

TCSC를 고려한 계통상태행렬 구조에 관한 연구

노규민* 장병훈** 김덕영*** 이종석**** 권세혁****
 * : 충청전문대 ** : 전력연구원 *** : 군산대학교 **** : 고려대학교

A Study on the Structure of System State Matrix considering TCSC

K.M.Rho* B.H.Jang** D.Y.Kim*** J.S.Lee**** S.H.Kwon****

*:Chung Cheong College **:Korea Electric Power Research Institute ***:Kun San University ****:Korea University

ABSTRACT

Thyristor-Controlled Series Compensation (TCSC) is expected to be applied in transmission systems to achieve a number of benefits. TCSC can provide such assistance for stability, as well as helping to direct flows onto desired transmission paths. This paper describes a TCSC model which can be used for typical transient and oscillatory stability studies. Also included is a discussion on relevant information to extend the modeling detail of the TCSC for use stability analysis.

치 커패시터는 power circuit breakers와 같은 기계적 장치를 사용하여 보상수준을 변화시키는 것이었다. 기계적 스위칭 보상방법의 한계는 상대적으로 느린 스위칭 시간으로 인하여 송전선의 용량이 분할적으로 변화하는 것이다. 그러나 사이리스터를 이용한 제어기는 빠르게 작동하여 연속적인 범위로 유연하게 보상이 이루어진다.

이러한 Thyristor를 이용한 보상방법이 크게 두 가지로 나눌수 있고 그중 하나가 Thyristor Controlled Series Capacitors(TCSC)이다.

미소신호안정도 영역에서 전기기계적 동요 해석을 하기위한 주요 주파수 범위는 0.1-2HZ 까지이며 이를위한 TCSC모델을 그림1과 같은 1차 지연요소를 갖는 블록선도로서 나타낼 수 있다.[4]

1. 서론

전력계통의 안정도해석에서 외란이 발생했을 때 모션전압 진동을 줄이고자 FACT요소중 하나인 Thyristor-Controlled Series Compensation (TCSC)를 계통내에 설치하여 TCSC 설치전과 TCSC 설치후 발전기 여자기의 전압기준에 +1%의 외란을 가했을때 발전기 모션과 TCSC를 설치한 모션 전압 크기의 시간응답을 보인다. 또한 계통내에 TCSC를 설치하면 그 선로의 임피던스값이 변화되고 새로운 조류계산 결과를 구할 수 있고 이 결과를 이용하여 변화된 어드미턴스행렬과 발전기 q축을 중심으로 한 초기 동작조건을 구하고 이 값들이 상태행렬의 대수적표현의 입력 자료로 이용할 수 있다.

2. TCSC의 모델

지역간 송전용량은 계통내의 직렬 임피던스 조정에 의해 상당한 영향을 끼칠 수 있다. 송전선 용량을 증가시키는 방법은 직렬 커패시터를 설치하여 전력 계통내의 직렬 임피던스를 줄임으로서 부수적인 송전계획이 가능하게 되는 것이다. 이러한 방법이 직렬보상방법(series compensation method)으로 널리 알려져 왔다.

오래전 부터 사용되어 온 직렬 보상방법인 스위

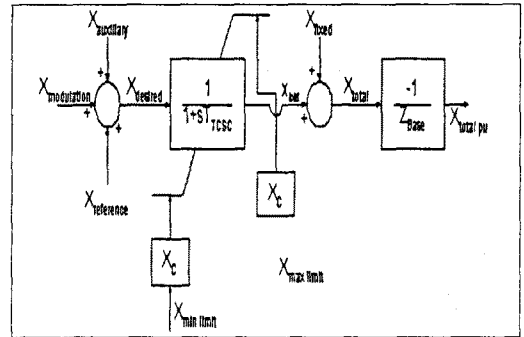


그림 1 1차 지연요소를 갖는 TCSC 블록선도

그림1을 이용한 TCSC의 대수적 표현에 사용되는 미분방정식은 식(1)과 같다.

$$T_{TCSC} \dot{X}_C = -X_C + X_{REF} + X_{CON} \quad (1)$$

식(1)에서 X_C 는 TCSC의 임피던스값이고 X_{REF} 는 기준이 되는 입력 임피던스, X_{CON} 은 저체동요를 완화시키기 위한 보조 제어기의 출력신호이다.

