

고토크·비상운전기능을 가진 다상BLDC모터 및 제어기개발

허동렬*, 황윤길**¹, 안기주***, 박형삼****, 신동률**²

A Development of Multi-Phase BLDC Motors and Controllers with High Torque and Emergency Driving

Dong-Ryol Hur*, Yun-Gil Hwang**¹, Gi-Ju Ahn***, Hyeong-Sam Park****, and Dong-Ryul Shin**²

본 논문은 중소기업청이 주관하는 구매조건부과제로 지원 받아 연구하였습니다.

요약

본 논문은 상 BLDC(다상 BLDC, Multi-phase Brushless Direct Current) 모터는 모터 상과 제어기의 상을 분배하여 기동하므로 고효율과 비상운전 추진체에 널리 사용된다. 특히 잠수함이나 전기자동차 등 고효율과 안전성(비상운전) 및 저소음을 요구하는 분야에 사용된다. 모터 권선 및 제어기를 다상($3n, n=자연수$)으로 만들고 제어하므로 열 손실을 줄여 고효율을 구현하고, n 상중 한상이 끊어져도 구동하는 비상운전 개념을 설계 및 제어기에서 구현하고자 한다. 다상으로 나눔으로 최대 출력 토크에서 스테이터 권선 손실의 증가를 최소화하여 토크 리플을 감소한다. 제어기는 부분상 여자 제어를 하므로 최대 효율을 구현하였으며, 이를 실측을 통하여 상 제어를 구현하므로 상 손실 비율로 감소하지 않음과 한상이 끊어져도 나머지 상에 의해 구동함을 즉, 비상운전에 탁월함을 실측을 통하여 검증하였다.

Abstract

In this paper, a multi-phase brushless direct current (BLDC) motor is widely used for high efficiency and emergency operation propellants because it operates by distributing the phases of the motor and the controller. In particular, it is used in areas that require high efficiency, safety (Emergency driving), and low noise, such as submarines and electric vehicles. Since the motor winding and controller are made and controlled in multi-phase (n =natural number, $3n$), high efficiency is achieved by reducing heat loss, and the concept of emergency operation that operates even when one of the n -phase is finished is designed and implemented in the controller. Reduce torque ripple by minimizing increase in stator winding loss at maximum output torque by multiphase division. The controller implements crime efficiency because it partially controls the excitation, and since phase control is implemented through actual measurement, it does not decrease to the phase loss ratio and is driven by the rest of the phase even after the Korean version is finished, that is, it is excellent in emergency operation is excellent measurement.

Keywords

high multi-phase brushless direct current motor, propulsion motor, emergency driving, multi-phase controller, zegles-nichols theory control

* 경남정보대학교 전기과 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2113-1711>
** (주)엔에스테크(**² 교신저자)
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0003-1550-1345>
- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0003-2614-2955>
*** (주)유일 연구소장
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0637-4081>

**** (주)미도 연구소장
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2826-4820>

• Received: Nov. 23, 2023, Revised: Jan. 31, 2024, Accepted: Feb. 03, 2024
• Corresponding Author: Dong-Ryul Shin
23,1502, Sejeon-ro 57beon-gil (Hongik Billel), Busanjin-gu, Busan
Tel.: +82-51-311-2031, Email: g9775996@hanmail.net

1. 서 론

세계적으로 환경 규제와 탄소 중립과 더불어 화석연료 에너지에서 배터리인 전기에너지로 시스템이 변화하고 있다. 이에 전기자동차 모터나 선박 모터같은 대형화 기술에 고효율, 안정성을 가진 대용량 전기 추진체가 개발되고 있다. 특히 이들은 거리의 문제, 소음공해 등으로 효율이 높고, 조용하며 추진체의 고장시 수리하는 곳까지 이동해야 하는 문제 등으로 기계적 소음이 심한 내연 기관 보다 조용한 전기 추진체를 꾸준히 연구하고 있는 추세이다[1][2].

