

특수 계통조건에서의 UPFC 적용사례

유일도<sup>1</sup>, 김준모<sup>1</sup>, 추진부<sup>2</sup>, 전영수<sup>2</sup>  
 (주)효성 중공업 연구소<sup>1</sup>, 한국전력공사 전력연구원<sup>2</sup>

Case study of UPFC Application for Special Power System

Yoo il-do<sup>1</sup>, Kim jun-mo<sup>1</sup>, Choo jin-boo<sup>2</sup>, Jeon young-soo<sup>2</sup>  
 Hyosung Corp.R&D Institute<sup>1</sup>, KEPRI<sup>2</sup>

**Abstract** - The UPFC is a new transmission power flow controller that has the ability to provide dynamic bus voltage control, series real power flow control and series reactive power control. With all of these versatile capabilities, it can provide transmission planner with a new tool to resolve system concerns for a wide variety of system conditions. This paper will describe UPFC system characteristics, operation status under special network systems and outline some advantageous applications. The first UPFC in Korea will be installed and operated by KEPRI and Hyosung Co.

있는 형태가 된다. 임의의 직렬전압 주입은 DC link단 이 허용범위에서 일정할 경우 가능한데 병렬인버터는 계 통으로부터 유효전력을 흡수하거나 방출함으로써 DC link전압을 유지하는 역할을 한다.

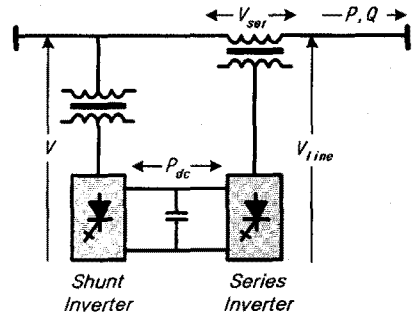


그림 1 UPFC의 구성

1. 서 론

UPFC(Unified Power Flow Controller)는 동적으로 버스전압을 제어함과 동시에 선로에 흐르는 무효, 유효전력을 독립적으로 제어할 수 있는 새로운 개념의 전력조류제어기이다. UPFC의 다양하고 종합적인 기능을 통하여 전력시스템에서 발생하는 다양한 문제들을 보다 효율적이고 경제적으로 해결할 수 있다. 본 논문에서는 UPFC 시스템 구성방식에 대하여 간략히 소개하며, 특수한 계통조건에서의 UPFC 활용방안에 대하여 고찰함으로써 향후 UPFC를 비롯한 FACTS기기를 국내에 도입할 경우 고려하여야 할 사항들을 제시하였다. 한편 전력연구원과 (주)효성에서는 국내 최초로 80MVA급의 UPFC를 전남 강진 소재의 강진변전소에 설치, 운전할 계획이다.

직렬인버터는 제어방법에 따라 선로의 전압제어와 위상각을 제어하는 능동적인 직렬보상기로서 동작할 수 있다. 또한 적절한 위치에 변압기와 차단기를 설치함으로써 필요한 경우 병렬인버터로서 동작하도록 전환될 수 있다. UPFC는 각각의 인버터에 대한 지령치를 적절히 설정함으로써 버스전압(V), 유효전력(P) 및 무효전력(Q)을 제어한다. 또한 버스전압(V)을 제어하면서 선로에 흐르는 무효전력을 제어함으로써, 선로의 유효전력을 제어함과 동시에 선로 양단의 전압을 제어할 수 있다. UPFC는 이와 같이 많은 기능을 동시에 수행하므로 기기 각 구성 요소들은 요소별로 정격을 가지고 있으며 이는 아래와 같이 분류할 수 있다.

