

UPFC 설비용량을 고려한 안정도 해석 모형

김학만, 국경수, 전진홍, 이영운, 오태규, 장병훈, 추진부  
한국전기연구소, 한전전력연구원

UPFC Model for Stability Study Considering the Controller Rating

H.M. Kim, K.S. Kook, J.H. Jeon, Y.W. Lee, T.K. Oh, B.H. Jang, J.B. Chu  
KERI, KEPRI

**Abstract** - This paper presents an UPFC(Unified Power Flow Controller) model that considered rating for stability study. The proposed UPFC model was implemented by PSS/E and IPLAN. As a control strategy for damping electromechanical oscillations, energy function method was adopted. By the adopted control law, the damping effect is robust with respect to loading condition, fault location and network structure. The effect of control of the UPFC model was demonstrated on a one machine infinite bus system.

1. 서 론

1980년 말 FACTS(Flexible AC Transmission Systems)의 개념이 소개된 이후 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있으며, 일부 FACTS 기기들은 시운전을 거쳐 상용화 단계에 이르고 있다. UPFC(Unified Power Flow Controller)는 모선 전압제어와 선로 조류제어를 동시에 수행하기 때문에 병렬형 FACTS 기기인 STATCOM (Static Synchronous Compensator)과 직렬형 FACTS 기기인 SSSC(Static Synchronous Series Compensator)의 기능을 모두 가지는 직·병렬형 FACTS 기기다[1].

최근 전력설비의 경과지 확보난에 따른 계통 병목 해소 뿐 만 아니라 수송용량증대, 전압유지, 안정도 향상 등 전력계통의 특성 개선에 FACTS의 도입 효과는 긍정적으로 평가되고 있다. 이러한 FACTS 적용 검토는 해석기법을 필요로 하며 이를 위해 해석 모형 수립이 중요하다.

특히, UPFC는 직렬 전압원 형태의 FACTS기기이므로 기존의 전력계통 해석의 수리적 모델에 접목시키기는 용이하지 못한 점이 있고, 특히 대규모 계통해석을 위한 모델 수립이 현재 활발히 연구되고 있다.

대표적인 것으로 부하로 등가 처리하는 주입모델(injection model)을 이용한 방법[2,3]이 있으며, 이를 상용 전력계통 해석 패키지에 접목시키는 연구[4]가 진행되고 있다.

본 논문은 UPFC의 설비용량을 고려한 안정도 해석 모형에 관한 것으로, UPFC 안정도 해석용 모형에서 제어기는 다양한 구조로 표현될 수 있으나, 본 논문에서는 에너지 함수에 근거한 제어전략[3,4,5]을 이용하여 인근의 측정 가능한 정보만을 입력받아 제어하기 때문에 계통의 조건과 설치 위치에 영향을 받지 않아 강인성을 가진다.

제한한 UPFC의 설비용량을 고려한 안정도 해석 모형을 대규모 계통해석에 널리 이용되는 상용 패키지인 PSS/E와 IPLAN을 이용하여 1기 무한대 계통에 적용하여 3상고장에 대해 UPFC의 동요 억제 효과를 검토하였다.

2. 설비용량을 고려한 UPFC 모델

2.1 UPFC

UPFC의 기본적인 구성은 그림 1과 같이 모선에 병렬로 연결되는 부분과 선로에 직렬로 삽입되는 부분 그리고 병렬부분과 직렬부분을 연결시켜주는 DC 연계 커패시터 부분으로 구성되어 있다. UPFC 시스템의 병렬부분은 병렬 변압기와 병렬 변압기에 전압을 인가해주는 인버터 1 부분으로 구성되어 있으며, UPFC의 입력단 전압  $V_i$ 의 크기를 일정하게 유지하는 기능과 DC 연계 커패시터의 전압을 일정하게 유지시키는 기능을 한다. 직렬부분은 선로에 직렬로 삽입된 직렬 변압기와 직렬 변압기를 통해 선로에 전압을 인가시키는 인버터 2 부분으로 구성되어 있으며, 인가되는 전압을 적절히 제어하여 UPFC 출력단의 유효전력과 무효전력을 제어하는 기능을 한다.

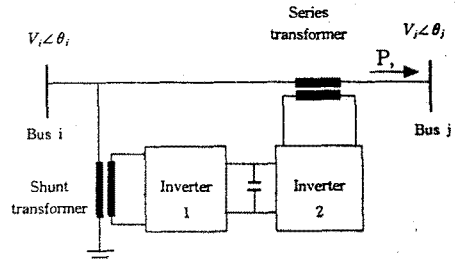


그림 1. UPFC 기본 구성도.

