

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "국토교통기술촉진연구사업에 관한 연구"과제(세부과제 "도시철도차량 영구자석식 견인전동기 개발에 관한 연구")의 보고서로 제출합니다.

2015 . 11 . 25

주관연구기관명 : 한양대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 이주

협동연구기관명 : (주)우진산전

협동연구책임자 : 강용성

협동연구기관명 : 동립산업(주)

협동연구책임자 : 하창용

협동연구기관명 : 한국기계전기전자시험연구원

협동연구책임자 : 김승주

보고서 요약서

과제고유번호	14PRTD-C 063977-03	해 당 단 계 연구 기 간	2012.10.26. ~ 2015.10.25.		단 계 구 분	3단계/3단계
연구사업명	국토교통기술촉진연구사업					
연구과제명	최 상 위 과 제 명	도시철도차량 영구자석식 견인전동기 개발				
	단위과제명	도시철도차량 영구자석식 견인전동기 개발				
연구책임자	이주	해당단계 참 여 연구원수	총 : 23명 내부 : 10명 외부 : 13명	총연구비	정부 : 359,000 천원 기업 : 279,450 천원 계 : 638,450 천원	
		총연구기간 참 여 연구원수	총 : 69명 내부 : 30명 외부 : 39명		총연구비	정부 : 839,000 천원 기업 : 618,650 천원 계 : 1,457,650 천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한양대학교 산학협력단		참여기업명	동림산업(주), (주)우진산전, 한국기계전기전자시험연구원		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :			
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	147	
1) 도시철도차량 견인용 IPM 전동기 설계 기법 개발 및 시제품 제작 - IPM 전동기 설계 기법 개발 (실용화를 고려한 형상설계, 최적설계) - IPM 전동기 설계 성능과 시작기 성능 비교 - IPM 전동기 효율 향상 연구 - IPM 전동기 실용화를 위한 신뢰성 연구 (강성해석, 감자특성 연구) - IPM 전동기 제작 기법 개발						
2) 210kW급 IPM 전동기 구동 드라이버 및 제어 알고리즘 개발 - IPM 전동기 연동해석 시뮬레이션 정확도 - IPM 전동기용 전력변환기 제작 및 단품시험 - IPM 전동기 제어 알고리즘 개발						
3) 210kW급 IPM 전동기 성능평가 시험기술 개발 - 전동기 및 전력변환기 효율성 평가기술 개발 - IPM 전동기 및 전력변환기 출력, 효율 평가시험 - IPM 전동기 실용화를 위한 감자 내구성 시험						
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	도시철도차량, 영구자석식동기전동기, 유한요소법, 실용화, 전폐형				
	영 어	urban railway, IPMSM, FEM, commercialization, totally enclosed				

요 약 문

I. 제 목

도시철도차량 영구자석식 견인전동기 개발

II. 연구개발과제 개요(목적, 필요성, 범위 등을 기술)

기존의 도시철도차량 견인용 전동기인 유도전동기를 영구자석식 전동기로 대체할 경우, 연간 약 25억 원의 전력요금을 절감할 수 있다. 본 과제에서는 도시철도차량 견인을 위한 영구자석식 동기전동기(IPMSM)를 개발하고자 한다. 견인용 IPMSM의 실용화를 위해 구조적으로 전폐형 외함에 대한 연구가 이뤄져야 한다. 회전자 내부로 들어오는 먼지 및 자성가루의 유입으로 전동기의 성능저하 및 소손이 발생할 수 있기 때문이다. 하지만 전폐형 외함을 채택한 전동기의 경우, 열에 매우 취약하기 때문에 외부로의 전도가 어려운 열을 냉각시킬 수 있는 하우징 구조에 대해 연구하고, 고정자 권선에 인가되는 전류밀도를 고려하여 영구자석의 열감자가 발생하지 않도록 설계하여야 한다. IPMSM은 구동을 위해 별도의 드라이버가 필요하며, 차량 견인을 위해서는 넓은 운전 범위의 속도제어 기술 또한 필요하기 때문에 IPMSM과 함께 구동 드라이버 및 제어 기술도 함께 개발하고자 한다. 또한, IPMSM의 성능 검증을 위해 IPM 전동기 성능평가 시험기술 개발도 함께 진행하고자 한다.

III. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

- 1) 도시철도차량 견인용 IPM 전동기 설계 기법 개발 및 시제품 제작
 - IPM 전동기 설계 기법 개발 (실용화를 고려한 형상설계, 최적설계)
 - IPM 전동기 설계 성능과 시작기 성능 비교
 - IPM 전동기 효율 향상 연구
 - IPM 전동기 실용화를 위한 신뢰성 연구 (강성해석, 감자특성 연구)
 - IPM 전동기 제작 기법 개발
- 2) 210kW급 IPM 전동기 구동 드라이버 및 제어 알고리즘 개발
 - IPM 전동기 연동해석 시뮬레이션 정확도
 - IPM 전동기용 전력변환기 제작 및 단품시험
 - IPM 전동기 제어 알고리즘 개발
- 3) 210kW급 IPM 전동기 성능평가 시험기술 개발
 - 전동기 및 전력변환기 효율성 평가기술 개발
 - IPM 전동기 및 전력변환기 출력, 효율 평가시험
 - IPM 전동기 실용화를 위한 감자 내구성 시험

IV. 연구성과 활용계획

[현장적용 방안]

- 기존 도시철도차량의 견인용 전동기 교체
 - 기존 대차에 장착 가능하도록 IPM 전동기 외함과 전력변환기 외함을 제작하여, 기존의 유도전동기와 전력변환기를 대체하여 장착 가능
 - 일부 차량의 일부 대차만 우선 적용하여 일정기간 동안의 전력소비량 추이를 비교하여, 도시철도차량의 IPM 전동기화의 타당성 입증 가능

[실용화 · 제품화 방안]

- 신규 차량의 IPM 전동기화
 - 신규로 제작되는 도시철도차량의 견인용 전동기로서 IPM 전동기를 장착하여 운행 가능
- 연구결과물 성과 홍보를 위한 세미나 개최
 - 철도관련 대기업, 관공서, 철도운영기관 관계자 초청
 - 자문 위원회 구성 및 활용

[신산업 창출]

- IPM 전동기 설계 기술은 도시철도차량뿐만 아니라 경전철이나 고속전철에도 적용 가능한 기술이며, 경전철이나 고속전철의 견인용 전동기로서 IPM 전동기를 채택할 경우, 설계 기술은 유용하게 활용될 수 있음
- 철도차량의 견인용 전동기로 IPM 전동기를 적용하면, IPM 전동기 제조 산업, 전력변환기 제조 산업 등의 활성화를 기대할 수 있음

SUMMARY

I. Title

The Study on IPM traction motor of urban railway vehicles

II. Purpose and Necessity of the Study

If existing induction motor is replaced by traction motor of urban railway vehicles, electric fee is reduced by 2,500 million won. In this study, the goal is to develop IPMSM for towing urban railway vehicles. Because dust getting in rotor make motor degraded and damaged, for practical use of traction IPMSM, totally-enclosed machine must be studied. But because motor that adopted totally-enclosed enclosure is vulnerable to heat, the housing structure cooling down heat is studied and the permanent magnet is designed not to generate demagnetization. Because IPMSM requires separate driver and wide velocity control technique for towing vehicle, driver and control techniques are developed with IPMSM. Also, IPM motor performance evaluation testing techniques are developed for qualification of IPMSM.

III. Contents and Results of the Study

- 1) Development of design technique of IPM motor for towing urban railway vehicles and production of prototype
 - Development of design technique of IPM motor
 - Design performance comparison between IPM motor and prototype
 - Research for increasing efficiency of IPM motor
 - Reliability research for practical use of IPM motor
 - Development of production technique of IPM motor
- 2) Development of drivers for driving 210kW IPM motor and control algorithm
 - Accuracy of co-analysis simulation of IPM motor
 - Manufacture of inverter for IPM motor and unit test
 - Development of control algorithm of IPM motor
- 3) Development of techniques to test and evaluate 210kW IPM motor
 - Development of evaluation technique of efficiency of motor and inverter
 - Evaluation test of output and efficiency of IPM motor and inverter
 - Demagnetization durability test for practical use of IPM motor

IV. Application plan of research development result

[Field application plan]

- Replacement of existing traction motor of urban railway vehicles
 - Manufacturing enclosure of IPM motor and inverter to install to existing tractor, possible to replace existing induction motor and inverter
 - Applying to partial tractor and comparing the progression of power consumption, possible to prove validity of IPM motor

[Commercialization plan]

- IPM motorization of new railroad vehicles
- Possible to run IPM motor as newly manufactured traction motor of urban railway vehicles
- Holding a seminar for promoting research result
- Visiting the persons of railroad major company, public office and management agency
- Constructing and using an advisory committee

[Creating new industry]

- Design technique of IPM motor is applicable not to urban railway vehicles but to light subway and high-speed train and, if IPM motor is adopted as traction motor of light subway and high-speed train, Design technique is utilized usefully
- If IPM motor is used for traction motor of railroad vehicles, invigoration of IPM motor industry and inverter industry is expected

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	9
1.1 Necessity of Study	9
1.2 Research summary	10
Chapter 2. Design of the IPMSM for urban railway vehicles	11
2.1 IPMSM design based in electromagnetic field	11
2.2 Comparison between 1st model and existing induction motor	31
Chapter 3. Manufacture and Test of 1st prototype	36
3.1 Manufacture of 1st IPMSM	36
3.2 Manufacture of 1st inverter	57
3.3 Test and Analysis	85
Chapter 4. Design and Manufacture considering commercialization	111
4.1 IPMSM design based in electromagnetic field considering totally enclosed structure	111
4.2 Design of enclosure of totally enclosed motor	120
4.3 Design of power converter considering application to practical car	125
Chapter 5. Manufacture and Test of 2nd prototype	129
5.1 Manufacture of 2nd IPMSM	129
5.2 Manufacture of 2nd inverter	134
5.3 Test and Analysis	140
Chapter 6. Achievement of research goal and Effect	144
6.1 Achievement of final research and development goal	144
6.2 Effectiveness analysis of the research developments	146
6.3 Necessity of additional research for practical application	148
Chapter 7. Conclusion	152
Chapter 8. Reference	154

목 차

제1장 서론	9
1.1 연구의 필요성	9
1.2 연구 내용	10
제2장 도시철도차량용 IPMSM 설계	11
2.1 전자계 기반 IPMSM 설계	11
2.2 1차 모델과 기존 유도전동기의 비교	31
제3장 1차 시작기 제작 및 시험평가	36
3.1 1차 IPMSM 제작	36
3.2 1차 전력변환기 제작	57
3.3 시험평가 및 분석	85
제4장 실용화를 고려한 설계 및 제작	111
4.1 전폐형 구조를 고려한 전자계 기반 IPMSM 설계	111
4.2 전폐형 전동기 외함 설계	120
4.3 실차 적용을 고려한 전력변환기 설계	125
제5장 2차 시작기 제작 및 시험평가	129
5.1 2차 IPMSM 제작	129
5.2 2차 전력변환기 제작	134
5.3 시험평가 및 분석	140
제6장 연구목표 달성 및 효과	144
6.1 연구개발 최종목표 달성도	144
6.2 연구개발 성과의 효과분석	146
6.3 실용화를 위한 추가 연구의 필요성	148
제7장 결론	152
제8장 참고문헌	154

제1장 서론

제1절 연구의 필요성

한국에 지하철이 처음 도입된 것은 1974년 이다. 전국의 대도시들은 극심한 교통난을 해소하기 위해 교통체증 없이 종횡무진 달릴 수 있는 지하철이 필요하였다. 1974년 8월 15일 서울지하철 개통을 시작으로 부산, 대구, 인천, 광주, 대전 등 총 6개 도시 땅 속에는 지하철이 달리고 있다. 이들 지하철은 총 507km 궤도 연장을 하루 최소 2분 30초 간격으로 운행 중이다. 하루 수송 인원은 수도권 전철 및 서울 메트로 등을 포함 지하철과 전철이 900만 명을 넘고 있어 각 도시들의 중요한 교통수단으로 자리 잡고 있다.

도시권역에서 급증하는 교통수요, 도로 교통시설 공급의 한계성, 지구의 환경문제에 대한 도쿄 의정서의 발효 등 주변여건으로 인해 도시철도의 중요성이 더욱 높아지고 있다.

도시철도차량 견인용 전동기는 전력용 반도체 및 제어기술의 발달에 따라 직류전동기에서 유도전동기로 획기적인 발전을 이루어 기술적 완성단계에 진입하였다. 그러나 친환경성 및 에너지 효율성 극대화를 위하여 **견인 전동기의 고효율화 및 경량화**가 필수적으로 요구되고 있다.

유도전동기는 전자기적 그리고 기계적으로 강인하나 출력밀도가 낮아 사이즈의 소형화가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 기존 페라이트 자석(Ferrite Magnet)은 낮은 에너지 밀도를 가지고 있어서 페라이트를 사용한 영구자석식 동기전동기(이하 PMSM: Permanent-Magnet Synchronous Motor)는 유도전동기와 비교할 경우 같은 출력 특성 대비 사이즈 면에서 큰 차이를 가지고 있지 않았다. 그러나 네오디움, 사마륨 코발트 등 새로운 소재의 높은 에너지 밀도를 가지는 영구자석이 개발되면서 같은 출력 특성대비 유도전동기에 비해 약 1.5배 정도의 소형, 경량화가 가능하게 되었다. 1990년대에 고성능 영구자석의 개발에 힘입어 일부 서보 모터에 응용되어 왔던 PMSM이 OA기기로부터 가전 및 산업 응용분야에까지 적용범위를 넓히며 서서히 기존 모터를 대체해 나가고 있다. 특히 차량 견인용 전동기로서 영구자석 매입형 동기전동기(이하 IPMSM: Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor)가 각광을 받고 있다. 직류전동기와 권선형 동기전동기는 회전자의 권선이 회전을 하기 때문에 브러쉬, 정류자, 슬립링 등의 소모적인 부분의 유지보수가 필요하다. 하지만 IPMSM은 회전자에 권선을 대신해서 영구자석을 사용하기 때문에 회전 시에 외부와의 접촉이 필요 없기 때문에 구조가 간단해지고 유지 보수가 필요 없게 된다. 최근 하이브리드 차량의 전기 추진 부분을 담당하는 전동기의 경우 소형, 경량화 및 고효율화를 위하여 기존의 유도전동기에서 효율과 출력밀도가 우수한 IPMSM으로 대체하는 연구가 진행되고 있다.

도시철도차량 견인용 전동기의 경량화 및 고효율화를 위하여 IPMSM을 도입할 시기가 도래했다. 현재 운행 중인 도시철도차량은 대부분 유도전동기를 사용하고 있으며, IPMSM에 비하여 출력밀도와 효율이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 따라서 유도전동기를 사용한 도시철도차량은 IPMSM을 사용한 차량에 비해 더 많은 출력과 더 많은 전력을 필요로 한다.

따라서 본 과제에서는 도시철도차량 견인을 위한 IPMSM을 개발하고자 한다. IPMSM은 구동을 위해 별도의 드라이버가 필요하며, 차량 견인을 위해서는 넓은 운전 범위의 속도제어 기술 또한 필요하기 때문에 IPMSM과 함께 구동 드라이버 및 제어 알고리즘도 함께 개발하고자 한다. 또한, 개발한 제품의 성능을 확인하기 위한 성능 인증시험도 함께 진행하고자 한다.

제2절 연구 내용

본 연구보고서는 “도시철도차량 영구자석식 견인전동기 개발”과제에서 3년에 걸쳐 연구한 내용을 정리한 것이다.

본 연구에서는 현재 도시철도차량용으로 실차적용 되어있는 견인용 유도전동기를 대체할 매입형 영구자석식 동기전동기(IPMSM)를 설계하였고, 그 설계 모델의 특성 해석을 실시하였으며, 설계된 IPMSM 단품의 토크 및 효율 측정 시험을 진행하였다. 또한 실용화를 위해서 영구자석을 사용한 IPMSM은 기존 유도전동기와 마찬가지로 냉각방식에 유리한 반폐형 구조가 아닌 전폐형 구조가 필요함을 제시하였다. 이러한 연구 내용을 본 절에 간단하게 서술하였다.

첫 번째로 도시철도차량 견인용 IPMSM을 설계하였다. IPMSM은 설계는 기존 유도전동기의 사양을 바탕으로 사양을 결정하였다. 기존 유도전동기의 기어비와 차륜경, 열차 속도를 가지고 전동기의 정격, 최대 속도 rpm을 구하고, 정격 및 최대 rpm에서 발생되어야 하는 요구토크는 열차 1량의 중량과 승객들의 수를 고려하여 계산하였다. 본 연구의 최종 목표는 계산되어진 정격, 최대 rpm에서의 유도전동기 대비 고출력, 고효율 특성을 가지는 IPMSM을 개발하기 위한 설계를 진행하였다.

두 번째로 유한요소법을 이용하여 설계된 IPMSM의 특성 해석을 실시하였다. IPMSM 특성 해석은 정격속도와 정격속도 이후의 약계자 영역 모두 수행하였다. 또한 영구자석의 비산 방지를 위하여 기계적 강성을 고려한 강성 해석과 실제 SVPWM 제어를 고려한 연동해석 시뮬레이션도 수행하였다.

