

계통동요 제어를 위한 UPFC제어기

윤종수, 윤용범, 문건우, 윤석호, 추진부
한전 전력연구원 전력계통연구소

UPFC Control for Power System Damping Reduction

Jong-Su Yoon, Yong-Beum Yoon, Gun-Woo Moon, Seok-Ho Yoon, Jin-Boo Choo
KEPRI, FACTS & Protection

Abstract - This paper presents a control system design for the UPFC of FACTS devices by optimal control scheme to enhance small-signal stability in the power system. The feature of this UPFC controller is coordinated with generator exciter controller(AVR, PSS) to improve the total power system stability and performance.

1. 서 론

핵심적인 FACTS기기의 하나인 UPFC는 송전선로에서 임피던스, 전압과 위상각등 종합적인 제어가 가능하여 유효, 무효전력 조류제어 및 계통동요제어에 큰 효과가 기대된다[1]. 현재 UPFC는 EPRI에서 현장적용 시험단계에 있으며, 계통해석용 모델 및 제어기법 개발등 많은 연구가 진행중이다[2][3]. FACTS기기중 가장 복잡한 형태를 지니고 있는 UPFC는 제어기의 형태도 계통에서의 다양한 제어목적에 맞게 복잡한 구조를 가질 것으로 예상되는데, 아직 상세모델이 정확히 공개되지 않아 제어기 설계에 많은 제한이 있다. 그러나 최근 PWM인버터 제어를 위한 UPFC 상세모델의 개발[3]로 보다 정밀한 제어기 설계가 가능할 것으로 보인다. 본 문은 [3]의 모델을 적용한 모의계통에서의 LQ제어기를 구성하고 UPFC동요억제효과를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 UPFC 모델

그림 1은 2개의 전압원 인버터(VSC-E, VSC-B)로 이루어진 UPFC의 등가모델이다. 각 인버터는 변압기를 통하여 송전선로에 직/병렬 연계되어 있고, 인버터들은 DC커패시터에 의하여 연결되어 있다. 인버터 VSC-B는 송전선로에 크기와 위상을 제어한 출력전압을 주입함으로 선로의 유효/무효전력을 제어하고, 인버터 VSC-E는 VSC-B에 의해 요구되는 유효전력을 DC커패시터를 통하여 공급 또는 흡수하는 것을 주기능으로 한다.

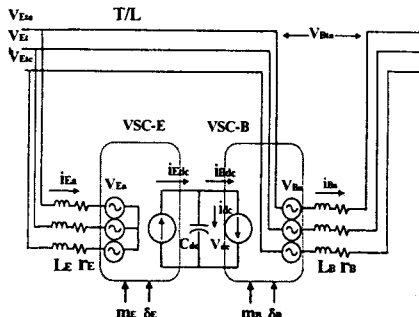


그림 1. UPFC의 등가모델

각 인버터들이 PWM스위칭 방식이라면, VSC-E의 경우 A상의 출력전압은 고조파를 무시할 경우 식 (1)로 나타낼 수 있다. (다른 인버터의 경우도 같은 형태)

$$V_{Ea} = (m_E V_{dc}/2) \cos(\omega t - \delta_E) \tag{1}$$

여기서 $m_{E,B}$ 은 Modulation Index이며, V_{dc} 는 인버터의 커패시터에 걸리는 DC전압, δ_E 는 인버터 출력과 교류단자측 전압의 위상차이다. $m_{E,B}$ 과 $\delta_{E,B}$ 는 PWM 제어를 통한 각 인버터의 제어신호에 해당한다. 그림 1의 교류측 회로방정식과 인버터 DC측의 전력방정식을 dq0변환한 UPFC의 상세모델은 식 (2)와 같다[3].

$$\frac{d}{dt} x_{dq0}(t) = Ax_{dq0}(t) + Bw_{dq0}(t) + Cu_{dq0}(t) \tag{2}$$

$$x_{dq0} = [i_{Ed}, i_{Eq}, i_{D0}, i_{Bd}, i_{Bq}, i_{B0}, v_{dc}]^T$$

$$w_{dq} = [V_{Edt}, V_{Eq}, V_{Bdt}, V_{Bqt}]^T$$

$$u_{dq0} = [\delta_E, \delta_B, m_E, m_B]^T$$

2.2 전력계통 모델

본 논문의 해석대상을 1기 무한모선으로 하였고 발전기 모델링은 식 (3)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \Delta \omega_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta \omega_r)$$

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega_0 \Delta \omega_r \tag{3}$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{fd} = \omega_0 (e_{fd} - R_{fd} i_{fd})$$

AVR과 PSS로 제어되는 발전기의 전체 블럭다이어그램은 그림 2과 같다.

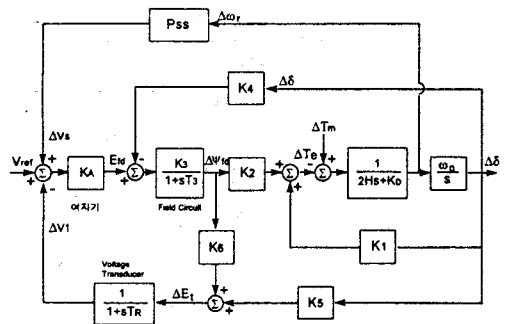


그림 2. AVR과 PSS로 여자제어되는 발전기[4]

2.3 UPFC가 연계된 전력계통 모델

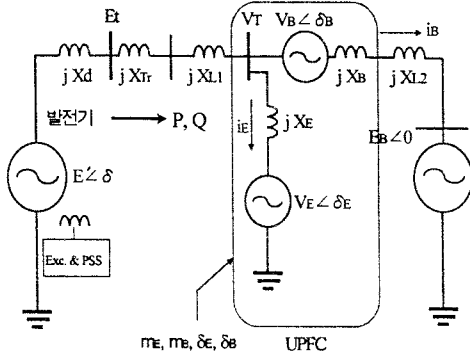


그림 3. UPFC가 연계된 1기 무한모션시스템

그림 3은 그림 2의 1기 무한계통에 식 (2)의 UPFC가 적용된 모습을 나타내고 있는데, UPFC제어를 위한 동작점에서의 선형화모델을 구하면 식 (4)로 나타난다.

$$\frac{d}{dt} \Delta x = A \Delta x + B \Delta W + B \Delta u \quad (4)$$

$$\Delta x = [\Delta \omega_r, \Delta \delta, \Delta \psi_{fd}, \Delta i_{Ed}, \Delta i_{Ea}, \Delta i_{Bd}, \Delta i_{Ba}, \Delta v_{dc}, \Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3]^T$$

$$\Delta W_{dc} = [\Delta T_m, \Delta V_T]^T$$

$$\Delta u_{dc} = [\Delta \delta_E, \Delta \delta_B, \Delta m_E, \Delta m_B]^T$$

식 (4)의 도출은 [6]에 자세히 주어져 있으며, 식 (4)의 상태변수중 $\Delta \omega_r, \Delta \delta, \Delta \psi_{fd}$ 는 발전기, $\Delta i_{Ed}, \Delta i_{Ea}, \Delta i_{Bd}, \Delta i_{Ba}, \Delta v_{dc}$ 는 UPFC의 직병렬 인버터와 DC커패시터 전압, $\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3$ 는 발전기의 AVR과 PSS 상태변수들이다. Δu 는 전체시스템을 제어하기 위한 두 인버터 VSC-E, VSC-B의 제어입력, ΔW 는 계통에 주어지는 외란으로 발전기 기계적인 입력변화와 송전선로의 전압변화를 고려하였다.

2.4 LQ제어기 설계

UPFC는 제어목적에 따라 다양한 형태의 제어가 가능하지만, 병렬인버터는 단자전압제어, 직렬인버터는 전력조류제어가 일반적인 운전형태이다. 따라서 이러한 목적의 LQ제어기를 구성하기 위하여 목적함수를 식 (5)과 같은 형태로 구성하였다.

$$J = \frac{1}{2} \int (x^T R x + 2x^T N u + u^T Q u) dt \quad (5)$$

목적함수에서 $x^T R x + 2x^T N u$ 는 그림 4의 송전선로에서의 외란에 따른 계통변동분을 의미하기 때문에 R, N 는 같이 고려해 주어야 하며, 각 인버터의 결합 정도를 고려하여 적절한 가중치를 설정하였다. 제어기를 구성하기 위한 대수 Riccati방정식은 식 (6)과 같다.

$$A^T P + P A - (P B + M) R^{-1} (P B + M)^T + Q = 0 \quad (6)$$

제어기는 상태변수 궤환형태로 식 (7)과 같다.

$$u = -K x \quad (7)$$

여기서 $K = R^{-1} (B^T P + N^T)$ 이다.

3. 모의 실험

모의 실험을 위한 그림 3의 1기 무한모션의 변수는 다음과 같다.

발전기 기저값 : 2220MVA, 24kV
 시스템 상태 : $P=0.9, Q=0.3,$
 $E_t = 1.0 \angle 36^\circ, E_B = 0.995 \angle 0^\circ$ (p.u.)
 발전기 : $X'_d = 0.3, H = 3.5, K_D = 0, X_d = 1.81, X_q =$
 $X_1 = 0.16, R_a = 0.003, T'_{do} = 8.0, A_{sat} = 0.031$
 $B_{sat} = 6.93, \phi_{T1} = 0.8$
 AVR, PSS : $K_A = 200, T_R = 0.02, K_{STAB} = 9.5, T_W =$
 $T_1 = 0.154, T_2 = 0.033$
 계통선로 : $X_{tr} = 0.15, X_{line1} = 0.1, X_{line2} = 0.5$

UPFC는 154kV, 200MVA급 ($L = 94.3mH, C = 12.71 \mu F$)의 STATCON모델을 [7] 단위값으로 환산하여 적용하였고 $t=1$ 에서 발전기 ΔT_m 이 0.1변할 때 미소변동분에 대한 계통동요 억제효과를 실험하였다.

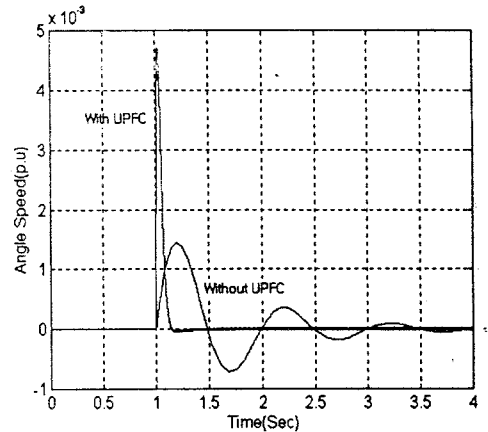


그림 4. LQ로 UPFC 제어시 발전기 $\Delta \omega$

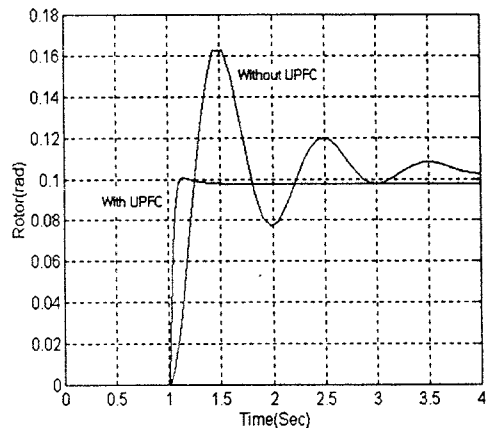


그림 5. LQ로 UPFC 제어시 발전기 $\Delta \delta$

그림 4와 5는 UPFC의 제어시와 UPFC 비제어시와 PSS/AVR만의 발전기 동요억제 제어효과를 보여준다.

4. 결 론

본 논문은 계통축약모델인 1기 무한 시스템에 FACTS 기기인 UPFC를 투입하여 계통의 안정도를 향상효과를 검토하였다. UPFC는 그 구조상 STATCON과 SSSC의 특징을 모두 가짐으로, 다양한 목적의 제어가 가능하다. 그중에서도 UPFC의 주기능을 수행하는 직렬 인버터의 경우 전력조류, 병렬 인버터의 경우 전압제어 운전이 일반적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 UPFC의 전력조류제어를 위한 LQ제어기를 구성하였고, 계통의 외란시 UPFC안정화 효과를 검토하였다. 본 제어기는 전계시스템의 운전점에서 선형화되었으므로 가까운 계통의 사고와 같은 비선형성이 매우 심한 과도안정도문제에서의 제어기법에 대한 보완이 계속될 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] A.S.Mehraban, A.J.F.Keri, "Application of the world's first UPFC on the AEP system", EPRI Conference on the Future of Power Delivery, April, 1996
- [2] I.Papic, P.Zuncko, "Basic control of Unified Power Flow Controller", IEEE Trans. Power Systems, Vol.12, No.4, Nov. 1997
- [3] A.Nabavi-Niaki, M.R.Itavani "Steady-state and dynamic models of unified power flow controller(UPFC) for power system studies", IEEE Trans. power systems, Vol. 11, No.4, 1996
- [4] P.Kunder, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1994
- [5] F.L.Lewis, "Applied optimal control and estimation", Prentice-Hall, 1992
- [6] 한전 전력연구원, "FACTS에 의한 계통제어 기술향상 및 복구운전 기법 개발에 관한 연구", 최종보고서, 98전력연-단 635, 1998. 6
- [7] 한병문 "비선형 보상을 적용한 송전용 무효전력보상강의 제어시스템 설계", 전기학회 논문지, 제 46권, 제 1호, p31, 1997