

병렬형 Z-소스 능동필터에 의한 배전계통의 전압 %THD 개선

오승열* 정영국** 임영철***
 전자부품연구원*, 대불대학교**, 전남대학교***

Voltage %THD Improvement of Distribution System by Shunt Z-Source Active Filters

*Seung-Yeol Oh, **Young-Gook Jung, ***Young-Cheol Lim

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

ABSTRACT

본 연구에서는 배전계통의 전압 고조파 확산에 따른 전압 %THD (%Total Harmonic Distortion)를 개선하기 위한 Z-소스 능동필터(Z-AFU : Z-Source Active Filter Unit)를 제시하였다. 버스(Bus)의 전압 고조파는 60Hz 버터워스 저역통과필터(LPF)에 의하여 검출하였다. 제안된 시스템의 보상전원으로는 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)를 사용하였다. 제안된 시스템의 타당성을 확인하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 수행하였으며, 전압 고조파 확산 억제에 따른 배전계통 전압의 %THD를 개선 할 수 있었다.

1. 서 론

장거리 배전계통의 경우, 버스(Bus)와 버스사이의 R-L 선로 임피던스는 사용자가 설치한 역률보상용 캐패시터(C)와 직렬 또는 병렬로 공진이 일으켜 전압 고조파 증폭 현상을 유발한다. 이 현상으로 인해 각 버스 간에는 고조파가 확산되며, 결국 피더(Feeder) 종단 전압의 %THD를 매우 악화시킨다. 경 부하 라 하더라도 6.6kv 배전계통의 야간 대도시지는 고조파 확산 현상이 더욱 심하며 특히 무 부하에는 버스 전압의 %THD는 최악의 상태로 된다[1-2].

이상의 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 연료전지 Z-소스 AFU를 6.6kv 배전계통과 병렬로 설치하여 각 버스간의 전압 고조파 확산을 억제하는 방법을 제시하였다. 버스 전압으로부터 고조파 전압 성분은 60Hz 버터워스 LPF에 의하여 추출하고, 추출된 전압 고조파에 회로의 특성 임피던스의 역수에 상응하는 고조파 콘덕턴스[3]를 곱하여 보상기준전류를 연산한다. Z-AFU의 보상전원으로는 신 재생에너지인 PEMFC 스택(Ballard NEXA,1.2kw)[4-5]을 사용하였다. 제안된 시스템에 의하여 전압 고조파 확산 억제와 버스 전압의 %THD를 저감할 수 있음을 PSIM 시뮬레이션에 의하여 정상상태와 과도 상태에서 확인하였다.

2. 본 문

그림 1은 6.6kv 배전계통에 병렬로 설치된 일반적인 AFU를 나타내고 있다. 표류 캐패시턴스를 무시하면, 선로의 두께와 길이와 관련된 L-C-R 회로 정수에 의해서 임의의 버스와 버스 사이에 대한 표현을 그림 1과 같이 할 수 있다. L은 배전 변압

기의 누설 인덕턴스와 선로 인덕턴스이며, 병렬 캐패시터 C는 사용자에게 의해서 설치된 역률보상용 캐패시터이다. 그림 1과 같은 배전계통은 무 부하에서도 선로의 종단에는 매우 큰 전압 고조파가 증폭되어 나타난다. 이것을 “고조파 증폭”(Harmonic Amplification) 또는 “고조파 확산”(Harmonic propagation)[1-2]이라 하며, 피더에 존재하고 있는 C와 L이 직 병렬로 공진을 일으키기 때문에 발생한 현상이다. 피더를 통해 확산되는 고조파의 억제를 위하여, 전압 검출법에 의한 병렬형 AFU를 버스의 종단에 설치한다. 배전계통에 대한 자세한 회로 변수를 표 1에 나타내었다.

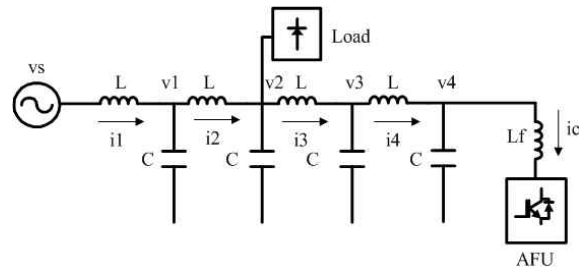


그림 1 배전계통에 설치된 병렬형 능동필터(AFU)
 Fig. 1 Shunt AFU for installation on distribution system

