

## 싸이리스터 제어 병렬 보상기에 의한 전력 제어 연구

정교범

홍익 대학교 전기공학과

### Power Flow Control of Thyristor Controlled Shunt Compensator

Gyo-Bum Chung

Dept. of Electrical Engineering, Hongik University

#### Abstract

A thyristor controlled shunt compensator, which is installed in the middle of the transmission line is adopted for controlling real power flow in a simple power transmission system. By means of the Fourier series representation of the thyristor switching action and the system parameters, the thyristor current equations are derived, which transmit the required real power of the simple power transmission system and inform the thyristor firing angle, the thyristor conduction angle, the power flows and the harmonic characteristics. EMTP simulations at the various operating points show the dynamic characteristics of the thyristor controlled shunt compensator and correspond to the results calculated with the Fourier series representation.

#### 1. 서 론

최근 전력계통내의 기존설비의 송전용량 증대 및 유연성 개선을 위하여 FACTS 기기의 개발·연구가 활발히 진행되고 있다[1,2,3]. 기존의 전력계통에서는 장거리 송전선의 유효전력 송전용량의 증가를 위해, 직렬 삽입 콘덴서(condenser)를 사용하였다. 그러나, 최근의 고내전압·대전류용 싸이리스터와 GTO의 개발은 Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)라는 개선된 형태의 직렬캐패시터로 발전하였으며, 다양한 FACTS 기기중에서 TCSC는 유효전력 제어 측면에서 가장 경제적으로 평가되고 있다[4,5].

장거리 송전선로의 송전용량 증대를 위한 다른

FACTS 기기로는 싸이리스터제어 병렬보상기가 있다. 싸이리스터제어 병렬보상기는 TCSC와 같은 구조를 갖고 있으나, 출력전압이 송전선로에 병렬로 삽입되는 점이 다르다. 싸이리스터제어 병렬보상기에 의해 보상되는 임피던스는 싸이리스터 도통각  $\sigma$ 의 크기에 의해 결정되며, 그 크기는 전력시스템 내의 각종 상수 및 싸이리스터 점화각  $\alpha$ 에 의해서 변화된다.

본 논문은 싸이리스터 제어 병렬보상기의 스위칭 작용에 의하여 전력계통내에 새로이 설정한 동작점의 특성을 비교·연구한다. 이를 위하여, 시스템 내의 전압, 전류, 임피던스 및 스위칭 동작의 복소수 푸리에 급수(Complex Fourier Series) 표현식을 이용한 전력방정식의 해를 구하여 정상상태 특성을 해석하고, EMTP 시뮬레이션으로 과도특성을 비교·해석한다.

#### 2. 싸이리스터제어 병렬보상기

그림 1은 본 연구에 사용된 싸이리스터제어 병렬보상기가 설치된 간단한 전력송전 시스템을 보인다.

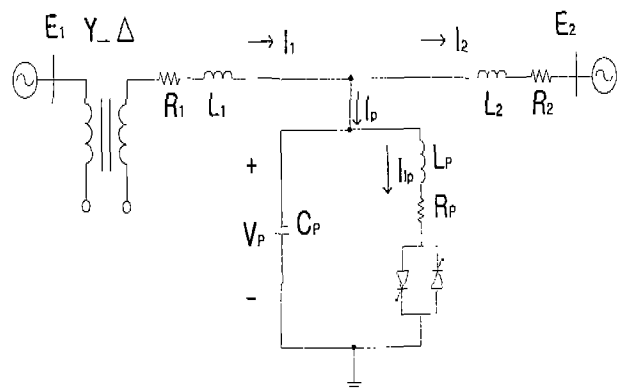


그림 1. 싸이리스터제어 병렬보상 전력송전 시스템

그림 1의 전력송전시스템은 테브난(Thevenin) 정리를 이용하여 발전기를 모의한 등가전압원  $E_1$ ,  $E_2$ , 발전기 내부 임피던스와 송전선을 모의한 등가저항  $R_1$ ,  $R_2$ , 등가인덕턴스  $L_1$ ,  $L_2$ , 및 3상 Y- $\Delta$  변압기로 간략하게 처리되었다. 그리고 병렬보상기는 2개의 싸이리스터, 스너버회로, 저항, 인덕터, 캐패시터, 각종 신호처리 및 싸이리스터 게이트 신호 발생을 위한 제어기로 구성된다.

