



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](#)

工學碩士 學位論文

7상 BLDC 전동기의 리플전류 감소 연구

A Study on the Reduction of Ripple Current
for 7 Phase BLDC Motor



指導教授 金潤植

2017年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

徐 東 俊

本 論 文 을 徐 東 俊 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로
認 准 함

委 員 長 : 工 學 博 士 李 成 根 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 徐 東 煥 ㉠

委 員 : 工 學 博 士 金 潤 植 ㉠



2016年 12月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

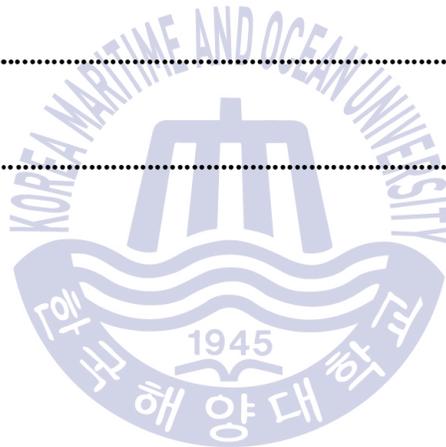
電 氣 電 子 工 學 科

徐 東 俊

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
제 1 장 서 론	1
제 2 장 BLDC 관련 이론	4
2.1 BLDC 전동기	4
2.1.1 BLDC 전동기의 구조	4
2.1.2 BLDC 전동기의 구동	7
2.1.3 BLDC 전동기의 속도제어	9
2.2 7상 BLDC 전동기	12
2.2.1 7상 BLDC 전동기의 구조	12
2.2.2 7상 BLDC 전동기의 구동	13
2.2.3 7상 BLDC 전동기의 PWM 구현	18
제 3 장 시스템 구성	21
3.1 제안한 시스템 구성	21
3.2 입력전원 리플전류, 리플전압 및 커패시터 용량 계산	22
3.2.1 전류 주파수	22
3.2.2 리플전류	23
3.2.3 리플전압 및 커패시터 용량 계산	27

제 4 장 시뮬레이션 및 실험	29
4.1 시뮬레이션	29
4.1.1 시뮬레이션 구성	29
4.1.2 시뮬레이션 결과	31
4.2 실험	40
4.2.1 실험 구성	40
4.2.2 실험 결과	41
 제 5 장 결 론	 51
참고문헌	54



List of Tables

Table 1 Phase current flows according to the operating mode	18
Table 2 Ripple current(ΔI) vs. Duty ratio(D)	25
Table 3 Ripple current according to duty ratio	26
Table 4 Ripple voltage according to DC Link Capacitor	28
Table 5 Case of simulation according to capacity of DC Link capacitor	31
Table 6 Summary of simulation results	39
Table 7 Measurement result without DC link capacitor	42
Table 8 Measurement result with 2.1[mF] DC link capacitor	45
Table 9 Measurement result with 2.5[mF] DC link capacitor	47
Table 10 Measurement result with 5.0[mF] DC link capacitor	49
Table 11 Summary of experiment results	50

List of Figures

Fig. 1 Structure of DC Motor and BLDC Motor	5
Fig. 2 Back EMF and Phase Current of PMSM	6
Fig. 3 Back EMF and Phase Current of BLDCM	6
Fig. 4 Drive system of BLDC Motor	7
Fig. 5 Fundamental of BLDC Motor drive	8
Fig. 6 Speed control system of BLDC Motor	9
Fig. 7 Speed control system with current controller	10
Fig. 8 Speed control system with DC current control	11
Fig. 9 Back EMF and Phase Current Wave Form of 7 Phase BLDCM	12
Fig. 10 Drive circuit of 7 phase BLDCM	13
Fig. 11 Block Diagram of 7 phase BLDCM	16
Fig. 12 Back EMF and Phase Current of 7 Phase BLDCM	18
Fig. 13 Switching Pattern of 6 Phase Excitation Method When the Position is '3'	19
Fig. 14 Back EMF and Phase Current of 7 Phase BLDCM	20
Fig. 15 Ripple current(ΔI) vs. Duty ratio(D)	25
Fig. 16 Ripple voltage vs. DC Link Capacitor(duty ratio 50%)	28
Fig. 17 Overall simulation model	29
Fig. 18 Inveter system for 7 phase BLDCM drive	30
Fig. 19 Modeling of 7 phase BLDC motor	30
Fig. 20 Ripple voltage(1000 μ F)	32
Fig. 21 Ripple current(1000 μ F)	32
Fig. 22 Ripple voltage(2000 μ F)	33
Fig. 23 Ripple current(2000 μ F)	33

Fig. 24 Ripple voltage(2200 μ F)	34
Fig. 25 Ripple current(2200 μ F)	34
Fig. 26 Ripple voltage(2500 μ F)	35
Fig. 27 Ripple current(2500 μ F)	35
Fig. 28 Ripple voltage(3000 μ F)	36
Fig. 29 Ripple current(3000 μ F)	36
Fig. 30 Ripple voltage(4000 μ F)	37
Fig. 31 Ripple current(4000 μ F)	37
Fig. 32 Ripple voltage(5000 μ F)	38
Fig. 33 Ripple current(5000 μ F)	38
Fig. 34 Summary of simulation results	39
Fig. 35 Test facility configuration	40
Fig. 36 Without DC Link Capacitor	41
Fig. 37 Measurement result without DC link capacitor	42
Fig. 38 Frequency of ripple current	43
Fig. 39 With 2.1[mF] DC Link Capacitor	44
Fig. 40 Measurement result with 2.1[mF] DC link capacitor	45
Fig. 41 With 2.5[mF] DC Link Capacitor	46
Fig. 42 Measurement result with 2.5[mF] DC link capacitor	47
Fig. 43 With 5.0[mF] DC Link Capacitor	48
Fig. 44 Measurement result with 5.0[mF] DC link capacitor	49
Fig. 45 Summary of experiment results	50
Fig. 46 Calculation results according to capacity of capacitor	51
Fig. 47 Simulation results according to capacity of capacitor	52
Fig. 48 Experiment results according to capacity of capacitor	52

A Study on the Reduction of Ripple Current for 7 Phase BLDC Motor

by Dong Jun Seo

Department of Electrical & Electronics Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Motors are indispensable components in the industrial field, and they are used in various fields such as transportation, industrial equipment and electric equipment. DC motors have been used in many fields because of their speed and torque characteristics. But there are some problems of maintenance and repair due to the life degradation that is occurred by the structural nature of the brush.

Brushless DC(BLDC) motors are simple in structure and high in efficiency, and their use is increasing due to the development of permanent magnets and power electronic devices. The BLDC motor has excellent torque characteristics because it can make uniform torque by the product of square wave phase current and trapezoidal counter electromotive force. In addition, since the constant field flux is supplied to the rotor by using the permanent magnet, the efficiency and the power factor are superior.

And because BLDC motors maintain high efficiency over a wide operating range, they are well suited for applications requiring variable speed drive. Generally 3 phase BLDC motors are limited in high speed due to torque ripple and speed fluctuation.

In order to improve the torque ripple, it is necessary to increase the number of phases, poles and slots of the motor.

Multi phase BLDC motors have advantages such as reduction of torque ripple and increase of efficiency compared with 3 phase BLDC motors and can operate even if one or two phases fail. These characteristics make multi phase BLDC motors widely used in military application products and special fields. Particularly, 7 phase BLDC motors are widely used as propulsion motor for military application products and underwater applications.

7 phase BLDC motor has higher phase usage rate than 3 phase BLDC motor, which is advantageous in achieving high output power within a limited space. In order to achieve high output power, 7 phase BLDC motor operates at a high speed of about 20,000rpm. The reactance of the phase winding increase due to the high speed operation, and the reactance value becomes larger as the speed of the motor increases. The influence of the reactance in the high speed operation is delayed in the rise of the phase current, making it impossible to make a sufficient phase current magnitude necessary for the output power, and the output power is lowered. In order to improve this phenomenon, the advance angle method and the 7 phase winding excitation method are applied..

However when the advance angle method and the 7 phase winding excitation method is applied, the ripple current and ripple voltage at the power input terminal increase, which may be a main cause of electrical noise.

In order to reduce the ripple current and ripple voltage for the 7 phase BLDC motor operated to achieve high output performance within the limited space, analyze the ripple current and ripple voltage generated at the power input terminal of the 7 phase BLDC motor. And apply the DC Link Capacitor to check how the ripple current and ripple voltage change. This paper proposes a method to select the DC Link Capacitor with the minimum and optimum capacity according to the motor characteristics.

제 1 장 서 론

전동기는 산업현장에서 빠질 수 없는 구성요소로 생산설비, 운송수단, 산업용 기기 및 전기기기 등 다양한 분야에 사용되어 지고 있다.

다양한 전동기 종류 중 직류전동기는 속도·토크 특성이 제어에 용이하여 많은 분야에 사용되어 왔으나 직류전동기의 구조적인 특성상 브러시 부분에서 발생하는 수명저하 현상으로 인한 유지·보수의 문제점 등으로 점점 다른 전동기로 대체되어 가고 있다. 영구자석의 기술발전 및 가격하락 등으로 영구자석을 이용한 전동기에 대한 연구 및 적용분야가 많아지고 있으며, 대표적으로 영구자석형 동기전동기(PMSM, Permanent Magnet Synchronous Motor)와 브러시리스 직류전동기(BLDCM, Brushless DC Motor)가 있다.[1]

BLDC 전동기는 구조가 간단하고 효율이 높다. 또한 높은 에너지 밀도를 가지는 영구자석과 집적회로, 그리고 전력용 스위치와 같은 전력전자 소자들의 개발과 가격의 하락으로 컴퓨터, 항공, 군용, 자동차 그리고 산업 및 가정 전반의 다양한 제품에서 그 사용이 증가되고 있는 추세이다. 직류 전동기에서 사용되는 브러쉬와 정류자편이 없기 때문에 기계적인 소음이 발생하지 않으며, 브러쉬의 마모가 없어서 친환경적이고, 유지 및 보수에 대한 추가 비용이 필요로 하지 않는다. 그러나 브러쉬와 정류자편을 사용하지 않는 대신에 전력용 반도체와 컨트롤러가 필요로 하게 된다. 그리고 회전자의 위치를 알아내기 위한 위치 검출용 센서와 전류제어를 위한 전류 검출용 센서를 사용하게 된다.

BLDC 전동기는 사다리꼴형 역기전력에 사각파 상전류의 곱에 의해 균일한 토크를 만들 수 있어 다른 전동기에 비해 보다 우수한 토크 특성을 갖고 있다. 또한 회전자에 영구자석을 이용하여 일정한 계자 자속을 공급하기 때문에 토크성분과 계자성분 전류가 요구되는 유도 전동기에 비하여 효율과 역률이 높다.

특히 정격속도에서 벗어나면 효율이 급격히 떨어지는 유도 전동기에 비해 BLDC 전동기는 넓은 운전영역에 걸쳐 높은 효율을 유지하기 때문에 가변속 구동이 요구되는 응용분야에 가장 적합한 전동기이다.

이러한 장점으로 인하여 BLDC 전동기는 다양한 분야에 활용되고 있는데, 일반적으로 사용되는 3상 BLDC 전동기는 토크 맥동 및 속도 변동으로 고속에는 적용 범위가 제한된다. 이러한 3상 BLDC 전동기의 토크 맥동을 개선하기 위하여 전동기의 상수, 극수 및 슬롯수를 증가시키는 것이 필요하다. 다상 BLDC 전동기는 3상 BLDC 전동기보다 토크 리플 감소, 효율 증가 등의 장점을 가지고 있으며, 한 상(Phase) 또는 두 상이 고장이 나더라도 동작할 수 있는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징으로 다상 BLDC 전동기는 군사 응용제품이나 특수 분야에 다양하게 사용이 되는데 그 중에서도 7상 BLDC 전동기는 군사 응용제품이나 수중 운동체 등의 추진용 전동기로 다양하게 사용되고 있는 추세이다.[2]

7상 BLDC 전동기는 3상 BLDC 전동기에 비해 상 이용률(Phase Usage Rate)이 높아 제한된 공간 내에서 고출력화 달성에 유리하다. 3상 BLDC 전동기는 3상 권선 중 2상이 항상 On 되어 있기 때문에 상 이용률이 2/3이며, 7상 BLDC 전동기는 7상 권선 중 6상이 항상 On 되어 있기 때문에 상 이용률이 6/7에 해당된다. 제한된 공간 내에서 고출력화를 위하여 7상 BLDC 전동기는 약 20,000[rpm]의 고속으로 운전하게 된다. 이러한 고속 운전으로 인하여 상 권선의 리액턴스가 증가하는 현상이 나타난다. BLDC 전동기의 속도가 증가할수록 스위칭 소자의 스위칭 시간이 짧아져 di/dt 에 의한 주파수 상승에 의한 리액턴스 값이 더욱 크게 나타난다.

고속운전에서 나타나는 리액턴스 영향은 상전류의 상승을 지연시켜 출력에 필요한 충분한 상전류 크기를 만들 수 없게 만들어 출력이 저하되는 현상이 나타난다. 이를 개선하기 위해서는 역기전력과 상 전류를 동상으로 만드는 기법이 필요하며, 일반적으로 진상각(Advance Angle) 기법을 적용하여 역기전력에 대해 상 전류를 앞서서 인가하는 방법을 적용하고 있다.[3][4]

7상 BLDC 전동기의 고속운전으로 인한 리액턴스의 증가로 나타나는 출력 저하를 개선하는 또다른 방법이 7상 권선 여자방식이다. 일반적으로 7상 BLDC 전동기에서는 6상 권선 여자방식을 사용하게 되는데, 7상 권선 여자방식은 6상 권선 여자방식과는 달리 비도통하는 상이 없이 항상 7상이 도통되기 때문에 리액턴스의 증가로 인한 출력 저하를 개선하는 제어방법이라고 할 수 있지만 고속운전시 나타나는 영향을 개선하기 위해 7상 권선 여자방식을 적용할 경우 6상

권선 여자방식에 비하여 전원 입력단의 리플전류 및 리플전압이 증가하여 전기적 노이즈의 주요 원인이 될 수 있다.

본 논문에서는 다상 BLDC 전동기 중에서도 제한된 공간 내에서 고출력의 성능을 내기 위하여 운용되는 7상 BLDC 전동기에 대해 전동기 구동시 발생하는 리플전류 및 리플전압을 감소시키기 위하여 전동기의 전원 입력단에 발생하는 리플전류 및 리플전압을 분석하고, DC Link Capacitor를 적용하여 전동기 구동시 발생하는 리플전류 및 리플전압이 어떻게 변화되는지 확인하고, 전동기 특성에 맞는 최소 최적 용량의 커패시터를 선정하는 방법을 제안하고자 한다.



제 2 장 BLDC 관련 이론

2.1 BLDC 전동기

직류 전동기는 정류자와 브러시를 이용하여 회전에 따라 전기자 전류의 극성을 바꾸어 주어야만 일정한 방향으로 토크가 발생되어 연속적인 회전이 가능하다. 이러한 기계적인 정류 기구는 기계적 소음과 전자기적 잡음을 발생시킨다. 또한 정류 시에 발생하는 섬락과 마찰에 의한 마모로 인하여 정류자와 브러시의 정기적인 유지보수가 필요하다.

이러한 직류 전동기와 전기적인 특성은 유사하지만 전자적인 정류 장치를 사용함으로써 기계적인 접촉 구조의 정류 장치를 제거하여 신뢰성을 향상시킨 전동기가 BLDC 전동기이다. 이러한 BLDC 전동기에서 전자적인 정류를 실현하기 위하여 영구자석 회전자에 자극 위치를 검출하는 센서와 센서 신호를 이용하여 전류가 흐르는 권선을 바꾸어 주도록 하는 반도체 소자를 사용한 구동 회로가 필요하다.

BLDC 전동기는 직류 전원과 연결될 전기자 권선을 고정자 측에, 영구자석을 회전자 측에 배치하기 때문에 일반적인 직류 전동기와는 구조가 다르게 된다.[5]

2.1.1 BLDC 전동기의 구조

BLDC 전동기의 구조는 직류 전동기와는 다르며, 교류 전동기인 영구자석 동기 전동기와 유사하다. BLDC 전동기는 영구자석은 회전자 측에, 권선은 고정자 측에 배치된 구조로서, 직류 전동기와는 고정자와 회전자의 기능이 서로 뒤바뀐 구조라고 볼 수 있다. 하지만 BLDC 전동기의 권선에는 직류 전동기의 전기자 도체에 흐르는 전류와 같이 구형파 형태의 전류가 흐른다.