표 1 배전계통의 회로 변수
 Table 1 Parameters of distribution feeder

Line inductance L	0.22mH
Shunt capacitance C	150uF

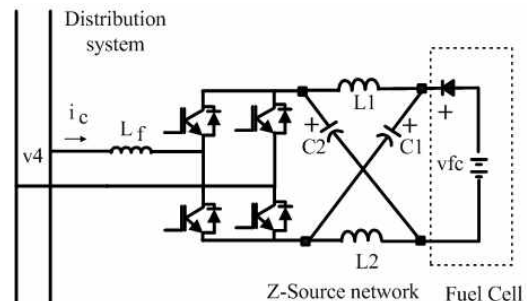


그림 2 Z-AFU의 전력회로
 Fig. 2 Power circuit of the Z-AFU

그림 2는 Z-AFU를 그림 1의 버스 4에 병렬로 연결한 것이며 이는 버스에서의 전압 고조파 확산을 억제하기 위해 본 연구에서 제시한 토폴로지이다. Z-AFU의 보상전원으로는 환경 친화적인 PEMFC 스택(Ballard NEXA,1.2kw) 2개를 서로 직렬연결하여 사용하고 있다. L_f 는 Z-AFU와 버스 4를 인터페이스하기 위한 것으로 그 양단에 걸리는 버스 4 전압 v_4 와 AFU의 출력 전압 v_c 와의 차에 의하여 보상전류 i_c 가 발생된다.

Z-AFU의 Z-소스 네트워크 dc전압은 상하 IGBT 스위치가 동시에 단락되는 shoot-through기간[4,6](그림 3의 회로)에 의하여 조절되며 V_{sh} 에 의하여 shoot-through는 제어된다. 그림 2의 Z-소스 네트워크 파라미터를 표 2에 나타내었다.

표 2 Z-AFU의 Z-소스 네트워크
Table 2 Z-source network of Z-AFU

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

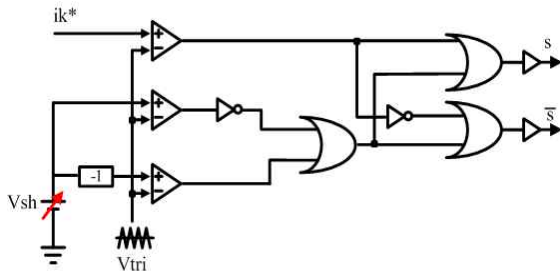


그림 3 Shoot-through 제어
Fig. 3 Shoot-through control

그림 4는 60Hz 버터워스 LPF를 이용한 전압 고조파 검출 방법을 나타내고 있다. 먼저 60Hz 버터워스 LPF에 의해 Z-AFU가 설치된 버스 4의 전압 v_4 로부터 60Hz 기본파 성분 $\overline{v_4}$ 를 추출하며, (1)를 이용하여 고조파 전압 v_h 를 구한다.

$$v_h = \overline{v_4} - v_4 \quad (1)$$

LPF에 의해 추출한 v_h 는 (2)과 같이 고조파 콘덕턴스 K_v 를 곱하여 보상기준전류 i_c^* 로 변환한다[1-3].

$$i_c^* = K_v v_h \quad (2)$$

여기서 버스 4에 흐르는 Z-AFU의 보상전류 i_c 가 (2)의 보상기준전류 i_c^* 를 이상적으로 추종한다고 가정하면, Z-AFU는 $1/K_v$ [V/A]로 표현되는 제동저항과 같이 동작한다[1,2].

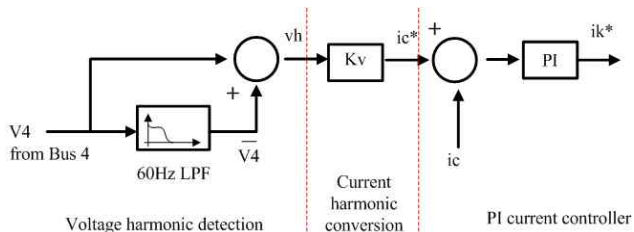


그림 4 60Hz 버터워스 LPF에 의한 고조파 전압 검출법
Fig. 4 Voltage harmonic detection by 60Hz butterworth LPF

이상의 조건들이 만족될 때 버스 4에 병렬로 설치된 Z-AFU는 전체 피더를 통하여 고조파 확산을 억제할 수 있다. K_v 의 최적치는 장거리 배전계통의 특성 임피던스 Z_0 의 역수와 동일하다. 그런데 실질적인 경우에 있어서 Z_0 를 구한다는 것은 매우 어려우며, 무 손실($R=0$) 회로를 가정한다면 특성 임피던스 Z_0 는 다음과 같이 계산된다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3)$$

