

발전기와 부하의 동특성을 고려한 TCSC에 의한 전압 안정화

° 조정현, 손광명, 이상호, 박종근, 이병하
서울대학교 전기공학과, 인천대학교 전기공학과

Voltage Stabilization by TCSC considering Dynamics of Generator and Load

J.H.Cho, K.M.Son, S.H.Lee, J.K.Park, B.H.Lee
Seoul National University University of Inchon

Abstract- Nowadays, voltage stability is well recognized as an important problem. It is well known that voltage stability is influenced by the characteristics of load. Up to present, voltage stability researches were done by the static load modeling, but it is needed that the precise analysis by the view point of dynamic load modeling. In this paper, with induction motor as dynamic load, using modal performance measure, optimal value of tcsc is determined.

1. 서론

많은 대규모 전력계통에서 전압 불안정 현상이 보고되고 있다. 이에 따라 전압 안정성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 과거에는 조류계산의 Jacobian의 특성을 이용한 연구가 활발하였고 최근에는 부하의 동특성을 고려한 연구도 진행되고 있다[1][2][3]. 이와 함께 제어기기를 사용한 전압 안정성 향상의 연구도 진행되고 있다.[4] 본 논문에서는 계통의 전압 안정도 향상을 위한 제어기기의 제어량의 최적값을 구하는 문제에 관하여 기술하였다. 최적값을 구하는 척도로 Modal Performance Measure의 개념을 사용하였다[5]. Modal Performance Measure의 개념은 전압 안정도의 연구에 사용된 적이 있으며 본 논문에서는 부하의 동특성을 고려하고 제어기기로 TCSC를 이용하여 이 개념을 전압 안정도 문제에 적용하고자 한다.[6][7][8]

2. 본론

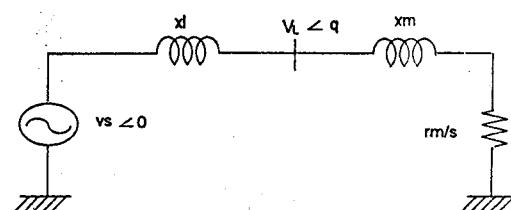


그림.1 계통 모형

앞으로 본 논문에서 사용할 계통은 위의 그림과 같은 유도 전동기, 발전기축, 송전선로를 가지는 간단한 계통이다. 이 모델에서 발전기축은 2-axis model을 사용하였고 Exciter로 IEEE-Type1을 이용하였으며 기계적 토크 입력은 일정한 것으로 하

였다. 또, 부하는 유도 전동기를 사용하였고 동요방정식을 만을 고려하였다. 여기서 부하는 aggregate 된 model이다.[9]

2.1 Dynamic and Static equation

발전기와 여자기 부하의 식은 다음과 같다.[10]

$$\begin{aligned} \dot{E}'_q &= \frac{1}{T'_q \omega} \left\{ -E'_q + (x'_d - x'_q) I_d + E_{fd} \right\} \\ \dot{E}'_d &= \frac{1}{T'_d \omega} \left\{ -E'_d - (x_q - x'_q) I_q \right\} \\ \dot{\delta} &= \omega_o (v - 1) \\ \dot{v} &= \frac{1}{\tau_j} \left\{ -(E'_d i_d + E'_q i_q) + T_m \right\} \\ \dot{V} &= \frac{1}{T_s} \left\{ K_s R_f - \frac{K_s K_f}{T_f} E_{fd} - V_R - K_s V_t + K_s V_{ref} \right\} \\ \dot{E}'_{fd} &= \frac{1}{T_f} \left\{ -(K_s + S_s) E_{fd} + V_R \right\} \dots (1) \\ \dot{R}_f &= \frac{1}{T_f} \left\{ R_f + \frac{K_f}{T_f} E_{fd} \right\} \\ \tau_i \frac{ds}{dt} &= \frac{P_m}{(1-s)} - P_e \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E'_d &= (r_m / s + r) I_d + (x'_q + x_m + x_t) I_q \\ E'_q &= -(x'_d + x_m + x_t) I_d + (r_m / s + r) I_q \dots (2) \end{aligned}$$

2.1 선형화

위에서 보인 수식은 크게 2개의 수식으로 나눌 수 있다.[6]

Dynamic Equation: $x = f(x, y)$

Algebraic Equation: $0 = g(x, y) \dots (3)$

x : state variable, y : network variable

외란이 있을 경우에 평형점 근처에서 선형화를 하면 다음과 같은 식이 나온다.

