



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2017년 8월
석사학위 논문

전기자동차 구동을 위한 BLDC 고효율 모터 개발에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계공학과

정 보 원

전기자동차 구동을 위한 BLDC 고효율 모터 개발에 관한 연구

A Study on the Development of BLDC High
Efficiency Motor for Electric Vehicle Drive

2017년 8월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

정 보 원

전기자동차 구동을 위한 BLDC 고효율 모터 개발에 관한 연구

지도교수 차 용 훈

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 4월

조선대학교 대학원

기계공학과

정 보 원

정보원의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 최 병 기 (인)

위 원 조선대학교 교수 성 백 섭 (인)

위 원 조선대학교 교수 차 용 훈 (인)

2017년 5월

조선대학교 대학원

목 차

List of tables	IV
List of figures	V
Abstract	IX

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구방법	5

제 2 장 관련이론

2.1 영구자석의 종류 및 특징	6
2.1.1 영구자석의 종류	6
2.1.2 BLDC 희토류 영구자석의 특징	11
2.2 BLDC 모터 및 구조	12
2.2.1 BLDC 모터	12
2.2.2 BLDC 모터 구조	13
2.2.3 BLDC 모터 특성	15
2.2.4 BLDC 모터 구동	17

2.3 BLDC 모터 속도 제어 시뮬레이션 23

2.4 유한 요소법에 의한 BLDC 모터의 해석 25

 2.4.1 전자장 지배방정식 25

 2.4.2 Maxwell stress tensor를 이용한 토크 계산 26

 2.4.3 Maxwell 방정식 및 경계조건 28

제 3 장 실험 및 해석

3.1 BLDC 모터 32

 3.1.1 BLDC 모터의 모델링 32

 3.1.2 BLDC 모터의 설계 및 제작 36

 3.1.3 BLDC 모터의 다이내모 성능실험 40

3.2 BLDC 모터 드라이버 44

 3.2.1 BLDC 모터의 드라이버 구성 44

 3.2.2 BLDC 모터의 제어부와 구동부 48

3.3 PSIM 프로그램을 이용한 제어기 시뮬레이션 57

 3.3.1 홀 센서를 이용한 BLDC 모터의 속도 제어 시뮬레이션 57

 3.3.2 BLDC 모터의 해석 결과 59

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 BLDC 모터의 성능평가 64

4.2 BLDC 모터의 홀 센서 각도에 따른 성능평가 67

제 5 장 결론 74

REFERENCES 75

List of tables

Table. 1.1 Environment-Friendly Vehicle Market Forecast by manufacturer(Material : USA)	1
Table. 1.2 Environment-Friendly Vehicle Market Forecast by manufacturer(Material : HIS)	2
Table. 1.3 Environment-Friendly Vehicle Market Forecast by manufacturer(Material : Hyundai Motor)	2
Table. 2.1 Comparison of BLDC motor and DC motor	16
Table. 2.2 Comparison of BLDC motor and AC induction motor	16
Table. 3.1 Specification of Sator and Rotor	38
Table. 3.2 BLDC motor specification	38
Table. 3.3 2WB115+EK+2PB115 Dynamometer Motor Test Equipment	40
Table. 3.4 DC power supply system	41
Table. 3.5 Property of test specimen (Nd-Fe-b)	59
Table. 4.1 Unit of dynamometer	65
Table. 4.2 BLDC motor performance measurement result	67

List of figures

Fig. 1.1 Electric Vehicle core pats	3
Fig. 2.1 Alick magnet	6
Fig. 2.2 Ferrite magnet	7
Fig. 2.3 Neodymium magnet	8
Fig. 2.4 Samarium cobalt magnet	9
Fig. 2.5 Rubber Magnet	10
Fig. 2.6 Brushless DC Motor	12
Fig. 2.7 Structure of DC Motor and BLDC Motor	13
Fig. 2.8 Structure of BLDC Motor_1	14
Fig. 2.9 Structure of BLDC Motor_2	14
Fig. 2.10 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(1/6)	17
Fig. 2.11 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(2/6)	18
Fig. 2.12 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(3/6)	19
Fig. 2.13 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(4/6)	19
Fig. 2.14 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(5/6)	20
Fig. 2.15 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(6/6)	21
Fig. 2.16 Principle of operation of 3-phase 2-pole BLDC motor	22
Fig. 2.17 Speed control algorithm design	23
Fig. 2.18 Speed control simulation circuit diagram	24
Fig. 2.19 Simulation results for speed control	24
Fig. 2.20 Boundary condition of electric field(ε)	30
Fig. 2.21 Boundary condition of magnetic field(μ)	31

Fig. 3.1 Three-phase armature winding equivalent circuit 32
 Fig. 3.2 BLDC motor equivalent circuit 35
 Fig. 3.3 BLDC motor 3D modeling 36
 Fig. 3.4 Major parts of BLDC motor 36
 Fig. 3.5 Stator and Rotor of BLDC Motor 37
 Fig. 3.6 Assembly diagram of stator and rotor 37
 Fig. 3.7 BLDC motor assembly 39
 Fig. 3.8 2WB115 + EK + 2PB115 Dynamo System 42
 Fig. 3.9 Control system Drawing 43
 Fig. 3.10 Control system 43
 Fig. 3.11 Microprocessor circuit diagram 45
 Fig. 3.12 Phase voltage inverter 46
 Fig. 3.13 SPM module (FSB5CH60B) 46
 Fig. 3.14 Internal circuit diagram of FSB5CH60B 47
 Fig. 3.15 BLDC communication module circuit diagram 48
 Fig. 3.16 Input circuit diagram of rotary position sensor 49
 Fig. 3.17 Input circuit diagram of current sensor 49
 Fig. 3.18 Control board PCB(Top) 50
 Fig. 3.19 Control board PCB(Bottom) 50
 Fig. 3.20 Control board PCB(Top) 51
 Fig. 3.21 Control board PCB(Bottom) 51
 Fig. 3.22 DC voltage detection circuit diagram 52
 Fig. 3.23 Control power circuit diagram 52
 Fig. 3.24 Signal detection circuit diagram 53
 Fig. 3.25 SPM module connection circuit diagram and

phase current detection circuit diagram	54
Fig. 3.26 Censored circuit diagram	54
Fig. 3.27 Power board PCB(Top)	55
Fig. 3.28 Power board PCB(Bottom)	55
Fig. 3.29 Power board PCB	56
Fig. 3.30 Control device of BLDC motor	56
Fig. 3.31 BLDC motor control	57
Fig. 3.32 Simulation results for speed control	58
Fig. 3.33 Master of boundaries of BLDC motor	59
Fig. 3.34 Slave of boundaries of BLDC motor	60
Fig. 3.35 Vector Potential of boundaries of BLDC motor	60
Fig. 3.36 Mesh of BLDC motor	61
Fig. 3.37 Magnetic distributions of BLDC motor	61
Fig. 3.38 Magnetic flux density distributions	62
Fig. 3.39 Magnetic field power distributions	62
Fig. 3.40 Analysis results of motor design	63
Fig. 4.1 Motor dynamics test equipment(2WB115+EK+2PB115)	64
Fig. 4.2 Efficiency measurement result	66
Fig. 4.3 Performance test of BLDC motor(5°)	68
Fig. 4.4 Performance test of BLDC motor(10°)	68
Fig. 4.5 Performance test of BLDC motor(15°)	69
Fig. 4.6 Torque measurement result	69
Fig. 4.7 Speed measurement result	70
Fig. 4.8 Voltage measurement result	70
Fig. 4.9 Watt measurement result	71

Fig. 4.10 Efficiency measurement result 71

Fig. 4.11 Comparison of measured efficiency and torque 72

Fig. 4.12 Comparison of measured efficiency and speed 72

Fig. 4.13 Comparison of measured efficiency and voltage 73

Fig. 4.14 Comparison of measured efficiency and watts 73

ABSTRACT

A Study on the Development of BLDC High Efficiency Motor for Electric Vehicle Drive

By Jung, Bo-Won

Advisor : Prof. Cha, Yong-Hun, Ph.D.

Department of Mechanical Engineering

Graduate School of Chosun University

In the past, the automobile industry market showed off the large displacement and high-power & high-performance technical power focusing on internal combustion engine. Due to the instability of oil price, however, it started developing/mass-producing vehicles with low displacement & high fuel-efficiency. Thus, the domestic automobile industry is continuously growing into the national core industry by developing vehicles with low displacement & high fuel-efficiency. However, because of car exhaust after using fossil fuels for a long time, the environmental problem is largely highlighted, and the issue of climate change was discussed with the development of automobile industry. Therefore, the environment-friendly trend could be found in the recent world automobile industry. On top of electric car, the R&D of environment-friendly vehicles such as fuel cell vehicle and hybrid vehicle is actively performed.

In case of environment-friendly vehicles, they are driving only with electric motor without engine, or the engine and electric motor are composed as serial, parallel, or serial-parallel. When driving, the high-efficiency driving is possible by combining engine and electric motor. When braking, as equipped with the regenerative braking ability to collect energy, the fuel-efficiency could be improved more than 50% compared to the existing vehicles.

The representative cases of environment-friendly vehicle include hybrid vehicle, fuel cell

vehicle, and electric vehicle driven by electric motor. Among them, the electric motor application technology which is the most core technology is represented as the technology of environment-friendly vehicle, so that the technical demand for it is increasing. In the world motor technology area, products for microminiaturization, high-speed, high-efficiency, high-power, and light-weight are rapidly growing. Especially, with the increased interest in environment, environment-friendly products are forming new markets. There have been active reinforcement of regulations and technical development to meet such demands for this R&D and also to reduce power consumption.

Especially, due to the intensified environmental problem, drivers' interest in electric vehicle is increasing. The great amount of subsidies from government/local governments is also a factor that promotes the purchase of electric vehicles. Moreover, once the autonomous function is added to no noise, no exhaust, light-weighted engine design, and high-tech driver's seat, it is the model of the 4th industrial revolution.

Currently, for the development of BLDC motor using the semiconductor switching element after removing the commutator and brush, on top of motor manufacturing businesses in the core parts industry of future automobile, even home-electronic motor manufacturers and industrial motor manufacturers are jumping in the business based on their great interest in researches on product development and quality improvement.

Compared to the brush-type DC motor, the BLDC motor has better durability, and high-efficiency and high-power. As there is no brush, the electric noise and mechanical noise are less, so that there is no need of maintenance/repair work. On top of high-speed, its reliability is also high. Compared to other DC motors and AC motors, the BLDC motor has more strengths as a driving motor of electric vehicle. In spite of its high price, it has a long life and great efficiency, so that it has been a lot researched as a driving motor of electric vehicle.

This paper aimed to develop the BLDC motor & driver as a driving system of 60kW-level electric vehicle. Completing the development of motor & controller for the PWM control in accordance with high-performance speed control of BLDC motor drive, the Maxwell Program was used for the detailed interpretation of the designed motor. Using the dynamo measuring system, the performance relation of motor efficiency was verified. The results of a series of motor performance test are like below.

1. In order to measure the test results of maximum output, the inverter input was measured as input voltage(VDC) 310V. The motor output was torque(Nm) 102.933Nm, the rated revolutions were 5,560rpm, and the rated output was(KW) 60.02KW.
2. In the results of the motor performance assessment by changing the angle of hall sensor by 5°, 10°, and 15° after producing a BLDC motor, when the speed value was high, and the values of torque, voltage, and watt were low, the performance efficiency was the highest.
3. In the results of dynamo test, when changing the angle of hall sensor by 5°, the maximum torque was 102.933Nm. When the maximum revolution speed was 5,560rpm with voltage(308.1V) and watt(60.02KW), the motor showed the maximum efficiency, which verified the excellence of the motor.

As PWM has high efficiency, high power-factor, and high performance, it gets the limelight in the application area of drive. As the motor could be driving in a certain torque area, certain output area, and extensive driving speed range, more things could be expected from future researches. Owing to the excellent control algorithm in the aspect of responsiveness, linearity of control, switching frequency, and high-frequency percentage of output current, it is applied to many drive systems. In the future, regarding the BLDC motor & drive system for high-performance & high efficiency electric vehicles, it is expected to apply the technology to auto part-related companies, and also to contribute to the commercialization of environment-friendly electric vehicles.

제 1 장 서 론

1.1 연구배경 및 목적

과거 자동차 산업시장은 내연기관을 위주로 대배기량과 고출력 고성능의 기술력을 과시하였으나 유가에 대한 불안정성으로 인하여 저배기량 고효율의 차량을 개발 및 양산하기 시작하였다. 이에 따라 국내에서도 저배기량 고효율의 차량을 개발하여 최근 2015년을 기준으로 전 세계 시장에 약 300만대의 수출을 달성하는 등 자동차 산업은 국가의 핵심 산업으로 성장하였다^(1~4).

하지만 오랜 기간 동안 화석연료를 사용한 자동차의 폐연으로 인하여 환경문제가 크게 부각되고 있으며, 기후변화에 대한 문제점 및 개선에 대한 이슈가 자동차 산업의 발전과 맞물려서 논의되기 시작하였다⁽⁵⁾. 때문에 최근 세계 자동차 산업에서는 친환경 바람이 불고 있으며, 전기자동차 외 연료전지자동차, 하이브리드자동차 등 친환경 자동차들의 연구 개발이 활발하게 진행되고 있는 추세이다⁽⁶⁾. 친환경 자동차의 개발은 자동차 산업의 생존이 걸린 미래 성장 동력이며, 현재 세계 각국의 환경규제 강화로 한국 정부는 10대 성장 품목 가운데 하나로 친환경 자동차 산업이 선정됐다^(7~10).

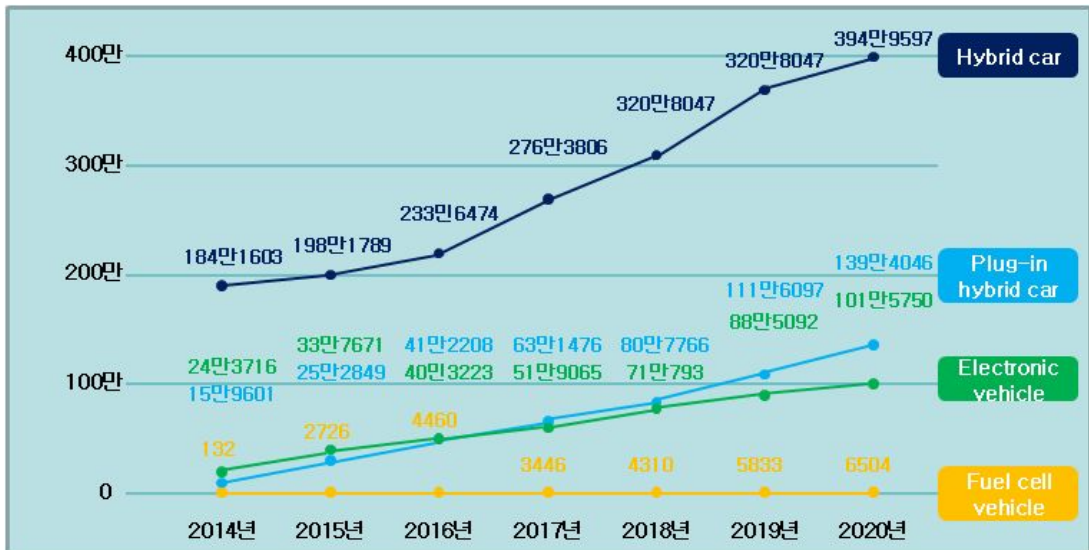


Table. 1.1 Environment-Friendly Vehicle Market Forecast by Manufacturer
(Material : USA)

	Hybrid car	Plug-in hybrid car	Electronic vehicle	Fuel cell vehicle	계
2015년	198만 1789	25만 2949	33만 7671	2726	257만 5135
2017년	276만 3806	63만 1476	51만 9065	3446	391만 7073
2020년	394만 9697	139만 4046	101만 5750	6504	636만 822

Table. 1.2 Environment-Friendly Vehicle Market Forecast by Manufacturer
(Material : HIS)

	Hybrid car	Plug-in hybrid car	Electronic vehicle	Fuel cell vehicle	계
2013년	155만		19만		174만
2015년	213만	22만		29만	264만
2020년	512만	128만		160만	800만

Table. 1.3 Environment-Friendly Vehicle Market Forecast by Manufacturer
(Material : Hyundai Motor)

미래의 친환경 자동차 시장현황은 Table. 1.1, Table. 1.2, Table. 1.3등의 여러 전문 기관 등에서 통계치를 내놓고 있으며 이러한 통계치는 대부분 증가세를 예측하고 있다^(11~15).

이러한 친환경 자동차는 엔진이 없이 전기모터로만 구동하거나 엔진과 전기모터가 직렬, 병렬, 직병렬로 구성되어 있으며 주행 시 엔진과 전기모터를 조합하여 고효율 주행을 가능하게 하며 Braking 시에는 에너지를 회수하는 회생제동 능력을 갖추어 기존 차량 대비 연비를 50%이상 향상시키게 된다⁽¹⁶⁾.

이 중 가장 핵심적인기술인 전기모터 응용기술이 친환경 자동차의 대표적인 기술로써 이에 대한 기술적인 수요가 증대되고 있다. 전기자동차는 화석연료를 사용하지 않고 전기 배터리와 전기 모터를 구동원으로 주행한다⁽¹⁷⁾. 전기 모터를 구동원으로 사용하면 내연기관에 비해 정밀한 토크제어, 높은 에너지 변환효율, 적은 소음/진동, 빠른 응답속도 등 여러 측면에서 장점을 가지며, 특히 지금과 같이 지구온난화 방지의 대책으로서 이산화탄소와 배기가스의 규제 그리고 석유자원의 고갈에 의한 대체 에너지 개발과 친환경적 자동차의 개발이 필요시 되는 가운데, 경제 위기로 물가가 계속 오르면서 생활이 점점 더 어려워지고, 휘발유와 경유의 가격이 급상승하고 있는 상황에 유지비가 적게 드는 연비 좋은 자동차를 찾는 운전자들이 많아지고 있다^(18~21).

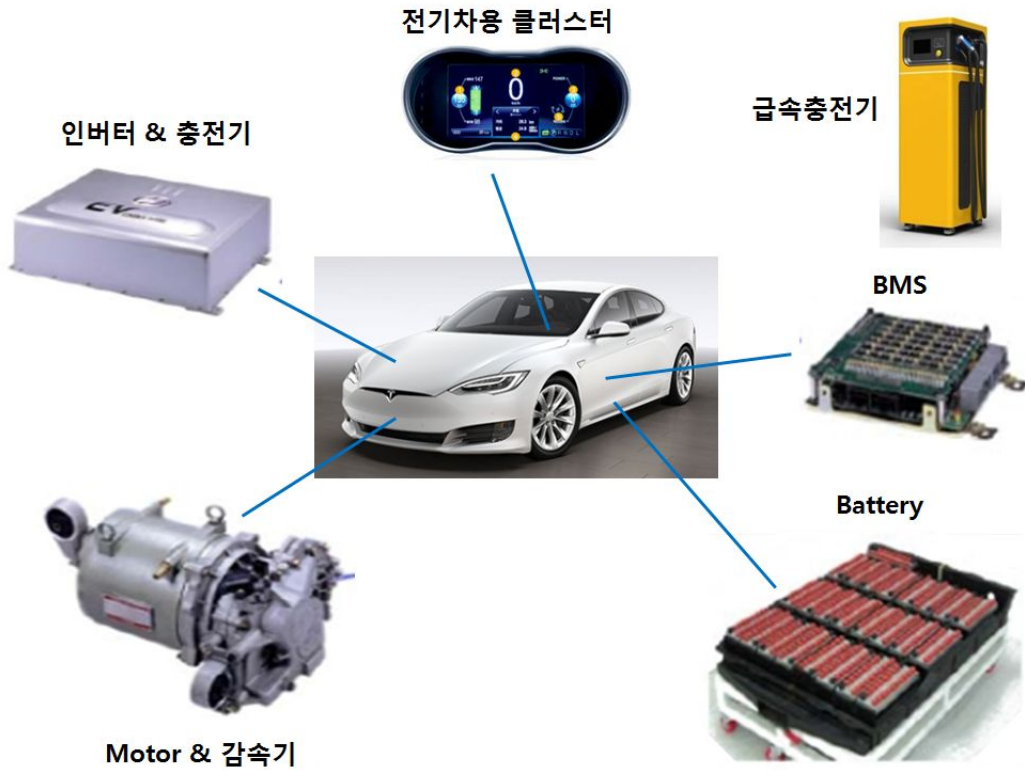


Fig. 1.1 Electric Vehicle core parts

전기자동차는 미세먼지 등의 환경문제가 날로 심각해지면서 운전자들의 관심도가 높아지고 있다. 정부·지자체의 파격적인 보조금도 전기자동차 구매촉진의 요인이다. 게다가 무소음, 무매연, 경량화된 엔진설계 첨단화된 운전석 등에 자율주행기능까지 첨가되면 그야말로 4차산업혁명의 모델이다⁽²²⁾.

현재 정류자와 브러시를 제거하고 반도체 스위칭 소자를 사용하는 BLDC 모터의 개발을 위해서 미래형자동차 핵심 부품산업의 모터 생산업체에 이어서 가전 모터 생산업체 그리고 산업 모터 생산업체들까지 제품개발과 품질향상에 관한 연구에 관심을 가지고 또 그 사업에 뛰어들고 있다^(23~24).

BLDC 모터는 브러시형 DC 모터 보다 내구성이 좋고, 고효율, 고 출력 특성을 가지고 있으며, 브러시가 없기 때문에 전기적인 노이즈뿐만 아니라 기계적인 노이즈가 작아서 유지보수가 필요 없고, 고속화가 가능하며 신뢰성이 높다. 그리고 BLDC 모터는 일반 DC 모터와 AC 모터 보다 전기자동차 구동 모터로서의 장점이 많기 때문에 고가

임에도 불구하고 긴 수명과 효율이 좋아 전기자동차의 구동 모터로서 많이 연구되고 있다^(25~26). 전기자동차용 모터는 영구자석전동기가 대세이며, BLDC 모터는 영구자석이 사용된다⁽²⁷⁾.

본 논문은 전기자동차용 구동시스템을 개발목적으로 구동 모터, 구동 드라이버에 대하여 연구하고 고효율 BLDC 모터의 성능향상을 위하여 BLDC 모터의 홀 센서의 각도변화에 따른 모터효율에 대한 성능평가를 모터 다이내모 측정시스템을 이용하여 검증하고자 하였고, 이 검증과정을 통하여 앞으로 그린카에 적용할 수 있는 그린카의 보급형 전기자동차용 구동시스템을 개발하고자 한다.

1.2 연구방법

본 논문에서는 전기자동차용 구동시스템을 개발목적으로 구동 모터, 구동 드라이버에 대하여 개발을 실시하였다. 고효율, 고 역률 그리고 고 토크밀도를 가지고 있는 BLDC 모터 드라이브에 대한 고성능 속도제어에 따른 PWM 제어를 위하여 모터 및 제어기를 개발하고, 모터 다이내모 측정시스템을 이용하여 모터효율에 대한 성능관계를 검증하고자 하였으며, 다음의 연구 방법을 통하여 실험을 실시하였다.

1. BLDC 고효율 모터 개발을 위하여 3D 모델링 전용설계 프로그램인 CATIA V5를 이용하여 모터를 설계하고, 설계된 모터의 해석을 위하여 Maxwell 2.0 프로그램을 이용하여 모터 시뮬레이션을 실시하였다.
2. BLDC 모터 설계프로그램에 의해 개발된 데이터로 PSIM 프로그램을 통해서 BLDC 모터 제어의 구현 및 가장 적합한 마이크로프로세서를 선정하고 주변회로를 구성하여 모터의 구동드라이브를 설계 및 제작하였다.
3. 홀 센서의 각도변화에 따른 모터효율의 성능관계를 검증하기 위하여 개발된 모터와 드라이브를 모터 다이내모 측정시스템을 이용하여 성능 시험을 실시하였다.
4. BLDC 모터의 성능 시험을 위하여 모터 다이내모시스템을 구축하고 토크, 속도 및 효율 등이 최대가 되도록 반복 시험을 실시하였다.

제 2 장 관련 이론

2.1 영구자석의 종류 및 특징

2.1.1 영구자석의 종류

가. 알리코 자석(주조자석)



Fig. 2.1 Alick magnet

알리코 자석은 높은 온도에서 자력의 감자 없이 안정적으로 사용할 수 있고, 고무자석과 비슷한 자력의 세기로 강한 힘을 발휘하진 않지만 고온에서 강력한 자력을 요구하지 않는 작업 현장에서 유용하게 활용되고 있고 우수한 경도를 가지고 있다. 철, 니켈, 알루미늄 코발트의 합금으로 제작되었으며 성형 방법으로 인해 주조 알리코와 소결 알리코로 구별되고 있다^(28~29).

(1) 주조 알리코

: 주조 자석은 경도가 높기 때문에 주로 연마를 통하여 가공되며 비교적 높은 온도에서 사용 하더라도 감자가 거의 발생하지 않는다. 또한 자기회로 구성 후에도 착자가 쉬우므로 자기 특성을 효과적으로 이용할 수 있고 스피커, 마이크 폰, 마이크 모터, 측정장비, 전화기, TV 등에 사용된다.

(2) 소결 알리코

: 소결 자석의 특성은 일반적으로 주조 알리코와 동일하다.

우수한 기계적 강도뿐만 아니라 높은 자기 특성을 가지고 있고 성형성이 좋아 복잡한 형상이 가능하며 비교적 고가이다. 그리고 측정 장비, 패널 미터, 레벨 미터, 센서 등에 사용된다.

영구자석 중에서 온도 특성이 가장 뛰어난 알리코 자석은 최대 에너지가 높으며 낮은 온도 계수를 가지고 있고 열에 대한 안정성이 탁월하다. 또한 단단하며 높은 자속 밀도를 가지고 있는 영구자석으로서 자석끼리 세계 부딪히거나 외부에 강한 충격에도 깨지거나 손상되는 현상이 없으며 강한 내구성을 가지고 있다^(30~31).

나. 페라이트 자석(소결자석)



Fig. 2.2 Ferrite magnet

페라이트 자석은 니켈, 망간, 코발트 등의 산화물과 철로 제작된 영구자석이며, 전자공업 또는 아이들의 학습용으로 사용되고 있다. 1500~2000Gauss로 강력한 자력의 힘을 발휘하진 않지만 자기 특성이 안정적이고 강한 자력을 요구하지 않는 경우에 많이 적용되고 있으며 최대 540°C의 고온에서도 자력의 감소 현상이 없고 우수한 온도 특성과 내식성이 뛰어난 영구자석이다^(32~33).

비교적 비용이 저렴해서 경제적인 사용이 가능한 페라이트 자석은 보통 우리 주변에서 흔하게 볼 수 있는 보급형 자석이다. 링형, 원형, 사각형의 다양한 형태와 사이즈로

구성되어 있어 선택의 폭이 넓고 주로 스피커, TV, 전화기, 모터 등 다양하게 활용되고 있으며 자장 방향에 따라서 이방성과 등방성으로 나누어지고 생산 방식에 따라서 습식공법과 건식공법으로 나누어진다⁽³⁴⁾.

(1) 습식공법

: 물과 페라이트 파우더의 비율을 일정하게 혼합하여 제작된다. 제작시간이 많이 걸리며 비교적 건식공법 보다 우수한 특성을 가지고 있다. 여러 가지 산화물을 원료로 제조되며 높은 보자력과 낮은 잔류자속 밀도를 가지고 있다.

