

한전계통의 전압안정도 향상 및 과부하 해소를 위한 80MVA UPFC(Unified Power Flow Controller) 설치

오관일*, 장병훈, 전영수, 박상태, 추진부
한국전력공사 전력연구원

Installation of 80MVA UPFC(Unified Power Flow Controller) for improving voltage stability and reducing heavy load in KEPCO power systems

Kwan-Il Oh, Byung-Hoon Chang, Young-Soo Jeon, Sang-Tae Park, Jin-Boo Choo
KEPRI(Korea Electric Power Research Institute)

Abstract - 최근 전력계통의 과부하, 전압안정도 등의 문제에 대한 해결책으로 FACTS (Flexible AC Transmission Systems)가 대두되고 있다. FACTS 설비에는 TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor), SSSC (Static Synchronous Series Capacitor)와 같은 직렬 기기와 SVC(Static Var Compensator), STATCOM(Static COMPensator)와 같은 병렬기기 그리고, 본 논문에서 다루는 UPFC와 같은 직·병렬기기로 나누어진다. UPFC는 SSSC와 STATCOM을 결합한 형태로 유·무효전력을 동시에 보상할 수 있는 FACTS 기기이다.^{[1],[4]} 본 논문에서는 한전계통의 전압안정도 향상과 과부하 해소를 위해 강진S/에 설치예정인 80MVA UPFC의 하드웨어 특성과 주변계통의 특성을 소개하고, UPFC와 한전계통의 연계방안과 시험방안을 설명한다.

1. 서 론

국내 전력계통은 전력수요의 급증으로 날로 대형화, 복잡화 추세에 있으며, 이에 대한 송전계통 확충은 송·변전 설비의 신규건설과 765kV 전압격상에 주로 의존하고 있으나, 신규 송전선로 건설은 부지확보 문제와 민영화에 따른 설비투자비의 분담문제 등으로 날로 어려움이 가중되고 있다. FACTS 설비는 이와 같은 전력계통운용상 외적인 요인의 환경변화에 능동적으로 대응하고 송전설비의 이용률을 극대화하고 전력계통의 안정도를 향상시키기 위한 최적 방안으로 국제적으로 활발한 연구가 진행되고 있는 기기이다. FACTS 설비는 TCSC, SSSC와 같은 직렬 기기와 SVC, STATCOM과 같은 병렬기기 그리고, 본 논문에서 다루는 UPFC와 같은 직·병렬기기로 나누어지며, 직렬기기는 선로의 임피던스를 가변하여 조류제어가 가능하고, 병렬기기는 선로의 무효전력을 제어하여 선로전압 보상이나, 역률제어가 가능하다. 그리고, 직·병렬기체인 UPFC는 직렬기체인 SSSC와 병렬기체인 STATCOM을 결합한 형태로 유·무효전력을 동시에 보상할 수 있는 FACTS기기로 선로 전압 보상과 조류제어가 동시에 가능한 최적의 전력전송 시스템이다. 물론, 현재 UPFC의 변형된 형태로 IPFC (Interline Power Flow Controller)와 CSC (Convertible Static Converter) 등에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있지만 이는 기본적으로 UPFC와 같은 형태의 FACTS기기로 볼 수 있다. 국내에 적용된 FACTS기기로는 한국전력공사에서 운용중인 서대구 S/S의 100Mvar SVC와 전력연구원과 효성중공업이 공동으로 수행하여 개발한 1MVA STATCON이 있으며 안정적으로 운전중이다. 본 논문에서 설명할 80MVA UPFC는 FACTS를 적용한 계통운용기법의 개발을 목적으로 강진S/에 설치하여 주변계통의 전압안정도 향상과 과부하 해소에 대한 효과를 검증하기 위해 전력연구원과 효성중공업이 공동으로 연구중인 최신 FACTS 설비이다. 80MVA UPFC는 크게 제어소 건물과 154kV 송전선로와 UPFC의 연결을 위한 GIS

(Gas Insulated Switch)설비, 직·병렬변압기와 보조변압기, 그리고, 냉각설비로 구성된다. 80MVA UPFC 제어소 건물의 Layout이 결정되어 토목 및 제어소 건물 건축공사가 진행중이다. UPFC의 H/W구조와 특성, 기기 구성방안, 계통연계방안 그리고, UPFC 시험방안에 대해서는 본문에서 자세히 설명하였다.