구동 드라이버는 반도체 스위칭 소자의 고장이나, 모터의 고정자 또는 회전자 고장 및 축의 며 비틀림 등으로 인해 토크 리플 성분이 발생하게 되면 이는 전기 모터 구동 시스템의 진동과 소음으로 야기한다. 또한 모터의 효율성 및 토크 리플에 관한 연구도 꾸준히 이루어지고 있다. 이런 대안으로 BLDC 모터의 사용 빈도가 증가하고 있다. 모터의 리플 소음이 발생하는 경우 소음문제를 중요시 하는 곳에서는 치명적이기 때문에 리플 감소에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다. 대부분의 리플 저감 방식은 전류 크기나 위상각 제어 방법을 주로 사용하고 있으나, 여기서는 다상 원리를 이용하여 토크 리플을 저감하고자 한다. 이 방법은 효과적으로 토크 리플을 감소하고 제어기로는 전류량 증가에 효과적이기 때문에 더욱더 활발한 연구와 논의가 이루어지고 있다[3]-[5]. 또한 추진 시스템이 고장시 2차 사고에 의한 안전사고가 발생하므로 이를 해결하는 방법이 연구되고 있다[6]. 이를 해결하기 위해서 다상구조로 한 쌍이 고장나도 나머지 살아있는 상에 의해 수리하는데 까지 구동하는 구조인 다상 구조가 연구되고 있다. 그래서 본 연구에서는 다상 BLDC 모터 구동 시스템에서 토크 리플을 감소시키기 위한 새로운 제어 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 상 개방 고장 상황에서 살아있는 여자상 전류의 크기인 진폭과 위상각을 제어하므로 전류 증가를 억제하고, 권선의 동손을 최소화하면서 토크 리플을 감소시키는 것을 목표로 한다[7][8]. 상 개방 고장이 발생한 위상으로 인해 리플이 발생하게 되면 전체 출력 토크 및 여자 전류를

억제하여 대칭되는 상을 제외한 모든 상전류를 선택하여 제어한다.

II. 이론고찰

2.1 다상 BLDC전동기의 등가회로

그림 1은 다상형 구조를 가진 BLDC(Brushless Direct Current:이하 BLDC) 모터의 전체 조립도를 나타내며, 그림 2는 모터의 실물과 그림 3은 사이즈를 나타낸다. 기존 모터의 권선구조인 Y, Δ방식을 벗어나 AC모터처럼 고속이 가능한 분포권과 DC모터처럼 고토크가 가능한 집중권의 융·복합된 다상형 권선구조는 한상이상이 고장나도 한상만 살아있으면 수리하는 곳 까지 구동할 수 있는 안정성이 뛰어난 모터 구조이다. 또한 한 상씩 고장이 날 때 출력과 효율을 본 실험을 통하여 검증하고 있다.

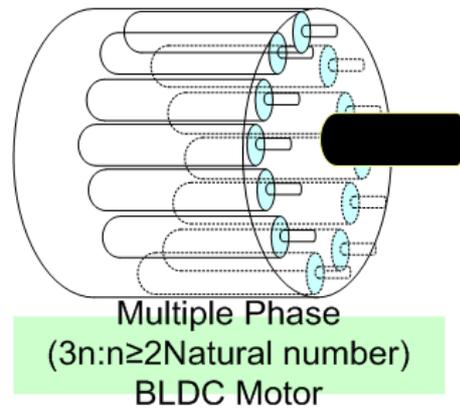


그림 1. 다상 BLDC 내부구조
Fig. 1. Multi-phase BLDC internal structure



그림 2. 실그림
Fig. 2. Real picture

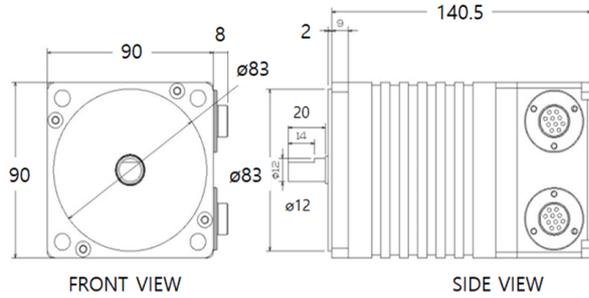


그림 3. 다상 BLDC 도면 사이즈
Fig. 3. Multi-phase BLDC drawing size

그림 4는 다상 BLDC모터의 권선 결선도를 비교하고 있다. (a)는 일반적인 Y권선으로 한상이 끊어지면 구동을 멈추게 되나, (b)는 다상 구조로 한상이 끊어져도 나머지 상에 의해서 구동하게 되는 권선도이다.

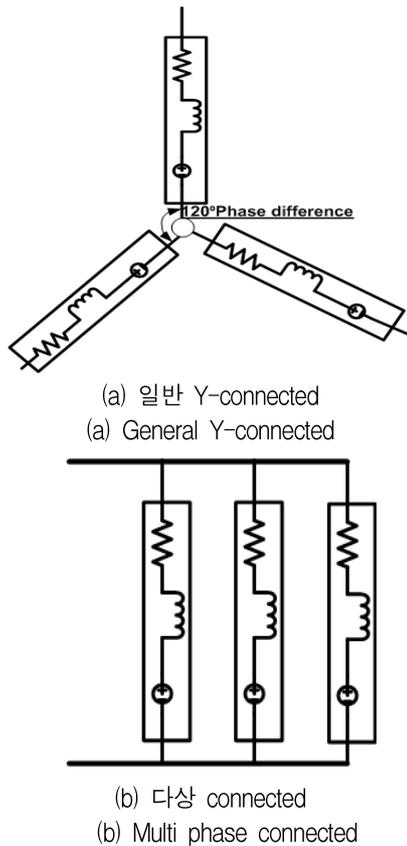


그림 4. 코일 권선 비교도
Fig. 4. Coil winding comparison

2.2 토크 방정식

식 (1)은 권선 전류에서 전동기의 토크로 발생되는 부분의 토크 방정식이다. 토크는 전류와 비례한

다고 근사와 할 수 있기 때문에 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_e = k_T I \tag{1}$$

$$\tau_e = e_u i_u + e_v i_v + e_w i_w$$

τ_L : 부하토크

τ_c : 전동기의 토크

k_T : 토크상수 [Nm/A]

ω_m : 각속도

역기전력은 식 (2)는 식 (3)과 같이 각속도와 자속, 그리고 역기전력의 사다리꼴 형태를 반영하여 표현할 수 있다. 또는 역기전력은 전동기의 각속도에 비례하기 때문에 역기전력 상수를 통해 비례식으로 표현할 수도 있다.

$$\begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} = \omega_m \lambda_m \begin{bmatrix} f_u(\theta_e) \\ f_v(\theta_e) \\ f_w(\theta_e) \end{bmatrix} = k_e \omega_m \tag{2}$$

λ_m : 자속

ω_m : 각속도

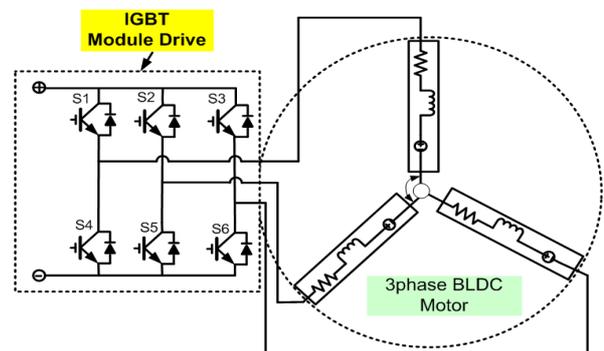
θ_e : 회전자 위치

$f(\theta_e)$: 사다리꼴 방정식

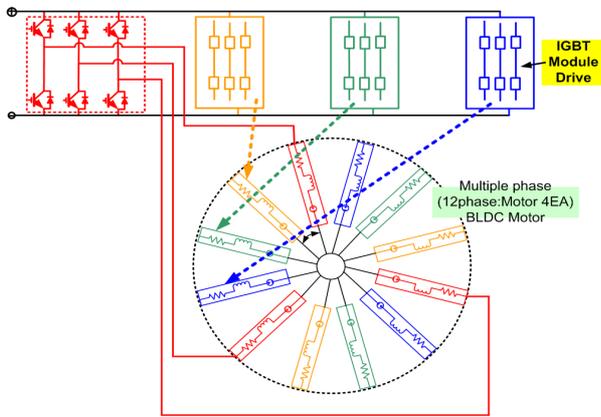
k_e : 역기전력 상수

$$f(\theta_e) = \begin{cases} 6\theta_e/\pi & 0 \leq \theta_e < \pi/6 \\ 1 & \pi/6 \leq \theta_e < 5\pi/6 \\ -6\theta_e/\pi + 6 & 5\pi/6 \leq \theta_e < 7\pi/6 \\ -1 & 7\pi/6 \leq \theta_e < 11\pi/6 \\ 6\theta_e/\pi - 12 & 11\pi/6 \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \tag{3}$$

그림 5(a)는 일반적인 BLDC의 제어 블록도이며, (b)는 n상이 가능한 BLDC의 제어 블록도로 비교하고 있다.



