

d-q이론을 이용한 계통 연계형 단상 인버터 제어기 설계기법

박창주, 김창현, 김명철, 최재영  
삼성전자 DA연구소

Controller Design of Utility-connected Single-phase Inverter using d-q Theory

Chang-Joo Park, Chang-Hyun Kim, Myung-Chul Kim, Jae-Young Choi

Abstract - Despite many advantages, d-q theory was available only for three phase system. But recently, some papers proposed the application methods of d-q theory or similar theories for single phase systems. This paper presents the control method of the utility-connected single-phase inverter using d-q theory. The suggested method gives single-phase system instantaneous controllability and also makes the realization of APF(Active Power Filter) without DFT operation and PFC(Power Factor Controller) possible. This paper deals with utility-connected single phase inverter with PFC function. The controller was verified by simulation tool.

1. 서 론

산업 발전에 따라 전력수요는 증가하는 반면 지구환경 오염에 대한 규제는 점차 강화됨에 따라 최근에는 대규모 전원에 대한 의존도를 낮추면서 배전계통을 위주로 하여 다양한 소규모 분산전원 시스템들의 적용이 검토되고 있다. 국내의 경우도 이미 수십 KW급의 풍력발전설비가 운전되고 있으며, 태양전지 및 연료전지를 이용한 발전 설비를 또한 활발하게 연구되고 있다. 한편 전력공급자는 분산형 전력시스템의 설치보급 관련 법규, 인증시험 기준, 설치용량한계 등의 세부사안을 구체화하기 위한 기준으로서 역할제어기능, 고조파발생량, 단독운전방지, 및 동기투입과 같이 주로 계통의 정상상태 및 과도상태 안정도에 영향을 미치는 요소들을 고려하고 있다[1]. 따라서 이들 다양한 조건을 만족하기 위하여 분산전원시스템은 역할제어기(PFC) 또는 능동고조파필터(APF)등의 부가기능을 수행하는 한편 빠른 제어특성이 요구될 전망이다. 3상 시스템의 경우 동기좌표계변환을 이용해 이러한 조건을 만족시킬 수 있지만, 단상 시스템의 경우는 그러하지 못하다. 최근에는 3상 시스템에서와 같이 순시 제어특성을 얻기 위해 단상시스템에 좌표변환이론을 적용한 논문들이 발표되고 있다[4,5,8]. 본 논문은 계통 연계형 단상인버터의 제어기 및 위상검출부에 대한 d-q이론의 적용 방안을 소개한다. 전류제어기에 d-q이론을 적용함으로써 제어기는 빠른 응답특성을 보였으며 유·무효전류의 독립제어가 가능해져서 PFC 구현이 용이하였다. 또한 d-q이론을 적용한 위상검출시스템은 기존 zero-crossing방식과 달리 순시적인 위상검출이 가능하기 때문에 계통연계인버터의 위상동기투입에 적합하였다.

제어기는 시뮬레이션 툴인 Psim의 DLL 모듈을 이용하여 시험되었다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성도

분산 전원 시스템의 경우 전력공급자와의 계약체결 여부에 따라 제어사양을 달리한다. 태양광, 풍력 및 폐열 발전 시스템의 경우 사업자를 대상으로 이미 가격산정이 되어 있으므로 부하용량과 상관없이 제어가 가능하다. 반면, 아직 계약대상이 아닌 연료전지 발전시스템, 가스엔진타입 열병합발전 또는 비사업자용의 분산전원 시스템의 경우는 부하용량범위 내에서 또는 필요한 열용량 범위내에서 전력을 생산하여야 하기 때문에 부하단에 전류센서를 필요로 한다. 본 논문은 후자의 경우로서 그림 1과 같이 비사업자용 전원에 연계되는 단상인버터시스템을 대상으로 한다.