T_{TCSC} 는 TCSC의 시정수로서 리액턴스의 변화에 반응하는 응답시간으로 대개 10-15msec로 두었고

본 논문에서도 시정수 T_{TCSC} 의 값을 10msec로 두었다.[3]

3. 발전기 q축 위상각의 계산

상태행렬구성시 사용되는 초기값들은 발전기의 q축 위상각을 기준으로 계산하는 것이 계통을 기준으로 계산하는 것 보다 더 간편하다. 따라서 계통을 발전기 내부전압 모선들만을 남기고 다른 모든 모선을 축약한 후의 Y_{BUS} 행렬 및 각 발전기의 q축의 위상각을 계산해야 한다. 각 발전기의 q축의 위상각은 전력조류계산 결과에서 단자전압 V_i 및 발전기 출력전류 I_a 를 안다고 하면 E_{qa} 를 다음과 같이 계산한다.[9]

$$E_{qa} = V_i + (r + jX_q)I_a = |E_{qa}| \angle \delta \quad (2)$$

δ : 계통기준에 대한 발전기 q축의 위상각

$$E' = V_i + (r + jX_d)I_a = |E_{qa}| \angle \alpha \quad (3)$$

발전기 단자전압 V_i 및 단자전류 I_a 는 각각 다음과 같은 페이서로 표시된다. 여기서 ϕ 는 발전기 단자전류의 단자전압에 대한 지상각이다.

$$V_i = |V_i| \angle \beta \quad (4)$$

$$I_a = |I_a| \angle \beta - \phi$$

이상의 페이서들은 모두 전력조류계산시 정모선의 전압의 위상각을 0° 로 계통기준으로 잡은 경우가 계통기준에 대한 페이서이다. 그러나 동적안정도 계산시에는 이들 페이서들을 발전기의 q축을 기준으로 하여 식(5)와 같이 표현하여야 한다.

$$E' = |E_{qa}| \angle -(\delta - \alpha) = E'_q + jE'_d$$

$$V_i = |V_i| \angle -(\delta - \beta) = V_q + jV_d \quad (5)$$

$$I_a = |I_a| \angle -(\delta - \beta + \phi) = I_q + jI_d$$

4. Transfer Function Residues

전력계통의 미소신호 안정도 해석법 중에는 계통 상태행렬을 이용하는 고유치 해석법이 있다. 상태행렬에 포함되는 제어계통을 설계하기 위해서는 먼저 특정변수사이의 개루프전달함수(open loop transfer function)를 고려해야 한다. 우선 상태행렬과 전달함수사이의 관계를 나타내기 위해 식(6)과 같이 y 와 u 변수 사이의 전달함수를 들 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A \Delta x + b \Delta u \\ \Delta y &= c \Delta x \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 A 는 상태행렬, Δx 는 상태벡터, Δu 는 single input, Δy 는 single output 이며 c 는 열벡터, b 는 행벡터이다.

여기서 전달함수 $G(s)$ 는 식(6)의 과정을 거쳐 식(7)과 같이 상태행렬로 표현된 라플라스 변환식으로 나타낼 수 있다.

$$(sI - A) \Delta x = b \Delta u$$

$$\Delta u = b^{-1}(sI - A) \Delta x$$

$$G(s) \cdot \Delta u(s) = \Delta y(s)$$

$$G(s) \cdot b^{-1}(sI - A) \Delta x = c \Delta x \quad (7)$$

$$G(s) = c(sI - A)^{-1} b$$

$$G(s) = \frac{\Delta y(s)}{\Delta u(s)} = c(sI - A)^{-1} b$$

이를 일반형으로 쓰면 식(8)과 같이 표현된다.

$$G(s) = K \frac{N(s)}{D(s)} \quad (8)$$

$$\text{단, } G(s) = K \frac{(s-z_1)(s-z_2) \cdots (s-z_n)}{(s-p_1)(s-p_2) \cdots (s-p_n)}$$

위의 전달함수 $G(s)$ 를 부분분수로 확장하여 나타내면 식(9)와 같다.

