

TCSC를 포함하는 전력계통의 RCF 해석법에 기초한 감도해석

김덕영, 박성주
군산대학교 전자정보공학부

Eigenvalue sensitivity analysis of power systems including TCSC based on the RCF method

Deok Young Kim, Sung Joo Park

School of Electronic & Information Eng. Kunsan National University

Abstract - In this paper, the RCF method is applied to analyze small signal stability of power systems including thyristor controlled FACTS equipments such as TCSC. The eigenvalue sensitivity analysis algorithm in discrete systems by the RCF method are presented and applied to the power system including TCSC. The RCF analysis method enabled to precisely calculate eigenvalue sensitivity coefficients of dominant oscillation modes after periodic switching operations. These simulation results are very different from those of the conventional continuous system analysis method such as the state space equation method.

1. 서 론

본 논문은 불연속 스위칭 동작을 하는 설비를 포함하는 전력계통의 미소신호 안정도해석에 기존의 연속시스템에서의 상태방정식에 의한 해석방법과 접근방법을 달리하여, 불연속 스위칭 동작을 하는 설비를 포함하는 전력계통을 이산시스템으로 모델링하고 수학적으로 강인한 특성을 갖는 RCF 해석법을 사용하여 이산 전력계통에 대해 상태천이방정식을 구성하고 이로부터 고유치 해석을 하여 스위칭 소자의 주기적 스위칭 동작에 의해 발생하는 진동현상의 정확한 해석 결과를 구하는 방법을 사용하였다[1, 2]. 이러한 RCF 해석법은 FACTS 설비와 같이 스위칭 소자를 포함하는 불연속 특성을 갖는 이산 전력계통의 미소신호 안정도 해석에 매우 적합한 방법이다. 또한 이산시스템에서 RCF 해석법에 기초한 감도해석 알고리즘을 제시하고, 사례연구에서 기존의 연속시스템에서의 고유치 감도해석 결과와 본 논문에서 제시한 RCF 해석법에 기초한 이산시스템에서의 고유치 감도해석 결과를 비교하고자 한다. RCF 해석법에 기초한 이산시스템에서의 감도해석은 FACTS 설비와 같이 주기적 스위칭 동작에 의해 발생하는 불안정 진동모드의 발생원인 분석과 제어기 정수의 최적화를 통한 이산 전력시스템의 안정도 향상에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

2. RCF 해석법에 기초한 이산시스템에서의 감도해석

일차 미분방정식으로 나타낸 계통의 상태방정식에서 제어기 정수 α 의 변화에 대한 고유치 λ_i 의 변화비율을 나타낸 고유치 일차 감도계수는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} = \frac{\left[\left[\frac{\partial A}{\partial \alpha} \right] V_i, W_i \right]}{\left[V_i, W_i \right]} \quad (1)$$

여기서 λ_i : i 번째의 고유치
 α : 계통 파라메타
 V_i : 각각 i번째의 고유벡터
 W_i : 각각 i번째의 전치고유벡터

2.1 이산시스템에서의 감도해석법

FACTS 설비를 포함하는 이산 전력시스템에서 상태천이방정식의 일반형은 다음과 같다.

$$X(k+1) = R_M^{-1} R_K X(k) + R_M^{-1} R_B U(k) = A_R X(k) + B_R U(k) \quad (2)$$

식(2)에서 상태천이행렬의 제어기정수에 대한 감도행렬을 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial A_R}{\partial \alpha} = -R_M^{-1} \frac{\partial R_M}{\partial \alpha} R_M^{-1} R_K + R_M^{-1} \frac{\partial R_K}{\partial \alpha} \quad (3)$$

식(3)은 상태방정식에서 구한 감도행렬과 형태는 유사하지만 감도계수를 구하기 위한 상태천이행렬이 해석하고자 하는 구간 동안의 각각의 적분구간에서 상태천이행렬이 곱해진 형태로 이루어진다는 것이 다르다.

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

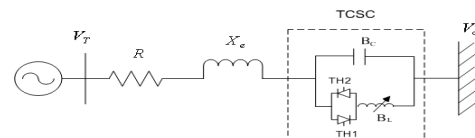
식(4)에서 해석하고자하는 전체 구간에서 상태천이행렬의 제어기정수에 대한 편미분식은 다음과 같이 구해지게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(t_n, t_0)}{\partial \alpha} &= \frac{\partial \Phi(t_n, t_{n-1})}{\partial \alpha} \Phi(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots \Phi(t_1, t_0) \\ &+ \dots \\ &+ \dots \\ &\Phi(t_n, t_{n-1}) \frac{\partial \Phi(t_{n-1}, t_{n-2})}{\partial \alpha} \cdots \frac{\partial \Phi(t_1, t_0)}{\partial \alpha} \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)는 각 적분구간에서의 상태천이행렬과 상태천이행렬의 편미분과의 곱으로 이루어진 항들의 합의 형태를 갖는 복잡한 수식으로 구성되어 있지만, 실제로 프로그램으로 반복계산하는 경우에 반복계산 단계마다 동일한 형태의 행렬곱에 의해 간단히 구해지게 된다.

