

중요부하를 갖는 계통연계형 인버터의 고조파주입에 의한 단독운전방지 기법

오형민¹, 최세완[†], 김태희², 이기풍², 이태원²

Anti-islanding Method by Harmonic Injection for Utility Interactive Inverter with Critical Load

Hyeong-Min Oh¹, Se-Wan Choi[†], Tae-Hee Kim², Gi-Pung Lee², and Tae-Won Lee²

Abstract - The utility-interactive inverter with critical loads should supply continuous and stable voltage to critical loads even during the grid fault. The conventional control method which performs current control for grid-connected mode and voltage control for stand-alone mode undergoes the critical load voltage variation during grid fault. The critical load voltage may have large transient when the inverter performs mode transfer after the islanding detection. Recently, the indirect current control method which does not have the transient state during not only islanding detection but also the mode transfer has been proposed. However, since the voltage control is maintained even during the grid-connected mode it is difficult to detect the islanding. This paper proposes an active anti-islanding method suitable for the indirect current control method which does not have NDZ(Non-Detection Zone).

Keywords: indirect current control, active anti-islanding, utility-interactive inverter, critical load

1. 서 론

최근 전 세계적인 에너지 및 자원 위기로 인한 유가 급등, CO₂와 같은 온실가스 배출 규제를 위한 기후변화 협약 등으로 신재생에너지의 보급에 대한 노력이 활발히 이루어지고 있다. 신재생에너지의 보급이 확산되면서 신재생에너지를 분산발전의 형태로 계통에 접속하기 위한 PLL(Phase Locked Loop), 단독운전방지 기법 등과 같은 계통연계 기술이 요구되고 있으며^[1] 분산전원을 통합하여 효율적인 운전이 가능한 마이크로그리드 등의 계통 운용기술도 요구되고 있다^[2].

기존의 분산발전시스템의 경우 발전된 에너지를 계통에 공급하는 계통연계 운전만 수행해 왔으나 마이크로

그리드, 연료전지 분산발전시스템의 경우 중요부하를 갖고 있어 계통이상 시 지속적인 전원 공급을 위해 독립운전이 필수적이다. 계통이상 등으로 인해 재폐로 차단기(recloser)가 차단되면 부하전압은 출력 전력과 부하 상태에 따라 변동될 수 있어 중요부하에 심각한 영향을 줄 수 있다. 그리고 계통으로부터의 전력 공급이 차단되었음에도 불구하고 인버터에 의해 부하에 지속적인 전력이 공급되는 단독운전이 발생하게 된다. 이러한 단독운전이 발생하게 되면 계통이 재투입될 경우 계통과 인버터 출력 전압과의 위상 오차로 인해 분산전원, 인버터 및 부하에 큰 손상을 야기시키고 인명피해가 발생할 수 있다. 따라서 시스템의 안전성을 확보하기 위해 신속히 단독운전을 인지하여 계통으로부터 분리시키는 것이 중요하다. 또한 인버터가 단독운전을 인지하여 독립운전으로 모드 전환을 수행할 때에 기존의 제어기법의 경우 계통연계 운전 시에는 전류제어를, 독립운전 시에는 전압제어를 수행하므로 모드 전환 시 제어기 전환에 의해 또 다시 부하전압이 큰 과도상태에 놓이게 된다. 따라서 단독운전 검출 전 뿐 아니라 모드 전환 시에도 부하전압의 과도현상을 최소화하는 모드 전환기법이 필수적이다. 이러한 과도상태를 최소화하기 위한 다양한 제어기법들이 제안되었다^[3-5]. 하지만 이러한 제어기법들은

Paper number: TKPE-2012-17-4-5 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding author: schoi@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology.

Tel: +82-2-970-6542 Fax: +82-2-972-2866

¹ Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

² Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd.

Manuscript received Jan. 25, 2012; accepted May 7, 2012

— 본 논문은 2011년 추계학술대회 우수추천논문임

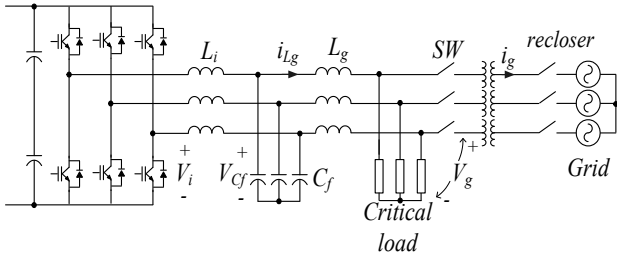


Fig. 1 Circuit diagram of a utility-interactive inverter with a critical load

단독운전을 검출하기 전의 부하전압 변동에 대해서는 보상하지 못하였다.

