

TCSC의 주기적 스위칭 동작에 의한 진동모드의 감도해석

김덕영, 동무환
군산대학교 전자정보공학부

Sensitivity analysis of oscillation modes occurred by periodic switching operations of TCSC

Deok Young Kim, Moo Hwan Dong
School of Electronic & Information Engineering, Kunsan National University

Abstract - In this paper, 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

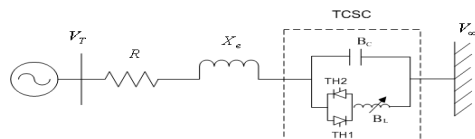
전력계통에 사용되는 제어장치의 하나인 FACTS 설비는 기존의 계통설비를 그대로 유지하면서도 전송전력을 크게 증가하여 계통설비의 경제성을 극대화 할 수 있을 뿐만 아니라 계통의 안정도 향상에도 기여하는 등의 장점을 가지며, 앞에서 설명한 계통설비 증설 문제의 현실적인 어려움을 고려할 때 앞으로 보다 폭넓게 전력계통에 적용될 것으로 예상된다고 할 수 있다[1, 2]. 그러나 FACTS 설비는 이러한 긍정적인 요소와 함께 전력전자 소자의 스위칭 동작에 의한 왜란이나 새로운 진동모드의 발생 등과 같은 부정적인 효과도 같이 나타나는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 이러한 불연속 특성을 갖는 계통의 미소신호 안정도해석을 위해서 기존의 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, 3, 4]. 또한 RCF 해석법에 기초한 감도 해석을 통해서 불안정 진동모드에 가장 큰 영향을 미치는 제어기 정수 선정에 하고 이로부터 이산 전력계통의 안정도를 향상시키기 위한 최적화 알고리즘에 적용을 가능하게 하여, 불연속 스위칭 동작을 하는 FACTS 설비를 포함하는 이산 전력계통의 안정도 향상에 사용할 수 있도록 하였다.

2. RCF 해석법에 의한 진동모드 해석

2.1 TCSC를 포함하는 이산계통의 진동모드 해석

TCSC를 포함하는 일기무한모선 계통도는 다음과 같다.



<그림 1> TCSC가 설치된 일기무한모선 계통도

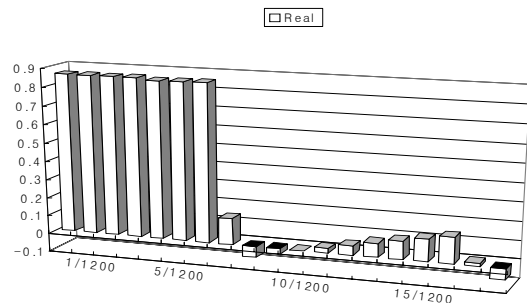
그림 1의 TCSC를 포함하는 계통에서 RCF 해석법을 사용하여 TCSC의 주기적인 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화를 해석한 결과 중에서 점화각이 144°인 경우의 해석결과를 표 1에 나타내었다.

표 1에서 TCSC가 동작하기 이전인 OFF시 불안정하였던 계통이 TCSC 싸이리스터가 주기적 동작을 시작하여 ON이 되는 9번째 구간에서 10번째 구간까지에서 불안정 영역에서 안정영역으로 이동하는 것을 알 수 있다. 표 1의 안정도 해석결과는 TCSC가 주기적으로 OFF/ON을 반복함에 따라서 불안정과 안정을 반복하는 형태를 보이지만, 이러한 진동모드의 해석결과 값은 연속시스템에서의 해석결과와는 매우 다른 결과값을 갖는 것을 알 수 있다.

<표 1> TCSC의 점화각이 144°인 경우의 고유치 해석결과

	OFF		ON			OFF	
	8 step	9 step	10 step	11 step	11 step	12 step	
고유치	-9.8029±j377.1154	-10.8419±j377.0159	-11.6717±j376.9312	-11.5025±j376.9489	-11.3000±j376.9636	-11.3000±j376.9636	
	-2.9827±j6.3381	-1.7422±j7.8304	-1.2424±j7.8304	-1.3206±j7.6841	-1.3847±j7.5774	-1.3847±j7.5774	
	0.0561	0.1488	-0.0593	-0.0294	0.0000	0.0000	
	-36.7997	-36.5966	-36.6745	-36.6527	-36.6348	-36.6348	
	-2.7337	-41.1843	-43.0926	-42.7062	-42.3822	-42.3822	
	-38.5368	-4.8570	-5.9166	-5.7367	-5.5732	-5.5732	
	불안정	불안정	안정	안정	불안정	불안정	
고유치	OFF						
	13 Step	14 Step	15 Step	16 Step	17 Step		
	-11.2402±j376.9758	-11.1382±j376.9862	-11.0486±j376.9952	-10.9709±j377.0030	-10.9028±j377.0099		
	-1.4636±j7.4766	-1.5365±j7.3883	-1.5855±j7.3120	-1.6423±j7.2442	-1.6947±j7.1840		
	0.0249	0.0500	0.0765	0.0977	0.1219		
	-36.6240	-36.6149	-36.6073	-36.6024	-36.5984		
	-42.1083	-41.8719	-41.6672	-41.4866	-41.3274		
	-5.4246	-5.2914	-5.1688	-5.0564	-4.9526		
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정		
고유치	OFF		ON				
	18 Step	19 Step	20 Step				
	-10.8414±j377.0160	-11.2777±j376.9719	-11.6710±j376.9312				
	-1.7428±j7.1304	-1.4408±j7.5087	-1.2417±j7.8304				
	0.0408	0.0170	-0.0393				
	-36.5949	-36.6275	-36.6745				
	-41.1847	-42.1559	-43.0915				
	-4.8572	-5.4732	-5.9156				
	불안정	불안정	안정				

표 1의 RCF 해석법을 사용한 진동모드 해석결과 중에서 점화각에 따라서 안정과 불안정의 다른 형태를 보이는 실수값을 갖는 진동모드의 주기적 스위칭 동작에 의한 시간구간에서의 진동모드 궤적을 그림 2에 나타내었다.



