

RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMİN MODELLENMESİ

Enver Şipar

Elektrik – Elektronik Fakültesi
Elektrik Mühendisliği Bölümü
Elektrik Makineleri ve Güç Elektronikleri Ana Bilim Dalı
Yıldız Teknik Üniversitesi
e-posta: enversipar@yahoo.com & f5507004@yildiz.edu.tr

Giriş

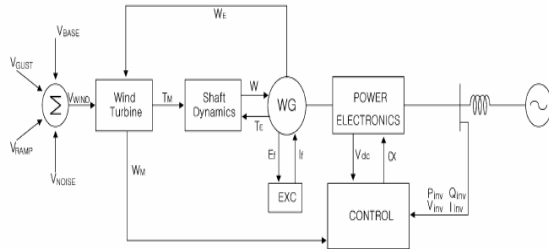
Bir sisteme etki eden tüm faktörlerin dikkate alınması ile ortaya çıkartılan matematiksel model vasıtasıyla o sistemin tüm davranışları, iyi bir simülasyon programı aracılığıyla, analiz edilebilir, bozucu etkenlerin etkisi daha iyi anlaşılabilir. Bu analizler neticesinde sistem hakkında öngörülen ve özellikle öngörülmeyen birçok bilgiye ulaşılır, oluşabilecek problemler kestirilerek önceden önlem alınabilir.

Hazırlanan bu çalışmada rüzgâr türbinlerinin matematiksel modeli çıkartılmıştır.

Anahtar sözcükler: Matematiksel model, simülasyon, sistemin analizi.

Şebekeye bağlantısı yapılacak sistemin simülasyonunun yapılabilmesi için gereken değişkenler şekil-1 de görüldüğü gibi,

- Rüzgârın modellenmesi,
- Rüzgâr türbininin modellenmesi,
- Generatörün modellenmesi,
- Shaft dinamiğinin modellenmesi,
- Kıyıcı ve VSI inverter kontrolü ve modellenmesi,
- Güç sisteminin kontrolünü içerir.



Şekil - 1: Şebeke bağlantısı için bir sistemin simülasyon modeli

Şekil-1' de görülen sistemde dişli kutusu kullanılmamıştır ve back-to-back VSI güç elektroniği sürücü devresinden oluşur.

Rüzgârın Modellenmesi

Rüzgâr hızının ortama ve zamana göre sürekli değişken bir yapıya sahip olması nedeniyle modellenmesi çok zordur. Bu zorluklara rağmen rüzgâr hızını ortaya koyan çeşitli yaklaşımlar vardır. Bunlardan bir tanesinin temeli **süper pozisyon** teoremine dayanır. Yani sisteme etki eden tüm bileşenler ayrı ayrı hesaplanarak toplanır. Bir diğer yöntem ise **Van Der Hoven ve Von Karman**'in geliştirmiş olduğu modeldir.

Süper pozisyon Teoremine Göre Rüzgâr Hızının Hesaplanması

Rüzgâr modelinin içerisine aşağıdaki bağıntıda görülen dört farklı bileşen katılabilir.

$$V_W = V_{BASE} + V_{GUST} + V_{RAMP} + V_{NOISE}$$

Burada:

V_{BASE} = temel bileşen [m/s];

V_{GUST} = rüzgâr hızının belirli bir süre içerisindeki en yüksek değeri [m/s];

V_{RAMP} = rampa fonksiyonu şeklinde tanımlanan rüzgâr bileşeni [m/s];

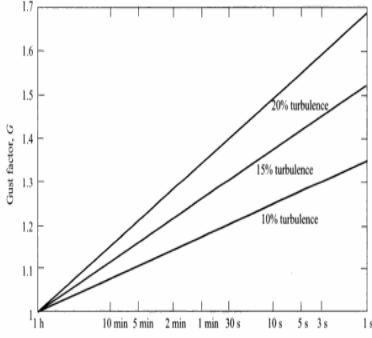
V_{NOISE} = sisteme etki eden dış etkenler (noise) [m/s];

V_{BASE}

Temel bileşendir ve rüzgârın sabit hızını ifade eder.

V_{GUST}

Belirli iki zaman aralığı içerisinde beklenen en yüksek rüzgar hızıdır. Bu bileşen genellikle bir saatlik dilim içerisinde belirlenir ve hava akımı şiddetinin (turbulence intensity) bir fonksiyonudur. Şekil -5'de gust faktörünün değişim eğrisi görülmektedir.