$$G(s) = \frac{R_1}{s-p_1} + \frac{R_2}{s-p_2} + \cdots + \frac{R_n}{s-p_n} \quad (9)$$

R_i : p_i pole 에 대한 $G(s)$ 의 residues

5. 사례연구

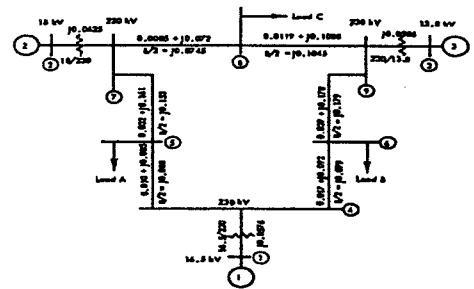


그림 2 3발전기 9모선 계통도

그림2의 예제계통의 초기값과 dynamic data 및 여자기 및 PSS 등의 제어계통 데이터는 참고문헌[1]에 기술되어 있다. 3기 9모선계통의 주요 진동모드는 표1과 같다.

표 1 3기 9모선계통의 주요 진동 모드

모드	$\alpha \pm j\beta$	SPR
1	-1.2114 ± j13.9222	0.5788
2	-0.5140 ± j8.8731	0.6949
3	-9.3346 ± j0.6784	2.83e-38
4	-7.2128 ± j2.6279	3.24e-8
5	-0.6165 ± j1.6431	0.0947
6	-0.3071 ± j0.7637	0.0799
7	-0.0524 ± j0.4999	0.5175

4절의 Transfer Function Residues를 이용하여 가장 critical mode인 λ_c 의 제동을 향상시키기 위하여 송전선에 TCSC를 설치할 위치는 식(10)

과 같은 전달함수를 가지고 구할 수 있다.

$$\Delta P_{kj}(s = \lambda_c) / \Delta B_{kj}(s = \lambda_c) \quad (10)$$

여기서 ΔP_{kj} 는 모선 k와 j사이의 증분된 전력조류이고 ΔB_{kj} 는 같은 선로사이의 susceptances의 변화량이다. 표1에서 2번 모드의 고유치를 이용하여 전달함수 $\Delta P_{kj} / \Delta B_{kj}$ 에 대한 Residue 결과를 표2에 보였다.

표 2 $\lambda = -0.5140 \pm j8.8731$ 에 대한 전달함수 P_{kj} / B_{kj} 의 Residue

Input : B_{kj}		Output : P_{kj}	
Eigen : $-0.5140 \pm j8.8731$			
LINE - LINE	MAGNITUDE	ANGLE	
5 - 7	1.0000	-84.90099	
2 - 7	0.68282	93.22208	
6 - 9	0.41721	-83.73985	
1 - 4	0.27555	94.38616	
4 - 5	0.04220	95.26019	
4 - 6	0.03836	96.48217	
7 - 8	0.03306	92.80768	
3 - 9	0.02154	96.45193	
8 - 9	0.00214	-112.7301	

전달함수 Residue $\Delta P_{kj} / \Delta B_{kj}$ 을 이용하여 5-7번 선로 사이에 TCSC를 설치하여 5-7번 선로의 임피던스에서 원래의 리액턴스 성분의 70%만 흐르게 하였다. 5-7번 선로 사이의 임피던스값이 $0.032 + j0.161$ 에서 $0.032 + j0.1127$ 로 변화되었다. 3절에서 기술한 발전기 q축을 중심으로 한 전압, 전류의 초기값은 참고문헌[1]의 예제 데이터를 사용하였다. 참고문헌[3]에 따르면 Edic-New Scotland, Marcy-NewScotland, Marcy-Cooper's Corner, Edic-Fraser 지역에 TCSC 설치시 송전용량 최대 보상 가능한 수준을 각각 100%, 80%, 60%, 40%로 설정했으므로 본 논문에서는 이들의 평균 보상수준인 70%를 보상 한도로 잡았다.

