항공기용 전동 액추에이터의 왜곡된 아날로그 홀 신호 보상 알고리즘

정성호
한국기계연구원

Compensation Algorithm of the Distorted Analog Hall Signal in Electric Actuator for Aircraft

Sungho Jung
Korea Institute of Machinery & Materials

ABSTRACT

본 논문에서는 아날로그 홀 신호의 특정지점에서 신호왜곡이 존재 할 때 이를 보정하여 전동 액추에이터를 구동하는 방법을 제안한다. 항공용 전동 액추에이터에서는 안정된 정위치 제어가 중요하지만 아날로그 홀 신호에 왜곡된 지점이 존재할 경우 위치제어 성능이 크게 저하된다. 이를 해결하기 위해 3개의 아날로그 홀 신호 중 2개를 선택적으로 사용하여 영구자석 전동기의 벡터 제어에 적용, 위치제어 성능을 개선하는 방법을 제시한다. 실험결과를 통해 제안된 방법의 유효성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 미래 도심항공교통(UAM)에 대한 관심과 투자가 전 세계적으로 급증하는 가운데 차세대 대중교통 서비스 시장을 선도할 eVTOL (Electric Vertical Take - Off and Landing)형태의 비행체 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히, eVTOL의 틸트 로터, 틸트 덕트, 틸트 윙의 동작 구현을 위해서는 전동 액추에이터가 필수적으로 사용된다.

이 항공기용 전동 액추에이터는 브러쉬리스 직류전동기(BLDC)와 저가의 MCU를 주로 사용하는데, 이때 디지털 홀센서를 이용하여 120도 통전방식으로 전동기를 주로 제어한다. 하지만, 항공기용 액추에이터는 정속 구동보다는 정지상태의 제어성능이 중요한 어플리케이션으로, 120도 통전방식을 사용하게 되면 구간절환지점 근처에서 원치 않는 토크 리플이 발생하여 위치제어 성능이 크게 떨어진다. 이를 개선하기 위해 아날로그 형태의 홀센서를 각도센서로 사용하여 위치정보를 획득하고, SVPWM과 동기좌표계 디커플링 전류제어방식을 적용하기도 한다.[1]

아날로그 홀센서는 제작상의 편의를 위해 기존의 디지털 홀센서가 장착되던 전동기 고정자 근처에 대체되어 장착되기도 한다. 전동기 내 고정자 표면에 위치한 아날로그 홀센서는 회전자의 영구자석에 의한 자속 이외에도 고정자 자속에 의한 영향을 받게 되며 그로인해 위치정보의 왜곡이 발생하기도 한다. 본 논문은 특정 구간에서 측정된 홀센서 신호에 왜곡이 존재할 때 이를 보상해 주는 방법을 제안한다. 실험을 통해 보상 전과 후의 아날로그 홀신호를 비교해 보고, 전동 액추에이터의 정위치 위치제어시 알고리즘 적용 우뮤에 따른 성능을 비교해 본다.

2. 아날로그 홀 신호

2.1 3개의 아날로그 홀 신호

아날로그 홀센서를 이용해 전동기의 위치정보를 취득하기 위해서는 2개 이상의 홀센서가 필요하다. 본 논문에서는 120도씩 위상차가 존재하는 3개의 아날로그 홀센서가 장착된 전동기의 경우를 기반으로 서술한다.

3개의 아날로그 홀센서 신호를 2개의 직교좌표계 값으로 변환한 뒤 atan함수 등을 이용하면 회전자 각을 직접 계산할 수 있다. 하지만, 홀센서 신호에 존재하는 노이즈 성분에 의한 영향을 줄이고자 각 추정기를 사용하여 전동기의 속도 및 각도를 추정하는 방식이 일반적으로 사용된다.

2.2 홀 신호의 왜곡

아날로그 홀신호가 전동기의 회전자와 고정자권선 사이에 존재할 경우 고정자 자속 등에 의해 홀센서에 수신되는 자속 자체가 왜곡될 수 있다[2]. 홀센서의 설치 오차 등으로 인해 정현적인 신호 이외에 고조파가 포함되기도 하며, 홀 신호 수신부의 회로 및 반도체 소자 스위칭 노이즈 등에 의해 홀 신호 자체가 왜곡되기도 한다. 그림 1은 저속으로 전동기 구동시 아날로그 홀 신호 아랫부분이 왜곡 되는 경우의 파형이다. 이러한 홀신호 조건에서 액추에이터 위치제어를 실시하게 되면 홀신호 왜곡이 심한 특정 지점에서 토크 맥동이 발생할 수 있다.

