

80MVA UPFC 운전 결과 분석

김수열 윤종수 전영수 박찬섭
한국전력공사

유현호
(주)효성 중공업연구소

The Study of 80MVA UPFC operation

S.Y. Kim J.S Yoon Y.S Jeon C.S Park
KEPCO

H.H Yoo
Hyosung Co.

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 모션전압 제어, 직렬인버터는 강진-장흥간의 조류제어에 기여하며, 상용운전 중이다. 본 논문에서는 강진 UPFC의 운전결과 및 효과를 분석하였다.

1. 서 론

최근 반도체 소자 기술의 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) 시제품을 154kV 강진변전소에 국내 최초, 미국 AEP에 이어 세계 2번째로 설치하였다.

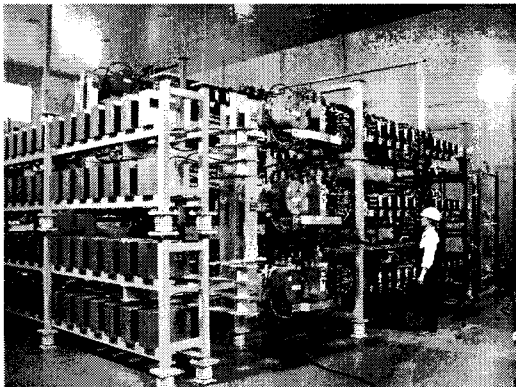


그림 1 UPFC 인버터 stack

전압원 인버터 FACTS 기기는 무효전력보상기(STATCOM:STATIC synchronous COMPensator), 직렬보상기(SSSC:Static Synchronous Series Compensator), 종합조류제어기(UPFC) 등이 있으며, UPFC는

STATCOM, SSSC, UPFC의 운전모드를 갖는다. STATCOM은 변전소 모선에 병렬 연계되어 무효전력을 수송하여 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 2는 우리나라 전라남도 지역 계통을 나타내고 있으며, 대표적으로 광주, 목포, 여수지역으로 구분할 수 있다. 이 지역의 주요 특성은, 345kV 신화순(WHS)-신강진(KJN) 선로 고장으로 이 선로가 차단되면, 목포지역이 전원지로부터 멀어지게 되어, 여러 가지 동적 불안정 현상이 발생하게 되는 것과, 목포지역과 연결된 HVDC를 통해 제주지역으로 섬지역의 약 40%의 전력을 공급하고 있다는 것이다. 따라서 UPFC는 345kV 신화순-신강진간 송전선 사고 시 발생하는 목포지역 계통전압 저하, 신광주 변압기 및 154kV 송전선로 과부하 등이 예상되어 목포지역과 여수지역 사이에서 계통 안정화에 기여할 수 있도록 강진변전소에 설치하였다[1].

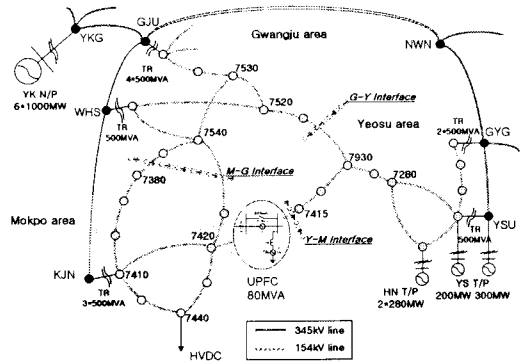


그림 2 강진 UPFC 인근 계통도

2. 본 론

2.1 강진 UPFC

강진 UPFC는 그림 3과 같이 병렬인버터와 직렬인버터, 이를 계통 연계하기 위한 GIS로 구성되어 있으며, 표 1과 같이 세가지의 운전모드를 갖는다.

