

비선형 부하를 고려한 계통연계형 인버터의 독립운전 제어알고리즘

정상민*, 유태식*, 명홍제*, 최세완*, 김효성**
 *서울산업대학교, **공주대학교

Control Algorithm for Stand-alone Operation of Utility Interactive Inverter considering Non-linear Load

Sangmin Jung*, Taesik Yu*, Hongjae Myung*, Sewan Choi*, Hyosung Kim**
 *Seoul National Univ. of Tech., **Kongju National Univ.

ABSTRACT

계통연계운전과 독립운전이 모두 가능한 계통연계형 인버터는 주전원계통의 고장 및 점검 시 독립운전모드로 동작하여 비상부하등의 전용부하에 안정된 전압을 공급해주어야 한다. 본 논문은 계통연계형 인버터의 독립운전 제어알고리즘에 관한 것으로 비선형 부하를 고려한 제어알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증한다.

1. 서론

계통연계운전과 독립운전이 모두 가능한 계통연계형 인버터는 비상부하 등의 전용부하가 접속되어 있는 경우, 주전원의 고장이 발생하더라도 비상전용부하에 지속적인 전력을 공급할 수 있다. 계통연계형 인버터의 독립운전시 전력회로의 토폴로지는 증가적으로 UPS 등의 분야에서 적용되는 CVCF용 인버터와 같게 된다.

계통연계형 인버터 시스템은 다양한 운전조건을 고려하여 유연한 제어 알고리즘을 확보하여야 하므로 마이크로프로세서나 DSP등과 같은 디지털 제어를 사용하는 것이 일반적이다.

이론적으로, 디지털 방식의 CVCF 인버터의 제어기로서 동특성이 가장 빠른 제어기는 데드비트(deadbeat) 제어기라고 할 수 있을 것이다^[1-3]. 그러나 데드비트제어기는 시스템의 파라미터에 의존하여 상태변수를 추정하여야 하므로, 노이즈나 파라미터의 비선형성 또는 드리프트에 의해 성능에 심각한 영향을 받을 수 있다^[4].

부하의 비선형 등에 따른 주기적인 부하의 외란에 대하여 인버터 출력단전압의 정상상태 오차를 제거할 수 있는 디지털 제어방법으로 반복(repetitive) 제어가 있다^[4-7]. 하지만 반복제어기는 부하의 간헐적인 변화라든지 전원주파수의 지속적인 변동이 발생할 경우 치명적인 과도현상이 나타날 수 있다^[7].

이에 비하여 적절히 게인이 조정된 PI제어기에 의한 다중루프 제어방식은 제어시스템의 강인성과 속응성의 비중에 적절히 안배시킬 수 있는 특징이 있다^[8-9].

본 논문에서는 계통연계형 인버터가 주전원계통의 고장 등으로 인하여 계통과의 연계가 차단되어 계통연계운전모드에서 독립운전모드로 전환하여 운전하는 경우, 다중루프 제어시스템에 의한 인버터의 제어기 구조를 분석하고 우수한 성능의 제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 제어알고리즘은 비상전용부하가 비선형 부하일 때를 고려하였으며 시뮬레이션에 의해 그 특성

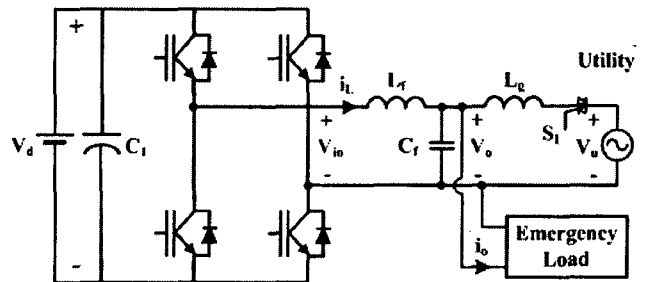


그림 1 계통연계 인버터 시스템
 Fig. 1 Utility interactive inverter system

을 검증하고 타당성을 확보한다.

2. 제안하는 독립운전 제어알고리즘

2.1 인버터 토폴로지

그림 1의 계통연계형 인버터가 주전원계통의 고장 등으로 인하여 독립운전으로 동작할 때는 LC필터를 가진 단상 풀브리지형 전압원 인버터와 증가의 토폴로지를 갖는다. 이를 모델링하게 되면 그림 2와 같고 전달함수($V_o(s)/V_{in}(s)$)에 대한 보드선도는 그림 3과 같이 된다.

