

연료전지 전원의 3상 하이브리드 Z-소스 동적 전압 보상기(Z-HDVR)

박희재* 정영국** 임영철***
전자부품연구원*, 대불대학교**, 전남대학교***

Three-Phase Hybrid Z-Source DVR(Z-HDVR) with a Fuel Cells Source

*Hee-Jae Park, **Young-Gook Jung, ***Young-Cheol Lim

*KETI(Korea Electronics Technology Institute), **Daebul University, ***Chonnam National University

ABSTRACT

본 연구에서는 전압품질에 민감한 설비를 위한 3상 하이브리드 Z-소스 동적 전압 보상기(Z-HDVR : Hybrid Z-Source Dynamic Voltage Restorer)을 제시하였다. 제안된 시스템은 수동필터와 Z-소스 토폴로지의 직렬형 능동필터로 구성된다. Z-HDVR의 ESS(Energy Storage System)로는 친환경적인 고분자 전해질 연료전지(PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cells)를 사용하였다. 고조파 검출 알고리즘은 동기좌표계의 $i_d - i_q$ 이론에 의하였으며, 부하전압 보상을 위하여 PI제어를 사용하였다. 전압swell 및 sag등 다양한 전원 조건하에서 제안된 시스템의 보상 성능을 검토하였다

1. 서론

반도체 제조공장 자동화와 같은 설비나 디지털 정보기기 그리고 의료기기 등은 전압sag 및 왜형 등 전압 품질에 매우 민감하다. 특히 이들 부하들은 24시간 연속적으로 동작하는 경우가 많기 때문에 높은 신뢰도의 전원을 필요로 한다. 전원의 다양한 변동을 순간적으로 보상하는 동적 전압 보상기(DVR) [1-3]는 전 전압 보상방법을 사용하는 UPS와 비교하여, 배전계통에서 직렬 변압기를 이용하여 전압변동분의 부족분만을 보상하기 때문에 용량을 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. DVR은 근본적으로 유효전력을 다루기 때문에 별도 에너지저장장치 ESS(Energy Storage System)를 필요로 한다. ESS로는 캐패시터, 배터리, 초전도코일, 플라이휠등이 있으며 전압변동이 발생하는 짧은 순간 (60Hz주파수를 기본으로 8.3ms-1min 기간)에만 보상전력이 방출되므로 적은 에너지의 소모로 양호한 보상특성을 얻을 수 있다.

본 연구에서는 신재생 에너지인 연료전지를 ESS로 사용하는 Z-소스 인버터(ZSD[4]와 수동필터(PF)를 혼합한 동적 전압 보상기(Z-HDVR)를 제안하였다. Z-HDVR의 ZSI는 shoot-through기간[4]을 조절하여 낮은 dc전압의 연료전지로부터 높은 ac전압을 직접 발생시킬 수 있는 인버터이다. 제안된 시스템은 $i_d - i_q$ 이론[5]에 의해 고조파 전류를 검출하고 여기에 전압 변동분을 더하여, 부하전압 변동과 보상전원 전류의 고조파를 동시에 보상한다. 연료전지는 전력전자 변환기의 전원으로 적합한 PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)[6,7]를 사용하였으며, 단상 ZSI 3대를 PEMFC에 공통으로 연결하

여 3상 ZSI를 구성하였다. PSIM시뮬레이션에 의하여 다양한 전원조건에 대한 제안된 시스템의 타당성을 확인하였으며, 특히 ESS로 배터리와 PEMFC를 사용한 경우에 대해 그 보상성능을 비교하였다. 3상전원이 모두 또는 각각 sag와 swell이 발생하는 경우에 대한 %THD(%Total Harmonic Distortion)를 비교 검토하였다.

