

KERI 시뮬레이터 적용을 위한 TCSC 시스템 설계

전진홍\*, 김광수\*, 김지원\*, 전영환\*  
\*한국전기연구원, \*홍익대학교

The Design and Implementation of TCSC System for KERI Simulator

Jin-Hong JEON\*, Kwang-Su KIM\*, Ji-Won KIM\*, Yeung-Han CHUN\*  
\*Korea Electrotechnology Research Institute, \*Hong-Ik University

**Abstract** - 본 논문에서는 한국전기연구원에서 보유하고 있는 아날로그형 전력계통 시뮬레이터인 KERI 시뮬레이터에 적용하고자 개발 중인 TCSC 시스템 시뮬레이터의 설계 방법과 적용 결과를 제시하고 한다.

KERI 시뮬레이터는 전력계통시스템을 모의하기 위해 한국전기연구원에서 보유하고 있는 실험장비로 3개의 동기발전기와 345kV 송전선로 모델, 각종 계통 설비의 축소 모형으로 구성되어 있다. 지금까지 UPFC, STATCOM과 같은 FACTS 모의장치의 계통 적용을 검토하기 위한 연구가 이루어져 왔다.

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.

그림 1은 TCSC의 싸이리스터의 점호각 변화에 따른 선로의 리액턴스를 보상하는 기본적인 동작 원리와 선로의 리액턴스가 보상되었을 때의 송전용량 증대 효과를 도시한 것이다<sup>[4]</sup>.

1. 서 론

기존의 전력계통 시스템은 수송소자 및 기계적인 스위치로 구성되어 시스템 특성을 제어하는 것이 매우 제한적이고 어려운 것이었다. 그러나 최근 반도체 기술과 전력전자 기술의 발달로 전력용 반도체 소자의 고압 대용량화 및 시스템화가 가능함에 따라 전력 계통 시스템에 전력전자 장치를 적용하여 송배전 계통의 기본특성을 결정하는 교류송전선로의 임피던스, 모션 전압의 크기 및 위상각을 제어하고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 전력계통에서 전력전자 시스템을 적용하여 전력계통 특성을 제어하고자 하는 기술을 FACTS(유연송전시스템, Flexible AC Transmission System)라고 하고, FACTS System을 구성하는 장치에는 TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor), STATCOM(Static Synchronous Compensator), UPFC(Unified Power Flow Controller)를 대표적인 장치로 들 수 있다.<sup>[1][2][3]</sup>

현재 한국전기연구원에는 전력계통 시스템을 모의할 수 있는 아날로그형 축소 시험설비가 구축되어 있으며, 축소 시험 설비를 이용하여 FACTS에 관한 연구를 수행하였다<sup>[2][3]</sup>. KERI 시뮬레이터는 345kV 송전 시스템을 380V급으로 등가 축소한 모델을 하드웨어적으로 구현한 시뮬레이터로서 5kVA급의 수력, 화력, 원자력 발전기의 특성을 모의한 발전기들과 송전선로 모듈, 변압기, 차단기, FACTS 설비 등으로 구성되어 있다. 이러한 연구의 일부분으로 TCSC 시뮬레이터의 설계와 구현에 관한 연구가 수행 되었으며 본 논문에서는 20KVA급 TCSC 시뮬레이터 설계와 구현에 대하여 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 TCSC 시스템 개요

TCSC는 싸이리스터 스위칭 제어에 의해 송전선로의 리액턴스를 고속으로 제어는 직렬 제어기로서, 송전선로의 전력전송능력, 전력조류제어 및 안정도 향상 목적에 적용되는 송전계통 설비다. 두 모션간 전력수송능력은 선로 리액턴스에 반비례하므로 TCSC를 이용하여 선로

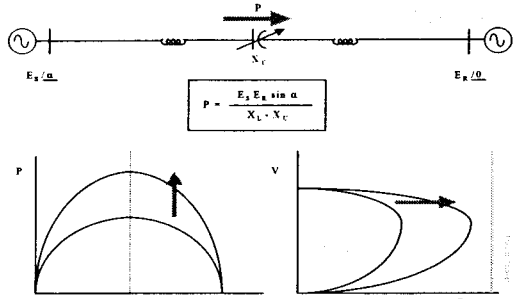


그림 1 TCSC에 의한 선로 리액턴스 보상

TCSC의 정상상태 임피던스 특성은 TCSC 시스템의 캐패시턴스와 인덕턴스에 의해 결정되며 투입되는 임피던스는 그림 2에 보이는 바와 같이 싸이리스터의 점호각에 따라 변한다<sup>[4]</sup>. 싸이리스터의 점호각 변화에 따른 임피던스 변화량을 그래프로 나타낸 것이 TCSC의 정상상태 임피던스 특성이다.

