

기 설치된 능동전력필터와 연료전지 Z-소스 능동전력필터의 병렬운전

엄준현*, 정영국**, 임영철*
*전남대 전기공학과, **대불대 컴퓨터정보공학부

Parallel Operation of an Existing Active Power Filter and a Fuel Cells based Z-Source Active Power Filter

*J.H. Oum, **Y.G. Jung and *Y.C. Lim
*Chonnam National University, **Daebul University

Abstract - 본 연구에서는 기 설치된 능동전력필터와 연료전지 Z-소스 능동전력필터의 병렬운전 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 이미 설치되어 운전 중인 단상 V-소스 병렬형 능동전력필터와 병렬로, 연료전지(FC) Z-소스 능동전력필터를 설치하여, 전체 능동전력필터 시스템의 용량 증가를 도모할 수 있었다. 제안된 방법의 타당성은 전력전자 전용 PSIM시뮬레이션에 의하여 과도상태 및 정상상태에서 확인하였다.

1. 서 론

현대의 전원환경에서 전력전자기술은 전력품질을 악화시키기도 하고 적극적으로 전력 품질을 개선시키는 기능을 하기도 하는 등 기술적인 양면성을 갖고 있다. 이러한 환경 하에서 전력품질에 관한 전력전자 기술자의 역할은 매우 중요하고도 독특한 하다고 할 수 있다. 이와 같은 전력품질의 악화는 능동전력필터(Active Power Filter: APF)[1]에 의하여 효과적으로 해결 가능하다. 만약 고조파를 발생하는 부하용량이 증가하여 이에 따른 APF의 보상용량 설비도 증가하는 경우, 전체 APF 시스템을 교체하기 위해 장시간 동안 중단해야 하는 문제점이 발생한다.

본 연구에서는 분산발전용 연료전지 전원(Fuel Cells System : FC)[2,3]을 d.c전원으로 한 APF[4]를 기 설치하여 운전 중인 APF와 병렬로 운전하는 시스템을 제안하였다. 이 방법은 설치 운전 중인 APF의 용량 증가분에 해당되는 FC 능동전력필터 모듈을 기존의 APF와 병렬로 신속하게 설치 운전 할 수 있다. 또한 용량 증가분에 해당되는 APF의 d.c전원으로 FC를 사용하므로 환경오염을 일으키지 않는 청정 분산전원으로서의 역할까지 담당한다. 또한 이 방법은 보상전류 부담에 있어서 1대의 내용량의 능동전력필터가 단독으로 운전하는 것 보다 유리하다.

일반적으로 FC 시스템으로부터 필요한 전력을 얻기 위해서는 여러 단의 비 절연 형 또는 절연 형 부스트 컨버터를 사용하여 FC 출력전압을 승압시키고 있다. 최근에 연구된 Z-소스 인버터[5,6]는 독특한 스위칭 패턴의 제어에 의해 출력전압을 승강압하기 때문에 추가적인 부스트 컨버터를 필요치 않아서 저전압-대전류의 전기적 특성을 갖는 FC 시스템에 매우 적합하다. 제안된 시스템의 용량 증설용 APF는 Z-소스 인버터 구조를 하고 있다. 본 연구의 타당성은 정상상태 및 과도상태하의 PSIM 시뮬레이션에 의하여 검토하였다.

2. 제안된 방법

그림 1은 이미 설치되어 운전 중인 일반적인 APF의 동작원리를 나타내고 있다. 그림 2는 이 경우의 제어 블록선도이며 정류된 d.c전압 vdc를 일정전압으로 제어하기 위한 부분과 보상기준전류 ic*를 보상전류 ic1가 추종하기 위한 히스테리시스(H.C)제어기로 구분된다. 또한 ic*

의 연산은 전압확립 기준치 vref와 d.c전압 vdc의 차에 대해 전원전압 vs를 곱한 후, 전원전류 is와의 차로부터 얻어진다.

