

풍력발전을 위한 권선형 유도발전기의 정출력 제어에 관한 연구

김 래영, 서 인영, 송 중환
(주) 효성 중공업 연구소

A Study on Constant Power Control of Doubly-fed Induction Generator for Wind Turbines

Rae-Young Kim, In-Young Suh, Jong-Hwan Song
Industrial R&D Institute, Hyosung Corp.

Abstract - This paper presents a constant power controller for doubly-fed Induction generators used in wind turbines. When the stator side of the generator is connected to the grid, the generated power depends on the rotor current. To control the rotor current based on it's average value, a cost effective SPC (Slip Power Controller) was developed and is ready for testing with an actual 660KW generator system. Experiment results are presented and discussed.

1. 서 론

풍속에 의해 발전기의 속도가 변화하는 풍력 발전에 있어서 회전 속도를 제어함으로써 효율을 증가시키기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 최근 풍력발전 시스템에서는 풍차 날개의 피치각을 변화시켜 속도를 제어하는 가변 피치각 제어 방법이 적용되고 있으며 또한 발전기에 있어서는 권선형 유도 발전기를 채택함으로써 극변환 방식이나 회전자 전류를 제어하는 슬립전력 제어가 연구되고 있다[1]-[2].

특히, 슬립 전력 제어 방식의 경우 회전자 측에 인버터를 채용하고 벡터 제어 이론을 도입하여 순시 제어를 행함으로써 빠른 응답특성을 가지는 시스템을 구축할 수 있으나 인버터의 용량 증가, 시스템의 신뢰성 저하 등의 문제로 인해 슬립 전력 제어 단독에 의존하기보다는 가변 피치각 제어 방법과 함께 적용되고 있다. 이 경우, 슬립 전력 제어 방식은 급격한 풍속의 변화가 있을 시기계적 작동으로 인해 느려지는 피치각 변화의 응답속도를 보상하고 전력 변화에 따른 계통의 불안정성을 막아 줌으로써 내구성을 강화를 위해 가변 피치각 제어의 내부 제어 루프로 동작하게 된다[3]. 이러한 슬립 전력 제어의 기능을 감안하면 인버터를 사용하는 것은 제어의 복잡성, 부피 증가뿐만 아니라 가격 상승 등의 문제점을 가지게 된다.

본 연구에서는 계통 연계용 가변 피치각 제어 풍력 발전 시스템을 위한 슬립 전력 제어를 개발하였다. 개발된 슬립 전력 제어기는 단일의 전력용 스위칭 소자를 사용하여 신뢰성, 제어의 용이성을 도모하였으며 회전자 측 전류를 평균 제어하여 약 10% 정도의 범위에서 원하는 슬립을 구현하는 것을 목적으로 한다. 계통 연계형 풍력발전기는 고정자 자속이 거의 일정하므로 이를 이용하여 유도 발전기의 제어 방법을 이론적으로 전개하고 개발된 슬립 전력 제어기의 실험 결과를 제시한다.

2. 본 론

2.1 전력 제어 이론 [1]-[2], [4]

일반적으로 계통 연계용 풍력 발전의 경우, 고정자 측에 계통에 연결되어 운전이 된다. 이는 고정자 측의 공

급 전압이 일정 크기, 일정 주파수를 갖는다고 가정할 수 있음을 의미한다. 고정자 측 3상 전압과 고정자 자속 $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ 를 정좌표계 기준으로 나타내면 다음과 같다.

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

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.

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

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,

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

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

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

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

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

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

2.2 슬립 전력 제어기

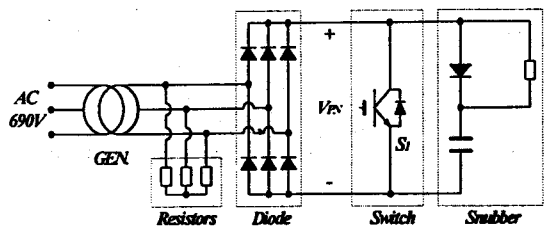


그림 1 개발된 슬립 전력 제어기

유도 발전기 회전자 측의 전류를 제어하기 위해 개발된 슬립 전력 제어기의 구성은 그림 1과 같다. 회전자 측의 권선은 3상 브릿지 형태로 구성된 다이오드부와 권선 저항에 병렬로 결선 된다. 전류 제어를 위한 전력용 스위칭 소자가 다이오드부의 DC쪽에 연결되어 있으며 슬립 전력 제어기와 권선 저항 내의 기생 인덕턴스에 스위칭 소자의 턴-오프시 발생하는 전압을 흡수하기 위한 스너버로 구성되어 있다.

