

교류전압 보상기능을 갖는 단상 마이크로 소스 시스템

엄준현*, 정영국**, 임영철*, 김광현*

*전남대학교 전기공학과 (RIC-HECS), **대불대학교 컴퓨터정보공학부

A Single-Phase Micro-Source System with a.c Voltage Compensation Capability

*J.H. Oum, **Y.G. Jung, *Y.C. Lim, and *G.H. Kim

*Chonnam National University (RIC-HECS), **Daebul University

Abstract - For compensating the a.c voltage variations of single-phase micro-source, micro-source system with a voltage compensator is proposed. Single phase p-q algorithm for calculating the a.c voltage variations of the micro-source is used. The effectiveness of the proposed system is verified by the PSIM simulation in the steady state and transient state.

1. 서 론

화석연료의 고갈과 대기 환경오염 등으로 인하여 최근에는 발전소에서 공급하는 전력을 직접 사용하기보다는 신재생 에너지를 이용하는 방안이 검토되고 있다. 신재생 에너지 발전은 태양광 발전, 풍력발전, 연료전지 그리고 바이오매스 등 환경을 오염시키지 않는 범위 내에서 전력을 발생시키는 시스템을 말한다. 이들 신재생 에너지원들은 그 각각이 소형 분산 에너지원으로서 마이크로 소스(Micro-Source)의 역할도 하고 있다^[1-2].

마이크로 그리드(Micro Grid)^[3]는 마이크로 소스들로 이루어진 분산 전원망의 총칭으로 다수의 수용가를 위하여 수요지에서 전력을 생산 및 공급하는 기술로 기본적으로 여러 수용가의 부하 및 분산 발전기들이 하나의 덩어리를 형성하게 되는 새로운 개념의 배전망이다. 일반적으로 마이크로 소스는 전력이 d.c전원을 생산하고 V-소스 인버터를 사용하여 a.c전원을 발생하는 방식을 채택하고 있다^[4,2]. 특히 독립운전을 하는 마이크로 소스의 경우에는 그 전력 발생원에 따라서 전력품질 등이 결정되기 때문에 대 전력계통의 전원에 비하여 고 전력 품질을 유지하는 것이 특히 중요하다.

본 연구에서는 단상 마이크로 소스의 출력 전압이 변동을 하는 경우에 이를 보상할 수 있는 전압 보상기능을 갖는 마이크로 소스 시스템을 제안하였다. 마이크로 소스에 대하여 전압 보상은 커플링 변압기를 통해 직렬로 연결되며 하이브리드 액티브 필터^[4]와 동일한 구조를 갖고 있다. 마이크로 소스는 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC)^[5]를 모의하는 연료전지 시뮬레이터(FC simulator)^[6]부분, 승압용 d.c변환기와 60Hz a.c출력의 인버터로 구성된 전력 변환기 부분으로 구성되어 있다. 마이크로 소스가 전력을 공급하는 부하는 싸이리스터 제어 정류기이며, 전압보상기가 항상 작동하는 경우와 전압변동이 발생할 때만 작동하는 경우에 대해 그 보상 특성을 PSIM 시뮬레이션에 의하여 확인하였다.

2. 제안된 시스템

2.1 보상 및 제어 알고리즘

본 연구에서 제안된 시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 부하가 급증하는 경우, 마이크로 소스의 순간 a.c전압변동이나, 마이크로 소스 자체의 이유로 인한 a.c 출력전압의 변동 분을 전압 보상기가 순간적으로 보상해

주는 원리를 설명하고 있다. 그림 1로 나타낸 마이크로 소스 출력 전압 v_s 과 출력 전류 i_s 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$v_s = \sqrt{2}E\sin\omega t \tag{1}$$

$$i_s = \sum \sqrt{2}I_m \sin(\omega t - \phi_n) \tag{2}$$

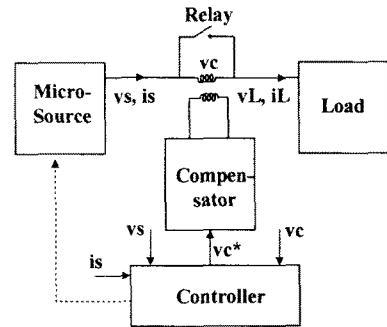


그림 1 제안된 시스템의 구성도
Fig.1 Configuration of the proposed system

(1),(2)로 나타낸 단상 시스템을 3상 p-q이론에 적용하기 위해, (1),(2)를 α - β 좌표계로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} i_s, v_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} v_s \tag{3}$$

