

고토크 저속 운전용 직구동 모터의 정밀 위치제어 알고리즘

신 명 환, 한 별, 오 우 석
한화시스템

Precise Position Control Algorithm of Direct Drive Motor for High torque Low speed Operation

Myeong Hwan Shin, Byeol Han, Woo Seok Oh
Hanwha Systems

ABSTRACT

본 논문은 고토크 저속 운전용 유리한 직구동 모터(Direct Drive Motor, DDM)의 정밀 위치제어 알고리즘을 제안한다. 최근 다양한 산업군에서 짐벌(Gimbal)형태로 구조물을 회전시키기 위한 전동기의 사용이 늘어나고 있다. 짐벌은 물체의 안정적인 추적을 위해 사용되며 고정밀 위치제어에 용이한 영구자석형 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)를 통해 저속 운전 특성을 가지는 부하의 2축 짐벌의 정밀 위치제어 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘의 유효성은 시뮬레이션 결과로 입증한다.

1. 서론

최근 다양한 산업군에서 전동기는 다양한 목적으로 사용된다. 이중 짐벌은 저중량 물체 또는 고중량 물체의 회전이나 일정 방향을 추적하기 위한 안정화 제어에 이용된다.

대형 레이더와 같은 고중량 물체가 피사체를 추적하기 위한 구동 및 지령의 추종은 기구물의 구조적 안정성이 보장된 구조와 정밀 제어가 가능한 모터를 선정해야 하며, 2축(Pitch, Yaw) 방향의 위치제어를 통해 피사체를 추적할 수 있어야 한다. Pitch 방향은 서보모터와 기어, 볼스크류를 이용한 구동장치를 주로 사용하며, Yaw 방향은 중량물을 안정적으로 지지할 수 있는 구조인 직구동 모터를 이용한 영구자석형 동기전동기(PMSM)를 주로 사용한다.

영구자석형 동기전동기(PMSM)는 지령을 추종하기 위한 위치제어로 직렬구조(Cascade Structure) 제어방식을 일반적으로 사용한다[1]. 직렬구조 제어방식은 바깥쪽 루프(Outer loop)에 위치 제어가 있으며 속도 제어기와 전류 제어기가 안쪽 루프(Inner loop)로 구성한다. 이러한 구조를 PPI(Proportional Integral, PPI)제어기라고 하며, 비례(Proportional, P)제어기를 이용한 위치 제어기와 비례적분(Proportional Integral, PI)제어기를 이용한 속도 제어기 및 전류 제어기로 구성한다. 직렬구조는 모터와 전류 제어기를 전류 제어기의 이득 설정을 통해 1차 저역 통과필터의 전달함수의 형태로 구성할 수 있으며 속도 제어기와 위치 제어기의 이득 설정이 비교적 간단한 장점이 있다. 또한 각 제어기의 출력값인 속도, 전류 지령의 최댓값 제한이 용이하며 출력 속도, 토크의 추종이 간단한 장점이 있다.

본 논문은 고토크 저속 운전용 직구동 모터의 정밀 위치제어 알고리즘을 제안한다. PPI 제어기법을 통해 고부하 구동에 유리한 직구동 모터를 이용하여 2축(Pitch, Yaw) 방향 중 Yaw 축 방향의 정밀 위치제어 알고리즘을 제안한다. 제안하는 논문의 유효성은 시뮬레이션 통해 구현하여 요구조건 충족을 입증한다.

