

안전도 향상을 위한 UPFC 운전 전략

이동우*, 안선주*, 문승일*, 윤종수**, 장병훈**, 김수열**, 문승필**
*서울대학교, **한전 전력연구원

UPFC Operation Strategy for Enhancement of System Security

Dong-Woo Lee*, Seon-Ju Ahn*, Seung-Il Moon*, J. S. Yoon**, B.H. Chang**, S.Y. Kim**, and S.P. Moon**
*Seoul National University, **Korea Electric Power Corporation

Abstract - The enhancement of system security is one of the most important objectives of UPFC operation. To describe the system security, the index related to line flows and bus voltages are used. For the enhancement of security, the operation point of UPFC is set to minimize the index. This paper proposes the minimization algorithm using the Marquardt method. Moreover, the coefficients minimizing iteration number will be derived. For verification of the proposed operation scheme, numerical simulations have been performed on power system in Kwanju area, Korea with a UPFC.
Keywords - UPFC (Unified Power Flow Controller), system security, security index, Marquardt method.

1. 서 론

현재 우리나라는 전력수요는 급격하게 증가하고 있는 데 반해 전력 생산 및 전송 설비의 신규 건설은 환경과 지리적 문제 등 여러 가지 사회적, 경제적 제약으로 어려움이 따르고 있다. 따라서 기존의 전력설비를 보다 효율적으로 활용하기 위한 방법으로 유연 송전 시스템(FACTS)에 대한 연구를 활발히 진행하였고, 그간의 연구를 바탕으로 강진변전소에 80MVA 용량의 UPFC를 설치하여 상용운전하고 있다.

FACTS 기기가 전력계통에 설치될 경우 그 특성이 기존 계통과는 확연히 달라질 수밖에 없으므로 대규모적인 적용을 위해서는 정밀한 해석기술을 바탕으로 한 운용 및 제어기법을 필요로 한다. 현재 강진 UPFC는 변전소 및 지역급전소에서 지정된 운전 시나리오에 따라 수동 설정치 운전(Set-point control) 방식으로 운영되고 있다. 그러나 계통의 환경은 항상 가변하며 다양한 원인에 의하여 예상하지 못한 외란이 발생하므로 수동 설정치 운전방식으로는 이러한 계통의 변화에 대응하는 데 한계가 있다. 본 논문에서는 계통에 상정사고가 발생하거나 중부하 상태에서 UPFC의 적절한 운전 값을 얻는 방법을 제시할 것이다. 이 운전 값은 일련의 반복과정을 통해 얻어지게 되는데 파라미터들을 적절히 조정함으로써 반복회수를 줄일 수 있다. 이 파라미터들을 결정하는 과정에 대해 논의할 것이다.

2. 본 론

2.1 안전도

전력시스템에서 안전도(Security)란 발전기 탈락 사고 및 송전선로 사고 등 전력시스템을 구성하는 설비에 예기치 못한 사고가 발생했을 때, 사고로 인한 외란에 얼마나 잘 견디어 낼 수 있는가에 대한 것으로 안정적으로 전력을 공급하기 위해 전력시스템 운용에 있어서 중요하게 다루어져야 할 제어이다[1]. UPFC가 설치된 전력 시스템의 경우, UPFC의 신속한 제어 특성과 연속적인 보상 능력으로 시스템 안전도를 향상시킬 수 있다. 전력시스템의 안전도를 평가하는 방법은 임의의 상정사고가 일어난 상황에 대해 전력시스템의 여러 조건들이 운전한계를 벗어나는(선로과부하, 전압강하, 주파수변동 등)을 점검해 보는 것이다.

2.2 안전도 지수(Security Index)

전력 시스템의 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 수치적인 반복 계산을 통해 이를 최소화시켜 구한 결과가 바로 안전도 향상을 위한 UPFC의 최적 운전점이 된다.

2.2.1 조류 안전도 지수

선로 조류에 대한 안전도 지수 J_p 는 다음 식 (1)과 같이 정의된다[2].

$$J_p = \sum_k \omega_k \left(\frac{P_{line_k}}{P_{line_k}^{Max}} \right)^2 \quad (1)$$

위의 식에서 알 수 있듯이 지수 J_p 는 각 선로의 유효전력 용량에 대하여 현재 흐르는 유효전력량의 비를 제곱한 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 갖

게 될 것이다. 즉, 만약 특정 선로에 흐르는 조류가 선로 용량에 이르게 되는 선로 과부하가 발생하게 되면 안전도 지수 값은 크게 증가하게 될 것이다. 또한, 과부하 선로가 많아지면 많아질수록 전력 조류에 대한 지수 값도 이에 따라 증가하게 될 것이다.

