

축소모형에 의한 공진형 전류원 인버터식 무효전력보상기의 특성 분석

한 병 문*, 백 승 태*, 박 덕 희*, 소 용 철**

*명지대학교 전기제어계측공학부, **생산기술연구원

Characteristic Analysis of Reactive-Power Compensator using Resonant Current-Source Inverter by simplification model

Byung-Moon Han*, Seung-Taek Baek*, Duk-Hee Park*, Yong-Cheol So**

*Myongji University, **KITECH

Abstract - This paper describes a scaled model for PWM thyristor current-source inverter with a commutation circuit. The system consists of a 6-pulse thyristor bridge and an LC resonant circuit with thyristor switches, which offers thyristors to have turn-off capability for PWM operation with minimal switching losses. The proposed system can be used as a reactive power compensator with PWM operation for the utility application. There would be two advantages in the proposed system over the existing voltage source inverter. One is the low system cost due to using the conventional thyristors. Another is easy expansion of system operation voltage because the series operation of thyristor devices is already proven in HVDC system.

I. 서론

80년대 후반에 대용량 스위칭소자가 개발되면서 이를 이용하여 전력계통의 무효전력을 효과적으로 보상하는 인버터식 무효전력보상기가 여러 학자들에 의해 제안되었다 [1,2]. 인버터식 무효전력보상기는 기능상 동기조상기와 동일하나 응답시간이 대단히 빠르므로 전력계통의 과도안정도와 전압안정도를 증대시키고 장거리 송전선로에서 발생하기 쉬운 저주파공진을 신속히 감소시키는 기능을 부여한다. 인버터식 무효전력보상기의 스위칭소자로는 GTO 또는 IGBT가 사용되는데 게이트에서 자기소호기능을 갖으므로 이들 소자로 구성된 인버터는 스위칭주파수가 높은 전압원방식으로 동작한다. 통상의 전압원인

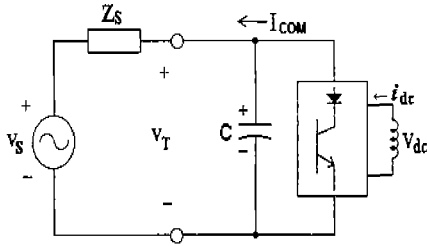
버터는 소자에서 스트레스가 큰 “하드스위칭”으로 동작하여 손실이 큰 단점을 갖는다[3,4]. 또한 전력계통에 응용할 경우 운용전압이 높기 때문에 다수의 소자를 직렬로 연결해야 하는데 전압원인버터의 경우 직렬동작이 어려운 단점을 갖는다. 자연전류방식인 싸이리스터 브리지는 전류원인버터로 교류모터구동에 주로 사용되어 왔다. 그런데 이 싸이리스터 브리지에 커뮤테이션회로를 부착하면 높은 주파수로 스위칭이 가능하여 자기소호 기능을 갖는 PWM 전류원인버터로 동작이 가능하다[5]. 이 경우 싸이리스터의 턴오프 특성에 따라 스위칭주파수가 결정되는데 통상 위상제어정류기에 사용되는 싸이리스터의 경우 800Hz 정도의 스위칭은 충분하다. 본 논문에서는 싸이리스터 브리지에 커뮤테이션용 공진회로를 부착한 무효전력보상기의 모형을 구성하고 이의 실험을 통해 전력계통에의 응용 가능성을 검토하는 것을 목적으로 한다. 싸이리스터 전류원인버터의 경우 소자의 직렬연결이 쉬워 동작전압을 높이기 쉽고 소자의 가격이 저렴하여 시스템비용의 절감이 가능하다.

II. 전류원 무효전력보상기

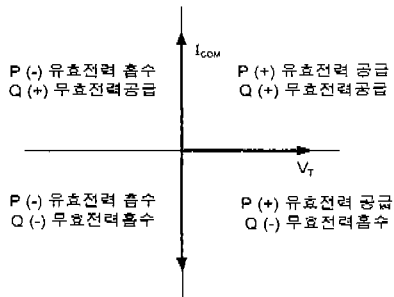
전압원 무효전력보상기는 입력단에 연결된 리액터 양단의 전압차에 의해 형성되는 전류에 의해 보상할 무효전력의 양이 결정되는데 전류원의 경우는 점호각에 의해 주입전류를 직접 제어한다. 그림 1a는 전류원 무효전력보상기의 단상등가회로를 나타낸 것이다.

