

위상동기루프를 이용한 자기저항 각도 센서의 맥동 제거 방법

이정훈, 김성진, 남광희
포항공과대학교

Magnetic Resistance Angle Sensor Ripple Elimination Method Using Phase Locked Loop

Jeonghun. Lee, Sungjin Kim, Kwanghee. Nam
POSTECH

ABSTRACT

본 논문에서는 자기저항 (Magnetic Resistive, MR)각도 센서에서 자속 간섭 및 축 진동과 같은 외란에 의해 발생하는 각도 맥동을 해결하는 방법이 연구되었다. 외란에 의한 각도 맥동은 일정한 기계각 속도 한 주기 내에서 전기각 속도가 불균일하게 측정되는 현상이다. 이를 해결하기 위해 위상동기루프 (phase locked loop, PLL)를 적용하였고, 자기저항 각도 센서의 각도 맥동을 효과적으로 제거하였다.

1. 서론

동기기를 구동하기 위해 일반적으로 적용되는 레졸버 또는 엔코더와 같은 각도 센서들은 가격이 비싸며, 설치하기 위한 별도의 기구적인 구조가 필요하기 때문에 부피가 증가한다는 단점이 있다. 이는 차량용 어플리케이션에서 바람직하지 않은 단점이며, 자동차 회사에서는 원가 절감 및 부피 축소를 위해 레졸버와 엔코더 같은 센서를 대체하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 센서리스 알고리즘은 이러한 목적에 가장 부합하는 연구이다. 하지만 자동차 안전 무결성 기준에 부합하지 않기 때문에 가격이 저렴하고, 작은 부피를 차지하면서 설치 가능한 자기저항 센서에 대한 관심이 증가하고 있다.

자기저항 센서는 전류가 흐르고 있는 고체소자에 자장을 가하면 소자의 전기 저항이 증가하는 현상을 이용하는 것이다. 고체 소자에 자장을 가해주기 위해 전동기 축 끝에 영구 자석이 부착되어 있고, 축 회전에 따른 자속의 변화를 감지한다. 이러한 구조적인 이유 때문에 여러 가지 외란에 의해 각도 신호에 간섭이 발생하게 되고, 이는 각도 오차로 귀결된다.

본 논문에서는 위상동기루프를 적용하여 외란에 의한 각도 맥동 해결하는 방법을 보여줄 것이다. 자기저항 각도 센서에서는 맥동 주파수가 동기 주파수보다 낮은 대역에 존재하기 때문에, 위상동기루프의 저역통과 필터가 적용될 경우 동기 주파수 성분까지 억제된다. 제안된 알고리즘에서는 동기 D-Q 좌표 변환으로 동기 주파수를 DC 대역으로 옮겨 문제를 해결하였다. 제안된 알고리즘은 실험을 통하여 유효성을 검증하였다.

2. 자기저항 각도 센서 맥동 제거 방법

2.1 자기저항 센서 원리

자기저항 센서는 전동기 축 끝에 있는 영구 자석의 자속

방향을 읽어내는 것이다.

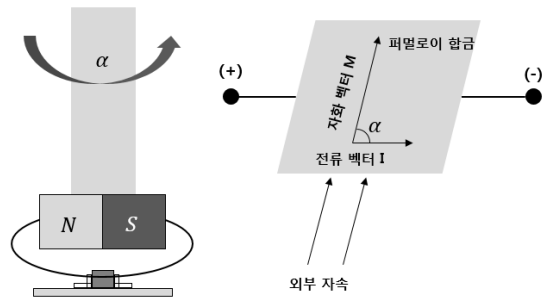


그림 1 자기저항 센서

그림 1에서 볼 수 있듯이 전동기 축의 끝에 영구 자석이 달려 있으며, 자속을 감지해 낼 수 있는 위치에 자기저항 센서가 PCB (printed circuit board)위에 부착되어 있다. 자기저항 센서 내부의 퍼멀로이 합금의 양단에 전압이 인가될 때 흐르는 전류 벡터를 I 로 정의한다. 다음으로 영구자석의 자속 중 전동기 축에 수직하는 성분을 자화벡터 M 으로 정의한다. 전류가 흐르고 있는 고체 소자 (퍼멀로이 합금)에 자장이 가해지면 소자의 전기 저항이 증가하게 된다. 전동기가 회전하면 영구 자석 또한 회전하게 되고, 자화벡터 M 과 전류 벡터 I 의 각도 α 가 변하게 된다. 퍼멀로이 합금의 저항 값은 이 두 벡터의 사잇각 α 의 함수로 나타난다.

$$R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2(\alpha) \tag{1}$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 α 가 0° 일 때 저항이 최대가 되고, α 가 90° 일 때 저항이 최소가 된다.

