

싸이리스터 전류원인버터를 이용한 새로운 무효전력보상기

論 文

48B - 4 - 11

New Reactive-Power Compensator using Thyristor Current-Source Inverter

白承澤* 韓炳文**
(Seung-Taek Baek · Byung-Moon Han)

Abstract - This paper proposes a new reactive-power compensator composed of a thyristor current-source inverter. The compensator consists of a 6-pulse thyristor bridge, dc reactor, and a commutation circuit. The commutation circuit offers the thyristor bridge to have PWM operation with minimal switching losses. The operation of proposed system was analyzed by computer simulations with EMTP and experimental works with hardware scaled-model. The proposed system would have low cost and easy expansion of operation voltage due to using the conventional thyristors.

Key Words : 전류원인버터, EMTP(electro-magnetic transient program), STATCOM(static synchronous compensator)

1. 서 론

80년대 후반에 대전력 반도체스위칭소자가 개발되면서 이를 이용하여 전력계통의 무효전력을 효과적으로 보상하는 인버터식 무효전력보상기가 여러 연구자들에 의해 제안되었다 [1,2]. 인버터식 무효전력보상기는 동기조상기와 동일한 원리로 전력계통의 무효전력을 보상하나 응답이 신속하여 과도안정도와 전압안정도를 증대시키고 저주파공진을 감쇠시키는 기능을 한다.

현재 미국과 일본에서 상용화 단계에 있는 인버터식 무효전력보상기는 직류링크단에 캐패시터를 연결한 전압원방식을 채택하고 있으며 스위칭소자로는 송전용에서는 GTO를 그리고 배전용에서는 IGBT를 사용하고 있다. 또한 인버터의 변조방식도 송전용에서는 변압기에 의한 다중펄스방식이 그리고 배전용에서는 스위칭주파수 3kHz 정도의 PWM방식이 사용되고 있다. 이들 전압원인버터에서는 "하드스위칭" 방식으로 스위칭소자들을 턴온과 턴오프함으로 전류와 전압 스트레스가 커 열손실이 큰 단점을 갖는다[3,4]. 또한 전력계통에 응용할 경우 운용전압이 높기 때문에 다수의 스위칭소자를 직렬로 연결해 하나의 스위치로 동작시켜야 하는데 전압원인버터의 경우 소자의 직렬동작이 어려운 단점을 갖는다.

싸이리스터브리지는 자연전류방식으로 동작하여 고압직류송전에서 정류기 및 인버터로 사용되어 왔다. 이 싸이리스터브리지의 직류단에 커뮤테이션회로를 부착하면 각 싸이리

스터는 자기소호기능을 가져 PWM 전류원인버터로 동작하는 것이 가능하다[5]. 이 경우 싸이리스터의 턴오프 특성에 따라 펄스수가 결정되는데 위상제어정류기에 사용되는 싸이리스터의 경우 교류 반주기당 3-5 펄스정도의 PWM 스위칭은 충분하다.

본 논문에서는 싸이리스터브리지에 직류리액터와 커뮤테이션용 공진회로를 부착한 전류원방식 PWM 무효전력보상기를 제안하고 시스템의 동작을 모드별로 나누어 이론적으로 해석하며 EMTP를 이용한 시뮬레이션으로 검증한다. 또한 축소모형을 제작하고 이의 실험을 통해 얻은 결과를 시뮬레이션결과와 비교검증하며 실시시스템구현의 가능성과 전력계통에의 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 1a는 전류원무효전력보상기의 단상등가회로를 나타낸 것이다. 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 1b에 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 리액터

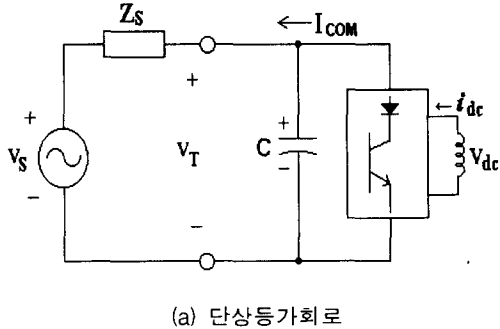
* 準 會 員 : 明知大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 明知大 電氣情報制御工學部 副教授 · 工博

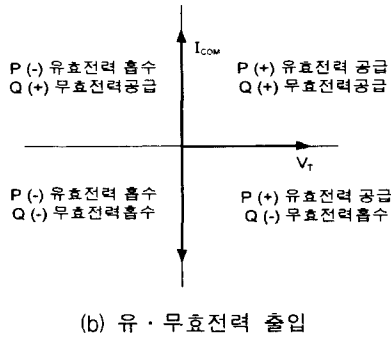
接受日字 : 1998年 12月 5日

最終完了 : 1999年 3月 8日

에 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.



