

교류-직류 계통의 안정화를 위한 H_∞제어기 설계

° 한길만* · 이정필* · 정형환* · 이동철**
 *동아대학교 전기공학과 **부경대 전기공학과

A Design of H_∞ Controller for the Stabilization of A.C. -D.C. Power Systems

° G. M. Han* · J. P. Lee* · H. H. Chung* · D. C. Lee**

*Dept. of Electrical Eng. Dong-A University **Dept. of Electrical Eng. Pukyong National University

Abstract -In this paper, a robust H_∞controller based on the Riccati equation approach, is proposed for HVDC power system with parametric uncertainties. Bounds of power system parametric uncertainties are included in Riccati equation to improve the robustness of controller. The proposed H_∞ controller for the stabilization of HVDC power system can ensure that the overall system is asymptotically stable for all admissible uncertainties. Simulation results show that the proposed H_∞ controller can achieve good performance in presence of uncertainties of power system.

1. 서 론

급격한 경제성장과 더불어 전력수요가 크게 증대하면서 전력 시스템은 거대화되고 복잡해지고 있다. 이로 인하여 전력 시스템은 점차 연계된 계통으로 변화하고 있으나 안정도는 오히려 저하하기 때문에 안정적인 전력공급을 위해서 지속적인 대책이 요구되고 있다. 또한 교류송전에서는 무효전력의 발생, 선로에 의한 전력손실 및 전력제어의 어려운 점등이 단점으로 대두되고 있다.[1]

초고압 직류송전은 전력 전송을 능동적으로 지속하게 제어할 수 있고, 교류선로의 단락용량 증대를 억제할 수 있어 교류송전의 한 대안으로 대두되고 있다. 이러한 특성 때문에 우리 나라에서는 계주와 해남을 연결하는 초고압 직류송전 선로가 건설되어 운전 중에 있다. 또한 통일된 후 남·북한간의 전력연계가 실현될 경우, 북한의 전력계통이 취약하여 안정도 문제가 야기될 수 있으므로, 초고압 직류송전은 남·북한간의 전력계통 연계에 가장 적절한 수단이 될 것으로 기대된다.

본 논문에서는 초고압 직류송전[2, 3]의 안정도를 향상시키기 위하여 시스템의 불확실성에도 불구하고, 시스템이 안정성을 유지하면서 외부 외란에 강인하게 대처할 수 있도록 Riccati 방정식 접근에 기초한 H_∞ 제어 이론[4~6]을 이용하여 강인한 제어기를 설계하고자 한다. 본 연구에서 고찰한 순 변환기와 역 변환기의 운전 제어 방식은 정전류-정전압(ACR-AVR) 제어방식을 구성하여 설계하였다. 제안한 H_∞제어기는 모델링 오차 및 측정오차, 계통의 사고 등을 포함하는 전력계통에 존재하는 파라미터 불확실성을 고려하기 위해 전형적인 파라미터 값을 사용하지 않고 파라미터의 변동 범위를 이용하여 Riccati 방정식의 해를 구해냄으로써, 불확실성이 존재하는 전력계통에 강인하게 동작하도록 설계하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여, 설계된 H_∞ 제어기는 HVDC 계통의 안정도를 향상시키기 위한 매우 효율적인 방법임을 입증하고자 한다.

2. 계통 모델

본 연구에서 고찰하고자 하는 대표적인 초고압 직류송전 시스템 모델(3)은 그림 1과 같으며 이는 직류 시스템의 제어기 성능평가에 널리 사용되는 시스템이다. 또한 교류 시스템은 IEEE Type I 여자기 및 조속기로 구성되어 있으며 직류시스템은 전력을 양방향으로 전송할 수 있는 초고압 직류 시스템으로 구성하였다.

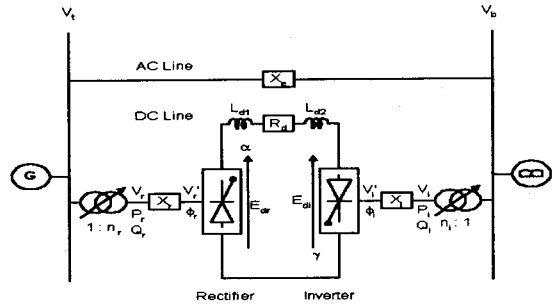


Fig. 1 Parallel A.C.-D.C. transmission model

2.1 교류 시스템(3)

그림 1에서 발전기 회전자 운동 방정식은 식 (1), (2)와 같고 IEEE type I 여자기 및 조속기에 대한 동특성 방정식은 식 (3)~(9)와 같다.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M}(P_m - D_w) - \frac{1}{M} P_e \tag{1}$$

$$\delta = 2\pi f_0 \omega \tag{2}$$

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{K_3 T_{do}} E'_q - \frac{K_4}{T_{do}} \delta + \frac{1}{T_{do}} E_{fd} \tag{3}$$

$$\dot{V}_r = \frac{K_5 K_r}{T_r} E'_q + \frac{K_5 K_r}{T_r} \delta - \frac{1}{T_r} V_r \tag{4}$$

$$\dot{V}_{gr} = -\frac{1}{T_f} V_{gr} + \frac{K_f}{T_f T_e} V_a - \frac{K(S_e + K_e)}{T_f T_e} E_{fd} \tag{5}$$

$$\dot{V}_a = \frac{K_a}{T_a} V_r - \frac{K_a}{T_a} V_{gr} - \frac{1}{T_a} V_a \tag{6}$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_e} V_a - \frac{S_e + K_E}{T_e} E_{fd} \quad (7)$$

$$\dot{P}_m = \frac{1}{T_t} P_m + \frac{1}{T_t} X_{gv} \quad (8)$$

$$\dot{X}_{gv} = -\frac{1}{RT_{gv}} \omega - \frac{1}{T_{gv}} X_{gv} + \frac{1}{T_{gv}} P_d \quad (9)$$

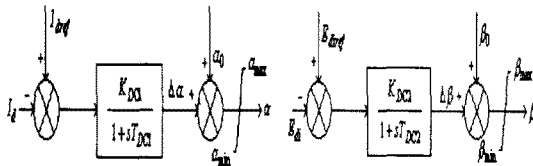
2.2 직류 시스템(3)

변환기용 변압기의 저항, 변환기의 양극 전압강하 및 내부 등가저항은 무시하고, 그림 1을 기초로 한 변환기의 교류전류 I 와 직류전류 I_d 는 식 (10), (11)과 같다 (3).

$$I \cong \sqrt{6} I_d / \pi \quad (10)$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}(V_r \cos \alpha - V_i \cos \gamma)}{\pi R_d + 3(X_r - X_i)} \quad (11)$$

여기서 X_r , X_i 는 전류 리액턴스(commutation reactance), R_d 는 직류선로 저항, γ 는 여유각, V_r , V_i 는 변환기의 교류측 전압이다.



(a) ACR in rectifier (b) AVR in inverter

Fig. 2 Block diagram of DC control systems

본 연구에서 고찰한 순 변환기와 역 변환기의 운전 제어 방식은 정전류-정전압 제어방식으로써 이러한 제어방식의 블록선도는 그림 2와 같다. 그리고 직류선로에서의 평활 코일 L_d 를 가지는 전압방정식은 (12), (13)과 같고, 그림 2의 블록선로부터 직류 전류의 동특성 방정식은 식 (14)와 같으며, 각 제어방식의 동특성은 식 (15), (16)과 같다.

$$E_{dr} = (3\sqrt{2}/\pi) V_r \cos \alpha - (3/\pi) X_d I_d \quad (12)$$

$$E_{di} = (3\sqrt{2}/\pi) V_i \cos \beta + (3/\pi) X_d I_d \quad (13)$$

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (E_{dr} - E_{di} - R_d I_d) \quad (14)$$

$$T_{DC1} \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = K_{DC1} (T_{dref} - I_d) \quad (15)$$

$$T_{DC3} \frac{d\beta}{dt} + \beta = K_{DC3} (T_{dref} - E_{di}) \quad (16)$$

3. H_∞ 제어이론

일반적으로 시스템의 상태 방정식은 식 (17), (18)과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + B_1 w(t) \quad (17)$$

$$z(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (18)$$

여기서 $x(t) \in R^n$ 는 상태벡터, $w(t) \in R^q$ 는 외부의란 벡터, $z(t) \in R^p$ 는 제어될 출력벡터, $u(t) \in R^m$ 는 입력 벡터이다.

식 (17), (18)에서 (A,B)는 안정화 가능하고 $D^T D > 0$ 이라고 가정한다. H_∞ 제어의 문제는 $x_0 = 0$ 인 조건에서 $w(t)$ 에서 $z(t)$ 까지의 전달함수의 H_∞ -norm을 최소화하는 상태 피드백 제어기 $u(t) = -Kx(t)$ 를 설계하는 것이다. 여기서 $w(t)$ 에서 $z(t)$ 까지의 전달함수는 식 (19)와 같다.

$$G_{zw}(s) = (C - DK)(sI - A + BK)^{-1} B_1 \quad (19)$$

상태피드백 제어법칙 $u(t) = -Kx(t)$ 를 포함한 식 (17), (18)의 폐-루프 시스템은 식 (20), (21)과 같다.

