

PSCAD/EMTDC를 이용한 태양광발전의 모델링에 관한 연구

손 준호¹, 노 대석¹, 김 찬혁², 왕 용필²
한국기술교육대학교¹, 한국전기산업연구원²
e-mail: dsrho@kut.ac.kr

A Study on the PV System Modeling Based on the PSCAD/EMTDC

Joonho Son¹, Daeseok Rho¹, Chanhyeok Kim², Yongpeel Wang²
Korea University of Technology and Education¹, ERIK²

요 약

본 논문에서는 태양광전원용 3상 인버터의 배전계통 연계시의 동특성을 이해하고 해석하기 위하여, dq좌표변환과 원하는 전압의 크기와 위상을 만들어 내기 위해 사용한 비례적분 제어기(Proportional Controller : PI), 출력전류 제어를 위한 전류제어 알고리즘, 2상/3상 변환 및 인버터의 Sinusoidal PWM방식의 인버터 설계에 대한 이론적인 알고리즘을 제시하였다. 이를 바탕으로 PSCAD/EMTDC를 이용한 태양광발전의 모델링을 수행하여, Simulation 결과와 산술적 해석의 비교, 분석을 통하여 모델링의 유효성을 확인하였다.

1. 서 론

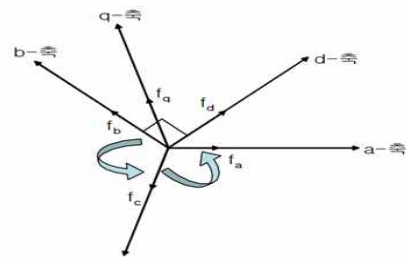
최근 태양광발전이 배전계통에 연계 운전되고 사례가 증가하고 있는 실정이다. 태양광전원이 배전계통에 연계 시 수용가에 미치는 영향과, 계통에서 태양광전원에 미치는 영향을 분석하기 위해서, 태양광발전의 모델링이 중요하다. 본 논문에서는 전력계통의 해석분야에 자주 사용되고 있는 상용 소프트웨어 PSCAD/EMTDC를 통하여 태양광발전 시스템을 모델링하여, Simulation결과와 산술적 해석의 비교, 분석을 통해 모델링의 유효성을 확인하였다.

2. 태양광발전의 제어 알고리즘

2.1 d-q 좌표평면 해석

일반적으로 3상 인버터 출력제어를 위해서는 d-q 축 변환행렬이 사용된다. 3상 인버터의 동특성을 이해하고 해석하는데 d-q좌표계의 모델링이 중요하다. 3상 인버터를 a, b, c좌표계에서 모델링하면 인버터에 접속되는 인덕턴스 전류, 전압 등이 시간에 따라 교류로 변하므로 동특성 해석 및 제어기 설계가 매우 어렵다. 따라서 d-q좌표계를 이용하여 3상의 교류 값을 일정한 직류 값으로 변환하여 해석하여야 한다. d-q좌표계를 적용하면 시간 또는 주파수에 따라 변화하는 파라미터가 상수가 되며, 3상이 평형인 경우 영상분을 제거할 수 있어 시스템의 차수를 줄일 수 있으며, 마지막으로 동기 좌표계로

dq 축을 선정하면 전압, 전류 등의 전기적 신호가 교류에서 직류로 변환되어 제어기 설계가 용이하다.



[그림 1] abc축과 dq축간의 변환

그림 1과 같이 f_d , f_q 는 정지된 또는 임의의 속도로 회전하는 dq축상의 변수이며, 만일 abc상이 균형이라면 abc좌표계와 dq좌표간의 변수는 아래 식 (1)과 같으며, 이때 abc좌표계에서 dq좌표계로 전환되는 전달함수 K_{abc}^{dq} 은 식 (2)와 같다.

$$f_{dq} = K_{abc}^{dq} \cdot f_{abc} [\text{Hz}] \quad (1)$$

$$f_{dq} = [f_d \ f_q]^T, f_{abc} = [f_a \ f_b \ f_c]^T [\text{Hz}]$$

$$K_{abc}^{dq} = \frac{2}{3} \begin{Bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

그리고 식 (3)에서 dq축의 회전각의 초기치는 d축의 a상에 일치되어 있다는 가정에서 일반적으로 0이며, dq축 회전속도를 0으로 하여 식 (2)에 $\theta=0$ 을 대

입하면 식(4)과 같이 된다.