(a) 단상등가회로



(b) 유 · 무효전력 출입

그림 1. 전류원 무효전력보상기의 동작원리
Fig. 1. Operational principle of current source STATCOM

전류원 인버터의 PWM방식은 전압원의 방식과 달리 기준신호로 정현파 대신 사다리꼴 파형을 사용하는데 그림 2는 전류원인버터의 PWM방식을 나타낸 것이다. 이 그림에서 게이트신호는 삼각캐리어파의 진폭 A_c 가 사다리꼴변조파의 진폭 A_r 보다 클 경우 1이 되고, 역일 경우 0이 된다. 교류 반주기 동안 하나의 스위칭 소자에 공급되는 PWM 펄스의 수는 소자의 스위칭속도에 따라 임의로 결정된다. 하나의 폴에 위치한 2개의 스위칭소자에 공급되는 펄스는 각각 60° 의 위상차를 갖으며 전류원인버터의 특성상 적어도 상단 스위칭소자중 하나와 하단 스위칭소자중 하나는 반드시 온(on) 상태를 유지해야한다. 만일 출력전류의 극성이 바뀌거나 전류의 방향이 한 상에서 다른 상으로 전환될 경우 잠시 동안 스위치가 오픈되어 있으면 직류단의 리액터에 의해 아주 큰 전압스파이크가 발생한다. 그러므로 전류의 방향이 바뀌는 구간에서 상단스위치와 하단스위치를 순간 단락시켜주는 shoot-through 펄스가 필요하다. 전류원인버터의 교류입력단에는 스위칭소자의 전류가 차단이 될 때 발생하는 과전압을 흡수하고 출력전류의 고조파를 감소시키는 필터 기능을 위해 교류캐패시터가 연결된다.

3. 제안하는 무효전력보상기

제안하는 무효전력보상기는 그림 3에 보인 바와 같이 싸

이리스터브리지의 직류단에 에너지저장용 리액터와 커패시션을 위한 공진회로가 부착된 구조를 갖고 있다. 브리지회로의 구조는 위상제어정류기와 동일하고 에너지저장용 리액터와 병렬로 연결된 커패시션회로는 LC공진회로와 이에 병렬로 연결된 싸이리스터 T_7 과 직렬로 연결된 T_8 로 구성되어 있다[5,6].

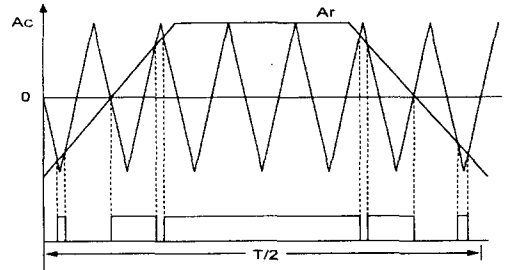


그림 2. 전류원인버터의 PWM방식
Fig. 2. PWM pattern of current source inverter

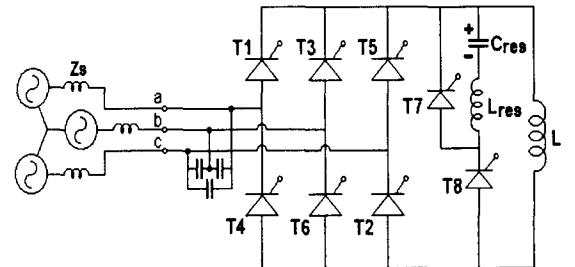


그림 3. 제안하는 무효전력보상기
Fig. 3. Circuit diagram of proposed compensator

제안하는 보상기는 위상제어정류기용 싸이리스터를 사용할 경우 교류 반주기당 3-5펄스의 PWM 스위칭이 가능하고 역회복시간이 짧은 인버터용 싸이리스터를 사용할 경우 7-9펄스의 PWM 스위칭이 가능하다. 제안하는 보상기는 자기소호형스위치를 사용한 보상기에 비해 스위칭손실이 적고 소자의 직렬동작이 용이하여 교류유효전압에 적절한 시스템 구현이 가능하다.

