

IPLAN을 이용한 SSSC 조류계산 모델

국경수*, 김학만*, 이영운*, 오태규*, 장병훈**, 추진부**
한국전기연구소*, 전력연구원**

SSSC model for Power Flow Study using IPLAN

Kyung-Soo Kook*, Hak-Man Kim*, Young-Woon Lee*, Taekyoo. Oh*, Byung-Hoon Jang**, Jin-Bu Chu**
KERI*, KEPRI**

Abstract - This paper presents Static Synchronous Series Compensator(SSSC) model for power flow study using IPLAN. In the proposed model, SSSC is represented by the equivalent load variation. The equivalent load consists of active power load specified by user and reactive power load which is founded for considering characteristic of SSSC. And this is implemented by IPLAN which is a macro-external program for PSS/E. Using this model, SSSC can be solved in load-flow by just calling the model in PSS/E. The proposed model was applied to a realistic power system for validity test.

1. 서 론

1980년 말 이후 도입된 FACTS(Flexible AC Transmission Systems)는 전력계통의 모션 전압, 위상각 및 임피던스를 제어하여 계통의 유연성을 제고 할 수 있는 기능이 최근 널리 소개되면서 전력계통의 특성 개선에 대한 역할이 크게 기대되고 있다[1].

SSSC(Static Synchronous Series Compensator)는 전압원 인버터형의 직렬형 FACTS 기기로 송전선로에 직렬 변압기를 통하여 선로에 제어 가능한 직렬 보상전압을 공급하여 선로 임피던스의 무효분을 증가 또는 감소시키는 직렬 커패시터나 인덕턴스의 삽입 효과를 내어 선로의 임피던스를 제어함으로써 TCSC와 같이 조류를 제어하며, 과도상태에서는 계통의 동요를 효과적으로 감쇄시키는 기능을 한다[2,3].

직렬형 전압원 인버터형인 SSSC는 직렬전압원이 선로에 삽입되는 형태로 전력계통의 조류계산을 위한 수리적 모형 수립 측면에서는 다소 이례적이라 할 수 있어 이에 대한 모형 수립의 연구가 진행되고 있으며, 직렬 삽입 전압원을 부하로 등가화 하는 기법이 소개되고 있다[2,3,4]. 특히, SSSC는 삽입전압이 선로의 전류와 $\pm 90^\circ$ 의 위상차를 갖는 특성이 있다.

본 논문에서는 이러한 SSSC의 조류계산을 위해 SSSC의 제어효과를 SSSC의 제어입력인 유효전력량과 SSSC에 의한 삽입전압이 선로의 전류와 90° 의 위상차를 갖도록 적절히 찾아진 무효전력량으로 이루어진 부하로 등가화 하여 조류계산 해를 구한다.

즉, SSSC는 동기 직렬 전압원으로 처리하는 것이 요구되나, 편의상 조류계산에서는 SSSC가 삽입되어 있는 선로를 절단하고, 새로운 가상모선(dummy bus)을 통해 선로에 원하는 유효전력과 무효전력을 주입하는 방법을 이용한다. 또한 본 논문에서는 이러한 일련의 절차를 PSS/E의 external macro program인 IPLAN으로 프로그래밍 하여 PSS/E에서 간단한 호출에 의해 수행될 수 있도록 하였으며 이를 실제통규모 계통의 조류계산에 적용하여 그 유용성을 확인하였다.

2. SSSC 조류계산 모델

2.1 SSSC

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

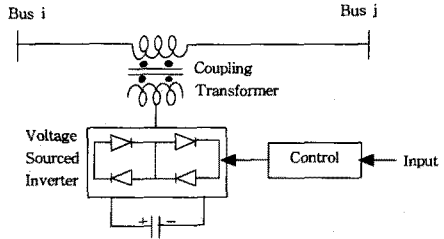


그림 1. SSSC 기본 구성

2.2 SSSC조류계산을 위한 계통구성

임의의 계통에 i-j 선로의 선로조류 유효분을 P_{sched} 값으로 제어하기 위해 SSSC가 선로에 직렬로 투입되어 그 제어 효과가 정상상태에 도달했다고 가정할 경우 계통의 상태는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