무효전력보상기가 전력계통에 무효전력을 주입 또는 흡수하기 위해서는 연결점의 전압에 대해 위상이 90° 앞서거나 뒤선 상태의 주입전류를 생성해야 한다. 또한 주입되는 무효전류의 양을 조절하기 위해서

는 점호각을 90° 위치에서 좌우로 편차를 준다. 주입 전류와 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 무효전력보상기에 무효전력을 공급하고, 보상기의 전류 I_{COM} 이 교류측 단자전압 V_T 에 대해 $+90^\circ$ 의 위상각을 갖으면, 교류계통은 무효전력보상기로부터 무효전력을 공급받는다. 한편 주입전류의 위상이 교류전압보다 90° 보다 적은 각을 이루면 보상기는 유효전력을 교류계통에서 에너지를 흡수하여 직류측에 연결된 리액터에 저장하여 리액터의 전류는 증가된다. 반면에 주입전류의 위상이 교류전압보다 90° 보다 큰 각을 갖으면 보상기는 유효전력을 교류계통에 방출하여 직류측에 연결된 리액터에서 에너지가 방출되어 리액터의 전류는 감소된다.



(a) 단상등가회로

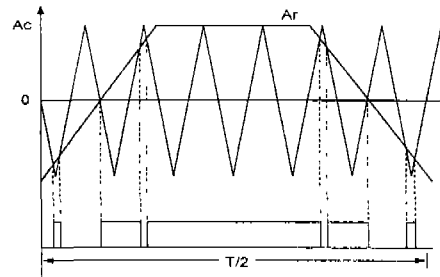


(b) 유·무효전력 출입

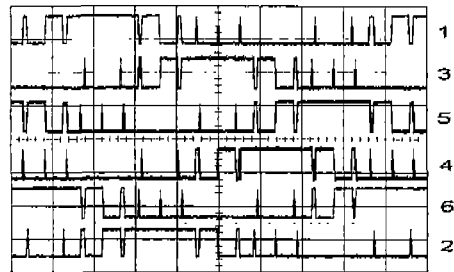
그림 1. 전류원 무효전력보상기

전류원 인버터의 펄스폭변조(PWM) 방식은 전압원 방식과 달리 기준신호로 정현파대신 사다리꼴파형을 사용하는데 그림 2는 전류원인버터의 PWM 방식을 나타낸 것이다. 여기서 A_c 는 삼각 캐리어파의 진폭이고, A_r 은 사다리꼴 변조파의 진폭이다. 게이트신호는 $A_r \geq A_c$ 일 때 1이 되고, $A_r < A_c$ 일 때 0이 된다. 교류 반주기 동안 하나의 스위칭 소자에 공급되는 PWM 펄스의 수는 소자의 스위칭속도에 따라 임의로 결정된다. 하나의 폴에 위치한 2개의 스위칭소

자에 공급되는 펄스는 각각 60° 의 위상차를 갖으며 전류원인버터의 특성상 커뮤테이션시 적어도 상단 스위칭소자중 하나와 하단 스위칭소자중 하나는 반드시 온(on) 상태를 유지해야한다. 전류원 인버터는 항상 전류가 흐를 수 있는 폐루프를 형성해줘야 하기 때문에 실제로 출력전류의 극성이 바뀌거나 전류의 방향이 한 상에서 다른 상으로 전환할 경우 잠시 동안 스위치가 오픈되어 있는 경우가 발생하는데 이때 전압스파이크가 발생한다. 그러므로 전류의 방향이 바뀌는 이 구간에서 순간 상단스위치와 하단스위치를 단락시켜주는 shoot-through 펄스가 필요하다. 전류원 인버터의 교류입력단에는 스위칭소자의 전류가 차단이 될 때 발생하는 과전압을 흡수하고 출력전류의 고조파를 감소시키는 필터 기능을 위해 교류 캐패시터가 연결되어 있는데 shoot-through 펄스는 이 교류 캐패시터가 과충전되는 것을 방지하는 역할도 한다.



