

연료전지 전원을 갖는 Z-소스 능동전력필터에 의한 장거리 배전선로의 전압 THD 저감

論 文
57-12-4

Voltage THD Mitigation of Power Distribution System using Z-Source Active Power Filter with a Fuel Cells Source

鄭 榮 國[†]
(Young-Gook Jung)

Abstract - This paper deals with a Z-source active power filter(Z-AFU) for mitigation voltage THD(total harmonic distortion) due to voltage harmonic propagation (amplification) in 6.6kv power distribution system. Bus voltage harmonic signal is detected by 60Hz butterworth BPF(band pass filter). As an ESS(energy storage system) of the proposed system, PEM fuel cells(Ballard NEXA, 1.2kw) is employed. Test results based on PSIM(power electronics simulation tool) validate the proposed approach.

Key Words : Z-source inverter, Z-source active power filter(Z-AFU), PEM fuel cells source, power distribution system, voltage harmonic propagation, voltage THD mitigation

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 부하라 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 연료전지를 전원으로 하는 Z-소스[4,6,7] AFU를 6.6kv 배전계통과 병렬로 설치하여 각 버스간의 전압 고조파 확산을 억제하는 방법을 제시하였다. 버스 전압으로부터 고조파 전압 성분은 60Hz 버터워스 BPF(band pass filter)에 의하여 추출하고, 추출된 전압 고조파에 회로의 특성 임피던스의 역수에 상응하는 고조파 콘덕턴스[3]를 곱하여 보상기준전류 i_c^* 를 연산한다. Z-AFU의 보상전원(ESS)으로는 신 재생에너지인 연료전지 PEMFC(proton exchange membrane fuel cell) 스택(Ballard NEXA, 1.2kw)[4,5,7-10]을 사용하였다. 제안된 시스템에 의하여 전압 고조파 확산 억제와 버스 전압의 THD를 저감할 수 있었으며, PSIM 시뮬레이션에 의하여 정상상태와 과도상태에서 검증하였다.

2. 본 문

그림 1은 6.6kv 장거리 배전계통에 병렬로 설치된 일반적인 AFU(active power filter unit)를 나타내고 있다. 표류 캐패시터를 무시하면, 선로의 두께와 길이와 관련된 L-C-R 회로 정수에 의해서 임의의 버스와 버스사이에 대한 표현을 그림 1과 같이 할 수 있다. L은 배전 변압기의 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 직병렬로 공진을 일으키기 때문에 발생한 현상이다. 피더를 통해 확산되는 고조파의 억제를 위하여, 전압 검출법에 의한 병렬형 AFU를 버스의 종단에 설치한다. 배전계통에 대한 자세한 회로변수를 표 1에 나타내었다.

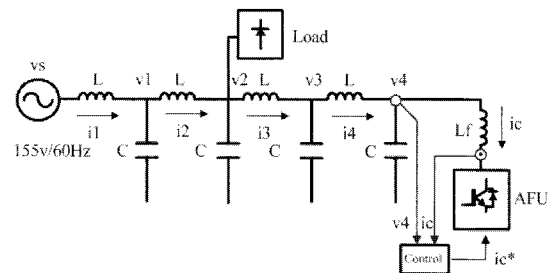


그림 1 장거리 배전계통에 설치된 능동전력필터(AFU)
Fig. 1 AFU for installation on power distribution system

[†] 교신저자, 正會員 : 대불대학교 융합기술학부 副教授 · 工博
E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr
接受日字 : 2008年 7月 11日
最終完了 : 2008年 11月 14日

표 1 장거리 배전계통의 회로 변수

Table 1 Parameters of power distribution feeder

Line inductance L	0.22mH
Shunt capacitance C	150uF

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 직렬 연결하여 사용하고 있다. L_f 는 Z-AFU와 버스 4를 인터페이스하기 위한 것으로 그 양단에 걸리는 버스 4 전압 v_4 와 Z-AFU의 출력전압 v_c 와의 차에 의하여 보상전류 i_c 가 발생된다.

