

# GTO 제어 STATCOM을 포함하는 이산 전력시스템의 RCF 해석법에 의한 진동모드 해석

論 文
56-5-2

## Analysis of Oscillation Modes in Discrete Power Systems Including GTO Controlled STATCOM by the RCF Method

金 德 泳<sup>†</sup>  
(Deok Young Kim)

**Abstract** - In this paper, the RCF method is applied to analyze small signal stability of power systems including GTO controlled parallel FACTS equipments such as STATCOM. To apply the RCF method in power system small signal stability problems, state transition equations of generator, controllers and STATCOM are presented. In eigenvalue analysis of power systems, STATCOM is modelled as the equivalents voltage source model and the PWM switching circuit model. As a result of simulation, the RCF 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 devices such as STATCOM.

**Key Words** : PWM 스위치회로 모델, RCF 해석법, STATCOM, 고유치 해석, 등가전압원 모델, 미소신호 안정도

### 1. 서 론

현대의 전력산업은 규모와 시설면에서의 지속적인 확대와 함께 고 품질의 전력에 대한 사회적 요구가 증대하고 있다. 그 중에서 발전시설의 대규모화와 수적인 증가에 따라 이를 전송하는 송·배전 설비도 계속적인 증설과 대용량화가 요구되나, 환경적인 문제와 지역 이기주의 등에 의해 많은 어려움이 발생하고 있다. 전력계통에 사용되는 제어장치의 하나인 FACTS 설비는 기존의 계통설비를 그대로 유지하면서도 전송전력을 크게 증가하여 계통설비의 경제성을 극대화 할 수 있을 뿐만 아니라 계통의 안정도 향상에도 기여하는 등의 장점을 가지며, 앞에서 설명한 계통설비 증설 문제의 현실적인 어려움을 고려할 때 앞으로 보다 폭넓게 전력계통에 적용될 것으로 예상된다고 할 수 있다[1, 2, 3].

그러나, FACTS 설비는 이러한 긍정적인 요소와 함께 전력전자 소자의 스위칭 동작에 의한 왜란이나 새로운 진동모드의 발생 등과 같은 부정적인 효과도 같이 나타나는 것으로 알려져 있다. 또한 이러한 FACTS 설비뿐만 아니라 일반적인 스위칭 소자를 포함하는 설비는 스위칭 동작에 의한 불연속 동작구간을 갖게 되며, 스위칭 동작에 의해 기존 진동모드의 변화뿐만 아니라 새로이 불안정한 진동모드가 발생하기도 한다. 따라서 불연속의 스위칭 동작특성을 갖는 설비를 포함하는 전력계통에서 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화를 정확하게 해석할 수 있는 해석방법의 개발에 대한 필요성이 요구된다[4, 5, 6].

본 논문에서는 이러한 불연속 특성을 갖는 계통의 미소신호 안정도해석을 위해서 수학적으로 강인한 특성을 갖는

RCF(Resistive Companion Form) 해석법을 전력계통의 안정도 해석에 적용하여 계통의 상태천이방정식을 구성하고 이로부터 고유치 해석을 하여 스위칭 소자의 주기적 스위칭 동작에 의해 발생하는 진동현상의 정확한 해석 결과를 제시하고자 한다. 이를 위해 병렬형 GTO 제어 FACTS 설비인 STATCOM에 대해 등가전압원 모델과 PWM 스위치회로 모델을 사용하여 RCF 해석법을 적용한 해석모델을 제시하고, STATCOM을 포함하는 전력계통의 미소신호 안정도 해석에 RCF 해석법을 적용하여 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화와 새로이 발생하는 불안정한 진동모드에 대한 정확한 해석이 가능함을 보이고자 한다. [7, 8].

### 2. RCF 해석법에 의한 미소신호 안정도 해석

전력계통의 구성장치 중에서 선형요소로 구성된 복합계통에서의 선형 미분방정식의 일반형태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

위의 방정식을 수치적분법인 Trapezoidal Method를 사용하여 적분구간 h에 대해 적분하고 계통방정식을 적용한 후의 상태천이 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t-h) \\ y(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Q_1(t-h) \\ Q_2(t-h) \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)는 시간 t-h에서 t동안의 전체계통의 상태천이방정식을