세 번째로 IPMSM과 이를 구동하기 위한 전력변환기의 제작과정을 알아보고 제작된 1차 시작기의 성능 검증위한 시험평가 및 분석을 진행하였다.

네 번째로 실용화를 고려한 전동기와 전력변화기의 설계 및 제작과정에 대하여 나타내었다. 영구자석전동기는 기존의 실차용 유도전동기와 달리 회전자에 영구자석이 있기 때문에 불순물이 개입될 확률이 높다. 따라서 냉각에 유리한 반폐형 구조가 아닌 전폐형 구조가 필수적이다. 전폐형은 내부 열이 외부로 방출되기 매우 불리하기 때문에 이를 고려한 설계가 이루어지지 않는다면, 전동기 소손을 가져올 수 있다. 전력변환기 또한 기존의 1C4M으로 운전되었던 유도전동기와 달리 영구자석전동기의 경우, 1C1M으로 운전되어야 하기 때문에 실차 치부를 위한 사이즈를 고려하여 설계되어야 한다. 따라서 이 모두를 고려한 전동기와 전력변환기에 대한 설계 과정을 다룬다.

다섯 번째로 1차 시작기와 마찬가지로 2차 시작기의 제작과정과 제작된 시작기의 성능 검증을 위한 시험평가 및 분석을 진행하였다.

마지막으로 본 과제의 연구목표 달성도를 알아보고 연구개발 성과의 효과분석을 다루었다.

제2장 도시철도차량용 IPMSM 설계

제1절 전자계 기반 IPMSM 설계

1. IPM 전동기 형상설계 (한양대학교)

기존 지하철 전인용 유도전동기의 사양 및 설계제원은 다음과 같다.

- 형식: 농형 3상 유도전동기, 자기통풍형
- 극수: 4극
- 구동방식: 헬리컬기어 감속기 및 플렉시블 기어 커플링
- 정격: 표 1.1
- 절연등급: H중
- 기어비: 7.07(99/14)
- 차륜경: 860mm(신품), 820mm(계산시)
- 중량: 약 800kg

표 2.1.1 유도전동기 정격

구분	연속	1시간
출력 [kW]	200	220
선간 전압 [V]	1,100	1,100
상전류 [A]	130	145
회전수 [rpm]	1950	1945
주파수 [Hz]	66.5	66.5
효율 [%]	92	92
역률 [%]	88	88

표 2.1.2 유도전동기 설계제원

항목	사양	항목	사양
고정자 외경 [mm]	520	결선방법	2 x STAR
고정자 내경 [mm]	330	회전자 외경	326
고정자 슬롯 수	48	회전자 내경	160
사용도체	(5x1.4)x2	회전자 슬롯 수	40
총 권선 회수	18	도체	동바
권선방법	2층 분포권	공극	2
적층길이 [mm]	270	—	—

가. 기존 유도전동기 사양

영구자석 동기전동기의 사양은 기존 유도전동기의 사양을 바탕으로 결정하였다. 기존 유도전동기의 경우 위 표 1.1에 나와있듯이, 연속정격에서 회전속도는 1950rpm, 기어비는 7.07(99/14), 차륜경은 820mm였고 연속정격에서의 열차속도는 42.6km/h, 최대 회전속도는 4750rpm이 되어 103.8km/h의 최고 속도를 낼 수 있다.

나. 기어비 변경을 고려한 사양 결정

영구자석 동기전동기를 설계하면서 기어비를 7.07(99/14)에서 8.43(118/14)으로 변경하였다. 820mm의 차륜경과 변경된 기어비를 통해 전동기의 회전속도를 산정하였다. 연속정격에서 영구자석 동기전동기의 회전속도는 2400rpm, 최대 회전속도는 6000rpm이 되고 속도로 환산하면 연속정격에서 44km/h, 최대 속도는 110km/h에 해당한다. 기어비에 의해 산정된 전동기 회전속도와 요구출력 210kW를 이용하여 계산하게 되면 영구자석 동기전동기의 최대 토크는 835.6Nm 이상이 되도록 산정하였다.

다. 영구자석 동기전동기(IPMSM) 기초모델 설계

앞에서 살펴본 바와 같이 연속정격에서 동기전동기의 회전속도는 2400rpm, 이 때 동기전동기의 최대 토크는 835.6Nm 이상이 되도록 설계하였다. 선로의 전압은 직류 1,500V라고 가정하였다.

라. IPMSM 기초모델 설계 프로그램

기초모델 설계를 위한 첫 번째 방법으로 자기등가회로법을 이용하여 영구자석 동기전동기 설계식을 유도하였다. 이렇게 유도된 설계식을 이용하여 설계 프로그램을 작성한 후 설계 프로그램의 사용자 입력 부분에 전동기 사양을 입력함으로써 전동기 사이즈 정보를 얻을 수 있었다.

사용자 입력 창			
Parameter	Value	Unit	Description
E ₀	635	V	무부하 역기전력(단수 조정)
ac	174000	AC/mm	전기장하 (경험치)
N _{base}	2400	RPM	기저속도
T _{base}	835.6	Nm	기저속도에서의 요구 토크
P _{base}	210009.19	W	기저속도에서의 출력
N _{max}	6000	RPM	최대 요구속도
T _{max}	250	Nm	최대속도에서의 요구 토크
P _{max}	157079.63	W	최대속도에서의 출력
Temp	150	°C	동작온도
V _{DC}	1500	V	DC 링크단 전압
V _a	866.03	V _{peak}	상전압 제한치(피크치)
m	3	-	상수(3상)
N _{Poles}	6	-	극수
N _{Slots}	54	-	슬롯수
K _w	0.956	-	권선계수
K _{ld}	0.85	-	형상치수비(L/D _g)
a	2	-	병렬회로수
g	1	mm	공극길이
K _c	1.05	-	카터계수
B _r	1.15	T	잔류자속밀도
mu _r	1.05	-	비투자율
TK (B _z)	-0.105	%/°C	잔류자속밀도의 온도계수
σ _m	909090	S/m	도전률
T _m	10	mm	영구자석 두께
alpha _m	0.56	-	극호율 (0.5~0.9)
B _{sat}	1.8	T	치, 요크 포화 자속밀도
B _{rib}	2	T	립 포화 자속밀도
T _{rib}	1.5	mm	립 두께
K _{lb}	0.97	-	배리어 누설계수
K _{ls}	0.95	-	공극 누설계수
K _r	1.30	-	릴럭턴스 계수
K _{sat}	1.00	-	인덕턴스 포화계수
J	4.5	A/mm ²	최대허용 전류밀도
K _{sf}	0.60	-	슬롯 점적률
W _{so}	2.5	mm	슬롯 개구폭
d1	1.5	mm	슈 높이
d2	1.5	mm	슈 높이

그림 2.1.1 설계 프로그램의 사용자 입력 부분

전동기 설계			
Parameter	Value	Unit	Description
Br_temp0	0.993025	T	동작온도에서 Br
B_g	0.474366979	T	공극자속밀도
B_g1	0.465376743	T	공극자속밀도 기본파
C_om	60799.73654		출력계수
D_g	0.25286726	m	공극 외경
L_stk	0.214937171	m	축방향 길이
D_ro	0.25186726	m	회전자 외경
W_m	0.071930551	m	영구자석 너비
Br_dec1	0.083413791	T	Rib 누설자속밀도
Br_temp1	0.909611209	T	잔류자속밀도
B_g	0.4345203	T	공극자속밀도
B_g1	0.426285241	T	공극자속밀도 기본파
C_om	55692.57757		출력계수
D_g	0.26037187	m	공극 외경
L_stk	0.22131609	m	축방향 길이
D_ro	0.25937187	m	회전자 외경
W_m	0.074099622	m	영구자석 너비
Br_dec2	0.080972073	T	Rib 누설자속밀도
Br_temp2	0.912052927	T	잔류자속밀도
B_g	0.435686706	T	공극자속밀도
B_g1	0.427429541	T	공극자속밀도 기본파
C_om	55842.07617		출력계수
D_g	0.260139309	m	공극 외경
L_stk	0.221118413	m	축방향 길이
D_ro	0.259139309	m	회전자 외경
W_m	0.074032405	m	영구자석 너비
Pos_m	0.122603577	m	영구자석 위치
psi_g1	0.012873423	Wb	극당 자속
N_ph	45.62148428	턴	상당 직렬 턴수
N_ph	45	턴	조정 턴수
alpha_m2	0.606575285		영구자석 하단 극호율
W_web	0.04783428	m	웹폭
Z_c	5	-	슬롯당 도체수/2
I_a	220	A	상전류(피크치)
A_slot	407.4074074	mm ²	슬롯 면적
W_t	7.326455148	mm	치 폭
W_sy	32.96904817	mm	고정자 요크 두께
R_ss	133.5696547	mm	R_si+d1+d2
H_t	38.884758	mm	치 길이

그림 2.1.2 설계 프로그램의 전동기 설계 부분

전동기 치수			
Parameter	Value	Unit	Description
beta	30	deg	전류 위상각(정격 속도)
I_a	220	A	상전류(피크치)
Zc	5	-	슬롯당 도체수/2
a	2	-	병렬회로수
N_poles	6	-	극수
D_ro	260	mm	회전자 외경
L_stk	221	mm	축방향 길이
W_m	74	mm	영구자석 폭
T_m	10	mm	영구자석 두께
Pos_m	122.0	mm	영구자석 위치
W_web	47.8	mm	웹 폭
T_rib	1.5	mm	립 두께
g	1	mm	공극길이
D_shaft	156	mm	회전자 내경
D_so	411.8	mm	고정자 외경
W_sy	33	mm	고정자 요크 두께
W_t	7.4	mm	치 폭
H_t	38.9	mm	치 길이
W_so	2.5	mm	슬롯 개구폭
d1	1.5	mm	슈 높이
d2	1.5	mm	슈 높이

그림 2.1.3 설계 프로그램의 전동기 치수 설계결과 출력 부분

마. 설계 프로그램을 통한 모델링

계산된 전동기 치수를 가지고 설계 프로그램을 이용하여 그림 1.4와 같이 모델링하였다. 극수, 슬롯수 조합은 6극 54슬롯 형태로서 주기성을 갖게 되어 1/6으로 모델링된 것이다. 또한 오픈 슬롯 형태의 고정자로 모델링하면서 일부 치수가 변경되었다. 영구자석 두께는 10mm, 폭은 74mm이고 회전자 외경은 260mm, 고정자 외경은 435mm로 정했다. 회전자와 고정자의 적층길이는 220mm이며 1상당 권선 회수는 45턴, 슬롯당 도체수는 10개이다. 이

때 병렬회로 개수는 2이다. 입력전류는 3상 220Arms가 된다. 아래 그림들은 설계된 기초모델과 유한요소해석법으로 얻은 전동기의 전자계 특성 결과를 보여준다.

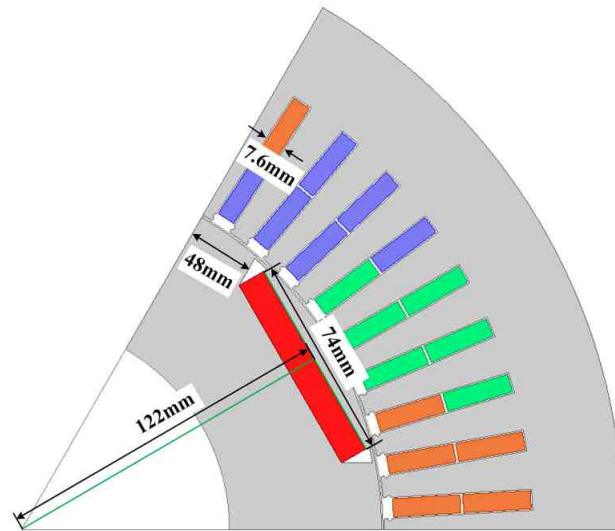


그림 2.1.4 영구자석 동기전동기의 기초설계 모델

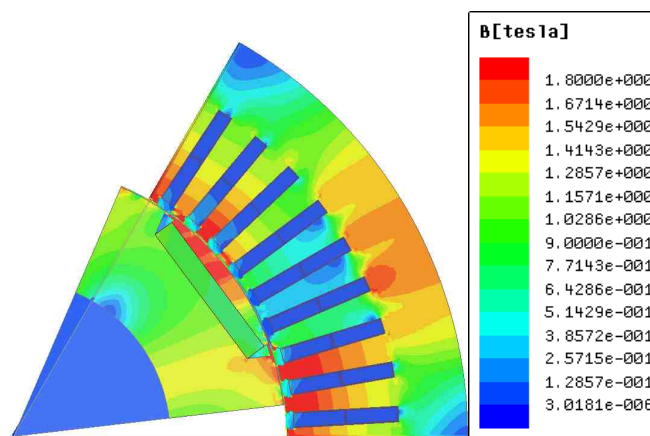


그림 2.1.5 기초설계 모델의 자속밀도분포도 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

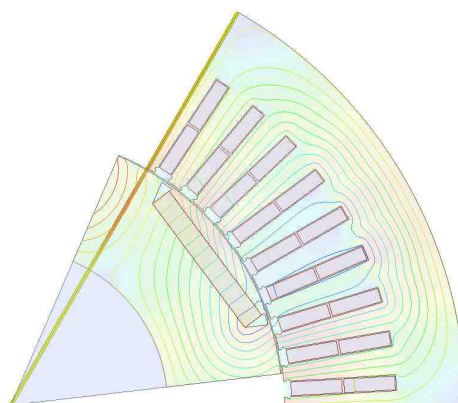


그림 2.1.6 기초설계 모델의 자속선도 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

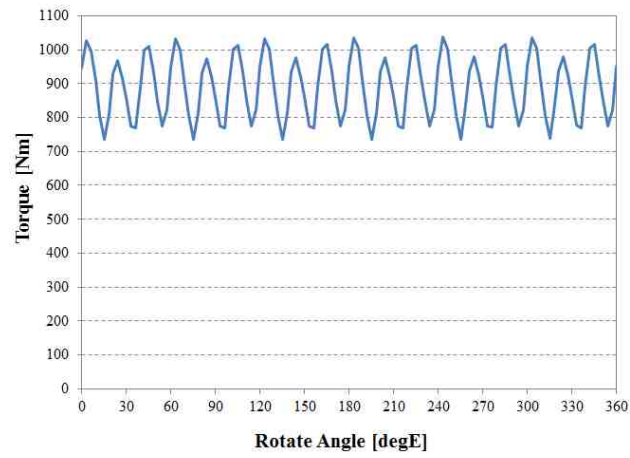


그림 2.1.7 기초설계 모델의 토크 파형 (2400rpm, $\beta=40^\circ$)

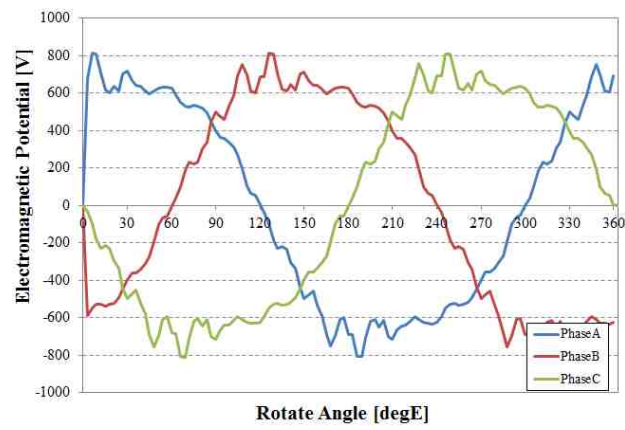


그림 2.1.8 기초설계 모델의 토크 파형 (2400rpm, $\beta=40^\circ$)

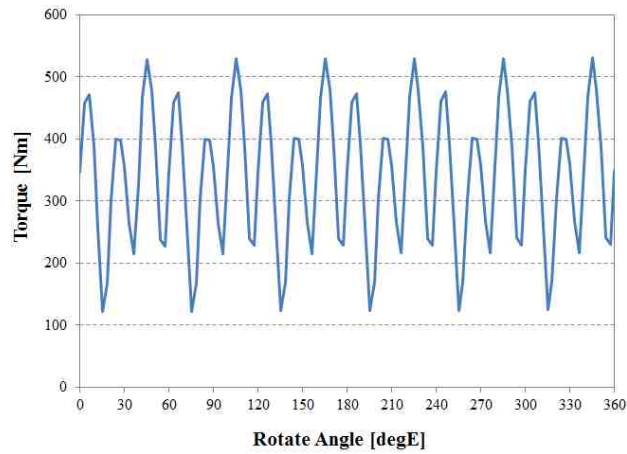


그림 2.1.9 기초설계 모델의 토크 파형 (6000rpm, $\beta=78^\circ$)

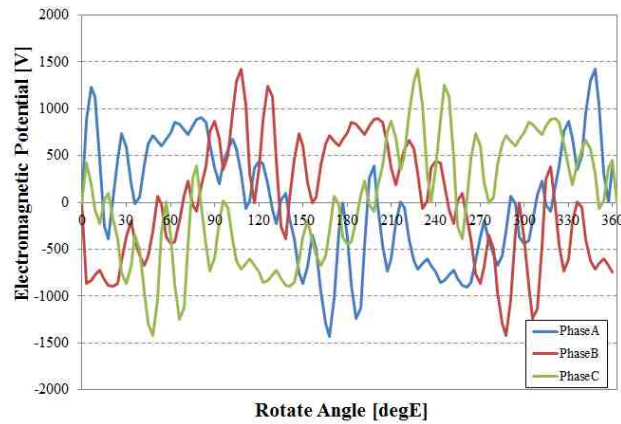


그림 2.1.10 기초설계 모델의 토크 파형 (6000rpm, $\beta=78\text{deg}$)

유한요소해석 결과, 2400rpm에서 토크는 889.4Nm가 되어 기초설계 모델의 설계 사양이었던 2400rpm에서 835.6Nm의 토크값과 비교했을 때 6.43%의 오차를 가짐으로써 오차를 10% 이내를 달성하였다.

