

퍼지제어에 의한 미사일 조종날개용 구동모터의 안정화에 관한 연구

김상우, 권용수
국방대학원 무기체계과

The stabilization of a missile actuator using fuzzy controller

Sangwoo Kim, Yongsoo Kwon
National Defense University

Abstract - A stabilization scheme of a missile actuator using fuzzy controller is proposed. A variable-reluctance stepping motor adopted as a actuator is critically restricted useful operation since pronounced oscillatory behaviour at a certain input frequencies. The previous stabilization scheme, which employs frequency modulation, of the clock-pulse source using derived from the modulation envelope of the total intake current is modified using fuzzy control. The proposed scheme has apparent advantage, particularly in size, mass and flexibility.

1. 서 론

미사일 조종날개용 구동기로는 유압, 공압 그리고 전기모터가 사용되고 있다. 종래에는 무게 대 출력비가 높은 유압구동장치가 많이 사용되었으나, 보존용기를 부식시킴으로써 저장수명이 짧고, 누설에 의해 환경을 오염시킨다는 문제점이 대두되어 사용에 제한을 받고 있다. 이에 따른 대체 수단으로 전기식 구동장치에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 고에너지밀도의 축전지, 강자성체, 초전도체와 디지털집적기술의 발달로 전기식 구동장치의 사용이 날로 증가되고 있는 추세이다. 이러한 미사일조종날개의 전기식 구동 장치는 사용과 정비가 용이하고 저장수명이 길며, 환경오염을 야기하지 않는다. 더욱이 미사일 탐지 및 항법 장치의 구동전원을 그대로 사용할 수 있고, 디지털화 및 집적화가 가능하여 소형 경량화가 가능하다는 이점을 지니고 있다. 전기식 구동기로는 BLDC모터와 스텝핑 모터가 있으나, 개루프로서 입력펄스에 의해 만족스러운 성능의 제어가 가능한 스텝핑모터의 사용이 관심을 모으고 있다.

스텝핑모터는 입력펄스에 따라 정해진 각도만큼 정확 하게 회전하고 디지털제어가 쉽기 때문에 첨단 제어 시스템의 위치제어용 모터로서 많이 사용되고 있으나, 개루프로서 동작시킬 때 특정 입력주파수 영역에서 심한 진동현상이 나타난다. 특히 중속 이상에서 발생하는 불안정 진동은 속도의 증가에 따라 크게 증가하여 마침내 동기상실을 야기하기 때문에 대부분의 개루프 제어 시스템의 사용에 있어 심각한 문제점을 지니고 있다. 입력주파수를 공진주파수 이상으로 증가시킬 때 따라 저속영역에서 발생하는 모터의 불규칙적인 회전속 진동은 공진주파수 부근에서 심하게 나타나 운전영역을 제한시킨다. 이러한 불안정은 정상 상태 동기회전에 중첩되는 저주파 속도진동의 존재에 의해 특성 지어진다. 모터자체와 구동회로의 시스템 파라미터에 따라 수백steps/sec 이상에서 1,000steps/sec 정도에 걸쳐 발생한다. 1979년 A. C. Leenhouts에 의해 구체 적으로 제시된 미세스텝제어 방식은 고분해능을 얻을 수

있을 뿐만 아니라 저속에서의 진동을 크게 감소시킬 수 있다는 점에서 중요하다. 그러나 이 방법은 특성 향상이 저속으로 한정되며, 중속영역 이상에서는 대부분의 토 크맥동과 진동이 그대로 나타나는 단점을 보이고 있다. 또한 저자는 최근 발표된 논문[1]을 통하여 타코미터나 엔코더와 같은 고가의 보조기를 사용하지 않고 전류 파형을 사용하여 심각한 중속 불안영역을 지나 고속 까지 광범위한 속도 범위에서 스텝핑모터를 원활히 운전시킬 수 있는 안정화회로에 대한 제시했다. 그러나 이러한 방식은 필터의 성능에 매우 민감한 반응을 나타내며, 회로의 특성상 다양한 운전 패턴하에서의 운전제 제한을 갖는다.

