

Reactive-Power Compensator using Soft-Switching Current-Source Inverter

鄭 鎮 圭* · 白 承 澤* · 金 義 重* · 韓 炳 文** · 白 文 鴻*** · 韓 后 錫§

(Jin-Gyu Jung, Seung-Taek Baek, Hee-Jung Kim, Byung-Moon Han, Moon-Hong Baek, Hoo-Suk Han)

Abstract - This paper proposes a new reactive-power compensator composed of a soft-switching current-source inverter. The compensator consists of 3-phase IGBT bridge, dc reactor, and a resonant circuit. The resonant circuit offers the IGBT bridge to have PWM operation with minimal switching losses. A theoretical analysis and computer simulation with Is-Spice were done to verify the operation of the proposed system. Also a scaled-model of the system was built and tested for verifying the feasibility of proposed system.

Key Words : 소프트-스위칭, 전류원인버터, Is-Spice, 무효전력보상기

1. 서 론

대전력 반도체 스위칭소자가 개발된 후 이를 이용하여 전력계통의 무효전력을 효과적으로 보상하는 인버터식 무효전력보상기가 많은 연구자에 의해 연구되어 현재 미국과 일본에서 이미 상용화 단계에 있다 [1,2,3,4].

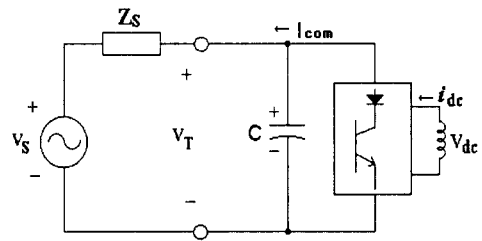
인버터식 무효전력보상기에는 직류단에 캐패시터를 사용하는 전압원 방식과 리액터를 사용하는 전류원 방식이 있는데 전류원 방식은 직접 전류를 제어하여 응답특성이 좋은 장점이 있으나 리액터의 손실로 인한 효율저하로 현재는 전압원 방식이 주로 채택되고 있다. 그런데 현재의 전압원 방식은 하드스위칭으로 소자를 턴온과 턴오프함으로써 전류와 전압스트레스에 의한 스위칭손실이 큰 단점을 갖는다.

최근 전류원인버터에 소프트스위칭회로를 부착하여 스위칭손실을 절감하는 연구가 몇몇 연구자에 의해 수행된 적이 있다[5,6]. 본 논문은 이점에 착안하여 소프트스위칭회로를 부착하여 소자의 스위칭시 발생하는 손실을 줄이고 소자의 스트레스를 경감시키는 전류원 PWM 무효전력보상기를 제안한다. 제안하는 보상기는 인버터의 스위칭손실이 낮아 전류원 방식의 리액터손실이 큰 단점을 보완 가능 할 것으로 보이며 전압원 방식과 효율면에서 경쟁력이 있을 것으로 기대된다.

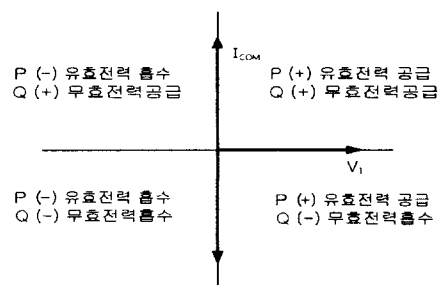
본 논문에서는 먼저 제안하는 시스템의 동작을 모드별로 나누어 이론적으로 해석하며 Is-Spice를 이용한 시뮬레이션으로 검증한다. 또한 축소모형을 제작하고 이의 실험을 통해 얻은 결과를 시뮬레이션과 비교검증하며 실시시스템구현의 가능성과 전력계통의 응용 가능성을 고찰한다.

2. 전류원 무효전력보상기

전압원방식은 입력단에 연결된 결합리액터 양단의 전압차로 형성되는 무효전류의 크기와 위상에 의해 보상할 무효전력의 양을 설정하나 전류원방식은 주입전류의 크기와 위상을 직접 제어하여 보상할 무효전력의 양을 설정한다. 그림 1(a)는 전류원무효전력보상기의 단상등가회로를 나타낸 것이다.



