

임피던스 소스 네트워크를 갖는 복합형 능동필터에 의한 고조파 보상

김재현* 정영국** 임영철*

전남대학교 전기공학과*, 대불대학교 융합기술학부**

Harmonics Compensation by Using an Impedance Source Hybrid Active Power Filter

*Jae-Hyun Kim, **Young-Gook Jung, *Young-Cheol Lim

*Chonnam National University, **Daebul University

ABSTRACT

본 연구에서는 종전의 전압형 및 전류형 능동전력필터를 대체 할 수 있으며, 부하의 특성에 무관하게 적용 가능한 Z-소스 인버터(Z-source inverter) 토폴로지의 능동전력필터에 대하여 고찰하였다. Z-소스 토폴로지의 능동전력필터의 보상 직류전원으로는 연료전지 PEMFC를 사용하였다. 본 연구에서 제안된 시스템은 고조파 발생원 비선형 부하와 병렬로 연결된 Z-소스 능동전력필터와 7고조파(420Hz) 동조 필터로 구성되며 Z-소스 능동전력필터의 스위치 스트레스를 감소할 수 있다. 제안된 Z-소스 하이브리드 능동전력필터(Z-HAF : Z-source hybrid active power filter)의 보상 알고리즘으로는 전류 동기 검출법(CSD)을 사용하였으며, PSIM 시뮬레이션에 의하여 제안된 Z-HAF의 정상상태에서의 보상 성능을 파악하였다.

1. 서론

능동전력필터[1,2]는 전원계통에 연결된 부하가 발생하는 고조파 및 무효전류를 보상하여 전원 측 전류의 품질을 개선하기 위한 전력전자변환장치이다. 부하에서 발생하는 고조파 및 무효전류와 180° 위상차를 갖는 보상전류를 발생하기 위해 능동전력필터는 직류 보상전원을 갖는데, 이것에 따라서 전압형 능동전력필터와 전류형 능동전력필터[2]로 구분되며, 이들은 고조파를 발생하는 부하의 특성에 따라서 적용 방법이 각각 다르다. 일반적으로 전류형 능동전력필터의 보상 직류전원으로는 큰 리액터를 사용되고 있으며, 전압형 능동전력필터의 보상 직류전원은 전압제어 직류 커패시터에 의하여 확립되고 있다. 또 다른 방법으로 다량의 배터리를 연결하여 고압의 보상전원을 직접 발생하거나, 소량의 배터리를 부스트 직류 컨버터에 의하여 고압의 보상전원으로 승압시킨다. 배터리를 이용하는 방법은 보상 고조파의 급변에도 안정적인 보상전원의 확보라는 관점에서는 유리하나, 카드늄과 수은, 납과 같은 독성이 강한 중금속을 포함하고 있기에 특별한 방법을 사용하여 폐기하지 않으면 심각한 환경 오염문제를 일으킨다. 이러한 문제점은 연료전지(fuel cell)[3]와 같은 신재생 에너지 전원을 활용하면 어느 정도 해결 가능하다.

본 연구에서는 종전의 전압형 및 전류형 능동전력필터를 대체 할 수 있으며, 부하의 특성에 무관하게 적용 가능한 Z-소스 인버터 토폴로지[4,5]의 능동전력필터에 대하여 고찰하였다. Z-소스 토폴로지의 능동전력필터의 보상 직류전원으로는 고분자 전해질 연료전지 PEMFC[3]를 사용하였다. 본 연구에서 제안된 시스템은 고조파 발생원 비선형 부하와 병렬로 연결된 Z-소스 능동전력필터와 7고조파(420Hz) 동조 필터로 구성되며 Z-소스 능동전력필터의 스위치 스트레스를 감소할 수 있다. 제안된 Z-소스 하이브리드 능동전력필터(Z-HAF)의 보상 알고리즘으로는 전류 동기 검출법(CSD)[1]을 사용하였으며, PSIM 시뮬레이션에 의하여 제안된 Z-HAF의 보상 성능을 살펴보고 정상상태의 보상특성을 파악하였다.

