

# RÜZGAR TÜRBİNİ İLE SÜRÜLEN ÇİFT ÇIKIŞLI ASENKRON JENERATÖRÜN İNCELENMESİ VE BULANIK MANTIK KONTROL YÖNTEMİYLE MAKSİMUM ÇIKIŞ GÜCÜNÜN ELDE EDİLMESİ

İres İSKENDER ve Naci GENÇ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe  
06750, Ankara,

[nacigenc@gazi.edu.tr](mailto:nacigenc@gazi.edu.tr), [iresis@gazi.edu.tr](mailto:iresis@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received:17.09.2008 ; Kabul/Accepted:26.03.2009)

## ÖZET

Bu çalışmada, değişken hız (senkronaltı ve senkronüstü shaft hızlarında), sabit frekans ve sabit gerilim altında çalışan rüzgar türbini ile sürülen Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratörün (ÇÇAJ) kararlı durum karakteristikleri incelenmiştir. Rüzgar türbini ve Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratörün matematiksel modelleri zaman ekseninde ayrı ayrı elde edilmiştir. Sabit olmayan rüzgar hızı ve sistem kısıtlamaları düşünülerek, jeneratörden maksimum toplam çıkış gücü elde etmek için bir bulanık mantık denetleyici tasarlanmıştır. Ayrıca, benzetim çalışması sonuçları ile laboratuvar ortamında hazırlanarak yapılan deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, bulanık mantık kontrol yöntemi kullanılarak rüzgar türbinine bağlı bir Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratöründen maksimum çıkış gücü elde edilebileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar türbini, bulanık mantık, çift çıkışlı asenkron jeneratörü.

## INVESTIGATION OF WIND TURBINE DRIVEN DOUBLE OUTPUT INDUCTION GENERATOR AND OBTAINING ITS MAXIMUM POWER USING FUZZY LOGIC CONTROL METHOD

### ABSTRACT

In this study, the steady state characteristic of a Double Output Induction Generator (DOIG) driven by wind turbine operating at variable speed (shaft speeds in the subsynchronous and supersynchronous regions), constant frequency and constant voltage is investigated. Mathematical model on time domain is obtained for wind turbine and double output induction generator separately. A fuzzy logic controller is designed to obtain maximum total output power from the generator considering the restrictions of the system and the speed of the wind which is not constant. Finally, the simulation results and experimental results carried out in the laboratory are compared. This study shows that using an appropriate control strategy, maximum output power can be obtained from the wind tribune connected to DOIG.

**Keywords:** Wind power, fuzzy control, double output induction generator.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geleneksel metotlar kullanılarak elektrik enerjisi üretiminin çevreye verdiği zararların artması ve günümüzde artan çevre bilincinin gelişmesiyle, elektrik enerjisinin elde edilebilmesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması yaygınlaşmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olan rüzgar enerjisi,

tamamıyla doğa ile uyumlu, çevreye zarar vermeyen ve tükenme ihtimali olmayan sonsuz bir kaynaktır.

Bir asenkron makinesi uygun koşullar dahilinde geniş hız aralığında elektrik enerjisi üreten bir jeneratör olarak kullanılabilir. Bu özellikten dolayı, kararsız hız karakteristiğine sahip rüzgar enerjisinden sabit frekanslı elektrik enerjisi elde etmek için asenkron

makinesinin kullanılması oldukça uygundur. Bir asenkron makinesi tek başına jeneratör olarak kullanıldığı zaman gereksinim duyacağı reaktif güç kapasitör bankası gibi yöntemler ile kompanse edilir. Diğer taraftan, asenkron makinesi elektrik şebekesine bağlandığında, ihtiyacı olan reaktif güç şebekeye bağlanma koşullarına bağlı olarak şebekeden karşılanabileceği gibi terminal gerilimi ve frekans kontrolü de gerekmez.

Literatürde, rüzgar enerjisi uygulamaları için çeşitli asenkron jeneratör projeleri önerilmiştir. Değişken hız, sabit gerilim ve frekanslı kendinden uyarımlı asenkron jeneratörü bağımsız sistemler için geniş olarak tartışılmıştır. Bilindiği gibi, kendinden uyarımlı bir asenkron jeneratörü değişken rüzgar hızı ve yük şartlarında sabit gerilim ve frekansta elektrik üretebilmektedir [1]. Konuyla ilgili temel çalışma alanı geniş rüzgar hızı aralığında elektrik şebekesine transfer edilen gücü optimize etmek olsa da, düşük maliyet, sağlamlık ve az harmonik içeren sade bir sistem tasarımı gibi avantajlar da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu gereksinimleri karşılamak için, DC ara bağlantılı çeviriciler vasıtasıyla AC şebeke hattına paralel bağlanan kendinden uyarımlı asenkron jeneratörü [2] ve Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratörü (ÇÇAJ) [3-6] gibi daha karmaşık sistemler önerilmiştir. İlk sistem makinenin gereksinimi olan reaktif gücü sağlamak için stator terminallerine kapasitör gurubu bağlanması gibi bir dezavantaja sahiptir. Ayrıca, makinenin stator değerlerine bağlı olarak güç transferi sınırlıdır. Halbuki, ikinci sistemde, bir ÇÇAJ aşırı yüklenmeden kendi güç değerinden daha fazlasını verir. Bu şekilde, güç üretimi daha geniş bir rüzgar hızı aralığında yapılabilir.

Köprü-diyot doğrultucu ve tristör evirici (thyristor inverter) bağlanmış ÇÇAJ sistemi rüzgar enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılacak en verimli ve ekonomik sistem olarak önerilmiştir. Dinamik ve kararlı durum performansını içeren benzetim çalışmaları, bu sistemin rüzgar türbinini şebeke hattına bağlamak için uygulanabilecek bir yöntem olduğu sonucunu doğurmaktadır [7].