(a) 단상등가회로



(b) 유·무효전력 출입

그림 1 전류원 무효전력보상기의 동작원리

Fig. 1 Operational principle of current source STATCOM

* 準 會 員 : 明知大 電氣學科 大學院
 ** 正 會 員 : 明知大 電氣工學科 副教授 · 工博
 *** 正 會 員 : 韓國 生産技術研究所 前任研究員
 § 正 會 員 : 基礎電力研究所 前任研究員
 接受日字 : 1999年 10月 9日
 最終完了 : 1999年 12月 27日

보상기가 전력계통에 무효전력을 주입 또는 흡수하기 위해서는 연결점의 전압에 대해 위상이 90° 진상 또는 지상인 상태의 주입전류를 생성한다. 또한 주입되는 무효전류의 크기를 조절하기 위해서는 점호각을 90° 위치에서 좌우로 편차를 준다. 주입전류와 유·무효전력의 관계는 그림 1(b)에 의해 설명 가능하다. 만일 보상기의 전류 I_{com} 이 교류측 단자전압 V_T 에 대해 -90°의 위상각을 갖으면, 교류계통은 보상기에 무효전력을 공급하고, 보상기의 전류 I_{com} 이 교류측 단자전압 V_T 에 대해 +90°의 위상각을 갖으면, 교류계통은 보상기로부터 무효전력을 공급받는다. 한편 주입전류의 위상이 교류전압에 대해 90°보다 작은 각을 이루면 보상기는 유효전력을 교류계통에서 흡수하여 직류측에 연결된 리액터에 저장하여 리액터의 전류는 증가된다. 반면에 주입전류의 위상이 교류전압에 대해 90°보다 큰 각을 이루면 보상기는 유효전력을 교류계통에 방출하여 직류측에 연결된 리액터에서 에너지가 방출되어 리액터의 전류는 감소된다.

3. 제안하는 무효전력보상기

제안하는 무효전력보상기는 그림 2에 보인 바와 같이 IGBT브리지의 직류단에 에너지저장용 리액터와 커뮤테이션을 위한 커뮤테이션회로가 부착된 구조를 갖고 있다. 주회로는 브리지형태의 스위치(S₁/D₁~S₆/D₆)으로 구성되어 있고 각각의 IGBT에는 직렬로 고속다이오드가 부착되어 있다. 커뮤테이션회로에는 커뮤테이션을 위한 인덕터(L_r)와 캐패시터(C_r), 스위치(S₇, S₈)와 고속다이오드(D₇, D₈)로 구성되어 있다.

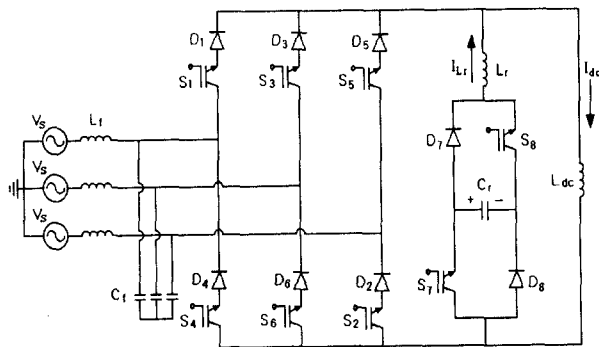


그림 2 제안하는 무효전력보상기

Fig. 2 Circuit diagram of proposed compensator

그림 3은 스위치 타이밍 순서도와 공진 인덕터 전류(I_{Lr}), 공진 캐패시터 전압(V_{Cr})의 동작파형을 나타낸 것이고 그림 4는 소프트스위칭 무효전력보상기의 동작을 모드별로 나타낸 것이다.

① Mode 0 - 초기상태

초기상태에서 전류는 인버터 회로의 스위치 S₁과 S₆을 통해서 흐르고 공진 캐패시터 C_r은 $-kV_p$ 로 충전되어 있다. V_p 는 전원에서의 선간 피크전압이다.

② Mode 1 - 전류 이동 모드($t_0 < t < t_1$)

커뮤테이션 회로스위치 S₇, S₈가 영전류상태에서 턴온되고 전류 I_{Lr} 는 점차 증가하여 I_{dc} 까지 증가되며, 이때 인버터

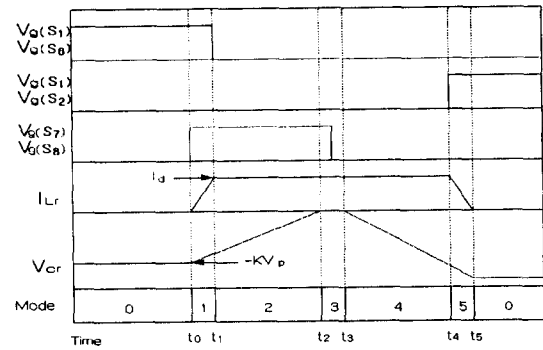


그림 3 커뮤테이션 동작파형

Fig. 3 Operating waveforms of the commutation circuit.