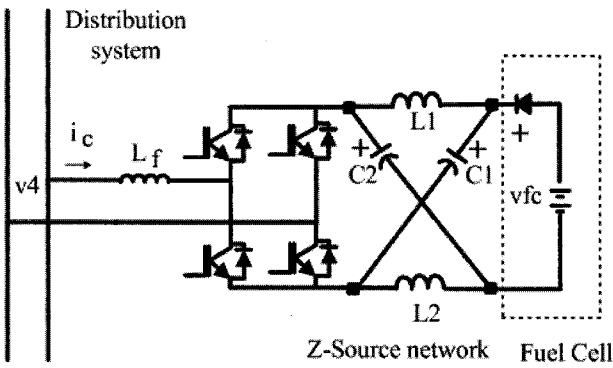


그림 2 연료전지 전원의 병렬형 Z-AFU의 전력회로
Fig. 2 Power circuit of shunt Z-AFU with fuel cells source

Z-AFU의 Z-소스 네트워크 dc전압은 상하 IGBT 스위치가 동시에 단락되는 shoot-through기간[4,6,7]에 의하여 조절(그림 3의 회로)되며 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

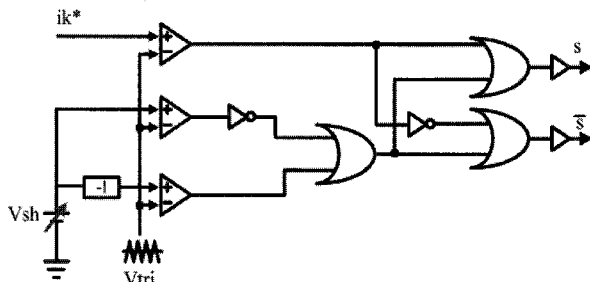


그림 3 Shoot-through 제어
Fig. 3 Shoot-through control

그림 4는 60Hz 버터워스 BPF를 이용한 전압 고조파 검출법을 나타내고 있다. 먼저 60Hz 버터워스 BPF에 의해 Z-AFU가 설치된 버스 4의 전압 v_4 로부터 60Hz 기본파 성분 \bar{v}_4 를 추출하며, (1)를 이용하여 고조파 전압 v_h 를 구한다. 그림 5는 60Hz BPF에 의한 고조파 전압 v_h 검출 부분에 대한 보드선도이다.

$$v_h = \bar{v}_4 - v_4 \quad (1)$$

BPF에 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 $\frac{1}{K_v} [V/A]$ 로 표현되는 제동저항과 같이 동작한다 [1,2].

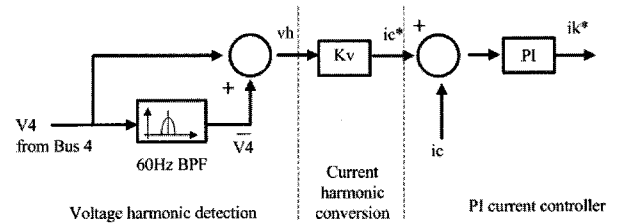


그림 4 60Hz 버터워스 BPF에 의한 고조파 전압 검출법
Fig. 4 Voltage harmonic detection by 60Hz butterworth BPF

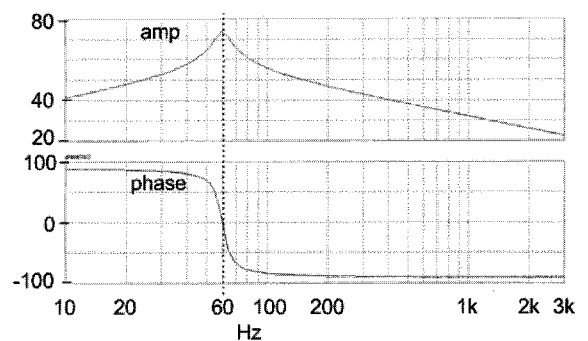


그림 5 60Hz BPF의 Bode 선도
Fig. 5 Bode diagram of 60Hz BPF

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, 무손실($R=0$) 회로를 가정한다면 특성 임피던스 Z_0 는 다음과 같이 계산된다.

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

그림 6은 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 차에 해당되는 전압이 Z-AFU의 L_f 양단에 나타나며 이 전압 차에 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.

