

# 교류전압 보상 기능을 갖는 독립형 단상 연료전지 마이크로 소스

論 文
58-1-7

## Stand-Alone Type Single-Phase Fuel Cells Micro-Source with ac Voltage Compensation Capability

鄭 榮 國<sup>†</sup>  
(Young-Gook Jung)

**Abstract** - This paper proposes a stand alone type single-phase fuel cells micro-source with a voltage sag compensator for compensating the ac output voltage variations (sag or swell) of micro-source. The proposed micro-source is consist of a PEM(polymer electrolyte membrane) fuel cells simulator, a full bridge dc converter, a 60Hz PWM(pulse width modulation) VSI(voltage source inverter), and a voltage sag compensator. Voltage sag compensator is similar to the configuration of hybrid series active power filter, and it is directly connected to micro-source through the injection transformer. Compensation algorithm of a voltage sag compensator adopts a single phase p-q theory. Effectiveness of the proposed the system is verified by the PSIM(power electronics simulation tool) simulation in the steady state and transient state which the proposed system is able to simultaneously compensate the harmonic current and source voltage sag or swell.

**Key Words** : PEMFC(polymer electrolyte membrane fuel cells), stand alone type fuel cells micro-source, voltage sag compensator, single phase p-q theory

### 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)[3-5]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. 마이크로 그리드를 구성하는 마이크로 소스 중 전력전자기술에 의한 마이크로 소스는 일반적으로 전력원이 직류 전원을 생산하고 전압형 인버터(voltage source inverter)를 사용하여 교류 전원을 발생하는 방식[6]을 채택하고 있다. 이러한 마이크로 소스는 자체적으로 전압 일정제어 부분을 포함하고 있으나, 직류전원에 순간적인 문제가 발생하거나 전력변환장치 외부에 연결된 특정 부하가 급변하게 되면 순간적으로 전력변환장치의 교류출력에 전압변동이 발생되어 전압에 민감한 부하는

심각한 영향을 받게 된다. 특히 독립운전[10]을 하는 마이크로 소스의 경우에는 그 전력 발생원과 부하에 따라서 전력 품질 등이 결정되기 때문에 대 전력계통의 전원에 비하여 고 전력 품질을 유지하는 것이 특히 중요하다.

본 연구에서는 독립형 단상 마이크로 소스의 교류출력 전압이 변동을 하는 경우에 이를 보상할 수 있는 전압 보상 기능을 갖는 마이크로 소스 시스템을 제안하였다. 마이크로 소스에 대하여 전압 보상은 결합 변압기를 통해 직렬로 연결되며 하이브리드 액티브 필터[7-9]와 동일한 구조를 갖고 있다. 마이크로 소스는 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC)[10-12]를 모의하는 연료전지 시뮬레이터(fuel cells simulator)[13]부분, 승압용 풀 브리지 직류 변환기(full bridge dc boost converter)와 60Hz 교류 출력의 PWM(pulse width modulation)인버터로 구성된 전력 변환기 부분으로 구성되어있다. 마이크로 소스가 전력을 공급하는 부하는 싸이리스터 제어 정류기이며, 전압보상기가 항상 작동하는 경우와 전압변동이 발생할 때만 작동하는 경우에 대해 그 보상 특성을 PSIM(power electronics simulation tool) 시뮬레이션에 의하여 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 보상 및 제어 알고리즘

본 연구에서 제안된 시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 부하가 급변에 따른 마이크로 소스의 순간 교류전압 변동이나, 마이크로 소스 자체의 이유로 인한 교류출력 전압의 변동 분을 이와 직렬로 연결된 전압 보상기가 순간적으로

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 대불대학교 융합기술학부 副教授 · 工博  
E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr  
接受日字 : 2008年 7月 11日  
最終完了 : 2008年 11月 14日

로 보상한다. 그림 2는 그림 1에서 연료전지 전력변환기 (fuel cells power converter)[6]만을 나타내고 있다. PEMFC 연료전지의 불안정하고 저압인 직류전압( $V_{fc}$ )을 안정하고 고압인 직류( $V_{fb-dc}$ )로 승압 제어하는 풀 브리지 직류 변환기와 이  $V_{fb-dc}$ 을 60Hz의 교류출력 전압( $v_{ac}$ )으로 변환하는 전압 제어 PWM인버터로 구성된다. 여기서 릴레이는 반도체 스위치로 되어 있으며 정상상태에서 릴레이는 “온”상태를 유지하고 있다. 전압변동이 발생하지 않는 정상 상태 동안에는 연료전지 전력변환장치의 교류출력 전압 $v_{ac}$ 은 곧바로 부하전압 $v_L$ 과 같게 된다. 그러나 전압 변동이 발생되면 릴레이는 순간적으로 “오프”되며 곧바로 전압 보상을 검출된 전압 sag나 swell을 보상하기 위하여 보상전압 $v_c$ 을 발생한다.

