

PSCAD/EMTDC를 이용한 하이브리드 필터 모델링 및 설계

조영식*, 차한주**, 김복렬*
한국원자력안전기술원*, 충남대**

Modeling and Design of a Hybrid Filter using PSCAD/EMTDC

Young-Sik Cho*, Hanju Cha**, Bok-Ryul Kim*
Korean Institute of Nuclear Safety*, Chungnam National University**

Abstract - 전력전자 소자의 급속한 발전에 따른 비선형부하 사용의 증가는 전력계통에 고조파 전류와 전압을 증가시키게 된다. 이러한 문제는 비선형 부하의 사용 증가가 예상되는 미래에는 점점 더 가속화될 것으로 보인다. 고조파 문제를 해결하기 위한 전통적인 방법인 수동필터에 의한 방법은 많은 단점을 가지고 있다. 설계의 어려움, 공진문제, 부품의 과부하, 필터성능이 시스템 임피던스에 의존한다는 점 등이 그것이다. 능동필터는 수동필터가 갖는 이러한 단점을 극복할 수는 있지만, 높은 가격과 낮은 신뢰성의 문제점을 가지고 있다. 이러한 딜레마의 해결책은 수동필터와 능동필터를 조합한 하이브리드 필터를 사용하는 것이다. 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 하이브리드 필터를 모델링하고 설계하는 방법을 제시한다.

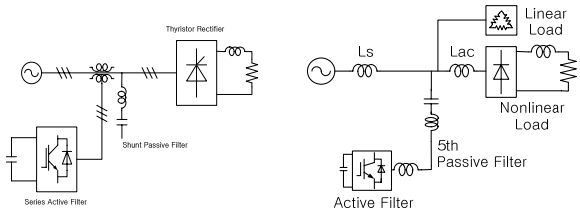
1. 서 론

최근 전력용반도체 소자의 급속한 발전으로 전력변환장치의 사용이 급증하고 있다. 대표적인 전력변환장치들 즉, 전력계통에서 정지형무효전력보상기(SVC)에 사용되는 사이리스터 제어정류기, HVDC에 사용되는 컨버터, 대형 전동기의 ASDs, 산업공장에서 사용되는 비선형부하들은 전류고조파의 주요 원인이다[1]. EPRI 보고서에 의하면 전력변환기를 사용한 전력공급이 1980년대 중반에는 전체 전력공급의 10%정도에 불과했지만, 2000년대에 이르러서는 60~70%까지 증가하고 있는 것으로 보고하고 있다[2]. 이것은 전기에너지의 안정적인 공급채무 외에도 전력품질의 확보라는 새로운 과제에 직면하는 계기가 되고 있다. 특히, 고조파 전류는 배전선로의 전압강하를 유발시켜 전력케이블의 절연과파, 회전기기의 가열, 토크맥동 및 기계적 진동 등의 직접적인 피해와 더불어 계통 내 변압기의 유효전력대비 피상전력을 증가시켜 설비용량의 낭비와 효율저하를 초래한다. 이러한 고조파를 저감하기 위한 방법은 수동필터, 능동필터, 이들을 조합한 형태인 하이브리드 필터 등 다양한 방법이 이용되어오고 있다. 하이브리드 필터에 관한 연구는 1990년대부터 많은 연구가 수행되고 있다. 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 하이브리드 필터를 모델링하고 설계하는 방법을 제시한다.

2. 하이브리드필터 모델링 및 설계

2.1 하이브리드필터 구성

고조파 제거를 위한 전통적인 방법인 수동필터 접근방법은 많은 문제점을 가지고 있다. 설계의 어려움, 공진문제, 부품의 과부하, 필터성능이 시스템 임피던스에 의존한다는 점 등이 그것이다. 능동필터는 수동필터가 갖는 이러한 단점을 극복할 수는 있지만, 높은 가격과 낮은 신뢰성의 문제를 안고 있다[3]. 이러한 딜레마의 해결책은 수동필터와 능동필터를 조합한 하이브리드 필터를 사용하는 것이다. 그림 1은 대표적인 하이브리드필터의 구성도를 보여준다.



〈그림 1〉 하이브리드필터의 구성 예

그림 1의 (a) Series Active Filter와 Shunt Passive Filter 조합형 구조는 부하전류가 능동필터를 통해 흐르게 되므로 능동필터의 전류정격이 높아야 한다는 점과 수동필터임피던스와 계통의 전원임피던스 간에 공진을 일으킬 가능성이 있다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 Shunt Active Filter와 Shunt Passive Filter의 직렬 조합형 구조의 하이브리드필터를 제안한다. 이 형태는 능동필터와 수동필터를 직렬로 구성함으로써 수동필터가 기동을 포함한 과도조건에서 전압과 전류 제한치를 제한함으로써 낮은 능동필터 정격을 실현가능하다는 장점을 가진다 [3].

