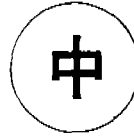


FACTS 기술 개요 및 전망



오태규·최규형
한국전기연구소 전력계통연구부

3. 전력계통특성 개선방안

가. 전력계통보상에 의한 송전용량증대

그림 4(a)에 보이는 2기 전력계통모델에서, 선로양단의 송수전단의 전압은 (b)와 같은 페이저 선도로 나타낼 수 있고, 송전선로를 흐르는 유효전력은

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta$$

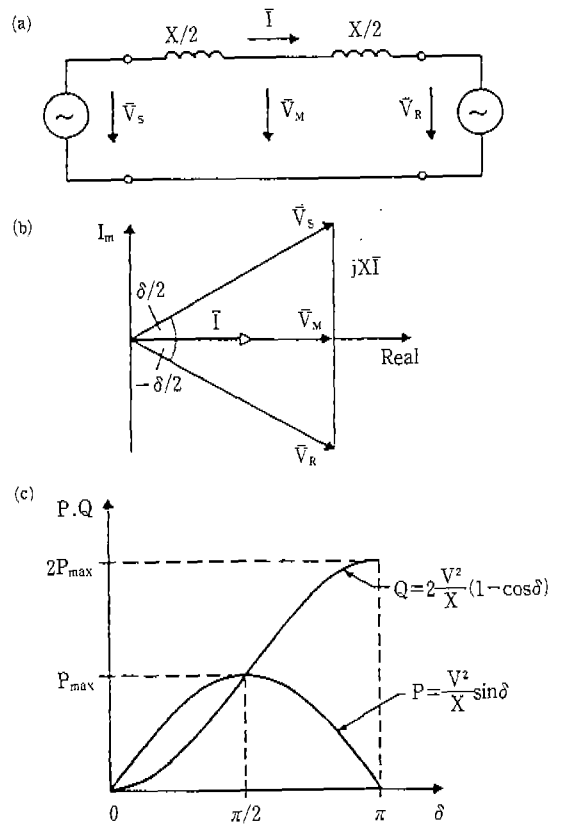
선로에서 흡수하는 무효전력은

$$Q = 2 \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta)$$

와 같이, 송수전단 전압(V), 전압 위상각차(δ) 및 선로임피던스(X)의 함수로 나타낼 수 있다. 그림 4(c)는 유효전력 P와 무효전력 Q의 위상각 δ 에 대한 관계를 나타내는 전력-상차각곡선이다. 여기서, 송전전력을 증가시키기 위해서는 다음과 같은 조작을 수행하여야 한다.

- ① 전압 증대
- ② 선로 임피던스 감소
- ③ 위상각차 증대

전압은 통상 공칭전압 정도로 유지되어 있어



<그림 4> (a) 2기 전력계통모델 (b) 페이저 선도
(c) 전력-상차각곡선

전압격상 이외에는 크게 증가시킬 수 없고, 송전 전력을 변경하기 위해서는, 위상각차를 제어하는 방법이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 본절에서는 전압을 유지하거나, 위상각차 및 선로 임피던스 등을 제어함으로써 송전전력을 증대시키는 수법에 대해 검토한다.

(1) 병렬보상

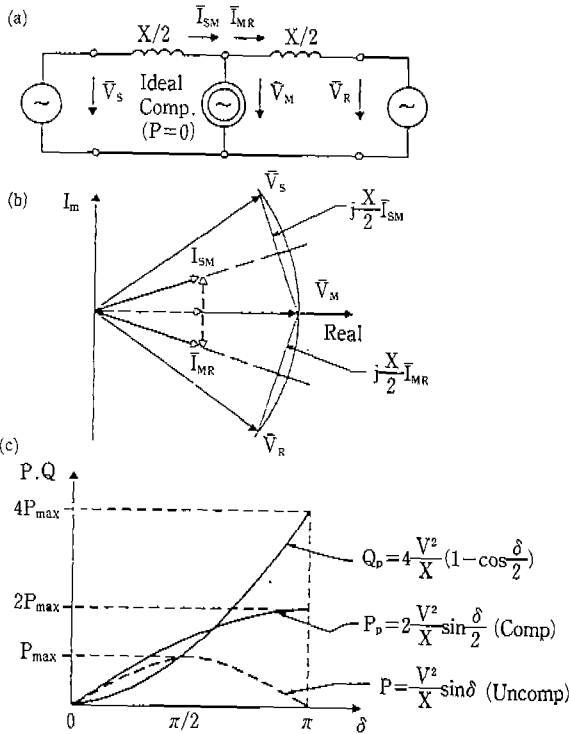
그림 5와 같이 송전선로의 중간점에 이상적인 무효전력보상장치(SVC)를 접속하였을 경우, 송전전력은

$$P_p = 2 \frac{V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2}$$

무효전력보상장치에서 공급되는 무효전력은 다음과 같이 된다.

$$Q_p = 4 \frac{V^2}{X} (1 - \cos \frac{\delta}{2})$$

그림 5(c)는 무효전력 병렬보상계통에서의 송전



<그림 5> (a) 중간점에 보상장치를 설치한 병렬보상계통
(b) 페이저 선도 (c) 송전특성

전력과 무효전력공급량 및 위상각과의 관계를 그린 것으로, 병렬보상장치를 이용해 무효전력을 공급하고 전압을 제어함으로써 송전전력을 크게 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있다(송전선 중간점에 1대의 보상장치를 설치하였을 경우 2배까지 가능).

(2) 직렬보상

그림 6(a)와 같이 2기 계통에 $X_c = sX_L$ 에 해당하는 직렬콘덴서를 투입하여 직렬보상을 하였을 경우, 총 선로임피던스는

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

여기서, s 는 보상도로서 다음과 같이 정의된다.

