

RÜZGAR TÜRBİNİ İLE SÜRÜLEN ÇİFT ÇIKIŞLI İNDÜKSİYON JENERATÖRÜN ÇALIŞMASININ İNCELENMESİ VE ÇIKIŞ GÜCÜNÜN MAKSİMUM YAPILMASINDA KULLANILAN BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ TASARIMI

¹Ersin AKYUZ

²İres İSKENDER

¹Balıkesir Üniversitesi M.Y.O Elektronik Haberleşme Programı.10100 Çağış-Balıkesir
²Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fak. Elektrik-Elektronik Müh. Böl. Maltepe-
Ankara

¹e-posta: ekyuz@balikesir.edu.tr

²e-posta: iresis@gazi.edu.tr

Anahtar sözcükler: Rüzgar türbin, çift çıkışlı indüksiyon jeneratör, bulanık mantık

ABSTRACT

In this study the steady state characteristic of a Double Output Induction Generator (DOIG) driven by wind turbine operating at variable speed, constant frequency and constant voltage is investigated. Mathematical model on time domain are 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.

1. GİRİŞ

Geleneksel metotlar kullanılarak elektrik enerji üretiminin çevreye verdiği zararların artması ve günümüzde artan çevre bilincinin gelişmesi sonucunda, elektrik enerjisinin elde edilebilmesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması oldukça yaygınlaşmıştır. Bunlar dikkate alınırca yenilenebilir enerji olan rüzgar enerjisi, tamamıyla doğa ile uyumlu, çevreye zarar vermeyen ve tükenme ihtimali olmayan sonsuz bir kaynaktır.

1990'lı yıllarda başlayarak türbinin elektriksel sisteminde bir yenilik olarak kullanılmaya başlayan şebekeye bağlı çalışan Çift Çıkışlı İndüksiyon Jeneratörü (ÇÇİJ) ve beraberinde kullanılan güç elektroniği dönüştürücüleridir. Verim ve kontrol üstünlüğü sebebiyle bir çok avantajı olan sistem, değişken hızlı rüzgar türbini olarak bilinmektedir. Bu avantajların başında dişli kutularındaki mekanik stresin azalması, elektrik üretiminde artan verim, aktif ve reaktif gücün kontrol edilebilir olması gelmektedir [1-2].

Bulanık kontrolörler, rüzgar enerjisi gibi lineer olamayan karakteristiklere sahip ve önceden tahmini mümkün olmayan durumlar içeren sistemlerin kontrolünde çok iyi performans göstermiştir [3-5].Bu çalışmada, bulanık mantık

denetleyicisi kullanılarak, değişen rüzgar hızlarında üç fazlı tristörlü eviricinin ateşleme açısı kontrol edilerek sistemin toplam çıkış gücünün maksimum yapılması incelenmiştir. Bu çalışmada, sistemin maksimum güç değerinde çalışması denetimli olarak sağlamıştır.

2. RÜZGAR TÜRBİNİNİN MATEMATİKSEL MODELİ

Rüzgar, atmosferdeki hava kütlelerinin, ana enerji kaynağı olan güneş tarafından farklı ısıtılması sonucu bozulan ısıl dengenin sağlanması için hava kütlelerinin hareket etmesi olarak tanımlanır. Rüzgardan elde edilen güç, rüzgar hızı v , hava yoğunluğu ρ ve yer düzlemine dik süpürme alanı A 'nın değişimiyle ile hesaplanır [2].

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

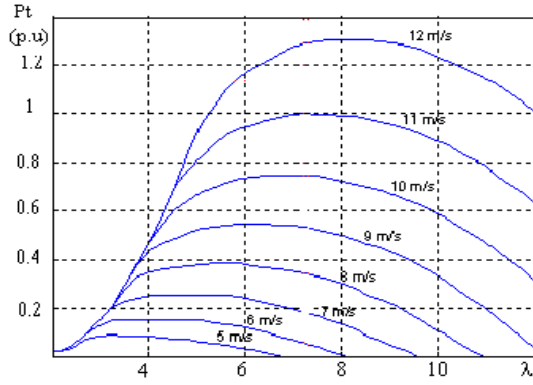
Rüzgar türbininin gücü P_{wt} , türbinin güç katsayısı C_p ile, rüzgar gücünün P_w çarpımı olarak ifade edilir .

