

GTO 제어 SSSC가 설치된 계통의 RCF 해석법에 의한 고유치 해석

동우환, 김덕영
 군산대학교 전자정보공학부

Eigenvalue Analysis of Power Systems with GTO Controlled SSSC by the RCF Method

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

Abstract - In this paper, the RCF(Resistive Companion Form) analysis method is used to analyze small signal stability of power systems including GTO controlled FACTS equipment such as SSSC. To apply the RCF analysis method in power system small signal stability problems, state transition equations of power system equipments and power systems with SSSC are presented. In eigenvalue analysis of power systems by the RCF analysis method, SSSC is modelled into the equivalents voltage source model and PWM switching circuit model. 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 periodic switching device such as SSSC.

1. 서 론

산업사회의 발전과 더불어 이를 뒷받침하는 전력산업도 규모와 시설면에서의 지속적인 확대와 함께 고 품질의 전력에 대한 요구가 증대하고 있다. 그 중에서 발전시설의 대규모화와 수적인 증가에 따라 이를 전송하는 송·배전 설비도 계속적인 증설과 대용량화가 요구되나, 환경적인 문제와 지역 이기주의 등에 의해 많은 어려움이 발생하고 있다. 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.

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. 또한 이러한 FACTS 설비뿐만 아니라 일반적인 스위칭 소자를 포함하는 설비는 스위칭 동작에 의한 불연속 동작구간을 갖게 되며, 스위칭 동작에 의해 기존 진동모드의 변화뿐만 아니라 새로운 불안정한 진동모드도 발생하기도 한다. 따라서 불연속의 스위칭 동작특성을 갖는 설비를 포함하는 전력계통의 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화를 포함하는 미소신호 안정도 측면의 정확한 해석을 위한 연구의 필요성이 요구된다[1, 2, 3].

본 논문에서는 이러한 불연속 특성을 갖는 계통의 미소신호 안정도 해석을 위해서 수학적으로도 강인한 특성을 갖는 RCF(Resistive Companion Form)법을 전력계통에 적용하여 계통의 상태천이방정식을 구성하고 이로부터 고유치 해석을 하여 스위칭 소자의 주기적 스위칭 동작에 의해 발생하는 진동현상의 정확한 해석 결과를 제시하고자 한다. 이러한 RCF 해석법은 FACTS 설비와 같이 스위칭 소자를 포함하는 불연속 특성을 갖는 전력계통의 미소신호 안정도 해석에 매우 적합한 방법이라고 생각된다.

2. RCF 해석법을 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.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\dot{v}(t), \dot{y}(t), v(t), y(t), u(t)) \\ f_2(\dot{v}(t), \dot{y}(t), v(t), y(t), u(t)) \end{bmatrix}$$

여기서, $i(t)$: 단자전류 벡터
 $v(t)$: 단자전압 벡터
 $y(t)$: 장치 내부상태변수 벡터
 $u(t)$: 독립제어변수 벡터

위의 방정식은 외부 방정식과 내부 방정식의 두 종류의 식으로 구성되어 있다. 단자전류는 외부 방정식에만 나와있고, 구성장치의 상태변수는 단자전압 $v(t)$, 내부변수 $y(t)$ 의 두 개의 변수로 구성되어 있다. 위의 식에서 외부상태변수의 수와 내부변수의 수는 각각 외부방정식과 내부 방정식의 수와 같게 된다. 전력계통의 구성장치 중에서 선형요소로 구성된 일반적인 복합계통에서의 선형 미분방정식의 형태는 다음과 같다.

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

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

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

계통연결 상태를 고려하기 위해서는 키르히호프의 전류법칙을 각 모선에 적용하여야 하며, 이때의 전체적인 계통방정식은 다음과 같은 형태가 된다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{s11} & Y_{s12} \\ Y_{s21} & Y_{s22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{s11} & P_{s12} \\ P_{s21} & P_{s22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t-h) \\ y(t-h) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Q_1(t-h) \\ Q_2(t-h) \end{bmatrix}$$

위의 식은 다음과 같이 등가변환이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{s11} & Y_{s12} \\ Y_{s21} & Y_{s22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{s11} & P_{s12} \\ P_{s21} & P_{s22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t-h) \\ y(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{s11} & Y_{s12} \\ Y_{s21} & Y_{s22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Q_1(t-h) \\ Q_2(t-h) \end{bmatrix}$$

위의 방정식은 시간 $t-h$ 에서 t 동안의 전체계통의 상태천이방정식을 나타내며, 하나의 적분구간 h 에서의 상태천이행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} Y_{s11} & Y_{s12} \\ Y_{s21} & Y_{s22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{s11} & P_{s12} \\ P_{s21} & P_{s22} \end{bmatrix}$$

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 적분구간적분구간에 대한 천이행렬은 각각의 적분구간에 대해 구한 천이행렬을 치환하여 다음과 같은 방법으로 전체구간에 대한 천이행렬이 관심대상이 되며, 이러한 다수개의 한 천이행렬을 구할 수 있다. 해석하고자 하는 전체 적분구간에서의 천이행렬 Φ 는 다음과 같다.

