

가정용 연료전지 발전 시스템을 위한 계통연계형 인버터

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

Utility Interactive Inverter for Residential Fuel Cell Power Generation System

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

ABSTRACT

본 논문에서는 연료전지를 이용한 가정용 발전 시스템의 계통 연계를 위한 새로운 단상 인버터 시스템을 제안한다. 제안한 방식에 의해 역률 1에 가까운 전원 품질로 독립 운전과 계통연계 운전이 가능하고 자동 모드 전환시 최소의 과도상태를 갖는다. 또한 제안한 인버터 제어기는 연산이 적고 구조가 간단하여 저가격의 고정소수점 DSP로 구현이 가능할 뿐 아니라 정상상태 오차가 거의 없고 양호한 과도상태 응답특성을 얻을 수 있다. 제안한 계통연계형 인버터의 제어기에 관하여 기술하고 모의 실험 및 실험에 의하여 그 타당성을 입증한다.

1. 서론

최근 들어 선진국을 중심으로 화석연료를 대체할 에너지원으로 풍력, 태양광 및 연료전지등의 신·재생에너지원의 개발이 활발히 진행되고 있어 이에 대한 각 산업분야에의 응용이 요구된다. 이러한 응용분야 중 신·재생에너지를 이용한 분산발전시스템에 대한 개발의 필요성이 제기되고 있는데^[1] 이는 최근들어 대규모 전원개발에 따른 자금과 지역이기주의로 인한 입지확보가 어려워지고 있는 실정이고 고압 전송에 따른 절연 비용과 송전 손실 및 피크 부하에 대한 예비력 확보를 위해 추가된 발전 및 송전 설비비용의 감소의 필요성이 점차 증대되고 있기 때문이다. 특히 연료전지의 경우 소규모로 계통과 연계가 가능한 가정용 분산발전시스템으로서 적합하다.

본 논문에서는 가정용 연료전지 발전 시스템으로서 독립운전과 계통연계운전이 모두 가능한 단상 계통연계형 인버터를 제안한다. 본 방식의 특징은 다음과 같다.

- 역률 1에 가까운 전원 품질로 독립운전 및 계통

연계운전이 가능하고 자동모드 전환시 최소의 과도상태를 갖는다.

- 제안한 인버터 제어기는 연산이 적고 구조가 간단하여 저가격의 고정소수점 DSP로 구현이 가능할 뿐 아니라 정상상태 오차가 거의 없고 과도상태 응답특성이 양호하다.
- LCL필터를 채택하여 부피를 절감할 수 있다.

2. 제안하는 계통연계 인버터 시스템

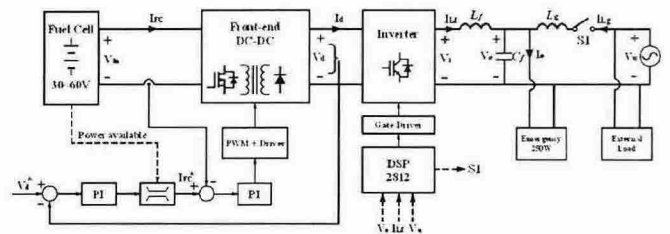


그림 1 제안하는 계통연계형 인버터 시스템

그림 1은 제안하는 가정용 연료전지 발전 시스템을 위한 계통연계형 인버터 시스템의 구성도를 그림 2는 이를 위한 제어블럭도를 각각 나타낸다.

계통연계운전 모드시 그림 2의 제어 스위치 Q1은 '1'의 위치에 연결되고 전류 지령치 I_d^* 는 전력 지령치 P^* 와 Q^* 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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 PLL^[2]로부터 발생된 위상임.