2. 본 론

2.1 80MVA UPFC의 H/W 구조와 특성

UPFC는 송전선로에 직·병렬로 설치되는 송전설비이며, UPFC를 계통에 적용하면 병렬측 인버터에 의해 연결지점의 병렬 모션전압을 제어하는 것과 같이 직렬측 인버터에 의해서 직렬로 삽입된 지점의 유·무효전력을 동시에 제어함으로써 송전선로의 용량을 극대화한다. 그리고, UPFC는 모션전압을 일정레벨로 유지하면서 유·무효전력을 동시에 독립적으로 동적 제어할 수 있다. 본 논문에서 설명할 80MVA UPFC는 기본적인 UPFC의 구조를 하고 있으며, 그 내용은 아래에서 자세하게 설명하도록 한다.

2.1.1 80MVA UPFC 구조 및 기기 구성방안

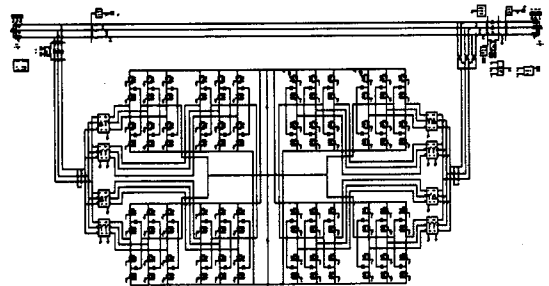


그림 1. 기본적인 UPFC Configuration

그림 1은 UPFC의 기본적인 configuration을 보여주고 있다. 강진S/에 설치하는 80MVA UPFC도 기본적인 구조는 그림 1과 같다. 강진S/에 설치하는 80MVA UPFC는 크게 제어소 건물과 154kV 송전선로와 UPFC의 연결을 위한 GIS (Gas Insulated Switch)설비, 직·병렬변압기와 보조변압기, 그리고, 냉각설비로 구성된다. UPFC 제어소 건물 내부에는 제어실과 기계실, 직렬인버터와 병렬인버터가 설치되는 인버터 홀로 구성된다. 인버터 홀에 설치되는 인버터는 각각 전압원 인버터이며, 정격 용량은 $\pm 40\text{MVA}$ 이고, 사상운전(four-quadrant operation)이 가능하다.^[2] 각 인버터는 3상 24펄스 전압파형을 출력할 수 있도록 설계되었으며, step-up 변압기를 통해 각각 송전선로에 직·병렬로 연결된다. 또한 직렬인버터와 병렬인버터는

DC link capacitor를 공유하고 UPFC의 주기능을 수행한다.

2.1.2 80MVA UPFC의 기능 및 특성

강진S/S에 설치하는 80MVA UPFC는 강진S/S 주변계통의 전압안정도 향상과 계통사고시 인근선로의 과부하 해소를 목적으로 한다. 이를 위해서 80MVA UPFC는 다음의 기능들이 있다.^{[3],[4]}

① STATCOM 단독운전: 직렬인버터는 동작하지 않고 병렬인버터만 단독으로 운전하여 모션전압을 제어하는 운전모드로 최대출력은 40Mvar이다.

② SSSC 단독운전: 병렬인버터는 동작하지 않고 직렬인버터만 단독으로 운전하여 선로전류와 유효전력을 제어하는 운전모드로 최대출력은 40Mvar이다.

③ UPFC 운전모드: 직·병렬인버터가 동시에 동작되며, 모션전압 제어와 독립적으로 선로의 유·무효전력을 동시에 제어하는 운전모드로 최대출력은 인버터 각각 40Mvar이다.

