

PDFF 제어기법을 이용한 단상 UPS 인버터 전압,전류제어에 관한 연구

오방원, 이상용, 이용균, 전윤석, 최규하
 건국대학교 전기공학과

A study on single phase UPS inverter control with PDFF method

B.W. Oh, S.Y. Lee, Y.K. Lee, Y.S. Jeon, G.H. Choe
 Dept. of Electrical Engineering Konkuk University

ABSTRACT

There are many methods in controlling inverter's voltage and currents. most of all, PI control method is a general method. PI control has some merits. But, PI control has zero effect. So, steady-state response errors always exist by the zero effect. For removing the steady-state error, This paper presents the modeling, design and analysis of the double loop feedback control scheme. and computing the value of parameters and applying to the single-phase full bridge inverter for comparison and analysis between the PI control and PDFF control. The system model is employed to examine the dynamics of power circuit and select appropriate feedback variables for stable operation of the closed-loop UPS inverter system. It analyzes and proves the output characteristic of inverter system with the PDFF control.

1. 서 론

현대 전자장비는 기존의 장비와는 다르게 고도의 집적화와 정밀화를요구하고있고, 전원에 상당히 민감하게 작용하는 장비가 대부분이다.이런측면에서 UPS(Uninterruptible Power Supplies)는 통신장비, 의료기관 시설장비 및 공항 관제 컴퓨터 시스템 등에 ,이로 인해 전원의 신뢰성이 더욱 중요시 되고 있다. 또한 전원의 이상현상이 짧은 시간 동안 발생하는 경우에도 그 피해는 매우 심각할 수 있기 때문에 전원 이상현상에 대비한 무정전전원장치(UPS)의 필요성이 더욱 증가하고 있는 추세이다. 하지만, 현재 이런 인버터 시스템을 제어하는 일반적인 방법인 PI 제어기법은 제로점에 의한 정상상태오차가 존재하기 때문에, 이에대한 보상이 필요하다. 따라서, 이 논문에서는 단상 UPS 시스템을

PDFF 방식의 전압제어, 전류제어를 이중루프 제어 회로를 구성하여 각각의 제어값을 계산하고,출력특성을 시뮬레이션을 하여, 영점에 의한 과도상태 및 정상상태 특성을 개선, 또한 위상지연 특성도 동기 신호의 샘플값을 조절하는 방식으로 개선하여, PI 제어 시스템의 응답특성과 비교분석 하고자한다.

2. 단상 인버터 시스템

2.1 단상인버터 시스템 모델링

그림 1은 단상 인버터 등가회로를 나타낸다. 위의 시스템을 모델링하게 되면, 식(1),(2)으로 전개가능하다.

$$V_{con} = L \frac{di_L}{dt} + R_L \cdot i_L + V_o \tag{1}$$

$$C \frac{dV_o}{dt} = i_L - i_o \tag{2}$$

위의 식에서 인덕터의 내부에 존재하는 내부저항

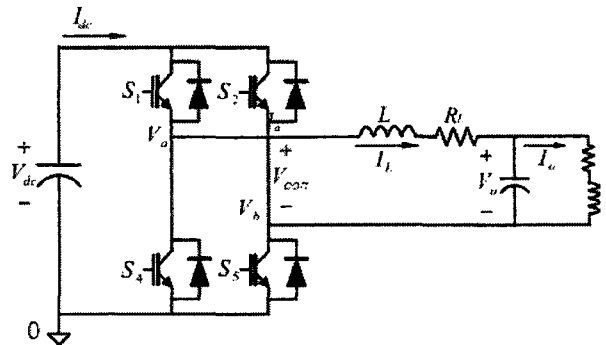


그림 1 단상 풀브리지 인버터 회로도
 Fig. 1 Single phase full bridge inverter circuit

(R_L)은 무시할만큼 작기 때문에 해석할 때 고려하

지 않았다. 위의 수식을 블록선도로 나타내면 그림 2로 나타낼 수 있고, 부하전류가 시스템에서 왜란으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

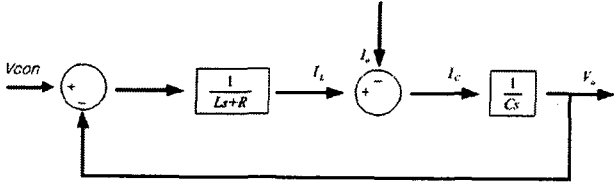


그림 2 단상인버터 전체 블록선도
Fig. 2 single phase inverter block diagram

2.2 인버터 시스템 제어기설계

본문에서는 서론에서 언급한 바와 같이 PDFF 제어기법을 비교 분석하기 위하여, PI 제어시스템도 모델링을 같이 하였다. 따라서, 식(3)~(8)로 PI 제어방식으로 제어기를 모델링하였고, 식(9)~(14)로 PDFF 제어방식을 이용하여 모델링을 하고 그림3, 그림4, 그림5, 그림6 으로 블록선도를 나타내었다.