<sup>†</sup> 正 會 員 : 群 山 大 學 電 子 情 報 工 學 部 副 教 授 · 工 博

E-mail : dykim@kunsan.ac.kr

接 受 日 字 : 2007年 1月 12日

最 終 完 了 : 2007年 3月 9日

나타내며, 하나의 적분구간  $h$ 에서의 천이행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi(t, t-h) = \begin{bmatrix} Y_{s11} & Y_{s12} \\ Y_{s21} & Y_{s22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_{s11} & P_{s12} \\ P_{s21} & P_{s22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)의 상태천이행렬에 대한 고유치 해석으로부터 대상계통의 미소신호 안정도해석이 가능하게 된다. 일반적으로 스위칭 소자를 포함하는 회로에 대해 고유치 해석을 하는 경우 불연속의 스위칭 구간을 포함하는 전체구간에 대한 천이행렬이 관심 대상이 되며, 다수개의 적분구간에 대한 상태천이행렬은 각각의 적분구간에 대해 구한 상태천이행렬로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\Phi(t_n, t_0) = \Phi(t_n, t_{n-1})\Phi(t_{n-1}, t_{n-2}) \cdots \Phi(t_2, t_1)\Phi(t_1, t_0) \quad (4)$$

식(4)의 상태천이행렬로부터 구한 고유치를  $\lambda_d$  라하고, 상태행렬에서 구한 고유치를  $\lambda_c (= -\alpha + j\beta)$ 라 하면 상태천이행렬로부터 구한 고유치와 상태행렬로부터 구한 고유치는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\lambda_d = e^{\lambda_c t} = e^{-\alpha t} e^{j\beta t} \quad (5)$$

식(5)에서 상태천이행렬로부터 구한 고유치는 상태행렬로부터 구한 고유치를 크기가 1인 단위원으로 mapping한 것과 같으며, 모든 고유치가 단위원 안에 있는 경우 안정하며, 단위원 밖에 있는 경우는 불안정함을 나타낸다.

### 3. 등가전압원 모델 STATCOM의 RCF 해석법에 의한 고유치 해석

#### 3.1 상태천이 방정식으로의 모델링

등가전압원 모델로 나타낸 STATCOM의 등가회로는 다음과 같다.

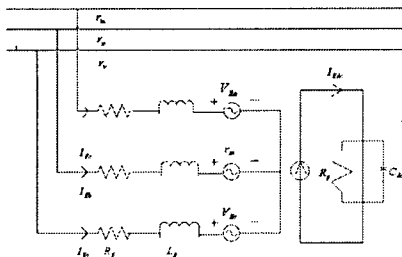


그림 1 STATCOM의 계통해석 등가회로  
Fig. 1 Equivalent circuit of the STATCOM

그림 1의 등가전압원 모델 STATCOM에 RCF 해석법을 적용하여 구한 상태천이 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} (1 + \frac{hR_E}{2L_E}) & \frac{h}{2}\omega_0 & -\frac{hk}{2L_E}\sin\delta_{EB} \\ -\frac{h}{2}\omega_0 & (1 + \frac{hR_E}{2L_E}) & +\frac{hk}{2L_E}\cos\delta_{EB} \\ \frac{hk}{2C_{dc}}\sin\delta_{EB} & -\frac{hk}{2C_{dc}}\cos\delta_{EB} & (1 + \frac{h}{2C_{dc}R_P}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ED}(t) \\ I_{EQ}(t) \\ V_{dc}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{h}{2L_E} \{ V_{1D}(t) + kV_{dc0}\cos\delta_{EB}\delta_E(t) \} \\ -\frac{h}{2L_E} \{ V_{1Q}(t) + kV_{dc0}\sin\delta_{EB}\delta_E(t) \} \\ \frac{hk}{2} (\cos\delta_{EB}I_{ED0} + \sin\delta_{EB}I_{EQ0})\delta_E(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 - \frac{hR_E}{2L_E}) & -\frac{h}{2}\omega_0 & \frac{hk}{2L_E}\sin\delta_{EB} \\ \frac{h}{2}\omega_0 & (1 - \frac{hR_E}{2L_E}) & -\frac{hk}{2L_E}\cos\delta_{EB} \\ -\frac{hk}{2C_{dc}}\sin\delta_{EB} & \frac{hk}{2C_{dc}}\cos\delta_{EB} & (1 - \frac{h}{2C_{dc}R_P}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ED}(t-h) \\ I_{EQ}(t-h) \\ V_{dc}(t-h) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{h}{2L_E} \{ V_{1D}(t-h) + kV_{dc0}\cos\delta_{EB}\delta_E(t-h) \} \\ \frac{h}{2L_E} \{ V_{1Q}(t-h) + kV_{dc0}\sin\delta_{EB}\delta_E(t-h) \} \\ -\frac{hk}{2} (\cos\delta_{EB}I_{ED0} + \sin\delta_{EB}I_{EQ0})\delta_E(t-h) \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 3.2 RCF 해석법에 의한 고유치 해석

