

SSSC 투입에 따른 연계선로의 송전운용한계 개선

김슬기* · 송화창* · 이병준* · 권세혁* · 장병훈**
*고려대학교 전기공학과 **한전 전력연구원

Enhancement of Interface Flow Limit using Static Synchronous Series Compensator(SSSC)

Seulki Kim* · Hwachang Song* · Byongjun Lee* · Sae-Hyuk Kwon* · Byunghoon Chang**
*School of Electrical Engineering, Korea University **KEPRI

Abstract - This paper introduces a power flow model of SSSC for voltage stability study. The SSSC model is obtained from the injection model of voltage source inverter by adding the condition that SSSC injection voltage is in quadrature with current of SSSC-installed branch. This model is incorporated into modified CPF algorithm to study effects of SSSC on the security-constrained interface flow limit. Determination of interface flow limit is simply briefed. In case study a 771-bus real system is used to show that SSSC can improve interface flow limit in terms of voltage stability.

1. 서 론

최근, 사회생활의 고도화와 정보사회의 진보로 인한 전력수요의 급속한 증대와 함께 전력계통은 대도시로의 수요집중 경향을 보이고 있고 동시에 전원의 원격화, 편재화에 의한 송전설비의 장거리화, 대용량화가 진행되고 있다. 이러한 상황에서 전력수송 문제를 송전선로 확충만으로 대처하기에는 송전선로 경과부지 확보의 어려움과 막대한 비용의 소요 등의 뚜렷한 한계가 있으므로 능률적인 전력수송수단 확보와 더불어 기존 설비의 이용을 향상시키기 위한 송전용량 증대 기술 및 고도의 계통 운용기술에 대한 연구의 필요성이 강력히 부각되고 있는 실정이다. FACTS(Flexible AC Transmission System) 기술은 위와 같은 문제에 대한 해결 방안으로 1980년대 말에 미국 EPRI에서 제안된 새로운 개념의 전력시스템 기술로서 최근 빠르게 발전하고 있는 전력용 반도체 기술과 제어기술을 이용하여 송전선로의 임피던스 및 전력조류의 흐름을 제어하여 계통안정도 향상과 송전선로의 송전용량을 극대화시키는 것을 목적으로 한다[1].

본 연구에서는 FACTS 기술 중 대표적인 직렬보상기인 SSSC(Static Synchronous Series Compensator)를 투입했을 때 연계선로의 송전운용한계 증대효과를 검토하기 위하여 SSSC의 전력조류계산 모델을 도출하고, 전력조류방정식에 포함시킨 후, 본 연구자들에 의해 개발된 수정된 연속조류계산 시스템[2]을 이용하여 연계선로의 송전운용한계를 결정한다.

SSSC는 게이트 턴오프 사이리스터(GTO:Gate Turn-off Thyristor)를 기반으로 한 직렬 전압원인버터를 선로에 투입한 형태로서 UPFC(Unified Power Flow Controller)와 달리 직렬 인버터에 에너지를 공급해주는 별도의 에너지원을 가지고 있지 않다. 이로 인해 SSSC 자체에서 유효전력을 공급하거나 소모하지 않으면서 선로전류와 직각의 위상차를 갖는 전압을 선로에 주입하여 선로의 유효전력조류를 제어하게 된다[3,4]. 이러한 점에 착안하여 SSSC 전력조류계산 모델은 기존의 전압원인

버터 주입모델[5]에 선로조류와 주입전압의 위상차가 직각이 된다는 조건을 고려하여 도출한다.

정적인 전압안정도 관점에서 계통의 안전도를 고려한 연계선로의 송전운용한계를 결정하는 방법에 대해 설명하고 사례연구에서는 SSSC를 771모선 계통에 적용하고 이 때 연계선로의 송전운용한계 증대 효과를 검토한다.