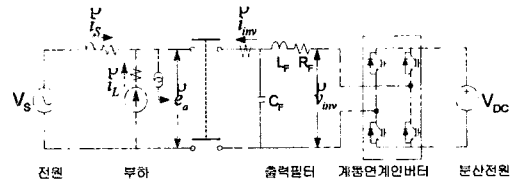


그림 1. 시스템 구성도

센서에 의해 얻어지는 제어변수는  $v_o^d$ ,  $i_{inv}^d$  및  $i_r^d$ 이며, 기타 변수들에 대한 정의는 다음과 같다.

- $v_o^d$  : 계통전압
- $i_{inv}^d$  : 인버터 출력전류
- $i_r^d$  : 전류전류
- $i_{inv}^q$  : 인버터 출력전압
- $i_r^q$  : 부하전류
- $V_{dc}$  : DC-link 전압

2.3 전압 위상검출부(PLL)

3상 평형 시스템 입력 전압을 d-q 정지 좌표계상에 변환하면  $V_d$  및  $V_q$ 는 크기는 동일하고 위상만 90도 차이를 이루는 파형이 된다. 단상 시스템에 대해 d-q이론을 적용하기 위해서 이러한 특성을 이용한다. 즉, d축 정지 좌표값대신 실제 파형을, q축 정지좌표계 값대신 90도 위상지연시킨 입력파형을 대입하는 것이다. 그림 2는 일반적으로 널리 이용되는 3상 시스템에서의 PLL 기법을 단상시스템에 적용한 제어 블록도이다. 그림 3은 고조파 및  $t=20msec$  지점에 전압변동을 포함하는 전압 입력에 대하여 검출된 전압의 위상을 보여준다[3].

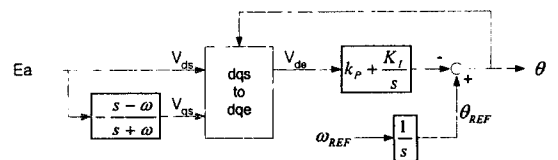


그림 2. Single phase PLL

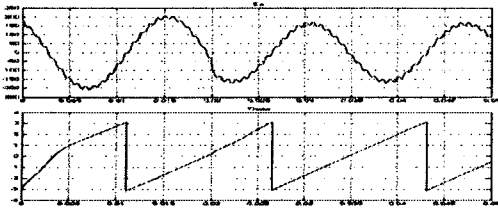


그림 3. 위상검출 파형

### 2.3 유효 및 무효성분 검출

그림 2로부터 전원전압의 위상  $\theta$ 를 이용하여 동기회전과 표변환을 하면 그림 4와 같이 유효 및 무효성분을 검출할 수 있다. 따라서 전원전압에 대한 유효 및 무효전류는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

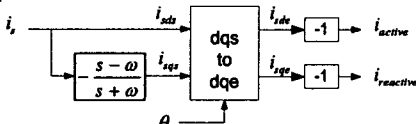


그림 4. 유효 및 무효전력 검출부

$$\begin{aligned} i_{\text{reactive}} &= -i_{\text{dsb}} = -(i_{\text{ds}} \cos \theta + i_{\text{sq}} \sin \theta) \\ i_{\text{active}} &= -i_{\text{sqr}} = -(i_{\text{ds}} \sin \theta + i_{\text{sq}} \cos \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

동일한 방법으로 인버터출력전압  $V_{\text{inv}}$ 을 전원전압에 대한 유효성분과 무효성분으로 구분할 수 있다.

### 2.4 제어기 설계

계통연계 인버터의 전압방정식을 세우면 다음과 같다.

$$e_a + (j\omega L_F + R_F) \cdot i_{\text{inv}} = v_{\text{inv}} \quad (2)$$

그림 5.a는 인버터가 전원전압의 위상에 대해 90도 위상차가 나는 전류를 계통에 유입했을 때의 인버터출력전압을 나타내며, 그림 5.b는 전원전압과 위상이 일치하는 전류를 유입했을 때의 인버터 전압을 나타낸다. 출력필터의 인덕터 내부저항  $R_F$ 는 무시하였다.