Şekil - 2: Gust faktörünün değişim eğrisi

t süresi içerisindeki Gust faktörü fonksiyonu:

$$G(t) = 1 + 0.42 I_u \ln \frac{3600}{t}$$

şeklinde. Burada I_u yer eksenine paralel olan hava akımı şiddetidir. Şekil -2'de çeşitli hava akımı şiddeti ve bu değerler ile zamana göre gust değişim eğrisi verilmiştir.

V_{RAMP}

Rampa fonksiyonu şeklindeki değişimdir. Bu değişime göre:

$$V_{RAMP} = \begin{cases} 0 & t < T_{1R} \\ V_{RAMP} & T_{1R} < t < T_{2R} \\ 0 & t > T_{2R} \end{cases}$$

ve

$$V_{RAMP} = [1 - (t - T_{2R}) / (T_{1R} - T_{2R})]$$

Şeklinde tanımlanmıştır. Burada;

T_{1R} = ramp fonksiyonunun başlangıç zamanı,

T_{2R} = ramp fonksiyonunun en yüksek olduğu zamanı ifade eder.

V_{NOISE}

Bu ifade aşağıda Van Der Hoven metodunda anlatılmış olan yöntemin ikinci (toplamsal şekilde ifade edilen kısım) kısmıdır.

Van Der Hoven ve Von Karmen Modeli Rüzgar Hızının Hesaplanması

Bu modele göre rüzgar hızı sürekli değişkendir ve anlık değeri $V_w(t)$ belirli bir süre içerisindeki tüm değerlerin toplamına dayanır. Bu değer:

$$v_w(t) = V_{wM} + \sum_{i=1}^N A_i \cos(\omega_i t + \Psi_i),$$

bağıntısı ile hesaplanır.

V_{wM} = Rüzgar hızının ortalama değeridir ve genellikle 10 dakika içerisindeki ortalama değerini ifade eder.

$A_i = \omega_i$ ayrı frekanstaki dalgalanmanın genliğini ifade eder. Burada $i=[1,N]$ ve N rüzgar hızından alınan örnek sayısıdır.

Ψ_i değişken faz acısının ifadesidir ve $-\Pi, \Pi$ aralığında değişir.

A_i genlik ifadesi Spectral yoğunluğun $S(\omega)$ bir fonksiyonudur. Bu ifade ile türbülansın etkisi sisteme dahil edilir. $S(\omega)$ bağıntısı ise;

$$S(\omega) = \frac{0.475 \sigma^2 \frac{L}{V_{wM}}}{[1 + (\frac{\omega L}{V_{wM}})^2]^{\frac{5}{6}}}$$

şeklinde verilir. Burada L bozucu etki olan türbülansın uzunluğunun ifadesidir. L' nin belirlenme kriteri ise:

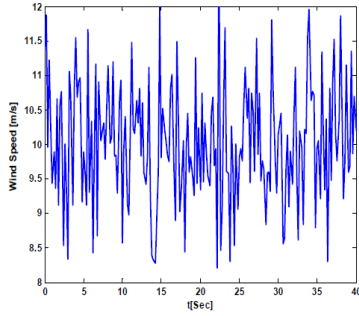
$$L = \begin{cases} 20h & \text{if } h \leq 30m \\ 600 & \text{if } h > 30m \end{cases}$$

şeklinde. h ifadesi ise rüzgar hızının ölçüm yapıldığı yüksekliktir. Sonuç olarak A_i ifadesi:

$$A_i(\omega_i) = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} [S(\omega_i) + S(\omega_{i+1})] (\omega_{i+1} - \omega_i)}$$

şeklinde hesaplanır.

Von Der Hoven metoduna göre rüzgar hızının değişimi Şekil -3'de verilmiştir.



