

# 축소모형 실험에 의한 TCSC의 성능분석

한 병문, 강 중 구\*  
명지 대학교

문 승 일, 김 태 현  
서울 대학교

## Performance Analysis of TCSC by Experiment with Scaled Model

B. M. Han, J. G. Kang\*  
Myongji University

S. I. Moon, T. H. Kim  
Seoul National University

Abstract - This paper describes a detailed performance analysis of TCSC using experiment with a scaled model. A 3-phase scaled model of TCSC was built with rating of 2kVA to verify the operation. The variable reactance of TCSC with respect to the firing angle of thyristor switch analyzed theoretically and experimentally. And the limit of TCSC operation was investigated in whole range of the thyristor firing-angle. The experimental results with scaled model were compared with the simulation results for a periodic state space model using MATLAB.

### 2. 본론

#### 2.1 축소모형

축소모형은 TCSC의 동적특성을 살펴보는 데 편리하기 때문에 그림 1에 보인 회로에 해당하는 축소모형을 제작하였다. TCSC의 구성은 다이리스터로 제어되는 리액터와 캐패시터가 병렬로 연결되어 있다. 다이리스터가 도통일 경우 리액터에 흐르는 전류와 캐패시터에 흐르는 전류의 합은 선로에 흐르는 전류와 같고, 비도통일 경우는 캐패시터에 흐르는 전류는 선전류와 같다. 리액터에 흐르는 전류는 전압보다 90° 뒤지고 캐패시터에 흐르는 전류는 전압보다 90° 앞서기 때문에 리액터 전류와 캐패시터 전류는 180° 위상차를 가지고 있다. 여기서 리액터에 흐르는 전류의 극성을 반대로 하면 리액터 전류와 캐패시터 전류는 같은 방향으로 흐르고 있게 된다. 다시 말해서 페루프를 돌고 있는 것이다. 그리고 본 논문의 점호각은 캐패시터의 전압을 기준으로 하고 있다.

### 1. 서론

다이리스터 제어 직렬보상기(TCSC : Thyristor Controlled Serise Compensator)는 직렬보상효과가 대단히 큰 대표적인 FACTS기기이다. 그러나, 효과를 크게 하기 위해 보상율을 높일 경우 전압 및 상차각의 미소 변화에 따라 계통의 안정도가 저하되고, 저주파 공진현상에 의해 축 진동이 발생할 수가 있으므로 TCSC를 설치하기 전에 TCSC의 특성을 해석하는 것이 반드시 필요하다.

TCSC의 3가지 동작모드는 도통모드, 개방모드, 점호각제어모드가 있다. 이중 점호각제어모드는 다이리스터의 도통과 비도통구간이 수시로 점호각에 따라 변하므로 개폐함수를 사용하여 시변선형상태방정식으로 표현 가능하다.

본 논문에서는 이 상태방정식을 MATLAB으로 시뮬레이션한 결과와 축소모형을 제작하고 실험한 결과를 비교하여 TCSC의 성능을 세부적으로 해석한다. 또한 TCSC의 동작한계를 분석하기 위해 점호각에 따른 임피던스의 변화를 분석한다.

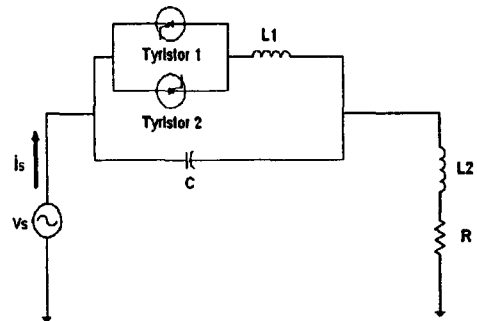


그림 1. TCSC의 하드웨어 구성도

표 1. TCSC의 회로 정수

	용량
전원 ( Vs )	110V 60Hz
리액터 ( L1 )	20mH
캐패시터 ( C )	250uF
다이리스터	1200V 180A
부하 ( R, L2 )	100Ω 53mH

## 2.2 동작 모드

TCSC 동작 모드는 전절에서 설명한 바와 같이 개방모드, 단락모드, 점호각 제어모드가 있으며 표 2와 같다.

