

TCSC를 포함한 일기무한모선계통에서 사이리스터의 스위칭에 의한 진동모드 해석

동우환, 이운호, 김덕영
 군산대학교 전자정보공학부

Analysis of Oscillation Modes Occurred by Thyristor Switching Operations of the TCSC in OMIB System

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

Abstract - In this paper, RCF(Resistive Companion Form) analysis method which is used to analyze small signal stability problems of non-continuous systems including switching device. The RCF analysis method are applied to the power systems with the thyristor controlled FACTS equipments such as TCSC. As a result of simulation, the RCF method is very powerful to calculate the oscillation modes exactly after the switching operations, and useful to analyze the small signal stability of power systems with switching devices such as FACTS equipments. As an applicable example of the RCF method in power system, the one machine infinite bus system including TCSC at generator terminal bus is investigated and the results proved that variations of oscillation modes after periodic switching operations of TCSC can be calculated exactly.

1. 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. 그러나 이러한 긍정적인 요소와 함께 FACTS 설비의 스위칭 동작에 의한 왜인이나 새로운 진동모드의 발생 등과 같은 부정적인 효과도 같이 나타나고 있다. 고전적인 미소신호 안정도해석의 개념에서는 계통조건이 불변인 것으로 가정하여 상태공간 방정식에 의한 상태행렬로부터 고유치를 해석하는 방법이 사용되어왔다. 그러나 전력계통에 FACTS와 같은 스위칭 설비가 포함되는 경우 불연속계통의 특성을 갖게 되어 기존의 상태방정식에 의한 해석방법으로는 스위칭 동작에 의한 진동현상을 해석하는 것이 불가능하게 된다[1, 2, 3].

본 논문에서는 직렬형 사이리스터 제어 FACTS 설비인 TCSC를 포함하는 전력계통에서 사이리스터의 1주기 스위칭 동작에 의해 발생하는 진동모드의 변화와 새로이 발생하는 불안정 진동모드를 해석하기 위해, 불연속 계통의 미소신호 안정도 해석에 수학적으로 강인한 특성을 갖는 RCF 해석법을 전력계통의 미소신호 안정도 해석에 적용하였고, 전력계통 구성설비에 대해 RCF 해석법을 적용한 상태천이 방정식으로서의 모델링 식을 제시하였다. 전력계통의 모델링으로는 일기무한모선 계통의 발전기 단자와 무한모선 사이의 선로에 TCSC가 설치되어 있는 경우의 상태천이 방정식을 제시하였다. 직렬형 사이리스터 제어 FACTS 설비인 TCSC를 포함하는 전력계통에서의 RCF 해석법을 적용한 사례연구에 대해 다루었다. TCSC 사이리스터의 스위칭 접화각의 변화에 의해 진동모드가 매우 큰 영향을 받을 수 있으므로 해석하였고, 접화각의 증가에 의해 진동모드에 미치는 영향에 대하여 해석결과를 제시하였다.

2. Resistive Companion Form(RCF)을 사용한 미소신호 안정도 해석법

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

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

위의 방정식을 수치적분법인 Trapezoidal Method를 사용하여 적분구간 h에 대해 적분하면 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다.

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

위의 방정식은 시간 t-h에서 t동안의 전체계통의 상태천이방정식을 나타내며, 하나의 적분구간 h에서의 천이행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi(t, t-h) = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

위의 식에서 상태천이행렬의 고유치 해석으로부터 대상계통의 미소신호 안정도해석이 가능하게 된다. 일반적으로 스위칭 소자를 포함하는 회로에 대해

고유치 해석을 하는 경우 불연속의 스위칭 구간을 포함하는 다수개의 적분구간에 대한 천이행렬은 각각의 적분구간에 대해 구한 천이행렬을 치환하여 다음과 같은 방법으로 전체구간에 대한 상태 천이행렬을 구할 수 있다. 해석하고자 하는 전체 적분구간에서의 상태 천이행렬 Φ 는 다음과 같다.

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

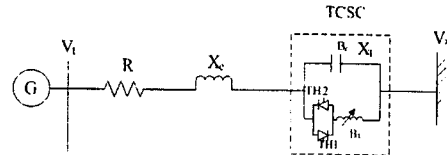
위의 천이행렬로부터 구한 고유치를 λ_d 라하고, 상태행렬에서 구한 고유치를 $\lambda_c (= -\alpha + j\beta)$ 라 하면 천이행렬로부터 구한 고유치와 상태행렬로부터 구한 고유치는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda_d = e^{\lambda_c t} = e^{-\alpha t} e^{j\beta t} \quad (5)$$

식(5)은 상태 천이행렬로부터 구한 고유치는 상태행렬로부터 구한 고유치의 크기가 1인 단위원으로 mapping한 것과 같으며, 모든 고유치가 단위원 안에 있는 경우 안정하며, 단위원 밖에 있는 경우는 불안정함을 의미한다[4, 5].

