

강진변전소 80MVA UPFC Commissioning

김준모^[1], 한영성^[1], 최중윤^[1], 김수열^[2], 장병훈^[2], 추진부^[2], 박찬섭^[3]
(주) 호성^[1], 한전 전력연구원^[2], 한전 강진변전소^[3]

KangJin Substation 80MVA UPFC Commissioning

J.M. Kim^[1], Y.S Han^[1], J.Y. Choi^[1], S.Y. Kim^[2], B.H. Chang^[2], J.B. Choo^[2], C.S. Park^[3]
Hvosuna Co^[1], KEPRI^[2], KEPCO Kangjin S/S^[3]

Abstract - 전력계통의 유연하고 안정적인 운용을 위한 인버터형 FACTS 기기의 국내 적용에 대한 연구 결과를 토대로 국내 154kV 계통에 적용되는 80MVA급 UPFC pilot plant project가 수행되었다. Project의 결과물로써 80MVA급 UPFC가 강진-장흥 154kV 계통에 제작, 설치되었다. 강진 변전소 UPFC는 각종 성능 시험 및 시운전 절차를 성공적으로 완료하였으며 현재는 병렬 인버터에 의한 강진 모선의 전압 제어 및 직렬인버터에 의한 강진-장흥간의 조류 제어 기능을 수행하며 상용 운전되고 있다.

1. 서 론

여러 가지 FACTS 기기 중 송전선로의 전력조류에 영향을 미치는 전압크기, 위상각 및 임피던스에 대한 제어가 가능한 UPFC(Unified Power Flow Controller)가 전남 강진 변전소에 설치, 운용되고 있다. 강진변전소에 설치된 UPFC는 국내 최초, 미국 AEP에 이어 세계 2번째로 실계통에 적용된 UPFC 기기이다. 강진 변전소 강진-장흥 선로에 UPFC 설치가 완료된 이후 기기의 상용 운전에 앞서서 commissioning 시험이 수행되었다. Commissioning 시험은 pre-commissioning, offline 시험 및 online 시험의 3단계로 분류된다. 본 논문에서는 강진 변전소 현장에서 UPFC 기기설치 완료 이후 상용 운전 전에 앞서 수행된 commissioning 결과에 대하여 정리하였다.

2. 본 론

2.1 Pre-commissioning 시험

Pre-commissioning은 시스템의 commissioning의 수행에 앞서서 인버터 기기를 제외한 각 단위 기기들의 설치 현황 및 개별 동작 상황을 점검하는 단계이다. 각 단위 기기에 전원을 인가하기 이전에 수행하는 비가압 시험과 전원 인가 이후 개별 동작 시험을 수행하는 보조 전원 시스템 시험의 두 가지 시험이 수행되며 세부 내용은 아래의 표 1과 같다.

표 1. Pre-commissioning 주요 시험 항목

시험내용	점검 항목
사양검사, 외관검사 및 보조전원 인가시험	- 변압기, 차단기 및 단로기
	- DC capacitor bank 및 DC bus bar
	- PT/CT 및 surge arrester
	- UPS, 중앙 제어기 및 RTU cabinet
	- AC/DC distribution panel
	- GTO 모듈 및 Thyristor Bypass Switch
	- 냉각 시스템, 밸브 및 배관부
	- Station service 380V 및 transfer switch
	- 각종 제어 보드 및 I/O 보드

2.2 Offline 시험

Offline 시험은 인버터를 모선에 접속하기 이전의 상태에서 각종 성능 시험을 수행하는 단계이다. 병렬 및 직렬 인버터 offline 시험 항목은 일부 항목을 제외하고는 큰 차이를 보이지 않는다. Offline 시험의 주요 항목은 시스템에서 측정된 각종 아날로그 신호들이 제어기에 올바르게 피드백 되는지의 여부 및 각 인버터의 개별 출력 전압 파형과 보조 변압기를 거쳐 합성된 전압 파형이 이론과 동일한 양상을 보이는지의 여부를 확인하는 것이다. 출력 전압 파형을 확인한 이후에는 단락 회로 시험을 통하여 기기의 전류 회로 결선 상태를 점검하게 된다.

(1) DC bus 가압 및 Clamp 동작 시험

본 시험은 DC 커패시터 bank의 충전여부, +/- DC의 balance 및 DC bank가 과충전 되었을 경우 이를 해소하기 위한 DC clamp의 동작을 확인하는 시험이다. 시험용 전원장치를 이용하여 계속적으로 DC bus를 충전시킬 경우, 아래의 그림 1의 결과에서 보이는 바와 같이 DC 전압이 1.5pu (72,00Vdc) 이상이 되면 DC clamp가 동작하여 DC 전압이 감소하고, 1.4pu (6,720Vdc) 이하일때는 DC clamp 동작이 정지하면서 DC 전압이 증가함을 확인할 수 있다.

