

전기설비 안전에 필요한 능동 전력 필터 설계

정재기
한빛 EDS(주)

Design of Active Power Filter for Safe Operation of Electrical Equipments

Jeong, Jae Kee
Hanbit EDS Co., Ltd.

Abstract - 최근 전력전자 기기와 같은 비선형 부하의 증가로 계통에서 고조파 발생 가능성은 점점 높아지는 추세이다. 이러한 계통의 고조파는 부하 설비 중 누전차단기 오동작 및 과부하 등의 원인이 되므로 전기설비 안전 측면에서 중요하게 다루어질 필요가 있다. 고조파에 대한 해결책으로는 수동필터 및 능동전력필터를 들 수 있는데 본 연구에서는 기존의 3상 풀브리지 스위칭 회로를 이용한 능동필터에 비해 안정성 및 대용량 시스템 구성에 유리한 모듈형 능동 전력 필터를 제안하였다.

1. 서 론

UPS, SMPS, 신재생 에너지용 전원장치 등의 비선형 부하기에서 발생하는 고조파는 전원 설비의 동작에 부정적 영향을 미치게 된다. 일예로 감전 재해 및 설비보호를 위한 누전차단기 오동작 요인 중 하나로 고조파가 지목된다[1][2][3].

고조파에 대한 일반적인 대책으로 수동필터 및 능동필터를 들 수 있는데 본 연구에서는 기존의 3상 풀브리지 스위칭 회로를 이용한 능동필터(그림 1(a))에 비해 안정성 측면에서 유리한 그림 1(b)와 같은 모듈형 능동 전력 필터를 제안한다. 본 연구에서 제안된 모듈형 능동 전력 필터는 그림1과 같이 3상 3선식 계통의 선간에 단상 필터 3대를 연결하는 방식이다. 3상 풀브리지 회로를 이용한 능동 필터는 전력 회로의 스위칭 소자 중 한 암에 문제가 발생시 시스템은 정지하게 된다. 그러나 그림 1(b)와 같은 모듈형 능동 전력 필터는 1대의 능동 필터가 고장이 나더라도 2대를 이용하여 삼상의 고조파 전류를 보상할 수 있어서 고조파 측면에서 전기설비의 안전이라는 관점에서 기존의 시스템에 비해 매우 유리하다.

본 연구에서는 삼상 모듈형 능동 필터의 협조제어 기법을 설계하고 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 시뮬레이션을 통해 1상 시스템의 사고 발생시 사고를 인식하고 운전 모드를 전환하는 시간만큼의 지연 후 시스템은 정상적으로 동작 가능함을 알 수 있었다.

2. 본 론

2.1 능동 필터의 고조파 전류 보상원리[4][5]

그림1(a)에서 각상의 계통 전류에 대해 키르히 호프의 전류 법칙을 적용하여 표기하면 다음과 같다.

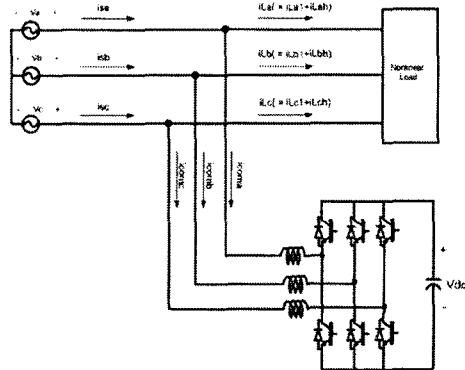
$$i_{sa} = i_{La} (= i_{La1} + i_{Lah}) + i_{coma} \quad (1)$$

