

A Study on The Over-Current Protection Method of A Series Active Compensator

蔡 梵 碩* · 李 雨 哲** · 李 宅 基*** · 玄 東 石§
 (Beom-Seok Chae · Woo-Cheol Lee · Taeck-Kie Lee · Dong-Seok Hyun)

Abstract - A protection scheme for series active compensator is presented and analyzed in this paper. The proposed series active compensator operated as a high impedance $K(\Omega)$ to the fundamentals when short-circuit faults occur in the power distribution system, and two control strategies are proposed in this paper. The first is the method by detecting the fundamental source current through the p-q theory, the second is the method by detecting the fundamental component of load current in Synchronous Reference Frame(SRF). When the short-circuit faults occur in the power distribution system, the proposed scheme can protect the series active compensator without additional protection circuits. The validity of the proposed protection scheme was investigated through experimental results.

Key Words : Series Active Compensator, Unified Power Quality Compensator, Hybrid Active Power Filter, Synchronous Reference Frame, p-q theory.

1. 서 론

직렬 능동 보상기는 직렬 주입 변압기를 사용하여 모선에 직렬로 연결되어 전압 고조파를 제거하고 PCC (Point of Common Coupling) 지점의 전압의 품질을 개선할 수 있으며 또한 비선형 부하에서 발생되어 계통에 유입되는 고조파 전류를 차단하는 역할을 수행할 수 있다.^[1] 이러한 일반적인 직렬 능동 보상기는 부하 고조파 전류의 저감을 위한 하이브리드형 능동 전력필터에 많이 사용되었고 최근 대용량의 부하로 인한 문제점들과 전력품질에 민감한 부하의 문제들을 해결할 수 있는 효과적인 방안의 하나로 널리 연구되고 있다. 하지만 직렬 능동 보상기는 과전류로부터 특별한 보호방법을 필요로 한다. 이는 직렬 능동 보상기의 변압기 1차 측이 전원라인과 직렬로 연결되어 변류기(Current Transformer)로서 동작하기 때문에 2차 측의 개방운전이 불가능함에 기인한다. 이 때문에 배전 시스템 내에서 사고가 발생하여 모선에 과전류가 유기될 경우 직렬 능동 보상기의 인버터를 과전류로부터 보호하기 위해 변압기의 2차 측에서 분리시키는 것이 불가능하다. 그러므로 일반적인 차단기나 속도 퓨즈를 이용하여 인버터를 보호하는 것이 불가능하고 모선의 사고가 제거되거나 인버터가 절연될 때까지 2차 측의 전류와 전압의 크기를 제한하는 새로운 보호 방법을 필요로 한다.^[2]

본 논문에서는 직렬 능동 보상기의 새로운 과전류 보호방법에 대하여 다루고 있다. 이는 일반적인 하이브리드형 능동 전력필터에서 직렬 능동 보상기가 전류의 고조파 성분에 대해서 선택적으로 큰 임피던스를 갖도록 제어함에 의해 고조파 절연기능을 수행함에 착안하여 배전 시스템 내에서 사고가 발생하는 경우 직렬 능동 보상기를 전류의 기본파 성분에 대하여 선택적으로 큰 임피던스를 갖도록 제어함으로써 기본파 성분을 제어하는 방식으로 이루어진다. 또한 이는 p-q 이론을 적용하여 추출한 전원전류의 기본파 성분을 이용한 방법과 SRF에서 저역통과필터를 이용하여 추출한 부하전류의 기본파 성분을 이용한 방법이 제안되었다. 이는 기존의 통합 전력품질 제어기의 보호방법과 비교하여 순시 과전류인 경우 부가회로가 필요하지 않고 과전류 보호동작 중에도 직렬 보상기가 정상상태와 동일하게 과도상태 없이 순시적인 보상을 수행할 수 있다는 장점을 갖는다.

2. 일반적인 직렬 능동 보상기

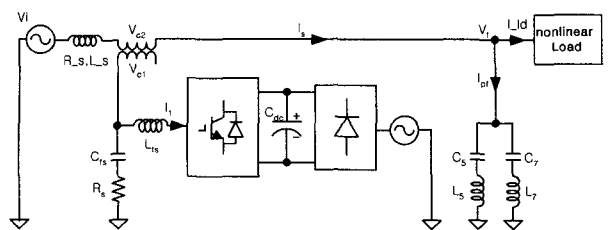


그림 1 직렬 능동 보상기를 이용한 하이브리드 능동필터
 Fig. 1 Hybrid active filter using the series active compensator

* 準 會 員 : 三星 SDI PDP 本部 開發센터
 ** 正 會 員 : 韓京大 電氣工學科 專任講師 · 工博
 *** 正 會 員 : 韓京大 電氣工學科 副教授 · 工博
 § 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 接受日字 : 2002年 3月 12日
 最終完了 : 2002年 4月 18日

그림 1은 직렬 능동 보상기와 병렬형 수동 필터를 갖는 일반적인 하이브리드형 능동 전력필터의 구성을 보여준다. 여기에서 직렬 능동 보상기는 변압기 1차 측이 전원라인과 직렬로 연결되어 변류기로서 동작함을 확인할 수 있다. 이는 특정 고조파에 동조되도록 설계된 수동필터와 더불어 직렬 능동 보상기를 부하전류의 고조파 성분에 대하여 큰 임피던스를 갖도록 제어함으로써 PCC 지점의 전원품질 저하를 막는 역할을 한다. 이와 더불어 수동필터만을 사용할 경우 발생할 수 있는 전원 임피던스와 수동필터의 병렬 공진의 위험성을 제거할 수 있다.^[3] 또한 최근 직렬 능동 보상기에 의해 전원전압의 전압강하, 전원 불평형, 전원의 고조파 보상 등의 부가적인 기능을 수행하는 것이 여러 논문들에서 연구되고 있다.^[4]

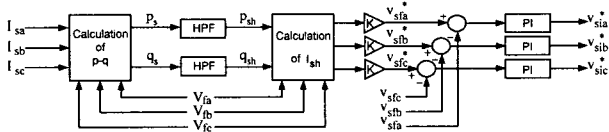


그림 2 일반적인 하이브리드형 능동필터의 제어구성도
 Fig. 2 Block diagram of the control scheme for the conventional hybrid active power filter

