

싸이리스터 제어 SVC를 포함하는 전력계통에서의 스위칭 점화각에 의한 고유치 해석

이윤호, 동무환, 김덕영
군산대학교 전자정보공학부

Eigenvalue Analysis of SVC's Thyristor Firing Angles in Power System

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

Abstract - In this paper, RCF analysis method which is very powerful to analyze non-continuous systems with switching elements is applied to small signal stability problems. As an effect of switching operations, the eigenvalues of system can be changed and newly unstable oscillation modes may be occurred. Also, changing firing angles of switching equipments may make the system stable or unstable. As an illustrating example, the oscillation modes of the system with different firing angles are computed by the RCF analysis method.

1. 서 론

전력계통의 미소신호 안정도해석은 이전까지의 연구방향이 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. 전력계통은 스위칭 소자를 포함한 불연속적인 동작특성을 갖는 다양한 서비스를 포함하고 있으며, 그 대표적인 서비스로 FACTS 서비스를 들 수 있다. 이러한 FACTS 서비스뿐만 아니라 일반적인 스위칭 소자를 포함하는 서비스는 스위칭 동작에 의한 불연속 동작구간을 갖게 되며, 스위칭 동작에 의해 기존 진동모드의 변화뿐만 아니라 새로운 불안정한 진동모드가 발생하기도 한다. 따라서 불연속의 스위칭 동작특성을 갖는 서비스를 포함하는 전력계통의 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화를 포함하는 미소신호 안정도 측면의 정확한 해석을 위한 연구의 필요성이 요구된다[1, 2, 3, 4].

본 논문에서는 스위칭 서비스의 점화각에 의한 진동모드의 변화와 새로이 발생할 수 있는 불안정 진동모드에 대해 미소신호 안정도 측면에서의 정확한 해석결과를 제시하고자 한다. 이러한 불연속 특성을 갖는 계통의 미소신호 안정도해석을 위해서 수학적으로도 간단한 특성을 갖는 RCF (Resistive Companion Form) 해석법을 사용하여 계통의 상태천이방정식으로부터 고유치를 해석하고자 하며, RCF법은 스위칭 소자를 포함하는 불연속 계통의 미소신호 안정도 해석에 매우 적합한 방법이다[5, 6].

이를 위해서는 RCF 해석법을 미·적분 방정식으로 표현되는 계통구성 서비스에 적용하여 발전기와 제어장치 그리고 스위칭 소자를 포함하는 FACTS 서비스를 상태천이 방정식의 형태로 모델링하고, 이때의 상태천이 행렬로부터 단위원으로 mapping 된 고유치를 구하게 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, 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 h 에 대해 적분한 후, 계통방정식을 치환한 후의 상태천이 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}^{-1} \left[\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \right] \begin{bmatrix} x(t-h) \\ y(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Q_1(t-h) \\ Q_2(t-h) \end{bmatrix}$$

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

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}^{-1} \left[\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \right]$$

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 치

환하여 다음과 같은 방법으로 전체구간에 대한 천이행렬이 관심대상이 되며, 이러한 다수개의 한 천이행렬을 구할 수 있다. 해석하고자 하는 전체적분구간에서의 천이행렬 Φ 는 다음과 같다.

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

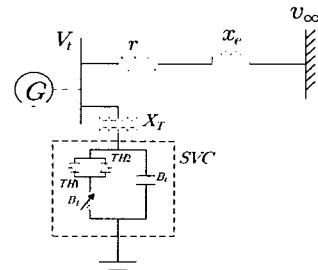
위의 천이행렬로부터 구한 고유치를 λ_d 라하고, 상태행렬에서 구한 고유치를 $\lambda_c (= -a + j\beta)$ 라 하면 천이행렬로부터 구한 고유치와 상태행렬로부터 구한 고유치는 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

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. SVC를 포함하는 일기무한모선 계통에서의 고유치 해석

일기-무한모선 계통의 발전기 단자에 스위칭 동작을 하는 SVC가 설치된 그림 1의 계통에 대하여 미소신호 안정도 해석을 하였다.



