

## 퍼지로직을 이용한 이중여자 유도기의 역률제어

김 재 홍\* · 김 일 환\*\*

### Power Factor Control of a Doubly Fed Induction Machine Using Fuzzy Logic

Jae-Hong Kim\* and Eel-Hwan Kim\*\*

#### ABSTRACT

This paper describes the power factor control of doubly fed induction machine, using fuzzy logic algorithm in wind power generation system. Under fuzzy logic control, which enables superior dynamic performance, the power factor is independently controllable by decoupled dq rotor current in a synchronously rotating reference frame. To verify the theoretical analysis, computer simulations and experimental results are presented.

**Key words** : Power factor control, fuzzy logic control, power generation system

#### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 대체에너지에 대한 관심이 크게 증대되고 있다. 그 중에서도 풍력에너지는 환경문제를 고려한 깨끗하고 매력적인 에너지로 부각되고 있다. 풍력발전 시스템에서 풍력에너지를 전기에너지로 변환시키는 것은 아주 중요한 일이다. 계자속 제어를 이용한 이중여자 유도기는 풍속이 일정하지 않은 곳에서도 전력 제어가 가능한 잇점이 있다.<sup>1,2)</sup> 또한 동기속도 이상 또는 이하의 속도에서도 회전자속 인버터를 이용한 전류 제어를 통해 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어가 가능하다.

바람에 대해 풍력발전기의 날개각이 기계적으로 최적화되어 있다면 고정자측의 출력은 풍속의 3제곱에 비례하게 제어할 수 있게 된다. 만일 주어진 바람의 속도에서 최대의 전력을 얻어낼 수 있는 적절한 터빈 속도를 결정할 수 있다면 바람의 속도가 다소 가변되더라도 전력손실이 최소가 되도록 제어할 수 있다. 이때 가변되는 바람으로부터 최대전력을 얻기 위한 터빈속도의 결정은 최대전력 분석표를 통해 얻을 수 있다.<sup>2),3)</sup> 그러나 최대전력 분석표의 수치를 시스템으로 하여금 계속적으로 추종하게 하는 일은 다소 어려운 일이다. 만일 PI(Proportional Integral) 제어기로 이러한 시스템이 안정적인 과도응답을 갖도록 구성한다면 제어기의 이득은 다소 작은 동작영역에서만 안정적인 과도응답을 보장할 수 있을 것이다. 따라서 비선형적이고 불확실한 제어 파라미터의 변화 또는 외란에 직면했을 때는 안정적인 동작을 보장하는 적응제어의 도입을 고려하지 않을 수 없다.

\* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju, Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 전기공학과, 산업기술연구소,

Dept. of Electrical Eng., Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

그러므로 구조가 복잡한 이중여자 유도기와 컨버터 시스템을 운전할 때 환경이 아주 열악한 풍력발전 시스템에 적용하여 안정적인 출력 특성을 얻는 것은 어려운 일이다.

본 논문에서는 특정한 수학적 모델없이 위의 단점들을 보완할 수 있는 퍼지로직 제어시스템을 이중여자 유도기 역률제어 시스템에 도입하였다. 또한 PI 제어 시스템과 퍼지 제어시스템과의 운전특성 비교를 위해 5[hp] 이중여자 유도기와 PWM 전력 컨버터를 가지고 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 구현하였다.

## II. 퍼지 전력제어

### 2.1. 유효전력 및 무효전력 제어

가변속 풍력발전 시스템에서 회전자 속도가 바람의 변화에 의해서 변한다 해도 고정자측 전압과 전류는 일정 주파수를 유지한다. 그리고 고정자측은 계통선과 연계됨으로써 항상 일정 전압을 유지하게 된다. 이것은 일정한 고정자 자속을 갖는다는 것을 의미한다. 또한 동기 좌표계로 해석하면서 고정자측의 q축 자속은 거의 0에 가까운 값을 갖고, d축 자속은 거의 일정한 값을 갖는다. 따라서 고정자 자속의 크기와 동기각도는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$|\lambda_s| = \sqrt{\lambda_{ds}^2 + \lambda_{qs}^2} \quad (1)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \quad (2)$$