그림 2는 p-q이론을 이용한 일반적인 하이브리드형 능동 전력필터의 제어블럭도이다. 직렬 능동 보상기의 출력 지령치(V_{si}^*)는 $V_{si}^* = K \cdot i_{sh}$ 로 나타낼 수 있다. 이 경우 직렬 능동 보상기는 기본파 성분에 대해서는 0의 임피던스, 고조파 성분에 대해서는 선택적으로 큰 임피던스($K\Omega$)를 제공함을 확인할 수 있다. 여기서 i_{sh} 는 전원전류 i_s 의 고조파 성분이고 고조파 전류 i_{sh} 는 전원단에서 부하단과 수동필터로 흐르는 순시 유효전력과 순시 무효전력의 고조파 성분을 p_{sh} , q_{sh} 를 통해서 계산된다. 이들 고조파 성분 p_{sh} , q_{sh} 는 각각 고역통과 필터(HPF $G(s)$)를 통해 p_s , q_s 로부터 추출되고 i_{sh} 는 p_{sh} , q_{sh} 로부터 계산된다.^[5]

식(1)~식(4)는 위의 과정을 설명한다.

$$\begin{bmatrix} p_s \\ q_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{fd} & v_{fq} \\ -v_{fq} & v_{fd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} P_{sh} \\ Q_{sh} \end{bmatrix} = G(s) \begin{bmatrix} P_s \\ Q_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{fd} & v_{fq} \\ -v_{fq} & v_{fd} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{sh} \\ Q_{sh} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_{sfd} \\ v_{sfq} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} i_{shd} \\ i_{shq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{fd} \\ v_{fq} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix}$$

3. 직렬 능동 보상기의 과전류 보호방법

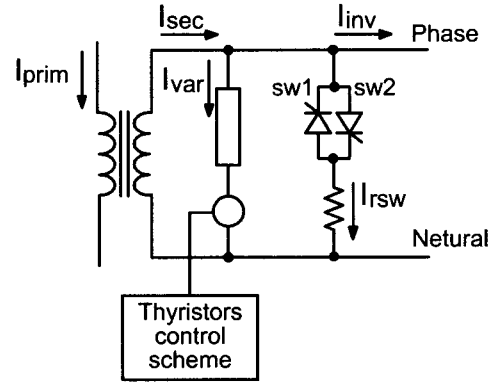


그림 3 기존의 직렬 능동 보상기의 과전류 보호방법
 Fig. 3 Conventional protection scheme of series active compensator

기존의 직렬 능동보상기의 과전류 보호방법은 그림 3에서 보는 것과 같다. 역병렬 사이리스터를 이용한 스위칭을 통해 2차측에 유기되는 과전류의 새로운 통로를 만들어 직렬 능동 보상기의 인버터와 변압기 2차측을 절연시키는 방법을 사용한다.^[2] 이는 과전류로부터 직렬 능동 보상기를 완벽하게 절연시킬 수 있지만 과전류 보호 동작시 직렬 능동 보상기의 출력을 모선에 전달할 수 없으며 부가적인 보호회로를 설치하여야 하는 단점을 갖는다.

4. 제안된 직렬 능동 보상기의 보호방법

본 논문에서 제안된 직렬 능동 보상기의 과전류 보호방법은 하이브리드형 능동 전력필터에서의 직렬 능동필터 동작과 유사한 방법을 통해 구현된다. 일반적인 하이브리드형 능동 전력필터의 경우 직렬능동필터가 기본파 전류에 대하여 영의 임피던스를 갖고 고조파 전류에 대해서는 큰 임피던스($K_1\Omega$)를 갖도록 제어하는 반면 배전 계통의 사고에 의해 직렬 능동 보상기의 보호가 필요한 경우 직렬 보상기를 기본파 전류에 대하여 큰 임피던스($K_2\Omega$)를 갖도록 제어한다. 그림 4는 제안된 직렬 능동 보상기의 과전류 보호방법을 위한 제어 블록도로서 (a)는 p-q 이론을 통해 전원 전류의 기본파 성분을 검출하여 구현하는 방법, (b)는 SRF에서 부하전류의 기본파 성분을 검출하여 구현하는 방법이다.^{[6][7]} 그림에서 명암 처리된 부분이 과전류 보호를 위해 제안된 제어 블록도이다. 여기서 K_1 은 기본파 성분의 제어를 위한 임피던스 성분이며 일반적인 하이브리드형 능동 전력필터의 구현을 위한 부분의 K_2 는 고조파 성분의 제어를 위한 임피던스 성분이다.

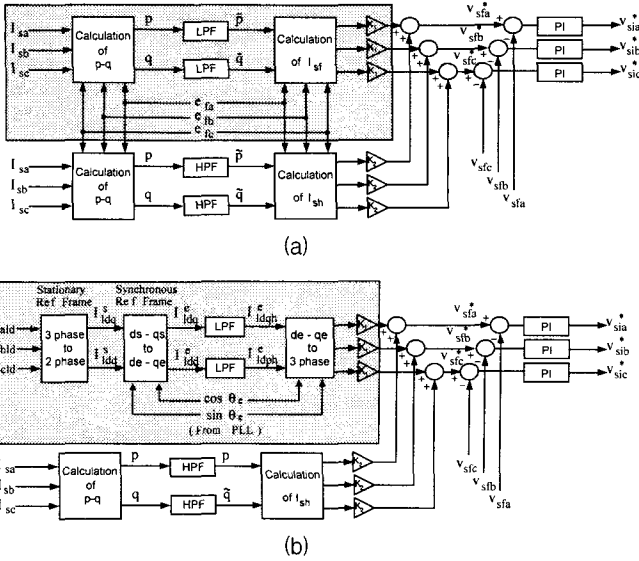


그림 4 제안된 과전류 보호방법의 구현을 위한 제어 지령치 산정기법 (e_{fa}, e_{fb}, e_{fc} : fundamental frequency of V_{fa}, V_{fb}, V_{fc})
Fig. 4 The methods of producing reference value in the proposed protection schemes
 (a) Method 1 : Detecting fundamental component of source current by using the p-q theory
 (b) Method 2 : Filtering a fundamental component of load current in SRF

제안된 직렬 능동 보상기의 과전류 보호방법을 구현함에 있어서 전원 임피던스와 하이브리드형 능동 전력필터를 구성하는 수동필터간의 병렬 공진에 의한 문제점들이 발생할 수 있다. 이는 과전류 보호를 위한 직렬 능동필터의 제어를 구현할 경우 기본파 성분에 대한 임피던스를 갖도록 하지만 고조파 성분에 대한 임피던스는 고려되지 않았기 때문이다. 그림 5는 이러한 경우 즉 고조파에 대한 임피던스를 고려하지 않고 제어하는 경우 ($K_2=0$)와 고조파에 대한 임피던스를 고려하는 경우 ($K_2=2$)의 필터특성을 나타낸다. 그림에서 K_2 가 0인 경우는 병렬 공진이 발생하였지만 K_2 가 2인 경우는 병렬 공진이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 따라서 과전류 보호기법의 동작 시 기본파에 대한 임피던스뿐만 아니라 고조파에 대한 임피던스도 함께 고려 되어야 한다.