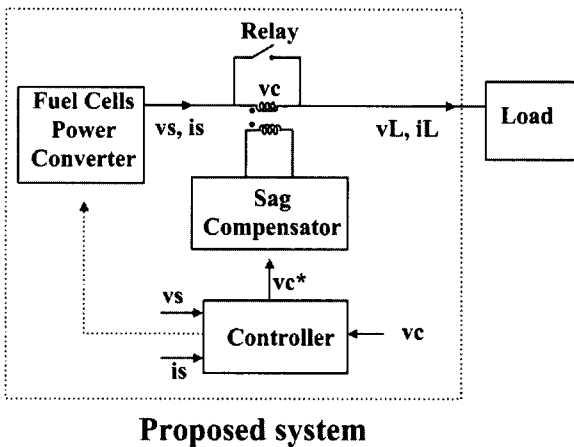


그림 1 제안된 시스템의 구성도  
Fig. 1 Configuration of the proposed system

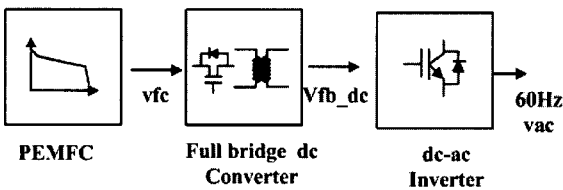


그림 2 연료전지 전력변환기  
Fig. 2 Fuel cells power converter

그림 1의 마이크로 소스 교류출력 전압 $v_s$ 과 교류출력 전류 $i_s$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$v_s = \sqrt{2} E \sin \omega t \quad (1)$$

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

3상 p-q이론을 (1),(2)의 단상 시스템을[14]을 적용하면, (1),(2)는 다음과 같이  $\alpha\beta$ 좌표계로 나타낼 수 있다.

$$i_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} i_s, \quad v_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} v_s \quad (3)$$

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

$$i_\beta = -i_{\alpha'}, \quad v_\beta = -v_{\alpha'} \quad (5)$$

이상의 (3)-(5)의 관계를 순시 공간 벡터로 표현하면 그림 3과 같다.

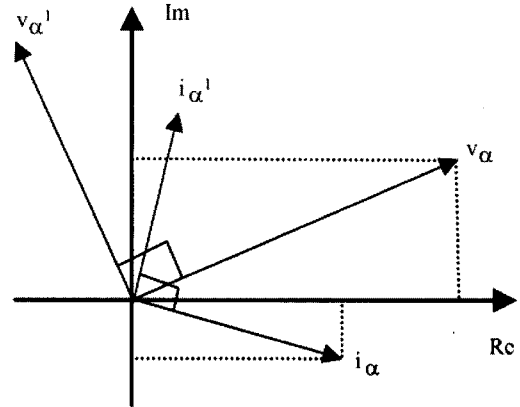


그림 3 순시 공간 벡터도  
Fig. 3 Instantaneous space vector

(3)-(5)를 이용하여 단상 p-q이론[15,16]을 적용하면 고조파 보상기준전류 $i_h$ 는 (6)과 같이 구해진다.

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

마이크로 소스 출력교류 전압  $v_s$ 와 교류전류  $i_s$ 로부터 얻어진 고조파 보상기준전류  $i_h$ 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  $\Delta v_L$ 은 기준부하전압 $v_{L^*}$ 과 검출된 부하전압 $v_L$ 과의 차와 같다.

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

결국  $\Delta v_L$ 과  $v_c$ 를 전압보상기가 일괄 보상하기 위한 최종적인 보상전압 기준치는 (9)와 같다.

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

제안된 시스템의 보상 및 제어 알고리즘을 그림 4에 나타내었다.