이러한 관점에서 본 연구는 기발표된 스텝핑모터의 안정화회로 대신 전문가의 지식에 의해 추론이 가능한 퍼지제어기법을 적용함으로써 안정화 필터설계의 문제점을 제거하고 다양한 운전패턴하에서의 만족스런 성능을 얻고자한다. 시뮬레이션을 통하여 기존의 안정화와 같은 성능을 구현했으며, 안정화회로의 퍼지제어화에 따른 경량, 소형화는 미사일 조종날개구동시스템의 요구조건을 만족시킨다.

2. 스텝핑모터의 불안정

2.1 스텝핑모터의 불안정 해석

일정한 크기의 진동을 갖는 진동성분이 정상 동기회전에 중첩된다는 가정 하에 회전자의 위치변동은, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\theta(t) = \omega_0 t - \delta + \theta_0 \sin(\alpha t) \tag{1}$$

식(1)를 만족하는 발생토크 T_e 는 다음 식과 같이 정상 토크 T_0 , 각속도 α 에서의 댐핑토크 T_d 와 동기토크 T_s 로 구성된다.

$$T_e(t) = T_0 + T_d \cos \alpha t + T_s \sin \alpha t \tag{2}$$

회전자에 대한 운동방정식은 다음과 같으며,

$$J_{rL} \frac{d^2 \theta}{dt^2} + K_v \frac{d\theta}{dt} + T_L = T_e(t) \tag{3}$$

식(2)를 (3)식에 등치시키고, 식(1)의 θ 를 대입하면 불안정 동작을 나타내는 다음과 같은 3개의 비선형 연립방정식이 얻어진다.

$$T_L + K_v \omega_0 - T_0(\theta_0, \alpha, \delta, \omega_1) = 0 \tag{4}$$

$$K_v \theta_0 \alpha - T_d(\theta_0, \alpha, \delta, \omega_1) = 0 \tag{5}$$

$$J_{rL} \theta_0 \alpha^2 + T_s(\theta_0, \alpha, \delta, \omega_1) = 0 \tag{6}$$

주어진 시스템 파라미터와 입력주파수 ω_1 에 대해 식(4)-(6)의 비선형 연립방정식을 수치적으로 계산함으로써 동적 불안정 특성을 알 수 있다. 또한 식(5)는 $K_d = -T_d/\theta_0\alpha$ 에 의해 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$K_v + K_d(\theta_0, \alpha, \delta, \omega_1) = 0 \quad (7)$$

여기서, K_d 는 댐핑토크계수를 나타내며 양의 값은 양의 댐핑토크 값을 나타낸다. 이 식은 댐핑토크계수가 음이고 크기에 있어 점성마찰계수 K_v 에 의해 생기는 양의 댐핑과 같을 경우 일정한 크기의 진동이 존재함을 나타낸다. 즉, 모터의 동적 불안정은 유효 댐핑토크계수 $K_v + K_d$ 에 의해 정해진다. 그 값이 양이면 진동은 일정하게 유지되지 않고 $K_v + K_d$ 에 의해 정해지는 비율로 감소하여 시스템이 안정되며, 만약 음이면 진동이 증가한다.

그러므로 증속영역에 대한 불안정 해석은 식(4)-(6)의 연립방정식의 수치적 계산 대신에 댐핑토크계수 해석을 통해 가능하다. 댐핑계수의 값을 얻기 위해서는 진동 크기 θ_0 가 정해지고, 주어진 임의의 여자주파수 ω_1 에 대해 식(4)와 (6)의 연립방정식을 만족하는 α 와 δ 를 구하고, 이로부터 K_d 가 쉽게 계산된다.