예제 계통의 각 발전기 모선(1,2,3번)에 발전기 여자기의 전압 기준에 1%의 외란을 가했을 때 발전기 모선과 TCSC를 설치한 5,7번 모선 전압 크기의 시간응답 결과를 살펴 보았다. 그림3은 TCSC 설치전 1번 발전기 여자기의 전압 기준에 1% 외란발생시 모선1,2,3,5,7의 시간응답을 보인 것이고 그림4는 5-7번 선로 사이에 TCSC 설치후 1번 모선 외란발생시 모선1,2,3,5,7의 시간응답을 보인 것이다.

그림5는 TCSC 설치전 2번 발전기 여자기의 전압 기준에 1% 외란발생시 모선1,2,3,5,7의 시간응답을 보인 것이고 그림6은 5-7번 선로 사이에 TCSC 설치후 2번모선 외란발생시 모선1,2,3,5,7

의 시간응답을 보인 것이다. 그림7은 TCSC 설치전 3번 발전기 여자기의 전압 기준에 1% 외란발생시 모선1,2,3,5,7의 시간응답을 보인 것이고 그림8은 5-7번 선로 사이에 TCSC 설치후 3번 모선 외란발생시 모선1,2,3,5,7의 시간응답을 보인 것이다.

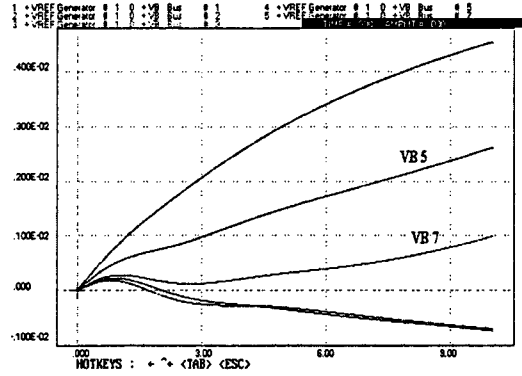


그림3 TCSC 설치전 1번 모선 외란발생시 모선1,2,3,5,7의 시간응답

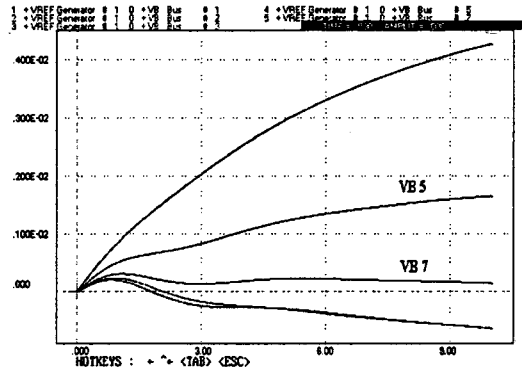


그림4 TCSC 설치후(5-7번선로) 1번 모선 외란발생시 모선1,2,3,5,7의 시간응답

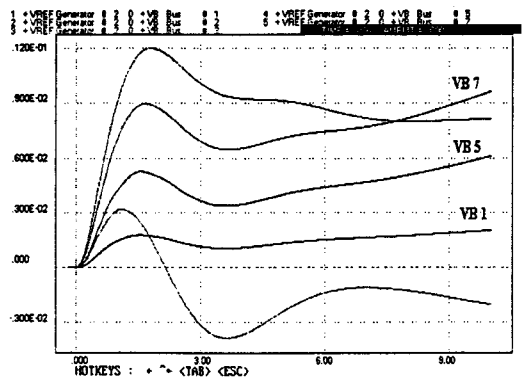


그림5 TCSC 설치전 2번 모선 외란발생시 모선1,2,3,5,7의 시간응답

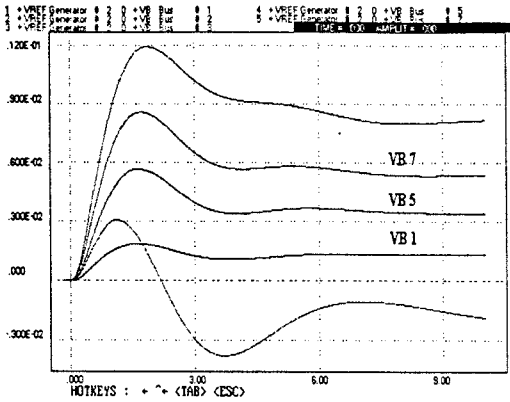


그림6 TCSC 설치후(5-7번선로) 2번 모선 외란발생시 모선1,2,3,5,7의 시간응답

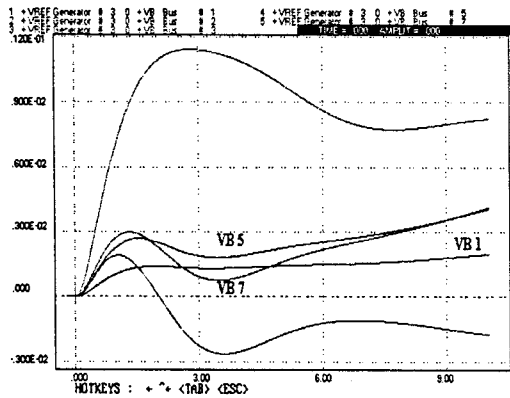


그림7 TCSC 설치전 3번 모선 외란발생시 모선 1,2,3,5,7의 시간응답

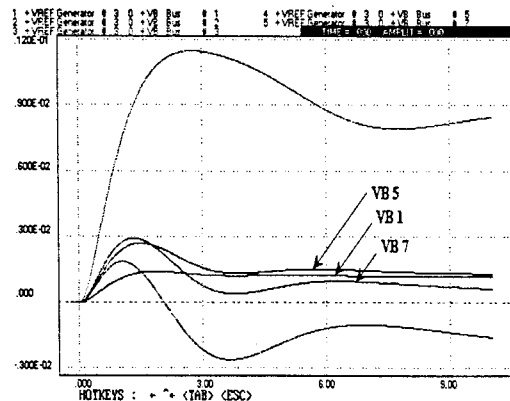


그림8 TCSC 설치후(5-7번선로) 3번 모선 외란발생시 모선1,2,3,5,7의 시간응답

6. 결론

전력계통의 안정도해석에서 외란이 발생했을 때

모선전압 진동의 감쇄효과를 증가시키기 위하여 FACT요소중 하나인 TCSC를 계통내에 설치하였다. 본 연구결과는 브라질의 CEPTEL에서 만든 프로그램인 PACDYN PROGRAM V3.0을 사용하여 산출하였다.참고문헌[3]의 WSCC SYSTEM(3발전기 9모선계통)DATA를 사용하였다.