2. 제안된 시스템

그림 1은 본 연구에서 제안된 Z-HAF의 기본 구조를 나타내고 있다. 우선 그림 1에서 본 바와 같이 제안된 시스템은 Z-소스 능동전력필터(Z-AF)와 부하전류 고조파 중에서 7차 고조파에 동조된 $L_f - C_f$ 수동필터(7-PF)로 구성되어져 있다.

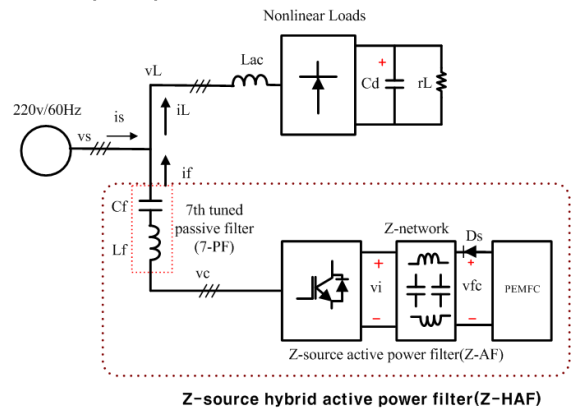


그림 1 제안된 Z-소스 하이브리드 능동전력필터
Fig. 1 Proposed Z-source hybrid active power filter

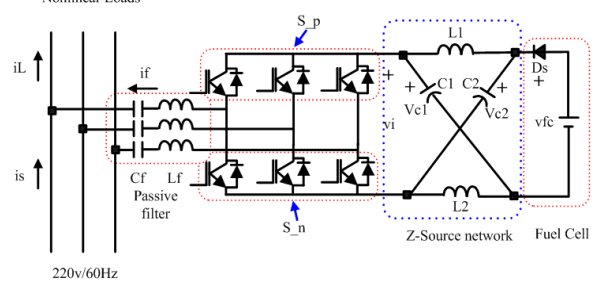


그림 2 Z-HAF의 전력회로
Fig. 2 Power circuit of Z-HAF

표 1 Z-AF의 Z-네트워크의 파라미터
Table 1 Z-network parameters of Z-AF

Inductance $L_1 = L_2 = L$	160uH
Capacitance $C_1 = C_2 = C$	1000uF
Resonant frequency f_r	400Hz

서론에서 이미 기술한 바와 같이, 제안된 시스템이 종전의 전압형 능동전력필터와 다른 점은 바로 능동전력필터의 보상전류 i_f 발생원에 있다. 그림 2는 Z-HAF의 전력회로만을 나타내고 있으며, 직류 단은 L-C의 격자 구조의 임피던스 소스(Z-소스)로 구

성되어져 있다. 또한 보상 직류전원으로는 소형 발전장치인 수소 (H_2)공급 연료전지(PEMFC)이다. Z-AF는 전압형 능동전력필터에서 금기시 되는 스위칭 디바이스의 각 상 Leg를 단락하는 'shoot-through'상태[4](dead time과 반대상태) T_0 를 제어하여 연료전지의 저전압 대전류 특성을 갖는 직류전원 V_{cf} 로부터 교류 보상전류 i_f 를 직접 발생한다.

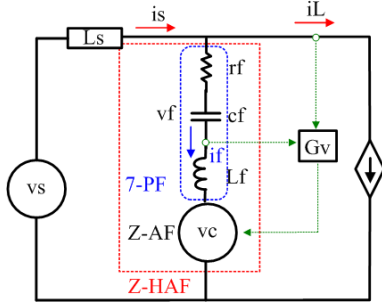


그림 3 제안된 시스템의 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit of the proposed system

표 2 7-PF의 회로 변수
Table 2 7-PF의 parameters

Inductance	L_f	2.5mH
Capacitance	C_f	57.6uF
Resistance	r_f	0.3 Ω
Resonant frequency	f_{r7}	419Hz
Quality factor	Q_7	21.9