$$\Delta x = A \cdot \Delta x + B \cdot \Delta y$$

$$0 = C \cdot \Delta x + D \cdot \Delta y \dots (4)$$

$$\text{단, } A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x_0}, B = \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{x_0}, C = \left. \frac{\partial g}{\partial x} \right|_{x_0}, D = \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{x_0}$$

위의 식에서 D 가 nonsingular하다고 한다면

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (A - BD^{-1}C) \cdot \Delta x = \tilde{A} \cdot \Delta x \\ \Delta y &= -D^{-1}C \cdot \Delta x = \tilde{C} \cdot \Delta x\end{aligned}\quad \dots (5)$$

$$\text{단, } \dot{x} = x(t) - x_r, \Delta y = y(t) - y_r,$$

x_r, y_r 는 steady state 값

여기서 제어변수는 행렬 \tilde{A} 의 요소안에 들어 있게 된다.

전압 안정화의 목표를 상태변수와 network 변수의 진동을 적게 하는 것이라 생각하면 다음과 같은 $z(t)$ 를 최소화 하는 것으로 문제를 생각할 수 있다.

$$z(t) = y(t) - y_r \quad (\text{단, } y_r \text{ reference 값})$$

위의 식으로부터 $z(t)$ 를 y 로 표현하면

$$z(t) = \tilde{C} \cdot \Delta x + y_r - y, \quad \dots (6)$$

\tilde{A} 이 서로 다른 고유치를 가지고 있다고 생각할 수 있고 (제어를 통해 \tilde{A} 의 고유치를 조정할 수 있으므로), 이에 따라 $x(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다

$$x(t) = \sum_{j=1}^n (v_j \Delta x_0) u_j \cdot \exp(s_j t) \quad \dots (7)$$

(s_j : \tilde{A} 의 j 번째 고유치, v_j 와 u_j : \tilde{A} 의 left,right eigenvector

Δx_0 : Δx 의 초기치)

그럼 다음과 같은 값을 정의하겠다.

$\Delta x_j(t)$: $\Delta x(t)$ 의 j 번째 state

$z_j(t)$: $z(t)$ 에서 $\Delta x_j(t)$ 에 영향을 받는 요소

$z_{i,j}$: $z_j(t)$ 의 i 번째 mode

$u_{i,j}$: u_j 의 i 번째 요소

\tilde{C}_j : \tilde{C} 의 j 번째 column vector

이 때,

$$z(t) = \sum_{j=1}^n \tilde{C}_j \cdot \Delta x_j(t) + z_0 = \sum_{j=1}^n z_j(t) + z_0 \quad \dots (8)$$

단, $z_0 = y_r - y$

$$z_j(t) = \sum_{i=1}^n z_{i,j}(t) = \tilde{C}_j \sum_{i=1}^n (v_i \Delta x_0) u_{i,j} \cdot \exp(s_i t)$$

여기서 error trajectory $z(t)$ 는 system의 mode의 선형결합으로 표현되고 있다.

여기서, 다음과 같이 Modal Performance Measure를 정의하여 보자.

$$J(p) = \sum_{j=0}^n J_j \quad \dots (9)$$

$$J_j = \int_0^T \sum_{i=1}^n z_{i,j}^* W_i z_{i,j} dt \quad J_0 = \int_0^T \sum_{i=1}^n z_0^* W_0 z_0 dt$$

T: integration time interval

W_j : J 번째 state에 관한 weighting matrix
t: transpose

*: complex conjugate

이 때, $J(p)$ 는 각 envelope 아래의 면적을 나타낸다고 볼 수 있고, 이것은 곧 $J(p)$ 를 최소화 하는 것이 envelope의 크기를 최소한다고 할 수 있다.

2.2 $J(p)$ 의 최소화

지금까지 Modal Performance Measure를 유도하였고 이 Measure를 최소화 하는 것에 위하여 우리가 의도하는 작은 외란시에 진동의 양체를 도모할 수 있다는 것을 알았다.

이제 $J(p)$ 를 최소로 하는 제어 parameter p 를 구하는 것에 대하여 설명하겠다.

