

RCF 해석법을 사용한 STATCOM의 진동모드 해석

이윤호, 김덕영
 군산대학교 전자정보공학부

Analysis of Oscillation Modes of the STATCOM by the RCF Method

Yun Ho Lee, Deok Young Kim

School of Electronic & Information Engineering, Kunsan National University

Abstract - The RCF analysis method is used to analyze small signal stability of power systems including GTO controlled FACTS equipment such as STATCOM. To apply the RCF analysis method in power system small signal stability problems, the state transition equations of power system equipments and power systems with STATCOM are presented. In eigenvalue analysis of power systems by the RCF analysis method, the STATCOM is modelled into the equivalents voltage source model and the PWM switching circuit model. As a result of simulation, the RCF analysis 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 periodically operated switching device such as the STATCOM.

1. 서 론

현대의 전력계통분야에서 FACTS 설비는 조류제어를 보다 효율적으로 하기 위해 대용량의 전력전자소자를 사용하고 있으며, 이로 인해 기존의 전력망을 그대로 사용하면서도 전력 전송용량과 경제성이 크게 증대되는 효과가 있다. 그러나 이러한 긍정적인 요소와 함께 전력전자 소자의 스위칭 동작에 의한 왜란이나 새로운 진동모드의 발생 등과 같은 부정적인 효과도 같이 나타나고 있다. 실제의 전력계통은 스위칭 소자를 포함한 불연속적인 동작특성을 갖는 다양한 설비를 포함하고 있으며, 그 대표적인 제어설비로 FACTS 설비를 들 수 있다. 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 진동모드가 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].

고유치 해석법은 시간영역에서의 해석법인 과도안정도 해석법에서 여러 진동모드들이 섞여진 형태로 나타나는 것과 달리, 각 상태변수별로 진동모드가 분리되어 구해지며, 고유치 각각에 대한 고유벡터로부터 진동의 물리적 의미와 각 상태변수와 진동모드와의 관계를 알 수 있고, 감도계수 등의 많은 정보를 구할 수 있어서 제어기 설계 등의 계통안정화에 사용할 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 상태방정식에 의한 고유치 해석법은 불연속 동작특성을 갖는 계통의 해석에는 적용할 수 없다는 문제점을 갖는다.

본 논문에서는 이러한 불연속 특성을 갖는 계통의 미소신호 안정도해석을 위해서 수학적으로도 강인한 특성을 갖는 RCF (Resistive Companion Form) 해석법을 사용하여 계통의 상태전이방정식으로부터 고유치를 해석하고자 한다. 이를 위해서는 RCF 해석법을 미·적분 방정식으로 표현되는 계통구성 설비에 적용하여 발전기와 제어장치 그리고 병렬형 GTO 제어 FACTS 설비인 STATCOM을 상태전이 방정식의 형태로 모델링하고, 이때의 상태전이 행렬로부터 단위원으로 mapping 된 고유치를 구하고자 한다. 본 논문에서는 STATCOM을 등가 전압원 모델과 PWM 스위칭 모델을 사용하여 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화와 새로이 발생할 수 있는 불안정 진동모드를 정확히 해석하고자 한다.

2. RCF 해석법을 사용한 미소신호 안정도 해석법

전력계통의 구성장치 중에서 선형요소로 구성된 일반적인 복합계통에서의 선형 미분방정식의 형태는 다음과 같다.

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

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

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

위의 식에 계통방정식을 치환한 후의 상태전이 방정식은 다음과 같다.

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

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

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

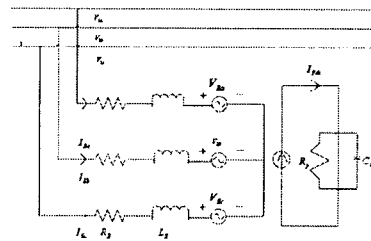
위의 식에서 상태전이행렬의 고유치 해석으로부터 대상계통의 미소신호 안정도해석이 가능하게 된다. 일반적으로 스위칭 소자를 포함하는 회로에 대해 고유치 해석을 하는 경우 불연속의 스위칭 구간을 포함하는 다수개의 적분구간적분구간에 대한 전이행렬은 각각의 적분구간에 대해 구한 전이행렬을 치환하여 다음과 같은 방법으로 전체구간에 대한 전이행렬이 관심대상이 되며, 이러한 다수개의 한 전이행렬을 구할 수 있다. 해석하고자 하는 전체 적분구간에서의 전이행렬 Φ 는 다음과 같다.

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

위의 전이행렬로부터 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. STATCOM의 상태전이 방정식으로의 모델링

병렬형 GTO 제어 FACTS 설비인 STATCOM의 등가전압원 모델은 다음과 같다.