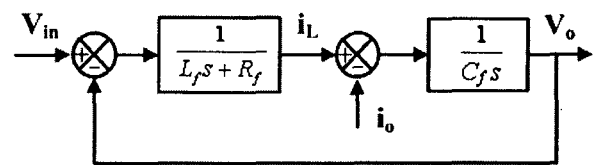


그림 2 인버터 블록도
 Fig. 2 Inverter block diagram

그림 3의 보드선도에 볼 수 있듯이 인버터 회로는 게인마진과 위상마진이 작아 안정도가 낮으며 저주파대역에서 매우 낮은 게인을 가지기 때문에 상당히 큰 정상상태오차가 예상되어진다.

2.2 제어알고리즘

본 논문에서는 낮은 위상여유와 저주파대역에서 낮은 게인을 갖는 인버터회로에 대하여, 적절한 제어기구조 및 제어게인

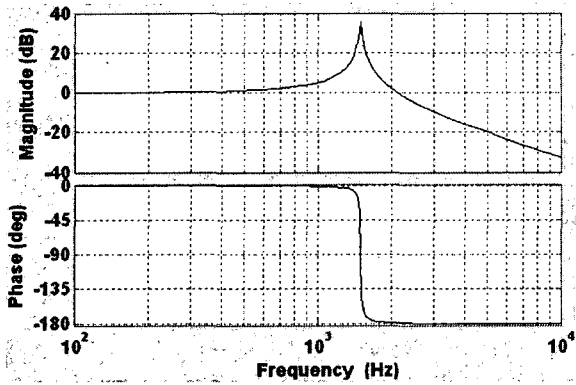


그림 3 인버터 보드선도($V_o(s)/V_{in}(s)$)
Fig. 3 Bode plot of inverter ($V_o(s)/V_{in}(s)$)

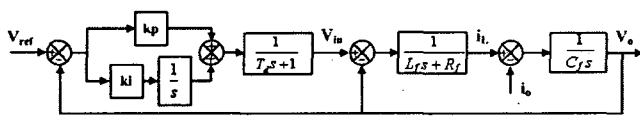
설계를 통해서 위상여유를 크게하여 안정도를 높이고, 저주파 대역의 게인 크기를 크게하여 정상상태 오차를 제거하고자 한다. 또한, 그림 2에서 볼 수 있듯이 부하전류는 출력전압에 대하여 외란으로 동작하여 제어에 악영향을 미치게 된다. 본 논문은 보드선도를 사용하여 부하전류에 대한 출력전압의 특성을 분석하여, 외란억제력(disturbance rejection)이 강하고 비선형 부하에서도 강한 제어력을 갖는 제어알고리즘을 제안한다.

PI 제어기에 기반을 둔 제어시스템은 일반적으로 제어기의 영점 위치에 따라 전체 시스템의 특성이 달라진다^[11]. 본 논문에서는 그림 3의 제어 대상인 인버터의 보드선도를 기준으로 우선적으로 안정성을 확보하면서 지령주파수에 대한 게인이 최대가 되도록 하여 정상상태 오차가 제거될 수 있도록 영점의 위치를 적절히 설정한다.

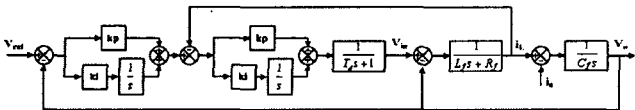
그림 4의 (a)-(c)에 3가지 인버터 제어 블록도를 보였다. 본 논문에서는 기존의 단일루프 PI 제어기, 이중루프 PI 제어기의 한계를 분석하고 이들 제어기보다 우수한 성능을 가진 피드포워드를 갖는 단일루프 PI 제어기를 제안하고 분석한다.