그림 4는 공진형 무효전력보상기의 커패시션 동작을 모드별로 나타낸 것이다. 그림 4a는 회로의 초기상태를 나타낸 것으로 먼저 공진회로의 캐패시터는 초기전압 V_{co} 로 충전되어 있는 것으로 하고 인버터브리지의 싸이리스터 T_1 과 T_6 이 오프상태인 것으로 가정한다. 또한 입력교류전압 V_s 의 주기는 PWM 동작을 위한 커패시션 주기에 비해 대단히 길기 때문에 편의상 직류전원 V_s 로 가정하였다.

그림 4b는 첫 번째 동작모드로 인버터스위치 T_1 과 T_6 이 닫히면서 에너지저장용 리액터에 전류가 흐르는 것을 나타낸다. 이 모드에서 공진캐패시터는 예상되는 링전압보다 훨씬 더 높은 정방향 전압으로 충전되어 있다. 그림 4c의 모드 2는 싸이리스터 T_8 이 온이 되면서 시작된다. 공진캐패시터에 저장된 에너지는 T_8 , L_{res} , C_{res} , 그리고 I_{dc} 전류원으로 구성되는 바이패스 회로에 의해 공진전류 $i_c(t)$ 를 증가

시킨다. $i_c(t)$ 가 I_{dc} 에 도달하면 인버터 스위치 T_1 과 T_6 은 손실없이 자연적으로 전류가 오프되어 그림 4d에 보인 모드 3으로 동작한다.

모드 3에서 에너지저장리액터는 공진캐패시터를 역방향으로 충전시키는 동작을 한다. 에너지저장리액터의 자기에너지는 공진캐패시터로 옮겨져 캐패시터의 전압은 서서히 상승한다. 인버터브리지의 다른 쌍의 스위치들이 턴온이 되면 그림 4e와 같이 2개의 전류루프가 존재하는데 공진캐패시터가 완전히 충전되었을 때 인버터로부터 전류 I_{dc} 가 에너지저장리액터로 흘러 싸이리스터 T_8 은 그림 4f와 같이 오프되고 캐패시터는 충전상태를 유지한다. 이 시점에서 공진캐패시터의 전압은 극성이 그림 4b와 반대인 것을 제외하고는 동일한 상태이다. 그림 4g는 이 캐패시터전압을 모드 1의 상태로 반전시키기 위한 동작모드로 T_7 을 턴온시켜 공진특성을 이용한다.