싸이리스터제어 병렬보상기는 전력송전 시스템의 중간지점에 설치되어 전압원  $E_1$ 과 전압원  $E_2$  사이의 전력조류를 제어한다. 그림 1의 전력송전시스템 상수의 Per Unit 값은 표 1과 같다.

표 1. 전력송전 시스템 상수의 P.U.값

$R_1$	0.0139	$R_2$	0.0139
$L_1$	0.00103	$L_2$	0.00103
$L_p$	0.00028	$C_p$	0.00875
$E_1$ 최대값	1	$E_2$ 최대값	1
$E_1$ 위상각	$30^\circ$	$E_2$ 위상각	$0^\circ$

TCSC의 운전모드와 마찬가지로 싸이리스터제어 병렬보상기의 운전모드는 싸이리스터 도통각  $\sigma$ 의 크기에 따라 Blocked 모드, Vernier 모드 및 Bypass 모드로 구분된다.

싸이리스터제어 병렬보상기의 60[Hz] 등가임피던스는 도통각  $\sigma$ 의 크기, 캐패시턴스 및 인덕턴스에 의해 용량성 임피던스 혹은 유도성 임피던스의 값을 전력송전 시스템에 제공하며 식 (1)과 같다[6].

$$X_c = \frac{-\omega L_{eq}}{1 - \omega^2 L_{eq} C_p} \quad (1)$$

여기서

$$L_{eq} = \frac{\pi L_p}{\sigma - \sin \sigma} \quad (2)$$

그림 2는 싸이리스터 도통각  $\sigma$ 의 크기 변화에 따른 싸이리스터제어 병렬보상기의 등가임피던스의 변화를 보인다. 등가임피던스는 용량성 임피던스에 유도성 임피던스의 값을 가지며, 일부 값을 취할 수 없는 영역과 도통각  $\sigma = 120^\circ$  근처에서 공진점이 존재함을 보인다.

싸이리스터제어 병렬보상기의 스위칭 동작에 의해 시스템 전압  $E_1$ 이 공급하는 유효전력 60[Hz] 성분  $P_1$ 은 식 (3)과 같다.

$$P_1 = \frac{E_1 \cdot V_p}{\frac{X_{T/L}}{2}} \sin \frac{\delta}{2} \quad (3)$$

여기서  $V_p$ 는 송전선 중간점에서의 전압,  $X_{T/L}$ 은 송전선 임피던스이다.  $P_1$ 은 시스템 전압, 상수 및 싸이리스터제어 병렬보상기의 등가임피던스에 의해 결정된다.

그림 3은 도통각  $\sigma$ 의 변화에 따른 시스템 전압  $E_1$ 으로부터 공급되는 유효전력  $P_1$ 과 무효전력  $Q_1$  및 싸이리스터제어 병렬보상기가 없을 때의 유효전력  $P_0$ 를 보인다.

그림 4는 싸이리스터제어 병렬보상기가 설치된 송전선 중간점의 전압  $V_p$ 의 크기를 보인다. 공진점에서 병렬보상기는 무한대 임피던스를 가지므로, 송전선 중간점 전압의 크기는 병렬보상기가 없는 경우와 일치한다.

