

A Study on Effects of SSSC Controllers on Interface Flow Limit

宋 和 昌* · 李 炳 峻** · 權 世 熾*** · 金 슬 기[§]

(Hwachang Song · Byongjun Lee · Sae-Hyuk Kwon · Seulki Kim)

Abstract - This paper introduces a power flow model of SSSC for voltage stability analysis of power system installed with Static Synchronous Series Compensators. 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 interface flow limit can be improved by appropriate control of SSSC in terms of voltage stability.

Key Words : power flow model of SSSC, steady-state voltage stability, interface flow limit, modified CPF

1. 서 론

최근, 사회생활의 고도화와 정보사회의 진보로 인한 전력 수요의 급속한 증대화와 함께 전력계통은 대도시로의 수요 집중 경향을 보이고 있고 동시에 전원의 원격화, 편재화에 의한 송전설비의 장거리화, 대용량화가 진행되고 있다. 한편, 수요의 급속한 증가에 따른 발전설비의 확충은 생산된 전기를 수송할 전력수송설비의 규모를 증가시키고, 그 구성을 복잡하게 함에 따라 계통사고의 빈도가 증가하고 사고가 계통에 미치는 영향이 심각해지는 등 전력의 안정적인 공급에 대한 사회적 관심이 고조되고 있다. 이러한 전력수송 문제를 송전선로 확충만으로 대처하기에는 송전선로 경과부지 확보의 어려움과 막대한 비용의 소요 등의 뚜렷한 한계가 있으며, 따라서 능률적인 전력수송수단 확보와 더불어 기존 설비의 이용율을 향상시키기 위한 송전용량 증대 기술 및 고도의 계통운용기술에 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 기존의 기계식 개폐제어 장치의 한계를 극복함으로써 제

어가 곤란하였던 교류송전선로의 임피던스 및 전력조류의 흐름을 제어하여 계통안정도 향상과 송전선로의 송전용량을 극대화시키는 것을 목적으로 한다[1].

본 연구에서는 이러한 FACTS 기술 중 대표적인 직렬보상기인 SSSC(Static Synchronous Series Compensator)를 투입하여 적절하게 제어했을 때, 연계선로의 송전용량 증대효과를 검토하기 위하여 SSSC의 전력조류계산 모델을 도출하고, 전력조류방정식에 포함시킨 후, 본 연구자들에 의해 개발된 수정연속조류계산 시스템[6]을 이용하여 연계선로의 송전용량한계를 산정한다. 일반적인 전압안정도 해석에서는 유효전력 여유[7]를 계산하는 데 계통 파라미터로 부하 증가가 이용되는 반면, 참고문헌 [6]에서는 수정연속조류계산을 이용한 f-V 해석으로서 선로조류 여유를 계산하기 위해 발전이동을 계통 파라미터로 이용하는 해석 방법을 제시하였다. 이는 같은 부하상태에서의 유효전력의 운용한계를 계산하는 데 있어서 유용하다.

2장에서 SSSC(Static Synchronous Series Compensator)의 전력조류계산 모델을 제시하고 이 모델에 의해 수정되는 자코비안행렬을 보인다. SSSC는 UPFC(Unified Power Flow Controller)와 달리 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[2,3]. 이러한 점에 착안하여 SSSC 전력조류계산 모델은 기존의 전압원인버터 주입모델[4]에 선로조류와 주입전압의 위상차가 직각이 된다는 조건을 고려하여 도출한다. 3장에서는 수정된 연속조류계산에 대해 간단히 언급하고 SSSC 조류계산 모델을 적용하는 과정을 보인다. 또한 정적인 전압안정도 관점에서 계통의 안

* 正 會 員 : 高麗大 電氣 · 電子 · 電波工學部 博士課程

** 正 會 員 : 高麗大 電氣 · 電子 · 電波工學部 副教授 · 工博

*** 正 會 員 : 高麗大 電氣 · 電子 · 電波工學部 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 研究員

接受日字 : 2000年 11月 28日

最終完了 : 2001年 2月 12日

전도를 고려한 연계선로의 송전운용한계를 산정하는 방법에 대해 설명한다. 4장의 사례연구에서는 SSSC를 771모선 실계통에 적용하고 이 때 연계선로의 송전운용한계 증대 효과를 검토하였다.

