

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 연구방향이였다. 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 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 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 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 h에 대해 적분한 후, 계통방정식을 치환한 후의 상태천이 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{a1} & Y_{a2} \\ Y_{e1} & Y_{e2} \end{bmatrix}^{-1} \left[\begin{bmatrix} P_{a1} & P_{a2} \\ P_{e1} & P_{e2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t-h) \\ y(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{a1} & Y_{a2} \\ Y_{e1} & Y_{e2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Q_1(t-h) \\ Q_2(t-h) \end{bmatrix} \right]$$

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

$$\begin{bmatrix} Y_{a1} & Y_{a2} \\ Y_{e1} & Y_{e2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{a1} & P_{a2} \\ P_{e1} & P_{e2} \end{bmatrix}$$

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 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 전체 적분구간에서의 천이행렬 Φ 는 다음과 같다.

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

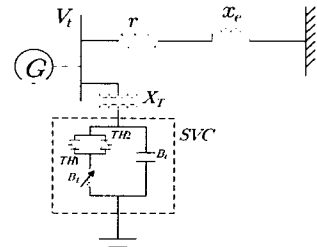
위의 천이행렬로부터 구한 고유치를 λ_d 라하고, 상태행렬에서 구한 고유치를 $\lambda_c (= -a + j\beta)$ 라 하면 천이행렬로부터 구한 고유치와 상태행렬로부터 구한 고유치는 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

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. 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].

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

3.1 상태방정식에 의한 진동모드 해석

상태방정식에 의한 고유치 해석결과를 표 1에 나타내었다.

<표 1> 상태방정식에 의한 고유치 해석결과

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

표 1에서 스위치가 각각 OFF, ON인 경우의 상태방정식에 의한 해석결과로서 스위칭에 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 sec³ 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 해석결과를 다음과 같다.

