

# TCSC가 적용된 실계통 시스템에서의 TRV와 MOV의 영향에 대한 분석<sup>+</sup>

(Analysis on the Effects of TRV and MOV in Real  
System with TCSC)

이 석 주<sup>1)\*</sup>  
(Lee Seok-Ju)

**요 약** 전력 시스템에서 직렬 보상기의 적용은 회로 차단기 과도 재기 전압 (Transient Recovery Voltage : TRV) 문제와 같은 다른 장치에 영향을 미친다. 본 논문에서는 TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor)가 있는 경우와 없는 경우의 선로 차단기에 대한 TRV 효과를 시뮬레이션을 통해 분석하고, TCSC 설치로 인한 TRV 증가를 극복하는 효과적인 방법을 제안한다. 또한 금속 산화물 비리스터 (Metal Oxide Varistor : MOV)에 대한 제안된 보호의 영향에 대해서도 설명한다. 시뮬레이션 모델은 국내의 345 kV 송전선로를 사용하였다. 전력 시스템은 PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) / EMTDC (Electro Magnetic Transient Direct Current)를 사용하여 모델링하였다. TRV는 송전선로 및 차단기 단자에서 단락 고장을 구현하여 분석하였고, MOV의 에너지는 보호 동작 알고리즘을 적용하여 해석하였다. 제안된 보호 방안을 적용하는 경우 TRV는 표준을 만족시키지만, 지연 시간이 증가함에 따라 MOV 에너지 용량의 증가하여야 한다. 이 결과를 적용하여 실제 전력 시스템에서 예상되는 전송 선로 고장 상태로 인한 TRV 문제를 해결할 수 있다.

**핵심주제어** : 사이리스터 제어 직렬 커패시터, 과도 재기 전압, 금속 산화물 비리스터

**Abstract** The application of series compensator in a power system affects other devices such as circuit breakers transient recovery voltage (TRV) problem. In this paper, we analyze the TRV effect on a line circuit breaker in the cases with and without thyristor-controlled series capacitor (TCSC) via simulation, and suggest an effective method to overcome the increase of TRV due to the TCSC installation. It also discusses the impact of proposed protection on metal oxide varistor (MOV). A 345 kV transmission line in Korea was selected as a study case. Grid system was modelled using PSCAD (Power Systems Computer Aided Design) / EMTDC(Electro Magnetic Transient Direct Current). The TRV was analyzed by implementing a short circuit fault along the transmission line and at the breaker terminal. The

\* Corresponding Author : i9993235@gmail.com

+ 이 논문은 2019~2020년 창원대학교 연구비에 의해 연구되었음.

Manuscript received March 25, 2019 / revised April 17 ,  
2019 / accepted April 19, 2019

1) 창원대학교 전기공학과, 제1저자

proposed protection scheme, the TRV satisfies the standard. However, the MOV energy capacity increased as the delay time increased. This result can solve the TRV problem caused by the expected transmission line fault in a practical power system.

**Key Words** : TCSC, Transient Recovery Voltage, Metal Oxide Varistor

### 1. 서론

사이리스터 제어 직렬 커패시터 (Thyristor-controlled series capacitor: TCSC)는 전력전송 라인에서 전력 전송을 증가시키기 위해 사이리스터 제어를 통해 임피던스를 조정하는데 효과적인 장치이다 [1, 2]. 국내의 전력수요에 맞춰 대도시 송전 능력 증대를 위한 345 kV 변전소간 송전선로에 TCSC를 설치하여 송전선로의 임피던스를 보상함으로써 전력 전송량을 증대시킬 수 있다. 이러한 TCSC를 설치하기 전에 전력 시스템에서 TCSC의 적용에 관한 효과를 검증하기 위한 연구가 선행되어야 한다. 이 연구들 중에서 본 논문은 전송 라인에서 고장이 발생했을 때 라인의 직렬 커패시터 보상에 따른 회선 회로 차단기 (Line Circuit Breaker, LCB)의 과도 재기 전압 (Transient recovery voltage, TRV)을 중요하게 다룬다 [3]. TRV는 고장 전류 차단 직후 차단기 접점의 전압을 의미한다. TCSC 시스템에서, TRV의 증가는 라인 전류 차단 순간에 직렬 커패시터에 남아있을 수 있는 전하에 의해 유발된다. 이 전압은 직렬 커패시터없이 발생하는 TRV와 더해진다[4]. TRV 연구의 중요한 요소는 TRV의 진폭과 회복 전압 상승률 (Rate of Rise of Recovery Voltage, RRRV)이다. 회로 차단기는 성공적인 전류 차단을 위해 TRV와 RRRV의 진폭을 견디 내야만 한다. 본 논문에서는 TCSC를 이용한 송전선로에서 고장이 발생했을 때 두 가지 유형의 사이리스터 밸브 바이 패스 운전 방법으로 인한 TRV, RRRV 및 MOV (Metal Oxide Varistor) 에너지 용량의 변화를 다룬다. 본 연구에서는 345 kV 변전소간 송전선로를 선정 하였다. 전력 시스템은 PSCAD (Power Systems Computer

