

# 80MVA UPFC 설치 및 시험

□ 전영수, 윤종수, 김수열 / 한전전력연구원 전력시스템기술그룹

## 서론

최근 반도체 소자 기술의 발달로 보다 효율적이고 유연한 전력계통의 구성 및 운용이 가능하게 되어, 송전용량을 증대하기 위해 전압원 인버터 FACTS 기기가 계통에 적용되는 단계에까지 이르게 되었다. 전압원 인버터 FACTS (Flexible AC Transmission System) 기술은 인버터 기술을 FACTS에 도입하여 계통의 유연성을 보다 증대시킨 차세대 전력수송 기술이라 할 수 있다. 우리나라의 경우, 인구밀집지역으로의 대용량의 전력수송이 불가피하지만, 환경문제, 경과지 확보 등의 어려움으로 설비확충이 계획대로 이루어지지 않고 있는 실정이며, 이러한 추세는 점차 심화될 것으로 전망된다. 이런 환경변화속에서 한국전력공사 전력연구원에서는 대용량 전력 변환기술 및 345kV로의 설비 확대적용에 대한 신뢰성 확보를 목표로, UPFC(Unified Power Flow Controller) 시작품을 154kV 강진변전소에 설치하여 2002. 11. 15일 커미셔닝을 2003. 3. 31일 계통연계 시험을 완료하였다. 강진변전소에 설치된 FACTS 기기는 국내 최초, 미국 AEP에 이어 세계 2번째의 UPFC기기로 신기술을 이용한 대용량 전력전자 설비이다. 강진 UPFC는 한국전력공사와 (주)효성이 공동으로 투자하고, 지멘스와의 기술제휴를 통해 개발하였다. 강진 UPFC는 병렬인버터 40MVA, 직렬인버터 40MVA 총 80MVA 용량이며, GTO(Gate

Turn-Off thyristor)를 이용한 3레벨 단위 인버터 20MVA 총 4대로 구성되어 있으며, 현재 병렬인버터는 강진 모선의 전압을 제어하며, 직렬인버터는 강진-장흥간의 조류제어에 기여하며, 상용운전 중이다.

## UPFC 적용 배경

### UPFC 소개.

전압원 인버터 FACTS 기기는 STATCOM(STATIC COMPensator), SSSC(Static Synchronous Series Compensator), UPFC 등이 있으며, STATCOM의 경우 계통전압에 동기된 인버터 출력전압이 병렬변압기를 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 주입 전압의 크기를 제어하여 조류제어 효과를 갖게 한다. UPFC는 송전선로의 전력조류에 영향을 미치는 모든 변수(전압크기, 위상각, 임피던스)에 대한 제어가 가능한 궁극적인 의미에서의 전력 제어기라고 할 수 있다. UPFC는 송전선로의 유효 및 무효전력 조류 제어와 모선의 전압 제어를 동시에 할 수 있는 유일한 FACTS 기기로서 직렬 FACTS 기기인 SSSC와 병렬 FACTS 기기인 STATCOM의 구조와 특성을 결합한 형태의 설비이



## 소 · 특 · 집 · ②

다. 즉, 직렬인버터와 병렬인버터로 구성되어 각각 변압기를 통해 직렬인버터는 선로에 직렬 접속되고, 병렬인버터는 모선에 병렬로 연결된다. 직렬인버터의 삼입 전압원은 모선 간 전압 위상각과 전압크기를 변화시키는 효과를 가져오고 이로 인해 선로조류가 변화하게 되며, 병렬 전압원은 해당 모선의 전압을 제어하고 직렬 삼입 전압원에 의해 소요되는 유효 전력을 공급 하는 기능을 수행한다.

### UPFC 적용 배경

80MVA UPFC는 인근선로 전압 및 조류제어로 전압안정화, 동적동요 저감, 계통 손실 저감 등의 목적으로 신김제변전소에 설치될 예정이었다. 하지만 345kV 광양-신강진 송전선로 건설계획의 지연으로 345kV 신강진 T/L 사고 시 발생하는 신광주 변압기 및 154kV 송전선로 과부하, 신강진계 계통전압 저하 등이 예상되어 FACTS Pilot Plant의 적용 장소가 강진변전소로 결정되었다. 이로써 강진변전소는 정상상태 시, 선로 이용율을 향상하고, 손실을 개선시키며, 사고 시 목표변전소 모선전압의 안정에 기여함은 물론 신광주 변압기의 과부하 해소 등에 기여하게 된다.