2. SSSC 전력조류계산 모델

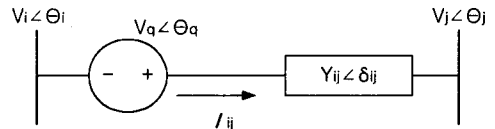


그림 1 직렬 전압원인버터

그림 1은 선로의 어드미턴스가 $Y_{ij} \angle \delta_{ij}$ 인 $i-j$ 선로에 위치한 직렬 전압원 인버터를 나타낸다. 선로에 주입되는 전압을 $V_q \angle \theta_q$ 라고 두고 이 주입전압을 i 모선의 전압 V_i 와 위상각 θ_i 를 기준으로 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} V_q &= rV_i \quad (\text{단, } 0 < r < \Gamma_{\text{MAX}}) \\ \theta_q &= \theta_i + \Gamma \quad (\text{단, } 0 < \Gamma < 2\pi) \end{aligned} \quad (1)$$

r 과 Γ 는 주입전압의 크기와 위상각을 제어하기 위한 제어 변수들인데 SSSC에서는 이 두 제어변수들에 의해 주입전압이 선로전류와 90° 위상차를 가지도록 하면서 선로조류를 제어하게 된다. 이것은 SSSC 자체에서 선로로 유효전력을 공급하거나 반대로 선로로부터 유효전력을 흡수하지 않는다는 것을 의미한다. 따라서 SSSC의 제어특성(i, ii)을 만족하게 하는 r_{SSSC} 와 Γ_{SSSC} 를 결정하고 전압원인버터 주입모델의 r 과 Γ 를 대신함으로써 SSSC 조류계산모델을 얻을 수 있다.

i. 유효전력교류(SSSC ↔ 선로) = 0

$$\begin{aligned} f(V_i, V_j, \theta_{ij}, \Gamma, r) &= \text{Real}[V_q I_{ij}^*] = 0 \\ V_i \cos(\Gamma - \delta_{ij}) + r V_i \cos \delta_{ij} - V_j \cos(\theta_{ij} + \Gamma - \delta_{ij}) &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

ii. j 모선에 전달되는 유효전력은 원하는 전력조류 P_{DES}

$$\begin{aligned} g(V_i, V_j, \theta_{ij}, \Gamma, r) &= P_{DES} - P_j^{\text{total}} = 0 \\ P_{DES} - V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_{ij}) + V_j^2 Y_{ij} \cos \delta_{ij} \\ - r V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_{ij} + \Gamma) &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

두 식(2)와(3)으로부터 r_{SSSC} 과 Γ_{SSSC} 를 구하고 직렬 전압원 인버터 모델의 선로 양단에 추가된 의존부하에 대입해서 도출한 SSSC 모델을 그림 2에서 보였다.

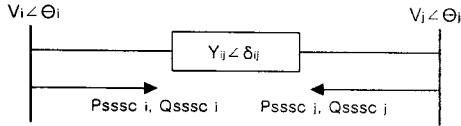


그림 2 SSSC의 전력조류계산 모델

$$\begin{aligned}
 P_{SSSCi} &= r_{SSSC} V_i^2 Y_{ij} \cos(\delta_{ij} + \Gamma_{SSSC}) \\
 P_{SSSCj} &= -r_{SSSC} V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} + \delta_{ij} + \Gamma_{SSSC}) \\
 Q_{SSSCi} &= -r_{SSSC} V_i^2 Y_{ij} \sin(\delta_{ij} + \Gamma_{SSSC}) \\
 Q_{SSSCj} &= r_{SSSC} V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_{ij} + \delta_{ij} + \Gamma_{SSSC}) \quad (4)
 \end{aligned}$$

SSSC를 투입함으로써 설치 선로 양단 모선(i, j 모선)에 $V_i, V_j, \delta_{ij}, \theta_{ij}, r, \Gamma$ 등의 변수로 이루어진 의존부하가 더해지는데 식(5)와 같이 i번째와 j번째 모선의 전력방정식의 부하부분(P_L, Q_L)에 의존부하를 추가하여 수정한다. 의존부하가 상태변수(V_i, V_j, θ_{ij})를 가지는 식으로 표현되므로 전력방정식의 재구성에 따른 자코비안 행렬의 수정이 필요하다.

$$\begin{aligned}
 P_G - P_L &= P_T \\
 Q_G - Q_L &= Q_T \quad (5)
 \end{aligned}$$

선로(i-j)에 SSSC가 투입된다면 SSSC에 의한 의존부하가 i 모선과 j 모선에 투입되므로 기존의 자코비안의 ij 모선에 해당하는 성분을 다음과 같이 간단히 수정할 수 있다. 표 1에서 위 첨자 0이 붙은 성분은 SSSC 투입 전의 자코비안 성분을 나타낸다.