회로스위치 S₁과 S₆은 영전류상태가 되고 그순간 S₁과 S₆을 턴 오프시킨다.

$$\text{초기조건 : } i_{Lr} = 0, \quad V_{Cr} = -kV_p \quad (1)$$

$$i_{Lr} = \frac{1}{Z_0} (kV_p + V_s) \sin \omega_0(t - t_0) \quad (2)$$

$$V_{Cr} = V_s - (kV_p + V_s) \cos \omega_0(t - t_0) \quad (3)$$

여기서, $Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$

그러므로 Mode 1의 기간은,

$$t_1 - t_0 = \frac{1}{\omega_0} \sin^{-1} \left(\frac{Z_0 I_{dc}}{kV_p + V_s} \right) \quad (4)$$

$t = t_0$ 에서의 캐패시터 전압은,

$$V_{Cn1} = V_s - \sqrt{(kV_p + V_s)^2 - (Z_0 I_{dc})^2} \quad (5)$$

③ Mode 2 - 공진캐패시터 방전 모드($t_1 < t < t_2$)

이 모드에서는 I_{dc} 는 에너지저장 리액터와 커뮤테이션 회로의 S₇, C_r, S₈로 흐르게 되며 C_r이 방전 될때까지 이루어진다.

$$i_{Lr} = I_{dc}, \quad V_{Cr} = \frac{I_{dc}}{C_r} (t - t_1) + V_{Cn1} \quad (6)$$

Mode 2에서의 기간은,

$$t_2 - t_1 = \frac{-C V_{Cn1}}{I_{dc}} = \frac{-C_r}{I_{dc}} \left(V_s - \sqrt{(kV_p + V_s)^2 - (Z_0 I_{dc})^2} \right) \quad (7)$$

인버터스위치에 역전압이 걸리는 시간은,

$$T_{rbis} = \frac{C_r}{I_{dc}} (V_s - V_{Cn1}) = \frac{C_r}{I_{dc}} \sqrt{(kV_p + V_s)^2 - (Z_0 I_{dc})^2} \quad (8)$$

④ Mode 3 - 프리유틀링 모드($t_2 < t < t_3$)

전류는 S₇, D₇과 S₈, D₈을 통해 흐르며 공진 캐패시터의 전압은 0이 된다.

$$i_{Lr} = I_{dc}, \quad V_{Cr} = 0 \quad (9)$$

⑤ Mode 4 - 공진 캐패시터 충전 모드($t_3 < t < t_4$)

커뮤테이션 회로의 스위치 S₇과 S₈은 ZVS상태에서 턴오프

되고 전류는 D_7 , C_r 과 D_8 로 흐르게 되며 그 결과 C_r 이 충전된다.

$$i_{Lr} = I_{dc}, \quad V_{Cr} = -\frac{I_{dc}}{C_r}(t - t_3) \quad (10)$$

Mode 4의 기간은,

$$t_4 - t_3 = \frac{C_r k V_p}{I_{dc}} \quad (11)$$

⑥ Mode 5 - 전류 이동 모드($t_4 < t < t_5$)

공진캐패시터가 $-kV_p$ 로 충전되었을 때 인버터 회로 스위치 S_1 과 S_2 는 ZCS상태에서 턴온하게 된다. 이후에는 커뮤테이션회로는 차단되며 전류원인버터만이 동작하게 된다.

초기조건 : $i_{Lr} = -I_{dc}, \quad V_{Cr} = -kV_p \quad (12)$

$$i_{Lr} = \frac{-1}{Z_0}(kV_p - V_s') \sin \omega_0(t - t_4) + I_{dc} \cos \omega_0(t - t_4) \quad (13)$$

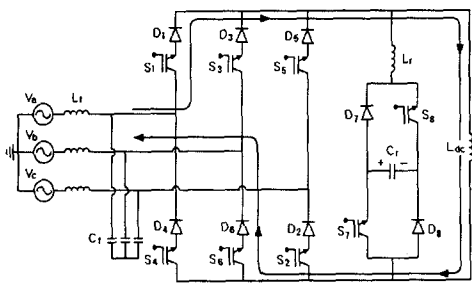
$$V_{Cr} = V_s' + (kV_p - V_s') \cos \omega_0(t - t_4) + Z_0 I_{dc} \sin \omega_0(t - t_4) \quad (14)$$

Mode 5의 기간은,

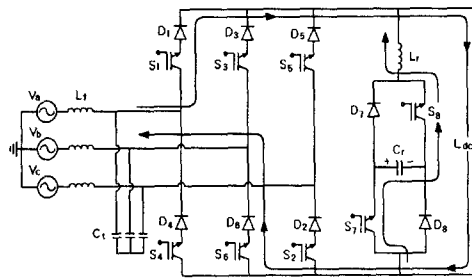
$$t_5 - t_4 = \frac{1}{\omega_0} \tan^{-1} \left(\frac{Z_0 I_{dc}}{kV_p - V_s'} \right) \quad (15)$$

전체 커뮤테이션 시간은 식 (4), (7), (11), (15)에 의해 다음과 같이 구해진다.