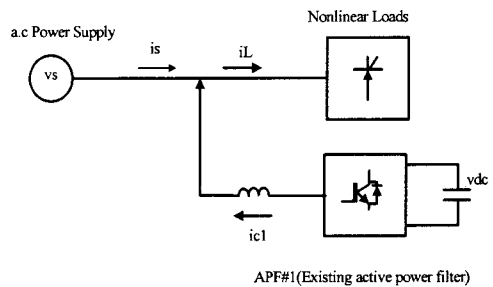


그림 1 일반적인 APF
Fig.1 General APF

이 과정을 수식으로 나타내면 (1)-(5)와 같다. 단상의 비선형 부하에 인가되고 있는 순시 전원전압 vs과 순시 전원전류 is는 다음으로 표현 가능하다.

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

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

$$= i_a + i_r \tag{3}$$

여기서 ia, ir는 각각 유효전류와 무효전류 성분이며, 그림 2로부터 유효전류 ia는 (4)와 같이 계산된다.

$$i_a = k_p(v_{ref} - v_{dc})\sin\omega t \tag{4}$$

이상의 ia를 이용하면 결과적인 APF#1의 보상기준치 ic1*은 (5)와 같게 된다.

$$i_{c1}^* = i_s - i_a \tag{5}$$

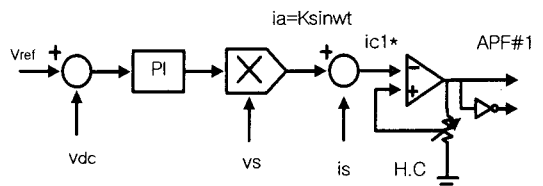


그림 2 일반적인 APF의 제어 블록선도
Fig.2 A Control block diagram of the general APF

그림 3은 용량 증설용 FC전원 Z-소스 APF의 구조이다. 이 경우의 제어 알고리즘을 그림 4와 같으며 보상 기준치 i_{cfc}^* 는 (6)-(8)로 연산된다. FC가 APF의 d.c전원을 안정적으로 공급하므로, 일반적인 APF와 같은 전압확립을 위한 피드백 제어가 필요하지 않다.

$$I_a = \frac{1}{T} \int_0^T i_L \sin \omega t dt \quad (6)$$

$$i_a = I_a \sin \omega t \quad (7)$$

$$i_{cfc}^* = i_L - i_a \quad (8)$$

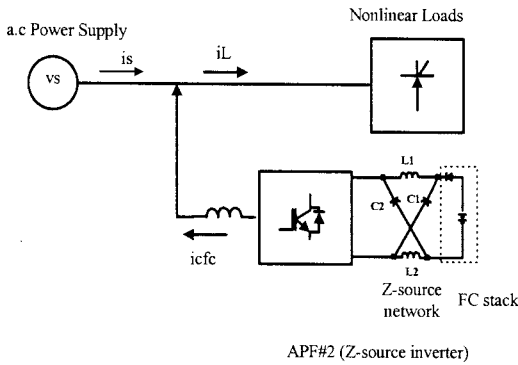


그림 3 FC전원 Z-소스 APF
Fig.3 FC based Z-source APF

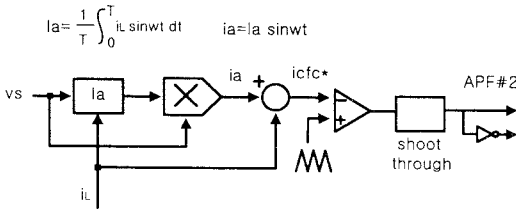


그림 4 FC전원 Z-소스 APF의 제어 블록선도
Fig.4 A Control block diagram of the FC based Z-source APF

