

데드비트 제어에 의한 전력계통 안정화 장치에 관한 연구

이흥재, 임찬호, 이철균*, 송자윤**
 (* 광운대 전기공학과, ** 인천전문대 전기공학과)

A Study on the Power System Stabilizer using Deadbeat Control

Heung-Jae Lee, Chan-Ho Lim, Chul-Kyun Lee*, Ja-Yoon Song**
 (* Kwangwoon Univ. ** Incheon Junior College)

Abstract - The deadbeat control has many advantage such as the ouput response without a ripple and the fast settling time. This paper presents a deadbeat control system to damp out the sustained low frequency oscillation.

The proposed deadbeat control system consists of th integral controller and the state observer, and it is simulated on the one-machine infinite-bus model of a power system. The efficiency of the proposed control system is verified through the several case studies.

1. 서 론

전력계통이 대형화되고 복잡해 짐에 따라 정상적인 운전상태에서 부하변동이나 선로상태의 변화 등 계통조건이 변화할 때 특정 발전기에 약간의 동요현상이 관측된다. 이와 같은 동요현상은 기계적 모드의 계동토크 성분이 부족하기 때문이며, 계통의 안정운전을 크게 위협하고 있다.

전력계통의 안정도 문제를 개선하기 위한 전력계통 안정화 장치(PSS)에 관한 연구는 1960년대 후반부터 LOEC(Linear Optimal Excite Control)[1]를 필두로 하여 진행되어 왔으며, 출력력편에 의한 방법[2] 및 퍼지 안정화 제어기[3] 등 시스템 응답 초기상태의 진동을 억제하는 다양한 방법이 소개되어 왔다. 최근에는 국내에서도 플랜트 현장의 공정을 자동으로 제어하는 디지털 분산제어 시스템을 화력발전소의 제어설비로 설치하게 되었고, 또한 전차원 관측기(full order state observer)를 사용하여 발전설비를 최적으로 감시제어하는 적응 제어기[6] 및 인공지능망 제어기[7] 등이 제시되었다.

데드비트 제어 시스템은 샘플링 주기만을 이용하여 설계된다. 데드비트 제어는 리플없는 출력을 획득할 수 있고, 정해진 샘플링 주기 후에 오차없는 정상상태에 도달하며, 짧은 샘플링 주기에서는 최적제어 등과 비교할 때 정정시간(settling time)이 훨씬 빠른 점 등의 장점이 예상되지만 전력계통 안정화 장치에 적용하기 위한 연구가 시도된 바는 없다.

본 논문에서는 데드비트 제어에 의한 전력계통 안정화 장치를 제안하였다. 제안된 데드비트 제어 시스템은 적분 제어기와 전차원 관측기로 구성하였으며, 1기 무한모선에 적용하였다.

제안된 데드비트 제어 시스템의 효용성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하고, 최적제어 응답과 비교검토했다.

2. 제어기 설계

2.1 발전시스템의 구조

발전계통의 선형화 모형은 그림 1과 같은 블록선도로

표시된다.

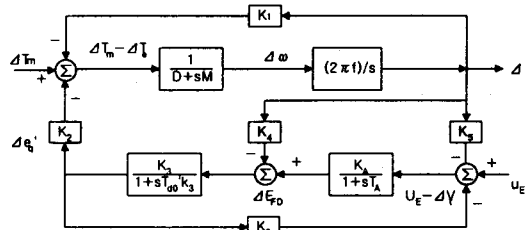


그림 1. 1기 무한모선 모형

이 계통의 모형은 기계적 입력(ΔT_m)을 고정시킨 후 평형상태에서 선형화한 모형이며, 저주파 진동을 해석하기 위하여 가장 일반적으로 사용하는 1기 무한모선의 4차 블록선도이다.

그림 1과 같은 1기 무한모선 모형은 식(1)과 같은 상태 방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

단,

$$x = \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{FD} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T'_{do}} & -\frac{1}{T'_{do}K_3} & \frac{1}{T'_{do}} \\ 0 & -\frac{K_4K_5}{T_A} & -\frac{K_4K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} \quad C = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

2.2 데드비트 제어기 설계

본 논문에서는 데드비트 제어 시스템을 설계하기 위하여 연속 시간계의 플랜트를 식(2)와 같은 형태의 이산 시간계로 표현하였다.

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Gx(k) + Hu(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

식(2)의 행렬 G와 H는 이산 시간계 플랜트의 상태공간 행렬을 나타내며 이는 행렬 A, B 및 샘플링주기 T에

의해서 결정된다.

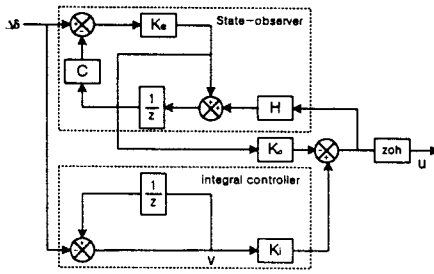


그림 2. 데드비트 제어기의 구성

제안된 데드비트 제어 시스템은 그림 2에서 보는 바와 같이 적분 제어기와 전차원 상태 관측기로 구성되어 있으며 연속 시간계의 플랜트 제어를 위하여 영차홀드(ZOH)를 포함하고 있다.

제어기의 적분상수 이득(\$K_i\$) 및 상태궤환 이득행렬(\$K_o\$)는 식(3)과 같이 표현되며 식(3)에서 \$\hat{K}\$는 시스템의 특성방정식이 0이 되도록 하는 이득행렬이다.

$$[K_o \mid K_i] = [\hat{K} + Q] \begin{bmatrix} G - I_n & H \\ CG & CH \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3)$$

$$\hat{K} = Q[\hat{H} \quad \hat{G}\hat{H} \quad \hat{G}^2\hat{H} \quad \hat{G}^3\hat{H} \quad \hat{G}^4\hat{H}]^{-1}\hat{G}^3$$

$$Q = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1], \quad \hat{G} = \begin{bmatrix} G & H \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \hat{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

제안된 제어기에서 사용된 전차원 상태 관측기의 상태 궤환 이득행렬(\$K_e\$)는 식(4)와 같이 주어진다.

$$K_e = \phi(G) \begin{bmatrix} C \\ CG \\ CG^2 \\ CG^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4)$$

식(4)에서 \$\phi(G)\$는 오차상태방정식의 특성식을 나타내며 본 논문에서는 데드비트 제어응답을 위해서 다음과 같이 선정 하였다.

$$\phi(G) = G^4$$

2.3 데드비트 제어기를 포함한 시스템

데드비트 제어기의 제어 신호인 \$u(k)\$는 상태 관측기를 통하여 관측된 상태벡터 \$\tilde{x}(k)\$로 구성된다.

$$u(k) = -K_o\tilde{x}(k) + K_i v(k)$$

$$= -K_o\tilde{x}(k) + K_i v(k) + K_o e(k) \dots\dots (5)$$

$$(e(k) = x(k) - \hat{x}(k))$$

여기서 \$v(k)\$와 \$e(k)\$는 각각 적분 제어기의 가동 오차벡터와 상태 관측기의 관측 오차벡터를 나타낸다.

따라서 플랜트 및 데드비트 제어 시스템을 포함한 시스템의 이산 시간계 상태방정식은 식(2)의 플랜트 상태방정식에 식(5)를 대입하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ v(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G - HK_o & HK_o & HK_i \\ -CG + CHK_o & 1 - CHK & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \\ e(k) \end{bmatrix}$$

$$+ \hat{H}r(k+1)$$

$$[e(k+1)] = (G - K_e)e(k)$$

여기서 \$r(k+1)\$은 명령입력벡터 \$r(k)\$의 변환이며 이를 정리하면 다음과 같은 상태방정식으로 나타낼수 있다.

$$x_o(k+1) = A_o x_o(k) + B_o(k)$$

$$y_o(k) = C_o x_o(k) \dots\dots\dots (6)$$

$$x_o(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \\ e(k) \end{bmatrix}$$

$$A_o = \begin{bmatrix} G - HK_o & HK_i & HK_o \\ -CG + CHK_o & 1 - CHK & 0 \\ 0 & 0 & G - K_e C \end{bmatrix}$$

$$B_o = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$C_o = [C \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

3. 사례연구

본 논문에서 제안한 데드비트 제어 시스템의 성능 검증을 위하여 연속 시간계 1기 무한모선 모형에 대하여 동일 조건하에서 기존의 선형 최적 제어기의 시간응답을 비교하였다. 데드비트 제어 시스템의 경우 연속 시간계 플랜트를 제어하기 위하여 영차홀드를 이용하여 플랜트 제어 입력으로 사용하였다.

표 1은 사례연구에 사용한 1기 무한모선 모형의 제정수를 나타내며, 이 경우 플랜트는 가제어성 및 가관측성을 가지게 되고 이 제정수에 따라 데드비트 제어 시스템 및 최적 제어기를 설계하였다.

표 1. 1기 무한모선 모형의 제정수

\$K_1 - K_6\$	\$K_1 = 0.5441 \quad K_2 = 1.2067 \quad K_3 = 0.6584\$ \$K_4 = 0.6981 \quad K_5 = -0.0955 \quad K_6 = 0.8159\$
발전기 정수	\$M = 9.26 \quad D = 0 \quad T_{d0}' = 7.76\$ \$x_d = 0.973 \quad x_d' = 0.19 \quad x_o = 0.55\$
여자기 정수	\$K_A = 50 \quad T_A = 0.05\$

그림 3과 그림 4는 각각 데드비트 제어 시스템과 선형최적 제어기에 대한 부하각과 각속도의 시간 응답을 보여 주고 있으며 그림 5는 이 경우에 대한 제어 입력

을 나타낸다.

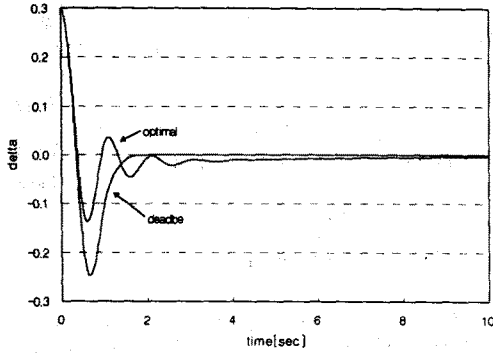


그림 3. 부하각의 시간 응답

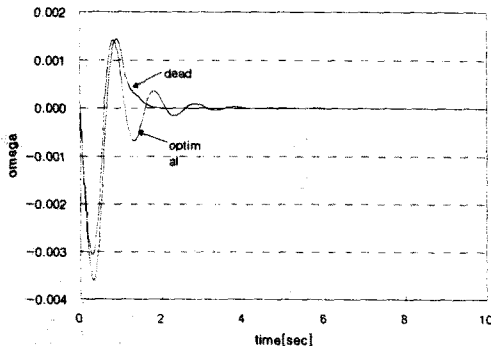


그림 4. 각속도의 시간 응답

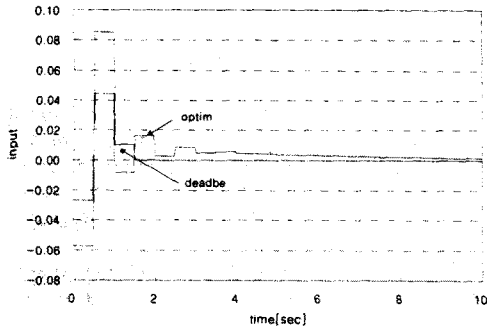


그림 5. 제어입력의 시간 응답

그림 3과 그림 4에 나타난 바와 같이 데드비트 제어 시스템에 대한 응답이 최적 제어기에 대한 응답보다 2 배 이상 빠르며 정정시간 이후에도 리플없이 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 전력계통 안정화를 위하여 데드비트 제어를 이용한 새로운 제어 시스템을 제안하였다. 제안된 제어 시스템은 적분 제어기와 상태 관측기로 구성되어 있으며 사례연구를 통해서 제안된 제어 시스템의 제어 성능을 기존의 최적 제어기와 비교 분석하였다. 사례연구 결과 최적 제어기보다 향상된 시간 응답을

보여 주고 있으며 이를 통하여 데드비트 제어가 전력계통 안정화에 대해 뛰어난 제어 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Y. Y. Yu, "Electric Power System Dynamics", Academic press, pp.65-135, 1983.
- [2] 박영문, 이홍재, 권태원, "출력귀환에 의한 PSS의 최적계수선정에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 38권, 5호, pp.336-342, 1989.
- [3] 이홍재, 박영문, 임찬호, "퍼지형 안정화제어기의 비선형 특성에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 42권, 11호, pp.61-66, 1993.
- [4] K. R. Padiyar, "Power System Dynamics : Stability and Control", John Wiley & Sons(Asia) Pte Ltd., pp.255-297, 1996.
- [5] J. Y. Yoon, et al., "Self-Tuning Fuzzy Logic Controllers Genetic Algorithm : HVDC System Application", Intelligent System Application to Power Systems(ISAP'97), Seoul, pp.291-295, 1996.
- [6] S. S. Lee and J. K. Park, "Full-order Observer-based Sliding Mode Power System Stabilizer with Desired Eigenvalue-Assignment for Unmeasurable State Variables", Journal of Electrical Engineering and Information Science, Vol.2, No.2, pp.36-41, 1997.
- [7] H. J. Lee, et al., "An ANN type Output Feedback Excitation Control to Damp the Sub-Synchronous Resonance", Intelligent System Application to Power Systems (ISAP'97), Seoul, pp.296-300, 1996.
- [8] K. J. Astrom, B. Wittenmark, "Computer-Controlled Systems : Theory and Design, 3rd edition", Prentice-Hall International, Inc., pp.16-29, 1997.
- [9] B. C. Kuo, "Digital Control Systems : 2nd edition", Saunders College Publishing, pp.530-562, 1992.
- [10] Katsuhiko Ogata, "Discrete-Time Control System : 2nd Edition", Prentice-Hall International, Inc., pp.377-629, 1995.
- [11] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering : 3rd Edition", Prentice-Hall International Inc., pp.803-957, 1997.