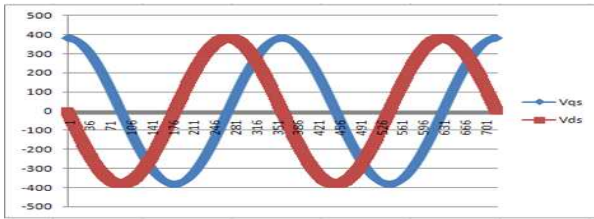
$$\theta(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau + \theta(0) \quad (3)$$

$$K_{abc}^{dq} = \frac{2}{3} \begin{Bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$V_d^s = \frac{2}{3} (V_a - V_b - V_c) \quad (5)$$

$$V_q^s = -\frac{1}{\sqrt{3}} (V_b - V_c)$$

식 (5)와 같이 3상의 교류전압은 d-q축 정지좌표계의 2상의 교류전압으로 변환된다.



[그림 2] d-q정지좌표 변환

식 (5)를 이용하여 그림 2의 엑셀그래프를 출력하였다. 3상의 교류전압이 d-q좌표 변환에 의해서 2상의 교류전압으로 바뀌었음을 확인 할 수 있다. 3상의 교류를 직류로 변환하기 위해서는 d-q정지좌표를 d-q동기좌표로 변환해야 한다. 즉 동기 d-q좌표계에서는 q축을 동기속도 ω_e 로 회전시켜 실제 교류의 전기 신호가 직류로 변환된다. 정지좌표계의 dq변수를 동기좌표계의 dq변수로 변환하기 위한 식은 아래의 식 (6)과 같다. 여기서 변환 전달함수 K_s^e 는 식 (7)과 같다.

$$f_{dq}^e = K_s^e \cdot f_{dq}^s [\text{Hz}] \quad (6)$$

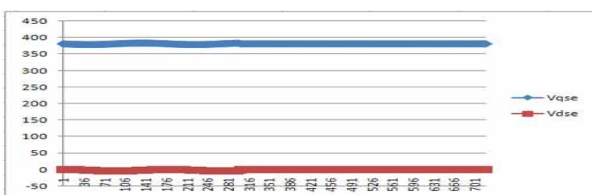
$$K_s^e = \begin{Bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$V_d^e = \cos\theta V_d^s - \sin\theta V_q^s \quad (8)$$

$$V_q^e = \sin\theta V_d^s + \cos\theta V_q^s$$

식 (9)와 같이 d-q축 정지좌표계의 2상 교류가 d-q축 동기좌표계의 직류로 변환되었으며, 그림 3과 같이 확인할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_d^e \\ V_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \times \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (9)$$



[그림 3] d-q동기좌표 변환

결론적으로 식(9)와 같이 3상의 교류에서 2상 교류변환 전달함수(K_{abc}^{dq})와 직류변환 전달함수(K_s^e)을 곱하면 된다. 이때 3상 교류의 최대치는 동기좌표 변환된 q축 전압과 거의 같으며, 변환된 직류를 전류제어알고리즘에 적용하여 쉽게 전력변환이 가능함을 알 수 있다.

2.2 전류제어 알고리즘

전류를 제어하기 위해서 원하는 전력에 대한 레퍼런스 전류를 정하여야 한다. 평형 3상 시스템에서 순시 유효전력 P 및 순시 무효 전력 Q는 dq축의 변수들을 이용하여 식 (10)과 같이 표현된다.

$$P = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad Q = \frac{3}{2} (V_d I_q - V_q I_d) \quad (10)$$

V_d, V_q = d축 및 q축에서의 출력전압

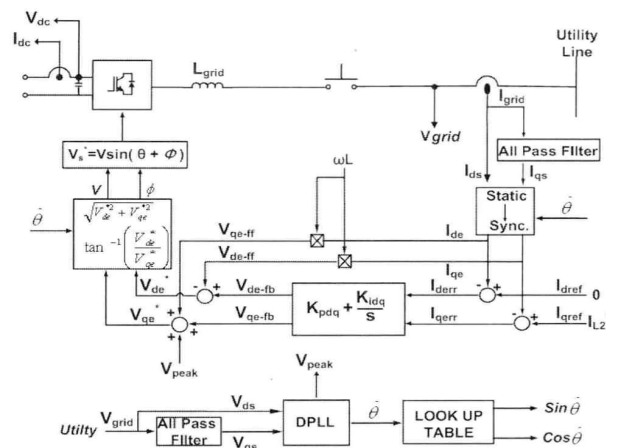
I_d, I_q = d축 및 q축에서의 출력전류

여기서 동기속도로 회전하는 dq축에서의 V_q 는 출력단의 순시전압의 크기와 동일하고 V_d 는 0임으로 식 (11)과 같이 표현된다.

