

80MVA UPFC 시험 및 운전 결과 분석

김수열*, 장병훈*, 광노홍*, 양재원*, 유현호**

*한국전력공사 ** (주)효성

The commissioning and test results of 80MVA UPFC

S.Y Kim, B.H Chang, N.H Kwak, J.W Yang, and H.H Ryu

*KEPCO **Hyosung

ABSTRACT

한국전력공사에서는 전압원 인버터형 FACTS 기기인 UPFC를 전남 강진군 강진변전소에 설치하였다. 강진 UPFC는 한전과 (주)효성이 공동으로 투자하고, 지멘스와 기술제휴를 통해 개발하였으며, 40MVA 병렬인버터, 40MVA 직렬인버터로 구성되어 총 80MVA 용량이다. 강진 UPFC는 GTO를 이용한 3레벨 인버터 모듈 20MVA 총 4대로 구성되어 있으며, STATCOM, SSSC, UPFC의 3가지 운전모드를 갖는다. 현재 병렬인버터는 강진 모선전압 제어, 직렬인버터는 강진-장흥간의 조류제어에 기여하며, 상용운전 중이다. 본 논문에서는 강진 UPFC 커미셔닝 및 그 운전 결과를 소개하였다.

1. 서 론

최근 반도체 소자 기술 발달로 보다 효율적이고 유연한 전력계통의 구성 및 운용으로, 송전용량을 증대하기 위해 전압원 인버터 유연송전시스템(FACTS:Flexible AC Transmission System) 기기가 계통에 적용되는 단계에까지 이르렀다. 우리나라의 경우, 인구밀집지역으로의 대용량의 전력수송이 불가피하지만, 환경문제, 경과지 확보 등의 어려움으로 설비확충이 계획대로 이루어지지 않고 있는 실정이며, 이러한 추세는 점차 심화될 것으로 전망된다^[1]. 이런 환경변화 속에서 전력연구원에서 (주)효성과 공동으로 대용량 전력변환기술 및 345kV로의 설비 확대적용에 대한 신뢰성 확보를 목표로, 종합조류제어기(UPFC:Unified Power Flow Controller) 시작품을 154kV 강진변전소에 국내 최초, 미국 AEP에 이어 세계 2번째로 설치하였다. 그림 1은 강진 UPFC 인버터이며, 이는 STATCOM(STATIC synchronous COMPensator), SSSC(Static Synchronous Series Compensator),

UPFC의 운전모드를 갖는다. STATCOM은 변전소 모선에 병렬 연계되어 무효전력을 수수하여 계통전압을 제어하며, SSSC는 송전선로에 전압을 직렬 주입하여 계통의 조류를 변화시킨다. UPFC는 송전선로에 직렬 및 병렬 연계되어 송전선로의 조류 제어와 모선의 전압 제어를 동시에 할 수 있다.^[2]

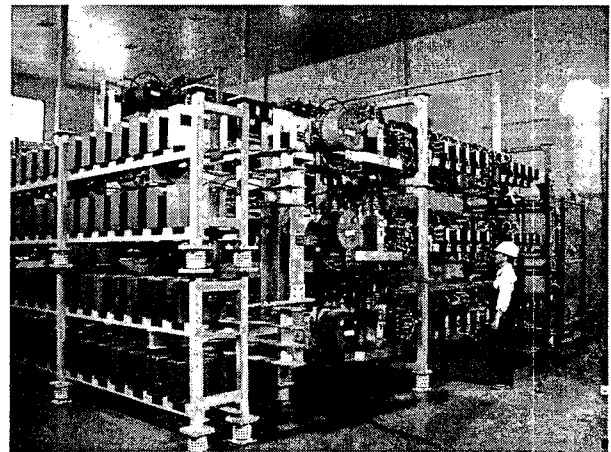


그림 1 20MVA 인버터 모듈

Fig. 1 20MVA inverter module

2. 강진 UPFC 소개

강진 UPFC는 그림2와 같이 병렬인버터, 직렬인버터로 구성되어 있으며, 변압기의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 변압기 사양

