

통합 전력품질 제어기의 과전류 보호방법에 관한 연구

(A Study on Over Current Protection Method of Unified Power Quality Conditioners)

이우철* · 김한정

(Woo - Cheol Lee · Han - Jung Kim)

요 약

본 논문에서는 직렬형, 병렬형 능동전력필터로 구성되어 있는 통합전력품질 제어기(UPQC)의 과전류에 대한 보호기법이 제시되며, 해석된다. 제안된 과전류 보호기법은 직렬형 능동전력필터에 과전류의 기본파 성분과 성분에 대해서 고 임피던스를 갖는 기능을 부여함으로써 구현하였으며, 세 가지 방법을 제시하였다. 첫 번째 방법은 p-q이론을 이용하여 기본파 전원전류를 검출하여 보호하는 방법, 두 번째 방법은 동기 좌표계에서 부하전류의 기본파 성분을 검출하여 보호하는 방법, 세 번째 방법은 입력전압을 검출하여 보호하는 방법이다.

전원계통에서 과전류가 흘렀을 경우 제안된 방법들은 UPQC에 부가적인 회로 없이 보호해 줄 수 있다. 제안된 방법의 타당성은 시뮬레이션 결과를 통하여 입증된다.

Abstract

A protection scheme for Unified Power Quality Conditioner (UPQC) is presented and analyzed in this paper. The proposed UPQC has the series active power filter operated as a high impedance $k(\Omega)$ to the fundamentals when the over current occurs in the power distribution system, and three control strategies are proposed in this paper. The first is the method by detecting the fundamental source current through the p-q theory,[1] the second is the method by detecting the fundamental component of load current in Synchronous Reference Frame(SRF) and the third is the method by detecting the input voltage. When the over current occurs in the power distribution system, the proposed scheme protects the UPQC without additional protection circuits. The validity of proposed protection scheme is investigated through simulation results.

Key Words : UPQC(Unified Power Quality Conditioner), p-q theory, SRF(Synchronous Reference Frame)

1. 서 론

기존의 일반적인 통합 전력품질 제어기(Unified Power Quality Conditioners)는 입력전압의 플리커/불평형 보상, 무효전력 보상, 역상분 전류 보상, 고조파 저감, dc-link 전압제어등의 기능을 수행할 수 있

* 주저자 : 한경대학교 전기공학과 전임강사
Tel : 031-670-5323, Fax : 031-670-5015
E-mail : woocheol@hnu.hankyong.ac.kr
접수일자 : 2002년 4월 26일
1차심사 : 2002년 4월 30일, 2차심사 : 2002년 6월 17일
심사완료 : 2002년 7월 22일

대[2]. 그 결과 통합 전력품질 제어기는 대용량의 부하로 인한 문제점들과 전력품질에 민감한 부하의 문제들을 해결할 수 있는 효과적인 방안의 하나로 주목 받고 있다. 그러나 통합 전력품질 제어기는 과전류로부터 특별한 보호방법을 필요로 한다. 이는 직렬보상기의 변압기 1차측이 전원라인과 직렬로 연결되어 Current Transformer로서 동작하기 때문에 2차측의 개방운전이 불가능함에 기인한다. 이 때문에 배전 시스템 내에서 단락이 발생하여 모선에 과전류가 유입될 경우 직렬보상기의 인버터를 변압기의 2차측에서 분리시키는 것이 불가능하다[3]. 그러므로 일반적인 차단기나 전력용 휴즈를 이용하여 인버터를 보호하는 것이 불가능하고 모선의 사고가 제거되거나 인버터가 절연될 때까지 2차측의 전류와 전압의 크기를 제한하는 새로운 보호 방법을 필요로 한다.

본 논문에서는 이러한 통합 전력품질 제어기의 새로운 과전류 보호방법 세 가지를 제안하였다. 이는 직렬 보상기를 전원전류의 기본과 성분에 대해 큰 임피던스를 갖도록 제어하는 방법, 부하전류의 기본과 성분에 대해 큰 임피던스를 갖도록 제어하는 방법, 그리고 전원전압의 역 전압을 직렬능동필터의 출력으로 갖도록 제어하는 방법으로 이루어지며 이는 기존의 통합 전력품질 제어기의 보호방법과 비교하여 기타 부가회로를 필요로 하지 않으며 실제 회로를 구성하기 쉽다는 장점을 갖는다.

