



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

하이브리드 전기추진 선박용 인버터 제어시스템의
출력안정화를 위한 배터리 관리 시스템

BMS for output stabilization of inverter control
system in hybrid electric propulsion ship



指導教授 李 成 根

2018年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 啟 權

本 論文을 金政權의 工學碩士 學位論文으로
認准함.



委員長 金潤植 (인)

委員 吉暻碩 (인)

委員 李成根 (인)

2017年 12月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

List of Figures	iv
Abstract	vi
1. 서 론	
1.1 연구 배경 및 시장현황	1
1.2 연구 필요성	2
1.3 연구 목적	3
2. 관련 이론	
2.1 배터리의 수명	5
2.1.1 SOH	6
2.1.2 배터리 열화 원인	6
2.1.3 Randles의 배터리 모델	7
2.1.4 SOC	8
2.1.5 OCV	9
2.2 벡터제어	10
2.2.1 유도전동기 벡터제어	10
2.2.2 2레벨 벡터제어	11
2.2.3 3레벨 벡터제어	17
3. 전기추진 인버터용 BMS	
3.1 하드웨어	22
3.1.1 BMS 구성	23
3.1.2 인버터 출력전류 일정제어	26
3.1.3 직렬통신(RS-232)모니터링 구성	29
3.2 소프트웨어	31
3.2.1 모니터링 소프트웨어 구성	31

3.2.2 BMS 소프트웨어 순서도	33
3.3 실험 및 고찰	37
3.3.1 인버터 레벨에 따른 배터리 수명 예측	37
3.3.2 인버터 출력전류 일정제어	41
4. 결론	46
참고문헌	49
감사의 글	51



List of Figures

Fig. 1 Randles model of battery	7
Fig. 2 A graph to estimate R_1 , R_2 through OCV	9
Fig. 3 2level inverter	12
Fig. 4 Switching states for applying vectors V(1)~V(6)	13
Fig. 5 Space voltage vectors corresponding (a)~(f)	15
Fig. 6 Output limit of 2level inverter	16
Fig. 7 3level inverter	17
Fig. 8 Voltage waveform of 3level inverter switching	18
Fig. 9 Sinusoidal waveforms created by phase voltages	19
Fig. 10 Phase current $I_A > 0$	20
Fig. 11 Phase current $I_A < 0$	20
Fig. 12 Whole structure of BMS for electric propulsion inverter ·	22
Fig. 13 Battery short-circuit protection and voltage management	23
Fig. 14 Inverter circuit of 2level	27
Fig. 15 Gate drivers of 2level	27
Fig. 16 Generation principle of PWM	29
Fig. 17 Three methods of serial communication	30
Fig. 18 Monitoring system of BMS for electric propulsion inverter	32
Fig. 19 Flowchart of internal resistance calculation for SOH estimation	34
Fig. 20 Flow chart for constant output current of inverter	36
Fig. 21 Comparison of input current harmonic according to inverter level	38
Fig. 22 Battery pack for inverter	39
Fig. 23 Li-ion battery(3.7V 500mAh)	40
Fig. 24 Experimental device for constant output of inverter	41
Fig. 25 Measured waveform without constant output control system	42
Fig. 26 Expanded waveform without constant output control system	43

Fig. 27 Measured waveform with constant output control system 44

Fig. 28 Expanded waveform with constant output control system 45



BMS for output stabilization of inverter control system in hybrid electric propulsion ship

by Kim, Min Gwon

Department of Electrical and Electronic Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Efforts to reduce pollutants from ships are continuing as concerns about environmental issues arise. If the ship uses electricity, the emission of air pollutants such as fine dust and sulfur oxides can be reduced. Therefore, researches on electric propulsion ship using battery are actively proceeding. In ships, there are many devices that use AC power, so an inverter is essential to use a battery that is a DC power source. In addition, the ship uses a BMS (Battery Management System) to check the battery voltage and current at real times so that it can be confirmed that there is no problem. However, if the battery cell is damaged when the ship is in operation, the supply voltage may be rapidly drop or the battery pack may be short-circuited to cause a safety accident.

In this paper, to prevent with such an accident, even if one of the battery cells fails, remaining cells are connected with bypass circuit to prevent a short-circuit of the whole battery. And we implemented the function to estimate the battery lifetime by measuring the OCV of the battery cell with switching controls. In addition, when the voltage of the battery suddenly decreases, the output of the inverter also decreases. In order to prevent the accident, the function of inverter output currents stabilization is implemented in the BMS. We also constructed a monitoring system using data communication so that measured and calculated values in BMS can be monitored on a remote PC. In addition, implement an experiment to compare and analyze lifetime characteristics of the battery according to the level of the inverter. This experiment will be a reference for battery lifetime measurement. The experimental data and BMS with added functions will help to develop the power system of the electric propulsion ship.

KEY WORDS: Hybrid electric propulsion ship, Inverter, BMS

하이브리드 전기추진 선박용 인버터 제어시스템의 출력안정화를 위한 배터리 관리 시스템

김민권

한국해양대학교 대학원
전기전자공학과

초록

환경문제에 대한 관심이 대두되면서 선박에서 나오는 오염물질을 줄이기 위한 노력이 이어지고 있다. 만약 선박이 전기를 사용하게 되면 미세먼지, 황산화물 등의 대기오염 물질 배출을 감소시킬 수 있다. 그래서 배터리를 이용한 전기추진 선박에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 선박에서는 교류 전원을 사용하는 장비가 많기 때문에 직류 전원인 배터리를 사용하기 위해서는 인버터가 필수적이다. 또한, 선박에서는 BMS(Battery Management System)를 사용하여 배터리 전압 및 전류를 항상 체크하여 문제가 없는지 확인할 수 있도록 하고 있다. 하지만 선박이 동작 중일 때 배터리의 셀에 문제가 발생하면 공급전압이 급감하거나 배터리 전체가 단락되어 안전사고로 이어질 가능성이 높다.

본 논문에서는 이러한 사고에 대처하기 위해 배터리 셀 중 하나가 고장이 나더라도 Bypass 회로를 구성하여 나머지 셀들을 연결함으로써 배터리 전체의 단락을 막는 시스템을 설계하였다. 그리고 스위칭 제어를 통해 배터리 셀의 OCV를 측정하여 배터리의 수명을 추정하는 기능을 구현하였다. 또한, 배터리의 전압이 급감하게 되면 인버터의 출력 또한 변하게 되는데 이로 인한 사고를 방지하기 위해 인버터 출력전류 안정화 기능을 BMS에 구현하였다. 그리고 BMS를 통해 측정, 계산되는 값들을 원격거리 PC에서도 모니터링 할 수 있도록 데이터 통신을 활용하여 모니터링 시스템을 구성했다. 그리고 배터리의 수명 측정에 참고할 수 있도록 인버터의 레벨에 따른 배터리의 수명 특성을 비교·분석하는 실험을 실시하였다. 이처럼 기능을 추가한 BMS 및 실험 내용들은 전기추진 선박의 전원 시스템을 개발하는데 도움이 될 것이다.

주요단어: 하이브리드 전기추진 선박, 인버터, BMS(배터리 관리 시스템)

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 시장현황

환경문제에 대한 관심이 대두되면서 선박에서 나오는 오염물질을 줄이기 위한 노력이 이어지고 있다. 특히, 미세먼지로 인한 피해가 늘어나고 있는 최근에는 선박에서 미세먼지와 황산화물이 포함되어 있는 대기오염물질을 줄이기 위한 시도가 계속되고 있다. 국립환경과학원에서는 2014년 기준 부산의 초미세먼지 배출량 185만 Kg 중 51.4%에 달하는 95Kg의 미세먼지가 선박에서 배출되었다고 밝혔으며, 부산항만공사(BPA)는 선박이 엔진가동을 중단하고 전기를 쓰면 선박 1척당 미세먼지 16Kg, 황산화물 830Kg의 배출을 감소시킬 수 있다고 발표했다.

이처럼 환경문제에 대한 관심이 커지고 있는 가운데, 선박의 에너지를 전기로 대체하여 환경오염을 줄이는 방안이 활발하게 연구되고 있다. 유럽에서는 이미 ZEMship, FellowShip, Methapu 등 연료전지 선박 시스템 개발 프로젝트를 진행 중이거나 추진 중에 있다.[1] 이러한 전기추진 선박은 기존의 엔진과 배터리의 전원을 적절히 분배 활용하여 환경오염물질의 배출을 줄일 수 있는 특징을 가지고 있다.

1.2 연구필요성

해상에서의 사고는 지상에서의 사고에 비해 한번 발생하면 그 피해 규모가 매우 크다. 현재 환경문제 때문에 전기추진선박에 대한 관심이 높아지는 만큼 배터리가 원인이 되어 발생하는 해상사고의 빈도 또한 늘어날 것이라 생각된다. 따라서 선박에 사용되는 배터리로 인한 안전 사고에 대한 대책 마련이 시급하다.

BMS란, 배터리를 관리해주는 시스템으로, 배터리 제어의 최적화를 통해 안전성을 확보해주는 기술을 지칭한다.[2] 육상에서는 전기자동차의 보급이 늘어나면서 BMS 시장 규모가 매년 30% 이상의 속도로 성장했다. 선박에서도 배터리의 사용이 늘어나면서 선박용 BMS 시장 또한 빠르게 성장할 것으로 예상된다.

그리고 전기추진선박에서는 추진 장치를 동작시키기 위해 배터리의 전압을 교류로 변경해주는 인버터가 필수적이다.[3] 이 인버터에는 복잡한 제어 알고리즘이 사용되는데, 이를 변경하면 출력 전압을 필요에 따라 바꾸는 게 가능하다.

본 논문에서는 BMS의 전압을 항상 체크하여 선박용 배터리 셀 중 일부가 고장 났을 경우 단락되지 않도록 스위칭 제어를 하는 기능을 추가하고 배터리의 수명 및 교체시기를 추정하는 기능을 추가하여 배터리 문제로 인한 안전사고를 예방할 수 있도록 하였다. 그리고 배터리의 전압이 급감하게 될 경우에도 인버터의 출력전류를 안정적으로 유지하는 제어 시스템을 BMS에 추가하고자 한다.

1.3 연구 목적

일반적으로 선박에서 사용되는 배터리는 여러 개의 배터리 셀을 묶어 놓은 방식으로 제작된다. 그런데 직렬로 연결된 배터리 셀의 경우 중간에 하나의 배터리 셀만 고장 나더라도 그 구조상 배터리 전체가 단락되게 된다. 이러한 상황을 방지하여 배터리 셀 중 하나가 고장이 나더라도 나머지 배터리 셀끼리 연결되어 계속해서 회로에 전류를 흘려 줄 수 있는 스위칭 제어 시스템을 BMS에 도입하여 배터리 안전사고에 보다 안정적으로 대응할 수 있도록 하고자 한다.

그리고 배터리의 SOC와 SOH를 추정하는 기능을 통해 배터리의 고장 유무를 미리 파악하고 교체시기를 미리 알려주는 시스템을 구현하여 사용자가 배터리의 이상 상태를 미리 예측하여 이에 대한 사고가 일어나기 전에 방지대책을 마련할 수 있도록 도움을 주고자 한다.

인버터에 사용되는 제어방식은 스위칭 제어 방식이다. 스위칭 소자를 On, Off 하는 시간을 조절하여 원하는 교류 파형을 만들어낸다. 이 On, Off 시간의 비율을 듀티비(Duty ratio)라고 하며, On 시간이 늘어날수록 더 많은 전류가 흐른다. 인버터에는 출력 파형의 모습에 따라 레벨을 나눌 수 있다. 레벨이 높아짐에 따라 사용되는 소자의 수가 늘어나지만, 출력파형이 정현파에 더욱 가까워져 고조파(Harmonics)를 줄일 수 있다. 그러나 레벨이 높아질수록 인버터를 제어하는 스위칭 소자들의 On, Off를 조절하는 게 매우 어려워진다. 원하는 출력 파형을 만들어내기 위해 스위칭 하는 시간을 계획적으로 구성해야 하는데 스위칭 소자가 많아질수록 서로 영향을 주는 소자도 늘어나 신경 써야 하는 부분이 복잡해지기 때문이다. 이를 계산하기 위해 인버터에는 벡터제어 라는 방식이 사용된다.

본 논문에서는 이 벡터제어 방식을 통해 인버터 제어를 하며 배터리의 전압을 실시간으로 측정하여 배터리에 문제가 발생해 인버터 입력 전압이 급격하게 바뀌게 되면 변경된 입력전압을 문제 발생 직전까지와 같은 출력 전압으로 변경하도록 인버터가 동작하게끔 스위칭 소자를 제어하는 시스템을 구현하였다. 이를 통해 배터리에 문제가 발생하더라도 인버터의 출력 전압을 안정적으로 일정하게 유지할 수 있도록 하였다.



제 2 장 관련 이론

2.1 배터리의 수명

배터리의 수명을 측정하는 이유는 여러 가지가 있다. 우선, 배터리의 고장유무를 예측하는 것이다. 선박 운행 도중 배터리에 문제가 발생하면 더 큰 사고로 이어질 수 있기 때문에[4] 배터리의 수명이 일정수치 이하로 줄어들게 되면 배터리의 교체를 결정하여 그러한 사고를 미리 방지할 수 있다. 그리고 다른 이유로는 선박 전원 상의 문제점 발견이다. 배터리의 수명이 예상보다 더 빠르게 줄어든다는 것은 다른 문제점이 발생하고 있다는 신호가 된다. 따라서 배터리의 수명을 측정하다가 수명이 줄어드는 속도가 비정상적인 상태가 되면 선박의 전원 연결 상의 문제점을 찾아보고 더 큰 사고가 발생하기 전에 미리 예방할 수 있다. 그리고 세 번째 이유로는 실험적인 이유이다. 특정 상황에서 배터리의 수명이 어떻게 변하는지 측정하여 배터리가 어떤 요소에 의해 데미지를 입는지 파악하는 것이다. 이러한 실험을 통해 배터리의 수명을 좀 더 오래 유지하거나, 혹은 특정 환경에 노출되었을 때 배터리의 수명이 어떻게 변할지 예측하여 배터리의 고장에 미리 대응할 수 있다. 본 논문에서는 배터리의 수명을 감지하여 배터리 고장 발생 시 단락되는 것을 막기 위해 스위칭 제어를 하고, 배터리의 교체시기를 파악하여 사용자에게 알려주고자 한다. 그리고 인버터의 레벨에 따른 배터리의 수명 변화를 파악하여 BMS의 배터리 수명 예측에 참조하였다.