$$i_{\alpha 1} = i_\alpha (\theta - 90^\circ), v_{\alpha 1} = v_\alpha (\theta - 90^\circ) \tag{4}$$

$$i_\beta = -i_{\alpha 1}, v_\beta = -v_{\alpha 1} \tag{5}$$

(3)-(5)의 관계를 순시 공간 벡터로 표현하면 그림 2와 같다.

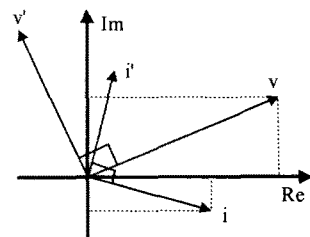


그림 2 순시 공간 벡터도
Fig. 2 Instantaneous space vector

(3)-(5)를 p-q이론에 적용하면 보상기준전류 i_h 를 (6)과 같이 구할 수 있다^[7,8].

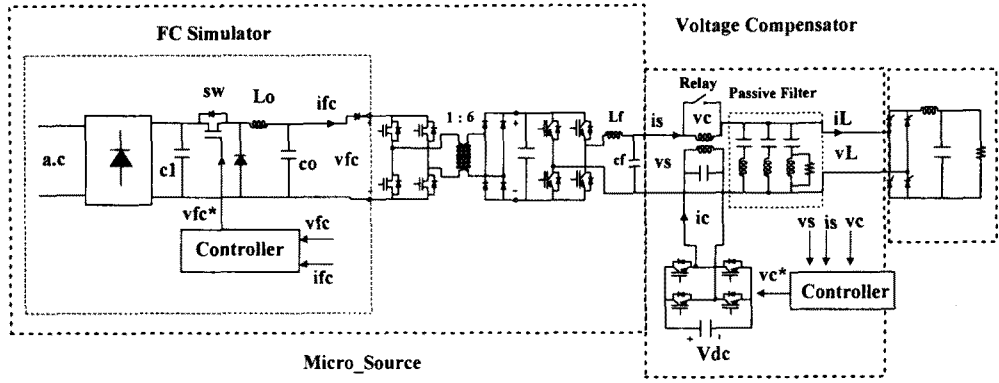


그림 3 제안된 시스템
Fig. 3 Detailed proposed system

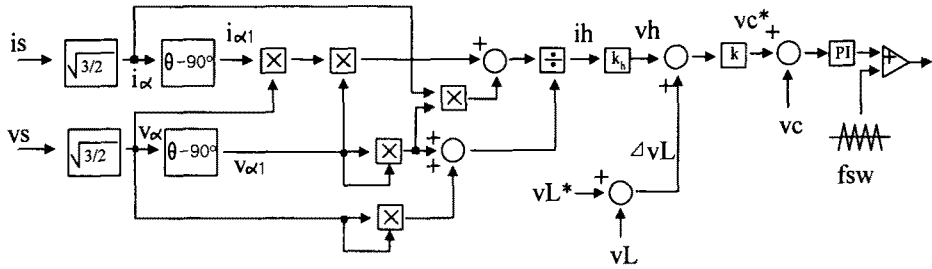


그림 4 보상 및 제어 알고리즘
Fig. 4 Compensation and control algorithm

$$i_h = \frac{v_\alpha v_{\alpha'} i_{\alpha'} - v_{\alpha'}^2 i_\alpha}{v_\alpha^2 + v_{\alpha'}^2} \quad (6)$$

마이크로 소스 전압 v_s 와 전류 i_s 로부터 연산된 보상기준 전류 i_h 는 (7)에 의해 보상전압 기준치 v_h 의 형태로 변환된다.

$$v_h = K_h i_h \quad (7)$$

또한 전압 v_s 의 변동에 따른 부하전압 v_L 의 변동분 Δv_L 은 기준부하전압 v_{L*} 과 검출된 부하전압 v_L 과의 차와 같다.

$$\Delta v_L = v_{L*} - v_L \quad (8)$$

결국 Δv_L 와 v_L 를 전압보상기가 일괄 보상하기 위한 최종적인 보상전압 기준치는 (9)와 같다.

$$v_c^* = k(\Delta v_L - v_h) \quad (9)$$

자세한 시스템과 보상 및 제어 알고리즘을 그림 3과 그림 4에 각각 나타내었다.

