

工學碩士 學位論文

다상 전동기 설계 및
특성 해석에 관한 연구

*Design and Characteristic Analysis of Multi-phase
Motor*

指導教授 吳 珍 錫

2007년 2월

韓國海洋大學校 大學院

메카트로닉스 공학과

趙 琯 濬

本 論 文 을 趙 琯 濬 의 工 學 碩 士
學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위원장 유 희 한 (인)

위 원 이 홍 찬 (인)

위 원 오 진 석 (인)

20006 년 12 월 20 일

한국해양대학교 대학원

< 목 차 >

기호 목록	III
Abstract	V
제1장 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 전기 추진 시스템	3
1.3 연구내용 및 구성	5
제2장 수중체 전기 추진 추진체계	6
2.1 수중체 추진 특성	6
2.2 전기 추진 전동기	9
2.3 인버터와 전동기 결선	12
제3장 추진용 BLDC 전동기의 특성	14
3.1 BLDC 전동기	14
3.1.1 BLDC 전동기	14
3.1.2 BLDC와 PMSM의 비교	21
3.2 다상 전동기	24
3.2.1 Y결선 다상 전동기	24
3.2.2 독립 다상 전동기	28
① 독립 3상 전동기	28
② 독립 다상 전동기	34
제4장 시뮬레이션	37
4.1 시뮬레이션 구성도	37
4.1.1 3상 및 7상 Y결선 전동기 모델링	37
① 3상 Y결선 BLDC 전동기 모델링	37
② 7상 Y결선 BLDC 전동기 모델링	45

4.1.2 3상 Y결선 및 독립 3상 모델링	51
① 3상 Y결선 BLDC전동기 모델링	51
② 3상 독립상 구조 BLDC 전동기 모델링	56
4.2 시뮬레이션 환경	62
4.2.1 3상 및 7상 Y결선 전동기 비교 환경	62
① 3상 전동기 시뮬레이션 환경	62
② 7상 전동기 시뮬레이션 환경	62
4.2.2 3상 Y결선 및 독립 3상 모델링	63
4.3 시뮬레이션 결과	64
4.3.1 3상 및 7상 BLDC전동기 시뮬레이션	64
4.3.2 3상 Y결선 및 독립 3상 전동기 시뮬레이션 결과	68
제 5장 결론	77
참고문헌	78

<기호 목록>

B	: 점성 마찰 계수
E_A, E_B, E_C	: 각상 역기전력(Y결선)
E_a, E_b, E_c	: 각상 역기전력(독립상)
E_M	: 도통시의 역기전력
e_{ab}, e_{bc}, e_{ca}	: 선간 역기전력
E_1, E_2, E_3	: 각상 역기전력(다상)
I_A, I_B, I_C	: 각상 전류(Y결선)
I_a, I_b, I_c	: 각상 전류(독립상)
I_{\max}	: 히스테리시스 제어기의 기준 전류
I_M	: 도통시의 상전류
I_m	: 인버터 소비 전류
I1-7	: 7상 상전류
I1-7_ref	: 7상의 각 기준 전류
I_1, I_2, I_3	: 선간 전류
i_1, i_2, i_3	: 각상 전류(다상)
J	: 회전 관성 모멘트
Kp_sc	: 속도 제어기의 비례상수
Ki_sc	: 속도 제어기의 적분 상수
Ka_sc	: 속도 제어기의 anti-windup 제어기 이득
Kp_cc	: 상전류 제어기의 비례상수
Ki_cc	: 상전류 제어기의 적분 상수
Ka_cc	: 상전류 제어기의 anti-windup 제어기 이득
Kt	: 역기전력 상수
L_A, L_B, L_C, L_{self}	: 자기 인덕턴스(Y결선)
L_a, L_b, L_c, L_{self}	: 자기 인덕턴스(독립상)
L_1, L_2, L_3, L_{self}	: 자기 인덕턴스(다상)

$L_{AB}, L_{BC}, L_{CA}, M$: 상호 인덕턴스(Y결선)
$L_{ab}, L_{bc}, L_{ca}, M$: 상호 인덕턴스(독립상)
$L_{12}, L_{23}, L_{31}, M$: 상호 인덕턴스(다상)
L	: 동기 인덕턴스
L_l	: 선간 동기 인덕턴스
P_e	: 전기적 출력 전력
P	: 상수
R	: 고정자 저항
R_l	: 선간 고정 저항
T_A, T_B, T_C	: 각 상에 가한 전압에 의해 발생하는 토크
T_{total}	: 총 토크
T_e	: 출력 토크
T_{load}	: 부하 토크
V_A, V_B, V_C	: 각상 전압(Y결선)
V_a, V_b, V_c	: 각상 전압(독립상)
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	: 선간 전압
V_{abc}	: 3상 교류 전원 전압
V_{dc}	: 인버터 입력 전압
V_T	: 전체 전압
V_{1-7}	: 7상 선간 전압
V_1, V_2, V_3	: 각상 전압(다상)
ω_m	: 모터의 회전 각속도
θ, theta	: 전기각

Design and Characteristic Analysis of Multi-phase Motor

Kwan Jun Jo

Department of Mechatronics Engineering
The Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Before 1980s the propulsion system for submarines were driven by DC motors using storage batteries as their power resource. Since then, PMPM (Permanent Magnet Propulsion Motor) was developed with a unified structure consisting of an inverter and motor together. This structure has a number of advantages compared with DC motors. In particular it is smaller, takes up less space and has a greater power output.

Recently, It is needed for submarines to have bigger spaces and speedy characteristics so that the PMPM is required to have greater power per unit volume. The 'multi-phase motor' is believed to be the best PMPM to meet the needs of modern submarines. This paper proposes the use of the 'multi-phase electric' motor which has an independent-connected structure and uses an H-bridge inverter. The multi-phase electric motor has more than 3 phases and its phases are individualized.

To analyze its specific characteristics mentioned above, I compared simulations by using several motors (Y-connected 3, 7 phase BLDC motors and independent connected 3 phase BLDC

motor). As a result, it is found that torque pulsation of Y-connected 7 phase BLDC motor was reduced more than 3 phase motor. In addition to it, comparing the simulation between Y-connected 3 phase BLDC motor and independent-connected 3 phase BLDC motor, phase-voltage of independent-connected 3 phase was increased in a same condition.

It was also found that the phase voltages of the independent connected 3 phase BLDC motor were increased. When the stator resistance and inductance are stable, phase voltage increases maximum torque. Thus the independent multi-phase BLDC motor has the specific characteristics of reduced torque pulsation and high maximum torque compared to the 3 phase BLDC motor.

In conclusion that the multi-phase motor has the characteristics of reduced torque pulsation and higher torque output by analyzing control characteristics of multi-phase propulsion motor and H-bridge inverter. Additionally, suitable control for submarines has been found with the multi-phase motor by using current control algorithm to produce reduced torque pulsation in the commutation period. For practical purpose, additional experiment-based research and development of the control algorithm for commutating of the multi-phase motor is required.

제1장 서론

1.1 연구 배경

선박은 사용 목적에 따라 다양한 추진시스템이 요구되고, 이에 따른 적합한 추진 시스템 모델이 지속적으로 연구 개발되고 있다. 특히 선박은 추진 시스템의 특성과 선박의 운항목적이 조화를 이룰 수 있도록 구성하는 것이 대단히 중요하다. 또한 선박 시스템에서 가장 중요한 것은 에너지의 효율적 변환과 공간의 효율적 배치이다. 현재 선박은 초고속화 및 초대형화가 진행되고 있으며, 이에 따른 대출력 추진 장치의 개발이 필수적으로 부각되고 있다. 디젤기관, 가스 터빈 등의 내외연 기관의 발전으로 선박의 추진 시스템은 상당부분 효율적인 면에서 개선되었다. 그러나 현재의 일반적인 선박 추진 시스템은 선체 내부에 위치한 엔진, 터빈 등의 구동원으로 부터 축으로 연결된 프로펠러를 회전시켜 추진력을 얻도록 하는 방법에 의존하였다. 이러한 추진 시스템은 길게 연결된 구동축으로 인해 설계시 많은 제약이 있고, 추진 체계의 부피 및 크기의 증가로 인하여 화물과 승무원을 위한 공간을 감소함과 동시에 큰 진동과 소음을 발생시키는 치명적인 단점이 있다[1-2].

전기 추진 시스템은 발전기로부터 선체 외부의 프로펠러와 일체형으로 구성된 전동기를 구동시켜 추진하는 방식으로 기존의 추진시스템과 비교하여 소음과 진동을 획기적으로 저감시킨다. 또한 구동축의 공간이 줄어들어 선박내공간 활용의 유연성이 높아지는데, 또한 디젤 엔진 등의 기존의 추진 시스템을 사용할 때 보다 15~19%의 에너지를 절약할 수 있을 것으로 예상되며, 추진기의 설치에 있어서 유연성과 체결의 오차와 같은 기계적 제한 사항이 없다. 이러한 전기 추진 시스템은 현재 추진 전동기와 추진 방식을 중심으로 발전하고 있다. 선박에 활용되는 추진 전동기의 경우, 영구자석형 추진 전동기 또는 성능을 개선한 유도 전동기로 발전하고 있다[1-6].

일반적으로 전기 추진 시스템은 수중체(잠수함), 소해정 같은 군용 및 여객선 등의 민수용으로 많이 사용되고 있다. 본 연구는 다상전동기를 이용한 전기추진 체계를 개발하기 위한 연구를 수행하고자 한다. 수중체에 활용되는 전기 추진 시스템은 상황에 따라 발전기 모드, 축전지 모드, 연료 전지 모드 등으로 추

진모드가 구성된다. 추진전동기는 직류 전동기, 교류 전동기 등이 다양하게 활용되고 있다. 종래에는 추진용 전동기로 직류 전동기를 많이 사용하였다. 그렇지만 직류 전동기는 용량이 대형화됨에 따라 부피와 무게가 커지며, 유지 보수 및 성능 측면에서 단점이 부각되었다. 현재의 추진 전동기는 이러한 단점을 보완하기 위하여 동기 전동기 및 유도 전동기에 관련된 연구가 집중적으로 수행되고 있다. 이 중에서도 영구자석형 추진 전동기(PMPM : Permanent Magnet Propulsion Motor)가 수중체에 적용되고 있다[2-6].

이러한 영구자석형 추진전동기는 영구자석형 전동기를 기반으로 하며, 동일 용량에서 기존의 유도전동기나 직류 전동기에 비하여 부피가 작은 이점이 있다. 영구자석형 동기 전동기는 BLDC (Brushless DC)전동기와 PMSM (Permanet Magnet Synchronize motor)으로 구분된다. 현재 수중체에 활용되고 있는 추진 전동기는 BLDC 전동기를 기반으로 하는 추진 전동기이다. 영구자석형 전동기에서 중요한 점은 각상의 상전환시에 발생하는 토크 맥동인데, 토크 맥동은 BLDC전동기가 갖는 유도성 성분으로 인해 전류과형의 맥동을 유발하기 때문이다. 전류 맥동은 BLDC 전동기가 대용량화됨에 따라 한 상에 흐르는 전류량이 증가하기 때문에 더 큰 전류 맥동을 발생하게 되며, 전류 맥동은 토크 맥동의 원인이 된다. 이러한 토크 맥동은 현재 BLDC 전동기를 추진 전동기로 사용하는데 가장 큰 문제점으로 대두되고 있으며, 이러한 토크맥동을 저감하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 통하여 다상 전동기를 중심으로 특성 분석하고, 더불어 BLDC 전동기의 토크 맥동 저감 기법에 대한 연구를 수행하고자 한다. 끝으로 연구 분석을 바탕으로 한 수중체에 적합한 전기 추진 체계를 제안하고자 한다.

1.2 전기 추진 시스템의 동향

스팀터빈을 추진 시스템으로 활용하던 20세기 초반에 디젤엔진과 더불어 전기 추진 시스템이 도입되었다. 선박용 추진 시스템에서 디젤엔진은 프로펠러의 최적 속도보다 다소 높은 속도였으며, 역회전의 어려움으로 디젤 엔진을 프로펠러에 직결하기에는 어려운 점이 많으며, 스팀 터빈의 경우에 있어서는 감속기어 추진 시스템에 효율적으로 적용할 수 없는 단점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 전기 추진 시스템 체계가 도입되었으나, 1940년대에 감속기어 기술의 발전으로 인하여 기계식 추진시스템 효율이 현저히 개선됨에 따라 선박용 추진시스템은 주로 기계식으로 발전하였다. 이에 반해 전기 추진 시스템은 당시 추진 전동기로 사용된 직류 전동기의 중량과 효율성 문제로 인하여 점차 도태 되었으나, 1980년대에 이르러 전력 전자 기술의 발전으로 대용량 전압 및 전류를 스위칭 할 수 있게 되어 다시 등장하게 되었다. 또한 추진 전동기에 있어서도 유도 전동기, 동기 전동기 등의 개발로 큰 출력을 내면서도 작은 부피를 차지하는 시스템으로 발전하였다. 수상함의 경우 초기에 여객선 분야에서 전기 추진 시스템이 적용되기 시작 하였다. 현재는 여객선 이외에도 쇄빙선, 준설선, 예인선, 트롤선, 케이블 부설선 등 특수 용도의 선박에 전기 추진 시스템이 적용되고 있다[7-10].

초기 수중체의 추진 체계는 인력을 이용 하거나 단순히 잠수와 부양을 하는 초기적인 수중 항해의 개념이었다. 하지만 1, 2차 세계 대전을 겪으면서 수중체의 추진 체계는 전기 추진 체계로 진화 하였다. 수중체는 수중 운항 시에 외부 공기와 단절되어 있는 상황에서 추진을 해야 하는 특수성에 따라 기계적 동력 기반의 전기 추진 체계가 일반화 되었다. 초기의 수중체 전기 추진 체계는 부상하여 디젤 발전기 또는 터빈 발전기를 통하여 축전지를 충전하고, 축전지를 에너지원으로 하는 방식이었다. 현재 수중 운항 시간을 높이기 위하여 핵 에너지와 AIP(Air Independent Propulsion system)를 이용하는 추진 시스템을 개발하여 활용하고 있다. 현재 수중체 전기 추진 체계는 핵 에너지 또는 AIP등의 시스템을 축전지와 연동하는 하이브리드 추진 시스템으로 발전하고 있으며 이에 따른 연구가 체계적으로 수행되고 있다[2-7]. 또한 수중체 추진 시스템의 요구사양을 만족할 수 있는 출력 밀도가 높은 초전도 전동기에 대한 연구도 진행 중이다. 최근에는 5MW급 고온 초전도체 전동기가 개발되었으며

앞으로 36MW를 목표로 한 연구가 진행되고 있다. 초전도 추진전동기가 개발될 경우 출력대비 부피와 중량을 줄일 수 있을 것으로 예상된다[14].

수중체 전기 추진 시스템의 추진 전동기는 저소음화와 작은 공간에서도 큰 출력을 낼 수 있는 고효율을 요구한다. 현재의 수중체 추진 전동기는 영구자석형 추진 전동기가 주로 사용되고 있는데, 이것은 영구자석형 추진 전동기가 기존의 전동기에 비하여 작은 공간에서도 고효율을 나타내기 때문이다. 그렇지만 영구자석형 추진 전동기는 상전환시에 발생하는 토크 맥동의 문제를 안고 있다. 이러한 토크 맥동을 저감하기 위한 여러 가지 스위칭 기법과 전동기 구조 개선에 관련된 연구가 다방면에서 진행되고 있으며, 본 연구에서는 영구자석형 추진전동기를 활용한 전기 추진 시스템에 필요한 제반 연구를 수행하고 그 결과를 분석하여 추진시스템 설계에 활용하고자 한다[11-13].

1.3 연구내용 및 구성

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있다. 1장은 연구 배경과 선박 전기 추진 시스템의 동향을 기술 하였다.

2장은 수중체 전기 추진 시스템의 전동기의 특성 및 특징을 기술하였다. 이를 위하여 현재 수중체에 적용되고 있는 전기 추진 전동기 특성을 설명하였다.

3장은 BLDC 전동기의 특성과 다상 전동기 특성을 기술 하였다. 다상 전동기 다상화와 독립상 구조에 따른 특성을 비교하기 위하여 Y결선 3상 전동기와 Y결선 다상 전동기, 독립상 형태의 3상 전동기를 수학적으로 모델링 하여 비교 하였다.

4장에서는 3장의 모델링을 기반으로 Matlab Simulink를 이용한 시뮬레이션 하였다. 동일한 환경에서의 각 전동기의 시스템에 대한 특성의 차이를 비교 분석 하였다.

5장에서는 3장과 4장의 연구내용을 바탕으로 결론을 도출하였다.

제2장 수중체 전기 추진 추진체계

2.1 수중체 추진 특성

완벽한 밀폐성이 요구되는 수중체는 그 특수성으로 인해 전기 추진 시스템이 보편적으로 적용되어 왔다. 하지만 현대에 이르러 고출력 대용량화 되고 있는 전기 추진 시스템은 수중체의 공간적 제한성으로 인해 새로운 과제에 직면하기에 이르렀다[3-6].

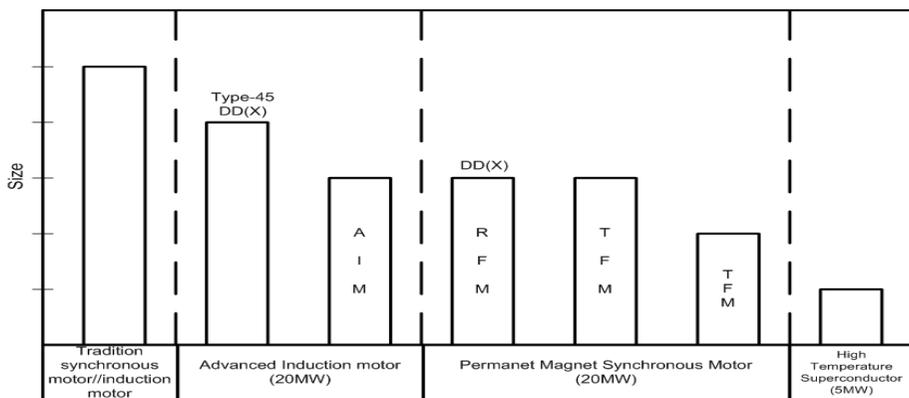


Fig. 2.1 Comparative size of different propulsion motor technologies

AIM: Advanced induction motor

RFM : Radial flux motor

TFM : Transverse flux motor

Fig. 2.1은 전기 추진 시스템에 사용되는 여러 전동기의 동일 용량에서 크기를 비교한 것이다. 수중체의 추진 시스템에서 사용되는 전동기는 영구자석형 전동기의 형태로 발전 하고 있다[16-19].

수중체는 군사용 목적으로 주로 사용됨에 따라 저소음화가 중요해지고 있다. 군사용 수중체의 추진체계로 인한 소음은 수중체의 생존성 문제와 직결됨으로 매우 중요하다. 전기 추진 시스템에서 발생하는 소음은 코깅 토크에 의한 소음

이며, 전기자 전류의 상승 및 하강 시간으로 인하여 발생한다. 전기자 전류의 상승 및 하강 시간은 전기자 권선이 갖는 인덕턴스에 의한 전류흐름을 방해하는 것으로부터 시작한다. 때문에 전기자 전류의 전류 맥동이 발생하게 되며, 전류 맥동에 의하여 토크맥동이 발생하고, 이때의 토크 맥동을 코깅 토크라고 한다.

저속에서 코깅 토크는 주파수가 낮아지고 진폭은 작아진다. 이러한 코깅 토크를 줄이기 위하여 기존의 3상에서 다상형태의 전동기로 발전하고 있다. 다상의 경우 상수의 증가로 인한 코깅 토크의 주파수가 높아진다. 반면 상수가 증가함으로 한상의 흐르는 전류량을 감소시켜 상전환시의 전류 맥동을 감소 시키며 전류 맥동의 감소로 토크 맥동을 저감하여 코깅 토크를 줄인다. 이러한 다상 전동기의 실제 예로 AIM(advanced induction motor : 15상, 유도 전동기)과 Permasyn모터(12상, 영구자석형 전동기)를 들 수 있다[16-20].

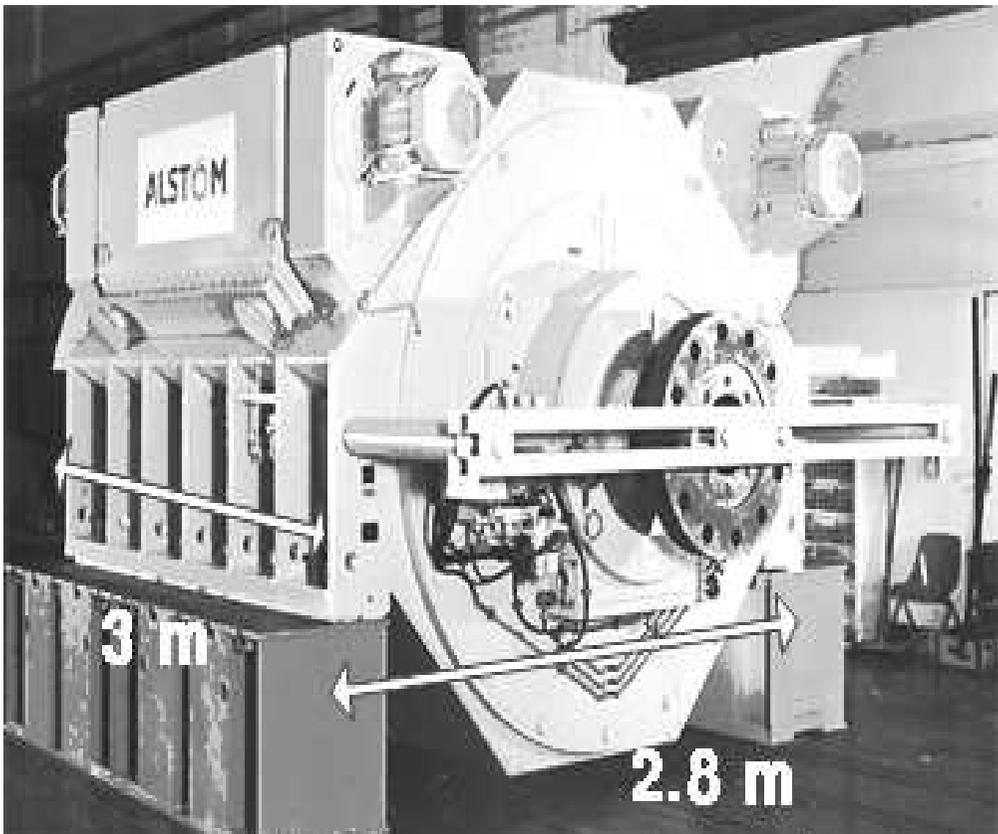


Fig. 2.2 AIM motor(Induction motor)

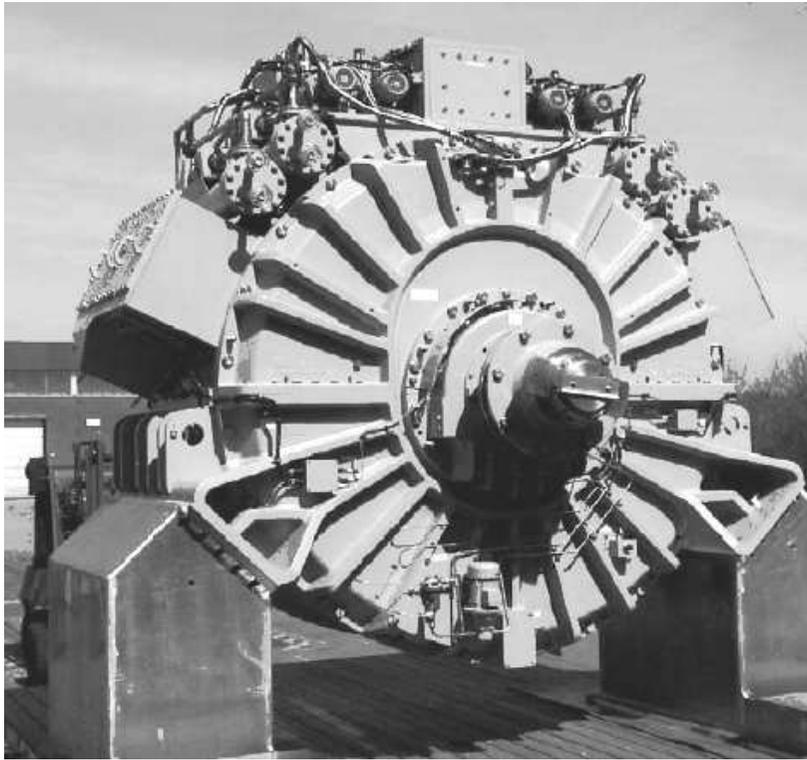


Fig. 2.3 Permasyn motor
(Permanent magnet motor)

수중체의 전기 추진 전동기의 특성은 공간 제약성, 저소음성, 고효율성 등이 다. 수중체의 진보에 따라 더 빠른 속도와 더 큰 공간이 필요하게 되고, 이에 따라 수중체에서 공간제약성과 고효율성이 더욱 부각될 것이다. 이러한 특성에 부합하기 위하여 수중체의 추진 전동기는 고효율 및 소형화 되는 방향으로 발전할 것이다.

2.2 전기 추진 전동기

전기 추진 전동기는 크게 전동기 부와 인버터 부로 구성된다. 전동기 부는 회전자와 고정자가 전자기적으로 구성되어 있는 부분이다. 인버터 부는 실제 전동기를 제어하기 위해서 전력을 제어하는 부분이며, 전동기 부와 인버터 부의 구성에 따라 크게 분리형과 일체형으로 나눌 수 있다.

분리형의 경우 인버터 부와 전동기 부가 분리되어 있는 구조이다. 일반적으로 직류 전동기나 유도 전동기 초전도 전동기 등이 이러한 구조에 속한다. Fig. 2.4는 분리형 구조인 MSI(Motor with Stand-alone Inverter)의 구조를 나타낸다. 전동기 부와 인버터 부가 완전히 구분되어 있는 형태를 확인할 수 있다.

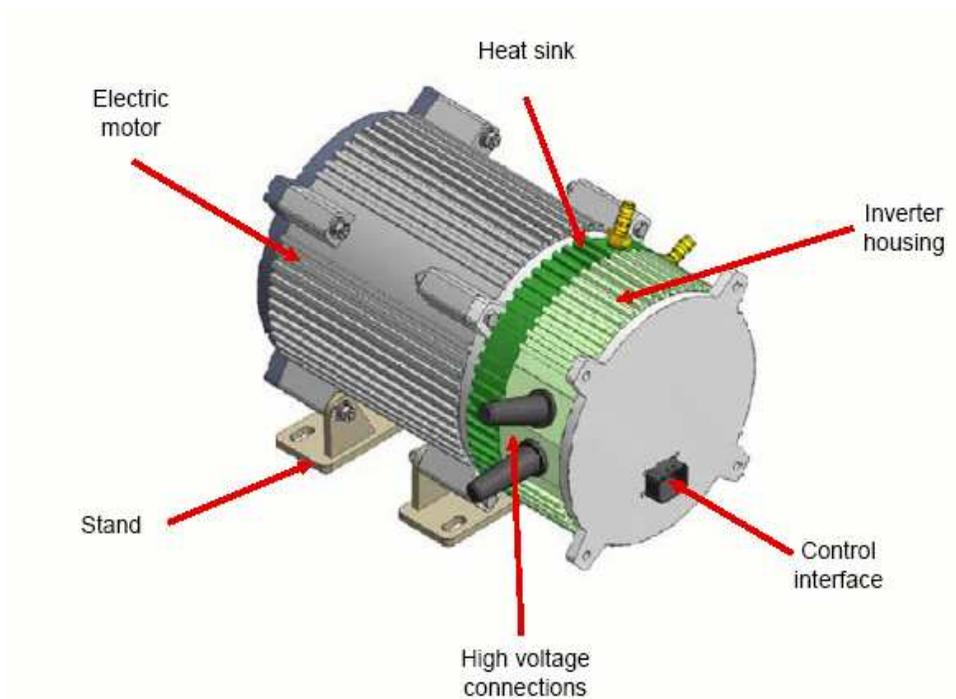


Fig. 2.4 Structure of MSI

일체형 구조는 인버터와 전동기가 하나의 구성체 속에 있는 형태이다. 이러한 일체형 구조는 크게 2가지로 구분 할 수 있으며, 일체형 구조는 MIER(Motor with Inverter External Rotor)와 MIIR(Motor with Inverter internal Rotor)로 나뉜다. MIER은 전동기 부와 인버터 부가 하나의 구성체 안

에 들어 있으나 인버터 부가 고정자 측에 설치되어 있는 형태이다. 반면 MIIR 형태는 인버터 부가 회전자 내부에 설치되어 있는 형태이다. Fig. 2.5는 MIER의 내부구조도이다. 이러한 구조에서 전동기 부와 인버터 부는 하나의 구조임을 알 수 있다. 유도 전동기와 초전도 전동기 등에서 일부 적용되고 있다 [21-23].

