

연속적인 운전모드의 전환을 위한 계통연계형 인버터의 간접전류 제어기법

俞太植*, 裴永相**, 崔世琬†, 金孝城***

Indirect Current Control of Utility Interactive Inverter for Seamless Transfer

Taesik Yu, Youngsang Bae, Sewan Choi, and Hyosung Kim

요 약

분산발전시스템에 비상부하 등의 전용부하가 접속되어 있는 경우, 주전원에 고장이 발생하더라도 비상전용부하에 는 지속적인 전력을 공급하기 위하여 의도적인 단독운전을 하게 된다. 기존의 계통연계형 인버터는 주전원에 전력을 주입하기 위하여 평소에 전류제어모드로 운전을 하기 때문에, 의도적인 단독운전 상황이 발생하는 경우 비상부하에 안정된 전압을 공급해 주기 위하여 전압제어모드로 운전을 전환하여야한다. 이러한 운전모드의 전환시 인버터의 출력단 전압에 심각한 과도문제가 발생된다. 본 논문에서는 의도적인 단독운전 발생시 인버터 운전모드 전환에 따른 출력전압의 과도현상을 최소화하기 위한 인버터 토폴로지와 제어알고리즘을 제안한다. 제안된 간접전류제어 알고리즘에 적합한 LCL필터 설계방법과 설계데이터를 제시한다.

ABSTRACT

Distributed generation (DG) systems go to intentional islanding operation to back up private emergency loads when the main grid is out of electric power. Conventional utility interactive inverters normally operated in current control mode in DG system must change their operation mode into voltage control mode to ensure stable voltage source to the emergency loads when intentional islanding operation occurs. During the transfer between current control mode and voltage control mode, serious transient problem may occur on the output terminal voltage of the utility interactive inverter. This paper proposes reasonal inverter topology and its control algorithm for seamless transfer of DG systems in intentional islanding operation. Filter design guide line and data for a LCL filter that is appropriate for the proposed control algorithm are also presented by the authors.

Key Words : Distributed generation, Intentional islanding operation, Seamless transfer, Indirect current control

1. 서 론

현재 사용되고 있는 에너지원의 대부분을 차지하는 화석연료는 지구온난화를 일으키는 이산화탄소 및 각

종 공해물질을 배출하고 있다. 최근 기후변화협약을 바탕으로 채택된 교토의정서가 발효됨에 따라 신·재생 에너지를 활용할 수 있는 기술의 중요성이 점차 증대 되고 있다. 이러한 신·재생에너지원은 그 규모가 1kW 급의 소형에서부터 수백MW급에 이르기까지 다양하며 분산발전의 형태로 계통에 연계된다.

분산발전시스템에서 주전원계통에 정전이 발생하는 경우에도 분산발전시스템이 주전원으로부터 분리되지 않고 계속 동작하는 상황을 단독운전(Islanding operation)이라고 한다.

†교신저자 : 정희원, 서울산업대 제어계측공학과 부교수
E-mail : schoi@snut.ac.kr

*학생회원, 서울산업대 제어계측공학과 석사과정

**정회원, 서울산업대 제어계측공학과 졸업(석사)

***정회원, 공주대 전기전자공학부 교수

접수일자 : 2005. 9. 14 1차 심사 : 2005. 10. 27

2차 심사 : 2005. 12. 21 심사완료 : 2006. 1. 5

일반적으로 단독운전상태가 검출되면 즉시 인버터의 동작을 정지시켜서 주전원계통과 분산발전시스템과의 연결을 해제하여야 한다. 단독운전방지(anti-islanding) 기법은 이러한 비의도적인 단독운전을 방지하는 것을 의미하며, 이 분야의 연구는 많은 연구자들에 의해 진행되어왔다^[1-3].

한편 의도적인 단독운전은 분산발전시스템에 비상부하 등의 전용부하가 접속되어 있어서, 주전원에 고장이 발생하더라도 비상전용부하에는 지속적인 전력을 공급하고자하는 경우이다. 이같이 의도적인 단독운전의 상황에서는 단독운전상태가 검출되더라도 분산발전시스템은 주요부하에 끊임없는 안정된 전압을 공급하는 한편 주전원계통으로부터는 접속을 차단하여 안전을 확보하여야 한다.

