
직렬형 FACTS 설비를 포함하는 전력시스템의 RCF 해석법에 기초한 감도해석

김덕영*

Sensitivity Analysis of Power System Including Series FACTS Device Based on RCF Method

Deok-young Kim*

이 논문은 2008년도 군산대학교 교수장기국외연수경비의 지원에 의하여 연구되었음

요 약

본 논문은 Exciter와 Power System Stabilizer(PSS)를 포함하는 발전기 제어장치와 싸이리스터에 의한 불연속 스위칭 동작을 하는 직렬형 Flexible AC Transmission System(FACTS) 설비인 Thyristor Controlled Static-var Compensator(TCSC)를 포함하는 전력계통의 고유치 해석과 안정도 개선을 위한 고유치 감도계수를 이산 시스템에서의 해석방법을 사용하여 해석하였다. 이산 시스템에서의 해석방법으로는 Resistive Companion Form(RCF) 해석법을 사용하였으며, 상태전이 방정식을 사용하여 감도해석에 필요한 계산 알고리즘을 제시하였고, 연속시스템에서의 해석결과와 비교하였다. TCSC의 스위칭 동작이 고려되지 않는 연속 시스템에서의 해석결과와 달리, 이산 시스템에서의 해석결과 스위칭 동작의 영향으로 제어기 정수에 대한 감도해석 결과가 일정한 방향성을 가지면서 주기적으로 변화하는 것을 알 수 있었다. 또한 중요 진동모드에 대한 제어기 정수의 감도계수 값이 연속시스템에서의 해석결과와 달리 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 다른 값을 가지면서 주기적으로 진동하는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, the RCF method is used in sensitivity analysis problems of the discrete power systems including both series FACTS equipments such as TCSC in transmission lines and generator controllers such as Exciter and PSS in generator terminal. To apply the RCF method in small signal stability problems of discrete power systems, state transition equations of controllers and TCSC are derived and the sensitivity calculation algorithm using state transition equations in discrete time domain is devised. The results of eigenvalue analysis showed that the variations of eigenvalues after periodic switching operations of TCSC can be calculated exactly by the RCF method and the change of firing angles in TCSC have important effect to determine the stability of power systems.

키워드

감도해석, 이산시스템, PSS, RCF 해석법, TCSC

Key word

Sensitivity analysis, Discrete system, PSS, RCF method, TCSC

* 정회원 : 군산대학교(교신저자, dykim@kunsan.ac.kr)

접수일자 : 2010. 10. 14

심사완료일자 : 2010. 12. 18

I. 서 론

현대의 전력계통분야에서 FACTS 설비는 조류제어를 보다 효율적으로 하기 위해 대용량의 전력전자소자를 사용하고 있으며, 이로 인해 기존의 전력망을 그대로 사용하면서도 전력 전송용량의 증가와 전송 전력손실의 최소화 등 계통 운영의 측면에서 경제성과 효율성이 크게 증대되는 효과가 있다.[1] 그러나 이러한 긍정적인 요소와 함께 FACTS 설비의 스위칭 동작에 의한 왜란이나 새로운 진동모드의 발생 등과 같은 부정적인 효과도 같이 나타나는 것으로 알려져 있다.[2,3] 이러한 스위칭 설비를 포함하는 전력계통의 미소신호 안정도 해석을 위해서는 기존의 연속시스템에서의 고유치 해석법이 아닌 새로운 접근방법이 필요하며, 전력계통을 이산시스템으로 모델링하고 이산시스템에서의 상태천이방정식에 의한 해석방법에 대한 연구가 진행되어왔다. RCF 해석법은 이산시스템에서 선형화된 계통구성 설비의 모델로부터 상태천이 방정식을 사용하여 진동모드를 해석하는 방법을 의미하며, 수치적분과정에서 다양한 형태의 알고리즘이 사용되고 있다.[4,5,6,7]