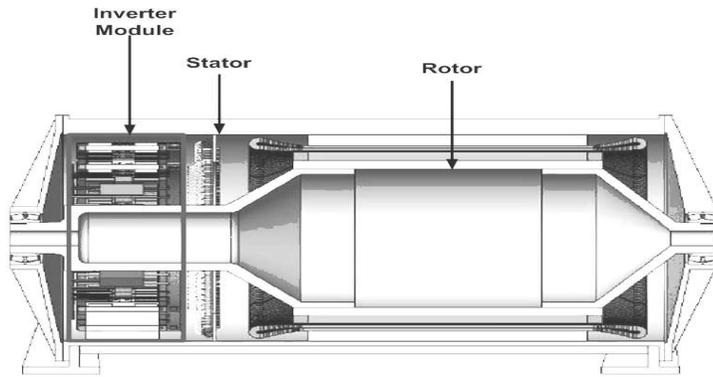


Fig. 2.5 Structure of MIER

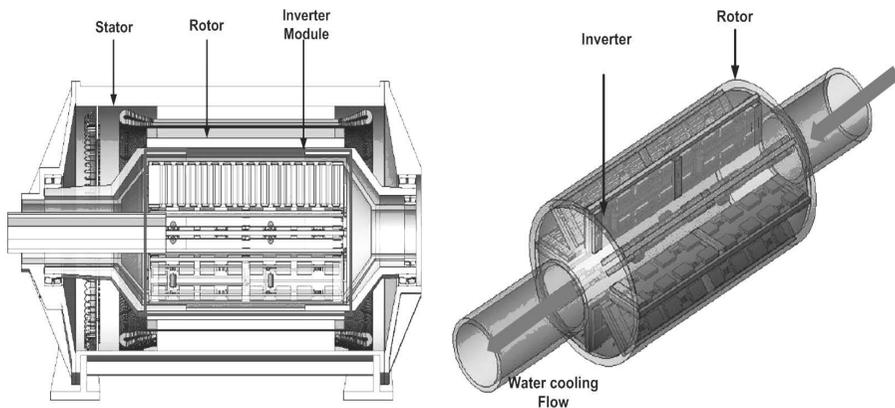


Fig 2.6 Structure of MIIR

Fig. 2.6은 MIIR구조를 나타낸다. MIIR구조는 인버터가 회전자 내부에 삽입되어 있는 구조를 말한다. MIIR구조는 영구자석형 동기전동기에 많이 사용되며 다른 전동기에서는 이용도가 높지 않다. MIIR형태는 Fig. 2.6과 같이 원통의 회전자구조와 중 형태의 구조가 대표적이다. Fig. 2.7은 중 형태의 MIIR의 구조이다.

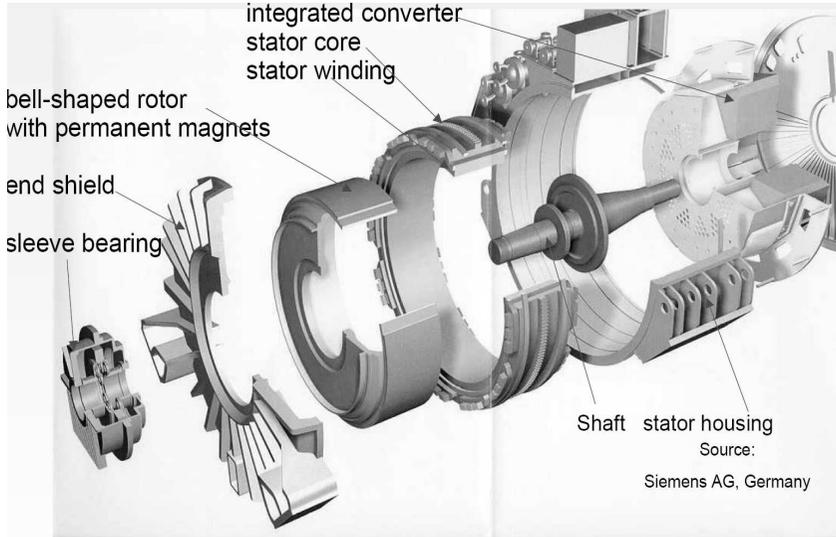


Fig. 2.7 Structure of bell-shaped MIIR

전동기 부와 인버터 부의 구성에 따라 분리형과 일체형으로 나뉘어 진다. 각각의 구성에 따라 구조적 특징과 그 특성이 변화하며, 냉각성능의 비교에서 큰 차이를 보였다. 다음은 구조에 따른 냉각 성능을 비교한 것이다. 분리형 구조로 MSI, 일체형 구조로 MIER과 MIIR을 비교하였다.

Table. 2.1 Summary of masses and volumes

	MSI Type	MIER Type	MIIR Type
Mass	118,000 Kg	110,000 Kg	113,000Kg
Gravimetric PowerDensity	0.169kW/kg	0.182kW/kg	0.177kW/kg
Volume	68m ³	60m ³	53m ³
Volumetric PowerDensity	294kW/m ³	333kW/m ³	377kW/m ³

표 2.1은 동일 용량에서 전동기의 부피와 시스템의 성능을 비교한 것이다. 분리형에 비하여 일체형이 더 적은 공간을 차지하는 것을 알 수 있으며, 냉각 성능에서도 일체형이 분리형에 비해 높은 것을 알 수 있다[21-23].

2.3 인버터와 전동기 결선

현재의 추진 전동기는 다상 형태의 전동기가 주를 이루고 있다. 추진 전동기는 저속으로 운전하게 되는데, 3상의 경우 저속으로 운전시 상전환 시점이 길어지게 되어 상전환 시에 발생하는 스위칭 손실이 커지게 된다. 이와 달리 다상은 3상에 비하여 상전환 시간이 짧다. 그러므로 저속으로 운전할 때에 발생하는 상전환시의 스위칭 손실을 줄일 수 있어 저속에서 효율이 높다.

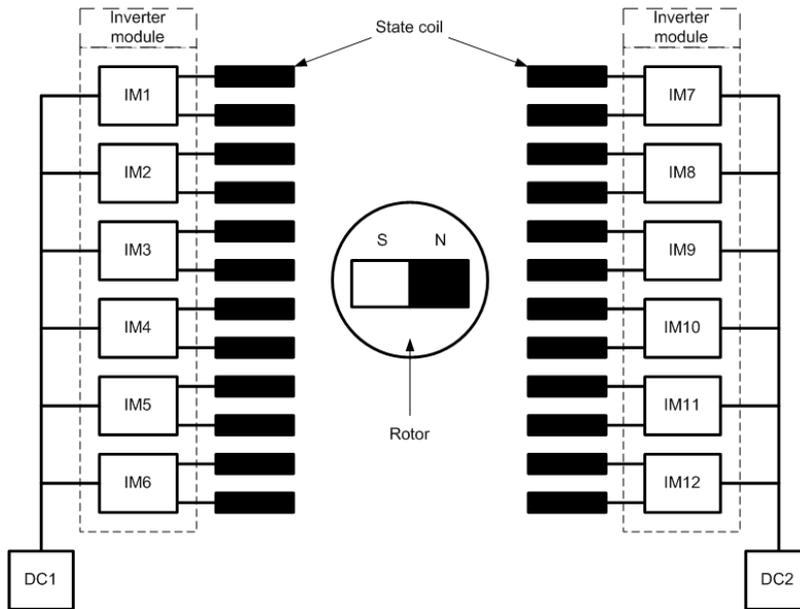


Fig. 2.8 Structure of Permasyn motor

Fig. 2.8은 영구자석형 동기 전동기인 Permasyn의 구조도이다. IM은 인버터 모듈을 나타내며 총 12개로 구성된다. 하나의 인버터 모듈은 두개의 H-bridge 인버터로 구성되며, 각각의 H-bridge인버터는 추진 전동기의 1개의 권선을 제어한다. Fig. 2.8의 가운데의 자석 표시는 전기각 360°에 전체 권선이 위치하는 것을 나타낸다.

전체 시스템의 24개의 권선 중 하나의 권선이 소손 되거나 인버터 모듈의 소손 발생시 12개 권선을 이용하여 운전할 수 있도록 DC전원 공급선을 2개의 그룹으로 나누었다. 독립 다상으로 구성 할 경우 스위칭 전압을 높여 각상의 높은 전류를 흐르게 할 수 있어 큰 토크를 발생 할 수 있으며 다상의 형태로

나타내어 토크 성능을 높일 수 있다. 독립 다상 전동기의 구동에 있어서 각상과 인버터 부와의 결선은 H-bridge 형태를 나타낸다. Fig. 2.9는 인버터와 전동기의 각상의 결선을 나타낸다[16-20].

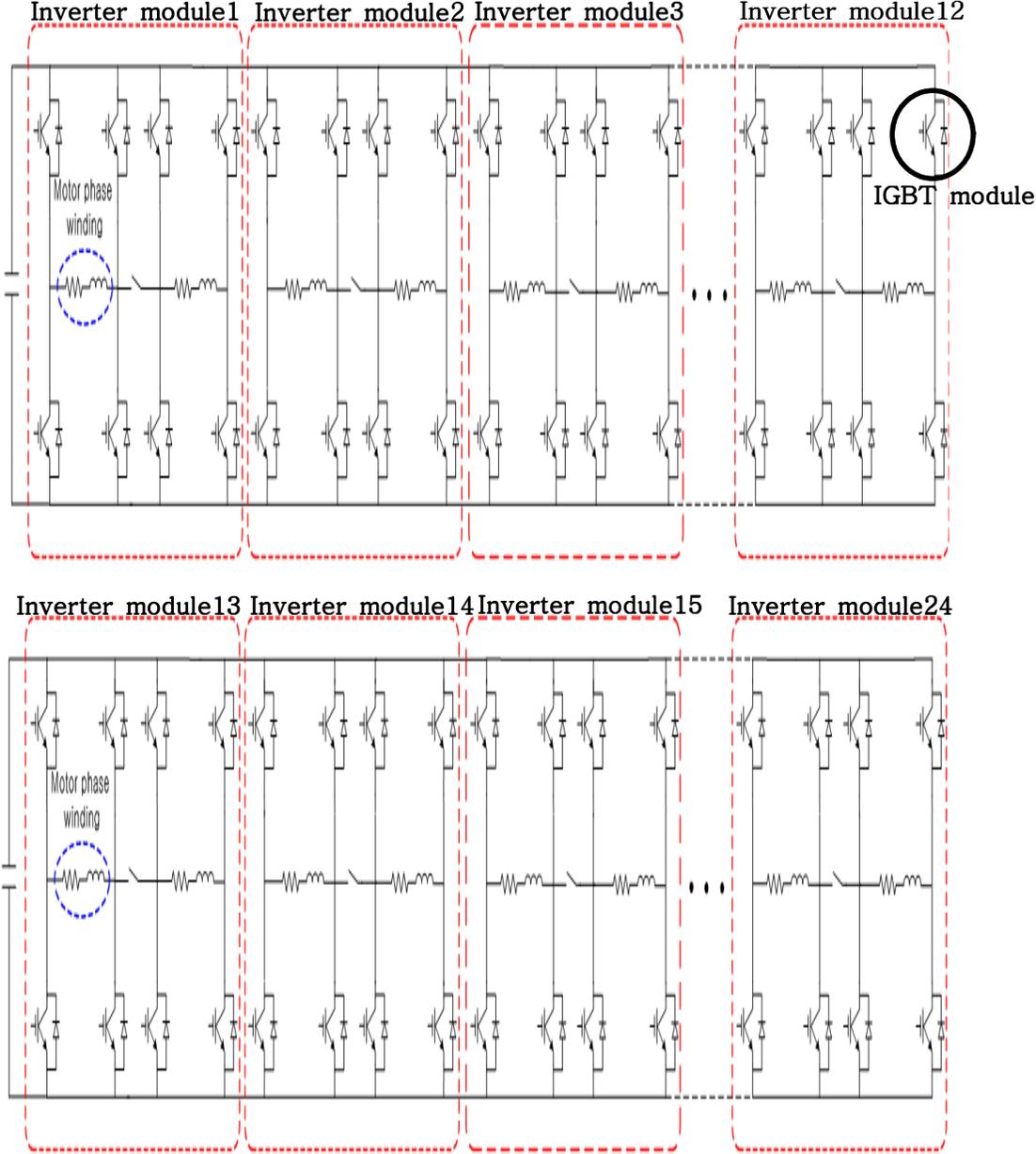


Fig. 2.9 Inverter schematic diagram of multi-phase motor

제3장 추진용 BLDC 전동기의 특성

3.1 BLDC 전동기

3.1.1 BLDC 전동기

BLDC전동기는 전기자 권선이 고정자 측에 설치되어 있고 계자용 영구자석이 회전자 자에 있는 구조이다. 이러한 BLDC전동기는 직류 전동기에 비하여 유지 보수가 필요 없고, 응답성이 빠르며 고속운전까지 가능한 장점이 있다. 또한 권선이 고정자에 국한되어 열 저항이 적으며 구동 방식의 제어가 비교적 간단하여 그 응용범위가 넓어지고 있다.

BLDC전동기는 구동 방식에서 전류원 인버터를 이용하여 일정 전류를 인가하는 방식과 전압원 인버터를 이용한 정전류 제어 방식으로 나눌 수 있다. 전류원 인버터를 이용하는 방식은 인덕터의 크기와 스위칭 소자의 내압등의 문제로 인해 전압원 인버터를 이용하여 구형파의 상전류를 제어하는 방식이 주로 사용된다. BLDC 전동기는 전기자 기전력과 자계 기전력의 상호 작용에 의해 발생하는 회전력을 일정하게 얻기위해 자극의 위치를 기준으로 해서 전기자 전류를 순차적으로 인가해 주어야 하며, 고정자 측 권선의 전류 방향 및 순서를 바꾸기 위해서 회전자의 절대적인 위치를 검출할 센서가 필요하다. BLDC전동기를 구동하기 위해서는 Fig. 3.1에 나타난 것처럼 전기적으로 반주기 중 120° 의 기간 동안 역기전력 값이 일정한 값을 갖는다. 이때 인버터를 이용하여 상전류구형파 형태로 흐르게 한다.

BLDC전동기의 회전자의 영구자석의 극간격 상수를 1에 가깝게 하고 자속 퍼짐효과를 고려하면 고정자 권선의 쇄교 자속 분포는 사다리꼴의 형태가 된다. Fig. 3.1은 이상적인 경우에 있어서의 BLDC전동기의 역기전력과 상전류를 나타낸 것이다. 이 경우 각 상의 상전류는 항상 일정한 크기를 갖게 되는데 전압원 인버터를 사용하는 경우에 상전류를 직접 제어하여 구형파에 가깝게 제어해 주는 것이 필요하다. BLDC 전동기의 토크 맥동을 제어하는데 있어서 전동기의 전류 맥동은 토크맥동의 직접적인 원인이 된다.

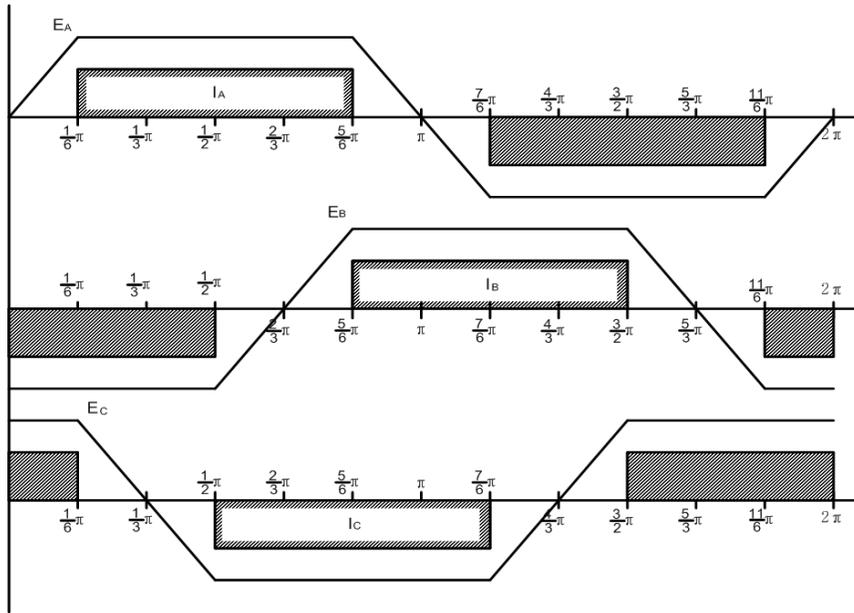


Fig. 3.1 Back-EMF and phase current waveforms of ideal BLDC

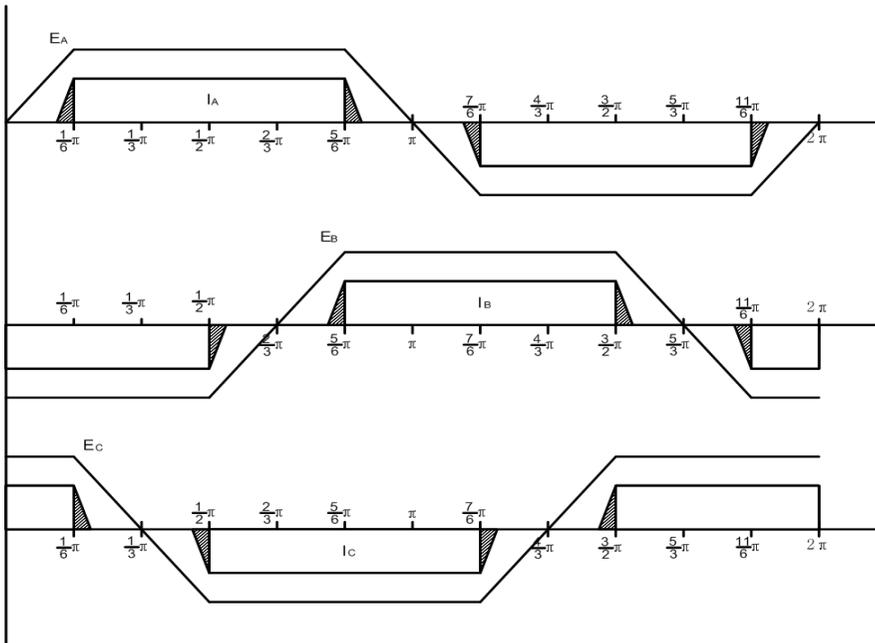


Fig. 3.2 Back-EMF and phase current waveforms of real BLDC

Fig. 3.2는 실제 BLDC전동기의 역기전력 파형을 나타낸 것이다. 실제 전압원 인버터로 시스템을 구성하는 경우 전동기 내부의 권선 저항, 인덕터 성분 및 제한된 직류 전압의 크기로 인하여 구형파 형태의 상전류로 제어하더라도 전동기의 전류파형은 구형파가 되지 못한다. 또한 전체 상전류의 합이 이상적인 경우처럼 일정하지 못하게 되는데, 이러한 문제는 상전환 하지 않는 상의 전류에 전류 맥동으로 나타나게 된다.

Fig. 3.2에서 상전류가 구형파 형태가 되지 못하고 사다리꼴 형태로 변형되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 전압원 인버터를 사용하는 경우 PWM (Pulse Width Modulation)전압원 인버터를 사용한다. PWM전압원 인버터를 사용하는 경우 토크 맥동은 PWM 스위칭에 따른 토크리플과 상전압에 의해 발생하는 코깅토크로 발생한다.

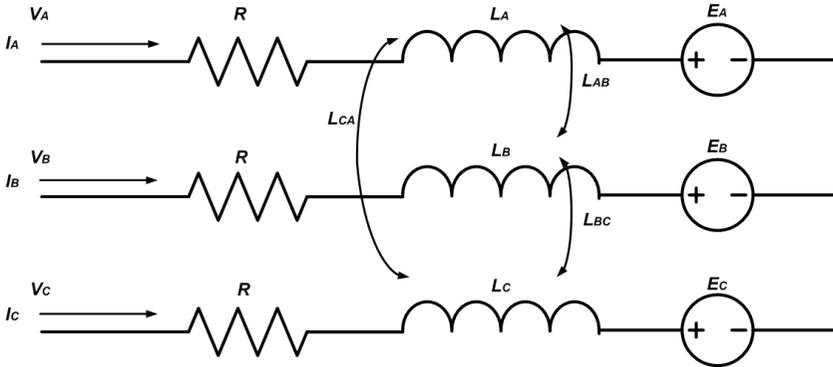


Fig. 3.3 Equivalent circuit of 3 phase BLDC motor(Y-connected)

Fig. 3.3은 3상 Y결선 BLDC 전동기의 등가회로를 나타낸 것이다. BLDC전동기는 인덕턴스와 저항 그리고 사다리꼴 형태의 역기전력으로 등가화 할 수 있다. 인덕턴스는 각상의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스로 나눈어진다. BLDC 전동기의 A상의 전압 방정식을 구하면 식(3.1)과 같다.

$$V_A = RI_A + \frac{d}{dt}(L_A I_A + L_{BA} I_B + L_{CA} I_C) + E_A \quad (3.1)$$

식(3.1)을 3상으로 확장하여 정리하면 식 (3.2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A & L_{BA} & L_{CA} \\ L_{AB} & L_B & L_{CB} \\ L_{AC} & L_{BC} & L_C \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

식 (3.2)에서 V_A, V_B, V_C 는 각 상전압을 나타낸다. 3상의 고정자 권선저항 및 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 동일하다고 가정한다. R 은 고정자 권선의 저항, I_A, I_B, I_C 는 각 상의 전류이다. 자기 인덕턴스는 L_A, L_B, L_C 이고, 상호 인덕턴스는 L_{AB}, L_{BC}, L_{CA} 이다. 여기서 회전자 위치를 따른 3상 고정자의 권선의 인덕턴스의 변화가 없다고 가정하면 각상의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스가 각각 동일하게 된다. 자기 인덕턴스를 L_{self} , 상호 인덕턴스를 M 으로 나타내면 식 (3.3)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} L_A &= L_B = L_C = L_{self} \\ L_{AB} &= L_{BC} = L_{CA} = M \end{aligned} \quad (3.3)$$

식 (3.2)를 식 (3.3)을 이용하여 정리 하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{self} & M & M \\ M & L_{self} & M \\ M & M & L_{self} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

위의 수식에서 BLDC 전동기의 저항 및 인덕턴스가 일정하다고 가정한다. 또한 전동기는 이상적인 경우로 가정하여 모델링 하였다. 중성점에서 3상의 상전류의 합은 0이다. 이를 3×3 의 행로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_A + I_B + I_C &= 0 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.5)$$

식(3.5)를 전류에 관하여 미분 하고 양변에 상수 $-M$ 을 곱하면 식(3.6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} (-M) \quad (3.6)$$

식(3.4)에 식 (3.6)을 더하여 전개 하면 식(3.7)과 같다.

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M & M & M \\ M & M & M \\ M & M & M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{self} & M & M \\ M & L_{self} & M \\ M & M & L_{self} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M & M & M \\ M & M & M \\ M & M & M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{self} - M & M - M & M - M \\ M - M & L_{self} - M & M - M \\ M - M & M - M & L_{self} - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \\ & \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{self} - M & 0 & 0 \\ 0 & L_{self} - M & 0 \\ 0 & 0 & L_{self} - M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.7)$$

식 (3.7)에서 $L_{self} - M$ 를 동기 인덕턴스 L 로 정의 하면 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

식 (3.8)을 전류 미분 방정식으로 정리 하여 식(3.9)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_A \\ E_B \\ E_C \end{bmatrix} \right\} \quad (3.9)$$

모터의 손실과 인덕턴스에 의한 영향을 무시하는 이상적인 경우로 A상 권선에 의한 상에서 발생하는 토크와 역기전력 및 상전류의 관계는 다음과 같다.

$$T_A = \frac{E_A \times I_A}{\omega_m} \quad (3.10)$$

T_A 는 A상에서 발생하는 토크, ω_m 은 모터의 회전 각속도를 나타낸 것이다.

식 (3.10)은 한상에서 발생하는 토크의 크기를 나타낸 것이다. 이것을 총 토크로 나타내면 식 (3.11)과 같다.

$$\begin{aligned} T_{total} &= T_A + T_B + T_C \\ &= \frac{E_A I_A + E_B I_B + E_C I_C}{\omega_m} \end{aligned} \quad (3.11)$$

이때 T_A , T_B , T_C 는 각상에서 발생하는 토크를 나타낸다. T_{total} 은 전체 발생 토크 이다. 여기서 역기전력 파형과 전류 파형은 이론적으로 Fig. 3.1과 같다. 도통 구간 동안 역기전력 값(E_M)과 상전류(I_M)값은 일정한 값이 된다.

도통 시점에서 일정한 구형과 전류 I_M 을 흐르도록 하는 이상적인 조건으로 생각하면 BLDC 전동기의 토크는 다음과 같다. 여기서 θ 는 전기각을 나타낸다.

$$T_{total} = T_A + T_B + T_C = \frac{2E_M(\theta) \cdot I_M(\theta)}{\omega_m} \quad (3.12)$$

Fig. 3.2에서 알 수 있듯이 상전류는 두 개의 상을 여자 시키며 도통한다. Fig. 3.4의 (a)는 전체 시스템의 전류 흐름도를 나타낸 것이고 (b)는 이중 I1의 흐름을 나타낸 것이다.

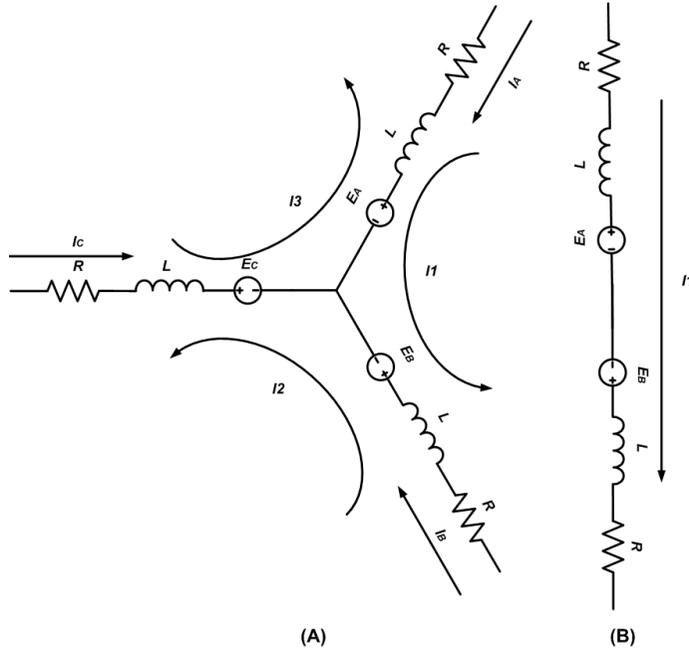


Fig. 3.4 Equivalent circuit of 3 phase BLDC motor(Y-connected)

$$\begin{aligned}
 V_{ab} &= R_l I_1 + L_l \frac{dI_1}{dt} + e_{ab} \\
 V_{bc} &= R_l I_2 + L_l \frac{dI_2}{dt} + e_{bc} \\
 V_{ca} &= R_l I_3 + L_l \frac{dI_3}{dt} + e_{ca}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

식(3.13)에서 V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} 는 선간 전압, R_l 은 선간 고정 저항, L_l 은 선간 동기 인덕턴스 e_{ab} , e_{bc} , e_{ca} 는 선간 역기전력을 나타낸다. 두상이 연결되어 있는 형태이므로 식(3.14)를 만족한다.

$$\begin{aligned}
 V_{ab} &= V_A - V_B, \quad V_{bc} = V_B - V_C, \quad V_{ca} = V_C - V_A \\
 e_{ab} &= E_A - E_B, \quad e_{bc} = E_B - E_C, \quad e_{ca} = E_C - E_A \\
 R_l &= 2R, \quad L_l = 2L \\
 I_1 &= I_A - I_C, \quad I_2 = I_B - I_C, \quad I_3 = I_C - I_A
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

3.1.2 BLDC와 PMSM의 비교

영구자석형 전동기는 크게 BLDC전동기와 PMSM으로 구분한다. 두 전동기는 회전자가 영구자석의 형태로 되어있는 면에서는 동일하나 영구자석의 자속 분포가 다르다는 큰 차이점이 있다. 또한 이러한 차이점으로 인해 역기전력 파형이 변화하고 그에 따라 제어하는 방식에서도 많은 차이점을 가져온다.



Fig. 3.5 Flux density of permanent magnet motor

Fig. 3.5는 영구자석형 전동기의 회전자의 자속 분포를 나타낸 것이다. PMSM의 경우에 있어서 자속분포는 정현파이므로, 한쪽으로 집중적으로 자속이 분포하는 것을 알 수 있다. 이러한 형태로 인하여 역기전력 파형에서도 BLDC 전동기는 사다리꼴 형태의 역기전력 파형을 지니며 PMSM은 사인파 형태의 역기전력 파형을 지니게 된다. PMSM과 BLDC전동기의 역기전력 파형과 전류 파형을 비교 하면 다음과 같다. 두 전동기를 3상 전동기로 제안하면 각상의 상전류의 합은 0이 되어야 한다.

Fig. 3.6는 PMSM과 BLDC 전동기의 이상적인 경우의 역기전력, 상전류 토크 파형을 나타낸 것이다. PMSM의 경우 역기전력 파형이 사인파 형태인 것을 알 수 있다. 또한 역기전력 파형에 상응하는 상전류도 사인파 형태이며 상의 전류의 합은 0이다. BLDC전동기는 역기전력 파형이 사다리꼴 형태이다. 각상의 상전류는 구형파 형태이다. 이러한 형태의 차이는 제어에 있어서 회전자의 위치 검출시 BLDC전동기는 60°간격으로 측정하면 되지만 PMSM의 경우에는 연속적으로 검출해야 한다. 이는 BLDC 전동기의 경우 사다리꼴 형태로 도통 구간 동안에 역기전력이 일정하기 때문이다.

