullanılmaktadır. Ancak kesimdeki anahtarlara DC bara geriliminin yarısı uygulandığı için (iki-düzeyle eviricidekinin yarısı) anahtarlar ekonomik ve verimlidir. Zira yüksek gerilim yarı-iletken anahtarları pahalı ve yüksek kayıplıdır. Dolayısıyla, doğal olarak yüksek gerilim/güç uygulamalarında iki-düzeyle eviricide anahtarları seri bağlayarak gerilim ve güç arttırmak yerine, üç-düzeyle evirici topolojisi kullanılır. Üç-düzeyle eviricinin temel sorunu olan nötr noktası geriliminin kayma/salınma problemi etkin denetim yöntemleri ile giderildiğinde, bu topoloji yüksek güç ve gerilimlerde en uygun seçenek olmakta ve yaygın olarak kullanılmaktadır [3].



Şekil 2 Faz arası çıkış gerilimleri; (a) üç-düzeyle evirici, (b) iki-düzeyle evirici.

3. ÜÇ-DÜZEYLİ EVİRİCİ UZAY VEKTÖR MODÜLASYON TEKNİĞİ

Uzay vektör yaklaşımında üç-fazlı evirici ve yük değişkenleri (gerilimler ve akımlar) (1) kullanılarak karmaşık değişkenlere dönüştürülür.

$$V = \frac{2}{3}(V_u + a \cdot V_v + a^2 \cdot V_w) \quad (1)$$

$$a = e^{-j120} \quad (2)$$

Üç-düzeyle eviricinin her bir fazı üç farklı anahtarlama konumuna sahiptir. Faz çıkışı bu anahtarlama durumlarında artı DC baraya (P), eksi DC baraya (N) veya nötr noktasına (0) bağlanabilmektedir. Sonuç olarak üç-fazlı üç-düzeyle evirici $3^3=27$ farklı anahtarlama durumuna sahiptir. Eşitlik (1) kullanılarak 27 anahtarlama durumunda çıkış gerilimleri karmaşık değişkenlere dönüştürüldüğünde karmaşık düzlemde 19 farklı vektör elde edilir. Çıkış gerilimi uzay vektörleri uzayda her 60° de bir tekrarlanır. Şekil 3 ilk 60° 'lik bölgedeki uzay vektörleri göstermektedir. Vektörler sıfır (op, oo, on), küçük (ap, an, bp, bn), orta (c) ve büyük (a, b) olmak üzere dört tiptedir. Uzay vektör modülasyonu yaklaşımında bir DGM periyodu T'deki evirici çıkış gerilimi ve referans gerilimi vektör volt-saniye değerleri eşitlenir. Üç-düzeyle eviricide yaygın olarak kullanılan uzay vektör modülasyon tekniği "En Yakın Üçgen Vektör" (EYÜV) tekniğidir [4]. Bu teknikte, (1) kullanılarak elde edilen referans gerilimi vektörünün uç noktasının içinde bulunduğu üçgensel bölgeyi oluşturan üç-düzeyle evirici çıkış gerilim vektörleri (en yakın vektörler) referans gerilim vektörünü oluşturmak için belirli sürelerde kullanılırlar. Kullanılacak olan çıkış gerilim vektörlerinin süreleri, T_k , T_{k+1} ve T_{k+2} , (3) karmaşık sayı denklemi ve (4) kullanılarak hesaplanır.

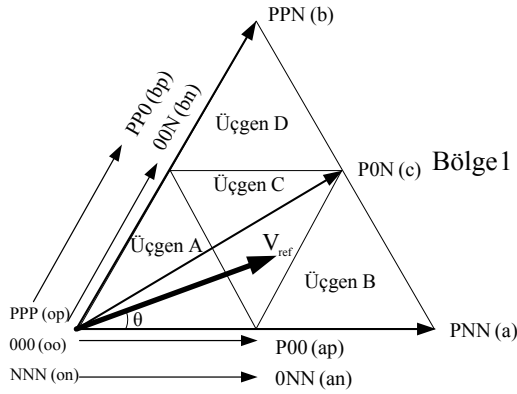
$$V^* \cdot T = V_k \cdot T_k + V_{k+1} \cdot T_{k+1} + V_{k+2} \cdot T_{k+2} \quad (3)$$

