

UPFC를 포함한 전력시스템에서의 연속조류계산

임 정욱\*                      문 승일  
 서울대학교 공과대학 전기공학부

Continuation Power Flow Method for Power System including UPFC

Jung-Uk Lim\*                      Seung-Il Moon  
 School of Electrical Engineering, Seoul National University

**Abstract** - In this paper, continuation power flow for power system including UPFC has been performed. The decoupled model, by which power flow can be performed without any modification of conventional power flow program is used as steady-state model. A numerical example has been given to analyze the influence on the voltage stability by UPFC.

1. 서 론

효율적이고 유연한 전력계통의 구성 및 운용을 도모할 수 있도록 하는 FACTS(Flexible AC Transmission System)기술이 최근에 새로이 제안되고 있다. 여러 FACTS 기기 중에서 UPFC(Unified Power Flow Controller)는 선로에 걸리는 전압을 임의의 크기와 위상을 갖도록 신속히 제어하여 선로로 전송되는 유·무효전력을 보상하는 FACTS 기기이다. UPFC는 정상상태에서 전력조류를 제어할 뿐만 아니라 과도 및 동적 안정도를 개선하는데 효과적이다.

UPFC는 L. Gyugyi에 의해 개념이 정립되었으며, 직·병렬 보상 기기로서 기존에 개발된 FACTS 기기에서 할 수 있는 여러 가지 기능을 동시에 종합적으로 수행할 수 있다[1]. 이러한 UPFC의 정상상태 수리모형을 살펴보면, L. Gyugyi, K. S. Smith, K. K. Sen, A. J. F. Keri 등은 UPFC를 구성하는 두 개의 인버터에 대해서 직렬 인버터의 경우는 직렬 전압원으로, 병렬 인버터의 경우는 병렬 전류원으로 나타내었다[2,3,4].

M. Noroozian은 직렬 인버터를 모형화한 직렬 전압원을 등가의 전류원으로 바꾸고 이를 UPFC의 양단 모션 전압을 곱하여 전류원에 의한 유·무효 전력을 계산하고 이를 이용하여 UPFC가 포함된 전력시스템에서의 조류계산을 수행하는 방법을 제안하였다[5]. 이 방법은 직렬 인버터를 전압원과 직렬 리액턴스로 모형화하여 전압원의 크기와 위상, 리액턴스 값을 직접적으로 고려할 수 있는 장점이 있었지만, UPFC에서의 유·무효 전력을 고려하기 위해 Jacobian을 수정해야만 하는 어려움이 있었다. 또한 직렬 인버터와 병렬 인버터를 모두 전압원과 직렬 임피던스로 모형화하여 UPFC 양단에서의 유·무효 전력과 두 개의 인버터에 의한 유·무효 전력을 계산하였고, 이를 통하여 조류계산을 수행하였다[6]. 이러한 조류 계산 모델은 최적조류계산에 적용되었다[7]. 앞에서 언급한 형태의 조류계산 모형은 UPFC의 양단이 서로 연결되어 있는 형태로 결합된 모형이라고 한다.

이에 반하여 분리된 모형이란 UPFC의 양단이 분리되어 있는 형태를 띠며, 기존 조류계산 프로그램을 그대로 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다. Nabavi-Niaki는 UPFC의 수리 모형을 과도 안정도 모형, 소신호 안정도 모형, 정상상태 모형의 3가지로 분류하였는데, 정상상태 조류계산을 위한 모형으로 분리된 모형을 제안하였다[8]. 또한 D. J. Gotham은 UPFC 뿐만 아니라, TCSC, TCP, STATCOM 등 여러 FACTS 기기를 세 가지의

부류로 나누고 조류계산을 위한 분리된 모형을 각각 제시하였다[9]. 본 논문에서는 UPFC의 결합된 모형과 분리된 모형을 비교하였고 연속조류계산을 위하여 분리된 모형을 채택하였다.

최근에 관심이 부족 높아진 전압 안정도 문제에 대한 분석에 있어서 중요한 일은 정적 전압안정도 임계점(critical point)을 찾아내는 것이다. 하지만 전압 불안정점을 찾아내는데 있어서 일반적으로 조류계산시 이용되는 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson)법은 전압 불안정점과 그 부근에서 자코비안이 특이성을 갖게 되어 조류계산의 해를 구할 수 없었고 전압 불안정점을 구할 수 없었다.

이러한 문제를 해결하고자 강인한 수렴특성을 갖는 연속 알고리즘을 전력조류계산에 적용하여 정상상태 전압 불안정점에서 전력 조류계산의 해를 구할 수 있는 연속 조류계산(Continuation Power Flow : CPF)이 소개되었다[10]. 현재 국내적으로 연속조류계산에 대하여 많은 연구가 진행되고 있는데 최근에는 연속조류계산의 예측 과정에 있어서 스텝크기를 효과적으로 선택하는 알고리즘을 제시한 연구가 있었다[11].