2. SSSC의 전력조류계산 모델

2.1 SSSC의 정적모델

SSSC를 통해 선로에 주입되는 전압은 선로전류와 위상이 90° 또는 -90° 차이를 가지면서 선로조류를 제어하는데 이것은 SSSC 자체에서 선로로 유효전력을 공급하거나 반대로 선로로부터 유효전력을 흡수하지 않는다는 것을 의미한다. 이 절에서는 직렬 전압원인버터 주입모델[4]에 이러한 SSSC 제어특성을 고려해서 전력조류계산 모델을 도출한다.

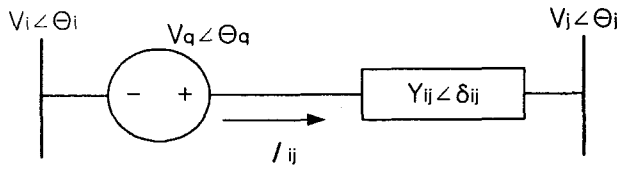


그림 1 직렬 전압원인버터
Fig. 1 Series Voltage Source Inverter

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.

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

r 과 Γ 는 주입전압의 크기와 위상각을 제어하기 위한 제어 변수들인데 SSSC에서는 이 두 제어변수들에 의해 주입 전압이 선로조류와 90° 위상차를 가지도록 하면서 선로에 흐르는 조류를 제어하게 된다. 따라서 SSSC의 제어특성 (i, ii)을 만족하게 하는 r_{SSSC} 와 Γ_{SSSC} 를 결정하고 전압원인버터 주입모델의 r과 Γ 를 대신함으로써 SSSC 조류계산 모델을 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 유효전력 = 원하는 전력조류 P_{DES}

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

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

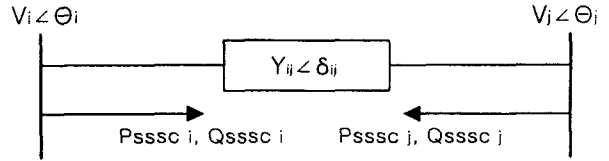


그림 2 SSSC의 전력조류계산 모델
Fig. 2 Static Model of SSSC

위 그림에서의 의존부하성분들은 다음과 같이 나타낸다.

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

2.2 자코비안 행렬의 수정

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 이를 전력조류방정식에 포함시키려면 식(5)와 같이 i번째와 j 번째 모선의 전력방정식의 부하부분(P_L, Q_L)에 의존부하를 추가하면 된다. 의존부하가 상태변수(V_i, V_j, θ_{ij})를 가지는 식으로 표현되므로 전력방정식의 재구성에 따른 자코비안 행렬의 수정 또한 필요하다.

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

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 투입전의 자코비안 성분을 나타낸다.

표 1 자코비안 행렬의 수정

Table 1 Modification of Jacobian Matrix

$H_{i,i} = H_{i,i}^0$	$N_{i,i} = N_{i,i}^0 + 2P_{\text{SSSC}i}$
$H_{i,j} = H_{i,j}^0$	$N_{i,j} = N_{i,j}^0$
$H_{j,i} = H_{j,i}^0 + Q_{\text{SSSC}j}$	$N_{j,i} = N_{j,i}^0 + P_{\text{SSSC}j}$
$H_{j,j} = H_{j,j}^0 - Q_{\text{SSSC}i}$	$N_{j,j} = N_{j,j}^0 + P_{\text{SSSC}i}$
$J_{i,i} = J_{i,i}^0$	$L_{i,i} = L_{i,i}^0 + 2Q_{\text{SSSC}i}$
$J_{i,j} = J_{i,j}^0$	$L_{i,j} = L_{i,j}^0$
$J_{j,i} = J_{j,i}^0 - P_{\text{SSSC}j}$	$L_{j,i} = L_{j,i}^0 + Q_{\text{SSSC}j}$
$J_{j,j} = J_{j,j}^0 + P_{\text{SSSC}i}$	$L_{j,j} = L_{j,j}^0 + Q_{\text{SSSC}i}$

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

3. SSSC 모델의 수정된 연속조류계산 알고리즘에의 적용

3.1 수정된 연속조류계산 알고리즘

연계선로 송전한계를 결정하기 위해서 기존의 연속조류계산 프로그램을 수정하여 개발한 수정된 연속조류계산 시스템[6]에 SSSC 전력조류계산 모델을 통합한다.