2.1.1 SOH

SOH(State Of Health)란 배터리의 수명을 상태에 따라 표시한 것이다. 배터리의 이상적인 상태에서 현재 배터리의 수명 상태를 비교하여 그 비율을 %로 나타낸다. 즉 가장 이상적인 상태의 SOH는 100%이고, 열화된 만큼 그 수치가 내려가게 된다. SOH는 배터리의 충전용량과도 밀접한 관계가 있다. SOH가 내려갈수록 충전용량도 줄어들게 된다. 따라서 배터리를 많이 사용하여 열화 되면 배터리는 SOH가 100%인 상태일 때 완전 충전한 전력량에 비해 완전 충전을 해도 저장된 전력량이 낮다. 일반적으로 충전용량이 80%정도까지 떨어지면 SOH가 0%, 즉 수명을 다했다고 판단한다. 배터리는 전기적, 화학적 작용을 통해 전력을 저장하게 되는데, 이러한 배터리의 열화는 전기적 영향, 화학적 영향, 기계적 영향 등에 의해 이루어지며 이렇게 SOH가 감소한 배터리를 계속 사용하게 되면 전력손실로 인해 효율이 감소하고 발열, 폭발 등 안전사고에 노출 될 수 있으므로 SOH가 0%로 되기 전에 배터리를 미리 교체해주어야 한다.[5]

2.1.2 배터리 열화 원인

배터리의 열화 즉, 성능 저하 요인은 배터리의 종류에 따라 다를 수 있으며, 한 종류 배터리의 열화 요인에도 여러 가지 원인이 존재한다. 그 중 리튬 이온 배터리의 충·방전을 반복함으로써 발생하는 열화는 주로 내부 구조의 변형과 분극현상 등으로 인해 진행된다. 리튬 이온 배터리는 충·방전을 실시할 시 Li이온과 H이온이 교환되는 과정에 산소 층의 전단 현상이 일어난다. 이러한 현상은 충·방전이 반복될수록 누적되어 배터리 내 원소의 배열이 붕괴되는 결과를 가져와 원자 배열

에서의 주기성이 점점 사라지게 된다.[6] 이런 이유로 배터리의 성능은 충·방전이 반복될수록 감소하는 것이다. 그리고 분극현상이란 배터리의 각 전극에 이온이 결합하여 전압을 방해하는 요소가 되는 현상을 말한다. 이러한 분극현상이나 여러 가지 환경 요인에 의해 리튬 이온 배터리의 단자 소재는 사용할수록 열화 되어간다.[7] 또한, 충·방전에 의해 움직이고 있는 리튬이온들 외에 사용되고 있지 않는 리튬이온들이 화학반응을 일으켜 내부저항을 증가시키는 요인이 되기도 한다.

2.1.3 Randles의 배터리 모델

Fig. 1은 영국의 전기 화학자 Randles가 제안한 배터리 모델 회로이다.[8] 그림에서 R1은 배터리 내부 저항, R2는 충·방전 전류가 흐를 시 발생하는 분극 현상에 의한 이온화 손실 저항, 그리고 C는 이중층의 커패시턴스 값을 나타낸다. Randles 배터리 모델의 각 수치들은 전류 양, 온도, 열화 상태 및 각종 환경 요인들에 영향을 받으며, 이 수치들을 통해 SOH 값을 추정할 수 있다.

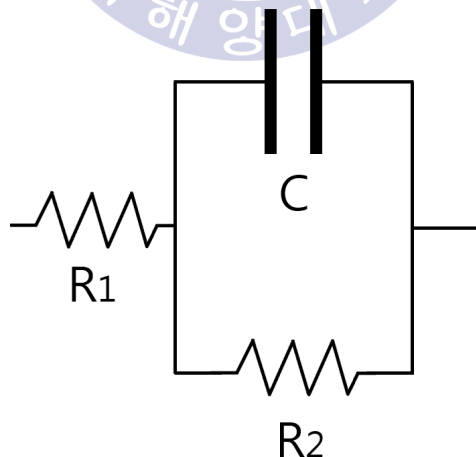


Fig. 1 Randles model of battery

2.1.4 SOC

SOC(State Of Charge)는 배터리의 잔존용량을 의미한다. 리튬 이온 배터리의 경우 여러 번의 충·방전이 가능한 이차전지에 속하는데, 이때 배터리를 어느 정도 충전할지 고려해야 한다. 배터리의 만충 상태란 배터리가 손상되지 않는 범위 내에서 수용할 수 있는 전하를 최대한 저장한 상태를 의미한다. 전하가 많이 충전될수록 배터리의 전압이 올라가게 되는데, 전압이 과하게 상승할 때까지 배터리를 충전하게 되면 손상이 오게 된다. 그러므로 배터리를 충전할 때에는 전압의 범위를 정해두고 충전을 해야 한다. 그리고 배터리의 만방 상태란 배터리가 손상되지 않는 범위 내에서 최대한 전하를 방출한 상태를 의미한다. SOC가 100%이면 배터리 용량이 가득 찬 상태, 즉 만충 상태이고, 0%이면 전력을 모두 소모한 상태인 만방 상태임을 의미한다. 일반적으로 상온에서 만충 상태인 배터리를 만방 상태까지 일정 전류로 방전시킨 값을 정격용량이라 한다. SOC는 직접적으로 잴 수 있는 방법은 없으며, 간접적으로 측정할 수 있는 방법이 몇 가지 있다.[9] 배터리 전해질의 비중과 pH를 측정하여 SOC 값을 계산하는 화학적 방법이 있고, 배터리의 전류를 시간에 대해 적분하는 전류 적분 방법, 배터리 내부 압력을 측정하여 계산하는 압력 측정 방법 등이 있다. 이 외에도 SOC를 보다 정확하게 측정하기 위한 여러 가지 방법들이 연구개발되고 있다. 그 중 본 논문에서 사용할 SOC 추정방법은 전압측정 방법이다. 이 방법은 측정된 배터리의 전압을 이용한 방식인데, 배터리의 전압은 전류에 영향을 많이 받게 된다는 특징이 있다. 그래서 보다 정확하게 SOC를 추정하기 위해서 OCV라는 기법을 사용하였다.[10]

2.1.5 OCV

OCV(Open Circuit Voltage) 기법은 배터리의 SOH를 추정하는데 꽤 유용하게 사용할 수 있다.[11] Randles 배터리 모델에서 보면 R_1 , R_2 가 있는데 전류가 흐르는 상태에서 전압은 두 개의 저항에 다 걸리게 되므로 이때의 전압을 측정하면 R_1 값과 R_2 값을 특정할 수 없게 된다. 그러나 전류의 인가 순간의 전압 및 단락 순간의 전압을 측정하는 OCV 방식을 사용하면, C값에 의해 R_2 에는 전압이 걸리지 않고 순수하게 R_1 에 걸리는 전압 값을 계산해 낼 수 있어서 R_1 저항 값을 추정할 수 있다. 이러한 방식을 통해 R_1 값이 의미하는 배터리 내부 저항 값을 추정해내 분석하여 배터리의 SOH를 추정하는데 사용할 수 있다.

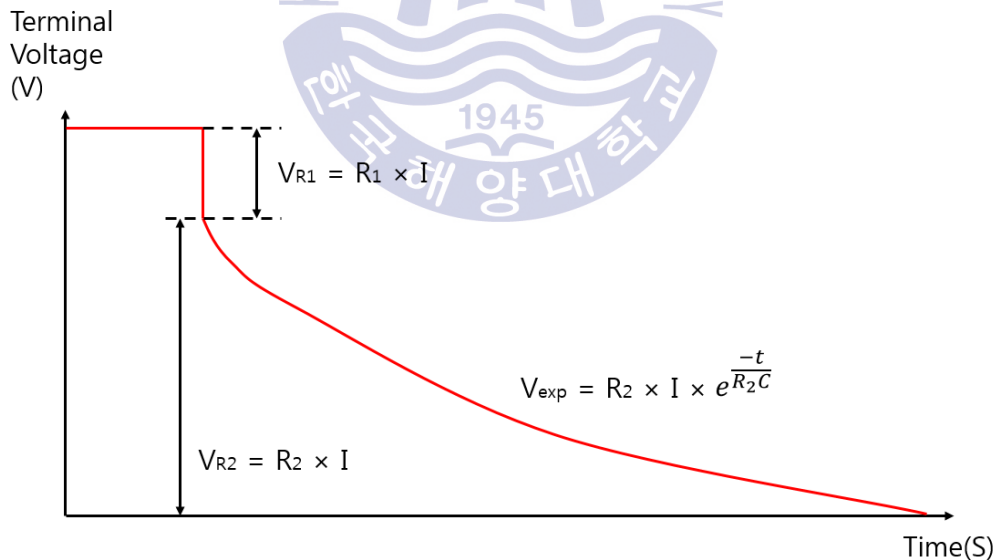


Fig. 2 A graph to estimate R_1 , R_2 through OCV

2.2 벡터제어

벡터제어에는 복잡한 연산이 필요하여 실시간 고속 연산이 가능한 고성능의 마이크로프로세서가 있어야 한다. 그래서 벡터제어 분야는 DSP 처럼 고성능 마이크로프로세서가 개발되면서부터 활발하게 연구가 진행 될 수 있었다.[12] 그리고 이러한 고속 스위칭 제어가 가능하기 위해서는 대용량이면서도 빠른 주파수 스위칭이 가능한 소자가 필요하였고, MOSFET이나 IGBT의 개발을 통해 벡터제어 시스템이 구현되기 시작했다.

2.2.1. 유도전동기 벡터제어

유도전동기의 토크를 제어하기 위해서는 고정자의 입력 전류를 제어해야 한다. 고정자 입력 전류에는 토크 전류성분과 여자 전류성분이 있는데, 이 두 가지를 제어하기 위해서는 고정자 전류를 좌표변환 해야 한다. 이를 위해 자속각을 기준으로 고정자 전류를 좌표변환 해야 한다. 이를 위해 자속각을 기준으로 고정자 전류를 제어하게 되며, 이러한 제어 방식을 벡터제어라고 부른다. 이 때, 자속 전류성분을 d 축, 토크 전류성분을 q축으로 두고, 자속의 회전각과 크기를 추정해야 한다. 이 회전각을 알아내는 방법으로 벡터제어는 직접벡터제어와 간접벡터제어로 나뉜다. 직접벡터제어는 고정자의 전류나 전압을 통해 자속을 알아내거나 혹은 전동기의 자속을 직접 측정하는 방식이다.[13] 이 방식은 직접 수치를 측정해야 한다는 점에서 센서를 설치할 필요가 있는데, 이 센서가 전동기 동작에 의한 온도 상승 및 진동에 의해 데미지를 입을 가능성이 있다. 그리고 센서를 설치하기 위해서는 전동기의 구조에도 제한이 따르며 센서 값을 받아들일 때 고조파 성분이나 리플 성분을 없애줄 필터를 추가로 설치할 필요가 있다. 이 때 필터는 전동기의 주파수 등에 의해 계산된 필터이어야 하며, 전동기의 특성이

달라지면 이 필터 또한 그에 맞춰 바뀌어야만 한다. 이에 비해 간접벡터 제어는 측정된 전류 값을 이용하여 슬립각속도를 계산하며 회전속도를 통해 자속 각속도를 추정하므로 직접벡터제어가 갖는 단점을 피할 수 있다.[14] 또한 간접벡터제어는 고속으로 동작하는 전동기에서도 사용할 수 있고, 계산을 통해 값을 알아내므로 센서나 필터 설치 등 추가 비용이 발생하지 않는다. 그러나 계산능력이 뛰어난 마이크로프로세서가 필요하다. 본 논문에서의 벡터제어는 이 간접벡터제어 방식을 사용한다.

2.2.2. 2레벨 벡터제어

과거에 사용했던 인버터 제어 방식은 PWM 방식이었다. 이 방식은 원리가 비교적 간단하지만, 응답특성이나 고조파 함유율 등의 문제로 인해 출력 파형이 매끄럽지 못하다는 단점이 있었다. 그러나 마이크로프로세서의 발전을 통해 좀 더 좋은 연산 능력을 갖게 되면서 복잡한 알고리즘을 필요로 하는 공간전압벡터 PWM방식을 사용할 수 있게 되었다.

Fig. 3은 3상 2레벨 인버터의 회로이다. 여기서 T1, T2는 직선상에 위치하고 있는데, 이 두 스위치가 동시에 On이 되면 도중에 부하가 없이 그대로 전류가 흘러 스위칭 소자가 손상 될 뿐만 아니라 매우 위험할 수도 있다. 따라서 한 직선상에 있는 T1-T2, T3-T4, T5-T6는 절대 동시에 On시키지 않도록 한다. 그리고 이러한 스위치를 묶어 SWa, SWb, SWc 라고 했을 때 SWa는 a상, SWb는 b상, SWc는 C상의 전압을 제어하는데 사용된다. 이 스위치들을 상호보완(Complementary)형으로 동작시켜 3상 교류를 만들어내는데 각 스위치 별 출력에 대한 내용은 Fig.

4와 같다.

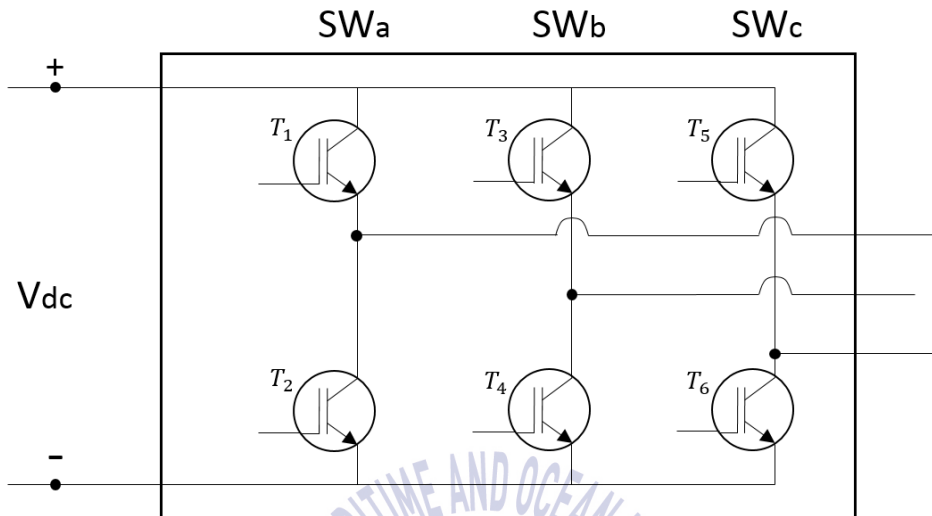
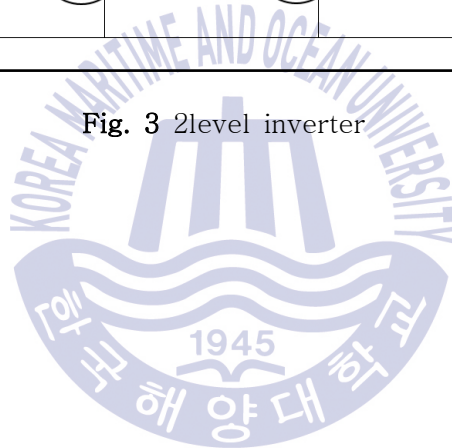
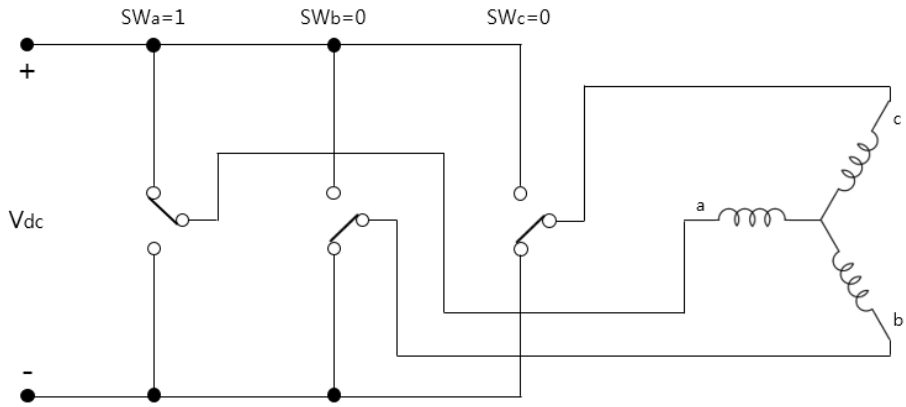
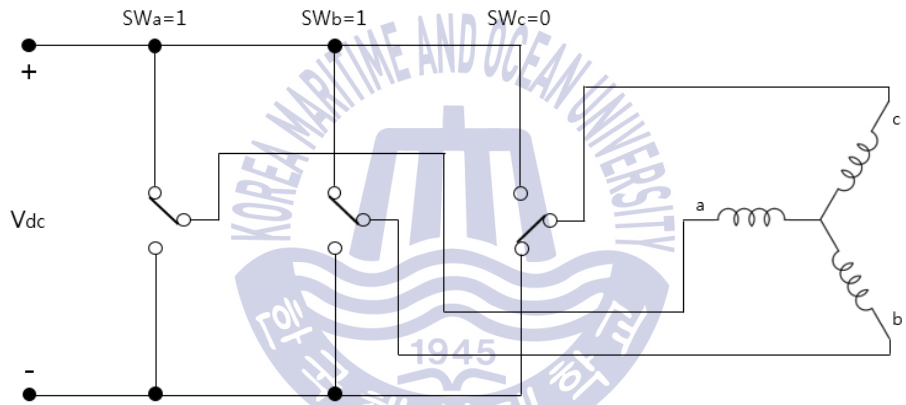