## UPFC 구성 및 기능

강진변전소 UPFC는 각각 40MVA의 병렬인버터와 직렬인버터로 구성되어 총 80MVA 용량이며, 3가지의 운전모드를 갖게 되는데, 40MVA 병렬인버터만으로 STATCOM 운전, 40MVA 직렬인버터만으로 SSSC 운전, 80MVA 직병렬인버터로 UPFC 운

표 1 운전모드별 인버터 구성

운전모드	인버터	제어모드
STATCOM	병렬인버터	전압제어 및 무효전력제어
SSSC	직렬인버터	주입전압제어
UPFC	병렬인버터	전압제어 및 무효전력제어
	직렬인버터	조류제어 및 주입전압제어

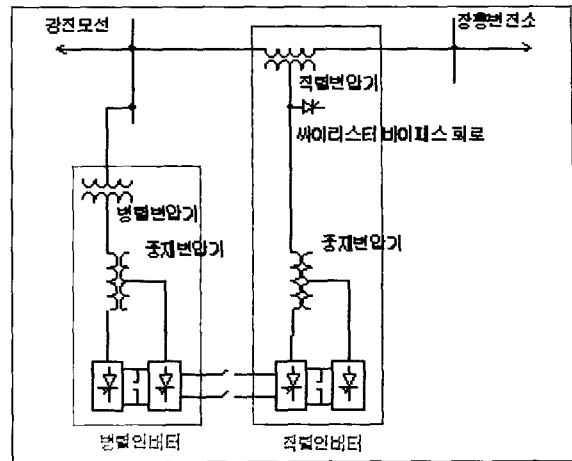


그림 1 강진 UPFC 계통 구성도

전이 가능하다.

직렬 및 병렬인버터는 각각 2대의 단위 인버터로 구성되어, 과전압 방지 목적의 DC clamping 회로, 단위 인버터 2대를 자기적으로 결합시키는 중재변압기 및 그 출력을 계통에 연계시키는 주변압기를 갖는다.

각 단위 인버터는 GTO 모듈로 구성된 3레벨의 6

표 2 변압기 사양

구분	전압비[kV]	MVA	비고
병렬변압기	154/√3/14,845	40	Y-Δ
직렬변압기	6,061/14,845	40	open Y-Δ
중재변압기	4,757/8,239	22,2	open Y-Δ

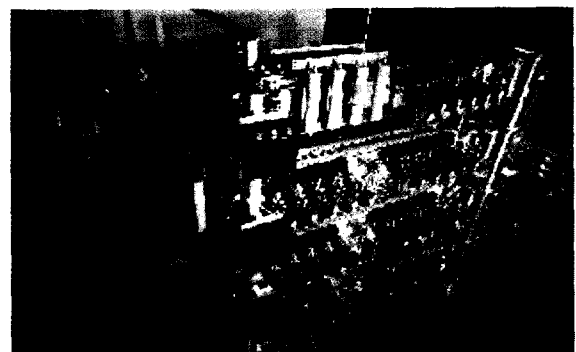
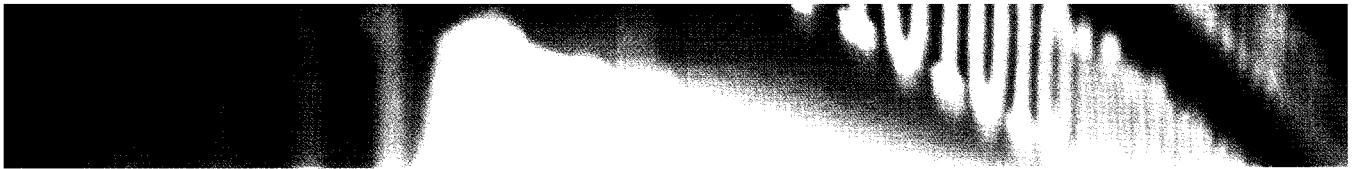


그림 2 Inverter Stack(4개의 20MVA Stack중 하나)



펄스 인버터이므로, 삼상 중 한상에 해당하는 한 폴의 구성도 및 출력파형은 그림 3과 같다. 한 폴은 4개의 GTO 밸브와 2개의 mid-point diode로 구성되어 있으며, 그 출력전압은 GTO 밸브의 스위칭 동작에 따라  $+V_{dc}/2$ ,  $-V_{dc}/2$ , GND의 3레벨의 값을 갖는다.

