

계통 안전도를 향상시키기 위한 UPFC의 유효 및 무효 전력 제어

송성환, 임정욱, 문승일
서울대학교

The Active and Reactive Power Control of UPFC's for Improving System Seci

Sung-Hwan Song, Jung-uk Lim, Seung-Il Moon
School of Electrical Engineering Seoul National University

Abstract - 본 논문은 UPFC(Unified Power Flow Control)의 유효전력 및 무효전력의 제어를 통해 시스템의 안전도 레벨을 향상시키기 위한 운용 알고리즘을 제시한다. 전력 계통에서 UPFC의 효과를 분석하기 위해 분리형 모델(decoupled model)을 이용하였다. 본 논문에서는 계통의 조류 및 전압을 이용한 안전도 지수가 제시되었고, 이를 반복계산(iterative method)을 통해 최소화하였다. 이를 위해 각 안전도 지수의 민감도 벡터가 최소화되는 방향으로 UPFC의 운전점을 찾고, 이로써 시스템의 안전도를 증대시킨다. 제안된 알고리즘은 다기의 UPFC를 대상으로 IEEE 30 모선에 적용하여 시스템 안전도 레벨을 검토하였다.

주제어 : UPFC(Unified Power Flow Controllers) 리형 모델, 안전도 여유, 안전도 지수, 민감도 벡터

1. 서 론

유연 송전 시스템 (FACTS : Flexible AC Transmission Systems)기 중 UPFC는 송전선로의 유·무효 전력을 결정하는 모선 전압, 선로 임피던스, 전압 위상차 등을 실시간으로 제어함으로써, 전력 시스템 운용시 다양한 응용에 이용된다. UPFC에 관한 연구는 전력 조류의 제어, 과도 안정도 향상, 미소 신호 안정도 향상 등과 같은 전력 시스템에 대한 영향과 UPFC의 개발에 주로 집중된다. 특히, UPFC를 통해 정상상태에서 시스템의 안전도를 향상시키고자 하는 연구도 진행된다.

또한, 전력 시장의 구조개편 환경에서 전력 시스템의 안정운동을 위해 적정 수준의 전압을 유지하고 안정적인 전력 공급의 중요한 문제로 대두되고 있다. 그 결과로, 시스템의 안전도는 전력 시스템의 신뢰도(Reliability)를 향상시키는데 매우 중요한 문제이다.

전력 시스템의 안전도 레벨은, 제어가 빠르고 연속적인 보상 영역을 가지고 있는 UPFC에 의해 향상될 수 있는데, 이것을 통하여 전력 조류의 혼잡을 완화할 수 있고 적정 수준의 전압을 유지할 수 있다. 만약, 다기의 UPFC가 전력 시스템에 설치되어 있다면, 전력 시스템이 안정적으로 운용될 수 있도록 각 기기들이 적절한 운전점에서 동작할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

이 논문에서는 시스템의 안전도 레벨을 향상시키기 위해 UPFC의 적절한 안정 운영점을 찾는 운용 알고리즘을 제시한다. 알고리즘 개발을 위해 전력 시스템의 안전도 지수를 통해 안전도 레벨을 표현한다. 안전도 지수는 송전 선로의 조류와 관련된 것과 모선의 전압과 관련된 것으로 나눌 수 있고, 이는 반복법(Iterative Method)을 통해 최소화되어 UPFC의 최적 운전점을 찾는다. 안전도 지수가 최소화되는 방향을 찾기 위해서는 UPFC의 유효 및 무효 전력 변화량으로 표현되는 각 지수의 민감도 벡터가 분석적 방법으로 유도된다. 민감도 벡터에 기초한 각 반복에서 제안된 알고리즘은 안전도 지수를 최소화하는 방향 즉, 시스템의 안전도가 증가되는 방향으로 적절한 운전점을 찾는다. 이 알고리즘은 IEEE 30모선에 적

용하고, UPFC를 통해 시스템의 안전도가 향상되었음을 입증한다.

2. 정상상태에서 UPFC 분리형 모델

전력 시스템의 조류계산에서 UPFC의 효과를 분석하기 위해 UPFC의 모델이 필요하다. 그림 1은 두 개의 분리된 버스로 표현되는 UPFC의 분리형 모델이다.

