

UPFC의 동적 시뮬레이션 알고리즘 개발

손광명\*, 김동현  
동의대학교 전기공학과

Development of Dynamic Simulation Algorithm of UPFC

K.M. Son\* , D.H. Kim  
Dept. of Electrical Eng., Dongeui Univ., Pusan, Korea

**Abstract** - This paper presents a dynamic simulation algorithm for studying the effect of Unified Power Flow Controller(UPFC) on the low frequency power system oscillations and transient stability studies. The algorithm is a Newton-type one and gives a fast convergence characteristics. The algorithm is applied to inter-area power oscillation damping regulator design of a sample two-area power system. The results show that UPFC is very effective for damping inter-area oscillations

1. 서론

FACTS 기기중 UPFC(Unified Power Flow Controller)는 전력계통의 다양한 변수들을 독립적으로 제어할 수 있는 능력 때문에 최근에 주목받기 시작하고 있다 [1]. 이러한 기기의 전력계통 제어 효과를 극대화하기 위해서는 이 기기에 적용될 수 있는 해석 방법과 효과 분석 도구가 개발되어야 하며, 기기의 특성을 반영할 수 있는 제어기 설계 방식이 확립되어야 한다.

UPFC에 의한 전력계통 제어 효과에 관한 여러 가지 연구 분야 중 정상상태 해석에 대한 연구는 다수의 연구 성과를 가져오고 있으나 [2-4], 동적 해석 분야에 있어서는 아직도 연구의 시작단계에 있다[5-6]. UPFC의 동적 시뮬레이션은 아직은 EMTP 수준의 스위칭 레벨 시뮬레이션이 다수를 이루고 있고, UPFC가 전력계통의 동적 성능 향상에 미치는 영향을 해석하기 위한 본격적인 다기 계통의 동적 시뮬레이션 방법은 아직 확립되고 있지 못한 실정이다. 이에 본 연구에서는 UPFC에 의한 대규모 전력 계통 동적 영향 평가 및 제어기 설계의 기초가 되는 동적 시뮬레이션 알고리즘을 개발하였다. 이 시뮬레이션 알고리즘은 동적 및 과도 안정도 해석에 이용될 수 있으며, 중요 억제 제어기 설계에 적용될 수 있다.

UPFC의 경우 선로에 직렬로 전압원이 삽입되는 형태이기 때문에 기존의 전력 계통 시뮬레이션 및 해석 프로그램들은 이를 용이하게 다루기 힘든 구조를 가지고 있다. 따라서 기존의 프로그램에서 UPFC가 효과적으로 모의될 수 있는 모델에 대한 연구가 필요하며, 약간의 수정을 통해 기존의 프로그램이 확장될 수 있는 방식에 대하여 연구되어야 한다. 본 연구에서는 확장된 전력계통 모델과 기존 모델과의 차이점에 관해 논의하였다.

2. UPFC의 동적 시뮬레이션 알고리즘

2.1 기존의 전력계통 해석 프로그램

전력계통 동적 해석을 위한 방정식은 다음과 같은 미분 방정식과 대수 방정식이 결합된 형태로 표현된다. 여기서 식(1)은 발전기 및 여자기의 동특성과 기타 동특성을 가지고 있는 요소를 포함한다. 식(2)는 발전기와 전력계통의 연결조건 및 송전 네트워크를 표현하는 부분이

다. 따라서, 전력계통의 모의를 위해서는 미분방정식과 대수방정식을 각 단계마다 풀이하여야 하는데, 통상 대수방정식은 내포적(implicit)인 형태를 가지게 되므로 반복해법을 이용하여야 하는 어려움이 생기게 된다.

$$\dot{x} = f(x, \bar{V}) \tag{1}$$

$$\bar{I}(x, \bar{V}) = \bar{Y}\bar{V} \tag{2}$$

여기에서 각 변수 위의 바(bar)는 복소 페이저량을 의미하고, x는 상태변수,  $\bar{V}$ 는 모션전압,  $\bar{I}$ 는 모션전류를, 그리고  $\bar{Y}$ 는 모션 어드미턴스 행렬을 의미한다. 총 n개의 모션으로 구성되어 있는 경우 대수적 변수에 해당하는 각 행렬의 차원은 n-by-n이 되고, 상태변수 벡터의 차원은 발전기 및 여자기 모델등의 종류에 의해 결정된다.

전력계통 해석 프로그램들 중 일부는 위의 식(1)과 (2)를 풀이하기 위해 대수 방정식을 다음과 같은 형태의 식으로 표현한다. 이식은 n개의 복소값을 가지는 복소변수 함수들로 구성된다.

$$\bar{F} = \bar{I}(x, \bar{V}) - \bar{Y}\bar{V} \tag{3}$$

위의 식을 실수변수 실수값 함수로 나눌 경우 총 방정식은 2n개의 식으로 이루어지며 2n개의 실수 미지수를 가지는 비선형 방정식으로 나타내어질 수 있다. 이 식들의 편도함수를 구하여 Newton 방식의 해법 알고리즘을 적용할 경우 복소변수를 극좌표 형식으로 표현하면 Jacobian 식은 다음과 같다. 여기서 첨자 I와 R은 각각 허수부와 실수부를 의미한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_R \\ \Delta F_I \end{bmatrix} \tag{4}$$

2.2 UPFC가 포함된 경우의 자코비안 행렬

전력계통에 UPFC가 포함될 경우를 생각해 보자. UPFC가 부착되기 이전의 기존의 모션 수가 n이고 UPFC에 의한 2개의 모션이 추가되어 n+2=N 이 되었다고 하자. 이때, UPFC 모션은 각각 모션 N-1과 모션 N이라고 하자. 그러면, 위의 식(2)는 식(5)와 같이 확장된 형태를 가지게 된다.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}(\bar{V}) \\ \bar{I}_U(\bar{V}_U) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Y} & \bar{Y}_M \\ \bar{Y}_L & \bar{Y}_U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V} \\ \bar{V}_U \end{bmatrix} \tag{5}$$

여기에서,  $\bar{I}_U$ 는 UPFC에 의해 각 모션에 주입되는 주입전류를 의미하며,  $\bar{V}_U = [\bar{V}_{N-1} \ \bar{V}_N]^T$ 에서 각각은 인버터측 모션(N-1)과 선로측 모션(N)의 전압을 의미한다. 모션 어드미턴스 행렬도 확장되는 형태를 가지는데 기존의 행렬에 UPFC와의 연결부분이 추가된다.  $\bar{Y}_M$ 과  $\bar{Y}_L$ 은 UPFC와 연결되어 있는 모션에 관련된 항이 의미있는 값을 가지고,  $\bar{Y}_U$ 는 UPFC의 두모션과의 관계를 의미한다.

이들 관계를 이용하여 UPFC가 포함된 경우의 네트워크 관계식을 Newton 방식으로 풀이하기 위해, 앞의 식(5)는 다음의 식(6) 및 (7)로 나누어 표시할 수 있다.

$$f = \overline{I}(\overline{V}) - \overline{YV} - \overline{Y_M V_U} = 0 \quad (6)$$

$$f_U = \overline{I_U}(\overline{V_U}) - \overline{Y_L V} - \overline{Y_U V_U} = 0 \quad (7)$$

여기서 식(6)은 N-2개의 복소변수 방정식들로 이루어지고 식(7)은 2개의 복소변수 방정식이다. 이때, 이들을 2N개의 극좌표 형식의 실수방정식으로 나타내고, 이의 Jacobian 행렬을 구성하면 다음과 같은 2N-by-2N 행렬을 구할 수 있다.

$$J = \begin{bmatrix} J & J_M \\ J_L & J_U \end{bmatrix} \quad (8)$$

식(8)에서 기존의 자코비안 행렬인 J를 제외한 나머지 부분을 구하면 UPFC가 포함된 전력계통의 모의가 가능해지므로, 이 부분들을 구하는 문제에 대하여 생각해 보자.

먼저  $J_M$ 을 구하는 문제를 생각해 보면, 관련된 항의 모션 어드미턴스 행렬과 전압벡터가 다음과 같다고 하자.

$$\overline{Y}_{Mik} = Y_{Mik} e^{j\theta_{ik}} \quad \overline{V}_{Uk} = V_{Uk} e^{j\theta_{Uk}} \quad (9)$$

이때, 식(6)의 편도함수를 계산하면,  $J_M$ 의 각 요소는 UPFC와 연결되어 있는 모션에서만 다음 식을 만족하는 값을 가지고, 그렇지 않으면  $J_M(i, j) = 0$ 이다. 다음 식(10)과 (11)을 실수부와 허수부로 분리하여 적당히 배치하면  $J_M$ 의 각 요소의 값을 구할 수 있다.  $i = 1, 2, \dots, N-2$ , 그리고  $k = 1, 2$ 에 대하여,

$$\frac{\partial f_i}{\partial V_{Uk}} = Y_{Mik} \exp [j(\gamma_{ik} + \theta_{Uk})] \quad (10)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \theta_{Uk}} = j Y_{Mik} V_{Uk} \exp [j(\gamma_{ik} + \theta_{Uk})] \quad (11)$$

이다. 비슷한 방법으로  $J_L$ 의 각 요소도 계산할 수 있다.

이제 가장 중요한 부분인 UPFC의 전류원과 직렬 전압원의 등가 전류원을 고려하는 식(7)을 생각하자. 식(7)의 각요소를 좀더 자세히 표현하면 식(12)와 같다.

$$\overline{I_U}(\overline{V_U}) = \left[ \overline{I_P}(\overline{V_U}) + \overline{I_Q} - \overline{I_S}(\overline{V_U}) \right] \quad (12)$$

식(12)에서 보듯이 UPFC의 주입전류원  $\overline{I_U}$ 는 2개의 복소 페이저 식으로 표현되는데, 그 중 윗부분은 인버터 측 모션인 모션 N-1에 해당하는 부분으로서,  $\overline{I_P}$ 는 병렬 인버터에 의해 흡수되어 직렬 전압원으로 전달되는 유효전력에 해당하는 부분이고,  $\overline{I_Q}$ 는 병렬 인버터의 정격 용량내에서 모션 전압 혹은 무효전력을 제어하기 위해 독립적으로 제어될 수 있는 부분이다. 식(12)의 두식에 동시에 나타나는  $\overline{I_S}$ 는 직렬 전압원을 등가적인 전류원으로 표현한 것으로서 병렬 인버터의  $\overline{I_P}$ 와 상호 연관되어서 다음의 식(13)로서 주어진다.

$$\overline{I_P} = -\frac{\text{Re} \{ \overline{V_S} \overline{I_S}^* \}}{\overline{V}_{N-1}} \quad \overline{I_S} = \frac{\overline{V_S} e^{j\theta_{N-1}}}{jx_S} \quad (13)$$

$J_U$ 를 구하는 방법은  $x_U = [V_{N-1} \theta_{N-1} V_N \theta_N]$ 에 대하여 위의 식(13)을 이용하여 식(12)의 편도함수를 직접 계산하여 행렬의 각 요소를 구하는 것이다. 이렇게 구한  $J_U$ 는 4-by-4 행렬로서 각 요소는 UPFC 전압에 대한 감도가 된다.

이렇게 구한 Jacobian 행렬을 이용하여 대수 방정식을 풀이함으로써 UPFC가 존재하는 전력계통의 동적 모의가 가능하게 된다. 개발된 시뮬레이션 알고리즘은 과도안정도 해석에 적용될 수 있고, 전력계통 동요 문제 등과 같은 전기-기계적 진동현상을 해석하는 데 활용될 수 있다.

### 3.1 UPFC 제어시스템의 구조 및 대상시스템

전력계통 동요 억제에는 병렬 보상에 비하여 직렬 보상이 훨씬 더 효과적이다. 따라서 직렬 부분의 전력계통 동요 억제효과를 검토하기 위해 직렬 부분에 그림1과 같은 현재 AEP의 UPFC 제어시스템에서 채택되어 있는 형태의 제어를 가정하였다.

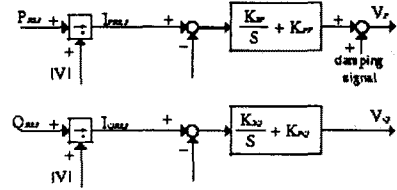


그림 1. UPFC의 제어시스템

통상 UPFC는 지역간을 연결하는 타이라인에 설치되므로, 본 연구에서는 그림2와 같은 2지역 시스템의 타이라인 선로의 중간에 UPFC가 설치된 경우를 상정하였다. UPFC의 직렬 부분의 전압제한 용량은  $\pm 0.05$  PU로 가정하였다.

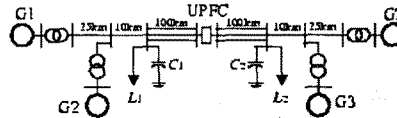


그림 2. 2지역 전력시스템 모델

그림2의 시스템에 사용된 각 발전기는 제동전선을 포함하는 2축모델을 사용하였다. 여자기 모델은 속응성 여자시스템을 사용하였으며 모든 여자기 정수는 동일한  $K_A = 200$ (pu),  $T_A = 0.02$ (sec)이다. 부하는 모두 일정 임피던스 부하로 가정하였다.

### 3.2 동요 억제 제어기 설계

본 연구에서는 다음과 같은 형태의 동요 억제 제어기를 상정하였다.

$$y = K \frac{sT_w}{1+sT_w} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \Delta P_{line} \quad (14)$$

wash-out 블록에서  $T_w$ 는 10으로 지정하였고, lead 블록의  $T_1$ 과  $T_2$ 는 lead 각  $15^\circ$ 에 상응하는 값으로 정하였다.

여러 동작점에서의 제어기 효과를 보기 위해 각 경우에 대한 지역간 동요 모드의 추이를 그림3에 나타내었다. 그림에서 원으로 표시된 점은 UPFC가 설치되지 않은 경우를 의미하며, Case I, II, III는 동요억제 제어기가 없는 경우의 적분기 이득의 변화에 따른 지역간 동요 모드의 추이를 보인다. 이것으로 알 수 있는 것은 적분기의 이득 증가로 동요 모드의 감쇠를 개선 정도에 비하여 주파수의 증가가 두드러지며, 동작점의 변화에 따른 효과 변화가 커서 동요억제제어를 위해서는 부가적인 제어장치가 필요함을 알 수 있다. Case IV, V, VI은 각각의 경우 상기한 방식의 동요억제 제어기가 부가된 경우를 나타내는 것으로서 동작점의 변화에도 불구하고 제어 효과는 비교적 일정함을 알 수 있고, 이득을 증가시키에 따라 감쇠율이 현저하게 증대되는 것을 알 수 있다.

### 3.3 시간영역 시뮬레이션 결과

제한된 시뮬레이션 알고리즘을 확인하고 주파수 영역에서 검토한 동요억제 제어기의 효과를 실제의 비선형 시스템에서의 시간영역 시뮬레이션을 통해 검증하기 위

해 각 경우의 시간영역 모의를 실시하였다. 그림4는 제어시와 비제어시의 지역간 발전기 회전각의 동요를 나타내었다. 이것으로서 주파수 영역에서의 결과와 일관성 있는 시간 영역 모의 결과를 가져올 수 확인할 수 있었다. 그림5는 삽입된 전압원의 응답을 나타내었다.