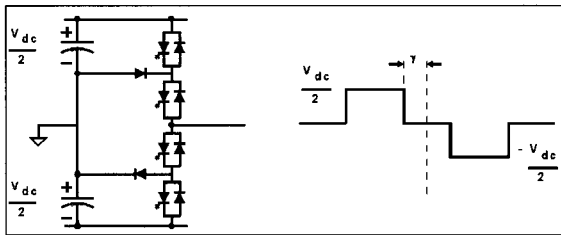


그림 3 3레벨 인버터 구성 및 출력형태

이 6펄스 인버터의 출력이  $30^\circ$  위상차로 중재변압기에서 합성되어 12pulse 출력을 갖게 된다 하지만 3레벨 인버터이므로, 고조파를 최소로 하도록 점호각( $\alpha = 7.5^\circ$ )을 제어하여, 24pulse의 인버터 시스템이 된다. STATCOM 동작 시, 병렬인버터로 최대 40MVAR의 진/지상 무효전력을 계통에 공급하여 계통전압을 제어하며, SSSC 동작 시, 직렬인버터로 6kV의 전압을 계통에 주입하여, 계통의 조류를 개루프로 제어한다. UPFC로 동작 시에는 계통 전압 및 조류를 페루프로 제어할 수 있다.

GTO 모듈은 GTO 소자, 역병렬 다이오드, RCD 스너버, GTO 직렬접속에 의한 전압분배 저항 등으로 구성되어 있다. GTO 소자는 4500V, 4000A 정격이며, 3000A에서 과전류 보호동작이 개시된다. 인버터에 대한 보호는 과전류, 저전압(0.3pu) 및 PLL 에러 발생 시에 동작하며, 병렬인버터는 병렬차단기 차단으로 인버터를 계통 분리시키고, 직렬인버터는 직렬차단기 바이패스로 인버터를 분리시킨다. 이로써 내부 시스템을 보호하고, 외부 계통에 대한 추가적인 피해 가능성을 제거하였다. 직렬인버터의 직렬변압기의 1차측은 계통의 전류가 직접 흘러가므로, 고장 발생 후 차단기 동작까지는 대략 7~9 사이클이 소요되므로, GTO를 소손시키기에 충분한 시간이다. 따라서 기계적인 차단기 동작 전에

TBS(Thyristor Bypass Switch) 동작하여 계통 전류로 인한 GTO의 소손을 방지한다.

인버터 냉각설비는 반도체 소자들의 과열을 방지하기 위하여 물과 에틸렌글리콜 혼합물인 냉각수를 이용해 인버터 발생열을 제어소 옥외로 순환시켜 열교환기를 통해 대기로 방출한다. 전동기, 필터 등의 유지보수가 필요한 부속품은 UPFC 운전 정지나 용량 감소 없이 냉각설비에서 분리할 수 있도록 이중화되어 있다. 열교환기는 유지보수를 위해 하나의 교환기를 분리할 경우, UPFC의 용량 감소를 방지하기 위해 33% 용량의 여분 열교환기를 가지고 있다.

강진 UPFC는 RTU(Remote Terminal Unit)를 통한 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템으로 신강진급전분소 및 LAN을 통한 운전자 환경 소프트웨어(PC anywhere)를 이용해 원격으로 제어 가능하다. 또한 운전자 환경을 통해, 충분한 고장유형별 처리방법과 정확한 고장 위치를 알려줄 수 있어 유지보수가 한층 편리하도록 하였다. 그림 3은 운전자가 UPFC 운전점 변경 시 접하는 운전자 화면이다.

