

2 Seviyeli Gerilim Kaynaklı Evirici için Ölü Zaman Telafisi Yöntemi

Dead Time Compensation Method for 2 Level Voltage Source Inverter

Yusuf Ulu¹, Nazif Hakan Yeniay², Berk Aşçıoğlu³, Ömer Mamuş⁴

¹AVL Araştırma ve Mühendislik
yusuf.ulu@avl.com

²AVL Araştırma ve Mühendislik
hakan.yeniay@avl.com

³AVL Araştırma ve Mühendislik
berk.ascioglu@avl.com

⁴AVL Araştırma ve Mühendislik
omer.mamus@avl.com

Özetçe

Gerilim kaynağı eviriciler (VSI), başta otomotiv olmak üzere endüstriyel hareket kontrolü, savunma, havacılık ve yenilenebilir enerji gibi birçok alanda yaygın uygulama alanına sahiptir. Ölü zaman, PWM gerilim kaynağı eviricinin DC bara kapasitörünün kısa devre durumunda olmasını engellemek için oldukça kritik bir roledir fakat aynı zamanda eviricinin harmonik bozunumu ve buna bağlı olarak da verimi için olumsuz etkiye sahiptir. En popüler tekniklerden biri, faz akımı polaritesi ile birlikte sabit bir ölü zaman geriliminin referans gerilimine eklenerek (DTCV), ölü zamandan dolayı oluşan harmonik bozunumu kompanse etmektir. Bu yazıda, sabit DTCV kullanılan ve kullanılmayan iki adet eviricinin karşılaştırmalı analizi ve benzetişim sonuçları verilmektedir. Her iki yöntem için benzetişim sonuçları MATLAB/Simulink'de elde edilmiştir.

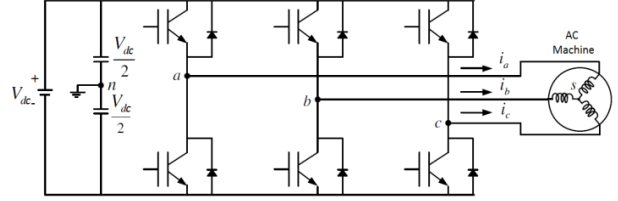
Abstract

Voltage source inverters (VSI) have widespread applications in many fields such as automotive, industrial motion control, defense, aerospace and renewable energy. The dead time plays a very critical role in preventing the DC link capacitor of the PWM voltage source inverter from a shoot-through state, but it also has a negative effect on the harmonic distortion of the inverter and hence its efficiency. One of the most popular techniques is to compensate for harmonic distortion due to dead time by adding a constant dead time voltage to the reference voltage (DTCV) with phase current polarity. In this paper, comparative analysis and simulation results of two inverters with and without fixed DTCV are given. Simulation results for both methods were obtained in MATLAB/Simulink.

1. Giriş

Darbe genişlik modülasyonu-gerilim kaynağı eviricileri (PWM-VSI), ev aletlerinden askeri uygulamalara kadar birçok endüstriyel uygulamada kullanılan popüler sistemlerdir. Bu popüler uygulama alanlarında AC motorların tahriki en önemli

parçalardan biridir. Şekil 1, bir AC makineyi sürmek için bir IGBT'ye sahip üç fazlı bir gerilim kaynağı PWM eviricinin devresini göstermektedir.



Şekil 1: AC motora bağlanmış üç fazlı PWM evirici

Kullanılan IGBT'lerin doğrusal olmayan davranışları bulunmaktadır. Ölü zaman, açma/kapama süresi gecikmesi ve anahtarlama cihazları arasındaki gerilim düşüşü gibi anahtarlama cihazlarının doğal özellikleri, PWM-VSI eviricilerde çıkış geriliminde bozulmaya neden olur. Bu bozulmalar akımın yönüne göre değişebilmektedir. Akım neredeyse sıfır olduğunda, sıfır akım kenetlenmesi nedeniyle çıkış akımı dalga biçimi bozulur [1]. Bu bozucu etkenler arasında en dikkat çekici olanı anahtarların açma ve kapama sürelerinin eşit olmayışı sebebiyle PWM sinyallerine eklenen ölü zaman süresidir.

