

전력시스템의 정적안전도 개선을 위한 UPFC의 운전방법

김선호, 임정욱, 문승일  
서울대학교

The UPFC Operation for an Increase of the Power System Security

Sun-Ho Kim, Jung-Uk Lim, Seung-Il Moon  
School of Electrical Engineering, Seoul National University

**Abstract** - The UPFC is known to have the ability to control both the real power flow and the reactive power flow.[1],[2] The power flow in the system is heavily related with the system security.[4] This paper deals with the operation of the UPFC to increase the power system security. The concept of the power system security is verified and the index to indicate the power system security level is suggested. And the algorithm to find the optimum operation point of the UPFC improving the system security level is presented.

경에 놓이게 된 상태가 되어, 이에 따라 시스템에 흐르고 있는 조류가 불균형을 이루게 된다. 다시 말하면 각 선로가 각각의 조류 수송한계에 다다른 정도가 다를 것이다. 이런 상황에선 조류가 조금만 바뀌어도 특정 선로에 과부하가 걸릴 확률이 높아지게 된다.[4] 선로가 과부하인 상태로 시스템이 운전되면 과열로 인해 전력손실이 증가할 것이고 결국에는 시스템의 안전을 중시해야 하는 상황이 올 수도 있다. 그러므로 전력시스템의 각 선로에 흐르는 유효전력은 시스템의 안전한 운전과 많은 관계가 있는 값이다. 따라서 전력시스템의 안전도를 각 선로에 흐르고 있는 유효전력이 해당선로에 흐를 수 있는 최대 유효전력의 몇 배에 달하는 가로 정의할 수 있다.

1. 서 론

최근 여러 나라에서 계속 증가하는 전력수요에 부응하여, 현재 갖추어져 있는 전력시스템의 활용을 극대화하고 전력시스템의 안정도(stability)를 향상시키려는 목적 하에 FACTS기기에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.[3] 이 FACTS기기를 사용하면 발전계획의 변경이나 전력시스템의 구조적 변경이 없이도 전력시스템의 유효/무효전력 조류제어를 할 수 있으므로 전력시스템의 조류흐름에 관련된 정적 상태의 안전도(security)향상을 기대할 수 있다.

이에 본 논문에서는 FACTS 기기들 중 모선전압 유지 기능 뿐만 아니라 전력조류 제어기능 또한 가지고 있는 UPFC가 전력시스템에 설치된 경우 전력시스템의 정적 안전도 향상을 위한 UPFC의 최적 운전점을 찾는 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 전력시스템의 안전도(security)를 정의하고, 이 안전도를 판단하기 위해 조류안전도 평가지수를 사용했다. 그리고, 이 평가지수를 통해, UPFC의 최적 운전점을 찾는 방법을 제안하였고, 2기 5모선 시스템에 UPFC가 1개 설치된 경우와, 10기39모선 시스템에 UPFC가 2개 설치된 경우에 대해 모의하였다.

2. 전력시스템 안전도 및 안전도 평가지수

2.1 전력시스템 안전도

전력시스템의 안전도란 예측할 수 없는 하지만 있을 수 있는 왜란이 있는 경우 전력시스템이 전력공급 및 전력품질을 유지할 수 있는 능력을 말한다. 일반적으로 전력시스템의 안전도를 평가하는 방법은 임의의 상정사고가 일어난 상황에 대해 전력시스템의 여러 조건들이 운전한계를 벗어나는가(선로과부하, 전압강하, 주파수변동 등)를 점검해 보는 것이다. 또한 전력시스템은 시간이 지남에 따라 보수유지, 고장, 부하의 변동 등에 의해 시스템이 처음 설치될 때와는 다른 환경에 놓이게 되며, 따라서 처음에 시스템이 갖고 있던 안전도 역시 변하게 된다. 즉, 현재 시스템이 정상적으로 작동하는 상태에 있더라도 현 시스템이 초기의 전력환경과는 다른 전력환경

2.2 안전도 평가지수

본 논문에서 안전도를 각 선로의 송전용량에 대한 해당선로의 유효전력의 비로 보고 있으므로 이를 나타내는 값으로 다음과 같은 안전도 평가지수를 사용했다.[4]

$$J = \sum_{\text{모선선로}} w_k \left( \frac{P_{\text{선로}k}}{P_{\text{선로}kMax}} \right)^2$$

$J$ : 안전도지수  $w_k$ : 가중치 (1)

$P_{\text{선로}k}$ : 선로  $k$ 에 흐르는 유효전력

$P_{\text{선로}kMax}$ : 선로  $k$ 에 허용된 유효전력 최대량

식(1)에서 보면 각 선로에 흐르는 유효전력과 해당선로의 최대 유효전력비가 균일할 수록, 즉 시스템의 조류분포가 고르게 될 수록, 이 안전도 평가지수는 작은 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 따라서 대상 시스템의 안전도 평가지수가 낮은 값을 나타낼수록 그 시스템의 안전도가 높다고 할 수 있을 것이다.

