

가변속 권선형 유도 발전기의 유효전력 및 무효전력 동시제어

이효진, 박성조, 김영삼, 권영안
부산대학교

Active/Reactive Power Control of Doubly Fed Induction Generator

H J Lee, S J Park, Y S Kim and Y A Kwon
Pusan National University

Abstract - 권선형 유도 발전기는 고정자뿐만 아니라 회전자에도 전력을 공급할 수 있는 이중여자의 구조를 가지므로 제어의 폭이 넓은 장점을 가진다. 본 연구에서 구성하는 권선형 유도발전기 시스템은 계통 연계형으로 유도발전기의 고정자는 계통에 직접 연결되고, 회전자는 AC/DC/AC 컨버터를 통해 계통과 연결된다. 본 연구는 이러한 시스템에서 가변속의 동력아래 고정자측 유효전력과 무효전력을 회전자의 d-q 독립제어에 의하여 동시제어가 이루어지도록 하는 연구이다. 본 연구에서는 종래의 유도발전기 시스템에서 터빈의 속도가 동기속도 이상이 되어야만 일정한 전력을 얻을 수 있는 최대전력점 트래킹 방식 보다 넓은 운전 범위인 동기속도 이하의 영역에서도 회전자 전력변환장치 용량내에서 일정 전력제어가 가능하도록 하였다.

1. 서 론

농형 유도기는 구조가 간단하고 견고하며 가격이 저렴한 장점으로 산업현장에서 전동기로서 널리 사용되고 있으나, 발전기로 사용하는 경우에는 동기속도이상으로 운전하여야 우수한 출력특성을 얻을 수 있으므로, 풍속이나 유속이 가변하는 상황에서는 적합하지 않다. 권선형 유도 발전기는 고정자뿐만 아니라 회전자에도 전력을 공급할 수 있는 이중여자의 구조를 가지므로 회전자에 인버터를 채용하여 풍속이나 유속의 변화에 따라 슬립 전력을 제어함으로써 제어의 폭이 넓은 전력제어를 수행할 수 있는 장점을 가진다[1],[2].

종래의 권선형 유도 발전기를 이용한 전력제어에 관한 연구로서 터빈에서 입력되는 전력이 최대가 되도록 속도 제어하는 방식은 일정한 전력을 필요로 하는 부하에는 사용이 어려우며, 터빈에 의해 가변하는 기계적 입력에 따라 계통으로 전달되는 전력이 변동된다. 그리고 임의의 속도범위에서 임의로 고정자 전력지령치를 주어 권선형 유도 발전기를 제어하는 방식은 회전자의 전력변환장치 용량을 고려하지 않으므로 시스템의 실제 운전에서 발전기의 운전 가능한 속도영역이 제한된다. 본 연구에서는 최대전력점 트래킹 방식을 이용하여 직접 고정자의 유효전력 지령치를 결정하고, 역률제어를 통하여 고정자의 무효전력 지령치를 계산함으로써 효과적인 전력제어를 수행한다. 그리고, 종래의 유도발전기 시스템에서 터빈의 속도가 동기속도이상인 되어야만 일정한 전력을 얻을 수 있는 최대전력점 트래킹 방식 보다 넓은 운전 범위인 동기속도 이하의 영역에서도 회전자 전력변환장치 용량내에서 일정 전력을 계통측으로 공급이 가능하도록 하였다. 이는 넓은 속도 영역에서 계통으로 일정 전력의 공급이 가능하고, 발전기의 이용률을 높이며, 돌발적인 터빈 속도의 변화에 의한 발전기의 정지를 방지하는 장점을 가지게 된다.