2.2 TCSC를 포함하는 이산계통의 진동모드 해석

TCSC를 포함하는 일기무한모선 계통도는 다음과 같다.



〈그림 1〉 TCSC가 설치된 일기무한모선 계통도

TCSC 제어기 정수인 K_p, T_r 에 대한 편미분 행렬은 대부분의 행렬요소가 0인 Sparse한 구조를 가지며, 0이 아닌 행렬요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_M(s, s)}{\partial K_p} &= \frac{T_r}{K_p^2} + \frac{h}{2K_p^2} \\ \frac{\partial R_M(s, s)}{\partial T_r} &= -\frac{1}{K_p} \\ \frac{\partial R_K(s, s)}{\partial K_p} &= \frac{T_r}{K_p^2} - \frac{h}{2K_p^2} \\ \frac{\partial R_K(s, s)}{\partial T_r} &= -\frac{1}{K_p} \end{aligned} \quad (6)$$

3. 이산시스템에서의 진동모드 해석과 감도해석

그림 1의 TCSC를 포함하는 일기무한모선 계통에서 TCSC의 주기적 스위칭 동작에 의한 새로운 형태의 진동모드 중에서 전기기계적 진동모드의 TCSC 제어기 정수 K_p, T_r 에 대한 감도해석을 하였다.

3.1 연속시스템의 감도해석

TCSC의 사이리스터가 각각 OFF와 ON인 경우에 대해 TCSC 제어기 정수 K_r , T_r 에 대한 감도해석 결과는 다음과 같다.

<표 1> TCSC의 RCF 해석법에 의한 감도해석($\times 10^{-3}$)

감도 계수	OFF		ON	
	K_r	T_r	K_r	T_r
	2.6987-j0.9965	-2.3861+j0.8812	-0.5119-j0.07962	.04526+j0.07040

표 1에서 진동모드에 대한 제어기 정수의 최적화에 사용되는 감도계수 실수부의 경우 K_r , T_r 에 대한 감도계수의 크기가 OFF인 경우의 값이 ON인 경우의 값보다는 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한 감도계수 실수부의 부호가 OFF인 경우와 ON인 경우에 반대이며, 이는 TCSC가 OFF인 경우와 ON인 경우의 안정도를 향상시키기 위한 제어기 정수의 변화방향이 서로 반대로 나타난 해석결과를 보여준다.

3.2 이산시스템의 감도해석

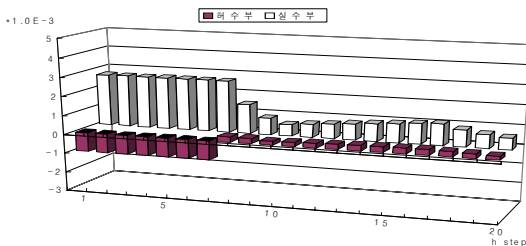
TCSC의 주기적 스위칭 동작에 의해 계통이 안정과 불안정을 반복하는 경우에 해당하는 점화각이 144° 일 때 RCF 해석법을 사용한 전기기계적 진동모드에 대한 감도해석 결과를 시간구간에 대해 나타내었다.

<표 2> 점화각 144° 인 경우의 TCSC의 감도해석($\times 10^{-3}$)

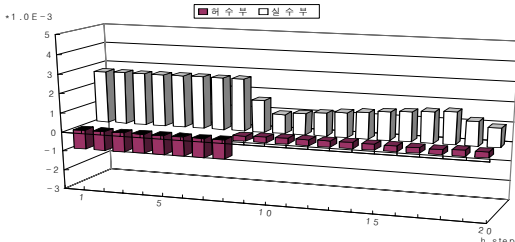
	OFF	ON			OFF
	8 Step	9 Step	10 Step	11 Step	12 Step
K_r	2.6985-j0.9964	1.6487+j0.2612	0.9837+j0.2864	1.0867+j0.2985	1.1835+j0.3049
T_r	-2.3859+j0.8811	-1.4577-j0.2309	-0.8698-j0.2532	-0.9608-j0.2639	-1.0464-j0.2695
	OFF				
	13 Step	14 Step	15 Step	16 Step	17 Step
K_r	1.2743+j0.3063	1.3594+j0.3034	1.4390+j0.2969	1.5134+j0.2874	1.5828+j0.2753
T_r	-1.1267-j0.2708	-1.2019-j0.2682	-1.2723-j0.2625	-1.3380-j0.2540	-1.3994-j0.2433
	OFF	ON			
	18 Step	19 Step	20 Step		
K_r	1.6476+j0.2612	1.2441+j0.3063	0.9830+j0.2863		
T_r	-1.4566-j0.2309	-1.0999-j0.2708	-0.8690-j0.2531		