일반적으로 댐핑토크계수의 각 특성곡선은 어떤 특정 경계치 Ω_{1b} 이상의 모든 여자주파수에 대해 음의 값을 지니며, 또한 그 이상의 임의의 값 $\hat{\Omega}_1$ 에서 음의 최대값을 갖는다. 모터는 Ω_{1b} 이하의 여자주파수에 대해 본래 안정된 운전이 가능하며, 그 이상의 주파수에서는 여자주파수의 증가에 따라 진동의 크기가 급격히 증가하여 동기상실과 같은 불안정 운전을 야기한다. 이러한 불안정 현상을 완전하게 제거하기 위해서는 외부에서 가해지는 점성댐핑이 음의 최대댐핑토크계수와 크기에 있어 최소한 같아야 한다. 그러므로 진동이 시작되는 주파수 (Ω_{1b})와 음의 최대댐핑값을 갖는 주파수 ($\hat{\Omega}_1$)에 대한 정확한 예측이 불안정 특성에 대한 연구의 주요 관점이 된다.

2.2 주파수변조시의 불안정 해석

주파수변조 전압원을 인가할 때 주파수변조 신호 위상 각 γ 가 일정한 범위 내에 존재하기만 하면 스텝핑모터는 언제나 광범위한 영역에 걸쳐 안정되게 운전될 수 있다.

Bessel 함수 $J_0(Nr\theta_0) = 1$, $J_2(Nr\theta_0) = 0$ 가 되도록 θ_0 가 매우 적고, $\omega_1 \gg \alpha$ 를 만족하는 '이상적인 관성 부하'라는 가정 하에 주파수변조에 기인하는 부가적인 댐핑토크에 대한 관계식은 다음과 같이 쓸 수 있다[2].

$$K_{df}' = -\frac{PL_1NrV_1^2K_v}{4r^4K_L^2} \frac{\sin\gamma}{\alpha} \left[\frac{G_r \cos(Nr\delta - \zeta)}{(1 + \Omega_1^2)(1 + (2\Omega_1)^2)} \right] \quad (8)$$

여기서,

$$\zeta = \tan^{-1} \left[\frac{2K_L^2\Omega_1(1 + (2\Omega_1)^2) + 2\Omega_1^3}{2K_L^2(1 + (2\Omega_1)^2) + \Omega_1^2} \right]$$

$Nr\delta - \zeta < \pi/2$ 의 조건하에서 $\sin\gamma/\alpha$ 가 음의 최대일 때 K_{df}' 는 최대가 된다. 더욱이 탈출토크까지의 모든 부하에 대해 $\cos(Nr\delta - \zeta) > 0$ 이므로 적절하게 γ 값을 선정하면 언제나 양의 댐핑토크계수 값을 얻을 수 있다.

식(8)에 의해 주어진 일반적인 관계는 $-180^\circ < \gamma < 0^\circ$ 일 때 K_{df}' 는 양이 되며, $0^\circ < \gamma < 180^\circ$ 경우는 K_{df}' 는 항상 음이 된다. 이상적인 부하에 대한 댐핑토크 특성이 γ 값에 따라 크게 변화됨을 알 수 있다. 특히 $\gamma = -\pi/2$ 일 때 K_{df}' 는 양이 되며 시스템이 안정되게 운전될 수 있다는 것에 주목해야 한다.

2.3 기존 안정화제어기

스텝핑모터가 불안정영역에서 구동되고 있을 때에는 회전자속도진동이 크게 나타나며 반전전류파형의 상측측포락선이 속도진동파형보다 $\pi/2$ 만큼 뒤진다. 그러므로 이러한 위상차 특성을 이용하는 경우 즉, 전전류 변조파형의 포락선신호를 모터의 입력펄스 주파수(구동주파수)로 주파수변조시킨 다음 변조된 신호로 스텝핑모터를 구동시킴으로써 안정된 구동을 실현할 수 있다. 그림1은 이러한 개념을 적용한 안정화회로의 블록선도이다. 그러나, 안정화회로의 개발에 있어서 중요한 문제는 저역통과필터의 파라미터에 대한 선정이다. 저역필터의 설계시 나타나는 위상지연이 앞에서 언급된 안정화 운전영역의 범위를 벗어나지 않도록 유의해야 한다. 선정된 파라미터의 값은 사용되는 구동모터에 따라 다르며, 스텝핑주파수와 진동주파수 간의 최소차 및 최대 진동주파수의 변화와 밀접한 관계가 있다.

