

## 전력시스템 동요억제를 위한 UPFC 적용 및 제어

김영수\*, 김태준\*, 이병하\*,  
\* 인천대학교 전기공학과

한학근\*\*, 손광명\*\*, 박종근\*\*  
\*\* 서울대학교 전기공학부

### Application and Control of UPFC for Improving Power System Oscillation Damping

Y.S.Kim\*, T.J.Kim\*, B.H.Lee\*,  
\* University of Incheon

H.G.Han\*\*, K.M.Son\*\*, J.K.Park\*\*  
\*\* Seoul National University

**Abstract** - The Unified Power Flow Controller(UPFC) with a series inverter and a shunt inverter is able to control all three line parameters (voltage, impedance and phase angle) and so UPFC technology has the potential to enhance the implementation and broad application of the FACTS concept with improved performance. In this paper, the UPFC is applied in order to improve the power flow oscillation damping. The modal performance measure is minimized in order to determine the optimal parameters of UPFC controller for damping power flow oscillations. The dynamics of the injected voltage of UPFC is represented as a first order delay element. The UPFC controller used here is of the PID type and the input signal to the controller is the active power flow through the UPFC. The effect of UPFC application to the power system are analyzed from the stand point of power system oscillation damping.

#### 1. 서 론

교류송전선을 이용한 송전전력은 선로임피던스, 송·수전단 전압의 크기와 위상각의 함수로 표현된다. 송전선로의 확보가 점차 어려워지고 전력수요가 계속적으로 높은 증가율을 보이고 있어 전력송전설비가 설비용량의 한계에 접근해 가고 있는 상황에서, 송전전력을 결정짓는 세 요소들을 제어 가능한 UPFC의 연구 및 개발은 전력전송의 새로운 개념으로서 중요한 의미를 갖는다.

FACTS에 관한 연구들이 TCSC와 STATCOM 등을 중심으로 많이 수행되어 왔으며 [1-3], 최근에 UPFC에 관한 연구도 미국 EPRI, 웨스팅하우스를 필두로 유럽, 일본 등 선진외국에서 활발히 수행되고 있다[4-6]. STATCOM은 미국 TVA사의 Sullivan 변전소에서 실증시험 중에 있고[7], UPFC도 미국 AEP사의 Inez 변전소에서 시험중에 있다[8].

UPFC는 대용량 GTO 싸이리스터를 사용한 2개의 스위칭 인버터로 구성되어 있는데, 하나는 송전선로와 병렬로 연결되어서 동작하며, 다른 하나는 직렬로 연결되어 있다. 이 인버터들은 직류 저장 커패시터에 공통으로 연결되어 있는데, 각 인버터들은 독립적으로 각각의 출력 단자에서 무효전력을 흡수 또는 발생시킬 수 있고, 두 인버터 사이로 어느 방향 이든 유효전력이 자유롭게 흐르도록 할 수 있는 구조로 되어 있다. 특히 직렬로 연결된 인버터는 전원과 동기인 교류전압원으로 작동한다. 모션전압을 제어하기 위해 병렬 인버터에서 무효전력을 발생시키거나 흡수하며, 송전선로의 전력흐름을 제어하기 위해 직렬 인버터에서 유효, 무효전력을 제어하게 된다.

이 논문에서는 다기 다모션 시스템에 UPFC를 적용한 효과를 시스템 모션간의 전력흐름의 동요억제의 관점에서 분석한다. UPFC를 송전선로의 중간에 설치하고, UPFC를 제어하기 위해 PID 제어기를 적용하였다. 전력흐름의 동요를 억제하기 위한 UPFC 제어기의 파라메타 최적선정을 위해 Modal Performance Measure를 최소화하는 기법[9]을 적용한다. 분석계통으로는 Ward & Hale의 6모션계통을 사용하고, 발전기의 여자기로서 IEEE type1 여자기를 사용하여 분석한다. UPFC를 제어하기위한 입력신호로서 실적용 가능한 UPFC 설치지점의 유효전력의 측정치를 이용한다. 전력시스템 동요를 최소화시키는 제어기의 설계가 되도록 Performance Measure로부터 모우

드의 Envelope의 감쇠를 최대화 시키는 제어기의 파라메타의 값들을 구하고 그 결과를 분석한다.

## 2. 동적 전력시스템 및 UPFC 제어기 모델

UPFC는 선로조류제어를 위하여 전력흐름의 3가지 변수인 선로의 임피던스, 송수전단전압의 크기, 그것의 위상을 모두 조절할 수 있으므로 지금까지의 다른 조상설비들에 비해 아주 효율적으로 전력을 제어할 수 있다. 이 논문에서 UPFC 제어기는 PID 타입이 적용되고, 제어기에 입력되는 입력신호는 UPFC가 설치된 지점에서 측정이 용이한 유효전력으로 하였다. 이 입력신호는 제어기를 거친 후 선로와 직렬로 주입되는 전압원의 산정된 전압 크기를 구현하는 점호각으로 변환된다. 입력으로부터 원하는 입력 전압으로의 전이는 약간의 시지연이 발생하며, 전력계통 안정도 해석에서 UPFC는 이 시지연을 반영한 1차 모델로 고려될 수 있다.