STATCOM 단독운전모드에서는 UPFC의 dc link단의 DS(Disconnecting Switch)가 개발되어 직병렬인버터 사이의 전력수수는 없으며, 병렬인버터만 운전되어 병렬측 모션전압을 최대출력 범위내에서 보상할 수 있다. 또한 용량성이나 유도성 동작시 20ms 이내에 UPFC의 출력을 영출력에서 정격출력의 90%까지 증가시킬 수 있으며, 인버터 용량내에서는 모션 전압을 설정치의 $\pm 0.3\%$ 이내로 유지할 수 있고, 전압설정치는 정격전압의 $\pm 5\%$ 이내로 연속적으로 조정이 가능하다. SSSC 단독운전모드에서는 STATCOM 단독운전모드와 마찬가지로 dc link단의 DS가 개발되어 직렬인버터만 동작하여 선로의 임피던스를 가변하여 선로조류를 제어한다. 시스템 응답속도는 STATCOM 단독운전과 같고, 선로전류와 $\pm 90^\circ$ 위상차를 가지는 전류를 정격용량인 $\pm 40\text{MVA}$ 까지 가변할 수 있다. UPFC 운전모드에서는 직렬인버터가 선로 전압과 위상각 차를 $0^\circ \sim 360^\circ$ 까지 가지는 직렬삽입전압을 인가할 수 있으며, 154kV 선로에 연속적으로 흐르는 전류의 최대값이 2,200A라 가정하면 최대인가 전압은 6,000V가 된다. 즉, 직렬삽입전압은 크기는 6,000V이며, 선로전압과는 $0^\circ \sim 360^\circ$ 까지 위상차를 갖는 범위내에서 제어가 가능하다. 이때, 반드시 직·병렬인버터의 허용전류와 정격용량을 초과하는지를 고려해야 한다. 즉, 직렬삽입전압은 인버터 용량과 허용전류의 크기 등이 고려되어 결정된다. UPFC는 RTU(Remote Terminal Unit)를 통해서 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템에서의 원격제어 기능을 제공하며, 충분한 고장유형별 처리방법을 제공하여 SCADA 시스템에 alarm등으로 고장을 확인시켜 주며, 현장의 작업자에게 정확한 고장 위치와 처리방법을 알려줄 수 있어 고장시 보수시간의 단축을 가능하게 한다. 그리고, UPFC는 계통사고 등의 원인으로 모션전압이 0.3p.u. 이하로 낮아지면 주요 전력전자 소자와 부속정치를 damage가 없도록 안전하게 계통으로부터 UPFC를 분리하며, 계통조건이 정상으로 돌아오면 2초 이내에 자동으로 재투입되어 운전이 가능하다.

2.1.2 80MVA UPFC의 주변기기

UPFC의 주변기기들로는 GIS (Gas Insulated Switch)설비, 직·병렬변압기와 보조변압기, 그리고 냉각설비 등이 있다. GIS는 UPFC와 계통의 연결을 위한 설비이며, 직·병렬변압기와 보조변압기는 인버터 출력을 계통에 보내며, 동시에 고조파를 저감하는 역할을 한다. 그림 2는 UPFC의 냉각설비의 단선도를 보여주고 있다. 주요 구성요소는 열교환기 모듈, de-ionization unit, 그리고, 순환펌프 이며, 여유분을 두어 사용함으로써 냉각시스템 및 UPFC 전체의 운전효율을 높일 수

있다. 냉각 시스템의 유지 및 보수에 필요한 모든 부품들은 다른 시스템과는 분리되어 설계된다. 이렇게 분리된 설계를 도입함으로써 냉각시스템 동작중 고장장비 교체 가능하게 되어 냉각 시스템의 유지 및 보수 작업에도 전체 시스템의 서비스가 중단되거나 운전 용량을 낮추는 일이 발생하지 않게 된다. 냉각 시스템은 전력전자부의 보호, 냉각 시스템 자체 보호기능 및 정상 운전, 보호용 유지보수, 수정 유지보수의 상태 표시를 위한 제어부 및 모니터링 부를 갖고 있다. 모니터링 및 제어 기능은 냉각 시스템 전용의 PLC(programmable logic controller)에 의하여 수행된다. 이 PLC는 냉각 시스템 제어 캐비닛 안에 설치되어 있으며 UPFC의 중앙 제어 시스템과의 직렬 통신을 위한 링크를 가지고 있다.

