

# Rüzgar Türbininde Kullanılan AC/DC Çeviricilerde Uzak Vektörü Modülasyonu Yöntemi ile Kontrol

Cenk Cengiz                      Eyüp Akpınar  
Dokuz Eylül Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Kaynaklar Yerleşkesi, Buca-İzmir  
[cenk.cengiz@eee.deu.edu.tr](mailto:cenk.cengiz@eee.deu.edu.tr), [eyup.akpinar@eee.deu.edu.tr](mailto:eyup.akpinar@eee.deu.edu.tr)

**Özet:** Bu çalışmada rüzgâr türbinine bağlı jeneratör ile şebeke arasındaki AC/DC doğrultucunun uzak vektörü modülasyonu ile kontrolü analiz edilmiştir. Şebeke ile AC/DC doğrultucu arasında bulunan endüktans ve onun direnci dikkate alınmış ve Matlab Simulink’de analiz yapılarak elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Uygulanan algoritma ile giriş güç faktörünün yaklaşık bir olduğu görülmüştür ve giriş akımlarının sinüs dalgası şeklinde şebekeden çekilmesi sağlandığından reaktif güç kompanzasyonuna gerek olmamaktadır.

## 1. Giriş

Son zamanlarda tüm dünyada ve Türkiye’de yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmıştır. Artan nüfus ve sanayileşme ile beraber enerji tüketimi de artmaktadır. Bu artan enerji talebini karşılamak için, gelecekte biteceği bilinen ve çevreye olumsuz etkileri olan fosil yakıtlar yerine kendi öz kaynaklarımız olan yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanmak önemli ölçüde istihdam ve birincil enerji kaynaklarından tasarruf sağlayabilir. Bu yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemlilerinden birisi rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr enerjisinin kullanımı ülkemiz için önemli bir potansiyeldir, temizdir ve her şeyden önemlisi doğal dengeyi olumsuz etkilememektedir.

Rüzgâr gücünden elektriksel güç elde etmede kullanılan sistemin içinde güç elektroniği devresi önemli bir bölümdür. Son yıllarda yüksek akım harmoniği ve düşük güç faktörü altında çalışan diyotlu ve tristörlü AC/DC çeviriciler yerine darbe genişlik bindirimli (PWM) AC/DC çeviriciler yaygınlaşmıştır. Yüksek performanslı bu çeviriciler şebekeden reaktif güç çekmemektedir (giriş güç faktörü bire eşittir), bu yüzden ek bir reaktif güç kompanzasyon devresine gerek yoktur [1].

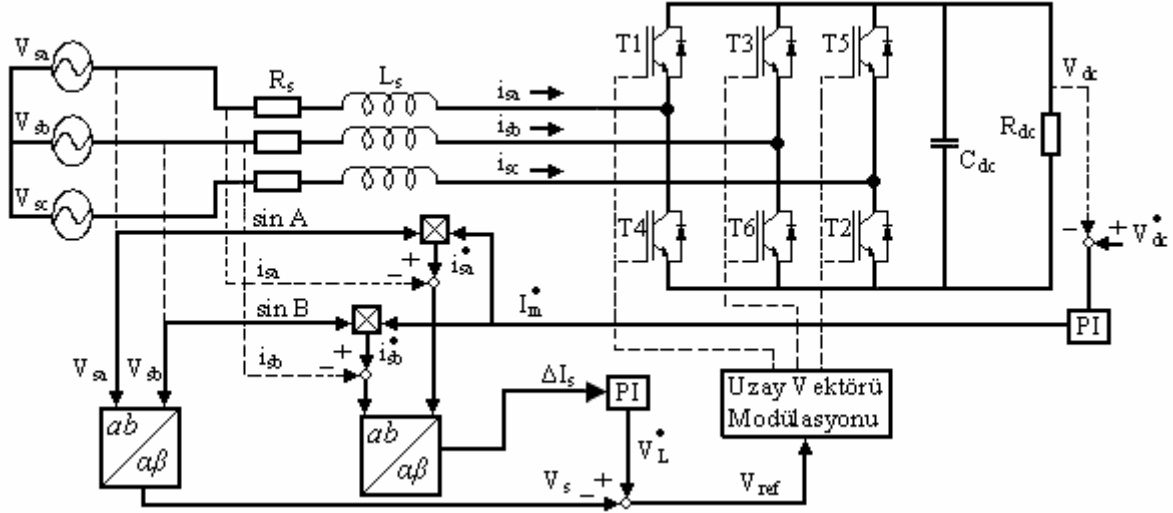
Uzak vektörü modülasyonu tekniği, DSP ve benzeri sayısal kontrol devreleri aracılığı ile kolayca uygulanabilir [2]-[3]. Bu çalışmada, giriş güç faktörünü bir elde etmek ve hat akımlarındaki harmonik bozulmayı minimum seviyede tutmak için, 3-faz gerilim kaynaklı darbe genişlik bindirimli AC/DC çeviricilere uzak vektörü modülasyonu algoritması uygulanacaktır. Bu algoritmada anahtarlama sırası ve süresi, referans gerilim bilgisinin uzak vektörü düzlemindeki pozisyonuna göre hesaplanacaktır.

