

장거리 배전선로의 전압 고조파 확산 억제를 위한 병렬형 HBML 능동전력필터

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

A Shunt HBML Active Power Filter for Damping of Voltage Harmonics Propagation in Power Distribution System

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

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

ABSTRACT

본 연구에서는 장거리 배전선로의 전압 고조파 확산을 억제하기 위한 HBML 능동전력필터(HBML-AFU : H-Bridge Multi-Level Active Power Filter Unit)를 제시하였다. 버스(Bus)의 전압 고조파는 60Hz 버터워스 대역통과필터(BPF : Band Pass Filter)에 의하여 검출하였다. 제안된 시스템의 보상전원으로는 배터리(24v×2=48v)를 사용하였다. 제안된 시스템의 타당성은 PSIM시뮬레이션에 의하여 과도상태 및 정상상태에서 확인하였다.

1. 서론

장거리 배전선로의 경우, 버스(Bus)와 버스사이의 R-L 선로 임피던스는 사용자가 설치한 역률보상용 캐패시터(C)와 직렬 또는 병렬로 공진이 일어져 전압 고조파 증폭 현상을 유발한다. 이 현상으로 인해 각 버스 간에는 고조파가 확산되며, 결국 피더(Feeder) 종단 전압의 총고조파 왜형률 (THD : Total Harmonic Distortion)를 매우 악화시킨다. 경 부하라 하더라도 6.6kv 배전계통의 야간 대도시심지는 고조파 확산 현상이 더욱 심하며 특히 무 부하에는 버스 전압의 THD는 최악의 상태로 된다[1-2].

이상의 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 HBML-AFU를 배전선로와 병렬로 설치하여 각 버스간의 전압 고조파 확산을 억제하는 방법을 제시하였다. HBML-AFU는 종전의 방식에 비하여 보상전압을 낮은 직류전원으로 발생할 수 있으며 또한 낮은 정격을 갖는 스위칭 디바이스로도 높은 보상전압을 발생할 수 있는 장점이 있다. 배전계통으로 버스 전압으로부터 고조파 전압 성분은 60Hz 버터워스 BPF에 의하여 추출하고, 추출된 전압 고조파에 회로의 특성 임피던스의 역수에 상응하는 고조파 콘덕턴스[3]를 곱하여 보상기준전류를 연산한다. HBML-AFU의 보상전원으로는 24v 배터리 2개를 연결하였다. 제안된 시스템에 의하여 전압 고조파 확산 억제와 버스 전압의 THD를 저감할 수 있음을 PSIM 시뮬레이션에 의하여 정상상태와 과도상태에서 확인하였다.

2. 제안된 시스템

그림 1은 장거리 배전선로에 병렬로 설치된 본 연구에서 제안된 HBML-AFU를 나타내고 있다. 표류 캐패시턴스를 무시

하면, 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.

표 1 배전계통의 회로 변수

Table 1 Parameters of distribution feeder

Line inductance L	0.22mH
Shunt capacitance C	150uF

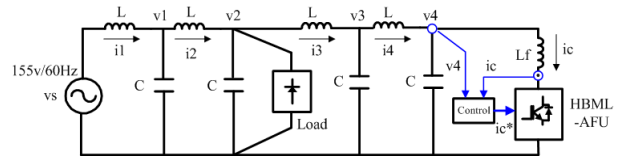


그림 1 배전계통에 설치된 HBML 능동전력필터(AFU)

Fig. 1 HBML-AFU for installation on distribution system

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 직렬로 공진을 일으키기 때문에 발생한 현상이다. 피더를 통해 확산되는 고조파의 억제를 위하여, 전압 검출법에 의한 병렬형 HBML-AFU를 버스의 종단에 설치한다. 배전계통에 대한 자세한 회로변수를 표 1에 나타내었다.

그림 2는 HBML-AFU를 그림 1의 버스 4에 병렬로 연결한 것이며 이는 버스에서의 전압 고조파 확산을 억제하기 위해 본 연구에서 제시한 방식이다. HBML-AFU의 보상전원으로는 24v 배터리 2개를 서로 직렬 연결하여 사용하고 있다. v_4 는 HBML-AFU와 버스 4를 인터페이스하기 위한 것으로 그 양단에 걸리는 버스 4 전압 v_4 와 HBML-AFU의 출력전압 v_c 와의 차에 의하여 보상전류 i_c 가 발생된다.