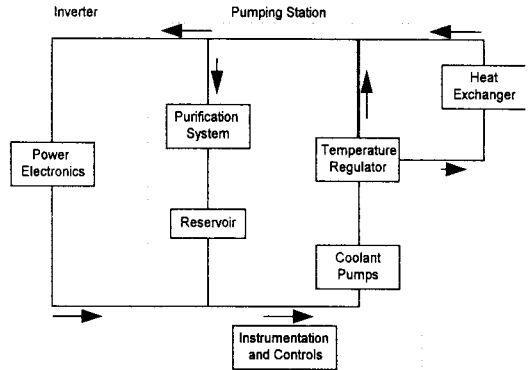


그림 2. UPFC 냉각설비의 단선도

2.2 80MVA UPFC 계통연계 방안

80MVA UPFC는 향후 송전설비와 발전소 건설 등의 어려움이 예상되는 시점에서 이러한 문제점들의 해결책으로 대두되고 있는 송전급 FACTS설비의 국내도입을 위해 연구목적으로 설치하여 그 효과를 확인하기 위해서 처음에는 신김제S/S에 설치하고자 하였으나, 한국전력공사(이하 한전)의 신강진계통에 대한 계통계획이 변경되어 이 지역 154kV 계통의 불안정이 우려되어 FACTS설비의 설치위치를 부지여건, 해당선로와 설치가능부지간 이격거리등 설치여건이 양호한 강진S/S의 5개소에 대하여 상정사고시 저전압 개선효과와 과부하 개선효과에 대해 재검토 한 결과 최종적으로 강진S/S로 결정되었다. 80MVA UPFC의 계통연계 방안과 시험방안에 대해서는 다음절에 자세하게 설명하였다.

2.2.1 80MVA UPFC 계통연계 방안

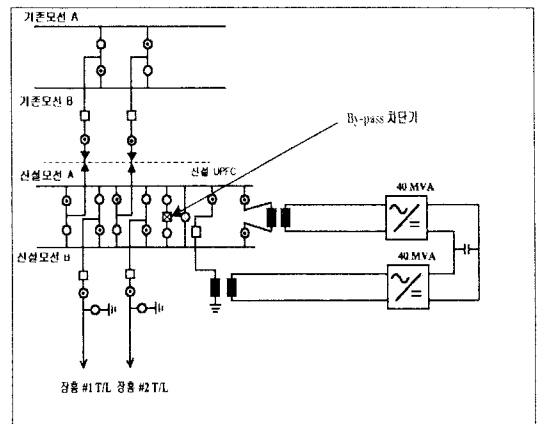


그림 3. 80MVA UPFC와 강릉T/L간 계통연계 방안

그림 3은 FACTS Pilot Plant인 80 MVA UPFC와 설치선로인 장흥#1 T/L과 장흥#2 T/L간의 계통연계방안이다. 그림에서 알 수 있듯이 기존모선 A, B에서 각각 CB를 사용하여 신설모선 A, B에 연결시킨 방안으로 본 연구과제에서 독창적으로 제안한 방안이다. 계통연계 초안은 일반적으로 사용되는 CB 1개를 사용하여 기존모선에서 신설모선으로 연결하는 방안이었으나 이는CB의 정기검사나 임시검사시 장흥#1 T/L과 장흥#2 T/L을 동시에 계통에서 분리시켜야 하는 문제점이 있어 이를 해결하는 방안으로 본 계통연계방안이 채택되었으며, 더불어 기존모선 A, B중 하나의 모선에 사고가 발생하여도 장흥#1 T/L과 장흥#2 T/L을 계속적으로 운전할 수 있는 장점이 있다.