표 1. 강진 UPFC 운전모드

운전모드	인버터	제어모드
STATCOM	40MVA 병렬인버터	전압 및 무효전력제어
SSSC	40MVA 직렬인버터	주입전압제어
UPFC	40MVA 병렬인버터	전압 및 무효전력제어
	40MVA 직렬인버터	조류 및 주입전압제어

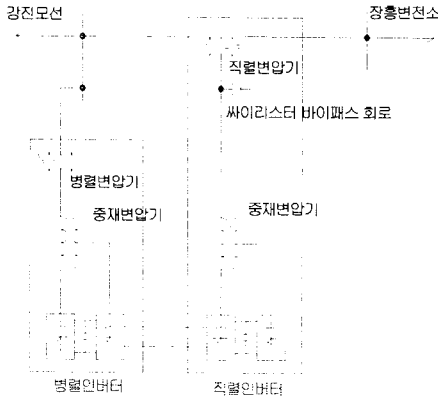


그림 3. 강진 UPFC 계통 구성도

표 2. 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

STATCOM은 모선전압에 동기된 병렬 전압원을 발생시켜 계통과 무효전력을 수수하며, 계통전압을 제어한다. SSSC는 송전선로 전류류 기준으로 ±90도 위상의 직렬 전압원을 계통에 직렬 주입하여, 계통의 유효 및 무효전력[P, Q]을 변화시킨다. UPFC의 직렬 주입 전압원은 두 모선간의 전압 위상각과 전압크기를 변화시켜 선로조류를 변화시키며, 병렬 전압원은 해당 모선의 전압을 제어하고, 4상한 동작하는 직렬 주입 전압원에 의해 소요되는 유효 전력을 공급 하는 기능을 수행한다.

2.2 사고 응답 사례

2.2.1 STATCOM모드 운전 사례('02.08.31)

강진 UPFC의 커미셔닝 기간 중 발생한 태풍 루사의 영향으로 강진 모선에 계통 전압 불안정 상황이 발생하였을 때 STATCOM이 계통전압 유지위해 응동한 파형이다. 상단 부분은 강진 모선 전압이며, 하단은 병렬변압기의 상전류이다. 모선 전압에 발생한 Sag에 대해 STATCOM이 droop 3%로 응동하였다.

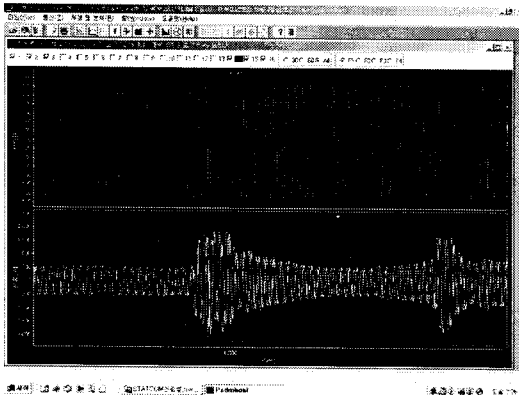


그림 4 계통 사고 발생 시 STATCOM 응동

2.2.2 UPFC 모드 계통 사고 응동('03.08.20)

아래의 그림 5에는 3상 계통 사고에 대한 UPFC의 응답을 보여주고 있다. 그림 5의 상위 3개 파형은 강진-강릉 154kV 모선의 전압을 나타내고 있다. 그림에서 보이는 바와 같이 154kV 선로에 3상 전압강하가 발생하였으며, 이는 낙뢰에 의한 강진-강릉 선로 인근 선로인 목포 #1, #2 T/L 사고에 의한 것이다. 그림 5의 하위 3개 파형은 병렬 주 변압기의 1차측에서 측정된 UPFC의 병렬 인버터의 3상 출력 전류를 나타내고 있다. 계통의 3상 전압 강하 발생시 병렬 인버터에서 저전압 상태를 해소하기 위하여 최대 출력 전류를 발생시키고 있음을 관찰할 수 있다.

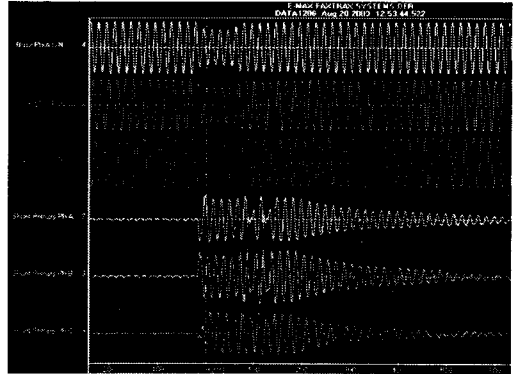


그림 5 3상 계통사고에 대한 UPFC 응답(병렬측)

2.3 고조파 분석

고조파 측정 장비 두 대를 사용하여 UPFC의 직렬, 병렬측 접속부에서의 전압 고조파를 측정하였다. 고조파 데이터는 UPFC의 출력 전압 변화에 따라 매 1분의 간격으로 최소 5분 이상 수행하여 분석하였다. 아래의 표 3에는 각 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 병렬측 1[pu]는 40MVA이며, 직렬측은 6kV이다. Bus 65는 강진 모선측이며, Bus 60은 직렬변압기 후단이다.