2. 일반적인 통합 전력품질 제어기

그림 1은 직렬 보상기와 병렬 보상기를 갖는 일반적인 통합 전력품질 제어기의 구성을 보여준다[4].

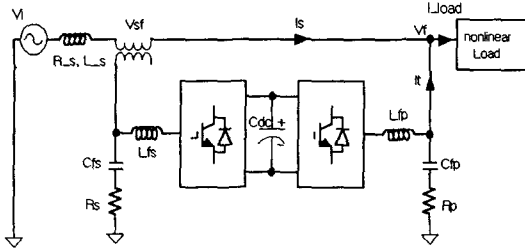
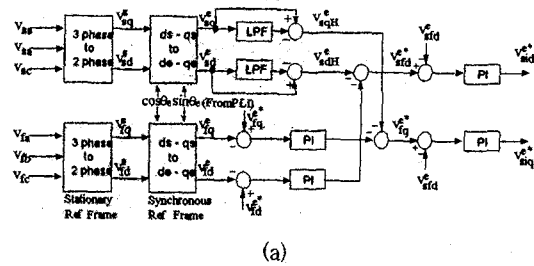


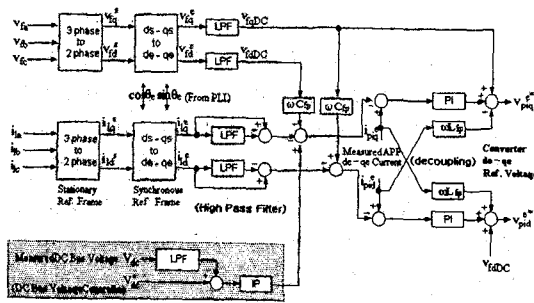
그림 1. 통합 전력품질 제어기의 구성도
Fig. 1. The Configuration of Conventional UPQC

조명 · 전기설비학의논문지 제16권 제5호, 2002년 9월

직렬 보상기는 PCC(Point of Common Coupling) 지점의 일정전압유지기능과 함께 전압 플리커/불평형 보상의 기능, 전원 고조파성분 보상 기능을 수행하며 하이브리드형 능동필터에서의 경우와 같이 전원단과 부하단의 고조파 절연의 기능을 수행할 수 있다. 또한 병렬보상기는 부하전류 고조파 보상, 부하측의 무효전력, 역상분 전류 보상, dc-link 전압제어 기능을 수행하며 그림 2는 일반적인 통합 전력품질 제어기의 제어블럭도를 보여준다. 그림 2(a)는 직렬 보상기의 제어블럭 구성도로 삼상 입력전압(V_{sa}, V_{sb}, V_{sc})은 동기좌표계로 변환하였으며, 기본 주파수 ω 에 대해서 기본과 전압은 DC 값으로 변환되며, 모든 고조파 전압 성분은 DC가 아닌 성분으로 변환된다. 따라서 고역통과필터를 사용하여 고조파 성분을 검출하여 보상을 해주며, 출력 전압 일정제어



(a)



(b)

그림 2. 직렬 보상기의 제어블럭 구성도

(a) 직렬보상기 (b) 병렬 보상기

(V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : 전원전압, V_{fa}, V_{fb}, V_{fc} : PCC 전압, i_{la}, i_{lb}, i_{lc} : 부하전류)

Fig. 2. Block diagram of the conventional UPQC
(a) series compensator
(b) parallel compensator

통합 전력품질 제어기의 과전류 보호방법에 관한 연구

를 위하여 PCC전압(V_{fa} , V_{fb} , V_{fc})값이 역시 동기좌표계에서 검출되어 보상된다. 그림 2(b)는 병렬보상기의 제어 블록도로 부하전류의 고조파 성분을 보상하기 위하여 부하전류(i_{la} , i_{lb} , i_{lc})값은 동기좌표계에서 고역통과필터를 사용하여 검출 보상된다. PCC 전압(V_{fa} , V_{fb} , V_{fc})은 비간섭 제어를 위하여 사용된다.