의도적인 단독운전 발생시 인버터는 운전모드의 전환에 따른 출력전압의 과도현상을 최소화하는 기술이 필수적이다. 그런데 기존의 직접전류 제어방식은 계통연계 운전시는 전류제어모드로 또한 단독운전시는 전압제어모드로 동작하게 된다. 따라서 계통연계운전중에 주전원계통에 고장이 발생하는 경우 의도적인 단독운전을 지속하기 위하여 인버터는 전류원모드에서 전압원으로 동작모드를 전환해야만 하므로 인버터전압이 매우 불안정해질 수 있다. 특히 새그나 스웰 또는 순시정전 등과 같이 시간적으로 급격한 사고시 운전모드의 전환이 신속히 이루어지지 못하게 되면서 과도문제가 더욱 심각하게 나타날 것이다. 더욱이, 단독운전검출 알고리즘에 따른 불검출영역(nondetection zone; NDZ)^[1]과 통신지연 등의 요인에 의하여 주전원계통의 고장이 분산발전시스템에서 즉시에 인식이 되지 못하게 된다면 상당한 시간동안 주요부하의 전압이 심각한 과도상태에 놓일 수 있게 된다.

본 논문에서는 의도적인 단독운전을 고려한 계통연계형 인버터의 제어알고리즘에 관하여 연구한다. 주전원계통의 사고가 분산발전시스템에서 늦게 감지되더라도 주요부하의 전압에 과도문제가 발생하지 않는 새로운 인버터 토폴로지를 제시하고 그에 따른 인버터제어 알고리즘을 구현한다. 시뮬레이션에 의해 제안된 인버터의 특성을 검증하여 타당성을 확보한다.

2. 제안하는 간접전류제어기법

그림 1에 제안한 방식의 인버터 토폴로지를 보인다. 본 논문에서는 교류측 전압 및 전류의 제어에 목적을 두고 있으므로 직류 링크측의 에너지원은 편의상 배터

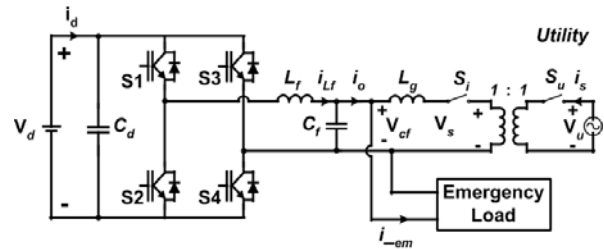


그림 1 제안한 계통연계 인버터를 사용한 단상 분산발전시스템

Fig. 1 Single-phase distributed generation system using proposed utility interactive inverter

리로 가정하였다. 그러나 적절한 직류단 전압제어기가 고려된다면 직류 링크측에는 태양전지, 연료전지, 등의 어떠한 에너지원이 접속되어도 제안된 제어기의 성능은 보장이 될 것이다.

주전원계통이 정상일 때에 보호스위치 S_u 및 계통연계스위치 S_i 는 ON 상태에 있다. 이때 제안된 계통연계형 인버터는 전압제어모드로 운전되면서 라인인덕터에 가해지는 전압을 제어함으로써 계통에 주입되는 전류 I_o 를 조정한다. 계통연계형 인버터에는 정격의 25%의 비상부하가 상시 연결되어 있는 것으로 가정 하므로, 계통에 주입할 수 있는 최대 전력은 정격의 75%이다.

주전원계통에 고장이 발생하면 주전원계통의 보호스위치인 S_u 는 곧바로 차단되면서 약 1/4사이클 이내에 사고를 계통연계형 인버터에게 알린다. 계통연계형 인버터는 사고를 인식하면 전류주입을 중단하고 계통연계스위치 S_i 를 차단하는 한편, 25%의 비상부하에 끊임없는 전력을 공급하며 의도적인 단독운전을 한다.

표 1에 제안된 분산발전시스템의 전기적 사양을 보인다. 제안된 시스템은 가정용을 대상으로 하여 1kW 급의 규모로 하였으나 대용량의 경우에도 토폴로지 및 제어알고리즘의 적용이 가능하다.