$$s = \frac{X_c}{X_L} \quad (0 \leq s < 1)$$

이와 같이 직렬보상된 송전선로에 흐르는 유효전력은

$$P = \frac{V^2}{X_L(1-s)} \sin \delta$$

직렬콘덴서로부터 공급되는 무효전력은

$$Q_{sc} = \frac{2V^2}{X_L} \frac{s}{(1-s)^2} (1 - \cos \delta)$$

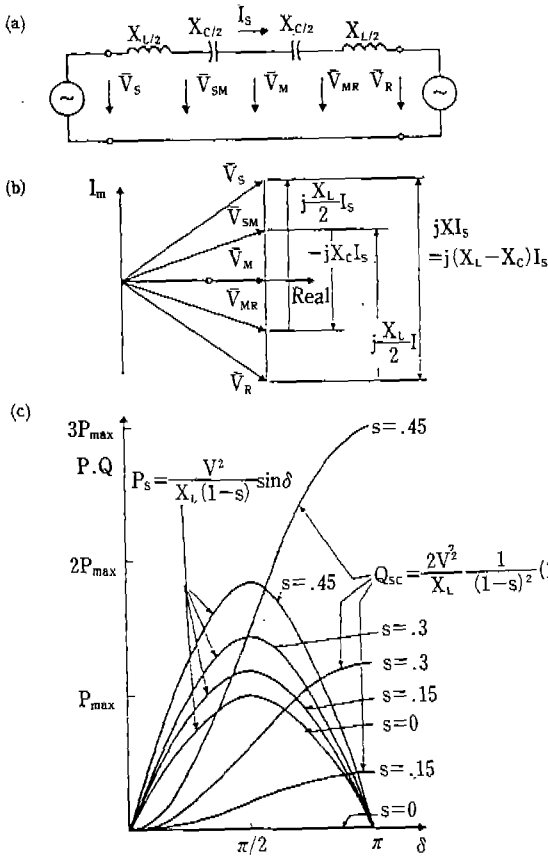
그림 6(c)는 송전전력 P_s 와 직렬콘덴서 무효전력 Q_{sc} 및 위상각 δ 와의 관계를 여러 가지 보상도 s 에 대해 그린 것으로, 송전가능한 전력은 보상도 s 에 따라 증가한다. 또한 직렬콘덴서에서 공급되는 무효전력도 보상도의 증가에 따라 급속하게 증가하며, 위상각 δ 의 변화에 대해 송전선로 무효전력과 같은 형태의 곡선으로 된다.

(3) 위상각제어

그림 7(a)와 같이 발전기와 송전단 사이에 위상조정기가 투입된 전력계통에서 송전전력은 다음과 같이 된다.

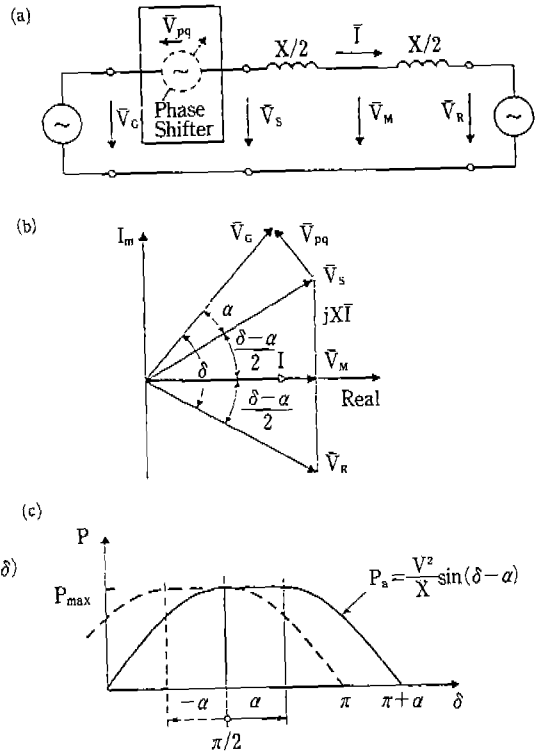
$$P_a = \frac{V^2}{X} \sin(\delta - \alpha)$$

여기서, $\delta \geq \pi/2$ 인 경우 $\alpha \geq 0$ 로, 위상조정기는 위상각 δ 가 송전전력이 최대가 되는 위상각값인 $\pi/2$ 보다 커지려는 순간, 적절한 전압과 위상의



〈그림 6〉 (a) 직렬보상계통 (b) 페이저 선도 (c) 송전특성

전압원 V_{pq} 을 투입함으로써 송전선 송수전단간의 위상각을 $\pi/2$ 로 유지시킨다. 이것은 실질적으로 발전기전압과 송전단전압 사이에 위상각차 α 를 유지시키는 작용을 하여, 선로 송수전단 사이의 위상각차를 $\delta - \alpha$ 로 만든다. 그림 7(c)는 송전전력 P_a 와 위상각 δ 및 α 와의 관계를 나타낸 전력-상차각곡선으로, 위상조정기는 최대 송전전력을 증가시킬 수는 없으나, $\pi/2 \leq \delta \leq \pi/2 + \alpha$ 범위내의 발전기 위상각 δ 에 대해서 송전전력이 최대가 되도록 전력-상차각곡선을 오른쪽으로 이동시키는 역할을 한다. 또한, 전압원을 반대 극성으로 투입함으로써 전력-상차각곡선을 왼쪽으로 이동시킬 수도 있으므로, 발전기 위상각이 $\pi/2$ 보다 작을 경우에도 최대전력을 송전할 수 있다.



〈그림 7〉 (a) 위상조정기 도입 전력계통 (b) 페이저 선도 (c) 송전특성

나. 안정도향상

전절에서 검토한 바와 같이 무효전력보상이나 위상각제어를 통해서 최대송전전력을 증가시킬 수 있으므로, 제어의 속도 및 정밀도를 높임으로써, 전력조류를 신속하게 제어할 수 있게 되어 과도안정도를 향상시키고 계통동요를 억제할 수 있다.

(1) 과도안정도 향상

그림 8(a)~(d)은, 그림 4~7에 보이는 2기계통, 직렬보상계통, 병렬보상계통 및 위상각제어계통의 4 전력계통에 대해, 사고발생후의 응답특성을 등면적법을 이용해 나타낸 것이다. 이때 등면적법에 의한 안정도해석은 다음과 같은 3 과정으로 나누어 분석된다.

- ① 사고발생전 : 송전전력=기계적입력= P_m
위상각= $\delta_1, \delta_{p1}, \delta_{s1}, \delta_{a1}$
- ② 사고발생중 : 송전전력=0, 기계적입력= P_m
으로 발전기는 가속
위상각= $\delta_2, \delta_{p2}, \delta_{s2}, \delta_{a2}$ 로 이동
가속에너지= $A_1, A_{p1}, A_{s1}, A_{a1}$
- ③ 사고제거후 : 발전기 회전자의 기계적관성으로 가속
감속에너지= $A_2, A_{p2}, A_{s2}, A_{a2}$
가속에너지= $A_1, A_{p1}, A_{s1}, A_{a1}$ 와
같아지는 점에서
최대 위상각= $\delta_3, \delta_{p3}, \delta_{s3}, \delta_{a3}$ 에 도달

사고발생후의 최대 위상각 $\delta_3, \delta_{p3}, \delta_{s3}, \delta_{a3}$ 가 각각 임계위상각 $\delta_{crit}, \delta_{crit,t}$ 을 초과하지 않을 때 과도적으로 안정하다고 볼 수 있다. 임계위상각과 최대위상각과의 차이는 과도안정도여유라고 정의된다. 그림 8(a)~(d)에서, 보상장치를 도입함으로써 원래의 무보상계통에 비해 과도안정도여유가 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