2.2.2 전압 안전도 지수

안전도 지수는 선로의 과부하 이외에도 전압에 대해서도 표시될 수 있다. 모선 전압의 크기는 해당 모선에 연결된 선로에 흐를 수 있는 조류량에 큰 영향을 줄 뿐만 아니라 선로나 모선 사고시 그 영향을 가장 크게 받는 물리량이다. UPFC의 경우 기기가 설치된 양단 모선에 독립적으로 무효전력을 보상하여 전압에 대한 안전도를 개선시킬 수 있다. 전압에 대한 안전도 지수는 부하 모선의 전압이 기준 전압의 크기로부터 얼마나 벗어났는가를 나타내는 것으로 다음과 같이 정의된다[2].

$$J_V = \sum_{i \in PQbus} \omega_i (V_i - V_{i,ref})^2 \quad (2)$$

발전기 모선에서는 발전기 자체에서 무효전력을 제어하여 단지 전압을 원하는 크기로 유지시킬 수 있으므로 전압에 대한 안전도 지수는 부하모선 즉, PQ 모선을 대상으로 한다. UPFC에서 무효전력을 제어하여 안전도 지수가 감소하는 방향으로 변화하면 부하 모선의 전압 크기가 변동하고 결과적으로 전압 안전도 지수가 줄어들게 된다.

2.3 안전도 지수의 최소화

2.3.1 조류 및 전압 안전도 지수의 최소화

참고문헌 [2]은 다기의 UPFC가 계통에 설치되어 있는 경우 Marquadt method를 사용하여 조류 및 전압 안전도 지수를 최소화 하는 방법을 제시하고 있다. Marquadt method를 사용하기 위해서는 최소화하려는 목적함수의 gradient 와 search direction을 만들기 위한 Hessian matrix,가 필요하다. 조류 안전도 지수는 UPFC의 유효전력 레퍼런스를 조정해서 최소화하고, 안전도 지수 최소화의 결과로 UPFC의 유효전력 레퍼런스를 얻게 된다. 조류 안전도 지수의 gradient(∇J_p), Hessian matrix(H_p), search direction (S_p)은 다음과 같다.

$$\nabla J_p = \left[\frac{\partial J_p}{\partial P_1^U} \frac{\partial J_p}{\partial P_2^U} \dots \frac{\partial J_p}{\partial P_n^U} \right]^T \quad (3)$$

$$H_p = \nabla J_p \cdot \nabla J_p^T \quad (4)$$

여기에서 Hessian matrix가 singular matrix가 되는 것을 방지하기 위해

$$H_{pmod} = H_p + \alpha I \quad (5)$$

$$S_p = -H_{pmod}^{-1} \cdot \nabla J_p \quad (6)$$

최소화의 결과로 유효전력 레퍼런스는 다음 값이 된다.

$$[P_1^U \ P_2^U \ \dots \ P_n^U]^T_{new} = [P_1^U \ P_2^U \ \dots \ P_n^U]^T_{old} + S_p \quad (7)$$

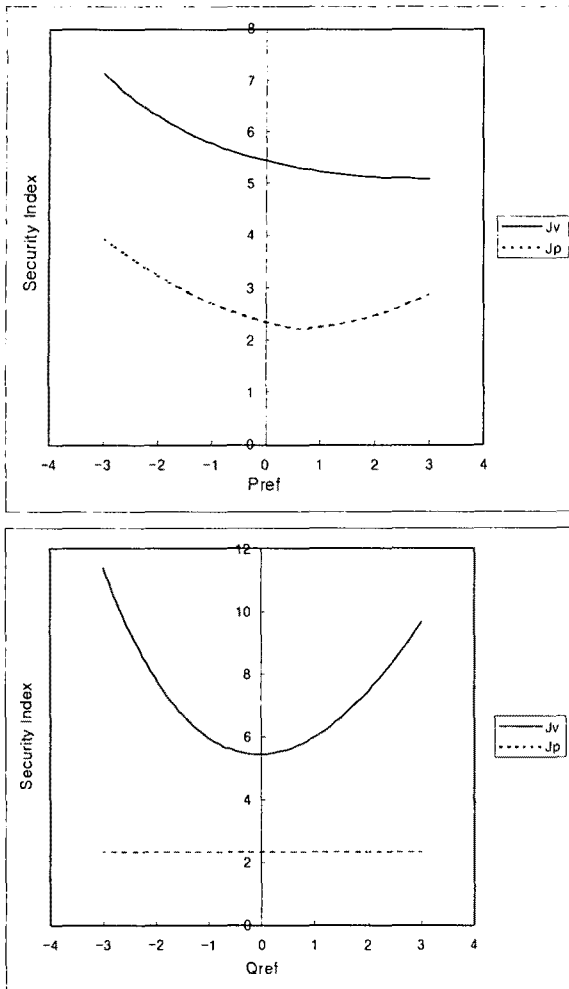
전압 안전도지수는 UPFC의 무효전력 레퍼런스를 조정해서 최소화하고, Marquadt method에 필요한 gradient, Hessian matrix, search direction은 조류 안전도 지수와 비슷한 방법으로 구한다.