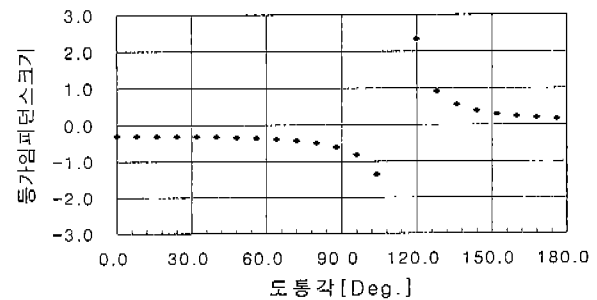


그림 2. 싸이리스터제어 병렬보상기의 등가임피던스

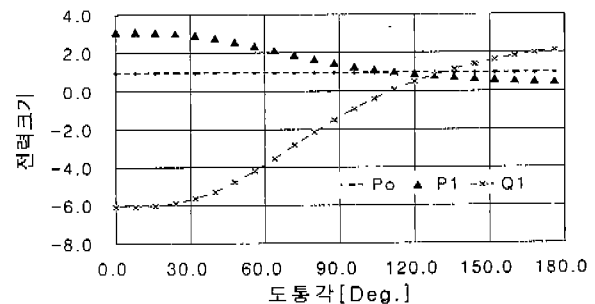


그림 3. 도통각  $\sigma$ 에 대한 전력송전시스템의 유효전력과 무효전력

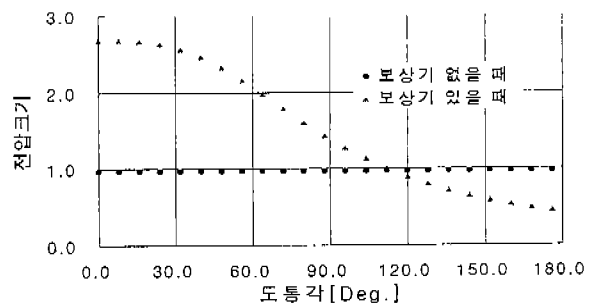


그림 4. 도통각  $\sigma$ 에 대한 중간점 전압  $V_p$ 의 크기

### 3. 푸리에 공간에서의 해석

싸이리스터제어 병렬보상기의 스위칭 동작에 의해서 새로이 설정된 운전점의 특성을 해석하기 위해서, 싸이리스터가 On일 때 1의 값, 싸이리스터가 Off일 때는 0의 값을 갖는 스위칭(Switching) 함수  $H_p(\omega t)$ 를 이용한다. 스위칭 함수  $H_p(\omega t)$ 를 푸리에 시리즈(Fourier Series)로 표현하면 식 (4)와 같다.

$$H_p(\omega t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k \cdot e^{jk\omega t} \quad (4)$$

식 (4)에서  $h_k$ 는 도통각  $\sigma$ , 점호각  $\alpha$ 의 함수이며,  $k$ 의 크기는 수치해석적으로 계산 가능한 임의의 정수  $n$ 으로 설정한다. 따라서,  $n$ 차의 고조파항까지 고려한 스위칭 함수벡터  $H_p$ 의 표현식은 식 (5)와 같다.

$$H_p^T = [h_{-n}, \dots, h_{-1}, h_0, h_1, \dots, h_n] \quad (5)$$

여기서 첨자 T는 Transpose를 의미하며, 병렬보상기의 전압  $V_p(\omega t)$ 를 푸리에 시리즈로 표현하면, 식 (6)과 같다.

$$V_p(\omega t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} V_{pn} \cdot e^{jn\omega t} \quad (6)$$

따라서  $n$ 차의 고조파항까지 고려한 병렬보상기 전압벡터  $V_p$ 는 식 (7)과 같다.

$$V_p^T = [V_{-pn}, \dots, V_{-p1}, V_{p0}, V_{p1}, \dots, V_{pn}] \quad (7)$$

그림 1에서, 싸이리스터제어 병렬보상기의 보상전류  $I_p$ 를 구하면 식 (8)과 같다.

$$I_p = (Y_{lp} \cdot H_p + Y_{cp}) \cdot V_p \quad (8)$$

여기서  $Y_{cp}$ 는  $n$ 차의 고조파항까지 고려한 싸이리스터제어 병렬보상기의 커패시터 어드미턴스 행렬이고,  $Y_{lp}$ 는 고조파 리액터 어드미턴스 행렬이다. 따라서 싸이리스터제어 병렬보상기의 리액터에 흐르는 전류벡터  $I_p$ 는 식 (9)와 같다.

$$I_p = \frac{Y_{lp} \cdot H_p}{Y_{lp} \cdot H_p + Y_{cp}} \cdot V_p \quad (9)$$

그림 1에서 송전선 전류  $I_1, I_2$ 는 식 (10)-(11)과 같다.