최근 독립운전 시 뿐 아니라 계통연계 시에도 전압제어를 유지함으로써 부하전압의 과도상태 없이 모드 전환할 수 있는 간접전류제어 기법^[6]이 제안된 바 있다. 그러나 간접전류제어 기법은 계통연계와 독립운전 시 지속적인 전압 제어를 유지하므로 부하전압의 변동이 발생하지 않아 일반적인 전압의 변동 등을 이용한 기존의 단독운전 검출 기법^[7]을 적용하는데 어려움이 있다.

본 논문에서는 독립운전 및 계통연계 시 전압제어를 유지함으로써 단독운전 검출 전에 부하전압에 변동이 없을 뿐 아니라 모드 전환 시 과도 상태가 없는 간접전류제어 기법에 적합한 전압 고조파를 주입하여 NDZ를 갖지 않는 액티브 방식의 단독운전방지 기법을 제안한다.

2. 시스템 구성

그림 1은 중요부하를 갖는 3상 계통연계형 인버터 회로도이다. LCL필터를 사용하여 효율적인 리플 저감효과와 작은 인덕턴스 값을 가질 수 있도록 하였다. 인버터 출력 측에 중요부하가 접속되어 있어서, 계통이상 시에도 지속적으로 전력을 공급하여야 한다. 또한, 인버터에 의해 제어되는 인버터 스위치 SW가 연결되어 계통이상 시 인버터가 이를 검출하여 인버터와 계통을 분리한다. 그리고 인버터와 계통전원과의 절연을 위해 상용주파수 변압기가 연결되며, 또한 계통에 의해 접속/차단이 결정되는 재폐로 차단기(recloser)로 구성되어 있다.

3. 간접전류제어 기법

3.1 간접전류제어의 원리

그림 2는 간접전류 제어기법의 원리를 보여주는 페이지도이다. 간접전류제어 기법은 커패시터 전압 V_{Cf} 의 크기와 위상을 제어함으로써 계통측 인덕터 전류 I_{Lg} 를 간접적으로 제어한다. 그림 2(a)는 계통측 인덕터 전류 I_{Lg} 가 정격값으로 증가되는 원리를 보여준다. 커패시터 전압 V_{Cf} 가 계통전압 V_g 와 크기, 위상이 동일하게 제어

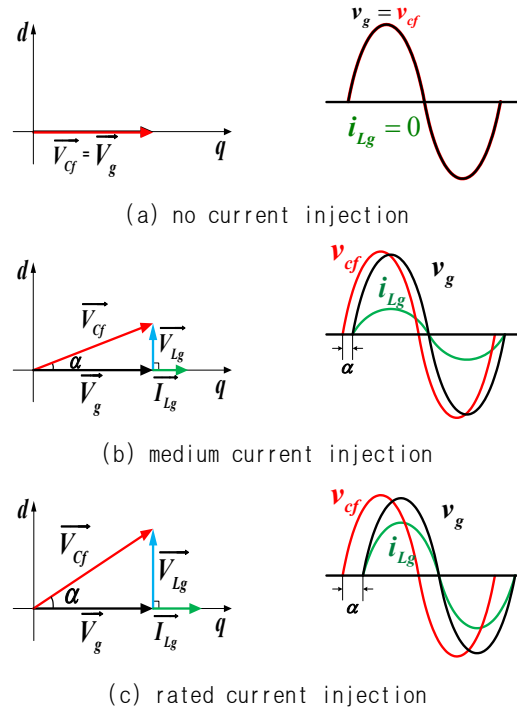


Fig. 2 Phasor diagram illustrating the operating principle of the proposed indirect current control

되고 있고 전류는 주입되지 않는 상태이다. 그림 2(b), (c)는 커패시터 전압 V_{Cf} 의 크기와 위상을 증가시킴으로써 계통전압 V_g 와 직각인 인덕터 양단 전압 V_{Lg} 가 증가되고 이로 인해 계통전압 V_g 와 동일한 위상을 갖는 계통측 인덕터 전류 I_{Lg} 가 증가된다.

그림 3은 계통연계 및 독립운전이 가능한 계통연계 인버터의 간접전류제어 블록도이다. S와 G는 각각 독립운전과 계통연계 모드를 나타낸다.

