

제동 저항 인가에 따른 TCSC 시뮬레이터의 특성 분석

전진홍\*, 김광수\*, 김지원\*, 전영환\*

\*한국전기연구원 산업전기연구단, \*\*홍익대학교 전기전자공학부

Operating Characteristics Analysis of TCSC Simulator with Damping Resistor

Jin-Hong JEON\*, Kwang-Su KIM\*, Ji-Won KIM\*, Yeung-Han CHUN\*\*

\*Korea Electrotechnology Research Institute, \*\*Hong-Ik University

**Abstract** - In this paper, we present the analysis results of TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor) operating characteristics with damping resistors. This TCSC system is designed for KERI simulator. It consists of many power system components, which are generator models, scale-downed transmission line modules, transformers, switches, FACTS(Flexible AC Transmission System) devices<sup>[1],[2],[3]</sup>.

1. 서 론

TCSC는 사이리스터 스위칭 제어에 의해 송전선로의 리액턴스를 고속으로 제어는 직렬 제어기로서, 송전선로의 전력전송능력, 전력조류제어 및 안정도 향상 목적에 적용되는 송전계통 설비다. 두 모선간 전력수송능력은 선로 리액턴스에 반비례하므로 TCSC를 이용하여 선로 리액턴스를 보상함으로써 선로의 전력수송능력이 증대된다. 또한 TCSC는 선로의 리액턴스를 제어하기 때문에 효과적으로 선로의 전력조류를 제어하는 기능을 가진다. 특히, 고장 발생 시 TCSC는 선로 리액턴스 제어에 의해 전력 동요를 억제 하여 계통 안정도를 향상시키는 기능이 있다.

본 논문에서는 연구원에서 보유하고 있는 아날로그 계통 시뮬레이터에 적용을 위한 20kV급 TCSC 시뮬레이터를 이용하여 TCR(Thyristor Controlled Reactor)에 직렬로 삽입된 제동 저항의 투입에 따른 TCSC의 임피던스 특성과 TCSC 회로 각 부분의 전압, 전류 파형, 고조파 특성, 응답 특성을 측정하고 분석한 결과를 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 TCSC 시스템의 개요

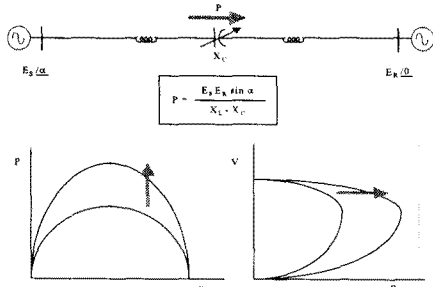


그림 1 TCSC에 의한 선로 리액턴스 보상

TCSC는 사이리스터 스위칭 제어에 의해 송전선로의 리액턴스를 고속으로 제어는 직렬 제어기로서, 송전선로의 전력전송능력, 전력조류제어 및 안정도 향상 목적에

적용되는 송전계통 설비다. 두 모선간 전력수송능력은 선로 리액턴스에 반비례하므로 TCSC를 이용하여 선로 리액턴스를 보상함으로써 선로의 전력수송능력이 증대된다<sup>[4]</sup>. 또한 TCSC는 선로의 리액턴스를 제어하기 때문에 효과적으로 선로의 전력조류를 제어하는 기능을 가진다. 특히, 고장 발생 시 TCSC는 선로 리액턴스 제어에 의해 전력 동요를 억제 하여 계통 안정도를 향상시키는 기능이 있다. 그림 1은 TCSC를 이용하여 선로의 리액턴스를 보상하는 기본적인 동작 원리와 선로의 리액턴스가 보상되었을 때의 송전용량 증대 효과를 도시한 것이다. TCSC의 정상상태 임피던스 특성은 그림 2와 같다<sup>[5]</sup>.