## 2. Kontrol Sistemi

AC/DC çevirici, çıkışında sabit bir DC gerilim verirken, giriş hat akımları birim güç faktöründe ve sinüs dalga şeklinde tutulabilmektedir. Ayrıca aktif güç akışı her iki yönde de (şebekeden jeneratöre ve jeneratörden şebekeye doğru olmak üzere) kontrol edebilmektedir. 3-Faz şebekede faz geriliminin tepe değeri  $E$ , seri bağlı endüktans  $L_s$  ve direnci  $R_s$  olarak alındığında, AC/DC çevirgeç girişindeki terminal gerilimleri ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [4].

$$\begin{aligned} V_a &= E \sin(\omega t) - R_s i_{sa} - L \frac{di_{sa}}{dt} = V_{sa} - R_s i_{sa} - L \frac{di_{sa}}{dt} \\ V_b &= E \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - R_s i_{sb} - L \frac{di_{sb}}{dt} = V_{sb} - R_s i_{sb} - L \frac{di_{sb}}{dt} \\ V_c &= E \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - R_s i_{sc} - L \frac{di_{sc}}{dt} = V_{sc} - R_s i_{sc} - L \frac{di_{sc}}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

$\omega$  (rad/s) şebeke frekansı;  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$  şebekeden çekilen hat akımlarıdır. 3-Faz gerilim kaynaklı darbe genişlik bindirimli AC/DC çevirici için kontrol sisteminin gösterimi Şekil 1’de verilmiştir. Bu doğrultucunun çıkışı inverter aracılığı ile jeneratöre bağlıdır [5]. Ancak bu çalışmada sistem içerisinde bulunan sadece AC/DC doğrultucu irdelendiği için doğrultucu çıkışı aktarılan aktif güç çıkışa bağlanan  $R_{dc}$  direnci ile temsil ettirilmektedir.



Şekil 1. Darbe genişlik bindirimli AC/DC çeviricinin kontrol devresi

Kontrol devresi DC gerilim regülasyonu (dış döngü) ve faz regülasyonundan (iç döngü) oluşur. Gerçek DC gerilimi ( $V_{dc}$ ), istenen DC gerilimle ( $V_{dc}^*$ ) karşılaştırılır ve çıkan hata ( $\Delta V = V_{dc}^* - V_{dc}$ ) bir PI kontrol devresinden geçirilir. Dış döngüdeki PI çıkışı, referans akımın genliğini ( $I_m^*$ ) oluşturur. Bu genlik değeri, A ve B fazına ait hat gerilimlerinin örneklenmiş biçimi ile çarpılırsa ( $\sin A = \sin(\omega t)$  ve  $\sin B = \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$ )  $i_{sa}^*$  ve  $i_{sb}^*$  referans akımları bulunur. Bu referans akımlarının bir sonraki anahtarlama periyodunda gerçek sinyallere eşit olması istenir. Bu referans akımlardan gerçek akımlar ( $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ) çıkartılıp, elde edilen farklara  $a\beta$  transformasyonu uygulanır, hat akımlarındaki istenen değişim elde edilir. Endüktans üzerinde oluşması istenen gerilim  $V_L^* = L_s \times \Delta I_s / T_s$  'den bulunur. Bu eşitlikte  $T_s$  anahtarlama periyodudur. Dengeli bir durumda, AC/DC çeviricinin AC tarafındaki istenen gerilim komutu ( $V_{ref}$ ) aşağıdaki eşitlikten bulunur [6]:

$$V_{ref} = V_s - L_s \frac{\Delta I_s}{T_s} \quad (2)$$

### 3. Uzay Vektörü Modülasyonu

Uzay vektörü modülasyonu tekniği, referans olarak girilen gerilimi AC/DC çeviricinin çıkışında elde etmek için kullanılan sayısal bir tekniktir. Bu teknikte her örnekleme periyodunda hangi anahtarlama yapılabileceği ve anahtarlama süreleri hesaplanır. Toplam sekiz adet anahtarlama ( $q_1q_2q_3 = 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111$ ) durumu vardır.  $q_1q_2q_3$ , T1, T3 ve T5'in anahtarlama durumlarıdır. Bu anahtarlama durumları, uzay vektörleri ( $V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6, V_7, V_0$ ) cinsinden denklem (3) kullanılarak hesaplanır:

$$\begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{pmatrix} = \frac{2\sqrt{3}}{3\sqrt{2}} V_{dc} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