2.3.2 안전도 지수 최소화 알고리즘

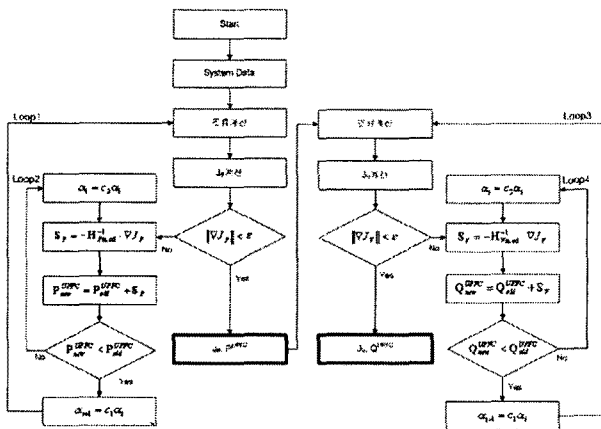
전력계통의 안전도는 앞에서 정의한 것과 같이 조류 안전도와 전압 안전도로 정의가 되고, 이 두 안전도 지수를 동시에 최소화하는 값이 계통의 안전도를 최대화하는 값이다. 한 번의 계산을 통해 유효전력 및 무효전력 레퍼런스를 모두 구하는 방법이 가장 좋겠지만, 각각의 레퍼런스들의 관계가 복잡하고 수식을 구하는 것조차 어렵기 때문에 앞에서 각각의 레퍼런스를 구하는 방법이 현실적이다. 이때에 어떤 유효전력 레퍼런스와 무효전력 레퍼런스 중 어떤 것을 먼저 구하는냐가 문제가 될 것이다. 이 문제를 해결하기 위해 10기 39모선에서 시뮬레이션을 해보았다. 그림1은 무효전력 레퍼런스를 고정하고 유효전력 레퍼런스만 변경시켰을 때, 조류 안전도 지수와 전압 안전도 지수가 어떻게 변하는가를 나타낸 것이고, 그림2는 반대로 유효전력 레퍼런스를 고정하고 무효전력 레퍼런스를 변화시키면서 테스트한 결과이다.

이 테스트의 결과로 무효전력 레퍼런스를 조절할 때에는 조류 안전도 지수가 거의 바뀌지 않음을 알 수 있다. 따라서 유효전력 레퍼런스를 먼저 조절한 후 무효전력 레퍼런스를 조절하면 조류 안전도 지수와 전압 안전도 지수를 모두 최소화하는 각 레퍼런스를 구할 수 있을 것이다. Marquadt

method를 이용하여 UPFC의 레퍼런스를 구하는 알고리즘을 그림3에 나타내었다.