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 3에서 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[5].

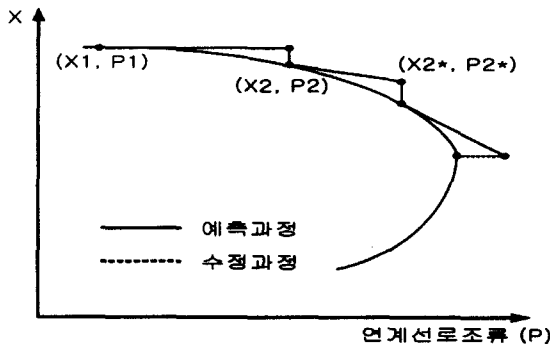


그림 3 연속조류계산 알고리즘의 개념도
Fig. 3 Concept of Continuation Power Flow

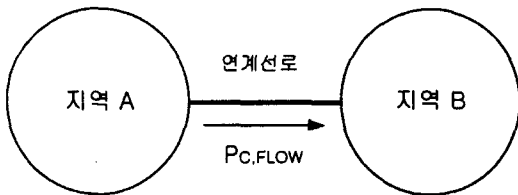


그림 4 연계선로를 가지는 계통
Fig. 3 Two-region System with Interface Lines

그림 4와 같은 연계계통에서 연속알고리즘 기법을 이용하여 고정된 부하수준에서 전압안정도 관점의 송전 가능한 최대 연계선로조류를 구하기 위해서 기존의 연속조류계산에 적용되는 전력조류방정식을 식(10a)와 (10b)와 같이 재구성한다. 발전 파라미터 λ를 이용하여 계통내의 두 지역(지역 A와 B)의 발전량을 각각 조절하고 이를 통해 두 지역을 연결하는 연계선로의 조류를 증가시켜 그 임계점을 구한다.

지역B의 발전기 모선의 경우

$$P_{Gi} = P_{Gio} - \lambda k_{GBi} P_{GBo, total} \quad (10a)$$

지역A의 발전기 모선의 경우

$$P_{Gi} = P_{Gio} + k_{GAi} \Delta P_{GB, total} \quad (10b)$$

$$\Delta P_{GB, total} = \sum_{i=N_{Ga}+1}^{N_G} \lambda k_{GBi} P_{GBo, total}$$

P_{Lio}, Q_{Lio} : 모선 i의 원래 부하의 유효전력, 무효전력

P_{Gio}, Q_{Gio} : 모선 i의 원래 유효전력, 무효전력 발전

k_{GAi} : 지역A의 총 발전증가 중 모선i의 부담률

k_{GBi} : 지역B의 총 발전감소 중 모선i의 부담률

$P_{GBo, total}$: 지역B의 원래 총 유효전력 발전

$\Delta P_{GB, total}$: 지역B의 총 발전감소

여기서 파라미터 λ의 변화에 따라 계통의 발전력 분배상 태는 변하고 두 지역을 연결하는 연계선로의 선로조류 역시 변하게 된다. 지역 B가 A에 비해 상대적으로 발전단가가 낮다면 λ가 큰 값을 가질수록 지역 B의 발전량은 증가하고 지역 A의 발전량은 감소하게 되어 연계선로를 통해 지역B에서 A로 송전되는 조류가 많아지고 계통은 경제적으로 운용되어 지고 있음을 의미한다.

3.2 SSSC 조류계산 모델의 적용

그림 5에서는 SSSC를 수정된 연속조류계산 시스템에 포함시킬 때의 순서도를 보이고 있다.