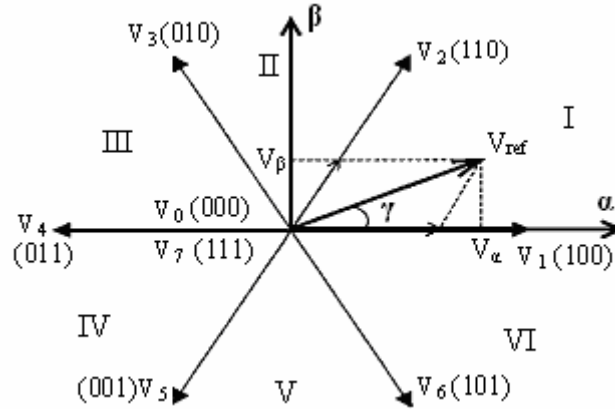
$(\sqrt{3}/\sqrt{2})$  çarpanı hat gerilimleri ve etkin (rms) değerleri ile işlem yapıldığı için eşitlik içinde görülmektedir. Denklem (3)'teki hesaplamalar yapıldığında altı adet vektörün konumu olan

$$V_{n+1} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{dc} e^{jn\frac{\pi}{3}} \quad n=0,1,\dots,5 \quad (4)$$

ile sıfır gerilim uzay vektörleri olan  $V_0=0$  ve  $V_7=0$  elde edilir, bu vektörler Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu vektörlerin altı tanesi aktif gerilim uzay vektörleridir ( $V_{n+1}$ ,  $n=0\dots,5$ ), diğer iki tanesi sıfır gerilim uzay vektörleridir ( $V_0, V_7$ ). Bu vektörlerin aralarında kalan altı bölge (I,II,...,VI) vardır.

Kontrol sisteminden elde edilen gerilim komutu (referans gerilim)  $V_{ref}$ 'in sürekli genliği ve açısı değiştiği için her örnekleme periyodunda ( $T_s$ )  $V_{ref}$  Şekil 2'de farklı bir konuma gelir. Bulunduğu bölge,  $V_{ref} = V_\alpha + jV_\beta = V\angle\gamma$  eşitliği kullanılarak belirlenir. Gerilim komutu ( $V_{ref}$ ),  $V_i$  ve  $V_{i+1}$  ( $i=1,2\dots,6$ ) aktif gerilim uzay vektörleri arasında bir yerde olduğunda, bulunduğu bölgeye komşu olan aktif gerilim uzay vektörleri ( $V_i$  ve  $V_{i+1}$ ) ve sıfır gerilim uzay vektörleri ( $V_z=V_0$  veya  $V_7$ ) bileşenleri cinsinden yazılabilir. Örnek olarak  $V_{ref}$ , I. bölgede ise  $V_{ref}$  gerilim komutu  $V_1, V_2$  ve  $V_z$  uzay vektörleriyle aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$V_{ref} \times T_s = V_1 \times T_1 + V_2 \times T_2 + V_z \times T_0 \quad (5)$$



Şekil 2. Gerilim uzay vektörleri

Yukarıdaki formülde  $V_1$  anahtarlama durumu  $T_1$  süresince,  $V_2$  anahtarlama durumu  $T_2$  süresince,  $V_z$  anahtarlama ( $V_0$  veya  $V_7$ ) durumu  $T_0$  süresince aktif olacaktır.  $T_s$ , örnekleme periyodudur. Denklem (5) bütün bölgeler için genelleştirildiğinde aşağıdaki denklem elde edilir ( $V_z=0$ ):

$$V_{ref} = V_\alpha + jV_\beta = \frac{T_k}{T_s} \times V'_{dc} \times e^{jn\frac{\pi}{3}} + \frac{T_{k+1}}{T_s} \times V'_{dc} \times e^{j(n+1)\frac{\pi}{3}} \quad (6)$$