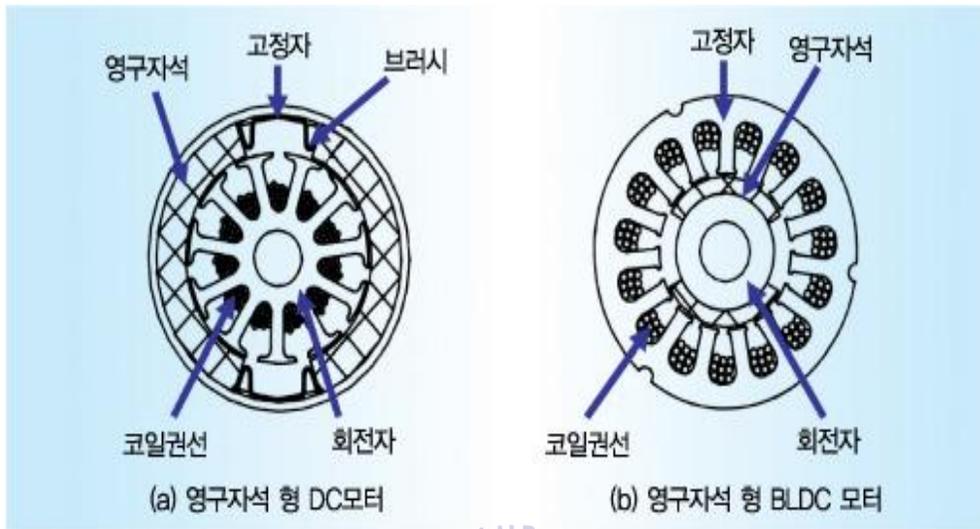


Fig. 1 Structure of DC motor and BLDC motor

BLDC 전동기의 구조는 직류 전동기에 비해 다음과 같은 장점을 가진다. 많은 도체로 이루어진 무거운 전기자가 회전하는 구조인 직류 전동기에 비해 영구자석이 회전하는 구조인 BLDC 전동기는 관성이 작게 되어 빠른 가감속에 유리하다. 또한 BLDC 전동기는 직류 전동기에서와 같은 정류자와 브러시의 기계적인 접촉문제와 정류기능의 문제가 없으므로 고속 운전이 가능하다.

BLDC 전동기는 구조의 유사성으로 인해 교류 전동기인 영구자석 동기전동기와 서로 혼동되기 쉬운데, 통상 역기전력의 형태로 구분한다. BLDC 전동기의 영구자석은 고정자 권선에 흐르는 구형과 전류와 작용하여 일정한 토크를 발생시키기 위하여 사다리꼴 형태의 역기전력을 가진다. 반면 영구자석 동기전동기는 정현파 전류와 작용하여 일정한 토크를 발생시켜야 하기 때문에 정현파 형태의 역기전력을 가지게 된다.[5]

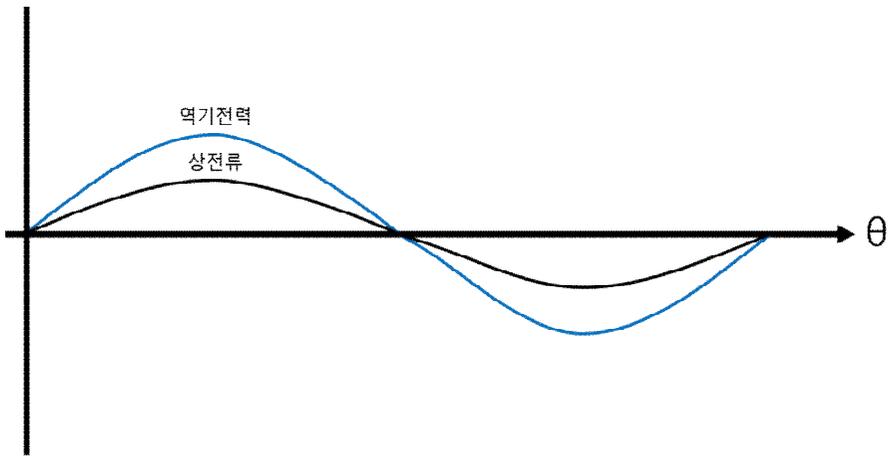


Fig. 2 Back EMF and phase current of PMSM

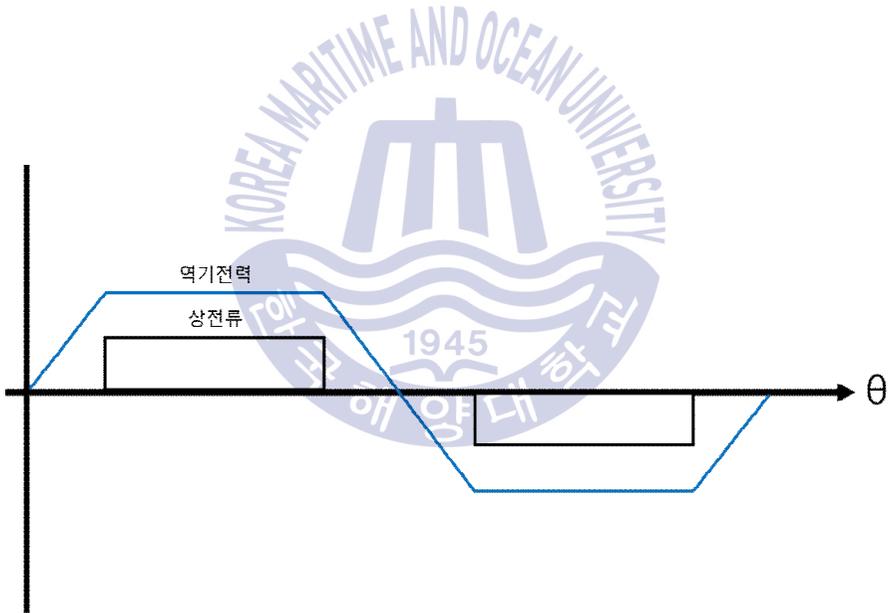


Fig. 3 Back EMF and phase current of BLDCM

2.1.2 BLDC 전동기의 구동

BLDC 전동기의 기본적인 구동 방법은 회전자가 일정 방향으로 회전하도록 회전자의 영구자석 위치에 따라 전류를 흘려서 자속을 발생시킬 고정자 권선을 바꾸어 주어 회전자에 힘이 연속적으로 발생하게 하는 것이다. 이러한 기능을 실현하기 위해서는 필수적으로 회전자, 즉 영구자석의 위치를 알아야 하므로 홀 센서와 같은 자속 검출 센서를 이용한다.

그림 4에 보이는 3상 2극 Y 결선의 BLDC 전동기의 경우 3개의 홀 소자가 120°(전기각) 간격으로 배치되며 이들 신호로부터 회전자의 위치를 6개 구간으로 구별하여 검출 할 수 있다. 따라서 회전자의 1회전(전기각 한주기)은 6개 구간으로 나누어 구동된다.

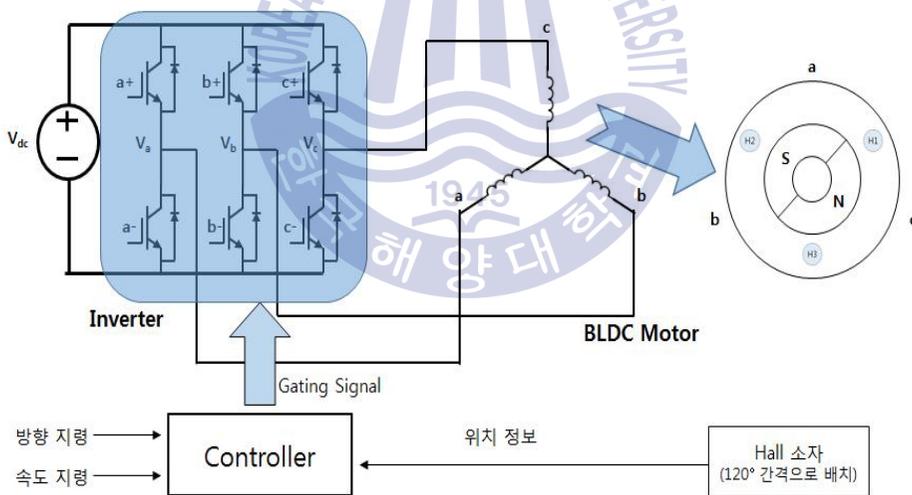


Fig. 4 Drive system of BLDC motor

홀 센서로부터 얻어진 회전자의 위치 정보를 통하여 6개 구간 중 연속적인 회전을 위해 현재 요구되는 동작 구간을 결정하고 이에 따라 전류를 흘려주어야 할 두 상을 선정하여 구동 회로인 인버터로 여자한다. BLDC 전동기의 구동 시에는

항상 3상 권선 중 두 상만 여자되며, 나머지 한상은 여자되지 않는다.

그림 5에 6개 모드에서의 역기전력(e_a, e_b, e_c)과 홀 센서의 검출 신호(H_1, H_2, H_3) 및 검출 신호에 따른 각 상 전류(i_a, i_b, i_c)를 표현하였다. 여기서 홀 센서는 N극을 검출 시에는 1을, S극을 검출시에는 0을 출력한다고 가정하면, 홀 센서 정보를 이용하여 60° 마다 도통되는 스위치를 바꾸어 전류가 흐르는 권선을 바꾸어주면 일정한 방향으로 토크가 발생하여 회전하게 된다. [5]

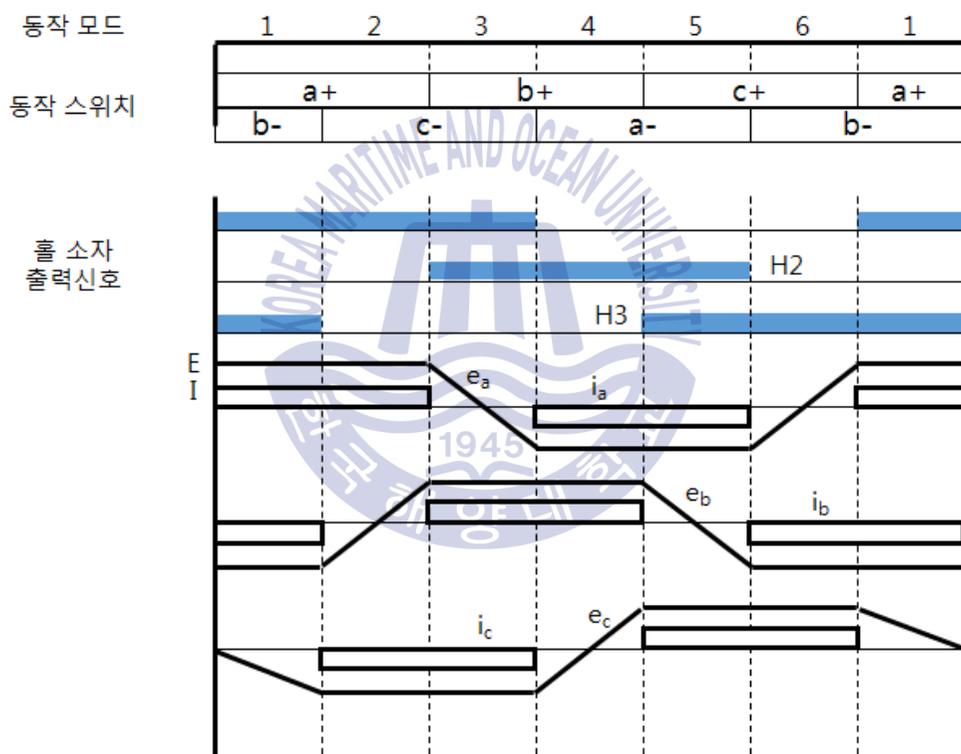


Fig. 5 Fundamental of BLDC motor drive

2.1.3 BLDC 전동기 속도제어

그림 6은 BLDC 전동기의 인가전압 제어에 의한 속도제어 시스템이다. 속도 제어기로는 비례적분 제어기가 사용되며, 속도 제어기의 출력은 인가전압(또는 PWM Duty)의 지령으로 주어진다.

$$v^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(\omega_m^* - \omega_m) \tag{1}$$

where K_p : 비례이득

K_i : 적분이득

제어기에서 출력된 지령 전압(또는 PWM Duty)은 PWM 기법을 통해 생성되어 전동기에 인가된다.

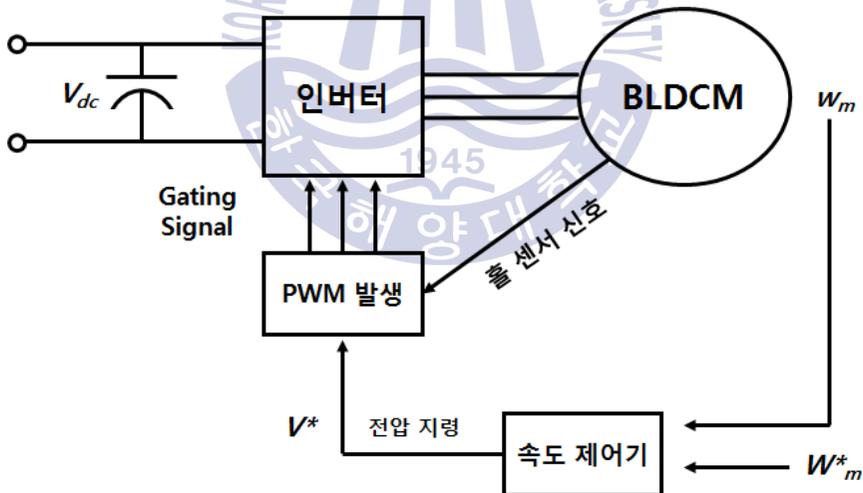


Fig. 6 Speed control system of BLDC motor

우수한 속도 제어 특성을 얻기 위해서는 토크 또는 전류를 제어하여 속도를 제어할 필요에 따라 내부에 전류 제어기를 갖는다. 속도 제어기의 출력은 전동기의 전류 지령으로 주어지며, 전동기의 실제 전류를 측정하기 위해 전류 센서가

필요하다.

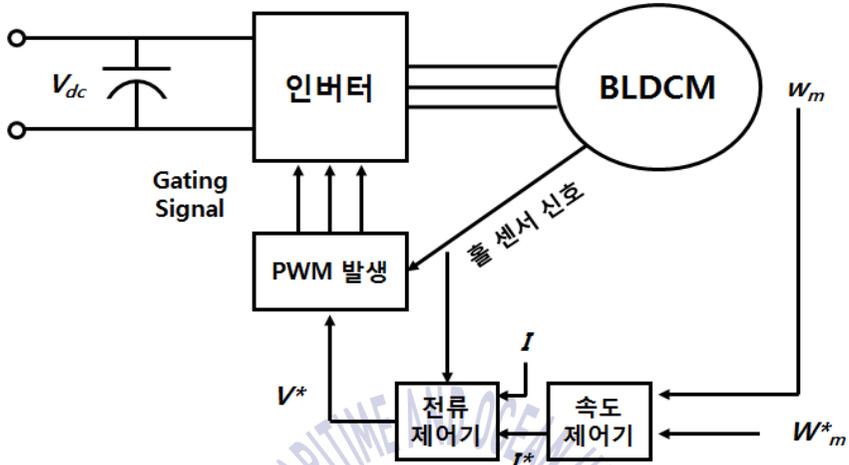


Fig. 7 Speed control system with current controller

BLDC 전동기에서는 출력 토크는 상전류의 크기에 비례하므로 상 전류의 크기를 제어하면 된다. BLDC 전동기의 상전류 크기는 인버터의 입력 측 직류전류(I_{dc})에 비례하므로 I_{dc} 의 크기를 제어하여 상전류의 크기를 제어한다.

$$I_{dc}^* = \left(K_{ps} + \frac{K_{is}}{s} \right) (\omega_m^* - \omega_m) \quad (2)$$

where K_{ps} : 비례이득

K_{is} : 적분이득

속도제어기에서는 지령속도 추종에 필요한 지령 전류 I_{dc}^* 가 출력된다. 이 지령 전류와 센서로부터 측정된 실제 전류와의 오차로부터 히스테리시스 기법이나 PWM 기법을 사용하여 스위칭 소자들의 구동 신호를 발생한다. 이러한 스위칭 신호는 최종적으로 홀 센서 신호로부터 결정된 동작 모드의 신호와 결합되어 실제 동작될 스위치들이 결정된다.

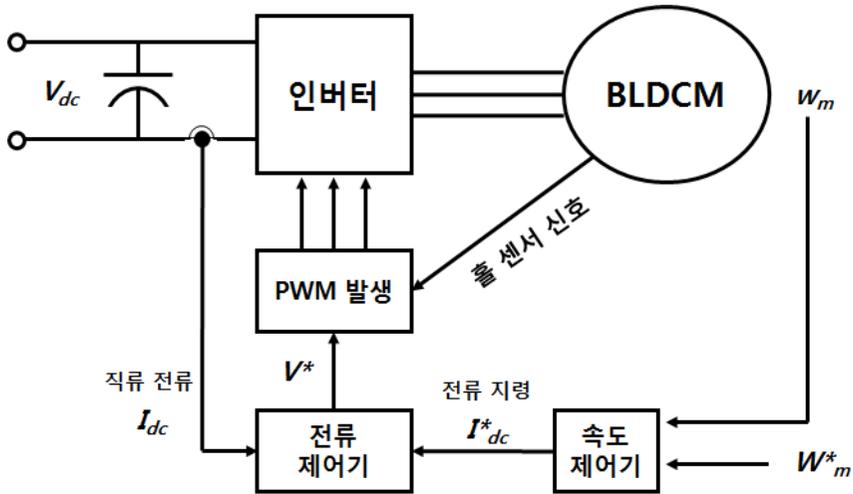


Fig. 8 Speed control system with DC current control

스위칭 주파수를 일정하게 유지할 수 있도록 PWM 기법을 사용하여 스위칭 상태를 결정하게 된다. 이 경우 통상 비례적분 전류 제어기를 사용하여 전류 오차로부터 다음과 같이 전동기의 지령 전압 또는 PWM Duty를 출력한다.[5]

$$v^* = \left(K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s} \right) (I_{dc}^* - I_{dc}) \quad (3)$$

where K_{pc} : 비례이득

K_{ic} : 적분이득

2.2 7상 BLDC 전동기

2.2.1 7상 BLDC 전동기의 구조

7상 BLDC 전동기는 각 상의 권선이 전기각으로 $\frac{2}{7}\pi$ 간격으로 배치되어 있으며, 일정한 토크출력과 최대한의 출력밀도를 얻기 위해서는 항상 6개의 상이 도통해야 하므로 각 상 권선내의 두 개의 도체는 전기각으로 $\frac{6}{7}\pi$ 간격으로 배치된다. 이러한 7상 BLDC 전동기의 이상적인 역기전력 파형과 전류 파형은 아래 그림 9와 같이 나타낼 수 있으며, 3상 BLDC 전동기의 역기전력 파형은 반주기 동안 평탄한 구간이 $\frac{2}{3}\pi$ 이지만 7상 BLDC 전동기의 역기전력 파형은 반주기 동안 $\frac{6}{7}\pi$ 의 평탄한 구간을 가지는 사다리꼴 파형이다. 따라서 일정한 토크를 발생시키기 위해서는 $\frac{6}{7}\pi$ 의 도통구간동안 전류가 일정하게 흐르도록 제어하여야 한다.

