

계통의 부하수준을 고려한 UPFC 운전 방안

임정욱\* 강상희\*  
\*명지대학교 전기공학과

UPFC Operating Scheme Considering Load Levels of Power System

Jung-Uk Lim and Sang-Hee Kang  
Department of Electrical Engineering, Myongji University

**Abstract** - 본 논문에서는 UPFC가 포함된 전력계통의 부하수준을 고려하여 각각의 수준에 적합한 계통 운용 목적을 달성하기 위한 UPFC 운전법을 제안하였다. 최적조류계산에 적용이 용이한 분리형 UPFC 수리 모형을 채택하여 부하수준이 낮은 경우나 평균부하에서는 경제 우선으로 발전비용과 손실을 최소화하였고, 사고시 과부하, 모선 저전압 문제 등이 발생할 가능성이 높은 중부하에서는 안전도 우선으로 안전도 지수를 최소화하였다. 본 논문에서 제안한 방법을 UPFC 3기가 설치된 6기 30모선 계통에 적용하여 중부하에서는 발전비용과 손실 최소화를 통하여 비용절감 효과를 정량적으로 나타내었다. 평균부하의 경우, 사고전에는 비용최소화를, 사고 후에는 안전도지수를 최소화하였다. 중부하에서는 사고에 대비하여 UPFC 운전으로 안전도지수를 최소화하였다.

UPFC를 어떻게 운전할 것인가의 문제에 대해서도 많은 연구가 진행되고 있다. 최근 대부분의 나라들이 전력 수요는 증가하지만 송전 선로를 새로이 추가하는 것에 어려움을 겪고 있어서 기존의 선로를 통해 전달되는 에너지 양이 증가하고, 국가간, 지역간 전력거래가 활발한 것이 안전도 문제를 부각시키는 원인이 된다.

본 논문에서는 UPFC가 포함된 전력계통의 부하수준을 고려하여 부하수준이 낮은 경우나 평균부하 상황에서는 경제 우선 목적으로, 부하 수준이 높아서 사고시 과급 효과가 큰 상황에서는 안전도 우선 목적으로 UPFC를 운전하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안한 방법의 효용성을 3기의 UPFC가 설치된 6기 30모선 시스템에 적용하여, 중부하 및 평균부하 상황에서는 비용 절감 효과를 정량적으로 보였고, 중부하 상황에서 안전도 향상의 효과를 보였다.

1. 서 론

최근에 송전망 수송 능력과 전력 설비의 이용률을 향상시킬 수 있는 유연송전시스템(FACTS: Flexible AC Transmission System)이 전력시스템에 도입되고 있다. 특히, 여러 유연송전기기를 중에서 모선 전압의 크기 및 위상각과 선로 임피던스까지 연속적인 제어가 가능한 UPFC(Unified Power Flow Controllers)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. UPFC가 도입되면 계통운용상 기존 발전 및 부하 부분에만 집중되었던 운용수단 영역을 송전 부분으로까지 확대시킬 수 있다[1].

전력시스템을 운용하기 위해서는 운용 목적, 운용 상태, 운용 수단이 필수적인데, 운용 수단에 있어서 유연송전시스템이 도입되기 전에 계통운영자는 주로 발전력 분배, 부하삭감, 부하이전 방법만을 적용하였다. 특히, 송전 영역의 경우, 선로를 구성하는 저항, 인덕턴스 등이 수동소자인 관계로 선로 조류나 모선 전압을 능동적으로 제어할 수 없었다. 하지만, 전력전자 기술에 기반을 둔 유연송전시스템을 도입으로 송전부분에서도 능동적으로 전력시스템을 제어할 수 있는 수단이 마련되었다. 이러한 송전선로에 대한 능동적인 제어는 전력시스템 운용에 새로운 패러다임을 제시하는 것으로 인식되고 있다.

최근까지 UPFC에 대한 연구는 주로 UPFC의 수학적 인 모형 개발, 정적 수리 모형을 통한 조류계산, 동적 수리 모형을 적용한 과도안정도 및 소신호 안정도 해석 등에 초점이 맞추어져 있었다[1]. 하지만, 계통 운용 측면에서 부하상황을 고려한 체계적이고, 구체적인 UPFC 운전 방법은 제시되지 못했다.