Aided Design) / EMTDC(Electro Magnetic Transient Direct Current)를 사용하여 모델링되었으며 송전선로, 상세한 TCSC 모델, LCB 및 인근 발전소가 포함하였다. TRV 및 MOV 에너지 분석을 위한 고장 시뮬레이션은 터미널 근처 및 송전선로 여러 구간에서 발생한 고장에 대해 시뮬레이션하였다. TRV에 대한 IEC (International Electrotechnical Commission) 표준에 따라 3 상 접지 고장을 선택하였고, TCSC 보호 방법에 따른 TRV의 차이를 비교 하였다. 본 연구에서 제안한 사이리스터 바이 패스 전략을 TCSC에 적용하여 운전 중 고장으로 인해 LCB가 동작 할 때의 TRV를 줄일 수 있어 용량을 늘리지 않고 기존의 LCB를 사용할 수 있음을 확인 하였다.

### 2. TCSC의 구성 및 보호 전략

#### 2.1 이론적인 TCSC의 구성

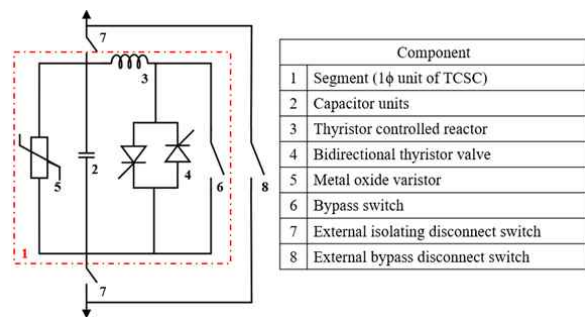


Fig. 1 Configuration of a practical TCSC

Fig. 1은 TCSC의 단일 위상의 일반적인 구성을 보여준다. TCSC는 송전선로의 임피던스를 보상하기 위한 주요부와 외란 및 결함으로부터 TCSC를 보호하기 위한 보호 부로 구성된다. 빨

간색 상자의 구성 요소는 TCSC의 주요 구성 요소이며 전체를 세그먼트라고 한다. 하나의 세그먼트가 하나의 TCSC를 구성한다. TCSC 주요 부품은 커패시터와 사이리스터 제어형 리액터 (Thyristor-Controlled Reactor, TCR)의 병렬 구조로 구성된다. 양방향 사이리스터의 점화 각도 ( $\alpha$ )는 TCR과 커패시터의 합성 임피던스 값을 조정하도록 제어된다. TCSC는 시스템 요구 사항에 따라 용량성 모드와 유도 모드로 작동할 수 있다. TCSC의 보호 요소는 금속 산화물 배리스터 (MOV)와 바이 패스 스위치로 구성된다. 각 보호 요소의 기능에서 MOV는 시스템 고장 동안 커패시터 뱅크를 보호하기 위한 기본 보호 장치로 동작한다. 정상 상태에서는 MOV가 높은 임피던스 값을 가지므로 전류가 커패시터 및 TCR로 전달되고, 고장의 경우, 사고 전류가 일정 수준을 초과하여 MOV 전압이 증가하면 MOV 특성의 변화로 인하여 임피던스가 작아지며 고장 전류를 감당하게 된다. 정상 상태에서는 바이 패스 스위치가 열려 있으나, 과전류가 유입 시 사이리스터의 손상을 방지하기 위해 바이 패스 스위치가 활성화된다.

**2.2 TCSC의 보호전략**

TCSC 보호 설비의 특성은 위에 설명되었다. CT (Current Transformer)는 고장이 발생하여 설정 전류보다 높은 사고 전류가 흐를 때, 고장 (Trip) 신호를 수 밀리 초의 지연으로 TCSC 보호 설비에 전송한다. 동시에 고장으로 인해 MOV의 임피던스가 감소하여 고장 에너지를 소모시킨다.