2. 본론

2.1 짐벌

짐벌은 주로 2축 (Pitch, Yaw) 방향의 위치제어를 통해 피사체의 추적 및 안정화 제어를 위해 사용된다. 짐벌의 사용은 크게 저중량 물체와 고중량 물체의 조향 및 안정화 위치제어로 구분할 수 있다. 대표적으로 카메라와 같은 저중량 물체를 구동하는 짐벌은 간단한 구조로 고속 조향 및 안정화 제어가 간단하지만, 대형 레이더와 같은 고중량 물체를 구동하는 짐벌은 고부하를 안정적으로 지지할 수 있는 구조적 강건성과 고토크 출력의 모터가 필요하다. 이를 만족시키기 위한 Yaw 축 구동을 위한 모터 구조는 직구동 모터가 적절하다. 직구동 모터는 회전자 축에 부하가 직접 연결되어 구동하며, 기어를 사용하지 않아 백래시(Backlash)가 없으며 회전 변동에 대한 토크 변동의 억제성이 좋아 제어 정밀도를 높일 수 있다[2].

2.2 PPI 위치제어기

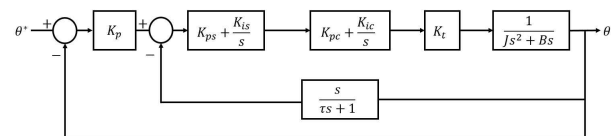


그림 1 Yaw 축 직구동 모터 위치 제어기 블록도
Fig. 1 Yaw axis of position controller diagram for direct drive motor

그림 1은 Yaw 축 직구동 모터 위치 제어기 블록도를 나타낸다. 위치 제어기 블록도는 직렬구조를 이용하여 각 제어기의 이득 조절을 통해 제어기를 비교적 쉽게 구성할 수 있다. 각 제어기 중 위치 제어기는 비례 제어기(Proportional Controller), 속도 제어기와 전류 제어기는 비례 적분(Proportional Integral, PI) 제어기로 구성한다. 전류 제어기의 경우 아래의 식 (1)과

같은 이득 설정 및 속도 제어기 대역폭 ω_{sc} 대비 높은 대역폭을 가질 경우, 크기가 1인 저역 통과 필터인 식 (2)와 같으며 속도 제어기는 식 (3)와 같은 이득 설정과 전류 제어기 대역폭 ω_{cc} 대비 1/5 이하로 설정하여 구성한다[2].

$$K_{pc} = L_a \omega_{cc}, K_{ic} = R_a \omega_{cc} \quad (1)$$

$$G(s)_{cc} = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \approx 1 \quad (2)$$

$$K_{ps} = \frac{J \omega_{cs}}{K_T}, K_{is} = K_{ps} \frac{\omega_{cs}}{5} = \frac{J \omega_{cs}^2}{5 K_T} \quad (3)$$

K_p 는 그림 (1)의 위치 제어기의 이득, 식 (3)의 K_{ps}, K_{is} 는 속도 제어기의 비례 이득, 적분 이득이며, 식 (2)의 $G(s)$ 는 속도 제어기 대역폭에서 전류 제어기의 비례 이득 K_{pc} , 적분 이득 K_{ic} 로 구성된 전류 제어기가 1차 저역통과필터로 치환된 전달함수이다.

속도 제어기는 엔코더의 각도 정보를 적분한 속도 정보를 피드백 받아 PI 제어기를 구성한다. 위치 제어기의 경우 속도 제어기의 PI 제어기에 의한 적분 오차가 발생하지 않아 비례 제어기만으로 구성하며, 이에 따라 제어 구조가 간단하여 계산량이 감소하고 속응성을 높일 수 있다[2].

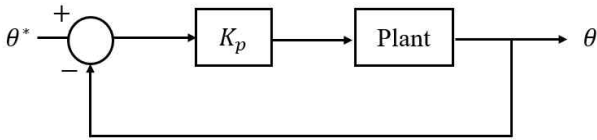


그림 2 간략화된 Yaw 축 PPI 위치 제어기 블록도
Fig. 2 Simplified Yaw axis PPI position control diagram

그림 2와 같이 속도 제어기와 전류 제어기의 이득 조절을 통해 Plant로 간략화할 수 있으면 위치 제어기의 비례 이득 조절만으로 제어기 구성이 가능하다. 고중량 물체의 Yaw 축 구동용 직구동 모터의 파라미터는 표 1과 같으며 요구조건인 이동속도 20 °/sec와 각도 정밀도 $\pm 0.2^\circ$ 의 구동 정밀도를 확인한다.