(2) 건식공법

: 접착용 특수 파우더와 페라이트 파우더의 혼합으로 단시간 내 제작이 가능하다. 습식에 비해 상대적으로 낮은 자기 특성을 갖지만 소형, 소량 다품종 생산에 좋고 개발비용이 저렴하다.

페라이트 자석은 가격은 저렴하나 온도계수가 나쁘며 특성 향상에 어렵고 대량 생산해야하는 문제점이 있다^(35~36).

다. 희토류 자석

희토류 자석은 네오디움 자석($Nd-Fe-B Magnet$)과 사마륨코발트 자석($Sm-Co Magnet$)으로 구분되며, 지금까지 개발된 영구자석 재료 보다 월등하게 높은 보자력과 잔류자속 밀도를 갖는 고자력 영구 자석이다.

(1) 네오디움 자석($Nd-Fe-B Magnet$)



Fig. 2.3 Neodymium magnet

가격대비 우수한 자력 세기를 가지고 있는 네오디움 자석은 원형, 접시홀 원형, 사각형, 구형, 링형 등 다양한 형태로 구성되어 있는 영구자석이다. 2500~5000Gauss의 강력 자력이 발휘하는 자석으로 각종 전자기기의 내장 또는 일상생활에서 의료용으로 통증 치료에 도움을 줄 수 있는 자석으로 활용되고 있다.

네오디움 자석은 희토류 금속중 하나인 Nd 와 Fe , B 와의 금속간 화합물로서 높은 보자력과 최대 자기 에너지적을 나타낸다. 그리고 자원적으로 풍부한 Nd 와 Fe 를 사용하므로 가격면에서 $Sm-Co$ 계자석보다 저렴하고 페라이트 자석이나 사마륨코발트 자석보다는 기계적 가공성이 우수하다⁽³⁷⁾.

(2) 사마륨코발트 자석($Sm-Co$ Magnet)



Fig. 2.4 Samarium cobalt magnet

사마륨코발트 자석은 네오디움 자석 다음으로 자기 특성이 높고 흡착력이 강하며 우수한 내식력 및 고온 안정성으로 해당 특성이 필요한 공업, 산업, 기기 등의 업종에 사용되고 있다. 하지만 기본적으로 유통되는 네오디움 자석 그레이드에 비해 높은 가격으로 인해서 적용시 채산성을 고려하여야 한다. 사마륨코발트 자석은 우수한 온도 특성으로 고온의 작업장 과 기기 내에 적용이 가능하고 일반적으로 최대 사용온도 300℃, 권장 사용온도 250℃의 특성 값을 갖는다.

또한 녹 방지를 가능 하게 하는 구성 물질인 사마륨과 코발트가 함유되어 있으므로 표면 처리 없이 사용한다. 하지만 기계적 강도가 비교적 낮아서 가공과 균열, 파손에 주의해야한다^(38~39).

라. 고무 자석



Fig. 2.5 Rubber Magnet

고무 자석은 페라이트 파우더에 고무를 혼합해서 제작되는 영구자석으로 고무 재질의 특성으로서 사용이 가능하다. 300~900Gauss의 아주 강력한 자력의 자석은 아니지만 유연하고 가벼워 광고, 전단지 등의 홍보 용도 또는 어린아이들의 장난감, 교육용 교구 등에 부착하여 활용되고 있다. 또한 고무 자석은 양쪽 면으로 자력이 나오는 이방성(강력형)과 한쪽 면으로만 자력이 나오는 등방성(일반형)으로 이렇게 두 종류로 구성되고 Plate Type과 Strip Type등이 있다^(40~41).

2.1.2 BLDC 희토류 영구자석의 특징

가. 네오디움 자석(*Nd-Fe-B Magnet*)

- (1) 제조공법은 *Sm-Co*계자석과 유사하고, 부피가 적으면서도 자기특성이 뛰어나다.
- (2) 가격이 *Sm-Co* 보다 저렴하여 현재 전 세계적으로 사용량이 급등한다.
- (3) 보자력(H_c) : $12K0e \sim 14.9K0e$
- (4) 잔류자속밀도(B_r) : $10,000 \sim 14,000$
- (5) 최대 에너지적(BH) $_{max}$: $20MG0e \sim 40MG0e$
- (6) 밀도(g/cm^3) : $7.48g/cm^3$

나. 사마륨코발트 자석(*Sm-Co Magnet*)

- (1) 희토류 금속인 *Sm*과 *Co*를 분말 가공 성형 후 진공상태에서 소결시키며 연마 후 완성품을 내고, 자기 특성이 네오디움 자석 다음으로 우수하다.
- (2) 전 세계적으로 *Co*의 매장량이 극소이므로 최근에는 *Nd-Fe-B*로 대체중 이고 열에 대한 안정성은 네오디움 보다 높으나 가격이 고가이다.
- (3) 보자력(H_c) : $5.5K0e \sim 9.0K0e$
- (4) 잔류자속밀도(B_r) : $9,200 \sim 11,200$
- (5) 최대 에너지적(BH) $_{max}$: $22MG0e \sim 26MG0e$
- (6) 밀도(g/cm^3) : $7.82g/cm^3$ ^(42~44)

2.2 BLDC 모터 및 구조

2.2.1 BLDC 모터



Fig. 2.6 Brushless DC Motor

브러시리스 모터(Brushless Motor)는 일반적으로 DC 모터에서 브러시와 정류자와 같은 기계적인 접촉부를 제거하고 전자적인 정류 기구를 설치한 직류모터이다. 따라서 전기적, 기계적 노이즈가 작고 브러시리스 모터를 무정류자 모터라고도 한다. 브러시리스 모터의 가장 큰 장점은 원리적으로 노이즈의 발생이 작다는 것이다. 또한 초고속 또는 초저속, 다극(자석의 수가 많을 때)인 수명의 모터가 간단히 만들어지는 장점이 있다⁽⁴⁵⁾. 브러시리스 모터의 구조는 중심에 회전하는 자석이 있고 그 둘레에 코일이 설치되어 있다. 브러시리스 모터의 작동원리는 DC 모터의 작동원리와 같은 플레밍의 왼손 법칙이며 영구 자석 또는 코일의 어느 쪽이 회전하더라도 그 작동원리는 같다⁽⁴⁶⁾. 그리고 브러시리스 모터의 경우 정류자가 없으므로 이것을 대신하는 전자 정류 회로가 필요하다. 이 회로는 홀 소자 등과 같은 자극 센서를 사용하여 마그넷 로터가 어느 곳에 위치하고 있는가를 검지하고, 이 신호를 바탕으로 전자 회로를 제어하여 회전 자기장을 발생시킨다. 이것이 브러시리스 모터의 구동회로인데 회로구성이 매우 복잡하게 되기 때문에 주로 전용 IC가 사용되고 있다⁽⁴⁷⁾. 브러시리스 모터의 주요한 용도는 CD 플레이어, VTR의 실린더, FDD, 카세트덱의 캡스텐 등이며 긴 수명과 높은 회전 성능이 요구되는 모터로 사용되고 있다. AC 모터의 경우 본래부터 브러시와 정류자가 필요 없는 모터이기 때문에 브러시리스 모터로 분류되지 않는다^(48~50).

2.2.2 BLDC 모터 구조

다음 Fig. 2.7은 DC Motor와 BLDC Motor의 구조적 차이를 나타낸 것이다.

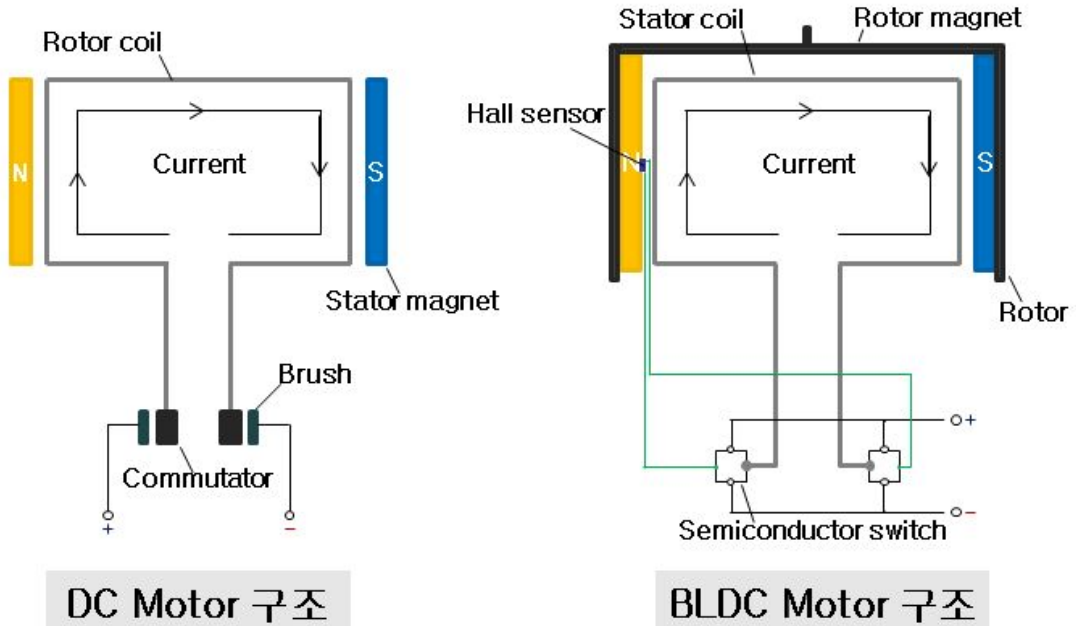


Fig. 2.7 Structure of DC Motor and BLDC Motor

Fig. 2.7에서 볼 수 있듯이, DC 모터 구조의 경우 회전체가 코일이고 반면에 BLDC 모터 구조는 자석자체가 회전하는 회전체의 모습이다. 그러므로 구조상 BLDC 모터는 Brush가 필요 없음을 알 수 있다.

BLDC 모터는 로터의 위치 검출용 자기센서 또는 광학식 엔코더가 모터에 내장되어 있다. 이 위치검출기에서 구동회로로 신호를 보내며, 모터 권선은 3상 스타(STAR)결선이다. 그리고 로터(ROTOR, 회전자)는 영구자석을 사용한다^(51~52).

Fig. 2.8의 오른쪽 그림을 보면 Fig. 2.7의 BLDC Motor의 구조에서 봤던 것처럼 코일에 전류가 흐르면 자석자체가 회전하게끔 만들어져 있으며, 3개의 극성 터미널 U, V, W 가 존재한다. 그리고 모터 회전체인 자석의 위치를 감지하는 홀 센서가 장착되어 있다. 이 홀 센서를 통해 모터의 회전각 및 회전속도 등을 알 수 있고, 모터자석의 위치를 판단할 수 있다.

검출용 자기 소자에는 Hall IC 가 사용된다. 스테이터(STATOR, 고정자) 안쪽에 3개 장착되어 있으며, 로터가 회전될 때마다 Hall IC에서 디지털 신호가 출력된다⁽⁵³⁾.

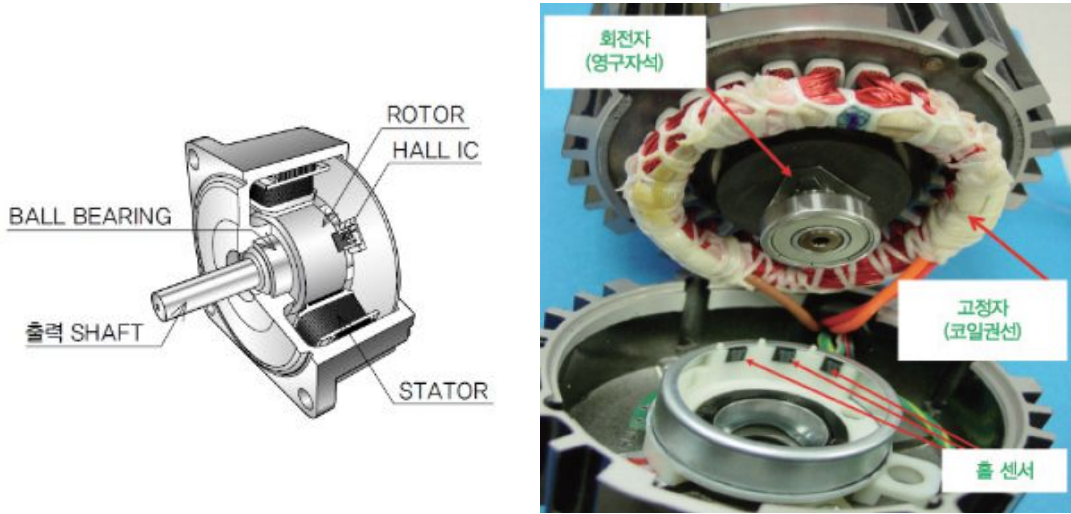


Fig. 2.8 Structure of BLDC Motor_1

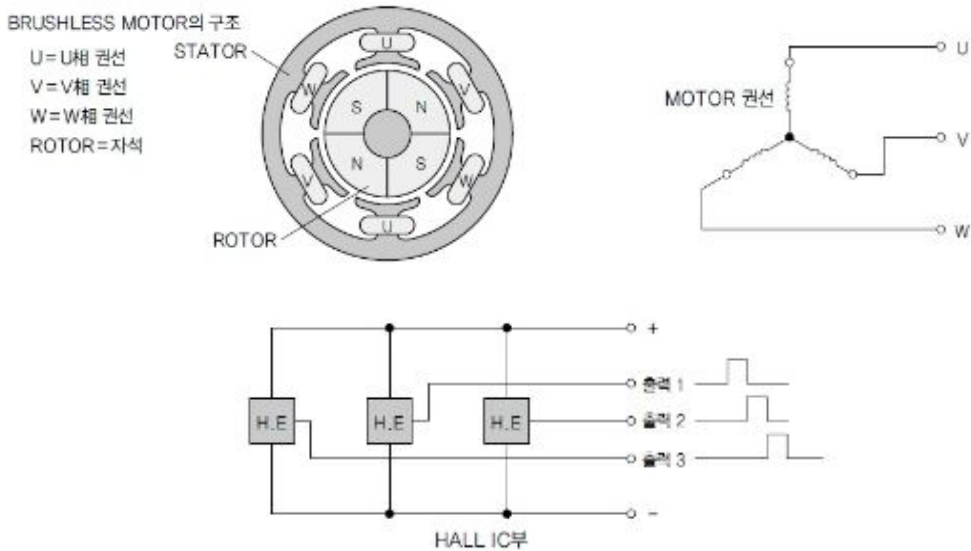


Fig. 2.9 Structure of BLDC Motor_2

2.2.3 BLDC 모터 특성

현재 사회 전반에 걸쳐 사용되고 있는 모터는 대표적으로 DC 모터, BLDC 모터, STEP 모터, 초음파 모터 등이 있다. 이 중에서 아직까지 가장 많이 사용되고 있는 모터는 DC 모터이다. 그 이유는 출력과 효율이 좋고 소형화가 가능하며 속도를 제어하는데 용의하기 때문이다. DC 모터의 구동이 가능하기 위해서는 정류자와 브러시를 이용하여 회전에 의한 전기자 전류의 극성을 바꾸어 주어 일정한 토크를 발생시킴으로써 구동을 한다⁽⁵⁴⁾.

하지만 이런 구조는 전류 방향을 반대로 바꾸는데 정류자와 브러시의 마찰이 생겨서 수명에 한계가 오고 전자 노이즈 그리고 기계적 소음 등과 같은 문제점이 발생하게 된다.

그렇기 때문에 DC 모터의 경우에는 주기적으로 브러시를 교체해야 하는 번거로움이 따르며, 장기적으로 모터의 내구성 문제의 발생으로 유지/보수가 필요해진다. 이러한 DC 모터의 단점을 보완해 줄 수 있는 모터로 최근에는 BLDC 모터의 사용이 증가하고 있다^(55~56).

BLDC 모터는 회전자에 권선을 감지 않고 영구자석을 장착하여 DC 모터에 비해 토크 대 관성의 비율이 높고, 비접촉식으로 전기각을 검출하기 때문에 부품을 교체할 필요가 없으며 수명이 반영구적이고 신뢰성이 높다. 그리고 전자적으로 전기각을 검출하기 때문에 브러시와 정류자간의 기계적인 마찰이 없어지므로 전자 노이즈가 감소한다⁽⁵⁷⁾.

일반적으로 DC 모터는 페라이트 자석을 사용하지만 BLDC 모터는 고에너지밀도를 갖는 영구자석(희토류자석)을 이용하므로 DC 모터에 비하여 소형화, 경량화가 가능하고, 90년대 이후 빠르게 성장한 정보화 산업에 그 적용이 늘어나고 있으며, 센서 일체형으로 저장되어 있어 산업용 이동 장비, 차량 내 전장부품 등에 사용되고 있다.

또한 BLDC 모터는 자동차 산업분야에서 벨트 및 유압 시스템의 제거 또는 연비 향상 및 기능 추가를 위한 전략으로서 각광 받고 있으며, 전기자동차 내 서스펜션, 구동 모터, 도어 개폐 및 연료펌프 등의 용도로 사용되고 있다^(58~61).

다음 Table. 2.1은 브러시가 있는 DC 모터와 브러시를 제거한 BLDC 모터를 비교하였고, Table. 2.2에서는 AC인덕션 모터와 BLDC 모터를 비교하였다.

특징	BLDC 모터	DC 모터
정류	Rotor 위치에 기초한 전자 정류	기계적인 브러시와 정류자에 의한 정류
효율성	높음 (브러시에 의한 전압 강하가 생김)	보통
유지 및 관리	거의 없음	정기적으로 요구
아웃풋 파워/ 프레임 사이즈	높음	중간 or 낮음
속도/토크 특성	마찰 손실의 감소로 모든 속도에서 동작 가능	고소일 때 브러시 마찰 손실의 증가로 토크 감소
동적 반응	빠름	느림
속도 범위	넓음 (기계적 한계 없음)	좁음 (기계적 한계)
제품수명	장기 사용 가능	브러시 한계로 인한 단기 사용
회전체 관성	낮음 (회전체가 영구자석이기에 때문에 동적 응답 특성이 개선 됨)	높음 (동적 특성의 한계)
비용	높음	낮음
제어	복잡함 (복잡한 제어가 요구됨)	간단함 (제어가 요구되지 않음)

Table. 2.1 Comparison of BLDC motor and DC motor

특징	BLDC 모터	AC Induction 모터
속도/토크 특징	마찰 손실의 감소로 모든 속도에서 동작 가능	낮은 속도에서 낮은 토크를 나타냄
아웃풋 파워/ 프레임 사이즈	높음	중간
동적 반응	빠름	주기적
슬립 빈도	고정자와 회전 자 사이에서 슬립 현상이 발생하지 않음	모터의 부하가 커짐에 따라 슬립현상이 증가함
회전체 관성	낮음 (회전체가 영구자석이기에 때문에 동적 응답 특성이 개선 됨)	높음 (동적 특성의 한계)
시작 전류	특별한 시작 회로가 요구 되지 않음	시작 회로가 요구됨
제어	모터 동작을 위해 제어가 필수적임	-고정된 속도: 제어가 필요하지 않음 -변화하는 속도: 제어가 필요함

Table. 2.2 Comparison of BLDC motor and AC induction motor

2.2.4 BLDC 모터 구동

BLDC 모터를 구동시키기 위해서는 회전자가 회전할 수 있도록 영구자석의 위치에 따라 고정자의 권선에 전류를 흘려줌으로서 자속을 발생시킬 권선을 바꾸어 주어야 한다⁽⁶²⁾.

BLDC 모터를 위한 인버터는 보통 어느 시점에 두 개의 스위칭 소자로만 동작되는 2상 여자 방식으로 구동된다. Fig. 2.10부터 Fig. 2.15는 3상2극 BLDC 모터의 구동 과정을 나타낸 것이다. 가운데에 있는 영구자석이 반시계방향으로 회전하고 고정자에는 3개의 고정자 상이 존재한다. 이때 각각의 상을 a, b, c상이라 하고, 3개의 홀센서는 H1, H2, H3 이라 한다. 홀센서(H1, H2, H3)는 N극이 검출될 때는 “1”을 출력하고, S극이 검출될 때는 “0”을 출력한다고 가정한다. Fig. 2.10을 보면 6개의 스위치 중 T1과 T6의 회로가 동작하여 a상에서 b상으로 전류가 공급된다. 이때 권선에 흐르는 전류에 의해서 a상은 S극을 띄고, b상은 N극을 띄게 되면, 영구자석이 반 시계 방향으로 60° 회전하게 된다. 홀센서 H1은 N극이 가까이에 있으므로 “1”, H2는 S극이 가까이에 있으므로 “0”, H3은 N극이 가까이에 있으므로 “1”을 출력한다. 따라서 H3, H2, H1의 신호 조합은 101₂ 이 되고, 이 이진수를 십진수로 변환하면 5가 된다.

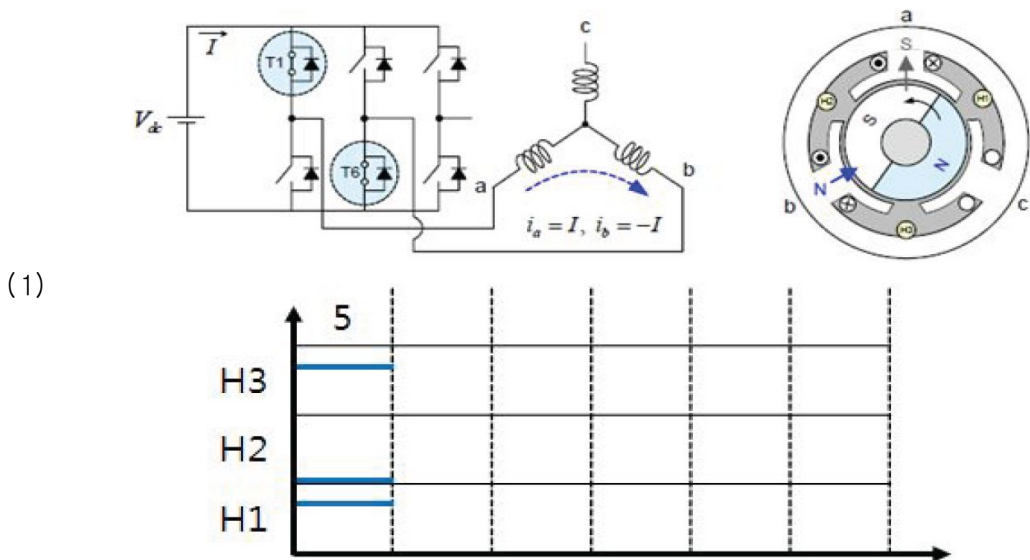


Fig. 2.10 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(1/6)

두 번째, Fig. 2.11을 보면 6개의 스위치 중 T1과 T2의 회로가 동작하여 a상에서 c상으로 전류가 공급된다. 이때 권선에 흐르는 전류에 의해서 a상은 S극, c상은 N극을 띄게 되면, 영구자석이 반 시계 방향으로 120° 회전하게 된다. 홀센서 H1은 N극이 가까이에 있으므로 “1”, H2는 S극이 가까이에 있으므로 “0”, H3은 S극이 가까이에 있으므로 “0”을 출력한다. 따라서 H3, H2, H1의 신호 조합은 001₂ 이 되고, 이 이진수를 십진수로 변환하면 1이 된다.

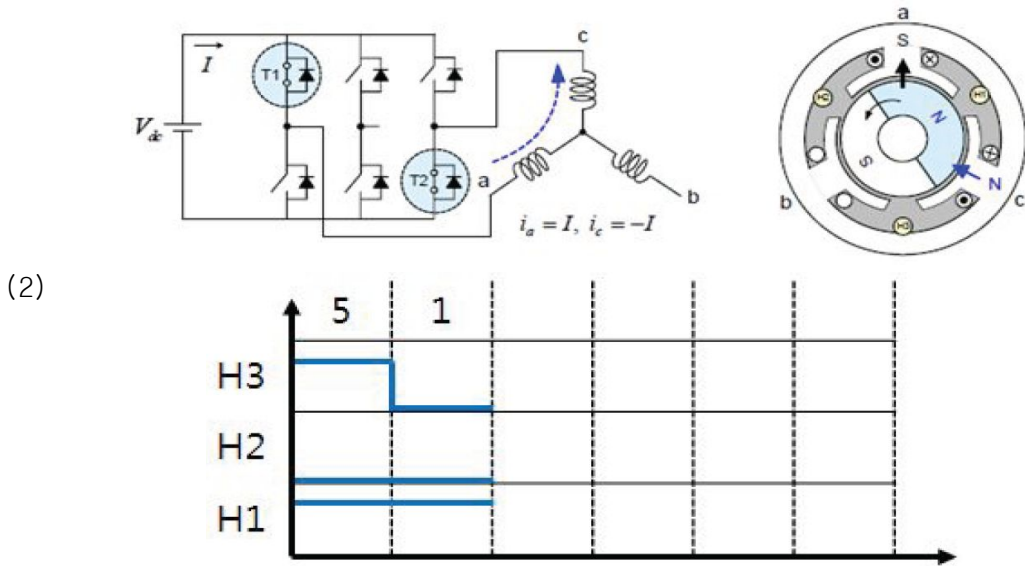
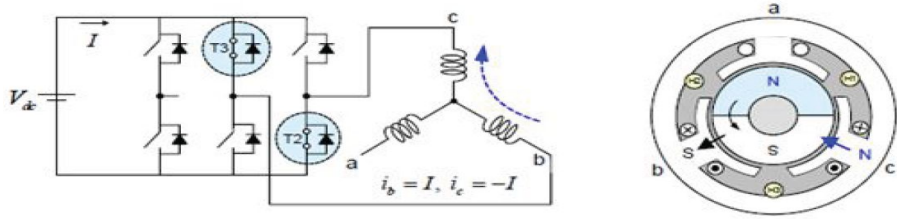


Fig. 2.11 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(2/6)

세 번째, Fig. 2.12를 보면 6개의 스위치 중 T3과 T2의 회로가 동작하여 b상에서 c상으로 전류가 공급된다. 이때 권선에 흐르는 전류에 의해서 b상은 S극, c상은 N극을 띄게 되면, 영구자석이 반 시계 방향으로 180° 회전하게 된다. 홀센서 H1은 N극이 가까이에 있으므로 “1”, H2도 마찬가지로 N극이 가까이에 있으므로 “1”, H3은 S극이 가까이에 있으므로 “0”을 출력한다. 따라서 H3, H2, H1의 신호 조합은 011₂ 이 되고, 이 이진수를 십진수로 변환하면 3이 된다.