3. 종래 보상기의 과전류 보호방법

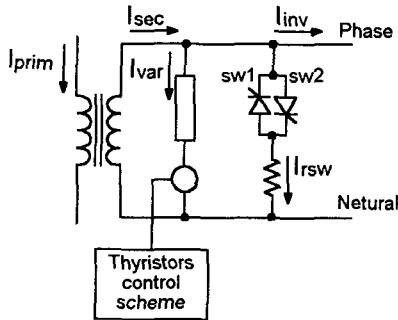


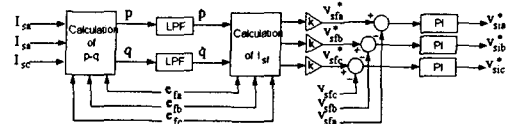
그림 3. 종래 보상기의 과전류 보호방법
Fig. 3. Conventional protection scheme

기존의 능동보상기의 과전류 보호방법은 그림 3에서 보는 것과 같다. 전원측에 과전류가 흘렀을 경우는 직렬형 보상기의 직렬 변압기의 1차측(I_{prim})을 통해서 그리고 변압기의 2차측(I_{sec})으로 흐르게 된다. 이 경우 과전류 검출 회로를 통해 전류는 흐르고 (I_{var}) 일정전류 이상일 경우 역병렬 사이리스터($sw1$, $sw2$)를 Turn-on 시켜 저항으로 방전하게끔 새로운 통로를 만들어 직렬 능동보상기의 인버터와 변압기 2차측을 절연시키는 방법을 사용한다[5]. 이는 과전류로부터 직렬 능동 보상기를 완벽하게 절연시킬 수 있지만 과전류 보호 동작시 직렬 능동 보상기의 출력을 모선에 전달할 수 없으며 추가적인 보호회로를 설치하여야 하는 단점을 갖는다

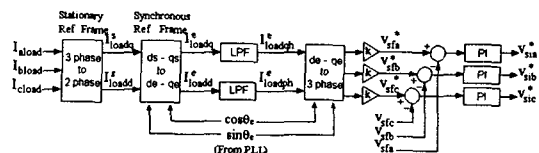
4. 제안된 새로운 보호방법

본 논문에서 제안된 통합 전력품질 제어기의 과전류 보호방법은 직렬능동필터와 병렬수동필터의 결합 형태인 하이브리드 능동필터에서의 직렬 능동필터 동작과 유사한 방법을 통해 구현된다.

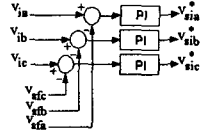
하이브리드형 능동필터의 경우 직렬능동필터가 기본과 전류에 대하여 영의 임피던스를 갖고 고조파 전류에 대해서는 $k(\Omega)$ 의 임피던스를 갖도록 제어하여 부하 고조파 전류를 보상한다[6]. 그러나 배전 계통의 사고에 의해 통합 전력품질 제어기의 보호가 필요한 경우 직렬보상기를 기본과 전류에 대하여 $k(\Omega)$ 의 임피던스를 갖도록 제어하며 이때 병렬보상기는 dc-link 전압제어 기능을 제외한 부하 고조파 전류 보상 기능을 정상적으로 수행할 수 있다. 그림 4는 제안된 통합전력품질제어기의 과전류 보호방법을 위한 제어 블록도로 직렬보상기의 지령치를 출력으로 갖고 이 3가지 방법으로 설명 될 수 있다. 방법 I은 p-q 이론을 이용해 전원전류의 기본과 성분을 검출하여 과부하시 기본과 전류성분에 대해 저항 단위를 갖는 이득 k 를 곱하여 전압 지령치(V_{sfa}^* , V_{sfb}^* , V_{sfc}^*)를 만들어 검출된 전압(V_{sfa} , V_{sfb} , V_{sfc})과 PI 제어를 통해 지령치를 생성하여 과부하 전류가 전원측으로 흐르지 못하도록 보호기능을 수행한다. 방법 II는 동기 좌표계에서 부하전류의 기본과 검출을 위하여 저역통과필터를 이용하여 보호하는 방법이며, 기본과 전류 성분에 대해 고 임피던스를 갖게끔 제어한다는 관점에서는 방법 I과 동일하다. 방법 III은 입력전압을 검출하여 과부하 전류에 비례한 입력전압의 역전압을 출력함으로써 부하에 인가되는 전압 값을 줄여 보호하는 방법이다.



