

전류 주입형 기법을 이용한 복수의 전압원 FACTS 기기들이 설치된 계통의 동적 안정도 해석에 대한 연구

박정수, 장길수, 손광명\*  
고려대학교, 동의대학교\*

A Study on the Dynamic Stability Analysis of Power System with Multi-VSI type FACTS Devices using the Current Injection Method

Jungsoo Park, Gilsoo Jang, Kwang M. Son\*  
Korea University, Dongeui University\*

**Abstract** - FACTS(Flexible AC Transmission System) 기기들은 전력 계통의 경제적이고 안정적인 운용과 제어에 더 많은 유연성을 제공할 수 있다. 그러나 이러한 FACTS 기기들은 기존의 전력 계통 설비들과는 달리 그 특성이 매우 비선형적이고 복잡하기 때문에 기존 전력 계통의 동적 시뮬레이션 알고리즘에 적용시키는 것이 매우 어렵다. 이러한 어려움을 해결하기 위하여 전압원 인버터(Voltage Sourced Inverter) 형태의 FACTS 기기를 병렬 형태로 주입되는 전류로 등가화 하여 기존의 시뮬레이션 알고리즘에 적용하는 방법이 제안되었다. 본 논문에서는 이 전류 주입형 기법을 이용하여 다수의 FACTS 기기들이 설치된 계통의 동적 안정도 해석 방법을 제안한다. 제안된 방법은 서로 다른 형태의 FACTS 기기들이 설치된 경우에도 적용될 수 있으며 이를 이용하여 서로 다른 FACTS 모델들 간의 조합에 의한 계통의 안정도 변화를 사례연구를 통하여 보일 것이다.

1. 서 론

Flexible AC Transmission System (FACTS) 기기들은 기존의 전력 계통 설비들과는 달리 전력 전자에 기초한 제어기들(power electronics based controllers)이다. 전력 전자 기반의 FACTS 기기들 중에 가장 발전된 것은 동기 전압원(synchronous voltage source)으로 자력식 스위치 컨버터(self-commutated switching converter)를 사용하는 제어기들이다. 이러한 VSI(Voltage Sourced Inverter) 형태의 FACTS 제어기들에는 대표적으로 병렬 형태의 Static Compensator (STATCOM)과 직렬 형태의 Static Synchronous Series Compensator (SSSC), 그리고 직 병렬 결합 형태의 Unified Power Flow Controller (UPFC)가 있다.[1]

이러한 VSI 형태의 FACTS 기기들에 의해 주입되는 전압은 내부 직류 캐패시터에서 공급되며 계통과 연결된 외부 회로의 전압에 의존적이다. 또한 직 병렬 인버터를 모두 가진 UPFC의 경우에는 각 인버터의 주입 전압이 서로 다른 인버터 측 노드의 전압에 영향 미치고 내부 직류 캐패시터를 통해 인버터 간에 에너지가 이동하여 각 인버터의 동작에 영향을 미친다. 이 관계는 매우 불분명(implicit)하고 비선형적(nonlinear)이어서 기존의 전력 계통 동적 시뮬레이션 알고리즘에 적용하는 것이 매우 어렵다. 더 나아가 여러 가지 형태의 다수의 FACTS 기기가 설치된 전력 계통 해석 방법은 더욱 어려운 일이며 이러한 이유로 인하여 계통의 기획 및 운용 전략에 있어서 다수의 FACTS 기기들을 이용한 방법은 아직까지도 고려되지 못하고 있다.

[3]에서는 UPFC의 직렬 인버터에 의해 주입되는 전압과 인버터에 이동하는 에너지를 외부 회로의 전압 위상에 의존적인 병렬 주입 전류들로 바꾸어 각 인버터의 외부 노드에 중첩된 전류로 표현하는 방법이 제안 되었다. 본 논문에서는 이와 같은 전류 주입형 기법을 이용하여 VSI 형태의 FACTS 기기들이 기존의 전력 계통 동적 시뮬레이션 알고리즘의 전압 전류 방정식에 적용 가능하도록 하였다. 이 모델은 UPFC 뿐만 아니라 SSSC와 STATCOM으로도 사용될 수 있으며 각 FACTS 기기에 의해 주입되는 전압은 각각의 독립적인 주입 전류로 표현할 수 있기 때문에 계통에 설치되는 FACTS 기기의 개수에 따라 손쉽게 확장될 수 있다.

2. 본 론

2.1 VSI FACTS 기기 모델링

그림 1은 UPFC를 간략하게 도식화하여 표현한 것이다. UPFC는 송전선과 직렬 그리고 병렬로 연결된 2개의 VSI (Voltage Sourced Inverter)로 이루어져 있으며 이 두 개의 인버터들은 내부 DC 회로에 캐패시터를 공유하고 있다. 직렬 인버터는 송전선에 흐르는 유효전력과 무효전력을 제어하는 역할을 하며 이 역할과 동작 특성은 SSSC와 유사하다. 병렬 인버터는 UPFC의 노드에 무효 전력을 주입하여 UPFC 노드의 전압을 제어하는 역할을 하며 이는 STATCOM과 유사하다. 따라서 UPFC는 유효 전력과 무효전력 그리고 UPFC 노드의 전압을 동시에 제어할 수 있다[2].

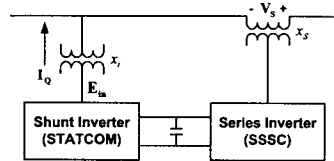
그림 1은 아래 그림 2(a)와 같은 회로 형태로 모델링 될 수 있다. 직렬 주입 전압  $V_s$ 와 직렬 임피던스  $x_s$ 는 그림 1의 직렬 인버터 부분의 등가 회로이며 병렬 주입 전류  $I_Q$ 는 그림 1의 병렬 인버터 의해 주입되는 전류이다. 직렬 인버터만을 가진 SSSC와 병렬 인버터만을 가진 STATCOM 또한 각각 이와 같은 형태로 표현될 수 있다.

기존의 전력 계통 동적 시뮬레이션 프로그램에 UPFC를 적용하기 어려운

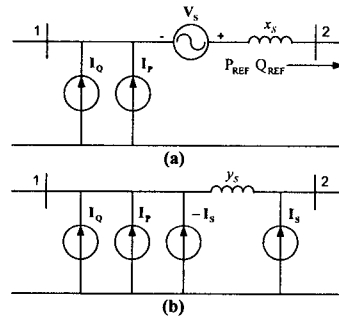
첫 번째 이유는 직렬 인버터에 의한 주입 전압  $V_s$ 가 병렬 인버터에 영향을 받는 병렬 인버터 측(그림 2의 1번 노드) 전압에 겹쳐지기(superimposed) 때문이다. 또한 직렬 인버터 측(그림 2의 2번 노드)의 결과적인 전압도 병렬 인버터 측 전압의 위상에 영향을 받게 되며 병렬 인버터 측의 전압 또한 직렬 인버터의 주입 전압에 영향을 받는다. 이 관계는 매우 불분명하고 비선형적이다. 이 문제를 해결하기 위하여 그림 2(a)의 직렬 인버터 부분을 Thevenin 회로 법칙을 이용하여 그림 2(b)와 같이 등가화 된 전류원  $I_S$ 로 등가화 하였다.

$$I_S = \frac{V_s \exp j\theta_1^u}{jx_s} \quad (1)$$

위 식 (1)에서 윗 첨자 u는 FACTS가 설치된 노드를 의미하며 아래 첨자 1은 병렬 인버터 측 노드를 의미한다.



〈그림 1〉 간략하게 도식화 하여 나타낸 UPFC



〈그림 2〉 (a) UPFC 모델, (b) 등가화 된 전류 주입형 모델

병렬 인버터에 의한 주입 전류  $I_Q$ 는 병렬 변압기( $x_t$ )를 가로지르는 병렬 인버터의 내부 전압  $E_{IN}$ 과 외부 회로의 병렬 인버터 측 전압  $V_1^u$ 과의 차이에 의해 결정된다.  $E_{IN}$ 과  $V_1^u$  위상이 같고 병렬 변압기의 임피던스는 순수한 리액턴스 값을 갖는다. 따라서 병렬 인버터에 의한 주입 전류  $I_Q$ 는 병렬 인버터 측 전압  $V_1^u$ 와 90도의 위상차를 갖게 되어 진상 또는 지상의 무효 전력을 공급한다.

$$I_Q = \frac{E_{IN} \angle \theta_1^u - V_1^u \angle \theta_1^u}{jx_t} = \frac{E_{IN} - V_1^u}{x_t} \angle (\theta_1^u - \frac{\pi}{2}) \quad (2)$$

$$I_Q = I_Q \exp j(\theta_1^u - \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

UPFC 모델링이 어려운 두 번째 이유는 직렬 인버터에 의해 공급되는 유효전력이 내부 DC 캐패시터를 통해서 병렬 인버터 측의 AC 회로에서 유도된다는 것이다[2]. 위 그림 2의 병렬 인버터 측 노드의 전류  $I_P$ 는 이 유효전력을 등가화하여 표현한 전류원이다. 이는 다음과 같이 요약될 수 있다.

$$Re[V_S I_{12}^*] = -E_{IN} I_P^*, I_{12} = \frac{V_1^u + V_s \exp j\theta_1^u - V_2^u}{jx_s} \quad (4)$$

$$I_P = \left[ -\frac{Re[V_S I_{12}^*]}{E_{IN}} \right]^* \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)에서 아랫 첨자 2는 직렬 인버터 측 노드를 의미한다. 이러한 과정에 의하여 직 병렬 인버터들에 의해 주입되는 전압들과 인버터

들 간의 에너지 이동은 그림 2(b)에서 볼 수 있는 것처럼 각 노드에서 중첩된(superposed) 전류원으로 표현될 수 있다. 따라서 그림 2(b)에서 직렬 인버터와 병렬 인버터에 해당하는 전류원만 선택하여 고려할 경우 각각 SSSC와 STATCOM으로 적용될 수 있다.

### 2.2 전압전류 방정식의 확장

많은 전력 계통 동적 시뮬레이션 프로그램들은 계통의 네트워크 방정식을 풀기 위해 전압 전류 균형 방정식을 적용한다. 전력 계통 동적 모델은 식 (6)와 같은 미분 방정식들의 집합과 식 (7)과 같은 대수 방정식들의 집합으로 표현될 수 있다.

$$\dot{x} = f(x, V) \quad (6)$$

$$I(x, V) = YV \quad (7)$$

I와 V는 n차의 복소 전류와 전압 벡터들이고 x는 m차의 상태 변수들의 벡터이다. n은 계통의 모선 숫자와 같고 m은 사용되는 동적 모델들의 형태화 숫자에 의존적이다. 비선형 정적 부하와 같은 몇몇 계통 기기들은 식 (7)에서 자신의 모선 전압에 의존적인 주입 전류로 표현된다. 그래서 대수 방정식들은 일반적으로 불분명(implicit)하고 비선형적이어서 매 시간 단계마다 반복 계산에 의해 풀어야 한다.

일반적으로 병렬 형태의 FACTS 기기는 그림 1의 병렬 인버터(shunt inverter) 부분과 같이 계통의 한 모선에 병렬로 설치되는 형태로 모델링되며 직렬 형태의 FACTS 기기는 그림 1의 직렬 인버터(series inverter) 부분과 같이 계통의 한 모선(그림 2의 1번 노드)을 기준으로 제어하고자 하는 선로와 연결되면서 선로 방향으로 노드가 추가(그림 2의 2번 노드)되는 형태로 모델링 된다. 따라서 L개의 FACTS가 설치된 경우에 기존의 대수 방정식 (7)은 다음 식 (8)과 같이 변형된 형태로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I(V) \\ I^{nL}(V^{nL}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y & Y^{m1} \dots Y^{mL} \\ Y^{m1} & Y^{m1} \dots 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y^{nL} & 0 \dots Y^{nL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ V^{n1} \\ \vdots \\ V^{nL} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$I^{nL} = I_1^{nL}, V^{nL} = V_1^{nL} = V_1^{nL} \angle \theta_1^{nL} \quad (\text{STATCOM}) \quad (9)$$

$$I^{nL} = \begin{bmatrix} I_1^{nL} \\ I_2^{nL} \end{bmatrix}, V^{nL} = \begin{bmatrix} V_1^{nL} \\ V_2^{nL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1^{nL} \angle \theta_1^{nL} \\ V_2^{nL} \angle \theta_2^{nL} \end{bmatrix} \quad (\text{SSSC, UPFC}) \quad (10)$$

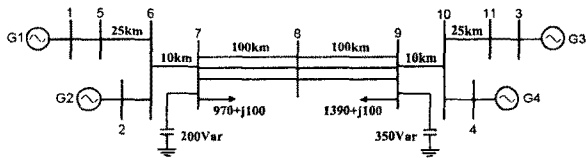
식 (9)와 식 (10)에서 아래 첨자 1과 2는 각각 그림 2의 병렬 인버터 측 노드와 직렬 인버터 측 노드를 의미하고 위첨자 l은 FACTS 기기의 번호를 의미한다. 식 (8)에서 I와 V의 차수는 N=n-L이 되며 전체 계통의 모선 숫자는 STATCOM이 설치된 경우에는 N=n이 되고 SSSC와 UPFC가 설치된 경우에는 N=n+L이 된다.

하위 행렬 Y는 (n-L)-by-(n-L)차의 일반적인 어드미턴스 행렬이고 Y<sup>m1</sup>과 Y<sup>mL</sup>은 FACTS 노드들과 네트워크 사이의 상호 어드미턴스 행렬이며 Y<sup>nL</sup>은 FACTS 노드들 사이의 상호 어드미턴스 행렬이다. 따라서 계통에 설치된 FACTS가 STATCOM일 경우 Y<sup>m1</sup>, Y<sup>mL</sup>과 Y<sup>nL</sup>는 각각 (n-1)-by-1차, 1-by-(n-1)차, 그리고 1-by-1차의 행렬이 되고 SSSC 또는 UPFC의 경우에는 각각 (n-1)-by-2차, 2-by-(n-1)차, 그리고 2-by-2차의 복소수 행렬이 된다.

위 식 (8)에 의하여 계통에 설치된 각 FACTS 기기들의 주입 전압에 의한 결과적인 주입 전류와 각 노드의 전압이 매 시간 단계마다 반복계산에 의해 풀이하게 된다.

### 2.3 사례연구

사례연구에 사용된 예제 계통은 그림 3에 볼 수 있는 간단한 2 지역, 4기의 전력 계통 모델이다[4]. 모든 발전기는 1차 고속 여자기를 가진 4차 2축 모델이다. 2축 모델의 수식은 [5]에 나타나 있으며 1차 고속 여자기는 [4]에 나타나 있다. 모든 부하는 일정한 임피던스 형태로 가정한다.

