

# TCSC의 소신호 모형을 이용한 점호각 제어에 의한

## 저주파 진동 감쇠 효과 해석 및 제어

○ 김태현\*, 서장철\*, 박종근\*, 문승일\*\*, 한병문\*\*\*  
 \* 서울대학교 전기공학과 \*\* 전북대학교 전기공학과 \*\*\* 인천대학교 전기공학과

Analysis and Control of Low Frequency Oscillation  
 using TCSC Small Signal Model by Control of Firing Angles

○ Tae-Hyun Kim\*, Jang-Cheol Seo\*, Jong-Keun Park\*, Seung-Ill Moon\*\*, Byung-Moon Han\*\*\*

\*Seoul National University \*\* Cheonbuk National University \*\*\* University Incheon

### Abstract

TCSC can not only increase power flow but also damp low frequency oscillation by controlling firing angles of thyristors. But, a model considering voltage, current, firing angles is not derived. This paper used a small signal model considering these variables which was derived in paper [1]. TCSC model is combined with swing equation. Being related to rotor angles and firing angles of thyristors, current and synchronizing torque coefficient is reformulated. Because firing angles of thyristors can be controlled only twice within one period, swing equation is transformed to discrete time model. It is shown that low frequency oscillation can be damped by controlling firing angles in one machine infinite bus power system.

### 1. 서론

TCSC는 송전 용량을 증가시킬 뿐만 아니라 저주파 진동 현상 감쇠, SSR 억제 등의 장점이 있다. 이러한 TCSC의 특성을 알기 위해서는 TCSC의 정확한 모형이 필요하다. 저주파 현상이나 SSR 등의 현상의 해석을 위해서는 동작점 근처에서 선형화하여서 고유치를 계산하여야 한다.

TCSC의 해석 방법은 연속적인 변수(capacitor 전압)와 이산적인 변수(thyristor 점호)가 혼합되어 있어서 해석이 복잡하다. 본 논문에서는 [1]에서 제시한 TCSC 모형을 사용하였다. 이 모형은 thyristor 점호가 capacitor에 미치는 영향을 정확히 설명하고 있다. 이 과정의 핵심은 현재의 반 주기동안의 전압, 전류, thyristor의 점호 순간에 근거하여 반 주기 후의 capacitor 전압을 예측하는 것이다.

제시된 TCSC 모형은 전력 계통에서의 저주파 동요 현상의 해석을 위해서 동요 방정식과 결합되었다. 제시된 TCSC 모형과 결합하기 위하여 동요 방정식이 이산 시간 모형으로 변환되었다. 점호각은 1주기에 2번 밖에 제어할 수 없으므로 점호각 제어를 위해서는 반 주기 이산 시간 모형으로 변화되어야 한다.

1기 무한대 모션에 TCSC가 부착된 전력 계통에서의 고유치를 구했다. 점호각에 의해서 고유치가 변하므로, 점호각의 영향을 고려하여야 하며, 점호각의 제어로 저주파 진동 현상 감쇠가 가능함을 보였다.

### 2. TCSC의 소신호 모형

TCSC의 소신호 모형을 구하는 과정은 다음과 같다.

- 1) thyristor이 on인 경우와 off인 경우의 전압, 전류를 계산한다.
  - 2) 상태 전이 행렬을 이용해서 상태 방정식을 푼다.
  - 3) 동작점 근처에서 선형화해서 소신호 모형을 구한다.
  - 4) 단상 모형이 만들어지면 3상 모형으로 확장하게 된다.
- 3상 모형이 구해지면 전력 계통의 다른 방정식과 결합할 수 있게 된다.

#### 2.1 단상 모형

그림 1이 단상 TCSC의 단선도이다.

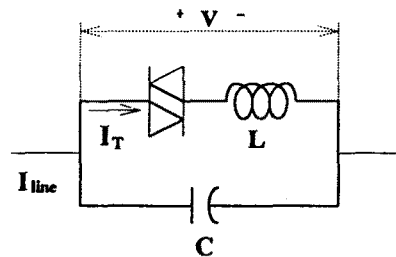


그림 1. 단상 TCSC의 단선도

역병렬 thyristor 중 하나는 전원 주파수의 반주기 중 일부분만 도통하고 나머지 기간은 도통하지 않게 된다. 반대로 연결된 다른 thyristor은 나머지 반 주기 동안 같은 방법으로 도통 비도통 과정을 반복하게 된다. thyristor이 도통하면 inductor와 capacitor에 순환 전류가 흐르게 되어서 capacitor 양단의 전압이 변하게 된다. thyristor의 개폐와 선 전류의 변화에 의한 capacitor 전압의 변화를 예측하는 해석적인 모형은 그림 2와 같다.