$$P_{wt} = C_p \cdot P_w \quad (2)$$

Rüzgar hızının ve shaft hızının bir fonksiyonu olan güç katsayısı C_p sabit bir çalışma noktasında, rüzgar hızı, shaft hızı ve pervane seçimine bağlı değişiklik gösterir. C_p 'nin değişimine etkiyen parametreler Eş.3. ile hesaplanır [2].

$$C_p = 0,22 \cdot \left(\frac{116}{\lambda} - 0,4 \cdot g - 5 \right) \cdot e^{\frac{-12,5}{\lambda i}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0,008 \cdot g} - \frac{0,035}{g^3 + 1} \quad (4)$$



Şekil-1 Dikey-eksenli rüzgar türbininin çıkış gücünün farklı rüzgar hızlarında uç hız oranıyla değişimi

Simülasyonu hazırlanan sistemde kullanılan rüzgar türbinini üç kanatlı, dikey eksenli ve türbinin sabitleri C_1, C_2, C_3 tür. Rüzgar türbininin giriş torku T_t Eş.5 ile hesaplanır [6].

$$T_{t(wt,v)} = C_1 \cdot R^2 \cdot w_t \cdot v + C_2 \cdot R \cdot v^2 + C_3 \cdot \frac{v^3}{w_t} \quad (5)$$

Rüzgar türbinlerinin düşük olan dönüş hızı elektrik makinesinin sahip olduğu yüksek olan dönüş hızıyla tam olarak uyum sağlamaz. Bu sebeple düşük hız yüksek tork değerine sahip olan rüzgar türbinlerinin elektrik makinesi ile uyum sağlaması için dişli kutusu kullanılır. Bu sebeple çevirme oranı n_t olan dişli kutusu sistemde kullanılmıştır. Türbin tarafındaki tork T_t çevirme oranından n_t Eş.5 formülü kullanılarak çift çıkışlı jeneratör tarafına indirgenerek bağıntısıyla hesaplanır [6,9].

$$T_e = \frac{C_1 \cdot R^2 \cdot w_s \cdot (1-s)}{(pp) \cdot n_t^2} + \frac{C_2 \cdot R \cdot v^2}{n_t} + \frac{C_3 \cdot (pp) \cdot v^3}{w_s \cdot (1-s)} \quad (6)$$

Eş-5 kullanılarak Şekil-1'de çizilen her rüzgar hızı için türbin shaftının devir sayısına bağlı değişen güç eğrileri çizilir. Çizilen bu eğrilerin her rüzgar eğrisi için belli olan tepe noktaları belirlenerek bu noktalardan geçen eğri bir polinomla ifade edilebilir. Bu da farklı rüzgar hızlarına ait eğrilerin maksimum olduğu noktaları kesen eğri üçüncü dereceden bir polinom olarak hesaplanmıştır.

$$P_{max} = 4,11 \cdot v^3 - 2,35 \cdot v^2 + 154,5 \cdot v - 1351 \quad (7)$$

Tablo-1 'de hesapladığı üzere, maksimum giriş ifadesini rüzgara bağlı ifade ettikten sonra η_j, η_g sırasıyla ÇÇİJ'ün verimi ve güç elektroniği devrelerinin verimlerini hesaba katılarak P_{ref} giriş güç değerine ulaşabiliriz. ÇÇİJ çıkışında alınabilecek maksimum güç değerini oluşturmaktadır [3].

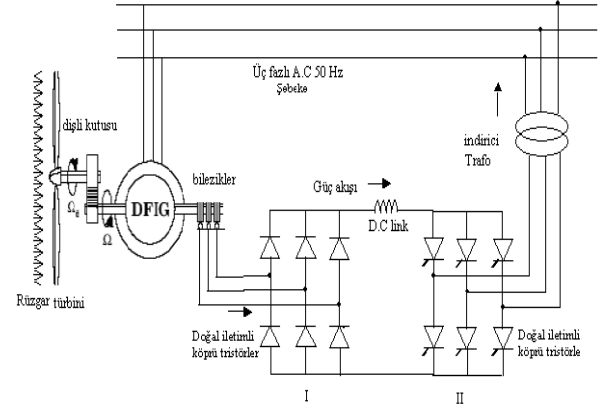
$$P_{ref} = \eta_j \cdot \eta_g \cdot P_{max} \quad (8)$$

