

전력시스템 안전도 향상을 위한 다기 UPFC의 최적 운전점 결정

論 文
50A - 8 - 6

The Optimal Operating Points of Multiple UPFC's for Enhancing Power System Security Level

林正煜* · 文承逸**
(Jung-Uk Lim · Seung-Il Moon)

Abstract - This paper presents how to determine the optimal operating points of Unified Power Flow Controllers (UPFC) the line flow control of which can enhance system security level. In order to analyze the effect of these devices on the power system, the decoupled model has been employed as a mathematical model of UPFC for power flow analysis. The security index that indicates the level of congestion of transmission line has been proposed and minimized by iterative method. The sensitivity of objective function for control variables of an UPFC has been derived, and it represents the change in the security index for a given set of changes in real power outputs of UPFC. The proposed algorithm with sensitivity analysis gives the optimal set of operating points of multiple UPFC's that reduces the index or increases the security margin and Marquart method has been adopted as an optimization method because of stable convergence. The algorithm is verified by the 10-unit 39-bus New England system that includes multiple FACTS devices. The simulation results show that the power flow congestion can be relieved in normal state and the security margin can be guaranteed even in a fault condition by the cooperative operation of multiple UPFC's.

Key Words : Unified Power Flow Controllers (UPFC), The Decoupled Model, Security Margin, Power Flow Congestion, Security Index

1. 서 론

유연송전시스템(Flexible AC Transmission Systems, FACTS)의 차세대 기기라고 불리는 Unified Power Flow Controllers(UPFC)는 전송선로에서 유효전력의 흐름을 결정하는 요소인 모선 전압의 크기 및 위상각과 선로 임피던스를 연속적으로 제어할 수 있는 기기이다. 현재까지 UPFC를 활용하여 전력시스템 운용 및 제어에 필요한 여러 가지 요구 조건들을 만족시키기 위한 연구가 계속되고 있다. 최근까지 UPFC에 대한 연구는 UPFC의 수학적 모형 개발, 개발된 수리 모형을 이용한 정적, 동적 해석, 조류 계산을 통한 비용 최소화, 과도 및 소신호 안정도 개선 등에 초점이 맞춰져 있었다[1-4]. 하지만, 전력시스템 정상상태 안전도(Security) 향상을 위해서 UPFC의 조류 제어를 어떤 식으로 할 것인가에 대한 연구는, 평시 및 사고시 전력시스템 운용에 있어서 안전도 확보가 중요하다는 사실을 누구나 인정하면서도 그동안 많은 연구가 수행되지는 못했다.

최근 대부분의 나라들이 전력 수요는 증가하지만 송전 선로를 새로이 추가하는 것에 어려움을 겪고 있어서 기존의 선

로를 통해 전달되는 에너지 양이 증가하는 상황으로 인해 전력시스템 안전도에 대한 문제가 더욱 부각되었다.

더구나, 국가간, 지역간 전력거래가 활발해지고 전력산업 규제 완화가 일반화되면서 안전도 문제는 더욱 더 강력하게 대두되었다. 앞에서 열거한 사실들로 인하여 송전 선로에서 흐르는 유효전력의 양은 선로 용량의 한계점 근처까지 이르렀고, 전력시스템 운용자가 시스템 안전도를 확보하여 계통 신뢰도를 유지하는 데에 많은 부담을 갖게 되었다.

UPFC가 설치된 전력 시스템의 경우, 안전도 문제는 UPFC의 신속한 제어 특성과 연속적인 보상 능력으로 향상될 수 있다[3]. UPFC는 선로의 송전 용량을 증대시키고 송전선에서의 유효 전력의 흐름을 신속하게 제어할 수 있기 때문에 특히, 전력소비가 많은 중부하 상태에서 전력을 공급하는데 있어서 큰 도움이 된다[4, 5]. UPFC는 송전선에 흐르는 조류를 제어함으로써 전력 조류 혼잡을 완화시킬 수 있기 때문에 결과적으로 전력 시스템의 안전도를 향상시킬 수 있다. 다기의 UPFC가 전력 시스템에 투입될 경우 안전도 향상을 위하여 이러한 기기들을 보다 효율적으로 운용하기 위한 운용 알고리즘은 안전도 향상을 위한 각 기기의 최적 운전점을 찾는 데 있다.

