

영구자석형 동기발전기를 갖는 풍력발전시스템의 동특성 해석

장 석명, 최 장영, 유 대준
충남대학교

Dynamic Analysis of Wind Power Systems with Permanent Magnet Generators

Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, Dae-Joon You
Chungnam National University

Abstract - This paper deals with the dynamic analysis of wind power systems with permanent magnet generator (PMG). The dynamic modeling for wind turbines, PMG and dc-dc converter are performed. On the basis of dynamic simulation model, simulation results are obtained. Finally, test results such as cp vs. TSR and generated voltage are given to confirm the analysis.

1. 서 론

본 논문은 영구자석형 동기발전기를 갖는 풍력 발전 시스템의 동특성해석에 대하여 다루고자 한다. 먼저 풍력터빈의 출력방정식으로부터 터빈의 동특성 모델링을 수행하고 다음으로 영구자석형 풍력발전기를 dq전압 방정식으로 표현하여 역시 동특성 모델링을 수행하였다. 마지막으로 부스트 컨버터의 동특성 모델링은 상태변수 평균 해석법을 이용하여 부스트 컨버터의 전압방정식을 유도한 후 동특성 모델링을 수행하였다. 본 논문에 제시된 각 요소의 동특성 모델링은 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 구현되었다. 마지막으로 각 블록들을 연계하여 풍속에 따른 터빈의 출력, 발전기의 발전전압 및 컨버터의 출력 변화와 같은 동특성 시뮬레이션을 수행하고, 무부하시 역기전력 시험 파형 및 풍력터빈의 TSR에 따른 Cp의 변화와 같은 실험결과가 동특성 시뮬레이션의 타당성을 입증하기 위하여 주어졌다.

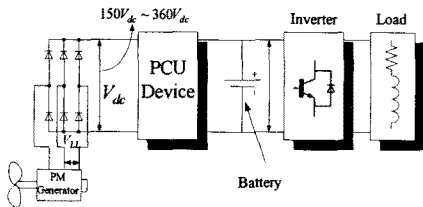


그림 1. 영구자석형 발전기가 사용된 풍력 발전시스템.

2. PMG가 사용된 풍력발전시스템

영구자석형 발전기가 사용된 풍력발전시스템의 대략적인 개념도는 그림 1과 같다. 20kW급 이하의 영구자석형 풍력발전시스템의 경우 단독 배터리 시스템과 연계되어 소 가구 규모의 전원으로 사용될 수 있고 용량이 높은 경우 인버터를 이용하여 계통연계도 가능하다. 본 논문에서 인버터를 고려하지 않고 PCU 장치 뒤에 일정전압의 배터리를 연결하였을 경우에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

3. 풍력 발전시스템의 수학적 표현

3.1 풍력터빈

풍력 터빈은 그것의 속도 대 출력 특성에 의해 특징지어진다. 임의의 바람속도에 대하여 풍력 터빈이 흡수할 수 있는 즉 바람에 의한 풍력 터빈의 출력은 식 (1)로

주어진다 [1].

$$P_t = 0.5C_p \rho A \omega \quad (1)$$

여기서 ρ 는 공기밀도 이고, A 는 터빈의 단면적이며 v 는 바람의 속도로 단위는 m/s이다. C_p 는 전력 계수로 풍력 터빈의 날개 끝 속도와 바람 속도의 비 즉 식 (2)로 주어지는 tip-speed ratio에 의해 결정된다.

$$\lambda = \omega_r R / v \quad (2)$$

여기서 ω_r 및 R 은 터빈의 속도 및 반경을 나타낸다.

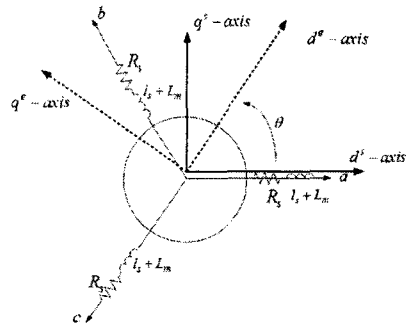


그림 2. 3상 영구자석 동기발전기의 등가회로 및 축 변환 관계.