2. IPM 전동기 최적설계 (한양대학교)

기초설계 모델은 도시철도차량 견인용 전동기로서의 요구 사양을 만족하지만, 전자계적인 소음진동원이 될 수 있는 토크리플이 비교적 큰 편이고, 회전자에 영구자석이 매입되어있는 구조특성상 구조적으로 강인한지에 대한 안전성 확인이 필요하다. 이를 위해 아래와 같이 구조해석을 실시하였다.

가. 구조해석 실시

구조해석을 진행하기 위해 첫 번째로 기초설계 모델에서 회전자 부분만 추출한 후 3차원 형상으로 변경하였다. 그리고 회전 시 구조적으로 가장 취약 조건이 되도록 영구자석의 윗면만 본딩(Bonding) 처리한 후에 회전자가 전동기 최대속도인 6000rpm으로 회전하도록 설정하여 구조해석을 실시하였다.

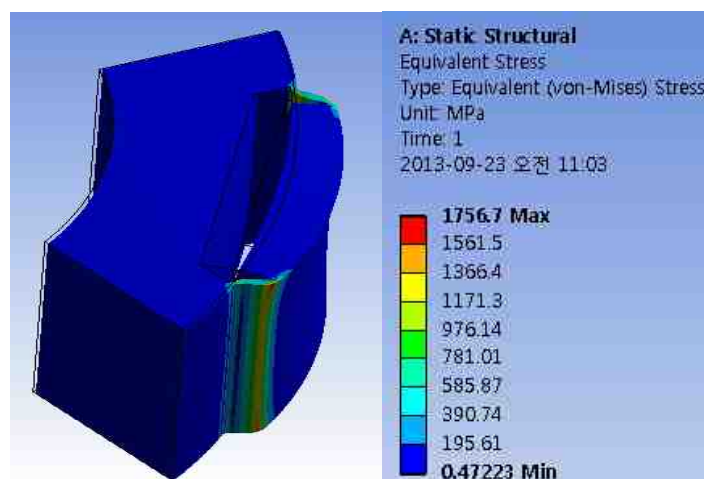


그림 2.1.11 기초설계 모델의 구조해석 결과 (@6000rpm)

$$\frac{440}{1756.7} = 0.25 \quad \left(\frac{440}{\max \sigma} = \text{안전율} \right)$$

구조해석 결과 안전율이 0.25로 기준치인 1.5에 비하여 매우 미달되는 수준이었고, 이 수치는 구조적으로 강인하지 못하여 영구자석이 비산될 가능성이 매우 높다는 것을 의미한다. 그렇기 때문에 기존 특성을 유지하면서 회전자 영구자석의 구조 변경이 불가피했다.

나. 회전자 구조 검토

기초설계 모델의 회전자의 구조적인 문제점을 해결하기 위해 그림 2.2와 같이 영구자석 사이에 1개의 Bridge를 갖는 형태의 회전자 구조를 검토하였다. Bridge의 두께는 1mm이다.

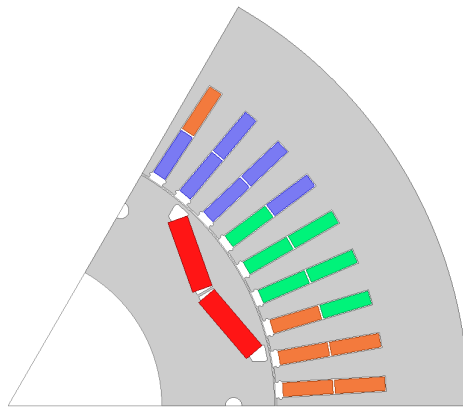


그림 2.1.12 한 개의 Bridge를 갖는 IPMSM

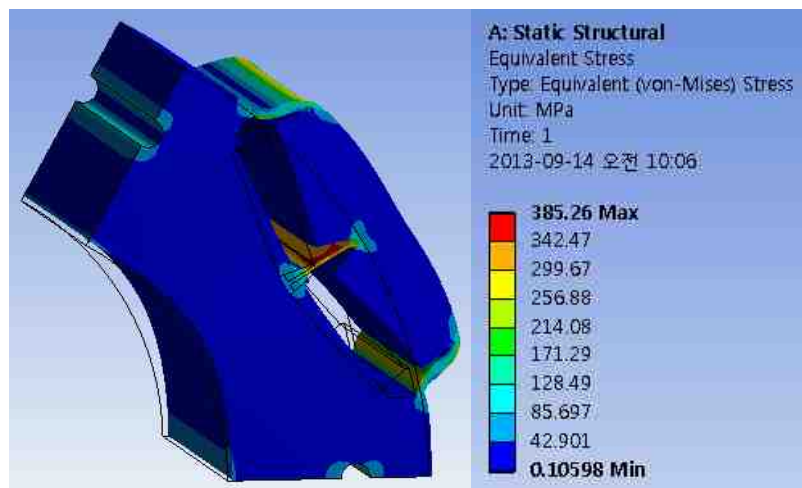


그림 2.1.13 Bridge 1개 모델의 구조해석 결과 (@6000rpm)

$$\frac{440}{385.26} = 1.14 \quad \left(\frac{440}{\max \sigma} = \text{안전율} \right)$$

설계 변경을 마치고 다시 구조해석을 진행한 결과 안전율이 1.14로 기준치인 1.5에 여전히 미치지 못했다. 영구자석 사이의 Bridge 부분에 Stress가 매우 심하게 나타났기 때문에 회전자 구조의 재변경이 불가피했다.

따라서 그림 2.4와 같이 영구자석 사이에 2개의 Bridge를 갖는 형태의 회전자 구조를 검토하게 되었고 Bridge의 두께는 1mm로 정하였다.

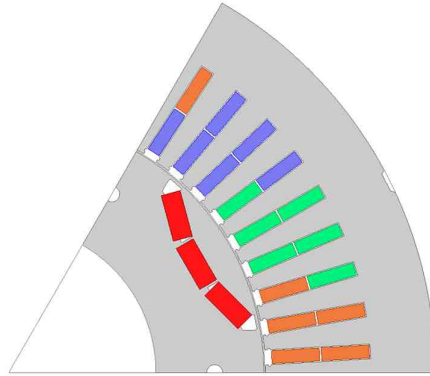


그림 2.1.14 두 개의 Bridge를 갖는 IPMSM

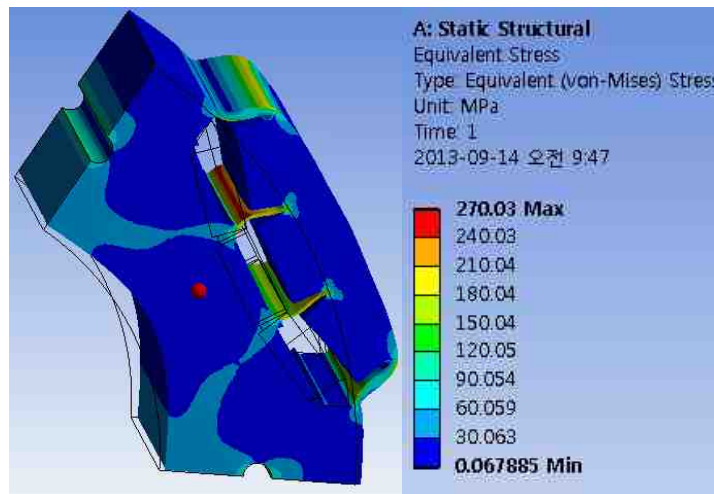


그림 2.1.15 Bridge 2개 모델의 구조해석 결과 (@6000rpm)

$$\frac{440}{270.03} = 1.62 \quad \left(\frac{440}{\max \sigma} = \text{안전율} \right)$$

세 번째 구조해석을 진행한 결과 그림 2.5와 같이 안전율이 1.62로 기준치인 1.5 이상을 만족하였다. 영구자석 동기전동기의 강성문제 해결을 위해서는 2개의 Bridge를 갖는 형태의 회전자 설계 필요하다는 결론을 내리게 되었고, 영구자석 동기전동기 최적 설계를 위해 설계변수를 다음 그림 2.6과 같이 선정하였다.

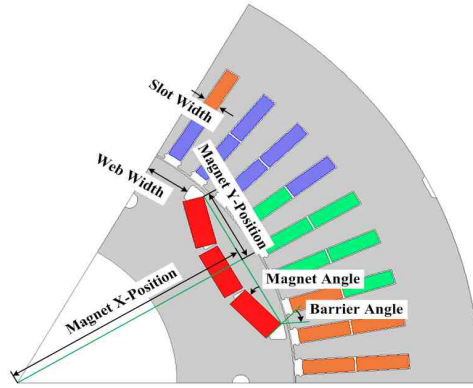


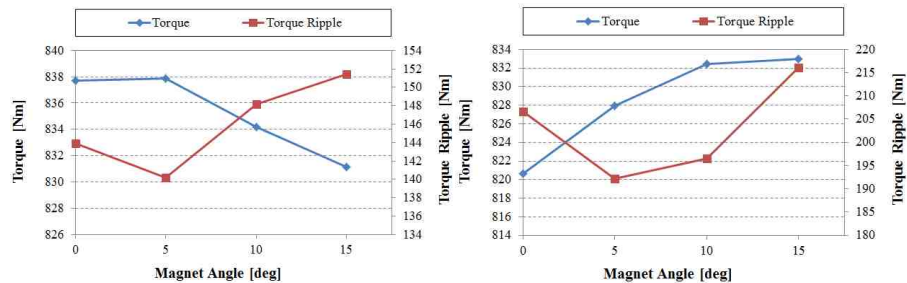
그림 2.1.16 영구자석 동기전동기 설계변수

다. 민감도 분석

각각의 설계변수가 토크와 토크리플에 얼마나 많은 영향을 미치는지 확인하기 위해 민감도 분석을 실시하였다. 해석을 진행할 때 전동기의 회전속도는 2400rpm으로 설정하고 슬롯 폭(Slot Width)은 7.6mm, 웹 폭(Web Width)은 43mm, 베리어 각도(Barrier Angle)는 13deg로 고정시켰다. 또한 회전자 강성을 위한 3분할된 영구자석의 각도(Magnet Angle), 영구자석의 위치(Magnet X-Position, Magnet Y-Position)에 대하여 해석을 진행하였다.

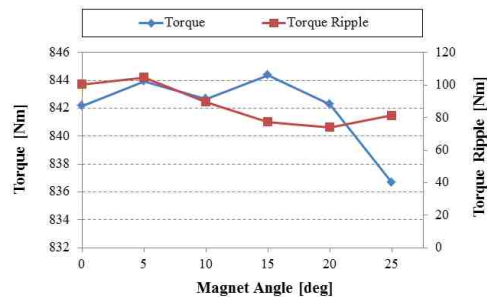
(1) Magnet Angle 변화에 따른 토크 특성

Magnet Angle 변화에 따른 토크의 크기 변화, 토크 리플의 변화의 규칙성을 발견하기 어려웠다. 다른 설계변수의 영향을 받는다는 것을 확인하였다.



Mag X-Pos=120[mm]
Mag Y-Pos=36.6[mm]

Mag X-Pos=122[mm]
Mag Y-Pos=38.6[mm]

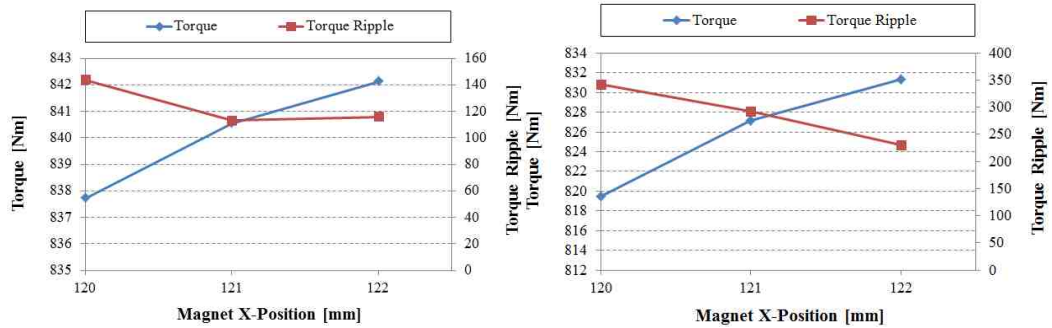


Mag X-Pos=122[mm]
Mag Y-Pos=36.6[mm]

그림 2.1.17 Magnet angle 변화에 따른 토크특성

(2) Magnet X-Position 변화에 따른 토크 특성

Magnet X-Position의 값이 커질수록 토크는 증가하고 토크리플 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 따라서 최대값인 122mm로 선택하였다.



Mag Y-Pos=36.6[mm]

Mag Angle=0[deg]

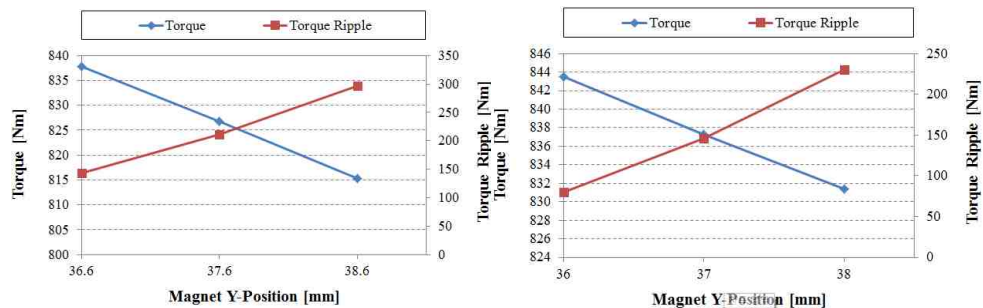
Mag Y-Pos=38.6[mm]

Mag Angle=15[deg]

그림 2.1.18 Magnet X_position 변화에 따른 토크특성

(3) Magnet Y-Position 변화에 따른 토크 특성

Magnet Y-Position의 값이 커질수록 토크는 감소, 토크리플 증가하는 경향을 보였다. 따라서 최소값인 36.6mm로 선택하였다.



Mag X-Pos=120[mm]

Mag Angle=0[deg]

Mag X-Pos=122[mm]

Mag Angle=15[deg]

그림 2.1.19 Magnet Y_position 변화에 따른 토크특성

최종적으로 설계 변수 중 경향성을 갖는 변수들은 다음과 같은 값으로 고정하였다.

Slot Width = 7.6mm,

Web Width = 43mm,

Barrier Angle = 13deg,

Magnet X-Position = 122mm,

Magnet Y-Position = 36.6mm

위 변수들을 고정한 상태에서 Magnet Angle 변화에 따른 토크 특성을 확인한 결과 Magnet Angle 15deg에서 최대 토크 발생, 20deg에서 토크리플 최소가 되는 특성을 보였고, 최종 모델은 토크가 최대이고, 토크리플이 비교적 작은 15deg를 선택하였다.

라. 최적 설계 모델

민감도 분석을 통해 얻은 주요 설계변수의 최적 사이즈를 가지고 그림 2.1.19와 같이 최적설계 모델을 모델링하였다.