2.2 순시전력이론(Instantaneous P-Q Theory)

순시전력이론은 순시무효 및 유효전력이론 또는 p-q이론이라 불리며, Akagi, Kanazawa 및 Nabae에 의해 1983년도에 처음 소개되었다[4]. p-q이론은 시간영역에서의 순시전력과 abc를 $\alpha\beta$ 로 변환하는 것에 기초를 둔다. 즉, p-q이론은 클라크(Clarke)변환이라 알려져있는 $\alpha\beta$ 변환을 이용하는 것이다. 즉, p-q이론은 3상 시스템에 정의되는 이론으로서, 3상 순시전력은 순시영상전력(p_0), 순시유효전력(p), 순시무효전력(q)으로 구성되며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 평형 3상 3선식에서 영상분 전류성분은 없으므로 즉, $i_0=0$ 이 경우 순시전력은 $v_0 i_0$ 곱 성분이 항상 '영'이기 때문에 α, β 축 성분만으로 정의된다.

따라서

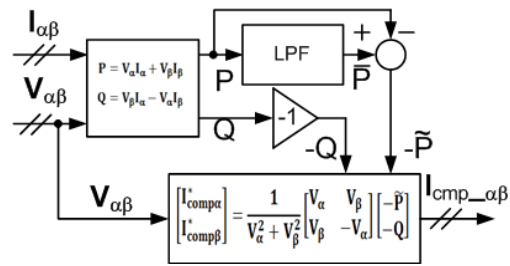
$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

가 되고, 3상 전압 및 전류가 평형이라면 영상분은 존재하지 않게 되므로 위에서 v_0, i_0 성분을 제거하면, 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

역변환하면,

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$



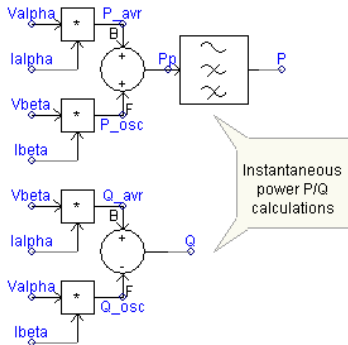
〈그림 2〉 p-q Theory 블록 다이어그램

3. 시뮬레이션 결과

모델링에 사용된 계통은 3상 3선식, 380Vac, 60Hz이며, 시뮬레이션에 사용된 회로정수 및 시뮬레이션 결과는 다음 표 1과 같다.

〈표 1〉 시뮬레이션 회로정수

항 목	값
정류기부하 정격	20kW
선간전압	380V
주파수	60Hz
계통 인덕턴스(L_s)	0.1mH
AC 인덕터(L_{ac})	2.0mH
필터 커패시터(C_F)	29.59 μ F
필터 인덕터(L_F)	10.76mH

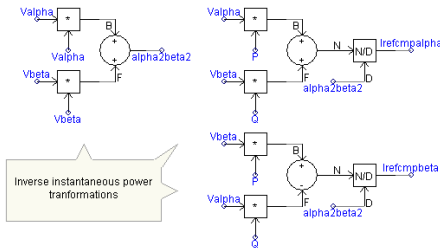


〈그림 3〉 PSCAD/EMTDC를 이용한 p-q계산 모델링

2.3 보상전류($I_{\alpha REF}, I_{\beta REF}$) 계산

본 논문에서 보상전류의 계산은 순시전력이론을 이용하여 계산한다. 즉, 순시전력은 α, β 축에서 정의되므로 식(3)과 같이 되고, 순시전력은 $p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta$, $q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta$ 가 된다. 다시 순시전력은 AC 및 DC성분으로 구분하여 $p = \bar{p} + \tilde{p}$ 및 $q = \bar{q} + \tilde{q}$ 와 같이 나타낼 수 있다. 여기서, \bar{p}, \bar{q} 는 일정한 상수이며, 정상성분에 해당하는 값이고, \tilde{p}, \tilde{q} 는 진동하는 값으로서 영상 및 역상성분에 해당하는 값이다. 따라서 병렬로 주입해야 되는 보상전류는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

