

부하 특성을 고려한 TCSC 전력송전 시스템의 고조파 해석

정 교 범

홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부

Harmonic Analysis of TCSC Power Transmission System considering Load Characteristics

Gyo-Bum Chung
Hongik University

ABSTRACT

This paper investigates the harmonics of TCSC power transmission system having nonlinear VI characteristic loads. Nonlinear VI characteristic components are modelled with Nortons harmonic current sources. The system parameters such as line impedances, admittances and node voltages, and the thyristor switching action are described in complex Fourier series. EMTP simulation studies with a detailed three-phase TCSC power transmission system are also performed in order to verify the harmonic analysis at the steady state.

TCSC의 싸이리스터 스위칭에 의하여 발생한 고조파 전류는 부하 특성에 영향을 줄 수 있으며, 또한 비선형 부하에 의하여 발생한 고조파 전류도 TCSC 시스템의 싸이리스터 동작에 영향을 줄 수 있다. 따라서 정상적인 TCSC 싸이리스터 동작과 부하 동작을 보장하기 위해서 고조파 필터를 설치하여야 하며, 이를 위해서 비선형 부하 특성을 갖는 TCSC 전력 송전 시스템내에 존재하는 고조파전류에 대한 정확한 해석이 필요하다.^[4,5,6]

본 논문에서는 비선형 부하는 Norton 등가회로에 의해서 표현되고, TCSC 전력송전 시스템내의 상수 및 싸이리스터의 스위칭 동작은 푸리에 공간에서 표현된다. 주어진 운전 조건을 만족하는 비선형 싸이리스터 전류방정식의 해를 구하여 시스템 내에 존재하는 고조파 해석을 수행하고, EMTP 시뮬레이션을 이용하여 해석 결과를 검증한다.

1. 서론

송전 용량 증대를 위해서 TCSC를 설치한 전력 송전 시스템은 그림 1과 같이 TCSC, 60[Hz] 전압원, 송전선, 변압기 및 각종 부하로 구성되어 있다. 최근의 전력용 반도체 스위칭 소자의 발달로 인하여, 전력송전 시스템 내의 스위칭 부하는 증가하고 있다. 스위칭 부하는 비선형 전압·전류특성을 가지며, 전력송전 시스템으로 고조파 전류를 유입시킨다.^[1,2,3]

2. 시스템 구성요소의 Fourier Series 표현

2.1 전원전압의 푸리에 표현

전력계통 내에 존재하는 전압원은 고조파 성분을 포함하는 주기함수로서 식 (1)과 같다.

$$E_S(\omega t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} E_{k,S} \cdot e^{jk\omega t} \quad (1)$$

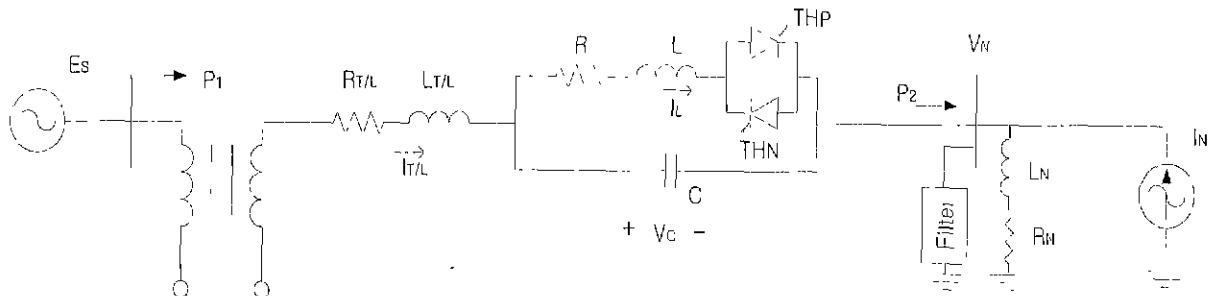


그림 1 고조파 전류원 부하에 연결된 TCSC 전력 송전 시스템

Fig 1 TCSC power transmission system connecting to a harmonic current source.

복소수 Fourier 공간에서 n차 고조파 항까지 고려한 전압원 벡터 E_S 는 식 (2)와 같다.

$$E_S^T = [E_{-n,S}, \dots, E_{-1,S}, E_{0,S}, E_{1,S}, \dots, E_{n,S}] \quad (2)$$

2.2 비선형 부하의 푸리에 표현

전력계통 내에 존재하는 비선형 VI 특성을 가진 대표적인 부하는, 반도체 스위칭 소자를 이용하는 각종 전력 변환기기이다. 전력변환기기는 스위칭 동작에 의하여 고조파 전류를 계통에 유입시킨다. 정상상태에서 전력변환기기에 의해 전력계통에 유입되는 고조파 전류성분에 대하여 많은 연구가 수행되어져 왔다. 대표적인 고조파 전류 발생원은 HVDC 시스템이며, 12pulse의 경우 고조파 전류 특성은 식 (3)과 같다.