3. UPFC의 최적운전 상태값 계산알고리즘

앞에서 언급한 것처럼 UPFC는 유효전력을 조절하는 기능을 갖고 있으므로 이를 이용하여 시스템의 안전도를 개선시킬 수 있다. 그렇다면 여기서 UPFC의 유효전력을 어느 방향으로 조절하는 것이 시스템의 안전도를 개선시키는 것인지를 알아야 UPFC를 이에 맞게 운전할 것이다. UPFC에 의해 조절되는 선로의 유효전력의 변화에 대한 안전도 평가지수의 변화를 알 수 있다면 전력시스템의 안전도를 향상시키기 위한 UPFC의 운전값을 찾을 수 있다. 식(1)에서 안전도 평가지수는 선로의 유효전력에 대한 함수이다. 전력시스템에서 선로에 흐르고 있는 유효전력은 이미 알려진 바와 같이 식(2)로 나타낼 수 있다.

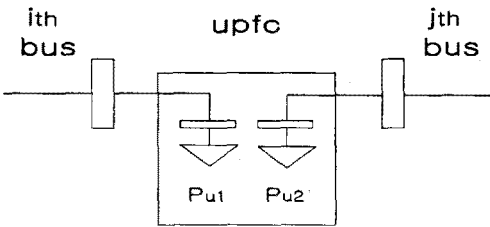
$$P = \frac{|V_i||V_j|}{X_{ij}} \sin \theta_{ij} \quad (2)$$

식(2)에서 버스의 전압의 크기변화는 작으므로 유효전력은 양단의 버스와의 차이( $\theta_{ij}$ )에 주로 영향을 받는 것을 알 수 있고, 이제 유효전력의 변화량에 대한 안전도 평가지수의 변화량은 아래의 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial I}{\partial P_k} = \frac{\partial I}{\partial \theta_{ij}} \times \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial P_k}$$

$$= \sum_i \sum_{j, j \neq i} 2|V_i|^2 |V_j|^2 \sin \theta_{ij} \cos \theta_{ij} \left( \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial P_k} - \frac{\partial \theta_{ji}}{\partial P_k} \right)$$

$J$ : 안전도 평가지수  
 $P_k$ :  $k$ 번째 선로에 흐르는 유효전력  
 $i, j$ : 버스번호  
 $\theta_{ij}$ :  $i$ 버스와  $j$ 버스 사이의 전압각차이



그림(1) UPFC 분리모형

조류계산을 위한 UPFC의 모델은 결합된 모형과 분리된 모형이 있다. 결합된 모형은 기존 조류계산의 프로그램 이용이 불가능하고, 자코비안 행렬의 수정이 불가피하며, 양단의 모선의 종류가 PQ모선인 경우만 가능하여 조류 제어에 적용하기에 곤란하다. 이에 반해 분리된 모형은 기존의 조류계산 프로그램을 사용할 수 있으며 자코비안의 수정이 불필요하고, 모선종류의 제약이 없고, 조류제어에 적용이 용이한 잇점이 있다[5]. UPFC의 분리된 모형(5)을 사용하면  $i$  번째 버스와  $j$  번째 버스 사이에 흐르던 유효전력  $P_k$ 는 UPFC 모델 양단 버스에서 유효전력으로 표현됨( $P_{u1} = P_k, P_{u2} = -P_k$ )으로 식(3)에 나타난  $\frac{\partial \theta_i}{\partial P_k}$  와  $\frac{\partial \theta_j}{\partial P_k}$  값을 조류계산과정에 나타나는 자코비안 행렬로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta \theta_i = \frac{\partial \theta_i}{\partial P_k} * \Delta P_k$$

$$= \frac{\partial \theta_i}{\partial P_{k1}} * (-\Delta P_{k1}) + \frac{\partial \theta_i}{\partial P_{k2}} * (-\Delta P_{k2})$$

