

풍력 발전시스템을 위한 유도 발전기의 동특성해석

장석명*, 최장영*, 문정술**, 유대준*, 이정준***

*충남대학교, **(주)한국중부발전, ***전력연구원

Dynamic Analysis of Doubly Fed Induction Generators for Wind Power System

SeokMyeong Jang*, JangYoung Choi*, JeongSul Moon**, DaeJoon You*, JeongJoon Lee***

Chungnam National University*, KOMIPO.**, KEPR***

Abstract - This paper deals with the dynamic analysis of doubly-fed induction generators for wind power system. The 3-phase voltage equations for stator and rotor of doubly-fed induction generator (DFIG) are derived and then, the equivalent circuit and mechanical output power of induction generators are obtained by converting the 3-phase voltage into dq voltage equation. Finally, the dynamic characteristics such as torque, speed and voltage for rotor of DFIG are presented, for the case when wind is considered.

1. 서 론

세계적으로 1970년대에 2차례의 석유파동을 계기로 각 국가는 에너지 효율향상 기술개발과 함께 태양에너지와 같은 대체에너지 기술의 개발에 관심을 기울이기 시작하였다. 특히 1990년대 들어 환경공해와 기후변화협약의 환경 문제가 사회적 관심으로 대두되면서 무한한 자연에너지를 이용함으로써 끊임없이 재생이 되고, 온실효과의 주원인이 되는 이산화탄소 등의 공해물질을 발생하는 기존의 화석에너지원과는 달리 공해가 거의 없는 신재생에너지를 얻기 위한 방법으로 태양에너지, 풍력, 소수력, 조력 등의 다양한 방법이 연구 개발되고 있다. 그중에서도 풍력이 가장 실용화에 근접한 에너지로 알려져 있다. 최근에 상용화된 풍력 발전시스템의 경우, 시스템의 용량이 수 MW급 대용량으로 설치되고 있으며 화력발전이나 원자력 발전에 의한 전력 생산원가에 근접한 4cents/kWh 수준까지 도달하였다. 한편, 1MW급 이하의 중대형 풍력발전시스템에서는 지금까지 가격이 저렴한 농형 유도기나 널리 사용되어 왔으나 정속운전 특성과 더불어 전력계통 연계 시 과도상태 등의 문제점을 가지고 있다. 이에 반해 권선형 유도기를 사용한 2중 여자 발전 시스템이 시스템의 가격 대비 성능 면에서 다른 방식의 시스템에 비하여 우수하기 때문에 최근에 상용화된 1MW급 이상의 대용량 발전 시스템에 널리 채택되고 있다.

따라서 본 논문에서는 계통연계용 풍력 발전시스템 구현을 위한 3상 유도 발전기의 모델링 및 시뮬레이션 프로그램을 활용하여 풍력발전시스템을 설계하고 설계된 풍력 발전시스템을 바탕으로 권선형 유도 발전기의 동특성을 해석하고자 한다. 우선 3상 대칭 유도 발전기의 전압 방정식을 세운 후 다시 dq변환을 하였다. 이 dq 전압 방정식으로부터 유도발전기의 등가 회로 및 기계적인 출력방정식을 얻을 수 있었다. 마지막으로 DFIG가 사용된 풍력 발전시스템의 동특성 시뮬레이션 알고리즘을 도출한 후 임의의 풍력에 대한 유도 발전기의 회전자 전압, 속도 및 토크에 대한 동특성을 시뮬레이션 하였다.

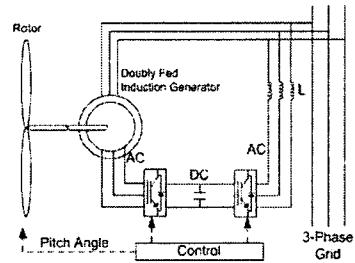


그림 1. DFIG를 이용한 풍력발전시스템.