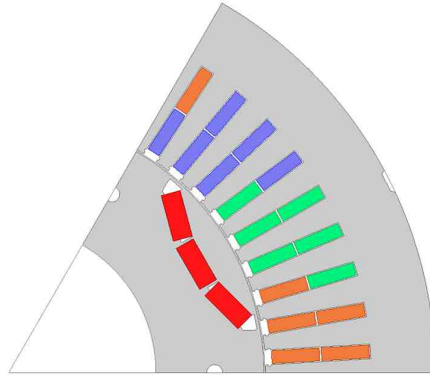


그림 2.1.19 영구자석 동기전동기 최적설계 모델

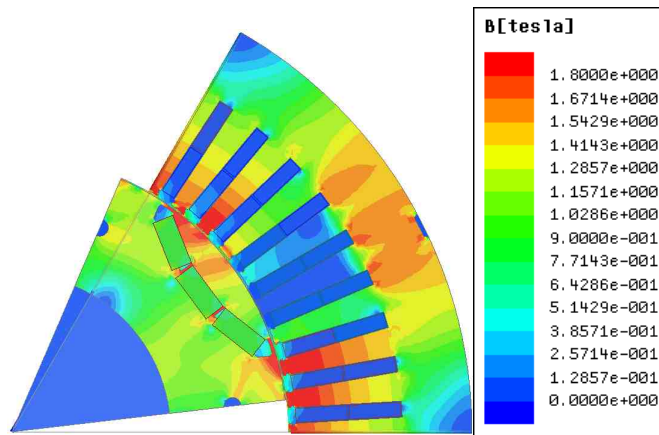


그림 2.1.20 최적설계 모델의 자속밀도분포도 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

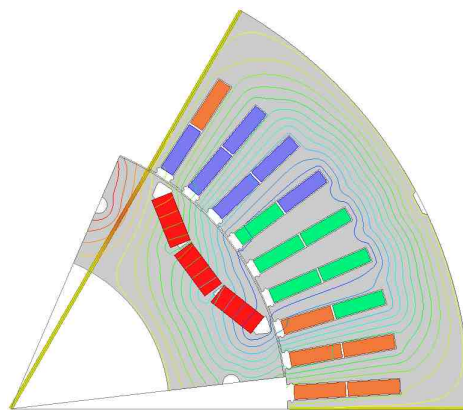


그림 2.1.21 최적설계 모델의 자속선도 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

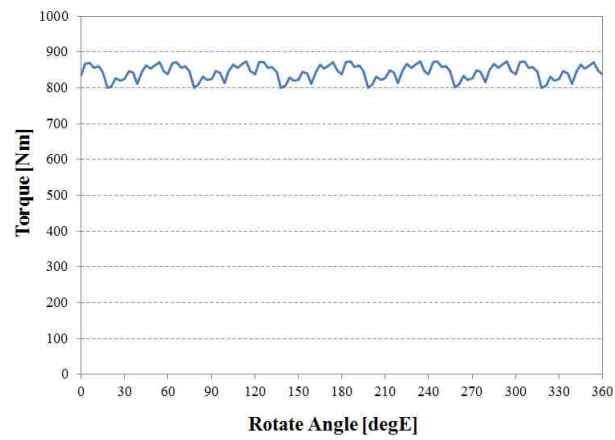


그림 2.1.21 최적설계 모델의 토크 파형 (2400rpm, $\beta=40^\circ$)

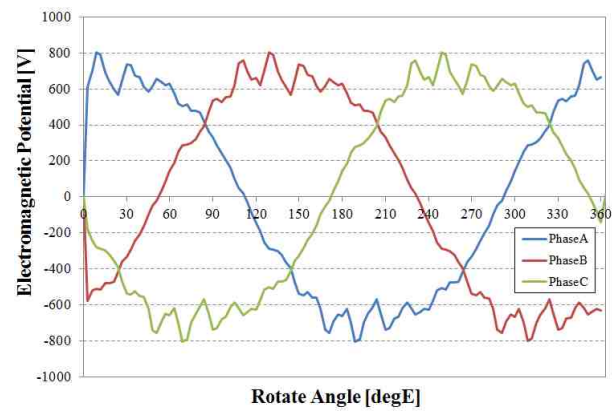


그림 2.1.22 최적설계 모델의 역기전력 파형 (2400rpm, $\beta=40^\circ$)

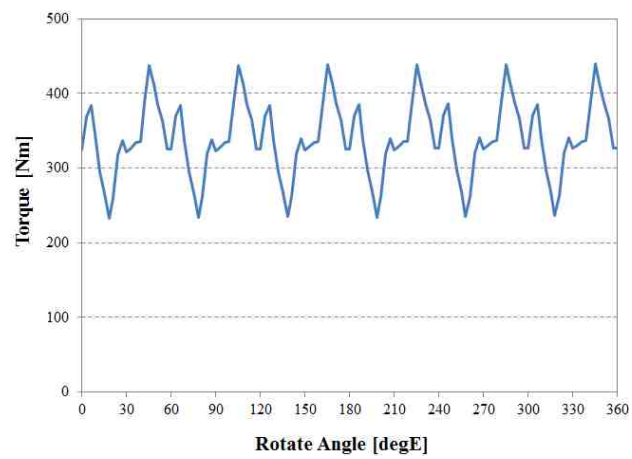


그림 2.1.23 최적설계 모델의 토크 파형 (6000rpm, $\beta=78^\circ$)

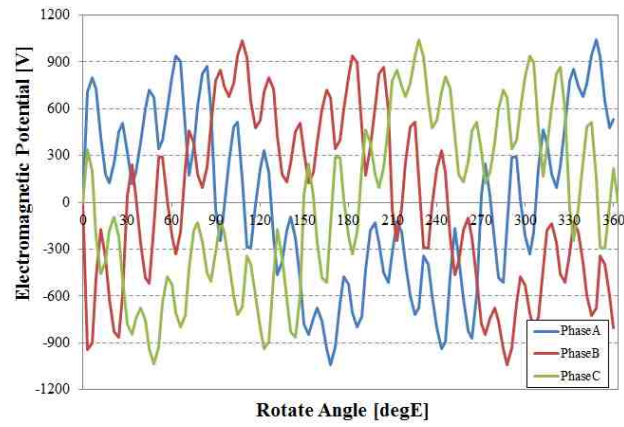


그림 2.1.24 최적설계 모델의 역기전력 파형 (6000rpm, $\beta=78\text{deg}$)

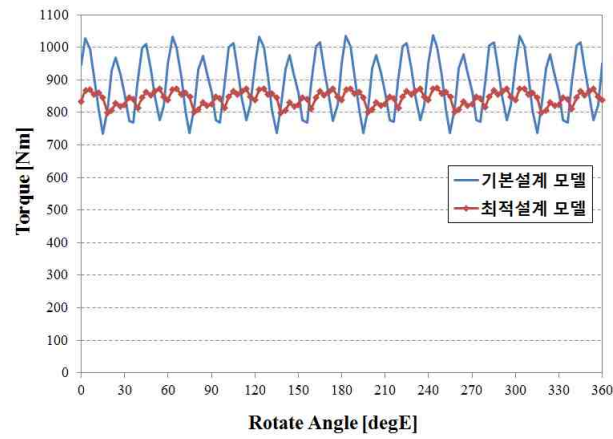


그림 2.1.25 기초설계 모델과 최적설계 모델의 토크 파형 비교 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

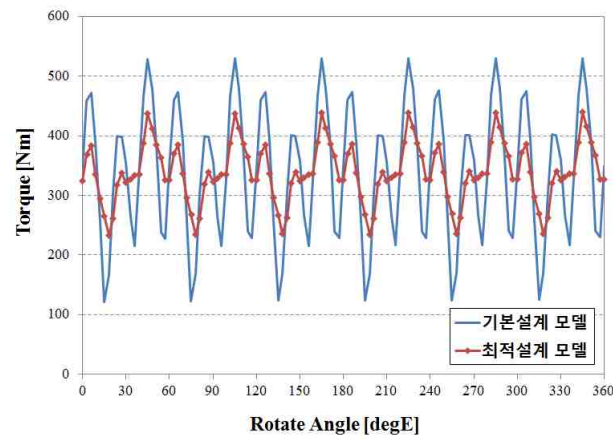
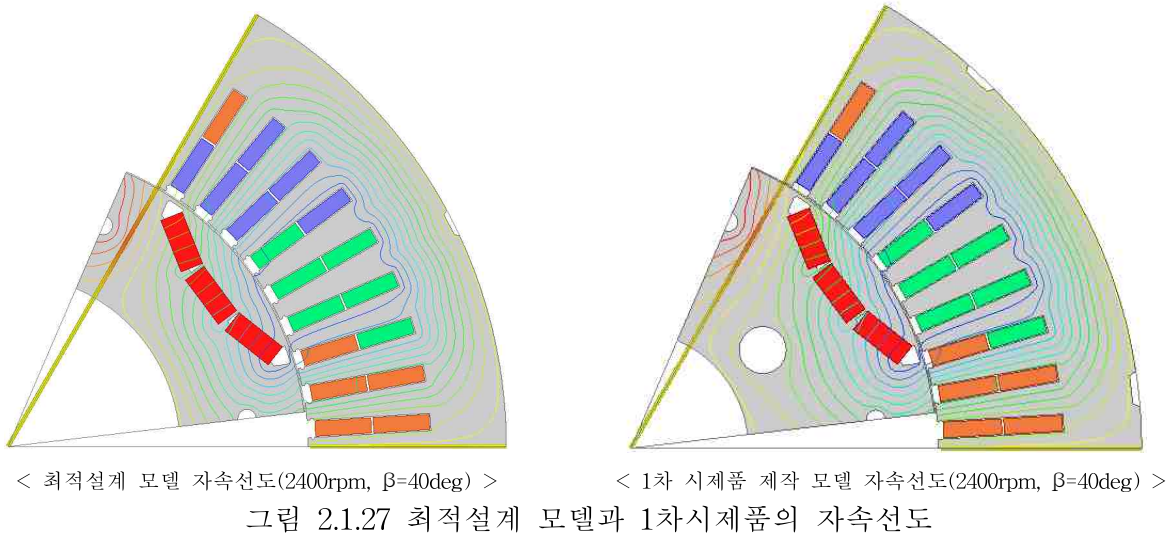


그림 2.1.26 기초설계 모델과 최적설계 모델의 토크 파형 비교 (6000rpm, $\beta=78\text{deg}$)

최적설계 모델의 유한요소해석 결과 그림 2.14와 같이 2400rpm에서 853.1Nm의 토크값을 얻었고 이는 목표 토크값인 835.6Nm 대비 오차가 2.09%가 됨으로써 10% 이내의 오차를 목표치를 만족하였다.

3. IPM 전동기 고조파 저감에 관한 연구

1차년도에 실시한 IPM 전동기 최적 설계를 통해서 그림 < 최적설계 모델 자속선도 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$) >와 같은 모델을 얻었으며, 실제 제작 모델에서는 전동기의 무게를 줄이기 위해 그림 < 1차 시제품 제작 모델 자속선도(2400rpm, $\beta=40\text{deg}$) >와 같이 회전자의 샤프트 외경을 줄이고 통풍구를 추가하였다.



모델은 회전자의 샤프트 외경과 통풍구의 유무만 차이가 있을 뿐, 위 그림에서 알 수 있듯이 자로에 영향을 거의 주지 않기 때문에 전기적인 특성은 거의 동일하다. 1차 시제품 제작 모델의 도면을 토대로 유한요소해석을 실시하였고, 부하 시 정격속도 2,400rpm에서의 역기전력과 최대속도 6,000rpm에서의 역기전력을 추출한 다음 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통해 다음 그림과 같이 고조파 성분 그래프를 얻었다.

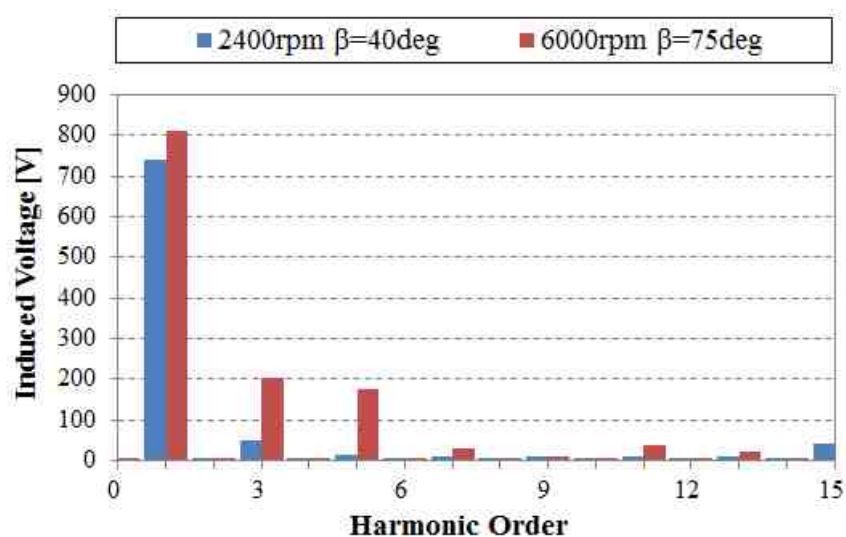


그림 2.1.28 역기전력 고조파 분석 결과(상전류=220A(peak))

IPM 전동기와 같은 영구자석형 전동기는 정격속도를 넘게 되면 상전압 기본파 크기가 증가하지 못하도록 전류위상각(β 각)을 조정하여 약자속 제어를 해야 한다. 1차 시제품 IPM 전동

기의 경우 상전류의 최대값이 220A일 때 2,400rpm 이하에서는 전류위상각을 40deg로 하여 운전해야 단위 전류당 최대 토크를 얻을 수 있으며, 6,000rpm 에서는 전류위상각을 75deg로 해서 운전해야 역기전력이 입력전압을 넘지 않도록 운전 가능하다. 반면, 전류위상각을 증가시키면 공극자속 흐름에 왜곡이 발생하여 고조파 성분이 증가하게 된다. 본 모델의 경우에는 전류위상각이 커질수록 3차와 5차 고조파 성분의 증가가 두드러지는 것을 위 그림에서 확인할 수 있다. 이러한 고조파 성분의 증가는 전동기의 토크 리플을 증가시키고, 철손도 많이 발생시키기 때문에 전동기의 효율 향상을 위해서는 고조파 발생 원인을 확인하고 철손이 어떻게 발생되는지에 대한 연구가 필요하다.

아래 두 그림은 최대토크 제어 시 철손 분포 및 각 부위별 자속밀도 파형을 2400rpm, 6000rpm에서 시뮬레이션 한 결과이다. 그림 < 최대토크 제어 시 철손 분포 및 각 부위별 자속밀도 파형(2400rpm) >는 정격속도인 2,400rpm에서 전류위상각 40deg로 운전했을 때의 철손 분포를 나타내고 그림 < 약자속 제어 시 철손 분포 및 각 부위별 자속밀도 파형(6000rpm) >은 최대속도인 6,000rpm에서 전류위상각 75deg로 운전했을 때의 철손 분포를 나타낸다.

철손은 다음 식과 같이 와전류손과 히스테리시스손의 합으로 나타낼 수 있다.

$$w_i = w_{ie} + w_{ih} = K_e f^2 B_{\max}^2 + K_h f B_{\max}^2 \quad [\text{W/kg}]$$

또한 유한요소해석 결과 데이터를 가지고 다음 식을 통해 전체 철손을 계산할 수 있다.

$$W_i = \sum_n \left\{ \int_{iron} K_e D \cdot (nf)^2 \cdot (B_{r,n}^2 + B_{\theta,n}^2) dv \right\} + \sum_n \left\{ \int_{iron} K_h D \cdot (nf) \cdot (B_{r,n}^2 + B_{\theta,n}^2) dv \right\} [\text{W}]$$

여기서, n : 고조파 차수

D : 철심의 밀도

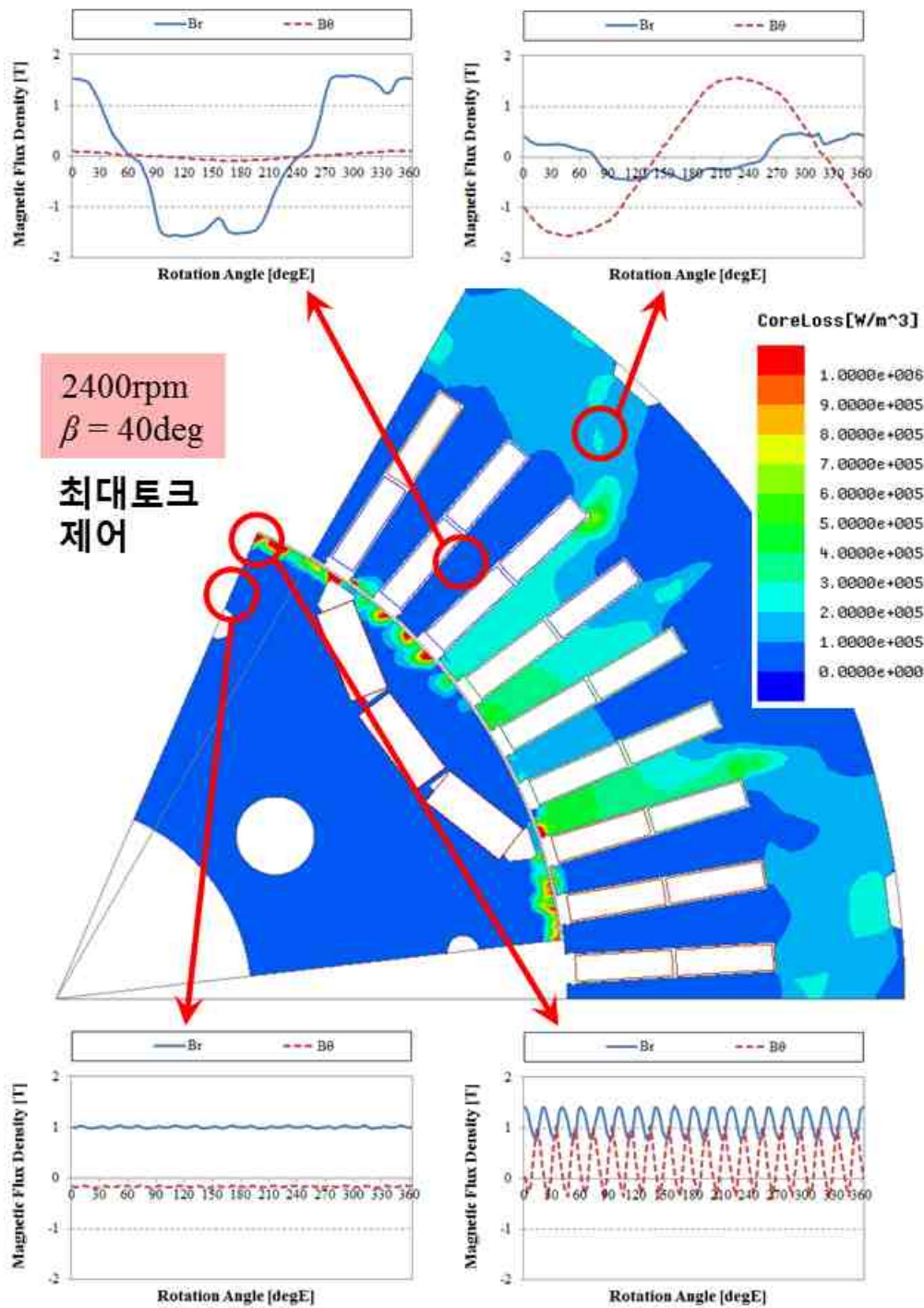


그림 2.1.29 최대토크 제어 시 철손 분포 및 각 부위별 자속밀도 파형(2400rpm)