그림 2의 입력은 현재의 capacitor의 전압, 현재 선전류의 dq0 성분, thyristor 점호각이며 출력은 반 주기 후의 capacitor 전압이다. 이 모형의 입출력 함수의 블록선도가 그림 2에 그려져 있다.

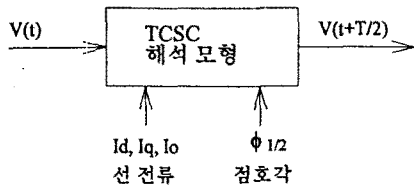


그림 2. TCSC 해석의 블록선도

본 논문에서는 편의상 a 상에 대해서 해석했는데 3상으로 변환해야 하므로 Park 변환에 의해서 dq0 기준축으로 변환해야 한다.

전류  $I_a$ 를 dq0 기준축으로 변환하면 (1)식과 같다.

$$I_a = I_d \cos \alpha t - I_q \sin \alpha t + I_0 \quad (1)$$

thyristor가 비도통인 경우 TCSC는 (2)식과 같이 직렬 capacitor로 모형화된다.

$$C \frac{dV}{dt} = I_a = I_d \cos \alpha t - I_q \sin \alpha t + I_0$$

$$\dot{y} = PB I_{dq0} \quad y = V$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\cos \alpha t}{C} & -\frac{\sin \alpha t}{C} & \frac{1}{C} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

thyristor이 도통인 경우 TCSC는 병렬 LC 회로로 모의되며 (3)식으로 모의된다.

$$C \frac{dV}{dt} = I_a - I_T = I_d \cos \alpha t - I_q \sin \alpha t + I_0 - I_T$$

$$L \frac{dI_T}{dt} = V$$

$$\dot{x} = Ax + BI_{dq0} \quad (3)$$

$$x = \begin{bmatrix} V \\ I_T \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \quad I_{dq0} = \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix}$$

thyristor의 점호, 소호 시간이 그림 3에 있다.

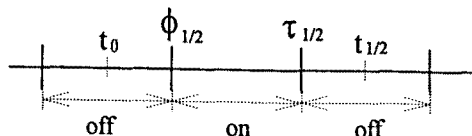


그림 3. thyristor의 점호 소호 시간

단상 TCSC의 해석적인 선형화 모형은  $t_0$ 에서의 capacitor의 전압의 변화, 점호각  $\phi_{1/2}$ 의 변화  $t_0$ 와  $t_{1/2}$  동안의 반 주기 사이에서의 선 전류의 변화로부터  $t_{1/2}$ 에서의 capacitor의 전압의 변화를 예측한다.

$t_{1/2}$ 에서의 capacitor 전압은, 3개의 구간으로 나누어서  $[t_0, \phi_{1/2}]$  구간에서는 (2)식을 적분하고,  $[\phi_{1/2}, \tau_{1/2}]$  구간에서는 (3)식을 적분하고, 마지막으로  $[\tau_{1/2}, t_{1/2}]$  구간에서는 마지막으로 (2)식을 적분해서 (4)식과 같이 된다.

$$[t_0, \phi_{1/2}]: x(\phi_{1/2}) = P^T \left[ V(t_0) + \int_{t_0}^{\phi_{1/2}} PB(s) I_{dq0}(s) ds \right]$$

$$[\phi_{1/2}, \tau_{1/2}]: V(\tau_{1/2}) = P \left[ e^{A(\tau_{1/2} - \phi_{1/2})} x(\phi_{1/2}) + \int_{\phi_{1/2}}^{\tau_{1/2}} e^{A(\tau_{1/2} - s)} B(s) I_{dq0}(s) ds \right] \quad (4)$$

$$[\tau_{1/2}, t_{1/2}]: V(t_{1/2}) = V(\tau_{1/2}) + \int_{\tau_{1/2}}^{t_{1/2}} PB(s) I_{dq0}(s) ds$$

(4) 식은 비선형인데 동작점 부근에서 선형화하면 (5)식과 같이 된다.

$$\Delta V(t_{1/2}) = F \Delta V(t_0) + G \Delta I_{dq0}(t_0) + H \Delta \phi_{1/2} \quad (5)$$

여기서 F, G, H는 (6)식과 같다.

$$F = \frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial x(\phi_{1/2})} P^T$$

$$G = \frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial I_{dq0}} + \frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial x(\phi_{1/2})} \frac{\partial x(\phi_{1/2})}{\partial I_{dq0}}$$

$$H = \frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial x(\phi_{1/2})} \frac{\partial x(\phi_{1/2})}{\partial \phi_{1/2}} + \frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial \phi_{1/2}} \quad (6)$$

(5)식에서 편미분은 (6)식으로부터 계산되는데 (7), (8)식과 같다.