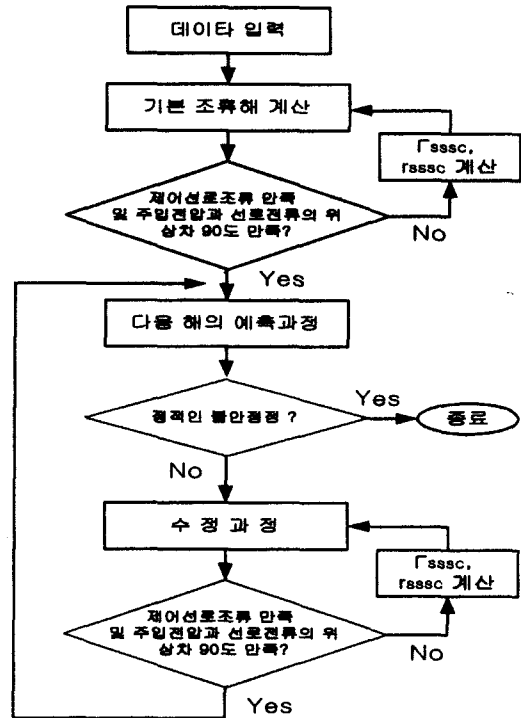


그림 5 SSSC 조류계산 모델의 적용 순서도
Fig. 3 Flow Chart of Application of SSSC Static Model to Continuation Power Flow

앞의 2장에서 제시한 SSSC 전력조류계산 모델과 자코비안의 수정성분은 연속처리 계산방식(Sequential Method)에 근거하여 도출한 것으로 그림 5의 순서도와 같이 조류계산을 하고 그 결과인 계통의 상태변수 V_i, V_j, θ_{ij} 의 값을 기준으로 하여 식(2),(3)을 만족하는 r_{sssc} 와 Γ_{sssc} 를 계산한 뒤 설치선로의 조류가 원하는 값을 가질 때까지 이 과정을 반복 수행한다. 그러나 선로조류가 원하는 값을 가지게 되더라도 SSSC에 의한 주입전압이 선로전류와 90° 또는 -90°의 위상차를 가지는 특성을 나타내는 식 (2)의 조건을 만족하지 않는다면 다시 반복 수행한다. 이를 구체적으로 살펴 보면 다음과 같다.

$$f(V_i^{(i)}, V_j^{(i)}, \theta_{ij}^{(i)}, \Gamma, r) = 0 \quad (6)$$

$$g(V_i^{(i)}, V_j^{(i)}, \theta_{ij}^{(i)}, \Gamma, r) = 0 \quad (7)$$

$$f(V_i^{(i+1)}, V_j^{(i+1)}, \theta_{ij}^{(i+1)}, \Gamma^{(i)}, r^{(i)}) = 0 \quad (8)$$

$$g(V_i^{(i+1)}, V_j^{(i+1)}, \theta_{ij}^{(i+1)}, \Gamma^{(i)}, r^{(i)}) = 0 \quad (9)$$

위의 식(6)과 (7)로부터(식(2)와 (3) 참고) i 번째 반복 수행시의 주입전압의 크기 및 위상각 제어변수인 $r^{(i+1)}$ 과 $\Gamma^{(i+1)}$ 이 계산되고 다시 조류계산과정을 거쳐 식(9)의 제어선로조류 만족여부 및 식(8)의 주입전압과 선로조류의 직각 위상차 조건의 만족여부를 판별하여 수렴여부를 판단하게 된다.

3.3 연계선로의 송전운용한계 결정 절차

계통에 심각한 상정사고를 일으켰을 때의 최대 송전가능 조류로부터 안전도를 고려한 연계선로 송전운용한계와 연계선로조류 여유를 산정한다[6]. 연계선로의 송전운용한계는 계통에 가장 심각한 상정사고를 일으키더라도 계통이 정적인 전압 불안정점에 이르지 않는 건전 계통의 최대 연계선로조류를 의미하고 결정하는 절차는 다음과 같다. 그림 6은 연계선로의 송전운용한계 산정 절차에 대한 개념도이다.