2.2 자기저항 센서의 각도 맥동 문제

자기저항 센서에서는 축 어긋남 (misalignment), 축 진동, 외부 자속에 의한 간섭 등의 외란으로 인해 오차가 발생한다. 그림 3은 이 중 외부 자속에 의한 간섭의 예시로서, 전동기 내부 자속이 전동기의 축을 타고 올라가서 자기저항 센서의 위치에서 자속 간섭을 일으키는 것을 보여준다.

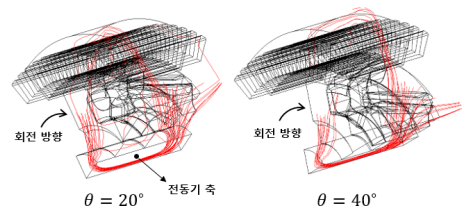


그림 3 외부 자속에 의한 간섭

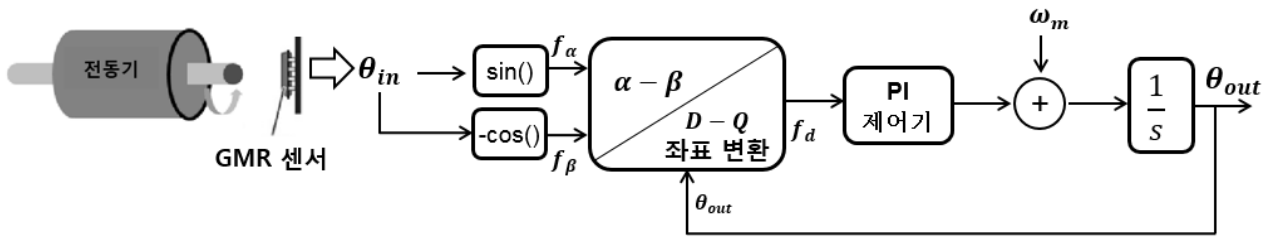


그림 2 각도 맥동 제거 알고리즘 블록선도

그림 3에서 간섭을 일으키는 자속량은 20mT 이다. 자기저항 센서의 센싱 자속 값이 50mT 이기 때문에, 외부 자속에 의한 간섭이 문제가 된다. 그림 4는 다이나모를 이용해 외부에서 정속도로 돌려주는 상황이다. 자속 간섭에 의해서 각도 오차가 발생하고, 그로 인해 속도 맥동이 약 120rpm (5%) 발생한다. 속도 맥동은 주기성을 가지고 발생하며, 그 주기는 기계 각 주기와 일치한다.

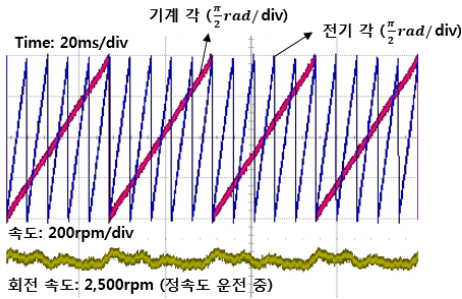


그림 4 다이나모를 이용한 정속도 운전 시 속도 맥동 문제

2.3 동기 D-Q 좌표계 위상 동기루프를 적용한 맥동 문제 해결

그림 2는 본 논문에서 제안하는 알고리즘의 블록선도를 나타낸다. 먼저 자기저항 센서로부터 출력되는 각도 θ_{in} 에 대한 사인 코사인 값을 구하여 f_α 와 f_β 로 정의한다.

