

# 전력계통 신기술(TCSC) 적용을 통한 계통 최적화

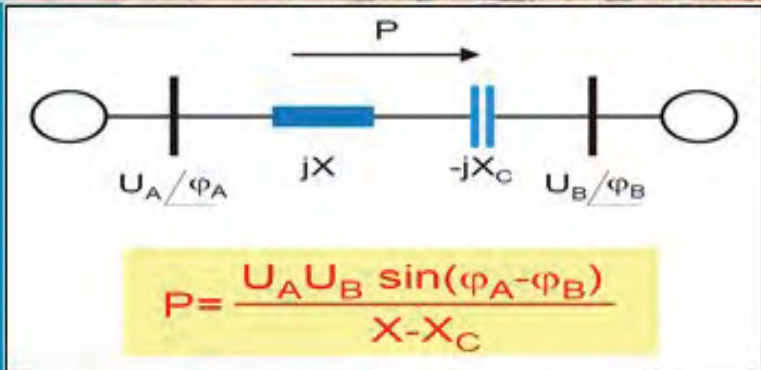


최진산  
한국전력 계통계획처 차장

## 1 현황

직렬보상은 장거리 AC 송전계통에서 동적 안정도 및 정태 안정도를 향상시킬 뿐만 아니라 송전용량을 증대시킨다. 최근에는 Thyristor 제어를 통해서 더욱 유연한 직렬보상이 가능하고, 새로운 기술 응용이 가능하게 되었다.

직렬보상은 1960년대 초반부터 상용화되었다. 전 세계에 765kV 송전 최고전압에서 10kV 배전전압까지의 전압범위에서 수백기가 넘는 직렬 커패시터가 설치되었다. 직렬보상은 전력주파수에서 송전 리액턴스를 감소시킨다. 이것은 계통 사용자에게 다음과 같이 많은 이득을 가져다준다.



- 계통 안정도 향상
- 전압 조절과 무효전력 수급 개선
- 병렬 송전선로 간의 부하분담 개선
- 송전 손실 감소

## 2 직렬보상 적용방안

### 가. 고정형 직렬 커패시터

직렬 커패시터는 송전선로에 직렬로 설치한 커패시터 뱅크로서, 올바른 기능을 위해서 직렬 커패시터는 제어, 보호, 감시설비가 필요하다. 직렬 커패시터는 기존 계통과 같은 전압에서 동작하므로 충분히 절연되어야 한다.

직렬 커패시터의 주 회로도에는 그림 1과 같다. 주 보호장치는 통상 ZnO 타입의 Varistor로서 계통 고장 발생 시 큰 단락전류가 선로를 통해서 흐를 때 커패시터 양단의 전압을 안전치 이내로 제한한다.

스파크 갭은 후비보호로서 고장 발생시 Varistor가 충분히 초과전류를 흡수하지 못하는 상황에서 직렬 커패시터의 바이패스를 가능하게 한다.

마지막으로 차단기는 필요할 경우 직렬 커패시터를 투입 또는 개방할 때 사용된다. 또한, 스파크 갭의 소호에도 필요하다. 스파크 갭이 없을 경우 직렬 커패시터 근단 고장 시(내부고장 시) Varistor를 바이패스 하는데 필요하다.

### 나. 제어 가능한 직렬 커패시터

직렬 커패시터는 매우 유용하지만 고정된 정격 때문에 유연성이 제한된다. 초기형태의 제어가능 직렬 커패시터에서는 기계적 차단기가 커패시터 뱅크의 일부분을 필요에 따라서 개폐하는데 사용된다. 이것은 전력조류 제어에는 적절하나 응용분야에 사용하려면 그 이상의 동적 응답이 필요하다. 차단기는 개폐용으로만 사용되므로 그 용도가 감소된다.

제어가능 직렬 커패시터의 진화된 모습이 그림 2에 나타나 있다. 여기에서는 Thyristor 기술이 도입되어 직렬 보상 개념이 한층 강화되었다.