구분	전압비[kV]	용량[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

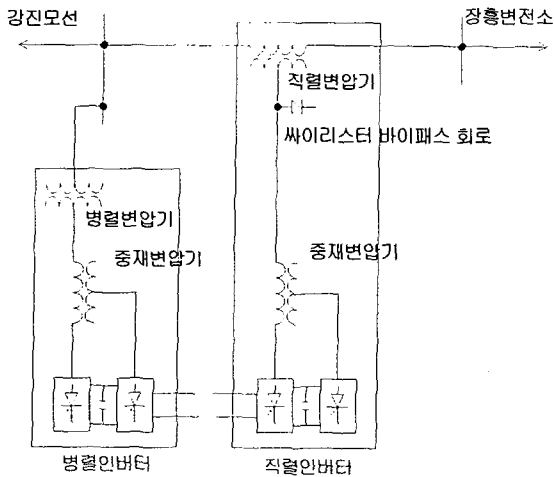


그림 2 강진 UPFC 계통 구성도
Fig. 2 Power system configuration of Kangjin UPFC

STATCOM 모드는 모선전압에 동기된 전압원을 발생시켜 계통과 무효전력을 수수하며, 계통전압을 제어한다. SSSC 모드는 송전선로 전류를 기준으로 $\pm 90^\circ$ 위상의 전압원을 계통에 직렬 주입하여, 계통의 유효 및 무효전력[P, Q]을 변화시킨다. UPFC 모드의 직렬 주입 전압원은 두 모선간의 전압 위상 각과 전압크기를 변화시켜 선로조류를 변화시킨다.

3. 커미셔닝

UPFC 커미셔닝은 비가압시험, Off-line 커미셔닝, On-line 커미셔닝으로 구분하여 수행하였다. 비가압시험은 육안 및 전기적인 시험을 통하여 각종 구성품의 물성치 및 전기적인 결선을 확인하는 시험이다. Off-line 커미셔닝 시험은 UPFC 시스템이 계통과 분리된 상태에서 인버터의 모든 기능을 확인하는 시험이며, On-line 커미셔닝 시험은 UPFC 시스템을 실계통 성능시험을 수행하여 UPFC가 계통에 정상적으로 기여할 수 있도록 각종 제어 파라미터들을 설정하는 시험이다.

3.1 Off-line 커미셔닝

UPFC 아날로그 신호 피드백, 인버터 출력전압 파형 및 과전압 보호등에 대한 시험을 수행하였다.

3.1.1 DC bus 가압시험

병렬인버터의 DC 커패시터 뱅크를 가압하여 positive-to-midpoint, negative-to-midpoint 간의 커패시터 전압 분배 및 이상 유무 확인

3.1.2 인버터 출력전압 파형 확인 시험

3.1.3 DC bus 측정 회로 교정 및 보호 시험

과전압 보호[1.5pu]에 대한 설정 후 과전압 인가하여 DC 클램프회로 동작 확인

3.1.4 동기 확인 시험(PLL) : 계통전압과 동기 확인

3.1.5 단락 시험

전류 정격 시험 수행하여 기기 구성품들의 정상 동작으로 전기적 회로 결선 확인

3.1.6 싸이리스터 바이패스 회로 시험

폴 전류 3000[A]에서 직렬인버터의 싸이리스터 바이패스 회로의 동작 확인

그림 3은 인버터의 3레벨 인버터 폴전압 파형이며, 인버터 모듈 #1의 ABC 폴의 출력과 인버터 모듈 #2의 D폴의 출력을 나타낸다. A폴과 D폴의 위상차 30° 와 dead angle 7.5° 를 확인하였다. 그림 4는 변압기의 최종 출력파형으로 154kV A상전압과 동기되어 있음을 확인하였다.

