

스위칭 설비의 ON/OFF 시간간격에 의한 진동모드 해석

김덕영, 동무환, 이윤호
 군산대학교 전자정보공학부

Analysis of oscillation modes caused by ON/OFF time intervals of switching equipments

Deok Young Kim, Moo Hwan Dong, Yun Ho Lee
 School of Electronic & 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 the ON/OFF time intervals of switching equipments may make the system stable or unstable. As an illustrating example, the oscillation modes of system with different switching time intervals are computed by 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 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, 4]

본 논문에서는 스위칭 설비의 ON/OFF 스위칭 시간간격에 의한 진동모드의 변형과 새로이 발생할 수 있는 불안정 진동모드에 대해 미소신호 안정도 측면에서의 정확한 해석 결과를 제시하고자 한다. 이러한 불연속 특성을 갖는 계통의 미소신호 안정도해석을 위해서 수학적으로도 강인한 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 설비에 적용하여 발전기와 제어장치 그리고 스위칭 소자를 포함하는 FACTS 설비를 상태천이 방정식의 형태로 모델링하고, 이때의 상태천이 행렬로부터 단위원

으로 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.

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

위의 방정식을 수치적분법인 Trapezoidal Method를 사용하여 적분구간 h에 대해 적분한 후, 계통방정식을 치환한 후의 상태천이 방정식은 다음과 같다.

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

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

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

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 Φ 는 다음과 같다.

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

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. 스위칭 시간 간격에 의한 진동모드의 영향

3.1 일반적 시스템에서의 영향

스위칭 소자를 포함하는 불연속계통에 대해 스위칭 시간 간격에 의한 진동모드의 변화를 비교하기 위해 다음과 같은 일반적 시스템에 대해 고유치 해석을 하였다.

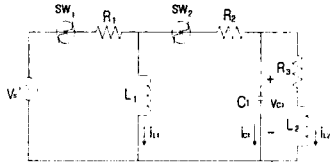


그림 1 두개의 스위칭 회로를 포함하는 시스템

$$R_1 = 20[\Omega], R_2 = 40[\Omega], R_3 = 30[\Omega], L_1 = 0.05[H],$$

$$L_2 = 0.1[H], C_1 = 0.2[F], V_s = 110[V], h = 0.0001\text{sec}$$

그림 1의 일반계통에서 스위치의 동작은 다음과 같으며, 스위칭 동작의 2주기 동안인 0에서 0.002 sec 동안에 사례 1과 사례 2가 일정한 시간간격으로 반복되는 것을 모의하였다. 적분구간 값은 0.0001 sec로 하였다.

사례 1 (스위치 1:닫락, 스위치 2:개방)

사례 2 (스위치 1:개방, 스위치 2:단락)

3.1.1 상대방정식에 의한 진동모드 해석

사례 1과 사례 2의 각각의 스위칭 구간에서의 고유치 해석결과는 표 1과 같으며, 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화는 해석이 불가능함을 알 수 있다.

표 1 상대방정식에 의한 고유치 해석결과

고유치	사례 1	사례 2
1	0.16675	-0.29187
2	299.83323	299.83312
3	-400.0	-799.87498

3.1.2 RCF 해석법에 의한 진동모드 해석

(1) 스위칭 시간 간격의 비율이 5:5인 경우

스위칭 동작의 전체 해석구간인 0.002 sec 동안에 사례 1과 사례 2의 동작이 5:5의 비율로 2회 반복되는 경우에 대한 해석결과는 표 2와 같다.

표 2 스위칭 간격의 비율이 5:5인 경우의 고유치 해석결과

고유치	t=0.0005	t=0.001	t=0.0015	t=0.002
1	-0.1667	-0.2085	-0.1878	-0.2085
2	-299.8554	-299.8555	-299.8555	-299.8555
3	-400.0531	-600.1980	-533.4898	-600.1980

표 2는 전체 해석구간 중에서 스위칭 동작이 일어나기 직전인 시간구간에서의 해석결과를 나타낸 것이며, 표 1의 해석결과와 비교할 때 진동모드 1과 3이 스위칭의 영향으로 다른 해석결과가 나온 것을 알 수 있다.

(2) 스위칭 시간 간격의 비율이 8:2인 경우

스위칭 동작이 8:2의 비율로 2회 반복되는 경우에 대한 해석결과는 표 3과 같다.