(a) 일반BLDC제어 블록도
(a) General BLDC control block diagram



(b) 다상BLDC 제어 블록도
 (b) Multi phase BLDC control block diagram
 그림 5. 제어 블록도 비교
 Fig. 5. Control block diagram comparison

III. 제어 알고리즘

3.1 다상 BLDC 엔코드원리

그림 6은 BLDC모터의 토크제어를 위한 엔코더 구성과 동작 원리를 나타내며, 센서부와 엔코더부의 동작은 ON/OFF 신호로 엔코더가 도통 시 ON신호, 비 도통 시 OFF신호로 동작한다. 포토인터럽트를 사용하며 기존의 복잡한 펄스 엔코더나 타코 제너레이터를 사용하지 않고도 단순한 구조로 동일한 역할을 수행할 수 있다.

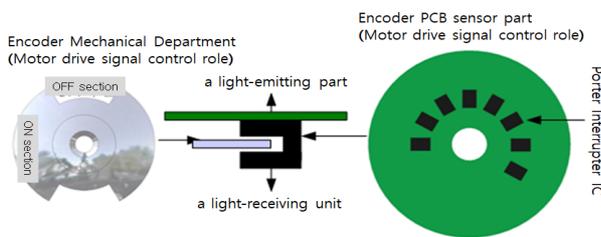


그림 6. 다상 엔코드 원리
 Fig. 6. Principle of multi-phase N-code

3.2 다상 BLDC 제어 알고리즘

그림 7은 스위칭 원리이며, 한 구간 360°의 A, B, C, D상의 신호파형을 나타낸다. 파란색 부분은 부분과 제어원리로 사각형으로 하는 제어원리보다 시작과 끝단의 열 손실을 줄여 구동체의 안정성을 구현하였다. 위치 제어를 위해 시간영역에서의 비례,

적분 및 미분상수를 결정하는 Ziegles - Nichols법인 P,I,D Gain값의 임계이득(Pcr, critical period) 튜닝 방법으로 PID제어기를 설계하였다.

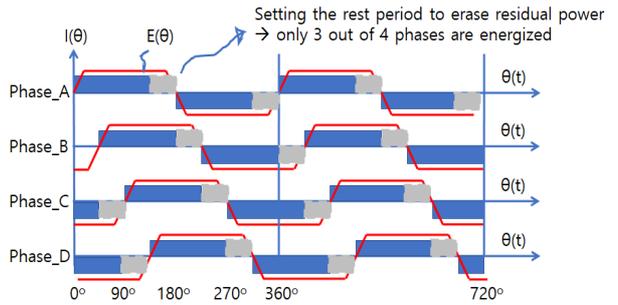
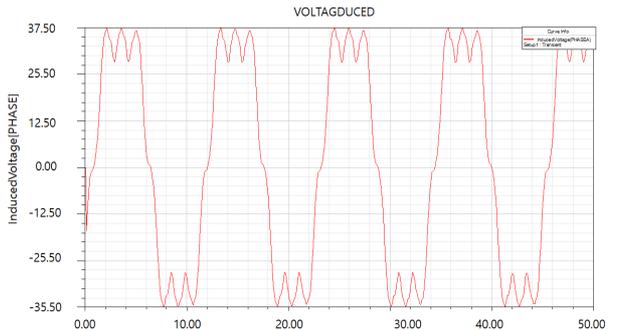


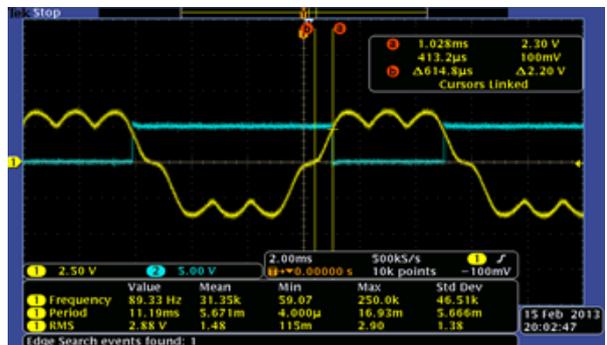
그림 7. 다상BLDC 스위칭파형
 Fig. 7. Multi-phase BLDC switching waveform

3.3 역기전력 시뮬레이션과 실측 비교

그림 8은 그림 7을 바탕으로 1상인 A의 360°한 구간 안에서 역기전력을 나타낸 것으로 사용전압은 28.8Vdc이고, Cycle time은 11.19ms이다.