3. RCF법에 의한 전력계통의 고유치 및 진동모드 해석

TCSC의 스위칭 동작에 의해 발생하는 진동모드의 변화에 대해 RCF 해석법을 적용하여 정확한 해석을 하기위하여, 일기무한모선 계통의 발전기와 무한모선 사이의 선로에 TCSC가 설치된 경우의 계통도를 그림 1에 나타내었다.



<그림 1> TCSC가 설치된 일기무한모선 계통의 계통도

3.1 TCSC가 설치된 계통의 상태천이방정식

$$\begin{bmatrix} (L_s + L_m) \frac{d}{dt} i_s(t) \\ M_f \dot{\theta}_f(t) \\ KM_f \dot{\theta}_m(t) \\ \frac{h}{2} \omega_s (i_s(t) - i_s(t-h)) \\ \frac{h(\lambda_{\omega} - L_{\omega})}{6} \dot{\omega}_s(t) \\ 0 \\ \omega_1 + \frac{h}{2} Z_1 \\ \omega_2 + \frac{h}{2} Z_2 \\ \omega_3 + \frac{h}{2} Z_3 \\ \omega_4 + \frac{h}{2} Z_4 \\ \omega_5 + \frac{h}{2} Z_5 \\ \omega_6 + \frac{h}{2} Z_6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ i_r(t) \\ i_o(t) \\ i_s(t) \\ i_o(t) \\ \omega(t) \\ \theta(t) \\ \frac{h}{2} V_{TCSC}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{h}{2} V_{TCSC}(t) \\ 0 \\ 0 \\ \frac{h}{2} T_{\omega}(t) \\ 0 \\ 0 \\ \frac{h}{2} [V_{TCSC}(t) + V_{TCSC}(t-h)] \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (L_s + L_m) \frac{d}{dt} i_s(t) \\ M_f \dot{\theta}_f(t) \\ KM_f \dot{\theta}_m(t) \\ \frac{h}{2} \omega_s (i_s(t) - i_s(t-h)) \\ \frac{h(\lambda_{\omega} - L_{\omega})}{6} \dot{\omega}_s(t) \\ 0 \\ \omega_1 - \frac{h}{2} Z_1 \\ \omega_2 - \frac{h}{2} Z_2 \\ \omega_3 - \frac{h}{2} Z_3 \\ \omega_4 - \frac{h}{2} Z_4 \\ \omega_5 - \frac{h}{2} Z_5 \\ \omega_6 - \frac{h}{2} Z_6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{x}(t-h) \\ i_r(t-h) \\ i_o(t-h) \\ i_s(t-h) \\ i_o(t-h) \\ \omega(t-h) \\ \theta(t-h) \\ -\frac{h}{2} [V_{TCSC}(t-h) + V_{TCSC}(t-h)] \end{bmatrix}$$

3.2 TCSC를 포함하는 전력계통의 고유치 해석

직렬형 싸이리스터 제어 FACTS 설비인 TCSC를 포함하는 전력계통에서 싸이리스터의 스위칭 동작에 의한 진동현상을 해석하기 위해 그림 1과 같이 일기무한모션 계통의 발전기 단자에 싸이리스터 제어 TCSC를 설치하고 TCSC 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화와 새로이 발생할 수 있는 불안정 진동모드에 대해 RCF 해석법을 적용하여 정확한 해석을 하였다. 그림 1에서 발전기와 송전선 정수는 참고문헌[1]의 데이터를 사용하였으며, 싸이리스터 제어 TCSC의 정수는 다음과 같다.

$$X_T = 0.08 pu \quad K_r = 50 \quad T_r = 0.15 sec$$

$$P = 1.0 pu, \quad pf = 0.85 lag$$

$$B_C = 10.0 pu, \quad B_{D0} = -4.0 pu$$

3.2.1 상태방정식에 의한 고유치 해석

그림 1에서 발전기 단자에 설치된 TCSC의 싸이리스터가 OFF와 ON 인 경우의 상태방정식으로 구한 각각의 고유치 해석결과는 다음과 같다.