표 2. TCSC 의 3가지 동작모드

모드	다이리스터 상태	TCSC 리액턴스
개방모드 (blocked mood)	항상 비도통	Xc
단락모드 (bypassed mood)	항상 도통	X <sub>L</sub> 과 Xc의 병렬
점호각 제어모드 (vernier mood)	비도통인 경우 도통인 경우	점호각에 따라 변함

TCSC의 3가지 동작모드 중에서 점호각 제어모드는 다이리스터의 on, off 동작에 의한 모드이고 TCSC의 주요 동작 모드가 된다.

위의 동작모드를 통한 TCSC의 특성을 알아보기 위해서 개폐함수를 이용하여 상태방정식으로 표현하면 다음 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= Ax + Bu \\
 x &= \begin{bmatrix} V_c \\ I_l \\ I_l \end{bmatrix} \quad u = [E] \quad E = E_m \sin \omega t \\
 A &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{s(\theta)}{C} & \frac{1}{C} \\ \frac{s(\theta)}{L_l} & -\frac{R_l}{L_l} & 0 \\ -\frac{1}{L_l} & 0 & -\frac{R_l}{L_l} \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

행렬A는 개폐함수의 값에 따라 다른 값을 가지는 시변특성을 가진다. 다이리스터가 비도통시 s(t)=0이고 도통시에는 s(t)=1이 된다.

## 2.3 TCSC 의 가변 리액턴스

다이리스터 점호각 제어모드에서 TCSC의 가변 리액턴스는 다음 식(2)에 의해서 구해진다.

$$X = - \left( \frac{\pi X_L}{(\sigma - \sin \sigma) - \pi \frac{X_L}{X_C}} \right) \quad (2)$$

여기서  $\sigma = 2\pi - 2\alpha$

$X_T =$  고정된 임피던스( 필터포함 )

$X_L =$  제어된 인덕턴스

또한, TCSC의 가변 리액턴스는 캐패시터 전압과 선로에 흐르는 전류를 검출하여 다음 식(3)에 적용하여 산출 할 수 있다.

$$X(a) = X_C \frac{U_C(a)}{I_{LINE}} \quad (3)$$

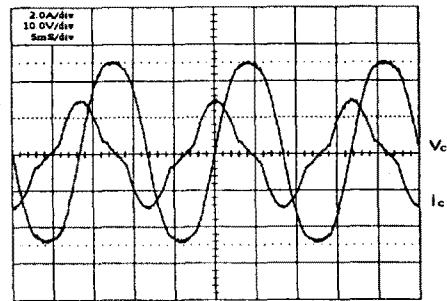
여기서  $X_C =$  TCSC의 캐패시터 리액턴스

$I_{LINE} = p, u.$  공칭 전류의 선간전류

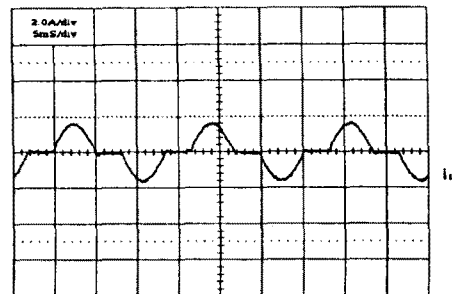
$U_C = p, u.$  공칭 전압의 캐패시터 전압

## 2.4 실험 결과

제안된 TCSC의 점호각에 따른 특성을 분석하기 위해서 상태방정식을 이용한 시뮬레이션과 축소모형의 TCSC의 실험파형을 비교 분석하였다. 그림 2에 보인 TCSC의 실험 결과와 그림 3에 보인 시뮬레이션을 한 결과는 유사한 특성을 갖는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 점호각에 따른 TCSC의 가변 리액턴스를 산출하기 위해서 다이리스터 점호각을 90° 에서 180° 까지 5° 씩 증가시켜서 그림 4에 나타낸 TCSC의 캐패시터 전압과 선전류를 검출하였다.

