

특집 : 전력산업에서의 전력전자기술

FACTS의 전력계통에의 적용

김수열*, 추진부**
(전력연구원 *연구원, **센터장)

1. 서론

우리나라와 같이 전력수요가 대도시 인구밀집 지역 중심으로 증가하는 경우, 대단위 발전단지, 송전선로 및 변전소의 개발이 불가피하지만, 환경문제, 경과지 확보 등의 어려움으로 설비확충이 계획대로 이루어지지 않고 있는 실정이며, 점차 심화될 것으로 전망된다. 이에 따라, 최근에는 전력의 안정공급과 주변 여건들의 해결 방안으로 전력변환 응용기술을 이용한 대용량 전력 수송기술 및 송전용량증대 기술 등이 주목받고 있다. 최근 반도체 소자 기술과 제어기술의 눈부신 발달은, 교류 전력계통을 실시간으로 제어함으로써, 보다 효율적이고 유연한 전력계통의 구성 및 운용이 가능하게 되어 송

전용량을 증대하기 위해 전압원 인버터 FACTS 기기가 계통에 적용되는 단계에까지 이르게 되었다.

FACTS 설비는 그 구조에 따라 표 1과 같이 GTO나 IGBT 등 자러식 소자를 이용한 전압원 인버터 기기와 Thyristor 소자 스위칭 시스템으로 나누어 볼 수 있다.

TCSC는 Thyristor를 이용해 직렬콘덴서를 제어하는 장치로, 종래의 차단기를 이용한 기계적인 방식을 개선한 것이며, 직렬콘덴서를 선로에 삽입함으로써 계통의 임피던스를 제어하는 설비이다.

SVC는 Thyristor를 이용하여 병렬 콘덴서나 리액터를 신속하게 접속 제어하여 무효전력 및 전압을 제어하는 장치이다. SVC는 처음에는 아-크로나 제철소의 압연설비로 인한 전

표 1. 대표적인 FACTS 설비 종류

구분	FACTS 기기명		주요특징 및 기능
싸이리스터 스위칭 (I 세대)	TCSC	싸이리스터 제어 직렬콘덴서 (Thyristor Controlled Series Capacitor)	선로 Impedance 제어 전력조류 제어 안정도 향상
	SVC	정지형 무효전력 보상기 (Static Var Compensator)	전압유지
전압원 인버터 (II 세대)	STATCOM	정지형 동기 조상기 (Static Compensator)	전압유지 안정도 향상
	SSSC	정지형 동기 직렬보상장치 (Static Synchronous Series Compensator)	전력조류 제어 선로 Impedance 제어 안정도 향상
	UPFC	종합 조류 제어기 (Unified Power Flow Controller)	위상각 제어 전압제어, 안정도 향상 전력조류 제어

압 변동(Flicker)을 보상하기 위해 개발되었으나, 대용량화가 추진됨에 따라 계통 안정화를 위해 송전선로에도 적용하게 되었다.

UPFC, STATCOM, SSSC 등은 90년대 이후 개발된 II 세대 설비들로서, 이제 FACTS (Flexible AC Transmission System) 기술은 종래의 교류 송전선로에 전력용 반도체 소자를 이용한 인버터 제어기술의 도입을 통하여 계통의 유연성을 증대시킴으로써, 교류계통의 한계점을 보완하고 특성을 개선시킨 차세대 전력수송 기술로 정의할 수 있다.

이러한 전압원 FACTS 기술의 개발은 1990년초 미국 EPRI에서 처음 개념이 수립된 이래 선진국을 중심으로 전력회사, 중전기업체 및 관련 연구기관들의 집중적인 연구투자로 신뢰성 있는 FACTS 기기들이 속속 개발되고 성공적으로 운용됨에 따라 향후 계통 운용개념의 획기적인 변화 가능성을 예고하고 있다.