본 논문은 시스템의 안전도를 향상시키기 위하여 다기 UPFC가 계통에 투입되었을 때 최적의 운전점을 찾기 위한 알고리즘을 제안한다. 전력 시스템의 안전도는 송전 선로의 혼잡 상태를 나타내는 안전도 지수를 통해 표현된다. 안전도

* 正 會 員 : 서울대 電氣 · 컴퓨터工學部 博士課程

** 正 會 員 : 서울대 電氣 · 컴퓨터工學部 助教授 · 工博

接受日字 : 2001年 7月 9日

最終完了 : 2001年 8月 7日

지수 값을 줄인다는 것은 송전 전력의 여유분을 증가시키는 것을 의미한다. 따라서, 이러한 지수를 목적함수로 하고 수치적인 반복 계산을 통해 이를 최소화시켜 구한 결과가 바로 안전도 향상을 위한 UPFC의 최적 운전점이 된다. 본 논문에서는 목적함수를 감소시키는 방향을 찾기 위하여 다기의 UPFC가 제어하는 유효 전력의 변화량에 의한 안전도 지수의 변화량을 나타내는 민감도 벡터가 유도되었다. 해석적으로 구한 민감도 벡터는 안정적으로 최소점을 구할 수 있는 것으로 알려진 Marquart 방식에 적용되었다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 3기의 UPFC를 포함한 39모선 New England 전력 시스템을 대상으로 평시와 사고시로 나누어 모의 실험되어 그 타당성이 분명하게 증명되었다[6].

2. UPFC 정상상태 모형

UPFC가 투입된 전력시스템을 어떤 목적으로 운용하거나 계획하기 위해서는 우선적으로 UPFC를 포함한 전력 시스템에 대한 정상상태 해석이 필요하다. 이러한 정상상태 해석에는 조류계산이 필수적인데, 조류계산을 수행하기 위해서는 UPFC가 수학적으로 표현되어야만 한다. UPFC를 수학적으로 표현하는 방식은 UPFC가 설치된 선로 양단의 결합 또는 분리에 따라 두 가지로 나눌 수 있다. 전자를 결합형이라고 하고 후자를 분리형이라고 한다.[1] 본 논문에서는 결합형 모형보다 변수의 수가 적고, 또한 유효 및 무효 전력을 직접 제어 변수로 정해서 다기 UPFC가 설치된 전력시스템에 적용하기에 보다 적합한 분리형 모형을 채택하였다[7]. 그림 1에서는 분리형 정상상태 수리모형이 제시되었다.

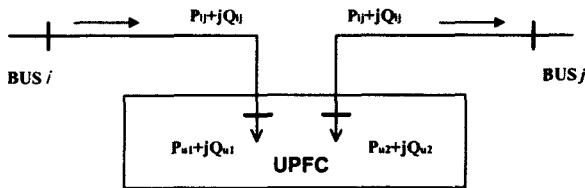


그림 1 UPFC의 분리형 수리 모형

그림 1에서 보는 바와 같이, UPFC는 선로 조류와 모선 전압을 제어할 수 있으므로 4개의 제어 변수 P_{u1} , Q_{u1} , P_{u2} , Q_{u2} 를 갖는다. UPFC에서 발생하는 손실을 무시한다면, i 번째 모선으로부터 j 번째 모선으로 흐르는 유효전력 P_{ij} 는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다. 다만, UPFC는 선로에 흐르는 유효전력을 제어할 수는 있지만, 유효전력을 자체적으로 생산하거나 소비할 수는 없으므로 식 (2)를 만족해야 한다.

$$P_{ij} = P_{u1} \tag{1}$$

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

UPFC의 무효전력 제어량인 Q_{u1} , Q_{u2} 는 모선 전압을 유지시키는데 필요한 것으로 UPFC의 무효전력 용량 내에서 임의의 값을 갖도록 지정된다. 따라서, 다기 UPFC가 전력 시스템에 투입된 경우, k 번째 UPFC의 제어 변수는 다음과 같이 표현된다. 본 논문에서는 UPFC가 선로 용량을 기존 값의

1.5배까지 증가시킬 수 있고[4], 선로 중앙에 위치하여 유효 및 무효전력을 제어한다고 가정한다[8].

$$UPFC_{k-th} = [P_{k1}^u \ Q_{k1}^u \ P_{k2}^u \ Q_{k2}^u], \quad P_{k1}^u + P_{k2}^u = 0 \tag{3}$$

여기서,

P_{k1}^u : k 번째 UPFC의 왼편 모선에서 제어하는 유효전력

Q_{k1}^u : k 번째 UPFC의 왼편 모선에서 제어하는 무효전력

P_{k2}^u : k 번째 UPFC의 오른편 모선에서 제어하는 유효전력

Q_{k2}^u : k 번째 UPFC의 오른편 모선에서 제어하는 무효전력.

3. 안전도 지수

전력시스템 상정사고 해석에서 널리 사용되는 안전도 지수 J 는 안전도 수준을 정의하는데 사용될 수 있다[9].

$$J = \sum_k w_k \left(\frac{P_k}{P_k^{max}} \right)^2 \tag{4}$$

여기서,

k : 송전 선로의 개수

w_k : 선로에 대한 가중치

P_k : k 번째 선로에 흐르는 유효전력량

P_k^{max} : k 번째 선로에 흐를 수 있는 최대 유효전력량, 선로용량.