본 논문에서는 UPFC가 포함된 전력시스템에 있어서 연속조류계산을 수행하여 보았다. 또한 연속조류계산의 결과를 통하여 UPFC를 통한 전력 시스템의 운용이 전압안정도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 UPFC의 정상상태 모형

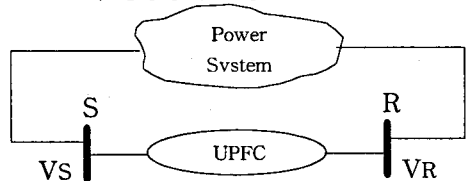


그림 1. UPFC가 포함된 전력시스템

그림 1에서는 UPFC가 포함 전력시스템을 그림으로 나타내었다. 정상상태 UPFC 등가모형을 두 가지로 분류할 수 있는데 결합된 모형과 분리된 모형이 그것이다.

2.1.1 결합된 모형

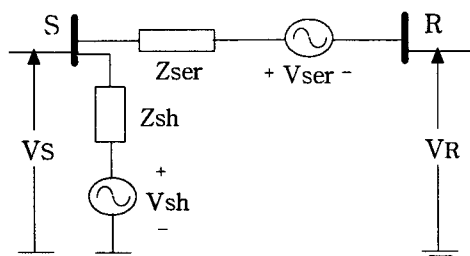


그림 2. UPFC의 결합된 모형

그림 2을 보면 UPFC의 직렬 인버터와 병렬 인버터를 각각 이상 전압원(때로는 전류원)과 변압기의 임피던스의 결합으로 모형화한 것을 알 수 있다. 전압원의 크기와 위상, 임피던스에 의해 UPFC 양단의 유·무효전력을 직접 계산할 수 있으나 조류계산시 자코비안 수정이 불가피하고 조류 제어에 직접적으로 적용하기에 불편하다는 단점이 있다.

### 2.1.2 분리된 모형

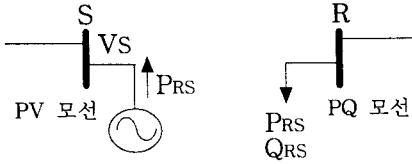


그림 3. UPFC의 분리된 모형

그림 3에서는 UPFC의 분리된 모형이 제시되었다. 그림을 보면 UPFC 양단이 분리되어 각각 PV모선 또는 PQ모선으로 바뀐 것을 알 수 있다. 원하는 선로조류와 모선전압 또는 무효전력을 직접 지정하여 조류계산을 할 수 있다는 장점이 있는 반면 UPFC의 동작 한계치(인버터 및 변압기 용량)를 초과해 운전되고 있는지 여부를 직접적으로 알 수 없다는 단점이 있다.

## 2.2 연속조류계산

연속조류계산이란 기준상태에서 부하가 서서히 변화할 때, 이를 따라 변하는 전력조류 방정식의 해를 전압불안 정점까지 연속적으로 구하는 방법을 말한다.

### 2.2.1 전력조류방정식의 재구성

연속 알고리즘을 조류계산에 적용하기 위해서는 부하 파라미터  $\lambda$ 를 전력조류방정식에 포함시켜야 하는데 이를 포함한 전력조류방정식은 다음과 같다. 단, 아래첨자 L은 부하, G은 발전, T는 주입(injection)을 의미한다.

$$\begin{aligned} P_{Gi}(1 + \lambda k_{Gi}) - P_{Lio} - \lambda(k_{Li} S_{base} \cos \phi_i) - P_{Ti} &= 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Lio} - \lambda(k_{Li} S_{base} \sin \phi_i) - Q_{Ti} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $P_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i V_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \nu_{ij})$

$$Q_{Ti} = \sum_{j=1}^n V_i V_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \nu_{ij})$$

$0 \leq \lambda \leq \lambda_{critical}$  :  $\lambda=0$ (기준부하),  $\lambda = \lambda_{critical}$ (임계부하)

i 모선 전압 :  $V_i \angle \delta_i$ , j 모선 전압 :  $V_j \angle \delta_j$

$y_{ij} \angle \nu_{ij}$  : 모선 어드미턴스 행렬  $Y_{BUS}$ 의 i행 j열 요소

$P_{Lio}, Q_{Lio}$  : 기준부하일 때 i모선에서의 유·무효전력

$k_{Li}, k_{Gi}$  :  $\lambda$ 의 변화에 의한 i모선 부하, 발전량의 변화율

$\phi_i$  : i 모선의 부하변화에 해당하는 역률각

$S_{base}$  :  $\lambda$ 의 적합한 비율을 정하기 위한 피상전력

$P_{Gi}$  : i 모선의 기준상태에서의 유효전력 발전량

### 2.2.2 예측과정(Predictor)

부하파라미터를 포함하여 새로 구성된 전력조류방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(\delta, V, \lambda) = 0 \quad (2)$$