2.1.1 단일루프 PI 제어기

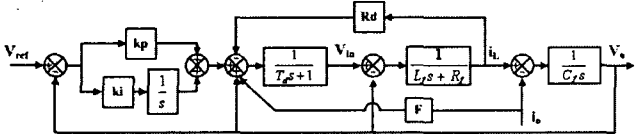
앞서 서술하였듯이 그림 4(a)에서 PI 제어상수는 안정성을 확보하면서 최대한 저주파 대역의 게인을 증가시킬 수 있도록



(a) 단일 루프 PI 제어 블록도



(b) 이중루프 PI 제어 블록도



(c) 제안한 피드포워드를 갖는 단일루프 PI 제어 블록도

그림 4 인버터 제어 블록도
Fig. 4 Inverter control block diagram

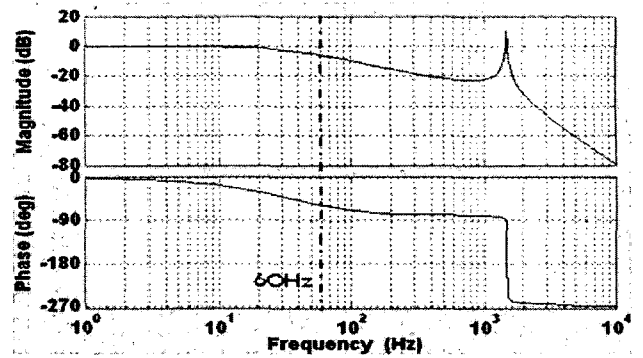


그림 5 단일루프 PI 인버터 제어 보드선도($V_o(s)/V_{ref}(s)$)
Fig. 5 Bodeplot of single loop PI inverter control ($V_o(s)/V_{ref}(s)$)

설계한다. 이때 그림 3에서 보듯이 제어 대상인 인버터가 매우 낮은 위상여유를 가지고 있으므로 최소한의 안정도를 유지하기 위하여는 저주파 대역의 게인이 제한될 수밖에 없다. 이러한 이유로 그림 5의 보드선도에서 보듯이 지령주파수에서 이득이 0dB이 되지 못하여 정상상태 오차가 발생한다.

2.2.2 이중루프 PI 제어기

앞서 단일루프 PI 제어기로는 정상상태오차를 제거 할 수 없음에 반하여 이중루프 제어기는 그림 4(b)와 같이 내부에 인덕터 전류제어 루프를 추가함으로써 안정성을 확보함과 동시에 정상상태 오차를 거의 없앨 수 있다. 그림 6의 보드선도에서 지령주파수에서 이득이 거의 0dB이 됨을 볼 수 있다. 하지만 그림 7의 외란(부하전류)에 대한 출력전압의 보드선도에 보듯이 5차까지의 주요한 주파수 대역에서의 이득이 커서 외란(부하전류)에 대한 출력전압 변동이 심할 것으로 예상되어 진다.

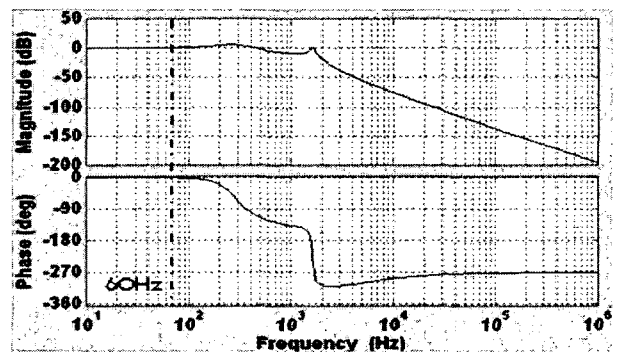


그림 6 이중루프 PI 인버터 제어 보드선도($V_o(s)/V_{ref}(s)$)
Fig. 6 Bode plot of double loop PI inverter control ($V_o(s)/V_{ref}(s)$)

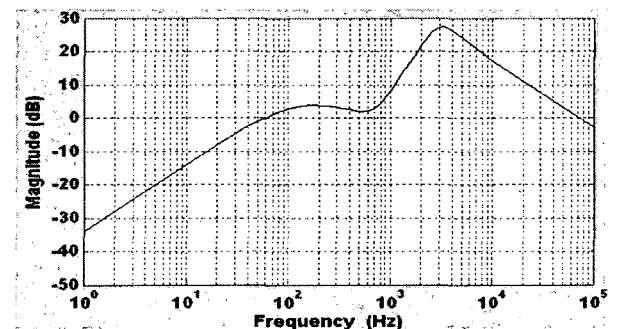


그림 7 이중루프 PI 인버터 제어 보드선도($V_o(s)/I_o(s)$)
Fig. 7 Bode plot of double loop PI inverter control ($V_o(s)/I_o(s)$)