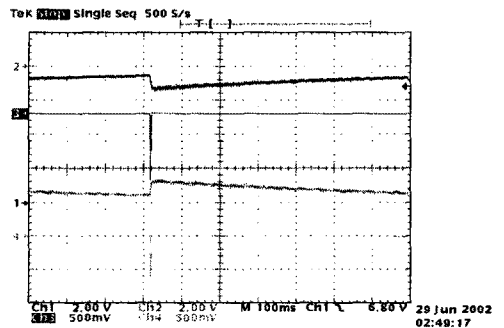


그림 1. DC clamp 동작 특성

(2) 인버터 출력 전압 확인 및 동기화 시험

인버터의 출력 전압 파형의 이상 여부와 계통 전압과의 위상관계를 확인하는 시험이다. 시험모드의 제어 환경에서 DC 전원을 시험용 전원 공급 장치를 통하여 공급하면서 인버터를 제어하여 그 출력을 확인한다. 그림 2에는 개별 인버터 폴의 출력을 나타내고 있으며 이 출력 전압의 파형이 일반적인 3레벨 인버터의 출력파형과 동일함을 확인할 수 있다. 그림 3에서는 인버터의 상별 출력 파형 및 인버터 출력 전압과 154kV 선로전압 사이의 위상 관계를 나타내고 있다. 인버터 출력 전압의 상간의 위상차는 120°를 유지하며 인버터 출력 전압과 154kV 선로 전압 사이의 동기화 제어 동작이 정상적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다.

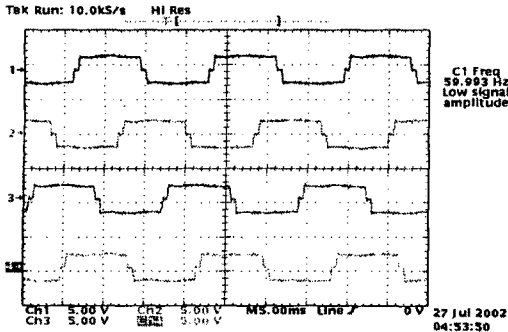


그림 2. 인버터 풀 개별 출력 전압

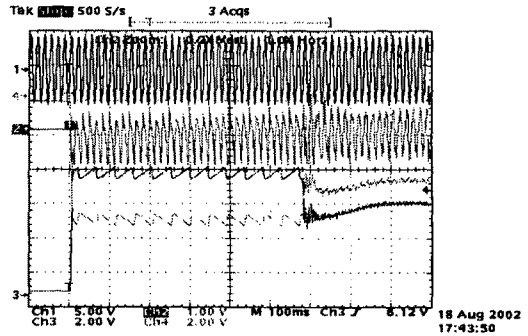


그림 4. STATCOM 초기 기동

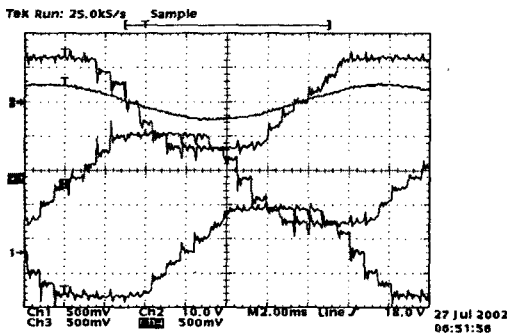


그림 3. STATCOM 상별 출력 전압

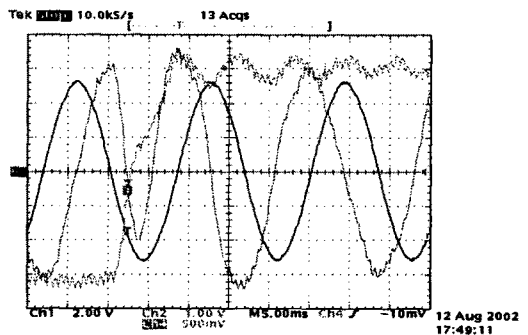


그림 5. STATCOM 제어 특성

(3) 인버터 단락회로 시험

본 시험은 각 인버터에서 구성되는 전류 회로 결선을 확인하기 위한 시험이다. 각 인버터의 출력단을 접시켜 단락회로를 구성함으로써 저전압, 고전류의 시험 조건을 구현한다. 시험용 전원 공급 장치를 이용하여 DC 전원을 공급하며 인버터 출력 전압, 전류의 파형 및 위상이 정상적인 응답을 보임을 확인하였다.

