

발전기 제어장치와 TCSC를 포함하는 이산 전력시스템의 고유치 감도해석

(Eigenvalue Sensitivity Analysis of Discrete Power Systems Including
Generator Controllers and TCSC)

김덕영*

(Deok-Young Kim)

Abstract

In this paper, the eigenvalue sensitivity analysis is calculated in the power system which is including both generator controllers such as Exciter, PSS and thyristor controlled FACTS devices in transmission lines such as TCSC. Exciter and PSS are continuously operating controllers but TCSC has a switching device which operates non-continuously. To analyze both continuous and non-continuous operating equipments, the RCF method one of the numerical analysis method in discrete time domain is applied using discrete models of the power system. Also the eigenvalue sensitivity calculation algorithm using state transition equations in discrete time domain is devised and applied to a sampled system. As a result of simulation, the eigenvalue sensitivity coefficients calculated using discrete system models in discrete time domain are changed periodically and showed different values compared to those of continuous system model in time domain by the effect of periodic switching operations of TCSC.

Key Words : Discrete System, Eigenvalue Sensitivity, PSS, RCF Method, TCSC

1. 서 론

본 논문은 Exciter와 PSS(Power System Stabilizer)를 포함하는 발전기 제어장치와 싸이리스터에 의한 불연속 스위칭 동작을 하는 직렬형 FACTS 설비

인 TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)를 포함하는 전력계통의 고유치 해석과 안정도 개선을 위한 고유치 감도계수를 이산 시스템에서의 해석방법을 사용하여 해석하는 것을 목적으로 한다. 기존의 경우 이러한 고유치 해석과 감도해석을 위해 전력시스템을 하나의 계통 동작점에 대해 선형화하고 이로부터 고유치와 감도계수를 구하는 방법을 사용하였다. 이러한 해석방법은 기존의 연속 제어동작을 하는 제어장치를 포함하는 전력시스템의 고유치 해석에 가장 적합한 방법으로 알려져 있다. 이 방법은 각각의 상태

* 주저자 : 군산대학교 공대 전기공학과 교수
Tel : 063-469-4746, Fax : 063-469-4699
E-mail : dykim@kunsan.ac.kr
접수일자 : 2010년 10월 14일
1차심사 : 2010년 10월 16일
심사완료 : 2010년 11월 15일

변수별로 진동모드를 해석하게 되어 진동현상에 대한 정확한 해석과 이로부터 안정도 개선을 위한 제어장치 파라미터의 최적화를 통해 부하변화와 같은 일상적인 전력시스템의 변화에 대한 시스템의 안정도 유지 및 개선에 대한 정확한 해석결과를 보여준다[1].

그러나 이러한 해석방법은 TCSC와 같이 스위칭 동작을 하는 제어설비를 포함하는 전력시스템의 고유치 해석에는 적합하지 않으며, 이에 대한 해결책으로 전력시스템을 이산 시스템으로 모델링하고 시간영역에서의 시간구간에 대해 상태변수별로 고유치 해석을 하는 방법을 사용하였다[2-3]. 이산시스템에서의 해석방법 중에서 RCF(Resistive Companion Form) 해석법은 수치적분으로 Trapezoidal 해석법을 사용하여 수학적으로 강인하고 계산의 효율성과 정확성이 높은 해석법으로 알려져 있으며, 본 논문에서는 RCF 해석법을 사용하여 스위칭 설비를 포함하는 시스템에서 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화와 새로이 발생할 수 있는 불안정 진동모드에 대해 상태변수별로 정확한 해석결과를 제시하였다[4-7]. 또한 시간영역에서 연속 제어동작을 하는 발전기 제어장치와 불연속 스위칭 동작을 하는 TCSC를 송전선로에 포함하는 전력시스템에 대하여 이산영역에서 스위칭 동작에 의해 발생하는 불안정 진동모드의 제어기 정수에 대한 감도해석을 구하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 사용하여 구한 스위칭 동작에 의한 진동모드의 제어기 정수에 대한 감도해석 결과가 연속 시간영역에서의 감도해석 결과와는 다른 값을 보이며, TCSC의 주기적 스위칭 동작에 의해 진동모드 뿐만 아니라 감도계수도 주기적인 진동현상을 보이는 것을 사례연구에서 보였다.

2. 이산시스템에서의 감도해석

2.1 발전기 제어장치와 TCSC 모델

본 논문에서는 발전기 단자에 IEEE Type 1 Exciter가 설치되어 있고 여기에 발전기 회전자 각속도(ω)를 입력신호로 하는 PSS가 설치된 경우를 해석대상으로 하였다. 직렬형 FACTS 설비인 TCSC는 발전기와 무

한모선을 연결하는 선로에 설치되어 있는 것으로 가정하였으며, TCSC와 PSS의 제어 블록선도는 다음과 같다.

