

가변 풍속과 터블런스를 고려한 가변속 풍력 발전 시스템 시뮬레이터 개발

송 승호¹⁾, 김 동용²⁾, 양 인선³⁾, 경 남호⁴⁾

Emulation of Variable Wind Speed and Turbulence Effects in a Wind Turbine Simulator

Seungho Song, Dongyong Kim, Insun Yang, Namho Kyong

Key words : Wind Turbine Simulator(풍력발전시스템 시뮬레이터), Variable Wind Speed(가변풍속), Turbulence Effects(타위효과)

Abstract : Control algorithms and implementation issues for a wind turbine simulator are presented for realistic emulation of variable wind characteristics using a lab-scale motor and generator set. When the average wind speed and turbulence level is given, the torque reference of prime mover is decided through various blocks, such as random wind speed generator, blade characteristic curves, and tower effect compensation. The variable nature of wind can be implemented and tested by not only the computer simulation but also the hardware-in-loop-simulator (HILS). Some application examples of HILS include the development and test of turbine control software for more efficient and stable operation. Feasibility of the proposed simulator has verified by computer simulations and experiment.

1. 서론

최근 풍력 발전 시스템에 대한 연구가 증가하고 상용제품들이 개발 되면서, 풍력 발전 시스템의 제어 알고리즘 개발과 개발된 사용 제품들의 성능 검증 및 효율 측정을 위한 시뮬레이터가 필요하게 되었다. 기본적인 동작 시험이나 비 이상적인 과도 상태 발생시 풍력 발전 시스템에 나타나는 과도 상태 시험 등을 위해서라도 풍력 발전 시스템 시뮬레이터는 필요하다. 계통에 연계되어 있는 가변속 풍력 발전 시스템은 Fig. 2에서 보여주고 있다.[1]

가변속 풍력 발전 시스템에서의 발전기는 주로 유도기 혹은 동기기가 사용된다. Power converter는 가변 전압 가변 주파수로 전송되는 파워를 일정 전압 일정 주파수로 변환하여 이를 부하 또는 계통에 연계한다.[2-4]

본 논문 연구의 목적은 풍력 발전 시스템 시뮬레이터를 설계 제작하고, 시뮬레이션 및 실험을 통해 그 성능을 보여주는 것이다. 풍력 발전

시스템 시뮬레이터에 Rotor-Blade를 사용할 경우 발전 시스템의 용량에 따라 Rotor-Blade를 제작해야 하고, 원하는 풍속 패턴을 구현하기 위해서 대형 풍동 실험실을 설치해야 한다. 그리고 연구 과정 동안 풍동 실험실을 유지하기 위해서는 많은 비용을 지불해야 한다.

그러나 전기기기를 사용하여 풍력 발전 시스템의 Rotor-Blade를 Torque Source로 대체할 경우 발전 시스템의 용량이 바뀌거나, 제어 프로그램의 몇 가지 변수를 변경하여 간단하게 구현할 수 있을 뿐만 아니라, 원하는 패턴에 따른

-
- 1) 광운대학교
E-mail : ssh@kw.ac.kr
Tel : (02)940-5762 Fax : (02)943-7195
 - 2) 전북대학교
E-mail : kimdy@chonbuk.ac.kr
Tel : (063)270-3583 Fax : (063)255-9535
 - 3) 한국에너지기술연구원
E-mail : krs99@nate.com
Tel : (042)860-3412 Fax : (042)860-3543
 - 4) 한국풍력기술개발사업단
E-mail : nhkyong@kier.re.kr
Tel : (042)860-3430 Fax : (042)860-3484

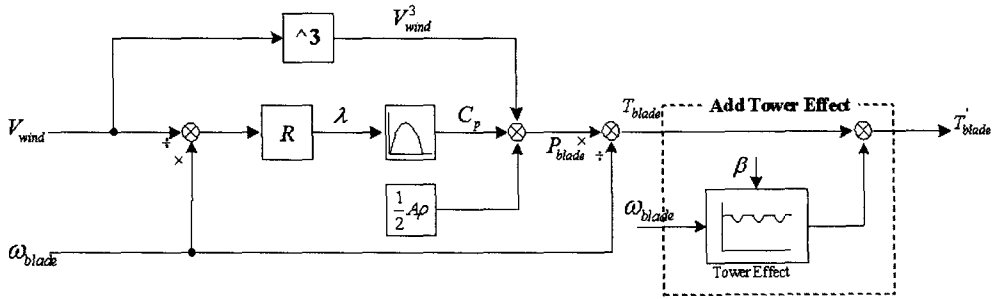


Fig. 1 Blade torque calculation block diagram including wind speed pattern generator, blade model and tower effect.

동작을 간단하게 구현할 수 있다.[5-7]

전형적인 시뮬레이터에서는 주기적인 power ripple에 대해 참고논문[10]에서는 단순히 고조파 성분만을 고려하였으며, 참고논문 [11]에서는 토오크와 파워에 대한 주기적인 ripple마저도 고려하지 않고 있다.

본 연구에서는 기존의 M-G set를 이용하여 가변 회전 속도에서도 Rotor-Blade의 동작을 구현하기 위하여 블레이드의 Torque Source 모의와 여기에 공기 역학적인 요소인 터블런스의 영향에 따른 가변 풍속 모의를 위한 풍속 패턴 발생기를 포함시켰다. 더불어 블레이드가 타워에 의해 미치는 주기적인 토오크 변동의 특성까지 포함시킨 모델을 시뮬레이션 및 실험을 통해 구현하였다.

2. 블레이드의 모델 및 구현

2.1 블레이드모델특성

바람이 가지고 있는 특성인 터블런스를 고려하여 풍속 패턴을 만드는 가변 풍속 패턴 발생기를 포함한 개념도를 Fig.1에서 보여주고 있다.

바람에 의해 Rotor-Blade에 입력되는 에너지를 계산하기 위해서는 먼저 출력 계수와 주속비

(TSR)를 고려해야 한다. 주속비λ는 풍속에 대한 블레이드 끝의 회전속도의 비로 식(1)과 같이 정리된다.

$$\lambda = \frac{R_{blade} \cdot \omega_{blade}}{V_{wind}} \quad (1)$$

단, V_{wind} : 바람의 속도[m/s]

λ : 주속비(TSR, Tip Speed Ratio)

ω_{blade} : 블레이드 회전속도[rad/s]

R_{blade} : 블레이드의 길이[m]

그리고 출력계수 C_p 는 바람이 가지고 있는 전체 에너지 중에서 Rotor-Blade에 의해 기계적인 에너지로 변환되는 에너지의 비율을 의미한다. 출력계수는 주속비에 대한 함수로 표현할 수 있기 때문에 $C_p(\lambda)$ 로 표현하기도 한다. 주속비에 따른 C_p 곡선을 Fig.3에서 보여주고 있다.

이 때, Rotor-Blade에 입력되는 파워는 다음과 같이 간단하게 정리할 수 있다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} A \rho V^3 C_p(\lambda) \quad (2)$$

A : rotor-blade의 회전면적[m²]

ρ : 공기밀도[kg/m³]

식 (2)에서 볼 수 있듯이 회전자 블레이드에 입력되는 파워는 풍속과 주속비에 따라서 달라진다. 그리고 주속비는 풍속과 회전각속도의 비이므로, 입력 파워는 풍속과 블레이드의 회전속도에 따라서 달라진다고 할 수 있다.

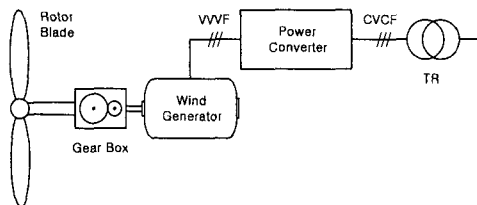


Fig. 2 Variable speed wind power generation system

2.2 Wind speed pattern generator

바람의 유동은 실제와 비교해서 가장 단순화

시켜 모델링 되는 부분이고, 바람은 시간에 따른 3차원 흐름이다. 바람이 거친 표면에 부딪치게 되면 공기는 멈추게 되고, 표면 위로 부는 바람의 유동이 낮을수록 멈추는 힘은 커지게 된다. 이는 잘 알려져 있는 풍속이 높이에 대한 함수로 표현 되는 함수식에 의해 구할 수 있다.

바람의 유동을 모델링하기 위해서는 먼저 풍력 발전 시스템 설치장소의 지표면에 대한 정의가 필요하다. 그리고 경계층을 시뮬레이션 할 수 있는 모델이 필요하다. 이러한 모델은 아마도 모델링 된 공간의 지점과 시간에 대한 바람의 값을 제공할 것이다. 로터의 모든 점에 작용하는 바람의 속도와 방향은 와류와 로터에 대한 삼차원 효과, 그리고 로터와 그 주위의 환경에 의한 상호효과가 반영되는 각각의 블레이드 단면에 대하여 다른 속도와 받음각으로 계산되어지는 삼차원 로터 모델에 입력이 될 것이다.

구현한 모델은 시간에 대해 전체 로터에 작용하는 오직 하나의 풍속 값만으로 구성되어 있다. 돌풍은 단지 풍속의 변화에 의해서만 고려되고, 바람의 방향에 대한 것은 요 계가 정확하게 이루어진다는 가정 하에 무시되고 있다.

이러한 가정 하에 바람의 유동은 시간에 따른 풍속으로 모델링을 하였고, 시간에 따른 풍속이라는 것은 시간에 따라 측정된 풍속 값을 말하는 것이다. 또한 모델링을 하는 데 있어 긴 시간의 측정으로서의 모든 평균 풍속과 측정이 어려운 터블런스가 필요하다.

바람은 확률적인 과정이기 때문에 랜덤수에 의한 시간에 따른 모델링을 하였다. 물론 발생된 시간 특성은 돌풍이 발생 하는 시간(rise time)에 대한 고려가 있어야 할 것이다.

참고문헌 [13]에 그러한 시간 특성을 반영하기 위한 의사 가우시안 랜덤 수 분포들에 대하여 설명해 놓았다. 이 방법을 약간의 수정을 거쳐 풍속 패턴 발생기 모델링에 사용하였다.

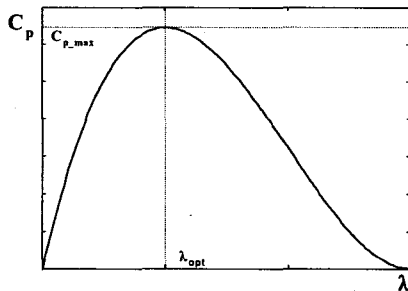


Fig. 3 TSR- C_p Curve

2.3 Tower Effect의 주기적인 리플

풍력 발전기는 바람으로부터 받은 에너지를 블레이드를 통해 동력으로 전환하여 축으로 돌리게 되고 이를 발전기에 전달하게 된다. 이 때 블레이드가 타워를 지날 때마다 블레이드의 개수, 형상 및 타워의 형태에 따라 토오크가 감소하는 현상이 일어나며 이를 '타워효과' 라고 한다.[1, 12]

이 타워효과 현상은 출력 토오크에 영향을 미치며 출력되는 토오크는 블레이드의 개수와 비례하여 주기적인 리플을 가지게 된다. 리플 성분 크기는 블레이드의 형상 및 타워 형태와 관계가 있다.

Fig.4 (a)는 풍력발전기 형상을 보여주고 있고, Fig.4 (b),(c)는 타워 효과가 블레이드 형상에 따라서 보여주는 토오크 형태를 보여주고 있다. 주기적인 리플을 램프 형태로 나타낼 수도 있고, 정현파 형태로 나타낼 수 있으며 그 크기와 폭도 블레이드 정보에 따라서 결정되어진다.

타워 효과에 대한 개념도는 Fig.2에 포함되어 있고, 식(4)는 블레이드에서 전달되는 토오크의 크기를 나타내는 식이다.

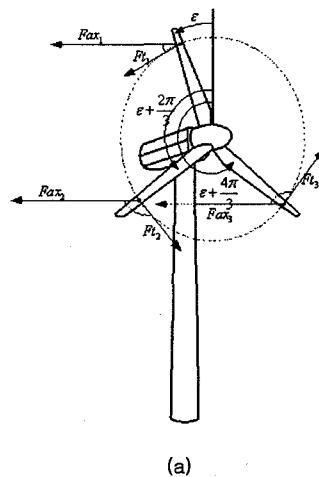
$$T_{blade} = T_{wind} - T_{tower}(z\omega t) \quad (4)$$

T_{blade} : 블레이드 토오크[N·m]

T_{wind} : 바람으로부터 블레이드 축에 전달되는 토오크[N·m]

T_{tower} : 타워 효과에 의해 감소되는 토오크[N·m]

z : 블레이드 개수



(a)

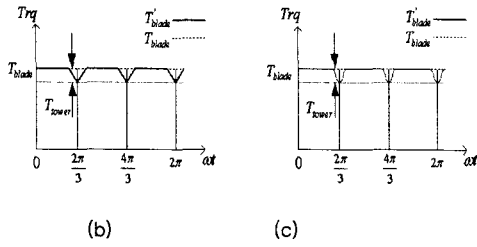


Fig. 4 Torque ripple modeling for tower effect
(a) 3 bladed wind turbine (b) ramp shape
(c) sine shape

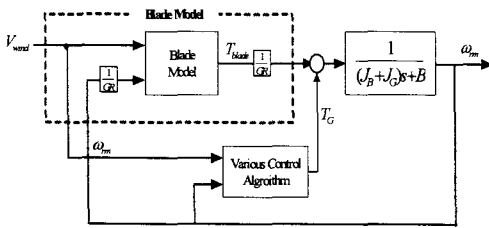


Fig. 5 Shaft torque production block diagram.

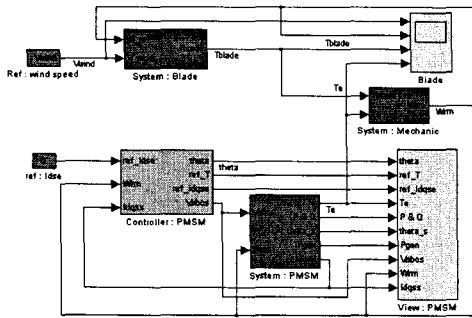


Fig. 6 Simulation block diagram

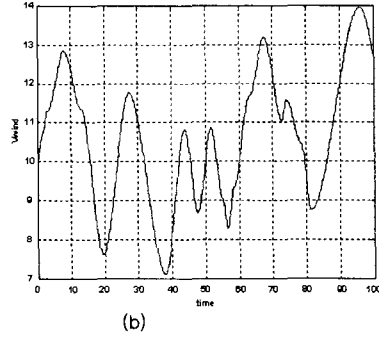
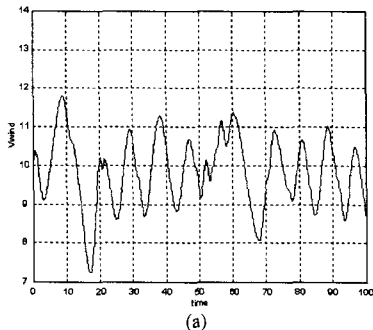


Fig. 7 Wind speed pattern generated by (a) average wind speed = 10m/s and turbulence coefficient = 10% (b) average wind speed = 10 m/s and turbulence coefficient = 20%.

Fig.5는 블레이드 토크와 발전기 토크 관계를 보여주고 있다. 발전기 토크 T_G 는 발전기 제어 알고리즘에 의해 결정되고, $T_{blade} - T_G$ 에 의해 시스템의 회전 속도를 결정한다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 구성

Table 1은 가변 풍속 모의를 위해 사용된 식을 보여주고 있다.

Fig.6은 타워 효과와 토크 계산 블록을 포함한 풍력 발전 시스템 시뮬레이션 블록 다이어그램을 보여주고 있는 것이다. 바람의 속도를 입력 받아 블레이드를 돌리며 구성된 제어기에 따라 다양한 제어 알고리즘을 수행할 수 있게 구성되어 있다. 전체 시뮬레이션 모델에는 바람의 속도 입력부터 TSR, C_p 계산, 파워 계산 및 토크 발생, 제어기의 지령, 전류제어기, 발전기 토크 전달로 인한 전력의 출력까지 포함하고 있다.

3.2 시뮬레이션 결과

Fig.7은 가변 풍속 패턴 발생기에 의해 평균 풍속을 10m/s로 동일하게 하고, 터블런스 계수를 (a)에서는 10% (b)에서는 20%로 한 시뮬레이션 결과 파형의 한 예를 보여 주고 있다.

Fig.8은 램프 기울기에 의해 변하는 바람의 입력에 대해서 발전기 속도, 블레이드 토크, 보상 토크, 전동기 토크의 변화를 보여주고 있다. C_p 를 최대로 유지하기 위해 발전기 속도를

Table 1 Algorithm for wind speed pattern generator

	Wind Speed	Wind power gradient
Random numbers	$R_{v,n,1...3} = Rand[-1,1]$	$R_{WPG,n,1...3} = Rand[-1,1]$
Average	$R_{v,n} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 R_{v,n,j}$	$R_{v,n} = \left \frac{1}{3} \sum_{j=1}^3 R_{WPG,n,j} \right $
Targets	$v_{w,n} = \bar{v}_w \cdot (1 + 0.0308c_{Turb} R_{v,n}) \cdot C$	$WPG_n = \overline{WPG}(\bar{v}_w) \cdot (1 + 7(R_{WPG,n} - 0.4)^3)$
Limit	$\lim v_{w,n} \text{ to } [0.1 \frac{m}{s}, \infty)$	
Slope	$\frac{\Delta v_w}{\Delta t} \Big _n = WPG_n \cdot 2 \frac{v_{w,n} - v_{w,n-1}}{\rho(v_{w,n}^3 - v_{w,n-1}^3)}$	
Duration	$\Delta t = \left \frac{v_{w,n} - v_{w,n-1}}{\frac{\Delta v_w}{\Delta t} \Big _n} \right $	
End time	$t_n = t_{n-1} + \Delta t_n$	
Polynomial coefficients	$C_{n,2} = 3 \cdot \frac{v_{w,n} - v_{w,n-1}}{\Delta t_n^2}$, $C_{n,3} = -2 \cdot \frac{v_{w,n} - v_{w,n-1}}{\Delta t_n^3}$	
Wind speed	$v_w = C_{n,3} \cdot (t - t_{n-1})^3 + C_{n,2} \cdot (t - t_{n-1})^2 + v_{w,n-1}$	

회전속도 제곱에 비례하여 토오크 제어하였으며, 타워 효과에 의해 시간에 따라서 주기적으로 토오크의 주파수와 크기가 변화하는 것을 볼 수 있다.

또한 관성 모의를 위하여 보상된 토오크를 볼 수 있다.

4. 실험

4.1 실험 구성

풍력 발전기 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 Fig.9는 시뮬레이터 구성도를 보여 주고 있고, 시뮬레이터는 크게 두 부분으로 구성 되어 있다.

첫 번째 부분은 블레이드에 의해서 풍력 발전 시스템에 입력되는 기계적 토오크를 모의한다. 블레이드에 의해서 입력되는 토오크는 7.5kW DC

전동기를 사용하여 구현하였다. DC 전동기를 제어하기 위하여 DC 전동기 드라이브(Eurotherm 590+)를 사용하였다. DC 전동기 드라이브는 전력 변환을 담당하는 싸이리스터 컨버터(Converter1)와 제어장치 (Controller)로 구성된다.

두 번째 부분은 발전을 담당한다. 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하기 위하여 4.4kW 영구자석 동기기 (PMSM)을 발전기로 사용하였다. 발전되는 전력 및 토오크 변동에 맞추어 최대 파워 출력을 위한 최적 TSR, C_p 를 유지하도록 제어기 위하여 IGBT 컨버터(Converter2)를 구성하여 발전기의 회전속도를 제어한다. 그리고 발전한 전력을 계통에 공급하기 위하여 IGBT 인버터(Inverter)를 구성하여 계통에 발전 전력을 공급한다. 이 때 인버터는 계통에 공급하는 에너지를 제어함으로써 인버터-컨버터의 직류단 전압을 일정하게 제어한다.

4.2 실험 결과

Fig.10은 실제 실험용 모의 풍력 발전 시스템 세트를 통하여 각 부 동작을 확인한 M-G set의 사진을 보여 주고 있다. Table 2는 DC 전동기, 발전기 인버터 컨버터의 사양을 보여주고 있다.

Fig.11은 풍력 발전 시스템 시뮬레이터의 시뮬레이션과 실험 파형을 보여주고 있다. 위에서 부터 풍속, 발전기 속도, 블레이드 토크와 블레이드 파워를 보여주고 있으며, 바람의 속도에 따라 블레이드 타워 현상에 의한 주기적인 리플이 발생하였음을 보여 주고 있다.

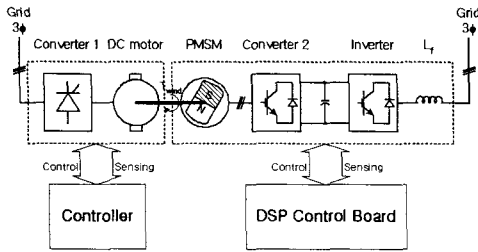
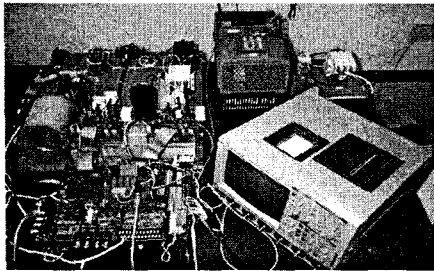
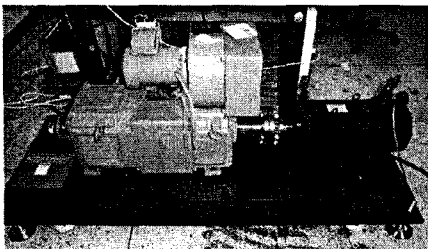


Fig. 9 Wind turbine test rig concept diagram



(a)

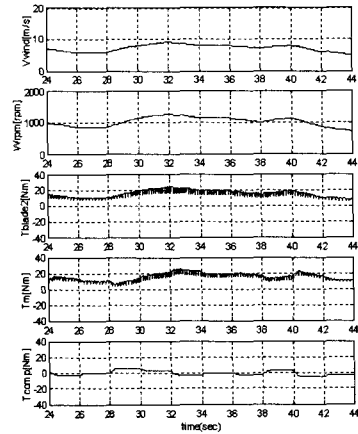


(b)