표 1 자코비안 행렬의 수정

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

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

3. 연계선로의 송전운용한계 결정절차

연계선로의 송전운용한계는 계통에 가장 심각한 상정 사고를 일으키더라도 계통이 정적인 전압 불안정점에 이르지 않는 건전 계통의 최대 연계선로조류를 의미하고 결정하는 절차는 다음과 같다. 그림 3은 연계선로의 송전운용한계 결정 절차에 대한 개념도이다.

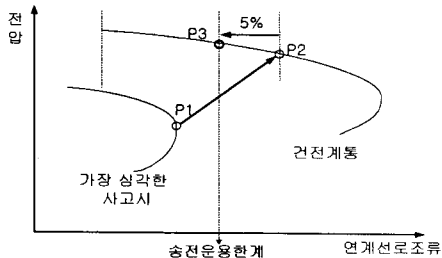


그림 3 연계선로의 송전운용한계 결정

1. 심각한 상정사고 후보선로들을 찾고 상정사고를 실시하여 각각에 대해 연계선로조류-전압 곡선을 그린다.
2. 사고 시 최대 연계선로조류와 초기조류의 차(선로조

류 여유라고 하기로 한다)가 가장 작은 사고를 가장 심각한 상정사고로 한다.

3. 가장 심각한 상정사고를 실시한 계통의 연계선로조류-전압 곡선의 임계점(P1)에서의 계통의 발전력분배와 동일한 발전력분배를 갖는 건전 계통에서의 연계선로조류(P2)를 구한다.
4. CIGRE 전압안정도 기준에 의한 계통의 불확실성을 고려해서 3단계에서 구한 연계선로조류(P2)보다 5% 적은 연계선로조류(P3)를 송전운용한계로 결정한다.

4 사례연구

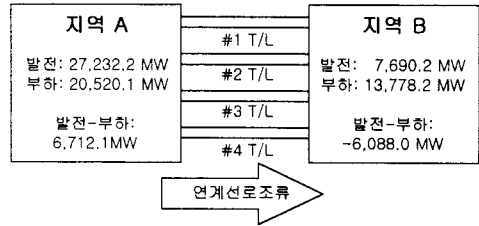


그림 4 771모선 대규모 계통의 연계선로조류

771모선의 실 계통을 이용해 SSSC를 계통에 투입함에 따른 연계선로조류의 운용한계 증대효과를 정적인 전압안정도 관점에서 알아본다.

이 계통은 771개의 모선과 1437개의 선로로 이루어져 있으며 그림 4와 같이 발전단가가 낮은 발전기들이 많은 지역A에서 지역A에 비해 상대적으로 발전기들의 발전단가가 높고 부하가 집중되어 있는 지역 B로 각각 2회선을 갖는 4개의 EHV(Extra High Voltage) 연계선로들(#1 T/L, #2 T/L, #3 T/L, #4 T/L)을 통해 일부 전력을 공급하고 있다. 현재 계통전체의 발전과 부하는 각각 34922MW, 34298.3MW이며 계통전체의 선로손실은 624.1MW 이고 지역 A에서 지역 B로 EHV 연계선로를 통해 전력을 공급하고 있다.

771모선 대규모 계통의 두 지역 A와 B를 연결하는 연계선로의 송전운용한계를 SSSC 투입 전과 투입 후로 나누어 산정하고 비교하여 SSSC 투입을 통한 운용한계를 증대효과를 검토한다. 고려하는 상정사고는 연계선로 4개 선로(각 2회선 선로)의 N-2 선로사고이다.