본 논문에서는 RCF 해석법의 수치적분과정에서 다른 수치적분법에 비해 정확성과 알고리즘의 효율성이 뛰어난 Trapezoidal 수치적분법을 사용하였으며, Trapezoidal 수치적분과정에서의 선형화에 의한 오차발생을 최소화하고 스위칭 동작의 첫 번째 주기부터 정확한 해석결과가 구해지도록 적분 시간구간의 크기를 반복주기의 10% 이하로 하였다. 이때 시간구간의 크기를 조절함으로써 모든 사이리스터 점화각에 대해서 해석이 가능하도록 하여, TCSC의 사이리스터 점화각에 의한 시스템 안정도에 미치는 영향을 정확히 해석할 수 있도록 하였다. 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 결과를 연속 시간영역에서의 감도해석 결과와 비교하여 RCF 해석법에 기초한 이산시스템에서

의 해석이 TCSC와 같이 주기적 스위칭 동작을 하는 제어기를 포함하는 시스템의 해석에 적합한 방법임을 보이고자 한다.

II. RCF 해석법을 적용한 계통의 모델링

2.1 RCF 해석법의 개요

전력계통의 미소신호 안정도 해석을 하기 위해서는 모든 계통구성장치를 다음과 같이 대수방정식과 미·적분 방정식으로 구성하게 되며, 이들 방정식의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

본 논문에서는 수치적분법 중에서 Trapezoidal Method를 사용하였다. Trapezoidal 수치적분법은 오일러 후방대입법이나 심슨법 등의 수치적분법에 비해 정확성과 효율성이 뛰어난 것으로 알려져 있다. 미분방정식의 일반형인 식(1)을 적분구간 h 에 대해 적분하고, 계통방정식을 적용한 후의 상태천이 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t-h) \\ y(t-h) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(t-h) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)는 시간 $t-h$ 에서 t 동안의 전체계통의 상태천이 방정식을 나타내며, 하나의 적분구간 h 에서의 천이행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi(t, t-h) = \begin{bmatrix} Y_{s11} & Y_{s12} \\ Y_{s21} & Y_{s22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{s11} & P_{s12} \\ P_{s21} & P_{s22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)에서 해석대상이 되는 다수개의 적분구간에 대한 상태천이행렬은 각각의 적분구간에서의 상태천이행렬을 사용하여 다음과 같이 전체구간에 대한 상태 천이행렬이 구해진다.

$$\Phi(t_n, t_0) = \Phi(t_n, t_{n-1})\Phi(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots \Phi(t_1, t_0) \quad (4)$$

식(4)는 상태 천이행렬로부터 구한 고유치는 상태행렬로부터 구한 고유치를 크기가 1인 단위원으로 mapping한 것과 같으며, 모든 고유치가 단위원 안에 있는 경우 안정하며, 단위원 밖에 있는 경우는 불안정함을 의미한다. 본 논문에서는 적분구간 h 의 크기를 동일하게 하고 스위칭 동작이 반복되는 주기의 10% 이하로 h 값을 설정하여 수치적분 과정에서 선형화에 따른 오차발생이 최소화되도록 하였으며, 적분구간의 간격을 조절함으로써 임의의 점화각에 대해서도 해석이 가능하도록 하였다.

2.2 이산시스템에서의 감도해석법

제어기 정수 α 에 대한 고유치 λ_i 의 고유치 일차 감도 계수는 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)에서 상태천이행렬의 제어기정수 α 에 대한 감도행렬은 다음과 같이 구해진다.

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

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.

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

III. 이산시스템에서의 모델링

본 논문에서는 발전기 단자에 IEEE Type 1 Exciter가 설치되어 있고 여기에 발전기 회전자 각속도를 입력 신호로 하는 PSS가 설치된 경우를 해석대상으로 하였다. 직렬형 FACTS 설비인 TCSC는 발전기와 무한 모선을 연결하는 선로에 설치되어 있는 것으로 가정하였으며, TCSC와 PSS의 제어 블록선도는 다음과 같다.[1,2]

