

인덱스 및 증분형 PWM 타입을 이용한 저가형 위치센서에 관한 연구

The Study on Low-cost Position Sensor Using Index and Increment PWM

김영수* · 권순재**†
Young-Su Kim* and Soon-Jae Kwon**†

(Received 18 July 2016, Revision received 26 November 2016, Accepted 29 November 2016)

Abstract: BLDC motors have the strong point of allowing high-efficiency operation, yet with the weak point of requiring position information for operation. Moreover, there have recently been frequent cases where the product differentiation of even a cheap BLDC motor demanded a high level of control performance similar to that of a controller using a high-precision position sensor. This paper proposes low cost position sensor that enables the acquisition of rotor position information based on index and incremental PWM, using a single position sensor instead of an expensive incremental encoder or a cheap 3 phase hall sensor. The characteristic of the proposed encoder is that index information at every 60° of electrical angle is inscribed on the encoder disk, as well as a multiple number of values representing information about PWM, which is obtained by modulating information about the electrical angle of the rotor that has the resolution of 60°. Such a method has the characteristic of enabling the acquisition of high-precision position information based on the information about a multiple number of PWM waveforms and counter values that have all been inscribed on the encoder disk for each 60° range. The feasibility of the proposed new encoder was verified by fabricating a prototype encoder generating 240 pulses, followed by confirming its performance using Micom's capture and software counter functions.

Key Words : Encoder, BLDC, Position sensor, PWM

1. 서 론

로봇, 자동화와 같이 전동기 산업 발달로 인하여 인간의 질적생활 향상이 이루어지면서 에너지 사용이 급증하고 있으며, 이로 인한 지구온난화가

심각한 문제로 대두되고 있다. 이러한 지구온난화를 방지하기 위해 전동기 산업분야에서는 고효율 전동기에 대한 관심이 급증하고 있다. 이 일환으로 효율문제로 인하여 일반산업 및 가정생활에 사용할 전동기로 현재 주류를 이루고 있는 유도

**† 권순재(교신저자) : 부경대학교 기계설계공학과
E-mail : sjkwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6150
*김영수 : 한국승강기대학교 승강기공학부

**† Soon-Jae Kwon(corresponding author) : Department of Mechanical Design Engineering, Pukyong National University.
E-mail : sjkwon@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6150
*Young-Su Kim : Department of Lift Engineering, Korea Lift College.

전동기에서 고효율 구동이 가능한 BLDC 전동기로 관심이 전환되고 있다. 그러나 BLDC 전동기는 유도전동기와 달리 구동을 위해서는 위치정보가 필수적이라는 단점이 있다.¹⁻⁵⁾ 이러한 위치센서로는 사용되는 대표적인 센서가 전기적 위상차가 90°를 갖는 2개의 수광부와 회전자의 절대 위치 정보를 갖는 1개의 수광부를 둔 증분형 엔코더이다. 이러한 위치센서는 고가라는 치명적인 단점의 의해 저가형 BLDC 전동기 구동용 센서로 채택하기에는 경제적인 면에서 무리가 있다. 따라서 동일 원주 상에 120° 간격으로 설치된 3개 검출부를 갖는 120°형 홀센서는 60° 분해능을 갖는 단점이 있지만 경제성이 우수하다는 측면에서 대다수 저가형 BLDC 전동기 구동에서 이 센서 방식을 채용하고 있다. 이러한 위치센서를 사용한 구동방식은 위치정보의 한계로 인하여 약계자와 같은 다양한 제어방식의 적용에는 그 한계가 있다. 최근에는 저가형 BLDC 전동기에서도 기존 홀센서 사용 시 나타나는 문제점 개선을 위해 고정도 위치센서를 사용한 제어기와 동등한 수준의 제어성을 요구하는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 따라서 현재 저가형 센서를 사용하면서도 고정도의 위치정보 취득 방식에 대한 관심이 급증하고 있다.⁶⁻¹⁰⁾

본 논문에서는 고가형 증분형 엔코더나 저가형 3상 홀센서 방식과 차별화 된 한 개의 위치센서를 사용하여 회전자의 위치정보를 취득할 수 있는 새로운 방식의 인덱스 및 증분형 PWM 타입을 이용한 저가형 위치센서를 제안한다. 제안된 엔코더의 특징으로는 전기각 60°마다 증분형 PWM(Pluse width modulation) 정보 인덱스를 엔코드 판에 각 인하고, 각 60°영역에서는 다수의 펄스열을 통하여 회전자 전기각에 대한 정보를 각인하는 수를 다수 개 삽입한다. 이러한 방식은 60°영역에 각인된 다수의 펄스파형에 대한 정보와 카운터 값으로 고정도의 위치정보를 취득 할 수 있는 특징을 갖게 된다.

제안된 방식의 새로운 엔코더의 타당성을 검증하기 위해 36 펄스를 갖는 프로토 타입 엔코더를 제작하고, 마이컴의 Capture 기능과 소프트웨어 카운터 기능을 사용하여 그 성능을 확인하였다.

2. 단일센서를 이용한 엔코더

2.1 BLDC 전동기와 위치정보

Fig. 1은 전형적인 3상 BLDC의 회전자 위치에 따른 이상적인 역기전력 및 전류 파형과 토크 파형이다. Fig. 1에서 e_a, e_b, e_c 와 i_a, i_b, i_c 는 각 상의 역기전압과 상전류이며, T_a, T_b, T_c 는 각 상에서 발생한 토크이며, T_{total} 은 3상 토크의 합으로 총 토크를 나타낸 것이다.

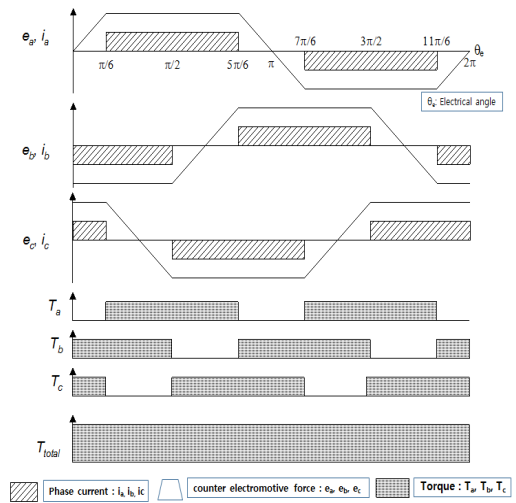


Fig. 1 Back-EMF, current and torque waveform of 3-phase brushless DC motor

직류전동기의 토크 상수와 역기전력 상수가 동일한 것과 같이 BLDC 전동기의 토크 함수는 역기전력 함수와 동일하다. 따라서 Fig. 1에서 알 수 있듯이 일정한 토크를 발생시키기 위해서는 역기전력 또는 토크 함수가 일정한 값을 갖는 전기각으로 120°의 통전구간에서 구형과 형태의 상전류를 전동기에 인가해야 하며, 전기각으로 60°마다 상전류 전환을 행하는 3상 2여자 방식으로 구동되어야 한다. BLDC 전동기 구동 시스템에서는 회전자 위치에 동기되어 상전류 전환을 위한 위치센서와 상전류 전환을 구현하기 위한 인버터가 필수적이다. 즉 BLDC 전동기 구동을 위해서는 전기각 120°차를 갖는 3개의 위치센서를 설치하고 3개의 센서는 회전자의 위치에 따라 회전자의 위

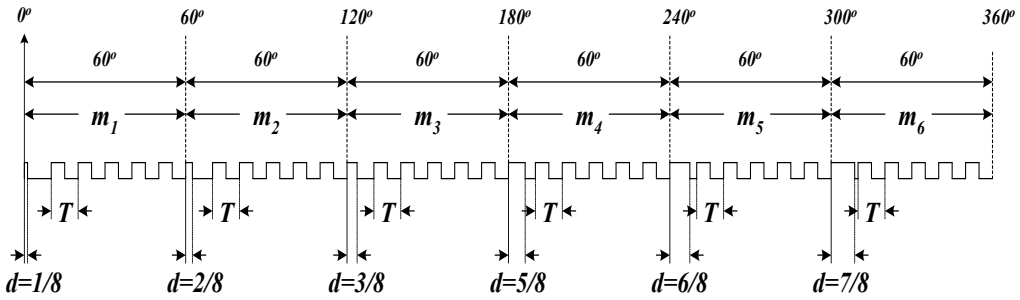


Fig. 3 Location principle of the proposed encoder

치와 동기된 전류를 전동기 스테이터(Stator)에 인가하여야 한다. 이 방식에서 역기전력이 평탄한 부분에서 상 전류가 흐르도록 기계적으로 정확히 취부하여야 한다. 만일 3개의 센서가 정확히 120° 위상차를 갖지 않는 경우 상전류의 비대칭으로 인하여 맥동토크가 발생하여 고속회전 시 진동의 주 원인이 된다. 또한 3개의 센서 중 1개라도 오동작을 하면 전동기에는 치명적인 문제가 발생한다.