또한 출력전압 Feedforward제어는 과도상태 및 정상상태의 오차를 제거하기 위하여 사용된다. 그림 3

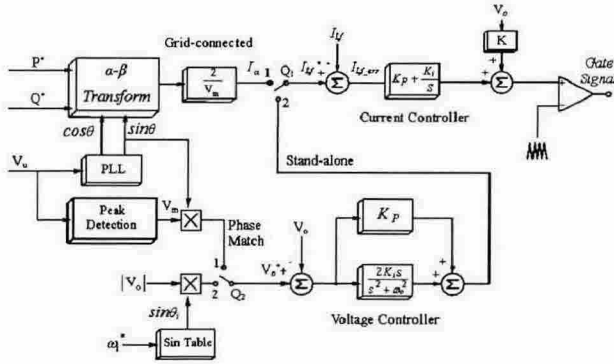


그림 2 제안하는 계통연계 인버터의 제어블럭도

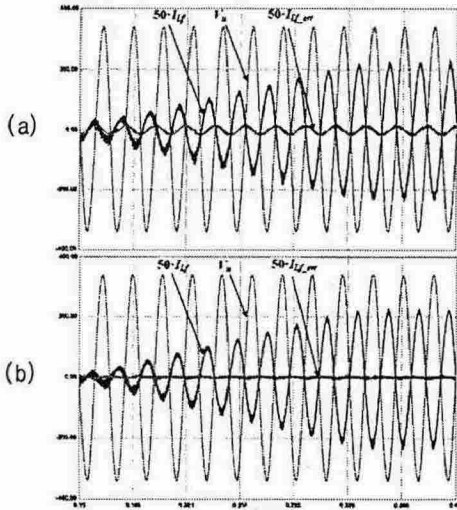


그림 3 제안한 전류제어기의 정상상태와 과도상태 응답
(a)Feedforward가 없는 제어 (b)Feedforward가 있는 제어

에서 보듯이 계통연계모드시 인버터의 출력전류는 지령한 정격전류만큼 점차 상승하는데 Feedforward 제어를 사용한 경우 과도상태 및 정상상태의 오차가 거의 없는 것을 알 수 있다.

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. 그러나 독립운전모드에서 계통연계모드로 전환시 먼저 제어스위치 Q_2 를 '1'의 위치에 연결시켜 인버터의 출력전압의 크기와 위상을 계통 전압에 일치시킨 후 다시 '2'의 위치로 하여 계통연계 운전을 시작해야 한다. 독립운전 모드에서 인버터는 교류전압제어를 수행해야 하는데 기존의 PI제어기를 사용하는 경우 상용 주파수에서의 유한한 계인으로 인하여 정상상태에서의 오차를 제거할 수가 없다^[4]. 한편 단상시스템에서도 동기 좌표계를 이용하여 직류값으로 변환한 후 PI제어기로 정상상태의 오차를 제거할 수 있지만 Cross-coupling 부분의 고려와 연산량의 증가로 인하여 저가격의 고정소수점 DSP로는 구현이

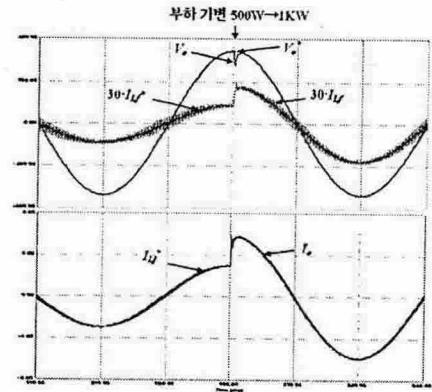


그림 4 제안한 전압제어기의 정상상태와 과도상태 응답

용이하지 않다^[3]. 따라서 본 논문에서는 정상상태의 교류오차를 제거할 수 있고 연산량이 적어 구현이 간단하여 단상 인버터 제어기로 적합한 다음의 P+Resonant 제어기를 사용한다^[4].

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

그림 4의 P+Resonant 제어기를 사용하는 제안한 전압 제어기의 정상상태와 과도상태 응답에서 보듯이 부하가 급변하는 동안에 약간의 오차가 발생할 뿐 정상상태의 오차는 거의 없는 것을 볼 수 있다. 또한 본 방식에서는 LCL 필터방식을 채택하며 인버터측 필터인덕터는 다음과 같이 구한다.

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

여기에서, 차단주파수 f_c 는 대개 스위칭주파수의 0.1배로 하며 계통측에 흐르는 전류 I_{Lg} 를 인버터측 인덕터에 흐르는 전류 I_{Lf} 에 비해 리플 성분이 20% 감소되도록 설계하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{Lg}(h_{sw})}{I_{Lf}(h_{sw})} = \frac{1}{|1 + r(1 - ax)|} = 20\% \quad (4)$$

여기서 $r = L_g/L_f$ 이고, $a = L_f \cdot C_b \cdot \omega^2$ 이다. 또한 x 는 인버터에서 발생한 전력 중 커패시터에서 흡수하는 무효전력의 비중으로 필터커패시턴스는 $C_f = xC_b$ 로 구할 수 있다^[5].

3. 실험결과

제안한 방식의 타당성을 입증하기 위하여 1kW 계통연계 인버터의 시작품을 제작하였으며 본 실험에서 사용한 정수는 다음과 같다.

