

풍력 발전용 유도 발전기를 위한 정출력 제어기 개발

김래영, 차종환, 송종환, 오시덕
(주) 효성 중공업 연구소

A Development of Constant Power Controller of Induction Generator for Wind Power System

Rae-Young Kim, Jong-Whan Cha, Jong-Whan Song, Si-Doek Oh
R&D Institute, Industrial PG, Hyosung Corp.

Abstract - The pitch and stall schemes have some problems such as, mechanical stress, tear and wear on the transmission line, noise emission and disturbance to the grid, due to a delaying factor of mechanical process. In this paper, a novel control is developed. It serves to compensate delaying of pitch or stall schemes and allows the generate power to control in fast response. The validity of the proposed control scheme is verified by experiment results with the actual 660KW wind power system model.

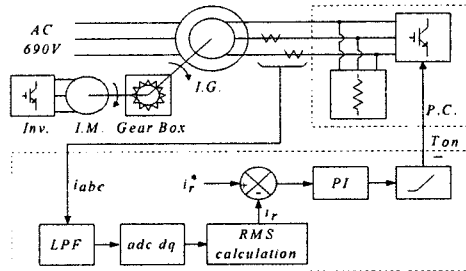


그림 1. 풍력 발전 실험설비 개략도 및 제어 블럭도.

1. 서 론

산업사회의 성장과 소득 증대에 따른 문화 산업의 고도화로 인해 전력 사용량은 날로 증가하고 있으나 전력 생산을 위한 화석 에너지는 안정적인 가격과 공급의 불안, 지구온난화 등의 범 지구적 환경문제와 맞물려 전망이 불투명하다. 따라서 세계 각국은 청정에너지원의 개발을 위해 지속적인 연구, 개발을 진행하여 왔으며 그 결과 바람 에너지를 이용한 풍력 발전시스템의 실용화 및 도입이 적극 추진되고 있다.

바람 에너지를 이용하는 풍력 발전은 에너지원이 무한하며 청정에너지원이라는 장점을 지니고 있으나 돌풍과 같은 기상조건의 변화에 따라 발전기의 입력토크가 변화하고 이로 인해 발전 출력이 불안정하게 되어 풍력 단지와 같은 대단위 시스템의 경우, 연계 계통의 안정도와 전력 품질을 떨어뜨리는 원인이 된다. 따라서 발전 출력 제어는 풍력 발전 시스템 도입의 중요한 요건으로 이를 극복하기 위한 많은 방법이 연구되어 왔다.[1]-[3]

발전기 출력을 제어하는 방법으로는 날개의 영각을 제어하는 부분과 발전기 제어부분으로 나눌 수 있다. 날개의 영각 제어는 블레이드의 공기역학적 특성을 이용하는 것으로 날개각을 조절하여 양력을 제어함으로써 발전기 입력 토크의 변동을 억제하는 피치(Pitch) 제어나 날개 표면에 난류를 발생시키는 스톨(Stall) 제어 방식이 있다. 이들은 신뢰성, 제어의 용이성, 저가격화 등의 장점으로 널리 사용되고 있으나 기계적 동작과정으로 인해 반응 시간이 지연 요소를 가지게 되어 기계적 스트레스, 에너지 전달 계통의 마모, 전력 계통의 외란 및 노이즈 발생 등의 문제점을 가지고 있다.

본 논문은 돌풍과 같은 급격한 기상조건의 변화에도 피치 제어의 기계적 동작으로 인해 느려지는 피치각 변화의 응답속도를 보상하여 전력 변화에 따른 계통의 불안정성을 막아주고 내구성을 강화를 위한 가변 피치각 제어용 전력 제어기 개발을 목적으로 한다. 개발된 제어기는 단일의 전력용 스위칭 소자를 사용하여 신뢰성, 제어의 용이성 및 저가격화를 도모할 수 있다. 발전기 회전자 전류를 제어함으로써 가변 슬립에 대해 정출력을 구현할 수 있음을 660KW급 풍력 발전 시스템 모의 실험을 통해 입증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 발전 전력 제어 이론(1)