2.2 제안된 새로운 엔코더

저가형 엔코더의 연구로는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 기존 디지털 방식 엔코더와 달리 엔코더 기관에 색감을 선형으로 사용함으로써 엔코더가 회전함에 따라 투과되는 광량은 선형적으로 감소 및 증가하는 방식이 있다. 이 방식에서 스위치 온·오프각 제어정도는 기존 엔코더와 달리 마이크로 프로세스 샘플링주기 및 전동기의 운전속도와 관계없이 항상 원하는 위치에서 온·오프 스위칭을 행할 수 있는 장점이 있다. 그러나 엔코더에 분진 같은 이물질이 있는 경우 광 투과량이 변하므로 엔코더 위치정보에 오차가 발생하는 치명적인 약점이 있다.

Fig. 3은 제안된 엔코더의 위치정보 원리를 나타내고 있다. 제안된 위치정보 센서인 엔코더에서 위치정보는 PWM을 이용한 인덱스 방식을 기초로 하고 있으며, 크게 영역의 시작을 나타내는 인덱스와 영역 내부의 세부영역을 표시하는 인덱스로 구분할 수 있다.

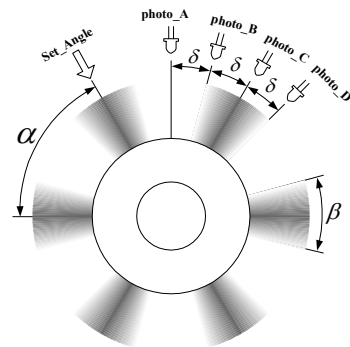


Fig. 2 Low cost linear encoder

제안된 인덱스 방식의 위치정보는 각 인덱스 영역에서 전동기의 속도변동이 급격히 일어나지 않는다는 가정 하에서 성립한다. 제안된 엔코더는 전기각 360°를 6개의 영역으로 나누고 있으며, 각 영역은 총 6가지로 1에서 6으로 구분되고, 그 영역은 Fig. 4에 나타나 있다.

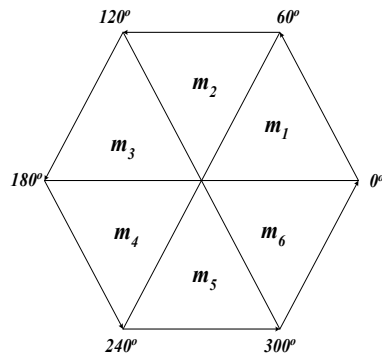


Fig. 4 Each mode according to the position

Fig. 4에서 보는 바와 같이 제안된 엔코더는 전기각 60° 주기로 고유영역 섹터의 시작을 알리는 인덱스가 각인되어 있으며, 각 영역은 영역을 표시하는 다수의 세부 위치정보를 인덱스로 각인되어 있다. 또한 각 인덱스의 전기각 주기를 동일하게 하였으며, 이로 인하여 전동기가 회전할 경우 인덱스의 시간을 이용하여 전동기의 현재속도에 대한 정보를 취득할 수 있게 하였다.

고유영역의 시작을 표시하는 인덱스는 6종류가 있으며, 세부영역을 표시하는 인덱스는 1개의 종류가 있어 총 6개의 PWM 인덱스가 필요하다. 고유영역의 시작을 표시하는 인덱스용 PWM은 다양한 방법이 가능하나, 본 논문에서는 세부영역을 표시하는 인덱스는 PWM 변조비를 0.5로 설정하고 고유영역을 표시하는 인덱스는 전동기의 속도 변동을 고려하여 Table 1과 같이 정의하였다.

Table 1 Index

영역	PWM index(d)
1	1/8
2	2/8
3	3/8
4	5/8
5	6/8
6	7/8

제안된 엔코더 방식에서 위치정보의 분해능을 높이기 위해 섹터의 시작을 알리는 인덱스를 기준으로 하여 영역을 표시하는 인덱스 수를 카운팅하여 각 영역에서 회전자가 위치하는 세부 영역에 대한 정보를 취득하게 된다. 따라서 각 영역에서는 영역을 표시하는 다수의 인덱스 수가 위치 정보의 정밀도를 결정하게 된다. 본 논문에서는 각 영역에 위치를 표시하는 인덱스를 포함하여 Fig. 4와 같이 6개의 펄스열을 구성하였으며, 제안된 엔코더 원판 구조는 Fig. 5에 나타내고 있다. Fig. 5는 제안된 엔코더의 타당성을 검증하기 위해 제작된 엔코더 원판을 나타내고 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 인덱스의 총 수는 36으로 60° 간격으로 다른 패턴을 각인하여 각 영역을 구분하였다.

