

# 저주파 진동 해석을 위한 UPFC의 동적 시뮬레이션 알고리즘에 관한 연구

論 文

49A-10-5

## A Study on the UPFC Dynamic Simulation Algorithm for Low Frequency Oscillation Studies

孫 光 明\*  
(Kwang-Myoung Son)

**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 proposed algorithm is a Newton-type one and uses current injection type UPFC model, which gives a fast convergence characteristics. The algorithm is applied to studying inter-area power oscillation damping enhancement of a sample two-area power system both in time domain and frequency domain. The case study results show that the proposed algorithm is very efficient and the UPFC is very effective and robust against operating point change.

**Key Words** : FACTS, UPFC(Unified Power Flow Controller), Dynamic Simulation, Low Frequency Oscillations

### 1. 서 론

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. UPFC의 경우 선로에 직렬로 전압원이 삽입되는 형태이기 때문에 기존의 동적 시뮬레이션 및 해석 프로그램들은 이를 용이하게 다루기 힘든 구조를 가지고 있다. 따라서, UPFC의 모델링 및 시뮬레이션이 UPFC의 전력계통 제어 효과 해석을 위한 중요한 시작점이 되고 있고, 현재 이에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

UPFC가 포함된 전력계통 해석에 관한 여러 가지 연구분야 중 정상상태 해석에 대한 연구는 다수의 연구성과를 가져오고 있다 [2-6]. UPFC의 전력조류계산 모델이 개발되어 정상상태 해석 및 조류제어에 응용되고 있으며 [2-4], 상업용 프로그램에서도 UPFC가 포함된 계통의 전력조류 계산이 가능하다 [5,6].

동적 해석 분야에 있어서도 연구가 진행되고 있다 [6-8]. 현재로는 동적 해석에 있어 UPFC의 제어시스템을 자세히 모델링하는 접근 방식이 있다 [7]. 이러한 접근방식은 전력계통 저주파 진동 해석이 본질적으로 수 Hz 정도의 현상에 관심이 있으므로 UPFC의 동특성을 무시하더라도 큰 오차

를 가져오지 않고, 이러한 방식이 기존의 안정도 및 동특성 해석 프로그램에서 쉽게 적용되기 어려운 정확한 해석은 가능한 대신 프로그램을 많이 수정해야 하는 어려움이 있다. 또 다른 접근 방법으로는 UPFC와 전력계통과의 연계조건을 전력 평형식의 형태로 정의하여 전력조류계산 모형을 이용하는 경향이 있다 [8]. 이는 UPFC 제어시스템의 동특성을 무시함으로써 약간의 오차가 발생할 가능성이 있으나, 기존의 안정도 해석 프로그램에서의 조류계산 자코비안을 약간만 수정하는 형태로 곧바로 UPFC를 모의할 수 있다는 장점이 있다. 최근에는 UPFC의 전류주입형 모델에 대한 연구가 시작되어, 참고문헌 [9]에서는 계통과의 연결조건을 만족시키는 UPFC의 주입전류를 찾아내는 반복계산방법이 제안되었다.

본 연구에서는 UPFC가 전력계통의 동적 성능 향상에 미치는 영향을 해석하기 위한 본격적인 다기 계통의 동적 시뮬레이션 방법에 대하여 연구하였으며, UPFC에 의한 대규모 전력 계통 동적 영향 평가 및 제어기 설계의 기초가 되는 동적 시뮬레이션 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘은 전류주입형 UPFC 모델을 이용하여 UPFC 모선에서의 전류 평형 조건을 만족하는 해를 찾아내는 것으로서 제안된 시뮬레이션 방법은 참고문헌 [9]와는 달리 뉴턴 반복법의 형태로서 개념적으로 간단하고 기존의 프로그램을 약간 수정함으로써 구현할 수 있으며, 빠른 수렴 특성을 보인다. 제안된 알고리즘을 이용하여 2지역 계통의 지역간 동요 모드 억제에 위한 UPFC의 보조제어기를 설계하였다. 제어 및 비 제어시의 주파수 영역 및 시간영역 시뮬레이션으로부터 제안된 알고리즘의 타당성을 확인하였으며, 사례연구 결과로부터 제안된 알고리즘의 우수한 수렴특성과 UPFC의 동요억제 효과 및 여러 가지 동작점에서의 강인성을 확인할 수 있었다.

\* 正 會 員 : 東 義 大 工 大 電 氣 電 子 情 報 通 信 工 學 部 助 教 授 · 工 博  
接 受 日 字 : 2000年 4月 10日  
最 終 完 了 : 2000年 10月 2日

## 2. UPFC의 모델링

저주파 진동 현상을 모의 및 해석하기 위한 모델은 대략 0.1-2Hz 범위의 현상을 충실히 반영할 수 있어야 한다. 현재 UPFC의 내부 제어시스템은 상기한 주파수 영역에서는 그림 1(a)와 같은 모델을 만족하는 것이 설계 목적중의 하나이다 [1]. 여기에서 DC 링크의 동특성은 상기한 주파수에서는 무시하여도 큰 오차가 나지 않는다는 것이 보고되고 있다. 직렬 전압원은 그림 1(b)에서와 같이 그와 동가인 주입전류원으로 모델링 할 수 있다. 상용으로 이용되는 전력계통 동적 시뮬레이션 프로그램중 다수가 전류주입형으로 변환하여 계산하므로, 전류주입형 모델은 이에 쉽게 적용할 수 있다는 잇점이 있다. UPFC의 경우 주입전류가 UPFC 모선전압에 의해 결정된다는 어려움이 있으며, 이는 반복 계산과 같은 해법을 이용하여 풀이하여야 함을 뜻한다.

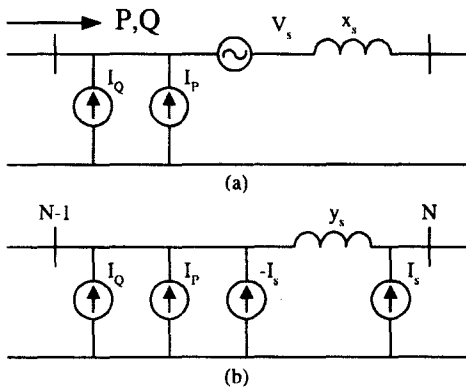


그림 1 UPFC 모델(a) 과 등가 전류주입형 모델(b)

Fig. 1 (a)UPFC model and (b) its equivalent current injection model

## 3. UPFC의 동적 시뮬레이션 알고리즘

### 3.1 기존의 전력계통 해석 프로그램[11,12]

전력계통 동적 해석을 위한 방정식은 다음과 같은 미분방정식과 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 부분이다. 따라서, 전력계통의 모의를 위해서는 미분방정식과 대수방정식을 각 단계마다 풀이하여야 하는데, 통상 대수방정식은 내포적(implicit)인 형태를 가지게 되므로 반복해법을 이용하여야 하는 어려움이 생기게 된다.

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

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

여기에서 각 변수 위의 바(bar)는 복소 페이저량을 의미하고, x는 상태변수,  $\bar{V}$ 는 모선전압,  $\bar{I}$ 는 모선전류를, 그

리고  $\bar{Y}$ 는 모선 어드미턴스 행렬을 의미한다. 총 n개의 모선으로 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.

$$\bar{F} = \bar{K}(x, \bar{V}) - \bar{Y}\bar{V} \quad (3)$$

위의 식을 실수변수를 가지는 실수 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.

$$J \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta F_R \\ \Delta F_I \end{bmatrix} \quad (4)$$

### 3.2 UPFC가 포함된 경우의 자코비안 행렬

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

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

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

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

$$f = \bar{K}(\bar{V}) - \bar{Y}\bar{V} - \bar{Y}_M\bar{V}_U = 0 \quad (6)$$

$$f_U = \bar{I}_U(\bar{V}_U) - \bar{Y}_L\bar{V} - \bar{Y}_U\bar{V}_U = 0 \quad (7)$$

여기서 식(6)은 N-2개의 복소변수 방정식들로 이루어지고 식(7)은 2개의 복소변수 방정식이다. 이때, 이들을 2N개

의 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 생각해보자.

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

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

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 각 요소를 좀더 자세히 표현하면 식(12)와 같다.

$$\bar{I}_U(\bar{V}_U) = \left[ \frac{\bar{I}_P(\bar{V}_U) + \bar{I}_Q - \bar{I}_S(\bar{V}_U)}{\bar{I}_S(\bar{V}_U)} \right] \quad (12)$$

식(12)에서 보듯이 UPFC의 주입전류원  $\bar{I}_U$ 는 2개의 복소 페이지서 식으로 표현되는데, 그 중 윗부분은 인버터측 모션인 모션 N-1에 해당하는 부분으로서,  $\bar{I}_P$ 는 병렬 인버터에 의해 흡수되어 직렬 전압원으로 전달되는 유효전력에 해당하는 부분이고,  $\bar{I}_Q$ 는 병렬 인버터의 정격 용량 이내에서 모션 전압 혹은 무효전력을 제어하기 위해 독립적으로 제어될 수 있는 부분이다. 식(12)의 두식에 동시에 나타나는  $\bar{I}_S$ 는 직렬 전압원을 등가적인 전류원으로 표현한 것으로서 병렬 인버터의  $\bar{I}_P$ 와 상호 연관되어서 다음의 식(13)로서 주어진다.

$$\bar{I}_P = -\frac{\text{Re}\{\bar{V}_S \bar{I}_S^*\}}{\bar{V}_{N-1}^*} \quad \bar{I}_S = \frac{\bar{V}_S e^{j\theta_{N-1}}}{j x_S} \quad (13)$$

$J_U$ 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.  $J_U$ 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 중요 문제 등과 같은 전기-기계적 진동현상을 해석하는 데 활용될 수 있다.

### 3.3 부하가 일정 임피던스 부하로 표현되는 경우

과도 안정도 등을 연구하는 경우 문제를 단순화하기 위해 대상 전력시스템의 부하를 일정 임피던스 부하로 표현하는 경우가 있다. 본 논문에서는 이러한 경우 제안된 알고리즘의 형태가 어떻게 변화되는 가를 논의한다.

모든 부하가 일정 임피던스 부하라고 하면, 식(5)에서의  $\bar{I}$ 는 매 스텝마다 발전기와 여자기의 상태변수로부터 결정된다. 따라서, 매 스텝마다 대수방정식을 풀이할 때  $\bar{I}$ 는 그전에 결정된 상수의 형태로 주어지게 된다. 이에 식(5)는 다음의 식(14)의 형태를 띄게 된다.

$$\left[ \frac{\bar{I}}{\bar{I}_U(\bar{V}_U)} \right] = \left[ \frac{\bar{Y}}{\bar{Y}_L} \frac{\bar{Y}_M}{\bar{Y}_U} \right] \left[ \frac{\bar{V}}{\bar{V}_U} \right] \quad (14)$$

식(14)에서  $\bar{I}_U$ 가  $\bar{V}_U$ 에 대한 내포적 함수 (implicit function)의 형태를 가지므로,  $\bar{V}$ 는 다음 식(15)에서와 같이  $\bar{V}_U$ 에 관한 식으로 표현될 수 있다.

$$\bar{V} = \bar{Y}^{-1} (\bar{I} - \bar{Y}_M \bar{V}_U) \quad (15)$$

식(14)에서 식(15)를 이용하면,  $\bar{I}_U$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{I}_U = \bar{Y}_L \bar{Y}^{-1} \bar{I} + (\bar{Y}_U - \bar{Y}_L \bar{Y}^{-1} \bar{Y}_M) \bar{V}_U \quad (16)$$

여기에서  $\bar{I}$ 는 상수행렬이고 위의 식 (16)에서 나타나는 각 행렬을 다음 식(17)과 같이 정의하면 식 (16)은 식(18)과 같이 된다.

$$\bar{I}_0 = \bar{Y}_L \bar{Y}^{-1} \bar{I}, \quad \bar{Y}_R = \bar{Y}_U - \bar{Y}_L \bar{Y}^{-1} \bar{Y}_M \quad (17)$$

식(18)은 복소값을 가지는 다음과 같은 형태를 가지며 차원은 2가 된다. 식(18)의 자코비안 행렬은  $\bar{Y}_U$ 가  $\bar{Y}_0$ 로 대체된다는 것을 제외하면 동일한 구조를 가진다.

$$\bar{I}_U(\bar{V}_U) - \bar{Y}_R \bar{V}_U - \bar{I}_0 = 0 \quad (18)$$

이 경우 UPFC를 시뮬레이션하기 위해서는 매스매티카식(18)을 풀어야 한다. 여기에서 특징적인 것은 UPFC 모션에서의 연결조건(interface condition)을 만족하는 해를 찾기만 하면 된다는 것이다. 즉, 풀이하는 자코비안의 크기는 계통의 크기에 관계없이 4-by-4 행렬이 되어, 계산량이 계통의 규모의 증가에 따라 증가하지 않는다. 이것은 일정 임피던스 부하로 표현되는 문제를 다룰 때에는 제안된 알고리즘의 계산량이 극히 효율적임을 의미하는 것이다. 식(18)에 의해 UPFC의 전압이 찾아지면 나머지 모션의 전압값은 식(15)에 의해 자동적으로 구해진다.

**4. 제안된 알고리즘의 전력계통 동요억제 제어기설계의 적용**

**4.1 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 그림2와 같은 현재 AEP의 UPFC 제어시스템에서 채택되어 있는 형태의 제어기를 가정하였다 [13].

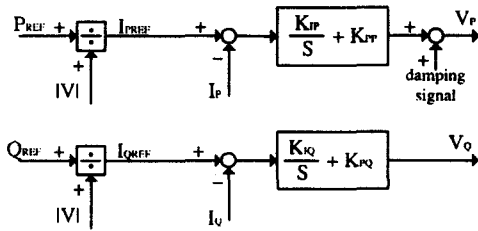


그림 2. UPFC의 제어시스템(직렬부분)  
Fig. 2 The series part of the control system of UPFC

통상 UPFC는 지역간을 연결하는 타이라인에 설치되므로, 본 연구에서는 그림3과 같은 2지역 시스템[14]의 타이라인 선로의 중간에 UPFC가 설치된 경우를 상정하였다. UPFC의 직렬 부분의 전압제한 용량은 ±0.05 PU로 가정하였다. 그림 2에서의 비례이득  $K_{PP}$ 와  $K_{PQ}$ 는 0으로 두었다. 그림에서 적분기의 이득  $K_{IP}$ 와  $K_{IQ}$ 는 각각  $V_p$ 와  $V_q$ 에 관련된 이득이다. 동요 억제 보조 제어기는 다음과 같은 형태를 상정하였다. 본 보조제어기의 입력은 지역적으로 측정 가능한 선로의 유효전력 조류를 택하였다. wash-out 블록에서  $T_w$ 는 10으로 지정하였고, lead 각은 15°로 하였다.

$$y = K \frac{sT_w}{1+sT_w} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \Delta P_{line} \quad (19)$$

그림3의 시스템에 사용된 각 발전기는 동일한 정수를 가지는 2축모델을 사용하였다. 여자기 모델은 속응성 여자시

스템을 사용하였으며 모든 여자기 정수는 동일한  $K_A = 200(pu)$ ,  $T_A = 0.02(sec)$  이다. 부하는 모두 일정 임피던스 부하로 가정하였다. 주어진 시스템의 여러 가지 동작점에서의 UPFC의 효과를 검토하기 위해, [15]에서와 같이 다음 3가지 동작점을 상정하였다. 즉, 공칭 시스템으로서 좌측 지역에서 우측 지역으로 400MW 정도의 유효전력을 공급하는 Median 계통과 Median 계통에 비해 좌측 지역의 발전력이 80% 정도 감소하고, 우측 지역의 부하가 80% 정도 감소하는 경우로서 지역간 조류가 300MW 정도로 감소한 Stiff 계통, 그리고 Median 계통과 동일한 발전 및 부하 조건에서 그림 3의 타이라인 중에서 하나가 운전되지 않는 Weak 계통이다.

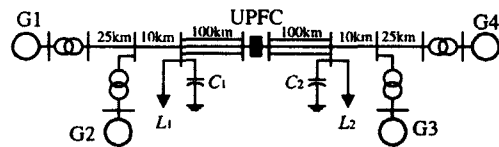


그림 3 2지역 전력시스템 모델  
Fig. 3 A sample two-area power system model

**4.2 주파수 영역에서의 동요 억제 효과 해석**

제안된 알고리즘을 이용하여 주파수 영역에서의 제어 및 비제어시의 동요억제 효과를 해석하였다. 제안된 알고리즘을 이용한 동작점에서의 섭동(Perturbation)을 통하여 선형화 모델을 구하였다. 구해진 선형화 모델을 이용하여 각각의 경우를 Case I부터 Case VI로 명명하여 각 경우의 지역간 동요모드의 감쇠율 변화를 표 1에 나타내었다. 표에서 보듯이 동요억제 제어기를 통해 비교적 양호한 결과를 가져올 수 있다.

표 1 각 경우의 지역간 동요모드의 감쇠율

Table 1 damping of inter-area mode for each case

Operating Point		Stiff	Median	Weak
W/O Damping Control	Case ID	I	II	III
	Damping(%)	5.81	3.24	-0.353
With Damping Control	Case ID	IV	V	VI
	Damping(%)	29.1	19.6	11.4

**4.3 시간영역 시뮬레이션 결과**

제안된 시뮬레이션 알고리즘을 확인하고 주파수 영역에서 검토한 동요억제 제어기의 효과를 실제의 비선형 시스템에서의 시간영역 시뮬레이션을 통해 검증하기 위해 각 경우의 시간영역 모의를 실시하였다. 그림 4-6은 각 동작점에서

서의 제어시와 비제어시의 지역간 발전기 회전각의 동요를 나타내었다. 이것으로서 주파수 영역에서의 결과와 일관성 있는 시간 영역 모의 결과를 가져움을 확인할 수 있었다. 그림 7은 삽입된 전압원의 응답을 나타내었다.

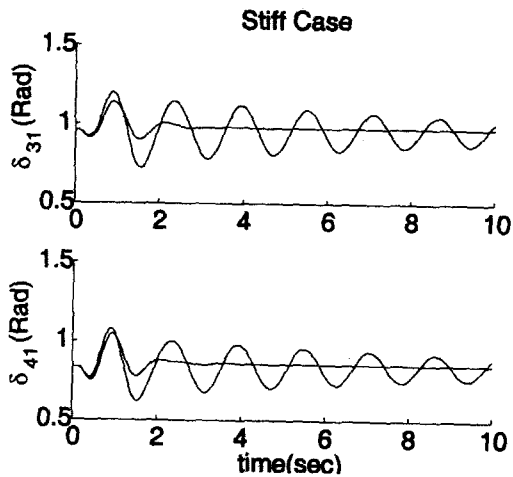


그림 4 Stiff 계통의 UPFC에 의한 전력계통 동요 억제 효과 (제어시 및 비 제어시)  
Fig. 4 Inter area oscillations with and without damping control (Stiff system)

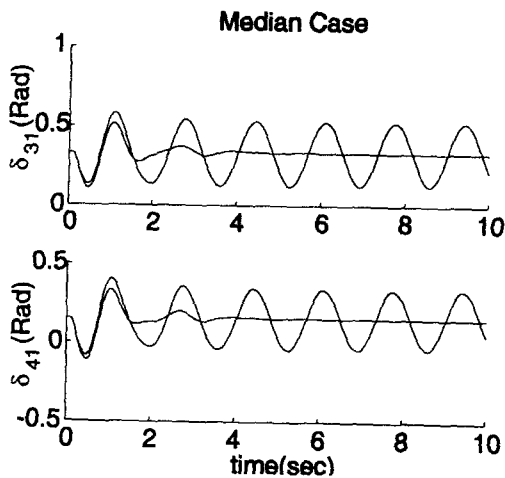


그림 5 Median 계통의 UPFC에 의한 전력계통 동요 억제 효과 (제어시 및 비 제어시)  
Fig. 5 Inter area oscillations with and without damping control (Median system)

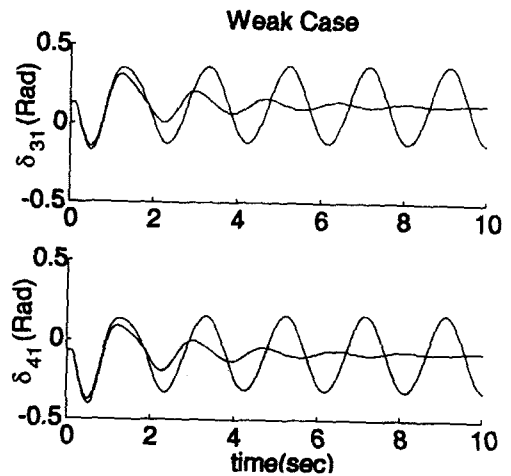


그림 6 Weak 계통의 UPFC에 의한 전력계통 동요 억제 효과 (제어시 및 비 제어시)  
Fig. 6 Inter area oscillations with and without damping control (Weak system)