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

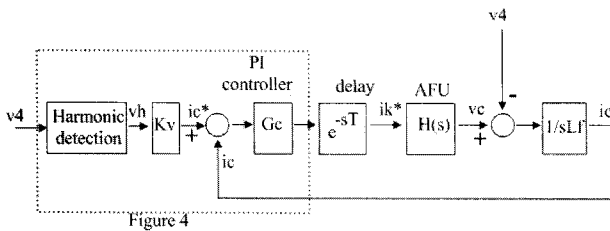


그림 6 Z-AFU의 제어 블록선도
Fig. 6 Control block diagram of Z-AFU

3. 모의 실험 검증

표 3는 제안된 시스템에 대한 PSIM시뮬레이션 파라미터를 나타내고 있다. 6.6kv 장거리 배전계통을 전원전압의 최대치가 155v/60Hz(선로 임피던스 $L=0.22mH$, $C=150\mu F$)인 모델로 축소하여 모의 실험하였다. 모의실험에 사용한 Z-AFU의 dc전원은 Ballard NEXA(1.2kw, $V_{fc}=42.2v-26.6v$, $I_{fc}=50A$) PEMFC의 시뮬레이터[4,5,9,10]를 사용하였다. 버스 2의 부하로는 전압형 다이오드 정류기를 사용하였다.

표 3 시스템의 파라미터

Table 3 System parameters

Distribution system	$v_s = 155v_{peak}/60Hz$ $L=0.22mH$, $C=150\mu F$
Z-AFU	$L_f=3mH$ Simple boost control $V_{tri}=1$, $V_{sh}=0.66$, $M=0.65$, $f_{sw}=10kHz$
	Z-network $L=160\mu H$, $C=1000\mu F$, $f_r=400Hz$
	PEM Fuel cells stack Ballard NEXA 2 (series) 1.2kw, $V_{fc}=42.2v-26.6v$, $I_{fc}=50$
Diode rectifier Load	$C_d=1000\mu F$, $R_L=50\Omega$

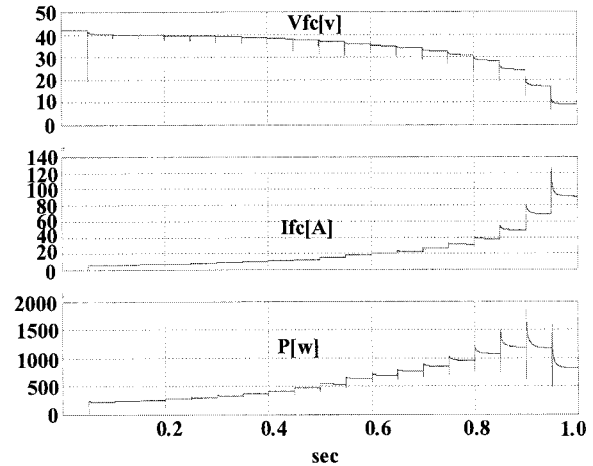


그림 7 PEMFC의 V-I-P 모의실험 파형($V_{fc}-I_{fc}-P$)
Fig. 7 Simulated results of PEMFC waveform($V_{fc}-I_{fc}-P$)

그림 7은 제안된 시스템의 ESS로 사용하는 PEMFC의 V-I-P(전압-전류-출력)의 모의실험 파형을 나타낸 것이다. Ballard NEXA (1.2kw) 연료전지의 특성을 얻기 위해 시뮬레이터[4,5,9,10]로 모델링 하였으며, 매 0.05s마다 저항 부하를 20번 증가한 결과 실제 Ballard NEXA (1.2kw) 연료전지와 유사한 특성을 얻을 수 있었다.

그림 8은 그림 1로 나타낸 버스 4 전압 (v_4)으로부터 그림 4 과정에 의하여 고조파 전압(v_h)신호를 검출한 결과이다. 검출된 v_4 신호로부터 고조파 전압신호 v_h 가 잘 추출되고 있음을 알 수 있다. Z-AFU이 동작하는 0.2-0.3ms동안에는 v_4 를 비롯한 계통 전압의 고조파 성분이 저감되므로 검출된 v_h 신호는 거의 0에 가깝게 된다.

