

매트릭스 컨버터를 이용한 가변속풍력발전시스템 시뮬레이션 모델 연구

차한주, 김우중
충남대학교

Simulation Model of Variable Speed Wind Turbine System Using Matrix Converter

Hanju Cha, Woojung Kim
Chungnam National University

Abstract - 본 논문에서는 매트릭스 컨버터를 이용하여 풍력을 에너지원으로 한 영구자석형 동기 발전기의 계통 연계방법을 제안하고 시뮬레이션으로 타당성을 검증한다. 풍속의 변화에 따라 영구자석형 동기발전기 속도가 변하며, 발전기 속도의 변화로 인해 발전전압의 크기와 주파수가 변한다. 이렇게 가변하는 발전 전압과 주파수를 계통전압의 고정된 전압 크기와 주파수로 변환하는 전력변환장치로서 기존의 PWM AC/DC/AC 컨버터 대신에 매트릭스 컨버터를 사용하여 직접적으로 AC-AC 변환을 한다. 매트릭스 컨버터가 가지고 있는, DC 링크 단의 대용량 캐패시터가 필요없고; 양방향전력흐름을 제어할 수 있고; 사용자가 원하는 출력전압의 크기, 주파수, 역률을 임의로 제어 할 수 있는 이점을 사용하여 매트릭스 컨버터를 이용한 영구자석형 동기발전기의 계통 연계에 대한 시뮬레이션 결과를 소개한다.

1. 서 론

최근 신재생 에너지에 대한 연구가 증가 하고 있다. 신 재생 에너지의 가장 큰 이점은 자원이 무한하고, 공해 물질을 배출하지 않는 점이다. 풍력은 이중에서 현재 활용도가 가장 높은 에너지 자원이다. 그리고 발전기를 어떤 형태로 사용하는가에 따라서 풍력발전을 분류 한다. 그 중에서 영구자석형 동기기를 선택해서 모델링한다. 영구자석형 동기기의 가장 큰 장점은 계자회로를 사용하지 않기 때문에 계자 손실이 없으므로 운전 효율이 증가 하게 된다. 계자회로에 별도로 전원을 공급하지 않아도 되기 때문에 구조도 간단해 진다. 그러나 회전자 속도에 비례해서 전압과 주파수가 달라지기 때문에 계통에 직접 연결할 수 없어 컨버터가 필요하며 계통과의 연결 컨버 터로 Matrix Converter를 선택하였다. 그림 1은 영구자 석형 동기 발전기를 이용한 풍력발전 시스템을 나타낸 것이며, 본 논문에서는 800kW급 영구자석형 동기 발전 기를 사용하여 그 결과를 소개한다.

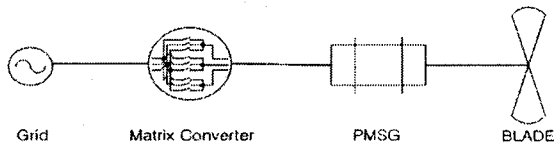


그림 1. 영구자석형 동기 발전기 모델

2. 매트릭스 컨버터 변조 방법

매트릭스 컨버터는 3상 AC 전압에서 다양한 전압과 주파수로 바로 변화 할수 있는 전력 변환 장치이다. 그림 2는 매트릭스 컨버터 회로 모델이다. 매트릭스 컨버 터의 출력 전압은 9개의 양방향 스위치에 의한 입력전압 의 조합으로 만들어 진다. 출력 전압은 아래 식(1) 과 같 이 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa} & S_{Ab} & S_{Ac} \\ S_{Ba} & S_{Bb} & S_{Bc} \\ S_{Ca} & S_{Cb} & S_{Cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

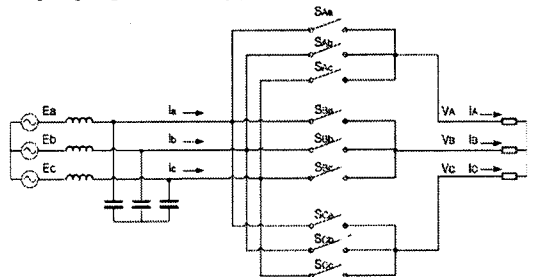


그림 2. 매트릭스 컨버터 전력 회로

매트릭스 컨버터는 에너지 저장 장치가 없어서 입력과 출력이 서로 강하게 영향 받는다. 하지만 제어방법에 따라 출력이 입력에 독립적으로 될 수 있으며, 본 논문에서는 [1]의 방법으로 제어한다. 이 방법은 입력 역률1.0 과 낮은 입력전류 THD(왜형을 종합평가함수) 를 보이고, 전압원의 왜곡과 불평형에 강한 운전 특성을 보인다.

