

단상 임피던스-소스 동적 전압 보상기

박희재*, 정영국**, 임영철***

*전자부품연구원, **대불대학교, ***전남대학교

Single-Phase Impedance-Source Dynamic Voltage Restorer

*H.J. Park, **Y.G. Jung, and ***Y.C. Lim,

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

ABSTRACT

This paper deals with a single-phase impedance-source dynamic voltage restorer (Impedance-DVR) to mitigate voltage sag/swell for the critical loads. The proposed system is composed of passive filter and impedance-source topology inverter. As an ESS(Energy Storage System) of the proposed system is employed the Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC). To calculate and control the compensation voltage, single-phase $d-q$ theory in dq rotating reference frame and PI controller are used. Simulation results under voltage sag and swell are presented to show the performance.

1. 서론

최근 24시간 연속적으로 동작하는 마이크로프로세서 기반 산업전자 제어장비와 정보기기 그리고 의료장비와 같은 비선형 부하에 대한 수요가 증가되고 있다. 이들 비선형 부하는 전원 전압의 왜형과 불 평형 그리고 고조파 전류에 대해 매우 민감한 동작 특성을 갖고 있으며, 동시에 관련 계통에 고조파 및 전압 왜형의 발생원이 되기도 한다. 전력 품질을 저하시키는 요인으로는 비선형 부하에서 전원 측으로 발생하는 고조파와 전원전압의 왜형 그리고 순시 전압 sag 또는 swell등으로 구분할 수 있다. 이상에 대한 문제점들은 동적전압보상기(DVR : Dynamic Voltage Restorer) [1,2]로 해결 가능하다.

본 연구에서는 신재생 에너지인 연료전지(Fuel cells source)[3,4]를 사용하는 임피던스-소스 인버터[5,6]에 의한 DVR를 제안하였다. 임피던스-소스 인버터는 Z-소스 인버터라 하기도 하며 shoot-through제어를 통해 저 전압의 연료전지로부터 고전압의 교류전압을 곧바로 발생시킬 수 있는 인버터이다. 이 인버터는 별도의 부스트 직류변환기가 필요하지 않기 때문에 가격과 효율 면에 연료전지나 태양광 발전에 적합하다. PSIM 시뮬레이션에 의하여 과도상태 및 정상상태에서 전원 전압의 sag와 swell을 효과적으로 보상가능하며, 그 결과 부하 단의 전압은 안정되게 제어됨을 확인할 수 있었다.

2. 단상 임피던스-소스 인버터

그림 1은 임피던스-소스 인버터를 간략화한 등가회로를 나타내고 있다. L-C 네트워크는 대칭 격자회로이므로 $I_1 = I_2 = I$ 과 $V_1 = V_2 = V$ 이며 $V_L1 = V_L2 = V_L$ 과

$V_C1 = V_C2 = V_C$ 조건을 만족하고 있다. 그림 3을 살펴보면, 임피던스-소스 인버터는 sw→1인 active상태와 sw→2인 shoot-through상태로 동작됨을 알 수 있다.

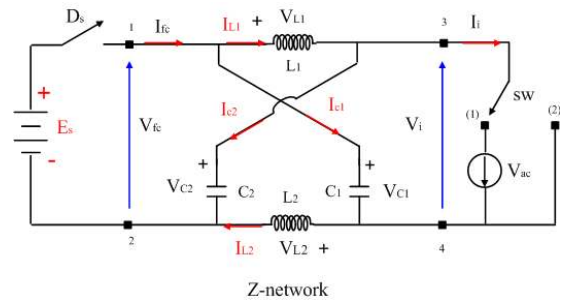


그림 1 임피던스-소스 인버터
Fig. 1 Impedance-source inverter

먼저, active상태는 인버터 dc링크 단에 평균전압 V_c 가 걸리는 상태로서 에너지는 ① 과 ② 에 충전되며 전압방정식은 다음으로 표현된다. 여기서 V_c 는 연료전지의 직류전압, V_i 는 임피던스-소스 네트워크 dc단의 피크전압, V_{ac} 는 임피던스-소스 인버터의 교류출력 전압이다.

$$V_L1 = V_c - V_c2$$

$$V_i = V_c1 - V_L1 = V_c1 - (V_c - V_c2) = 2V_c - V_c2 \quad (1)$$

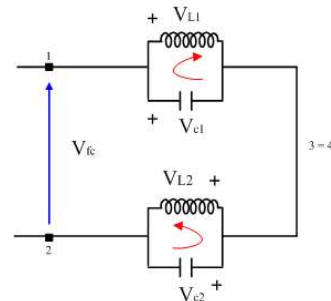


그림 2 shoot-through 상태
Fig. 2 Shoot-through state

그림 2는 그림 1의 shoot-through상태를 나타내는 등가회로이며 인버터의 동일 Leg내의 positive 스위치와 negative 스위

치가 동시에 'on'되므로 결국 $v_i = 0$ 이다. 따라서 충전의 인버터의 경우, shoot-through상태가 발생되면 방지되며 PWM 스위칭 신호에 데드타임을 추가하여 방지한다. shoot-through상태에서 1과 2에 충전된 에너지는 1과 2로 전달되며 전압방정식은 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} v_L &= v_c \\ v_f c &= v_c 1 + v_c 2 = v_c \\ v_i &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