2. 제안된 시스템

전원전압 품질에 민감한 부하에 대해, 보상전압 v_c 을 발생하기 위한 제안된 Z-HDVR 시스템을 그림 1에 나타내었다. 제안된 시스템은 전원 측의 전압변동을 보상하여 부하 전압을 일정한 크기의 평형전압으로 유지시킬 뿐 만 아니라, 결합 변압기(T_r)에 흐르는 전류에 대하여 기본파 전류제어를 행함으로써 고조파 전류성분이 전원으로 흐르지 못하고 수동필터(PF) 쪽으로 흐르도록 한다. T_r 은 누설 인덕턴스가 매우 적도록 설계되어야 하며 변압기의 전압 주입방향은 전력계통에서 공급하는 극성과 일치하도록 한다. ac스위치(sw)는 Z-HDVR를 선로에 투입할 때는 “on”상태이며 선로에서 제거할 때는 “off”상태로 전환된다.

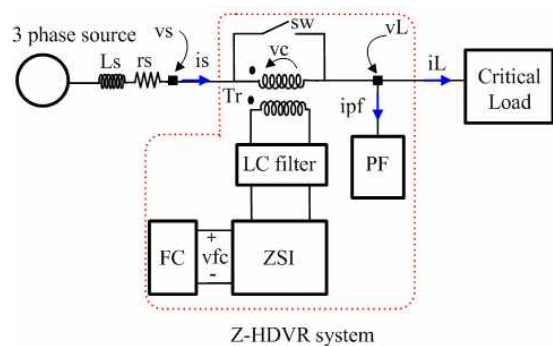


그림 1 제안된 3상 Z-HDVR 시스템
Fig. 1 Proposed three-phase Z-HDVR system

Z-HDVR은 5차, 7차 그리고 고차 고조파를 억제하기위한 PF와 연료전지를 전원으로 갖는 ZSI로 구성되며 전체적으로 하이브리드 능동필터와 유사하다. Z-HDVR은 부하에 유효전력을 공급하는 것이 주목적이므로 별도의 에너지 저장장치(ESS)가 필요하며, 본 연구에서는 배터리 대신 환경 친화적인

PEMFC를 ESS로 사용하고 있다. ZSI는 전원전압 변동분 Δv 과 고조파전류 보상분 i_h 을 고려하여 보상전압 v_c 를 다음과 같이 발생한다.

$$i_h = i_s - i_{s1} \quad (1)$$

$$\Delta v = v_{ref} - v_L \quad (2)$$

$$v_c = \Delta v - k_h i_h \quad (3)$$

여기서 i_{s1} 은 i_s 의 60Hz 기본주파수 성분, v_{ref} 는 v_L 의 기준 전압, k_h 는 i_h 를 전압으로 변환해주는 보상의 게인이다. 결과적으로 Z-HDVR에 의해 v_c 가 계통에 주입되어지면 (4)가 얻어진다.

$$v_s = v_L + v_c \quad (4)$$

그림 2는 보상과정을 나타내는 페이서도이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 부하전압 v_L 은 전원전압 v_s 보다 위상이 δ 만큼 앞서고 있으며, v_L 을 원 궤적에 따르는 1 PU 전압을 유지하기 위하여 sag시에는 $+v_c$ 를 swell시에는 $-v_c$ 를 Z-HDVR은 발생하여야 한다.

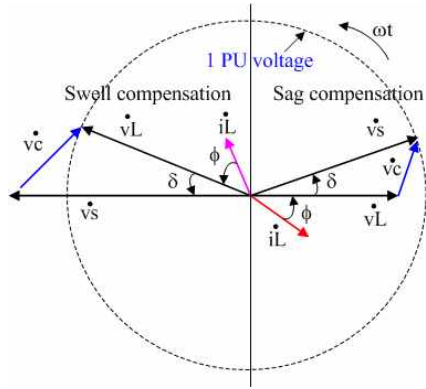


그림 2 보상전압의 페이서도
Fig. 2 Phasor diagram of compensation voltage

그림 3은 제한된 시스템 중에서 ZSI의 전력회로만을 나타내고 있다. 3대의 단상 ZSI의 dc링크 단을 PEMFC와 공통으로 연결한 구조로 되어 있다. ZSI 출력단의 LC필터는 인버터 스위칭으로 발생한 고조파 성분을 제거하기 위한 것이다. ZSI는 shoot-through기간을 조절하여 PEMFC의 낮은 dc전압을 곧바로 높은 ac 보상전압 v_c 로 변환하여 배전계통에 주입한다.