(3)

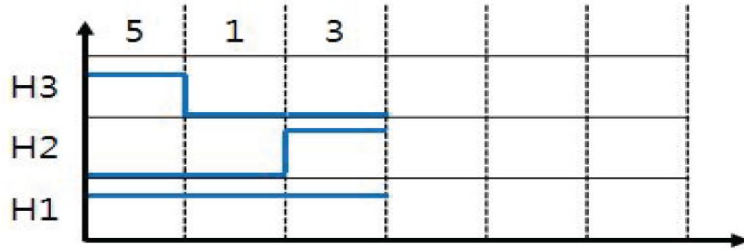
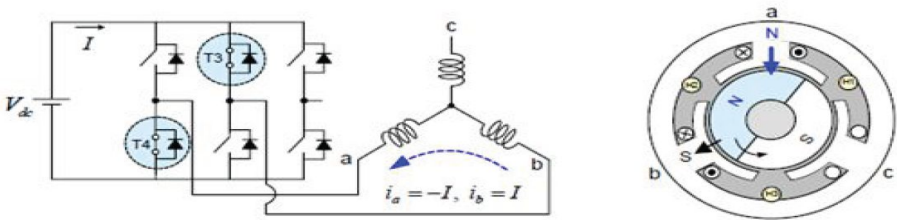


Fig. 2.12 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(3/6)

네 번째, Fig. 2.13을 보면 6개의 스위치 중 T3과 T4의 회로가 동작하여 b상에서 a상으로 전류가 공급된다. 이때 권선에 흐르는 전류에 의해서 b상은 S극, a상은 N극을 띠게 되면, 영구자석이 반 시계 방향으로 240° 회전하게 된다. 홀센서 H1은 S극이 가까이에 있으므로 “0”, H2는 N극이 가까이에 있으므로 “1”, H3은 S극이 가까이에 있으므로 “0”을 출력한다. 따라서 H3, H2, H1의 신호 조합은 010₂ 이 되고, 이 이진수를 십진수로 변환하면 2가 된다.



(4)

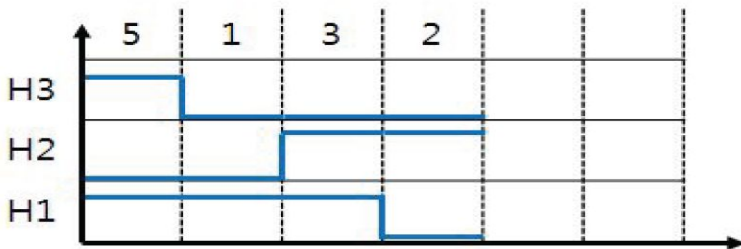
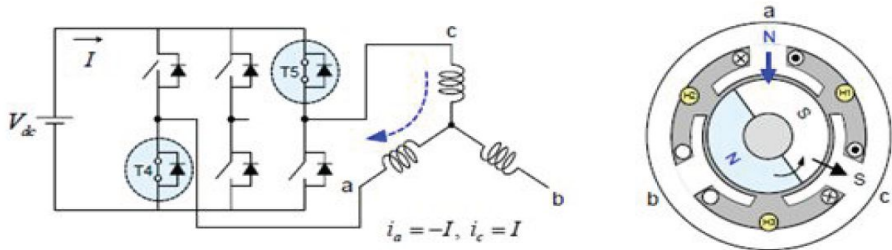


Fig. 2.13 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(4/6)

다섯 번째, Fig. 2.14를 보면 6개의 스위치 중 T5와 T4의 회로가 동작하여 c상에서 a상으로 전류가 공급된다. 이때 권선에 흐르는 전류에 의해서 c상은 S극, a상은 N극을 띄게 되면, 영구자석이 반 시계 방향으로 30° 회전하게 된다. 홀센서 H1은 S극이 가까이에 있으므로 “0”, H2는 N극이 가까이에 있으므로 “1”, H3도 N극이 가까이에 있으므로 “1”을 출력한다. 따라서 H3, H2, H1의 신호 조합은 110₂ 이 되고, 이 이진수를 십진수로 변환하면 6이 된다.



(5)

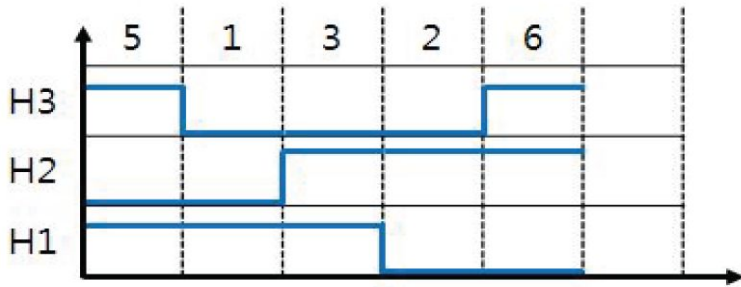
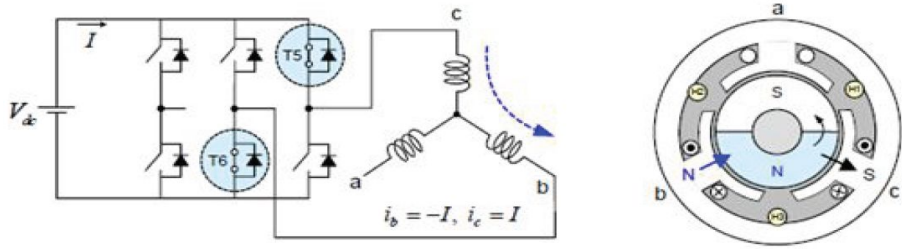


Fig. 2.14 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(5/6)

마지막 과정으로 여섯 번째, Fig. 2.15를 보면 6개의 스위치 중 T1과 T6의 회로가 동작하여 c상에서 b상으로 전류가 공급된다. 이때 권선에 흐르는 전류에 의해서 c상은 S극, b상은 N극을 띄게 되면, 영구자석이 반 시계 방향으로 360° 회전하게 된다. 홀센서 H1은 S극이 가까이에 있으므로 “01”, H2도 마찬가지로 S극이 가까이에 있으므로 “0”, H3은 N극이 가까이에 있으므로 “1”을 출력한다. 따라서 H3, H2, H1의 신호 조합은 100₂ 이 되고, 이 이진수를 십진수로 변환하면 4가 된다.



(6)

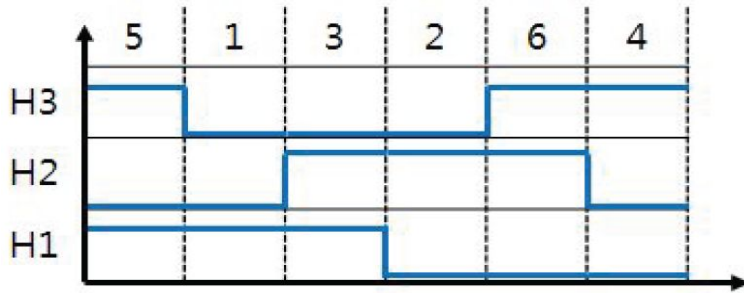


Fig. 2.15 Driving process of 3 phase 2 pole BLDC motor(6/6)

이와 같은 여섯 사이클의 구동 과정으로 지속적인 스위칭 제어를 함으로써 모터가 회전하게 된다. 만약 이와 같은 순차적인 과정이 아닌 다른 과정으로 사이클을 구동한다면 회로에 문제가 발생 될 수 있고, 정상적으로 운전을 할 수 없는 상황이 발생하게 된다^(63~64).

Fig. 2.16은 위 3상2극 BLDC 모터의 여섯 사이클의 구동 과정으로써 반시계 방향으로 회전함에 따라 발생하는 전류, 역기전력, 토크 및 홀센서 신호에 대한 변화를 나타낸 것이다.

관련 식은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \text{ BLDC 모터의 전압 방정식 : } v_{abc} = R_s i_{abc} + (L_s - L_m) \frac{di_{abc}}{dt} + e_{abc} \quad (2.1)$$

$$\textcircled{2} \text{ BLDC 모터의 출력 전력 : } P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (2.2)$$

$$\textcircled{3} \text{ BLDC 모터의 토크 : } T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (2.3)$$

BLDC 모터의 영구자석은 고정자의 권선에 흐르고 있는 구형파 전류와 작용하여 일정한 토크의 발생을 위하여 Fig. 2.16과 같이 근사 사다리꼴의 역기전력을 갖는다⁽⁴⁶⁾.

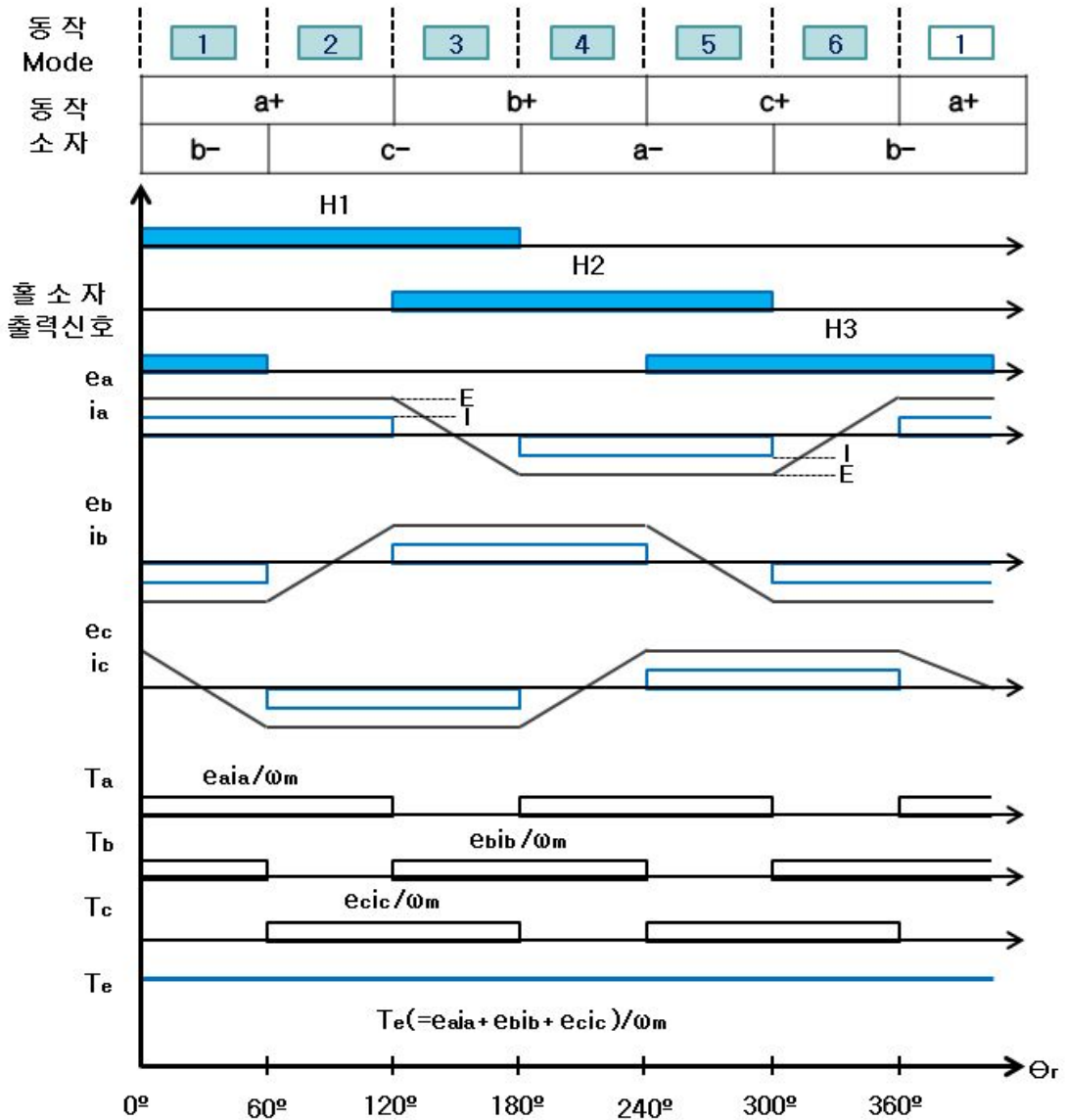


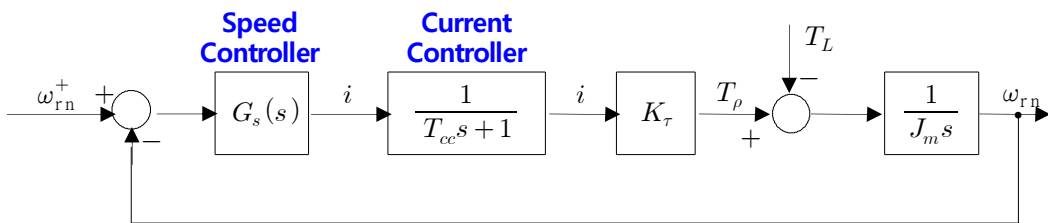
Fig. 2.16 Principle of operation of 3-phase 2-pole BLDC motor

여기서 H1, H2, H3은 각상의 홀소자에서 검출되는 신호, e_a , e_b , e_c 는 각 상에서 발생하는 역기전력, i_a , i_b , i_c 는 각상에 공급되는 전류, T_a , T_b , T_c 는 각 상의 토크, T_e 는 전체 토크를 나타낸다.

2.3 BLDC 모터 속도 제어 시뮬레이션

PSIM 프로그램의 LIBRARY에서 제공되는 BLDC 모터 블록과 DLL 블록을 이용하여 BLDC 모터의 속도 제어 시뮬레이션을 수행 할 수 있다. Fig. 2.17은 속도 제어 알고리즘 설계를 나타낸 것이며, 그 결과로서 PSIM 프로그램을 이용한 BLDC 모터의 속도 제어 시뮬레이션은 Fig. 2.18와 같다⁽⁶⁵⁾. BLDC 모터의 속도 제어를 PSIM 프로그램으로 구현하여 적분기, 제한 블록, 비례 블록 등을 이용하여 PI제어기를 구성하고, PSIM 프로그램의 Subcircuit을 이용하여 Out-going phase unipolar PWM block을 단순화 할 수 있다. 참고로 Subcircuit을 이용하면 PWM, PI 제어기 등 모터 제어에 사용되는 일반적인 기능을 표준화 할 수 있다⁽⁶⁶⁾.

시뮬레이션으로 구현된 BLDC 모터의 3상 전류 및 속도제어에 대한 출력파형의 결과로 Fig. 2.19와 같은 그래프를 얻을 수 있다.



$$G_s(s) = K_{sp} + \frac{K_{SI}}{S}$$

open loop transfer function of the speed control system

$$G_{sc}^0(s) = \left(K_{sp} + \frac{K_{SI}}{S} \right) \cdot \frac{1}{T_{CC}s + 1} \cdot \frac{K_T}{J_m s}$$

open loop transfer function can be simplified as following:

$$G_{sc}^0(s) \approx K_{sp} \cdot \frac{K_T}{J_m s} \quad \leftarrow \quad G_{sc}^0(s) \approx 1 \quad G_{sc}^0(s) \approx K_{sp}$$

Fig. 2.17 Speed control algorithm design

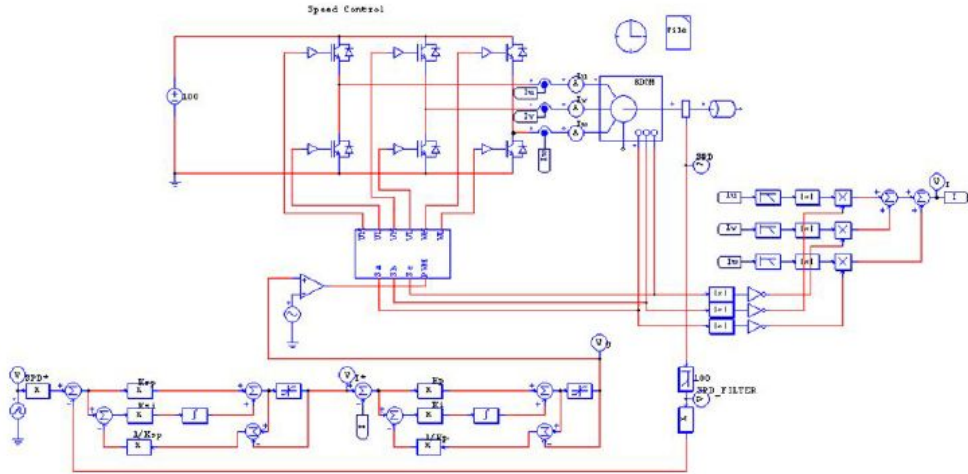


Fig. 2.18 Speed control simulation circuit diagram

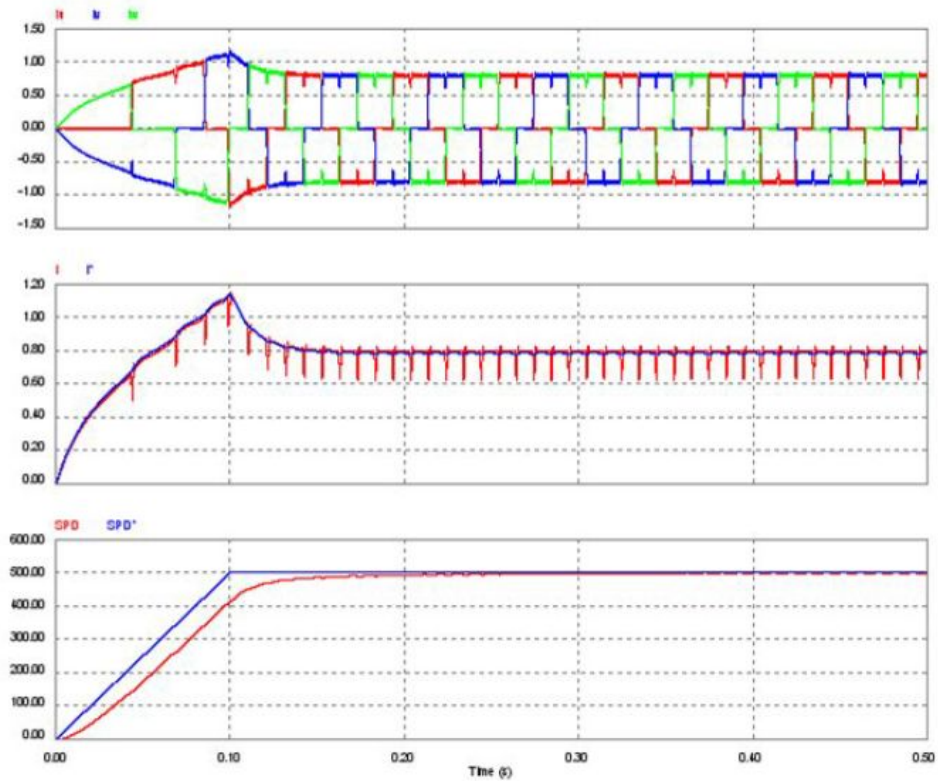


Fig. 2.19 Simulation results for speed control

2.4 유한 요소법에 의한 BLDC 모터의 해석

2.4.1 전자장 지배방정식

유도전류와 변위전류를 무시할 수 있으며 전자계에서 성립하는 Maxwell 방정식과 그 보조방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = J \quad (2.4)$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2.5)$$

$$B = \nabla \times A \quad (2.6)$$

여기서 μ_0 는 진공에서의 투자율(Permeability), A 는 자기 벡터 포텐셜이다. 비선형 현상이 없을 때 자화량은 자화율 χ 로서,

$$M' = \chi H \quad (2.7)$$

로 표현되지만 해석 영역 안에 비선형 특성을 갖는 매질이 포함되는 경우의 자화량 M' 은 자계의 세기와 자속밀도에 대한 단순한 식으로 표현되지 않기 때문에 미지수로 남겨두어야 한다. 일반적으로 자화량 M' 은 외부의 자계가 없어지면 사라지는 가역항(Reversible Component : χH)과 외부의 자계가 없어져도 사라지지 않고 자발자화 특성을 갖는 비가역항(Irreversible Component : M)을 합한 식으로 나타낼 수 있다.

$$M' = \chi H + M \quad (2.8)$$

식(2.8)을 식(2.5)에 대입시키면,

$$H = vB - M \quad (2.9)$$

와 같은 식을 얻는다. 여기에서 $v = 1/\mu$, $\mu = \mu_0\mu_r$, $\mu_r = 1 + \chi$ 이다. 이것을 식(2.4)와 식(2.6)을 이용해서 식(2.9)의 관계로부터,

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J + \nabla \times M \quad (2.10)$$

회전에 의한 벡터 관계식과 쿨롱 게이지로부터 식(2.10)과 같은 지배방정식을 얻는다.

$$-(\nabla \cdot \nu \nabla)A = J + \nabla \times M \quad (2.11)$$

해석영역을 경계조건에 따라 다른 해석을 하게 되며, 경계면에서의 자계의 성분을 감안하여 경계조건을 만족시키고 한번 미분 가능한 가중함수 W 를 식(2.11)에 곱한 뒤 전체 영역에서 적분하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\int_{\Omega} W\{(\nabla \cdot \nu \nabla)A + J + \nabla \times S\}d\Omega = 0 \quad (2.12)$$

Green 정리와 경계조건으로부터,

$$\int_{\Omega} (-\nu \nabla W \nabla \times A + WJ - \nabla W \times M)d\Omega = 0 \quad (2.13)$$

를 얻는다⁽⁶⁷⁾.

2.4.2 Maxwell stress tensor을 이용한 토크 계산

전자력 밀도 f 는 전류밀도 J 와 자속밀도 B 에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$f = J \times B \quad (2.14)$$

Maxwell 방정식을 이용하면 식(2.14)는,

$$f = (\nabla \times H) \times B = \frac{1}{\mu_0}(\nabla \times B) \times B \quad (2.15)$$

가 된다. 따라서 체적 V 인 물체에 작용하는 총 전자력은,

$$f = \int_V f dv = \int_V \frac{1}{\mu_0}(\nabla \times B) \times B dv \quad (2.16)$$

로 된다. 그런데 식(2.16)은 surface stress P 에 의해 물체가 포함된 있는 임의의 표

면에 대한 면적분으로 바뀌서 표현할 수 있다. 벡터등식

$$(\nabla \times B) \times B = (B \cdot \nabla)B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \quad (2.17)$$

를 이용하면,

$$f = \frac{1}{\mu_0} \left[\int_V (B \cdot \nabla)B dv - \int_S \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} ds \right] \quad (2.18)$$

가 된다. 여기서 S 는 체적 V 의 표면적이고 \hat{n} 은 표면적 S 의 단위외향벡터이다.

$$(B \cdot \nabla)B = (B \cdot \nabla)B_x \hat{x} + (B \cdot \nabla)B_y \hat{y} + (B \cdot \nabla)B_z \hat{z} \quad (2.19)$$

이다. 또

$$\nabla \cdot (B_x B) = (B \cdot \nabla)B_x + B_x (\nabla \cdot B) \quad (2.20)$$

이며, $\nabla \cdot B = 0$ 이기 때문에

$$f = \int_S \frac{1}{\mu_0} \left[(B \cdot \hat{n})B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} \right] ds \quad (2.21)$$

가 된다. 식(2.21)을

$$F = \int_S P ds \quad (2.22)$$

로 쓸 수 있고, 여기에서

$$P = \frac{1}{\mu_0} \left[(B \cdot \hat{n})B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} \right] \quad (2.23)$$

이며, Maxwell stress tensor로 부른다.

2차원 문제는 유한요소법으로 힘의 계산을 하기 위하여 m 개의 요소를 나눈 뒤 요소의 면적을 S 라 하고, 그 각 요소에서의 힘을 F^e 라 하면,

$$F = \sum_{e=1}^m F^e \quad (2.24)$$

이고, 여기서 m 은 표면 S 와 교차하는 요소의 수이다. 한 요소에서의 힘 F^e 는

$$F^e = \int_{\Delta S} P ds = P \Delta S = P \Delta Cl \quad (2.25)$$

이고, 여기서 ΔC 는 표면 S 가 요소 e 를 자르는 길이이고, l 은 z 축 방향의 길이이다. F^e 의 x 성분, y 성분 F_x^e 와 F_y^e 는,

$$F_x^e = \frac{\Delta Cl}{2\mu_0} [(B_x^2 - B_y^2)n_x = 2n_y B_x B_y] \quad (2.26)$$

$$F_y^e = \frac{\Delta Cl}{2\mu_0} [(B_x^2 - B_y^2)n_y = 2n_x B_x B_y] \quad (2.27)$$

이다. 여기서 토크는 다음 식(2.28)로,

$$\vec{T} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2.28)$$

구할 수 있다⁽⁶⁸⁾.

2.4.3 Maxwell 방정식 및 경계조건

해석을 위해 전기장과 관련된 Maxwell 방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad \oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q = \int_v \rho dv \quad (2.29)$$

어떠한 폐곡면을 통과하는 전속은 폐곡면 내부에 존재하는 전체의 전하량과 같고, 발산정리와 가우스의 법칙을 이용하면 전기장에 대한 Maxwell 방정식이 유도된다.

$$\nabla \times \vec{E} = 0, \quad \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2.30)$$

단위 전하를 임의의 폐경로를 따라서 일주시킬 때 필요한 일은 0이다.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2.31)$$

다음으로 자기장과 관련된 Maxwell 방정식을 정리하면 다음 식(2.32)로 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j}, \quad \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{s} = I \quad (2.32)$$

자기장에 대한 가우스(Gauss) 법칙에서 자속선은 항상 폐곡선을 형성하고 점전하와 같은 형태의 자하는 존재하지 않는다.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (2.33)$$

$$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = Q \quad (2.34)$$

$$\int_v (\nabla \cdot \vec{D}) dv = \int_v \rho dv \quad (2.35)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.36)$$

위식(2.32)는 비오-사바르 법칙의 미분형인 미소전류를 구현할 수 없기 때문에 실험적인 확인이 불가능하지만 다음 식(2.37)로 표현된다.

$$d\vec{H} = \frac{Id\vec{l} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} \quad (2.37)$$

그러나 Biot-Savart의 법칙의 저분량은 실험적으로 증명이 가능하다.

$$\vec{H} = \oint_l \frac{Id\vec{l} \times \hat{a}_R}{4\pi R^2} \quad (2.38)$$

암페어(Ampere)의 주회법칙은 폐경로 위에서 자속 벡터 \vec{H} 에 의한 선적분은 폐경로 내부를 통과하는 전류(I)의 크기와 같다.

이 법칙은 비오-사바르 법칙으로부터 유도 가능하다.

$$\oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (2.39)$$

폐경로가 x-y평면에 평행하게 놓였을 때, z방향의 전류밀도는 다음 식(2.40)로 나타낼 수 있고,

$$\lim_{dx, dy \rightarrow 0} \frac{\oint \vec{H} \cdot d\vec{l}}{dxdy} \cong \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \cong J_z \quad (2.40)$$

폐경로가 y-z평면에 평행하게 놓였을 때, x방향의 전류밀도는 다음 식(2.41)로 나타낼 수 있으며,

$$\lim_{dy, dz \rightarrow 0} \frac{\oint \vec{H} \cdot d\vec{l}}{dydz} \cong \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \cong J_x \quad (2.41)$$

폐경로가 z-x평면에 평행하게 놓였을 때, y방향의 전류밀도는 다음 식(2.42)로 나타낼 수 있다.

$$\lim_{dz, dx \rightarrow 0} \frac{\oint \vec{H} \cdot d\vec{l}}{dzdx} \cong \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \cong J_y \quad (2.42)$$

스토크스(Stokes) 정리를 이용하여 다시 정리하면, 다음 식(2.43)로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} &= \int_s (\nabla \times \vec{H}) \cdot d\vec{s} \\ \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = I &= \int_s \vec{J} \cdot d\vec{s} = \int_s (J_x \hat{a}_x + J_y \hat{a}_y + J_z \hat{a}_z) \cdot d\vec{s} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{J} &= J_x \hat{a}_x + J_y \hat{a}_y + J_z \hat{a}_z \end{aligned} \quad (2.43)$$

전기장에서의 경계조건은 Fig. 2.20과 같다.