Fig. 3 2level inverter

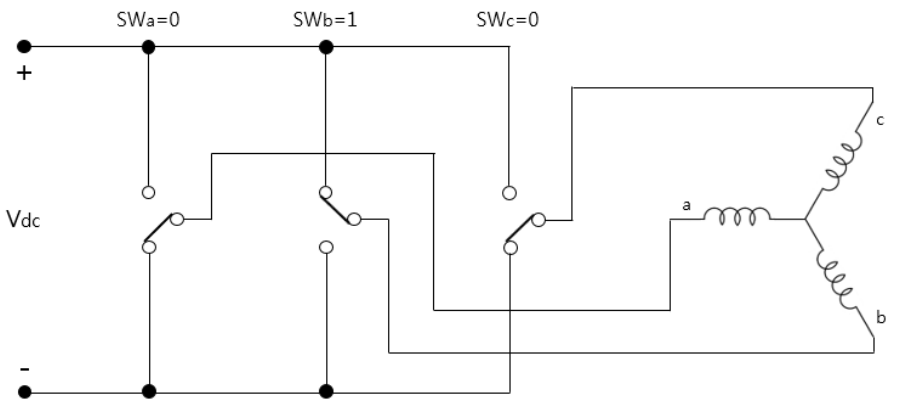




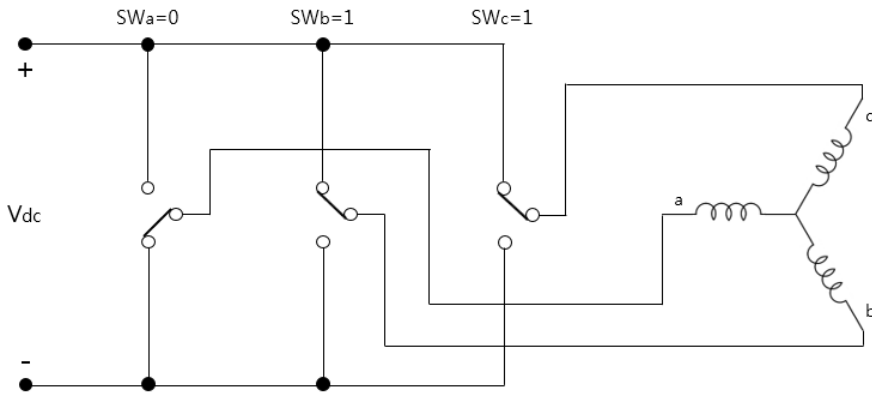
(a) Switching state for applying a vector $V(1)$



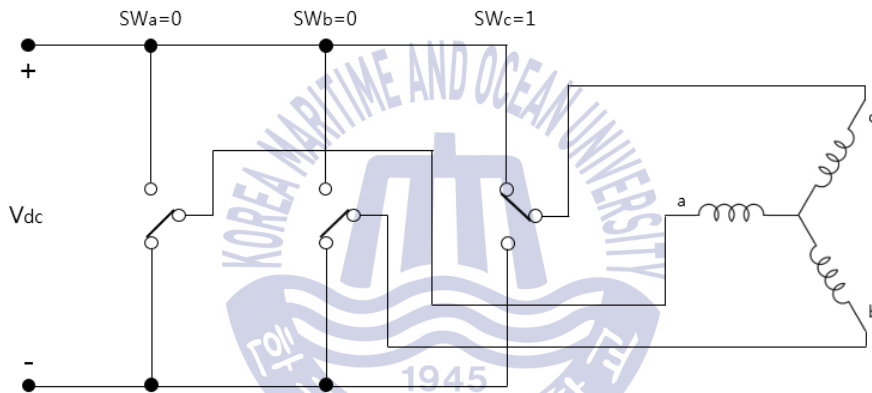
(b) Switching state for applying a vector $V(2)$



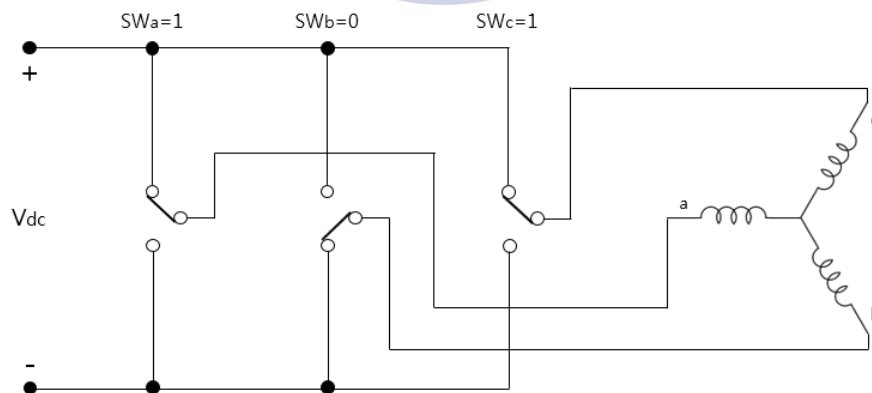
(c) Switching state for applying a vector $V(3)$



(d) Switching state for applying a vector $V(4)$



(e) Switching state for applying a vector $V(5)$



(f) Switching state for applying a vector $V(6)$

Fig. 4 Switching states for applying vectors $V(1)\sim V(6)$

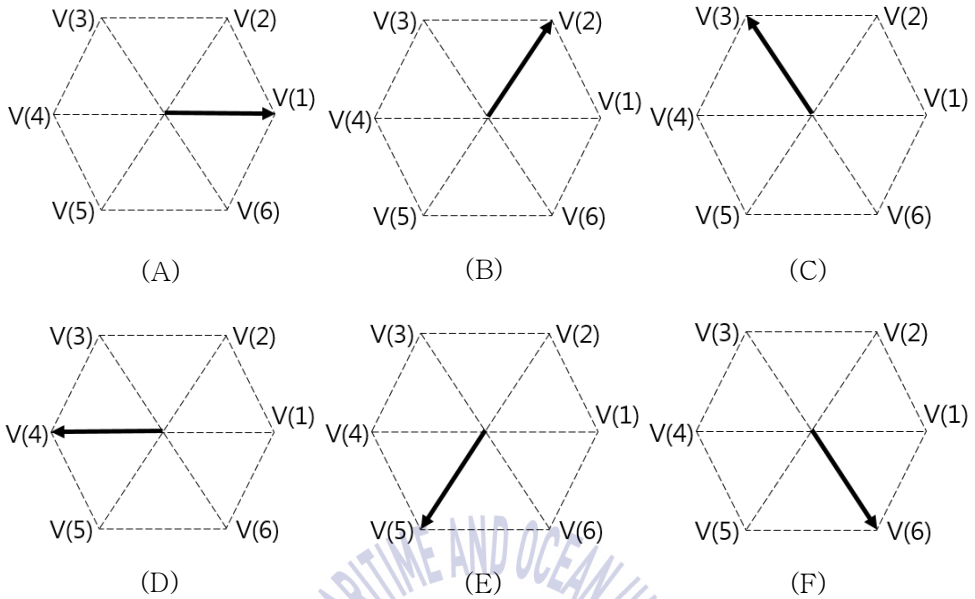


Fig. 5 Space voltage vectors corresponding (a)~(f)

이 3상 2레벨 인버터에서 나타나는 각 스위치 별 On, Off에 따른 전압벡터의 각도 및 각 상의 전압에 대한 내용은 아래의 표와 같다. 모든 스위치가 0이 되거나 1이 될 경우 벡터의 합이 0이 되는 무효벡터는 Fig. 4, Fig. 5에선 표현하지 않았다. 그리고 아래의 식(1)은 인버터 출력의 공간전압벡터를 나타낸다.

$$v_s^s = \frac{2}{3}(v_{as} + av_{bs} + a^2v_{cs}) \quad (1)$$

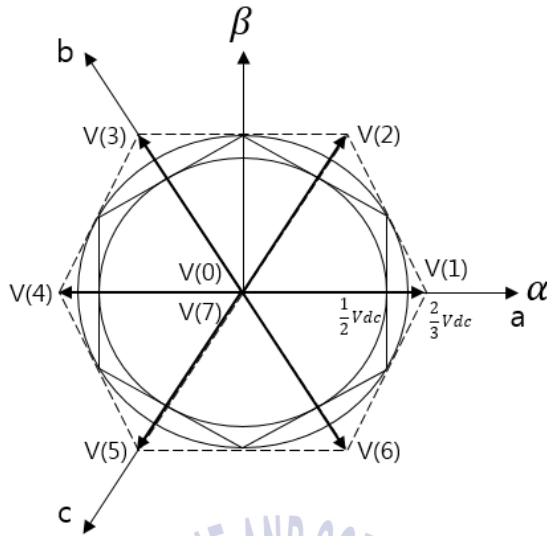


Fig. 6 Output limit of 2level inverter

Fig. 6에서 나타난 원은 2레벨 인버터가 낼 수 있는 출력의 파형이 선형일 때 최대 출력의 한계를 나타낸다. 이 이상 출력을 올리면 파형이 일그러지게 된다. 여기서 V(1)~V(6)으로 이루어진 육각형에 내접한 원은 공간전압벡터 제어 방식일 때의 최대치이고, 그보다 작은 육각형에 내접한 원은 삼각과 비교방식으로 인버터를 제어할 때의 최대치를 나타낸다. 이를 식으로 나타내면,

$$\frac{\frac{2}{3} V_{dc} \cos \frac{\pi}{6}}{\frac{1}{2} V_{dc}} = 1.155 \quad (2)$$

로서, 공간전압벡터 방식으로 제어할 때 인버터 출력의 선형제어 영역이 삼각과 비교방식의 경우보다 15.5%정도 넓음을 알 수 있다.

2.2.3. 3레벨 벡터제어

3레벨 인버터의 벡터제어는 2레벨 인버터의 벡터제어보다 까다롭다. Fig. 7은 3레벨 인버터의 그림이다. 2레벨 인버터와 비교하면 전압이 인가되는 부분에 캐패시터 두 개가 연결되어 있는 것과 스위치의 수가 늘어난 것을 확인할 수 있다. 이 캐패시터에 의해 인가전압이 분배되는 것을 이용하여 출력파형의 고조파를 줄일 수 있게 된다.

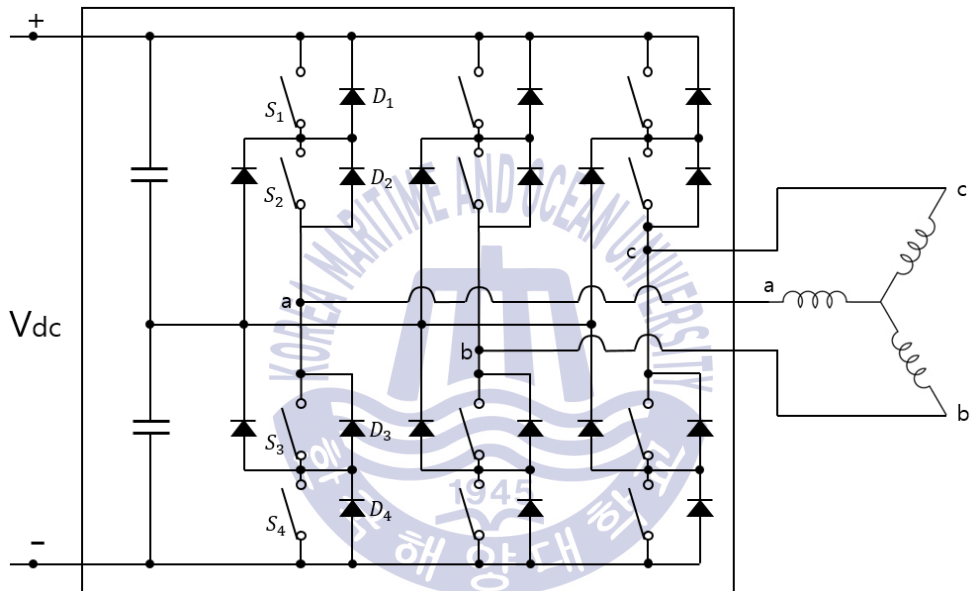


Fig. 7 3level inverter

2레벨 인버터와 마찬가지로 한 직선상에 있는 스위치가 모두 On이 되면 과전류가 흘러 소자에 손상이 갈 수 있으므로 이를 방지하기 위해 스위치 $S_1 - S_3, S_2 - S_4$ 는 서로 On, Off 상태가 반대가 되도록 제어한다. 그리고 스위칭이 일어날 때 아주 짧은 순간 두 스위치가 모두 On이 되는 것을 막기 위해 스위칭 시 두 스위치 모두 Off가 되는 시간인 Deadtime을 사용한다. 2레벨에서는 각 상의 전압 상태가 V_{dc} 와 0의 두 종류였으나, 3레벨에서는 각 캐패시터에 걸리는 전압을 E 라고

두면 각 상의 전압 상태는 E, 0, -E의 세 종류가 존재하게 된다.

Table. 2 Switch states and voltage of P, O, N

스위칭상태	한 상의 전압상태를 제어하는 스위치				걸리는 전압
	S_1	S_2	S_3	S_4	
P	On	On	Off	Off	E
O	Off	On	On	Off	0
N	Off	Off	On	On	-E

그리고 위 표에 나타난 특성을 활용하여 인버터를 동작 시킬 때의 스위칭 상태에 따른 전압 파형의 모습을 간단히 나타내면 Fig. 8과 같다.