단상 TCSC 모듈의 기본 회로는 고정된 직렬 커패시터와 리액터를 제어하는 반대방향의 병렬 Thyristor로 구성된다. 또한, 과전압 보호용 서지피뢰기와 바이패스 차단기가 포함된다.

커패시터 전압은 Thyristor 점호각( $\alpha$ )에 대한 위상

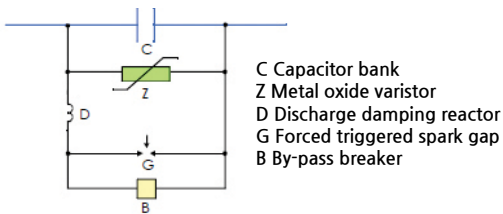


그림 1 계통구성(45/60MVA 주변압기)

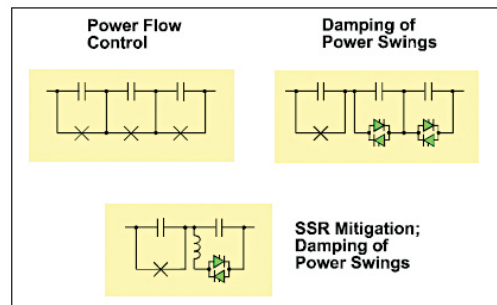


그림 2 제어가능 직렬보상의 진화

기준으로 사용된다. Thyristor는 커패시터 전압과 전류가 반대 극성일 때 점호된다. 이것은 Thyristor 점호각이 90°에서 180°인 것과 동일하다. 이런 방법으로 Thyristor가 점호되면 리액터에 커패시터와 반대방향인 전류가 흐른다. 이 루프전류는 커패시터 양단의 전압을 증가시키고 전체적인 직렬보상도 증가시킨다. 점호각( $\alpha$ )이 180°에서 감소할수록 루프전류는 증가한다.

TCSC는 3가지 기본 동작방식을 가진다.

- Thyristor 차단 : Gate 신호와 Thyristor 도통 없음
- Thyristor 바이패스 : 연속 Gate 신호와 Thyristor 완전 도통
- Vernier 방식 : Gate 신호의 위상제어와 이에 따른 부분적 도통

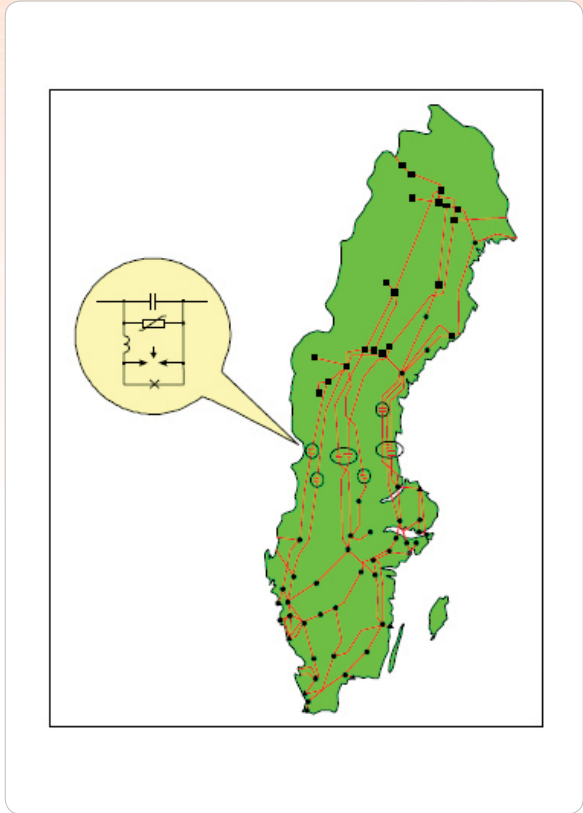


그림 1 계통구성(45/60MVA 주변압기)

### 3 해외 직렬보상 적용사례

#### 가. 스웨덴

스웨덴의 전력계통은 스웨덴, 핀란드, 노르웨이, 덴마크 동부를 연결하는 북유럽 전력계통의 한 부분이다. 스웨덴의 전력계통은 발전소와 수요지역 간 거리가 멀고 대용량 전력이 장거리로 수송된다.

