

회전자 피상전력을 고려한 권선형 유도발전기의 유효전력제어 기법

박정우, 이기욱, 이호진
한국전기연구원

Active power control of a doubly-fed induction generator considering the apparent power of rotor-side

Jung-Woo Park, Ki-Wook Lee, and Hyo-Jin Lee
KERI

ABSTRACT

신재생에너지 개발을 위한 권선형유도발전기의 유효전력제어와 무효전력제어에 대해 고찰하였다. 10kW DFIG에 양방향 AC/DC/AC 전력변환장치를 적용한 실험을 통해 유효전력제어와 무효전력제어를 검증하였고, 운전 개시 속도를 결정하는 방법과 전력변환장치 용량을 고려한 제어방법, 그리고 역률 가변을 통해 저속도 영역에서의 에너지 회수방안에 대해 고찰하였다.

1. 서 론

대체에너지는 태양에너지, 풍력, 조력, 조류력, 소수력, 지열, 폐기물에너지, 연료전지 등 지속 가능하고 재생 가능한 환경친화적인 청정에너지로서 화석에너지 고갈과 UN 기후변화협약 이후 국제 환경규제 강화로 향후 주요 에너지원으로 부상할 전망이다.

국내에서 대체에너지 공급 비율을 보면 청정에너지로 분류할 수 있는 태양열에너지, 태양광 에너지, 풍력 에너지를 모두 합하여 대체에너지의 10% 이하이며, 대체에너지 비율의 90% 이상을 폐기물로부터 얻은 에너지가 차지하고 있는 실정이다.

특히 해양에너지 개발 측면에서 부존량을 살펴보면, 조류에너지는 진도 주변의 해역에서 약 362만 kW가 되고, 조력은 650만 kW, 파력(동해안 후포 연안) 20만 kW가 되는 것으로 조사된 바 있다.

이에 따라 해양수산부에서는 Ocean Korea 21에서 2010년까지 조류, 조력, 파력에너지에서 87만 kW의 전력을 생산하며, 2단계 (2011-2020)까지는 162만 kW를, 그리고 3단계(2021-2030)까지는 264만 kW의 전력을 생산한다는 계획 하에 해양에너지 개발사업이 진행되고 있다.

해양에너지 개발에 대한 기술수준은 아직 국내외적으로 태동기에 머물러있는 단계이지만 풍력분야에서의 기술이 곧바로 접목 될 수 있는 것이기 때문에 유속조건이

양호하고 구조물 시공비가 적게 소요되는 곳에서부터 발전되고 있으며 발전기 역시 풍력에서와 마찬가지로 시스템 가격을 저렴화할 수 있는 권선형유도발전기가 유력한 후보이다.

권선형유도발전기의 특징은 발전기 정격 출력에 상당하는 전력변환 장치 즉 1 power unit(p.u.)의 용량을 갖는 전력변환장치를 필요로 하지 않고 변동되는 터빈 속도의 범위에 따라 변동되지만 보통 정격속도의 $\pm 30\%$ 이내에서 변동된다고 할 때 0.3p.u. 용량의 전력변환 장치로 1p.u.의 발전기 출력을 제어할 수 있는 장점이 있다.

따라서 권선형유도발전기를 조류발전기로 전제 한 후, 계통 연계형으로 운영될 때에 고정자 권선으로 회생되는 유효전력과 무효전력(역률제어)에 대해 고찰한 후, 운전 개시 속도를 결정하는 방법과 전력변환장치 용량을 고려한 제어방법, 그리고 역률가변을 통해 저속도 영역에서의 에너지 회수방안에 대해 실험결과를 통해 고찰하였다.

2. 피상전력을 고려한 DFIG 제어기법

2.1 권선형 유도발전기

권선형유도발전기에 대한 제어방법에는 속도제어형과 전력제어형으로 크게 구분되는데 이에 대한 발전기 모델링, 제어기법, 그리고 전력변환장치의 토폴로지와 관련하여 많은 문헌이 발표되었다.^{[1]-[4]} 권선형유도발전기는 3상의 고정자 권선은 계통에 직접 연결되고, 회전자 권선은 양방향의 AC/DC/AC 전력변환장치와 연결되는데 이를 그림 1에 나타내었다.