표 3 스위칭 간격의 비율이 8:2인 경우의 고유치 해석결과

고유치	t=0.0008	t=0.001	t=0.0018	t=0.002
1	-0.16667	-0.1751	-0.1686	-0.1751
2	-299.8555	-299.8555	-299.8555	-299.8555
3	-400.0531	-480.1194	-444.5362	-480.1194

표 3의 해석결과는 사례 2의 지속시간이 더 짧은 경우이며, 표 2의 해석결과와 비교하여 진동모드 1과 3의 변화폭이 더 좁은 것을 알 수 있다.

사례 1과 사례 2의 스위칭 간격의 비율이 5:5인 경우와 8:2인 경우의 진동모드 1과 3의 전체 해석구간에서의 값을 그림 3과 4에 나타내었다.

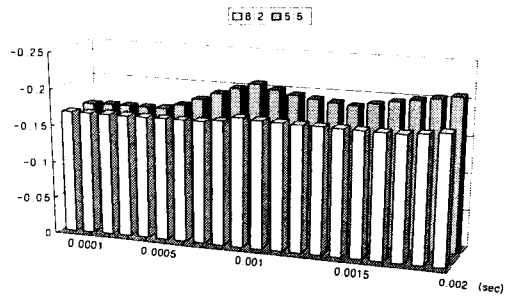


그림 3 진동모드 1의 스위칭 시간 간격에 의한 해석결과

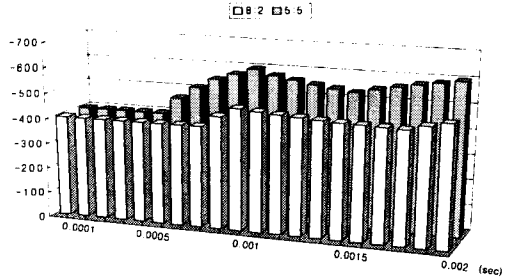


그림 4 진동모드 3의 스위칭 시간 간격에 의한 해석결과

3.2 SVC를 포함하는 일기무한모선 계통에서의 영향

일기-무한모선 계통의 발전기 단자에 스위칭 동작을 하는 SVC가 설치된 그림 2의 계통에 대하여 미소신호 안정도 해석을 하였다.

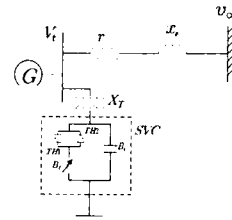


그림 2 SVC가 설치된 일기-무한모선 계통도

발전기와 송전선 정수 그리고 무효전력보상기의 정수는 다음과 같다.[1,7]

$$X_T = 0.08pu \quad K_T = 50 \quad T_T = 0.15 \text{ sec}$$

$$P = 1.0 pu, \quad pf = 0.85 \text{ lag}$$

$$B_T = 10.0pu, \quad B_{T0} = -10.5pu$$

3.2.1 상태방정식에 의한 진동모드 해석

상태방정식에 의한 고유치 해석결과를 표 4에 나타내었다.

표 4 상태방정식에 의한 고유치 해석결과

	스위치 ON	스위치 OFF
고유치	-4.61439 ± j 376.0897	-4.95752 ± j 376.665
	-12.2397 ± j 376.9332	-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

표 4에서 스위치가 OFF인 경우 불안정한 결과를 보이며, 스위칭에 의한 영향은 해석되지 않는다.

3.2.2 RCF 해석법에 의한 진동모드 해석

(1) 스위칭 시간 간격의 비율이 7:3인 경우

스위칭 동작의 전체 해석구간인 0.02 sec 동안에 ON:OFF 동작이 7:3의 비율로 2회 반복되는 경우에 대한 해석 결과는 표 5와 같다.

표 5 RCF법의 적분구간마다의 고유치 해석결과

	T=0.007 sec	T=0.01 sec	T=0.017 sec	T=0.02 sec
고유치	-4.6483±j376.0855	0.7399±j378.1449	-0.4782±j377.8492	0.8011±j378.1449
	-12.1808±j376.9440	-15.7399±j375.7853	-14.7448±j375.8895	-15.7379±j375.7852
	-43.2808±j39.6155	-83.8539	-67.1732	-83.8549
	-0.3106±j9.0608	-41.0263	-39.6945	-41.0250
	-0.5168	33.0485	-0.5526±j7.5127	33.0475
	-38.7339	-0.3971±j6.6124	1.4909	-0.3966±j6.6124
		-0.6112	-1.4077	-0.6112

표 5는 전체 해석구간 중에서 스위칭 동작이 일어나기 직전인 시간구간에서의 해석결과를 나타낸 것이며, 상태방정식에 의한 해석결과인 표 4와는 달리 2번째 스위칭 구간에서 ON시에도 스위칭의 영향으로 계통이 불안정한 상태로 지속되는 것을 알 수 있다.

