

## SVC의 스위칭 동작에 의해 발생하는 진동현상의 미소신호 안정도 해석

김덕영

군산대학교 전자정보공학부

### Small signal stability analysis of oscillations caused by switching operations of SVC

Deok Young Kim

School of Electronic & Information Engineering, Kunsan National University

**Abstract** - A new small signal stability analysis method for eigenvalue analysis is presented. This method is called RCF method and based on the computation of the state transition equations and state transition matrix over a specified time interval that corresponds to one or some cycle operations of the system. This method is applicable to any system with or without switching elements. As an applicable example of RCF method in power system, the one machine infinite bus system connected switching SVC at generator terminal is investigated and the results proved that variations of oscillation modes after switching operations 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 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.

전력계통의 미소신호 안정도해석은 이전까지의 연구방향은 연속 선형계통을 대상으로 상태방정식을 구성하여 고유치 해석을 하는 방법이 주된 연구방향이었다. 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.[1, 2, 3]

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.[4, 5, 6]

본 논문에서는 이러한 불연속 특성을 갖는 계통의 미소신호 안정도해석을 위해서 수학적으로도 강인한 특성을 갖는 RCF(Resistive Companion Form)법을 사용하여 계통의

상태전이방정식으로부터 고유치를 해석하고자 한다. 이러한 RCF법은 스위칭 소자를 포함하는 불연속 계통의 미소신호 안정도 해석에 매우 적합한 방법이다.[7, 8, 9, 10]

이를 위해서는 RCF법을 미·적분 방정식으로 표현되는 계통구성 설비에 적용하여 발전기와 제어장치 그리고 스위칭 소자를 포함하는 FACTS 설비를 상태전이 방정식의 형태로 모델링하고, 이때의 상태전이 행렬로부터 단위원으로 mapping 된 고유치를 구하게 된다. RCF법을 사용하여 스위칭 소자를 포함하는 FACTS 설비가 있는 계통의 미소신호 안정도 해석을 함으로써, 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변동과 새로이 발생할 수 있는 불안정 진동모드에 대한 정확한 해석이 가능하게 된다.

#### 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.

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

여기서,  $\dot{i}(t)$  : 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 나와 있고, 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.

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

계통연결 상태를 고려하기 위해서는 키르히호프의 전류법칙을 각 모선에 적용하여야 하며, 이때의 전체적인 계통 방정식은 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-h에서 t동안의 전체계통의 상태천이방정식을 나타내며, 하나의 적분구간 h에서의 천이행렬은 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 대상 계통의 미소신호 안정도해석이 가능하게 된다. 일반적으로 스위칭 소자를 포함하는 회로에 대해 고유치 해석을 하는 경우 불연속의 스위칭 구간을 포함하는 다수개의 적분구간 적분구간에 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  $\Phi$  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  $\lambda_d$  라하고, 상태행렬에서 구한 고유치를  $\lambda_c (= -\alpha + j\beta)$  라 하면 천이행렬로부터 구한 고유치와 상태행렬로부터 구한 고유치는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda_d = e^{\lambda_c t} = e^{-\alpha t} e^{j\beta t}$$

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.

### 3. RCF법에 의한 전력계통의 고유치 해석

스위칭 소자를 포함하는 전력계통에서의 RCF법을 적용한 고유치 해석을 위해 그림 1과 같이 일기-무한모선 계통의 발전기 단자에 스위칭 소자를 포함하는 SVC가 설치된 경우에 대하여 고유치 해석을 하였다.

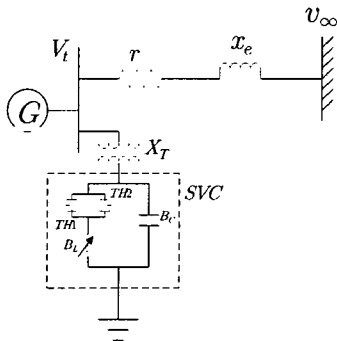


그림 1 SVC가 설치된 일기-무한모선 계통도

발전기와 송전선 정수는 참고문헌[1]의 것을 사용하였으며 무효전력보상기의 정수는 다음과 같다.

$$X_T = 0.08 pu \quad K_r = 50 \quad T_r = 0.15 sec \\ P = 1.0 pu, \quad pf = 0.85 lag$$

SVC가 각각 진상과 지상의 무효전력을 보상하는 경우를 가정하여 고유치 해석을 하였다.

$$B_C = 10.0 pu, B_{D0} = -10.5 pu$$

가변 리액터의 스위치가 OFF(개방)된 경우 지상의 무효전력을 보상하는 경우이다.