그림 3에서 $E_{(a,b,c)}$ 와 $V_{(A,B,C)}$ 를 크기 비교를 통해 이 후로는 $E_{(max,mid,min)}$ 와 $V_{(max,mid,min)}$ 로 입·출력 전압 을 나타낸다. θ_i 는 입력전류의 위상각이고, θ_v 는 출력 전압의 위상각이다. E_{bas} 는 매 시간마다 입력전압 3상 절 대값 중 가장 큰 값을 갖는 상의 값이다. 그리고 이에 따른 스위치도 $S_1 \sim S_0$ 로 다시 명명된다. 입력전압과 출력 전압사이의 스위칭관계는 아래 그림 3과 같다. 아래 그림 3에서 ΔV_{max} 는 출력선간전압에서 가장 큰 선간전압 을 뜻한다. ΔE_{max} 는 E_{bas} 와 나머지 두상간의 선간전압 중 큰 선간전압을 뜻하고 ΔE_{mid} 는 다른 선간전압 이다. 이를 식 (2)와 같이 나타낼수 있다.

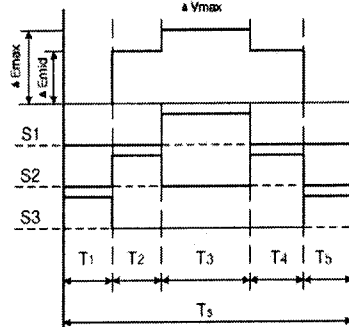


그림 3. PWM 패턴 발생

$$\Delta V_{max} = \frac{1}{T_3} [(T_2 + T_4) \cdot \Delta E_{mid} + T_3 \cdot \Delta E_{max}] \quad (2)$$

그리고 $(T_2 + T_4)$ 와 T_3 은 입력전류의 [2]배분계수에 의해서 식 (3)과 같이 구한다.

$$\alpha = \frac{T_2 + T_4}{T_3} = \frac{I_{mid}}{I_{min}} \text{ or } \frac{I_{mid}}{I_{max}} \quad (3)$$

입력측의 역률이 1일 때 I_{mid} , I_{min} 을 E_{mid} , E_{min} 로 계산할 수 있다. 다른 전압과 스위칭도 위와 같은 방식으로 계산된다.

3. 가변속 풍력발전 시스템 시뮬레이션

그림 4는 계통 전압에서부터 영구자석 발전기까지의 시스템을 간단히 나타낸 것이다. 계통전압 E_a , 매트릭스 컨버터 V_A , 동기리액턴스 L_s , 역기전력 E_A 로 구성되어 있으며, 발전기 역기전력 E_A 와 매트릭스 컨버터의 출력단 전압 V_A 간의 차이가 동기리액턴스 L_s 에 인가되어 전류가 발생되며 이를 제어하게 된다.

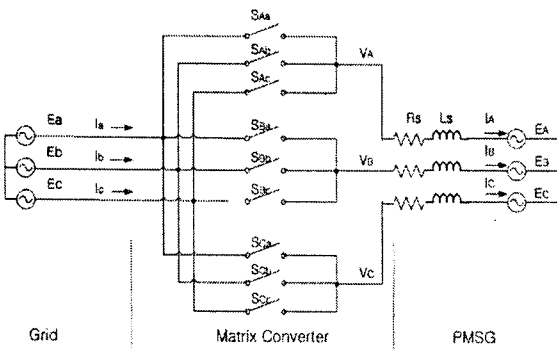


그림 4 매트릭스 컨버터를 사용한 가변속 풍력발전기

3.1 블레이드 출력 모델

풍속을 시간 간격을 두고 증가하는 형태로 구성하였으며, 풍속은 에너지의 시발점이 되고, 출력 계산의 근거가 되기 때문에 중요한 정보이다. Psim의 DLL 블록을 사용하여 시간에 따른 변화를 주면서 결과를 보았다. 먼저 블레이드 회전 단면을 통과할 때 갖는 에너지 P_{wind} 는 아래 식(4)와 같다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 [W] \quad (4)$$