〈표 1〉 상태방정식에 의한 고유치 해석결과

스위치 OFF	스위치 ON
-9.79283 ± j 377.1155	-19.0968 ± j 375.9597
-2.99302 ± j 6.39848	-0.56611 ± j 11.28674
0.862863	-0.3775
36.808	38.2643
-2.72342	-8.52086
-38.5339	60.1888
불안정	안정

표 1에서 TCSC의 싸이리스터 스위치가 OFF인 경우 전체 8개의 고유치 중에서 1개의 고유치가 S-평면에서 우측에 존재하는 불안정상태인 것을 알 수 있으며, TCSC의 싸이리스터 스위치가 ON인 경우는 안정한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 표 1의 상태방정식에 의한 해석결과는 TCSC의 싸이리스터가 각각 ON과 OFF인 계통의 상태에 대한 해석결과를 나타내며, 스위칭 동작에 의한 진동현상은 해석이 불가능하다.

3.2.2 RCF 해석법에 의한 고유치 및 진동모드 해석

TCSC의 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작시에 접화각의 크기에 의한 진동모드의 영향을 해석하기 위해 각각 144°, 126°의 경우에 대하여 RCF 해석법을 적용하여 고유치 및 진동모드 해석한 결과를 다음의 표 2와 표 3에 나타내었다.

〈표 2〉 TCSC의 스위칭 동작에 의한 진동모드 해석결과 (접화각 : 144°)

OFF		ON				OFF	
T-8/1200 sec	T-9/1200 sec	T-10/1200 sec	T-11/1200 sec	T-12/1200 sec	T-13/1200 sec	T-14/1200 sec	
-9.802 ± j377.11	-10.84 ± j377.01	-11.67 ± j376.93	-11.50 ± j376.94	-11.35 ± j376.95	-11.23 ± j376.97	-11.13 ± j376.98	
-2.982 ± j6.39	-1.743 ± j7.130	-0.823	-1.202 ± j7.094	0.000	1.394 ± j7.577	-1.463 ± j7.476	
0.862	0.158	0.033	0.024	0.028	0.028	0.028	
-36.7982	-36.5951	-36.6731	-36.6512	-36.6385	-36.6225	-36.6134	
-2.7235	-4.8658	-5.9163	-5.7364	-5.5730	-5.4244	-5.2912	
-38.5339	41.1826	-43.0009	47.7045	-42.3638	-42.1065	-41.8721	
불안정	불안정	안정	안정	불안정	불안정	불안정	

〈표 3〉 TCSC의 스위칭 동작에 의한 진동모드 해석결과 (접화각 : 126°)

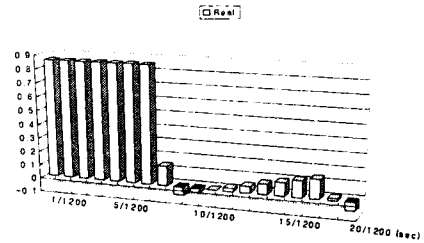
OFF		ON				OFF	
T-8/1200 sec	T-9/1200 sec	T-10/1200 sec	T-11/1200 sec	T-12/1200 sec	T-13/1200 sec	T-14/1200 sec	
-9.80 ± j377.11	-10.86 ± j377.00	-11.81 ± j376.90	-12.60 ± j376.83	-12.35 ± j376.85	-12.13 ± j376.88	-11.95 ± j376.90	
-2.98 ± j6.39	-1.64 ± j7.244	-1.15 ± j7.991	-0.92 ± j8.50	0.99 ± j8.334	1.06 ± j8.183	1.12 ± j8.061	
0.862	0.101	-0.088	-0.168	-0.167	-0.125	0.109	
-36.7977	-36.6706	-36.7031	-36.5242	-36.7788	-36.7435	-36.7159	
-2.7250	-5.0650	-5.1153	-5.0903	-5.087	-5.3116	-5.1878	
-38.5339	-41.4966	-43.5005	-45.2015	-44.8283	-44.1487	-43.7431	
불안정	불안정	안정	안정	안정	안정	안정	

표 2와 표 3은 RCF 해석법을 적용하여 구한 고유치 해석결과로서 표 1의 상태방정식에 의해 구한 해석결과와는 많은 차이가 있음을 알 수 있다. TCSC 싸이리스터의 스위칭 1주기 구간동안 싸이리스터가 OFF인 경우 계통이 불안정으로 ON인 경우 안정으로 판정되는 것은 표 1의 상태방정식에 의한 결과와 동일하나, 각 구간에서의 진동모드의 형태는 다른 결과를 보인다. 특히 스위칭 1주기 구간에서 싸이리스터가 두 번재로 OFF가 된 후에 다시 ON이 되기 직전의 스위칭 구간에서 불안정한 값을 갖는 진동모드는 표 1에서의 불안정한 모드의 값과는 많이 다르며, S-평면의 허수축에 훨씬 가까운 모드로 바뀐 것을 알 수 있다.