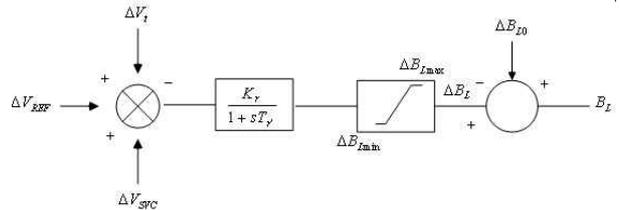


그림 1. TCSC의 제어 블록선도
Fig. 1. Block diagram of TCSC

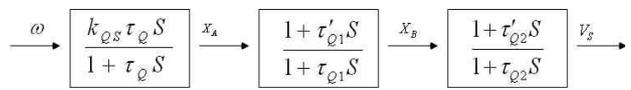


그림 2. Power System Stabilizer 블록선도
Fig. 2. Block diagram of Power System Stabilizer

위의 그림에서 TCSC와 PSS의 상태천이 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{T_r}{K_r} + \frac{h}{2K_r} \right] B_L(t) + \frac{h}{2} [V_i(t) - V_{REF}(t) - V_{SVC}(t)] \\ &= \left[\frac{T_r}{K_r} - \frac{h}{2K_r} \right] B_L(t-h) + \frac{h}{2} [-V_i(t-h) + V_{REF}(t-h) + V_{SVC}(t-h)] \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 + \frac{h}{2\tau_Q} & 0 & 0 \\ \frac{-h}{2\tau_{Q1}} \left(1 - \frac{\tau_{Q1}}{\tau_Q}\right) & 1 + \frac{h}{2\tau_{Q1}} & 0 \\ \frac{-h\tau_{Q2}}{2\tau_{Q1}\tau_{Q2}} \left(1 - \frac{\tau_{Q1}}{\tau_Q}\right) & \frac{h}{2\tau_{Q2}} \left(1 - \frac{\tau_{Q2}}{\tau_{Q1}}\right) & 1 + \frac{h}{2\tau_{Q2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A(t) \\ X_B(t) \\ V_S(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_{QS}\omega(t) \\ \frac{-\tau_{Q1}}{\tau_{Q1}} K_{QS}\omega(t) \\ \frac{-\tau_{Q1}\tau_{Q2}}{\tau_{Q1}\tau_{Q2}} K_{QS}\omega(t) \end{bmatrix} \quad (2) \\ &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{h}{2\tau_Q} & 0 & 0 \\ \frac{h}{2\tau_{Q1}} \left(1 - \frac{\tau_{Q1}}{\tau_Q}\right) & 1 - \frac{h}{2\tau_{Q1}} & 0 \\ \frac{h\tau_{Q2}}{2\tau_{Q1}\tau_{Q2}} \left(1 - \frac{\tau_{Q1}}{\tau_Q}\right) & \frac{-h}{2\tau_{Q2}} \left(1 - \frac{\tau_{Q2}}{\tau_{Q1}}\right) & 1 - \frac{h}{2\tau_{Q2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A(t-h) \\ X_B(t-h) \\ V_S(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_{QS}\omega(t-h) \\ \frac{-\tau_{Q1}}{\tau_{Q1}} K_{QS}\omega(t-h) \\ \frac{-\tau_{Q1}\tau_{Q2}}{\tau_{Q1}\tau_{Q2}} K_{QS}\omega(t-h) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

식 (1)과 식 (2)에서 h는 이산시스템에서의 시간구간을 나타내며, 식 (1)에서 발전기 단자전압을 그리고 식 (2)에서 발전기 회전자 각속도를 각각 발전기의 내부변수로 치환한 후, 상세모델로 나타낸 발전기와 Exciter를 포함한 전체 시스템에 대한 상태천이 방정식과 상태변수는 다음과 같다.

$$X(t) = R_M^{-1} R_K X(t-h) + R_M^{-1} R_B U(t-h) \quad (3)$$

$$= A_R X(t-h) + B_R U(t-h) n$$

$$X^t = [i_d i_F i_D i_q i_Q \omega \delta V_1 V_3 V_R E_{FD} X_A X_B V_S B_L] \quad (4)$$

2.2 이산시스템에서의 감도해석법

연속시스템에서 제어기 정수 α 에 대한 고유치 λ_i 의 고유치 일차 감도계수는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} = \frac{\left[\left[\frac{\partial A_R}{\partial \alpha} \right] V_i, W_i \right]}{\left[V_i, W_i \right]} \quad (5)$$

