

특집

## 전력계통 응용기기

임근희  
(한국전기연구소)

전력전자 기술의 계통응용기술은 전력소요의 증대와 대전력 수송문제에 대처하기 위한 전력계통의 특성개선과 송전용량 극대화를 위한 계통의 운용과 제어기술의 고도화에 의해 능동적인 전력조류제어와 계통의 안정도 향상을 위해 유연송전 시스템(FACTS : Flaxible AC Transmission System)기술의 개념을 정립시켜 종래의 기계식 스위치를 이용한 제어장치 대신에 대용량 전력용 반도체를 이용하여 종래의 전력시스템 기술의 한계를 극복하고 다음과 같은 효과를 가져올 것으로 예상된다.

- 전력설비의 사고영향 최소화 - 안정적 전력 시스템 운용 실현
- 송전선로의 능동적 전력제어 - 전력수송설비의 이용을 극대화
- 전력수송능력의 극대화 - 송전선로의 증설 최소화
- 전압변동억제 및 신속한 사고 대처능력 향상 - 전력품질 및 신뢰도 향상

전력전자기술을 기본으로 하는 FACTS 기술은 교류전력계통의 조류를 제어하기 위한 송전선의 선로 임피던스, 선로 양단간의 전압 및 위상각차 제어를 목적으로 하는 기술로서 각 설비의 종류와 특성은 다음과 같다.

### 1. TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor)

전력 계통의 조류 제어 및 안정도 제어에 가장

효과적인 방법은 선로 임피던스나 위상각을 제어하는 것이다. 송전선의 임피던스는 대부분 유도성이고 저항분은 5~10%에 불과하기 때문에, 직렬콘덴서를 선로에 삽입함으로써 계통의 임피던스를 쉽게 제어할 수 있다. 이 직렬콘덴서가 선로 리액턴스를 보상하는 정도는

$$s = \frac{X_C}{X_L} \quad (0 \leq s < 1) \text{이며}$$

여기서,  $X_L$  : 선로 임피던스,  $X_C$  : 직렬콘덴서 리액턴스

직렬보상후의 선로임피던스는,

$$X = X_L - X_C = X_L(1 - s)$$

로 되어, 송전선로의 임피던스를 줄임으로써 송전선로의 전기적 거리를 줄일 수 있다. 이와같이 직렬콘덴서를 투입함으로써, 정전압 송전계통에서의 송전용량을 증대시키고 조류분포를 적절히 안배할 수 있다는 효과를 얻을 수 있다. 더욱이 이러한 효과가 자율적, 속응적으로 얻어진다는 점이 가장 큰 특징이라고 할 수 있다. 직렬콘덴서의 장점으로는,

① 다른 방식에 비해 설비비가 극히 작고, 공사기간이 짧다.

② 기존의 선로에 설치하기가 용이하다.

반면에 단점으로는,

① 직렬콘덴서 보상시 이상현상이 발생할 우려가 있다.

② 선로고장시 고장전류가 직렬콘덴서에 흐르게 되므로, 이에대한 보호장치가 필요하며, 보호장치로 사용하는 보호간극이 방전하면 과도 안정도가 저하될 수 있다.

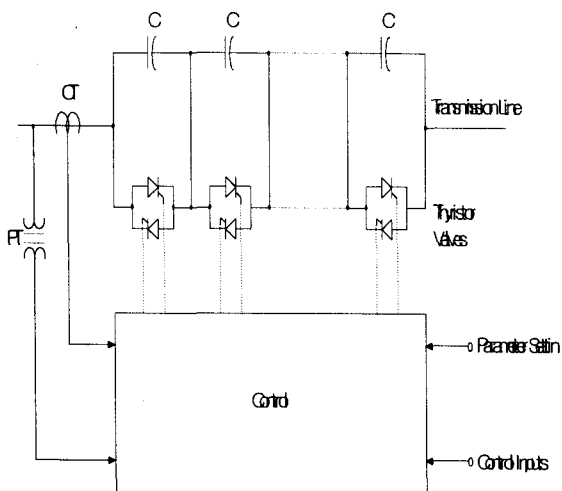


그림 1. TCSC의 구조

## 2. STATCON(Static Condenser)

교류 송전선로 및 배전선로는 직렬 리액턴스와 병렬 콘덴서로 구성되어 있기 때문에, 부하 및 역률의 변동에 따라 송전선로의 전압 분포가 바뀌고 수전단에서 큰 폭의 전압 변동을 일으킬 수 있다. 예를들어, 대용량 전동기와 같은 유도성 부하는 선로 전압을 저하시키게 되고, 장거리 송전선에서 경부하인 경우는 선로의 용량성 임피던스가 상대적으로 커져서 전압이 높아지게 된다. 대부분의 부하들은 이러한 전압 변동에 크게 영향을 받는데, 저전압의 경우에는 유도전동기 등 부하의 성능저하와 소손 등의 문제를 유발하며 송전용량이 저하되며 전력손실이 커지게 되며, 반대로 과전압의 경우에는 변압기의 자기 포화로 인하여 고조파가 발생하거나 전력기기가 열화되고 심한 경우에는 절연 파괴로 인한 고장으로 이어질 수 있다.