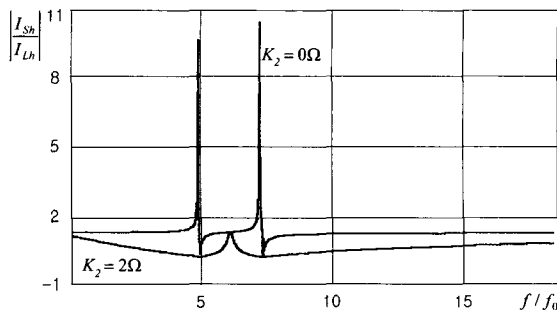


그림 5 고조파에 대한 임피던스를 고려할 경우 부하 고조파 전류의 필터특성
Fig. 5 Filter characteristic for load harmonic current in conventional Hybrid Active Filter

5. 제안된 과전류 보호방법의 특성 분석

5.1 제안된 방법 1의 특성 분석 (전원전류의 기본파이용)

그림 6에서 G_1, G_2 는 각각 기본파 성분과 고조파 성분의 검출기능을 포함하는 직렬 능동 보상기의 등가 전달 함수이다. 즉 부하에 과부하가 걸렸을 때 G_1 은 기본파 성분에 대해서 $|G_{1f}|=1$ 의 값을 갖고 고조파 성분에 대해서 $|G_{1h}|=0$ 의 값을 갖게되어 K_1 과 함께 기본파 성분을 제한하는 기능을 수행한다. G_2 는 기본파 성분에 대하여 0에 가까운 값을 갖고 고조파 성분에 대하여 1의 값을 갖는다. 그러므로 $|G_{2f}|=0, |G_{2h}|=1$ 로 표현할 수 있으며 K_2 와 함께 부하 고조파 전류를 제한하는 기능을 수행한다. 이러한 방법으로 직렬 능동 보상기는 K_1, K_2, G_1, G_2 를 이용하여 기본파 성분과 고조파 성분 모두에 대하여 큰 임피던스를 갖도록 제어하는 것이 가능하다. K_1 과 K_2 는 옴(Ω)의 단위를 갖는 이득값이다.

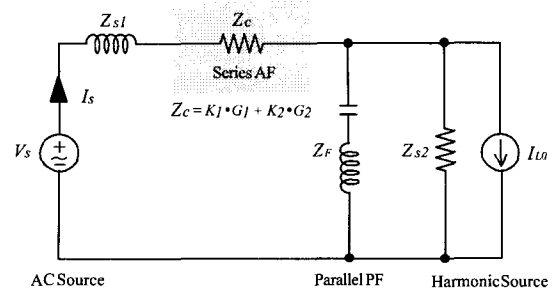


그림 6 전원전류의 기본파성분을 이용한 과전류 보호방법1의 등가회로
Fig. 6 The proposed protection Method 1 using the fundamental component of source current

그림 6으로부터 다음의 전류 방정식을 얻을 수 있다.

$$I_s = \frac{V_s(Z_{s2} + Z_F) + (I_{L0} \cdot Z_{s2} \cdot Z_F)}{Z_{s1}Z_{s2} + Z_{s1}Z_F + Z_{s2}Z_F + (Z_{s2} + Z_F)Z_c} \quad (5)$$

$Z_c = K_1G_1 + K_2G_2$ 이므로 식 (5)를 고조파전류에 대하여 분석하면 식(6)으로 표현 가능하다.

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}(Z_{s2} + Z_F) + (I_{LOh} \cdot Z_{s2} \cdot Z_F)}{Z_{s1}Z_{s2} + Z_{s1}Z_F + Z_{s2}Z_F + (Z_{s2} + Z_F)K_2} \quad (6)$$

이상적인 경우 이득값(K_2)이 무한대의 값을 갖도록 제어하면 식(6)은 식(7)과 같이 표현 가능하므로 전원전류의 고조파 성분(I_{sh})은 더 이상 존재하지 않는다.

$$I_{sh} \cong 0 \quad (7)$$

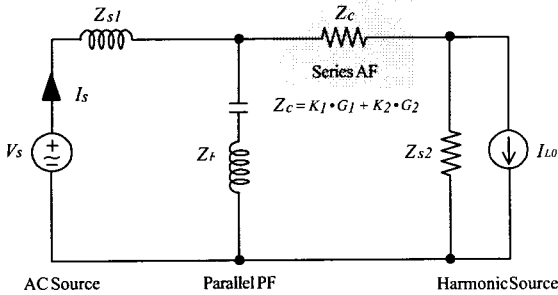
식 (5)를 다시 기본파전류에 대하여 해석하면 식 (8)로 표현 가능하다.

$$I_{sf} = \frac{V_{sf}(Z_{s2} + Z_F) + (I_{LOf} \cdot Z_{s2} \cdot Z_F)}{Z_{s1}Z_{s2} + Z_{s1}Z_F + Z_{s2}Z_F + (Z_{s2} + Z_F)K_1} \quad (8)$$

식 (8)에서 역시 전원전류의 기본파 성분(I_{sf})은 이득값(K_1)을 제어함으로써 제한하는 것이 가능하고 이는 식(9)를 통해 확인할 수 있다.

$$I_{sf} \cong 0 \quad (9)$$

4.2 제안된 방법 2의 특성 분석 (부하전류의 기본파이용)



Z_{s1} : the source impedance,
 Z_f : the equivalent impedance of the passive filter,
 I_{LO} : the equivalent harmonic current source

그림 7 부하전류의 기본파성분을 이용한 과전류 보호방법2의 등가회로

Fig. 7 The proposed protection Method 2 using the fundamental component of load current

그림 7에서와 같은 방법으로 전류 방정식을 구하면 식(10)과 같고 고조파성분과 기본파성분에 대하여 해석하면 각각 식(12), 식(14)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_s = \frac{V_s(Z_c + Z_{s2} + Z_F) + (I_{LO} \cdot Z_{s2} \cdot Z_F)}{Z_{s1}Z_{s2} + Z_{s1}Z_F + Z_{s2}Z_F + (Z_{s1} + Z_F)Z_c} \quad (10)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}K_2 + V_{sh}(Z_{s2} + Z_F) + (I_{LOh} \cdot Z_{s2} \cdot Z_F)}{Z_{s1}Z_{s2} + Z_{s1}Z_F + Z_{s2}Z_F + (Z_{s1} + Z_F)K_2} \quad (11)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{sh}}{Z_{s1} + Z_F} \quad (12)$$

식 (12)에서 실제 전원전압의 고조파 성분은 직렬형 보상기에 의해 보상되므로 이상적인 경우 존재하지 않기 때문에 고조파성분 전류는 더 이상 존재하지 않는다는 설명이 가능하다.

$$I_{sf} = \frac{V_{sf}K_1 + V_{sf}(Z_{s2} + Z_F) + (I_{LOf} \cdot Z_{s2} \cdot Z_F)}{Z_{s1}Z_{s2} + Z_{s1}Z_F + Z_{s2}Z_F + (Z_{s1} + Z_F)K_1} \quad (13)$$

$$I_{sf} = \frac{V_{sf}}{Z_{s1} + Z_F} \quad (14)$$

식 (14)에서 수동필터의 임피던스 Z_F 는 기본파성분에 대하여 무한대의 임피던스를 갖기 때문에 전류의 기본파성분은 제한 될 수 있다.