다이오드부는 3상 발전기 회전자 측에서 발생하는 역기전압에 따라 가장 큰 전압과 가장 작은 전압을 나타내는 상들로 하여금 선택적으로 스위칭 되도록 한다. 즉, 회전자 한 상의 역기전압은 한 주기에 1/6동안은 가장 큰 전압을 나타내며 1/6 동안은 가장 작은 전압으로 나타남으로 1/3 동안 스위칭이 되게 된다. 이 구간 동안 각 상은 전력용 스위칭 소자에 의해 전류가 증가 또는 감소하게 된다.

스위칭 소자의 온 구간에서는 다이오드부에 의해 가장 큰 역기전압을 나타내는 상의 전류가 증가하게 되며 반대로 가장 작은 역기전압을 나타내는 상의 전류는 감소하게 된다. 오프 구간에서는 증가 또는 감소했던 전류가 정상 상태시의 전류로 회복되며 이 구간 동안 권선 저항을 통해 전류가 흐르게 된다.

스위칭 소자 오프시 또는 스위칭 되고 있지 않은 구간 동안 회전자 전류는 권선 저항을 통해 흐르게 된다. 권선 저항은 원하는 정격 슬립을 구현하기 위해 적절한 값이 선정되어야 한다. 권선 저항에 포함된 기생 인덕턴스 성분은 오프시 스위칭 소자에 과 전압을 유발할 수 있는 직접적인 원인이 되므로 이를 최소화해야 한다.

2.2.1 모드별 동작특성 분석

개발된 슬립 전력 제어기의 동작 특성을 살펴보기 위해 그림 2에 단상 등가회로를 나타내었다. 등가회로의 전원 V_G 는 발전기 회전자 측 역기전력이 다이오드부에 의해 선택된 후의 전압(그림 1의 V_{PK})으로 스위칭 과도 상태동안은 직류로 가정할 수 있으며 L_G 는 발전기 회전자 측 누설 인덕턴스를 나타내고 있다. 권선 저항은 R_E 로 모델링 되었으며 저항의 기생 인덕턴스는 L_E 로 나타내었다. 스위칭 소자는 이상적으로 가정하였다. 슬립 전력 제어기는 스위칭 시 5가지 동작 모드를 갖게 되며 이를 그림 3에 나타내었다.

모드 1(t_1-t_2) : 전력용 스위치 S_1 이 오프 상태로 이때 전류 I_G 는 권선 저항 R_E 를 통해 흐르게 된다. 이때 흐르는 전류 I_G 는 $I_G = \frac{V_G}{R_E}(t)$ 로 나타난다. 만약 스위칭이 발생한 후 충분한 시간이 흐른 후는 V_G 를 V_{PK} 으로 대체될 수 있다.