일반적으로 계통 연계용 풍력 발전의 경우, 고정자 측의 계통에 연결되어 운전이 된다. 이는 고정자 측의 공급 전압이 일정 크기, 일정한 주파수를 갖는다고 가정할 수 있음을 의미한다. 고정자 측 3상 전압과 고정자 자속 $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ 를 정지좌표계 기준으로 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda_{ds} = \int (v_{ds} - R_s i_{ds}) dt, \lambda_{qs} = \int (v_{qs} - R_s i_{qs}) dt \quad (1)$$

여기서, R_s 는 고정자 저항, i_{ds}, i_{qs} 는 고정자 전류 그리고 v_{ds}, v_{qs} 는 고정자 전압을 나타낸다.

고정자 측에 출력되는 유효 전력은 식 (2)와 같다.

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{eqs}) \quad (2)$$

여기서, i_{eds}, i_{eqs} 는 동기좌표계 상의 고정자 전류 그리고 v_{eds}, v_{eqs} 는 동기좌표계 상의 고정자 전압이다. 이때 동기좌표계는 q축을 기준좌표로 한다고 가정하면 고정자 측이 계통에 연계되어 있으므로 $\lambda_{eds} \approx$ 일정, $\lambda_{eqs} \approx 0$ 이 된다. 따라서,

$$\lambda_{eqs} = L_s i_{eqs} + L_m i_{eqr} \approx 0 \quad \therefore i_{eqs} \approx -\frac{L_m}{L_s} i_{eqr} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)으로부터 유효 전력은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P_s = -\frac{3}{2} \left(\frac{L_m}{L_s} \right) v_{qs} i_{eqr} \quad (4)$$

한편, 정상 상태에서, 회전자 측 실효치 전류를 I_r 라고 하고 회전자측 누설 리액턴스로 인한 영향을 무시하면 $i_{eqr} \approx \sqrt{2} I_r$ 로 볼 수 있으므로 식 (4)는 다음과 같이 근사화될 수 있다.

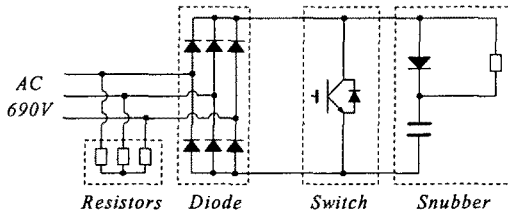


그림 2. 개발된 전력 제어기의 구조.

$$P_s \approx -\frac{3}{2} \left(\frac{L_m}{L_s} \right) v_{eqs} \sqrt{2} I_s \quad (5)$$

즉, 유효 전력은 정상 상태에서 회전자 전류 I_s 에 비례하는 관계를 가지게 되므로 이를 이용하여 발전전력을 제어할 수 있다.

2.2 발전 전력 제어 시스템

그림 1은 계통 연계된 풍력 발전 모의 설비를 대략적으로 보여주고 있다. 유도 발전기(I.G.)는 고정자와 회전자를 통하여 여자가 가능한 권선형 구조로 고정자 측은 연계 계통에 결선되어 있고 회전자는 전력 제어기(P.C.)에 결선된다. 바람을 모으기 위한 유도 전동기가 기어박스를 통해 유도 발전기의 축에 직결되어 있으며 유도 전동기는 700KW급 벡터 인버터에 의해 제어된다. 그림 2는 개발된 전력 제어기의 구조를 보여주고 있으며 이의 모드별 동작 특성은 참고 문헌 [1]을 참조하도록 한다.

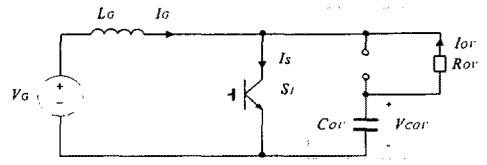
식 (5)에 알 수 있는 바와 같이 발전기 출력 전력은 발전기 회전자축 전류를 제어하여 이루어지며 이를 위해 전력용 스위치의 ON-Duty를 변동하게 된다. 그림 1에 유도 발전기의 출력 제어 알고리즘을 블록도가 나타나 있다. 정격 출력에 대한 회전자축 지령 전류 i_r 이 상위 제어기에 의해 입력되고 발전기 회전자축에 장착된 전류 센서로부터 측정된 실제 전류의 실효치 i_s 과 비교되어 PI 제어기로 들어가게 된다. PI 제어기는 이러한 전류 오차로부터 스위치 ON-duty를 발생하게 되며 limit를 거쳐 전력변환부의 반도체 스위치로 들어가게 된다.