2.3 제안한 피드포워드를 갖는 단일 루프 PI 제어기

제안한 제어기는 그림 4(c)와 같이 인덕터 전류 피드포워드에 의해서 인버터전압의 공진을 억제하여 제어 안정도를 높이고, 출력전압 피드포워드를 통해 저주파 대역의 게인 증가를 시킴으로써 제어 속응성과 정상상태 특성을 확보할 수 있다. 또한, 부하전류에 대하여 게인($sL_f + R_d$)을 가지고 피드포워드함으로써 외란(부하전류)에 대한 특성을 향상 시켰으며 이중 루

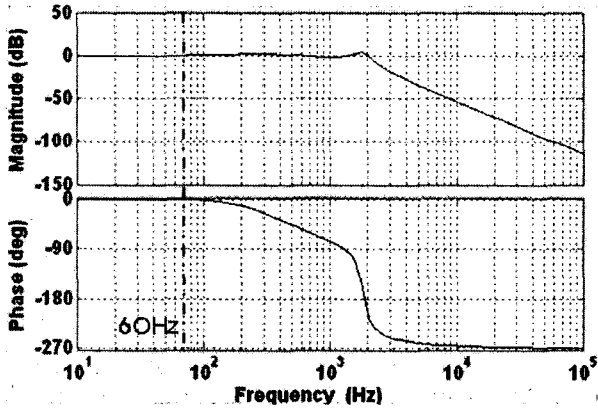


그림 8 제안한 피드포워드를 갖는 단일루프 PI 인버터 제어 보드 선도($V_o(s)/V_{ref}(s)$)
Fig. 8 Bode plot of proposed single loop PI inverter control with feedforward ($V_o(s)/V_{ref}(s)$)

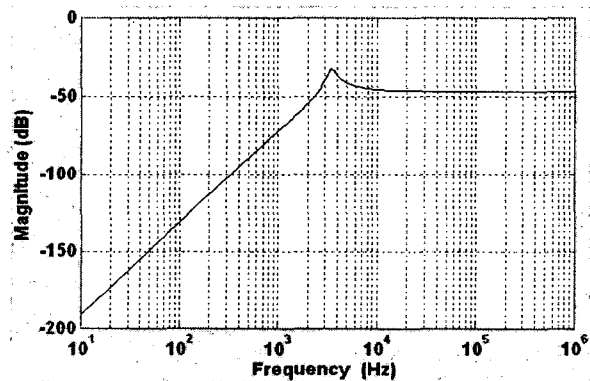


그림 9 제안한 피드포워드를 갖는 단일루프 PI 인버터 제어 보드선도($V_o(s)/V_{ref}(s)$)
Fig. 9 Bode plot of proposed single loop PI inverter control with feedforward ($V_o(s)/V_{ref}(s)$)

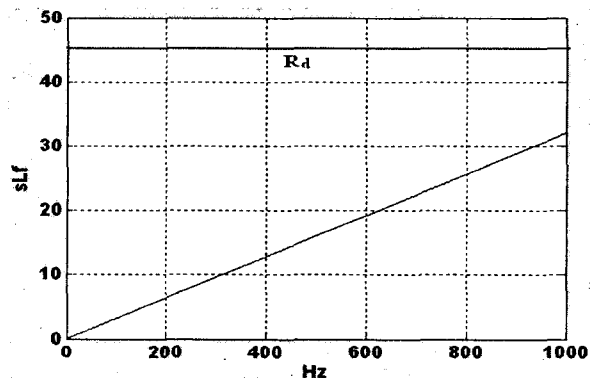


그림 10 sL_f 와 R_d 값
Fig. 10 Impedance values of sL_f and R_d

프 PI 제어기에 비해 제어게인 설정이 보다 간편하다.

그림 8에 제안된 제어알고리즘에 의한 폐루프 시스템의 출력전압 지령치에 대한 출력전압의 특성을 나타내었으며, 지령 주파수에서 이득이 거의 0dB이 됨을 볼 수 있다. 그림 9는 외란(부하전류)에 대한 출력전압의 특성을 나타내는 보드선도이다. 이를 통해서 비선형 부하에서도 제어가 가능함을 예상할 수 있다.

