

전류 주입형 방식의 UPFC 모델을 이용한 과도 안정도 해석

김천희, 박정수, 장길수, 손광명\*, 김태균\*\*  
고려대학교, 동의대학교\*, 한국전력연구원\*\*

Modeling of Unified Power Flow Controllers Using a Current Injection Method for Transient Stability Analysis

Chonhoe Kim, Jungsoo Park, Gilsoo Jang, Kwang M. Son\*, Tae-Kyun Kim\*\*  
Korea Univ., Dongeui Univ.\*, KEPRI\*\*

**Abstract** - This paper presents a dynamic simulation of the unified power flow controller (UPFC) using a current injection method. Flexible AC Transmission System (FACTS) devices give more flexibility of control for security and economic operation of power systems. Difficulties of modeling UPFC in the conventional dynamic simulation programs arise from the fact that the injected voltage by the series inverter is superimposed on the shunt inverter side voltage. A solution can be a current injection method, in which a serial part of UPFC is converted to a parallel equivalent circuit using source transformation, and two current sources affect each other at every time step. To verify efficiency of this method, the proposed model is applied for the transient analysis of an example power system.

되고, 병렬 주입 전류  $I_0$ 는 STATCOM으로 제어된다. 직렬 주입 전압은 그림 1(b)와 같이 등가 주입 전류원으로 변환할 수 있다. 그래서 UPFC의 전류 주입은 반복 기법을 이용해서 해석된다.

1. 서 론

전력 전자 소자를 이용한 FACTS 기기는 계통의 제어성, 안정성, 그리고 AC 송전 능력을 향상에 크게 기여한다[1]. 이러한 FACTS 기기는 SSSC와 같은 직렬 제어기, STATCOM과 같은 병렬 제어기, UPFC와 같은 직병렬 제어기로 분류할 수 있다. 이러한 FACTS 제어기 중, UPFC는 송전 선로, 임피던스, 위상, 그리고 무효전력을 제어할 수 있는 강력한 기기이다.

FACTS 기기의 동적 모델링, 시뮬레이션과 제어 방법 등이 현재도 계속 진행중이다[2],[4]-[9]. 그러나 기존의 UPFC 연구는 EMTP를 이용한 시간 영역 시뮬레이션을 통해서 스위치 동작에 기초한 UPFC의 세부적인 동적 모델링에만 중점을 두었다 [2].

UPFC는 직렬 인버터로부터 주입되는 전압이 병렬 인버터측 전압과 서로 영향을 미치기 때문에 기존의 동적 시뮬레이션 프로그램에서는 UPFC 모델링이 어려웠다. 두 전압의 관계는 합축적이고 비선형적이기 때문에 동적 시뮬레이션의 매 스텝마다 반복적으로 풀어야 한다[3].

본 논문에서는 동적 시뮬레이션에서의 UPFC가 미치는 영향에 대해 연구하기 위해서 UPFC의 전류 주입형 모델이 제안된다. 이 논문의 주 공헌은 전류 균형 방정식에 기초한 뉴턴 타입의 반복 공식을 유도한 것이다. 제안된 모델이 뉴턴 모델이므로 그것은 개념적으로 간단하고 2차 수렴 특성을 가진다. 유도된 모델은 어떤 형태의 발전기 모델, 네트워크, 부하에도 적용될 수 있다. 이를 간단한 2area 계통 모델에 적용하여 UPFC의 전류 주입형 모델에 대한 효과를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 UPFC 모델링

전류 주입형 모델을 이용한 UPFC 모델의 등가 회로는 그림 1과 같다. 직렬 주입 전압  $V_s$ 는 SSSC로 제어

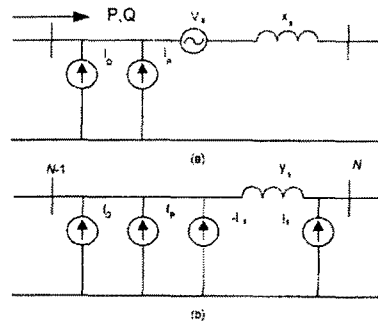


그림 1 (a) UPFC 모델, (b) 전류 주입형 모델

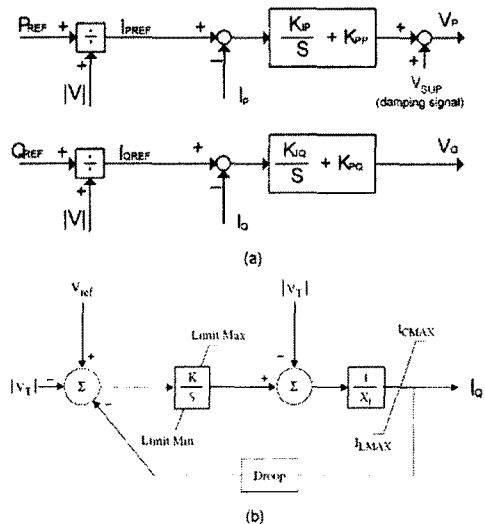


그림 2 (a) SSSC 제어 블록 (b) STATCOM 제어 블록

2.2 제안된 모델을 적용한 회로망 방정식

대부분의 동적 시뮬레이션 프로그램들은 계통의 회로망 방정식을 풀기 위해서 전류 균형 형태를 채용한다. 전력 계통 동적 모델은 벡터 형태로서 식(1)과 (2)에서 보듯이 미분 방정식들의 모임과 대수 방정식의 모임으로

각각 나타난다.