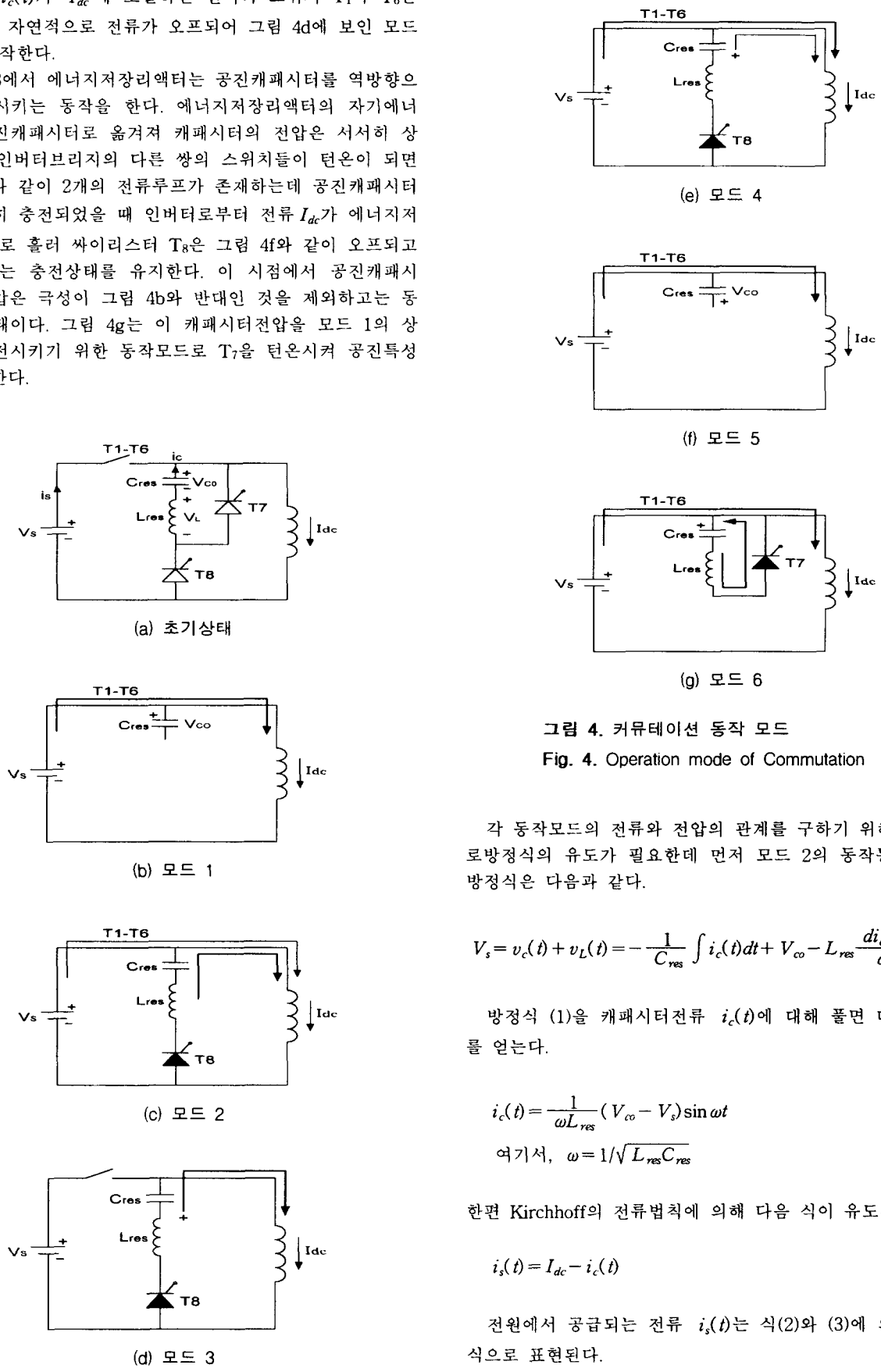


그림 4. 커뮤테이션 동작 모드
Fig. 4. Operation mode of Commutation

각 동작모드의 전류와 전압의 관계를 구하기 위해서는 회로방정식의 유도가 필요한데 먼저 모드 2의 동작동안 회로방정식은 다음과 같다.

$$V_s = v_c(t) + v_L(t) = -\frac{1}{C_{res}} \int i_c(t) dt + V_{co} - L_{res} \frac{di_c(t)}{dt} \quad (1)$$

방정식 (1)을 캐패시터전류 $i_c(t)$ 에 대해 풀면 다음 관계를 얻는다.

$$i_c(t) = \frac{1}{\omega L_{res}} (V_{co} - V_s) \sin \omega t \quad (2)$$

여기서, $\omega = 1/\sqrt{L_{res}C_{res}}$

한편 Kirchoff의 전류법칙에 의해 다음 식이 유도된다.

$$i_s(t) = I_{dc} - i_c(t) \quad (3)$$

전원에서 공급되는 전류 $i_s(t)$ 는 식(2)와 (3)에 의해 다음 식으로 표현된다.

$$i_s(t) = I_{dc} - \sqrt{\frac{C_{res}}{L_{res}}} (V_{co} - V_s) \sin \omega t \quad (4)$$

전류 $i_s(t)$ 를 0보다 작게 만들기 위해서는 방정식 (4)의 우변을 영보다 작거나 같게 해야 한다. 따라서 $\omega t = \pi/2$ 일 때 다음 관계가 유도된다.

$$\sqrt{\frac{C_{res}}{L_{res}}} (V_{co} - V_s) \geq I_{dc} \quad (5)$$

$$V_{co} \geq I_{dc} \sqrt{\frac{L_{res}}{C_{res}}} + V_s \quad (6)$$

만일 V_{co} 가 충분히 클 경우 입력 전류의 감쇠는 빠르지만 이 감쇠시간은 인버터브리지에 있는 싸이리스터의 턴오프시간과 역회복시간 보다 커야한다. 따라서 최소 역회복시간 t_p 에 대해 방정식 (4)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$I_{dc} - \sqrt{\frac{C_{res}}{L_{res}}} (V_{co} - V_s) \sin \omega t_p \leq 0 \quad (7)$$

$$V_{co} \geq \frac{I_{dc}}{\sin \omega t_p} \sqrt{\frac{L_{res}}{C_{res}}} + V_s \quad (8)$$