그러나 이 두가지 경우 즉 이득값 K_1, K_2 를 모두 사용하여 기본파를 제한하고 부하 전류 고조파 절연을 위한 제어를 구현하는 경우 일반적인 하이브리드형 능동필터만을 구현하였을 경우 보다 직렬 능동 보상기의 출력 전압은 증가하게 되며 이는 직렬 능동보상기를 구성하는 인버터 용량과 밀접한 관계가 있다. 이러한 인버터 용량의 증가는 식(15)를 통해 설명될 수 있다. 여기서 우측항은 기본파성분을 제한하기 위한 부분과 고조파 절연을 유지하기 위한 부분으로 나누어 진다.

$$V_c = K_1 \cdot I_f + K_2 \cdot I_h \quad (15)$$

그러나 직렬형 전압보상기를 갖는 다른 형태의 전력변환시스템인 Delta Conversion UPS, 순간 전압보상기등 전원전압 불평형, 전원전류불평형을 보상하는 기능을 갖춘 장치에 비해 시스템을 구성하는 인버터의 용량면에서는 큰 차이가 없다. [8][9][10]

6. 하이브리드 능동필터의 전력 흐름도

그림 8은 하이브리드형 능동필터의 전력흐름을 각각 나타낸 그림으로, 그림 8 (a)는 정상 부하 조건시의 전력흐름을 나타낸 그림이며 그림8 (b)는 부하 사고 발생 시 제안한 과전류 보호방법을 적용하였을 경우의 전력흐름을 보여준다. 그림 1에서 삼상 평형이며 일정한 값을 갖고 고조파를 포함하지 않는 각상의 공통 접속점 전압 (v_{ta}, v_{tb}, v_{tc})과 보상된 전원 전류 (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})는 항상 보상전의 입력전압 (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc})의 위상과 같다. 삼상 순시 입력전력 $p_s(t)$ 와 순시 부하

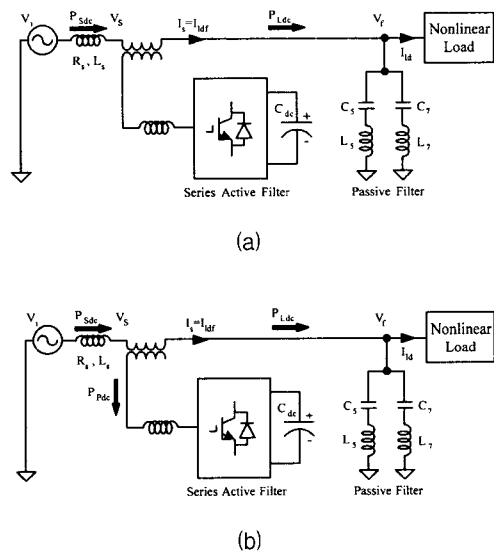


그림 8 하이브리드형 능동필터의 전력 흐름도

Fig. 8 Power Flow of the Hybrid active power filter
 (a) Under normal load condition
 (b) Applied fault protection schemes

전력 $p_L(t)$ 는 각각 식(16)과 식(17)로 계산할 수 있다. 순시 전력 $p_s(t)$ 와 $p_L(t)$ 는 모두 직류성분(p_{dc})과 교류성분(p_{ac})로 구성되어 있다. 그러므로 식(16), 식(17)은 각각 식(18), 식(19)로 다시 표현할 수 있다.

$$p_s(t) = v_{sa}i_{sa} + v_{sb}i_{sb} + v_{sc}i_{sc} \quad (16)$$

$$p_L(t) = v_{fa}i_{ald} + v_{fb}i_{blid} + v_{fc}i_{clid} \quad (17)$$

$$p_s(t) = p_{sdc} + p_{sac} \quad (18)$$

$$p_L(t) = p_{Ldc} + p_{Lac} \quad (19)$$

하이브리드형 능동필터에서 순시 부하전력의 고조파 성분 p_{Lac} 는 수동필터에 의해 보상된다. 또한 p_{sac} 는 직렬 능동 보상기에 의해 보상된다. 그러므로 부하전류의 고조파 성분은 수동필터에 의해 보상되는 것을 고려하면 부하전류의 기본과 성분은 입력전류의 기본과 성분과 동일하다. 즉, $i_{saf} = i_{ald}$, $i_{sbf} = i_{blid}$, $i_{scf} = i_{clid}$ 의 관계가 성립한다. 그러므로 직렬 능동 보상기의 삼상 순시전력은 각각 식(20)과 식(21)로 나타낼 수 있다.

$$p_s(t) = v_{sa}i_{saf} + v_{sb}i_{sbf} + v_{ca}i_{scf} \quad (20)$$

$$p_L(t) = v_{fa}i_{ald} + v_{fb}i_{blid} + v_{fa}i_{clid} \quad (21)$$

만약 직렬 능동 보상기의 출력전압 (v_{fa} , v_{fb} , v_{fc})가 고조파 성분을 포함하고 있지 않고 입력전류 (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc})가 전류 보상 후 깨끗한 정현파를 나타내고 있다면 순시전력 $p_s(t)$, $p_L(t)$ 는 모두 직류 성분만을 가지고 있으며 이는 식(22)로 표현 가능하다. 그림 8 (a)는 하이브리드형 능동필터가 정상부하시 직렬 능동 보상기의 출력($p_s(t)$)과 부하 측 출력($p_L(t)$) 전력의 흐름을 보여준다.

$$p_s(t) = p_{sdc} = p_{Ldc} \quad (22)$$

또한 만약 직렬 능동 보상기가 배전 계통의 사고에 의한 과전류를 검출하여 제안한 보호방법을 구현하는 경우 직렬 능동 보상기의 출력 p_{sdc} 와 p_{Ldc} 는 더 이상 식(22)를 만족하지 않는다. 그림 8 (b)는 사고 시 직렬 능동 보상기의 출력 p_{sdc} 가 정상 부하의 경우의 p_{sdc} 또는 p_{Ldc} 보다 큰 값을 갖게 된다. 식 (23)은 사고 시 보호를 위한 p_{pdc} 를 사용하여 p_{Ldc} 가 제한되는 것을 보여준다.

$$p_{sdc} = p_{Ldc} + p_{pdc} \quad (23)$$

이 경우 제안된 보호방법 구현을 위한 순시 전력 p_{pdc} 는 dc-link에 축적되고 그 결과 dc-link의 전압 상승이 발생한다. 이 때문에 하이브리드형 능동 전력필터에서 제안된 보호 방법을 구현하는 경우에 발생하는 dc-link 캐패시터의 과전압은 보호할 수 있는 과전류의 크기와 과전류 허용시간을 결정하는 요소로 작용한다. 이 순시전력은 dc-link에 배터리가 붙는 전력변환장치(Delta conversion UPS 등)의 배터리 충전에 사용될 수 있고,^[10] 오랜 시간의 과전류인 경우 dc-link 방전회로는 부가되어야 한다. 그러나 순시적인 과전류에 대해

서는 제안된 보호 방법이 추가적인 보호회로를 필요로 하지 않고 직렬 능동 보상기의 정상적인 기능, 과전류의 보호를 수행하고 또한 우수한 과도응답특성을 갖고 있음을 실험결과로서 확인한다.