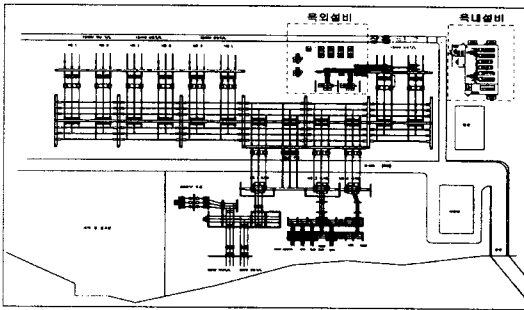


그림 4. 강진S/S내 UPFC기기 배치방안

그림 4는 강진S/S내 UPFC 기기배치 방안이며, 그림에서 보이듯이 UPFC는 우측 상단에 설치된다. 그리고, UPFC설비는 크게 옥내설비와 옥외설비로 구분할 수 있으며, 옥내설비로는 직·병렬인버터, DC clamp bus, 냉각시스템, 제어실, 운전자교육용 시뮬레이터실 등이며, 옥외설비로는 신설모선, 직·병렬변압기, 보조변압기, 그리고, 열교환기 등이 있다. FACTS Pilot Plant인 80MVA UPFC 건설공사는 한전 광주전력관리처에서 주관하며, '01. 6월부터 '02. 5월까지 12개월이 소요될 것으로 예상된다.

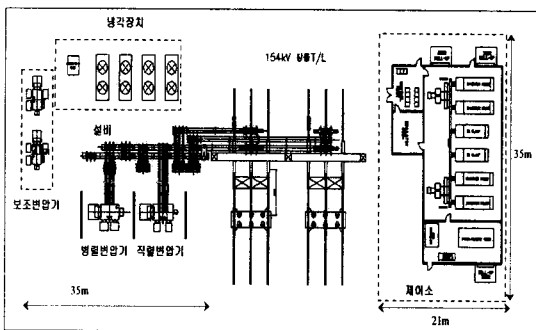


그림 5. UPFC 기기 배치방안

그림 5는 UPFC 기기 배치방안 상세도로 그림 4의 강진S/S내 설치방안에서 UPFC기기 부분만 따로이 그린 것이다. 옥내설비와 옥외설비사이에 장흥#1 T/L과 장흥#2 T/L이 놓이며, 송전선로와 직·병렬인버터간의 연결은 GIS설비를 사용하여 연계한다. 옥외설비중 냉각장치는 냉각시스템의 일부분으로 열교환기이며, 직·병렬인버터에서 발생하는 열을 옥내의 냉각시스템에서 흡수하여 이를 공기와 열교환을 하여 냉매의 온도를 일정하게 유지시키는 장치라 할 수 있으며, 20%이상의 여

유도를 가지고 있어 6개의 fan중 하나가 정지하여도 UPFC의 정상동작에는 지장을 주지 않도록 설계되었다. 그림 6은 UPFC 제어소 건물내 기기와 열교환기의 배치방안을 보여주고 있다. UPFC 건물은 내부에 취부되는 기기의 종류에 따라 인버터 hall, 기계실, 제어실, 그리고 시뮬레이터실 등의 4부분으로 나누어질 수 있다. 또한 인버터 hall은 각 인버터 모듈별로 두 개의 공간으로 나누어져 배치된다. 인버터 hall에는 각 인버터 모듈과 바이패스 스위치, 그리고 DC 클램프 등의 구성요소가 설치되며, 기계실에는 냉각 시스템 및 주변장치가 취부되고, 제어실에는 제어부 캐비닛, 배터리 그리고 step-down TR 등이 설치된다. 마지막으로 시뮬레이터실에는 UPFC 운전자를 교육하기 위한 운전 교육용 시뮬레이터를 설치하게 된다.