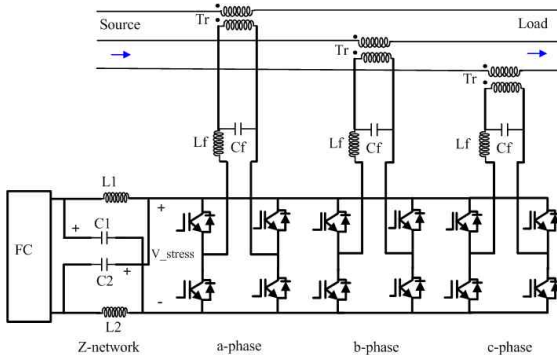


그림 3 Z-HDVR의 ZSI 전력회로
Fig. 3 ZSI power circuit of Z-HDVR

표 1 Z-소스 네트워크의 파라미터
Table 1 Parameters of Z-source network

Inductance L	160uH
Capacitance C	1000uF
Resonant frequency f_r	400Hz

그림 4는 simple boost제어에 의한 3상 shoot-through회로를 나타내고 있다. simple boost제어법[4]은 dc의 $\pm V_{sh}$ 를 조절하여 Z-네트워크의 캐패시터 C_1 에 걸리는 전압 v_{c1} 을 제어하는 기법을 말하며, 표 1에 ZSI의 Z-네트워크의 파라미터를 나타내었다.

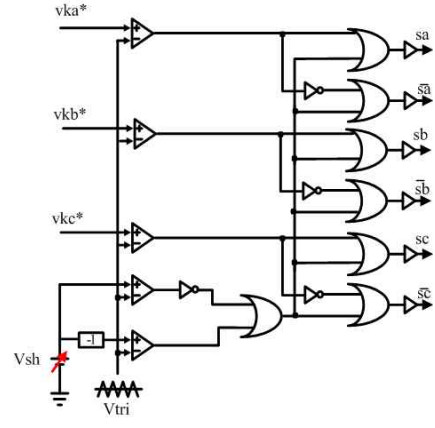


그림 4 3상 shoot-through 제어회로
Fig. 4 Three-phase shoot-through circuit

그림 5는 Z-HDVR의 수동필터로서 5고조파와 7고조파 그리고 고역통과필터로 구성되어있다. 이 수동필터는 민감한 부하로부터 발생하는 5차, 7차 등 고조파 전류에 대하여 0임피던스 경로를 제공하여 이들 고조파를 흡수하는 역할을 한다. 따라서 이 수동필터로 인해 Z-HDVR의 ZSI 용량은 대폭 감소한다. 표 2는 수동필터에 대한 파라미터를 나타내었다.

표 2 수동필터의 파라미터
Table 2 Parameters of passive filter

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

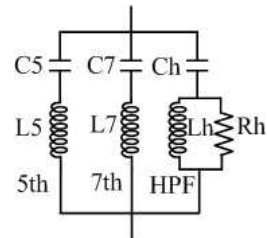


그림 5 수동필터 구조
Fig. 5 Passive filter configuration

그림 6은 고조파 전류 보상분과 전압 변동 분을 모두 고려하여 보상전압을 검출하기 위한 블록선도를 보이고 있다. 고조

과 전류 보상 분은 d-q좌표계에서의 $i_d - i_q$ 이론[5]으로 검출하며 여기에 게인 k_h 을 곱하여 전압으로 변환한다. 전원전압 변동 분은 부하전압과 기준전압과의 차에 의한 PI제어를 통하여 구해진다. 블록선도내의 HPF는 i_d 와 i_q 로부터 고조파 성분 \tilde{i}_d 와 \tilde{i}_q 를 추출하기 위한 고역통과필터를 나타낸다.