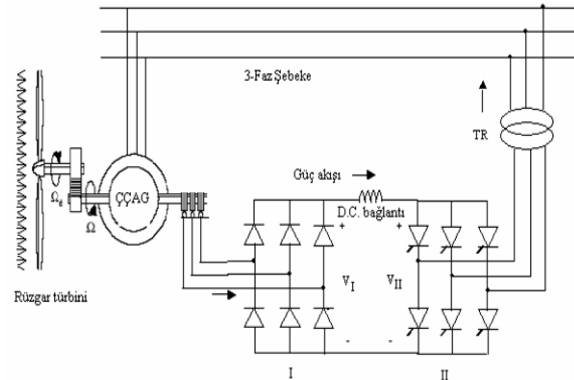
Literatürde ÇÇAJ sistemine uygulanan farklı kontrol yöntemleri bulunmaktadır. Rüzgar enerjisi gibi doğrusal olmayan karakteristiklere sahip ve önceden tahmini mümkün olmayan durumlar içeren sistemlerin kontrolünde bulanık mantık denetleyicileri çok iyi performans gösterebilmektedir [8-12]. Bulanık mantık kontrol yönteminin uygulandığı bu çalışmalar incelendiğinde; [9] ve [10]'da yapılan çalışmalarda DC ara bağlantısında kullanılan iki tane kontrollü çevirici vasıtasıyla AC şebeke hattına paralel bağlanan kendinden uyarımlı asenkron jeneratörü kullanılmıştır. Makinenin gereksinimi olan reaktif gücün stator terminallerine bağlanan kapasitör gurubu vasıtasıyla sağlanması bu sistemler için bir dezavantajdır. [11]'de yapılan çalışmada ise makinenin gereksinimi olan

reaktif gücün şebekeden karşılandığı ÇÇAJ kullanılmıştır. Çalışmada DC ara bağlantı devresinde kullanılan eviricilerin ikisinin de kontrollü olması, hem sistemin karmaşıklığını hem de maliyetini arttırmaktadır.

DC bağlantı devresinde köprü-diyot doğrultucu ve tristör evirici (thyristor inverter) bağlanmış biri kontrolsüz diğeri kontrollü olan iki dönüştürücünün kullanılması ve gereksinim duyulan reaktif gücün şebekeden karşılandığı ÇÇAJ ile rüzgar türbini sistemine bulanık mantık denetleyicisinin uygulanarak çıkış gücünün maksimum yapılması, yukarıda aktarılan literatürde mevcut çalışmalara göre sistemi daha ucuz ve daha az karmaşık hale getirmektedir.

Bu çalışmada, Şekil 1'de gösterildiği gibi, geniş bir senkronüstü shaft hızı aralığında güç üretimi elde etmek için, rotor ile şebeke arasına bağlanan iki dönüştürücülü (biri kontrollü, biri kontrolsüz), değişken hızlı ve sabit frekanslı bir ÇÇAJ sistemi incelenmiştir. Bulanık mantık denetleyicisi kullanılarak, değişken rüzgar hızlarında üç fazlı tristörlü eviricinin ateşleme açısı kontrol edilmiş ve sistemin toplam çıkış gücünün maksimum yapılması incelenmiştir. Bu sayede, sistemin maksimum güç değerinde çalışması denetimli olarak sağlanmıştır. Laboratuvar ortamında makine ve iki dönüştürücülerden oluşan deney düzeneği kurularak ilgili sistem incelenmiştir. Benzetim çalışmalarında bulanık mantık kontrolörü vasıtasıyla elde edilen ateşleme açıları kullanılarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar benzetim sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlardan, doğrusal olmayan hıza sahip rüzgardan elektrik enerjisi üreterek elektrik şebekesine aktarmada bu sistemin önemli avantajları olduğu gözlenmiştir.

Şekil 1'de görüldüğü gibi, ÇÇAJ'ın statoru doğrudan elektrik şebekesine bağlı iken, rotoru iki dönüştürücü ve bir eşleştirici trafo ile elektrik şebekesine bağlanmıştır. Bu sistemde güç üretimi, rüzgar türbini ile senkronüstü hızda ( $-1 < s < 0$ ) döndürülen ÇÇAJ'ın stator ve rotorundan elde edilebilir. Sistemdeki I. dönüştürücü 3-fazlı diyot doğrultucu ve II. dönüştürücü ise 3-fazlı evirici olarak çalışmaktadır. Sistemin giriş değişkeni rüzgar hızı, kontrol değişkeni II.



**Şekil 1.** Rüzgar türbini-ÇÇAJ sisteminin şematik gösterimi (Schematic diagram of wind turbine-DOIG system)

dönüştürücünün ateşleme açısı ( $\alpha$ ) ve çıkış değişkeni ise çıkış gücüdür.

## 2. SİSTEMİN MATEMATİKSEL MODELİ (MATHEMATICAL MODEL OF THE SYSTEM)

Genelleştirilmiş makine teorisi ve rüzgar türbinin analitik ifadeleri kullanılarak toplam sistemin genel matematiksel modeli türetilir. Doyum etkileri ve nüve kayıpları ihmal edildiğinde, 3-faz dengeli bir asenkron makinasının, bütün değişkenleri statora indirgenmiş ve senkron referans eksen takımına göre ifade edilmiş şekilde, kayma ( $s$ ) ve d-q koordinat gösterimi cinsinden denklemleri referans [1]'de aktarılmıştır.

Faz ve komütatör dönüşümü kullanılarak, d-q eksenindeki rotor gerilim ve akım değerleri gerçek gerilim ve akım değerleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$V_{dr} = -\sqrt{3} \cdot V_{rp} \cdot \sin \delta \quad (1)$$

$$V_{qr} = \sqrt{3} \cdot V_{rp} \cdot \cos \delta \quad (2)$$

$$I_{dr} = -\sqrt{3} \cdot I_{rp} \cdot \sin \delta \quad (3)$$

$$I_{qr} = \sqrt{3} \cdot I_{rp} \cdot \cos \delta \quad (4)$$

burada,  $V_{qr}$ ,  $V_{dr}$ ,  $i_{qr}$ ,  $i_{dr}$ , değerleri Park dönüşümü kullanılarak elde edilen anlık gerilim ve akım değerlerinin d-q koordinat sisteminde gösterimleridir.  $V_{rp}$  ve  $I_{rp}$  sırasıyla rotor faz gerilimi ve akımının etkin değerini,  $\delta$  ise rotor fazı ile d-ekseni arasındaki başlangıç açısını ifade eder. DC bağlantılı ara devrenin gerilim denklemleri ise;

$$V_I + V_{II} = L \frac{d}{dt} I_{dc} + R I_{dc} \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada anahtarların ideal olduğu ve harmonik etkilerin olmadığı varsayılarak;

$$V_I = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_{rp} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot s \cdot V_{sp} \cdot \frac{N_r}{N_s} \quad (6)$$

$$V_{II} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot a_{TR} \cdot V_{sp} \cdot \cos \alpha \quad (7)$$

denklemleri elde edilir.  $V_{sp}$  stator faz geriliminin etkin değerini ve  $a_{TR}$  ise eşleştirme (uyum) transformatörünün dönüştürme oranını göstermektedir. Dönüştürücülerdeki güç kayıpları ve dc link kaybı ihmal edildiğinde, aktif güç denge denklemi aşağıdaki ifade ile gösterilebilir.