7. 실험 및 시뮬레이션 결과

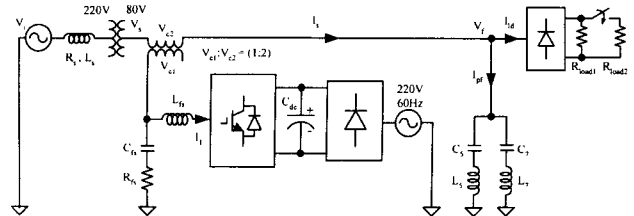


그림 9 실험 시스템의 구성

Fig. 9 Experiment system configuration

그림 9은 실험 시스템의 구성을 보여준다. 삼상 전압원 PWM 인버터를 사용한 직렬 능동 보상기는 권선비 1:2의 단상 변압기 3대를 사용하여 모선에 직렬로 연결되었고 dc-link의 충전을 위한 다이오드 정류기는 별도의 전원을 사용하여 구성하였다. 부하단과 전원단의 고조파 절연을 위한 LC 수동 필터는 5차 고조파와 7차 고조파에서 동조되도록 설계하여 모선에 병렬로 접속되었다. 또한 실험에서의 부하 조건은 정상상태를 가정한 부하(R_{load1})와 정상상태의 약 3배의 과 전류를 발생시키는 과부하조건($R_{load1} + R_{load2}$)을 가정하여 실험을 수행하였다.

표 1은 실험 시스템의 파라미터 값을 나타낸다. 배전계통의 사고를 가정하는 실험에서 발생할지도 모르는 시스템의 소손을 방지하기 위하여 강압 변압기를 사용하여 입력전압은 80V로 낮추어 실험을 수행하였다.

그림 10은 일반적인 하이브리드형 능동 전력필터의 실험 파형으로 (a)는 직렬 능동 보상기의 동작 전 파형이며 (b)는 직렬 능동 보상기를 동작시켰을 경우의 실험 파형이다. 그림 10의 (a)에서 수동필터의 고조파 보상으로 전원전류는 부하 전류보다 정현적인 모양을 유지하고 있음을 확인 할 수 있다.

표 1 실험 시스템 파라미터

Table 1 Experiment system parameters

Parameters	Value
Input voltage (V_{sa} , V_{sb} , V_{sc})	80V, 60Hz
Line impedance (R_s , L_s)	.
dc-link capacitor	13000 μ F
dc-link voltage	320V
C_{fs} , L_{fs} , R_{fs}	100 μ F, 1.3mH, 1 Ω
R_{load1} , R_{load2}	16 Ω , 9 Ω
C_5 , L_5	200 μ F, 1.24mH
C_7 , L_7	125 μ F, 1.18mH

그림 10의 (b)에서는 하이브리드형 능동 전력필터를 구현한 과형으로 직렬 능동 보상기가 수동필터와 함께 동작하여 수동필터만을 사용한 경우보다 낮은 THD(Total Harmonic Distortion)의 전원전류가 흐를 수 있도록 고조파 보상이 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

그림 11 (a)는 어떠한 과전류 보호방법도 적용하지 않았을 경우의 전압, 전류의 실험 파형으로 과부하 시는 정상상태와 비교하여 3배의 과전류가 흐르고 있음을 확인할 수 있다. 그림 11의 (b), (c)는 각각 전원전류의 기본파성분을 이용한 방법1과 부하전류의 기본파성분을 이용한 방법2를 적용하여 직렬 능동 보상기의 과전류 보호동작을 수행하는 경우의 전압, 전류 파형이다. 여기서 모선의 과전류는 정상 부하조건과 유사하게 제한되고 있음을 실험을 통하여 알 수 있다. 만약 배전계통의 이상으로 모선에 과전류가 발생하면 이는 그림 11의 (a)에서처럼 인버터 전류 역시 과전류가 흐르게 된다. 그러나 그림 11의 (b), (c)의 경우에 제한한 과전류 보호방법을 적용함으로써 사고시 인버터 전류를 크게 감소시킴을 검증하였다. 그림 11의 (d)는 과전류 보호방법을 적용하는 경우에 유효 전력의 흐름을 통해 발생하는 dc-link의 과충전 현상을 보여준다. dc-link의 과충전 현상은 제한할 수 있는 과전류의 크기와 보호할 수 있는 시간을 제한하는 요소로 작용하지만 일반적인 직렬보상기의 보호방법과 비교했을 경우 제한된 과전류 보호동작의 경우에도 직렬형 보상기가 정상적인 동작을 할 수 있다는 점과 순시 과전류에 대해서는 다른 부가회로를 필요로 하지 않는다는 장점을 갖는다. 그러나 장시간의 과전류 시 dc-link에 추가적인 방전회로가 필요함을 알 수 있다.

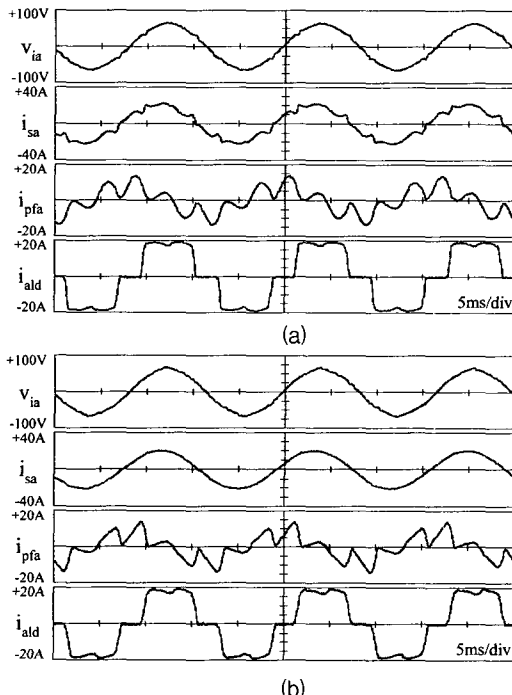


그림 10 일반적인 하이브리드형 능동필터의 동작 실험
 (V_{ia} : 입력 전압, i_{sa} : 전원전류, i_{pfa} : 수동필터에 유입전류, i_{ald} : 부하전류)
Fig. 10 Experimental waveforms in a typical hybrid active power filter
 (a) Before the operation of series active power filter
 (b) After the operation of series active power filter