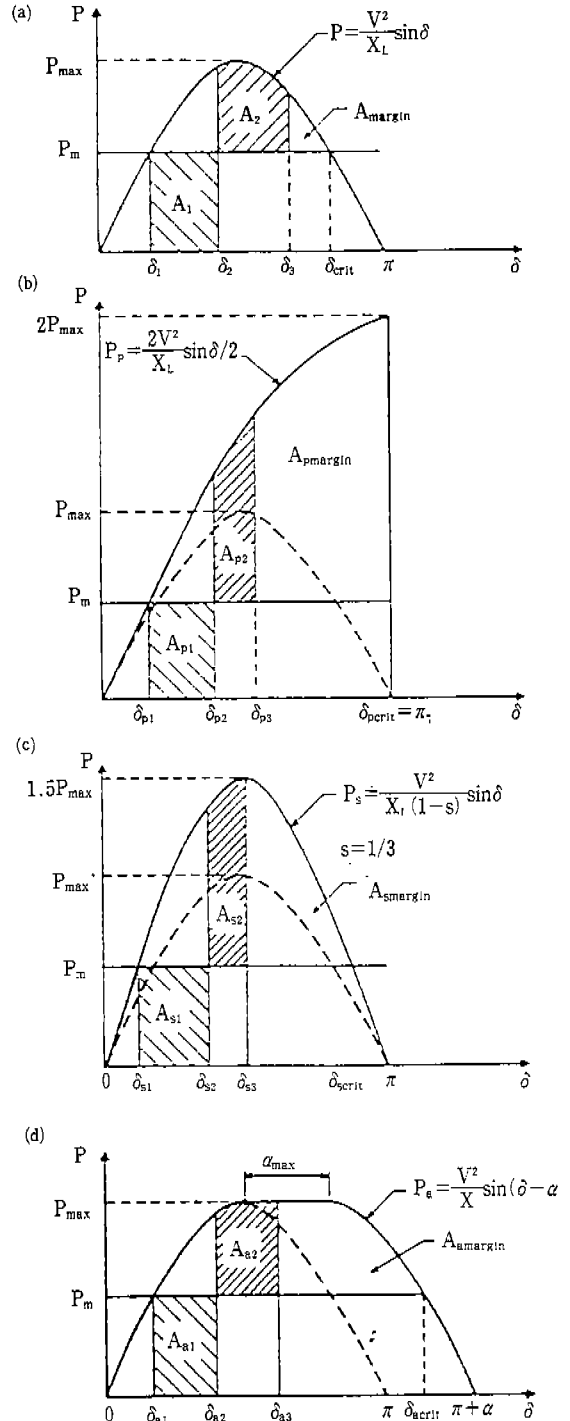
(2) 계통동요억제

보상장치를 이용하여 과도안정도를 개선시키는 것과 같은 작용으로 전력계통동요도 억제할 수 있다. 즉, 발전기가 가속하여 위상각 δ 이 증가할 때는 송전전력을 증가시켜 여분의 기계적입력 에너지를 흡수하고, 반대로 발전기가 감속하여 위상각 δ 가 감소할 때는 송전전력을 감소시켜서 부족한 기계적입력에너지와 평형을 이루게 한다.

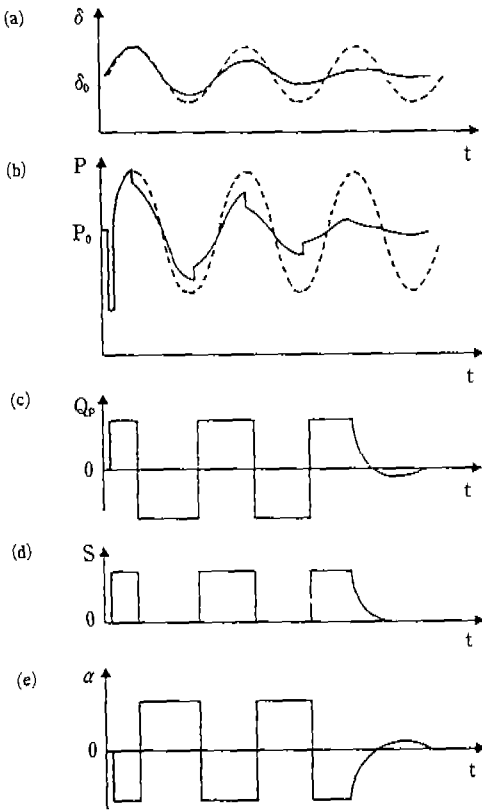
그림 9는 보상장치에 의해 계통동요를 억제하는 과정 및 필요한 출력제어를 나타내고 있다. 그림 9(a)는 정상상태에서의 위상각 δ_0 근처에서의 위상각 진동, (b)는 정상상태에서의 송전전력 P_0 근처에서의 송전전력의 진동을, 제동시와 비제동시를 비교하여 그리고 있다.

4. FACTS 설비의 개요

FACTS 장치에 의한 전력조류제어의 고속성과



<그림 8> 동면적법에 의한 과도안정도여유
(a) 무보상계통 (b) 병렬보상계통 (c) 직렬보상계통
(d) 위상각제어계통

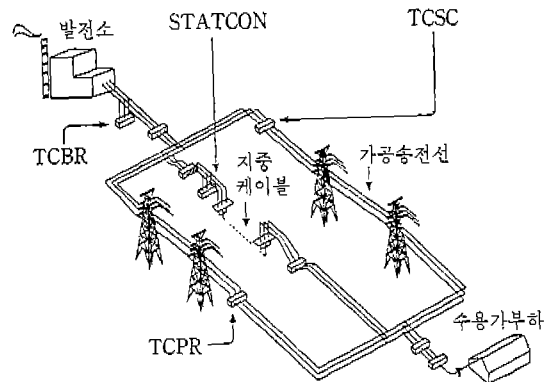


〈그림 9〉 계통동요곡선 및 보상장치출력
 (a) 발전기위상각 (b) 송전전력
 (c) 병렬보상장치 무효전력출력 (d) 직렬보상도
 (e) 위상조정기의 위상각변환치