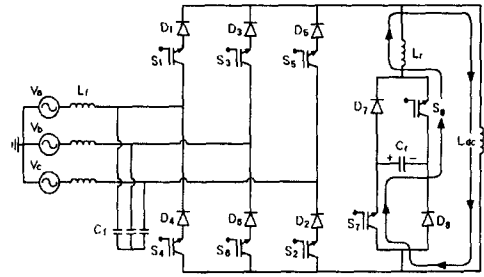
$$t_5 - t_0 = \frac{1}{\omega_0} \sin^{-1} \left(\frac{Z_0 I_{dc}}{kV_p + V_s'} \right) + \frac{1}{\omega_0} \tan^{-1} \left(\frac{Z_0 I_{dc}}{kV_p + V_s'} \right) + \frac{C_r k V_p}{I_{dc}} - \frac{-C_r}{I_{dc}} \left(V_s - \sqrt{(kV_p + V_s')^2 - (Z_0 I_{dc})^2} \right) \quad (16)$$



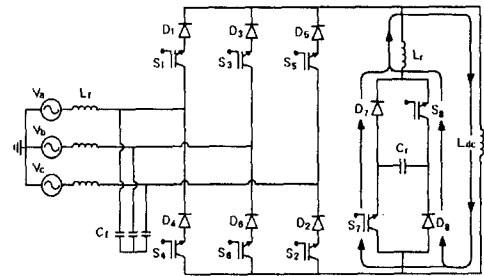
(a) Mode 0



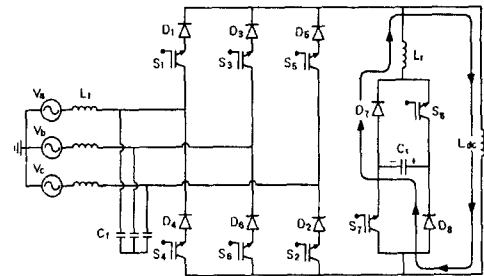
(b) Mode 1



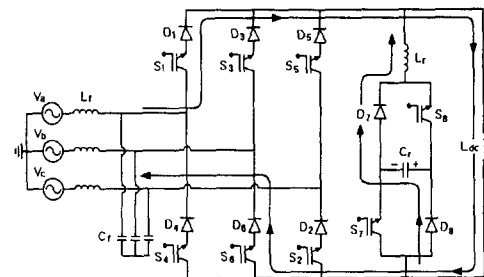
(c) Mode 2



(d) Mode 3



(e) Mode 4



(f) Mode 5

그림 4 커뮤테이션 동작모드
Fig. 4 Operation mode of commutation

4. 시뮬레이션

소프트스위칭 전류원인버터에 의한 무효전력보상기의 동작을 검증하기 위해 Is-Spice에 의한 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션모형의 전력회로는 그림 2에 보인 것과 동일

하게 구성되었다. 시뮬레이션에서 사용된 파라미터는 표1과 같다.

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Parameters of simulations.

| | |
|---------------------------------------|----------------------|
| 전원전압 | 110 V _{rms} |
| 필터 (L _f , C _f) | 10 mH, 20 uF |
| 공진리액터 (L _r) | 20 uH |
| 공진캐패시터 (C _r) | 0.2 uH |
| 직류리액터 (L _{dc}) | 500 mH |

그림 5는 보상기의 제어 블록선도를 나타낸 것이다. 이 블록선도에서 선전류 i_a, i_c 를 입력으로 하여 d-q변환을 거쳐서 나온 i_q 와 무효전류의 기준값 i_q^* 를 비교한다. 이것을 PI제어기를 통해서 점호각을 계산해서 보상기의 리미터를 거쳐 점호각을 보정한다.