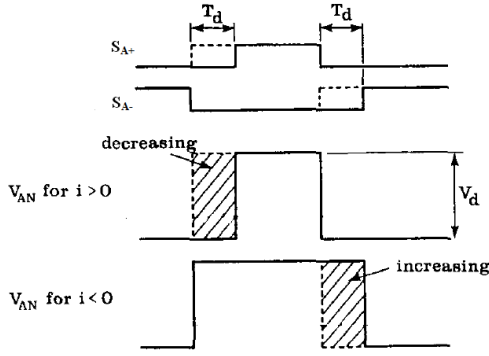
Literatürde, gerilim kaynaklı eviriciler için ölü zaman kompanzasyonu hakkında birçok çalışma mevcuttur. Kompanzasyonun on-line ve adaptif olarak sağlandığı çalışmalar gerçekleştirilmiştir fakat bu sistemler fazlardan gözlemci ve ileri besleme bağlantısı gerektirmektedir [1-5]. [6] numaralı çalışmada faz akımlarının, ölü zaman sırasında yüksek bir hassasiyet ve örnekleme ile ölçülerek kompanzasyon doğruluğunun artırılması amaçlanmıştır ancak bu sistem yüksek maliyetli ADC (Analog Dijital Dönüştürücü) kullanımı gerektirmektedir. [7] numaralı çalışmada ise motorun stator akımı ile lineer orantılı şekilde değişen bir ölü zaman kompanzasyon gerilimi sağlanmıştır fakat bu çalışmada ölü zaman kompanzasyon gerilimi eğrisinin doğru belirlenmesi oldukça kritiktir. Çeşitli makine öğrenmesi teknikleri kullanılarak ölü zaman kompanzasyonunun

sağlandığı çalışmalar da mevcuttur. [8] numaralı çalışmada SVR (Support Vector Regression) yöntemi kullanılarak ölü zaman kompanzasyon gerilimi kestirilmek istenmiş olsa da, bu yöntem bir çok ek donanıma ve işlemci gücüne ihtiyaç duyar.

Bu çalışmada ölü zaman kompanzasyon gerilimi off-line yöntemle belirlenmiş ve bu yöntem bir motor kontrol sistemindeki eviriciye uygulanarak, DTCV içeren ve içermeyen sistemlerin MATLAB/Simulink benzetişim çıktıları kıyaslanmıştır. Anahtar elemanları üzerindeki gerilim düşümleri ve diğer bazı parazitik etkilerin (parazitik endüktans, kapasitans vb.) ihmal edilebilir düzeyde olmasından dolayı bu çalışmada dikkate alınmamıştır.

2. Gerilim Kaynaklı Eviricilerde Ölü Zaman Etkisi

Şekil 2, bir eviricinin bir fazına ait PWM sinyallerini ve çıkış gerilimi göstermektedir. Şekil 2'de gösterildiği gibi, PWM sinyallerinin yükselen kenarları, DC bara geriliminin kısa devre olmasını önlemek için geciktirilir. T_d gecikme süresi birkaç mikro saniye arasında değişir. Bu ölü süre boyunca, açma sinyallerinin olmaması nedeniyle akım, anahtarlar cihazlarından akamaz. Akımın akabilmesinin tek yolu, faz akımının polaritesine bağlı olarak üst veya alt serbest diyotlardır.



Şekil 2: Evirici anahtarlama sinyalleri ve çıkış gerilimleri [9]

Şekil 2'den de anlaşılacağı üzere ölü zamanın eviricinin çıkış gerilimine etkileri akım polaritesine göre aşağıdaki gibi farklı şekiller gösterir.

Faz akımı pozitif durumunda; üst anahtar açılırken ve alt anahtar kapanması esnasında ölü zaman süresince akım alt diyottan akar ve t_{on} açma gecikme süresinden sonra faz akımı üst anahtar üzerinden akmaya başlar. Bu esnada, ölü zaman süresinde çıkış gerilimi istenen referans gerilimden daha az bir gerilim aktarılmış olur. Üst anahtarın kapanmaya ve alt anahtarın açılmaya gittiği esnada ise anahtarın kapanma gecikme süresinden sonra üst anahtardan akan akım, alt diyottan akmaya başlar.