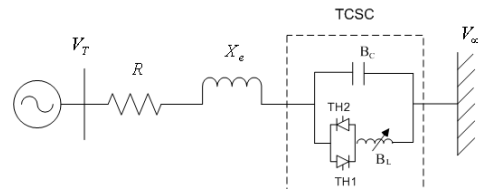


그림 1 TCSC가 설치된 일기무한모선 계통의 계통도
Fig. 1 One machine infinite bus system with TCSC

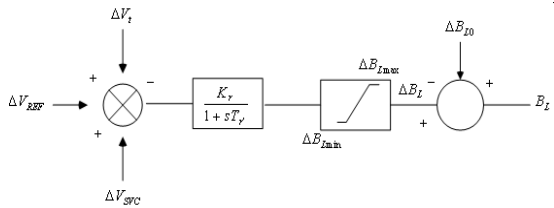


그림 2 TCSC의 제어 블록선도
Fig. 2 Block diagram of TCSC

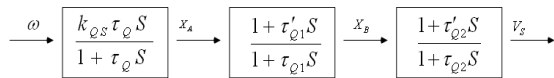


그림 3 Power System Stabilizer 블록선도
Fig. 3 Block diagram of Power System Stabilizer

그림 1의 계통도에서 발전기는 상세 전류모델을 사용하였다. TCSC에 흐르는 전류의 d, q 성분을 i_{d-TCSC}, i_{q-TCSC} 라 하면, 발전기 단자전류의 d, q 성분 i_d, i_q 와 선로에 흐르는 전류의 d, q 성분 i_{td}, i_{tq} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{i}_d &= \dot{i}_{td} = \dot{i}_d - TCSC \\ \dot{i}_q &= \dot{i}_{tq} = \dot{i}_q - TCSC \end{aligned} \quad (9)$$

그림 2의 TCSC 제어블럭에서 발전기 단자전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_i = \Delta V_{REF} + \Delta V_{SVC} - \frac{1}{K_r} \Delta B_L - \frac{T_r}{K_r} \Delta \dot{B}_L \quad (10)$$

식(10)과 그림 3의 블록선도로부터 TCSC와 PSS의 상태천이 방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{T_r}{K_r} + \frac{h}{2K_r} \right] B_L(t) + \frac{h}{2} [V_i(t) - V_{REF}(t) - V_{SVC}(t)] \\ &= \left[\frac{T_r}{K_r} - \frac{h}{2K_r} \right] B_L(t-h) + \frac{h}{2} [-V_i(t-h) + V_{REF}(t-h) + V_{SVC}(t-h)] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 1 + \frac{h}{2\tau_Q} & 0 & 0 \\ \frac{-h}{2\tau_{Q1}} \left(1 - \frac{\tau_{Q1}}{\tau_Q}\right) & 1 + \frac{h}{2\tau_{Q1}} & 0 \\ \frac{-h\tau_{Q2}}{2\tau_{Q1}\tau_{Q2}} \left(1 - \frac{\tau_{Q1}}{\tau_Q}\right) & \frac{h}{2\tau_{Q2}} \left(1 - \frac{\tau_{Q2}}{\tau_{Q1}}\right) & 1 + \frac{h}{2\tau_{Q2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A(t) \\ X_B(t) \\ V_S(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_{Qs\omega}(t) \\ \frac{-\tau_{Q1}}{\tau_{Q1}} K_{Qs\omega}(t) \\ \frac{-\tau_{Q1}\tau_{Q2}}{\tau_{Q1}\tau_{Q2}} K_{Qs\omega}(t) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 - \frac{h}{2\tau_Q} & 0 & 0 \\ \frac{h}{2\tau_Q} \left(1 - \frac{\tau_Q}{\tau_{Q1}}\right) & 1 - \frac{h}{2\tau_Q} & 0 \\ \frac{h\tau_{Q2}}{2\tau_{Q1}\tau_{Q2}} \left(1 - \frac{\tau_Q}{\tau_{Q1}}\right) & \frac{-h}{2\tau_{Q2}} \left(1 - \frac{\tau_{Q2}}{\tau_{Q1}}\right) & 1 - \frac{h}{2\tau_{Q2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A(t-h) \\ X_B(t-h) \\ V_S(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -K_{Qs\omega}(t-h) \\ \frac{-\tau_{Q1}}{\tau_{Q1}} K_{Qs\omega}(t-h) \\ \frac{-\tau_{Q1}\tau_{Q2}}{\tau_{Q1}\tau_{Q2}} K_{Qs\omega}(t-h) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

