

## TCSC 투입계통의 송전용량 증대에 대한 연구

이 주 호    이 병 준  
고려대학교

### The Effect of Thyristor Controlled Series Capacitor(TCSC) on Power Transfer Capability

Jooho Lee    Byongjun Lee  
School of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - TCSC is a FACTS device that can control the active power flow and current of transmission lines by adjusting line impedances. In this paper, we study the effect of TCSC on power transfer capability. A static model of TCSC is implemented in the continuation power-flow(CPF) program and the power transfer capability is measured using the CPF. The site of TCSC is selected to increase power transfer capability by the sensitivity information provided from the CPF. The effect of TCSC with various control mode is tested in IEEE New England 30-bus system.

#### 1. 서 론

최근, 전력전자 기술 개발에 힘입어 대용량 반도체 스위칭 소자를 이용한 FACTS(Flexible AC Transmission System) 기기가 사용되고 있는데, 이러한 FACTS 기기는 전력 조류를 유연하게 제어함으로써 송전 계통의 수송 능력과 공급 신뢰도, 설비 이용률을 향상시키는 장점이 있다. 현재, 이에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 직렬·병렬 보상 FACTS 기기가 개발되어 실제통에 적용되고 있다[1-3].

본 논문에서는 이러한 FACTS 기기 중에서 송전 선로의 임피던스를 조절하여 무효전력을 공급하고 선로의 유효전력과 전류의 크기를 제어할 수 있는 직렬보상기기인 Thyristor Controlled Series Capacitor(TCSC)의 조류계산 모델을 연속조류계산 알고리즘[4]에 적용시켜 정적인 전압 불안정점에 대한 영향과 송전용량 증대방안을 제안하고 있다. 여기서 구현한 TCSC 모델은 정적 모델[5]을 사용하였으며 정적인 전압 불안정점일 때의 모선의 전압 감도와 선로의 무효전력 손실 감도를 이용하여 TCSC의 효과적인 투입 위치를 결정하였다. 아울러, 투입 위치와 투입량, 그리고 제어방식에 따른 TCSC의 효과를 평가하기 위해 New England 30-모선 계통에 적용하여 유용성을 검증하였다.

#### 2. TCSC의 정적 모델

송전 선로에서 TCSC의 일반적인 구조는 그림 1과 같이 서로 병렬인 고정 캐패시터와 가변 리액터로 구성된 TCSC module이 다단 구조로서 송전 선로에 직렬로 연결되어진다. 이러한 다단 구조는 대용량화가 용이하며 고조파 감소에 유리하게 작용한다. BPS(Bypass Switch)와 MOV(Metal Oxide Varistor)는 기기를 보호하고 신뢰도를 높이기 위한 보호 장치들이다[6].

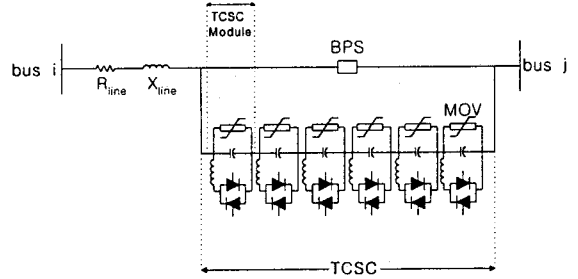


그림 1. 송전 선로에서의 일반적인 TCSC의 구조

TCSC가 투입된 계통의 정적인 해석을 위해서 투입량의 등가 리액턴스를  $X_{TCSC}$ 라 하고 모선 i와 모선 j 사이에 그림 2와 같이 나타낸다[5]. 이 때  $X_{TCSC}$ 의 투입량을 변화시키면서 선로 리액턴스인  $X_{line}$ 값을 보상한다.

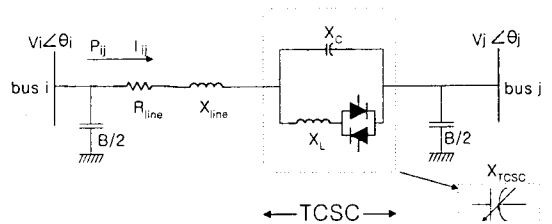


그림 2. TCSC의 등가 회로

이 때의, 송전점과 수신점 간에 전송되는 유효전력과 전류는  $X_{TCSC}$ 값에 따라 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{ij} = \text{Real} \left[ (V_i \angle \theta_i) \cdot \left( \frac{V_i \angle \theta_i - V_j \angle \theta_j}{R_{line} + j(X_{line} + X_{TCSC})} + j \frac{B}{2} V_i \angle \theta_i \right) \right] \quad \dots\dots(1)$$

$$I_{ij} = \frac{V_i \angle \theta_i - V_j \angle \theta_j}{R_{line} + j(X_{line} + X_{TCSC})} + j \frac{B}{2} V_i \angle \theta_i \quad \dots\dots(2)$$

위의 식 (1), (2)로부터 알 수 있듯이 TCSC의 설비용량 범위 내에서 투입량( $X_{TCSC}$ )을 조절하여 송전 선로의 리액턴스값을 직접적으로 보상함으로써 선로의 유효전력과 전류량을 제어할 수 있다. 송전용량 증가나 무효조류 제어, 열용량 한계 문제 등 그 투입 목적에 따라 일정 임피던스 제어와 정전력 제어, 정전류 제어로 그 제어 방식을 분류할 수 있다[5].