$\phi_{1/2}$ 에 대한 미분은 (7)식과 같다.

$$\frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial \phi_{1/2}} = -P \left[ e^{A\sigma} x(\phi_{1/2}) + B(\phi_{1/2}) I_{dq0}(\phi_{1/2}) \right]$$

$$\frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial x(\phi_{1/2})} = P e^{A\sigma} \quad (7)$$

$$\frac{\partial x(\phi_{1/2})}{\partial \phi_{1/2}} = P^T PB(\phi_{1/2}) I_{dq0}(\phi_{1/2})$$

$I_{dq0}$ 에 대한 미분은 (8)식과 같다.

$$\frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial I_{dq0}} = P \int_{\phi_{1/2}}^{\tau_{1/2}} e^{A(\tau_{1/2} - s)} B(s) ds$$

$$\frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial I_{dq0}} = \int_{\tau_{1/2}}^{t_{1/2}} PB(s) ds$$

$$\frac{\partial x(\phi_{1/2})}{\partial I_{dq0}} = P^T \int_{\tau_{1/2}}^{\phi_{1/2}} PB(s) ds \quad (8)$$

여기서  $\sigma = \tau_{1/2} - \phi_{1/2}$ 는 thyristor 도통 기간이고  $V(\phi_{1/2})$ 는 thyristor가 점호되는 순간의 capacitor의 전압이다.

(7), (8) 식을 사용하면, (5)식의 F, G, H는 (9)식과 같다.

$$F = \cos \left( \frac{\sigma}{\sqrt{LC}} \right)$$

$$G = F \int_{t_0}^{\phi_{1/2}} PB(s) ds + P \int_{\phi_{1/2}}^{\tau_{1/2}} e^{A(\tau_{1/2} - s)} B(s) ds + \int_{\tau_{1/2}}^{t_{1/2}} PB(s) ds$$

$$H = \frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial \phi_{1/2}} + \frac{\partial V(\tau_{1/2})}{\partial x(\phi_{1/2})} \frac{\partial x(\phi_{1/2})}{\partial \phi_{1/2}}$$

$$= -P e^{A\sigma} x(\phi_{1/2}) = \sin \left( \frac{\sigma}{\sqrt{LC}} \right) \frac{V(\phi_{1/2})}{\sqrt{LC}} \quad (9)$$

### 2.2.3 상 모형

단상 모형을 3상 모형으로 확장시키는 것은 간단하다. 정상 상태에서 일정한 출력 신호를 산출하고 송전 계통의 소신호 모형과 결합시키기 위하여 TCSC 3상 모형에서 capacitor 전압은 abc 기준축에서 dq0 기준축으로 변환된다.

Park 변환식에 의한 abc 전류와 dq0 전류와의 관계는 (10)식과 같다.

$$\begin{aligned} I_a(t) &= I_d \cos(\omega t) - I_q \sin(\omega t) + I_0 \\ I_b(t) &= I_d \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) - I_q \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + I_0 \\ I_c(t) &= I_d \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) - I_q \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) + I_0 \end{aligned} \quad (10)$$

그림 4는 3상 선 전류와 thyristor 전류를 보인다.

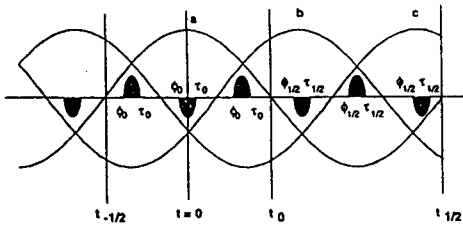


그림 4. 3상 선 전류와 thyristor 전류

TCSC 모형은  $t_0$ 에서의 값에 근거해서  $t_{1/2}$ 에서의 capacitor 전압의 dq0 성분을 구하게 된다. 3상에 대한 thyristor의 점호 소호 시간과 관계되는 B(s) 행렬이 표 1에 요약되어 있다.