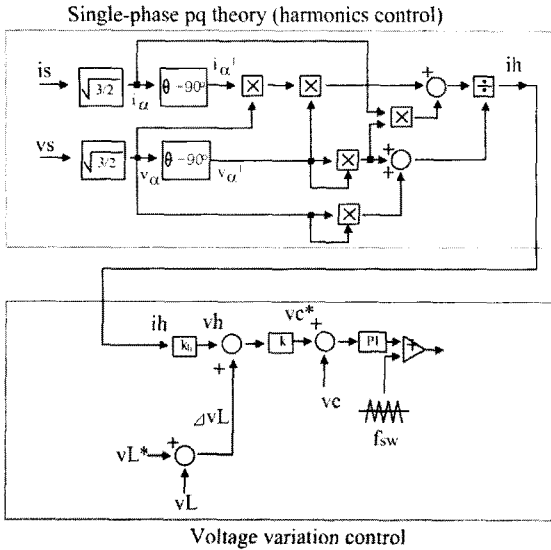


그림 4 보상 및 제어 알고리즘  
Fig. 4 Compensation and control algorithm

2.2 연료전지 모델

본 연구에서 직류전원으로 사용하는 PEMFC 연료전지 모델은 Ballard NEXA (1.2kw)[17]이며 그림 5와 같이 buck-컨버터를 연료전지 시뮬레이터로 사용하였다. buck-컨버터를 연료전지 시뮬레이터로 사용할 수 있는 이유는 그림 6의 PEMFC V-I특성 곡선 중 연료전지가 대부분 동작하는 영역인 Ohmic loss영역을 1차 방정식으로 모델링 하여 buck-컨버터를 제어할 수 있기 때문이다. 그림 5의 Ohmic loss영역은 (10)과 같이 1차 방정식으로 구해진다[13]. 여기서 각 변수에 대한 설명을 그림 6에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 V_{fc}(I_{fc}) &= V_{fci} \quad (0 < I_{fc} < I_{fci}) \\
 V_{fc}(I_{fc}) &= \left[ \frac{V_{fcf} - V_{fci}}{I_{fcf} - I_{fci}} \right] I_{fc} - \left[ \frac{V_{fcf} - V_{fci}}{I_{fcf} - I_{fci}} \right] I_{fci} + V_{fci} \quad (I_{fci} < I_{fc} < I_{fcf}) \\
 V_{fc}(I_{fc}) &= 0 \quad (I_{fc} > I_{fcf})
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

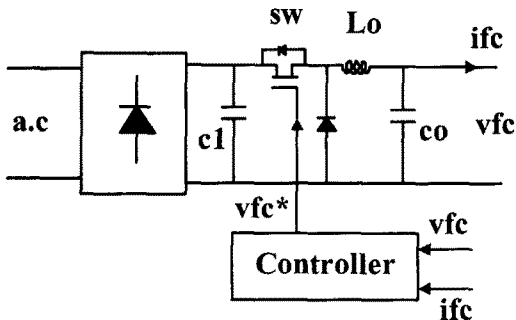


그림 5 PEMFC 시뮬레이터로서 buck컨버터  
Fig. 5 Buck converter as a PEMFC simulator

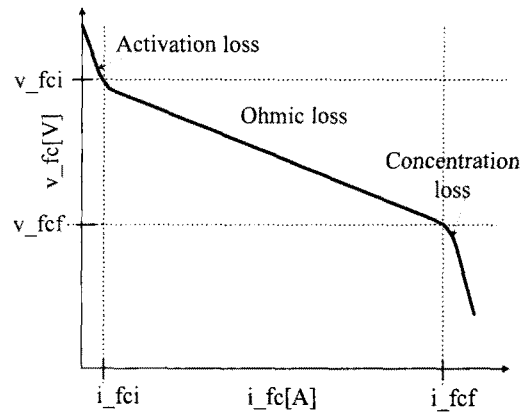


그림 6 PEMFC의 V-I곡선  
Fig. 6 V-I curve of the PEMFC

3. 사례 연구

3.1 시뮬레이션 모델

그림 7은 본 연구의 타당성을 검증하기 위한 시스템 모델이다. 그림 7을 이용한 모의실험은 PSIM 6.5에 의하여 수행되었다. 우선 그림 7을 살펴보면, 연료전지 전력변환기는  $V_{fc} = 42.2v$ 의 직류전압을 발생하는 연료전지 부분과 이를  $V_{fb-dr} = 288v$ 의 안정된 직류전압으로 승압하는 풀 브리지 직류변환기와  $v_{oc} = 110v/60Hz$  실효치 교류전압으로 변환시키는 PWM인버터로 구성되어져 있다. PWM인버터의 출력단의 7mH와 1000uF의  $L_f - C_f$ 필터에 의하여 실효치  $v_s = 110v/60Hz$ 의 정현파 교류전압이 출력된다. 그림 7에서 보는 바와 같이 인버터의 교류전압  $v_{oc}$ 의 최대치는 출력전압 피드백 루프에 의하여 일정하게 유지된다. PWM변조를 위해서  $f_{sw} = 15KHz$  삼각파 비교방식을 이용하였다.

