

Hysteresis PWM 전류 제어 기법을 사용한 독립 다상 BLDC 전동기의 효율 해석 유효성 검증

이준원^{*,1)} · 공영경¹⁾ · 박선정²⁾ · 최호용²⁾ · 홍성영²⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제6기술연구본부

²⁾ (주)효성 중공업PG

Validation of Efficiency Analysis for Independent Multi-Phase BLDC Motor Using Hysteresis PWM Current Control Method

Junewon Lee^{*,1)} · Yeongkyung Kong¹⁾ · Sunjung Park²⁾ · Hoyong Choi²⁾ · Sungyoung Hong²⁾

¹⁾ The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Power & Industrial Systems Performance Group, Hyosung Corporation, Korea

(Received 20 January 2014 / Revised 24 June 2014 / Accepted 15 August 2014)

ABSTRACT

In this paper, the analysis and the experiment of independent multi-phase BLDC motor are performed. The back-emf, iron loss analysis are performed by the finite element method and compared with experimental results. The independent multi-phase BLDC motor is manufactured and to measure the efficiency of the motor, evaluation system is also manufactured including the load generator. By comparing the analytic and the experimental results, the effectiveness of the analysis model is verified when calculating the efficiency of the motor.

Key Words : Independent Multi-Phase BLDC Motor(독립 다상 BLDC 전동기), Current Control(전류 제어), Back EMF (역기전력), Efficiency(효율)

1. 서론

최근 영구자석을 사용한 전동기의 활용 증가와 제반 기술의 발전으로 인해 선박의 전기추진시스템, 풍력시스템, 전기자동차 등 고부가가치 산업에 대한 적용을 위해 많은 연구들이 이루어지고 있다¹⁻³⁾.

영구자석형 전동기는 영구자석에 의해 자속을 얻기 때문에 계자 권선을 제거하여 전동기의 소형화를 이룰 수 있고, 계자 권선으로 인한 손실을 제거하여 고효율을 달성할 수 있다. 더불어 넓은 회전속도 영역 내에서 고효율과 고출력을 보장할 수 있다. 이와 같은 기술적 배경에 따라 전동기를 최대 출력을 기준으로 설계할 경우, 저속과 저출력 구간에서의 효율이 급격히 저하되는 특징을 갖고 있다. 효율 저하 문제는 설계 단계에서부터 효율 개선의 필요성을 인지하고 있

* Corresponding author, E-mail: j.lee@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

으며, 효율은 전동기의 성능을 판단할 수 있는 중요한 척도로서 이에 영향을 미치는 요소에 대한 다각도의 검토를 통해 설계하여야 한다. 이러한 전동기의 성능 개선 이슈는 구조적인 면뿐만 아니라 전류 제어 기법 영역에서도 다루어지고 있다⁴⁷⁾.

본 논문에서는 독립 다상 BLDC 전동기의 해석, 설계 제작을 통해 전동기의 효율을 해석하고 시험을 통해 정확도를 검증하였다. 유한요소 해석을 통한 역기전력 해석을 수행하여 역기전력 측정 결과와 비교하여 해석 정확도를 검증하고, 전동기의 회전속도 별로 무부하 손실해석을 수행하며, 손실 측정시험을 통해 해석 방법을 검증하였다. 최종적으로 부하 손실 해석결과와 무부하시험결과를 비교하여 손실 해석방법을 검증하였다. 이러한 해석결과는 속도 별로 여러 상황에 대해 수행하여 시험결과와 비교함으로써 신뢰도를 높였다.

2. 독립 다상 BLDC 전동기의 구조

본 시험에 사용된 BLDC 전동기는 신뢰성을 향상시키기 위해 전원, 구동부, 권선에까지 모두 이중화된 구조로 설계되었다. 이것은 전동기 구동을 위해 공급되는 직류 전원과 인버터 시스템이 2개로 분리되어 구성된다는 것을 뜻한다. 여기에 연결되는 전동기의 상 권선도 동상 2조로 이중화 구성되어 인버터에 연결되므로 전동기 구동을 위한 전원이나 인버터, 권선 등에서 치명적인 고장이 발생하더라도 나머지 절반의 시스템을 이용해 제한된 출력으로 전동기를 구동할 수 있다. 또한 전원의 고장 외에 인버터 및 권선의 부분적인 고장이 생겼을 때는 고장 부분을 제외한 나머지만으로 제한적인 구동이 가능하다.

3. 효율 해석과 전류 제어 기법

3.1 효율 해석

전동기의 손실은 소비전력 및 효율과 직결되므로 전동기의 성능을 판별하는데 중요한 척도가 된다. 전동기의 손실은 권선 영역에서의 동손과 철심 영역에서의 철손으로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 전동기 내부에서 발생하는 비선형의 철손 특성 등을 감안하여 FEM을 이용, 무부하 철손 및 부하시 출력, 손실 특성 해석을 수행하였다.

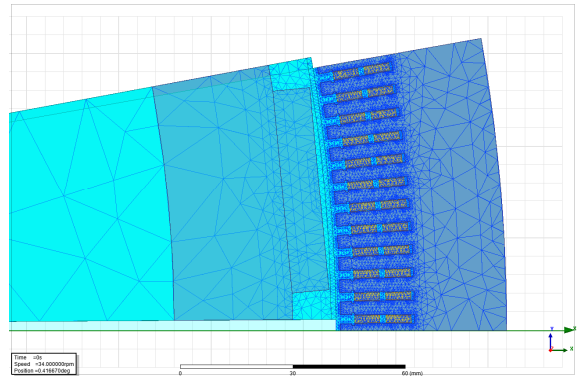


Fig. 1. FEM model

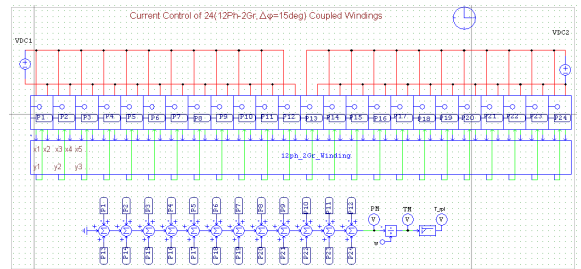


Fig. 2. Motor-inverter system modeling circuit

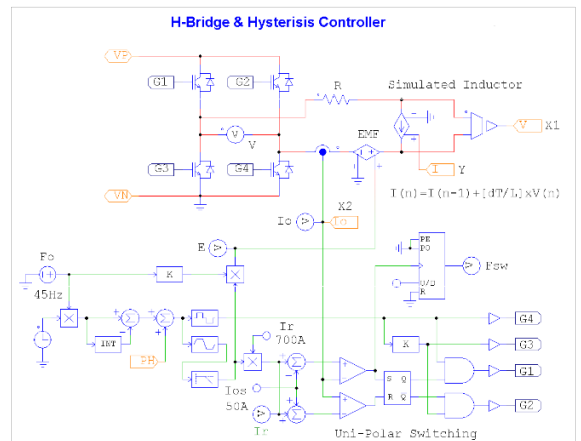


Fig. 3. H-bridge inverter modeling circuit

전동기를 구성하는 철심, 영구자석, 권선의 형상과 재질 정보를 이용하여 무부하시의 자속밀도분포, 역기전력 특성, 무부하 손실 등을 해석할 수 있고, 무부하 전류 입력을 추가하여 부하 인가시 출력 및 철손 특성을 해석할 수 있다. 시험 대상 전동기를 활용하여 유한요소 해석모델의 해석결과와 실제 무부하, 부하

시험을 통한 결과를 비교하여 해석 방법의 유효성을 확인하는 것이 본 검증 시험의 목적이다. Fig. 2는 PSIM을 활용하여 모델링한 전동기의 회로 구성을 나타내며 회전속도, 공급전압, 밴드폭, 전류 지령을 입력 방향으로 구현하였고, 전류, 전류리플, 토크, 토크리플, 출력 등을 결과 값으로 확인할 수 있다. H-bridge 회로로 구성된 개별 인버터 모듈들을 모델링하였고, 다상 전동기는 역기전력과 인덕턴스 행렬을 이용해 모델링하였다.

3.2 전류 제어 기법

전동기의 전류 지령을 다루기 위해서는 적절한 방식의 제어 기법을 사용하여야 한다. 본 연구에서는 복잡한 다상 권선을 안정적으로 제어하고 인버터 스위칭 손실과 도통 손실을 줄이기 위해 Hysteresis PWM 전류 제어 기법을 사용하였다. Hysteresis PWM 전류 제어 기법은 원하는 전류 지령에 상측(Upper) 및 하측(Lower) 밴드를 설정한 후에 밴드 내에서 전류를 스위칭하여 제어하는 방식이다. 이 방식은 Fig. 4에 나타나 있는 전류 제어 개념도처럼 전류가 상측 밴드까지 상승하여 맞닿으면 상전류 인가스위치가 꺼지고(Turn-off), 하측 밴드까지 전류가 하강하여 부딪히면 스위치가 켜지는(Turn-on) 방식이다.