식(11)에서 발전기 단자전압을 그리고 식(12)에서 발전기 회전자 각속도를 각각 발전기의 내부변수로 치환한 후의 시스템 상태천이 방정식과 상태변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X(t) &= R_M^{-1} R_K X(t-h) + R_M^{-1} R_B U(t-h) \\ &= A_R X(t-h) + B_R U(t-h) \end{aligned} \quad (13)$$

$$X^t = [i_d \ i_F \ i_D \ i_q \ i_Q \ \omega \ \delta \ V_1 \ V_3 \ V_R \ E_{FD} \ X_A \ X_B \ V_S \ B_L] \quad (14)$$

식(13)의 상태천이행렬로부터 이산시스템에서의 고유치 해석과 감도해석을 위한 감도행렬을 구하게 된다. 주기적 스위칭 동작에 의한 진동모드의 영향을 해석하기 위해 해석구간 전체에 대한 상태천이행렬과

감도행렬은 식(7)과 식(8)에서 제시한 방법으로 구해진다.

IV. 사례연구

그림 1의 발전기 제어장치와 TCSC를 포함하는 시스템에 RCF 해석법을 적용하여 이산시스템에서의 진동모드 해석과 제어기정수에 대한 감도해석을 하였다. 이때 발전기는 상세모델을 사용하였고, 발전기와 제어장치의 정수는 참고문헌[1]의 데이터를, TCSC 정수는 참고문헌[2]의 데이터를 사용하였다.

4.1 이산시스템의 고유치 해석

이산시스템에서의 진동모드 해석결과 TCSC의 점화각이 144° 인 경우를 기준으로 점화각이 144° 보다 작은 경우는 TCSC 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 대해서도 시스템이 안정한 것으로 해석되었고, 점화각이 144° 이상인 경우 시스템이 불안정한 것으로 해석되었다. 이때 수치적분구간 h 값은 1 주기를 20개의 구간으로 나눈 값을 갖는 동일한 시간간격으로 하였으며, 해석결과 TCSC 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작시 두 번째 반주기부터 동일한 해석결과를 보임을 알 수 있었다.

표 1은 TCSC 싸이리스터의 점화각이 144°인 경우의 이산시스템에서의 고유치 해석결과를 나타낸 것이다. 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. 다시 싸이리스터가 점화되면서 19 Step 부터 바로 안정한 값을 갖게 된다. 이와같이 TCSC 싸이리스터의 점화각이 144°인 경우에는 싸이리스터의 주기적인 스위칭 동작에 의해 진동모드가 안정과 불안정으로 주기적으로 바뀌는 것을 알 수 있으며, 이때의 진동모드를 그림 4에 나타내었다.

