

20kVA 시뮬레이터급 TCSC 설계 및 제작

전진홍*, 김광수*, 김지원*, 전영환**

*한국전기연구원, **홍익대학교

The Design and Implementation of 20kVA TCSC Simulator

J.H. Jeon*, K.S. Kim*, J.W. Kim*, and Y.H. Chun**

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

ABSTRACT

In this study, we design and implement the 20kVA TCSC(Thyristor Controlled Series Compensator) simulator. It was tested on the KERI simulator. The KERI simulator is a analog simulator for power system at the KERI power system division lab. It consist of many power system components, which are a 380V 5kVA generators, scale-downed transmission line modules, transformers, switches, FACTS(Flexible AC Transmission System) devices.^{[1][2][3]}

In this paper, we present the design and implementation of 20kVA TCSC simulator and its basic test results.

1. 서 론

기존의 전력계통 시스템은 수동소자 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, 모선 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 Compensator), STATCOM(Static Synchronous Compensator), UPFC(Unified Power Flow Controller)를 대표적인 장치로 들 수 있다.^{[1][2][3]} 이러한 FACTS 설비 중, TCSC는 thyristor 스위칭에 의해 송전선로의 리액

턴스를 고속으로 제어하는 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.^{[2][3][4]}

현재 한국전기연구원에는 전력계통 시스템을 모의할 수 있는 아날로그형 축소 시험설비가 구축되어 있으며, 축소 시험 설비를 이용하여 FACTS에 관한 연구를 수행하고 있다.^{[2][3]} 이러한 연구의 일부분으로 20kVA급 TCSC 모의장치의 설계와 구현에 관한 연구가 수행 되었으며, TCSC 시뮬레이터를 제작하기 위해 기존의 시뮬레이터 관련 논문을 검토하고, 기준 설계 자료를 기반으로 EMTDC를 통한 시뮬레이션을 실행하여 TCSC 모의장치에 대한 설계 파라미터를 결정하였다. 본 논문에서는 주로 thyristor의 점호각(firing angle)에 대한 TCSC의 임피던스 특성과 TCSC 회로 각 부분의 전압, 전류 파형, 고조파 특성, 응답 특성을 측정하고 분석한 결과를 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 TCSC 시스템 임피던스 특성 분석

TCSC 시스템의 기본적인 동작과 제어 방법에 대하여는 참고문헌^[1]의 내용을 참고하길 바라며 본 논문에서는 지면관계상 생략하기로 한다. TCSC 시스템의 임피던스 특성에 대한 검토는 참고문헌^[5]에서 그 내용을 자세히 다루었으며 각 경우에 대한 모의 해석 결과 또한 상세히 수록되어 있다. 본 논

문에서는 모의 해석을 통한 검토 결과만을 제시하고자 한다. 모의 해석을 통한 TCSC 시스템의 임피던스 특성을 분석하여 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 점호각에서 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)은 진상분 임피던스는 감소시키고 지상분 임피던스는 증가시킨다.(즉, 진상분 운전영역이 증가하고 지상분 운전영역은 감소된다. 점호각이 공진영역에 가까이 감에 따라 증가 임피던스에 크게 영향을 주게 된다.)
- 부가 제동 저항(damping resistor)은 진상운전 영역을 증가시키지만 진상분 증가 임피던스와 지상분 증가 임피던스는 감소한다.(TCSC의 점호각이 180°에서 멀어질수록 그 영향은 줄어든다.)
- 기생 저항과 부가 제동 저항의 효과는 공진 영역 근처에서 증가 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 감쇄시키며 안정한 동작영역을 증가시킨다. 고조파는 사이리스터와 캐패시터의 폐회로를 순환하며 송전 선로에는 영향을 미치지 않는다.

2.2 TCSC 시스템 파라미터 설정

현재, 본 연구원에서 보유하고 있는 아날로그형 전력계통 모의장치의 송전선로 모듈은 345kV의 송전선을 기준으로 축소형으로 설계되어 있으며

100km의 송전선로를 등가 Π 모델로 모의되어 설계되어 있다. 100km의 345kV 송전선로의 등가 선로 임피던스는 44mH(16.587 Ω)이다. 이 송전선로 모듈의 등가 임피던스를 기준으로 TCSC 시뮬레이터 시스템의 파라미터를 설정하였다. 선로 보상률을 50%이하로 설정하여 TCSC 시스템의 캐패시터는 1000 μ F과 500 μ F로 설정하고, 이에 따라 적절한 인덕턴스 값을 설정하여 그 결과를 EMTDC를 통해 검토하였다.^[5] 인덕턴스와 캐패시터 값에 따른 TCSC 시스템의 공진 주파수는 표 1과 같다.

표 1 LC 파라미터에 따른 TCSC 시뮬레이터의 공진 주파수
Table 1 Resonance Frequency of TCSC Simulator as LC parameter

캐패시터(C) 인덕턴스(L)	500 μ F	1000 μ 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

표 1에서 검토한 파라미터 중 공진 주파수가 일정 범위 내에 존재할 수 있도록 인덕턴스 값을 각각 3.5mH와 1.5mH로 설정하였다.