<그림 1> STATCOM의 계통해석 등가회로

RCF 해석법을 사용한 상태전이 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \left(1 + \frac{hR_E}{2L_E}\right) & \frac{h}{2}\omega_0 & -\frac{hk}{2L_E}\sin\delta_{E0} \\ -\frac{h}{2}\omega_0 & \left(1 + \frac{hR_E}{2L_E}\right) & +\frac{hk}{2L_E}\cos\delta_{E0} \\ \frac{hk}{2C_{dc}}\sin\delta_{E0} & -\frac{hk}{2C_{dc}}\cos\delta_{E0} & \left(1 + \frac{h}{2C_{dc}R_P}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ED}(t) \\ I_{EQ}(t) \\ V_{dc}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{h}{2L_E} \{ V_{1D}(t) + kV_{d0}\cos\delta_{E0}\delta_E(t) \} \\ -\frac{h}{2L_E} \{ V_{1Q}(t) + kV_{d0}\sin\delta_{E0}\delta_E(t) \} \\ \frac{hk}{2} (\cos\delta_{E0}I_{ED0} + \sin\delta_{E0}I_{EQ0})\delta_E(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{hR_E}{2L_E}\right) & -\frac{h}{2}\omega_0 & \frac{hk}{2L_E}\sin\delta_{E0} \\ \frac{h}{2}\omega_0 & \left(1 - \frac{hR_E}{2L_E}\right) & -\frac{hk}{2L_E}\cos\delta_{E0} \\ -\frac{hk}{2C_{dc}}\sin\delta_{E0} & \frac{hk}{2C_{dc}}\cos\delta_{E0} & \left(1 - \frac{h}{2C_{dc}R_P}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ED}(t-h) \\ I_{EQ}(t-h) \\ V_{dc}(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{h}{2L_E} \{ V_{1D}(t-h) + kV_{d0}\cos\delta_{E0}\delta_E(t-h) \} \\ \frac{h}{2L_E} \{ V_{1Q}(t-h) + kV_{d0}\sin\delta_{E0}\delta_E(t-h) \} \\ -\frac{hk}{2} (\cos\delta_{E0}I_{ED0} + \sin\delta_{E0}I_{EQ0})\delta_E(t-h) \end{bmatrix}$$

4. 사례연구

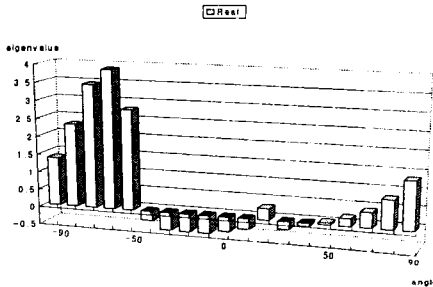
4.1 전압원 등가모델을 사용한 STATCOM의 고유치 해석

일기무한모션 계통의 발전기 단자에 전압원으로 등가 모델링한 STATCOM을 설치하여 고유치 해석을 하였다. 이 때 전압원으로 등가 모델링한 STATCOM의 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($V_E = 0.9pu$)

	위상각 : -90°	위상각 : -60°	위상각 : -30°	위상각 : 0°
고유치	-173.206+j822.8237	-113.404+j 729.9725	-57.0166+j597.4054	-20.1258+j431.6269
	-15.5101+j376.3177	-15.6988+j376.4579	-15.9145+j376.4977	15.7793+j376.8408
	-75.3914+j83.36663	-77.0423+j41.47838	-123.191	-94.1699
	-38.1025	3.882872	-0.45825+j11.70743	-37.1047
	-0.99764+j6.595675	-2.77735+j2.475794	-0.67411	8.466776
	1.348223	-40.098	-20.6553	-6.41748+j10.41267
			-32.2777	0.40447
	불안정	불안정	안정	불안정
	위상각 : 30°	위상각 : 60°	위상각 : 90°	
고유치	-66.8362+j594.992	-126.327+j728.0845	-173.233+j822.758	
	-15.7527+j376.4323	-15.5909+j376.413	-15.5369+j376.5665	
	-73.6191	-65.5764+j73.9897	-75.3375+j83.0332	
	-41.608+j12.94172	-38.3452	-38.2103	
	-0.6471+j6.514662	-0.48529+j7.798335	-0.94373+j5.145188	
	-0.21572	0.215716	1.348223	
	안정	불안정	불안정	

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



〈그림 2〉 등가전압원 모델의 위상각에 의한 진동모드 6의 궤적

그림 2는 표 1의 진동모드 중에서 등가전압원의 위상각 변화에 따라서 안정과 불안정 상태가 달라지는 진동모드 6에 대하여 등가 전압원 모델 STATCOM의 위상각에 대한 진동모드의 궤적을 나타내었다.

4.2 PWM 스위칭 모델을 사용한 STATCOM의 고유치 해석

일기무한모션의 발전기 단자에 병렬로 설치된 STATCOM의 인버터회로가 OFF인 경우와 ON인 경우에 대한 고유치 해석결과를 표 2에 나타내었다.