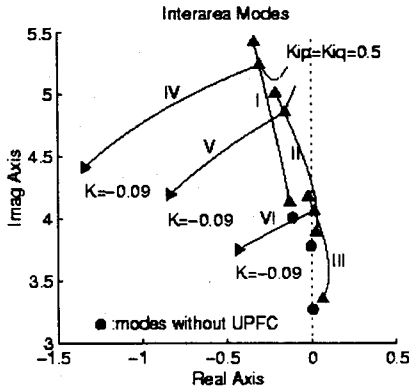


그림 3. 각 경우의 지역간 동요모드의 추이

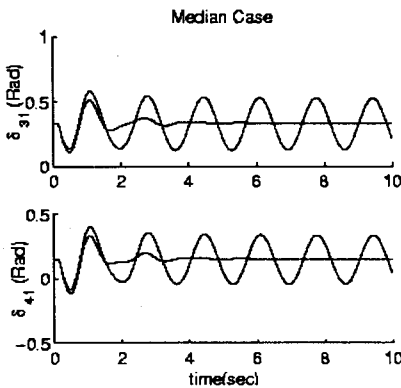


그림 4. 제어시와 비제어시의 지역간 동요

그림6은 각 경우의 제안된 시뮬레이션 알고리즘의 매 단계에의 반복 계산 횟수를 나타내었다. 각 반복계산의 오차의 허용한계는  $10e-9$ 로 지정하였다. 통상 2-3회 정도의 반복계산으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 다음 단계의 반복계산의 초기치로서 그 이전단계에서의 값을 사용하므로, 3상 사고등과 같은 급격한 변화가 발생하는 시점에서는 반복계산 횟수가 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 약 1.5초 이후에는 반복계산 횟수가 2회로 유지됨을 확인할 수 있어, 제안된 알고리즘의 효율성을 검증할 수 있었다.

#### 4. 결 론

전력계통의 동요 현상을 해석하고 제어하기 위한 UPFC 제어 알고리즘 개발을 위해서는 먼저 UPFC를 모의할 수 있는 알고리즘의 개발이 필수적이다. 따라서, 이를 위한 기초 연구로서 UPFC가 포함된 전력계통의 전기기계적 동요 현상을 구명하기 위한 시뮬레이션 알고리즘을 개발하였다. 개발된 시뮬레이션 알고리즘은 기존의 전력계통 해석 프로그램에서도 약간의 수정으로 용이하게 UPFC를 모의할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이로서 본 연구를 통해 UPFC가 포함된 대규모 전력계통의 동특성을 해석할 수 있는 토대를 마련하였다고 사료된다.

(참 고 문 헌)

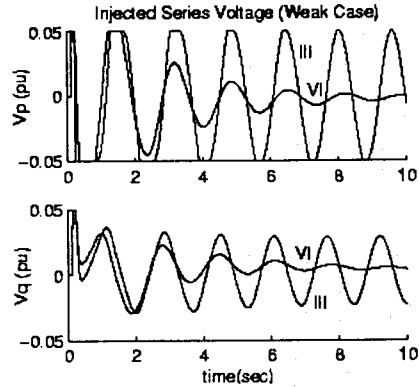


그림 5. 삽입된 전압원

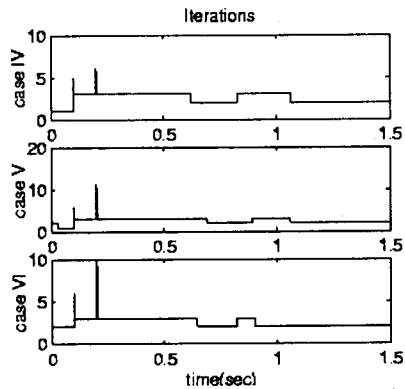


그림 6. 각 단계에서의 반복계산 횟수

- [1] L. Gyugyi, G.D. Schauder, S.L. Williams, T.R. Rietman, D.R. Torgerson, A. Edris, The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.10, No.2, Apr.1995, pp.1085-1097.
- [2] Nabavi-Niaki, M.R. Iravani, Steady-State and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies, IEEE Trans. On Power Systems, Vol.11, No.4, Nov.1996, pp.1937-1943.
- [3] CR Fuerte-Esquivel and E. Acha, A Newton-Type Algorithm for the Control of Power Flow in Electrical Power Networks, IEEE Trans. On Power Systems, Vol.12, No.4, Nov.1997, pp.1474-1480.
- [4] M.Noroozian, L. Angquist, M.Ghandhari and G. Andersson, Use of UPFC for Optimal Power Flow Control, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.12, No.4, Oct.1997, pp.1629-1634.
- [5] S. Arabi, P.Kundur, A Versatile FACTS Device Model for Power Flow and Stability Simulations, IEEE Trans. On Power Systems, Vol.11, No.4, Nov.1996, pp.1944-1950.
- [6] K.S.Smith, L.Ran, J.Penman, Dynamic Modelling of a Unified Power Flow Controller, IEE Proceedings - Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, No.1, Jan 1997, pp. 7-12.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의해 기초전력공학공동 연구소의 주관으로 수행되었음 (과제관리번호98-025)