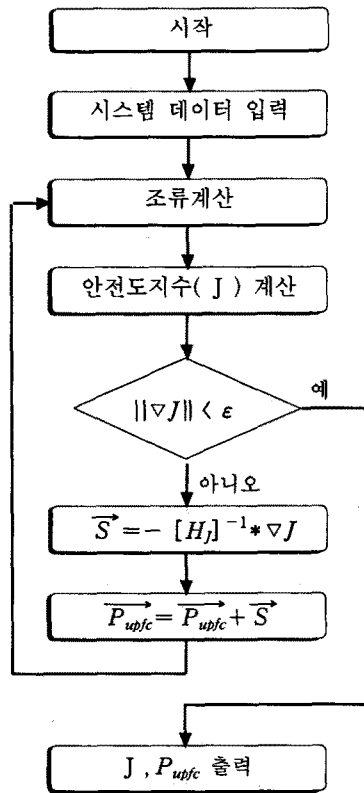
$$= \frac{\partial \theta_i}{\partial P_{k1}} * (-\Delta P_k) + \frac{\partial \theta_i}{\partial P_{k2}} * (\Delta P_k) \quad (4)$$

$$\therefore \frac{\partial \theta_i}{\partial P_k} = -\frac{\partial \theta_i}{\partial P_{k1}} + \frac{\partial \theta_i}{\partial P_{k2}}$$

마찬가지로

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial P_k} = -\frac{\partial \theta_j}{\partial P_{k1}} + \frac{\partial \theta_j}{\partial P_{k2}}$$

식(3),식(4)를 바탕으로 안전도 지수의 gradient와 hessian을 구할 수 있으므로, Marquardt 방법을 사용하여 시스템안전도 지수를 최소화 하는 UPFC의 최적 유효전력값을 계산하였다. Marquardt 방법을 이용한 최적값 계산 알고리즘은 그림2에 나타나 있다. 우선 시스템데이터를 입력하고, 조류계산을 실행한다. 여기서 구할 수 있는 자코비안을 통해 안전도 지수의 gradient

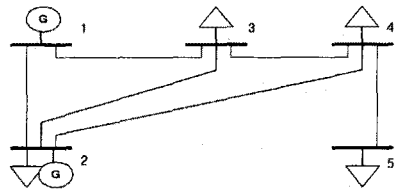


그림(2). 전력시스템 안전도 최소화 알고리즘 순서도

벡터를 구한다. gradient 벡터의 놈(norm)이 적정값에 들어왔는지를 판단하고, 적정값에 안들어온 경우, 안전도지수의 헤시안과 gradient 벡터를 이용하여 현재 UPFC의 유효전력값이 변화해 나아갈 방향벡터( $\vec{S}$ )를 구한다. 방향벡터( $\vec{S}$ )로 UPFC의 유효전력값을 변화시킨 후 다시 앞서 언급된 과정을 반복한다. 식(1)에서 각 모선의 전압은 거의 1(pu)에 가깝고, 삼각함수의 최대값은 1이므로, 전압안정도를 계산할 때에 필요한 선로의 허용 최대 유효전력은 각 선로의 리액턴스의 역수값에 해당하는  $\frac{1}{X_{ij}}$ 로 가정하였다.

#### 4. 사례연구

##### 4.1 2기 5모선 안전도 평가지수 모의



그림(3). 2기 5모선 시스템

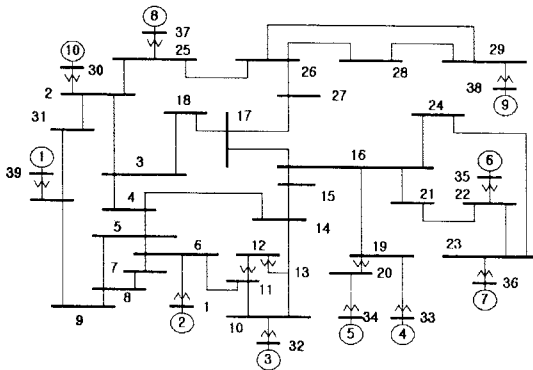
알고리즘을 확인하기 위하여 우선 2기 5모선의 전력시스템에 UPFC를 1개 설치한 경우에 대해 모의하였다. UPFC의 설치 선로는  $\frac{\partial I}{\partial P_{선로}}$  값이 가장 큰 곳인 1-3선로를 선택하였으며, UPFC의 설치위치는 UPFC의 설치시에 가장 큰 효과를 보이는 선로의 중간지점으로 설정하였으며[6], 이에 대한 결과는 표(1)에 나타내었다. 표(1)에서 보면 UPFC를 사용하기 전에는 안전도지수