$$T = T_k + T_{k+1} + T_{k+2} \quad (4)$$

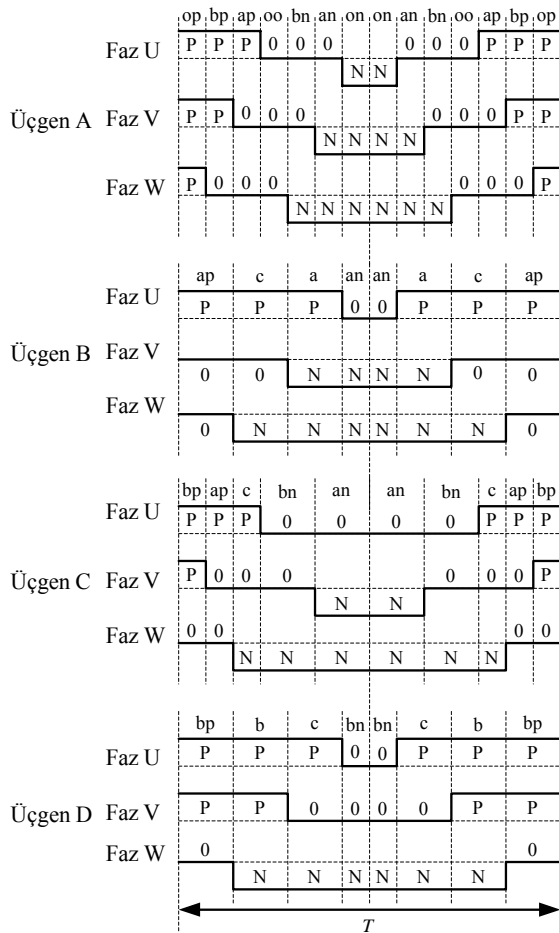
Vektörlerin kullanım sıraları en az anahtarlama ile en yüksek kaliteli çıkış gerilimi dalgasını üretme mantığına göre belirlenir. EYÜV tekniğinde yaygın olarak kullanılan ve bu başarımlı ölçütlerini sağlayan darbe şablonu Şekil 4'te gösterilmektedir [4]. Elde edilen vektör kullanım süreleri ve darbe şablonu kullanılarak yarı-iletken anahtarların bir DGM periyodundaki iletim süreleri hesaplanır.

Evirici referans gerilimi vektörü şiddeti V_m^* 'nin (sinüs faz referans gerilimi şiddetinin) eviricinin DGM uygulayarak temel frekansta üretebileceği en yüksek faz gerilimi şiddetine oranı modülasyon indeksi M_i olarak tanımlanır ve M_i eviricinin gerilim kullanım oranının göstergesidir.

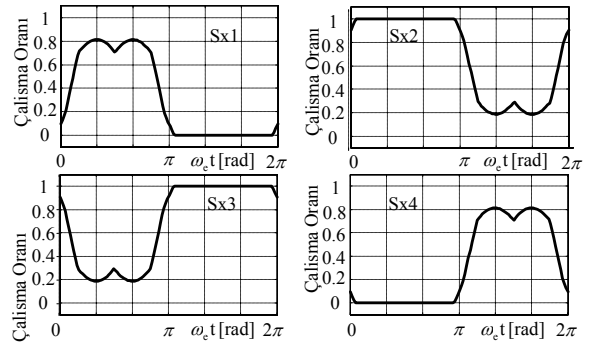
$$M_i = V_m^* / (V_{dc} / \sqrt{3}) \quad (5)$$



Şekil 3 Üç-düzeyle evirici çıkış gerilimi uzay vektör gösterimi (altgende ilk 60°).