발전력 공급의 대부분은 수력(45%)과 원자력(50%)에 의존한다. 대부분의 수력발전소는 북부 지역에 위치하고, 원자력 발전소는 남부 해안에 위치한다.

주요 수요지역은 중부와 남부이다. 총 8개의 400kV 송전선로가 북부의 수력발전소와 중남부의 대규모 부하지역을 이어준다. 각 선로는 길이가 500km에 이르고, 모두 70%까지 직렬보상 되도록 직렬 커패시터가

설치되어 있다. 8개의 직렬 커패시터 정격의 합은 대략 5,000Mvar이다.

#### 나. 브라질

브라질의 전력계통은 두 개의 주요 전력계통 즉, 북부계통과 남부계통이 존재하는데 두 계통은 국가의 총 발전과 수요의 95%를 차지하고 주로 수력에 의존한다. 두 계통의 연계선로는 500kV 단일회선(향후 2회선 예정)으로 길이가 1,000km 이상이고 여러 곳에 직렬 보상된다. 5개의 직렬 커패시터가 설치되어 있고, 직렬 커패시터 정격의 합은 대략 1,100Mvar이다.



그림 4 브라질의 남북 연결 송전선로 직렬보상

## 4 국내 전력계통 직렬보상 적용

### 가. 배경

2018년까지 동해안에 약 6GW 규모의 원자력·화력 발전소가 건설된다. 현재 한울원전, 양양양수 등 약 7GW의 기설 발전설비가 존재하고, 앞으로 3년 이내에 신한울원전, 삼척화력, 북평화력 등 6GW의 신규 발전설비가 건설될 예정이다.

동해안 발전설비 증가로 동해안의 송전망 안정도가 크게 악화될 전망이다. 시뮬레이션 결과에 따르면

765kV 2회선 고장 시 최소 5,000MW 이상(원전 4기 이상)의 발전력이 강제 정지되어야 계통안정도 확보가 가능할 전망이다. 이에 따라 대규모 발전력의 손실로 계통주파수가 급격히 하락하여 저주파수계전기(UFR) 동작으로 전국적 광역정전 발생이 우려된다.

또한, 대규모 광역정전 발생을 방지하기 위해 동해안 발전소의 제약운전이 불가피할 전망이다. 최소한 신한울원전 1기(1,400MW)의 상시 운전제약이 필요하며, 이에 따라 1조 원 이상의 발전제약 비용 발생이 예상된다(과거 SMP 실적을 통한 예측임).



그림 5 발전소 건설계획 및 동해안의 송전망 구성도



그림 6 5,000MW 발전력 강제정지 및 계통주파수 하락

#### 나. TCSC 적용 방안

동해안 송전망은 765kV 1개 루트와 345kV 2개 루트로 구성되어 있다. 만약 765kV 루트에 고장이 발생하면, 345kV 2개 루트로 동해안의 발전력을 우회 송전 해야 한다.

- 345kV 우회 송전선로
  - ①: 동해-신제천-신영주-동서울 송전선로(320Km)
- 345kV 우회 송전선로
  - ②: 한울-신영주-신제천 송전선로(170Km)

345kV 우회 송전선로는 부하중심지까지 전체 길이가 최대 320Km의 장거리이므로 송전선로의 임피던스가 매우 높아 안정도를 고려한 송전용량이 낮아지게 된다. 따라서 TCSC를 적용한 안정도 향상, 송전용량 증대 등 345kV 우회 송전선로 성능개선이 필요하다.

TCSC 적용위치는 효과가 가장 크게 나타나는 발전소 인근 송전선로를 선정하였다. TCSC 용량은 해외사례 참조 및 시뮬레이션 검토를 통해 송전선로 임피던스의 50% 수준으로 하였고, 이는 약 400MVar의 용량에 해당한다.

