

## 전력조류계산을 위한 SSSC모델의 개발과 연속조류계산 알고리즘에의 적용

김슬기 · 송화창 · 이병준  
고려대학교 전기전자전파공학부

### Development of SSSC Power Flow Model and its Implementation into Continuation Power Flow Algorithm

Seulki Kim · Hwachang Song · Byongjun Lee  
School of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - This paper proposes a SSSC(Static Synchronous Series Compensator) power flow model to be incorporated into power flow calculation for the steady state analysis of the power system. SSSC provides controllable compensating voltage, which is in quadrature with the line current, over an capacitive and an inductive range, independently of the magnitude of the line current. This SSSC model is obtained from the injection model for series connected VSC(Voltage Source Converter) by adding a constraint that the injected voltage should be in quadrature with the line current. In this paper the static model is implemented into the continuation power-flow (CPF) program. It is shown that SSSC has its intrinsic superiority over TCSC in controllable power flow range.

그림 1에서와 같이 계통에 직렬로 연결된 전압원이  $i$  모선과  $j$  모선 사이에 위치하고 있다고 가정하면, 직렬 전압원 인버터는 내부 리액턴스  $X_s$ 를 가지는 이상 전압원  $v_s$ 로 나타낼 수 있다. 직렬 전압원  $v_s$ 는 전압크기와 위상각의 조절이 가능한데, 그 크기와 위상각을  $i$ 모선의 전압  $V_i \angle \theta_i$ 를 기준으로 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = r V_i e^{j\Gamma} = r V_i \angle (\theta_i + \Gamma) \quad (1)$$

(단,  $0 \leq r \leq r_{max}$ ,  $0 \leq \Gamma \leq 2\pi$  이다)

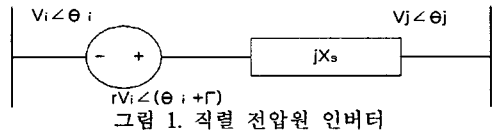


그림 1. 직렬 전압원 인버터

그림 1의 전압원  $v_s$ 를 내부리액턴스  $X_s$ 와 병렬로 연결한 전류원  $I_s = v_s / jX_s$ 로 바꾸어 나타내면 그림 2와 같다. (단,  $b_s = 1 / X_s$ )

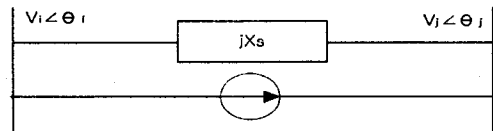


그림 2. 직렬 전압원을 전류원으로 나타낸 그림

전류원  $I_s$ 에 의해  $i$  모선과  $j$  모선에서 계통으로 주입되는 유효전력, 무효전력  $P_{si}$ ,  $Q_{si}$ 와  $P_{sj}$ ,  $Q_{sj}$ 를 각각 식 (2),(3)에서와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{si}^* &= P_{si} - j Q_{si} = (V_i)^* I_s \\ &= V_i \angle (-\theta_i) [ -j r b_s V_i \angle (\theta_i + \Gamma) ] \\ &= r b_s V_i^2 \angle (\Gamma - 90^\circ) \\ &= r b_s V_i^2 \sin \Gamma - j r b_s V_i^2 \cos \Gamma \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} S_{sj}^* &= P_{sj} - j Q_{sj} = (V_j)^* (-I_s) \\ &= V_j \angle (-\theta_j) [ j r b_s V_i \angle (\theta_i + \Gamma) ] \\ &= -r b_s V_i V_j \angle (\theta_j + \Gamma - 90^\circ) \\ &= -r b_s V_i V_j \sin (\theta_j + \Gamma) \\ &\quad + j r b_s V_i V_j \cos (\theta_j + \Gamma) \end{aligned} \quad (3)$$

#### 1. 서 론

FACTS 기술을 전력계통에 도입하기 위한 연구에서는 특정한 선로의 수송능력을 향상시키기 위한 적용방안 연구를 비롯하여 전력조류제어에 의한 운용계약완화, 설비이용률향상, 적정전압유지, 안정도향상 등이 연구되어 지고 있다[1,2,3].