$V'_{dc} = (\sqrt{2}/\sqrt{3})V_{dc}$  ve  $n=0,1\dots,5$  ise I,II..VI bölgelere karşılık gelir.  $T_k$  ve  $T_{k+1}$  komşu aktif bölgelerdeki zaman aralıklarıdır,  $T_0$  ise sıfır bölgesindeki zaman aralığıdır ve denklem (6)'dan çekilerek aşağıda olduğu gibi hesaplanarak bulunurlar:

$$T_k = \frac{V_\alpha \times \sin\left(\frac{(n+1)\pi}{3}\right) - V_\beta \times \cos\left(\frac{(n+1)\pi}{3}\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \times V'_{dc}} \times T_s$$

$$T_{k+1} = \frac{V_{\alpha} \times \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) - V_{\beta} \times \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right)}{-\sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \times V'_{dc}} \times T_s \quad (7)$$

$$T_0 = T_s - T_k - T_{k+1}$$

Anahtarlama sayısını ve anahtarlama kayıplarını azaltmak için I, III ve V. bölgeler için  $T_1=T_k$ ,  $T_2=T_{k+1}$ ; II, IV ve VI. bölgeler için  $T_1=T_{k+1}$ ,  $T_2=T_k$ 'dir ve anahtarlama sıralamaları Tablo 1'de verilmiştir.

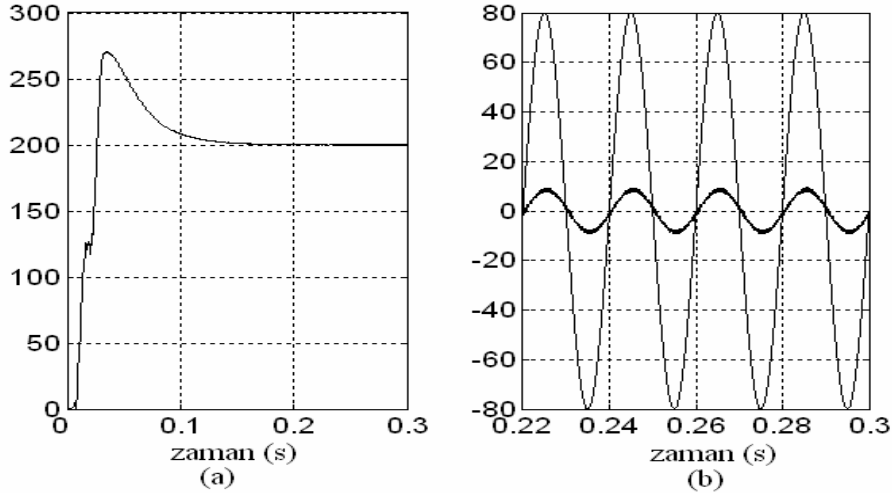
Bölge	$T_0/4$	$T_1/2$	$T_2/2$	$T_0/2$	$T_2/2$	$T_1/2$	$T_0/4$
I	000	100	110	111	110	100	000
II	000	010	110	111	110	010	000
III	000	010	011	111	011	010	000
IV	000	001	011	111	011	001	000
V	000	001	101	111	101	001	000
VI	000	100	101	111	101	100	000

**Tablo1.** Anahtarlama sıralaması

#### 4. Matlab Simulink Analiz Sonuçları

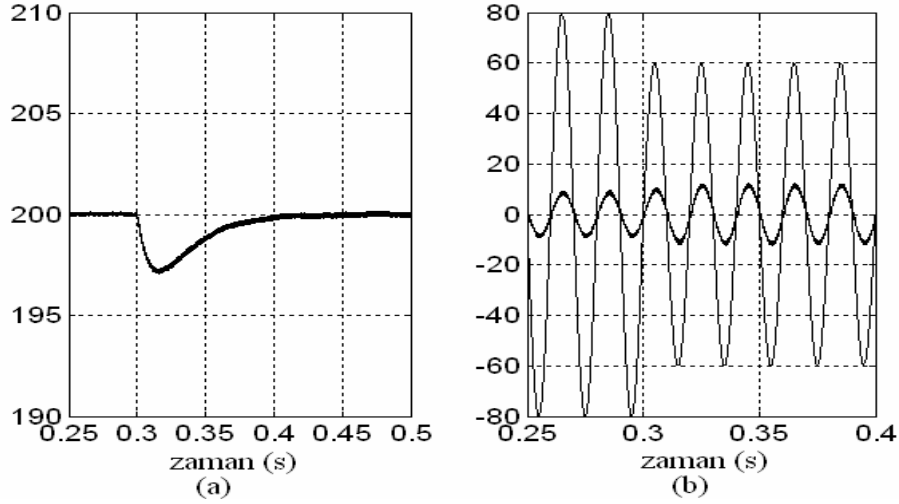
Matlab Simulink'de yapılan analizdeki devre parametreleri olarak şebeke faz gerilimlerinin tepe değeri 80 V,  $L_s=5$  mH,  $C_{dc} = 3$  mF,  $R_{dc} = 40 \Omega$ ,  $V_{dc,ref} = 200$  V,  $T_s = 0.5$  msec ( $f_s = 2$  kHz) kullanılmıştır.