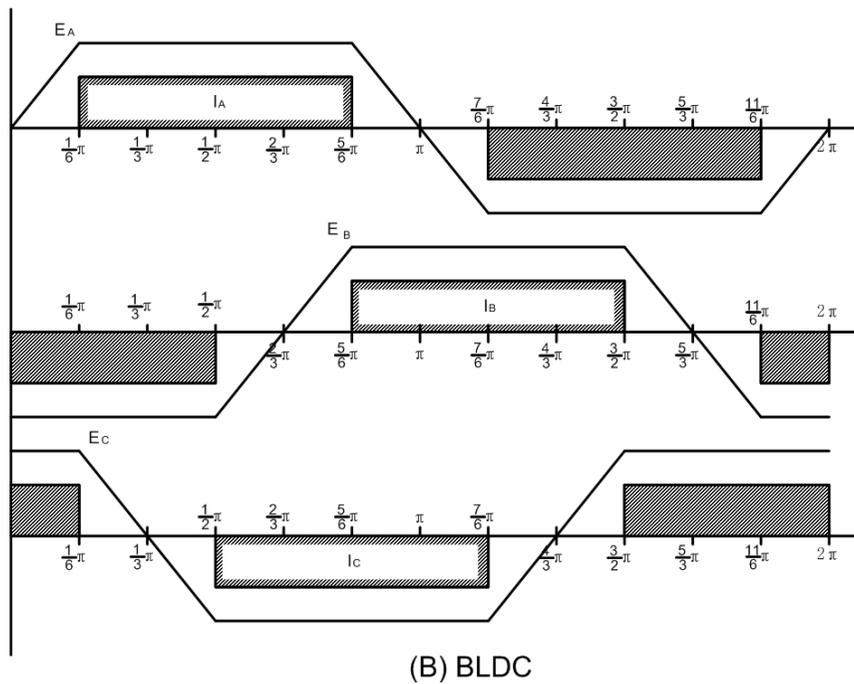
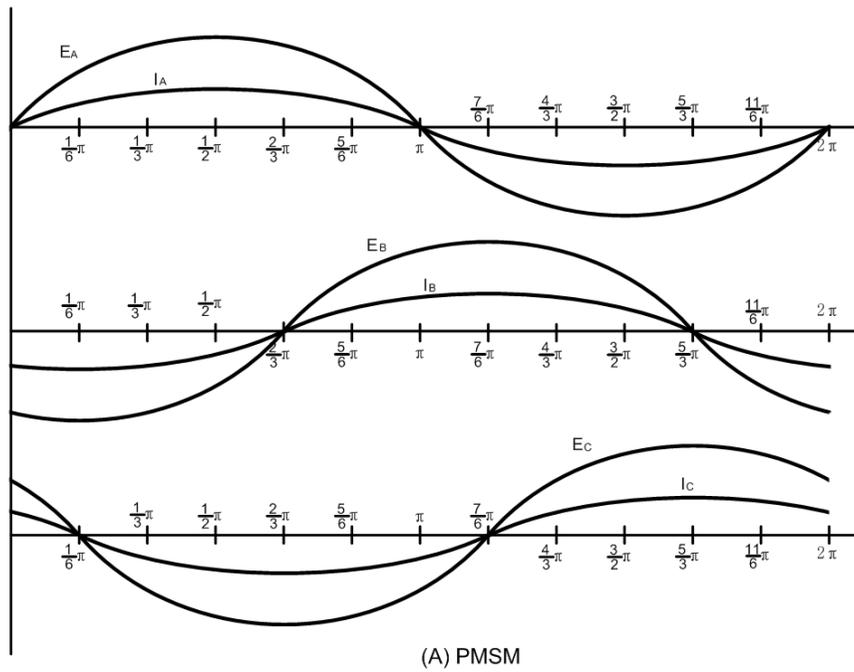


Fig. 3.6 Back-EMF and phase current waveforms of permanent magnet motor

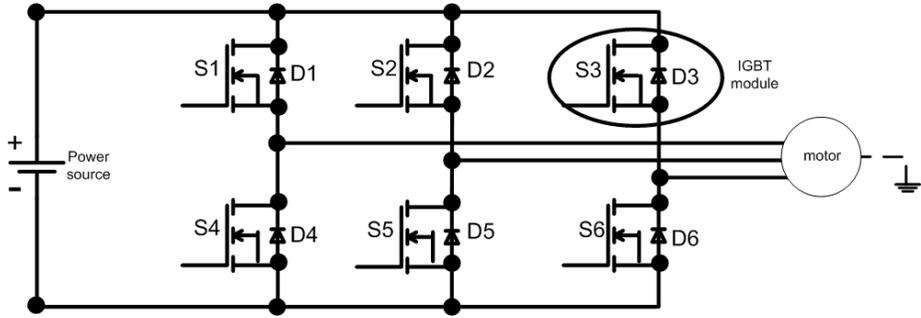


Fig. 3.7 Inverter schematic diagram of permant magnet motor(3 phase)

Fig. 3.7은 3상 영구자석형 전동기의 인버터를 나타낸 것이다. BLDC전동기는 구형과 구동으로 인버터의 스위치 손실이 적다. 또한 상전환시에 스위칭을 하지 않기 때문에 S1과 S4가 동시에 스위칭 되는 시점이 발생하지 않는다. 그러므로 인버터의 단락현상을 막기 위한 데드 타임이 불필요하게 됨에 따라 효율을 극대화 할 수 있다. 그러나 PMSM의 경우에 있어서는 BLDC에 비하여 스위칭 손실이 크며 데드타임으로 인한 스위칭 효율이 감소한다[24-28].

3.2 다상 전동기

다상 전동기는 3상 이상의 상을 지닌 전동기를 의미한다. 동일 출력에서 다상의 전동기는 상수를 증가시키므로 한상에 인가되는 전류를 줄일 수 있다. 또한 상수의 증가로 출력이 증가하게 되어 대용량 추진 전동기로 사용되는 추진 전동기에는 다상 전동기를 적용하고 있다. 본 논문에서는 다음 두 가지의 다상 전동기를 제안한다.

3.2.1 Y결선 다상 전동기

BLDC 전동기는 대부분이 Y결선 형태의 전동기이다. 이러한 Y결선 형태의 전동기는 중점에서 항상 입력 되는 전류와 출력되는 전류의 합이 같다. Y결선 형태의 다상 전동기는 BLDC 전동기를 기반으로 하여 설명된다. 그러므로 Y결선 형태의 다상 전동기의 상수는 항상 $2n+1$ ($n=1, 2, 3\dots$)의 형태로 나타난다. Y결선의 경우 짝수개의 상이 서로 평형을 이루고 있는 상황에서 하나의 상이 상전환을 이루게 된다[29-31].

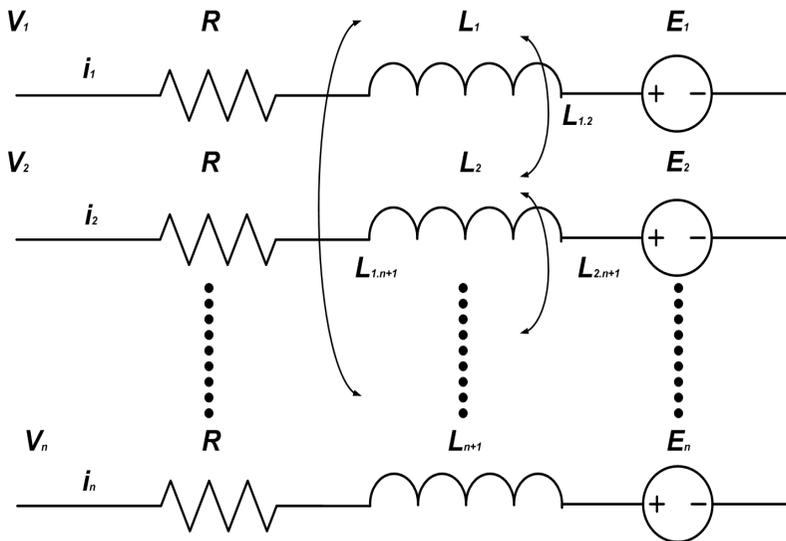


Fig. 3.8 Equivalent circuit of multi-phase motor(Y-connected)

Fig. 3.8는 Y결선 다상 전동기의 등가회로이다. 여기서 n 은 1, 2, 3...의 상수이다. 등가회로에서 V_1, V_2, \dots, V_n 은 상전압을, i_1, i_2, \dots, i_n 은 상전류를 나타내며, 권선 저항은 R 로 나타낸다. E_1, E_2, \dots, E_n 은 역기전력을 나타내고, L_1, L_2, \dots, L_n 은 각 상의 자기 인덕턴스이다. $L_{1,2}, L_{1,3}, \dots, L_{1,n+1}$ 은 상호 인덕턴스이다. 이러한 등가회로에서 1번상의 전압 방정식은 다음과 같이 된다.

$$V_1 = Ri_1 + \frac{di_1}{dt}(L_1 + L_{1,2} + L_{1,3} + \dots + L_{1,n+1}) + E_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.15)$$

여기서 인덕턴스가 일정하고 상호 인덕턴스의 변화가 없다고 가정하면 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_1 = L_2 = L_3 = \dots = L_n = L_{self} \\ L_{1,2} = L_{2,3} = L_{1,3} = \dots = L_{1,n+1} = M \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \end{aligned} \quad (3.16)$$

여기서 L_{self} 는 자기 인덕턴스의 값이다. M 은 상호 인덕턴스를 나타낸다. 전동기의 각상의 전류는 평형을 이루고 있으므로 식 (3.17)식과 같이 정의 할 수 있다.

$$i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n = 0 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.17)$$

식(3.15)를 식(3.16)과 식(3.17)을 이용하여 정리 하면 식 (3.18)과 같이 정리 할 수 있다.

$$V_1 = Ri_1 + \frac{di_1}{dt}(L_{self} - M) + E_1 \quad (3.18)$$

식(3.18)은 $L_{self} - M$ 을 인덕턴스 L 로 하고 다상 전동기의 전압 방정식으로 정리 하면 식(3.19)와 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & L & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

식(3.19)에서 R 과 L 의 이차원 배열은 $2n+1 \times 2n+1$ 형의 배열이다 식 (3.19)에서 전류 미분 방정식으로 정의 하면 식(3.20)과 같이 정리 할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \right\} \quad (3.20)$$

Y결선 다상전동기의 토크 값은 식(3.21)과 같다.

$$T_{total} = \frac{E_1 i_1 + E_2 i_2 + \cdots + E_n i_n}{\omega_m} \quad (3.21)$$

각 상은 상수에 따라서 역기전력 파형이 차이가 난다. 3상의 경우에는 120° 씩의 위상차가 난다. 하지만 7상의 경우에는 $\frac{2\pi}{7}$ 씩 위상차를 갖는다. 역기전력 파형의 위상차는 식(3.22)만큼의 위상차를 갖는 식으로 정의된다.

$$\theta = \frac{360}{P} \quad (3.22)$$

식(3.22)에서 P 는 상수, θ 는 위상차를 의미한다. 이러한 각 상의 위상차는 모터의 등가 회로에서도 그 위상차를 갖는다. Fig. 3.9는 Y결선의 7상 BLDC 전동기의 등가회로를 나타낸다.

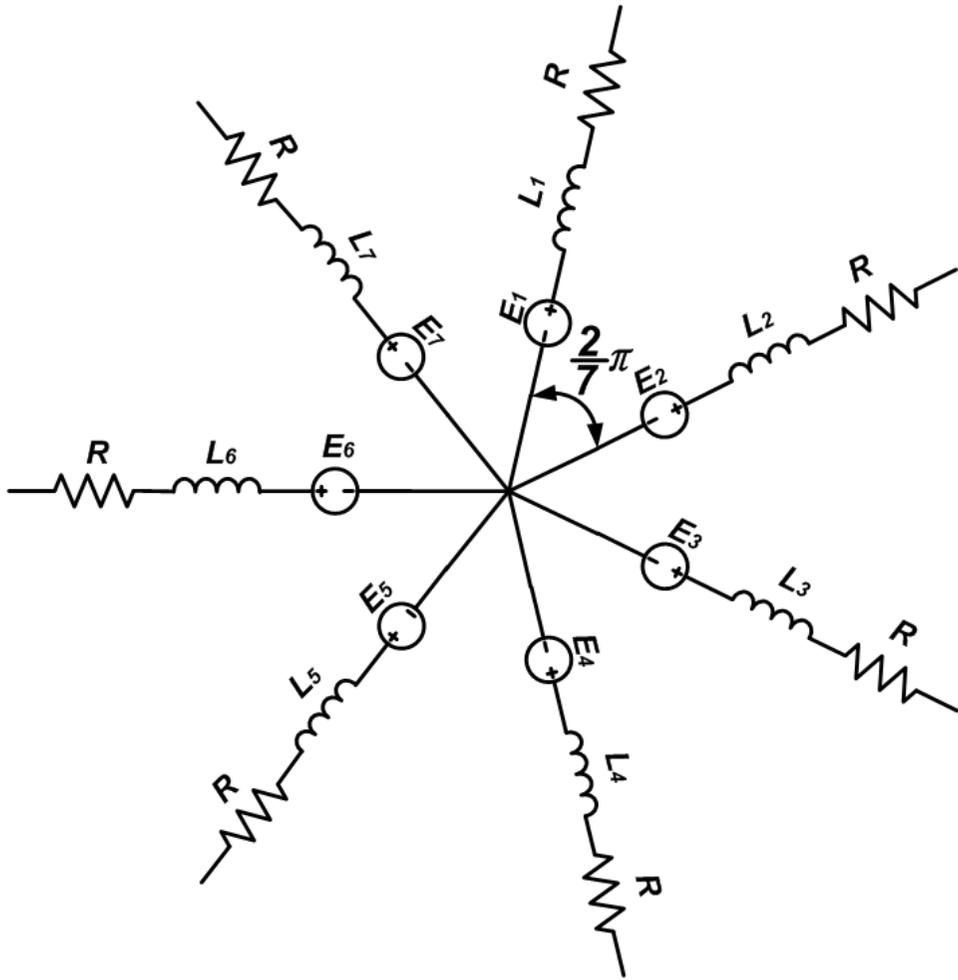


Fig. 3.9 Equivalent circuit of 7 phase motor
(Y-connected)

3.2.2 독립 다상 전동기

독립 다상 전동기는 상수가 3이상이며 상의 구조가 독립상의 구조로 되어 있는 전동기이다. 독립상 구조는 각상이 전기적으로 인버터에 의하여 분리되어 있는 전동기이다. 독립 다상 전동기를 설명하기 전에 독립 3상 전동기와 Y결선 3상 BLDC 전동기를 비교하여 독립상 구조의 특징을 알아보았다.

① 독립 3상 전동기

독립상 구조는 각 상을 모두 분리한 형태이다. 이러한 형태의 전동기 3상의 예를 들어 설명하면 다음과 같은 등가 회로로 구성할 수 있다.

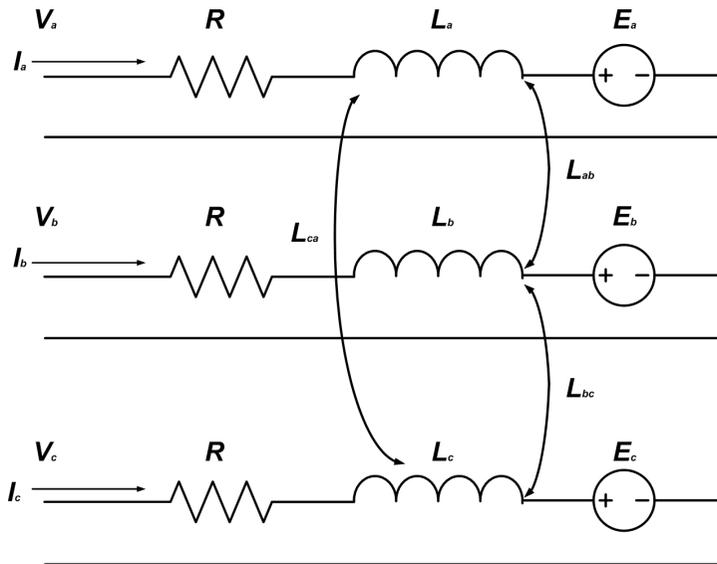


Fig. 3.10 Equivalent circuit of 3 phase motor(independent-connected)

독립상 BLDC 전동기의 등가회로는 Y결선 BLDC전동기의 등가회로와 유사하다. 등가회로에서 상전압은 V_a , V_b , V_c 이고 권선저항은 R , 자기 인덕턴스는 L_a , L_b , L_c , 상호 인덕턴스는 L_{ab} , L_{bc} , L_{ca} ,이며 역기전력은 E_a , E_b , E_c 이다. 전동기의 회전자의 영구자석 위치는 변화하지 않는다. 3상 Y결선의 BLDC전동기

와의 차이점은 각상이 분리되어 있다는 점이다. 각상이 분리되어 있더라도 BLDC전동기와 동일한 형태의 각상의 전압 방정식을 얻을 수 있다.

$$V_a = RI_a + \frac{d}{dt}(L_a I_a + L_{ba} I_a + L_{ca} I_a) + E_a \quad (3.21)$$

식 (3.21)은 일반 BLDC전동기와 동일한 것을 알 수 있다. 이것은 전동기의 구조적인 측면을 바꾸지 않고 각상의 권선만을 분리한 형태로써, 구조적인 변화가 없고 단지 모터 전체의 상을 분리한 개념으로 배치한 것이다. 이렇게 분리할 경우 각상은 서로 만나지 않음으로써 전류는 3상평형을 이루지 않는다. Y 결선 BLDC전동기와 동일한 방식으로 역기전력 파형이 일정한 부분에서 상전류를 구형파 형태가 되도록 스위칭한다. 식(3.21)에서 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 값이 일정한 이상적인 전동기로 가정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_a &= L_b = L_c = L_{self} \\ L_{ab} &= L_{bc} = L_{ca} = M \end{aligned} \quad (3.22)$$

식 (3.21)을 식(3.22)으로 정리하여 3상의 전압 방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{self} & M & M \\ M & L_{self} & M \\ M & M & L_{self} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

식(3.23)에서 $L_{self} - M$ 을 동기 인덕턴스 L 로 정의하면 식(3.23)은 식(3.24)으로 정의 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

식(3.24)은 독립상 전동기의 전압 방정식이다. Y결선 3상 BLDC 전동기와 독립 3상 BLDC 전동기의 전압 방정식에서는 그 차이점을 찾을 수 없으나, BLDC 전동기와 인버터의 결선에서 큰 차이를 나타낸다. Fig 3.11은 BLDC 전동기의 결선도를 나타낸 것이다. Fig. 3.11에서 점선으로 표시된 부분과 같이 전동기의 각상은 두 개의 스위칭 모듈에 의하여 제어된다. 스위칭에 의하여 각 상의 전압이 결정되며 기준전위를 생각하여 음전위와 양전위를 구분하여 상 전압을 인가하게 된다.

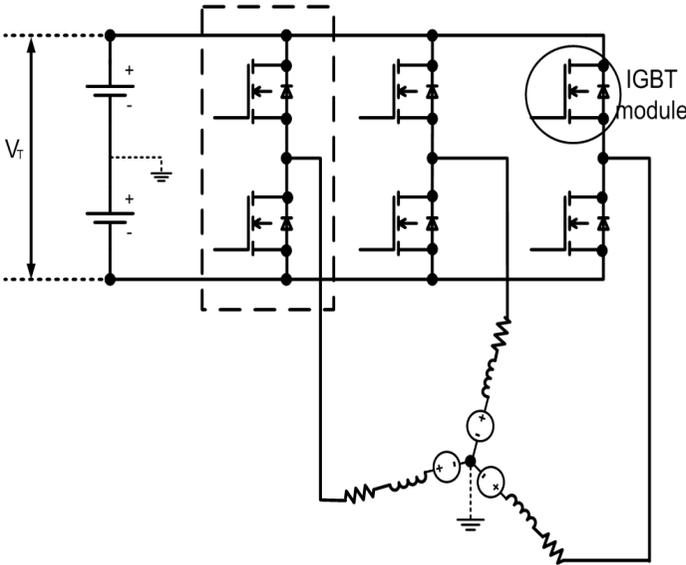


Fig. 3.11 Inverter schematic diagram of Y-connected BLDC motor

Fig. 3.12은 스위칭에 따른 상의 배치를 나타낸 것이다. V_T 는 전체 전압 이다. 식(3.25)는 스위칭에 따른 상의 배치에 따라, a상에 인가되는 상전압과 전체전압의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 3.13은 독립 3상 BLDC 전동기의 인버터 결선을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned}
 (1) \quad V_a &= \frac{1}{2} V_T & (3.25) \\
 (2) \quad V_a &= \frac{2}{3} V_T \\
 (3) \quad V_a &= \frac{1}{3} V_T
 \end{aligned}$$

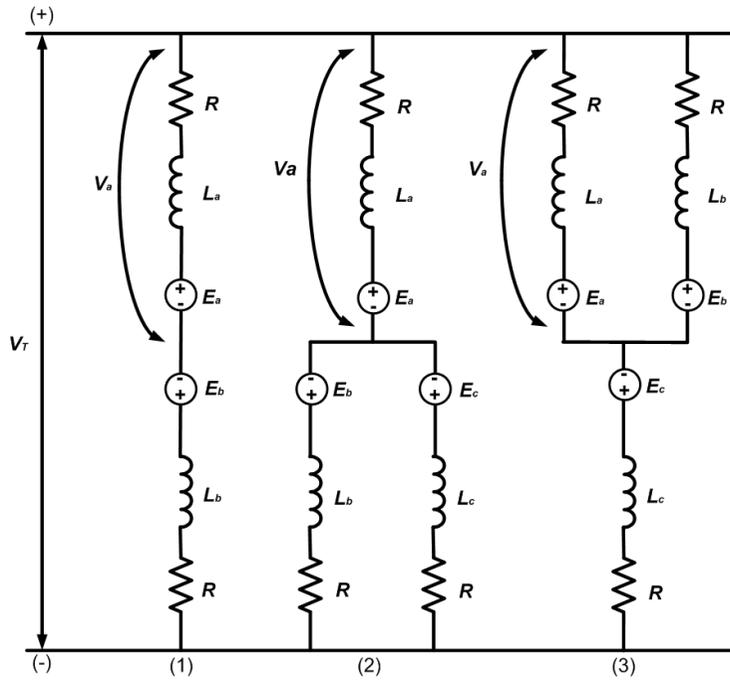


Fig. 3.12 Y-connected BLDC motor schematic diagram in commutating period.

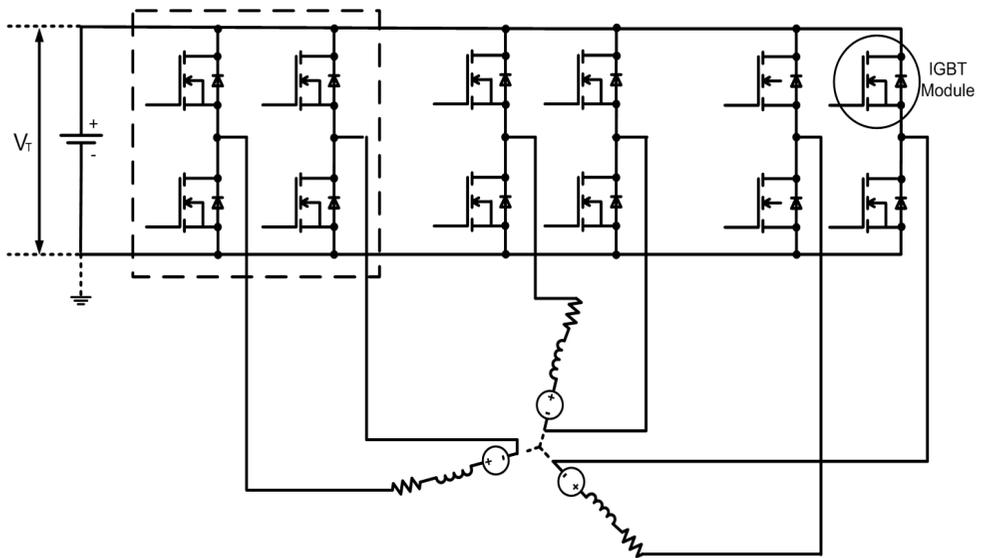


Fig. 3.13 Inverter schematic diagram of independent-connected BLDC motor

Fig. 3.13에서 전동기의 각 상은 중성점으로 모이지 않고 떨어져 있는 형태이다. 하지만 Y결선 BLDC 전동기와 같이 상은 동일한 위상각을 갖고 배치되어 있어 구조적으로 같은 형태이다. 인버터와 연결된 구조에서 인버터는 H-bridge 형태이다. Fig. 3.13에 표시된 부분과 같이 4개의 스위치가 동작하여 하나의 상을 제어하게 된다.

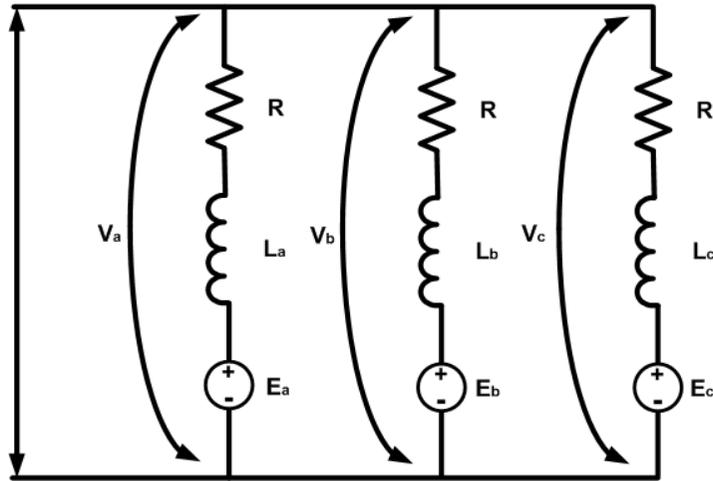


Fig. 3.14 Equivalent circuit of independent-connected phase

Fig. 3.14은 독립상 BLDC 전동기의 상전압을 나타낸 것이다. 스위칭에 따라서 전체 시스템의 전압 분배비가 변화하지 않으며 각상의 스위칭 전압은 다음과 같다.

$$V_a = V_T \quad (3.26)$$

전동기 전체에서 발생하는 토크는 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} T_{total} &= T_a + T_b + T_c \\ &= \frac{E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c}{\omega_m} \end{aligned} \quad (3.27)$$

식 (3.27)에서 T_a , T_b , T_c 는 각 상에서 발생하는 토크를 나타낸다. ω_m 은 모터의 회전 각속도를 나타낸다. 식 (3.25)과 식 (3.26)에 따라 Y결선 전동기에 비하여 독립상 전동기의 동일전원에서의 스위칭 상전압이 높은 것을 알 수 있다. 상전압이 더 높기 때문에 한상에 흐를 수 있는 전류의 크기가 커지게 되어 더 높은 토크를 발생 할 수 있다.

Fig. 3.13에서 알 수 있듯이 각상의 전기각의 위치는 Y결선 3상 전동기와 차이가 없기 때문에 독립 3상 역기전력 파형 역시 Y결선 3상 전동기와 동일하다. Fig. 3.15은 독립상 역기전력 파형을 나타낸 것이다.

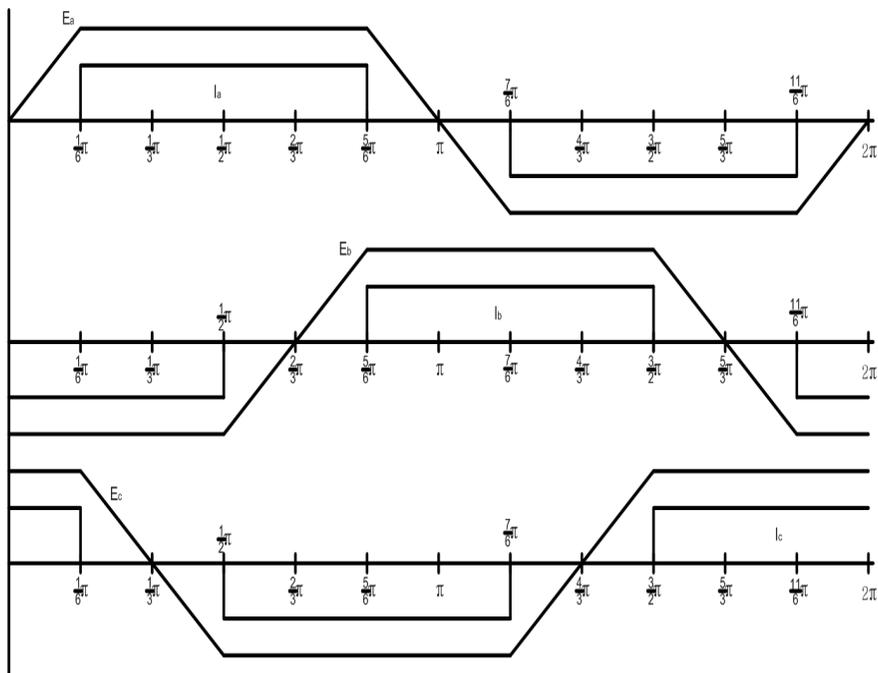


Fig. 3.15 Back-EMF waveforms of independent- connected BLDC motor

② 독립 다상 전동기

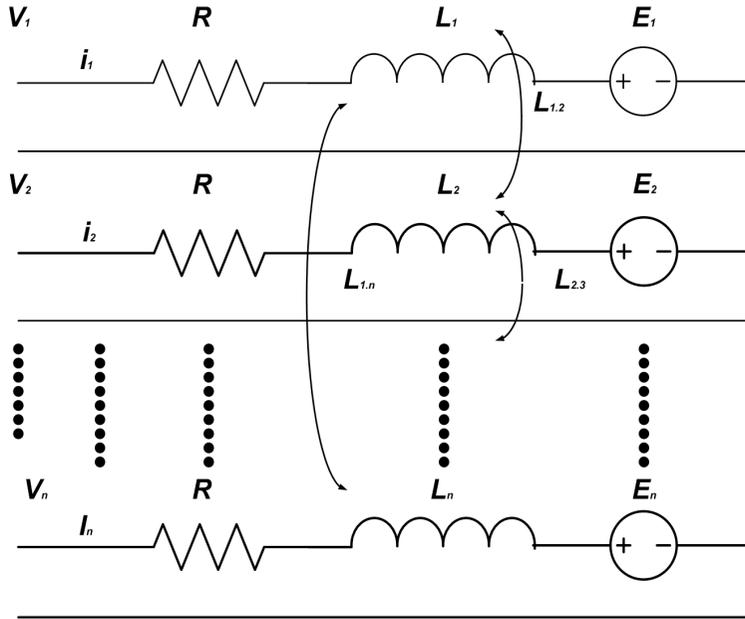


Fig. 3.16 Equivalent circuit of multi-phase motor(independent-connected)

Fig. 3.16은 독립 다상 등가회로를 나타낸 것이다. 독립상 BLDC전동기와 마찬가지로 각상의 권선이 분리 되어 있는 형태이다. 또한 다상의 특성에 맞게 3상이 아닌 여러 상으로 구성되어 있는 구조이다. 즉 독립 다상 전동기는 독립상 전동기에 다상 전동기를 혼합한 형태이다. Fig. 3.16에서 V_1, V_2, \dots, V_n ($n=1,2,\dots,n$)은 상전압을 나타낸다. R 은 권선저항, L_1, L_2, \dots, L_n ($n=1,2,\dots,n$)은 자기 인덕턴스, $L_{1,2}, L_{1,3}, \dots, L_{1,n+1}$ ($n=1,2,\dots, n$)은 상호인덕턴스, E_1, E_2, \dots, E_n ($n=1,2,\dots,n$)은 역기전력 이다.