본 논문에서는 대표적인 직렬보상기기인 SSSC(Static Synchronous Series Compensator) 기술의 전력계통 적용시 수행되는 정상상태 해석을 위하여 SSSC의 정적인 모델을 도출하고 이를 전력조류방정식에 포함시킨 후, 정적전압안정도 판별알고리즘을 적용하였다. SSSC 조류계산 모델은 기존의 전압원인버터의 주입모델을 바탕으로 하여, 여기에 전압원인버터에 의한 직렬주입전압이 선로전류와 위상이  $90^\circ$  또는  $-90^\circ$ 의 차이가 나도록 구현한 것이다. 제안한 모델을 통해 SSSC가 투입되는 계통의 자코비안 행렬을 수정하여 전력조류계산프로그램에 용이하게 포함시킬 수 있다.

사례연구에서는 SSSC 전력조류계산 모델을 연속조류계산 프로그램에 적용하여 New England 30모선을 통해 TCSC와의 기본적인 동작특성의 차이를 분석하고 선로조류제어와 선로보상범위에 있어서 SSSC의 우수함을 보인다.

#### 2. SSSC의 정적 모델

직렬 전압원 인버터 주입모델은 직렬 전압원에 의해 주입된 전력  $P_{si}$ ,  $Q_{si}$  와  $P_{sj}$ ,  $Q_{sj}$  를 각각의 모선에 의존부하로써 추가한 형태가 되는데, 이것은 그림 3에서 나와있다[4].

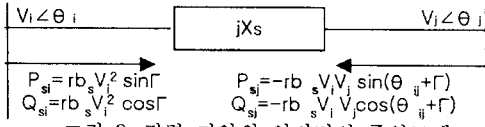


그림 3. 직렬 전압원 인버터의 주입모델

SSSC 에서는 직렬 전압원 인버터에 의한 주입전압의 위상각이 선로에 흐르는 전류의 위상각과  $90^\circ$  또는  $-90^\circ$  를 이루어[5] 선로의 흐르는 조류를 조절하도록 제어하므로 계통과 SSSC 사이의 총 유효전력 교류의 합은 0 이 되어야 한다. 이러한 조건으로부터 SSSC 주입모델을 얻기 위한  $\Gamma$  와  $r$  의 값을 결정할 수 있는데 그 전개 과정은 식 (4)-(9) 와 같다.

$$P_{si} + P_{sj} = r b_s V_i^2 \sin \Gamma - r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \Gamma) = 0 \quad (4)$$

$$\therefore V_i \sin \Gamma = V_j \sin(\theta_{ij} + \Gamma) \quad (5)$$

$$\therefore \Gamma_{SSSC} = \tan^{-1} \left( \frac{V_j \sin \theta_{ij}}{V_i - V_j \cos \theta_{ij}} \right) \quad (6)$$

단,  $V_i - V_j \cos \theta_{ij} \neq 0$

$V_i - V_j \cos \theta_{ij} = 0$  이면,  $\Gamma_{SSSC} = 90^\circ$  또는  $-90^\circ$

SSSC의 정적모델은 그림 3의 직렬 전압원 인버터 주입모델에서  $\Gamma$  대신 식(6)에서 얻은  $\Gamma_{SSSC}$ 로 대체함으로써 얻을 수 있다. 또한, 선로에서 j 모선으로 전달되는 유효전력은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있고

$$P_{ij} = b_s V_i V_j \sin \theta_{ij} + r b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \Gamma_{SSSC}) \quad (7)$$

식 (7)로부터 제어하고자 하는 선로의 유효전력량  $P_{des}$ 를 얻기 위한  $r_{des}$  을 구하면 식 (8),(9)와 같다

$$P_{ij} = P_{des} \quad (8)$$

$$\therefore r_{des} = \frac{P_{des} - b_s V_i V_j \sin \theta_{ij}}{b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \Gamma_{SSSC})} \quad (9)$$

SSSC 정적 모델을 전력조류계산 프로그램에 포함시킬 때 자코비안 행렬은 SSSC 투입전의 자코비안 행렬에 SSSC 투입에 의한 의존부하를 추가한 형태로 간단히 수정할 수 있다.