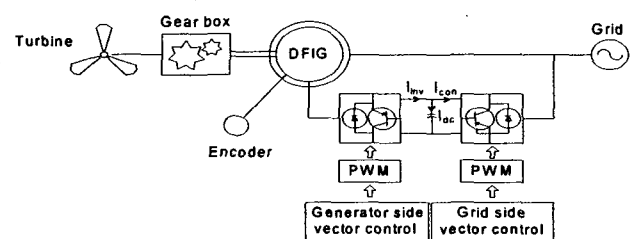


그림 1 DFIG 시스템 구조
Fig. 1 System structure of a DFIG

DFIG의 고정자는 계통과 직접 연결되어 있기 때문에 고정자측 자화전류는 일정하며 고정자측 자속을 d축에만 집중 분포시킴으로써 d, q 축 자속은 다음과 같게 된다.

$$\lambda_{ds} = L_o i_{ms} = L_s i_{ds} + L_o i_{dr} \quad (1)$$

$$\lambda_{qs} = 0 \quad (2)$$

고정자측 q축 자속성분이 0인 관계를 이용하여 q축자속 방정식(3)에 대입하면 식(4)와 같이 고정자의 전력 크기를 결정하는 q축 성분전류와 회전자에 q 축전류 사이의 관계를 얻을 수 있다.

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_o (i_{qs} + i_{qr}) = L_s i_{qs} + L_o i_{qr} \quad (3)$$

$$i_{qs} = -\frac{L_o}{L_s} i_{qr} \quad (4)$$

고정자측에서의 d, q축 전력은 식(5)와 식(6)으로 결정된다.

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds}) \quad (5)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (6)$$

그런데 고정자측의 권선분포가 3상 대칭이므로 고정자측의 d 축 전압성분인 v_{ds} 는 0이라는 관계와 식(4)의 관계성을 적용하면 회전자측의 q축 전류 성분만으로 고정자 전력을 제어할 수 있다는 관계식을 식(7)과 같이 얻을 수 있다.

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_o}{L_s} v_{qs} i_{qr} \quad (7)$$

q 축 전압방정식인 식(8)에 식(2)의 관계와 고정자 저항 성분이 작다는 조건을 적용하면 고정자측 자화전류 (i_{ms})는 식(9)와 같이 표현된다. 이를 식(1)에 대입하여 i_{ds} 에 대해 정리하면 식(10)과 같이 되고 이를 식(6)에 대입함으로써 회전자측 d축 전류 성분만으로 고정자측 무효전력을 제어할 수 있다는 관계식을 식(11)과 같이 얻을 수 있다.

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (8)$$

$$i_{ms} = \frac{v_{qs}}{\omega_e L_o} \quad (9)$$

$$i_{ds} = \frac{L_o}{L_s} \left(\frac{v_{qs}}{\omega_e L_o} - i_{dr} \right) \quad (10)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} v_{qs} \frac{L_o}{L_s} \left(\frac{v_{qs}}{\omega_e L_o} - i_{dr} \right) \quad (11)$$

따라서 회전자에 d, q 축 전류는 고정자의 무효전력과 유효전력과 1:1 관계를 갖게 됨으로, 그림2에서 P_s^* 와 Q_s^* 제어기의 출력을 i_{qr}^* 와 i_{dr}^* 로 놓을 수 있는 것이다.

2.2 피상전력을 고려한 DFIG 유효전력 제어

고정자와 회전자에 대한 피상전력은 식(12)와 식(13)으로 표현된다.

$$S_s = \sqrt{P_s^2 + Q_s^2} \quad (12)$$

$$S_r = \sqrt{P_r^2 + Q_r^2} \quad (13)$$

여기서

$$P_r = \frac{3}{2} (v_{qr} i_{qr} + v_{dr} i_{dr}) \quad (14)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr}) \quad (15)$$

그런데 DFIG의 회전자 무효전력은 슬립속도 영역을 넘어서면 매우 크게 나타내는 것을 그림2로부터 알 수 있다. 즉 정격속도에서 멀리 떨어진 저속도 영역과 고속도 영역에서 크게 나타내는 특징이 있다. 이것은 v_{qr} 값이 양의 수에서 음의 수로 크게 흔들리는 것으로부터 발생하는 것으로 그림3에서 알 수 있다. 따라서 회전자의 피상전력을 계산하여 모니터링을 하면서 그 크기가 전력변환장치 용량 내로 들어서게 되는 속도를 발전 개시점으로 설정하면 된다.