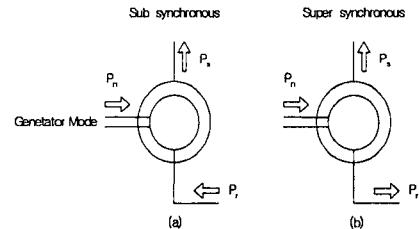


그림 2. DFIG의 모드별 전력조류.

2. 이중여자 유도 발전기의 원리

2중 여자(권선형 회전자) 유도 발전기(이하 DFIG)는 고정자와 회전자에 전력을 공급하는데 이는 양방향 전력 조류 컨버터를 사용하여 회전자 회로에 이용된다. DFIG의 주요 장점은 $\pm(20 \sim 40)\%$ 속도 변화와 전형적인 동기속도에 대하여 일정한 전압과 주파수 출력을 공급할 수 있는데 있다 [1]. 그림 1은 DFIG를 이용한 풍력 발전시스템을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 발전기의 회전자를 위한 양방향 전력 전달을 위하여 AC/DC/AC 컨버터가 발전기의 회전자와 3상 grid사이에 연결되었고, 제어 시스템은 터빈 로터의 전력을 제어하기 위하여 회전자 축 및 그리드 축의 컨버터를 위한 전압 명령 신호와 피치각 명령을 발생시킨다. 다시 말해서, 2중 여자 발전 시스템은 권선형 유도기의 고정자를 계통에 직접 연결하고, 회전자 전압을 제어하여 발전기의 출력 또는 회전속도를 제어하는 방식으로, 회전자 유효전력은 컨버터를 사용하여 회전자의 전압을 제어하고, 컨버터의 직류 전압은 다이오드 정류 회로를 사용하여 계통에서 공급한다. 그림 2 (a)는 동기 속도 이하에서 회전하는 순간의 에너지 흐름인 발전기 모드를 보여주고 있다. 즉, $0 < S < 1$ 이라는 슬립에서 S_f 라는 주파수의 슬립 전력 SP_f 를 공급하면 기계적 에너지 P_n 을 흡수하여 P_s 라는 발전 전력을 생산하게 된다. 그림 2 (b)는 동기 속도 이상, 즉 $S < 0$ 인 경우, S_f 라는 주파수의 SP_f 라는 슬립 전력을 소모함으로써 P_s 라는 발전 전력을 제어할 수 있다 [2].

3. 권선형 유도 발전기의 등가회로

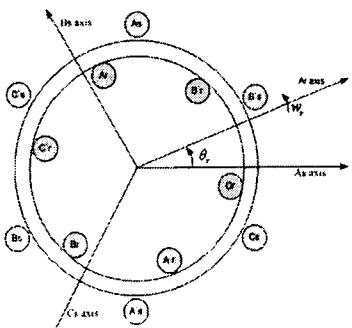


그림 3. 3상 대칭 유도 발전기 모델.

그림 3은 3상 대칭 유도 발전기의 모델을 보여주고 있다. 고정자 권선이 대칭이며 정현파적으로 분포되어 있고, 각 상마다 120° 간격으로 위치해 있으며, 등가된 N_s 과 저항 r_s 를 가지고 있다고 가정한다. 또한 회전자 권선 역시 정현파적으로 분포된 대칭권선이며, 각 상마다 120° 간격으로 위치해 있고 등가된 N_r 과 저항 r_r 을 가지고 있다고 가정한다. 각 권선의 자기축의 양의 방향은 그림 3에 표시되어 있다. 고정자와 회전자 모두를 평형 3상 권선이라고 가정한다. 3상 고정자 권선을 A_s, B_s, C_s 라 하고, 첨자 's'는 이를 권선이 고정자라는 것을 표시해 주고 있다. 회전자 권선은 A_r, B_r, C_r 로 놓으면, 첨자 'r'은 이런 3상 권선이 회전자 권선이라는 것을 말해주고 있다.

유도 발전기의 고정자 및 회전자의 전압 방정식을 a, b, c 상에서 벡터 행렬식으로 나타내면 식 (1)과 (2)와 같다.