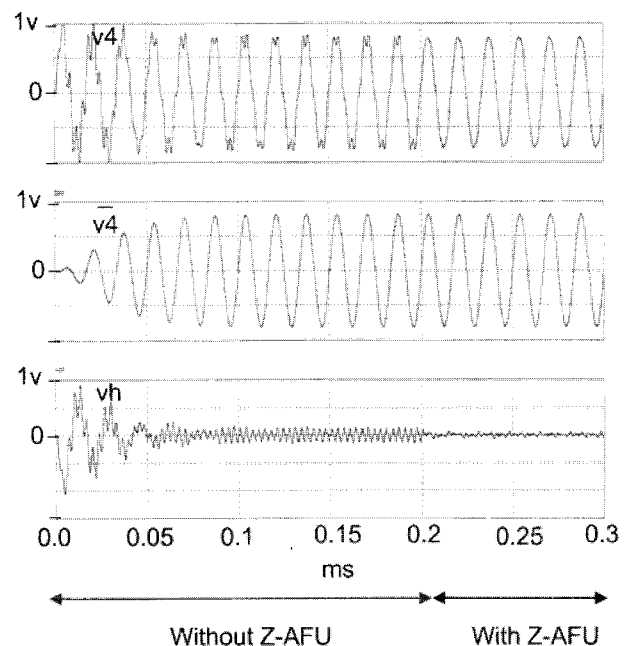


그림 8 버스 4(v_4)의 고조파 전압(v_h) 신호 검출
Fig. 8 Voltage harmonic(v_h) signal detection of bus 4(v_4)

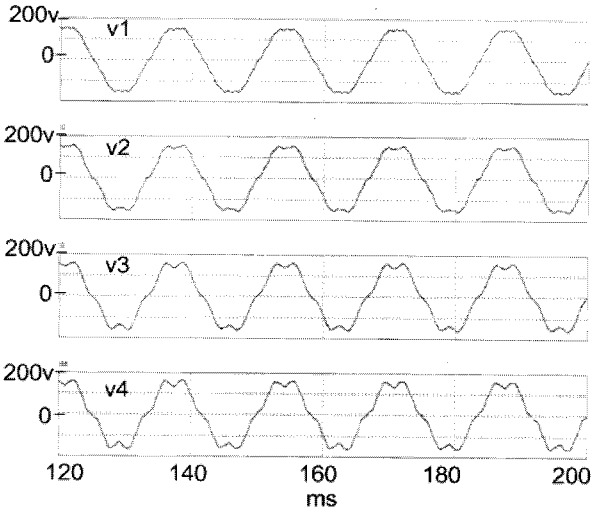


그림 9 Z-AFU 설치 전, 각 버스에서의 전압파형
Fig. 9 Voltage waveforms of each bus without Z-AFU

그림 9는 버스 2에 전압형 다이오드 정류기가 연결되어 있을 때, 버스 4에 Z-AFU가 설치되기 전의 각 버스에 대한 전압 파형을 보인 것이다. 그림 9와 표 4-5에서 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.

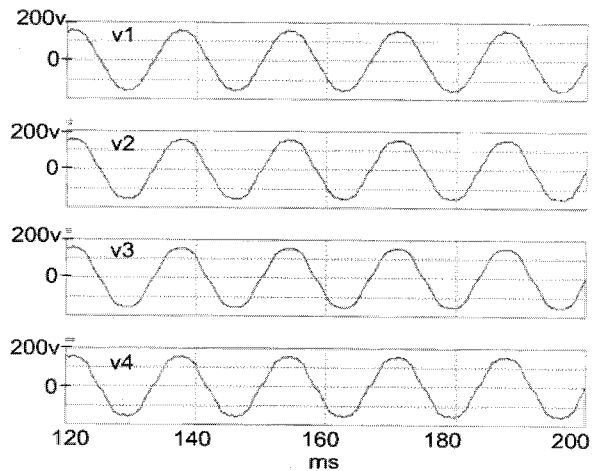


그림 10 Z-AFU 설치 후의 각 버스에서의 전압파형
Fig. 10 Voltage waveforms of each bus with Z-AFU

그림 10은 버스 4에 Z-AFU를 설치하여 전압 고조파 확산을 억제한 결과이다. 표 4-5에서와 같이, 버스 1에서의 전압의 THD는 3.1%이며 버스 4에서는 THD가 5.3%로 매우 감소됨을 알 수 있다. 표 4와 표 5는 그림 9와 그림 10의 전압파형에 대한 THD를 나타낸 것이다. 특히 표 5는 5 고조파 전압 $v(5th)$ 과 기본파 전압 $v(1th)$ 과의 비 $THD_5 = \frac{v(5th)}{v(1th)}$ 를 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 보

고 있다. Z-AFU를 버스 4에 설치한 후에 모든 버스에서의 고조파 확산은 억제되며 또한 버스 전압 파형은 정현파로 됨을 알 수 있다.