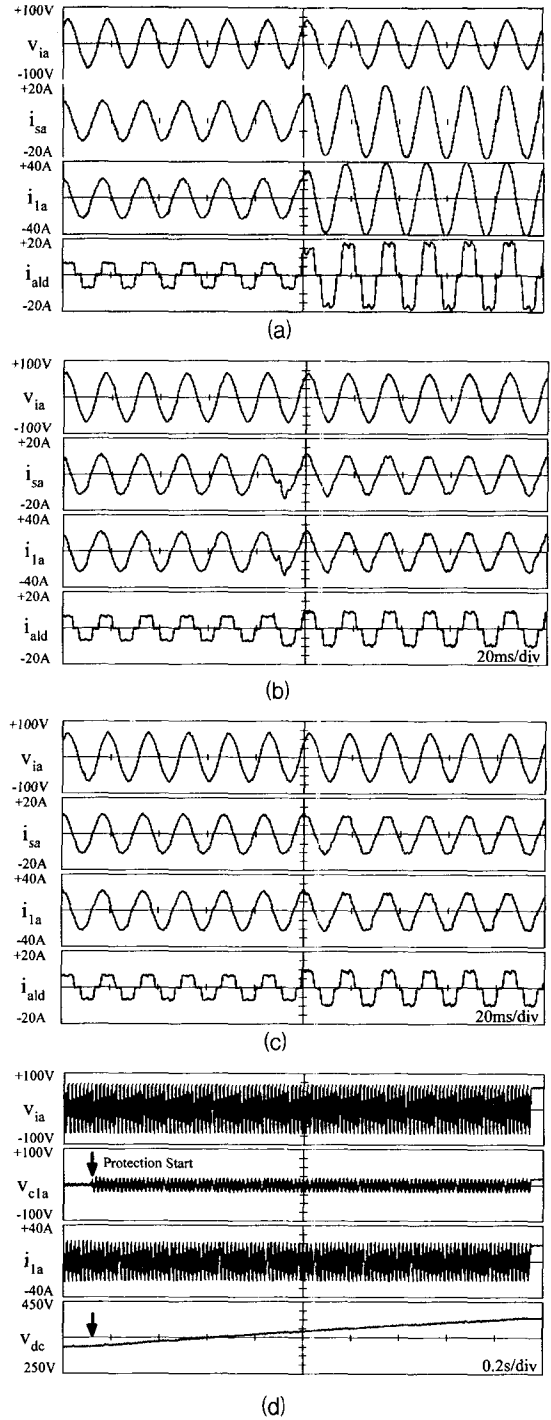


그림 11 부하 과전류 가정시의 실험 파형
Fig. 11 Experimental waveforms when over current were happened (V_{ia} : Input voltage, i_{sa} : Source current, i_{la} : Converter output current, V_{c1a} : Converter output voltage, i_{ald} : Load current, V_{dc} : dc-link voltage)
 (a) When the any protection scheme was not applied
 (b) When the protection scheme Method 1 was applied
 (c) When the protection scheme Method 2 was applied
 (d) Increase of the dc-link voltage because of the over current protection scheme

제안된 과전류 보호방법은 일반적인 직렬 능동 보상기와 비교하여 좀더 큰 정격의 직렬 능동 보상기를 필요로 함을 앞서 설명하였다. 그러나 최근 많은 논문들이 불평형 전원 보상 기능을 갖는 직렬 능동 보상기를 소개하고 있으며 이 경우 보상기를 구성하는 컨버터 용량의 증가는 불가피 하다. 이 경우 컨버터는 전원전류의 역상분을 공급해야 하므로 제안한 과전류 보호방법에서의 직렬 능동 보상기를 구성하는 컨버터의 정격은 더 이상 문제가 되지 않는다. 그림 12와 그림 13은 불평형 전원을 보상하기 위한 직렬 능동 보상기와 제안된 과전류 보호방법을 위한 직렬 능동 보상기는 컨버터 정격 측면에서 큰 차이가 없음을 보여준다. 그러나 직렬 능동 보상기를 구성하는 컨버터의 용량은 전원의 불평형 정도와 제한하는 과전류의 크기에 의존하여 결정될 것이다. 그림 12는 C상이 정격전압보다 30% 상승할 경우 입력전압(v_{ia} , v_{ib} , v_{ic}), 보상후의 평형전압(v_{fa} , v_{fb} , v_{fc}), 직렬 능동보상기의 컨버터 출력전압(v_{c1a} , v_{c1b} , v_{c1c})을 각각 나타낸다.

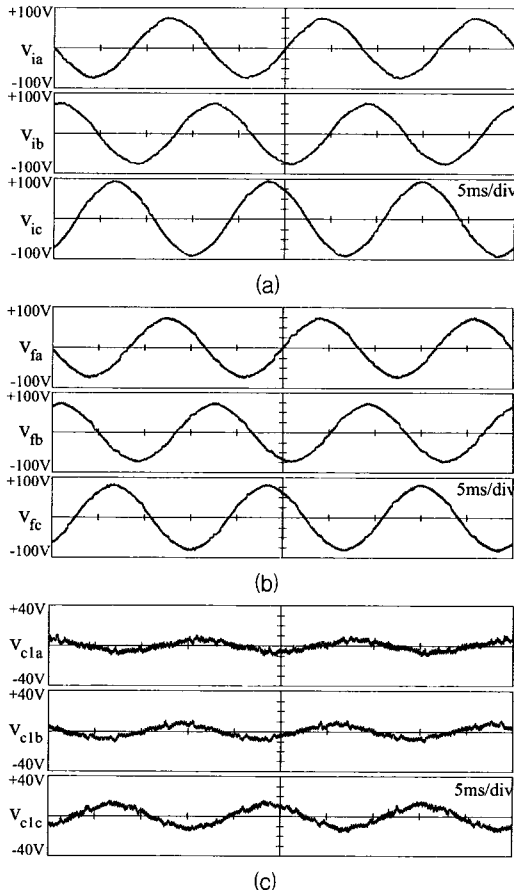


그림 12 하이브리드형 능동필터가 전원전압의 불평형을 보상하는 경우의 실험 파형

Fig. 12 Experimental waveforms in the case that Hybrid Active Power Filter compensates for the imbalance of source voltage (v_{ia} , v_{ib} , v_{ic} : Input voltage, v_{fa} , v_{fb} , v_{fc} : Point of common coupling voltage, v_{c1a} , v_{c1b} , v_{c1c} : Converter output voltage)

- (a) Unbalanced three-phase input voltage
- (b) Compensated three-phase PCC voltage
- (c) Converter output voltage in Hybrid Active Power Filter

그림 13 (a)는 불평형 입력전압을 보상하기 위한 컨버터의 출력 전압(v_{c1a})과 전류(i_{1a})를 그림 13 (b)는 과전류 보호방법을 구현하기 위한 컨버터의 출력 전압(v_{c1a})과 전류(i_{1a}) 파형이다. 그림 13 (a), (b)에서 컨버터 출력 전압(v_{c1a})과 전류(i_{1a})를 각각 비교해 보면 정격의 관점에서 두 경우는 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다.