디지털제어기로는 실제 미분기의 구현이 어렵다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 5차까지의 주요한 주파수 대역에서 $R_d(=48)$ 값이 $sL_f(=5.1e-3)$ 값에 비해 매우 크기 때문에 sL_f 성분이 무시될 수 있으므로, 실제 부하전류 피드포워드에서는 $L_d R_d$ 성분만 사용하도록 하였다.

3. 시뮬레이션 검증

제안한 계통연계 인버터의 독립운전 제어알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 PSIM을 사용한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 11과 표 1에 시뮬레이션 회로와 조건을 각각 나타내었다. 그림 12는 제안한 피드포워드를 갖는 단일 루프 PI 제어기의 부하의 계단변화에 대한 출력전압 레플리케이션 특성을 보인다.

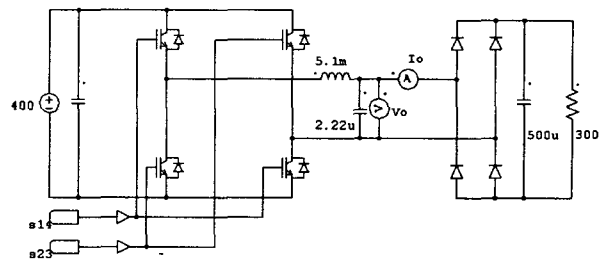


그림 11 시뮬레이션 회로
Fig. 11 Simulation circuit

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

DC-Link 전압	400Vdc
인버터 출력전압	220Vac/60Hz
필터 인덕터	5.1mH
필터 커패시터	2.2uF
스위칭 주파수	15kHz

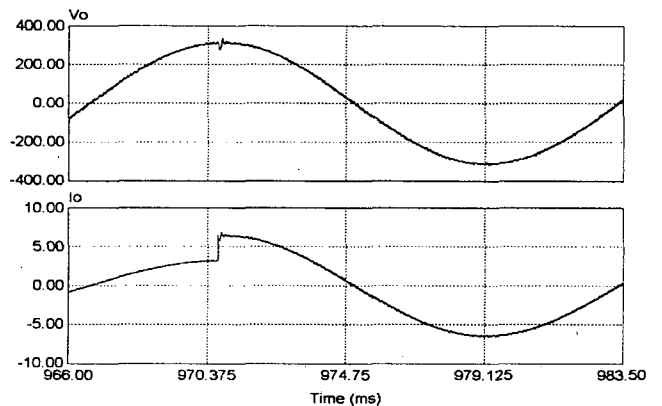


그림 12 부하가변(500W→1kW)에 대한 인버터 출력 전압 및 전류 파형 (제안한 피드포워드를 갖는 단일루프 PI 제어)
Fig. 12 Inverter output voltage and current waveforms against load change(500W→1kW)(Proposed Single loop PI control with feedforward)

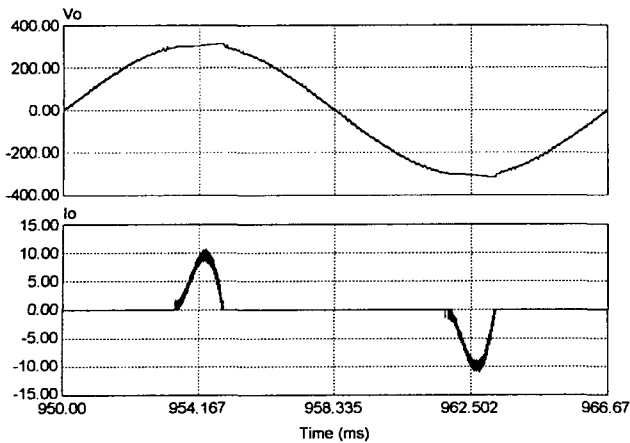


그림 13 비선형 부하에 대한 인버터 출력 전압 및 전류 파형 (제한한 피드포워드를 갖는 단일루프 PI 제어)
 Fig. 13 Inverter output voltage and current waveforms against non-linear load(Proposed single loop PI control with feedforward)