본 논문에서 제시하는 안전도 지수 J 는 각 선로의 유효전력 용량에 대하여 현재 흐르는 유효전력량의 비를 제공한 다음, 각 선로에서 구한 값들을 모두 합한 결과로 나타난다. 이러한 지수는 각 선로에 흐르는 유효전력의 분포가 각 선로의 유효전력 용량에 대해 균일하게 분포한다면 작은 값을 갖게 될 것이다. 즉, 만약 특정 선로에 흐르는 조류가 선로 용량에 이르게 되는 현상인 선로 과부하가 발생하게 되면 안전도 지수 값은 크게 증가하게 될 것이다. 또한 과부하 선로가 많아지면 많아질수록 지수값도 이에 따라 증가하게 될 것이다. 이와 같은 사실은 이러한 지수가 선로 과부하로 인한 조류 혼잡의 정도를 수리적으로 보여주는 값을 뒷받침한다. 따라서, 이러한 안전도 지수를 감소시키는 노력은 전력 시스템의 안전도를 개선하려는 것과 직결됨을 알 수 있다.

안전도는 선로의 과부하 이외에도 전압에 대해서도 표시될 수 있다. 또한, 선로를 통해 수송되는 유효전력 수송량은 선로 양단의 모선 전압과 아주 밀접한 관계가 있다. 따라서, 안전도를 논의하는데 있어서 전압 문제는 중요한 의미를 갖는다. 하지만, UPFC의 경우, 이 기기가 설치된 양단 모선에 독립적으로 무효전력을 보상하여 전압 Profile을 개선시킬 수 있다. 본 논문에서는 UPFC의 무효전력 보상으로 인하여 모선 전압을 원하는 값으로 유지시킨다는 가정을 바탕으로 선로 조류의 제어를 통한 과부하 문제를 해결하는 방법을 제시하고자 한다.

4. 안전도 향상을 위한 UPFC 운전점 결정

식 (4)에서 각 선로의 가중치를 모두 1이라고 놓으면, 안전도 지수 J 는 다음과 같은 식이 된다.

$$J = \sum_i \sum_{j \neq i} \left(\frac{P_{ij}}{P_{ij}^{\max}} \right)^2 \quad (5)$$

여기서,

i, j : 모선 번호

P_{ij} : i 번 모선과 j 번 모선사이의 선로에 흐르는 유효전력량

P_{ij}^{\max} : i 번 모선과 j 번 모선사이의 선로에 흐를 수 있는 최대 유효전력량. 선로 용량.

다기 UPFC가 전력시스템에 설치되어 있을 경우, 안전도 지수를 최소화하기 위한 각 UPFC의 운전점을 결정하기 위해서는 민감도 분석이 선행되어야 한다. 안전도 지수에 대한 k 번째 UPFC가 제어하는 유효전력의 민감도는 $\frac{\partial J}{\partial P_k^u}$ 라고 표현할 수 있는데, 이러한 민감도 유도 결과는 다음과 같다.

$$\frac{\partial J}{\partial P_k^u} = \sum_i \sum_{j \neq i} 2 \left(\frac{V_i V_j}{X_{ij} P_{ij}^{\max}} \right)^2 \sin \theta_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial P_k^u} - \frac{\partial \theta_j}{\partial P_k^u} - \frac{\partial \theta_j}{\partial P_k^u} + \frac{\partial \theta_i}{\partial P_k^u} \right) \quad (6)$$

자세한 유도 과정은 부록에 나타나 있다. UPFC의 개수가 모두 n 개라면, 앞에서 제시한 방법으로 구한 n 개의 민감도 값은 다음과 같이 Gradient 벡터 형태로 묶을 수 있다.

$$\nabla J = \left[\frac{\partial J}{\partial P_1^u} \quad \frac{\partial J}{\partial P_2^u} \quad \dots \quad \frac{\partial J}{\partial P_n^u} \right]^T \quad (7)$$

목적함수인 안전도 지수를 최소화하기 위한 방법으로 채택된 Marquardt 방법[10]을 적용하기 위해서, 앞에서 구한 Gradient 벡터로부터 다음과 같이 Hessian 행렬을 구할 수 있다.

$$H = \nabla J \cdot \nabla J^T \quad (8)$$

Hessian 행렬은 보통 Singular가 되어 역행렬이 존재하지 않는 경우가 많다. 이를 방지하기 위해 Hessian 행렬을 변형시킬 필요가 있다. 최소화를 위한 방향 벡터는 다음과 같이 수정된 Hessian 행렬로부터 구할 수 있다.

$$H_{\text{mod}} = H + \alpha \cdot I \quad (9)$$

$$\vec{S} = -H_{\text{mod}}^{-1} \cdot \nabla J \quad (10)$$

여기서,

α : 상수값

I : H 와 같은 크기를 갖는 단위 벡터.