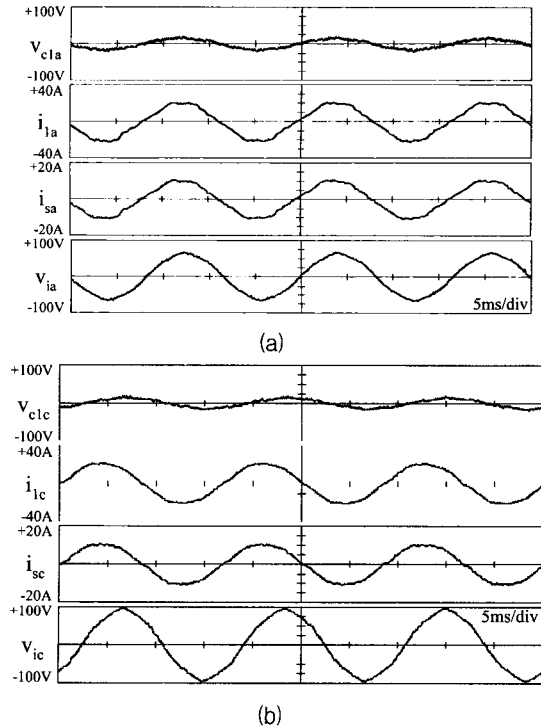


그림 13 한 상의 컨버터 출력 전압과 출력 전류의 비교
 Fig. 13 Experimental waveforms of converter output voltage and current for one phase. (v_{c1a} : Converter output voltage, i_{1a} : Converter output current, i_{sa} : Source current, v_{ia} : Input voltage)
 (a) When the over current protection scheme was applied (about 3 times),
 (b) When the imbalance of source voltage was compensated(30% imbalance)

그림 14와 그림 15는 시뮬레이션 결과로서 직렬 능동 보상기가 일반적인 하이브리드형 능동 전력필터로서 동작하다가 과전류 보호 동작모드로 전환하는 경우의 전원전류(i_s)와 직렬 보상기를 구성하는 컨버터의 출력전류(i_1)의 크기비교를 위한 파형이다. 그림 14의 (a), (b)는 과전류 보호동작의 경우 전원전류의 d축 성분과 q축 성분의 값들은 변화하지만 결국 이들의 합은 그림 14의 (c)에서 보여지는 것처럼 일정하며 이로서 전원전류 ($i_{s,cal}$)의 크기는 과전류 발생이후에도 효과적으로 제한되어지고 있음을 확인할 수 있다. 또한 컨버터 출력전류를 나타내는 그림 15의 경우 d축성분과 q축 성분은 각각 전원전류와 유사한 형태로 변동하지만 이들의 합($i_{1,cal}$)은 역시 정상상태와 비교하여 변화 없는 일정한 값을 갖게된다. 이는 직렬 능동 보상기를 구성하는 변압기가 변류기로 동작함에 기인한다.

그림 16은 제안된 과전류 보호동작 시 컨버터 출력전압을 분석한 파형으로 d축성분과 q축 성분으로 나누어 설명하였

다. 이 경우 d축 성분은 무효분 전압으로 과전류 보호동작의 경우에도 큰 변화가 없으며 q축 성분은 증가하여 실질적인 과전류 보호동작을 수행하고 있음을 알 수 있다. 이러한 컨버터 출력전압의 증가는 입력전압을 80V로 가정하여 3배의 과전류를 가정하는 경우 약 30V까지, 입력전압을 220V로 가정하여 3배의 과전류를 가정하는 경우 약 80V까지 증가함을 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었다. 그러나 dc-link 전압으로 300V~400V를 사용하는 하이브리드형 능동 전력필터는 스위칭 소자의 전압정격 면에서 소자 내압이 큰 소자를 별도로 필요로 하지 않는다. 이상의 그림 14~그림 16에서 과전류 보호동작을 수행하는 경우 컨버터 출력전압은 정상상태와 같은 값을 유지함을 확인하였고 컨버터 출력전압(V_{fc})은 기본 파에 대한 임피던스를 부여하기 위한 V_{fc_qe} 성분의 영향으로

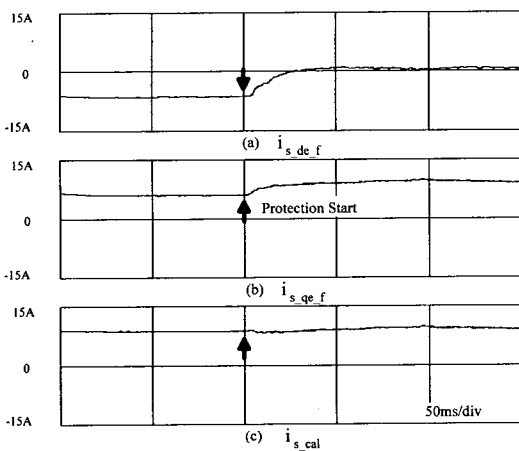


그림 14 과전류 보호동작 시 모선의 전원전류의 변화

Fig. 14 Variation of the source current because of the over current protection scheme

(a) d-axis component of i_s , (b) q-axis component of i_s
(c) Total source current (sum of d-axis and q-axis)

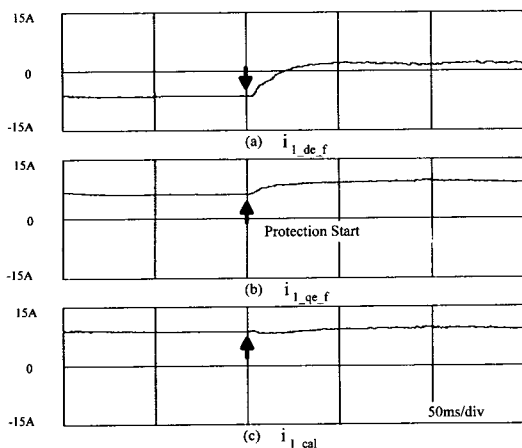


그림 15 과전류 보호동작 시 컨버터 출력전류의 변화

Fig. 15 Variation of the converter output current because of the over current protection scheme

(a) d-axis component of i_l , (b) q-axis component of i_s
(c) Total converter output current (sum of d-axis and q-axis)

증가하였지만 컨버터를 구성하는 스위칭 소자의 내압증가 없이 적용 가능함을 확인하였다. 이상의 시뮬레이션 결과로서 제안한 과전류 보호동작을 위한 직렬 보상기 설계시 요구되는 전류정격, 전압정격은 기존의 하이브리드형 능동 전력필터와 동등하게 설계됨을 알 수 있다.