UPFC를 경제적 운용 목적에 부합하도록 운전하는 문제 자체에 대해서는 많은 연구가 수행되었다. 사고 발생의 빈도나 사고 발생에서 해결까지의 시간을 고려해볼 때, 대규모의 설치비용이 소요되는 유연송전시스템을 단지 사고를 대비하거나 사고를 해결하기 위한 수단으로만 사용한다면 이는 낭비라고 할 수 있다. 따라서, 사고의 위험이 없는 상태에서는 경제적인 목적으로 UPFC를 운전하는 것이 합리적이다.

또한, 정상상태 안전도(Security) 향상을 위해서

2. 본 론

2.1 전력시스템 운용 체계

전력시스템 운용은 운용 조치를 취하기 위한 결정을 내리는 시기에 따라 예방적 운용(Prevenient Operation)과 즉각적 운용(Proximate Operation)의 두 종류로 나뉜다[2]. 예방적 운용이란 발전, 송전, 배전 설비를 운전 이전에 취해지는 조치들을 말한다. 예방적 운용은 계통 운용의 범주에도 포함되고, 넓은 의미로 계통 계획의 범주에도 포함될 수 있다. 예방적 운용 조치는 주로 오프라인으로 미리 이루어진다. 예방적 운용에는 예방정비계획, 발전연료계획, 기동정지계획 등이 포함된다. 반면에, 즉각적 운용이란 시스템의 상태를 고려하여 운전중인 설비들에 대해 운용 목적에 적합한 조치를 즉각적으로 취하는 것을 말한다. 시간 단위는 수 초에서부터 수 시간 까지이며, 외란 발생시에는 과도현상이 지난 후에 정상상태에 도달한 시점에 해당한다. 즉각적 운용에 대한 결정은 보통 온라인에서 순시적으로 이루어지는 경제급전, 자동발전제어 등과 관련이 있다.

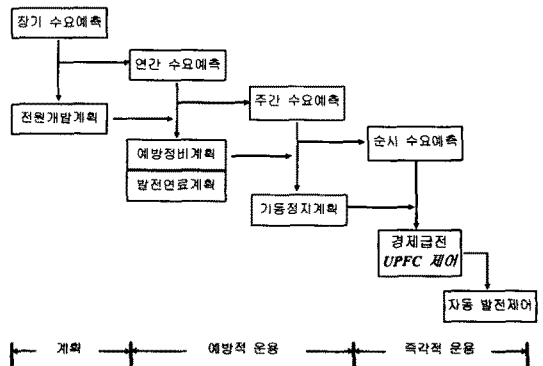


그림 1. 계통 계획 및 운용의 시간대별 구분

계통계획, 예방적 운용, 즉각적 운용에 대한 시간대별 구분은 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 알 수 있듯이 UPFC를 계통 운용 측면에 적용할 경우, 발전력 급전과 더불어 UPFC의 운전점을 결정할 수 있다. 그림 2에서는 전력계통 운용 체계를 나타내었는데, 계통운영자는 계통이 처한 상태를 파악하여 운용 목적들을 만족시키도록 주어진 UPFC를 포함한 운용수단을 최대한 활용하여 운용 전략을 수립하고 필요한 조치를 취하여야 한다.

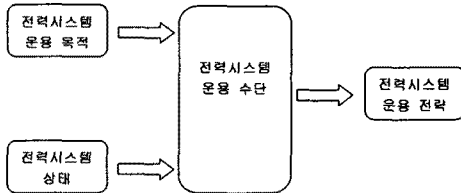


그림 2. 계통 운용 체계

## 2.2 UPFC 수리모형

그림 3에는 본 논문에서 채택한 UPFC 수리모형인 분리형 모형이 제시되었다. 이 모형은 UPFC 양단이 분리된 형태로 양단 모선을 각각 PV모선이나 PQ모선으로 지정할 수 있으므로, 조류계산에 적용하기 용이하다.

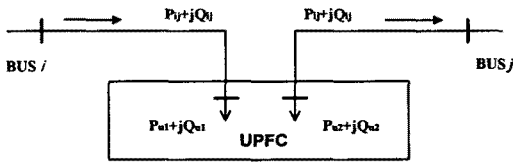


그림 3. 분리형 UPFC 수리모형

그림 3을 참고로 하여 다기의 UPFC가 계통에 설치된 경우에, k번째 UPFC의 제어 변수들은 식 (1)과 같다. UPFC는 유효전력을 생산하거나 소비하지 않으므로 식 (2)를 만족한다. 본 논문에서는 UPFC가 선로 중앙에 위치하여 유효전력 및 무효전력을 제어한다고 가정한다.