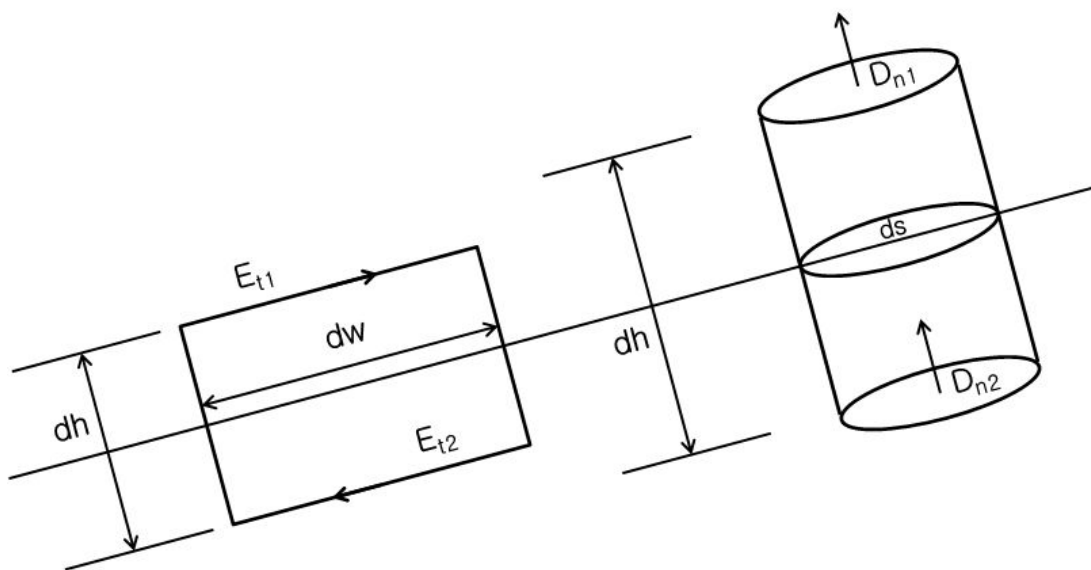


Fig. 2.20 Boundary condition of electric field(ϵ)

경계면에서의 연속조건을 정리하기 위하여 높이 dh를 0으로 만드는 극한 $\lim_{dh \rightarrow 0}$ 을 적용하면서 회전정리 및 발산정리를 적용하면 다음 식(2.44)과 같이 경계조건이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} &= 0 & \oint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} &= 0 \\
 E_{t1}dw - E_{t2}dw &= 0 & D_{n1}ds - D_{n2}ds &= \rho ds \\
 E_{t1} &= E_{t2} & D_{n1} &= D_{n2}
 \end{aligned}
 \tag{2.44}$$

자기장에서의 경계조건은 Fig. 2.21과 같다.

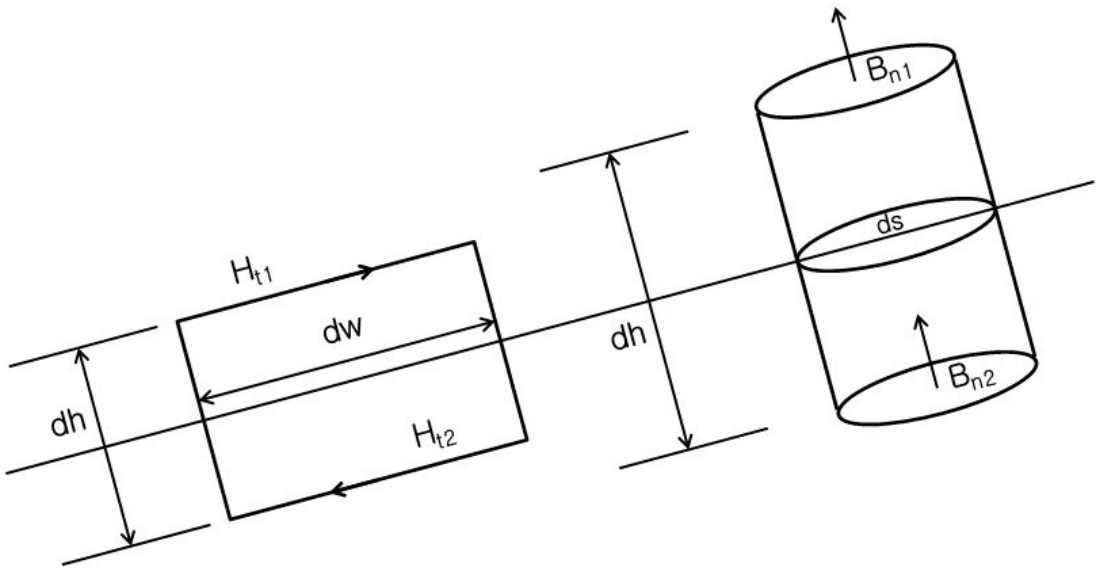


Fig. 2.21 Boundary condition of magnetic field(μ)

Fig. 2.20의 전기장의 경우와 동일한 방법으로 높이 dh를 0으로 만드는 극한 $\lim_{dh \rightarrow 0}$ 을 적용하면서 회전정리 및 발산정리를 적용하면 다음 식(2.45)와 같이 경계조건이 정리된다.^(69~70)

$$\begin{aligned}
 \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} &= I & \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} &= 0 \\
 E_{t1}dw - E_{t2}dw &= Kdw & B_{n1}ds - B_{n2}ds &= 0 \\
 H_{t1} &= H_{t2} = K & B_{n1} &= B_{n2}
 \end{aligned}
 \tag{2.45}$$

제 3 장 실험 및 해석

3.1 BLDC 모터

3.1.1 BLDC 모터의 모델링

본 논문에서는 BLDC 모터는 이상적인 사다리꼴 형태의 역기전력과 회전자 위치에 따라서 고정자 권선 인덕턴스의 변화가 비정현적 이므로 상변수 모델링으로 접근하기로 한다. Fig. 3.1은 BLDC 모터의 3상 전기자 권선의 등가회로이다.

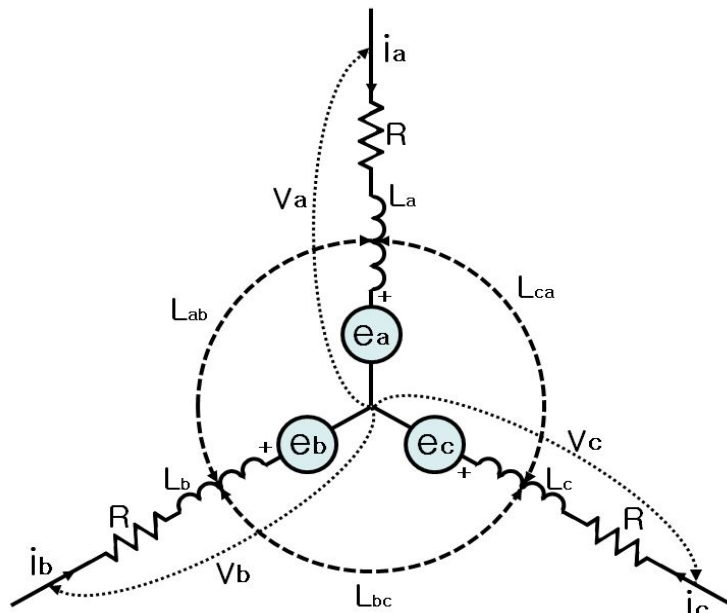


Fig. 3.1 Three-phase armature winding equivalent circuit

회전자는 영구자석과 스테인리스강으로 구성되어 있어서 높은 저항성을 갖고 있으므로 회전자에 유도되는 전류는 무시될 수 있고 제동 권선은 없다고 가정하였을 때 고정자 3상 권선에 대한 상변수 회로 방정식은 다음 식(3.1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{dt}{d} \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_b \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

위 식(3.1)에서 v_a, v_b, v_c 는 상전압, R 은 상저항, i_a, i_b, i_c 는 상전류, L_a, L_b, L_c 는 각 상의 상호 인덕턴스, L_a, L_b, L_c 는 각 상의 자기 인덕턴스, e_a, e_b, e_c 는 상역기전력이다.

여기서 고정자 3상 권선은 동일하다고 가정한다. 그리고 유기된 역기전력은 Fig. 2.16에서 와 같이 이상적인 사다리꼴 형태를 가지며 그것의 크기는 회전자의 속도에 비례한다. 전동기의 전기적 위치를 θ_e 라고 한다면 θ_e 의 함수인 역기전력 함수 $k_e(\theta_e)$ 를 도입해서 역기전력을 다음 식(3.2)와 같이 표현할 수 있다.

$$e_a = k_e(\theta_e) \frac{2w_e}{p} \quad (3.2)$$

위 식(3.2)에서 w_e 는 전기적 각속도이고, p 는 전동기의 극 수 이다. 역기전력 함수 $k_e(\theta_e)$ 의 크기는 k_e 로 가정하면,

$$K_e(\theta_e) = \begin{cases} K_e \frac{6}{\pi} \theta_e & (0 \leq \theta_e \leq \frac{\pi}{6}) \\ K_e & (\frac{\pi}{6} \leq \theta_e \leq \frac{5\pi}{6}) \\ K_e \frac{6}{\pi} (\pi - \theta_e) & (\frac{5\pi}{6} \leq \theta_e \leq \pi) \end{cases} \quad (3.3)$$

식(3.3)으로 표현되며 반파 대칭이므로,

$$k_e(\theta_e + \pi) = -k_e(\theta_e), \quad (\pi \leq \theta_e \leq 2\pi) \quad (3.4)$$

식(3.4)와 같이 표현된다.

b상과 c상의 역기전력의 크기는 a상의 역기전력과 크기가 같고 전기각으로 120도와 240도의 위상차를 가진다. 또한 회전자의 위치에 따른 고정자 3상 권선인 표면 부착형 타입의 인덕턴스의 변화가 없는 영구자석전동기라고 가정한다면 각 상의 self inductance와 mutual inductance가 동일하기 때문에 이를 다음 식(3.5)와 같이 각각 L_s 와 M 으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L_a &= L_b = L_c = L_s \\
 L_{ab} &= L_{bc} = L_c = M
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

식(3.5)를 식(3.1)에 대입하면,

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}
 \tag{3.6}$$

식(3.6)과 같다. 3상 Y결선 전동기에서,

$$i_a + i_b + i_c = 0 \tag{3.7}$$

이므로,

$$M_{ia} + M_{ib} = -M_{ic} \tag{3.8}$$

이다. 위 식을 이용하여 식(3.6)을 간략하게 정리하면,

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s - M & 0 & 0 \\ 0 & L_s - M & 0 \\ 0 & 0 & L_s - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}
 \tag{3.9}$$

식(3.9)와 같다.

식(3.9)에

$$L = L_s - M \tag{3.10}$$

로 표현하면 등가회로는 Fig. 3.2와 같고 전압 방정식은,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

식(3.11)과 같이 정리된다.

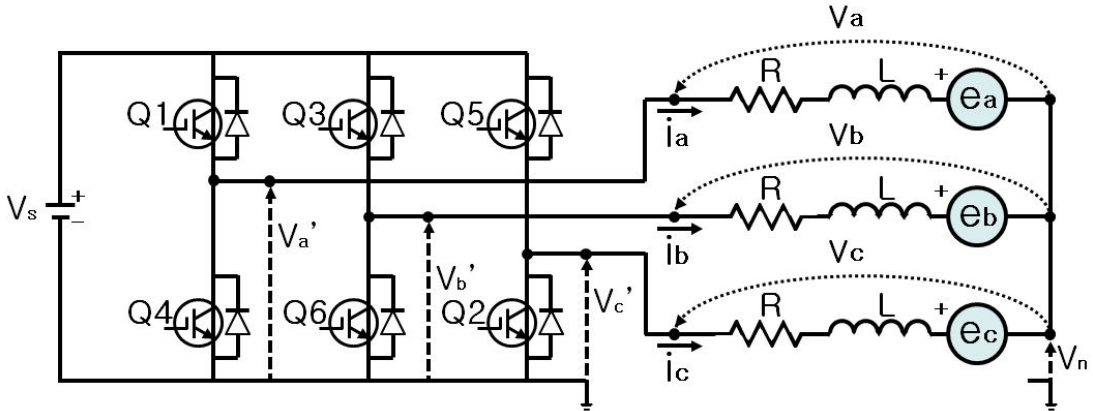


Fig. 3.2 BLDC motor equivalent circuit

그리고 전동기의 출력은,

$$P_{out} = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (3.12)$$

식(3.12)이며, 이 식을 기계적 출력으로 표현하면,

$$P_{out} = T w_m \quad (3.13)$$

식(3.13)과 같고, 식(3.12)와 식(3.13)에 의한 출력 토크 T는,

$$T = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{w_m} \quad (3.14)$$

식(3.14)와 같이 유도될 수 있다. 이때의 운동 방정식은,

$$\frac{d}{dt} w_m = -\frac{B}{J} w_m - \frac{T_L}{J} + \frac{T}{J} \quad (3.15)$$

식(3.15)와 같다.

3.1.2 BLDC 모터의 설계 및 제작

본 논문에서는 BLDC 모터의 설계를 3D 모델링 설계 프로그램인 CATIA V5를 사용하여 모델링하였으며, Fig. 3.3은 CATIA V5 프로그램으로 BLDC 모터의 모델링을 Assembly한 상태이고, Fig. 3.4는 Fig. 3.3 모델링의 주요부품들을 제작한 것이다.

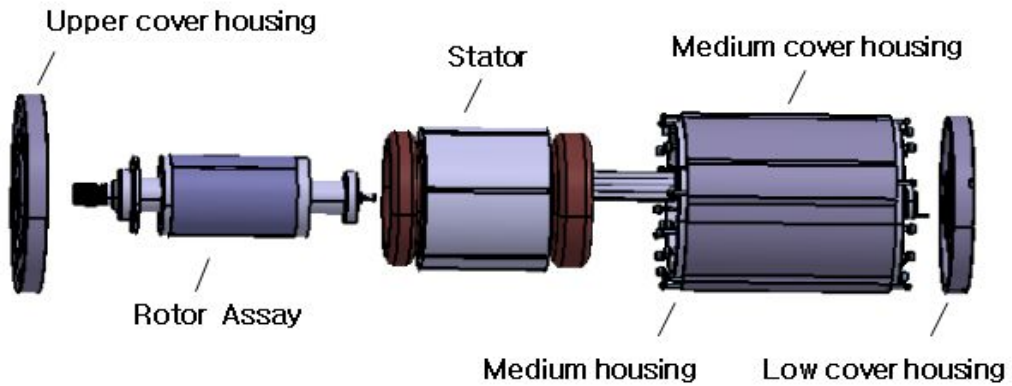
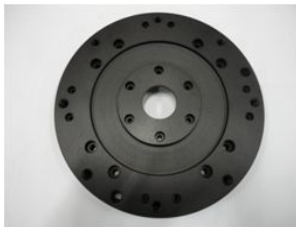


Fig. 3.3 BLDC motor 3D modeling



(a) Upper cover housing



(b) Rotor Assay



(c) Medium housing



(d) Medium cover housing



(e) Low cover housing

Fig. 3.4 Major parts of BLDC motor

Fig. 3.5는 CATIA V5 프로그램으로 모델링한 Stator와 Rotor를 보여주고 있으며, Fig. 3.6은 Stator와 Rotor의 조립도이고, Table. 3.1과 같이 공극을 0.7mm로 하였으며, Table. 3.2에서는 BLDC 모터의 사양을 나타내고 있다.

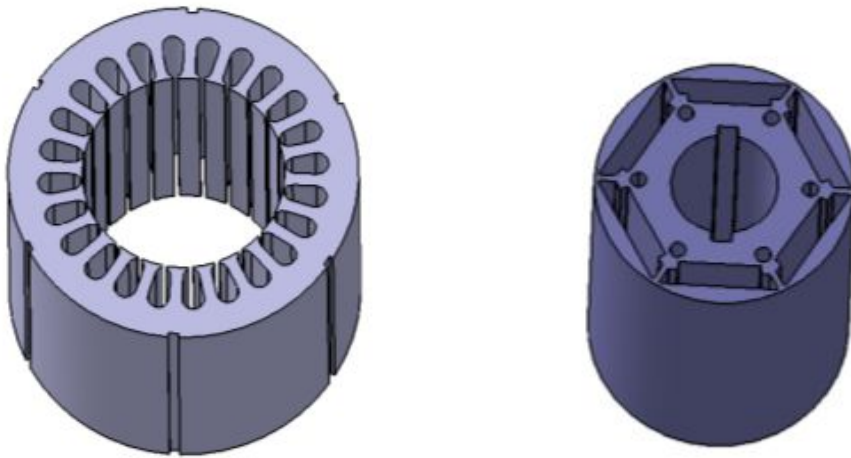


Fig. 3.5 Stator and Rotor of BLDC Motor

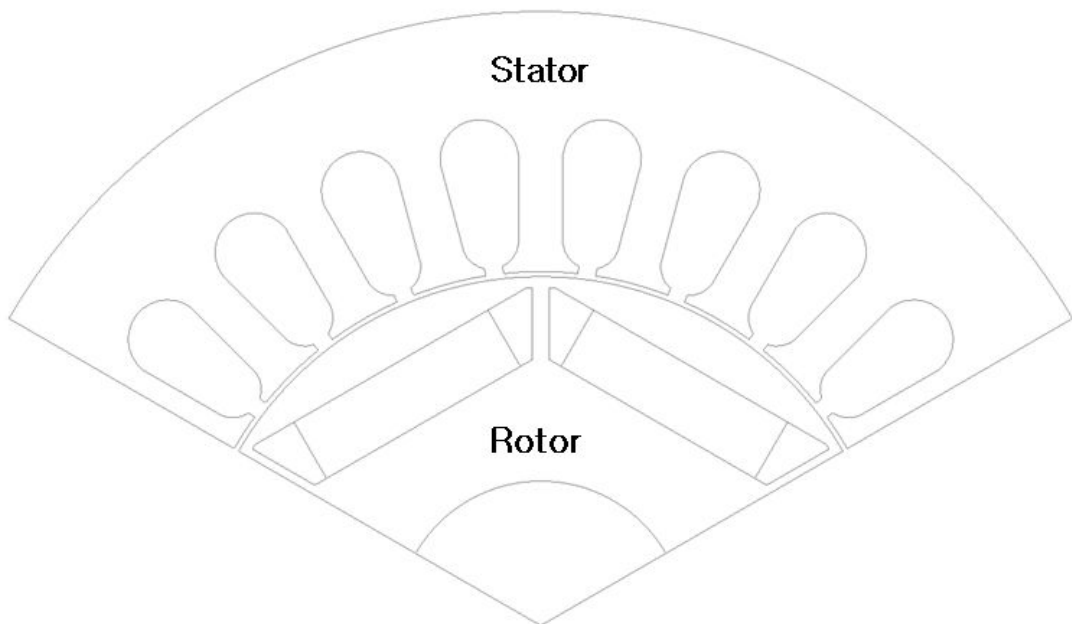


Fig. 3.6 Assembly diagram of stator and rotor

Components	Parameters	Values (mm)
Stator	Outer Diameter	170
	Stack Length	150
Rotor	Outer Diameter	96.6
	Stack Length	150
	Air gap	0.7

Table. 3.1 Specification of Sator and Rotor

Motor Type	PWM Inner Rotor	Contents
Performance	Input Voltage(VDC)	310
	Max. Power(KW)	80
	Max. Torque(Nm)	153
	Cont. Power(KW)	50
	Cont. Torque(Nm)	95.5
Dimension	Stator O.D(mm)	∅170
	Rotor O.D(mm)	∅96.6
Method	Cooling	Water cooling
	Speed Sensor	Hall Sensor

Table. 3.2 BLDC motor specification

다음 Fig. 3.7은 제작된 60KW BLDC 모터를 보여주고 있다.

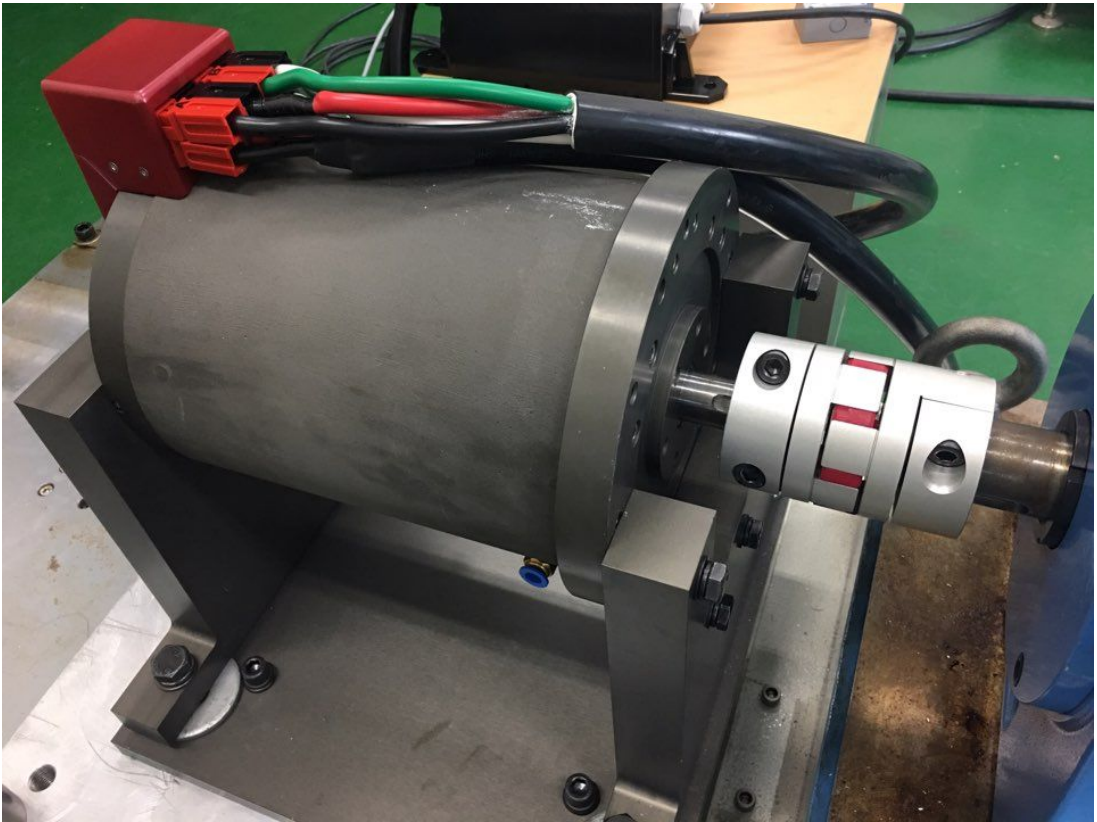


Fig. 3.7 BLDC motor assembly

3.1.3 BLDC 모터의 다이나모 성능실험

개발된 BLDC 모터의 최대출력 성능특성을 검증하기 위하여 Table. 3.3과 같이 Magtrol Ltd.의 전동기 동특성 시험장치 2WB115+EK+2PB115로 시험을 실시하였다. 다이나모 시스템은 제어기 입력전압과 전류 그리고 제어기 출력에 관한 각 상의 전압, 전류, 토크, 회전수 등을 측정할 수 있다. 시험은 모터가 최대속도일 때 부하에 따른 반응성 및 수렴성을 평가하고 최대출력을 측정할 수 있다. 다이나모 성능실험을 통해서 제어기의 성능을 확인하기 위하여 인버터시스템 출력, 역률, 효율 등의 전기적인 신호는 파워아날라이저를 통해서 데이터가 수집이 되고, 전동기의 부하토크와 속도 등은 전동기 부하시험기로부터 물리적인 데이터를 전기적인 신호로 변화해서 성능시험 분석 장치에 입력이 된다. 입력된 물리적인 데이터와 전기적인 데이터를 수집 및 계산을 통해서 제어기의 성능 확인을 할 수 있도록 실험장치가 구성 되어있다.

Type	Nominal braking torque (Nm)	Nominal speed of rotation (rpm)	Nominal braking power (KW)	Maximum speed of rotation (rpm)
2WB115 WB Eddy Current	100	2,865	30	18,000
2PB115 PB Powder	200	480	10	3,000

Table. 3.3 2WB115 + EK + 2PB115 Dynamometer Motor Test Equipment

Table. 3.4는 DC 전원 공급 장치의 사양이고, Fig. 3.8은 모터다이나모 시스템의 구성으로 모터의 성능시험에 사용된 다이나모 장비는 시험 데이터의 획득이 가능한 모터 성능 분석 장치로 모터의 속도를 검출하고 확인을 할 수 있다. 또한 Fig. 3.9는 컨트롤 시스템 도면이고, Fig. 3.10은 도면을 바탕으로 개발된 컨트롤 시스템으로 내부에는 Module Encoder ETC, PLC 등이 설치되었다.

