

UPFC 운용에 의한 전력 시스템 최적 전압 유지

김 태현*, 문 채주, 박 종근, 문 승일, 서 장철, 한 병문
 목포대학교 전기제어공학부, 서울대학교 전기공학부, 명지대학교 전기정보제어공학부

Maintaining Optimal Voltage Profile by the Operation of UPFC

Tae-HyunKim*, Chae-JooMoon, Jong-KeunPark, Seung-IlMoon, Jang-CheolSeo, Byung-MoonHan
 Mokpo National University, Seoul National University, Myongji University

Abstract - A method to compute the reactive powers of the added buses by the decoupled UPFC model for the optimal voltage profile is presented, by which the voltage magnitudes of PQ buses can get closer to the reference value(usually one p.u.). The performance index for assessing how much the voltage magnitude is closer to the reference value is defined as the squared sum of the present voltage minus the reference voltage multiplied by the weighting number associated with the relative importance of the buses. Numerical example in a 10-unit 39-bus power system with 2 UPFC's shows that the performance index can be very much reduced by operating multi UPFC's with the reactive powers for the optimal voltage profile proposed in this paper.

1. 서 론

UPFC가 있는 전력 계통에서, 원하는 조류 상황을 유지하도록 UPFC를 제어하고 운용하기 위해서는 정상상태 해석이 우선적으로 필요하다. 이를 위해서는 조류계산을 수행하여야 한다. UPFC의 조류 계산 모형으로는 분리된 모형이 널리 사용되고 있다. 이 방법에 의하면 1개의 UPFC당 2개의 모션만 추가하면, 기존의 조류계산 프로그램을 전혀 수정하지 않고도 UPFC가 있을 때의 조류계산을 수행할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 분리된 UPFC 모형을 이용한 정상 상태에서의 기초 연구로서, UPFC가 존재하는 전력 계통의 조류 계산 결과 직렬 전압 그리고/또는 병렬 전류 크기가 제한 값을 초과하였을 경우 제한 값 이내가 되도록 UPFC 모션의 유효 전력과 무효 전력 또는 전압 크기를 바꾸어 주는 체계적인 방법이 제시되었다(1)-(3). 그 밖에 분리된 UPFC 모형을 이용한 연구로서 정상상태 뿐만 아니라 과도 상태에서의 모형 개발(4), 다른 FACTS 기기와와의 종합적인 조류 제어 연구(5) 등 활발한 연구가 진행되고 있다. 정상 상태에서 UPFC는 여러 가지 목적으로서 운용될 수 있다. 분리된 모형을 이용하여 원하는 목적을 수행하도록 UPFC를 운용하기 위한 값을 구하는 연구는 아직 거의 되어있지 않은데, 전력 계통에서 UPFC를 운용하기 위해서는 반드시 필요하다. 본 논문에서는 전력 품질을 결정하는 중요한 요소 중의 하나인 전압 크기를 우리가 규정값(보통 1p.u.)에 가깝도록 하는 최적 전압 운용을 위한 UPFC 모션의 무효전력 값을 구하는 방법을 제시하였다. 평가 지수는 PQ 모션에서 현재 전압 크기와 원하는 전압 크기의 차이의 제곱에 모션별 중요도에 의한 가중치를 곱한 값의 합으로 정의하였다. 사례 연구로서 39모션 계통에서 UPFC가 2개 있을 때, 제시한 방법에 의하여 UPFC 모션의 무효전력 값을 지정하면 평가 지수 값이 훨씬 작아지므로, 최적 전압 유지 즉 전력 품질 향상이 가능함을 보였다.

2. 본 론

2.1 조류 계산을 위한 분리된 UPFC 모형

본 논문에서 이용한 조류 계산을 위한 분리된 UPFC 모형은 그림 1과 같다. i 모션과 j 모션이 끊어져 있는데, 이는 조류 계산의 효과적인 수행을 위함이고, 실제로는 여기에 UPFC가 있다.