표 1은 수정된 자코비안 행렬을 나타낸다.

$H_{i,i} = H_{i,i}^0$	$N_{i,i} = N_{i,i}^0 + 2P_{si}$
$H_{i,j} = H_{i,j}^0$	$N_{i,j} = N_{i,j}^0$
$H_{j,i} = H_{j,i}^0 + Q_{sj}$	$N_{j,i} = N_{j,i}^0 + P_{sj}$
$H_{j,j} = H_{j,j}^0 - Q_{sj}$	$N_{j,j} = N_{j,j}^0 + P_{sj}$
$J_{i,i} = J_{i,i}^0$	$L_{i,i} = L_{i,i}^0 + 2Q_{si}$
$J_{i,j} = J_{i,j}^0$	$L_{i,j} = L_{i,j}^0$
$J_{j,i} = J_{j,i}^0 - P_{sj}$	$L_{j,i} = L_{j,i}^0 + Q_{sj}$
$J_{j,j} = J_{j,j}^0 + P_{sj}$	$L_{j,j} = L_{j,j}^0 + Q_{sj}$

표 1. 자코비안 행렬의 수정

$$\text{단, } \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}$$

(단, 위 첨자 0은 SSSC 투입전의 자코비안 성분)

### 3. SSSC 정적모델의 적용

연속조류계산 알고리즘은 비선형 방정식에 파라미터를 도입하고 이 파라미터의 변화에 따른 평형해의 경로를 구하는 기법으로써 비선형 방정식의 수렴특성과 무관하게 항상 해의 경로를 추적할 수 있는 강인한 수렴성을 가지고 있다. 그림 4에서 보여 주고 있는 연속조류계산 알고리즘의 과정은 현재의 평형해인  $(X1, P1)$ 으로부터 다음해의 예측값인  $(X2^*, P2^*)$ 를 구하는 예측과정과 이 예측값으로부터 다음해의 평형해  $(X2, P2)$ 를 구하는 수정과정으로 이루어진다[6].

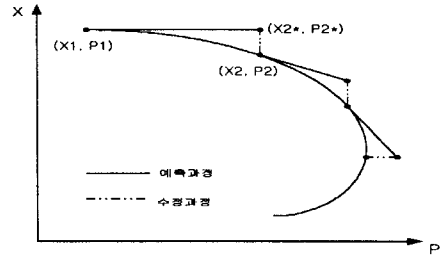


그림 4. 연속조류계산 알고리즘의 개념

i 모선과 k 모선 사이에 SSSC를 적용한다고 하면 j 모선은 SSSC 설치에 의한 중간모선에 해당한다. 먼저, 설치하고자 하는 선로에 SSSC의 내부 리액턴스  $X_s$  를 더해 선로의 어드미턴스를 수정하고, 자코비안 행렬을 표 1 에서와 같이 변화시킨다. 다음으로는 초기 조류해로부터 시작하여 예측과정과 수정과정을 반복하여 조류해의 경로를 찾아가는 연속조류계산 과정 중에서 조류계산 기능을 수행하는 수정과정에 SSSC 정적 모델을 적용하는데 그 적용절차는 다음과 같다.

- 1> SSSC의 입력 데이터에서 원하는 송전 유효전력  $P_{DES}$  를 입력받는다.
- 2> 기본조류해를 계산한다.
- 3> 선로에 흐르는 전류와  $P_{DES}$  사이의 차의 값이 허용오차를 넘으면 다음과정을 계속 수행하고, 허용 오차를 넘지 않으면 5>번 단계로 간다.
- 4> 식(6)으로부터  $\Gamma_{SSSC}$  계산 후 식(7)에서  $r_{des}$  를 계산하고 2>번 단계로 간다.
- 5> 현재 스텝에서의 조류계산을 마치고 다음 예측과정을 수행한다.