$$V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} = -V_I I_{dc} \quad (8)$$

denklem (6) ve (8) kullanılarak, dc bağlantı devresi akımı;

$$I_{dc} = -\frac{\pi(V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr})}{3\sqrt{6} \cdot V_{rp}} \quad (9)$$

formülü ile ifade edilebilir. ÇÇAJ'ün mekaniksel giriş gücü ( $P_m$ ), kayma, senkron hız ve giriş momenti ( $T_m$ ) cinsinden;

$$P_m = (1/pp) \cdot (1-s) \cdot \omega_s \cdot T_m \quad (10)$$

şeklinde. Burada, asenkron makinasının kutup çifti  $pp$  ile gösterilmiştir. Dönüştürücülerin kayıpları ihmal edilerek stator gücü ( $P_s$ ) ve rotor gücü ( $P_r$ );

$$P_s = -(V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) = (1/pp) \cdot \omega_s \cdot T_m - r_s \cdot I_s^2 \quad (11)$$

$$P_r = -\left(\frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{sp} a_{TR} \cos \alpha\right) I_{dc} = -\left(\frac{s \cdot \omega_s \cdot T_m}{pp} + r_r \cdot I_r^2\right) \quad (12)$$

ifadeleri ile aktarılabilir. Reaktif güç denge denklemi ise;

$$(V_{dr} I_{qr} - V_{qr} I_{dr}) = 3V_{rp} I_{rp} \sin \alpha = -s \cdot \omega_s \cdot M(I_{qs} I_{qr} + I_{ds} I_{dr}) \quad (13)$$

şeklinde ifade edilir. Asenkron jeneratörün moment denklemi ise [1];

$$-(J \cdot \omega_s / pp) p_s = (pp) \cdot M(I_{qs} I_{qr} - I_{ds} I_{dr}) + T_m \quad (14)$$

biçimindedir. Burada,  $J$  atalet momenti ve  $T_m$  ise türbin momentidir. (6). ve (7). denklemler kullanılarak, kayma dönüştürücü açısı cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir ( $N_r/N_s=1$  düşünülerek).

$$s = -a_{TR} \cdot \cos \alpha \quad (15)$$

Elektrik şebekesine aktarılacak net çıkış gücü sistemin çalışma durumuna bağlıdır. Düşük rüzgar hızında ÇÇAJ sadece senkronaltı hızda güç üretebilir. Rüzgar hızı arttığı zaman, şaftta artan enerji rotora aktarılır ve sistem senkronüstü hızda çalışmış olur. Bu durumda, birinci dönüştürücü doğrultucu ve ikinci dönüştürücü ise evirici olarak çalışır.

Rüzgardan elde edilebilecek güç ( $P_w$ ), rüzgar hızına ( $v$ ), hava yoğunluğuna ( $\rho$ ) ve türbinin yere olan dikey alanına ( $A$ ) bağlıdır. Fakat, rüzgar gücünün tamamı makineye aktarılamaz. Bu nedenle, türbin gücü ( $P_{wt}$ )  $C_p$  gibi bir sabit ile çarpılarak elde edilir [8]. Bu bağımlılar aşağıda aktarıldığı gibi ifade edilebilir;

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (16)$$

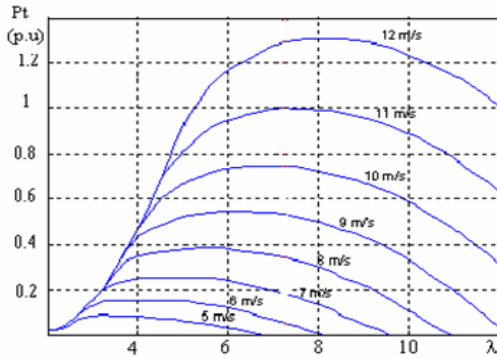
$$P_{wt} = C_p \cdot P_w \quad (17)$$

$C_p$  rüzgar hızı ve şaft hızının bir fonksiyonu olup türbinin yapısına bağlıdır. Burada  $\lambda$  rüzgarın noktasal hız oranını ifade eder.

$$C_p = 0,22 \cdot \left( \frac{116}{\lambda} - 0,4 \cdot \theta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{12,5}{\lambda}} \quad (18)$$

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 00,8 \cdot \theta} - \frac{0,035}{\theta^3 + 1} \quad (19)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak 25kW'lık dik eksenli bir rüzgar türbinin farklı rüzgar hızlarında  $\lambda$ 'ya bağlı çıkış gücü Şekil 2'de gösterilmiştir.



**Şekil 2.** 25kW'lık dik eksenli bir rüzgar türbinin  $\lambda$ 'ya bağlı çıkış gücü (Output power of a25kW perpendicular axis wind turbine versus  $\lambda$ )

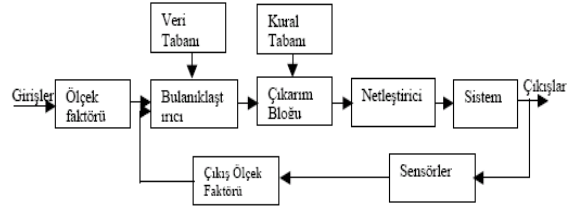
Hedeflenen Rüzgar türbinin moment-hız karakteristiği (20) eşitliği ile ifade edilebilir [1];

$$T_m = \frac{k_1 \cdot w_s \cdot (1-s)}{(pp) \cdot n_t^2} + \frac{k_2 \cdot v^2}{n_t} + \frac{k_3 \cdot (pp) \cdot v^3}{w_s \cdot (1-s)} \quad (20)$$

burada,  $n_t$  dişli kutusu dönüştürme oranı sabiti olup,  $k_1=C_1R^2$ ,  $k_2=C_2R$  ve  $k_3=C_3$  tür. Denklem (15) ve (20)'den anlaşılacağı üzere, rüzgar türbinin momenti kayma ve dolayısıyla ikinci dönüştürücünün ateşleme açısına bağlıdır. Böylece, ateşleme açısı kontrol edilerek rüzgar türbininden maksimum güç elde edilebilir ve elektrik şebekesine aktarılabilir.