$$\Phi(t_n, t_0) = \Phi(t_n, t_{n-1})\Phi(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots \Phi(t_2, t_1)\Phi(t_1, t_0)$$

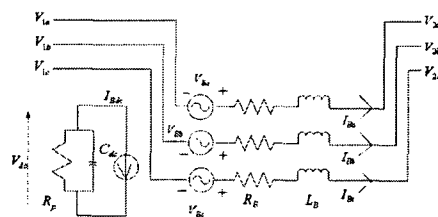
위의 천이행렬로부터 구한 고유치를 λ_d 라고하고, 상태행렬에서 구한 고유치를 $\lambda_c (= -a + jb)$ 라 하면 천이행렬로부터 구한 고유치와 상태행렬로부터 구한 고유치는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda_d = e^{\lambda_c t} = e^{-at} e^{jbt}$$

위의 식은 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[4, 5].

3. SSSC의 상태천이 방정식으로서의 모델링

직렬형 GTO 제어 FACTS 설비인 SSSC의 등가회로는 다음과 같다.



<그림 1> SSSC의 계통해석 등가회로

RCF 해석법을 적용하기 위한 상태천이 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} (1 + \frac{hR_B}{2L_B}) & \frac{h}{2}\omega_0 & \frac{hk}{2L_B}\sin\delta_m \\ -\frac{h}{2}\omega_0 & (1 + \frac{hR_B}{2L_B}) & -\frac{hk}{2L_B}\cos\delta_m \\ -\frac{hk}{2C_{dc}}\sin\delta_m & \frac{hk}{2C_{dc}}\cos\delta_m & (1 + \frac{h}{2C_{dc}R_P}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{BD}(t) \\ I_{BQ}(t) \\ V_{dc}(t) \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} -\frac{h}{2L_B} \{ V_{HD}(t) + kV_{dc}\cos\delta_m\delta_B(t) \} \\ -\frac{h}{2L_B} \{ V_{HQ}(t) + kV_{dc}\sin\delta_m\delta_B(t) \} \\ -\frac{hk}{2} (\cos\delta_m I_{BD} + \sin\delta_m I_{BQ})\delta_B(t) \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} (1 - \frac{hR_B}{2L_B}) & -\frac{h}{2}\omega_0 & -\frac{hk}{2L_B}\sin\delta_m \\ \frac{h}{2}\omega_0 & (1 - \frac{hR_B}{2L_B}) & \frac{hk}{2L_B}\cos\delta_m \\ \frac{hk}{2C_{dc}}\sin\delta_m & -\frac{hk}{2C_{dc}}\cos\delta_m & (1 - \frac{h}{2C_{dc}R_P}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{BD}(t-h) \\ I_{BQ}(t-h) \\ V_{dc}(t-h) \end{bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} \frac{h}{2L_B} \{ V_{HD}(t-h) + kV_{dc}\cos\delta_m\delta_B(t-h) \} \\ \frac{h}{2L_B} \{ V_{HQ}(t-h) + kV_{dc}\sin\delta_m\delta_B(t-h) \} \\ \frac{hk}{2} (\cos\delta_m I_{BD} + \sin\delta_m I_{BQ})\delta_B(t-h) \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

단, $V_{1D}-V_{2D}=V_{HD}$, $V_{1Q}-V_{2Q}=V_{HQ}$

4. 사례연구

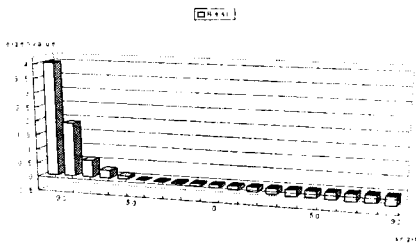
4.1 전압원 등가모델을 사용한 SSSC의 진동모드 해석

일기무한모선 계통의 발전기 단자와 무한모선 사이의 송전선로에 전압원으로 등가 모델링한 SSSC를 설치하여 고유치 해석을 하였다. 이 때 전압원으로 등가 모델링한 SSSC의 전압은 0.9pu로 가정하였으며, 전압원의 위상각은 -90° 에서 90° 까지 단계적으로 변화시켜가면서 안정도 판별을 한 결과를 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 등가전압원 모델의 위상각에 의한 고유치 해석결과 ($V_B = 0.9pu$)

고유치	위상각 : -90°	위상각 : -60°	위상각 : -30°	위상각 : 0°
		-2396.63 -49.8897-j379.5473 3.980729 35.9721 -2.39985-j0.171404 -31.8192	2396.82 -50.3207-j380.0965 -36.1339 0.45835+j6.470494 0.269645 -30.7675	2396.8 51.0219-j380.0511 -36.2687 -0.21563-j8.938966 0.02696 -29.4732
	불안정	불안정	안정	안정
고유치	위상각 : 30°	위상각 : 60°	위상각 : 90°	
	2396.44 -50.942-j378.8452 0.107939-j8.552316 -36.2367 -0.18876 -30.39	-2396.44 50.3217-j378.8865 0.161844-j7.189252 -36.1608 -0.24268 -31.8462	-2396.63 50.0784-j379.5545 -36.1069 0.161805-j4.033361 0.32357 32.1428	
	불안정	불안정	불안정	

표 1은 SSSC의 전압원 위상각의 변화에 따른 고유치 해석결과를 위상각을 30° 간격으로 나타낸 것이다. 표 1에서 SSSC의 등가 전압원 위상각이 -30° 와 0° 근처에서 계통이 안정화되는 것을 알 수 있으며, 나머지 위상각에서는 불안정상태인 것을 나타낸다.