현 시점의 조류방정식 해로부터 다음 시점의 해의 방향을 나타내는 접선벡터를 구하기 위해 식(2)의 양변을 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_\delta & F_V & F_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

국부적으로 파라미터화된 연속 알고리즘을 적용하여 자코비안  $F_\delta, F_V$ 의 수렴성을 보장하기 위해서 연속조류계산의 예측과정에서는 접선벡터  $[d\delta \ dV \ d\lambda]^T$  성분 중 어느 하나를 선택하는 식을 다음과 같이 추가한다.

$$\begin{bmatrix} F_\delta & F_V & F_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} [t] = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,  $e_k$ 는 k번째 성분만 1이고 나머지 성분은 0인 열벡터로 접선벡터의 성분 중 어느 하나의 크기를 1로 정하는 식이 된다. 한편 식(4)의 오른쪽 항에서의 부호는 선택된 접선벡터 성분의 부호를 유지시키기 위한 것이다. 식(4)을 풀어 현 시점의 해로부터 다음 시점의 해에 대한 추정치는 다음식으로 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \delta^* \\ V^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ V \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma$ 는 스텝크기를 나타내는데 수정과정의 수렴반경안에 다음해의 추정값이 존재하도록 선택되어야 한다.

### 2.2.3 수정과정(Corrector)

수정과정에서는 예측과정에서 구한 다음해의 추정치로부터 Newton-Raphson법을 이용, 조류방정식의 해를 구하게 된다.  $x = [\delta \ V \ \lambda]^T$ 이라고 하고  $x_k$ 를 예측과정에서 선택한 연속 파라미터인 k번째 요소라고 하자. 이때,  $x_k = \eta$ (연속 파라미터의 다음해 추정치)이 되고, 이 식이 덧붙여져 확장된 전력조류방정식을 이용하여 해를 구하는 과정에서 연속 파라미터는 예측과정에서 계산된 추정치로 고정된다. 수정과정에서의 확장된 전력조류방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F(x) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0] \quad (6)$$

식(6)을 풀어 해를 구할 때에도 확장된 자코비안을 이용하기 때문에 특이성 문제를 회피할 수 있게 된다. 그림 4에서는 연속조류계산의 예측과정과 수정과정을 부하-전압 곡선으로 나타내었다.

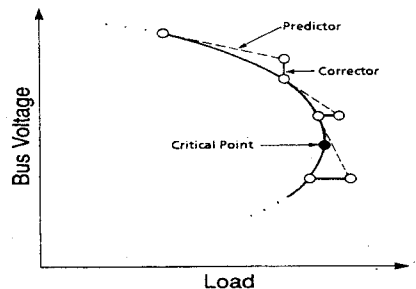


그림 4. 연속조류계산에서의 예측 및 수정과정

### 2.3 UPFC가 포함된 계통에서의 연속조류계산

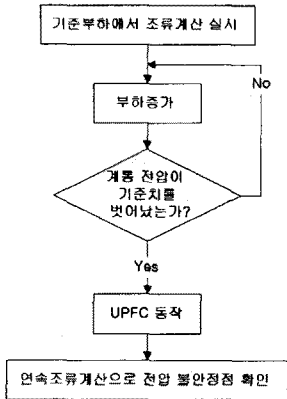


그림 5. UPFC가 포함된 전력시스템에서의 연속조류계산

부하증가로 전압이 기준치를 벗어날 경우 UPFC가 동작하게 되는데, 이럴 경우 연속조류계산으로 전압불안정점을 계산하는 과정을 그림 5에서 나타내었다. UPFC가 부동작시와 동작시에 대해서 각각 전압불안정점과 계통 최대부하를 구하고 비교할 수 있다.

### 2.4 수치계산

본 논문에서는 UPFC가 포함된 2기 5모선 계통을 연속조류계산의 대상으로 하였는데, 그림 6에 나타내었다.

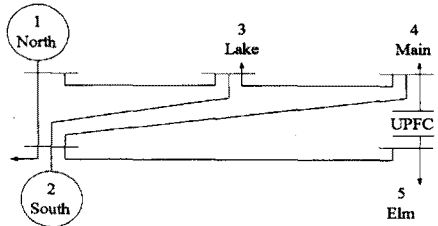


그림 6. 예제 계통

대상계통에서는 정전력 부하모델을 사용하였고 일정역률을 유지하도록 부하를 증가시켰다. 또한 전체부하 증가량을 각 발전기의 초기 발전 분담비에 따라 분담시켜 전력수급조건을 만족하도록 하였다. 그림 7에서는 UPFC의 부동작시와 동작시 5번 모선에서의 P-V곡선을 나타내었다.