DC Output	Wattage	60KW
	Voltage (C.V)	5V~120V
	Current (C.C)	0A~500A
Ripple & Noise (from 20 Hz to 20MHz)	Voltage	(p-p) Less then $\pm 5\%$
	Current	(p-p) Less then $\pm 5\%$
Load & Ineregulation	Voltage	Less then $\pm 2\%$
	Current	Less then $\pm 2\%$
Accuracy & Stability	Voltage	Less then $\pm 2\%$
	Current	Less then $\pm 2\%$
Control & display resolution	Voltage	1V
	Current	1A
Output start slope time		min 1sec~max 60sec
Dimension		W550×H1350×D960mm

Table. 3.4 DC power supply system

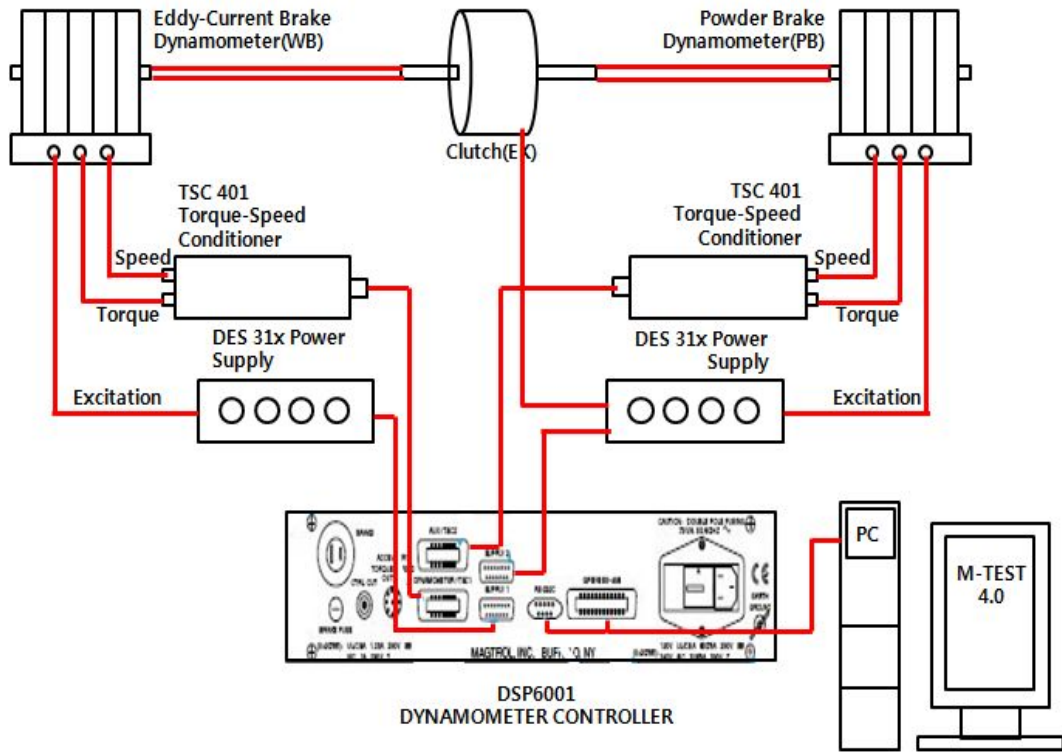


Fig. 3.8 2WB115 + EK + 2PB115 Dynamo System

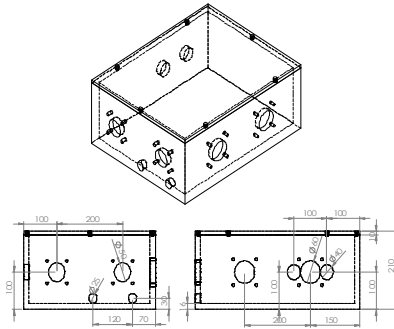


Fig. 3.9 Control system Drawing

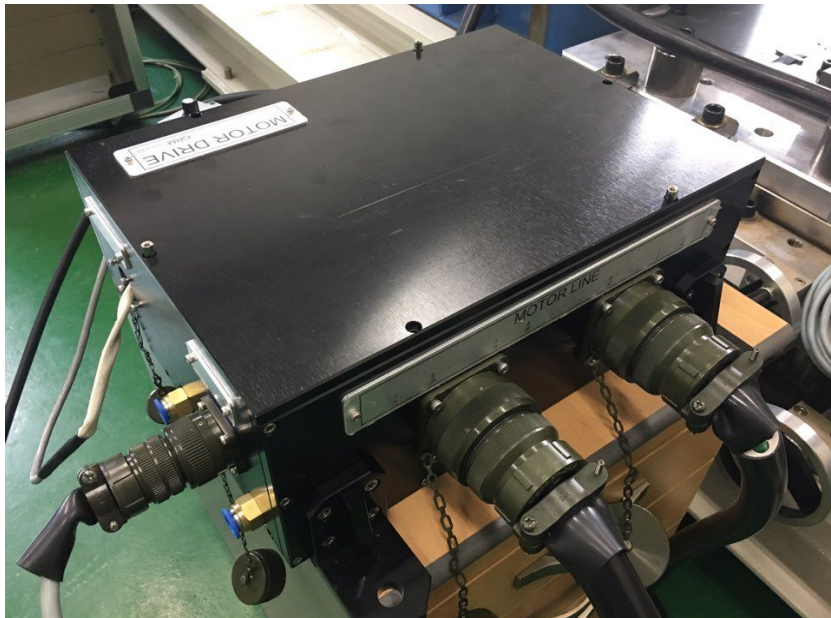


Fig. 3.10 Control system

3.2 BLDC 모터 드라이버

3.2.1 BLDC 모터의 드라이버 구성

교류 전원을 정류기를 통하여 직류전원으로 변환하고 모터 구동을 위하여 스위칭 될 때 고조파가 발생되면서 전원의 품질을 저하시키므로 이것을 보상하기 위해서 역률 보상을 설치하고, 각종 제어회로의 전원으로 사용하기 위하여 SMPS와 같은 전원회로가 필요하며, 급격한 전압변동에 의한 보호를 위해 Braking 회로가 추가되어 있다.

BLDC 모터의 구동을 위해 스위칭 소자모듈이 구성되어 있으며, BLDC 모터에서 속도 검출을 하기 위해 Resolver, Encoder, Hall sensor와 같은 회전자 위치검출용 센서가 모터에 부착되어 이것을 제어하는 제어기에 회전자의 위치정보를 전달하고 적절한 회전자의 위치를 검출하여 스위치모듈의 게이트 신호를 출력해서 모터를 제어한다.

일반적으로 BLDC 모터의 과전류, 전류제어 그리고 위치/속도 제어를 위하여 상전류 검출용 전류센서를 약 두 개정도 사용하고, 센서 수를 줄이기 위하여 DC-link단에 전류센서를 한 개만 설치해서 사용하기도 한다. 모터 제어기의 두뇌인 Fig. 3.11과 같이 마이크로 컨트롤러는 최근 들어 전자부품 및 메모리의 집적화 기술의 발달로 인해 다양한 제품들이 많이 개발되어서 상용화 되고 있으며 연구에 사용한 컨트롤러는 전력전자, 모터구동, 센서분야의 제어기기 개발에 널리 사용되고 있는 TI사의 TMS320F2808 DSP를 이용하였다.

이 DSP는 32bit 고정소수점 연산이 가능한 프로세서로 처리속도가 최대 100MIPS이다. DSP는 다양한 제품라인을 가지고 있으나 이 컨트롤러는 이전의 C24x, C281x에서 외부 신호의 Capture, PWM의 출력, 시간단축, 엔코더펄스의 해석 등의 다양한 기능들을 삽입시켜서 Event Manager라는 모듈에서 통제 한다.

TMS320F2808은 이러한 기능을 3개의 독립 모듈인 ePWM, eCAP, eQEP로 각자의 자원을 사용하고 필요에 따라 다른 모듈들과 동기화하는 형태로 설계 되어 사용의 유연성과 연산속도를 높인다.

또한, Pipeline 방식의 16채널 고속 12bit ADC를 가지고 있어서 최대 12.5MSPS의 속도로 데이터 처리를 할 수 있으며, 다양한 통신규격에 연동가능 하도록 CAN, SPI, UART등의 통신모듈들을 탑재하였다.

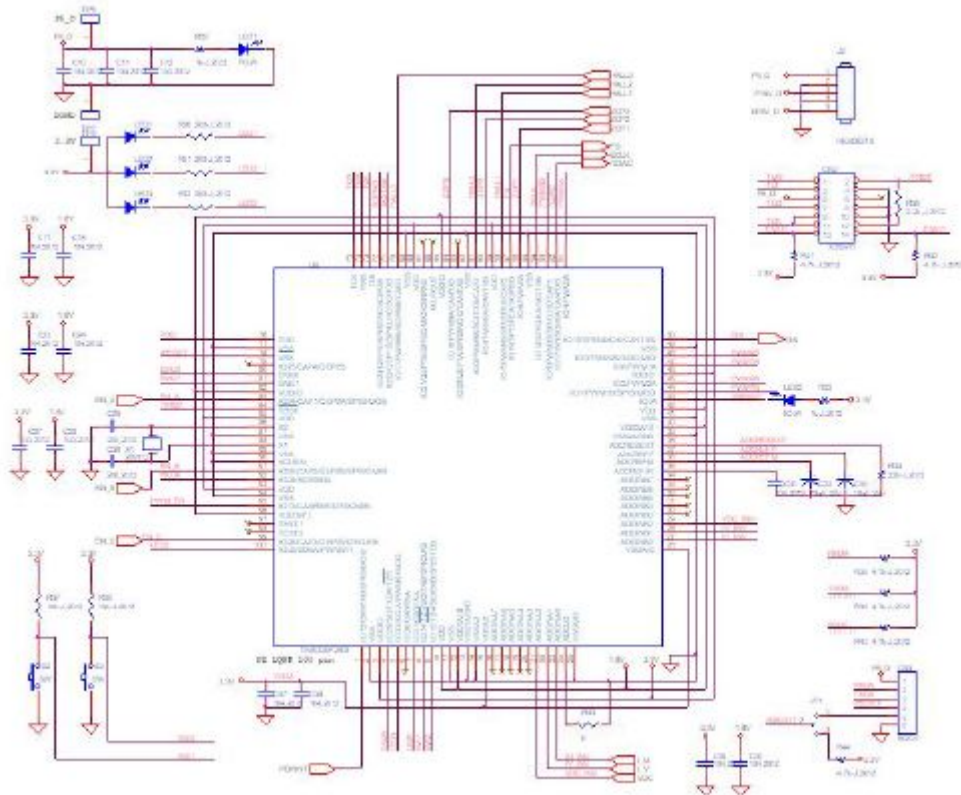


Fig. 3.11 Microprocessor circuit diagram

개발한 인버터는 기본적으로 3상 부하의 구동을 위해서 Fig. 3.11과 같이 상당 2개의 스위칭 소자가 필요하며 중소 용량의 인버터인 경우 대부분 주로 IGBT 소자를 사용하고 있다. 일반적으로 이용하는 IGBT의 경우 3상 부하의 구동을 위하여 6개의 IGBT 스위칭 소자를 필요로 하고, 디지털 제어부의 Gate Signal을 인터페이스 하기 위하여 별도의 드라이브 회로가 요구된다. 하지만, IPM은 단일모듈로 내부에 6개의 스위칭 소자와 Gate Drive 회로 및 자체적인 보호회로가 있어서 인버터 하드웨어 구성이 간단하고, 뜻밖의 예기치 못한 상태가 발생할 경우 스스로 고장 신호를 검출해서 스위칭을 중단 시키고, 외부에 고장신호를 발생시킴으로서 이것을 사용자가 인지할 수 있도록 하였다.

일반적인 IPM에 있어 내부 보호기능으로는 단락보호, 과열보호, 전원전압의 변동보호, 과전류보호 기능 등이 있다. 또한 상기한 6-pack IPM외에도 Dynamic Braking을

고려해서 1개의 IGBT 소자를 추가한 7-pack 형이 개발되어 신뢰도 및 집적도의 극대화를 추구 할 수 있어서 사용범위가 확대되고 있다.

Fig. 3.12는 기존의 IPM은 상부 암과 하부 암의 IGBT 소자의 게이트 구동을 위하여 4개의 별도의 전원이 필요했으나, 게이트 전원 2개만 있으면 구동이 가능하고 소형화 시킨 SPM이 개발되어 많이 이용되고 있다.

BLDC등 구동형 모터 구동을 위해서 페어차일드의 SPM 모듈(FSB5CH60B)을 사용하였으며, SPM 모듈의 형태와 내부 구성은 Fig. 3.13과 Fig. 3.14와 같다.

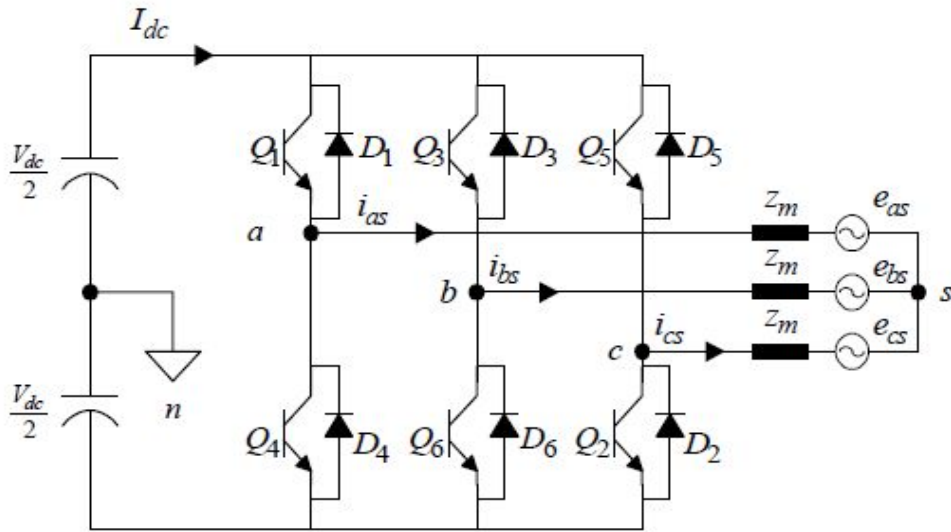


Fig. 3.12 Phase voltage inverter

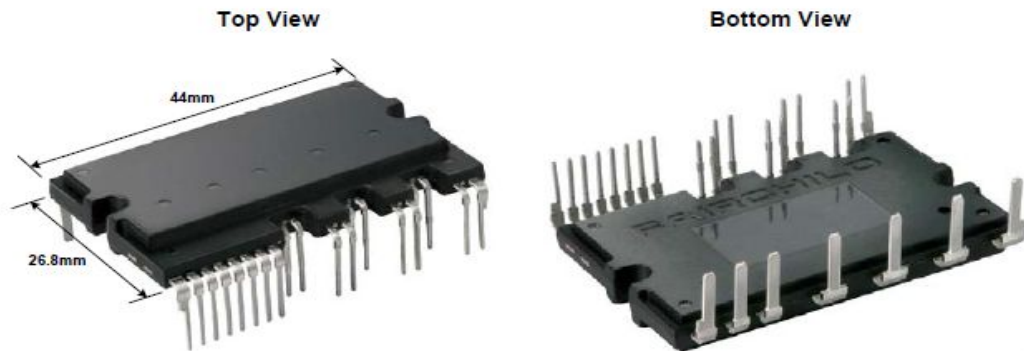


Fig. 3.13 SPM module (FSB5CH60B)

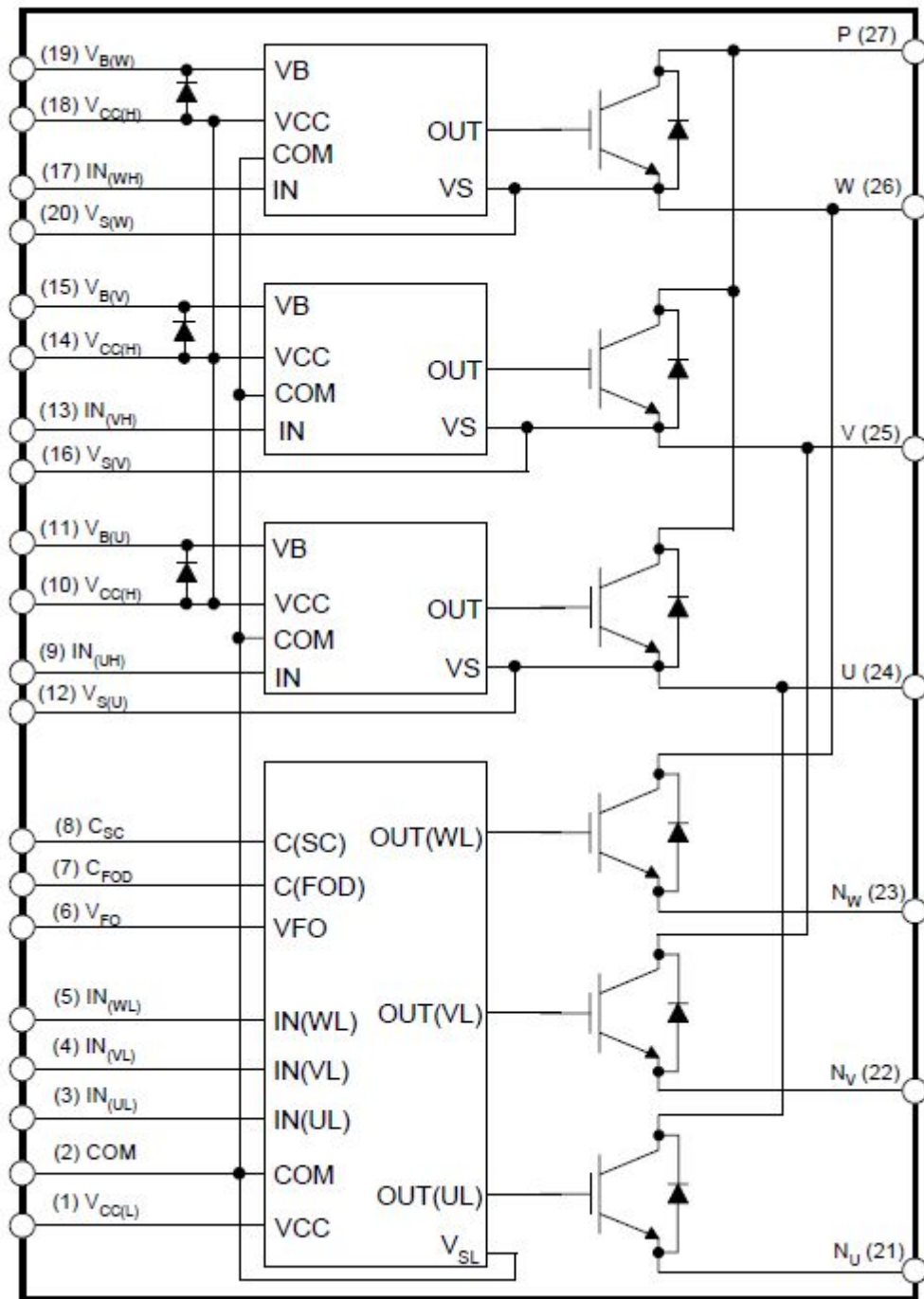


Fig. 3.14 Internal circuit diagram of FSB5CH60B

3.2.2 BLDC 모터의 제어부와 구동부

BLDC 모터 드라이브는 크게 제어부, 구동부 그리고 전원 공급부로 나뉘어진다. 구동을 위한 제어부는 마이크로프로세서이고, Fig. 3.15는 BLDC의 통신 모듈 회로도를 보여주고 있으며, 그에 따른 전류센서 및 회전위치의 센서의 입력 회로도는 Fig. 3.16과 Fig. 3.17과 같다. 마이크로프로세서와 Gate Drive는 PCB로 설계하여 제작하였으며, Fig. 3.18부터 Fig. 3.21과 같다.

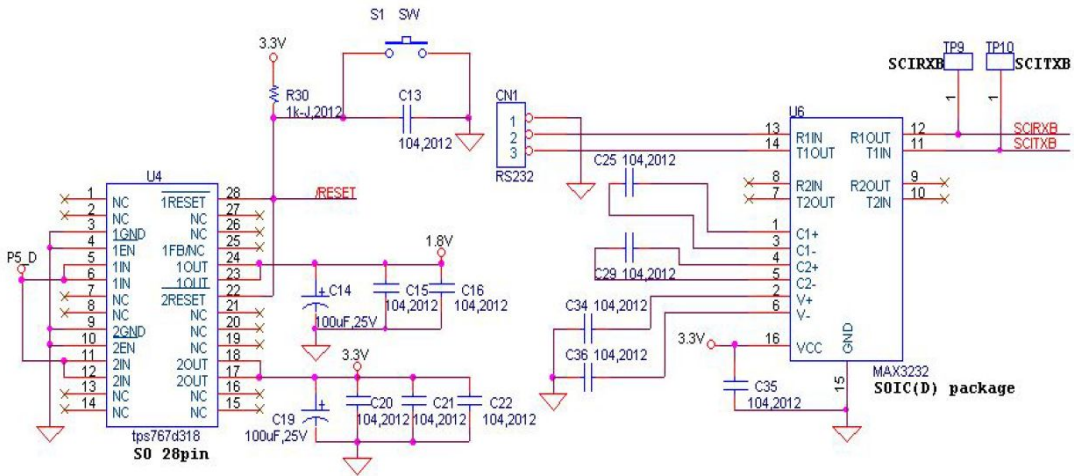


Fig. 3.15 BLDC communication module circuit diagram

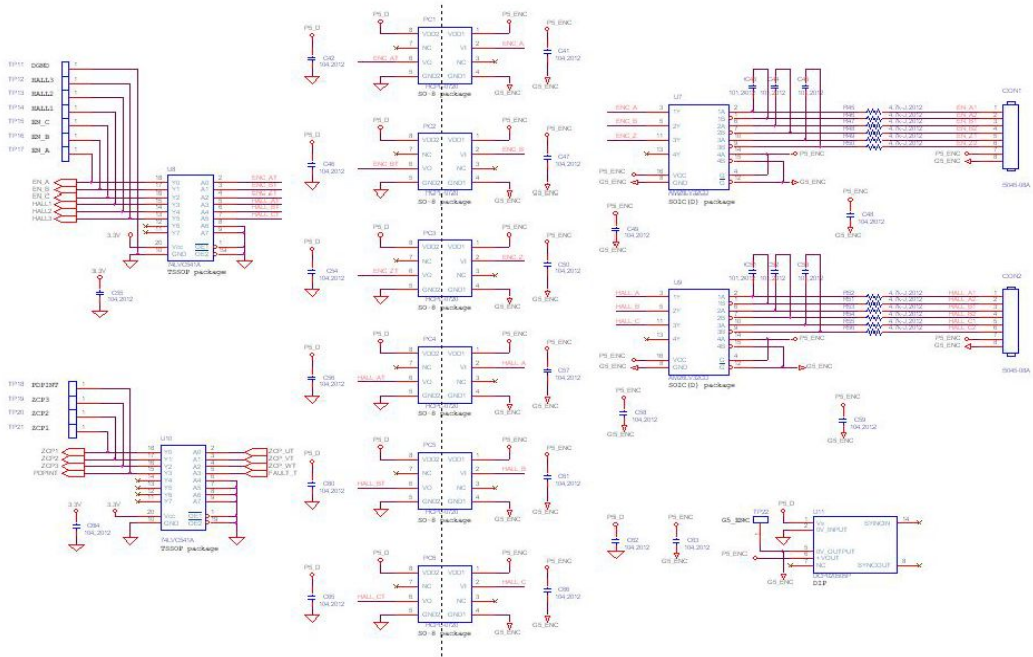


Fig. 3.16 Input circuit diagram of rotary position sensor

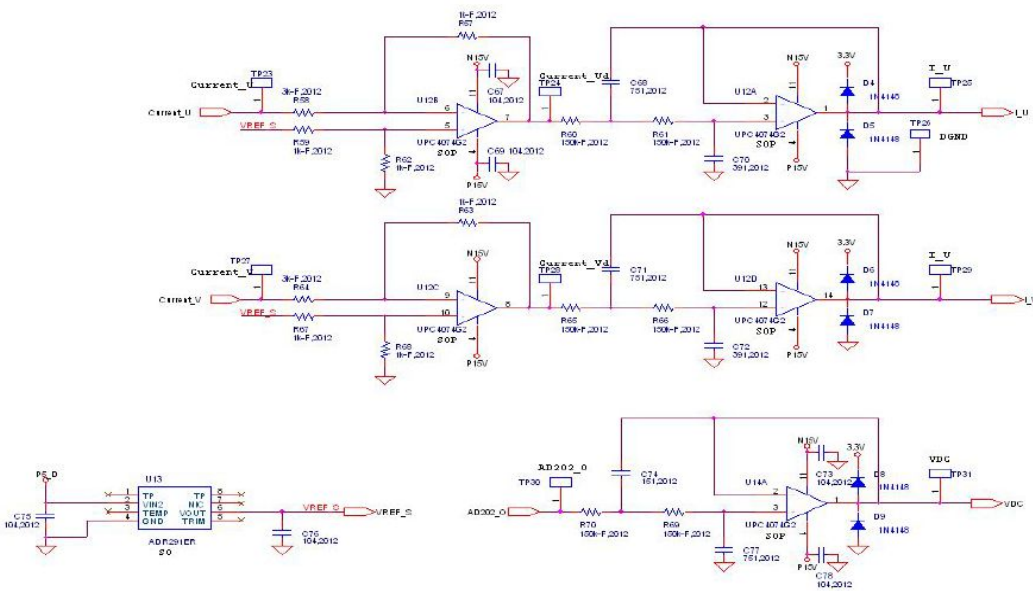


Fig. 3.17 Input circuit diagram of current sensor

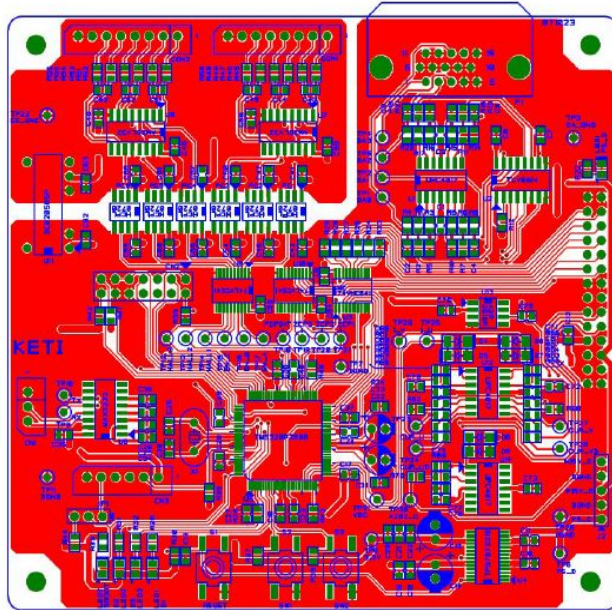


Fig. 3.18 Control board PCB(Top)

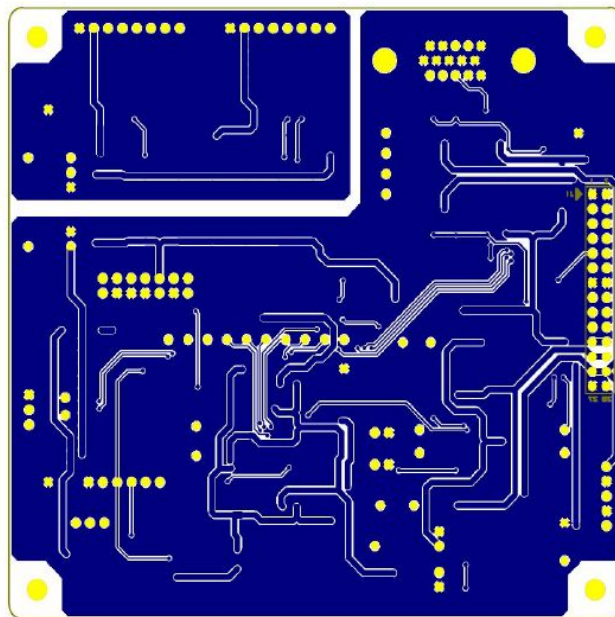


Fig. 3.19 Control board PCB(Bottom)

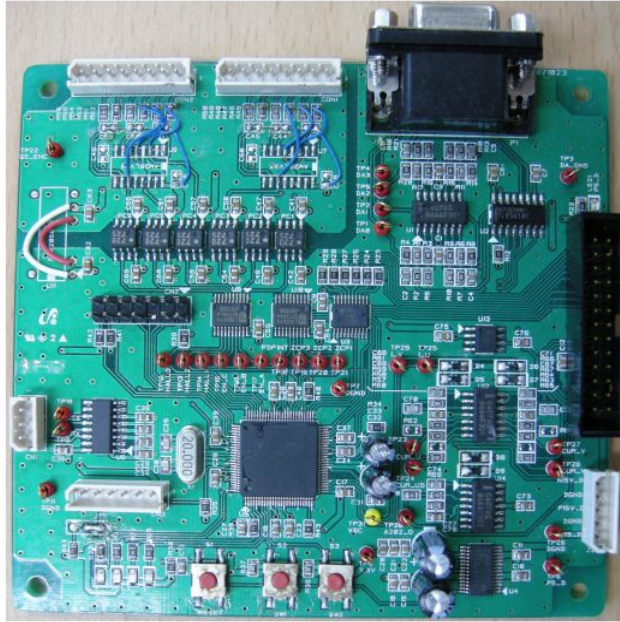


Fig. 3.20 Control board PCB(Top)

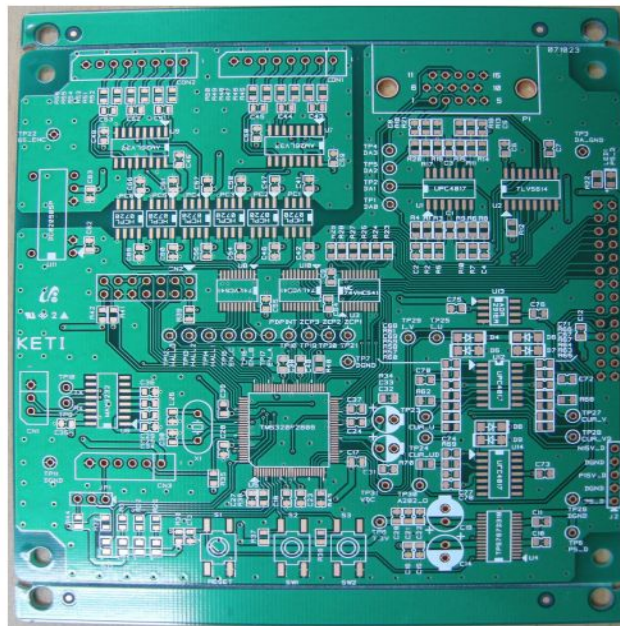


Fig. 3.21 Control board PCB(Bottom)

구동부로는 Gate Drive 부분과 이들 각 부분 동작을 하기 위한 전원 공급 부분 그리고 각 상의 전류 신호를 검출하기 위한 전류 센서로 구성하였다. DC 전압의 검출, 제어 전원 그리고 신호 검출에 대한 회로도 는 Fig. 3.22부터 Fig. 3.24와 같고, SPM 모듈 연결 회로도 및 상전류 검출 회로도 는 Fig. 3.25와 같으며, 검열 회로도 는 Fig. 3.26과 같다. 구동부에 대한 상하부 PCB를 Fig. 3.27과 Fig. 3.28과 같이 설계하였고, 제작이 완료된 구동부는 Fig. 3.29로 나타냈다. 제어부와 구동부를 연결하여 제작된 BLDC 모터의 제어부는 Fig. 3.30과 같다.

