

전력계통의 미소신호안정도에 미치는 무효전력보상기의 영향에 관한연구

권세혁* 김덕영(**) 노규민* 유광용*
 * 고려대학교 ** 안양전문대학

A Study on the Effect of SVC in One machine infinite bus system

S.H. Kwon* D.Y. Kim(**) K.M. Ro* K.Y. Yoo*
 * Korea University ** Anyang Technical College

Abstract

The effect of static var compensator(SVC) in one machine infinite bus system is investigated. SVC is installed in generator terminal and the structure of state matrix including SVC is represented. Eigenvalue analysis is performed in changing the value of SVC parameter to show the effect of SVC. The effect of SVC in eigenvalue analysis is small in the case of one machine infinite bus system.

1. 서론

전력계통안정도의 관점에서 계통을 효율적으로 운영하기 위해서는 계통의 전압을 일정하게 유지하고, 송전선에서의 손실을 최소화하여 최대의 전력을 부하단에 공급해야하는 문제가 제기된다. 전력계통에서 전압을 제어하기 위한 일반적인 방법으로는 여자기를 발전기에 설치하여 발전기의 계자전류를 조절하여 발전기 단자의 전압을 제어하는 방법과 무효전력보상기(SVC)나 커패시터를 사용하여 무효전력성분을 보상함으로써 모선의 전압을 제어하는 방법이 사용된다. 무효전력보상기는 발전기단자를 포함한 일반모선에서 전압제어를 목적으로 사용되며, 무효전력원의 공급뿐만 아니라 안정도측면에서 계통의 제동특성을 증가시키는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.

본 연구는 무효전력보상기를 계통에 투입하여 모선전압을 효과적으로 제어하여 안정도문제를 개선시키기 위한 전 단계로, 일기무한모선 계통의 발전기 단자에 무효전력보상기를 설치한 경우의 고유치해석을 위한 상태행렬의 구조와 제어기 정수의 변화에 의한 고유치에 미치는 영향에 대해 살펴보고자 한다.

2. 본론

2.1 정석화

계통안정도에 미치는 무효전력보상기의 영향을 해석하기 위해 다음과 같은 일기무한모선 계통을 가정한다. 이 때 무효전력보상기는 발전기단자에 설치되어있는 것으로 한다. 그림1에서 다음의 관계식을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} v_d &= L_B \dot{i}_{Bd} + \omega L_B i_{Bd} \\ v_q &= L_B \dot{i}_{Bq} - \omega L_B i_{Bq} \end{aligned} \quad (1)$$

$$K_r(\Delta V_{REF} - \Delta V_t) = \Delta B_L + T_r \Delta \dot{B}_L$$

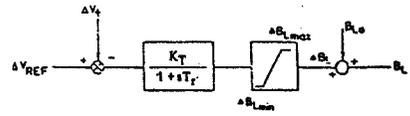
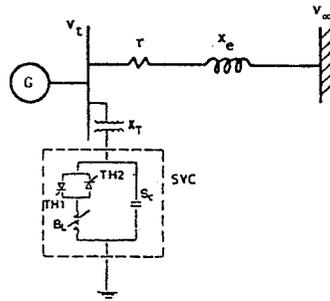


그림1. 무효전력보상기의 블록선도와 계통도

발전기 단자전압에 대한 선형화된 표현식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_t &= do v_d + qo v_q \\ v_d &= -\sqrt{3} V_{\infty d} \delta + R_e i_d + L_e \dot{i}_d + \omega_0 L_e i_q + i_{q0} L_e \omega \\ v_q &= -\sqrt{3} V_{\infty q} \delta + R_e i_q + L_e \dot{i}_q - \omega_0 L_e i_d - i_{d0} L_e \omega \end{aligned} \quad (2)$$

단, $do = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_{d0}}{V_{t0}}$, $qo = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_{q0}}{V_{t0}}$

상태방정식의 형태로 나타내기 위해 (1)식을 동작점에 대해 선형화하고 발전기 단자전압을 (2)식으로 치환하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_B \dot{i}_{Bd} &= -L_d \dot{i}_d - KM_F i_F - KM_D \dot{i}_d - r i_d - \omega_0 L_e i_q \\ &\quad - \omega_0 KM_Q i_Q - (\lambda_d + L_B i_{Bd}) \omega - \omega_0 L_B i_{Bd} \\ &\quad - \frac{\omega_0 i_{Bd}}{B_0^2} B_L \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} L_B \dot{i}_{Bq} &= -L_q \dot{i}_q - KM_Q \dot{i}_Q + \omega_0 L_d \dot{i}_d + \omega_0 KM_F i_F \\ &\quad + \omega_0 KM_D i_{D-n_r} + (\lambda_d + L_B i_{Bd}) \omega \\ &\quad + \omega_0 L_B i_{Bd} + \frac{\omega_0 i_{Bd}}{B_0^2} B_L \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{T_r}{K_r} B_L = -\omega_1 i_d - \omega_2 i_F - \omega_3 i_D - \omega_4 i_q - \omega_5 i_Q$$