2. 권선형 유도발전기의 모델링

3상 평형, 권선형 유도발전기의 전압 방정식 및 자속 방정식을 동기속도로 회전하는 동기좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_e L_s & pL_o & -\omega_e L_o \\ \omega_e L_s & R_s + pL_s & \omega_e L_o & pL_o \\ pL_o & -\omega_{sl} L_o & R_r + pL_r & -\omega_{sl} L_r \\ \omega_{sl} L_o & pL_o & \omega_{sl} L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_o (i_{ds} + i_{dr}) = L_s i_{ds} + L_o i_{dr} \quad (2)$$

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

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_o (i_{ds} + i_{dr}) = L_r i_{dr} + L_o i_{ds} \quad (4)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_o (i_{qs} + i_{qr}) = L_r i_{qr} + L_o i_{qs} \quad (5)$$

$$\text{단, } \omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$$

3상 평형, 권선형 유도발전기에서 입력전력을 동기좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{in} = \frac{3}{2} (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) \quad (6)$$

권선형 유도발전기의 고정자측 유효전력 및 무효전력은 각각 다음과 같다.

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds}) \quad (7)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \quad (8)$$

권선형 유도발전기의 회전자측 유효전력 및 무효전력은 각각 다음과 같다.

$$P_r = \frac{3}{2} (v_{qr} i_{qr} + v_{dr} i_{dr}) \quad (9)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr}) \quad (10)$$

권선형 유도발전기의 토크방정식 및 운동방정식은 각각 다음과 같다.

$$T_{DFIG} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (11)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{-B}{J} \omega_r + \frac{T_{DCM} - T_{DFIG}}{J} \quad (12)$$

단, T_{DCM} : 발전기의 외부 인가 토크

T_{DFIG} : 권선형 유도발전기의 발생토크

3. 유도발전기의 유효전력 및 무효전력 제어

그림 1은 본 연구에서 구성하는 계통 연계된 권선형 유도 발전기 시스템의 블록도이다.

유도발전기의 동기속도 이하 운전에서는 모선에서 회전자로 유효전력이 전달되는 경우로서, 발전기측 컨버터는 인버터로 동작하고, 계통측 컨버터는 정류기로 동작한다. 반대의 경우인 동기속도 이상의 운전에서는 회전자로부터 모선으로 유효전력이 전달되는 경우로서, 발전기측 컨버터는 정류기로 동작하고, 계통측 컨버터는 인버터로 동작하게 된다. 여기서 발전기측 컨버터와 계통측 컨버터의 PWM 제어를 통해 회전자 여자전압의 주파수와 크기를 각각 제어할 수 있다.

그림 2와 그림 3은 유효전력 및 무효전력을 동시 제

어하기 위한 권선형 유도발전기의 발전기측 컨버터 제어시스템 및 계통측 컨버터 제어시스템의 블록도를 나타낸다.