인버터의 교류출력측 필터로 LCL구조의 필터를 사

표 1 제안된 분산발전시스템의 전기적 사양
Table 1 Electrical Specification of the Proposed Distributed Generation System

정격출력전력(P)	1kW
공칭전원전압(V)	240V
공칭전원주파수(f)	50Hz
스위칭주파수(f_{sw})	15kHz

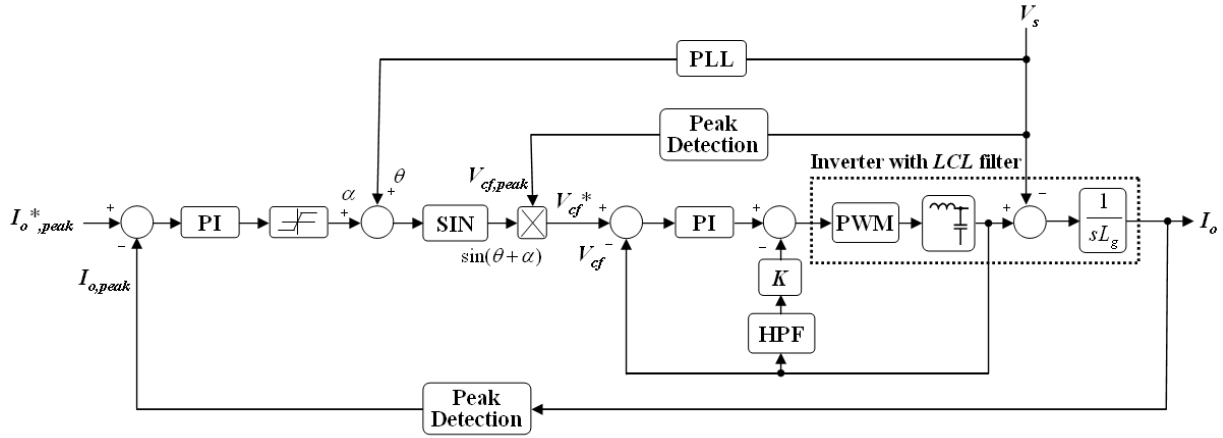


그림 2 제안된 간접전류제어방식의 제어시스템 블록도
 Fig. 2 Control system block diagram for the proposed indirect current control algorithm

용한다. 기존의 전류제어방식의 토폴로지에서는 인버터에 L형 교류필터를 접속하여 전류제어를 하고, 전류리플성분이 계통으로 유입되는 것을 억제하기 위하여 CL형 교류필터를 사용한다^[4,5].

이와 달리, 본 논문에서 제안한 간접전류제어방식의 토폴로지는 LC형 교류필터를 기본으로 동작하여 필터 커패시터 양단의 전압을 제어함으로써, 계통쪽의 라인 인덕터 L_g 양단에 걸리는 전압을 제어하여 간접적으로 계통에 주입되는 전류를 조정한다. 다음에 본 논문에서 제안하는 인버터 토폴로지에 적용되는 LCL 필터설계 순서를 설명한다^[6].

① R_{base} 저항을 구한다.

$$R_{base} = \frac{V^2}{P} = \frac{240^2}{1000} = 57.6\Omega \quad (1)$$

② 필터공진주파수 f_c 를 결정한 뒤 LC 필터뱅크 값을 구한다.

$$f_c = \frac{1}{10} \times f_{sw} = 1500Hz \quad (2)$$

$$LC = \left(\frac{1}{2\pi f_c}\right)^2 \quad (3)$$

③ 인덕터 과도 전류 특성을 보장하는 L/C를 구한다.

$$\frac{L}{C} < \left(\frac{R_{base}}{\xi_c}\right)^2 \quad (4)$$

④ L과 C를 구한다.

$$L = \left(\frac{1}{2\pi f_c}\right) \cdot \left(\frac{R_{base}}{\xi_c}\right) = 6.11mH \quad (5)$$

$$C = \left(\frac{1}{2\pi f_c}\right) / \left(\frac{R_{base}}{\xi_c}\right) = 1.84\mu F \quad (6)$$

⑤ L_g 값을 구한다(0.1pu).

$$L_g = 0.1 R_{base} / 2\pi f = 18.3mH \quad (7)$$

표 2에 위의 과정에 의해 설계된 LCL필터의 설계결과를 보인다.

표 2 LCL필터 설계결과
 Table 2 Design Data for the LCL Filter

L_f	6.11 mH
C_f	1.84 uF
L_g	18.3 mH

직접전류제어방식은 계통연계시에 주입전류의 제어 특성은 우수하지만, 서론에서 언급한 바와 같이 의도적인 단독운전의 경우에 전류제어모드에서 전압제어모드로 전환하여야 하므로 과도문제가 예상된다. 이에 반하여 제안된 간접전류제어방식은 계통연계운전의 경우나 단독운전의 경우 모두 전압제어모드로만 운전하기 때문에 모드전환에 따른 과도문제가 근본적으로 발생하지 않는 특징이 있다.