발전기 회전자축의 3상 전류 주파수는 슬립에 따라 변화하게 되는데 최대 가변 슬립이 5%이므로 슬립 주파수는 0~3Hz에서 변화하게 된다. 뿐만 아니라 회전자축 전류에는 스위칭에 의한 전류 리플이 포함되게 되어 회전자축 전류에는 고주파수 영역의 혼재된 전류 파형을 검출하게 된다. 슬립 주파수에 해당하는 전류 성분의 검출을 위해 10Hz대의 차단 주파수를 가지는 LPF(Low Pass Filter)를 거쳐게 되고 3상 좌표계를 2상 좌표계로 변환시키는 abc-dq 변환을 거쳐 실시간으로 실효치를 계산하는 방법을 적용하게 된다.

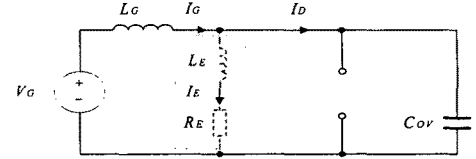
2.3 전압 상승 효과

개발된 전력 제어기는 발전기의 누설 인덕턴스 성분과 스너버 커패시터에 의한 공진 현상으로 발전기 회전자축의 유기전압에 비해 큰 전력용 스위치 정격 차단 전압을 요구하게 된다. 상승된 차단 전압은 스위치가 턴-온되어 스너버 커패시터가 방전될 때까지 계속적으로 지속되게 된다. 이러한 현상은 Boost(Step-up) 컨버터가 전압을 상승시키는 원리와 매우 유사하다.

그림 3은 전력변환기의 단상 등가 회로를 통해 스위칭 전류 도통 등가회로를 보여주고 있다. 등가회로의 전원 V_G 는 발전기 회전자축 역기전력이 다이오드부에 의해 선택된 후의 전압으로 스위칭 과도 상태동안은 직류로 가정할 수 있다. L_G 는 발전기 회전자축 누설 인덕턴스를 나타내고 있으며 권선 저항은 R_E 로 모델링 되었으며 저항의 기생 인덕턴스는 L_E 로 나타내었다.



(a) 스위치 턴-온시 전류 도통 등가 회로.



(b) 스위치 턴-오프시 전류 도통 등가회로.

그림 3. 슬립 전력 제어기 전류 도통 등가회로.

턴-온시 커패시터 전류는 스위치를 통해 방전되게 되어 정상 상태에서 커패시터 전압은 0이 되며 이와 동시에 스위치를 통해 인덕턴스 L_G 에 에너지가 축적되게 된다. 턴-오프시 I_D 는 $I_G - I_E$ 로 나타나게 된다. 비록 L_E 는 L_G 에 비해 대단히 작은 값을 나타내나 L_E 의 영향으로 $I_E \ll I_G$ 가 된다. 따라서 $I_D \approx I_G$ 로 근사화될 수 있으며 L_G 에 저장된 에너지를 스너버 커패시터 C_{ov} 로 넘기게 된다. 스위칭 주기를 T_s , ON 시간을 T_{ON} 이라고 하면 커패시터에 유기되는 전압은 다음과 같다.

$$V_{COV} = \frac{T_s}{T_s - T_{ON}} V_G \quad (6)$$

2.4 실험 결과 및 고찰

2.4.1 전력 제어기 제어 성능 시험

전력 제어기의 발전 출력 제어 성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 시험을 실시하였다. 실험 조건은 표 1과 같다. Sensorless Direct Torque Control 모드의 인버터는 속도 제어 오차가 모터 슬립의 $\pm 10\%$ 로 실제 발전기는 1832~1840 RPM으로 운전되게 된다.