Faz akımı negatif durumunda; üst anahtar açılırken ve alt anahtar kapanması esnasında, kapanma gecikme süresinden sonra alt anahtardan akan akım üst diyottan akmaya başlar. Üst anahtar kapanırken ve alt anahtarın açılmaya başladığı esnada ölü zaman süresince akım üst diyottan ve anahtar açılma süresi gecikmesinden sonra akım anahtar üzerinden

akmaya başlar. Bunun sonucu olarak evirici çıkış geriliminde hata oluşur ve bu ölü zaman süresinde istenen referans gerilimden daha fazla gerilim motora aktarılmış olur. Dolayısıyla, evirici çıkış gerilimleri ölü zamandan dolayı referans gerilimlerden sapar. Sonuç olarak, faz akımı dalga biçimleri bozulur ve düşük dereceli harmonikler içerir. Faz akımının bu düşük dereceli harmonikleri, tork dalgalanmalarına neden olur ve sistem performansını olumsuz yönde etkiler.

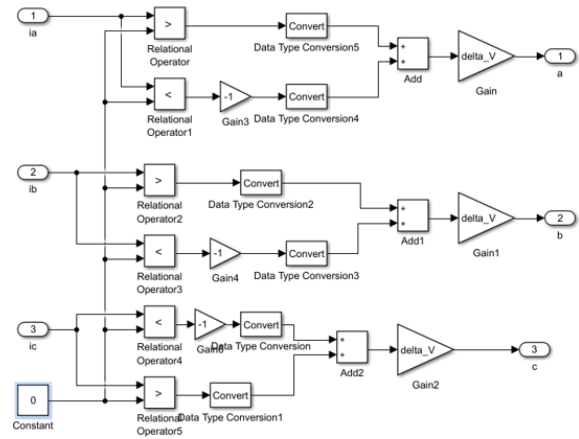
Ölü zaman telafi gerilimi (DTCV), uygulaması kolay popüler bir tekniktir. Sistemde yalnızca faz akımının polaritesi, ölü zaman ve DC-link gerilimini gerektirir. DTCV'nin temel prensibi, vektör kontrollü motor sürücü sisteminde akım denetleyiciden üretilen referans faz gerilimlerine bir kompanzasyon gerilimi eklemektir. Ölü zaman telafi gerilimi şu şekilde ifade edilebilir:

$$DTCV = \frac{T_c}{T_s} V_{dc} \text{sgn}(i) \quad (1)$$

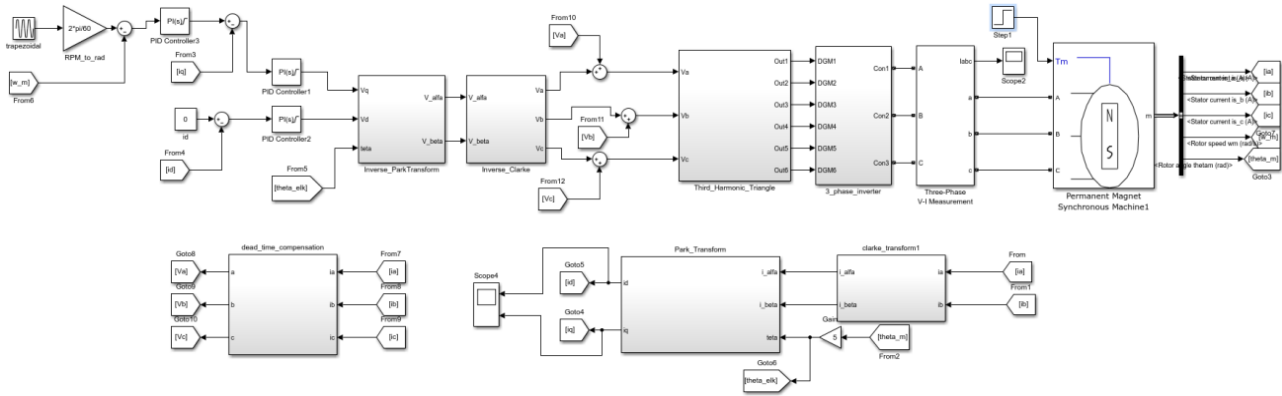
Yukarıdaki denklemde T_c ölü zaman, T_s anahtarlama periyodu, V_{dc} DC link gerilimi ve i motor faz akımıdır. DTCV tekniği, açma/kapama gecikme süresini ve anahtarlama cihazının açık durum gerilimini dikkate almaz.