1. 심각한 상정사고 후보선로들을 찾고 상정사고를 실시하여 각각에 대해 연계선로조류-전압 곡선을 그린다.
2. 사고시 최대 연계선로조류와 초기조류의 차(선로조류 여유라고 하기로 한다)가 가장 작은 사고를 가장 심각한 상정사고로 한다. - 임계점에서의 파라미터 λ 의 값이 가장 작은 사고가 가장 심각한 사고이다.
3. 가장 심각한 상정사고를 실시한 계통의 연계선로조류-전압 곡선의 임계점(P1)에서의 계통의 발전력분배와 동일한 발전력분배를 갖는 건전계통에서의 연계선로조류(P2)를 구한다. - 동일한 파라미터 λ 를 갖는 지점의 조류를 구한다.
4. CIGRÉ 전압안정도 기준[7]에 의한 계통의 불확실성을 고려해서 3단계에서 구한 연계선로조류보다 5% 적은 연계선로조류(P3)를 송전운용한계로 산정한다.

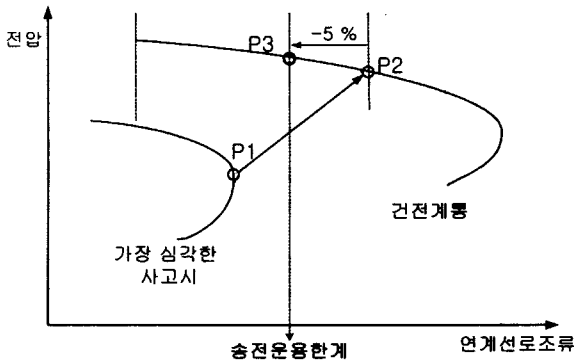


그림 6 연계선로의 송전운용한계 결정

Fig. 6 Illustration of Determining Interface Flow Limit

4. 사례연구

771모선의 실 계통을 이용해 SSSC를 계통에 투입함에 따른 연계선로조류의 운용한계 증대효과를 정적인 전압안정

도 관점에서 알아본다. 본 사례연구에서 사용한 계통은 771개의 모선과 1437개의 선로로 이루어져 있으며 그림 7과 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.

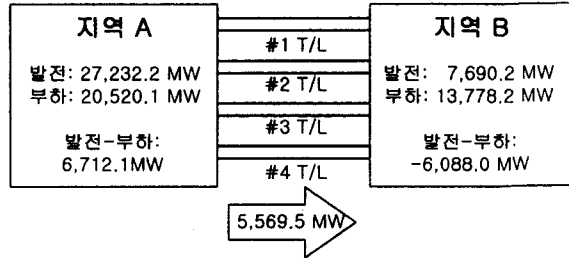


그림 7 771모선 대규모 계통의 연계선로조류

Fig. 7 Interface Flow of 771-bus System

기본상태에서의 계통전체의 발전과 부하는 각각 34,922 MW, 34,298.3 MW이며 계통전체의 선로손실은 624.1 MW 이고 지역 A에서 지역 B로 EHV 연계선로를 통해 5,569.5 MW의 전력을 공급하고 있다. HV(High Voltage) 선로를 통해서도 일부 전력(518.5 MW)이 공급되고 있으나 본 논문에서는 이 4개의 EHV 연계선로에 의한 송전능력을 검토하는데 초점을 맞춘다. 계통운용 특성으로 인해 지역A에서 지역B로 많은 전력을 공급할수록 계통의 보다 경제적인 운용이 가능하다.

3장에서 설명한 절차를 통해 771모선 대규모 계통의 두 지역 A와 B를 연결하는 연계선로의 송전운용한계를 SSSC 투입 전과 투입 후로 나누어 산정하고 비교하여 SSSC 투입을 통한 운용한계의 증대효과를 보이고자 한다. 본 연구에서 고려하는 계통의 상정사고는 이미 이 계통에서의 심각한 사고로 인정되는 연계선로 4개 선로(각 2회선 선로)의 N-2 선로사고로 제한한다.