과부하로부터 MOV를 보호하기 위해 MOV의 과부하 위험이 있을 때 보호 시스템이 감지된다. 전류 또는 에너지가 설정 값을 초과하면 연속 점화 펄스가 사이리스터 밸브로 보내져 MOV를 우회하고 바이 패스 스위치가 닫힌다. 사이리스터는 MOV 또는 CT에 의해 생성된 신호 중에서 더 빠른 신호를 검출함으로써 바이 패스를 수행한다. 그 후, 바이패스 스위치가 작동되고 고장 발생 후 약 3 사이클 후에 LCB가 작동한다. 본 연구에서는 TRV 감소를 위한 새

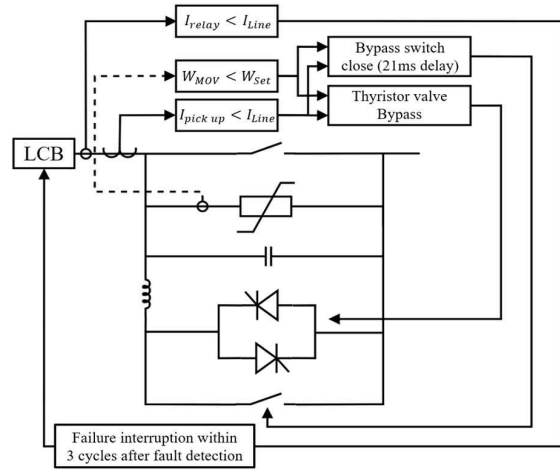


Fig. 2 Protection scheme of a TCSC

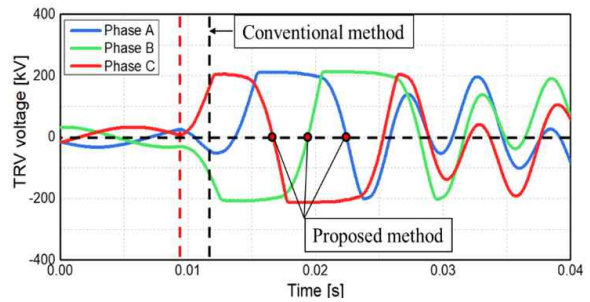


Fig. 3 Voltage across the capacitor during fault

로운 방법을 제안하고 기존의 방법과 비교하였다. 기존 방법은 MOV 및 전류 CT에서 고장을 감지하면 TCSC를 보호하기 위해 가능한 빨리 사이리스터를 우회합니다. 제안된 방법은 각 위상의 커패시터 양단 전압이 0 V가 될 때까지 지연시킴 후 사이리스터를 우회하는 것이다. 고장 발생 시에 커패시터 양단 전압은 Fig. 3에 나타내었다.

**3. TRV 분석을 위한 TCSC와 전력 계통 시스템의 모델링**

**3.1 TCSC 모델링**

실제 그리드 시스템 조건에서 TCSC가 TRV에 미치는 영향을 검증하기 위해 국내의 실제

그리드 시스템을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. TCSC는 Table 1에 나와 있는 것처럼 라인 임피던스를 고려하여 설계되었다. 또한 실제 TCSC는 정상 상태에서 50 % 보상 비율로 동작하고 고장 상태의 해석에서는 사이리스터의 제어 로직이 필요치 않으므로 TCSC의 C는 Fig. 4와 같이 고정된 커패시터로 대체하여 적용하였다.

Table 1 Design value of real grid with TCSC

Parameter	Symbol & Unit	Value
T-Line reactance	$\Omega$	27.87
Compensation	$k_{TCSC}$	50
Boost factor	$\omega_{order}$	1.05
Resonance factor	$\lambda$	2.6
Capacitance	$\mu F$	198.94
Inductance	mH	5.23