독립상의 경우 각상의 상전류의 합은 0이 되지 않는다. 때문에 제어를 통하여 각상의 상전류의 합을 0으로 한다. 전압 방정식에 있어서도 독립다상전동기는 Y결선 다상 전동기와 유사하다. 다음은 1번상의 전압방정식이다.

$$V_1 = R\dot{i}_1 + \frac{di_1}{dt}(L_1 + L_{1,2} + L_{1,3} + \dots + L_{1,n+1}) + E_1 \quad (n=1, 2, \dots) \quad (3.28)$$

식(3.28)에서 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 값이 같다는 이상적인 전동기로 가정하면 식(3.29)과 같다. 또한 각상의 상전류의 합이 0이라고 하면 식(3.30)이 성립한다.

$$\begin{aligned} L_1 = L_2 = \dots = L_n = L_{self} \\ L_{1,2} = L_{2,3} = \dots = L_{1,n+1} = M \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$i_1 + i_2 + i_3 + \dots + i_n = 0 \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (3.30)$$

식(3.28)을 식(3.29)과 식(3.30)으로 정리하면 식(3.31)이 된다.

$$V_1 = Ri_1 + \frac{di_1}{dt}(L_{self} - M) + E_1 \quad (3.31)$$

식(3.31)에서 $L_{self} - M$ 을 인덕턴스 L 로 정의 하여 다상 전동기의 전압방정식을 구하면 식(3.32)이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

식(3.32)에서 n 은 1,2,3...이다. 행렬, L 은 $n+3 \times n+3$ 의 행렬이다. 이때 출력 토크는 다음과 같다.

$$T_{total} = \frac{E_1 i_1 + E_2 i_2 + \dots + E_n i_n}{\omega_m} \quad (3.33)$$

독립 다상과 Y결선 다상 전동기는 전압방정식에서 매우 유사하다. 독립상 전동기는 각상이 독립적으로 떨어져 있으면서 다상형태로 구성되어 있다. Fig. 3.17은 독립 7상 전동기의 등가회로이다.

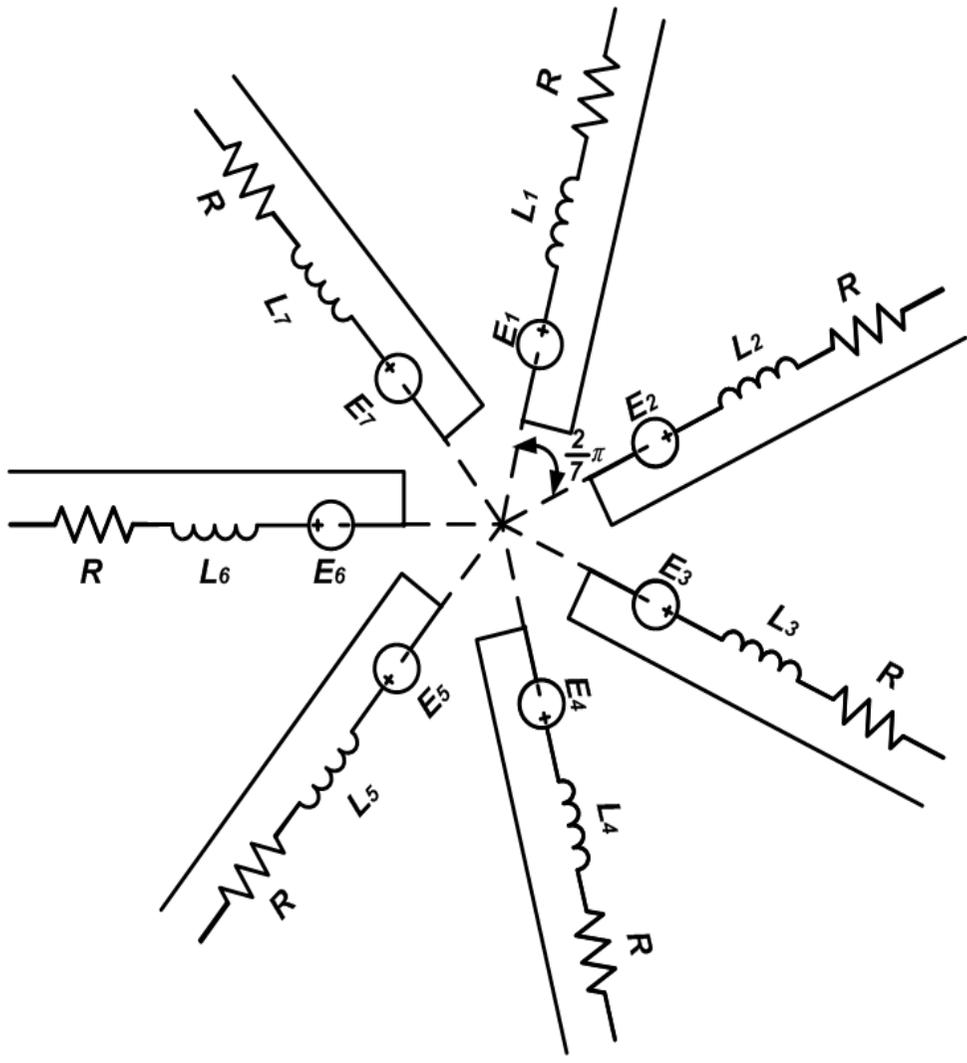


Fig. 3.17 Equivalent circuit of 7 phase motor(independent-connected)

제4장 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 구성도

현재 추진 전동기로 사용되는 다상 전동기는 독립 다상 전동기이다. 다상 전동기의 특성을 분석하기 위하여 기존의 3상 전동기와 비교하였다. 독립 다상 전동기의 특징은 3상 이상의 상수와 독립상 구조이다.

3상 이상으로 상수 증가에 따른 특성을 비교하기 위하여 Y결선 3상 BLDC 전동기와 Y결선 7상 BLDC 전동기를 시뮬레이션 하여 비교하였다. 또한 독립상 구조를 비교하기 위하여 Y결선 3상 전동기와 독립 3상 전동기를 비교하였다. 전동기의 모델링은 제어기와 전동기로 구성된다. 본 논문에서는 MATLAB 7.1과 Simulink 6.3을 통하여 시뮬레이션 하였다.

4.1.1 3상 및 7상 Y결선 전동기 모델링

① 3상 Y결선 BLDC 전동기 모델링

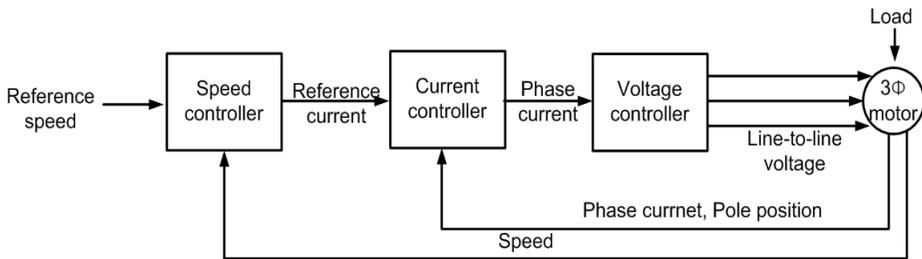


Fig. 4.1 Block diagram of BLDC motor system (Y-connected)

Fig. 4.1은 시뮬레이션 구성도를 나타낸다. 점선으로 표시된 것은 실제 시스템을 나타낸 것이다. 점선으로 표시된 부분은 시뮬레이션에서의 블록을 나타낸 것이다. 전동기의 구조에 따른 특성을 알아보기 위해 인버터 특성을 최소화하고 전압 제어기는 이상적인 경우로 가정하였다. Fig. 4.1는 실제 장치구성과 현재의 시뮬레이션 구성을 나타낸 것이다. Fig. 4.2는 Y결선 3상 BLDC전동기의 전체 시뮬레이션 구성이다.

Fig. 4.2의 전체 구성에서 BLDC전동기를 제외한 부분을 제어기로 보고 전체 시스템을 구성하였다. 제어기에서는 전동기에 선간 전압을 입력한다. 전동기는 선간전압에 따른 각상의 상전류와 속도, 위상각, 토크 등을 출력으로 할 수 있도록 구성하였다.

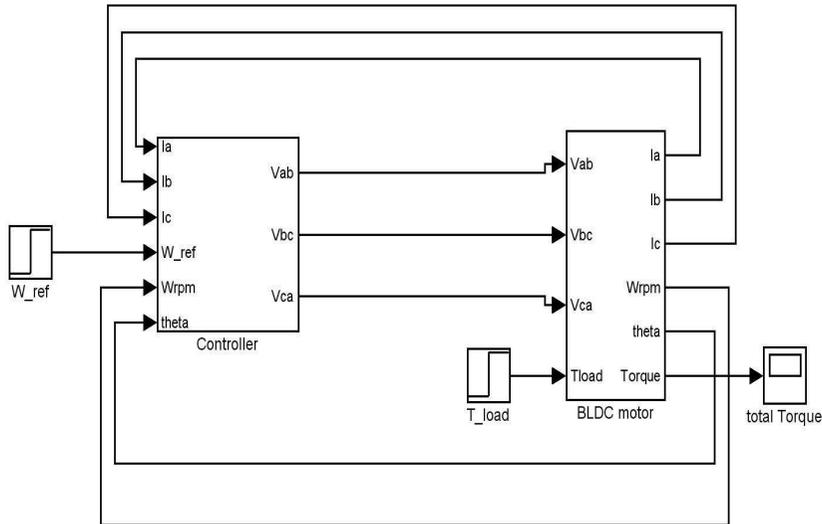


Fig. 4.2 Simulation block diagram for 3 phase BLDC motor control(Y-connected)

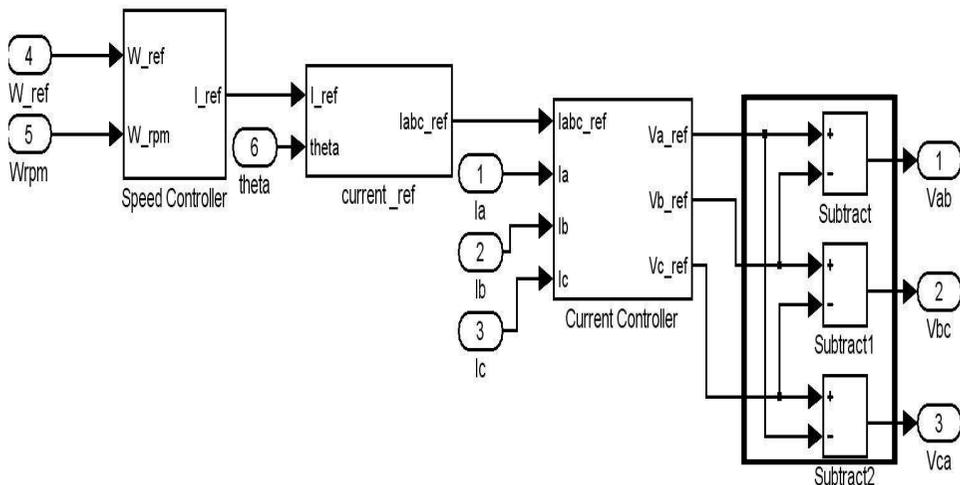


Fig. 4.3 Simulation block diagram for BLDC motor controller (3 phase Y-connected)

Fig. 4.3은 Y결선 3상 전동기의 제어부를 나타낸다. 제어부는 속도 제어기, 전압제어기가 포함된 전류 제어기로 구성된다. 전류 제어기의 출력이 각상의 상전압으로 출력된다. BLDC 전동기는 선간 전압의 형태가 인가되므로 Fig. 4.3에 표시된 부분에서 계산하여 선간 전압의 형태로 바꾸어 준다.

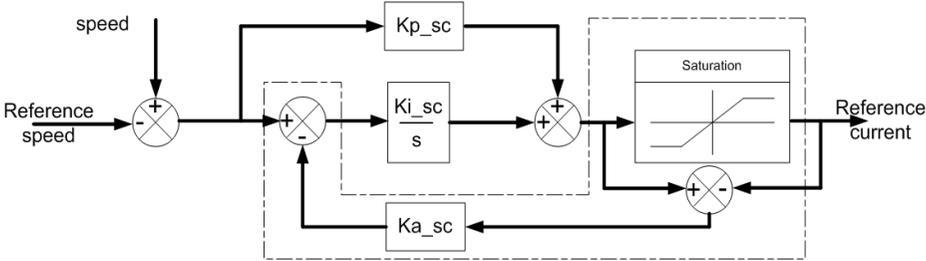


Fig. 4.4 Block diagram of speed controller

Fig. 4.4는 속도 제어기를 블록도로 나타낸 것이다. 여기서 Kp_sc 는 속도제어기의 비례상수, Ki_sc 는 속도 제어기의 적분 상수를 나타낸다. Ka_sc 는 anti-windup 제어기 이득이다. 속도 제어기는 기본적으로 모델링 오차에 비교적 강한 PI제어기를 이용하였다. 하지만 포화에 의한 누적 현상(windup)에 의해서 응답의 오버슈트 및 느린 정착 시간을 초래하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 Fig. 4.4의 점선으로 된 anti-windup제어기를 이용하였다. 상·하위 제한기는 지정해 놓은 제한 범위를 초과 할 경우 최대 값 또는 최소 값으로 유지 하도록 하는 블록이다. Fig. 4.5는 시뮬레이션에서의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다.

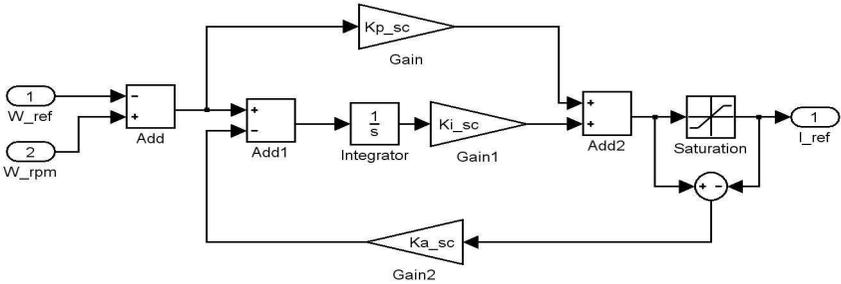


Fig. 4.5 Simulation block diagram for speed controller

Fig. 4.6의 시뮬레이션 블록은 기준전류와 전동기의 위치에 다른 3상의 기준 상전류를 만든다. 속도제어기의 기준 전류와 전동기의 위치에 따라 사각과 형태의 상전류를 만든다. Fig. 4.6에 사각형의 부분은 각 상전류 파형의 120°의 위상지연을 시뮬레이션 블록으로 나타낸 것이다.

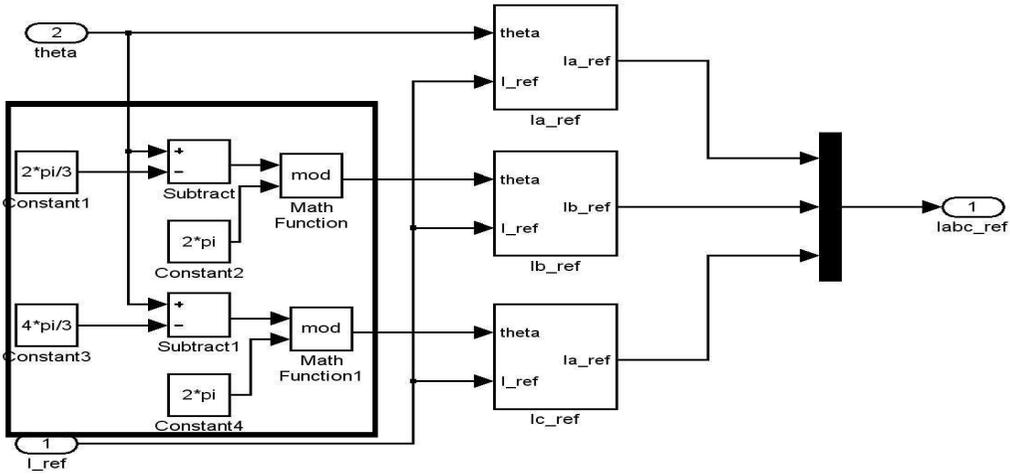


Fig. 4.6 Simulation block diagram for current reference (3 phase Y-connected)

Fig. 4.7은 전류 제어기의 블록도이다. 상전류 제어기는 현재의 상전류와 기준 상전류를 비교하여 전동기의 상전압을 결정한다. 마찬가지로 PI제어기와 anti-windup 제어기를 사용하였다. K_{p_cc} 는 상전류 제어기의 비례상수, K_{i_cc} 는 상전류 제어기의 적분 상수, K_{a_cc} 는 상전류 제어기의 anti-windup 제어기 이득이다. Fig. 4.8은 상전류 제어기의 시뮬레이션 블록이며, 각각 3개 부분으로 구분 되는 것을 알 수 있다.

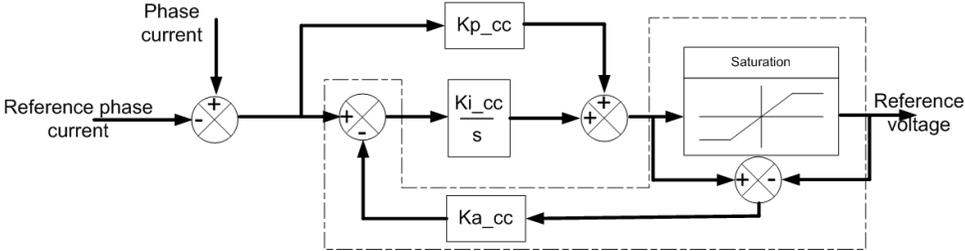


Fig. 4.7 Block diagram of current controller

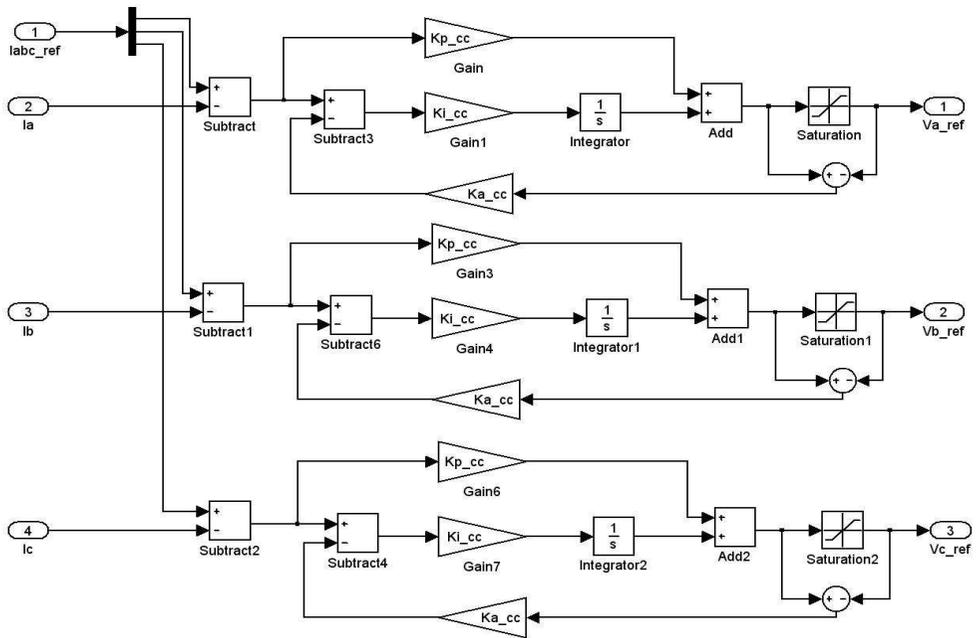


Fig. 4.8 Simulation block diagram for current controller
(3 phase Y-connected)

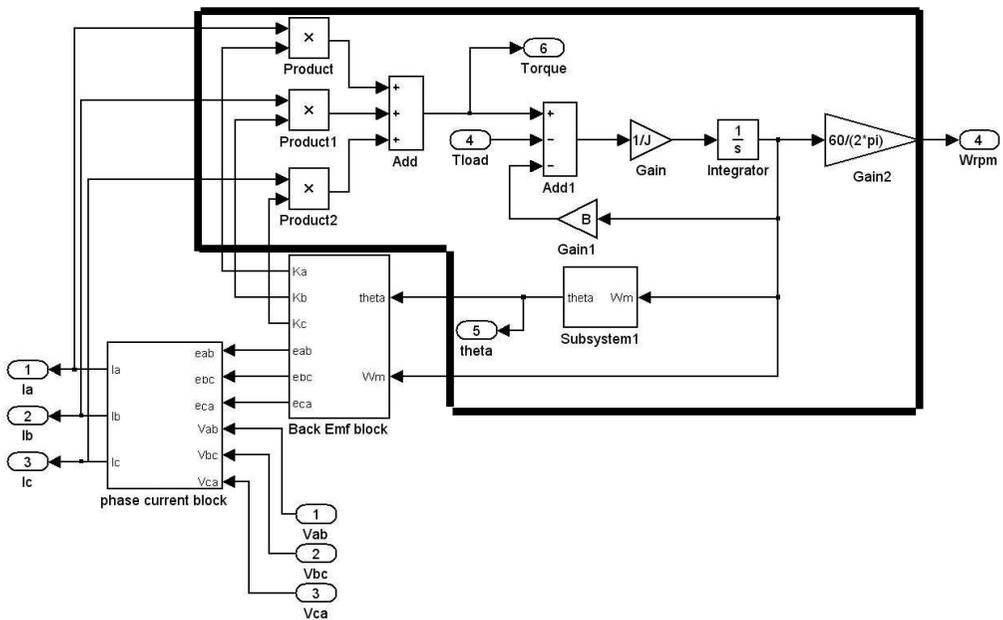


Fig. 4.9 Simulation block diagram for BLDC motor
(3 phase Y-connected)

Fig. 4.9는 BLDC 전동기의 시뮬레이션 블록은 나타낸 것이다. 시뮬레이션 블록은 역기전력 블록, 상전류블록 그리고 토크와 속도 계산식으로 구성된다. Fig. 4.9에서 선으로 표시 한 부분은 전체 토크와 속도를 나타낸 블록이다. 전체 토크는 식 (4.1)과 같다.

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (4.1)$$

T_e 는 출력 토크, P_e 는 전기적인 출력전력, ω_m 은 모터의 회전 각속도이다. 출력토크에 의한 운동방정식은 식(4.2)와 같다.

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (4.2)$$

$$\omega_m = \frac{1}{J} \int (T_e - T_{load} - B\omega_m) dt$$

식(4.2)에서 J 은 회전관성 모멘트, B 은 점성마찰계수, T_{load} 은 부하토크를 나타낸다. Fig. 4.10은 토크와 속도의 관계식을 블록도로 나타낸 것이다.

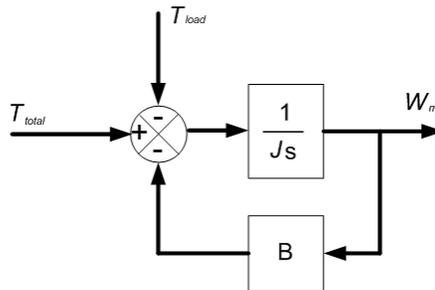


Fig. 4.10 Block diagram of torque

Y결선의 경우 선간 전압으로 전압 방정식을 나타내어 전류에 관하여 정리하면 식 (4.3)과 같다. V_{ab} 는 ab상의 선간 전압 R 은 선간 고정저항 I 은 ab상의 통전 전류, L_l 은 선간 동기 인덕턴스 e_{ab} 는 선간 역기전력이다. R 은 한상의 고정저항, L 은 한상의 동기 인덕턴스 이다.

$$V_{ab} = R_l I_1 + L_l \frac{dI_1}{dt} + e_{ab} \quad (4.3)$$

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{1}{L_l} (V_{ab} - R_l I_1 - e_{ab}) \quad : R_l = 2R, L_l = 2L$$

식(4.3)을 블록도로 나타내면 Fig. 4.11과 같다. Fig. 4.11을 시뮬레이션 블록으로 나타내면 Fig. 4.12와 같이 나타낼 수 있으며 이때 각 상의 상전류로 출력을 나타내기 위해 표시된 부분과 같이 계산한다.

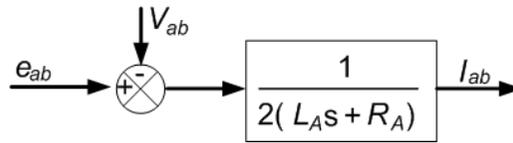


Fig. 4.11 Block diagram of line-to-line current (3 phase Y-connected)

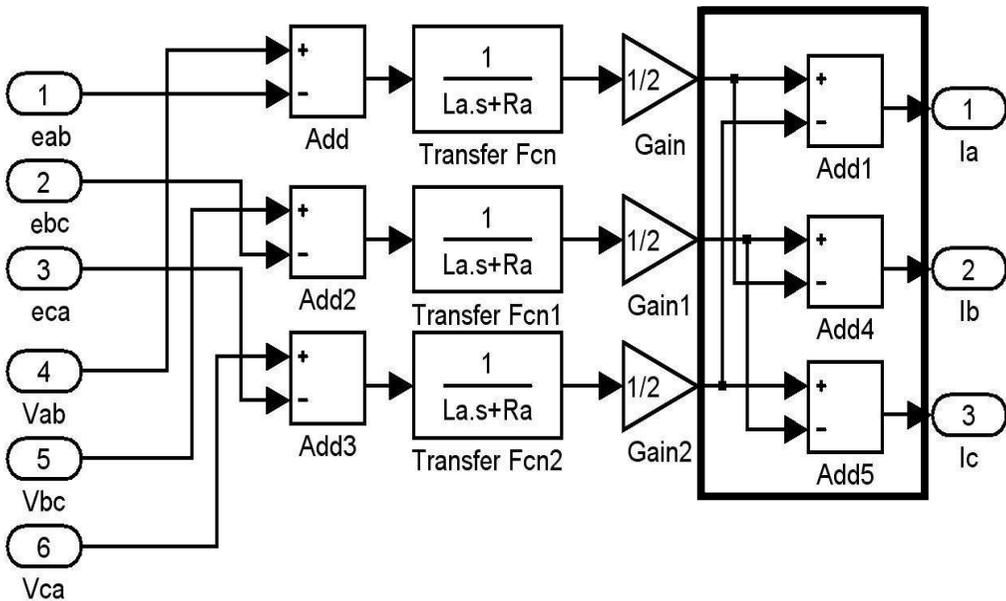


Fig. 4.12 Simulation block diagram for phase current (3 phase Y-connected)

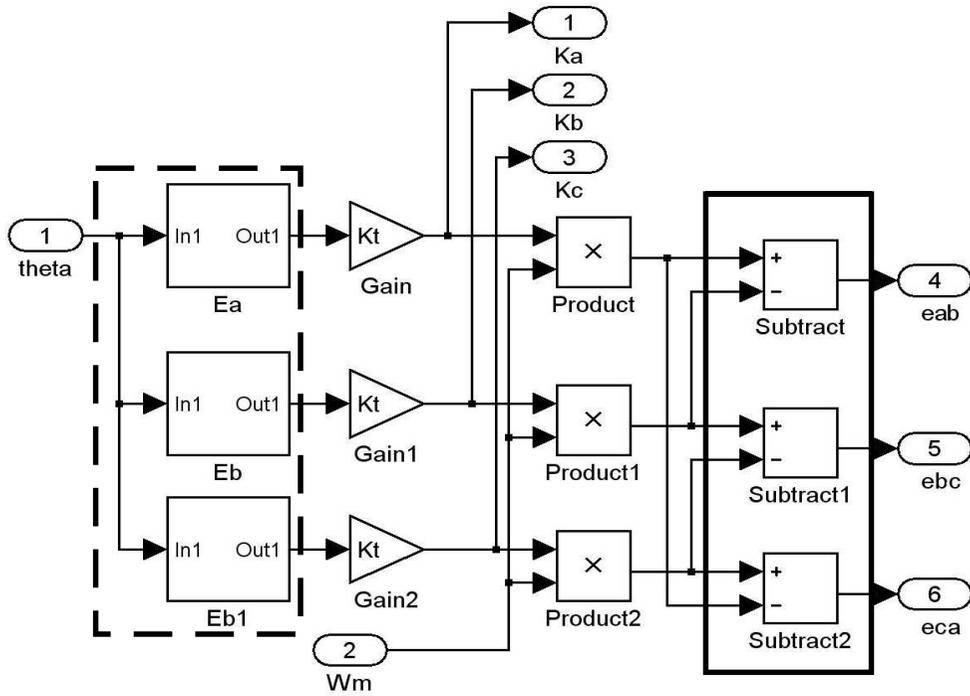


Fig. 4.13 Simulation block diagram for Back-EMF
(3 phase Y-connected)

Fig. 4.13은 역기전력파형을 생성하는 시뮬레이션 블록을 나타낸다. Fig. 4.13에서 점선 사각형 부분은 각도에 따라 120°의 위상차를 갖는 진폭 1의 사다리꼴 파형을 만들어 낸다. 이 역기전력 파형에 역기전력 상수 K_t 를 곱하고 모터의 회전 속도를 곱하면 한 상의 역기전력이 된다. 이것을 실선 사각형 부분 처럼 계산하면 선간 역기전력을 구할 수 있다.

② 7상 Y결선 BLDC 전동기 모델링

이 장에서는 다상 전동기의 특성을 알아보기 위하여 7상 전동기를 모델링하였다. 비교를 위하여 7상 전동기도 3상 전동기와 동일한 구조로 시뮬레이션 하였다.