〈그림 1〉 SVC가 설치된 일기-무한모선 계통도

발전기와 송전선 정수 그리고 무효전력보상기의 정수는 다음과 같다[1].

$$\begin{aligned} X_T &= 0.08 \text{ pu} & K_r &= 50 & T_r &= 0.15 \text{ sec} \\ P &= 1.0 \text{ pu}, & p_f &= 0.85 \text{ lag} \\ B_C &= 10.0 \text{ pu}, B_{L0} &= -10.5 \text{ pu} \end{aligned}$$

3.1 상태방정식에 의한 진동모드 해석

상태방정식에 의한 고유치 해석결과를 표 1에 나타내었다.

〈표 1〉 상태방정식에 의한 고유치 해석결과

	스위치 OFF	스위치 ON
고 유 치	$-4.8674+j377.2229$ $-20.0575+j378.1159$ 189.4971 -125.2463 -45.5734 2.6925 -3.5094 -0.4968	$-4.7164+j377.2110$ $-12.1519+j376.4025$ $-43.4792+j37.1771$ $-0.3452+j8.9403$ -0.4997 -39.0232

표 1에서 스위치가 각각 OFF, ON인 경우의 상태방정식에 의한 해석결과로서 스위치에 의한 영향은 나타나지 않는다.

4 RCF 해석법에 의한 SVC의 진동모드 해석

SVC의 싸이리스터에 의한 주기적 스위칭 동작이 발생하는 1주기 구간을 36 step으로 나누어, 1step당 0.000463 sec로 하여 RCF 해석법에 의한 고유치 해석을 하고, 진동모드의 변화를 비교하였다.

4.1 점화각이 10° 인 경우

스위칭 동작의 전체 해석구간인 1주기 동안에 OFF:ON 동작이 1:17의 비율로 2회 반복되는 경우에 대한 해석결과는 다음과 같다.

<표 2> SVC의 스위칭 동작에 의한 고유치 해석결과(점화각:10°)

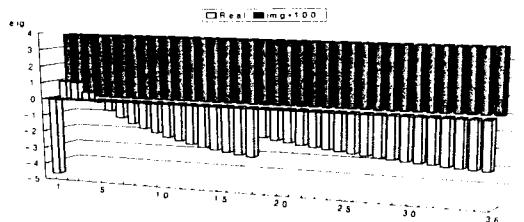
	스위치 OFF(1step)	스위치 ON(18step)	스위치 OFF(19step)	스위치 ON(36step)
고 유 치	-4.7177±j377.1684 -20.1035±j378.1557 189.4633 -125.2816 -45.5767 3.1063 -2.1841±j0.7114	-13.2152±j376.1365 -2.8982±j377.5397 -1.7002±j377.6845 -0.0661±j25.9807 -0.3821±j44.439 -0.4260 -40.1356	-13.9060±j376.0110 -2.8934±j377.5397 -0.4105±j8.0134 -47.5612 -33.6329±j6.7325 -0.3806	-13.2162±j376.1365 -2.8934±j377.5397 -0.4066±j25.9807 -0.3821±j44.439 -0.4273 -40.1359

<표 3> 스위칭 2주기 구간에서의 진동모드 3의 고유치 해석(점화각:10°)

Step	ON											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mode	189.4	78.28	40.63	20.48	7.202	0.054	-0.291	-0.345	0.372	0.388	-0.347	-0.404
<hr/>												
Step	ON											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Mode	-0.410	-0.416	-0.420	-0.421	-0.425	-0.426	-0.340	-0.388	-0.382	-0.389	-0.403	-0.405
<hr/>												
Step	ON											
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Mode	-0.409	-0.410	-0.413	-0.416	-0.418	-0.419	-0.421	-0.423	-0.425	-0.425	-0.425	-0.427

표 2는 전체 해석구간 중에서 스위칭 동작이 일어나기 직전인 시간구간에서의 해석결과를 나타낸 것이다. 상태방정식에 의한 해석결과인 표 1과는 달리 두 번째 스위칭 구간에서 OFF시에도 스위칭의 영향으로 계통이 안정한 상태로 지속되는 것을 알 수 있다.