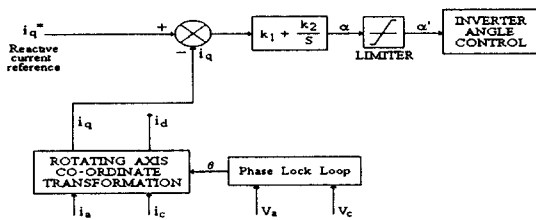
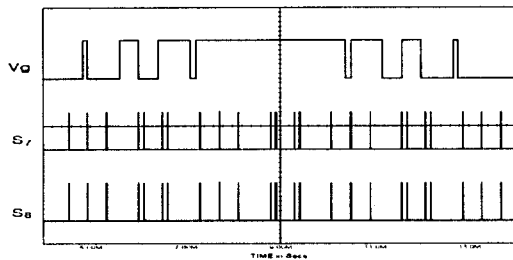


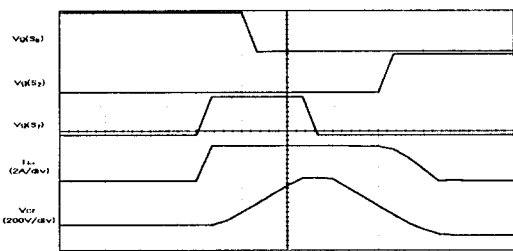
그림 5 제어 블록선도

Fig. 5 Control block diagram for compensator

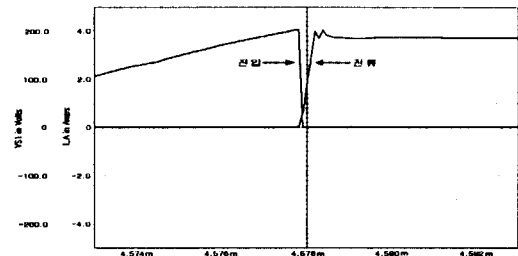
그림 6은 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 커뮤테이션 회로의 적절한 동작에 따른 인버터 스위치와 커뮤테이션 회로 스위치의 소프트-스위칭을 확인할 수 있으며 진상에서 지상으로 또는 지상에서 진상으로 전류가 천이하는 상태도 한 주기 이내에서 동작함을 확인할 수 있다.