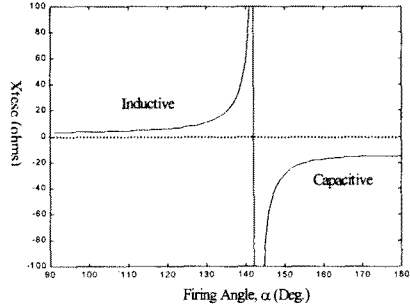


그림 2 TCSC의 정상상태 임피던스 특성

2.2 TCSC 시뮬레이터

KERI 시뮬레이터의 송전선로 모듈은 345kV의 송전선을 기준으로 축소형으로 설계되어 있으며 100km의 송전선로를 등가 pi 모델로 모의되어 설계되어 있다. 100km의 345kV 송전선로의 등가 선로 임피던스는 44mH(16.587Ω)이다. 이 송전선로 모듈의 등가 임피던스를 기준으로 TCSC 시뮬레이터 시스템의 파라미터를 설정하였다. 선로 보상율을 50%이하로 설정하여 TCSC 시스템의 캐패시터는 1000uF과 500uF로 설정하고, 이에 따라 적절한 인덕턴스 값을 설정하여 그 결과를 EMTDC를 통해 검토하였다<sup>[6]</sup>. 인덕턴스와 캐패시턴스 값에 따른 TCSC 시스템의 공진 주파수는 표 1과 같다. 표 1에서 검토한 파라미터 중 공진 주파수가 일정 범위 내에 존재할 수 있도록 인덕턴스 값을 각각 3.5mH와 1.5mH로 설정하였다.

TCSC 시스템은 LC 파라미터와 그 구조적인 특성으로 인해 점호각에 따라 임피던스가 변하게 되며, 이러한 점호각에 따른 임피던스 변화를 정상상태 임피던스 특성 곡선이라고 한다. 정상상태 임피던스 특성 곡선에 따라 특정 점호각에서 공진영역이 존재하게 되므로, 이러한 공진영역에서 사이리스터가 점호하지 않도록 동작 영역을 제한해 주어야 한다. 1000uF-1.5mH의 파라미터로 설정한 경우와 500uF-3.5mH의 파라미터로 설정한 경우와

대하여 각각 진상 운전 모드와 지상 운전 모드의 TCSC 동작 특성을 EMTDC로 검토하였다<sup>5)</sup>.

표 1 LC 파라미터에 따른 TCSC 시뮬레이터의 공진 주파수

캐패시턴스(C) 인덕턴스(L)	500 $\mu$ F	1000 $\mu$ F
5.0mH	100 Hz	71 Hz
3.5mH	120 Hz	91 Hz
1.5mH	184 Hz	130 Hz
0.7mH	269 Hz	190 Hz

각각의 경우 운전 범위는 다음과 같다.

■ 1000 $\mu$ F-1.5mH, 0.05 $\Omega$

지상 운전 모드 : 105°~ 125°, 1.23 $\Omega$  ~ 5.72 $\Omega$

진상 운전 모드 : 140°~ 160°, -6.88 $\Omega$  ~ -2.88 $\Omega$

■ 500 $\mu$ F-3.5mH, 0.05 $\Omega$

지상 운전 모드 : 100°~ 120°, 2.50 $\Omega$  ~ 9.27 $\Omega$

진상 운전 모드 : 145°~ 165°, -8.30 $\Omega$  ~ -5.47 $\Omega$

위의 검토 결과를 바탕으로 제작된 TCSC 시뮬레이터의 전체적인 구성은 그림 3과 같다.

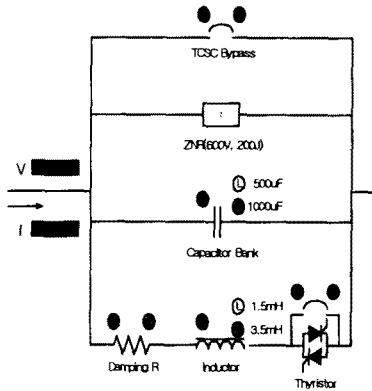


그림 3 TCSC 시뮬레이터 구성

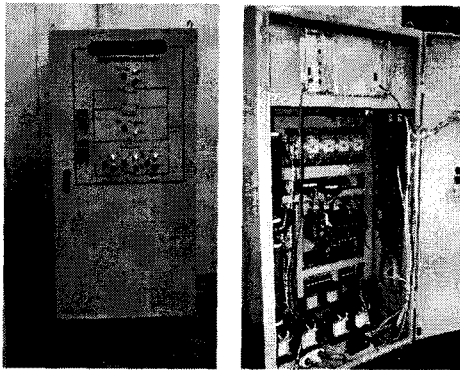


그림 4 TCSC 시뮬레이터

TCSC 시뮬레이터는 그림 3에 나타난 것처럼 스위치를 이용하여 각각의 모듈(캐패시터, 제동저항, 인덕터, 싸이리스터)을 자동 혹은 수동으로 투입 혹은 제거할 수 있도록 구성하였으며 그 상태는 시뮬레이터 전면 패널에 표시될 수 있도록 하였다.