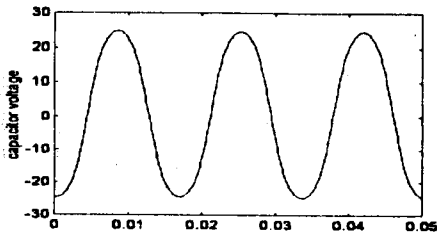


(a) 캐패시터 전압과 전류

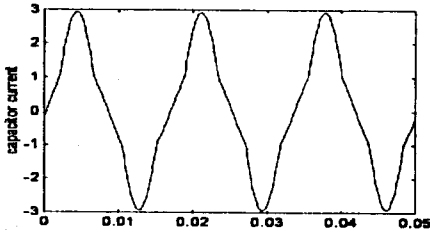


(b) TCSC 리액터 전류

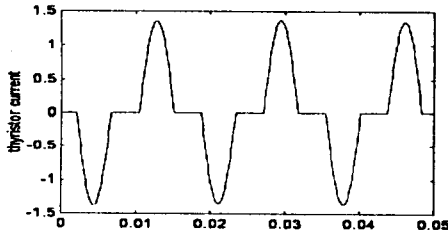
그림 2. 점호각에 따른 TCSC의 실험적 특성



(a) 캐패시터 전압



(b) 캐패시터 전류



(c) 리액터 전류

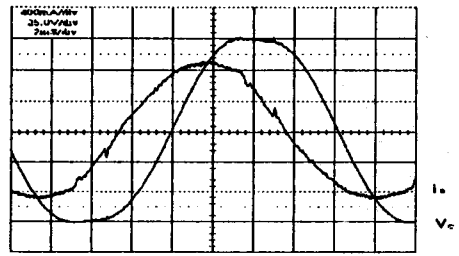
그림 3. 시뮬레이션에 의한 TCSC 특성

TCSC의 가변 리액턴스를 구하기 위해서 검출한 값을 식(3)에 적용해서 실험적 가변 리액턴스를 산출하고, 식(2)를 적용해서 가변 리액턴스를  $C^{**}$ 을 사용하여 시뮬레이션을 하였다.

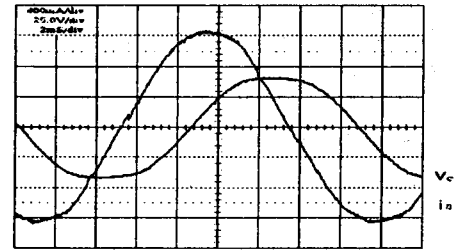
그림 5, 6을 살펴보면 비슷한 점화각에서 준공진점(quasi-resonance point)이 생김을 볼 수 있다. 준공진은 계통의 전류가 전압보다 앞서거나 뒤서는 기준점이다. 실험치에서는 ( $105^{\circ} \sim 110^{\circ}$ ) 정도에서 준공진현상이 생기고 시뮬레이션에서는  $104^{\circ}$  에서 준공진현상이 일어남을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문은 TCSC의 축소모형을 제작하고 실험을 통해, 점화각제어에 따른 각 부분의 전압, 전류파형을 측정하고 제시된 수식을 적용하여 가변 리액턴스용량을 산출하였다. 실험결과를 MATLAB으로 비교 분석하였다.



(a)  $105^{\circ}$  캐패시터 전압과 전류



(b)  $110^{\circ}$  캐패시터 전압과 전류

그림 4. 점화각에 따른 캐패시터 전압과 선전류

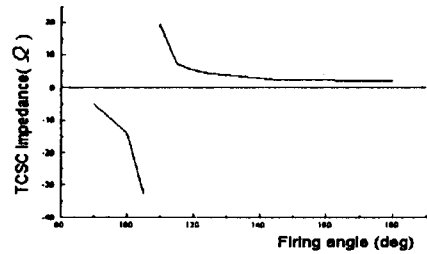


그림 5. 측정된 가변 리액턴스

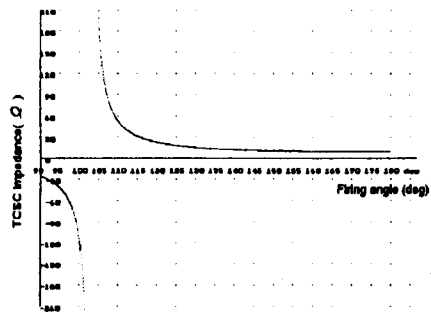


그림 6. 산출한 가변 리액턴스 치

### 참고 문헌

- [1] Scott Gerard Helbing, "Detailed Analysis of An Advanced Form of Series Compensation", Arizona State University, Master thesis, December 1992
- [2] Nicholas W. Miller, "Application of TCSC Augmented Series Compensation for improved Voltage Stability", EPRI FACTS Conference, October 5-7 1994