

SSSC를 이용한 전력조류제어에 관한 연구

나완기 정재길 이인용 정인학 이홍주
 중앙대 전자전기공학부

A Study of the Power Flow Control Using SSSC

Wan-Ki Na, Jai-Kil Chung, In-Yong Lee, In-Hark Chung, Hong-joo Lee
 School of Electrical and Electronic Engineering, Chung-Ang Univ.

Abstract - This paper describes a modeling of a FACTS(Flexible AC Transmission System) device, namely, SSSC(Static Synchronous Series Compensator) model. The SSSC, a solid-state voltage source inverter coupled with a transformer, is connected in series with a transmission line. 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. The paper discusses the basic operating and performance characteristics of the SSSC, and power flow control in power system.

지의 평형을 유지하는 기능을 한다. 또한 인버터는 선로 전류에 대해 직각에 약간 못 미치는 지상(90° - α)인 전압의 주입을 통해 교류측으로부터 약간의 유효전력을 흡수함으로써 그 내부손실을 보상하고 직류커패시터의 양단전압(DC전압)을 일정하게 유지시킨다. 따라서 α의 조절을 통해 DC전압을 증가 또는 감소시킬 수 있으며 이에 따라 인버터의 출력전압과 보상무효전력의 크기가 결정된다. 이러한 SSSC의 구성을 그림1에 나타낸다.

1. 서 론

추가적인 송전선로의 건설 없이 송전용량을 상당히 증가시킬 수 있는 하나의 방법이 바로 FACTS(Flexible AC Transmission System)인데, 이를 이용하여 전력 시스템 운용을 안정화시키며, 전력수송설비의 송전용량을 증가시킴으로써 송전선로를 추가로 건설하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있다[1]. FACTS설비의 하나인 SSSC(Static Synchronous Series Compensator)는 전압원 인버터형의 직렬형 FACTS설비로 송전선로에 직렬 변압기를 통하여 연결되어 있다. 선로에 제어 가능한 직렬 보상전압을 공급하여 선로 임피던스의 리액턴스를 증가 또는 감소시키는 직렬 캐패시터나 인덕턴스의 삽입 효과를 내어 선로의 임피던스를 제어함으로써 TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)와 같이 조류를 제어하며, 과도상태에서는 계통의 동요를 효과적으로 감쇄시키는 기능을 한다[2][3][4]. 본 논문에서는 기존의 전압원 인버터 주입모델로부터 유도된 SSSC의 정적인 모델을 기술하고 그 모델을 송전선로에 적용하여 전력조류제어 특성을 보인다. 사례연구로는 SSSC가 설치된 5모선의 전력계통에 대한 모의실험으로서 전력조류의 제어에서의 SSSC의 효용성을 입증하였다.

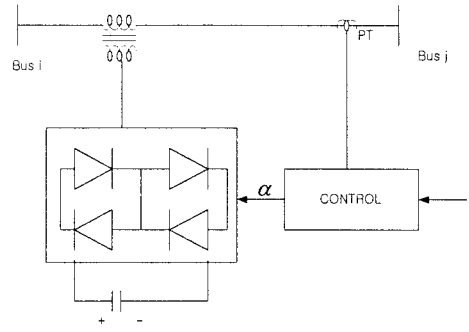


그림 1 : SSSC 구성도

2.2 SSSC 모델링

본 논문에서는 SSSC의 모델링을 부하로 등가 처리하는 주입모델(injection model)을 이용하였다. 그림2와 같이 모선 i와 모선 j 사이의 선로중간에 SSSC가 위치한다면, 직렬 전압원을 모형화하기 위하여 SSSC 설치 선로에 임의의 두 모선이 새로이 추가된다 고 가정하였다.

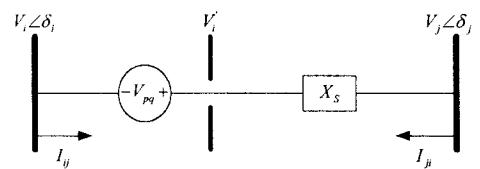


그림 2 : 직렬 전압원의 등가회로

2. SSSC 조류계산 모델

2.1 SSSC의 구성

SSSC는 전압원인버터, 직류캐패시터, 직렬주입변압기, 그리고 제어 및 펄스발생장치로 구성된다. 에너지 저장요소인 직류커패시터는 지속적인 무효전력의 공급과 흡수를 위해 교류와 직류측 단자간에 형성되는 순시에너

모선 i와 모선 j 사이에 직렬전압원이 있다고 하면, 직렬 전압원 인버터는 직렬변압기의 리액턴스 X_s 와 직렬로 연결된 이상 직렬 전압원 \bar{V}_s 로 모형화 할 수 있다. \bar{V}_s 는 이상 전압원이고 \bar{V}'_i 는 직렬리액턴스 배후 가상 전압이다.

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

직렬전압원 \overline{V}_s 는 크기와 위상을 제어할 수 있는 전압원으로 나타낼 수 있다.

$$\overline{V}_s = r \overline{V}_i e^{j\gamma} \quad (2)$$

그림3은 등가회로의 벡터도이다.