### 3. UYGULANAN KONTROL YÖNTEMİ (APPLIED CONTROL METHOD)

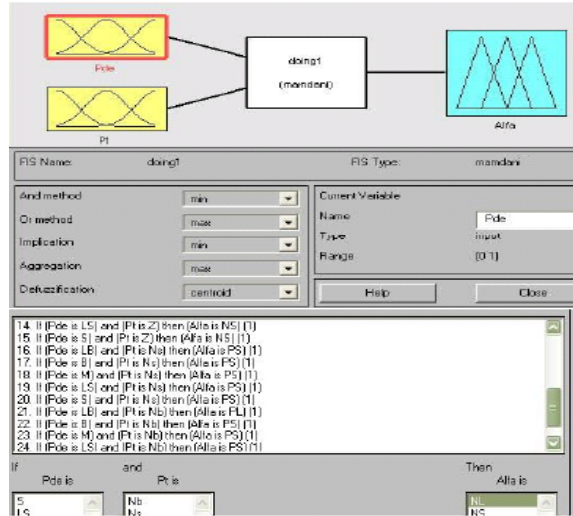
Bu bölümde, Şekil 3'de gösterildiği gibi, türbinden maksimum çıkış gücü elde edebilmek için sisteme uygun temel bir bulanık mantık kontrol yöntemi tasarlanmıştır. Bulanık mantık kontrolörü ikinci dönüştürücünün ateşleme açısını belirleyerek şebekeye maksimum güç aktarılmasını sağlar. Ateşleme açısının kontrolü rüzgar hızı ve ilgili eğriden maksimum güç noktasına göre yapılır.



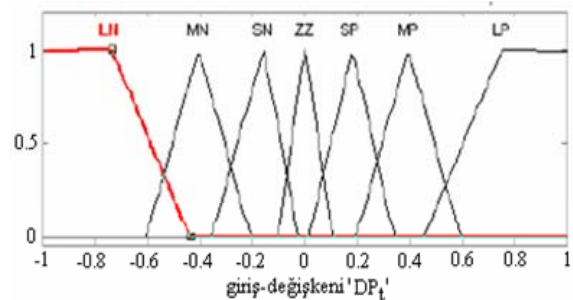
**Şekil 3.** Temel bir bulanık mantık kontrol diyagramı (A basic fuzzy control block diagram)

Bu amaçla, Matlab/Simulink programı kullanılarak bir bulanık mantık kontrol algoritması tasarlandı. ÇÇAJ'ünden maksimum net çıkış gücü (rotor ve stator güçlerinin toplamı) elde etmek için, net toplam güçteki değişimler ( $DP_t$ ) ve  $(P_{ref}-P_t)/P_{ref}$  kontrolörün girişleri olarak tanımlandı. Burada,  $P_{ref}$  rüzgardan elde edilen giriş gücü ve  $P_t$  ise net çıkış gücüdür. Tasarlanan kontrol şeması ve bulanık mantık kuralları Şekil 4-7 ve Tablo 1'de gösterilmiştir.

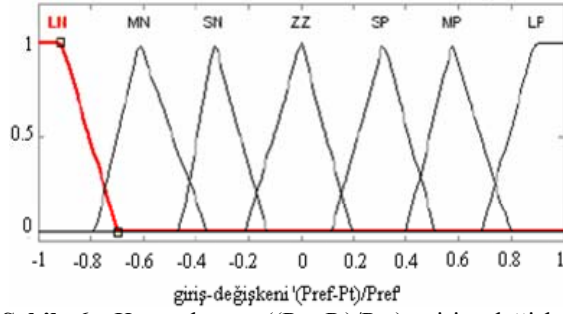
Kontrolörün temel işlevi rüzgar türbininden elde edilen gücü maksimum oranda şebekeye aktarmak için II. dönüştürücüde kullanılacak 'alfa' açısını belirlemektir.



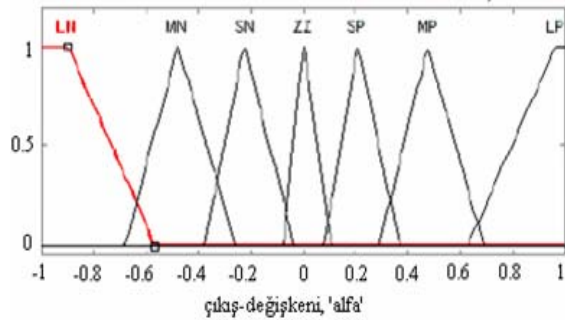
**Şekil 4.** Matlab/Simulink programı vasıtasıyla tasarlanan bulanık mantık kontrolörü (The designed fuzzy controller using Matlab/Simulink program)



**Şekil 5.** Kontrolörün ( $DP_t$ ) giriş değişkeni üyelik fonksiyonu (The controller input variable ( $DP_t$ ) membership function)



**Şekil 6.** Kontrolörün  $(P_{ref}-P_t)/P_{ref}$  giriş değişken üyelik fonksiyonu (The controller input variable  $(P_{ref}-P_t)/P_{ref}$  membership function)



**Şekil 7.** Kontrolörün  $(\alpha)$  çıkış değişken üyelik fonksiyonu (The controller output variable  $(\alpha)$  membership function)

Şekil 4'de aktarılan ve Matlab/Simulink programı vasıtasıyla tasarlanan bulanık mantık kontrolörü kullanılarak, Şekil 5, 6 ve 7'de aktarılan kontrolör giriş değişkenleri ile çıkış değişkenine ait üyelik fonksiyonları elde edilmiştir.

Tablo 1'de verilen kısaltmaların açıklamaları, **LP**; Büyük Pozitif (Large Positive), **MP**; Orta Pozitif (Medium Positive), **SP**; Küçük Pozitif (Small Positive), **ZZ**; Sıfır (Zero), **LN**; Büyük Negatif (Large Negative), **MN**; Orta Negatif (Medium Negative), **SN**; Küçük Negatif (Small Negative) şeklindedir.