그림 3은 60Hz 버터워스 BPF를 이용한 전압 고조파 검출법을 나타내고 있다. 먼저 60Hz 버터워스 BPF에 의해 HBML-AFU가 설치된 버스 4의 전압 v_4 로부터 60Hz 기본파 성분 v_1 를 추출하며, (1)를 이용하여 고조파 전압 v_h 를 구한다.

$$\mathcal{h} = \mathcal{V} - \mathcal{V}_4 \quad (1)$$

BPF에 의해 추출한 \mathcal{h} 는 (2)과 같이 고조파 콘덕턴스 \mathcal{K}_v 를 곱하여 보상기준전류 \mathcal{I}^* 로 변환한다[1-3].

$$\mathcal{I}^* = \mathcal{K}_v \mathcal{h} \quad (2)$$

여기서 버스 4에 흐르는 HBML-AFU의 보상전류 i_c 가 (2)의 보상기준전류 \mathcal{I}^* 를 이상적으로 추종한다고 가정하면, HBML-AFU는 $1/\mathcal{K}_v$ [V/A]로 표현되는 제동저항과 같이 동작한다 [1,2].

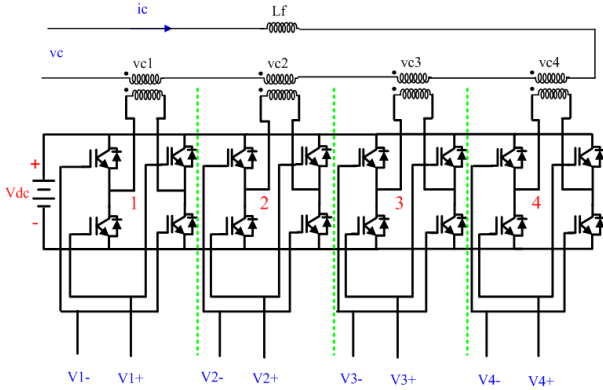


그림 2 병렬형 HBML 능동전력필터(AFU)의 전력회로
Fig. 2 Power circuit of shunt HBML-AFU

그림 4는 고조파 전압 검출에 사용한 60Hz BPF의 보드선도를 나타낸 것이다. i_c^* 와 i_c 에 의한 PI제어 신호 i_k^* 는 그림 5에서 보는 바와 같이 삼각파 캐리어를 PD(Phase Disposition)로 배치한 후 정현파 기준치와 비교하면 본 연구에서 제시된 기법의 PWM펄스가 얻어지게 된다.