3.2 독립운전 모드

독립운전 모드는 인버터가 계통과 분리되어 중요부하에만 전력을 공급하고 있는 상태로 인버터는 전압제어를 수행한다. 출력전압 지령치 V_{Cf}^* , V_{Cf}^{q*} 와 동기좌표 변환된 센싱전압 V_{Cf}^d , V_{Cf}^q 을 비교하여 PI제어를 수행하고 PI제어기의 출력에 커패시터 전압 전향보상 항과 좌표 변환에 따른 간섭성분을 보상하기 위한 항이 더해진다.

3.3 계통연계 모드

계통연계 모드에서는 계통측 인덕터 지령치 I_{Lg}^* , I_{Lg}^{q*} 는 계통에 주입하고자 하는 유·무효전력 P^* , Q^* 센싱받은 계통전압 V_g 로부터 계산되어 질 수 있다.

$$I_{Lg}^{q*} = \frac{\frac{2}{3}(P^* V_g^q + Q^* V_g^d)}{(V_g^d)^2 + (V_g^q)^2} \quad (1)$$

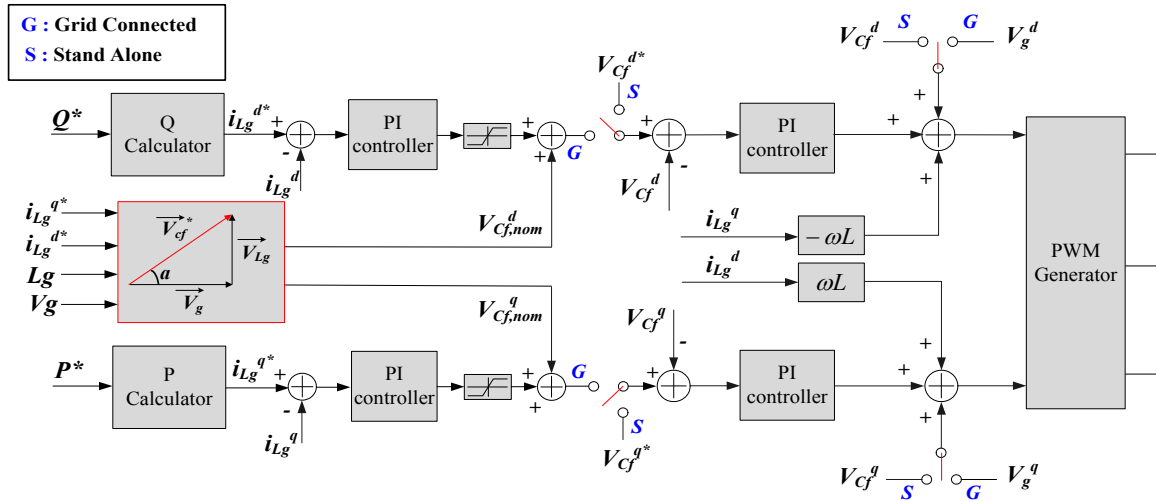


Fig. 3 Block diagram of the proposed indirect current control for utility-interactive inverter

$$I_{Lg}^d = \frac{2}{3} \frac{(P^* V_g^d - Q^* V_g^q)}{(V_g^d)^2 + (V_g^q)^2} \quad (2)$$

전류 주입에 필요한 커패시터 전압 $V_{Cf,nom}^d$, $V_{Cf,nom}^q$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$V_{Cf,nom}^d = |V_{Lg}| = I_{Lg}^d \times \omega L_g \quad (3)$$

$$V_{Cf,nom}^q = |V_g| \quad (4)$$

계산된 출력전압 d, q축 지령치와 계통에 주입하고자 하는 유·무효전력 P^* , Q^* 으로부터 얻어진 출력 전류의 보상분을 합하여 최종 전압 지령치를 얻는다. 최종 전압 지령치와 커패시터 전압 V_{Cf} 를 비교하여 계통연계 시에도 전압제어를 수행한다. 최종적으로 독립운전과 마찬가지로 계통전압 전향보상 항과 좌표변환에 따른 간섭성분을 보상하기 위한 항이 더해진다.