**Tablo 1.** Kontrolörün bulanık küme kural tablosu (The rules set of fuzzy controller)

$DP_t$ $(P_{ref}-P_t)/P_{ref}$	LP	MP	SP	ZZ	SN	MN	LN
LP	LP	LP	LP	LP	MP	SP	ZZ
MP	LP	LP	MP	MP	SP	ZZ	SN
SP	LP	MP	SP	SP	ZZ	SN	MN
ZZ	MP	MP	SP	ZZ	SN	MN	MN
SN	MP	SP	ZZ	SN	SN	MN	LN
MN	SP	ZZ	SN	MN	MN	LN	LN
LN	ZZ	SN	MN	LN	LN	LN	LN

İstenilen ateşleme açısı çıkış değerlerini elde etmek için bulanık denetleyicinin tasarım adımları aşağıdaki sıralamayla yapılmıştır.

**a-)** Bulanık denetleyicinin giriş-çıkış minimum ve maksimum değerleri belirlendikten sonra, giriş ve

çıkış bulanık kümelerini ifade eden dilsel değişkenler tanımlanır.

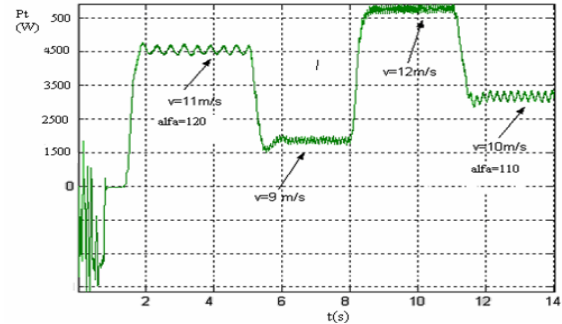
**b-)** Nitelendirilen giriş ve çıkışlar uygun bulanık kümelerle ölçeklendirilir. Daha sonra Şekil 5-7 ile verilen bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları saptanır. Şekillerde dilsel değişkenler ve üyelik fonksiyonlarının kullanımıyla giriş ve çıkış değişkenleri tanımlanmıştır.

**c-)** Her rüzgar hızı giriş değerinde sisteme ait toplam elektriksel çıkış gücünü maksimum yapmak için tasarlanan giriş fonksiyonları hata  $(P_{ref}-P_t/P_{ref})$ , hatanın değişimi  $(DP_t)$  ve çıkış fonksiyonu "alfa" için hazırlanan bulanık mantık kural tablosu Tablo 1 ile oluşturulmuştur.

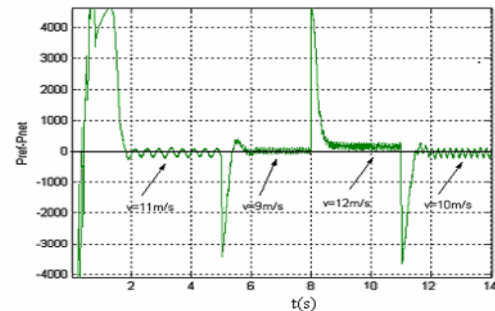
**d-)** Bulanık çıkış kümesinden arzu edilen gerçek değeri bulmak için, **centroid** metodu kullanılarak bulanık değerler gerçek değerlere dönüştürülür.

#### 4. BENZETİM VE DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI (RESULTS OF SIMULATION AND EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada, Dinamik davranışı incelemek ve optimum ateşleme açısını bulmak için sistemin farklı rüzgar hızları için Matlab/Simulink programı kullanılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmasında elde edilen sonuçlar Şekil 8-16 ve Tablo 2-3'de aktarılmıştır. Benzetimde, 2-kutup, 1.1kW, 380V-hat, 50Hz'lik bir asenkron makinası ( $r_s=6.5\Omega$ ,  $r_r=6.4\Omega$ ,  $L_s=0.42H$ ,  $L_r=0.7H$  ve  $N_r/N_s=1.05$ );  $R_{dc}=0.31\Omega$ ,  $L_{dc}=100mH$ 'lik DC bağlantı devre parametreleri ve  $k_1=-3.22$ ,  $k_2=12.9$ ,  $k_3=-8.80$ ,  $n_t=7.2$ 'lik rüzgar türbini sabitleri kullanılmıştır. Ayrıca eşleştirme transformörünün parametreleri, 3000VA, 50Hz ve 380/110V

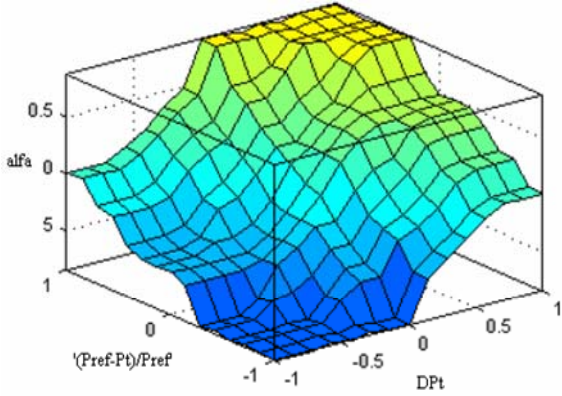


**Şekil 8.** Farklı rüzgar hızlarında türbin çıkış gücü ( $P_t$ ) (Output power of the turbine ( $P_t$ ) at different wind speeds)

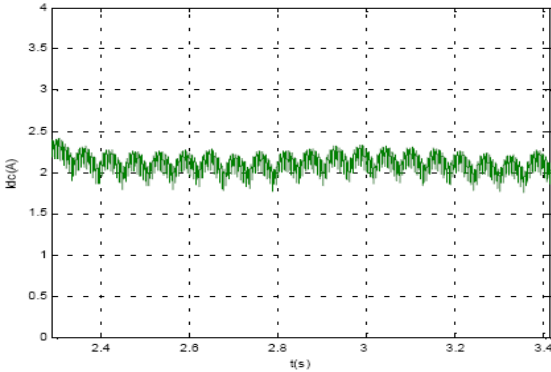


**Şekil 9.** Farklı rüzgar hızlarında  $(P_{ref}-P_t)$  ( $(P_{ref}-P_t)$  at different wind speeds)

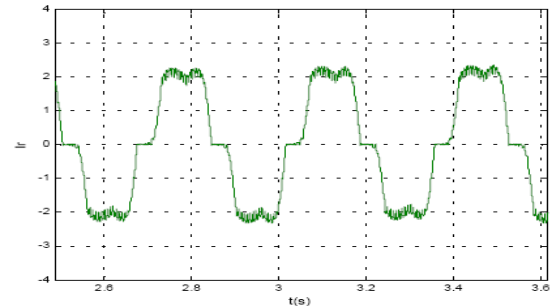




Şekil 10. Tasarlanan kontrolörün kural yüzeyi (The rule-surface of the controller)