A는 블레이드의 회전 단면적으로 $[m^2]$ 단위로 표시한다. ρ 는 공기밀도로 $1.225[kg/m^3]$ 이며, 그리고 시뮬레이션 기본 데이터는 [3]을 참조 했다. 그러나 바람이 가지는 에너지 P_{wind} 중 일부분만 기계적에너지로 변환되며, 이 비율을 출력계수(Power Coefficient)라고 하며 C_p 로 표현되고 식(5)로 관계를 나타낸다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 C_p(\lambda) [W] \quad (5)$$

여기에서 C_p 는 풍속과 블레이드 축의 각속도 ω_m (rad/s)의 관계가 주요 변수가 된다. 풍속과 회전속도의 관계를 주속비 λ 라고 한다. 그리고 주속비 계수값은 정격 풍속(13m/s), 정격회전속도(25rpm)에서의 값이다.

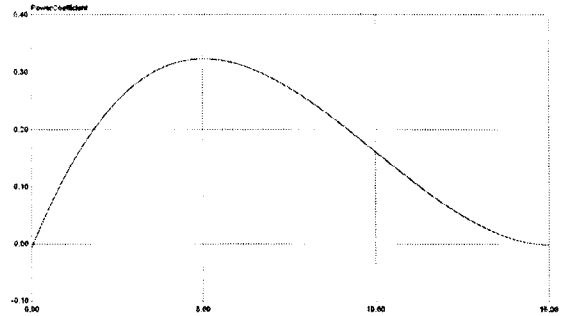


그림 5. 주속비와 C_p 와의 관계 그래프

그림 5의 주속비와의 관계 그래프에서 C_p 가 최대가 되는 값의 주속비를 찾으면 $\lambda=5.035$ 정도이고, 이때의 $C_p=0.323$ 의 값을 시뮬레이션에 사용한다.

이제 위에서 계산한 값으로 각 풍속에서 최대로 얻을수 있는 출력값 P_{blade} 를 계산하고 이 값을 발전기 제어에 활용한다.

3.2 영구자석형 동기발전기

영구자석형 동기 발전기의 $d-q$ 모델을 비롯한 발전기 전압식은 식(6)과 같다.

$$V_{dqs} = R_s I_{dqs} + L_s \frac{d}{dt} I_{dqs} + E_{dqs} \quad (6)$$

V_{dqs} : 발전기 출력단자전압

R_s : 권선저항

I_{dqs} : 발전기 전류

E_{dqs} : 발전기 역기전력

L_s : 동기 리액턴스

800kW급 발전기 파라미터 값은 [3]의 값을 사용했고 아래 표 1과 같다.

표 1 발전기 파라미터

R_s (stator resistance)	0.023
L_d (d-axis inductance)	16.798mH
L_q (q-axis inductance)	16.798mH
No. of Poles	84
Rated RMS line-to-neutral voltage	419.1V
Rated RMS line current	642A
Moment of inertia	7200kgm ²

3.3 발전기 출력제어

발전기의 출력은 매트릭스 컨버터의 출력 지령전압과 발전기의 역기전력 사이의 전압차로 인해 발생하는 전류에 의해서 결정된다. 앞서 계산한 각 풍속에 따른 최대 출력값을 역으로 환산해서 $I_{q.ref}$ 를 구할수 있다.

3.3.1 동기 위상각 검출

$I_{q.ref}$ 를 구하기에 앞서 발전기의 위상각(θ_e)을 검출해야 한다. 영구 자석동기 발전기의 동기 위상각은 그림 6과 같이 계산된다. 그리고 이부분을 먼저 시뮬레이션 해봄으로써 출력전류의 위상이 잘 맞는 것을 그림 7로 확인할 수 있다.