다기의 전력계통에서 TCSC의 적합한 위치를 결정하기 위하여 계통의 불안정한 모드에 대한 전달함수residues ($\Delta P_{ij}(s=\lambda) / \Delta B_{ij}(s=\lambda)$)를 사용하였다.PACDYN PROGRAM을 이용하여 TCSC를 설치하기전과 TCSC설치후 발전기 여자기의 전압기준에 +1%의 외란을 가했을 때의 시간 응답의 결과로서 발전기모선1,2,3번과 TCSC를 설치한 5,7번 모선의 전압 크기를 보였다. TCSC설치후 외란에 의한 모선 전압의 크기가 빨리 감쇄됨을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1]P.M.Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.
- [2]PACDYN User's Manual, Version3.0, October, 1994.
- [3]"Application of Thyristor Controlled Series Capacitors in New York State", EPRI TR-103641s, December 1993.
- [4]J.Urbank, R.T.Piwko, E.V.Larsen, B.L. Damsky,B.C.Furumasu,W.Mittlestadt and J.D.Eden,"Thyristor Controlled Series Compensation Prototype Installation at the SL-ATT 500kVsubstation",IEEE Transactions on Power Delivery, Vol8, No.3, July,1995.
- [5]J.Paserba,N.W.Miller,E.V.Larsen and R. J.Piwko,"A Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol10, No.3, July,1995.
- [6]"A Stability Model for Thyristor Controlled Series Compensation(TCSC)", FACTS Conference2.EPRI TR-10178 4,May ,1992
- [7]"FACTS OVERVIEW", IEEE Power Engineering Society, 95TP108.April 1995.
- [8]N.Martins,H.J.C.P.Pinto,A.Bianco,N.J.P .Macedo,"TCSC Control structures for Line Scheduling and Methods to Determine their Location and Tuning to Damp System Oscillations".IV SEPOPE, Fozdo Iguacu, Brazil.May 1994.
- [9]한국과학재단,"전력계통의 종합적인 안정도 해석",1994년 8월.