안전도를 향상시키기 위한 다기 UPFC의 최적 운전점을 찾는 과정에서 방향 벡터가 사용된다. 최적의 운전점을 찾기 위한 반복 계산과정에서 업데이트되는 유효 전력량은 다음과 같다.

$$[P_1^u \ P_2^u \ \dots \ P_n^u]^T_{\text{new}} = [P_1^u \ P_2^u \ \dots \ P_n^u]^T_{\text{old}} + \vec{S} \quad (11)$$

그림 2에서는 안전도 지수를 최소화하기 위하여 다기 UPFC의 운전점인 유효전력 조류 제어량을 결정하는 반복 계산 알고리즘이 제시되었다.

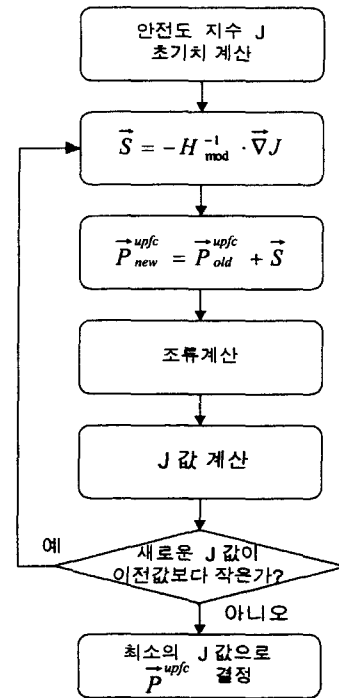


그림 2 안전도 지수를 최소화하기 위한 다기 UPFC의 운전점 결정 알고리즘

5. 사례 연구

본 논문에서 제안한 알고리즘이 그림 3에서 나타난 3대의 UPFC를 투입한 10기 39모선 New England 시스템에 적용되었다. 모의 대상 시스템 내에서의 발전기 모선과 부하 모선의 분포를 기초로 하여 시스템을 세 지역으로 나누었다. 표 1에 나타난 바와 같이 A 지역은 부하 집중 지역이고, B 지역과 C 지역은 발전기 집중 영역으로 정의할 수 있다.

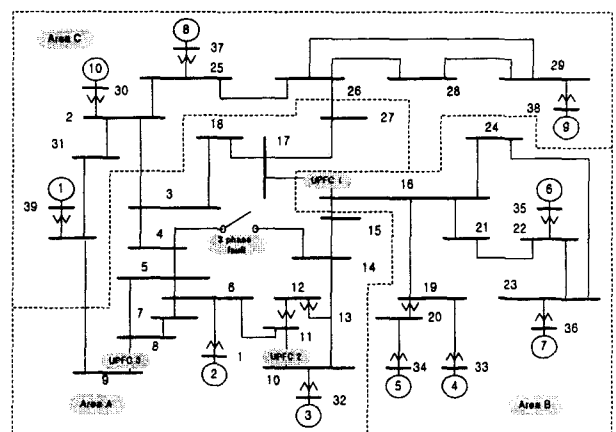


그림 3 3기의 UPFC가 투입된 New England 39모선시스템

표 1 각 지역에서의 발전량 및 부하량

지역	유효전력 발전량 [MW]	유효전력 부하량 [MW]	발전량 - 부하량 [MW]
A 지역	1127.1	2353.5	-1226.4
B 지역	2350	1787.1	562.98
C 지역	2620	1956.5	663.5

그림 3과 표 1을 참고하면, B지역과 C 지역에서 5 개의 송전선로를 통해 A지역으로 유효전력이 전송됨을 알 수 있다. 표 2에서는 5개의 선로에 대해서 각 선로에 흐르는 유효 전력량과 송전 용량에 대한 이들의 비가 제시되었다.

표 2 5개의 선로를 통해 전송되는 조류량 및 용량에 대한 비

모선 - 모선	유효전력 전송량 [MW]	전송량 / 송전용량
16 - 17	231	0.8
16 - 15	314	0.7
26 - 27	263	0.6
2 - 3	362	0.44
9 - 39	21	0.08

표 2를 참고하면 16번 모선과 17번 모선 사이에 연결된 선로가 선로 용량에 대한 조류량의 비율이 가장 높다. 이것은 선로의 유효 전력에 대한 여분이 가장 적다는 것을 의미한다. 이 선로는 16-15 선로와 함께 부하 지역 A와 발전 지역 B를 연결하는 중요한 선로이다. 부하지역 A에서 부하량이 늘어날 경우, 이들 선로에 과부하가 발생할 가능성이 가장 높기 때문에 안전도를 고려하여 16-17 선로가 UPFC 1의 설치 대상으로 선정되었다. UPFC 2의 경우는 UPFC 1의 운전시 지역 A내에서 유효전력 흐름의 여분이 가장 적은 선로에 대해 안전성을 확보하기 위해 설치되었다. 선로 사고시 UPFC 1과 UPFC 2를 운전할 경우, 8번 모선과 9번 모선 사이 선로의 과부하 문제를 막고 7번 모선과 8번 모선의 저전압 문제를 개선하고자 UPFC 3이 8-9 선로에 설치되었다.

다른 전력기기와 마찬가지로 UPFC도 내부의 변압기 등의 용량으로 인해서 자체 용량의 한계가 있다. 따라서, 어떤 계통 운용 조건에서는 UPFC가 제어하는 유효전력량이 용량 한계 내에 있지 않을 경우가 있다. 이런 경우 UPFC는 용량 한계점에서 운전해야 할 것이다. 이러한 경우들을 고찰하기 위해서 본 사례연구에서는 UPFC의 용량 한계를 정하지 않은 경우와 용량 한계를 0.5[p.u.]로 정한 경우에 대해 어떠한 차이가 있는지를 살펴보았다. 또한, 본 사례연구에서는 계통 운용 상황을 평시 및 사고시로 나누어 각각 모의 실험을 수행하였다.

5.1 평시 운전

평시 운전시 기준 부하 및 110% 부하에 대해서 3대의 UPFC가 제어하는 유효전력 및 안전도 지수 J를 표 3에 나타

내었다. UPFC 투입전 안전도 지수는 16.20이었지만, 용량 제한을 고려하지 않았을 경우에 UPFC 투입 후 안전도 지수는 15.58로 줄었다. 하지만, 용량 제한을 고려한 경우에는 UPFC 1 및 UPFC 3의 유효전력 제어용량이 0.5 p.u.의 한계에 걸리므로, 안전도 지수 J는 15.64로 용량 제한을 고려하지 않았을 경우보다는 약간 높다. 하지만, 이 값은 UPFC를 운전하지 않은 경우인 16.20보다는 큰 폭으로 줄었고, 이는 UPFC 운전으로 안전도가 개선되었음을 의미한다. 부하를 기준부하에서 110%로 증가시킨 경우에는 중부하로 인하여 선로에 흐르는 조류량이 증가하므로 안전도 지수는 기준부하시의 16.20에서 19.55로 크게 증가하였다. 하지만, 본 논문에서 제안한 방법으로 UPFC 운전점을 결정하여 운전한 결과, 안전도 지수가 용량제한을 고려하지 않은 경우에는 18.77로, 고려한 경우는 18.82로 감소하였다.

표 3 평시 대기 UPFC 운전

부하	상태	P_1^* [p.u.]	P_2^* [p.u.]	P_3^* [p.u.]	J	
100%	UPFC 운전하지 않은 경우	2.315	3.632	-0.208	6.20	
	UPFC 운전	용량 비고려	1.421	3.847	0.402	15.58
		용량 고려	1.815	3.941	0.292	15.64
110%	UPFC 운전하지 않은 경우	2.548	3.980	-0.228	19.55	
	UPFC 운전	용량 비고려	1.797	4.153	0.280	18.77
		용량 고려	2.048	4.317	0.272	18.82

5.2 사고시 운전

사고에 의한 송전 선로의 손실이 있는 경우에 UPFC를 이용하여 안전도를 향상시키는 과정을 모의하였다. 4번 모선과 14번 모선사이의 선로에 3상 지락 사고가 발생하여 사고 구간을 제거하였다. 이러한 상황에서 3대의 UPFC가 제어하는 유효전력, 안전도 지수 J, 과부하 선로의 개수를 표 4에 나타내었다. 기준 부하의 경우, 한 개의 선로 손실로 인해 다른 4개의 선로에 과부하가 발생했으며 안전도 지수 J는 16.20에서 사고 발생 후 19.75로 크게 증가하였다. UPFC의 용량 제한을 고려하지 않은 경우에는 안전도 지수 J가 18.13으로 줄어들었고, 적절한 조류 재배분으로 과부하가 걸린 모든 선로에서의 과부하 문제가 해결되었다. 용량을 고려하는 경우에는 UPFC 1과 UPFC 2의 유효전력 제어량이 용량 한계치에 걸리기 때문에 안전도 지수 J는 18.34로 약간 증가하였다.

110%의 중부하 상황에서 선로 손실이 발생하면 안전도가 크게 악화되어 지수가 23.84까지 증가되었다. 용량 제한을 고려하지 않은 경우에 UPFC의 운전을 통해서 안전도 지수를 21.55로 낮추었고, 모든 선로의 과부하 문제를 해결하였다. 하지만, 0.5 p.u.의 용량 한계를 고려하는 경우, 안전도 지수는 그렇지 않은 경우보다 22.24로 약간 증가했는데, 모든 UPFC가 용량 한계치에 걸려서 운전했기 때문이었다. 결국, 세 개의 선로에서는 과부하 문제가 해결되었으나 한 개의 선로는 여전히 과부하가 해결되지 못했다. 그림 4와 그림 5에서는

UPFC의 운전 이전과 이후의 모든 선로에서의 선로 용량에 대한 조류량의 비율이 제시되었는데, UPFC의 조류제어로 과부하가 해소되고 조류가 균등하게 분포됨을 알 수 있다. 본 모의실험을 통해 사고시 UPFC의 조류 제어로 안전도가 향상될 수 있음을 보였고, 사고시 모든 선로가 과부하 되지 않도록 하는 UPFC의 설치 위치와 용량을 계산할 수 있다는 가능성을 보였다.