고정자측의 유효전력과 무효전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{qse} \cdot i_{qse} + v_{dse} \cdot i_{dse}) \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qse} \cdot i_{dse} - v_{dse} \cdot i_{qse}) \quad (4)$$

동기좌표계에서 q축 고정자 자속  $\lambda_{qse}$ 는 0에 가깝기 때문에 q축의 고정자 전류  $i_{qse}$ 는 다음과 같이 쓸 수

있다.

$$\lambda_{qse} = (L_s \cdot i_{qse} + L_m \cdot i_{qre}) \quad (5)$$

$$i_{qse} = -\frac{L_m}{L_s} \cdot i_{qre} \quad (6)$$

식(6)에서 고정자측 유효전력은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$P_s = -\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot v_{qse} \cdot i_{qre} \quad (7)$$

그리고 동기좌표계에서 본 d축 고정자 자속과 고정자 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{dse} = L_s \cdot i_{dse} + L_m \cdot i_{dre} \quad (8)$$

$$i_{dse} = \frac{\lambda_{dse} + L_m \cdot i_{dre}}{L_s} \quad (9)$$

고정자측 무효전력은 식(4)와 식(9)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta_s = \frac{3}{2} \cdot v_{qse} \left[ \frac{\lambda_{qse} - L_m \cdot i_{dre}}{L_s} \right] \quad (10)$$

식(7)과 식(10)의 결과로서, 고정자측 유효전력과 무효전력은 회전자측의 전류  $i_{qre}$  와  $i_{dre}$  를 제어함으로써 얻을 수 있음을 알 수 있고 이 결과로 고정자측 역률은 다음과 같이 구현할 수 있게 된다.

$$\cos \theta = \frac{P_s}{\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}} \quad (11)$$

$$\sin \theta = \frac{Q_s}{\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}} \quad (12)$$

이를 바탕으로 이중여자 유도기를 풍력발전기로 적용할 때 동기조상기로서 사용할 수 있음을 알 수 있다.

### 2.2. 퍼지 로직 제어

퍼지로직을 이용한 발전 시스템은 Fig. 1 처럼 회

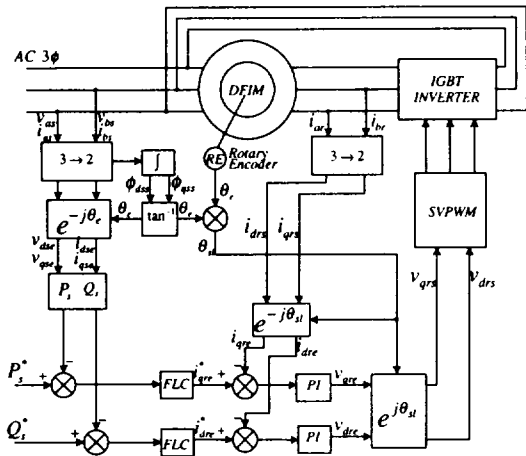


Fig. 1. Schematic diagram of proposed control system.

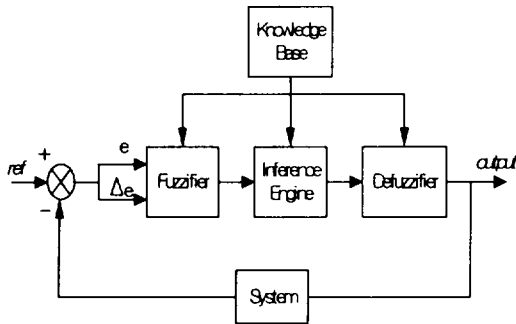


Fig. 2. Block diagram of FLC system.

전자 측에 PWM 컨버터를 이용해 구현하고 있으며 퍼지로지 시스템은 다음의 다섯 절차에 의해 구현하였다.

- Step 1 : definition of input output variables of a controller.
- Step 2 : design of fuzzy control rule linguistic conditional statements.
- Step 3 : fuzzification fuzzy singleton method.
- Step 4 : inference mamdani method.
- Step 5 : defuzzification center of gravity method.