식 (5)의 감도계수를 구하는 식을 이산시스템에 적용하면, 식 (3)으로부터 상태천이행렬의 제어기정수 α 에 대한 감도행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial A_R}{\partial \alpha} = -R_M^{-1} \frac{\partial R_M}{\partial \alpha} R_M^{-1} R_K + R_M^{-1} \frac{\partial R_K}{\partial \alpha} \quad (6)$$

식 (6)은 하나의 시간구간에서의 감도행렬을 나타내며, RCF해석법을 사용한 계통의 상태천이 방정식으로부터 상태천이 행렬의 일반형은 해석하고자 하는 구간 전체에 대해 각각의 시간구간에서의 상태천이행렬이 곱해진 형태로 이루어진다.

$$A_R(t_n, t_0) = A_R(t_n, t_{n-1}) A_R(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots A_R(t_1, t_0) \quad (7)$$

식 (7)에서 해석하고자하는 전체 구간에서 상태천이행렬의 제어기정수에 대한 감도행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_R(t_n, t_0)}{\partial \alpha} &= \frac{\partial A_R(t_n, t_{n-1})}{\partial \alpha} A_R(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots A_R(t_1, t_0) \\ &+ \quad \vdots \\ &+ \quad \vdots \\ &A_R(t_n, t_{n-1}) A_R(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots \frac{\partial A_R(t_1, t_0)}{\partial \alpha} \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 제어기 감도해석

■ TCSC의 감도행렬 계산식

식 (3)에서 TCSC 제어기 정수 중 제어 가능한 K_r, T_r 에 대한 감도행렬의 요소는 대부분의 행렬요소가 0인 구조를 가지며, 0이 아닌 행렬요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_M(8,8)}{\partial K_r} &= \frac{T_r}{K_r^2} + \frac{h}{2K_r^2} \\ \frac{\partial R_M(8,8)}{\partial T_r} &= -\frac{1}{K_r} \\ \frac{\partial R_K(8,8)}{\partial K_r} &= \frac{T_r}{K_r^2} - \frac{h}{2K_r^2} \\ \frac{\partial R_K(8,8)}{\partial T_r} &= -\frac{1}{K_r} \end{aligned} \quad (9)$$

■ PSS의 감도행렬 계산식

식 (3)에서 PSS 제어기 정수 중 제어 가능한 시정수 τ_Q 와 PSS 이득정수 K_{QS} 에 대한 감도행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_M(12,12)}{\partial \tau_Q} &= -\frac{h}{2\tau_Q^2}, & \frac{\partial R_K(12,12)}{\partial \tau_Q} &= \frac{h}{2\tau_Q^2} \\ \frac{\partial R_M(13,12)}{\partial \tau_Q} &= \frac{\tau_{Q1}}{\tau_Q} \frac{\partial R_M(12,12)}{\partial \tau_Q}, & \frac{\partial R_K(13,12)}{\partial \tau_Q} &= \frac{\tau_{Q1}}{\tau_Q} \frac{\partial R_K(12,12)}{\partial \tau_Q} \\ \frac{\partial R_M(14,12)}{\partial \tau_Q} &= \frac{\tau_{Q2}}{\tau_Q} \frac{\partial R_M(13,12)}{\partial \tau_Q}, & \frac{\partial R_K(14,12)}{\partial \tau_Q} &= \frac{\tau_{Q2}}{\tau_Q} \frac{\partial R_K(13,12)}{\partial \tau} \\ \frac{\partial R_M(12,i)}{\partial K_{QS}} &= -\frac{h}{2} A_i, & \frac{\partial R_K(12,i)}{\partial K_{QS}} &= \frac{h}{2} A_i \\ \frac{\partial R_M(13,i)}{\partial K_{QS}} &= \frac{K_{13}}{K_{QS}} \frac{\partial R_M(12,i)}{\partial K_{QS}}, & \frac{\partial R_K(13,i)}{\partial K_{QS}} &= \frac{K_{13}}{K_{QS}} \frac{\partial R_K(12,i)}{\partial K_{QS}} \\ \frac{\partial R_M(14,i)}{\partial K_{QS}} &= \frac{K_{14}}{K_{QS}} \frac{\partial R_M(12,i)}{\partial K_{QS}}, & \frac{\partial R_K(14,i)}{\partial K_{QS}} &= \frac{K_{14}}{K_{QS}} \frac{\partial R_K(12,i)}{\partial K_{QS}} \end{aligned}$$