<그림 1> UPFC 레퍼런스 제어의 영향



<그림 2> 안전도 지수 최소화 알고리즘

2.4 광주지역 계통에서의 시뮬레이션

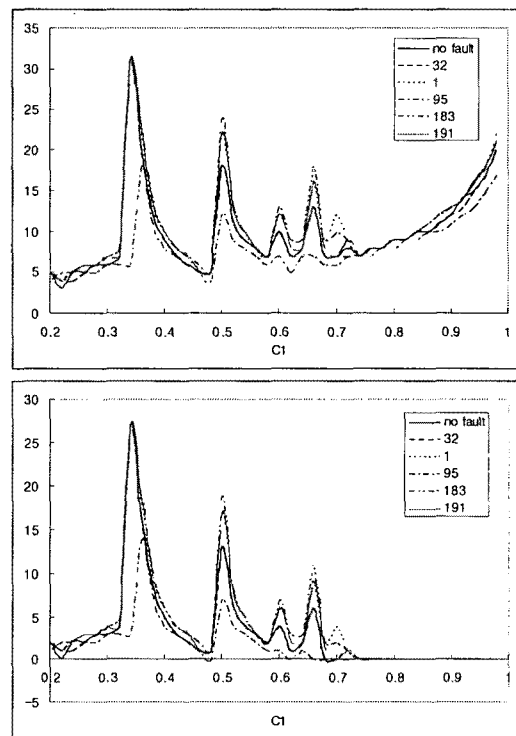
앞 절에서 구한 안전도 지수 최소화 알고리즘을 2007년 광주지역 계통 데이터를 이용해서 시뮬레이션을 해보았다. 시뮬레이션은 각각 중부하시와 경부하시에 UPFC가 설치되어 있지 않을 때의 안전도 지수를 구한 후, UPFC를 이용하여 안전도 지수 최소화 알고리즘 적용하여 그 결과를 비교해 보았다. 또한, 선로 탈락 사고를 고려하여, 각 선로를 하나씩 끊어서 시뮬레이션을 한 후 결과를 비교해 보았다. 그 결과, 현재 UPFC가 설치되어 있는 위치가 계통에 크게 영향을 주지 않은 곳으로 선정이 되어있기 때문에 전체적으로 안전도 지수가 크게 변하지는 않고 있지만, 어느 정도 개선 효과가 있는 것으로 나타났다. 만약 UPFC가 UPFC의 영향이 큰 지역에 설치되어 있다면, 더욱 큰 효과가 있을 것으로 예상된다. 표1에 중부하시, 상정사고를 고려했을 때 조류 안전도 지수의 개선효과를 나타내었다.

<표 1> 상정사고를 고려한 조류 안전도 지수 최소화 결과

사고선로	신남원 - 광양3	일곡 - 신광주1	신화순3 - 신광주3	영광NP#1 - 신광주3
안전도 지수 최소화 이전 JP	95.579	94.495	94.137	91.898
안전도 지수 최소화 후 JP	94.781	93.635	93.336	90.862

2.5 안전도 지수 최소화 알고리즘의 수행시간 최소화

Marquadt method에서 계수 C1과 C2를 조절하여 그림 3에 나타난 Loop1, Loop2, Loop3, Loop4의 반복회수를 각각 조절할 수 있다. C1은 0과 1사이의 값을 가지고 C2는 1이상의 값을 가진다. C2는 1/C1의 값으로 결정하고 C1을 변화시키면서 광주지역 데이터를 기준으로 시뮬레이션을 해보았다. 이 시뮬레이션은 상정사고가 없을 때와, 각 중요 선로의 상정사고를 고려한 것에 대해 이루어 졌다. 그림3은 각각 Loop1과 Loop2의 반복회수를 나타낸다. 시뮬레이션 결과 조류 안전도 지수 최소화에서는 Loop1과 Loop2 모두 최소값을 가지는 0.22로 C1을 결정하는 것이 가장 타당하다는 결론을 얻을 수 있었고, 전압 안전도 지수 최소화에서는 Loop3과 Loop4 모두 최소값을 가지는 0.96으로 결정하는 것이 가장 타당하다는 결론을 얻을 수 있었다.



<그림 3> Loop1, Loop2 반복회수

3. 결 론

본 논문에서는 계통에 상정사고가 발생했을 때의 적절한 UPFC의 운전 값을 얻는 방법에 대해서 제안하였다. UPFC의 운전 값인 P, Q 레퍼런스들은 계통의 안전도 지수를 최소화하는 과정을 통해 얻어지게 되며 이 값들은 계통의 조류들을 적절히 재분배함으로써 계통의 안전도를 증가시킬 것이다. 이 알고리즘은 SCADA 시스템과 연계된 UPFC 자동운전 시스템에 탑재가 되어 상정사고가 발생했을 때 UPFC의 운전 값을 내어주면 효과가 더욱 클 것으로 예상된다.

본 논문에서는 안전도 지수 최소화 알고리즘의 수행시간을 최소화하는 방안 에 대해서도 논의하였다. 그것은 안전도 지수 최소화 알고리즘에서 사용된 Marquadt method의 상수들을 적절히 결정하는 간단한 방법이다. 계통의 상태는 매우 빠른 속도로 변하기 때문에 각각의 상황에 맞는 적절한 운전 값을 얻기 위해서는 알고리즘의 수행시간이 매우 중요한 문제이다.

[참 고 문 헌]

[1] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation Operation and Control," second Ed. John Wiley & Sons, INC. pp410-452, 1996
 [2] Lim, J U; Moon, S I, "An operation scheme of UPFC's considering operating objectives and states", Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE Volume1, 610-615, 2002