2.1 UPFC 모형

본 논문에서는 UPFC의 모델링을 병렬부분과 직렬부분으로 나누어 병렬부분 중 모선전압제어 부분은 STATCOM으로 모델링하고 인버터 1의 그외 기능 부분과 직렬부분은 부하로 등가 처리하는 주입모델을 이용하였다. UPFC의 직렬부분은 그림 2와 같이 리액턴스  $X_s$ 를 가지는 이상적인 직렬 전압원으로 이 직렬 전압원이 선로에 삽입된 형태의 등가회로에서의 벡터도는 그림 3과 같다.

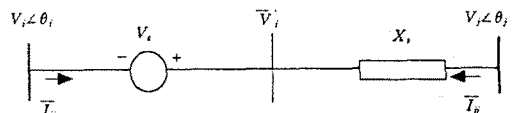


그림 2. UPFC의 직렬부분의 등가도.

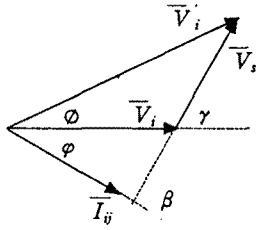


그림 3. 직렬부분의 등가회로의 벡터도.

그림 2와 3에서  $\bar{V}_s$ 는 삼입 전압원으로  $re^{j\gamma}\bar{V}_i$ 로 정의되고,  $r$ 은  $|\bar{V}_s|/|\bar{V}_i|$  ( $0 \leq r \leq r_{max}$ )로 정의된다.  $\bar{V}_i$ 는 직렬 리액턴스 배후 가상 전압을 나타낸다. 또한 각  $\gamma$ 는 삼입 전압의 위상각으로 0에서  $2\pi$ 까지 제어 가능하다.  $b_s = 1/X_s$ 로 정의되고, 그림 2의 UPFC의 직렬부분의 등가회로를 부하로 등가 처리하는 주입모델 (injection model)로 나타내면 그림 4와 같다.

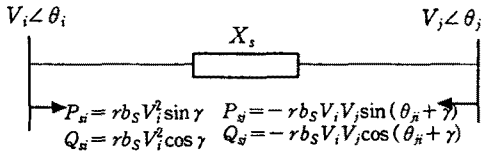


그림 4. 주입모델로 표현한 직렬 전압원.

UPFC에서 인버터 1, 2 내에서 수수되는 유효전력은 손실이 없다는 가정과 인버터 1측의 무효전력은 독립적으로 제어된다고 가정 하에서 모션전압을 제어하는 부분을 제외한 STATCOM 부분은 그림 5와 같은 주입모델로 표현된다[2].

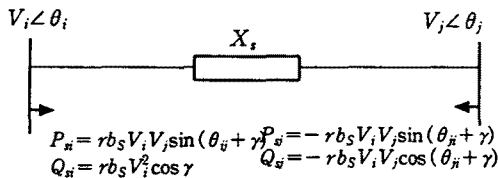


그림 5. 주입모델로 표현한 UPFC.

UPFC의 병렬부분 중 모션전압을 제어하는 부분은 PSS/E에서 제공하는 STATCOM 모형인 그림 6의 CSTATC[6]을 이용하였다.

### 2.3 제어 전략

UPFC의 병렬부분인 STATCOM은 모선의 전압을 일정하게 유지시킬 수 있도록 제어 파라미터를 결정하였는데, 여기서는 제동력 보강에 이용되는 보조신호를 사용하지 않고 STATCOM을 전압유지 목적으로 활용하였고 제동력은 UPFC의 직렬부분을 이용하여 제공하는 것으로 하였다.

UPFC의 직렬부분에 대해서는 에너지 함수법에 근거하여 계통의 에너지수준을 감소시키는 방향으로 제어하는 제어전략을 적용하였다[3].

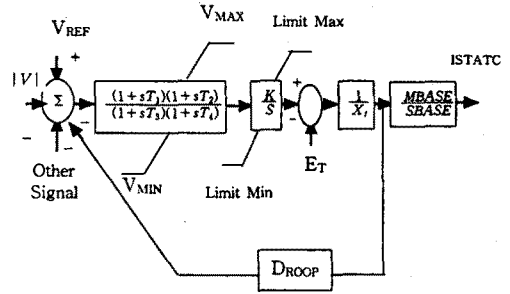


그림 6. UPFC의 병렬부분 모델.