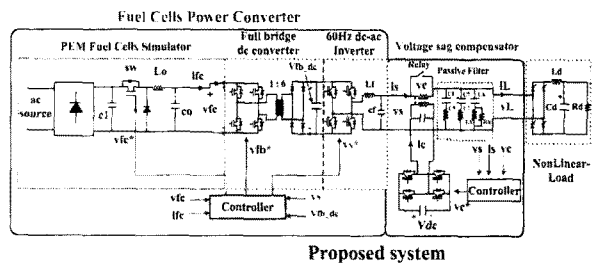


그림 7 제안된 시스템의 시뮬레이션 모델  
Fig. 7 Simulation model of the proposed system

전압 보상은 하이브리드 직렬형 액티브 필터를 사용하며, 마이크로 소스의 출력 단에 결합 변압기를 통하여 직렬로 연결되고 있다. 결합 변압기는 누설 인덕턴스가 매우 적도록 설계되어야 하며 변압기의 전압 주입방향은 전력계통에서 공급하는 극성과 일치하도록 한다. 마이크로 소스 외부에 전압 보상을 직렬로 연결했기 때문에 수동소자 (결합 변압기와 수동필터)에 의한 손실이 발생되며, 소형 분산전원의 경우에는 문제가 될 수가 있기 때문에 전압 보상기 설계

시 이 부분을 잘 고려하여 한다.

표 1 수동필터의 파라미터

Table 1 Parameters of passive filter

5th	$C_5=140\mu\text{H}, L_5=2\text{mH}$
7th	$C_7=70\mu\text{H}, L_7=2\text{mH}$
HPF	$C_h=300\mu\text{H}, L_h=0.26\text{mH}, R_h=3\Omega$

본 연료전지 전력변환기의 출력교류 전압  $v_s$ 의 변동에 따른 부하전압  $v_L$ 의 변동분  $\Delta v_L$ 과  $i_s$ 의 고조파 성분을 보상하기 위해 전압 보상은 병렬형 수동필터[18]와 직렬형 액티브 필터로 구성된다. 직렬형 액티브 필터는 연료전지 전력변환기의 교류출력 전압의 변동분을 보상하여 부하단의 전압을 일정하게 유지시켜준다. 또한 병렬로 연결된 5고조파 ( $L_5 - C_5$ ), 7고조파 ( $L_7 - C_7$ ) 그리고 고역통과 수동필터 ( $L_h - C_h - R_h$ )는 고조파에 대해 저 임피던스 회로로 동작하여 고조파를 흡수한다. 직렬형 능동전력필터의 직류단 캐패시터는 시뮬레이션을 위하여 직류 전압원으로 하였으며, 비선형 부하는 사이리스터 제어 정류기 ( $L_d=7\text{mH}, C_d=6600\mu\text{F}, R_d=5\Omega$ )를 사용하였다. 표 1에 수동필터의 파라미터를 나타내었다.

3.2 시뮬레이션 결과

그림 8은 마이크로 소스의 직류전원으로 사용한 PEMFC의 V-I-P(전압-전류-출력)시뮬레이션 파형 결과이다. 매 0.05s마다 저항 부하를 20번 증가한 결과, 실제 Ballard NEXA (1.2kw) 연료전지와 유사한 특성[11]을 얻을 수 있었다. 그림 9는 본 연구에서 모델링 한 PEMFC의 동특성을 나타내고 있다. 0.3s지점에서 부하가 20A→37A로 급증하는 경우, 약 20ms지연하고 난 후 전압은 35V→28V로 감소되는데 이는 그림 8의 0.8s지점에서의 V-I-P곡선에서 그 특성을 살펴볼 수 있다.