3.2 영구자석형 동기 발전기

그림 2에 제시된 3상 영구자석 동기발전기의 전압방정식과 3상의 전류의 합이 0이라는 조건을 이용하면 식 (3)으로 주어지는 동기발전기의 전압방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_s + PL_s) & 0 & 0 \\ 0 & -(R_s + PL_s) & 0 \\ 0 & 0 & -(R_s + PL_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 V_a, V_b, V_c 는 고정자 a, b 및 c상전압, R_s 는 고정자 권선의 상전압, L_s 는 상당 동기인덕턴스로 $i_s + 3L_m/2$ 로 계산된다. i_s 는 전기자 권선의 누설 인덕턴스이고 L_m 은 권선의 end-turn인덕턴스와 자기인덕턴스의 합 즉 자화 인덕턴스이다. p 는 미분 연산자 즉 d/dt , i_a, i_b, i_c 는 고정자 권선의 각 상 전류 및 e_a, e_b, e_c 는 고정자 각 상에 유기되는 속도 기전력을 나타낸다. 식 (3)을 정좌표계에서의 dq 방정식으로 변환한 후 회전행렬을 곱하여 식 (4)로 주어지는 동기좌표계에서의 dq 전압방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_d^e \\ V_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(R_s + PL_s) & \omega_r L_s \\ -\omega_r L_s & -(R_s + PL_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

한편, 출력방정식과 토크방정식은 각각 식 (5)와 (6)으로 주어진다 [2].

$$P_o = \frac{3}{2}(V_d^e i_d^e + V_q^e i_q^e) \quad (5) \quad T_e = \frac{3}{2} P \phi_f i_q^e \quad (6)$$

3.3 DC-DC 컨버터

풍력 터빈의 에너지 변환 효율이 일반적으로 45% 이하이기 때문에 Buck-boost 컨버터는 최대출력을 추종하도록 동작되어야만 한다. 그림 1에 제시된 시스템의 배터리 전압은 거의 일정하므로 배터리의 입력 전류 즉 컨버터의 출력 전류를 항상 최대가 되도록 한다면, 최대출력 제어는 가능해진다 [3]. 그림 3은 풍력 터빈의 일반적인 출력 특성 및 최대출력 추종 제어방법을 보여준다. 그림에서 A-B의 경계를 나누는 실선이 각 풍속에 대한 최대출력을 연결한 선이고 A부분은 듀티가 증가할수록 출력이 커지거나 B부분은 반대의 양상을 보인다. 또한 풍속이 강할수록 출력 역시 증가함을 볼 수 있다. 최대출력 추종 제어 개념을 설명하기 위해, 그림 3에서 듀티가 d_1 인 경우 동작점이 출력이 P_1 인 지점일 때, d_2 와 d_3 사이의 범위에서 최대출력 동작 점을 찾기 위해 듀티 d 를 연속적으로 그리고 느리게 변경한다고 하자. 이를 그림 3에서 수식으로 표현하면 식 (7)과 같다.

$$d = d_1 + d_m \sin \omega t, d_m = d_3 - d_2 = d_1 - d_3 \quad (7)$$

동작점이 그림 3과 같이 A영역에 존재하는 경우 $P_3 > P_2$ 를 만족하며, 임의의 듀티 d_2 및 d_3 에 해당하는 출력 P_2 와 P_3 를 찾고 식 (8)로 표현되는 방정식에 의해 d_1 을 결정할 수 있다.

$$d_1 = K_p \int (P_3 - P_2) dt \quad (8)$$

결론적으로 A영역에서 듀티가 증가할수록 출력 전류가 증가하도록 하고 B영역에서는 출력전류가 감소하도록 하면 최대출력 추종제어가 완성된다고 볼 수 있다. 그림 4에 제시된 buck-boost 컨버터의 on 모드 및 off 모드 시 회로를 해석한 후 상태변수 평균해석법을 적용하면 식 (9)로 주어지는 상태방정식을 얻는다.