표 2의 감도해석 결과는 TCSC 사이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 진동모드가 안정과 불안정을 반복하지만, 감도계수는 새로운 형태의 진동모드에 대해서 표 1과 달리 제어기 정수 K_r 에 대해서는 전체 구간에 대해서 감도계수의 실수부가 (+)의 부호를 갖는 것을 알 수 있으며, 제어기 정수 T_r 에 대해서는 전체 구간에 대해서 감도계수의 실수부가 (-)의 부호를 갖는 것을 알 수 있다.

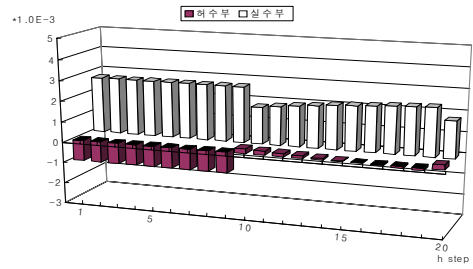
TCSC를 포함하는 일기무한모선 계통에서 전기기계적 진동모드에 대한 감도계수의 사이리스터 점화각에 의한 변화를 관찰하기 위한 해석결과를 그림 2와 3에 나타내었다.



(a) 점화각 126°

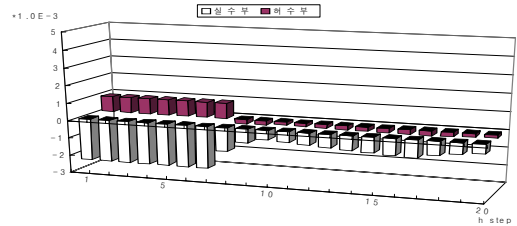


(b) 점화각 144°

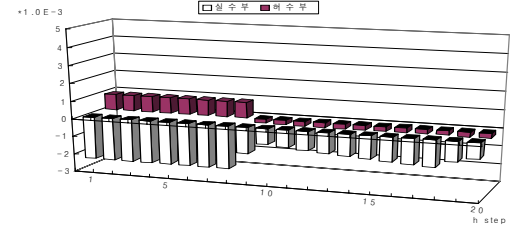


(c) 점화각 162°

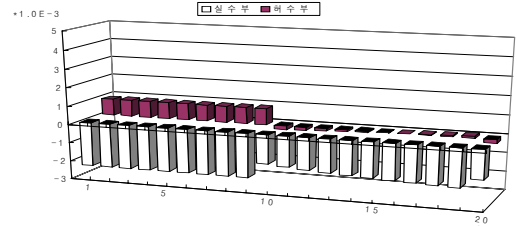
<그림 2> TCSC의 K_r 감도계수의 궤적



(a) 점화각 126°



(b) 점화각 144°



(c) 점화각 162°

<그림 3> TCSC의 T_r 감도계수의 궤적

4. 결론

본 논문에서는 사이리스터 제어 FACTS 설비인 TCSC를 포함하는 전력계통을 이산 시스템으로 모델링하고 수학적으로 강인한 특성을 갖는 RCF 해석법을 사용하여 이산 전력시스템의 미소신호 안정도 해석뿐 아니라 고유벡터와 감도행렬로부터 감도계수를 구하여 불안정 진동모드에 가장 큰 영향을 미치는 제어기 정수의 선정과 전력시스템의 안정도 향상을 위한 최적화 알고리즘에의 적용이 가능하도록 하였다. TCSC를 포함하는 전력계통에 대한 감도해석 결과로부터 사이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 진동모드의 변화와 새로이 불안정 진동모드가 발생하듯이 감도계수도 기존의 연속시스템에서의 해석결과와 크게 다른 해석결과를 보이면서 스위칭 동작에 의해 주기적으로 변하는 것을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power system control and stability, Iowa state press, 1994.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Dragan Jovicic, G. N. Pillai, "Analytical modeling of TCSC dynamics", IEEE Transactions on Power Delivery, April 2005.