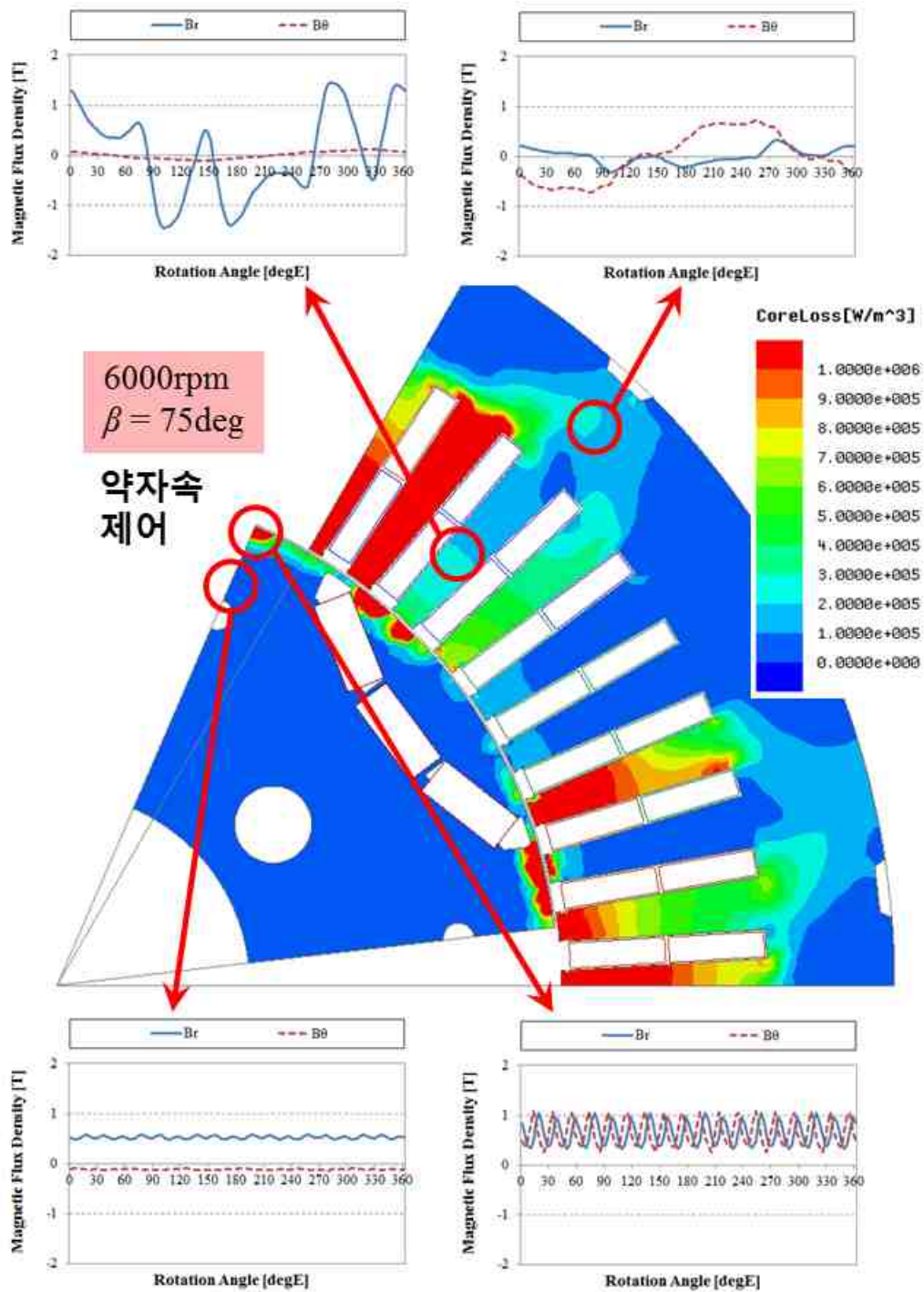


그림 2.1.30 약자속 제어 시 철손 분포 및 각 부위별 자속밀도 파형(6000rpm)

와전류손은 주파수 제곱에 비례하고, 히스테리시스손은 주파수에 비례하는 것을 알 수 있다. 즉, 단위 시간당 자속밀도의 변화가 크거나 빈번할 경우에 철손이 증가하게 되는 것이다. 그림 < 최대토크 제어 시 철손 분포 및 각 부위별 자속밀도 파형(2400rpm) >와 < 약자속 제어 시 철손 분포 및 각 부위별 자속밀도 파형(6000rpm) >에서도 이와 부합하게 자속밀도의 변화가 빈번하거나 크게 변하는 부위에서 철손이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히 고속회전 시 주파수 증가로 철손이 크게 증가하게 되며, 고정자 치 부분과 회전자 표면 부분에서 많은 양의 철손이 발생하는 것을 볼 수 있다.

고정자 치와 회전자 표면에서 많은 양의 철손이 발생하는 원인을 분석하기 위해 IPM 전동기의 각 부위에 대하여 시간에 따른 자속밀도의 변화 파형을 분석하였고, 자속밀도 파형에 FFT를 적용하여 주파수 성분별로 분리하였다.

아래의 그림은 고정자 요크 부분과 치 부분에서의 자속밀도 파형과 고조파 차수별 그래프를 각각 나타낸다. 고정자 부분에서의 자속밀도 파형은 대부분 1차, 3차, 5차, 7차, 9차 성분의 홀수 차 고조파 성분이 발생한다. 이 때, 1차 성분은 회전자계에 의해 발생하는 기본파 성분이며, 3차, 5차, 7차, 9차 성분은 회전자의 영구자석에서 발생하는 고조파에 의한 성분이라고 할 수 있다.

또한 고정자 요크 부분은 자속밀도의 원주방향 성분 B_θ 가 대부분인 반면, 고정자 치 부분은 자속밀도의 반지름방향 성분 B_r 이 대부분이다. 즉, 영구자석 고조파 성분이 고정자의 요크 부분보다 치 부분에서 자속밀도 파형에 더 많은 영향을 미치는 것이다.

영구자석에서 발생하는 고조파 성분은 고정자에서 발생하는 철손의 주요 원인이 된다. 따라서 고정자 철손 저감을 위해서는 영구자석 고조파를 줄이는 형상으로 회전을 설계해야 하지만 회전자가 고속으로 회전하기 때문에 기계적 강성과 전자기적 특성을 동시에 고려해야 한다는 어려움이 있다.

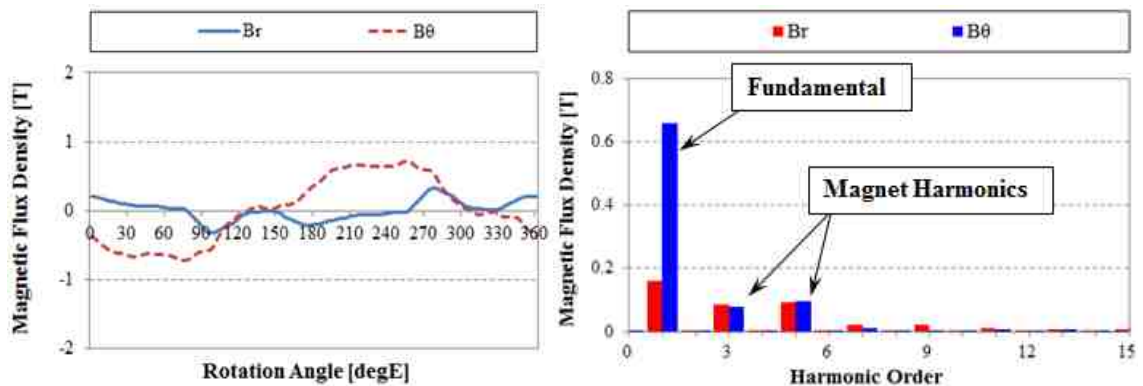


그림 2.1.31 고정자 요크 부분에서의 자속밀도 파형(6,000rpm)

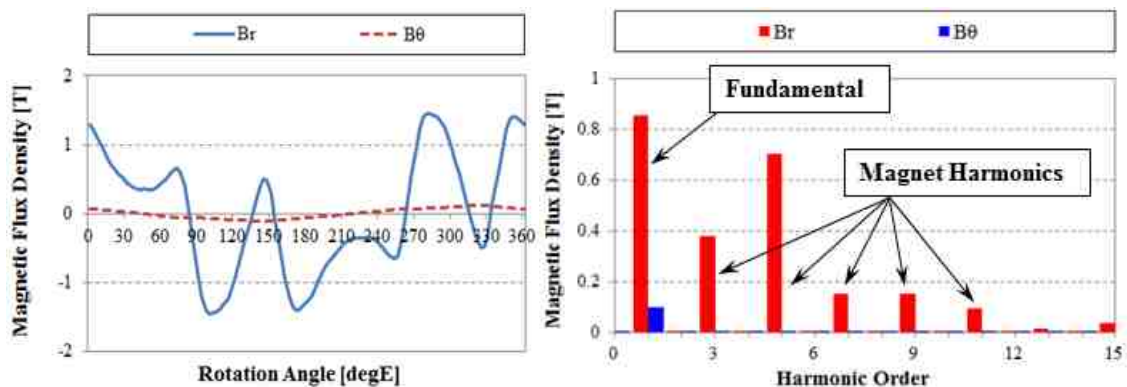


그림 2.1.32 고정자 치 부분에서의 자속밀도 파형(6,000rpm)

아래의 그림은 회전자 표면 부분과 안쪽 부분에서의 자속밀도 파형과 고조파 차수별 그래프를 각각 나타낸다.

회전자 부분에서의 자속밀도 파형은 직류 성분과 18차, 36차 성분의 짝수 차 고조파 성분이 대부분 발생한다. 직류 성분은 영구자석과 회전자계에 의해 발생하는 기본파 성분으로, 회전자는 회

전자계와 동기속도로 회전하기 때문에 1차 성분이 아닌 직류 성분으로 나타나는 것이다. 18차와 36차 성분은 고정자 슬롯 리플에 의해 발생하는 고조파 성분이다.

회전자 표면에서의 자속밀도 파형은 원주방향 성분 B_θ 가 대부분이며, 반지름방향 성분 B_r 은 미미하게 발생한다. 반면, 회전자 안쪽에서의 자속밀도 파형은 직류 성분이 대부분이며, 고조파 성분은 거의 나타나지 않는다. 이와 같이 회전자에서 발생하는 철손은 대부분 회전자 표면에 집중되어 있으며, 고정자 슬롯 리플이 철손을 증가시키는 주된 원인이 된다. 따라서 고정자 슬롯 리플을 줄이는 형상으로 고정자 치 부분을 설계해야 한다. 이에 대한 대표적인 방법은 치 끝을 슈(Shoe) 구조로 만들어서 슬롯 개구 폭을 줄이는 것이지만, 본 연구의 IPM 전동기와 같은 고전압 전동기는 형권 권선 구조로 설계해야 하므로 슈가 없는 개방 슬롯 구조로 고정자를 설계해야 한다.

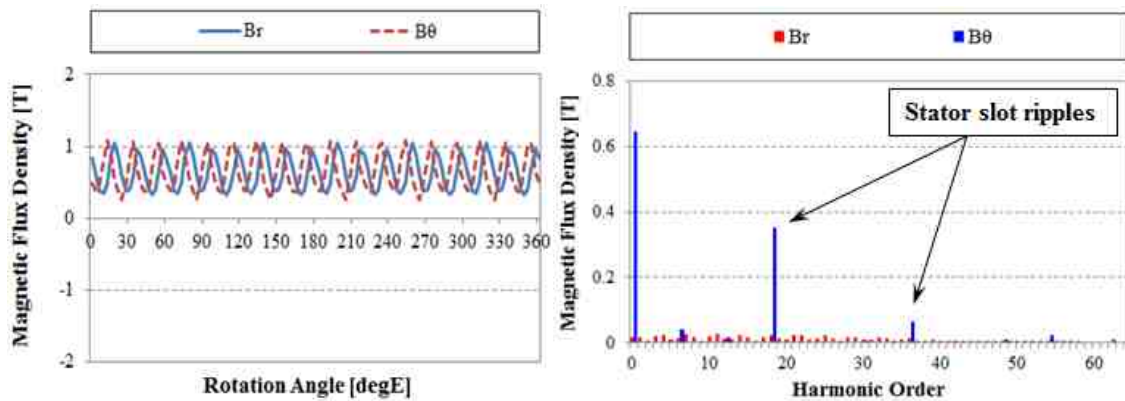


그림 2.1.33 회전자 표면 부분에서의 자속밀도 파형(6,000rpm)

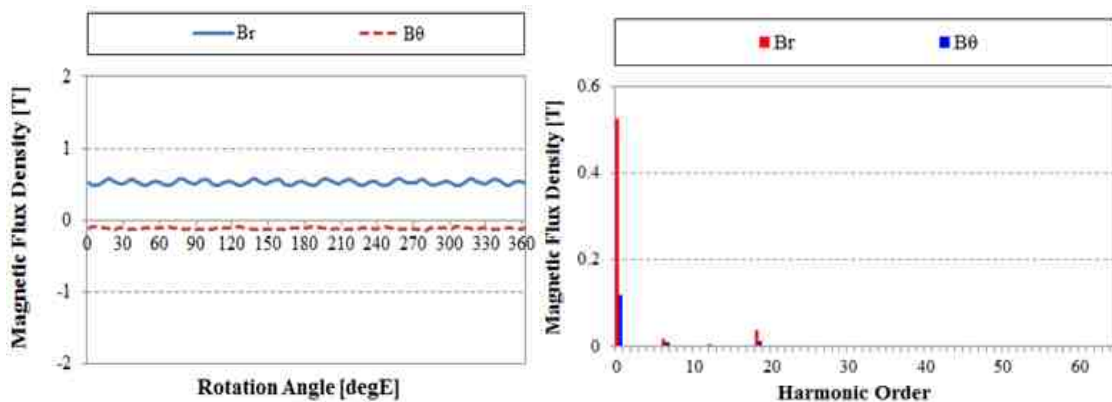


그림 2.1.34 회전자 안쪽 부분에서의 자속밀도 파형(6,000rpm)

개방 슬롯 구조의 전동기에서 슬롯 리플에 의한 고조파 성분을 줄이기 위해 슬롯 끝 부분에 권선이 탈 방지를 위해 삽입하는 일반 켜기 대신에 자성 켜기로 변경한 후 전자계 유한요소해석을 수행하였다.

해석 결과, 자성 켜기 모델이 1차 시제품 설계 모델의 해석 결과보다 평균토크는 약 2% 향상하였으며, 토크 리플은 2% 감소하였다.

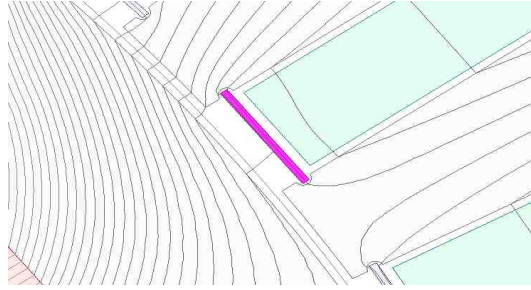


그림 2.1.35 자성 켜기를 사용한 전동기의 자속선도

위 그림은 자성 켜기를 사용했을 경우의 IPM 전동기 자속선도를 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 켜기 부분으로 일부 자속이 지나가면서 공극자속밀도 파형에 약간의 변화가 발생하였으며, 그 결과 역기전력의 THD가 시제 모델에 비해 약 2.5% 감소하였다. 또한 아래 그림에서는 자성 켜기를 사용함으로써 역기전력의 기본파 성분이 증가하고 고조파성분은 감소한 것을 확인할 수 있다.