2.3 TCSC 시스템 동작범위 설정

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 thyrister가 점호하지 않도록 동작 영역을 제한해 주어야 한다. 1000 μ F-1.5mH의 파라미터로 설정한 경우와 500 μ F-3.5mH의 파라미터로 설정한 경우에 대하여 각각 진상 운전 모드와 지상 운전 모드의 TCSC 동작 특성을 EMTDC로 검토하였다.^[5]

각각의 경우 운전 범위는 다음과 같다.

■ 1000 μ F-1.5mH, 0.05 Ω

지상 운전 모드 : 105°~ 125°, 1.23 Ω ~ 5.72 Ω

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

■ 500 μ F-3.5mH, 0.05 Ω

지상 운전 모드 : 100°~ 120°, 2.50 Ω ~ 9.27 Ω

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

2.4 20kVA TCSC 모의장치

이러한 검토 결과를 바탕으로 제작된 TCSC 시뮬레이터의 전체적인 구성은 그림 1과 같다.

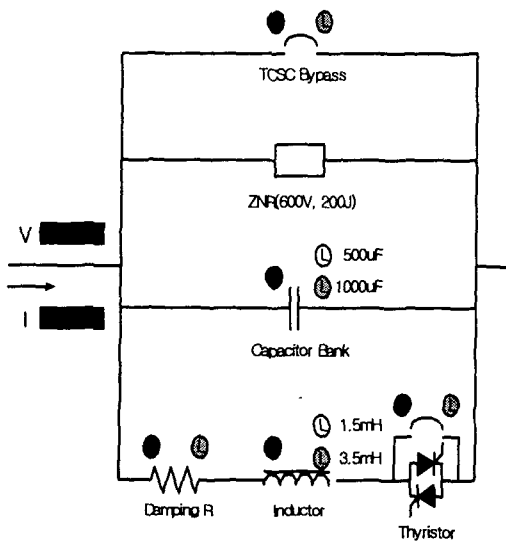


그림 1 TCSC 시뮬레이터 구성

Fig 1 Basic structure of TCSC simulator

TCSC 시뮬레이터는 그림 1에 나타난 것처럼 스위치를 이용하여 각각의 모듈(캐패시터, 제동저항, 인덕터, 싸이리스터)을 자동 혹은 수동으로 투입 혹은 제거 할 수 있도록 구성하였으며 그 상태는 시뮬레이터 전면 패널에 표시될 수 있도록 하였다. 각각 모듈의 상태는 운전자가 임의로 설정하거나 제어기를 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 2와 같다.

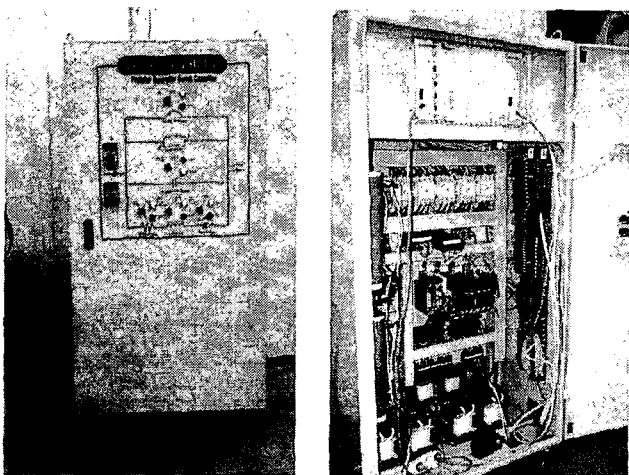


그림 2 TCSC 시뮬레이터

Fig. 2 TCSC simulator

2.5 TCSC 모의장치 동작 실험

제작된 20kVA급 TCSC 시뮬레이터를 전력계통 시뮬레이터에 연계하여 기본 응답 특성에 대한 실험

을 하였다. 각 실험 결과에 대한 파형은 그림 3에서 그림 7과 같다. 그림 3은 싸이리스터가 동작하지 않은 상태에서 TCSC가 투입되었을 때의 선로 전류와 TCSC에 인가되는 전압에 대한 결과이다. 그림 3에 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.

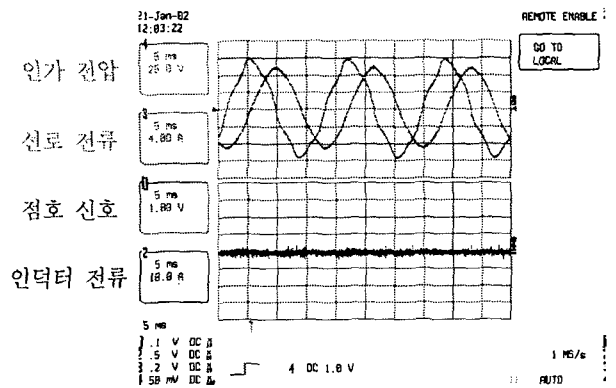


그림 3 점화각 180°

Fig. 3 Firing Angle 180°

그림 4와 그림 5는 지상 모드 운전에 대한 결과이다. TCSC 시스템의 점화각은 112°로 운전되고 있음을 점호 신호 파형을 통해 알 수가 있으며 그 결과로 선로 전류와 TCSC에 인가되는 전압과는 지상관계가 이루어지고 있음을 알 수 있다. 제동저항의 투입에 따라 인덕터 전류의 크기가 감소하게 되고 이에 따라 인가전압의 왜형이 크게 영향을 받고 있음을 실험 결과를 통해 알 수 있다.