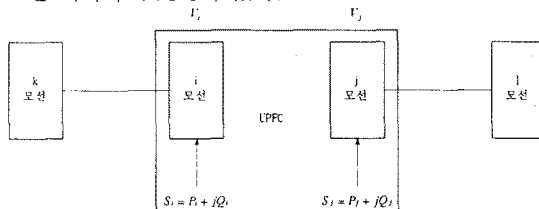


그림 1 조류 계산을 위한 분리된 UPFC 모형
 Fig. 1 A decoupled UPFC model for power flow

이 모형에 의하면 UPFC 설치 전에 전력 계통에 있던 기존의 k와 l 모션 사이에 UPFC를 설치함으로써 새롭게 i와 j 두 모션을 추가하여야 한다. 그러므로 1개의 UPFC당 두 모션을 추가하면, 기존의 조류 계산 프로그램을 전혀 수정하지 않고도 UPFC가 있을 때의 조류 계산을 수행할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. i와 j 두 모션은 PV 또는 PQ 모션 중에 원하는 대로 지정할 수 있다는 장점도 있다.

i와 j 두 모션의 유효 전력과 무효 전력 또는 전압 크기의 값은 UPFC의 동작에 의하여 변화시킬 수 있으며, 이 값을 지정하는 방법은 (1), (2)에 자세히 설명되어 있다. UPFC는 유효 전력을 흡수하거나 저장할 수 없으므로, i와 j 모션의 유효 전력의 합은 항상 0이다. 따라서, 1개의 UPFC에서 의해서 생긴 i와 j 두 모션에서 세 개의 모션 변수 값(1개의 유효 전력과 2개의 무효 전력 또는 2개의 전압 크기)을 독립적으로 변화시킬 수 있다.

2.2 최적전압 유지를 위한 UPFC 모션의 무효전력

본 논문에서는 PQ 모션의 전압 크기를 원하는 값에 가깝도록 하는 최적 전압 운용을 위한 UPFC 모션의 무효 전력 값을 구하는 방법을 제시하였다. 유효 전력에 비해 무효 전력이 PQ 모션의 전압 크기에 미치는 영향은 훨씬 작으므로 유효 전력에 의한 영향은 무시하였다. 계산의 편의상 UPFC에 의해서 추가된 i와 j 두 개의 모션은 전부 PQ 모션으로 가정하였다. 따라서 최적 전압 유지를 위해서, UPFC의 설치에 의해서 생긴 모션(그림 1에서 i, j)의 무효 전력(P_i, P_j)을 변화시켰다.

모션에 대한 변수는 식 (1)-(3)과 같이 가정하였다.

- K : UPFC가 없을 때의 모션 수 (1)
- M : UPFC에 의해서 생긴 모션 수 (2*UPFC 수)(2)
- K+M : UPFC가 설치된 계통의 모션 수 (3)

2.2.1 평가 지수와 제어 변수

본 논문에서 전압 크기에 의한 전기 품질을 정의하는 평가 지수(6)를 식 (4)과 같이 정의하였다.

$$\text{평가 지수} : \text{최소화 } J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} \omega_k (V_k - V_{kref})^2 \quad (4)$$

$$V_k : k\text{모선의 실제 전압 크기} \quad (5)$$

$$V_{kref} : k\text{모선의 원하는 전압 크기이고 보통 } 1(\text{p.u.}) \quad (6)$$

$$\omega_k : k\text{모선 전압 크기의 중요도에 의한 가중치} \quad (7)$$

본 논문에서는 식(9)를 바꾸어 식(4)를 최소화하였다.

$$m : \text{UPFC의 설치에 의해서 생긴 모선} \quad (8)$$

$$Q_m : \text{UPFC의 설치에 의해서 생긴 모선의 무효전력} \quad (9)$$

2.2.2 제안한 알고리즘

최적전압운용을 위한 UPFC 모선의 무효전력을 구하기 위하여 제안한 알고리즘의 흐름도는 그림 2와 같다.