여기서, $i = 1 \sim 6$

$$\begin{aligned} \text{단, } A_1 &= \frac{\lambda_{q0} - L_d i_{q0}}{3\tau_j} \quad A_2 = -\frac{kM_R i_{q0}}{3\tau_j} \quad A_3 = -\frac{kM_D i_{q0}}{3\tau_j} \\ A_4 &= \frac{-\lambda_{d0} + L_q i_{d0}}{3\tau_j} \quad A_5 = \frac{kM_Q i_{d0}}{3\tau_j} \quad A_6 = -\frac{D}{\tau_j} \end{aligned}$$

$$K_{13} = \frac{K_{QS} \tau_{Q1}'}{\tau_{Q1}} \quad K_{14} = \frac{K_{QS} \tau_{Q1}' \tau_{Q2}'}{\tau_{Q1} \tau_{Q2}} \quad (10)$$

식 (10)의 감도 행렬요소 식을 사용하여 하나의 시간구간에서의 감도행렬을 구성하게 되며, 전체 해석구간에 대해서는 식 (8)에서 제시한 방법으로 감도행렬이 구해진다.

3. 사례연구

3.1 이산시스템의 고유치해석

사례연구에서 발전기 제어장치와 TCSC를 포함하는 일기무한모선 계통의 해석을 위한 발전기와 제어기 그리고 TCSC의 기본 데이터는 참고문헌[1-2]의 값을 사용하였다. 이산시스템에서의 진동모드 해석결과 TCSC의 점화각이 144[°] 이상인 경우 시스템이 불안정으로 바뀌는 것을 알 수 있었다. 해석과정에서 수치적분구간 h 값은 1 주기를 20개의 구간으로 나눈 값을 사용하였으며, 일반적으로 h 값은 수치계산상의 오차를 감소하기 위해 1 주기의 10[%] 이하의 값을 사용하였다.

표 1은 TCSC 싸이리스터의 점화각이 144[°]인 경우의 이산시스템에서의 고유치 해석결과인 15개의 진동모드를 나타낸 것으로, TCSC의 싸이리스터가 반 주기를 나타내는 10개의 시간구간마다 1 Step 에서 8 Step 까지는 OFF를, 점화각 144[°]에 해당하는 9 Step 에서 10 Step까지는 ON의 스위칭 동작을 주기적으로 반복하게 된다. 표 1에서 각 시간구간마다 (+)의 부호를 갖는 불안정한 진동모드를 음영으로 나타내었으며, 불안정한 진동모드가 하나라도 있게 되면 그 시간구간은 불안정을 나타내고 불안정한 진동모드가 없는 시간구간은 안정한 것을 나타낸다. 표 1에서 TCSC의 싸이리스터가 동작하기 이전인 8 Step까지는 시스템이 불안정한 상태를 유지하고 TCSC 싸이리스터가 동작하는 첫 번째 구간인 9 Step부터 불안정 진동모드가 안정영역으로 이동을 시작하여 10 Step에서 안정한 상태로 됨을 알 수 있다. 두 번째 반주기 OFF 구간인 11 Step에서 다시 진동모드가 서서히 불안정영역으로

이동하여 14 Step에서 불안정한 진동모드로 바뀌게 되지만, 첫 번째 반주기에서의 불안정한 진동모드에 비해 허수축에 가까운 값을 가지는 것을 알 수 있다.