정밀성은 교류전력계통 제어에 내재하는 문제들을 해결할 수 있는 새로운 방법들을 제시하고 있다. 이 중에서, 실용적인 FACTS 기술개발의 가장 큰 흐름은, 교류전력계통의 조류를 제어하기 위해 송전선의 선로 임피던스나 양단간의 전압 위상각차를 제어하는 설비의 개발이라고 할 수 있다. 또한 교류 송전시스템에 필연적으로 존재하는 무효전력의 영향을 줄이고 전압안정도를 개선하기 위한 무효전력보상제어 장치와, 사고발생에 대한 과도안정도 향상 장치의 개발이 추진되고 있다. 이러한 설비들 중에서 실용화의 가능성이 높고, 실제통적용을 통한 시험연구가 진행되고 있는 설비들은 표 1과 같다. 그림 10은 이러한 FACTS 설비들을 응용하여 전력계통을 제어

〈표 1〉 FACTS 설비

FACTS 설비명	주요특징 및 기능
TCSC 다이리스티제어 직렬콘덴서 (Thyristor Controlled Series Capacitor)	· 선로임피던스 제어 · 전력조류 제어 · 안정도 향상
TCBR 다이리스티제어 제동저항 (Thyristor Controlled Braking Resistor)	· 안정도 향상 · 계통동요 억제
STATCON 정지형 동기조상기 (Static Condenser)	· 전압유지 · 안정도 향상
TCPR 다이리스티제어 위상변환기 (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)	· 위상각 제어 · 전력조류 제어 · 안정도 향상



〈그림 10〉 FACTS의 개념도

하는 개념도를 나타낸 것이다.

(1) TCSC(Thyristor-Controlled Series Capacitor)

전장에서 검토한 바와 같이 전력계통의 조류제어 및 안정도제어에 가장 효과적인 방법은 선로 임피던스나 위상각을 제어하는 것이다. 특히 송전선의 임피던스는 대부분 유도성이고 저항분은 5~10%에 불과하기 때문에, 직렬 콘덴서를 선로에 삽입함으로써 계통의 임피던스를 쉽게 제어할 수 있다. 직렬콘덴서가 선로리액턴스를 보상하는 정도는 다음 식과 같은 보상도로 나타내며,

$$s = \frac{X_c}{X_L} \quad (0 \leq s < 1)$$

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. 이와 같이 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 장점으로서는,

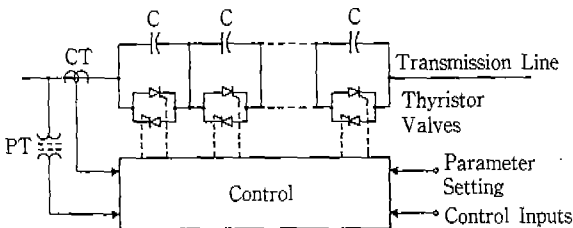
- ① 다른 방식에 비해 자본투자가 극히 작고, 공기가 대단히 짧다.
- ② 기존의 선로에 설치하기가 용이하다.

반면에 단점으로는,

- ① 직렬콘덴서 보상시 이상현상이 발생할 우려가 있다.
- ② 선로고장시 고장전류가 직렬콘덴서에 흐르게 되므로, 이에 대한 보호장치가 필요하며, 보호장치로 사용하는 보호간극이 방전하면 과도안정도가 저하할 수 있다.

이와 같이 직렬콘덴서를 차단기를 이용하여 기계적으로 제어할 경우, 마모의 우려 때문에 사용빈도에 제한이 있으며, 보상치가 일정한 값으로 고정되고, Subsynchronous Resonance와 같은 이상현상을 유발하기 쉽다는 단점 때문에 보편적 이용에 한계가 있었다.

TCSC는, 그림 11에 보이는 것처럼, Thyristor 제어를 이용해 직렬 콘덴서를 제어하는 장치로, 종래의 차단기를 이용한 기계적 스위칭에 비



<그림 11> TCSC의 구조

해, 다음과 같이 보다 정밀하고 효과적인 제어가 가능하게 된다.

- ① 동작회수에 제한받지 않고 상시 운용도 가능하다.
- ② Thyristor 제어의 속응성을 이용하여, 분수 조파 진동 및 저주파 전력동요조건과 같은 과도 현상을 제어할 수 있어서, 직렬보상에 따른 이상현상의 억제 및 과도 안정도 향상에 크게 기여할 수 있다.

TCSC는 고조파, 축진동 등과 같은 계통에의 영향, 기술개발상황, 신뢰도, 성능 등의 여러가지 요인을 고려함에 따라 다양한 형태로 개발되고 있으며, 혁신적인 개선방안이 기대되고 있다. TCSC에서 일반적으로 고려되고 있는 사항은 다음과 같다.

- ① 경제적인 시스템 구현을 위해, 계통특성개선을 위해 필요한 직렬콘덴서의 일부분만을 Thyristor 제어하고 나머지는 기계제어한다.
- ② TCSC는 여러 개의 Module로 구성되어 리액턴스를 다단제어하며, 각 Module은 직렬콘덴서와 병렬접속의 Thyristor 스위치로 구성되어 있다. Module의 크기는 TCSC가 설치되는 특정전력계통에 따라 정해지는 용량성 리액턴스의 허용범위를 수용할 수 있어야 한다.
- ③ 직렬콘덴서를 바이패스하는 Thyristor 스위치의 회로 구성은 정상상태는 물론 과도상태에서의 투입/개폐를 고려해야 한다. Thyristor 회로는, 임피던스 변조를 위한 전압조정용 리액터를 Thyristor 회로에 직렬접속하는 부제어(Vernier Control) 회로를 사용하는 방식과 부제어회로를 사용하지 않고 Zero-Crossing 투입하는 방식으로 나눌 수 있다.
- ④ TCSC는 지상레벨에서 제어할 수 있어야 하며, 고전압의 직렬콘덴서로부터 전소되는 정보와 현장에서의 센서로부터의 입력은 물

론 원격제어 입력 등을 포함해야 한다.

(2) STATCON(Static Condenser)

가) 기술개요

교류 송전선로 및 배전선로는 직렬리액턴스와 병렬콘덴턴스로 구성되어 있기 때문에, 부하 및 역률의 변동에 따라 송전선로의 전압분포가 바뀌고 수전단에서 큰 폭의 전압변동을 일으킬 수 있다. 예를 들어, 대용량 전동기와 같은 유도성 부하는 선로전압을 저하시키게 되고, 장거리 송전선에서 경부하인 경우는 선로의 용량성 임피던스가 상대적으로 커져서 전압이 높아지게 된다. 대부분의 부하들은 이러한 전압변동에 크게 영향을 받는데, 저전압의 경우에는 유도전동기나 전구의 성능이 떨어지고 송전용량이 저하되며 전력손실이 커지게 되고, 반대로 과전압의 경우에는 변압기의 자기 포화로 인하여 고조파가 발생하거나 전력기기가 열화되고 심한 경우에는 절연 파괴로 인한 고장으로 이어질 수 있다. 이러한 정상상태에서의 문제외에도, 선로 개폐조작이나 부하 분리와 같은 외란으로 인해 무효전력수급이 급변하고 이에 따라 전압이 변동되었을 때, 발전단부근에서 과도적으로 유효전력수급에 불균형이 생겨나 발전기가 가속하여 탈조를 일으키고 전력계통으로부터 분리될 가능성이 있다. 이에 따라 동기조상기를 이용하거나, 병렬콘덴서나 분포리액터의 개폐제어를 통하여 무효전력을 제어하고 전압을 조정하는 방법이 사용되어 왔으나, 동기조상기는 보수가 곤란하고, 그외의 장치는 응답속도가 느리며 제어량도 이산적이라는 결점이 있다.