또한, TCSC 적용에 따른 전력조류 증가로 송전



그림 7 TCSC 적용위치 및 설치 전경

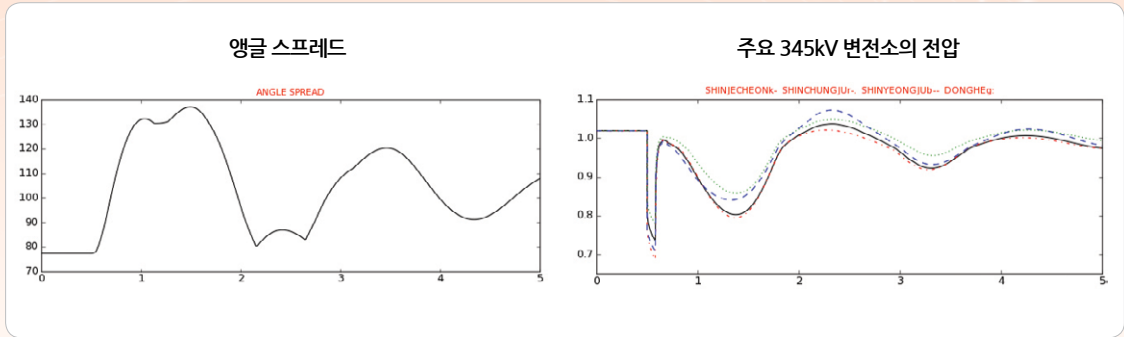


그림 8 765kV 2회선 고장 시 앵글 및 전압

망 전압이 낮아지는 현상을 개선하기 위해 주요 저전압 발생지점에 순동무효전력 보상장치(SVC 또는 STATCOM)를 적용하였다.

- TCSC 적용위치 : 345kV 동해-신제천, 한울-신영주 송전선로
  - \* 적용용량 : 송전선로 당 약 50% 보상
- 순동무효전력보상장치 적용위치 : 345kV 동해, 신제천, 신영주, 신충주S/S
  - \* 적용용량 : 변전소 당 약 400MVar~450MVar

#### 다. TCSC 적용 효과

동해안 345kV 기존 송전선로에 TCSC를 적용함으로써 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다. 765kV 송전선로 2회선 고장 시 기존 345kV 송전선로를 최대한 활용하여 계통 최적화를 실현하였다. 그 결과 발전기 강제정지(탈락)가 당초 5,000MW에서 2,500MW로 대폭 감소하여 저주파수계통기에 의한 광역정전 우려가 해소되었다.

경제적 관점으로는 동해안 발전소의 상시 운전제약이 해소되어 약 1조 원 이상의 제약비용이 절감될 전망

이다.

또한, TCSC가 변전소 구내에 설치되어 민원이 제기될 가능성이 낮아졌으며, 적기 건설이 가능해짐으로써 적기 계통보강을 달성할 수 있게 되었다.

그림 8은 765kV 2회선 고장 시 계통 앵글 스프레드와 주요 345kV 변전소의 전압을 나타낸다. 앵글 스프레드는 최대치가 140도 이하이고, 전압은 최저치가 0.7pu 이상으로 모두 양호한 것으로 판단된다.

## 5 향후계획

직렬보상은 계통 안정도 향상, 전압 조절과 무효전력 수급 개선, 병렬 송전선로 간 부하분담 개선, 송전손실 감소 등의 효과가 있다. 국내에서는 동해안에 대규모 발전설비 건설에 따라 기존 345kV 계통 최적화 및 이용 극대화를 위해 TCSC 적용이 필요한 실정이다.

특히, TCSC 적용에 따른 SSR(Sub-Synchronous Resonance) 현상, 계통보호 기법 등에 대한 추가적 검토가 요구되고, 향후 구매 규격 제정 및 기기설치, 상업운전 과정에서 한전, 제작사, 연구기관, 학계 등 전력산업 유관기관 간의 긴밀한 협조가 필요할 것으로 예상된다. 