(a) 사다리꼴 PWM



(b) 생성 PWM 펄스

그림 2. 전류원인버터의 PWM 펄스

III. 공진형 무효전력보상기

공진형 무효전력보상기는 싸이리스터 브리지의 직류링크단에 커뮤테이션을 위한 공진회로가 부착된 구조를 갖고 있다. 이 공진형 무효전력보상기는 자기소호형 스위치를 사용한 인버터에 비해 스위칭손실이 적고 고주파 스위칭이 가능하다. 역회복시간이 대단

히 짧은 싸이리스터를 사용하는 경우 인버터브리지의 모든 싸이리스터를 고주파 PWM으로 동작시키는 것이 가능하다. 그림 3은 공진형 무효전력보상기의 커뮤테이션 동작을 설명하기 위한 간이화회로를 나타낸 것이다. 기본회로는 앞에서 설명한 직류원 무효전력 보상기와 동일하고 커뮤테이션회로는 에너지저장용 리액터와 병렬로 연결된 LC공진회로가 있는데 이 공진회로는 싸이리스터 T_7 과 병렬로 그리고 T_8 과 직렬로 연결되어 있다.

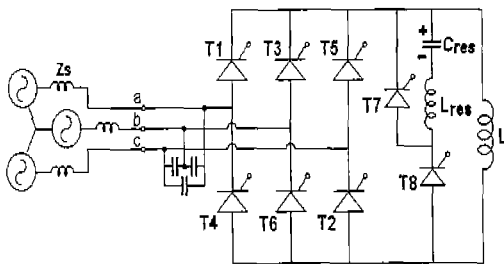
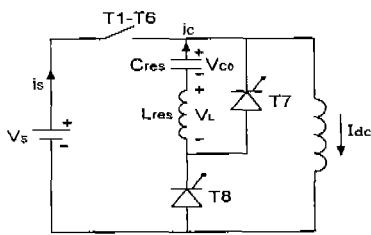
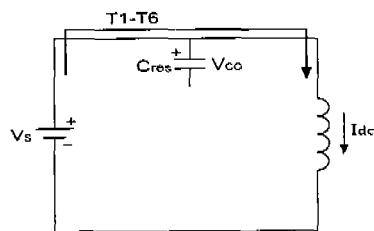


그림 3. 공진형 무효전력보상기

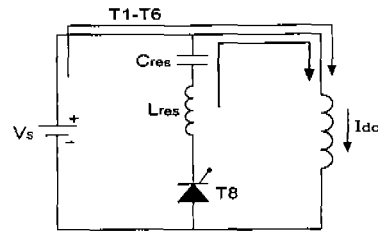
그림 4는 공진형 무효전력보상기의 커뮤테이션 동작을 모드별로 나타낸 것이다. 그림 4a는 회로의 초기상태를 나타낸 것으로 먼저 공진회로의 캐패시터는 초기전압 V_{co} 로 충전되어 있는 것으로 하고 인버터 브리지의 싸이리스터 T_1 과 T_6 가 오프상태로 있는 것으로 가정한다. 또한 입력교류전압 V_s 의 주기는 PWM동작을 위한 커뮤테이션 주기에 비해 대단히 짧으므로 편의상 직류전원 V_s 로 하였다.



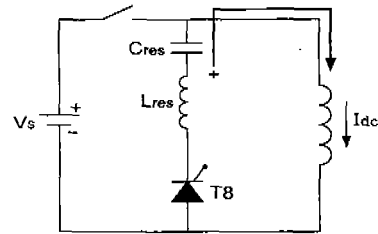
(a) 초기상태



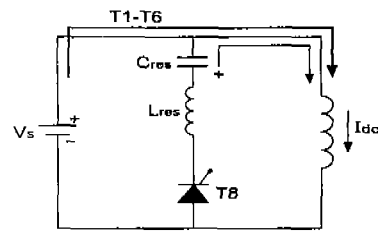
(b) 모드 1



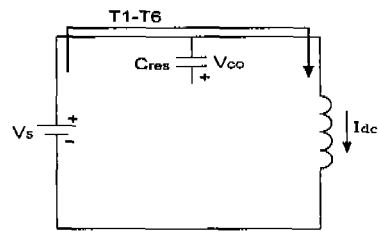
(c) 모드 2



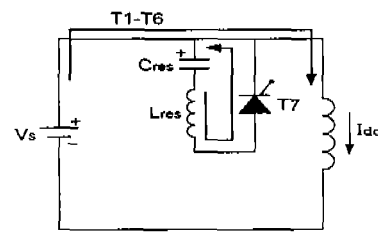
(d) 모드 3



(e) 모드 4



(f) 모드 5



(g) 모드 6

그림 4. 커뮤테이션 동작 모드

그림 4b는 첫 번째 동작모드로 인버터스위치 T_1 과 T_6 이 닫히면서 에너지저장용 리액터에 전류가 흐르는 것을 나타낸다. 이 모드에서 공진캐패시터는 다음