최근의 대전력 반도체 소자 및 전력전자 기술의 비약적 발달에 힘입어, 고속정밀한 전압 및 무효전력 제어가 가능하고 보수가 용이한 정지형무효 전력보상장치(SVC: Static Var Compensator)가 실용화되었다. SVC는 Thyristor를 이용하여 병렬콘덴서나 리액터를 신속하게 접속제어(0.04초)하여 무효전력 및 전압을 제어하는 장

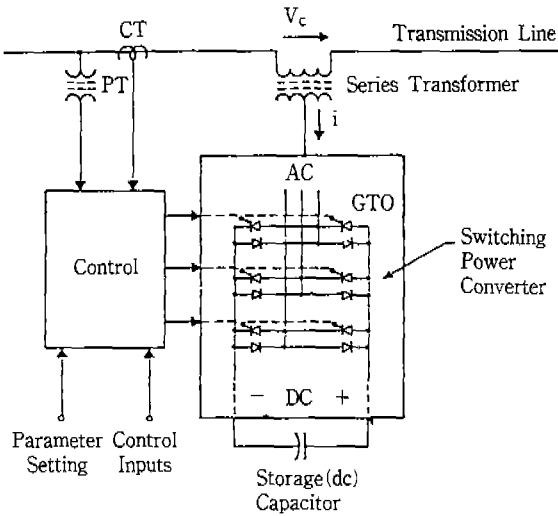
치라고 정의할 수 있다. SVC는 처음에는 아크로나 제철소의 압연설비로 인한 전압변동(Flicker)을 보상하기 위해 개발되었으나, 대용량화가 추진됨에 따라 계통 안정화를 위해 송전선로에도 적용하게 되었다. SVC의 특징은 응답특성이 빠르며 조작에 제한이 거의 없고, 신뢰성이 높으며 유지보수가 간단하고 조작성이 뛰어나다는 점에 있다.

무효전력보상장치의 방식은 여러 가지가 있으나, GTO(Gate Turn Off) Thyristor의 대용량화가 실현됨에 따라, 병렬콘덴서나 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 연속제어성능을 갖기 때문에, 이로부터 이름을 따서 STATCON(Static Condenser)이라고 부른다. 또한 ASVC(Advanced SVC), SVG(Static Var Generator)라고 부르기도 하며, 자력식 인버터에 의한 정지형 무효전력보상장치라는 점에서 자력식 정지형무효전력보상장치(자력식 SVC)라고 부르기도 한다.

최근 전력전자기술을 교류전력계통에 적용하여 계통을 보다 유효하게 운용하고자 하는 FACTS(Flexible AC Transmission System)기술이 주목을 받고 있는데, STATCON은 이러한 FACTS기술에서 중요한 위치를 차지하고 있으며, STATCON에서 이용되는 Thyristor를 이용한 대전력제어기술은 TCSC(Thyristor Controlled Series Capacitor)나 TCPR(Thyristor Controlled Phase Angle Regulator), TCBR(Thyristor Controlled Braking Resistor)과 같은 FACTS 설비의 구현에 필요한 공통적인 핵심기술로 되어 있다.

나) 기본원리

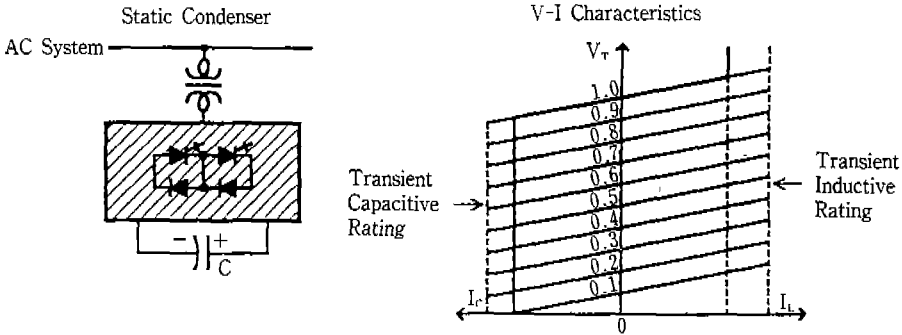
STATCON은 그림 12에서 보이는 바와 같이



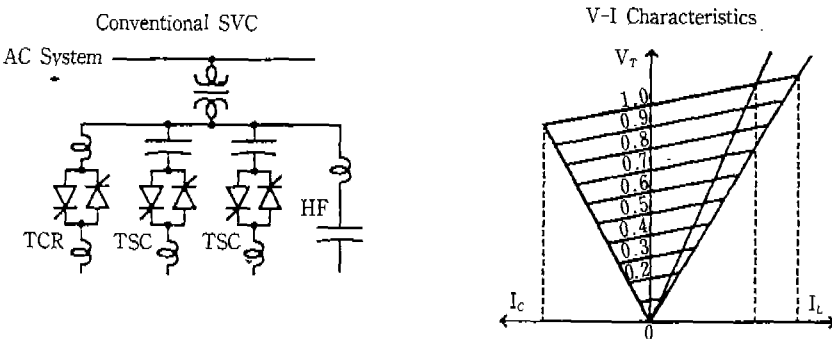
〈그림 12〉 STATCON의 구조도

기본적으로는 직류 축전용 콘덴서로 구동되는 3상 인버터로 되어 있으며, 그 3상 출력 전압은

교류 계통전압과 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 진상전류가 흘러서 STATCON이 콘덴서 부하의 역할을 하며, 계통전압보다 낮으면 지상 전류가 흘러서 유도성 부하의 역할을 하게 된다. 이때 양 전압의 차이에 의해 전류치가 결정되고 보상 무효전력량이 결정된다. 계통 선간전압이 평형인 경우, 계통으로부터 STATCON으로 유입되는 유효전력의 합계는 항상 0이므로, STATCON은 전력용콘덴서나 리액터와 같은 에너지 저장요소를 필요로 하지 않으며, 사고시의 전압불평형 등으로 인한 고조파발생분의 흡수를 위하여 평활용 콘덴서를 설치하는 것만으로 충분하다.