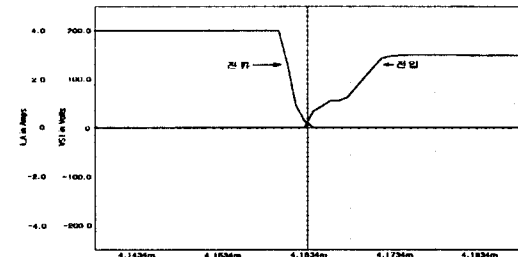
(a) 게이트 펄스



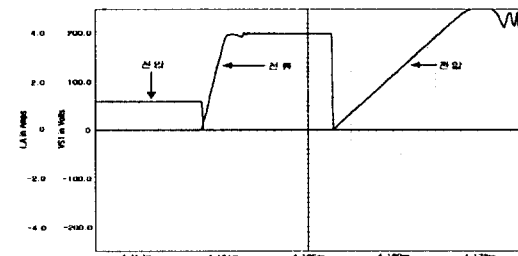
(b) 커뮤테이션 동작파형



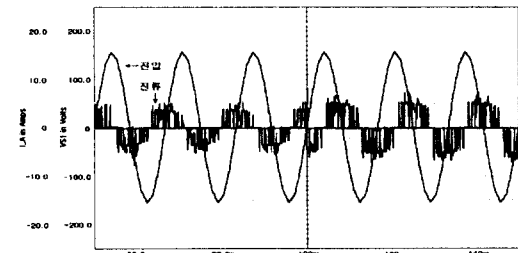
(c) 인버터스위치 턴온



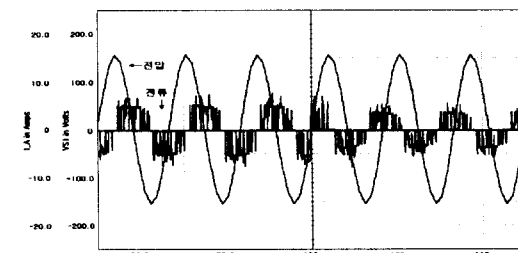
(d) 인버터스위치 턴오프



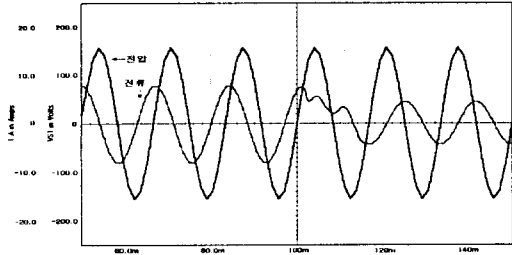
(e) 커뮤테이션 회로 스위치 턴온, 턴오프



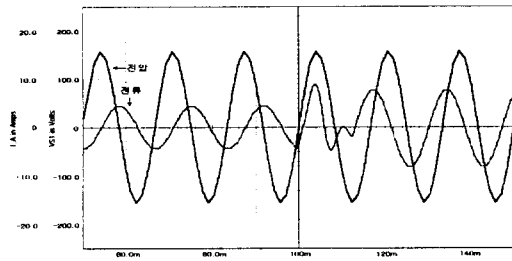
(f) 모선전압과 무효전류(진->지상)



(g) 모선전압과 무효전류(지->진상)



(h) 모션전압과 필터링전류(진->지상)



(i) 모션전압과 필터링전류(지->진상)

그림 6 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Simulation results

5. 축소모형실험

소프트스위칭 전류원 무효전력보상기의 동작과 특성을 파악하기 위해서 그림 7과 같이 축소모형을 제작하였다. 2kVA로 축소모형을 제작하였으며, 스위칭 소자로는 600V/50A의 IGBT를 사용하였다. 스위칭 소자와 직렬로 역회복시간이 빠른 고속다이오드를 부착하였으며, 사용된 각 파라미터는 표 2와 같다.

표 2 축소모형 파라미터

Table 2 Parameters of hardware scaled-model.

| | |
|--------------------|----------------------|
| 전원전압 | 100 V _{rms} |
| 필터 (L_f, C_f) | 5 mH, 20 μ F |
| 공진리액터 (L_r) | 18 μ H |
| 공진캐패시터 (C_r) | 0.1 μ H |
| 직류리액터 (L_{dc}) | 500 mH |

전체 시스템의 제어장치로는 80C196KC를 사용하였으며 선로전압과 정확한 동기를 위해 선로A상 전압의 영교차점을 검출하였고 이를 마이크로 프로세서의 외부인터럽트로 사용하여 인버터 출력의 동작시점으로 사용하였다.

커뮤테이션회로의 스위칭신호는 80C196KC에서 구현된 펄스의 하강점을 검출, EPLD ipLSI1032를 사용하여 구현하였다.

그림 8은 축소모형의 실험파형을 나타낸 것이다. 인버터의 동작을 확인하기 위해 무효전류 i_q 를 진상영역에서 지상영역으로 지상영역에서 진상영역으로 천이하도록 하여 기준신호로 사용하였다.

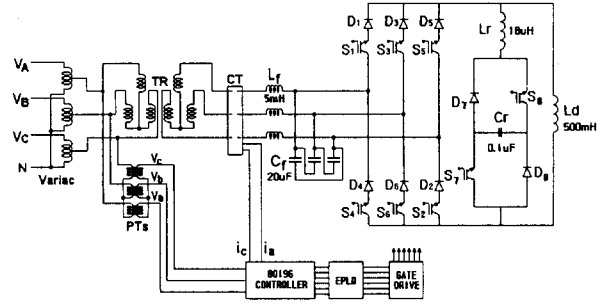
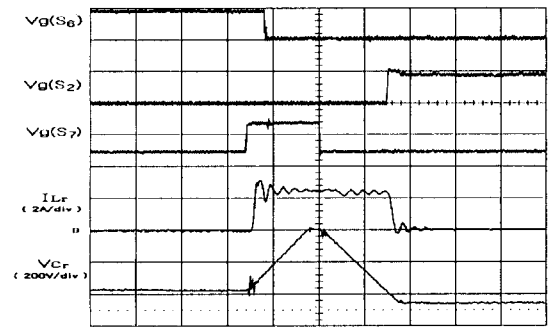