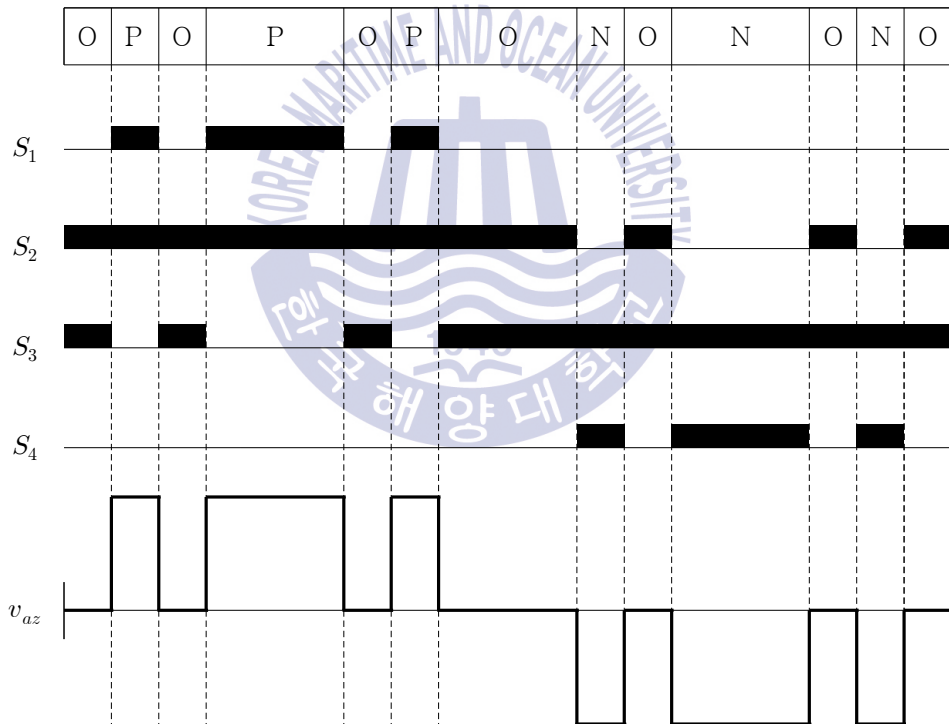


Fig. 8 Voltage waveform of 3level inverter switching

여기서 까만 줄로 표시된 시간은 스위치가 On이 되는 시간이며, v_{az} 는 a상의 상전압을 나타낸다. v_{az} 에서 나타는 전압의 크기는 캐패시터

하나에 분배된 V_{dc} 값인 E 가 되며, 따라서 v_{az} 의 크기는 $E, 0, -E$ 의 세 가지 상태로 나타내어진다. 그리고 이러한 각 상의 전압 파형을 120° 위상차를 두고 출력하면 Fig. 9와 같은 결과를 얻을 수 있다.

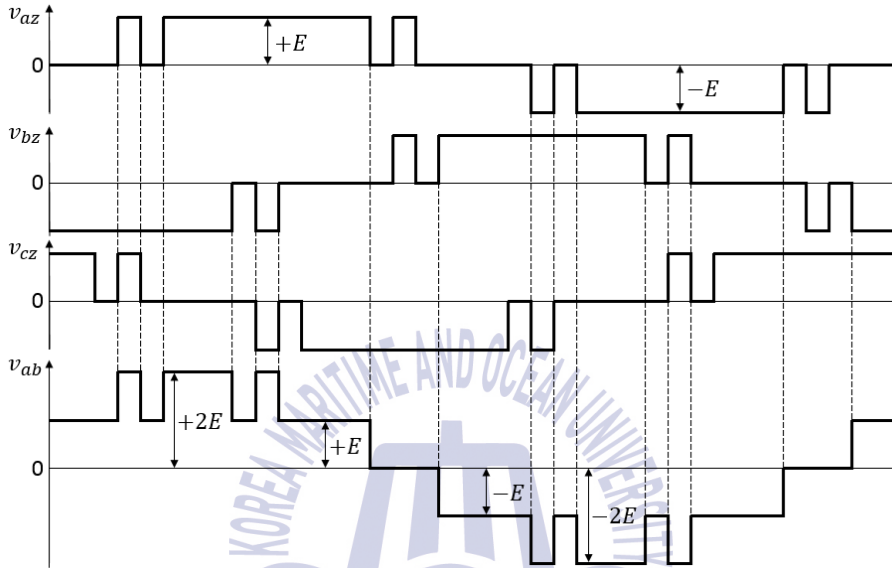


Fig. 9 Sinusoidal waveforms created by phase voltages

여기서 가장 밑에 위치한 v_{ab} 파형은 v_{az} 에서 v_{bz} 를 뺀 값이다. 각 상의 스위칭 작용에 의해 생겨난 $+E \sim -E$ 사이의 전압 파형이 서로 상호작용하여 $+2E \sim -2E$ 범위의 보다 정현파에 가까운 전압을 만들어낸다. 이 때, 유도성 부하를 사용하게 되면 각 상에서 스위칭 상태가 O에서 P로 바뀔 때의 전류의 흐름은 Fig. 10, Fig. 11과 같이 나타난다.

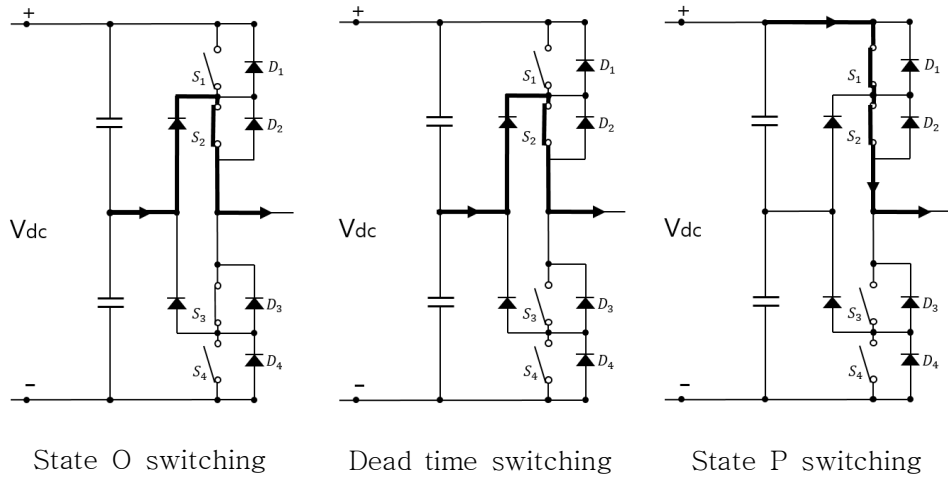


Fig. 10 Phase current $I_A > 0$

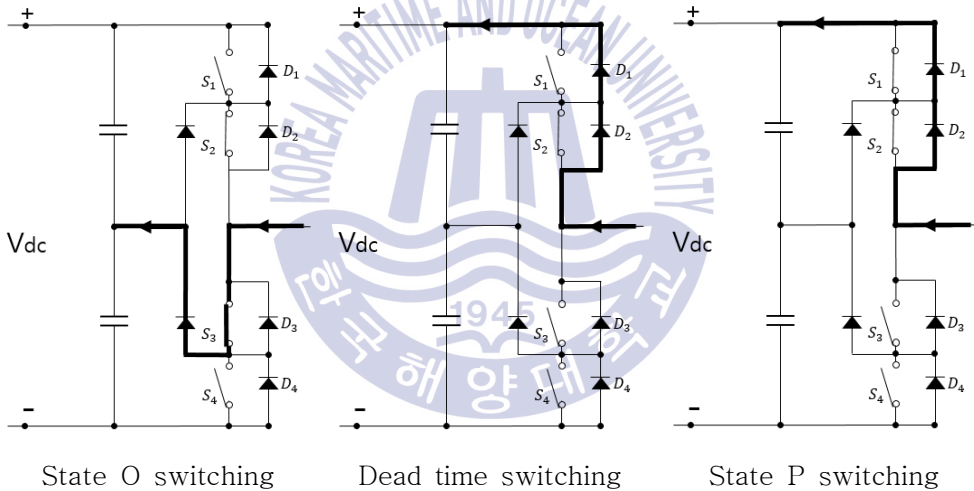


Fig. 11 Phase current $I_A < 0$

Fig.10, Fig. 11를 통해서 3레벨 인버터는 아래와 같은 특징을 가진다는 것을 알 수 있다.

첫 번째, 전압분배로 인해 각 스위치에 걸리는 전압의 크기가 줄어든다. 인버터가 동작하는 중에는 각 스위치가 견뎌야 하는 전압의 크기가 전체 DC전압의 절반에 불과하다.

두 번째, 추가적인 요소가 없이도 전압을 균등분배 할 수 있다. 가장

위나 가장 아래에 위치한 스위치에 흐르는 누설전류가 안쪽에 위치한 스위치들보다 낮도록 선택된다.

마지막 세 번째는 시간에 따른 전압의 변화량이 적고 고조파가 감소된다는 점이다. 선간 전압 파형이 다섯 개의 높이를 가지는데, 이는 2레벨 인버터에 비해 같은 입력전압과 스위칭 주파수를 사용하더라도 더 좋은 고조파 특성을 가진다는 장점이다.

단점으로는, 다이오드와 스위칭 소자가 추가적으로 들어간다는 점과, 중간전압지점이 흔들릴 가능성 등이 있다.[15]



제 3 장 전기추진 인버터용 BMS

3.1 하드웨어

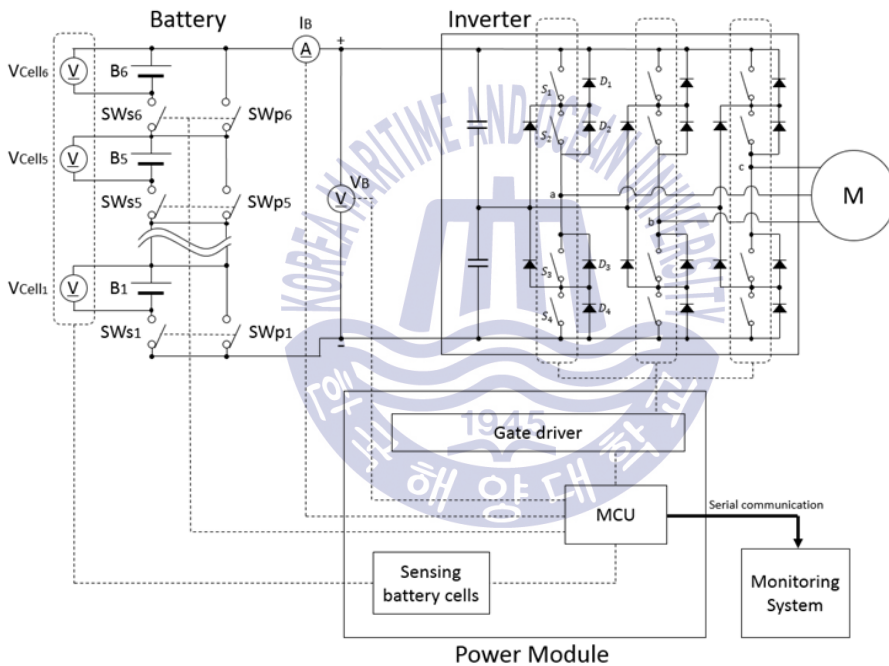


Fig. 12 Whole structure of BMS for electric propulsion inverter

Fig. 12는 전기추진 인버터용 BMS의 전체 시스템에 관한 그림이다. 그림의 왼쪽 부분을 보면 배터리 셀마다 전압을 측정하고 있으며, SWs, SWP 스위치가 연결되어 있음을 알 수 있다. 이를 이용하여 배터리 각 셀에 문제가 발생했을 경우 파악하는 것이 가능하며 셀의 고장에 의한 배터리 전체 단락을 막기 위해 스위치를 제어할 수 있다. 그

리고 배터리의 전압 측정을 통해 OCV를 계산하여 배터리 셀 내부 저항값을 추정할 수 있으며 이 내부저항 값을 이용하여 도출해 낸 SOH를 활용해 배터리의 고장 예측 및 교체 시기 파악이 가능해진다. 그리고 아래의 Power Module에서 배터리에 이상이 생겨 전압의 급감이 감지되면 Duty ratio를 조절하여 인버터의 출력을 일정하게 유지하도록 제어한다. 본 논문에서는 이러한 전기추진 인버터용 BMS 시스템을 제안하고 있으며 이 시스템의 구현에 관한 실험을 진행하였다.

3.1.1. BMS 구성

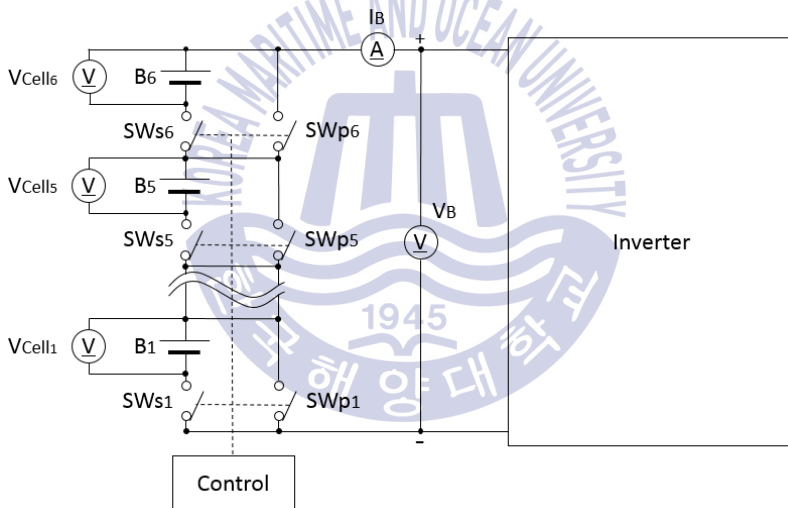


Fig. 13 Battery short-circuit protection and voltage management

Fig. 12에서 배터리의 전체 전류가 단락되는 것을 막기 위한 바이패스 스위칭 제어 부분과 배터리의 전압을 관리하는 부분에 관한 내용이 Fig. 13에 나타나있다. 배터리 팩 중에서 특정 셀이 고장 났을 경우 남은 배터리 셀들이 연결될 수 있도록 스위치가 나열되어 있다. 그리고 이 스위치들과 전압 측정 장치를 이용하여 OCV를 측정할 수 있도록

하였다. Fig. 13에서 배터리는 Cell1~Cell6까지 총 6개의 셀로 이루어져 있으며 스위치 $SW_{S1} \sim SW_{S6}$ 과 $SW_{P1} \sim SW_{P6}$ 이 각 배터리 셀 마다 연결되어 있다. 이 중 $SW_{S1} \sim SW_{S6}$ 는 평소에 On 상태로 있으며 각 배터리들을 연결해 준다. 그러나 동작 중 배터리 셀 중 하나에 문제가 발생하여 이상이 검출되면, 해당 배터리 셀에 해당하는 SW_S 스위치가 Off되어 그 배터리 셀을 제외시키고, SW_P 스위치가 On되어 다른 배터리들을 연결시켜 전체 배터리 팩이 인버터와 접속되도록 해준다.

또한, 배터리 셀 당 OCV를 측정하기 위해서도 이 스위치를 사용한다. OCV를 측정하고 싶은 셀의 SW_S 스위치를 Off시키고 SW_P 스위치를 On시키게 되면 해당 배터리는 순간적으로 연결이 끊기게 되므로 그 순간의 전압을 측정하면 OCV 값을 측정할 수 있다. 이 때 SW_P 스위치를 On 해주는 이유는 OCV를 측정할 때 전체 배터리가 단락되지 않게 하기 위해서이다.

이렇게 측정된 배터리의 OCV 값을 측정된 전류 값 I_B 을 이용해 계산하면 각 배터리 셀의 내부 저항 R_1 값을 추정할 수 있다. 이 내부 저항 값을 이용하면 SOH를 계산할 수 있으며 이를 통해 배터리의 교체 시기를 알 수 있고 또한 배터리의 이상상태를 미리 감지할 수 있게 해준다. 이처럼 BMS는 배터리를 관리, 모니터링 하기 위한 시스템으로써 이를 통해 배터리를 사용하는 장치로부터 발생하는 안전사고를 예방할 수 있다. 따라서 BMS는 배터리의 상태를 체크해야 하는데, 측정되는 값은 다음과 같다.

