

권선형비동기전동기 초동기속도조종체계에 대한 함머스테인모형작성의 한가지 방법

김명철, 리덕종

본문에서는 직접식주파수변환기를 리용한 권선형비동기전동기의 초동기속도조종체계에서 제기되는 수학적모형작성방법에 대하여 논의하였다.

선행연구에서는 교류전동기의 동작구간을 선형접근방에서 제한한 조건밑에 대상을 ARX 모형구조로 파라미터화하고 최소2제곱법(LS법)으로 입출력특성을 동정하였으나 얻어지는 모형은 전동기의 속도를 동기속도근방의 넓은 범위에서 조절하는 조종기의 설계에는 적합치 않다.[2]

우리는 입출력측정자료에 기초하여 권선형비동기전동기의 초동기속도조종장치를 입구측에 정적비선형요소를 가진 동적비선형체계로 놓고 대상의 선형동적부분과 정적비선형요소의 파라미터들을 교차추정하는 동정방법[1]에 의하여 수학적모형을 작성하는 문제에 대하여 논의하였다.

1. 문 제 설 정

권선형비동기전동기의 초동기속도조종체계는 주파수변환기에 의하여 전동기의 회전자에 걸어주는 전압의 주파수와 진폭, 위상을 조절하여 동기속도의 근방에서 전동기의 회전속도를 조절하는 체계로서 권선형비동기전동기와 조종정류소자식주파수변환기, 조종정류소자조종단으로 구성되어있다.(그림 1)

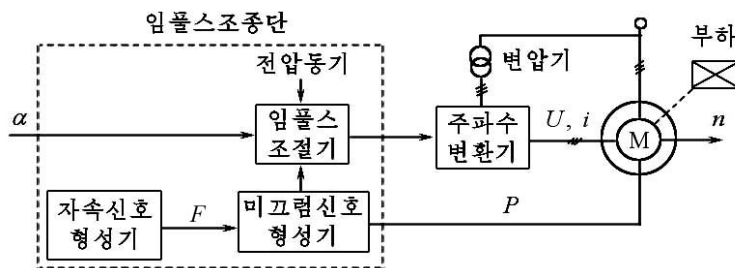


그림 1. 권선형비동기전동기 초동기속도조종체계의 구성도

여기서 M 은 권선형비동기전동기, P 는 전동기회전자의 위치신호, F 는 전동기공극자속의 위치신호, α 는 주파수변환기의 SCR조종각, i 는 전동기의 회전자전류, n 은 전동기의 회전속도이다.

이제 초동기속도조종체계에서 전동기의 회전자에 유도기전력과 같은 주파수와 위상을 가진 보조기전력을 가해준다고 하고 속도조종기의 설계에 필요한 체계의 모형작성에 대하여

보자.

직접식주파수변환기의 출력전압이 공업전원전압과 주파수가 일정한 조건에서 SCR조종각 $\alpha(t)$ 의 함수이고 주파수변환기의 시정수가 전동기의 전기기계적인 시정수에 비하여 아주 작다는것을 고려하면 변환기는 다음과 같은 정적비선형요소로 볼수 있다.

$$U = f(\alpha(t)) \quad (1)$$

여기서 $\alpha(t)$ 는 SCR조종각, f 는 정적비선형함수이다.

한편 전동기의 속도는 회전자의 기전력과 주파수변환기의 출력전압에 의하여 변화되기에때문에 권선형비동기전동기 초동기속도조종체계의 입출력특성 즉 SCR조종각과 전동기의 회전속도사이의 관계를 입력측에 정적비선형성을 가진 비선형동적체계로 특징지을수 있으며 컴퓨터조종에 편리하게 피염화하면 다음과 같다.

$$n(t) = \frac{B(q)}{A(q)} f(\alpha(t)) \quad (2)$$

우리는 열린고리상태에서 SCR조종각 α 를 변화시켜 전동기를 동기속도의 75~125%범위에서 조절하면서 동정실험을 진행하여 입력 α 와 출력 v (전동기회전속도)를 수집하였다. 이때 체계의 직접식주파수변환기에서 정변환각의 범위는 $0 \sim 90^\circ$ 이며 출력전압은 $\alpha = 90^\circ$ 일 때 0V, $\alpha = 0^\circ$ 일 때 최대이므로 수값적인 처리의 편리를 위하여 입력을 다음과 같이 변환한다.

$$\alpha_m = 90 - \alpha \quad (3)$$

자료측정의 표본주기를 10ms로 하고 반복측정실험($n=12$)을 진행하였으며 입출력자료들을 모두 MATLAB의 mat파일로 기록하였다.

입력에 대한 출력의 정상상태값을 직관적으로 볼 때(그림 2) 대상이 비선형성을 가진다는것을 알수 있으며 이것은 대상의 모형이 식(2)와 같은 합머스테인체계로 볼수 있다는 사실과 잘 맞는다.

문제는 측정한 입출력자료로부터 체계모형(2)의 동적부분과 정적부분의 미지파라미터를 추정하여 공업전원의 변화와 부하변동을 비롯한 외란에 로바스트인 내부모형조종기설계에 합리적인 수학적모형을 얻는것이다.

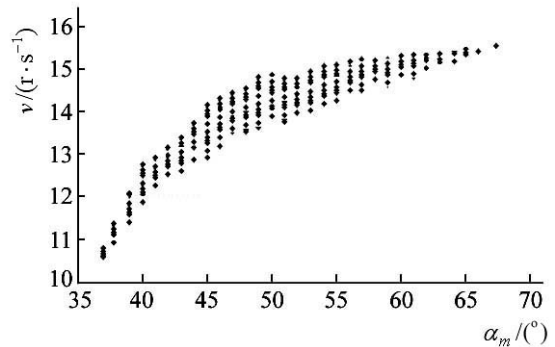


그림 2. 입력과 출력사이의 관계

2. LS교차추정법에 의한 권선형비동기전동기 초동기속도조종체계의 수학적모형작성

체계의 수학적표현은 체계의 정적비선형요소 $f(\cdot)$ 가 다항식이면 체계의 출력 $y(t)$ (전동기의 회전속도 $v(t)$)와 입력 $u(t)$ (SCR조종각 $\alpha(t)$)사이의 관계로서

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= \frac{B(q)}{A(q)} f(u(t)) + e(t) \\ A(q) &= 1 + \sum_{i=1}^{na} a_i q^{-i}, \quad B(q) = q^{-nk} \sum_{i=1}^{nb} b_i q^{-i} \\ f(u(t)) &= \mu_0 + \mu_1 u(t) + \mu_2 u^2(t) + \cdots + \mu_r u^r(t) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

와 같이 표시할수 있다. 여기서 다항식들의 차수 na , nb , nk 는 기지이며 $e(t)$ 는 령평균 가우스백색잡음, a_i , b_i , μ_i 들은 구하려는 미지파라메터들이다.

문제는 입출력측정자료 $\{u(t), y(t), t=\overline{1, N}\}$ 가 주어졌을 때 평가함수

$$J = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [y(t) - \hat{y}(t|t-1)]^2 \quad (5)$$

을 최소화하는 선형동적체계와 정적비선형요소의 파라메터들을 반복추정하는것이다.

먼저 k 째 반복의 추정량들을 $\hat{A}(q)$, $\hat{B}(q)$, $\hat{f}(u(t))$ 로 표시하고 비선형고정모형을 리용하여 동적선형모형을 동정한다.

고정된 정적비선형모형의 파라메터 $\hat{\mu}_i$, $i=\overline{1, r}$ 들에 대하여 그것의 출력은 다음과 같이 표시된다.

$$w(t) = f(u(t)) = \hat{\mu}_1 u(t) + \hat{\mu}_2 u^2(t) + \cdots + \hat{\mu}_r u^r(t) \quad (6)$$

한편 체계 (4)를 ARX형모형구조로 표현하고 그것을 비선형요소의 고정파라메터 $\hat{\mu} = (\hat{\mu}_1, \cdots, \hat{\mu}_r)^T$ 에 대하여 회귀모형으로 표시하면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= \varphi_1^T(t, \hat{\mu}) \rho + e(t) \\ \rho &= (a_1, \cdots, a_n, b_1, \cdots, b_n)^T \\ \varphi_1^T(t, \hat{\mu}) &= (-y(t-1), \cdots, -y(t-n), w(t-1), \cdots, w(t-n)) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

자료 $\{y(t), w(t), t=\overline{1, N}\}$ 에 LS법을 적용하여 다음의 추정량을 얻는다.

$$\hat{\rho} = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi_1(t, \hat{\mu}) \varphi_1^T(t, \hat{\mu}) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi_1(t, \hat{\mu}) y(t) \quad (8)$$

다음으로 선형고정모형을 리용하여 비선형요소모형을 동정한다.

이를 위해 측정자료를 려파하여 다음과 같은 려파자료 ($u_{Fi}(t)$, $i=\overline{1, r}$, $y_F(t)$, $t=\overline{1, N}$)를 만든다.

$$y_F(t) = \frac{1}{\hat{A}(q)} y(t), \quad u_{Fi}(t) = \frac{1}{\hat{A}(q)} u^i(t), \quad i=\overline{1, r} \quad (9)$$

그리고 고정된 $\hat{A}(q)$, $\hat{B}(q)$ 와 려파된 자료를 리용하여 식 (4)를 다음과 같이 표시한다.

$$\left. \begin{aligned} \hat{A}(q) y_F(t) &= \hat{B}(q) w_F(t) + e(t) \\ w_F(t) &= \mu_1 u_{F1}(t) + \mu_2 u_{F2}(t) + \cdots + \mu_r u_{Fr}(t) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

한편 새로운 자료

$$\tilde{y}(t) = \hat{A}(q)y_F(t), \quad \tilde{u}_i(t) = \hat{B}(q)u_{Fi}(t), \quad i = \overline{1, r} \quad (11)$$

를 만들고 식 (10)을 다시 표시하면 다음과 같다.

$$\tilde{y}(t) = \mu_1 \tilde{u}_1(t) + \cdots + \mu_r \tilde{u}_r(t) + e(t) \quad (12)$$

이 식을 고정파라미터 $\hat{\rho}$ 에 대하여 회귀형식

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}(t) &= \varphi_2^T(t, \hat{\rho})\mu + e(t) \\ \mu &= (\mu_1, \dots, \mu_r)^T, \quad \varphi_2^T(t, \hat{\rho}) = (\tilde{u}_1(t), \dots, \tilde{u}_r(t)) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

로 표현하고 LS추정하면 추정량은 다음과 같이 된다.

$$\hat{\mu} = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi_2(t, \hat{\rho}) \varphi_2^T(t, \hat{\rho}) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi_2(t, \hat{\rho}) \tilde{y}(t) \quad (14)$$

위의 과정들을 파라미터들이 수렴할 때까지 반복한다.

3. 모형작성결과 및 분석

현실에서 대상으로 한 권선형비동기전동기의 전기기계적파라미터들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_s &= 0.016\Omega, \quad R_r = 0.012\Omega, \quad L_s = 18.39\text{mH}, \quad L_r = 18.53\text{mH}, \quad U_{sn} = 3\,000\text{V}, \quad U_{rn} = 480\text{V}, \\ I_{sn} &= 160\text{A}, \quad I_{rn} = 820\text{A}, \quad p = 8, \quad P_m = 660\text{kW}, \quad n = 883\text{r/m} \end{aligned}$$

측정자료를 동정의 요구에 맞게 평균값을 제거한 다음 2개의 토막자료부분들로 분할하고 파라미터추정자료 data_e는 자료의 첫 토막을 취하고 검증자료 data_v는 두번째 토막을 선택하였다.

모형구조선택과 입출력모형의 파라미터동정실험은 MATLAB의 체계동정도구함 SITB에 의하여 진행되고 결과분석되었다.

먼저 선형동적부분의 모든 파라미터들이 2차라고 가정하고 지연차수 nk 를 $[0, 10]$ 에서 변화시키면서 결정한 다음 파라미터(차수)들의 모든 원소들을 $[1, 5]$ 사이에서 변화시키면서 손실함수가 최소가 되도록 파라미터차수행렬을 계산한 결과는 $nn = [2, 2, 3]$ 이다.

파라미터를 반복추정한 결과 $k = 2\,000$ 일 때의 조종대상의 동적선형부분과 정적비선형부분의 추정결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{A}(q) &= 1 - 1.591q^{-1} + 0.593\,8q^{-2} \\ \hat{B}(q) &= 0.010\,86q^{-3} - 0.004\,51q^{-4} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\hat{f}(u(t)) = 0.003\,87u(t)^3 - 0.005\,45u(t)^2 + 0.074\,55u(t) + 1.319 \quad (16)$$

모형검증결과 손실함수는 0.317 222이고 최종예측오차는 0.317 349로 평가되었으며 같은 입출력자료에 기초하여 LS법으로 모형을 추정하였을 때 손실함수는 0.768 732, 최종예측오차는 0.769 124였다. 비교실험결과로부터 LS교차추정법에 의한 추정모형이 선행한 동정방법으로 얻은 모형에 비하여 실제측정출력을 정확히 근사시킨다는것을 알수 있다.

맺 는 말

함머스테인모형의 선형부분과 정적비선형부분을 독립파라미터화하고 선형부분의 추정모형을 자료려파기로 리용하면서 선형부분과 정적비선형요소의 파라미터들을 교차추정하여 접근불편추정량을 얻어내는 한가지 LS반복동정방법을 권선형비동기전동기 초동기속도조종체계의 모형화에 적용하여 조종기설계에 합리적인 모형을 추정하였다.

참 고 문 헌

[1] 김일성종합대학학보(자연과학), 57, 10, 33, 주체100(2011).

[2] 김일성종합대학학보(자연과학), 56, 11, 54, 주체99(2010).

주체104(2015)년 1월 5일 원고접수

A Hammerstein Modelling on Supersynchronous Speed Control System for Wound-Rotor Type Asynchronous Motor

Kim Myong Chol, Ri Tok Jong

We proposed an identification problem of Hammerstein model on supersynchronous speed control system for wound-rotor type asynchronous motor.

In order to identify the system, we applied a bootstrap method that the estimated polynomial of linear part is used as a filter, and the parameter estimation of linear and nonlinear part is iterative and proved the validation of the estimated model by numerical comparative simulation with LS identification method.

Key words: asynchronous motor, Hammerstein model