

계통 임피던스를 고려한 단상 인버터 시스템의 전력 제어 방법

김은석, 박한얼, 송중호
서울산업대학교

A Power Control Method of Single-Phase Inverter Systems Considering Grid Impedance

Eun-Seok Kim, Han-Eol Park, Joong-Ho Song
Seoul National University of Technology

ABSTRACT

상태 공간 평균화법을 이용한 단상 인버터의 동적 모델링을 통해 제어 특성을 해석하고, 계통 연계시 인버터 출력 전압, 계통 임피던스, 계통 전압의 관계를 분석하여 시스템의 유효 전력과 무효 전력 흐름의 특성을 파악 하였다. 본 논문에서는 DQ 기반 전력제어 방법을 제안하였고 이를 근거로 전력 제어기를 설계하였다. 시뮬레이션을 통해 제안한 전력 제어 알고리즘의 타당성과 유용성을 검증하였다.

1. 서론

최근 들어, 주택용 분산발전시스템의 계통에 유입되는 전력 제어에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 계통에 유입되는 전력을 제어하는 방법으로는 크게 인버터 출력 전압 제어와 계통 전류 제어 방법으로 나눌 수 있다. 인버터 출력 전압 제어는 전압의 크기와 위상으로 각각 무효전력과 유효 전력을 제어 할 수 있는 장점이 있지만 계통 임피던스를 정확히 알아야 한다는 단점이 있다.^[1] 반대로 계통 전류 제어는 전류 파형에 관심이 있기 때문에 전력 제어의 어려움을 가지고 있다.^[2] 따라서 본 논문에서는 DQ 기반 전력제어 방법을 제안하였고 이를 근거로 전력 제어기를 설계하였다. 제안된 전력제어기는 적분 제어기를 추가하여 계통 임피던스 측정의 불확실성으로 인한 전력 제어의 어려움을 극복하였다. 그리고 시뮬레이션을 통해 제안한 전력제어기의 유용성과 타당성을 검증하였다.

2. 단상 인버터 시스템의 DQ 모델링

단상 인버터 시스템은 3상 시스템과는 달리 동기좌표계에서 좌표 변환하여도 서로 직교하는 성분이 없으므로 그림 1과 같이 가상의 회로를 도입하여 직교성분을 만들어 주어야 한다.^{[3],[4]}

그림 1에서 $m_D, i_{f,D}, i_{f,Q}, i_{l,D}, e_D$ 는 변조계수, 필터 인덕터 전류, 부하 전압, 부하전류에 각각 위상이 90° 앞선 가상 성분이고 DQ 변환 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$T = T^{-1} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & \cos\omega t \\ \cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \quad (1)$$

그림 1의 회로를 식 (1)과 상태 공간 평균화법을 통한 소신호 해석을 수행하면 다음과 같다.

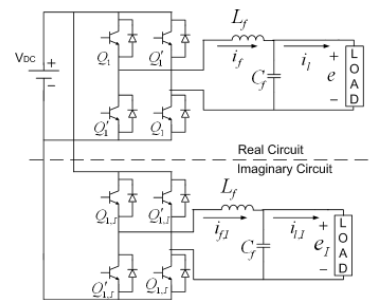


그림 1. 실제 회로와 가상회로

Fig. 1. Real circuit and imaginary circuit

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{f,D} \\ \tilde{i}_{l,D} \\ \tilde{e}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & -\frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{f,D} \\ \tilde{i}_{l,D} \\ \tilde{e}_D \end{bmatrix} + \tilde{m}_D \begin{bmatrix} V_{DC} \\ L_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \tilde{\omega} \begin{bmatrix} I_{f,Q} \\ I_{l,Q} \\ E_Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{f,Q} \\ \tilde{i}_{l,Q} \\ \tilde{e}_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & -\frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{f,Q} \\ \tilde{i}_{l,Q} \\ \tilde{e}_Q \end{bmatrix} + \tilde{m}_Q \begin{bmatrix} V_{DC} \\ L_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \tilde{\omega} \begin{bmatrix} I_{f,D} \\ I_{l,D} \\ E_D \end{bmatrix} \quad (3)$$

단상 인버터 시스템은 변조계수로 출력전압을 제어하기 때문에 수식(2), (3)에서 주파수의 미소분은 0이다. 또한 실제회로의 변조계수 m 과 출력 전압 e 는 교류 성분이므로 미소분(\tilde{m}, \tilde{e})으로 생각할 수 있다. 따라서 $\tilde{m}_D, \tilde{m}_Q, \tilde{e}_D, \tilde{e}_Q$ 는 m_D, m_Q, e_D, e_Q 와 같다.

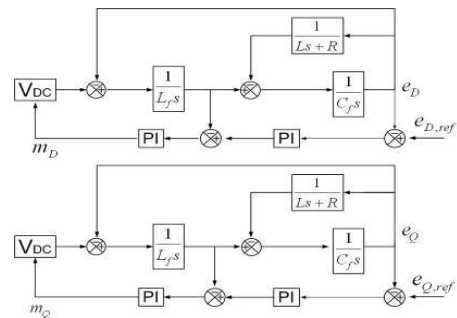


그림 2. 소신호 모델

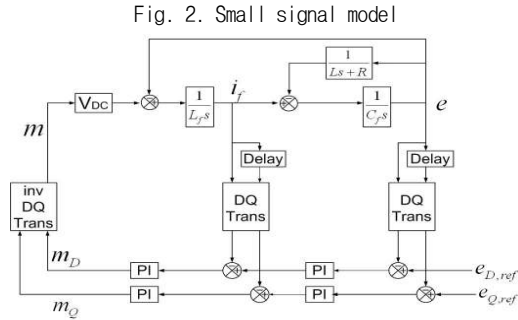


Fig. 2. Small signal model

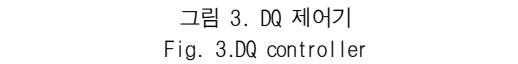


그림 3. DQ 제어기
Fig. 3. DQ controller

그림 2는 DQ 단상 인버터 시스템의 소신호 모델을 보여주고 있다. 하지만 가상 회로는 실제 존재하지 않기 때문에 그림 3과 같이 Time delay 블록을 사용하여 시스템을 구현 하였다. 가상회로 제어 출력 m_j 는 사용하지 않는다.

$e_{D.ref}$ 와 $e_{Q.ref}$ 는 다음과 같이 구한다.

$$\begin{bmatrix} e_{D.ref} \\ e_{Q.ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & \cos\omega t \\ \cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} e \\ e_I \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 $e = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \phi)$ 이고 $e_I = \sqrt{2} E \cos(\omega t + \phi)$ 이면

$$\begin{bmatrix} e_{D.ref} \\ e_{Q.ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} E \cos\phi \\ \sqrt{2} E \sin\phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

그러므로 $e_{D.ref}$ 와 $e_{Q.ref}$ 의 값은 부하 전압 지령치의 크기와 위상으로 알 수 있다.

3. DQ 기반 전력제어 방법

인버터 출력 전압과 위상이 정상상태에 있다면 단상 인버터 시스템은 그림 4와 같이 전압원으로 표현가능하고 A에서의 전력 흐름은 다음과 같다.^[5]

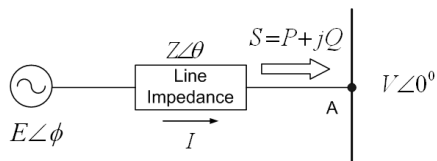


그림 4. 전력 제어
Fig. 4. Power regulation

$Z e^{j\theta} = R + jX$ 이고 E 와 V 는 실효값이다. 그러므로 유효전력과 무효전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E \cos\phi = \frac{RP + XQ}{V} + V \quad (6)$$

$$E \sin\phi = \frac{XP - RQ}{V} \quad (7)$$

식(6), (7)을 최대값으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sqrt{2} E \cos\phi \\ \sqrt{2} E \sin\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \frac{RP + XQ}{\sqrt{2} V} + \sqrt{2} V \\ 2 \frac{XP - RQ}{\sqrt{2} V} \end{bmatrix} \quad (8)$$

그러므로 계통 연계시 $e_{D.ref}$ 와 $e_{Q.ref}$ 의 값은

$$\begin{bmatrix} e_{D.ref} \\ e_{Q.ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} E \cos\phi \\ \sqrt{2} E \sin\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \frac{RP^* + XQ}{\sqrt{2} V} + \sqrt{2} V \\ 2 \frac{XP^* - RQ^*}{\sqrt{2} V} \end{bmatrix} \quad (8)$$

같이 표현된다.

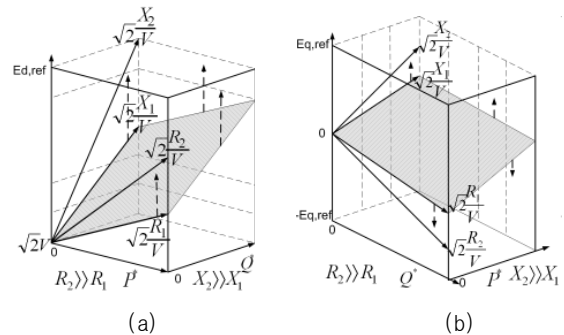


그림 5. 계통 임피던스에 따른 $e_{D.ref}$ 와 $e_{Q.ref}$
Fig. 5. $e_{D.ref}$ and $e_{Q.ref}$ according to line impedance

그림 5에서 V 의 값은 일정하고 X, R, P^*, Q^* 의 값이 변동할 때 $e_{D.ref}$ 와 $e_{Q.ref}$ 의 값의 변화를 보여주고 있다. 따라서 $X \gg R$ 인 경우라면 식 (8)은 다음과 같이 간략하게 된다.

$$\begin{bmatrix} e_{D.ref} \\ e_{Q.ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos\phi \\ E \sin\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \frac{X}{\sqrt{2} V} Q^* + \sqrt{2} V \\ 2 \frac{X}{\sqrt{2} V} P^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(9)를 기반으로 한 제안한 전력제어기는 그림 6에서 보여주고 있다. 이 제어기는 계통 임피던스의 오차를 보정하기 위해 적분 제어기가 추가 되었다. 모드전환 스위치는 단독운전과 계통연계운전의 전환을 수행하며 그림 7에서 계통 임피던스를 고려한 단상인버터 시스템을 보여준다.

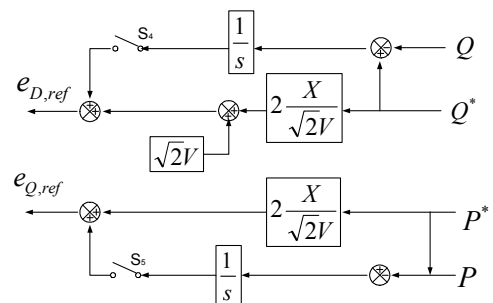


그림 6. 제안한 전력 제어기
Fig. 6. Proposed power controller

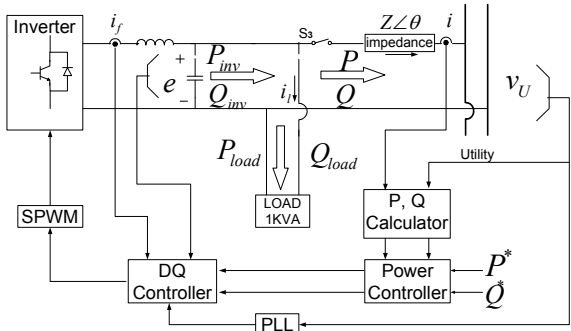


그림 7. 시스템 구성

Fig. 7. System configuration

5. 시뮬레이션 결과

제안한 전력 제어기의 타당성을 검증하기 위하여 PSIM을 사용하여 시스템을 시뮬레이션 하였다. 인버터는 단독 운전 → 계통 연계 → 단독 운전 순서로 동작하고 시뮬레이션 시스템 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameters

분산 전원 전압	400 Vdc
인버터 출력 전압	220 Vac
인버터 출력 주파수	60 Hz
필터 인덕터	1 mH
필터 커패시터	100 uF
스위칭 주파수	20 kHz
부하	1 kVA, 0.7 lagging
계통 임피던스	$0.042 + j0.42$

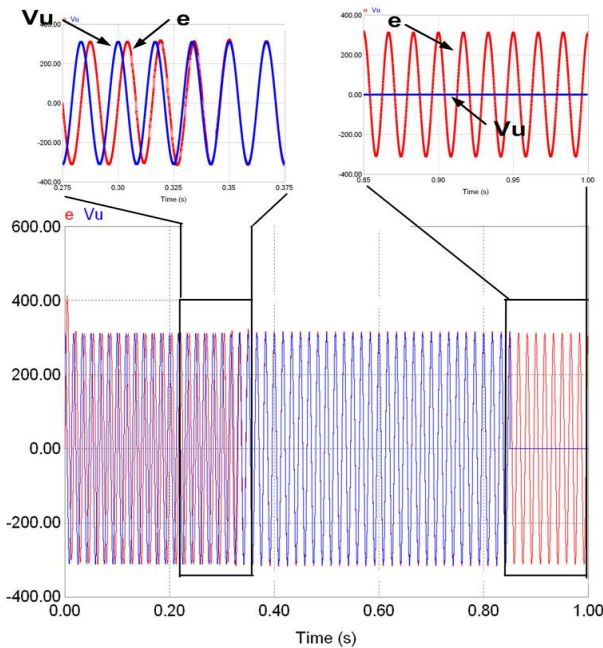


그림 8. 모드 전환시 계통/인버터 출력 전압 파형

Fig. 8. Grid and inverter output voltage waveforms during a mode transition

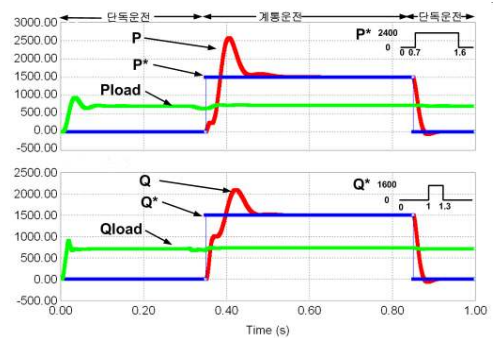


그림 9. 모드 전환시 전력 제어

Fig. 9. Power regulation during a mode transition

그림 8에서 초기 단독 운전시 인버터 출력 전압은 계통 전압보다 90° 뒤집이다. 이때 유효전력과 무효 전력의 지령치는 0이며 0.275초부터 0.375구간에서 PLL이 동작하여 전압을 동기화 시킨다. 0.85초에서 계통은 단락 된 것으로 가정하였다. 그림 8, 9에서 제안한 전력 제어기는 모드 전환 중에도 부하에 일정한 전압과 전력을 공급한다. 또한 계통 연계 운전시 정상상태에서 P^* , Q^* 와 P , Q 의 오차는 0임을 볼 수 있다

6. 결론

본 논문은 단상 인버터에 DQ 모델을 도입하였고 이를 소신호 모델링함으로써 DQ 제어를 설계하였다. 또한 DQ 기반 전력제어 방법을 제안하였고 이를 근거로 전력 제어기를 설계하였다. 시뮬레이션을 통해 제안한 전력 제어기는 단독 운전 모드와 계통 연계 모드에서 부하 전압과 전력을 일정하게 유지하고 계통 연계 운전시 무효전력과 유효전력의 지령치를 추종함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] S.H. Ko, S.R. Lee, H. Dehbonei and C.V. Nayar, "Application of Voltage-and Current-Controlled Voltage Source Inverters for Distributed Generation Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no.3, pp. 782-792, 2006
- [2] M. Dai, M.N. Marwali, J.W. Jung and A. Keyhani, "Power Flow Control of a Single Distributed Generation Unit with Nonlinear Local Load", *IEEE PSCC Proceedings*, vol 1, pp. 398-403, 2004
- [3] R. Zhang, M. Cardinal, P. Szczesny and M. Dame, "A Grid Simulator with Control of Single-Phase Converters in D-Q Rotating Frame", *IEEE PSEC Proceedings*, vol 3, pp. 1431-1436, 2002
- [4] B. Saritha and P.A. Jankiraman, "Observer based current control of single-phase inverter in DQ rotating frame", *IEEE PEDES Proceedings*, pp. 1-5, 2006
- [5] K.D. Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen and R.Belmans, "A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, issu 4, pp. 1107-1115, 2007