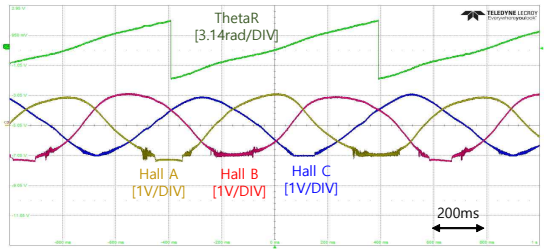

그림 1 홀 신호 왜곡 존재시 3개의 홀신호 파형(5rad/s)

2.3 왜곡보상 알고리즘

본 논문에서 제안하는 홀신호 보정 알고리즘은 아래의 과정을 통해 구현된다.

2.3.1 홀신호 정규화

홀 신호 왜곡보상을 하기 위해 먼저 각 상의 Hall신호 크기가 1이 되도록 정규화를 실시한다. 120도 위상차를 가지는 정규화가 된 각 홀 신호를 H_A, H_B, H_C 라고 할 때 이상적인 정현파의 경우 아래 수식을 만족한다.

$$H_A + H_B + H_C = 0 \quad (1)$$

따라서 사전시험을 통해 이상이 존재하는 구간을 정의하고, 왜곡된 해당 홀신호 대신 나머지 두 개의 홀 신호를 이용하여 계산된 값을 사용할 수 있다.

2.3.2 섹터판별

보상 할 홀 신호를 선택하기 위해 섹터판별을 실시한다. 그림1에서처럼 홀 신호가 아래 피크치 부근에서 왜곡이 발생하기 때문에 측정된 홀 신호 H_{Asen}, H_{Bsen}, H_{Csen}의 비교하여 가장 작은 크기를 가지는 신호는 계산된 값을 사용한다. 예를 들어 H_{Asem}의 크기가 가장 작을 때 이를 섹터 1, H_{Bsen} 신호가 가장 작을 때는 섹터 2 H_{Csen} 신호가 가장 작을 때는 섹터 3으로 정의한다. 반대로 홀신호의 위쪽 피크치 부근에서 왜곡이 발생하는 경우에는 H_{Asen}, H_{Bsen}, H_{Csen}의 비교하여 가장 큰 크기를 가지는 신호는 계산된 값을 사용한다.

2.3.3 보상구간 및 보상신호

측정된 홀신호가 이상적인 정현파 일때 섹터 1에서는 H_A 신호로 $-H_{Bsen}-H_{Csen}$를, 섹터 2에서는 H_B신호로 $-H_{Asen}-H_{Csen}$를, 섹터 3에서는 H_C신호로 $-H_{Asen}-H_{Bsen}$를 사용하면 각 섹터 간 절환 시점에서도 홀 신호들은 부드럽게 이어진다. 하지만 4극 이상의 전동기에 아날로그 홀신호를 사용할 경우, 홀신호의 정규화가 정확히 이루어지지 않거나 짝수 고조파를 포함할 수 있다. 이러한 환경에서 수식 (1)을 통해 간단히 계산된 홀 신호 보상값을 사용 할 경우 각 섹터 절환 시점에서 신호가 급변하게 되어 각추정 성능이 떨어진다.

이를 해결하기 위해 측정된 신호와 계산된 신호간의 선형 보간을 적용하여 신호가 선형적으로 이어지도록 한다. 예를 들어 측정된 홀 신호 H_{Asen}이 H_{th0}보다 클 때는 H_A신호로 H_{Asen} 사용하고, H_{th1}보다 작을 때는 $-H_{Bsen}-H_{Csen}$을 사용한다. 측정된 홀신호가 H_{th0}와 H_{th1}의 사이 일때는 수식(2) 처럼 H_{Asen}와 $-H_{Bsen}-H_{Csen}$을 둘 다 사용하되 선형적인 교차가 가능하도록 그림 2처럼 정의한 이득 K_1과 K_2를 사용한다. 따라서 섹터 1에서 H_A 신호로 아래 수식처럼 계산된 H_{Acal}을 사용한다.

