

현수형 가선 케이블의 장력 유지제어에 관한 연구

윤정환*, 홍순일*, 김철우* *
부경대학교*, 부산대학교* *

A Study on Maintaining Control of Tension for a Catenary's Cable

Jung-hwan Yoon* *, Soon-ill Hong * , Chunt-woo Kim * *
Pukyong University * , Pusan University * *

Abstract - 본 논문은 제어대상인 현수형 케이블의 수학적 모델을 작성하고 이것에 장력을 발생하는 교류서보 전동기의 수학적 모델을 구하였다.

제어 방법은 제어대상의 동적 모델이 비선형 시변계이기 때문에 강인성이 있는 퍼지제어를 적용하고 차대가 움직이기 시작할 때 발생하는 오버슈트를 억제하기 위해서 피드포워드제어를 채택한다. 케이블의 동적 모델에 기초하여 퍼지제어기와 피드포워드제어를 도입하여 시스템을 구성하고 시뮬레이션 실험에 의해 그 유효성을 평가하였다.

현재 로프제조 공정, 전차 트롤리선 가설공사는 장력의 제어가 필요하지만 거의 수동으로 행하고 있는 실정이고 제품의 균질성과 생산성 향상을 위하여 제조 공정의 자동화가 필요하다. 따라서 전차의 트롤리선 가설공사는 케이블을 탑재한 차대가 주행하면서 드럼에 감긴 케이블을 풀어주고 양단의 장력을 일정히 유지하도록 조절할 필요가 있다.

그러나 전기공사에서 시행하고 있는 송·배전 선로의 전력케이블 가선공사나 전차 트롤리선 가설공사는 수동으로 하고 있는 실정이고 이것의 자동화기계가 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 현수형 가선 케이블 가설장치의 자동화이다.

본 연구에서는 제어대상인 현수형 케이블의 수학적 모델을 작성하고 이것에 장력을 발생하는 교류서보 전동기의 수학적 모델을 구하였다.

제어 방법은 제어대상의 동적 모델이 비선형 시변계이기 때문에 강인성이 있는 퍼지제어를 적용하고 차대가 움직이기 시작할 때 발생하는 오버슈트를 억제하기 위해서 피드포워드제어를 채택한다. 케이블의 동적 모델에 기초하여 퍼지제어기와 피드포워드제어를 도입하여 시스템을 구성하고 시뮬레이션 실험에 의해 그 유효성을 평가하였다.

1. 현수형 케이블의 장력 제어 시스템

1.1 현수형 케이블의 운동방정식

일정한 질량을 가지고 가선 되는 케이블에 힘을 가해 당기면 공기중의 중력에 의해 현수곡선(Catenary curve)의 형상이 되고 운동방정식은 다음과 같다,

$$y = \cosh(x/a) + n \tag{1}$$

케이블에 걸리는 장력 및 풀린 길이는 다음 식이 된다.

$$T = l \rho g \frac{\sqrt{1 + \dot{y}^2}}{2y} \tag{2}$$

$$= a \rho g \sqrt{1 + \sinh^2(x/a)}$$

$$l = \int_{-x}^x \sqrt{1 + \sinh^2(x/a)} dx \tag{3}$$

$$= 2 a \sinh(x/a)$$

여기서, ρ 는 케이블의 선밀도, g 는 중력가속도, $a > 0$, n 는 현수선의 형을 결정하는 파라미터이다.

1.2 제어시스템의 구성

케이블의 장력제어는 교류 전동기의 토오크로 제어하고 장력을 측정하여 측정값에 따라 전동기의 토오크를 조정한다.

제어방법은 검출한 장력을 피드백하고 속응성과 정상특성을 개선하기 위해서 퍼지제어와 피드포워드 제어한다.