표 1. TCSC의 점화각 144[°]인 경우의 고유치 해석결과

Table 1. Oscillation modes of TCSC with 144[°] firing angle

OFF				
1 Step	2 Step	3 Step	4 Step	5 Step
-9.738+j377.115	-9.797+j377.115	-9.802+j377.115	-9.800+j377.115	-9.801+j377.115
-10.948+j2.934	-10.948+j2.934	-10.948+j2.934	-10.948+j2.934	-10.948+j2.934
-2.993+j6.396	-2.979+j6.396	-2.984+j6.396	-2.986+j6.396	-2.982+j6.396
-99.999	-99.997	-99.994	-99.992	-99.995
-36.800	-38.537	-36.808	-38.533	-38.536
-38.535	-36.797	-38.538	-36.800	-36.799
-44.086	-44.025	-44.082	-44.029	-44.029
-2.723	-2.737	-2.732	-2.730	-2.728
0.882	0.835	0.844	0.835	0.841
-2.022	-2.022	-2.022	-2.022	-2.022
-0.107	-0.121	-0.116	-0.114	-0.113
-0.134	-0.121	-0.125	-0.128	-0.129
불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
OFF		ON		
6 Step	7 Step	8 Step	9 Step	10 Step
-9.808+j377.115	-9.802+j377.115	-9.802+j377.115	-10.841+j377.015	-11.671+j376.931
-10.948+j2.934	-10.948+j2.934	-10.945+j2.934	-10.946+j2.934	-10.946+j2.934
-2.983+j6.396	-2.985+j6.396	-2.982+j6.396	-1.743+j7.128	-1.242+j7.829
-99.996	-99.992	-99.995	-99.994	-99.993
-38.534	-38.533	-38.533	-41.184	-41.657
-36.799	-36.799	-36.799	-36.536	-36.674
-44.029	-44.080	-44.081	-44.080	-43.082
-2.732	-2.731	-2.730	-4.880	-44.029
0.844	0.839	0.842	0.107	-5.919
-2.022	-2.025	-2.025	-2.025	-2.025
-0.116	-0.115	-0.114	-0.101	-0.124
-0.125	-0.127	-0.128	-0.125	
불안정	불안정	불안정	불안정	안정
OFF				
11 Step	12 Step	13 Step	14 Step	15 Step
-11.502+j376.948	-11.360+j376.933	-11.240+j376.975	-11.138+j376.986	-11.048+j376.995
-10.946+j2.934	-10.947+j2.934	-10.945+j2.934	-10.945+j2.934	-10.946+j2.934
-1.320+j7.692	-1.394+j7.576	-1.463+j7.475	-1.536+j7.387	-1.586+j7.310
-0.083+j0.054	-0.089+j0.040	-0.056+j0.005	-99.994	-99.993
-99.994	-99.995	-99.995	-36.613	-41.657
-42.706	-42.382	-42.108	-41.871	-36.607
-36.652	-36.634	-36.624	-44.080	-44.080
-44.081	-44.081	-44.029	-5.235	-5.170
-5.739	-5.575	-5.428	0	0.082
-2.024	-2.024	-2.024	-2.024	-2.024
-0.122	-0.123	-0.124	-0.084	-0.083
			-0.123	-0.124
안정	안정	안정	불안정	불안정

OFF			ON	
16 Step	17 Step	18 Step	19 Step	20 Step
-10.970+j377.003	-10.902+j377.009	-10.841+j377.016	-11.277+j376.971	-11.671+j376.931
-10.946+j2934	-10.946+j2934	-10.946+j2934	-10.946+j2934	-10.946+j2934
-1.642+j7.242	-1.638+j7.182	-1.741+j7.128	-1.440+j7.537	-1.240+j7.829
-99.994	-99.993	-99.993	-0.059+j0.024	-0.038+j0.063
-41.486	-41.327	-41.184	-99.993	-99.994
-36.600	-36.538	-36.594	-42.194	-43.091
-44.080	-44.029	-44.029	-36.626	-36.674
-5.058	-4.954	-4.858	-44.080	-44.080
0.060	0.085	0.107	-5.476	-5.919
-2.024	-2.024	-2.023	-2.025	-2.025
-0.097	-0.099	-0.101	-0.123	-0.122
-0.124	-0.125	-0.124		
불안정	불안정	불안정	안정	안정

치 해석결과 중에서 전기기계적 진동모드에 대해 TCSC와 PSS의 제어기정수에 대한 감도해석을 하였다.

■ TCSC의 감도해석

표 2는 TCSC의 사이리스터가 각각 OFF 또는 ON인 경우에 대해 TCSC 제어기 정수 중에서 제어가 가능한 K_r , T_r 에 대한 감도해석 결과를 나타낸 것으로, OFF와 ON시에 감도계수의 실수부가 반대의 부호를 갖는 것을 알 수 있다.

표 2. TCSC의 RCF 해석법에 의한 감도해석($\times 10^{-3}$)
Table 2. Sensitivity analysis of TCSC using RCF method($\times 10^{-3}$)

	OFF		ON	
	K_r	T_r	K_r	T_r
감도 계수	2.6987-j0.9965	-2.3861+j0.8812	-0.5119-j.07962	.04526+j07040

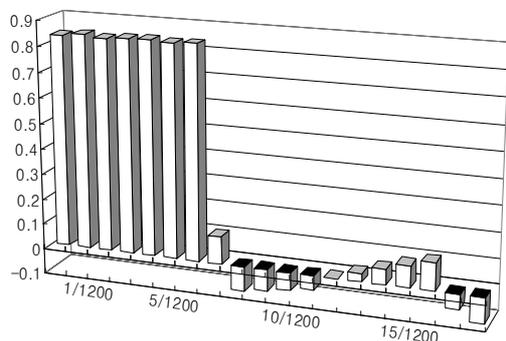


그림 3. TCSC 점화각 144[°]인 경우의 불안정 진동모드의 궤적
Fig. 3. Locus of unstable oscillation mode with 144[°] firing angle

다시 사이리스터가 점화되면서 19 Step부터 바로 안정한 값을 갖게 된다. 이와같이 TCSC 사이리스터의 점화각이 144[°]인 경우에는 사이리스터의 주기적인 스위칭 동작에 의해 진동모드가 안정과 불안정으로 주기적으로 바뀌는 것을 알 수 있으며, 이때의 진동모드를 그림 3에 나타내었다.