4. 시뮬레이션

공진형 PWM 전류인버터에 의한 무효전력보상기의 동작을 검증하기 위해 EMTP에 의한 시뮬레이션을 실시 하였다. 시뮬레이션모형의 전력회로는 그림 3에 보인 것과 동일하게 싸이리스터 브리지 직류단에 에너지 저장용 리액터와 커뮤테이션 회로를 부착하여 구성하였다. 시뮬레이션에 사용된 전원전압은 120V이고, 전원주파수 60Hz, 공진리액터 $L_{res}=0.6mH$, 공진캐패시터 $C_{res}=0.42\mu F$, 그리고 에너지 저장을 위해 직류리액터 $L_{dc}=2H$ 를 사용하였다. 그림 5는 PWM 펄스발생기의 구성을 나타낸 것이다. PWM 펄스는 교류 반주기당 3펄스로 구성되어 있는데, 3개의 구형파 발생기가 1, 2, 3의 구형파를 생성하여 그것을 조합하면 그림 7a의 상단과 같은 PWM 펄스가 생성된다. 또한 공진회로에 있는 싸이리스터에 공급되는 펄스는 주 싸이리스터에 공급되는 펄스의 하강단을 검출하여 생성하도록 되어있다.

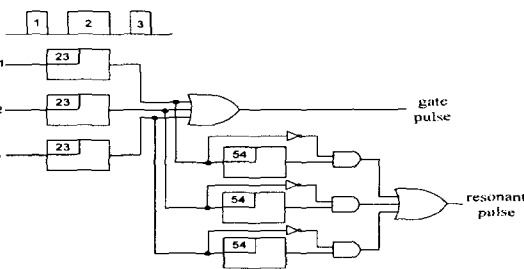


그림 5. 펄스 발생기
Fig. 5. Gate pulse generator for thyristor

그림 6은 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.

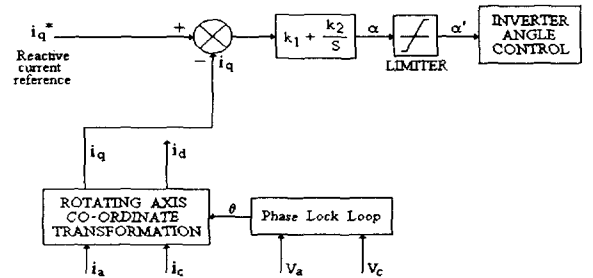
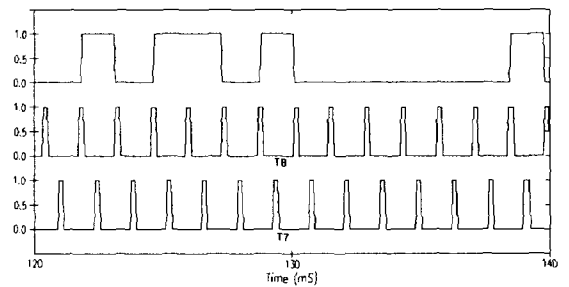
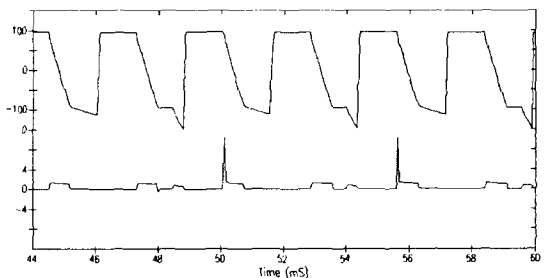