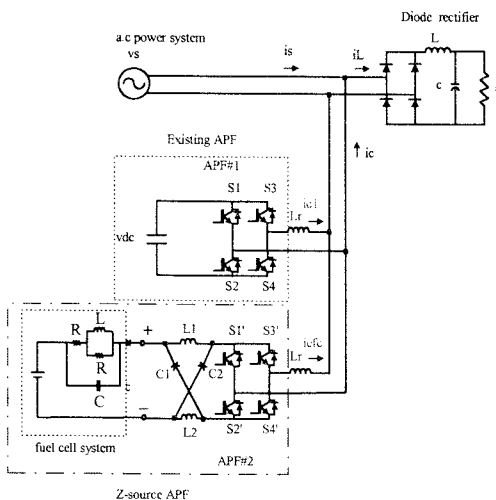


그림 5 제안된 시스템
Fig.5 The proposed system

그림 5는 그림 1과 그림 3을 병렬 연결하여 재구성한 제안된 시스템이다. APF#1은 i_s 에서 보상기준치를 검출하며, APF#2는 i_L 에서 보상기준치를 검출하여 이에 상응하는 보상전류 i_{c1} 과 i_{cfc} 를 APF#1과 APF#2가 각각 균등 분담한다. 결과적으로 i_{c1} 과 i_{cfc} 를 합한 전체 i_c 에 의하여, 전원 측의 전력품질은 향상되게 된다. 그림 6은 전체 시스템에 대한 제어 블록선도이다.

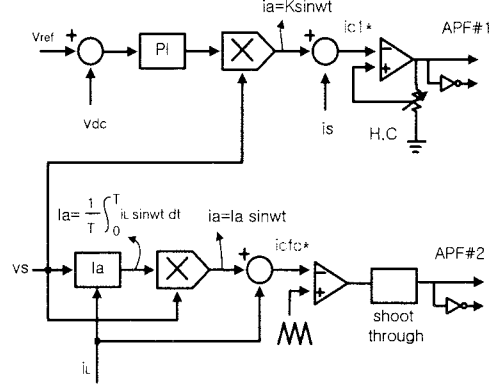


그림 6 제안된 시스템의 제어 블록선도
Fig.6 A Control block diagram of the proposed system

본 연구의 Z-소스 APF의 전원은 낮은 반응온도를 갖고 있으며 가정용, 자동차용, 이동용 전원에 적합한 PEM(Polymer Electrolyte Membrane)FC이다. PEMFC는 AvistaLab SR-12(500W)을 모델로 하였으며, 등가회로는 그림 7과 같다. SR-12(500W)는 무부하 전압 $v_{cell}=40.6V$, 정격전압 $v_{base}=28.9V$, 정격전류 $i_{base}=17.3A$ 의 규격을 갖고 있다. PEMFC는 출력전압이 일반적으로 48V이지만, 부하의 조건에 따라서 42V-60V로 출력전압이 변동하며 또한 시동 시간이 수초에서 수십초로 매우 느린 시동 시간을 갖고 있다.

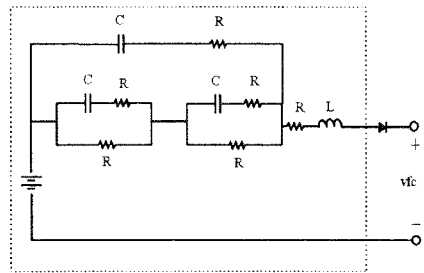


그림 7 PEMFC의 등가회로
Fig.7 Equivalent circuit of the PEMFC

3. 모의실험 결과

표 1은 그림 5로 나타난 제안된 시스템의 파라미터이다. 그림 8은 APF#1의 보상전류 i_{c1} 과 300V로 일정하게 제어된 v_{dc} 를 나타내고 있다. 그림 9는 APF#2의 보상전류 i_{cfc} 와 FC의 정격전압 40.6V를 Z-소스 APF#2에 의하여 부스트 시킨 Z-소스 네트워크 전압 v_{c1} 이다. APF#1의 v_{dc} 와 APF#2의 v_{c1} 의 확립과정은 그림 10에서 비교하여 나타내었다. v_{dc} 는 급격하게 증가한 후 다시 300V로 일정하게 전압을 유지하나, v_{c1} 은 완만한 전압 증가로부터 일정하게 290V를 유지함을 알 수 있다.