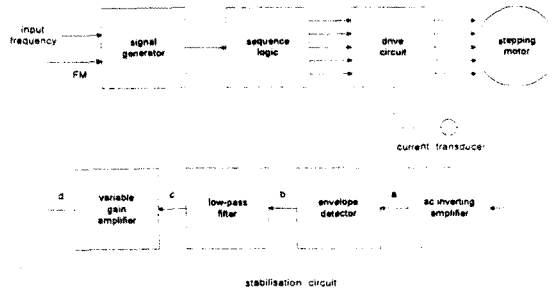


그림 1. 기존 안정화 제어기의 구조

3. 퍼지제어기 설계

Mamdani에 의해 처음 도입된 퍼지제어기가 오늘날 비선형시스템 제어에 폭넓게 사용되고 있다. 저자에 의해 발표된 안정화연구[2,3]를 통해 얻어진 퍼지제어의 기본이 되는 전문가 지식은 다음과 같다.

- (i) 스텝핑모터의 불안정시 반전된 전전류파형의 상측 포락선은 회전자속도 진동파형보다 90° 뒤진다.
- (ii) 시스템이 안정하기 위한 입력주파수의 변화율은 초기 전류값에 대한 전전류 파형의 하측포락선 값의 변화율의 1/2이다. 즉,

$$P_{\omega_1}(n) = \frac{1}{2} P_i(n) \quad (9)$$

여기서

$$P_i(n) = [i_{on}^0(n) - i(0)] / i(0)$$

$$P_{\omega_1}(n) = [\omega_1(n) - \omega_1] / \omega_1$$

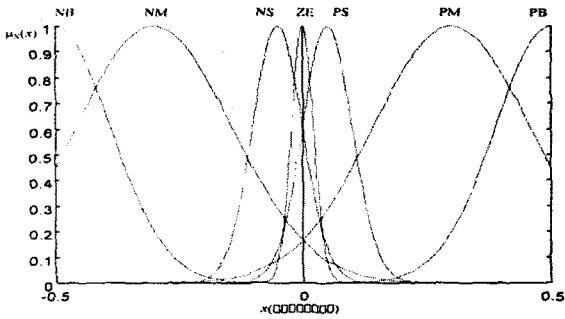
또한, $i(0)$, $i_{on}^0(n)$ 와 $\omega_1(n)$ 는 각각 첫 번째 switch-on 전전류의 초기값, n 번째 switch-on 전전류의 초기값과 n 번째 입력주파수를 의미하며, 그 값의 범위는 $-0.5 < P_i(n) < 0.5$, $-0.25 < P_{\omega_1}(n) < 0.25$ 이다.

(iii) 입력주파수가 증가함에 따라 전전류는 감소된다. 위와 같은 전문가 지식을 바탕으로 제어입력변수와 제어출력변수는 각각 $x = P_i(n)$ 과 $y = P_{\omega_1}(n)$ 로 선정한다.

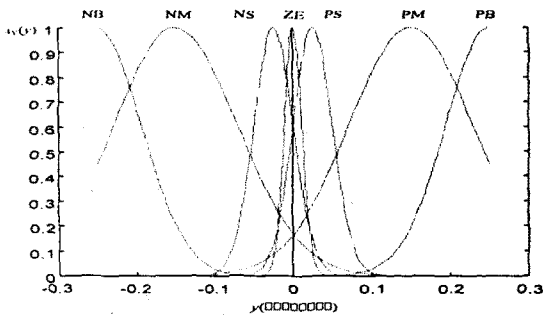
다. 각각의 변수는, 전체집합을 X,Y로 정의하고 이를 각각 그림 2와 같이 NB(negative big), NM(negative medium), NS(negative small), ZE(zero), PS(positive small), PM(positive medium) 및 PB(positive big)로 영역을 분할하고 다음과 같은 형태의 소속함수 값을 부여 한다(4).