그림 11은 그림 9와 그림 10의 각 전압 파형 중 v_3 와 v_4 에 대한 고조파 스펙트럼을 FFT로 분석 결과를 나타내고 있다. Z-AFU이 동작하기 전에 v_3 와 v_4 에 있는 300Hz 성분은 Z-AFU이 동작한 후 제거됨을 보인다. v_3 와 v_4 를 FFT대상으로 선택한 것은 AFU설치에 따른 전압 고조파 저감 효과가 v_3 와 v_4 에서 가장 크기 때문이다.

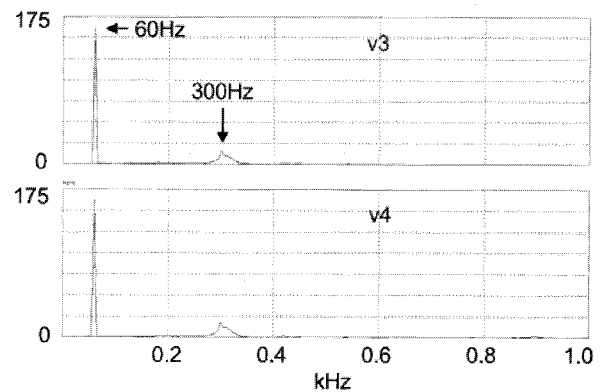
표 4 각 버스에 대한 전압 THD
Table 4 Voltage THD for each bus

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 THD_5 의 비교
Table 5 Comparison of THD_5 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 12와 그림 13은 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 고조파확산은 곧바로 억제되기 시작하며, 각각의 버스 전류 역시 고조파 진동이 감쇄된다.



(a) without Z-AFU

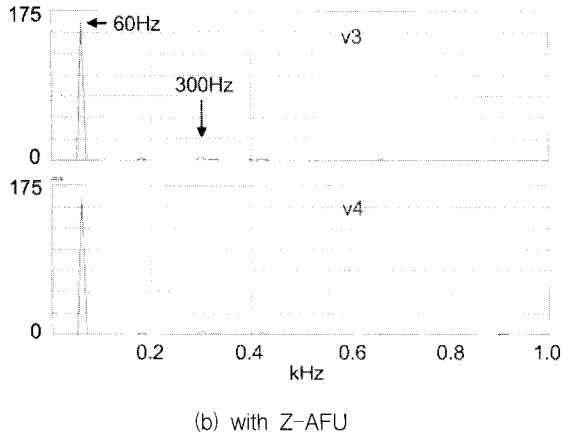


그림 11 v_3 와 v_4 에 대한 FFT 스펙트럼 분석 결과
 Fig. 11 FFT spectra analysis results of v_3 and v_4

특히 그림 12의 V_{c1} 는 그림 2의 Z-네트워크에 있는 C_1 에 걸리는 전압이다. 이는 그림 3의 삼각파 캐리어의 최대치 $V_{tri}=1$, shoot-through 조절전압 $V_{sh}=0.66$, 변조지수 $M=0.65$ 의 조건하에서, PEMFC의 전압 $V_{fc}=84.4v$ ($V_{fc}=42.2v \times 2$)을 300v까지 부스트함을 보인다[7]. Z-AFU는 $V_{c1}=300v$ 를 보상 에너지로 하여 그림 12에서 보는 바와 같은 각 버스 전압의 고조파 확산을 저지할 뿐 만 아니라, 그림 13의 각 버스 전류의 고조파 진동을 감쇄하기 위한 보상전류 i_c 를 발생하게 된다.