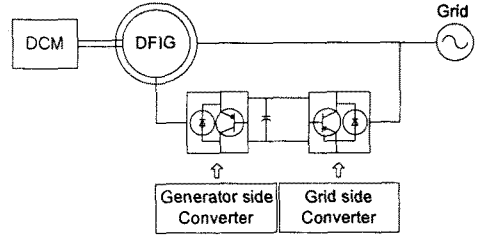


그림 1 권선형 유도발전기 시스템의 블록도

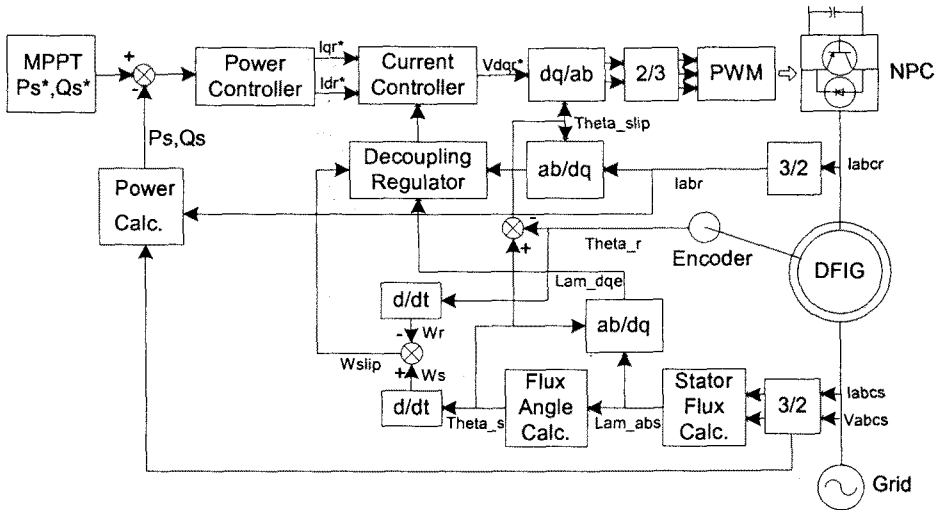


그림 2 발전기측 컨버터 제어시스템의 블록도

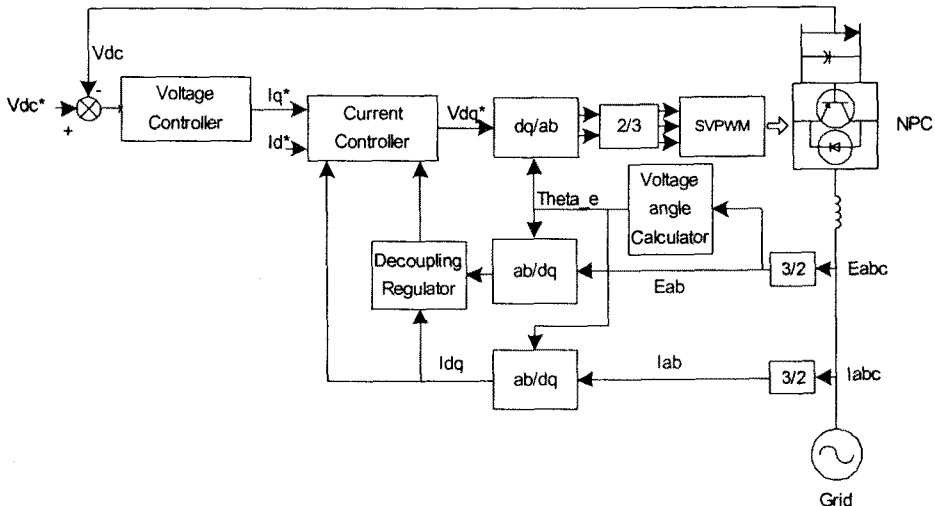


그림 3 계통측 컨버터 제어시스템의 블록도

풍력발전에서 발전기의 축을 회전시키는 원천은 순수 자연 에너지인 풍력이고, 풍력은 항상 변화하므로 발전기로 입력되는 에너지양도 변동하게 된다. 따라서 최대 전력점 트래킹(Maximum Power Point Tracking, MPPT)을 사용함으로써 발전 시스템이 허용할 수 있는 범위에서 자연 에너지의 이용률을 최대한으로 할 수 있게 된다. 이러한 이유로 고정자의 유효전력 지령치 결정은 발전기로 입력되는 자연에너지를 최대한 이용하며, 기계적 손실이나 전기적 손실을 최소화하기 위해 MPPT를 사용한다. 그림 4는 바람의 속도와 터빈의 축 속도에 따른 출력 파워 특성 곡선으로서 바람의 속도와 출력의 상관 관계는 포물선의 형태가 된다. 이 포물선의 기울기가 영이되는 지점인 Global Maximum Point가 Maximum Power Point가 된다. 예를 들어 그림 4에서 바람의 속도가 9m/s일 경우 터빈축의 회전속도는 500rpm에서 2700rpm까지 운전 가능하다. 그리고 운전점이 점 a인 경우와 점 b인 경우에 비해 점 c에서 출력 전력이 가장 크므로 바람의 속도에 따라 이 점을 연결한 곡선이 발전기의 동작점이 되도록 제어한다[3].

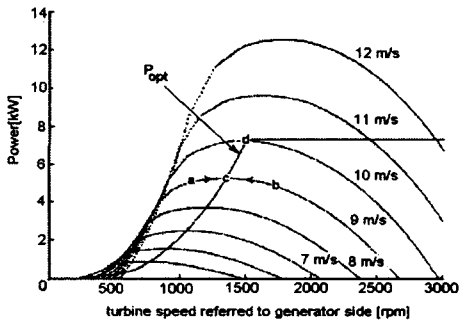


그림 4 풍력 발전용 최대 전력 곡선

4. 시뮬레이션

그림 2와 그림 3과 같은 제어시스템에 의한 전력제어를 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션에 사용한 권선형 유도발전기 및 직류기의 사양은 표 1과 같다.