2.2 연료전지 마이크로 소스

그림 3를 보면 마이크로 소스는 $v_{fc}=40.6v$ d.c를 발생시키는 연료전지 부분과 이를 288v d.c로 승압하여 $v_s=120v/60Hz$ a.c전압으로 변환시키는 전력변환기로 구성되어 있음을 알 수 있다. 여기서, 연료전지는 PEMFC를 모의 할 수 있는 buck-컨버터를 FC시뮬레이터로 사용하였다. buck-컨버터를 FC시뮬레이터로 사용할 수 있는 이유는 그림 5의 PEMFC V-I특성 곡선 중 연료전지가 대부분 동작하는 영역인 Ohmic loss영역을 1차 방정식으로 모델링 할 수 있기 때문이다. 그림 5의 Ohmic loss영역은 (10)과 같이 1차 방정식으로 구해진다^[6]

$$v_{fc}(i_{fc}) = \left[\frac{v_{fcf} - v_{fci}}{i_{fcf} - i_{fci}} \right] i_{fc} - \left[\frac{v_{fcf} - v_{fci}}{i_{fcf} - i_{fci}} \right] i_{fci} - v_{fci} \quad (10)$$

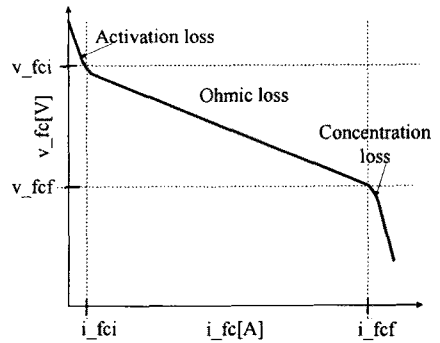


그림 5 PEMFC의 V-I곡선
Fig. 5 V-I curve of the PEMFC

전력변환기 부분은 절연형 d.c Full Bridge 변환기와 PWM인버터로 구성되어 있다. PWM인버터의 출력단의 7mH와 1000uF의 L_f - C_f 필터에 의하여 실효치 $v_s=120v/60Hz$ 의 정현파 a.c전압이 출력된다. 인버터의 a.c전압의 최대치는 출력전압 피드백 루프에 의하여 일정하게 유지되고 있다.

2.3 전압 보상기

전압 보상은 하이브리드 직렬형 액티브 필터^[4]를 사용하였으며, 마이크로 소스의 출력단에 커플링 변압기를 통하여 직렬로 연결되고 있다. 전압 보상은 단상 마이크로 소스 전압 v_s 의 변동에 따른 부하전압 v_L 의 변동분 Δv_L 과 i_s 의 고조파를 보상하기 위한 병렬형 수동필터와 직렬형 액티브 필터로 구성된다. PWM변조를 위해서 $f_{sw}=15KHz$ 삼각파 비교방식을 이용하였다. 직렬형 능동전력필터의 직류단 캐패시터는 시뮬레이션을 위하여

d.c 전압원으로 하였으며, 비선형 부하는 싸이리스터 제어 정류기를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 6은 마이크로 소스의 d.c full bridge 컨버터의 출력전압 v_{fb_dc} 과 PEMFC의 무부하 전압 v_{fc} 를 서로 비교한 것이다. PEMFC 시뮬레이터 출력전압 $v_{fc}=40.6$ 은 d.c full bridge 컨버터에 의하여 $v_{fb_dc}=288$ v의 d.c 전압으로 승압됨을 알 수 있다.

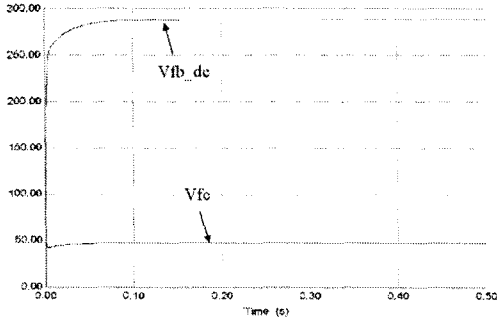


그림 6 마이크로 소스의 d.c 전압 특성
Fig. 6 D.c voltage characteristics of micro-source

그림 7-그림 11은 마이크로 소스의 전압 변동과 무관하게 직렬변압기의 릴레이가 오픈된 상태에서 항상 전압 보상기가 동작하는 모드이다. 전압 보상기가 항상 동작되고 있으므로 전원전압의 변동과 무관하게 일정한 교류 전압을 부하에 공급할 수 있다. 또한 이 모드에서 전압 보상기는 상시 동작되므로 전원전류의 고조파 역시 상시 보상 가능하다. 그러나 전압보상기의 전원이 배터리로 되어있는 경우가 많기 때문에 전압 보상기를 장기간 운전시키기는 어렵다.

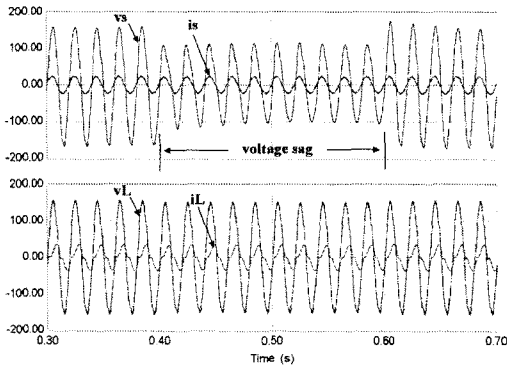


그림 7 전원 측 전압, 전류와 부하 측 전압, 전류
Fig. 7 v_s, i_s and v_L, i_L

먼저 그림 7은 v_s 가 155v(peak)에서 110v(peak)로 10 주기정도 sag가 발생한 경우의 전압과 전류 관계를 나타내었다. 보상기가 항상 동작되고 있기 때문에 전원 전류(i_s)는 전원전압(v_s)과 동상인 정현파를 유지하고 있으며 부하전압(v_L)은 전원전압(v_s)과 무관하게 일정한 전압을 유지하고 있다. 그림 8은 이 경우에 대한 부하전류(i_L)과 전원전류(i_s)만을 나타낸 것이다.

그림 9는 v_s 와 v_L 의 최대치와 각각의 rms를 서로 비교한 것이다. v_s 는 sag가 발생한 기간 동안 rms가 감소되고 있다. 그러나 v_L 은 sag가 발생한 기간에도 110v(rms) 전압을 부하에 공급할 수 있음을 보여준다.

그림 10은 v_s 에 전압변동이 없는 경우(1)와 있는 경우(2)에 대한 v_s, v_L 의 1과형을 반주기만 확대하여 나타내었다. (2)지점을 살펴보면 45v(peak)정도의 전압을 보상 가능함을 알 수 있으며, (1)지점에서 보는 바와 같이 v_s 가 정상 전압을 부하에 공급하더라도 부하에는 PWM 스위칭 성분 존재하는 v_L 을 공급받고 있음을 알 수 있다. 이는 전원 전압의 변동과 무관하게 전압보상기가 항상 동작하고 있기 때문이다. 그림 11은 보상된 v_L 과 v_L 의 60Hz 기본과 성분을 비교한 것이다. PWM 스위칭 성분을 제외하면 보상된 v_L 과 60Hz 기본과 성분은 진폭과 파형이 동일하다.

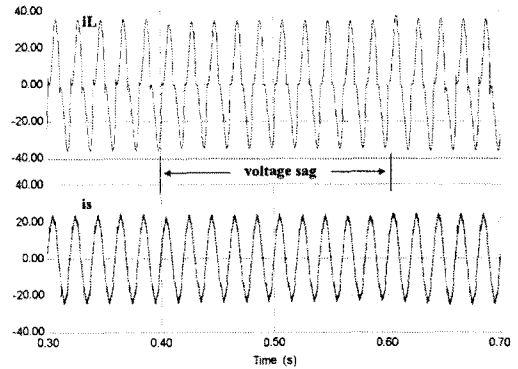


그림 8 부하 측 전류와 전원 측 전류
Fig. 8 Load current and source current

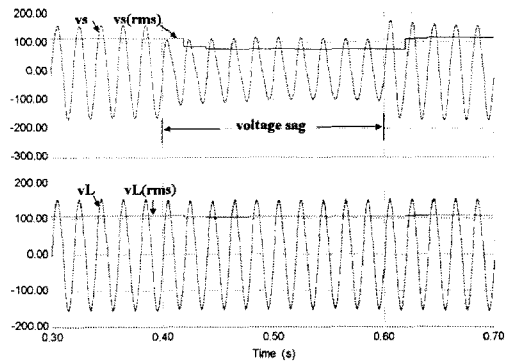


그림 9 Sag가 발생한 경우, 보상 특성
Fig. 9 Compensation characteristics in case of sag

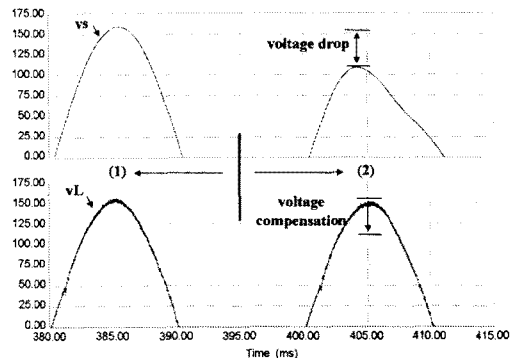


그림 10 전원전압 변동이 없는 경우와 있는 경우, 부하전압을 확대한 파형
Fig. 10 Load voltage (v_L) without/with source voltage (v_s) variation

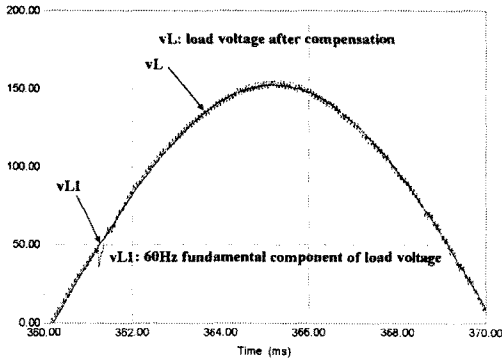


그림 11 보상된 부하전압(vL)과 60Hz 기본파 성분(vL1)

Fig. 11 Compensated load voltage (vL) and its 60Hz fundamental component (vL1)

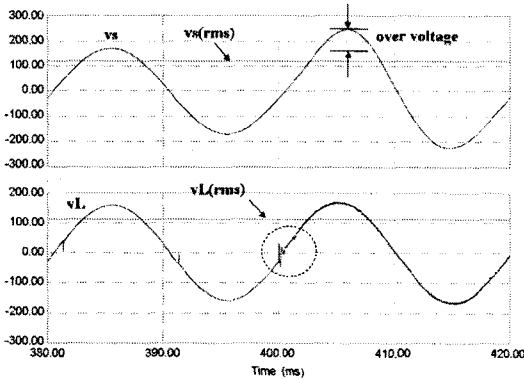


그림 12 전압변동이 있는 경우에만 전압 보상기를 작동시킨 경우에 대한 vs-vL의 비교 파형

Fig. 12 Waveform of the vs-vL in case that voltage compensator is operated for the voltage variation

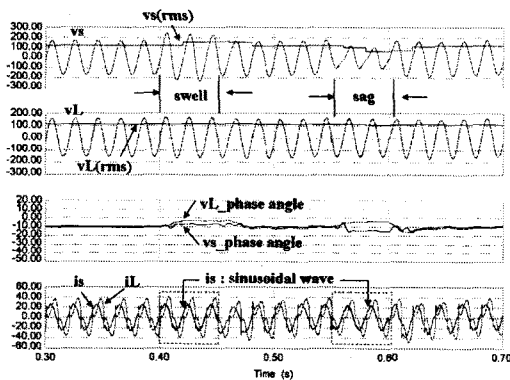


그림 13 Swell과 sag가 있는 경우에만 전압 보상기를 작동시킨 경우에 대한 보상특성

Fig. 13 Compensation characteristics in case that voltage compensator is only operated for the swell or sag