○ 일정 임피던스 제어 :  $X_{TCSC} = X_{SET}$

○ 정전력 제어 :  $P_{TCSC} = P_{SET}$

3. 연속조류계산에의 TCSC 정적 모델 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[4]. 그림 3에서 보여 주고 있는 연속조류계산 알고리즘의 과정은 현재의 평형해인 (X1,P1)로부터 다음해의 근사치인 (X2\*,P2\*)를 구하는 예측과정과 이 근사치로부터 다음해의 평형해(X2,P2)를 구하는 수정과정으로 이루어진다.

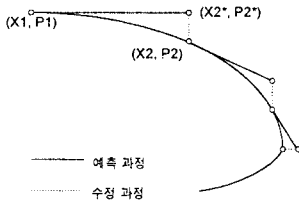


그림 3. 연속조류계산 알고리즘의 개념

TCSC의 정적 모델의 적용은 초기 조류해로부터 시작하여 예측 과정과 수정 과정을 반복하여 조류해의 경로를 찾아가는 연속조류계산 과정 중에 조류계산 기능을 수행하는 수정과정에 포함되어야 한다. 이러한 연속조류계산 알고리즘에서의 TCSC의 적용 절차는 다음과 같다. 먼저 TCSC의 입력 데이터로부터 선로에 투입되는 위치와 투입 최대 용량, 초기 투입량, 허용오차 값, 그리고 제어 모드를 입력받는다. 만약 제어 모드가 일정 임피던스 제어라면 유지하기를 원하는 리액턴스 값 ( $X_{DES}$ )을, 정전력 제어라면 원하는 유효전력 송전값 ( $P_{DES}$ )을, 정전류 제어라면 원하는 선로 전류량( $I_{DES}$ )을 입력받는다. 이 때 일정 임피던스 제어시에는 입력 받은  $X_{DES}$ 값을 투입하고, 정전력, 정전류 제어시에는 TCSC 투입량  $X_{TCSC}$ 를 식 (1), (2)를 이용하여 계산한다. 이렇게 투입량  $X_{TCSC}$ 가 결정되면 Y bus Matrix에 그 투입값을 포함시킨다. 만약 모선 i와 모선 j 사이에 TCSC가 투입된다면 기존의 값에서 변화가 있는 부분은 그림 4와 같이  $Y(i,i)$ ,  $Y(i,j)$ ,  $Y(j,i)$ ,  $Y(j,j)$  4개의 성분이다. 이 때 Y bus Matrix의 sparsity 구조를 고려해 주어야 한다. 변형된 Y bus Matrix로 주입전력과 차코비안을 구성하여 조류 계산을 수행한다. 조류 계산의 결과  $P_{DES}$ ,  $I_{DES}$ 와 모선 i와 모선 j 사이 송전선로의 실제 유효전력 조류치  $P_{ij}$ 와 전류치  $I_{ij}$ 의 차이가 허용오차 안에 있는지 검토한다. 만약 허용오차 안에 있다면 현재 스텝에서의 조류계산을 마치고 다음 예측과정을 수행하며 그렇지 않다면 식 (1), (2)를 이용하여 다시 TCSC의 투입량을 결정하여 위의 단계를 반복한다. 이러한 과정을 정적인 전압 불안정점에 도달할 때까지 반복하여 연속조류계산을 마친다.

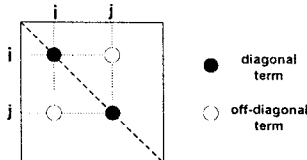


그림 4. Y bus Matrix의 변화 성분

사례연구에 이용된 계통모델은 New England 30 모선 계통이다. 본 사례연구에서는 TCSC 투입 후에 나타나는 송전용량의 증가에 대해서 알아보았다. 먼저 TCSC 투입 전의 연속조류계산을 수행시에 정적인 전압 불안정점에서의 가장 약한 모선은 9번 모선이며, 무효전력 감도가 가장 큰 선로는 순서대로 2-30, 8-9, 1-30, 1-9, 5-8 선로이다. 투입전의 정적인 전압 불안정점에서의 총부하량은 9381.40MW이며 이후의 P-V 곡선은 9번 모선의 전압과 총부하간의 그래프를 나타낸다.