$$I_1 = Z_1^{-1} \cdot (E_1 - V_p) \quad (10)$$

$$I_2 = Z_2^{-1} \cdot (V_p - E_2) \quad (11)$$

여기서  $Z_1, Z_2$ 는 고조파 송전선 임피던스 행렬이다. 병렬보상기의 설치점에서 전류방정식은 식 (12)와 같다.

$$I_p = I_1 - I_2 \quad (12)$$

그림 1의 등가전압원  $E_1$ 이 공급하는 유효전력  $P_1$  및 무효전력  $Q_1$ 은 식 (13)과 같다.

$$P_1 + jQ_1 = 3 \cdot E_1 \cdot I_1 \quad (13)$$

유효전력조류 제어기로서 싸이리스터제어 병렬보상기를 사용할 때, 식 (4) - (13)으로부터 등가전압원  $E_1$ 이 공급하는 유효전력  $P_1$ 을 만족하고, 인덕터 전류  $I_p$ 는 싸이리스터 Turn-Off 순간에 0의 값을 가지는 조건을 만족하는 점호각  $\alpha$ 와 도통각  $\sigma$ 를 수치해석적 방법으로 구할 수 있다.

표 2는 그림 1 시스템의 여러 동작점에서의 전력조류  $P_1, Q_1$ 의 P.U. 값과 점호각  $\alpha$ , 도통각  $\sigma$  및 병렬보상기 출력전압  $V_p$ 의 고조파 특성의 계산 결과를 보인다.

표 2. 정상상태에서의 병렬보상기 운전점과 고조파특성

운전조건	$P_1$	$Q_1$	점호각 $\alpha$	도통각 $\sigma$	THD of $V_p$
Blocked 모드	3.103	-6.082	-	-	-
$P_1$ 100% 증가	1.981	-3.087	44.7°	64.2°	6.26%
보상기 없음	0.972	0.224	-	-	-
0% 보상	0.972	0.371	21.7°	106.4°	14.9%
$P_1$ 20% 감소	0.78	1.0	13.9°	121.3°	15.3%
Bypass 모드	0.472	2.251	-	-	-

### 4. EMTP 시뮬레이션

싸이리스터제어 병렬보상기의 과도특성 해석을 위해서 EMTP 시뮬레이션을 수행하였다. 전력송전 시스템은 초기에는 병렬보상기없이 전압  $E_1$ 으로부터 0.972 [P.U.] 크기의 유효전력  $P_1$ 을 공급하며, 8.3[msec]에서 싸이리스터제어 병렬보상기가 투입된다. 점호각  $\alpha$ 는 3장 표 2의 결과를 이용하며, 결과 파형의 단위는 P.U.이다.

그림 5은 100% 전력 증가를 위해 Vernier 모드의 병

병렬보상기를 투입시킨 후의 전력파형을 보인다. 전력파형의 동요는 30[ms]정도의 시간이 지난후에 정상상태에 도달한다.

그림 6은 병렬보상기가 투입된 후, 300[ms]정도의 비교적 긴 시간이 지난 후에, 시스템 전압  $E_1$ 의 공급전력이 투입전과 같은 초기 동작점에서 다시 운전된다. 이것은 사이리스터제어 병렬보상기의 스위칭 동작에 의한 것이다. 사이리스터의 스위칭 동작은 고조파 전압·전류를 발생시키며, 그림 7은 캐패시터 전압의 P.U. 단위로 표현된 파형을 보인다. 캐패시터 전압  $V_p$ 의 THD는 14.9%이고, 크기는 기준전압과 비슷함을 알 수 있다.