$$P = \frac{3}{2} |V_0| I_q, \quad Q = -\frac{3}{2} |V_0| I_d \quad (11)$$

$|V_0|$ = 인버터 순시전력전압의 크기

즉 출력전압의 크기(V_0)와 연계시스템의 교류전압과 동일한 상수(V_a)가 같다고 가정하면, 순시 유효전력(P)은 인버터 출력 전압 크기(V_0)와 인버터 출력 전압의 크기와 동상인 선로전류 크기(I_q)에 비례함을 알 수 있으며, 순시 무효전력(Q)은 인버터 출력 전압 크기(V_0)의 인버터 출력 전압과 90도 위상차이가 나는 선로전류 크기(I_d)에 비례한다. 그러므로 P는 I_q 에 의해 조절이 가능하며, Q는 I_d 에 의해 조절이 가능하다. 그림 4는 인버터의 전류 제어기 블록도이다.



[그림 4] dc/ac 인버터 전류 제어기 블록도

그림 4의 전류제어 알고리즘을 수식으로 표현하면 식(12), (13)과 같다.

$$V_{qe-fb} = (I_{qref} - I_{qe}) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) + I_{de} \cdot \omega L + V_m \quad (12)$$

$$V_{de-fb} = (I_{dref} - I_{de}) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_{qe} \cdot \omega L \quad (13)$$

여기서 I_{qref} 는 원하는 태양광발전의 출력량에 대한 기준 전류이며, I_{qe} 는 계통전류값을 나타낸다. 이때 I_{qref} 값과 I_{qe} 의 차이만큼 계통에 전류의 증·감하여 P 조절이 가능하게 된다. $k_p + \frac{k_i}{s}$ 는 PI 제어를 나타내며 식(14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\text{조작량} = Kp\chi(\text{편차}) + Ki\chi(\text{누적값}) V_d^e$$

P제어는 가장 기본적인 제어이며 출력주파수를 제어하여 편차가 비례관계를 가지도록 한다. 편차와 출력주파수의 계수는 비례이득 (Kp:Proportional Gain)이라고 하며, 만약 Kp를 높게 설정하면 편차가 빠른 변화를 나타내기 때문에 시스템의 응답은 빨라지며 시스템은 불안정하게 된다. 제어장치에 동작신호 Z(t)가 주었을 때, 조작량 y(t)가 얻어지는 경우, 즉 조작량 y(t), 동작신호 Z(t)에 비례하여 변환 때의 그 관계식은 $y(t) = kz(t)$ 이다. 한편, I제어는 편차를 적분하여 출력 주파수를 수정하기 위해서 사용되며, 출력 주파수의 적분보정은 편차를 전체시간에 걸쳐 누적함으로써 수행하게 되고 결과적으로 편차가 0이 된다. 적분게인(Ki: interal Gain)은 얼마나 자주 편차를 적분할 것인가의 계수 적분게인의 역수는 적분시정수(Ti : Integral Time Constant $Ti=1/ki$)이며, 적분동작 관계식은 $y(t) = k \int z(t)dt$ 이며, 적분동작은 단독으로 사용되지 않으며 P동작과 결합하여 쓰이며 적분동작은 P동작에서 발생할 수 있는 잔류편차를 없앨 수 있다.

변화된 전류와 관계없이 계통전압의 크기와 위상을 출력전압과 같도록 비례이득을 곱하며 회전 좌표계의 직류값 인 V_{de-fb} , V_{qe-fb} (그림3 참조)를 만든다. 적분시정수는 보통 0.0001~0.001범위에서 설정된다. 그리고 3상 정지 좌표계로 표현된 수식을 상 정지 좌표계로 변환하고 다시 ω 로 회전하는 2상 회전 좌표계로 표현하면 식 (15)과 같다. 그리고 i_a 에 관한 식으로 정리하면 식 (16), (17)이 된다. 이때 d-q 전류제어계에 있어서 d축에서 q축으로의 간섭분($-\omega L_s i_d$)이 존재하며 q축에서 d축으로의 간섭분($\omega L_s i_q$)이 존재한다. 그러므로 간섭분을 미리 보상하는 비간섭 전류제어를 한다.

$$\begin{bmatrix} E_q \\ E_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s + R & \omega L_s \\ -\omega L_s & L_s + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$L_s \frac{di_a}{dt} = -i_q R + E_q - V_q - \omega L_s i_d \quad (16)$$

$$L_s \frac{di_a}{dt} = -i_d R + E_d - V_d + \omega L_s i_q \quad (17)$$

V_m 은 인덕터의 전압크기와 계통전압크기 일정하게 만든다.