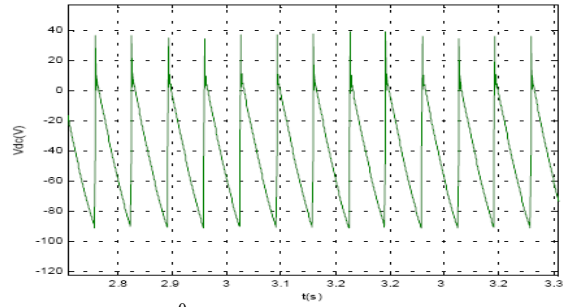
Şekil 11.  $\alpha=110^\circ$  ve  $s=-0.115$  için DC bağlantı devre akımının ( $I_{dc}$ ) benzetim sonucu (Simulation result of DC link current ( $I_{dc}$ ) for  $\alpha=110^\circ$  and  $s=-0.115$ )



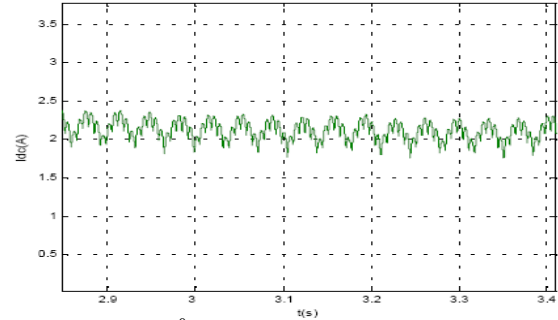
Şekil 12.  $\alpha=110^\circ$  ve  $s=-0.115$  için rotor akımının ( $I_r$ ) benzetim sonucu (Simulation result of rotor current ( $I_r$ ) for  $\alpha=110^\circ$  and  $s=-0.115$ )

şeklinde. 11m/s, 9m/s, 12m/s ve 10m/s rüzgar hızlarının türbin girişine uygulanması ile tasarlanan denetleyicinin belirlediği ateşleme açısı neticesinde, Şekil 8 ve 9'da aktarılan türbin çıkış gücü ve  $P_{ref}-P_t$  değerlerinin değişimi görülmektedir. Tablo 2'de farklı rüzgar hızlarında elde edilen ( $P_{tmax}$ ), ( $P_{ref}$ ) ve Tablo 3'de ise 10m/s rüzgar hızındaki farklı ateşleme açıları için ÇÇAJ'den elde edilen güç değerleri aktarılmıştır.

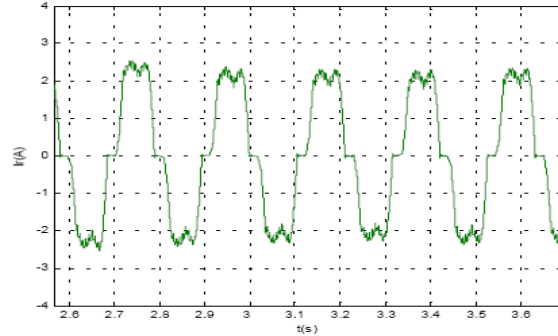
Şekil 10'da aktarılan kontrolörün kural yüzeyi ile rüzgar türbininden maksimum güç elde etmek için II. dönüştürücüde kullanılacak ateşleme açısının kontrolör giriş değişkenleri ile değişimi verilmiştir. Farklı rüzgar hızlarında oluşacak türbin çıkış gücü ve gerekli



Şekil 13.  $\alpha=110^\circ$  ve  $s=-0.115$  için DC bağlantı devre geriliminin ( $V_{dc}$ ) benzetim sonucu (Simulation result of DC link voltage ( $V_{dc}$ ) for  $\alpha=110^\circ$  and  $s=-0.115$ )



Şekil 14.  $\alpha=130^\circ$  ve  $s=-0.186$  için DC bağlantı devre akımının ( $I_{dc}$ ) benzetim sonucu (Simulation result of DC link current ( $I_{dc}$ ) for  $\alpha=130^\circ$  and  $s=-0.186$ )

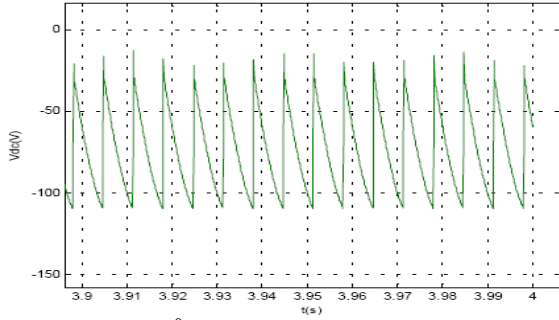


Şekil 15.  $\alpha=130^\circ$  ve  $s=-0.186$  için rotor akımının ( $I_r$ ) benzetim sonucu (Simulation result of rotor current ( $I_r$ ) for  $\alpha=130^\circ$  and  $s=-0.186$ )

ateşleme açısı Şekil 8 ve 9 ile çizdirilmiştir. Burada, Şekil 10 ile verilen ateşleme açıları kullanılmıştır. Şekil 8 ve 9'dan, değişken rüzgar hızlarına karşın sistemin dinamik tepkisinin iyi olduğu görülmektedir. Benzetim sonuçlarından, maksimum gücün  $120^\circ$ 'lik ateşleme açısı etrafında elde edilebildiği gözlenmiştir.

Şekil 11-16'de ise farklı ateşleme açısı ve kayma değerlerine bağlı elde edilen DC bağlantı devre voltajı, akımı ve ÇÇAJ'ın rotor akım şekilleri aktarılmıştır.