일기무한모선 계통의 발전기 단자에 전압원으로 등가 모델링한 STATCOM을 설치하여 고유치 해석을 하였다. 이때 전압원으로 등가 모델링한 STATCOM의 전압은 0.9pu로 가정하였으며, 전압원의 위상각은  $-90^\circ$ 에서  $90^\circ$ 까지 단계적으로 변화시켜가면서 안정도 판별을 한 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1 전압원 위상각에 의한 고유치 해석결과( $V_E = 0.9pu$ )

Table 1 Eigenvalues from the point of voltage source phase angles ( $V_E = 0.9pu$ )

	위상각 : $-90^\circ$	위상각 : $-60^\circ$	위상각 : $-30^\circ$	위상각 : $0^\circ$
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	-0.45825+j11.70743	-6.41748+j10.41267
	-38.1025	-2.77735+j2.475794	-123.191	-94.1699
	-0.99764+j6.595675	-40.098	-20.6553	-0.40447
	1.348223	3.882872	-32.2777	-37.1047
		-0.67411	8.466776	
	불안정	불안정	안정	불안정
고유치	위상각 : $30^\circ$	위상각 : $60^\circ$	위상각 : $90^\circ$	
	-66.8362+j594.992	-126.327+j728.0845	-173.233+j822.758	
	-15.7527+j376.4323	-15.5909+j376.413	-15.5369+j376.5665	
	-41.608+j12.94172	-65.5764+j73.9897	-75.3375+j83.03332	
	-0.6471+j6.514662	-0.48529+j7.798335	-0.94373+j5.145188	
	-73.6191	-38.3452	-38.2103	
-0.21572	0.215716	1.348223		
	안정	불안정	불안정	

표 1은 STATCOM의 전압원 위상각의 변화에 따른 고유치 해석결과를 위상각을  $30^\circ$  간격으로 해서 나타낸 것이다. 표 1에서 STATCOM의 전압원 위상각이  $-30^\circ$ 와  $30^\circ$  근처에서 계통이 안정화되는 것을 알 수 있으며, 나머지 위상각에서는 불안정상태인 것을 나타낸다. 표 1의 진동모드 중에서 STATCOM의 등가전압원 위상각의 변화에 따라서 안정과 불안정 상태가 달라지는 진동모드 6에 대하여 전체 위상각의 변화범위에 대한 궤적을 그림 2에 나타내었다.

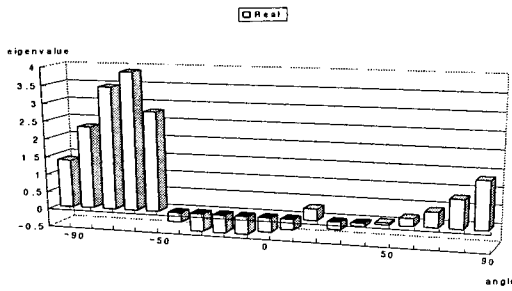


그림 2 STATCOM의 위상각에 의한 진동모드 6의 궤적  
Fig. 2 Loci of oscillation mode 6 from the point of the STATCOM phase angles

4. PWM 스위치회로 모델 STATCOM의 고유치 해석

4.1 상태방정식에 의한 고유치 해석

일기무한모선의 발전기 단자에 병렬로 설치된 STATCOM의 인버터회로가 각각 OFF, ON인 경우의 고유치 해석결과를 표 2에 나타내었다.

표 2 STATCOM 스위치 회로의 OFF/ON에 의한 고유치  
Table 2 Eigenvalues of the STATCOM switching circuit

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

표 2의 해석결과는 STATCOM의 스위치 회로가 각각 OFF와 ON인 경우의 고유치 해석결과로서 상태방정식에 의한 해석결과와 RCF 해석법에 의한 해석결과가 동일하다. STATCOM의 스위치 회로가 OFF시에는 불안정한 진동모드가 존재하며, ON시에는 모든 진동모드가 안정한 것을 나타낸다.