Şekil - 3: Von Der Hoven metoduna göre rüzgar hızının anlık değişim grafiği

Türbinin Modellenmesi

Türbinden alınacak mekaniksel tork ve güç ifadeleri aşağıdaki gibidir .

$$\lambda = \frac{\omega_M R}{V_{WIND}}$$

$$P_M = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_P V_{WIND}^3$$

$$T_M = \frac{P_M}{\omega_M} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 C_P \frac{\omega_M^2}{\lambda^3}$$

mekaniksel torktan, rüzgar jeneratörünün giriş gücü elde edilir. Güç coefficient (C_P) katsayısı tip hız oranının ($\lambda=TSR$) bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi elde edilir. Buradaki β kat sayısı türbin gövdesinin acısını ifade eder.

$$C_P = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \frac{\pi(\lambda - 2)}{13 - 0.3\beta} - 0.00184(\lambda - 2)\beta$$

Generatörün Modellenmesi

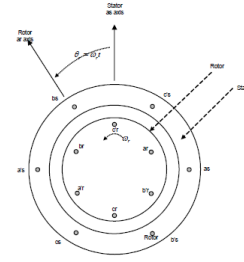
Şekil-4'de üç fazlı bir asenkron makinenin rotor ve statorun eşdeğer devresi verilmiştir. Stator sargılarındaki dengeli üç fazlı AC gerilim rotor üzerinde bir akım indüklenmesine neden olur. Stator akımı makinenin hava aralığında, senkron hızda sinüzoidal bir manyetik akı oluşturur. Makinenin hava aralığındaki senkron hızın ifadesi ise:

$$\omega_z = \frac{2}{P} \omega_e$$

şeklindedir. burada ω_s senkron hız (rad/san), ω_e statorun elektriksel acısal frekansı (rad/san) ve P rotorun kutup sayısını ifade eder. Asenkron makinenin çalışma karakteristiğinden dolayı rotorun hızı senkron hızdan jeneratör çalışmada yüksektir ve bu iki hız farkından dolayı bir kayma meydana gelir. Bu kaymanın ifadesi ise:

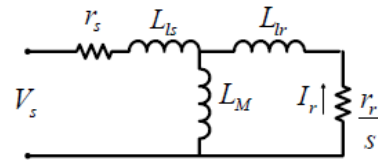
$$s = \frac{\omega_z - \omega_r}{\omega_z}$$

şeklindedir. Burada s kaymayı, ω_r rotor frekansını ifade eder.



Şekil - 4: Asenkron makinenin tek faz eşdeğer devresi

Asenkron makinenin her bir fazı, kararlı hal şartlarında şekil -5'de görüldüğü gibi primere indirgenmiş bir transformatör şeklinde tasarlanabilir.



Şekil - 5: Asenkron makinenin primere indirgenmiş transformatör eş değer devresi.

Burada r_s stator direnci, L_{ls} stator endüktansı, L_M mıknatıslanma endüktansı, r_r/s statora indirgenmiş rotor direnci, L_{lr} statora indirgenmiş rotor endüktansını ifade eder. r_r/s değeri jeneratör çalışmada negatiftir.

Kararlı hal şartlarında shaftın elektromanyetik torku rotor akımına, direncine ve kaymaya bağlıdır ve bu ifade:

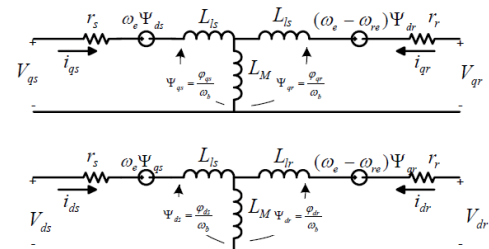
$$T_e = \frac{3}{\omega_z} I_r^2 \frac{r_r}{s}$$

şeklinde ifade edilir.

Generatorun çıkış gerilimi, makinenin hava aralığında oluşan mıknatıslanma ergisinin şekline çıkartılabilir ve bu şekil ayrıca makinenin kapasitif reaktif gücünü sağlamak için hatta bağlanmış olan kondansatör banklarına bağlıdır.

Asenkron Makinenin Dinamik Modeli

Akı girişim yöntemi asenkron makinenin dinamik modellenmesinde en yaygın kullanılan yöntemdir. Asenkron makinenin qdo'ya bağlı dinamik eşdeğer devresi şekil -6'da verilmiştir .



Şekil - 6: Asenkron makinenin qdo eşdeğer devresi

Şekil -6'daki devreden akı girişimine bağlı olarak dört farklı diferansiyel denklem yazılır ve bu denklemlerin sonucunda,

$$i_{ds} = \frac{1}{x_{ls}} (\psi_{ds} - \psi_{md}),$$

$$i_{qr} = \frac{1}{x_{lr}} (\psi_{qr} - \psi_{mq}),$$

$$i_{dr} = \frac{1}{x_{lr}} (\psi_{dr} - \psi_{md}),$$

akım bağıntıları ile,

$$\psi_{mq} = x_{ml}^* \left[\frac{\psi_{qs}}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qr}}{x_{lr}} \right]$$

$$\psi_{md} = x_{ml}^* \left[\frac{\psi_{ds}}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}}{x_{lr}} \right]$$

akı bağıntıları elde edilir. Bu bağıntılardan asenkron makinenin elektro mekanik torku:

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{p}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})$$

şeklinde yazılır.