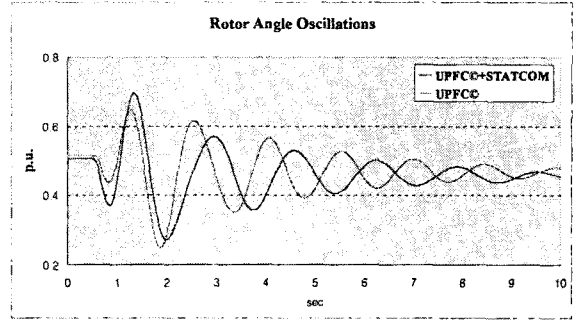


〈그림 3〉 사례연구에 사용된 2 지역 시험 계통

FACTS 기기들은 200km의 타이 선로에 설치된다고 가정한다. STATCOM이 설치된 경우 7번 또는 8번 모선이 FACTS 노드가 되고 SSSC 또는 UPFC가 설치된 경우에는 7번 또는 8번 모선이 병렬 인버터 측 노드(그림 2의 1번 노드)가 되며 12번 모선과 13번 노드가 추가되어 직렬 인버터 측 노드(그림 2의 2번 노드)가 된다. 이 때 7번 모선과 8번 모선 사이의 선로들은 12번 모선과 8번 모선 사이의 선로가 되고 8번 모선과 9번 모선 사이의 선로들은 13번 모선과 9번 모선 사이의 선로로 바뀌게 된다.

시간 영역에서의 시뮬레이션은 FACTS가 설치되지 않은 경우와 SSSC, STATCOM 그리고 UPFC가 하나만 설치된 경우, 그리고 2개가 설치된 경우에 대하여 실행하였다. FACTS가 설치되지 않은 경우와 STATCOM이 설치된 경우에는 선로 어드미턴스에 직렬 인버터의 변압기 리액턴스와 같은 임피던스 값을 추가하여 FACTS 기기들 간의 상대적인 비교가 가능하

도록 하였다. 시뮬레이션은 10초간 수행되었으며 0.5초에 7번 모선과 8번 모선 사이의 1회선에 3상 사고를 상정하였다. 사고는 6 사이클 후에 제거되며 사고 전과 사고 제거 후의 계통은 같다.



〈그림 4〉 발전기의 지역 간 회전자 진동, δ<sub>31</sub>

위 그림 4는 7번과 8번 모선 사이에 UPFC만 설치된 경우와 8번과 9번 모선 사이에 STATCOM을 같이 설치한 경우를 비교한 그림이다. 이 그림에서 볼 수 있는 것처럼 UPFC와 STATCOM을 같이 설치한 경우가 그렇지 않은 경우보다 지역 간 진동의 감쇄가 더 증가한 것을 볼 수 있다. 따라서 제안된 방법이 다수의 FACTS 기기가 계통의 동적 특성에 미치는 영향이 잘 반영되고 있다고 할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 VSI(Voltage Sourced Inverter) FACTS 기기들의 전류 주입형 모델을 이용하여 다수의 FACTS 기기가 설치된 계통의 동적 특성을 해석을 해석 기법을 제안하였다. 위 식 (1)~(10)에서 기술된 것과 같이 제안된 모델은 테브넨 등가 회로 방법에 의해 FACTS 기기들의 각 인버터에서 주입되는 전압을 간단히 병렬 주입 전류로 등가화 할 수 있으며 이 등가화된 전류원은 기존의 전력계통 동적 시뮬레이션 알고리즘의 전압 전류 네트워크 방정식에 손쉽게 적용될 수 있다. 사례연구에서 나타난 것처럼 제안된 모델은 다수의 FACTS 기기들이 계통의 동적 특성에 미치는 영향을 잘 나타내고 있다. 따라서 제안된 방법은 매우 효율적이고 적용 가능성이 매우 높다고 할 수 있으며 이 모델을 이용하면 다수의 FACTS 기기가 설치된 계통의 동적 특성도 쉽게 해석할 수 있으며 또한 다양한 FACTS 기기들 간의 상호작용을 이용한 계통의 안정도 향상 방안에 대한 연구도 가능할 것이다.

### 〈참고 문헌〉

- [1] Yong Hua Song, and Allen T Johns, Flexible AC Transmission Systems (FACTS), London : The Institution of Electrical Engineers, 1999.
- [2] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Perez, Cesar Angeles-Camacho, FACTS - Modeling and Simulation in Power Networks, England : John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [3] Kwang M. Son, Robert H. Lasseter, "A Newton-Type Current Injection Model of UPFC for Studying Low-Frequency Oscillations," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 19, No. 2, April 2004.
- [4] Kundur, Power System Stability and Control, New York : McGraw-Hill, 1994.
- [5] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power System Control and Stability, NJ : A John Wiley & Sons, Inc., 2003.