3. Karşılaştırmalı Benzetim Analizi

Benzetim çalışmasında alan yönlendirmeli kontrol tekniği ile 3 fazlı bir evirici üzerinden dahili mıknatıslı bir senkron motorun hız kontrolü gerçekleştirilmiştir. Ölü zaman kompanzasyon bloğuna motor faz akımları giriş olarak verilir, akımların polaritesine bakılarak kompanzasyon geriliminin hesaplandığı açıkça görülmektedir. Matlab/SIMULINK programında gerçekleştirilmiş her iki benzetimde de aynı motor kontrol algoritması, dahili mıknatıslı senkron motor ve evirici kullanılmış olup tek fark, ölü zaman düzeltme bloğunun benzetime eklenip eklenmeme durumudur. Benzetimdeki hız kontrolünden motora 300 rad/s değerinde bir hız referansı uygulanmış ve yük torku ise 1.2 Nm olarak seçilmiştir. Ölü zaman kompanzasyon bloğunun içi Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3: Ölü zaman kompanzasyon bloğu



Şekil 4: Sabit mıknatıslı senkron motorun ölü zaman kompanzasyonu ile hız kontrol benzetimi

Sabit mıknatıslı senkron motorun (PMSM) DTCV tekniği ile hız kontrolü MATLAB/Simulink programında benzetimi Şekil 4'te verilmiştir.

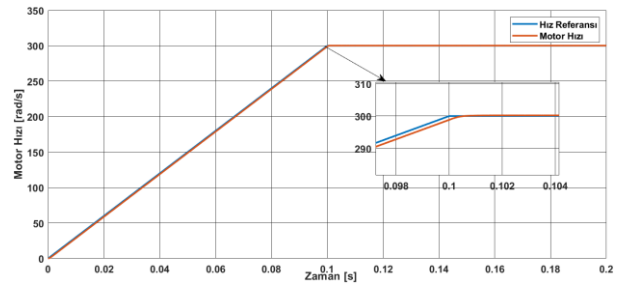
Benzetim çalışmasında motor kontrol yöntemi olarak oldukça popüler bir yöntem olan vektör kontrol yöntemi tercih edilmiştir. Motordan bir pozisyon sensörü sayesinde alınan pozisyon bilgisi ve 3 fazlı motor akımları sırasıyla Clarke ve Park dönüşümleri yapılarak durağan d-q eksen motor akımlarına dönüştürülmüştür. Q-eksen akımı ile motor torku kontrol edilirken, d-eksen akımı ile motor akısını yönlendirmek için kullanılır. Yapılan benzetimde, yüzey monteli sabit mıknatıslı senkron motor kullanıldığından d-eksen referansı sıfır olarak verilmiştir. Hız denetimi iki kapalı çevrim içeren kademeli bir kontrol ile gerçekleştirilir. İçteki çevrimde d-q motor faz akımlarının kontrolü için iki adet PI kullanılmıştır. Dıştaki kapalı çevrimde ise hız kontrolü için bir adet PI kontrolör tercih edilmiştir. Hız PI kontrolörün çıkışı q-eksen PI kontrolörün referans girişidir. D-q eksen akım PI kontrolörünün çıkışında motora verilmek istenen V_d ve V_q eksen gerilimleri elde edilir. V_q ve V_d eksen gerilimleri sırasıyla ters Park ve Clarke dönüşümleri ile V_a , V_b ve V_c referans gerilimlerine dönüştürülmektedir. Bu referans gerilimleri ile ölü zaman kompanzasyon bloğundan çıkan ölü zaman telafi gerilimleri toplandığı Şekil 4'de açıkça görülmektedir. Bu işlemden sonra üçüncü harmonik eklemeli PWM yöntemi ile evircinin güç anahtarlarına verilmek istenen PWM sinyalleri oluşturulup motora istenen referans gerilimleri sağlanarak döngü tamamlanır.