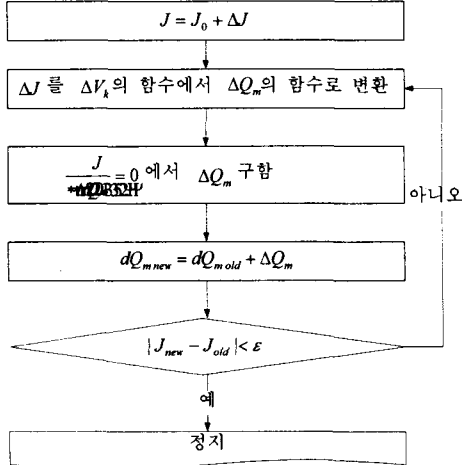


그림 2 최적 전압 운용을 위한 UPFC 모선의 무효 전력 계산 과정

Fig. 2 Calculation process of the reactive powers of the UPFC buses for the optimal voltage profile

점두어 Δ 는 각 단계에서의 계산에 의한 변화량을 의미하며, 점두어 d 는 UPFC가 동작하지 않을 때에 비하여 변화한 양이다[1][2].

평가 지수 J 를 최소화하기 위한 Q_m 의 값을 구하기 위하여 본 논문에서 제시한 방법은 다음과 같다.

J , V_k , Q_m 가 현재의 값(아래 첨자 0가 붙은 항)에 가상의 변화(점두어 Δ 가 붙은 항)가 생긴다고 가정하면 식 (10)-(12)과 같이 표시할 수 있다.

$$J = J_0 + \Delta J \quad (10)$$

$$V_k = V_{k0} + \Delta V_k \quad (11)$$

$$Q_m = Q_{m0} + \Delta Q_m \quad (12)$$

식 (4)에 식 (10)-(11)을 대입하면 J_0 와 ΔJ 를 식 (13)-(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J_0 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} \omega_k (V_{k0} - V_{kref})^2 \quad (13)$$

$$\Delta J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} \omega_k (2\Delta V_k (V_{k0} - V_{kref}) + \Delta V_k^2) \quad (14)$$

J_0 는 상수이기 때문에 J 의 최소 값을 구하는 문제는 ΔJ 의 최소 값을 구하는 문제와 같으므로 본 논문에서는 J 대신 ΔJ 의 최소화 문제를 생각한다.

식 (14)과 같이 ΔJ 가 ΔV_k 의 함수인데, 제어 변수는 ΔQ_m 이므로 이에 대한 함수로 변환하여야 한다. 그러기 위해서는 ΔV_k 와 ΔQ_m 와의 관계식을 구하여야 한다. 본 논문에서는 다음과 같은 과정으로 이 관계식을 구하였다.

뉴턴 램슨법에 의한 조류 방정식은 식 (15)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (15)의 왼쪽에 자코비안의 역행렬을 곱하면 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \theta}{\partial P} & \frac{\partial \theta}{\partial Q} \\ \frac{\partial V}{\partial P} & \frac{\partial V}{\partial Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (16)$$

본 논문에서는 식 (16)의 자코비안의 역행렬의 요소 ($\frac{\partial V}{\partial Q}$)들을 이용하여 ΔV_k 와 ΔQ_m 와의 관계식을 구하였다.

식 (17)과 같이 ΔV_k 를 ΔQ_m 들의 선형 결합으로 나타냈다.

$$\Delta V_k = \sum_{m=1}^{UPFC\text{모선}} X_{km} \Delta Q_m \quad (17)$$

여기서 X_{km} 은 간단하게 나타내기 위하여 도입한 변수이며 식 (18)과 같다.

$$X_{km} = \frac{\partial V_k}{\partial Q_m} \quad (18)$$

식 (17)을 식 (14)에 대입하면, 식 (19)와 같이 ΔJ 가 ΔV_k 에 대한 식에서 ΔQ_m 에 대한 식으로 변환된다.

$$\Delta J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} [2\omega_k (V_{k0} - V_{kref}) \sum_{m=1}^{UPFC\text{모선}} X_{km} \Delta Q_m + (\sum_{m=1}^{UPFC\text{모선}} X_{km} \Delta Q_m)^2] \quad (19)$$