UPFC 제어기의 모델은 그림1에 제시되어 있는데, 여기서  $V_{ms}$ 는 UPFC에 의해 조절되는 주입되는 전압원의 전압크기이고,  $T_c$ 는 UPFC의 전압 조정 시지연을 반영하는 시정수이고,  $P_{ref}$ 와  $P_s$ 는 각각 UPFC가 설치된 선로의 기준입력 전력흐름 및 보조입력 전력흐름이며,  $K_p, K_I, K_D$ 는 각각 PID 제어기의 비례, 적분, 미분 이득이다.

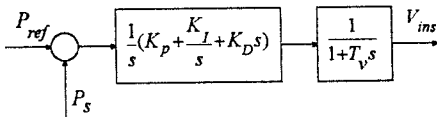


그림1. UPFC제어기의 모델  
Fig.1. UPFC controller model

이 논문에서는 여자기로서 IEEE type 1 여자기를 사용하였고 3차의 PSS 모델[10]을 사용하였다.

## 3. 전력시스템 동요 억제를 위한 UPFC 제어기 파라메타 결정

동적 전력시스템의 수학적모델은 미분 대수방정식 형태로 나타낼 수 있다. 평형점 부근에서 작은 외란 발생시 이 미분 대수 방정식들은 선형화 될 수 있고, 이것을 다시 대입하여 정리하면 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{d\Delta X}{dt} = (A - BD^{-1}C)\Delta X = \tilde{A}\Delta X \quad (1)$$

$$\Delta Y = -D^{-1}C\Delta X = \tilde{C}\Delta X \quad (2)$$

여기서  $X$ 는 상태변수들을 나타내고  $Y$ 는 모션전압, 위상각 등의 회로변수들을 나타내고  $A, B, C, D$ 는 적합한 차수의 계수행렬들이다. UPFC를 투입하는 경우 그림1에서 보여진 동적시스템이 수식화되어 UPFC에 의해 조절되는 주입전압원의 크기를 포함한 상태변수들이 추가된다.  $Y_s$ 을  $Y$ 의 기준값이라 할 때,  $Z(t) = Y(t) - Y_s$  이라 두면, 제어의 목적은 시스템 파라메타에 대한 에러  $Z(t)$ 를 최소화하는 것으로 귀결된다.

이때  $Z(t)$ 는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} Z(t) &= \tilde{C}\Delta X + Y_s - Y_r \\ &= \sum_{j=1}^n \tilde{C}_j \Delta X_j(t) + Z_0 \\ &= \sum_{j=1}^n Z_j(t) + Z_0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Z_j(t) &= \sum_{i=1}^m Z_{j,i}(t) \\ &= \tilde{C}_j \sum_{i=1}^m (V_i \Delta X_0) U_{j,i} \cdot \exp(s_i t) \end{aligned} \quad (4)$$

$Y_s$ 는  $Y(t)$ 의 정상상태 값,  $Z_0 = Y_s - Y_r$ 이고  $U$ 와  $V$ 는 각각 Right, Left Eigenvector들이고,  $U_{j,i}$ 는  $i$ 번째 Right Eigenvector  $U_i$ 의  $j$ 번째 성분이다. 전력시스템의 동요를 억제하는 것은 각 모우드의 Envelope의 감쇠를 극대화하는 것에 해당한다. 각 모우드의 Envelope의 감쇠를 극대화하도록 하기 위한 Modal Performance Measure는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$J(p) = \sum_{j=0}^n J_j \quad (5)$$

여기서,

$$J_j = \int_0^T \sum_{i=1}^m Z_{j,i}^* W_j Z_{j,i} dt \quad (6)$$

$W_j$ 는  $j$ 번째 상태에 대한 가중치 행렬이고,  $t$ 와  $*$ 는 각각 전치와 공액복소수를 뜻한다. 위의 Modal Performance Measure  $J(p)$ 는 파라메타 벡터  $P$ 에 관한 Sensitivity [9]를 이용하여 최소화 될 수 있다. Chain rule을 적용하여,  $J$ 의 Gradient  $\nabla J$ 는 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \nabla J &= \frac{\partial J}{\partial p} = \sum_{j=0}^n \frac{\partial J_j}{\partial p} \\ &= \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m \left( \frac{\partial J_j}{\partial \tilde{A}} \right)_{k,l} \left( \frac{\partial \tilde{a}_{k,l}}{\partial p} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $\left( \frac{\partial J_j}{\partial \tilde{A}} \right)_{k,l}$  은 행렬  $\left( \frac{\partial J_j}{\partial \tilde{A}} \right)$ 의  $(k,l)$ 성분이다.

이 Sensitivity 식[9]으로부터 최대경사법 등을 이용해서 최적 파라메타의 값을 구할 수 있다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

분석계통으로는 간단한 Ward & Hale의 6모선 계통을 사용하였고, 그림 2에 보여져 있다. 그림 2의 5번, 6번 모선사이에 UPFC가 설치되어 있는 경우를 고려하였다. UPFC의 동작의 특성을 잘 분석하기 위해 UPFC의 병렬 인버터 설치 지점에 하나의 모선을, 그리고 UPFC의 직렬 인버터 출력 지점에 하나의 모선을 추가로 지정하여 분석하였다. 적용한 UPFC를 사용하지 않았을 경우와 UPFC를 사용하였을 경우에 대하여 그림 3에서 비교하였다. 부하의 변동이 외란으로서 발생했을 때의 모선6에서 모선5로의 전력흐름의 동요 궤적이 보여져 있는데, 실선이 UPFC가 설치되지 않았을 때의 궤적이며, 점선으로 표시된 것이 UPFC가 설치된 경우의 궤적이다.  $T_c=0.1$ [sec]으로 가정했고, 위의 제어기 파라메타 결정과정을 통하여  $K_f=86.0$ ,  $K_I=3.8$ ,  $K_D=1.5$ 로 정해졌다. 이 그림에서 UPFC가 없을 때에는 모선간의 전력흐름이 매우 큰 진동을 일으키나, UPFC가 설치된 경우는 그 진동의 크기가 아주 미미하도록 대폭 감소함을 알 수 있다.

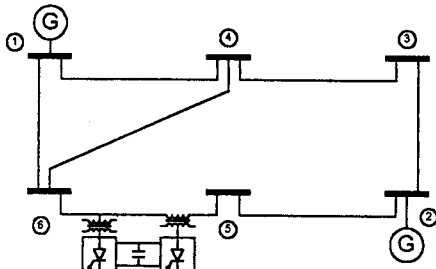


그림2. 6 모선 전력시스템  
Fig.2. 6 bus power system

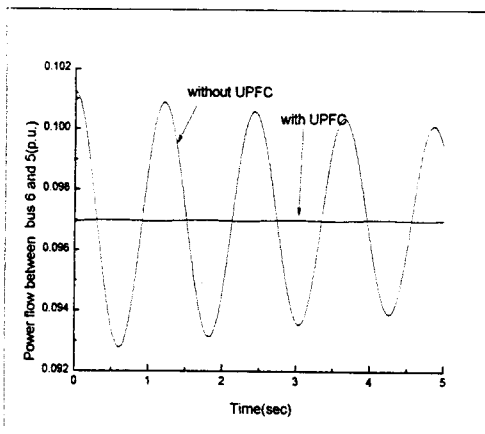


그림3. 모선간의 전력 흐름 변화 비교  
Fig.3. Comparison of the power flow variations between bus 5 and 6.

#### 5. 결론

UPFC를 선로의 중간에 설치하고 UPFC설치단에서 측정이 용이한 유효전력을 제어기의 입력으로 선택하여 제어기를 구성하였다. UPFC의 주입전압원의 동특성을 간단한 1차 지연요소로 모델링하였다. 제어기는 상용의 PID제어기를 사용하였고, Modal Performance Measure를 최소화하도록 파라메타를 선택함으로써 전력시스템 동요를 최소화시키는 제어기 설계를 하였다. 간단한 6모선 시스템에 적용하여 전력시스템의 모선간 전력흐름의 동요 억제 관점에서 분석하였으며, UPFC가 전력흐름의 동요를 아주 효과적으로 억제할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 보여주었다.

#### [참고 문헌]

- [1] J.J.Paserba, E.V.Larsen, "A stability model for Thyristor Controlled Series Compensation(TCSC)", FACTS Conference 2, EPRI TR-101784, Boston, Massachusetts, May, 1992.
- [2] Paserba, N.W.Miller, E.V.Larson, R.J.Piwko, "A Thyristor controlled series compensation model for power system stability analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July, 1995.
- [3] K.M. Son, J.K. Park, B.H. Lee, "On the stabilization of power system by advanced series compensation", Proceedings of JIEE Conference, Nagoya Japan, Aug., 1995.
- [4] L.Gyugyi, "Dynamic Compensation of AC transmission lines by solid state synchronous voltage sources," IEEE Paper 93 SM 434-1 PWRD, July, 1993.
- [5] R.J.Nelson, "Transmission power flow control: Electronic vs. electromagnetic alternatives for steady state operation," IEEE Paper 94WM 067-9 PWRD, January, 1994.
- [6] L.Gyugyi, et al., "The Unified Power Flow Controller: A new approach to power transmission control", IEEE Trans. on Power Delivery, vol.10, No.2, April,1995.
- [7] C.D.Schauder, et al., "Development of  $\pm 100$  MVAR Static Condenser for voltage control of transmission systems," IEEE Paper 94 SM 479-6 PWRD, July, 1994.
- [8] M.Ea.Rahman, "Unified Power Flow Controller: System studies and its application on the AEP system," IEEE New York FACTS/HVDC Workshop, September, 1995.
- [9] B.H. Lee, K.Y. LEE, "Dynamic and static voltage stability enhancement of power systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8, No.1, February 1993.