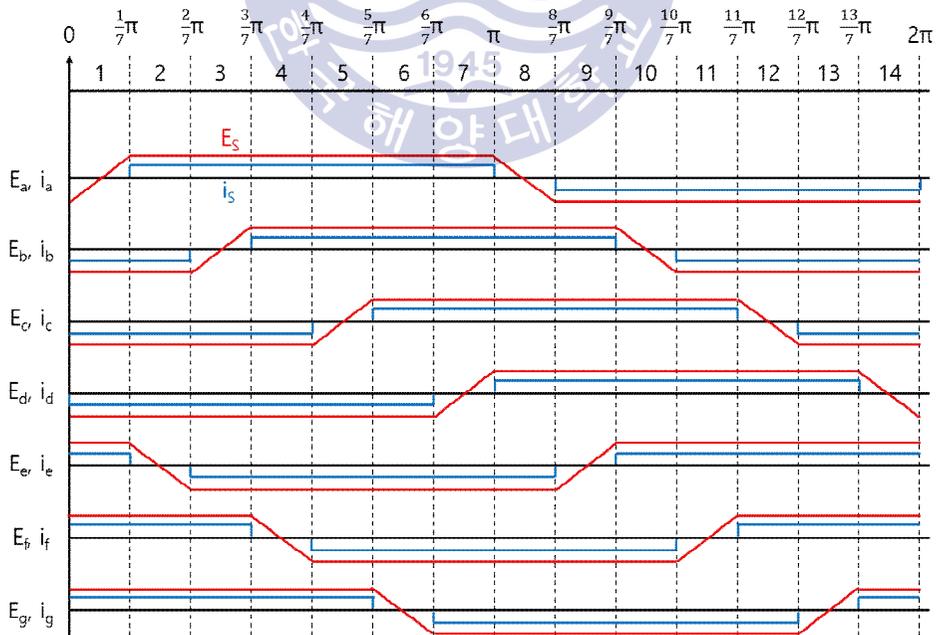


Fig. 9 Back EMF and phase current wave form of 7 phase BLDCM

2.2.2 7상 BLDC 전동기의 구동

그림 10은 7상 BLDC 전동기의 구동회로를 나타내고 있다. 7상 BLDC 전동기의 구동회로는 크게 직류 전압부, 직류 전압을 BLDC 전동기의 구동전력형태로 변환하는 인버터부 및 전동기로 구성되어 있다. 또한 이러한 전동기는 전동기의 회전속도에 비례해서 발생하는 역기전력 및 전동기 내부의 인덕턴스 성분 및 저항으로 등가화 된다.

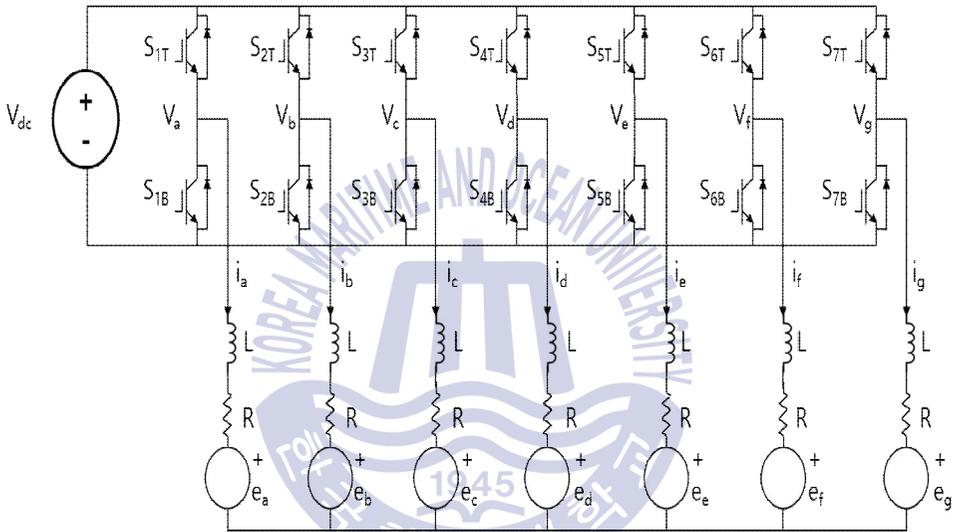


Fig. 10 Drive circuit of 7 phase BLDCM

그림 10의 구동회로에서 인버터 출력전압 V 와 전동기 역기전력 성분, 각 상의 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스와 저항성분을 포함한 전기회로에 KVL을 적용하면 구동시스템의 회로방정식은 다음과 같이 식 4로 표현 가능하다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_d \\ v_e \\ v_f \\ v_g \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \\ i_g \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{ad} & M_{ae} & M_{af} & M_{ag} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} & M_{bd} & M_{be} & M_{bf} & M_{bg} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c & M_{cd} & M_{ce} & M_{cf} & M_{cg} \\ M_{da} & M_{db} & M_{dc} & L_d & M_{de} & M_{df} & M_{dg} \\ M_{ea} & M_{eb} & M_{ec} & M_{ed} & L_e & M_{ef} & M_{eg} \\ M_{fa} & M_{fb} & M_{fc} & M_{fd} & M_{fe} & L_f & M_{fg} \\ M_{ga} & M_{gb} & M_{gc} & M_{gd} & M_{ge} & M_{gf} & L_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \\ i_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ e_d \\ e_e \\ e_f \\ e_g \end{bmatrix} + v_{no} \quad (4)$$

where v_x : 인버터 출력단 전압 ($x = a, b, c, d, e, f, g$)

L_x : 각 상의 자기 인덕턴스 ($x = a, b, c, d, e, f, g$)

$M_{\alpha\beta}$: 각각의 상호 인덕턴스 ($x = a, b, c, d, e, f, g$)

i_x : 각 상의 전류 ($x = a, b, c, d, e, f, g$)

e_x : 각 상의 역기전력 ($x = a, b, c, d, e, f, g$)

v_{no} : GND와 중성점간의 전압

이 때 각 상의 역기전력 및 전류가 이상적인 파형이라 가정하면 임의의 한 상이 다른 상에 의해 영향을 받는 상호 인덕턴스는 어느 상이나 동일한 효과를 얻음으로서 상태평준화 기법에 의해 각 상의 전압방정식은 다음 식 5와 같이 된다.

$$V_x = RI_x + (L_x - M_x) \frac{dI_x}{dt} + e_x + V_{no} \quad (5)$$

where $x = a, b, c, d, e, f, g$

이 때 각 상의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스에 의한 영향이 평형을 이루고 있다고 가정했을 경우 $L_x - M_x = L$, $R_x = R$ 이라 정의하고 최종적으로 식 4의 행렬식을 라플라스 변환하면 각 상에 대한 수식으로서 표현 할 수 있다.

$$v_a = (L_s + R)i_a + e_a + v_{no} \quad (6)$$

$$v_b = (L_s + R)i_b + e_b + v_{no} \quad (7)$$

$$v_c = (L_s + R)i_c + e_c + v_{no} \quad (8)$$

$$v_d = (L_s + R)i_d + e_d + v_{no} \quad (9)$$

$$v_e = (L_s + R)i_e + e_e + v_{no} \quad (10)$$

$$v_f = (L_s + R)i_f + e_f + v_{no} \quad (11)$$

$$v_g = (L_s + R)i_g + e_g + v_{no} \quad (12)$$

where L : 등가화된 각상의 인덕턴스

R : 등가화된 각상의 저항

또한 전동기의 중성점 n 에서는 전류의 총합이 0이 되므로 식 13과 같은 관계가 성립한다.

$$i_a + i_b + i_c + i_d + i_e + i_f + i_g = 0 \quad (13)$$

식 6 ~ 12를 13에 대입하면 식 14를 구할 수 있다.

$$v_{no} = \frac{1}{7} \sum_{x=a}^g (v_x - e_x) \quad (14)$$

손실을 무시하는 경우 전기적인 출력 전력은 기계적인 출력과 같으므로 역기전력 및 상전류의 파형이 이상적이라면 출력 토크 및 회전속도에 따른 관계에 의해 출력 관계식은 다음의 식 15와 같이 모델링 된다.

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d + e_e i_e + e_g i_g + e_g i_g}{\omega_m} = \frac{6E_s I_s}{\omega_m} \quad (15)$$

where T_e : 출력토크

P_e : 전기적인 출력 전력

ω_m : 전동기 회전 각속도

E_s : 각상 역기전력의 평균

I_s : 각상 전류

이 때의 출력토크 T_e 에 의한 전동기의 운동 방정식은 식 16과 같이 모델링 된다.

$$T_e = T_L + J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (16)$$

where J_m : 회전관성 모멘트
 B_m : 점성마찰계수
 T_L : 부하토크

식 4 ~ 16까지의 모델링 방정식에 의하여 전동기의 블록선도를 그리면 다음과 같이 되며, 이를 통해서 7상 전동기의 속도에 관한 운동방정식은 3상 전동기와 동일하며 상수에 의해 전기적인 회로 부분만 모델링이 변화하게 됨을 알 수 있다.

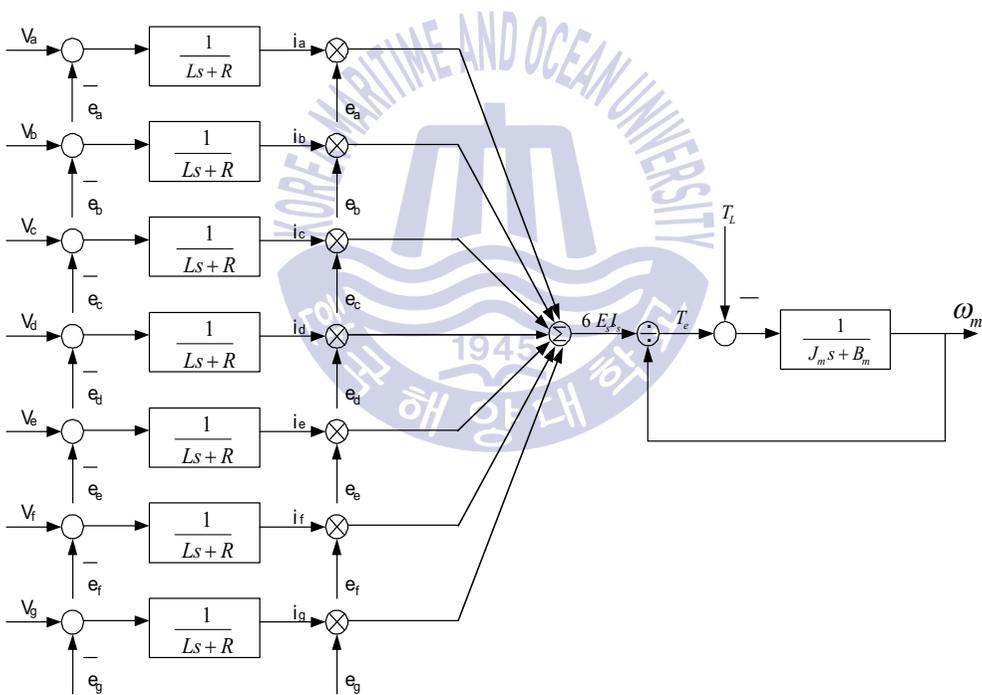


Fig. 11 Block diagram of 7 phase BLDCM

2.2.3 7상 BLDC 전동기의 PWM 구현

다상 전동기는 고속 고효율이므로 정격속도에서의 역기전력 제한을 위해 낮은 권선수를 가지고 있어 인덕턴스가 아주 낮다. 이러한 낮은 권선 인덕턴스에 의하여 전류의 리플이 커지며, 특히 저속구간에서 그 특성이 심화되므로 일반적인 히스테리시스 제어기의 경우 스위칭 주파수가 극히 높아지는 단점이 있다. 따라서 저속구간에서는 히스테리시스 제어기의 경우 스위치의 on-off시간이 스위치의 정격 이상으로 높아지는 경우가 생기며 스위칭 소자의 파손위험이 높아지게 된다. 이에 반하여 디지털 제어 방식의 PWM의 경우 스위칭 주파수가 고정적이기 때문에 스위칭 소자의 스위칭 주파수 제한으로부터 자유롭다.

3상 BLDC 전동기의 경우 일반적으로 2상 권선 여자방식을 취하고 있다. 2상 권선 여자방식은 도통되는 2개의 상만을 PWM하고, 비도통상의 스위치는 모두 off시키는 방식이다.

7상 BLDC 전동기는 일반적으로 6상 권선 여자방식을 주로 사용하게 되는데, 6상 권선 여자방식의 경우 3개의 양의 전류와 3개의 음의 전류 그리고 하나의 비도통구간으로 나누어진다.

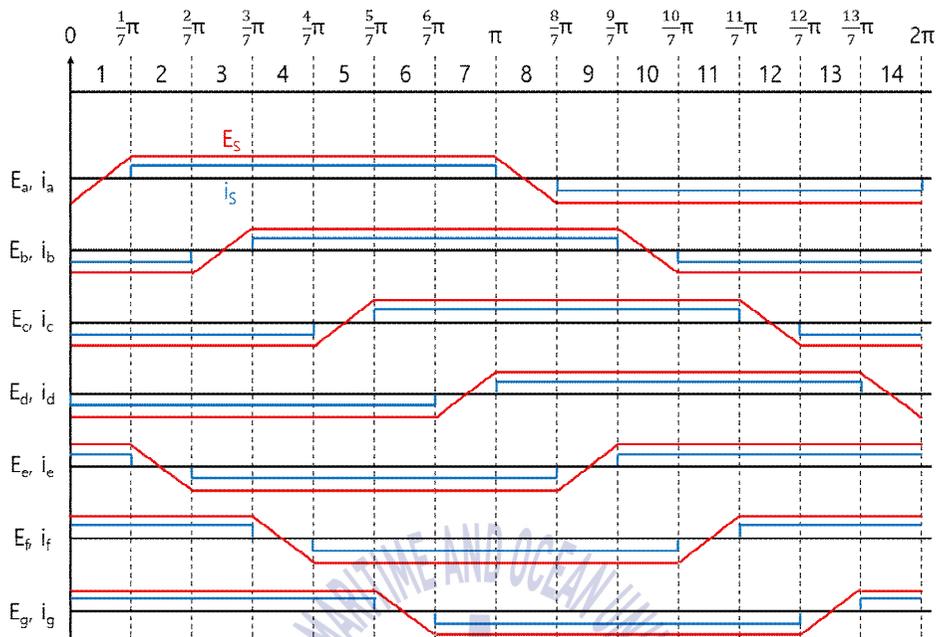


Fig. 12 Back EMF and phase current wave form of 7 phase BLDCM

Table 1 Phase current flows according to the operating mode

	i_a	i_b	i_c	i_d	i_e	i_f	i_g
1	0	-	-	+	+	+	
2	+	-	-	-	0	+	+
3	+	0	-	-	-	+	+
4	+	+	-	-	-	0	+
5	+	+	0	-	-	-	+
6	+	+	+	-	-	-	0
7	+	+	+	0	-	-	-
8	0	+	+	+	-	-	-
9	-	+	+	+	0	-	-
10	-	0	+	+	+	-	-
11	-	-	+	+	+	0	-
12	-	-	0	+	+	+	-
13	-	-	-	+	+	+	0
14	-	-	-	0	+	+	+

그림 13에는 3번 구간에서의 스위칭 패턴에 따른 상전류의 흐름을 나타내었다. 3번 구간에서는 a, f, g상에 양의 전류가 흐르고, c, d, e상에 음의 전류가 흐르며 비도통상은 b상이다.