3.2 연속 시스템에서의 감도해석

전력시스템의 안정도 해석시 대부분의 경우는 발전기 회전자에 의한 전기기계적 진동모드가 시스템의 안정여부를 결정짓는 역할을 한다. 표 1의 고유

■ PSS의 감도해석

표 3은 TCSC의 사이리스터가 각각 OFF 또는 ON인 경우의 PSS 제어기 정수 중에서 제어가 가능한 τ_Q , K_{Qs} 의 감도해석 결과이며, OFF와 ON시에 τ_Q 의 감도계수는 실수부가 서로 반대의 부호를 가지며, K_{Qs} 도 해석결과가 크게 다른 것을 알 수 있다.

표 3. PSS의 RCF 해석법에 의한 감도해석
Table 3. Sensitivity analysis of PSS using RCF method

	OFF		ON	
	$\tau_Q(\times 10^{-13})$	$K_{Qs}(\times 10^{-7})$	$\tau_Q(\times 10^{-13})$	$K_{Qs}(\times 10^{-7})$
감도 계수	0.110+j0.250	-1.29-j1.57	-0.020+j0.01	-0.5257-j0.652

3.3 이산 시스템에서의 감도해석

본 논문에서 제안한 RCF 해석법에 기초한 이산시스템에서의 감도해석방법을 사용하여 이산시스템에서의 감도해석을 하였다.

■ TCSC의 감도해석

표 4. 점화각 144[°]인 경우의 TCSC 감도해석($\times 10^{-3}$)
 Table 4. Sensitivity analysis of TCSC with 144[°]
 firing angle($\times 10^{-3}$)

	OFF		ON		OFF	
	8 Step	9 Step	10 Step	11 Step	12 Step	13 Step
Kr	2.698+j0.996	1.648+j0.261	0.983+j0.286	1.086+j0.298	1.183+j0.304	
Tr	-2.385+j0.881	-1.457-j0.230	-0.869-j0.253	-0.960-j0.263	-1.046-j0.269	
	OFF					
	13 Step	14 Step	15 Step	16 Step	17 Step	
Kr	1.274+j0.306	1.359+j0.303	1.439+j0.296	1.513+j0.287	1.582+j0.275	
Tr	-1.126-j0.270	-1.201-j0.268	-1.272-j0.262	-1.338-j0.254	-1.399-j0.243	
	OFF		ON			
	18 Step	19 Step	20 Step			
Kr	1.647+j0.261	1.244+j0.306	0.983+j0.286			
Tr	-1.456-j0.230	-1.099-j0.270	-0.869-j0.253			

그림 1의 TCSC를 포함하는 이산시스템에서 RCF 해석법에 기초한 감도해석의 결과를 표 4에 나타내었다. 표 4에서 싸이리스터가 OFF 상태가 유지되는 8 Step에서의 감도해석결과는 표 2의 연속시스템에서의 감도해석결과 중에서 스위치가 OFF인 경우와 정확히 일치하며, 점화각 144[°]에서 싸이리스터가 ON이 되면서 감도계수가 K_r 은 감소하고 T_r 은 증가하는 방향으로 이동하다가 두 번째 반주기에서 스위치가 OFF가 되면서 18 Step까지 K_r 은 다시 증가하고 T_r 은 감소하는 것을 알 수 있다. 18 Step에서의 값은 처음 싸이리스터가 동작하기 직전인 8 Step에서의 감도해석결과와는 다른 값을 가지며, 두 번째 반주기에서 싸이리스터가 ON이 되는 19 Step에서 다시 K_r 은 감소하고 T_r 은 증가하는 것을 알 수 있다. 이후의 싸이리스터의 주기적인 스위칭 동작에 대해서는 두 번째 반주기에서의 감도해석 결과의 변화과정이 그대로 반복된다.

표 4의 TCSC 정수 K_r 과 T_r 에 대한 감도해석결과를 그림 4와 그림 5에 나타내었다.