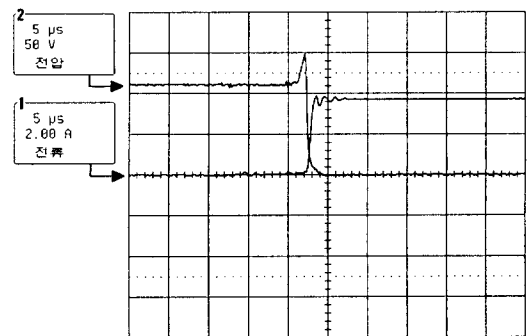
그림 7 전체 하드웨어 구성도

Fig. 7 Hardware configuration of scaled model

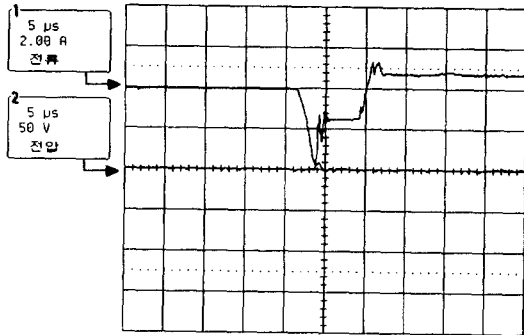
그림 8(a)는 커뮤테이션회로의 동작파형을 나타낸 것이다. 그림 8(b)는 인버터 스위치의 턴온상태를 나타낸 것이며 그림 8(c)는 인버터 스위치의 턴오프상태를 나타낸 것이다. 그림 8(d)는 커뮤테이션회로 스위치의 턴온, 턴오프상태를 나타낸 것이다. 그림 8(e)와 8(f)는 모션전압과 필터전단의 무효전류를 나타낸 것으로 무효전류가 모션전압에 대해 90° 진상인 상태에서 90° 지상인 상태로의 상태 천이와 90° 지상인 상태에서 90° 진상인 상태로의 상태천이를 하고 있다. 그림 8(g)는 모션전압과 무효전력보상기의 A상 전류로 진상에서 지상으로의 천이과정을 나타내고 있다. 모션전압에 대해 +90° 진상에서 점호각의 변화에 의해서 -90°의 지상으로 천이하고 있고, 천이시 과도현상이 크게 나타나고 있지 않다. 그림 8(h)는 모션전압과 무효전력보상기의 A상 전류로 지상에서 진상으로의 천이과정을 나타내고 있다.



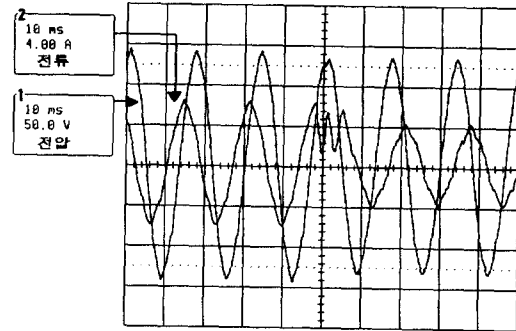
(a) 커뮤테이션 동작파형



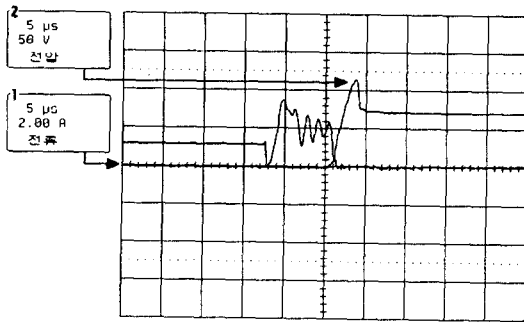
(b) 인버터스위치 턴온



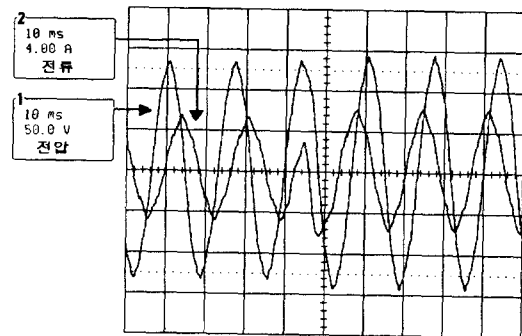
(c) 인버터스위치 턴오프



(g) 모션전압과 필터링전류(진->지상)



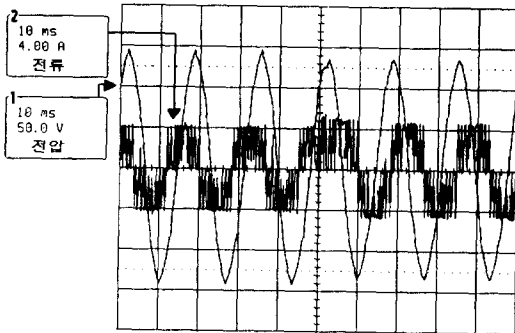
(d) 커뮤테이션 회로스위치 턴온,턴오프



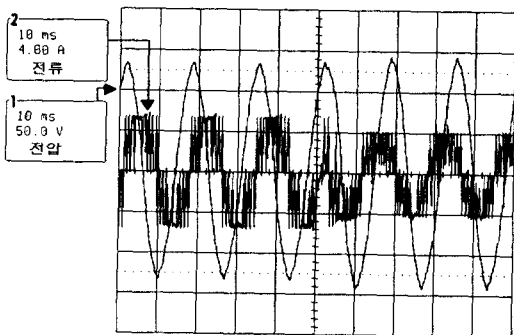
(h) 모션전압과 필터링전류(지->진상)