그런데 Z-AF만을 단독으로 운전하게 되면, 비선형 부하에서 발생하는 고조파 및 무효전력을 모두 Z-AF가 부담해야 하며 따라서 그림 2의 Z-소스 네트워크내의 캐패시터 C_1 과 C_2 의 전압 V_{c1} 과 V_{c2} 와 스위칭 디바이스의 용량 역시 커지게 된다. 따라서 특정 고조파에 동조된 수동필터와의 연동을 고려 할 수 있는 데, 우선 3상 비선형 부하에서 발생하는 고조파 성분 중 5고조파와 동조된 수동필터를 생각할 수 있다. 3상의 경우, 5고조파는 다른 고조파 성분에 비하여 우세하나, 동일 L_f 에 대하여 전체 수동필터의 용적을 비교해보면 7차 고조파 필터(7-PF)는 5고조파 필터(5-PF)보다 유리하기 때문에 본 연구에서는 7-PF를 Z-AF와 직렬로 연결하여 운전하는 방식을 채택하였다. 표 1에 Z-AF의 Z-소스 네트워크의 파라미터를 나타내었다.

$$Z_{f7}(s) = r_f + sL_f + \frac{1}{sC_f} = \frac{s^2 L_f C_f + s C_f r_f + 1}{s C_f} \quad (1)$$

$$\omega_{r7} = \sqrt{\frac{1}{L_f C_f}} \quad \text{단 } \omega_{r7} = 2\pi f_{r7}, \quad f = 60\text{Hz} \quad (2)$$

$$Q_7 = \frac{\omega_{r7} L_f}{r_f} \quad (3)$$

7고조파 전류에 대한 제안된 시스템의 상태 공간 모델은 (4)와 같으며,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f7} \\ v_{f7} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_f}{L_f} - \frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f7} \\ v_{f7} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} v_c \quad (4)$$

Z-AF의 제어전압(출력전압) v_c 와 필터전류(보상전류) i_f 사이의 전달함수는 (5)로 표현된다.

$$G_{v7} = \frac{I_{f7}}{V_{c7}} = -\frac{\frac{s}{L_f}}{s^2 + \left(\frac{r_f}{L_f}\right)s + \frac{1}{(L_f C_f)}} \quad (5)$$

그림 3은 그림 1에서 제안된 시스템의 등가회로이며 그림 4는 7-PF에 대한 보드선도이다. 전원단의 Z-AF에서 발생하는 2kHz이상의 스위칭 주파수 성분과 60Hz 기본파 성분은 420Hz 직렬공진 회로인 7-PF에 의하여 저지되고, 비선형 부하에서 발생하는 7고조파 성분에 대해서 7-PF은 낮은 임피던스를 제공한다. 이 7-PF에 의하여 Z-AF의 보상 용량은 감소된다. 이때 r_f 를 고려한 7-PF의 필터 임피던스 Z_{f7} 는 (1)과 같으며, 이때 공진주파수 f_{r7} 와 Quality factor Q_7 는 각각 (2)와 (3)으로 표현된다. 표 2에 7-PF에 대한 파라미터를 나타내었다.