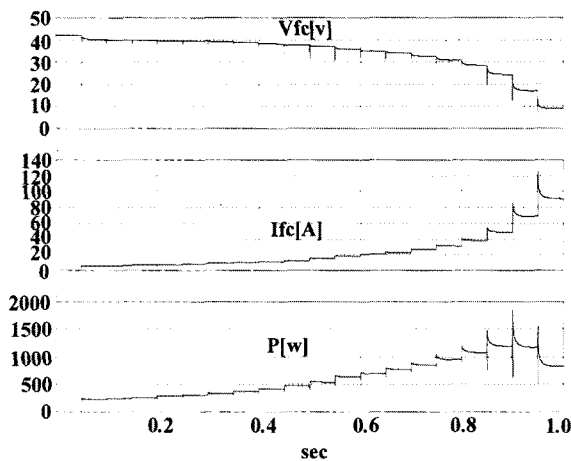


그림 8 PEMFC의 V-I-P곡선  
Fig. 8 V-I-P curve of PEMFC

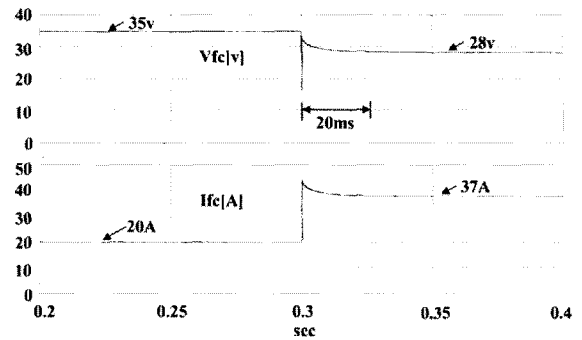


그림 9 200%부하 증가에 따른 PEMFC의 동특성  
Fig. 9 Dynamic response of PEMFC to a 200% step increase

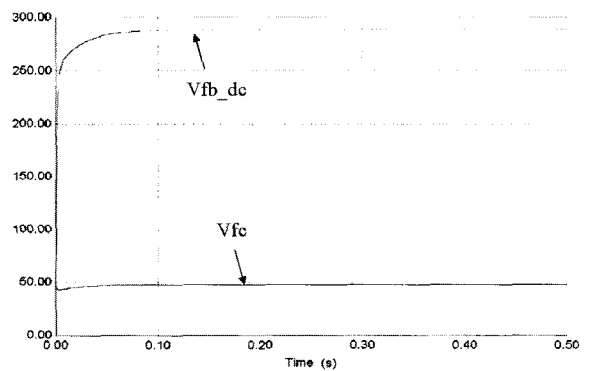


그림 10 마이크로 소스의 직류전압  
Fig. 10 Dc voltages of micro-source

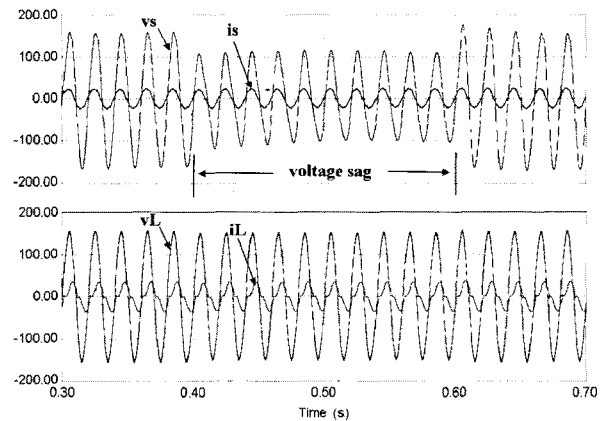


그림 11 교류출력 전압, 교류출력 전류와 부하 측 전압, 전류  
Fig. 11  $v_s, i_s$  and  $v_L, i_L$

그림 10은 마이크로 소스의 풀 브리지 직류 변환기의 출력전압  $V_{fb-dc}$ 와 PEMFC의 무부하 전압  $V_{fc}$ 를 서로 비교한 것이다. 연료전지 시뮬레이터의 출력전압  $V_{fc}=42.2\text{v}$ 를 풀 브리지 직류 변환기에 의하여  $V_{fb-dc}=288\text{v}$ 의 직류전압으로 승압시킬 수 있음을 알 수 있다. 그림 11-그림 15는 마이크로 소스의 교류출력 전압 변동과 무관하게 직렬 변압기의 릴레이가 오픈된 상태에서 항상 전압 보상이 동작하는 모

드이다. 전압 보상기가 항상 동작되고 있으므로 전원전압의 변동과 무관하게 일정한 교류전압을 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.

먼저 그림 11는 마이크로 소스의 교류출력 전압  $v_s$ 가 155v(peak)에서 110v(peak)로 10주기 정도 sag가 발생한 경우의 전압과 전류 관계를 나타내었다. 보상기가 항상 동작되고 있기 때문에 교류출력 전류  $i_s$ 는 교류출력 전압  $v_s$ 과 동상인 정현파를 유지하고 있으며 부하전압  $v_L$ 은 전원전압  $v_s$ 와 무관하게 일정한 전압을 유지하고 있다. 그림 12는 이 경우에 대한 부하전류  $i_L$ 과 교류출력 전류  $i_s$ 만을 나타낸 것이다.

