

비상용발전기의 상불평형 및 역률보상기 시뮬레이션

신병철* · 송의호* · 정창용** · 강유리** · 조정규** · 임근희**
 *창원대학교 제어계측공학과, **한국전기연구소

Simulation of Phase Unbalance and Power Factor Correction System

B. C. Shin* · E. H. Song* · C. Y. Jeong** · Y. Kan** · J. G. Cho** · G. H. Rim**
 *Changwon National University, **KERI

Abstract - Three-phase system has many problems because of the unbalance load. So we propose two control algorithms using active power filter to dissolve these problems. One is three-leg inverter topology in which ac neutral line is connected directly to the midpoint of two series dc capacitors. The other is four-leg inverter topology in which ac neutral line is provided through a fourth leg. The three-phase unbalance is considered by connecting the load to one-phase. It is show that the proposed control algorithms give good performances.

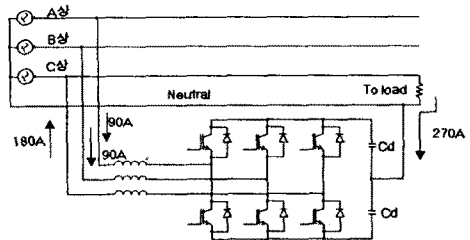
1. 서론

일반적으로 산업계에서 많이 사용하고 있는 3상 시스템들은 불평형 부하가 인가되면 많은 문제점들을 야기시킨다. 이와 같은 불평형 상태를 해결하기 위해 M. Aredes는 3상 4선 능동필터를 이용했다[1]. 또한 관련 연구에서 four-leg 형태의 인버터가 3상 4선 능동 필터를 충족시키는 최고의 접근 방식이며, 순시 전력이론(p-q 이론)을 이에 적용했다. 전원에 불평형 부하가 인가되면 부하에 흐르는 전류 성분은 왜곡된 전류 성분과 기본파 성분으로 구성된다[2, 3]. 전압원 인버터 방식의 능동 필터는 이때 발생하는 왜곡된 전류 성분을 콘덴서의 충전전을 이용하여 보상한다. 이와 같은 보상 기능은 전원 측 전류의 역률을 개선시킨다.

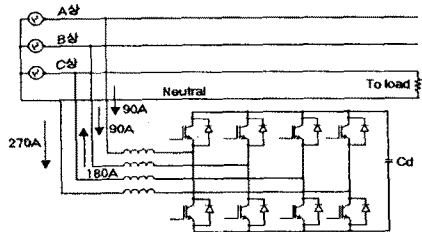
본 논문에서는 3상 시스템 중 비상용 발전기를 대상으로 불평형 부하를 고려하였다. 비상용 발전기에 불평형 부하가 인가되면 순간 불평형이 발생하게 되는데, 이로 인해 발전기에 불평형 전류가 발생하여 과열, 기계적인 진동, 소음 등이 발생한다. 여기서는 3상 비상용 발전기에 불평형 부하가 인가되었을 때, 이를 효과적으로 보상하는, 능동 필터를 이용한 두 종류의 역률보상기를 제안하고 있다. 그리고, 이에 관한 PID 제어기 구성 및 시뮬레이션 결과들을 보여준다.

2. 감전 회로 및 제어기 구성

본 논문에서 3상 4선식 불평형 부하에 대한 전원의 역률 개선을 위해 두 가지 형태의 역률보상기가 그림 1과 같이 제안된다. 전압원 인버터의 원리를 이용한 Type A에서는 3상 three-leg 형태의 인버터에서 두 개의 직렬 콘덴서를 사용하여 전압원을 형성하였고, 두 콘덴서 사이와 중성선을 연결하였다. Type B에서는 3상 four-leg 형태의 인버터로 네 번째 leg와 중성선을 연결하였다. Type A의 기본 구성은 그림 1(a)와 같으며, 부하 측에서 상 불평형이 발생할 때 역률보상기를 사용하



(a) Type A



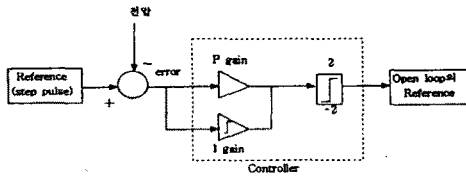
(b) Type B

그림 1 감전 회로 구성도

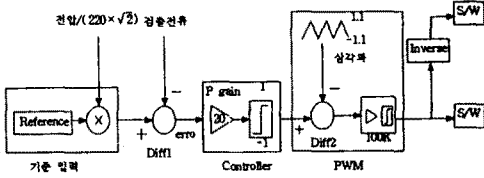
표 1 역률보상기의 기본 사양

입력전압	380Vrms
입력전류	a,b상 : 90Arms c상 : 180Arms neutral : 270Arms
DC-Link 전압	800Vdc
DC-Link Cap.	8,200 μ F/450V
Switching freq.	10kHz
Over load	150%(5sec)
IGBT	1200V/300A