2. 본 론

2.1 UPFC 구조 및 특징

UPFC는 대상선로에 대한 감쇠제어(damping control) 및 조류 제어 목적으로 구성되었으며, 여러 연구를 통하여 시스템의 과도상태나 정상상태의 안정도에 대하여 중요한 제어 성능을 제공하는 것으로 알려져 있다. UPFC는 두 개의 전압형 인버터로 구성되어 있으며 각각의 인버터는 병렬 및 직렬로 선로에 연결되며 DC link를 공유하고 있다. 유효전력은 공유된 DC link를 통하여 교환될 수 있으며 무효전력은 각 인버터의 AC단에서 발생시키거나 소비할 수 있다. 병렬인버터는 독립적인 STATCOM으로써 버스의 전압을 유지할 목적으로 이용될 수 있으며 직렬인버터와 함께 사용될 경우 전력시스템에 무효전력을 공급함으로써 전압을 유지하고, DC link를 통하여 직렬인버터에 유효전력을 공급한다. 직렬인버터는 위상제어 변압기와 유사한 형태의 직렬변압기를 통하여 계통과 연결되어 있으므로 임의 크기의 전압과 위상을 직렬로 주입할 수 있도록 구성된다. 이러한 형태는 3상 교류 전압원이 계통과 직렬로 연결되어

- 1) 최대 병렬 전류
- 2) 최대 병렬 전압
- 3) 최대 직렬측 전류
- 4) 최대 직렬측 주입전압
- 5) 최대 DC버스 전송전력

위의 항목중 1)과 2)항목의 곱은 병렬기기의 정격을 표시하고 3)과 4)항목의 곱은 직렬기기의 정격을 표시하며 항목 5)는 DC버스의 전류 제한치이다. 또한 계통 운영면에서 볼 때 선로측 전압에 의한 제한조건이 존재한다.

2.2 UPFC의 활용 방안

UPFC는 전압제어와 조류제어가 동시에 요구되는 계통에서 유용하게 사용될 수 있다. 현재까지의 많은 연구 결과들을 통하여, UPFC의 다양한 제어기능을 이용함으로써 전력시스템 과도 안정도 개선 측면에서의 전력동요 제어(power swing damping), 진동 제어(oscillatory damping), first-swing 안정도 개선 등과 같은

이점을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 과거에 적용되었던 다른 보상기기들도 이러한 현상에 대하여 효과가 있는 것으로 발표되었지만, UPFC의 경우 상기의 기능들을 수행하는 물론 연속적으로 전력조류를 제어하면서 전압을 제어함으로써 여타의 기기와 비교하여 많은 장점을 갖고 있는 것으로 밝혀졌다. 본 논문에서 제시하는 두 가지의 예제는 UPFC를 이용한 계통건설의 경제적 운용에 관한 고려사항이며 그 내용은 다음과 같다.

- 1) 사고발생시 저전압 선로 수송능력의 증가 (비상시 backup선로의 사용 예)
- 2) 지중 및 해저 케이블의 전력수송 능력 증가 및 수송길이 연장

### 2.3 비상시 backup용 전송

UPFC의 운용에 있어서 가장 일반적으로 사용될 수 있는 부분은 사고발생시에 저전압 선로의 용량을 증가시키는 것이며 그 개념이 그림 2에 나타나 있다.

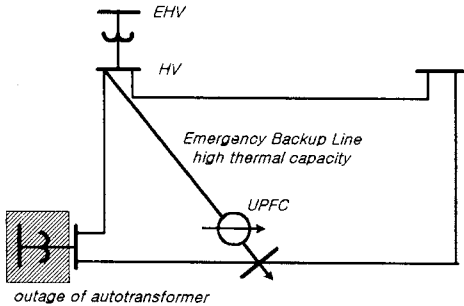


그림 2 비상시 backup선로의 운용

Backup선로는 비록 정상상태에서 송전을 하고 있더라도 대전력의 장시간의 이동은 큰저항 손실을 발생시키며 또한 상정사고를 대비하여 대용량의 전력을 전송할 수 있도록 열용량을 강화시켜야 한다. 사고의 지속시간 동안 backup선로를 이용하여 전력을 전송하는 경우 약 10%의 전력손실을 발생시킬 수 있다. 이러한 손실률은 정상상태의 운전조건에서는 허용될 수 없는 값이지만 사고가 지속되는 짧은 기간동안에 높은 전력품질이 요구되는 지역이나 지역적인 부하차단을 최소화하기 위한 한 가지 방안이 될 수 있다. 많은 선로가 사고 발생시에 대비하여 건설되고 있는 현재 상황을 고려한다면 이러한 방법은 효과적인 대안이 될 수 있을 것이다. 기존의 저전압 선로는 열용량의 한계를 넘림으로써 backup용 선로로 전환될 수 있다. 새로운 EHV선로나 UHV선로의 건설은 철탑의 건설, 부지확보, 민원수용과 같은 문제를 해결하여야 하므로 기존 선로를 이용한 이같은 방법은 효과적인 대안이 된다.