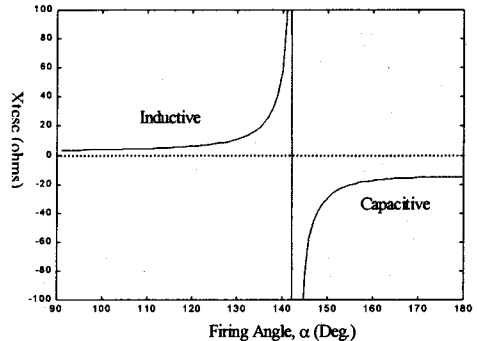


그림 2 TCSC의 정상상태 임피던스 특성

싸이리스터의 점호각에 따라 선로에 투입되는 임피던스

스가 변하게 되며 그림 2의 정상상태 임피던스 특성에 나타난 바와 같이 inductive 영역이나 capacitive 영역에서 다음의 세 가지 모드 중 하나로 동작하게 된다.

■ INSERT MODE

싸이리스터가 항상 오픈인 상태, 즉 선로에 직렬콘덴서만 투입된 상태로 기존의 무제어 직렬 커패시터처럼 콘덴서의 용량만큼 보상된다.

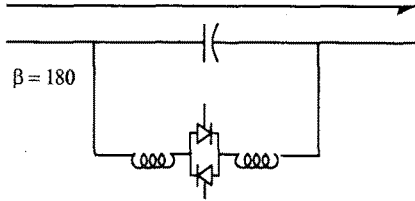


그림 3 Insert 모드

■ BYPASS MODE

싸이리스터가 항상 도통되는 상태, 즉 리액터와 콘덴서가 병렬로 연결된 상태로  $X_c > X_L$ 의 조건을 만족하도록 L,C의 값을 결정하므로 합성리액턴스는 유도성이 된다. 따라서 송전선로 단락사고가 발생했을 때 선로 리액턴스를 증가시키기 위해 이용할 수 있는 모드이다.

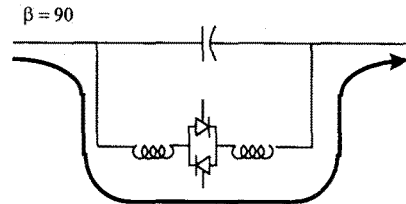


그림 4 Bypass 모드

■ VERNIER CONTROL MODE

임피던스 연속제어 모드로서 원하는 리액턴스가 되도록 싸이리스터를 제어할 수 있다. 이 모드는 정상상태 선로의 조류제어는 물론 과도시 계통의 동요를 효과적으로 억제할 수 있는 모드이다.

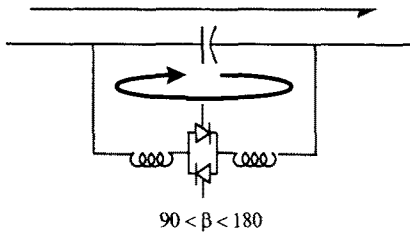


그림 5 Vernier Control 모드

2.2 KERI 시뮬레이터

KERI 시뮬레이터는 한국전기연구원의 전력계통실험실에 있으며 345kV 전력계통 시스템을 380V급으로 축소하여 실제 시스템의 특성을 반영할 수 있도록 설계하였다. KERI 시뮬레이터는 크게 발전기 모듈, 송전선로 모듈, FACTS 모듈로 구성되어 있다. 발전기 모듈은 각각 보정화력, 삼량진 양수 발전기를 5kVA급으로 축소하여 동특성을 반영할 수 있도록 설계되어 있으며 각각은 MG set 형태로 구성되어 원하는 발전기 특성을 모의할 수 있게 제작되어 있다. 또한 다관성(multi-mass) 형태를 가지는 발전기 모듈이 있어