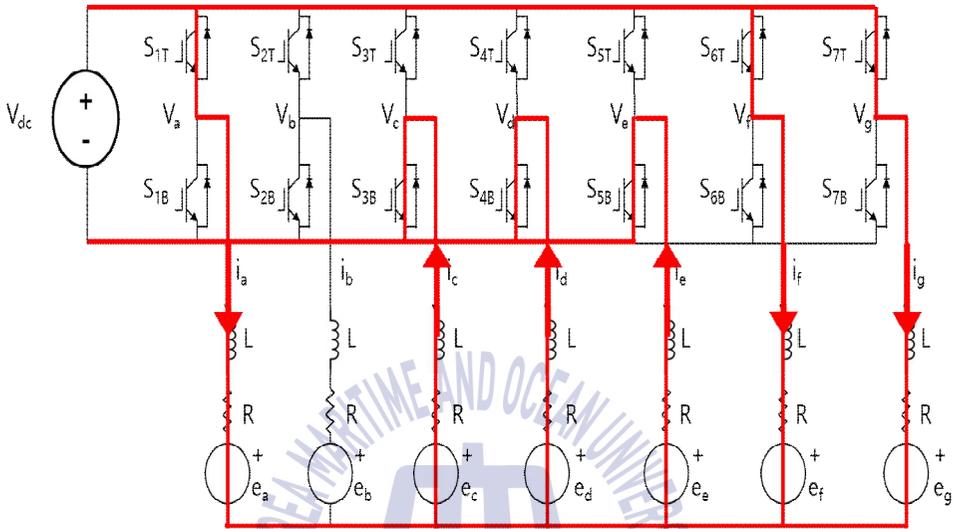


Fig. 13 Switching pattern of 6 phase excitation method when the position is '3'

본 연구에서 사용된 7상 BLDC 전동기에는 7상 권선 여자방식의 구동 방식을 채택하였다. 6상 권선 여자방식이 사다리꼴 파형의 역기전력의 평평한 구간만 사용하는 반면, 7상 권선 여자방식은 사다리꼴 파형의 역기전력이 증가 또는 감소하는 구간까지 사용하게 됨으로써 6상 권선 여자방식에 비하여 더 큰 출력을 얻을 수 있게 된다.

7개의 도통 상이 상단 3상/하단 4상 또는 상단 4상/하단 3상과 같이 반복된다. PWM이 되는 스위치는 회전자의 위치에 따라서 결정된다.(상단 또는 하단 SW) 각 상의 역기전력 및 상전류에 따른 스위칭 패턴을 그림 14에 나타내었다. 이 때 전동기의 회전자 위치가 2번 구간에 있을 경우를 살펴보면 양의 전류가 흘러야 하는 상은 a, f, g상이며, 음의 전류가 흐르는 상은 c, d, e상이다. 이 경우 양의 전류가 흐르는 상의 PWM 상태의 On-Off에 따라 전류의 흐름은 그림 14와 같이

된다. 도통 상의 인버터 출력 전압을 수식으로 나타내면 아래 식 17 ~ 19와 같다.

$$V_p = \frac{3}{7} V_{dc} D \quad (17)$$

$$V_n = -\frac{4}{7} V_{dc} D \quad (18)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (19)$$

where V_p : 양의 도통상의 인버터 출력 전압

V_n : 음의 도통상의 인버터 출력 전압

D : 듀티비

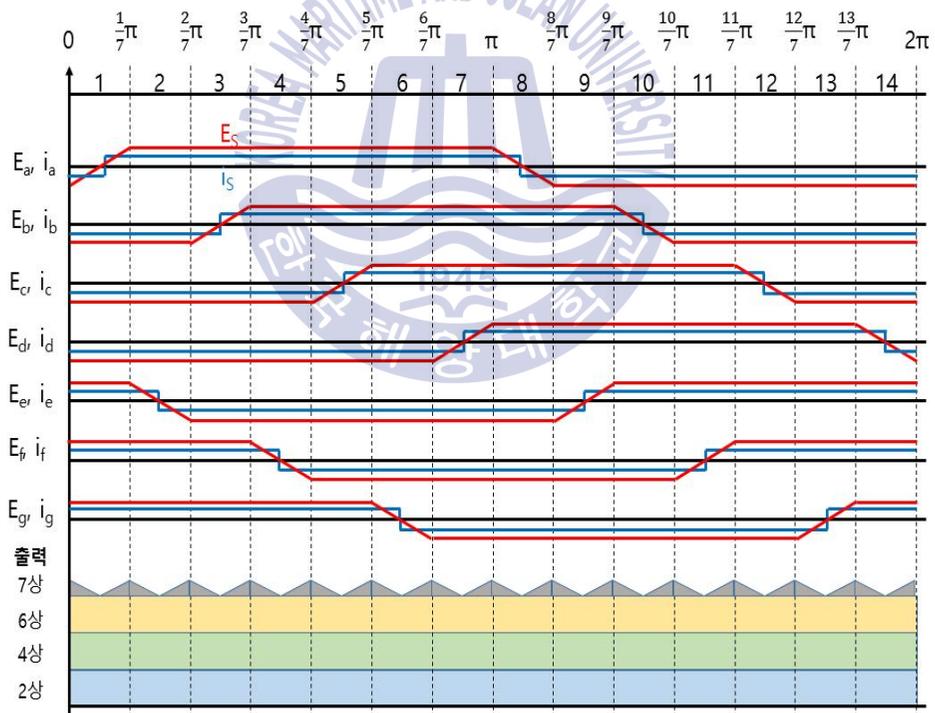


Fig. 14 Back EMF and phase current of 7 phase BLDCM

제 3 장 시스템 구성

3.1 제안한 시스템 구성

BLDC 전동기 구동시 사용되는 인버터의 스위칭 동작으로 인하여 전원 입력단에 전류 및 전압의 맥동이 발생하게 된다. 발생하는 리플전류 및 리플전압은 특정 주파수 성분을 가지는 고조파 성분과 특정 주파수 성분을 가지지 않는 노이즈 성분이 포함되어 있는데, 이러한 고조파 및 노이즈 성분들이 전원 및 전원과 연결되는 Bus bar에 그대로 나타나게 된다.

리플전류 및 리플전압을 감소시키기 위한 방안으로는 크게 하드웨어적인 방법과 소프트웨어적인 방법으로 구분되는데, 하드웨어적인 방법은 필터, 리액터 및 커패시터 적용 등의 방법이 있고, 소프트웨어적인 방법으로는 제어방식(PWM 제어) 변경 등의 방법이 있다.

리플전류 및 리플전압을 저감하기 위한 방안 중 소프트웨어적인 방법인 제어방식의 변경은 개발 또는 변경에 시간이 오래 걸리고, 또한 적용 후 시스템 안정화에 시간이 오래 걸리는 단점을 가진다.

하드웨어적인 방법 중 노이즈 제거용 필터를 적용하는 방안은 고전압 대전류를 사용하는 대전력 계통에는 적용이 어려운 단점이 있고, 코일을 이용한 인덕턴스를 증가시키는 방안은 제한된 공간 내에 설치되어 사용되는 전동기의 경우 체적과 중량 등의 제약조건으로 인하여 적용에 어려움이 있다.

본 논문에서 제안하는 것은 커패시터를 사용하여 전동기 전원 입력단에 발생하는 리플전류 및 리플전압을 저감시키는 방안이다. 다양한 용량의 커패시터를 이용하여 실험시 커패시터 용량 변경이 용이하고, 체적 및 중량 등의 제약조건이 비교적 덜하며 실험결과를 바로 전동기에 적용이 가능한 점 등 여러 장점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 7상 BLDC 전동기의 전원 입력단에 다양한 용량의 커패시터를 적용하여 리플전류 및 리플전압을 저감시키는 방안에 대하여 연구하고자 한다.

3.2 입력전원 리플전류, 전압리플 및 커패시터 용량 계산

3.2.1 전류 주파수

인버터 1상의 상전류 주파수는

$$freq_{1P_{cur}} = \frac{RPM}{60} \times \frac{극수}{2} = \frac{18000}{60} \times \frac{6}{2} = 900[Hz] \quad (20)$$

6상 120° 상전류 제어인 경우의 DC 입력전류는 인버터 1상의 상전류 1주기 운전동안 인접한 2개의 상전류가 On-Off 교번하므로, DC 입력전류의 주파수는 1상의 상전류 주파수의 3배가 된다.

$$freq_{DC_{120}} = freq_{1P_{cur}} \times 3 = 900 \times 3 = 2700[Hz] \quad (21)$$

6상 180° 상전류 제어인 경우의 DC 입력전류는 인버터 1상의 상전류 1주기 운전동안 인접한 2개의 상전류가 On-Off 교번하므로, DC 입력전류의 주파수는 1상의 상전류 주파수의 3.5배가 된다.

$$freq_{DC_{180}} = freq_{1P_{cur}} \times 3.5 = 900 \times 3.5 = 3150[Hz] \quad (22)$$

이는 7개의 도통 상이 상단 3상/하단 4상 또는 상단 4상/하단 3상과 같이 반복되는 결과에 의해 상전류 주파수의 3.5배가 된다.

3.2.2 리플전류

전원 입력단은 7상 BLDC 전동기 구동시 스위칭 소자의 On-Off 등에 의해 전원 입력단에 특정 주파수를 갖는 리플전압 및 리플전류가 만들어 진다.

DC 입력은 인버터 내부의 각 상에 상전압 및 상전류 등의 전력으로 변환되며 이들 상에 해당되는 전력들의 합은 DC 입력전력과 같다. 특히 DC 입력전류는 상전류 등의 합과 같다. 도통되는 2개의 상에 인가되는 상전압은 스위칭 소자의 On-Off에 따라 달라지며 출력전압 V_{out} 은 아래 식 23과 같다.[6]

$$V_{out} = dutyratio \times V_{bus} \quad (23)$$

여기서 V_{bus} = 전동기 입력전압,

$0 \leq dutyratio(D) \leq 1$ 로 하면,

$$V_{out} = D \times V_{bus} \quad (24)$$

전원 입력단에 만들어지는 리플전류(ΔI)는 아래와 같이 계산 할 수 있다.

여기서 V_L = 상전압

L = 전동기 인덕턴스로 하고,

$$V_L = L \frac{dI}{dt} \quad (25)$$

$$dI = \frac{V_L}{L} dt \quad (26)$$

$$\int dI = \int \frac{V_L}{L} dt \quad (27)$$

$$\Delta I = \frac{V_L}{L} \int dt \quad (28)$$

$$= V_L \times \frac{\Delta t}{L} \quad (29)$$

인버터의 상단 스위치가 On 되면

$$V_L = V_{bus} - V_{out} \quad (30)$$

$$\Delta I = (V_{bus} - V_{out}) \times \frac{\Delta t}{L} \quad (31)$$

$$= (V_{bus} - D \times V_{bus}) \times \frac{\Delta t}{L} \quad (32)$$

여기서 $\Delta t = D \times PWM_{period}$ 또는 $\Delta t = D \times \frac{1}{PWM_{Frequency}}$ 이며,

$$\text{따라서 } \Delta t = D \times \frac{1}{f}$$

$$\Delta I = (V_{bus} - D \times V_{bus}) \times \frac{D}{f \times L} \quad (33)$$

$$= D \times (1 - D) \times \frac{V_{bus}}{f \times L} \quad (34)$$

위 식 34에 따라 *dutyratio*(*D*)에 따른 리플전류를 계산해 보면 아래 표 2와 같다.

Table 2 Ripple current(ΔI) vs. Duty ratio(D)

duty ratio(D)	$D \times (1 - D)$	ΔI	duty ratio(D)	$D \times (1 - D)$	ΔI
0	0	0	0.55	0.2475	0.2475
0.05	0.0475	0.0475	0.60	0.24	0.24
0.10	0.09	0.09	0.65	0.2275	0.2275
0.15	0.1275	0.1275	0.70	0.21	0.21
0.20	0.16	0.16	0.75	0.1875	0.1875
0.25	0.1875	0.1875	0.80	0.16	0.16
0.30	0.21	0.21	0.85	0.1275	0.1275
0.35	0.2275	0.2275	0.90	0.09	0.09
0.40	0.24	0.24	0.95	0.0475	0.0475
0.45	0.2475	0.2475	1	0	0
0.50	0.25	0.25			

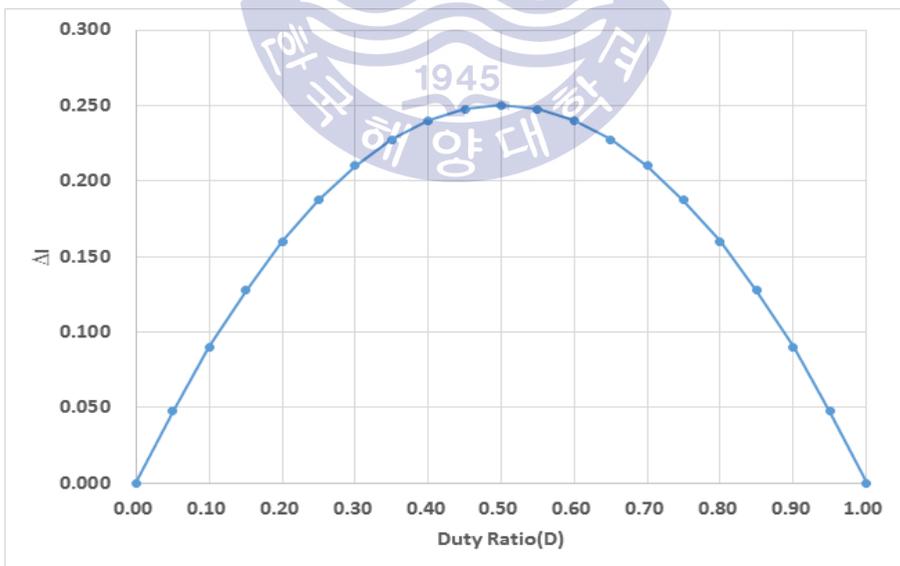
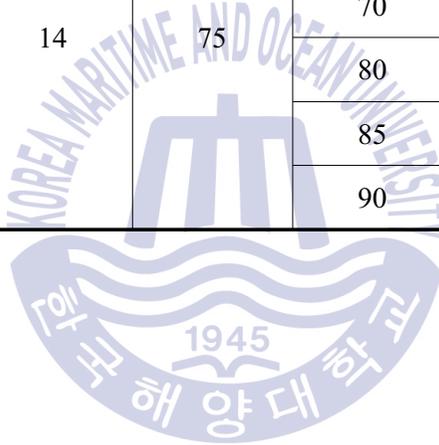


Fig. 15 Ripple current(ΔI) vs. Duty ratio(D)

그림 15는 ΔI 와 D 에 대한 그래프이다. Duty ratio 50%, 즉 D 가 0.5일 때 리플전류는 최대값이 된다. 본 논문의 실험에서 사용된 7상 BLDC 전동기의 입력전압, 스위칭 주파수 및 인덕턴스를 대입하여 Duty ratio에 따른 리플전류를 계산하면 아래 표 3과 같다.

Table 3 Ripple current according to duty ratio

입력전압 [V]	스위칭 주파수[kHz]	인덕턴스 [μ H]	duty ratio [%]	$\Delta I[A_{p-p}]$
600	14	75	50	142.86
			60	137.14
			70	120.00
			80	91.43
			85	72.86
			90	51.43



3.2.3 리플전압 및 커패시터 용량 계산

커패시터 전류 i_c 는 아래와 같이 표현된다.

여기서 $C =$ 커패시터 용량이며, *dutyratio*가 50%일 경우에 대해 계산한다.[6]

$$i_c = C \frac{dV}{dt} \quad (35)$$

$$dV = \frac{i_c}{C} dt \quad (36)$$

$i_c = \Delta I_{0.5t}$ 로 놓고,

$$i_c = \Delta I_{0.5t} = 0.25 \times \frac{V_{bus}}{f \times L} \quad (37)$$

$$dV = [0.25 \times \frac{V_{bus}}{f \times L \times C}] dt \quad (38)$$

$$\int dV = \int [0.25 \times \frac{V_{bus}}{f \times L \times C}] dt \quad (39)$$

$$\Delta V_{0.5t} = [0.25 \times \frac{V_{bus}}{L \times C}] \times \int \frac{1}{f} dt \quad (40)$$

$\frac{1}{f} = t$ 이므로

$$\Delta V_{0.5t} = [0.25 \times \frac{V_{bus}}{L \times C}] \times \int t dt \quad (41)$$

$$= (0.25 \times \frac{V_{bus}}{L \times C}) \times \frac{\Delta t^2}{2} \quad (42)$$

$$= \frac{V_{bus}}{8 \times L \times C} \times \Delta t^2 \quad (43)$$

Δt 를 *dutyratio* 50%로 놓으면,

$$\Delta t = 0.5t = \frac{1}{2} \times \frac{1}{f} \quad (44)$$

$$\Delta V_{0.5t} = \frac{V_{bus}}{32 \times L \times C \times f^2} \quad (45)$$

DC Link capacitor 용량에 따른 리플전압을 식 45에 따라 계산하면 표 4와 같다.

Table 4 Ripple voltage according to DC Link Capacitor

입력전압 [V]	스위칭 주파수[kHz]	인덕턴스 [μ H]	duty ratio [%]	Capacitor 용량[μ F]	ΔV [V_{p-p}]
600	14	75	50	330	3.87
				500	2.55
				1000	1.28
				1500	0.85
				2000	0.64
				2200	0.58
				2500	0.51
				3000	0.43
				3500	0.36
				4000	0.32
				4500	0.28
5000	0.26				

그림 16은 표 4에 나타난 내용 중 *dutyratio* 50% 일 때의 커패시터 용량 대 리플전압 계산 결과를 나타낸 것이다.

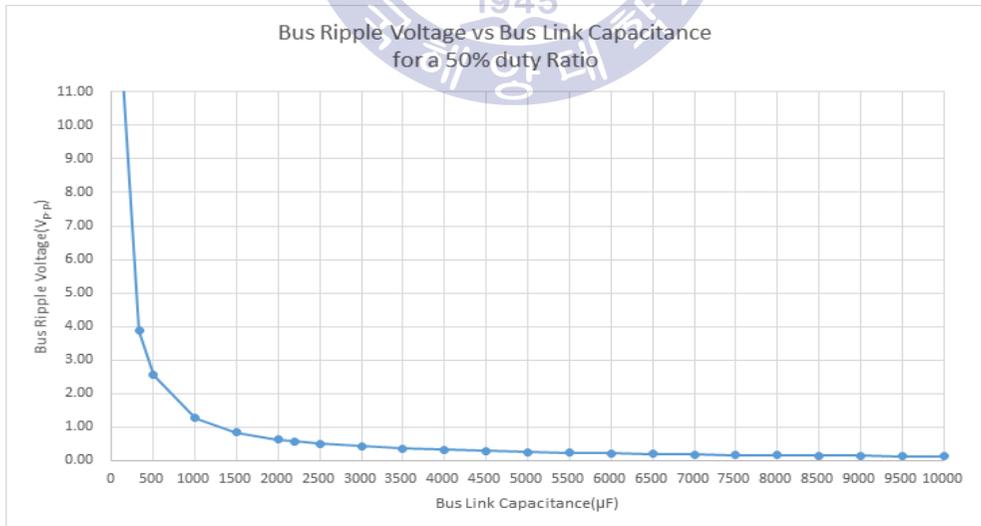


Fig. 16 Ripple voltage vs. DC Link Capacitor(duty ratio 50%)

제 4 장 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션

본 연구에서 제안한 DC Link Capacitor 적용 및 커패시터 용량에 따른 전동기 입력전압 및 입력전류의 변화를 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 Maths Works의 Dynamic Simulation Tool인 Matlab Simulink를 이용하였다.

4.1.1 시뮬레이션 구성

본 연구에서 제안하는 DC Link Capacitor 적용 및 용량에 따른 전원 입력단의 리플전류 및 리플전압의 변화를 확인하기 위하여 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 아래 그림 17은 전체 시뮬레이션 모델을 나타내었다.

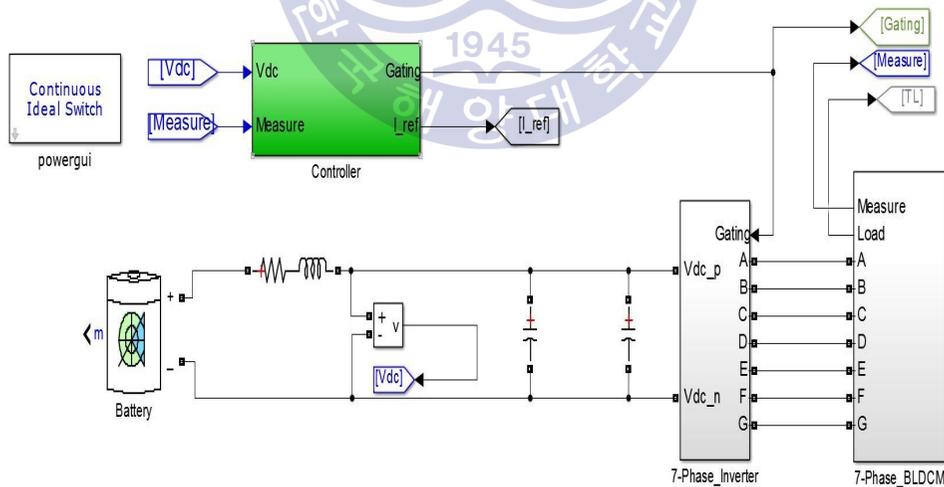


Fig. 17 Overall simulation model

아래 그림 18과 19는 각각 7상 PWM 인버터 시스템과 7상 BLDC 전동기 모델이다.

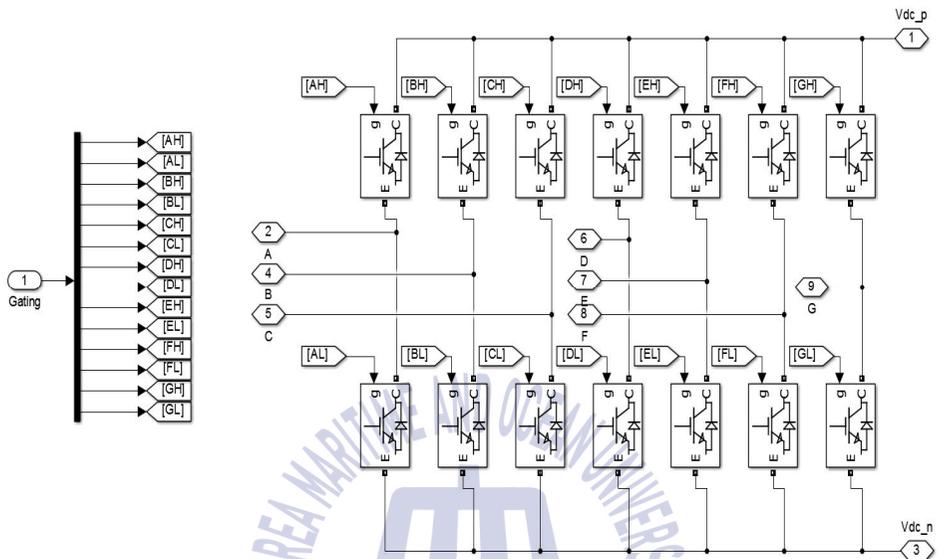


Fig. 18 Inverter system for 7 phase BLDCM drive

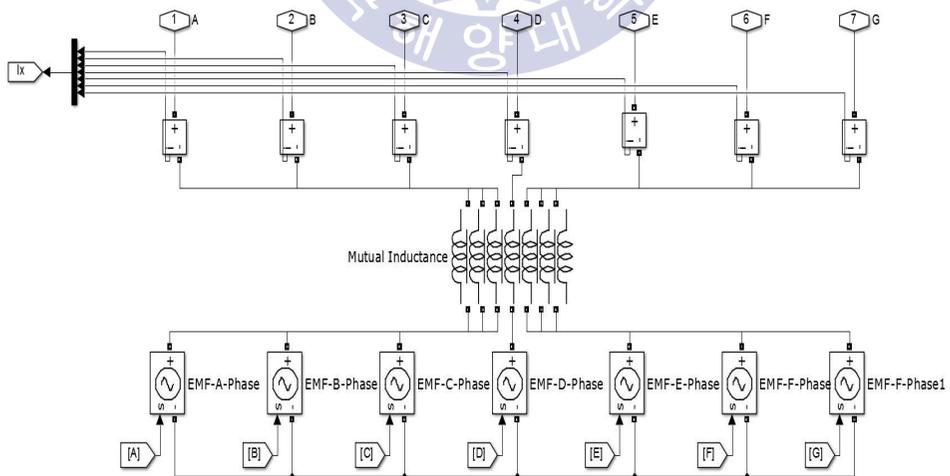


Fig. 19 Modeling of 7 phase BLDC motor

4.1.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서는 DC Link Capacitor의 용량을 아래 표 5와 같이 변화시키면서 전동기 전원 입력단의 리플전류 및 리플전압의 크기를 확인하였다. 시뮬레이션에서의 커패시터 용량은 3.2절의 리플전압 및 커패시터 용량 계산에 사용한 전동기 파라미터 및 커패시터 용량과 동일하게 설정하였다.

Table 5 Case of simulation according to capacity of DC Link capacitor

구분	커패시터 용량(μF)	구분	커패시터 용량(μF)
1	1000	6	3000
2	1500	7	3500
3	2000	8	4000
4	2200	9	4500
5	2500	10	5000

그림 20과 21은 1000[μF]의 커패시터를 적용한 경우 전동기 입력단의 리플전압 및 리플전류 결과이다. 시뮬레이션 결과는 전압은 약 644[V] \pm 28[V]이며, 최고전압은 약 671[V], 최저전압은 약 616[V]의 결과가 나왔다. 또한 전류는 약 438[A] \pm 83[A]이며, 최대전류는 약 520[A], 최소전류는 약 355[A]의 결과가 나왔다.

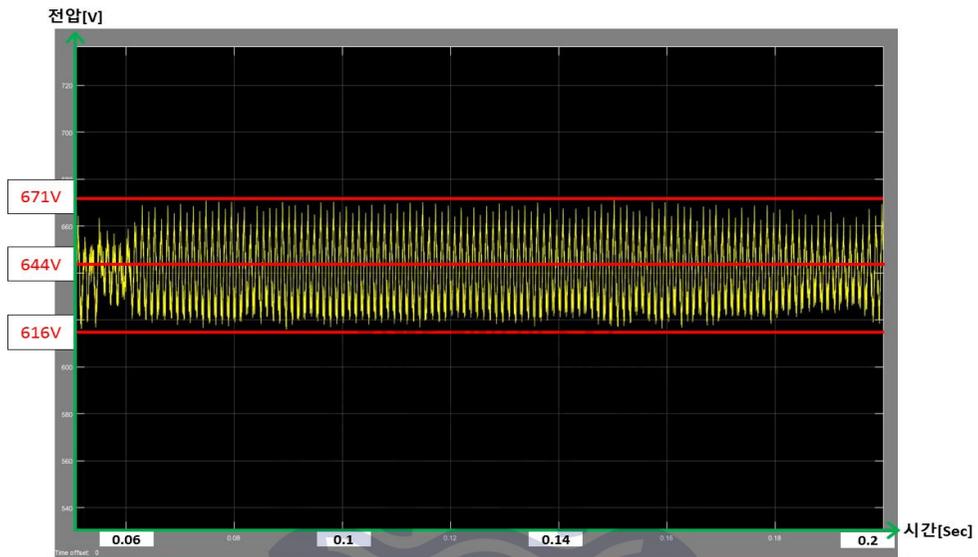


Fig. 20 Ripple voltage(1000 μF)

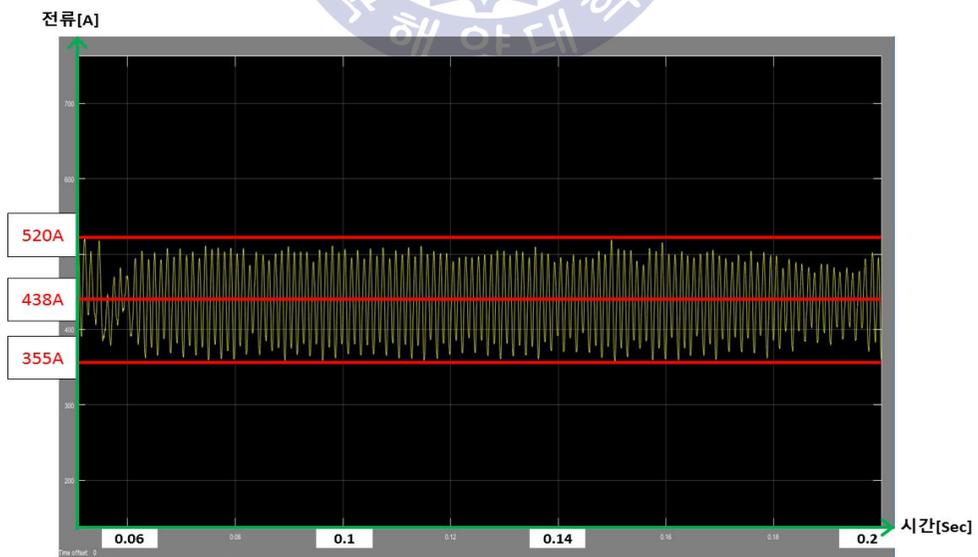


Fig. 21 Ripple Current(1000 μF)

그림 22와 23은 2000[μF]의 커패시터를 적용한 경우 전동기 입력단의 리플전압 및 리플전류 결과이다. 시뮬레이션 결과는 전압은 약 640[V] \pm 14[V]이며, 최고전압은 약 653[V], 최저전압은 약 626[V]의 결과가 나왔다. 또한 전류는 약 437[A] \pm 45[A]이며, 최대전류는 약 482[A], 최소전류는 약 392[A]의 결과가 나왔다.

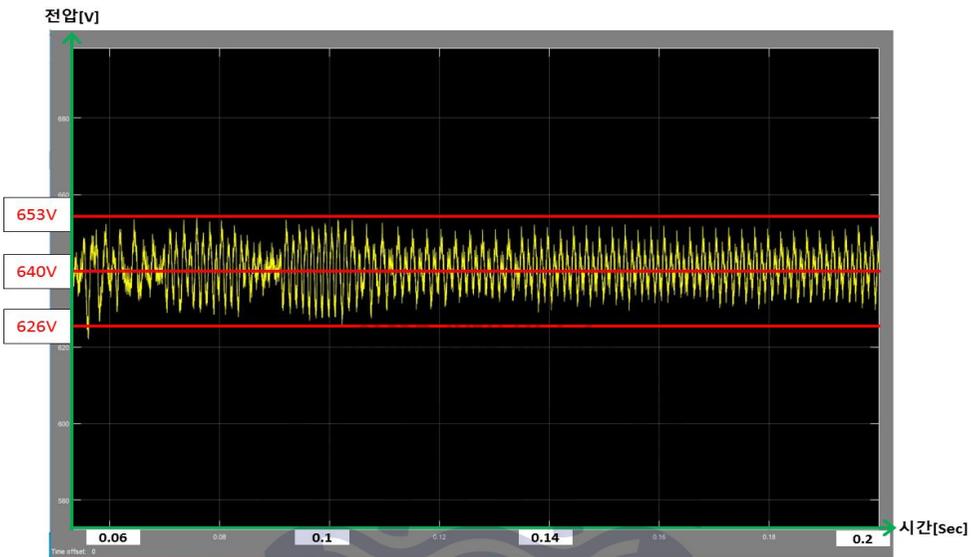


Fig. 22 Ripple voltage(2000 μF)

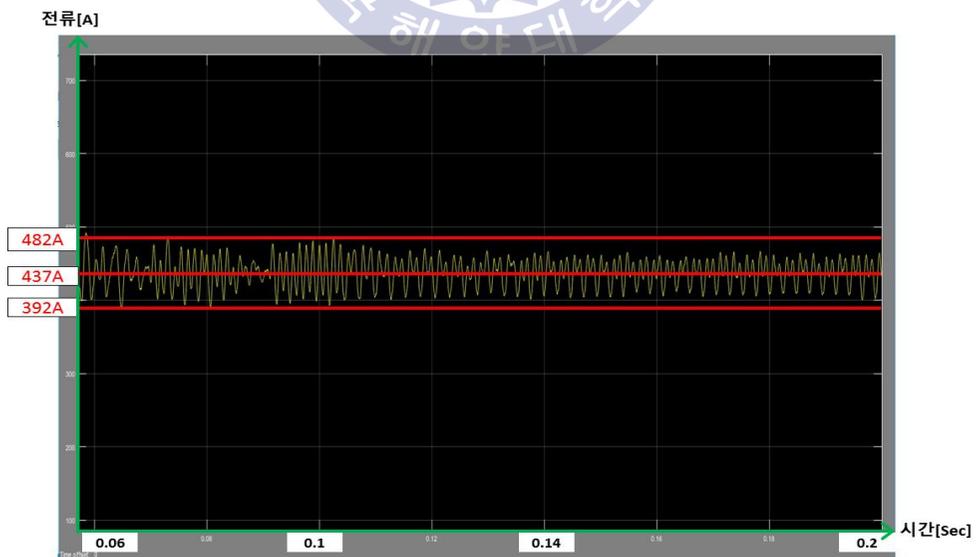


Fig. 23 Ripple Current(2000 μF)

그림 24와 25는 2200[μ F]의 커패시터를 적용한 경우 전동기 입력단의 리플전압 및 리플전류 결과이다. 시뮬레이션 결과는 전압은 약 642[V] \pm 10[V]이며, 최고전압은 약 651[V], 최저전압은 약 632[V]의 결과가 나왔다. 또한 전류는 약 435[A] \pm 35[A]이며, 최대전류는 약 469[A], 최소전류는 약 400[A]의 결과가 나왔다.