$$UPFC_{k-th} = [P_{k1}^u \quad Q_{k1}^u \quad P_{k2}^u \quad Q_{k2}^u] \quad (1)$$

$$P_{k1}^u + P_{k2}^u = 0 \quad (2)$$

여기서,  $P_{k1}^u, P_{k2}^u$ : k번째 UPFC의 유효전력 제어량  
 $Q_{k1}^u, Q_{k2}^u$ : k번째 UPFC의 무효전력 제어량

## 2.3 비용최소화를 위한 UPFC 운전법

### 2.3.1 발전비용 절감

기동정지계획에 따라 기동이 결정된 발전기들에 대하여 발전비용을 목적함수로 하는 최적조류계산이 수행된다. 최적조류계산의 결과로 총 발전비용이 계산되고 각 발전기의 출력이 결정된다. UPFC가 포함된 계통의 경우에는 최적조류계산 과정에서 UPFC의 유효전력 제어에 관한 변수들을 조절할 수 있다. 이는 최적화과정에서 등식 및 부등식 제약조건을 완화시켜 UPFC가 없는 경우의 최소치에 대해 추가적으로 비용 감소효과를 얻을 수 있다. UPFC 포함 계통에서의 발전비용을 최소화할 위한 최적조류계산식은 다음과 같다. 본 논문에서는 최적화 기법으로 선형화를 통한 선형계획법을 적용하였다[3].

- (목적함수) 총 발전비용
- (등식 제약조건) 전력조류방정식
- (부등식 제약조건) 발전기출력제약, 모선제약, 선로제약
- (UPFC 제약조건) 식(1), 식(2), 식(3), 식(4)

$$P_{g,k1} + P_{k1}^u - P_{d,k1} = \sum_{i=1}^N |V_{k1}| |V_{i,k1}| \cos(\theta_{k1i} + \delta_i - \delta_{k1}) \quad (3)$$

$$P_{g,k2} + P_{k2}^u - P_{d,k2} = \sum_{i=1}^N |V_{k2}| |V_{i,k2}| \cos(\theta_{k2i} + \delta_i - \delta_{k2}) \quad (4)$$

### 2.3.2 선로손실 절감

UPFC의 무효전력 제어를 통한 선로 손실 최소화 문제는, 기존의 병렬 무효전력 보상장치를 통하여 손실을 최소화했던 알고리즘을 그대로 적용할 수 있다. 전력조류방정식에서 UPFC 모선에 무효전력 관련 변수가 첨가되고, 부등식 제약조건에 UPFC의 무효전력 제어량의 한계가 포함된다. UPFC가 포함된 전력시스템에서의 손실 최소화를 위한 최적조류계산식을 정식화하면 다음과 같다. 최적화를 위한 기법으로 기존의 선형화를 통한 선형계획법을 적용하였다[3].

- (목적함수) 총 선로손실
- (등식 제약조건) 전력조류방정식
- (부등식 제약조건) 발전기출력제약, 모선제약, 선로제약
- (UPFC 제약조건)  $Q_{min}^u \leq Q_{k1}^u, Q_{k2}^u \leq Q_{max}^u$ , 식(5), 식(6)

$$Q_{gk1} + Q_{k1}^u - Q_{dk1} = \sum_{i=1}^N |V_{k1}| |V_{i,k1}| \sin(\theta_{k1i} + \delta_i - \delta_{k1}) \quad (5)$$

$$Q_{gk2} + Q_{k2}^u - Q_{dk2} = \sum_{i=1}^N |V_{k2}| |V_{i,k2}| \sin(\theta_{k2i} + \delta_i - \delta_{k2}) \quad (6)$$

## 2.4 안전도 향상을 위한 UPFC 운전법

UPFC의 신속한 제어 특성과 연속적인 보상 능력으로 정상상태 안전도를 향상시킬 수 있다. UPFC는 유효전력 및 무효전력을 신속히 제어하여 선로의 송전 용량을 증대시키고, 송전선에서의 유효 전력의 흐름을 신속하게 제어할 수 있으며, 무효전력 제어로 모선 전압을 유지시킬 수 있기 때문에 전력소비가 많은 중부하에서 안정적인 전력 공급에 큰 도움이 된다.