그림 12는 vs에 전압변동이 발생하는 경우에만 전압 보상기를 작동시키는 모드에 대한 vs-vL의 파형을 비교하였다. 정상상태의 vs에 대한 vL의 보상은 이루어지지 않

고(릴레이는 단락상태) vs는 그대로 vL로 전달되며 vs가 증가한 시점(vL의 점선으로 표시된 부분)부터 전압보상이 이루어진다. 따라서 전압보상기는 vs에 전압변동이 있는 경우에만 동작되므로 배터리의 소모가 적어 효율적인 운전을 할 수 있다.

그림 13은 vs가 155v(peak)→220v(peak)→90v(peak)→155v(peak)로 swell과 sag를 반복하는 경우에만 전압보상기를 작동한 결과이다. vL과 vs는 정상상태에서 위상각이 일치하고 swell과 sag가 발생하는 경우에 약간의 차이가 남을 알 수 있다. 전류파형의 관점에서 살펴보면, vs에 전압변동이 없는 경우, is는 그림 3에서 나타난 전압보상기의 수동필터에 의하여 어느 정도 고조파가 감소되며 전압보상기가 동작하는 시점에는(점선박스 부분) 거의 완전한 정현파로 됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 교류전압 보상기능을 갖는 단상 마이크로 소스의 특성에 대하여 PSIM 시뮬레이션에 의하여 고찰하였다. 제안된 시스템은 PEMFC 시뮬레이터, d.c full bridge 컨버터, PWM인버터로 구성된 마이크로 소스와 하이브리드 액티브 필터 구조의 전압보상기로 구성되어 있다.

제안된 시스템은 전압보상기를 상시 운전하는 경우와 전압변동이 발생될 때만 동작시키는 모드로 나누어 고찰하였다. 10주기 정도의 전압 상승과 강하에 대하여 제안된 시스템은 곧바로 전압을 보상하는 속응성을 가지고 있었다. 또한 전압의 swell이 발생하거나 왜형된 sag등이 발생하더라도 부하 단에 %THD가 매우 낮은 60Hz 정현파 전압을 일정하게 공급할 수 있었다. 끝으로 마이크로 소스의 전압보상과 동시에 마이크로 소스 전류의 고조파도 보상할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지정 '전남대 고품질 전기전자 부품 및 시스템 연구센터'의 연구비 지원으로 연구된 결과의 일부임.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Chakraborty, M.G. Simoes, "Advanced active filtering in a single phase high frequency ac microgrid", in Conf. Rec. of IEEE PESC'05, 2005, pp.191-197.
- [2] 손광명, 이계병, 김영섭, "SVPWM방식 마이크로소스로 구성된 마이크로그리드 모델링 및 해석", 한국조명전기설비학회 논문지 제20권 제3호, pp.12-19, 2006.
- [3] 임준현, 정영국, 김광원, 임영철, "연료전지 마이크로소스와 능동전력필터 시스템", 전력전자학술대회 논문집, 2006. 6, pp.508-511.
- [4] P.T. Cheng, C.C. Hung, C.C. Pan, and S. Bhattacharya, "Design and implementation of a series voltage sag compensator under practical utility conditions", in Conf. Rec. of IEEE APEC'02, 2002, pp.1061-1067.
- [5] P.J.H. Wingelaar, J.L. Duarte, and M.A.M. Hendrix, "Dynamic characteristics of PEM fuel cells", in Conf. Rec. of IEEE PESC'05, 2005, pp.1635-1641..
- [6] Y.R. de Novaes, R.R. Zepelini, and I. Barbi, "Design considerations of a long term single-phase uninterruptible power supply based on fuel cells", in Conf. Rec. of IEEE PESC'05, 2005, pp.1628-1634.
- [7] M.T. Haque, and T. Ise, "Implementation of single-phase pq theory", in Proc. PCC-Osaka'02, 2002, pp.761-765
- [8] M.T. Haque, "Single-phase pq theory", in Conf. Rec. of IEEE PESC'02, 2002, in CD-version