그림 5는 Z-AFU의 제어 블록선도를 나타낸다. Z-AFU가 설치된 버스 4의 v_4 로부터 (1)을 이용하여 v_h 를 검출하고 여기에 K_v 를 곱하여 보상기준전류 i_c^* 를 구한다. i_c^* 는 피더 4에 흐르는 i_c 와 비교한 후 그 차이를 PI 전류제어기 G_c 에 의하여 i_k^* 가 발생된다. v_c 와 v_4 의 차이에 해당되는 전압이 Z-AFU의 L_f 양단에 나타나며 이 전압차이에 의해 보상전류 i_c 가 발생된다. 샘플링 주기를 T라 할 때 디지털 샘플링 지연은 e^{-sT} 로 되며 Z-AFU의 PWM인버터의 전달함수 $H(s)$ 는 (4)로 표현된다.

$$H(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \quad (4)$$

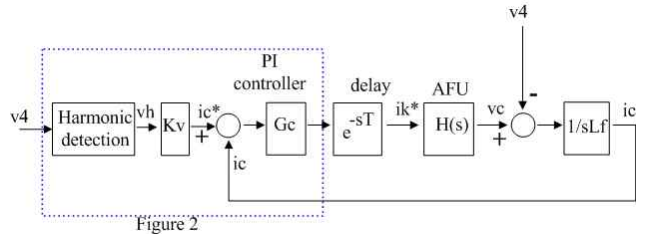


그림 5 Z-AFU의 제어 블록선도
Fig. 5 Control block diagram of Z-AFU

3. 시뮬레이션 결과

표 3는 제안된 시스템에 대한 PSIM시뮬레이션 파라미터를 나타내고 있다. 배전계통 전원전압은 최대치 155v/60Hz이며 선로 임피던스는 $L=0.22mH$, $C=150uF$ 이다. 시뮬레이션에 사용한 Z-AFU의 dc전원은 Ballard NEXA(1.2kw, $v_{fc}=42.2v-26.6v$, $i_{fc}=50$) PEMFC의 등가 모델[4-5]을 사용하였다. 버스 2의 부하로는 전압형 다이오드 정류기를 사용하였다.

그림 6은 버스 2에 전압형 다이오드 정류기가 연결되어 있을 때, 버스 4에 Z-AFU가 설치되기 전의 각 버스에 대한 전압 파형을 보인 것이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 버스 1의 전압 v_1 은 %THD가 5.3%로 약간의 고조파를 함유하고 있으나, 버스 4로 갈수록 고조파는 확산되어 버스 4에서는 %THD가 13.3%로 증폭된다.

그림 7은 버스 4에 Z-AFU를 설치하여 전압 고조파 확산을 억제한 결과이다. 표 4와 같이, 버스 1에서의 전압의 %THD는 3.1%이며 버스 4에서는 %THD가 5.3%로 매우 감소됨을 알 수 있다. 표 4와 표 5는 그림 6과 그림 7의 전압파형에 대한 %THD를 나타낸 것이다. 특히 표 5는 5 고조파 전압

$$\%THD_5 = \frac{v(5th)}{v(1th)}$$

각 버스에 대하여 나타내고 있다. 표 5에서 보는 바와 같이 버스 4에서의 5고조파 전압에 대한 %THD 11.9%는 Z-AFU를 설치한 후 4.3%로 감소됨을 보이고 있다. Z-AFU를 버스 4에 설치한 후에 모든 버스에서의 고조파 확산은 억제되며 또한 버스 전압 파형은 정현파로 됨을 알 수 있다.

표 3 시스템의 파라미터
Table 3 System parameters

Distribution system	$v_s = 155v_{peak}/60\text{Hz}$	
	$L = 0.22\text{mH}, C = 150\mu\text{F}$	
Z-AFU	$L_f = 3\text{mH}$	
	Simple boost control $V_{sh} = 0.65, M = 0.65, f_{sw} = 10\text{kHz}$	
	Z-network	$L = 160\mu\text{H}, C = 1000\mu\text{F}, f_r = 400\text{Hz}$
PEM Fuel cells stack	Ballard NEXA $\times 2$ (series) $1.2\text{kw}, v_{fc} = 42.2\text{v} - 26.6\text{v}, i_{fc} = 50$	
Diode rectifier Load	$C_d = 1000\mu\text{F}, R_L = 50\Omega$	