에너지 함수는 식 (1)과 같이 표현되는데, 식 (1)에서  $E_{KE}$ 는 회전자의 운동에너지,  $E_{PE}$ 는 계통의 위치에너지,  $E_C$ 는 평형점에서의 상수를 나타낸다.

$$V = E_{KE} + E_{PE} + E_C \quad (1)$$

계통 외란에 대해서 시스템을 안정화시키기 위해서는 UPFC는 계통의 과도 에너지가 외란의 영향으로 변화하는 system trajectory 따라 감소하여야 하므로 시간 미분이 항상 영 이하 즉,  $\dot{V} \leq 0$ 가 되게 제어되어야 하므로 이 관계는 식 (2)와 같다.

$$\dot{V} = -rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) \leq 0 \quad (2)$$

식 (3)은 에너지 함수에 근거한 제어법칙을 나타낸 것으로 UPFC가 설치되어 있는 모션주파수를 입력으로 하여 식 (2)가 항상 만족되도록 삼입 전압의 크기와 위상각을 제어함을 보인다.

$$\begin{cases} \text{if } \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) < 0 \text{ then } r = r_{max} \text{ and } \gamma = -\frac{\pi}{2} - \beta_j \\ \text{if } \frac{d}{dt}(\theta_{ij}) \geq 0 \text{ then } r = r_{max} \text{ and } \gamma = +\frac{\pi}{2} - \theta_{ij} \end{cases}$$

### 2.4 설비용량 고려

에너지 함수에 근거한 제어법칙인 식 (3)에서 두 제어 파라미터  $r$ ,  $\gamma$  중에서  $\gamma$ 는 모션간 위상차  $\theta_{ij}$ 에 의해서 결정되기 때문에 실질적으로 결정되어야 하는 제어 파라미터는  $r$ 이다. 제어전략을 나타내는 식 (3)에서  $r=r_{max}$ 인 경우에 제어 효과가 가장 크게 되나 실제 UPFC의 설비용량의 제약하의 삼입 전압의 최대 크기 즉,  $r_{max}^*$ 를 결정하여야 한다.  $r_{max}^*$ 를 구하는 유도 과정은 다음과 같다.

UPFC의 설비용량은 인버터 1, 2의 용량, 즉  $S_{conv1}$ ,  $S_{conv2}$ 로 구분되는데, 인버터 1의 용량은 병렬 측 모션의 전압 제어에 이용되는 STATCOM 기능으로 이용되는 부분과 인버터 2로의 유효전력 전송에 이용되는 부분의 합으로, 식 (4)와 같이 표현된다.

$$S_{conv1} = P_{conv1} + jQ_{conv1} = P_{conv1} + jQ_{STATCOM} \quad (4)$$

식 (4)의 인버터 1에서 2로의 전송되는 유효전력의 손실이 없다는 가정에 의해서 인버터 1, 2의 유효전력량은 같으므로 식 (5)의 관계가 성립한다.

$$P_{con1} = P_{con2} \quad (5)$$

인버터 2의 용량은 다음 식으로 계산된다.

$$S_{con2} = \overline{V_s} \overline{I_{ij}^*} = re^{j\gamma} \overline{V_i} \overline{I_{ij}^*} \quad (6)$$

식 (6)을 정리하면 인버터 2에 의해서 공급되는 유효 전력 및 무효전력은 다음과 같이 구분하여 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{con2} &= rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) - rb_s V_i^2 \sin \gamma \\ Q_{con2} &= -rb_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) + rb_s V_i^2 \cos \gamma + r^2 b_s V_i^2 \end{aligned} \quad (7)$$

먼저 인버터 2의 용량의 최대 삼입 전압 크기,  $r_2$ 를 구하는 과정은 다음과 같다. 식 (8)에 의해서 인버터 2의 정격용량에서의  $r_2$ 는 계산되는데, 식 (8)를  $r$ 에 관해서 풀면 식 (9)의 형태로 전개된다. 즉,  $r$ 을 제외한 모든 변수들은 측정과 설정에 의해서 결정되므로 A, B, C, S는 상수로 되어 식 (9)는  $r$ 에 관한 4차 방정식이 구성된다. 식 (9)의 해가 인버터 2의 용량의 삼입 전압 최대 크기인  $r_2$ 이 된다.

$$P_{con2}^2 + Q_{con2}^2 = S_{con2}^2 \quad (8)$$

$$Ar^4 + Br^3 + Cr^2 = S_{con2}^2 \quad (9)$$

인버터 1의 용량의 최대 삼입 전압 크기,  $r_1$ 을 구하는 과정은 다음과 같다. 인버터 1과 인버터 2의 유효전력량이 같다는 관계식 (5)에 의해서 인버터 1의 유효전력량을  $r$ 의 비례관계로 표현하여 인버터 1의 전체 용량은 관계식은 식 (10)과 같이 표현된다. 식 (10)에서 인버터 2의 유효전력량과 관계되는 식 (7)으로부터 구한 것이며 이 양은 측정과 설정에 의해서 구해진다.