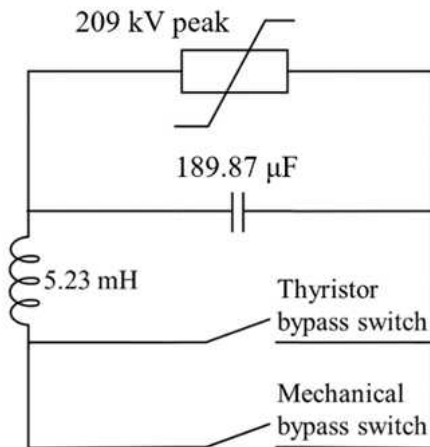


Fig. 4 TCSC 50% compensation equivalent model

### 3.2 전력 계통 시스템 모델링

실제 송전선로, 변전소, 발전소 등과 같은 전력 계통 시스템은 PSCAD / EMTDC로 모델링하였다. 시스템 범위는 TCSC가 설치된 전송 라인에서 3 단계 간격의 모선까지만 확장하여 구성하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 TCSC가

설치된 두 송전선 중 하나에서 고장을 모의하여 시뮬레이션 하였다. 고장 후 발생한 LCB의 TRV를 확인하였고 TRV 시뮬레이션 기준은 IEC에서 권장하는 시험 표준이며 가장 심각한 고장 중 하나인 삼상 단락 고장만을 고려하였다. 고장 위치는 TCSC 터미널과 전송 라인의 여러 구간을 모의하였다. 송전선로의 고장 위치는 전체 길이 1/10 구간을 모의하였고, 고장 발생 시간은 10도를 기준으로 360도까지의 시간을 적용하였다.

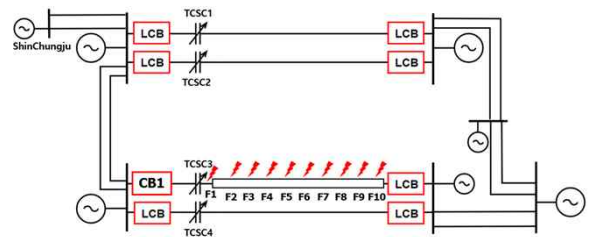


Fig. 5 A simplified single line diagram of the power system network with fault location

## 4. TRV 시뮬레이션 결과

### 4.1 TRV와 RRRV 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 3 절에서 제시한 시나리오에 따라 수행되었다. 대부분의 시뮬레이션 사례는 Long line fault (LLF)로 구성된다. 차단기 터미널 고장 시험 기준 T10, T30 및 위상차 시험 기준 OP2에 의해 입증된 TRV 내력 성능은 대개 LLF TRV를 포함한다. 이 연구에서는 CIGRE(Conseil International des Grands Reseaux Electriques) 권장 규격 T10을 참조로 사용하였다. TRV 감소를 검증하기 위해 기존 TCSC 보호기법과 제안된 TCSC 보호기법을 비교하였다. Fig. 6과 7은 TRV 분석의 가장 심각한 경우를 보여준다. Fig. 6에서, 그래프의 굵은 선은 종래의 보호 방법이고, 가는 선은 제안된 방법의 경우이다.

기존 보호 계획이 적용되면 TRV가 표준 기준을 초과한다. 대조적으로, 제안된 방법이 적용

될 때 TRV는 감소한다. Fig. 7의 RRRV는 제안된 방법을 통해 증가율이 감소함을 보여준다. 전체적인 시뮬레이션 결과는 Fig. 8과 같고, 검은 점으로 표시한 기존의 보호 방법을 적용하면 많은 경우의 시뮬레이션 결과가 적용 표준을 초과함을 확인할 수 있다. 그러나 제안된 TCSC 보호 방법이 적용될 때, TRV 표준은 모든 경우에 만족된다.