이러한 문제들을 해결하기 위해 대전력 반도체 소자 및 전력전자 기술을 이용하여 고속 정밀한 전압 및 무효전력 제어가 가능하고 보수가 용이한 정지형 무효전력보상장치(SVC : Static Var Compensator)가 실용화되었다. SVC는 Thyristor를 이용하여 병렬 콘덴서나 리액터를 신속하게 접속제어(0.04초)하여 무효전력 및 전압을 제어하는장치라고 정의할 수 있다. SVC는 처음에는 아-크로나 제철소의 압연설비로 인한 전압 변동(Flicker)을 보상하기 위해 개발되었으나, 대용량화가 추진됨에 따라 계통 안정화를 위해 송전선로에도 적용하게 되었다. SVC의 특징은 응답 특성이 빠르며 조작에 제한이 거의없고, 신뢰성이 높으며 유지보수가 간단하고 조작성이 뛰어나다는 점에 있다.

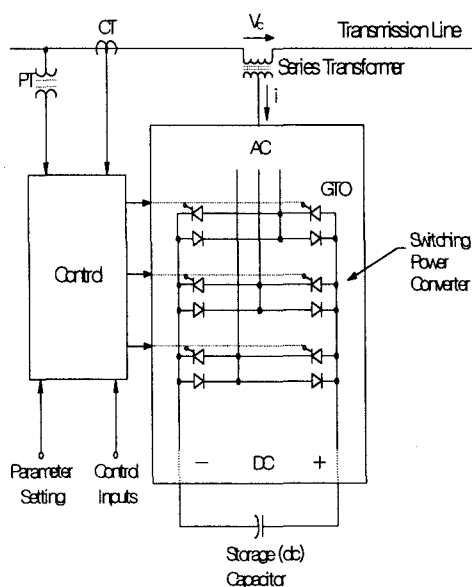


그림 2. STATCON의 구조

무효전력보상장치의 방식은 여러 가지가 있으나, GTO(Gate Turn Off) Thyristor의 대용량화가 실현됨에 따라, 병렬 콘덴서나 리액터를 접속제어하지 않고도, 자력식 인버터를 이용하여 무효전력을 공급할 수 있는 새로운 형식의 정지형무효전력보상장치가 개발되었다. 이 장치는 종래의 SVC의 성능을 혁신적으로 개선하여 동기조상기(Synchronous Condenser)와 비슷한 무효전력의 연속제어성을 갖기 때문에, STATCON(Static Condenser)이라고 부른다.

STATCON은 그림 2에서 보이는 것처럼, 기본적으로는 직류 축전용 콘덴서로 구동되는 3상 인버터로 되어 있으며, 3상 출력 전압은 교류 계통 전압과 위상이 일치하도록 되어 있다. 등가적으로는 크기와 위상을 신속하게 조절할 수 있는 전압 phasor를 변압기 누설 리액턴스를 통하여 계통에 인가하는 장치로 볼 수 있다. 출력 전압이 교류계통전압보다 높으면 진상 전류가 흘러서 STATCON이 콘덴서 부하의 역할을 하며, 계통전압보다 낮으면 지상전류가 흘러서 유도성 부하의 역할을 하게 된다. 이때 양 전압의 차이에 의해 전류치가 결정되고 보상 무효전력량이 결정된다. 계통 선간 전압이 평형인 경우, 계통으로부터 STATCON으로 유입되는 유효전력의 합계는 항상 0이므로, STATCON은 전력용콘덴서나 리액터와 같은 에너지 저장요소를 필요로 하지 않으며, 사고시의 전압불평형등으로 인한 고조파발생분의 흡수를 위하여 평활용 콘덴서를 설치하는 것만으로 충분하다.

STATCON은 종래의 동기조상기나 SVC에 비해 다음과 같은 장점을 갖고 있다.

- ① 기계적 동작부가 없기 때문에 조작 신뢰도가 높고 운전보수가 용이하며 진동 소음이 작다.
- ② 진상 무효전력에서 지상무효전력까지 무효전력을 연속적으로 세밀하게 제어할 수 있다.
- ③ 응답특성이 빠르므로 계통의 과도 안정도 향상에 기여할 수 있어 송전용량을 증가시킬 수 있다.
- ④ 대용량의 전력용 콘덴서나 리액터를 사용하지 않기 때문에 설치 면적이 적다. (SVC의 70% 이하)
- ⑤ SVC는 Thyristor를 사용하기 때문에 반 사이클에 1회씩밖에 제어할 수 없으나, STATCON에서는 GTO Thyristor를 사용하기 때문에 임의의 시각에서 개폐제어를 할 수 있게 되어 한 사이클에서도 수10회이상 제어가 가능하기 때문에 보다 응답특성이 빠른 무효전력보상이 가능하다.
- ⑥ SVC에 비해 제어 능력이 뛰어나며, 특히 계통전압이 기준이하로 떨어져 무효전력보상이 가장 필요한 시점에서 SVC의 무효전력공급 능력은 전압의 공급에 비례해서 급격히 떨어진다는 단점이 있는데 반해, STATCON은 전압 강하에도 불구하고 무효전력공급량을 일정하게 유지할 수 있다는 장점이 있다.
- ⑦ 전력변환능력이 있기 때문에, 대용량의 직류 콘덴서나 에너지 저장장치를 추가함으로써 단시간동안이지만 유효전력도 공급할 수 있기 때문에 응용범위가 넓다.

### 3. TCBR (Thyristor-Controlled Braking Resistor)

발전소로부터 수요지까지 대전력 수송하는 전원 송전선에서 단락과 같은 사고가 발생하면, 발전기에 막대한 가속력이 더해져, 최악의 경우 발전기가 탈조를 일으키게 된다. 이러한 가속력에 의한 발전기의 탈조를 방지하고 과도안정도를 향상시키는 유력한 수단의 하나로써, 발전기 단자에 병렬로 저항부하를 삽입해서 발전기의 기계적 가속에너지를 전기적에너지로 소비·발산시켜 가속력을 감소시키는 방법이 있다. 이 저항은 제동저항이라고 하며, 상차각 동요의 제1과외의 과도안정도향상을 주목적으로 하나, 반복적으로 투입하여, 계통동요 및 다른 계통 소자

에 의해 야기되는 저주파동요현상(Subsynchronous Resonance (SSR))을 억제하는 역할을 기대할 수 있다.

그림 3에 보이는 것처럼, 제동저항은 발전기단자의 모선에 설치되어, 송전선 사고가 제거된 직후에 투입되는데, 이때 송전단에서의 구동점 어드미턴스와 전달 어드미턴스는 각각

$$Y_{11} = \frac{1 + jgx_i}{-gxx_i + j(x+x_i)}$$

$$Y_{12} = \frac{1}{gxx_i - j(x+x_i)}$$

여기서,  $g$  : 제동저항의 컨덕턴스,  $x$  : 변압기 리액턴스,  $x_i$  : 선로 리액턴스로 되어, 발전기의 전기적 출력은

$$P = gx_i^2 E_1^2 / A^2 + \{E_1 E_2 \cos(\delta - \theta)\} / A$$

$$\text{단, } A = \sqrt{(gxx_i)^2 + (x+x_i)^2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\{(x+x_i)/gxx_i\}$$

로 주어지므로 제동저항의 컨덕턴스를 제어함으로써 발전기의 전기적 출력의 잉여분을 흡수하는 제어가 가능하다. 종래의 제동저항은 차단기를 이용하여 제동저항의 컨덕턴스를 기계적으로 ON/OFF 제어하는 방식이기 때문에, 발전기 및 계통 상태에 적합한 제어를 하기가 어렵다는 단점이 있어서, 과도안정도 향상을 위한 경제적인 수단이라는 장점에도 불구하고, 보편적인 이용에 한계가 있었다. TCBR은 Thyristor 스위칭 제어장치를 이용하여 제동저항의 컨덕턴스를 제어함으로써, ON/OFF 제어외에 연속적인 컨덕턴스 제어가 가능하도록 개량된 장치로서, 종래의 제동저항에 비해 다음과 같은 장점이 있다.

- 제동저항의 임계 차단 시간을 정할 필요가 없다.
- 제동 파워를 발전기 회전자의 상대 속도의 절대치에 비례하도록 설정할 수 있어 정밀제어가 가능하다.
- 브레이크의 투입 및 차단이 자동적으로 행해진다.