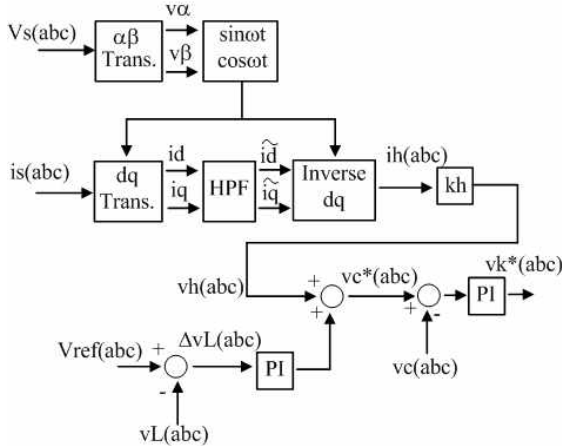


그림 6 고조파 검출과 전압 제어의 블록선도
Fig. 6 Block diagram of harmonic detection and voltage control

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제안하는 3상 Z-HDVR의 동작을 검증하기 위하여 PSIM소프트웨어를 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 부하는 3상 전압형 다이오드 정류기를 사용하였으며, 표 3에 시뮬레이션에 사용한 시스템 파라미터를 나타내었다.

표 3 시스템의 파라미터
Table 3 System parameters

3 phase source		$v_s = 311v_{peak}/60\text{Hz}$	
		$L=0.05\text{mH}, R=0.5\Omega$	
3 phase Z-HDVR	ZSI	LC filter	$L_f=1\text{mH}, C_f=10\mu\text{F}, R=5\Omega$
		Simple boost control $M=0.55, V_{sh}=0.61f_{sw}=10\text{kHz}$	
	PEM FC	Ballard NEXA (1.2kw) × 4 (series) $v_{fc}=42.2\text{v}-26.6\text{v}, i_{fc}=50$	
	Passive filter	5th	$C_5=140\mu\text{H}, L_5=2\text{mH}$
		7th	$C_5=70\mu\text{H}, L_5=2\text{mH}$
HPF		$C_5=300\mu\text{H}, L_5=0.26\text{mH}, R=3\Omega$	
Diode rectifier Load		$C_d=1000\mu\text{F}, R_L=10\Omega$	

그림 7과 그림 8은 3상의 전원이 동시에 36% sag가 발생한 경우, 150vdc 배터리 스택과 표 3의 Ballard NEXA (1.2kw) PEMFC [6,7]4개(직렬연결)를 ESS로 적용하여, Z-네트워크 C_1 의 전압 v_{c1} 과 부하전압 v_L 의 보상능을 각각 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 양 쪽의 경우 모두 v_L 의 보상능이 동일함을 알 수 있다. PEMFC를 ESS로 사용한 경우는 배터리의 경우보다 부하전압 보상기간 동안(0.1-0.15ms) v_{c1} 에

전압변동이 좀 더 존재한다. 이는 전류증가에 대한 전압변동이 심한 연료전지의 V-I특성 때문이라 생각된다. 또한 위상각의 관점에서 살펴보면, sag가 발생하기 전의 전압 위상각은 v_s 와 v_L 모두 -4° 로 동일하나, sag를 보상하는 기간동안에는 약간의 차이가 발생하고 있음을 알 수 있다.

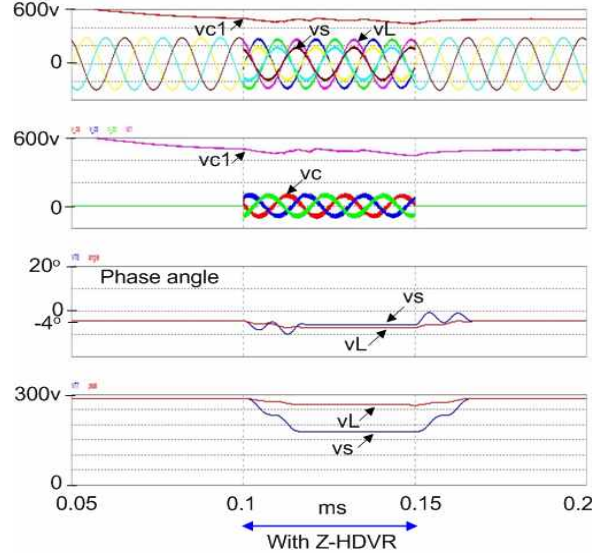


그림 7 ESS로서 배터리를 사용한 경우의 전압 보상 결과 (a,b,c전압 sag 36%)