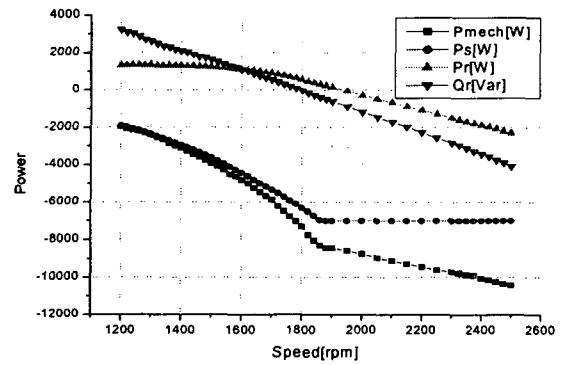


그림 2 속도에 따른 DFIG의 무효전력 특성
Fig. 2 Reactive power char. of the a DFIG due to the speed

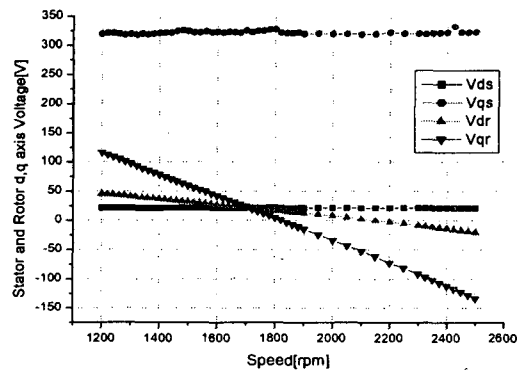


그림 3 회전자 q축 전압특성
Fig. 3 char. of the q-axis rotor voltage in the control mode of Fig. 2

그리고 고정자 역률을 -1로 유지한 상태에서, 고정자의 유효전력을 최대로 운전할 수 있는 영역은 정해지게 되는데, 저속도 임계 구간(예:1300rpm)을 넘게 되면 역률을 -1 이상로 조절하여 임계구간을 확장할 수 있다. 역률 조절은 식 (16)에 의해 조절할 수 있다.

$$Q_s^* = P_s^* \frac{\sqrt{1-pf^2}}{pf} \quad (16)$$

운전 영역이 확대되는 과정은 다음과 같다. 식 (1)을 살펴보면 역률을 -1.0로 제어하는 경우 DFIG의 자속성분을 회전자에서 모두 공급해야한다. 그러나 역률이 -1.0 보다 커지는 경우 Q_s^* 가 증가한다. 식 (11)에서 i_{dr} 이 작아져야 함을 볼 수 있다. i_{dr} 이 작아지면 회전자의 피상전력 크기가 작아져서 회전자 용량 제한치에 대해 여유가 생기는데 이 여유분만큼 운전영역을 확대할 수 있는 것이다.

이상의 제어전략을 포함하여 MRAPPT (maximum rotor -apparent power point tracking) 제어개념을 포함한 DFIG 발전기의 제어기 구성도를 그림 4에 제시하였다. MRAPPT는 터빈 특성을 고려하지 않고 회전자의 피상전력에 대한 제한 범위 내에서 최대로 회수할 수 있는 전력제어를 갖는 제어기로 그림 5에 제시하였다.

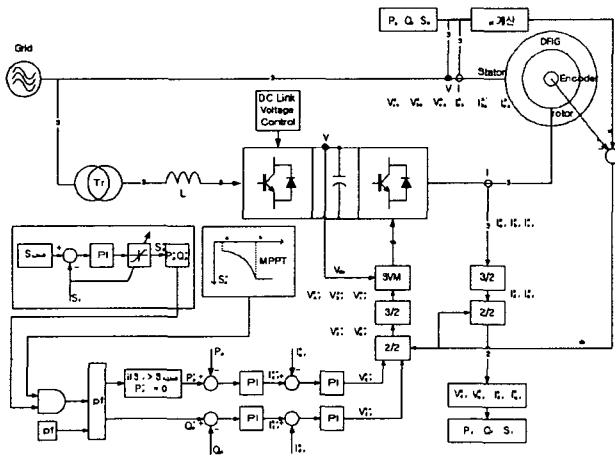


그림 4 피상전력을 고려한 DFIG의 유·무효전력 전력제어기
Fig. 4 Power control structure of the DFIG including the rotor-apparent power

3. 실험

10kW DFIG와 양방향 AC/DC/AC 전력변환장치를 이용하여 제시한 방식을 검증하였다.