4.2 RCF 해석법에 의한 고유치 해석

RCF 해석법을 사용하여 STATCOM의 스위칭 동작에 의한 진동모드의 변화에 대한 해석을 하기 위해, STATCOM의 스위치 회로가 정현파 1주기에 대하여 12 pulse의 PWM 제어방식으로 동작하는 것을 가정하였다. 이때 1 pulse의 스위칭 구간을 다시 6개의 시간구간으로 나누어 각 구간에서의 스위치 회로의 OFF와 ON의 비를 조절하여 PWM 스위칭 동작에 의한 진동모드를 해석하고, 해석결과를 표 3에 나타내었다.

표 3 RCF 해석법에 의한 고유치 해석결과  
Table 3 Eigenvalues by the RCF analysis method

	1-step(off)	2-step(off)	3-step(off)	4-step(on)	5-step(on)
고유치	-15.9734±j376.5788	-15.9785±j376.5788	-15.9512±j376.5788	-16.2073±j376.3796	-16.3630±j376.2876
	0.2377±j377.00107	0.2814±j377.00108	0.3250±j377.00106	-0.0193±j377.2358	-2.085±j377.3422
	-43.6830	-43.7322	-43.7166	-49.9709	-53.8601
	-37.3732	-37.3736	-37.3740	-38.1754	-38.5787
	-1.8443±j4.2513	-1.8928±j4.2513	-1.8767±j4.2513	-3.396±j7.9643	-3.493±j9.5851
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	4.6594	4.6594	4.6594	0.8251	0.3106
	-1.6502	-1.6987	-1.6825	-2.5966	-2.9121
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	6-step(off)	7-step(off)	8-step(off)	9-step(off)	10-step(on)
	-16.3066±j376.3260	-16.2539±j376.3568	-16.2156±j376.3796	-16.1870±j376.3989	-16.2624±j376.3467
	-1.230±j377.2381	-0.0546±j377.2635	-0.0145±j377.2359	0.0264±j377.21336	-0.0774±j377.2742
	-52.1327	-50.8891	-49.9740	-49.2654	-51.2622
	-38.4109	-38.2773	-38.1772	-38.0394	-38.3189
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	11-step(on)	12-step(on)	13-step(on)	14-step(off)	15-step(off)
	-16.3338±j376.3081	-16.3861±j376.2787	16.4312±j376.2569	-16.3942±j376.2725	-16.3692±j376.2877
	-0.1545±j377.3188	-0.2196±j377.3525	-0.2828±j377.3785	-0.2407±j377.3586	-0.2049±j377.3422
	-52.9138	-54.3065	-55.4853	-54.6159	-53.8800
	-38.4997	-38.6240	-38.7378	-38.6550	-38.5833
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	16-step(on)	17-step(on)	18-step(on)	19-step(on)	20-step(on)
	-16.4088±j376.2679	-16.4387±j376.2515	-16.4712±j376.2378	-16.4658±j376.2261	-16.5232±j376.2162
	-0.2469±j377.3648	-0.2302±j377.3835	-0.2322±j377.3990	-0.3585±j377.4121	-0.3872±j377.4231
	-54.8484	-55.7242	-56.5028	-57.1997	-57.8318
	-38.6784	-38.7624	-38.8372	-38.9041	-38.9595
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	21-step(on)	22-step(on)	23-step(on)	24-step(on)	25-step(on)
	-16.5439±j376.2076	-16.5632±j376.2002	-16.5813±j376.1937	-16.5983±j376.1880	-16.6144±j376.1830
	-0.4128±j377.4326	-0.4409±j377.4408	-0.4585±j377.4479	-0.4791±j377.4541	-0.4984±j377.4596
	-58.3983	-58.9198	-59.3993	-59.8350	-60.2308
	-39.0143	-39.0642	-39.1055	-39.1475	-39.1882
	안정	안정	안정	안정	안정
고유치	26-step(off)	27-step(off)	28-step(on)	29-step(on)	30-step(off)
	16.5885±j376.1914	-16.5648±j376.1996	-16.5813±j376.1943	-16.5983±j376.1895	-16.5736±j376.1939
	-0.4259±j377.4366	-0.4405±j377.4415	-0.4502±j377.4473	-0.4755±j377.4525	-0.4513±j377.4445
	-59.5784	-58.9960	-59.3552	-59.7211	-59.1653
	-39.1248	-39.0680	-39.1020	-39.1370	-39.0856
	안정	안정	안정	안정	안정
고유치	31-step(off)	32-step(off)	33-step(off)	34-step(off)	35-step(off)
	16.5517±j376.2041	-16.5346±j376.2112	-16.5158±j376.2181	16.5013±j376.2248	-16.4851±j376.2313
	-0.4259±j377.4366	-0.4054±j377.4288	-0.3835±j377.4211	-0.3632±j377.4135	-0.3443±j377.4062
	-58.6486	-58.1643	-57.7093	-57.2811	-56.8802
	-39.0375	-38.9924	-39.0501	-39.1003	-38.8728
	안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	36-step(off)	37-step(off)	38-step(off)	39-step(off)	40-step(on)
	-16.4702±j376.2378	-16.4563±j376.2440	-16.4434±j376.2500	-16.4314±j376.2559	-16.4447±j376.2494
	-0.3288±j377.3990	-0.3104±j377.3920	-0.2962±j377.3852	-0.2785±j377.3785	-0.2368±j377.3369
	-56.5016	-56.1435	-55.8043	-55.4850	-55.4802
	-38.8374	-38.8013	-38.7397	-38.7338	-38.7745
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정