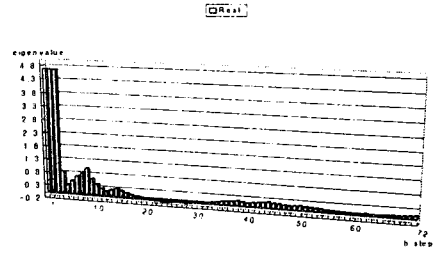
〈표 2〉 STATCOM 스위칭 동작에 의한 고유치

	OFF	ON
고유치	-15.9734±j376.5788	-0.9269±j377.5168
	0.2377±j377.00107	-16.9442±j376.1216
	-43.6830	-70.0876
	4.6594	40.0913
	-1.8443±j4.2513	-1.0677±j13.2932
	-37.3732	-0.3882
	-1.6502	3.9799
	불안정	안정

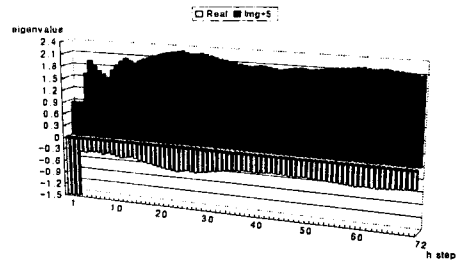
표 2는 STATCOM의 스위칭 회로가 각각 OFF와 ON시의 진동모드 해석결과를 나타낸 것으로, 스위칭에 의한 영향을 나타내지 않는다. 이때 스위칭 회로가 OFF시에는 직류 커패시터가 회로적으로 연결이 되지 않으며 불안정한 진동모드가 존재하는 것을 알 수 있으며, 커패시터가 연결되는 ON시에는 계통이 안정해지는 것을 나타낸다.

RCF 해석법을 적용하여 PWM 스위칭 모델의 STATCOM에 대한 진동현상을 해석하기 위해서, 주기적 스위칭 동작이 반복되는 정현파 1주기에 대하여 12 pulse의 PWM 제어방식을 가정하고 1 pulse의 스위칭 구간을 다시 6개의 구간으로 나누어 RCF 해석법을 적용하였다. 이때의 고유치 해석결과 중에서 실수값을 갖는 4번 모드와 전기기계적 진동모드인 5번 모드 그리고 계통주파수에 해당하는 진폭을 갖는 진동모드 2에 대하여 PWM 스위칭 모

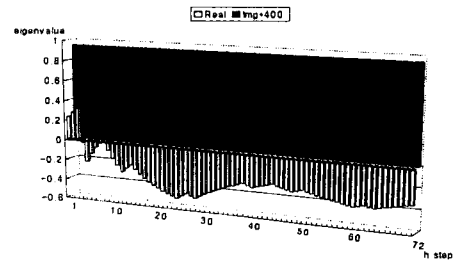
델을 사용한 경우의 진동모드 궤적을 그림 3, 4, 5에 나타내었다.



〈그림 3〉 STATCOM의 PWM 스위칭 모델에 의한 진동모드 4의 궤적



〈그림 4〉 STATCOM의 PWM 스위칭 모델에 의한 진동모드 5의 궤적



〈그림 5〉 STATCOM의 PWM 스위칭 모델에 의한 진동모드 2의 궤적

그림 3, 4, 5는 RCF 해석법에 의한 진동모드 해석결과로서 PWM 스위칭 모델 STATCOM의 주기적 스위칭 동작에 의해 진동모드가 변화되는 과정을 보여준다.

5. 결 론

본 논문에서는 병렬형 GTO 제어 FACTS 설비인 STATCOM을 포함하는 전력계통에서 GTO 제어 사이리스터의 주기적 스위칭 동작에 의해 발생하는 진동모드의 변화와 새로이 발생하는 불안정 진동모드를 해석하기 위해, 불연속 계통의 미소신호 안정도 해석에 수학적으로 강한 특성을 갖는 RCF 해석법을 전력계통의 미소신호 안정도 해석에 적용하였다. RCF 해석법을 적용하기 위해 STATCOM을 등가 전압원 모델을 사용한 경우와 PWM 스위칭 모델을 사용한 경우에 대하여 상태전이 방정식에서의 모델링 식을 제시하고 진동모드 해석을 하였다.

등가 전압원 모델을 사용한 STATCOM의 고유치 해석결과는 기존의 상태방정식에 의한 해석결과와 정확히 일치하였으며, PWM 스위칭 모델을 사용한 해석결과는 기존의 상태방정식에 의한 해석방법으로는 해석이 불가능한 것으로, STATCOM의 주기적 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화를 정확하게 나타내는 결과이다.

감사의 글

본 연구는 2005년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력선형 기술에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [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.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.