

가정용 연료전지 발전 시스템을 위한 단상 계통연계형 인버터

丁相玟[†], 裴永相[‡], 俞太植[‡], 崔世琬[†], 金孝城^{**}

Single-Phase Utility-Interactive Inverter for Residential Fuel Cell Generation System

Sangmin Jung, Youngsang Bae, Taesik Yu, Sewan Choi, Hyosung Kim

요 약

본 논문에서는 연료전지를 이용한 가정용 발전 시스템의 계통 연계를 위한 새로운 단상 인버터 시스템을 제안한다. 제안한 인버터는 계통연계 운전과 독립 운전이 모두 가능하고 두 운전사이의 모드전환이 자동으로 이루어지며 전환시 최소의 과도상태를 갖는다. 제안한 제어방식은 정상상태 오차가 거의 없고 양호한 과도상태 응답특성을 가진다. 또한 연산량과 센서수가 적고 구조가 간단하여 저가격의 고정소수점 DSP로도 구현이 가능한 특징이 있다. 제안한 계통연계형 인버터의 제어기에 관하여 기술하고 모의실험 및 실험에 의하여 그 타당성을 입증한다.

ABSTRACT

In this paper, a new single-phase utility-interactive inverter system for residential power generation with fuel cell is proposed. The proposed inverter system is not only capable of working in both stand-alone and grid-connected mode, but also ensures smooth and automatic transfer between the two modes of operation. The proposed control method has little steady-state error and good transient response characteristic. Also, the control method can be implemented using low-cost, fixed point DSP since it has simpler structure, smaller amount of calculation, and smaller number of sensors. The controller for the proposed utility-interactive inverter system is described, and the validity is verified through simulation and experiment.

Key Words : Utility-interactive inverter, Fuel cell, Residential power generation

1. 서 론

최근 들어 선진국을 중심으로 화석연료를 대체할 에너지원으로 풍력, 태양광 및 연료전지 등의 신·재생에너지원의 개발이 활발히 진행되고 있어 이에 따른 각

산업분야에서의 응용이 기대된다. 이러한 응용분야 중 신·재생에너지를 이용한 분산발전시스템에 대한 기술 개발의 필요성이 제기되고 있는데^[1] 특히 연료전지의 경우 250kW급 이상의 중·대규모 분산발전 시스템 뿐만 아니라 소규모로 계통과 연계가 가능한 가정용 분산발전시스템으로서도 유망하다고 판단되어지고 있다. 이러한 소형 분산발전 시스템의 핵심장치로서 계통연계 인버터의 역할이 매우 중요하다고 할 수 있으며, 이러한 분산발전용 계통연계 인버터의 주요한 요구사항은 다음과 같다^[2].

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

[‡]학생회원, 서울산업대 제어계측공학과 석사

^{**}정회원, 공주대학교 전기전자공학부 교수

접수일자 : 2006. 11. 27 1차 심사 : 2006. 12. 19

심사완료 : 2007. 1. 22

- 신·재생 에너지원의 폭넓은 전압변동을 허용할 것
- 낮은 고조파 왜율과 주파수 변동을 갖는 고품질의 출력전력을 가질 것
- 계통연계 운전 및 독립 운전이 모두 가능할 것
- 고효율, 저가격 및 고 신뢰성을 가질 것

특히 분산발전시스템의 빠른 보급 확산을 위하여 인버터의 저가격화가 필수적이며, 이에 따라 저개발국가의 생활수준의 향상도 기대 할 수 있다. 그 일환으로 미국 에너지부(U.S. Department of Energy)와 IEEE가 공동으로 “소형 분산발전을 위한 계통연계 인버터”라는 주제로 “2005 Future Energy Challenge Competition”를 주최하였는데 이 대회에서 제시한 계통연계 인버터의 설계 목표사양은 표 1과 같다. 제시된 인버터의 설계 목표사양에 따르면 효율 90%이상, \$200/KW의 양산가를 갖는 인버터를 목표로 하고 있고 계통연계 운전과 독립 운전을 겸하도록 되어 있으며 특히 IEEE 1547의 계통연계 규정을 준수하도록 되어 있다. 이러한 계통연계 인버터는 주로 전압형 인버터로 구현하게 되고 계통측에 연결되는 필터로는 LC 필터 또는 LCL필터를 사용할 수 있다. 최근에는 LC필터 보다 부피를 줄일 수 있고 계통측으로부터의 돌입 전류를 방지할 수 있는 LCL필터를 주로 사용한다. 이러한 LCL필터를 갖는 전압형 인버터를 제어하는 방식으로서 계통연계시 기존의 계통측 인덕터 전류와 커패시터 전류의 두 신호를 센싱하여 제어하는 방식^[3]이 있다. 또한 단상시스템에서 가상의 상을 추가하여 동기좌표계를 이용하는 제어 방식^[4]이 있는데 이는 연산량이 많은 단점이 있다. 본 논문에서는 가정용 연료전지 발전시스템을 위하여 계통연계운전과 독립운전이 모두 가능한 단상 인버터로서 센서의 수가 적고 연산량이 적은 제어를 제안한다. 본 방식의 특징은 다음과 같다.