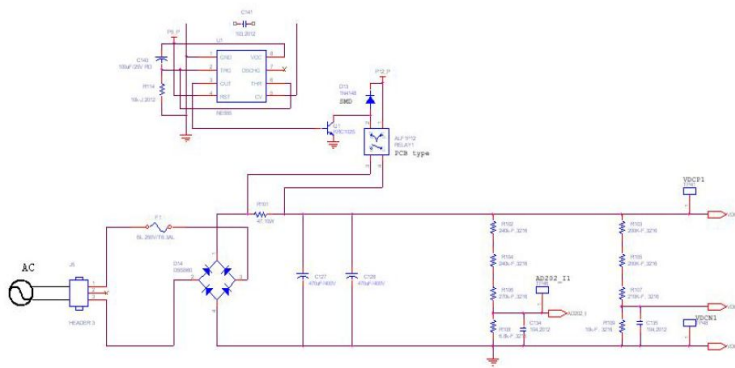


Fig. 3.22 DC voltage detection circuit diagram

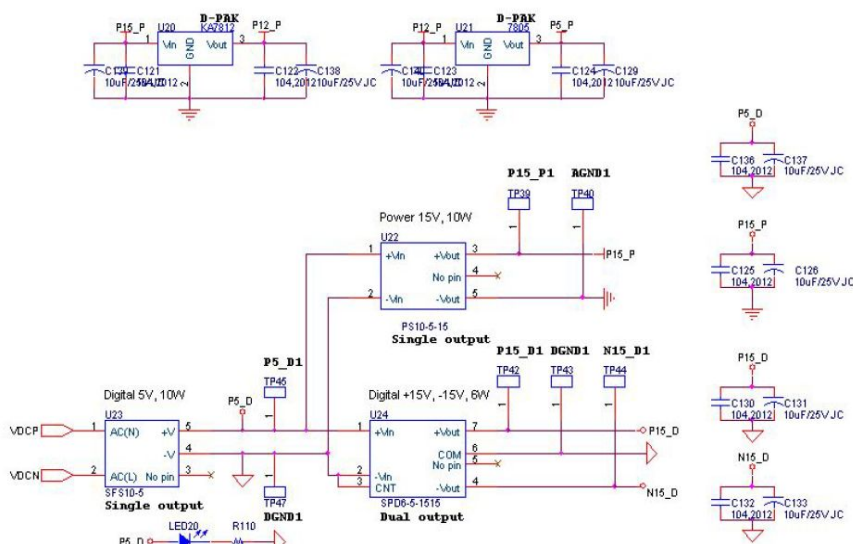


Fig. 3.23 Control power circuit diagram

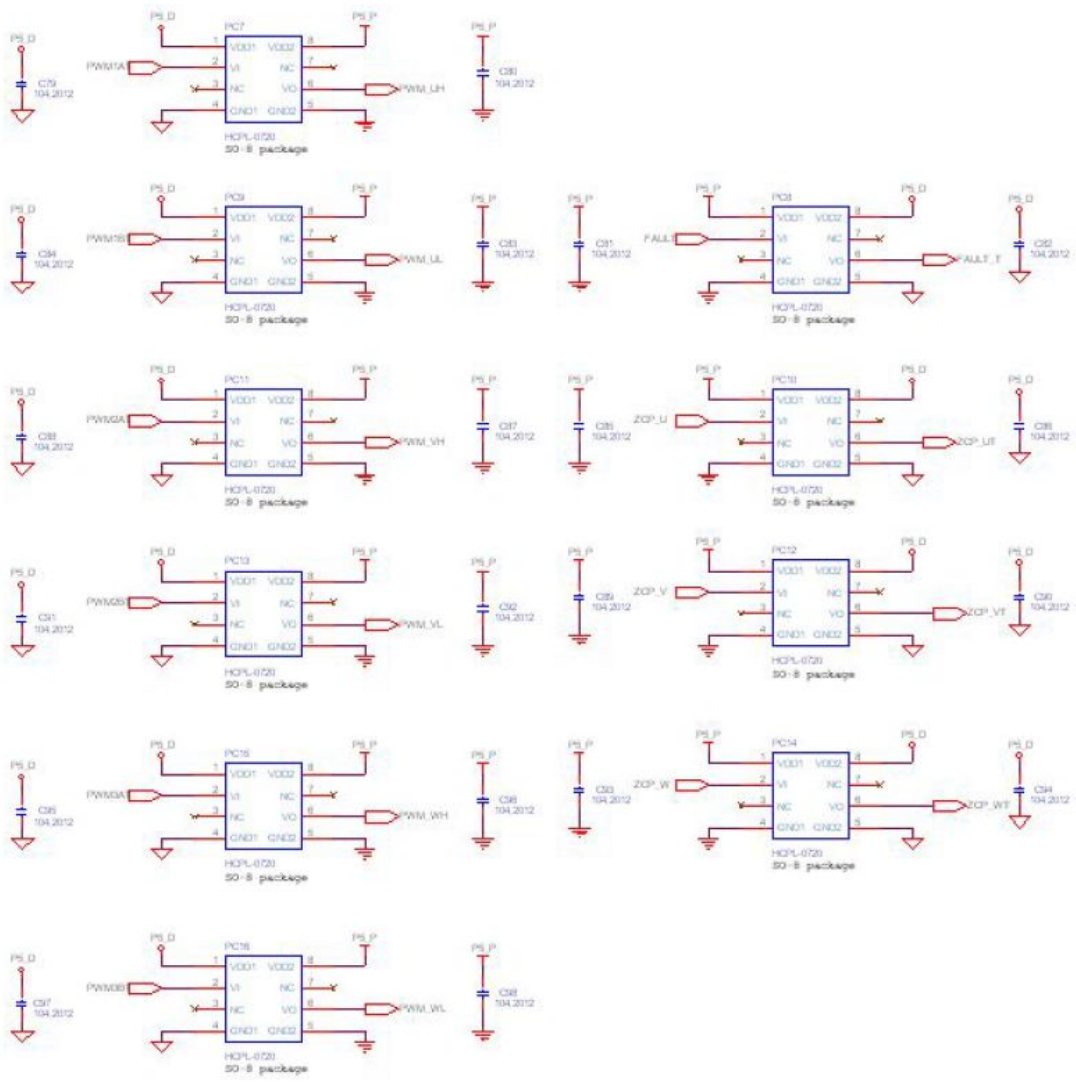


Fig. 3.24 Signal detection circuit diagram

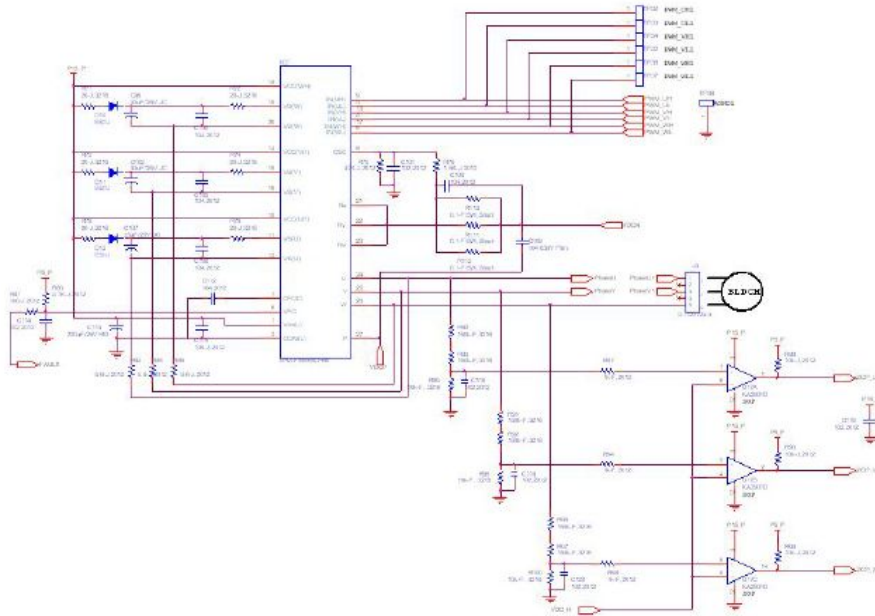


Fig. 3.25 SPM module connection circuit diagram and phase current detection circuit diagram

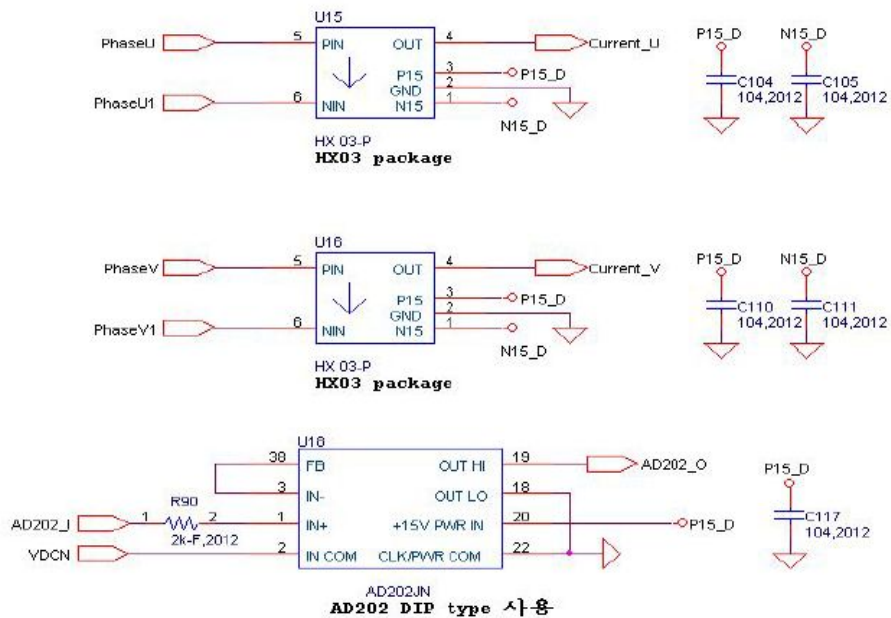


Fig. 3.26 Censored circuit diagram

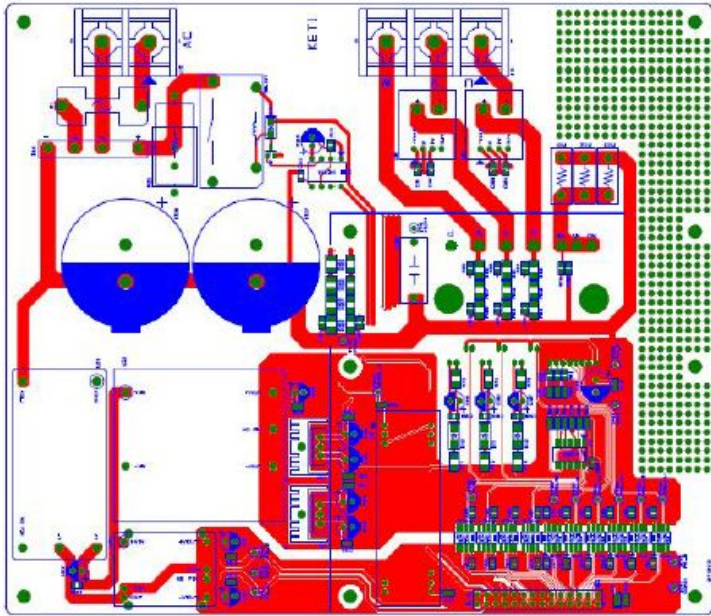


Fig. 3.27 Power board PCB(Top)

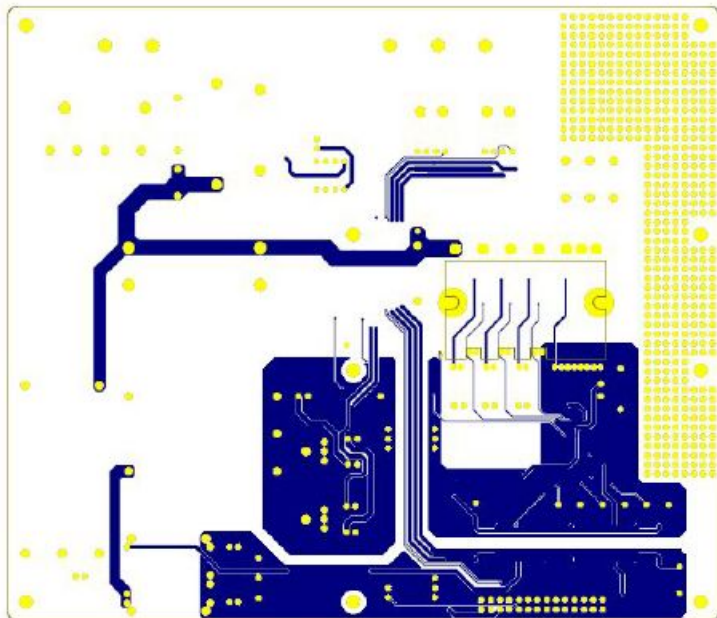


Fig. 3.28 Power board PCB(Bottom)



Fig. 3.29 Power board PCB



Fig. 3.30 Control device of BLDC motor

3.3 PSIM 프로그램을 이용한 제어기 시뮬레이션

본 논문에서는 BLDC 모터 제어 시뮬레이션을 구현하기 위하여 PSIM 프로그램을 이용하였고, C++ 언어를 이용하여 제어 알고리즘을 구현하였다. PSIM의 드라이브 모듈은 전압, 전류 센서, 스위칭 소자, 회전자의 위치, 각속도 측정 센서 그리고 모터의 부하를 측정할 수 있다.

Fig. 3.31은 BLDC 모터 제어의 조작부터 모터까지의 순서를 나타낸 것이다.

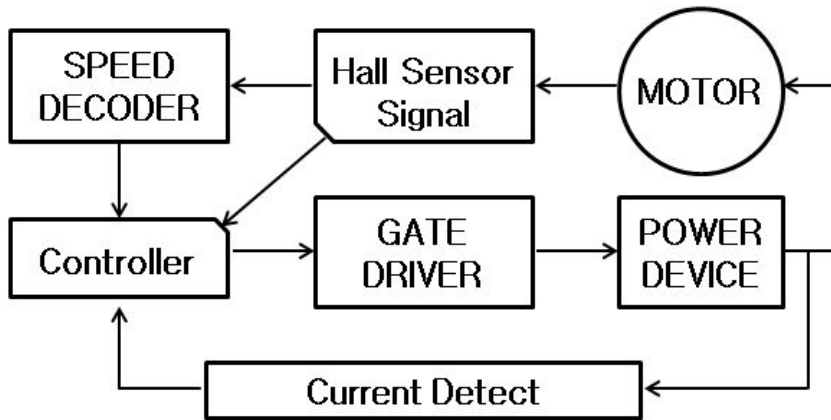


Fig. 3.31 BLDC motor control

3.3.1 홀 센서를 이용한 BLDC 모터의 속도 제어 시뮬레이션

PSIM 프로그램의 모터 드라이브 모듈에서 제공되는 BLDC 모터의 모델은 3상 Y결선으로 된 구조로, 3개의 홀 센서 출력단자, 기계적인 부하를 연결하기 위한 단자, 모터의 3상 입력 단자 및 중성점 단자로 구성되어 있다. BLDC 모터 모델의 역기전력 상수, 고정자 권선의 저항, 인덕턴스, 기계적인 시정수, 극수 및 관성 등의 제정수를 입력한 결과 PSIM 프로그램에 의한 BLDC 모터 모델의 역기전력 파형은 Fig. 3.32와 같이 이상적인 사다리꼴 형태를 가진다.

PSIM 프로그램을 통해 홀 센서를 이용한 BLDC 모터의 속도 제어 시뮬레이션으로 3상 전류와 출력 파형의 결과를 토대로 Fig. 3.32와 같은 그래프를 얻을 수 있었다.

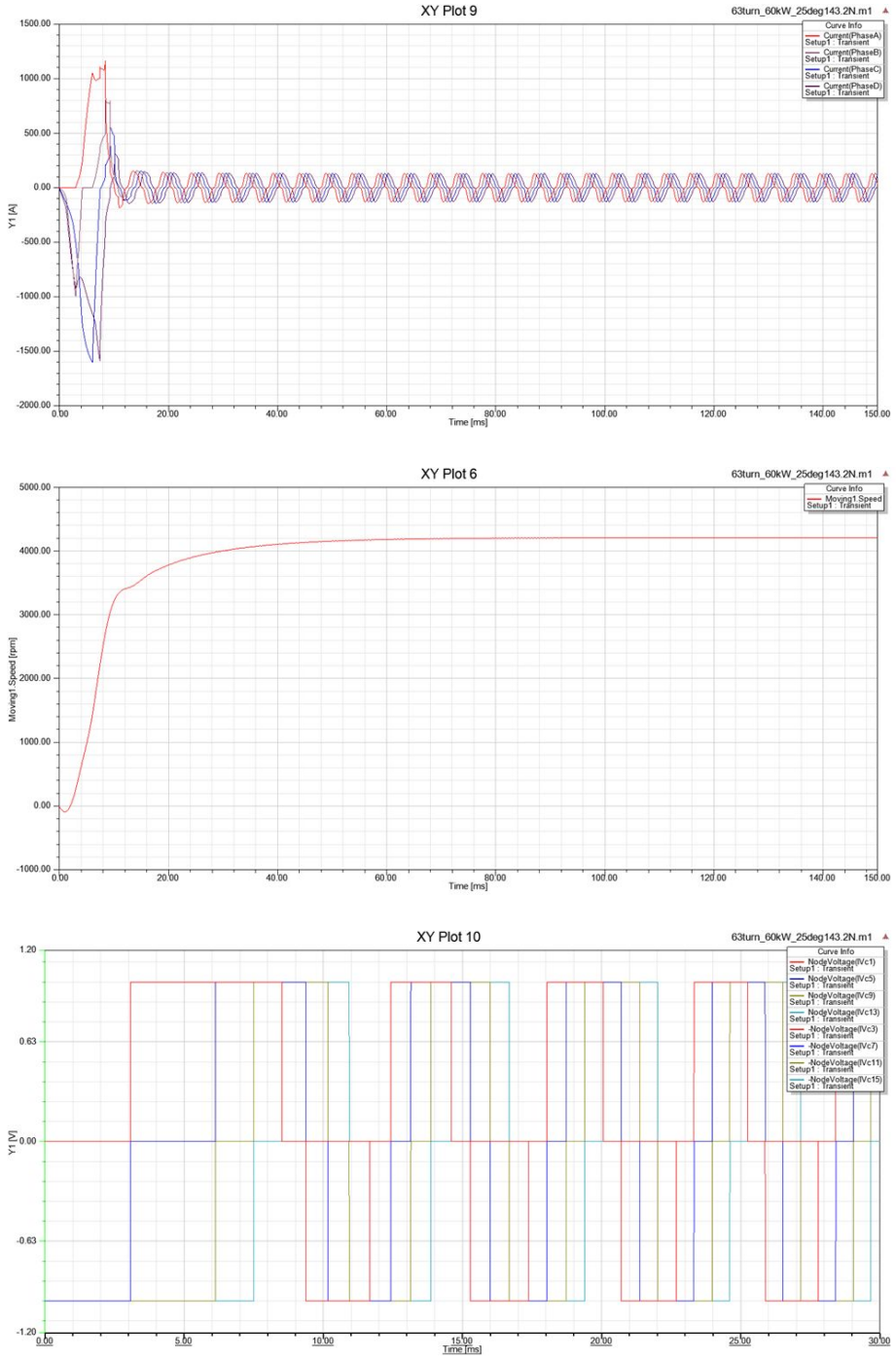


Fig. 3.32 Simulation results for speed control

3.3.2 BLDC 모터의 해석 결과

본 논문에서는 자기 등가 회로법에 대한 설계 후 세부적인 해석은 Maxwell 2.0 프로그램에 의한 유한 요소법으로 검토하였으며, BLDC 모터의 해석 설계 프로그램은 유한요소를 해석하기 위한 데이터 파일을 출력하고, 이어서 유한요소 해석 시스템을 자동적으로 호출하도록 되어 있으며, 유한요소 해석 도구에서 추가적인 작업을 통하여 상세 해석을 실시하였다.

Fig. 3.33부터 Fig. 3.35는 모터의 해석을 위한 조건 범위를 Stator의 1/3 크기로 나타낸 것이다. 구속조건 사용 시 절점간의 상대변위와 응력의 발생이 크지 않도록 Fig. 3.33과 같이 하중을 주기 위한 절점 및 경계조건을 Master node로 설정하였고, 변위구속과 하중이 적용되지 않도록 Fig. 3.34와 같이 경계조건을 Slave node로 부여하였다. 또한 자기장에 대해 정의되는 위치함수 벡터 퍼텐셜을 Fig. 3.35와 같이 경계조건을 설정하였다. 또한 Table. 3.5는 본 해석 조건에서 사용된 시험편의 물성치 이다.

(Wt.%)				
Nd	Fe	B	Dy	etc(Al)
28	67.42	1.08	2.8	0.8

Table. 3.5 Property of test specimen (Nd-Fe-b)

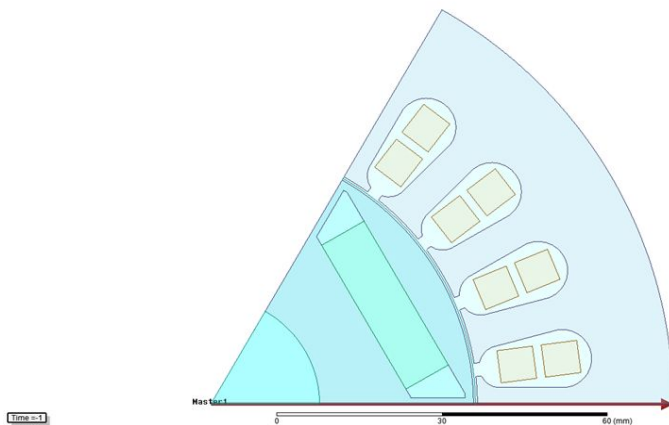


Fig. 3.33 Master of boundaries of BLDC motor

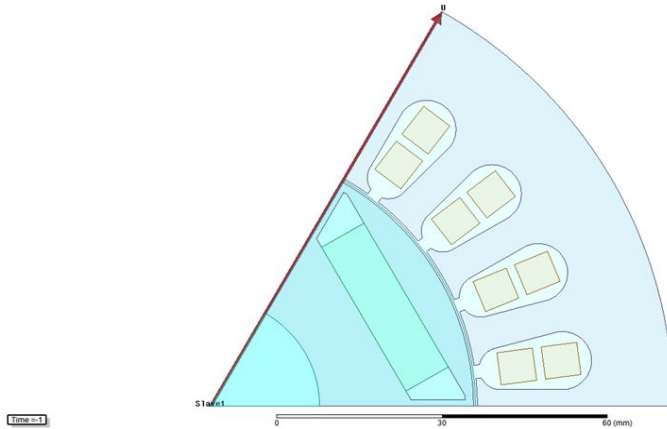


Fig. 3.34 Slave of boundaries of BLDC motor

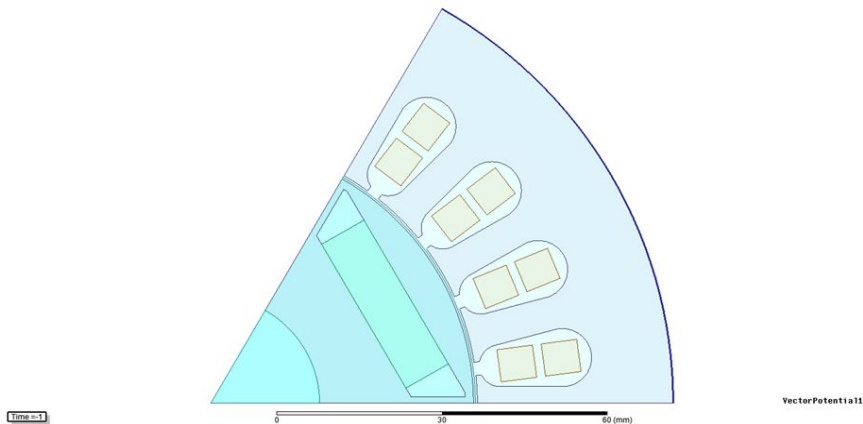


Fig. 3.35 Vector Potential of boundaries of BLDC motor

Fig. 3.36은 유한요소 해석 방법에 따라 모델링 1/6 Mesh 설정 결과를 보여주고 있으며, Elements는 8,000개 이고 Nodes는 120,000개 이다. Fig. 3.37은 자력분포 해석 결과이고, Fig. 3.37에서 알 수 있듯이 자력분포 값의 최대값이 1.8831E-002로 대체적으로 양호한 상태를 보였다.

Fig. 3.38과 Fig. 3.39를 통해서 알 수 있듯이 자속 밀도로 최대 2.0654 B(T)를 보이고 있으며, 이것은 모터설계에 있어서 양호한 상태임을 보여주고 있다.

전체적으로 자속 밀도의 포화현상이 없고 고정자 및 회전자에 분포되었음을 확인 할 수 있다. 반면 자속밀도의 포화가 일어나면 더 이상의 출력 상승은 없고 누설로 인해

서 열이 발생하게 된다. 이러한 현상이 발생하지 않기 위해서 자속밀도가 포화되지 않게 코어의 형상을 설계 하였다. 시뮬레이션의 조건으로 설계 할 때 가혹조건인 85℃를 적용하였다. 목표사양에서 제시했던 정격 부하 3000rpm으로 회전을 하고 있는 상황의 시뮬레이션을 한 것이다. 따라서 코어에 분포되는 자속밀도의 크기는 Stater의 코일에 흐르는 전류의 양에 의해서 결정된다.