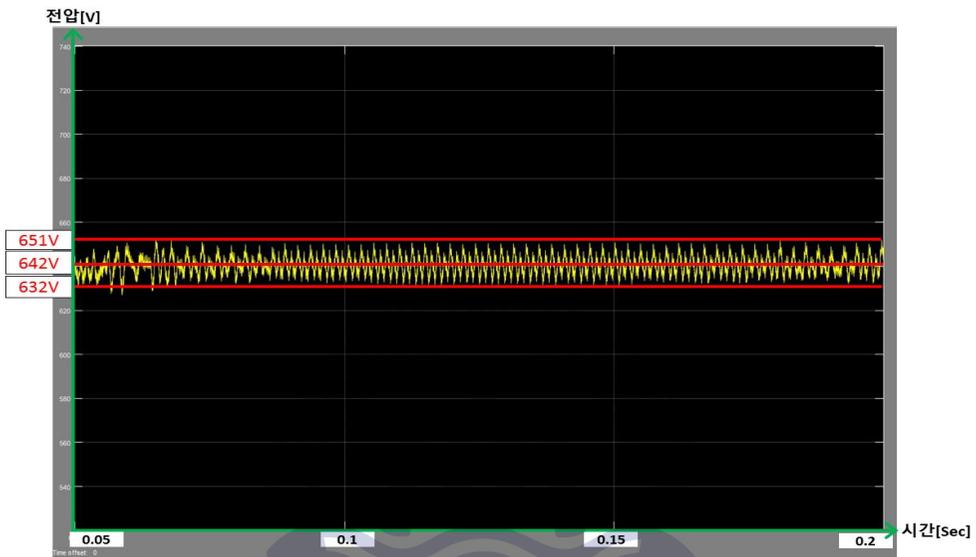


Fig. 24 Ripple voltage(2200 μ F)

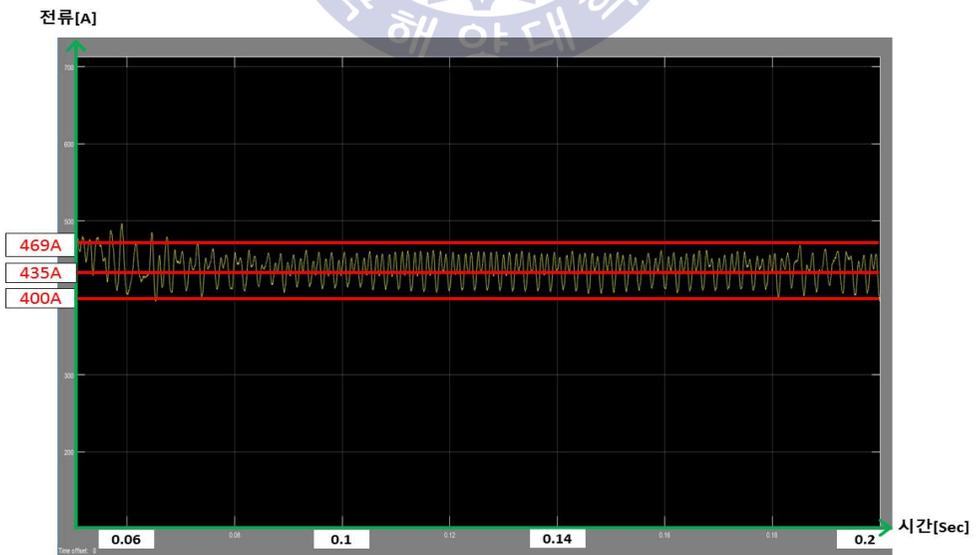


Fig. 25 Ripple Current(2200 μ F)

그림 26과 27은 2500[μ F]의 커패시터를 적용한 경우 전동기 입력단의 리플전압 및 리플전류 결과이다. 시뮬레이션 결과는 전압은 약 641[V] \pm 8[V]이며, 최고전압은 약 649[V], 최저전압은 약 633[V]의 결과가 나왔다. 또한 전류는 약 434[A] \pm 24[A]이며, 최대전류는 약 457[A], 최소전류는 약 410[A]의 결과가 나왔다.

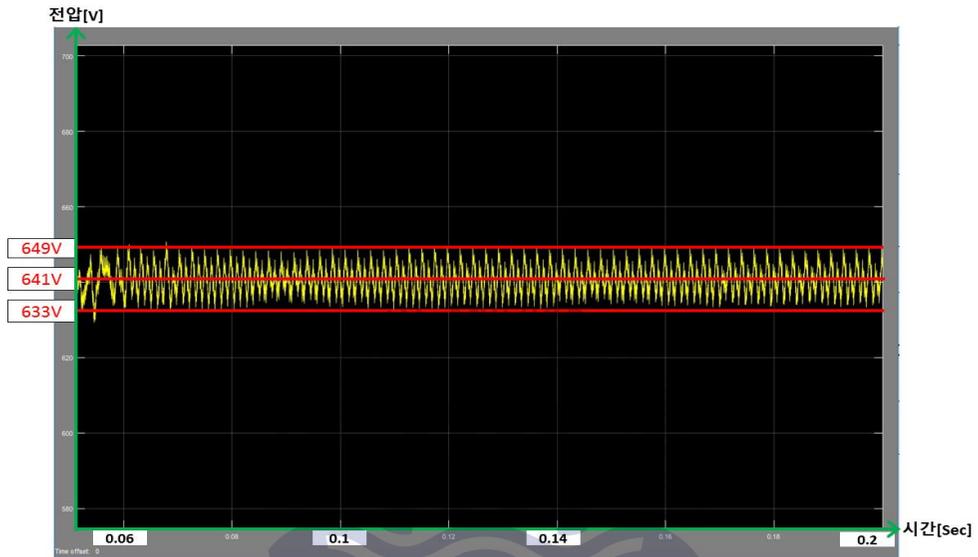


Fig. 26 Ripple voltage(2500 μ F)

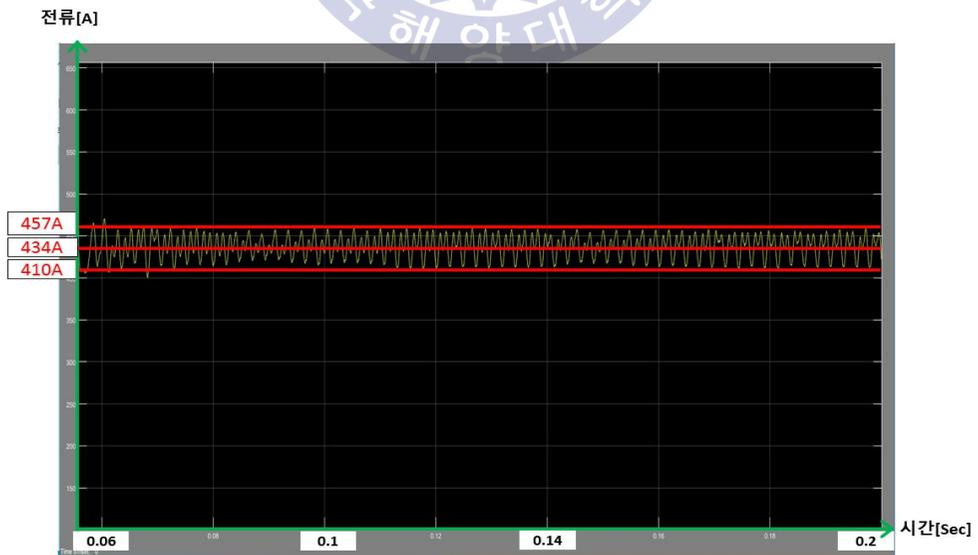


Fig. 27 Ripple Current(2500 μ F)

그림 28과 29는 3000[μF]의 커패시터를 적용한 경우 전동기 입력단의 리플전압 및 리플전류 결과이다. 시뮬레이션 결과는 전압은 약 641[V] \pm 7[V]이며, 최고전압은 약 647[V], 최저전압은 약 634[V]의 결과가 나왔다. 또한 전류는 약 437[A] \pm 21[A]이며, 최대전류는 약 458[A], 최소전류는 약 416[A]의 결과가 나왔다.

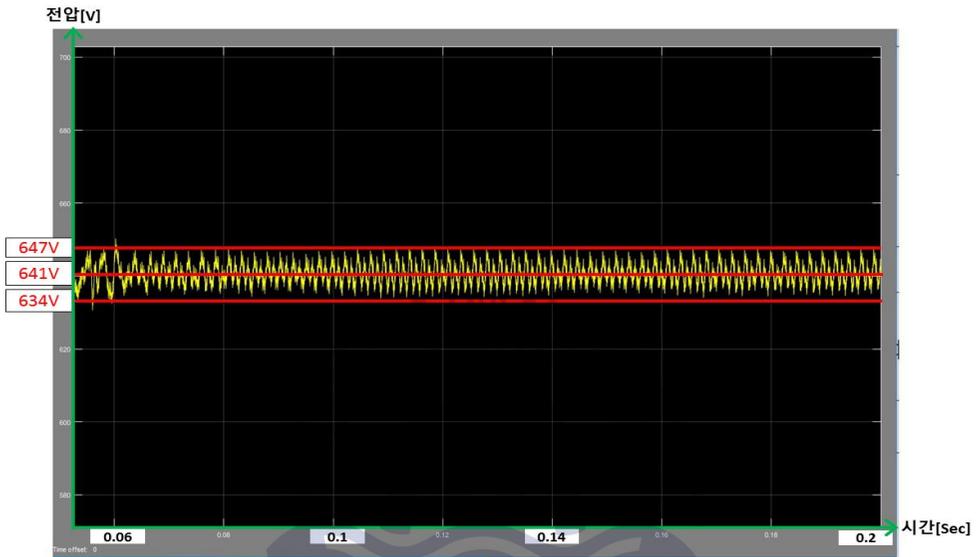


Fig. 28 Ripple voltage(3000 μF)

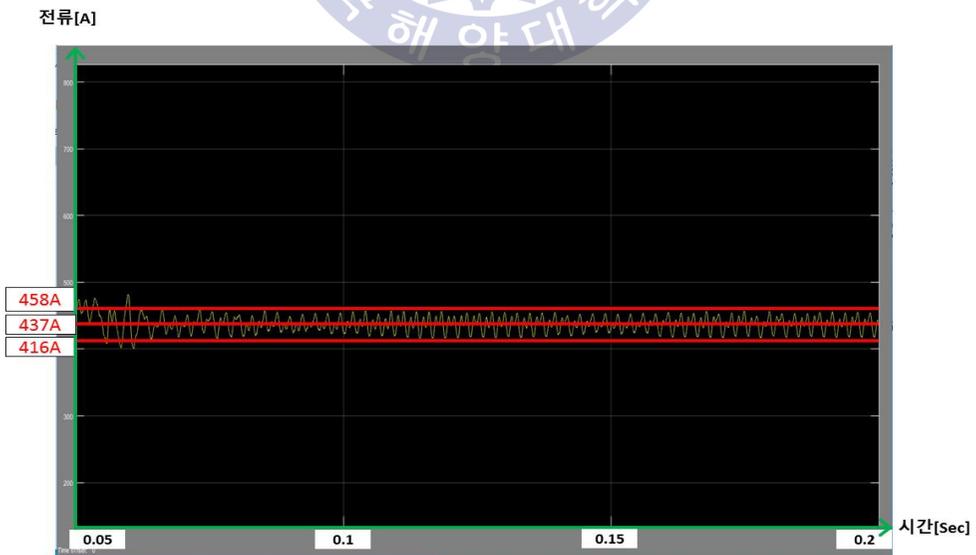


Fig. 29 Ripple Current(3000 μF)

그림 30과 31은 4000[μ F]의 커패시터를 적용한 경우 전동기 입력단의 리플전압 및 리플전류 결과이다. 시뮬레이션 결과는 전압은 약 641[V] \pm 6[V]이며, 최고전압은 약 647[V], 최저전압은 약 635[V]의 결과가 나왔다. 또한 전류는 약 440[A] \pm 22[A]이며, 최대전류는 약 461[A], 최소전류는 약 418[A]의 결과가 나왔다.

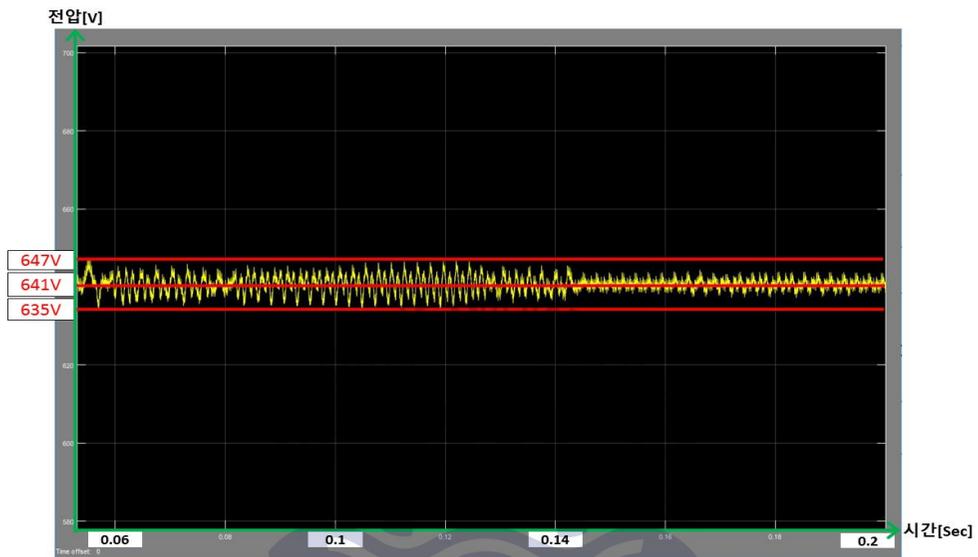


Fig. 30 Ripple voltage(4000 μ F)

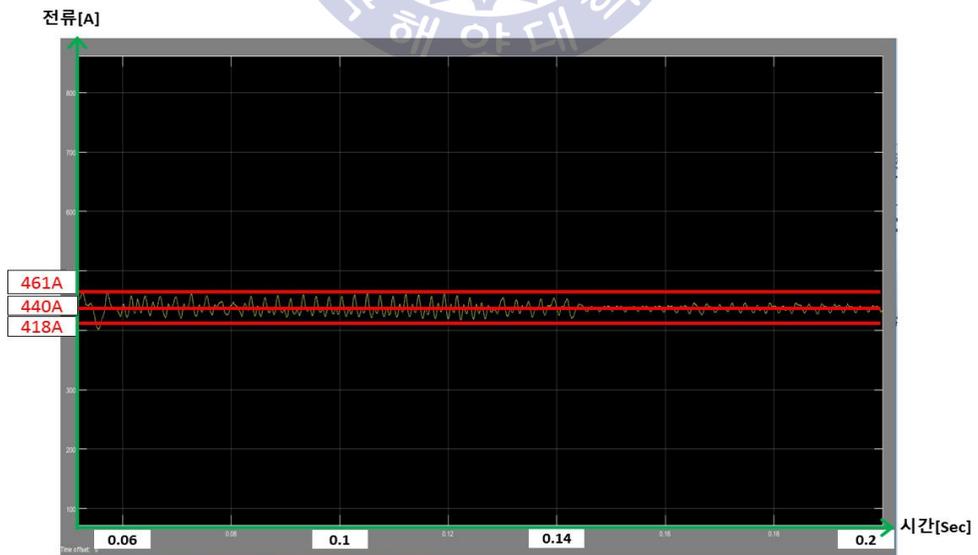


Fig. 31 Ripple Current(4000 μ F)

그림 32와 33은 5000[μ F]의 커패시터를 적용한 경우 전동기 입력단의 리플전압 및 리플전류 결과이다. 시뮬레이션 결과는 전압은 약 640[V] \pm 4[V]이며, 최고전압은 약 644[V], 최저전압은 약 636[V]의 결과가 나왔다. 또한 전류는 약 441[A] \pm 16[A]이며, 최대전류는 약 457[A], 최소전류는 약 425[A]의 결과가 나왔다.

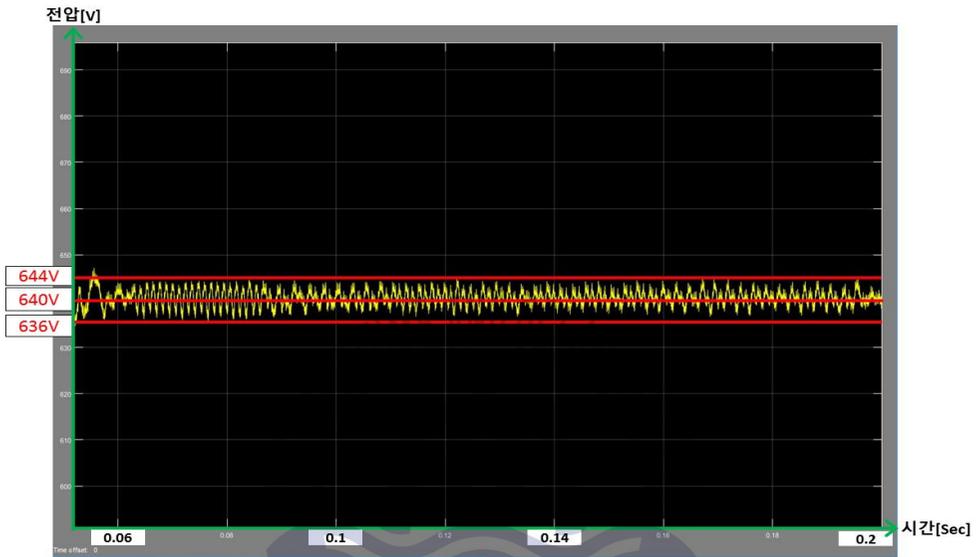


Fig. 32 Ripple voltage(5000 μ F)

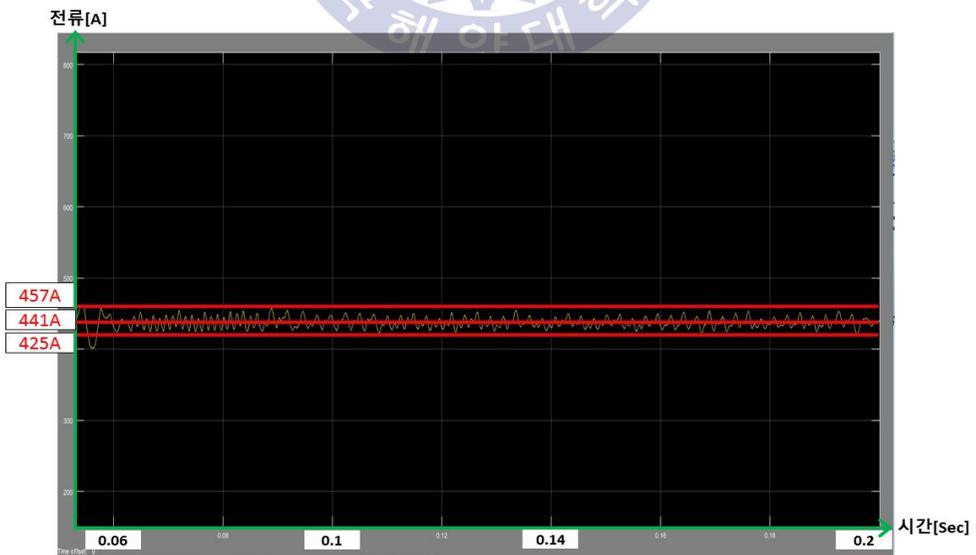


Fig. 33 Ripple Current(5000 μ F)

시뮬레이션 결과는 아래 표 6과 같다. 커패시터의 용량이 커질수록 리플전류 및 리플전압이 감소되는 것을 확인할 수 있는데, 2,000~2,200[μF]에서 용량 대비 감소 효과가 가장 좋은 것으로 판단되며, 커패시터의 용량을 계속 증가시키더라도 리플전류 및 리플전압의 감소 효과가 크게 나타나지 않는 것으로 확인된다. 이는 앞서 3.2절에서 확인한 커패시터 용량에 따른 리플전류 및 리플전압을 계산한 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다.