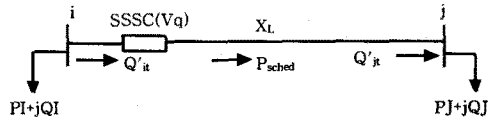


그림 2. SSSC 투입 후의 계통상태

선로의 조류를 제어하는 SSSC의 동작은 그 제어효과를 부하로 등가화 하여 조류계산 해를 구함으로써 조류계산에 반영될 수 있다. 즉, SSSC는 동기 직렬 전압원으로 처리하는 것이 요구되나, 편의상 조류계산에서는 그림 3과 같이 SSSC가 삽입되어 있는 선로를 절단하고, 새로운 가상모선(dummy bus)을 통해 선로에 원하는 유효전력과 무효전력을 주입하는 방법을 이용한다.

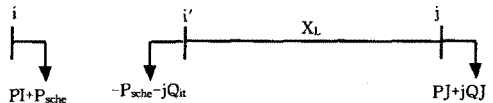


그림 3. SSSC 조류계산을 위한 계통구성

단, 여기서 더 고려해야 할 점은 SSSC는 선로조류 중 유효전력분만을 지정하기 때문에 모선의 전압이나 선로 조류의 무효분 등은 SSSC의 제어대상이 아니라 SSSC 설치 후의 결과 값이 되어야 한다는 점과 SSSC는 선로 전류에 $\pm 90^\circ$ 의 위상차를 갖는 전압을 삽입한다는 점이다. 즉, SSSC의 삽입전압에 제약 조건이 존재한다.

이를 위해 본 논문에서는 선로조류 유효분의 지정치를 기준으로 SSSC의 삽입전압이 대상선로의 전류와 $\pm 90^\circ$ 의 위상차를 갖게 되는 무효전력 주입량을 찾는 방법을 이용하였다. 즉, 선로조류 유효분에 대한 지정치와 임의의 선로조류 무효분으로 구성된 초기 등가부하를 가정한 후 이를 이용한 조류계산 해를 얻은 다음, 이로부터 이때의 SSSC삽입전압을 계산하고 이 삽입전압에 의한 선로조류의 무효분을 계산하여 등가부하모델의 무효전력 주입량을 수정한 후 다시 이를 조류계산하여 전체 계산이 수렴(SSSC 삽입전압이 선로의 전류와 $\pm 90^\circ$ 의 위상차가 됨)할 때까지 반복함으로써 SSSC 삽입시의 무효전력분 만큼이 정확히 주입되도록 한다.

여기서, 등가부하의 무효전력 주입량을 찾기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다.

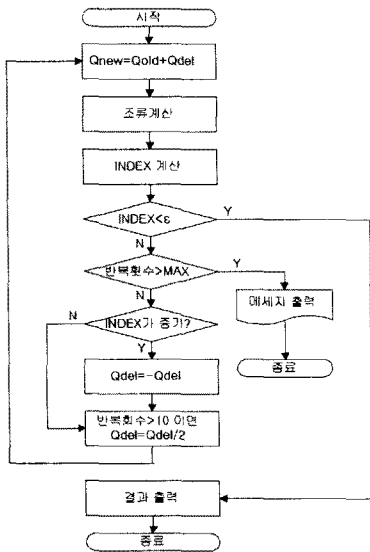


그림 4. 무효전력 주입량을 찾기 위한 알고리즘

여기서, 각 변수들은 다음과 같다.

- Q : 부하등가모델의 무효전력 주입량
- Qdel : 부하등가모델의 무효전력 주입량 수정치

$$INDEX = \left| \left| SSSC삽입전압위상각 - 대상선로전류의위상각 \right| - \frac{\pi}{2} \right|$$

ϵ : 수렴한계

2.3 IPLAN을 이용한 SSSC 조류계산 모형

본 논문에서는 SSSC의 조류계산을 위한 계통구성에서 실행되는 Base case에 대한 조류계산, 선로의 절단, 부하의 삽입, 조류계산 반복 등의 일련의 과정을 PSS/E 프로그램의 외부 매크로 프로그램(external macro program)인 IPLAN을 사용하여 프로그래밍 하여 PSS/E에서 자동적으로 처리되도록 하였다[5]. 즉, 사용자는 PSS/E에서의 간단한 호출에 의해 SSSC의 조류계산을 실행할 수 있다. 프로그래밍에 적용된 계산절차는 다음과 같다.