Tablo-1 Rüzgar hızının değişimine bağlı olarak hesaplanan rüzgar türbininden elde edilebilecek maksimum güç değeri P_{max} ve çıkıştan alınabilecek maksimum güç değeri P_{ref}

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

3.ÇÇİJ'ÜN MATEMATİKSEL MODELİ

Şebekeye bağlı çalışan ÇÇİJ'ün statoru doğrudan rotoru ise, Şekil-2'de gösterildiği gibi güç elektroniği dönüştürücüleri ile şebekeye bağlanır. Bu bağlantı şekliyle rüzgar türbinini ile sürülen ÇÇİJ'ü sadece senkron üstü hızlarda ($-1 < s < 0$) stator ve rotordan enerji elde edilebilir. Bu durumda güç akışının sağlanabilmesi için rotor tarafındaki dönüştürücü üç fazlı doğrultucu, diğeri ise üç fazlı evirici olarak çalışır. Sistemin giriş değişkeni rüzgar hızı, kontrol değişkeni üç fazlı eviricinin ateşleme açısı ($90^\circ-180^\circ$) ve çıkış değişkenini ise toplam aktif gücdür [7].



Şekil-2 Rüzgar türbinini sürülen şebekeye bağlı çalışan ÇÇİJ'ün şeması.

Park's koordinat sisteminde w_s senkron hızında ortak bir referans koordinat sisteminde ÇÇİJ'ün uç denklemleri aşağıda verilmiştir [8].

$$V_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \psi_{ds} \quad (9a)$$

$$V_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \psi_{qs} \quad (9b)$$

$$V_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - p \cdot \omega_m) \cdot \psi_{dr} \quad (9c)$$

$$V_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_s - p \cdot \omega_m) \cdot \psi_{qr} \quad (9d)$$

$V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$ gerilimin ani değerleri $i_{qs}, i_{qr}, i_{dr}, i_{ds}$ akımın ani değeridir. Alt indis s stator, r indis rotor büyüklüklerine karşılık gelmektedir. Kaçak akı matrisi ve endüktans matrisiyle ilişkisi aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ \psi_{dr} \\ \psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (10)$$

ÇÇİJ'ün ürettiği elektromanyetik tork T_e aşağıdaki bağıntıyla verilmiştir.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (11)$$

Kaçak akıların türev ifadesi aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$\frac{d\psi_{ds}}{dt} = v_{ds} - r_s \cdot i_{ds} + \omega_s \cdot \psi_{qs} \quad (12a)$$

$$\frac{d\psi_{qs}}{dt} = v_{qs} - r_s \cdot i_{qs} - \omega_s \cdot \psi_{ds} \quad (12b)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = v_{dr} - r_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - p \cdot \omega_m) \cdot \psi_{qr} \quad (12c)$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = v_{qr} - r_r \cdot i_{qr} + (\omega_s - p \cdot \omega_m) \cdot \psi_{ds} \quad (12d)$$

Yukarıdaki denklemlere bağlı olarak ÇÇİJ'ün dinamik davranışını belirleyen hareket denklemi ise aşağıdaki gibidir. Buna bağlı olarak sistem türbinden gelen T_m giriş torku, elektromanyetik torkun farkı ve sürtünme kayıplarının ardından dönüş hareketini oluşturur.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2.H} (T_e - F\omega_s - T_m) \quad (13)$$

Devrede mevcut anahtarları ideal kabul ederek rotor ve şebeke arasında mevcut sırası ile doğrultucu, evirici devrelerinin gerilimleri aşağıdaki bağıntılarla ifade edilir.

$$V_I = 3 \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_{rp} \quad (14a)$$

$$V_{II} = 3 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_{rL} \cdot \cos \alpha \quad (14b)$$

DC hat üzerindeki köprü doğrultucu ve evirici arasındaki gerilim eşitliği ise aşağıdaki şekilde yazılabilir. Eviricinin çıkış geriliminin ortalama değeri V_{II} daha önce verilmişti. Buna göre DC hat üzerindeki kayıpları P_{dceu} ihmal ederek $V_I = V_{II}$ eşitliği yazılarak aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$3 \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot s \cdot V_s \cdot \frac{N_r}{N_s} = 3 \cdot \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_s \cdot \dot{u}_t \cos \alpha \quad (15)$$

Kayma, eviricinin tristörlerinin ateşleme açısıyla kontrol edilebilir. Kaymanın, ateşleme açısına bağlı değişimi bağıntıyla ifade edilir [7].

$$s = - \frac{\dot{u}_t \cdot \cos \alpha}{\ddot{u}_m} \quad (16)$$

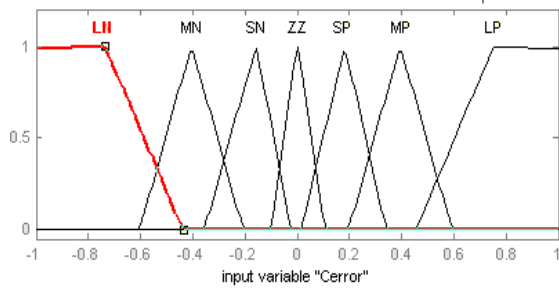
4.BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ TASARIMI

Rüzgar türbinleri rüzgar hız değerine bağlı olarak farklı ve türbin hızına bağlı olarak değişen güç eğrilere sahiptir. Kontrol sistemin elektromanyetik torkunu ateşleme açısıyla kontrol ederek türbin shaft hızını, rüzgarın hız değeri için belirli olan güç eğrisindeki maksimum güç noktasına getirmekle sağlanır. Bunun için sistemin çalışmasının analizinin hem rüzgar türbini için hem de elektrik makinesi için çok iyi bir şekilde yapılmış olması gerekmektedir. Bu amaçla sistemin çalışmasını incelemek için Matlab-Simulink kullanılmıştır. Simülasyonda rüzgar türbinine uygulanan farklı rüzgar hız değerlerinde ÇÇİJ'ün çıkışındaki rotor ve stator güçlerinin toplamı olan toplam net gücün maksimum olması için bulanık mantık denetleyicinin giriş değişkenlerini net gücün değişimi DP_t ve rüzgardan elde edilen giriş gücünün net güç ile farkının oranı $(P_{ref} - P_t)/P_{ref}$ oluşturmuştur. İstenilen ateşleme açısı çıkış değerlerini elde etmek için bulanık denetleyicinin tasarım adımları aşağıdaki sıralamayla yapılmıştır.

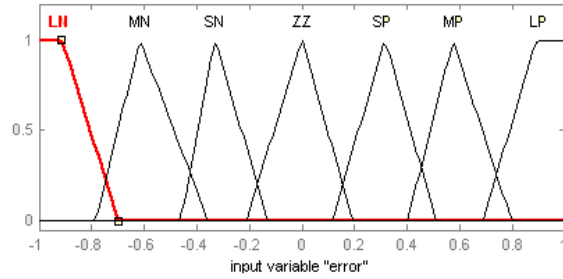
1- Bulanık denetleyicinin giriş ve çıkış minimum ve maksimum değerleri belirlendikten sonra giriş ve çıkış bulanık kümelerini ifade eden dilsel değişkenler tanımlanır.

2- Nitelendirilen giriş ve çıkışlara uygun bulanık kümelerle ölçeklendirilir. Daha sonra Şekil-3, Şekil-4, Şekil-5 ile verilen bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları saptanır. Şekilde dilsel değişkenler ve üyelik fonksiyonlarının kullanımıyla giriş ve çıkış sinyalleri tanımlanmıştır.

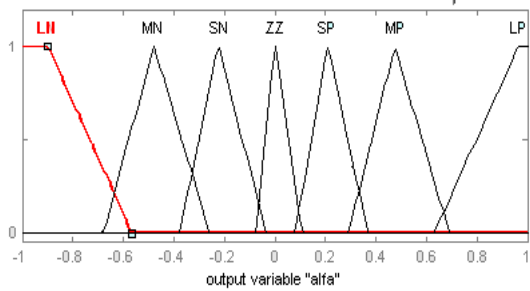
3- Her rüzgar hız giriş değerinde sisteme ait toplam elektriksel çıkış gücünü maksimum yapmak için tasarlanan giriş fonksiyonları hata " $(P_{ref} - P_t)/P_{ref}$ ", hatanın değişimi " (DP_t) " ve çıkış fonksiyonu alfa için hazırlanan bulanık mantık kural tablosu Tablo-1'de verilmiştir.



Şekil-3 Bulanık mantık denetleyicisinin giriş sinyali hatanın değişimi (CP_t) üyelik fonksiyonu



Şekil-4 Bulanık mantık denetleyicisinin giriş sinyali ($P_{ref}-P_t/P_{ref}$) üyelik fonksiyonu



Şekil-5 Bulanık mantık denetleyicisinin çıkış sinyali (alfa) üyelik fonksiyonu

Tablo-1'de verilen bulanık kontrol kurallarının uygulanması ile bulanık çıkış kümesi elde edilir.

Tablo-2 Bulanık mantık denetleyicisi kural kümesi

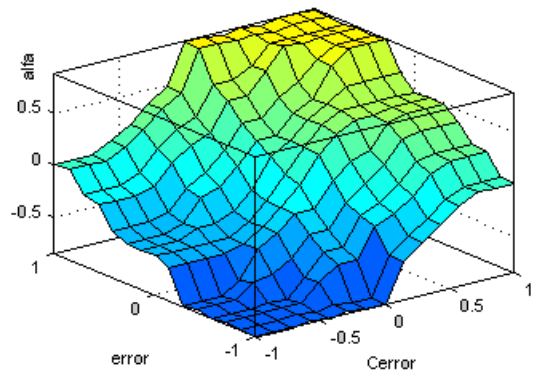
CP _t \ (P _{ref} -P _t)	LP	MP	SP	ZZ	SN	MN	LN
LP	LP	LP	LP	LP	MP	SP	ZZ
MP	LP	LP	MP	MP	SP	ZZ	SN
SP	LP	MP	SP	SP	ZZ	SN	MN
ZZ	MP	MP	SP	ZZ	SN	MN	MN
SN	MP	SP	ZZ	SN	SN	MN	LN
MN	SP	ZZ	SN	MN	MN	LN	LN
LN	ZZ	SN	MN	LB	LN	LN	LN

Tablo-1'de verilen kısaltmalar sırasıyla LP; Geniş Pozitif, MP; Orta Pozitif, SP; Küçük Pozitif, ZZ;Sıfır ,

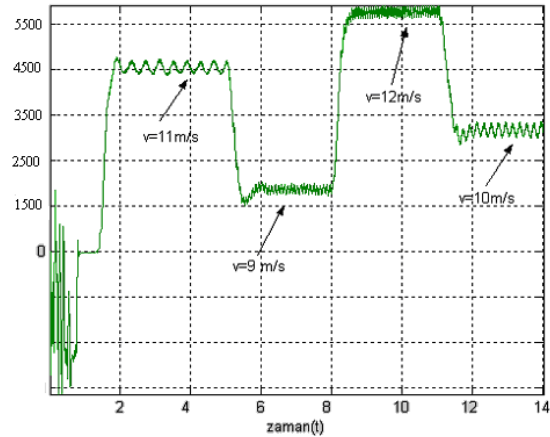
LN; Geniş Negatif, MN; Orta Negatif, SP; Küçük Negatif olarak tanımlanmıştır.

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

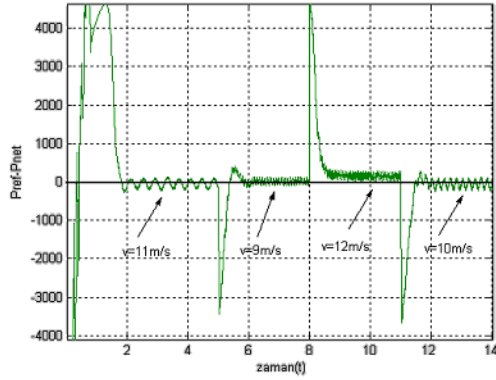
Şekil-7 ve Şekil-8 ile tasarlanan denetleyicinin belirlediği ateşleme açısı ile 11m/s, 9 m/s, 12m/s, 10m/s rüzgar hızlarının türbin girişinden uygulanıp neticesinde Şekil-7 ile stator ve rotor toplam gücünün değişimi elde edilmiştir. Şekil-8 ile Rüzgardan elde edilebilecek maksimum gücün çıkış gücünü nasıl takip ettiği görülmektedir. Ayrıca giriş ve çıkış kural kümelerinin belirlenmesinin ardından Şekil-6 ile kural yüzeyi oluşturulmuştur.