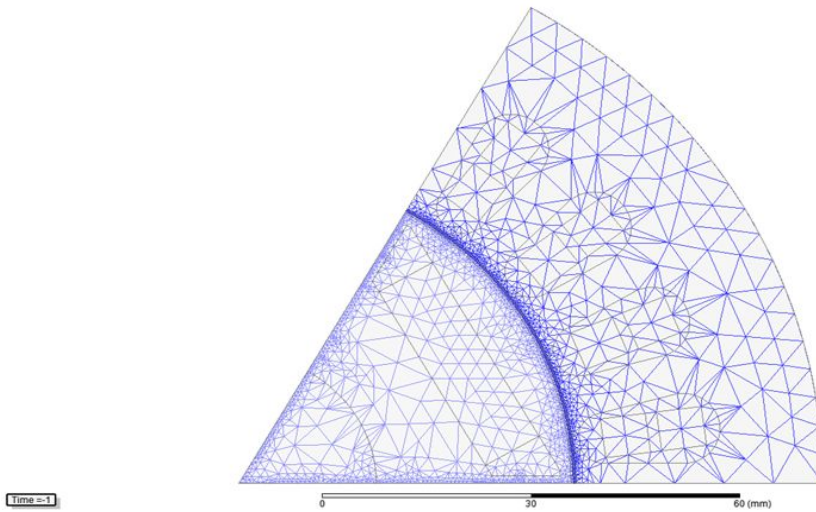


Fig. 3.36 Mesh of BLDC motor

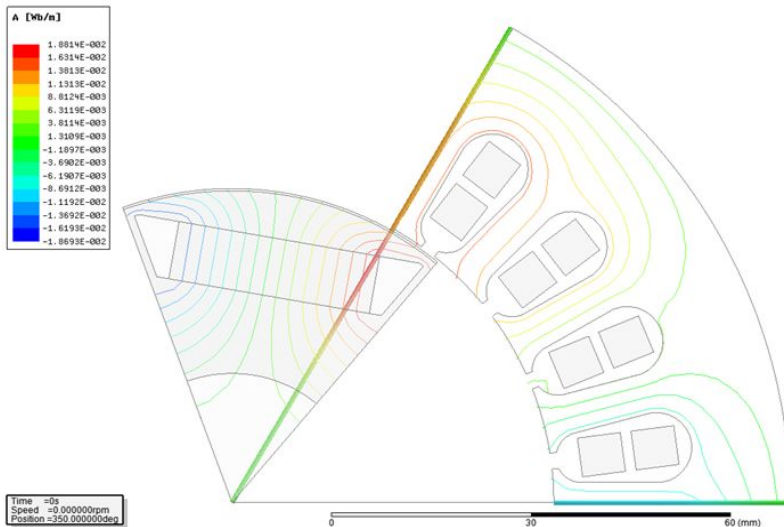


Fig. 3.37 Magnetic distributions of BLDC motor

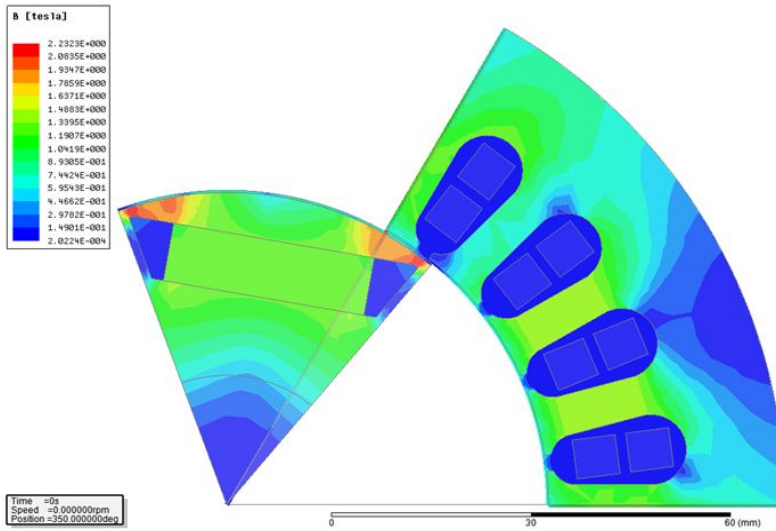


Fig. 3.38 Magnetic flux density distributions

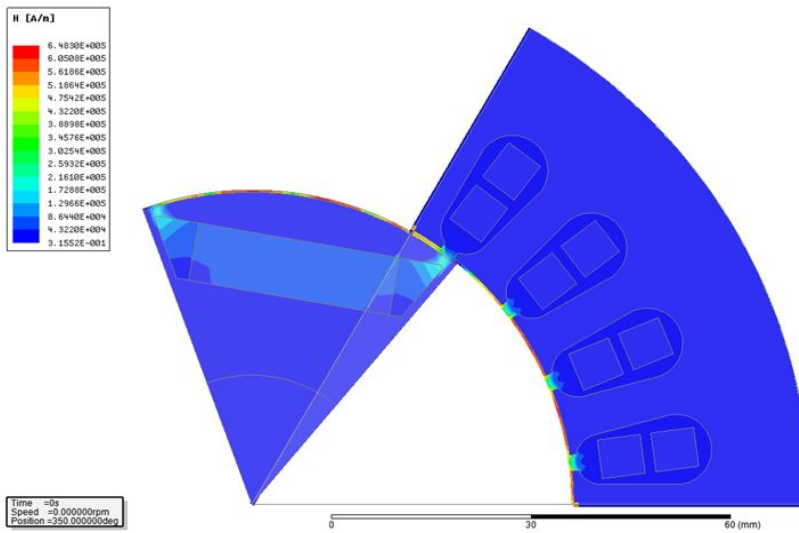


Fig. 3.39 Magnetic field power distributions

Fig. 3.40은 모터설계 해석 결과 그래프로 모터의 구조상 발생하는 토크로 회전자의 자석 분극과 고정자 슬롯에 의해서 주로 발생하게 되며, 전류를 고정자 권선에 인가하지 않은 상태에서 외부에서 회전자를 회전시켰을 때 나오는 토크를 측정된 것이다.

Fig. 3.40의 시뮬레이션 해석결과에서 볼 수 있듯이 0~0.5Nm의 안정적인 범위를 확인할 수 있으며, 여기서 모터의 최대 안전율을 감안하기 위하여 절반 수준인 0.25Nm의 토크를 적용하고자 하였다.

즉, 시뮬레이션 결과에서와 같이 BLDC 모터의 효율 과 시스템의 구성의 전체적인 성능에서 정격사항의 도달이 가능하도록 하였다.

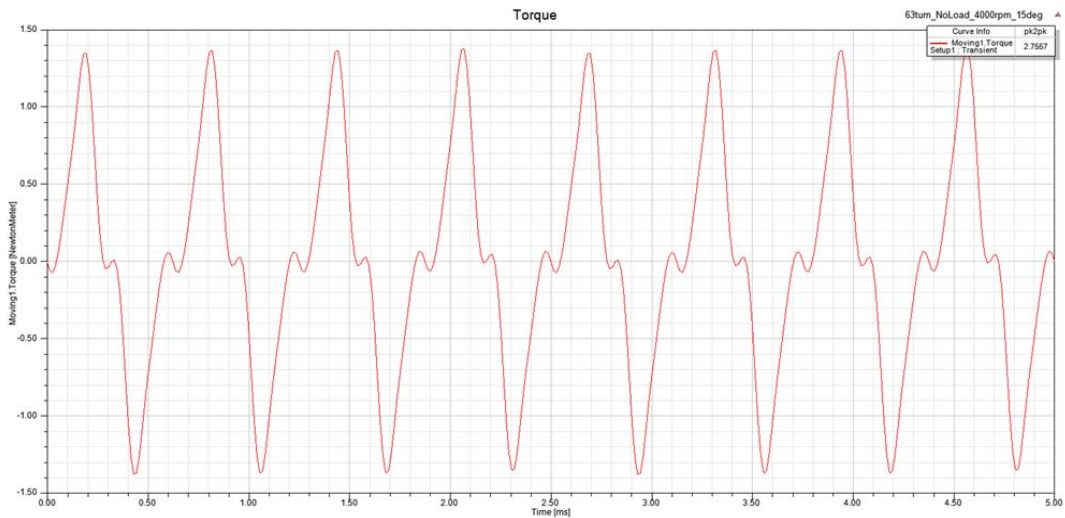


Fig. 3.40 Analysis results of motor design

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 BLDC 모터의 성능평가

Fig. 4.1과 같이 개발된 BLDC 모터의 최대출력에 대한 성능특성을 파악하기 위해 Magtrol Ltd. 의 모터 동특성 시험장치인 2WB115+EK+2PB115로 시험을 실시하였다.

Table. 4.1은 다이내모미터의 단위를 나타내며, 제어기 입력전압과 전류 그리고 제어기 출력에 관한 각 상의 전압, 전류, 토크, 회전수 등을 측정하였다. 시험은 모터가 최대속도일 때 부하에 따른 반응성 및 수렴성을 평가하고 최대출력을 측정하였다.

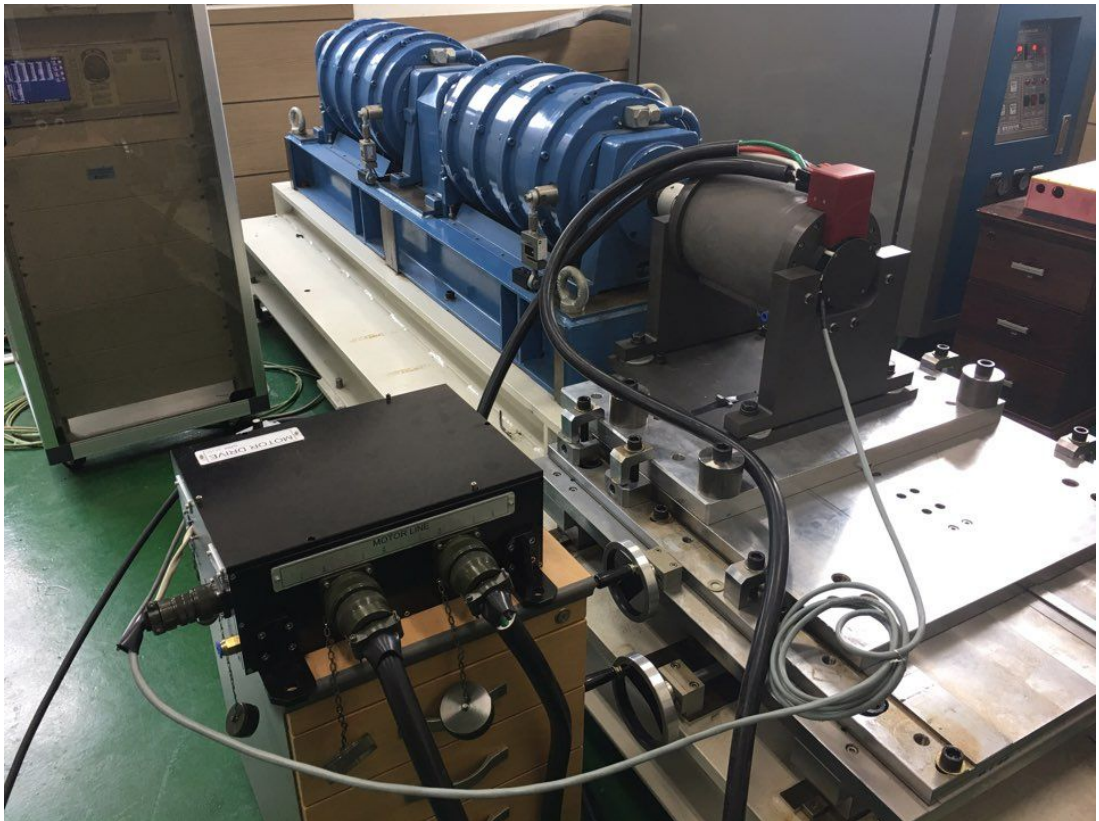


Fig. 4.1 Motor dynamics test equipment(2WB115+EK+2PB115)

Type	DES 311	P/N	234-311-000-031
Supply	220/230Vac - 50/60Hz - 700VA		
Fuse	T12, 5A/T8A/T4A/T2A (S/N:01191)		

Table. 4.1 Unit of dynamometer

성능실험은 제어기의 성능을 확인하기 위하여 인버터시스템의 출력, 역률, 효율 등의 전기적인 신호는 파워아날라이저를 통해서 데이터가 수집이 되고, 전동기의 부하토크와 속도 등은 전동기 부하시험기로 부터 물리적인 데이터를 전기적인 신호로 변화해서 성능시험 분석 장치에 입력이 된다. 입력된 물리적인 데이터와 전기적인 데이터를 수집 및 계산을 통해서 제어기의 성능 확인을 할 수 있도록 실험장치가 구성 되어 있다. 실험에 사용된 다이ना모 장비는 파워아날라이저와 모터에 부하를 걸어주고 시험 데이터의 획득이 가능한 모터성능 분석 장치로 모터의 속도를 검출하고 확인하기 위하여 타코메타 및 스트로보스코프를 이용하였다. 이용된 장비는 국가공인기관의 검교정을 득한 장비이며, 이 장비를 통해서 시험 데이터를 수집하였다.

Fig 4.2는 모터에 부하를 걸어주면서 제어기의 전기적 신호를 측정한 그래프이다. 그래프를 통해서 알 수 있듯이 모터의 회전수가 4000rpm에서 운전을 하다가 부하가 증가되면서 모터의 이탈토크 이상의 부하가 걸리면 속도가 감소됨을 확인 할 수 있다.

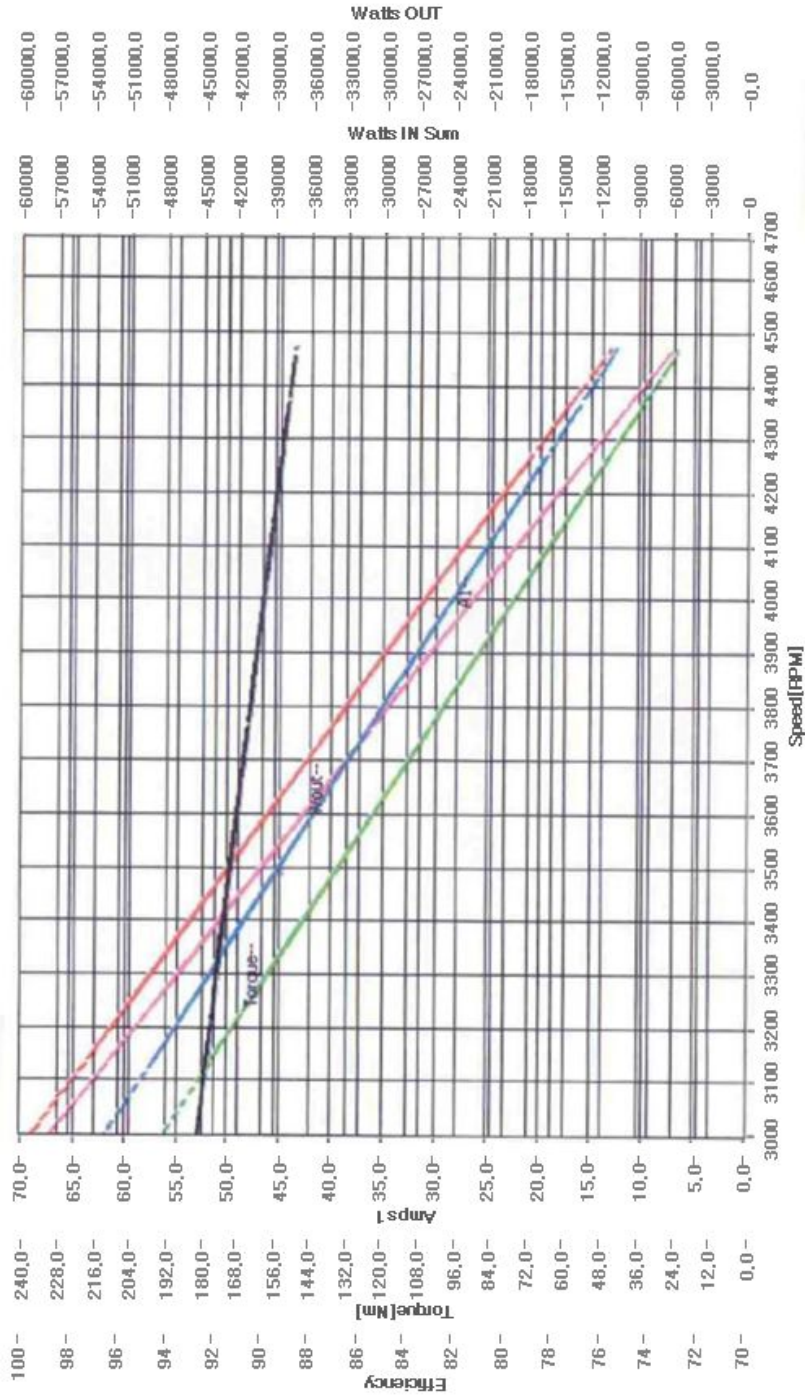


Fig. 4.2 Efficiency measurement result

4.2 BLDC 모터의 홀 센서 각도에 따른 성능평가

BLDC 모터의 홀 센서의 각도변화에 따라 모터의 효율의 향상도를 분석하기 위하여 모터의 다이내모 시험을 실시하였으며, 그 결과로 BLDC 모터의 토크(Nm), 속도(rpm), 전압(V), 와트(KW) 및 효율(%)변화 경향을 측정된 그래프를 Fig. 4.3부터 Fig. 4.5의 그래프로 나타내고, 그 평균 데이터 값을 Table. 4.2에 나타냈다. 그리고 평균 데이터 값에 대한 홀 센서 각도에 따른 비교 그래프를 Fig. 4.6부터 Fig. 4.10에 나타냈다.

홀 센서의 각도를 5°, 10°, 15°로 각도변화를 줌으로써 이에 따른 모터의 성능평가를 수행한 결과 Fig. 4.11부터 Fig. 4.14에 나타낸 그래프와 같이 속도 값이 높고 토크와 전압 그리고 와트 값이 낮을 때 성능 효율이 가장 좋음을 확인하였다.

즉, 다이내모 테스트 결과 아래 Table. 4.2에서 볼 수 있듯이 센서의 각도를 5°만큼 변화를 주었을 때 최대 토크가 102.933Nm로 측정되었으며, 최대 회전속도는 5,560rpm 이었다. 이에 따라 모터의 성능효율이 94.2%로 측정되었음을 확인 할 수 있다.

Sensor angle	Torque (Nm)	Speed (rpm)	Voltage (V)	Watts (KW)	Efficiency (%)
5°	102.933	5,560	308.1	60.02	94.2
10°	104.985	5,471	308.5	60.08	93.5
15°	109.421	5,242	308.7	60.1	92.8

Table. 4.2 BLDC motor performance measurement result

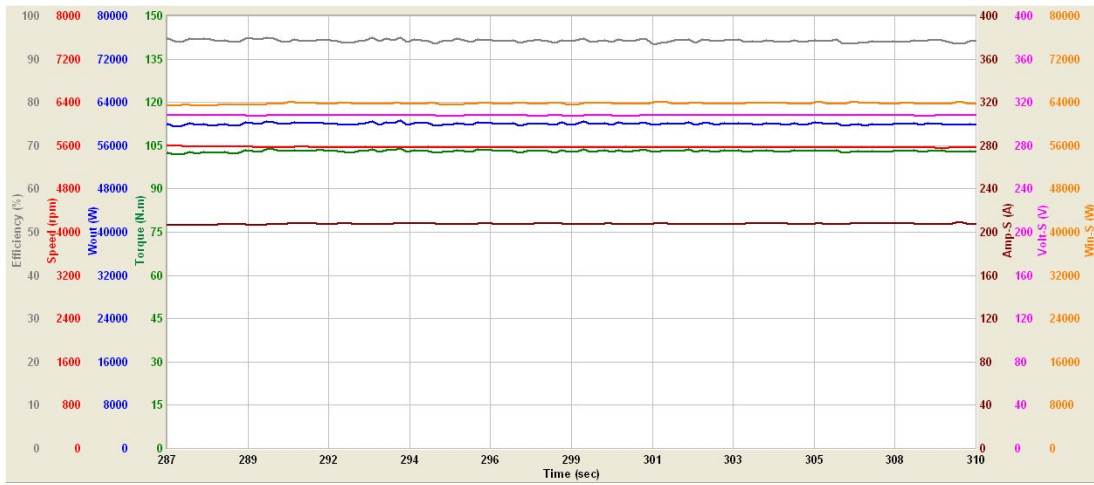


Fig. 4.3 Performance test of BLDC motor(5°)

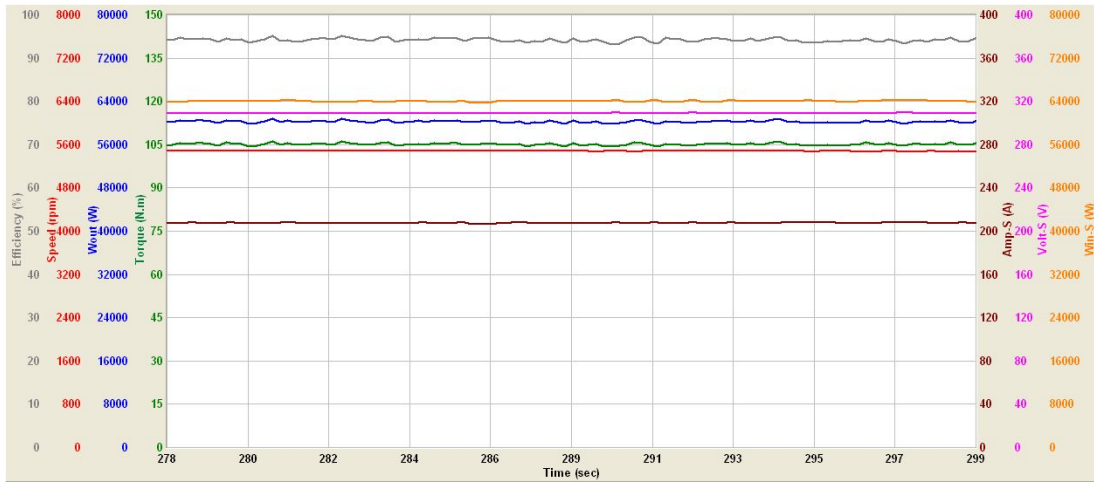


Fig. 4.4 Performance test of BLDC motor(10°)

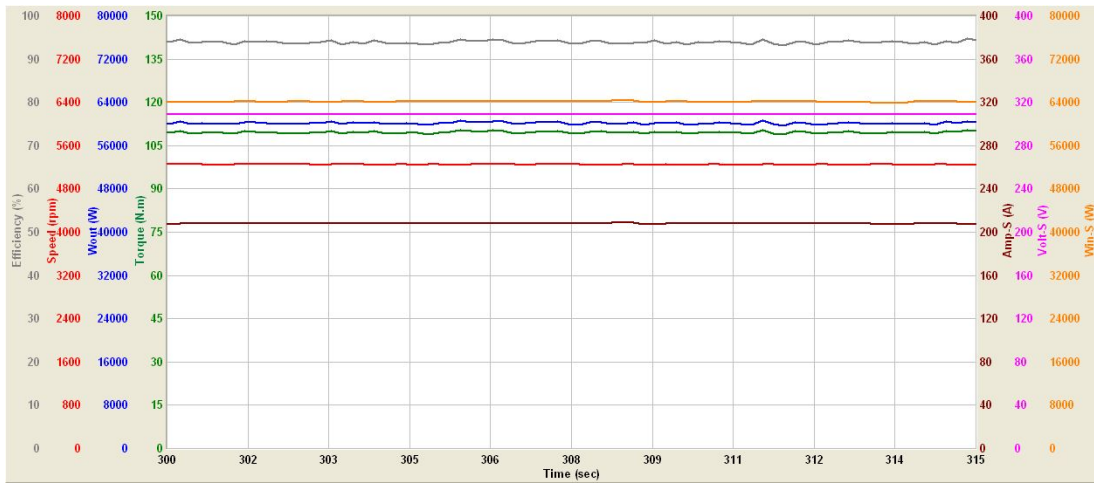


Fig. 4.5 Performance test of BLDC motor(15°)