4. 제안한 단독운전방지 기법

기존의 단독운전방지 기법의 경우 인버터가 출력하는 전력과 부하가 소모하는 전력의 차이에 의해 단독운전 시 부하전압의 크기와 주파수가 변하게 되고 이러한 변화를 감지하여야 하므로 단독운전 발생 시 부하전압이 일정한 값 이상으로 변해야만 검출이 가능하다. 하지만 간접전류제어 기법을 적용할 경우 계통연계 시에도 전압제어를 하기 때문에 부하전압이 변동하지 않으므로 기존의 방법과는 다른 단독운전기법이 필요하다. 그림 4는 제안하는 단독운전방지 기법이 포함된 인버터 제어 블록도이다. 제안하는 방법은 전압 제어기의 출력에 단독운전 검출을 위한 고조파 성분을 주입한다. 계통연계 시에는 계통 전압이 지배적이므로 전압에 고조파 성분

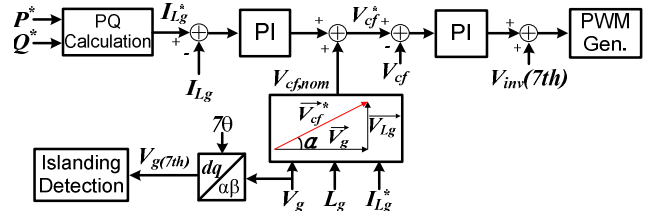


Fig. 4 Control block diagram including the proposed anti-islanding method

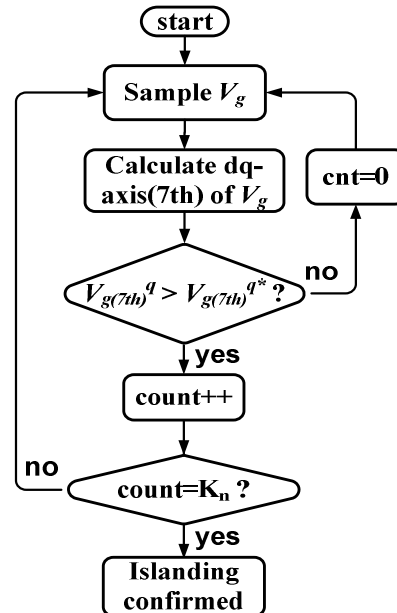


Fig. 5 Flow chart of the proposed anti-islanding algorithm

이 보이지 않지만 단독운전이 발생하여 계통과 차단된 경우에는 인버터의 출력 전압에 고조파 성분이 보이게 된다. 이 때의 고조파 성분을 검출하여 단독운전을 방지한다.

그림 5는 제안한 단독운전방지 알고리즘의 순서도이

Table 1 Standard for harmonic current distortion

harmonic order h	Percent(%)
$h < 11$	4.0
$11 \leq h < 17$	2.0
$17 \leq h < 23$	1.5
$23 \leq h < 35$	0.6
$35 \leq h$	0.3
Total demand distortion	5.0

Table 2 System specification

P	1kW	V_{LL}	110V	f_s	10kHz
L_i	1.78mH	C_f	3uF	L_g	3mH

다. 매 샘플링마다 센싱받은 계통전압을 수식 (5)와 (6)과 같이 계통 주파수 7배의 위상각에 동기화시켜 7차 고조파 성분을 계산한다.

$$\begin{pmatrix} V_g^\alpha \\ V_g^\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_g^a \\ V_g^b \\ V_g^c \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} V_{g(7th)}^d \\ V_{g(7th)}^q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 7\omega t & \sin 7\omega t \\ -\sin 7\omega t & \cos 7\omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_g^\alpha \\ V_g^\beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

계산된 계통 전압 고조파의 크기 $V_{g(7th)}^q$ 와 사용자에 의해 결정된 계통 전압 고조파의 크기 $V_{g(7th)}^*$ 를 비교한다. 사용자가 정하는 계통 전압 고조파의 크기에 의해 인버터에서 주입하는 고조파의 크기가 정해지므로 표 1의 고조파 차수에 따른 주입하는 고조파의 크기에 대한 규정을 만족하도록 선정한다. 이 값을 크게 선정하면 출력 전류의 THD가 증가하고 작게 선정하면 인버터 스위치의 잦은 트립이 발생할 수 있다. 센싱받은 고조파의 크기가 사용자가 정한 고조파의 크기보다 큰 시간이 일정 시간(Kn) 지속되면 단독운전 검출이 완료되고 독립운전 모드로 전환한다. 단독운전 검출시간은 IEEE std. 1547-2003에서는 2초 이내로 한전 규정에서는 0.5초 이내로 규정하고 있으므로 이를 만족하도록 Kn을 정해야 한다.