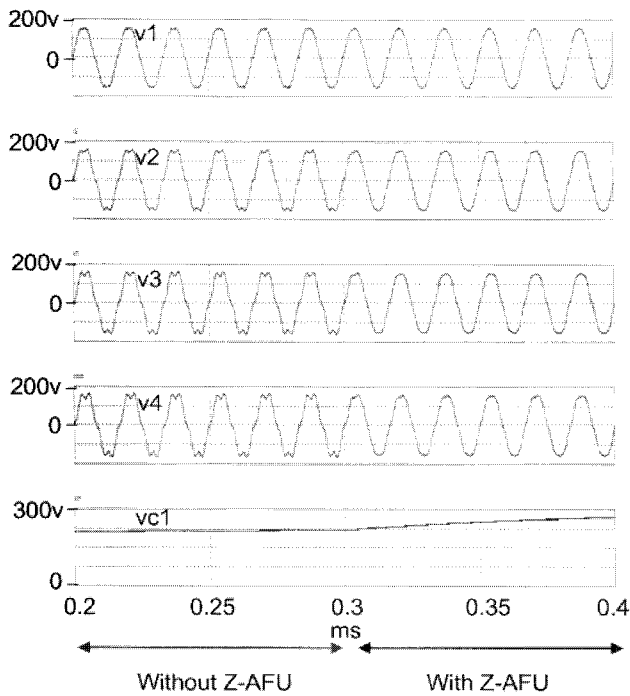


그림 12 전압 고조파 확산 억제 동 특성(버스 전압)
 Fig. 12 Dynamic characteristics for damping of voltage harmonics propagation (Bus voltages)

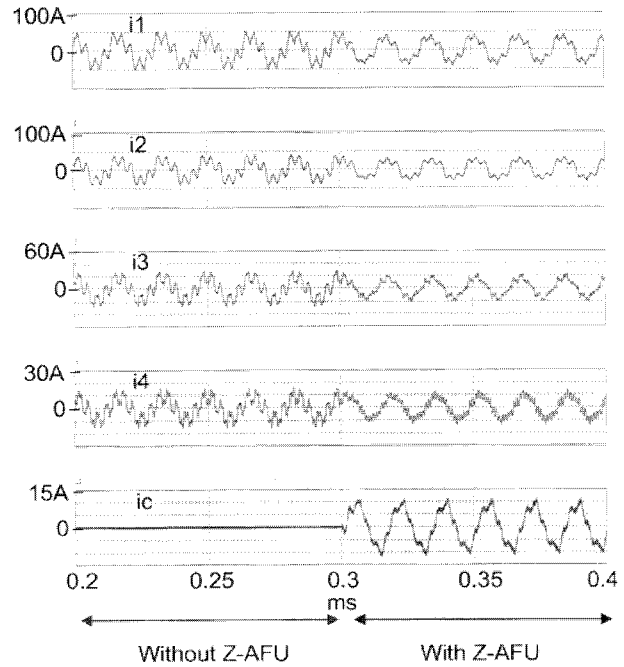


그림 13 전류 고조파 확산 억제 동 특성(버스 전류)
 Fig. 13 Dynamic characteristics for damping of current harmonics propagation (Bus current)

4. 결 론

본 연구에서는 장거리 배전계통에서 선로 임피던스간의 공진에 의해 전압 고조파가 각 버스로 확산되는 것을 억제하기 위한 방법을 제시하였다. 이를 위해 60Hz 버터워스 대역통과필터(BPF)에 의한 60Hz 기본파 전압 검출법 기반의 Z-소스 능동필터(Z-AFU) 시스템을 제안하였다. Z-AFU의 ESS로는 2개를 직렬($V_{fc}=42.2v \times 2$)로 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 13.3%에서 5.3%으로 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.

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(DAFSS) : a new approach to power system harmonics", IEEE Trans. Ind. Applicat., 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, pp.467-471, 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, pp.472-477, in CD-ROM version.
- [6] Fang Zheng Peng, "Z-Source Inverter", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.39, No.2, pp.504-510, 2003.
- [7] 정영국, "연료전지 전원을 갖는 3상 Z-소스 동적 전압 보상기", 한국조명전기설비학회 논문지 제22권 제10호, pp.41-48, 2008
- [8] W. J. Choi, "New approaches to improve the performance of the PEM based fuel cell power systems", *ph.D. dissertation*, Dept. Elect. Eng., Texas A & M University, August 2004.
- [9] 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.
- [10] Y.R. de Novaes, R.R. Zapelini, and I. Barbi, "Design considerations of a long term single-phase uninterruptible power supply based on fuel cells", in Conf. Rec. of IEEE PESC'05, 2005, pp.1628-1634.

저 자 소 개



정영국 (鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 일본 오카야마대학교 연구방문. 현재 대불대학교 융합기술학부 부교수.

Tel : 061-469-1263

E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr