

모터의 성능향상을 위한 마그네틱 센서의 3차원 전자장 해석

심상오¹, 김기찬^{2*}

¹국립한밭대학교 경영회계학과, ²국립한밭대학교 전기공학과

3D Electromagnetic Analysis of Magnetic Sensor for Improvement of Motor

Sang-Oh Shim¹ and Ki-Chan Kim^{2*}

¹Department of Business Administration and Accounting, Hanbat National University

²Department of Electrical Engineering, Hanbat National University

요 약 본 논문에서는 전동기의 속도 센서로 사용되는 마그네틱 센서의 3차원 전자장 해석 기술 및 분석 방법에 대하여 논하였다. 마그네틱 센서는 레졸버 및 엔코더와 같은 속도센서에 비해 가격이 싸고 활용성이 높은 장점이 있는 반면, 정밀도가 낮으며 외부 자기장에 대하여 간섭을 많이 받는 단점이 존재한다. 마그네틱 센서는 전동기가 회전할 때 사인과 코사인 파형이 발생된다. 그러나 홀 소자 근처에서의 자기적 노이즈로 인하여 사인 및 코사인 신호가 왜곡이 발생하여 각도 오차로 나타난다. 본 논문에서는 마그네틱 센서의 홀 소자의 적절한 위치 선정과 주위에 적절한 요크를 다꾸찌 방법에 의해 최적 설계를 수행하여 이러한 왜곡을 방지하고자 하였다. 해석방법으로는 3차원 유한요소법을 이용하여 해석의 정밀도를 높였다.

Abstract This paper deals with an optimal angle error reduction method of magnetic hall sensor using hall effect elements with yoke. The magnetic position sensor is required to generate ideal sine and cosine waveforms from its hall effect elements according to rotation angle for precise angle information. However, the output signals are easy to include harmonics due to uneven magnetic field distribution from disturbance in the vicinity of hall effect elements. Thus, The paper studies a way which makes sine and cosine waveforms robust in disturbance and reduces harmonics by installing a yoke around Hall effect elements. The angle detection simulation for the magnetic hall sensor is performed by 3 dimensional finite element method and Taguchi method, one of the design of experiments. For the Taguchi method, three design parameters related to position of hall effect elements and shape of hall effect element yoke are selected.

Key Words : Angle Error, Magnetic Noise, Magnetic Sensor, 3D FEM Analysis

1. 서론

마그네틱 센서는 위치 검출 센서로 센서 내부에 자석과 내부 자석에 의해 변화하는 자계를 검출하는 홀 소자로 구성되어있다. 마그네틱 센서의 회전자 위치 검출 방법은 전동기의 샤프트에 고정시킨 센서 내부의 자석을 회전자의 회전에 따라 회전한다. 내부의 자계가 변화하여 30도의 각도로 위치해 있는 홀 소자에 검출되어 출력과

형으로 Sine, Cosine파형을 발생시킨다. 두 파형을 이용하여 Arctan파형을 만들어 회전자의 위치를 추정하는 시스템이다[1,2].

전동기의 정확한 속도 제어 및 위치제어를 하기 위해서 위치 검출 센서를 이용하여 회전자의 위치를 검출한다. 이를 위한 센서로서 엔코더 및 레졸버가 널리 사용된다. 엔코더는 차량의 진동 및 충격 등의 높은 내환경성을 만족하기 어려우며, 레졸버의 경우에는 내환경성과 정

본 논문은 2011년도 국립한밭대학교 교내학술비 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Ki-Chan Kim(Hanbat National Univ.)

Tel: +82-42-821-1090 email: kckim@hanbat.ac.kr

Received March 8, 2013

Revised (1st April 16, 2013, 2nd May 2, 2013)

Accepted May 9, 2013

확성이 좋으나 가격적인 측면이 높다. 이와 같은 문제점 때문에 위치센서는 엔코더나 레졸버 대신에 마그네틱 센서로 대체되기도 한다[3].

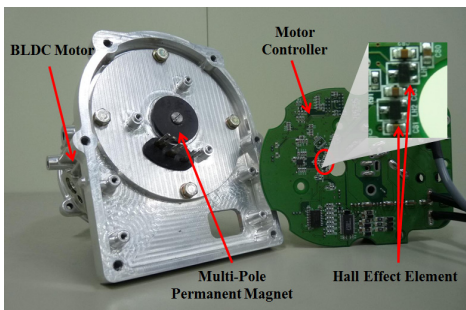
마그네틱 센서의 경우에는 전동기에 비접촉식으로 반영구적이며 크기를 작게 만들 수 있어서 공간을 적게 차지한다는 장점을 갖고 있으며 내환경성에 강하며 낮은 비용의 특징을 가지고 있다. 반면에 정밀도가 낮으며 외부 자기장에 간섭을 많이 받는 단점이 있다.

마그네틱 센서의 정밀도를 높이기 위해서는 센서 출력의 문제가 되는 고조파의 성분 및 파형의 왜곡에 대하여 검증 및 개선을 우선시 하여야 하며, 위치검출 및 속도오차, 소음 및 진동 등을 개선되어야 한다.

본 논문은 마그네틱 센서를 외란에 강인하게 개선하였다. 마그네틱 센서의 단점 중 외란에 의한 파형의 왜곡을 개선하기 위하여 홀 소자의 위치와 주위에 요크를 설치하여 외란의 영향을 차폐하여 고조파의 비율을 감소시키고자 한다. 이에 따라 'Minitab'을 이용한 다구찌 기법을 이용하여 외란을 효과적으로 차폐하는 홀 소자의 위치와 요크 모양을 선정하였다. 이를 Ansys사의 'Maxwell'을 이용하여 3D FEM 해석을 통한 개선된 설계를 하였고 이를 실제 센서 출력과 비교 분석하였다.

2. 마그네틱 센서 초기 모델

Fig. 1은 MDPS(Motor Direct Power Steering)시스템으로 BLDC전동기로 구성되어 있다.



[Fig. 1] Permanent magnet motor with magnetic hall sensor

전동기가 6극기기기 때문에 샤프트에 Ferrite 재질의 6극 원형 자석을 고정시켰다. 제어보드에는 두 개의 홀 소자를 자석 중앙에서 반경 9mm, 높이 5mm, 기계각 30°차이로 위치시켜 전기각 90°차이인 Sine과 Cosine의 출력파형을 발생시킨다. Arctan파형은 Sine, Cosine파형을 식 2를 이용하여 얻는다.

$$\omega = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right) \quad (2)$$

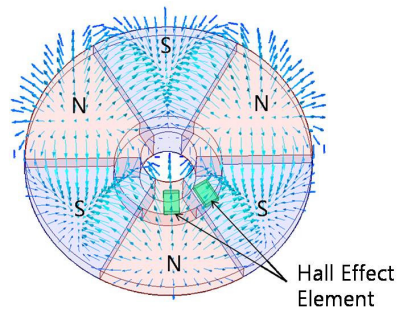
Arctan파형은 회전자와 같이 회전하는 원형 자석의 전기각 ω 를 도출해주는 파형으로써 모터의 위치를 추종하는 역할을 한다[4].

Fig. 2는 초기 모델의 3D FEM을 이용한 자속밀도 벡터를 나타냈다. 해석결과 Fig. 2와 같이 N극에서 나온 자속은 일정 높이 도달 후에 양쪽 S극으로 들어가는 것을 확인할 수 있다. 자속에 고조파가 인가 될 시 파형의 왜곡으로 인하여 위치 검출의 오차를 갖으며, 이를 다음 식 1과 같이 THD(Total Harmonic Distribution: 전고조파 왜율)분석 결과는 Table 1과 같이 나타나는 것을 확인할 수 있다[5].

$$THD = \frac{V_H}{V_1} = \frac{\sqrt{V^2 - V_1^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} V_n^2}}{V_1} \quad (1)$$

[Table 1] THD of Sine and Cosine waveforms

	THD%(Sine)	THD%(Cosine)
5mm_9mm	2.99	3.05

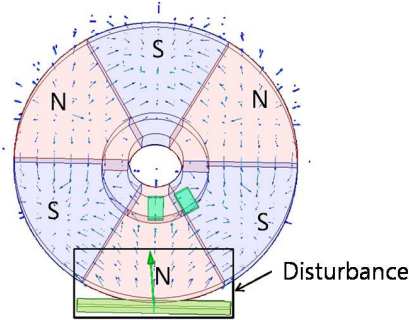


[Fig. 2] 3D FEM Analysis for Magnetic Sensor

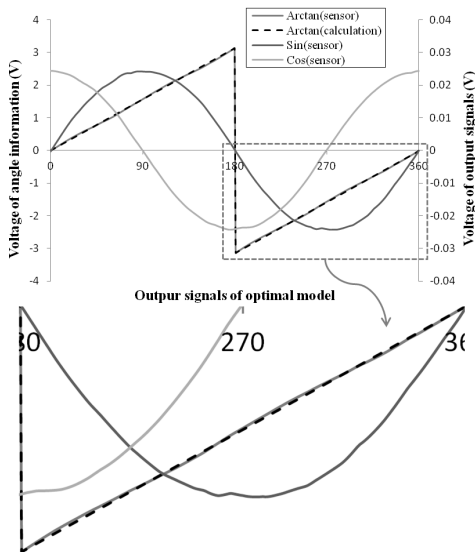
외란에 의한 출력파형과 위치정보파형에 영향을 알아보기 위하여 Fig. 3과 같은 위치에 자석을 추가시켜 외란을 인가하였다. 자속밀도 벡터를 보면 자석에 의해 큰 자속이 홀 소자 쪽으로 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4는 외란이 인가된 센서의 출력 Sine, Cosine 파형과 두 파형을 이용하여 만든 Arctan와 이를 선형적인 Arctan와 비교하여 나타낸 파형이다. 확대한 그림을 통해 파형이 왜곡되었음을 알 수 있다.

파형의 왜곡은 정확한 위치 추종이 불가능하여 회전자의 위치에 따른 정확한 전류지령을 내려주지 못하여 전

동기의 운전에 영향을 줄 것이며, 소음과 진동의 원인이 된다. 원활한 운전과 소음과 진동을 줄이기 위하여 THD를 줄여 출력파형이 외란에 균건하고 개선되기 위한 설계가 요구된다.



[Fig. 3] 3D FEM Analysis with magnetic disturbance



[Fig. 4] Sine, Cosine waveforms and angle information

3. 외란 영향의 감소

외란의 영향에 강인한 마그네틱 센서를 위해 초기모델의 홀 소자 위치 변경과 홀 소자 주변에 요크를 추가시킴으로써 외란을 차폐하여 THD를 개선시키고자 한다. 명확한 분석을 하기 위하여 3D 해석과 3가지 요인을 설정하여 다구찌 기법을 이용하였으며, 이를 통하여 효과적인 THD 개선 모델을 도출하였다.

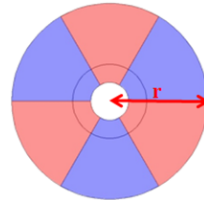
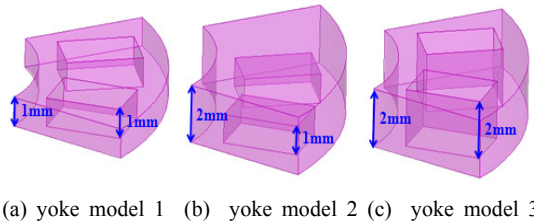
각각의 요인이 서로 관련없이 작용하면 문제가 되지

않지만 동시에 교호작용하면 다른 결과가 나올 수 있다. 따라서 여러 가지 요인을 동시에 포함하였을 때, 상호간의 영향을 끼칠 경우 다른 결과를 가져올 수 있기 때문에 3가지의 요인(높이, 반경, 요크타입)을 3가지 수준으로 나누어 경우의 수인 27번의 실험을 거쳐야 한다. 하지만 3D FEM 해석을 통하여 27번의 실험을 하는 것은 시간적으로나 필요성 부분에서 비효과적이므로 실험계획법 - 다구찌 기법을 이용하였다.