여 이러한 불평형을 바로 잡아주도록 하는 회로이다. 그림 1에서는 극단적인 불평형의 한 예로, 부하가 한 개의 상에만 존재하고, 나머지 두 개의 상은 floating 상태인 경우이다. 이러한 불평형 부하에 전원을 공급하는 발전기는 효율이 떨어지고, 소음 및 진동을 발생시킨다. 이와 같은 상황에서 역률보상기는 발전기 측, 즉 전원 측에서 불 때 불평형 부하와 역률보상기의 합이 평형 3상 부하가 되도록 한다. 그림 1(a)의 정상 상태에서는 전원 측에서 각 상당 90A의 전류가 흐르게 되며, 부하 측



(a) 외부 전압 제어기



(b) 내부 전류 제어기

그림 2 제어기 구성도

표 2 불평형 부하의 종류 및 크기

전류제어기	불평형 저항 부하	$R_{load} = 0.81\Omega$
	불평형 저항 및 인덕턴스 부하	$R_{load} = 0.58\Omega$ $L_{load} = 1.5mH$
	정전류 출력 3상 정류기 부하	$I_{load} = 110A$
전압제어기	불평형 저항 부하	$R_{load} = 0.81\Omega$

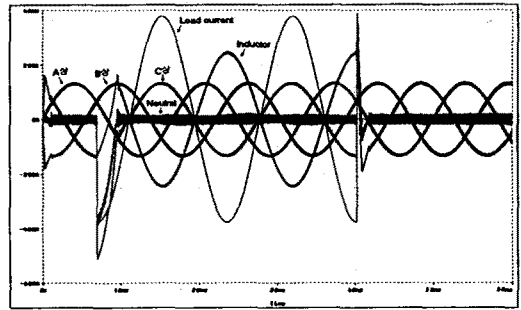
에는 270A의 전류가 두 개의 폰덴서 사이로 흐르게 된다. 역률 보상은 무효 전력을 공급하게 되며, 전원의 중성선으로는 전류가 흐르지 않게 된다. Type B는 Type A에 비해 전력용 반도체가 더 많이 소요되나 시스템의 제어성은 우수한 것으로 알려져 있다[4, 5]. 그림 1(b)의 정상 상태에서는 전원 측에서 각 상당 90A의 전류가 흐르게 되며, 부하 측에는 270A의 전류가 네 번째 leg로 흐르게 된다. 전원의 중성선으로는 Type A와 마찬가지로 전류가 흐르지 않게 된다. 표 1은 역률 보상의 기본 사양이다.

제어기 구성은 그림 2와 같이 내부 전류 제어기와 외부 전압 제어기로 구성된다. 전압 제어기는 기준 전압과 인버터 출력단에서 폐환된 전압을 비교하여 PI 제어기를 통해 전류 제어기의 기준 신호를 발생시킨다. 정상 상태에서 인버터 출력단 전압은 800V가 되도록 전압 제어기가 동작하게 된다. 전류 제어기는 Pulse Width Modulation(PWM) 전류 제어 방식으로, 외부 전압 제어기에서 발생한 기준 입력 신호를 3상 전압 신호에 실어 각 상의 전류 지령치로 보낸다. 이러한 신호는 검출 전류와 비교되고 증폭되어 PWM 신호를 발생시킨다.

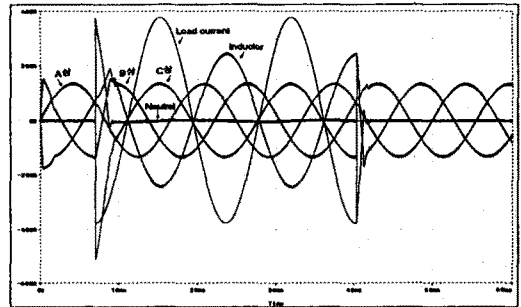
3. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 다음과 같은 3상 불평형 부하에 대해 Type A와 Type B의 역률보상기를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 2는 불평형 부하의 종류를 보여주고 있으며, Type A와 Type B에 동일하게 적용하였다. 그림 3, 4, 5는 전류 제어기만으로 시뮬레이션한 결과이며, 그림 6은 전류 제어기와 전압 제어기를 합친 전체 제어기로 시뮬레이션한 결과이다.