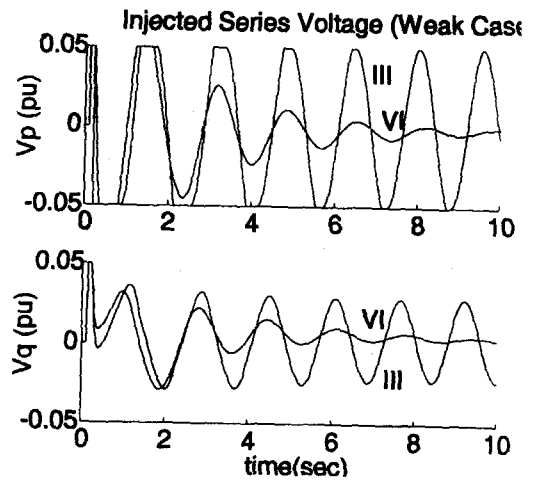


그림 7 UPFC에 의해 삽입된 직렬 전압원 (Weak 계통)  
Fig. 7 Series injected voltage by UPFC with and without damping control (Weak system)

그림8은 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 반복 계산 횟수가 2회로 유지됨을 확인할 수 있어, 제안된 알고리즘의 효율성을 검증할 수 있었다.

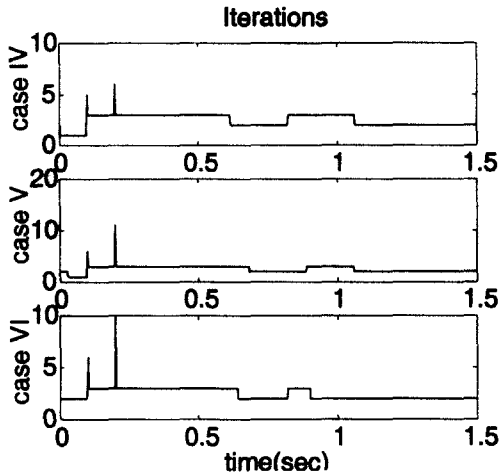


그림 8 각사례에서의 각단계에서의 반복계산 횟수

Fig. 8 Number of iterations of each step for case IV,V and VI

### 5. 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 제안하였다. 제안된 시뮬레이션 알고리즘은 기존의 전력계통 해석 프로그램에서도 약간의 수정으로 용이하게 UPFC를 모의할 수 있는 장점을 가지고 있다.

또한, 제안된 알고리즘을 지역간 동요모드 억제제 위한 시간영역 시뮬레이션 및 주파수 영역 해석에 적용함으로써 제안된 알고리즘의 타당성을 입증하였다. 사례연구 결과로부터 제안된 알고리즘의 우수한 수렴특성과 UPFC의 여러 가지 동작점에서의 동요억제 효과를 확인할 수 있었다. 이로서 본 연구를 통해 UPFC가 포함된 대규모 전력계통의 동특성을 해석할 수 있는 토대를 마련하였다고 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의해 기초전력공학 공동연구소의 주관으로 수행되었음 (과제관리번호98-025)