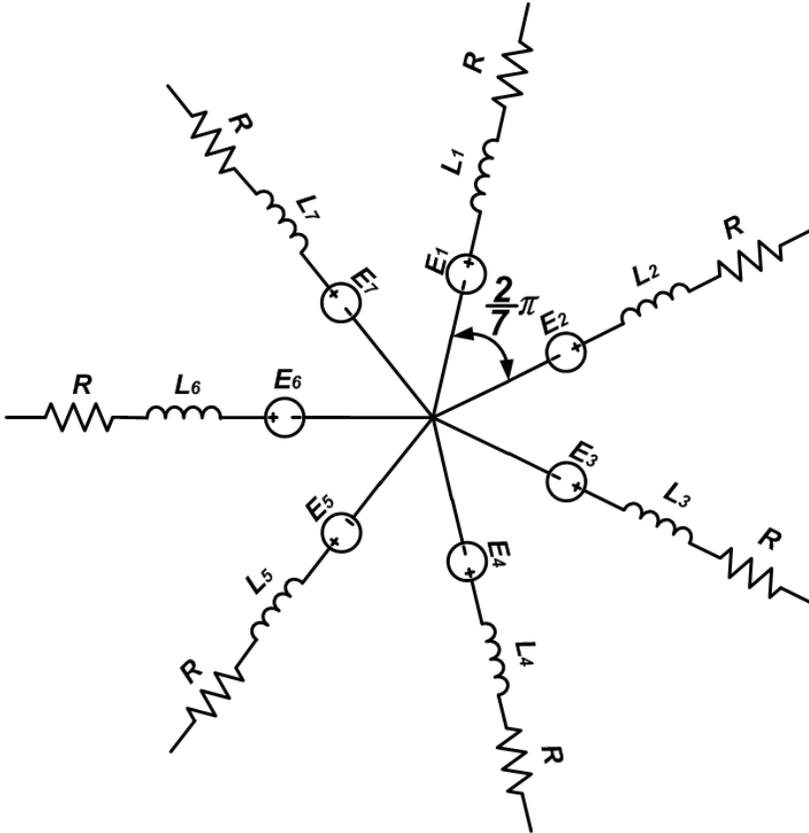


Fig. 4.14 Equivalent circuit of 7 phase motor(Y-connected)

Fig. 4.14은 Y결선 7상 BLDC 전동기의 등가회로이다. 다상 전동기의 차이점을 살펴 보기 위하여 7상 전동기를 시뮬레이션 하였다. 7상 전동기의 구조에서 각 상은 $\frac{2}{7}\pi$ 만큼의 위상각 차이를 갖는다.

7상 제어기의 경우에도 3상 제어기와 유사하게 구성되었다. 하지만 상수가 증가함에 따라 역기전력 파형과 상전류 각 상전압 등이 변화 했다. 또한 전동기의 전체적인 요소들도 변화 하게 된다. 다음은 전체 시뮬레이션 시스템이다.

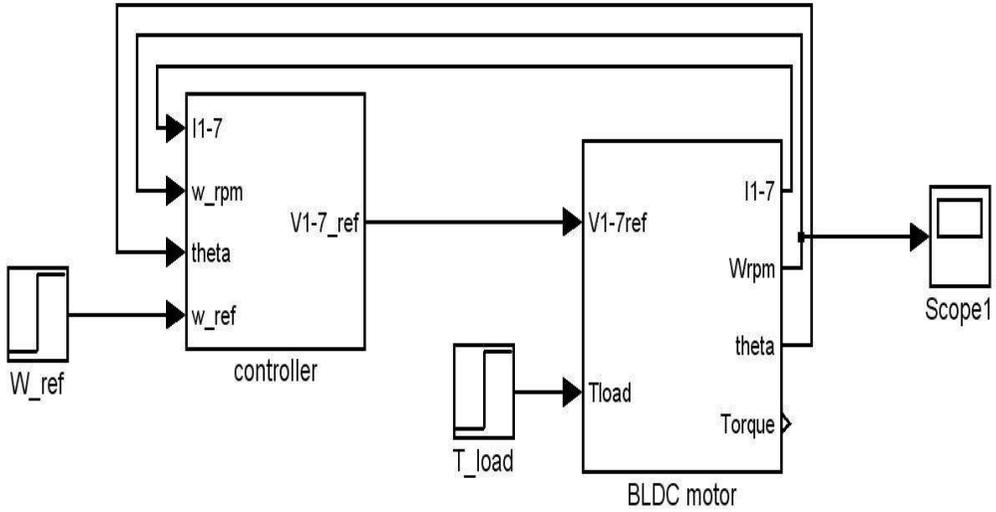


Fig. 4.15 Simulation block diagram for 7 phase BLDC motor control(Y-connected)

Fig. 4.15은 7상 전동기의 시뮬레이션 시스템이다. 3상 시스템과 유사하게 구성되었다. 차이점은 3상 역기전력과 상전류의 위상차가 $\frac{2}{7}\pi$ 라는 점과 6상이 도통되어 구동되는 점이다. Fig. 4.16는 제어 시스템이다. 제어 시스템은 속도 제어기와 기준 상전류 제어기로 구성되어 있다. 속도 제어기는 3상 제어기와 동일하게 anti-windup제어기를 이용하여 구성하였다. Fig. 4.17는 7상의 각 상에 대한 기준 전류를 모델링한 것이다.

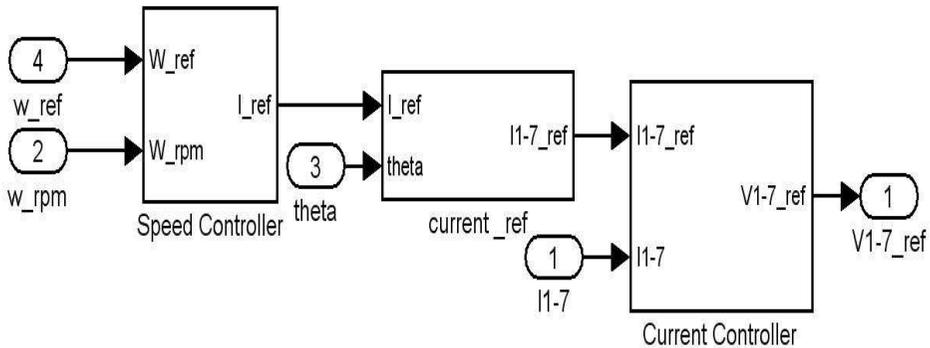


Fig. 4.16 Simulation block diagram for BLDC motor controller (7 phase Y-connected)

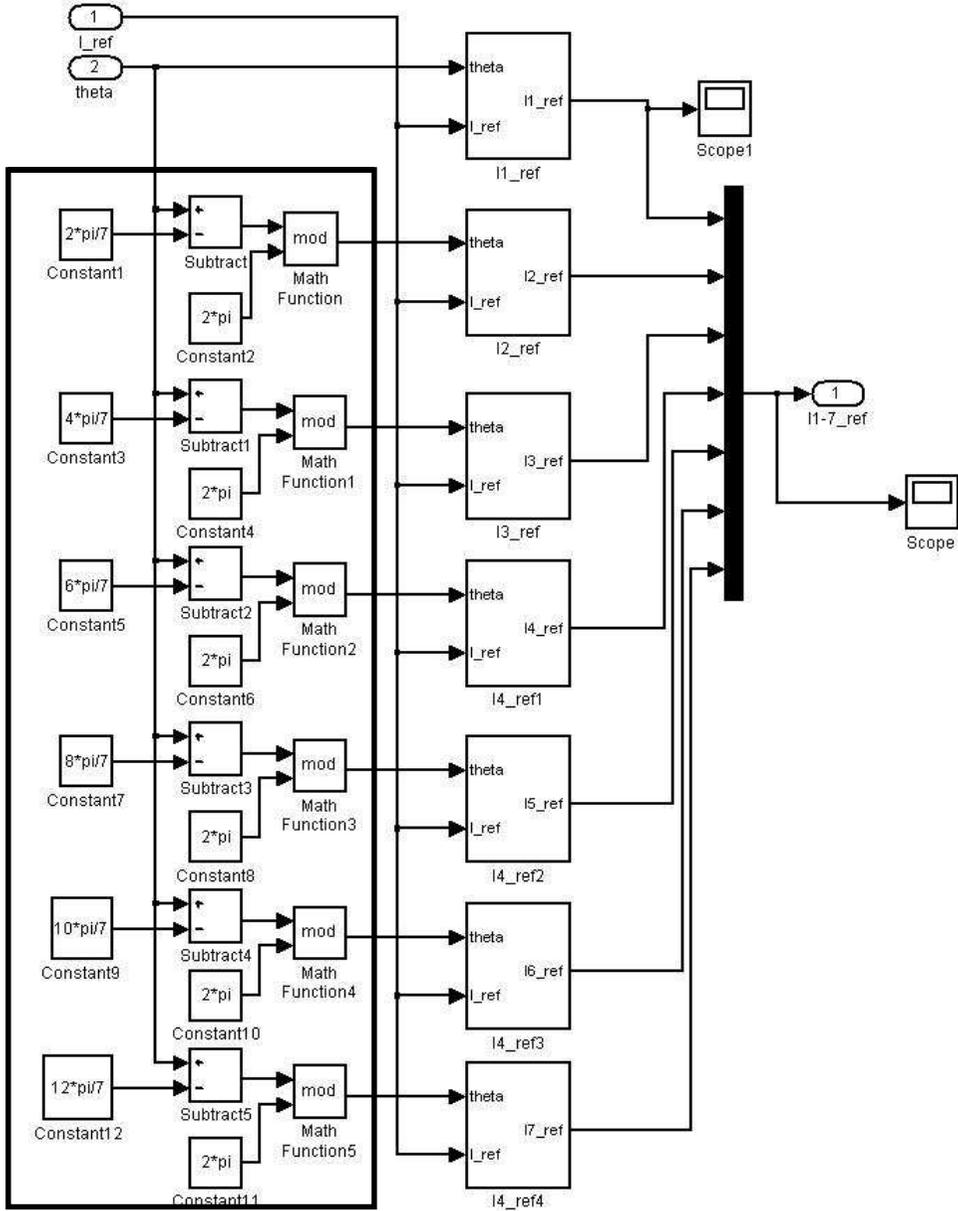


Fig. 4.17 Simulation block diagram for current reference
(7 phase Y-connected)

Fig. 4.17에서 표시된 부분은 각도에 따른 기준 상전류 파형의 위상을 지연시키는 것이다. I1-7_ref는 기준 전류 1~7까지를 버스 형태로 묶어서 데이터를 처리 한 것이다. Fig. 4.18은 상전류 제어를 나타낸 것이다. 3상과 동일하게

PI제어기를 기본으로 하여 anti-windup제어기를 사용하였다. Fig. 4.18에서는 current controller로 표시 되었다. I1-7은 상전류를 나타낸 것이다. V1-7 선 간 전압을 나타낸다.

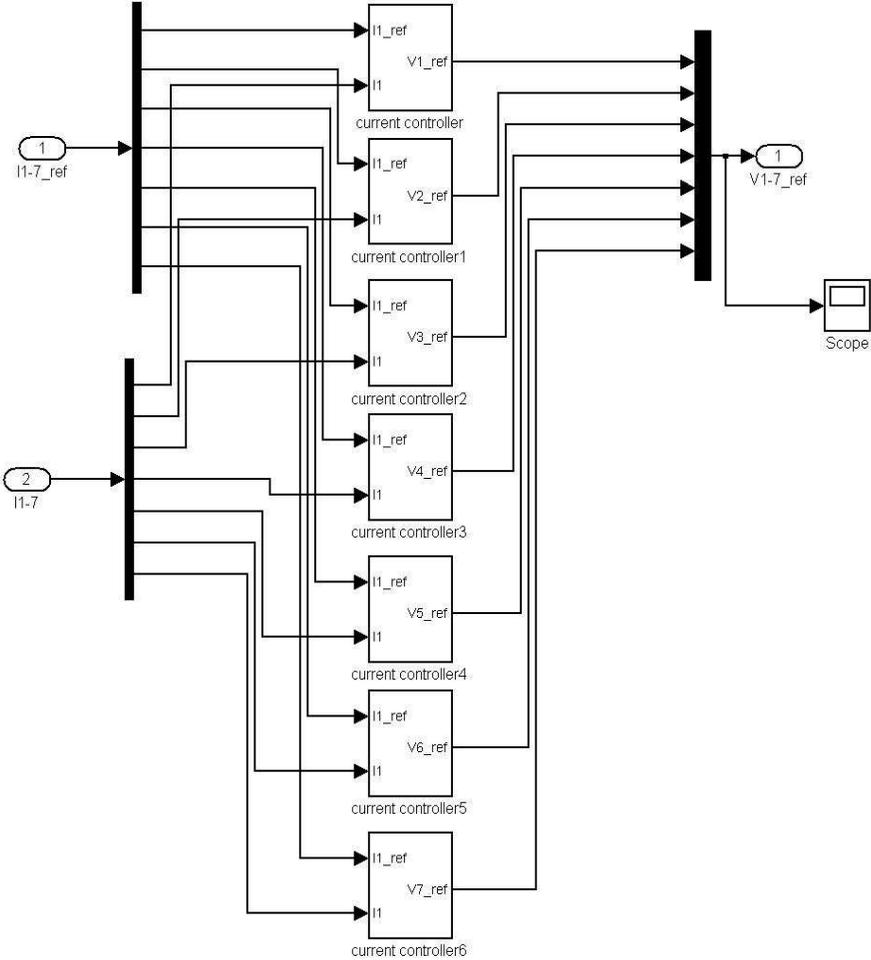


Fig. 4.18 Simulation block diagram for current controller (7 phase Y-connected)

Fig. 4.19는 7상 Y결선 BLDC 전동기의 시뮬레이션 전체블록을 나타낸 것이다. 이것은 상전류 블록, 역기전력 블록, 토크 블록으로 구성되며 Y결선 3상 전동기와 유사하게 구성 하였다. Fig. 4.20은 속도와 토크를 계산하는 블록이다.

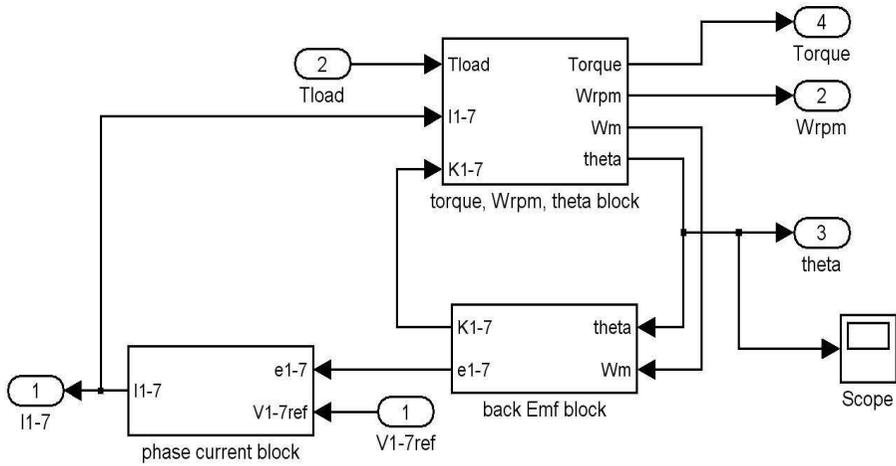


Fig. 4.19 Simulation block diagram for 7 phase BLDC motor (Y-connected)

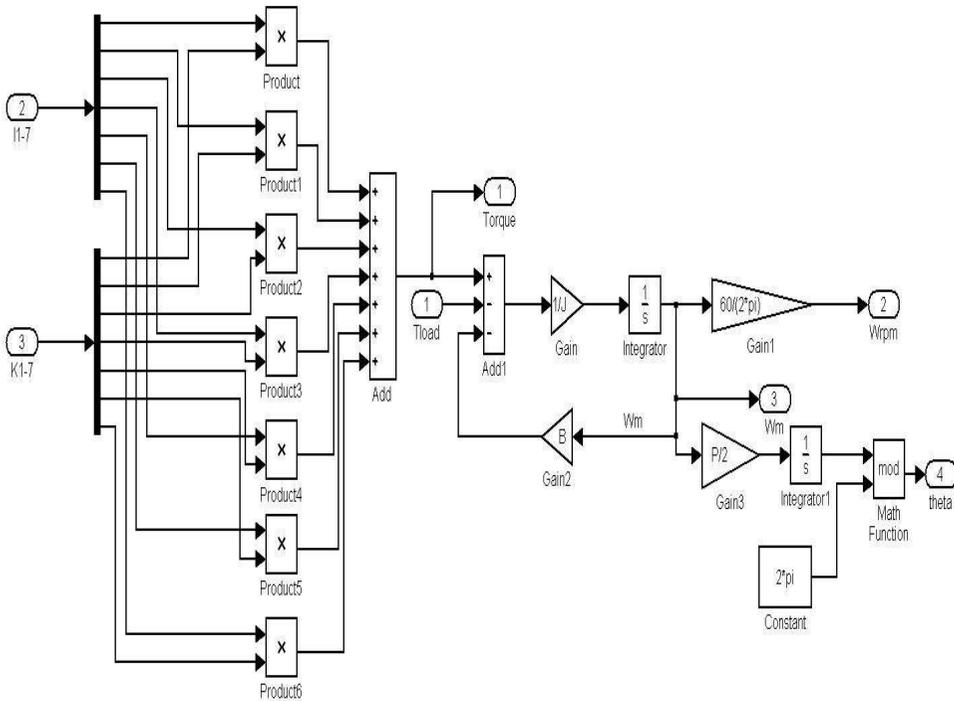


Fig. 4.20 Simulation block diagram for torque and speed

Fig. 4.21은 상전류 블록을, Fig. 4.22는 7상 역기전력 블록을 나타낸 것이다. 3상 Y결선과 유사하게 블록을 구성한 것을 알 수 있다.

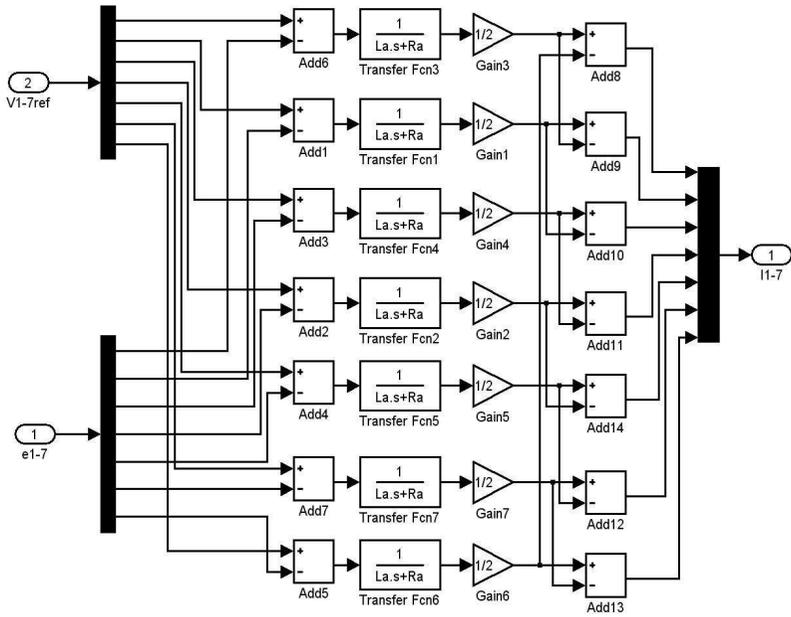


Fig. 4.21 Simulation block diagram for phase current (7 phase Y-connected)

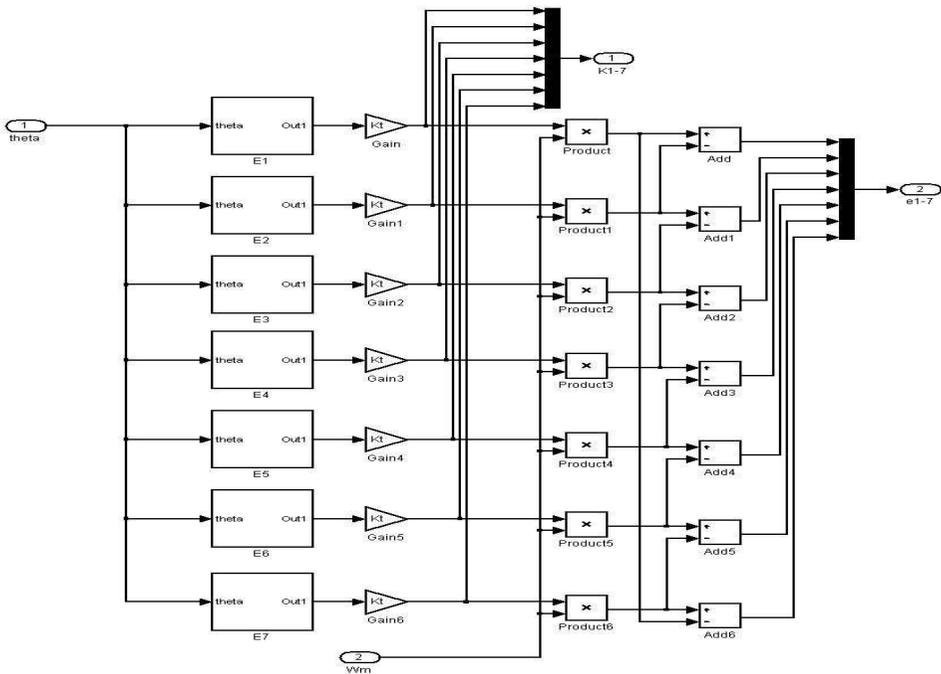


Fig. 4.22 Simulation block diagram for Back-EMF (7 phase Y-connected)

4.1.2 3상 Y결선 및 독립 3상 모델링

다상전동기는 전동기의 상수와 관계가 있다. 때문에 시뮬레이션에서 전동기의 스위칭보다는 전동기의 실제 식에 의한 유도과 전동기의 시뮬레이션에 치중하여 모델링 하였다. 독립상 구조의 전동기 경우에는 기존의 3상 전동기와 다른 인버터 구조를 지니고 있다.

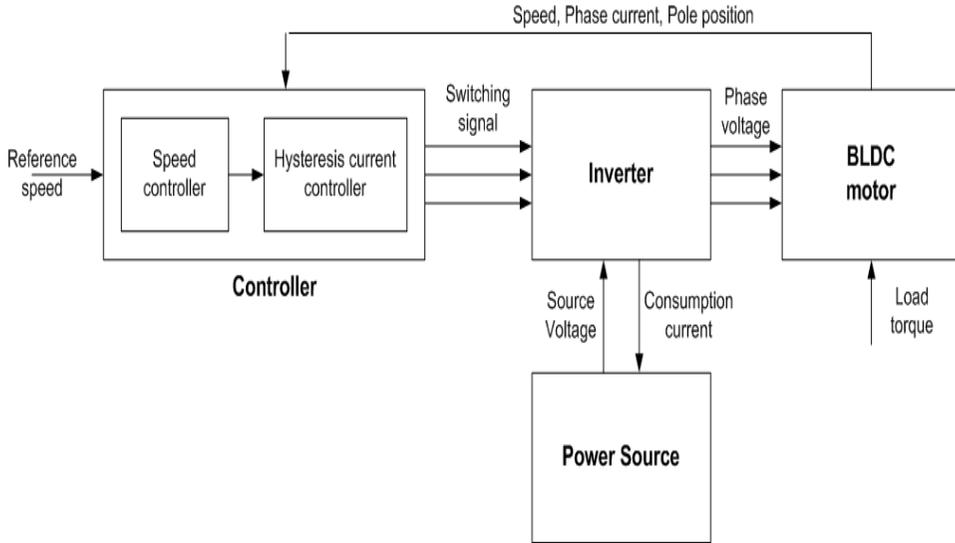


Fig. 4.23 Block diagram of BLDC motor system
(Y-connected, independent-connected)

Y결선 3상 전동기와 독립 3상 시스템의 비교를 위하여 Fig. 4.23 같이 시뮬레이션을 구성 하였다. 기존의 시뮬레이션 구성보다 좀 더 실제 시스템에 유사하도록 인버터 스위칭에 대한 모델링을 기술 하였다. Fig. 4.23에서 보는 바와 같이 제어기와 인버터 전동기 전원부분으로 구성된다. 제어기는 상전류와 속도 극의 위치를 신호로 받아 스위칭 신호를 출력하는 시스템으로 구성하였다. 스위칭 신호는 Hysteresis제어기를 이용하였다. 전원 부분은 3상 전원을 입력으로 받아 정류하여 직류 전원으로 공급하며 사용 전류의 영향을 받도록 하였고, 인버터는 제어기의 스위칭 신호에 따라 전원 부분에서 공급된 전원을 출력 하도록 하였다. BLDC 전동기는 앞서 모델링한 전동기의 모델링 식을 사용하였다.

① 3상 Y결선 BLDC전동기 모델링

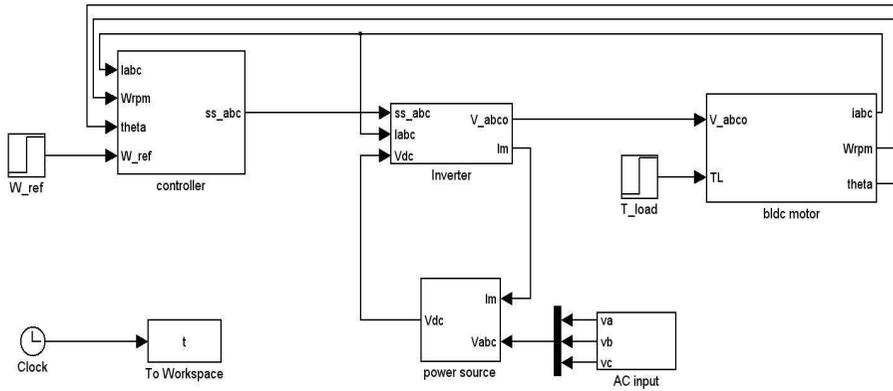


Fig. 4.24 Simulation block diagram for BLDC motor system(Y-connected)

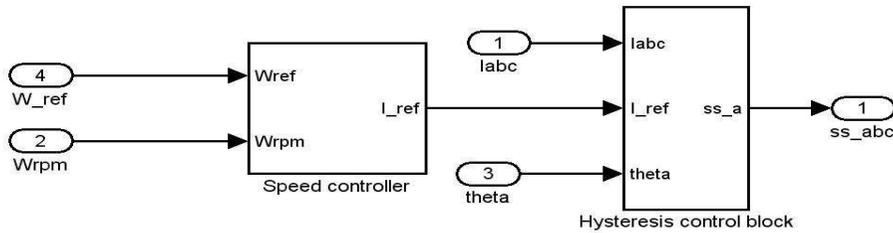


Fig. 4.25 Simulation block diagram for BLDC motor controller (Y-connected)

Fig. 4.24은 3상 전동기 시뮬레이션 시스템이다. 전동기 시뮬레이션은 앞서 언급한 Y결선 3상 전동기에 비하여 좀더 인버터와 스위칭 특성등을 고려하여 모델링 하였다.

Fig. 4.25는 제어기 구성도이다. 이것은 속도 제어기와 Hysteresis 제어기로 구성된다. 속도 제어기는 앞서 언급한 PI제어기로 anti-windup을 적용하여 구성하였다. 앞서 언급한 속도 제어기와 동일하기 때문에 언급하지 않는다. Hysteresis 제어기는 기준 전류를 받아 스위칭 신호를 내보낸다. Fig. 4.26는 Y결선 BLDC전동기와 인버터의 결선을, Fig. 4.27는 상전류와 Hysteresis 제어기의 스위칭 방법을 보여 준다. 각 스위칭은 스위칭 소자와 다이오드를 위한 스위칭으로 나누어진다

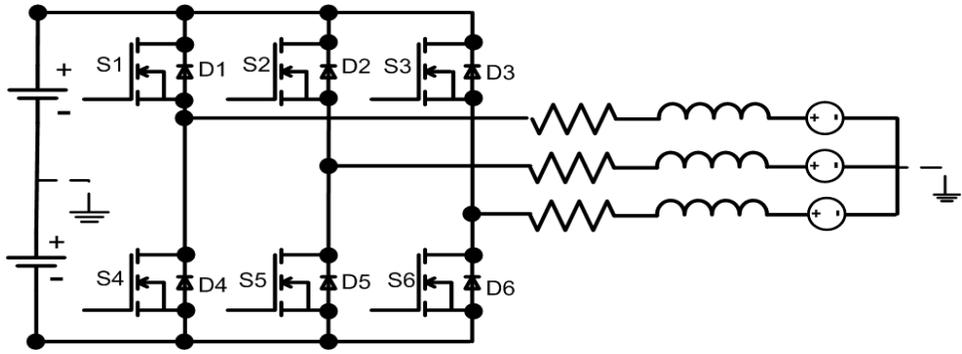


Fig. 4.26 Inverter schematic diagram of Y-connected BLDC motor(3 phase)

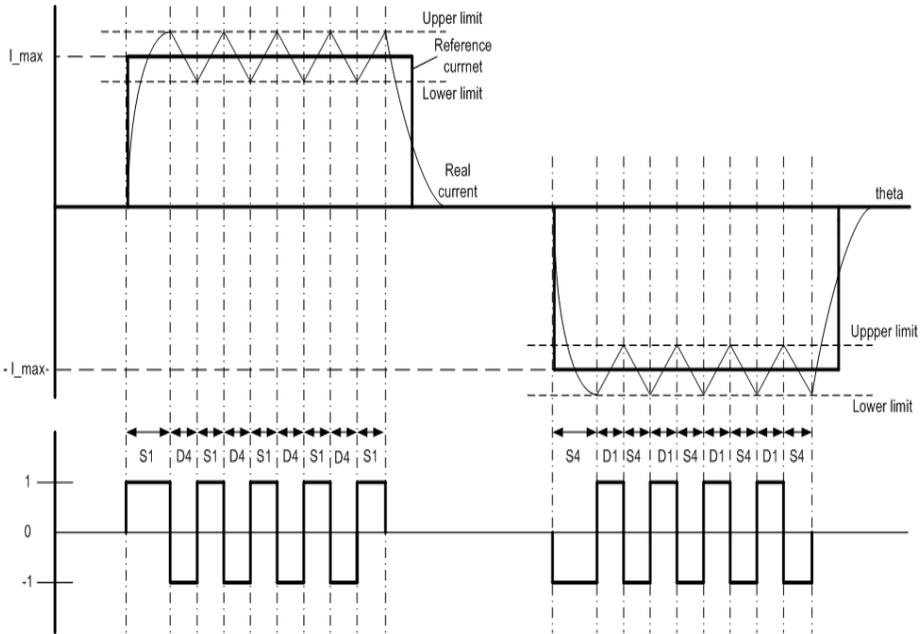


Fig. 4.27 Hysteresis current control for phase A(Y-connected)

스위칭 방법은 표 4.1과 같은 방식으로 스위칭하게 된다. 상위 범위와 하위 범위는 본 논문에서는 기준 전류의 10%씩의 범위를 두었다. 범위가 짧아지면 스위칭 주파수가 높아지게 된다. Hysteresis 제어기는 기준전류와 현재의 상전류 값 위상각 등을 입력으로 받아 스위칭 패턴에 따라 스위칭 하게 된다. Fig. 4.28은 Hysteresis 블록도이다. Fig. 4.27과 표 4.1에 따라 스위칭 패턴을 Fig. 4.29에 a상 Hysteresis 제어기로 구성하였다[32].