5. 시뮬레이션 및 실험결과

제안한 제어 기법을 검증하기 위하여 PSIM을 통해 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 및 실험을 위한 시스템 파라미터는 표 2와 같다. 그림 6은 독립운전 모드에서 계통연계 모드로의 전환과정을 보여주며 독립운전 모드에서는 계통전압과 커패시터 전압의 위상

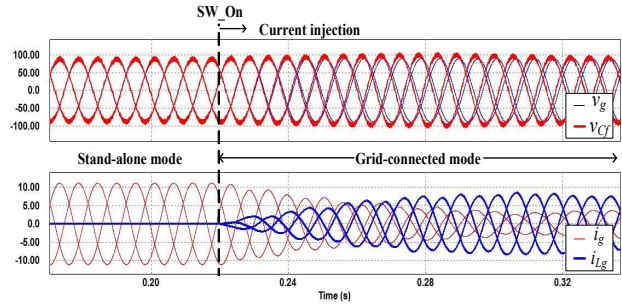


Fig. 6 Simulation results of the proposed control showing a mode transfer from stand-alone mode to grid connected mode

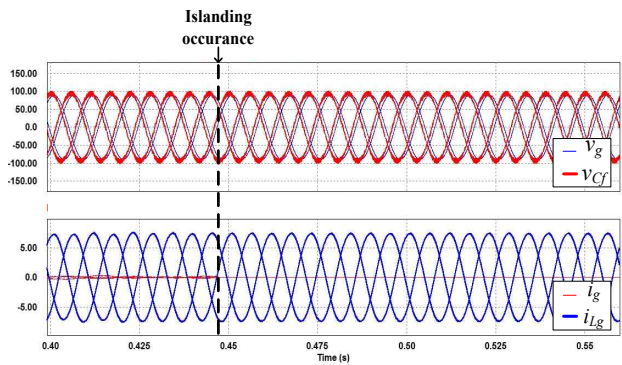


Fig. 7 Simulation results of the conventional control method showing a mode transfer from grid-connected mode to stand-alone mode

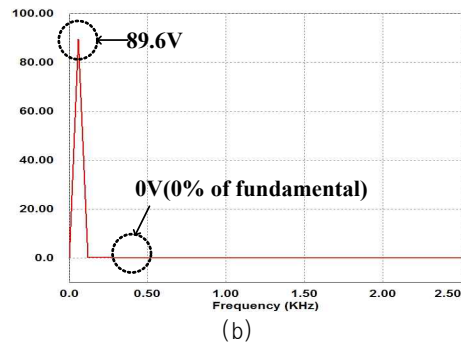
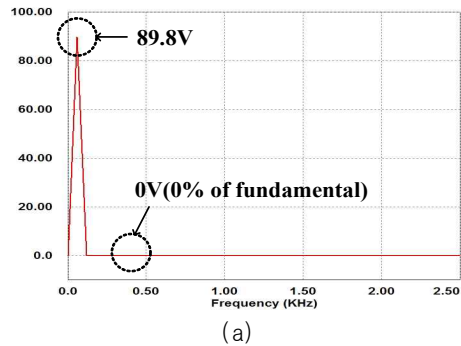


Fig. 8 Grid voltage FFT of Fig. 7 (a) before islanding occurrence (b) after islanding occurrence

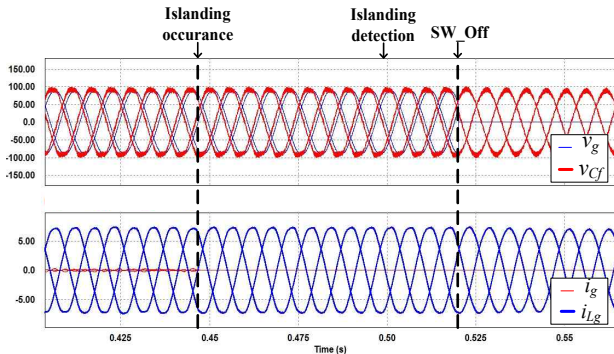
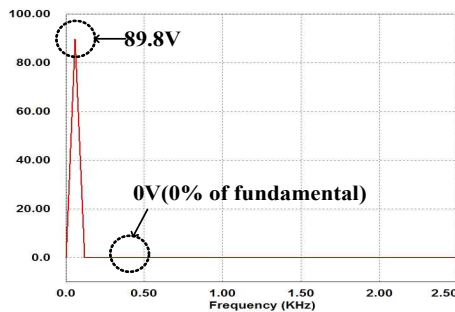
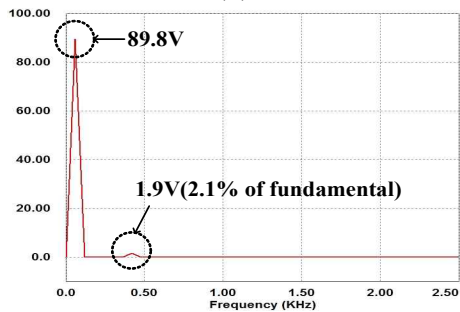