2.3 전원 위상 검출 및 Sinusoidal PWM

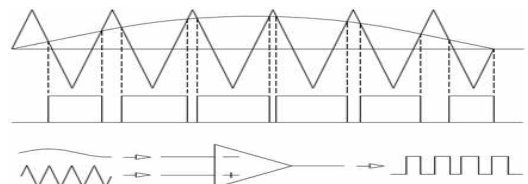
계통전압의 위상각은 계통연계시스템에 있어 가장 기본적인 중요한 정보이다. 계통연계 시스템에서 정확하고 빠른 계통전압의 위상각 검출은 정확한 기준생성을 위해 필요하다. 그러므로 전원전압과의 위상을 동기 시키기 위한 전원 위상 검출부가 필요하다. 검출된 위상을 기준으로 120° 위상차이로 조정하며, PI제어기를 통한 동기좌표의 V_q^e 와 V_d^e 는 식 (18), 식 (19)에 의해서 3상의 전압으로 변환된다.

$$V_d^s = \cos\theta V_d^e - \sin\theta V_q^e \quad (18)$$

$$V_q^s = \sin\theta V_d^e + \cos\theta V_q^e$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_d^s \\ V_q^s \end{bmatrix} \quad (19)$$

Sinusoidal PWM을 이용하여 3상 정현파 구현이 가능하다. 그림 5와 같이 아날로그 파형과 기준 삼각파가 비교기(Comparator)에 입력하여 아날로그신호가 큰 경우에는 ON 신호를 출력하며, 삼각파신호가 큰 경우에는 OFF 신호를 출력하여 아날로그 신호의 크기에 비례하는 펄스폭을 갖는 PWM 파형이 일정한 주기로 발생하여 120° 위상 차이가 나는 3상 전압이 출력된다.



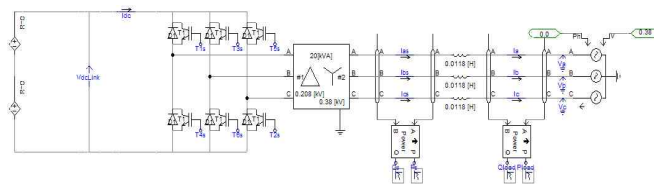
[그림 5] Sinusoidal PWM 개념

3. PSCAD/EMTDC 모델링 및 시뮬레이션 분석

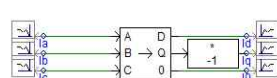
PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광발전을 모델링하여 수치해석으로 검증한다.

3.1 PSCAD/EMTDC를 이용한 태양광발전 모델링

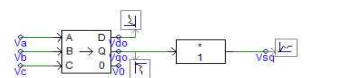
PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광발전의 제어기를 모델링하면 그림 6 - 그림 14와 같다.