ΔJ 를 ΔQ_m 에 대해서 미분하여 0과 같다고 놓은 식을 풀면 식 (20)과 같이 ΔJ 를 최소화하기 위한 ΔQ_m 을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial \Delta J}{\partial \Delta Q_m} = \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} X_{km} [\omega_k (V_{k0} - V_{kref}) + \sum_{m=1}^{UPFC\text{모선}} X_{k(N+M)} \Delta Q_m] = 0 \quad (20)$$

이 식을 행렬로 표현하면 식 (21)과 같다.

$$[\Delta Q_m] = -[\omega XX]^{-1} * [\omega VX] \quad (21)$$

여기서 $[\omega XX]$, $[\Delta Q_m]$, $[\omega VX]$ 은 식 (22)-(24)와 같다.

$$[\omega XX] = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} \omega_k X_{k(K+1)}^2 & \dots & \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} \omega_k X_{k(K+1)} X_{k(K+M)} \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} \omega_k X_{k(K+M)} X_{k(K+1)} & \dots & \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} \omega_k X_{k(K+M)}^2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[\Delta Q] = \begin{bmatrix} \Delta Q_{K+1} \\ \dots \\ \Delta Q_{K+M} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$[\omega VX] = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} \omega_k (V_{k0} - V_{kref}) X_{k(K+1)} \\ \dots \\ \sum_{k=1}^{PQ\text{모선}} \omega_k (V_{k0} - V_{kref}) X_{k(K+M)} \end{bmatrix} \quad (24)$$

식 (21)에서 구한 $[\Delta Q_m]$ 를 현재 UPFC 모선의 무효 전력의 값에 더하면 식 (25)과 같이 UPFC 모선의 무효 전력 값이 바뀌게 된다.

$$\Delta Q_{m\ new} = \Delta Q_{m\ old} + \Delta Q_m \quad (25)$$

$\Delta Q_{m\ old}$: 이전 단계의 UPFC 모선의 무효전력(26)

$\Delta Q_{m\ new}$: 현재 단계의 UPFC 모선의 무효전력(27)

UPFC 모선의 무효 전력 값이 바뀌면, PQ 모선의 전압 크기가 기준 전압 크기에 가까워져서 평가 지수의 값이 감소하게 되며, 반복 여부를 결정하기 위하여 식 (28)을 이용하였다. 식 (28)이 만족되지 않으면 식 (17)부터 반복하고, 반대로 식 (28)이 만족되면 반복을 중단하고 끝낸다.

$$|V_{new} - V_{old}| < \epsilon \quad (28)$$

J_{old} : 이전 단계의 평가 지수 (29)

J_{new} : 현재 단계의 평가 지수 (30)

ϵ : 허용 오차 (31)

2.2 수치 예

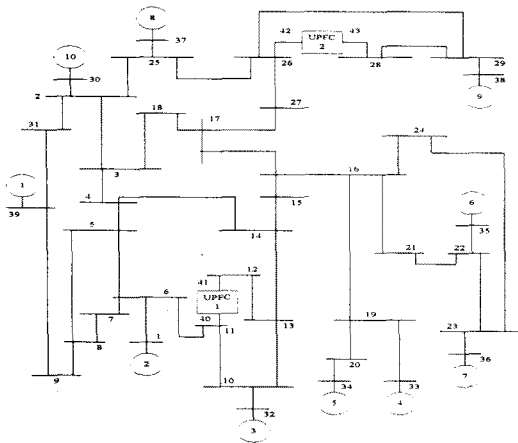


그림 3 UPFC가 2개 있는 10기 39모선 전력 계통
Fig. 3 10-unit 39-bus power system with 2-UPFC's

본 논문에서 제시한 방법에 의하여 구한 UPFC 모선의 무효전력에 의해서 평가 지수의 값이 작아진다는 것을 보이기 위하여 그림 3과 같이 UPFC가 2개 있는 39모선 계통(7)에서 적용하였다. UPFC가 설치되기 전에는 39(=K) 모선이었는데, UPFC 2개가 설치되어 40~43번 4(=M)개의 모선이 추가되어 43(=K+M) 모선이 되었다.