Bir sonraki adım olarak sistem için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Rüzgar türbini ve bulanık mantık kontrolörünü içeren bir deneysel çalışma yapmak karmaşık ve maliyetli olacağından, deneysel çalışmada rüzgar türbini yerine bir DC motor kullanılarak (Şekil 17'de deneysel devre şemasında aktarıldığı



**Şekil 16.**  $\alpha=130^0$  ve  $s=-0.186$  için DC bağlantı devre geriliminin ( $V_{dc}$ ) benzetim sonucu (Simulation result of DC link voltage ( $V_{dc}$ ) for  $\alpha=130^0$  and  $s=-0.186$ )

gibi) laboratuarda deney düzeneği kurulmuş ve benzetim çalışmasında bulunan optimum ateşleme açıları kullanılarak deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen bu deneysel çalışmalar benzetim çalışmasında elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

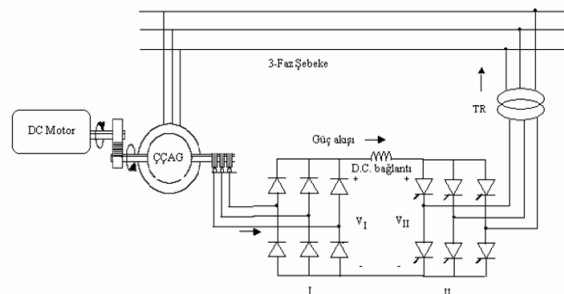
**Tablo 2.** Farklı rüzgar hızlarında elde edilen ( $P_{tmax}$ ) ve ( $P_{ref}$ ) ( $P_{tmax}$  and ( $P_{ref}$ ) powers obtained from different wind speeds)

V (m/s)	$P_{tmax}$ (W)	$P_{ref}$ (W)
9	2845	2247,5
10	4069	3214,5
11	5534	4371,8

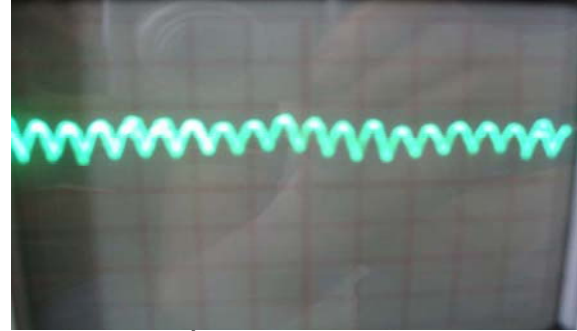
**Tablo 3.** 10m/s rüzgar hızındaki benzetim sonuçları (Simulation results for 10m/s wind speed)

Ateşleme açısı ( $\alpha$ )	ÇÇAJ'nden elde edilen güç			kayma	$P_{wt}(W)$
	$P_s(W)$	$P_r(W)$	$P_t(W)$		
$110^0$	-3000	-325	-3325	-0,175	-3800
$120^0$	-2800	-425	-3225	-0,2	-3700
$130^0$	-2500	-490	-2990	-0,22	-3500
$140^0$	-2350	-525	-2775	-0,27	-3350
$150^0$	-2200	-550	-2750	-0,28	-3200
$160^0$	-2100	-565	-2665	-0,285	-3100

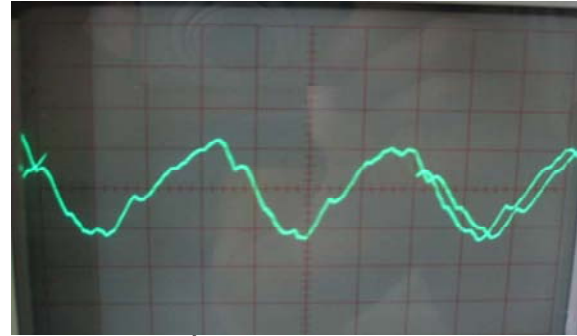
Deneysel çalışmada, 2-kutup, 1.1kW, 380V-hat, 50Hz'lik bir asenkron makinası ( $r_s=6.5\Omega$ ,  $r_r=6.4\Omega$ ,  $L_s=0.42H$ ,  $L_r=0.7H$  ve  $N_r/N_s=1.05$ );  $R_{dc}=0.31\Omega$ ,  $L_{dc}=100mH$ 'lik DC bağlantı devre parametreleri; ve 220V, 1.1kW, 3200 rpm'lik bir DC motor kullanılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda şekiller (Şekil 18-21) ve tablolar halinde sunulmuştur.



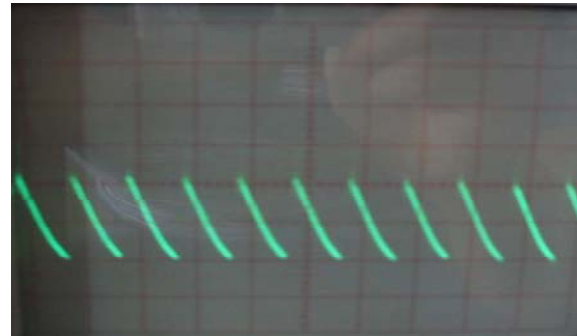
**Şekil 17.** DC Motor-ÇÇAJ deneysel çalışma sisteminin şematik gösterimi (Schematic diagram of DC Motor-DOIG system)



**Şekil 18.**  $\alpha=110^0$ ,  $s=-0.103$  için DC bağlantı devre akımının ( $I_{dc}$ ) deneysel sonucu (Experimental result of DC link current ( $I_{dc}$ ) for  $\alpha=110^0$ ,  $s=-0.103$ ) ( $t/div=20m$ ,  $V/div=0.5$ )



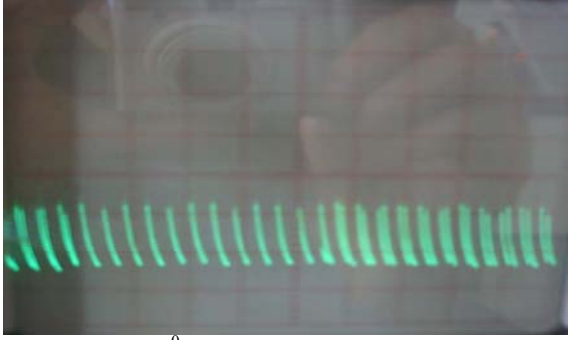
**Şekil 19.**  $\alpha=110^0$ ,  $s=-0.103$  için rotor akımının ( $I_r$ ) deneysel sonucu (Experimental result of rotor current ( $I_r$ ) for  $\alpha=110^0$ ,  $s=-0.103$ ) ( $t/div=2m$ ,  $V/div=2$ )



**Şekil 20.**  $\alpha=110^0$  ve  $s=-0.103$  için DC bağlantı devre geriliminin deneysel sonucu (Experimental result of DC link voltage for  $\alpha=110^0$ ,  $s=-0.103$ ) ( $t/div=2m$ ,  $V/div=6x10$ )

Deneysel ve benzetim çalışması sonuçlarını karşılaştırmak için, Tablo 4 ve 5'de sırasıyla deneysel ve benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar aktarılmıştır.