Fig. 7 Voltage compensation results in case while battery stack is adopted as ESS (sag 36%)

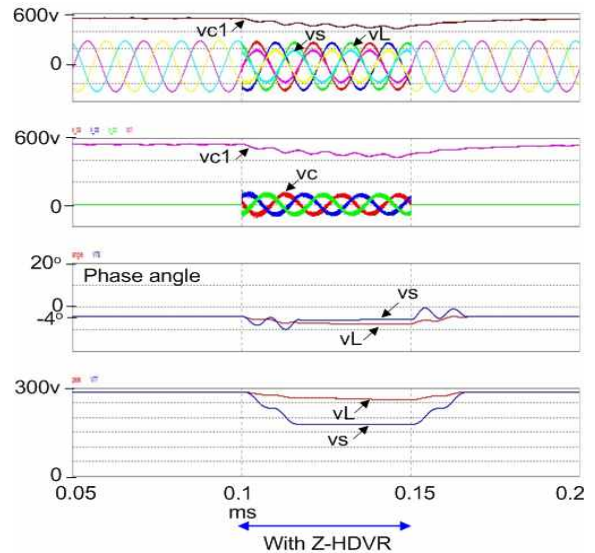


그림 8 ESS로서 PEMFC를 사용한 경우의 전압 보상 결과 (a,b,c전압 sag 36%)

Fig. 8 Voltage compensation results in case while PEMFC stack is adopted as ESS (sag 36%)

그림 9와 그림 10은 그림 4의 shoot-through회로내의 기준치 변조 파형과 dc전압 스트레스 V_{stress} 그리고 보상 전후의 전류 파형을 나타낸 것이다. 표 3에 본 바와 같이 $v_{tri}=10\text{v}$ 를 기준을 할 때, $V_{sh}=6.1\text{v}$ 그리고 $M=5.5$ 에 의해 보상기준치 v_{k*} 가 변조됨을 알 수 있다. 부하전류로부터 발생하는 진폭이 큰 5차, 7차 고조파 전류는 PF에 흡수됨을 그림 10의 i_{pf} 파형으로 알

수 있으며, 이로 인해 전원전류 i_s 는 정현파로 된다. 그러나 i_s 는 v_s 와 동상으로 되지는 않는다. 표 4는 sag나 swell등 다양한 전압 조건이 발생하는 경우 제안된 방법으로 보상된 v_L 의 %THD를 나타낸 것이다. 최대치 311V에 대해 a, b, c상 전압 모두 36% sag와 28% swell이 발생하는 경우에는 보상된 v_L 의 %THD는 대략 4-5%정도이다. 그러나 각상이 독립적으로 swell과 sag가 발생하는 경우는 %THD는 약 10%정도이며, 이는 각상이 모두 동일한 크기의 sag나 swell이 발생하는 것보다 %THD가 더 악화됨을 알 수 있다.

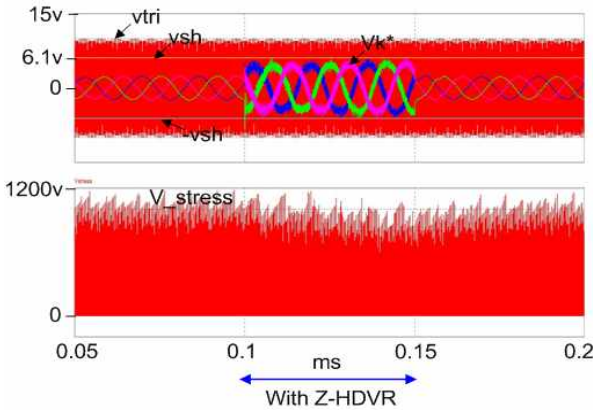


그림 9 기준치 변조파형과 dc 전압 스트레스
Fig. 9 D.c voltage stress and reference modulation waveform