그림 11은 본 연구에서 매우 중요한 모의실험 결과로서 제안된 시스템의 전체 보상전류 $i_c=30A(\text{peak})$ 는 정확하게 APF#1의 보상전류 $i_{c1}=15A(\text{peak})$ 와 APF#2의 보상전류 $i_{c2}=15A(\text{peak})$ 로 균등 분담됨을 알 수 있다. 즉 보상용량이 증가하는 경우에 기설치 동작중인 APF#1은 그대로 두고 증가분에 해당하는 FC기반 APF#2만을 모듈로 설치하면 그만큼 설치비용 및 유지보수 측면에서 유리하다.

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System Parameters

vs(a.c)	155v(peak)/60Hz
i_L	70A(peak)
Lr	3mH
Nonlinear load	L=3mH, C=3300uF, r=62
Existing APF#1	vref(vdc)=300v, Hysteresis Controller(H.C)
APF#2	v _{c1} =v _{c2} (d.c)=300v, fsw=5.4kHz, SPWM, M=0.645, shoot-through duty ratio=0.162
	Z-source network L1=L2=160uH C1=C2=1000uF
	Fuel Cells PEMFC, AvistaLab SR-12(500W), v _{cell} =40.6v, v _{base} =28.9v, i _{base} =17.3A

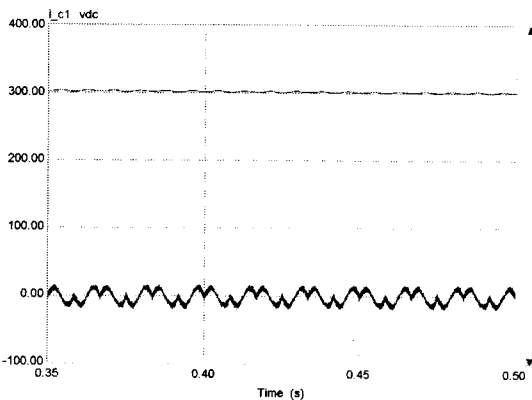


그림 8 APF#1의 vdc와 ic1
Fig.8 vdc and ic1 of the existing APF#1

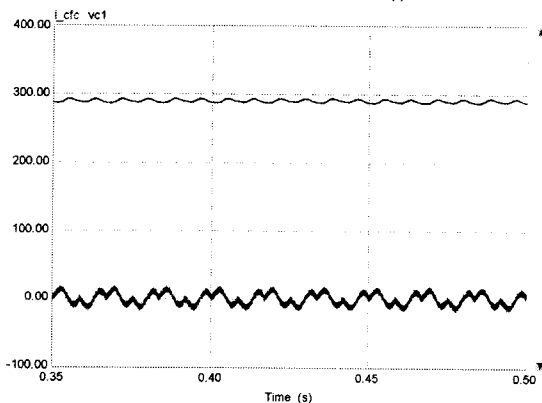


그림 9 APF#2의 vdc와 icfc
Fig.9 vdc and icfc of the APF#2

그림 12는 정상상태에서의 보상성능을 나타낸 것이다. 보상 후의 전원 전류 i_s 는 전압 v_s 와 동상이며 정현파를 유지하고 있다. 그림 13은 이 경우의 고조파 스펙트럼의 분석 결과이다. 보상 후의 i_s 를 살펴보면, i_L 에 있던 기본파 60Hz를 제외하고 3고조파와 5고조파 성분은 모두 제거됨을 알 수 있으며, 기본파 성분도 35A(peak) → 30A(peak)로 약간 감소함을 알 수 있다.