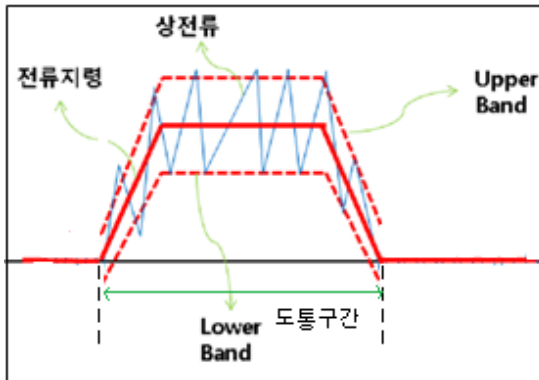


Fig. 4. Hysteresis PWM current control concept

Fig. 5는 본 연구에서 적용된 Hysteresis PWM 전류 제어의 스위칭 개념을 나타낸다. 전류 스위칭을 위해 기준 전류 값과 측정 전류 값의 비교를 하며, 이후 상호 보완적인 한 쌍의 스위치들을 작동시킨다. Hysteresis 제어 로직이 스위칭 명령을 내릴 때, 전류는 증가하거나 감소하며, 이 때 네 개의 스위치 중 한

쌍(G1 & G4)은 켜지고 다른 한 쌍(G2 & G3)은 꺼지며 각각의 전류 방향이 바뀌게 되는 알고리즘이다.

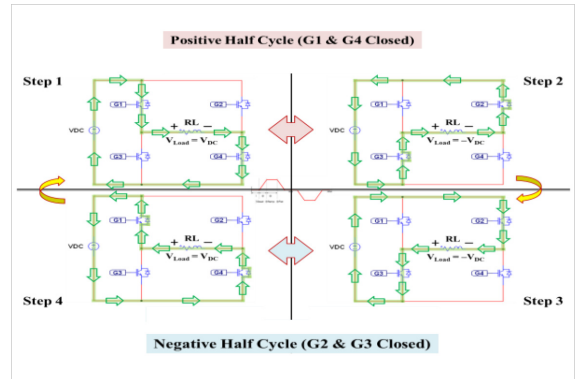


Fig. 5. Switching concept

4. 시험을 통한 효율 측정

4.1 시험 설비의 구성

본 연구에 사용된 시험 설비의 구성은 Table 1과 Fig. 6에 나타나있다. 주요 시험 설비는 시험 대상 전동기와 인버터, 부하용 전동기와 인버터, 시험 설비 제어기, 그리고 토크미터로 구성되어 있다.

전동기 출력은 토크미터를 이용해 회전속도와 토크를 측정하여 계산할 수 있다. 입력 에너지는 전동기 입력단에 전력분석기를 설치하여 입력 전류와 전압을 측정하여 입력 전력을 측정하였다.

이 시험에서 사용된 토크미터는 프랑스 SCAIME社의 DR-2112 모델로 0.1N·m에서 20,000N·m까지의 측정범위를 갖고 있으며 대상 전동기의 축과 부하용 전동기의 축에 커플링을 통해 맞물려 설치된다.

Table 1. Contents of the test equipment

구 분	정격속도	정격출력	비 고
전동기	150RPM	60kW	
인버터	-	60kW	
부하용 전동기	1800RPM	75kW	유도전동기 (Geared 1:12)
부하용 인버터	-	75kW	속도제어 0~1800RPM