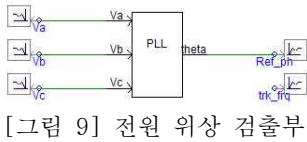
[그림 6] 태양광발전 연계계통 단선도



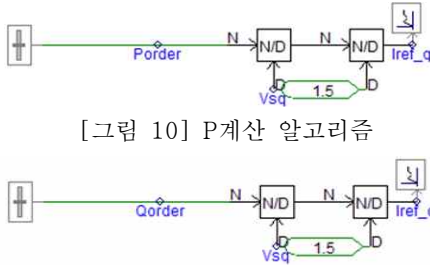
[그림 7] 전류동기좌표변환



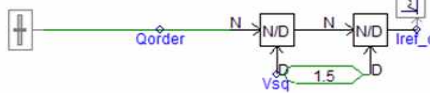
[그림 8] 전압동기좌표변환



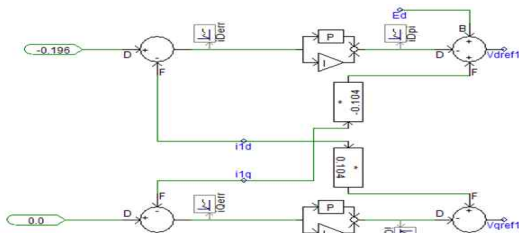
[그림 9] 전원 위상 검출부



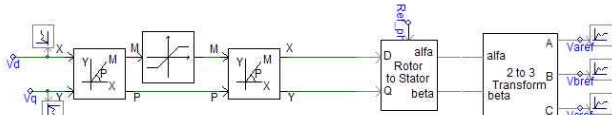
[그림 10] P계산 알고리즘



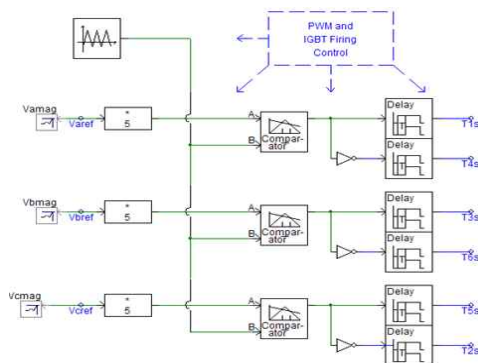
[그림 11] Q계산 알고리즘



[그림 12] 전류 제어 알고리즘



[그림 13] 직류-> 3상 교류변환



[그림 14] Sinusoidal PWM

3.2 시뮬레이션 및 분석

30kw의 태양광발전을 모의를 가정하여 수치 해석하였다. 먼저 유효전력에 대한 관계식은 식(20)과 같다. 여기서 E_{sd} , I_{sd} 는 0이다. 그러므로 전력에 관한 기준전류 I_{ref-q} 를 구할 수 있다.

$$Power = \frac{3}{2} [(V_{sq} \times I_{sq}) + (V_{sd} \times I_{sd})] \quad (20)$$

$$I_{ref-q} = \frac{2}{3} \div \left[\frac{power}{V_{sq}} \right]$$

$$-0.196 = \frac{-2}{3} \div \left[\frac{0.03}{0.1020} \right]$$

그리고 무효전력에 대한 관계식은 식 (21)과 같

다.

$$I_{ref-q} = \frac{2}{3} \div \left[\frac{power}{V_{sq}} \right] \quad (21)$$

$$0 = \frac{-2}{3} \div \left[\frac{0}{0.310} \right]$$

그리고 PI제어의 비례이득은 식(22)과 같이 얻을 수 있다. 적분시정수는 0.0001로 정하여 시뮬레이션 하였다.

$$[(I_{ref-q} - I_q) \times Kp] + V_{sq} + \omega L \times I_d = V_q \quad (22)$$

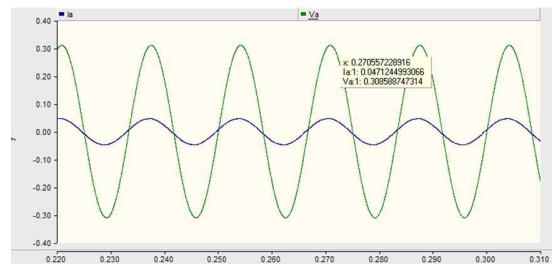
$$[0.0264 \times Kp] + 0.206 + 0.0124 = 0.310$$

$$[0.0264 \times Kp] + 0.223 = 0.310$$

$$[0.0264 \times Kp] = 0.081$$

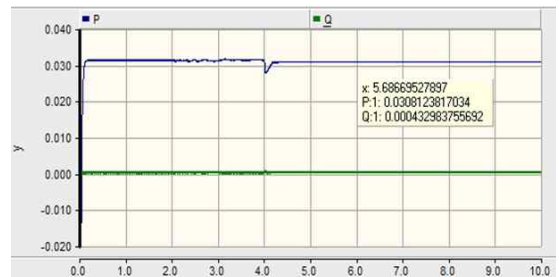
$$Kp = 3.33$$

그림 15와 같이 전압, 전류가 동상임으로 전류제어 알고리즘의 유효성을 확인 할 수 있다. 또한 Kp(비례이득)와 적분시정수의 적절성도 확인 할 수 있다.



[그림 15] 인버터 계통연계 전압 및 전류

그림 16과 같이 30kw의 출력을 확인 할 수 있으며, 무효전력은 0kw임을 알 수 있다.



[그림 16] 인버터 계통 연계 유효전력 및 무효전력

4. 결 론

본 논문에서는 태양광발전을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링 하였으며, Simulation수치와 산술적 해석의 비교/분석을 통해 모델링의 유효성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 황인호 외 3인, “계통연계 태양광발전시스템의 제어기법 및 연계운전 특성”, 전력전자학술대회 논문집, 2003.5
- [2] 차한주 외 2인, “전류형 MPPT를 이용한 3kw 태양광 인버터 시스템 제어기 설계 및 구현”, 대한전기학회 논문집, 2008.9
- [3] 김슬기 외 2인, “PSCAD/EMTDC를 이용한 계통연계형 태양광발전시스템의 모델링 및 모의 해석”, 대한전기학회 논문집, 2005.2