- 독립 운전 및 계통연계 운전이 가능하고 모드 전환이 자동으로 이루어지며 최소의 과도상태를 갖는다.
- 제안한 제어기는 계통연계시 인버터측 인덕터 전류만을 센싱하고 P+Resonant 제어를 사용하여 연산량을 줄임으로서 저가격의 고정소수점 DSP로도 전체 시스템의 구현이 용이하다.
- LCL필터를 사용하여 부피를 저감하고 리플제거 성능을 향상한다.

- 계통연계시 단위역률의 전류제어가 가능하고 독립운전시 출력전압의 정상상태 오차가 거의 없으며 양호한 과도응답을 갖는다.

표 1 계통연계 인버터의 최소 설계 요구사항
Table 1 Minimum design requirement of utility-interactive inverter (2005 Future Energy Challenge Competition 제공)

설계항목	설계목표
정격전력	1kW(3kW 최대)
입력전압	30V ~ 60V
출력전압	240/110V ± 10%
주파수	50/60Hz ± 2%
고조파 왜율	5% 이하
역율	90% 이상
양산가	\$200/kW 이하
효율	90% 이상
무게 및 크기	3kg, 7.5L 이하
동작모드	독립운전 및 계통연계운전
계통연계규정	IEEE1547
보호기능	과전류, 과전압, 과온도, 저전압, 단락회로

2. 제안하는 계통연계 인버터 시스템

2.1 계통연계 인버터 시스템의 구성

그림 1은 가정용 연료전지 발전 시스템을 위해 제안하는 계통연계형 인버터 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 이는 출력전압이 30~60V_{dc}로 가변이 되는 연료전지, DC-DC 컨버터, DC-AC 인버터, LCL 출력필터, 계통연계 스위치(Static Transfer Switch) 및 부하로 구성된다.

DC-DC 컨버터는 부하에 따라 변동되는 연료전지의 30V~60V의 낮은 전압을 인버터에서 요구되는 DC-link 전압인 400V_{dc}로 승압시켜 준다. 1차측에는 Full-bridge 토폴로지를 사용하고 Phase-shift 방식에 의해 영 전압 스위칭을 구현하여 스위칭 손실을 줄였다. 제어기로는 출력전압 제어를 외부루프로 하고 과도응답을 향상시키기 위하여 내부루프로 전류제어를 수행하였다.

DC-AC 인버터는 승압된 400V_{dc}를 실효값 110V/

240V, 주파수 50/60Hz인 단상 AC전압으로 변환한다. 그리고 인버터의 출력필터로서 LC 필터에 비해 부피를 작게할 수 있는 장점이 있는 LCL 방식의 필터를 사용하였다. 이 LCL 필터는 단독운전시 인버터의 PWM에 의한 스위칭 리플전압과 부하에서 발생하는 고조파 전류를 제거하고 계통연계운전시 낮은 고조파 왜율을 갖는 전류를 공급해 준다. 또한 DC-AC 인버터 및 전체시스템의 제어를 위해 저가격의 고정소수점 DSP인 TMS320F2812를 사용하여 구현하였다.

계통 연계 스위치 S1은 계통에 인버터 출력을 연결하거나 분리하기 위해 사용된다. 스위치 S1을 ON하면 인버터는 계통과 연결되어 전류제어 모드로 동작하며 이를 계통연계(Utility-interactive) 모드라 한다. 또한 OFF하면 계통과 분리되어 인버터는 전압제어 모드로 동작하며 이를 독립운전(Stand-alone) 모드라 한다. 부하로는 외부부하와 250W급의 비상부하가 있는데 계통 연계시는 연료전지 및 계통으로부터 두 부하에 모두 전력이 공급되나 계통 이상시에는 독립운전으로 전환이 되면서 연료전지로부터 비상부하에만 전력이 공급되도록 한다.