4.1 TCSC 투입 위치에 따른 일정 임피던스 제어

송전용량의 증가를 위해 TCSC 투입전 전압 불안정점에서의 무효전력 감도가 큰 선로에 우선적으로 투입 위치를 결정한다. 그림 5는 각 선로 리액턴스의 50%를 보상시키는 것으로 하고 2-30, 8-9, 1-30, 1-9, 5-8 선로에 TCSC를 투입시킨 P-V 곡선이다. TCSC 투입 위치에 따른 각각의 총부하와 증가된 송전용량은 표 1에 나타나 있다.

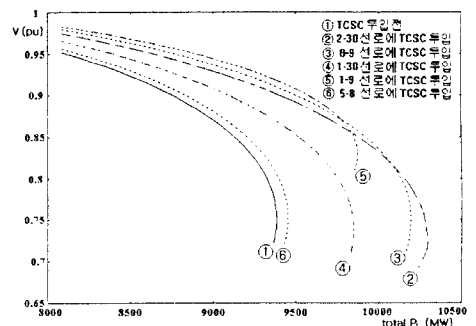


그림 5. TCSC 투입 위치별 P-V 곡선

투입 선로	TCSC 투입전	2-30	8-9	1-30	1-9	5-8
총부하 (MW)	9381.40	10289.37	10189.58	9846.45	9872.23	9451.34
송전용량 증가(MW)		907.98	808.18	465.15	490.83	69.64
normalized sensitivity		1.00000	0.85099	0.59470	0.58426	0.07631

표 1. TCSC 투입 위치별 송전용량의 증가량

일반적으로 선로의 무효전력 감도가 클수록 TCSC 투입 시 더 큰 송전용량의 증가가 나타났다. 5-8선로에 투입 시 나타나는 69.64MW의 송전용량 증가에 비교하여 무효전력 감도가 가장 큰 2-30 선로에 TCSC 투입시 나타나는 907.98MW의 송전용량 증가는 투입 위치의 선택에 따른 송전용량 증가 차이를 분명하게 보여 준다. 그러나 1-30 선로와 1-9 선로의 송전용량 증가량은 무효전력 감도 순서와 일치하지 않는데 이는 사용되는 감도가 선로용량 등이 고려되지 않은, 단지 임계점에서의 무효전력 변화량만을 나타내는 정보이기 때문이다. 또한 8-9, 1-9 선로에 TCSC 투입시 전압값이 보다 높게 나타나는 것은 P-V 곡선이 TCSC가 투입된 선로에 직접 연결된 9번 모선의 전압을 나타내기 때문이다.

4.2 TCSC 보상도에 따른 일정 임피던스 제어

송전용량 증가를 위해서 정적인 전압불안정점에서 가장 약한 선로인 2-30 선로를 TCSC의 투입 위치로 결정하고 선로 리액턴스의 10%, 20%, 30%, 40%,

50% 보상을 하여 보상도에 따라 나타나는 송전용량 증가를 알아보았다. 그림 6은 각각의 보상도 변화에 따른 P-V 곡선을 나타내며 TCSC 보상도에 따른 총부하와 송전용량의 증가를 표 2에 정리하였다. 선로 리액턴스 보상량의 증가에 따른 송전용량의 증가량을 알 수 있으며 또한 정적인 전압 불안정점에서의 전압값이 점차 낮아지고 있음을 볼 수 있다. 전압 불안정점에서 9번 모선의 전압값을 개선하기 위해서는 그림 5에서 나타난 바와 같이 TCSC 투입 선로가 직접적으로 9번 모선에 연결된 8-9, 1-9 선로에 투입하는 것이 적당한 위치일 것이다.

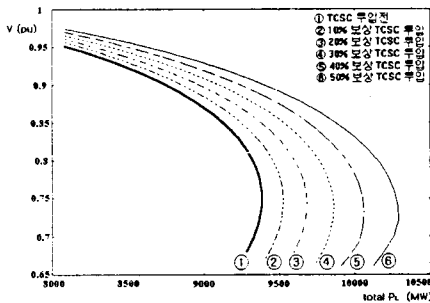


그림 6. 일정 임피던스 제어에서의 P-V 곡선

	보상 없음	10% 보상	20% 보상	30% 보상	40% 보상	50% 보상
총부하 (MW)	9381.40	9523.88	9680.76	9858.14	10060.15	10289.21
송전 용량증가 (MW)		142.48	299.36	476.74	678.75	907.81