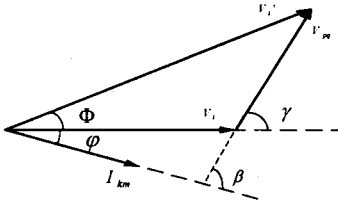


그림 3: 직렬 전압원의 등가회로 벡터도

그림 4와 같은 전류주입 모형은 전압원 \overline{V}_s 를 선로와 병렬인 등가 전류원 $\overline{I}_s = -jb_s \overline{V}_s$ 로 변환하여 식(3)과 식(4)와 같이 전압원 양단 모션전압을 곱하여 주입전력으로 전압원을 등가화 할 수 있다. 여기서 $b_s = 1/X_s$ 이다.

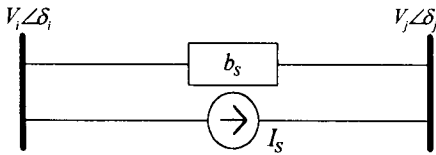


그림 4: 직렬 전압원의 등가 전류원

등가 전류원 \overline{I}_s 는 주입전력 \overline{S}_{is} 과 \overline{S}_{js} 에 상용하므로,

$$\overline{S}_{is} = \overline{V}_i (-\overline{I}_s)^* \quad (3)$$

$$\overline{S}_{js} = \overline{V}_j (\overline{I}_s) \quad (4)$$

주입전력 \overline{S}_{is} 과 \overline{S}_{js} 를 극좌표계로 표현하면 식(5), (6)을 얻을 수 있다.

$$\overline{S}_{is} = \overline{V}_i [jrb_s \overline{V}_i e^{j\gamma}]^* = -b_s r V_i^2 \sin \gamma - jrb_s V_i^2 \cos \gamma \quad (5)$$

$$\overline{S}_{js} = \overline{V}_j [-jrb_s \overline{V}_i e^{j\gamma}]^* = rb_s V_i V_j \sin(\delta_{ij} + \gamma) + jrb_s V_i V_j \cos(\delta_{ij} + \gamma) \quad (6)$$

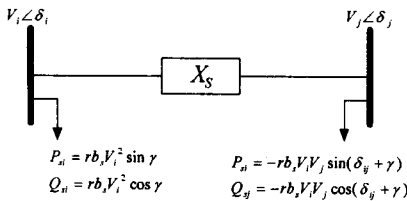


그림 5: 직렬 전압원의 주입모형

2.3 조류계산을 위한 자코비안 행렬의 수정

SSSC주입모델은 조류계산에 간단히 추가 될 수 있다. SSSC가 모션 i와 j 사이에 있다면, 어드미턴스 행렬은 모션 i와 j 사이에 X_s 를 추가하여 수정하고 Jacobian 행렬은 주입전력을 추가하여 수정한다. 수정방정식은 다음과 같다[5].

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (7)$$

표1은 Jacobian 행렬을 수정한 것이다.(첨자 o는 SSSC 투입전의 Jacobian 요소를 나타낸다.)

표 1: 자코비안 행렬의 수정

$H_{(i,i)} = H_{(i,i)}^o$	$N_{(i,i)} = N_{(i,i)}^o + 2P_{si}$
$H_{(i,j)} = H_{(i,j)}^o$	$N_{(i,j)} = N_{(i,j)}^o$
$H_{(j,i)} = H_{(j,i)}^o + Q_{sj}$	$N_{(j,i)} = N_{(j,i)}^o + P_{sj}$
$H_{(j,j)} = H_{(j,j)}^o - Q_{sj}$	$N_{(j,j)} = N_{(j,j)}^o + P_{sj}$
$M_{(i,i)} = M_{(i,i)}^o$	$L_{(i,i)} = L_{(i,i)}^o + 2Q_{si}$
$M_{(i,j)} = M_{(i,j)}^o$	$L_{(i,j)} = L_{(i,j)}^o$
$M_{(j,i)} = M_{(j,i)}^o - P_{sj}$	$L_{(j,i)} = L_{(j,i)}^o + Q_{sj}$
$M_{(j,j)} = M_{(j,j)}^o + P_{sj}$	$L_{(j,j)} = L_{(j,j)}^o + Q_{sj}$

3. 사례연구

본 논문에서 제시한 SSSC의 조류계산 모델과 프로그램의 효용성을 입증하기 위해 모델계통으로서 그림 6의 IEEE 2기 5모션 계통 Hale Network를 선정하여 적용하였다[6]. SSSC의 설치위치는 SSSC의 설치시 가장 큰 효과를 보이는 선로의 중간지점으로 설정하였으며, 그 위치는 North 모션과 Lake 모션 사이의 2번 선로에 설치되었다고 가정하였다. SSSC 주입모델에서 직렬 변압기의 리액턴스는 $X_s = 0.08$ p.u로 사용하였다.