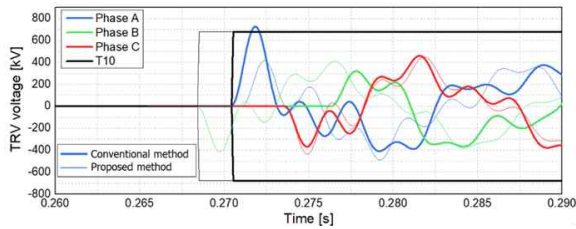


Fig. 6 Simulation results of severe TRV cases

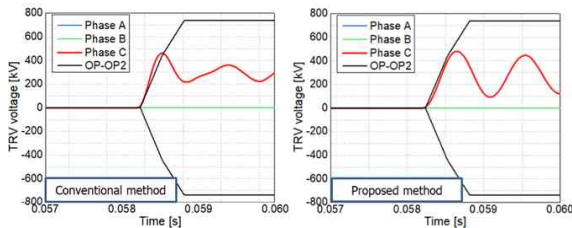


Fig. 7 Simulation results of severe RRRV cases

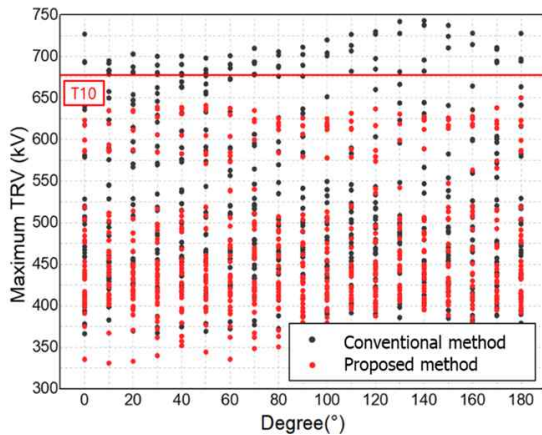


Fig. 8 Comparison of maximum TRV values when two protection methods are applied

#### 4.2 MOV에서 소비되는 에너지

고장이 발생한 후 MOV는 TCSC의 직렬 커패시터 양단 전압이 209kV를 초과하는 지점에서 에너지를 소비하기 시작한다.

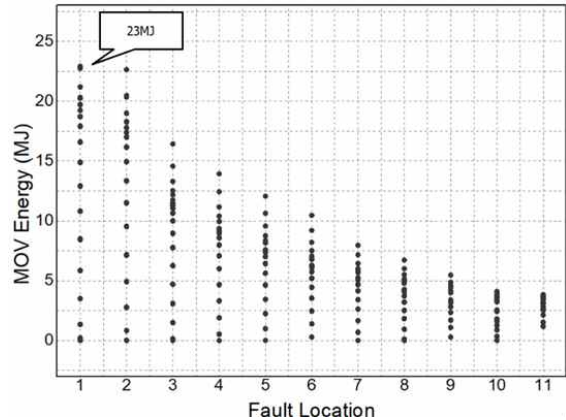


Fig. 9 MOV energy consumption with proposed method according to fault location

이러한 MOV의 에너지 소비는 고장 전류가 사이리스터로 바이패스 될 때까지 계속된다. 따라서, 사이리스터 바이패스 동작 지연 시간이 증가하면 MOV의 에너지 소비가 커지고 그에 따른 용량 산정이 필요하다. Fig. 9는 제안된 방법을 적용했을 때의 고장 위치에 따른 MOV 에너지 소비량을 나타낸다. 기존의 방법으로 소비되는 최대 에너지는 10 MJ 이하 이지만 제안된 방법으로는 20MJ 이상의 에너지가 소비되므로 이에 알맞은 MOV의 용량 산정이 필요하다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 TCSC 보호 방법에 따른 TRV 및 MOV 에너지 변화를 다룬다. TCSC로 송전 선로의 TRV를 줄이기 위해 사이리스터 바이패스 전략이 제안되었다. 제안된 방법을 사용하면 기존 방법에 비해 TRV를 줄일 수 있음을 확인하였다. 시뮬레이션 결과는 제안된 방법이 IEC 표준을 만족함을 보여 준다. 그러나 제안된 방법은 사이리스터를 우회하기 전에 지연 시간을

필요로 하기 때문에 MOV 용량을 증가시켜야 한다. 이 결과는 기존 송전선로에 TCSC를 설치할 때 TRV 감소 및 MOV 설계에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

## References

- [1] S. Jamhoria, and L. Srivastava, "Applications of Thyristor Controlled Series Compensator in Power System: An Overview" 2014 International Conference on Power Signals Control and Computations (EPSCICON), pp. 1-6, 2014.
- [2] N.G Hingorani, and L. Gyugyi, Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE press, 2000.
- [3] A. Parvizi, M. Rostami, and A. M. Ghadiri. "Sensitivity Analysis of TRV in TCSC Compensated Transmission Lines during Fault Clearing by Line CB," 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, pp. 1345-1349, 2008.
- [4] N. Mohsen, M. Pazoki, and M. Gholamzadeh. "TRV Evaluation in Advanced Series Compensated System," International Journal of Computer Applications, Vol. 34, No. 7, pp. 1-6, 2011.



이 석 주 (Lee Seok-Ju)

- 정회원
  - 창원대학교 전기공학과 학사
  - 창원대학교 전기공학과 석사
  - 창원대학교 전기공학과 공학 박사
- 관심분야 : 에너지 산업, 전력시스템, 초전도 전력 응용기기, 신재생 대체에너지