이러한 운전 상태에서 슬립 전력 제어기의 전류 지령을 다음과 같이 설정하고 제어기의 각부 전압, 전류 파형과 발전기 출력의 추이를 살펴보았다.

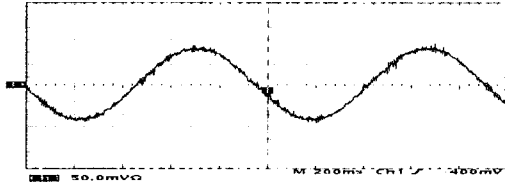
- ① 슬립 전력 제어기의 전류 지령을 ON-duty의 최대 및 최소 제한치 사이에서 발전 출력이 정격 70% 되도록 설정 - 모터의 회전속도가 지령치의 이상, 이하에 관계없이 슬립 전력 제어기는 발전기의 출력이 70%에 고정되도록 제어하게 된다. 만약, 회전속도가 과도하게 증가 또는 감소하여 스위치 ON duty의 최대, 최소 제한치에 도달하게 되면 속도 비례하여 발전기 출력이 변화하게 된다.

- ② 슬립 전력 제어기의 전류 지령을 ON-duty의 최대

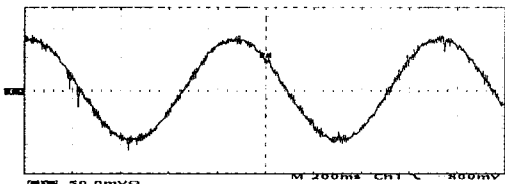
항 목	설 정 치	
전동기부	속도지령	1836 [RPM] (S = -0.02)
	동작 모드	Sensorless DTC Mode (오차-모터 슬립 $\pm 10\%$)
전력 제어기	전류 지령	가변
	권선 저항	0.4 [Ω /상]
발전기부	발전 출력	660KW (충분히 큰 전류지령을 인가한 경우)

표 1. 전력 제어기 및 모의 설비 시험 조건.

제한치(Maximum Limit) 근처에서 발전 출력이 정격 100%로 설정 - 모터의 회전속도가 지령치를 상회하는 경우, 슬립 전력 제어기는 발전기의 출력이 100% 초과하지 못하도록 제어를 시행하게 되어 발전기 출력은 속도의 증가에 관계없이 100%로 고정된다. 반면 속도지령 아래에서 회전하는 경우에는 ON-duty의 최대 제한치에 의해 제어되지 못하여 속도 하강에 비해, 발전기 출력이 감소하게 된다.

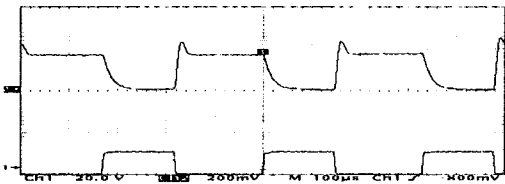


(a) 발전 출력 70% 제어시, 발전기 회전자측 상전류.

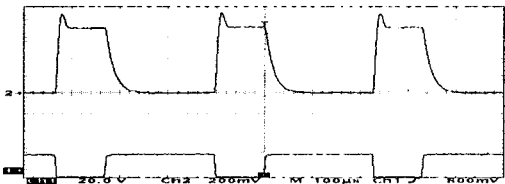


(b) 발전 출력 100% 제어시, 발전기 회전자측 상전류.

그림 3. 전력제어시 회전자측 전류(100A/div,200mS).



(a) 발전출력 70% 제어시, 스너버 커패시터 전압.



(b) 발전출력 100% 제어시, 스너버 커패시터 전압.

그림 4. 전력 제어기 스너버 커패시터 전압 (100V/div).