(a) 시뮬레이션
 (a) Simulation



(b) 실측
 (b) Actual measurement

그림 8. 다상 BLDC 역기전력 파형
 Fig. 8. Multi-phase BLDC counter electromotive force waveform

그림 8은 역기전력의 시뮬레이션과 실측 파형으로 설계가 일치함을 알 수 있다. 3상 12슬롯이라 36 슬롯보다는 리플 파형이 더 생기나 실측을 통해 실험한 결과 안정된 속도 파형을 얻을 수 있었다. 이 결과로 모터의 안정된 토크를 얻기 위해서는 슬롯 수를 늘려야 됨을 알 수 있었다.

3.4 토크와 속도 시뮬레이션 특성

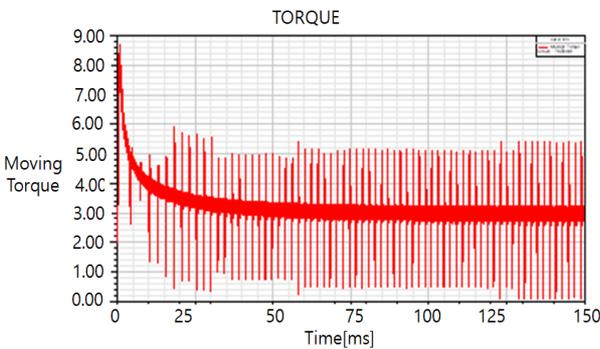


그림 9. IPM BLDC의 토크 파형
Fig. 9. Torque waveform from IPM BLDC

그림 9는 토크파형으로 9kg·m에서 3kg·m로 안정

화 되고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 10은 rpm 속도 파형으로 토크 안정시 속도도 같이 안정화됨을 시뮬레이션을 통해 알 수 있다.

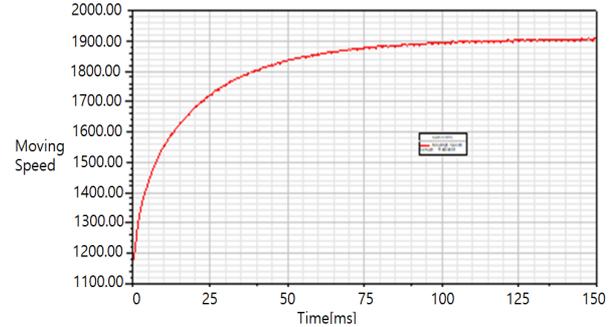


그림 10. IPM BLDC의 속도 파형
Fig. 10. Speed waveform of IPM BLDC

3.5 제어기 구성도

그림 11은 다상 BLDC의 제어기 구성도를 나타낸다. 본 제시한 모터가 다상이므로 제어원리도 1상에 대한 제어를 먼저 구성하여 이를 다상으로 구성하면 된다. 사용된 프로세서는 Atmega 128이며, 논리회로를 구성하고 스위칭소자는 IGBT를 사용한다.