### 4. 사례연구

SSSC의 정적모델을 적용한 연속조류계산 프로그램을 이용해 SSSC의 정적인 동작특성을 해석한다.

New England 30 모선 계통에서 기본 조류계산 후 무효전력 손실감도가 제일 큰 8-9 선로에 SSSC와 TCSC 를 각각 설치하는 것으로 하고 선로의 capacitive 보상정도는 두 기기 모두 초기 부하상태에서의 선로의 리액턴스의 약 50% 가 되도록 조절한다. SSSC와 TCSC 두 기기의 양단에 걸릴 수 있는 최대전압을 두 기기 모두 0.1 [PU]라 하고 선로에 흐를 수 있는 최대 전류를 10 [PU]으로 두면 두 기기 모두의 VA 용량은 1 [PU]이다. 참고로 초기 부하상태에서 선로에 흐르는 전류는 약 5 [PU] 이다. 그림 5는 가장 약한 모선인 30번 모선에서의 연속조류계산의 부하증가 시나리오에 따른 PV곡선을 나타낸 것이다.

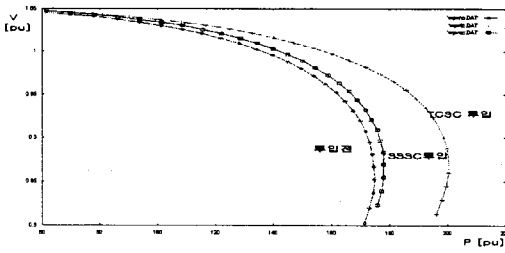


그림 5. 30번 모선에서의 PV 곡선

그림 6에서는 TCSC와 SSSC의 V-I특성과 X-I특성을 나타내는데 TCSC의 경우 선로의 리액턴스를 직접 보상해주기 때문에 선로의 전류가 증가하더라도 선로의 보상율은 일정하고 선로보상을 위해 선로에 투입되는 전압크기도 비례해서 커진다. 반면, SSSC의 경우 선로에 흐르는 전류에 관계없이 일정한 보상전압을 투입하기 때문에 선로에 흐르는 전류가 증가하면 선로의 리액턴스 보상효과는 이에 반비례하게 감소한다. 이러한 동작특성의 차이로 그림 5의 PV곡선에서처럼 부하증가에 따라 보상정도의 차이를 보인다. 그러나 양단에 걸릴 수 있는 최대전압한도내에서 선로보상을 하게 되므로 TCSC는 capacitive 보상면에서 보면 선로의 최대보상범위는 같은 부하상태에서 같은용량을 가지는 SSSC와 동일하다.