$$I_n = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{23} \cos 23\omega t + \dots \right) \quad (3)$$

식 (3)과 같은 고조파 전류 특성을 갖는 부하는 그림 1에서와 같이 Norton 등가 전류원으로 모델링되며, 복소수 Fourier 공간에서 전류원 벡터 I_N 은 식(4)와 같다.

$$I_N^T = [I_{-n,N}, \dots, I_{-1,N}, I_{0,N}, I_{1,N}, \dots, I_{n,N}] \quad (4)$$

2.3 싸이리스터 스위칭

TCSC 모듈의 싸이리스터 스위칭 동작은 싸이리스터가 On일 때 1의 값, 싸이리스터가 Off일 때는 0의 값을 갖는 스위칭함수를 이용하여 표현한다. 그림 1 TCSC 전력송전 시스템의 싸이리스터 스위칭 함수 $H(\omega t)$ 를 그림 2에 나타내었다.

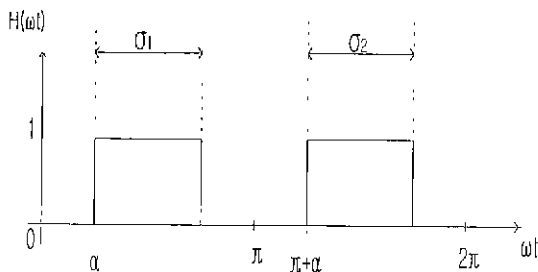


그림 2 TCSC의 싸이리스터 스위칭 함수 $H(\omega t)$
Fig 2 The thyristor switching function of TCSC. $H(\omega t)$

TCSC 싸이리스터 게이트 TH_p 에 인가하는 점호각은 α 이고, 싸이리스터 게이트 TH_n 에 인가하는 점호각은 $\pi + \alpha$ 이다. 복소수 푸리에 시리즈로 표현된 스위칭 함수

$H(\omega t)$ 는 식 (5)와 같다.

$$H(\omega t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_k \cdot e^{jk\omega t} \quad (5)$$

식 (5)에서 h_k 는 식 (6) 및 식 (7)과 같다.

$$h_0 = \frac{1}{2\pi} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (6)$$

$$h_k = \frac{j}{2k\pi} [e^{-jk\phi_1} (e^{-jk\sigma_1} - 1) + e^{-jk\phi_2} (e^{-jk\sigma_2} - 1)] \quad (7)$$

식 (5)에서 n차 고조파 항까지 고려한 스위칭 벡터 H 는 식 (8)과 같다.

$$H^T = [h_{-n}, \dots, h_{-1}, h_0, h_1, \dots, h_n] \quad (8)$$

2.4 임피던스 및 어드미턴스 구성 요소

TCSC 전력송전 시스템은 송전선, TCSC를 구성하는 커패시터 및 인덕터와 고조파 제거를 위한 필터와 같은 임피던스 성분으로 구성되어 있다. n차의 고조파 항까지 고려한 TCSC 커패시터 어드미턴스 행렬 Y_C 은 식 (9)와 같다

$$Y_C = \begin{bmatrix} -j\omega C & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & -j\omega C & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & j\omega C & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & j\omega C \end{bmatrix} \quad (9)$$

TCSC 서어지 인덕턴스 L 및 저항 R에 의한 어드미턴스 행렬 Y_L 은 식 (10)과 같다.

$$Y_L = \begin{bmatrix} \frac{1}{R-j\omega L} & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{R-j\omega L} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{R} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \frac{1}{R+j\omega L} & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{R+j\omega L} \end{bmatrix} \quad (10)$$

복소수 푸리에 평면에서 송전선의 저항 R_{TL} 및 인덕턴스 L_{TL} 에 의한 임피던스 행렬 Z_{TL} 과 부하단에서 Norton 등가임피던스 및 Filter에 의한 임피던스 행렬

Z_N 은 식 (9) 및 (10)과 유사한 모양을 갖는다.

3. 싸이리스터 전류 방정식

그림 1에서 부하 전류 I_N 과 송전선 전류 I_{TL} 에 의한 부하 전압 V_N 은 식(11)과 같다.

$$V_N = Z_N \cdot (I_{TL} + I_N) \quad (11)$$

송전선 전압 강하 ΔV_{TL} 을 부하 전압 V_N 과 공급 전압원 E_s 를 이용하여 구하면 식 (12)와 같다.

$$\Delta V_{TL} = E_s - Z_N \cdot (I_{TL} + I_N) \quad (12)$$

또한, 송전선 전압 강하 ΔV_{TL} 을 TCSC의 어드미턴스 행렬 Y_C, Y_L , 스위칭 벡터 H 및 송전선 전류벡터 I_{TL} 을 이용하여 구하면 식 (13)과 같다.