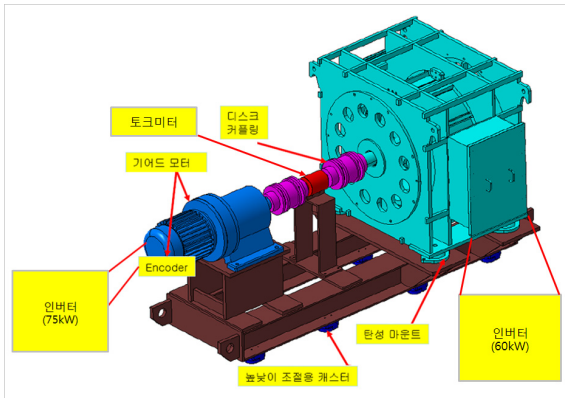


Fig. 6. Configuration of the test equipment

4.2 검증 절차

효율 해석의 유효성 검증을 위한 시험 절차를 Fig. 7에 나타내었다. 이를 위해 우선 전동기의 FEM 해석 모델을 구축하고 역기전력 특성 해석을 수행한다. 그 후 이 결과를 측정 값과 비교하여 해석모델의 기본적인 엄정성을 검증하고, 전동기의 회전속도 별로 무부하 손실해석을 수행한 후에 무부하 손실을 측정한다. 이후 부하 시험을 실시하여 전동기의 입력 전압과 입력 전류, 출력 토크와 속도를 측정하여 전동기 효율을 측정하고 해석결과와 부하 시험 결과를 비교하여 효율 해석의 유효성을 검증한다.

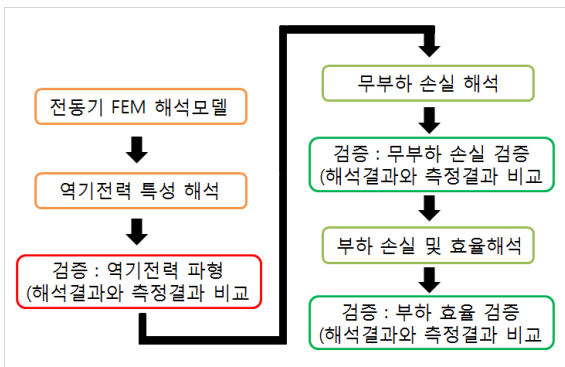


Fig. 7. Validation of test procedure

5. 시험과 결과분석

지정한 속도로 시험 대상 전동기를 구동하여 시스템 입력 전력, 입력 전류(인버터 출력 전력), 출력 토

크를 측정하여 효율을 계산하였다. 이 시험에서 해석과 시험 결과에 대한 신뢰성을 높이기 위해 20회의 해석 및 시험을 진행하여 얻은 결과 값을 평균한 값을 취하였다.



Fig. 8. Measurement of phase resistance and back-emf

우선 전동기 제작 오류를 확인하기 위하여 기본적인 상 저항 측정 시험을 진행하였다. 상저항은 권선 단자에서 전류계를 이용하여 측정하였다.

Table 2. Measurement result of phase resistance

상	기준저항[Ω]	측정저항[Ω]
A1	0.6	0.575
B1		0.572
C1		0.582
D1		0.585
E1		0.578
F1		0.571
G1		0.579
H1		0.579
I1		0.572
J1		0.568
K1		0.576
L1		0.57

- 상 저항 해석결과 : 0.6Ω
- 해석 및 측정 평균편차 : 약 0.7%

상 저항의 해석결과는 0.6Ω이고 측정결과는 기준치에서 약 0.7%의 편차를 갖고 있어 해석모델과 측정결과가 유사하여 전동기의 기본적인 제작에 문제가 없음을 확인하였다.

역기전력 해석은 유한요소 해석법을 이용하였으며, 역기전력 시험은 단자함에 측정 장비를 연결하여 오실로스코프를 이용하여 진행하였다. 부하발전기를 이용해 전동기 회전자를 정격속도로 회전시킨 후 권선 단자에 발생하는 역기전력을 측정하였다. 역기전력 최대 전압 해석 및 측정결과를 Fig. 9, 10에 나타내었다.