$$V_o = (V_o^* - V_o) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{1}{Cs} \quad (3)$$

$$\frac{V_o}{V_o^*} = \frac{K_p}{C} \cdot \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s^2 + \frac{K_p}{C}s + \frac{K_i}{C}} \quad (4)$$

$$K_p = 2\zeta \cdot \omega_n \cdot C, \quad K_i = \omega_n^2 \cdot C \quad (5)$$

$$I_L = \left(\left[(I_L^* - I_L) \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) + K_{mc} \cdot V_o \right] \frac{V_{dc}}{V_{tri}} - V_o \right) \frac{1}{Ls} \quad (6)$$

$$\frac{I}{I^*} = \frac{K_p}{L} \cdot \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s^2 + \frac{K_p}{L}s + \frac{K_i}{L}} \quad (7)$$

$$K_p = 2\zeta \cdot \omega_n \cdot L, \quad K_i = \omega_n^2 \cdot L \quad (8)$$

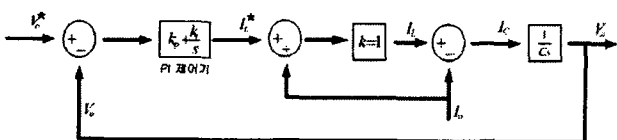


그림 3 PI 제어기를 이용한 전압제어 블록선도
Fig. 3 Voltage controller block diagram with PI control

$$V_o = \left[(V_o^* - V_o) \left(\alpha \cdot K_p + \frac{K_i}{s} \right) - (1-\alpha)K_p \right] \frac{1}{Cs} \quad (9)$$

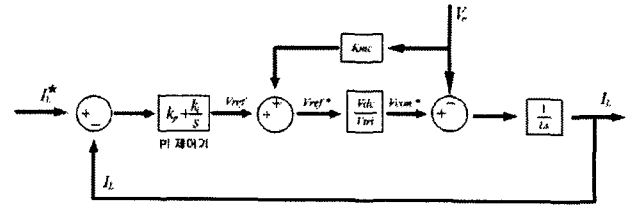


그림 4 PI 제어기를 이용한 전류제어 블록선도
Fig. 4 Current controller block diagram with PI control

$$\frac{V_o}{V_o^*} = \frac{\alpha \cdot K_p}{C} \cdot \frac{\left(s + \frac{K_i}{\alpha \cdot K_p} \right)}{\left(s^2 + \frac{\alpha \cdot K_p}{C}s + \frac{K_i}{C} \right)} \quad (10)$$

$$K_p = \frac{2\zeta \cdot \omega_n \cdot C}{\alpha}, \quad K_i = \omega_n^2 \cdot C \quad (11)$$

$$I_L = \left(\left[(I_L^* - I_L) \left(\alpha \cdot K_p + \frac{K_i}{s} \right) - (1-\alpha)K_p + K_{mc} \cdot V_o \right] \frac{V_{dc}}{V_{tri}} - V_o \right) \frac{1}{Ls} \quad (12)$$

$$\frac{I_o}{I_o^*} = \frac{\alpha \cdot K_p \cdot V_{dc}}{V_{tri} \cdot L} \cdot \frac{\left(s + \frac{K_i}{\alpha \cdot K_p} \right)}{\left(s^2 + \frac{\alpha \cdot K_p \cdot V_{dc}}{V_{tri} \cdot L}s + \frac{K_i \cdot V_{dc}}{V_{tri} \cdot L} \right)} \quad (13)$$

$$K_p = \frac{2\zeta \cdot \omega_n \cdot V_{tri} \cdot L}{\alpha \cdot V_{dc}}, \quad K_i = \frac{\omega_n^2 \cdot V_{tri} \cdot L}{V_{dc}} \quad (14)$$

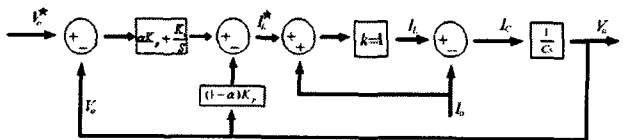


그림 5 PDFF 제어기를 이용한 전압제어 블록선도
Fig. 5 Voltage controller block diagram with PDFF control