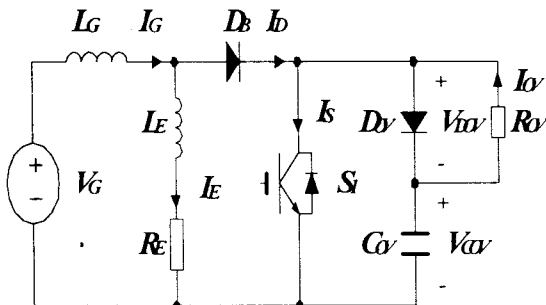


그림 2 슬립 전력 제어기의 단상 등가 모델

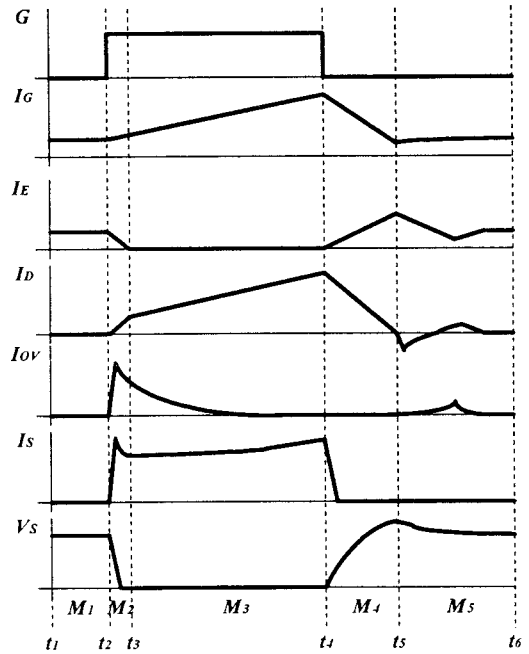


그림 3 슬립 전력 제어기 동작 모드

모드 2(t_2-t_3) : 전력용 스위치 S_1 이 턴-온이 되면 전류 I_G 는 $I_G = \frac{V_G}{L_G}(t)$ 의 기울기로 선형적으로 증가한다.

반면 전류 I_E 는 $I_E = \frac{V_G}{L_E}(t)$ 로 감소하기 시작하는데 $L_G \gg L_E$ 이므로 I_E 의 감소가 훨씬 크게 빠르게 나타난다. 다이오드의 전류 I_D 는 $I_D = I_G - I_E$ 만큼 증가한다. 스위치 S_1 이 턴-온됨에 따라 스너버 저항 R_{ov} 를 통해 전류 I_{ov} 가 흘러 커패시터 C_{ov} 전압이 감소된다. 따라서 스위치 S_1 에 흐르는 전류 I_S 는 $I_S = I_D + I_{ov}$ 로 나타난다.

모드 3(t_3-t_4) : 모드 3은 I_E 전류가 0에 도달할 때 시작 된다. 이 구간동안 커패시터 C_{ov} 는 방전을 끝내게 되고 I_{ov} 역시 0에 도달한다. 전류 I_G 는 모드 2와 같은 기울기로 증가하므로 결국 $I_G = I_S$ 로 표현될 수 있다.

모드 4(t_4-t_5) : 전력용 스위치 S_1 이 턴-오프 되면 I_S 는 0이 된다. 그러나 I_G 는 L_G 로 인하여 선형적으로 감소하기 시작하며 I_E 역시 선형적으로 증가하게 된다. $I_G - I_E$ 는 다이오드 D_{ov} 를 통해 커패시터에 충전되기 시작하여 전압 V_{cov} 가 증가하기 시작한다.

모드 5(t_5-t_6) : 커패시터 전압 V_{cov} 이 $V_G - V_{LS}$ 에 도달하면 다이오드 D_B 는 역방향 바이어스되고 순간 역회복 전류가 흐르게 된다. 일반적으로 스너버 커패시터는 그 용량에 제한이 있게 되므로 이 역회복 전류에 의해 순간 방전되고 다이오드 D_B 가 다시 순방향되어 충전이 되고 정상상태에 도달하게 된다. S_1 이 스위칭 주기를 T_S , 온 시간을 T_{on} 이라 하면, 정상 상태에서 L_G 에 걸리는 시간 평균 전압 $V_G T_{ov} + (V_G - V_{cov})(T_S - T_{on})$ 는 0이다.

따라서 정상상태시 V_{cov} 는 $V_{cov} = \frac{T_s}{T_s - T_{on}} V_G$ 가 된다. 따라서, 스위치 S_1 의 온 시간이 증가할수록 커패시터에 충전되는 전압이 증가하는 승압 현상이 발생하게 된다.

2.3 실험 결과 및 고찰

제작된 슬립 전력 제어기의 동작 특성 및 성능을 분석하기 위한 간이 실험 장치에 의해 실험을 행하였다. 간이 실험 장치는 유도 발전기를 3상 변압기로 대체하여 제작한 것으로 슬립 전력 제어기의 전류 제어 성능을 평가하기에는 문제가 없을 것으로 사료되며 660KW의 실 부하 실험 장치를 현재 설치 중에 있다. 간이 실험 장치의 사양은 표 1와 같다.