표 1 TCSC의 점화각 144°인 경우의 고유치 해석결과
Table 1 Oscillation modes of 144° firing angle

		OFF					
		1 Step	2 Step	3 Step	4 Step	5 Step	
고유치		-9.793±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	
		-36.809	-38.537	-36.803	-38.533	-38.536	
		-38.535	-36.797	-38.538	-36.800	-36.799	
		-44.036	-44.025	-44.032	-44.029	-44.029	
		-2.723	-2.737	-2.732	-2.730	-2.728	
		0.862	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	
고유치		-9.803±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	-0.097±j0.063	
		-38.534	-38.533	-38.533	-41.184	-99.993	
		-36.799	-36.799	-36.799	-36.596	-36.674	
		-44.029	-44.030	-44.031	-44.030	-43.092	
		-2.732	-2.731	-2.730	-4.860	-44.029	
		0.844	0.839	0.842	0.107	-5.919	
		-2.022	-2.026	-2.025	-2.025	-2.025	
		-0.116	-0.115	-0.114	-0.101	-0.124	
		-0.125	-0.127	-0.128	-0.125	-0.124	
		불안정	불안정	불안정	불안정	안정	
			OFF				
		11 Step	12 Step	13 Step	14 Step	15 Step	
고유치		-11.502±j376.948	-11.360±j376.963	-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	-1.526±j7.387	-1.586±j7.310	
		-0.083±j0.054	-0.069±j0.040	-0.056±j0.005	-99.994	-99.993	
		-99.994	-99.995	-99.995	-41.871	-36.607	
		-42.706	-42.382	-42.108	-44.030	-44.030	
		-36.652	-36.634	-36.624	-5.295	-5.170	
		-44.031	-44.031	-44.029	0	0.032	
		-5.739	-5.575	-5.428	-2.024	-2.024	
		-2.024	-2.024	-2.024	-0.084	-0.093	
		-0.122	-0.123	-0.124	-0.123	-0.124	
		안정	안정	안정	불안정	불안정	
			OFF			ON	
			16 Step	17 Step	18 Step	19 Step	20 Step
고유치		-10.970±j377.003	-10.902±j377.009	-10.841±j377.016	-11.277±j376.971	-11.671±j376.931	
		-10.946±j2.934	-10.946±j2.934	-10.945±j2.934	-10.946±j2.934	-10.946±j2.934	
		-1.642±j7.242	-1.693±j7.182	-1.741±j7.128	-1.440±j7.507	-1.240±j7.829	
		-99.994	-99.993	-99.993	-0.059±j0.024	-0.098±j0.063	
		-41.486	-41.327	-41.184	-99.993	-99.994	
		-36.600	-36.598	-36.594	-42.194	-43.091	
		-44.030	-44.029	-44.029	-36.626	-36.674	
		-5.058	-4.954	-4.858	-44.030	-44.030	
		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	-0.123	-0.122	
		불안정	불안정	불안정	안정	안정	

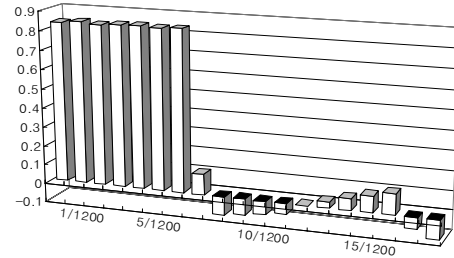


그림 4 TCSC 점화각 144°인 경우의 불안정 진동모드의 궤적

Fig. 4 Locus of unstable oscillation mode with 144° firing angle

표 1과 그림 4에서 사이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 안정과 불안정을 반복적으로 나타내는 12번 진동모드에 대해 점화각이 126°인 경우와 162°인 경우의 해석결과를 그림 5와 그림 6에 보였다.

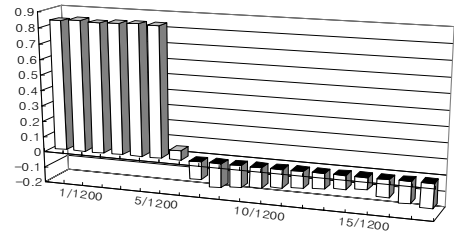


그림 5 TCSC 점화각 126°인 경우의 12번 고유치의 궤적

Fig. 5 Locus of unstable oscillation mode with 126° firing angle

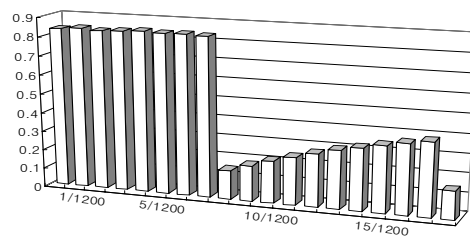


그림 6 TCSC 점화각 162°인 경우의 12번 고유치의 궤적

Fig. 6 Locus of unstable oscillation mode with 162° firing angle

그림 5에서 TCSC의 점화각이 126°인 경우는 주기적 스위칭 동작에 의해 12번 고유치가 안정한 영역에서 값이 주기적으로 변하고 있음을 알 수 있으며, 그림 6의 점화각이 162°인 경우는 동일한 진동모드가 불안정한 영역에서 값이 주기적으로 변하고 있음을 알 수 있다.

4.2 연속 시스템에서의 감도해석

전력시스템의 안정도 해석시 대부분의 경우는 발전기 회전자에 의한 전기기계적 진동모드가 시스템의 안정여부를 판정짓는 중요진동모드의 역할을 하게 되며, 표 1의 고유치 해석결과 중에서 전기기계적 진동모드에 대해 TCSC와 PSS의 제어기정수에 대한 연속 시스템에서의 감도해석을 표 2와 표 3에 나타내었다.

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

	OFF		ON	
	Kr	Tr	Kr	Tr
감도계수	2.6987-j0.9965	-2.3861+j0.8812	-0.5119-j.07962	.04526+j0.07040

표 2는 TCSC의 싸이리스터가 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 3 PSS의 RCF 해석법에 의한 감도해석
Table 3 Sensitivity analysis of PSS using RCF method

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

표 3은 TCSC의 싸이리스터가 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.

4.3 이산 시스템에서의 감도해석

표 1의 고유치 해석결과 중에서 전기기계적 진동모드에 대해, 본 논문에서 제안한 RCF 해석법에 기초한 이산 시스템에서의 감도해석방법을 사용하여 TCSC와 PSS의 제어기정수에 대한 감도해석을 하였다.

■ TCSC의 감도해석

그림 1의 시스템에서 TCSC의 제어기정수에 대해 본 논문에서 제안한 RCF 해석법에 기초한 감도해석 결과를 표 4에 나타내었다.

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
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		

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 변화 과정이 그대로 반복된다.

■ PSS의 감도해석

그림 1의 시스템에서 PSS의 제어기정수에 대해 본 논문에서 제안한 RCF 해석법에 기초한 감도해석 결과를 표 5에 나타내었다.

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	-0.920-j1.57	-0.972-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 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.

사례연구의 해석결과로부터 TCSC와 같이 주기적으로 스위칭 동작을 하는 설비를 포함하는 전력시스템에서 안정도 개선을 위해 제어기 정수에 대한 감도해석을 하는 경우 본 논문에서 제안한 RCF 해석법에 기초한 이

산시스템에서의 감도해석 방법을 사용하면, 싸이리스터의 주기적 스위칭에 의해 제어기 정수에 대한 감도계수도 주기적으로 진동하는 현상이 발생하는 것을 정확히 해석할 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 Exciter와 PSS를 포함하는 발전기 제어장치와 싸이리스터에 의한 불연속 스위칭 동작을 하는 직렬형 FACTS 설비인 TCSC를 포함하는 전력계통의 고유치 해석과 안정도 개선을 위한 고유치 감도계수를 이산 시스템에서의 해석방법을 사용하여 해석하였다. 이산 시스템에서의 해석방법으로는 RCF 해석법을 사용하였으며, 상태전이 방정식을 사용하여 감도해석에 필요한 계산 알고리즘을 제시하였고, 연속시스템에서의 해석결과와 비교하였다.

TCSC의 스위칭 동작이 고려되지 않는 연속 시스템에서의 해석결과와 달리, 이산 시스템에서의 해석결과 스위칭 동작의 영향으로 제어기 정수에 대한 감도해석 결과가 일정한 방향성을 가지면서 주기적으로 변화하는 것을 알 수 있었다. 또한 중요 진동모드에 대한 제어기정수의 감도계수 값이 연속시스템에서의 해석결과와 달리 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 다른 값을 가지면서 주기적으로 진동하는 것을 알 수 있었다. 이러한 해석결과는 본 논문에서 제안한 RCF 해석법에 기초한 이산시스템의 진동모드 해석과 감도해석이 TCSC와 같이 주기적으로 스위칭 동작을 하는 제어기를 포함하는 시스템의 해석에 적합한 해석방법임을 입증하는 결과이다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 군산대학교 교수장기국의 연수경비의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [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, A.P. 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.



김덕영(Deok-Young Kim)

1988 고려대학교 전기공학과 학사
1990 고려대학교 대학원
전기공학과 석사
1996~현재 군산대학교
전기공학과 교수

※ 관심분야 : FACTS, 스마트그리드, 전력계통 안정도 해석, 전력계통 모델링