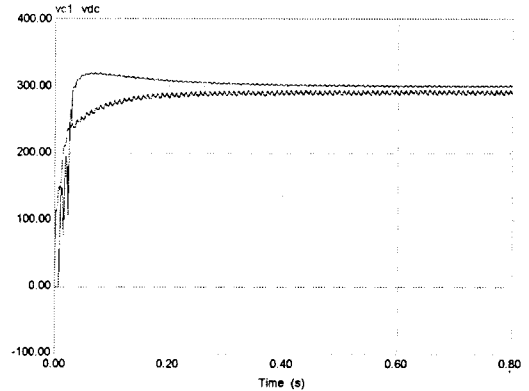


그림 10 APF#1과 APF#2의 d.c.전압의 비교
Fig.10 Comparison of the APF#1, #2 d.c voltages

그림 14는 보상용량이 급증하는 경우 즉 부하전류가 25A(peak) → 60A(peak)로 매우 급하게 증가하는 과도상태의 보상특성을 나타내고 있다. 과도 상태에서도 보상 성능은 양호하며, 특히 v_{c1} 은 300V → 280V로 감소됨을 알 수 있다.

FC는 부하에 대한 의존성이 매우 크기 때문에 시동시 또는 매우 큰 부하변동이 발생하는 경우에는 슈퍼 캐패시터나 저 전력의 2차 전지 뱅크와 같은 보조 에너지 저장장치와 연동하여야 안정되게 출력전압을 조절할 수 있다. 이에 반해 vdc는 전압일정 제어에 의해 전압이 확립되기 때문에 수 v의 전압변동만이 발생한다.

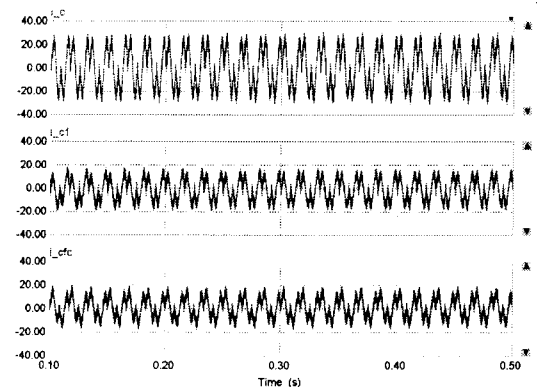


그림 11 정상상태의 보상전류 파형(i_c, i_{c1}, i_{cfc})
Fig.11 Compensating current (i_c, i_{c1}, i_{cfc}) in steady state

그림 15는 부하전류가 45A(peak) → 65A(peak) → 45A(peak)으로 변동하는 과도상태에서의 보상 성능을 나타낸 것이다. 이때 v_{c1} 은 300V → 280V → 300V로 변동하고 있으나, vdc는 300V를 기준으로 약간의 변화만 존재함을 알 수 있다. 이와 같이 매우 급변하는 과도상

태에서도 제안된 시스템에 의하여 전원전류 i_s 는 정현파를 잘 유지할 수 있음을 알 수 있다.

