

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.10.1045>

ISSN 1226-4873(Print)

2288-5226(Online)

슬라이딩모드 제어 기법을 이용한 대형 구동기 안정화 설계

김성룡[†] · 박동명 · 문우용

* 한화탈레스 메카트로닉스그룹

Stabilization Design of Large Rotating Stand Using Sliding Mode Control

Sungryong Kim[†], Dongmyung Park, Wooyong, Moon

* Group of Mechatronics, Hanwha Thales.

(Received February 11, 2015 ; Revised July 20, 2015 ; Accepted August 10, 2015)

Key Words: Rotating Stand(회전구동기), Stabilization(안정화), Sliding Mode Control(슬라이딩 모드 제어), Disturbance(외란), Wind Effect(풍속 효과), Nonlinear Control(비선형제어)

초록: 본 논문은 장거리 탐지 레이더(LRSR; Long Range Surveillance Radar) 회전 구동 안정화에 관한 내용으로, 외란에 강인한 제어기 설계에 관한 것이다. 외란에 강인한 제어기 설계를 위하여 시스템 동특성과 외란 요소를 분석하고 그에 대한 수학적 모델링을 수행한다. 탐지레이더는 바람이 강한 높은 지대에 설치되는 특성과 넓은 안테나면을 갖는 형상적인 특성을 감안하였을 때 주 외란 요소는 풍속을 들 수 있다. 풍속은 베어링의 마찰을 증가시키는 요소로 작용하고 이는 안정화 성능을 저해 한다. 풍속이 탐지레이더에 미치는 영향은 전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics) 해석 결과를 이용한다. 전산유체역학 해석 결과를 제어알고리즘의 외란 입력으로 구성하여 제어기법에 대한 안정화 성능을 시뮬레이션과 실험을 통하여 기술한다. 플랜트 모델링 및 제어기는 Matlab / Simulink 를 이용하여 구성한다.

Abstract: In this paper, a stabilized control algorithm for the large rotating stand of a long-range surveillance radar (LRSR) system is introduced. The stabilized control algorithm for this large rotating stand system was designed using mathematical plant modeling. The LRSR system is located on high ground and has a wide surface, making it susceptible to the effects of wind, which increases the bearing friction and reduces the stability of the rotating stand. The disturbance caused by the wind was analyzed using computational fluid dynamics (CFD) in this study. The results of the CFD analysis were used to construct a control algorithm for the disturbance. The performance of the proposed control algorithm was demonstrated experimentally and through simulations. The plant model and the control algorithm were constructed in Matlab/Simulink.

- 기호설명 -

J_R : 피구동부 질량 관성 모멘트
 θ_A : 회전축에 대한 부하의 회전각도
 w_A : 회전축에 대한 부하의 회전속도
 $T_M(t)$: 모터 토크
 $T_w(t)$: 풍속에 의한 토크
 $T_f(t)$: 베어링 마찰 토크

v_m : 평균 풍속
 A_{xy} : 피구동부의 방향에 단면적
 θ_M : 모터 회전 각도
 θ_{Md} : 모터 회전 요구 각도
 F_w : 풍속에 의한 힘
 C_d : 항력 계수
 ρ_a : 공기 밀도
 $T_C(t)$: 쿨롱 마찰 토크
 μ : 베어링 마찰 계수
 M_k : 편심에 의한 모멘트

- M_w : 풍속에 의한 모멘트
- F_a : 축 하중
- F_r : 반경 하중
- D_p : 베어링 피치 지름
- T_v : 점성마찰계수

1. 서 론

장거리 탐지레이더는 탐지 시계가 확보된 높은 지대에 설치되며 고속 표적을 탐지하는 기능을 한다.

탐지레이더는 피구동부인 레이더부와 구동부인 회전구동기 및 제어 콘솔로 구성된다.

운용 조건에 의거 최대 풍속 35 m/s 조건 하에서 정상 운용이 가능하여야 하며 10 rpm 으로 등속 구동하여야 한다. 허용 속도 오차 범위는 2 % 이내 이며, 오차 값이 그 이상 될 경우 레이더의 탐지 정확도가 저하된다. 탐지레이더의 등속 구동 성능이 표적 탐지 성능에 주요한 영향을 끼치므로 외란 조건에서 등속 구동 안정화가 레이더 시스템 성능을 좌우하는 요소로 작용한다.

탐지레이더의 형상은 Fig. 1 에서 보는 것과 같이 형상 자체가 바람의 영향을 많이 받을 수 있는 대개 구면과 자중이 7.7 ton 인 피구동부를 가진 것을 특징으로 한다.

본 시스템의 피구동부의 등속 구동을 저해하는 주요인은 풍속에 의한 외란 효과이며, 이러한 풍속에 의해 발생하는 토크와 모멘트는 구동축의 베어링 마찰력을 변화시키며 속도 안정화를 저해하는 요인으로 작용한다.