〈그림 13〉 STATCON의 V-I 특성



〈그림 14〉 SVC의 V-I 특성

그림 13과 그림 14는 각각 SVC와 STATCON의 V-I 특성을 나타내는 곡선으로, STATCON은 계통전압이 0.15p.u.까지 떨어져도 정격 최대치까지 용량성 전류를 공급할 수 있다. SVC의 경우, 용량성 부하에서의 정격 최대치에서는 제어가 불가능한 콘덴서 뱅크로 되므로 전압에 반비례해서 전류치가 줄어든다는 결점이 있다. 이와 같이 뛰어난 V-I 특성 때문에, STATCON의 경우 SVC보다 적은 용량으로도 동일한 안정도 향상효과를 얻을 수 있다. 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 반사이클에 1회씩밖에 제어할 수 없으나, STATCON에서는 GTO Thyristor를 사용하기 때문에 임의의 시각에서 개폐제어를 할 수 있게 되어 한 사이클에서도 수10회 이상 제어가 가능하기 때문에 보다 응답특성이 빠른 무효전력보상이 가능하다.
- ⑥ SVC에 비해 제어 능력이 뛰어나며, 특히 계통전압이 기준 이하로 떨어져 무효전력보상이 가장 필요한 시점에서 SVC의 무효전력공급능력은 전압의 제곱에 비례해서 급격히 떨어진다는 단점이 있는데 반해, STATCON은 전압 강하에도 불구하고 무효전력공급량을 일정하게 유지할 수 있다는

장점이 있다.

- ⑦ 에너지 저장능력이 있기 때문에, 대용량의 직류 콘덴서나 에너지 저장장치를 추가함으로써 단시간 동안이지만 유효전력도 공급할 수 있기 때문에 응용범위가 넓다.

(4) 응용분야

STATCON은 송전계통 및 배전계통에 설치할 수 있는데, 송전선에 설치할 때는 주로 전압 안정도 향상 및 계통 동요 억제를 통한 안정도 향상을 목적으로 하며, 배전계통에는 다음과 같이 전력 품질의 향상과 공급능력 향상을 위해 설치된다.

① 전력 품질 향상

- 아크로 등에 의한 Flicker 발생 감소
- 콘덴서 개폐 등에 따른 과도전압 억제
- 수용부 부하 변동에 따른 전압변동 억제
- 배전선 사고로 인한 전압강하 감소
- 고조파 억제: 병렬 콘덴서는 계통의 공명 주파수를 낮추기 때문에 심각한 왜곡파형을 유발할 위험이 있으나, 진상 무효전력을 공급하는 STATCON은 공명주파수를 높이고 부하로부터 발생한 고조파를 흡수하는 역할을 한다.

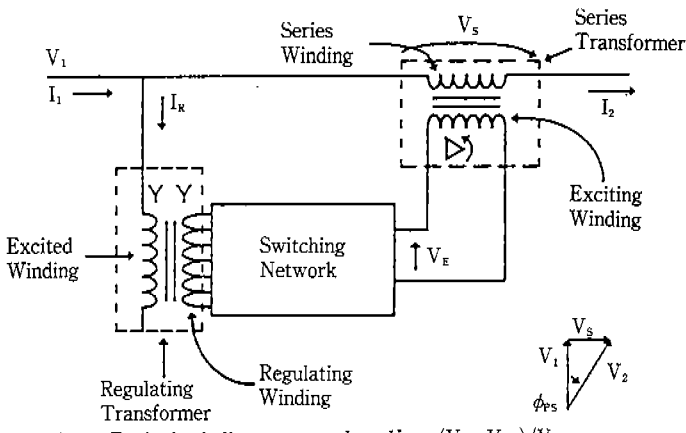
② 전력 공급능력 향상

STATCON은 사고 발생시에 신속한 전압유지 기능을 갖기 때문에 배전 계통에 설치할 경우 전력 공급능력을 향상시킬 수 있다. 특히 전동기 부하가 큰 비중을 차지하는 배전선의 경우, STATCON에 의한 전압 안정도 및 전력 공급능력의 향상 효과가 크게 나타난다.

(3) TCPR(Thyristor-Controlled Phase Angle Regulator)

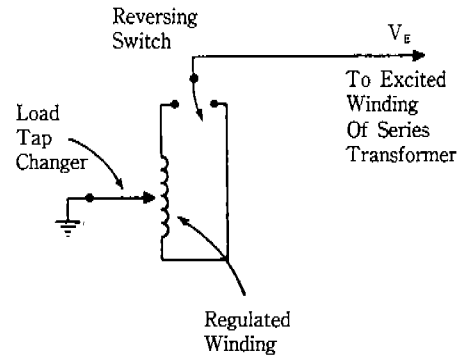
(가) 기술개요

송전선로의 전력 조류를 제어하는 가장 간단한 방법은 선로 양단 전압의 위상각차를 조정하는 것으로, 이를 위해 위상조정변압기(Phasing



Note : Excited winding connected so $V_{SA} = (V_{DB} \cdot V_{EC}) / V_3$

<그림 15> 위상조정변압기의 구조

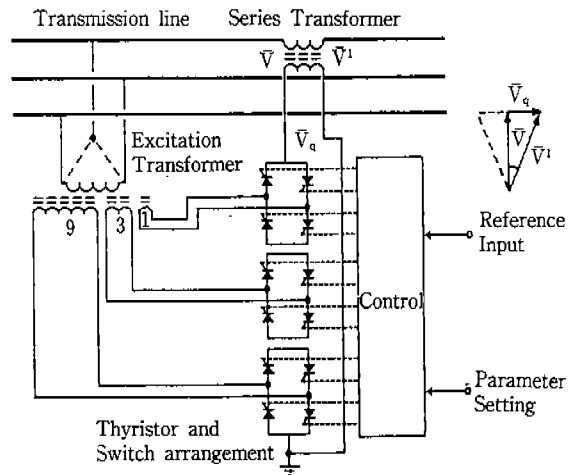


<그림 16> 위상조정변압기의 스위칭회로

-Shifting Transformer)가 사용되어 왔다. 위상각의 변화는, 그림 15에 보이는 것처럼, 선로의 상전압에 직각인 가변의 전압원을 삽입하거나 축출함으로써 얻어진다. 이러한 직각 성분의 전압원은 나머지 2상에 연결한 변압기의 적절한 Y-Y 및 Δ - Δ 결함으로부터 얻어진다. 종래의 위상조정변압기에서는, 그림 16에 보이는 것처럼, 부하시 탭 변환기(Load-Tap Changing : LTC) 장치와 역순 스위치(Reversing Switch)를 이용해서 위상을 조정하였으나, 이러한 장치들은 작동속도가 느리고 사용빈도도 제한되는 단점이 있었다.