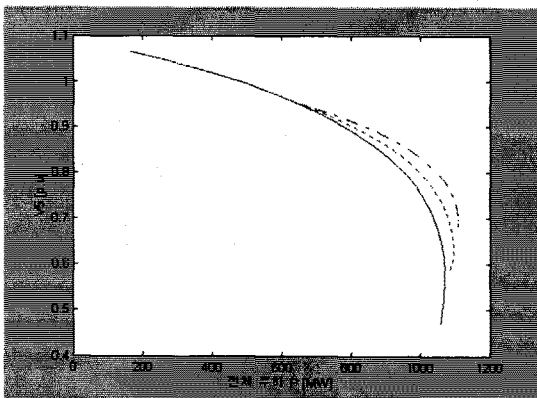


그림 7. 5번 모선에서의 P-V 곡선

UPFC를 이용하여 4번 모선과 5번 모선사이의 선로조류를 제어했을 경우에는 각 모선에서의 전압 위상만 변동될 뿐 전압 크기는 거의 변하지 않았다. 따라서 실선으로 표시된 UPFC 부동작의 경우와 같다고 볼 수 있다. 이 때 정적 전압 불안정점에서의 전체계통 유효부하는 1061.8[MW]로 계산되었다.

부하가 증가하여 5번 모선의 전압이 0.95[p.u]가 되었을 경우에 UPFC가 동작하여 무효전력을 공급할 경우가 그림 7에 나타나 있다. 점선으로 표시된 경우가 10[MVar]를 보상한 경우이고 일점쇄선으로 표시된 경우가 20[MVar]를 보상한 경우이다. 이 때 전압 불안정점에서의 전체 유효부하는 각각 1087.7[MW], 1102.3[MW]로 무효전력을 많이 보상할수록 전압불안정점에서의 유효부하는 증가하는 것으로 나타났다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 UPFC가 포함된 전력시스템에서 연속조류계산을 수행하여 전압불안정점과 불안정점에서의 전체부하를 계산해 보았다. UPFC의 정적 수리모형으로는 원하는 선로조류와 모선전압 또는 무효전력을 직접 지정하여 조류계산을 할 수 있는 분리된 모형을 이용하였다. 또한 연속조류계산의 결과를 통하여 UPFC가 동작시 전압안정도에 미치는 영향을 분석하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] L. Gyugyi, "Unified Power-Flow Concept for flexible AC transmission systems", IEE Proc. C Transmission and Distribution, vol. 139, no.4, July 1992, pp.323-331.
- [2] L. Gyugyi, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson and A. Edris, "The UPFC : A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. on PWRD, vol. 10, no. 2, April 1995, pp.1085-1093.
- [3] K. K. Sen, E. J. Stacey, "UPFC : Theory, Modeling, and Applications", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 13, No. 4, Oct. 1998, pp.1453-1460.
- [4] A. J. F. Keri, A. S. Mehraban, X. Lombard, A. Elriachy and A. A. Edris, "UPFC : Modeling and Analysis", IEEE PE-423-PWRD-0-06-1998.
- [5] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari and G. Anderson, "Use of UPFC for Optimal Power Flow Control", IEEE Trans. on PWRD, vol. 12, no. 4, October 1997, pp.1629-1633.
- [6] C. R. Fuerte-Esquivel and E. Acha, "UPFC : A critical comparison of Newton-Raphson UPFC algorithms in power flow studies", IEE Proc. C Generation, Transmission and Distribution, vol. 144, no. 5, September 1997, pp.437-444.
- [7] H. Ambriz-Perez, E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, A. De la Torre, "Incorporation of a UPFC Model in an Optimal Power Flow Using Newton's Method", IEE Proc. C. Generation, Transmission and Distribution, Vol. 145, No. 3, May 1998, pp.336-344.
- [8] A. Nabavi-Niaki, M. R. Iravani, "Steady-State and Dynamic Models of UPFC for Power System Studies", IEEE Trans on PWRD, Vol. 11, No. 4, Nov. 1996, pp. 1937-1943.
- [9] D. 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.
- [10] V. Ajarapu, C. Christy, "The Continuation Power Flow : A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis", IEEE Trans. on PWRD, Vol. 7, No. 1, Feb. 1992, pp.416-423.
- [11] 송화창, 이병준, 권세혁, "실용적인 스텝크기 선택 알고리즘을 고려한 연속조류계산 시스템의 개발", 대한전기학회 논문지, Vol. 48A, No. 3, Mar., 1999, pp.190-196.