연계선로조류 제어를 위해서 지역 A와 B에서 발전기들의 투입시나리오는 다음과 같다.

- 지역A에서는 발전단가가 낮은 순서로 다음 7개의 발전기 모선(#745, #746, #760, #761, #762, #768, #769)에서 발전량을 증가시켰고, 지역B에서는 발전단가가 높은 순서로 다음 7개의 발전기모선(#572, #573, #574, #627, #628, #629, #630)의 발전량을 감소시키면서 연계선로조류를 점차적으로 증가시킨다.

4.1 SSSC 투입전의 연계선로의 송전운용한계

표 2에서 4개의 연계선로 각각에 대해 선로 사고 시 초기조류와 임계점에서의 조류를 비교하여 볼 때 1번 선로 사고의 경우가 두 조류간의 차이가 276.4 MW로 가장 작으므로 가장 심각한 사고로 본다. 발전 파라미터 λ 를 이용하여 1번 선로 사고 시 임계점에서의 계통의 발전력분배와 동일한 발전력분배를 갖는 건전 계통상태에서의 연계선로조류는 5,842.4 [MW]인데 계통의 불확실성을 고려하여 이보다 5%가 작은 5,550.3 [MW]를 송전운용한계로 결정한다. 결국 건

전 계통 시 연계선로에 5,550.3[MW]의 조류가 흐르고 있을 때 1번 선로가 끊어진다면 계통이 정적인 전압불안정점 근방에 이르게 됨을 의미하므로 현재 부하 및 발전력분배 상태에서 연계선로에 5,550.0 [MW]보다 많은 조류가 흐르면 선로사고에 대한 계통의 안전성을 보장할 수 없다.

표 2 각 연계선로의 사고시 선로조류여유

Table 2 Interface Flow Margin at each contingent state

	초기조류 [MW]	임계조류 [MW]	선로조류여유 [MW]
건전계통	5,569.5	6,973.8	1,404.3
#1 T/L 사고	5,325.6	5,602.0	276.4
#2 T/L 사고	5,486.0	6,669.8	1,183.8
#3 T/L 사고	5,460.2	6,495.9	1,035.7
#4 T/L 사고	5,234.2	5,523.1	288.9

4.2 SSSC 투입 시나리오

가장 심각한 선로사고 시에 SSSC를 투입하여 임계점을 증가시킴으로써 송전운용한계를 증대시킨다. 그림 8의 개념도에서와 같이 심각한 사고 시 SSSC를 통해 특정선로를 보상함으로써 그 임계점이 증가(W→W*)하고 이 임계점들의 계통의 발전력 배분과 같은 상태를 갖는 건전계통의 연계선로조류 지점도 증가(P→P*)하게 되어 송전운용한계가 증대된다.

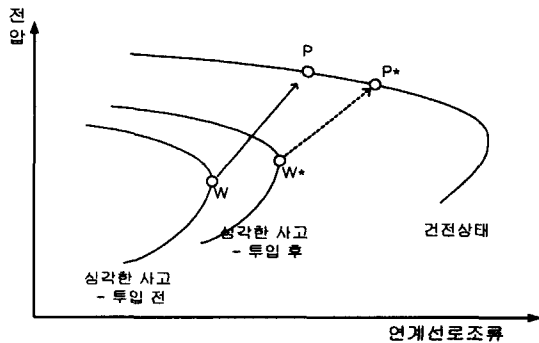


그림 8 송전운용한계 증대 개념도

Fig. 8 Concept of Increasing Interface Flow Limit

먼저 투입시킬 위치를 선정하기 위해 사고 시 각 연계선로의 조류변화를 알아야 하는데 표 3에서 심각한 사고인 1번 사고와 4번 사고의 경우의 각 선로의 조류변화와 한계용량을 나타내고 있다.

표 3 건전계통과 1번 및 4번 사고 시 연계선로조류

Table 8 Interface Flow at Normal and Contingent states

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

SSSC에 의한 송전능력 증대 효과를 검토하기 위하여 다음의 투입 시나리오를 가지고 계통에 적용하였다.