따라서, 본 논문에서는 시스템 및 외란 요소의 특성을 분석하고 수학적 모델을 Matlab/Simulink 로 구성하여 외란에 강인한 제어 기법을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 이를 위해, 실험을 통하여 수학적 모델을 검증하고, 선형제어 기법인 PID

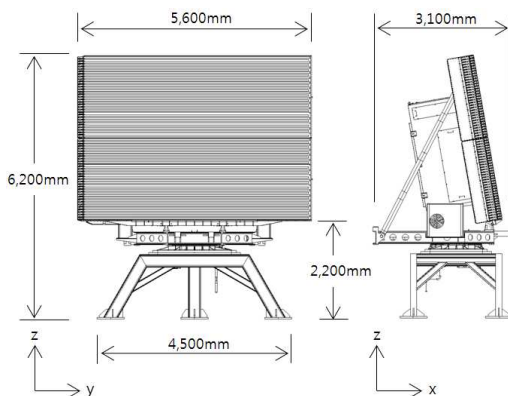


Fig. 1 Layout and dimension of LRSR

제어 기법과 비선형 제어기법인 슬라이딩 모드 제어 기법(SMC; Sliding Mode Control) 을 각각 외란 조건에 적용 및 비교 분석을 통하여 그 안정화 성능을 검증하고자 한다.

2. 시스템 분석

2.1 시스템 분석

탐지레이더 운동 방정식은 시스템을 강체로 가정하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.(Fig. 2)

$$J_R \ddot{\theta}_A(t) + b_R \dot{\theta}_A(t) + T_w(t) + T_f(t) = T_M(t) \quad (1)$$

피구동부의 무게중심이 회전축으로부터 벗어나 편심이 발생하는 경우의 질량 관성 모멘트 값 변화는 다음과 같다.

$$J_R = J_{CG} + m \times l^2 \quad (2)$$

J_{CG} 는 무게 중심에서의 질량 관성 모멘트 질량, m 은 피구동부의 전체 무게, l 은 회전축과 무게중심간의 반경방향 거리를 나타낸다.

구동모터는 2 차 직류 모터로 가정하여 모델을 구성한다.

$$J_M \ddot{\theta}_M(t) + b_M \dot{\theta}_M = T_M(t) \quad (3)$$

$$L_M \frac{d}{dt} i_M(t) + R_M i_M(t) + K_e \dot{\theta}_M(t) = v_M(t) \quad (4)$$

$$T_M(t) = K_T i_M \quad (5)$$

J_M 은 로터의 질량 관성 모멘트, b_M 는 모터의 점성 마찰 계수를 나타낸다. L_M 은 모터의 인덕턴스 R_M 은 모터의 저항, K_e 는 모터의 역기전상수, K_T 는 모터토크 상수를 나타낸다. 직류 모터 모델의 각 파라미터 값은 Table 1 과 같다.

Table 1 DC motor model parameter

| Parameter | K_T | L_M (H) | R_M (Ω) | K_e | J_M (kgm^2) |
|-----------|-------|-----------|--------------------|-------|--------------------------|
| Value | 0.35 | 0.0124 | 0.9875 | 0.74 | 0.1239 |

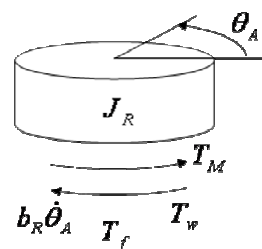


Fig. 2 Schematic diagram of LRSR

식 (1) ~ (5)를 상태 공간으로 나타내고, 상태 변수는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} x &= [\theta_A \ \omega_A \ i_M]^T \\ \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + D \end{aligned} \quad (6)$$

플랜트 모델의 상태 공간 방정식은 식 (7)과 같고 3 차 시스템으로 구성된다. 제어 입력을 전압 $u(t)$ 으로 정의한다.

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\omega}_A \\ \dot{i}_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{(b_R + b_M)}{J_R + J_M} & \frac{K_T}{J_R + J_M} \\ 0 & -\frac{K_e}{L_M} & \frac{R_M}{L_M} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_A \\ \omega_A \\ i_M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_M} \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} T_w(t) + T_f(t) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

2.2 외란 동특성 분석

2.2.1 풍속의 정의

풍속은 일반적으로 평균 풍속을 나타내며, 순간 풍속이라는 정의 또한 특정 시간에 대한 평균 값으로 나타낸다. 따라서 풍속에 대한 실시간 샘플을 얻기 위하여 백색 소음을 Daveport filter⁽¹⁾ 식에 통과시켜 실시간에서의 풍속 값을 얻는다.

$$v(t) = v_m + \Delta v_m \quad (8)$$

Daveport filter 함수는 전달 함수 형태로 나타내며 그 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H &= (3.9021s^3 + 230.1426s^2 - 686.3151s + 3.4197) \\ &/ (0.331s^4 + 38.2997s^2 + 224.7118s^2 + 22.7788s + 0.3538) \end{aligned}$$

Fig. 3 은 Daveport filter 식에 백색 소음이 통과된 평균 풍속 0 m/s 에서의 실시간 풍속을 나타낸다.