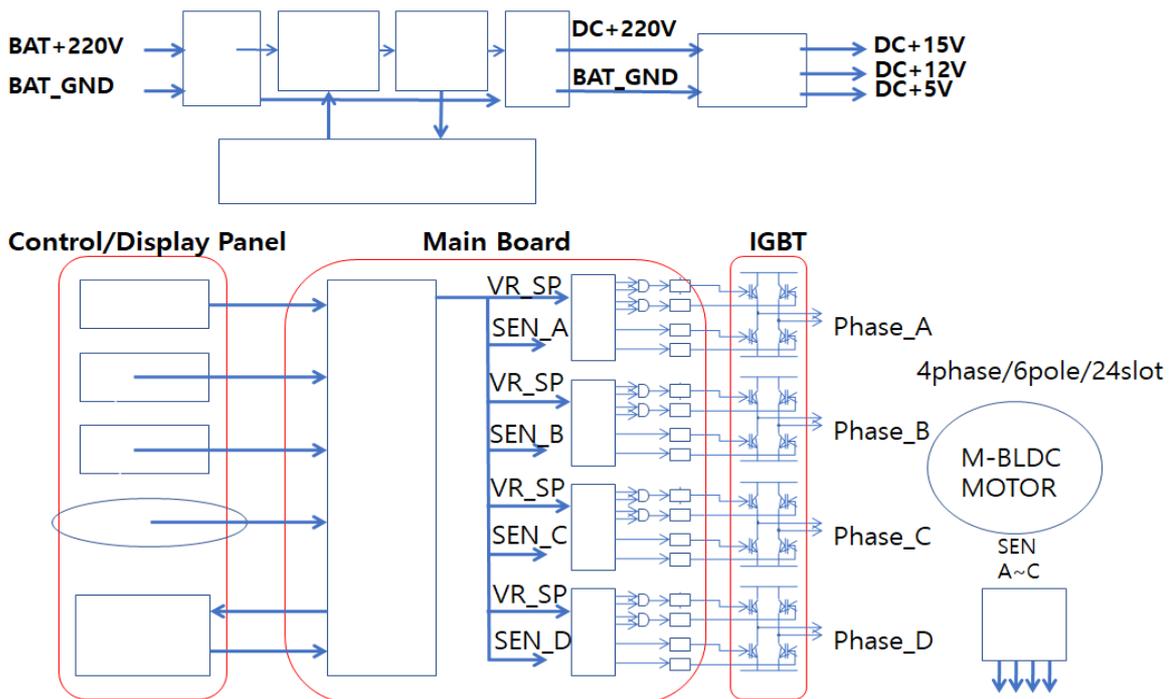


그림 11. 다상BLDC 제어기 구성 블록도
Fig. 11. Block diagram of Multi-phase BLDC controller configuration

IV. 실험결과 및 고찰

4.1 사양 및 설계

다음은 표 1과 같이 본 실험에 제작된 모터 제원을 나타내고 있다.

표 1. IPM BLDC 모터 사양
Table 1. IPM BLDC motor specifications

Motor specification	3phase, 12pole, Nd
winding specification	ø0.4×2wire, 40turn, 3parallel
stator specification	OD84mm, ID44mm, length64mm
Number of slots	12SLOT
Rotor specification	OD43mm, ID16mm, length64mm

4.2 시험 장면



그림 13. 시험 사진
Fig. 13. Picture for testing

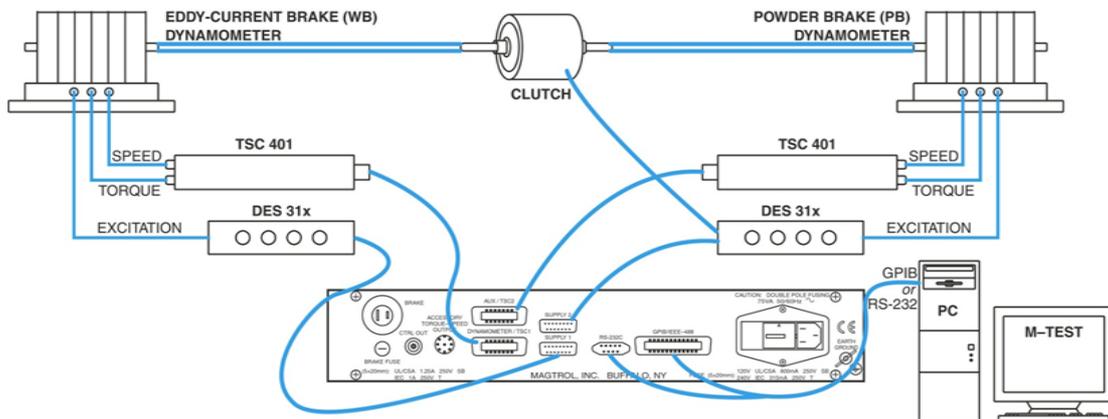
그림 12는 동력실험을 위한 시험구성도를 나타내고, 시험 장비는 1kW 다이내모메트로 미국의 HD-515를 사용하고, 타코메타는 FT-3V, 디지털 온습도계는 MHB-382SD, 그밖에 직류전원공급장치와 모터 컨트롤 유닛을 사용하였다. 그림 13은 제안된 모터의 시험 장면이다.

4.3 시험 결과

본 실험 결과는 KORAS인증 기관인 조선기자재 연구원에서 시험하였으며 다상 구조를 가진 모터와 드라이버의 상이 끊어져도 나머지 상이 구동하는지에 대하여 실험하고 결과를 도출하였다. 먼저 다상 BLDC모터의 출력 특성을 그림 14에 나타내고, 다상 모터이므로 그림 14는 기본 3상에 대한 기준 파형으로 효율과 토크 등 기본 파라메타를 나타내고 있다. 제안된 모터의 기본 3상 출력은 710W이다.