그림 3은 저항 부하가 C상에 단독으로 가해진 경우로 전원의 각 상 전류 및 부하 전류를 나타내고 있다. 부하를 인가한 시간은 $t = 6.99ms - 40.3ms$ (C상 전압의 -peak point) 구간 동안이며, 각 상 전류는 빠른 응답 특성을 가지며, 또한 우수한 역률과

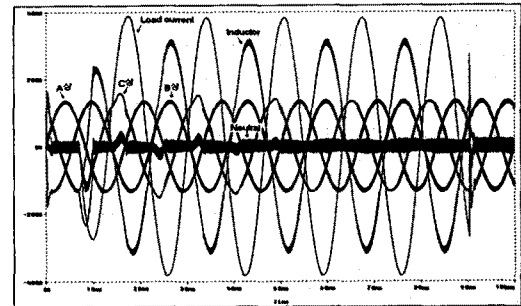


(a) Type A

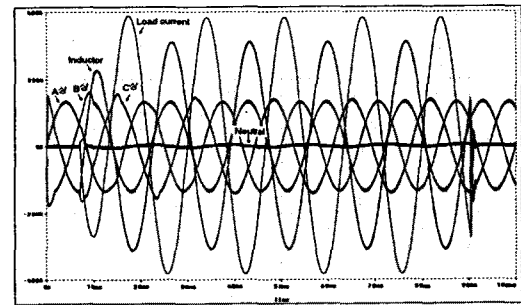


(b) Type B

그림 3 저항 부하 인가시 전류 파형



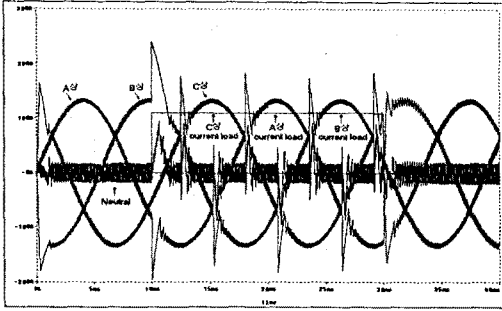
(a) Type A



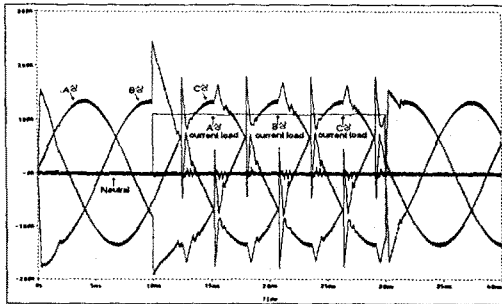
(b) Type B

그림 4 저항 및 인덕턴스 부하 인가시 전류 파형

정현파 특성을 알 수 있다. 상 전류의 정상 상태 도달 시간은 부하를 인가하는 시간에 따라 다소 차이가 있지만 2.5ms 이내에 도달하였다.



(a) Type A



(b) Type B

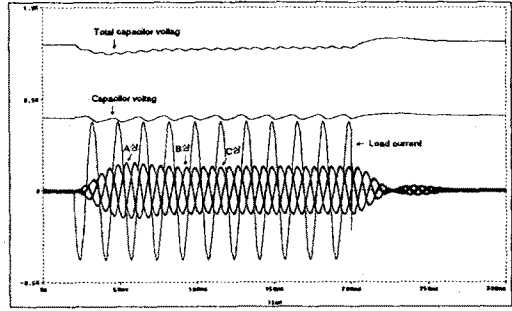
그림 5 전류 부하 인가시 전류 파형

그림 4는 $t=6.99\text{ms}-90.34\text{ms}$ (C상 전압의 $-peak$ point) 구간 동안에 불평형 저항 부하와 인덕터 부하가 C상에 단독으로 가해진 경우로 전원의 각 상 전류 및 부하 전류를 보여 주고 있다. 여기서는 불평형 저항 부하때보다 C상 전류의 정상 상태 도달 시간이 느리다. 이는 부하로 인가한 인덕터의 전류 특성으로 인해 부하 쪽의 전류가 순간적으로 변하지 못하고 서서히 변하여 정상 상태에 도달하기 때문이다. 여기서도 저항 부하인 경우와 마찬가지로 부하를 인가하는 시간에 따라 응답 속도에 다소 차이가 있지만, 80ms 이내에 정상 상태에 도달한다.