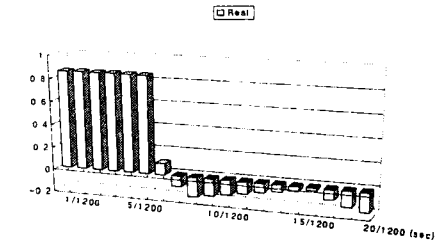
표 2는 TCSC 싸이리스터 접화각이 144°인 경우에 대하여 스위칭 동

작에 의한 진동모드의 변화에 대한 해석을 나타내었다. 표 2의 해석 결과를 보면 ON이 되는 9/1200 sec에서 계통의 안정도 해석결과가 바로 안정으로 바뀌는 것이 아니라 불안정 상태가 9/1200 sec 구간동안 유지되다가 10/1200 sec 이후에 안정으로 되는 것을 알 수 있으며, 다시 OFF가 되는 11/1200 sec 구간에서도 안정상태를 유지하는 것을 알 수 있다. 이때의 모드는 S-평면의 허수축에 매우 가까운 값을 갖게 되어 중요모드 또는 잠재적 불안정 모드로 해석이 되며, 표 1의 결과와는 매우 다르다.

표 3은 접화각 126°인 경우에 대하여 진동모드의 변화에 대한 해석결과를 나타내었다. 여기서 표 3은 표 2와 다르게 ON이 되는 9/1200 sec에서 계통이 안정 상태가 된 이후에 계통이 지속적으로 안정한 상태에서 진동을 유지하는 것을 알 수 있다. 표 2와 표 3의 진동모드 중에서 TCSC의 스위칭 동작에 의해 계통의 안정도 여부를 결정하는 진동모드3에 대해 접화각 126°와 144°에 대한 고유치 궤적을 그림 2와 그림 3에 나타내었다.



〈그림 2〉 TCSC 접화각에 의한 진동모드3의 궤적(144°)



〈그림 3〉 TCSC 접화각에 의한 진동모드3의 궤적(126°)

그림 2와 표 3에 나타낸 진동모드3의 궤적을 비교하면 TCSC 싸이리스터 OFF 시의 불안정한 진동모드가 싸이리스터의 주기적인 스위칭 동작에 의해 새로운 진동모드로 바뀌는 것을 알 수 있다. 접화각이 126°인 경우 싸이리스터 ON 이후의 진동모드3의 궤적을 살펴보면 진동모드가 안정한 영역에서 진동을 하고 있음을 알 수 있다. 하지만 싸이리스터 ON 이후의 안정한 값을 갖는 진동모드3에 접화각이 증가함에 따라 S-평면의 오른쪽으로 이동하게 되어 접화각이 144°인 경우 안정과 불안정 영역에 교대로 나타나는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 RCF 해석법을 이용하여 기존의 상태방정식에 의한 해석 방법으로는 해석이 불가능한 직렬형 싸이리스터 제어 FACTS 설비인 TCSC와 같은 불연속 스위칭 소자를 포함하는 전력계통 미소신호 안정도 해석이 가능함을 나타내었다. RCF 해석법을 이용하여 직렬형 싸이리스터 제어 FACTS 설비인 TCSC를 포함하는 전력계통에서 싸이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 발생하는 진동모드의 변화와 새로이 발생하는 불안정 진동모드를 해석하였다.

TCSC를 포함하는 일기무한모션계통에 RCF 해석법을 사용하여 TCSC의 싸이리스터가 주기적으로 스위칭 동작을 반복하는 경우의 정확한 진동모드 해석 결과를 제시하였고, 접화각의 변화에 의해서도 계통의 안정도 판별여부가 크게 달라지는 것을 보였다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지·자원기술개발사업(과제관리번호 : 2004-E-EL03-P-04-0-000)의 지원에 의하여 수행된 과제입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power system control and stability, Iowa state press, 1994
- [2] Naring G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS, IEEE Press, 1999
- [3] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems, Wiley-Interscience, 2002
- [4] Younsin 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.