4.1 SSSC 투입전의 연계선로의 송전운용한계

표 2에서 선로조류여유가 276.4MW로 가장 작은 1번 선로사고가 가장 심각한 사고이다. 1번 선로사고 시 임계점에서의 계통의 발전력분배와 동일한 발전력분배를 갖는 건전 계통상태에서의 연계선로조류는 5842.4MW이고 계통의 불확실성을 고려하여 이보다 5%가 작은 5550.3MW를 송전운용한계로 결정한다.

표 2 각 연계선로의 사고시 선로조류여유

계통상태	선로조류여유[MW]
건전 계통	1,404.3
#1 T/L 사고	276.4
#2 T/L 사고	1,183.8
#3 T/L 사고	1,035.7
#4 T/L 사고	289.9

표 3 건전계통과 1번 및 4번 사고 시 연계선로조류

연계선로	건전계통 [MW]	1번 사고 [MW]	4번 사고 [MW]	선로용량 [MVA]
#1 T/L	1499.9	0	1687.4	4384
#2 T/L	830.0	1501.9	1169.7	2192
#3 T/L	1228.7	1536.8	2377.1	4384
#4 T/L	2010.8	2286.9	0	4384

4.2 SSSC 제어 전략 및 투입 시나리오

심각한 선로사고 시에 SSSC를 투입하여 임계점에서 선로조류여유를 증가시킴으로써 송전운용한계를 증대시킨다. 표 2에서 1번 사고와 4번 사고가 심각한 선로 사고이다.

■ 1번 선로사고 : 2번 선로에 많은 조류가 실려서 선로 용량에 근접할 위험이 있다(표 3). 선로용량의 여유가 충분한 3번 및 4번 연계선로의 조류를 증가시켜 사고 시 2번 선로로 집중되는 조류를 분담하도록 한다.

■ 4번 선로사고 : 4번 선로에 흐르던 조류의 대부분이 3번 선로를 통해 전달되는데 3번 선로의 경우 아직 선로 용량까지 충분한 여유가 있으므로 선로보상을 해서 4번 선로에 흐르던 조류를 최대한 많이 담당하도록 한다.

이러한 제어전략을 바탕으로 다음 두 가지의 투입 시나리오로 계통에 적용한다.

시나리오 1 3번 연계선로 1.2회선에 SSSC 2기 설치

1번 선로사고-3번 선로 최대보상($r_{MAX} = 0.1$)

4번 선로사고-3번 선로 최대보상($r_{MAX} = 0.1$)

시나리오 2 3번 연계선로 1.2회선과 4번 연계선로 1.2회선에 SSSC 4기 설치

1번 선로사고-3번 선로와 4번 선로를 최대보상($r_{MAX} = 0.1$)

4번 선로사고-3번 선로 최대보상($r_{MAX} = 0.1$)

4.3 SSSC 투입에 따른 송전운용한계 증대

표 4와 표 5는 1번 및 4번 선로 사고 시에 시나리오 1과 표 2에 의한 초기조류의 변화를 보인 것이다.

시나리오 1의 결과 선로여유조류가 1번 사고와 4번 사고 시 각각 406.8MW, 543.4MW로 증가되었다. 1번 사고가 여전히 가장 심각한 사고이며 이로부터 송전운용한계를 결정하면 5676.3MW로서 투입 전의 5550.3MW에 비해 123.0MW가 증대되었다. 이때 3번 선로 2회선에 설치된 SSSC 각각의 용량이 100Mvar로 총 200Mvar의 용량이 투입되었다(그림 5와 표 6).

시나리오 2의 결과 표 6에서 보듯이 1번과 4번 사고 시의 선로조류여유가 각각 563.0MW, 543.4MW로 증가되었다. 그 결과 심각한 선로사고가 1번 사고에서 4번 사고로 바뀌었고 이 때의 송전운용한계는 5831.3MW이다. 3번 선로에 설치된 SSSC 투입용량이 각각 84Mvar이고 4번 선로의 경우 각각 150Mvar와 111Mvar로 총 482Mvar의 용량이 투입되었다(그림 6과 표 6).