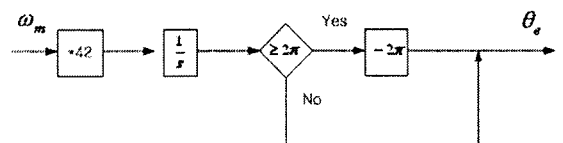


그림 6. 영구자석 동기 발전기의 동기 위상각 계산

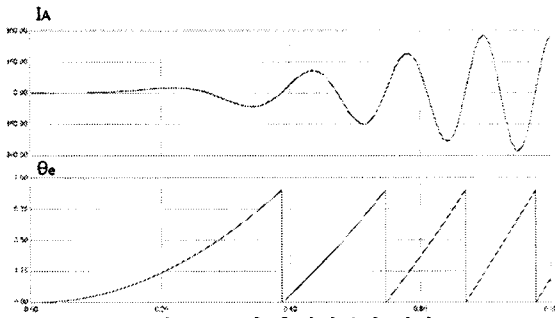


그림 7. θ_e 와 출력전류의 위상

3.3.2 전류 제어

가변할 발전기 속도에 해당되는 $I_{q.ref}$ 는 아래 식 (7)의 관계에서 구할 수 있다.

$$\frac{3}{2} \frac{P}{2} \psi I_{q.ref} = T_e^* \quad (7)$$

84극이고, 발전기 역기전력 상수 ψ 는 고정이어서 $I_{q.ref}$ 는 T_e^* 와의 관계로 나타내어지며, T_e^* 은 식 (5)를 ω_m 으로 나누는 값으로 나타낼 수 있고, 결과적으로 $I_{q.ref}$ 는 ω_m 의 관계식인 식(8)로 나타낸다.

$$I_{q.ref} = -140.0648 \times \omega_m^2 \quad (8)$$

출력 전류를 센서로 측정하여 앞서 구한 동기 위상각으로 정지좌표계 d-q 변환한후 $I_{q.ref}$ 를 따라가는 제어를 한다. 그림 8은 이러한 전류 제어의 블록도이다.

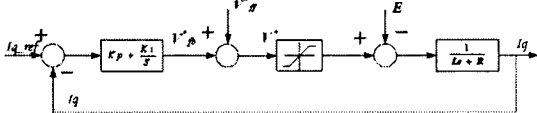


그림 8 q축 전류제어기 블록도

전류오차에 대한 피드백(V_{fb}^*)성분과 역기전력 보상을 위한 전향(V_{ff}^*) 성분으로 구성되며 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$V_{fb}^* = K_p(i_{q.ref} - i_q) + K_i \int (i_{q.ref} - i_q) dt \quad (9)$$

$$V_{ff}^* = E$$

여기서 E 는 역기전력으로 $\omega_c \psi$ 이다.

그림 7의 전류 제어 블록을 라플라스 변환하여 정리하면 식 (10)과 같이 된다.

$$I_q(s) = \frac{\frac{K_p}{L_s}s + \frac{K_i}{L_s}}{s^2 + \frac{K_p + R_s}{L_s}s + \frac{K_i}{L_s}} I_{q.ref}(s) \quad (10)$$

그리고 $K_p = L\omega_c$, $K_i = R\omega_c$ 로 하고 식을 다시 쓰면 식 (11)과 같이 정리된다.

$$\frac{I(s)}{I_{q.ref}(s)} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (11)$$

발전기의 출력전류 주파수가 정격에서 17.5Hz 임으로 차단 주파수를 250Hz로 설정하여 $\omega_c (= 2\pi \times 250)$ 를 구하고 K_p 와 K_i 값을 설정한다. 이로써 원하는 전류 주파수 대역을 설정할 수 있다. 이제 d축 $I_{d.ref}$ 의 제어를 해야 하는데 이 값은 발전기 d-q축의 자속제어 부분이고 발전기 출력에서의 무효분 조절을 의미함으로 0으로 설정하고 제어 방식은 q축 전류 제어기와 같은 구조이다.