정상상태 안전도는 송전 선로의 혼잡 상태를 나타내는 조류 안전도 지수와 모선에서의 전압 크기를 나타내는 전압 안전도 지수를 통해 표현된다. 안전도 지수 값을 줄인다는 것은 송전 전력의 여유분을 증가시키고, 심각한 전압 하락을 막는다는 것을 의미한다. 따라서, 이러한 지수를 목적함수로 하고, 이를 수치적인 반복 계산을 통해 이를 최소화하여 구한 UPFC 운전점이 계통 안전도 향상을 위한 UPFC의 최적 운전점이 된다.

상정사고 해석에서 널리 사용되는 선로 조류에 대한 안전도 지수  $J_p$ 는 식 (7)과 같다. 이를 최소화하기 위하여, UPFC가 제어하는 유효전력의 변화에 따른 안전도 지수의 변화를 나타내는 민감도 벡터를 해석적으로 유도하였다. 이 민감도 벡터를 이용하여 목적함수의 감소 방향벡터를 구한다[4]. 이러한 과정은 Marquardt법을 적용한 것인데 이 최적화 기법으로  $J_p$ 를 최소화하였다[3].

$$J_p = \sum_k w_k \left( \frac{P_k}{P_k^{max}} \right)^2 \quad (7)$$

전압에 대한 안전도 지수  $J_v$ 는 식 (8)와 같다.  $J_v$ 는 부하모선의 전압 크기가 기준 전압 크기로부터 얼마나 벗어나 있는가를 나타낸다. UPFC가 설치된 양단 모선에 무효전력을 보상하여 전압에 대한 안전도를 개선시킬 수 있다. 앞에서와 마찬가지로  $J_v$ 의 경우에도, UPFC의 무효전력에 의한 지수의 변화를 나타내는 민감도 벡터를 유도하여 Marquardt법을 적용하여 이를 최소화하였다[4].

$$J_v = \frac{1}{2} \sum_{i \in PQ \text{ bus}} w_i (V_i - V_{i,ref})^2 \quad (8)$$

### 2.5 사례연구

본 논문에서 제안한 UPFC 운전법에 대한 타당성을 검증하기 위하여 IEEE 6기 30모선 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 실시하였다.

본 연구에서는 각 모선 부하의 할당 비율을 일정하게 유지한다는 가정 아래, 부하 수준을 중부하, 평균부하, 경부하의 3단계로 나누어 각 수준에서의 계통 상황을 모의하였다. 침투부하를 포함하는 중부하는 평균부하의 120%로, 평균부하는 기준부하로서 100%로 모의하였으며, 경부하는 평균부하의 80%로 모의하였다.

UPFC의 제어 능력을 평가하기 위하여 선로 사고에 대한 상정사고 해석을 실시하였다. 사고 조건으로 사고 발생부터 사고 해결의 시간 동안 하나의 사고만을 고려하는 단일사고(N-1) 조건을 적용하였다. 상정사고 해석 결과, 경부하에서는 사고 후에 과부하 선로 및 저전압 모선이 나타나지 않았다. 평균부하에서는 5건의 사고에서 선로 과부하가, 3건의 사고에서 모선 저전압이 나타났다. 한편, 중부하에서는 18건의 사고에서 선로 과부하가, 7건의 사고에서 모선 저전압이 나타났다. 또한, 28-27선로 사고가 가장 심각한 사고로 판명되었다.

상정사고 해석을 통하여 안전도를 기준으로하여 UPFC 설치 위치가 결정되었다. 가장 심각한 사고의 영향을 최소화할 수 있는 선로에 UPFC를 설치하되, 중부하시 UPFC가 설치된 선로에 사고가 발생되더라도 과부하나 저전압이 발생하지 않도록 하였다. 이러한 원칙에 따라 3개의 UPFC가 설치된 6기 30모선 계통을 그림 3에서 나타내었다.

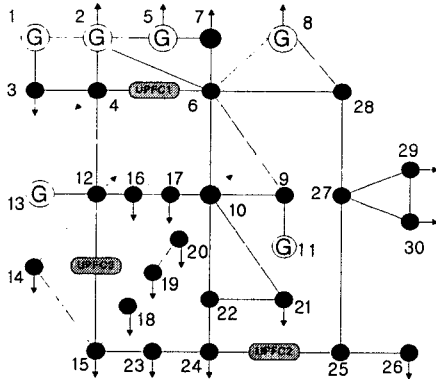


그림 3 UPFC가 설치된 6기 30모선 계통

경부하에서는 선로 사고가 발생하여 계통에서 분리되어도 과부하 선로 및 저전압 모선이 발생하지 않는다. 따라서, 경부하에서는 경제적인 목적을 위해서만 UPFC를 운전한다. 경부하시 UPFC 운전 유무에 의한 발전비용 및 손실 최소값의 차이를 그림 4에서 나타내었다.