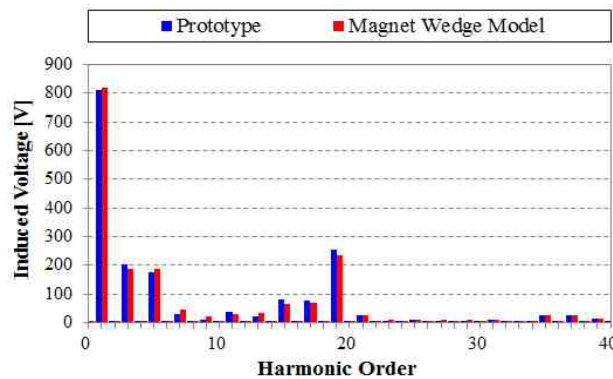


그림 2.1.36 시제 모델과 자성 켜기 모델의 역기전력 주파수 분석 결과(6,000rpm)

표 2.1.3 시제 모델과 자성 켜기 모델의 특성 비교(6,000rpm)

	1차 시제품 설계 모델	자성 켜기 모델
THD [%]	49.09	46.62
평균 토크 [Nm]	428.16	436.17
토크 리플 [Nm]	192.51	188.72
철손 [kW]	7.11	7.21
출력 [kW]	269.02	274.05
효율 [%]	96.34	96.37
철손/출력 [%]	2.64	2.63

고정자 슬롯 리플에 의한 고조파 성분을 줄이기 위해 자성 켜기를 사용할 경우, 역기전력 파형의 고조파 성분은 약 2.5% 줄었으나, 철손은 위의 표와 같이 약 1.4% 증가하였다. 이것은 역기전력 파형의 기본파 성분이 증가하면서 전체적인 출력도 함께 증가했기 때문이다. 정확한 비교를 위해서 출력 대비 철손의 비율을 계산해 보았는데 시제 모델은 약 2.64%, 자성 켜기 모델은 약 2.63%의 출력 대비 철손 비율을 갖는다는 것을 확인하였다. 따라서, 자성 켜기 모델의 역기전력 고조파 성분이 저감되었으며, 이에 따라 철손도 함께 저감되었다고 볼 수 있다. 또한, 철손 저감 효과로 인해 효율이 96.34%에서 96.37%로 약 0.03% 만큼 향상되었다.

제2절 1차 모델과 기존 유도전동기의 비교

1. IPM 전동기의 출력밀도 비교 (한양대학교)

다음은 기존 유도전동기와 영구자석 동기전동기(IPMSM) 최적설계 모델의 형상(그림 3.1, 3.2)과 기존 유도전동기와 IPMSM 최적설계 모델의 설계 치수(표 3.1)를 나타낸 것이다.

보다 정확한 출력밀도 비교를 위하여 표 3.2와 3.3과 같이 전동기를 이루는 각 구성품들의 중량계산을 비중과 차지하는 체적을 이용하여 행하였다.

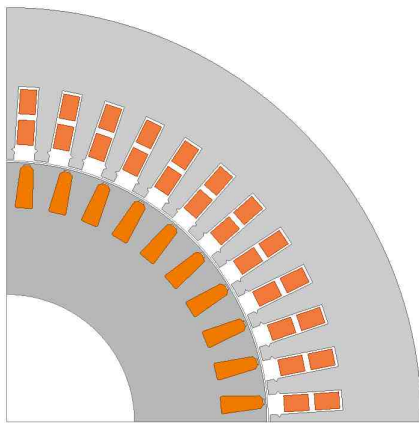


그림 2.2.1 기존 유도전동기 모델

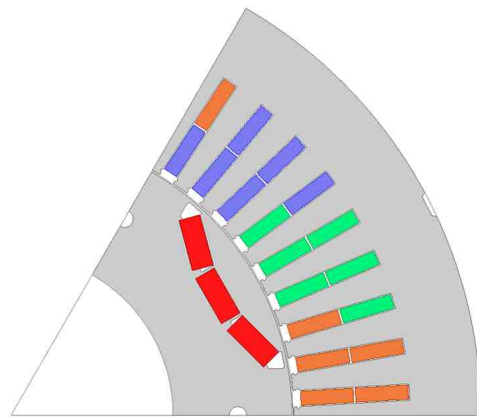


그림 2.2.2 IPMSM 최적설계 모델

표 2.2.1 유도전동기와 IPMSM의 설계 치수

항목	유도전동기	IPMSM
고정자 외경 [mm]	520	435
고정자 내경 [mm]	330	262
고정자 슬롯 수	48	54
공극 [mm]	2	1
사용도체	(5x1.4)x2	(7x3.5)x1
슬롯당 도체 수	18	10
권선방법	2층분포권	2층분포권
결선방법	2 x STAR	2 x STAR
회전자 외경 [mm]	326	260
회전자 내경 [mm]	160	160
적층길이 [mm]	270	220

표 2.2.2 유도전동기의 중량 계산

항목	재질	비중 [kg/L]	체적 [L]	중량 [kg]
고정자 권선	구리	8.93	8.22	73.45
고정자 철심	35PN230(S08)	7.60	26.60	202.16
회전자 철심	35PN230(S08)	7.60	14.41	109.50
회전자 동바	구리	8.93	2.67	23.84
샤프트	SCM440	7.85	5.43	42.62
합계	—	—	57.33	451.57

표 2.2.3 IPMSM의 중량 계산

항목	재질	비중 [kg/L]	체적 [L]	중량 [kg]
고정자 권선	구리	8.93	6.34	56.60
고정자 철심	35PN230(S08)	7.60	15.91	120.94
회전자 철심	35PN230(S08)	7.60	6.65	50.50
영구자석	Nd-Fe-B	7.50	0.95	7.13
샤프트	SCM440	7.85	3.89	30.52
합계	—	—	33.73	265.69

표 2.2.4 유도전동기와 IPMSM의 출력밀도

항목	유도전동기	IPMSM
중량 [kg]	451.57	265.69
출력 [W]	205.41	214.40
출력밀도 [kW/kg]	0.45	0.81

표 3.4에서 유도전동기와 IPMSM의 출력은 유한요소해석을 통하여 계산하였다.

유도전동기의 출력은 유한요소해석을 통해 계산된 것이며 IPM 전동기의 출력은 성능평가 시험을 통해 얻은 결과이다. 시험 결과, IPMSM의 출력밀도가 0.79KW/Kg인 것이 확인되었는데, 이는 0.79KW/Kg인 기존 유도전동기의 출력밀도 대비 75.6% 증가한 것이며 목표치였던 20%를 만족시킨다.

2. IPM 전동기의 효율 비교 (한양대학교)

기존 유도전동기의 효율을 구하기 위해 유도전동기에 대한 유한요소법 해석을 실시하였다.

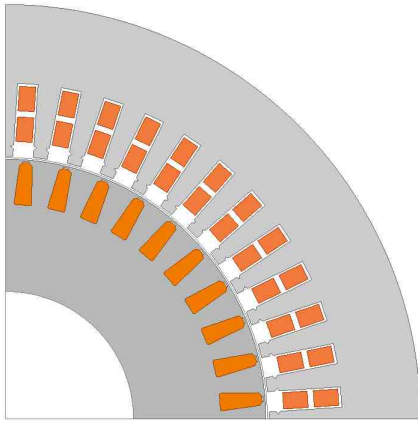


그림 2.2.3 기존 유도전동기 모델

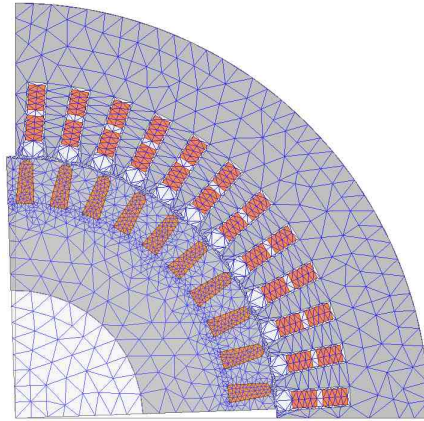


그림 2.2.4 유도전동기 해석 모델 요소분할도

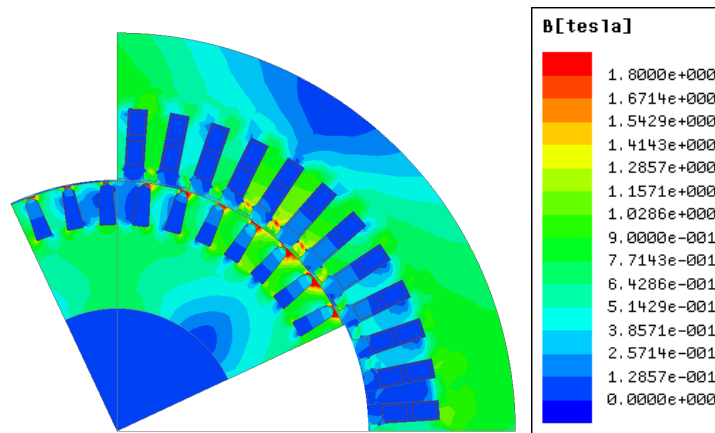


그림 2.2.5 유도전동기 모델의 자속밀도분포도 (1950rpm)

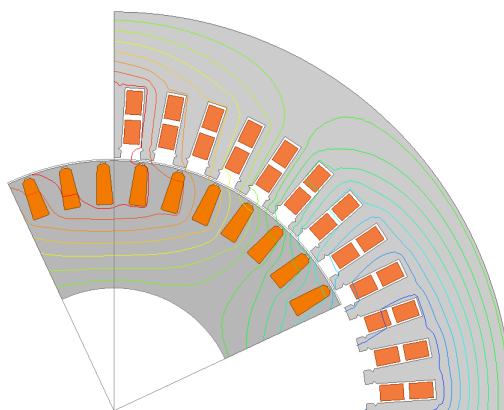


그림 2.2.6 유도전동기 모델의 자속선도 (1950rpm)

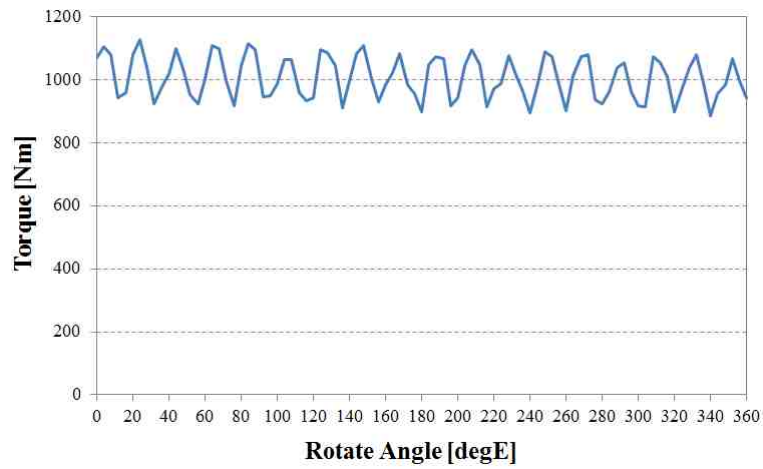


그림 2.2.7 유도전동기 모델의 토크 파형 (1950rpm)

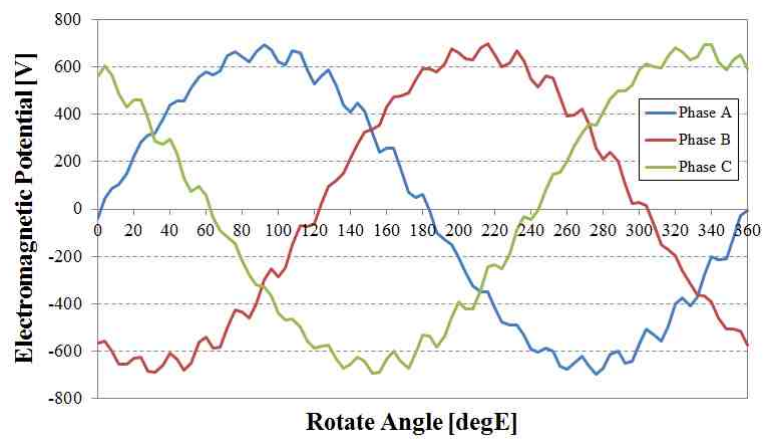


그림 2.2.8 유도전동기 모델의 역기전력 파형 (1950rpm)

다음과 같은 유도전동기 효율 계산식을 통해 효율을 계산하였다.

$$\text{효율} = \frac{\text{공극출력} - \text{철손} - \text{회전자 동손} - \text{기계손}}{\text{공극출력} + \text{고정자 동손}} \times 100\%$$

표 2.2.5 유도전동기 효율

항목	유도전동기
공극출력 [kW]	205.41
고정자 동손 [W]	7181.46
회전자 동손 [W]	3169.70
철손 [W]	652.25
기계손 [W]	0
효율 [%]	94.82

IPMSM의 경우는 아래의 효율 계산식을 통해 효율을 계산하였다.

$$\text{효율} = \frac{\text{공극출력} - \text{철손} - \text{영구자석 와전류손} - \text{기계손}}{\text{공극출력} + \text{고정자 동손}} \times 100\%$$

표 2.2.6 IPMSM 효율

항목	IPMSM
공극출력 [kW]	214.40
고정자 동손 [W]	1742.40
영구자석 와전류손 [W]	59.55
철손 [W]	1916.26
기계손 [W]	0
효율 [%]	98.28
기존 유도전동기 효율 [%]	94.82
효율 증가율 [%]	3.46(목표치 2)

3. 유도 전동기 비교군 선정 (한양대학교)

표 2.2.7 서울 메트로 2,3호선 / 4호선 실 차량용 유도전동기 사양

항 목	2,3호선	4호선
형식	3상 농형 유도전동기	3상 농형 유도전동기
냉각방식	자기 통풍식	자기 통풍식
출력	210kW	200kW
전압	1100V	1100V
전류	136A	130A
주파수	75Hz	66.5Hz
회전수	2200rpm	1945rpm
절연방식	C종 절연	H종 절연
중량	650kg	785kg

제3장 1차 시작기 제작 및 시험평가

제1절 1차 IPMSM 제작

1. 전동기 제원

표 3.1.1 전동기 제원

정격 용량	극수	정격 전압	주파수
210 kW	6 극	1100 V	120 Hz
정격 속도	최대 속도	정격 토크	최대 토크
2,400 rpm	6,000 rpm	85.7 kgf.m	96.9 kgf.m
회전자 외경	회전자 철심장	철심 재질	회전자 질량
260 mm	220 mm	S08	92 kg

2. 고정자 제작

가. 고정자 제작 공정

- 프레임의 측면 상하좌우 4개소에 4각형으로 구멍을 내어 고정자 철심에서 대기 중으로 직접 방열되도록 하여 냉각에 유리하다.
- 고정자 철심은 사용 주파수 대역이 넓으므로 고주파 대역에서도 철손이 적은 높은 등급의 규소강판을 사용한다.
- 고정자 철심은 적층 완료 시 균일한 적층 두께를 유지하도록 철심의 반을 180도 회전시켜서 적층한다.
- 권선단부는 진동에 의하여 절연이 파괴되지 않도록 견고하게 고정한다.
- 고정자 권선은 진공함침(VPI) 처리하여 진동 및 오염 환경에서도 높은 절연강도와 열응력을 갖도록 한다.
- 1,500V의 고압 전원을 사용하므로 절연 처리를 위해 형권을 사용한다.

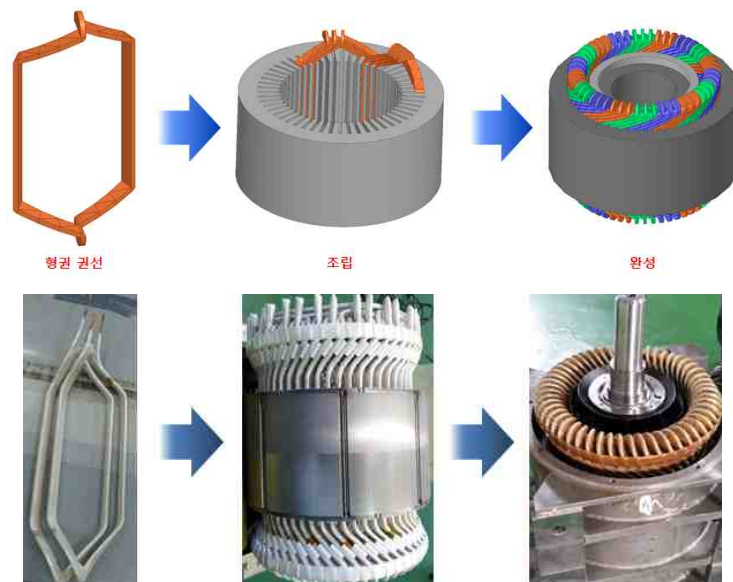
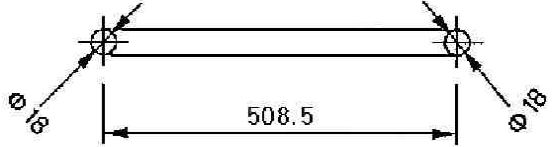
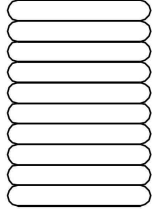
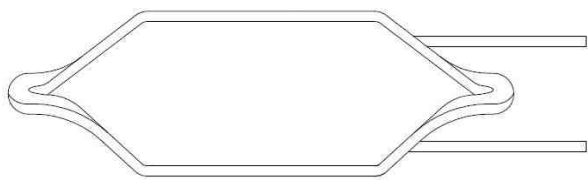
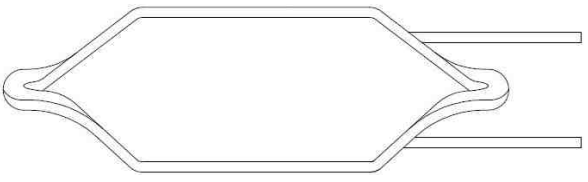
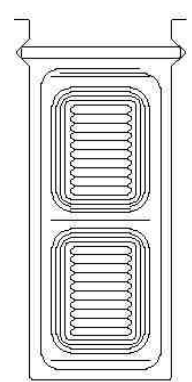
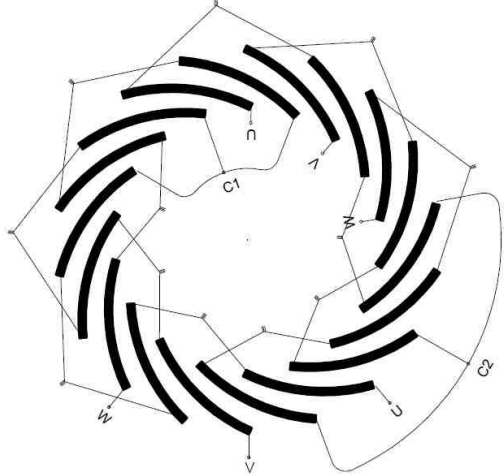