표 1. thyristor 점호 소호 시간

phase	$\phi_{1/2}$	$\tau_{1/2}$	$PB(s)$
a	$\pi - \frac{\sigma}{2}$	$\pi + \frac{\sigma}{2}$	$\begin{bmatrix} \cos \alpha s & -\sin \alpha s & 1 \end{bmatrix}$
b	$\frac{2}{3}\pi - \frac{\sigma}{2}$	$\frac{2}{3}\pi + \frac{\sigma}{2}$	$\begin{bmatrix} \cos\left(\alpha s - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\alpha s - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix}$
c	$\frac{4}{3}\pi - \frac{\sigma}{2}$	$\frac{4}{3}\pi + \frac{\sigma}{2}$	$\begin{bmatrix} \cos\left(\alpha s + \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\alpha s + \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix}$

(9)식의 단상 모형을 이용하면 3상 모형은 (11)식과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V_a\left(k + \frac{1}{2}\right) &= F_a \Delta V_a(k) + G_a \Delta I_{dq0}(k) + H_a \Delta \phi_a(k) \\ \Delta V_b\left(k + \frac{1}{2}\right) &= F_b \Delta V_b(k) + G_b \Delta I_{dq0}(k) + H_b \Delta \phi_b(k) \\ \Delta V_c\left(k + \frac{1}{2}\right) &= F_c \Delta V_c(k) + G_c \Delta I_{dq0}(k) + H_c \Delta \phi_c(k) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 a,b,c 상에 대한 F,G,H는 표 1의 값에서 주어진 적분 한계를 가진 (5)식으로 주어진다. a,b,c 상에 대한 thyristor 점호 시간은 각각  $\phi_a, \phi_b, \phi_c$ 이다. F 행렬의 경우,  $F_a = F_b = F_c$ 이다.

송전 선로 모형과 결합하기 위하여 계통 행렬이 abc에서 dq0로 변환하게 된다.

Park의 변환 행렬로서  $t = \frac{3}{2}\pi$ 와  $t = \frac{\pi}{2}$ 에서 계산된 행렬을 각각  $P_{1/2}$ 과  $P_0$ 이라 하면 (12)식과 같다

$$\begin{aligned} P_{1/2} &= P\left(t = \frac{3}{2}\pi\right) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & -1/2 \end{bmatrix} \\ P_0 &= P\left(t = \frac{\pi}{2}\right) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

dq0 기준축에서의 TCSC 3상 모형은 (13)식과 같다.

$$\Delta V_{abc}\left(k + \frac{1}{2}\right) = F_{dq0} \Delta V_{dq}(k) + G_{dq0} \Delta I_{dq0}(k) + H_{abc} \Delta \phi_{abc}(k) \quad (13)$$

여기서  $F_{dq0}, G_{dq0}, H_{abc}$ 는 (14)식과 같다.

$$\begin{aligned} F_{dq0} &= P_{1/2} * F_a * P_0^{-1} \\ G_{dq0} &= P_{1/2} * \begin{bmatrix} G_a \\ G_b \\ G_c \end{bmatrix} \\ H_{abc} &= P_{1/2} * \begin{bmatrix} H_a & 0 & 0 \\ 0 & H_b & 0 \\ 0 & 0 & H_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

### 3. 동요 방정식

아래 (15)식은 잘 알려진 동요 방정식이다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\omega} &= \frac{1}{2H} (\Delta T_m - K_s \Delta \delta - K_D \Delta \omega) \\ \Delta \dot{\delta} &= \omega_0 \Delta \omega \end{aligned} \quad (15)$$

### 4. TCSC와 동요 방정식의 결합

#### 4.1 전류와 동기화 torque 계수의 미소 변화의 정식화

선 전류는 상차각의 변화와 점호각의 변화에 따라 변하고 동기화 torque 계수는 점호각의 영향을 받기 때문에 TCSC와 동요 방정식은 상호 연관이 있으므로 결합해서 생각되어야 한다. 다시 말하면  $\Delta I_{dq}$ 는  $\Delta \delta$ 와  $\Delta \phi_{abc}$ 로 나타내어야 하며,  $\Delta T_m$ 는  $\Delta \phi_{abc}$ 와도 관계가 있으므로 다시 정식화하여야 한다.

본 논문에서는 그림 5와 같은 1기 무한대 모선에 TCSC가 있을 때를 대상으로 정식화 한다.