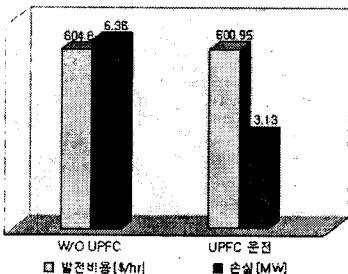


그림 4. 경부하시 발전비용 및 손실 최소화 결과

평균부하의 경우, UPFC를 사고 발생 이전에는 경제 우선의 목적으로, 사고 발생 시에는 복구 제어를 통한 안전도 우선의 목적으로 운전된다. 즉, 사고가 발생되기 전까

지는 안전도보다는 경제성에 무게를 두고 계통 운영을 한다는 의미이다. 평균부하시 UPFC 운전유무에 의한 발전비용 및 손실 최소값을 그림 5에서 나타내었다.

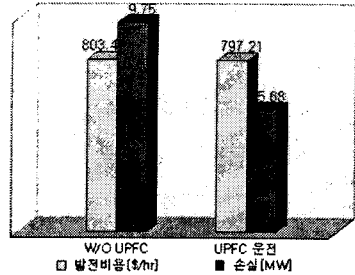


그림 5. 평균부하시 발전비용 및 손실 최소화 결과

평균부하에서 사고가 발생되면, UPFC는 선로 과부하 및 모선 저전압 문제를 해결하기 위하여 운전된다. 선로 과부하 모선 저전압을 유발하는 사고에 대하여 안전도 지수 최소화 알고리즘을 적용한 결과를 표 1에 나타내었다.

사고선로	1-2	1-3	3-4	2-5	28-27	27-29	27-30
과부하 선로	3개	2개	2개	1개	2개		
저전압 모선					5개	1개	1개
Jp	UPFC 비운전	9.234	7.383	7.265	9.319	10.464	
	UPFC 운전	8.939	7.262	7.088	8.744	9.937	
Jv (*10 <sup>3</sup> )	UPFC 비운전					97.76	43.70
	UPFC 운전					21.44	16.59
UPFC 운전후	과부하 선로, 저전압 모선 없음						

표 1. 평균부하에서 사고발생시 UPFC운전에 의한 안전도향상

중부하에서는 사고에 대비하여 UPFC를 안전도 우선으로 운전해야 하는데, 본 논문에서 제안한 안전도 지수 최소화 방법을 적용하여 과부하가 걸리지 않도록 선로 조류를 분산시켜 조류 분포를 평준화하고, 저전압 가능성이 높은 모선의 전압을 끌어 올려야 한다. 사고에 대비하여 UPFC를 운전한 결과 Jp는 7.562에서 7.260으로, Jv는 47.947에서 19.437로 감소되었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 부하 수준을 고려하여 송전영역에서의 계통운용 수단인 UPFC의 운전법을 제시하였는데, 이는 계통 운용에 있어서 새로운 패러다임을 제시한 것이다. 사례연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

경부하나 사고전 평균부하에서는 UPFC의 비운전시와 운전시의 발전비용 및 손실을 각각 최소화하여 최소치를 비교하였는데, UPFC 운전시 비용절감 효과가 있었다.

평균부하에서 사고발생시에는 UPFC를 안전도 우선으로 운전하여 단일 선로사고에 대해서는 UPFC로 선로 과부하 및 모선 저전압 문제를 극복할 수 있음을 보였다. 중부하에서는 사고에 대비하여 UPFC를 안전도 우선으로 운전하여 사고의 위험을 경감시킬 수 있음을 보였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] N.G.Hingorani, L.Gyugyi, "Understanding FACTS", IEEE Press, 2000.
- [2] T.E.DyLiacco, "The Adaptive Reliability Control System", IEEE PAS-86, pp.517-531, May 1967.
- [3] S.S Rao, "Engineering Optimization", John Wiley & Sons, 1996.
- [4] 송성환, 임정욱, 문승일, "FACTS 기기를 이용한 전력시스템 안전도 향상", 대한전기학회 논문지, Vol. 52A, No. 3, pp.165-172, 2003.3.