

전해도금전류조종을 위한 내부모형조종기설계의 한가지 방법

김명철, 황명혁

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《우리는 과학기술강국건설에 박차를 가하여 짧은 기간에 나라의 과학기술발전에서 새로운 비약을 이룩하며 과학으로 흥하는 시대를 열고 사회주의건설에서 혁명적전환을 가져와야 합니다.》(《조선로동당 제7차대회에서 한 중앙위원회사업총화보고》 단행본 38페이지)

선행연구[2]에서는 전해조의 목적구역에 대한 도금전류밀도의 실시간적추정에 대하여 제안하고 제한된 전류설정값에 대한 조종을 실현하였으며 선행연구[1, 3]에서는 선형시불변체계에 대한 내부모형수법을 준선형가변파라메터모형에 적용하는 수법, 블록지향비선형체계의 증폭도계획화조종에 대한 이론적연구를 진행하였다.

론문에서는 전해도금전류조종과정의 입출력측정자료에 기초하여 동정한 모형을 리용한 한가지 내부모형조종기설계에 대하여 논의하였다.

1. 내부모형조종방법을 리용한 전해도금전류조종기설계

전해조의 음극에서의 금속석출과정은 금속이온이 확산에 의하여 음극겉면에 이동하여 그것에 흡착되어 방전하면서 금속원자로 되는 과정이다.

도금액의 조성이 사전에 확정된 조건에서 도금의 질에 관계되는 중요한 인자는 전류밀도이다. 전류밀도를 높이면 분극이 커지고 결정립자가 미세화되는 경향이 있는데 한계전류밀도보다 큰 전류밀도에서는 수소의 방전으로 인하여 도금이 잘되지 않고 밀착되지 않은 검은색가루모양(타진 모양)의 도금이 이루어지며 수소의 석출에 의하여 잔구멍이 생긴다.

도금질에 영향을 주는 다른 중요한 인자는 도금액의 온도이다. 도금액의 온도가 낮으면 수소과전압이 커지기때문에 전류효율이 높지만 온도를 높이면 전기전도성이 좋아지기때문에 전류밀도를 높일수 있고 평탄하고 결정이 미세한 도금층이 얻어진다.

도금과정에 전해액의 온도가 일정하게 유지된다고 하면 도금전류조종을 위한 대상은 입력이 극판전극에 가해지는 전압 $u(V)$, 출력이 극판사이 전류가 $y(A)$ 인 1입력1출력체계로 볼수 있다. 전해도금전압-전류측정자료와 선행연구[2]결과는 대상의 동특성이 비선형이라는것을 보여준다.

론문에서는 대상의 비선형특성을 고려하여 대상모형을 조종기설계에 적합한 블록지향모형구조로서 다음과 같은 합머스테인체계로 선택한다.

$$y(t) = G(q)f(u(t)) + e(t) \quad (1)$$

여기서 q 는 이동연산자이고 $G(q)$ 와 $f(\cdot)$ 는 각각 대상의 동적선형부분의 전달함수와 정적비선형부분의 다항식이며 $e(t)$ 는 령평균가우스백색잡음이다.

문제는 도금조의 액상태가 변화되는 속에서 전류의 안정화조종을 실현하는것인데 이

것은 내부모형조종방법을 적용하여 실현할수 있다.

조종대상 (1)에 대한 내부모형조종기를 설계하기 위하여 조종력 $u(t)$ 를 선형동적요소 G_{IMC} 와 정적비선형요소 $h(\cdot)$ 로 이루어진 조종기의 출력이라고 가정한다.

만일 $h(\cdot)$ 를 $f(\cdot)$ 의 거울함수 $f^{-1}(\cdot)$ 과 일치하도록 구성한다면 즉 $h(\cdot)=f^{-1}(\cdot)$ 이라면 조종대상 (1)에 대한 조종기설계는 $G(q)$ 에 대한 조종기설계와 동가이며 내부모형조종기(IMC)는 다음과 같이 구성할수 있다.

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= G_{IMC}(q)e(t) \\ u(t) &= \hat{f}^{-1}(x(t)) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

그림 1에 증폭도계획화된 내부모형조종체계의 구성도를 보여주었다.

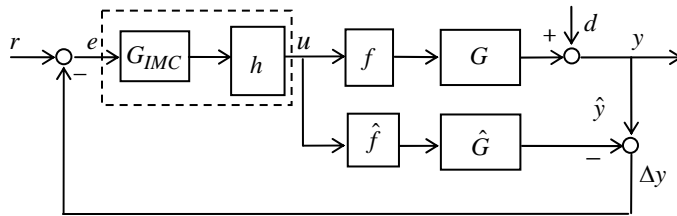


그림 1. 증폭도계획화된 내부모형조종체계의 구성도

그림 1에서 \hat{G} , \hat{f} 은 각각 모형의 동적선형부분 및 정적비선형부분, r 는 목표량, y 는 출력, Δy 는 대상의 출력과 모형출력의 오차이다.

조종기 (2)의 $G_{IMC}(q)$ 는 공칭내부모형조종기 $G_{IMC_n}(q)$ 와 려파기 $F(q)$ 에 의하여 다음과 같이 구성한다.

$$G_{IMC}(q) = G_{IMC_n}(q)F(q) \quad (3)$$

이때 $G_{IMC_n}(q)$ 와 려파기 $F(q)$ 는 다음과 같이 결정한다.

먼저 대상의 모형화오차를 무시하고 $G_{IMC_n}(q)$ 를 다음과 같이 얻을수 있다.

$$G_{IMC_n}(q) = \hat{G}_+^{-1}(q)H(q) \quad (4)$$

여기서 $\hat{G}_+(q)$ 는 모형의 최소위상부분, $H(q)$ 는 $H(1) = \hat{G}_+^{-1}(1)$ 이 만족되는 려파기이다.

다음 조종체계가 로바스트성을 가지도록 $F(q)$ 를 선정한다. 조종처리의 실시간성을 보장하기 위하여 $F(q)$ 를 저역려파기로서 1차형식으로 선정한다.

$$F(q) = \frac{1 - \alpha_f}{1 - \alpha_f q^{-1}} \quad (0 < \alpha_f < 1) \quad (5)$$

리상적인 모형 즉 $\hat{G}(q) = G(q)$ 이고 대상이 최소위상체계($\hat{G}_+(q) = \hat{G}(q)$)라고 할 때 내부모형조종체계의 목표량전달함수 $T_r(q)$ 와 외란억제전달함수 $T_d(q)$ 는 다음의 관계를 만족시킨다.

$$T_r(q) = F(q), \quad T_d(q) = 1 - F(q) \quad (6)$$

이것은 내부모형조종방법으로 설계된 닫힌체계의 성능이 려파기동특성에 의하여 결정된다는것을 보여준다. 닫힌체계의 정상특성을 보면 $t \rightarrow \infty$ 일 때 즉 $q \rightarrow 1$ 일 때 식 (5)와 (6)에 의하여 $T_r(q) \rightarrow 1$, $T_d(q) \rightarrow 0$ 이다.

조종대상의 동적선형부분이 지연항 q^{-d} 와 최소위상체계 $G_m(q)$ 에 의하여 다음과 같

이 구성된다고 하면 즉

$$\hat{G}(q) = q^{-d} G_m(q) \quad (7)$$

이면 내부모형조종기는

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= G_m^{-1} F / (1 - F) e(t) \\ u(t) &= f^{-1}(x(t)) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

로 된다.

식 (5)를 식 (8)에 대입하면

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= G_m^{-1} \frac{1 - \alpha_f}{\alpha_f} \frac{1}{1 - q^{-1}} e(t) \\ u(t) &= \hat{f}^{-1}(x(t)) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

이다.

2. 모의 및 실험결과분석

도금하려는 제품량이 고정된 아연도금조에 대하여 열린고리상태에서 표본화주기를 10ms로 하여 전해조극판전압을 변화시켜 반복측정실험을 진행하였으며 선행연구[1]의 동정방법에 의하여 모형을 동정하였다.

$$y_{M1}(t) = \frac{0.009\,939q^{-1} + 0.000\,587\,8q^{-2}}{1 - 1.622q^{-1} + 0.632\,4q^{-2}} (9.2u(t) - 0.506u^2(t) + 0.006\,78u^3(t)) \quad (10)$$

모형 (10)을 리용하여 내부모형조종기 (3)을 설계하고 대상이 변동되는 경우의 조종체계를 수값모의하였다.

조종기의 려과기시정수 α_f 는 조종체계의 안정성과 실시간성을 고려하여 수값모의적인 방법으로 0.8로 정하였으며 실제대상의 입출력관계는 $y(t) = kG(q)f(u(t)) + e(t)$ 라고 가정하였다. 여기서 k 는 상대적리득이다.

모의결과는 설계된 내부모형조종기는 목표량추종성이 강하며 외란억제특성이 좋다는 것을 보여주었다.(그림 2)

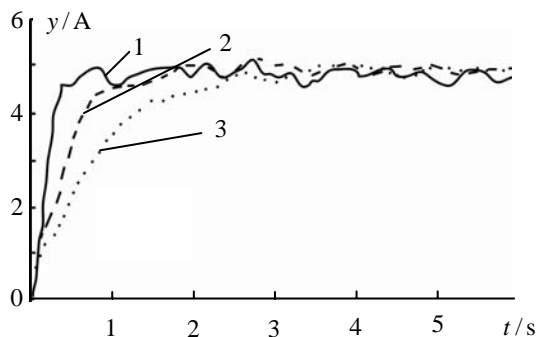


그림 2. 제안한 내부모형조종기에 의한 도금조의 전류조종결과
1-3은 각각 1, 1.2, 0.9인 경우

내부모형조종기를 도금공정에 도입한 현장시험결과는 도금과정에 온도가 변화되고 기체발생으로 인한 도금액상태의 변화속에서도 설정한 전류밀도를 높은 정확도로 추종하면서 도금의 질을 보장한다는것을 보여주었다.

맺는 말

도금조의 극판전압-전류모형을 함머스테인체계로 근사시켰을 때 대상모형에 기초하여 설계한 내부모형조종기는 도금전류의 안정화조종을 높은 정확도로 실현한다는것을 수 값 및 현장실험을 통하여 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Zeng Qiu et al.; Control Engineering Practice, 46, 105, 2016.
- [2] Yoshinao KIshimoto et al.; Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 5, 12, 656, 2011.
- [3] F. Giri et al.; IEEE Trans. Automat. Contr., 54, 9, 2174, 2009.

주체107(2018)년 2월 5일 원고접수

A Method Internal Model Controller Design for Electroplating Current Control

Kim Myong Chol, Hwang Myong Hyok

We identified a Hammerstein model for current dynamics of electroplating process based on input-output measurement data, designed an internal model controller using the identified model, and validated its control performance through both of numerical simulation and in-situ test.

Key words: internal model control, electroplating, Hammerstein model