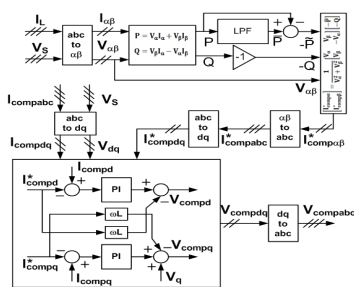
$$\begin{bmatrix} i_{\alpha REF} \\ i_{\beta REF} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p_{sp} + \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (5)$$



〈그림 4〉 PSCAD/EMTDC를 이용한 보상전류 계산 모델링

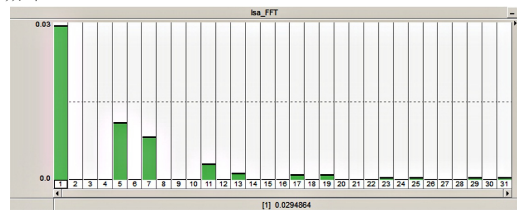
2.4 전류제어기 설계

가상의 전류제어를 위해 abc 3상전류를 각각 직접 제어할 수 있으나, 백터제어 시에는 이러한 3상전류를 d-q축 좌표계로 변환하여 사용함으로써 3상전류를 직접 제어하는 것보다 d-q축의 2개 전류를 제어하는 것이 보다 효과적이다. 본 논문에서는 d-q축 정지좌표계(Stationary Reference Frame)의 비례적분(PI) 전류제어기를 사용하였으며 블럭도를 그림 3에 나타내었다. 일반적으로 전류제어기는 통상 비례적분(PI)제어기가 사용되며, 이 전류제어기에서 전류지령은 정지좌표계의 d-q축 전류 i_{ds}^*, i_{qs}^* 로 주어지고, 실제 3상 부하전류 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 는 좌표변환을 통해 d-q축 전류 i_{ds}^*, i_{qs}^* 로 변환되어 피드백(feedback)된다. 비례적분 전류제어기에서는 전류오차를 감소시키기 위해 필요로 하는 d-q축 정지 좌표계의 지령전압 v_{ds}^*, v_{qs}^* 를 생성하며, 이들은 다시 좌표변환을 통해 3상 지령전압 $v_{as}^*, v_{bs}^*, v_{cs}^*$ 로 변환된다. 이 지령전압을 PWM 인버터에서 발생해서 3상 부하에 인가함으로써 지령전류를 추종하게 된다.

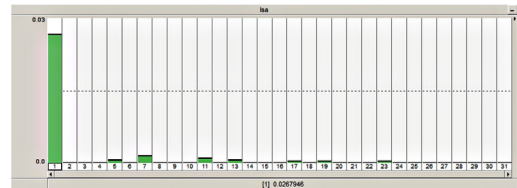


〈그림 5〉 전류제어기의 블럭도

PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션결과는 그림 6과 같으며, 시뮬레이션 결과 능동필터 단독 사용 시보다 정격을 약 30%정도 줄일 수 있어 능동필터의 가장 큰 약점인 경제성을 확보할 수 있다. 따라서 하이브리드 필터는 고조파를 효과적으로 제거할 수 있는 효과적인 대안으로 볼 수 있다.



(a) 필터설치 전 전류 FFT과정



(c) 하이브리드 설치 후 전류 FFT 과정

〈그림 6〉 시뮬레이션 결과

4. 결 론

본 논문에서는 전력계통에서의 비선형부하의 증가에 따른 발생하는 고조파를 효과적으로 제거하기 위한 방안인 하이브리드필터를 PSCAD/EMTDC를 이용하여 모델링하고 설계하였다. 본 논문에서 제안한 하이브리드 필터는 Shunt Active Filter와 Shunt Passive Filter를 직렬로 연결한 형태로서 수동필터의 공진문제와 능동필터의 경제성의 문제를 동시에 해결 가능한 대안임이 확인되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Young-Sik Cho and Hanju Cha, "A single-tuned passive harmonic filter design using transfer function approach for industrial process application" IJMA, Vol. 1, No. 1, April 2011
- [2] S. L. Clark, P. Famouri and W. L. Cooly, "Elimination of Supply Harmonics", IEEE Industrial Application Magazine, pp. 62~82, March/April, 1997
- [3] 조영식, 차한주, "고조파 저감을 위한 수동필터와 하이브리드필터의 성능비교", 2010년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 추계학술대회 논문집, 2010. 10. 23
- [4] Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanade, Mauricio Aredes, "Instantaneous power theory and applications to power conditioning," Wiley-Interscience, a John Wiley&Sons, Inc., Publication, pp. 109-110 2007