2.2.2 회전체의 풍속 영향

회전체에 있어서 풍속에 의한 토크는 회전축과 풍속 방향의 단면적의 중심과의 거리에 의해서

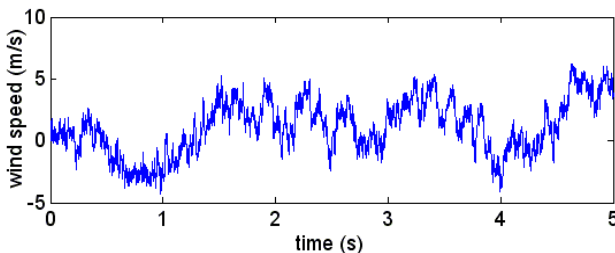


Fig. 3 Wind speed with Daveport filter (at $v_m = 0$)

결정된다. 단면적의 중심이 회전축 상에 놓이게 되는 경우를 제외하면 외란 토크 값은 항상 존재한다. 식 (9)는 피구동부가 회전 각도에 따라 받는 힘을 나타내고, 식 (10)는 회전 각도와 풍속에 따른 외란 토크 값을 나타낸다.

$$F_w(t, v, \theta_A) = \frac{1}{2} C_d(\theta_A) \rho_a [(A_{xy} \cos(\theta_A) + A_{yx} \sin(\theta_A))] v(t)^2 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} T_w(t, v, \theta_A) &= \frac{1}{2} \rho_a C_d(\theta_A) v(t)^2 \\ &\times \left| \begin{matrix} (d_{xy}(\theta_A) \cos(\theta_A) A_{xy} \cos(\theta_A)) \\ + d_{yx}(\theta_A) \sin(\theta_A) A_{yx} \sin(\theta_A) \end{matrix} \right| \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{let, } \eta(\theta_A) = C_d(\theta_A) \left| \begin{matrix} (d_{xy}(\theta_A) \cos(\theta_A) A_{xy} \cos(\theta_A)) \\ + d_{yx}(\theta_A) \sin(\theta_A) A_{yx} \sin(\theta_A) \end{matrix} \right|$$

식 (9)를 다시 쓰면,

$$T_w(t, v, \theta_A) = \frac{1}{2} \rho_a A(\theta_A) \eta(\theta_A) v(t)^2 \quad (11)$$

기준 항을 다음과 같이 정의한다.

$$T_{w_ref}(t, v, \theta_A) = \frac{1}{2} \rho_a A(\theta_A) \eta(\theta_A) v_{ref}(t)^2 \quad (12)$$

각각의 변에 대하여 식 (11)을 식 (12)로 나누면,

$$T_w(t, v, \theta_A) = \left(\frac{v(t)}{v_{ref}(t)} \right)^2 T_{wind_ref}(t, v, \theta_A) \quad (13)$$

위 식으로부터, 풍속에 대한 기준 외란 토크가 존재하면 풍속과 피구동부의 각도에 따른 토크 값을 얻을 수 있다. 유사한 방법으로 모멘트 값도 기준 외란 모멘트가 있는 경우 풍속과 피구동부의 각도에 따른 모멘트 값도 구할 수 있다. 식 (8)과 식 (13)을 이용하여 실시간 풍속에 대한 외란 효과를 구현할 수 있다.

기준 외란 토크 및 모멘트 값을 구하기 위하여 전산유체역학 상용프로그램을 이용한 공력 해석 데이터를 이용한다. 일정한 풍속일 때의 피 구동부의 회전 각도에 따른 베어링 중심 축에서의 토크와 모멘트 값을 구한다. 해석상 특정 속도는 관계 없으나 이 해석에서는 운용 최대 속도인 35 m/s 의 풍속을 이용하였다. 토크 값은 직접적으로 구동토크에 영향을 주고 모멘트 값은 베어링에서의 마찰 토크로 작용한다. 이 마찰 값은 구동 방향에 대하여 항상 음(-)의 값을 갖는다.