Table 4.1 Switching pattern of hysteresis current controller

Current state		Switching	
$I_a > 0$	$I_a < \text{Lower limit}$	S1_on	
	$I_a > \text{Upper limit}$	S1 off, D4 on	
	Lower limit $< I_a < \text{Upper limit}$	$\frac{d}{dt} I_a > 0$	S1_on
		$\frac{d}{dt} I_a < 0$	S1 off, D4 on
$I_a < 0$	$I_a < \text{Lower limit}$	S4 on	
	$I_a > \text{Upper limit}$	S4 off, D1 on	
	Lower limit $< I_a < \text{Upper limit}$	$\frac{d}{dt} I_a > 0$	S4 on
		$\frac{d}{dt} I_a < 0$	S4 off, D1 on

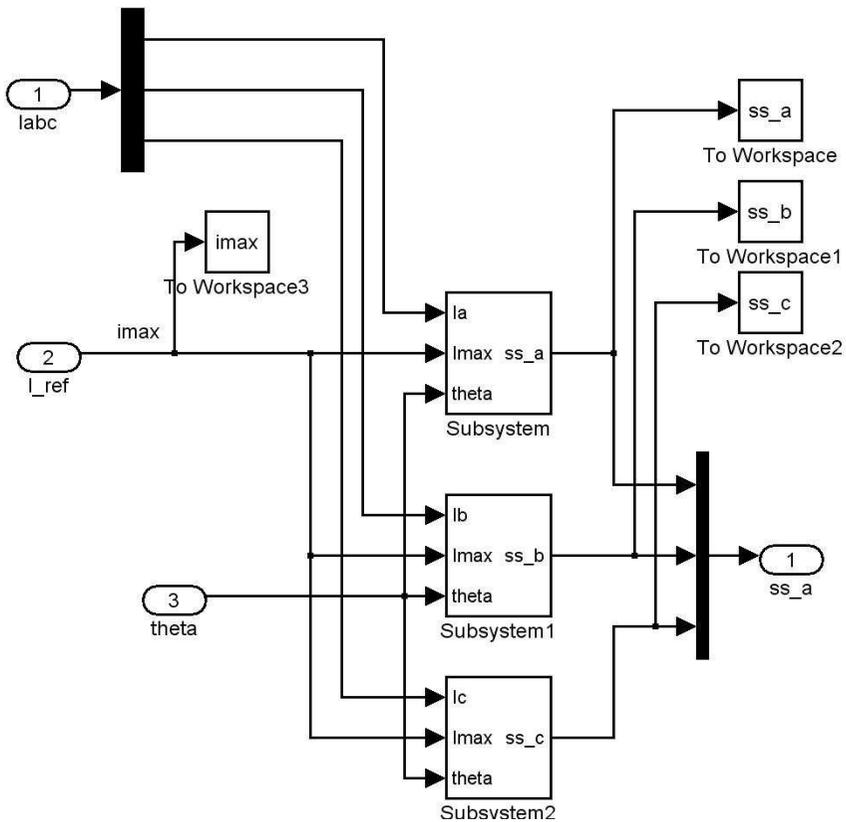


Fig. 4.28 Simulation block diagram for hysteresis current controller(Y-connected)

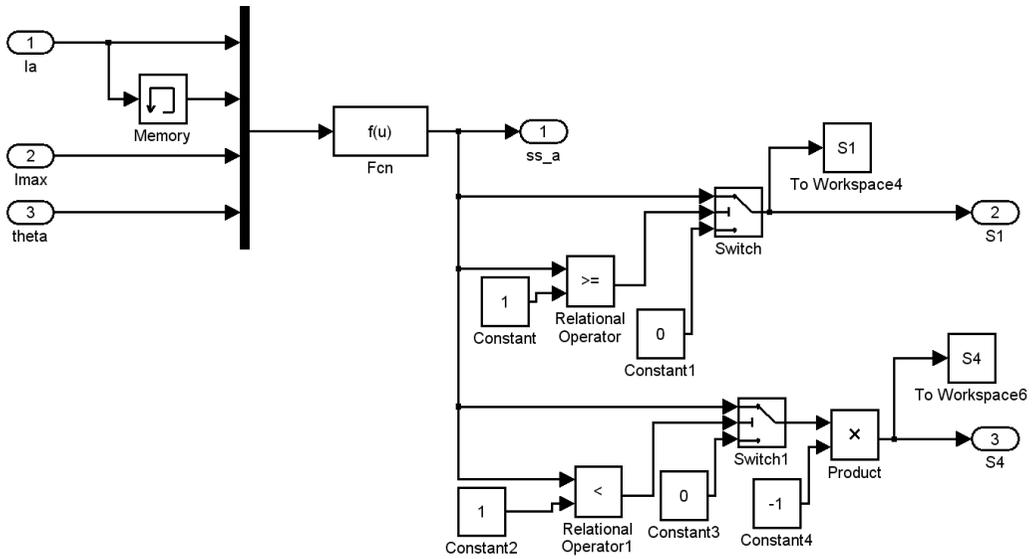


Fig. 4.29 Simulation block diagram of hysteresis current controller for phase A(Y-connected)

Fig. 4.29에서 I_a 는 a상의 상전류, I_{max} 는 기준 전류, θ 는 전기각을 나타낸다. S1은 Fig. 4.26의 S1 스위치의 스위칭 신호를 나타낸다. S4는 스위치 S4의 스위칭 신호를 나타낸다.

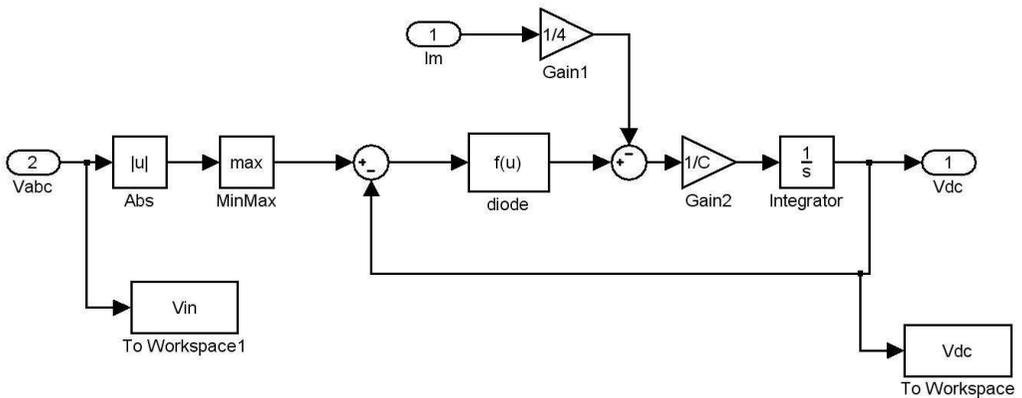


Fig. 4.30 Simulation block diagram for power source

Fig. 4.30은 전원 공급원이다. 여기서 V_{abc} 는 3상 전원이고 I_m 은 인버터에서 소비 되는 전류량 이며 V_{dc} 는 인버터에 전원으로 공급되는 전압이다. 전동기의 모델링은 앞서 모델링한 3상 Y결선의 모델링과 동일하다.

② 3상 독립상 구조 BLDC 전동기 모델링

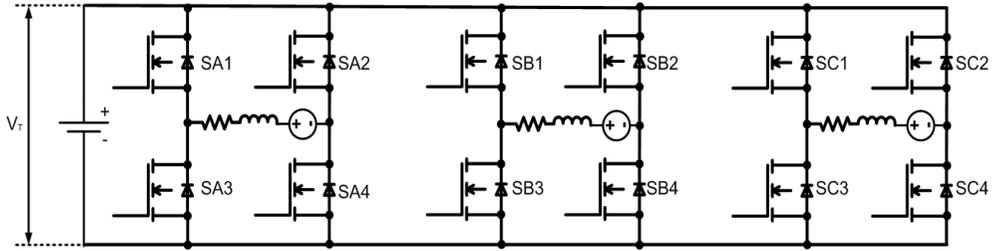


Fig. 4.31 Inverter schematic diagram of independent-connected BLDC motor(3 phase)

독립상 전동기는 각상이 분리되어 있는 형태로 구성된다. 하지만 그 외의 상의 배치와 상의 구성은 Y결선의 형태와 동일하다. Fig. 4.31은 독립상 BLDC 전동기와 인버터의 결선도이다. 각상은 H-bridge에 한상씩 연결되어 있는 형태이다. 전동기의 각상은 BLDC 전동기와 같이 동일하게 120° 간격으로 배치되어 있다. 때문에 역기전력 과형은 3상 전동기와 동일한 형태이다. Fig. 4.32는 BLDC 전동기의 등가 회로 이다.

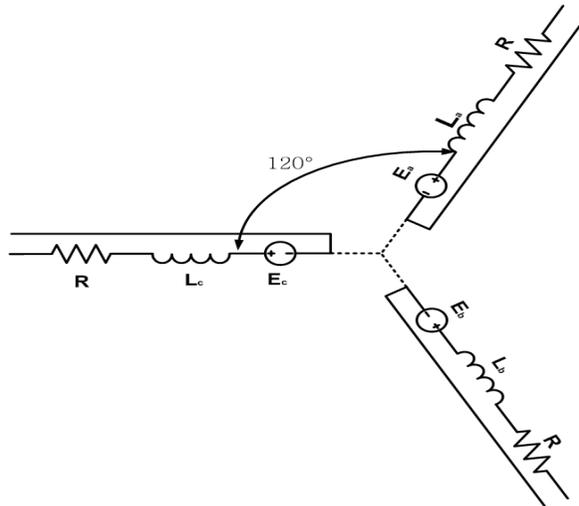


Fig. 4.32 Equivalent circuit of 3 phase motor(independent-connected)

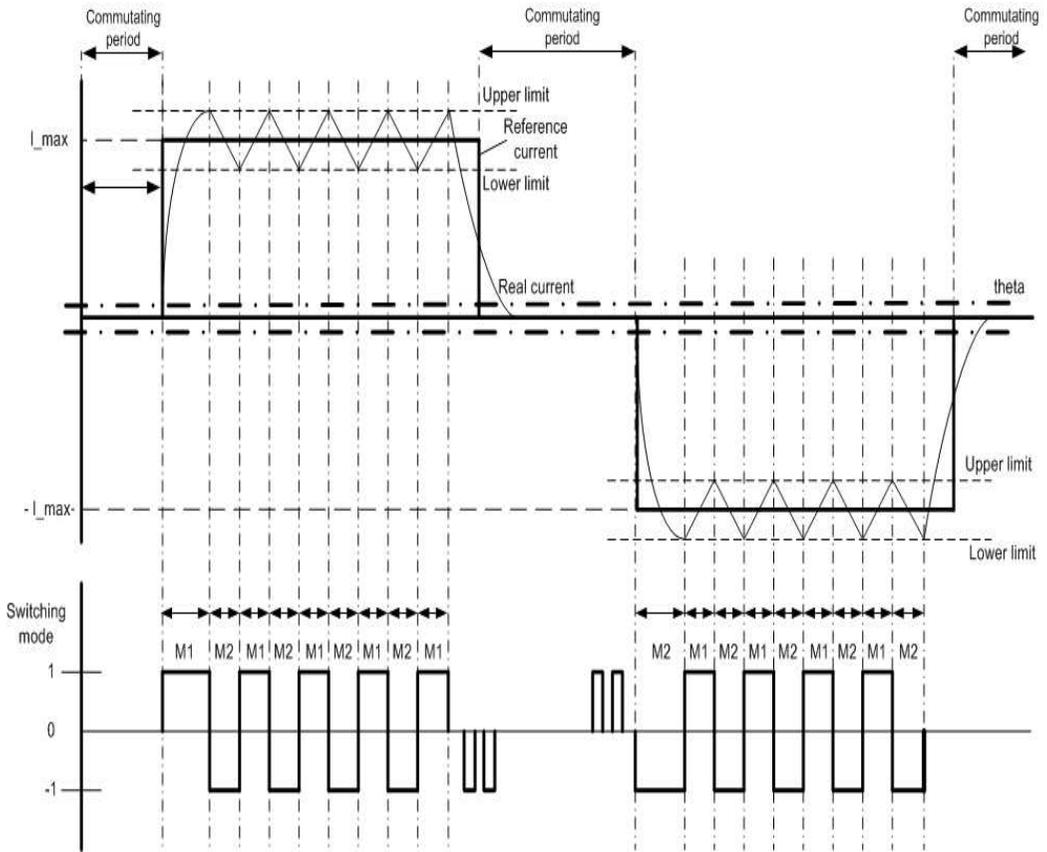


Fig. 4.33 Hysteresis current control for phase A
(independent-connected)

독립상의 제어에 있어서도 Hysteresis제어기를 도입하였다. Fig. 4.33에서 한상에 흐르는 상전류를 나타낸다. 이때 스위칭은 M1과 M2 2가지 스위칭 모드로 나뉘어 진다. Fig. 4.33에 스위칭 모드가 M1일 때 Fig. 4.31의 인버터 스위칭은 SA1과 SA4가 동작하게 되고, M2일 때는 SA2와 SA3가 동작하게 된다. SA1과 SA4, SA2와 SA3는 동시에 스위칭 된다. Fig. 4.35는 독립상에서 Hysteresis 제어기를 나타낸다. 독립상 Hysteresis 제어기는 상전환 구간에서 Y결선과 한 상이 연결되는 지점이 없어진다. 하지만 전동기가 구동됨으로 역기 전력에 의한 전류가 발생하게 되고, 이에 따라 상전환 구간에서 독립상의 경우 토크 맥동이 크게 발생하게 된다. 이러한 점을 보완하기 위하여 스위칭을 통하여 상 전환 시점에서 전류의 맥동이 발생하지 않도록 스위칭을 통하여 독립상의 전류를 제한 한다. 다음은 독립상 전동기를 모델링 한 것이다.

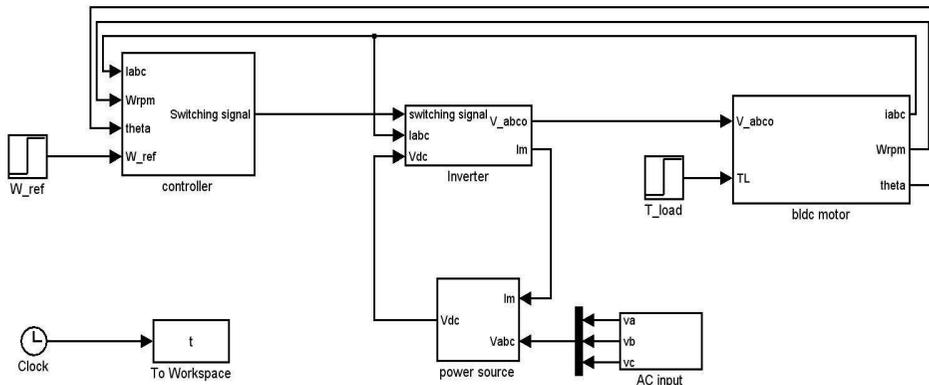


Fig. 4.34 Simulation block diagram for BLDC motor system(independent-connected)

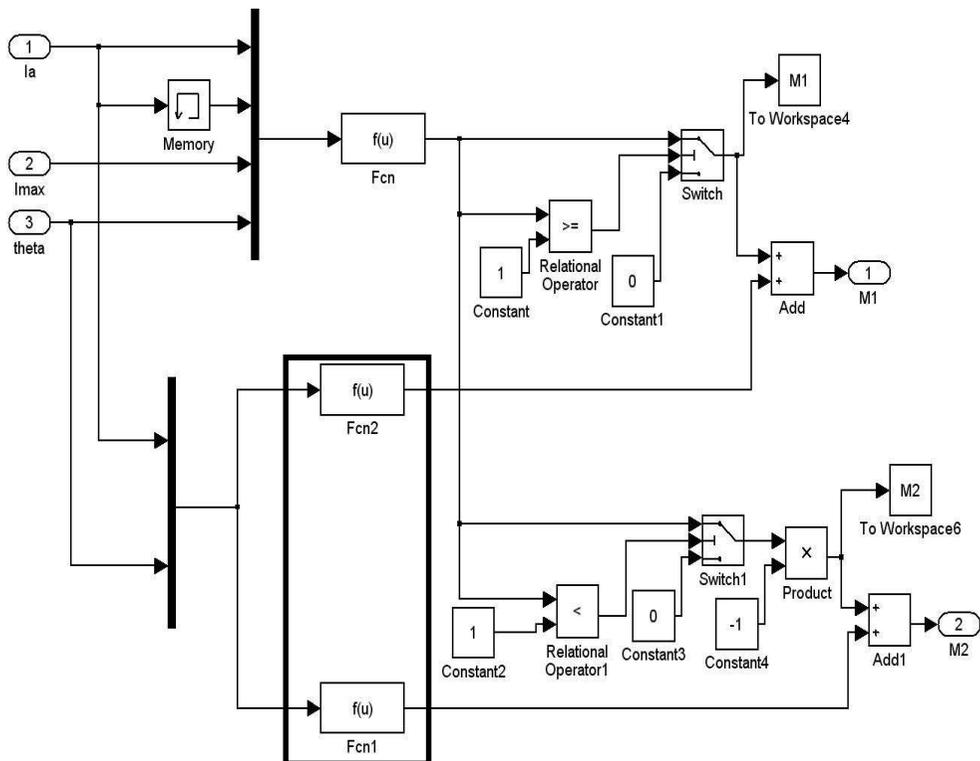


Fig. 4.35 Simulation block diagram of hysteresis current controller for phase A(independent-connected)

Fig. 4.35에서 표시된 부분은 위상 각과 현재 상전류 값을 받아서 위상각이 상전환 시점일 때 상전류의 흐름이 0.1A이상 일 경우 상전류 흐름의 반대 방

향으로 스위칭하는 신호를 내보내어 상전류의 흐름을 저장하는 블록이다. Fig. 4.36 인버터시스템을 블록으로 나타낸 것이다. 인버터 시스템은 스위칭 신호에 시스템 전압을 인가하여 스위칭 하도록 구성하였다. 인버터 시스템에서는 한상에 걸리는 전압이 기존의 Y결선에서는 전체 전압의 절반이었지만 현재 시스템에서는 전체 전압이 인가 되도록 하였다. BLDC전동기의 모델링에서도 상전류 블록의 모델링에서 선간전압이 아닌 상전압으로 정리 하였다.

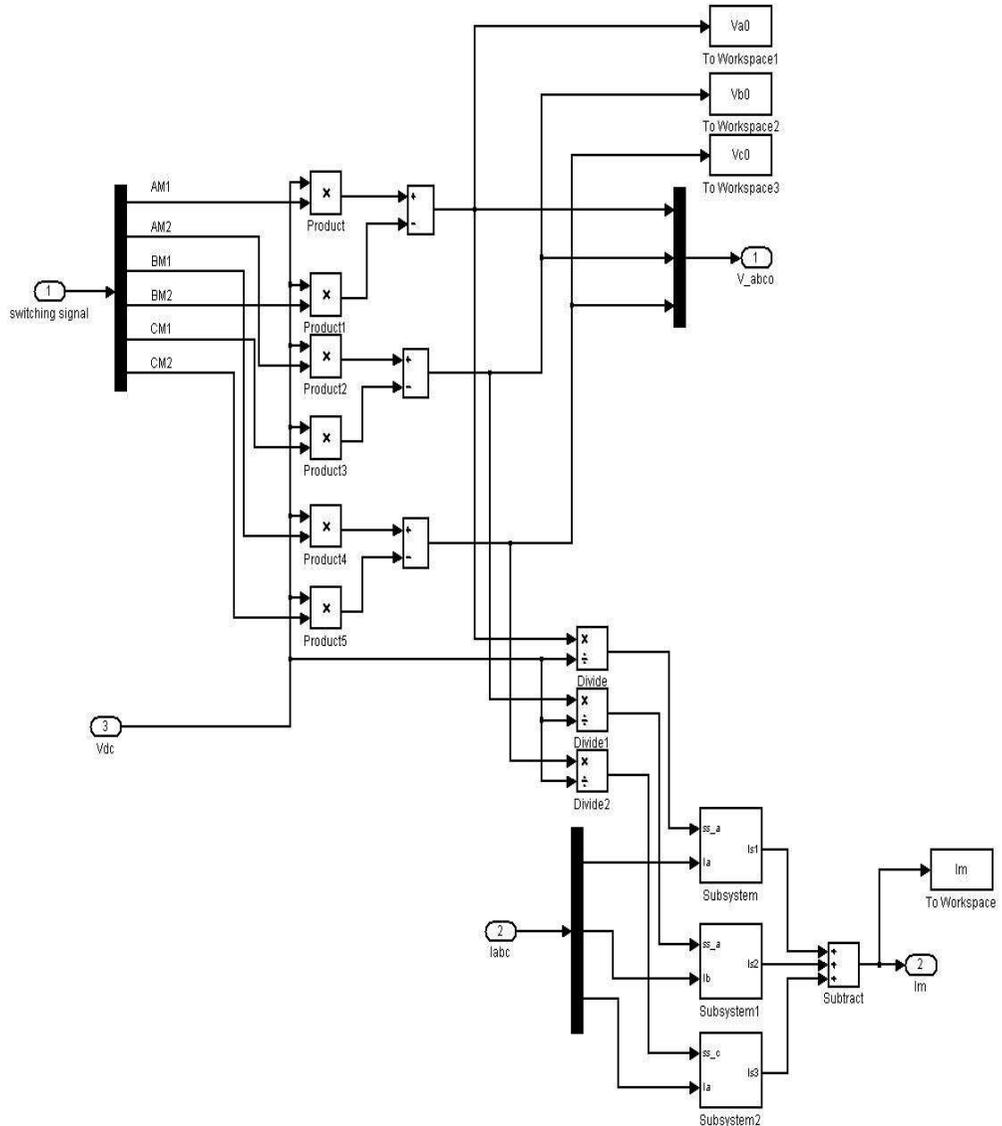


Fig. 4.36 Simulation block diagram for inverter system

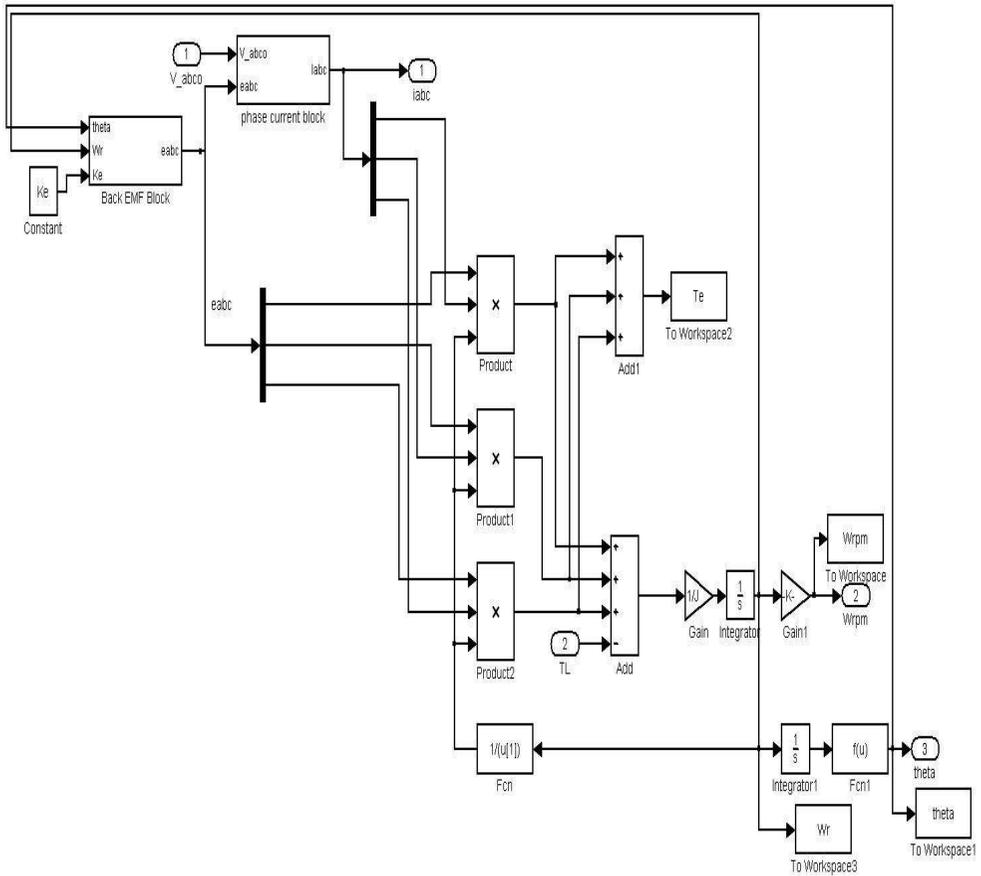


Fig. 4.37 Simulation block diagram for 3 phase BLDC motor (independent-connected)

Fig. 4.37는 독립 3상 BLDC전동기의 시뮬레이션 블록이다. 기존의 3상 블록과는 토크와 속도의 관계식이나 역기전력 부분에서는 동일하나 상전류 블록에서 큰 차이가 있다. 상전류 부분에서 독립상의 경우에는 선간전압의 개념이 없기 때문에 상전압으로 전체 식을 정리하게 된다. 독립상의 한상의 전압 방정식을 정리하여 전류에 관하여 정리 하면 식(4.4)와 같다.

$$V_a = RI_a + L \frac{dI_a}{dt} + E_b \quad (4.4)$$

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L} (V_a - RI_a - E_a)$$

Fig. 4.38은 식(4.4)를 바탕으로 하여 상전류 블록도를 나타낸 것이다. Fig 4.39은 독립 3상의 상전류 시스템을 시뮬레이션 블록으로 구성한 것이다.

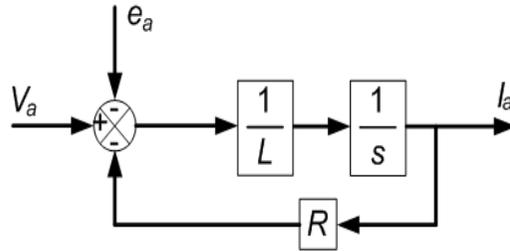


Fig. 4.38 Block diagram of phase current
(3 phase independent-connected)

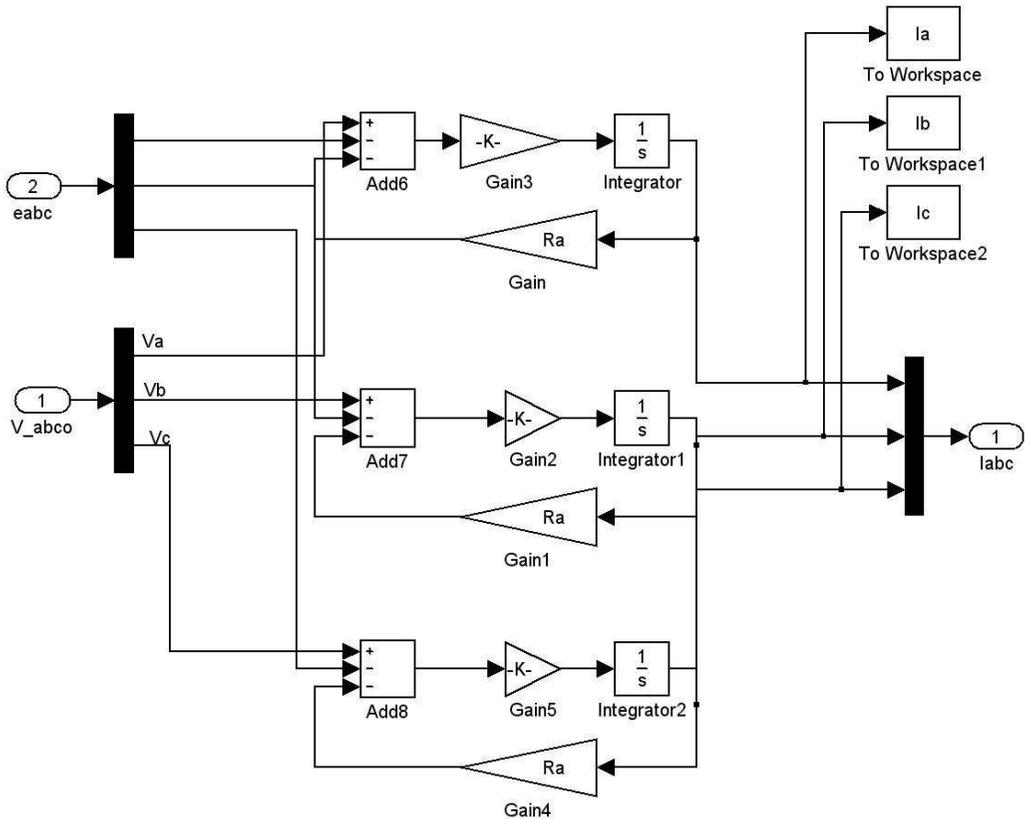


Fig. 4.39 Simulation block for phase current
(3 phase independent-connected)

4.2 시뮬레이션 환경

4.2.1 3상 및 7상 Y결선 전동기 비교 환경

① 3상 전동기 시뮬레이션 환경

Table 4.2 Motor Specification(3 phase)

Pole	4
Stator resistance	1.5[Ω]
Self-inductance	0.0061[mH]
Mutual inductance	0[mH]
Rotor inertia	$8.2614 \times 10^{-5}[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$
Back EMF constant	0.21486[V/(rad/sec)]
Torque constant	0.21476[N·m]
Load Torque	0.662[N·m]

Table 4.2는 3상 전동기의 사양을 나타낸 것이다. 이 전동기에 목표 속도를 1800rpm 구동하였으며, 입력 전압은 DC 100V를 입력하였다[33-34].