Fig. 9 Simulation results of the proposed control method showing a mode transfer from grid-connected mode to stand-alone mode



(a)



(b)

Fig. 10 Grid voltage FFT of Fig. 9 (a) before islanding occurrence (b) after islanding occurrence

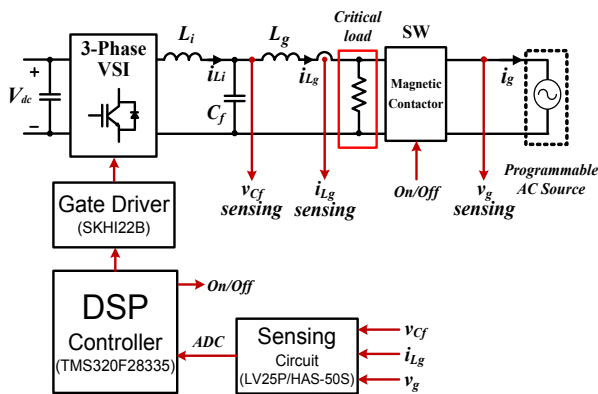


Fig. 11 Block diagram of experimental setup

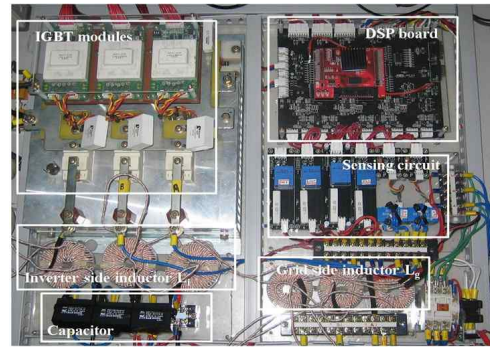


Fig. 12 Photograph of the laboratory prototype

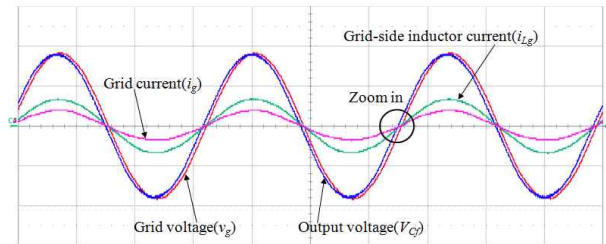


Fig. 13 Experimental waveforms of the indirect current control showing grid-connected mode

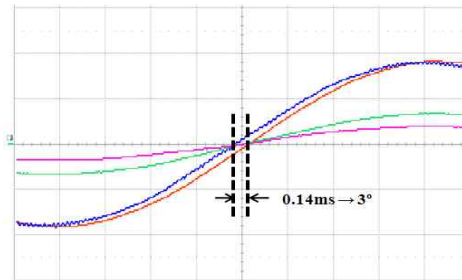


Fig. 14 Extended waveforms of Fig. 13

이 일치한 상태에서 계통연계 모드가 시작되면 인버터 스위치가 닫히고 계통으로 주입되는 전류가 정격 값까지 서서히 증가하는 상황을 보여준다. 전류가 증가되면서 계통 전압과 커패시터 전압의 위상차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한 모드 전환 시 출력전압에 과도상태가 거의 없음을 확인할 수 있다.

그림 7은 고조파 주입을 하지 않고 기존의 계통전압 크기와 주파수 변동을 이용한 단독운전 검출 기법을 사용하였을 경우에 계통 이상이 발생하여 단독운전이 발생한 상황이다. 간접전류제어 방식을 적용할 경우 그림 8과 같이 단독운전 발생 전이나 발생 후에도 전압은 항상 일정하게 유지되기 때문에 단독운전 검출이 이루어지지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 제안된 제어기법이 적용된 시뮬레이션 파형으로 그림 10과 같이 단독운전 발생 전에는 고조파가 보이지 않지만 단독운전 발생 후에는 고조파 성분이 나타난다. 제안된 검출기법에 의해 이를 감지하여 인버터 스위치를 차단하고 독립운전 모드로 전환된다. 또한 계