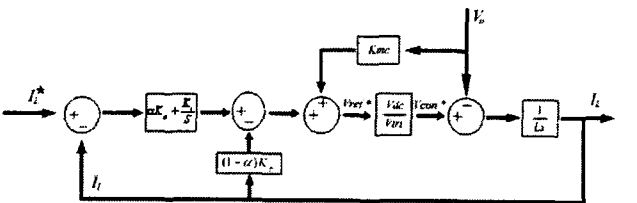


그림 6 PDFF 제어기를 이용한 전류제어 블록선도
Fig. 6 Current controller block diagram with PDFF control

PDFF 제어기의 특성은 α 에 의해서 특성을 변화시킬 수가 있는데, 영점특성과 위상지연 특성에 영향을 미친다. 이러한 사항은 Matlab tool을 이용하여, 보드선도를 작성하였고, 그림 7에 전압제어기의 보드선도를 나타내었다.

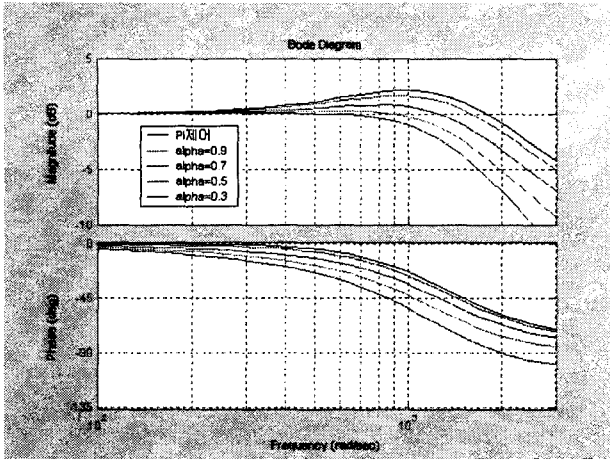


그림 7 PI, PDFF 전압제어의 보드선도
Fig. 7 Voltage control bode plot with PI,PDFF control

α 값은 크기가 0에서 1까지 바뀌는데, 여기서는 간단히 비교를 하기 위해 α 가 0.9, 0.7, 0.5, 0.3 일때만을 나타내었다. 상용주파수 상에서의 PI제어기의 영점특성에 의한 게인값이 0.687[dB]으로 가장 크게 나타나고, PDFF 제어기는 α 값이 0.3일때 0.0346[dB]으로 가장 작게 나타남을 알 수 있다. 즉, α 값이 작아질 수록 영점효과는 사라지고 있음을 알 수 있다. 위상효과는 PI제어기의 위상지연이 -1.2[deg]이고, PDFF제어기는 α 값이 0.3일때 -14.7[deg]로 더 큰 위상지연이 생김을 볼 수 있다. 전류제어기는 전압제어기의 루프 안에 존재하는데, 이상적으로 동작하기 위해서는 전압제어기보다 빠른 응답특성을 보여야 한다. 따라서, 위의 전류제어기는 전압제어기보다 대역폭을 전압제어기보다 5배이상 크게 하였다. 그런결과 상용주파수 대역에서의 전류제어기 보드선도는 PI 제어방식이나, PDFF 제어방식에 있어서, 영점효과나 위상지연현상에서 별다른 차이를 보이지 않았다.

3. 시뮬레이션

표1은 제어기를 설계하기위한 파라미터들을 나타내었다. 시뮬레이션은 Powersim 사의 Psim 시뮬레이션툴을 이용하여 시뮬레이션을 구현하였고, 그림 8은 PDFF 제어기의 비교분석을위한 PI 제어방식을 사용한 인버터 시뮬레이션 시스템을 나타낸다. 그림 9, 10은 PI control을 이용하여 얻은 시뮬레이션을 나타낸다. 정상상태에서의 전압오차율은 4.5 [%]이고, 부하변동시에 발생하는 피크전압은 397.3[V]로 나타내었다. 그림 11은 PDFF 제어기법을 이용한 인버터 시스템 회로도를 나타내고 있다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation Parameter

항 목	설정값
정격용량	3[kVA]
출력전압	220[V]
스위칭 주파수	10[kHz]
인버터 입력 직류전압	400[V]
필터 인덕턴스	3[mH]
필터 커패시턴스	10[μ F]
전압제어기 고유주파수	1256[rad/s]
전류제어기 고유주파수	6283[rad/s]
감쇄비	0.707