3.4 시뮬레이션 결과

위에서 설정한 순서대로 Psim에서 DLL 파일을 만들고 먼저 매트릭스 컨버터의 입출력 파형의 결과를 그림 9

에 나타내었다. 입력전압 V_a , 입력전류 I_a 와 출력 전압 V_A 와 출력 전류 I_A , 출력선간전압 V_{AB} 를 나타내었다.

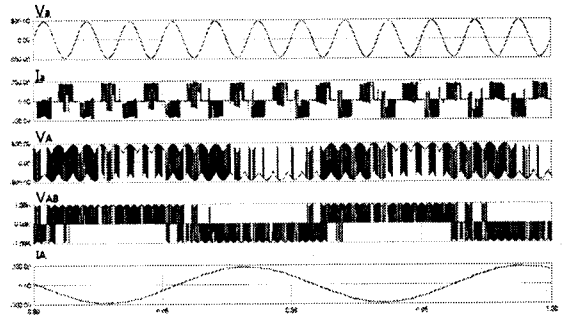


그림 9 $V_a, I_a, V_A, I_A, V_{AB}$

그림 9에 나타낸 바와 같이 매트릭스 컨버터의 출력 파형이 잘 나온 것을 알 수 있다. 출력 전압과 출력 전류의 위상이 약간 차이가 나는데, 발전기의 인덕턴스 성분에 의한 것이다. 그림 10에는 I_q, I_d 와 $I_{q.ref}, I_{d.ref}, T_e, P$ 를 나타내었다.

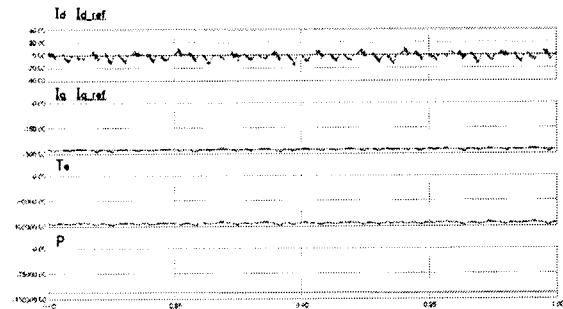


그림 10 I_q, I_d 와 $I_{q.ref}, I_{d.ref}, T_e, P$

I_d 의 제어 부분에서 약간의 오차를 보이는데 I_q 의 크기가 약 270A 정도인 것을 감안하면 제어가 잘 되고 있는 것으로 판단된다. I_q 는 $I_{q.ref}$ 를 잘 따라간 모습을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 800kW급 영구자석형 동기 발전기로 풍력발전시스템을 모델링하고 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하고 결과를 소개하였다. 블레이드를 전동기로 대체하여 모델링 하고 매트릭스 컨버터를 적용하여, PMSG의 출력을 바탕으로 한 매트릭스 컨버터 출력단 전류 제어가 이론대로 잘 되고 있음을 알았다. 이후에 시뮬레이션을 바탕으로 연구실에 맞는 용량의 PMSG와 매트릭스 컨버터로 구현한 축소 발전 시스템을 만들어 지속적인 연구를 할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Watanabe, E.; Ishii, S.; Yamamoto, E.; Hara, H.; Jun-Koo Kang; Hava, A.M.; "High performance motor drive using matrix converter", Advances in Induction Motor Control (Ref. No. 2000/072), IEE Seminar, 23 May 2000 Page(s):7/1 -7/6
- [2] Oyama, J.; Xiarong Xia; Higuchi, T.; Yamada, E.; "Displacement angle control of matrix converter" Power Electronics Specialists Conference, 1997. PESC '97 Record., 28th Annual IEEE, Volume 2, 22-27 June 1997 Page(s):1033 - 1039
- [3] 송승호, "풍력발전 계통연계식별 시뮬레이션 모델 개발", 산업자원부, May 2004
- [4] Han Ju Cha & P.N. Enjeti, "Matrix converter-fed ASDs: a ride-through module for arix converters" IEEE Industry Applications Magazine, July-Aug. 2004, pp. 33-39.