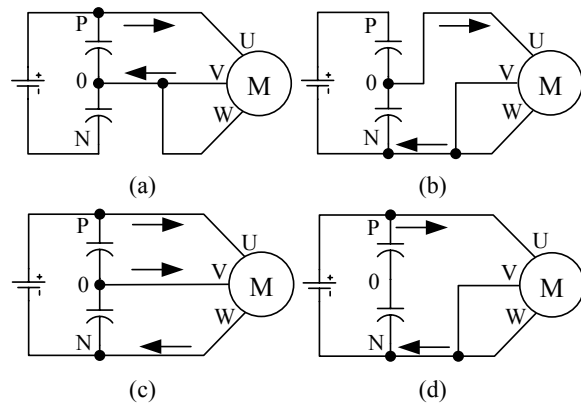
Kararlı halde sinüs referans gerilimleri ve $M_i=0.72$ için elde edilen anahtar iletim sürelerinin DGM periyoduna oranı (t_{on}/T) (çalışma oranı) Şekil 5'te gösterilmektedir. Şekilde gösterildiği gibi iç anahtarlar SU2 ve SU3'ün çalışma oranları yaklaşık yarım temel periyot boyunca 1'e eşittir (anahtarlar sürekli iletimdedirler). Bu yüzden SU2 ve SU3'ün iletim kayıpları dıştaki anahtar SU1 ve SU4'e oranla daha yüksektir. Aynı nedenle nötr noktası bağlantı diyotlarının da iletim kaybı yüksektir. Bu bilgiler tasarımda önemlidir.



Şekil 5 Üç-düzeyle evirici yarı-iletken anahtarlarının çalışma oranları (x:U, V, W).

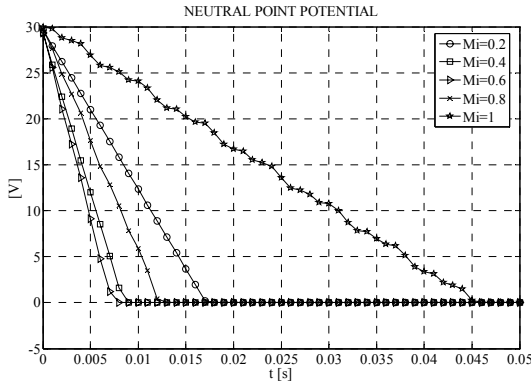
4. ORTA NOKTA (NÖTR) GERİLİMİ

Üç-düzeyle eviricinin en önemli sorunu olan olan nötr noktası geriliminin kayması ve/veya salınım yapması kullanılan darbe şablonu ile ilişkilidir. Kullanılan darbe şablonu sonucu oluşan anahtarlama durumları ve yük akımlarının işaretlerine bağlı olarak nötr noktasına akım girer ya da çıkar (bkz. Şekil 6). Şekil 6.a'da gösterildiği gibi nötr noktasına akım akması durumunda nötr noktası gerilimi daha büyük değerlere doğru kayar. Şekil 6.b'de gösterilen akım çekilmesi durumunda ise nötr noktası gerilimi aşağı doğru kayar. Nötr noktası geriliminin düşük frekansta salınım yapması da kullanılan darbe şablonunun sonucudur. Şekil 6.c'de düşük frekans (tipik olarak çıkış temel frekansının üç katı frekans) salınımlarına neden olan anahtarlama durumu (Şekil 3'te "c" gerilim vektörü) gösterilmektedir. Nötr noktası kullanılmadığında (Şekil 6.d) söz konusu problemlerle karşılaşmaz. Nötr noktası gerilimi modülasyon indeksine de bağlıdır. $M_i \leq 0.5$ için nötr noktası üzerinde düşük frekansta salınımlar görülmez. $M_i > 0.5$ için ise görülür. Düşük frekanstaki salınımların genlikleri yük güç katsayısına (PF) da bağlıdır. PF düştükçe düşük frekanstaki salınımların genlikleri artar. Kayma veya salınım miktarı %3-5'ten fazla olursa çıkış gerilimi bozulur ve daha önemlisi anahtarlar aşırı gerilimden zarar görür ve bozulur. Ancak kullanılan darbe şablonu üzerinde değişiklikler yapılarak nötr noktası gerilimi denetim altında tutulabilir ve bu sorun tamamen giderilebilir [3].



Şekil 6 Üç-düzeyle evirici anahtarlama durumlarının nötr noktası gerilimine etkilerini gösteren örnek durumlar.