(a) Method 1 : Detecting fundamental component of source current by applying the p-q theory
(e_{fa} , e_{fb} , e_{fc} : fundamentals of v_{fa} , v_{fb} , v_{fc})



(b) Method 2 : Filtering a fundamental component of load current in Synchronous Reference Frame



(c) Method 3 : Sensing of input voltage

그림 4. 제안된 보호방법에서 지령치 산정 기법
Fig. 4. The methods of producing reference value in proposed protection scheme

4.1 Method 1 특성분석

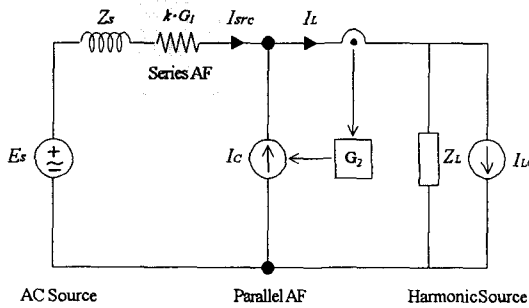


그림 5. 전원전류의 기본파 성분을 이용한 과전류 보호방법
Fig. 5. The propose protection scheme using the source current fundamental

(ZS : the source impedance,
ILO: the equivalent harmonic current source
ZL : the equivalent impedance on the load side)

G1은 통합 전력품질 제어기를 구성하는 직렬보상기의 등가 전달함수로서 고조파 성분과 기본파 성분의 검출회로를 포함한다. G1은 고조파 성분의 제거 기능을 수행한다. 즉 기본파 성분에 대하여 |G1|f=1, 고조파 성분에 대하여 |G1|h=0의 값을 갖는다. G2는 병렬보상기의 등가 전달함수로서 기본파 성분에 대하여 0에 가까운 값을 갖고 고조파 성분에 대하여 1에 근접한 값을 갖는다. 즉 |G2|f=0, |G2|h=1 이다[7]. 여기서 k는 Ω단위를 갖는 이득 값이다.

그림 5로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$I_c = G1 I_L \tag{1}$$

$$I_s = \frac{Z_L}{Z_s + G_1 \cdot k + \frac{Z_L}{1-G_2}} I_{LO} + \frac{V_s}{Z_s + G_1 \cdot k + \frac{Z_L}{1-G_2}} \tag{2}$$

전원전압 Vs가 정현적 이라고 가정하면

$$\frac{I_s}{I_{LO}} = \frac{Z_L}{Z_s + G_1 \cdot k + \frac{Z_L}{1-G_2}} \tag{3}$$

고조파 성분에 대한 전달함수를 구하면

$$\frac{I_{sh}}{I_{LOh}} = \frac{Z_L}{Z_s + \frac{Z_L}{1-G_2}} \cong 0 \tag{4}$$

식 (4)는 전원전류는 부하 고조파 전류에 영향을 받지 않음을 증명한다.

기본파 성분에 대한 전달함수를 구하면

$$I_{sf} = \frac{Z_L}{Z_s + G_1 \cdot k + Z_L} I_{LOf} + \frac{V_{sf}}{Z_s + G_1 \cdot k + Z_L} \tag{5}$$

k값이 무한하다고 가정하면

$$I_{sf} = 0 \tag{6}$$

식 (6)은 제어이득 k값을 이용하여 전원전류의 기본파 성분이 제한되어질 수 있음을 보여준다.

4.2 Method 2 특성분석

Method 1에서와 같은 방법으로 그림 6으로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

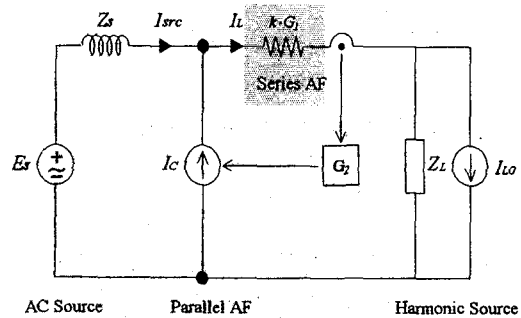


그림 6. 부하전류의 기본파 성분을 이용한 과전류 보호방법
Fig. 6. The propose protection scheme using the load current fundamental

$$I_s = \frac{Z_L}{Z_s + \frac{G_1 \cdot k + Z_L}{1 - G_2}} I_{LO} + \frac{V_s}{Z_s + \frac{G_1 \cdot k + Z_L}{1 - G_2}} \quad (7)$$

전원전압 V_s 가 정현적 이라고 가정하면

$$\frac{I_s}{I_{LO}} = \frac{Z_L}{Z_s + \frac{G_1 \cdot k + Z_L}{1 - G_2}} \quad (8)$$

식(7)과 식(8)을 3.1절에서와 동일한 방법으로 정리 하면 결과는 식(6), 식(4)와 각각 일치하므로 Method 1과 Method 2가 동일한 특성을 갖음을 알 수 있다.