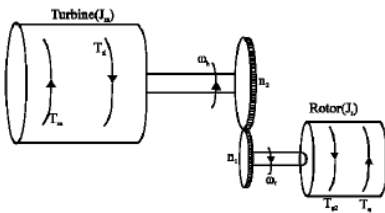
Denklemlerde kullanılan semboller ise:

Ψ_{ds} , Ψ_{qs} , Ψ_{dr} , ve Ψ_{qr} : stator ve rotora ait akı girişimlerini, r_s ve r_r : rotor ve stator dirençlerini, ω_e , ω_b : rotor ve taban elektriki açısal hızları, ω_{re} : rotor elektriki hızı, v_{qs} , v_{ds} : q ve d eksenli stator gerilimlerini, v_{qr} , v_{dr} : d ve q eksenli rotor gerilimini ve T_e , T_l : elektro mekaniksel ve yük torkunu ifade eder.

Shaft Dinamiğinin Modellenmesi

Türbin rotoru ile generatör birbirine shaft aracılığı ile dişli kutulu veya dişli kutusuz olarak bağlanırlar. Şekil - 4'de dişli kutusu kullanılan bir sistemin modelini göstermektedir.

Rüzgâr türbini ile generatör aynı shaft üzerinde ise iki kütle arasında bir burulma osilasyonu meydana gelir. Türbin ile generatör arasında meydana gelen burulma karakteristiğini tespit edebilmek için shaft'ın dinamik davranışı bilinmelidir.



Şekil - 7: Shaft dinamiğinin modellenmesi.

T_m = Türbin torkunun ifadesidir ve rüzgâr tarafından oluşturulur.

J_m = Türbinin atalet momenti.

T_{s1} = Türbinden shafta aktarılan torkun ifadesidir.

ω_b = Türbinin açısal hızı

Rüzgârın oluşturduğu T_m torku ile shaft üzerinde ω_b açısal hızı ile bir döndürme momenti oluşturur.

$$T_m - T_{s1} = J_m \frac{d\omega_b}{dt}$$

Shaftın generatör tarafında ise:

T_{s2} = Shafttan generatör tarafına aktarılan tork,

T_e = Generatör üzerinde oluşan tork ,

ω_r = Generatör rotorunun açısal hızı,

J_r = Generatör rotorunun açısal hızını ifade eder. Bu ifadelerle göre generatör tarafına aktarılan mekanik güç bağıntısı,

$$T_{s2} - T_e = J_r \frac{d\omega_r}{dt}$$

gibidir. Dişli kutusunun ideal, kayıplarının olmadığı ve shaftın her noktada aynı mukavemeti gösterdiği kabul edilirse

$$\frac{T_{s1}}{T_{s2}} = \frac{\omega_r}{\omega_b} = \frac{n_1}{n_2}$$

oranı elde edilir. Burada n_1/n_2 dişli kutusunun dönüştürme oranıdır. Yukarıdaki ifadeler uygun şekilde birleştirilir ve gereken sadeleştirmeler yapılırsa,

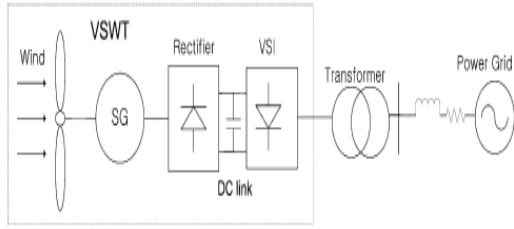
$$T_m \left[\frac{n_2}{n_1} \right] - T_e = \left[\frac{J_m \left[\frac{n_2}{n_1} \right]^2 + J_s}{J_{eq}} \right] \frac{d\omega_s}{dt}$$

bağıntısı elde edilir.

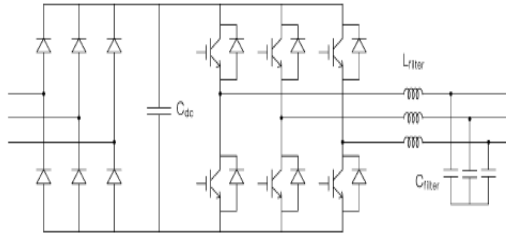
Sistemde eğer dişli kutusu kullanılmıyorsa n_1/n_2 dönüştürme oranı 1 alınır.