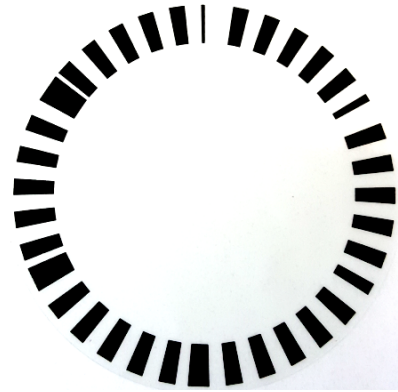


Fig. 5 Proposed structure of the Encoder Disc

따라서 제안된 인코더는 60° 간격으로 절대 위치를 인식할 수 있으며, 10° 간격으로 Fig. 6과 같이 정확한 위치 정보를 취득할 수 있다.

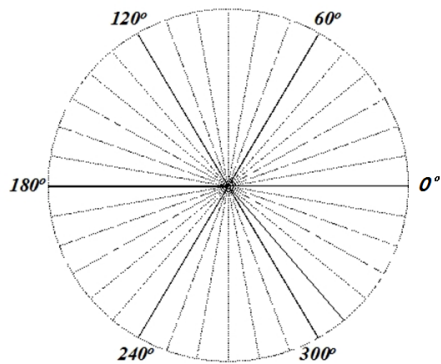
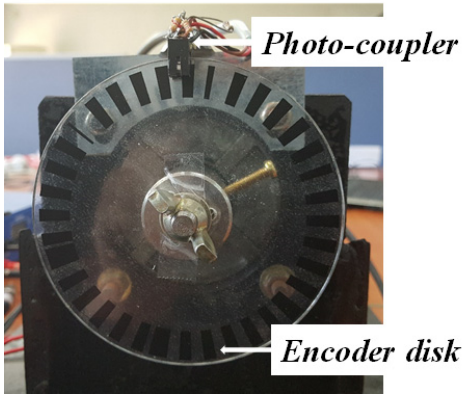


Fig. 6 Location information of the proposed encoder

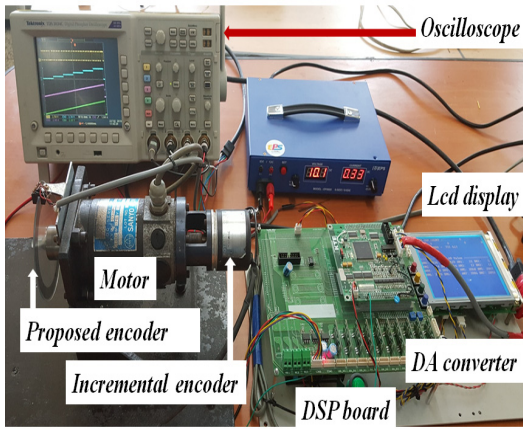
3. 시스템 구성 및 실험 결과

3.1 시스템 구성

Fig. 7은 제안된 엔코더의 타당성을 검증하기 위한 프로토타입 시스템이다. Fig. 7(a)는 제안된 엔코더 취부 사진이며, 그 성능을 확인하기 위해 기존의 1024펄스 타입의 증분형 엔코더를 사용하였고 제어보드는 TI사의 DSP(TMS320F335)를 사용하여 제안된 엔코더의 위치정보와 기존 엔코더의 위치정보를 16-Bit DA컨버터를 통하여 아날로그로 출력하여 오실로스코프로 관측하였다.



(a) Proposed encoder



(b) Prototype system

Fig. 7 Prototype system

3.2 실험 결과

Fig. 8은 제안된 엔코더의 위치 취득 정보 특성을 분석하기 위한 엔코더의 포토커플러 출력(Photo signal), 6개의 절대 위치 정보(Angle Sector), 제안된 엔코더에 의한 위치정보(Estimation angle) 및 기존의 고정도 증분형 엔코더의 위치정보(Real angle)를 나타내고 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 엔코더의 포토커플러 출력 펄스에는 6개의 펄스주기마다 60° 단위의 절대위치정보를 나타내는 펄스열이 나타나고 있으며, 이를 기준으로 하여 추정위치와 4096펄스열을 갖는 증분형 엔코더의 출력인 실제 위치각과 일치함을 알 수 있다.