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

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

$\mathbf{I}$ 와  $\mathbf{V}$ 는 복소 주입 전류와  $n$ 차의 전압벡터이다. 그리고  $\mathbf{x}$ 는  $m$ 차의 상태 변수 벡터이다.  $n$ 은 계통의 노드 숫자와 같고  $m$ 은 사용되는 동적 모델의 형태와 숫자에 의존한다. 비선형 정적 부하들은 식(2)에서 보는 것처럼 그들의 모션 전압에 의존하는 주입 전류로 나타낼 수 있다. 식(2)는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F} = \mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{V}) - \mathbf{Y}\mathbf{V} = \mathbf{0} \quad (3)$$

식(3)을 실수부와 허수부로 나누고  $2n$ -by- $2n$  자코비안을 계산해서 뉴턴 반복 공식을 얻을 수 있다.

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

$\mathbf{R}$ 과  $\mathbf{I}$ 는 실수부와 허수부를 나타낸다. 명확한 적분 접근에서 매 스텝마다 식(1)은 상태 변수  $\mathbf{x}$ 를 업데이트하기 위하여 쓰이고, 식(2)의 대수적인 변수들은 식(4)에 주어진 뉴턴 공식에 의해 풀려진다.

$$\mathbf{F}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{I}(\mathbf{V}) \\ \mathbf{I}^{u1}(\mathbf{V}^{u1}) \\ \mathbf{I}^{u2}(\mathbf{V}^{u2}) \\ \vdots \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{Y} & \mathbf{Y}^{m1} & \mathbf{Y}^{m2} & \dots \\ \mathbf{Y}^{n1} & \mathbf{Y}^{u1} & \mathbf{0} & \dots \\ \mathbf{Y}^{n2} & \mathbf{0} & \mathbf{Y}^{u2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{V}^{u1} \\ \mathbf{V}^{u2} \\ \vdots \end{bmatrix} = \mathbf{I}_A(\mathbf{V}_A) - \mathbf{Y}_A \mathbf{V}_A = \mathbf{0}$$

$$l = 1, 2, \dots, L \quad (5)$$

$\mathbf{I}$ 와  $\mathbf{V}$ 는 식(2)의 기존의  $n$ 차 복소 주입 전류와 전압 벡터이다. 식(5)에서  $\mathbf{I}^{u1}$ 와  $\mathbf{V}^{u1}$ 는 2-D 복소 UPFC 주입 전류와 전압 벡터이다. 전압에 대응되는 위상각  $\theta$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{I}^{u1} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1^{u1} \\ \mathbf{I}_2^{u1} \end{bmatrix}, \mathbf{V}^{u1} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^{u1} \\ \mathbf{V}_2^{u1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^{u1} \angle \theta_1^{u1} \\ V_2^{u1} \angle \theta_2^{u1} \end{bmatrix} \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (6)$$

첨자 1은 병렬 인버터 측 노드(그림1의 N-1)이고 첨자 2는 직렬 인버터 또는 선로 측 노드(그림1의 N)이다. 식(5)의 첨자 A는 증가된 양을 의미한다. 하위 행렬  $\mathbf{Y}$ 는 식(2)에서처럼 네트워크와 발전기 고정자 과도 임피던스를 포함하는  $n$ -by- $n$  기존 버스 어드미턴스 행렬이고  $\mathbf{Y}^m$ 과  $\mathbf{Y}^n$ 은 UPFC 노드와 네트워크 사이의 상호 어드미턴스 행렬이다.  $\mathbf{Y}^n$ 은 UPFC 인버터 측 노드와 선로 측 노드를 관련시킨다.

식(5)를 실수부와 허수부로 나누는 것과  $2N$ 개의 방정식을  $2N$ 개의 알 수 없는 변수로 편미분하면  $2N$ -by- $2N$  자코비안을 가진 뉴턴 공식이 된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta F_R \\ \Delta F_I \\ \Delta F_R^{u1} \\ \Delta F_I^{u1} \\ \Delta F_R^{u2} \\ \Delta F_I^{u2} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J} & \mathbf{J}^{m1} & \mathbf{J}^{m2} & \dots \\ \mathbf{J}^{n1} & \mathbf{J}^{u1} & \mathbf{0} & \dots \\ \mathbf{J}^{n2} & \mathbf{0} & \mathbf{J}^{u2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \\ \Delta V^{u1} \\ \Delta \theta^{u1} \\ \Delta V^{u2} \\ \Delta \theta^{u2} \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ or}$$

$$\Delta \mathbf{F}_A = \mathbf{J}_A \Delta \mathbf{V}_A \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (7)$$

$\mathbf{J}$ 는 식(4)에 대응하는 기존의  $2n$ -by- $2n$  자코비안이고  $\mathbf{J}^m$ ,  $\mathbf{J}^n$  그리고  $\mathbf{J}^u$ 는 UPFC 때문에 증가된 부분이다.

### 2.3 시뮬레이션 결과

사례연구에 사용된 간단한 계통은 그림 2와 같이 간단한 2-area 4기 전력 계통 모델이다. UPFC가 200km 타이 라인 한가운데 설치되었다고 가정한다. 모든 발전기는 1차의 여자기를 가진 4차 2축 모델이다. 모든 여자기 인수들은  $K_a=200$ ,  $T_a=0.02$ 로 같다. 모든 부하는 상수 임피던스 형태로 가정한다.

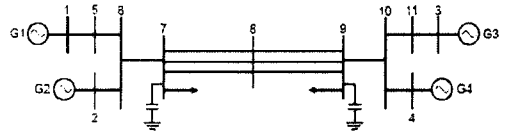


그림 3 간단한 2-area 4기 전력 계통 모델

시뮬레이션에서 고려한 2개의 동작점이 표1에 열거되어 있다. 시간 영역 시뮬레이션은 각 계통에 area 1의 부하 모선에 6 사이클의 3상 사고를 적용해서 수행되었다. 직렬 주입 전압의 한계는  $V_p$ 와  $V_Q$  모두 0.05 pu로 가정한다.  $\pm 0.1$ 의 non-windup limit이 각 적분기에 적용되었다.

【표 1】 모의한 운전점

System	Tie Power Flow (MW)	Gen/Load (MW)	
		Area 1	Area 2
Normal	20.9	1003/970	1400/1390
Stressed	377	1384/970	1400/1740

UPFC가 적용되면 직렬 주입 전압  $V_p$ 와  $V_Q$ 는 직렬 제어 부분인 SSSC로써 제어되고 병렬 주입 전류의 크기  $I_Q$ 는 병렬 제어 부분인 STATCOM으로써 동시에 제어된다.

그림 4는 UPFC의 직렬 주입 전압이다. 그림 4에서 보듯이,  $V_Q$ 는 upper limit 값으로 정해져서 제어되지 않는다. 결과적으로 직렬 주입 전압  $V_S$ 의 제어 가능한 위상  $\theta_S$ 의 범위가 줄어들었다. 그러나 직렬 주입 전압의 limit은 UPFC와 SSSC가 같다. 다시 말해,  $V_S$ 의 최대 값 역시 같다. 결과적으로, UPFC는 SSSC보다 직렬 보상 능력이 적어지게 된다.

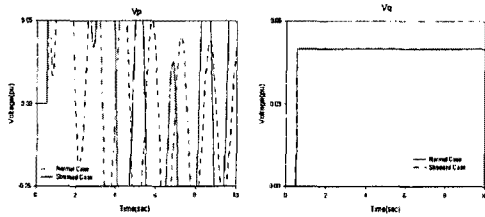


그림 4 UPFC에 의해 제어되는 직렬 주입 전압  $V_p$ 와  $V_q$

병렬 제어가 이러한 현상을 일으킨다. 그림 5은 UPFC의 병렬 주입 전류이다. SSSC 제어 모드에서 병렬 인버터측 전압은 유효 전력을 보상하기 위해서 무제어 모드보다 더 불안정해야 한다. 그러나 UPFC의 병렬 제어기(STATCOM)은 그림 5에서 보듯이 전압 조정을 위해 전류의 형태로 무효 전력을 주입한다. 병렬 제어기의 작동으로 인하여, 직렬 주입 전압  $V_s$ 의 허수 부분인  $V_q$ 는 upper limit으로 설정되고 유효전력 보상 능력은 SSSC보다 줄어들게 되어 계통의 댐핑 제어 능력이 저하되게 된다.

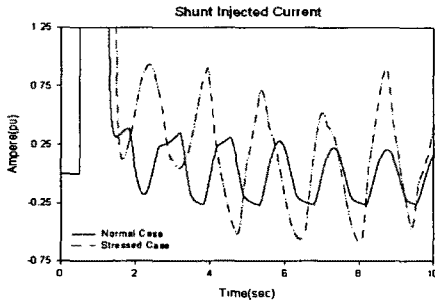


그림 5 UPFC에 의해 제어되는 병렬 주입 전류  $I_D$

이러한 이유로 댐핑 제어기로 lead-lag 타입의 regulator를 고려해야 한다. 보조 입력 신호로 인하여 발생하는 선로간 전력 조류의 차이 또한 고려하여야 한다.