그림 3.1.1 형권 제작 및 고정자 결합

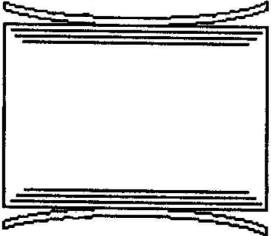
나. 고정자 권선 세부작업공정

공 정	부품 / 작업	내 용
동선 소재	AIW 평각동선	- 소선 4.4 x 1.7 - 소선절연 Mica Tape 0.065t 1/2 OL 2회
Winding	Winding Pin	- Pin to Pin 
	Coil Winding	- 2 Reel, 5 Turn/Coil - Mica로 감은 평각동선 2가닥으로 5회 
	캡톤 테이프 부착	- 인출선 절단하고 6개소에 캡톤 접착테이프 바인딩
	Lead Cleaing	- 인출선단 30mm 절연 제거
Coil Forming	Spreading	- 관리항목 : Coil 전장, 직선부 길이 - Coil 폭, Coil Head 높이, 각도

공 정	부 품 / 작 업	내 용
Insulation	Coil Taping	- 주절연 Mica Tape 0.13t 1/2 OL 3회 
		- 곡선부 절연보강 PT(열수축 Tape) 0.13t 1/2 OL 1회 
Inserting		- 모든 Tape의 단말처리는 캡톤 접착 Tape 사용
	Slot 절연	- Nomex 0.18t 1매
	권선 삽입	- 2층권, 중권으로 결선측에서 보아 시계방향으로 Inserting 작업 진행
	층간 절연	- Coil Pitch : 단절권 사용 8 Slot 간격 (#1 ~ #9) - Nomex#410 0.18t 각 1매 Slot Bottom, Middle, Upper 

공 정	부 품 / 작 업	내 용
Connection	Top Wedge 삽입	- Top Wedge : SGL (Silicone Glass Laminate) 사용
	절연 저항	- 각 Coil에 DC 1,000V (Coil-Core 간) 100MΩ 이상
	내전압 시험	- 각 Coil에 3,200V, 1분간 실시 Coil-Core 간
	파형 비교검사	- Surge Test (Coil-Coil 간) 각 권선의 파형이 같을 것
	결선도 준비	- 2병렬 Y결선 회전자계의 방향 : 결선부에서 보아 CW
		
	Brazing	- PCuP3 사용 산소 용접 인출선 : 15,000V 고압 케이블 사용
	내전압 시험	- 중성점 개방 상태에서 DC 11kV, 3분간 실시 (Coil - Core 간)
	중성점 용접	- 중성점 결선 및 절연

다. 고정자 철심 세부작업공정

공 정	부품 / 작업	내 용
철심 적층	공구/자재 준비	- 적층 Press, JIG - 직각자, 줄자(강철) - 버니어캘리퍼스(500mm) - 용접기(CO₂) - 부품 (CORE, END PLATE)
	적층 작업	- 적층 JIG에 CORE와 END PLATE 쌓는다 - CORE를 110mm 두께로 회전 적층한다 - END PLATE는 LASER CUTTING 시의 열변형 방향을 확인하여 적층한다 
	용접 작업	- 적층된 CORE를 적층 PRESS에 세팅 - PRESS 압력을 맞추고 1분간 유지하여 CORE를 교정한다 - 철심장을 검사하고 CORE를 넣고 빼어 기준 치수가 되도록 한다 - 적층 철심의 외측면 6개소에 용접한다

3. 회전자 제작

가. 축 설계

(1) 축의 재료

전동기 축의 재료는 동력전달에 의한 비틀림이나 휨에 대한 충분한 강도가 있어야 한다. 진동으로 발생하는 반복하중에 대비한 내피로성, 저널 등에 의한 마모에 대비한 내마모성, 충격 등에 대비한 인성을 고려하여야 한다. 재료의 성질이 열처리 및 표면경화를 하기 쉽고 충분한 경도를 낼 수 있어야 한다.

일반 산업용 전동기의 축 재료로는 보통 기계구조용 탄소강 강재(KSD3517) 중 SM45C를 사용한다. 당해 견인전동기의 축으로는 인성이 높고 SNC(니켈크롬강)에 가까운 성질을 가지면서도 가격은 SNC에 비하여 20~30% 정도 저렴한 크롬몰리브덴강 강재(SCM재, KSD3711)를 사용한다. SCM440은 SM45C 보다 인장강도와 충격값이 크고 내부까지 완전한 담금질 조직을 얻을 수 있다.

(2) 축의 강도

축설계 시에는 강도, 강성, 진동 등의 사항을 고려하여야 한다.

- 강도(Strength) : 작용하는 하중에 의하여 축이 파괴되지 않도록 충분한 강도를 가져야 한다.
- 강성(Rigidity) : 축에 작용하는 하중에 의한 변형도가 일정한 한계를 초과하지 않도록 한다. 굽힘 모멘트를 받는 축은 축처짐으로, 비틀림 모멘트를 받는 축은 비틀림 각으로 제한한다.
- 진동(Vibration) : 축의 고유진동에 따른 위험속도에서 충분히 벗어난 속도에서 운전하도록 설계하여야 한다.

비틀림 강도로 축경을 계산해 보자. 회전각속도는 2400rpm, 동력은 210 kW이며, 허용 비틀림응력은 $\tau_a = 2$ [kgf/mm²], 허용 비틀림각은 1[m]당 0.25°를 적용한다. 전달토크와 축경은 다음과 같다.

$$T = 974,000 * \frac{kW}{N} = 85,225 \text{ [kgf} \cdot \text{mm]}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{16T}{\pi\tau_a}} = \sqrt[3]{\frac{16*85,225}{\pi*2}} = 60.1 \text{ [mm]}$$

(3) 축의 강성

이제 비틀림 강성으로 축경을 계산해 보자. 1[m]당 0.25°의 비틀림각을 허용하므로 Bach의 축공식을 이용한다.

$$d = 130 \sqrt[4]{\frac{kW}{N}} = 130 \sqrt[4]{\frac{210}{2400}} = 70.7 \text{ [mm]}$$

따라서 축경은 큰 쪽의 값 70.7mm 이므로 다음 표에서 75mm를 선택한다.

KS 규격에 제시되어 있는 표준 축경은 다음과 같다. (KBB0406, 50~100)

축경 [mm]										
50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100

(4) 축의 진동

축의 진동은 진동방향에 따라 굽힘진동, 비틀림진동, 길이방향진동(축방향진동)으로 구분한다. 일반적으로 비틀림진동의 위험속도는 굽힘진동에 의한 위험속도의 3~4배에서 발생하므로 굽힘진동을 주로 고려한다. 일반적으로 길이방향진동에 의한 위험속도는 굽힘진동에 의한 위험속도의 10배 이상에서 발생하므로 길이방향진동은 고려하지 않는다.

축의 회전속도가 축의 고유진동수 부근에서 진동의 진폭이 커져서 축 또는 베어링이 파괴될 수도 있으므로 축의 운전속도를 결정할 때에는 회전축의 고유진동수로부터 25% 이상 떨어질 것을 권장하고 있다.

축의 양쪽 끝이 단순 지지되어 있고, 축경이 75[mm]이고 축길이가 450[mm]인 축의 중앙에 92[kg]의 회전체(Core)가 설치되어 있을 때 축의 위험속도를 계산해 보자. 단, $E = 2.1 \times 10^4$ [kgf/mm²]이고, $\gamma = 0.0078$ [kgf/cm³]로 간주한다.

분포하중이 작용하는 보에서 위험속도를 계산하기 위한 상당 처짐량

$$\delta_0 = \frac{1}{\pi^4} \frac{ql^4}{EI} = \frac{1}{\pi^4} \frac{\gamma(\pi/4)d^4l^4}{E(\pi/64)d^4} = \frac{16}{\pi^4} \frac{\gamma l^4}{Ed^2}$$

$$N_0 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_0}} = \frac{15\pi}{2} \frac{d}{l^2} \sqrt{\frac{gE}{\gamma}} = \frac{15\pi}{2} \frac{75}{450^2} \sqrt{\frac{9,810 \times 21,000}{0.0078/1,000}} = 44,848 \text{ [rpm]}$$

중앙에 위치한 회전체에 의한 처짐은

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \frac{Wl_1^2l_2^2}{3EI \cdot l} = \frac{Wl^3}{48EI} \quad (l_1 = l_2 = l/2) \\ &= \frac{92 \times 9.81 \times 450^3}{48 \times (2.1 \times 10^4 \times 9.81) \left(\frac{\pi}{64} \times 75^4\right)} = 0.00536 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

중앙의 회전체에 의한 위험속도는

$$N_1 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_1}} = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{9.81 \times 1,000}{0.00536}} = 12,925 \text{ [rpm]}$$

회전체의 위험속도는

$$\frac{1}{N_{cr}^2} = \frac{1}{N_0^2} + \frac{1}{N_1^2}$$

$$\frac{1}{N_{cr}^2} = \frac{1}{44,848^2} + \frac{1}{12,925^2}$$

$$N_{cr} = 12,419 \text{ [rpm]}$$

축의 운전속도는 회전축의 고유진동수로부터 25% 이상 떨어져야 하므로 전동기의 운전속도는 15,500rpm 이상이거나 9,310rpm 이하여야 한다. 실제로 전동기의 정격 운전속도는 2,400rpm, 최대 운전속도도 6000rpm 이므로 위험속도로부터 안전범위에 있다.

나. 회전자 제작공정

- 회전자 철심도 고정자 철심과 마찬가지로 사용 주파수 대역이 넓으므로 고주파 대역에서도 철손이 적은 높은 등급의 규소강판 사용한다.
- 적층된 철심은 볼트로 고정하고 키로 축에 고정한다.
- 영구자석은 네오디움 자석 중에서 사용온도가 높은 등급을 사용한다.
- 와전류 손실을 최소화하기 위하여 축 방향으로 11등분, 원주 방향으로 18등분한다.
- 회전자 철심에 통풍구를 설치하여 냉각효과를 향상시킨다.
- 회전자 축은 고속회전 시 기계적 강도를 유지할 수 있도록 크롬-몰리브덴 강 재질을 사용한다.

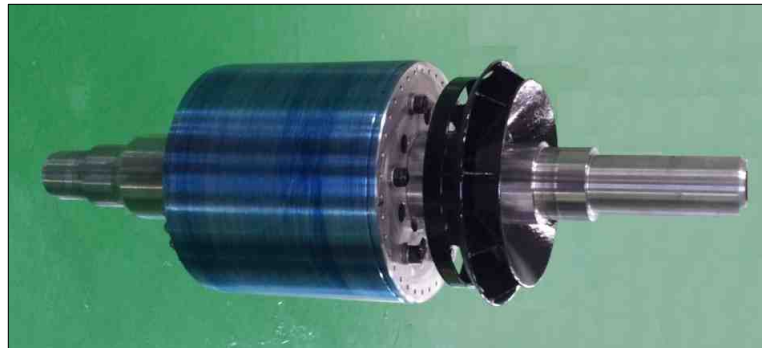
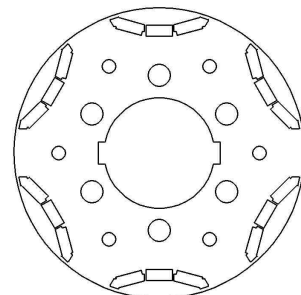
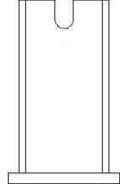


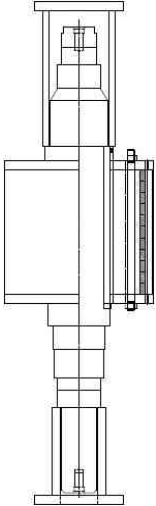
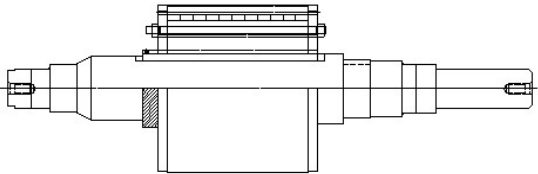
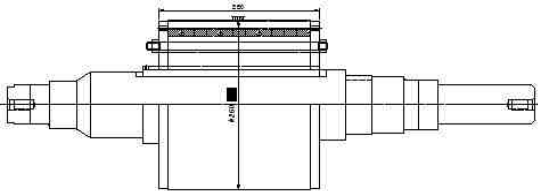
그림 3.1.2 완성된 1차 시작기 회전자

다. 회전자 세부작업공정

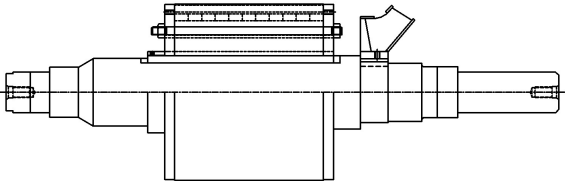
공 정	부품 / 작업	내 용
축조립	공구/자재 준비	- CRANE - STUD BOLT - EYE BOLT - GAUSS METER - 축, KEY, CORE - 압축판, 영구자석
	준비 작업	- 축단에 EYE BOLT를 잠근다 - 축에 하부 압축판을 삽입한다 - 축에 KEY를 조립한다
	철심 적층	- 축에 회전자 철심 20mm를 삽입한다 - 크레인의 인양고리로 EYE BOLT를 고정한다 - 압축판과 철심에 STUD BOLT를 삽입하고 NUT로 잠근다
	영구자석 삽입	- 철심의 영구자석을 넣을 곳에 접착제를 도포한다 - 철심의 6개소에 영구자석을 각각 3개씩 삽입한다 (N극, S극 구분)



공 정	부 품 / 작 업	내 용
축조립	영구자석 삽입	- EYE BOLT에서 크레인의 인양고리를 빼낸다 - 상기의 철심적층 ~ 영구자석 삽입공정을 11회 반복한다 -축에 상부 압축판을 삽입한다
축조립	철심 고정	- PRESS 작업대에 하부 축조립 JIG를 놓는다  - 철심과 영구자석이 삽입 되어있는 축을 하부 축조립 JIG에 올려 놓는다 - 축단에 하부 축조립 JIG를 올려 놓는다 - PRESS로 철심을 압축한다 - 철심에 스타드 볼트를 삽입하고 너트를 잠근다 (6개소) - 스타드 볼트가 부하측 압축판에서 15mm 이상 돌출되지 않도록 조립한다 - NUT가 풀리지 않게 LOCTITE를 바르고 나사산을 코킹한다 - 회전자를 JIG로부터 분리한다

공 정	부 품 / 작 업	내 용
축조립	철심 고정	
축조립	고정링 체결	- 회전자 고정링을 부하측에 열박음한다 - 회전자 고정링을 SET BOLT로 고정한다 - SET BOLT가 풀리지 않게 LOCTITE를 바른다 
외경가공	외경가공 작업	- 회전자를 선반의 척과 심압대로 고정한다 - 회전자의 외경부를 선삭 가공한다 가공 치수 : $\Phi 260 \pm 0.03\text{mm}$ 

공 정	부 품 / 작 업	내 용
연마	연마 작업	- 회전자의 양쪽 센터링한 부위를 기준으로 회전자의 베어링 자리를 연마한다 동심도 0.02mm 이하
바란싱	바란싱 준비	- 회전자의 양쪽 베어링 자리가 바란싱기의 롤라에 접촉되도록 바란싱기의 페데스톨을 조정한다 - 베어링 자리의 연마부와 바란싱기의 롤라에 상처가 나지 않도록 바란싱기의 롤라에 고무판을 올려 놓는다 - 바란싱기의 롤라에 회전을 내려 놓고 고무판을 빼낸다
	웨이트 부착	- 바란싱 웨이트를 부착하는 방법 : 회전자 압축판의 탭에 스텐 볼트를 체결한다 - 한쪽 잔류 언바란스량 : 0.5g 이하 - 모든 스텐 볼트를 빼어 ROCTITE를 묻히고 원래 위치에 다시 잠근다 - 잔류 언바란스량을 다시 확인한다

공 정	부품 / 작업	내 용
팬 체결	내부 팬 체결	- 팬을 가열하여 축에 체결한다
팬 바란싱	내부 팬 바란싱	- 바란싱 방법 : 팬 외경부에 드릴로 마이너스 바란싱을 실시한다 - 잔류 언바란스량은 0.5g 이내로 한다 
베어링 삽입	공구/자재 준비	- 유도가열기 - 6312, NU215 절연베어링
	베어링 열박음	- 베어링(6312M/C3VL0241)을 유도가열기에서 105℃로 가열하여축의 반부하측에 삽입한다 - 베어링(NU215ECM/C4HVA3091)을 유도가열기에서 105℃로 가열하여 축의 부하측에 삽입한다

4. 전동기 총조립

가. 전동기 총조립 공정

(1) 베어링 공정

- 전동기의 축을 중심으로 하는 자속분포가 완전히 대칭이 되지 않으면 축에 전압이 유기되어 양쪽 베어링으로 전류가 순환하는 축전류가 발생한다.
- 축 전압은 자기 불평형과 외부 전원에 의한 발생 빈도가 높다.
- 축 전압이 일정 값 이상이 되면 베어링에 전식 현상이 발생되고, 이로 인해 베어링의 유막이 국부적으로 파괴되어 결국 베어링 손상을 초래한다.
- 회전자를 지지하는 베어링은 혹시라도 발생할 수 있는 축전류에 의한 전식을 방지하기 위하여 세라믹 절연베어링을 채택한다.
- 구동측에는 볼러베어링(NU215), 반구동측에는 볼베어링(6312)을 사용한다.
- 베어링을 지지하는 브라켓에는 주유가 가능하도록 니플을 설치한다.