2. 전압원 FACTS 기기

그림 1은 기본적인 전압원 FACTS 기기의 종류별 계통 연계방식을 보여준다. STATCOM의 경우 계통전압에 동기된 인버터 출력전압이 변압기를 통해 계통에 연결되어 무효전력을 발생시켜 계통전압을 제어한다. SSSC는 계통전류를 기준으로 위상이 90도 진상 혹은 지상인 전압을 계통에 직렬 주입하는 FACTS기기로, 이로써 계통의 조류가 변화하게 된다. SSSC는 계통의 조류를 페루프로 제어하는 것이 아니며, 단지 전압의 크기를 제어하여 부수적으로 조류를 제어하게 된다. UPFC는 송전선로의 전력조류에 영향을 미치는 모든 변수(전압크기, 위상각, 임피던스)에 대한 제어가 가능한 궁극적인 의미에서의 전력 제어기라고 할 수 있다. UPFC는 송전선로에 직렬 및 병렬 연결되어 송전선로의 유효 및 무효전력 조류 제어와 모선의 전압 제어를 동시에 할 수 있는 유일한 FACTS 기기로서 병렬 FACTS 기기인 STATCOM과 직렬 FACTS 기기인 SSSC의 구조와 특성을 결합한 형태의 설비이다.

직렬 삽입 전압원은 모선 간 전압 위상각과 전압크기를 변화시키는 효과를 가져오고 이로 인해 선로조류가 변화하게 되며, 병렬 전압원은 해당 모선의 전압을 제어하고 직렬 삽입 전압원에 의해 소요되는 유효 전력을 공급하는 기능을 수행한다. 공통의 DC bank에 여러 대의 SSSC를 연결하여 구성하는 것이 IPFC(Interline Power Flow Controller)이며, SSSC가 각각 다른 선로에 연결되어, 별도로 직렬 무효전력 보상이 가능하고, 상호 선로간의 유효전력의 직접 전송이 가능하게 한다.

IPFC는 한 변전소에 여러 대를 동시 설치하여 선로간의 과부하 제어 및 무효전력 보상으로 동적 외란에 대한 전반적인

보상 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. IPFC는 여러 개의 송전선로가 있는 변전소에서 효율적으로 계통 외란을 보상할 수 있는 FACTS 설비이다. 아직 IPFC 단독으로 설치되어 있는 곳은 없으며, 미국 NYPA Marcy 변전소의 경우 CSC(Convertible Static Compensator)가 IPFC 모드로 운전될 수 있다. NYPA CSC는 야드의 스위치 조작에 따라 FACTS의 운전 모드가 바뀌도록 설계되어 있으며, STATCOM, SSSC, UPFC, IPFC 모드 운전이 가능하고, 현재 추가 설치된 직렬인버터의 시험이 진행 중이다.

Back-to-Back STATCOM은 STATCOM을 DC bank를 공통으로 하여 서로 다른 선로에 병렬 연결한 설비로 전압원 HVDC로 생각할 수 있으며, 각각 무효전력을 통한 전압제어 및 선로간에 유효전력을 수수할 수 있어 송전선로 과부하 해소에 도움이 된다.