SSR(Sub-Synchronous Resonance) 현상 또한 모의할 수 있다. 이러한 발전기 모듈들을 계통의 특성을 반영하여 네트워크를 구성할 수 있도록 하는 각종 차단기 모듈과 등가 변압기 모듈, 345kV의 송전 선로 100km를 등가회로로 모델링하여 송전선로 특성을 반영할 수 있는 송전 선로 모듈들이 있으며, UPFC, STATCOM과 같은 FACTS 모듈들이 존재하여 다양한 계통의 현상을 모의할 수 있게 하였다. 지락 및 단락 사고를 임의로 재현할 수 있으며 reclosing 기능이 구현되어 있는 차단기 모듈들이 있어 실제의 계통 사고가 발생할 때의 상황을 실제통과 유사하게 모의할 수가 있다. KERI 시뮬레이터는 전력 계통 안정도 현상 해석, 계통 이상 현상의 해석, 계통 보호 제어 시스템의 개발 및 검증, 기기 이상 현상 해석 등의 연구에 이용되어 왔다. KERI 시뮬레이터는 그림 6과 같다<sup>[5]</sup>.

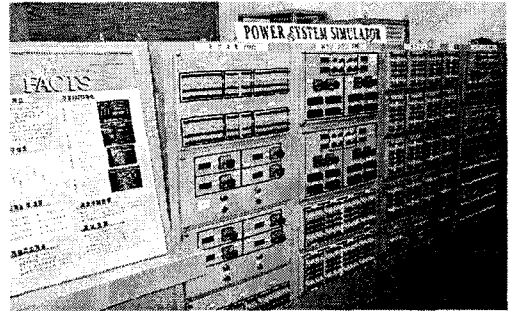


그림 6 KERI 시뮬레이터

2.3 TCSC 시뮬레이터 파라미터 설정

KERI 시뮬레이터의 송전선로 모듈은 345kV의 송전선로 기준으로 축소형으로 설계되어 있으며 100km의 송전선로를 등가 II 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 보상을 50%이하로 설정하여 TCSC 시스템의 캐패시터는 1000uF과 500uF로 설정하고, 이에 따라 적절한 인덕턴스 값을 설정하여 그 결과를 EMTDC를 통해 검토하였다<sup>[5]</sup>. 인덕턴스와 캐패시턴스 값에 따른 TCSC 시스템의 공진 주파수는 표 1과 같다.

표 1 LC 파라미터에 따른 TCSC 시뮬레이터의 공진 주파수

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

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 싸이리스터가 점호하지 않도록 동작 영역을 제한해 주어야 한다. 1000uF-1.5mH의 파라미터로 설정한 경우와 500uF-3.5mH의 파라미터로 설정한 경우에 대하여 각각 진상 운전 모드와 지상 운전 모드의

TCSC 동작 특성을 EMTDC로 검토하였다<sup>5)</sup>.

각각의 경우 운전 범위는 다음과 같다.

■ 1000uF-1.5mH, 0.05Ω

지상 운전 모드 : 105°~ 125°, 1.23Ω ~ 5.72Ω

진상 운전 모드 : 140°~ 160°, -6.88Ω ~ -2.88Ω

■ 500uF-3.5mH, 0.05Ω

지상 운전 모드 : 100°~ 120°, 2.50Ω ~ 9.27Ω

진상 운전 모드 : 145°~ 165°, -8.30Ω ~ -5.47Ω

2.4 TCSC 시뮬레이터

이러한 검토 결과를 바탕으로 제작된 TCSC 시뮬레이터의 전체적인 구성은 그림 7과 같다.

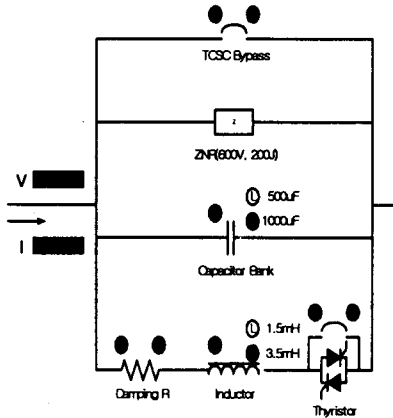


그림 7 TCSC 시뮬레이터 구성

TCSC 시뮬레이터는 그림 7에 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 제어를 통해 설정할 수 있도록 설계하였다. 이러한 구성으로 위에서 검토한 각각 파라미터 조합에 따른 TCSC 시스템의 응답 특성을 시뮬레이터를 통해 검토할 수 있다. 제작된 TCSC 시뮬레이터의 사진은 그림 8과 같다.