실험 방법은 한 상 식 끊어가며 3상과 (3-1)2상, (3-2)1상씩으로 구동시험과 효율 및 출력 특성에 대한 결과치를 그림 15~16에 나타내고 있다. 그림 15는 3상중 한상이 끊어졌을 때 구동 파형과 파라메타를 나타낸 것으로 이론상 한상이 멈추면 출력은 66%로 떨어져야 하나 680W로 95.7%이다. 거의 한상이 끊어져도 출력은 변동이 없음을 보여주고 있다. 이는 안정성이 뛰어난을 보여주고 있다.

그림 16은 500W로 70.4%의 출력과 파라메타 특성을 보여주고 있다. 이는 한상만 살아 있어도 2차 사고를 예방하고 수리장조까지 구동하는 안정성이 탁월함을 실측을 통하여 보여주고 있다.



DSP6001 Connected to Eddy-Current and Powder Brake Dynamometer (Tandem Setup)

그림 12. 시험 구성도
Fig. 12. Test configuration

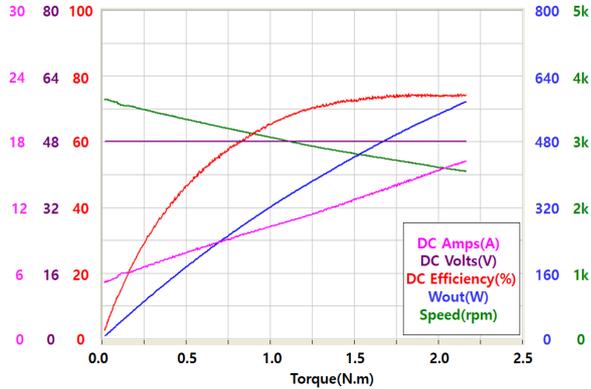


그림 14. 3상 ON - 710W
Fig. 14. Three-phase ON - 710W

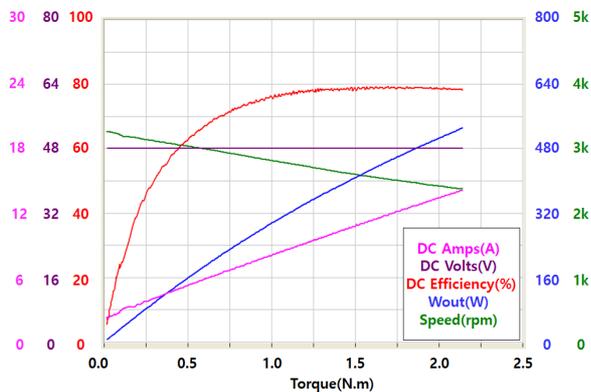


그림 15. 2상 ON, 1상 오픈 - 680W
Fig. 15. Two-phase ON, One-phase OPEN - 680W

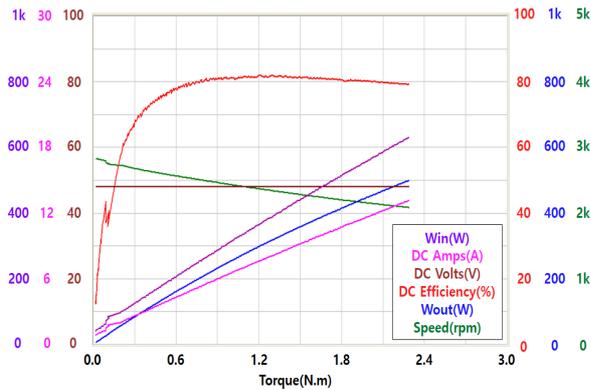


그림 16. 1상 ON, 2상 오픈 - 500W
Fig. 16. One-phase, Two-phase OPEN - 500W

V. 결 론

대형 구조물이나 선박 등은 소음과 진동, 안전성이 부족한 내연기관 시스템에서 벗어나 클린에너지인 전기 추진 시스템을 사용하는 형태로 변화하고 있다. 특히 안전성 위주의 시스템 같은 경우에는 일

반적인 모터시스템은 상개방 고장이 발생하면 2차 사고로 연결되어 안전성과 직결된다. 그래서 시스템의 지속적으로 오랜 시간 동안 운전할 수 있으며 수리를 요구하는 곳까지 운행할 수 있는 시스템과 동시에 고효율, 정숙함을 유지하는 능력이 강조된다.