$$\Delta V_{TL} = \{Z_S + (Y_L \cdot H + Y_C)^{-1}\} \cdot I_{TL} \quad (13)$$

따라서, 식 (12), (13)을 정리하면 식 (14)와 같다.

$$I_{TL} = \{Z_N + Z_{TL} + (Y_L \cdot H + Y_C)^{-1}\} \cdot \{E_s - Z_N \cdot I_N\} \quad (14)$$

TCSC의 리액터 전류벡터 I_L 는 식 (15)와 같다.

$$I_L = \frac{Y_L \cdot H}{Y_L \cdot H + Y_C} \cdot I_{TL} \quad (15)$$

리액터 전류벡터 I_L 로부터 시평면상에서의 리액터 전류 $I_L(\omega t)$ 를 구할 수 있으며, 식 (16)과 같다.

$$I_L(\omega t) = \sum_{k=-n}^n I_{L,k} \cdot e^{jk\omega t} \quad (16)$$

리액터 전류는 $I_L(\omega t)$ 는 싸이리스터는 Turn-Off 순간에 0의 전류값을 가지므로, 식 (17)을 만족한다.

$$I_L(\alpha + \sigma) = 0 \quad (17)$$

수치해석적으로 운전 조건 및 식 (17)을 만족하는 TCSC 싸이리스터 점호각 α 와 도통각 σ 를 구하면, 시스템 내의 고조파 성분에 대한 해석을 할 수 있다.

4. 사례 연구 및 EMTF 시뮬레이션

4.1 TCSC 전력 송전 시스템 데이터

그림 1의 TCSC 전력송전 시스템의 시스템 상수는 표 1과 같다. P_{L0} 및 $P_{2,0}$ 는 TCSC에 의한 보상이 없는 경우이고, $P_{2,comp}$ 는 TCSC에 의한 보상이 있는 경우에 전압 E_s 에서 부하 V_N 으로 흐르는 유효전력이다. TCSC에 의한 보상이 없을 때, V_N 은 최대값 120V, 위상각 0° 이다. 부하로부터 유입되는 고조파 전류는 식 (3)과 같으나, 11차 성분만을 고려하였다.

표 1 TCSC 전력송전 시스템 상수값
Table 1 Parameters of TCSC power transmission system

R_{TL}	1Ω	L_{TL}	50mH
R	0.001Ω	R_N	1Ω
L	20mH	L_N	10mH
C	244 μF	$P_{2,0}$	778 W
P_{L0}	863 W	$P_{2,comp}$	1800 W
E_s 최대값	120V	I_N 최대값	30.8A
E_s 위상각	60°	I_N 위상각	-75.2°
L_F	1mH	C_F	58 μF

4.2 TCSC 전력송전 시스템의 고조파 해석

부하전류 I_N 에서 고조파 유입이 없을 경우, 11차 고조파의 유입이 있을 경우 및 11차 고조파 필터를 설치한 경우의 송전선 전류 I_{TL} 의 고조파 성분은 그림 3과 같다.

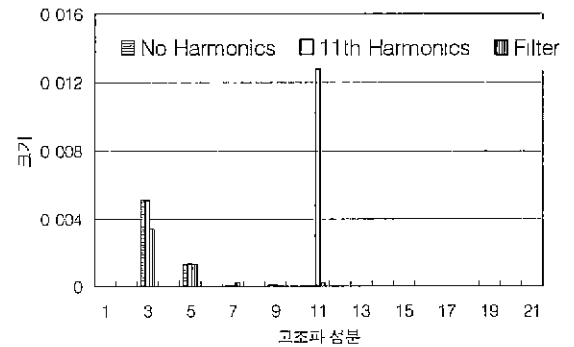


그림 3 송전선 전류 I_{TL} 의 고조파 성분
Fig 3 Harmonic components of I_{TL}

그림 4는 TCSC 전압 V_C 의 고조파 해석 결과이다. 부하로부터 유입된 고조파 전류에 의해 전압 V_C 의 고조파 성분이 변화되고, 고조파 필터 설치는 저차 고조파 성분에 영향을 줄 수 있다.

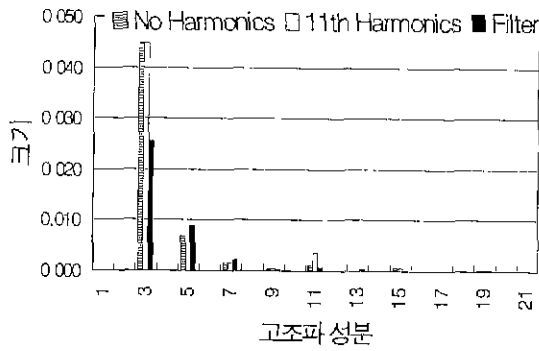


그림 4 TCSC 전압 V_c 의 고조파 성분
Fig. 4 Harmonic components of V_c

4.3 EMTP 시뮬레이션 파형

해석 결과의 검증은 위해서, 식 (17)의 계산 결과로 얻어진 점호각 α 를 이용하여 EMTP 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 5는 기본파만을 고려한 경우, 부하단 V_N 에서의 유효전력 P_2 의 파형이며, 표 1에 주어진 운전조건 $P_{2,comp}$ 를 만족한다. TCSC 싸이리스터 스위칭 동작에 의한 고조파 발생의 영향은 미약함을 알 수 있다.