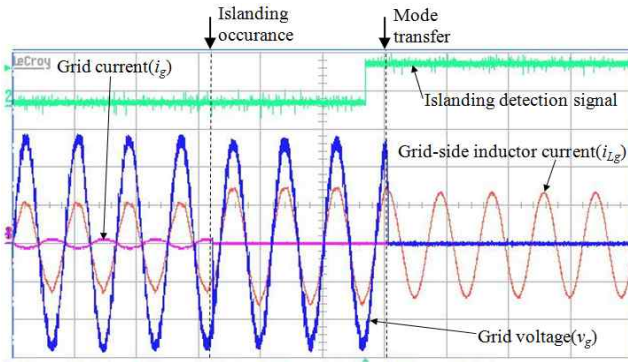


Fig. 15 Experimental waveforms of the proposed anti-islanding method in the case of detection zone

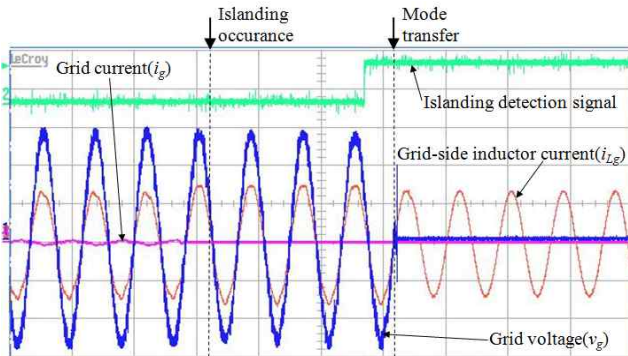


Fig. 16 Experimental waveforms of the proposed anti-islanding method in the case of NDZ

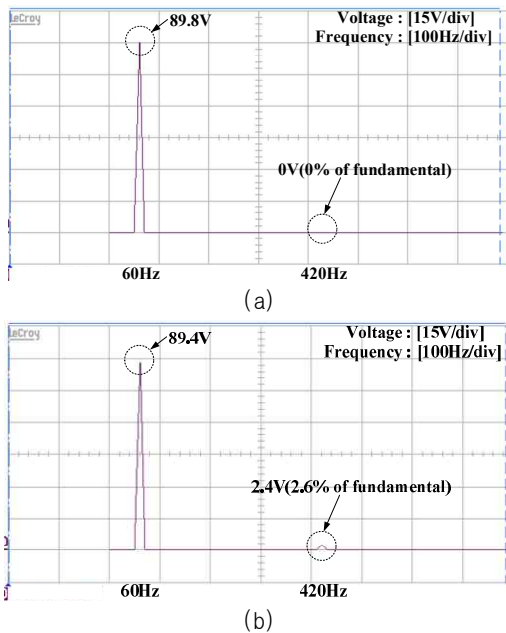


Fig. 17 FFT of grid voltage (a) before islanding occurrence (b) after islanding occurrence

속적으로 전압을 제어하고 있으므로 출력전압에 과도상태가 없음을 확인할 수 있다.

그림 11은 전체 실험 구성도이다. 계통연계 인버터 시

스템의 실험을 위해 계통전압을 모의하기 위한 교류전원장치는 Pacific사의 345-ASX를 사용하였다. 인버터의 IGBT는 세미크론사의 SKM75GB128D를 사용하였고 DSP(TMS320F28335) 프로세서를 이용하여 제어보드를 구성하였다. 그리고 모드 전환을 위하여 MC(Magnetic Contactor)를 이용하여 계통전원과의 접속/차단이 이루어지게 하였다. 그림 12는 축소 시작품의 사진이다.

그림 13은 계통연계 시 실험파형으로 인버터와 계통에서 부하에 전류를 분담하여 공급하고 있는 상황이다. 그림 14는 그림 13을 확대한 파형으로 출력전류에 따라 계통전압과 커패시터 전압 간에 위상 차이가 발생하고 출력전류와 계통전압의 위상은 일치함을 볼 수 있다.

그림 15는 아일랜드 발생 시 파형이다. 출력 전류와 계통 전류가 부하에 전류를 분담하여 공급하는 상황으로 단독운전 검출 전까지 부하전압이 변동하지 않고 독립운전으로의 모드 전환 시 과도상태가 없는 것을 확인할 수 있고 아일랜드 상황이 약 25ms 내외로 검출되었다. 그림 16은 인버터가 부하에 모든 전류를 공급하고 계통으로는 주입되는 전류는 없는 상황으로 전압과 전류가 변동하지 않아 NDZ가 발생할 수 있는 상황이다. 이 상황에서도 아일랜드 상황이 약 27ms 내외로 검출된 것을 확인할 수 있고 마찬가지로 모드 전환 시 과도상태가 없다. 그림 17은 계통전압의 FFT 파형으로 단독운전 발생 전에는 고조파 성분이 보이지 않지만 발생 후에는 인버터에 의해 주입된 약 2.6%의 7차 고조파 성분이 나타난다.