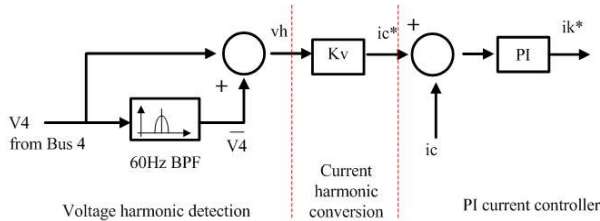


그림 3 고조파 전압(\mathcal{h}) 검출법
Fig. 3 Voltage harmonic (\mathcal{h}) detection

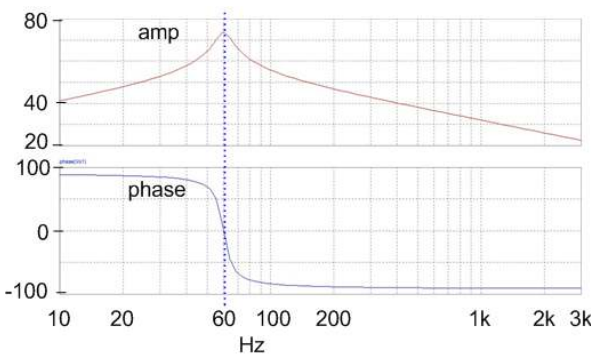


그림 4 60Hz BPF의 보드선도
Fig. 4 Bode plot of 60Hz BPF

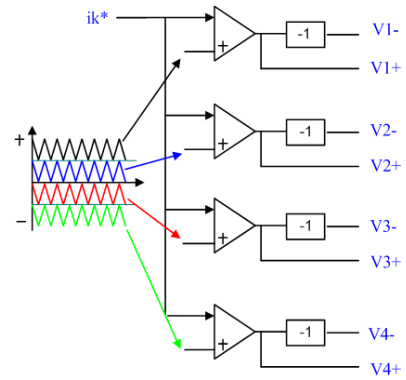


그림 5 PWM신호 발생기
Fig. 5 PWM signal generator

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

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

그림 6은 HBML-AFU의 제어 블록선도를 나타낸다. HBML-AFU가 설치된 버스 4의 \mathcal{V}_4 로부터 (1)을 이용하여 \mathcal{h} 를 검출하고 여기에 \mathcal{K}_v 를 곱하여 보상기준전류 \mathcal{I}^* 를 구한다. \mathcal{I}^* 는 피더 4에 흐르는 i_c 와 비교한 후 그 차이를 PI 전류제어기 G_c 에 의하여 i_k^* 가 발생된다. \mathcal{V}_4 와 \mathcal{V} 의 차이에 해당되는 전압이 HBML-AFU의 f 양단에 나타나며 이 전압차이에 의해 보상전류 i_c 가 발생된다. 샘플링 주기를 T 라 할 때 디지털 샘플링 지연은 e^{-sT} 로 되며 HBML-AFU의 PWM인버터의 전달함수 $H(s)$ 는 (4)로 표현된다.

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

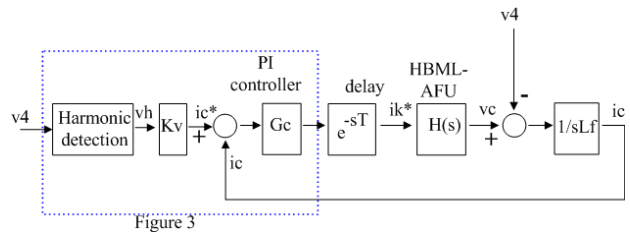


그림 6 HBML-AFU의 제어 블록선도
Fig. 6 Control block diagram of HBML-AFU

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

배전계통 전원전압은 최대치 155v/60Hz이며 선로 임피던스는 $L=0.22mH$, $C=150\mu F$ 이다. 시뮬레이션에 사용한 HBML-AFU의 직류전원은 24v 배터리 2개를 직렬로 연결하여 사용하

였다. 버스 2의 부하로는 전압형 다이오드 정류기를 사용하였다. 그림 7은 그림 2에서 나타낸 HBML-AFU의 각 cell 인버터의 보상전압 $v_{c1}, v_{c2}, v_{c3}, v_{c4}$ 과 총 보상전압 $v_c (=v_{c1}+v_{c2}+v_{c3}+v_{c4})$ 파형을 나타내고 있다. 48v배터리 전압으로 192v의 교류보상전압을 발생할 수 있음을 보인다.

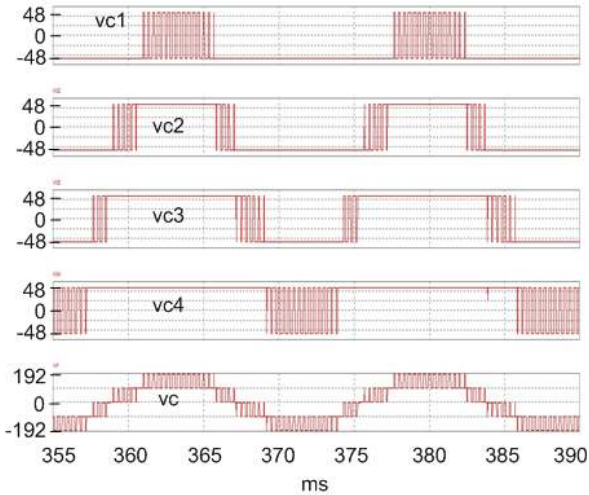
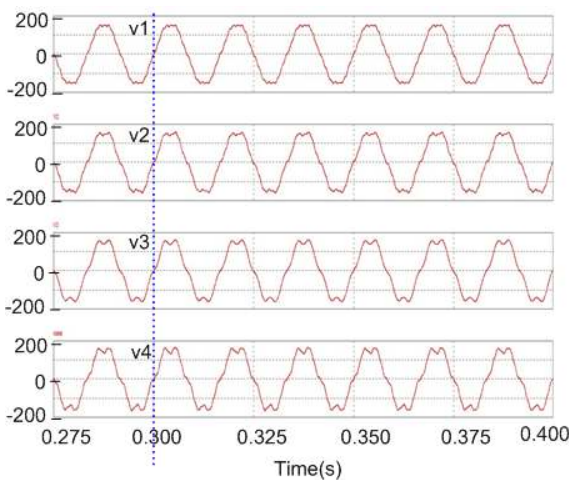