İki parametre yönteminde, referans gerilim vektörü iç altıgende (Şekil 3, A üçgeni) iken nötr noktası gerilim hatasını sıfırlamak için tekrarlı vektörler (Şekil 3, (ap), (an) ve (bp), (bn)) kullanılır. Referans gerilim vektörü iç altıgende değilse, orta vektör (Şekil 3 (c)) komşu büyük vektörlere (Şekil 3 (a) ve (b)) dağıtılarak nötr nokta dengesi sağlanır. Bu yöntem uygulandığında, nötr noktasındaki kayma ve/veya salınım en kısa zamanda en aza indirilebilir. Şekil 7’de nötr nokta gerilimi 30V iken bunu iki parametre yöntemiyle sıfıra indirme dinamiği bilgisayar benzetimi ile incelenmiştir. Yöntemin başarımı her koşulda yüksek olup hatayı sıfırlamaktadır.



Şekil 7 Çeşitli M_i değerleri ve $PF=1$ için iki parametrelili nötr nokta denetimiyle nötr gerilimi hatasının sıfırlanması.

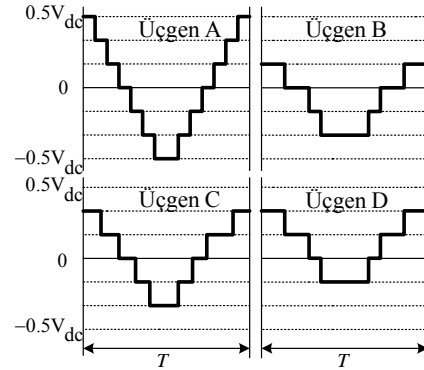
5. ORTAK MOD GERİLİMİ

Eviricilerin önemli bir özelliği yükün yıldız noktası ile toprak arası gerilim olan ortak mod gerilimidir. Yüksek frekanstaki bozucu etkilerin (sargı izolasyon delinmesi, yataklarda aşınma, kaçak akım, elektronik devrelerde gürültü) az olması için bu gerilimin ve değişim hızının (dv/dt) düşük olması istenir. EYÜV kullanıldığında, $M_i \leq 0.5$ için ortak mod gerilimi Şekil 8’de Üçgen A ile gösterildiği gibidir. Ortak mod geriliminin en büyük değeri iki-düzeyle evirici ile aynı olup $V_{dc}/2$ şiddetindedir. Ancak iki-düzeyle eviricide basamaklar $V_{dc}/3$ şiddetindeyken üç-düzeyle eviricide bunun yarısı kadardır. Böylece daha düşük dv/dt oranı elde edilir. $M_i > 0.5$ için ortak mod gerilimi iki-düzeyle eviriciye göre daha düşüktür. Ortak mod gerilimin en büyük değeri $V_{dc}/3$ olup değişim yine $V_{dc}/6$ küçük adımlarıyla olmaktadır. Bu durum Şekil 6’da Üçgen B, C ve D’de gösterilmektedir. Böylece tüm çalışma bölgelerinde üç-düzeyle eviricinin iki-düzeyleye göre ortak mod gerilim bakımından üstün olduğu görülür.

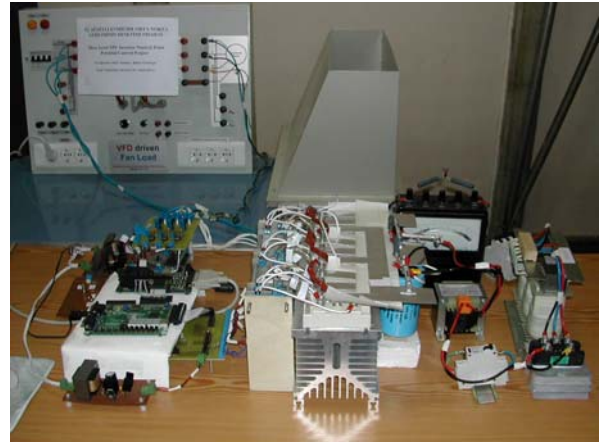
6. DENEY SONUÇLARI

ODTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü, Güç Elektroniği Laboratuvarında tasarlanan birer adet 5kVA gücünde iki-düzeyle ve üç-düzeyle evirici deneysel olarak 2.2 kW asenkron motorun sürdüğü bir havalandırıcı yükü ile yüklenmiş ve deneysel olarak değerlendirilmiştir. Her iki evirici sisteminde de girişte $400 V_{LLrms}$, 50 Hz AC şebekeden beslenen