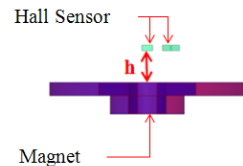
다구찌 기법(Taguchi Method)은 제어 가능한 인자를 통하여 제어할 수 없는 잡음(환경) 인자에 강건한 설계를 하는 것이다. 이는 신호 대 잡음(SN: Signal to Noise)비를 통하여 출력파형의 THD 특성을 더 작은 인자를 선출하는 것이다. 이는 다음 식 3을 통하여 얻을 수 있다[6].

$$SN = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad (3)$$

Fig. 5는 다구찌 기법을 위한 3인자, 즉, 높이, 반경 거리, 요크타입의 3수준을 설정하였다. 높이 5mm를 중심으로 1mm씩 증감하였고 1mm씩 증감 시켜 4~6mm, 반경 길이는 9mm를 중심으로 1mm씩 증감시켜 8~10mm로 설계하여 높이의 증감과 반경의 증감에 따른 THD를 분석하였다.



(d) r = 8, 9, 10mm



(e) h = 4, 5, 6mm

[Fig. 5] Design elements

요크는 재질을 iron으로 하였으며, 총 3가지 타입으로 나누었다. 요크 타입 1은 높이 1mm로 홀 소자의 주변부만 감싼 것이며, 요크 타입 2는 높이를 2mm로 하였으며 안 쪽 1mm를 흡을 주어 홀 소자의 상단을 뒤덮은 모델이

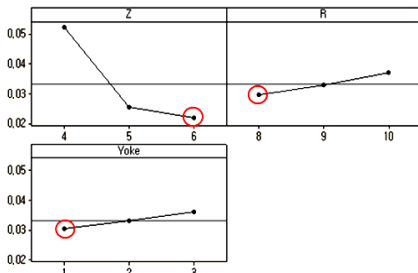
다. 3번 모델은 높이 2mm, 홈 높이도 2mm하여 구멍을 뚫은 모델이다.

직교배열법을 적용하여 3가지 요인의 3수준을 9가지의 모델을 설계한 뒤 3D FEM 해석한 후 THD결과를 확인하였다. Table 2는 직교배열법을 통한 3D FEM해석 결과이다. Table 2를 보면 5번 모델은 높이 5mm, 반경 9mm, 요크타입 3으로 Sine은 2.37%, Cosine은 2.98%로 기본 모델에 비하여 THD가 감소된 것을 알 수 있었으며, 8번 모델이 제일 작은 값을 나타낸다.

[Table 2] Analysis results of each model according to SN(Signal to Noise)

Mode l	Height (mm)	radius (mm)	yoke type	THD% (Sine)	THD% (Cosine)
1	4	8	1	4.12	4.84
2	4	9	2	4.07	6.67
3	4	10	3	6.67	5.02
4	5	8	2	1.57	2.65
5	5	9	3	2.37	2.98
6	5	10	1	2.52	3.09
7	6	8	3	2.02	2.51
8	6	9	1	1.38	2.25
9	6	10	2	2.17	2.69

다구찌 기법으로 각각의 요인이 서로에게 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 SN (Signal to Noise)비를 망소특성으로 하여 결과를 나타내면 Fig. 6과 같다.



[Fig. 6] SN(Signal to Noise) ratio for design elements

Table 2의 결과와 Fig. 6을 보면 Z축 높이로 변화하였을 때 폭의 변화가 제일 크므로 THD에 가장 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있으며, 다른 요소들은 영향이 미비한 것을 알 수 있다. 또한 대체적으로 요크모델 2가 좋았으나 어느 한 모델에서 요크타입 1이 다른 모델과 비교시 월등하여, 평균적인 결과를 도출하는 다구찌 기법의 경우는 Fig. 6과 같이 높이 6mm, 반경 8mm, 요크 타입 1이 최적 모델로 판명한다.