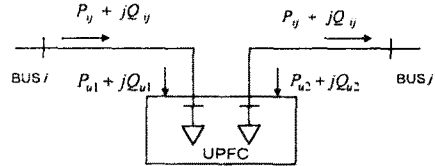


그림 1. UPFC의 분리형 모델

UPFC는 송전선로 조류를 제어할 수 있지만 자체적으로 유효전력을 생산해 낼 수 없기 때문에 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$P_{ij} = P_{ul} \tag{1}$$

$$P_{u1} + P_{u2} = 0 \tag{2}$$

그리고 UPFC의 모선전압을 유지하기 위한 무효전력 출력(Q_{u1}, Q_{u2})은 UPFC의 용량 범위 내에서 임의로 정할 수 있다.

3. 안전도 지수

전력 시스템의 상정사고에 대한 안전도 지수 J 는 다음과 같이 표현된다.

$$J_P = \sum_k a_k \left(\frac{P_k}{P_k^{max}} \right)^2 \tag{3}$$

$$J_V = \sum_m b_m (V_m - V_m^{ref})^2 \tag{4}$$

$$J = J_P + J_V \tag{5}$$

- k : 송전선로 수
- n : PQ모선의 수
- a_k, b_m : 가중치
- P_k : k번째 선로의 유효전력
- P_k^{max} : k번째 선로의 최대 유효전력
- V_m : m번째 모선의 전압 크기
- V_m^{ref} : m번째 모선의 기준 전압 크기

안전도 지수 J 는 선로의 조류와 관계되는 J_b 와 모선의 전압과 관계되는 J_v 로 나눌 수 있다. J_b 는 선로의 총 유효전력 흐름의 균등한 정도를 나타내는 지수이며, J_v 는 모선의 전압이 기준 전압에 얼마나 가까운가를 나타내는 지수이다. 그리고 이러한 지수들은 선로가 과부하에 걸리거나, 저전압 모선의 수가 증가할수록 증가한다. 즉, 지수가 감소한다는 것은 전력 시스템의 안전도가 향상된다는 것을 의미한다. 따라서, 안전도 지수 J 는 전력 시스템의 안전도를 평가하는데 이용될 수 있다.

4. 안전도 향상을 위한 UPFC 운용 알고리즘

J_b 와 J_v 의 가중치를 각각 1로 두면 J_b 와 J_v 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J_P = \sum_i \sum_{j \neq i} \left(\frac{P_{ij}}{P_{ij}^{Max}} \right)^2 \quad (6)$$

$$J_V = \sum_i (V_i - V_i^{ref})^2 \quad (7)$$

i, j : 모선 지수

P_{ij} : 모선 i 와 j 사이의 선로 유효전력

P_{ij}^{max} : 모선 i 와 j 사이의 선로 총 용량

V_i : 모선 i 의 전압

V_i^{ref} : 모선 i 의 기준전압

그리고 각 모선의 유효전력과 무효전력에 대한 지수의 민감도는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial J_P}{\partial P_k^u} = \sum_i \sum_{j \neq i} 2 \left(\frac{V_i V_j}{X_{ij} P_{ij}^{Max}} \right)^2 \sin \theta_{ij} \cos \theta_{ij} \quad (8)$$

$$\frac{\partial J_V}{\partial Q_m^u} = 2 \sum_i \frac{\partial V_i}{\partial Q_m^u} (V_i - V_i^{ref}) \quad (9)$$

만약 UPFC의 개수가 n 개라면, n 개의 UPFC에 대한 민감도를 구하면 다음과 같이 그래디언트(gradient)로 표현할 수 있다.

$$\vec{\nabla} J_P = \left[\frac{\partial J_P}{\partial P_1^u} \quad \frac{\partial J_P}{\partial P_2^u} \quad \dots \quad \frac{\partial J_P}{\partial P_n^u} \right]^T \quad (10)$$

$$\vec{\nabla} J_V = \left[\frac{\partial J_V}{\partial Q_1^u} \quad \frac{\partial J_V}{\partial Q_2^u} \quad \dots \quad \frac{\partial J_V}{\partial Q_n^u} \right]^T \quad (11)$$

그리고 Marquart 방법[8]을 적용하기 위해 Hessian행렬을 식 (10), (11)에 표현된 그래디언트 벡터로부터 구할 수 있다.

$$H_P = \vec{\nabla} J_P^T \cdot \vec{\nabla} J_P \quad (12)$$

$$H_V = \vec{\nabla} J_V^T \cdot \vec{\nabla} J_V \quad (13)$$

여기서 Hessian 행렬이 역행렬로 변환될 때, singular해질 수 있도록 다음과 같은 수정 과정이 필요하다.