그림3은 이러한 운용예를 구체적으로 나타낸 것이다. 주요 부하 지역이 두 군데 있으며, 138kV 선로 및 69kV의 2중 선로를 통해 전력을 공급하고 있다. 그리고 이러한 두 곳의 부하지역은 69kV 선로를 통하여 서로 연결되어 있다. 만약 한 곳의 주요 전력공급 선로에 사고가 발생하여 전력을 공급하지 못할 경우 다른 부하 지역으로부터 69kV의 tie선로를 통하여 전력을 공급하는 방법을 생각할 수 있다. 그러나 지금까지의 경험으로는 이같은 레벨에서의 전송은 큰 용량의 보상기기 없이는 불가능한 것으로 생각되었으며, 전력조류의 계산을 통하여 직렬측의 유효 및 무효의 보상이 없는 전송이 불가능함을 보여주고 있다. 만약 69kV의 선로의 열용량의 한계를 늘리고 UPFC를 설치할 경우 A지역은

440MW의 전력을 전송받아 240MW의 전력을 25mile 떨어져 있는 B지역으로 몇시간 내지 며칠 동안 공급할 수 있다. 이때 요구되는 선로의 열용량은 이러한 전송을 감당할 수 있는 정도이어야 한다.

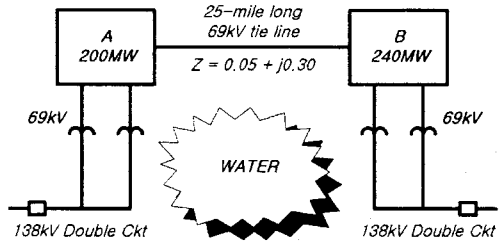


그림 3 69kV tie선로

만약 선로 중간점에 전압보상 장치만을 사용하여 보상하는 경우 선로의 저항에 의한 전압강하 때문에 크게 효과를 보여주지 못하게 된다. 이외의 다른 대안으로서 선로의 신설과 승압을 생각할 수 있지만 문제를 해결하는 데는 효과적인 반면 그 활용도를 생각할 때 불필요한 것으로 간주된다. 이러한 점들을 고려해 볼 때 가장 효과적인 대안은 기존의 시설을 이용하고 tie선로의 열용량을 늘려 UPFC를 설치하는 것이다. 계통의 운용은 tie선로를 통한 장시간의 전력전송은 금지하고 주요 선로의 고장 발생시 선로복구가 이루어지는 기간 동안만 운용하는 것으로 한다. 이러한 상황에 대한 설치 예로서 Kentucky주의 Inez 변전소 138kV선로를 들 수 있다. 이 지역의 경우는 사고 발생시 광역정전이나 열용량 초과, 지역적인 전압붕괴를 방지하기 위하여 800MW가량의 전력 전송이 요구된다. 무효전력 공급원이 30 mile 이상 떨어져 계통 구성하에서 일반적으로 이러한 용량의 전력전송을 위해서는 345kV이상의 용량을 갖는 선로의 증설이 요구되었다. 그러나 138kV 선로의 열용량 한계를 높이고 160MVA의 UPFC를 설치하여 전압과 전력조류를 동시에 제어함으로써 345kV 선로 증설과 동등한 효과를 얻을 수 있었다.