### 4. TCPR (Thyristor-Controlled Phase Angle Regulator)

송전선로의 전력 조류를 제어하는 가장 간단한 방법은 선로 양단 전압의 위상각차를 조정하는 것으로, 이를 위해 위상조정변압기(Phasing-Shifting Transformer)가 사용되어 왔다. 위상각의 변화는,

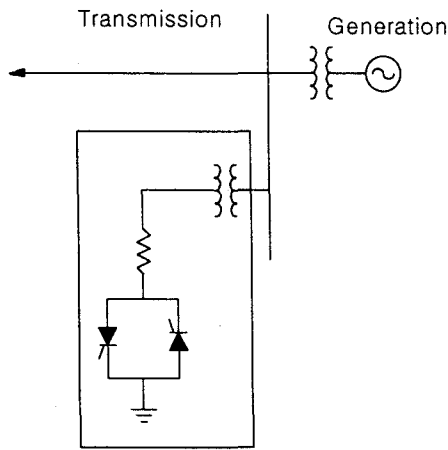


그림 3. TCBR의 구조

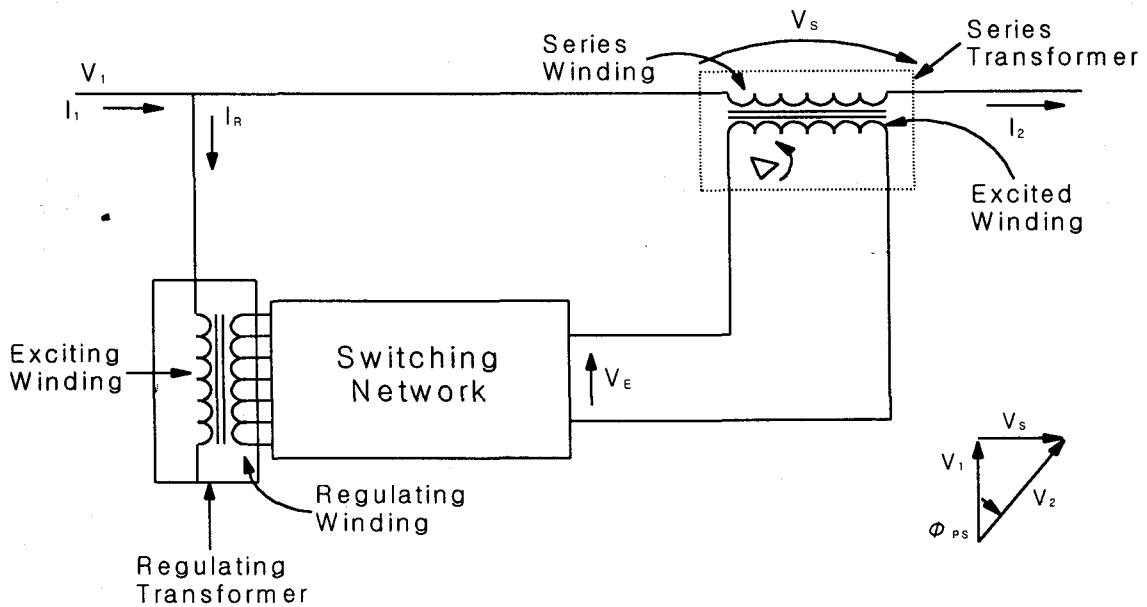
그림 4에 보이는 것처럼, 선로의 상전압에 직각인 가변의 전압원을 삽입하거나 축출함으로써 얻어진다. 이러한 직각 성분의 전압원은 나머지 2상에 연결한 변압기의 적절한 Y-Y 및 Δ-Δ결합으로부터 얻어진다. 종래의 위상조정변압기에서는, 그림 4에 보이는 것처럼, 부하시 변환기(Load-Tap Changing : LTC) 장치와 역순 스위치(Reversing Switch)를 이용해서 위상을 조정하였으나, 이러한 장치들은 작동속도가 느리고 사용빈도도 제한되는 단점이 있었다.

### 5. UPFC (Unified Power Flow Controller)

전압, 위상각을 제어하는 다른 대안으로, 그림 5에 보이는 것처럼 스위칭 컨버터를 이용한 보상장치를 생각할 수 있다. 여기서 Inverter 2는, GTO Thyristor를 이용한 전압원 인버터로, 선로에 직렬로 전압원을 투입한다. 이 투입전압원과 계통전압과의 위상관계에 따라, 그림 5의 페이저선도에 보이는 것처럼, 다음과 같이 위상각조정이나 전압조정을 할 수 있고 두가지 조정을 동시에 할 수도 있다.