② 7상 전동기 시뮬레이션 환경

Table 4.3 Motor Specification(7 phase)

Pole	4
Stator resistance	1.476[Ω]
Self-inductance	2.18[mH]
Mutual inductance	0[mH]
Rotor inertia	$1.32341 \times 10^{-3}[\text{kg}\cdot\text{m}^2]$
Back EMF constant	0.003824[V/(rad/sec)]
Torque constant	0.04774[N·m]
Load Torque	0.662[N·m]

Table 4.3은 7상 전동기의 사양을 나타낸 것이다. 입력 전압과 속도는 Y결선 3상 전동기와 동일하게 하였다[28-32].

4.2.2 3상 Y결선 및 독립 3상 모델링

Y결선 3상 전동기와 독립 3상 전동기를 비교하기 위하여 두 전동기의 고유값을 동일하게 하였다. 이 전동기의 값은 앞서 모델링한 3상 Y결선 전동기의 시뮬레이션환경의 값과 동일한 값이다. 독립상 전동기는 인버터 시스템을 포함하는 시스템으로 모델링 하였다. 본 시뮬레이션에서 스위칭 소자의 손실과 특성은 고려하지 않았다. 하지만 전원 공급단의 정류시의 손실과 특성은 고려하였다[32].

Table 4.4 Power source specification

Capacitance	$22000 \times 10^{-6} \mu\text{F}$
Frequency	60Hz
Input voltage	3 Φ 220V
Initial voltage	100V

인버터 스위칭을 얻기 위한 Hysteresis 제어기의 상위 및 하위 제한은 10%로 하였다. 독립상의 경우 상전환시 전류 제한은 0.1A로 하였다. 이 제한 값들이 낮아 질 경우 스위칭 주파수가 높아지고 이는 하드웨어 구성시 비현실적일 수 있다. 또한 시뮬레이션 계산시 많은 시간이 요구되는 문제로 스위칭 주파수를 제한하였다.

4.3시뮬레이션 결과

4.3.1 3상 및 7상 BLDC전동기 시뮬레이션

Fig. 4.36은 전동기의 상전류 파형을 나타낸 것이다. 각상이 $\frac{2}{3}\pi$ 의 위상 차이를 가지고 상전류의 파형이 인덕턴스의 영향에 의하여 구형파에서 약간의 왜곡을 갖는 것을 알 수 있다. Fig. 4.38은 7상 전동기의 상전류 파형을 나타낸다. 7상 전동기의 경우 $\frac{2}{7}\pi$ 씩의 위상차를 갖는데, 7상의 경우가 3상의 경우에 비하여 상변환이 빠르다는 것을 알 수 있다. 또한 상전류의 도통에서 3상에 비하여 7상의 경우가 도통 시점에서 평활하다는 것을 알 수 있다.

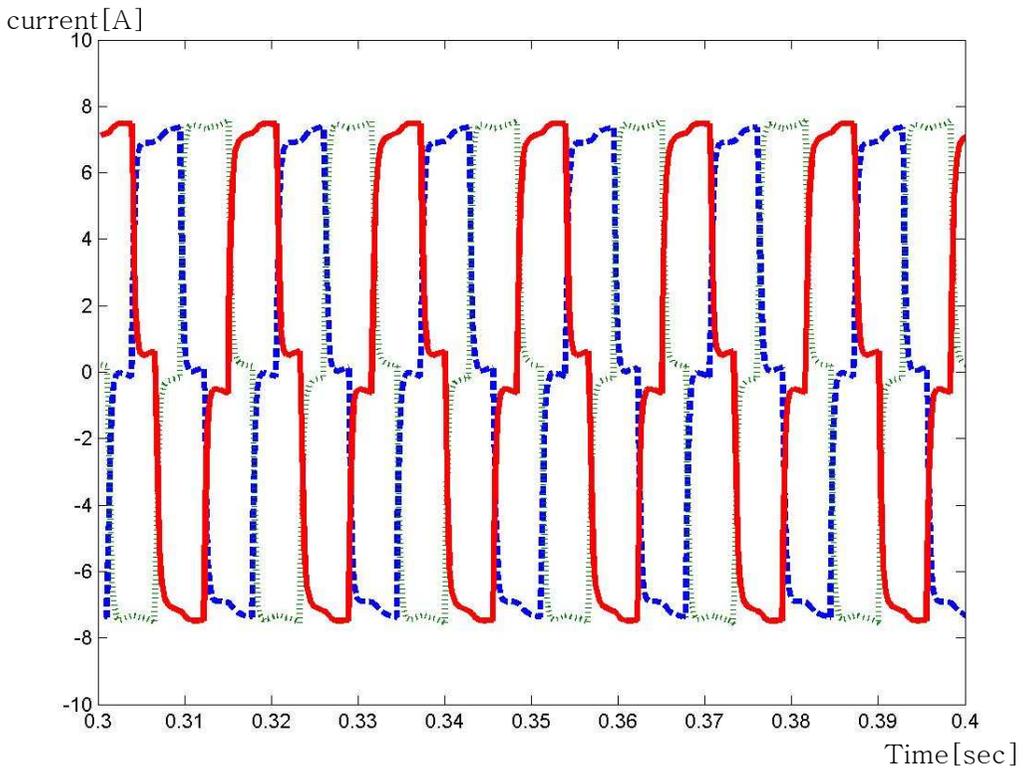


Fig. 4.37 Phase current waveform of 3 phase BLDC motor(Y-connected)

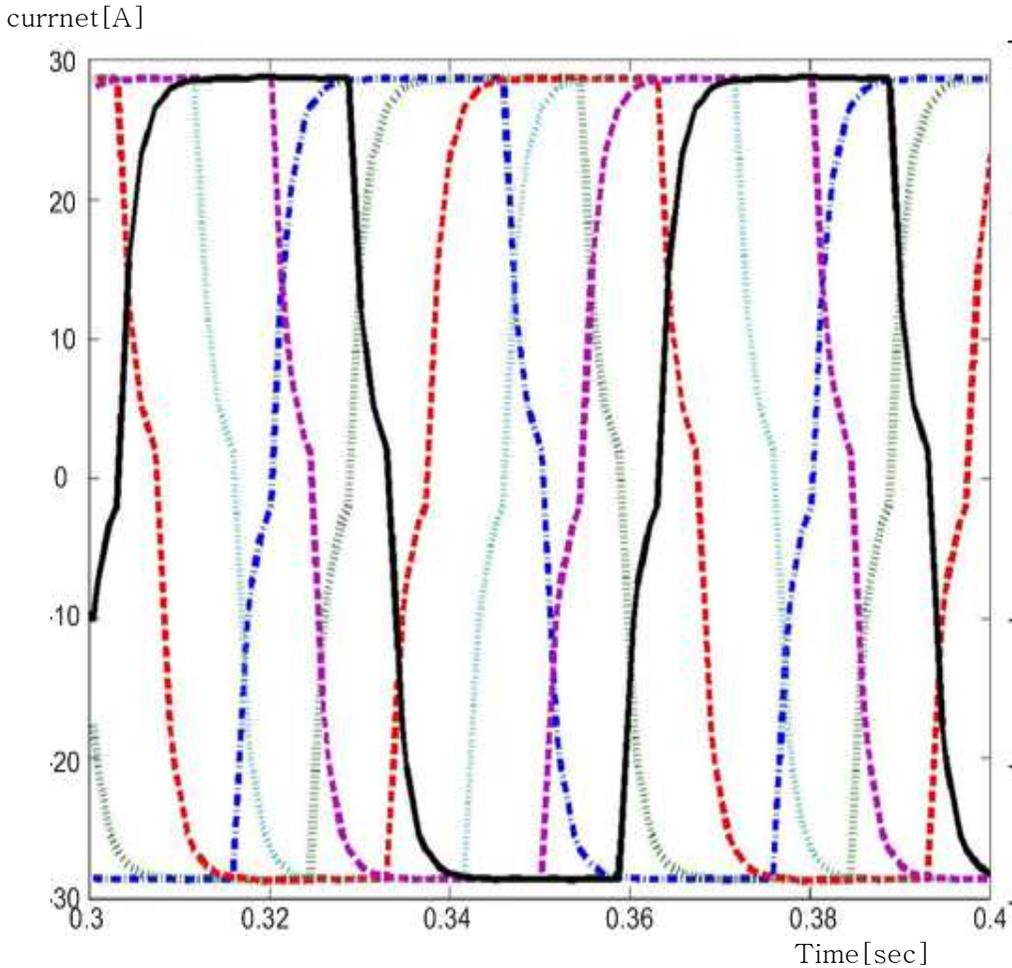


Fig. 4.38 Phase current waveform of 7 phase BLDC motor(Y-connected)

Fig. 4.37과 Fig. 4.38의 비교에서 상전류 파형의 왜곡이 7상 전동기가 적은 것을 알 수 있다. Fig. 4.39와 Fig. 4.40은 3상 전동기의 토크 파형을 나타낸 것이고 Fig. 4.41과 Fig. 4.42는 7상 전동기의 토크 파형을 나타낸 것이다.

3상 전동기의 토크 맥동 주파수는 120Hz이고 진폭은 0.068N·m이며, 7상 전동기의 경우에는 맥동 주파수는 230Hz이고 맥동 진폭은 0.0117N·m이다. 상이 증가한 경우 상 전환 횟수가 증가하여 맥동 주파수가 증가 하였다. 하지만 다 상화에 따라 토크 맥동 진폭이 감소 하였다.

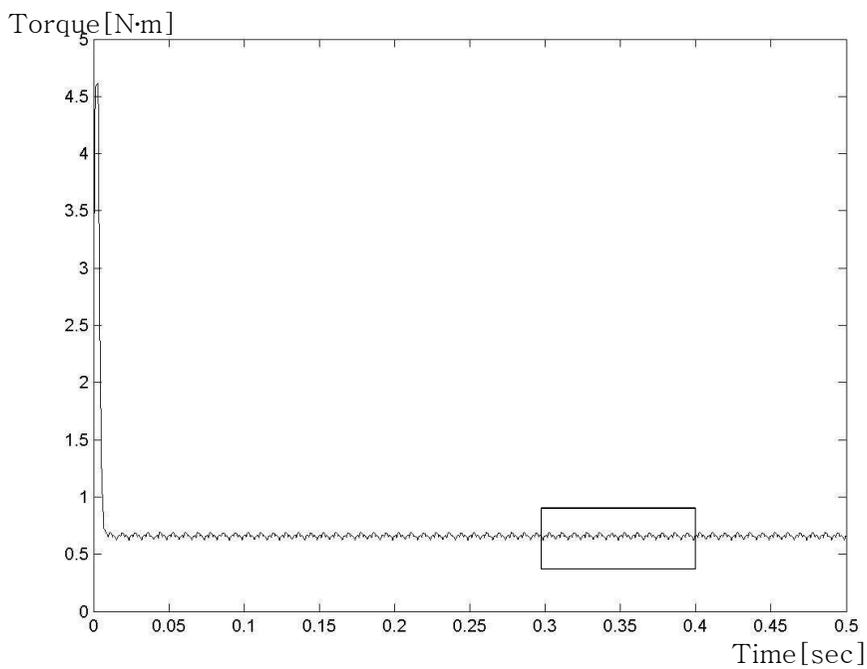


Fig. 4.39 Torque waveform of BLDC motor(3 phase)

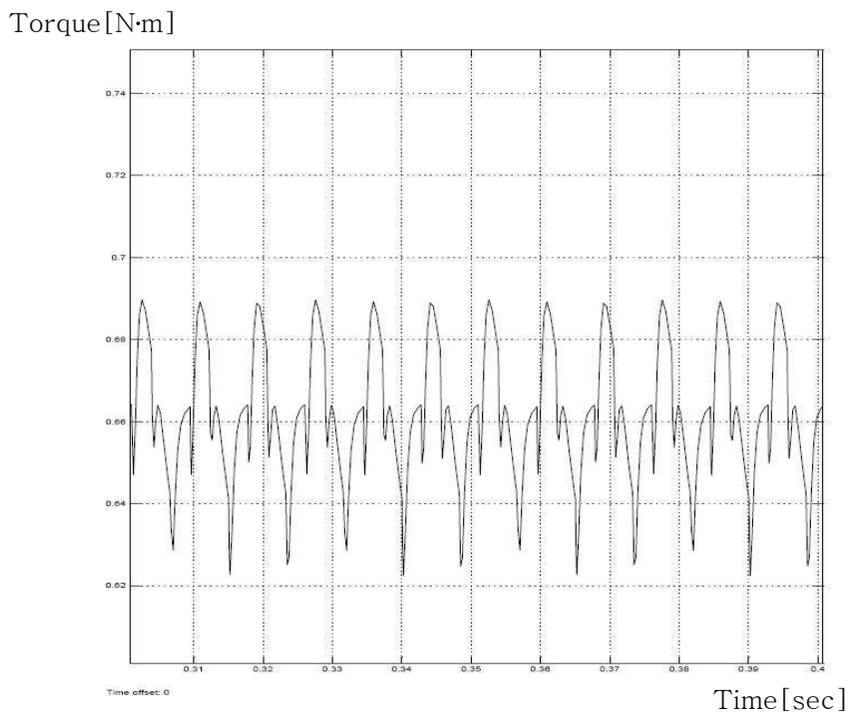


Fig. 4.40 Expanded torque waveform of BLDC motor (3 phase)

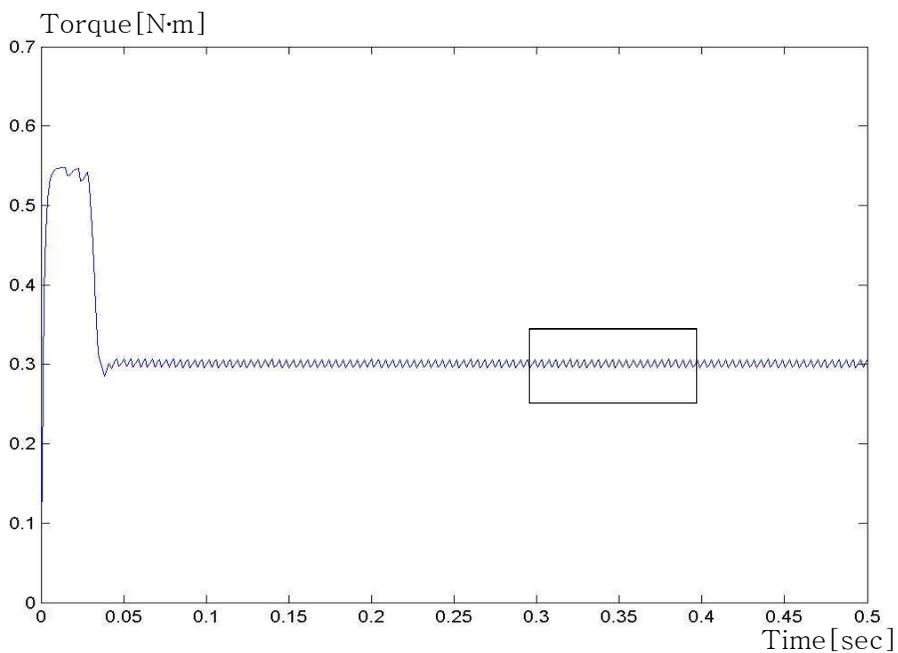


Fig. 4.41 Torque waveform of BLDC motor(7 phase)

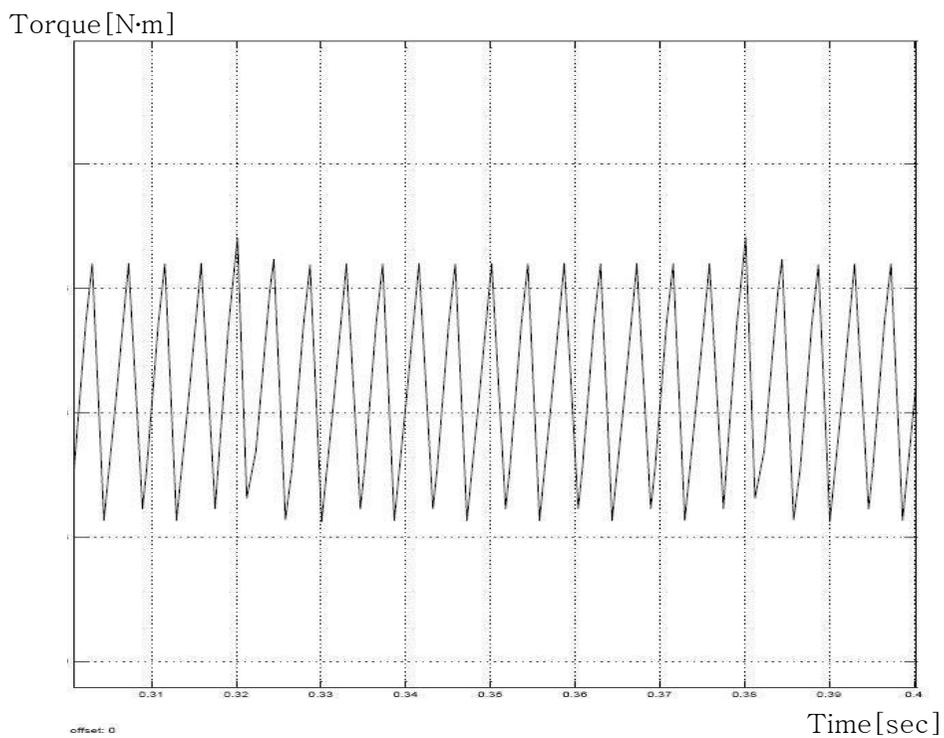


Fig. 4.42 Expanded torque waveform of BLDC motor(7 phase)

4.3.2 3상 Y결선 및 독립 3상 전동기 시뮬레이션 결과

독립상 구조의 특성을 알아 보기 위하여 Y결선 3상 전동기와 독립 3상 전동기를 동일한 환경에서 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에서의 차이는 상의 배치에 따른 차이만을 두었다.

Fig. 4.43은 Y결선 전동기의 Power 입력단이다. Fig. 4.43의 상단 그림은 입력 전압이고 하단은 정류하여 인버터에 공급되는 전압을 나타낸 것이다.



Fig. 4.43 Voltage waveform of power source(Y-connected)

Fig. 4.44는 인버터에서 출력되는 출력 전압을 나타낸 것이다. Hysteresis 제어 알고리즘으로 PWM스위칭 하고 있으며, 상전압이 전체 시스템 전압 만큼의 폭이되는 것을 알 수 있다. 즉 전체 시스템 전압의 절반 값이 BLDC전동기에 인가된다. Fig. 4.45는 상전압의 일부를 확대한 것이다.

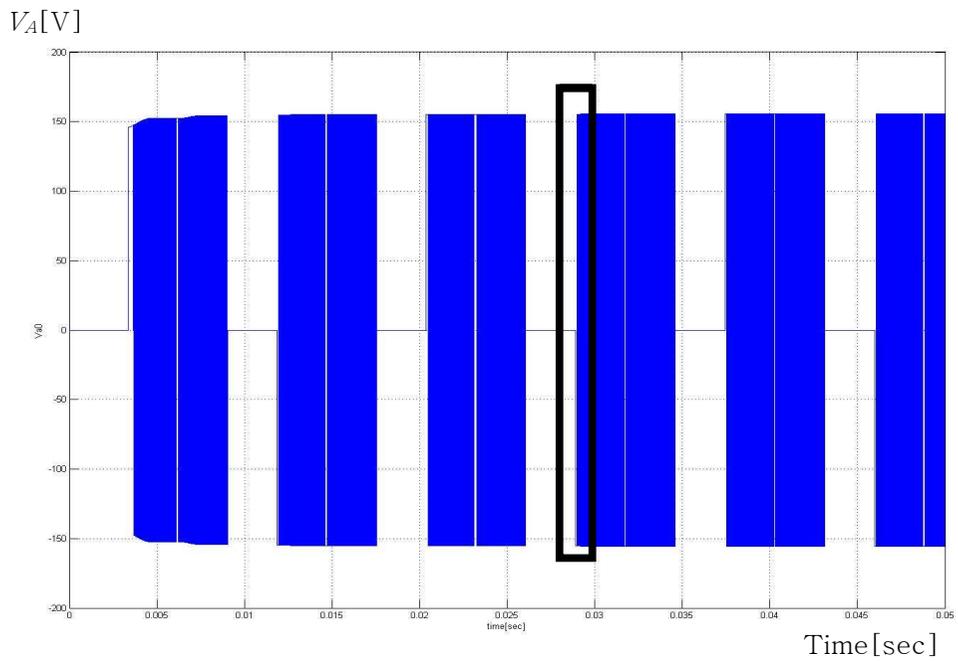


Fig. 4.44 Phase voltage waveform of Y-connected BLDC motor (3 phase)

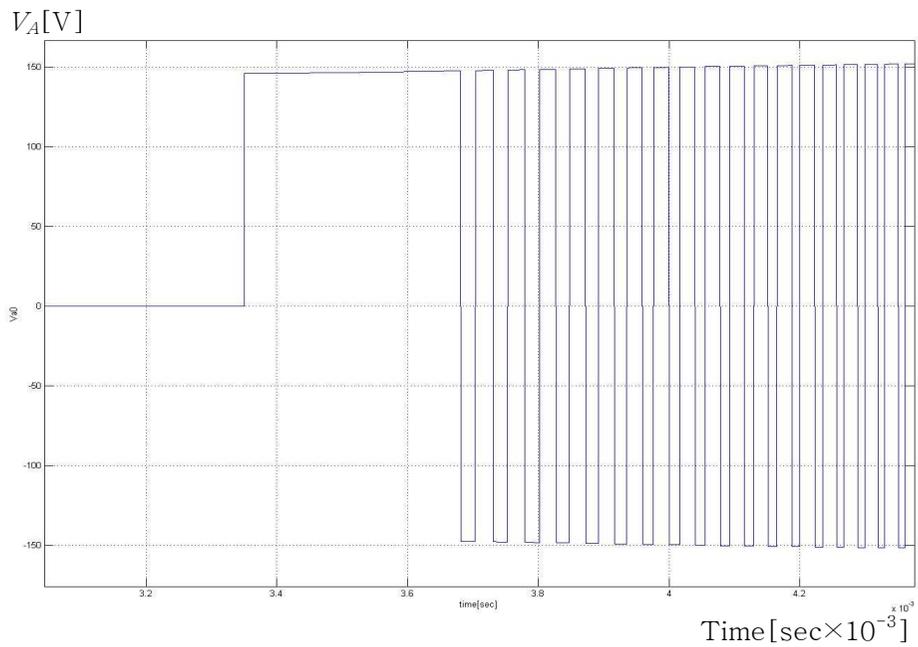


Fig. 4.45 Expanded phase voltage waveform of Y-connected BLDC motor(3 phase)

Fig. 4.46은 각상의 상전류 파형이다. 상전류 파형에서 표시된 부분은 Hysteresis 제어가 동작하며 기준전류를 추종하고 있는 모습이다. 이때의 상전류파형 왜곡은 상전환 시점에서의 토크 맥동이다.

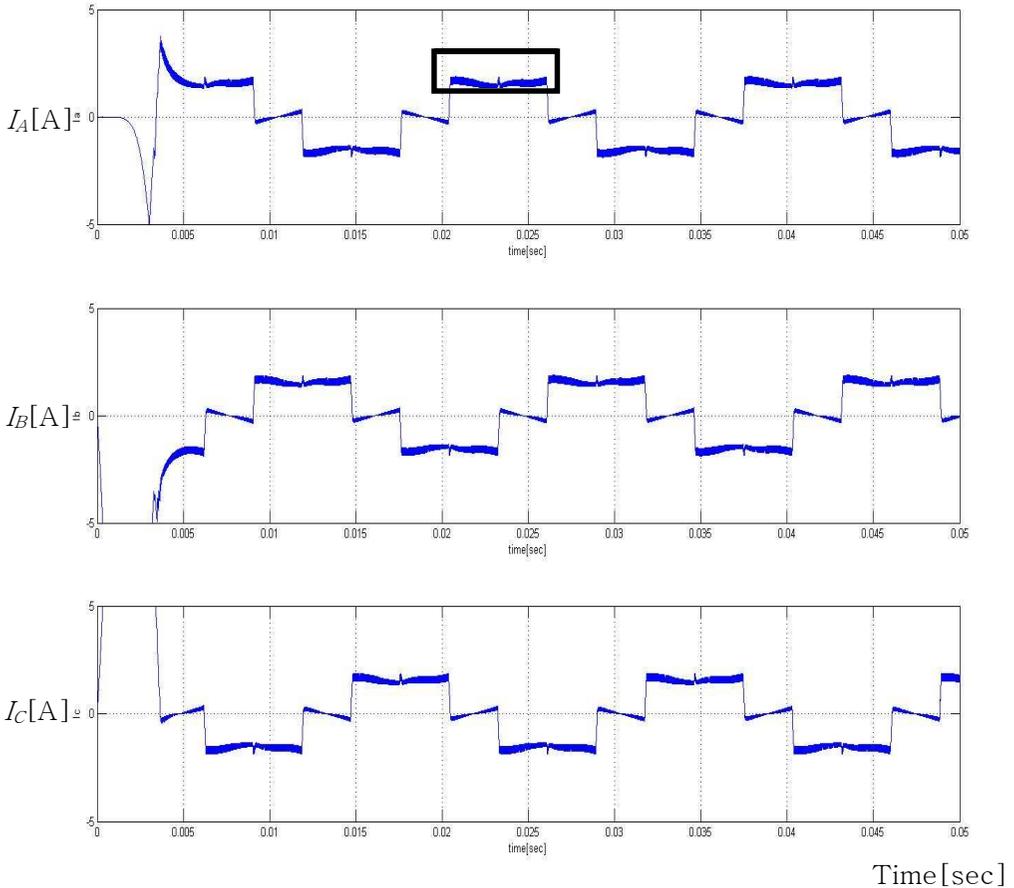


Fig. 4.46 Phase current waveform of Y-connected BLDC motor(3 phase)

Fig. 4.47은 토크, 역기전력 속도의 파형이다. Fig. 4.48은 Fig. 4.47의 한 부분을 확대한 것이다. 앞서 실험한 3상 Y결선 전동기에서의 결과 보다 더 큰 토크 맥동이 발생 하였다. 앞서 실험한 3상 Y결선 전동기의 시뮬레이션은 이상적인 경우로 제어기가 출력 전압을 이상적으로 BLDC 전동기에 인가한 것이고, Fig. 4.47의 결과는 PWM 제어기를 이용하여 상전압을 인가하였기 때문이다.

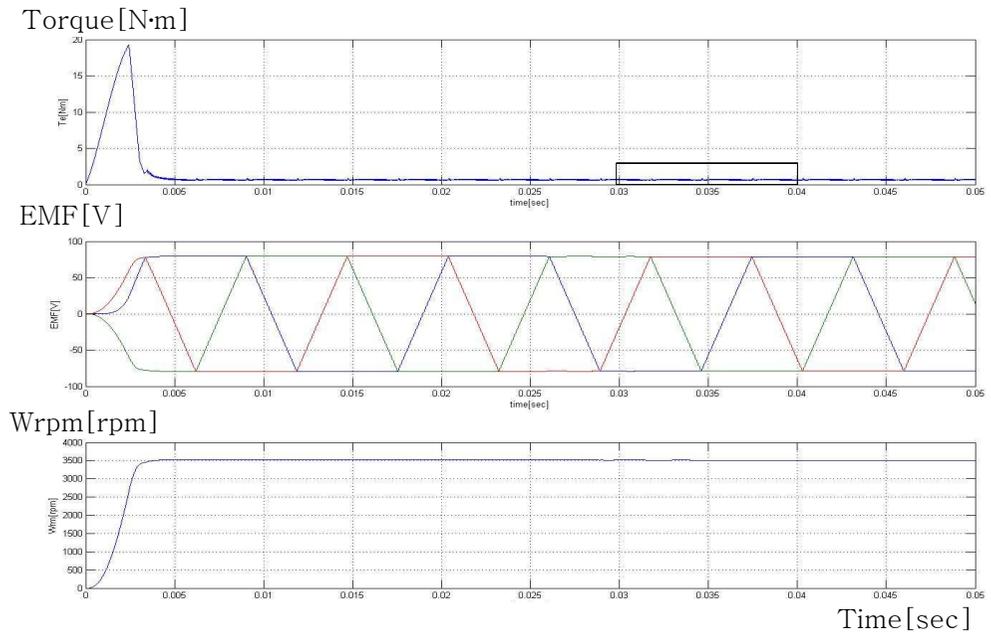


Fig. 4.47 Torque, EMF and motor speed waveforms of BLDC motor(Y-connected)

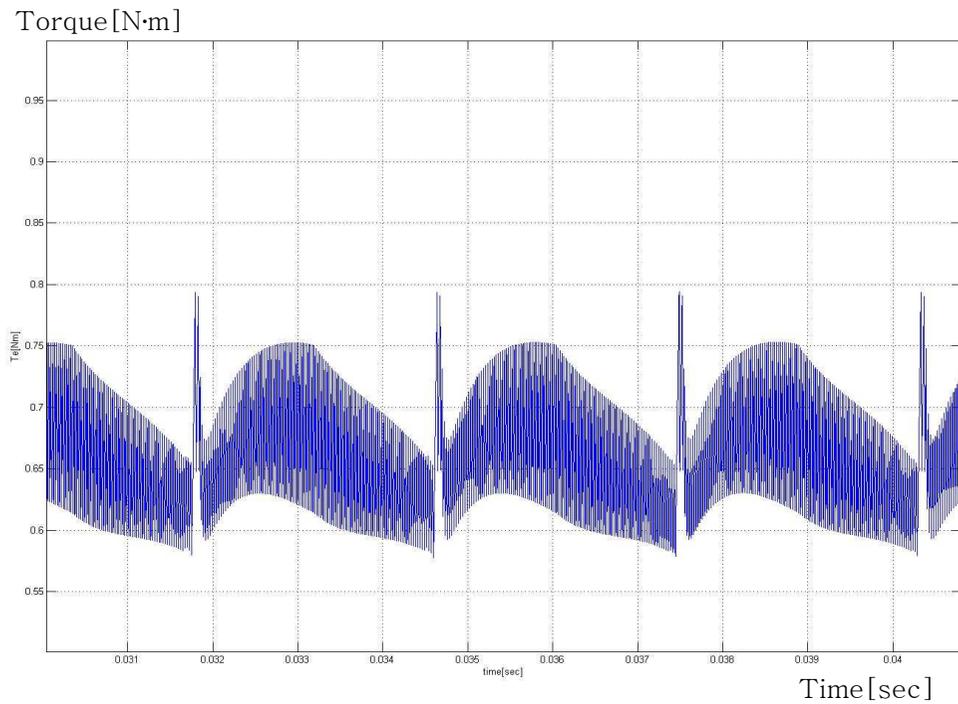


Fig. 4.48 Expanded torque waveform of BLDC motor(3 phase)

독립상 전동기의 경우에도 Y결선의 형태와 같은 종류의 전원을 사용하였다.
 Fig. 4.49 독립상 전원공급원의 입 출력단의 파형이 Y결선과 동일한 형태이다.