Fig. 4 는 풍속이 35 m/s 로 일정할 때 피구동부가 받는 토크 값을 위치 별로 나타낸다. 0° (정면,

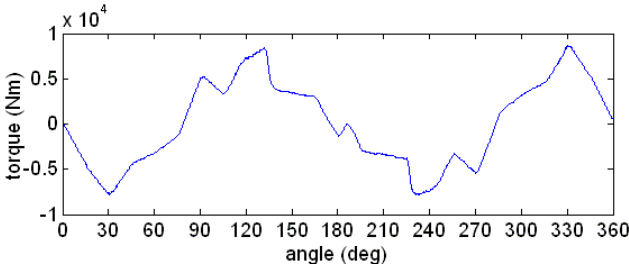


Fig. 4 Disturbance torque (at 35 m/s, static)

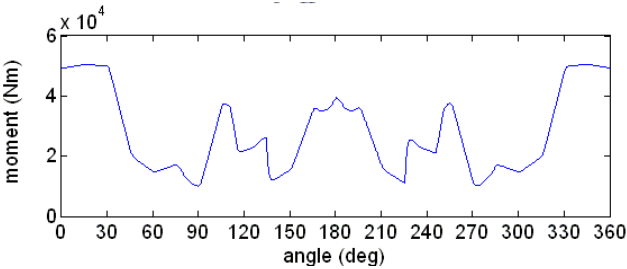


Fig. 5 Disturbance moment (at 35 m/s, static)

x+ 방향), 180 ° (후면 x- 방향)일 경우에는 대칭의 특성으로 인해 회전축과 면적의 중심이 직선 위에 놓이는 지점으로 토크 값이 0이다. Fig. 5는 풍속에 따른 모멘트 값을 나타낸다. 피구동부가 0° 일 때 가장 큰 단면적을 가지기 때문에 가장 큰 모멘트 값을 나타내고 90 ° (측면 y-)와 270 ° (측면 y+)에서는 가장 작은 모멘트 값을 갖는다.

2.2.3 베어링 마찰 분석

베어링 마찰은 회전 마찰 모델식⁽⁴⁾을 이용한다.

$$T_f(t) = (T_c + (T_{brk} - T_c)\exp(-c_v|\dot{\theta}_A|))\text{sgn}(\dot{\theta}_A) + T_v\dot{\theta}_A \quad (14)$$

T_{brk} 는 break away 토크를 나타내며, T_c 는 베어링의 정지 마찰 계수로서 이에 관여하는 요소는 피구동부의 무게에 의한 하중 및 모멘트, 외란 요소에 의한 하중 및 모멘트 등이 있다. 베어링은 Cross roller type의 베어링을 사용하였으며, 제공하는 실험식⁽⁸⁾은 다음과 같다.

$$T_c(t) = \frac{\mu(4.4(M_k + M_w) + F_a D_p + 2.2F_r D_p)}{2} \quad (15)$$

$T_v\dot{\theta}_A$ 는 점성 마찰 토크를 나타낸다. 점성 마찰 계수는 구동 속도에 따라 비선형적으로 변화하기 때문에 속도 별 마찰토크 값을 측정하여 마찰계수 값을 Look up table로 구성하여 제어 모델에 반영한다.

3. 제어기 설계

3.1 제어기 구성

제어 모델은 기준 입력, 제어기, 플랜트 등으로

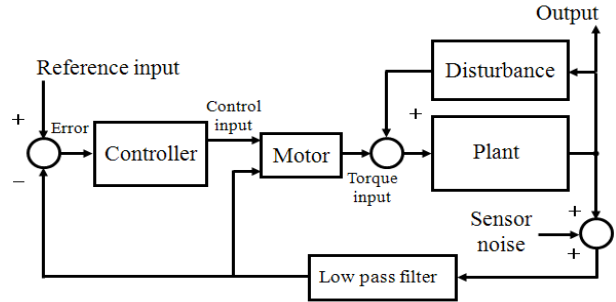


Fig. 6 Blocks of control system

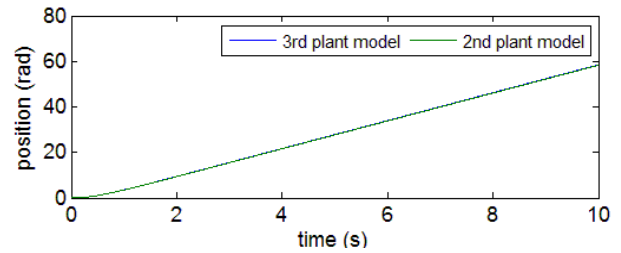


Fig. 7 Validation of reduced order model of plant

구성이 되며 이는 Matlab/Simulink를 이용하여 구현한다. 외란 항은 전산유체역학 해석 결과에 따른 외란 토크 및 모멘트 값을 Lookup table로 구성한다. 제어기 모델은 Fig. 6에서 보는 것과 같이 기준입력에 대한 오차 값이 제어기의 입력 값이 되고, 제어기는 오차 값에 대한 전압 입력 값을 인가한다. 제어기는 PID 또는 슬라이딩 모드 제어 기법을 이용한다. 모터가 회전 구동기를 구동하고 풍속에 의한 피구동부의 회전 각도에 따른 외란 성분이 플랜트 모델에 인가된다. Low pass filter는 센서 노이즈를 제거하기 위한 목적으로 구성한다.