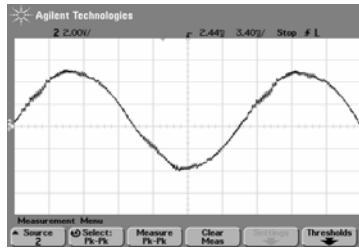
diyotlu doğrultucu kullanılarak 550 V DC bara gerilimi elde edilmiştir. Havalandırıcı yükü için açık çevrim hız denetimi yeterli olduğundan eviriciler sabit V/f oranlı ($220 V / 50 Hz$) deneteçle sürülmüştür. Denetim ortamı TMS320C2808 DSP tabanlıdır. Her iki eviricide de taşıyıcı frekansı 5 kHz olarak seçilmiştir. Motorun 1250 min^{-1} hızda döndüğü çalışma durumunda ($f^* = 45 Hz$), eviricilerin çıkış akımı ve ortak mod gerilimi incelenmiştir. Şekil 9’da deneysel sistemin fotoğrafı görülmektedir. Şekil 10’da görüldüğü gibi, üç-düzeyle evirici motor faz akımı dalgacıkları iki-düzeyleye göre çok daha azdır (yaklaşık $1/2$ kat). Şekil 11’de görüldüğü gibi üç-düzeyle eviricide ortak mod geriliminin dv/dt oranı daha düşüktür ve ayrıca sözkonusu çalışma bölgesinde şiddeti de daha azdır. Dolayısıyla ortak mod geriliminin zarar verici etkileri iki-düzeyleye göre daha azdır. Şekil 12’de geliştirilen iki parametrelili nötr noktası denetim yöntemiyle yüksek M_i çalışma koşulunda çalışırken nötr noktası geriliminin denetlenişi gösterilmektedir. Şekilde osilogramın ilk (sol) yarısında denetim yapılmazken ikinci (sağ) yarısında geliştirilen yöntemle denetim yapılarak nötr noktası gerilimi kaymasının yokedildiği ve salınımının bastırıldığı görülmektedir.



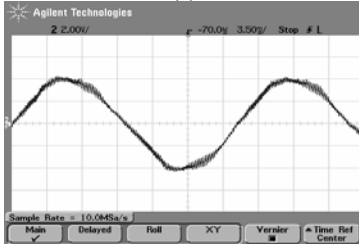
Şekil 8 Üç-düzeyle evirici ortak mod gerilimleri.



Şekil 9 Deneysel üç-düzeyle evirici sistemi ve havalandırıcı yük sistemi.

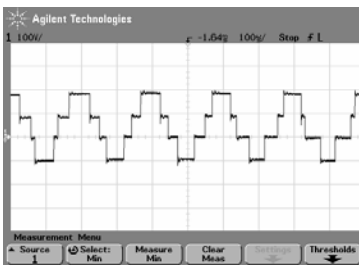


(a)

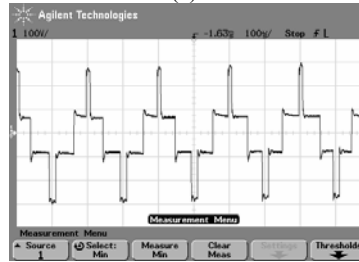


(b)

Şekil 10 Motor akımları; (a) Üç-düzeyleyici, (b) İki-düzeyleyici (2A/bölme, 3.5ms/bölme).