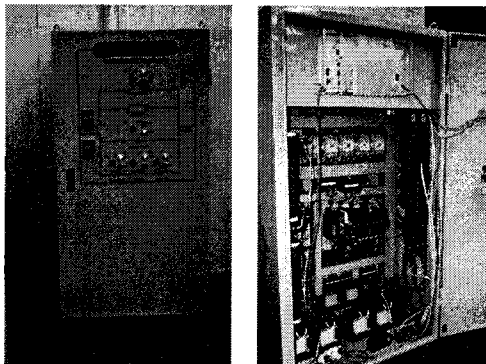


그림 8 TCSC 시뮬레이터

2.5 TCSC 시뮬레이터 동작 실험

제작된 TCSC 시뮬레이터를 KERI 시뮬레이터에 연

계하여 기본 응답 특성에 대한 실험을 하였다. 각 실험 결과에 대한 파형은 그림 9에서 그림 13과 같다. 그림 9는 싸이리스터가 동작하지 않은 상태에서 TCSC가 투입되었을 때의 선로 전류와 TCSC에 인가되는 전압에 대한 결과이다. 그림 9에 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.

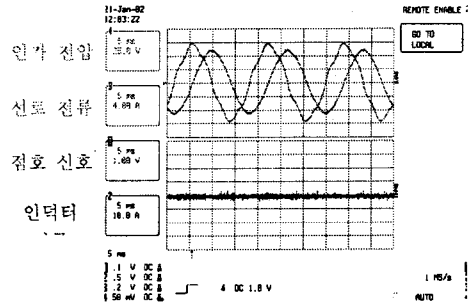


그림 9 점호각 180°

그림 10과 그림 11은 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.

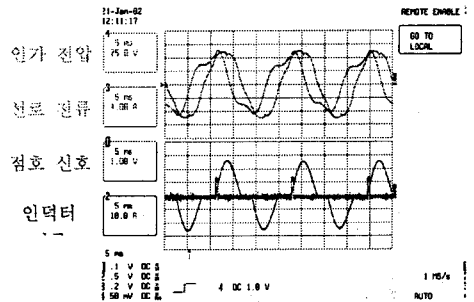


그림 10 지상 모드 운전(점호각: 112°)

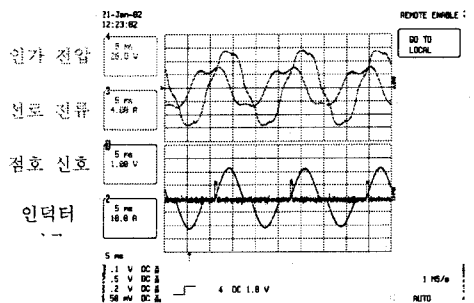


그림 11 지상 모드 운전(점호각: 112°) - 제동 저항 인가

그림 12와 그림 13은 진상 모드 운전에 대한 결과이다.

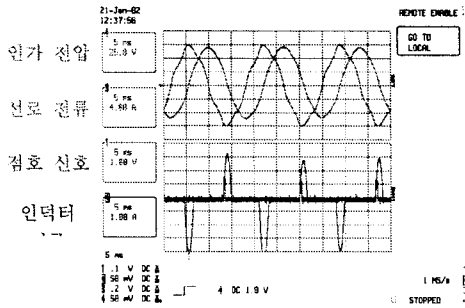


그림 12 진상 모드 운전(점호각: 155°)

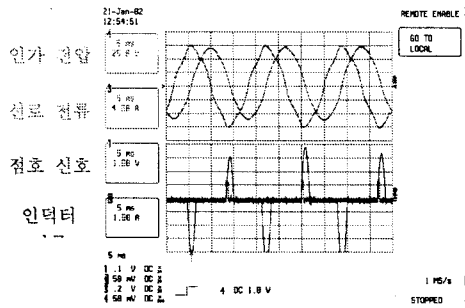


그림 13 진상 모드 운전(점호각: 155°) - 제동 저항 인가

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

### 3. 결 론

본 논문에서는 KERI 시뮬레이터에 적용을 목적으로 설계된 20kVA급 TCSC 시뮬레이터의 설계와 제작에 대하여 살펴보았다. TCSC 시뮬레이터를 제작하기 위해 기존의 시뮬레이터 관련 논문을 검토하고, 기준 설계 자료를 기반으로 모의 해석을 통한 검토 결과를 제시하였다. 또한, 실험 결과를 통하여 싸이리스터의 점호각에 대한 TCSC의 임피던스 특성과 TCSC 회로 각 부분의 전압, 전류 파형, 고조파 특성, 응답 특성을 측정하고 분석한 결과를 제시하였다. 향후 KERI 시뮬레이터에 적용하여 축진동 Damping 제어기로서의 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] "1MVA 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