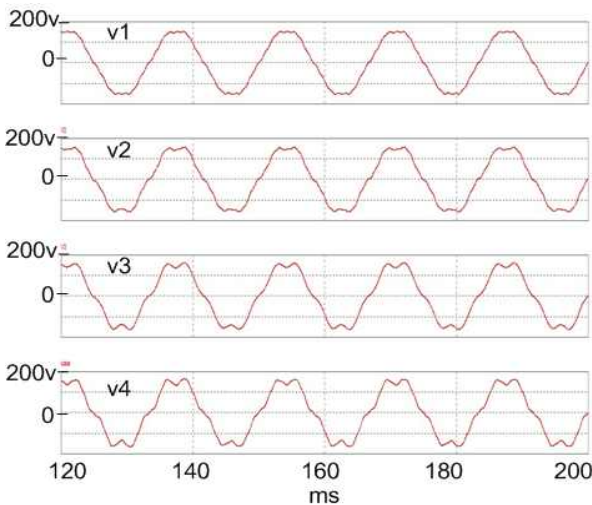


그림 6 Z-AFU 설치 전, 각 버스에서의 전압파형
Fig. 6 Voltage waveforms of each bus without Z-AFU

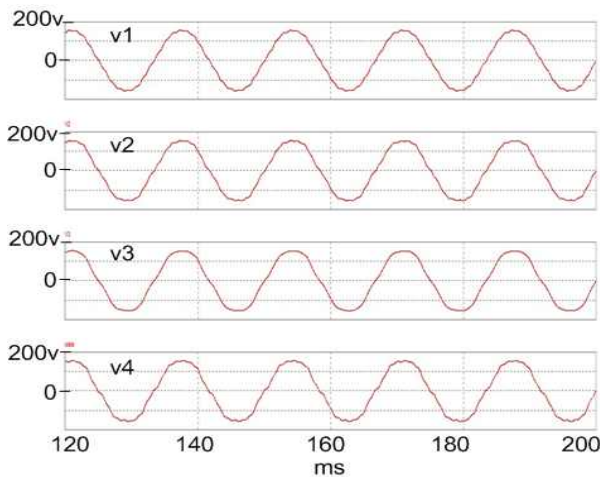


그림 7 Z-AFU 설치 후의 각 버스에서의 전압파형
Fig. 7 Voltage waveforms of each bus with Z-AFU

표 4 각 버스에 대한 전압 %THD
Table 4 Voltage %THD for each bus

%THD	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4
Without Z-AFU	5.3	9.1	11.7	13.3
With Z-AFU	3.1	4.5	4.7	5.3

표 5 각 버스에 대한 %THD₅ 비교
Table 5 Comparison of %THD₅ for each bus

%THD ₅	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4
Without Z-AFU	4.3	7.9	10.5	11.9
With Z-AFU	1.9	3.6	4.2	4.3

그림 8과 그림 9는 Z-AFU를 동작하기 전과 동작한 후, 과도상태에 대한 전압 고조파 확산 억제 성능을 나타낸 것이다. 버스 4에 설치된 Z-AFU가 0.3ms부터 동작할 때 전압 고조파 확산은 곧바로 억제되기 시작하며, 각각의 버스 전류 역시 고조파 진동이 감소된다.

그림 8의 v_{c1} 는 Z-네트워크의 C_1 의 전압으로서, 삼각파 캐리어의 최대치 $v_{tri} = 1$, shoot-through 조절전압 $V_{sh} = 0.66$, 변조지수 $M = 0.65$ 의 조건하에서, PEMFC의 전압 $V_{fc} = 84.4\text{vdc}$ 를 300vdc로 부스트함을 보이고 있다. Z-AFU는 $v_{c1} = 300\text{vdc}$ 를 보상 에너지로 하여 그림 9에서 보는 바와 같은 보상전류 i_c 를 발생한다.