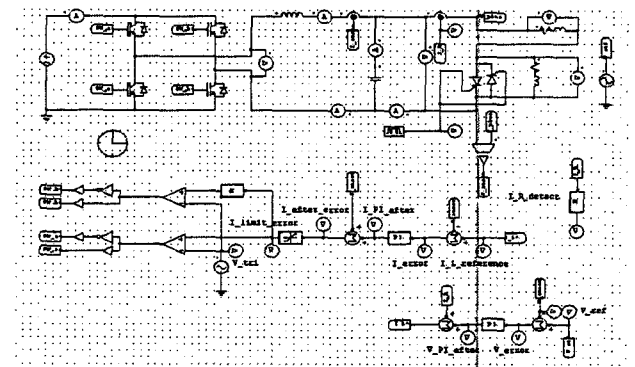


그림 8 PI 제어방식을 이용한 단상 인버터 시뮬레이션 회로도
Fig. 8 Simulation circuits using PI control

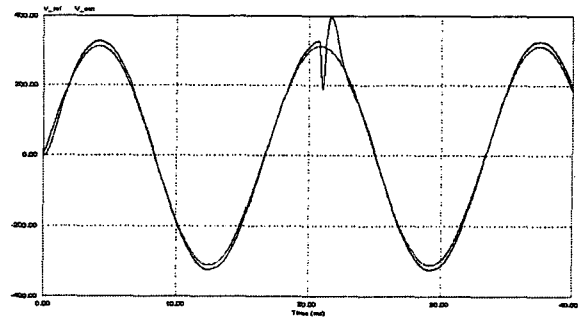


그림 9 PI제어시 0.1[p.u]에서1[p.u]변동시 전압파형
Fig. 9 Voltage plot with PI control in 0.1~1[p.u] load

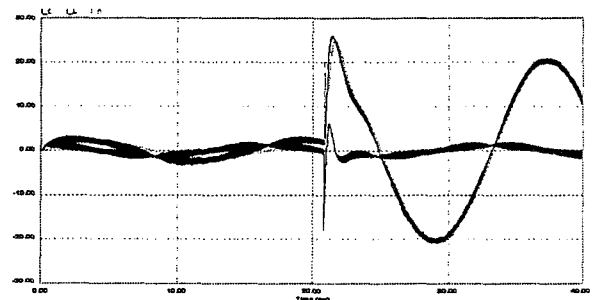


그림 10 PI제어시 0.1[p.u]에서1[p.u]변동시 전류파형
Fig. 10 Current plot with PI control in 0.1~1[p.u] load

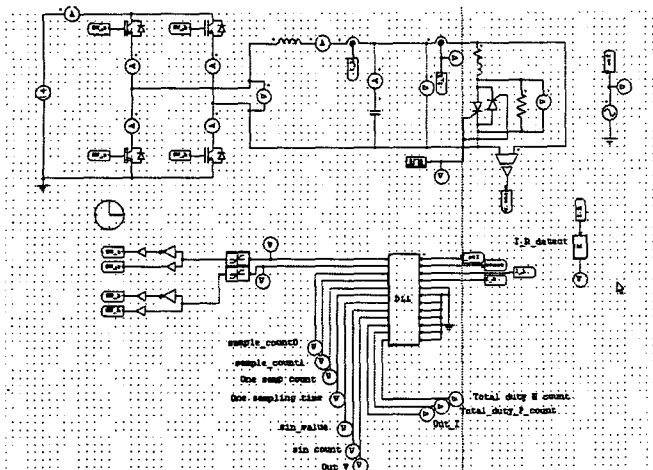


그림 11 PDFF 제어방식을 이용한 인버터 시뮬레이션 회로도
Fig. 11 Simulation circuits using PDFF control

PDFF 제어기는 특성상 α 에 의하여 영점효과를 없애려고 하려면, 값을 줄이게 되는데, 이때 위상지연 또한 발생하게 된다. 이러한 위상지연을 저감하기 위해 전원의 동기화된 신호를 센싱받아 Psim에서 제공하는 DLL을 이용하여 동기화된 신호보다 몇 sampling 앞서는 신호를 만들어 내어 뒤진 위상지연을 보상하게 된다. DLL 내우에 들어가는 프로그램은 C 언어로 구성하였다. 그림12, 13은 위의 회로도를 통하여 얻은 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션에 필요한 파라미터들은 위의 PI제어방식에서 사용한 파라미터와 동일하게 적용하였다.