그림 6은 DFIG가 계통에 직결되어 있기 때문에 여러 입력 조건에서도 고정자 자속이 일정할 것이라는 증명하는 것이다.

그림 7은 슬립속도 영역 내에서 제어되는 DFIG의 유·무효전력 전력제어 특성을 살펴본 것으로, 기존의

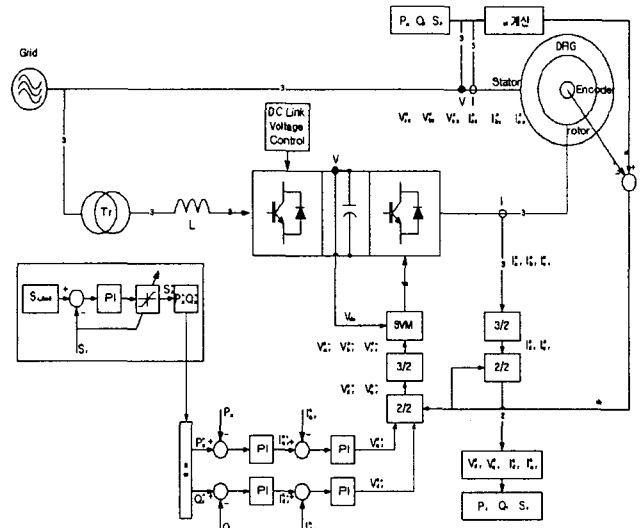


그림 5 MRAPPT 제어를 갖는 DFIG의 전력 제어기
Fig. 5 Power control structure of the DFIG including MRAPPT

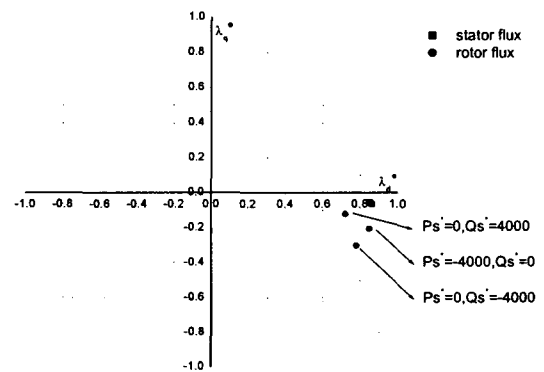


그림 6 고정자 자속 특성 (pf= -1.0, 0.0(진상, 지상))
Fig. 6 Stator flux char. at the various pf condition

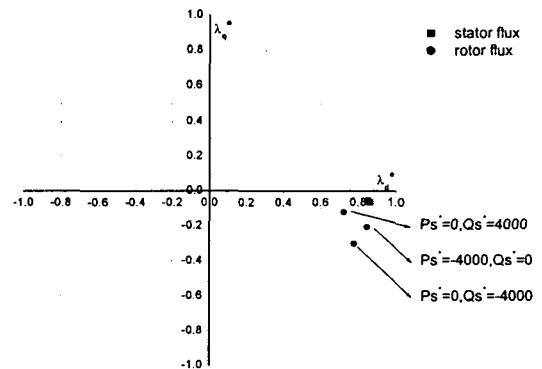
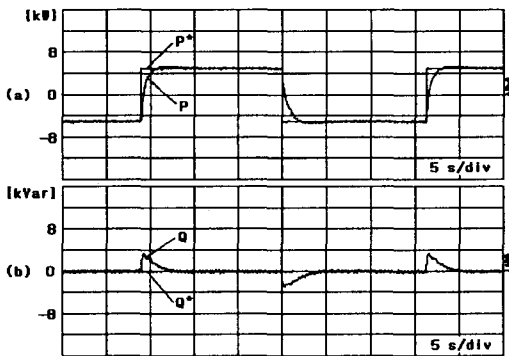


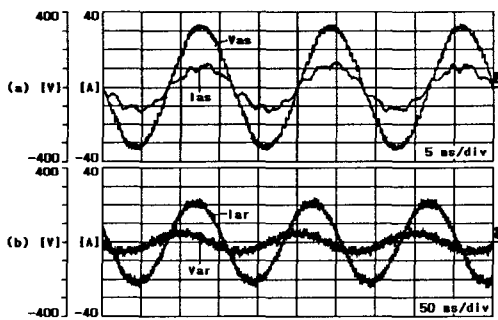
그림 7 고정자 자속 특성 (η = -1.0, 0.0(진상, 지상))
Fig. 7 Stator flux char. at the various η condition

MPPT 제어 특성을 갖는 영역으로 유효전력과 무효전력, 그리고 직류전압 제어 특성이 잘 수행되고 있음을 보여준다.