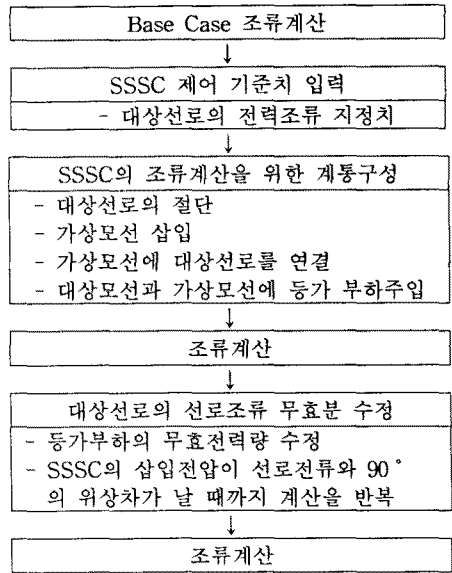


그림 5. SSSC 조류계산을 위한 계산절차

IPLAN으로 프로그래밍된 SSSC 모델은 그림 6과 같은 SSSC의 입력데이터와 함께 PSS/E에서 다음 그림 7과 같이 호출된다.

h06.sav	→ 조류계산 data
5500	→ 선로의 시작모선
5700	→ 선로의 끝모선
2	→ 선로의 회선수
1	→ 등가 회선수
4444	→ 가상모선 번호
250	→ 유효전력 지정치
0	→ 직렬 변압기 저항
0	→ 직렬 변압기 리액턴스
FNSL	→ 조류계산 방법

그림 6. 입력데이터 파일

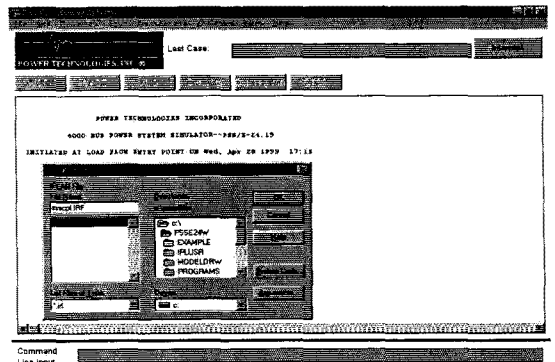


그림 7. SSSC 조류계산 실행화면

2.4 SSSC의 용량산정

SSSC의 조류계산 결과로부터 SSSC에 의해 선로에 직렬로 삽입된 전압을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{V}_s = \bar{V}_i - \bar{V}_i \quad (1)$$

단, \bar{V}_s : SSSC에 의한 직렬삽입전압

\bar{V}_i : 가상모선의 전압

\bar{V}_i : 시작모선의 전압

식(1)을 이용하여 제어조건을 만족시키기 위한 SSSC의 설비용량을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$|S_{SSSC}| = \sqrt{P_{SSSC}^2 + Q_{SSSC}^2} = |\bar{V}_s \bar{I}_{ij}| \quad (2)$$

여기서, $|S_{SSSC}|$: SSSC의 설비용량

P_{SSSC} : SSSC의 유효전력

Q_{SSSC} : SSSC의 무효전력

\bar{I}_{ij} : 제어대상 선로의 전류

3. 사례연구

본 논문에서는 955 모선, 252 발전기, 1935 선로로 구성된 대규모 계통을 대상으로 제안된 SSSC의 조류계산 모델을 적용하여 그 유용성을 검증하였다. 즉, 대상계통에 대해 SSSC가 다음과 같은 조건으로 운전되었을 때를 가정한 후 SSSC 모델을 적용하여 SSSC의 조류계산을 수행하고 각 운전조건에 대한 SSSC의 설비용량을 산정 하였다.

- SSSC 설치위치 : 5500-5700모선간 345kV 2회선 선로
- SSSC 적용목적 : 5500-5700모선간 선로의 조류제어
- SSSC 운전상태 : 대상선로의 유효전력을 130[MW], 250[MW], 550[MW]로 운전하는 세 가지 경우를 가정

대상계통에 대한 SSSC 조류계산 결과를 다음과 같이 정리하였다.