$$\dot{x} = Ex + FV_b = (dA + d_0C)x + (dB + d_0D)V_b \quad (9)$$

여기서 d 는 듀티비이고 d_0 는 $1-d$ 로 주어진다. 한편,

$$E = \begin{bmatrix} -\left\{ \frac{d(R_r + R_g)}{L_g + R_g R_r C_r + L_r} + \frac{R_r d_0}{L_r} \right\} & -\frac{d_0}{L_r} \\ \frac{d_0}{C} & -\frac{(R_L + d_0 R_b)}{C R_L R_r} \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} \frac{d_0}{d(L_g + R_g R_r C_r + L_r)} \\ \frac{R_L + d_0 R_b}{C R_b (R_L + R_b)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

한편, duty비 변화에 따른 출력전류의 주파수 특성을 알아보기 위하여서는 입력으로써의 duty비와 출력으로써의 출력전류와의 전달함수를 유도해야만 한다. 따라서 본 논문은 식 (9)의 상태변수를 포함한 몇 가지 변수를 식 (11)과 같이 다시 정의한다.

$$\begin{cases} v_b = V_b + \Delta v_b, x = X + \Delta x, v_{out} = V_{out} + \Delta v_o \\ d_0 = D_{off} - \Delta d, d = D_{on} + \Delta d \end{cases} \quad (11)$$

식 (11)를 식 (9)에 대입하면 식 (12)로 주어지는 전달함수를 얻을 수 있다.

$$\frac{\Delta V_{out}(s)}{\Delta D(s)} = \frac{n_{21}}{den(s)} (G_{11} I_r + G_{12} V_{out} + H_{11} V_b) + \frac{n_{22}}{den(s)} (G_{21} I_r + G_{22} V_{out} + H_{21} V_b) \quad (12.a)$$

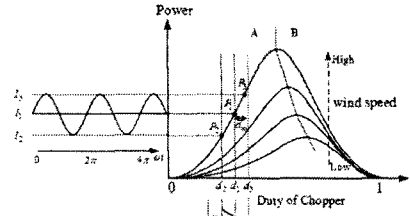


그림 3. 풍력 터빈의 일반적인 특성 및 최대 출력 추종 제어 방법.

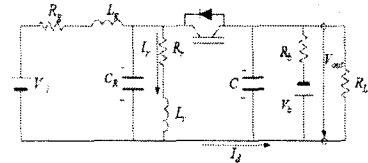


그림 4. buck-boost DC 컨버터 해석 모델.

$$\frac{\Delta I_d(s)}{\Delta D(s)} = \frac{R_L + R_b}{R_L R_b} \left\{ \frac{n_{21}}{den(s)} (G_{11} I_r + G_{12} V_{out} + H_{11} V_b) + \frac{n_{22}}{den(s)} (G_{21} I_r + G_{22} V_{out} + H_{21} V_b) \right\} i_d(t) \quad (12.b)$$

여기서 $den(s) =$

$$s^2 + \left(\frac{R_L + D_{off} R_b}{C R_L R_b} + \frac{L_r (R_r + D_{on} R_g) + D_{off} R_r (L_g + R_g R_r C_r)}{L_r (L_g + R_g R_r C_r + L_r)} \right) s + \frac{(R_L + D_{off} R_b) \{ L_r (R_r + D_{on} R_g) + D_{off} R_r (L_g + R_g R_r C_r) \}}{C R_L R_b L_r (L_g + R_g R_r C_r + L_r)} + \frac{D_{off}^2}{L_r C}$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{R_r}{L_r} & \frac{R_r + R_g}{L_g + R_g R_r C_r + L_r} & \frac{1}{L_r} \\ \frac{1}{C} & \frac{1}{C R_L} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} \frac{D_{off}}{D_{on} (L_g + R_g R_r C_r + L_r)} \\ \frac{1}{C (R_L + R_b)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