표 1 직구동 모터 파라미터
Table 1 Parameters of Direct Drive Motor

Ra	0.512 [Ω]	J	6180 [kgm ²]
La	1.24 [mH]	토크 상수	61.1 [Nm/A]
극수	120 [Pole]	정격 토크	1800 [Nm]
부하 토크	1198 [Nm]	정격 속도	40 [rpm]

3. 시뮬레이션 결과

그림 3은 Yaw 축 구동을 위한 시뮬레이션 블록도이다. 단상 220V_{AC} 전파 정류를 통해 310V_{DC} 직류 전압으로 정류하였으며, SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) 전압 변조 방식을 이용하여 3상 인버터를 10kHz로 구동하였다.

0°에서 300° 구동 후 -120°에서 0° 구동 시 구동 속

도와 각도 정밀도를 확인한다. 요구조건인 만족 여부는 MATLAB Simulink를 이용하여 검증한다.

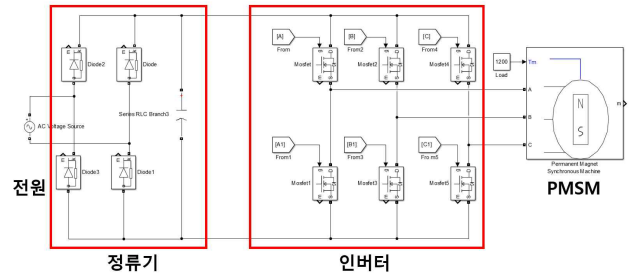


그림 3 Yaw 축 구동을 위한 시뮬레이션 블록도
Fig. 3 Simulation block diagram for yaw axis motor drive system

그림 4는 PPI 제어를 통한 Yaw 축 직구동 모터의 회전자 위치이며 요구조건인 속도, 정밀도를 표 2와 같이 확인하였다.

표 2 시뮬레이션 결과
Table 2 Simulation results

	요구조건	시뮬레이션 결과
속도	20 °/sec	25.4 °/sec
정밀도	$\pm 0.2^\circ$	$\pm 0.18^\circ$ 이내

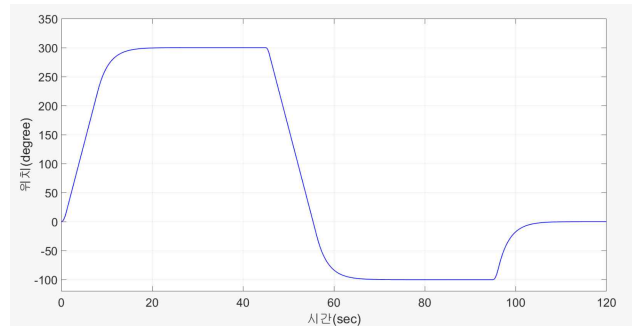


그림 4 PPI 제어를 통한 Yaw 축 직구동 모터의 회전자 위치
Fig. 4 Simulation result of rotor position of Yaw axis direct drive motor through PPI control

4. 결론

본 논문에서는 고토크 저속 운전용 직구동 모터의 정밀 위치제어를 PPI 제어기를 이용하여 검증하였다. 고부하 구동용 직구동 모터의 위치제어에 PPI 제어를 이용 시 선정된 요구조건을 만족시킨다. 이에 실제 장비 제작 및 검증 단계에서 제어기의 구현을 통해 정밀 위치제어를 통한 구동으로 피사체의 원활한 추적이 가능할 것으로 예상된다.

참고 문헌

[1] Ju-Hyeong Jang, Sang-Hoon Kim.(2017).A PI-PD Controller Design for the Position Control of a Motor.THE TRANSACTIONS OF KOREAN INSTITUTE OF POWER ELECTRONICS,22(1),60-66.
[2] S.-H. Kim. "Motor Control", Bogdo, 2022, 9791166754715