Simulasyon sonuçları Şekil 3' de verilmiştir. Şekil 3(a)' da görüldüğü üzere DC çıkış gerilimi, istenen değer ( $V_{dc,ref}$ ) olan 200V'a çok kısa bir sürede ulaşmaktadır. Referans değere gelme süresi ve tepe değeri PI parametreleri ayarlanarak değiştirilebilir. Şekil 3(b)'de ise A fazının gerilimi ve akımı vardır; giriş güç faktörünün yaklaşık bir olduğu ve çekilen akımın sinüs dalgası şeklinde olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.** (a) AC/DC çeviricinin çıkış gerilimi (b) A fazının gerilimi ve akımı

Şebekedeki gerilim düşmesi durumunda kullanılan AC/DC çevirgecin kontrol ünitesinin tepkisi incelenmiştir. Şebeke faz gerilimleri 0.3'üncü saniyede 80 V tepe değerinden 60 V tepe değerine düşürülmüştür. Bu durumda sistemin DC çıkış geriliminde ufak bir gerilim düşmesi görülmesine rağmen çok kısa bir süre sonra DC çıkış geriliminin yeniden istenen değere (200 volt) ulaştığı Şekil 4(a) da gözükmektedir. Şebekenin A fazının gerilimi ve akımı, şebeke geriliminde düşme olduğu durumda incelenmiştir ve giriş güç faktörü şebekenin gerilimindeki düşme anında bile yaklaşık bir değerinde denetleyici tarafından tutulabilmekte olduğu Şekil 4(b) de görülmektedir.



Şekil 4. (a) AC/DC çeviricinin çıkış gerilimi (b) A fazının gerilimi ve akımı

## 5. Sonuç

Bu çalışmada rüzgar türbinine bağlı jeneratör ile şebeke arasında bulunan AC/DC çeviricinin uzay vektörü modülasyonu tekniği kullanılarak kontrolü Matlab ortamında analiz edilmiştir. Bu kontrolde AC/DC çeviricinin çıkış gerilim değerinin referans değere gelmesi istenirken, aynı zamanda giriş güç faktörünün bir ve giriş hat akımlarının da sinüs dalga şeklinde olması hedeflenmiştir. Uzay vektör modülasyonu DSP gibi sayısal kontrol devreleri aracılığı ile kolayca uygulanabilir. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki şebeke gerilimlerinde anlık değişimler olmasına rağmen sistem çok kısa bir sürede referans çıkış gerilim seviyesini koruyabilmekte ve şebekeden istenen koşullarda akımların çekilmesini sağlamaktadır.

## Kaynaklar

- [1] Malinowski M. ve Bernet S., "Simple Control Scheme of PWM Converter Connecting Wind Turbine with Grid-Simulation Study," Nordic Wind Power Conference, Chalmers University of Technology, 1-24 Mart 2004.
- [2] Cichowlas M., Malinowski M., Kazmierkowski M.P. ve Blaabjerg F., "Direct Power Control for Three-phase PWM Rectifier with active filtering function," IEEE, s.913-918, 2003.
- [3] Mazumder S., "DSP based implementation of a PWM ac/dc/ac converter using space vector modulation with primary emphasis on the analysis of the practical problems involved," APEC 1997, IEEE, s. 306-312, 1997.
- [4] Patterson D. ve Jiao S., "Mathematical Model and Control System Design For A Three Phase AC/DC Voltage Source Converter," Journal of Electrical&Electronics Engineering, Avustralya, 2001.
- [5] Sürgevil T., Akpınar E., "Modelling of a 5-kW Wind Energy Conversion System with Induction Generator and Comparison with Experimental Results," International Journal of Renewable Energy, Vol:30, no:6, s.913-929, 2005.
- [6] Hao M., Yunping L. ve Huming C., "A Simplified Algorithm for Space Vector Modulation of Three-phase Voltage Source PWM Rectifier," 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Almanya, 2004.