여기서 i_{La1} : 부하전류 i_{La} 에 포함된 기본파 성분,

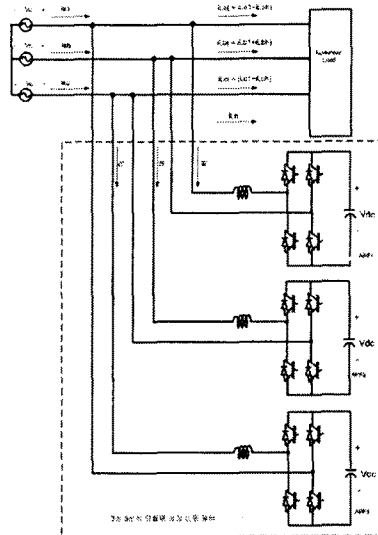
i_{Lah} : 부하전류 i_{La} 에 포함된 고조파 성분

$$i_{sb} = i_{Lb} (= i_{Lb1} + i_{Lbh}) + i_{comb} \quad (2)$$

$$i_{sc} = i_{Lc} (= i_{Lc1} + i_{Lch}) + i_{comc} \quad (3)$$



(a) 기존의 3상 능동 필터



(b) 제안된 3상 모듈형 능동 전력 필터
그림 1 삼상 능동 필터의 전력 회로 구성

각 상 능동필터의 출력 전류 i_{coma} , i_{comb} , i_{comc} 는 임의로 제어 가능한 전류로 가정한다. 능동 필터의 각 상 전류를 다음과 같이 제어하면,

$$i_{coma} = -i_{Lah} \quad (4)$$

$$i_{comb} = -i_{Lbh} \quad (5)$$

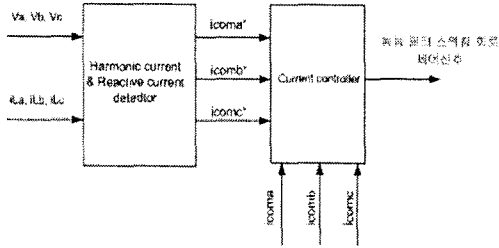
$$i_{comc} = -i_{Lch} \quad (6)$$

식(1),(2),(3)에 식(4),(5),(6)에 대입하면 전원측 전류에 포함된 성분은 다음과 같이 부하에 공급되는 기본파 성분만 남게 되어 부하측에서 발생한 고조파 전류는 전원측에 영향을 미치지 않는다.

$$i_{sa} = i_{La1} \quad (7)$$

$$i_{sb} = i_{Lb1} \quad (8)$$

$$i_{sc} = i_{Lc1} \quad (9)$$



$$i_{coma}^* = -i_{Lah} \quad i_{comb}^* = -i_{Lbh} \quad i_{comc}^* = -i_{Lch}$$

그림 2. 그림1(a)의 삼상 능동 필터 제어계통

2.2 삼상 모듈형 능동 전력 필터의 협조제어기법

2.2.1 3대가 모두 정상일 경우

삼상 3상 3선식에 단상 능동필터를 이용한 모듈형 삼상 능동 필터를 구성하기 위해서는 식22~24와 같이 보상전류가 구성되도록 각각의 단상 능동 필터의 제어계가 구성되어야 한다.

$$i_a - i_c = i_{acom} = -i_{Lah} - i_{Lcq} \quad (10)$$

$$i_b - i_a = i_{bcm} = -i_{Lbh} - i_{Lbq} \quad (11)$$

$$i_c - i_b = i_{ccom} = -i_{Lch} - i_{Lcq} \quad (12)$$

그러므로 각 상의 선전류를 검출하여 계산된 식(10),(11),(12)에서의 i_{acom} , i_{bcm} , i_{ccom} 은 선간에 연결된 단상필터의 출력 전류 i_a , i_b , i_c 로 분리되어야 한다. 식10~12를 행렬 형태(matrix form)로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{acom} \\ i_{bcm} \\ i_{ccom} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \tilde{A} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

식(25)에서 행렬 \tilde{A} 의 역행렬을 구하면 단상필터의 출력 전류가 구해지나, 행렬 \tilde{A} 는 singular matrix 이므로 역행렬을 가지지 않는다. 다음과 같은 보조 방정식을 도입하고 다음과 같이 이는 영이라고 가정한 후

$$i_{\Delta} = i_a + i_b + i_c = 0 \quad (14)$$

식(13)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{acom} \\ i_{bcm} \\ i_{ccom} \\ i_{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ 0 \end{bmatrix} = \tilde{A} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

\tilde{A} 는 nonsingular matrix이므로 역행렬을 구해서 각 능동필터의 보상전류를 구하면 다음과 같다.