표 3은 점화각 10°일 때, 진동모드 3에 대한 전체 해석구간의 고유치를 나타낸 것이다. 스위칭 1주기에서 ON시의 7step부터 계통이 불안정에서 안정한 상태로 유지하게 된다.



<그림 2> 점화각이 10°인 경우의 진동모드 1 궤적

그림 2는 점화각이 10°인 경우에 대한 진동모드 1의 전체 해석구간에서의 값을 나타내었다.

4.2 점화각이 20°인 경우

스위칭 동작이 2:16의 비율로 2회 반복되는 경우에 대한 해석결과는 다음과 같다.

<표 4> SVC의 스위칭 동작에 의한 고유치 해석결과(점화각:20°)

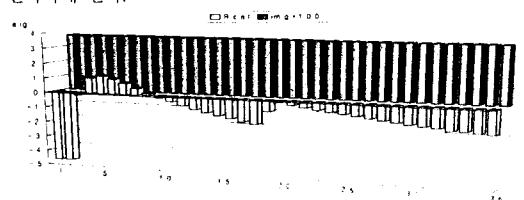
	스위치 OFF(2step)	스위치 ON(18step)	스위치 OFF(20step)	스위치 ON(36step)
고 유 치	-4.7032±j377.1684 0.0887±j378.1557 189.4898 -125.2912 -45.5337 3.1548 -2.1841±j0.71140	-14.0094±j377.0011 -1.5782±j377.6961 -0.4145±j79.6388 -0.3721 -50.0901 -32.0425±j1.7811	-0.1136±j377.7768 14.9238±j375.8933 -70.7252 -40.1009 -0.4022±j2523 7.1972 -0.5945	-14.0091±j377.0000 15.779±j377.6961 0.4138±j96.9838 0.3734 -50.0885 -32.0416±j1.7811

<표 5> 스위칭 2주기 구간에서의 진동모드 3의 고유치 해석(점화각:20°)

Step	ON											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mode	189.4	189.4	115.1	78.27	55.94	40.65	29.33	20.48	13.25	7.202	2.259	0.064
<hr/>												
Step	ON											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Mode	-0.20	-0.287	-0.32	-0.34	-0.36	-0.37	-0.16	7.197	4.557	2.254	0.662	0.068
<hr/>												
Step	ON											
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Mode	-0.12	-0.21	-0.25	-0.28	-0.30	-0.32	-0.33	-0.34	-0.35	-0.36	-0.36	-0.37

표 4는 스위칭 OFF 지속시간이 더 길어진 경우이며, 2주기 동안의 해석 결과 표 2에서의 결과와 달리, 반주기 후 OFF시에 스위칭의 영향으로 계통이 계속 불안정한 상태를 나타낸다.

표 5는 점화각 20°일 때, 진동모드 3에 대한 전체 해석구간의 고유치를 나타낸 것이다. 주기적으로 스위칭을 반복하면서 불안정과 안정한 상태가 주기적으로 변화하게 된다.



<그림 3> 점화각이 20°인 경우의 진동모드 1 궤적

점화각이 20°인 경우에 대한 진동모드 1의 전체 해석구간에서의 값을 그림 3에 나타내었다.

에 나타내었다.

4.3 점화각이 30°인 경우

스위칭 동작이 3:15의 비율로 2회 반복되는 경우에 대한 해석결과는 다음과 같다.