$$\mu_{FS}(v) = e^{-a(v+v_0)^2} \quad (10)$$

여기서 FS, v, a와 v_0 는 각각 퍼지집합, 입출력변수, 함수의 분산정도를 갖는 비율과 최대의 소속함수값을 갖는 변수를 나타낸다.



(a) 제어입력의 퍼지집합과 소속함수



(b) 제어출력의 퍼지집합과 소속함수

그림2. 제어입·출력 퍼지집합과 소속함수

추론방식은 Mamdani의 min 연산을 적용하며, 규칙은 다음과 같이 정한다.

- $R_1 : \text{If } x=NB, \text{ then } y=NB$
- $R_2 : \text{If } x=NM, \text{ then } y=NM$
- $R_3 : \text{If } x=NS, \text{ then } y=NS$
- $R_4 : \text{If } x=ZE, \text{ then } y=ZE$
- $R_5 : \text{If } x=PS, \text{ then } y=PS$
- $R_6 : \text{If } x=PM, \text{ then } y=PM$
- $R_7 : \text{If } x=PB, \text{ then } y=PB$

또한, 매 스텝간의 지속적인 동작특성이 효과적으로 개선되도록 최대평균법을 적용하였다. 이 방법은 출력부 퍼지집합에서 소속함수가 최대값을 가질 때 값들의 평균을 계산하는 방식으로 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_0 = \sum_{j=0}^k \frac{y_j}{k} \quad (11)$$

여기서 y_j 는 소속함수값이 최대가 되는 제어값 그리고, k 는 최대가 되는 제어값의 개수이다.

그림 3은 이와 같은 방식에 의해 설계된 퍼지제어기를 나타낸다.

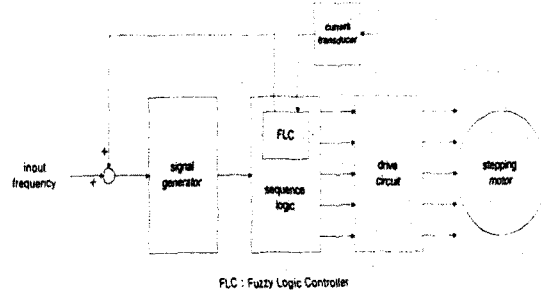


그림3. 퍼지 제어기의 구조

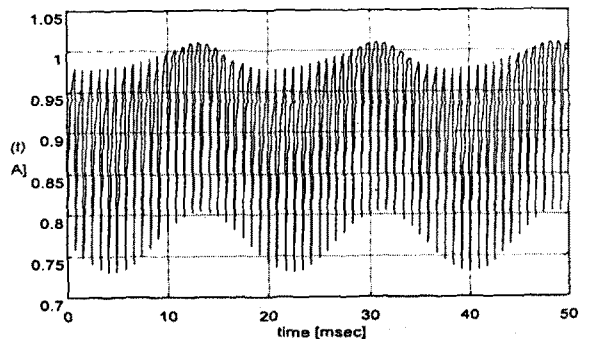
4. 시뮬레이션 결과 및 검토

시뮬레이션에 사용된 스텝핑모터는 5상 가변펄럭턴스 모터로서 주요 모터상수는 표 1과 같다.