Kıyıcı ve VSI İverter Kontrolü

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde, tasarlanan sistemin ihtiyacına göre birçok güç elektroniği devreleri kullanılabilir. Şekil -8'de referans alınan sistemde VSI inverter kullanılmıştır. VSI inverterde, generatör terminalerinde oluşan harmonikler filtrelemek için LC harmonik filtre kullanılır. Şekil - 9'de kıyıcı ve VSI inverter modeli görülmektedir.



Şekil - 8: Şebeke bağlantısı yapılan sistemin blok şeması.



Şekil - 9: Kıyıcı ve VSI inverter modeli.

Şekil - 10'de verilen modelde kıyıcı, generatorun çıkışından alınan AC gerilimi kontrolsüz olarak DC gerilime dönüştürür. Akım kontrollü VSI inverter aktif ve reaktif gücün aktarımını sağlar ve çıkışta AC sinüzoidal bir dalga oluşturur.

Şekil - 11'de VSI inverterin matematiksel modeli verilmiştir. Asıl kontrolü yapan aktif target, aktif ve reaktif güç ayarını yapar, P_{ref} ve Q_{ref} gerçek aktif ve reaktif gücü takip eder. Aktif ve reaktif güç ayarı yapabilmek için öncelikle sistem için gerekli olan $I_{d,ref}$ ve $I_{q,ref}$ akımlarını hesaplamaktır. d - q eksenlerine ait bileşenler, a - b - c eksenlerine ait ifadelerin $T(\Phi)$ dönüşüm matrisi ile çarpımları sonucunda elde edilir. $T(\Phi)$ dönüşüm matrisi

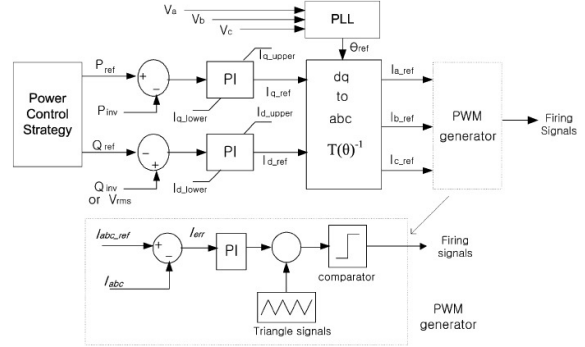
$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

şeklinde ifade edilir. d - q dönüşümü aşağıdaki dönüşüm matrisi kullanılarak yapılır.

$$[V_o, V_d, V_q]^T = T(\Phi) [V_a, V_b, V_c]^T$$

Dönüşüm matrisi içerisindeki semboller ise:

V_o, V_d, V_q : d - q eksenine ait değişkenler,
 V_a, V_b, V_c : a - b - c eksenine ait değişkenler,
 Φ : V_a bileşenine ait faz açısını ifade eder.



Şekil - 10: Akım kontrollü VSI inverterin matematiksel modeli.

Üç fazlı, dengeli sistemlerde anlık aktif ve reaktif (P, Q) değişimi:

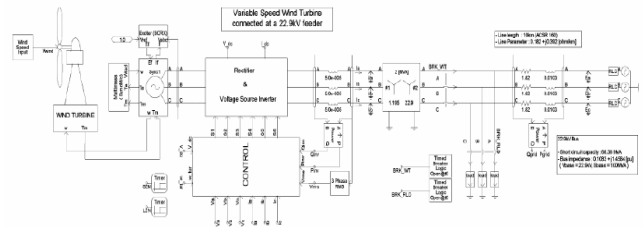
$$P = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q), \quad Q = \frac{3}{2}(V_d I_q - V_q I_d).$$

bağıntıları ile hesaplanır. Buradaki V_q inverter terminallerindeki anlık gerilimidir ve V_d gerimi d - q dönüşümü sonucunda 0 olur. P ve Q ifadeleri tekrar düzenlenirse:

$$P = \frac{3}{2}|V_o|I_q, \quad Q = -\frac{3}{2}|V_o|I_d$$

elde edilir. P ve Q ifadesindeki $|V_o|$ inverterin anlık çıkış geriliminin büyüklüğüdür.