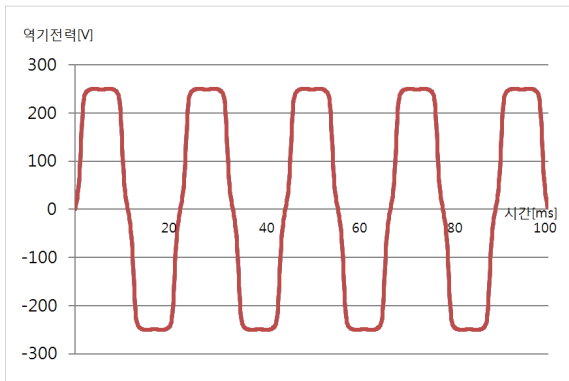


Fig. 9. Analysis result of back-emf

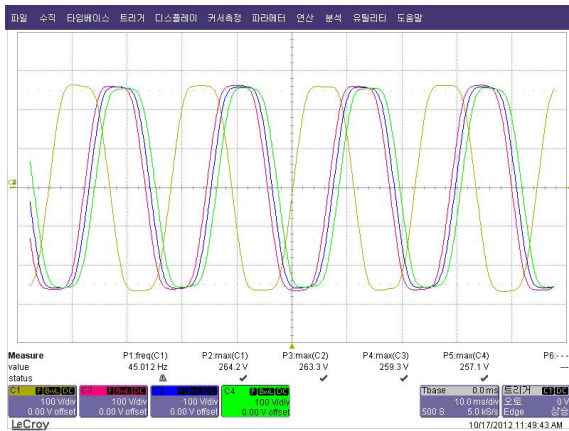


Fig. 10. Measurement result of back-emf

- 역기전력 최대전압 해석결과 : 260V
- 역기전력 최대전압 측정결과 : 259.225V

이중화된 상 권선의 각 그룹별 역기전력 최대전압 해석결과는 260V이고, 개별적인 측정결과를 Table 3에

도시하였다. 측정된 역기전력에는 해석 파형에 비해 제작시 적용된 스큐(Skew)에 의한 영향을 확인할 수 있다. 유한요소 해석에서의 역기전력은 상별로 동일하지만 실제 제작된 전동기에서는 형상의 오차, 고정자-회전자가 동심도 오차, 권선 제작 오차 등으로 인해 상별로 약간의 역기전력 편차가 나타나게 된다. Group 1, 2의 각 상들에 대한 측정결과는 해석결과를 기준으로 약 2.6%의 오차범위 내에 분포하고 있음을 알 수 있었다. 결과적으로 해석결과와 시험결과의 차이가 매우 미미하여 전동기의 전자계 해석모델이 유효함을 확인하였다.

Table 3. Measurement result of back-emf(group1)

상	속도[RPM]	주파수[Hz]	최대 전압[V]
A1	150	45	264.4
B1	150	45	253.5
C1	150	45	261.9
D1	150	45	258.5
E1	150	45	256.7
F1	150	45	265
G1	150	45	253.9
H1	150	45	263.3
I1	150	45	259.3
J1	150	45	257.1
K1	150	45	263
L1	150	45	253.5

역기전력 측정시험에 이어 무부하 상태에서의 손실 측정시험을 진행하였다. 무부하손실의 해석은 철심 제조사의 주파수별 철손 데이터를 이용하여 유한요소 해석을 통해 각 속도별로 무부하철손을 계산하여 수행하였다. 무부하손실 측정 시험은 전동기의 회전자를 부하발전기를 이용하여 목표 RPM으로 회전시킨 후 토크미터에 측정되는 토크 값으로 무부하손실을 측정하여 진행하였다. Fig. 11과 Table 4는 해석과 시험결과를 나타낸 것으로 전동기를 무부하로 운전하며 회전속도 별로 해석손실과 측정손실을 비교해본 결과, 속도별로 오차범위에 다소 차이가 있으나 평균적으로 약 14%의 오차를 나타내었다. 손실 해석결과가 시험결과에 비해 다소 크므로 전동기의 효율을 보수적으로 예측하는데 유용함을 확인할 수 있다.

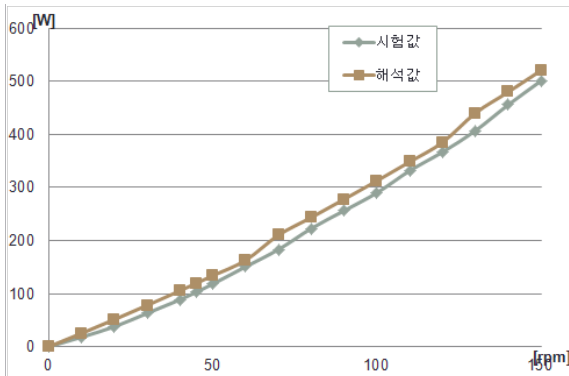


Fig. 11. No-load loss measurement result

Table 4. No-load loss analysis and test result

속도	토크[Nm]	해석손실[W]	측정손실[W]
30	20.1	78.1	63.1
50	22.6	134	118.3
150	31.9	520.7	501.1