$$i_a = \frac{1}{3}(i_{acom} - i_{bcm}) \quad (16)$$

$$i_b = \frac{1}{3}(i_{bcm} - i_{ccom}) \quad (17)$$

$$i_c = \frac{1}{3}(-i_{acom} + i_{ccom}) \quad (18)$$

식(17)~(19)와 같이 표현되는 단상 능동필터의 출력전류의 합은 다음과 같이 영이 되어 식(14)와 같은 가정을 만족시킨다.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (19)$$

$$\frac{1}{3}(i_{acom} + i_{bcm} + i_{ccom} - i_{acom} - i_{bcm} - i_{ccom}) = 0$$

2.2.2 1상 시스템에 이상이 발생하였을 경우

그림1(a)와 같이 구성되는 시스템은 스위치 회로를 구성하는 스위칭 소자 중 1개만 이상이 발생하여도 시스템은 정상적인 운전을 수행할 수 없으나, 그림6과 같이 제안된 모듈형 시스템은 1대의 능동 필터에 이상이 발생하여도 2대의 시스템으로 삼상의 보상이 가능한 제어 계통을 본 연구에서 제안한다.

그림 1(b)에서 APF3이 이상이라고 가정하면 $i_c = 0$ 이므로 식13은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{acom} \\ i_{bcm} \\ i_{ccom} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \tilde{A}^* \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (20)$$

식 \tilde{A}^* = $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ 의 행벡터는 1차 독립을 이루므로 의사 역행렬(Pseudo inverse)를 이용하여 정상인 2대의 능동 필터의 보상전류를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 3 & -3 & 3 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{acom} \\ i_{bcm} \\ i_{ccom} \end{bmatrix} \quad (\text{APF 3 이상시}) \quad (21)$$

상기와 같은 방법으로 각각 APF2, APF1 이상시 정상인 두 대의 능동필터의 보상전류를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 3 & -3 & 3 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{acom} \\ i_{bcm} \\ i_{ccom} \end{bmatrix} \quad (\text{APF2 이상시}) \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 3 & 3 & 3 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{acom} \\ i_{bcm} \\ i_{ccom} \end{bmatrix} \quad (\text{APF1 이상시}) \quad (23)$$

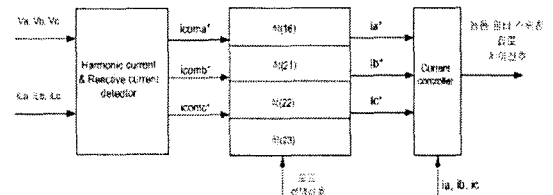
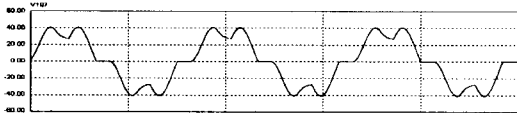


그림 3 제안된 모듈형 삼상 능동필터의 제어계통

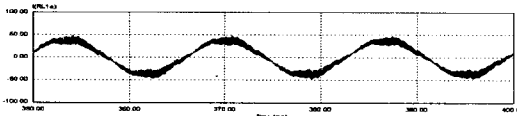
3. 결 과

제안된 시스템의 타당성을 검증하기 위해 그림 1(b)와 같이 시스템을 구성하고 Powersim사의 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서 스위칭 주파수는 4[kHz]로 실시하였으며 전류 제어기로는 데드비트 PI 전류 제어기[6]를 이용하였다.

그림 4는 3대 협조 제어시 부하 전류 및 보상 된 전원 전류 파형 및 주파수 해석 결과를 나타낸다. 저차 고조파 성분의 저감을 확인 할 수 있으며, 보상 후 전류에서 8[kHz]대 성분이 나타남을 볼 수 있다. 이는 unipolar 스위칭 방식[7]을 이용함에 따라 시스템의 운전 주파수가 스위칭 주파수의 2배가 됨에 따라 나타나는 현상으로 고차 수동 필터의 소형화 및 소음저감을 기대할 수 있다.