- 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: $24.2\Omega(500W)$
- 비상부하: $48.3\Omega(250W)$

그림 5(a)~(b)는 계통연계 모드에서 독립운전 모드로 전환할 때의 실험파형이다. 계통연계 모드를 위한 전류제어와 독립운전 모드를 위한 전압제어의 상호전환 시 최소한의 과도상태를 가지도록 제어한다^[6]. 그림 5(a)에서 보듯이 인버터는 초기에 단위역률로 전력을 계통에 보내고 있으며 계통전압이 정상 동작전압 범위에서 벗어나면 즉시 스위치 S1에 Turn-off 신호가 인가되고 계통전압의 다음 영전위에서 전류는 0이 되어 스위치 S1은 실제 Turn-off 된다. 그림 5(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 6은 독립운전 모드에서 계통연계 모드로 전환할 때의 실험 파형이다. 비상부하를 공급하고 있던 인버터는 계통전압이 정상 동작전압으로 복구되면 그림 6(a)에서와 같이 출력전압의 크기와 위상

을 조정하여 계통전압과 일치하도록 동작한다. 일정주기를 지나 인버터 출력전압이 계통전압과 일치된 후 그림 6(b)에서 보듯이 스위치 S1을 영 전위에서 Turn-on 시키고 계통전류 I_{Lg} 는 정격 전류까지 서서히 증가되어 계통에 단위역률로 전력이 공급됨을 알 수 있다. 이때, 독립운전 모드에서의 인버터 출력전압과 연계운전 모드에서의 계통전류의 THD는 각각 3.8%와 3.3%로 측정되었다.

4. 결론

본 논문에서는 가정용 연료전지 발전 시스템을 위한 계통연계형 인버터를 제안하였다. 제안한 제어기는 구현이 간단하여 저가격의 DSP로도 구현이 가능하고 정상상태 및 과도응답 특성이 우수함을 알 수 있다. 제안한 방식의 제어기의 타당성을 입증하기 위하여 모의실험 및 1KW 축소모형으로부터의 실험결과를 제시하였다.

이 논문은 전력선행기술재원의 “신·재생 에너지 발전의 계통연계 기초기술개발연구” (R-2004-D-125)에 의하여 수행되었음.

참고 문헌

- [1] 김호용, 김재언, 김웅상, 이승재, “분산형전원의 배전계통 도입전망과 대책”, *전기학회지*, 제45권 10호, pp.23-31, 1996.
- [2] 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.
- [3] 최시영, 김래영, 권형남, 송중환, “DQ 모델을 이용한 단상 계통연계 인버터의 제어”, *전력전자학술대회 논문집*, pp. 602-605, 2003.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.

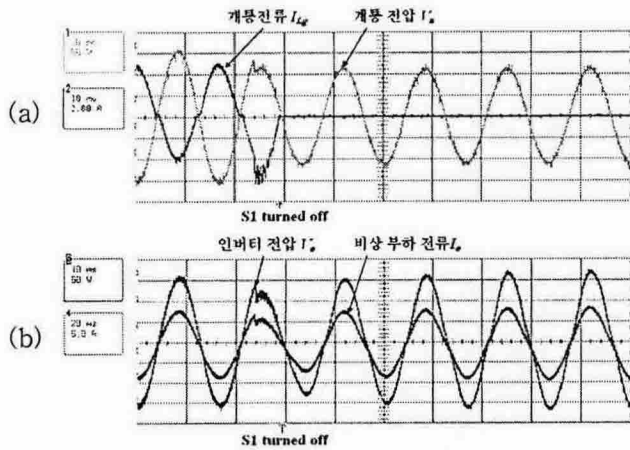


그림 5 계통연계운전에서 독립운전으로 모드전환시

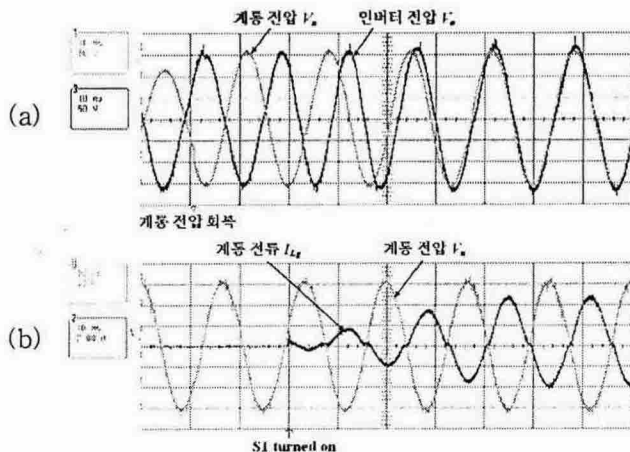


그림 6 독립운전에서 계통연계운전으로 모드전환시