$$H_{Pmod} = H_P + \alpha \cdot I \quad (14)$$

$$H_{Vmod} = H_V + \alpha \cdot I \quad (15)$$

여기서,
 α : 정수

I : H_P, H_V 와 같은 차원의 단위행렬

이 Hessian을 이용하여 아래와 같이 유효전력과 전압에 관한 탐색 벡터 \vec{S} 를 각각 구할 수 있다.

$$\vec{S}_P = -H_{Pmod}^{-1} \cdot \vec{\nabla} J_P \quad (16)$$

$$\vec{S}_V = -H_{Vmod}^{-1} \cdot \vec{\nabla} J_V \quad (17)$$

이 탐색 벡터는 안전도 향상을 위해 UPFC의 적절한 운전점을 찾는 데 이용된다. 다기의 UPFC에 대해 새로운 유효 및 무효전력의 값을 다음과 같이 찾게 된다.

$$\begin{aligned} [P_1^u \ P_2^u \ \dots \ P_n^u]^T_{new} = \\ [P_1^u \ P_2^u \ \dots \ P_n^u]^T_{old} + \vec{S}_P \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} [Q_1^u \ Q_2^u \ \dots \ Q_n^u]^T_{new} = \\ [Q_1^u \ Q_2^u \ \dots \ Q_n^u]^T_{old} + \vec{S}_V \end{aligned} \quad (19)$$

송전선로의 과부하 문제는 유효전력을 통해 개선할 수 있고, 모선의 전압 문제는 무효전력을 통해 개선할 수 있다. 안전도 지수 J 는 J_b 와 J_v 의 합으로 나타낸다. J 를 최소화하기 위해서는 J_b 와 J_v 가 동시에 감소해야 한다. 그림 2에 보듯이 J_b 와 J_v 의 최소화 문제는 서로 상관관계가 있으며, 기본적으로 두 가지의 목적은 상호 의존적이다.

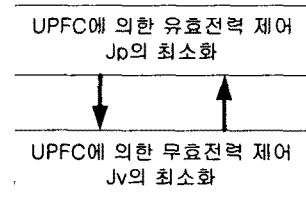


그림 2. J_b 와 J_v 의 상관관계

5. UPFC의 동작 모의 및 분석

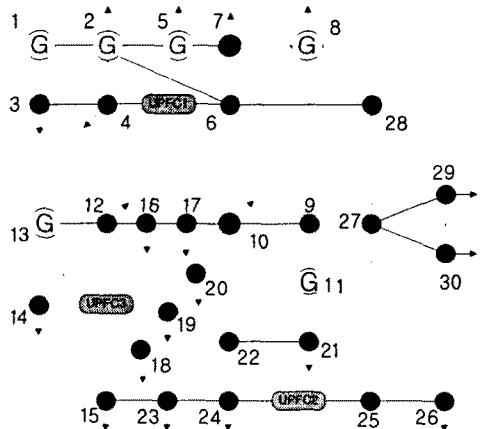


그림 3. 3대의 UPFC가 설치된 30모선 시스템

그림 3은 본 논문에서 모의에 사용할 30모선 시스템이다. 여기서는, 각 부하량을 20% 증가시키고, 각 선로의 사고를 상정해 본 결과 가장 심각한 경우 중 하나인, 28-27 선로에 사고가 발생한 경우 모의 시험을 통하여 UPFC에 의한 개선효과를 알아본다.

표 1. 부하량 120%, 28-27 상정사고 시 과부하 선로

	P	P/P_{max}
1-2	132.23	1.017
22-24	23.17	1.448
24-25	22.42	1.401
25-27	16.77	1.048
12-15	29.00	0.90625

전체 부하량이 120%이고, 28-27에 상정사고가 발생하였을 경우, 과부하 선로는 표 1과 같다. 여기서, 22-24-25-27의 선로가 과부하가 걸리는 이유는 그림 3에서 보듯이 28-27 선로가 사고에 의해 제거된다면, 28-27 선로를 통해 29, 30번 부하로 공급되어야 할 전력이 10-22-24-25-27을 통해 전력이 공급되기 때문이다. 이 표를 근거로 하여 1-2번의 과부하를 완화시키기 위해 4-6선로에 UPFC1을 설치하였고, UPFC2는 22-24-25-27의 선로 용량을 확보하기 위해 24-25 사이에 설치하였다. 마지막으로 UPFC3은 27-28의 선로 사고 이후에, 또 다른 이유로 계통 사고가 발생하였을 때, 12-15 선로의 용량 여유를 확보하기 위해서 설치하였다.