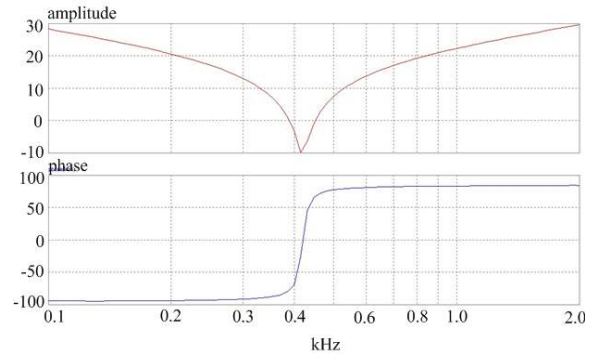


그림 4 7-PF의 보드선도
Fig. 4 Bode plot of 7-PF

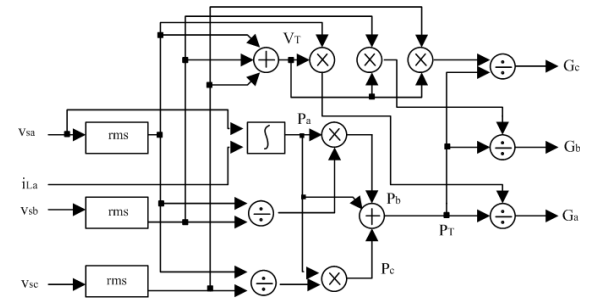


그림 5 CSD 알고리즘
Fig.5 CSD algorithm

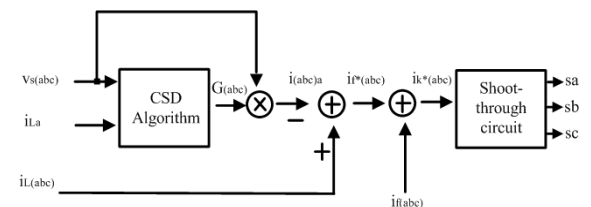


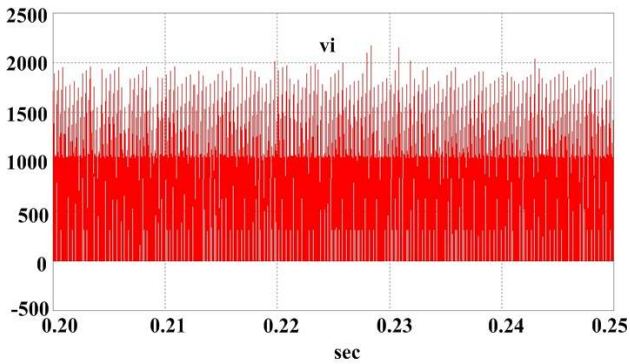
그림 6 $i_f^*(abc)$ 를 구하기 위한 블록선도
Fig. 6 Block diagram for calculating $i_f^*(abc)$

그림 5는 비선형 부하의 콘덕턴스를 연산하기 위한 전류 동기 검출법(CSD) 알고리즘[1]을 나타내 것이며 그림 6은 그림 5를

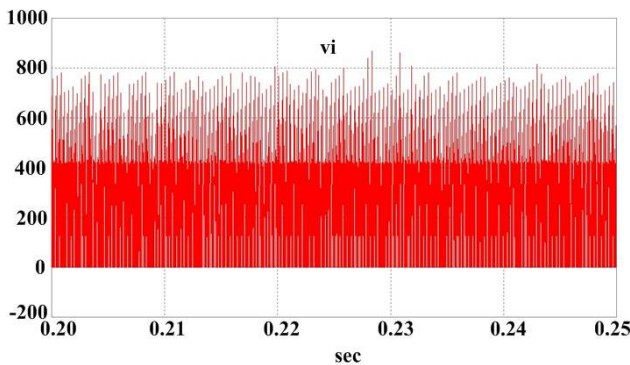
이용하여 3상 보상 기준 전류 $i_f^*(abc)$ 를 계산하는 블록선도이다.

3. 검증 및 고찰

본 연구에서 제안된 시스템의 타당성은 PSIM 6.0(power electronics simulation tool) 시뮬레이션 소프트웨어에 의하여 확인하였다. 제안된 시스템의 보상 직류전원으로 사용한 PEMFC는 Ballard NEXA (1.2kw)[3] 2개를 직렬로 연결하여 사용하였다. Z-소스 인버터 토폴로지를 갖는 제안된 시스템의 shoot-through주기 T_0 는 변조지수 $M=0.55$, shoot-through 조절전압 $V_{sh}=0.645$, 스위칭 주파수 $f_{sw}=5.4\text{kHz}$ 을 가지고 조절되며, shoot-through 발생을 위하여 3상 simple boost control[5]회로를 사용하였다.



(a) without 7-PF



(b) with 7-PF

그림 7 제안된 시스템의 전압 스트레스(V_i)

Fig.7 Voltage stress(V_i) of the prosed system

그림 7은 제안된 시스템의 스위칭 디바이스 전압 스트레스 V_i 를 나타낸 것으로 그림 7(a)는 7고조파 수동필터 7-PF가 없이 Z-AF가 단독으로 동작한 경우이며 그림 7(b)는 7-PF와 Z-AF가 연동한 결과이다. 7-PF와 Z-AF가 연동한 경우가 단독으로 동작한 경우보다 전압 스트레스 V_i 가 감소됨을 알 수 있다. 그림 8은 입력단에 $L_{ac}=1.5\text{mH}$ 을 설치한 전압형 다이오드 정류기 부하($C_d=1000\mu\text{F}$, $r_L=20\Omega$)에 대한 제안된 시스템의 보상 성능을 나타낸 것이다. 그림 8에서 보는 바와 같이 저전압의 PEMFC 출력전압 V_{fc} 는 일정한 값을 갖는 Z-소스 네트워크 전압 V_{c1} 로 승압된다. 이 전압을 보상 직류전압으로 하여 a상의 보상전류 i_{fa} 를 발생하며 결과적으로 i_{fa} 에 의하여 a상의 전원전류 i_{sa} 는 정현파로 된다.