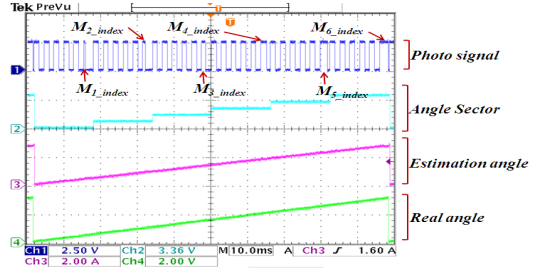
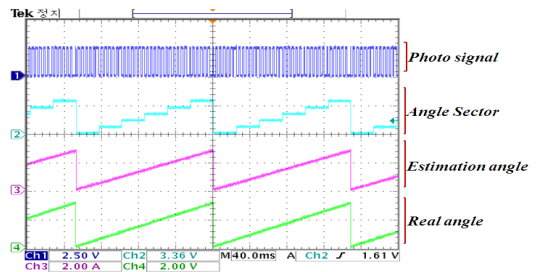
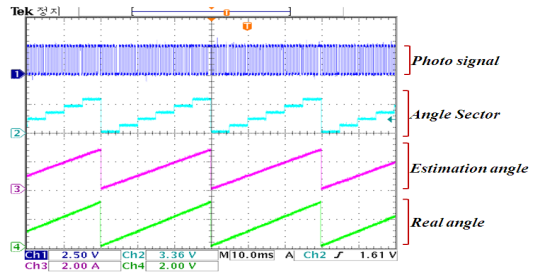


Fig. 8 Position obtaining information characteristic of the proposed encoder

Fig. 9는 전동기 속도를 100 rpm 및 500 rpm으로 구동 시 제안된 엔코더의 포토커플러 출력, 6개의 절대 위치 정보, 제안된 엔코더에 의한 위치정보 및 기존의 고정도 증분형 엔코더의 위치정보를 나타내고 있다. Fig. 9(a)는 100 rpm에서의 파형이며 위치 추중오차는 1° 이내를 유지함을 알 수 있었다. Fig. 9(b)는 500 rpm에서의 파형이며 위치 추중오차는 0.5° 이내를 유지함을 알 수 있었다. 이는 전동기의 속도를 고속으로 가속시 속도 변동이 적어 추중 특성이 양호한 것으로 나타났다.



(a) 100 [rpm]



(b) 500 [rpm]

Fig. 9 Encoder characteristic

Fig. 10은 전동기의 기동 시 엔코더의 포터커플러 출력, 6개의 절대 위치 정보, 제안된 엔코더에 의한 위치정보 및 기존의 고정도 증분형 엔코더의 위치정보 나타내고 있다.

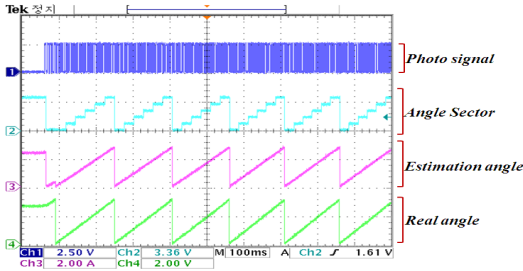
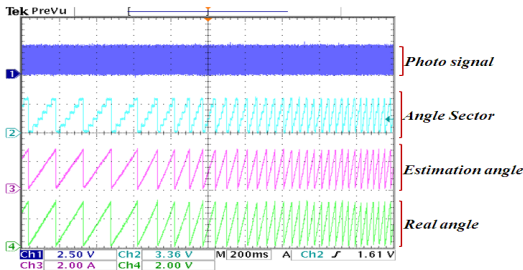
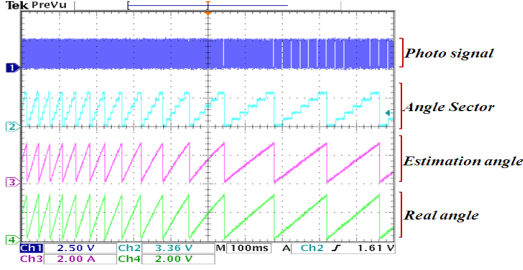


Fig. 10 Starting characteristic

Fig. 10에서 보는 바와 같이 기동초기 60°에서는 위치 추종을 할 수 없으나 다음 위치모드에서는 위치추종 특성이 양호하게 이루어짐을 알 수 있다.