댐핑 신호가 추가된 것은 매우 중요한 고려 사항이다. 댐핑 신호는 그림 2의  $P_{REF}$ 와 같은 다른 점에 추가될 수도 있다. 그러나 댐핑 신호가 적분기를 포함한다면, 댐핑 제어기의 과도 동작은 나빠질 것이다. 그러므로 그림 2에서 보이는 직렬 제어기의 끝 부분인  $V_p$ 에 추가한다.

$$V_{SUP} = K_{Stab} \frac{sT_W}{1+sT_W} \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \Delta P_{line} \quad (8)$$

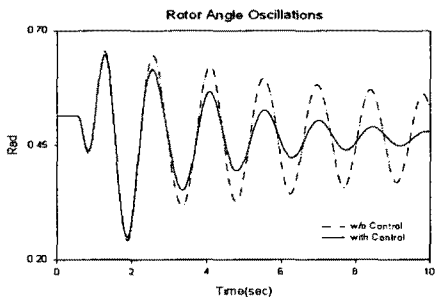


그림 6 댐핑 제어 여부에 따른 로터 앵글 진동 (normal case)

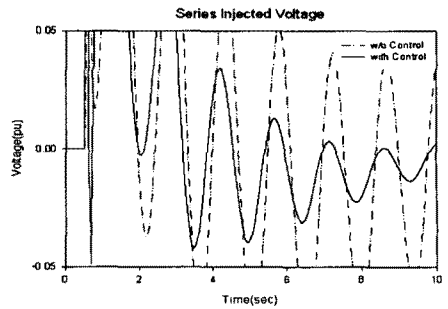


그림 7 댐핑 제어 여부에 따른 UPFC의 직렬 주입 전압 (normal case)

그림 6은 normal case에서 식(8)의 댐핑 제어기의 여부에 따른 지역간의 로터 앵글 진동을 보여준다. 댐핑 제어기가 있을 경우 그림 7에서처럼  $V_p$ 의 크기가 댐핑 신호  $V_{SUP}$ 에 의해 줄어들고 댐핑 제어를 하게 된다. 그러므로 UPFC는 보조 입력 신호를 통해 댐핑 제어가 가능하게 된다.

### 3. 결 론

이 논문은 Newton-type 전류 주입형 모델을 이용한 UPFC를 동적 시뮬레이션에 적용하여 그 효과에 대하여 알아보았다. 시뮬레이션을 통해 제안된 모델의 효과를 검증할 수 있었다. 이 모델을 통하여 UPFC의 동적특성을 확인할 수 있고, 계통의 과도 안정도를 향상시킬 수 있었다. 앞으로 제안된 모델을 대규모 계통에 적용시키는 연구가 필요할 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi, "Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems," *IEEE Press Marketing*, pp. 2-16, New York, 2000.
- [2] A. Nabavi-Niaki and M.R. Iravani, "Steady-State and dynamic models of unified power flow controller (UPFC) for power system studies," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 11, pp. 1937-1943, Nov. 1996
- [3] Kwang M. Son, Robert H. Lasseter, "Newton-Type Current Injection Model of UPFC Studying Low-Frequency Oscillation," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol 10, no 2, pp. 694-701, 2004.
- [4] M. Noroozian, :, Angquist, M. Ghandhari, and G. Andersson, "Im-proving power system dynamics by series-connected FACTS devices," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, pp. 1635-1641, Oct. 1997.
- [5] K. R. Padiyar and K. U. Rao, "Modeling and control of unified power flow controller for transient stability," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 1-11, 1999.
- [6] S. Arabi, P. Kundur, and R. Adapa, "Innovative techniques in modeling UPFC for power system analysis," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, pp. 336-341, Feb. 2000.
- [7] Z. Huang, Y. Ni, C. M. Shen, F. F. Wu, S. Chen, and B. Zhang, "Application of unified power flow controller in interconnected power systems-Modeling, interface, control strategy and case study," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, pp. 817-824, May 2000.
- [8] H. F. Wang, "A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations-Part III: Unified power flow controller," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 15, pp. 978-983, July 2000.
- [9] S. Bruno, E. De Tuglie, M. L. La Scala, and P. Scrpellini, "Dynamic security corrective control by UPFC's," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, pp. 490-497, Aug. 2001.
- [10] H. Fujita, Y. Watanabe, and H. Akagi, "Transient analysis of a unified power flow controller and its application to design of the DC-link capacitor," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, pp 735-740, Sept. 2001.
- [11] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.