Bu benzetim çalışmasında kullanılan sabit mıknatıslı senkron motora ait parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Senkron motor parametreleri

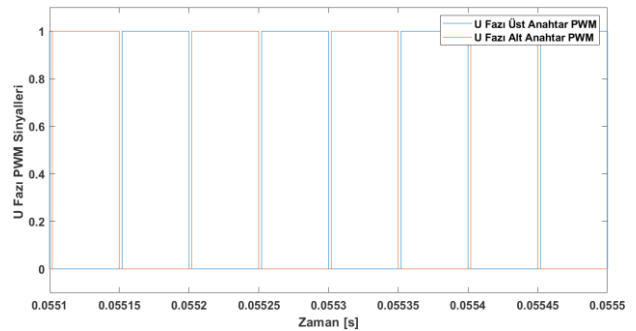
Güç	750 W
Anma Torku	2.4 Nm
Anma Akımı	5 Arms
Anma Hızı	3000 rpm
Kutup Çifti	5
Giriş Gerilimi	311 VDC
Motor Ataleti	1.1 kg x cm ²
Mıknatıs Akısı	0.045255

Yukarıdaki parametreleri verilen sabit mıknatıslı senkron motorun hız kontrolünün başarılı bir şekilde yapıldığı Şekil 5'te görülmektedir.



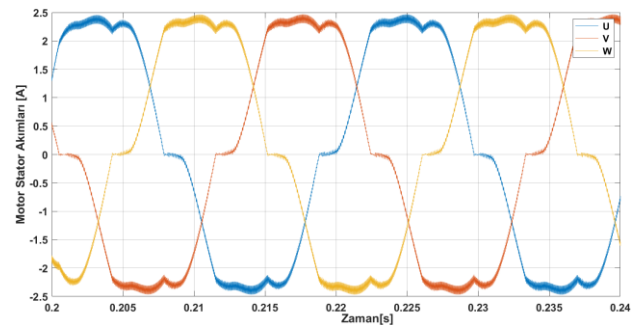
Şekil 5: Hız kontrolü sonucu

Benzetim çalışmasında U fazına ait PWM sinyalleri Şekil 6'da gösterilmiştir. 10 kHz anahtarlama frekansına sahip olan PWM sinyallerinde 2us'lik bir ölü zaman süresi içermektedir.



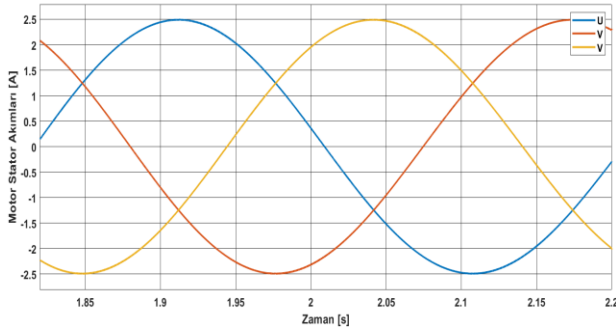
Şekil 6: U fazı PWM sinyalleri

2us ölü zaman süresi sistemde varken ve ölü zaman kompanzasyon gerilimi sisteme eklenmediğinde elde edilen motor akımları Şekil 7'de betimlenmiştir.



Şekil 7: Motor stator akımları (ölü zaman telafi gerilimi eklenmemiş hali)

Yukarıdaki motor stator akımlarında ölü zaman kaynaklı oluşan bozulmalar açıkça görülmektedir. Bu simülasyonda modülasyon indeksi 0.907 olarak hesaplanmıştır. 2us ölü zaman ve 10 kHz (100 us) anahtarlama frekansı için Denklem (1) kullanılarak hesaplanan ölü zaman telafi gerilimi 6.22V olarak hesaplanmıştır. Bu ölü zaman telafi gerilimi V_a , V_b ve V_c motor referans gerilimlerine eklenerek gözlemlenen yeni stator akımları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8: Motor stator akımları (ölü zaman telafi gerilimi eklenmiş hali)

DTCV gerilimin eklenmesi sonucu stator akımlarındaki ölü zaman kaynaklı bozulmaların düzeldiği görülmektedir. Bunu sebebi ölü zaman sebebiyle sisteme eksik veya fazla verilen referans gerilimlerinin DTCV gerilimi sayesinde düzeltilmesi ile olmuştur. Bu simülasyonda modülasyon indeksi artmış ve 0.925 olarak hesaplanmıştır.