부하시 효율 해석은 유한요소 해석을 통해 수행하였다. 계산된 출력 토크와 회전속도를 이용해 출력을 계산하고, 상전류와 저항 값으로 동손을 계산, 철심의 철손 데이터를 이용해서 철손 계산을 하여 효율을 계산하였다.

$$\text{해석효율 } \eta = \frac{T\omega}{T\omega + P_{cop} + P_{iron}} \quad (1)$$

효율 시험은 부하발전기를 이용해 속도별로 지정된 부하를 가한 상태에서 토크미터를 이용해 출력을 측정하고, 전동기 입력단에 전력분석기를 연결하여 입력 전력을 측정하여 효율을 계산하여 수행하였다. 효율 해석결과와 시험결과는 각각 Table 5, 6에 나타나있다.

$$\text{측정효율 } \eta = \frac{T_o\omega}{V_i I_i} \quad (2)$$

시험 결과, 효율은 전동기의 회전속도와 출력 증가와 함께 높아지며, 해석결과가 측정결과에 비해 다소 낮은 특성을 보이고 있다. 본 연구결과에서는 효율 해석 값과 시험 값이 약 1.66%의 오차를 보이고 있으며, 효율 해석결과가 시험결과에 비해 다소 낮아 전동기

의 효율을 보수적으로 예측하는데 유효함을 확인할 수 있다.

Table 5. Load efficiency analysis result

속도[RPM]	효율 해석결과[%]
30	86.2
50	88.8
150	93.2

Table 6. Load efficiency test result

속도	입력[W]	토크[Nm]	출력[W]	효율[%]
30	4004.4	1080.7	3458	86.36
50	6242.4	1056.4	5636	90.29
150	64000	3837	60585.6	94.67

6. 결론

이중화된 독립 다상 BLDC 전동기에 대한 효율 해석 유효성 검증에 대한 연구를 수행하였다. 정격속도 150RPM, 정격출력 60kW의 용량으로 설계된 전동기에 대해 FEM을 이용하여 해석모델을 구축하고 역기전력 해석과 손실 계산을 수행하였다. 전동기 구동을 위한 전류 지령 제어는 Hysteresis PWM 기법을 사용하였다. 제안된 전동기 설계와 해석모델로 상 저항 및 역기전력 최대전압 측정을 실시하여 미미한 수준의 오차를 얻어 기본 제작성 및 설계 대한 유효성을 얻었다. 무부하 손실 시험 및 부하 효율 측정 시험을 통해 전동기 효율 해석 방법이 전동기 효율을 보수적으로 예측하는데 유효함을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 해석모델의 유효성이 입증되었으므로 추후에는 전류 제어 알고리즘의 변화에 따른 효율 예측이 가능하다.

References

[1] Yeong-Kyung Kong, "The Trend of Development on Propulsion System of Electric Propulsion Ship," Journal of the Korean Society of Marine Engineers,

- Vol. 27, No. 5, pp. 548-554, 2003.
- [2] Jang-Mok Kim, Jin-Seok Oh, Hyung-Shic Oh, Kwan-Jun Jo, "Modeling and Simulation of Large Permanent Magnet Propulsion Motor Drive System," Proceedings of the Korean Society of Marine Engineering Conference, pp. 151-152, 2007.
- [3] Jin-Seok Oh, Heui-Han Yoo, Jang-Mok Kim, Kwan-Jun Jo, Jun-Ho Kwak, Hyung-Shic Oh, "Characteristic Analysis of Inverter for Multi-phase BLDC Motor," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31, No. 8, pp. 983-989, 2007. 11.
- [4] Saliah Baris Ozturk and Hamid A. Toliyat, "Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Non-Sinusoidal Back-EMF," Electrical Machines & Drives Conference, 2007.
- [5] Kai Sheng Kan and Ying-Yu Tzou, "Adaptive Wide Angle PWM Control Strategy of BLDC Motor Drive for Efficiency Optimazation and Wide Speed Control Range," Energy Conversion Congress and Exposition, 2011.
- [6] Jagat Jyoti Rath, Suman Saha and Hanumath Prasad Ikkurti, "Sliding Mode Scheme for Speed and Current Control of Brushless DC(BLDC) Motor," ICAESM, 2012.
- [7] Jae-Bum Park, Matthew Johnson, Sun-Jung Park, Yeong-Kyung Kong, Jae-Goo Bin, and Hamid A. Toliyat, "Integrated Troque Ripple Analysis Method for Multi-Phase Motors," International Electric Machines & Drives Conference, 2013.