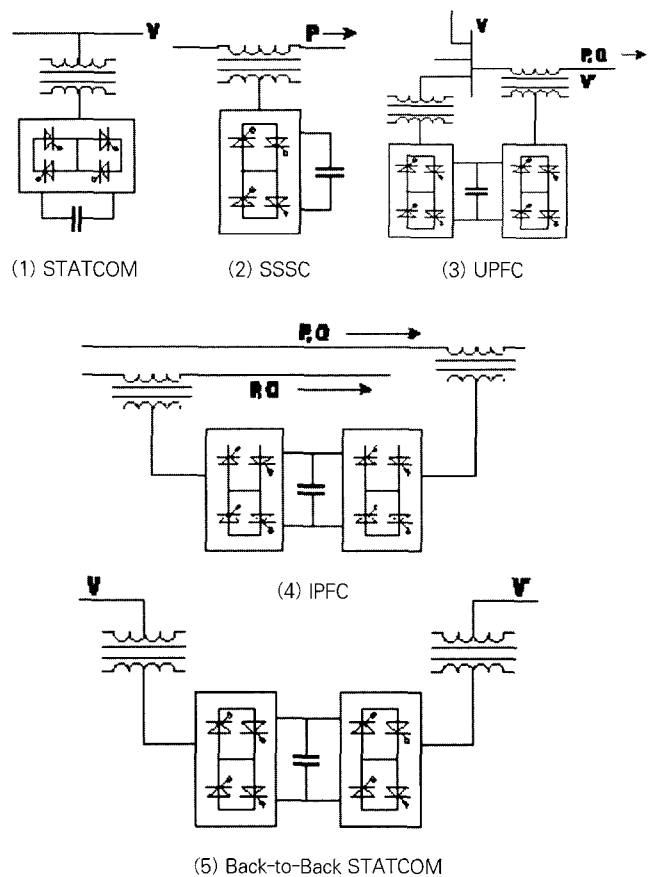


그림 1. 전압원 인버터를 이용한 FACTS 기기 종류

3. 국내의 기술 동향

미국은 EPRI를 중심으로 90년대 세계최초로 실용화에 성공한 이후 전압원 컨버터형 기기의 개발과 관련 기술을 주도

표 2. 미국의 FACTS 설비 적용 현황

전력회사	설비 규모	계통 적용 목적	운영 현황
BPA (Slatt s/s)	500kV/202MVA TCSC	· TCSC 실증시험, 조류제어, SSR 제어시험 · TCSC 제어모형 정립	· 운전중 냉각수 누수 고장 경험 · 고장수리완료후 운전중(1992년)
WAPA	230kV/165MVA TCSC	· 송전선로 용량 증대 · TCSC 제어 모형 정립	· 실계통 적용 운전중(1992년)
TVA (Sullivan s/s)	161kV/100MVA STATCOM	· 송전선로 용량 증대 · 연속, 정밀 전압제어 · 계통 진동 감쇄	· 운전중(1995년)
AEP (Inez)	138kV/160MVA UPFC	· 송전선로 용량 증대 · 연속, 정밀 전압제어 · 계통 진동 감쇄 · 송전선로 용량 증대 · 지정선로의 직접 조류제어 · 계통 진동 감쇄 · 전압 보상 및 제어	· 운전중(1997년)
NYPA (Marcy s/s)	345kV/200MVA CSC	· 송전선로 용량 증대 · 지정선로의 직접 조류제어 · 계통 진동 감쇄 · 전압 보상 및 제어	· 시험중(2003년)

표 3. 일본의 FACTS 설비 적용 현황

전력회사	설비 규모	계통 적용 목적	운영 현황
관서전력	154kV/80MVA STATCOM	· 장거리 송전선로의 안정도 향상 · 송전용량 증대	· 운전중(1991년)
동경전력	275kV/50MVA × 2 UNIT STATCOM	· 기간계통의 안정성향상 · 말단계통의 전압변동 억제 · 기기 성능 및 신뢰도 시험	· 운전중(1992년)

표 4. 국내 FACTS 관련 연구개발 현황

Project	기금	상태	기간	비고
3.3KV 1MVAR SVC개발	한전지원	완료	1991 ~ 1995	3.3KV 1MVAR GTO사용
서대구 SVC	한전	완료	1998 ~ 1999	100MVA, 345kV
1MVA급 IGBT형 정기형 동기 조상기 개발	전력연구원 효성중공업	완료	1996 ~ 1999	1MVA DSTATCOM, 22.9KV적용
80MVA UPFC 제작 및 설치	전력연구원 (주) 효성	진행중	2000 ~ 2003	80MVA, 154kV GTO사용

하고 있다. 현재 전압원 인버터 기기인 STATCOM 및 UPFC의 개발 및 설치에 주력하고 있다.

일본의 경우, 전력용 반도체 소자 개발 및 적용 기술에서 특히 앞서가고 있고 자체적인 컨버터 기술을 바탕으로 동 분야의 기기제작 및 실증시험을 통하여 운영기술 확보에 대한 노력을 지속하고 있으며, 전압원 인버터를 채택한 STATCOM 연구와

동을 국가 및 중전사들이 협동으로 추진하고 있는 실정이다.

