

정상상태시 전압유지를 위한 TCSC의 최적 위치 선정에 관한 연구

임 정욱* 서 장철 문 승일
 서울대학교 공과대학 전기공학부

Selection of Optimal TCSC Location to Keep the Steady-state Voltage Profile within limits

Jung-Uk Lim* Jang-Cheol Seung-ill Moon
 School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - This paper discusses the selection of optimal location of Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) devices to maintain the steady-state voltage profile within limits. A procedure for selecting optimal TCSC location based on sensitivity analysis is developed. This approach identifies the critical lines by evaluating all the voltage magnitudes sensitivity with respect to a line reactance. Computer simulation of a example system is used to verify the proposed procedure.

1. 서 론

최근 산업화의 영향으로 전력 수요가 급속하게 증가되는 경향을 보이고 있는 반면, 이에 따른 발전설비의 확충은 경제적, 사회적 요인으로 말미암아 한계에 부딪치고 있다. 또한 전력의 안전한 공급에 대한 사회적 관심이 고조되고 있는 현실에서 능률적인 전력 수송 수단 확보와 함께 기존 설비의 이용률을 향상시키기 위한 송전용량 증대 기술 및 고도의 전력계통 운용 기술이 필요하게 되었다. 이러한 문제에 대한 해결 방안으로 대전력 반도체 소자 기술과 컴퓨터를 이용한 디지털 제어 및 고속 데이터통신 기술을 이용하여 교류 전력계통을 실시간으로 제어함으로써, 보다 효율적이고 유연한 전력계통의 구성 및 운용을 도모할 수 있는 FACTS (Flexible AC Transmission System) 기술이 제안되었다.

FACTS 기술중에서 하나의 실용적인 개발 흐름은 교류전력계통의 조류를 제어하기 위해 송전선의 임피던스를 직렬로 보상하는 설비의 개발이라고 할 수 있다. FACTS 설비중에서 현재 상용화가 추진되고 있는 대표적인 직렬 보상기기로서 TCSC(Thyristor-Controlled Series Compensator)가 있다. TCSC는 정상상태시 선로의 열용량 한계 문제, 루프 조류 문제, 부하변동이나 사고 후의 고전압과 저전압문제, 과도한 크기의 단락 전류 문제 등을 해결할 수 있고, 과도상태시 신속히 과도조류를 제어함으로써 과도안정도 문제를 해결할 수 있으며, 연속적인 제어능력으로 SSR (Subsynchronous Resonance) 현상을 억제함과 동시에 저주파 진동을 감쇠시킬 수 있다.

이러한 TCSC 설비를 실제로 계통에서 어느 위치에 설치해야 가장 효율적일 것인가를 결정하는 문제는 TCSC 자체의 동작 특성을 향상시키는 문제만큼 중요하다. 또한 후보지 선정문제에 있어서, 현재 계통이 가지고 있는 정상상태 및 과도상태에서의 여러 문제중에서 어느 문제를 우선시하여 TCSC를 설치하는가를 결정하는 것도 또한 중요하다.

후보지 선정에 관련하여 이전에 수행된 연구를 살펴보면, 과도상태시 추진동 모드에 대한 고유치의 감도를 해석하여 TCSC의 후보지를 결정하는 연구가 있었고[1], 정적 상태 안정도의 향상을 위하여 자코비안 행렬의 고유치중 불안정 고유치에 대한 modal analysis를 통해 불

안정 고유치에 대한 참여율이 높은 모선 또는 선로를 선정하는 방법도 제시되었다[2]. 또한 정상상태시 TCSC를 비롯한 직렬보상기기를 이용하여 직렬보상을 실시하였을 경우, 최대 전력수송을 위한 직렬보상의 위치와 규모를 정하는 방법도 제시되었다[3].

정상상태시 TCSC를 설치하는 것은 송전용량을 증대시킬 목적 이외에도 선로에 무효전력을 공급하여 무효전력 흐름 변화에 의한 전압강하를 전반적으로 감소시키는 목적도 병행하게 된다. 이때 중요한 것은 TCSC를 설치함으로써 선로 리액턴스 값이 가변성을 획득하게 된다는 것이며, 선로 리액턴스 변화에 대한 전압의 변화율, 즉 리액턴스에 대한 전압의 민감도를 분석할 필요가 있다.