$$S_{con1} = r_1 P_1 + jQ_{STATCOM} \quad (10)$$

$$\text{여기서 } P_1 = b_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) - b_s V_i^2 \sin \gamma$$

따라서 식 (10)에서  $r_1$ 을 구하면 다음과 같다.

$$r_1 = \sqrt{\frac{S_{con1}^2 - Q_{STATCOM}^2}{P_1^2}} \quad (11)$$

따라서 최종적으로 제어법칙에 적용되는  $r_{max}^*$ 는  $r_1$ ,  $r_2$ 을 식 (12)의 관계로부터 결정된다.

$$r_{max}^* = \min(r_1, r_2) \quad 0 \leq r_{max}^* \leq r_{max} \quad (12)$$

여기서  $r_1$ : 인버터 1 용량의 최대  $r$

$r_2$ : 인버터 2 용량의 최대  $r$

### 3. UPFC의 제어 효과

그림 7의 1기 무한대 모선 계통에 대해서 3상 고장에 대한 UPFC의 제어 효과를 검토하였다. UPFC의 설치지점은 모선 2와 선로 2-3 사이로 하였다. 설치 선로에서 모선에 전압을 일정하게 유지하도록 제어하였다. 본 논문에서는 1번 모선의 발전기는 classical model을 이용하였고 5번 모선의 발전기는 관성정수를 크게 하여 5번 모선이 무한대 모선의 효과를 가지게 하였다. 상정사고는 모선 3에 3상 고장이 발생하여 6 cycle(0.1초) 지속된 후 345 kV 선로 3-4의 1회선 개방에 의해 고장이 제거되는

것으로 하였고 이 상정사고에 대해서 UPFC의 제어 효과를 검토하였다. 부하모형은 1번 모선과 4번 모선의 부하는 유효전력의 경우 일정 전류 부하로 하였고, 무효전력의 경우는 일정 임피던스 부하로 표현하였다. 시뮬레이션은 PSS/E와 IPLAN을 이용하여 수행하였다(6.7). UPFC의 용량으로 인버터 1은 200 MVA인데, 이 용량 중 모선 전압제어로 최대 150 MVA가 이용되도록 설정하였다. 인버터 2는 100 MVA로 하였다. 선로의 삼입 전압의 크기는 0~0.5 PU로 제약을 설정하였다.

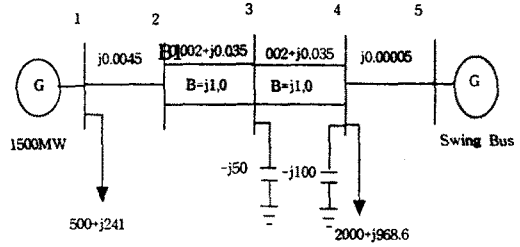


그림 7. 1기 무한대 모선 계통.

등가 전류 주입 모형에 근거한 UPFC의 안정도 해석 모형은 이상적인 직렬 삼입 전압원으로 가정하였고 UPFC의 내부의 dynamic을 무시하였다.

상정사고에 대해서 발전기의 회전자 위상각은 그림 8과 같이 중요 지속 모드를 보였다. 설치된 UPFC에 의해서 동요가 효과적으로 억제되어 약 1.5초 이후 새로운 평형점으로 정착되는 것이 보인다.

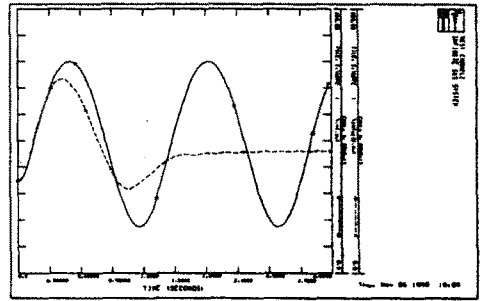


그림 8. UPFC의 제어 효과.

그림 9, 10은 UPFC의 제어에 의해 선로 2-3에 삼입되는 전압의 크기와 위상각을 나타낸 것이다.

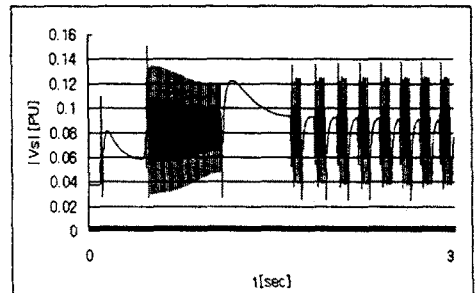


그림 9. UPFC의 삼입 전압 크기.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 조류계산에 의해 설정된 UPFC의 설비 용량을 안정도 해석에서 고려하기 위한 방법론은 제시하였다.

- a) UPFC를 STATCOM과 부하 모형으로 처리함으로써 종래의 계통 해석 tool을 활용할 수가 있으며, 안정도 검토에 UPFC의 설비용량이 고려되었다.
- b) 에너지 함수에 근거하여 제어 전략을 수립하였기 때문에 계통의 운전조건, 계통구성, 설치 위치 등에 큰 영향을 받지 않으므로 계통 적용 검토에 편리한 제어 구조를 제공하였다.
- c) 대규모 계통해석용 패키지인 PSS/E에서 IPLAN을 이용하여 구현하였으므로 대규모 계통에서의 UPFC 적용 효과 검토에 편의성을 제공하였다.

#### (참 고 문 헌)

- (1) Laszlo Gyugyi, Colin D. Schauder, Kalyan K. Sen, "Static Synchronous Series Compensator : A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, pp. 406-417, Jan. 1997.
- (2) M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Andersson, "Use of UPFC Optimal Power Flow Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1629-1634, Oct. 1997.
- (3) M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Andersson, "Improving Power System Dynamics by Series-Connected FACTS Devices", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1635-1641, Oct. 1997.
- (4) 김학만, 오태규, 장병훈, 추진부, "IPLAN을 이용한 UPFC 안정도 해석 전산 모형", 1998년도 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, pp.119-123, 1998.
- (5) M. Noroozian, "A Robust Control Strategy for Shunt And Series Reactive Compensators to Damp Electromechanical Oscillations", PE-244-PWRD-0-12-1997, 1997.
- (6) Power Technologies Inc., PSS/E-24 Power System Simulator Program Operation Manual & Application Guide, Dec. 1995.
- (7) Power Technologies Inc., PSS/E-24 IPLAN Version 11.0, Dec. 1995.
- (8) P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Inc., 1994.

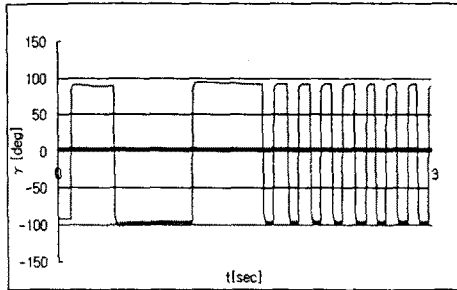


그림 10. UPFC의 삽입 전압 위상각.

그림 11은 모선 2의 전압제어에 이용된 무효전력량을 나타낸 것이고 그림 12는 UPFC 인버터 1, 2로 수송된 유효전력량을 나타낸 것이다. 그림 13은 제어에 이용된 UPFC의 시간축상에서의 용량 변화를 나타낸 것이다.

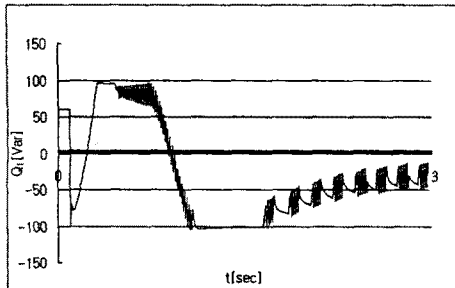


그림 11. UPFC의 모선 전압 제어량.

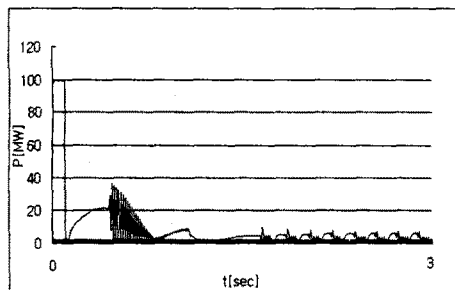


그림 12. UPFC의 유효전력 수수량.

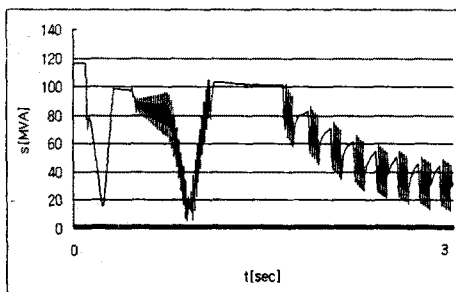


그림 13. UPFC의 제어에 이용된 용량.