표 1. 제어기 및 시험설비 사양

항 목	내 용	
시험 설비	변압기	3상, 220V/50V, 2KVA
	권선 저항	400W, 6Ω, 권선형
	정격 용량	150KVA
슬립 전력 제어기	전력 소자	IGBT, 600V/400A
		DIODE, 800V/400A
	스위칭	3KHz
	제어주기	1KHz

그림 4는 전류 제어기 스위칭시 각 부분의 전압 및 전류 파형이며 그림 5는 스위칭 듀티비 10%, 40%시의 전력용 스위치의 양단 전압과 변압기 2차 전류 파형을 보여주고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 듀티비가 커짐에 따라 승압 현상이 나타남을 알 수 있다. 또한 전압의 승압 현상과 함께 턴-오프시 발생하는 과전압의 크기도 커지게 된다. 따라서 스너버 설계시 충분한 마진을 확보하는 것이 바람직할 것이다. 그림 6은 스텝의 전류 지령에 대한 제어기의 응답과 스위칭 전압을 보여준다.

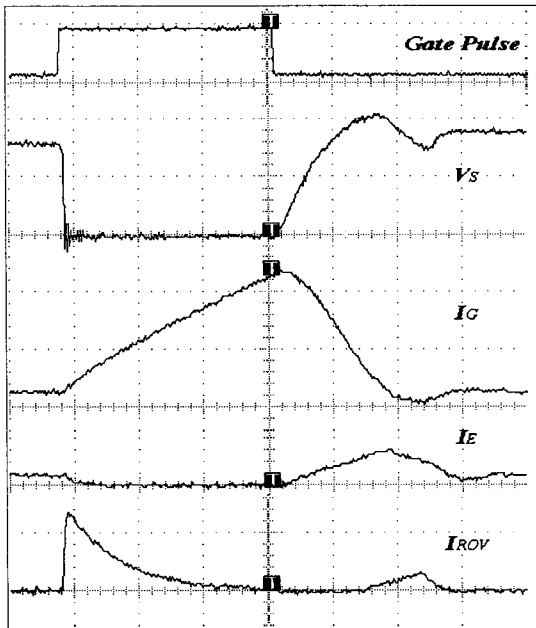
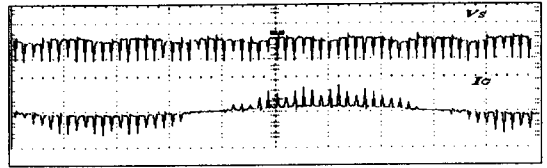
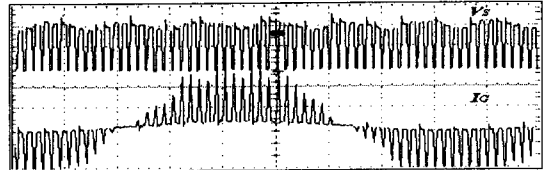


그림 4 스위칭시 각 부분의 전압 및 전류 파형 (100V/div, 25A/div, 20us/div)



(a) 스위칭 듀티비 10%



(b) 스위칭 듀티비 40%

그림 5 전력용 스위치 양단 전압과 변압기 2차 전류 (100V/div, 25A/div, 20us/div)

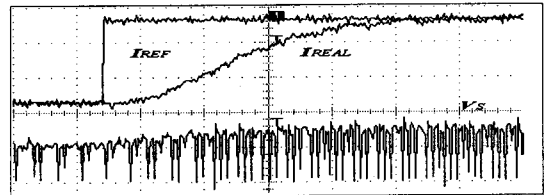


그림 6 슬립 전력 제어기의 응답 특성 (10ms/div)

3. 결 론

계통 연계용 가변 피치각 제어 풍력 발전 시스템을 위한 슬립 전력 제어기를 개발하였으며, 전류 제어기의 동작에 대한 해석을 하였고 이의 타당성을 검증하기 위 한 실험을 진행하였다. 개발한 제어기는 신뢰성, 유지 보수의 용이성을 위하여 단일의 전력용 스위치로 이루어 진 구조를 지니고 있다. 또한 저가격화에 유리할 것으로 사료된다. 향후 현재 설치 중에 있는 660KW급 실 부하 실험을 통해 신뢰성을 입증과 유도발전기 출력 제어의 해석과 특성에 관한 연구결과를 발표할 수 있을 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 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.
- [2] C. Brune, R. Spee and A. K. Wallace, "Experimental Evaluation of a Variable Speed, Doubly-Fed Wind-Power Generatinf System," *IEEE IAS Annual Meeting*, Oct, pp. 480-487, 1993
- [3] Vestas Corp., "V44-500/600 kW Electrical Operating and Maintenance Manual", 1997
- [4] 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 에너지자원기술개발 사업인 "풍력발전시스템용 증속기 및 유도발전기 개발" 과제의 일부로 수행되었음.