본 논문에서는 선로 리액턴스 변화에 대한 부하모선에서의 전압 변동의 민감도를 유도하고, 이를 바탕으로 하여 전압유지 관점에서의 TCSC의 최적 설치 위치에 대한 기준을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 직렬보상

교류송전계통에서 송전단과 수전단사이에 전송되는 전력은 이 두지점을 연결하는 송전선로의 직렬 임피던스를 제어함으로써 가장 효과적으로 제어가능하다. 특히 송전선의 임피던스는 대부분 유도성이고 저항분은 5-10%에 불과하기 때문에, 직렬 콘덴서를 선로에 직렬로 삽입함으로써 계통의 임피던스를 쉽게 제어할 수 있다. 직렬콘덴서가 선로 리액턴스를 보상하는 정도를 나타내는 보상비는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$s = \frac{X_c}{X_L} \quad (0 \leq s \leq 1) \quad (1)$$

여기서,

X_L : 선로 임피던스

X_c : 직렬콘덴서 리액턴스

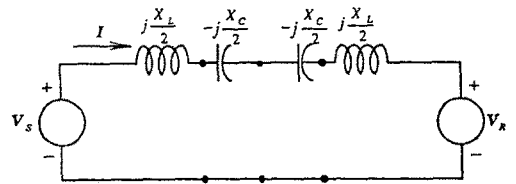


그림 1. 직렬보상

그러므로 직렬보상후의 선로 임피던스는 다음과 같은 식으로 주어지게 된다.

$$X = X_L - X_c = X_L(1 - s) \quad (2)$$

그림 1에서 보는 바와 같이 직렬컨덴서를 투입함으로써 송전선로의 임피던스를 줄여 송전선로의 전기적 거리를 줄이고 정전압 송전계통에서 송전용량을 증대시키는 것을 직렬보상이라고 한다. 이론적으로는 보상도 s 는 1(100%)까지 가능하지만 보상도가 너무 커지면 안정도에 악영향을 끼치는 SSR 현상이 발생할 가능성이 높아 지므로 실제로는 0.7(70%) 정도로 제한되어 있다. 여러 가지 직렬보상법중에서 고속스위칭이 가능한 사이리스터 스위치를 이용하여 계통의 변동에 따라 신속히 선로에 흐르는 전력조류를 제어하도록 고안된 설비가 바로 TCSC이다[4].

2.1.1 직렬보상의 효과

직렬보상의 효과는 송전선에서 소모하는 무효전력을 최소화하여 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다.

- (1) 주어진 선로를 통해 최대전력을 전송
- (2) 연결된 모든 발전기들을 동기상태로 유지
- (3) 계통의 전압을 가능한 한 정격으로 유지

이중에서 전송가능한 최대전력은 계통의 안정도를 고려해서 부하인가한계(loading limit)로 제한되는데, 이 값은 선로에서 소모되는 무효전력과 부하의 역률 변동을 감안하여 선로의 열적한계(thermal limit)내에서 충분한 여유를 두고 정하는 것이 보통이다. 따라서 직렬보상으로 선로에서 소모되는 무효전력을 적절히 감소시키면 전송가능한 최대전력은 열적한계에 더 가깝게 운용될 수 있다. 계통의 안정도는 동기상태를 유지하거나 유지하려는 정도를 표시하는 것으로 외란에 의해 계통이 정상 상태를 벗어났을 경우 이를 신속히 복귀시키는 정도를 의미한다. 정격 전압유지는 계통의 적절한 동작과 부하를 최대로 운용하는데 중요한 요소로, 저전압에서는 부하의 성능이 저하되고 또한 과전압에서는 부하의 손실과 자기포화현상에 의한 고조파의 증가를 가져온다. 본 논문에서 관심을 갖는 부분은 바로 모선에서의 정격 전압유지이며, 이는 정상상태에서 직렬보상의 효과중에서 송전선로 용량증대와 더불어 중요한 부분이라고 할 수 있다.

2.2 모선 전압과 선로 리액턴스의 관계

일반적으로 선로 임피던스가 대부분 유도성이므로 모선 전압과 유효전력, 모선 위상과 무효전력의 관계를 무시할 수 있다. 이러한 상황에서 그림 2에서와 같은 관계가 성립한다.