그림 8 실험결과

Fig. 8 Experimental results



(e) 모션전압과 무효전압(진->지상)



(f) 모션전압과 무효전류(지->진상)

6. 결 론

본 연구에서는 소프트스위칭 전류원인버터를 이용한 무효전력보상기를 제안하고 동작과 성능을 검증하기 위해 이론적인 해석과 이를 토대로 Is-Spice를 이용한 시뮬레이션을 실시하였고 축소모형을 제작, 실험하여 시뮬레이션 결과와 비교 검증하여 하드웨어 구현의 타당성을 확인하였다.

시뮬레이션과 축소모형의 각 스위칭의 턴온과 턴오프에서 볼 수 있듯이 스위칭소자의 전류와 전압 스트레스가 감소하였음을 확인할 수 있었고 무효전력보상기의 동작에도 무리가 없음을 알 수 있다.

제안하는 시스템은 영전압, 영전류의 스위칭을 하고 있어 기존의 시스템보다 스위칭 손실을 줄일 수 있으며 스위칭 소자의 스트레스를 경감시켜 스위치의 수명을 연장시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다.

앞으로의 과제는 선로와의 동적응동에 대한 세부고찰이 필요하고 현재는 7펄스로 실험하였으나 11-13펄스로 동작시킴으로서 출력파형을 개선을 가져올수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 98-0101-09-01-3) 지원으로 수행된 연구내용의 일부임.

참 고 문 헌

- [1] L. Gyugyi, "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits", IEEE Trans. on Industry Application, IA-15, NO.5, Sept./Oct. 1979, pp.521-532
- [2] G.Joos, L.Moran, P.Ziogas, "Performance Analysis of a PWM Inverter Var Compensator", IEEE Trans. on PE, Vol. 6, No. 3, July, 1991, pp. 380-391
- [3] C. Edward, et. al, "Advanced Static Var Generator employing GTO Tyristors", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No.4, Oct. 1988, pp. 1622-1627.
- [4] S. Mori, et. al., "Development of A Large Static Var Improving Power System Stability", IEEE PES Winter Meeting, Paper No. 92-WM165-1PWRS, Jan. 26-30, 1992.
- [5] Y.Konoshi, et. al. "Current-Fed Three-Phase Converter and Voltage-Fed Three-Phase Converter using Optimum PWM Pattern and Their Performance Evaluation", Conf. Rec. of IEEE EPE-Annual Meeting, 1997, pp. 2893-2900.
- [6] G. Moschopoulos and G. Joos, "A Novel Soft-Switched PWM Current Source Rectifire/Inverter", Conf. Rec. of IEEE PESC-Annual Meeting, 1997, pp. 573 -579.

저 자 소 개



정진규 (鄭鎭圭)

1973년 2월 23일 생. 1998년 명지대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업예정(석사). 현재 (주) 대영 초음파 연구원

E-mail : Hex@shinbiro.com

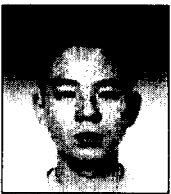


한병문 (韓炳文)

1953년 7월 5일 생. 1976년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 미 아리조나주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 미 Westinghouse 중앙연구소 선임 연구원. 현재 명지대 전기정보제어공학부 부교수.

Tel : 0335-330-6366

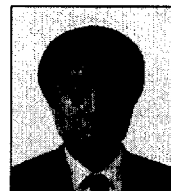
E-mail : erichan@wh.myongji.ac.kr



백승택 (白承澤)

1971년 11월 24일 생. 1997년 명지대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

E-mail: inverter@wh.myongji.ac.kr



백문홍 (白文鴻)

1958년 4월 25일 생. 1982년 서울대 제어공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984~1989년 한국과학기술원 연구원, 1996년~현재 한국생산기술연구원 선임연구원

E-mail: mhbaeg@kitech.re.kr



김희중 (金羲重)

1970년 9월 10일 생. 1997년 명지대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

E-mail: Inverter@nownuri.net



한후석 (韓后錫)

1958년 10월 24일 생. 1987년 전북대 전기공학과 졸업. 1997년 전북대학교 의용생체공학 박사과정 수료. 현재 기초전력연구소 선임연구원.