표 4 사고시 대기 UPFC 운전

부하	상태	P_1^u [p.u.]	P_2^u [p.u.]	P_3^u [p.u.]	J	과부하 선로
100%	UPFC를 운전하지 않은 경우	3.292	5.225	-0.197	19.75	4 개
	UPFC 용량 비교려	2.690	5.907	0.057	18.13	0 개
	UPFC 운전 용량 고려	2.792	5.725	0.133	18.34	0 개
110%	UPFC를 운전하지 않은 경우	3.622	5.727	-0.228	23.84	4 개
	UPFC 용량 비교려	2.627	6.965	0.280	21.55	0 개
	UPFC 운전 용량 고려	3.122	6.227	0.272	22.24	1 개

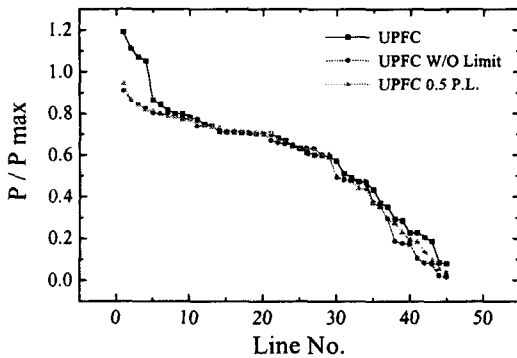


그림 4 선로 사고시 기준 부하에서 각 선로의 P/Pmax

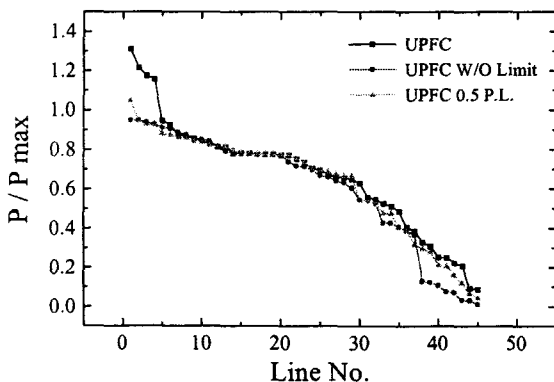


그림 5 선로 사고시 110% 부하에서 각 선로의 P/Pmax

6. 결 론

본 논문에서는 전력 시스템의 안전도를 향상시키기 위해서 대기 UPFC의 최적 운전점을 찾는 방법을 제안하였다. 이를 위해서 전력시스템의 안전도를 수치적으로 표현하는 안전도 지수를 제안하였고, 이러한 안전도 지수를 목적함수로 삼아 반복계산 알고리즘으로 최소화하는 방법을 제안하였다. 최소화를 위한 알고리즘으로는 Marquart 법을 적용하였는데, 이를 위해 안전도 지수에 대한 UPFC의 유효전력 제어량의 민감도를 유도하였다. 본 논문에서 유도한 민감도 벡터 및 이를 이용한 안전도 지수의 최소화, 최소화의 결과로 나타난 UPFC의 유효전력 제어량을 찾는 과정이 New England 10기 39모선 전력시스템에서 모의되었다. 본 논문에서 제안한 알고리즘의 특성은 다음과 같다.

- ◆ 본 논문에서 유도한 민감도는 UPFC에 의한 조류 제어량과 전력시스템 안전도와와의 관계를 표현한다.
- ◆ 안전도 지수를 목적함수로 하는 비선형 최소화 문제를 풀기 위하여 Marquart법을 적용하였는데, 민감도 벡터는 안전도 지수를 감소시키는 방향 벡터를 구하는데 사용되었다.
- ◆ 본 논문에서 제안한 알고리즘이 평시와 3상 사고시 선로 과부하로 악화된 안전도를 향상시키는 대기 UPFC의 운전점을 찾는 방법이 될 수 있음을 모의 실험을 통해 증명하였다.
- ◆ 본 논문의 연구 결과를 이용하여 전력 시스템 안전도의 측면에서 단일 선로 사고시 어떠한 선로도 과부하 되지 않게 할 UPFC의 설치 위치와 용량을 계산해낼 수 있는 가능성을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] H. Ambriz-Perez, E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, and A. De la Torre, "Incorporation of a UPFC model in an optimal power flow using Newton's method", IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No. 3, pp. 336-344, May 1998.
- [2] S. Y. Ge and T. S. Chung, "Optimal active power flow incorporating power flow control needs in Flexible AC Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 14, No. 2, pp.738-744, May 1999.
- [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] 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, pp.1629-1634, October 1997.
- [5] W. L. Fang and 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.
- [6] M. A. Pai, Energy function analysis for power system

stability: Kluwer Academic Publishers, 1989.