에 예상되는 링크전압보다 훨씬 더 높은 정방향 전압으로 충전되어 있다. 그림 4c에서 모드 2는 싸이리스터 T₈이 온이 되면서 시작된다. 공진캐패시터에 저장된 에너지는 T₈, L_{res}, C_{res}, 그리고 I_{dc} 전류원으로 구성되는 바이패스 회로에서 공진전류 i_c(t)를 증가시킨다. i_c(t)가 I_{dc}에 도달하면 인버터 스위치 T₁과 T₆는 손실없이 자연스럽게 전류가 오프되어 그림 4d에 보인 모드 3로 동작한다. 모드 3에서 에너지저장리액터는 공진캐패시터를 역방향으로 충전시키는 동작을 한다. 에너지저장리액터의 에너지는 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 T₈은 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 T₇을 턴온시켜 공진특성을 이용한다. 각 동작모드의 전류와 전압의 관계를 구하기 위해서는 회로방정식의 유도가 필요한데 먼저 모드 2의 동작동안 회로방정식은 다음과 같다.

$$V_s = v_c(t) + v_L(t) \quad : \quad i_s(t) = I_{dc} - i_c(t) \quad (1)$$

$$v_c(t) = \frac{1}{C_{res}} \int i_c(t) dt \quad : \quad v_L(t) = L_{res} \frac{di_c(t)}{dt} \quad (2)$$

방정식 (1)과 (2)를 캐패시터전류 i_c(t)에 대해 풀면 다음 관계를 얻는다.

$$i_c(t) = \frac{1}{\omega L_{res}} (V_s - V_{co}) \sin \omega t \quad (3)$$

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

한편 전원에서 공급되는 전류 i_s(t)는 다음 식과 같다.

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

전류 i_s(t)를 0으로 만들기 위해서는 방정식 (4)의 우변을 영 또는 영보다 작게 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 클 경우 입력 전류의 감소는 빠르지만 이 감소시간은 인버터 싸이리스터의 턴오프시간과 역회복시간 보다는 커야한다. 따라서 최소회복시간 t_p에 대해서 방정식 (4)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

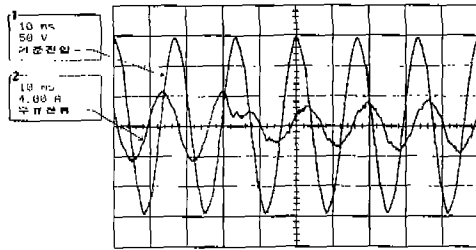
$$V_{co} \geq \frac{I_{dc}}{\sin \omega t_p} \sqrt{\frac{L_{res}}{C_{res}}} + V_s \quad (8)$$

IV. 축소모형실험

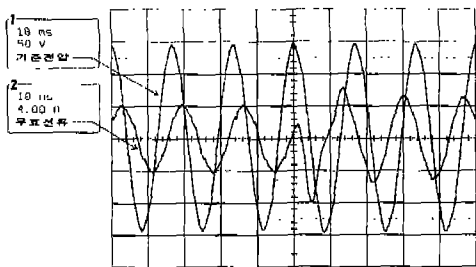
공진형 전류원 무효전력보상기의 동작과 특성을 검증하기 위해서 3상, 120V, 2kVA 용량의 축소모형을 제작하였고 인버터의 스위칭 소자로는 600V/50A 위상제어 싸이리스터를 사용하였다. 공진회로에 사용된 싸이리스터는 역회복 시간이 빠른 FR(fast recovery) 싸이리스터를 사용하였다. 시스템의 제어장치로는 마이크로프로세서 80C196KC를 사용하였으며, 계통전압과 동기된 정확한 각도 조절을 위해 계통전압의 영교차점을 검출하고 이를 80C196KC의 외부 인터럽트에 이용하여 인버터 출력 PWM의 동작시점으로 사용하였다. 그림 5는 하드웨어 축소모형을 구동시켰을 때의 실험파형을 나타낸 것이다. 공진회로를 부착한 인버터를 시험하는 단계를 거치기 위해서 점호각 α의 변화를 진상영역에서 지상영역으로 천이하도록 하였다. 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 α를 보상한 영역에서 동작한다.