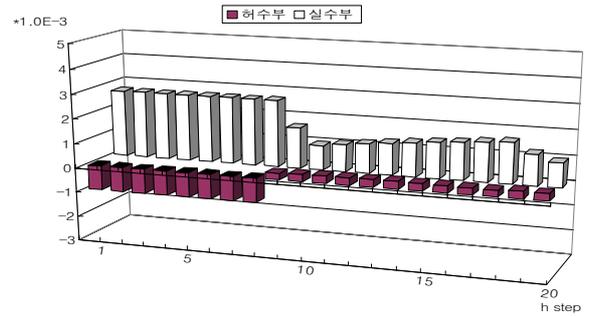


그림 4. 점화각 144[°]인 TCSC의 Kr 감도계수
 Fig. 4. Sensitivity coefficient of Kr in TCSC with 144[°] firing angle

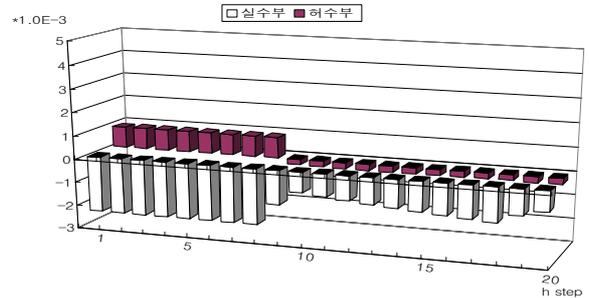


그림 5. 점화각 144[°]인 TCSC의 Tr 감도계수
 Fig. 5. Sensitivity coefficient of Tr in TCSC with 144[°] firing angle

■ PSS의 감도해석

그림 2의 PSS를 포함하는 이산시스템에서 RCF 해석법에 기초한 감도해석의 결과를 표 5에 나타내었다.

표 5에서 싸이리스터가 OFF 상태가 유지되는 8 Step에서의 감도해석결과는 표 3의 연속시스템에서의 PSS 제어기정수에 대한 감도해석결과 중에서 스위치가 OFF인 경우와 일치하며, 점화각 144[°]에서 싸이리스터가 ON이 되면서 감도계수가 τ_Q 은 실수부가 (-)의 영역으로 이동하여 거의 일정한 상태에서 허수부가 감소하고 K_{QS} 은 증가하는 방향으로 이동하다가 두 번째 반주기에서 스위치가 OFF가 되면서 18 Step까지 τ_Q 은 허수부가 다시 서서히 증가하고 K_{QS} 은 감소하는 것을 알 수 있다. 18 Step에서의 값은 처음 싸이리스터가 동작하기 직전인 8 Step에서의 감도해석결과와는 크게 다른 값을 보이며, 두 번째 반주기에서 싸이리스터가 ON이 되는 19 Step에서 다시 τ_Q 은 감소하고

K_{QS} 은 증가하는 것을 알 수 있다. 이후의 싸이리스터의 주기적인 스위칭 동작에 대해서는 두 번째 반주기에서의 감도해석 결과의 변화과정이 반복된다.

표 5. 점화각 144[°]인 경우의 PSS 감도해석 ($\tau_Q(\times 10^{-13})$, $K_{QS}(\times 10^{-7})$)

Table 5. Sensitivity analysis of PSS with 144[°] firing angle ($\tau_Q(\times 10^{-13})$, $K_{QS}(\times 10^{-7})$)

	OFF	ON		OFF	
	8 Step	9 Step	10 Step	11 Step	12 Step
τ_Q	0.12+j0.26	-0.09+j0.15	-0.08+j0.07	-0.09+j0.08	-0.09+j0.09
K_{QS}	-1.55-j1.59	-1.01-j1.73	-0.871-j1.51	-0.92-j1.57	-0.97-j1.62
	OFF				
	13 Step	14 Step	15 Step	16 Step	17 Step
τ_Q	-0.09+j0.11	-0.10+j0.12	-0.10+j0.13	-0.10+j0.14	-0.10+j0.15
K_{QS}	-1.02-j1.66	-1.08-j1.70	-1.14-j1.74	-1.20-j1.77	-1.26-j1.79
	OFF	ON			
	18 Step	19 Step	20 Step		
τ_Q	-0.10+j0.16	-0.10+j0.10	-0.10+j0.07		
K_{QS}	-1.32-j1.82	-1.25-j1.70	-1.25-j1.59		

표 5의 PSS 정수 τ_Q 과 K_{QS} 에 대한 감도해석결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

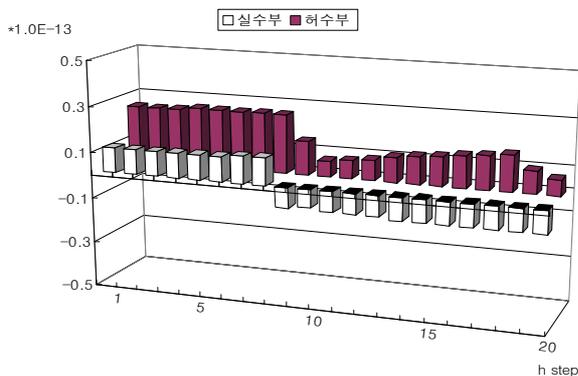


그림 6. 점화각 144[°]인 PSS의 τ_Q 감도계수($\times 10^{-13}$)
Fig. 6. Sensitivity coefficient of τ_Q in PSS with 144[°] firing angle($\times 10^{-13}$)