### 2.4 지중케이블과 해저케이블의 전력수송거리 연장

AC 해저케이블과 지중케이블의 실제적인 전송거리는 충전전류를 포함한 케이블의 열용량에 의해서 결정된다. 예를 들어 high-pressure oil-filled(HPOF)케이블의 경우 25A/mile의 충전전류를 발생시킨다. 만약 케이블이 1000A의 전류용량(Ampacity)을 가질 경우 유효전송전력(충전전류를 고려한 실질적인 유효전력의 전송을 위해 사용된 전류)은 40mile(64km)에서 거의 0일 수 있다. 이것은 1000A가 모두가 충전 전류로만 사용되어지는 결과를 가져온다. 충전전류의 흐름은 수전단과 송전단의 상대적인 전압차에 의해서 결정된다. 케이블의 최대 사용 길이를 20mile로 제한하여 나머지 전류가 유효전력의 흐름에 사용될 수 있도록 한다. 이와 같은 기준은 1969년 Kimbark에 의해서 제안되었으며 지금까지 이용되고 있다. 만약 충전전류를 제어하기 위해 UPFC를 사용할 경우 케이블의 최대 전송길이를 연장할 수 있다. 하나의 예로서 20 mile의 케이블의 경우 25A/mile의 충전전류가 발생하므로 정상전압에서 500A의 충전전류가 발생한다(25A/mile × 20mile = 500A). 케이블을 통해 흐르는 전류는 순수하게 무효전력이므로 유효전류는 500A(1000-500=500)이다. UPFC가 양단의 충전전류를 제어하여 전체적인 전력의 총합이 유효전력이 되도록 한다. 이 경우 1000A의 전류용량을 갖는 20 mile의 케이블은 설치전과 비교하여 큰 유효 전송전력을 갖는다. 이때 UPFC는 유효, 무효

전력의 조류를 제어할 수 있으므로 양단에서의 충전 전류를 동일하게 만들기 위해 이용된다. 부하의 역률을 1로 놓을 경우 20 mile 케이블의 유효분 전류용량은 500A에서 968A로 증가하였다. 만약 케이블의 길이를 40mile로 연장할 경우 유효분 전류용량은 866A가 된다. 전력선 케이블과 UPFC를 함께 사용하여 케이블의 최대 연장길이를 2배까지 연장하였다.

이에 관한 하나의 예를 보이기 위해 그림 4에 나타난 상황을 고려하자. 345kV 전송 선로에서 인근 섬으로 500MW의 전력을 공급해야 한다고 가정하자. 섬은 약 25mile의 거리에 있다.

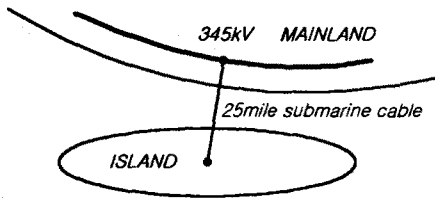


그림 4 25mile의 해저 케이블

섬에는 발전소가 있지만 발전단가가 비싸 비경제적이며, 사고 발생시 비상시에만 유용하게 사용될 수 있다. 이와 같은 계통조건에서 HVDC의 사용은 하나의 해결책이 될 수 있다. 다만 HVDC시스템은 UPFC시스템과 비교하여 송, 수전단 모두에 전력변환 장비가 요구되므로 상대적으로 높은 고장 가능성을 내재하고 있어 전력공급이나 수용가에게 불리한 조건이 된다. 만약 AC 케이블과 충전전류를 제어하기 위한 UPFC를 사용하여 계통을 구성하는 경우 일반적으로 사용되는 케이블과 변전설비가 사용될 수 있어 섬의 수용가는 육지와 거의 비슷한 전력 서비스를 제공받을 수 있다. UPFC는 단지 송, 수전단의 충전전류를 동일한 값으로 유지하기 위해 사용되므로 UPFC가 서비스를 중단한 경우라도 계속하여 전력을 공급할 수 있다. 하지만 HVDC시스템은 송전단과 수전단 양시스템이 모두 정상적인 동작을 수행하는 경우만 서비스가 가능하다. 또한 전송되는 전력의 수, 송전단모두에서 100%로 컨버터를 통해 변환되어야 하므로 기기의 규모가 커질 뿐 아니라 손실이 크게 발생한다. 예를 들어 1000MVA장비의 경우 대략 \$100M의 비용이 요구되며 변환손실을 1%로 가정할 때 최대 전송시 약 20MW의 손실이 발생한다.