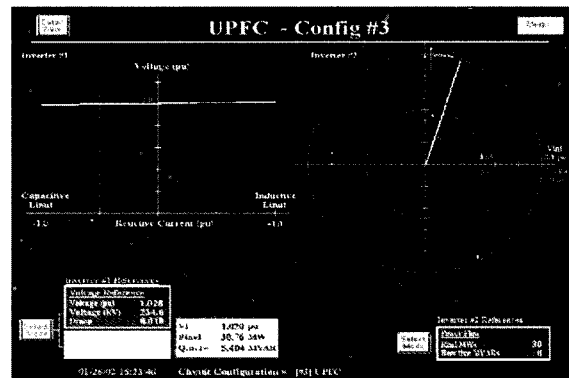


그림 4 UPFC 운전자 화면

## 커미셔닝 시험

UPFC 시스템을 현장에 최초 설치 하고, 수행하는 시험으로, 비가압시험, Off-line 커미셔닝, On-line



커미셔닝으로 구분한다. 비가압시험은 육안 및 전기적인 시험을 통하여 각종 구성품의 물성치 및 전기적인 결선을 확인하는 시험이며, Off-line 커미셔닝은 UPFC 시스템이 계통과 분리된 상태에서 인버터 기기로서의 모든 기능을 확인하는 시험으로, 이 시험이 완료된 후에야, 병렬 및 직렬인버터로서의 기능을 갖는다. 이 시험은 시험용 전원공급장치를 필요로 한다. On-line 커미셔닝은 UPFC 시스템을 계통에 투입하여 UPFC로서의 정상 동작 여부 확인 및 성능시험을 수행하는 시험이다. 따라서 이 시험을 통하여 UPFC가 계통에 정상적으로 기여할 수 있도록 각종 제어 파라미터들을 설정한다.

시험순서는 UPFC를 STATCOM모드로 설정하여 병렬인버터의 Off-line, On-line 커미셔닝을 완료한 후, UPFC 모드에서 직렬인버터의 기능을 확인한다. 이는 직렬인버터 단독으로 On-line 커미셔닝 수행시 계통 전류가 직렬인버터의 DC bank를 직접 충전하는 다소 위험 부담이 따르는 시험이므로, UPFC 모드의 병렬인버터가 직렬인버터를 충전하도록 하여, 위험 부담을 줄이기 위함이다. 직렬인버터의 Off-line은 UPFC 모드에서 완료 되었으므로, SSSC 모드의 On-line 시험을 수행하여 UPFC 커미셔닝을 완료한다.

### STATCOM

UPFC의 STATCOM 모드 운전은 병렬인버터에 대한 시험을 수행하는 부분으로, Off-line 커미셔닝 시험은 아래와 같다.

#### 1) 저전압 DC bus 가압시험

병렬인버터의 커패시터 뱅크를 가압하여 Pos.-to-mid, Neg.-to-mid 간의 전압 분배 및 이상 유무 확인한다.

#### 2) 저전압 인버터 출력전압 확립 시험

저전압으로 DC bus를 가압하여 인버터의 pole 출력 전압파형을 확인한다.

3) DC bus 측정 회로 교정 및 과전압 보호 시험  
정격전압 시험 전, 과전압 보호에 대한 설정 후 클램프 동작 확인한다.

4) 정격전압 인버터 출력전압 확립 시험  
정격전압상의 폴 출력전압 파형 확인한다.

5) 동기 확인 시험  
계통전압과의 동기를 확인한다.

6) 단락 시험  
전류 정격에 대한 시험 수행하여 각 기기 구성품들의 정상 동작 확인한다.

STATCOM의 온라인 시험은 아래와 같다.

#### 1) STATCOM 투입 시험

STATCOM 시험 위험 부담을 줄이기 위해 DC bus를 단계별로 기 충전시켜 놓은 후 시스템을 계통에 투입시킨다. 100, 75, 50, 25, 0% 순으로 단계별 충전하여 STATCOM을 계통 투입 시험한다.

#### 2) 무효전력제어모드 운전

STATCOM을 no precharge 상태에서 계통 투입 후, 무효전력제어운전을 수행하며 정격으로 운전한다.

#### 3) 전압제어모드 운전

무효전력제어모드에서 전압제어모드로 변경하여 bumpless하게 절환되는지 확인한다.

#### 4) 동특성 시험

droop별로 전압명령치를 변경하며 droop을 설정하고, 동특성 시험을 수행한다.

#### 5) 이중화 시험

이중화 되어 있는 냉각시스템의 일부 구성품 및 UPS, GPS(Gating Power Supply)등이 고장 시 UPFC 시스템 트립없이 절체되는지 확인한다.