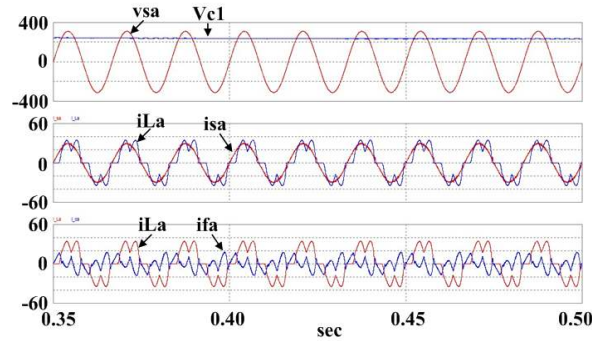


그림 8 보상 후의 a상 파형(v_{sa} , V_{c1} , i_{La} , i_{sa} , i_{fa})

Fig. 8 A-phase waveform after compensation

$$(v_{sa}, V_{c1}, i_{La}, i_{sa}, i_{fa})$$

4. 결론

본 연구에서는 중전압의 전압형 또는 전류형 인버터 대신에 Z-소스 인버터를 적용한 능동전력필터 시스템에 대하여 고찰하였다. 제안된 시스템은 고조파 발생된 비선형 부하와 병렬로 연결된 7고조파(420Hz) 동조 $L_f - C_f$ 필터와 Z-소스 능동전력필터로 구성되어 있다. Z-소스 능동전력필터는 변조지수 $M=0.55$, shoot-through 조절전압 $V_{sh}=0.645$, 스위칭 주파수 $f_{sw}=5.4\text{kHz}$ 의 조건하에서 PSIM 시뮬레이션에 의하여 성능을 확인하였다. 이 경우 shoot-through상태를 나타내는 T_0 의 조절만으로 저전압의 연료전지 출력전압 V_{fc} 는 일정한 값을 갖는 Z-소스 네트워크 전압 V_{c1} 로 승압하였으며, 7고조파 동조 수동필터로 인하여 Z-소스 능동전력필터의 스위치 스트레스가 감소됨을 알 수 있었다. 또한 제안된 시스템은 중전압의 전압형과 전류형 경우와 같이 보상전류를 잘 발생하였으며, 전압형 다이오드 비선형 부하가 전원 측으로 발생하는 고조파 전류에 대한 보상 특성이 양호함을 확인 할 수 있었다.

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

참고 문헌

- [1] Y.G. Jung, W.Y. Kim, Y.C. Lim, S.H. Yang and F. Harashima, "The Algorithm of Expanded Current Synchronous Detection for Active Power Filters Considering Three-Phase Unbalanced Power System", IEEE Trans. Ind. Electron., vol.50, no.5, pp.1000-1006, 2003.
- [2] M. Routimo, M. Salo, and H. Tuusa, "Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters", IEEE Trans. Power Electron., vol.22, no.2, pp.636-643, 2007.
- [3] J. M. Correa, F. A. Farret, J. R. Gomes, and M. G. Simoes, "Simulation of Fuel Cell Stacks Using a Computer Controlled Power Rectifier with the Purposes of Actual High Power Injection Applications", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.39, No.4, pp.1136-1142, 2003.
- [4] Fang Zheng Peng, "Z-Source Inverter", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.39, No.2, pp.504-510, 2003.
- [5] M. Shen, J. Wang, A. Joesph, F.Z. Feng, L. Tolbert, and D.J. Adams, "Constant Boost Control of the Z-Source Inverter to Minimize Current Ripple and Voltage Stress," IEEE Trans. Power. Electron., vol.42, No.3, pp.770-777, 2006.