4. Sonuçlar

2 seviyeli eviricilerde anahtarlama PWM'indeki zaman gecikmesi performansa olumsuz etkileri bulunmaktadır. Ölü zaman gecikmesinin 3 faz motor akımlarında sinüsoidal yapısını bozduğu ve düşük dereceli harmonikler yarattığı yapılan benzetim çalışmasında açıkça görülmüştür. Motor referans gerilimlerine akım polaritesini dikkate alarak eklenen sabit bir ölü zaman gerilimi sayesinde 3 fazlı motor akımlarında meydana gelen bozulmanın düzeltilebildiği yine yapılan çalışmada ortaya konulmuştur. Bununla birlikte DTCV gerilimi uygulanan üç faz stator akımlarının THD'si %0,4'ün altındayken, DTCV uygulanmayan benzetimde ise yaklaşık 13 kat daha büyük olan %5,4 THD'ye sahip olduğu görülmüştür.

Kaynakça

- [1] Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul, "Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, no. 2, pp. 221-227, Mar 1996.
- [2] Y. Murai, T. Watanabe and H. Iwasaki, "Waveform Distortion and Correction Circuit for PWM Inverters with Switching Lag-Times," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-23, no. 5, pp. 881-886, Sept. 1987.
- [3] A. R. Munoz and T. A. Lipo, "On-line dead-time compensation technique for open-loop PWM-VSI drives," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 4, pp. 683-689, Jul 1999.
- [4] Hyun-Soo Kim, Kyeong-Hwa Kim and Myung-Joong Youn, "On-line dead-time compensation method based on time delay control," in IEEE Transactions on Control

Systems Technology, vol. 11, no. 2, pp. 279-285, Mar 2003.

- [5] N. Urasaki, T. Senjyu, T. Kinjo, T. Funabashi and H. Sekine, "Dead-time compensation strategy for permanent magnet synchronous motor drive taking zero-current clamp and parasitic capacitance effects into account," in IEE Proceedings - Electric Power Applications, vol. 152, no. 4, pp. 845-853, 8 July 2005.
- [6] T. Sukegawa, K. Kamiyama, K. Mizuno, T. Matsui and T. Okuyama, "Fully digital, vector-controlled PWM VSI-fed AC drives with an inverter dead-time compensation strategy," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 3, pp. 552-559, May/June 1991.
- [7] R. P. Joshi and B. K. Bose, "Base/gate drive suppression of inactive power devices of a voltage-fed inverter and precision synthesis of AC voltage and DC link current waves," Industrial Electronics Society, 1990. IECON '90., 16th Annual Conference of IEEE, Pacific Grove, CA, 1990, pp. 1034-1040 vol.2.
- [8] Y. Murai, A. Riyanto, H. Nakamura and K. Matsui, "PWM strategy for high frequency carrier inverters eliminating current clamps during switching dead-time," Conference Record of the 1992 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, TX, USA, 1992, pp. 317-322 vol.1.
- [9] J. Seung-Gi, P. Min-Ho, "The Analysis and Compensation of Dead-Time Effects in PWM Inverters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 38, no. 2, April 1991
- [10] R. B. Sepe and J. H. Lang, "Inverter nonlinearities and discrete-time vector current control," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 1, pp. 62-70, Jan/Feb 1994.
- [11] Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul, "New dead time compensation eliminating zero current clamping in voltage-fed PWM inverter," Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Denver, CO, 1994, pp. 977-984 vol.2.
- [12] S. H. Hwang and J. M. Kim, "Dead Time Compensation Method for Voltage-Fed PWM Inverter," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 25, no. 1, pp. 1-10, March 2010.