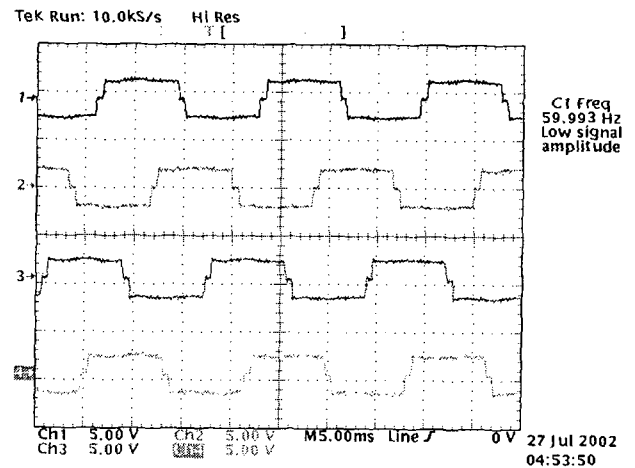


그림 3 폴A, B, C, D 출력 전압
Fig. 3 The voltage of pole A, B, C, D

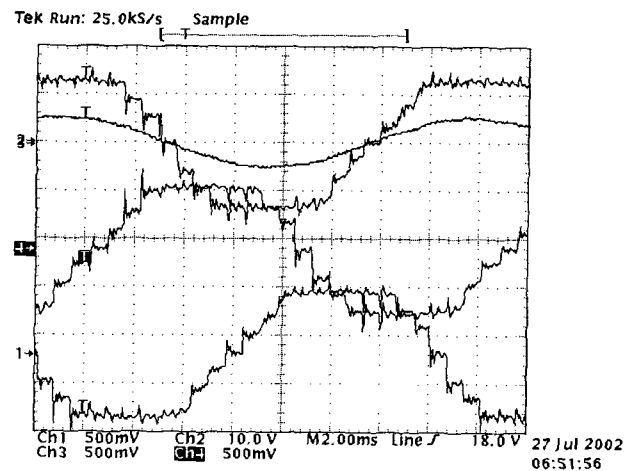


그림 4 STATCOM A, B, C상 출력 전압
Fig. 4 STATCOM voltage of A, B, C Ph.

3.2 On-line 커미셔닝

Off-line 커미셔닝에서 검증된 인버터를 실계통에 투입하여 운전모드별, 제어모드별 정격성능을 확인하는 시험이다.

3.2.1 STATCOM

(1) STATCOM 투입 시험

DC bus 전압 100, 75, 50, 25, 0%별 STATCOM을 계통 투입하여 전압, 전류 파형 확인

(2) 무효전력제어모드 운전 : 정격운전 확인

(3) 전압제어모드 운전

전압제어모드로 변경하여 bumpless 절환 확인

(4) 동특성 시험

droop별로 전압명령치를 변경하며 droop 설정을 위한 동특성 시험을 수행하여 3%로 설정하였다. 응답특성은 용량성이나 유도성 동작 시 20ms 이내에 UPFC의 출력을 영출력에서 정격출력의 90%까지 증가시킬 수 있도록 설정하였다.

(5) 이중화 시험

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

그림 5는 병렬인버터 투입시의 파형을 보여준다. 병렬인버터는 초기 가압 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 발생한 과전압을 DC clamp회로가 동작하여 과전압을 방지한다. DC 커패시터 전압이 700msec 동안 1.5[pu]로 정상 제어되면, GTO gating이 시작되어 병렬인버터가 전압제어모드로 계통에 병입 운전되고, DC 전압은 정상화된다.

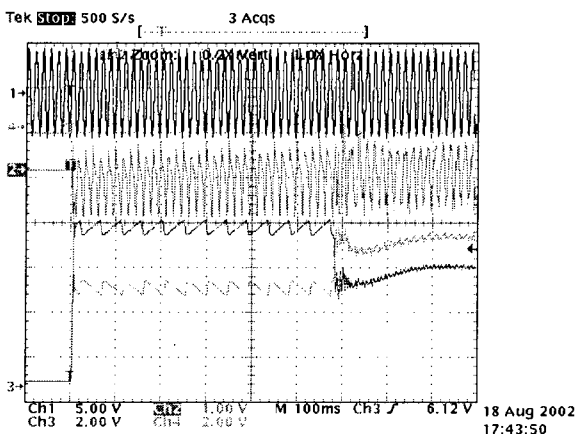


그림 5 병렬인버터 투입시(no precharge)