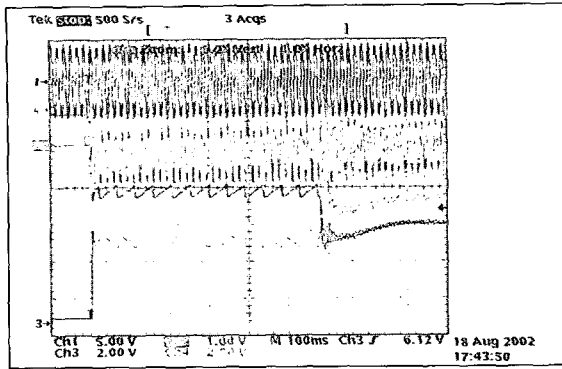
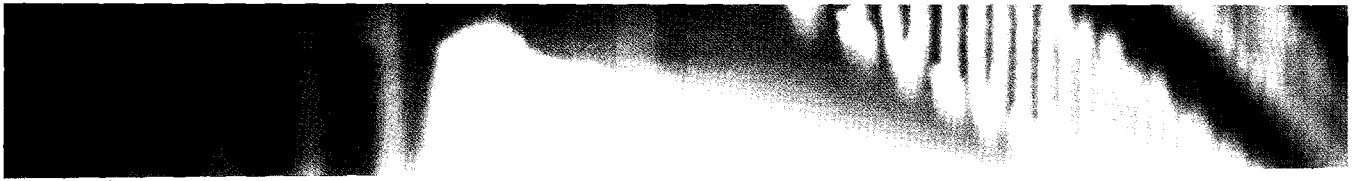


그림 5 병렬인버터 투입시 파형(no precharge)

Ch 1, 154kV A상 전압  
Ch 2, Shunt A상 전류  
Ch 3, +Vdc, Ch 4, -Vdc

병렬인버터는 초기 운전 시, 병렬차단기 투입되고 시스템이 안정화되면, 병렬인버터의 GTO gating을 시작한다. 병렬차단기 투입 시, 계통으로부터의 전류가 GTO 역병렬 다이오드를 통해 DC 커패시터 뱅크를 충전하고, 초기 충전전류에 의해 발생된 과전압을 DC clamp회로가 동작하여 과전압을 방지한다. 그림 4의 톱니 파형이 과전압을 방지하기 위해 DC clamp회로의 동작을 보여준다. DC 커패시터 전압이 700msec 동안 1.5[pul로 정상 제어됨이 확인되면, GTO gating이 시작되어 병렬인버터가 전압제어모드로 계통에 병입 운전되고, DC 전압은 정상화된다.

STATCOM은 Droop = 3%로 설정되어 있으며, 응답특성은 용량성이나 유도성 동작 시 20ms 이내에 UPFC의 출력을 영출력에서 정격출력의 90%까지 증가시킬 수 있도록 설정되어 있다.

### UPFC

직렬변압기의 Off-line 커미셔닝은 병렬변압기의 절차외에 TBS(Thyristor Bypass Switch) 시험을 추가로 수행해야 한다.

UPFC On-line 시험내용은 아래와 같다.

#### 1) 직렬변압기 단독 가압시험

직렬인버터의 게이트를 비활성화 시킨 상태에서 직렬변압기를 계통에 투입하여 변압기의 절연 상태

및 전기적 결함 유무를 최종 확인한다.

2) UPFC모드로 병렬인버터 초기 가압시험  
직렬인버터를 계통에 투입하기 전에 먼저 병렬인버터를 투입한다.

3) 과전류 보호시험(바이패스 회로 시험)  
UPFC 시스템 트립 시 직렬인버터 측 바이패스 회로가 동작하여 직렬인버터를 계통으로부터 분리시키므로, 먼저 싸이리스터 바이패스 회로의 정상동작을 확인한다.

4) 직렬인버터 투입시험  
직렬인버터를 점호각을 주입전압이 영이 되도록 제어하여 이상 없음을 확인한 후, 주입전압 명령치를 바꿔본다.

5) 전압주입제어모드 운전  
주입전압 명령치를 정격치로 바꿔 이상 유무를 확인한다.

6) 조류제어모드 운전 전압주입모드에서 조류제어모드로 변경하여 bumpy한 모드 절환을 확인한다.

7) 동특성 시험  
스텝시험을 통하여 시스템의 응답특성을 확인한다.