[7] T. H. Kim, J. C. Seo, J. U. Lim, S. I. Moon, J. K. Park, and B. M. Han, "A Decoupled Unified Power Flow Controller Model for Power Flow Considering Limit Resolution", IEEE PES Winter Meeting, New-York, Jan.-Feb., 1999.

[8] B. T. Ooi, M. Kazerani, R. Marceau, Z. Wolanski, F. D. Galiana, D. McGillis, and G. Joos, "Mid-Point Siting of FACTS Devices in Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, October 1997.

[9] Atif S. Debs, Modern Power Systems Control and Operation: Kluwer Academic Publishers, pp. 119-122, 1988.

[10] S. S. Rao, Engineering Optimization: John Wiley & Sons, 1996.

부 록

A. 민감도 유도 과정

i 번째 모선에서 j 번째 모선으로 흐르는 유효 전력의 흐름 P_{ij} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \sin \theta_{ij} \quad (a)$$

기서,

V_i, V_j : i 번째 모선 및 j 번째 모선의 전압 크기

X_{ij} : i 번째 모선과 j 번째 모선 사이의 선로 리액턴스

θ_{ij} : i 번째 모선과 j 번째 모선 전압의 위상각 차이.

따라서, 4 장의 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J = \sum_i \sum_{j \neq i} \left(\frac{V_i V_j \sin \theta_{ij}}{X_{ij} P_{ij}^{\max}} \right)^2 \quad (b)$$

모선 전압의 크기의 변화는 $\sin \theta_{ij}$ 의 변화에 비해 상대적으로 작으므로, 안전도 지수의 변화에 대한 모선 전압 크기의 변화가 무시될 정도로 충분히 작다고 가정하면, k 번째 UPFC의 유효전력 제어량에 대한 안전도 지수의 편미분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial J}{\partial P_k^u} = \left(\frac{\partial J}{\partial \theta_{ij}} \right) \left(\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial P_k^u} \right) \quad (c)$$

여기서, P_k^u 는 k 번째 UPFC에서 제어하는 유효전력량.

식 (b)과 식 (c)에 의해서 다음과 같은 편미분식을 구할 수 있다.

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

식 (d)의 θ_{ij} 에 대한 편미분식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \theta_{ij}}{\partial P_k^u} = \frac{\partial \theta_i}{\partial P_k^u} - \frac{\partial \theta_j}{\partial P_k^u} \quad (e)$$

식 (e)를 식 (d)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial J}{\partial P_k^u} = \sum_i \sum_{j \neq i} 2 \left(\frac{V_i V_j}{X_{ij} P_{ij}^{\max}} \right)^2 \sin \theta_{ij} \cos \theta_{ij} \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial P_k^u} - \frac{\partial \theta_j}{\partial P_k^u} \right) \quad (f)$$

k 번째 UPFC의 유효전력 변화에 의한 i 번째 모선의 위상각 변화는 다음과 같다.

$$\Delta \theta_i = \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial P_k^u} \right) \Delta P_k^u \quad (g)$$

본 논문에서 제안한 UPFC 수리모형에 대한 식 (3)이 만족되어야 하고, UPFC 양단의 유효전력 변화에 대한 위상각의 변화가 각각 다르므로 식(g)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \theta_i = \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial P_{ki}^u} \right) \Delta P_{ki}^u - \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial P_{kj}^u} \right) \Delta P_{kj}^u \quad (h)$$

따라서,

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial P_k^u} = \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial P_{ki}^u} \right) - \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial P_{kj}^u} \right) \quad (i)$$

저 자 소 개



임 정 욱 (林正煜)

1970년 9월 27일 생. 1996년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2001년 현재 동 대학원 전기 컴퓨터 공학부 박사과정

Tel : 02-880-7257

E-mail : julim@powerlab.snu.ac.kr



문 승 일 (文承逸)

1961년 2월 1일 생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 오하이오 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1993~1997년 전북대 전기공학과 조교수. 1997~현재 서울대

전기 컴퓨터공학부 조교수

Tel : 02-880-1821

E-mail : moonsi@plaza.snu.ac.kr

$$\frac{\partial \theta_j}{\partial P_k^u} = \left(\frac{\partial \theta_j}{\partial P_{k1}^u} \right) - \left(\frac{\partial \theta_j}{\partial P_{k2}^u} \right) \quad (j)$$

식(f), (i), (j)로부터 안전도 지수에 대한 k 번째 UPFC의 유효전력 제어량의 민감도는 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\partial J}{\partial P_k^u} = \sum_i \sum_{j \neq i} 2 \left(\frac{V_i V_j}{X_{ij} P_{ij}^{\max}} \right)^2 \sin \theta_{ij} \cdot \cos \theta_{ij} \left(\frac{\partial \theta_i}{\partial P_{k1}^u} - \frac{\partial \theta_i}{\partial P_{k2}^u} - \frac{\partial \theta_j}{\partial P_{k1}^u} + \frac{\partial \theta_j}{\partial P_{k2}^u} \right) \quad (k)$$

식 (k)과 4 장의 식 (8)이 같은 식이므로 이것으로 유도과정은 마무리된다.