3.2 시스템 차수

시스템의 차수가 높을 수록 파라메트릭 오차로 인하여 시스템 오차가 증가하고 이는 시스템 제어를 불안정하게 만든다. 이에 제어 모델을 구성함에 있어서 그 시스템 차수를 플랜트 모델의 차수보다 낮게 만들어 시스템 응답을 보다 안정적으로 만들 수 있다. 특정 파라미터를 생략함으로써 그 식을 단순화한다.

모터 모델의 경우 식 (4)로부터 인덕턴스의 영향이 매우 작다고 가정하여 L_M 값을 무시하면, 모터 모델을 다음과 같이 정의할 수 있다

$$R_M i_M(t) + K_e \dot{\theta}_A(t) = v_M(t) \quad (16)$$

$$i_M(t) = \frac{1}{R_M} v_M(t) + \frac{K_e}{R_M} \dot{\theta}_M(t) \quad (17)$$

식 1), 3), 5), 17) 를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(J_R + J_M)\ddot{\theta}_M(t) + (b_R + b_M)\dot{\theta}_M + T_w(t) + T_f(t) = \frac{K_T}{R}v_a(t) + \frac{K_T K_e}{R}\dot{\theta}_M(t) \quad (18)$$

2 차 플랜트 모델의 유효성을 나타내기 위하여 경사 입력에 대한 3 차 모델과 2 차 모델의 결과를 비교하여 나타낸다. Fig. 7에서 보는 것과 같이 그 영향은 매우 작으며, 3 차 모델과 2 차 모델의 오차 값은 최대 0.1 % 미만이다.

3.3 슬라이딩모드 제어기

시스템의 위치 및 속도 제어기의 강인성 향상을 위하여, 슬라이딩 모드 제어 기법을 적용한다. 슬라이딩 모드 제어 기법은 가변 구조 기법으로 시스템 상태에 대하여 슬라이딩 평면을 기준으로 시스템의 제어 입력을 스위칭하여 구현한다.

슬라이딩 평면에 시스템의 상태가 위치하면, 시스템은 외란에 영향을 받지 않으며, 지수 함수적으로 0 으로 수렴하며, 슬라이딩 평면에 위치시키기 위하여, 수렴 조건(Lyapunov stability)을 만족해야 한다.

제어기 모델은 2 차 인 식 (17)을 이용한다. 오차를 다음과 같이 정의 한다.

$$e(t) = \theta_M - \theta_{Md} \quad (19)$$

슬라이딩 평면을 아래와 같이 정의한다.

$$s(t) = e(t) + \lambda \dot{e}(t) \quad (20)$$

$$\dot{s}(t) = -ks(t) \quad (21)$$

k 와 λ 는 계인 이며, 식 (20)와 식 (21)로부터,

$$\dot{s}(t) = \dot{e}(t) + \lambda \ddot{e}(t) \quad (22)$$

식 (19), 식 (21)와 식 (22)로부터,

$$-ks(t) = \lambda \ddot{\theta}_M + \dot{\theta}_M - (\lambda \ddot{\theta}_{Md} + \dot{\theta}_{Md}) \quad (23)$$

식 (18)과 식 (23)를 $\ddot{\theta}_M$ 에 관하여 소거하면,

$$-ks(t) = -\frac{\lambda}{(J_R + J_M)} \left(\frac{K_e}{R_M} + b \right) \dot{\theta}_M(t) - \lambda \frac{T_w(t) + T_f(t)}{(J_R + J_M)}$$

$$+ \frac{\lambda}{(J_R + J_M)R_M} v_M(t) + \dot{\theta}_M - (\lambda \ddot{\theta}_{Md} + \dot{\theta}_{Md}) \quad (24)$$

$v_M(t)$ 를 $u(t)$ 로 놓고 정리하면, 제어식은 다음과 같다.

$$u(t) = (RK_e + Rb - 1)\dot{\theta}_M(t) + R(T_w(t) + T_f(t)) + \frac{(J + J_M)R}{\lambda} (\lambda \ddot{\theta}_{Md} + \dot{\theta}_{Md}) - \frac{(J + J_M)R}{\lambda} ks(t) \quad (25)$$

K_L 은 계인이며 Low pass filter 항은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{\omega}}_M = K_L(\omega_M - \hat{\omega}_M), \quad K_L > 0 \quad (26)$$

3.4 제어기 안전성

일반적으로 Lyapunov stability 는 평형점에서의 상태의 특성을 결정하는데 쓰인다. $V(X, t)$ 를 원점을 포함하는 미분 가능한 스칼라 함수로 놓았을 때 시스템 $\dot{X} = f(X, t)$ and $f(X, t) = 0 \quad \forall t \geq t_0$ 에 대하여 $V(X, t) > 0$ (positive definite)이고, $\dot{V}(X, t) \leq 0$ (semi-negative definite)이면, 점근적으로 평형점에 이른다.