Fig. 2에서 보이는 퍼지로지 제어기의 블록 선도는 전력에러  $e(k)$ , 에러 미분치  $\Delta e(k)$ , 출력  $U(k)$  의

관계를 보이고, 이는 다음과 같이 주어진다.

$$U(k) = U(k-1) + \rho \cdot \Delta u(k) \quad (13)$$

$\Delta u(k)$  : inferred change of current command by FLC

$\rho$  : gain factor of the controller.

### III. 시뮬레이션

제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Table 1과 같은 파라메타를 갖는 이중여자 유도기를 모델기로 하여 Fig. 1과 같은 제어 시스템 구조로 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 캐나다 Powersim사에서 전력전자용으로 개발된 Psim 프로그램을 이용하였다. 제어해석시 샘플링 시간은  $100[\mu s]$ 로 하였다. Fig. 3과 Fig. 5는 PI 제어와 퍼지로지 제어기를 이용하여 유효율을 제어하기 위해  $P_s = \pm 1500[W]$ ,  $Q_s = 0[var]$ 의 명령값을 주었을 때의 결과이다. 이 두 결과에서 보면  $P_s$ 가 +일 때는 상전압과 전류의 위상이 동상이 되고 -일 때는  $180^\circ$ 위상차가 생겨 제어가 잘되고 있음을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 6은 무효율을 제어하기 위해  $P_s = 0[W]$ ,  $Q_s = \pm 1500[var]$ 의 명령값을 주었을 때의 결과이다. 이 두 결과에서 보면  $Q_s$ 가 +일 때는 전류가 상전압보다  $90^\circ$ 뒤지고 -일 때는  $90^\circ$ 앞섬을 볼 수 있다. 이는 제어가 원하는 대로 잘되고 있음을 알 수 있는 것이다. Fig. 7과 Fig. 8은 이중여자 유도기가  $1800 [rpm]$ 에서  $1500[rpm]$ 으로 가변될 때의 제어 특성을 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 퍼지제어가 PI 제어보다 우수한 제어특성을 나타내고 있다. 이는 과도현상시 퍼지제어가 PI 제어보다 우수한 특성을 가짐을 알 수 있는 것이다. 이상과 같은 시뮬레이션 결과를 종합해 보면 모델기를 풍력발전엔 적용할 때 퍼지로지 제어기를 도입하여 운전하면 우수한 운전특성을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 계통선의 역률을 조절할 수 있는 동기 조상기로서 역할을 할 수 있음을 나타내고 있다.

Table 1. Parameters of model machine

rated power	5 hp	
pole number	4	
rotor inertia [ $kg-cm^2$ ]	0.036	
	Stator	Rotor
rated voltage [V]	220	220
rated current [A]	16	11
resistor [ $\Omega$ ]	0.30	0.53
leakage inductance [H]	0.0022	0.0022
magnetizing inductance[H]	0.044	

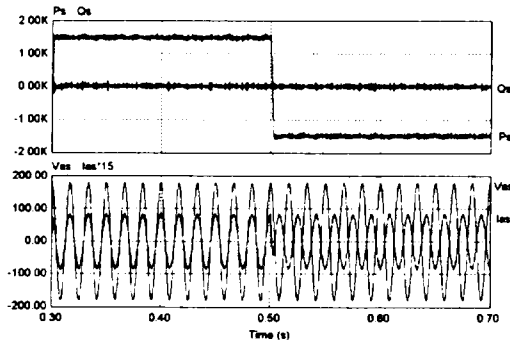


Fig. 3. Simulation results of active power control with PI.

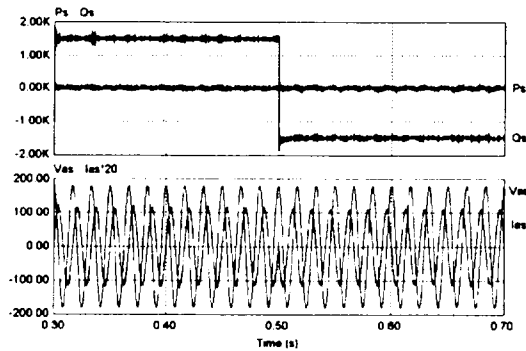


Fig. 4. Simulation results of reactive power control with PI.