그림 2에 본 논문에서 제안하는 간접전류제어알고리즘을 적용한 제어시스템의 개념을 블록도로 보인다.

점선으로 표시된 부분은 LC출력필터를 갖는 계통연계형인버터와 라인인덕터 L_g 로 구성된 전력회로의 모델이다. 외부피드백루프에서는 계통주입전류 I_o 를 제어하며, 내부피드백루프에서는 외부루프에서 요구하는 계통주입전류를 제어하기 위하여 필요한 인버터 출력전압을 순시적으로 제어한다.

계통주입전류는 매 반주기에서의 피크값을 검출하므로 외부루프는 계통주입전류의 피크값을 기준값으로 조정(regulation)해 주는 기능을 갖는다. 제안된 간접전류제어 알고리즘에서는 계통연계운전시, 라인인덕터 L_g 에 인가되는 전압을 제어함으로써 간접적으로 주입전류를 조정한다. 주전원계통에 주입하고자하는 유효전력이 P 라고 하면, 라인인덕터 L_g 를 통하여 주입되어야할 전류 I_o 는 (8)과 같이 계산되어질 수 있다.

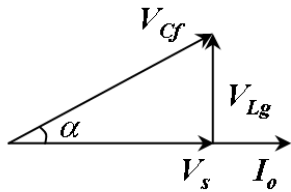


그림 3 제어알고리즘 벡터도
Fig. 3 Vector diagram for the control algorithm

$$I_o = \frac{P}{V} \tag{8}$$

이때 라인인덕터 L_g 에 가해지는 전압은 식 (9)와 같이 유도된다.

$$V_{Lg} = 2\pi f \times L_g \times I_o \tag{9}$$

라인인덕터에 가해지는 전압 V_{Lg} 와 계통전압 V_s 그리고 인버터 출력단전압 V_G 사이에는 그림 3과 같은 벡터관계가 형성된다.

따라서 주전원계통에 I_o 의 전류를 주입하기 위하여 필요한 인버터 출력단전압의 크기 및 전원전압과의 위상차는 다음 식과 같이 계산된다.

$$V_G = \sqrt{V_s^2 + V_{Lg}^2} \tag{10}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_{Lg}}{\sqrt{V_s^2 + V_{Lg}^2}} \tag{11}$$

식 (10)과 (11)은 인버터를 제어하기 위한 내부피드백루프의 기준값이 된다. 인버터 출력단전압의 크기는 정밀히 제어할 필요는 없으며 피드포워드제어로 간단

히 구현할 수 있다. 위상차가 작은 경우는 전원전압의 피크값을 검출하여 인버터 출력단 전압의 크기 기준값으로 삼아도 큰 오차가 없다.

그러나 위상차각 α 는 매우 정밀한 제어가 요구된다. 제안된 제어방식에서는 그림 2에 보인 것처럼 주입전류의 오차를 PI제어기로 처리한 출력을 위상차각의 제어변수 α 로 택하였다. 이 위상차각 제어변수 α 에 PLL에 출력되는 전원전압의 기본위상각 θ 를 더하면 인버터 출력단 전압 V_G 에 요구되는 제어각의 기준이 된다. 이 제어각의 SIN값을 취한 후 앞서 구한 인버터 출력단 전압의 크기 기준값을 곱하면 인버터 출력단 전압을 제어하기 위한 내부피드백루프의 순시적인 기준값이 생성된다.

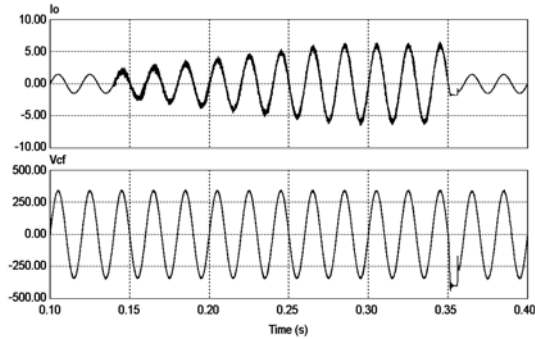
내부루프에서는 외부루프에서 생성한 순시 기준전압에 따라서 인버터 출력단전압 V_G 를 순시적으로 제어한다. 인버터 출력단전압은 LC필터에 의한 공진의 가능성이 있다. 인버터 출력단전압의 공진을 억제하기 위하여 고역통과필터(high pass filter; HPF)를 사용한 피드포워드 제어를 사용하였다^[7].