그림 6. 제어 블록선도
Fig. 6. Control block diagram for compensator

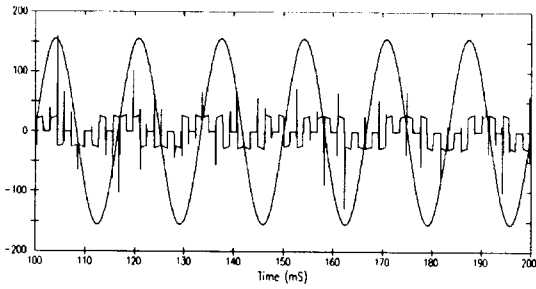
그림 7a의 하단은 싸이리스터 T_7 과 T_8 의 게이트펄스를 나타낸 것이다. 게이트 펄스 T_8 은 싸이리스터의 PWM 펄스를 강제 전류 시키기 위한 커뮤테이션 펄스이고, T_7 은 공진 캐패시터의 극성을 초기상태로 반전시켜주는 펄스이다. 그림 7b는 공진시 공진전압과 전류를 나타낸 것이다. 그림 7c는 모션전압과 STATCOM 무효전류 A상 파형을 나타낸 것인데, 0~150ms 동안은 진상무효전류를 공급하기 위해서 점호각을 $+85^\circ$ 를 유지하다가 150ms에서 무효전류가 지상으로 전환되면서 점호각은 -85° 를 유지한다. 그러므로 150ms에서 무효전류가 모션전압에 대해서 90° 진상인 상태에서 90° 지상인 상태로의 상태 천이를 하고 있다. 그림 7d는 150ms에서 90° 지상인 상태에서 90° 진상인 상태로의 상태 천이를 하고 있다. 그림 7e는 보상기가 상태 천이를 할 때의 직류리액터의 전류변화를 나타낸 것이다.



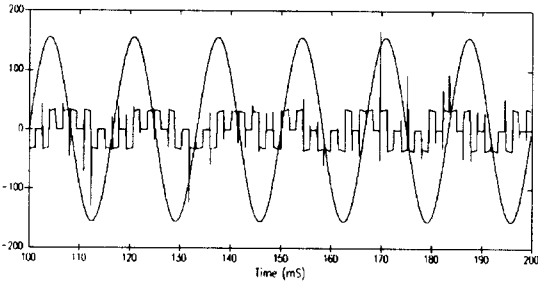
(a) 게이트 펄스



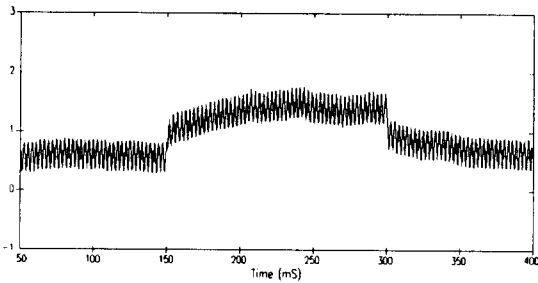
(b) 공진전압과 전류



(c) 모션전압과 무효전류(진=>지상)



(d) 모션전압과 무효전류(지=>진상)



(e) 직류리액터의 전류변화

그림 7. 시뮬레이션 결과

Fig. 7. Simulation results

5. 축소모형실험

공진형 전류원 무효전력보상기의 동작과 특성을 검증하기 위해서 그림 8에 보인 3상, 120V, 2kVA 용량의 축소모형을 제작하였는데 인버터의 스위칭 소자로는 1200V/60A 위상제어 싸이리스터를 사용하였다. 직류리액터의 리액턴스값은 시뮬레이션에서 사용한 것과 같은 큰 값을 구하지 못해서 400mH를 사용하였다. 공진회로에 사용된 싸이리스터는 역회복 시간이 빠른 FR(fast recovery) 싸이리스터를 사용하였다. 전체 시스템의 제어장치로는 마이크로프로세서 80C196KC를 사용하였으며, 계통전압과 동기된 정확한 각도 조절을 위해 계통전압의 영교차점을 검출하고 이를 80C196KC의 외부 인터럽트에 이용하여 인버터 출력 PWM의 동작시점으로 사용하였다.

그림 9는 하드웨어 축소모형을 구동시켰을 때의 실험과형을 나타낸 것이다. 공진회로를 부착한 상태에서 인버터의

동작을 시험하기 위해서 무효전류 i_0 의 변화를 진상영역에서 지상영역으로 천이하도록 기준신호를 공급하였다. 보상기가 진상영역으로 동작하기 위해서는 보상기의 전류가 연결점의 기준전압보다 90° 앞서야하고, 지상영역으로 동작하기 위해서는 보상기의 전류가 연결점의 기준전압보다 90° 뒤쳐야 한다. 하지만 실제로 보상기의 동작영역은 인버터의 손실분이 존재하므로 그 손실분만큼의 α 를 보상한 영역에서 동작한다.