각각 모듈의 상태는 운전자가 임의로 설정하거나 계어를 통해 설정할 수 있도록 설계하였다. 이러한 구성으로 위에서 검토한 각각 파라미터 조합에 따른 TCSC 시스템의 응용 특성을 시뮬레이터를 통해 검토할 수 있다. 제작된 TCSC 시뮬레이터의 사진은 그림 4와 같다.

2.3 TCSC 시뮬레이터 동작 실험 결과

제작된 TCSC 시뮬레이터를 KERI 시뮬레이터에 연계하여 기본 응용 특성에 대한 실험을 하였다. 여러 가지 점호각에 제동저항의 투입에 따른 여러 가지 실험이 이루어졌다. 이에 대한 상세한 내용은 참고문헌[5]를 참고하길 바란다. 본 논문에서는 그 중 대표적인 실험결과 파형을 수록 하였다. 각 실험 결과에 대한 파형은 그림 5에서 그림 9와 같다. 그림 5는 싸이리스터가 동작하지 않은 상태에서 TCSC가 투입되었을 때의 선로 전류와 TCSC에 인가되는 전압에 대한 결과이다. 그림 5에 나타나 있는 바와 같이 스위칭 동작이 발생하지 않을 경우에는 선로에 캐패시터가 인가되어 있는 상태이므로 TCSC에 인가되는 전압과 선로 전류 사이에는 진상관계가 나타나고 있음을 알 수 있다.

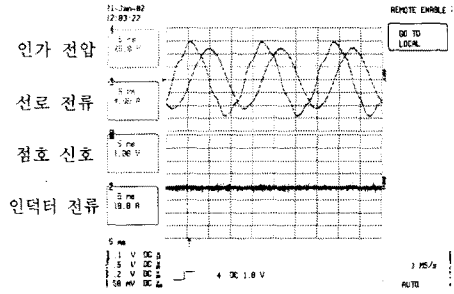


그림 5 점호각 180°

그림 6과 그림 7은 지상 모드 운전에 대한 결과이다. TCSC 시스템의 점호각은 112°로 운전되고 있음을 점호 신호 파형을 통해 알 수가 있으며 그 결과로 선로 전류와 TCSC에 인가되는 전압과는 지상관계가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 제동 저항의 투입에 따라 인덕터 전류의 크기가 감소하게 되고 이에 따라 인가전압의 왜형이 크게 영향을 받고 있음을 실험 결과를 통해 알 수 있다.

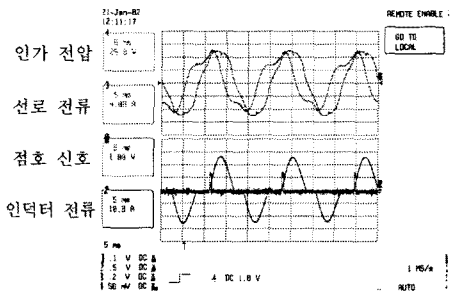


그림 6 지상 모드 운전(점호각: 112°)

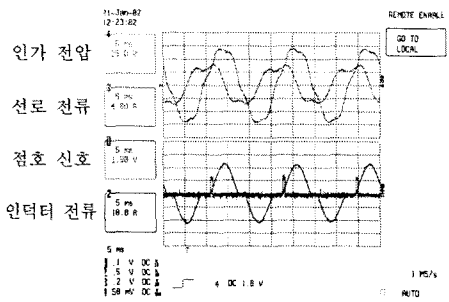


그림 7 지상 모드 운전(점호각: 112°) - 제동 저항 인가

그림 8과 그림 9는 진상 모드 운전에 대한 결과이다.

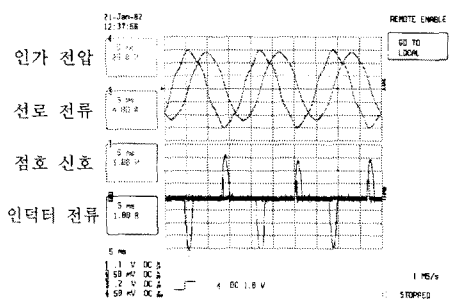


그림 8 진상 모드 운전(점호각: 155°)

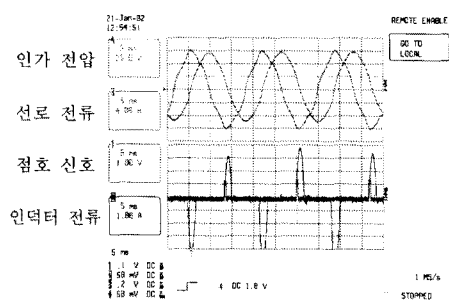


그림 9 진상 모드 운전(점호각: 155°) - 제동 저항 인가

TCSC 시스템의 점호각은 155°로 운전되고 있음을 점호 신호 파형을 통해 알 수가 있으며 그 결과로 선로 전류와 TCSC에 인가되는 전압파는 진상관계가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 댄핑 저항의 투입에 따라 인덕터 전류의 크기가 감소하게 되나 현재 결과 파형에서는 그 결과가 미미하여 제동 저항의 투입에 따른 효과는 나타나지 않고 있다.