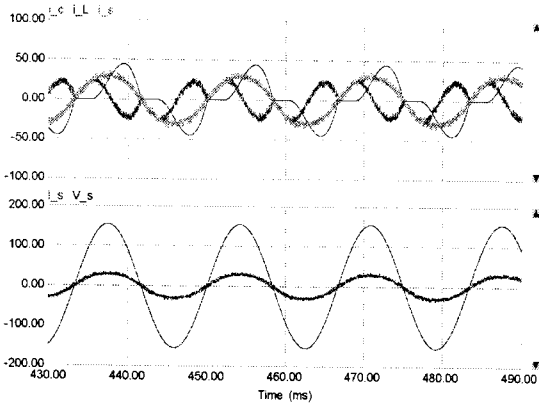


그림 12 정상상태의 보상성능
Fig.12 Compensation performance in steady state

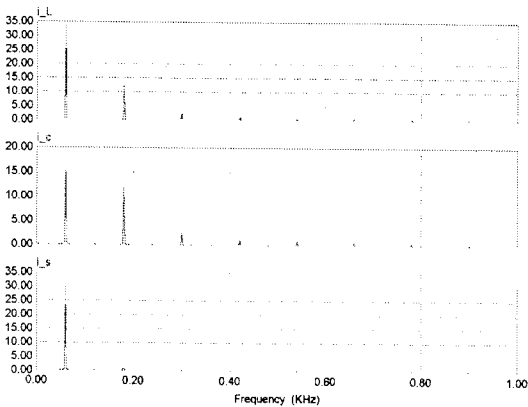


그림 13 고조파 스펙트럼
Fig.13 Harmonics spectra

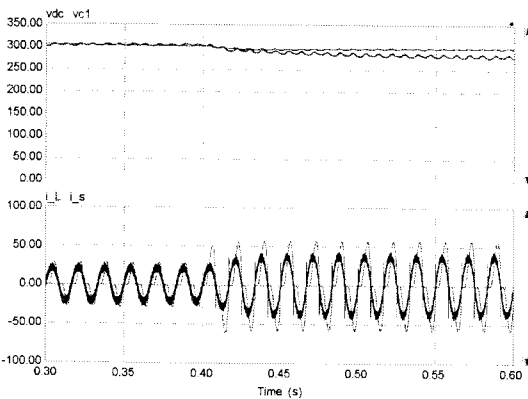


그림 14 과도상태의 보상성능(1)
Fig.14 Compensation performance in transient state (1)

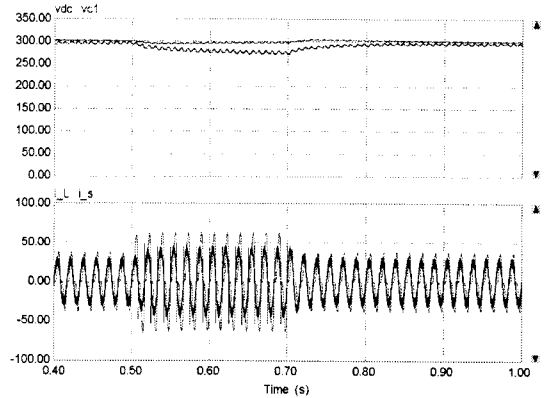


그림 15 과도상태의 보상성능(2)
Fig.15 Compensation performance in transient state (2)

4. 결 론

본 연구에서는 기 설치되어 운전 중인 일반적인 능동 전력필터(APF#1)의 보상용량을 증가하기 위한 연료전지(FC) Z-소스 능동전력필터(APF#2)의 병렬운전 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 동일한 보상용량을 갖는 2대의 APF를 병렬 운전하기 때문에 스위칭 소자의 용량 그리고 APF 모듈의 설치 및 유지보수의 측면에서도 유리하다. 또한 용량 증설용 APF#2를 FC기반의 Z-소스 인버터를 사용하여 친환경 측면을 고려하였으며, 저 전압의 FC를 직접 고전압으로 변환하기 때문에 여러 단의 전력변환기가 불필요한 고효율 시스템 구현이 가능하리라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 '전남대 고품질 전기 전자 부품 및 시스템 연구센터'의 연구비 지원으로 연구된 결과의 일부임.

[참 고 문 헌]

- [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] P.J.H. Wingelaar, J.L. Duarte and M.A.M. Hendrix, "Dynamic Characteristics of PEM Fuel Cells", in Conf. Rec., IEEE PESC'05, 2005, pp.1635-1641.
- [3] "Fuel Cell Seminar-Special Session on Fuel Cell Power Conditioning and International Future Energy challenge", (Miami Florida), 2003
- [4] 김기선, 정영국, 임영철, "Z-source 능동전력필터", 대한전기학회 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부문회 추계 학술대회 논문집, 2005, pp.189-191.
- [5] Fang Zheng Peng, "Z-Source Inverter", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.39, No.2, pp.504-510, 2003.
- [6] Jin-Woo Jung, Min Dai, and Ali Keyhani, "Modeling and Control of a Fuel Cell Based Z-Source Converter," in Conf. Rec., IEEE APEC'05, 2005, pp.1112-1118.