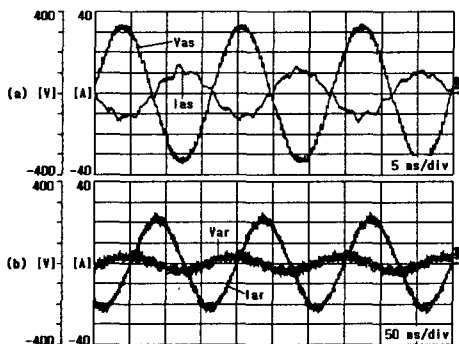
그림 8은 MPPT 제어기와 MRAPPT 제어기, 그리고 본 논문에서 제시한 혼합형 제어기의 특성을 보여주는 것으로서 제시한 기법이 저속 영역에서와 고속영역에서는 피상전력의 제한 궤적을 추적하며, 슬립 속도 영역에서는 MPPT 궤적을 따라간다는 것을 보여주고 있다.



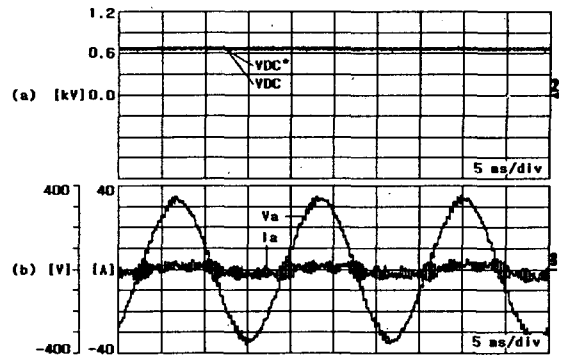
㉑ stator power control char. ($P_s^* = \pm 5[\text{kW}]$, $Q_s^* = 0[\text{kVar}]$)



㉒ phase voltage and current char. of the stator and rotor at the $P_s^* = 5[\text{kW}]$ and $Q_s^* = 0[\text{kVar}]$



㉓ phase voltage and current char. of the stator and rotor at the $P_s^* = -5[\text{kW}]$ and $Q_s^* = 0[\text{kVar}]$



㉔ Converter side phase voltage and current at the $P_s^* = 5[\text{kW}]$, $Q_s^* = 0[\text{kVar}]$, and $VDC^* = 650[\text{V}]$

그림 8 슬립 속도 영역 내에서 제어되는 DFIG의 유효·무효전력 전력제어 특성

Fig. 8 Active and reactive power control char. of the DFIG in the slip speed range

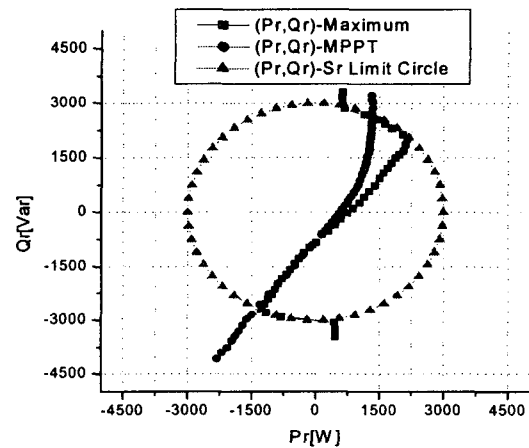
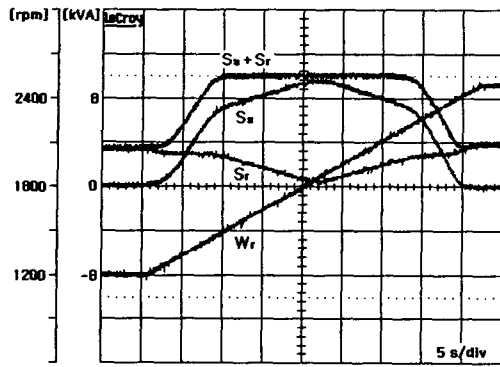