$$H_{Acal} = K_1 H_{Asen} + K_2(-H_{Bsen} - H_{Csen}) \quad (2)$$

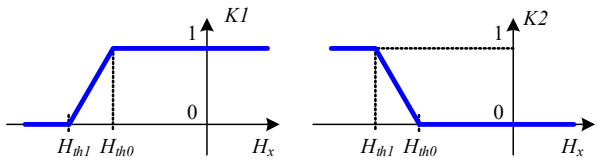

그림 2 측정된 홀신호 크기에 따른 K_1, K_2(x=A,B,C)

3. 실험결과

제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 130kgf·cm급 항공기용 액추에이터로 구성된 시험장치를 구현하였다. 이 액추에이터는 약 190:1의 기어비가 적용되었으며, TMS320F28377S기반으로 구성된 제어보드를 사용하였다. 위치 제어기는 기어박스 출력단에 추가로 장착된 위치정보를 피드백신호로 사용하여 위치제어를 실시하며, 속도제어기 및 전류제어기는 전동기의 아날로그 홀센서 신호를 바탕으로 추정된 속도 및 각도를 사용하였다.

전동 액추에이터를 홀 신호 보정없이 저속인 5rad/s로 구동할 경우 그림 1에서처럼 홀 신호가 왜곡되는 구간이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 환경에서 제안한 홀 신호 보정 알고리즘을 적용할 경우 그림 3에서처럼 왜곡된 홀 신호 없이 부드럽게 홀 신호가 이어지는 것을 알 수 있다. 그림 4는 전동 액추에이터를 무부하 조건에서 위치 제어할 경우의 q축 전류 및 홀 신호 파형을 보여준다. 홀 신호 보정 알고리즘 적용이 없는 조건에서는 H_A 신호의 왜곡으로 인해 속도제어기가 반응하여 q축 전류 맥동이 발생했다. 이때 제안된 홀 신호 보정 알고리즘을 적용할 경우 H_A의 홀 신호를 보정하고 그로인해 q축 전류 맥동도 사라지는 것을 확인하였다.

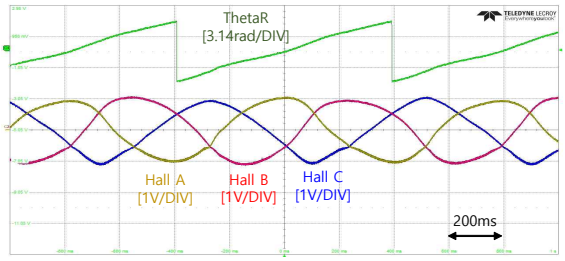

그림 3 보정된 홀신호 파형(5rad/s)

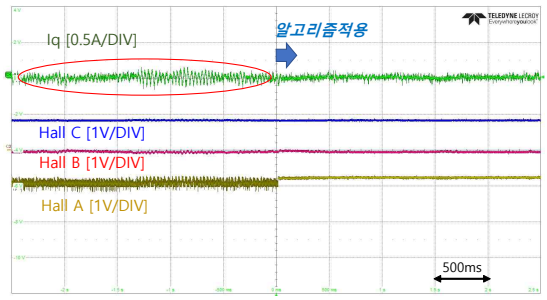

그림 4 위치 제어시 알고리즘 적용 전후의 q축 전류 및 홀 신호 파형

4. 결 론

본 논문에서는 3개의 아날로그 홀센서 중 하나의 홀센서 신호에 왜곡이 존재할 경우 이를 보정하여 위치제어에 사용하는 방법을 확인해 보았다. 구간 판별을 통해 보정할 홀 센서 신호를 정의하고, 왜곡이 심한 하나의 홀 신호 대신 나머지 두 개의 홀센서 신호를 이용해 신호를 보정하였다. 또한 기존 신호와 보정신호사이의 절환을 위해 선형적인 보간을 사용하도록 하였다. 실험을 통해 홀 신호의 보정성능을 검증하였으며, 최종적으로 액추에이터의 위치 제어시 원치 않는 토크 리플이 제거됨을 확인하였다.

본 연구는 대한민국 정부(산업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업의 연구비지원으로 수행되었습니다.(협약번호 UM21420RD4)

참 고 문 헌

[1] 하덕주, "항공기용 전기식 구동장치의 지터현상 방지 시스템", 대한민국, 등록번호 10-2116859, 등록일 2020.05.25.

[2] D. Reigosa, D. Fernandez, C. González, S. B. Lee and F. Briz,"Permanent magnet synchronous machine drive control using analog hall-effect sensors", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 54, no. 3, pp. 2358-2369, May/Jun. 2018.