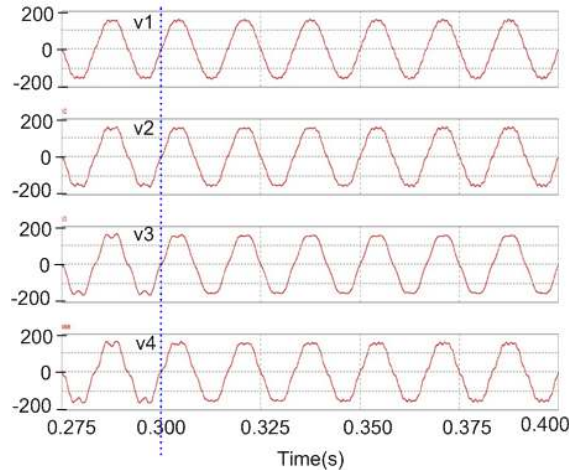
그림 7 HBML-AFU의 보상전압
Fig. 7 Compensation voltages of HBML-AFU

그림 8은 버스 2에 전압형 다이오드 정류기가 연결되어 있을 때, 버스 4에 HBML-AFU가 설치되기 전(그림 8(a))과 설치 후(그림 8(b))의 각 버스에서의 전압 파형을 보인 것이다. 그림 8(a)에서 보는 바와 같이 그림 1의 버스 1 전압 v_1 에 있는 약간의 고조파는 버스 4로 갈수록 확산되며 결국 버스 4의 전압 v_4 는 매우 왜형되고 있다. 그림 8(b)는 버스 4에 HBML-AFU를 설치하여 전압 고조파 확산을 억제한 결과이다. HBML-AFU를 버스 4에 설치한 후, 모든 버스에서의 고조파 전압 확산은 억제되며 각 버스에서의 전압은 정현파로 된다.

그림 9는 이 경우에 대한 보상전압 v_c 와 보상전류 i_c 를 나타낸 것이다.



(a)without HBML-AFU



(b)with HBML-AFU

그림 8 각 버스에서의 전압 파형
Fig. 8 Voltage waveforms of each bus

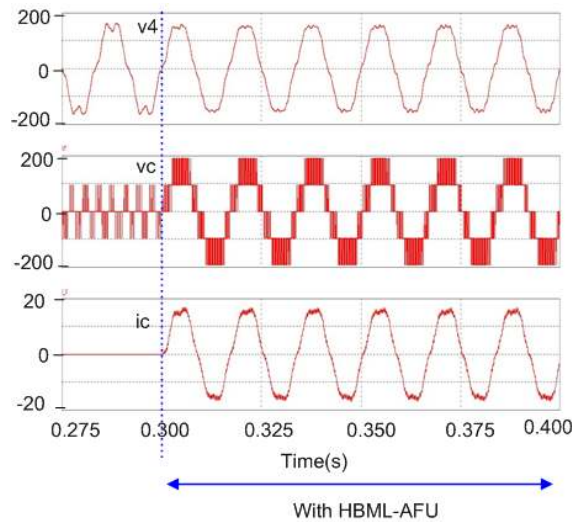


그림 9 버스 전압 (v_4), 보상전압(v_c) 및 보상전류(i_c)
Fig. 9 Bus voltage (v_4), compensation voltage(v_c) and compensation current (i_c)

4. 결론

본 연구에서는 장거리 배전선로에서 선로 임피던스간의 공진에 의해 전압 고조파가 각 버스로 확산되는 것을 억제하기 위한 HBML(H-Bridge Multi-Level)-능동전력필터(AFU)를 제시하였다. 제안된 시스템은 60Hz 버터워스 대역통과필터(BPF)에 의해 배전계통의 60Hz 기본파 전압을 검출하고 있으며, 이를 HBML-AFU로 보상전압을 발생한다. 제안된 시스템의 보상전원으로서 24v 배터리 2개를 직렬로 사용하였다.

제안된 시스템을 버스 4에 병렬로 설치하여 운전한 결과, 전체 버스 전압의 고조파가 억제됨을 알 수 있고 특히 버스 4에서의 고조파 전압 억제 효과가 가장 탁월하였다. 제안된 시스템은 멀티레벨 구조를 채택함으로써 적은 배터리 전압과 적은 스위칭 소자 정격으로 높은 보상전압을 얻을 수 있었다.

This study was supported by the Research Center for Large-Scale Distributed Generation 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(DAFSs) : 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.