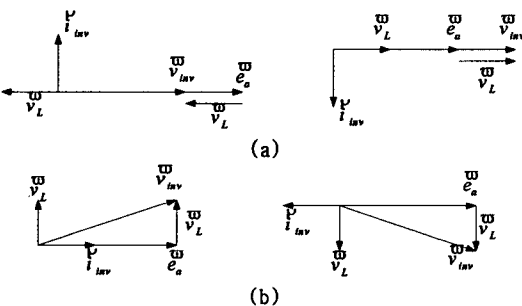


그림 5. 계통연계 단상 인버터의 위상관계

인버터 출력전압 및 전류 각각에 대하여 전원전압과 위상이 일치하는 성분 ( $v_{\text{inv\_active}}, i_{\text{active}}$ )을 유효성분으로, 90도 위상차이가 나는 성분 ( $v_{\text{inv\_reactive}}, i_{\text{reactive}}$ )을 무효성분으로 정의하면 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{\text{inv\_active}} &= e_a + \omega L_F \cdot i_{\text{reactive}} \quad (i_{\text{reactive}} > 0, \text{ when capacitor mode}) \\ v_{\text{inv\_reactive}} &= e_a + \omega L_F \cdot i_{\text{active}} \quad (i_{\text{active}} > 0, \text{ when current source mod e}) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)은 전원전압에 대한 인버터 유효전압성분을 증가시키면 인버터 출력전류의 무효전류성분만이 증가되고 인버터의 무효전압성분을 증가시키면 인버터 출력전류의 유효전류성분만이 증가됨을 의미한다. 따라서, 유효 및 무효전류에 대한 독립적인 제어기 설계가 가능해진다. 그림 6은 유효전류제어기와 무효전류제어기가 독립된 계통연계형 인버터의 제어를 나타낸다.

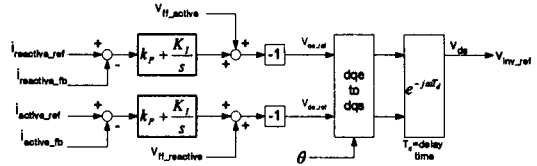


그림 6. 전류제어기 블록도

$V_{\text{inv\_active}}$  및  $V_{\text{inv\_reactive}}$ 는 각각 전원전압으로부터 계산된 인버터 출력전압  $V_{\text{inv}}$ 의 유효 및 무효성분으로 전류제어기의 전향보상기의 역할을 한다. 수 kW급 단상 분산전원 시스템은 주로 부하말단에 위치하기 때문에 LC출력필터의 차단주파수를 낮추어야 한다. 그러므로, LC필터 출력단과 입력단 사이에 전압의 크기 및 위상차가 커질 수 있다. 전압 측정점인 LC필터 출력단의 전압  $v_{\text{inv}}$ 로부터 입력단전압  $V_{\text{inv}}$ 를 추정하기 식 (4)를 사용하였다..

$$V_{\text{inv}} = (1 + s^2 \cdot L_F C_F) \cdot v_{\text{inv}} \quad (4)$$

식 (1)로부터  $V_{\text{inv}}$ 에서  $V_{\text{inv\_active}}$  및  $V_{\text{inv\_reactive}}$ 를 얻을 수 있다. 이때 계산에 필요한  $\cos \theta$ 와  $\sin \theta$ 는 식 (1)에서 사용한 값을 그대로 이용하므로 제어기의 연산량은 크게 증가하지 않는다.

전류제어기 블록도의  $e^{-sT_{\text{delay}}}$  부분은 각종 저차필터 및 디지털 연산에 의한 시지연을 보상한다. 아날로그 입력단의 저차필터 컷오프 주파수  $f_c$ 를 1kHz로 할 경우 필터의 출력과형에 226usec 위상차연이 생기므로  $T_{\text{delay}}$ 는 다른 지연 요소들을 고려하여 그 이상으로 설정한다[7].