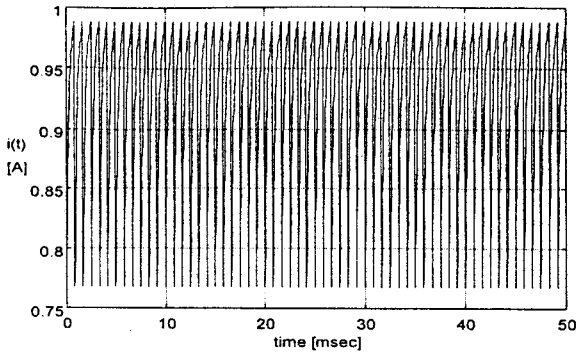
표1. 모터 상수

구 분	제 원
치 수	16
정 격 전 류 [A]	3.5
저 령 항 [Ω]	6.5
인 덕 턴 스 [mH]	6.17
스 텡 각 [deg]	4.5

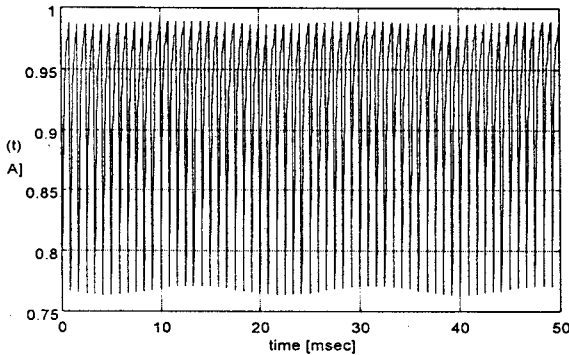
그림 4(a)는 공시모터를 정격전류로 불안정 영역에서 1상여자방식 운전시킬때의 전전류파형을 나타낸다. 반면 그림 4(b)와 (c)는 기존의 제어기(그림1 참고)와 본 연구에서 제안된 퍼지제어기에 의한 전류파형의 결과로 불안정영역에서 안정한 운전이 가능함을 보여준다. 퍼지 제어시의 전류파형의 하측포락선에 나타나는 미세한 진폭의 진동은 출력변수 퍼지집합 ZE와 NS(또는 PS)간의 소속경계값에 기인하는 것으로 식(10)의 분산정도를 갖는 비율 a 값을 조절함으로써 이러한 진동을 쉽게 제거할 수 있다. 그러므로 전문가의 지식을 기반으로 하는 추론형식의 퍼지제어기는 불필요한 제어회로부를 프로그램화함으로써 소형, 경량화와 다양한 운전조건에 대한 적용이 가능하다. 이러한 사실은 미사일의 조종날개 구동모터 제어기로서 요구 조건을 만족시킨다.



(a) 불안정 전류파형



(b) 기존제어기의 전류파형



(c) 퍼지제어 이후의 전류파형

그림4. 전전류파형

($V/r=3.5A$, $1200pps$, $T_L=0$)

5. 결 론

미사일 조종날개의 구동용모터인 가변릴럭턴스 스텝핑 모터의 불안정을 전문가 지식을 기반으로 하는 퍼지제어에 의해 제거함으로써 광대역 운전이 가능함을 제시했다. 기존의 안정화회로 부분을 퍼지화함으로써 소형·경량화가 가능하며, 다양한 운전조건에 따른 적용 능력이 우수함으로 미사일조종날개 구동모터로서의 요구성능을 만족시킬 수 있다. 이러한 방식은 시스템에 대한 정확한 수학적 모델과 분석을 통하지 않고 기존 제어기에 대한 전문가의 지식만으로도 제어 목적을 달성할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 권용수, 정삼, "광파이버 자이로컴퍼스 시스템을 위한 스텝핑모터의 안정화", 하계학술대회는문집A, 대한전기학회, pp.152-154, 1997.
- [2] 권용수, "주파수변조 구동에 의한 가변릴럭턴스 스텝핑 모터의 불안정 해석", 하계학술대회는문집A, 대한전기학회, pp.114-118, 1994.
- [3] 권용수, "가변릴럭턴스 스텝핑모터의 전류파형 해석", 하계학술대회는문집A, 대한전기학회, pp.116-118, 1995.
- [4] 이광형, 오길록, "퍼지이론 및 응용(I, II)", 홍릉과학출판사, 1992.