$J(p)$ 를 최소화하는 기법으로 steepest descent 법을 사용하려 한다. 이 방법을 쓰기 위하여 $J(p)$ 의 gradient를 구하면 다음과 같다.

$$\nabla J = \frac{\partial J}{\partial p} = \sum_{j=0}^n \frac{\partial J_j}{\partial p} = \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \left(\frac{\partial J_j}{\partial \tilde{A}} \right)_{k,l} \left(\frac{\partial \tilde{A}_{k,l}}{\partial p} \right) \quad \dots (10)$$

$$\left(\frac{\partial J}{\partial \tilde{A}} \right)_{k,l} \left(\frac{\partial J}{\partial \tilde{A}} \right)_{k,l} \text{의 } (k,l) \text{ 요소}$$

$\tilde{a}_{k,l}$: \tilde{A} 의 (k,l) 요소

위 식에서 불때 $J(p)$ 의 gradient는 $J(p)$ 의 \tilde{A} 에 대한 편미분을 구해야 하고 이를 위하여 다음과 같이 식을 정리하였다.

$$J_m = \sum_{i=1}^n (\tilde{C}_m^t W_m \tilde{C}_m^*) (v_i \Delta x_0)^t (v_i \Delta x_0)^* (u_{m,i}) (u_{m,i}^*)^* f(\sigma_i)$$

$$\text{단, } f(\sigma_i) = \frac{1}{2\sigma_i} (\exp(2\sigma_i T) - 1)$$

σ_i 는 고유치 s_i 의 실수부.

여기서, J_m 의 sensitivity를 J_m 을 선형화 시켜 구할 수 있으며, $\Delta J_m, \Delta \sigma_i, \Delta u_{m,i}, \Delta v_{m,i}$ 를 \tilde{A} 의 증분에 따른 증가량

이라고 할 때 $\Delta J_m \equiv J_m(\tilde{A} + \Delta \tilde{A}) - J_m(\tilde{A})$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\Delta J_m &= \sum_{i=1}^n (\tilde{C}_m^t W_m \tilde{C}_m^*) \{ f(\sigma_i) (v_i \Delta x_0) (v_i^* \Delta x_0^*) u_{m,i} \Delta u_{m,i}^* \\ &\quad + f(\sigma_i) (v_i \Delta x_0) (v_i^* \Delta x_0^*) \Delta u_{m,i} u_{m,i}^* + f(\sigma_i) (v_i \Delta x_0) \\ &\quad \cdot (\Delta v_i^* \Delta x_0^*) u_{m,i} u_{m,i}^* + f(\sigma_i) (\Delta v_i \Delta x_0) (v_i^* \Delta x_0^*) u_{m,i} u_{m,i}^* \\ &\quad + f(\sigma_i) \Delta \sigma_i (v_i \Delta x_0) (v_i^* \Delta x_0^*) u_{m,i} u_{m,i}^* \}\end{aligned}$$

이 때, $\Delta J_m, \Delta \sigma_i, \Delta u_{m,i}, \Delta v_{m,i}$ 를 $\Delta \tilde{a}_{k,l}$ 또는 $\Delta \tilde{A}$ 로 나타낼 수 있고 다음과 같이 나타난다.[6].

$$\begin{aligned}\Delta J_m &= \sum_{i=1}^n (\tilde{C}_m^t W_m \tilde{C}_m^*) \\ &\quad \cdot \{ f(\sigma_i) v_i \Delta x_0 v_i^* \Delta x_0^* 2 \operatorname{Re}(\underline{U}_m^t D_i \bar{A} u_{m,i} u_{m,i}^*) \\ &\quad + f(\sigma_i) u_{m,i} u_{m,i}^* 2 \operatorname{Re}(v_i \Delta \tilde{A}^t U D_i V \Delta x_0 v_i^* \Delta x_0^*) \\ &\quad + f'(\sigma_i) \operatorname{Re}(v_i \Delta \tilde{A} u_i) v_i \Delta x_0 v_i^* \Delta x_0^* u_{m,i} u_{m,i}^* \} \dots (11)\end{aligned}$$

단, $D_i = \operatorname{diag}[1/(s_i - s_1), \dots, 1/(s_i - s_{i-1}), 0,$

$$1/(s_i - s_{i+1}), \dots, 1/(s_i - s_n)]$$

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad \cdots \quad u_n]$$

$$V = [v_1^t \quad v_2^t \quad \cdots \quad v_n^t]$$

$$\underline{U} = U^t = [U_1 \quad U_2 \quad \cdots \quad U_n]$$

$\left(\frac{\partial J}{\partial \tilde{A}} \right)_{k,l}$ 를 구하기 위하여 같은 성질을 이용하겠다.[11]

$$\operatorname{Tr}(BC) = \operatorname{Tr}(CB) = CB$$

$$\Delta J = \operatorname{Tr}(M \Delta A) \Rightarrow \frac{\partial J}{\partial \tilde{A}} = M^t$$