그림 5a는 연결점에서의 기준전압과 무효전력보상기의 A상 전류로 진상에서 지상으로의 천이과정을 나타내고 있다. 그림 5b는 연결점에서의 기준전압과 무효전력보상기의 A상 전류로 지상에서 진상에서의 천이과정을 나타내고 있다. 그림 5c는 직류리액터의

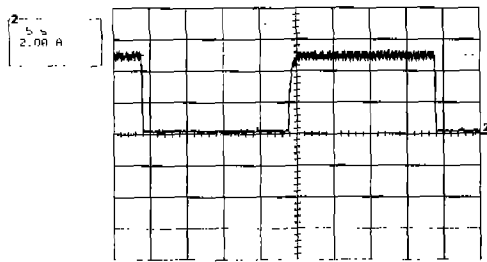
전류변화를 나타낸 것이다. 그림 5d는 공진회로의 싸이리스터 동작시 전압과 전류파형을 나타낸 것이다.



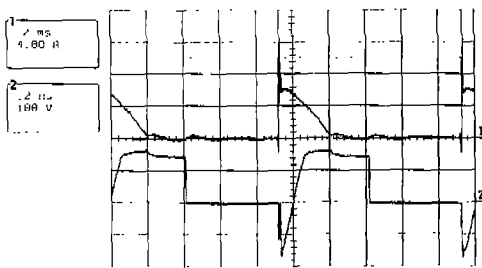
(a) 모션전압과 무효전류(진->지상)



(b) 모션전압과 무효전류(지->진상)



(c) 직류 리액터의 전류변화



(d) 공진시의 전류, 전압

그림 5. 실험결과

V. 공진형 직·병렬보상기

제안된 공진형인버터는 직류링크단에 유도성 에너지 저장요소인 리액터를 갖고 있어 출력전류의 크기와 위상을 신속하고 유연하게 제어 가능하다. 따라서

2대의 공진형 인버터를 직류링크단을 공유시켜 back-to-back으로 결합하면 선로를 통해 전송되는 전력을 유연하게 조절 가능하다. 그림 6은 캐패시터로 직렬보상된 선로와 병렬로 연계된 시스템을 개략적으로 나타낸 것인데 송전선로의 전송용량증대와 안정도 향상에 효과적일 것으로 예상된다. 제안하는 직·병렬보상에서는 변환되는 전력은 송전선로에 유기되는 전압보다 장치의 정격전압에 의해 한정된다.

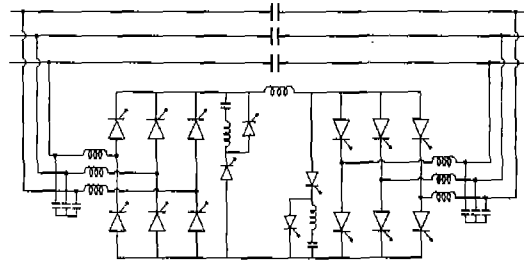


그림 6. 공진형 직·병렬보상기

VI. 결론

본 연구에서는 공진형 전류원인버터에 의한 무효전력보상기의 타당성을 검증하기 위해 축소모형을 제작하고 실험한 결과에 대해 기술하였다. 제안하는 공진형 전류원인버터는 기존의 싸이리스터브리지의 직류링크단에 커뮤테이션을 위한 LC 공진회로와 2개의 싸이리스터 스위치로 구성되어 있으며 출력전류의 파형을 개선하도록 전류원 PWM 방식으로 동작한다.

전체 시스템의 동작은 축소모형의 제작과 실험을 통해 검증 중에 있으며 기본동작의 이미 검증을 완료하였다. 제안하는 시스템은 기존의 전압원 무효전력보상기에 비해 2가지 장점을 갖는데, 하나는 재래의 싸이리스터를 사용하여 시스템비용이 저렴하다는 것이고, 다른 하나는 계통적용을 가상할 때 동작전압을 높이기 위해서는 소자를 직렬로 동작시켜야 하는데 전압원 방식에 비해 쉽게 가능하다는 점이다. 전류원 방식의 경우 이미 직류고압송전에서 이미 검증된 기술이다. 앞으로 계속되어야 할 연구는 계통과의 동적응동에 대한 세부고찰이 필요하고 위상제어정류기용 싸이리스터는 스위칭주파수가 800Hz에 불과하나 고속싸이리스터를 사용할 경우 1kHz 이상의 스위칭이 가능하므로 출력전류의 파형을 개선하기 위해 이에 관한 실험이 필요하다.

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단 연구비 지원에 의하여 수행된 결과의 일부임.

참고문헌

- [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, E. DaSilva, and T. Lipo, "Soft Switched Notching Current Source Converters", Power Electronics Specialist Conference, July, 1992, Toledo Spain, pp. 1093-1097.