Table 6 Summary of simulation results

커패시터 용량[μF]	전압[V]			전류[A]		
	최고	최저	리플전압	최대	최소	리플전류
1000	671	616	644 \pm 28	520	355	438 \pm 83
2000	653	626	640 \pm 14	482	392	437 \pm 45
2200	651	632	642 \pm 10	469	400	435 \pm 35
2500	649	633	641 \pm 8	457	410	434 \pm 24
3000	647	634	641 \pm 7	458	416	437 \pm 21
3500	646	635	641 \pm 6	454	420	437 \pm 17
4000	647	635	641 \pm 6	461	418	440 \pm 22
4500	645	636	641 \pm 5	457	420	439 \pm 19
5000	644	636	640 \pm 4	457	425	441 \pm 16

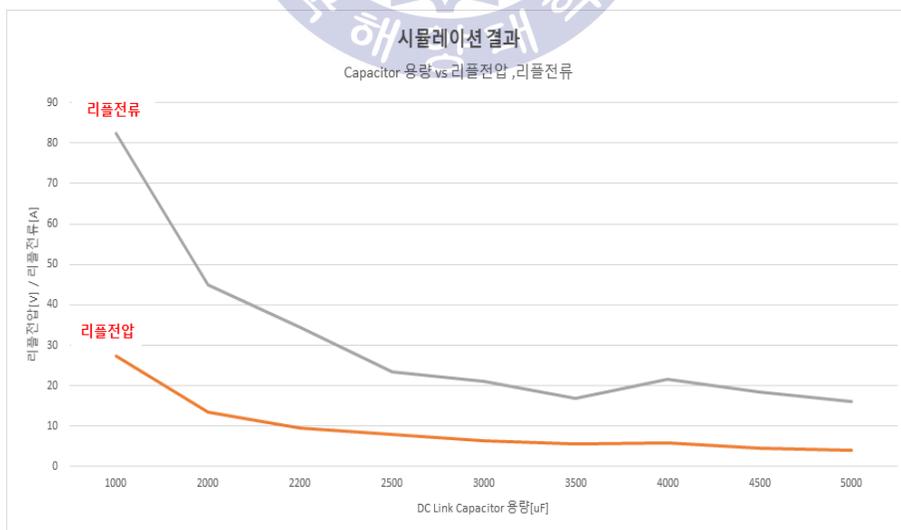


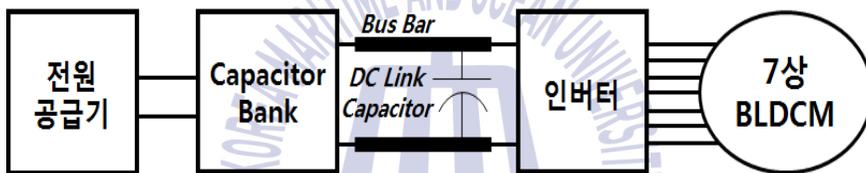
Fig. 34 Summary of simulation results

4.2 실험

본 연구에서 제안한 DC Link Capacitor 적용 및 커패시터 용량에 따른 전동기 입력전압 및 입력전류의 변화를 검증하기 위하여 실제 7상 BLDC 전동기와 육상 시험설비를 이용하여 실험으로 검증하였다.

4.2.1 실험 구성

본 실험의 구성은 아래 그림 35와 같다. DC 전원 공급기, 커패시터 뱅크(Capacitor Bank), 부스바(Bus bar), 인버터, 7상 BLDC 전동기 및 부하시험기 등으로 구성되어 있다.



(a) Configuration of 7 phase BLDC motor test



(b) Picture of 7 phase BLDC motor test

Fig. 35 Test facility configuration

4.2.2 실험 결과

실험은 DC Link Capacitor가 없는 조건에서 리플전압 및 리플전류를 측정하였다. 리플전압 및 리플전류에 대한 개선방안으로 DC Link Capacitor를 인버터 입력단에 추가한 후 전동기 리플전압 및 리플전류를 측정하였다. 7상 BLDC 전동기 및 인버터가 전원공급기로부터 먼 거리에 있어, 커패시터 뱅크(12[mF])를 설치하여 선간 인덕턴스를 상쇄시켜 전원을 안정화하였다. 그림 36은 DC Link Capacitor가 없는 경우의 회로도이며, 커패시터 뱅크를 포함하여 전원공급기로 나타내었다.

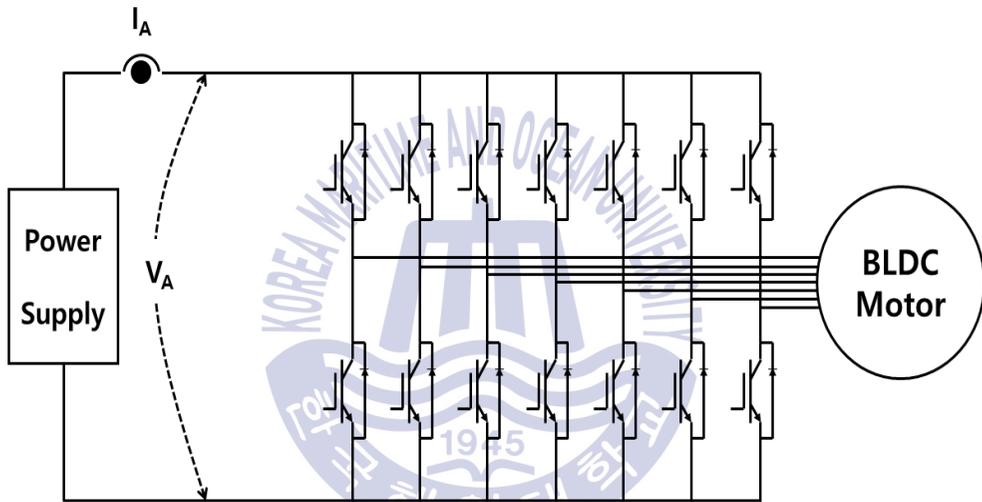


Fig. 36 Without DC Link Capacitor

전동기의 운전조건은 전원공급기 출력전압 600[Vdc] 및 7상 BLDC 전동기는 약 18,000[rpm]으로 구동하였다.

전동기에 입력되는 전압 및 전류를 측정한 결과는 아래 그림 37, 표 7과 같다.

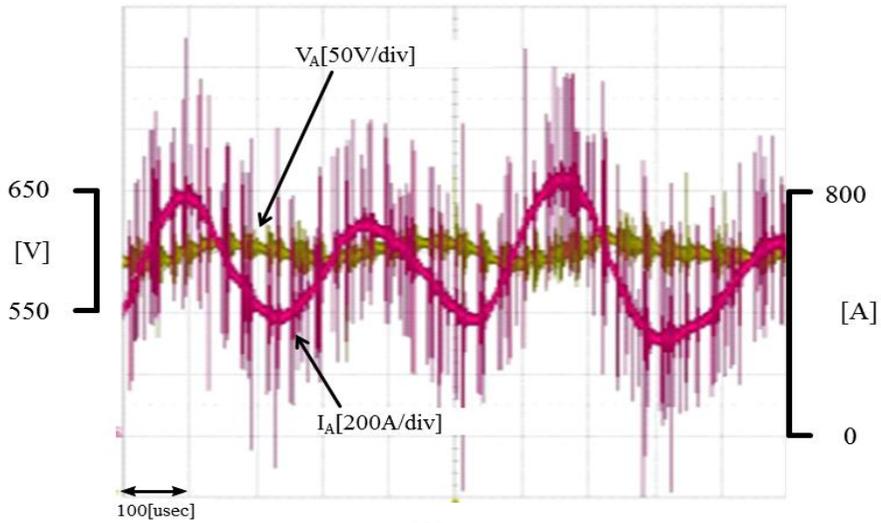


Fig. 37 Measurement result without DC link capacitor

Table 7 Measurement result without DC link capacitor

구분	V _A [V]	I _A [A]
Capacitor 미적용	600±5	590±260

DC 리플전류는 7상 권선 여자방식인 경우 상전류 주파수의 3.5배의 합성된 리플전류가 만들어 진다. 이는 7개의 도통상이 상단 3상/하단 4상 또는 상단 4상/하단 3상과 같이 반복되는 결과에 의해 상전류 주파수의 3.5배인 3,150[Hz]의 리플전류가 발생된다.

DC 리플전류는 7상 BLDC 전동기 내에 있는 약 330[μF] 커패시터와 병렬 연결된 DC Link Capacitor의 결합으로 DC 리플전류의 주파수에 약간의 변동이 있다. 아래 그림 38은 오실로스코프로 측정된 전압 및 전류 그래프이며 한 주기는 약 3.2x100[μ sec]으로 주파수는 약 3,150[Hz]에 가깝다.

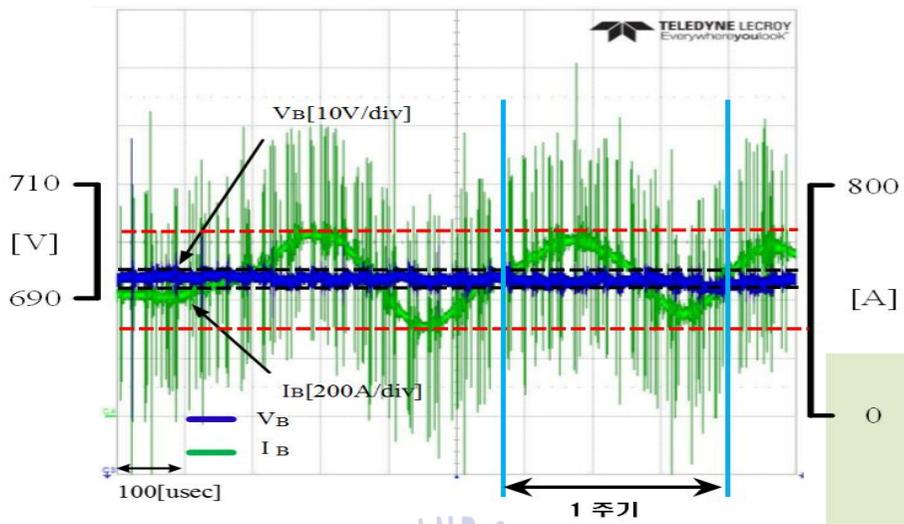


Fig. 38 Frequency of ripple current



아래 그림 39와 같이 2.1[mF]의 DC Link Capacitor를 추가하여 커패시터 전후의 전압 및 전류를 계측하였다.

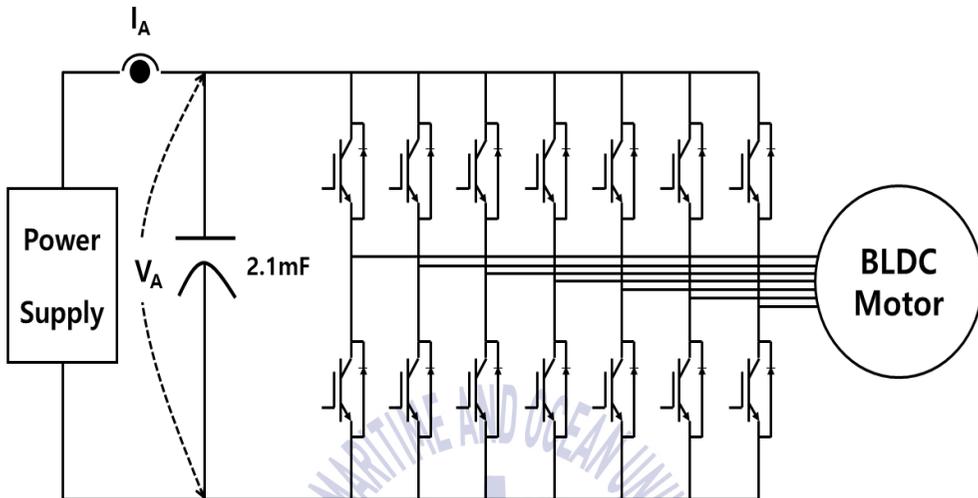
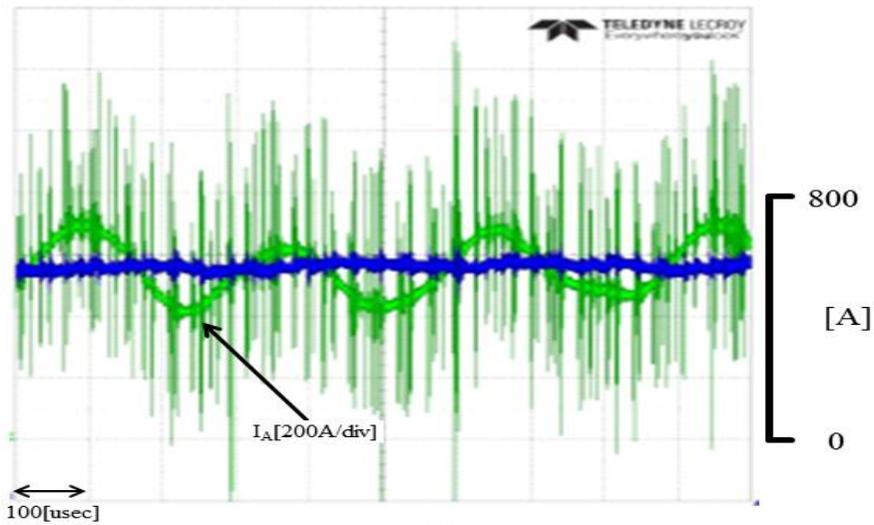
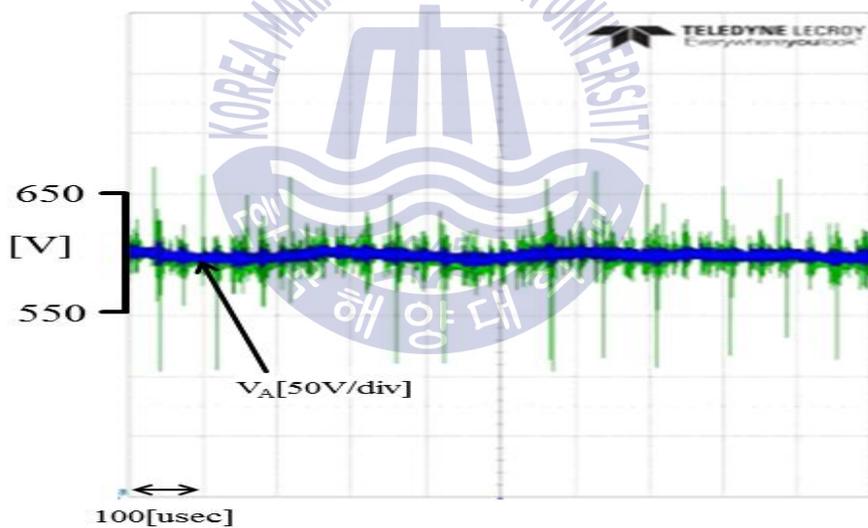


Fig. 39 With 2.1[mF] DC Link Capacitor

7상 BLDC 전동기의 인버터단에 입력되는 전압 및 전류를 측정한 결과는 아래 그림 40, 표 8과 같다.



(a) I_A



(b) V_A

Fig. 40 Measurement result with 2.1[mF] DC link capacitor

Table 8 Measurement result with 2.1[mF] DC link capacitor

구분	V_A [V]	I_A [A]
2.1mF Capacitor	600±5	570±150

아래 그림 41과 같이 2.5[mF]의 DC Link Capacitor를 추가하여 커패시터 전후의 전압 및 전류를 계측하였다.