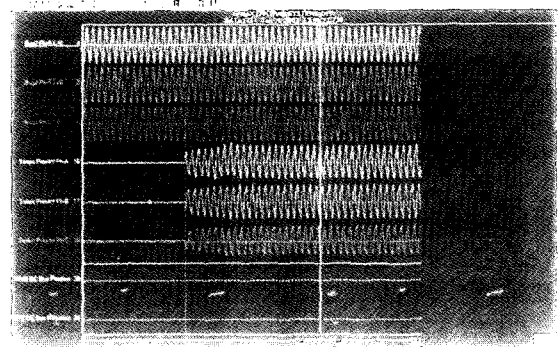


그림 6 직렬인버터 투입 시 전류 파형(4, 5, 6번째 파형)



8) 이중화 시험

STATCOM 설명 참조

9) 고조파 측정

UPFC 모드로 운전하면서 병렬인버터 모션 전압 및 직렬인버터 전압 주입 후단 전압의 THD를 측정한다. 시험 결과 UPFC는 THD에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

직렬인버터는 UPFC 모드에서 병렬인버터가 계통에 투입되고, 700msec 후 GTO 게이트 점호가 가능하게 된다. 점호가 90° 상태에서 계통 주입 출력전압이 영에서 2초동안 대기한 후, 병렬인버터가 정상일 경우 직렬변압기 양단의 바이패스 차단기를 개방하여 인버터 출력전압을 계통에 주입시킨다.

UPFC 모드에서의 직렬인버터 주입전압은 4상한 제어가 가능하므로, d-q축에 대해 상호 간섭 없이 제어되어야 한다. 따라서 명령을 입력 시, 주입전압 모드에서의 명령치는 Vd, Vq로 조류제어모드에서는 P, Q로 입력한다.

SSSC

SSSC에 대한 온라인 시험내용은 아래와 같다.

1) 동기화 시험

SSSC모드는 계통전류의 위상을 기준으로 출력 전압이 주입되므로 계통전류와의 위상을 확인하여야 한다.

2) 전압주입 시험

전압주입 명령치를 변경하여 이상 유무 확인한다.

3) 동특성 시험

스텝시험 수행하여 시스템 응답특성을 확인한다.

SSSC 모드의 직렬인버터의 동작은 초기 투입 시, 트립조건이 아니면, 점호가 90도로 GTO 게이팅 가능하게 한 후, 2초뒤에 직렬차단기를 개방시켜 인버

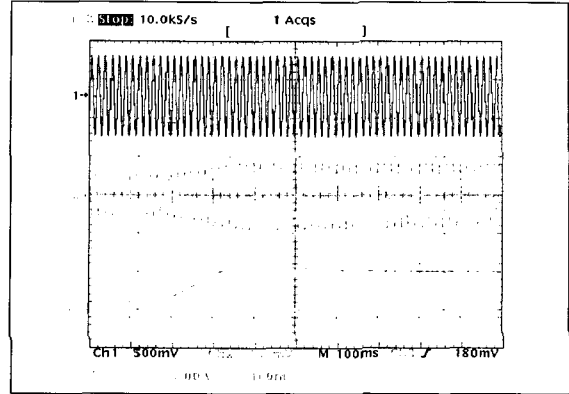


그림 7 동특성시험 결과(Vinj : 0.2 → 1.0)

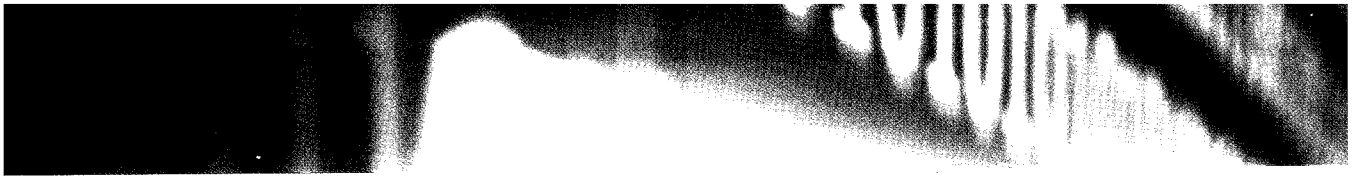
Ch1. A상 전압, Ch2. A상 계통전류  
ChM1. DC 전압(Pos to Neg.)