Fig. 5 The waveform on putting shunt inverter in power system

Ch 1. A Ph. voltage of 154kV bus

Ch 2. A Ph. current

Ch 3. 4. DC bus voltage of +Vdc, -Vdc

3.2.2 UPFC

(1) 직렬변압기 단독 가압시험

직렬인버터 게이트 비활성상태에서 직렬변압기를 계통에 투입하여 변압기의 절연 상태 및 전기적 결합 유무 확인

(2) UPFC모드로 병렬인버터 초기 가압시험

직렬인버터를 계통 투입 전에 온라인 성능이 완전한 병렬인버터를 투입하여 DC bank를 충전한다.

(3) 직렬인버터 투입시험

직렬인버터를 점호각을 주입전압이 영이 되도록 제어하여 이상 없음을 확인한 후, 주입전압 명령치를 바꿔 전기적 파형을 확인

(4) 전압주입제어모드 운전

정격전압 명령치에서 전기적 파형 확인

(5) 조류제어모드 운전

조류제어모드로 변경하여 bumpless 절환 확인

(6) 동특성 시험

스텝시험을 통해 직렬인버터측의 시스템의 응답특성을 설정하였다. 주입전압은 계통에의 외란을 줄이기 위해 10짜이클의 응답을 갖도록 설정하였다.

(7) 고조파 측정

UPFC 모드로 운전하면서 병렬인버터 모션 전압 및 직렬인버터 전압 주입 후단 전압의 THD를 측정한다. 시험 결과 UPFC는 THD에 미치는 영향이 미미함을 확인하였다.

그림 6은 UPFC 모드에서 직렬인버터 전류파형을 보여준다. 직렬인버터는 병렬인버터가 계통에 투입되고, 700msec 후 GTO 게이트 점호가 가능하게 된다. 점호각 90° 상태에서 계통 주입 출력전압이 영에서 2초동안 대기한 후, 병렬인버터가 정상일 경우 직렬변압기 양단의 바이패스 차단기를 개방하여 인버터 출력전압을 계통에 주입시킨다.

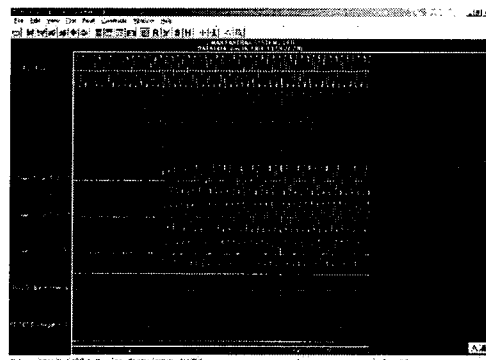


그림 6 직렬인버터 전류 파형(4, 5, 6번째 파형)

Fig. 6 Cur. waveform of series inverter(4, 5, 6th)

3.2.3 SSSC

(1) 동기화 시험

계통전류와의 위상 확인

(2) 전압주입 시험 : 전압 파형 확인

(3) 동특성 시험 : 10짜이클 응답특성 확인

SSSC 모드의 직렬인버터의 동작은 초기 투입 시, 트립조건이 아니면, 점호각 90도로 GTO 게이팅 가능하게 한 후, 2초 뒤에 직렬차단기를 개방시켜 인버터 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 독립적인 P, Q 제어는 불가능하다.