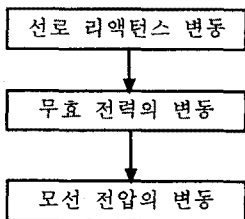


그림 2. 모선전압과 선로 리액턴스 관계

TCSC는 선로의 리액턴스를 제어할 수 있으므로 리액턴스 값은 더 이상 상수가 아니고 변수가 된다. 선로 리액턴스에 대한 모선 전압크기의 민감도는 아래와 같은 식으로 정의할 수 있다.

$$\Delta V_{bus} = \left(\frac{\partial V_{bus}}{\partial X_{line}} \right) \Delta X_{line} = J_{VX} \Delta X_{line} \quad (3)$$

여기서,

J_{VX} : 선로 리액턴스에 대한 모선 전압크기의 민감도 행렬

ΔV_{bus} : 모선 전압크기의 증분 벡터

ΔX_{line} : 선로 리액턴스의 증분 벡터

단, 발전기 모선에서는 전압의 크기를 독립적으로 제어할 수 있기 때문에, ΔV_{bus} 는 발전기 모선을 제외한 부하모선의 전압크기의 증분만을 포함한다. 따라서 J_{VX} 는 (부하모선의 개수 \times 선로 수)의 크기를 갖는 행렬이 된다.

위의 선형화된 행렬의 각 원소가 가지고 있는 의미는 특정한 하나의 리액턴스를 제외한 모든 송전선의 리액턴스가 변하지 않는 상태에서 특정 선로의 리액턴스가 변할 때, 각 모선에서의 전압의 증분을 의미한다.

2.3 민감도 행렬 유도

선로 리액턴스에 대한 모선 전압크기의 민감도 행렬, 즉 $\left(\frac{\partial V_{bus}}{\partial X_{line}} \right)$ 을 구하기 위해서는 (4)식과 같은 chain rule을 이용한다.

$$\left(\frac{\partial V_{bus}}{\partial X_{line}} \right) = \left(\frac{\partial V_{bus}}{\partial Q_{bus}} \right) \left(\frac{\partial Q_{bus}}{\partial X_{line}} \right) \quad (4)$$

(4)식에서 $\left(\frac{\partial V_{bus}}{\partial Q_{bus}} \right)$ 부분은 전압크기의 증분과 무효전력의 증분의 선형관계를 나타내는 정상상태 축소 자코비안 행렬을 이용하여 구한다[2].

정상상태 전력계통의 선형화된 전압방정식은

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

ΔP : 모선에서의 유효전력증분

ΔQ : 모선에서의 무효전력증분

$\Delta \theta$: 모선에서의 전압위상증분

ΔP : 모선에서의 전압크기증분

(4)식에서 $\Delta P=0$ 이라고 하면,

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}] \Delta V = J_R \Delta V \quad (6)$$

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q = \left(\frac{\partial V_{bus}}{\partial Q_{bus}} \right) \Delta Q \quad (7)$$

여기서, J_R 는 정상상태 축소 자코비안이다.

$\left(\frac{\partial Q_{bus}}{\partial X_{line}} \right)$ 부분 또한 전력조류 방정식에서 쉽게 유도

할 수 있다. 모선으로 주입되는 무효전력은 서로 연결된 모선 전압의 크기와 위상, 그리고 연결된 선로의 리액턴스의 함수가 된다. 여기서 선로에서의 저항값이 리액턴스 값보다 작기 때문에 이를 무시하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{bus} = f(V_{bus}, \theta_{bus}, X_{line}) \quad (8)$$

여기서,

- Q_{bus} : 모선으로 주입되는 무효전력을 나타내는 벡터
- V_{bus} : 모선전압의 크기를 나타내는 벡터
- θ_{bus} : 모선전압의 위상을 나타내는 벡터
- X_{line} : 선로 리액턴스를 나타내는 벡터

무효전력에 대한 (8)식을 변수 X_{line} 에 대해서 미분하면 $\left(\frac{\partial Q_{bus}}{\partial X_{line}}\right)$ 을 구할 수 있다.

2.4 TCSC 최적 위치 결정

선로 리액턴스에 대한 모선 전압크기의 민감도 행렬, 즉 (3)식에서 J_{VX} 의 한 행에서의 모든 원소의 의미는 특정 선로의 리액턴스 증분에 대하여 발전기 모선을 제외한 모든 모선에서의 전압크기의 증분을 나타낸다. 따라서, TCSC의 최적 위치를 결정하기 위한 평가함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{line,i} = \sum_{j=1}^{bus} w_j |(J_{VX})_{ij}| \quad (9)$$

여기서,

- $J_{line,i}$: i 번째 선로에 대한 평가함수
- $(J_{VX})_{ij}$: J_{VX} 행렬의 (i,j) 번째 원소
- w_j : j 번째 모선에 대한 가중치

단, 모선 수에는 발전기 모선은 포함시키지 않는다.