스위칭 주기를 $T = T_1 + T_2$ 라 할 때, 인버터 직류단의 평균전압 v_i , dc 전압의 boost factor B 그리고 shoot-through duty ratio D_0 는 active상태의 총 지속시간 T_1 과 shoot-through상태의 총 지속시간 T_2 로 표현된다.

$$v_i = \frac{T_1}{T} v_f c = v_c \quad (3)$$

$$v_i = \frac{T_1}{T} v_f c = B v_c \quad (4)$$

$$B = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{1}{1 - \frac{2T_2}{T}} \geq 1, D_0 = \frac{T_2}{T} \quad (5)$$

(2)-(5)에 의하여 v_c 는 (6)과 같이 된다.

$$v_c = \frac{1 - D_0}{1 - 2D_0} v_f c = \frac{1 - D_0}{1 - 2D_0} v_f c \quad (6)$$

이상의 식들로부터 임피던스-소스 인버터의 교류출력전압 v_{ac} 은 (7)과 같은 변조지수 M과 boost factor B의 함수로 나타낼 수 있다.

$$v_{ac} = M \frac{v_i}{2} = MB \frac{v_f c}{2} \quad (7)$$

3. 제안된 시스템

그림 3은 제안된 임피던스-소스 DVR을 나타내고 있다. 제안된 시스템은 sag 및 swell에 대한 보상전압 v_c 를 발생하는 전원(ESS)에 있어서 충전의 구조와 차이점이 있다. 즉 충전의 방법은 v_c 를 발생하기 위하여 고전압을 갖는 배터리 스택과 V-소스 인버터(전압형인버터)가 필요하다. 그러나 제안된 방법은 저 전압의 연료전지 스택으로부터 곧바로 v_c 를 얻어내기 위한 임피던스-소스 인버터를 DVR로 사용하고 있다.

그림 4는 제안된 시스템의 보상 페이저이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 부하전압 v_L 은 전원전압 v_s 보다 위상이 δ 만큼 뒤지며, v_L 을 원 궤적에 따르는 1 PU 전압을 유지하기 위하여 sag시에는 $+v_c$ 를 swell시에는 $-v_c$ 를 임피던스-소스 DVR이 발생하여야 한다. 그림 5는 제안된 시스템의 보상 제어 알고리즘을 나타내고 있는데, 단상 $d-q$ 이론[7,8]과 PI제어기를 기본으로 하고 있다.