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + P\lambda_{abcs} \quad (1)$$

$$v_{abc'r} = r_r i_{abc'r} + P\lambda_{abc'r} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abc'r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abc'r} \end{bmatrix} \quad (3)$$

위 식에서 알 수 있듯이 유도 발전기의 동특성은 고정자와 회전자 상호간의 결합효과 때문에 시변계수를 가지는 복잡한 미분방정식으로 표현된다. 시변계수를 제거하기 위하여 기준좌표계이론을 적용하여 dq 회전좌표계로 변환한다. 변환과정을 생략하면 결과적으로 식 (4)로 주어지는 고정자 및 회전자의 dq전압 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} V_{ds} &= r_s i_{ds} + P\lambda_{ds} - w\lambda_{qs} \\ V_{qs} &= r_s i_{qs} + P\lambda_{qs} + w\lambda_{ds} \\ V_{ns} &= r_s i_{ns} + P\lambda_{ns} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_{dr} &= r_r i_{dr} + P\lambda_{dr} - (w - w_r)\lambda_{qr} \\ V_{qr} &= r_r i_{qr} + P\lambda_{qr} + (w - w_r)\lambda_{dr} \\ V_{nr} &= r_r i_{nr} + P\lambda_{nr} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 회전자의 저항 및 인덕턴스는 고정자로 환산한 값임을 유의해야 한다. 그리고 고정자와 회전자의 쇄교자속은 식 (6)과 (7)처럼 표현된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= L_s i_{ds} + L_m i_{dr} & \lambda_{dr} &= L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \lambda_{qs} &= L_s i_{qs} + L_m i_{qr} & \lambda_{qr} &= L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \\ \lambda_{ns} &= L_s i_{ns} & \lambda_{nr} &= L_r i_{nr} \end{aligned} \quad (6) \quad (7)$$

고정자의 중성점과 외부와의 결선이 없고 3상 고정자 전류가 평형이라면, 3상 고정자 전류의 합은 0이므로, i_{ns} 와 λ_{nr} 가 0이 되고, dq 변수만으로 유도 발전기 고정자를 회로로 해석할 수 있다. 유사하게 회전자의 중성점과 외부와의 결선이 없는 경우는 i_{nr} 와 λ_{nr} 가 0이 된다. 따라서 유도 발전기 등가회로는 그림 4와 같다.

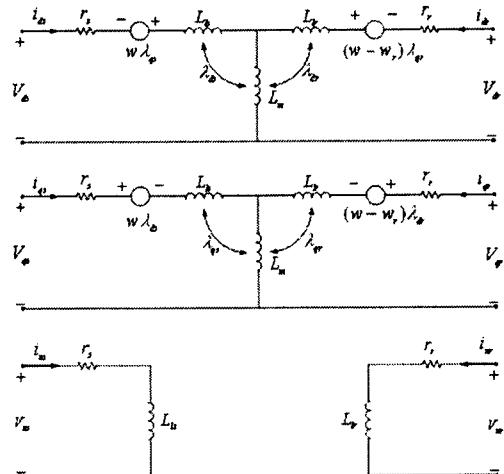


그림 4. 유도 발전기 등가회로

임의의 속도로 회전하는 dq 좌표계상에서의 유도 발전기 입력전력은 식 (8)과 같다.

$$P_{in} = \frac{3}{2} [V_{ds}i_{ds} + V_{qs}i_{qs} + V_{ns}i_{ns} + V_{dr}i_{dr} + V_{qr}i_{qr} + V_{nr}i_{nr}] \quad (8)$$

식 (8)은 식 (9)와 같이 다시 정리할 수 있다

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{3}{2} r_s i_s^2 + \frac{3}{2} r_r i_r^2 + P[W_b + W_m + W_r] \\ &\quad + \frac{3}{2} w L_m (i_{dr}i_{qs} - i_{qr}i_{ds}) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 계수는 식 (10)으로 주어진다.