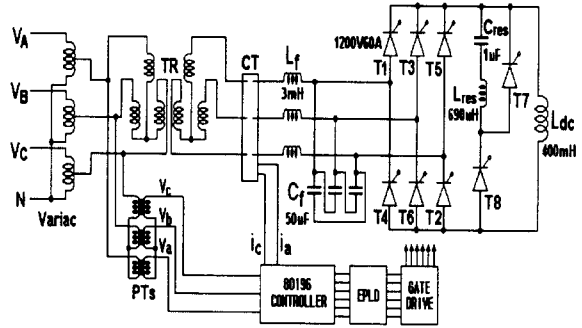
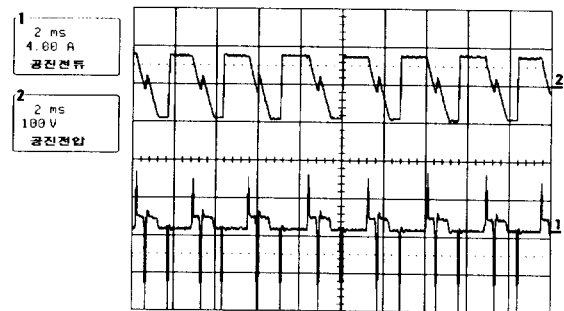


그림 8. 전체 하드웨어 구성도

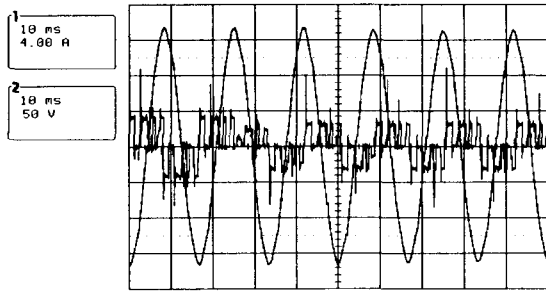
Fig. 8. Hardware configuration of scaled model

그림 9a는 공진회로 동작시 공진전압과 전류를 나타낸 것이다. 그림 9b와 9c는 모션전압과 필터전단의 무효전류를 나타낸 것으로 무효전류가 모션전압에 대해서 90° 진상인 상태에서 90° 지상인 상태로의 상태 천이와 90° 지상인 상태에서 90° 진상인 상태로의 상태 천이를 하고 있다.

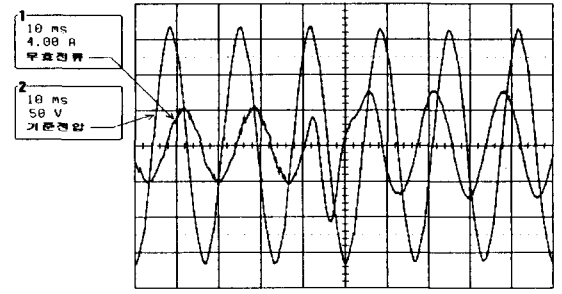
그림 9d는 직류리액터의 전류변화를 나타낸 것이다. 지상 무효전력을 공급하다가 진상무효전력의 공급을 위해 7A까지 상승한 후 다시 지상무효전력 공급으로의 전환을 나타내고 있다. 그림 9e는 PI제어기가 기준무효전력을 추종하는 특성을 나타낸 것이다. 그림 9f는 모션전압과 무효전력보상기의 A상 전류로 진상에서 지상으로의 천이과정을 나타내고 있다. 모션전압에 대해 $+90^\circ$ 진상에서 점호각의 변화에 의해서 -90° 의 지상으로 천이하고 있고, 천이시 과도현상이 크게 나타나고 있지 않다. 그림 9g는 모션전압과 무효전력보상기의 A상 전류로 지상에서 진상으로의 천이과정을 나타내고 있다.



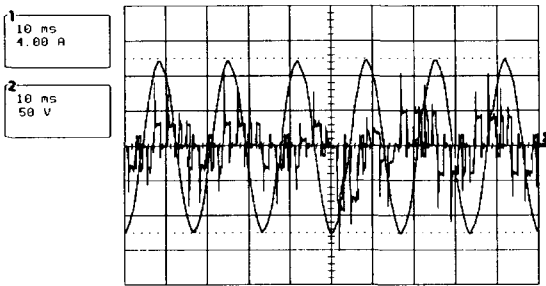
(a) 공진전압, 전류



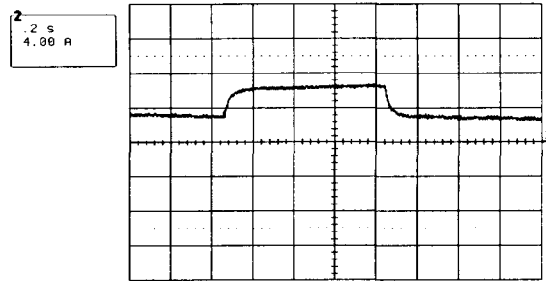
(b) 모선전압과 무효전류(필터전단)