국내 FACTS 기술의 경우 시스템을 구성하는 주요 핵심기기는 외국 제작사에 의존하고 있으며, 일부 시스템 엔지니어링, 설치 및 Commissioning기술은 자체적으로 습득하는 단계에 있다. 또한 전력품질 향상기기 개발 등 기타 동 분야 기술 실계통 적용을 위한 소규모 단위의 과제가 진행되고 있다.

4. 국내 전압원 FACTS 기기 소개

한국전력공사 강진변전소에 80MVA UPFC를 설치하여 2002. 11. 15일 커미셔닝을 완료하였으며, 2003. 03. 31까지 시운전을 마치고, 현재 운전 중이다. 그림 2는 UPFC가 설치되어 있는 강진변전소 전경이다.

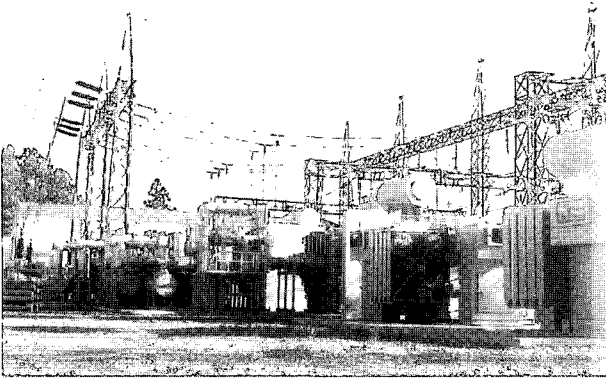


그림 2. 80MVA UPFC 계통연계 설비(직렬/병렬 변압기, GIS)

그림 3은 강진 UPFC의 계통 연결도이다. 병렬인버터는 강진 모선측에 병렬 연결되어 있고, 직렬인버터는 강진-장흥간의 장흥송전선로에 직렬 연결되어 있다. 강진 UPFC는 직렬 및 병렬인버터가 각각 40MVA 용량이며, 병렬인버터만으로 STATCOM 기기가 구성되며, 직렬인버터만으로는 SSSC 기기가 구성된다. 직렬 및 병렬인버터가 동시 동작하면, UPFC

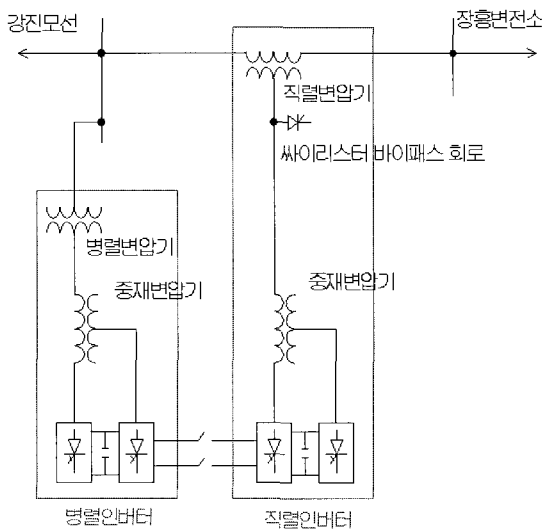


그림 3. 강진 UPFC의 계통연결도

기기가 구성되어, 강진 UPFC는 STATCOM, SSSC, UPFC의 3가지 운전모드를 갖게 된다.

강진 UPFC 인버터는 20MVA 단위 인버터 4대로 구성되어 총 80MVA 용량이며, 직렬 및 병렬인버터는 각각 2대의 단위 인버터, 과전압 방지 목적의 DC clamping 회로, 단위 인버터 2대를 자기적으로 결합시키는 중재변압기 및 그의 출력을 계통에 연계시키는 주변압기를 갖는다. STATCOM 모드로 동작 시 40MVAR의 진상-지상의 무효전력을 공급하여 154kV 계통전압을 제어하고, SSSC로 동작 시 계통에 직렬로 주입되는 전압크기를 제어하며, UPFC로 동작 시에는 계통 전압 및 조류를 제어한다. 각 단위 인버터는 인버터 폴 스택으로 구성되어 있으며, 3레벨의 전압원 인버터이다.