UPFC 1이 연결된 모선(11번과 12번 모선)과 UPFC 2가 연결된 모선(26번과 28번 모선)의 중요도에 의한 가중치를 변화시켜서 다음과 같은 5가지 경우에 대해서 최적 전압 운용을 실시하였다. 표 1에 보이지 않은 모선의 가중치는 전부 1이다.

표 1 최적 전압 운용 적용시 가중치

Table 1 the weighting numbers in optimal voltage profile operation

사례 가중치	ω_{11}	ω_{12}	ω_{26}	ω_{28}
1	1	1	1	1
2	2	2	1	1
3	0.5	0.5	1	1
4	1	1	2	2
5	1	1	0.5	0.5

본 논문에서 제시한 방법으로 계산을 반복함에 따라 각 단계에서 평가 지수의 값은 표 2와 같이 급격히 감소한다. 평가 지수에서 10^{-5} 를 생략하였다. 허용 오차를 5×10^{-9} (= ϵ) 으로 지정하였더니 표 2와 같이 3번 반복으로 수행이 중단되었다.

표 2 각 단계별 평가 지수

Table 2 the performance indices of each stage

사례	반복	초기 조건	1단계	2단계	3단계
1		11.6555	5.3904	4.8962	4.8959
2		12.6431	5.4048	4.9053	4.9051
3		11.1616	5.3836	4.8892	4.8889
4		13.2689	5.4979	5.0467	5.0467
5		10.8488	5.3386	4.7408	4.7394

3. 결 론

UPFC의 운용 방법의 일례로서 PQ 모선의 전압 크기를 원하는 전압 크기에 가깝도록 하는 UPFC 모선의 무효전력 값을 구하는 방법을 제시하였다. UPFC의 조류계산 모형으로서 분리된 모형을 사용하였다. 이 모형은 UPFC 1개당 2개의 모선만 추가하면 기존의 조류계산 프로그램을 그대로 이용할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 사례 연구로서 10기 39모선 계통에서 UPFC가 2개 있을 때 적용하였는데, 본 논문에서 제시한 방법에 의하여 계산된 무효전력 값을 UPFC 모선에 지정하면 평가 지수의 값이 훨씬 작아지므로 원하는 최적 전압 운용을 위하여 성공적으로 수행할 수 있음을 보였다.

(참 고 문 헌)

- (1) Tae-Hyun Kim, Jang-Cheol Seo, Jung-Uk Lim, Seung-Il Moon, Jong-Keun Park and Byung-Moon Han, "A decoupled UPFC Model for power flow considering limit resolution," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Feb. 1999, pp 1190-1195
- (2) 김 태현, 서 장철, 임 정욱, 문 승일, 박 종근, 한 병문, "조류계산을 위한 분리된 모형에서의 제한값 해결", 대한전기학회 논문지, 제48권, 제7호, pp 824-831, 1999.7
- (3) Jung-Uk Lim, Tae-Hyun Kim, Jang-Cheol Seo, Seung-Il Moon, "A Limit Resolution Method of UPFC for Power Flow Studies", Symposium on Applied Electromagnetics Power System and Controls, Nov. 1999
- (4) A. Nabavi-Niaki, M. R. Iravani, "Steady-State and Dynamic Models of UPFC for Power System Studies" IEEE Trans on PWRs, Vol. 11, No. 4, Nov. 1996, pp 1937-1943
- (5) Douglas J. Gotham and G.T. Heydt, "Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices", IEEE Trans. Power Systems, vol. 13, no. 1, February 1998, pp. 60-65
- (6) Atif-S Debs, "Modern power system control and operation", Kluwer academic publishers, 1987, p. 119
- (7) M. A. Pai, "Energy function analysis for power system stability", Massachusetts: Kluwer academic publishers, 1989, p. 223-225