값이 0.013235이었으나 앞서 언급한 알고리즘에 의해 UPFC를 운전하면 안전도지수가 0.003162로 줄었음을 보이고 있다. 따라서 UPFC의 설치와 이의 적절한 운전을 통해 시스템의 안전도가 증가하였다는 것을 알 수 있다.

표[1]. 2기 5모선 시스템 모의결과

선로	1-3	J
UPFC 설치전 P	40.72[MW]	0.013235
UPFC 설치후 P	33.39[MW]	0.003162

#### 4.2 10기 39모선 안전도 평가지수 모의



그림[4]. 10기 39모선 UPFC 2개

앞서의 모의에 이어 조금 더 큰 시스템인 10기 39모선에 UPFC를 2개 설치한 경우에 대해 본 논문에서 제안된 알고리즘을 검토해 보았다. UPFC의 설치 선로는  $\frac{\partial I}{\partial P_{\text{상}}}$  값이 가장 큰 순으로 우선순위를 정하고, 대상 시스템의 구조를 생각해 선로 2곳을 선택하였다. 그 결과 26-29선로와 23-24선로에 각각 1개의 UPFC를 선로의 중간지점에 설치한 시스템에 대해 모의 하였다. 표 [2]에서 보면 UPFC를 사용하기 전의 안전도 지수값이 0.1912이었으나 앞서 언급한 알고리즘에 의해 UPFC를 운전하면 안전도지수가 0.1812로 줄었음을 보이고 있다. 이 모의에서도 역시 전력시스템에 UPFC를 설치한 경우, UPFC의 적절한 운전을 통해 시스템 유효전력의 분포를 고르게 만듦으로써 시스템의 안전도가 증가될 수 있다는 것을 알 수 있다.

표[2]. 10기 39모선 시스템 모의결과

선로	26-29	23-24	J
UPFC 설치전 P	-189.73	354.57	0.1912
	[MW]	[MW]	
UPFC 설치후 P	-24.62	12.45[MW]	0.1812
	[MW]		

### 5. 결 론

본 논문에서는 현재 운전 중인 시스템의 안전도를 유효전력의 측면에서 측정할 수 있는 안전도 지수를 제시하였다. 그리고, 이를 기준으로 시스템에 UPFC를 설치할 때 시스템의 안전도를 향상시키기 위한 운전점을 찾는 알고리즘을 제시하였으며, 2기 5모선과 10기 39모선에 대해 모의하여 알고리즘을 검토해 보았다.

본 논문에서 제안된 전력시스템 안전도 지수와 UPFC 운전 알고리즘은 앞으로 전력시스템에 많은 UPFC가 설치될 경우, 전력시스템의 운전자에게 시스템에 설치된 UPFC의 운전방향을 제시해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] L.Gyugyi, C.D.Schauder, L.S.Williams, T.R.Rietman, D.R.Torgerson, A.Edris, "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.10, No.2, April 1995.
- [2] M.Noroozian, L.Angquist, M.Ghandhari, G.Anderson, "Use of UPFC for Optimal Power Flow Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, October 1997.
- [3] M.Noroozian, L.Angquist, M.Ghandhari, G.Anderson, "Improving Power System Dynamics by Series-connected FACTS Devices", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, October 1997.
- [4] Atif S. Debs, "Modern Power Systems Control and Operation", Kluwer Academic Publishers, pp119-122, 1988.
- [5] T.H.Kim, J.C.Seo, J.U.Lim, S.I.Moon, J.K.Park, B.M.Han, "A Decoupled Unified Power Flow Controller Model for Power Flow Considering Limit Resolution", Power Engineering Society winter meeting, Jan, Feb, 1999.
- [6] B.T.Ooi, M.Kazerani, R.Marceau, Z.Wolanski, F.D. Galiana, D.McGillis, G.Joos "Mid-Point Siting of FACTS Devices in Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, October 1997.