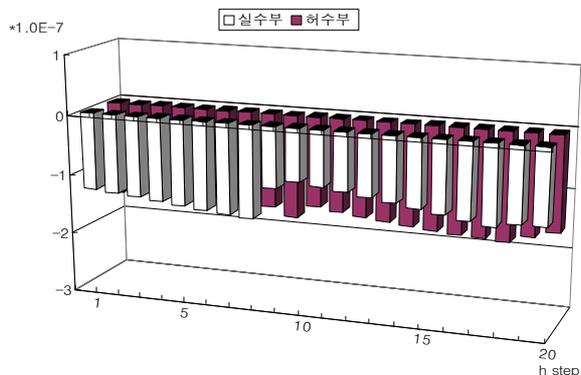


그림 7. 점화각 144[°]인 PSS의 K_{QS} 감도계수($\times 10^{-7}$)
Fig. 7. Sensitivity coefficient of K_{QS} in PSS with 144[°] firing angle($\times 10^{-7}$)

사례연구의 해석결과로부터 TCSC와 같이 주기적으로 스위칭 동작을 하는 설비를 포함하는 전력시스템에서 안정도 개선을 위해 제어기 정수에 대한 감도해석을 하는 경우 연속시스템에서의 해석결과를 사용하게 되면 싸이리스터의 주기적 스위칭에 의한 영향이 고려되지 않는다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 연속 제어동작을 하는 Exciter와 PSS를 포함하는 발전기 제어장치와 싸이리스터에 의한 불연속 스위칭 동작을 하는 TCSC를 포함하는 전력계통의 고유치 해석과 안정도 개선을 위한 고유치 감도해석을 이산 시스템에서의 해석방법을 사용하여 해석하였다. 이산 시스템에서의 해석방법으로는 RCF 해석법을 사용하였으며, 이산 시스템에서의 제어기정수에 대한 감도해석시 RCF 해석법에 기초한 감도해석 알고리즘을 제시하였다. 기존의 연속시스템에서의 감도해석과 본 논문에서 사용한 이산시스템에서의 감도해석 결과, 기존의 연속시스템에서의 해석결과가 TCSC 싸이리스터가 OFF 또는 ON인 경우의 진동모드 해석결과와 이때의 제어기정수에 대한 감도해석 결과만을 보이는데 반해, 본 논문에서 사용한 이산시스템에서의 진동모드와 감도해석 방법은 TCSC 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 시스템의 진동모드 뿐만 아니라 제어기정수에 대한 감도해석결과도 주기적으로

변화하고 있음을 정확히 해석할 수 있었다. 이러한 해석결과는 TCSC와 같은 스위칭 소자를 포함하는 전력 계통의 해석과 안정도 개선을 위한 제어기 정수에 대한 감도해석시 본 논문에서 제안한 RCF 해석법에 기초한 이산 시스템에서의 감도해석 방법이 적합하다는 것을 보여주는 결과이다.

이 논문은 2008년도 군산대학교 교수장기국외연수경비의 지원에 의하여 연구되었음.

References

[1] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power system control and stability, Iowa state press, 2003.

[2] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems, IEEE Wiley Inter-Science, 2002.

[3] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS, IEEE Press, 2000.

[4] Yousin Tang, A. P. Sakis Meliopoulos, "Power system small signal stability analysis with FACTS elements", IEEE Trans. of power delivery, Vol. 12, No. 3, pp.1352-1361, July 1997.

[5] Eugene V. Solodovnik, George J. Cokkinides, AP. Sakis Meliopoulos, "On stability of implicit numerical methods in nonlinear dynamical systems simulation", IEEE winter meeting 1998.

[6] Eugene V. Solodovnik, George Cokkinides, Roger Dougal, A. P. Sakis Meliopoulos, "Nonlinear power system component modeling using symbolically assisted computation", power engineering society summer meeting, pp. 1439-1444, 2001.

[7] A. P. Meliopoulos, George J. Cokkinides, George K. Stefopoulos, "Improved numerical integration method for power/power electronic systems based on three-point collocation", Proceedings of the 44th IEEE conference on decision and control, pp. 6780-6787, December, 2005.

◆ 저자소개 ◆



김덕영(金德泳)

1964년 11월 22일생. 1988년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년 7월~2002년 8월 미국 Georgia Institute of Technology 과학재단 Post-doc. Fellow. 2008년 7월~2010년 1월 미국 University of South Florida 교환교수. 1996년~현재 군산대학교 전기공학과 교수.