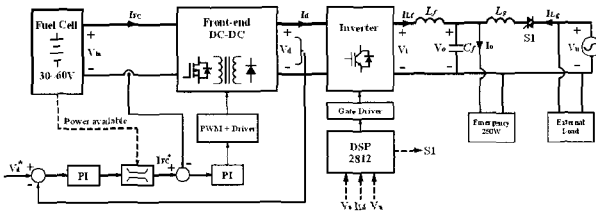


그림 1 제안하는 계통연계형 인버터 시스템
Fig. 1 Proposed utility interactive inverter system

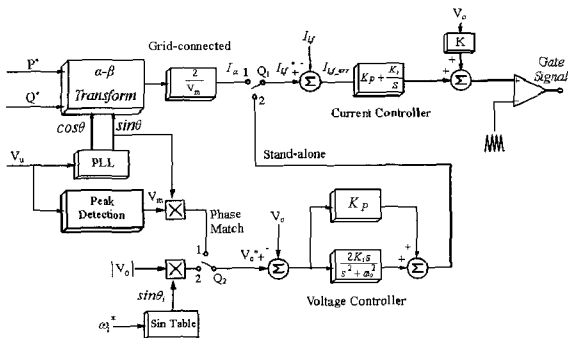


그림 2 제안하는 계통연계형 인버터를 위한 제어블럭도
Fig. 2 Control block diagram for the proposed utility- interactive inverter

2.2 인버터 제어 알고리즘

그림 2는 제안하는 계통연계형 인버터 시스템을 위한 제어블럭도를 나타낸다. 이는 계통연계 운전을 위한 전류제어부와 독립운전을 위한 전압제어부로 나눌 수 있다.

2.2.1 계통연계를 위한 전류제어

계통연계 운전 모드시 그림 2의 제어 스위치 Q₁은 '1'의 위치에 연결되고 전류 지령치 I_{Lf}^{*}는 전력 지령치 P^{*}와 Q^{*}로부터 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} \\ &= \frac{2}{V_m} \cdot \begin{bmatrix} \sin\theta & -\cos\theta \\ \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^* \\ Q^* \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $V_{\alpha} = V_m \sin\theta$ 와 $V_{\beta} = V_m \cos\theta$ 이고 V_m 과 θ 는 각각 계통전압으로부터 계산한 크기와 동기좌표계를 이용한 PLL로부터 발생된 위상이다. 그림 2에서 출력 전압의 Feedforward는 과도상태 응답을 개선하고 정상상태의 오차를 제거하기 위하여 사용된다.

그림 3에 본 계통연계인버터 시스템에서 구현한 단상 PLL 구성도를 나타낸다. 동기 좌표계의 원리를 이용한 PLL 방식으로 크게 좌표계 변환기와 위상 검출기로 구성되어 있으며 노이즈에 취약한 영전압 검출 방식에 비해 신뢰성이 높다^[5].

그림 4에 제안한 전류제어기를 포함하는 시스템 블록도를 나타낸다. 그림 4로부터 인버터 전류의 지령값에 대한 실제값을 나타내는 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{Lf}(s)}{I_{Lf}^*(s)} = \frac{BS^3 + CS^2 + K_pS + K_I}{AS^4 + BS^3 + DS^2 + K_pS + K_I} \quad (2)$$

여기서 $A = L_f C_f L_g$, $B = K_p C_f L_g$, $C = K_I C_f L_g$, $D = C + L_f + L_g - K L_g$ 임.

만약 feedforward 게인 K가 1이라면 식(2)는 다음과 같이 간략화 될 수 있으며

$$\frac{I_{Lf}(s)}{I_{Lf}^*(s)} = \frac{C_f K_p S + C_f K_I}{L_f C_f S^2 + C_f K_p S + C_f K_I} \quad (3)$$