표 3 RCF 해석법에 의한 고유치 해석결과(계속)

Table 3 Eigenvalues by the RCF analysis method (contin.)

고유치	41-step(on)	42-step(off)	43-step(off)	44-step(off)	45-step(off)
	16.4576+j376.2434 -0.3120+j377.3327 -56.1782 -38.8052 -0.4300+j10.3394 0.1231 -3.0827	16.4489+j376.2488 -0.2968+j377.3365 -56.8706 -38.7766 -0.4262+j10.2459 0.1432 -3.0625	-16.4347+j376.2542 -0.2848+j377.3306 -56.9796 -38.7493 -0.4140+j10.1551 0.1625 -3.0409	-16.4232+j376.2593 -0.2714+j377.3746 -56.2936 -38.7211 -0.4045+j10.0669 0.1853 -3.0203	-16.4126+j376.2643 -0.2587+j377.3689 -56.0343 -38.6964 -0.3955+j9.9811 0.2027 -3.0007
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	46-step(on)	47-step(on)	48-step(on)	49-step(on)	50-step(off)
	16.4259+j376.2584 -0.2742+j377.3358 -55.3512 -38.7255 -0.4058+j10.0835 0.1815 -3.0241	-16.4368+j376.2527 -0.2871+j377.3321 -58.7555 -56.6567 -0.4177+j10.1795 0.1569 -3.0465	-16.4455+j376.2474 -0.3017+j377.3381 -55.9465 -38.7843 -0.4292+j10.2700 0.1375 -3.0380	16.4589+j376.2424 -0.3139+j377.3337 -56.2305 -38.8119 -0.4401+j10.3552 0.1188 -3.0966	-16.4506+j376.2470 -0.3027+j377.3386 -56.9713 -38.7859 -0.4233+j10.2767 0.1359 -3.0035
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	51-step(off)	52-step(on)	53-step(on)	54-step(on)	55-step(on)
	16.4400+j376.2515 -0.2901+j377.3354 -55.7223 -38.7629 -0.4209+j10.2002 0.1522 -3.0512	-16.4506+j376.2466 -0.3024+j377.3389 -55.9916 -38.7875 -0.4314+j10.2829 0.1344 -3.0709	-16.4610+j376.2421 -0.3163+j377.3391 -56.2507 -38.8130 -0.4414+j10.3613 0.1172 -3.0881	16.4712+j376.2378 -0.3280+j377.3390 -56.5003 -38.8359 -0.4512+j10.4356 0.1006 -3.1064	-16.4795+j376.2337 -0.3377+j377.4036 -56.7427 -38.8596 -0.4605+j10.5062 0.0847 -3.1241
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	56-step(on)	57-step(on)	58-step(on)	59-step(on)	60-step(on)
	-16.4894+j376.2298 -0.3489+j377.4079 -56.9747 -38.8808 -0.4635+j10.5733 0.0658 -3.1394	-16.4974+j376.2261 -0.3599+j377.4121 -57.1986 -38.9030 -0.4789+j10.6372 0.0579 -3.1558	-16.5054+j376.2226 -0.3691+j377.4159 -57.4166 -38.9228 -0.4883+j10.6981 0.0485 -3.1717	16.5132+j376.2193 -0.3797+j377.4197 -57.6272 -38.9435 -0.4980+j10.7562 0.0329 -3.1854	-16.5210+j376.2162 -0.3885+j377.4231 -57.8292 -38.9620 -0.5058+j10.8118 0.0194 -3.2003
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	61-step(on)	62-step(off)	63-step(off)	64-step(on)	65-step(on)
	-16.5287+j376.2132 -0.3972+j377.4264 -58.0232 -38.9738 -0.5149+j10.8649 0.0095 -3.2131	16.5305+j376.2109 -0.3871+j377.4224 -57.7870 -38.9579 -0.5034+j10.8001 0.0219 -3.1973	-16.5112+j376.2205 -0.3759+j377.4184 -57.5554 -38.9367 -0.4939+j10.7365 0.0069 -3.1804	-16.5192+j376.2175 -0.3848+j377.4217 -57.7460 -38.9542 -0.5027+j10.7891 0.0242 -3.1944	-16.5256+j376.2146 -0.3966+j377.4249 -57.9224 -38.9711 -0.5099+j10.8395 0.0149 -3.2055
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	66-step(off)	67-step(off)	68-step(off)	69-step(off)	70-step(off)
	-16.5171+j376.2181 -0.3833+j377.4211 -57.7692 -38.9508 -0.5006+j10.7787 0.0264 -3.1918	16.5091+j376.2215 -0.3734+j377.4173 -57.4912 -38.9255 -0.4916+j10.7190 0.0405 -3.1760	-16.5000+j376.2248 -0.3639+j377.4135 -57.2810 -38.9104 -0.4829+j10.6604 0.0513 -3.1621	-16.4927+j376.2281 -0.3535+j377.4098 -57.0784 -38.8918 -0.4745+j10.6027 0.0647 -3.1473	-16.4844+j376.2314 -0.3449+j377.4062 -56.8803 -38.8724 -0.4653+j10.5461 0.0748 -3.1328
	불안정	불안정	불안정	불안정	불안정
고유치	71-step(off)	72-step(off)			
	-16.4779+j376.2346 -0.3353+j377.4026 -56.6877 -38.8549 -0.4583+j10.4904 0.0875 -3.1201	-16.4703+j376.2378 -0.3274+j377.3990 -56.5018 -38.8365 -0.4506+j10.4356 0.0997 -3.1055			
	불안정	불안정			