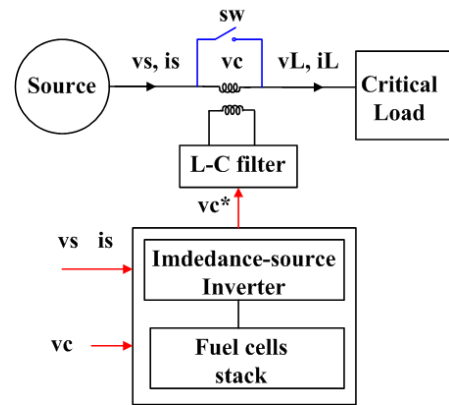


그림 3 제안된 임피던스-소스 DVR
Fig. 3 Proposed impedance-source DVR

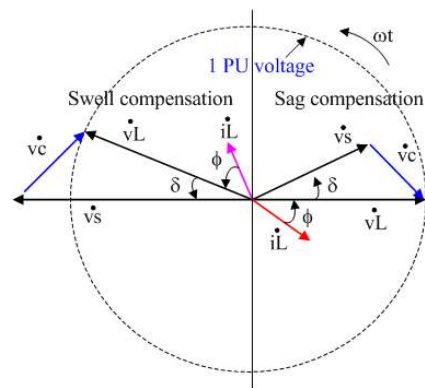


그림 4 보상 페이저
Fig. 4 Compensation phasor

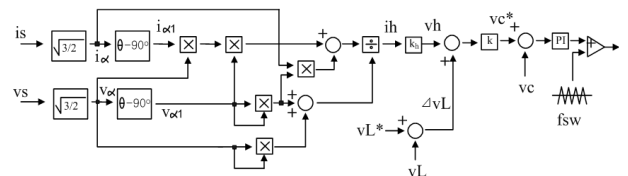


그림 5 보상 및 제어 알고리즘
Fig. 5 Compensation and control algorithm

4. 시뮬레이션 검증

그림 6에는 155v(peak)/60Hz, 3kw급의 제안된 시스템의 구체적인 하드웨어를 나타내었다. DVR은 직렬형 능동필터와 같은 구조를 갖고 있으며, 커플링 변압기(1:1)를 통하여 배전계통과 직렬로 연결되고 있다. 제안된 시스템은 v_s 의 변동에 따른 v_L 의 변동분 Δv_L 과 i_s 의 고조파를 보상하기 위한 병렬형 수동필터와 직렬형 임피던스-소스 능동필터 필터로 구성된다. PWM변조를 위해서 $f_{sw} = 5.4\text{KHz}$ 삼각파 비교방식을 이용하였다. DVR의 ESS로는 AvistaLab SR-12(0.5kw) PEMFC 스택 [3,4]을 기본 모델로 하였으며, 비선형 부하로는 사이리스터 제어 정류기를 사용하였다.

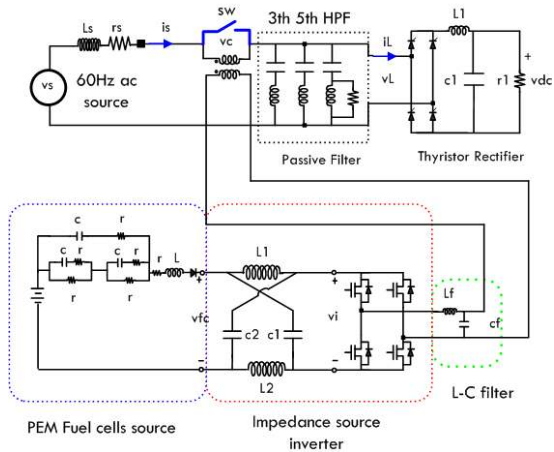


그림 6 제안된 시스템의 하드웨어
Fig. 6 Hardware of the proposed system

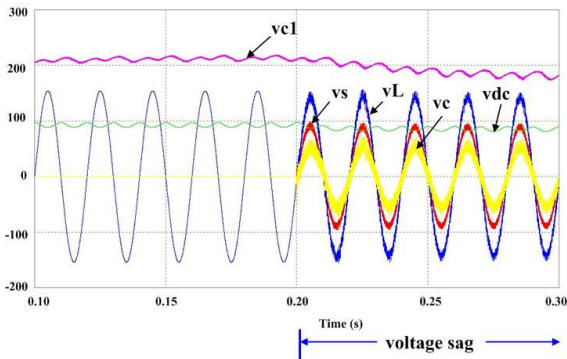


그림 7 35% sag 발생시 제안된 시스템의 보상성능
Fig. 7 Compensation performance of the proposed system for 35% voltage sag

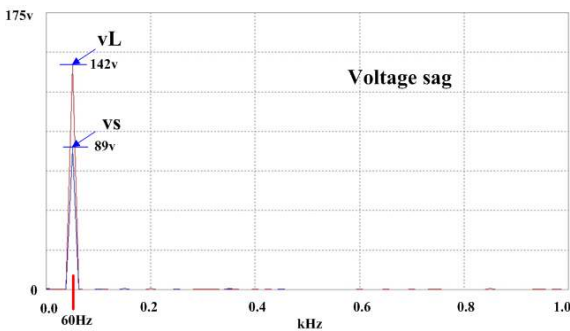


그림 8 전압 FFT스펙트럼(35% 전압sag)
Fig. 8 Voltage FFT spectra(35% voltage sag)

그림 7은 v_s 의 피크치 155v에 대해 35%정도의 sag가 0.2s부터 v_s 에 발생한 경우이다. v_s 에 sag가 발생한 경우라도 제안된 시스템에 의해 0.2s부터 v_c 가 순차적으로 발생되므로 싸이리스터 정류기에 공급되는 v_L 은 sag가 발생되기 전의 v_s 와 동일한 파형이다. 즉 v_L 은 v_s 와 무관하게 최대치가 항상 155v를 유지하며 싸이리스터 정류기의 출력전압 v_{dc} 역시 일정한 전압을 유지한다. 그림 6의 임피던스 네트워크의 1에 걸리는 전압 v_{c1} 은 PEMFC 연료전지의 40.2v 직류전압을 2장에서 이

미 언급한 shoot-through제어 의해 약 200v정도로 부스트됨을 보인다.