표 1 시스템 상수

| 110kW 직류기 | 10kW DFIG |
|---------------------------|--------------------------|
| $L = 1.557 \text{ mH}$ | $R_s = 0.2340 \ \Omega$ |
| $R = 0.1027 \ \Omega$ | $R_r = 0.2817 \ \Omega$ |
| $J = 11.5 \text{ kg m}^2$ | $L_r = 40.35 \text{ mH}$ |
| Pole = 4극 | $L_l = 40.41 \text{ mH}$ |
| | $L_o = 38.58 \text{ mH}$ |
| | Pole = 4극 |

그림 5는 고정자측 유효전력 및 무효전력 제어의 응답 특성을 나타낸다. 여기서 P_s^* 및 Q_s^* 는 유효전력 및 무효전력의 지령치이며, ω_{rpm} 은 속도를 나타낸다. 본 결과에서 동기속도 이하인 1600rpm 과 동기속도 이상인 2000rpm 에서 각각 고정자의 유효전력 및 무효전력이 상호 독립적으로 양호하게 제어됨을 알 수 있다. 그림 6은 고정자의 역률제어 응답특성을 나타낸다.

5. 결론

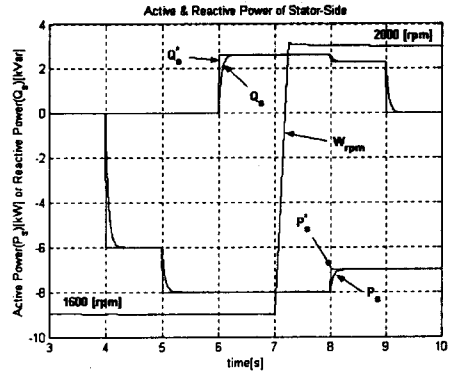


그림 5 고정자 유효전력 및 무효전력 응답 특성

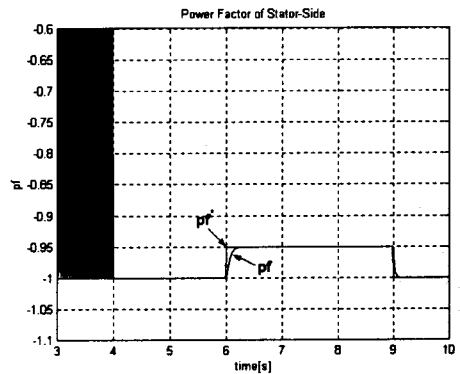


그림 6 고정자 역률의 응답 특성

본 논문에서는 MPPT를 이용하여 직접적으로 고정자의 유효전력 지령치를 결정하고 역률제어를 통하여 고정자의 무효전력 지령치를 계산함으로써 기존의 경우보다 효과적이고 실제적인 권선형 유도발전기 시스템의 전력제어 방식을 제시하였다. 그리고, 종래의 유도발전기 시스템에서 동기속도이상인 경우에 일정한 전력을 얻을 수 있는 MPPT 방식 보다 넓은 운전 범위인 동기속도 이하의 영역에서도 회전자 전력변환장치 용량이내에서 일정 전력을 계통측으로 공급이 가능하도록 하였다. 본 연구에서 제시된 전력제어 방식은 계통과 연계된 권선형 유도 발전기를 사용한 발전시스템의 실질적인 제어 형태가 될 것으로 기대된다. 또한, 고정자측 무효전력의 제어가 가능하므로 고정자측과 직접 연계된 계통의 역률보상기의 역할도 가능한 장점을 가진다.

[참고 문헌]

- [1] S Muller, M Deicke and R W Doncker, "Doubly-Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines," IEEE, Ind Appl Magazine, Vol.8 No.3, pp.26-33, 2002
- [2] R S Pena et al, "A Constant Frequency Constant Voltage Variable Speed Stand Alone Wound Rotor Induction Generator," Int Conf on Opportunities and Advances in Int Elect Power Generation, pp.111-114, 1996.
- [3] R Mukund and D P E Rate], *Wind and Solar Power Systems*, CRC press, 1999.