$$\begin{aligned} i_s^2 &= i_{ds}^2 + i_{qs}^2 + i_{ns}^2 \\ i_r^2 &= i_{dr}^2 + i_{qr}^2 + i_{nr}^2 \\ W_b &= \frac{3}{4} L_b (i_{ds}^2 + i_{qs}^2 + i_{ns}^2) \\ W_m &= \frac{3}{4} L_m [(i_{ds} + i_{dr})^2 + (i_{qs} + i_{qr})^2] \\ W_r &= \frac{3}{4} (i_{dr}^2 + i_{qr}^2 + i_{nr}^2) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (9)에서 우변의 첫째 항은 고정자 저항손실을 나타내는 항이고, 두 번째 항은 회전자 저항손실을 의미한다. 그리고 W_b 는 고정자 누설 인덕터에 저장된 자기 에너지를 나타내며, W_m 은 상호 인덕터에 저장된 자기 에너지를 나타내고, W_r 은 회전자 누설 인덕터에 저장된 자기 에너지를 나타낸다. 그러므로 식 (9)에서 세 번째 항은 자기 에너지의 시간에 관한 변화를 나타내는 전력을 의미한다. 그리고 마지막 항은 기계적인 출력을 의미한다. 따라서 유도 발전기의 기계적 출력은 식 (11)과 같다.

$$T_e w_{rm} = \frac{3}{2} w_r L_m (i_{dr}i_{qs} - i_{qr}i_{ds}) \quad (11.a)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{dr}i_{qs} - i_{qr}i_{ds}) \quad (11.b)$$

여기서 w_{rm} 은 기계각속도이고, $w_{rm} = \frac{2}{p} w_r$ 이며, p는극수이다. 토크를 회전자 자속의 관계식을 이용하여 고정자 전류와 회전자 자속으로 나타내면 식 (12)을 얻을 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr}i_{qs} - \lambda_{qr}i_{ds}) \quad (12)$$

또한 고정자 자속의 관계식을 이용하여 고정자 전류와 고정자 자속으로 나타내면 식 (13)과 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds}) \quad (13)$$

4. 동특성 시뮬레이션

4.1 설계 파라미터

동특성을 위한 해석모델은 정격 출력 672.981[kW], 극수 4[극], 정격 축 속도 1759.04[rpm]의 가변 슬립 권선형 유도 발전기이며 설계 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 해석모델의 설계 파라미터

항 목	사 양	단위
출 력	672.981	kW
정격전압	690	V
극 수	4	Pole
회전자 유형	권선형	
주파수	60	Hz
Jm	31.1862	kg ⁻¹
정격 슬립	2.27538	%
정격 축 속도	1759.04	rpm
고정자 저항	5.7346	mΩ
고정자 누설 리액턴스	38.7938	mΩ
회전자 저항	14.7177	mΩ
회전자 누설 리액턴스	61.1476	mΩ
자화 리액턴스	3.07013	Ω
고정자 상전류	626.198	A
회전자 상전류	596.035	A
자화 전류	126.134	A

4.2 시뮬레이션 블록도

4.1절에서 제시된 설계변수를 갖는 권선형 유도 발전기의 모델로부터 동특성을 해석하기 위하여 전체적인 시스템 구성도를 그림 5와 같이 설계하였다.