B. 시스템 데이터

모선 데이터

Bus	V	P _G	Q _G	P _L	Q _L
1	0.982	0	0	9.2	4.60
2	1.0	0	0	0	0
3	1.0	0	0	322.0	2.40
4	1.0	0	0	500.0	184.0
5	1.0	0	0	0	0
6	1.0	0	0	0	0
7	1.0	0	0	233.8	84.0
8	1.0	0	0	522.0	176.0
9	1.0	0	0	0	0
10	1.0	0	0	0	0
11	1.0	0	0	0	0
12	1.0	0	0	7.5	88.0
13	1.0	0	0	0	0
14	1.0	0	0	0	0
15	1.0	0	0	320.0	153.0
16	1.0	0	0	329.0	32.3
17	1.0	0	0	0	0
18	1.0	0	0	158.0	30.0
19	1.0	0	0	0	0
20	1.0	0	0	628.0	103.0
21	1.0	0	0	274.0	115.0
22	1.0	0	0	0	0
23	1.0	0	0	247.5	84.60
24	1.0	0	0	308.6	-92.20
25	1.0	0	1.0	224.0	47.20
26	1.0	0	0	139.0	17.0
27	1.0	0	0	281.0	75.5
28	1.0	0	0	206.0	27.6
29	1.0	0	0	283.5	26.9
30	1.0475	250.0	0	0	0
31	1.0	0	0	0	0
32	0.9831	650.0	0	0	0
33	0.9972	632.0	0	0	0
34	1.0123	508.0	0	0	0
35	1.0493	650.0	0	0	0
36	1.0635	560.0	0	0	0
37	1.0278	540.0	0	0	0
38	1.0265	830.0	0	0	0
39	1.03	1000.0	0	1104.0	250.0

선로 데이터

From	To	R[p.u.]	X[p.u.]	B[p.u.]	P _{max} [MW]
2	31	0.0035	0.0411	0.6987	208.05
31	39	0.0010	0.0250	0.7500	208.04
2	3	0.0013	0.0151	0.2572	819.39
2	25	0.0070	0.0086	0.1460	401.66
3	4	0.0013	0.0213	0.2214	237.79
3	18	0.0011	0.0133	0.2138	117.70
4	5	0.0008	0.0128	0.1342	443.8
4	14	0.0008	0.0129	0.1382	419.35
5	6	0.0002	0.0026	0.0434	818.8
5	8	0.0008	0.0112	0.1476	526.550
6	7	0.0006	0.0092	0.1130	714.650
6	11	0.0007	0.0082	0.1389	719.494
7	8	0.0004	0.0046	0.0780	295.690
8	9	0.0023	0.0363	0.3804	246.930
9	39	0.0010	0.0250	1.2000	238.650
10	11	0.0004	0.0043	0.0729	495.940
10	13	0.0009	0.0043	0.0729	559.50
13	14	0.0018	0.0101	0.1723	561.0
14	15	0.0009	0.0217	0.3660	240.40
15	16	0.0009	0.0094	0.1710	421.416
16	17	0.0007	0.0089	0.1342	276.590
16	19	0.0016	0.0195	0.3040	595.790
16	21	0.0008	0.0135	0.2548	412.70
16	24	0.0003	0.0059	0.0680	56.28
17	18	0.0007	0.0082	0.1319	270.640
17	27	0.0013	0.0173	0.3216	131.330
21	22	0.0008	0.0140	0.2565	848.20
22	23	0.0006	0.0096	0.1846	88.380
23	24	0.0022	0.0350	0.3610	480.1
25	26	0.0032	0.0323	0.5130	228.20
26	27	0.0014	0.0147	0.2396	410.010
26	28	0.0043	0.0474	0.7802	163.20
26	29	0.0057	0.0625	1.0290	242.70
28	29	0.0014	0.0151	0.2490	488.80
11	12	0.0016	0.0435	0	73.5
12	13	0.0016	0.0435	0	79.69
19	20	0.0007	0.0138	0	347.90
1	6	0.0000	0.0250	0	1092.22
10	32	0.0000	0.0200	0	970.70
19	33	0.0007	0.0142	0	890.70
20	34	0.0009	0.0180	0	712.0
22	35	0.0000	0.0143	0	924.1
23	36	0.0005	0.0272	0	789.80
25	37	0.0006	0.0232	0	850.69
2	30	0.0000	0.0181	0	676.18
29	38	0.0008	0.0156	0	1172.9