따라서 높이와 반경은 각각 6mm, 8mm로 고정한 뒤

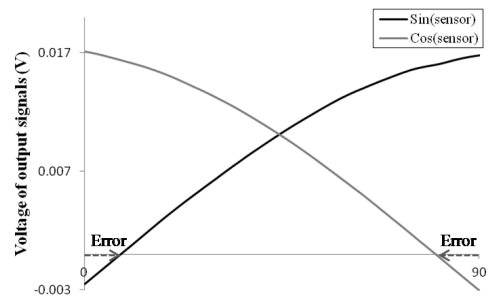
요크 타입 1과 2를 두 타입 모두 적용하여 3D FEM을 진행하였다. Table 3는 기본 모델과 개선 모델 사이에 THD 크기를 비교한 것이다. 요크 타입 1을 적용한 경우가 Sine, Cosine의 THD가 각각 1.21%, 2.17%로 더 적은 것을 볼 수 있다.

[Table 3] Analysis results

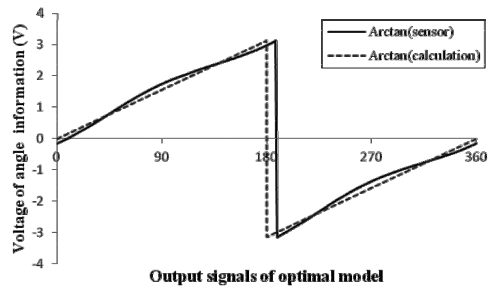
mode 1	height (mm)	radius (mm)	yoke type	THD% (Sine)	THD% (Cosine)
Base	5	9	-	2.71	3.10
1	6	8	2	1.21	2.17
2	6	8	1	1.29	2.18

Fig. 7은 개선 모델 1의 출력파형으로 기존의 파형에 비하여 파형이 정현적으로 변화한 것을 확인할 수 있다. 그러나 Sine과 Cosine의 파형이 다르며 위상이 뒤쳐진 것과 파형의 크기가 다른 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 개선모델 1의 출력 파형 Sine과 Cosine을 통하여 얻어진 Arctan파형으로 파형이며, 이를 외란이 인가된 초기 모델과 비교한 것으로 초기모델보다 개선모델의 파형이 굴곡이 심하며, 위상도 약 10도가 뒤쳐지는 것을 알 수 있다.



[Fig. 7] Output signals of modified model 1(height 6mm, radius 8mm, yoke type 1)



[Fig. 8] Angle waveform with magnetic disturbance

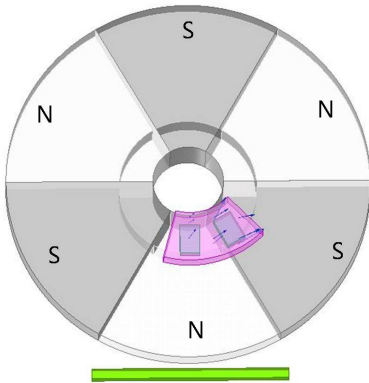
결국 요크를 추가하였을 시에 THD는 많이 개선되는 것으로 분석되었으나 Arctan파형에 많은 굴곡이 발생되는 것을 알 수 있었다. 따라서 Arctan파형이 정형화된 요크 타입이 요구되었다.

4. 요크 형태 선택 및 비교

홀 소자의 주변에 요크를 추가하게 되면 Arctan파형이 심한 왜곡이 생기게 되므로 왜곡의 원인 파악과 이를 보완할 방안이 요구된다. 따라서 THD도 좋아지며 Arctan파형의 위상 또한 변화가 적은 모델이 요구되어 원인을 분석하고 이를 보완 방법을 연구하였다.