6. 결 론

본 논문에서는 중요부하를 갖는 계통연계 인버터에서 단독운전 검출 전에도 중요부하전압이 변동하지 않고 모드 전환에 따른 부하전압의 과도상태를 최소화하는 간접전류제어 기법에 적합하고 고조파 주입을 이용하여 단독운전을 검출할 수 있는 제어기법을 제안하였다. 계통에 이상이 발생하여 단독운전 검출 전에도 중요부하전압이 변동하지 않으며 계통연계에서 독립운전으로 모드 전환 시 중요부하전압에 과도상태가 없음을 확인하였다. 또한 제안한 단독운전 검출 기법이 NDZ를 갖지 않음을 시뮬레이션과 실험으로 검증하였다.

본 연구는 2008년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2008-N-FC12-J-04-2100)

참 고 문 헌

[1] S. Jung, Y. Bae, T. Yu, S. Choi, H. Kim. "A Low Cost Utility Interactive Inverter for Residential Fuel Cell

Generation," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 22, pp. 2293-2298, Nov. 2007.

- [2] L. Wang, C. Singh, A. Kusiak, "Guest Editorial: Special Issue on Integration of Intermittent Renewable Energy Resources into Power Grid," *IEEE System Journal*, Vol. 6, pp. 2-3, March 2012.
- [3] T. Hwang, K. Kim, B. Kwon, "Control strategy of 600kW E-BOP for molten carbonate fuel cell generation system," *ICEMS 2008*, pp. 2366-2371, 2008.
- [4] G. Shen, D. Xu, X. Yuan, "A Novel Seamless Transfer Control Strategy Based on Voltage Amplitude Regulation for Utility-interconnected Fuel cell Inverters with an LCL-filter," *IEEE PESC 2006*, pp. 1-6, 2006.
- [5] Z. Yao, L. Xiao, Y. Yan, "Seamless Transfer of Single-Phase Grid-Interactive Inverters between Grid-Connected and Stand-Alone Modes," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 25, No. 6, pp. 1597-1603, Jun. 2010.
- [6] J. Kwon, S. Yoon, S. Choi, "Indirect Current Control for Seamless Transfer of Three-Phase Utility Interactive Inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 27, No. 2, pp. 773-781, Feb. 2012.
- [7] F. D. Mango, M. Liserre, A. Dell'Aquila, A. Pigazo, "Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems. Part I: Passive Methods," *Power Electronics and Motion Control Conf.*, pp. 1878-1883, 2006.
- [8] *IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE 1547*, 2003.
- [9] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 22, No. 2, pp. 613-625, Mar. 2007.
- [10] R. Tirumala, N. Mohan, and C. Henze, "Seamless transfer of grid-connected PWM inverters between Utility-Interactive and Stand-Alone Modes," *IEEE APEC 2002*, pp. 1081-1086, 2002.



오형민(吳炯玟)

1983년 10월 3일생. 2010년 서울과학기술대 제어계측공학과 졸업. 2012년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2012년~현재 LG 전자 HAE연구소 연구원.



최세완(崔世琿)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공학박). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합 연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 당 학회 국제이사.



김태희(金榮佑)

1968년 10월 24일생. 1993년 창원대 전자공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1995년 창원대 강사 및 포항공대 가속기연구소 위촉연구원. 1996년~현재 두산중공업(주) 기술연구원 연료전지시스템 개발팀(책임).



이기풍(李基豊)

1964년 8월 20일생. 1988년 고려대 기계공학과 졸업. 1988년~1999년 삼성중공업(주) 선임연구원. 2000년~현재 두산중공업(주) 기술연구원 연료전지시스템개발팀장(수석).



이태원(李泰遠)

1957년 3월 29일생. 1983년 전북대 화학공학과 졸업. 1991년 Columbia Univ. 대학원 화학공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 화학공학과 졸업(공학박). 1998년~2002년 Duracell Global Science Center, Program Manager, 2002년~2005년 Fuelcell Energy, R&D Manager, 2005년~현재 두산중공업(주) 기술연구원 연료전지개발센터장(상무).