$$-z_1 i_d - z_2 i_F - z_3 i_D + z_4 i_q + z_5 i_Q - z_6 \omega$$

$$- \frac{1}{K_r} B_L \quad (5)$$

단,

$$z_1 = -d_o r + q_o L_d \quad w_1 = -d_o L_d$$

$$z_2 = q_o \omega_o KM_F \quad w_2 = -d_o KM_F$$

$$z_3 = q_o \omega_o KM_D \quad w_3 = -d_o KM_D$$

$$z_4 = -d_o \omega_o L_q \quad w_4 = -q_o L_q$$

$$z_5 = -d_o \omega_o KM_Q \quad w_5 = -q_o KM_Q$$

$$z_6 = -d_o \lambda_{qo} + q_o \lambda_{do}$$

$$L_B = X_T - \frac{1}{B_C + B_L} \quad B_o = B_C + B_{Lo}$$

$$B_L = B_{Lo} + \Delta B_L \quad L_{Bo} = X_T - \frac{1}{B_o} \quad (6)$$

2.2 상태행렬 구성

발전기의 표현식과 앞절의 무효전력보상기의 표현식을 합하여 하나의 상태방정식의 형태로 나타낸다.

$$M = \begin{bmatrix} L_d + L_e & KM_F & KM_D & 0 & 0 & 0 & 0 & -L_e & 0 & 0 \\ KM_F & L_F & M_R & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ KM_D & M_R & L_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q + L_e & KM_Q & 0 & 0 & 0 & -L_e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & KM_Q & L_Q & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -T_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ L_d & KM_F & KM_D & 0 & 0 & 0 & 0 & L_{Bo} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_q & KM_Q & 0 & 0 & 0 & L_{Bo} & 0 \\ w_1 & w_2 & w_3 & w_4 & w_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T_r}{K_r} \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} r + R_e & 0 & 0 & \omega_o(L_q + L_e) & \omega_o KM_Q & \lambda_{qo} + L_e(i_{qo} - i_{Dqo}) & -\sqrt{3}V_o \cos \delta_o & -R_e & -\omega_o L_e & 0 \\ 0 & r_F & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_o(L_d + L_e) & -\omega_o KM_F & -\omega_o KM_D & r + R_e & 0 & -\lambda_{do} - L_e(i_{do} - i_{Ddo}) & \sqrt{3}V_o \sin \delta_o & \omega_o L_e & -R_e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\lambda_{qo} - L_d i_{qo}}{3} & \frac{-KM_F i_{qo}}{3} & \frac{-KM_D i_{qo}}{3} & \frac{-\lambda_{do} + L_q i_{do}}{3} & \frac{KM_Q i_{do}}{3} & -D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r & 0 & 0 & \omega_o L_q & \omega_o KM_Q & \lambda_{qo} + L_{Bo} i_{Dqo} & 0 & 0 & \omega_o L_{Bo} & \frac{\omega_o i_{Dqo}}{B_o^2} \\ -\omega_o L_d & -\omega_o KM_F & -\omega_o KM_D & r & 0 & -(\lambda_{do} + L_{Bo} i_{Ddo}) & 0 & -\omega_o L_{Bo} & 0 & -\frac{\omega_o i_{Ddo}}{B_o^2} \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 & z_6 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{K_r} \end{bmatrix}$$

그림2. M, K행렬의 구성

그림1에서 발전기와 무효전력보상기는 다음의 전류관계식을 갖는다.

$$i_{d1} = i_d - i_{Bd}$$

$$i_{q1} = i_q - i_{Bq} \quad (7)$$

단, i_{d1}, i_{q1} : 송전선에 흐르는 전류

i_{Bd}, i_{Bq} : SVS에 흐르는 전류

i_d, i_q : 발전기 단자전류

상태방정식의 일반형태를 다음과 같이 나타내면, 발전기와 무효전력보상기를 포함한 상태행렬은 다음과 같은 행렬연산으로부터 구할 수 있다.

$$M\dot{X} = -KX + U$$

$$\dot{X} = -M^{-1}KX + M^{-1}U$$

$$= AX + BU \quad (8)$$

단,

$$X = [i_d \ i_F \ i_D \ i_q \ i_Q \ \omega \ \delta \ i_{Bd} \ i_{Bq} \ B_L]$$

3. 사례연구

그림1의 일기무한모선계통에 대해 무효전력보상기가 계통안정도에 미치는 영향을 살펴보았다.

발전기와 송전선 정수는 참고문헌[1]의 것을 사용하였으며 무효전력보상기의 정수는 다음과 같다.

$$X_T = 0.08 pu \quad K_r = 50 \quad T_r = 0.15 sec$$

$$B_C = 0.325 pu \quad B_{Lo} = -0.3 pu$$

계통조건은 일반적인 운영조건인 경우와 과부하상태일때의 계통운영조건을 가정하였다.