빠른 과도상태 특성이 요구되는 시스템의 경우, 출력필터의 인덕터 내부저항성분에 의한 유효전류제어기와 무효전류제어기 사이에 약간의 커플링이 발생하여 수렴 특성을 저해할 수 있으므로 이에 대한 보상루틴이 필요하다. 그 외 고려사항으로는 단독운전 방지기능이 있다. 정전이 발생했을 때 분산전원시스템이 이를 감지하지 못하고 단독운전이 되면 전로가 재폐로되는 순간 단락현상이 발생하므로 이를 방지해야한다. 부하측 전류를 검출하지 않는 경우 정전을 감지하기 위해 주파수 및 전압의 위상 등의 변화를 종합적으로 고려하여야 한다. 그러나, 본 시스템의 경우, 부하측 전류를 검출하기때문에 정전이 발생하면 인버터 출력전류와 부하전류가 정확히 같아 지므로 일정기간동안의  $\int (i_L - i_{\text{inv}})$  값을 감시하면 단독운전을 방지할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션

시뮬레이션은 표 1.의 조건하에서 Psim에 의해 수행되었다. 모든 제어기는 DLL을 이용하여 샘플링 주파수와 전류제어기 제어주파수를 10kHz로 함으로써, DSP 제어 환경과 유사하도록 하였다.

전원전압	220[Vrms]
$L_F$	1.5mH, 20[mΩ]
$C_F$	25uF, 20[mΩ]
Dc-link	400[Vdc]
Tsamp(샘플링타임)	100[usec]
부하전류( $I_L$ , peak A)	유효30[A] +지상무효30[A]

표 1 시뮬레이션 파라미터

그림 7, 8, 9는  $t=0.2\text{sec}$ 에 각각의 모드로 동작시켰을 때로서, (a)는 전원전압 및 인버터출력전류의 파형을 나타내고, (b)는 부하전류파형, (c)는 전원전압에 대한 인버터 출력전류의 순시 유효 및 무효전류의 파형을 나타낸다.

case (i) 발전모드(유효전류공급)

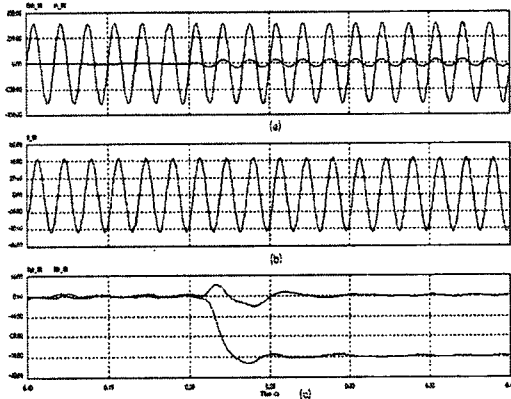


그림 7. (a)  $\bar{e}_s$ ,  $i_{inv\_fl}$  (b)  $i_L$  (c)  $i_{inv\_dc}$ ,  $i_{inv\_qr}$

Case (ii) PFC 모드(무효전류보상):

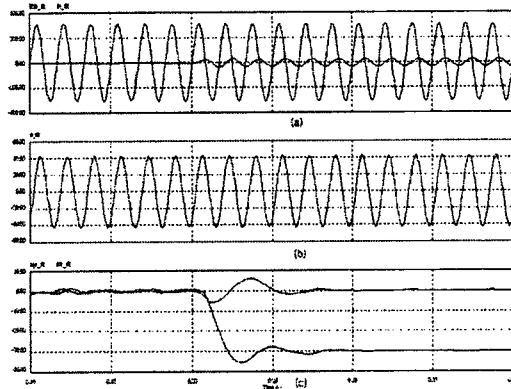


그림 8. (a)  $\bar{e}_s$ ,  $i_{inv\_fl}$  (b)  $i_L$  (c)  $i_{inv\_dc}$ ,  $i_{inv\_qr}$

Case (iii) 발전 & PFC:

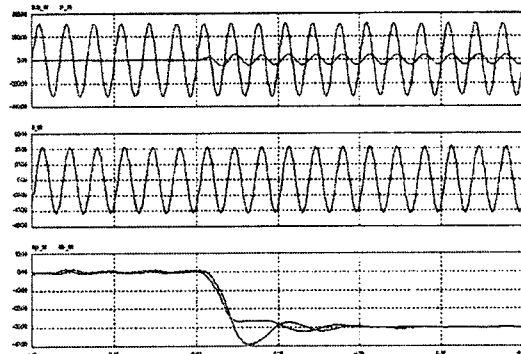


그림 9. (a)  $\bar{e}_s$ ,  $i_{inv\_fl}$  (b)  $i_L$  (c)  $i_{inv\_dc}$ ,  $i_{inv\_qr}$

그림 10은  $t=0.2\text{sec}$ 에서 정전이 발생했을 때, 단독운전 방지 기능에 대한 모의 실험 파형을 나타낸다. 정전발생 후 대략 2msec뒤에 정전을 감지하여 게이팅신호가 차단되었다.

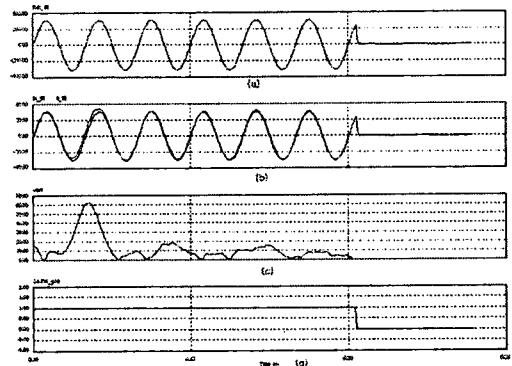


그림 10. (a)  $\bar{e}_s$ , (b)  $i_L$ ,  $i_{inv}$  (c)  $\int_0^T (i_L - i_{inv})$  (d)  $S_{gating\_enable}$

### 3. 결 론

본 논문은 소규모 분산전원용 계통연계형 단상인버터 제어기에 동기회전좌표계 이론을 적용하여 유효전류 및 무효전류제어기를 독립적으로 구성하였다. d-q이론을 도입함으로써 단상인버터의 순시제어가 가능해졌으며, 유효전류와 무효전류를 개별적으로 제어할 수 있게 되어 계통연계형 단상인버터에 PFC기능을 추가할 수 있었다. 제어기 성능은 시뮬레이션 툴을 이용해 검증하였다.

향후에는 계통연계형 단상인버터 제어기에 고조파보상 기능을 추가할 예정이다. 일반적으로 단상 능동고조파 필터의 경우 고조파 검출을 위해 DFT연산이 요구되지만, 동기회전좌표계를 이용할 경우, DFT 연산없는 능동 고조파필터 제어기 구현이 가능해질 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 김용상 "대체에너지전원의 배전계통 연계기술", Proceedings of KIEE Vol. 50, No. 6, pp34-40, 2001.
- [2] Shinya Sakamoto, Tomonory Izumi, "A new Method for Digital PLL control Using estimated Quadrature Two Phase Frequency Detection", IEEE PCC-Osaka, p671-676, 2002.
- [3] Sang-Joon Lee, Jun-Koo Kang, "A New Phase Detecting Method for Power Conversion Systems considering Distorted Conditions in Power System", IEEE, pp2167-2172, 1999.
- [4] Hong-Seok song, Peter Mutschler, "Very Fast Phase Angle Estimation Algorithm for a Single Phase System having Sudden Phase Angle Jumps", IEEE, pp-925-931, 2002.
- [5] Makoto saitou, Toshihisa Shimizu, "Generalized Theory of Instantaneous Active and Reactive Powers in single-phase Circuits based on Hilbert Transform" IEEE, pp1419-1424, 2002.
- [6] 김재식, 최재호 "단상 UPS 인버터의 출력필터와 제어기 설계", 대한전기학회 학제학술대회 논문집, 2001
- [7] 박기원, 권병기, 조용상, "능동전력필터의 현장적용" 대한전기학회 학제학술대회, pp1024-1027, 2002.
- [8] W.-L.Lu, S.-N. Yeh, "Development of a single-phase half-bridge active power filter with the function of uninterruptible power supplies", IEE Proc.Electr. Power Appl. Vol. 147, No. 4, 2000.