

이산시스템에서 RCF 해석법에 기초한 감도분석

김덕영, 박성주
 군산대학교 전자정보공학부

Eigenvalue sensitivity analysis of discrete system based on the RCF method

Deok Young Kim, Sung Joo Park

School of Electronic & Information Engineering, 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 SVC. The eigenvalue sensitivity analysis algorithm in discrete systems by the RCF method are presented and applied to the power system including SVC. As a result of simulation, the RCF analysis method is very powerful to calculate the newly generated unstable oscillation modes precisely after periodic switching operations of SVC. Also 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 전력 계통의 미소신호 안정도 해석에 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 상태전이방정식을 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 감도분석 알고리즘을 제시하고, 사례연구에서 기존의 연속시스템에서의 고유치 감도분석 결과와 본 논문에서 제시한 RCF 해석법에 기초한 이산시스템에서의 고유치 감도분석 결과를 비교하고자 한다. RCF 해석법에 기초한 이산시스템에서의 감도분석은 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 감도분석

일차 미분방정식으로 나타낸 계통의 일반형은 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (1)$$

식 (1)에서 제어기 정수 α 의 변화에 대한 고유치 λ_i 의 변화 비율을 나타낸 고유치 일차 감도계수는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial \alpha} = \frac{\left[\left[\frac{\partial A}{\partial \alpha} \right] V_i, W_i \right]}{\left[V_i, W_i \right]} \quad (2)$$

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

2.1 이산시스템에서의 감도분석법

FACTS 설비를 포함하는 이산 전력시스템에서 상태전이방정식의 일반형은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X(k+1) &= R_M^{-1} R_K X(k) + R_M^{-1} R_B U(k) \\ &= A_R X(k) + B_R U(k) \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서 상태전이행렬의 제어기정수에 대한 감도행렬을 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{\partial A_R}{\partial \alpha} = -R_M^{-1} \frac{\partial R_M}{\partial \alpha} R_M^{-1} R_K + R_M^{-1} \frac{\partial R_K}{\partial \alpha} \quad (4)$$

식(4)는 상태방정식에서 구한 감도행렬과 형태는 유사하지만 감도계수를 구하기 위한 상태전이행렬이 해석하고자 하는 구간 동안의 각각의 적분구간에서 상태전이행렬이 곱해진 형태로 이루어진다는 것이 다르다.

$$\Phi(t_n, t_0) = \Phi(t_n, t_{n-1}) \Phi(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots \Phi(t_1, t_0) \quad (5)$$

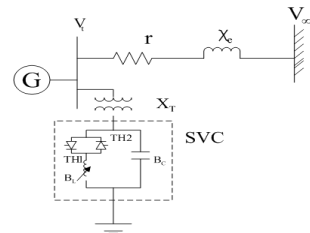
식(5)에서 해석하고자하는 전체 구간에서 상태전이행렬의 제어기정수에 대한 편미분식은 다음과 같이 구해지게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi(t_n, t_0)}{\partial \alpha} &= \frac{\partial \Phi(t_n, t_{n+1})}{\partial \alpha} \Phi(t_{n+1}, t_{n+2}) \cdots \Phi(t_1, t_0) \\ &+ \quad \vdots \\ &+ \quad \vdots \\ &\Phi(t_n, t_{n-1}) \Phi(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots \frac{\partial \Phi(t_n, t_0)}{\partial \alpha} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)은 각 적분구간에서의 상태전이행렬과 상태전이행렬의 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 SVC를 포함하는 이산시스템의 감도분석

SVC를 포함하는 일기무한모선 계통도는 다음과 같다.



<그림 1> SVC가 설치된 일기무한모선 계통도

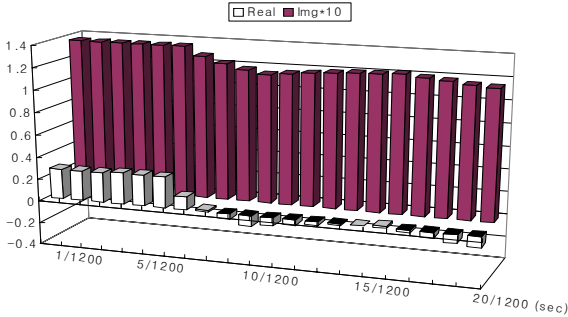
SVC 제어기 정수인 K_r, T_r 에 대한 편미분 행렬은 대부분의 행렬요소가 0인 Sparse한 구조를 가지며, 0이 아닌 행렬요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_M(10, 10)}{\partial K_r} &= \frac{T_r}{K_r^2} + \frac{h}{2K_r^2} \\ \frac{\partial R_M(10, 10)}{\partial T_r} &= -\frac{1}{K_r} \\ \frac{\partial R_K(10, 10)}{\partial K_r} &= \frac{T_r}{K_r^2} - \frac{h}{2K_r^2} \\ \frac{\partial R_K(10, 10)}{\partial T_r} &= -\frac{1}{K_r} \end{aligned} \quad (7)$$

3. 이산시스템에서의 진동모드 해석과 감도해석

3.1 이산시스템의 진동모드 해석

그림 1의 SVC를 포함하는 계통에서 RCF 해석법을 사용하여 SVC의 주기적인 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화를 해석한 결과 중에서 점화각이 108°인 경우의 진동모드 해석결과를 그림 2에 나타내었다.



<그림 2> SVC의 점화각이 108°인 경우의 전기기계적 진동모드의 궤적

3.2 SVC의 중요 진동모드에 대한 감도해석

그림 1의 SVC를 포함하는 일기무한모선 계통에서 SVC의 주기적 동작에 의해서 안정과 불안정을 반복하는 전기기계적 진동모드의 SVC 제어기 정수 K_r , T_r 에 대한 감도해석을 하였다.

3.2.1 연속시스템의 감도해석

SVC의 싸이리스터가 OFF와 ON의 주기적 스위칭 동작을 하는 경우에 대해 SVC 제어기 정수 K_r , T_r 에 대한 감도해석 결과는 다음과 같다.

<표 1> SVC의 RCF 해석법에 의한 감도해석($\times 10^{-5}$)

	OFF		ON	
	K_r	T_r	K_r	T_r
감도계수	-3.7186-j7.1989	3.2878+j6.3648	2.19380+j6.0717	-1.9397-j5.3685

표 1의 감도계수 중에서 진동모드의 추정치를 구하는데 사용되는 감도계수의 실수부가 K_r , T_r 에서 크기는 비슷하지만, 실수부의 부호가 OFF인 경우와 ON인 경우에 반대로 구해진 것을 알 수 있다. 즉, SVC가 OFF인 경우와 ON인 경우의 안정도를 향상시키기 위한 제어기 정수의 변화방향이 서로 반대로 나타난 해석결과를 보여준다.

3.2.2 이산시스템의 감도해석

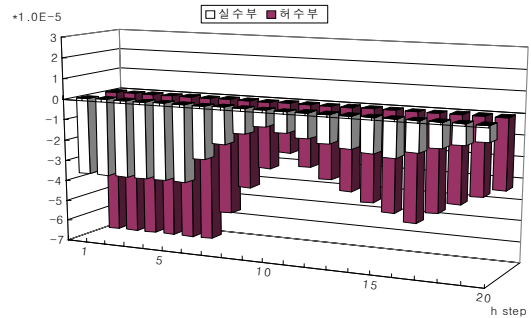
표 1에서 SVC의 주기적 스위칭 동작에 의해 계통이 안정과 불안정을 반복하는 경우인 점화각이 108°인 경우에 대해 RCF 해석법을 사용한 진동모드의 감도해석 결과를 시간적분구간에 대해 나타내었다.

<표 2> 점화각 108°인 경우의 SVC의 감도해석($\times 10^{-5}$)

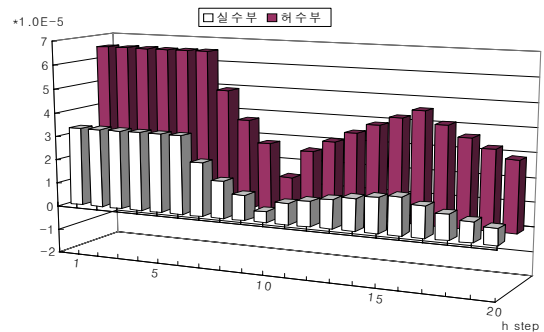
	OFF					ON				
	6Step	7Step	8Step	9Step	10Step	6Step	7Step	8Step	9Step	10Step
K_r	-3.7340-j7.3997	-2.5354-j5.6030	-1.7470-j4.2566	-1.1898-j3.2142	-0.7746-j2.3846	3.3014+j6.5424	2.2417+j4.9538	1.5445+j3.7634	1.0519+j2.8418	0.4575+j1.4767
T_r	0.8801+j2.6364	1.0496+j3.1051	1.1985+j3.5283	1.3306+j3.9160	1.4400+j4.2752	-0.9955-j2.9819	-1.1872-j3.5121	-1.3556-j3.9908	-1.5051-j4.4233	-1.6390-j4.8357
	OFF					ON				
	11Step	12Step	13Step	14Step	15Step	16Step	17Step	18Step	19Step	20Step
K_r	-0.9955-j2.9819	-1.1872-j3.5121	-1.3556-j3.9908	-1.5051-j4.4233	-1.6390-j4.8357	1.5558+j4.6115	1.2802+j2.8886	1.0447+j3.6716	0.8410+j3.2778	0.6628+j2.9245
T_r	0.8801+j2.6364	1.0496+j3.1051	1.1985+j3.5283	1.3306+j3.9160	1.4400+j4.2752	-1.7398-j5.2161	-1.4481-j4.6525	-1.1817-j4.1530	-0.9513-j3.7076	-0.7497-j3.3080

표 2의 감도해석 결과는 SVC 싸이리스터의 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. 이 결과는 표 2의 연속시스템에서의 SVC가 ON과 OFF일 때 서로 다른 해석결과를 보인 것과 달리 SVC의 주기적 동작에 의해 발생하는 새로운 형태의 진동모드에 대해서 전체 구간에서의 감도계수의 정확하고도 일관된 해석결과를 보여준다.

표 2의 시간구간에 대한 제어기 정수 K_r 과 T_r 의 감도계수의 궤적을 그림 3과 그림 4에 나타내었다.



<그림 3> 점화각 108°인 SVC의 K_r 감도계수



<그림 4> 점화각 108°인 SVC의 T_r 감도계수

4. 결론

본 연구에서는 싸이리스터 제어 FACTS 설비인 SVC를 포함하는 이산 전력계통에서 RCF 해석법에 기초한 이산시스템에서의 상태전이 방정식으로부터 감도계수를 구하는 알고리즘을 제시하였다. 이산 시스템의 해석시 해석하고자 하는 전체 구간에서의 상태전이행렬이 각 적분구간에서의 상태전이행렬의 곱의 형태로 나타나게 되어, 감도계수를 구하기 위한 감도행렬의 표현식이 매우 복잡하게 표현되지만 실제 프로그램 작업시에 간단한 반복계산에 의해 구해질 수 있음을 보였다. SVC를 포함하는 전력계통에 대한 감도해석 결과로부터 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 진동모드의 변화와 새로이 불안정 진동모드가 발생하듯이 감도계수도 기존의 연속시스템에서의 해석결과와 크게 다른 해석결과를 보이는 것을 확인하였다.

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.