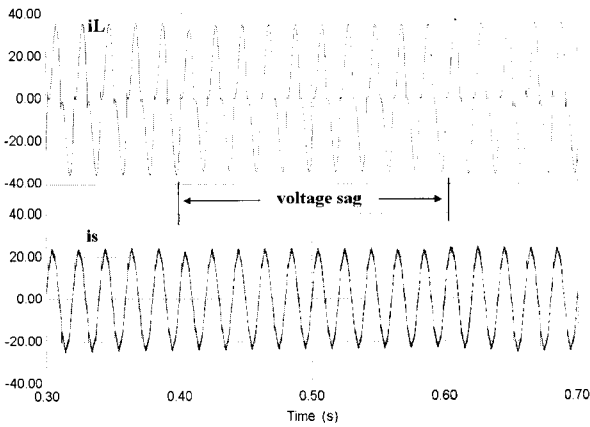


그림 12 부하 측 전류와 교류출력 전류  
Fig. 12  $i_L$  and  $i_s$

그림 13은  $v_s$ 와  $v_L$ 의 최대치와 각각의 실효치를 서로 비교한 것이다.  $v_s$ 는 sag가 발생한 기간 동안 실효치가 감소되고 있다. 그러나  $v_L$ 은 sag가 발생한 기간에도 110v(rms) 전압을 부하에 공급할 수 있음을 보여준다.

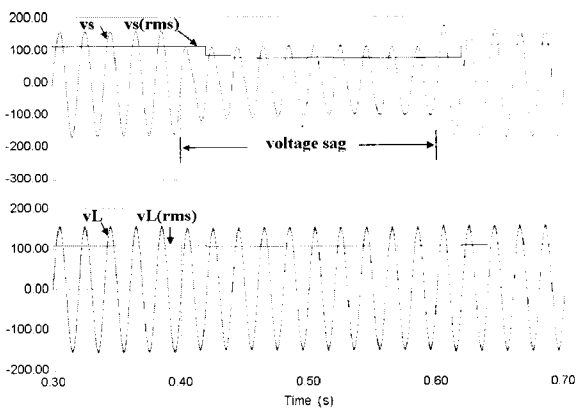


그림 13 Sag가 발생한 경우, 보상 특성  
Fig. 13 Compensation characteristics in case of sag

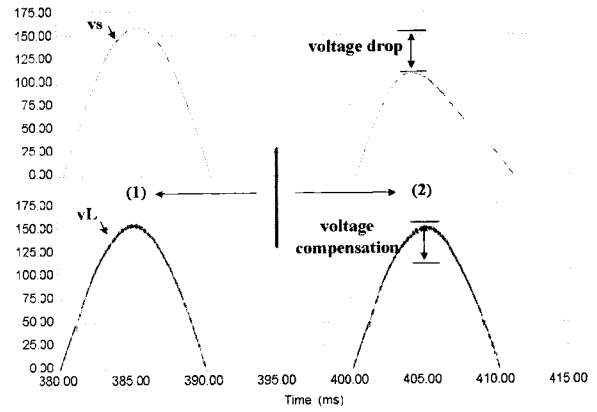


그림 14 전원전압 변동이 없는 경우와 있는 경우의 부하전압 파형

Fig. 14  $v_L$  without / with  $v_s$  variation

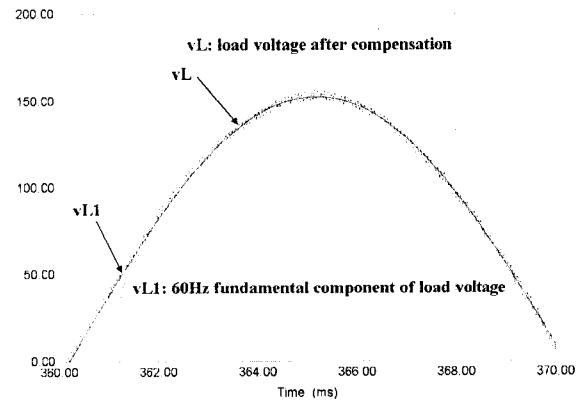


그림 15 보상된  $v_L$ 과 60Hz 기본파 성분  $v_{L1}$   
Fig. 15 Compensated  $v_L$  and its 60Hz fundamental component  $v_{L1}$

그림 14는  $v_s$ 에 전압변동이 없는 경우(1)와 있는 경우(2)에 대한  $v_s$ ,  $v_L$  파형의 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 성분이 존재하는  $v_L$ 을 공급받고 있음을 알 수 있다. 이는 전원 전압의 변동과 무관하게 전압보상기가 항상 동작하고 있기 때문이다. 그림 15는 보상된  $v_L$ 과  $v_L$ 의 60Hz 기본파 성분  $v_{L1}$ 을 비교한 것이다. PWM 스위칭 성분을 제외하면 보상된  $v_L$ 과 60Hz 기본파 성분  $v_{L1}$ 은 진폭과 파형이 동일하다.