모든 선로중에서 평가함수의 값이 가장 큰 선로가, 모든 모선에 대한 민감도가 가장 큰 선로라고 할 수 있고, 전압 유지 관점에서 그 선로에 TCSC를 설치하는 것이 가장 효과적이라고 할 수 있다.

2.5 사례연구

본 논문에서는 그림 3에서 제시한 New England 10기 39모선 시스템[5]에서 선로 리액턴스에 대한 모선 전압크기의 민감도 행렬을 구하였다. 예상한 바와 같이 J_{VX} 행렬의 거의 모든 원소는 음의 값을 갖는다. 이는 선로에서의 리액턴스 값이 증가할 때, 선로의 인덕터에서 소비되는 무효전력이 증가되기 때문에 계통 전반적으로는 모선전압이 낮아지는 현상을 의미한다.

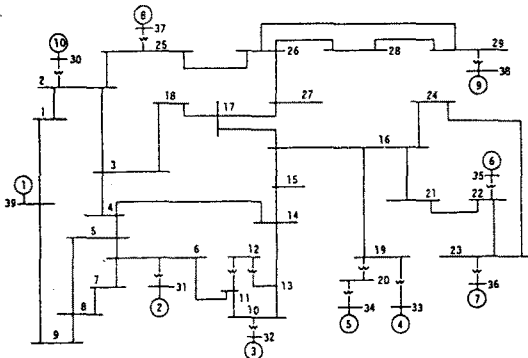


그림 3. 10기 39모선 New England Test System

표 1. TCSC 최적 선로 및 평가함수값

순 위	선로명(from-to)	평가함수 값
1	13 - 14	25.74
2	5 - 8	22.01
3	4 - 14	20.44
4	4 - 5	19.90
5	5 - 6	18.18
6	3 - 18	17.79
7	7 - 8	16.88
8	26 - 27	15.62
9	10 - 13	15.47
10	10 - 11	14.57

표 1에는 모든 모선에 대한 가중치를 1로 고정하고 각 선로에 대한 평가함수를 계산하여, 평가함수가 큰 순서대로 10개의 선로를 나타내 보았다. 표 1에서 보인 모든 전력계통의 총 46개의 선로중, 13번 모선과 14번 모선이 연결된 선로의 평가함수가 가장 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이 선로가 전압유지 관점에서 볼 때 바로 TCSC를 설치해야 할 최적 위치가 된다.

표 1에서 알 수 있듯이 J_{VX} 로 구한 평가함수의 값은 계통의 구조(topology), 리액턴스의 크기, 선로에 흐르는 무효전력의 크기, line charging admittance의 크기와 관계가 있다. 하지만 이들 요소들이 비선형적이고 복잡한 관계로 얽혀 있기 때문에 조류계산을 통하여 구한 자료비안 해석이 효율적인 대안이 됨을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 정상상태시 전압유지 관점에서의 TCSC의 최적 설치 위치에 대한 기준을 제시하였다. 이를 위하여 선로 리액턴스 변화에 대한 부하모선에서의 전압 변동의 민감도를 유도하고 선로 별로 평가해 보았다. 평가함수를 통해 제시된 최적 후보지 선정 기준은 정상상태에서 TCSC의 송전선 용량증대를 위한 목적과 함께 모선의 정격전압 유지 측면에서 효율적인 방법이 될 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. O. Gjerde, R. Flolo, T. Gjengedal, "Selection of Optimal TCSC Damping Control Parameters And Placement by Use of Eigenvalue And Sensitivity Analysis Methods", *Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering*, pp.1328-1333, 1996.8.
- [2] 장병훈, 전영수, 김종선, 이기선, "실계통에서의 FACTS 설치 후보지 선정 연구", 1998년도 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, pp.135-139, 1998.
- [3] R. Rajaraman, F. Alvarado, A. Maniaci, R. Camfield, and S. Jalali, "Determination of Location and Amount of Series Compensation to Increase Power Transfer Capability", *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 294-300, May, 1998.
- [4] 전력연구원, "송전선로 송전용량 증대방안에 관한 연구", KEPRI-94Y-S12, 1996.9.
- [5] M. A. Pai, "Energy Function Analysis For Power System Stability", *Kluwer Academic Publishers*, 1989.