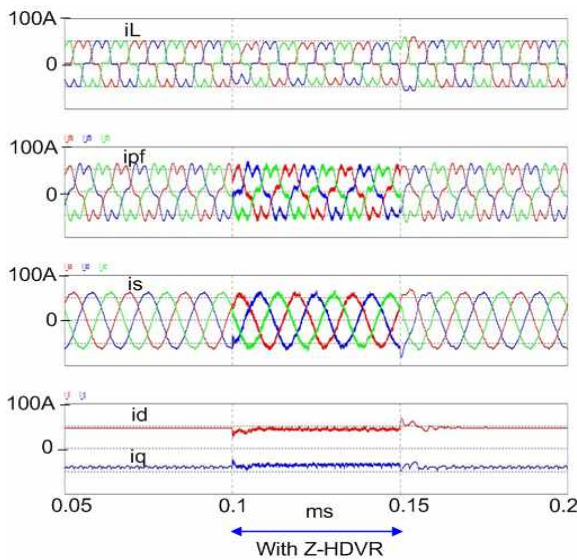


그림 10 제안된 방법의 전류 파형
Fig. 10 Current waveforms of the proposed system

표 4 보상된 v_L 의 %THD

Table 4 compensated v_L %THD

%THD	a-phase	b-phase	c-phase
No sag/swell	0.9	1	0.9
a,b,c-phase : sag 36%	4.3	4.5	4.2
a,b,c-phase : swell 28%	4.8	4.7	4.6
a-phase : sag 42%	12.5	8.6	9.9
b-phase : swell 38%			
c-phase : sag 20%			

4. 결론

본 연구에서는 다양한 전원전압의 조건에 민감한 부하에 대해, 평형되고 일정한 3상 전압을 공급하기 위한 PEMFC기반의 3상 Z-소스 하이브리드 동적 전압 보상기(Z-HDVR)를 제시하였다. 제안된 시스템의 Z-소스 인버터(ZSI)와 5차, 7차 그리고 고차 고조파를 억제하기 위한 수동필터(PF)로 나누어지며, 왜형된 전원전류를 정현파로 합과 동시에 부하전압을 기준치로 일정하게 유지할 수 있었다. ESS로 배터리를 적용한 경우와 PEMFC를 사용한 경우, 부하전압과 고조파 전류의 보상 성능을 비교하였다. 전원전압의 다양한 조건에 대한 보상된 부하전압의 %THD를 비교 검토하였다.

This study was supported by the Research Center for Stabilization of Power Systems with Large Distributed Generations at Chonnam National University in KOREA

참고 문헌

- [1] M. J. Newmann, D. G. Holmes, J. G. Nielsen, and F. Blaabjerg, "A dynamic voltage restorer(DVR) with selective harmonic compensation at medium voltage level", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.41, no.6, pp.1744-1753 2005.
- [2] J. H. Kim, Y. G. Jung, and Y. C. Lim, "A stand alone type fuel cells micro-source system with a voltage sag compensator", in Conf. Rec. of ICPE'07 (Daegu,Korea), 2007, in CD-ROM version.
- [3] D. M. Vilathgamuwa, H. M. Wijekoon, and S. S. Choi, "A novel technique to compensative voltage sags in multiline distribution system - the interline dynamic voltage restorer", IEEE Trans. Ind. Electron., vol.53, no.5, pp.1603-1611, 2006.
- [4] Y. Huang, M. Shen, F. Z. Peng, and J. Wang, "Z-source inverter for residential photovoltaic systems", IEEE Trans. Power Electron., vol.21, no.6, pp.1776-1782, 2006.
- [5] V. Soares, P. Verdelho, and G. D. Marques, "An instantaneous active and reactive current component method for active filters", IEEE Trans. Power. Electron., vol.15, no.4, pp.660-669, 2000.
- [6] J. H. Oum, Y. G. Jung, and Y. C. Lim, "Z-source active power filter with a fuel cells source", in Conf. Rec. of ICPE'07 (Daegu,Korea), 2007, in CD-ROM version.
- [7] J. M. Correa, F. A. Farret, V. A. Popov, and M. G. Simoes, "Sensitivity analysis of the modeling parameters used in simulation of proton exchange membrane fuel cells", IEEE Trans. Energy Conversion, vol.20, no.1 pp.211-218, 2005.