그림 16은 마이크로 소스의 교류출력 전압  $v_s$ 에 전압변동이 발생하는 경우에만 전압 보상기를 작동시키는 모드에 대한  $v_s$ - $v_L$ 의 파형을 비교하였다. 정상상태의  $v_s$ 에 대한  $v_L$ 의 보상은 이루어지지 않고(릴레이는 단락상태)  $v_s$ 는 그대로  $v_L$ 로 전달되며  $v_s$ 가 증가한 시점( $v_L$ 의 점선으로 표시된 원)부터 전압보상이 이루어진다. 따라서 전압 보상기는  $v_s$ 에 전압변동이 있는 경우에만 동작되므로 배터리의 소모가 적어 효율적인 운전을 할 수 있다. 그림 17은  $v_s$ 에 왜형된 전압

sag가 발생된 경우에 대한 보상전압  $v_c$ 와 부하전압  $v_L$ 의 파형을 나타낸 것이다.

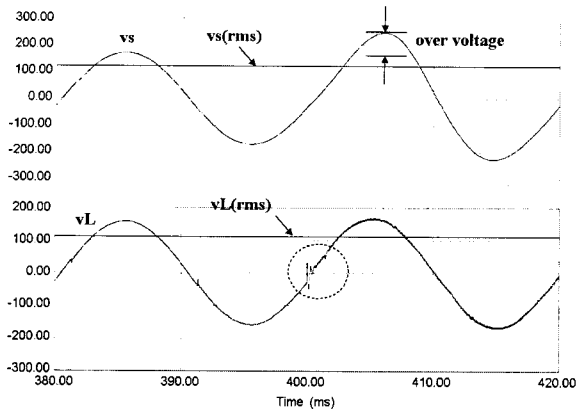


그림 16 전압변동이 있는 경우에만 전압 보상기를 작동시킨 경우에 대한  $v_s - v_L$ 의 비교 파형

Fig. 16 Waveform of the  $v_s - v_L$  in case that voltage compensator is operated for compensating the voltage variation

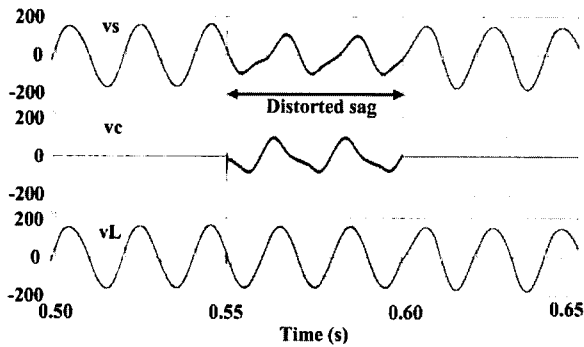


그림 17 왜형된 전압 sag에 대한  $v_s, v_c$ 와  $v_L$  파형

Fig. 17  $v_s, v_c$  and  $v_L$  for distorted voltage sag

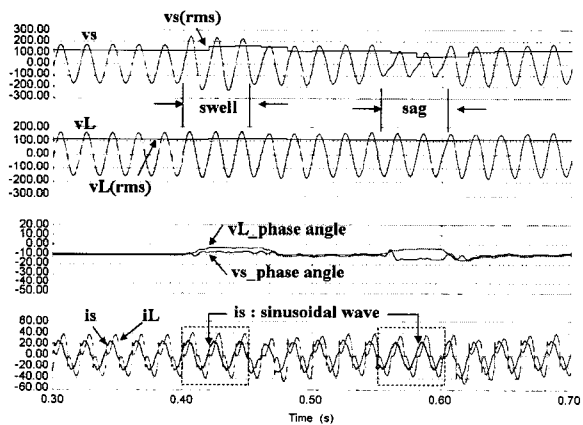


그림 18 Swell과 sag가 있는 경우에만 전압 보상기를 작동시킨 경우에 대한 보상성능

Fig. 18 Compensation performance in case that voltage compensator is only operated for the swell or sag

그림 18은  $v_s$ 가 155v(peak)→220v(peak)→90v(peak) → 155v(peak)로 swell과 sag를 반복하는 경우에만 전압 보상기를 작동한 결과이다.  $v_s$ 와  $v_L$ 은 정상상태에서 위상각이 일치하고 swell과 sag가 발생하는 경우에 약간의 차이가 나고 있다. 전류파형의 관점에서 살펴보면,  $v_s$ 에 전압 변동이 없는 경우,  $i_s$ 는 그림 7에서 나타낸 전압보상기의 수동필터에 의하여 어느 정도 고조파가 감소되며 전압 보상기가 동작하는 시점에는(점선박스 부분)거의 완전한 정현파로 됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 출력교류 전압 보상기능을 갖는 독립형 단상 마이크로 소스의 특성에 대하여 PSIM 시뮬레이션에 의하여 고찰하였다. 제안된 시스템은 PEMFC 시뮬레이터, 풀브리지 직류 변환기, 60Hz PWM인버터로 구성된 연료전지 전력변환기와 하이브리드 액티브 필터 구조의 전압보상기로 구성되어져 있다.