#### IV. 실험결과

Table 1과 같은 계수를 갖는 이중여자 유도기를 모델로 하여 회전자측에 IGBT PWM 전력용 컨버터와

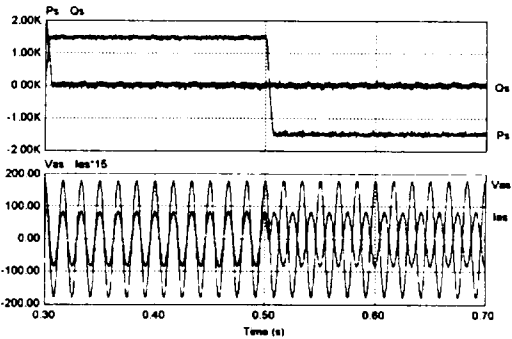


Fig. 5. Simulation results of active power control with FLC.

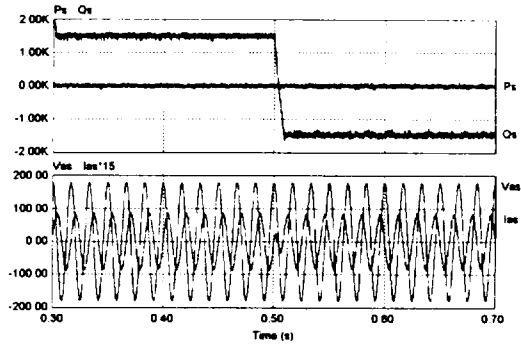


Fig. 6. Simulation results of reactive power control with FLC.

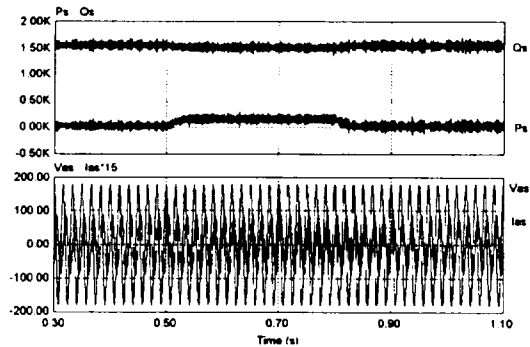


Fig. 7. Simulation results of power control under rotor speed change with PI.

TMS320C31 DSP 시스템으로 Fig. 1과 같은 제어 알고리즘으로 구현하였다.

Fig. 9는 PI 제어 알고리즘을 이용하여 유효전력 명령치를  $\pm 1500[W]$ , 무효전력 명령치를  $0[var]$ 로 제어하였을 때의 출력 파형을 나타내고 있다. 이 결과

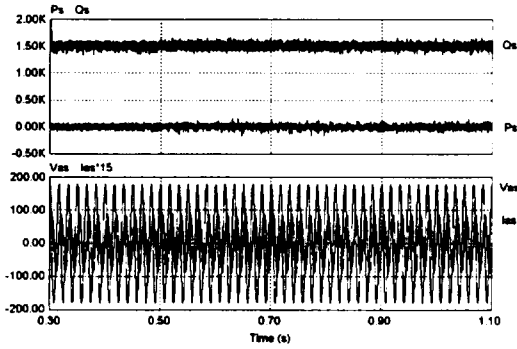


Fig. 8. Simulation results of power control under rotor speed change with FLC.

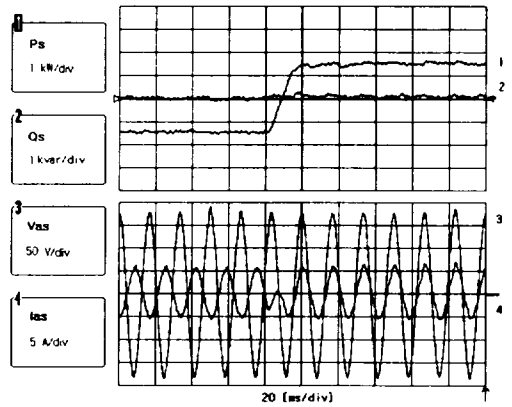


Fig. 11. Active power control with FLC.

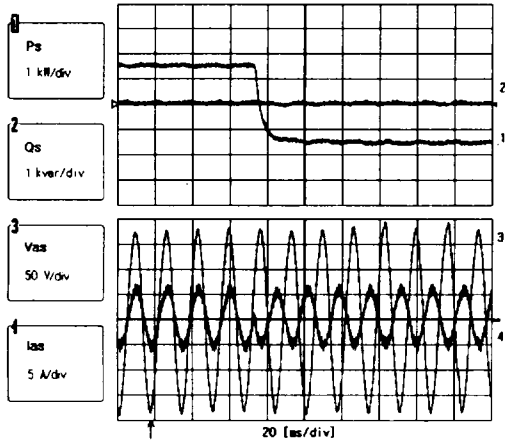


Fig. 9. Active power control with PI.

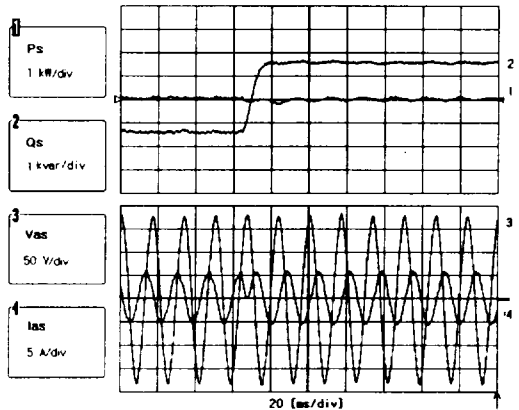


Fig. 12. Reactive power control with FLC.

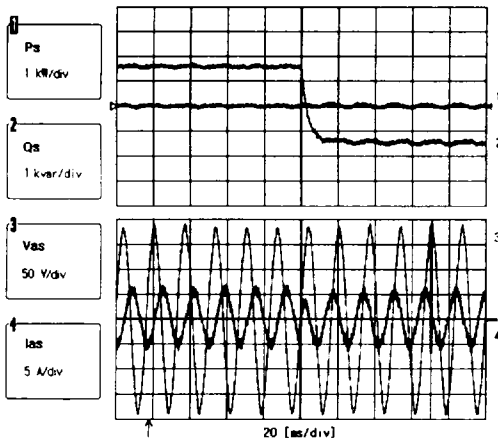


Fig. 10. Reactive power control with PI.

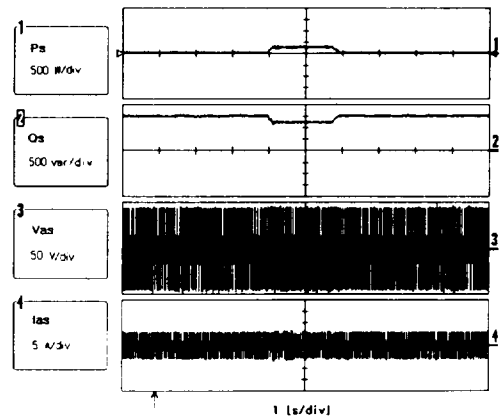


Fig. 13. Power control under rotor speed change with PI.

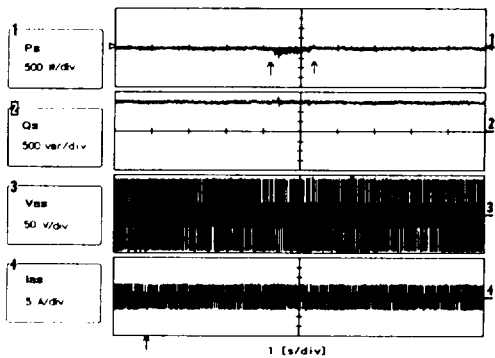


Fig. 14. Power control under rotor speed change with FLC.

에서 보면 유효전력 명령치가 +일 때는 상전압과 전류가 동상이지만 유효전력 명령치가 -일 때는 180° 차이가 나고 있어 제어가 잘 되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9와 같은 제어 알고리즘으로 유효전력의 명령치는 0으로 하고 무효전력 명령치를 ±1500[var]로 변동시켰을 때의 출력 결과를 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 무효전력 명령치가 +일 때는 상전류가 90° 지상이 되고 있고 -일 때는 90° 진상이 되고 있다. 이는 이 시스템이 역률을 제어할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 이 시스템이 동기조상기로서의 역할을 할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 Fig. 9와 Fig. 10과 같은 조건으로 퍼지로직 알고리즘을 이용하여 유효전력을 제어한 결과이다. 두 결과를 비교해 보면 운전특성이 거의 비슷하나 퍼지제어기가 출력 전류의 리플이 적음을 알 수 있다.

Fig. 13과 Fig. 14는 회전자 속도 변화에 따른 제어 응답 특성을 고찰하기 위해 유효전력 명령치를 0[W], 무효전력 명령치를 1500[var]로 하여 회전자 속도를 1750[rpm]에서 1500[rpm]으로 변동시켰을 때의 출력 특성을 나타내고 있다. Fig. 13에서는 PI 제어 알고리즘을 이용해 제어하고 있으며 속도를 가변하는 순간 어느 정도의 출력값이 변하고 있음을 알 수 있다. Fig. 14에서 보이는 결과는 퍼지로직 제어를 이용해 제어하고 있으며 속도를 가변하는 순간 Fig. 13보다는 훨씬 작은 출력의 변화가 보인다.

이로서 바람의 속도가 계속적으로 변하는 실제 풍

력발전 시스템에 PI 제어기보다는 퍼지로직 제어기를 이용하여 시스템을 구성하는 것이 더욱 좋은 제어 결과를 기대할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 이중여자 유도기의 회전자측에 IGBT PWM 전력용 컨버터 시스템을 채용하여 PI 제어 알고리즘과 퍼지로직 알고리즘으로 고정자측에 출력되는 역률을 제어하는 방법을 제안하였다. 제안된 시스템의 타당성을 입증하기 위해 계자속 제어를 기반으로 일반적인 PI 제어와 퍼지 알고리즘의 동특성을 비교하기 위해 실험을 행하였다. 두 실험결과를 비교해 보면 퍼지 제어기가 정상 운전시나 과도 상태에서 우수한 운전특성을 얻을 수 있었다. 따라서 제안된 시스템이 제주도와 같은 바람의 변화가 심한 지역의 풍력발전 시스템에 적용된다면 더 좋은 운전 효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 참고 문헌

- 1) L.Xu and Tang Y.Tang. 1992. A Novel Wind Power Generating System Using Field Orientation Controlled Doubly Fed Excited Brushless Reluctance Machine. IEEE IAS Annual Meeting Conf., pp.408-413.
- 2) E.H. Kim. 2000. Power Control of Doubly Fed Induction Machine for Wind Power Generation without Rotational Transducers. KIPE. Vol.5. No.1. pp.72-78.
- 3) C.Brune. R.Spee and A.K.Wallace. 1993. Experimental Evaluation of a variable Speed Doubly-Fed Wind Power Generation System. IEEE IAS Annual Meeting Conf., pp.480-487.
- 4) L.Xu. Li Zhen and E.H. Kim. 1998. Field Orientation Control of a Doubly Excited Brushless Reluctance Machine. IEEE Trans. Appl., Vol.34. No.1. Jan/Feb.

- 5) L. Wang. 1993. Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems. IEEE Trans. on Fuzzy Systems. Vol.1. No.2. pp.146-155. May.
- 6) B.K. Bose. 1988. Power Electronics And AC Drives. Prentice Hall., pp.207-231.
- 7) X.Xu.Rik De Doncker and Donald W.Novotny, 1998. A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive. Proc. of IEEE PESC. pp.870-876.
- 8) Rene Spee.Shibashis Bhowmik. Johan HR Enslim. 1994. Adaptive Control Strategies for Variable Speed Doubly Fed Wind Power Generation Systems. IEEE IAS. pp.545-552.