3. 시뮬레이션 검증

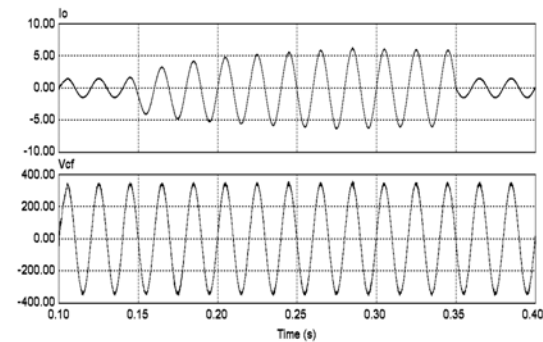
제안된 제어방식의 계통연계운전에 대한 타당성을 검증하기 위하여 PSIM을 사용한 시뮬레이션을 수행하였다. PSIM은 전력전자회로의 특성을 분석 검증하기에 적절한 범용 시뮬레이터 중의 하나로서 특히 단상회로의 경우 비교적 정밀히 회로의 동작을 예측할 수 있으며, 전력전자분야에서 사용되는 다양한 소자들과 아날로그제어기 및 함수들을 편리하게 사용할 수 있는 특징이 있다. 또한 Zero order holder를 사용하여 간단히 디지털제어 시스템의 특성을 예측해 볼 수도 있다.

본 논문에서는 시뮬레이션의 정밀도를 높이기 위하여 인버터회로를 실제의 소자에 해당되는 IGBT요소를 사용하여 구성하였고, PLL회로를 하드웨어설계에 맞추어 구현하는 등 가능한 실제의 상황을 충분히 예측할 수 있도록 하였다. PWM은 실제의 구현에 맞추어 삼각파 비교법을 적용하였다. 따라서 본 논문에서 수행한 시뮬레이션은 하드웨어를 구성하여 제작하기 전에 제안된 토폴로지와 제어알고리즘의 타당성을 미리 검증하여 보기에 충분하다고 사료된다. 본 논문에서 적용한 시뮬레이션의 시나리오는 다음과 같다.

- ① 초기에 주전원계통이 정상적인 상태(보호스위치 S_u 는 ON)에서 계통연계스위치 S_f 를 ON시켜서 계통연계운전을 시작한다. 이때 전류주입은 하지 않고, 다만 비상부하에 25%의 전력을 공급하고 있다.



(a)



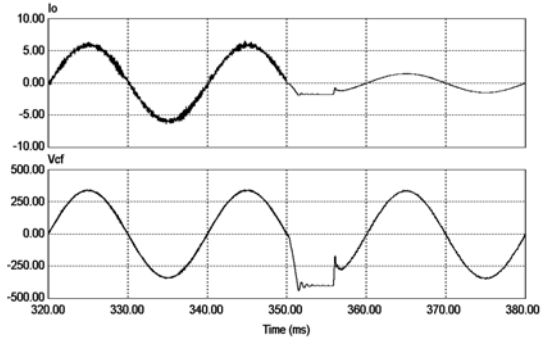
(b)

그림 4 시뮬레이션 시나리오에 따른 각 제어방식에서의 인버터출력전류 및 전압파형; (a)직접전류제어방식, (b)제한한 간접전류제어방식

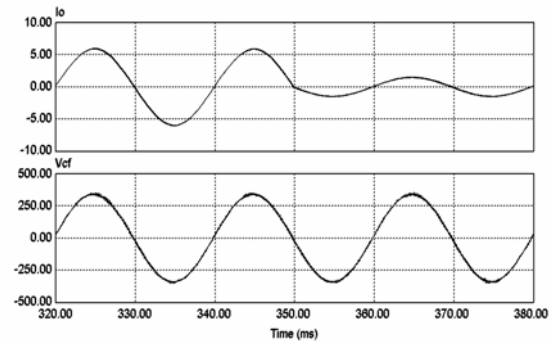
Fig. 4 Inverter output current and voltage waveforms according to each control algorithm; (a)direct current control algorithm, (b)indirect current control algorithm

- ② 0.14초의 시점부터 서서히 75%의 전력을 계통에 주입한다.
- ③ 0.35초의 시점에 전원측에 고장이 발생된다. 이때 보호스위치 S_u 는 즉시 차단되지만 계통연계인버터는 1/4사이클이 지난 후에 고장을 인식한다고 가정한다.
- ④ 0.355초에 인버터는 주전원계통의 사고를 인지하여 S_i 를 차단하고 25%의 비상부하에 끊임없는 전력을 공급하면서 의도적인 단독운전으로 전환한다.