4.1 위상 변화의 원인

Fig. 9는 요크에서의 자속밀도 벡터를 나타낸다. 자속 밀도의 벡터를 보면 한쪽 방향으로 향하는 것을 볼 수 있다. 이는 링형 자석의 N극에서 자속이 나와 투자율이 높은 iron재질의 요크를 걸쳐 모두 S극으로 넘어가는 모습을 나타내는 것이다.

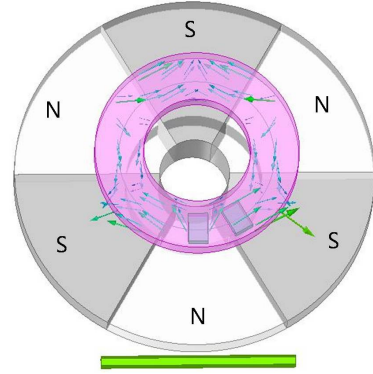


[Fig. 9] magnetic flux at segment yoke

따라서 본래 링형 자석의 자속은 N극으로 나와서 양쪽 측면의 S극으로 나누어 들어가야 하지만 투자율이 높은 iron에 의하여 우측으로만 넘어가는 것을 알 수 있다. 따라서 요크의 타입을 부분적인 것이 아닌 링형 요크로 변화하기로 하였다.

Fig. 10은 요크타입 2를 토대로 만든 링형 요크의 자속 밀도를 나타낸다. 이를 통하여 보면 N극에서 나온 자속이 링을 걸쳐 양극으로 나누어져 S극으로 퍼져 나가는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이전의 부분적인 모델은 한쪽의 N극과 S극에만 걸쳐있어 자속선이 양 갈래로 나누

어서 가지 못해 그만큼 한쪽으로 집중되어 출력파형의 Cosine파형과 Sine파형에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

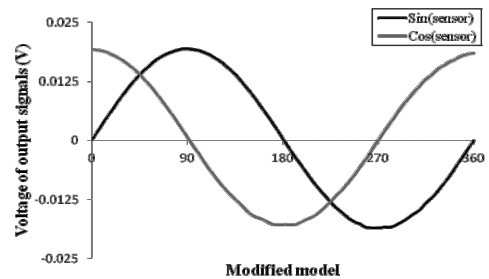


[Fig. 10] magnetic flux at ring shape yoke

4.2 링형 요크 모델과 기본 모델 비교

THD고려시 가장 많이 개선된 요크모델 1과 Arctan의 위상을 고려하여 마그네틱 센서의 형태를 고려한 링형 타입은 Fig. 10과 같다.

Fig. 11은 최종 모델의 출력파형으로써 요크가 없이 외란이 인가된 파형에 비하여 더 정형적으로 나타나는 것을 알 수 있다.



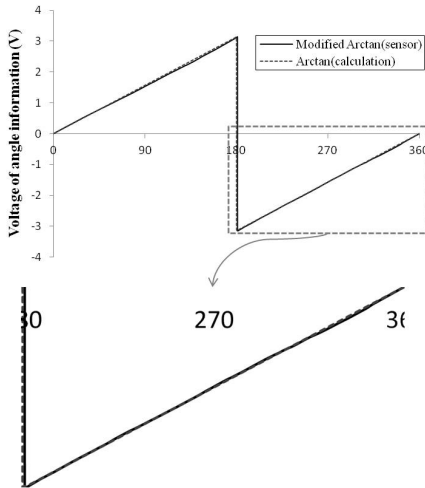
[Fig. 11] Output waveform of ring shape yoke

Table 4는 링형 요크모델의 THD분석 결과를 나타낸 표이다. 이는 기본 모델에 비하여 Sine, Cosine의 출력파형을 각각 약 1.8%, 0.2%가 개선된 것을 나타낸다.

[Table 4] Analysis results of ring shape yoke

model	height(mm)	radius(mm)	yoke type	THD% (Sine)	THD% (Cosine)
Base	5	9	-	2.71	3.10
링형	6	8	2	0.98	2.92

Fig. 12는 Arctan파형을 나타낸 것으로 계산된 Arctan 파형과 위상차이가 없이 THD만을 개선됨을 나타낸다.