- 사례1: 유효전력 0.9 pu, 역률 0.85 지상인 경우
- 사례2: 유효전력 1.0 pu, 역률 0.70 지상인 경우

앞에서의 무효전력보상기 정수를 사용한 경우의 주요진동모드는 표1과 같다.

표 1. 동작점에서의 주요진동모드

	고유치	주파수 [Hz]	SPR
사례1	$-0.35635 \pm j 9.41223$	1.49800	0.78830
사례2	$-0.16844 \pm j 8.70821$	1.38595	0.88556

무효전력보상기의 정수중에서 K_r , T_r 만을 변화가능한 정수로 하였으며 각 정수값의 변화에 대한 고유치의 변화는 표2, 표3과 같다.

표 2. K_r 정수 변화에 의한 고유치의 형태 ($T_r = 0.15\text{sec}$)

K_r	사례1	사례2
20	$-0.37174 \pm j 9.39852$	$-0.16111 \pm j 8.67755$
100	$-0.35665 \pm j 9.41375$	$-0.17403 \pm j 8.71961$
150	$-0.35681 \pm j 9.41428$	$-0.17635 \pm j 8.72333$

표 3. T_r 정수 변화에 의한 고유치의 형태 ($K_r = 50$)

T_r	사례1	사례2
0.01	$-0.35871 \pm j 9.41371$	$-0.18492 \pm j 8.71529$
0.30	$-0.35486 \pm j 9.41025$	$-0.15305 \pm j 8.69683$
0.80	$-0.35411 \pm j 9.40254$	$-0.12937 \pm j 8.64482$

표2에서는 K_r 값을 초기값보다 증가시키는 경우 대체로 제동특성이 개선되며 표3에서는 T_r 을 증가시키는 경우 제동특성이 오히려 나빠지는 것을 알 수 있다. 두 경우 모두 정수변화폭에 비해 고유치값의 변화는 매우적으며, 따라서 일기무한모선계통에서는 무효전력보상기가 계통에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

그림3과 4는 사례1과 사례2에서 K_r 정수의 값을 0.1에서 250까지, 시정수 T_r 의 값을 0.01sec에서 0.2sec까지 변화시킬때의 고유치궤적을 나타낸다. 그림2와 3에서 이득 K_r 값을 증가시키는 경우 고유치의 실수부는 제동특성이 나빠지다가 다시 개선되고, 주파수성분은 증가하는 것을 알 수 있다. 시정수 T_r 의 값을 증가시키는 경우 고유치의 실수부의 변화는 K_r 을 증가시킨 경우와 동일하나 주파수 성분은 감소하는 것을 알 수 있다. 두 경우 모두 계통조건을 달리하여도 고유치궤적의 형태는 유사함을 알 수 있다.

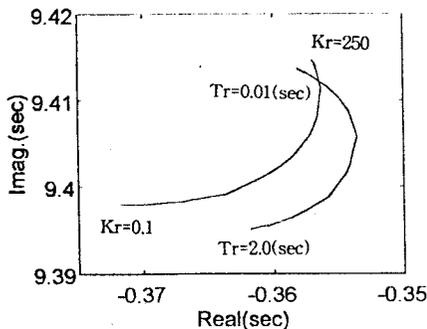


그림3 사례1의 정수변화에 의한 고유치 궤적

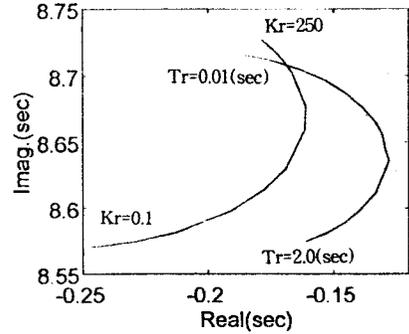


그림4 사례2의 정수변화에 의한 고유치 궤적

4. 결론

본 연구에서의 결론은 다음과 같다.

- (1) 계통안정도에 미치는 무효전력보상기의 영향을 살펴보기 위한 전단계로 일기무한모선계통에 대해 상태방정식의 표현식을 제시하였다. 이 때 무효전력보상기는 발전기단자에 설치하였다.
- (2) 무효전력보상기의 정수값을 변화시키면서 고유치값의 변화를 관찰하였다. 정수변화에 의한 고유치궤적의 형태는 유사하며, 정수값의 변화에 따라 고유치실수부는 제동특성이 바뀌지만 주파수성분은 일정한 변화를 보이는 것을 알 수 있다.
- (3) 보다 일반적인 무효전력보상기 제어에 의한 영향을 관찰하기 위해서는 대기계통에서의 해석이 필요하다.

5. 참고문헌

- [1] P.M.Anderson and A.A.Fouad, "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [2] P.Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994.
- [3] Chin-Hsing Cheng, Yuan-Yih Hsu, " Damping of Generator Oscillations Using An Adaptive Static Var Compensator ", IEEE, Vol. 7, No. 2, May 1992.