B : column vector, C: row vector, Tr: trace

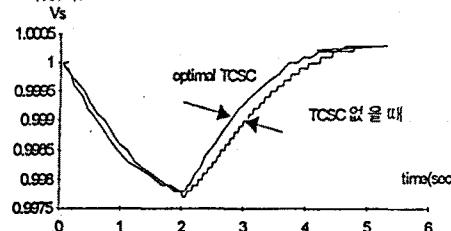
위 식을 이용 $\left(\frac{\partial J}{\partial A}\right)$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_m}{\partial A} &= \sum_{i=1}^n (\hat{C}_m^T W_m \hat{C}_m^*) \\ &= \left\{ f(\sigma_i) |v_i \Delta x_0|^2 2 \operatorname{Re} [\langle u_i U_m^* D_i V \rangle^* u_{m,i}] \right. \\ &\quad + f(\sigma_i) |u_{m,i}|^2 2 \operatorname{Re} [\langle U D_i V \Delta x_0 v_i \rangle^* v_i^* \Delta x_0^*] \\ &\quad \left. + f'(\sigma_i) |v_i \Delta x_0|^2 |u_{m,i}|^2 \operatorname{Re} [\langle v_i u_i \rangle^*] \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

로써 최대 경사법을 이용하여 $J(p)$ 의 최소값을 구하는 식을 위와 같이 구할 수 있으며 이 식을 토대로 계통에 적용해 보겠다.

3. 사례연구

1초동안 외란으로 부하가 10% 증가하는 경우에 대하여 simulation 을 행하였다. 아래에는 부하단의 전압의 변화를 TCSC를 최적값으로 했을 때와 TCSC가 없는 경우에 대하여 비교하였다.



4. 결론

지금까지 간단한 계통에 대해서 Modal Performance Measure 를 이용하여 최적의 TCSC값을 알아내는 법에 대하여 기술하였다. 여기서는 TCSC의 dynamics를 고려하지 않았고 발전기의 pss 를 고려하지 않았다.

앞으로 TCSC의 dynamics를 고려하여야 하겠으며 다기계통에 대하여도 범위를 넓히는 것이 필요하겠다.

5. 참고 문헌

- [1] Y. Sekine, H. Ohtsuki, "CASCADED VOLTAGE COLLAPSE", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 5, No. 1, pp. 250-256, February, 1990
- [2] Th. Van Cutsem, "DYNAMIC AND STATIC ASPECTS OF VOLTAGE COLLAPSE", EPRI EL-6183 Project 2473-21 Proc., pp. 6.55-6.79, Jan., 1989
- [3] M. Pal, "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 7, No. 1, pp. 243-249, feb, 1993.
- [4] A.E. Hammad, "Comparing the Voltage Control Capabilities of Present and Future VAr Compensating Techniques in Transmission Systems", IEEE-PES Winter Meeting, New York, Jan.29-Feb. 2, 1995
- [5] JM. R. Khaldi, A. K. Sarkar, K. Y. Lee, and Y. M. Park, "THE MODAL PERFORMANCE MEASURE FOR PARAMETER OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM STABILIZERS", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 8, No. , pp.660-666, Dec. 1993
- [6] Byung Ha Lee, Kwang Y. Lee, "DYNAMIC AND STATIC VOLTAGE STABILITY ENHANCEMENT OF POWER SYSTEMS", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 1, pp. 231-238, Feb. 1993.
- [7] 조정현, "동적부하를 고려한 TCSC에 의한 전압 안정화", 대한전기학회 춘계 종합 학술 대회 논문집, pp. 16-19, 1995.5
- [8] 한국전력공사 기술 연구원, "전력계통 안정도 해석을 위한 적정부하 모델에 관한 연구(최종 보고서)", 1990.10월
- [9] 손광명, "씨이리스터 제어 직렬 보상기에 의한 전력계통 안정화 효과", 대한전기학회 추계 종합 학술 대회 논문집, pp.9-11, 1994.11월
- [10] P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control", IEEE Press, 1977
- [11] T. R. Crossley, B. Porter, "Eigenvalue and eigenvector sensitivities in linear systems theory", Int. J. Control, 1969, Vol. 10, pp. 163-170.