Şekil-6 Tasarlanan bulanık mantık denetleyicisinin kural yüzeyi



Şekil-7 Tasarlanan bulanık denetleyicinin farklı rüzgar hızlarında toplam çıkış gücünün değişimi



Şekil-8 Girişte rüzgardan elde edilen maksimum güce göre, çıkış toplam gücünün girişe göre değişimi

5. SONUÇ

Yapılan çalışmada, değişen rüzgar hızlarında ÇÇİJ'nün çıkış büyüklükleri incelenmiştir. Sistem rüzgardan elde ettiği enerjiyi, sistemin verimini hesaba kattıktan sonra, maksimum güç çıkışı için, üç fazlı tristörlü eviricinin ateşleme açısını kontrol etmektedir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına göre bulanık mantık denetleyicisi ile sistemin çıkış büyüklüklerinin değişimi kontrolsüz durumu göre daha az salınım yapar. Ayrıca sistemin dinamik performansı da bulanık mantık denetleyici sayesinde çıkışında daha kararlı bir durum oluşturmuştur.

ÇÇİJ'ün Plaka Değerleri

$S_n = 7500 \text{ VA}$	$V_{LL} = 380 \text{ V}$	$f = 50 \text{ Hz}$
$R_s = 0,9 \Omega$	$R_r = 1,25 \Omega$	$L_m = 175e-3 \text{ H}$
$L_s = 20e-3 \text{ H}$	$L_r = 20e-3 \text{ H}$	$J = 0,089 \text{ kg.m}^2$
$pp = 2$	$F = 0,0001 \text{ N.m.s}$	

$$\eta_j * \eta_g = \%79$$

Köprü Diyot Parametreleri

$R_s = 500 \Omega$	$C_s = 0,1e-6 \text{ F}$
$R_{on} = 1e-3 \Omega$	$V_f = 1,5 \text{ V}$

DC Hat Değerleri

$R_{dc} = 0,31 \Omega$	$L_{dc} = 100e-3 \text{ H}$
$R_s = 500 \Omega$	$C_s = 0,1e-6 \text{ F}$
$R_{on} = 1e-3 \Omega$	$V_f = 1,5 \text{ V}$

İndirici Transformatörün Parametreleri

$S_n = 5000 \text{ VA}$	$f = 50 \text{ Hz}$	$V_{2LL} = 100 \text{ V}$
$R_1 = 2e-3 \Omega$	$L_1 = 40e-3 \text{ H}$	$R_m = 200 \Omega$
$R_2 = 2e-3 \Omega$	$L_2 = 40e-3 \text{ H}$	$V_{1LL} = 380 \text{ V}$
$n = 0,265$		

Rüzgar türbini

3-pervaneli ve $R=5 \text{ m}$ dişli oranı $n_t=7,2$

KAYNAKLAR

[1] Hansen L.H., Blaabjerg F., Christensen H.C., Lindhard U., Madsen P.H., "Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines",

Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2000-2005 (2001).

[2] Heier S., 1998, "Grid Integration of Wind Energy Conversion System 2nd ed", *John Wiley and Sons Ltd*. pp.106-116 54-65, 230-245 (1998).

[3] 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).

[4] 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).

[5] 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).

[6] Eskandarzadeh I., Master Tezi, "Steady State and Dynamic Analysis of a Double Output Induction Generator", *O.D.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, pp.31-43, 67-87 (1990).

[7] 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).

[8] Marques G.D., "Numerical Simulation Method for the Slip Power Recovery System", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol.146: pp.17-23 (1999).

[9] Üçtüğ Y., Eskandarzadeh I., İnce H., "Modelling and output power optimization of a wind turbine driven double output induction generator" *IEE Proc.-Electr. Power Appl.* Vol. 141, No. 2, March 1994.