1. 배터리 셀 당 전압 : 선박에 사용되는 배터리의 경우 여러개의 셀이 한 배터리 팩을 구성하게 되는데 본 논문에서 제안하는 BMS는 각 셀별로 전압을 측정한다. 이렇게 하는 이유는 직렬로 연결된 배터리의

셀 중 하나가 이상이 생겨 제대로 전류를 흘릴 수 없게 되면 배터리 팩 전체 전류가 단락되어 버리기 때문이다. 그래서 셀별로 전압을 측정하여 어느 셀에 이상이 생겼는지 파악해야 할 필요가 있다. 또한, 상상하듯 전압을 이용하여 각 셀의 SOH를 추정할 수 있다. 이렇게 구해진 SOH는 관리자로부터 배터리에 문제가 발생하기 전에 조치를 취할 수 있도록 해준다. 이러한 전압의 측정은 저항으로 전압을 분배시키는 회로를 구성하고 이를 통해 구해진 전압을 Microprocessor의 A/D컨버터로 읽어 들이는 방식으로 이루어지며 이는 배터리 팩 전체 전압의 측정에도 동일하게 적용된다.

2. 배터리에 흐르는 전류 : 배터리 팩에서 흐르는 전류는 인버터에 인가되며, 이에 따라 인버터 제어와 출력, 그리고 부하에 영향을 받는다. 그래서 인버터의 레벨이 낮아 고조파가 높아지게 되면 배터리의 전류 출력이 불안정해지므로 배터리의 수명에도 영향을 주게 된다. 따라서 배터리에 흐르는 전류를 측정하고 관리하는 것 또한 중요하며 이상이 발생하면 대처를 하도록 해야 한다. 그리고 이 전류 값은 SOH를 추정하기 위한 내부저항 값 계산에도 사용되므로 반드시 측정해야 할 필요가 있다. 도선에 전류가 흐르면 자기장이 발생하는데, 이 자기장의 방향과 수직으로 전류를 흘려 전기장을 발생시켜 Hall effect를 활용하는 전류센서를 이용하여 이 전류를 측정한다.

3. 배터리 전체 전압과 인버터 출력 : 인버터에 인가되는 배터리의 전체 전압이 달라지면 인버터의 출력 또한 바뀐다. 그런데 배터리 셀 중 하나에 이상이 생기면, 셀 별 스위치 제어를 통해 배터리 전체의 단락을 막더라도 배터리 전체 전압은 급격히 낮아지게 된다. 그러면 인버터의 출력 파형 또한 급격히 변하게 되어 인버터를 통해 구동하고 있

던 장치에도 심각한 데미지를 줄 수 있다. 이는 안전사고로도 이어질 수 있는 중요한 문제이다. 본 논문에서는 배터리의 전체 전압을 실시간으로(약 46us마다) 측정하여 문제가 발생 했을 시 출력이 일정할 수 있도록 인버터 스위칭 제어의 Duty ratio를 제어하는 시스템을 설계하였다.

3.1.2. 인버터 출력전류 일정 제어

인버터는 직류 출력인 배터리로부터 선박의 추진 장치 등에 사용되는 교류파형을 만들어내기 위해 필요한 장비이다. 인버터는 스위칭 파형을 계산하는 Microprocessor, 스위칭 전압을 출력하는 게이트 드라이버 회로, 해당 스위칭 신호를 받아 교류 전압 파형을 출력하는 인버터 회로로 나뉜다. Fig. 14은 2레벨 인버터 회로이고, Fig. 15은 2레벨 인버터에 사용되는 게이트 드라이버 회로이다. Microprocessor는 TI사의 TMS320F28335 칩을 사용하였고, 모듈은 SyncWorks사의 JTAG로 프로그램을 입력하여 동작시켰다. 스위칭 전압을 출력하기 위해 제작한 Flyback converter에 DRP-9303TP 전원공급기로 전압을 인가하여 Switching module을 동작시켰다. Switching module에 충분한 전압을 공급한 후 Microprocessor에서 만들어진 PWM 신호에 맞게 스위칭 전압을 Inverter로 보내게 했다. Inverter의 인가전압은 리튬이온 배터리로 입력했다.

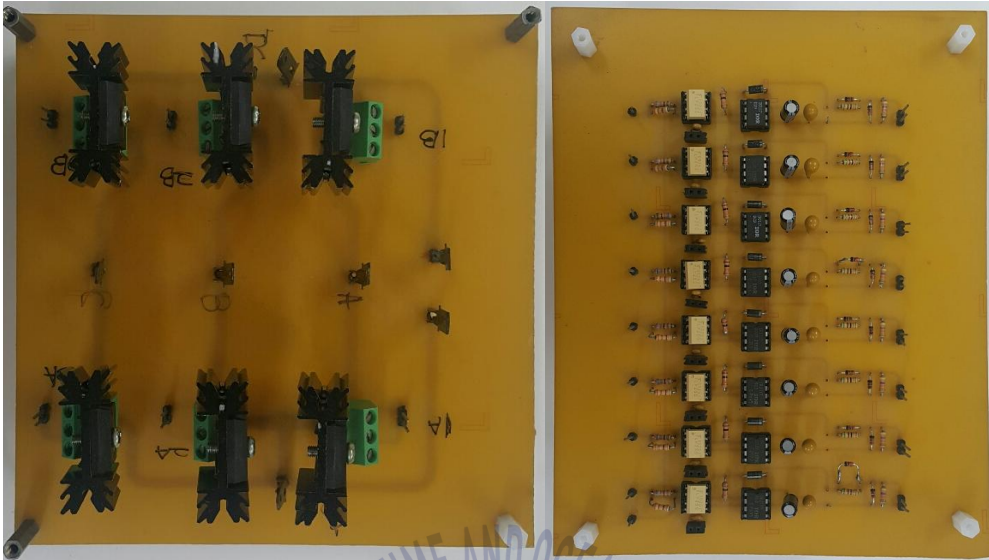


Fig. 14 Inverter circuit of 2level

Fig. 15 Gate drivers of 2level

선박의 운전 중에 배터리의 셀 중 하나가 이상이 생기면 BMS시스템을 이용하여 배터리의 출력이 끊기는 것은 막을 수 있지만 순간적으로 배터리 팩 전체의 전압이 낮아지게 된다. 이는 인버터의 출력에 영향을 주게 되어 선박 구동장치에 손상을 줄 수도 있으며 안전사고로 이어질 수도 있다. 인버터는 대부분 공간전압벡터 PWM 제어 방식을 사용하는데, 이러한 제어 방식은 PWM의 Duty ratio에 따라 인버터의 출력 크기를 바꿀 수 있다. 따라서 이를 이용하면 급격한 입력전압의 변화에도 안정화된 출력을 유지할 수 있다.

Fig. 16는 DSP 칩에서의 PWM 신호 발생과 Duty ratio의 제어에 관한 그림이다. 이러한 Duty ratio 제어는 Microprocessor 칩에 의해 계산되며 칩의 성능에 따라 Duty ratio의 제어를 더 세밀하게 할 수도 있다. 먼저 Microprocessor의 타이머-카운터에 따라 T1PR 값을 정할 수 있다. 이 값은 카운트 되는 숫자의 최대치를 나타내며 카운트 값은 이 T1PR을 넘어갈 수 없다. 그리고 CMPR1과 CMPR2의 값을 지정해 줄

수 있는데, 카운트 값이 계속 증가하다가 이 값에 도달하게 되면 각 숫자에 해당하는 PWM을 ON, OFF 시키게 된다. 이 때 PWM 값이 ON 이 되느냐 OFF가 되느냐를 결정하는 것은 PWM 모드인 Active Low 방식과 Active High 방식이다. Fig. 16에 나타난 PWM1의 모드인 Active Low는 카운트 값이 CMPR1보다 낮을 때 ON이 되는 방식이다. 따라서 카운트가 증가하다가 CMPR1 값에 도달하게 되면 PWM1은 OFF가 된다. 그리고 Fig. 16의 PWM2가 설정된 Active High 모드는 설정된 CMPR2 값에 카운트가 도달하게 되면 ON이 된다. 즉 Active Low 인지 Active High인지에 따라서 CMPR 값에 대한 ON, OFF 특성이 바뀌게 되며, Fig. 16에 나타난 카운트 방식에서는 Active Low를 쓰면 PWM 주기 T_s 의 처음과 끝에 스위치를 ON시킬 수 있고, Active High를 쓰면 T_s 의 가운데 시간에서 스위치를 ON시킬 수 있다. 여기서 Duty ratio란 주기 T_s 에서 스위치가 ON이 되는 시간의 비율을 의미한다. Fig. 16에 나타난 대로 PWM을 설정해둔다면 한 주기 T_s 에서 PWM1이 ON되는 비율은 $D_1(1 \geq D_1 \geq 0)$ 이 된다. 그리고 PWM1과 PWM2가 모두 0이 되는 비율이 D_0 이므로, 이 Duty ratio 값 D_0, D_1, D_2 를 모두 더하면 1이 되어야 한다. 만약 PWM1의 Duty ratio를 증가시키고 싶으면 CMPR1 값을 올리면 된다. 그러면 카운트 값이 증가한 CMPR1 값과 같아질 때까지 PWM1은 ON상태를 유지한다. 즉, PWM의 Duty ratio를 제어하기 위해서는 CMPR 값을 변경하면 된다. 인버터의 출력을 낮추려면 인버터를 제어하는 공간전압벡터 PWM의 CMPR 값을 낮추면 되고, 이 값을 올리면 인버터의 출력이 증가하게 된다.

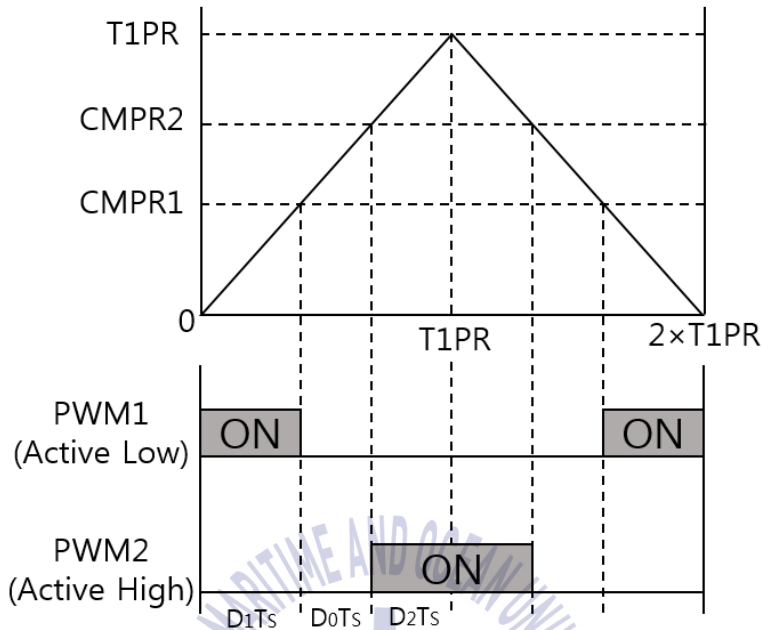
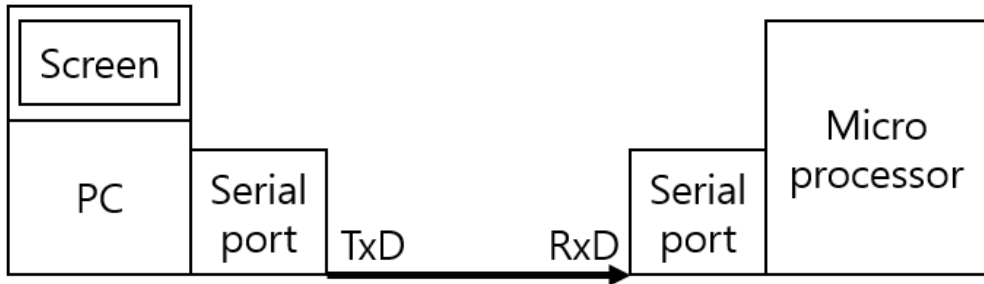


Fig. 16 Generation principle of PWM

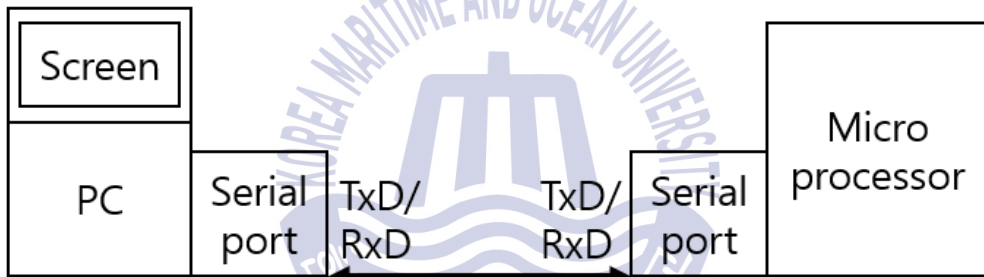
3.1.3 직렬통신(RS-232) 모니터링 구성

파워 모듈을 통해 측정된 전압, 전류 및 배터리 SOH값 등을 쉽게 관리, 제어하기 위해서는 모니터링 시스템이 필요한데 이러한 정보를 송·수신하기 위해 본 논문에서는 시리얼 통신을 사용하였다. 시리얼 통신은 직렬통신이라고도 불리며 대부분의 PC에서 사용이 가능한 통신 프로토콜이다. 이와 대비되는 통신으로 병렬통신이 존재하는데, 병렬통신의 경우 직렬통신에 비해 통신 속도가 빠르지만 비교적 짧은 거리(기기 간의 경우 20m, 디바이스 간의 경우 2m)에서 통신이 가능하다는 단점이 있다. 선박에서는 파워 모듈의 위치와 모니터링 PC의 위치가 일반적으로 수 십 미터 이상 떨어져 있으므로 여기에 사용되는 통신으로는 최대 1.2km 거리 까지 통신이 가능한 직렬통신이 적합하다. 또한 병렬통신은 많은 데이터 선과 신호 선 등을 필요로 하지만, 직렬

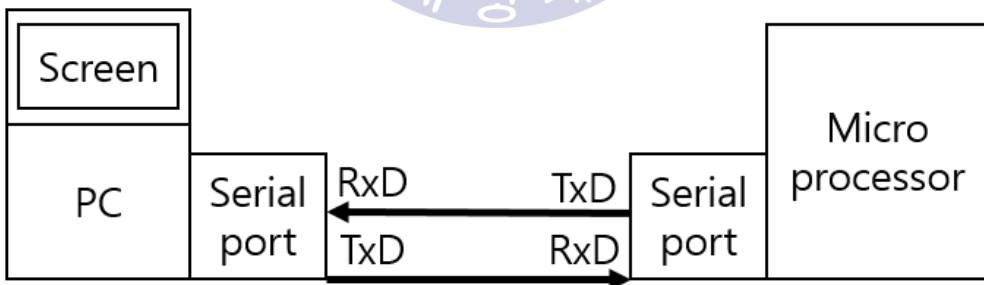
통신은 송신, 수신, 그라운드의 세 선만 있으면 통신이 가능하므로 케이블의 사용이 훨씬 효율적이다. 따라서 본 논문에서의 모니터링 통신에는 직렬통신인 RS-232를 사용하였다.