다상 BLDC 모터에서 상개방 고장 발생 시 다수의 건전 상전류의 위상각과 크기를 제어하여 토크 리플과 상전류를 감소시키는 제어 방법을 제안하였다. 또한 상고장시 구동하는 독립시스템을 실측을 통하여 검증하고 안전성을 요구하는 산업에 적용가능성을 제시하였다.

References

- [1] H. Xiong, Q. Wu, Y. Rang, G. Meng, H. Li, and L. Zhou, "Analysis and Simulation of High Power Multi Phase BLDC Motor", 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), Deng Feng, China, pp. 3751-3754, Aug. 2011. <https://doi.org/10.1109/AIMSEC.2011.6010040>.
- [2] H.-C. Jung, G.-J. Park, D.-J. Kim, and S.-Y. Jung, "Optimal design and validation of IPMSM for maximum efficiency distribution compatible to energy consumption areas of HD-EV", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 53, No. 6, pp. 23, Jun. 2017. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2660524>.
- [3] H. Park and Y. Suh, "Fault-tolerant control strategy for reduced torque ripple of independent twelve-phase BLDC motor drive system under open-circuit faults", 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1109/ECCE44975.2020.9235949>.
- [4] A. Akay, P. Lefley, and M. Kansara, "Open-circuit fault-tolerant control of five-phase PM machine based on current space vectors", 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Istanbul, Turkey, Sep. 2020. <https://doi.org/10.1109/IEPS51250.2020.9263138>.

[5] G. Feng, et al., "Open-phase fault modeling and optimized fault-tolerant control of dual three-phase permanent magnet synchronous machines", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 34, No. 11, pp. 29, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2900599>.

[6] J.-J. Moon, W. Lee, S.-W. Park, and J.-M. Kim, "Fault tolerant control method of seven-phase BLDC motor in asymmetric fault condition due to open phase", 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), Seoul, Korea, pp. 1-5, Jun. 2015. <https://doi.org/10.1109/ICPE.2015.7167989>.

[7] H. Qiu-Liang, C. Yong, and X. Li, "Fault-tolerant control strategy for five-phase PMSM with third-harmonic current injection", IEEE ACCESS, Vol. 6, pp. 58501-58509, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2873603>.

[8] Y.-G. Kim, C.-B. Bae, J.-M. Kim, and H.-C. Kim, "Efficiency improvement by Changeover of Phase Windings of Multiphase Permanent Magnet Synchronous Motor with Outer Rotor type", 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Palm Springs, CA, USA, Feb. 2010. <https://doi.org/10.1109/APEC.2010.5433683>.

저자소개

허 동 렬(Dong-Ryol Hur)



2001년 8월 : 동아대학교
전기공학과 대학원
졸업(공학박사)
2012년 2월 ~ 2018년 2월 :
(주)이쓰리엑스퍼트 대표이사
2018년 2월 ~ 현재 :
경남정보대학교 전기과 교수

관심분야 : 전력 및 제어 시스템, IOT, 모터제어

황 윤 길 (Yun-Gil Hwang)



2001년 2월 : 동아대학교
전기공학과(공학사)
2005년 10월 ~ 현재 :
(주)티앤에스테크 대표이사
관심분야 : 용접로봇/모니터링,
모터제어

안 기 주 (Gi-Ju Ahn)



1999년 8월 : 전북대학교
경영학과(학사)
2012년 9월 : 목포대학교
기계공학과(공학석사)
2012년 2월 ~ 현재 : (주)유일
연구소장
관심분야 : 기계, 조선, AI 자동화
로봇

박 형 삼 (Hyeong-Sam Park)



2017년 8월 : 전남대학교
컴퓨터공학과(박사수료)
2018년 4월 ~ 현재 : (주)미도
연구소장
관심분야 : 용접로봇머신,
전기모터, 컴퓨터

신 동 루(Dong-Ryul Shin)



2001년 2월 : 동아대학교
전기공학과(공학박사)
2018년 3월 ~ 2020년 2월 :
(주)이앤아이 연구소장
2020년 3월 ~ 현재 :
(주)티앤에스테크 연구소장
관심분야 : 용접로봇 및 모니터링,
모터제어