(a) 100 [rpm] -> 500 [rpm]



(b) 500 [rpm] -> 100 [rpm]

Fig. 11 Speed regulation characteristic

Fig. 11은 전동기 속도가 100 rpm에서 500 rpm으로 변동할 경우와 500 rpm에서 100 rpm으로 변

동할 경우의 엔코더의 포터커플러 출력, 6개의 절대 위치 정보, 제안된 엔코더에 의한 위치정보 및 기존의 고정도 증분형 엔코더의 위치정보를 나타내고 있다. Fig. 11(a)는 전동기 속도가 가속할 경우의 파형으로 위치 추종 특성은 속도 변동이 시작된 속도 가속영역인 M0 영역에서는 최대 1°의 위치 오차가 발생하였으나, 다음 모드에서는 양호한 위치 추종특성을 보임을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 전동기 속도가 감속할 경우의 파형으로 양호한 위치 추종특성을 보임을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문은 팬 모터와 같은 소형 BLDC 전동기 구동 시 위치센서에 대한 경제적 부담과 다수의 위치센서를 사용함으로써 발생하는 위치정보 취득을 위한 새로운 방식의 엔코더에 관한 것이다. 제안된 방식의 엔코더는 한 개의 위치센서를 사용하여 회전자의 위치정보를 취득할 수 있는 새로운 방식의 인덱스 및 증분형 PWM 타입으로 구성하였다. 따라서 다수의 신호선 사용 및 신뢰성 저감을 극복하기 위해 고가형 증분형 엔코더나 저가형 3상 홀센서 방식과 차별화된 저가형 위치센서를 제안하였다.

1) 제안된 엔코더는 전기각 60°마다 위치에 대한 절대정보를 얻을 수 있어 기존의 증분형 엔코더 보다 위치 절대정보 취득 능력이 우수함을 알 수 있었다.

2) 전동기 속도가 100 rpm 이상의 영역에서는 위치 추종오차가 최대 1% 이내에서 양호하게 추종함을 알 수 있었다.

3) 기존 엔코더와 비교한 결과 10° 단위의 위치 검출은 에러 없이 양호하게 검출됨을 알 수 있었으며 이는 자기식 엔코더를 이용한 3상 홀센서 방식보다 우수한 특성으로 구동됨을 알 수 있었다.

이상의 결론으로부터 본 엔코더는 급속한 속도 변동이 요구되지 않는 BLDC 전동기 구동시스템에 적용할 경우 센서의 위치 취부 문제뿐만 아니라 경제적인 장점을 가질 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 부경대학교 자율창의 학술연구비 (2016년)에 의하여 연구되었으며 지원에 감사드립니다.

References

1. J. Shao, 2006, "An Improved Microcontroller-Based Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drive for Automotive Applications", IEEE Transfer on Ind Appl, Vol. 42, No. 5, pp. 1216-1221.
2. R. Krishnan, 2010, "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives", CRC Press.
3. Y. S. Chen and Z. Q. Zhu, 2007, "Investigation of Magnetic Drag Torque in Permanent Magnet Brushless Motors", IEEE Transfer on Magn, Vol. 43, No. 6, June.
4. Industrial Environment Research Report for Small Motor, 2002, KETI.
5. P. Pillay and R. Krishnan, 1991, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motors for Servo Drives", IEEE Transfer on Ind Appl, Vol. 27, No. 5, pp. 086-996.
6. S. H. Lee and T. Velinsky, 2004, "Improved velocity estimation for low-speed and transient regimes using low-resolution encoders", IEEE Trans. Mechatronics, Vol. 9, No. 3, pp. 553-560.
7. J. H. Hwang and C. S. Chung, 2012, "DSP Implementation of a Sinusoidal Encoder using linear Hall Sensor", KIEE, Vol. 61, No. 2, pp. 298-302.
8. C. F. Lepple, 2004, "Implementation of a High-speed Sinusoidal Encoder Interpolation System", Blacksburg, Virginia, Master of Science in Electrical Engineering, Jan.
9. L. Kovudhikulrungsri, 2006, "Precise speed estimation from a low-resolution encoder by dual-sampling-rate observer", IEEE/ASME Transfer on Mechatronics, Vol. 11, No. 6, pp. 661-670.
10. R. Petrella, M. Tursini, L. Peretti and Zigliotto, M, 2007, "Speed Measurement Algorithms for Low-Resolution Incremental Encoder Equipped Drives: a Comparative Analysis", Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), pp. 780-787.