TCPR은 그림 17에 보이는 바와 같이 위상조정변압기의 탭 스위칭제어를 Thyristor 제어방식으로 개선한 것으로, 1 : 3 : 9의 비율로 독립적으로 구성된 3개의 변압기 권선과 이 권선들을 Bypass 또는 역접속시키는 스위칭장치로 구성된다. 이와 같은 구성에서는 1상당 12개의 Thyristor 스위치를 사용하여 최대 27단계까지 조정할 수 있다. 여기서 Thyristor 위상제어를 할 경우 고조파가 발생하기 때문에 전력계통에의 적용에 적합하지 않고, 다단계제어방식을 취하는 것이 일반적이다.

이와 같이 TCPR은 마모의 염려가 없기 때문에 사용빈도에 제한을 받지 않고 상시 운용이 가능하며, Thyristor 제어의 속응성을 이용하여 조



<그림 17> TCPR의 구조도

류제어의 신속화는 물론 과도안정도 및 계통동요와 같은 동적현상의 제어에도 이용할 수 있다는 장점이 있다.

(4) Unified Power Flow Controller

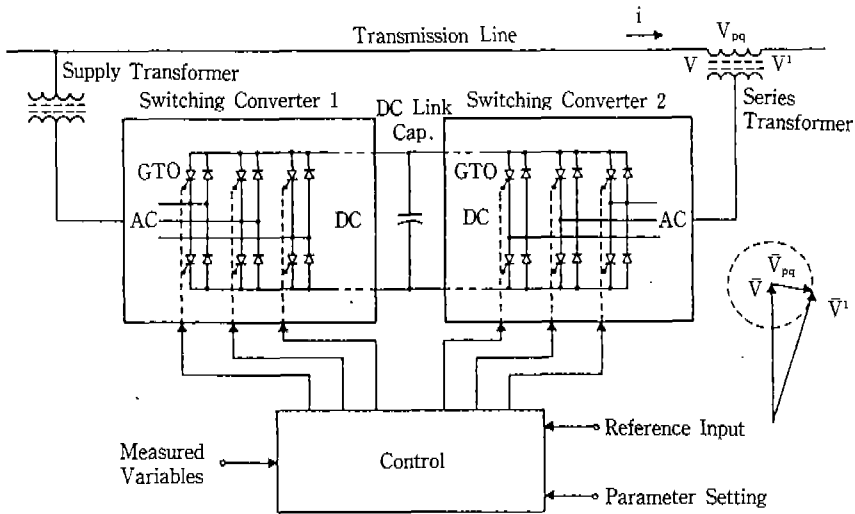
위상각을 제어하는 다른 대안으로, 그림 18에 보이는 바와 같이 스위칭 컨버터를 이용한 보상장치를 생각할 수 있다. 여기서 스위칭 컨버터 2는, GTO Thyristor를 이용한 전압원 인버터로, 선로에 직렬로 전압원을 투입한다. 이 투입전압원과 계통전압과의 위상관계에 따라, 그림 19의 페이처선도에 보이는 것처럼, 다음과 같이 위상

각조정이나 전압조정을 할 수 있고 두가지 조정을 동시에 할 수도 있다.

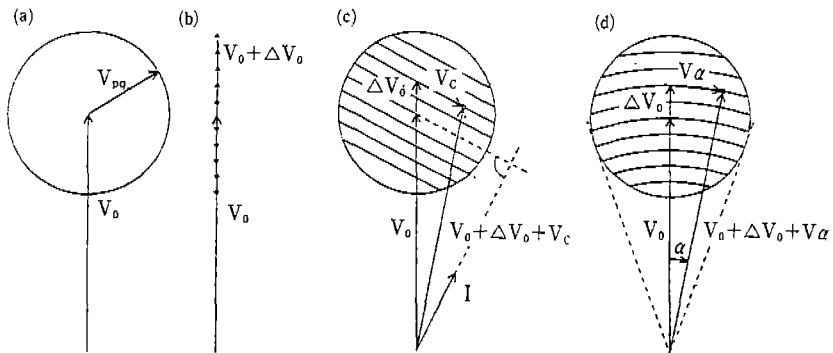
- (a) 단자전압 및 위상각 제어
- (b) 단자전압조정
- (c) 단자전압 및 선로임피던스 조정
- (d) 단자전압 및 위상각 조정

전압원 인버터는 보상전압투입에 따라 변동되는 무효전력을 공급 또는 흡수 할 수 있고, DC 콘덴서를 통하여 유효전력까지 공급 또는 소비할 수 있다. 이 장치는 송전에 영향을 미치는 3가지 파라미터(위상각, 전압, 선로 임피던스)를 종합

적으로 제어할 수 있다는 점에서 통합조류제어기 (Unified Power Flow Controller : UPFC)라고 불리며, 구극적인 송전계통 보상장치라고 할 수 있다. 예를 들면, 대상 전력계통의 사고에 보다 효율적으로 대처하기 위해, 계통보상방식을 실시간대에서 동적으로 변경할 수 있으며, 보상에 필요한 무효전력을 내부적으로 공급할 수 있기 때문에 송전선로의 어떤 지점에도 설치할 수 있다는 장점이 있어, 전력계통운용의 개념을 혁신시킬 가능성이 있다. 이 장치는, 고속이상기 또는 연속형위상조정기(High Speed Phase Shifter :



<그림 18> Unified Power Flow Controller



<그림 19> UPFC 동작 페이저 선도

HSPS), 반도체화 고속이상기(Solid State Phase Shifter : SSPS)라고 불리기도 한다.

(4) TCBR(Thyristor-Controlled Braking Resistor)

(가) 기술개요

발전소로부터 수요지까지 대전력을 수송하는 전원 송전선에서 단락과 같은 사고가 발생하면, 발전기에 막대한 가속전력이 더해져, 최악의 경우 발전기가 탈조를 일으키게 된다. 이러한 가속전력에 의한 발전기의 탈조를 방지하고 과도안정도를 향상시키는 유력한 수단의 하나로써, 발전기 단자에 병렬로 저항부하를 삽입해서 발전기의 기계적 가속에너지를 전기적에너지로 소비·발산시켜 가속전력을 감소시키는 방법이 있다. 이 저항은 제동저항이라고 하며, 상차각 동요의 제1파의 과도안정도 향상을 주목적으로 하나, 반복적으로 투입하여, 계통동요 및 다른 계통 소자에 의해 야기되는 Subsynchronous Resonance (SSR)을 억제하는 역할을 기대할 수 있다.