$$\begin{aligned} f_\alpha &= \sin(\theta_{in}) \\ f_\beta &= -\cos(\theta_{in}) \end{aligned} \quad (2)$$

f_α 와 f_β 는 회전변환 행렬에 의해 동기 D-Q 좌표계 성분 f_d 로 변환되어 위상동기루프의 입력으로 들어가게 된다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} f_d \\ f_q \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_{out}) & \sin(\theta_{out}) \\ -\sin(\theta_{out}) & \cos(\theta_{out}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin(\theta_{in}) \\ -\cos(\theta_{in}) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos(\theta_{out})\sin(\theta_{in}) - \sin(\theta_{out})\cos(\theta_{in}) \\ -\sin(\theta_{out})\sin(\theta_{in}) - \cos(\theta_{out})\cos(\theta_{in}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

회전 변환 결과 중 D-축 성분 f_d 는 삼각함수 식에 의해서

$$\begin{aligned} f_d &= \cos(\theta_{out})\sin(\theta_{in}) - \sin(\theta_{out})\cos(\theta_{in}) \\ &= \sin(\theta_{in} - \theta_{out}) \approx \theta_{in} - \theta_{out} \end{aligned} \quad (4)$$

로 근사화 된다. 이것은 하나의 추정 오차로 간주되어 비례 PI 제어기의 입력으로 들어간다. 그러면 PI 제어기를 포함한 폐루프 시스템의 추종 능력 때문에 오차를 제거할 수 있다.

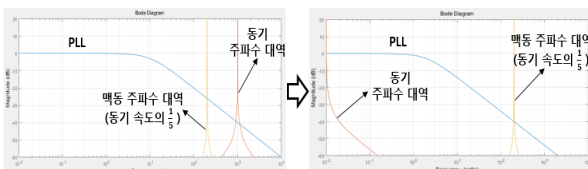


그림 5 다이나모를 이용한 정속도 운전 시 속도 맥동 문제 실험과 시뮬레이션에 사용된 모터는 10극 모터이기 때문에

동기 주파수의 $\frac{1}{5}$ 배 대역에 맥동 주파수가 존재한다. 위상 동기루프는 저역통과 필터의 특성을 가지기 때문에, 그림 5에서 볼 수 있듯이 맥동 주파수 대역을 억제하게 되면 동기 주파수 대역 또한 함께 억제된다. 하지만 동기좌표계 위상동기루프를 사용하게 되면 동기 주파수 대역이 DC로 옮겨지기 때문에 맥동 주파수 대역만 억제할 수 있다.

2.4 실험 결과

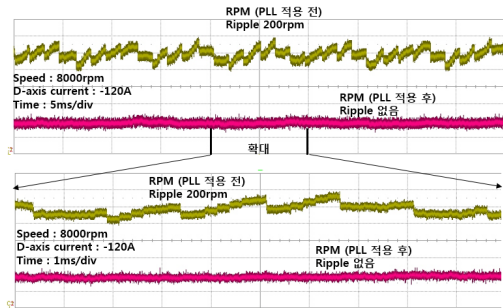


그림 6 다이나모를 이용한 정속도 운전 시 속도 맥동 문제
그림 6은 다이나모로 8,000rpm 운전 시, 알고리즘 적용 전후 속도를 비교한 것이다. 위상동기루프 (PLL)를 적용하기 전 외부 자속 간섭으로 인해 200rpm의 속도 맥동이 있었지만, 알고리즘을 적용한 후에는 효과적으로 제거되었다.

3. 결론

본 논문에서는 자기저항 각도 센서에서 외란에 의한 간섭을 분석하고 해결하는 방법을 제시하였다. 실험 결과 8000rpm 정속도 운전 조건에서 존재하던 200rpm의 속도 맥동이 10rpm 미만으로 효과적으로 제거되었다.

이 논문은 현대모비스와 포항공과대학교의 산학협력과제에서 연구되었음.

참고 문헌

[1] R. E. Best, "Phase-locked Loops: Design, Simulation, and Applications". ISBN-0071412018, New York: McGraw-Hill Professional, 5th edition, 2003.
[2] Silva, S.M.; Lopes, B.M.; Filho, B.J.C.; Campana, R.P.; Bosventura, W.C. "Performance evaluation of PLL algorithms for single-phase grid-connected systems", in Industry App. Conference Vol. 4, Oct. 2004.