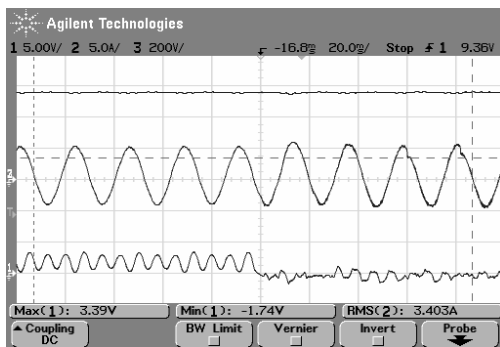


(a)



(b)

Şekil 11 Ortak mod gerilimleri; (a) Üç-düzeyleyici, (b) İki-düzeyleyici (100V/bölme, 100µs/bölme).

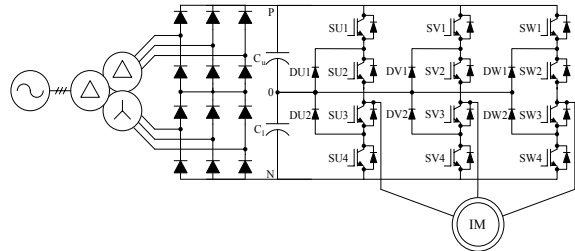


Şekil 12 $M_i=0.87$ çalışma noktasında DC bara toplam gerilimi, motor faz akımı ve nötr nokta gerilimi (Ölçekler: 5V/bölme, 5A/bölme, 200V/bölme, 20ms/bölme).

7. UYGULAMALAR

Üç-düzeyleyici eviriciler 400 V AC ve üstünde geniş gerilim ve güç değerlerinde kullanılmaktadır. Ancak özellikle 1000 V DC bara ve megavat ve üstü güç

uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir [5], [6]. Şekil 13'de giriş akım kalitesini yükseltici oniki-darbe giriş doğrultuculu üç-düzeyleyici evirici motor sürücüsü devre diyagramı gösterilmektedir. Havalandırıcı, pompa, kompresör, lokomotif, dev-yük kamyonu vb. yükler bu tip motor sürücülerinin tipik uygulama alanlarıdır. Sağladıkları enerji verimliliği, güç ve hareket kalitesi nedeniyle kullanımları yaygınlaşmaktadır. Enerjinin her iki doğrultuda da akması gerektiği rejeneratif uygulamalarda, giriş katında da üç düzeyleyici eviricinin kullanımı ile hem enerji şebekeye aktararak enerji verimi yükseltilmekte, hem de şebekeden çekilen akımın toplam harmonik bozulması az ve güç katsayısı yüksek yapılabilmektedir.



Şekil 13 Üç-düzeyleyici motor sürücü diyagramı.

8. SONUÇ

Üç-düzeyleyici eviriciler 400 V AC ve üstünde geniş gerilim ve güç değerlerinde kullanılmaktadır. Modülasyon ve denetim yöntemi karmaşık olan bu tür eviricilerin gerçekleştirilmesi sayısal işaret işleyiciler ve vektör modülasyon/denetim yaklaşımları ile kolaylaşmaktadır. Nötr nokta kayma ve salınımı iki parametre denetim yöntemi ile yokedilebilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] J.M. Erdman, R.J. Kerkman, D.W. Schlegel, and G.L. Skibinski, "Effect of PWM inverters on AC motor bearing currents and shaft voltages," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.32, No.2, pp. 250-259, 1996.
- [2] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.17, No.5, pp.518-523, 1981.
- [3] B. Üstüntepe, "Üç-Düzeyleyici Nötr Noktası Bağlantılı Evirici İçin İki Parametrelili Modülasyon ve Nötr Noktası Denetim Yöntemi," Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Aralık 2005.
- [4] K.Yamanaka, A.M. Hava, H.Kirino, Y.Tanaka, N.Koga, and T.Kume, "A Novel Neutral Point Potential Stabilization Technique Using the Information of Output Current Polarities and Voltage Vector," IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol.38, No:6, pp.1572-1580 Nov/Dec 2002.
- [5] D. Krug and S. Bernet, "Comparison of state-of-the-art voltage source converter topologies for medium voltage applications," IEEE-IAS2003 Conf. Rec. Vol.1, pp. 168-175.
- [6] R. Teichmann and S. Bernet, "A comparison of three-level converters versus two-level converters for low-voltage drives, traction, and utility applications," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.41, No.3, pp. 855-865, 2005.