일반적인 통합 전력품질 제어기에서 부하 전류의 검출은 병렬 보상기에 의한 부하 고조파 전류를 보상을 위해 반드시 필요하다. 그러므로 앞서 설명한 두 가지 방법 중 과전류 보호의 실제 구현 시 Method 2가 Method 1 보다 더 효율적이다.

4.3 Method 3 특성분석

Method 3 에서 직렬보상기는 입력전압의 역 전압을 출력으로 갖음으로서 앞서 설명한 두 가지 방법과 동일한 결과의 과 전류 보호동작을 수행할 수 있다.

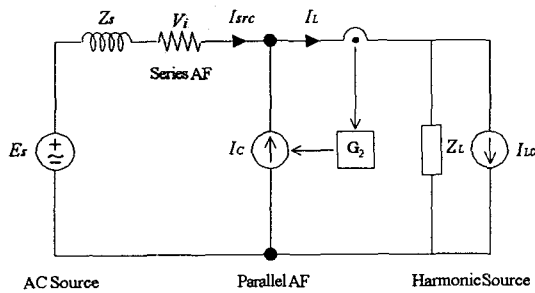


그림 7. 입력전압을 이용한 과전류 보호방법
Fig. 7. The propose protection scheme using input voltage

5. 제안된 보호방법을 하이브리드 능동필터에 적용하는 경우

제안한 과전류 보호 방법은 하이브리드형 능동필터에도 적용이 가능하다. 그러나 앞서 설명한 방법들은 과전류 보호 동작시 직렬능동필터의 고조파에 대

한 임피던스를 고려하지 않았기 때문에 수동필터만을 사용할 경우에 야기될 수 있는 전원단과 수동필터단의 병렬 공진의 위험성을 갖는다.

그림 8은 직렬 능동필터의 고조파에 대한 임피던스가 0일 경우($k=0$), 2일 경우($k=2$)를 각각 나타낸다. 즉 $k=0$ 의 경우엔 병렬 공진이 발생하지만 $k=2$ 의 경우 병렬 공진이 발생하지 않음을 볼 수 있다. 그러므로 하이브리드형 능동필터에 제안한 과전류 보호방법을 적용할 경우 직렬보상기를 제어함에 있어 기본파에 대한 임피던스와 함께 고조파에 대한 임피던스도 함께 고려 되어야 한다.

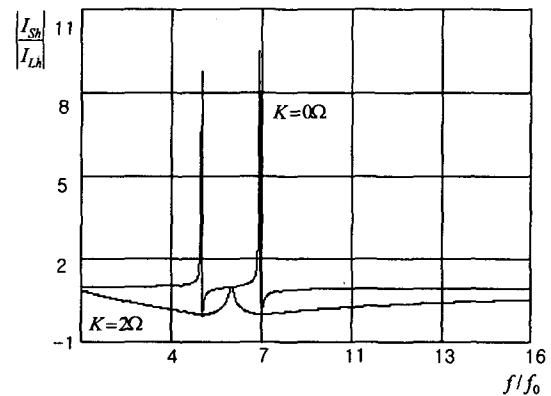


그림 8. 일반적인 하이브리드형 능동필터의 부하 고조파 전류의 필터특성
Fig. 8. Filter characteristic for load harmonic current in conventional Hybrid Active Filter

6. 시뮬레이션 결과

표 1. 시스템 파라미터
Table 1. System parameters

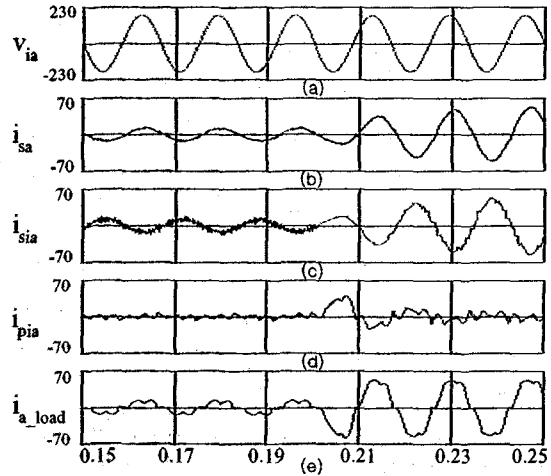
Parameters	Value
Input voltage (V_{ia}, V_{ib}, V_{ic})	220V, 60Hz
Line impedance (R_{-s}, L_{-s})	$0.2\Omega, 25\mu H$
C_{fs}	$280\mu F$
L_{fs}	$0.5mH$
R_s	0.5Ω
C_{fb}	$17\mu F$
L_{fb}	$1.5mH$
R_b	1Ω
DC capacitor (C_{dc})	$15,000\mu F$
DC voltage (V_{dc})	400V
$k(\Omega)$	5