Series Z = 0.05 + j 0.25 Ω/mi  
Charging = 15MVar/mi

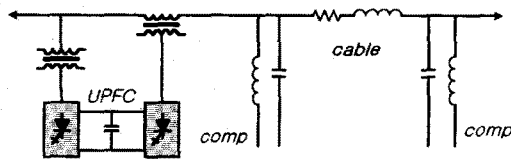


그림 5 UPFC로 제어되는 케이블

그림 5에 보여진 AC케이블과 UPFC시스템은 HVDC시스템과 비교하여 적은 손실과 설비 비용을 갖는다. 이는 시스템에서 전력이 직류로 변환되는 양이 상대적으로 적기 때문이다. 이 시스템은 선로 양단에 큰 리액터 보상을 갖는데 최대 전력 전송시에는 시스템으로부터 무효전력을 보상받지 않고 전송이 없을 경우 약간의 무효전력을 공급한다. 이것은 실제 시스템에서 받아들일 수 있는 수준이며 공급되는 양이 클 경우 UPFC를 이용하여 무효전력을 흡수한다. UPFC는 단지 충전전류를 제

어하는 용도로만 사용되어지므로 정격은 병렬과 직렬의 경우 전송되는 전력의 5%보다 적을 수 있다(만약 UPFC가 전압제어이나 각도제어를 하는 경우 용량이 커질 수 있으나 HVDC시스템보다는 작다). UPFC시스템의 손실은 최대전송시 0.5MW정도이고 설비의 비용은 \$10M정도이다. 표 1은 UPFC시스템과 HVDC시스템의 비용과 손실의 비교를 나타낸 것이다.

표 1. 각 기기의 소요비용 및 손실의 비교

시스템	AC시스템	DC시스템
변환 장비(MVA)	50	10000
변환장비의 비용(\$M)	10	100
변환 손실(MW)	0.5	10

이러한 시스템은 DC시스템과 비교하여 병렬리액터, AC케이블, 차단기 및 주변기기의 제어장비가 요구된다. 하지만 DC시스템의 비용과 비교할 때 \$90M의 큰 차이를 갖는 작은 부분만을 차지한다. 추가적으로 UPFC가 설치되는 변전소는 양단의 어느 쪽에도 설치될 수 있고 대부분 기존의 장비들을 이용할 수 있다. DC시스템은 작은 단라비를 유지하기 위해 단자의 가까운 곳에서의 발전기 운전이 요구된다. 그리고 특별한 DC케이블과 DC장비들을 다루기 위해 기술적인 훈련이 필요하지만 AC시스템은 이러한 제약조건이 없다. 하지만 DC시스템을 적용할 경우 얻을 수 있는 한 가지의 장점은 DC시스템에서는 두 선로의 케이블만이 요구된다는 점이다. 반면 AC시스템은 세 개의 선로를 요구한다. 이는 선로 비용이 전체 project 비용 중 큰 부분을 차지하는 장거리 선로에서 매우 큰 이점이 될 수 있다. UPFC 제어시스템은 동기시스템이며 동기 전력을 비롯한 전체적인 시스템의 안정도가 AC tie선로의 존재로 인해 증가됨으로써 손실, 신뢰도, 단가 및 운용 비용 등의 많은 측면에서 장점을 갖게 된다.

### 3. 결 론

UPFC의 다양한 제어 기능을 이용하면 계통에서 발생하는 여러 문제를 해결할 수 있다. 본 논문에서는 UPFC를 적용하여 계통을 효과적으로 운용할 수 있는 아래의 두 가지 활용방안을 제시함으로써 향후 UPFC를 계통에 적용할 경우 고려할 수 있는 사항들에 대하여 제시하였다.

- 1) 사고 발생시 운전 범위 내로 전압을 유지하면서 저전압 선로를 통해 전력을 전송하는 예
- 2) 충전전류로 인해 제한되는 지중 및 해저 케이블의 전력 수송량을 늘리고 최대 전송을 늘리는 예  
현재 한전전력연구원과 (주)효성에서는 전남 강진 소재의 강진변전소에 80MVA급 UPFC를 설치, 운전할 예정이다. UPFC는 타 보상기에 비하여 다양한 제어기능을 가지고 있으므로 선로의 조건에 따라서 이와 같은 활용방안 이외의 새로운 응용방안이 개발될 수 있을 것이다.

#### (참고 문헌)

(1) Gyugyi, L., "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid State Synchronous Voltage Sources", IEE Paper 93 SM 434-1 PWR, 1993  
(2) Gyugyi, L., "A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission System", IEEE, Proceeding, Vol. 139, No. 4, July, 1992  
(3) Rahman, et. al., "UPFC Application on the AEP System Planning Considerations", IEEE Winter Power Meeting, 1997, PE-582-PWR-0-01-1997