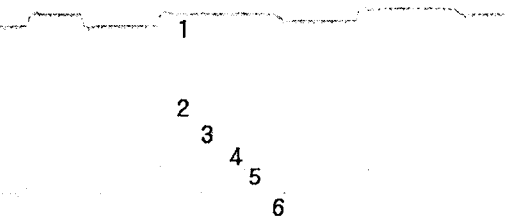


그림 5. 가변 속도시 발전기 토크, 전력 파형
그림 3은 발전기 회전자측 전류 파형을 보여주고 있

다. 발전기의 회전자 전류의 주파수는 슬립 주파수와 동일하며 그림 (a)는 발전기가 슬립 $S = -0.017$ 로 운전되고 있음을 알 수 있다. 제어가 없는 경우, 이 슬립에서는 85%(560KW)에 해당하는 전력이 출력되어야 하나 슬립 전력 제어기에 의해 출력이 70%로 제어되고 있음을 알 수 있다. 그림 (b)는 $S = -0.019$ 이다. 발전 출력은 100%로 그림 (a)와 60A의 전류 차이를 보인다. 이러한 전류 차이는 슬립 속도에 의한 차이로 인한 감소분이 25A이고 나머지 35A가 전력 제어기에 의한 감소분이다. 따라서 이는 발전 출력의 감소로 나타나게 되고 이를 통해 발전 출력이 제어되게 된다.

그림 4는 70%, 100%로 각각 제어되는 순간의 스너버측의 커패시터 양단 전압과 그때의 게이트 파형으로 앞서 설명한 전압 상승 효과를 볼 수 있다. 그림 (a)와 그림 (b)는 거의 동일한 슬립에서 운전중으로 발전기의 역기전압의 차이는 무시할 수 있을 정도이나 스위치의 T_{ON} 의 차이로 인한 전압 상승 효과로 인해 많은 차이를 보이고 있음을 알 수 있다.

2.4.2 가변 속도 시험

풍량의 변화에 따른 전력 제어기의 응답 특성을 모의하기 위하여 발전기의 속도를 변화시키고 발전 전력의 변동을 살펴보았다. 그림 5에서 가변 속도 시험시 발전기 발전 전력의 변화를 보여주고 있다. 이때 1번 파형은 발전기 속도, 2번은 발전기 권선 온도, 3번 전동기 토크, 4번 발전기 토크, 5번 발전기 발전 전류 그리고 6번은 발전기 발전 출력을 나타낸다. 발전기 속도(1)은 임의의 속도로 변화시킴에도 불구하고 발전 출력(6)은 약간의 과도 상태를 보이지만 하나 우수한 정출력 제어 특성을 보이고 있다.

3. 결 론

본 제어기는 풍속의 변화에 따라 피치각을 변화시켜 발전 출력을 제어하는 가변 피치각 제어 방식의 풍력 발전 시스템에 적용한 전력 제어기로서 피치 제어로 인한 전력의 변동을 보상하고 전력 변화에 따른 계통의 불안정성을 막아주기 위한 전력 제어기를 개발하였으며 회전자 전류 제어에 의한 발전기의 출력 제어의 이론적 근거를 바탕으로 발전기 출력 제어 알고리즘을 구현하고 슬립 전력 제어기를 제작하여 이를 적용함으로써 그 타당성과 유효성을 검증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 김래영, 서인영, 송종환, "풍력발전을 위한 권선형 유도발전기의 정출력 제어에 관한 연구", *대한전기학회 학술대회*, Vol. B, pp. 1312-1314, 2001.
- [2] M.Yamamoto and O Motoyoshi, "Active and Reactive Power Control for Doubly Fed Wound Rotor Induction Generator," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 6, No. 4, pp. 624-629, 1991.
- [3] C. Brune, R. Spee and A. K. Wallace, "Experimental Evaluation of a Variable Speed, Doubly-Fed Wind-Power Generation System," *IEEE IAS Annual Meeting*, Oct. pp. 480-487, 1993
- [4] Vestas Corp., "V44-500/600 kW Electrical Operating-and Maintenance Manual", 1997
- [5] F.J. Brady, "A Mathematical Model for the Doubly-fed Wound Rotor Generator," *IEEE PAS-103*, No. 4, pp. 798-802, 1983.

본 논문은 산업자원부에서 지원하는 에너지자원기술개발사업인 "풍력발전시스템용 증속기 및 유도발전기 개발" 과제의 일부로 수행되었음.