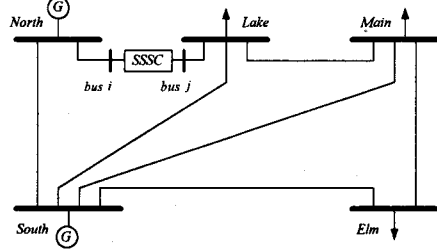


그림 6: 2기 5모션 계통

표 2: 정상상태 2기 5모션 계통 전력조류

선로번호	모션	유효전력 (MW)	무효전력 (Mvar)
1	North -> South	89.09	-8.75
2	North -> Lake	40.76	2.60
3	South -> Lake	24.77	5.50
4	South -> Main	28.02	5.47
5	Main -> Elim	6.50	3.41

표 3: SSSC 설치 계통의 전력조류(r=0.09)

선로번호	모션	유효전력 (MW)	무효전력 (Mvar)
1	North -> South	108.66	68.44
2	North -> Bus i	22.42	20.60
2'	Bus j -> Lake	22.56	23.61
3	South -> Lake	33.03	-5.10
4	South -> Main	34.55	-3.70
5	Main -> Elim	3.33	1.70

표2는 IEEE 2기 5모선 계통 Hale Network의 기본 조류계산을 나타내었고, 표 3은 그림 6과 같이 2번 선로에 SSSC 설치시의 조류계산 결과를 나타낸 것이다 ($r=0.09$).

2번 모선을 살펴보면 SSSC 미설치시에 40.76MW의 유효전력이 흐르는데, SSSC 설치시 22.42MW의 유효전력이 흐름을 알 수 있다. r 값을 0.06으로 주어졌을 경우에는 2번 선로에 28.79MW가 흐르고, $r=0.03$ 일 경우에는 35.19MW가 흐른다. 따라서 r 값이 클수록 조류 제어 범위는 넓어진다.

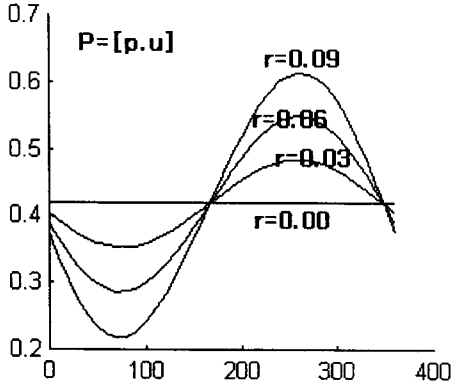


그림 7 : 주입전압의 크기와 위상각에 대한 SSSC 설치 2번 선로의 유효전력조류의 변화

그림 7은 SSSC의 주입전압의 크기와 위상각에 대한 SSSC 설치선로의 유효전력조류의 변화를 보여준다. $r=0.09$ 일 때, 유효전력조류의 제어범위는 Base Case 조류의 50%인 $\pm 0.2(p.u.)$ 이고, $r=0.06$ 일 때는 대략 40%인 $\pm 0.16(p.u.)$, $r=0.03$ 일 때는 17%인 $\pm 0.07(p.u.)$ 의 유효전력조류가 제어되었다.

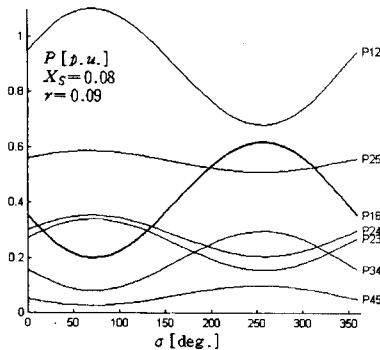


그림 8 : 2번 선로에 SSSC 설치 시 위상각에 대한 전력계통의 유효전력조류의 변화

위의 그림 8은 SSSC 설치 선로의 조류제어에 따른 전체 계통의 유효전력 조류를 보여준다. 가장 큰 영향을 받는 선로는 SSSC 설치 선로인 2번 선로와 이와 연결된 North모선으로 연결된 1번 선로이다. 즉, 2번 선로 조류의 변화만큼 1번 선로의 조류가 같이 변함을 알 수 있다. 이는 North모선의 발전전력은 변하지 않으므로 2번 선로의 전송전력의 증가는 1번 선로의 전송전력의 감소로 나타남을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 조류계산을 위해 실제계에 적용할 수 있는 SSSC의 모델을 기존의 전압원 인버터 주입모델로 나타내었고, 이를 조류계산프로그램에 적용하였다. 사례연구에서는 모선전압의 0.09 p.u의 전압을 주입함으로써 SSSC가 설치된 선로의 유효전력 조류의 변화를 확인할 수 있었고 따라서 SSSC의 조류제어 효율성을 입증하였다. SSSC의 조류제어 해석으로 SSSC의 주입전압에 의한 영향은 SSSC 설치 선로에서 가장 크게 받음을 알 수 있었고 그 다음으로 SSSC 설치 선로의 양단 모선과 연결된 선로의 조류가 영향을 많이 받음을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국전기연구소, "FACTS에 의한 송배전 계통의 용량증대 기술 개발", 1998
- [2] LG산전 전력연구소, FACTS 시스템 구성요소 분석 중점별 FACTS 설비 기술, 1998
- [3] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, "Understanding FACTS", IEEE PRESS, 1999
- [4] 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
- [5] H. Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1999
- [6] G. W. Stagg & A. H. EI-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw-Hill, 1968