터 출력전압을 계통에 주입시킨다. SSSC 모드 운전의 주입전압제어는 계통전류를 기준으로 하여 90도 진/지상의 전압을 직접 제어하므로, 무효전력만 공급한다. 단지 주입전압을 제어하여 부가적으로 조류제어 효과를 낼 수 있지만 벡터적인 P, Q 제어는 불가능 하다.

계통연계시험

계통연계시험은 UPFC 시스템의 커미셔닝이 완료된 후, 강진변전소의 실증시험을 통하여 신뢰성 확인 및 시스템의 적용효과를 분석하기 위한 시험이다. 시험은 현장운전, 원격운전, 유지보수 기술 확보 시험, 모드별 연속운전 등의 시험을 수행하였다. 현장운전 및 원격운전을 통해 UPFC의 각 모드별 운전을 수행하여 병렬 및 직렬인버터의 계통에의 전압보상 및 조류제어효과를 확인하였다.강진 UPFC는 상시 UPFC 모드로 운전하게 되며, 직렬인버터 고장 시는 SSSC모드로 운전하게 된다.병렬인버터의 동특성 시험을 통해 진/지상의 상호 변화는 대략 반 사이클후에 안정되며, 이는 규격치인 20msec를 충분히 만족한다.

직렬인버터는 대략 10사이클 정도의 동특성을 보



이며, Vd, Vq축의 명령치에 대한 응답은 다음 표와 같다. Vd축은 계통전압과 동상의 전압을 계통에 주입시켜, 계통의 무효전력을 변화시키므로, 장흥축의 전압 변동이 매우 심하다. 따라서 실제 시험 시, 1[pu]의 시험은 불가능했으며,  $\pm 0.6$ [pu]까지 시험하였다. Vq축은 계통 전압과 90도의 진/지상의 전압을 주입시키므로, 강진-장흥간의 유효전력에 직접적인 영향을 미친다.

표 3 주입전압 변경에 따른 강진-장흥간 조류변화

Vq [pu]	Vd [pu]	Pline [MW]	Qline [MVAR]	강진전압	장흥전압
0,0	0,0	-18	-1	160,3	159,7
0,0	0,6	-15	44	159,1	164,3
0,6	0,6	24	41	159,6	164,8
0,0	-0,6	-14,8	-	161,7	155,8
1,0	0,0	49	-5	160,3	160,2
-1,0	0,0	-80	11	160,7	159,9

표 3에서 보듯이 Vq가 -1로 입력 시, 강진-장흥간의 조류가 음의 부호로 증가하였다. 따라서 이는 장흥에서 강진으로의 조류가 증가함을 뜻한다. 345kV 신강진T/L이 계통에서 탈락 사고 시, Vq=-1로 입력하여, 광주지역에서 여수지역으로의 조류를 증가시켜, 신광주 154kV 과부하를 해소시킬 수 있다.

## 결론

국내 최초로 강진에 설치된 전압원 FACTS설비에 대하여 수행한 커미셔닝 및 시운전에 대하여 소개하였다. 강진 UPFC는 80MVA 용량으로 20MVA 6 pulse 단위 인버터 4대로 구성되었다. 강진 UPFC는 STATCOM, SSSC, UPFC의 세가지 운전 모드를 가지며, STATCOM 운전시 병렬인버터 40MVA, SSSC 운전시 직렬인버터 40MVA, UPFC 운전시, 직렬인버터 80MVA가 동작한다.

계통연계시험 시, 직렬변압기 전단 측, 강진 모선 측과 직렬변압기 후단의 고조파를 측정하였으나, 계통의 THD는 UPFC 각 인버터 출력변화에 큰 영향을 받지 않았다. 강진변전소에 UPFC를 적용하여, 병렬인버터  $\pm 1$ [pu]에 대해 대략  $\pm 2.5$ [kV]정도의 전압보상 효과가 있으며, 직렬인버터 운전 시 강진-장흥간의 조류는 계통부하 상황에 따라 바뀔 수 있지만, 시험 당시  $\pm 60$ [MW]정도 변화 하였다. 강진 UPFC는

상시, 강진지역의 전압 안정도 향상 및 손실을 최소화할 수 있는 조류제어모드로 운전될 예정이며, 사고 시에는, 장흥으로부터의 조류를 최대화하여 신광주154kV 계통의 과부하를 해소하는데 기여할 것으로 기대된다.