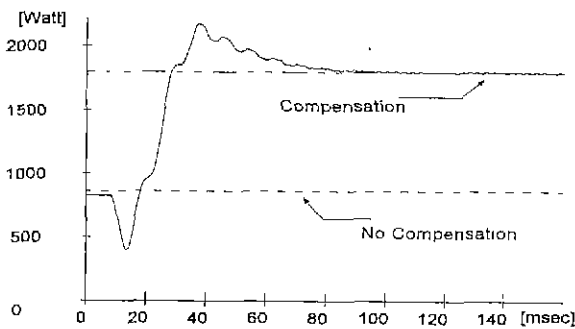


그림 5 부하단 전력 파형 P_2
Fig. 5 Powerflow P_2 at V_N node

그림 6은 부하로부터 고조파 전류의 유입이 있을 경우, 부하단 V_N 에서의 유효전력 P_2 의 파형이다. 고조파 필터의 설치가 필요함을 알 수 있다.

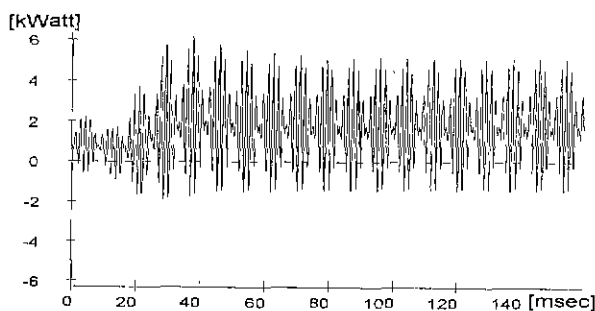


그림 6 고조파 전류 유입 부하단 전력 파형 P_2
Fig. 6 Powerflow P_2 with harmonic currents.

그림 7은 11차 고조파 필터를 설치한 경우, 부하단 V_N 에서의 유효전력 P_2 의 파형이다. 전력 파형의 리플이 감소하였음을 알 수 있다.

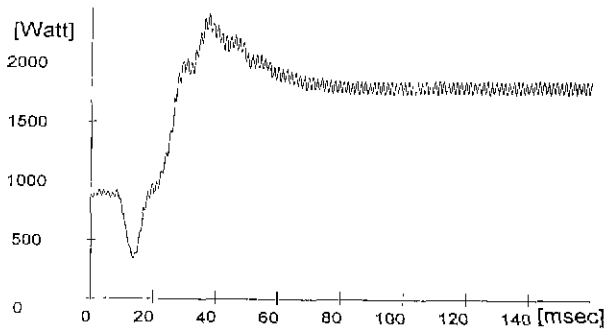


그림 7 고조파(11차) 필터 설치후의 부하단 전력 파형 P_2
Fig. 7 Powerflow P_2 with 11th harmonic filter.

5. 결론

전력계통 내에 존재하는 비선형 부하에 의해 발생하는 고조파 전류를 고려한 TCSC 전력송전 시스템의 고조파 특성을 복소수 푸리에 공간에서 해석하였다.

정상상태에서 운전 중인 비선형 부하의 고조파 특성을 Norton 전류원으로 표현하여 모델링하였다. 주어진 운전조건과 싸이리스터 전류의 Turn-Off 조건을 만족하는 점호각 α 를 구한 후에 고조파 해석을 수행하였다.

EMTP 시뮬레이션을 수행하여 푸리에 공간에서의 고조파 해석 결과를 검증하였다.

참고 문헌

- [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, pp. 481-482, 1988, April.
- [2] L Gyugyi, "Solid-State Control of AC Power Transmission," EPRI workshop on the Future in High Voltage Transmission, Cincinnati, Ohio, November 1990.
- [3] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS," IEEE Press, New York, 1999.
- [4] 정교범, "Verier 모드 2-모듈 TCSC의 특성 해석을 위한 싸이리스터 점호각 계산," 전력전자학회논문지 제 5권 1호, pp 54-62, 2000.
- [5] S.G. Jalali and R.H. Iaseter, "Harmonic Instabilities in Advanced Series Compensators," EPRI FACTS Conference, Boston, December, 1992, pp.1.4.3-1.4.28.
- [6] 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.