표 2. TCSC 보상도와 송전용량의 증가

#### 4.3 정전력 제어

무효 전력 감도가 가장 큰 2-30선로에 유효전력조류를 조절하기 위한 TCSC를 투입하였을 때 전압 불안정점에 나타나는 효과를 그림 7에서 P-V 곡선으로 나타내었다. 각각 유지하는 선로 유효전력은 1300MW, 1450MW, 1600MW이며, 이 때의 허용 오차는 5MW이다. area interchange를 고려할 때나 상정사고시 조류 제어, 루프조류 제어 같은 목적으로 사용되는 정전력 제어는 선로 유효전력을 일정하게 고정시키기 위해 TCSC가 인덕턴스 성분으로 포함되던 송전용량 증가 측면에서 악영향을 줄 수 있음을 보여준다.

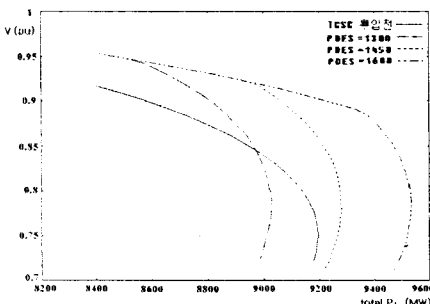


그림 7. 정전력 제어에서의 P-V 곡선

#### 4.4 정전류 제어

2-30 모선에서 정전류 제어를 위해 TCSC를 투입시켜 보았다. 허용 오차를 5A로 하여 선로 전류의 크기를 1600A, 1750A, 1900A로 고정시켰을 때의 정적인 전

압 불안정점의 변화를 알아보기 위해서 각각의 P-V 곡선을 그림 8에서 나타내었다. 이 때에도 정전력 제어와 비슷한 결과로써 일정값으로 고정된 선로 전류량에 따라서 송전용량이 증가 혹은 감소하였다. 선로의 열용량 한계를 넘지 않을 목적으로 투입되었을 때에는 TCSC가 인덕턴스 성분으로 투입되기 때문에 계통의 송전용량이 감소하게 되며 선로의 설비이용율을 높여 주기 위해 투입되었을 때에는 증가하게 됨을 확인 할 수 있다.

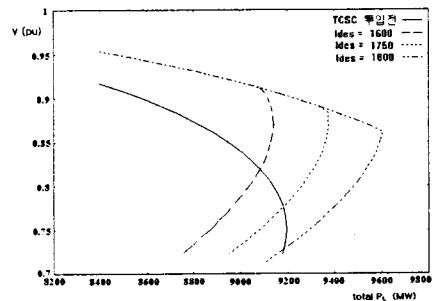


그림 8. 정전류 제어에서의 P-V 곡선

### 5. 결론

본 연구에서는 계통에 TCSC를 투입하였을 때의 송전용량 증가 측면에서의 효과를 알아보기 위해 연속조류계산에 TCSC의 정적인 모델을 적용시켜 보았다. TCSC의 투입 위치는 선로의 무효전력 감도를 이용해 결정하였으며, TCSC의 세 가지 제어 모드에 따라 계통의 송전용량에 나타나는 영향을 시뮬레이션 하였다. 일정 임피던스 제어에서 선로 리액턴스 보상에 따라 송전용량이 증가되는 효과를 확인하였으며 정전력 제어와 정전류 제어에서는 TCSC의 투입 상황과 목적에 따라 송전용량 측면에서의 영향이 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 현재까지는 TCSC 투입시 나타나는 송전용량의 영향만을 고려하고 있으나 앞으로 연구를 계속하여 좀 더 개선된 TCSC의 모델을 연속조류계산에 구현하고 정적인 전압 안정도에서의 효과를 알아볼 계획이다.

#### (참고 문헌)

- [1] IEEE Working Group, CIGRE Working Group, "FACTS OVERVIEW", IEEE 95 TP 108
- [2] N. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE Spectrum, V. 30, NO.4, pp. 40-45, April 1993
- [3] CIGRE Working Group, "Thyristor Controlled Series Compensation", CIGRE WG14.18
- [4] V. Ajarapu and C.Christy, "The Continuation Power Flow : A Tool for Steady State Voltage Analysis", IEEE Trans. on Power System, Vol 7, No. 1, Feb. 1992
- [5] C. A. Cañizares, Z. T. Faur, "Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse", IEEE PES Preprint PE-200-PWRS-0-2-1998
- [6] D. McDolad, B. Damsky, "Modeling and Testing of a Thyristor-Controlled Series Compensation(TCSC)", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp. 352 - 359, Jan. 1994
- [7] IEEE Working Group, "Voltage Stability of Power Systems : Concepts, Analytical tools, Industry Experience", Preprint of voltage stability report, IEEE, voltage stability working group