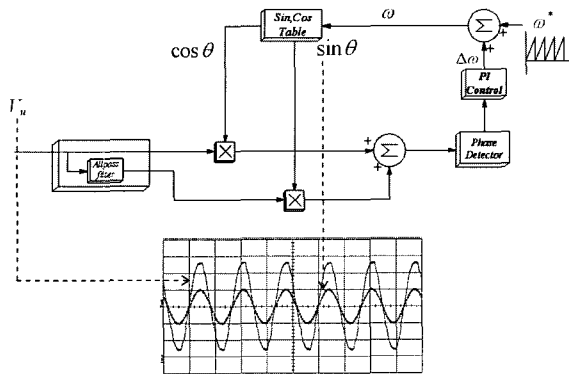


그림 3 동기 d-q 좌표 PLL 구성도
Fig. 3 Configuration of synchronous d-q frame PLL

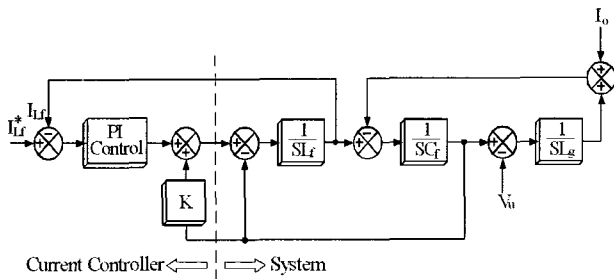


그림 4 제안한 전류제어기를 포함하는 시스템 블록도
Fig. 4 System block diagram including the proposed current controller

전원주파수 ω_0 에서의 전달함수의 이득은 $I_{L_f}(j\omega_0)/I_{L_f}^*(j\omega_0) \approx 1$ 로 되므로 전원주파수에 대한 정상상태의 오차가 거의 없음을 알 수 있다. 그림 5는 계통연계 모드에서 제안한 Feedforward 제어의 유무에 따른 전류 제어의 정상상태와 과도상태 응답을 보여준다. 인버터의 출력전류는 지령한 정격전류만큼 점차 상승하며 Feedforward 제어가 있을 때 정상상태 및 과도상태의 에러가 거의 제거되는 것을 볼 수 있다.

2.2.2 독립운전을 위한 전압제어

독립운전 모드시 제어스위치 Q_1 은 '2'의 위치에 연결되어 외부루프 전압제어와 내부루프 전류제어로 구성되는 이중루프제어를 실시한다. 또한 독립운전시 Q_2 는 '2'의 위치에 연결되어 독립적인 크기와 위상을 갖는 전압 지령치를 준다. 한편, 독립운전모드에서 계통연계 모드로 전환시에는 먼저 제어 스위치 Q_2 를 '1'의 위치에 연결시켜 인버터의 출력전압의 크기와 위상을 계통 전압에 일치시킨 후, 제어 스위치 Q_1 를 '1'의 위치로

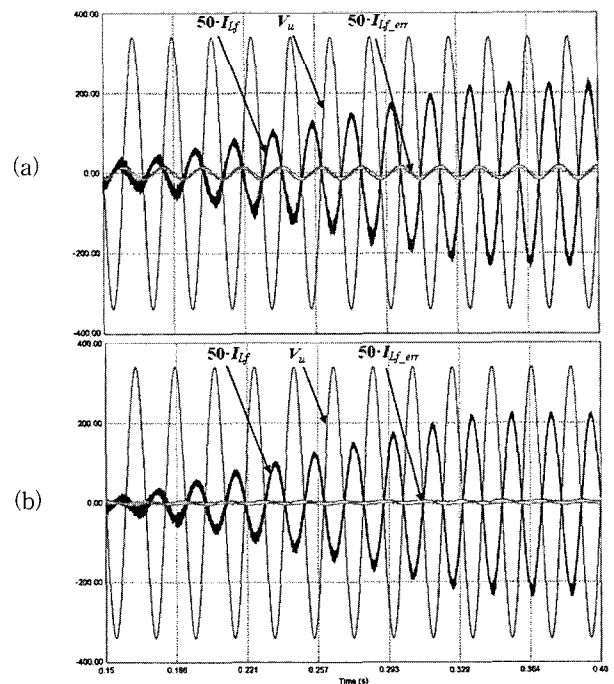


그림 5 전류제어기의 정상상태와 과도상태 모의실험 파형
(a) Feedforward 제어가 없는 제어 (b) 제안한 Feedforward 제어가 있는 제어
Fig. 5 Simulated waveforms of steady-state and transient-state
(a) Without the feedforward control (b) With the feedforward control

하여 계통연계 운전을 시작한다.

독립운전 모드에서 인버터는 교류전압제어를 수행해야 하는데, 기존의 PI제어기는 직류의 기준값에 대하여는 정상상태 응답이 무한대의 게인을 갖지만 상용주파수의 기준값에 대하여는 정상상태 응답이 유한한 게인을 갖게 됨으로, 정상상태에서의 오차를 완전히 제거할 수가 없다^[6]. 또한 단상시스템에서도 가상동기 좌표계를 사용하여 기준값을 직류화함으로써 기존의 PI제어기로 정상상태의 오차를 제거할 수도 있지만, 이 방식은 Cross-coupling 항들이 존재하고 좌표변환에 따른 연산량의 증가로 인하여 저가격의 고정소수점 DSP로는 구현이 용이하지 않다.

따라서 본 논문에서는 교류인 기본파의 주파수 성분에 대하여 매우 큰 게인을 가지기 때문에 정상 상태의 오차를 제거할 수 있고 프로세서로 구현시 연산량이 적어서 단상 인버터의 제어에 장점이 있는 P+Resonant 제어기^[7]를 적용한다. P+Resonant 제어기는 다음과 같

은 보상특성을 가지며 그림 6에 보이는 것처럼 공진주파수 ω_0 에서 매우 큰 계인을 갖는다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (4)$$

그림 7의 P+Resonant 제어를 사용하는 제안한 전압 제어기의 정상상태와 과도상태 응답에서 보듯이 부하가 급변하는 과도기간에 약간의 오차가 발생할 뿐 정상상태의 오차는 거의 없는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 Direct Form 이용한 IIR 필터 구현 방법을 통해 P+Resonant 제어를 구현하였다.

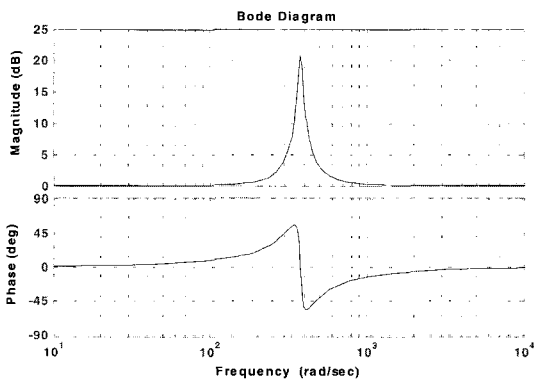


그림 6 P+Resonant 제어기의 보상특성
Fig. 6 Compensation characteristic of P+Resonant Controller

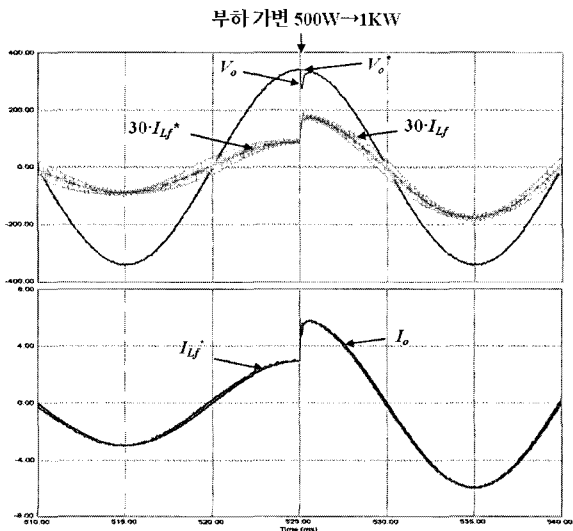


그림 7 제안한 전압제어기의 정상상태와 과도상태 응답
Fig. 7 Steady-state and transient-state response of the proposed voltage controller

2.3 LCL 필터 설계

본 논문에서는 LC 필터에 비해 부파를 절감할 수 있고 계통연계시 돌입전류를 방지할 수 있는 LCL 필터를 사용하였다. 인버터측 필터인덕터는 다음과 같이 구한다.

$$L_f = \frac{1}{C_f} \left(\frac{1}{2\pi f_c} \right)^2 \quad (5)$$

여기에서, 차단주파수 f_c 는 대개 스위칭주파수의 0.1 배로 한다. 본 논문에서는 인버터의 스위칭 주파수를 15kHz로 하였으며 계통측에 흐르는 전류 I_{Lg} 를 인버터측 인덕터에 흐르는 전류 I_{Lf} 에 비해 리플 성분이 20% 감소되도록 설계하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{Lg}(h_{sw})}{I_{Lf}(h_{sw})} = \frac{1}{\left| 1 + L_g \left(\frac{1}{L_f} - C_b \omega_{sw}^2 \right) \right|} = 20\% \quad (6)$$

여기서 C_b 는 커패시턴스의 Base 값이며, 인버터에서 발생한 전력 중 커패시터에서 흡수하는 무효전력의 비중(x)으로 필터커패시턴스는 다음과 같이 구한다^[9].

$$C_f = x C_b \quad (7)$$

2.4 모드 전환 알고리즘

인버터는 계통연계를 위한 전류제어 모드와 독립운전을 위한 전압제어 모드의 상호전환이 필요하며 모드 전환시 최소한의 과도상태를 가지도록 다음과 같은 모드전환 알고리즘을 제안한다.

2.4.1 계통연계모드에서 독립운전모드 전환

- 1) 계통의 고장을 검출한다.
- 2) 스위치 S1에 Turn off 신호를 인가한다.
- 3) S1 Turn off시의 인버터 출력전압을 전압 지령치로 하여 다음 영전위에서 전압제어 모드로 전환한다.
- 4) 전압 지령치를 원하는 값까지 점차 증가시킨다.

2.4.2 독립운전 모드에서 계통연계 모드 전환

- 1) 계통전압이 정상적인 동작 범위 이내로 회복됐는지 검출한다.
- 2) 인버터 출력전압의 크기와 위상을 계통전압과 일치하게 동기 시킨다.

- 3) 인버터 출력전압이 계통전압과 동기 되었다면 다음 영전위에서 스위치 S1을 Turn on 한다.
- 4) S1 Turn on시의 인버터 출력 전류 I_L 를 전류 지령치로 하여 전류제어 모드로 전환한다.
- 5) 전류 지령치를 원하는 값까지 점차적으로 증가시킨다.

2.5 시물레이션

그림 8은 계통연계 운전 및 독립 운전을 위해 제안한 제어알고리즘에 대한 타당성을 검증하기 위하여 PSIM을 사용한 시물레이션을 보인다.

시물레이션은 독립운전 → 상호모드전환 → 계통연계 운전 → 독립운전의 순서로 진행되는 것을 보여준다. 초기에는 주전원계통에 이상이 발생하였다고 가정하여 독립운전모드로 비상부하에만 전력을 공급하고 있는 상황으로 인버터 출력전압은 인버터에 의하여 제어되고 계통의 이상유무를 계속 체크한다.

계통이상을 체크하여 주전원계통이 정상으로 회복되면 상호전환모드로 변환하여 인버터 출력전압을 PLL을 이용하여 계통전압의 위상과 크기로 동기 시킨다. 인버터전압과 계통전압의 크기와 위상이 동기 되면 인버터의 제어기 구조를 독립운전모드에서 계통연계모드로 전환하여 계통으로 전류를 주입시키게 된다. 또한, 계통연계시에 계통전압에 고장이 발생하면 계통 연계 스위치를 off하고 계통연계운전모드에서 독립운전모드로 전환하여 비상부하에만 전류를 공급한다.

그림 8의 (a)~(c)에 각 부의 전압, 전류파형을 나타내었다. 그림 8(a)에서 보듯이 인버터 출력전압은 독립운전시와 계통연계시에도 항상 안정적인 전압을 유지

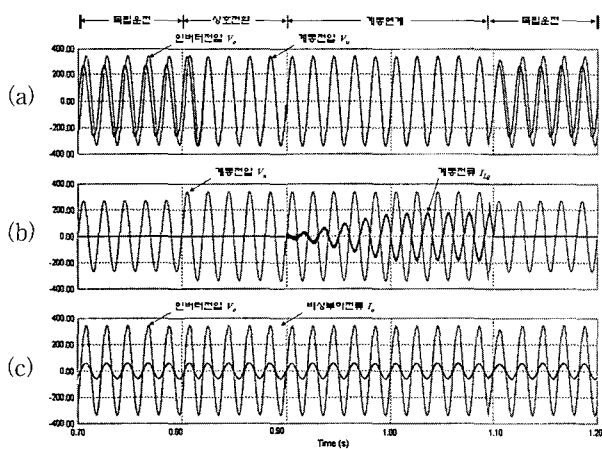


그림 8 제안한 제어알고리즘 시물레이션
 Fig. 8 Simulation of the proposed control algorithm

하고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 상호전환시에 인버터전압과 계통전압이 PLL을 사용하여 동기 되는 것을 볼 수 있다. 그림 8(b)에서는 계통연계시에 계통에 주입하는 전류 I_L 는 정격 전류까지 서서히 증가되어 계통에 단위역률로 전력이 공급됨을 알 수 있다. 그림 8(c)는 계통전압의 고장유무에 상관없이 비상부하에 안정된 전압이 공급되는 것을 볼 수 있다.

3. 실험 결과

제안한 방식의 타당성을 입증하기 위하여 1kW 계통연계 인버터의 시작품을 제작하였으며 본 실험에서 사용한 정수는 다음과 같다. 제작된 계통연계 인버터의 외관 사진을 그림 9에 나타낸다.