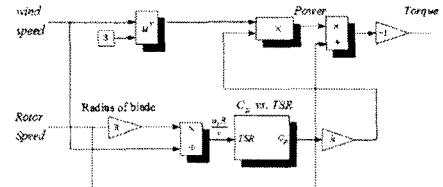


그림 5. 풍력터빈의 동특성 시뮬레이션 모델

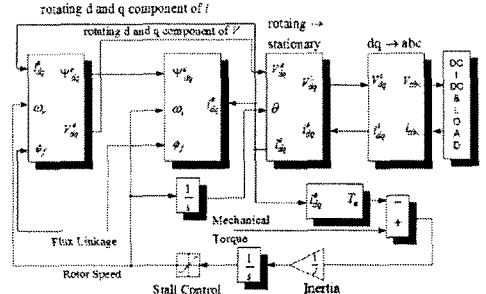


그림 6. 영구자석형 풍력발전기의 동특성 시뮬레이션 모델

4. 풍력발전시스템의 동특성 시뮬레이션 모델

그림 5와 6은 각각 풍력터빈 및 풍력발전기의 동특성 시뮬레이션 모델로 3장에 제시된 수식을 바탕으로 구성되었으며 MATLAB/SIMULINK를 통하여 구현하였다. DC-DC 컨버터의 동특성 시뮬레이션 모델은 3장의 수식에서 알 수 있듯이, 전달함수로 구성되어 동특성 시뮬레이션 모델을 따로 제시하지 않았다.

5. 동특성 시뮬레이션 및 실험결과

그림 7은 풍속과 터빈에 대한 속도, 출력 및 토크에 대한 동특성 시뮬레이션결과를 보여준다. 그림 7(a)에서 알 수 있듯이, 바람은 3초까지 풍속 8m/s로 불다가 증가를 시작하여 6초 이후에는 11m/s가 되도록 시뮬레이션 되었다. 풍력 터빈의 속도는 그림 7(b)에서 알 수 있듯이, 1.8초에 1200rpm에 도달하고 그 이후는 실속현상으로 인해 회전속도가 증가되지 않도록 시뮬레이션 됨을 알 수 있다. 식 (1)의 터빈 출력 식에 의해 회전속도가 일정한 경우 풍력터빈의 토크 및 출력에 영향을 주는 변수는 풍속이므로, 그림 7(c)와 그림 7(d)에 제시된 시뮬레이션결과에서 알 수 있듯이, 터빈의 회전속도가 1200rpm으로 일정해지는 1.8초 후에 풍속과 같은 추세의 출력 및 토크곡선이 얻어진다. 또한, 풍력터빈의 출력 및 토크는 6초 후에 각각 300W 및 -2.4Nm로 일정해짐을 볼 수 있는데, 이는 풍속이 11m/s에서 시뮬레이션 되었다는 것을 감안하더라도 풍력터빈의 정격에 부합함을 알 수 있다. 그림 8(a) 및 (b)는 각각 C_p vs. TSR 및 시간에 따른 TSR and C_p 곡선을 보여주며, 그림 8에서 알 수 있듯이 C_p 는 시간 및 TSR에 대해 0.5이하의 값을 가짐을 알 수 있다. 이 결과는 측정결과에 대체적으로 부합한다. 일반적으로 발전기의 발전전압은 회전속도에 비례하므로 앞 절에서 제시된 바와 같이 1.8초 이후 회전속도가 일정해졌기 때문에 그림 9의 상 발전전압에 대한 시뮬레이션 결과 역시 1.8초 이후 168V로 일정해짐을 볼 수 있다. 또한 회전속도 2235rpm에서 측정된 역기전력일지라도 역기전력이 회전속도에 비례한다는 것에 비추어볼 때, 시뮬레이션결과는 타당하다고 보인다. 그림 10(a)는 동작점 듀티비 $D=0.45$ 에서 듀티비의 미소변화 즉 dm 의 변화에 따른 출력전류, 전압, 전력의 특성을 보여준다. 여기서 dm 은 0.03으로 $-0.03+0.03$ 만큼 정현적으로 동작점 듀티비를 기점으로 변화함을 볼 수 있다. 이는 출력전류가 초퍼의 스위칭으로 인해 리플이 생겼을 경우 최대출력추종 제어가 되는지를 알아보기 위해 만들어진 함수이다. 시뮬레이션결과는 예상한대로 dm 이 최대일 때 출력전류가 최대가 되므로 최대출력 추종 제어가 이론적으로 가능함을 알 수 있다. 또한, 고정된 동작점에서 듀티비 미소변화에 따라 출력 전압은 거의 일정하므로 컨버터의 출력은 전적으로 전류에 의존함을 볼 수 있다. 또한, 그림 10(b)에서 알 수 있듯이 터빈의 회전속도가 증가할수록 출력이 커지고 출력이 최대가 되게 하는 동작점 듀티비는 작아짐을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문은 영구자석형 발전기를 갖는 풍력발전시스템의 동특성 해석에 대하여 다루었다. 먼저 풍력발전시스템을 구성하는 각 요소 즉 풍력터빈, 영구자석형 발전기 및 DC-DC컨버터를 수식으로 표현한 후 이를 바탕으로 동특성 모델링을 수행하였다. 마지막으로 풍력터빈, 영구자석형 발전기 및 DC-DC 컨버터에 대한 시뮬레이션 결과가 제시되었고, 발전전압 및 TSR에 따른 C_p 의 변화에 대한 실험결과가 시뮬레이션 결과의 타당성을 뒷받침하기 위하여 제시되었다. 향후 연구에서는 인버터를 고려한 풍력발전시스템의 동특성실험을 수행할 계획이다.