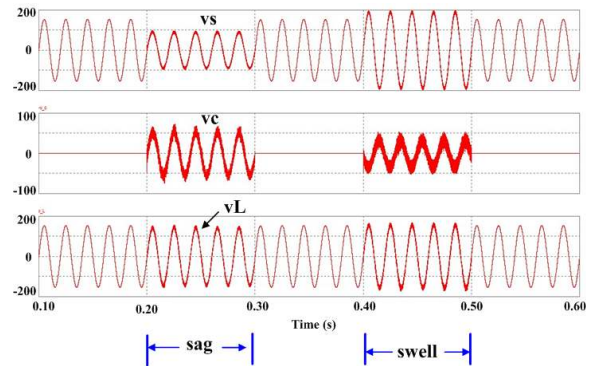


그림 9 제안된 시스템의 과도상태 보상성능
(35% sag과 122%swell)

Fig. 9 Transient state compensation performance of the proposed system (35% sag, 122% swell)

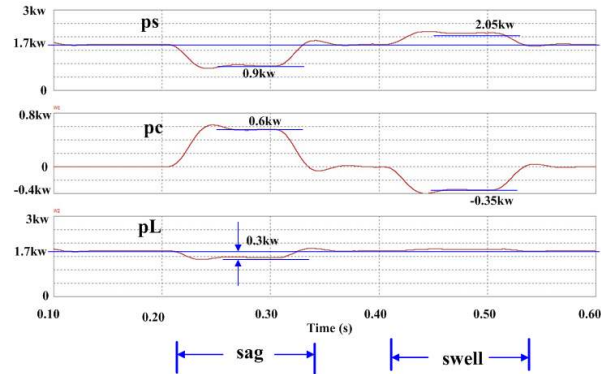


그림 10 공급전력 p_s , 보상전력 p_c 와 부하전력 p_L
(35% sag과 122%swell)

Fig. 10 Supply power p_s , compensation power p_c and load power p_L (35% sag, 122% swell)

그림 8은 그림 7의 sag 발생기간 0.2s-0.3s동안의 전압을 FFT스펙트럼 분석결과를 보인다. 보상 전의 $v_s = 89v$ 정도의 60Hz 기본과 성분에 대하여 보상 후 $v_L = 142v$ 정도로 보상됨을 알 수 있다. 그리고 보상 후 v_L 에는 60Hz 외에는 거의 고조파 성분이 존재하지 않는다. 그림 9는 35% sag와 122% swell이 v_s 에 순차적으로 발생하는 과도상태에 대한 보상결과이다. 과도상태라 할지라도 정상상태와 동일한 보상성능을 보이고 있다.

그림 10은 이 경우에 대한 전력 p_s 와 보상전력 p_c 그리고 부하전압 p_L 을 보이고 있다. sag발생 전에 전원 단은 부하 단에 1.7kw의 전력을 공급하고 있다. 그러나 sag가 발생하여 부하 단에 0.9kw의 전력이 덜 공급되는 경우, 배전계통에 직렬로 연결된 제안된 시스템에 의하여 보상전력 $p_c = 0.6kw$ 이 배전계통에 공급한다. 이는 부하가 필요로 하는 0.9kw보다 0.3kw부족하다. 그러나 swell이 발생하는 경우에는 보상기에 의하여 정확한 $p_c = -0.35kw$ 가 발생하므로 sag와는 다르게 부하 단에는 거의 1.7kw전력이 공급됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 신재생 에너지인 연료전지에 적합한 단상 임피던스-소스 동적전압보상기(DVR)를 제안하였다. 제안된 시스템은 보상전압의 피크치에 근접한 고전압의 배터리 스택과 V-소스 인버터 대신에 저 전압의 PEMFC 스택을 전원으로 하는 임피던스-소스 인버터를 DVR의 기본 토폴로지로 사용하고 있다. 이 방식은 임피던스-소스 인버터의 shoot-through 제어를 통하여 저전압의 직류전압 $f_c=40.2v$ 를 곧바로 $v_{c1}=200v$ 로 부스트할 수 있었으며 이 v_{c1} 을 이용하여 제안된 시스템은 교류보상전압 v_c 을 직접 발생할 수 있다. 전원전압에 대하여 35%의 sag와 122%swell이 발생하여도 제안된 시스템은 보상 전압을 순시적으로 발생할 수 있음을 시뮬레이션에 의하여 검증하였다.

This study was supported by the Research Center for Large-Scale Distributed Generation in KOREA

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] D.M. Vilathgamuwa P.C. Loh, and Y.W. Li, "Voltage sag compensation with Z-source inverter based dynamic voltage restorer", in Conf. Rec. of IEEE IAS'06, 2006, pp.2242-2248.
- [3] 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..
- [4] Jin-Woo Jung, Min Dai, and Ali Keyhani, "Modeling and Control of a Fuel Cell Based Z-Source Converter," in Conf. Rec. of, IEEE APEC'05, 2005, pp.1112-1118.
- [5] Fang Zheng Peng, "Z-Source Inverter", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.39, No.2, pp.504-510, 2003.
- [6] P.C. Loh, D.M. Vilathgamuwa, and Y.Li "Pulse width modulation of Z-Source Inverters", IEEE Trans. Power Electron., vol.20, No.6, pp.1346-1355, 2005.
- [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