그림 4에는 시뮬레이션 시나리오에 따른 각 제어방식의 인버터 출력전류 및 전압을 보인다. 시뮬레이션 파형에서 알 수 있는 바와 같이 직접전류제어방식이나 제한된 간접전류제어방식 모두 계통연계시 주입전류를 잘 제어하고 있다. 그러나 주전원계통에 고장이 발생하여 이를 감지하고 의도적인 단독운전으로 전환하는



(a)



(b)

그림 5 주전원에 고장이 발생한 경우의 확대 파형; (a)직접전류제어방식, (b)제한한 간접전류제어방식

Fig. 5 Zoomed-in waveforms when the fault occurred in the mains; (a)direct current control algorithm, (b)indirect current control algorithm

0.35초 이후의 파형을 보면, 제한된 간접전류제어방식의 동작특성이 우수함을 알 수 있다.

그림 5는 주전원에 고장이 발생한 시점을 확대한 파형이다. 그림 5(a)의 직접전류제어방식의 경우 주전원 계통에 고장이 발생한 상황을 인버터가 인식하기까지의 지연시간동안 인버터의 출력전압과 전류가 제어 불능의 상태에 빠져서 회로의 조건에 따라 비상부하에 걸리는 전압과 전류가 비정상적인 형태로 결정되는 것을 알 수 있다. 이에 반하여 그림 5(b)의 제한된 간접전류제어방식의 경우 과도기간 중에도 비상부하에 걸리는 전압과 전류는 아주정상적인 것을 볼 수 있다.

그림 6은 단독운전의 상황에서 부하전류의 외란에 대한 인버터 출력단전압의 레귤레이션 특성을 보인다. 제한된 간접전류제어방식의 경우가 전류외란에 대하여 출력전압이 강인함을 보인다. 이는 직접전류제어방식

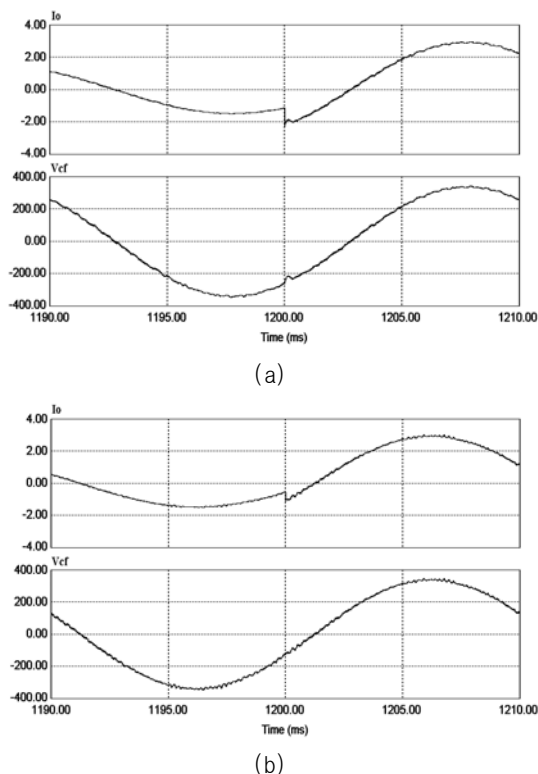


그림 6 단독운전시 부하가변(250W→500W)에 대한 인버터 출력전류 및 전압 파형; (a)직접전류제어방식, (b)제안된 간접전류제어방식

Fig. 6 Inverter output current and voltage waveforms against load change (250W→500W) during islanding operation; (a)direct current control algorithm, (b)indirect current control algorithm

이 전압진동을 억제하기 위하여 내부 인덕터전류만을 피드백을 하기 때문이다. 이를 개선하기 위하여는 인버터출력전류 I_o 에 대한 센서를 추가하면 되지만 이는 센서의 추가로 인한 비용이 지불된다^[8].