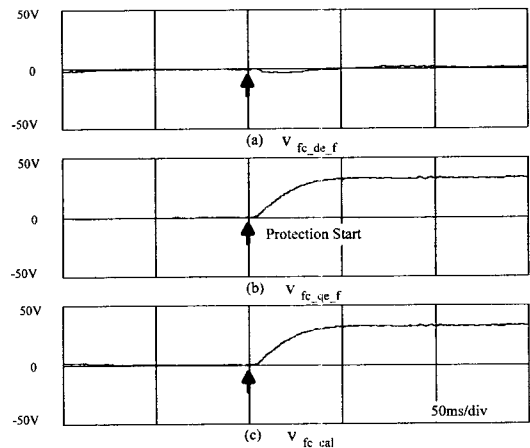


그림 16 과전류 보호동작 시 컨버터 출력 전압의 변화

Fig. 16 Variation of the converter output voltage because of the over current protection scheme

(a) d-axis component of V_{fc} , (b) q-axis component of V_{fc} and (c) Total converter output voltage (sum of d-axis and q-axis)

8. 결 론

본 논문에서는 직렬 능동 보상기의 과전류 보호방법에 관하여 새로운 방법을 제안하고 분석하였다. 이는 기존에 널리 이용되는 직렬 능동보상기를 포함한 전력품질 향상 기기들에 사용될 수 있다. 본 논문에서는 그 중 하이브리드형 능동 전력필터에 제안한 과전류 보호방법을 적용하였다. 먼저 일반적인 제어방법을 분석 정리하였으며 또한 제안된 과전류 보호방법을 이들 기기에 적용할 경우 각각의 동작특성을 등가 회로와 수식을 통해 정리하고 설명하였다. 또한 제안한 과전류 보호방법을 사용할 경우에 발생하는 dc-link의 과충전 현상에 대하여 전력흐름도를 통해 설명하였다.

제안한 과전류 보호방법은 순시 과전류 시 기존의 설비에 부가적인 하드웨어를 필요로 하지 않고 과전류 보호동작을 수행할 수 있다는 장점을 갖으며 또한 기존방법과 비교하여 직렬 능동보상기의 순시적인 보상특성을 유지하면서 과도상태 없이 과전류 보호동작을 수행할 수 있는 장점을 갖고있다.

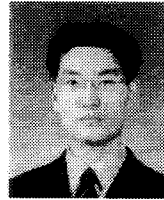
본 논문에서 제안한 직렬 능동 보상기의 새로운 과전류 보호방법의 기술적 타당성은 IGBT소자를 사용한 10KVA 정격의 하이브리드형 능동 전력필터에서 수행한 실험결과로서 검증하였으며 또한 직렬 능동 보상기를 구성하는 컨버터 용량에 관련한 문제도 시뮬레이션과 실험을 통해 여러 측면에서 연구되었다.

향후 입력전압을 80V에서 220V로 승압하여 실험이 이루어질 것이며 더욱더 가혹한 과전류 조건에서의 연구가 계속 수행될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] B. Singh, K. Al-Haddad, A Review of Active Filters for Power Quality Improvement, IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, Oct. 1999.
- [2] Luis A. Moran, I. Pastorini, and Juan Dixon, A Fault Protection Scheme for Series Active Power Filters, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 14, no. 5, pp. 928-938, Sep. 1998.
- [3] H. Akagi, New Trends in Active Filters for Power Conditioning, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 32, no. 6 pp. 1312-1322, Nov./Dec. 1996.
- [4] L. Moran, I. Pastorini, and R. Wallace, Series active power filter compensates current harmonics and voltage unbalance simultaneously, IEE Proc.-Gener. Trans. Distrib., vol. 147, no. 1, Jan. 2000.
- [5] F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, Compensation Characteristics of the Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 29, no. 1 pp. 144-152, Jan./Feb. 1993.
- [6] F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, A New Approach to Harmonic Compensation in Power systems A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filter, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 26, no. 6, pp. 983-990, Nov./Dec. 1990.
- [7] H. Fujita and H. Akagi, A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power System-Series Connection of Passive and Active Filters, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 27, no. 6, pp. 1020-1025, Nov. /Dec. 1991.
- [8] F. Z. Peng, Application Issues of Active Power Filters, IEEE Industrial Applications Magazine, pp. 21-30, Sep./Oct. 1998.
- [9] Da Silva, S.A.O.; Ponoso-Garcia, P.F.;Cortizo, P.C.; Seixas, P.F. A Comparative Analysis of Control Algorithms for Three-Phase Line-Interactive UPS Systems with Series-Parallel Active Power Conditioning Using SRF Method, in Proc. IEEE/PESC, vol. 2, pp. 1023-1028, 2000.
- [10] Arindam Ghosh, Gerard Ledwich, Structures and Control of Dynamic Voltage Regulator(DVR), Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 3, pp. 1027-1032, 2001.

저 자 소 개



제 범 석 (蔡梵碩)

1974년 6월 5일생. 2000년 단국대학교 전기공학과 졸업(학사). 2002년 한양대학교 졸업(석사). 2002년~현재 삼성SDI PDP본부 개발센터 근무
 Tel : (041) 560-3396,
 Fax: (041) 560-3398,
 E-mail : chaeb@samsung.ac.kr



이 우 철 (李雨哲)

1964년 3월 24일생. 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 1989년 동 대학원 졸업(석사). 2001년 동대학원 졸업(공학박). 1988년~1998년 효성중공업(주) 기술연구소 근무. 2002년~현재 한경대학교 전기공학과 전임강사
 Tel : (031) 670-5323,
 Fax : (031) 670-5015
 E-mail : woocheol@hnu.hankyong.ac.kr



이 택 기 (李宅基)

1963년 9월 4일생. 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 1989년 동 대학원 졸업(석사). 1993년 동 대학원 졸업(공학박). 1994년~1996년 서남대학교 전기공학과 전임 강사. 1996년~현재 한경대학교 전기공학과 부교수
 Tel : (031) 670-5292,
 Fax : (031) 670-5015
 E-mail : tklee@hnu.hankyong.ac.kr



현 동 석 (玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1978년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 민헨공과대학 교환교수. 현재 한양대 공대 전자전기컴퓨터공학부 교수
 Tel : (02) 2290-0345, Fax : (02) 2290-0532
 E-mail : dshyun@hanyang.ac.kr