표 1. SSSC 조류계산 결과

	선로조류 지정치	선로조류 (P+jQ)	SSSC 삽입전압 (크기, 위상)	선로의 전류 (크기, 위상)
Base Case		168.8[MW] -j2.7[MVar]		
SSSC 설치후 I	130.0 [MW]	130.0[MW] -j1.1[MVar]	0.020[PU], -102.14[Deg.]	2.578[PU], -12.06[Deg.]
SSSC 설치후 II	250.0 [MW]	250[MW] -j11.6[MVar]	0.042[PU], 83.01[Deg.]	4.980[PU], -6.98[Deg.]
SSSC 설치후 III	550.0 [MW]	550.0[MW] -j349.1[MVar]	0.287[PU], 121.50[Deg.]	15.192[PU], 31.83[Deg.]

표 1의 조류계산 결과를 통해 대상선로의 선로조류가 지정치로 제어됨을 확인할 수 있고 SSSC에 의한 삽입된 전압이 선로의 전류와 90[Deg]의 위상차를 갖는 특성을 확인할 수 있다.

조류계산 결과로부터 각 운전상태에 대한 SSSC의 설비용량을 계산하여 다음 표 2에 정리하였다.

표 2. SSSC 설비용량

	선로조류	SSSC 용량
Base Case	168.8[MW] -j2.7[MVAR]	
SSSC 설치후 I	130.0[MW] -j1.1[MVAR]	5.1[MVA]
SSSC 설치후 II	250[MW] -j11.6[MVAR]	21.0[MVA]
SSSC 설치후 III	550.0[MW] -j349.1[MVAR]	436.5[MVA]

표 2에서 SSSC에 의한 조류 제어량이 클수록 SSSC의 설비용량도 크게 요구됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 SSSC의 조류계산을 위해 SSSC의 제어 효과를 SSSC의 제어입력인 유효전력량과, SSSC에 의한 삽입전압이 선로의 전류와 90°의 위상차를 갖도록 적절히 찾아진 무효전력량으로 이루어진 부하로 등가화 한 후 조류계산 해를 구한다. 이를 위해 SSSC가 삽입되어 있는 선로를 절단하고, 새로운 가상모선(dummy bus)을 통해 선로에 원하는 유효전력과 무효전력을 주입하는 방법을 이용한다. 특히 본 논문에서는 이러한 일련의 절차를 PSS/E의 external macro program인 IPLAN으로 프로그래밍 하여 실제 계통 해석에 많이 이용되는 PSS/E에서 간단한 호출에 의해 수행될 수 있도록 하였다.

또한 본 논문에서는 SSSC의 조류계산 결과를 이용하여 SSSC의 다양한 제어조건에 대해 SSSC의 설비용량을 산정하여 보았다.

사례연구를 통해 실제 계통 규모의 대규모 계통해석에 대해서도 PSS/E에서의 간단한 호출에 의해 SSSC의 조류계산 결과와 이에 대한 설비용량을 계산할 수 있었으며 향후, 실제 계통에서의 SSSC에 대한 계통해석에서 많은 활용이 기대된다.

[참고 문헌]

- [1] Douglas J. Gotham, G. T. Heydt, "POWER FLOW CONTROL AND POWER FLOW STUDIES FOR SYSTEMS WITH FACTS DEVICES", IEEE Trans, on Power Systems, Vol. 13, No. 1, February, 1998
- [2] Laszlo Gyugyi, Colin D. Schauder, Kalyan K. Sen, "STATIC SYNCHRONOUS SERIES COMPENSATOR : A SOLID-STATE APPROACH TO THE SERIES COMPENSATION OF TRANSMISSION LINES", IEEE Trans, on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, January 1997
- [3] 김학만, 오태규, 국경수, 전진홍, 이영운, 장병훈, 추진부, "에너지 함수법에 근거한 SSSC 제어전략", 대한전기학회 춘계학술대회, 1999.
- [4] 국경수, 김학만, 전진홍, 이영운, 오태규, 장병훈, 추진부, "대규모 계통에서의 조류제어를 위한 UPFC 적용", 대한전기학회, 춘계학술대회, 1999.