2.3 Online 시험

Online 시험은 Offline 시험에서 검증된 인버터의 모션 접속을 위한 절차와 모션 접속 이후의 운전 및 제어 성능을 점검하는 단계이다. STATCOM 모드에서의 무효 전력 제어 모드 및 전압 제어 모드, UPFC의 전압 주입 모드 및 조류 제어 모드 그리고 SSSC의 전압 주입 모드의 운전 및 제어성능에 대하여 확인한다. 최종적으로 각 모드별로 최소 8시간 이상 정격 용량으로 운전하는 heat run을 수행하여 기기의 전체적인 성능 점검 및 이상 여부를 확인한다.

(1) STATCOM(Static Compensator) 모드

STATCOM online 시험에서는 시험용 보조전원을 이용하여 DC bus를 사전 충전한 이후 직접 online 시켜 충전하는 시험을 단계적으로 완료한 이후에 STATCOM을 계통에 투입한다. 아래의 그림 4에는 STATCOM이 초기 기동될 때의 각종 출력 파형을 나타내었다. STATCOM이 선로에 투입되면 약 600ms 기간동안 돌입전류에 의한 과전압 해소를 위하여 DC clamp 동작이 발생하며 그 이후 출력이 안정됨을 알 수 있다. 그림 5에서는 STATCOM 모드에서 출력이 용량성 40MVAR에서 유도성 40MVAR로 변화할 경우의 시스템 응답을 나타내었다. 기준값 변화에 따라 STATCOM의 출력 전류가 진상에서 지상으로 1사이클 이내의 빠른 시간에 안정적으로 변화하는 응답을 보임을 알 수 있다.

(2) UPFC(Unified Power Flow Controller) 모드

UPFC 모드의 운전에서 직렬 인버터를 계통에 연계시키기에 앞서 직렬측 기기를 보호할 수 있는 보호 기기 및 제어 기능에 대한 시험이 선행되어야 한다. TBS(Thyristor Bypass Switch)는 직렬 차단기의 동작에 앞서 한시적으로 인입전류를 bypass시킴으로써 기기를 보호하는 동작을 하게 된다. 아래의 그림 6에 TBS의 성능 시험 결과를 나타내었으며 TBS 동작시 스위치 양단에 인가되는 전압, 전류의 변화를 관찰할 수 있다.

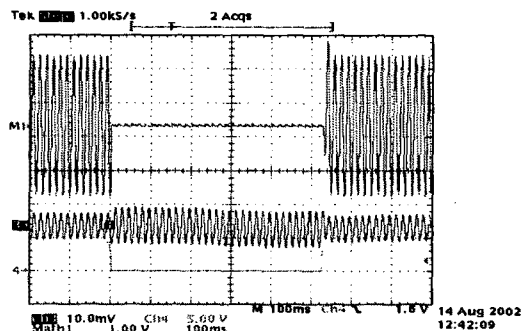


그림 6. TBS on/off 시험

과전류 시험은 인버터에서의 과전류 감시 및 보호동작의 검증에 그 목적이 있으며 인버터 풀에서의 전류가 3,000A 이상이 되면 이를 감시하여 보호동작을 수행하여야 한다. 아래의 그림 7에는 과전류 시험 결과를 나타내고 있다. 이 경우 최대 전류가 3,080A로 설정되어 시험이 수행되었으며 설정값이 보호동작의 레벨을 벗어나므로 시스템의 트립을 발생시킴을 볼 수 있다. 각 채널은 인버터의 상별 출력 전류를 나타낸다.

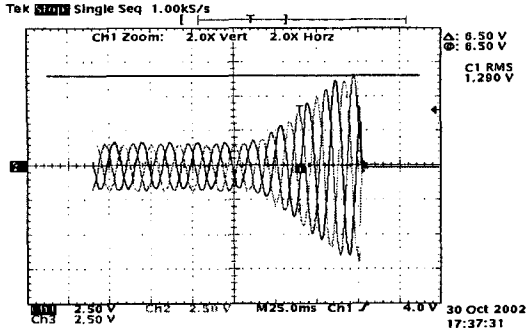


그림 7. 인버터 과전류 보호 기능 시험

UPFC의 제어특성 시험은 전압주입모드와 조류제어모드의 두 가지로 분류되어 수행된다. 아래의 표 2, 3에는 각 모드에서의 계통응답이 나타내었다. 최대 주입전압에 대한 계통 응답의 변화는 모두 1사이클 이내의 짧은 시간에 정상적으로 제어되었다. 조류제어모드의 응답또한 기준치를 정확히 추정함을 알 수 있었다. 또한 제어모드간의 모드변화에 대해서도 별다른 과도상태 없이 자연스러운 변환이 가능함을 확인할 수 있었다.