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) + B_1 w(t) \quad (20)$$

$$z(t) = (C - DK)x(t) \quad (21)$$

식 (20), (21)의 안정성에 대한 정리는 다음과 같다.

[정리 1] - $\gamma > 0$ 인 스칼라로 두고, 앞의 가정을 만족하는 시스템 식 (17), (18)을 고찰하면, 다음 식 (22)를 만족하는 양한정 행렬 P 가 존재할 때만, 식 (20), (21)과 같이 주어지는 시스템은 안정하고 $\|G_{zw}(s)\|_\infty < \gamma$ 이 된다[5].

$$(A - BR^{-1}D^T C)^T P + P(A - BR^{-1}D^T C) + P(\gamma^2 B_1 B_1^T - BR^{-1}B^T)P + C^T C < 0 \quad (22)$$

$$K = R^{-1}(B^T P + D^T C) \quad (23)$$

여기서 $R = D^T D > 0$ 이다.

이 결과를 초고압 직류송전 시스템의 안정도를 향상시키기 위한 H_∞ 제어를 설계하기 위해서 교류계통의 동특성을 나타내는 식 (1)~(9)와 직류계통의 동특성을 나타내는 식 (14)~(16)에 적용한다.

일반적으로 전력시스템의 수학적 모델은 실제 전력시스템과는 정확히 일치하지 않는다. 따라서 모델 시스템의 파라미터를 정확히 알 수 없기 때문에, 불확실성을 포함하는 시스템 모델은 식 (24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t) = (\bar{A} + \Delta A)x(t) + (\bar{B} + \Delta B)u(t) \quad (24)$$

여기서 $A = \bar{A} + \Delta A$, $B = \bar{B} + \Delta B$ 이고, \bar{A} , \bar{B} 는 시스템의 공칭 행렬이다. 또한 $[\bar{A}, \bar{B}]$ 는 안정화 가능하고, ΔA , ΔB 는 식 (25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$[\Delta A, \Delta B] = LF(t)[E_1, E_2] \quad (25)$$

여기서 L , E_1 , E_2 는 알려진 실수 행렬이고, $F(t)$ 는 식 (26), (27)을 만족하는 알려지지 않은 행렬 함수이다.

$$F^T(t)F(t) \leq I \quad (26)$$

$$E_2^T E_2 > 0 \quad (27)$$

H_∞ 제어 설계의 목적은 식 (25)~(27)을 만족하는 모든 가능한 불확실성에 대해서 전체 폐루프 시스템이 점근적으로 안정하게 하도록 선형 피드백 제어기 $u(t) = -Kx(t)$ 를 설계하는 것이다[6]. 식 (28)에서 스칼라 ν 가 존재하고 양한정 행렬 P 가 존재할 경우에만 [정리 1]을 이용하여 얻은 식 (29)와 같이 주어지는 H_∞ 제어기를 전력시스템 모델에 적용하면, 모든 가능한 불확실성에 대해서 점근적으로 안정하게 된다.

$$(\bar{A} - \bar{B}R^{-1}E_2^T E_1)^T P + P(\bar{A} - \bar{B}R^{-1}E_2^T E_1) + \nu^{-2} P(LL^T - \bar{B}R^{-1}\bar{B}^T)P + \nu^2 E_1^T E_1 < 0 \quad (28)$$

$$u(t) = -\frac{1}{\nu} (E_2^T E_2)^{-1} (\bar{B}^T P + \nu^2 E_2^T E_1) x(t) \quad (29)$$

여기서 $R = E_2^T E_2 < 0$ 이고 $x(t)$ 는 식(17)과 같이 정의된다.

본 연구에서 제시한 H_∞ 제어기 설계 과정은 다음과 같다.

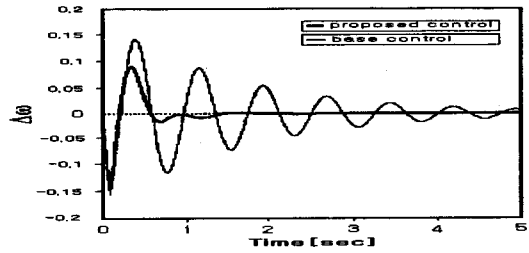
- STEP 1. 시스템에 대한 불확실한 파라미터의 범위를 지정한다.
- STEP 2. 시스템의 공칭 파라미터를 선택하고 $F^T(t)F(t) \leq I$ 와 $[\Delta A \ \Delta B] = LF(t)[E_1 \ E_2]$ 를 만족하는 $L, E_1, E_2, F(t)$ 를 결정한다.
- STEP 3. 설계 상수 ν 를 선택한다.
- STEP 4. Riccati 부등식(28)을 풀고 P 를 구한다.
- STEP 5. 다음과 같은 피드백 이득을 얻는다.

$$K = \frac{1}{\nu} R^{-1} (\bar{B}^T P + \nu^2 E_2^T E_1)$$

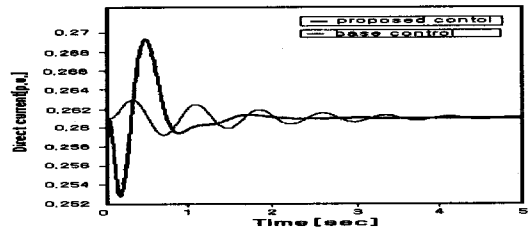
4. 시뮬레이션 및 결과

교류계통과 직류계통이 연계하는 경우에 직류전력의 변동이 특히 교류계통의 주파수에 영향을 미칠 수 있으므로 주파수 변동을 규정 범위내(60 ± 0.2(Hz))에서 유지시키기 위하여 발전기의 조속기 제어계와 직류 계통간의 협조제어가 필요하다. 즉 직류전력 또는 직류전류를 발전기의 조속기 제어계로 보내고 직류전력의 변동에 대응하여 조속기 제어계를 동작시켜 계통의 주파수를 제어하도록 한다. 교류계통에 교류선로와 제어계통을 포함하는 상태 변수는 $X_{AC} = [\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta E_q', \Delta V_r, \Delta V_g, \Delta V_a, \Delta E_{fd}, \Delta P_m, \Delta X_{gv}]^T$ 이고, 직류계통에 직류선로와 제어계통을 포함하는 상태 변수는 $X_{DC} = [\Delta I_d, \Delta\alpha, \Delta\beta]$ 이며, $U_{DC} = [U_R, U_1]^T$ 이다. 교류계통의 샘플링 주기는 0.01(s)로 하였으며, 직류계통의 샘플링 주기는 0.001(s)로 하였다. 이것은 직류계통이 교류계통에 비해서 변화의 속도가 빠르므로 샘플링 주기를 짧게 잡는 것이다.

그림 3은 부하가 0.1(sec) 사이에 정격출력이 3[%] 증가한 경우에 대해서 정전류-정전압 제어에 적용하여 각속도 편차 특성과 직류전류를 고찰하였다.



(a) Angular velocity $\Delta\omega$



(b) Direct current I_d

Fig. 3 Dynamic response to increasing power

그림 3의 결과로부터 제안된 제어기가 외란에 대한 우수한 성능을 나타내고 파라미터 불확실성에도 강한 성능을 보임을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서 교류-직류 계통의 안정화를 위해 H_∞ 제어 이론을 적용하여 직류제어 시스템의 제어특성과 부하 외란에 대한 안정도와, 교류-직류 계통 모델의 불확실성에 대한 안정도를 고찰하였다.

본 논문에서 제안한 H_∞ 제어기는 우수한 외란억제 성능을 나타내고, 교류-직류 계통의 수학적 모델과 실제 전력시스템과의 불일치 등에 의한 파라미터 불확실성에 대해서도 강한 성능을 보임을 알 수 있었다.

(참고 문헌)

- [1] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] R. L. Cresap, W. A. Mittelstadt, "Small signal Modulation of the Pacific HVDC Intertie", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 95, No. 2, pp. 536-541, 1978.
- [3] 정형환, 왕용필, 안병철, 이광우, "교류-직류 연계계통에 있어서 직류제어방식의 비교연구", 대한전기학회 논문지, vol. 45, no. 4, pp. 474-483, 1996.
- [4] Petersen, I. R., "A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems", Syst. Control Lett., 8, pp. 351-357, 1987.
- [5] Zhou, K. and P. P. Khargonekar, 'An algebraic Riccati equation approach to H_∞ optimization', Syst. control Lett., 11, pp. 85-91, 1988.
- [6] Khargonekar P. P., I. R. Petersen and K. Zhou, Robust stabilization of uncertain system: quadratic stabilizability and H_∞ control theory", IEEE Trans. Automatic Control, AC-35, pp. 356-361, 1990.