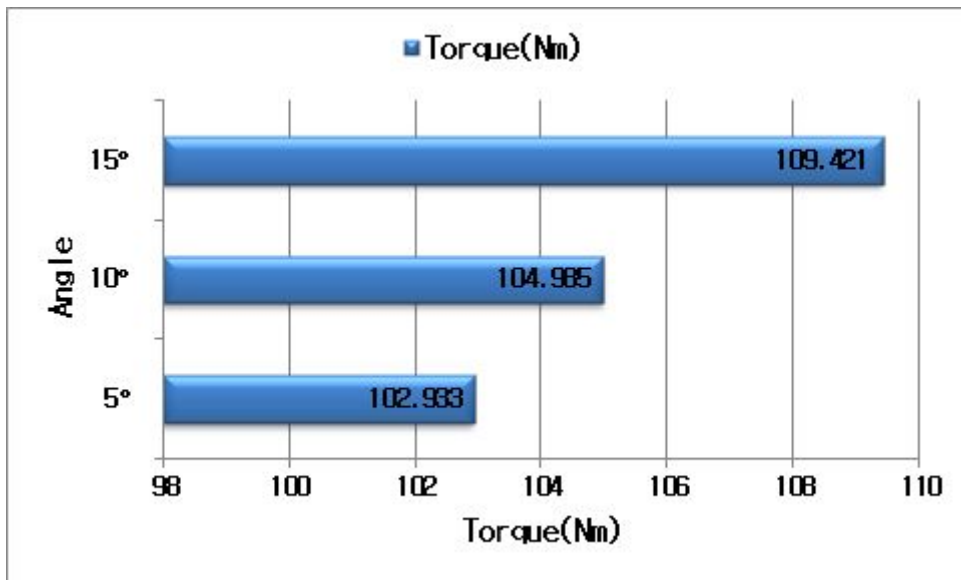


Fig. 4.6 Torque measurement result

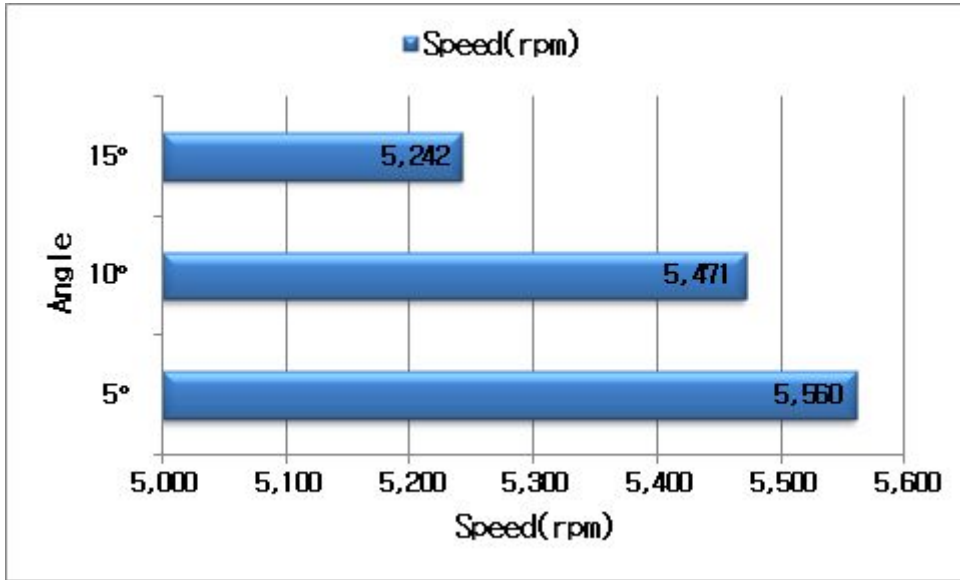


Fig. 4.7 Speed measurement result

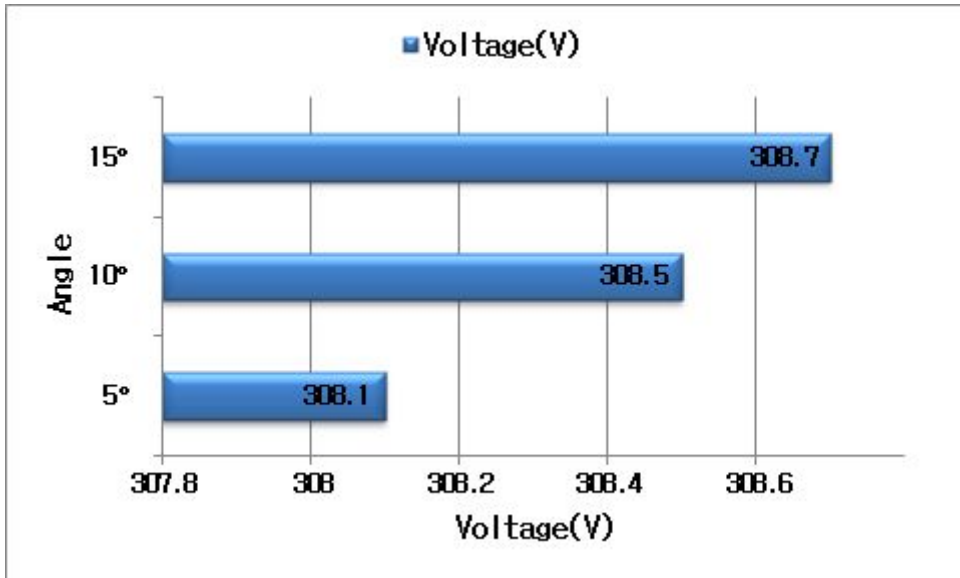


Fig. 4.8 Voltage measurement result

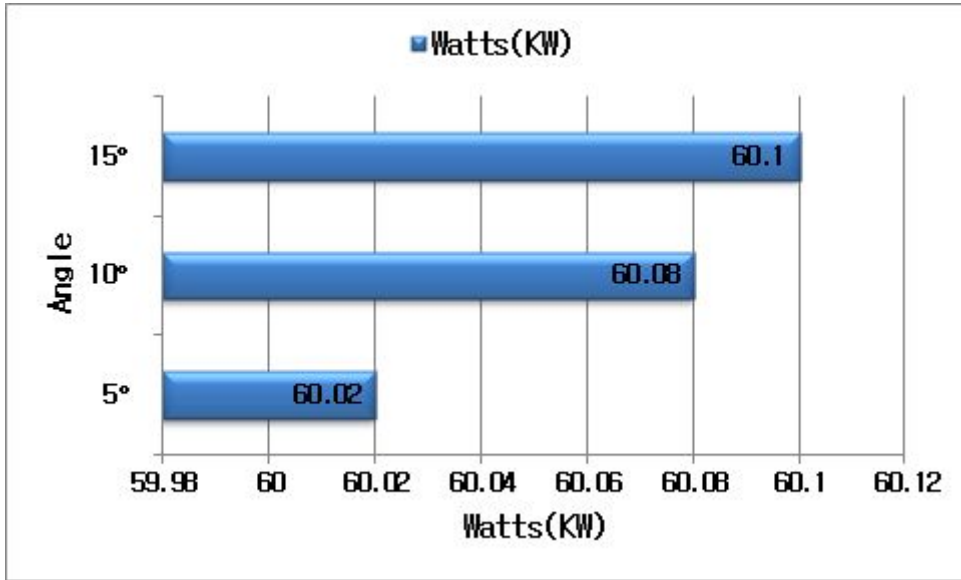


Fig. 4.9 Watt measurement result

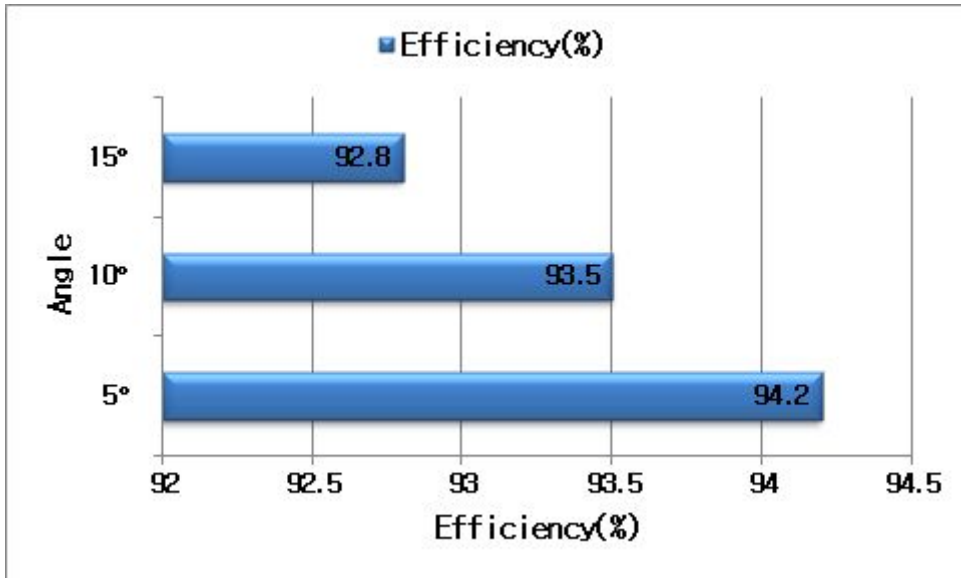


Fig. 4.10 Efficiency measurement result

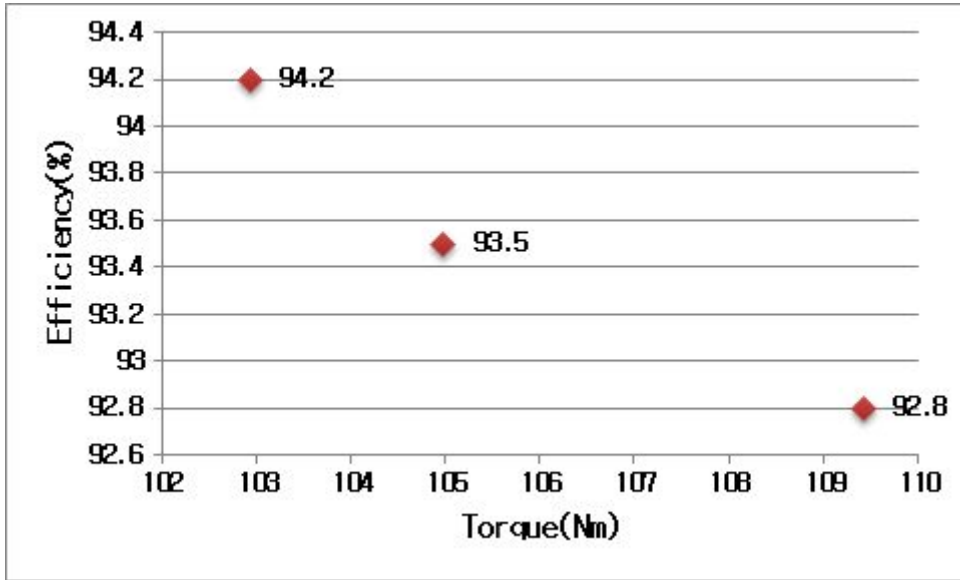


Fig. 4.11 Comparison of measured efficiency and torque

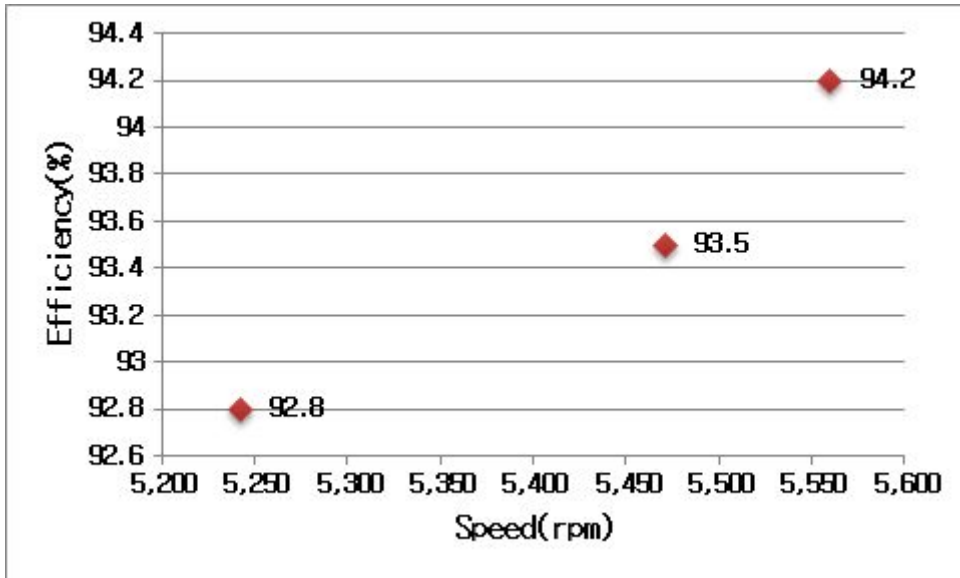


Fig. 4.12 Comparison of measured efficiency and speed

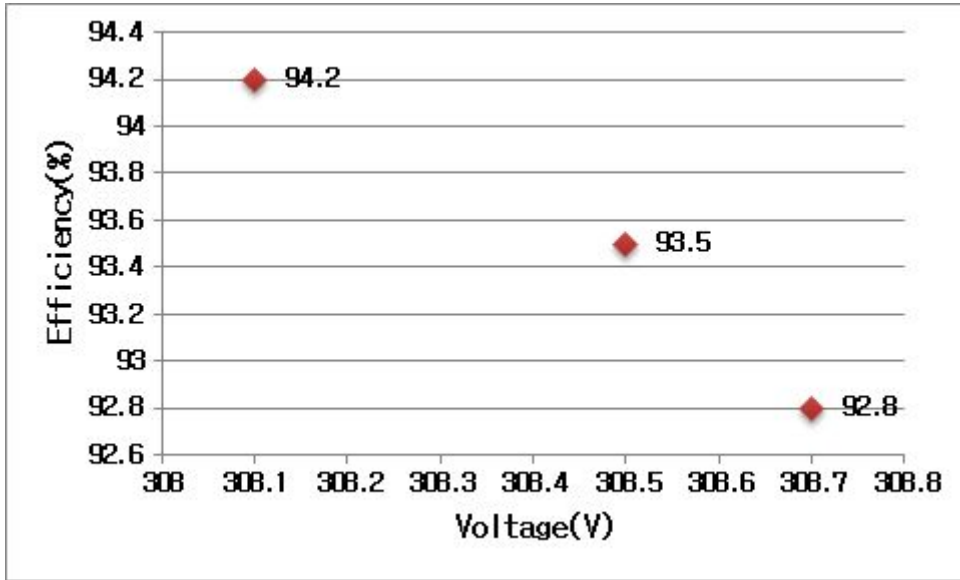


Fig. 4.13 Comparison of measured efficiency and voltage

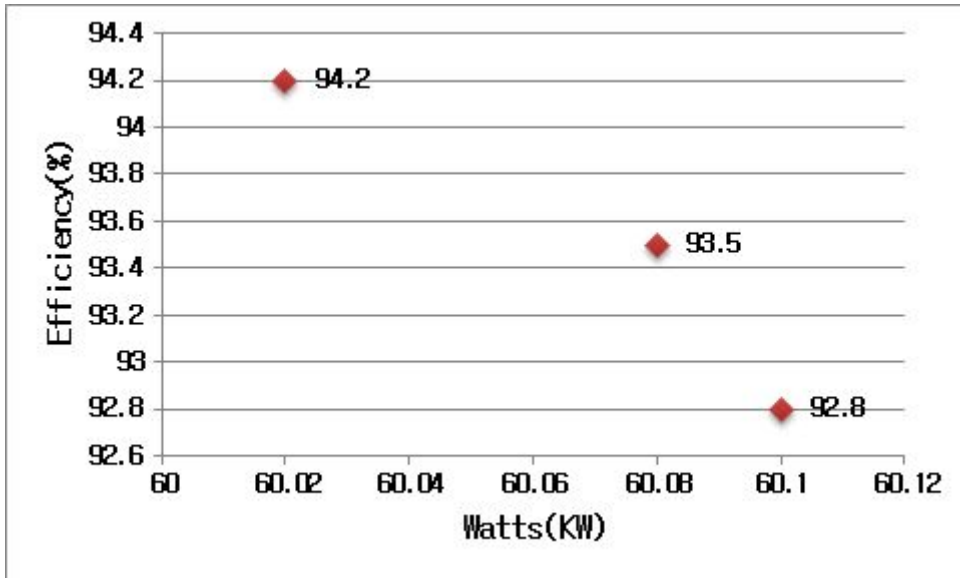


Fig. 4.14 Comparison of measured efficiency and watts

제 5 장 결 론

본 논문에서는 60KW급 전기자동차 구동시스템인 BLDC 모터 및 드라이버에 대하여 개발을 실시하였다. BLDC 모터 드라이브에 대한 고성능 속도제어에 따른 PWM 제어를 위하여 모터 및 제어기의 개발을 완료하였으며, 설계된 모터의 상세해석을 위하여 Maxwell 프로그램을 사용하였고, 다이نام 측정시스템을 이용하여 모터효율에 대한 성능관계를 검증하여 일련의 모터 성능 시험 검증 결과는 다음과 같다.

1. 최대출력에 대한 시험결과를 측정하기 위해서 인버터 입력은 입력전압(VDC) 310V로 측정되었으며, 모터 출력은 토크(Nm) 102.933Nm, 정격 회전수(rpm) 5,560rpm, 정격출력(KW) 60.02KW로 측정되었다.
2. BLDC 모터를 제작하여 홀 센서의 각도를 5°, 10°, 15°로 각도변화를 줌으로써 이에 따른 모터의 성능평가를 수행한 결과 속도 값이 높고 토크와 전압 그리고 와트 값이 낮을 때 성능 효율이 가장 높았음을 확인하였다.
3. 다이نام 테스트 결과 홀 센서의 각도를 5°만큼 변화를 주었을 때 최대 토크가 102.933Nm로 측정되었으며, 최대 회전속도는 5,560rpm, 전압은 308.1V, 와트는 60.02KW일 때 모터의 최대효율로 측정되어 모터의 우수함을 확인하였다.

PWM은 효율 및 역률이 높고 고성능을 발휘 할 수 있기 때문에 드라이브의 적용 분야에 각광 받고 있다. 이에 일정 토크 영역에 이어서 일정 출력영역과 광범위한 운전 속도범위까지 모터의 운전이 가능하므로 앞으로의 연구가 기대되고, 응답성, 제어의 선형성, 스위칭 주파수, 출력전류의 고주파 함유율 등의 측면에서 우수한 제어 알고리즘으로 여러 드라이브 시스템에 적용되고 있다. 향후, 고성능, 고효율 전기자동차용 BLDC 모터와 드라이브 시스템에 관하여 자동차 부품 관련 기업에 기술을 응용할 수 있고, 친환경 전기자동차의 상용화에 일조할 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] Y. Wu, Z. Yang, B. Lin, H. Liu, R. Wang, B. Zhou, and J. Hao, "Energy consumption and CO2 emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China," *Energy Policy*, Vol.48, pp.537 - 550, Sep. 2012.
- [2] 전략산업보고서, 자동차산업의 미래-그린카 현황 및 전망, 전국경제인연합회(FKI), FIP-2009-0022, 통권 제 146호, 2009년 9월.
- [3] 임한상, "자동차의 전기/전자화 동향", 광운대학교, 전자융합공학과, 2011.
- [4] A. T. Morgan, *General Theory of Electrical Machines*, Heyden & Son Ltd. 1979.
- [5] Frost & Sullivan, 2011년.
- [6] Y.Hori, "Future vehicle driven by electricity and control-research on four-wheel-motored" UOT Electric March II, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 51, pp. 954-962, 2004.
- [7] 공영경, "전기추진선박의 추진체계 발전방향", 한국마린 엔지니어링 학회지, Vol.27, No.5, pp.548-554, 2003.
- [8] G.J Su and J.W Mckeever, "Low cost sensorless control of brushless DC motors with improved speed range", *IEEE Trans on Power Elec.* Vol.19, No.2, pp.296-302, 2004.
- [9] 강경수, 21세기 현대자동차의 공급사슬재편에 관한 연구“, 학위논문(박사), 韓國技術教育大學交大學院, 2016.
- [10] 박승환, “한국 자동차 산업의 산업내무역 구조와 결정요인”, 학위논문(석사), 中央大學校大學院, 2015.
- [11] 한국에너지기술평가원[편], “(2013-2014) 에너지기술 국내시장 전망 [전자자료]”, 산업통상자원부, 2014.
- [12] 곽종석, “유럽 자동차 판매시장의 체제 변화와 전망에 관한 연구”, 학위논문(석사), 亞洲大學校大學院, 2009.
- [13] Hao. Li-Li, “혁신적인 친환경 자동차에 대한 중국소비자의 구매의도 연구 : 기술 수용모형을 중심으로”, 학위논문(석사), 忠北大學校大學院, 2013.
- [14] 이택희, “한국 자동차 산업의 발전 방안에 관한 연구”, 학위논문(석사), 延世大學校大學院, 2003.
- [15] 이지영, “한국자동차기업의 발전방안에 관한 연구”, 학위논문(석사), 洞神大學校大

- 學院, 2010.
- [16] 한명훈, “친환경 자동차 활성화 방안에 관한 연구 제어 특성 연구,” 학위논문(석사), 漢陽大學校大學院, 서울, 2015.
 - [17] 노형복, “국내 전기자동차 기술 경쟁력 분석”, 산업기술이슈, 2012년 3월
 - [18] Y.Hirota, S. Adachi S. Ogasawara, and Y.Deguchi, "Model-Based Control System Design for Electric Vehicles", Tokyo Denki University Press, Japan, 2009.
 - [19] 전자부품연구원, “미래형 자동차 전장기술 발전동향”, 2009년 4월
 - [20] P.Pillay and R.Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor for Servo Drives", IEEE IAS Annual Meeting, pp. 380~390, 1987.
 - [21] 김기호, “연료 품질기준 변화가 저감장치에 미치는 영향(I)”, 2010.
 - [22] 김대중, “친환경 자동차 산업의 정부보조금 효과 : 게임이론 선발주자 효과 및 네트워크 외부성 이용“, 釜山大學校大學院, 2011.
 - [23] 이광운, 김대경, 김태덕, “브러시리스 직류전동기용 센서리스 드라이브의 토크 맥동 저감 방법” 대한전기학회 하계학술대회 논문 집, 2003.
 - [24] 손명철, “중국 자동차산업 발전에 관한 연구 - 한중 협력을 중심으로”, 학위논문(석사), 韓南大學校大學院, 2011.
 - [25] 김대경, “브러시리스 직류 모터의 제어 장치” 등록번호 10-0489583, 2005.
 - [26] 김대경, 이광운, “브러시리스 직류전동기의 센서리스 구동장치” 공개번호 10-2006-0002566, 2006.
 - [27] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics Pub., 1994.
 - [28] D. C. Hanselman, "Minimum Torque Ripple, Maximum Efficiency Excitation of Brushless Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. On IE, Vol.41, No.3, pp.292-300, June, 1994.
 - [29] 배재남, “비장하 자동 선정을 통한 영구자석 동기전동기의 설계기법에 관한 연구,” 학위논문(박사), 漢陽大學校大學院, 서울, 2010.
 - [30] 김기찬, “EV/HEV용 매입형 영구자석 동기전동기의 최적 설계 및 제어 특성연구”, 학위논문(박사), 한양대학교 대학원, 2008.
 - [31] Katsumi Yamazaki, et al., “Loss Analysis of Permanent Magnet Motors with

- Concentrated Windings-Variation of Magnet Eddy Current Loss Due to Stator and Rotor Shapes,” Industry Applications Society Annual Meeting, pp.1-8, Oct. 2008.
- [32] Hendershot, J. R. and Miller. T. J. E., "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Magna Physics Publishing, Oxford, 1994.
- [33] Ki-Chan Kim, Seung-Bin Lim, Ki-Bong Jang, Sung-Gu Lee and Ju Lee, "Analysis on the Direct-Driven High Power Permanent Magnet Generator for Wind Turbine," The eighth International Conference On Electrical Machines and Systems(ICEMS 2005), pp. 43-247, Nanjing, China, September, 2005.
- [34] H. Zerougetal, "Analysis of Torque Ripple in BDCM", IEEE Trans. On Magnetics, Vol.38, No.2, pp.1293-1296, March, 2002.
- [35] Byung-taek Kim, Byung-il Kwon, Dae-kyong Kim, "Analysis of Torque Components and Skew Effects In a Single-Phase Line Start Permanent Magnet Motor Using FEM" COMPUMAG2007, IEEE Conference on the Computation of Electromagnetic Fields, 2007.
- [36] 김덕근, "페라이트 자석 직류전동기의 최적치수 설계에 관한 연구", 박사학위논문, 서울대학교, 1992.
- [37] 윤상우, "자석이야기", (주)마그토피아, pp.15, 2009.
- [38] 윤중석, "자극형상 최적화에 의한 표면부착 영구자석형 교류 서보모타의 최적설계", 박사학위논문, 서울대학교, 1993.
- [39] K.Yamazaki and A.Abe:"Loss investigation of interior permanent magnet motors considering carrier harmonics and magnet eddy currents",The 2006 International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS 2006), 2006.(IEEE Trans. On Ind. Appl.,in press)
- [40] 김동환, "희토류 자원전쟁", 미래의창, 2011.
- [41] Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, and Ju Lee, "Review of Maglev Train Technologies," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 7, pp. 1917-1925, July 2006.
- [42] 윤석길, "초강력 영구자성체 희토류 철계 영구자석재료", 울산대학교 출판부, 2002.
- [43] J. C. Moreira, "Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet

- AC Motors Operation in a Wide Speed Range," Conference Record of IEEE IAS Annual Meeting, pp.401-407, 1994.
- [44] L. A. Jones and J. H. Lang, "A State Observer for the Permanent Magnet Synchronous Motor," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.36, No.3, pp.374-382, August 1989.
- [45] H. Le-huy, R. Perret, and R. Feuillet, "Minimization of Torque Ripple in Brushless DC motor Drive", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-22, No.4, pp.748-755, 1986.
- [46] 장진욱, "자동차 연료펌프용 BLDC 모터의 센서리스 제어에 관한 연구", 공주대학교 대학원, 석사학위논문, 2012.
- [47] 박수현, "자동차 연료펌프용 저가형 센서리스 BLDC 전동 시스템", 전남대학교 대학원, 석사학위논문, 2013.
- [48] 김대경, "압축기용 브러시리스 직류전동기의 기동 성능 개선 및 토크 맥동 저감", 한양대학교 대학원, 박사학위논문, 2007.
- [49] 전용범, 이형실, "모터, 세상을 움직이는 힘", 2009년 12월
- [50] 이재준, "비선형 자기-열 등가회로 기반 전기자동차용 계자권선형 동기전동기 설계", 학위논문(박사), 漢陽大學校大學院, 서울, 2015.
- [51] Duc Thuan Vu, "A Study on Thermal Analysis and Cooling System Design of Brushless Direct Current(BLDC) Motor for Air Conditioning System on Electric Vehicle", The Graduate School of Yeungnam University, Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, 2013.
- [52] S. Murata, "Innovation by in-wheel-motor drive unit", Vehicle System Dynamics, Vol.50, pp.807-830, 2012.
- [53] Microchip AN1160 (Sensorless BLDC Control with Back-EMF filtering Using a Majority Function)-2009 Microchip Technology Inc.
- [54] 김대원, 마이크로 컨트롤러를 이용한 BLDC 전동기 구동에 관한 연구", 석사학위논문, 전남대학교, 2000.
- [55] 김상훈, "DC, AC, BLDC 모터 제어" 북두출판사, 2010.
- [56] T. Kosaka, T. Hirose, and N. Matsui, "Brushless synchronous machines with wound-field excitation using SMC core designed for HEV drives," 2010 Int. Power Electron. Conf. - ECCE Asia -, IPEC 2010, pp. 1794 - 800, 2010.
- [57] 안영일, 자동차용 Cooling Fan 구동용 motor에 BLDC motor 적용에 관한 설계 해석 및 특성 연구", 석사학위논문, 한국기술교육대학, 2004.

- [58] 한만승, 홍성렬, 조주희, 이상훈, 반성준, 김대경, “전기자동차용 0.5[kw]급 공기압 축기의 브러시리스 직류전동기 개발” 조명·전기설비학회 논문지, 제 26권, 제 8호, pp. 71-78, 2012.
- [59] 김원호, “EV 견인용 IPM 동기전동기의 NE-Map 기반 설계”, 학위논문(박사), 漢陽大學校大學院, 서울, 2011.
- [60] 김광수, “유도전동기의 MEPS에 부합하는 고효율화 설계 기법 도출 및 실증연구,” 학위논문(박사), 漢陽大學校大學院, 서울, 2011.
- [61] 김미정, “EV 견인용 유도전동기의 설계 기법 및 운전 특성 해석에 관한 연구”, 학위논문(박사), 漢陽大學校大學院, 서울, 2014.
- [62] N. Matsui, “Sensorless PM Brushless DC motor drives”, IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol.43, No.2, pp.300-308, 1996.
- [63] Microsemi, “Speed Control of Brushless DC Motors-Block Commutation with Hall Sensors,” Technical report, 2012.
- [64] W. L. Soong and T. Miller, “Field-weakening performance of brushless synchronous AC motor drives”, Electric Power Applications, IEEE Proceedings, pp.331-340, 1994.
- [65] C. C. Chan and K. T. Chau, “A new PWM algorithm for battery-source three phase inverters”, Elec. Machines Power Sys., Vol.9, No.1, pp.43-54, 1991.
- [66] Y. S. Lai, F. S. Shyu, and Y. H. Chang, “Novel sensorless PWM controlled BLDCM drives without using position and current sensors. filter and center tap voltage”, in Proc of IEEE Indus. Elec. Soc. Conf. Vol.3, pp.2144-2149, 2003.
- [67] 최홍순, “스페이스 매핑과 매개변수, 유한요소 해석에 의한 전기기기 설계”, 박사 학위논문, 서울대학교 2000.
- [68] 최홍순, 한송엽, “스페이스 매핑과 유한요소 해석에 의한 IPM형 모터 설계”, 전기기기연구회 2000년 춘계학술대회 논문집, 2000.
- [69] 최홍순, 한송엽, “자기회로법과 유한요소법을 결합한 전기기기 설계”, 대한전기학회 1999년 추계학술대회 논문집, 1999.
- [70] H. S. Choi and etc, “An Adaptive Mesh Generator based on Nodal Errors”, IEEE Trans. on Mag., Vol.36, No.4, pp.1619-1622, 2000.