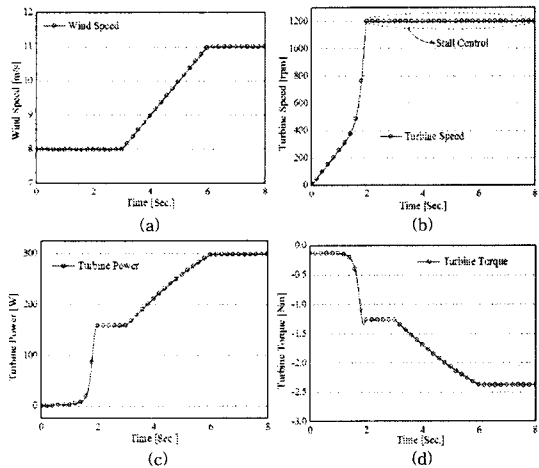


그림 7. 풍력터빈에 대한 동특성 시뮬레이션 결과 : (a) 풍속, (b) 터빈 속도, (c) 터빈 출력 및 (d) 터빈 토크.

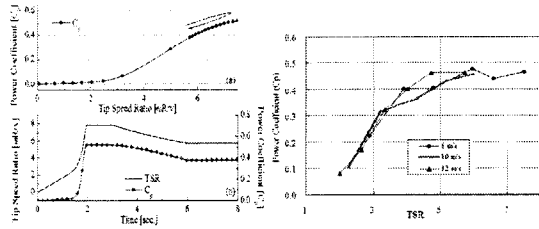


그림 8. C_p vs. TSR의 시뮬레이션 및 실험결과 비교

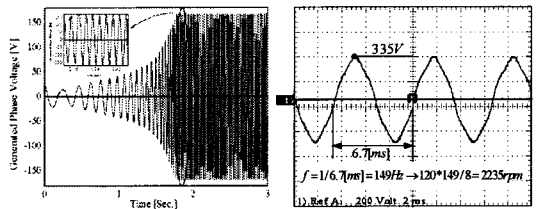


그림 9. 발전전압에 대한 시뮬레이션 및 실험결과와의 비교.

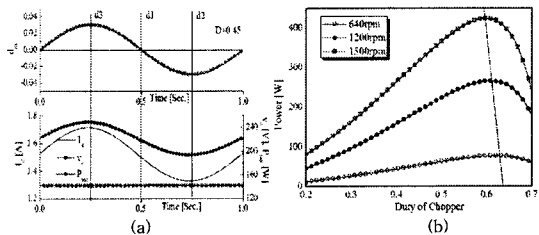


그림 10. (a) 듀티비 변화에 따른 출력 전류, 전압, 전력의 변화 및 (b) 다양한 회전속도에 대한 듀티비에 따른 출력변화.

[참 고 문 헌]

[1] Rajib Datta and V. T. Ranganathan, "Variable-Speed Wind Power Generation Using Dpubly Fed Wound Rotor Induction Machine-A Comparison with Alternative Schemes," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 17, no. 3, pp. 414-421, Sept. 2002.
 [2] 설송기, 전기기기 제어론, 브레인 코리아. 2002.
 [3] Naoki Yamamura, Muneaki Ishida and Takamasa Hori, "A Simple Wind Power Generating System with Permanent Magnet Type Synchronous Generator," *IEEE PEDS'99*, pp. 849-854, July 1999.