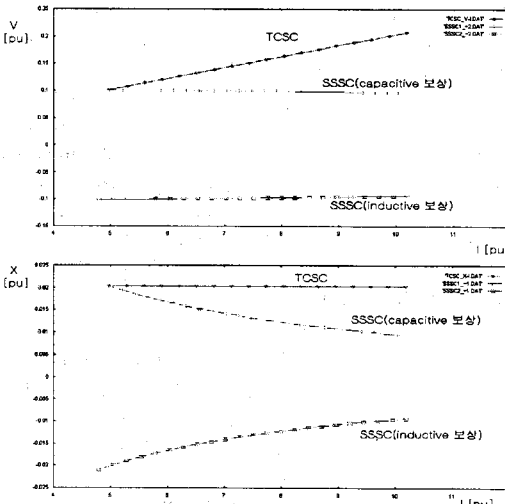


그림 6. TCSC와 SSSC의 (1)V-I 및 (2) X-I 특성

또한, SSSC에서는 capacitive 보상전압과 동일한 정도의 inductive보상전압의 투입을 통해 inductive보상도 가능하므로 같은 용량의 TCSC에 비해 넓은 범위의 선로 보상과 선로 조류제를 제어 할 수 있다[3]. 표 2는 같은 용량을 갖는 SSSC와 TCSC 두기기를 8-9 선로에 각각 설치했을 때의 선로 조류제어 범위와 선로 보상 영역을 보여준다. 이때 선로에서 제어되는 유효-무효전력의 궤적을 그림 7에 나타내었다. 표 2와 그림 7에서 두 기기는 capacitive 보상 면에서 선로 보상범위와 선로조류제어 범위가 동일하나 전체적으로는 SSSC가 TCSC보다 약 2배정도 제어영역이 넓다.

	선로조류제어	선로보상
TCSC	4.433 ~ 5.038 [PU]	0 ~ 49.4 [%]
SSSC	3.832 ~ 5.038 [PU]	-64.5 ~ 49.4 [%]

표 2. SSSC의 선로조류제어 및 선로 보상 범위 (단, 양단의 최대허용전압은 0.1 [PU])

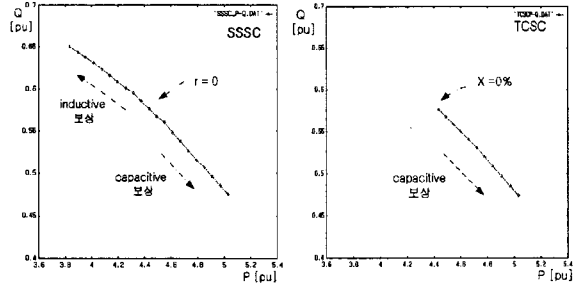


그림 7. SSSC와 TCSC에 의해 제어되는 선로의 유효-무효전력 궤적

그림 7에서 SSSC는 보상비를 0에서부터 0.1까지 0.01간격으로 조절하며 capacitive 보상과 inductive 보상 양방향으로 제어하였고 TCSC는 선로의 보상범위를 0%에서 49.4%까지 5% 간격으로 늘려가며 제어하였다. capacitive 보상방향에서는 두 곡선이 동일하고 SSSC가 TCSC보다 더 큰 보상궤적을 가짐을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 조류계산프로그램에 포함시킬 수 있는 SSSC의 정적인 모델을 기존의 전압원인버터 주입모델로부터 도출하고, 이를 연속조류계산에 적용하여 SSSC의 정적인 동작특성을 같은 직렬보상장치의 하나인 TCSC와 비교하여 분석했다. 두기기의 V-I 및 X-I 특성 곡선을 통해 기본적인 선로보상원리의 차이점을 확인했으며 같은 용량의 두기기를 비교할 때 선로의 최대 capacitive 보상범위는 같으나, SSSC의 경우 capacitive 보상전압과 동일한 크기의 inductive보상전압의 투입이 가능하므로 선로보상이나 선로조류제어 면에서 더 넓은 제어능력을 가짐을 볼 수 있었다.

## [참고문헌]

- [1] 한국전기연구소, FACTS 엔지니어링 기술 제3차 Workshop 자료집, 1998
- [2] 강중구, 한병문, "EMTP 시뮬레이션과 축소모형 실험에 의한 SSSC의 성능해석", 대한전기학회, 전기학회는 문지, 제 48권, 5호, pp.524-530. 1999.5
- [3] 김학만, 오태규, 국경수, 전진홍, 이영운, 장병훈, 추진부, "에너지 함수법에 근거한 Static Synchronous Series Compensator 제어 전략", 대한전기학회 1999년도 춘계학술대회 논문집, pp.58-61, 1999. 5. 28.
- [4] M. Noroozi, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Andersson, "USE OF UPFC FOR OPTIMAL POWER FLOW CONTROL". IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997
- [5] L. Gyugyi, C.D. Schauder, K.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, January 1997
- [6] V. Ajjarapu, C. Christy, "The Continuation Power Flow : A Tool for Steady State Voltage Analysis", IEEE Trans. Power System, Vol. 7, No. 1, Feb. 1992