스칼라 함수 $V(X, t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2}(\omega_M - \hat{\omega}_M)^2 \quad (27)$$

등속 구간에 대하여 식 (27)를 미분하고, 식 (21)과 식 (26)을 이용하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{s}s - (\omega_M - \hat{\omega}_M)\dot{\hat{\omega}}_M \\ &= -kss - k_L \tilde{\omega}_M \dot{\hat{\omega}}_M \\ &= -ks^2 - k_L \tilde{\omega}_M^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (28)$$

이로써 시스템의 안정성을 증명하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1 시뮬레이션

제어 로직의 유효성 검증을 위하여 시뮬레이션을 수행한다. 피구동부, 모터, 베어링 마찰, 외란 등으로 플랜트를 구성하고 제어 로직을 통한 시스템 거동 및 제어 성능(명령 추종, 외란 제어 등)을 예측을 할 수 있다. 시뮬레이션을 통하여 실제 시스템의 파라미터 및 계인 튜닝에 대한 시간과 노력을 줄일 수 있다.

4.2 실험 및 실험 장치 구성

실험은 Fig. 8 과 같이 노트북 컴퓨터, 원격 제어

기, 380 V 3 상을 공급하기 위한 전원변압기, 전력 분석기, 제어기, 회전구동기가 조립되어 있는 피구동부로 구성된다. 노트북 컴퓨터에는 프로그래밍과 상태 변수의 모니터링을 위한 소프트웨어(Code composer 6, Labview 7.0)가 구성되어 있다. 빠른 데이터 전송을 위해, CAN 통신을 이용하여, 상태 값을 입력 받는다. 제어기에는 모터 드라이버, 제어보드(TMS320F2833x), 회생 제동 장치, 전원 필터 등이 구성되어 있다.

4.3 시뮬레이션 및 실험 결과

4.3.1 실험 결과 및 수학적 모델 검증

Fig. 9 ~Fig. 12는 등속 구동 10 rpm 기준으로 기준 입력 대비 제어 기법에 따른 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸다. Fig. 9와 Fig. 10은 평균 풍속 3 m/s 이하(no wind)에서의 PID 제어 기법을 이용한 결과를 나타내고 Fig. 11과 Fig. 12는 같은 조건에서의 슬라이딩 모드 제어 기법을 이용한 결과를 나타낸다

각각의 제어 기법을 통한 기준 입력 대비 실험 결과를 보면 Table 2에서 보는 것과 같이 PID와 슬라이딩 모드 제어기법의 추종 오차를 비교한 결과 2% 이내를 나타냈다. 또한 Table 3에 나타낸 것과 같이 수학적 모델 검증을 위한 각각의 제어 기법에 대한 실험결과와 시뮬레이션 비교 결과가 0.5% 이내로 상당히 유사한 것을 알 수 있다.

4.3.2 제어기 별 외란 영향성 비교

탐지레이더의 운용 특성상 상시 가동 된다. 탐지 레이더의 설치 장소에서는 풍속이 3m/s ~ 35m/s 다양하게 변화 한다. 탐지 레이더는 대형 구조물로서 실제로 강한 풍속하에서 실험을 수행하기 어렵기 때문에 3 m/s 미만의 평균 풍속에서 실험을 통하여 시뮬레이션 모델을 검증한 뒤, 검증된 시뮬레이션 모델을 이용하여 다양한 풍속 조건으로 시뮬레이션을 통해 제어기를 검증한다. PID 제어기의 경우 각 풍속에 따라 최적의 게인 값이 달라져야 하지만 시시각각으로 변화하는 풍속의 변화에

게인 값을 변화시키기 어렵고 그 게인 값을 실험을 통해서 구하기 어렵다. 슬라이딩 모드 또한

Table 2 Max Error PID and SMC control – experiment/reference

| 평균 풍속 (m/s) | 최대 속도 오차(%) | |
|----------------|-------------|--------|
| | PID | SMC |
| 3 미만 | 1.85 % | 1.26 % |

Table 3 Max Error PID and SMC control –simulation/experiment

| 평균 풍속 (m/s) | 최대 속도 오차(%) | |
|----------------|-------------|-------|
| | PID | SMC |
| 3 미만 | 0.48 % | 0.16% |

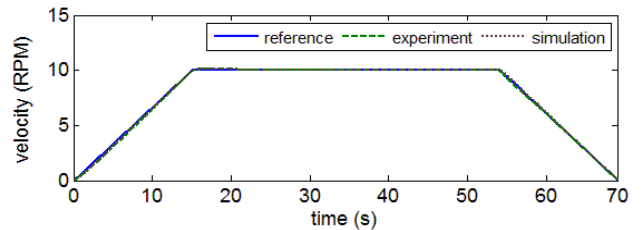


Fig. 9 Angular velocity result -PID control (no wind)