그림 9 MPPT 제어곡선과 MRAPPT 제어곡선 비교
Fig. 9 Comparison char. of between the MPPT controller and the MRAPPT controller

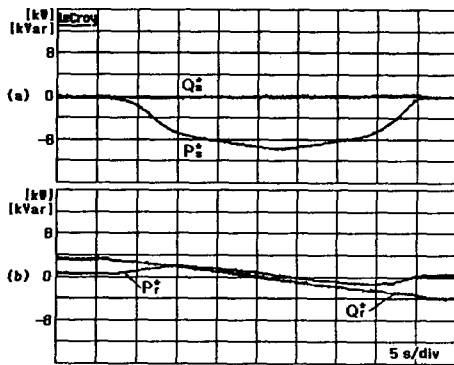
그림 9는 DFIG의 회전자 전력 측면에서 MPPT와 MRAPPT 제어 특성을 나타내고 있다. 회전자 피상 전력 제한원 내에서는 MPPT 자체적인 제어 특성을 가지고 운전하고, 제한치에 도달하여서는 제한원 궤적을 따라서 제어됨을 보여주고 있다.

그림 10은 MRAPPT 제어 특성을 보여주고 있다. 시험용 다이내모메터의 속도를 1200[rpm]에서 2500[rpm]까지 가변시킬때 그림 10.㉑는 고정자와 회전자의 피상전력 변화를 나타낸다. 그림 10.㉒에서 상단은 고정자 측, 하단은 회전자 측의 유효·무효 전력을 나타낸다.

그림 11는 임계속도 이하에서 역률을 1에서 0.95로 낮추어 제어를 하게 되면 정해진 속도에서의 피상전력이 떨어지게 되므로 즉 포화되었던 전력변환장치의 용량에서 여유도를 갖게되어 가용할 수 있는 유속 (또는 풍속) 영역을 확대할 수 있다는 것을 보여주는 실험과형이다.



㉑ apparent power char.



㉒ active and reactive power char.

그림 10 MRAPPT 제어 특성
Fig. 10 Char. of the MRAPPT

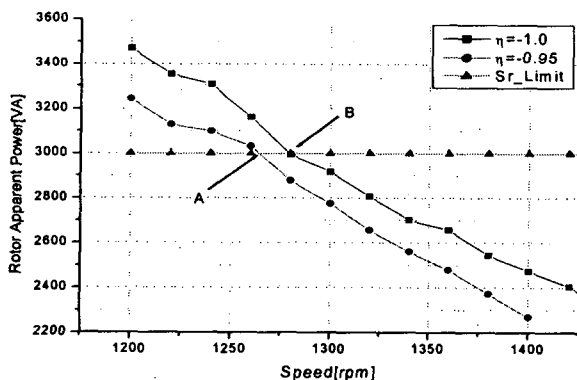


그림 11 역률제어에 의한 가용속도 영역의 확대 특성
Fig. 11 Available speed range char. by the power factor reduction

표 1 시제품 DFIG 사양
Table 1 Spec. of the DFIG

| | |
|--------------------------|------------------------|
| $R_s = 0.2340[\Omega]$, | $R_r = 0.2817[\Omega]$ |
| $L_s = 40.35[mH]$, | $L_r = 40.41[mH]$ |
| $L_o = 38.58[mH]$, | Pole no. = 4 |

4. 결론

피상전력을 고려한 DFIG의 유·무효전력 전력제어기를 제시하였다. 이는 운전 개시 속도를 결정하는 방법과 전력변환장치 용량을 고려한 제어방법, 그리고 역률가변을 통해 저속도 영역에서의 에너지 회수 방안이 고려된 것이다. 10kW DFIG와 AC/DC/AC 변환장치를 사용하여 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] S. Muller, M. Deicke & Rik W. De Doncker, Doubly-Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines, IEEE, 2002.
- [2] P. 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, May, 1996.
- [3] S. Muller, 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, 2000.
- [4] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, Reactive Power Control of a Wind Farm made up with Doubly Fed Induction Generators(I), IEEE, 2001.