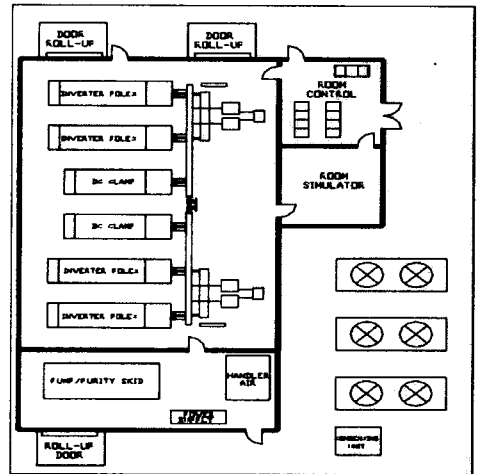


그림 6. UPFC 제어소 건물내 기기배치와 열교환기

2.2.2 80MVA UPFC 시험방안

80MVA UPFC의 시험방안은 크게 Factory Acceptance test와 Commissioning and Field Acceptance test로 나누어지며, 각 시험방안은 다음과 같다. Factory Acceptance test는 Siemens에 의해 수행되며, Siemens는 UPFC의 제작과 설치에 필요한 모든 소자 및 부품에 대해서 공장내 승인시험을 수행하며, 이때 한전은 공장승인시험에 참관을 할 수 있으며, 약 2주가 소요된다. 이렇게 공장내 승인시험을 마친 UPFC의 부품은 설치를 위해 강진S/S로 운송되며, 운송후 다시 부품의 이상 유무를 확인하기 위하여 시험을 수행하며 시험기준은 ANSI, IEEE, IEC, NEC, Siemens's industry standards 등을 따른다. 공장내 승인시험에는 다음의 항목들이 포함된다.

- Pole Electronics/Gate Drive/HF Inverter checkout
- Low Voltage/High Current Test
- Static High Voltage DC Test
- High Voltage/Low Current Switching Test
- High Voltage/High Current Test

UPFC 제어기는 제어기 설계에 관한 연구의 일부로 TNA(Transmission Network Analyser) 시험을 거치며, UPFC의 제어모드에 대한 제어응답을 확인할 수 있다. 또한 TNA 시험은 UPFC의 모든 제어회로 카드별로 수행한다. Siemens는 향후 상세한 테스트 항목과 시험계획, 일정등에 대해서 한전에 제출한다.

Commissioning and Field Acceptance test는 한

전, 협동연구기관, Siemens가 80MVA UPFC의 설치와 같이 설치현장에서 수행하며, 협동연구기관은 모든 시설과 소자, 그리고, 프로그램 등에 대한 commissioning 및 현장승인시험에 대해서 책임을 가진다. 현장승인시험에는 단계별 시험과 시스템 외란에 대한 측정이 포함되며, IEEE와 ANSI 소자 시험 가이드라인과 표준규격 그리고, 한국전력공사의 표준서 등을 따른다. 본 시험에는 전력전자시스템, interfacing equipments, auxiliaries, cooling system, control, protection 등이 포함되며 다음의 시험항목 등이 있다.

- Remote and local operation of the UPFC
- Determination of UPFC behavior in the extremes of system behavior
- Cooling system performance
- Assessment of non-simulated dynamics and any adverse effects
- Controller tuning and validation of performance

3. 결 론

본 논문에서는 송전계통의 전압안정도 향상과 과부하 해소를 위해 국내에 설치되는 직·병렬 FACTS기기인 80MVA UPFC의 도입배경과 설치장소인 강진S/S의 주변계통의 특성, 80MVA UPFC의 기기의 구조, 154kV 송전계통과의 연계방안 및 시험방안에 대하여 설명하였다. 앞에서 설명한 내용 중 향후 상세 설계시 80MVA UPFC의 제어소 건물의 구조가 변경이 가능한 부분이며, 다른 부분은 변경이 불가능하다. 향후 80MVA UPFC의 현장승인시험에 대한 상세한 계획의 수립과 엄격한 평가를 수행하기 위한 검수방안 등을 확정할 예정이다. UPFC의 제작과 설치가 완료된 후 공장승인시험과 commissioning 및 현장승인시험의 내용을 분석하여 UPFC의 성능평가를 수행할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Edris, "FACTS Technology Development : An Update", IEEE Power Engineering Review, Mar. 2000
- [2] L. Gyugyi, C.D. Schauder, S.L. Williams, T.R. Rietman, D.R. Torgerson, A. Edris, "The Unified Power Controller : A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2 April 1995
- [3] K. Kalyan, Eric J. Stacey "UPFC-Unified Power Flow Controller : Theory, Modeling, and Applications", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 4 October 1998
- [4] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS", IEEE Press, 2000