#### (1) 상태방정식에 의한 고유치 해석

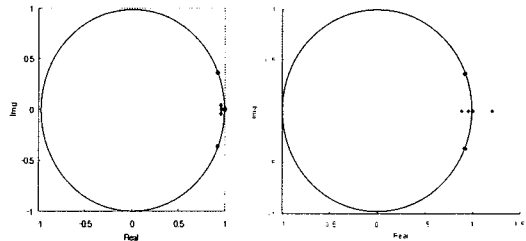
상태방정식에 의한 고유치 해석결과를 표 1에 나타내었다.

표 1 상태방정식에 의한 고유치 해석결과

	스위치 ON	스위치 OFF
고유치	-12.2397 ± j 376.9332	-4.95752 ± j 376.665
	-4.61439 ± j 376.0897	-20.1658 ± j 378.1461
	-43.3053 ± j 39.60776	185.0869
	-0.30875 ± j 9.061536	-124.497
	-0.50121	-45.6973
	-38.6879	2.84617
		-3.66215
		-0.49933

#### (2) RCF 법에 의한 고유치 해석

상태천이 방정식으로부터 구한 고유치 해석결과 중에서 SVC가 ON인 경우(T=0.001 sec) 와 OFF인 경우(T=0.007 sec)의 RCF법을 적용하여 구한 단위원으로 나타낸 고유치 해석결과를 그림 2에 나타내었다.



(a) SVC ON

(b) SVC OFF

그림 2 RCF법에 의한 고유치 해석결과

그림 2에서 SVC가 ON인 경우의 고유치는 모두 단위원 안에 있으며 계통이 안정함을 나타낸다. 반면에 SVC가 OFF인 경우의 고유치는 고유치의 크기가 1보다 큰 진동모드가 2개가 존재함을 알 수 있으며, 따라서 이 경우의 계통은 불안정함을 나타낸다.

표 2는 스위칭 2주기 전체구간에 대한 해석결과 중에서 SVC가 ON 또는 OFF되기 직전의 해석결과를 나타낸 것이다.

표 2 RCF 법에 의한 고유치 해석결과

	T=0.006 sec	T=0.01 sec	T=0.016 sec	T=0.02 sec
고유치	-12.1807±j376.9439	1.164082±j378.1531	0.404192±j378.072	1.163085±j378.1531
	-4.64587±j376.0855	-16.3749±j375.8176	-15.374±j375.8039	-16.3739±j375.8175
	-43.2842±j39.6155	-92.8272	-78.2341	-92.8277
	-0.31019±j9.06077	55.70794	-40.5547	55.70717
	-0.51682	-41.8722	20.9191	-41.8718
	-38.736	-0.3838±j5.768706	-0.41606±j7.035768	-0.38224±j5.768705
		-0.60671	-0.63339	-0.60783

표 2에서 SVC가 ON 상태를 유지하고 있는 T=0.006 sec의 첫 번째 열은 같은 고유치 값을 가지며, SVC가 OFF된 후를 나타내는 T=0.006 sec에서 0.01 sec는 2, 3, 5번 진동모드의 크기가 증가하여 안정한 영역으로 이동한 반면에, 나머지 1, 4, 6번 진동모드는 불안정한 영역으로 이동하였음을 알 수 있으며, 특히 1, 4번 진동모드는 고유치의 실수부가 (+)의 값을 갖는 불안정 진동모드이며, 계통이 불안정함을 나타낸다.

다시 SVC가 ON이 되는 T=0.01 sec부터 0.016 sec 사이의 구간에서는 1, 4, 6, 7번 진동모드가 보다 안정한 방향으로 이동하였으며, 1번 진동모드는 여전히 (+)의 값을 갖는 불안정한 진동모드임을 알 수 있다. 나머지 2, 3, 5번 진동모드는 불안정한 방향으로 이동하였고, 특히 5번 진동모드가 새로이 (+)값을 갖는 불안정 진동모드가 되었음을 알 수 있다.

SVC가 OFF가 되는 T=0.016 sec에서 0.02 sec 사이의 구간에서는 2, 3, 5번 진동모드가 안정한 방향으로 이동하였으며, 나머지 1, 4, 6, 7번 진동모드는 불안정한 방향으로 이동하였다. 특히 1, 4번 진동모드는 (+)의 값을 갖는 불안정한 진동모드인 것을 알 수 있다. 표 2에서 알 수 있듯이 SVC가 ON, OFF를 반복함에 따라 표 4에서 상태방정식으로부터 구한 고유치 값을 갖는 것이 아니라 표 2에 나타난 고유치 값의 범위 안에서 진동모드가 주기적으로 변화하는 것을 알 수 있다.

표 2의 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화를 보다 정확히 나타내기 위해 SVC가 ON 상태인 0.006 sec에서 0.009 sec 사이의 시간구간에서의 고유치 해석결과를 표 3에 나타내었다.

표 3 RCF법의 적분구간마다의 고유치 해석결과

	T=0.006 sec	T=0.007 sec	T=0.008 sec	T=0.009 sec
고유치	-12.1807±j376.9439	-1.01534±j377.6875	.40434±j378.0719	93.02±j378.1653
	46.687±j376.0855	-14.4064±j375.9612	15.3742±j375.8039	15.9623±j375.7886
	43.2842±j39.6155	59.6833	78.2338	87.11379
	0.31019±j9.06077	39.9±j7.74405	-40.5508	40.77648
	-0.51682	38.9865	20.9385	41.318513
	38.736	38.98744	41.5179±j6.3187	39.1507±j6.3187
		11.8839	63.984	63.705

표 3에서 0.006 sec에서 첫 번째 스위칭 동작구간에서의 해석결과는 진동모드가 모두 (-)의 부호를 가지는 안정한 계통임을 나타낸다. SVC의 스위치가 0.006 sec에서 OFF 되면 표의 세 번째 열에 있듯이 진동모드가 순간적으로 불안정 영역에 가까이 이동하게 되지만, 아직 전체 진동모드가 (-)의 부호를 갖는 안정한 상태임을 알 수 있다. 계통이 불안정해지는 것은 0.008 sec부터이며, 표 3의 네 번째 열과 다섯 번째 열에서 나타나듯이 일부 진동모드가 (+)의 부호를 갖는 불안정한 계통상태가 되었음을 나타낸다.

즉 상태방정식에 의한 해석결과에서는 0.006 sec에서 SVC가 OFF 되는 순간에 계통이 불안정상태가 되는 것으로 해석이 되지만, RCF법을 적용한 고유치 해석결과 스위치가 동작한 직후인 0.007 sec까지는 안정상태가 유지되지만, 0.008 sec 부터는 불안정 상태로 바뀌는 것을 알 수 있다. 이는 스위칭 소자의 스위칭 시간에 따라 실제적인 고유치

의 값은 보다 안정한 영역에서 존재할 수도 있고, 반대로 보다 불안정에 가까운 영역에서 존재할 수도 있음을 나타내는 결과이며, 이러한 해석결과는 본 연구에서 사용한 RCF법에 의해서만 해석이 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 불연속 스위칭 동작특성을 갖는 설비와 이를 포함하는 전력계통에 대한 미소신호 안정도 해석을 위해, 불연속 계통의 미소신호 안정도 해석에 수학적으로 강인한 특성을 갖는 RCF법을 사용하여 고유치 해석을 하였다. RCF법을 전력계통에 적용하기 위해 전력계통 구성 설비에 대해 RCF법을 적용한 상태전이 방정식으로서의 모델링 식을 제시하였다.

사례연구로 스위칭 소자를 포함하는 일반 시스템에 대해서도 동일한 방법으로 각 각의 스위칭 동작구간에 대해서 해석결과가 일치함을 보였으며, RCF법에 의한 해석을 스위칭 동작의 전체구간에 적용하여 스위칭 동작의 영향으로 진동모드가 변화하는 것을 시간구간마다 정확히 계산할 수 있음을 보였다.

또한, 불연속 스위칭 소자를 포함하는 전력계통의 RCF법을 적용한 해석을 위해 일기-무한모션 계통의 발전기 단자에 스위칭 소자를 포함하는 SVC를 설치하여 SVC의 ON, OFF에 의해 발생하는 진동모드의 변화에 대해 시간구간마다의 정확한 해석결과를 제시하였다. 이러한 해석결과는 기존의 상태방정식에 의한 해석방법으로는 해석이 불가능한 것으로, 본 연구에서 사용한 RCF법이 불연속 스위칭 소자를 포함하는 계통의 미소신호 안정도 해석에 매우 적합하며, 이로부터 구한 고유치와 고유벡터 등의 해석결과가 매우 유용하게 활용될 수 있음을 입증하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power system control and stability, Iowa state press, 1994
- [2] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994
- [3] P. Kundur, D. Y. Wong, G. J. Rogers, B. Porretta, Eigenval Analysis of very Large Power System, 1988
- [4] "FACTS overview", IEEE power engineering society, 95 TP 108, 1995.
- [5] Naring G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS, IEEE Press, 1999
- [6] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-based FA CTS controllers for electrical transmission systems, Wiley Inter-science, 2002
- [7] Bohmann L. J., Lasseter R. H., "Stability and harmonics in thyristor controlled reactors", IEEE Trans. on Power delivery, Vol. 5, No. 2, pp.1175-1181, April 1990.
- [8] 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.
- [9] Eugene V. Solodovnik, George J. Cokkinides, A. P. Sakis Meliopoulos, "On stability of implicit numerical methods in nonlinear dynamical systems simulation", Proceedings of the 30th southeastern symposium on system theory, pp. 27-31, West Virginia, March 1998.
- [10] 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.
- [11] Chin-Hsing Cheng, Yuan-Yih Hsu, "Damping of generator oscillations using an adaptive static var compensator", Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992.