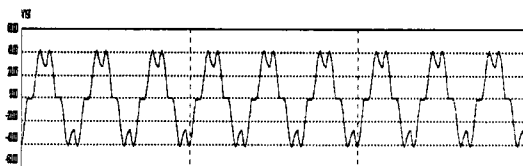


(a) a상 부하 전류 및 FFT 분석 결과

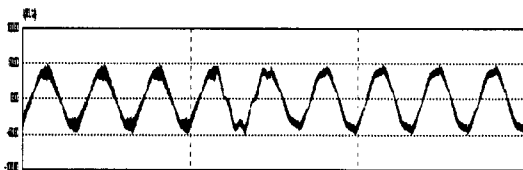


(b) 보상 후 전원전류 및 FFT 분석 결과
그림 4 3대 협조제어시 보상 특성

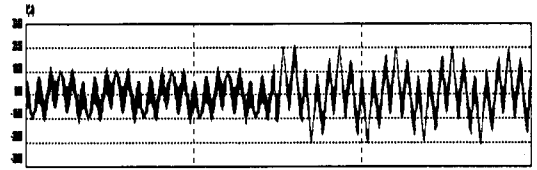
그림 5는 1대 고장시 2대로 운전 모드를 전환하는 특성을 보여준다. 그림 1(b) APF3에서 사고가 발생하여 멈추며, 약 17[msec] 후 동작 모드를 전환하였다. 1대 지시시 보상 후 전원 전류는 왜곡되나 2대 협조제어 모드로 전환 후 다시 보상이 이루어 짐을 볼 수 있다.



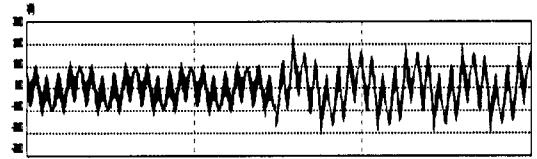
(a) a상 부하전류



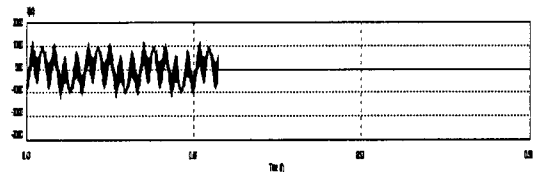
(b) 보상 후 전원전류



(c)그림 1(b)에서 APF1 출력 전류



(d)그림 1(b)에서 APF2 출력 전류



(d)그림 1(b)에서 APF3 출력 전류

4. 결 론

본 연구에서는 삼상 모달형 능동 전력필터 및 제어기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 타당성을 확인하였다.

결과를 통하여 제안된 능동 필터는 기존의 능동 필터에 비해 다음과 같은 면에서 유리함을 알 수 있었다.

- 2대 협조제어가 가능하므로 시스템의 안정성이 높다.
- 운전 주파수가 스위칭 주파수의 2배가 되므로 스위칭 주파수를 높이기 어려운 대용량 시스템에 적용이 유리하다.

본 연구는 산업 자원부 산업기술 개발 사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] “電力中央研究所 技術交流(電力技術分野)コーステキスト”, 平成11年,
- [2] 이상익, 유재근, 박종찬, 최규하, “차단기류 오동작 분석을 위한 전원왜형장치 설계 및 개발”, 전력전자 학회 논문지, 제11권 제5호, pp.480~488, 2006.
- [3] 이상익, 유재근, 전정재, 전현재, 허혜성, 최규하, “공장설비에서의 누전차단기 오동작과 전력품질 분석”, 2007 전력전자 학술대회 논문지, 479~481.
- [4] Gyu-Ha Choe, Min-Ho Park, “Analysis and Control of Active Power Filter with Optimized Injection”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.4, No. 4, pp. 427~433, 1989.
- [5] Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa, Akira Nabe, “Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 3, pp.625~630, 1984.
- [6] 조준석, 이승요, 김홍성, 최규하, “3상 UPS의 정전압 출력특성 향상을 위한 개선된 데드비트 디지털 제어기 설계”, 전력전자학회 논문지, 제5권, 제 1호, pp.1~10, 2002.
- [7] Ned Mohan, “Power Electronics”, WILEY, pp. 119~121, 1989.