표 4 1번 사고 시 연계선로의 초기조류 변화

연계선로	투입전 [MW]	시나리오1 [MW]	시나리오2 [MW]
#1 T/L	0	0	0
#2 T/L	1501.9	1419.8	1341.5
#3 T/L	1536.8	1894.0	1665.1
#4 T/L	2286.9	2055.4	2439.9

표 5 4번 사고 시 연계선로의 초기조류 변화

연계선로	투입전 [MW]	시나리오1 [MW]	시나리오2 [MW]
#1 T/L	1687.4	1629.8	1629.8
#2 T/L	1169.7	1065.2	1065.2
#3 T/L	2377.1	2,616.4	2616.4
#4 T/L	0	0	0

표 6 SSSC 투입에 의한 송전운용한계

	투입 전	시나리오1	시나리오2
1번 사고 시 선로조류여유	276.4 MW	406.8 MW	563.0 MW
4번 사고 시 선로조류여유	288.9 MW	543.4 MW	543.4 MW
송전운용한계	5550.3 MW	5676.3 MW	5831.3 MW
투입용량		200 MVar	482 MVar

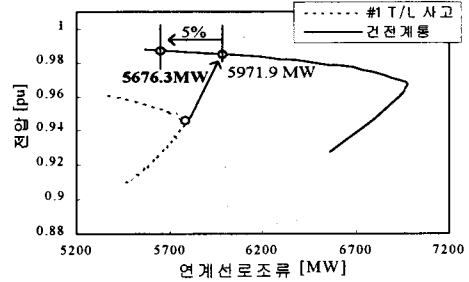


그림 5 시나리오 1의 송전운용한계

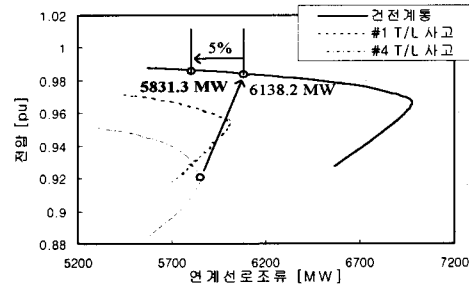


그림 6 시나리오 2의 송전운용한계

5. 결론

본 논문에서는 FACTS 기기 중 대표적인 직렬보상 기기인 SSSC의 선로조류제어를 통해 연계선로의 송전운용한계를 증대시키는 효과를 검토하고자 SSSC 전력조류계산 모델을 도출하여 수정된 연속조류계산 시스템에 통합시키고 실 계통에 적용하였다.

SSSC에 의한 주입전압이 선로전류와 직각의 위상차를 가지면서 선로의 조류를 제어하는 특성을 기존의 전압원 인버터 주입모델에 적용하여 설치선로 양단 모선에 의존부하의 형태로 표현된 새로운 SSSC 전력조류계산 모델을 도출하였고 771 모선 실 계통을 이용해 모의함으로써 SSSC에 의한 상당한 연계선로의 송전운용한계 증대효과를 확인 할 수 있었다. 그러나 본 연구는 그 기능적인 측면만을 고려한 것으로 FACTS 기술의 실 계통 적용을 위해서는 최적의 투입위치와 투입용량을 결정하기 위한 연구뿐만 아니라 철저한 종합적인 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- [1] 한국전기연구소, FACTS 엔지니어링 기술 제3차Workshop 자료집, 1998.
- [2] 김술기, 송화창, 이병준, 권세혁, "연속알고리즘을 이용한 연계선로의 송전운용한계 결정", 대한전기학회 논문지 제 49권 제2호, 2000년 2월, pp.78-84.
- [3] L. Gyugyi, C. Schauder, and K. K. Sen, "Static synchronous series compensator : a solid-state approach to the series compensation of transmission lines", IEEE PES Winter meeting, pp. 150-159, 1996.
- [4] L. Gyugui, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, and A. Edirs, "The Unified Power Flow Controller : A New Approach to Power Transmission Control," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, April 1995.
- [5] M. Noroozian, L. Ångquist, M. Ghandhari, and G. Andersson, "Use of UPFC for Optimal Power Flow Control," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, Oct. 1997.