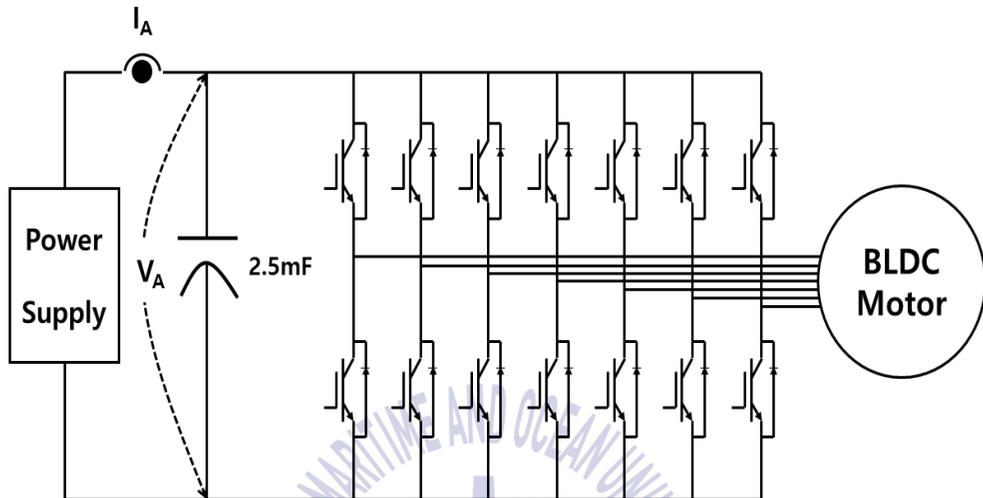


Fig. 41 With 2.5[mF] DC Link Capacitor

7상 BLDC 전동기의 인버터단에 입력되는 전압 및 전류를 측정한 결과는 아래 그림 42, 표 9와 같다.

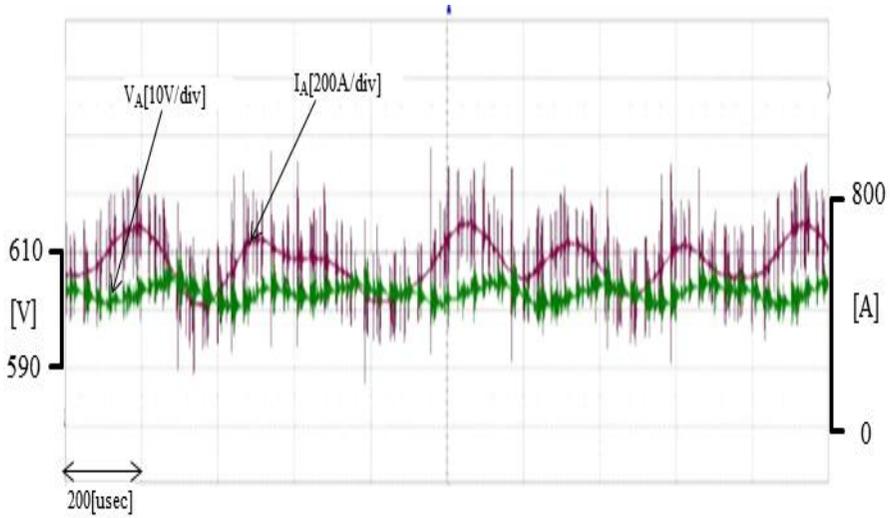


Fig. 42 Measurement result with 2.5[mF] DC link capacitor

Table 9 Measurement result with 2.5[mF] DC link capacitor

구분	V_A [V]	I_A [A]
2.5mF Capacitor	593±3	545±135

아래 그림 43과 같이 5.0[mF]의 DC Link Capacitor를 추가하여 커패시터 전후의 전압 및 전류를 계측하였다.

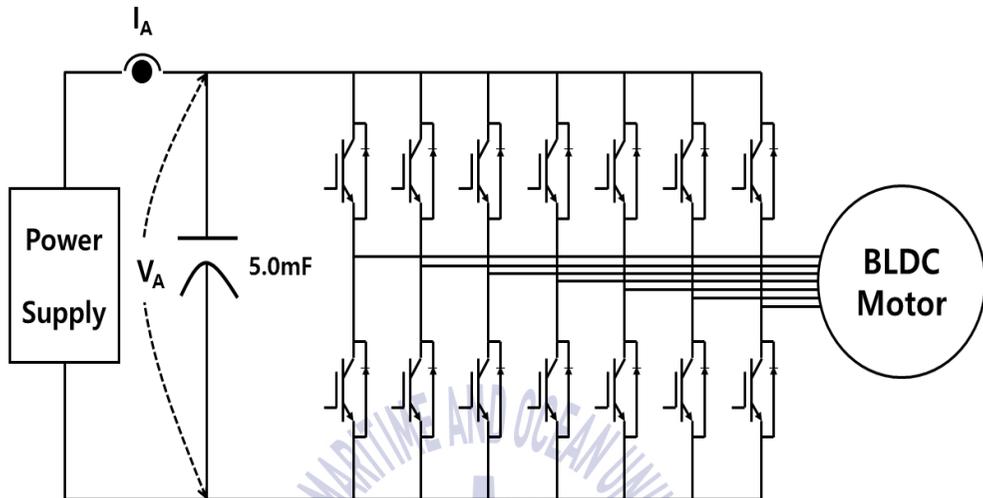


Fig. 43 With 5.0[mF] DC Link Capacitor

7상 BLDC 전동기의 인버터단에 입력되는 전압 및 전류를 측정한 결과는 아래 그림 44, 표 10과 같다.

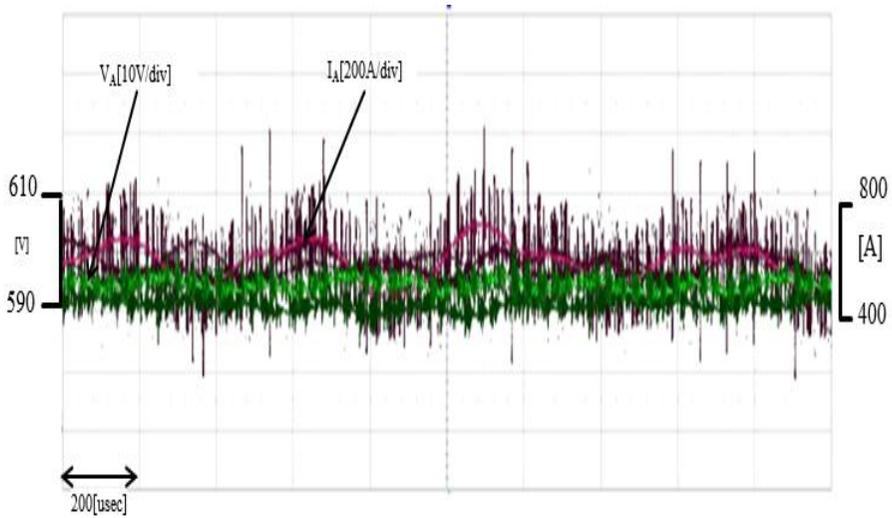


Fig. 44 Measurement result with 5.0[mF] DC link capacitor

Table 10 Measurement result with 5.0[mF] DC link capacitor

구분	V_A [V]	I_A [A]
5.0mF Capacitor	593 ± 3	600 ± 120

7상 BLDC 전동기 구동시 발생하는 전원 입력단의 리플전류 저감을 위하여 DC Link Capacitor를 적용한 실험결과를 표 11에 나타내었다. 커패시터 용량이 2.1[mF]에서 용량 대비 감소 효과가 가장 큰 것으로 판단되며, 커패시터의 용량이 커지더라도 용량 대비 감소 효과는 크게 나타나지 않는 것으로 확인된다.

Table 11 Summary of experiment results

구분	실험 결과	
	V _A [V]	I _A [A]
Capacitor 미적용	600±5	590±260
2.1mF Capacitor	600±5	570±150
2.5mF Capacitor	593±3	545±135
5.0mF Capacitor	593±3	600±120

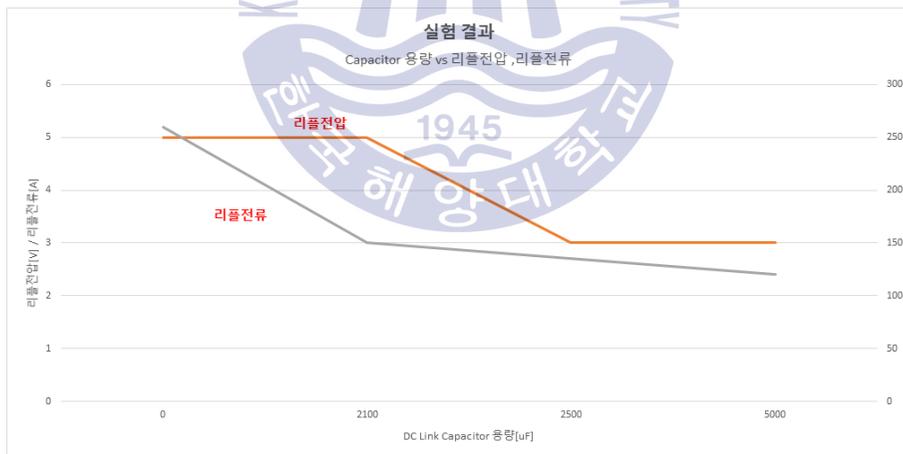


Fig. 45 Summary of experiment results

실험에서 확인한 커패시터 용량에 따른 리플전류 및 리플전압의 감소 효과는 3.2절의 리플전류, 리플전압 및 커패시터 용량 계산 결과 및 4.1절의 시뮬레이션 결과와 유사한 경향을 보여주고 있음을 확인 할 수 있다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 7상 BLDC 전동기 전원 입력단에서 발생하는 리플전류 및 리플전압으로 인하여 발생하는 전자기적 노이즈를 감소시키기 위한 방안에 대하여 연구하였다. 리플전류 및 리플전압을 감소시키는 여러 방안 중 문제 해결에 필요한 일정 및 비용 등이 최소화되고, 또한 실제 운용환경에서 7상 BLDC 전동기에 적용이 용이하다는 장점으로, 7상 BLDC 전동기의 전원 입력단에 DC Link capacitor를 적용하는 것을 제안하였다.

DC Link Capacitor의 용량에 따라 리플전류 및 리플전압의 크기가 달라지는 것을 확인하고 커패시터 용량 변경에 따른 리플전류 및 리플전압의 감소 효과가 어떻게 나타나는지 계산을 통해 확인하였다. 또한 계산 결과를 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였으며, 수식과 시뮬레이션 및 실험 결과에서 커패시터 용량에 따른 리플전류 및 리플전압의 감소 효과가 유사한 경향을 나타냄을 확인하였다.

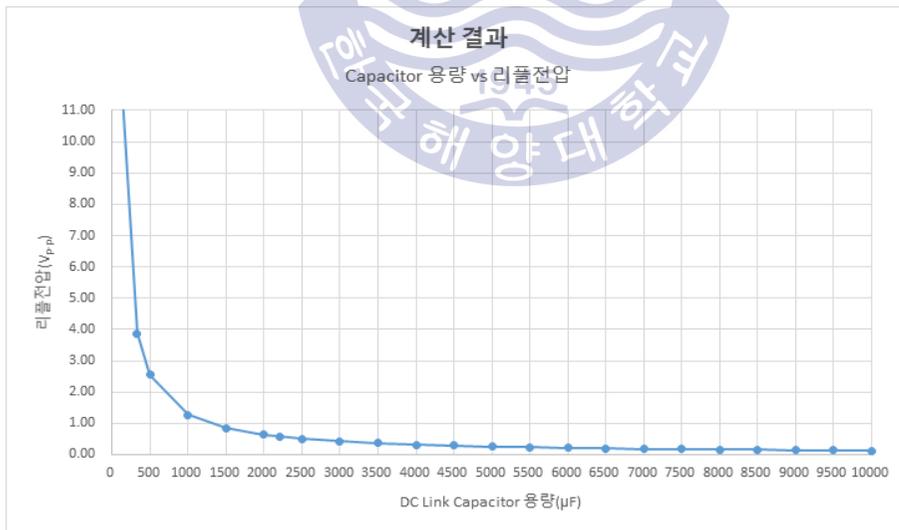


Fig. 46 Calculation results according to capacity of capacitor

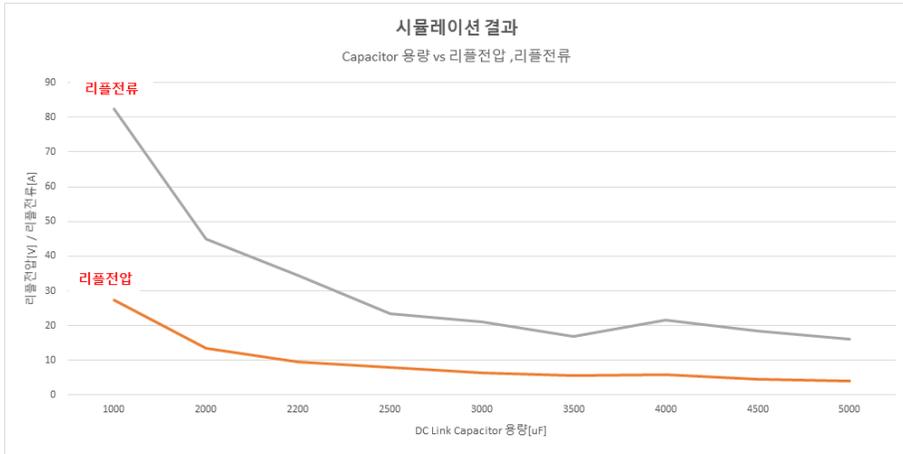


Fig. 47 Simulation results according to capacity of capacitor

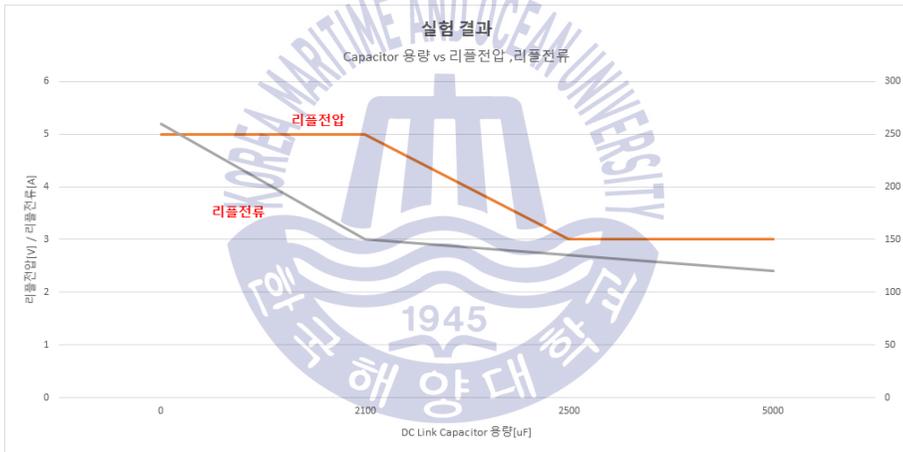


Fig. 48 Experiment results according to capacity of capacitor

커패시터의 용량을 증가시킬수록 리플전류 및 리플전압의 크기는 작아지는 경향을 보이지만, 커패시터 용량과 리플전류 및 리플전압의 감소량이 비례하여 변화되는 것이 아님을 확인 할 수 있다. 따라서 전동기의 전기적인 특성과 함께 구조적인 특성(중량, 체적 등)을 동시에 고려하여 최소, 최적 용량의 DC Link Capacitor 적용이 필요하다. 특수한 목적 또는 사용 환경에 따른 여러 제한 조건을 가지는 7상 BLDC 전동기를 설계 및 제작하는 경우에 전동기 구동시 발생하는 리플전류 및 리플전압에 의해 야기되는 전자기적 노이즈를 제거하기 위한 방안으로

DC Link Capacitor를 사용할 수 있으며, 최소 용량으로 최대의 효과를 얻기 위한 커패시터 용량 선정 방법을 사용함으로써 문제 해결에 필요한 일정의 단축 및 비용 절감 등 많은 장점을 가질 것으로 생각된다.

본 논문에서 고찰한 DC Link Capacitor 용량에 따른 리플전류 및 리플전압 감소 방안은 7상 BLDC 전동기 및 다상 BLDC 전동기 설계에 활용 할 수 있을 것이라 생각되며, 다상 BLDC 전동기의 리플전류 및 리플전압에 의한 관련 계통상의 전자기적 노이즈와 이로 인해 야기되는 문제를 해결하는 방안으로 활용 할 수 있을 것으로 기대한다.



참고문헌

- [1] 전윤석, “7상 브러시리스 직류전동기를 위한 고속구동 시스템의 해석 및 설계”, 박사학위 논문, 건국대학교, 2003.
- [2] 송상훈, 윤용호, 이병국, 원충연, “7상 BLDC 전동기 구동시스템 해석 및 설계”, 전기학회논문지 Vol. 63, No. 4, pp 575~582, 2014.
- [3] H. C. Kim, H. S. Oh, J. M. Kim and C. U. Kim, “A Study On the Phase Advance Angle of High Speed Operation for 7 Phase BLDC Motor Drives”, Trans KIEE, Vol 56, No. 11, pp.1571-1576, 2007
- [4] 김현철, “7상 BLDC 전동기의 고속운전 특성 향상을 위한 최적 진상각에 관한 연구”, 박사학위 논문, 부산대학교, 2008.
- [5] 김상훈, “모터제어 - DC, AC, BLDC”, 북두출판사, 2014.
- [6] M. Salcone, J. Bond, "Selecting Film Bus Link Capacitors For High Performance Inverter Applications", Electric Machines and Drives Conference 2009 IEEE International, pp. 1692-1699, 2009