표 3에서 불안정한 값을 갖는 진동모드를 음영으로 나타내었다. 표 3의 해석결과로부터 12 pulse 스위칭 구간 중에서 4번째 pulse의 6번째 구간부터 6번째 pulse의 4번째 구간까지의 계산구간에서는 고유치 해석결과가 안정한 값을 가지며, 나머지 구간에서는 불안정한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 표 3의 고유치 해석결과 중에서 2번, 4번, 5번 진동모드의 전체 해석구간에 대한 궤적을 그림 3, 4, 5에 나타내었다.

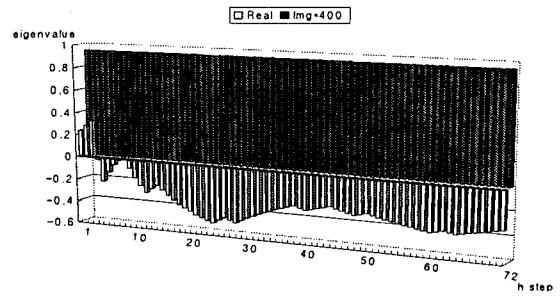


그림 3 진동모드 2의 궤적  
Fig. 3 Loci of oscillation mode 2

그림 3은 표 2에서 STATCOM의 스위치 회로가 각각 OFF와 ON인 경우 불안정과 안정의 상반되는 해석결과를 나타내는 진동모드이다. 표 3과 그림 3에서 알 수 있듯이, STATCOM이 PWM 스위칭 방식에 의해 동작하는 경우 처음의 OFF 구간에서만 불안정한 값을 나타내고, 이후의 연속적인 스위칭 동작에서는 안정한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

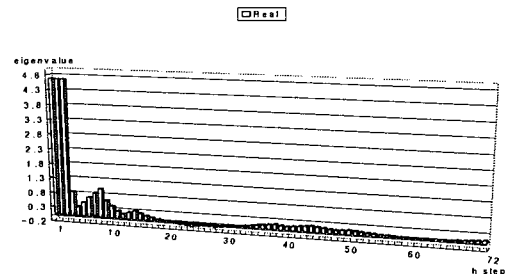


그림 4 진동모드 4의 궤적  
Fig. 4 Loci of oscillation mode 4

그림 4의 진동모드 4도 표 2에서 STSTCOM의 스위칭 회로가 각각 OFF와 ON인 경우 불안정과 안정의 상반되는 해석결과를 나타내는 진동모드이다. 표 3과 그림 4에서 알 수 있듯이, PWM 스위칭 방식에 의해 STATCOM이 동작하는 경우 첫 번째 반주기에서 최대의 진폭을 갖는 경우에만 안정한 값을 가지며, 나머지 구간에서는 불안정한 값을 갖는 것을 알 수 있다.

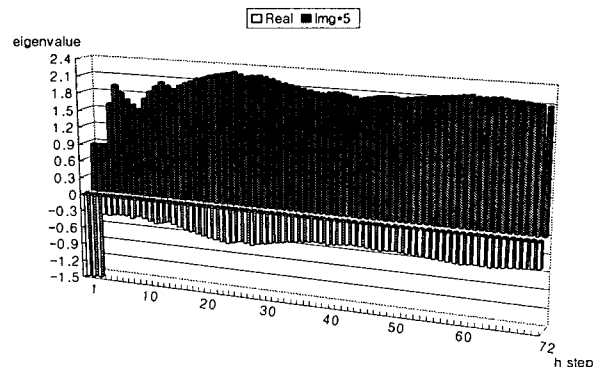


그림 5 진동모드 5의 궤적  
Fig. 5 Loci of oscillation mode 5

그림 5는 전기기계적 진동모드인 진동모드 5를 나타낸 것이며, 표 2에서 STATCOM 스위치 회로가 각각 OFF와 ON인 경우에 안정한 값을 갖는다. 표 3과 그림 5에서 알 수 있듯이, PWM 스위칭 방식에 의해 STATCOM이 동작하는 경우 고유치가 안정한 영역에 있지만, 이 때의 고유치 실수부는 표 2의 해석결과와 비교할 때 허수축에 훨씬 가까이 존재하는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 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 강인한 특성을 갖는 RCF 해석법을 적용하여 전력계통의 미소신호 안정도 해석을 하였다.

RCF 해석법을 사용한 진동모드 해석을 위해서 STATCOM을 등가전압원 모델과 PWM 스위치회로 모델로 나타내었으며, STATCOM을 포함하는 일기무한모션 계통에 대해 RCF 해석법에 의한 해석결과를 제시하였다. 등가전압원 모델의 STATCOM을 사용한 경우 기존의 상태방정식에 의한 해석결과와 RCF 해석법에 의한 해석결과가 완전 일치하였으며, PWM 스위치회로 모델을 사용한 경우는 기존의 상태방정식에 의한 해석결과와 달리 RCF 해석법을 사용한 진동모드 해석의 결과 PWM 스위칭 방식에 의한 진동모드의 변화와 새로이 발생하는 불안정 진동모드에 대한 정확한 해석이 가능함을 보였다. 이러한 해석결과는 본 논문에서 사용한 RCF 해석법이 스위칭 동작특성을 갖는 FACTS 설비를 포함하는 이산 전력시스템의 미소신호 안정도 해석에 매우 적합한 해석방법임을 나타내는 결과이다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(과제관리번호:R-2005-B-108) 주관으로 수행된 과제입니다.

### 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, Eigenvalue Analysis of very Large Power System, 1988.
- [4] "FACTS overview", IEEE power engineering society, 95TP 108, 1995.
- [5] Naring G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, Understanding FACTS, IEEE Press, 1999
- [6] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems, Wiley Inter-science, 2002
- [7] 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.
- [8] 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.

### 저 자 소 개



#### 김 덕 영 (金 德 泳)

1964년 11월 22일 생. 1988년 고려대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년 - 2002년 미국 Georgia Tech. Post-doc. Fellow, 1996년~현재 군산대학교 전자정보공학부 부교수

Tel : (063) 469-4746

Fax : (063) 469-4699

E-mail : dykim@kunsan.ac.kr