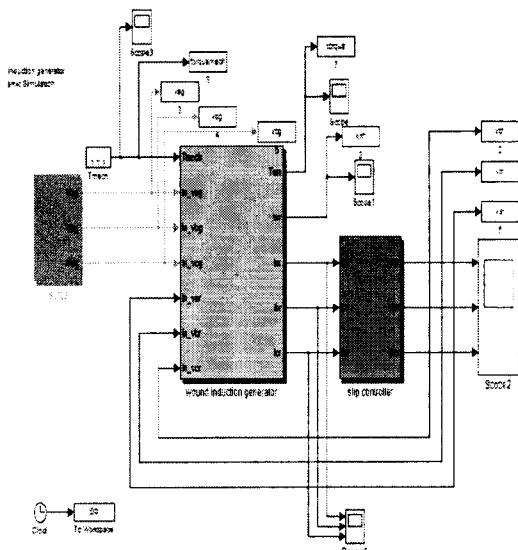


그림 5. 동특성 시뮬레이션을 위한 전체 시스템 블록도

4.3 풍력을 고려한 경우의 동특성

유도 발전기의 동특성 모드 중 외부 풍력조건을 고려한 경우 발전기의 동특성은 다음과 같다. 그림 6은 발전기를 기동하는 경우 회전자 권선의 전압이 0.3초 정도에서 정상상태에 도달한 후 0.4초에서 인위적으로 외부 풍력을 인가한 경우인데 이때 외부 풍력토크에 상응하는 회전자 권선의 전압이 유기됨을 알 수 있다. 그림 7(a)는 발전기를 기동하는 경우 속도가 0.3초 부근에서 정격속도인 1,800[rpm]에 도달하고 0.4초 부근에서 인

위적으로 외부 풍력이 가해질 경우에는 속도의 변화가 발생되며 잠시 후 다시 정격속도로 회복됨을 알 수 있다. 그럼 7(b)은 발전기의 토크가 0.3초 부근에서 0으로 수렴하고 인위적으로 외부 풍력이 고려된 때에는 회전자에 걸리는 토크는 정격속도인 1,800[rpm]를 유지하기 위하여 음(-)의 토크가 발생되고 있음을 나타내고 있다. 즉 발전기로서 동작되고 있음을 알 수 있다.

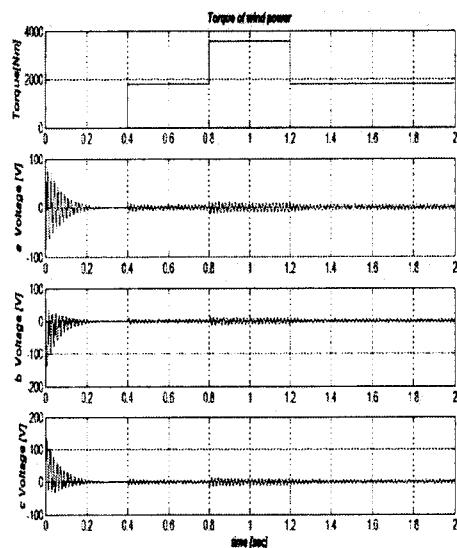


그림 6. 회전자 권선 전압.

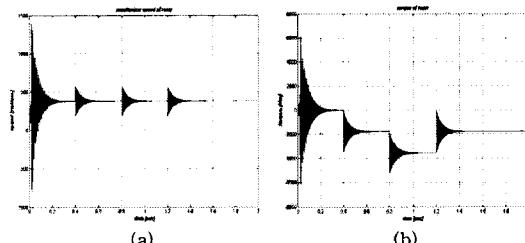


그림 7. (a) 기계적 회전 속도 및 (b) 회전자 토크

5. 결 론

본 논문에서는 이중여자 유도 발전기를 사용한 풍력 발전시스템에서 유도 발전기의 회전자 전압, 토크, 속도에 대한 동특성을 수행하였다. 먼저, 3상 대칭 유도 발전기 모델로부터 고정자와 회전자에 대한 전압 방정식을 도출했고 도출된 전압 방정식을 dq 방정식으로 변화하였다. 이로써 유도발전기의 등가회로 및 기계적 출력 방정식을 도출하고, 더 나아가 시뮬레이션 알고리즘 역시 유도하였다. 마지막으로 도출된 동특성 시뮬레이션 알고리즘으로부터 풍력이 고려된 경우의 이중여자 권선형 유도 발전기의 회전자 전압, 속도, 토크에 대한 동특성을 제시하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정병창, 권태화, 송승호, 김일환, “회전자축 PWM 인버터-컨버터를 사용한 이중여자 유도형 풍력 발전기의 계통 투입 알고리즘”, 전기학회논문집 52B권 10호 2003년 10월, pp. 528-534.
- [2] Rajib Datta and V. T. Ranganathan, “Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Induction Machine-A Comparison With Alternative Schemes”, IEEE Transaction on energy conversion, Vol. 17, No. 3, September 2002.