제안된 시스템은 전압 보상기를 상시 운전하는 경우와 전압변동이 발생될 때만 동작시키는 모드로 나누어 고찰 하였다. 10주기 정도의 전압 상승과 강하에 대하여 제안된 시스템은 곧바로 전압을 보상하는 속응성을 가지고 있었다. 또한 전압의 swell이 발생하거나 왜형된 sag등이 발생하더라도 부하 단에 %THD가 낮은 60Hz 정현파 전압을 일정하게 공급할 수 있었다. 끝으로 마이크로 소스의 전압 보상과 동시에 마이크로 소스 전원전류의 고조파도 보상 할 수 있었다

#### 참 고 문 헌

- [1] M. Prodanovic, and T.C. Green, "High-quality power generation through distributed control of a park microgrid", IEEE Trans. Ind. Electron., vol.53, no.5, pp.1471-1482, 2006.
- [2] 손광명, 이계병, 김영섭, "SVPWM방식 마이크로소스로 구성된 마이크로그리드 모델링 및 해석", 한국조명전기설비학회 논문지 제20권 제3호, pp.12-19, 2006.
- [3] Y. Li, D.M. Vilathgamuwa, and P.C. Loh, "Microgrid power quality enhancement using a three-phase four-wire grid-interfacing compensator", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.41, no.6, pp.1707-1719, 2005.
- [4] Y. Li, D.M. Vilathgamuwa, and P.C. Loh, "A grid-interfacing power quality compensator for three-phase four-wire micro grid applications", IEEE Trans. Power. Electron., vol.21, no.4, pp.1201-1031, 2006.
- [5] 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.
- [6] S.K. Mazumder, R.K. Burra, and K. Acharya, "A ripple-mitigating and energy-efficient fuel cell power-conditioning system", IEEE Trans. Power. Electron.,

- vol.22, no.4, pp.1437-1452, 2007.
- [7] H. Xinming, and L. Jinjun, "A novel control for load voltage conditioning by a series power quality controller without dc energy source," in Conf. Rec. of IEEE APEC'08, 2008, pp.1690-1696.
- [8] C. Zhan, V.K. Ramachandaramurthy, A. Arulampalam, C. Fitzer, S. Kromlidis, M. Barnes, and N. Jenkins, "Dynamic voltage restorer based on voltage-space-vector PWM control", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.37, no.6, pp.1855-1863, 2001.
- [9] 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.
- [10] M.Y. EL-Sharkh, A. Rahman, M.S. Alam, A.A. Sakla, P.C. Byrne, and T.Thomas, "Analysis of active and reactive power control of a stand-alone PEM fuel cell power plant", IEEE Trans. Power Systems, vol.19, no.4, pp.2022-2028, 2004.
- [11] C. Wang, M.H. Nehrir, and S.R. Shaw, "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits", IEEE Trans. Energy Conversion, vol.20, no.2, pp.442-451, 2005.
- [12] 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.
- [13] Y.R. de Novaes, R.R. Zapelini, 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.
- [14] J.M. Correa, F.A. Farret, and M.G. Simoes, "Application of a modified single-phase p-q theory in the control of shunt and series active filters in a 400Hz microgrid", in Conf. Rec. of IEEE APEC'05, 2005, pp.2585-2591.
- [15] M.T. Haque, and T. Ise, "Implementation of single-phase pq theory", in Proc. PCC-Osaka'02, 2002, pp.761-765
- [16] M.T. Haque, "Single-phase pq theory", in Conf. Rec. of IEEE PESC'02, 2002, in CD-version
- [17] 최우진, "양자 교환막형 연료전지의 등가 임피던스 모델을 이용한 인버터에 의한 맥동전류의 영향에 관한 연구", 한국조명전기설비학회 논문지 제18권 제6호, pp.230-237, 2004.
- [18] W. Jian, H. Na, X. Dianguo, "A 10KV shunt hybrid active filter for a power distribution system", in Conf. Rec. of IEEE APEC'08, 2008, pp.927-932.

저 자 소 개



**정영국 (鄭榮國)**

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 일본 오카야마대학교 연구방문. 현재 대불대학교 융합기술학부 부교수.

Tel : 061-469-1263  
E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr