

강인 제어에 의한 Static Synchronous Series Compensator의 전력계통 동요 억제

김학만\*, 오태규\*, 국경수\*, 진진홍\*, 장병훈\*\*, 추진부\*\*  
한국전기연구소\*, 전력연구원\*\*

Damping Oscillation of Power System by Robust Control of SSSC

Hak-Man Kim\*, Tae-Kyoo Oh\*, Kyung-Soo Kook\*, Jin-Hong Jeon\*, Byung-Hoon Jang\*\*, Jin-Bu Chu\*\*  
KERI\*, KEPRI\*\*

Abstract - To improve the damping of all poorly damped oscillation modes, a control strategy of Static Synchronous Series Compensator (SSSC) based on energy method is presented in this paper. As a synchronous voltage-sourced inverter, SSSC is used to provide controllable series compensation. SSSC can provide controllable compensating voltage over an identical capacitive and inductive range. The damping effect of control strategy based on energy function is robustness with respect to loading condition, fault location and network configuration. Furthermore, the control inputs are based on local signals. In two area system, the effect of damping inter-area mode oscillation is demonstrated by the robust control strategy of SSSC.

1. 서 론

신송전 방식으로서 FACTS(Flexible AC Transmission Systems)의 기술 개념이 1980년대 후반 미국 EPRI에 의해 제시된 이래, 이 분야에서 괄목할만한 발전이 이루어지고 있다. FACTS 기술은 전력계통의 주요 파라미터인 선로의 임피던스, 모선 전압의 크기 및 위상각을 고속 정밀제어하여 계통의 가제어성을 높여서 안정도 개선, 전압변동 억제 등 계통 특성을 향상시키기 때문에, 궁극적으로는 계통설비 이용의 극대화를 목표로 한다[1].

SSSC(Static Synchronous Series Compensator)는 전압원 인버터 형의 직렬형 FACTS 기기로 송전선로에 직렬 변압기를 통하여 선로에 제어 가능한 직렬 보상전압을 공급하여 선로 임피던스의 무효분을 증가 또는 감소시키는 직렬 캐패시터나 인덕턴스의 삽입 효과를 내어 선로의 임피던스를 제어함으로써 TCSC와 같이 조류를 제어하며, 계통에 외란인가시 계통의 동요를 효과적으로 감쇄시키는 기능을 한다[2].

직렬형 전압원 인버터 형인 SSSC는 직렬전압원이 선로에 삽입되는 형태로 전력계통의 조류계산을 위한 수리적 모형 수립 측면에서는 다소 이례적이라 이에 대한 모형 수립의 연구가 진행되고 있으며, 직렬 삽입 전압원을 부하로 등가화하는 기법이 소개되고 있다[3]. 특히, SSSC의 모형에서 삽입 전압의 위상각은 선로 전류의 위상각에 대해서 항상  $\pm 90^\circ$ 가 되게 인가되는 특성이 있다. 이에 대해서 부하로 등가화하는 기법에 항상 삽입 전압의 위상각은 선로 전류의 위상각에 대해서 항상  $\pm 90^\circ$ 가 되게 인가되는 특성을 만족시키는 모델이 제시되고 있다[4].

에너지 함수법에 근거한 SSSC의 제어 전략은 인근의 측정 가능한 정보만을 입력받아 제어가능하기 때문에 계통의 조건 변화에도 크게 영향을 받지 않는 강인성을 보인다. 본 논문에서는 two area 계통에서 운전조건 변화에 대한 SSSC의 동요 억제 효과를 검토하였다. 시뮬레이션 IPLAN과 PSS/E를 이용하여 수행하였다[5-7].

2. SSSC 수리적 모형

2.1 SSSC

SSSC는 GTO(gate turn-off) 싸이리스터에 의해서 구동되는 전압원 인버터형의 직렬 FACTS 기기로서 그림 1과 같이 송전선로에 직렬 변압기를 통하여 선로에 제어 가능한 직렬 보상전압을 공급하여 선로 임피던스의 무효분을 증가 또는 감소시키는 직렬 캐패시터나 인덕턴스의 삽입 효과를 내어 선로의 임피던스를 제어함으로써 TCSC와 같이 조류를 제어하며, 계통에 외란인가시 계통의 동요를 효과적으로 감쇄시키는 기능을 한다.

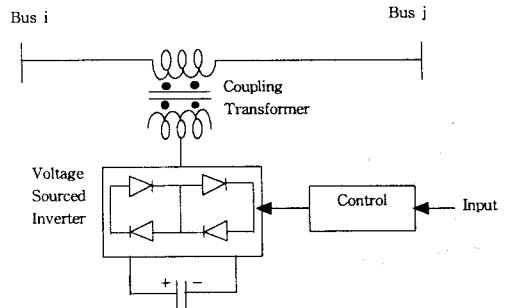


그림 1 SSSC 기본 구성

2.2 SSSC 모델링

본 논문에서는 SSSC의 모델링을 부하로 등가 처리하는 주입모형(injection model)을 이용하였다. SSSC는 그림 2와 같이 리액턴스  $X_s$ 를 가지는 이상적인 직렬 전압원으로 이 직렬 전압원이 선로에 삽입된 형태의 등가 회로에서의 벡터도는 그림 3과 같다.

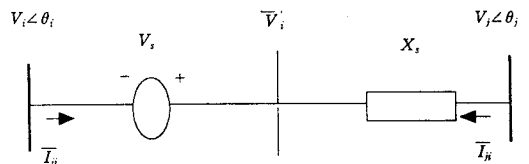


그림 2 직렬 전압원의 표현

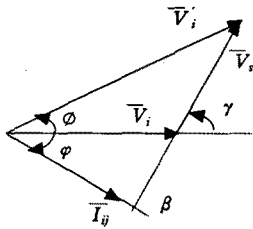


그림 3 직렬 전압원 등가회로의 벡터도

그림 2와 3에서  $\overline{V}_s$  는 인가되는 직렬 전압을 나타내며,  $\overline{V}_i$  는 직렬리액턴스 배후 가상 전압을 나타낸다. 또한 각  $\gamma$  는 주입 전압의 위상각으로  $0 \sim 2\pi$  범위에서 제어 가능하다. 그림 2의 직렬전압원인 직렬전압원은 주입모델(injection model)을 이용하여 그림 4와 같이 등가 부하 처리할 수 있다[3].

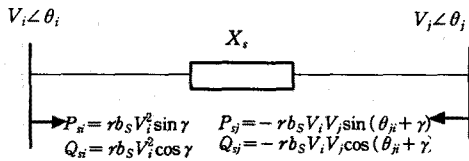


그림 4 주입모델로 표현한 직렬 전압원

SSSC의 경우는 인가되는 전압  $\overline{V}_s$  의 위상각  $\gamma$  가 전류  $\overline{I}_{ij}$  의 위상각과  $\pm 90^\circ$  가 되게 인가되는 특성이 있다. 전압  $\overline{V}_i$  의 위상각을 기준으로 하여 즉,  $\overline{V}_i \angle 0^\circ$  로 할 경우 전류의 폐이저가 그림 5와 같이 4분면에 각각 놓일 때, 인가되는 전압  $\overline{V}_s$  의 위상각  $\gamma$  는 모두 식 (1)과 같이 전압과 전류의 위상각차인  $\phi$  를 포함하는 두 가지의 형태로 동일하게 표현 가능하다[4].

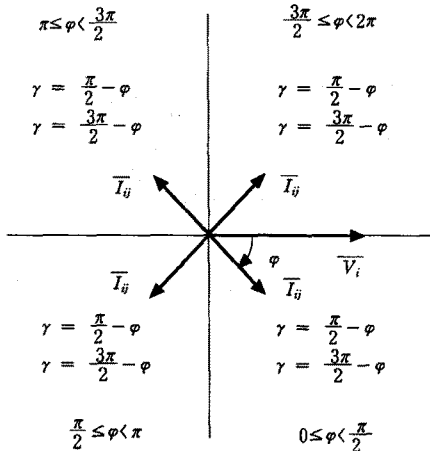


그림 5 전압  $\overline{V}_i$  과 전류  $\overline{I}_{ij}$  에 위상차( $\phi$ )에 따른 SSSC 주입 전압의 위상각

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\pi}{2} - \phi \\ \gamma &= \frac{3\pi}{2} - \phi \end{aligned} \quad (1)$$

### 3. SSSC 제어 전략

SSSC의 제어는 에너지 함수법에 근거하여 계통의 에너지수준을 감소시키는 방향으로 제어하는 전략을 적용하였다[4]. 에너지 함수는 식 (2)와 같이 표현되는데, 식 (2)에서  $E_{KE}$  는 계통 운동에너지,  $E_{PE}$  는 위치에너지,  $E_C$  는 평형점에서의 상수를 나타낸다.

$$V = E_{KE} + E_{PE} + E_C \quad (2)$$

계통 외란에 대해서 시스템을 안정화시키기 위해서는 SSSC는 에너지가 trajectory 상의 시간 미분이 항상 영 이하 즉,  $\dot{V} \leq 0$  가 되게 제어되어야 한다. 에너지의 시간 미분에 대해서 근사적인 식으로 나타내면 다음과 같다[7].

$$\dot{V} = -rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) \leq 0 \quad (3)$$

식 (4)는 에너지 함수에 근거한 제어법칙을 나타낸 것으로 SSSC가 설치되어 있는 모선의 전압 주파수를 입력으로 하여 식 (3)이 항상 만족되도록 삽입 전압의 크기와 위상각을 제어함을 보인다. 전압의 크기는 이미 설정된 최대값을 투입하는 bang-bang 제어 형태로 하였다[4].

$$\begin{aligned} &\text{if } \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) < 0 \\ &\quad \text{if } (-\frac{\pi}{2} < \theta_{ij} - \phi < \frac{\pi}{2}) \text{ then } \gamma = \frac{3\pi}{2} - \phi \\ &\quad \text{else } \gamma = \frac{\pi}{2} - \phi \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\text{if } \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) \geq 0 \\ &\quad \text{if } (-\frac{\pi}{2} \leq \theta_{ij} - \phi \leq \frac{\pi}{2}) \text{ then } \gamma = \frac{\pi}{2} - \phi \\ &\quad \text{else } \gamma = \frac{3\pi}{2} - \phi \end{aligned}$$

### 4. 강인 제어 효과 검토

#### 4.1 검토 조건

그림 6의 two area 계통에 발생하는 interarea 모드에 대한 SSSC의 강인제어 효과를 검토하였다. 계통 조건은 표 1과 같이 3가지 조건에 대해서 검토 하였다.

표 1 검토 계통 조건

	발전량		부하량	
	유효전력	무효전력	유효전력	무효전력
Case 1	2,237.4	93.1	2,187.2	160.0
Case 2	2,525.0	244.0	2,460.6	180.0
Case 3	2,815.1	440.5	2,734.0	200.0

단위 : MW/MVar

표 2 Case 별 주요 모드

Case	Mode		Damping	
	Real	Imaginary	Hertz	Ratio
Case 1	0.04244	± 3.661	0.5827	-0.0116
	-0.5572	± 6.848	1.0899	0.0811
	-0.5781	± 7.023	1.1177	0.0820
Case 2	0.1242	± 3.518	0.5600	-0.0353
	-0.4898	± 6.883	1.0955	0.0710
	-0.5061	± 7.061	1.1238	0.0715
Case 3	0.2150	± 3.341	0.5318	-0.0642
	-0.4297	± 6.899	1.0980	0.0622
	-0.4388	± 7.081	1.1270	0.0619

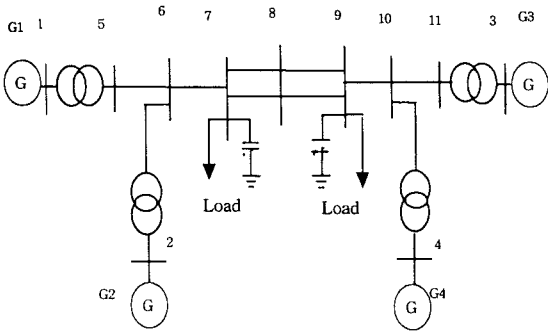


그림 6 Two area 계통

그림 6의 two area 계통의 선로 데이터는 표 2와 같다.

표 2 2지역 계통의 선로 데이터

선로	R+jX <sub>L</sub>	B
1-5	j0.0167	-
2-6	j0.0167	-
3-11	j0.0167	-
4-10	j0.0167	-
5-6	0.0025+j0.25	j0.0438
6-7	0.001+j0.01	j0.0175
7-8(per 1circuit)	0.011+j0.11	j0.125
8-9(per 1circuit)	0.011+j0.11	j0.125
9-10	0.001+j0.01	j0.0175
10-11	0.0025+j0.25	j0.0438

SSSC의 설치위치는 모선 7과 선로 7-8 사이에 2회선 각각에 설치하였다. 동적 모의에서 발전기들은 PSS/E에서 제공하는 GENROU[5]를 이용하였고 여자시스템은 EXAC1[5]를 이용하였다. 상정사고는 9번 모선에 3상 고장을 발생시켜 0.04초 지속시킨 후 고장 제거와 동시에 선로 8-9 1회선을 차단하는 것으로 하였다. 안정도 해석을 위한 부하모형으로는 유효전력은 정전류 부하로 하였고 무효전력은 정인피던스 부하로 모의하였다.

#### 4.2 검토 결과

표 2는 각 Case에 대해서 모드해석을 수행하여 동특성에 주요하게 영향을 미치는 모드를 나타낸 것이다. 표 2에서 확인할 수 있듯이 two area 계통은 negative damping이 있는 불안정한 경우로 주요모드는 0.5~0.6 Hz 부근의 inter-area 모드와 1.08~1.12 Hz 부근의 지역 모드가 중첩된 형태로 보인다. 계통의 부하가 증가에 따른 계통 조건 변화에 대해서는 damping이 낮아지는 경향을 보인다.

그림 7은 Case 1에서 해당 상정사고 적용시의 1번 모선의 발전기 회전자각을 나타낸 것이다. 적용 상정사고에 대해 동요가 지속되는 모드가 나타나지만 SSSC 적용시는 선로의 조류 제어에 의해서 동요 지속 모드가 신속히 제어됨을 보인다. 시뮬레이션 기간 중 SSSC의 최대 용량은 59.66 MVA로 추정되었다.

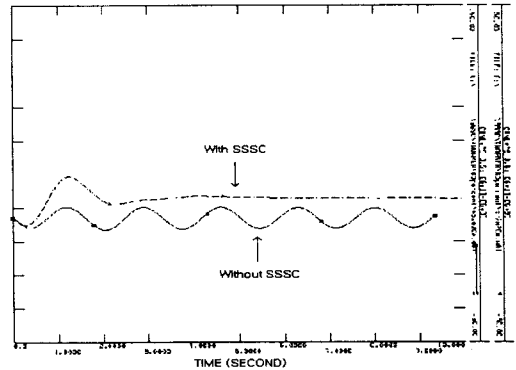


그림 7. SSSC 동요 억제 효과(Case 1)

그림 8은 Case 2에서 해당 상정사고 적용시의 1번 모선의 발전기 회전자각을 나타낸 것이다. 적용 상정사고에 대해 동요가 지속되며 점차 증가되는 모드가 나타나지만 SSSC 적용시는 선로의 조류 제어에 의해서 동요 지속 모드가 신속히 제어됨을 보인다. 시뮬레이션 기간 중 SSSC의 최대 용량은 62.77 MVA로 추정되었다.

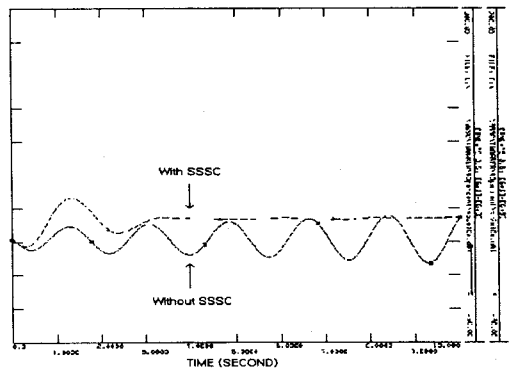


그림 8. SSSC 동요 억제 효과(Case 2)

그림 9는 Case 3에서 해당 상정사고 적용시의 1번 모선의 발전기 회전자각을 나타낸 것이다. 적용 상정사고에 대해 동요가 지속되다 동요가 점차 증가하며 5파 이후는 탈조되는 모드가 나타나지만 SSSC 적용시는 선로의 조류 제어에 의해서 동요 지속 모드가 신속히 제어됨을 보인다. 시뮬레이션 기간 중 SSSC의 최대 용량은 67.78 MVA로 추정되었다.

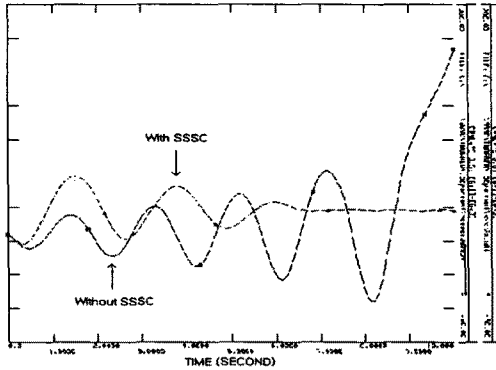


그림 9. SSSC 동요 억제 효과(Case 3)

표 2와 그림 7, 8, 9에서 확인할 수 있듯이 계통 조건이 변화에 따라 계통은 더욱 불안정한 경우로 이행되지만 모든 경우에 대해서 SSSC 제어는 강인성을 보인다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 에너지 기법에 근거한 SSSC의 제어 전략의 강인성에 대해서 검토하였다. 이를 위해서 삼입 전압의 위상각은 선로 전류의 위상각에 대해서 항상  $\pm 90^\circ$ 가 되게 인가되는 특성을 만족시키는 부하 증가 모형으로 처리하는 SSSC의 안정도 해석 모형을 제공하였다.

검토 방법으로는 two area 계통의 3가지 계통 운전 조건에 대해서 고장 발생 시 나타나는 inter-area 모드의 계통 동요에 대해서 억제 효과를 검토하였다. 검토 결과 계통 운전 조건의 변화에 따라 계통은 불안정으로 이행되지만 제어 파라미터의 변화 없이 우수한 제어 성능을 보이는 강인성을 확인할 수 있었다.

## (참 고 문 헌)

- [1] IEEE FACTS Working Group, FACTS Applications, IEEE Power Eng. Society, 1995.
- [2] Laszlo Gyugyi, Colin D. Schauder and Kalyan K. Sen, "Static Synchronous Series Compensator : A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 406-417, Jan. 1997.
- [3] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari and G. Andersson, "Use of UPFC Optimal Power Flow Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1629-1634, Oct. 1997.
- [4] 김학만, 오태규, 국경수, 전진홍, 이영운, 장병훈, 추진부, "에너지 함수법에 근거한 SSSC 제어 전략", 99년도 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, 1999.
- [5] Power Technologies Inc., PSS/E-24 Power System Simulator Program Operation Manual & Application Guide, Dec. 1995.
- [6] Power Technologies Inc., PSS/E-24 IPLAN

Version 11.0, Dec. 1995.

- [7] 김학만, 오태규, 장병훈, 추진부, "IPLAN을 이용한 UPFC 안정도 해석 전산 모형" 전기학회 논문지, 48권, 3호, 1999.
- [8] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari and G. Andersson, "Improving Power System Dynamics by Series-Connected FACTS Devices", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1635-1641, Oct. 1997.
- [9] M. Noroozian, "A Robust Control Strategy for Shunt And Series Reactive Compensators to Damp Electromechanical Oscillations", PE-244-PWRD-0-12-1997, 1997.
- [10] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Inc., 1994.
- [11] P.M. Anderson and A.A Foud, Power System Control and Stability, Iowa State Univ. Press, 1977.