[Fig. 12] angle information of Modified model

5. 결론

마그네틱 센서에 외란이 인가될 경우 자속의 변화에 의하여 Sine, Cosine의 출력파형이 변화하게 된다. 따라서 회전자 위치를 파악하는 Arctan파형은 고조파가 함유되어 왜곡이 일어나, 위치 정보에 따른 전류지령이 제대로 수행되지 않는다. 이와 같은 문제점들은 외란의 작용을 적게 영향을 받으며, 고조파를 개선시키면 효율적인 전동기 운전이 가능하게 된다.

먼저, 다구찌 기법을 통하여 요크의 적절한 위치와 전체적인 크기, 형태를 선정하였다. 요크 타입은 홀 소자의 주변에 세그먼트로 설치를 하면 THD는 감소하나, N극에서 나오는 자속이 양 쪽으로 분산되지 않고 한 방향으로 정렬된다. 이 때문에 출력파형의 Sine과 Cosine은 서로 다른 크기를 갖으며 위치정보 파형인 Arctan의 위상이 왜곡된다. 반면에 요크를 원형형태로 설치할 시 위치정보 파형의 위상이 왜곡되지 않으며 THD를 감소시킬 수 있는 것을 보았다.

본 논문은 홀 소자의 위치를 변화 시켜 외란의 영향이 적은 곳을 선정하고, 홀 소자의 주변에 요크를 설치하여 외란이 홀 소자에 직접적으로 영향을 주지 못하고 요크의 차폐현상에 의하여 외란의 영향이 감소되어 설계하는 방안을 제시하였다.

외란에 굳건하게 개선된 마그네틱 센서는 다른 위치 센서에 비교하여 경제적이고 공간을 작게 차지하며, 단점

이었던 정밀도도 상승되어 전동기의 위치 센서로 많이 사용될 것이라고 생각된다.

References

- [1] Schott, C., "A new two-axis magnetic position sensor," *Sensors, 2002.Proceedings of IEEE*, vol. 2, pp.911-915, Jun, 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICSENS.2002.1037230>
- [2] Bretchneider, J., "Design of multi-dimensional magnetic position sensor systems based on HallinOne technology," *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium.*, vol. 12, pp. 422-427, July, 2010.
DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-23071-4_6
- [3] Kikuchi, Y., Nakamura, F., Wakiwaka, H., and Yamada, H., "Consideration of magnetization and detection on magnetic rotary encoder using finite element method", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, no. 2, pp. 2159-2162, Mar, 1997.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/20.582759>
- [4] Seung-Ho Jeong, Se-Hyun Rhyu, Byung-Il Kwon, and Byung-Taek Kim, "Design of the Rotary Magnetic Position Sensor With the Sinusoidally Magnetized Permanent Magnet", *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 43, No. 4, pp. 1837-1840, Apr, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2007.892617>
- [5] Walid G.Morsi and M. E. El-Hawary, "Wavelet Packet Transform-Based Power Quality Indices for Balanced and Unbalanced Three-Phase Systems Under Stationary or Nonstationary Operating Conditions", *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 2033-2310, Oct, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2027496>
- [6] Omekanda, A. M., "Robust torque and torque-per-inertia optimization of a switched reluctance motor using the Taguchi methods," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol, 42, no. 2, pp. 473-478, Mar, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2006.870031>

심 상 오(Sang-Oh Shim)

[정회원]



- 2006년 2월 : 한국과학기술원 (KAIST) 산업공학과 (공학박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 경영회계학과 교수

<관심분야>

생산운영관리, 시뮬레이션, 경영과학, 품질경영

김 기 찬(Ki-Chan Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (전기공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2005년 1월 : 현대중공업 기계전기연구소 선임 연구원
- 2008년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (전기공학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전기기기, 전기제어