(a) One way communication



(b) Half duplex communication



(c) Full duplex communication

Fig. 17 Three methods of serial communication

Fig. 17은 직렬통신의 세 가지 방식을 그림으로 표현한 것이다. 직렬 통신에는 그림과 같이 단방향 통신, 반 이중 통신, 전 이중 통신 방식

이 있다. 단방향 통신은 데이터 선이 하나만 있어도 가능하지만 한 방향으로만 데이터를 보낼 수 있어서 모니터링 시스템에 적용하면 데이터를 확인 할 수는 있지만 제어는 불가능하다. 반 이중 통신은 양방향 통신 방식으로써, 서로 데이터를 송·수신 할 수 있다. 반 이중 통신의 데이터 선은 하나이기 때문에 송신과 수신을 동시에 할 수는 없고 번갈아가며 데이터를 전송해야 한다. 그렇기 때문에 모니터링 시스템에 이 통신 방식을 사용하면 실시간 측정이 어렵다. 전 이중 통신 방식은 각자 송·수신 데이터 선을 사용하기 때문에 데이터 선이 두 개가 필요하지만, 서로 동시에 송신과 수신이 가능하고 양방향 통신이 가능해서 모니터링 프로그램의 통신 방식으로 가장 적합하다.

3.2 소프트웨어

3.2.1 모니터링 소프트웨어 구성

모니터링 소프트웨어에서 데이터는 RS-232로 통신하도록 구성하였으며 프로그램은 National Instrument 사의 LabVIEW를 활용하여 구현하였다. 배터리를 구성하는 각 셀의 전압을 측정하여 SOC 값을 계산한 후 화면에 표시하고, OCV 값을 활용하여 SOH값을 예측할 수 있는 내부저항 값 Internal resistance를 표시하도록 하였다. 그리고 각 배터리 셀에 문제가 발생하여 사용할 수 없게 된 경우 Break down 경고등에 불이 들어오도록 해서 관리자가 쉽게 알아볼 수 있도록 하였다. 또한 배터리 팩에 문제가 발생하면 Battery trouble 경고등이 켜지도록 하였으며 현재 사용되는 전원이 발전기인지 배터리인지 알 수 있게 구성하였다. 그리고 인버터의 입력 전압, 전류, 출력 전류 등을 그래프로 그려서 관리자가 언제든지 확인할 수 있게 하였다.



BMS for hybrid inverter monitoring system

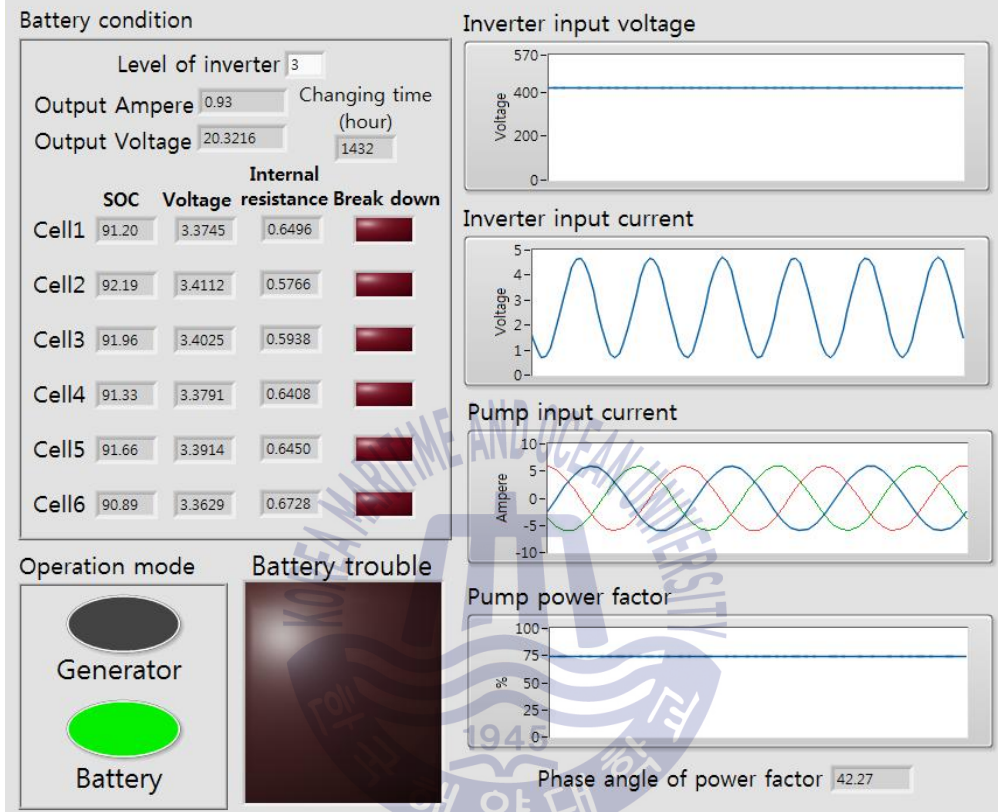


Fig. 18 Monitoring system of BMS for electric propulsion inverter

3.2.2 BMS 소프트웨어 순서도

먼저, Fig. 19는 BMS에 사용된 소프트웨어 중 배터리 셀의 SOH를 추정하는 순서도이다. 이 순서도는 Microprocessor에서 측정 및 계산된다. 먼저 배터리의 사용여부를 판단하여 배터리가 사용 중인 경우와 아닌 경우로 나뉘게 된다. 배터리가 사용 중인 경우 배터리 셀의 전압(V_{C0})과 배터리 전체에 흐르는 전류(I_B)를 측정하고, SOH를 추정하고자 하는 셀의 SWs 스위치는 Off 시키고, SWp 스위치는 On 시킨다. 그리고 이렇게 스위칭 되어 제외된 배터리 셀의 전압(V_{C1})를 측정하여 SOH를 추정하기 위한 내부 저항 값을 구하는 식 $R_i = \frac{V_{C1} - V_{C0}}{I_B}$ 를 계산한다. 그리고 이렇게 구해진 파라미터들을 모니터링 시스템으로 전송한다. 만약 처음에 배터리가 사용 중이 아닌 경우로 판별이 되면 우선 배터리 셀의 전압(V_{C0})를 측정하고, 이후 배터리가 사용 중일 때까지 셀의 전압 측정을 반복하다가, 배터리가 사용이 되는 순간 배터리 셀의 전압(V_{C1})을 측정하고 이때 배터리 전체에 흐르는 전류(I_B)를 측정하여 내부 저항 값 $R_i = \frac{V_{C0} - V_{C1}}{I_B}$ 을 계산한다. 그리고 상술된 순서와 마찬가지로 모니터링 시스템으로 데이터를 송신한다.

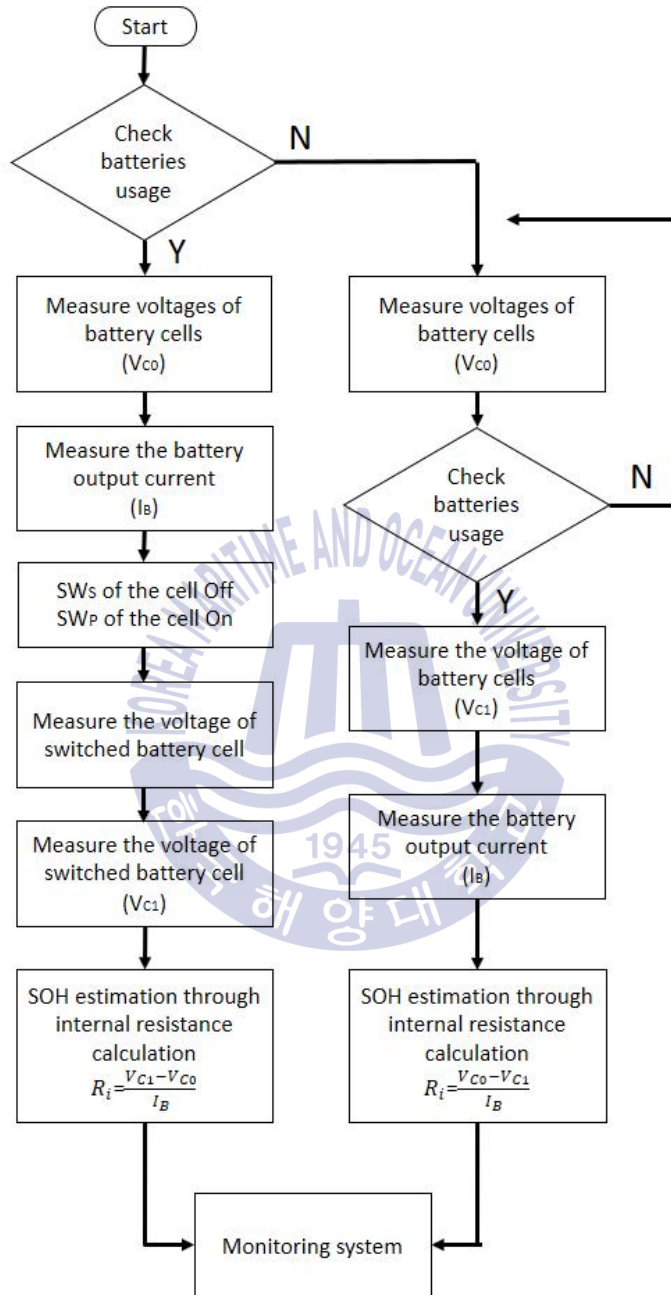


Fig. 19 Flowchart of internal resistance calculation for SOH estimation

그리고 Fig. 20은 배터리의 전압을 측정해서 출력을 일정하게 유지하도록 하는 인버터 시스템의 순서도이다. 인버터의 입력 전압의 급감으로 인한 사고를 예방하기 위해 해당 시스템에서는 배터리의 전압이 변경되더라도 인버터의 출력이 일정하게 유지되도록 알고리즘을 구성하였다.

먼저, 배터리의 전류 측정을 통해 현재 배터리가 사용되고 있는지 여부를 판단하고, 배터리가 사용 중이면 Microprocessor의 A/D 컨버터를 이용하여 지속적으로 배터리의 전압을 측정한다. 그러던 중 배터리의 일부 셀에 이상이 생겨 배터리의 전압이 정격전압보다 낮아지게 되면 이를 감지한 스위칭 컨트롤 시스템(Switching Control System)이 인버터의 스위칭 Duty ratio의 변환 폭을 증가 시킨다.

인버터의 스위칭은 PWM 전압으로 이루어지는데, 이 PWM 전압의 Duty ratio가 높을수록 흐르는 전류가 높고, Duty ratio가 낮아질수록 흐르는 전류가 작아진다. 그리고 이러한 제어는 CMPR 값을 변화시킴으로써 이루어진다. 이런 방법으로 Duty ratio의 크기를 급감한 입력전압에 맞추어 조절한다. 그리고 이 Duty ratio의 변환 폭에 따라 출력전류의 크기가 달라진다.

이를 이용하여 배터리의 전압 변화에 따라 Duty ratio의 변환 폭을 바꾸어 적용함으로써 인버터의 출력전류를 일정하게 유지시킬 수 있다. 이후 계속해서 배터리가 사용 중이라면 다시 배터리의 전압이 변경 될 때까지 전압을 실시간으로 측정하고, 배터리의 사용이 멈추면 이를 종료한다.

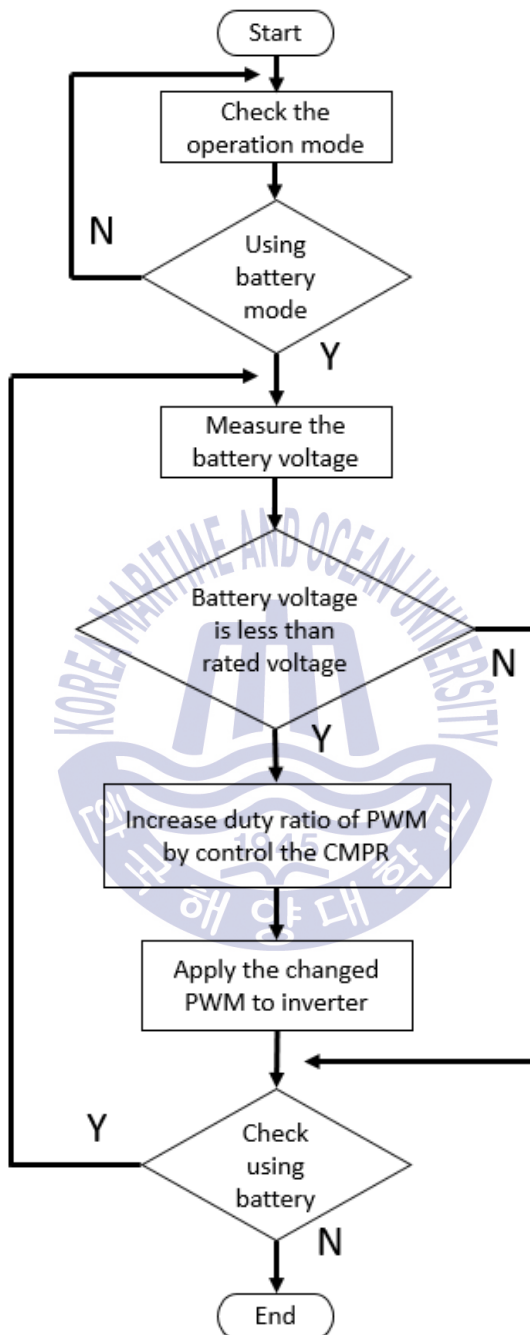


Fig. 20 Flow chart for constant output current of inverter

3.3 실험 및 고찰

3.3.1 인버터 레벨에 따른 배터리 수명 예측

3상 2레벨 인버터의 경우 주어진 입력 전압을 이용하여 각 상마다 +V, 0, -V 의 세 가지 전압 상태를 이용해 정현파에 가까운 교류파형을 구현한다. 여기에 사용되는 스위칭 소자의 개수는 6개이며, 이에 따라 게이트 전압 또한 6개를 만들어내도록 게이트 회로를 설계해야 한다. 이와 비교해서, 3레벨 이상의 멀티레벨 인버터는 전압을 분배하는 캐패시턴스 소자, 이 분배된 전압을 활용하고 전류를 흘리기 위한 다이오드 등 추가적인 소자가 필요하고, 사용되는 스위칭 소자의 개수 또한 증가하게 된다. 예를 들어 3상 3레벨 인버터에 사용되는 스위칭 소자의 개수는 12개이며, 4레벨 인버터는 18개, 5레벨 인버터는 24개의 스위칭 소자가 필요하다. 그렇지만 인버터의 레벨이 높아질수록, 같은 스위칭 주파수와 입력 전압을 사용한다 해도 보다 정현파에 가까운 출력 파형을 얻을 수 있다. 이는 출력파형의 고조파가 줄어든다는 것을 의미한다. 고조파가 늘어날수록 그 전류를 사용하는 장치에 안 좋은 영향을 미치게 된다. 특히 추진 장치의 경우 토크가 계속 변동되고 철손과 동손의 손실이 증가한다. 따라서 이러한 고조파를 줄이는 것은 중요한 일이며, 소자 및 추가 장비가 들어가게 되더라도 높은 레벨의 인버터를 사용하는 이유이기도 하다.

본 논문에서는 인버터의 레벨에 따라 사용하는 배터리에 어떤 영향을 주는지를 실험하기 위해 구현한 2레벨 인버터와 3레벨 인버터를 동작시켜 Chauvin Arnoux사의 C.A 8333(Power Quality Analyser)장비로 인

버터 입력단의 전류 고조파를 측정하였다.

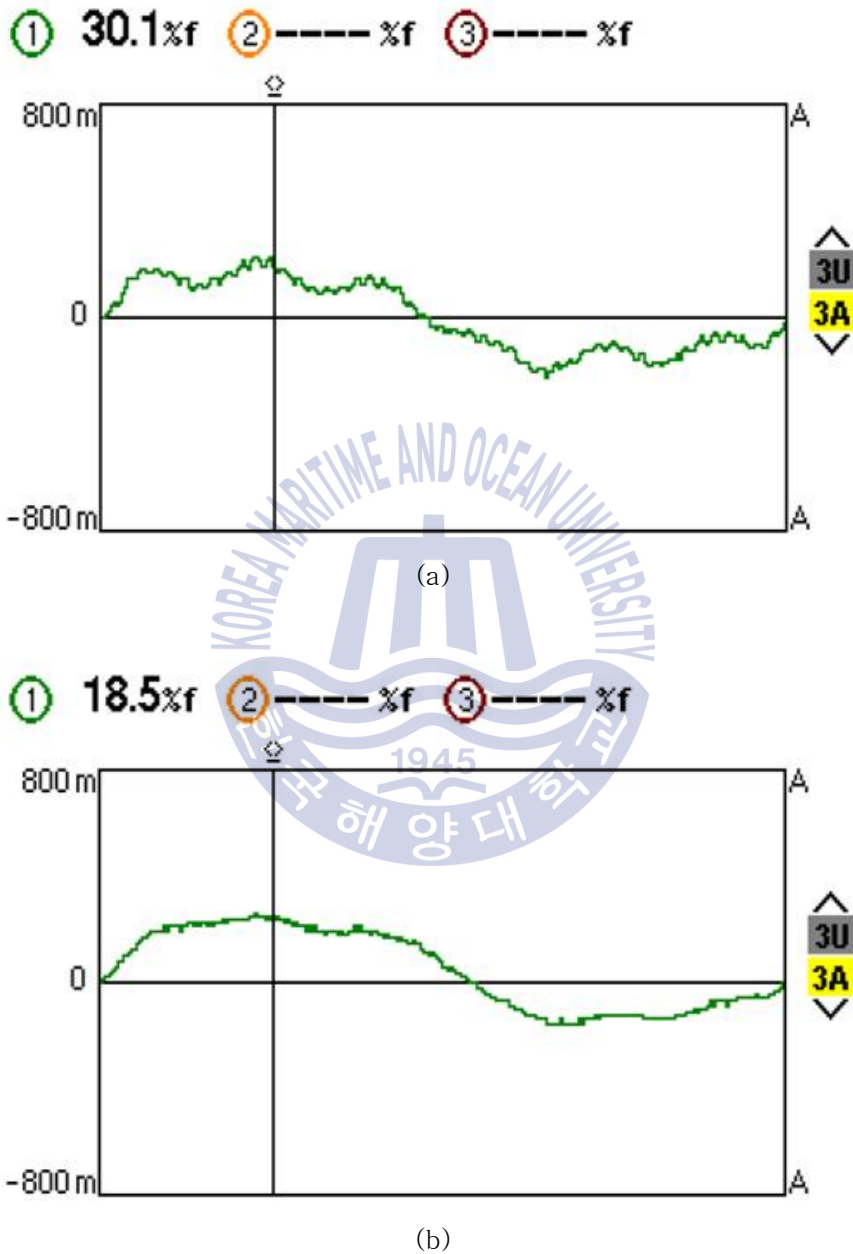


Fig. 21 Comparison of input current harmonic according to inverter level

Fig. 21의 (a)는 2레벨 인버터의 입력 전류 파형이고 (b)는 3레벨 인버터의 입력 전류 파형이다. 여기서 입력 전류 파형을 측정된 이유는 인버터에 전류를 공급하는 배터리에 미치는 영향을 알아보기 위해서이다. (a)파형과 비교하여 (b)파형은 보다 사인파에 가까운 것을 확인할 수 있으며, 장비에서 측정된 고조파 수치 또한 2레벨의 경우 30.1%에 달하고 3레벨의 경우는 18.5%로 3레벨 인버터의 입력 전류 파형이 훨씬 고조파가 낮다는 것을 확인할 수 있다.

이러한 특성을 가진 2레벨, 3레벨 인버터를 사용하는 배터리의 수명 변화를 비교하기 위한 실험을 위해 우선 Fig. 22와 같이 배터리 6셀을 한 팩으로 묶어 총 두 개의 배터리 팩을 제작하였다. 여기서 사용된 배터리는 Fig. 23의 리튬이온 배터리이다.

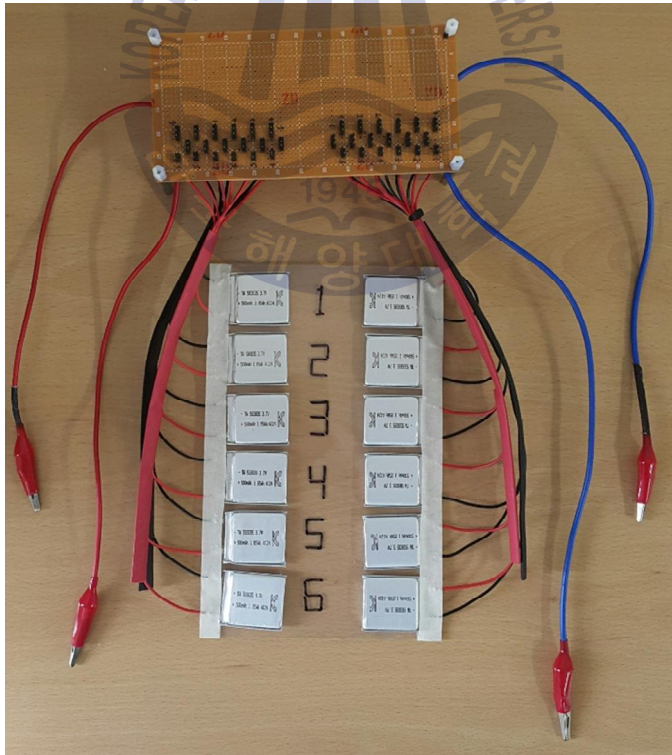


Fig. 22 Battery pack for inverter



Fig. 23 Li-ion battery(3.7V 500mAh)

그리고 이렇게 제작한 두 개의 배터리 팩을 각각 2레벨, 3레벨 인버터의 전원으로 사용하고 충·방전 반복실험을 한 결과 **Table. 3**과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 실험에서 배터리의 정격전압이 3.7V이므로 배터리 팩의 정격전압을 22.2V로 두었고, 방전하다가 배터리의 한 셀이 3.0V까지 내려가면 방전을 정지시키고 충전을 시작하였다. 각 셀 당 OCV의 측정은 $3.7V \pm 0.5\%$ 의 오차범위 내에서 실시하였다.

Table. 3 Lifetime change according to inverter level after discharges

인버터 레벨	2레벨	3레벨
실험 전 내부저항 평균값 (Ω)	0.4644	0.4716
500회 충·방전 후 내부 저항 평균값 (Ω)	0.6213	0.5897
내부 저항 증가량 ($\Omega / \%$)	1569 / 33.8	1181 / 25.0

이 표를 보면 2레벨 인버터에 사용되었던 배터리들의 초기 내부저항 평균값에 비해 500회 충·방전 후 내부저항 평균값은 0.1569Ω 이 증가

하였으며, 3레벨 인버터에 사용되었던 배터리들의 내부저항 값은 0.1181Ω 이 증가하였음을 확인 할 수 있다. 이를 비율로 나타내면 2레벨 인버터의 경우 배터리의 내부저항이 33.8% 증가하였고, 3레벨은 25.0% 증가하였다. 이를 통해 입력 파형 특성상 고조파가 낮았던 3레벨 인버터를 사용했을 때 배터리의 수명이 더 천천히 감소함을 알 수 있다.

3.3.2 인버터 출력전류 일정 제어

Fig. 24은 인버터의 출력을 일정하게 제어하는 실험에 사용된 장비들 사진이다. Flyback converter와 Switching module을 통해 Inverter 게이트 전압을 만들어 냈으며, Microprocessor를 통해 제어하였다. 그리고 배터리 팩은 총 6 셀의 배터리를 직렬 연결하여 구성 하였으며 배터리 전체 전압은 저항을 이용하여 전압 분배시켜 Microprocessor를 통해 측정하였다. Inverter의 출력을 받아 동작하는 Motor는 TAMAGAWA사에서 판매하고 있는 3phase motor인 TS4632N2050E510를 사용했다.

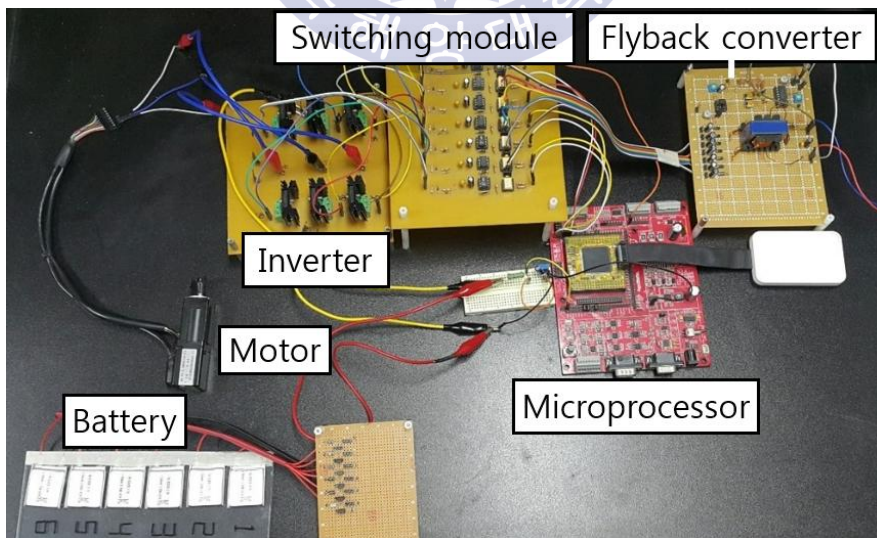
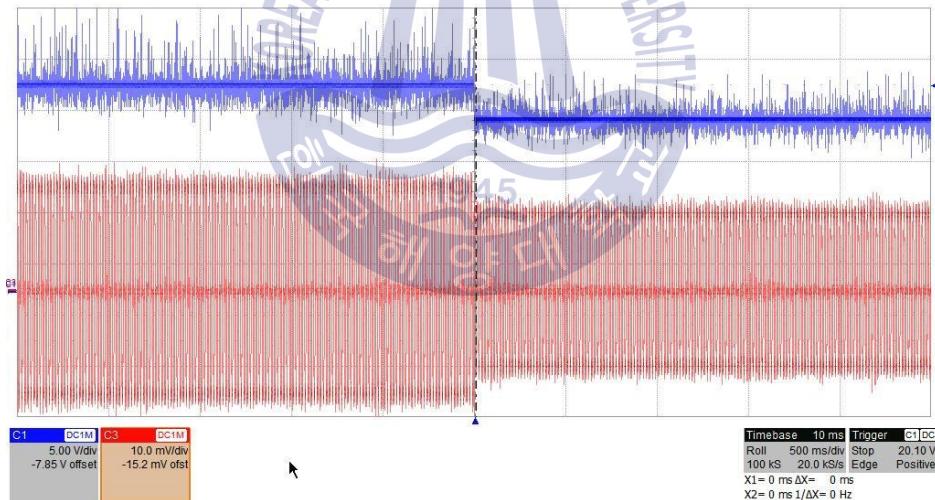


Fig. 24 Experimental device for constant output of inverter

이 실험 결과의 파형은 Fig. 25과 같이 나타난다. 인버터 일정출력 제어 시스템의 적용 여부에 따른 출력 변화를 확인하는 실험 파형이다. Fig. 25에서 위에 나타나는 파란색 파형이 배터리 전체 전압을 나타내며, 아래의 빨간색 파형은 전류센서를 통해 측정된 인버터의 출력 전류 파형이다. 이 때 사용한 전류 프로브의 배율은 10.0mV/A 이다. 배터리 셀의 문제 발생으로 인한 전체 전압 급감은 스위칭 제어를 통해 구현하였으며, 급감하기 전 배터리의 전압은 20V이고 급감 후 배터리의 전압은 16.5V이다. 여기서 (a)그림은 인버터 일정출력 제어 시스템이 적용되지 않은 경우의 파형이다. 인버터에 인가되는 전압인 배터리 전체 전압이 감소하자 인버터 출력 전류 값 또한 감소됨을 확인 할 수 있다.



voltage 5.00V/div
current 1.00A/div
time 500ms/div

Fig. 25 Measured waveform without constant output control system
이 파형을 Time division을 낮추어 측정해 보면 Fig. 26에 나타나는 것
과 같은 파형을 얻을 수 있는데, 이를 통해 보면 전압이 2ms에 걸쳐

감소하는데 그에 맞춰서 인버터 출력 전류 파형 또한 감소하는 것을 확인할 수 있다. 배터리의 전압처럼 인버터의 출력도 급격히 감소하는데, 만약 선박에서 장치를 구동하는 도중 이처럼 급격한 변화가 발생한다면 장치에 손상이 올 가능성이 높다.