투입시나리오 : 2번 연계선로의 경우 선로용량이 다른

연계선로의 0.5배에 해당하는 2,192 MVA 인데 표 3에서 보는 바와 같이 1번 선로사고 시 이미 1,501.9 MW의 많은 조류가 흐르고 있어 더 많은 조류가 흐르도록 제어한다면 선로용량에 근접할 위험이 있으므로 선로용량의 여유가 충분하고 1번 연계선로에 비교적 가까이 위치한 3번 연계선로 1,2회선에 각각 SSSC 1기를 투입하여 보상하였다. 연계선로의 보상정도는 극대화된 송전한계향상 효과를 검토하기 위해 최대($\Gamma_{MAX} = 0.1$)로 하였다. 4번 사고 시 4번 선로로 흐르지 못하는 조류의 많은 부분을 3번 선로에서 담당하게 되는데 아직 선로용량까지 충분한 여유가 있으므로 3번 선로를 보상하여 더 많은 조류가 흐르도록 한다.

4.3 SSSC 투입에 따른 송전운용한계 증대

표 4와 표 5는 1번 및 4번 선로 사고 시에 SSSC투입에 의한 초기조류의 변화를 보인 것이다. 그림 9과 표 6에서 SSSC 적용 시의 송전운용한계를 나타내고 있다.

투입 시나리오에 따라 제어한 결과 선로여유조류가 1번 사고와 4번 사고 시 각각 276.4MW와 288.9MW에서 406.8 MW, 543.4MW로 증가되었으며 1번 사고가 여전히 가장 심각한 사고이고 이로부터 송전운용한계를 결정하면 5,676.3 MW로 투입전의 5,550.3MW에 비해 126.0MW가 증대되었다. 이때 3번 선로 2회선에 설치된 SSSC에 의해 투입된 각각의 용량은 100Mvar로 총 200Mvar의 용량이 투입되었다.

표 4 1번 사고시 SSSC 투입 전과 투입 후의 각 연계선로의 초기조류 변화

Table 4 Initial Interface Flow with and without SSSC at Outage of Route 1

	투입 전 [MW]	투입 후 [MW]
#1 T/L	0	0
#2 T/L	1,501.9	1,419.8
#3 T/L	1,536.8	1,894.0
#4 T/L	2,286.9	2,055.4
Total	5,325.6	5,369.2

표 5 4번 사고시 SSSC 투입 전과 투입 후의 각 연계선로의 초기조류 변화

Table 5 Initial Interface Flow with and without SSSC at Outage of Route 4

	투입 전 [MW]	투입 후 [MW]
#1 T/L	1,687.4	1,629.8
#2 T/L	1,169.7	1,065.2
#3 T/L	2,377.1	2,616.4
#4 T/L	0	0
Total	5,234.2	5,311.4

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.

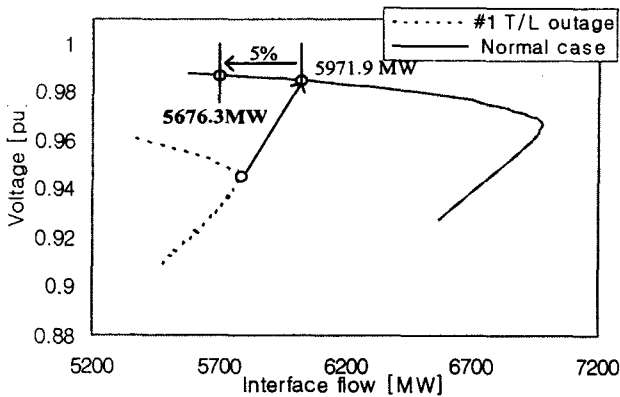


그림 9 3번 선로에 SSSC 투입 시의 송전운용한계
Fig. 9 Determining Interface Flow Limit with SSSC

표 6 SSSC 투입시의 1번 및 4번 사고의 선로조류여유 및 송전운용한계

Table 6 Interface Flow Margins and Operating Limit in 1 and 4 Contingent States

	투입전	SSSC 투입
1번사고시 선로조류여유	276.4 MW ($\lambda=0.2023$)	406.8 MW ($\lambda=0.3055$)
4번사고시 선로조류여유	288.9 MW ($\lambda=0.2165$)	543.4 MW ($\lambda=0.4203$)
송전운용한계	5,550.3 MW	5,676.3 MW
투입용량		200 MVar