표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값이다. 그림 9~12은 그림 1의 통합 전력품질 제어기를 모델링하여 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)로 시뮬레이션 결과이다. 그림 9는 어떤 과전류 보호기법도 적용하지 않은 경우의 전압, 전류 파형이고, 그림 10~12는 각각 Method 1, Method 2, Method 3을 적용한 경우의 전압, 전류 파형이다. 본 시뮬레이션에서는 사고 시(0.2 초) 정상상태 보다 4배의 과전류가 흐르는 것으로 가정하였다. 이때 모선에 과전류가 흐르게 되면 그림 9에서 보여지는 것처럼 직렬보상기를 구성하는 변압기 2차측 즉 직렬보상기의 인버터 측에도 과전류가 유입된다. 이 경우 제안한 Method 1, Method 2 Method 3를 적용하면 직렬보상기의 인버터측에 유입되는 전류가 크게 감소함을 그림 10, 11, 12의 (c)에서 확인할 수 있다. Method 1, Method 2가 사용된 경우의 실험 파형인 그림 10, 11은 각각 전원전류, 부하전류를 검출하여 과전류시 기본파 전류에 대해서 고 임피던스를 갖게끔 제어 해준다는 기본 원리는 동일하다. 따라서 결과 파형이 유사하게 나올 수 있다.

제안된 과전류 보호 방법 3가지가 적용시 부하 과전류는 직렬형 보상기가 흡수해 DC-link를 충전하게 되며 충전된 DC-link는 병렬형 보상기를 통하여 방전하게 된다. 따라서 부하전류가 4배 정도 증가하여도 실제 부하 전류 파형에는 안 나타나게 됨을 알 수 있다.

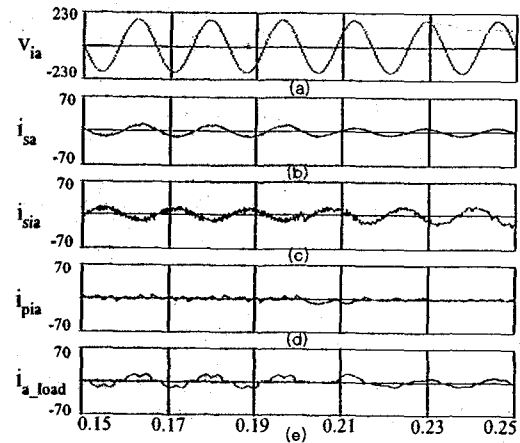
제안된 세가지 방법의 특징은 다음과 같다. Method 1은 기존의 하이브리드 능동전력필터의 제어기법을 응용하여 과전류시는 기존의 제어방법인 고조파에 대한 임피던스뿐만 아니라 기본파 전류에 대한 임피던스도 키워 과전류에 대해 직렬형 보상기를 보호하는 방법으로 기존 하이브리드 능동필터에 곧바로 적용할 수 있는 장점이 있고, 방법 2는 부하전류를 검출하여 보호해 주는 방법으로 통합전력 보상기에서는 부하전류의 검출은 병렬 보상기에 의해 부하 고조파 전류를 보상하기 위해 반드시 필요하여 방법 2는 통합전력 품질제어기에 적용하기에 방법 1 보다 더 효율적이다. 방법 3은 과전류 시 전원 전압을 검출하여 전원전압의 위상과 반전된 전압을 직렬형에 인가함으로써 제어해주는 방법으로 시뮬레이션 결과 그림

12에서 알 수 있듯이 부하를 곧바로 차단하는 장점은 있으나 부하에 지속적인 전류를 공급할 수 없는 단점이 있다.