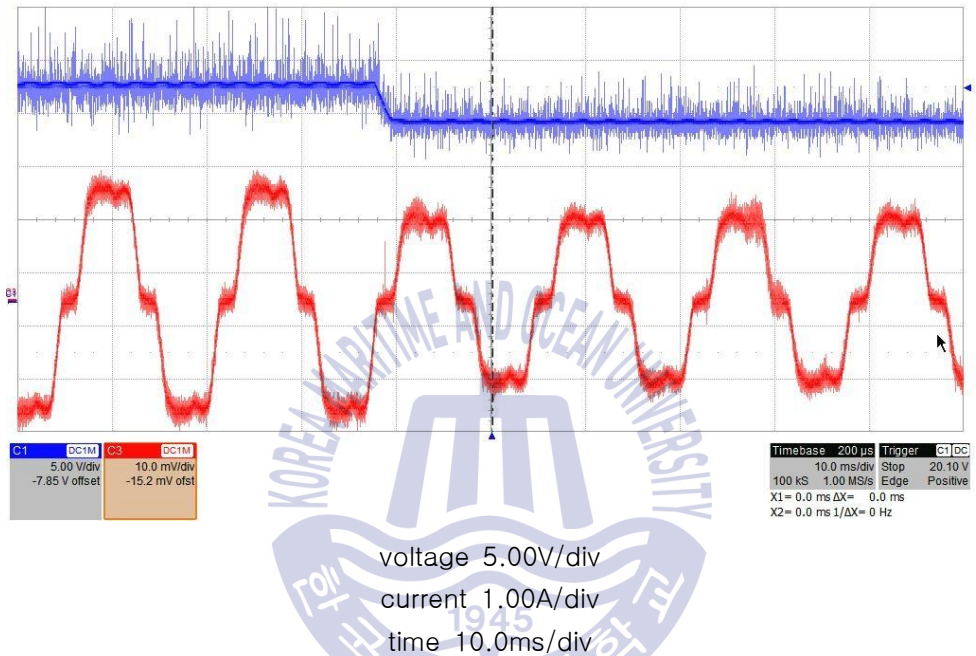
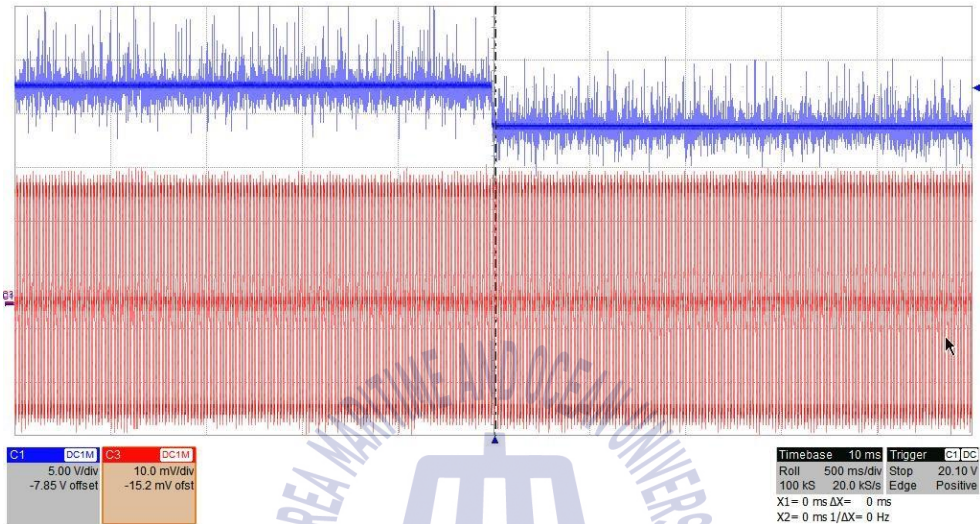


Fig. 26 Expanded waveform without constant output control system

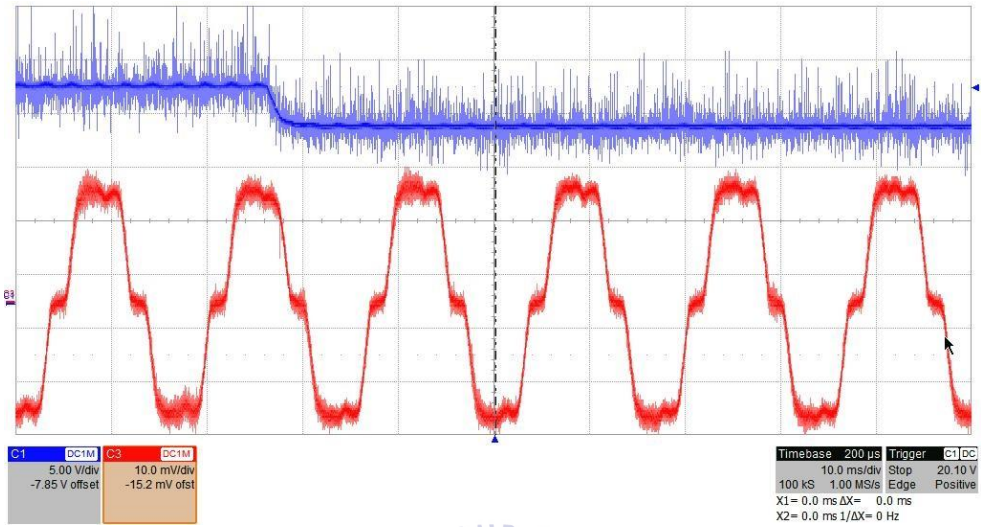
반면, Fig. 27의 파형은 인버터 일정출력 제어 시스템을 적용하여 측정된 파형이다. Fig. 25과 비교해보면 배터리 전압이 급감하는데도 인버터 출력 전류 파형에 변화가 없음을 확인 할 수 있다.



voltage 5.00V/div
current 1.00A/div
time 500ms/div

Fig. 27 Measured waveform with constant output control system

확대한 파형인 Fig. 28은 10ms/div의 time division으로 측정된 사진으로, 이를 보면 전압이 급감하는데 2ms의 시간이 걸리는 것을 확인할 수 있다. 이 제어 시스템은 배터리의 전압을 약 46us마다 측정하여 그에 따른 Duty ratio 계산을 실시하는데, 스위치 제어를 통해 배터리의 전압이 2ms에 걸쳐 변화하는 동안 그 변화에 맞추어 Duty ratio를 제어함으로써 매우 빠른 대응을 통해 인버터의 전류 출력을 일정하게 제어하고 있음을 확인할 수 있다.



voltage 5.00V/div
 current 1.00A/div
 time 10.0ms/div

Fig. 28 Expanded waveform with constant output control system



제 4 장 결론

이 논문은 현재 전기추진 선박 시장에서 사용에 대한 기대가 증가하고 있는 리튬이온 배터리를 전기추진 선박의 인버터용 BMS를 사용하여 전압, 전류, SOH 등을 추정하고 이를 직렬통신을 통해 원격 감시가 가능하도록 구성하였으며, 측정된 값을 사용하여 일부 배터리의 고장에도 인버터의 출력이 일정하도록 제어하는 시스템을 구현하였다. 그리고 원격 모니터링 시스템에서는 인버터 시스템의 전압, 전류뿐만 아니라 배터리 각 셀의 전압 및 수명 또한 측정, 표시하여 배터리 문제로 발생할 수 있는 사고에 대해 미리 대처할 수 있게 하였다. 이러한 시스템을 설계하고, 실험한 결과 다음과 같은 결론을 확인 할 수 있었다.

1. 전기추진 인버터 구동용 배터리 전원을 대상으로 일정시간 동안 부하를 구동하는 중에 SWs 및 SWp를 이용한 스위칭 제어를 통하여 OCV 값을 측정할 수 있었고, 이 값과 배터리의 전류(I_B)를 사용하여 내부저항(R_i)배터리 내부 저항을 계산해서 배터리의 수명(SOH)을 추정할 수 있었다. 또한, 배터리 셀 중 일부가 고장 났을 때 SWs, SWp 스위칭을 통해 고장난 셀을 제외하고 배터리를 연결하여 단락을 막을 수 있었다.

2. 배터리의 셀 중 일부에 문제가 생겨 배터리 전체의 전압이 급감할 때 인버터의 출력이 일정하게 유지되도록 제어하는 시스템을 구현하였다. 그리고 이 시스템이 적용된 경우 배터리의 전압이 단기간(2ms)에 감소 할 때도 46us마다 측정된 전압에 맞게 인버터의 Duty ratio를 변경하여 출력 전류가 일정하게 유지되는 것을 관찰하면서 시스템을 적용시키지 않은 경우와 비교해 배터리 전압의 급감으로 인한 사고에 대한 대책으로써 사용될 수 있음을 확인하였다.

3. 2레벨 인버터와 3레벨 인버터의 전류 특성 및 고조파를 확인하여 이러한 요소가 배터리를 전원으로 하여 장기간 사용했을 경우 배터리에 어떤 영향을 미치는지를 실험한 결과, 고조파가 30.1%인 2레벨 인버터 전원으로 사용한 경우 내부저항이 33.8% 증가하였고, 고조파가 18.5%인 3레벨 인버터 전원으로 사용한 경우 내부저항은 25.0% 증가하였다. 이를 통해 고조파 수치가 낮은 3레벨 인버터를 사용할 때 배터리를 더 오랫동안 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

4. BMS용 모니터링 화면을 구성하여 실시간 관찰이 용이하게 함으로써 측정된 내부저항(R_i)의 확인을 통한 SOH의 추정으로 배터리 교체시기를 사전에 알려주어 시스템의 안전사고에 대비가 가능하였다. 또한 배터리 셀에 문제가 발생했을 경우 경고등을 켜서 배터리에 대해 조치를 취할 수 있도록 하였다.

이 논문을 제작하면서 장기간에 걸친 실험을 실시한 경우가 많았는데, 여러 가지 환경적 요인에 의해 정확한 값을 얻는데 실패할 때도

많았다. 특히 스위칭 소자의 온도가 올라가게 되면 인버터의 입력 및 출력에 노이즈가 발생하게 되는데, 스위칭 소자의 온도는 환기 상태, 냉각판의 사용 여부 등 다양한 요소에 의해 영향을 받기 때문에 보다 정확한 값을 필요로 하는 실험을 할 때에는 스위칭 소자의 온도를 일정하게 유지하는 방안에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

그리고 리튬이온 배터리의 경우 열화 되면 내부에 가스가 생겨 폭발할 위험성이 있다. 실제로 충·방전 실험을 다수 반복한 경우 리튬이온 배터리가 부풀어 오른 것을 확인 할 수 있었는데 이러한 가스가 폭발하게 되면 큰 사고로 이어질 수 있다. 이를 막기 위해 리튬 폴리머 배터리 등 다양한 연구가 이루어지고 있으나 온도 변화에 대한 내구성, 무게, 용이성 등을 고려할 때 전기추진 선박용 배터리로써 리튬이온 배터리가 가지는 장점이 아직은 더 크다고 볼 수 있다. 앞으로 이러한 장점을 가지면서도 폭발에 대한 안전성을 보유할 수 있는 배터리에 대한 연구가 진행되어야 한다.

참고문헌

- [1] 노길태, 2015, 선박용 연료전지 기술개발 현황, 충남미래연구포럼(6차)
- [2] 중소기업 기술로드맵 2015-2017, 2014, 중소기업청, 627
- [3] 김종수, 김성환, 2011.3, 전기추진선박의 토크 및 속도변화에 따른 전력변환장치의 고조파 분석, 海洋環境安全學會誌 第17卷 第1號, 83-88
- [4] 심상보, 이춘하, 김시국, 2016.4, 고온 및 단락전류에 따른 리튬배터리의 폭발 및 화재 위험성에 관한 연구, 한국화재소방학회 논문지, 114-122
- [5] 서철식, 문종현, 박재욱, 김금수, 김동희, 2008.5, 배터리관리시스템(BMS)을 이용한 배터리 잔존수명(SOH) 추정 알고리즘에 관한 연구, 한국조명·전기설비학회 2008 춘계학술대회 논문집, 317-320
- [6] Jatinkumar Rana, Marian Stan, Richard Kloepsch, Jie Li, Gerhard Schumacher, Edmund Welter, Ivo Zizak, John Banhart, Martin winter, 2013, Structural Changes in Li_2MnO_3 Cathode Material for Li-Ion Batteries, Advanced Energy Materials
- [7] 조우람, 나병기, 2014.12, Ru를 첨가한 음극활물질 $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ 의 전기화학적 특성, 청정기술 제20권 제4호, 433-438
- [8] Randles, J. E. B. (1947). "Kinetics of rapid electrode reactions". Discussions of the Faraday Society. 1: 11. doi:10.1039/df9470100011.

ISSN 0366-9033

- [9] 송정용, 서유진, 권오상, 정관철, 허창수, 2004.6, Battery SOC(State of Charge)측정을 통한 태양광발전 시스템 운영 방안 연구, 한국태양 에너지학회 논문집 제24권 제2호, 1-7
- [10] 최정렬, 이성근, 2016, 하이브리드 선박 직류전원용 고 안전 BMS, 한국마린엔지니어링학회지, 40(7), 635-641
- [11] 박정호, 차왕철, 조옥래, 김재철, 2014.11, 전류적산법과 OCV 방법을 결합한 Li-Ion 배터리의 충전상태 추정, 조명·전기설비학회논문지 제28권 제11호, 77-83
- [12] 황락훈, 나승권, 최성식, 2012, 유도전동기의 전압·전류 모델 합성 자속 추정기에 의한 속도제어에 관한 연구, 한국산학기술학회논문지 제13권 제11호, 5416-5426
- [13] D. Casadei , 2002 , FOC and DTC: Tox-viable schemes for induction motors torque control , IEEE Trans. Power Electronics. On PE 17 (5) : 35 ~ 42
- [14] 경제문, 김훈모, 2000.10, 퍼지 알고리즘을 이용한 유도전동기 간접벡터제어기의 설계와 엘리베이터 속도제어 시스템의 응용, 韓國精密工學會 2000年度 秋季學術大會 論文集, 110-113
- [15] 권민호, 김주하, 최세완, 2014, 양방향 3레벨 인버터를 위한 반송파 기반 PWM 방식의 중성점 제어 기법, 전력전자학회 2014년도 하계 학술대회 논문집, 211-212

감사의 글

석사 학위과정을 마무리하기 까지 많은 도움을 주신 분들께 진심으로 감사의 마음을 전하고자 합니다.

2009년 전기전자공학부에 입학하고, 학사 졸업 후 대학원생활을 거치면서 현재에 이르기까지, 지금에 와서 돌이켜보면 정말 많은 분들이 저에게 도움을 주셨고 모든 일들이 저를 성장시키는 경험이 되었습니다. 처음에는 전공에 대한 관심으로 실험실에 들어와 기본적인 지식들을 익히면서 교수님과 선배들의 도움으로 실력을 쌓기 시작했습니다. 그리고 제가 하고 싶은 연구와 공부를 진행하면서 제가 방향을 잘못 잡고 있거나 실수를 할 때면 언제나 도움을 받아 왔습니다. 그렇게 하면서 무언가를 하나하나 완성해 나가고, 또 프로젝트를 성공시켜 가면서 뿌듯함을 느끼고, 동시에 제가 성장해 나가고 있다는 것을 느꼈습니다. 그렇게 대학원을 진학해야겠다는 결심을 하게 되었습니다.

대학원에 들어와서 저는 또 선배가 되어 저와 같이 기본적인 것을 배우고 하고 싶은 연구와 공부를 하는 후배들을 가르쳐주면서 후배를 인도하고 양성하는 것이 어떤 의미인지 조금이나마 느끼게 되었습니다. 그렇게 교수님과 선배들, 그리고 후배들 사이에서 저의 역할을 충실히 해내면서 얻은 것은 비단 지식과 기술만이 아니었습니다. 제가 석사

학위과정 동안 얻은 가장 소중한 것은 저에게 도움을 주는 많은 사람들이었습니다. 제가 진행하려는 일의 방향과 계획, 그리고 인간적으로도 언제나 조언을 아끼지 않으시고 경험과 지혜를 알려주시는 지도교수 이성근 교수님, 그리고 항상 지식과 기술을 전해주시기 위해 많은 관심을 가져주시고 제 논문을 심사해주신 김윤식 교수님과, 도움을 청하면 언제나 진심으로 도와주시고 몰랐던 부분을 깨닫게 해주시며 제 논문을 심사해주신 길경석 교수님께 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.

그리고 옆에서 항상 저의 연구를 응원하고 많은 도움을 주셨던 양현숙 박사과정님, 그리고 현실적인 조언을 아끼지 않았던 권혁주 석사님, 힘이 들 때마다 먼 곳에서 찾아와 응원해주신 구봉규 선배에게도 이 자리를 빌어 진심으로 감사의 말씀을 전합니다. 그리고 실험실에서 항상 연구하다가 힘들 때 서로를 부축해주고 어려운 게 있을 때 도와주려고 노력을 아끼지 않았던 최정렬 석사과정과 송태현 석사과정에게도 고맙다고 전하고 싶습니다. 도움을 주신 모든 분들을 만난 것이 제 석사과정의 가장 큰 보상이라고 생각합니다.

그리고 마지막으로 저를 믿고 대학원에 가는 것을 허락해주신 부모님과 형을 항상 응원해주는 동생에게 사랑한다고 전합니다.