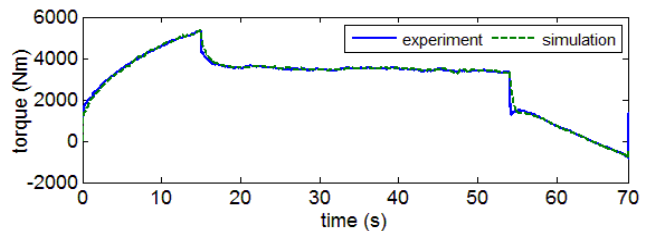


Fig. 10 Actuation torque result-PID control (no wind)

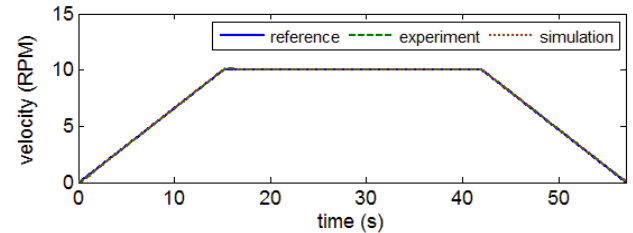


Fig. 11 Angular velocity result -SMC control (no wind)

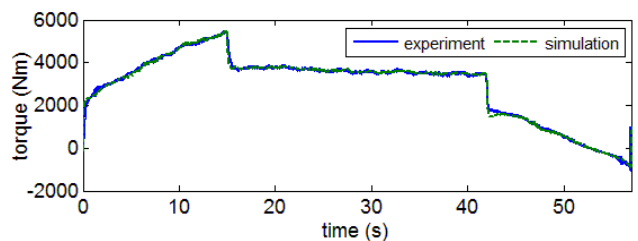


Fig. 12 Actuation torque result-SMC control (no wind)

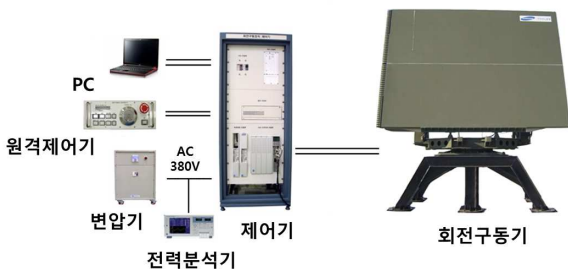


Fig. 8 Test bench of LRSR

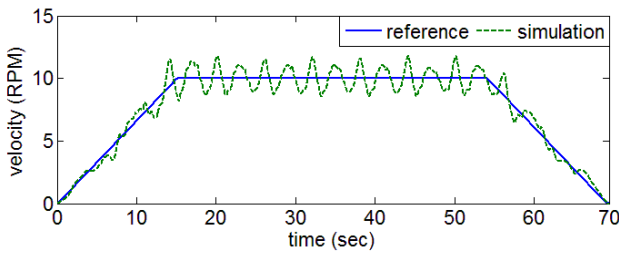


Fig. 13 Angular velocity result -PID control (35 m/s)

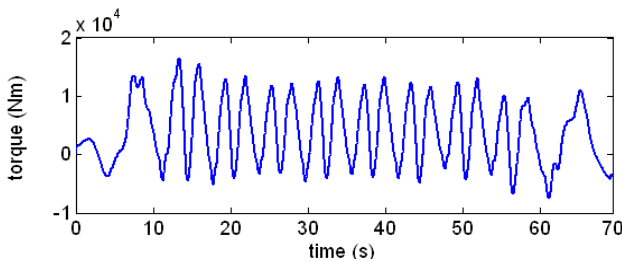


Fig. 14 Actuation torque result-PID control (35 m/s)

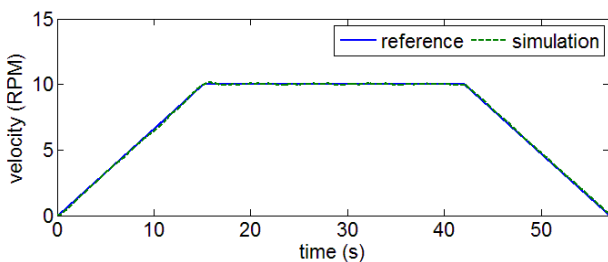


Fig. 15 Angular velocity result -SMC control (35 m/s)

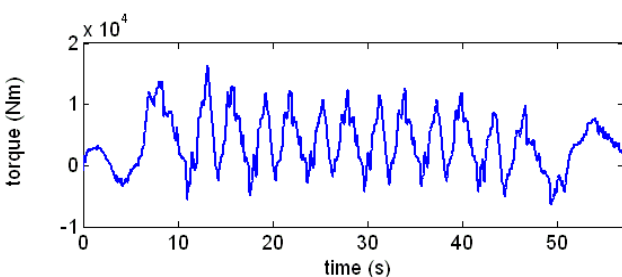


Fig. 16 Actuation torque result-SMC control (35 m/s)

PID 제어기와 동일한 조건에서 개인 튜닝을 진행하고 각 풍속이 있는 경우의 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸다.

Fig. 13 은 35 m/s 의 평균 풍속하에서 PID 제어기를 적용한 시뮬레이션 결과로써, 가·감속 구간 및 10 rpm 등속 구간에서 최대 19.2%의 속도 오차가 발생하였다. 반면 Fig. 15 의 동일 조건에서 슬라이딩 모드 제어기를 적용한 경우에는 최대 오차가 1.68%으로 나타났다.

Table 4 Max Error PID and SMC control-simulation/reference

| 평균 풍속 (m/s) | 최대 속도 오차(%) | |
|----------------|-------------|-------|
| | PID | SMC |
| 35 | 19.20 | 1.68 |
| 30 | 13.76 | 1.53 |
| 25 | 9.32 | 1.475 |
| 20 | 5.76 | 1.39 |
| 15 | 3.17 | 1.34 |
| 10 | 2.50 | 1.30 |
| 5 | 2.27 | 1.28 |

Table 4 에는 풍속별 PID 제어기와 슬라이딩 모드 제어기에 대한 시뮬레이션 결과를 나타냈다.

5. 결론

장거리 탐지레이더와 같은 외란에 강인한 대형 회전구동기의 속도 안정화를 구현하기 위하여, 시스템 모델링을 통하여 모터/피구동부/베어링 마찰 특성 등을 분석하였다. 풍속에 대한 실시간 정의를 외란 특성에 반영하였다. 또한 공력 해석 결과를 이용하여 풍속에 의한 토크와 모멘트 효과를 나타내었다.

제어 기법에서는 선형 제어 방법과 비선형 제어 방법을 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 슬라이딩 모드 제어기법에서는 보다 안정적인 제어기 설계를 위해 시스템 차수를 낮춘 모델을 제어기 모델로 이용하였다. 실제 시스템의 35 m/s 풍속에서의 실험이 어려운 관계로, 3 m/s 미만의 풍속에서 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 통하여 시뮬레이션 모델을 검증하고, 검증된 시뮬레이션 모델을 이용하여 35 m/s 풍속에서의 시뮬레이션 결과를 PID 제어기와 슬라이딩 모드 제어기를 통하여 비교하였다. 선형 제어 기법인 PID 제어 기법 보다는 비선형 제어 기법인 슬라이딩 모드 제어 기법이 외란에 대하여 더 강인한 결과를 나타내었다. 또한 35 m/s 의 풍속에서도 시스템 제어 성능을 만족할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

후기

이 논문은 한화탈레스 자체 투자로 쓰여짐

참고문헌 (References)

- (1) Gawronskil, "Three Models of Wind-Gust Disturbance for the Analysis of Antenna Pointing

- Accuracy" *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 20, No. 5, pp. 449~464.
- (2) Lee, C.-W. and Kim, N.-I., 1999, "Model-Based Control System Design and Sliding Mode Control of Stewart Platform Manipulator," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 23(6), 903-911.
- (3) Edwards, C. and Spurgeon, S. K., 1998, "Sliding Mode Control," Theory and Application, CRC press, 270 Madison Avenue New York, NY 10016, pp. 1~18
- (4) Armstrong, B. and de Wit, C.C., 1995, "Friction Modeling and Compensation," *The Control Handbook*, CRC Press, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487, pp. 1369-1382
- (5) Haug, E. J., 1989, "Computer Aided Kinematics And Dynamics of Mechanical Systems" Volume1, Allyn and Bacon A division of Simon & Schuster, 160 Gould Street Needham Heights, Massachusetts 02194, pp. 20~24
- (6) Park, S.-H., Lee, J.-M. and Kim J.-S., 2009. "A Decentralized Brake System for Railway Rolling Stocks Using the Adaptive Sliding Mode Control Scheme," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 33(10), 1005~1013.
- (7) Chen, M. and Chen, W.-H., 2010, "Sliding Mode Control for a Class of Uncertain Nonlinear System Based on Disturbance.," *International journal of adaptive control and signal processing*, Volume24, Issue1, pp. 51~64.
- (8) Kaydon corporation, 2000, "Catalog 300k, REAL-SLIM Ball and Roller Bearings," Kaydon Bearings, 2860 Mc Cracken St, Norton Shores, MI 49441, USA, pp. 81~85.
- (9) Harris, T. A., 1991, "Rollin Bearing Anlysis," 3rd Edition, A Wiley-Interscience Publication, 111 River Street Hoboken, NJ 07030-5774, pp. 445~458.
- (10) Lim, C. W. and Seo, K. Y., 2010, "Comparison of Response Properties Determined in Two Torque Control Methods for a 2.75-MW Wind Turbine Under Turbulence Wind Speed," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 34(12), 1885~1891.