### 참 고 문 헌

[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] Rahman, M.Ahmed, R. Gutman, R.J.O'Keefe, R.J. Nelson, J. Bian, UPFC Application on the AEP System: Planning Considerations, IEEE Trans. On Power Systems, Vol.12.No.4,Nov.1997,pp.1695-1701.  
 [6] 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.  
 [7] 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.  
 [8] K.R. Padiyar, K.U. Rao, Modeling and Control of Unified Power Flow Controller for Transient Stability, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.21, No.1, 1999, pp.1-11.  
 [9] M.Noroozian, L. Angquist, M.Ghandhari and G. Andersson, Improving Power System Dynamics by Series-Connected FACTS Devices, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.12, No.4, Oct.1997, pp.1635-1641.  
 [10] H.F. Wang, Damping Function of Unified Power Flow Controller, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol.146, No.1, Jan.1999.  
 [11] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.  
 [12] P.W. Sauer and M.A.Pai, Power System Dynamics and Stability, Prentice Hall, 1998.  
 [13] J. Bian, D.G. Ramey, R.J. Nelson, A. Edris, A Study of Equipment Sizes and Constraints for a Unified Power Flow Controller, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.12, No.3, Jul.1997, pp.1385-1391.  
 [14] M. Klein, G.J. Rogers, P. Kundur, A Fundamental Study of Inter-area Oscillations in Power Systems, IEEE Trans. On Power Systems, Vol.6, No.1, 1991, pp.914-920.  
 [15] G.N. Taranto, J.H. Chow, A Robust Frequency Domain Optimization Technique for Tuning Series Compensation Damping Controllers IEEE Trans. On Power Systems, Vol.10, No.3, Aug. 1995. Pp.1219-1225.

부 록

MATLAB 으로 표현된  $J_U$  ( $J_{upfc}$ )의 각 요소

```

ipc=V4*sin(as-a4)-V3*sin(as-a3);

Isr=Vs/xs*sin(as+a3);
Isi=-Vs/xs*cos(as+a3);

df1dV3 =
Vs/xs*V4*cos(a3)*sin(as-a4)/(V3^2)-Ym(1,1)*cos(a3+Ya(1,1));
df1da3
=-Vs/(xs*V3)*(V3*cos(as-a3)*cos(a3)-ipc*sin(a3))+Isi+Ym(1,1)
)*V3*sin(a3+Ya(1,1))+Iq*cos(a3);
df1dV4
=-Vs/(xs*V3)*sin(as-a4)*cos(a3)-Ym(1,2)*cos(a4+Ya(1,2));
df1da4 =
Vs*V4/(xs*V3)*cos(as-a4)*cos(a3)+Ym(1,2)*V4*sin(a4+Ya(1,2)
);

df2dV3 =
Vs*V4/(xs*(V3^2))*sin(as-a4)*sin(a3)-Ym(1,1)*sin(a3+Ya(1,1))
;
df2da3
=-Vs/(xs*V3)*(V3*cos(as-a3)*sin(a3)+ipc*cos(a3))-Isr-Ym(1,1)
)*V3*cos(a3+Ya(1,1))+Iq*sin(a3);
df2dV4
=-Vs/(xs*V3)*sin(as-a4)*sin(a3)-Ym(1,2)*sin(a4+Ya(1,2));
df2da4 =
Vs*V4/(xs*V3)*cos(as-a4)*sin(a3)-Ym(1,2)*V4*cos(a4+Ya(1,2)
);

df3dV3 =-Ym(2,1)*cos(a3+Ya(2,1));
df3da3 = Vs/xs*cos(as+a3)+Ym(2,1)*V3*sin(a3+Ya(2,1));
df3dV4 =-Ym(2,2)*cos(a4+Ya(2,2));
df3da4 = Ym(2,2)*V4*sin(a4+Ya(2,2));

df4dV3 =-Ym(2,1)*sin(a3+Ya(2,1));
df4da3 = Vs/xs*sin(as+a3)-Ym(2,1)*V3*cos(a3+Ya(2,1));
df4dV4 =-Ym(2,2)*sin(a4+Ya(2,2));
df4da4 =-Ym(2,2)*V4*cos(a4+Ya(2,2));

J_upfc = [ df1dV3 df1da3 df1dV4 df1da4
            df2dV3 df2da3 df2dV4 df2da4
            df3dV3 df3da3 df3dV4 df3da4
            df4dV3 df4da3 df4dV4 df4da4 ];
    
```

표 2 사례연구에 사용된 발전기 정수

Table 2. machine parameters

H	58.5	xd	0.2
D	0	xd'	0.033
Tdo'	8.0	xq	0.18
Tqo'	0.4	xq'	0.033

저 자 소 개



손 광 명 (孫 光 明)

1966년 9월 6일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1997년-현재 동의대 전기전자정보통신공학부 조교수.

Tel : 051-890-1671, Fax : 051-890-1619

E-mail : kimson@dongeui.ac.kr