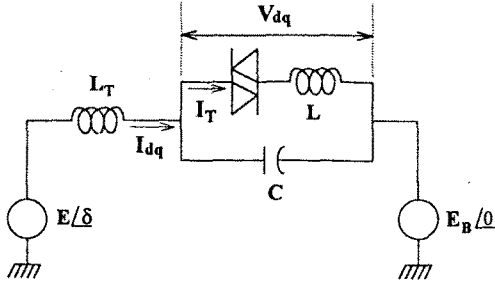


그림 5. TCSC가 있는 1기 무한대 계통

여기서는 3상 대칭인 경우를 가정하였으므로 0축의 변화는 없어서 생략하였다.

1기 무한대 모선에서의  $T_e$ 와  $I_d$ ,  $I_q$ 는 (16)식과 같다.

$$T_e = \frac{EE_B}{X} \sin \delta$$

$$I = \frac{E \angle \delta - E_B \angle 0}{jX} = \frac{E(\cos \delta + j \sin \delta) - E_B}{jX} = I_d + jI_q$$

$$I_d = \frac{E}{X} \sin \delta$$

$$I_q = \frac{E_B - E \cos \delta}{X}$$

$\Delta T_e$ 와  $\Delta I_{dq}$ 는 (17)식과 같다.

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial T_e}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \phi} \Delta \phi = K_{T_e} \Delta \delta + K_{T_e} \Delta \phi$$

$$\Delta I_{dq} = \frac{\partial I_d}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial I_d}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \phi} \Delta \phi = K_{I_d} \Delta \delta + K_{I_d} \Delta \phi$$

$\delta$ 에 대한 미분은 (18)식과 같다.

$$\frac{\partial T_e}{\partial \delta} = \frac{EE_B}{X} \cos \delta$$

$$\frac{\partial I_d}{\partial \delta} = \frac{E}{X} \cos \delta$$

$$\frac{\partial I_q}{\partial \delta} = \frac{E}{X} \sin \delta$$

X에 대한 미분은 (19)식과 같다.

$$\frac{\partial T_e}{\partial X} = -\frac{EE_B}{X^2} \sin \delta$$

$$\frac{\partial I_d}{\partial X} = -\frac{E}{X^2} \sin \delta$$

$$\frac{\partial I_q}{\partial X} = -\frac{E_B - E \cos \delta}{X^2}$$

$\phi$ 에 대한 X의 미분은 (20)식과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial X}{\partial \phi} = \frac{\partial X}{\partial X_s} \frac{\partial X_s}{\partial \phi} + \frac{\partial X}{\partial X_c} \frac{\partial X_c}{\partial \phi}$$

$X_s$ 에 대한 X의 미분은 (21)식과 같다.

$$\frac{\partial X}{\partial X_s} = \frac{\partial}{\partial X_s} \frac{1}{1/X_s + 1/X_c} = \frac{-1}{(1/X_s + 1/X_c)^2} \cdot \left(-\frac{1}{X_s}\right)$$

$$= \frac{(X_s X_c)^2}{(X_s + X_c)^2} \cdot \frac{1}{X_s^2} = \frac{X_c^2}{(X_s + X_c)^2}$$

$\phi$ 에 대한  $X_s$ 의 미분을 알리면 점호각에 대한 reactance의 식을 구해야 하는데 [2]에서의 식을 이용하면 (22)식과 같다.

$$\tau = 2(\pi - \phi)$$

$$L_\phi = \frac{\pi}{\tau - \sin \tau} L$$

$$X_s = \omega L_\phi \quad X_r = \omega L_r \quad X_c = -\frac{1}{\omega C}$$

$$X = X_r + (X_s \parallel X_c)$$

$\phi$ 에 대한  $X_s$ 의 미분은 (23)식과 같다.

$$\frac{\partial X_s}{\partial \tau} = -L \pi \frac{1 - \cos \tau}{(\tau - \sin \tau)^2}$$

$$\frac{d\tau}{d\phi} = -2$$

#### 4.2 변형된 동요 방정식

##### 4.2.1 점호각의 변화를 고려한 동요 방정식

점호각의 변화를 고려한 연속 시간 동요 방정식은 (24)식과 같다.

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - K_s \Delta \delta - K_D \Delta \omega - K_\phi \Delta \phi_{abc})$$

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_0 \Delta \omega$$

##### 4.2.2 이산 시간 동요 방정식

2에서 구한 TCSC 모형은 연속 시간 모형이므로 TCSC 모형과 결합시키기 위해서는 이산 시간 모형으로 고쳐야 한다.