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 도출하였는데 기존의 전력조류계산 알고리즘에서 간단한 자코비안의 수정과 조류제어를 위한 r_{SSSC} 와 Γ_{SSSC} 계산 과정의 추가를 통해 용이하게 최대 연계선로조류 계산 프로그램에 통합시킬 수 있었다.

771 모선 실 계통에서 발전단가가 낮은 지역 A에서 발전단가가 상대적으로 높은 지역 B로 전력을 공급하는 8개 (각 2회선의 4개 선로군)의 연계선로의 송전운용한계를 증대시키기 위해 SSSC를 적용하였다. 3번 선로 2회선에 SSSC를 각각 설치한 경우 200Mvar의 용량 투입을 통해 126MW의 증대효과를 보였다.

본 연구에서는 SSSC에 의한 연계선로의 송전운용한계 증대의 가능성만을 검토한 것으로서 FACTS 기술을 실 계통에 적용하기 위해서는 최적의 투입위치와 투입용량을 결정하기 위한 연구가 계속 진행되어야 하며 SSSC 뿐만 아니라 UPFC, STATCOM 등의 다양한 FACTS기기 적용을 통해 계통의 특성 및 목적에 맞는 최적 투입기기 결정에 관한 연구 또한 활성화되어 송전계통의 효율적인 운용에 기여할 수 있도록 해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구과제 연구비에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] 한국전기연구소, FACTS 엔지니어링 기술 제3차 Workshop 자료집, 1998.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 송화창, 이병준, 권세혁, "실용적인 스텝크기 선택 알고리즘을 고려한 연속조류계산 시스템의 개발", 대한전기학회 논문지 제48권 제3호, 1999년 3월, pp.190-196.
- [6] 김슬기, 송화창, 이병준, 권세혁, "연속알고리즘을 이용한 연계선로의 송전운용한계 결정", 대한전기학회 논문지 제49권 제2호, 2000년 2월, pp.78-84.
- [7] CIGRÉ Task Force 38-02-017, "Criteria and Counter-measures for Voltage Collapse", CIGRÉ Brochure No. 101, October 1995

저 자 소 개



송 화 창 (宋 和 昌)

1973년 1월 24일 생. 1997년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기·전자·전파공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.

Tel : 02-3290-3675

E-mail: sunny@elec.korea.ac.kr



이 병 준 (李 炳 峻)

1961년 7월 16일 생. 1987년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 미국 Iowa State Univ. 전기공학과 졸업(석사), 1994년 동 대학원 졸업(공학박). 1994년~1995년 Iowa State Univ. Post Doc. 1995년 ~1996년 일

본 미쯔비시 전기 근무. 현재 고려대 전기·전자·전파공학부 교수.

Tel : 02-3290-3242, Fax : 02-921-1325/0544

E-mail : leeb@elec.korea.ac.kr

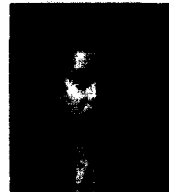


권 세 혁 (權 世 熾)

1949년 5월 14일 생. 1974년 서울대 공대 공업교육과(전기전공) 졸업. 1976년 서울대 교육대학원 공업교육과 졸업(석사). 1980년 미국 Iowa State Univ. 졸업(석사), 1984년 미국 Iowa State Univ. 졸업(공학박). 현재 고려대 전기·전자·전파공학부 교수.

Tel : 02-3290-3220, Fax : 02-921-1325/0544

E-mail : SHKWON@elec.korea.ac.kr



김 슬 기 (金 슬 기)

1972년 5월 7일 생. 1998년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 연구원.

Tel : 055-280-1332

E-mail : blksheep@keri.re.kr