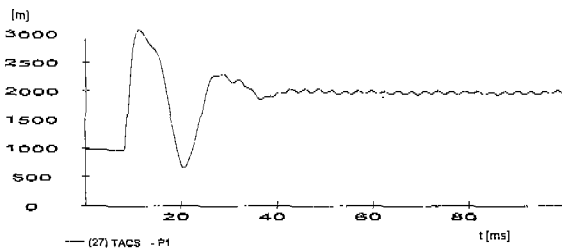


그림 5. Vernier 모드 투입후의 100% 증가된  $P_1$  파형

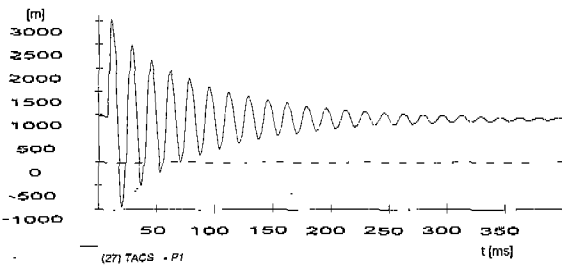


그림 6. 0% 보상 Vernier 모드 투입후의  $P_1$  파형

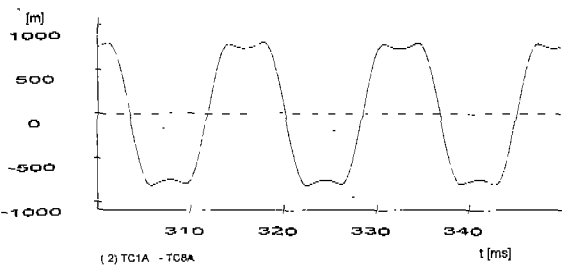


그림 7. 0% 보상 Vernier 모드 투입후의  $V_p$  파형

그림 8는 시스템 전압  $E_1$ 의 공급전력  $P_1$ 을 -20% 감소시키기 위해서 병렬보상기를 투입한 후의 전력파형을 보인다. 600[ms]의 긴 시간이 지난 후에도 전력의 동요는 계속되고 있다.

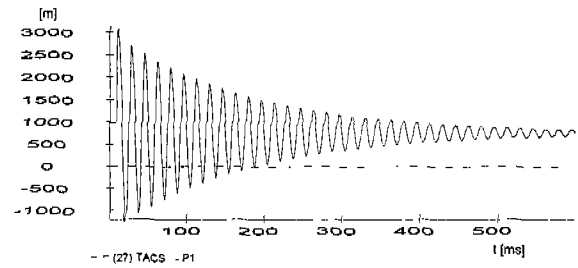


그림 8. -20% 보상 Vernier 모드 투입후의  $P_1$  파형

## 5. 결 론

본 연구는, 대표적인 FACTS 기기중의 하나인 사이리스터제어 병렬보상기의 송전전력 제어특성, 전압·전류의 고조파특성 및 사이리스터 점호각  $\alpha$ 와 도통각  $\sigma$ 의 값을 구하기 위해서, 푸리에 공간에서 표현된 사이리스터 전류방정식의 해를 수치해석적 방법으로 구하였으며, EMTP 시뮬레이션으로 얻은 파형을 이용하여 푸리에 공간에서의 해석 결과를 검증하였다. EMTP 시뮬레이션은 사이리스터제어 병렬보상기가 전력송전시스템의 용량성 동작점에서 전력을 유연하게 제어할 수 있음을 보이고, 유도성 동작점에서는 전력의 동요가 오래 지속됨을 보인다.

## [참고문헌]

- [1] N. G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power System," Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, April, 1988, pp. 481--482.
- [2] L. Gyugyi, "Solid-State Control of AC Power Transmission," EPRI workshop on the Future in High Voltage Transmission, Cincinnati, Ohio, November 1990.
- [3] G.B. Chung, "High Frequency AC Link Converter as a Phase Shifter in a Power Transmission System," IEEE APEC Proceedings, Dallas, Texas, March 1995, pp. 999-1005.
- [4] E.V. Larsen, et. al., "Characteristics and Rating Considerations of Thyristor Controlled Series Compensation," IEEE PES Paper 93-SM-433-3-PWRD. Vancouver, British Columbia, July 1993.
- [5] 정교범, "공진형 컨버터를 이용한 직렬보상기와 병렬보상기의 비교연구," 대한전기학회 하계학술대회 논문집 B, 1995, pp. 468--470.
- [6] T.J.E. Miller, "Reactive Power Control in Electric Systems," John Wiley & Sons, 1982.