- (a) 단자전압 및 위상각 제어
- (b) 단자전압조정
- (c) 단자전압 및 선로임피던스 조정
- (d) 단자전압 및 위상각 조정

전압원 인버터는 보상전압투입에 따라 변동되는 무효전력을 공급 또는 흡수할 수 있고, DC 콘덴서를 통하여 유효전력까지 공급 또는 소비할 수 있다. 이 장치는 송전에 영향을 미치는 3가지 파라미터(위상각, 전압, 선로 임피던스)를 종합적으로 제어할 수 있다는 점에서 종합조류제어기(Unified Power flow Controller : UPFC) 라고 불리며, 궁극적인 송전계통 보상장치라고 할 수 있다. 예를들면, 대상 전력계통의 사고에 보다 효율적으로 대처하기 위해, 계통의 파라메타를 실시간으로 제어할 수 있으며, 또한 지



Note : Excited winding connected so  $V_{sA} = (V_{EB} - V_{EC}) / \sqrt{3}$

그림 4. 위상조정변압기의 구조

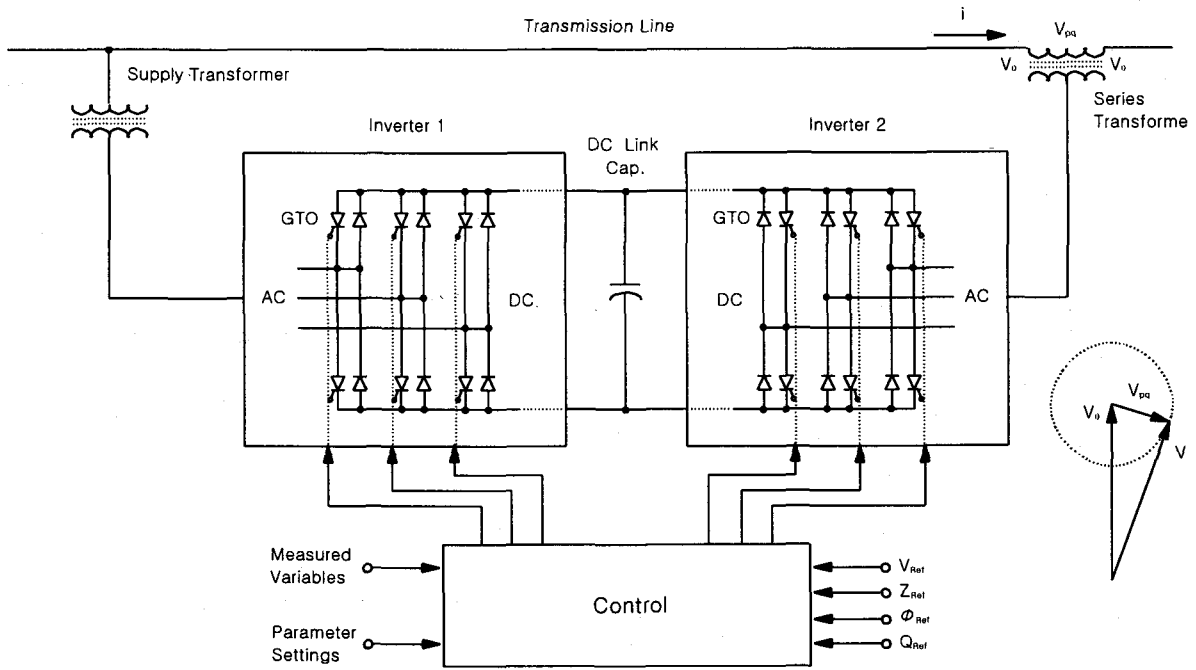


그림 5. UPFC 구조

점에도 설치할 수 있다는 장점이 있어, 송전선로의 다양한 제어요구에 적절히 응할 수 있기 때문에 전력계통운용의 개념을 혁신시킬 가능성이 있다. 이 장치는, 고속이상기 또는 연속형 위상조정기(High Speed Phase Shifter : HSPTS), 반도체화 고속이상기(Solid State Phase Shifter : SSPS)라고 불리기도 한다.

[참고문헌]

- 1) FACTS 연구기획사업 1995. 5 과학기술처/한국전력공사, 한국전기연구소



임근희 (林根希)

1955년 10월 7일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 VPI&SU 대학원 전기공학과 졸업(석사).

1992년 VPI&SU 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 한국전기연구소 전기물리연구팀 책임연구원