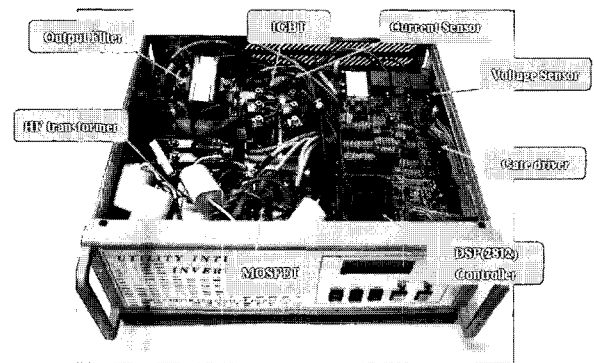


그림 9 제안한 계통연계 인버터 사진
 Fig. 9 Photograph of the proposed utility-interactive inverter

- 전원(V_u): 110V, 60Hz
- 계통전류(I_{Lg}): 2.73A (300W)
- $L_f = 8.7mH$, $C_f = 2.4\mu F$, $L_g = 500\mu H$
- 외부부하: 24.2Ω (500W)
- 비상부하: 48.3Ω (250W)

그림 10은 계통연계 모드에서 독립운전 모드로 전환할 때의 실험파형이다. 계통연계 모드를 위한 전류제어와 독립운전 모드를 위한 전압제어의 상호전환 시 최소한의 과도상태를 가지도록 제어한다. 그림 10(a)에서 보듯이 인버터는 초기에 단위역률로 전력을 계통에 보내고 있으며 계통전압이 정상 동작전압 범위에서 벗어나면 즉시 스위치 S1에 Turn-off 신호가 인가되고 계통주입전류가 0이 되는 시점에서 스위치 S1은 실제

로 Turn-off 된다. 그림 10(b)는 S1이 Turn-off 될 때 전류제어에서 전압제어로 전환되어 약간의 과도상태 후 인버터의 출력전압은 정격전압까지 서서히 증가되어 비상부하에 안정된 전력이 공급됨을 알 수 있다.

그림 11은 독립운전 모드에서 계통연계 모드로 전환

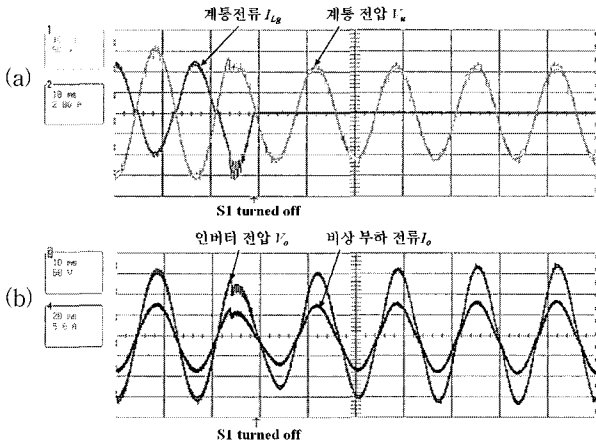


그림 10 계통연계운전에서 독립운전으로 모드전환시 실험파형

Fig. 10 Experimental waveforms during a transition from grid-connected mode to stand-alone mode

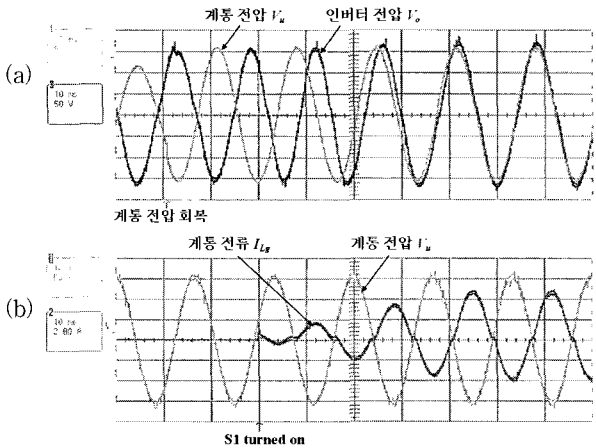


그림 11 독립운전에서 계통연계운전으로 모드전환시 실험파형 (그림 11(b)는 그림 11(a) 후의 각 실험파형이다.)

Fig. 11 Experimental waveforms during a transition from stand-alone mode to grid-connected mode (Fig 11(b) was measured several cycles after Fig 11(a).)

할 때의 실험 파형이다. 비상부하에 전압을 공급하고 있던 인버터는 계통전압이 정상 동작전압으로 복귀되면 그림 11(a)에서와 같이 출력전압의 크기와 위상을 조정하여 계통전압과 동기 하도록 동작한다. 일정주기를 지나 인버터 출력전압이 계통전압과 동기된 후 그림 10(b)에서 보듯이 스위치 S1을 영 전위에서 Turn-on 시키고 계통전류 I_{Lg} 는 정격 전류까지 서서히 증가되어 계통에 단위역률로 전력이 공급되도록 한다. 이때, 독립운전 모드에서의 인버터 출력전압과 연계운전 모드에서의 계통전류의 THD는 각각 3.8%와 3.3%로 측정되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 가정용 연료전지 발전 시스템을 위한 계통연계형 단상 인버터를 제안하였다. 제안한 제어기는 연산량과 센서수가 적고 구조가 간단하여 저가격의 DSP로도 구현이 가능하였고, 정상상태 및 과도상태의 응답 특성이 우수함을 알 수 있었다. 제안한 방식의 제어기의 타당성을 입증하기 위하여 시뮬레이션 및 1kW 축소모형으로부터의 실험결과를 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] 김호용, 김재언, 김응상, 이승재, “분산형전원의 배전계통 도입전망과 대책”, 전기학회지, 제45권 10호, pp.23-31, 1996.
- [2] Future Energy Challenge Web page. [Online]. Available : <http://www.energychallenge.org>
- [3] Erika Twining, D.G. Holmes, “Grid Current Regulation of a Three-Phase Voltage Source Inverter With an LCL Input Filter” *IEEE Transaction on Power Electronics*, May. pp. 888-895, 2003.
- [4] 최시영, 김래영, 권형남, 송종환, “DQ 모델을 이용한 단상 계통연계 인버터의 제어”, 전력전자학술대회 논문집, pp. 602-605. 2003.
- [5] S.-J. Lee, J.-K. Kang, and S.-K. Sul, “A New Phase Detecting Method for Power Conversion Systems Considering Distorted Conditions in Power System,” in *Proc. IEEE IAS Conf.*, May/April. pp. 2167-2172, 1999.
- [6] X. Yuan, W. Merk, H. Stemmler, and J. Allmeling, “Stationary-frame Generalized Integrators for Current Control of Active Power Filters with Zero Steady-state Error for Current Harmonics of Concern Under Unbalanced and Distorted Operating Conditions”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 38,

no. 2, May/April. pp. 523-532, 2002.

- [7] M. Newman "Design and Control of a Universal Custom Power Conditioner" Ph.D. Thesis. Monash University, 2002
- [8] 최호현외, "실리콘계 태양광 및 인산형연료전지 발전시스템의 직류/교류변환기 개발" LG산전(주) KIER보고서, 1991년 9월
- [9] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen "Design and control of an LCL-filter based three-phase active rectifier", in *Proc. IEEE IAS Conf.*, Sept/Oct. pp. 297-307, 2001.
- [10] R. Tirumala, N. Mohan, and A. Walter, "Seamless Transfer of Grid-connected PWM Inverters between Utility-interactive and Stand-alone Modes", in *Proc. IEEE APEC Conf.*, Mar. pp. 1081-1086, 2002.

Power Electronics 편집위원. 당 학회 국제이사.



김효성(金孝城)

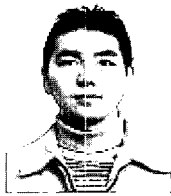
1958년 10월 20일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~1997년 일본 오까야마대 방문교수. 2000년~2001년 덴마크 Aalborg대 방문교수. 1987년~2005년 천안공업대 교수. 2005년~현재 공주대 전기전자공학부 교수. 당 학회 국제이사.

저 자 소 개



정상민(丁相玟)

1979년 2월 20일생. 2004년 서울산업대 제어계측공학과 졸업. 2006년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2006년~현재 (주)효성 중공업연구소 연구원.



배영상(裴永相)

1979년 11월 30일생. 2003년 호서대 전기공학과 졸업. 2005년 서울산업대 제어계측공학과 대학원 졸업(석사). 2006~현재 (주)파워프라자 중앙연구소 연구원.



유태식(俞太植)

1979년 6월 10일생. 2005년 서울산업대 제어계측공학과 졸업. 2007년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 2007년~현재 (주)씨엠파트너 연구원.



최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 미국 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(박사). 1985년~1990년 대우 중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합 연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울산업대 제어계측공학과 부교수. 2006~현재 IEEE Transactions on