널리 알려진 식에 의해서 이산화하면 (25)식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \left( k + \frac{1}{2} \right) = \exp(A \cdot T/2) \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \delta \end{bmatrix} (k) + \int_0^{T/2} \exp(A \cdot (\frac{T}{2} - \tau)) B d\tau \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta \phi_{abc} \end{bmatrix} (k)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{K_s}{2H} & -\frac{K_D}{2H} \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$T = \frac{1}{60}$$

#### 4.3 변형된 TCSC 모형

$\Delta I_{dq}$ 를  $\Delta \delta$ 와  $\Delta \phi_{abc}$ 로 나타내면 TCSC의 소신호 모형은 (26)식과 같다.

$$\Delta V_{dq} \left( k + \frac{1}{2} \right) = F_{dq} \Delta V_{dq} (k) + G_{dq} \Delta I_{dq} (k) + H_{dq} \Delta \phi_{abc} (k)$$

$$= F_{dq} \Delta V_{dq} (k) + G_{dq} (K_{I_d} \Delta \delta (k) + K_{I_q} \Delta \phi_{abc} (k)) + H_{dq} \Delta \phi_{abc} (k)$$

$$= G_{dq} K_{I_d} \Delta \delta (k) + F_{dq} \Delta V_{dq} (k) + (G_{dq} K_{I_q} + H) \Delta \phi_{abc} (k)$$

#### 4.4 결합된 상태 방정식

동요 방정식과 TCSC가 결합된 최종 상태 방정식은 (27)식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta V_{dr} \end{bmatrix} \left( k + \frac{1}{2} \right) = \begin{bmatrix} \exp(A \cdot T/2) & 0 \\ 0 & G_{dr} K_{dr} & F_{dr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta V_{dr} \end{bmatrix} (k) + \begin{bmatrix} \int_0^{T/2} \exp(A \cdot (\frac{T}{2} - \tau)) B d\tau \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta\phi_{dr} \end{bmatrix} (k) \quad (27)$$

5. 모의

모의한 계통은 1기 무한대 모선에 직렬로 inductance와 TCSC가 연결된 계통으로 그림 5에 나타나 있다.

점호각을 변화시켜 가면서 구한 고유치는 아래 표 2와 같다.

표 2 점호각 변화에 따른 고유치

점호각 ( $\frac{2}{3}\pi$ )	고유치			
1	.9952	-.9952	1.0512	.9513
2	.9808	-.9808	1.0512	.9513
3	.9569	-.9569	1.0511	.9513
4	.9239	-.9239	1.0510	.9514
5	.8819	-.8819	1.0509	.9516
6	.8315	-.8315	1.0507	.9518
7	.8315	-.8315	1.0507	.9518
8	.7730	-.7730	1.0504	.9521
9	.7071	-.7071	1.0500	.9524
10	.6344	-.6344	1.0494	.9529
11	.5556	-.5556	1.0480	.9542
12	.3827	-.3827	1.0471	.9550
13	.2903	-.2903	1.0460	.9560
14	.1951	-.1951	1.0448	.9571
15	.0980	-.0980	1.0435	.9584
16	.0000	.0000	1.0419	.9598

6. 결론

TCSC가 연결된 1기 무한대 모선 계통에서 저주파 진동 현상에 의한 소신호 안정도에 대하여 알아 보았다.

입력 변수가 제어각인데 제어각은 1주기에 2번 밖에 변화시킬 수 없으므로 제어를 위해서는 이산 시간 모형으로 표현되어야 한다. 이를 위하여 우리가 알고 있는 동요 방정식을 시간 간격이 반 주기인 이산 시간 방정식으로 변환하였다.

동요 방정식과 TCSC 방정식을 결합하여 상태 방정식을 만들어서 고유치를 알아 보았다. 고유치는 위상각에 따라 변화하므로 점호각 제어에 의해서 저주파 진동 현상을 감쇠시킬 수 있는 가능성을 보였다. 이 모형은 저주파 진동 현상 뿐만 아니라 SSR 문제[3]에도 적용이 가능하며 간단한 실험도 고려하고 있다.

[참고 문헌]

- [1] Hisham A. Othman, Lennart Angquist "analytical modeling of TCSC for SSR studies", IEEE 95 WM 171-9 PWRS
- [2] 김태현, 서 장철, 박 종근, 문 승일, "ASC의 회로 동작 해석 방법", 1995년 대한 전기 학회 춘계 학술 대회 논문집
- [3] 서 장철, 김 태현, 문 승일, 박 종근 "LQG 제어 방식을 이용한 직렬 capacitor 보상 선로의 SSR 제어용 PSS의 설계", 1994년 대한 전기 학회 추계 종합 학술 대회 논문집