표 2. 전압제어 모드 동적 응답

항 목			변경전		변경후	
Vq_ref			P	Q	P	Q
0.5	to	0.0	64	-7	33	-4
0.0	to	0.5	34	-3	66	-5
0.0	to	1.0	35	-3	98	-6
1.0	to	0.0	98	-6	34	-3
-1.0	to	1.0	-45	2	84	-12
1.0	to	-1.0	85	-12	-45	2

표 3. 조류제어 모드 동적 응답

항 목			기준값		측정값	
V bus (pu)	I line (pu)	V inj2 (pu)	MW	MVAR	Pline (MW)	Qline (MVAR)
1.033	0.050	0.057	-30	0	-30	0
1.037	0.016	0.032	-10	0	-10	0
1.037	0.000	0.021	0	0	0	0
1.037	0.065	0.018	40	0	40	0
1.035	0.132	0.062	80	0	80	0
1.035	0.140	0.064	85	0	85	0
1.035	0.143	0.680	90	0	86	0
1.034	0.074	0.030	35	30	35	30

(3) SSSC(Static Synchronous Series Compensator)모드
SSSC의 시험 조건으로는 계통 전류가 정격의 0.1pu 이상이어야 한다. 강진-장후간 선로 전류는 정상시 5% 미만으로써 정상적인 SSSC 운전이 어려웠던 관계로 인근 여수화력의 발전기 운전이 정지되는 주말에 여천 T/L을 정전시킴으로써 SSSC 운전 조건을 구현할 수 있었다. 직렬 차단기가 개방되고 직렬 인버터가 게이팅을 하는 상태에서 주입 전압의 증가에 따라 계통의 유효전력이 증가하였다. 그림 8에서 SSSC 모드에서 전압 주입 기준값이 0.2pu에서 1.0 pu로 변할 때 선로 전류가 증가하고 DC 전압도 증가함을 알 수 있다. 주입 전압은 계통에의 영향을 최소화하기 위하여 약 10 사이클 정도의 기울기를 가지며 제어값으로 수렴함을 알 수 있다.

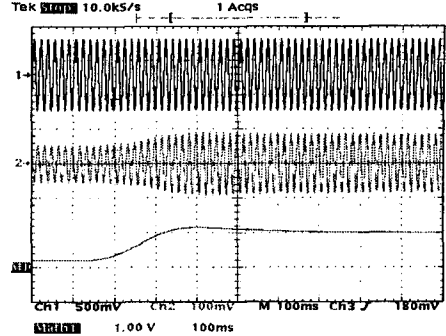


그림 8. SSSC 제어 특성

(4) UPFC heat run 시험

Heat run 시험은 기기가 장기간의 운전기간동안 기기의 제어 성능이나 주변 기기에 별다른 이상 발생없이 적절한 성능을 구현하는지의 여부를 판별하기 위하여 수행하는 시험이다. UPFC는 다음의 그림 9에 나타난 바와 같이 병렬측은 최대 용량성 모드로 직렬측은 최대 양의 전압 주입 모드로 설정되어 약 11시간 이상의 운전을 수행하였으며 이 결과 모든 기기상태 및 변수들은 정상값을 나타냄을 확인할 수 있었다.

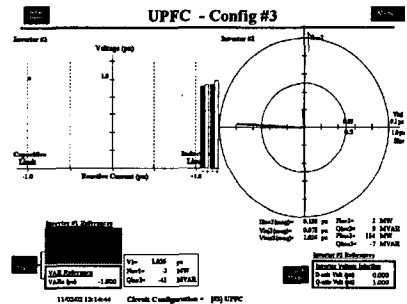


그림 9. UPFC Heat run - 운전자 화면

3. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 설치된 80MVA급 강진변전소 UPFC의 commissioning 시험 내용에 대하여 정리하였다. UPFC의 운전준비를 위하여 pre-commissioning, offline 시험 및 online 시험이 수행되었다. Offline 시험에서는 각 인버터의 관점에서 병렬 인버터, 직렬 인버터 각각에 대한 시험을 수행하였으며 일부 항목을 제외하고는 시험방법 및 결과에 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다. Online 시험에서는 STATCOM, UPFC 그리고 SSSC의 각 모드별 시험을 수행하였으며 기기가 최초로 선로에 투입될 때의 현상 및 각 제어 모드별 운전 특성에 대하여 관찰하였다. 이상과 같이 commissioning 시험을 통하여 UPFC 기기의 운전 특성 및 관련 시험 기술을 이해함으로써 향후 기기의 계통 운용, 운전 및 유지보수에 활용 가능할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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
- [2] Schauder, C., et al, "AEP Unified Power Flow Controller Performance", IEEE Transactions on Power Delivery, 1999
- [3] KOREA Kangjin S/S UPFC Commissioning Report, 2003