(2) 스위칭 시간 간격의 비율이 8:2인 경우

스위칭 동작이 8:2의 비율로 2회 반복되는 경우에 대한 해석 결과는 표 6과 같다.

표 6 RCF법의 적분구간마다의 고유치 해석결과

	T=0.008 sec	T=0.01 sec	T=0.018 sec	T=0.02 sec
고유치	4.6483±j376.0854	0.1549±j377.9880	-1.6132±j377.4889	-0.1537±j377.9380
	12.1789±j376.9439	14.9605±j375.8529	14.0405±j376.0569	14.9617±j375.8530
	-43.2813±j39.6155	-71.2491	-0.3330±j8.0661	-71.2500
	0.3109±j9.0608	-40.0118	-0.4681	-40.0117
	0.5168	-0.5003±j7.4419	-47.9043	-0.5007±j7.4419
	38.7333	7.8054	33.0248±j3.5034	7.8046
		-0.7505		0.7505

표 6은 스위칭 OFF 지속시간이 더 짧은 경우이며, 2주기 동안의 해석결과 OFF시에는 불안정한 상태가 유지되지만, ON 시에는 계통이 안정으로 되돌아가는 것을 알 수 있다. 참고로, 스위칭 간격의 비율이 9:1인 경우는 OFF 시에도 계통이 안정한 상태를 유지하게 된다.

스위칭 간격의 비율이 7:3인 경우와 8:2인 경우에 대한 진동모드 1의 전체 해석구간에서의 값을 그림 5와 6에 나타내었다.

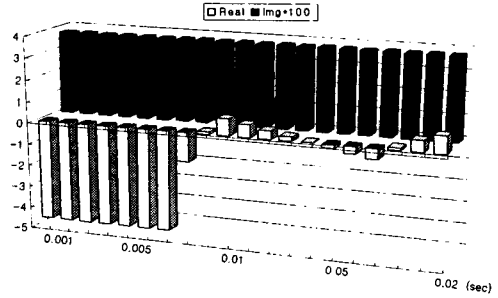


그림 5 스위칭 간격 7:3인 경우의 진동모드 1 해석결과

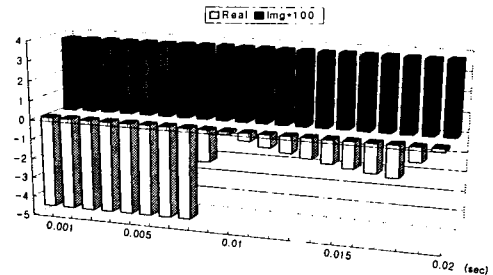


그림 6 스위칭 간격 8:2인 경우의 진동모드 1 해석결과

4. 결 론

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.

상태방정식에 의한 해석결과와 달리 RCF해석법을 사용한 해석 결과는 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화와 새로이 발생하는 불안정 진동모드에 대해서 정확한 해석 결과를 구할 수 있음을 보였다. 사례연구에서는 일반적인 시스템과 SVC를 포함하는 일기무한모선 계통에 대해 스위칭 동작의 스위칭 시간 간격의 비율이 다른 경우에 대한 수치 해석결과를 통해서 스위칭 동작의 영향으로 계통의 안정도 해석결과가 서로 다르게 나타날 수 있다는 사실을 예시하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power system control and stability, Iowa state press, 1994
- [2] "FACTS overview", IEEE power engineering society, 95 TP 108, 1995.
- [3] Naring G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS, IEEE Press, 1999
- [4] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems, Wiley Inter-science, 2002
- [5] 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.
- [6] Eugene V. Solodovnik, George J. Cokkinides, A.P. Sakis Meliopoulos, "On stability of implicit numerical methods in n nonlinear dynamical systems simulation", IEEE winter meeting 1998.
- [7] 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.