표 2. 부하량 120%, 28,27 상정사고시 UPFC 3대 설치

	P	P/P_{max}	UPFC 및 설치 위치
1-2	110.16	0.847	UPFC1 (4-6)
22-24	3.88	0.246	
24-25	24.16	1.510	UPFC2 (24-25)
25-27	16.08	1.005	
12-15	15.41	0.482	UPFC3 (12-15)

표 2는 표 1의 경우 각 선로에 UPFC를 설치하여 그것의 개선 효과를 확인하였다. UPFC1을 통하여 선로 1-2의 송전 용량을 1.017에서 0.847로 완화하였고, 선로 12-15에서는 UPFC3을 통하여 다른 계통사고에 대해 용량 여유를 확보하였다. 하지만, 22-24-25-27 선로의 경우, UPFC3의 유효 및 무효 전력 제어를 통하여 선로 용량을 확보하려고 하였지만, 24-25번 선로에서는 오히려 UPFC의 개선 효과가 나오지 않았다. 이는 계통의 심각한 상황, 즉 120%의 부하량, 선로 하나의 고장에 대해서는 UPFC의 기능으로 선로의 과부하 문제는 해결되지 못함을 의미한다. 특히 이러한 경우는 29번 및 30번 부하 모선에 직접적으로 연결되는 28-27 선로의 사고로 인해 더욱 그 영향은 크다. 따라서, 이러한 문제는 선로의 보강이나 발전력의 재 접근을 통하여 해결될 수 있을 것이라 사료된다.

표 3. UPFC 운용에 의한 안전도 지수의 변화

	J_P	$J_V(\times 100)$
사고 후	10.04825	33.7484
UPFC 운용	7.25013	21.1308

표 3은 28-27의 상정 사고로 인한 계통의 안전도 지수 J_P , J_V 가 UPFC1, UPFC2, UPFC3의 운용을 통하여 개선되었음을 보여주고 있다. J_P 의 값이 낮아졌다는 것은 선로의 조류가 보다 균등하게 흐르고 있음을 의미하고, J_V 값이 낮아졌다는 것은 각 모선의 전압이 기준전압에 보다 가까워졌음을 의미한다. 이를 통하여 과부하 및 사고를 겪고 있는 계통이 UPFC 운영을 통하여 전반적으로 계통 안전도가 향상되었음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 안전도 향상을 위한 다기 UPFC의 최적 운전점을 찾는 알고리즘을 제안하였다. UPFC가 전력 시스템에 미치는 영향을 분석하기 위해 수학적인 모델로서 UPFC의 분리형 모형을 이용하였다. 그리고 선로의 조류와 관계되는 안전도 지수 J_P , 모선의 전압과 관계되는 안전도 지수 J_V 를 제시하여 시스템의 안전도를 표현하였다. 안전도 지수 J_P 는 UPFC의 유효전력을 제어함으로써 최소화할 수 있고, J_V 는 UPFC의 무효전력을 제어함으로써 최소화할 수 있다. 각 안전도 지수를 최소화하기 위한 Marquadt 방법을 적용하는데 있어서 그레디언트 벡터(Gradient Vector)로부터 탐색 벡터가 유도되었고, Hessian 행렬이 구해졌다. J_P 와 J_V 를 최소화하는 문제는 서로 관계가 있으며, 하나의 지수가 다른 지수에 필수 불가결한 요소이다. 본 논문에서 제안된 알고리즘을 IEEE 30 모선에 적용하여 3대의 UPFC를 설치하여 모의해본 결과 안전도 지수들이 유효 및 무효 전력에 따라 개선되고 있음을 확인했다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [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] W.L.Fang, H.W.Ngan, Optimizing location of unified power flow controllers using the method of augmented Lagrange multipliers, IEE Proc.-Gener.Transm.Distrib., Vol.146, No.5, September 1999
- [4] M.A. Pai, Energy function analysis for power system stability, Kluwer Academic Publishers, 1989
- [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.
- [7] Atif S. Debs, "Modern Power Systems Control and Operation", KluwerAcademic Publishers, pp119-122, 1988.
- [8] S.S Rao, Engineering Optimization, John Wiley & Sons, 1996.