<표 6> SVC의 스위칭 동작에 의한 고유치 해석결과(점화각:30°)

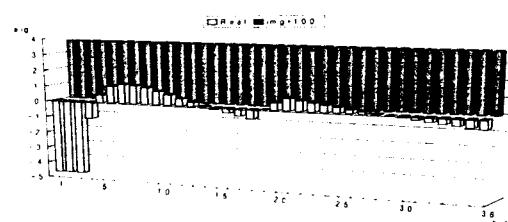
	스위치 OFF(3step)	스위치 ON(18step)	스위치 OFF(21step)	스위치 ON(36step)
고 유 치	-4.7048±j377.1684 -20.0740±j378.1557 189.4899 -125.2946 -45.5337 3.1386 -2.2003±j0.7114	-0.5863±j377.7648 -14.6170±j375.9218 -65.1213 -39.5338 0.4469±j75.3939 0.0701 -3.4947	0.7397±j377.7380 -15.6020±j375.8659 -81.353 -41.051 0.4409±j6.5137 -0.4044	-0.5843±j377.7648 -14.6162±j375.9218 -65.1213 -39.5338 0.0574 -3.4948

<그림 7> 스위칭 2주기 구간에서의 진동모드 3의 고유치 해석(점화각:30°)

Step	ON											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Mode	189.4	189.4	133.6	100.4	78.28	62.37	50.25	40.65	32.77	26.16	20.47	
<hr/>												
Step	ON											
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Mode	15.51	11.12	7.202	3.743	1.073	0.070	10.09	20.47	29.33	36.16	23.21	20.47
<hr/>												
Step	ON											
	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Mode	17.91	15.51	13.25	11.11	9.103	7.198	5.407	3.746	2.256	1.073	0.379	0.057

표 6은 스위칭 OFF 지속시간이 더 길어진 경우이며, 2주기 동안의 해석 결과 표 4에서의 결과와 달리, ON시에도 스위칭의 영향으로 계통이 계속 불안정한 상태를 유지하게 된다.

표 7은 점화각 30°일 때, 진동모드 3에 대한 전체 해석구간의 고유치를 나타낸 것이다. 스위칭의 영향으로 전체 해석 구간에서 불안정을 나타낸다.



<그림 4> 점화각이 30°인 경우의 진동모드 1 궤적

점화각이 30°인 경우에 대한 진동모드 1의 전체 해석구간에서의 값을 그림 4에 나타내었다.

4. 결론

본 연구에서는 불연속 스위칭 동작특성을 갖는 설비와 이를 포함하는 전력계통에 대한 미소신호 안정도 해석을 위해, 불연속 계통의 미소신호 안정도 해석에 적합한 RCF 해석법을 사용하여 고유치 해석을 하였다.

사례연구에서는 SVC를 포함하는 일기무기한 모선 계통에 대해 RCF 해석법을 사용하여 SVC의 싸이리스터가 주기적으로 스위칭 동작을 반복하는 경우의 정확한 고유치 해석 결과를 제시하였고, 스위칭 동작에 의해 새로운 형태의 진동모드 또는 불안정한 진동모드가 발생하는 것을 시간구간에 대하여 정확한 해석결과를 제시하였다. 또한 SVC 싸이리스터의 스위칭 점화각에 의해 계통의 안정도 평정결과가 달라지는 것을 수치적으로 정확히 해석하였고, 점화각의 단계적 변화에 의해 진동모드에 미치는 영향에 대하여 해석결과를 보였다.

이러한 해석결과는 기존의 상태방정식에 의한 해석방법으로는 해석이 불가능한 것으로, 본 논문에서 사용한 RCF 해석법이 FACTS 설비와 같은 불연속 스위칭 소자를 포함하는 전력계통의 미소신호 안정도 해석에 매우 적합한 해석방법임을 입증한 결과이다.

감사의 글

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

[참고문헌]

- P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power system control and stability, Iowa state press, 1994
- "FACTS overview", IEEE power engineering society, 95TP 108, 1995.
- Narang G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS, IEEE Press, 1999
- R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems, Wiley Inter-science, 2002
- Youxin 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 2.1361, July 1997.
- 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.