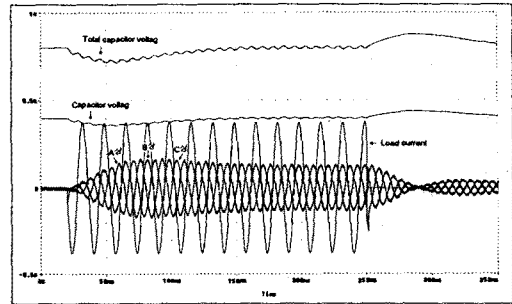
그림 5는 $t=10\text{ms}-30\text{ms}$ 구간 동안에 정전류 출력 3상 정류기 부하를 인가하는 경우로, 각 상 전류 및 부하 전류를 나타내고 있다. 여기서는 상 전류에 360Hz마다 순간적인 왜곡이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 왜곡 현상은 전류원 부하의 상간 전류 전환시 전류 제어기의 응답 특성에 기인한다.

Type B에서는 전원의 중성선 전류를 직접 제어하기 때문에 중성선 전류의 왜곡이 Type A에서 보다 적으며, 부하가 걸리지 않은 A, B상이 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그리고, 전체 전류 파형들의 스위칭 리플 폭이 현저하게 줄은 것을 볼 수 있는데, 이는 전원의 중성선이 내 번째 leg에 연결되어 하나의 인덕터를 더 가지기 때문이다.

그림 6은 전압 제어기에 불평형 저항 부하를 인가한 경우로 상전류, 부하 전류 및 콘덴서 전압의 결과 파형이다. 그림 6.(a)는 Type A에 $t=20\text{ms}-200\text{ms}$ 구간 동안 불평형 저항 부하를 인가했으며, 그림 6.(b)는 Type B에 $t=20\text{ms}-250\text{ms}$ 구간 동안 불평형 저항 부하를 인가했다. 여기서 각 콘덴서가 3상 전원과 같은 60Hz의 주파수를 가지고 충방전을 하는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 콘덴서의 전체 전압 파형에 120Hz의 주파수를 가지는 리플이 존재하는 것을 알 수 있다. 제어기는 PI gain만을 사용하여 3상 전류를 빠른 시간에 안정화시키고, 콘덴서의 전압을 일정하게 유지시킨다. 이외에도 상간에 위와 같은 불평형 부하를 인가하는 경우도 매우 좋은 결과를 얻을 수 있으며, 콘덴서 부하시에도 역률 보상은 좋은 응답 특성을 나타낸다.



(a) Type A의 전류 및 전압 파형



(b) Type B의 전류 및 전압 파형

그림 6 외부 전압 제어 루프 시뮬레이션 파형

4. 결론

본 논문에서는 불평형 부하에 대한 역률 보상의 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 A, B 형태의 역률 보상은 일반적인 부하 상황인 저항, 인덕터 및 전류원 부하에 대하여 잘 동작하였다. 불평형 부하 조건에서 역률 보상의 내부 제어 루프인 전류 제어기에 의해 전류는 목표치인 전압 파형을 추적하여 평형 3상과 고역률 특성을 나타내었다. 또한 외부 전압 제어기를 포함한 시뮬레이션에서 콘덴서 전압은 일정하게 유지되었으며, 이로 인해 안정한 전류 제어를 할 수 있었다. 특히, Type B의 경우에는 스위칭 리플의 크기를 작게 줄일 수 있고, 제어성이 좋은 장점이 있으나, 전력을 반도체 소자의 개수가 Type A에서보다 두 개 더 많은 것이 단점이다. 앞으로 본 연구 내용을 토대로 불평형 부하에 대한 역률 보상을 제작하고, 이를 보다 많은 분야에 응용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] M. Aredes, J. Häfner, and K. Heumann, "Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies," *IEEE Trans. Power Elec.*, vol. 12, no. 2, pp. 311-318, March 1997.
- [2] E.H. Song and B.H. Kwon, "A Novel Digital Control for Active Power Filter," *IECON*, vol. 3, pp. 1168-1173, Nov. 1992.
- [3] Mohan, Undeland and Robbins, *Power Electronics Converter, Application and Design*, Wiley, 1995.
- [4] C. A. Quinn and N. Mohan, "Active filtering of harmonic currents in three-phase, four-wire systems with three-phase and single-phase nonlinear loads," in *APEC'92-Applied Power Elec. Conf.*, 1992, pp. 829-836.
- [5] C. A. Quinn, N. Mohan, and H. Mehta, "A four-wire, current-controlled converter provides harmonic neutralization in three-phase, four-wire systems," in *APEC'93-Applied Power Elec. Conf.*, 1993, pp. 841-846.