인버터를 전력소자의 구성측면에서 본다면 2레벨 인버터와 3레벨 이상의 멀티레벨 인버터 구조로 크게 나눌 수 있다. 멀티레벨 인버터의 경우 인버터 하드웨어의 구조가 복잡해지긴 하지만 전력소자의 부담을 경감하고 고조파 특성을 개선할 수 있는 장점이 있다. 강진 UPFC의 경우 대용량 전력용 인버터로 멀티레벨 전압원 인버터 구조와 멀티펄스 구동방식을 채택하고 있는데, 고조파 측면이나, 전력손실, 전력소자의 스트레스 측면에서 효과적인 방법이다.

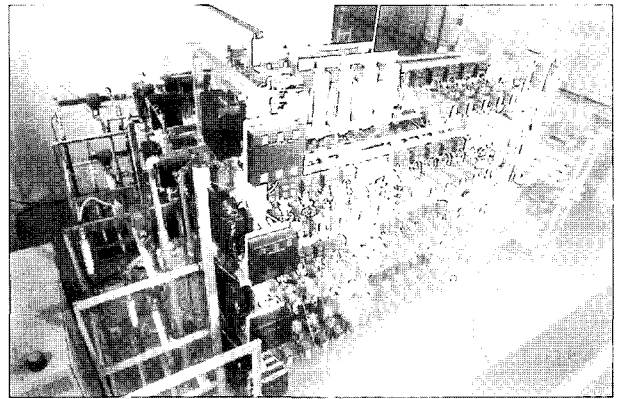


그림 4. UPFC Inverter Stack(4개의 20MVA Stack중 하나)

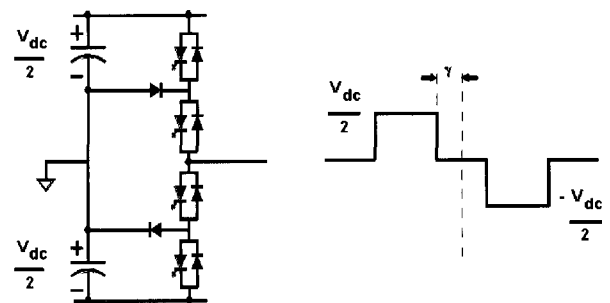


그림 5. 3레벨 인버터 폴 구성 및 출력형태

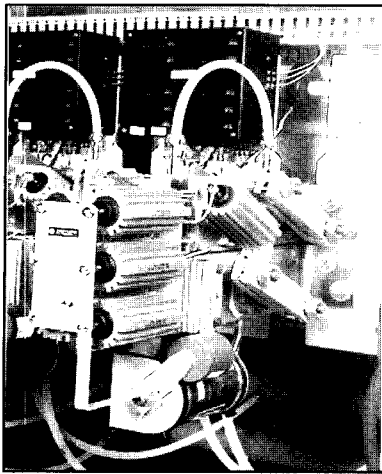


그림 6. GTO 모듈(스너버 회로 포함)

그림 5는 3레벨 인버터의 한 폴의 모습이며, 4개의 GTO 밸브와 2개의 mid-point diode로 구성되어 있다. 폴 출력전압은 GTO 밸브의 스위칭 동작에 따라 $+V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$, GND의 3레벨의 값을 갖는다. GTO 밸브는 각각 5개의 GTO 모듈이 직렬연결되어 있으며, 한개의 여유분을 가지고 있다.

그림 3의 3레벨 6pulse 단위 인버터의 출력이 30° 위상차로 중재변압기에서 합성되어 12pulse 출력을 갖게 된다. 3레벨 인버터의 그림 5의 감마(γ)각을 고조파를 최소로 하는 조건으로 제어하면 ($\gamma = 7.5^\circ$), 중재변압기 출력전압은 $24k \pm 1$ 의 고조파를 갖게 되어, 병렬 및 직렬인버터는 24pulse의 인버터 시스템이 된다.