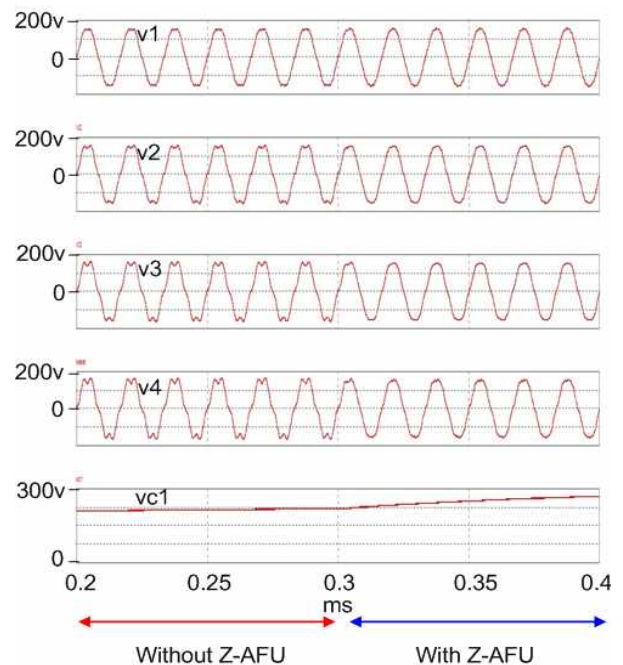


그림 8 전압 고조파 확산 억제의 동 특성(버스 전압)
Fig. 8 Dynamic characteristics for damping of voltage harmonics propagation(Bus voltages)

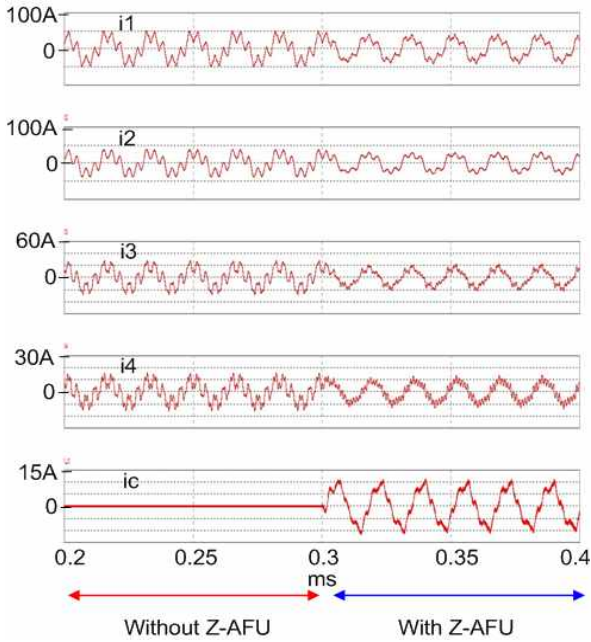


그림 9 전압 고조파 확산 억제에의 동 특성(버스 전류)
 Fig. 9 Dynamic characteristics for damping of voltage harmonics propagation(Bus current)

4. 결 론

본 연구에서는 배전계통에서 선로 임피던스간의 공진에 의해 전압 고조파가 각 버스로 확산되는 것을 억제하기 위한 방법을 제시하였다. 이를 위해 60Hz 버터워스 저역통과필터(LPF)에 의한 60Hz 기본파 전압 검출법 기반의 Z-소스 능동 필터(AFU) 시스템을 제안하였다. Z-AFU의 보상전원은 2개를 직렬로 연결한 Ballard NEXA PEMFC 모델을 사용하였다.

제안된 시스템을 버스 4에 병렬로 설치하여 운전한 결과, 전체 버스 전압의 고조파가 억제됨을 알 수 있고 특히 버스 4에서의 %THD는 13.3에서 5.3으로 가장 많은 개선효과가 있었다. 또한 전압 고조파가 억제됨과 동시에 버스 전류에서의 고조파 진동 감쇄효과도 있었다. 과도상태에서의 고조파 확산 억제 특성을 살펴보았으며 각 버스에서의 전압%THD를 분석하였다.

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

참 고 문 헌

[1] P. Jintakosonwit, H. Fujita, and H. Akagi, "Control and performance of a fully-digital-controlled shunt active filter for installation on a power distribution system", IEEE Trans. Power Electron., vol.17, no.1, pp.132-140, 2002.
 [2] H. Fujita, and H. Akagi, "Voltage-regulation performance of a shunt active filters intended for installation on a power distribution system", IEEE Trans. Power Electron., vol.22, no.3, pp.1046-1053, 2007.

[3] P. T. Cheng, and T. L. Lee, "Distributed active filter system(DAFSSs) : a new approach to power system harmonics", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.42, no.5, pp.1301-1309, 2006.
 [4] 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.
 [5] 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.
 [6] Fang Zheng Peng, "Z-Source Inverter", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.39, No.2, pp.504-510, 2003.