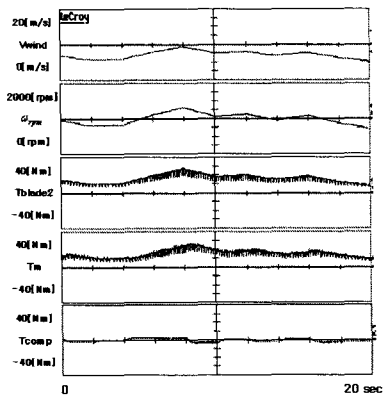
Fig. 10 Experimental test rig
(a) Controller, inverter-converter set, DC machine thyristor converter (b) M-G set

Table 2 Experimental Set-up Parameters

Parameters	Value
Motor Rating	7.5[kW] DC (220V 1750rpm)
Generator Rating	4.4[kW] PMSM (220V 40A 1500rpm)
Converter 1	6 pulse Thy. (Torque Controlled by Communication)
Converter 2	PWM IGBT Vector Controller (MPPT Speed Controlled)
Inverter	PWM IGBT Vector Controller (DC Voltage Regulated)



(a)



(b)

Fig. 11 (a)Simulation and (b)experimental results when wind speed varies as shown on the top of graph

4. 결론

본 논문에서는 풍력 발전 시스템 시뮬레이터를 제작하고, 이를 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다. 제한한 시뮬레이터에는 블레이드의 토오크 특성 모의 시 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나인 타워 효과를 포함한 블레이드 토오크 특성을 구현하였다. 또한 여기에 공기 역학적인 요소인 터블런스의 영향에 따른 가변 풍속 모의도 포함시켜 구현하였다. 향후 가변 회전 속도에서도 Rotor-Blade의 동작을 구현하기 위하여 관심을 고려한 블레이드의 Torque Source를 모의하여 좀 더 정확한 풍력발전 시스템 모델 구현 연구와 풍력 발전 시스템의 최대의 발전량을 얻기 위한 제어 전략의 연구가 요구된다.

References

- [1] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Kassel University, John Wiley & Sons, Germany, 1996.
- [2] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly-fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters and Its Application to Variable-Speed Wind-Energy Generation", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 3, pp. 231-241, 1996.
- [3] S. Mller, M. Deicke, Rik W. De Doncker, "Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor", IEEE IAS 2000. Conference Record, Vol. 4, pp. 2249 -2254, 2000.
- [4] S. Bhowmik, R. Spe, J. H. R. Enslin, "Performance Optimization for Doubly Fed Wind Power Generation Systems", IEEE Tr. Industry Application, Vol. 35, No.4, pp. 949-958, 1999.
- [5] A. Grauers, "Efficiency of Three Wind Energy Generator Systems", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, pp. 650-657, 1996.
- [6] R. Hoffmann, P. Mutschler, "The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbines", IEEE IAS Conference Record, pp. 886-893, 2000.
- [7] R. Hofmann, "A Comparison of Control Concepts for Wind Turbines in Terms of Energy Capture", Ph.D. Thesis, Univ. of Darmstadt, 2002.
- [8] Z. Hakan Akpolat, Greg M. Asher, Jon C. Clare, "Dynamic Emulation of Mechanical Loads Using a Vector-Controlled Induction Motor-Generator Set", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 46, No. 2, pp. 370-379, 1999.
- [9] E. R. Collins, Jr., Y.Huang, "A Programmable Dynamometer for Testing Rotating Machinery Using a Three-Phase Induction Machine", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 3, 1994.
- [10] C. L. Kana, M. Thamodharan, "System Management of a Wind-Energy Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 16, No. 3, 2001.
- [11] L. Chang, R. Doraiswami, T. Boutot, "Development of a Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems", 2000 Canadian Conference Electrical and Computer Engineering, Vol. 1, 2000.
- [12] T. Thiringer, J. Dahlberg, "Periodic Pulsations from a Three-Bladed Wind Turbine", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 16, No. 2, 2001
- [13] Constantis Sourkounis, Windenergiekonverter mit maximaler Energieausbeute am leistungsschwachen Netz, PhD thesis, Technische Universitat Clausthal, 1994