그림 20에 보이는 것처럼, 제동저항은 발전기 단자의 모선에 설치하게 되어, 송전선 사고가 제거된 직후에 투입되는데, 이때 송전단에서의 구동점 어드미턴스와 전달 어드미턴스는 각각

$$\dot{Y}_{11} = \frac{1 + jgx_e}{-gxx_e + j(x + x_e)}$$

$$\dot{Y}_{12} = \frac{1}{gxx_e - j(x + x_e)}$$

여기서, g: 제동저항의 컨덕턴스

변압기 리액턴스

선로 리액턴스

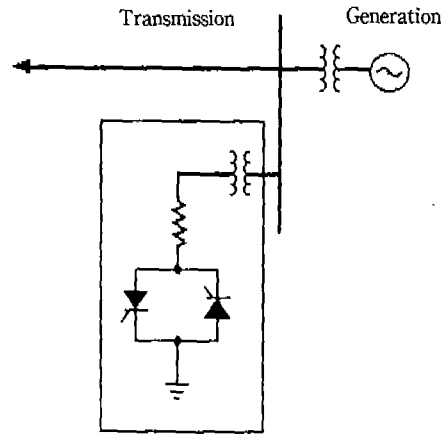
로 되어, 발전기의 전기적 출력은

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

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

$$\theta = \tan^{-1}\{(x + x_e) / gxx_e\}$$

로 주어지므로 제동저항의 컨덕턴스를 제어함으로써 발전기의 출력을 제어할 수 있게 된다. 종래의 제동저항은 차단기를 이용하여 제동저항의

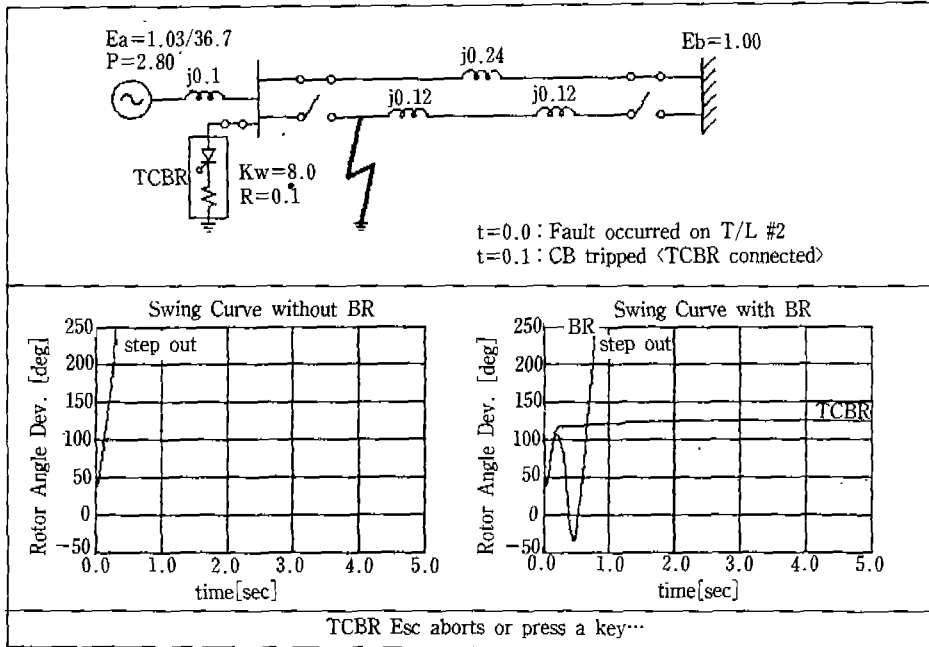


<그림 20> TCBR의 구조도

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 제어 외에 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.

그림 21은 TCBR의 과도안정도 향상 효과를 보여주기 위해 작성한 데모프로그램 화면의 일부로, 1기 무한대모선 계통에서 송전선로 1회선 고장분리사고에 대해 발전기가 탈조하는 상황에서, TCBR을 투입하여 안정도를 제어할 수 있음을 모의하고 있다. 이때, 종래의 제동저항방식은 제2파 이후에 탈조에 이르고 있음을 나타내고 있다.



<그림 21> TCBR 적용 시뮬레이션

(나) 응용분야

우리나라는 원자력에너지에 의존이 높은데다 급증하는 전력수요에 대비하기 위하여 원자력발전소를 계속적으로 건설하고 있다. 그러나 체르노빌 원자력발전소에서 사고가 발생한 후, 원자력발전소의 안전도에 대한 경각심이 높아진데다, 지역 이기주의의 태도로 인하여 새로운 원자력발전소의 부지확보가 대단히 곤란하기 때문에, 기존의 원자력발전소 단지에 추가하여 새로운 원자력발전소를 증설할 수밖에 없는 실정으로 원자력발전소 단지가 대규모 단지화하는 경향에 있다. 이와 같이 원자력발전소가 대규모 단지화되는데다, 우리나라 전력수요의 43%를 차지하는 경인 지역으로부터 멀리 떨어진 곳에 원자력발전소가 위치하기 때문에 원자력발전기의 안정도가 중요한 문제로 부각될 전망이다. 즉 원자력발전소에서 발전한 전력을 수용가에까지 수송하는 송전선로에 사고가 발생하였을 경우, 발전기 회전자가 가속하여 전력계통에서 분리되고 원자력발전소로

부터의 전력공급이 중단되는 사태가 일어날 가능성에 대비하기 위한 대책마련이 요구된다.

이상과 같은 전력계통사고로부터 원자력발전소를 보호하고 전력계통의 과도안정도를 향상시키는 방법으로 송전선로를 추가로 건설하는 것이 가장 확실한 방법이나, 경우에 따라 대단히 비경제적이고 선로 경과지를 확보해야 한다는 문제가 있다. 이에 대한 경제적이고 동등한 효과를 얻는 대안으로 제동저항(Braking Resistor)의 도입을 검토할 필요가 있다. 제동저항은 발전기 모선단에 접속하여 가속중인 발전기군의 에너지를 흡수/소비함으로써 자동차의 브레이크와 같은 제동 효과를 얻을 수 있는 장치로, Thyristor 제어방식을 도입함으로써 연속적인 정밀제어가 가능하게 된다. 이와 같이 TCBR을 도입함으로써, 비교적 적은 비용으로 계통안정도를 효과적으로 향상시킬 수 있고, 과도현상후 또는 정상상태에서의 계통동요에 따른 진동을 억제하며, 다른 계통소자에 의해 야기되는 Subsynchronous Resonance(SSR)을 완화시키는 효과를 얻게 된다.

☞ 다음 호에 계속