## 2.4 TCSC 시뮬레이터 운전 특성

2.3절에 제시한 바와 같이 여러 점호각에서 제동저항의 투입에 따른 각 부분의 파형에 대한 검토가 이루어졌으며 검토된 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 리액터의 인덕턴스 값이 증가할수록 TCSC의 진상(capacitive) 운전 영역이 증가한다.(TCSC 시스템에 인가되는 전압에 대해 리액턴스 값이 증가할수록 리액턴스 전류가 감소하기 때문이다. 이는 같은 점

호각에서 리액터의 임피던스가 크고 캐패시터의 임피던스가 작으므로 리액터 전류는 감소하고 캐패시터 전류는 증가하기 때문에 TCSC 시스템의 전류는 진상 전류가 된다.)

- 리액터의 인덕턴스 값이 작으면 TCSC의 안전운전 영역이 감소한다.(공진점 부근에서 3차 고조파의 증가로 캐패시터 전압이 크게 왜곡되어 불규칙한 zero-crossing이 발생하고 고조파 성분도 크게 증가하기 때문이다.)
- 기생 저항(parastic resistance)는 진상분 임피던스는 감소시키고 지상분 임피던스는 증가시킨다.(즉, 진상분 운전영역이 증가하고 지상분 운전영역은 감소된다. 점호각이 공진영역에 가까이 갈수록 임피던스에 크게 영향을 받게 된다.)
- 부가 제동 저항(damping resistor)은 진상운전 영역을 증가시키지만 진상분 등가 임피던스와 지상분 등가 임피던스는 감소한다.(TCSC의 점호각이 180°에서 멀어질수록 그 영향은 줄어든다.)
- 기생 저항과 부가 제동 저항의 효과는 공진 영역 근처에서 등가 임피던스의 급격한 증가로 나타난다.

이러한 임피던스 특성을 통한 전체 TCSC 시뮬레이터 시스템의 부가저항, 리액터, 캐패시터 파라미터의 특성은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 리액터의 인덕턴스가 클수록, TCSC의 진상 운전영역이 증가한다. 같은 점호각에서 진상 리액턴스는 감소하고, 지상 리액턴스는 증가한다. 캐패시터 인가 전압의 oscillation 크기와 시간을 감소시킨다.
- 기생 저항과 부가 제동 저항은 공진 영역 부근에서 효과가 크게 나타난다. 또한, TCSC의 전체 임피던스 특성을 저하시키지만 oscillation에 대한 제동(damping) 효과를 나타낸다.
- 리액터의 인덕턴스가 작을수록 고조파가 증가하고 TCSC 시스템의 전체적인 동작을 불안정하게 만들 수 있다. 부가 제동 저항은 고조파를 감소시키며 안정한 동적영역을 증가시킨다. 고조파는 싸이리스터와 캐패시터의 폐회로를 순환하며 승전 선로에는 영향을 미치지 않는다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 연구원에서 보유하고 있는 아날로그 계통 시뮬레이터에 적용을 위한 20kVA급 TCSC 시뮬레이터의 사양과 이를 이용하여 TCR에 직렬로 삽입된 제동 저항의 투입과 점호각의 변화에 따른 TCSC의 임피던스 특성과 TCSC 회로 각 부분의 전압, 전류 파형, 고조파 특성, 응답 특성을 측정하고 분석한 결과를 제시하였다. 향후 KERI 시뮬레이터에 적용하여 축전동 Damping 제어기로써의 동작과 선로 임피던스 조절에 따른 조류제어에 대한 연구가 진행될 예정이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] Narain G. Hingorani and Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems(Book)", IEEE Press, 2000
- [2] "FACTS 연구기획사업", 최종보고서, 과학기술부, 1995
- [3] "IMVA 급 통합전력제어기 개발", 최종보고서, 과학기술부, 1999
- [4] "FACTS에 의한 송배전 계통의 용량증대 기술개발" 1단계 최종보고서, 과학기술부, 1998
- [5] "다관성 터빈/발전기 시뮬레이터와 TCSC 제어 시스템 개발", 국무총리실, 2002