표 2 정상상태 성능 시뮬레이션 결과($V_{ref}=220Vac/60Hz$)
 Table 2 Simulation analysis results

제어기	부하	
	저항부하(1kW)	비선형 부하
단일 루프 PI 제어기	<ul style="list-style-type: none"> ▶ $V_o = 136.4(Vac)$ ▶ $THD = 12.3(\%)$ 	제어안됨
이중루프 PI 제어기	<ul style="list-style-type: none"> ▶ $V_o = 226.9(Vac)$ ▶ $THD = 5(\%)$ 	제어안됨
제한한 피드포워드를 갖는 단일 루프 PI 제어기	<ul style="list-style-type: none"> ▶ $V_o = 219.6(Vac)$ ▶ $THD = 2.36(\%)$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ $V_o = 219.94(Vac)$ ▶ $THD = 4.1(\%)$

부하의 계단변화에 대해 출력전압은 작은 글리치 형태의 전압강하 이후 곧바로 출력 지령치를 추종하는 것을 볼 수 있다. 그림 13은 비선형 부하의 경우 제한한 피드포워드를 갖는 단일 루프 PI 제어기의 출력전압 레귤레이션 특성을 보인다. 비선형 부하에서 출력전압은 작은 전압 왜곡만을 나타낸다. 표 2에 PSIM 시뮬레이션에 의하여 수행된 3가지 제어기의 정상상태 성능을 정리하였다. 이는 각 제어블럭도에 대한 Matlab 분석과 거의 일치함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 계통연계 인버터의 독립운전 제어알고리즘을 제안하였다. 단일 루프 PI 제어기에 피드포워드 추가된 형태의 제안된 제어기는 인덕터 전류 피드포워드를 통한 안정성 확보, 출력전압 피드포워드를 통한 저주파 대역의 게인 증가, 부하전류 피드포워드를 통한 외란억제(부하전류) 특성 향상을 하였으며 정상상태오차 제거와 외란(부하전류)에 대한 특성이 우수함을 제어블럭도에 대한 Matlab 분석과 평가시스템에 대한 PSIM 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] T.Yokoyama, A.Kawamura, "Disturbance Observer Based

Fully Digital Controlled PWM Inverter for CVCF Operation," *IEEE Trans. on PE*, vol.9, no.5, pp.473-480, Sept. 1994.

[2] N.Uemura, T.Yokoyama, "Current Control Method Using Voltage Deadbeat Control for Single Phase Utility Interactive Inverter," *Proceedings on INTELEC03*, pp.40-45, Oct. 2003.

[3] 김효제, 권순재, 김상봉, 정영석, "소신호 모델을 이용한 전류모드제어의 데드비트 제어기 설계," 2004년도 전력전자학계학술대회 논문집, pp.752-755, 2004년 7월.

[4] 김병진, 최재호, "AC 전원장치의 출력 THD 저감을 위한 반복제어기 설계," 1999년도 전력전자학계학술대회 논문집, pp.311-314, 1999년 7월.

[5] T.Haneyoshi, A.Kawamura, R.G.Hoft, "waveform Compensation of PWM Inverter with Cyclic Fluctuating Loads," *IEEE Trans. on IA*, vol.24, pp.582-588, Jul./Aug. 1988.

[6] Y.Y.Tzou, H.C.Yeh, "DSP-Based Adaptive Repetitive Control of a PWM Inverter for UPS with Very Low Harmonic Distortion," *Proceedings on IECON 22nd International Conference*, vol.2, pp.1122-1127, Aug. 1996.

[7] C.Rech, J.R.Pinheiro, "New Repetitive Control System of PWM Inverters with Improved Dynamic Performance under Non-periodic Disturbances," *Conf. Records on 35th PESC 2004*, pp.54-60, 2004.

[8] M.J.Ryan, W.E.Brumsickle, D.R.Lorenz, "Control Topology Options for Single-Phase UPS Inverters," *IEEE Trans. on IA*, vol.33, no.2, pp.493-501, Sept. 2003

[9] P.C.Loh, M.J.Neman, D.N.Zmood, D.G.Holmes, "A Comparative Analysis of Multiloop Voltage Regulation Strategies for Single and Three-Phase UPS Systems," *IEEE Trans. on PE*, vol.18, no.5, pp.1176-1185, Sept. 2003.

[10] M.J.Ryan, D.R.Lorenz, "A High Performance Sine Wave Inverter Controller with Capacitor Current Feedback and Back-EMF Decoupling," *Conf. Records on PESC95*, pp.507-513, 1995.

[11] Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", second edition, Kluwer Academic Publishers, 2001.