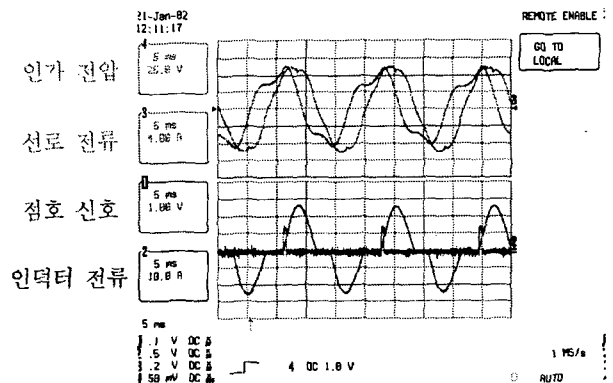


그림 4 지상 모드 운전(점화각: 112°)

Fig. 4 Lag mode operation(Firing Angle : 112°)

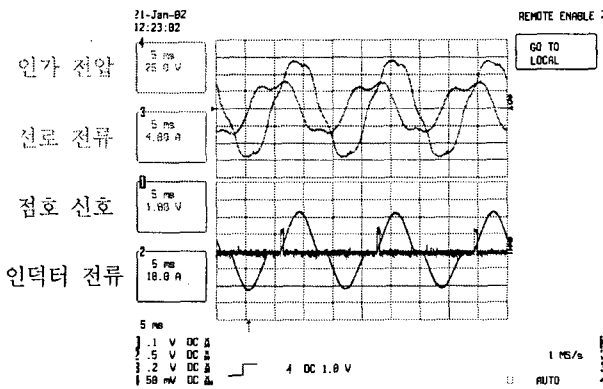


그림 5 지상 모드 운전(점호각: 112°) - 제동 저항 인가
Fig. 5 Lag mode operation(Firing Angle : 112°) with damping resistor

그림 6과 그림 7은 진상 모드 운전에 대한 결과이다.

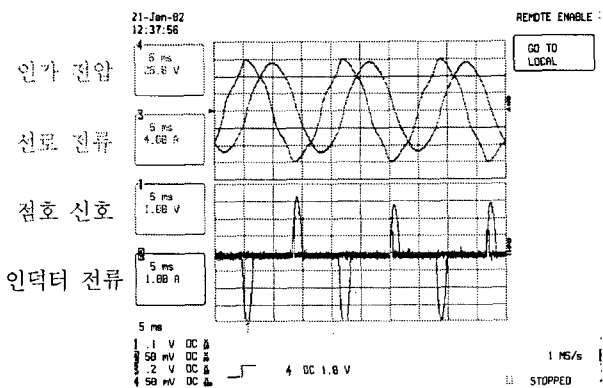


그림 6 진상 모드 운전(점호각: 155°)
Fig. 6 Lead mode operation(Firing Angle : 155°)

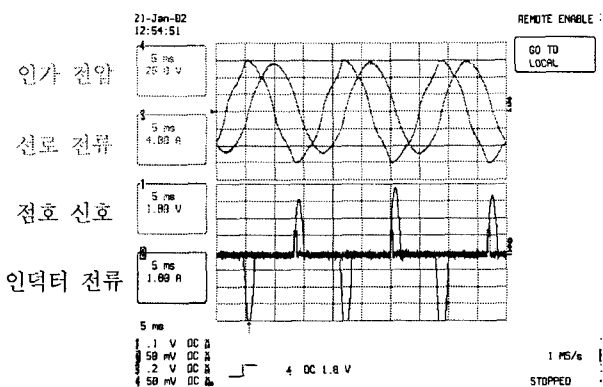


그림 7 진상 모드 운전(점호각: 155°) - 제동 저항 인가
Fig. 7 Lead mode operation(Firing Angle : 155°) with damping resistor

TCSC 시스템의 점호각은 155°로 운전되고 있음을 점호 신호 파형을 통해 알 수가 있으며 그 결과로 선로 전류와 TCSC에 인가되는 전압과는 진상

관계가 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. 이는 앞의 설계^[5]에서 검토 결과와 일치하는 사항이다.

3. 결 론

본 논문에서는 KERI simulator에 적용을 목적으로 설계된 20kVA급 TCSC 모의장치의 설계와 제작에 대하여 살펴보았다. TCSC 시뮬레이터를 제작하기 위해 기존의 시뮬레이터 관련 논문을 검토하고, 기존 설계 자료를 기반으로 모의 해석을 통한 검토 결과를 제시하였다. 또한, 실험 결과를 통하여 Thyristor의 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.

이 논문은 과학기술부 특정연구개발사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

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.