# PSCAD/EMTDC를 이용한 태양광발전의 상세 모델링에 관한 연구

유경상\*, 노대석\*, 김찬혁\*\*, 왕용필\*\*
\*한국기술교육대학교, \*\*한국전기산업연구원
e-mail: dsrho@kut.ac.kr, ryu3212@kut.ac.kr

# The Detailed Modeling for PV System Based on the PSCAD/EMTDC

Kyung-Sang Ryu\*, Dae-Seok Rho\*, Chang-Hyeok Kim\*\*, Yong-peel Wang\*\*

\*Korea University of Technology and Education, \*\*ERIK

#### 요 약

본 논문에서는 태양광발전의 3상 계통연계형 인버터를 모델링하기 위하여, d-q좌표변환을 통한 상태방정식을 유도하고, 전류제어 알고리즘과 Sinusoidal PWM방식의 이론적 알고리즘 제시하였다. 이를 바탕으로 배전계통의 상용소프트웨어인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 태양광발전의 모델링을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과와 이론적인 수치해석과의 비교, 분석을 통하여 본 연구에서 제시한 모델링의 유효성을 확인하였다.

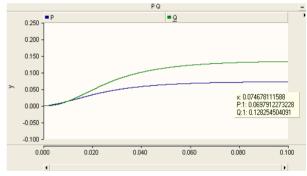
## 1. 서론

2011년 발생한 일본의 원전사태로 인한 환경문제와 국내에서 발생한 순환 정전 사태로 인해 대규모 분산전원 도입의 필요성이 더욱더 부각되고 있다. 그러나 태양광이나 풍력 같은 분산전원이 계통에 연계될 때 전압, 주파수, 위상 등이 맞지 않을 경우 계통 운영상 문제점이 발생 될 수 있어, 이에 따른 영향을 분석하기 위해서 계통연계형 인버터의 모델링이 중요하다.

이에 본 논문에서는 태양광 발전을 모델로 하여 d-q좌표변환과 전류제어 알고리즘, Sinusoidal PWM에 대한 이론적인 배경을 바탕으로 PSCAD/EMTDC로 기존의 모델링이 갖고 있던 문제점을 개선하여 모델링을 다시 수행하였다. 모델링 된 인버터는  $10^{\sim}400$ kw의 출력과 함께 무효전력도 제어가가능하며 Simulation 결과와 산출된 수식을 비교, 분석을 통해 유효성을 확인하였다.

### 2. 기존의 PSCAD/EMTDC 모델링 문제점 분석

기존의 모델링된 계통연계형 인버터는  $10^{\circ}60(KW)$ 의 낮은 출력과 함께 무효전력의 경우 전혀 제어가 되지 않는 문제점을 가지고 있다. 그림 1은 기존의 모델링으로 수행된 80kw 인버터로 유효전력 값이 제대로 나오지 않을뿐더러 무효전력도 제어가 되지 않음을 확인할 수 있다.



[그림 1] 80[Kw]의 인버터 계통연계 유·무효전력

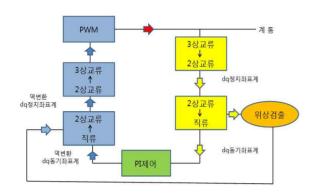
이에 유효전력의 출력을 최대한 향상 시키고, 요즘 중요한 이슈로 떠오르고 있는 무효전력도 제어할수 있는 계통연계형 인버터를 모델링 하였다. 이를위해서는 PV모델링의 이론적 배경인 d-q좌표변환과전류제어 알고리즘, Sinusoidal PWM에 관한 이론적배경과 관련 수식의 이해가 필수적이다.

# 3. PV의 제어 알고리즘

# 3.1 3상 계통연계형 인버터 제어

그림 2는 3상 계통연계형 인버터의 전체적인 제어 블록도를 나타낸 것이다. 먼저 3상 교류를 dq정지좌 표계를 통하여 2상 교류로 변환 후, dq동기좌표계를 통해 2상 교류를 직류로 변환한다. 그리고 원하는 전력을 제어하기 위해 PI제어기를 이용하여 전류 제어를 수행하며, 디커풀링 회로이기 때문에 유효전력

과 무효전력을 서로 독립접으로 제어할 수 있다. 한편 PI 제어로 변환된 직류 값은 검출된 위상을 기준으로 계통전압과 일치시킨 후, 직류에서 2상 교류로, 2상 교류에서 3상 교류로 변환된다. 계통연계용 인버터는 일반적으로 IGBT 소자를 사용하는 전류제어형 전압원 인버터이다. 변환된 3상의 전압은 DC를 AC로 변환하기 위한 IGBT의 구동신호로 입력되며이 부분에서 PWM(Pulse Width Modulation)이 필요하다. 본 논문에서도 PSCAD/ EMTDC를 이용하여 3상 PWM 인버터를 스너버회로와 Free-Wheeling 다이오드가 내장된 IGBT 모듈로 계통연계형 시스템의 DC-AC변환부를 모델링하였다.

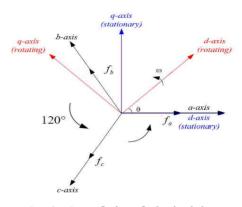


[그림 2] 3상 계통연계형 인버터 제어블록도

# 3.2 d-q 좌표변환 해석

3상 인버터를 a, b, c 좌표계에서 모델링하면 인버터에 접속되는 인덕턴스 전류, 전압 등이 시간에 따라 교류로 변하므로 동특성 해석 및 제어기 설계가매우 어렵다. 그러나 d-q좌표변환을 이용하면 시간또는 주파수에 따라 변화하는 파라미터가 상수가 되어 제어기 설계가 용이하다. 또한 3상이 평형인 경우 영상분을 제거할 수 있어 시스템의 차수를 줄일수 있으며, 유효전력 및 무효전력을 상호 독립적으로 제어할 수 있다.

그림 3은 abc축과 dq축간의 변환관계를 나타내며  $120^{\circ}$ 위상차를 갖는  $f_a, f_b, f_c$ 는 abc축에 정지되어시간에 따라 상하로 변하는 변수로 전압, 전류 및 자속 등의 상변수를 나타낸다. 따라서 식 (1), (2)와 같이 abc 세 축에서의 변수를 d-q변환행렬을 통하여 a축 변수와 동일한 위상각을 가지고 동기속도로회전하는 dq축 상의 변수로 변환할 수 있다. abc상이 평형일 경우, abc좌표계를 dq좌표계로 변환하기위한 전달함수는 식 (3)과 같으며, 반대로 dq좌표계를 abc좌표계로 역변환하기위한 전달함수는 식 (4)와 같다.



[그림 3] abc축과 dq축간 의 변환

$$f_{da} = T(\theta) \cdot f_{abc}[Hz] \tag{1}$$

$$f_{dg} = [f_d f_g]^T, f_{abc} = [f_a f_b f_c]^T [\text{Hz}]$$
 (2)

여기서,  $f_d, f_q$ : 정지된 또는 임의 속도로 회전하는  $\mathrm{dq}$ 축상의 변수

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin\theta - \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) - \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{pmatrix}$$
(3)

$$T(\theta)^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin \\ \cos(\theta - \frac{2}{3\pi}) & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{pmatrix}$$
(4)

# 3.3 전류제어 알고리즘

평형 3상 시스템에서 순시 유효전력(P) 및 순시 무효전력(Q)은 dq축의 변수들을 이용하여 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$P = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad Q = \frac{3}{2} (V_d I_d - V_q I_q)$$
 (5)

여기서,  $V_d$ ,  $V_q$ : d축 및 q축에서의 출력전압  $I_d, I_a: \mathrm{d} \div \mathbb{Q} \ \mathrm{q} \div \mathrm{d} \to \mathrm{d}$ 

동기속도로 회전하는 d-q축에서의  $V_q$ 는 출력단의 순시전압의 크기와 동일하고  $V_d$ 는 0이기 때문에 아래의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{3}{2} |V_0| I_q, \ Q = -\frac{3}{2} |V_0| I_d \tag{6}$$

여기서, | V<sub>o</sub>| : 인버터 순시전압의 크기

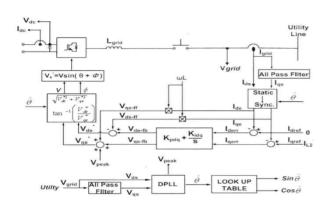
순시 유효전력(P)은 인버터 출력 전압 크기( $V_o$ )와 동상인 선로전류 크기( $I_q$ )에 비례함을 알 수 있으며, 순시 무효전력(Q)은 인버터 출력 전압 크기( $V_o$ )와

90도 위상차를 이루는 선로전류의 크기( $I_d$ )에 비례한다. 따라서 P는  $I_q$ 에 의해 조절 가능하며, Q는  $I_d$ 에 의해 조절 가능함으로 유·무효전력을 독립제어할 수 있다. 그림 3은 DC/AC 인버터 전류 제어기블록도이다. 세부적인 전류제어 알고리즘을 수식으로 표현하면 식 (7)과 식 (8)과 같이 표현된다.

$$V_d = (I_{ref-d} - I_d) \cdot (k_p + \frac{k_i}{s}) - I_q \cdot \omega L + V_{sq}$$
 (7)

$$V_q = (I_{ref-q} - I_q) \bullet (k_p + \frac{k_i}{s}) + I_d \bullet \omega L \qquad (8)$$

여기서,  $I_{ref-q}$ 는 원하는 태양광발전 출력량의 기준 전류[A],  $I_q$ 는 계통전류값[A]



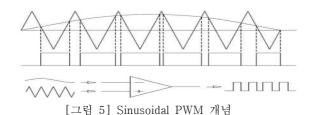
[그림 4] DC/AC 인버터 전류 제어기 블록도

#### 3.4 Sinusoidal PWM

Sinusoidal PWM을 이용하여 3상 정현파 구현이가능하다. 그림 5와 같이 아날로그 파형과 기준 삼각파가 비교기(Comparator)에 입력되어 아날로그신호가 큰 경우에는 ON 신호를 출력하며, 삼각파신호가 큰 경우에는 OFF 신호를 출력하여 아날로그 신호의 크기에 비례하는 펄스폭을 갖는 PWM 파형이일정한 주기로 발생하여 120° 위상 차이가 나는 3상전압이 출력된다. 변환된 3상의 전압은 식 (9)과 식(10)에 의해서 계통의 위상과 전압의 크기를 맞추게된다.

$$\phi = (\tan^{-1} \frac{V_q}{V_d}) \times \frac{180}{\pi} \tag{9}$$

$$V_{t} = \sqrt{V_{q}^{2} + V_{d}^{2}} \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$$
 (10)

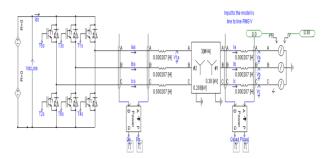


4. PSCAD/EMTDC 모델링 및 시뮬레이션 분석

PSCAD/EMTDC를 이용하여 10~400(kw)의 출력을 낼 수 있는 태양광발전을 모델링하였으며, 수치해석을 통한 모델링의 유효성을 확인한다.

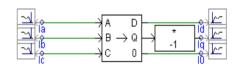
# 4.1 PSCAD/EMTDC를 이용한 태양광발전 모델링

그림 6은 태양광발전 연계계통 단선도로 스너버 회로와 Free-Wheeling 다이오드가 내장된 IGBT 모 듈을 사용한 계통연계형 시스템의 DC-AC변환부와 출력파형의 개선을 위한 필터로 구성된다.

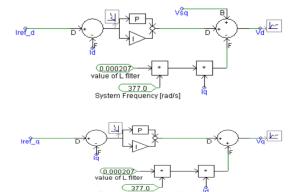


[그림 6] 태양광발전 연계계통 단선도

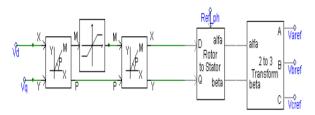
그림 7에서 d-q변환을 통해 나온 Id와 Iq는 식(7) 과 식(8)을 모델링한 그림 8에서 Iref-d와 Iref-q를 추종하기 위해 그 오차를 PI제어로 보정하였고, 여기서 Iref-d와 Iref-q를 적절히 조정함으로써 유효전력과 무효전력을 제어할 수 있다. 또한 그림 9에서 Vd와 Vq는 d-q변환을 통해 PWM파를 발생시키기위한 3상의 전압으로 변환되었다.



[그림 7] 3상 전류의 d-a 변환

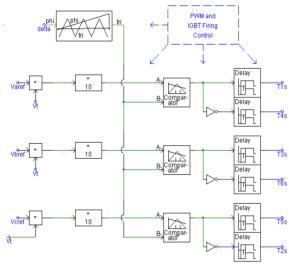


[그림 8] 전류제어알고리즘



[그림 9] 동기좌표의 전압을 3상 전압으로 변환

그림 10은 3상 교류전압과 기준삼각파를 비교하여 Sinusoidal PWM 스위칭 신호를 모델링한 것이다. 변환된 3상의 전압을 계통의 전압과 크기를 맞추기위해 식 (10)의 Vt를 곱하였고, 삼각파와 비교를 통해 만들어진 6개의 PWM파는 IGBT의 게이트 신호로 들어가 DC전압을 120도 위상차이가 나는 3상 교류 정현파로 변환시키게 된다.



[그림 10] PWM과 IGBT Control

### 4.2 시뮬레이션 및 분석

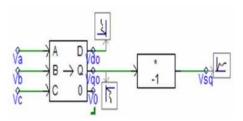
3가지 Case로 모의를 가정하였으며, 각각에서 태양광발전의 유효전력은 식 (11)의 계산식을 통해 계산된다. 여기서 Vsq는 그림 11에서 보는 봐와 같이계통의 3상 전압을 d-q변환에 의해 나온 Vq값으로 그 산출식은 식 (12)과 같다.

Power=
$$\frac{3}{2}[(V_{sq} \times I_{sq}) + (V_{sd} \times I_{sd})]$$
 (11)

$$I_{ref_-q} = \frac{2}{3} \times [\frac{P_{power}}{V_{sq}}]$$

여기서,  $E_{sd}$ ,  $I_{sd}$ =O

$$V_{sg} = (380 \times \sqrt{2}) \div \sqrt{3} = 310$$
 (12)



[그림 11] 10[Kw]의 인버터 계통연계 유·무효전력

Case 1. 50[kw]인 경우

$$-0.107 = -\frac{2}{3} \times \left[ \frac{0.05}{0.310} \right] \tag{13}$$

Case 2. 400[kw]인 경우

$$-0.86 = -\frac{2}{3} \times \left[ \frac{0.4}{0.310} \right] \tag{14}$$

그리고 무효전력에 대한 수치해석은 다음과 같다.

$$I_{ref_{-}d} = \frac{2}{3} \times \left[\frac{Q_{power}}{V_{sq}}\right]$$

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

$$(15)$$

Case 3. 200[kw], 50[kvar]인 경우

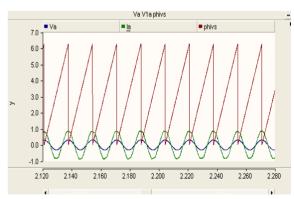
유효전력에 관한 값은 다음과 같다

$$-0.43 = -\frac{2}{3} \times \left[ \frac{0.2}{0.310} \right] \tag{16}$$

무효전력에 관한 값은 식 (21)과 같다

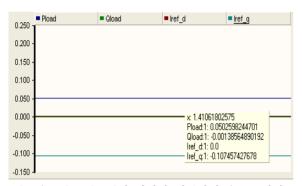
$$-0.107 = -\frac{2}{3} \times \left[ \frac{0.05}{0.310} \right] \tag{17}$$

그림 12와 같이 전압 및 전류가 위상각에 따라 동 상임으로 전류제어 알고리즘의 유효성을 확인할 수 있다.



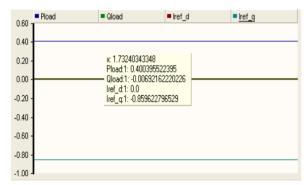
[그림 12] 위상각과 인버터 계통연계 전압 및 전류

Case 1.에서 50[kw]의 태양광출력의 경우, 식 (13) 의 수치해석인 유·무효전력과 Iref-q 값이 그림 13의 결과와 일치함을 알 수 있었다.



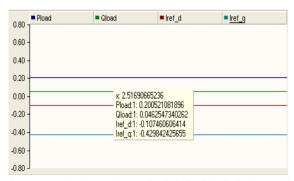
[그림 13] 50[Kw]의 인버터 계통연계 유·무효전력

Case 2.의 400[kw]인 경우에 대해서도 그림 14의 값과 식 (14)의 수치해석 값이 일치하였다. 무효전력은 동기좌표계의 d축 전류가 0임으로 역시 0(kavr) 임을 확인 할 수 있었다.



[그림 14] 400[Kw]의 인버터 계통연계 유·무효전력

마지막으로 Case 3.의 200[kw], 50[kvar]인 경우에도 그림 15의 값과 식 (16), (17)의 값이 거의 일치하며, 이를 통해 무효전력도 제어가 됨을 확인할 수 있다.



[그림 15] 200[Kw], 50[kvar]의 인버터 계통연계 유·무효전력

#### 5. 결 론

본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 PV모 델링을 수행하였다. 그리고 시뮬레이션 결과와 이론적 인 수치해석을 비교/분석하여 다음과 같이 제안한 PV모델링의 유효성을 확인하였다.

- (1) 모델링된 계통연계형 인버터는 기존의 모델링이 갖고 있던 출력의 약 7배인 400[kw]까지 출력을 향상시켰다.
- (2) 유효전력 뿐만 아니라 무효전력 또한 제어가 가능 함을 확인할 수 있었으며, 개선된 모델링을 배전계 통에 적용할 경우 보다 정확한 시뮬레이션을 수행 할 수 있을 것이라 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] 노대석 외 3인, "PSCAD/ EMTDC를 이용한 태양광발전의 모델링에 관한 연구", 한국 산학기술학회 추계논문집, 2010.11
- [2] 노대석 외 4인 , "PSCAD/EMTDC를 이용한 PV 모델링", 한국 산학기술학회 논문집, 2011.5
- [3] 김슬기 외 2인 , "PSCAD/EMTDC를 이용한 계 통연계형 태양광발전시스템의 모델링 및 모의 해 석", 대한전기학회 논문집, 2005.2