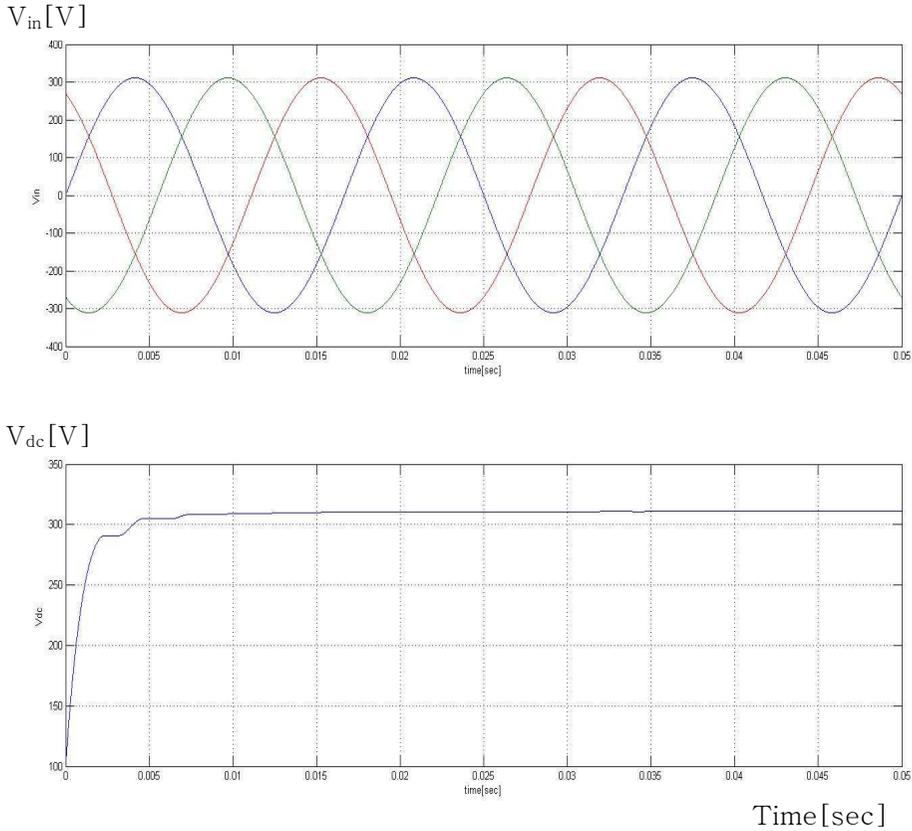


Fig. 4.49 Voltage waveform of power source(independent-connected)

Fig. 4.50는 독립상 전동기의 상전압 파형이다. 각상의 상전압이 Y결선에 두 배로 인가되는 것을 알 수 있다. Fig. 4.51은 상전압 파형의 일부분을 확대한 것이다. 또한 상전압에서 기존의 Y결선의 Hysteresis 제어기의 파형 이외에 상전환시에 스위칭을 하는 것을 알 수 있다. 이러한 스위칭을 통하여 독립상에서 발생하는 토크 맥동을 저감 할 수 있다. Fig. 4.51에서 실선 사각형 부분은 Hysteresis 제어기의 파형이고 점선 부분은 전류 억제 알고리즘에 따라 상전류의 흐름 방향의 역방향으로 스위칭한 상전압 파형이다.

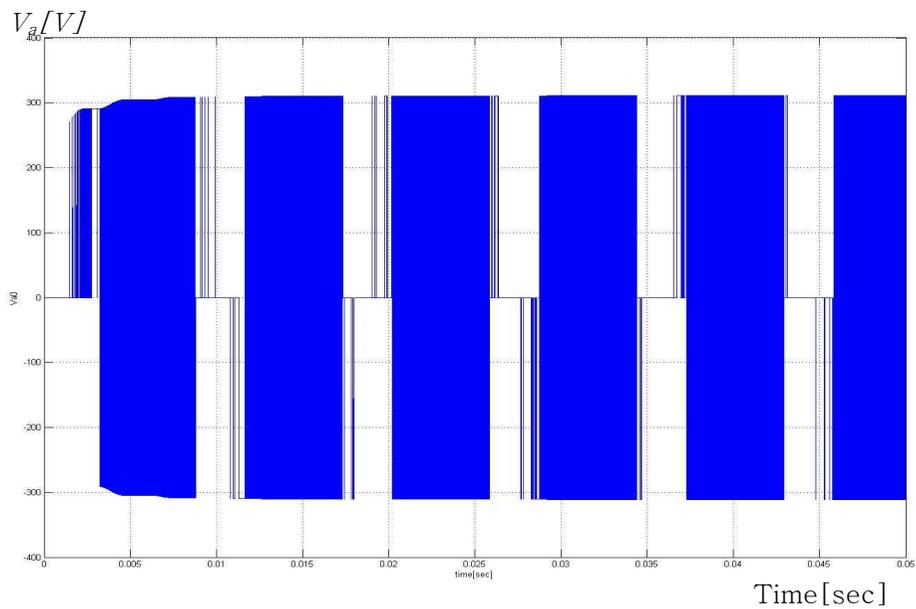


Fig. 4.50 Phase current waveform of independent-connected BLDC motor(3 phase)

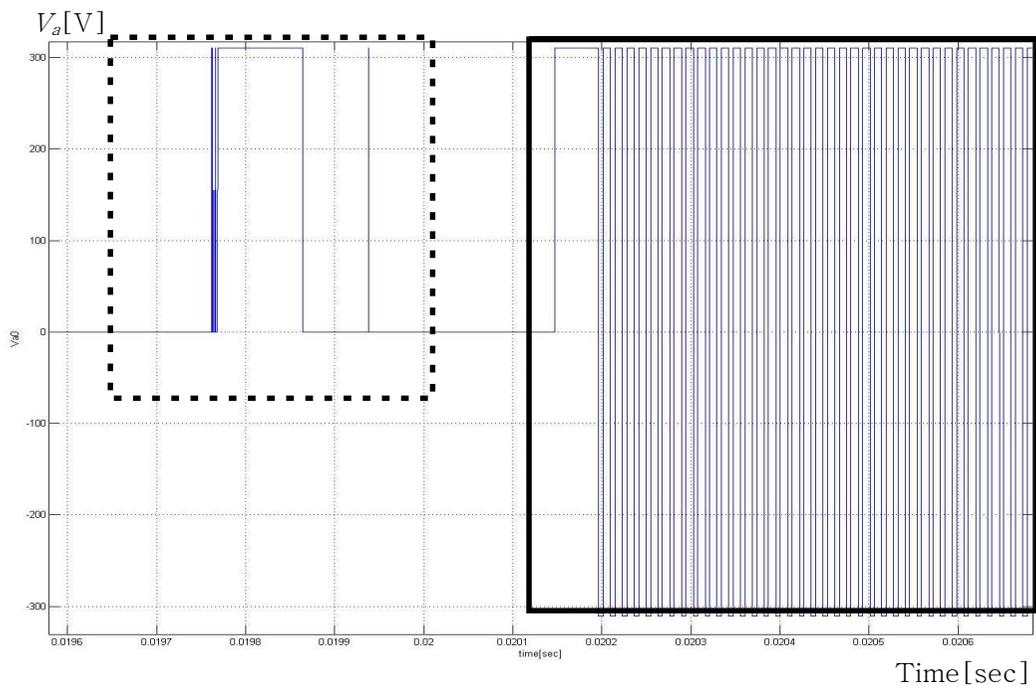


Fig. 4.51 Expanded phase current waveform of independent-connected BLDC motor(3 phase)

Fig. 4.52에서 상전류의 값이 기존의 Y결선의 상전류와 동일한 값을 갖는다. 이것은 BLDC전동기의 토크는 상전류와 역기전력의 영향을 받기 때문이다. 상전압의 증가는 최대 상전류량의 증가를 의미한다. 0.1A의 전류 오차로 인하여 상전류의 값이 0.1A사이를 움직이는데, 이러한 상전류의 변화는 토크 값의 변화를 가져 온다. Fig. 4.53은 독립상 전동기의 토크, 역기전력, 속도를 나타낸 것이다. Fig. 4.54는 Fig, 4.53의 토크 파형의 일부를 확대 한 것이다. Y결선 전동기와 비슷한 폭을 갖는다. 독립상 구조의 경우 상전환시 전류 억제 알고리즘을 사용하였다. 전류 억제 알고리즘을 적용한 것과 적용하지 않은 상황에서의 독립 3상 BLDC 전동기의 상전류 파형을 나타낸 것이다.

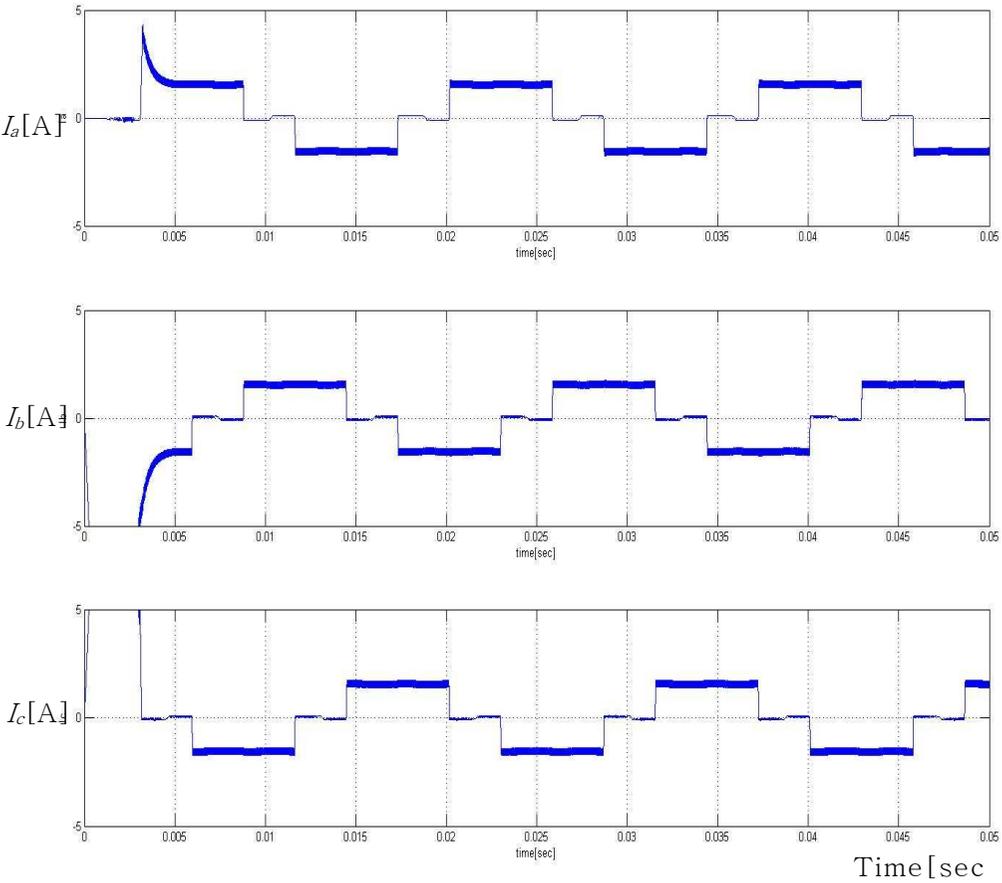


Fig. 4.52 Phase current waveform of independent-connected BLDC motor(3 phase)

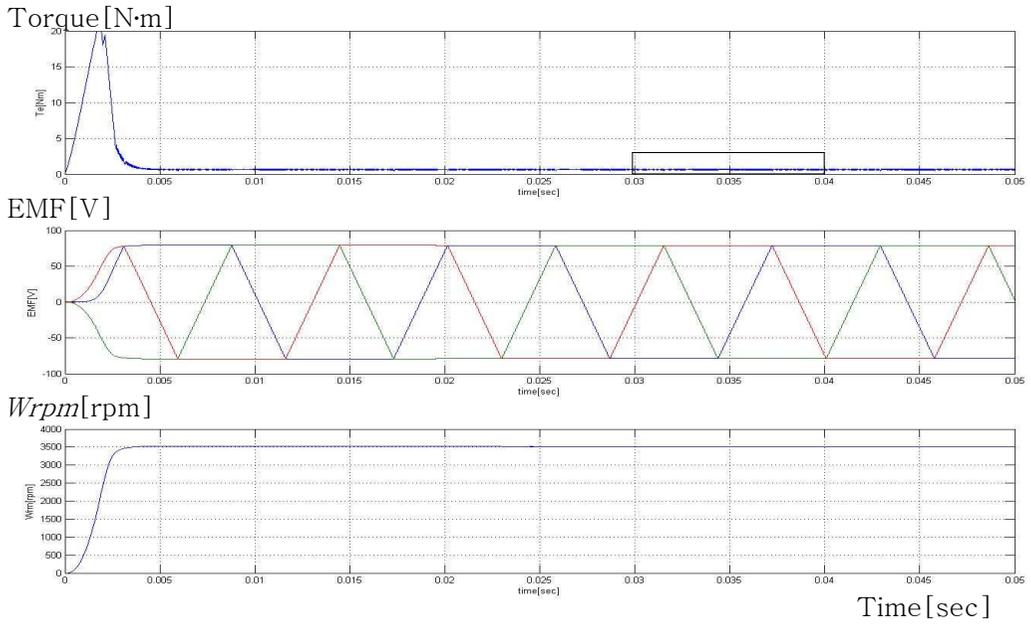


Fig. 4.53 Torque, EMF and motor speed waveforms of BLDC motor(Y-connected)

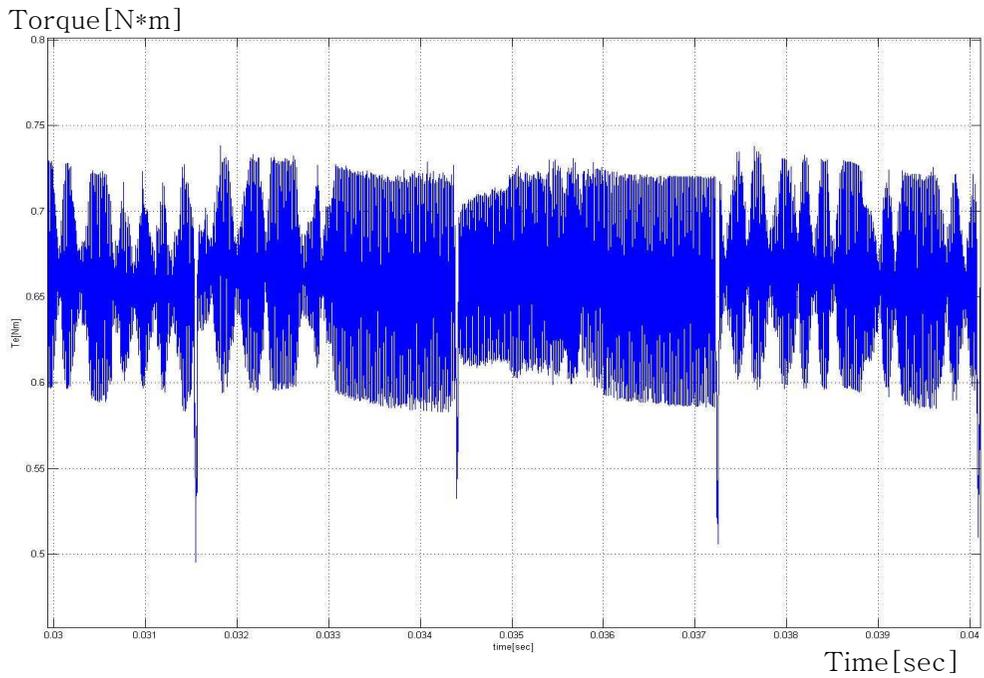


Fig. 4.54 Expanded torque waveform of BLDC motor(3 phase)

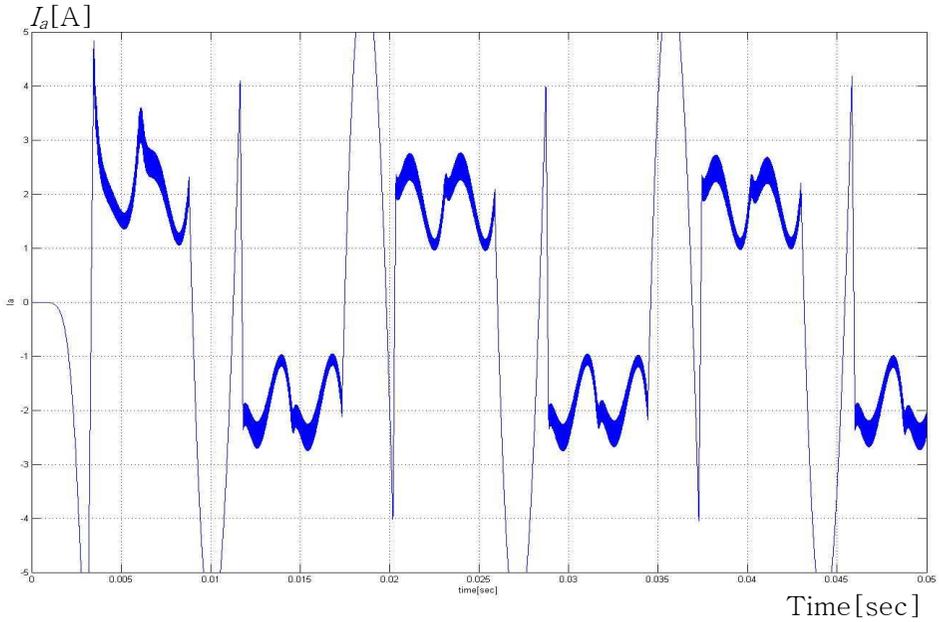


Fig. 4.55 Phase current waveform of no current control in commutation period (independent-connected 3-phase)

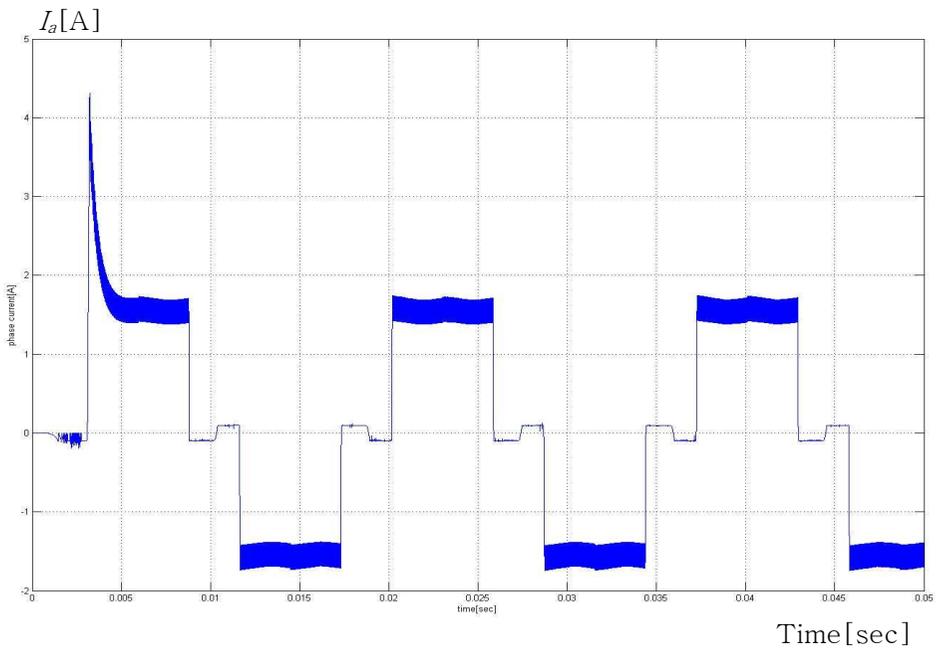


Fig. 4.56 Phase current waveform of current control in commutation period (independent-connected 3 phase)

제 5장 결론

전기 추진 시스템은 특수한 선박의 운항 조건을 만족하기 위하여 활용되고 있다. 이러한 전기 추진 방식은 기계식 추진 방식에 비하여 진동 소음 측면에서 유연성을 가지고 있으며 특히 공간적인 제약을 받는 함정에서 배치의 다양성을 가지고 있는 장점을 가지고 있다. 전기 추진 방식은 추진 전동기와 인버터의 연동 특성에 따라 일체형과 분리형으로 구분되며 일체형은 분리형에 비하여 출력 특성이 우수하고 공간 활용 측면에서 분리형에 비하여 장점을 가지고 있다. 수중함의 추진 체계에 있어서 추진 전동기는 단위 체적 당 출력 특성이 우수해야 하고 특수한 목적에 부합하여 저소음으로 운전되어야 한다. 그리하여 추진 전동기의 저소음화를 위해 추진 전동기의 토크 맥동을 저감할 필요성이 있다.

토크 맥동 저감과 최대 출력을 증가시키기 위하여, 본 논문에서는 영구자석형 추진 전동기를 변형한 독립상 형태의 다상 전동기(독립 다상 전동기)를 제안하였다. 독립 다상 전동기의 특성 분석을 위해, Y결선 3상 전동기와 시뮬레이션 결과를 통하여 비교하였다. 시뮬레이션 결과 독립 다상 전동기가 Y결선 3상 전동기에 비하여 토크 맥동 저감 특성이 우수하며, 높은 상전압 특성으로 인한 최대 토크가 증가하였다. 또한 독립 다상 전동기의 스위칭에 Hysteresis 전류 제어 알고리즘과 전류 제한 알고리즘을 적용하여 상전환시 발생하는 토크 맥동을 저감하였다.

본 논문은 독립상 형태의 전동기의 스위칭 제어 알고리즘과 토크 맥동 저감을 위한 기초 자료로 활용될 것이다. 수중체에 적합한 우수한 성능의 전기 추진 시스템을 확보하기 위해서는 실용화를 위한 실험 기반의 연구가 수행되어야 할 것이며, 다상 전동기의 스위칭 주파수 감소 및 H-bridge를 이용한 고조파 제거에 대한 연구도 추가적으로 수행 되는 것이 바람직 할 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. 남택근, “전기 추진선박의 추진 체계 발전방향”, 한국마린엔지니어링 학회지, 한국마린엔지니어링학회지 제27권5호 pp548-554, 2003.
2. 공영경, “전기추진선박의 추진체계 발전방향”, 한국마린엔지니어링학회지, 제 27권 5호, pp548-554, 2003.
3. Dcr C. G. Hodge and Cdr D J Mattick, " The Electric Warship", TransIMarE, Vol.109, part2, pp. 109-125, 1996.
4. Dcr C. G. Hodge and Cdr D J Mattick, " The Electric Warship II", TransIMarE, Vol.109, part2, pp. 127-144, 1997.
5. Dcr C. G. Hodge and Cdr D J Mattick, " The Electric Warship III", TransIMarE, Vol.109, part2, pp. 119-134, 1998.
6. Dcr C. G. Hodge and Cdr D J Mattick, " The Electric Warship IV", TransIMarE, Vol.109, part2, pp. 25-30, 2001.
7. S.M Robinson, "Electric ship propulsion", Simmons-Boardman Publishing Company, 1992.
8. H. D. McGerge, "Marine Electric Equipment and Practice, Second Edition", B.H. NEWNES, 1995.
9. Philip T. Krein, "Elements of Power Electronics", Oxford University Press, 1998.
10. Cdr Stuart Young, Cdr. John Newel and Cdr. Graeme Little, "beyond Electric ship", Naval Engineers Journal, pp. 79-92, 2001.
11. 강병희, 목형수, 최규하, “최소토크 맥동을 갖는 BLDC 전동기의 최적 제어”, 전력전자학술대회논문집, pp104-109, 2002.
12. 김태성, 안성찬, 현동석, “ BLDC 전동기의 토크리플 저감을 위한 새로운 전류 제어 알고리즘에 대한 연구”, 전력전자학회, 전력전자학회 논문지 제6권5호. pp 416-422, 2001.
13. 김철주, 강병희, 목형수, 김덕근, 김병규, “BLDC 모터에서 전류 시간에 의한 토크맥동에 관한 연구”, 전력전자학회, 전력전자학술대회논문집 2000년

- 학술대회논문집, pp610-614, 2000.
14. Kalsi,S.S, "HTS ship propulsion motors", Power Engineering Society General Meeting, 2004, IEEE, vol, pp2047-2048, 2004.
 16. S. M. Robinson, "Electric ship propulsion", Simmons-Boardman Publishing Company, 1992.
 17. CAPT Chuck Goddard, " DD(X) Program Overview", Expeditionary Warfare Conference, 2002.
 18. Timothy J McCoy, " Contemporary Naval Electrical Power System", massachusetts, 2003.
 19. Dave Mattick OBE, BScEng, C Eng, MIEE, MiNucE, FIMarEST and Martin Butcher, MEng(Hons), MIEE, "Demonstrating Electrical Systems Reconfiguration at ESTD" Alstom
 20. G. Nerowski B. Piepenbreier, "A New Generation of Submarine propeller motors with PM excitation and integrated inverters", pp549-555, UDT, 1991.
 21. McCoy, T.J., "Full scale land based testing of the U.S. Navy's Integrated Power System (IPS)," Proceedings of the 5th International Naval Engineering Conference, p. 155-162, INEC (2000).
 22. "Baseline Prime Power System Used by the University of Texas," UT-CEM report, 2003.
 23. 유병량, 오진석, 진선호, 임명규, 곽준호, 조관준, 김장목, "전기추진시스템의 냉각시스템에 관한 연구", 한국마린엔지니어링학회, 한국마린엔지니어링학회 2005년도 전기학술대회 논문집 pp887-893, 2005.
 24. 오진석, 조관준, 곽준호, 진선호, 유병량, 임명규, 이홍찬, " Multi-phase 인버터 특성 해석", 한국마린엔지니어링학회 2005년 전기 학술 대회, pp 950, 2005.
 25. R. Krisbnan," A Novel Single Switch per Phase Converter Topologyfor Four -Quadrant PM Brushless DC Motor Drive: Conference Record, IEEE-IAS Annuat Meeting, pp. 311-318, 1996.
 26. P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of

- Permanent -Magnet drives, Part 11:The Brushless DC Motor Drive,"IEEE Trans. on Ind. App, Vol. 5, No.2, 1989.
27. A.K. Wallace and R. Spee, "The simulation of Brushless DC drive failures" pp. 199-206, PESC '88 Record.
 28. Marcelo Godoy Simões, Petronio Vieira, Jr. A High-Torque Low-Speed Multiphase Brushless Machine-A Perspective Application for Electric Vehicles IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 49, NO. 5, 2002.
 29. A.Iqbal, E.Levi, "Space Vector Modulation Schemes for a Five-Phase voltage Source inverter", EPE, 2005.
 30. 전윤석, 이용균, 목형수, " 6상 여자방식을 이용한 7상 BLDC 전동기 구동 시스템", 건국기술연구논문지, 제 28집 pp105-110, 2003.
 - 31 박성인, 김태성, 현동석 "고속도 BLDC 전동기의 토크 향상을 위한 개선된 전류 제어 방법", 전력전자학술대회 논문집 pp.115-118
 32. Byoung-kuk, Lee, Mehrdad Ehsani, "Advanced simulation Model for Burshless DC motor Drives", Journal of Power Electronics, Vol 3, No2, 2003.
 33. H. Le-huy, R. Perret, and R. Feuillet, "Minimization of Torque Ripple in Burshless DC motor Drive", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-22, No. 4 pp748-755,1986
 34. D/C/ Hanselman, Burshless Permanent-Magnet Motor Design, McGraw-hill,1994

감사의 글

길 것만 같던 석사과정의 시작이 어느덧 결실을 맺으려 합니다. 호기심과, 무엇인가를 이루고 싶다는 생각이 지금의 저를 있게 한 원동력이 된 것 같습니다. 무지로 시작된 배움의 길은, 작은 언덕에 올라 큰 동산을 바라보는 것 같습니다. 어려움을 닦칠 때마다 부모님의 가르침을 생각하며 고난의 시간을 이겨 낸 것 같습니다. 배움의 길을 걸을 수 있도록 노력하신 부모님께 오늘의 기쁨을 바칩니다.

오늘에 이르기까지 학문적으로나, 인간적인 면에서 밝고 곧은 가르침을 주신 오진석 교수님에게 감사드립니다. 부족한 논문을 정성껏 심사하고, 토의해 주신 유희한 교수님, 이홍찬 교수님 지난 2년간 학문의 길에서 많은 도움을 주신 정병건 교수님과 김성환 교수님, 이상태 교수님, 소명옥 교수님, 오세준 교수님께 감사드립니다.

항상 곁에서 학문적 모범이 되어준 곽준호 선배님, 논문의 검토와 교정을 도와준 박용주 선배님, 저의 문제를 항상 같이 고민해 주시던 진선호 소령님, 항상 진심어린 충고를 주신 임명규 선배님과 유병량 선배님, 이지영 선배님, 연구실에서 굳을 일을 도맡아 도와주신 이종호 선배님과 김연형 선배님, 최훈석 선배님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 오늘까지 묵묵히 저를 도와준 배수영, 하검양, 박도영, 정혜미 후배들에게도 이 고마움을 전합니다. 많은 질문과 토론으로 힘들게 해드렸던 부산대학교의 오형식, 김동석 씨에게도 감사드립니다. 그 외에도 일일이 거명하지 못한 많은 분들에게 감사드리며, 이분들의 도움으로 지금의 결실을 맺게 되었습니다.

끝으로 오늘도 저를 위해 노력하시는 부모님과 배움의 기회를 열어 주신 오진석 교수님께 깊이 감사의 마음을 전합니다.