<그림 2> TCSC의 점화각이 144°인 경우의 불안정 진동모드의 궤적

3. RCF 해석법에 의한 이산시스템의 감도해석

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

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

3.1 이산시스템에서의 감도해석법

그림 1의 TCSC를 포함하는 일기무한모선 계통도에서 상태천이행렬의 제어기정수에 대한 감도행렬을 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial A_R}{\partial \alpha} = -R_M^{-1} \frac{\partial R_M}{\partial \alpha} R_M^{-1} R_K + R_M^{-1} \frac{\partial R_K}{\partial \alpha} \quad (2)$$

식(2)에서 해석하고자하는 전체 구간에서 상태천이행렬의 제어기정수에 대한 편미분식은 다음과 같이 구해지게 된다.

$$\frac{\Phi(t_n, t_0)}{\partial \alpha} = \frac{\partial \Phi(t_n, t_{n-1})}{\partial \alpha} \Phi(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots \Phi(t_1, t_0)$$

$$+ \quad \vdots$$

$$+ \quad \vdots$$

$$\Phi(t_n, t_{n-1}) \Phi(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots \frac{\partial \Phi(t_1, t_0)}{\partial \alpha}$$
(3)

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

$$\frac{\partial R_M(8,8)}{\partial K_r} = \frac{T_r}{K_r^2} + \frac{h}{2K_r^2}$$

$$\frac{\partial R_M(8,8)}{\partial T_r} = -\frac{1}{K_r}$$

$$\frac{\partial R_K(8,8)}{\partial K_r} = \frac{T_r}{K_r^2} - \frac{h}{2K_r^2}$$

$$\frac{\partial R_K(8,8)}{\partial T_r} = -\frac{1}{K_r}$$
(4)

4. 이산시스템 감도해석 사례연구

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

4.1 연속시스템의 감도해석

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

<표 2> 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	-0.05119-j0.07962	.04526+j0.07040

표 2에서 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.

4.2 이산시스템의 감도해석

표 2에서 TCSC의 주기적 스위칭 동작에 의해 계통이 안정과 불안정을 반복하는 경우인 점화각이 144°인 경우에 대해 RCF 해석법을 사용한 전기기계적 진동모드에 대한 감도해석 결과를 시간구간에 대해 나타내었다.

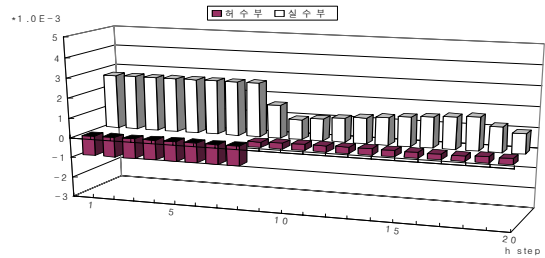
<표 3> 점화각 144°인 경우의 TCSC의 감도해석($\times 10^{-3}$)

	OFF		ON		OFF	
	8 Step	9 Step	10 Step	11 Step	12 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	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			

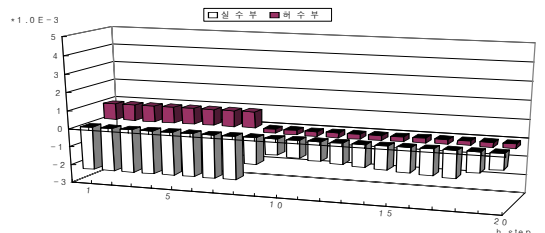
표 3의 감도해석 결과는 TCSC 사이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 진동모드가 안정과 불안정을 반복하지만, 감도계수는 새로운 형태의 진동모드에 대해서 표 4.5와 달리 제어기 정수

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.

표 3의 적분구간에 대한 제어기 정수 K_r 과 T_r 의 감도계수의 제적을 그림 3과 그림 4에 나타내었다.



<그림 3> 점화각 144°인 TCSC의 K_r 감도계수



<그림 4> 점화각 144°인 TCSC의 T_r 감도계수

5. 결론

본 논문에서는 사이리스터 제어 FACTS 설비인 TCSC를 포함하는 전력계통에서 사이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화와 새로이 발생하는 불안정 진동모드에 대한 정확한 해석을 가능하게 하기 위해, 이들 스위칭 설비를 포함하는 전력계통을 이산 시스템으로 모델링하고 수학적으로 강인한 특성을 갖는 RCF 해석법을 사용하여 이산 전력시스템의 미소신호 안정도 해석뿐만 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 의한 진동모드의 변화와 새로이 불안정 진동모드가 발생하듯이 감도계수도 기존의 연속시스템에서의 해석결과와 크게 다른 해석결과를 보이는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 본 논문에서 사용한 RCF 해석법에 의한 진동모드 해석과 감도해석 방법이 TCSC와 같이 주기적 스위칭 동작을 하는 FACTS 설비를 포함하는 이산 전력계통의 안정도 해석과 향상을 위한 감도해석에 매우 적합한 방법임을 나타내는 결과이다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선행기술에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

[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.