이상의 시뮬레이션 결과를 볼 때 제안된 간접전류제어방식은, 의도적인 단독운전이 발생한 상황에서 단독운전의 검출에 지연이 발생되어도 비상부하에 끊임없는 안정된 전압을 공급할 수 있음이 검증되었다. 또한 각각 1세트의 전압센서와 전류센서 만에 의하여 우수한 제어특성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문은, 의도적인 단독운전이 발생한 경우 주요 부하에 인가되는 전압이 끊임없이 안정되게 공급될 수

있도록, 새로운 인버터 토폴로지 및 제어알고리즘을 제안하였다. 제안된 토폴로지에 따른 LCL필터 구조에 대하여 필터설계 방법과 설계 데이터를 제시하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 타당성을 조사하였다. 제안된 방법은 인버터가 항상 전압모드로만 안정하게 동작하므로, 주전원에 고장이 발생한 경우에 주요부하단 전압을 안정하게 유지할 수 있었다. 제안된 간접전류제어 방법은 계통에 주입하는 전력을 전 영역에서 안정되게 조정할 수 있으며, 직접전류제어방식에 비하여 정상상태 특성과 과도상태 특성의 우수함이 입증되었다. 또한 부하전류 외란에 대하여 제어의 강인함을 보였다. 결론적으로 제안된 방법은 의도적인 단독운전을 하는 분산발전시스템에 유용하게 쓰일 것으로 판단된다.

이 연구는 공주대학교 자체 학술연구지원(과제번호 2005-0157)에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] J.Stevens, R.Bonn, J.Ginn, S.Gonzalez, G.Kern, *Development and Testing of an Approach to Anti-Islanding in Utility-interconnected Photovoltaic Systems*, Sandia National Laboratories report SAND2000-1939, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, August 2000.
- [2] R.M.Hudson, T.Thome, F.Mekanik, M.R.Behnke, S.Gonzalez, J.Ginn, "Implementation and Testing of Anti-islanding Algorithm for IEEE 929-2000 Compliance of Single Phase Photovoltaic Inverters," *Records on 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp.1414-1419, May 2002.
- [3] C.Jerapurtra, P.N.Enjeti, I.H.Hwang, "Development of A Robust Anti-Islanding Algorithm for Utility Interconnection of Distributed Fuel Cell Power Generation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.19, No.5, pp.1163-1170, Sept. 2004.
- [4] M.Liserre, F.Blaabjerg, S.Hansen, "Design and Control of An LCL Filter Based Active Rectifier," *IEEE Transactions on Ind. App.*, Vol.38, No.2, pp.299-307, Sept/Oct. 2001.
- [5] T.CY.Wang, Z.Ye, G.Sinha, X.Yuan, "Output Filter Design for a Grid-interconnected Three-Phase Inverter," *Conference Records on PESC'03*, Vol.2, pp.779-784, June 2003.

- [6] Hyosung Kim, Seung-Ki Sul, "The Behavior of Filter Inductor Current on Controlling Filter Capacitor Voltage of Output LC Filters for PWM Inverters," *Conference Records on ICPE 2004-Pusan, CD Rom*, October 2004.
- [7] A.Nabae, H.Nakano, Y.Okamura, "A novel control strategy of the inverter with sinusoidal voltage and current outputs," *Conference Records on PESC'94*, Vol.1, pp.154-159, June 1994.
- [8] M.J.Ryan, W.E.Brumsickle, and R.D.Lorenz, "Control Topology Options for Single-Phase UPS Inverters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.33, No.2, pp.491-501, March/April 1997.

저 자 소 개



유태식(俞太植)

1979년 6월 10일생. 2005년 서울산업대 제어계측공학과 졸업. 현재 2005년~현재 서울산업대 제어계측공학과 석사과정.



배영상(裴永相)

1979년 11월 30일생. 2003년 호서대 전기공학과 졸업. 2005년 서울산업대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사).



최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 미국 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공학박). 1985년~1990년 대우 중공업 중앙연구소 주임연구원. 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울산업대 제어계측공학과 부교수. 당 학회 재무이사.



김효성(金孝城)

1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일본 오까야마대학 방문교수. 2000년~2001년 덴마크 Aalborg대학 방문교수. 1987년~2005년 천안공업대학 교수. 2005년~현재 공주대 전기전자공학부 교수. 당 학회 편집위원.