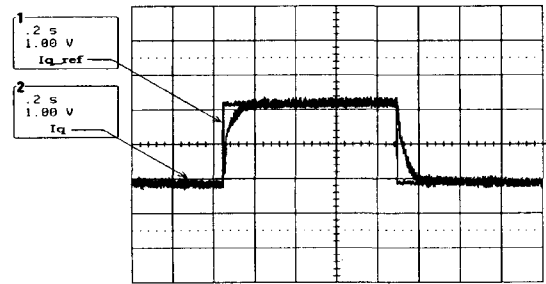
(g) 모선전압과 무효전류(지->진상)



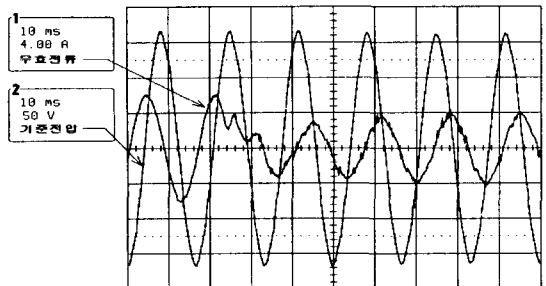
(c) 모선전압과 무효전류(필터전단)



(d) 직류리액터의 전류 변화



(e) 출력무효전류



(f) 모선전압과 무효전류(진->지상)

그림 9. 실험결과

Fig. 9. Experimental result with scaled model

6. 결 론

본 연구에서는 공진형 전류원인버터에 의한 무효전력보상기를 제안하고 동작과 성능을 검증하기 위해 이론적인 해석과 이를 토대로 EMTP를 이용한 시뮬레이션을 실시하였다. 또한 하드웨어 구현의 타당성을 확인하고 시뮬레이션 결과를 비교검증하기 위해 축소모형을 제작하여 실험을 실시하였다. 제안하는 공진형 전류원인버터는 재래의 싸이리스터 브리지로 구성되어 있으며, 직류링크단에는 에너지저장용 리액터와 커뮤테이션용 LC 공진회로와 2개의 싸이리스터 스위치로 구성되어 있고 출력파형은 전류원 PWM으로 동작한다.

제안하는 시스템은 기존의 전압원인버터식 무효전력보상기에 비해 하드웨어 비용이 저렴하고 스위칭소자의 직렬운용이 용이하여 전력계통에 적합한 동작전압을 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 그 이유는 싸이리스터브리지의 경우 스위칭소자의 직렬운용은 이미 직류고압송전에서 검증된 기술이기 때문이다.

앞으로 계속되어야 할 연구는 계통과의 동적응동에 대한 세부고찰이 필요하고 위상제어정류기용 싸이리스터를 사용할 경우 교류반주기당 3-5펄스 정도만 가능하나 인버터용 고속싸이리스터를 사용할 경우 교류반주기당 7-9 펄스로 동작이 가능하므로 출력파형의 개선을 위해 이에 관한 실험이 필요하다.

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단 연구비 지원으로 이루어졌음. (과제번호 96-001-E0718)

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.W. Edward, et. al, "Advanced Static Var Generator employing GTO Thyristors", 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 Generator using Self-Commutated Inverters for Improving Power System Stability", IEEE PES Winter Meeting, Paper No. 92-WM165- 1PWRS, Jan. 26-30, 1992.
- [5] G. Ledwich, et. al, "Soft Switched Notching Current -Source Converters", Power Electronics Specialist Conference, July, 1992, Toledo Spain, pp.1093-1097.
- [6] 한 병문, 백 승택, "공진형전류원인버터에 의한 무효전력보상기의 동특성 해석", 대한전기학회 전력전자연구회, 춘계학술회의, 호남대학교, 1998.4.25

저 자 소 개



백 승택(白承澤)
1971년 11월 24일 생. 1997년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



한 병문(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 선임연구원.

현재 명지대 전기정보제어공학부 부교수

Tel : (0335) 330-6366

E-mail : erichan@myongji.ac.kr