표 3 고조파 측정 데이터

Case	병렬측 출력(pu)	직렬측 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

2.4 상시 운전 효과

강진 UPFC는 '03. 5월 준공이후로, 상업운전을 해오며, 무효전력 공급 및 계통안정화에 기여하고 있으며, 특히 '03년 6월 이후에는 강진-강릉간 조류제어에 여수

T/P Auto Tr의 과부하를 해소하고 있다. 강진변전소에서 장흥변전소로 실제 최소 20에서 최대 80정도까지를 더 공급하게 하므로써, 여수 T/P Auto Tr의 과부하를 해소한다. 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 4는 UPFC Vd, Vq축의 명령치에 대한 응답을 나타낸다. Vd축은 계통전압과 동상의 전압을 계통에 주입시켜, 계통의 무효전력을 변화시키므로, 장흥축의 전압 변동이 매우 심하여 Vd축은 0.6[pu] 까지 입력하여 제어하였다. Vq축은 계통 전압과 90도의 진/지상의 전압을 주입시키므로, 강진-장흥간의 유효전력에 직접적인 영향을 미친다.

표 4 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 4에서 보듯이 Vq가 -1로 입력 시, 강진-장흥간의 조류가 음의 부호로 증가하였다. 따라서 이는 장흥에서 강진으로의 조류가 증가함을 뜻한다. 따라서 신화순-신강진간의 345kV 루트가 계통에서 탈락 사고 시, Vq=-1로 입력 하여, 광주지역에서 여수지역으로의 조류를 증가시켜, 신광주 154kV 계통 과부하를 해소시킬 수 있다.

2.5 강진 UPFC 설비 특징

강진 UPFC 인버터는 3레벨 GTO 인버터가, 중재변압기를 통해 결합한 최종 24pulse의 출력전압이 주변압기를 통하여 계통에 연계된다. 따라서 총 20MVA 인버터 모듈 4대로 구성되며, 인버터 밸브당 한개씩의 GTO모듈 여유를 가지고 있어, 한개의 고장시에도 연속운전이 가능하다. 냉각방식은 수냉식이며, 33%의 여분 열교환기를 가지고 있어, 한대의 열교환기 고장시에도 UPFC 운전 용량 감소를 방지할 수 있다. 또한 운전자화면에서 설비의 고장 정보를 쉽게 접근할 수 있으며, PC anywhere 통신 프로그램을 이용하여, 현장의 화면과 같은 환경에서 원격제어 및 기존 스카다를 활용하여서도 제어가 가능하다. 하지만, 현재의 운전방식은 운전자가 UPFC 명령치를 입력하게 되어 있어, 운전 명령치를 스스로 연산하여 입력하는 상위제어기의 개발 연구가 필요하다. 강진 UPFC의 운전 결과 사소한 심여건의 고장이 발생하였으나, 냉각시스템의 누수에 대해서는 지속적인 관심이 필요하다.

3. 결 론

국내 최초로 강진에 설치된 전압원 FACTS설비에 대한 사고응동사례 및 운전결과를 소개하였다. 강진 UPFC의 직렬변압기 전단 측, 강진 모선 측과 직렬변압기 후단의 고조파를 측정하였으나, 계통의 THD는 UPFC 각 인버터 출력변화에 큰 영향을 받지 않았다. 강진변전소에 UPFC를 적용하여, 병렬인버터 ±1[pu]에 대해 대략 ±2.5[kV]정도의 전압보상 효과가 있으며, 직렬인버터 운전 시 강진-장흥간의 조류는 계통부하 상황에 따라 바뀔 수 있지만, 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.

[참 고 문 헌]

- [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 1)", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.13, No.4, Oct. 1998
- [5] Schauder, C., et al, "AEP Unified Power Flow Controller Performance", *IEEE Transactions on Power Delivery*, March, 1999
- [6] Gyugyi, et al. "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control", *IEEE Transactions on Power Delivery*, April, 1995
- [7] Gyugyi, L., Hingorani, N. "Understanding FACTS : Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems", IEEE press, 2000