Tablo 4 ve 5'den görüldüğü gibi, teorik ve deneysel çalışma sonuçları arasında, türbinden alınan güç ( $P_{wt}$ ), stator gücü ve rotor gücü değerlerinde bazı farklılıklar mevcut. Bunun nedeni, teorik çalışmada ihmal edilen güç kayıplarından (nüve kayıpları, sürtünme kayıpları v.b.) kaynaklanmaktadır. Deneysel çalışmada benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar alınması, bulanık mantık kontrolörünün önerilen sisteme uygulanabilirliğini göstermektedir.



**Şekil 21.**  $\alpha=130^0$  ve  $s=-0.186$  için DC bağlantı devre geriliminin deneysel sonucu (Experimental result of DC link voltage for  $\alpha=130^0$ ,  $s=-0.186$ ) ( $t/div=5m$ ,  $V/div=7x10$ )

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Çift Çıkışlı Asenkron Jeneratörü ile elektrik şebekesine bağlı bir rüzgar enerjisi dönüştürme sisteminde şebekeye aktarılacak maksimum güç incelenmiştir. Bu amaçla, bütün sistemin matematiksel modeli çıkarılmış ve bulanık mantık kontrol yöntemi kullanılarak türbinden maksimum güç elde etmek için gerekli optimum ateşleme açıları belirlenmiştir. Çalışmanın içeriğinde aktarılan kabullenmeler doğrultusunda, Matlab/Simulink programı vasıtasıyla sistem simüle edilmiş ve laboratuarda kurulan bir deney düzeneği ile ilgili sistemin deneysel sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, bulanık mantık kontrol yöntemi ile sistemin değişken rüzgar hızlarına karşı iyi bir dinamik tepkisinin olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, deneysel ve benzetim çalışması sonuçları karşılaştırıldığında, teorik ve pratik sonuçların bir birine yakın olduğu görülmektedir. Teorik ve deneysel çalışma sonuçları arasındaki farklılıkların, teorik çalışmadaki bazı kayıpların ihmal edilmesinden kaynaklandığı söylenebilir.

**Tablo 4.** Farklı ateşleme açıları için çıkış güç değerlerinin deneysel çalışma sonuçları (Experimental results of output powers for different firing angles)

Ateşleme açısı ( $\alpha$ )	ÇÇAJ'den elde edilen güç			DC bağlantı devresi		kayma	$P_{wt}$
	$P_s$ (W)	$P_r$ (W)	$P_t$ (W)	$V_{dc}$	$I_{dc}$		
$110^0$	-900	-200	-1100	49	4.3	-0.118	-1551
$130^0$	-810	-360	-1170	76	4.8	-0.186	-1695

**Tablo 5.** Farklı ateşleme açıları için çıkış güç değerlerinin benzetim sonuçları (Simulation results of output powers for different firing angles)

Ateşleme açısı ( $\alpha$ )	ÇÇAJ'den elde edilen güç				kayma	$P_{wt}$ (W)
	$P_s$ (W)	$P_r$ (W)	$P_t$ (W)	Q (VAR)		
$110^0$	-900	-210	-1110	2790	0,115	-1450
$130^0$	-900	-290	-1190	3150	0,186	-1500

Böyle bir sistemde, iki adet kontrollü dönüştürücünün kullanılması daha geniş rüzgar hızı aralığında elektrik enerjisi üretme avantajı sağlar. Fakat, asenkron makinasının rotor terminallerinde iki kontrollü dönüştür-

rücü kullanılması hem maliyeti artırır hem de ateşleme ve iletim problemlerine yol açar. Bu nedenle, üzerinde çalışılan sistemin hem daha basit oluşu hem de daha düşük maliyete sahip olması tercih sebebi olmaktadır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Üçtüğ Y., Eskandarzadeh I., İnce H., "Modeling and output power optimization of a wind turbine driven double output induction generator" **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** Vol. 141, No. 2, March 1994
- Natarajan, K., Sharaf. A.M., Sivakumar, S., and Naganathan, S., "Modeling and control design for Wind energy power conversion scheme using self-excited induction generator", **IEEE Trans.**, EC-2, (3). pp. 506-512, 1987
- Salameh, Z.M., and Kazda, L.F., "Analysis of the steady-state performance of the double output induction generator", **IEEE Trans.**, EC-1, pp. 26-32, 1986
- Salameh, Zm., and Kazda, L.F., "Analysis of the double output induction generator using direct three-phase model: parts 1 and II", **IEEE Trans.**, EC-2, (2). pp. 175-188, 1987
- Brady, F.J.: "A mathematical model for the doubly-fed wound rotor generator", **IEEE Trans.**, EC-1, (2). pp. 180-183, 1986
- NAKRA, H.L., and DUBE, B., "Slip power recovery induction generators for large vertical axis Wind turbines". **IEEE Trans.**, EC-3, (4), pp. 753-73, 1988
- Çadirci I., Ermiş M., "Double-Output Induction Generator Operating at Subsynchronous and Supersynchronous Speeds: Steady-State Performance Optimisation and Wind Energy Recovery", **IEE Proceedings-B**, Vol.139:pp.429-442, 1992
- Heier S., **Grid Integrtrion of Wind Energy Conversion System 2<sup>nd</sup> ed**, John Wiley and Sons Ltd. pp.106-116 54-65, 230-245, 1998
- Mashaly H.M., Sharaf A.M., El-Sttar A.A., Mansour M.M., "Implementation of Fuzzy Logic Controller for Wind Energy Induction Generator D.C. Link Scheme", **3rd IEEE-CCA** pp.978-982, 1994
- Chen Z., Arnalte S.G., McCormick M., "A Fuzzy Logic Controlled Power Electronic System for Variable Speed Wind Energy Conversion System", **IEE Conference**, pp.114-119, 2000
- V. Galdi, A. Piccolo, P. Siano, "Designing an Adaptive Fuzzy Controller for Maximum Wind Energy Extraction" **IEE Trans. on Energy conv.**, Vol. 23, No. 2, June 2008
- Hilloowala M., Sharaf Adel M., "A Rule-Based Fuzzy Logic Controller for a PWM Inverter in a Stand Alone Wind Energy Conversion Scheme", **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol 32: pp57-65, 1996.