전동기의 전달함수는 식(4)이 된다.

$$G(s) = 0.4e^{-0.002s} \frac{1 + \frac{1}{350}s}{1 + \frac{1}{90}s} \tag{4}$$

식(2)에서 장력과 차대의 진행거리의 관계는

$$T_f = a(t)\rho g \sqrt{1 + \sinh^2\left(\frac{\Delta x}{a(t)}\right)} \tag{5}$$

가 된다. 식(3)에서 케이블의 길이와 차대의 진행거리의 관계는 식(6)이 된다.

$$l = 2a(t)\sinh\left(\frac{\Delta x}{a(t)}\right) \tag{6}$$

여기서, Δx 는 차대의 진행거리, T_f 는 케이블 양단에 걸리는 장력을 나타내고 $a(t)$ 는 현수선의 모양을 결정하는 파라미터로 케이블이 풀릴 때 시간에 따라 변한다.

토오크 발생용 전동기와 부하의 운동방정식은 식 (7)이 된다.

$$T_m(t) = (J_m + k_r J_L) \frac{d}{dt} \omega_m(t) + k_r R T(t) + k_r R k_f \omega_m(t) \quad (7)$$

여기서, k_s 는 스프링 정수, k_f 는 피드백 정수, k_r 는 치차비, J_m 는 전동기 관성 모우먼트 이다.

Fig.1은 식(4), 식(5), 식(6) 및 식(7)으로 구성된 시스템의 블록선도이다.

여기서 k_v , k_a 는 각각 차대의 속도 파라미터와 가속도 파라미터이고 V_d , a_d 는 차대의 속도와 가속도 이다.

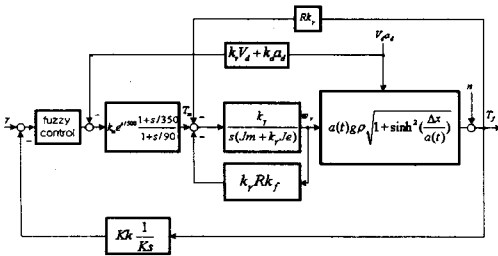


Fig.1 Proposed tension control system for catenary cable

2. 시뮬레이션에 의한 정장력제어의 평가

퍼지추론에서 전진부의 소속함수는 삼각형법으로 하고 각각 NB, NS, ZO, PS, PB의 5부분으로 나눈다. 후진부 소속함수는 막대형으로 하고 각각 NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB의 7부분으로 나눈다. 퍼지제어 규칙은 입력의 e 와 de 에 따라 25개의 제어규칙이 설정된다.

초기값은 케이블의 폭은 1[m], 덩 길이는 0.01[m]으로 하였고 양단에 걸린 장력은 20.8[N]이다. 또 장력의 목표값을 40[N]으로 하고 샘플링 시간은 10[ms]로 한다.

여기서는 Table 1에 나타난 각 정수를 이용하여 시뮬레이션하고 시스템의 유효성을 조사한다.

Table 1. parameters for simulation

J_m	3.5×10^5 [kgm ²]	J_e	$J_m/10$ [kgm ²]
R	0.02 [m]	k_r	0.1
Dip	0.01 [m]	k_s	200 [N/m]
k_f	200 [A/m]	k_k	200 [Nsec]
폭	1 [m]	반경	$\varnothing 2.5$ [m m] 동선

[1] 정지상태 장력조절 실험

Fig. 2는 속도형과 위치형 퍼지제어를 조합하여 차대가 정지한 상태에서 시뮬레이션을 행한 결과를 나타낸다. 이 실험의 경우 입상 시간은 0.3초이고 오버슈트는 발생하지 않고 정상오차도 없는 결과가 얻어졌다. 그러나 차대가 정지상태에서 가속도로 움직이면 장력의 응답이 크게 진동하였다.

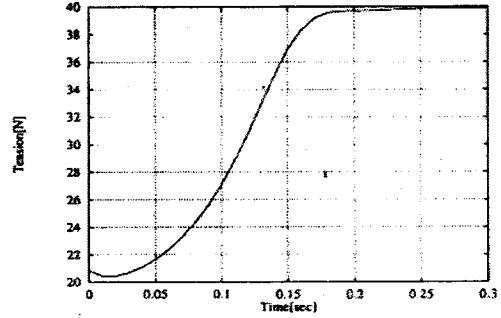


Fig.2 The tension response at $V_d = 0$ [m/s], $a_d = 0$ [m/s²]

[2] 피드포워드에 대한 실험

Fig. 3은 차대가 0.3초에서 0.4초 사이에 0.1m/sec²의 가속도로 움직이기 시작할 때 차대의 속도만 피드포워드 제어한 경우의 장력 응답을 나타낸 것이다. 이때, 피드포워드 제어의 입력 f_f 는 $f_f = k_v v_d$ 이다. 여기서, 시행착오 방법에 의해 $k_v = 85.0$ 으로 설정한다. 그 결과 응답은 진동은 소멸하였지만 상당히 큰 오버슈트가 발생하고 있다.

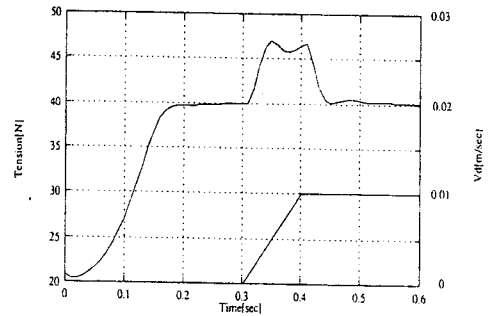


Fig. 3 The tension response with feed-forward at $k_v = 85.0$, $k_a = 0$

Fig. 4는 차대가 속도와 가속도를 가지고 움직이기 시작할 때 속도와 가속도를 피드포워드 한 장력 응답을 나타낸다. 여기서, 차대의 가속도 신호와 속도 신호를 피드포워드 제어신호로 한 경우 입력 f_f 는 $f_f = k_a a_d + k_v v_d$ 이고, 이 경우 시행착오 방법에 의해 $k_v = 85.0$, $k_a = 0.8$ 로 설정한다. 오버슈트가 없는 양호한 결과가 얻어졌다. Fig. 3과 Fig. 4에서

알 수 있는 것은 속도와 가속도를 조합하여 피드포워드 제어를 행하는 것이 좋은 결과를 얻을 수 있다.

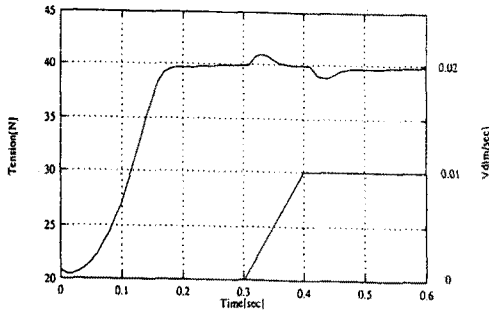


Fig.3 The tension response with feedforward at $k_t = 85.0$, $k_a = 0.8$

3. 결론

본 논문에서는 먼저 케이블의 장력특성에 기초하여 동적 모델을 만들어, 장력제어시스템을 구성했다. 동적 모델은 비선형 시변계가 되기 때문에 제어장치는 강인성이 있는 퍼지제어를 사용하였고 오버 슈트를 억제하기 위하여 피드포워드제어를 도입하여 정상력의 제어에 관해서 평가하였다.

1) 퍼지제어에 있어서는 위치형과 속도형의 조합에 의해 입상 시간이 짧고 정상오차가 없는 제어방법을 제안하였고 시뮬레이션에 의해 그 유연성과 유효성을 나타내었다.

2) 차대가 움직이기 시작하는 때에 생겨난 오버슈트에 대해서 시스템에 피드포워드제어를 도입하여 빨리 장력의 조절을 행하는 것이 가능하고 시스템이 이 오버슈트를 억제할 수 있는 것도 시뮬레이션에 의해 검증하였다.

(참 고 문 헌)

[1]坂本 鐵三 "ウェブ의 張力制御系の 解析 と 制御", TIEE Japan, Vol.117_D, No.3 pp. 274~281, 1997.

[2]村上慶一, "30년모つ 電車線", JR East R&D Symposium, pp.176-186, 1993.

[3]M.H. Raibert and J.J.Craig, "Hybrid position/force control of manipulators," Transaction of the ASEM, Journal of Dynamic System, Measurement, and Control, vol.102, pp.126 -133, 1981.

[4] Norbert A. Ebler, Gerd Michaelis, and Noel D'Sa, " Tension Control : Dancer Rolls or Load Cells, " IEEE Transaction Industry Application Vol.29, No.4, pp.101-107, 1993.