Şekil 10'da verilen blok şemada görüldüğü gibi P_{ref} ve P_{inv} , Q_{ref} ve Q_{inv} arasındaki hata PI kontrollerden geçirilmesi ile $I_{q,ref}$ ile $I_{d,ref}$ akım bilgileri elde edilir. d-q eksenindeki bu veriler a- b- c eksenine dönüştürülür. PLL (Phase Lock Loop) devresi sistem için gerekli olan Q_{ref} açısını oluşturur ve bu referans açısına göre $T(\Phi)^{-1}$ matrisi ile d-q eksenel dönüşümü yapılır. Sistem PWM tekniği ile kontrol edilir. PWM bloğu içerisinde $I_{abc,ref}$ referans akımı ile I_{abc} anlık akım değeri karşılaştırılması sonucunda I_{err} hata sinyali elde edilir. Bu hata sinyalleri ile IGBT'leri sürme sinyalleri oluşturulur. q eksenine ait üst ve alt akım ($I_{q,upper}$ ve $I_{q,lower}$) değerleri sistemi korumak için VSI'nin nominal akım değerinin 1.1 ile 1.5 katına set edilir.



Şekil - 11: Sistemin matematiksel modelin detaylı gösterimi.

Değişken Hız Kontrolü

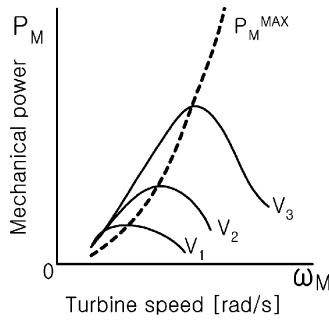
Sistemden alınacak P_M^{MAX} maksimum gücün ifadesi ve şekil-7 da ergisi verilmiştir. Bu ifadenin basitçe anlamı, maksimum güç rüzgar hızının değişim ergisi takip edilerek elde edilir. Sistemin çıkışından alınan asıl güç ise maksimum gücün verim ile çarpımından elde edilir.

$$P_M^{MAX} = \frac{1}{2} \pi \rho R^5 \frac{C_P^{MAX}}{\lambda_{OPT}^3} \omega_M^3$$

maksimum güç ifadesi.

$$P_{ref} = \eta P_M^{MAX}.$$

sistemin çıkışından alınan asıl gücün ifadesi.



Şekil - 11: Türbin hızındaki değişim eğrisine göre gücün değişimi.

Sistem modellenmesinin yapılmasıyla elde edilen simülasyon ile rüzgar enerjisi temelli güç sisteminde meydana gelen transienler ve sistemin davranışı kestirilebilir, değişken hızlı sistemlerde, sistemin dinamik davranışı ve güç akışı analiz yapılabilir.

Kaynakça

System Management of a Wind-Energy Converter
Charles Lemogo Kana, Manoharan Thamodharan, and Albrecht Wolf
IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 16, NO. 3, MAY 2001

High Speed Large Capacity Inverter for Power System Apparatus

Akira Nakamori, Naoya Eguchi, Yoske Nakanishi, Member, IEEE

Fuji Electric Corporate Research and Development, Ltd.

Current Control in the Grid Connection of the Double – Output Induction Generator Linked to a Variable Speed Wind Turbine

C.J.Ramos, A.P.Martins, A.S. Araujo, A.S.Carvalho
0-7803-7474-6/02/ 2002 IEEE

Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines

L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. M. Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen and B.Jensen.
Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark December 2001

DA/AA Dönüştürücü

Onur Ortaç, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi.

PSCAD/EMTDC-Based Modeling and Analysis of a Gearless Variable Speed Wind Turbine

Seul-Ki Kim and Eung-Sang Kim
0885-8969 © 2005 IEEE

POWER ELECTRONIC DEVICES FOR WIND TURBINES

Krusteva Anastassia, Marinov Tsvetan, Hinov Nikolay
Department of Power Electronics, Technical University of Sofia, – 22 September, Sozopol, BULGARIA

RÜZGAR ENERJİSİ İLE ELEKTRİK ÜRETİMİ

Seyfullah UGUZ, YÜKSEK LİSANS TEZİ, GAZİ ÜNİVERSİTESİ, EKİM 2005

WIND ENERGY HANDBOOK

T.Burton, D.Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi

Modeling and Controller Design of a Wind Energy Conversion System Including a Matrix Converter

S. Masoud Barakati, A thesis presented to the University of Waterloo-2008