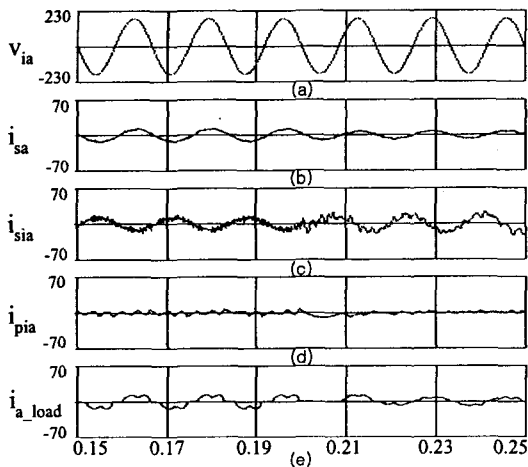
(a) 전원전압, (b) 전원전류 (c) 직렬보상기 전류 (d) 병렬보상기 전류, (e) 부하전류

그림 9. 보호기법을 적용하지 않았을 경우의 파형
Fig. 9. Simulation waveforms without any protection scheme



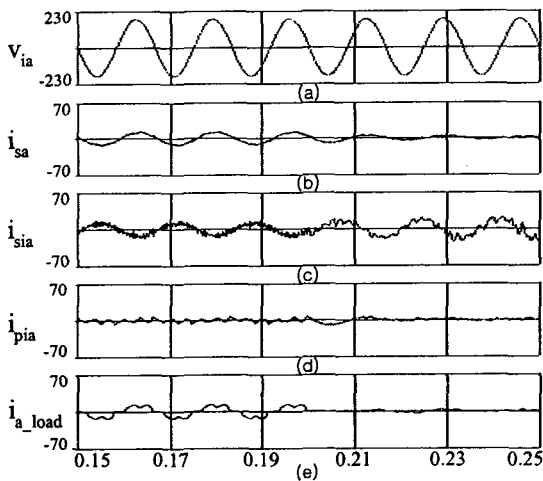
(a) 전원전압, (b) 전원전류, (c) 직렬보상기 전류 (d) 병렬보상기 전류, (e) 부하전류

그림 10. Method 1을 사용한 경우의 파형
Fig. 10. Simulation waveforms in method 1



(a) 전원전압, (b) 전원전류, (c) 직렬보상기 전류, (d) 병렬보상기 전류, (e) 부하전류

그림 11. Method 2를 사용한 경우의 시뮬레이션 파형
Fig. 11. Simulation waveforms in method 2



(a) 전원전압, (b) 전원전류, (c) 직렬보상기 전류, (d) 병렬보상기 전류, (e) 부하전류

그림 12. Method 3을 사용한 경우의 시뮬레이션 파형
Fig. 12. Simulation waveforms in method 3

7. 결론

본 논문에서는 통합 전력품질 제어기의 새로운 과전류 보호방법을 제안하고 분석하였다. 제안된 과전류 보호방법은 배전 계통에 사고가 발생하였을 경우

직렬보상기를 부하전류 또는 전원전류의 기본파에 대하여 $k(\Omega)$ 의 임피던스 값도록 제어하거나 직렬보상기의 출력으로 전원전압의 역 전압을 갖도록 제어함으로써 수행하였다. 그 결과 직렬보상기를 과전류로부터 보호할 수 있으며 제안된 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증되었다. 추후 제안한 새로운 과전류 보호방법은 IGBT소자를 사용한 10[kVA] UPQC를 사용하여 실험적으로 입증할 예정이다.

References

- [1] 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, 1991, December.
- [2] H. Fujita and H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series- and Shunt-Active Filters", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 13, no. 2, pp. 315-322, 1998, March.
- [3] 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, 1998, September.
- [4] H. Akagi, "New Trends in Active Filters for Power Conditioning", IEEE Trans. on Industry Applications, vol.32, no.6 pp. 1312-1322, 1996, November/December.
- [5] 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.
- [6] 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, 1993, January/February.
- [7] F. Z. Peng, "Application Issues of Active Power Filters", IEEE Industrial Applications Magazine, pp. 21-30, 1998, September/October.

◇ 저자소개 ◇

이 우 철 (李雨哲)

1964년 3월 24일생, 1987년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1989년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업, 1988년-1998년 효성중공업 기술연구소 책임연구원, 1995년-2001년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 한경대학교 전기공학과 전임강사.

김 한 정 (金漢正)

1957년 1월 22일생, 1980년 서울대학교 사범대학 물리교육학과 졸업, 1989년 Auburn University, AL, USA, 물리, 1994년 Auburn University, AL, USA, 물리(박사), 현재 한경대학교 제어계측공학과 조교수.