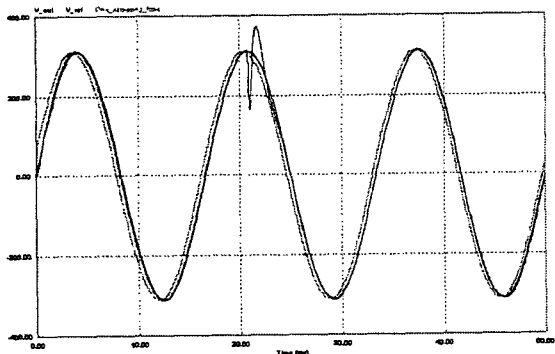


그림 12 PDFF제어시 0.1[p.u]에서1[p.u]변동시 전압파형
Fig. 12 Voltage plot with PDFF control in 0.1~1[p.u] load

그림 12, 13에서는 α 가 0.5 인 경우에 대해 시뮬레이션을 하였는데, 이때 위상지연은 7.04[deg]가 발생한다. 위상지연을 저감하기 위한 레퍼런스 함수가 원래의 동기신호보다 앞서는 것을 볼 수 있고, 위상지연은 0.8[deg] 가 나왔다. 이것은 PI 제어기의 제어방식에 비해 위상지연이 차이나지 않음을 알 수 있다. 정상상태에서의 전압오차는 1.1[%]이고, 과도상태에서 나타나는 피크전압은 382[V]로 PI 제어방식보다 약 15[V] 정도 더 낮게 나타남을 알 수 있다. 또한 과도상태에 부하에 흐르는 피크 전류도 PI제어 방식에서는

24.82[A]인데 비해, PDFF 제어 방식에서는 22.79[A]로 2[A]정도 더 낮은 수치를 얻을 수 있었다.

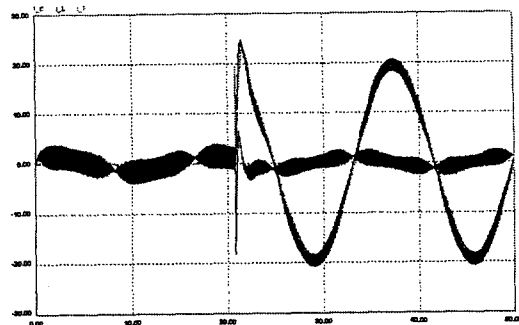


그림 13 PDFF제어시 0.1[p.u]에서1[p.u]변동시 전류파형
Fig. 13 Current plot with PDFF control in 0.1~1[p.u] load

4. 결 론

본 논문에서는 단상 UPS 인버터 시스템에서 사용되는 제어방식중에 PI 제어기법에서 발생하는 영점에 의한 정상상태 오차를 저감하기 위해 PDFF 제어를 이용하여 시뮬레이션하고 PI제어방식과 비교함으로써, 영점효과 저감특성을 확인하였다. PDFF제어기 특성상 발생하는 위상지연 효과는 DLL을 사용하여 프로그램 내부에서 위상지연에 따른 table을 적용하여, 동기 신호보다 위상이 앞서는 새로운 reference 신호를 만들어내어 이 신호를 이용하여 제어를 함으로서 위상지연현상을 저감하였다. 이 결과를 토대로 하여 실제 실험을 함으로서 위의 시뮬레이션과 비교,분석하는 연구가 더욱 필요하다고 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] Kukrer, O.;Komurcugil, H.;Bayindir, N.S;"Control Strategy for single-phase UPS inverters";Electric Power Applications, IEE Proceedings ,Volume: 150, Issue: 6, 7 Nov. 2003 Pages:743 - 746
- [2] Ryan, M.J.; Brumsickle, W.E.;Lorenz, R.D;"Control topology options for single-phase UPS inverters";Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, 1996, Proceedings of the 1996 International Conference on, Volume: 1, 8-11 Jan. 1996 Pages:553 - 558 vol.1
- [3] Liang,T.-J.;Shyu,J.-L;"Improved DSP-controlled online UPS system with high real output power";Electric Power Applications, IEE Proceedings- , Volume: 151 , Issue: 1, 9 Jan, 2004 Pages:121 - 127
- [4] 전윤석;"PDFF 제어기법을 이용한 3상 PWM 컨버터의 전압제어기 설계"; 건국대학교 공학석사 학위논문,1998
- [5] Abdel-Rahim, N.M.; Quaicoe, J.E;"Analysis and design of a multiple feedback loop control strategy for single-phase voltage-source UPS inverters";Power Electronics, IEEE Transactions on , Volume: 11 , Issue: 4 ,July 1996 Pages:532 - 541