강진 UPFC는 RTU(Remote Terminal Unit)를 통한 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템으로 신강진급전분소 및 LAN을 통한 PC anywhere라는 운전자 환경의 소프트웨어를 이용해 원격으로 제어 가능하다. 또한 운전자 환경을 통해, 충분한 고장유형별 처리방법과 정확한 고장 위치를 알려줄 수 있어 유지 보수가 한층 편리하도록 하였다. 또한 계통사고 등의 원인으로 인한 과전류나 저전압이 발생할 경우 주요 전력전자 소자와 부속장치의 damage가 없도록 병렬인버터의 경우 계통으로부터 차단 분리하고, 직렬인버터의 경우, 직렬변압기를 바이패스 분리시켜 내부 시스템을 보호하고 외부 계통에 대한 추가적인 피해 가능성을 제거하였다. 직렬인버터는 사이리스터 및 기계식 차단기의 2중 바이패스 설비가 구비되어 있으며, 먼저 속응성이 빠른 사이리스터 바이패스 회로가 동작한 후, 기계식 차단기가 동작한다.

현재 강진 UPFC는 병렬인버터는 전압제어모드로, 직렬인버터는 조류제어모드로 동작하여 강진변전소 모선의 전압제

어 및 강진-장흥간의 조류를 제어하여 계통에 안정도 증진에 기여하고 있다.

5. 결 론

FACTS 기술은 사이리스터 소자를 이용한 1세대 FACTS 설비에서, 이제는 GTO를 활용한 자기 소호방식의 대용량 반도체 소자를 사용하는 2세대의 전압원 인버터 방식의 FACTS 설비가 계통에 실증 적용되고 있는 단계이다. 현재 GTO를 대체하는 대용량 반도체 소자로서 IGCT를 FACTS에 적용하는 연구가 진행되고 있으며, 조만간 IGCT 전압원 인버터 FACTS 설비가 상품화 될 것으로 예상된다.

FACTS 기술은 미국, 유럽, 일본 등 전력기술 선진국 뿐만 아니라 전력수요 성장률이 높은 중국을 비롯한 아시아 지역 국가에서 활발히 연구되고 있으며, 계통계획 및 운용단계에서 기술 대안으로서 유용성이 매우 클 것으로 기대되고, 관련 산업에 대한 파급효과와 상승효과가 대단히 큰 복합 기술로 인정되고 있다.

또한, 선진국의 경우 FACTS 분야의 연구를 국가적인 지원으로 진행시켜 왔고 선 기술투자를 통한 세계 시장선점을 완료한 상태이며 후발국에 대한 기술이전도 기피하는 분야이다. FACTS 기술은 자원이 빈약한 우리나라로서 에너지 다변화의 일환인 동북아 계통 연계의 근간이 되는 기술이며, 전력설비 보강 지연 등에 따른 계통 안정화 운용 제어에 꼭 필요한 기술이지만 국내 FACTS 기술 기반은 매우 취약한 실정이다. 따라서 향후 선진국의 기술보호주의를 극복하고 독자적인 기술 개발을 위해서는 국가 차원의 지속적인 연구개발 및 지원이 절실히 요구된다. □

〈 저 자 소 개 〉



김수열(金守烈)

1968년 2월 29일생. 1990년 중앙대 전기공학과 졸업. 1995년 중앙대 대학원 졸업. 1995년 한전 전력연구원 입사. 현재 한전 전력연구원 전력시스템기술그룹 근무. 주요관심 분야 FACTS, power quality.



추진부(秋鎭夫)

1950년 1월 7일생. 1977년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 한전입사. 1994년 서울대 대학원 졸업(공학). 현재 한전 전력연구원 전력계통해석센터장(수석갑). 주요관심 분야 FACTS, Real time power system simulation.