〈그림 2〉 등가전압원 모델의 위상각에 의한 진동모드 3의 궤적

그림 2는 표 1의 진동모드 중에서 위상각의 변화에 따라서 안정과 불안정 상태가 달라지는 진동모드 3에 대하여 전체 위상각에 대한 궤적을 나타낸 것이다.

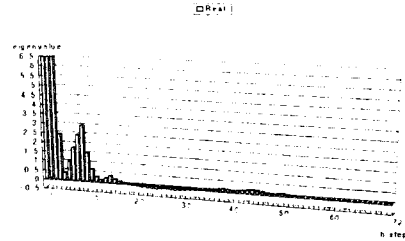
4.2 PWM 스위칭 회로를 사용한 SSSC의 진동모드 해석

일기무한모선의 발전기 단자와 무한모선 사이의 송전선로에 직렬로 설치된 SSSC의 인버터회로가 OFF인 경우와 ON인 경우에 대한 고유치 해석결과를 표 2에 나타내었다. 표 2에서 OFF시에는 직류 커패시터가 회로적으로 연결이 되지 않으며 불안정한 진동모드가 존재하는 것을 알 수 있으며, 커패시터가 연결되는 ON시에는 계통이 안정해지는 것을 나타낸다. 정전과 1주기에 대하여 12 pulse의 PWM 제어방식을 가정하고 1 pulse의 스위칭 구간을 다시 6개의 구간으로 나누어 RCF 해석법을 적용한 고유치 해석을

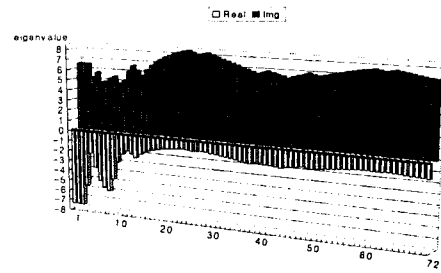
〈표 2〉 SSSC의 스위칭 동작에 의한 고유치 해석결과

	OFF	ON
고유치	10.6287 ± j377.1383	32.6070 ± j375.7221
	6.4714	0.4582 ± j10.5771
	0.5662	0.3235
	7.4152 ± j6.5181	56.1975
	34.6507	13.0779
	30.6596	36.4844
	불안정	안정

하였으며, PWM 제어방식에서의 위상각제어는 SSSC의 입력전압의 위상각과 같도록 하였다. 고유치 해석결과 중에서 실수값을 갖는 2번 모드와 전기기계적 진동모드인 4번 모드의 PWM 스위칭 모델을 사용한 진동모드의 궤적을 그림 3과 4에 나타내었다.



〈그림 3〉 SSSC의 PWM 스위칭 모델에 의한 진동모드 2의 궤적



〈그림 4〉 SSSC의 PWM 스위칭 모델에 의한 진동모드 4의 궤적

그림 3에서 2번 모드는 인버터의 PWM 스위칭 동작에 의해 크기가 크게 감소되면서 안정영역에서 허수축에 매우 가까이 존재하는 중요모드임을 알 수 있으며, 그림 4의 전기기계적 진동모드도 인버터의 PWM 스위칭 동작에 의해 안정영역에서 허수축에 보다 가까이 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 직렬형 GTO 제어 FACTS 설비인 SSSC를 포함하는 전력계통에서 GTO 제어 싸이리스터의 주기적 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 적용하였다. RCF 해석법을 적용하기 위해 SSSC의 상태전이 방정식으로서의 모델링 식을 제시하였으며, RCF 해석법을 적용한 사례연구에서 SSSC를 전압원 등가모델을 사용한 경우와 PWM 스위칭 모델을 사용한 경우에 대하여 진동모드 해석을 하였다.

전압원 등가모델의 SSSC에 대한 RCF 해석법을 사용한 고유치 해석결과는 기존의 상태방정식에 의한 해석결과와 정확하게 일치하였으며, PWM 스위칭 모델을 사용한 해석결과는 기존의 상태방정식에 의한 해석방법으로 해석이 불가능한 것으로, 스위칭에 의한 진동모드의 변화를 정확하게 보여준다. 이러한 결과는 RCF 해석법이 FACTS 설비와 같은 불연속 스위칭 소자를 포함하는 전력계통의 미소신호 안정도 해석에 매우 적합한 해석방법임을 입증하는 결과이다.

감사의 글

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

[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 Inter-science, 2002
- [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.135-136, 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.