4. 시험 및 운전

UPFC 커미셔닝 완료 후, 신뢰성 확인 및 시스템의 적용효과를 분석하기 위해 계통연계시험을 수행하였다. UPFC 모드별 장기간의 신뢰성 운전을 수행하여 병렬 및 직렬인버터의 계통에의 전압보상 및 조류제어효과를 재확인하였다. 병렬인버터는 20msec내, 직렬인버터는 10짜이클의 동특성을 보였다. Vd, Vq축의 명령치에 대한 응답은 표 2와 같다. Vd축은 계통전압과 동상의 전압을 계통에 주입시켜, 계통의 무효전력을 변화시키므로, 장흥축의 전압 변동이 매우 심하다. 따라서 실제 시험 시, 1[pu]의 시험은 불가능했으며, ±0.6[pu]까지 시험하였다. Vq축은 계통 전압과 90도의 진/지상의 전압을 주입시키므로, 강진-장흥간의 유효전력에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 인근 계통 사고시, 조류 제어를 통해 계통의 과부하를 해소시킬 수 있다. 특히 5월 준공 이후, 강진-장흥간 조류제어로 여수 T/P Auto Tr의 과부하 해소에 크게 기여하고 있다. 특히 발전단기 때문에 감발하는 주말에는 여수 T/P Auto Tr의 과부하 현상이 심해지는데, 대략 강진 UPFC 조류 기여량의 3% 정도가 Auto Tr의 출력에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

표 2 주입전압에 따른 강진-장흥간 조류변화

Vq [pu]	Vd [pu]	Pline [MW]	Qline [MVAR]	강진 [kV]	장흥 [kV]
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 3은 조건별 최대 고조파 값을 기록하였다. Case 9는 UPFC 운전 정지 상태에서 측정된 고조파 중 최대값이며 참고용으로 수록하였다. 이 결과에서

UPFC의 출력 변화는 계통의 고조파 THD에 별다른 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다. 표의 병렬축 1[pu]는 40MVA이며, 직렬축은 6kV이다. Bus 65는 강진 모선축이며, Bus 60은 직렬변압기 후단이다.

표 3 고조파 측정 데이터

Case	병렬축 출력(pu)	직렬축 출력		Max. THD (%)	
		Vd (pu)	Vq (pu)	Bus 65	Bus 60
0	0	0	0.05	1.44	1.28
1	1	0	0.05	1.56	1.36
2	-1	0	0.05	1.50	1.36
3	1	0	1	1.36	1.41
4	1	0	-1	1.44	1.51
5	-1	0	1	1.36	1.32
6	-1	0	-1	1.38	1.43
7	-1	0.3	0	1.53	1.33
8	-1	-0.7	0	1.49	1.53
9*	-	-	-	1.75	1.55

5. 결론

국내 최초로 강진에 설치된 전압원 FACTS설비에 대하여 소개하였다. 고조파의 영향은 거의 없었으며, 강진에 적용하므로써 병렬인버터 ±1[pu]에 대해 대략 ±2.5[kV]정도의 전압보상 효과가 있으며, 직렬인버터 운전 시 강진-장흥간의 조류를 ±80[MW]까지 제어한 실적이 있다. 강진 UPFC는 상시, 강진지역의 전압 안정도 향상 및 인근 선로 손실 최소 혹은 인근 변압기의 과부하를 해소하도록 운전되고 있다. 또한, 신화순-신강진간 345kV T/L 사고 시에는, 장흥으로부터의 조류를 최대화하여 신광주 154kV 계통의 과부하를 해소하는데 기여할 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] 전력연구원 계통안정화그룹 "FACTS 계통운용기술 개발연구(II단계 : Pilot Plant 제작, 설치)", 전력연구원 과제 최종보고서, 2003. 4.
 [2] Kalyan K. Sen, Eric J. Stacey, "UPFC-Unified Power Flow Controller : Theory, Modelling and Applications", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, pp 1453 - 1460, 1998, Oct.
 [3] Laszlo Gyugyi, Colin Schauder, Kalyan K. Sen, "Static synchronous series compensator : A solid-state approach to the series compensation of transmission lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp 406 - 417, 1997, Jan.
 [4] Schauder, C., et al, "AEP UPFC Project : Installation, Commissioning and Operation of the ±160MVA STATCOM(Phase I)", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.13, No.4, Oct. 1998