(2) 속도 검출부

- 회전자의 위치와 회전수를 검출하기 위하여 스피드 센서와 리졸버를 부착한다.
- 스피드 센서는 영구자석이 내장되어 있어 회전자에 설치된 기어의 60개의 치와 마주쳐 지나칠 때마다 자기 저항이 변화하여 출력 파형이 정현파로 변화하는 것을 이용하는 센서이다.
- 전기적으로 90도의 위상차를 갖는 정현파 출력을 이용하여 회전자의 회전 방향과 회전속도를 확인할 수 있다.
- 레졸버는 축방향의 길이를 짧게 할 수 있는 VR TYPE의 레졸버를 사용한다.
- 두 종류의 센서 모두 센서의 고정자와 회전자 간의 공극의 치수가 중요하므로 동심이 맞는지를 쉽게 확인할 수 있도록 전동기를 조립한 후 센서를 장착하는 구조이다.

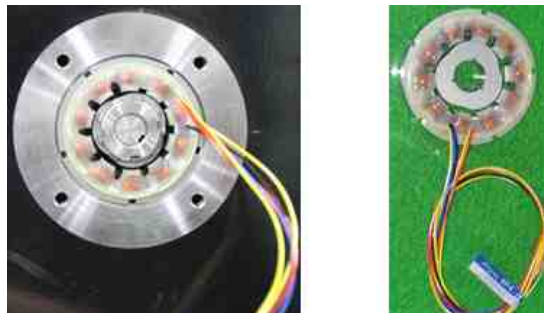


그림 3.1.3 회전자 위치 검출을 위한 VR TYPE 레졸버

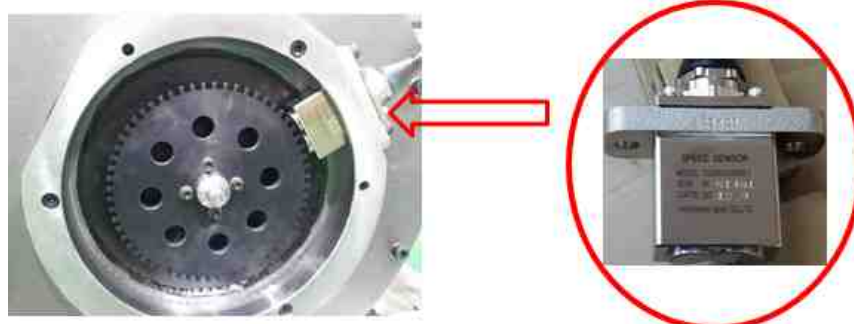


그림 3.1.4 스피드 센서

(3) 냉각 방식

- 반부하측에는 흡기구를, 부하측에는 냉각팬을 설치한 강제통풍방식이다.
- 반부하측 흡기구를 통하여 유입된 차가운 공기는 반부하측 권선단을 냉각시킨다.
- 반부하측 권선단을 통과한 공기는 회전자 철심 요크부분에 설치된 통풍구를 거치면서 회전자를 냉각시킨다.
- 공극을 거치면서 고정자와 회전자 치에서 발생하는 열을 빼앗는다.
- 회전자 통풍구와 공극을 통과한 공기는 냉각팬을 경유하여 부하측의 권선단을 냉각시키고
- 부하측에 사방으로 분포된 배기구를 통하여 배출된다.
- 프레임 측면에 사각형 구멍을 내어 고정자 철심에서 대기 중으로 직접 방열되는 구조로서 냉각에 유리하다.

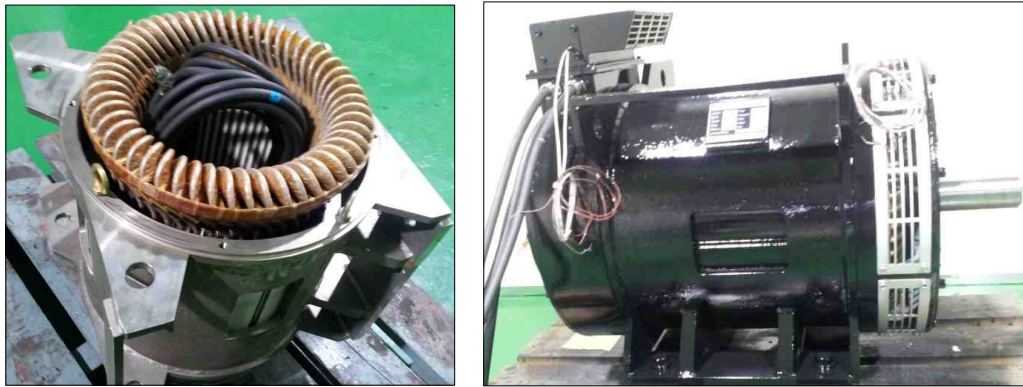
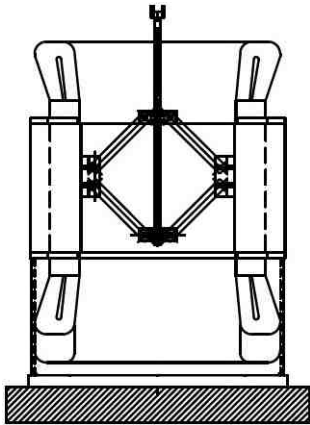
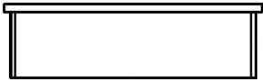
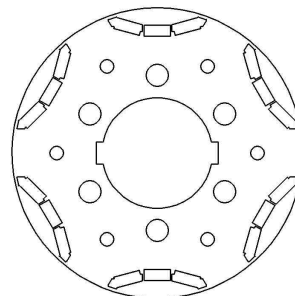


그림 3.1.5 반부하측 권선단과 반폐형 구조의 하우징

나. 전동기 총조립 세부작업공정

공 정	부품 / 작업	내 용
Frame에 Core 삽입	공구/자재 준비	- 프레스, 하부 JIG, 상부 JIG - 고정자 인양 JIG, 고정자 철심, 후레임
	삽입 작업 준비	- 후레임을 가열한다 (170℃, 4Hr) - 프레스 작업대에 하부 JIG를 놓는다 - 고정자 인양 JIG로 권선의 함침이 완료된 고정자 철심을 하부 JIG 위에 올려 놓는다  - 고정자 인양 JIG를 빼낸다 - 고정자 철심 외경부에 가열된 후레임의 내경부를 맞추어 올려 놓는다 - 고정자 철심위에 상부 JIG를 올려 놓는다 
	삽입 작업	- 프레스로 상부 JIG를 누른다 - 후레임이 식으면 SET BOLT로 후레임과 고정자 철심을 고정한다

공 정	부 품 / 작 업	내 용
축조립	공구/자재 준비	- CRANE - STUD BOLT - EYE BOLT - GAUSS METER - 축, KEY, CORE - 압축판, 영구자석
	준비 작업	- 축단에 EYE BOLT를 잠근다 - 축에 하부 압축판을 삽입한다 - 축에 KEY를 조립한다
	철심 적층	- 축에 회전자 철심 20mm를 삽입한다 - 크레인의 인양고리로 EYE BOLT를 고정한다 - 압축판과 철심에 STUD BOLT를 삽입하고 NUT로 잠근다
	영구자석 삽입	- 철심의 영구자석을 넣을 곳에 접착제를 도포한다 - 철심의 6개소에 영구자석을 각각 3개씩 삽입한다 (N극, S극 구분)



공 정	부품 / 작업	내 용
고정자에 회전자삽입	공구/자재 준비	- 천정 크레인, 조립 작업대 - EYE BOLT - 고정자 (고정자 철심에 후레임 삽입 상태) - 회전자 (바란싱 완료 상태)
	고정자 고정	- 천정 크레인의 작업 범위 안에 조립 작업대를 놓는다 - 고정자의 반부하측(코일 결선부)의 부라케트 체결용 볼트 홀 4개에 각각 EYE BOLT를 꼽는다 - 크레인 인양 고리를 EYE BOLT의 구멍에 넣어 고정자를 들어 올린다 - 고정자를 조립 작업대에 올려 놓는다 - 고정자의 부라케트 체결용 볼트 홀과 조립 작업대의 구멍 4개가 서로 일치하게 고정자를 움직인다 - 고정자와 조립 작업대를 볼트로 고정한다
	회전자 삽입	- 회전자의 부하측 축단에 EYE BOLT를 체결한다 - 크레인의 인양 고리를 EYE BOLT 구멍에 넣어 회전자를 들어 올린다 - 회전자를 고정자의 위로 가져가서 고정자와 회전자의 중심을 일치 시킨다. - 회전자가 고정자 내부로 천천히 들어가도록 크레인 버튼을 조금씩 누른다

공 정	부 품 / 작 업	내 용
고정자에 회전자삽입	회전자 삽입	- 조립 작업대의 중앙에 고무판을 5겹으로 깎는다 - 회전자가 고정자에 어느 정도 삽입되면 크레인을 치운다 - 고무 망치로 회전자를 두드려서 고정자와 회전자의 철심 끝을 동일하게 한다
브라켓 체결	공구/자재 준비	- 회전자, 브라켓 - Grease
	그리스 도포	- 반부하측 브라켓의 베어링 하우스에 그리스를 바른다 - 회전자의 양쪽 베어링에 그리스를 바른다
	반부하측 브라켓 체결	- 반부하측 브라켓을 고정자에 올려놓고 체결볼트를 십자의 순서로 체결한다
	조립대에서 분리	- 조립대와 후레임 체결 볼트(4개)를 푼다 - 회전자에 EYE BOLT를 체결하고 천정 크레인으로 고정자를 들어 올린다 - 파레트에 고정자를 뉘어 놓는다
	그리스 도포	- 부하측 브라켓의 베어링 하우스에 그리스를 바른다
	반부하측 브라켓 체결	- 후레임과 부하측 브라켓을 체결한다 - 체결 볼트는 십자의 순서로 체결한다

5. 전동기 제작 참조도

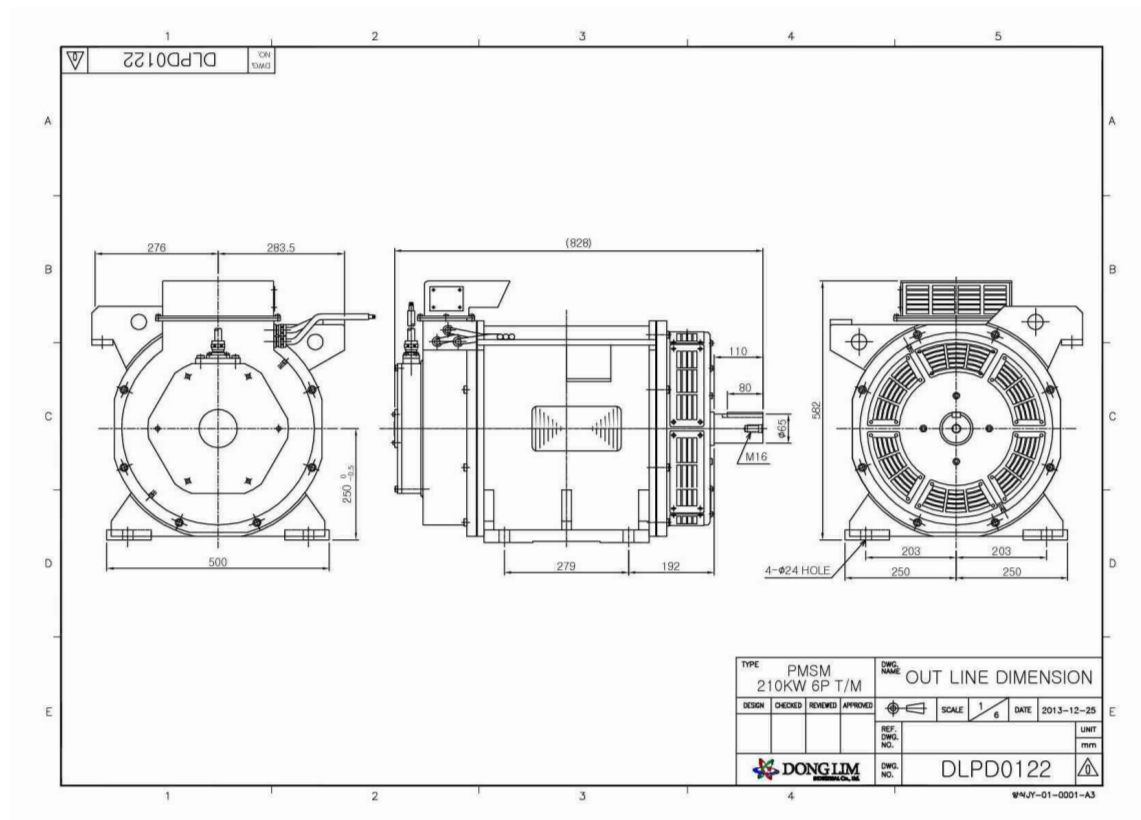


그림 3.1.6 외형도

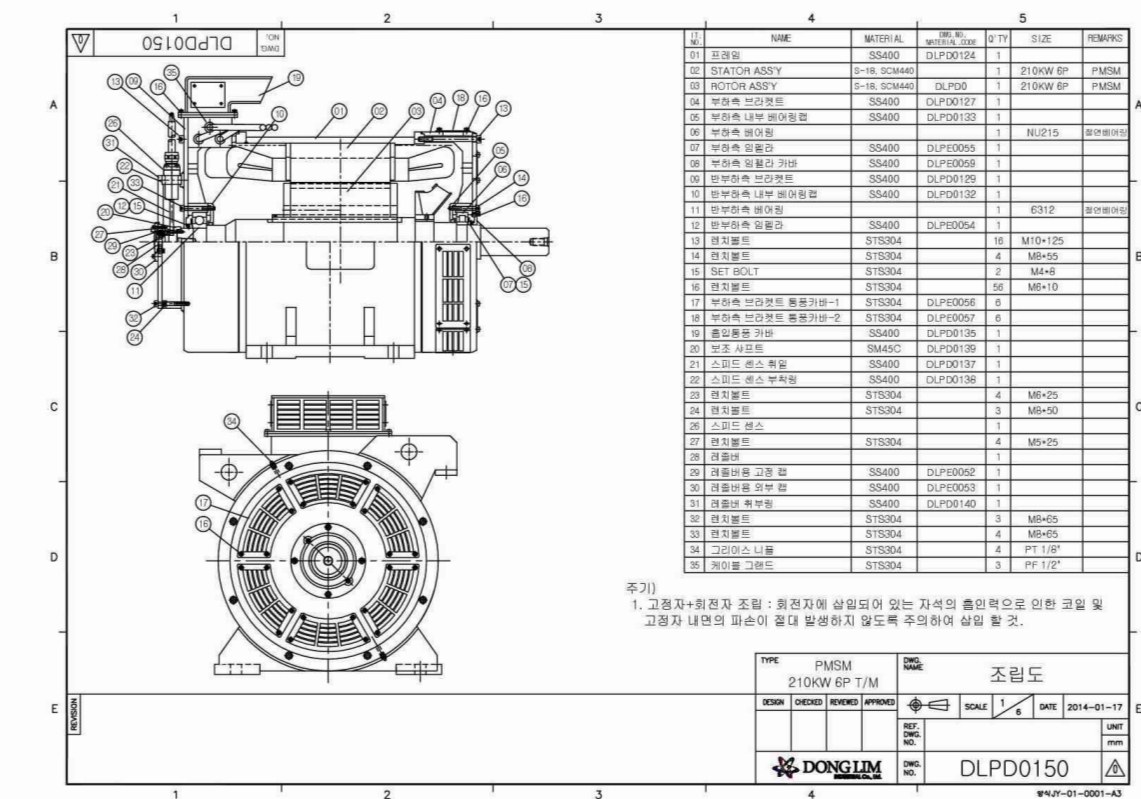


그림 3.1.7 조립도

제2절 1차 전력변환기 제작

1. IPMSM 전동기 제어용 보드 개발

IPMSM 전동기 제어용 보드 주 연산장치는 제어알고리즘을 실시간으로 수행하기 위하여 고성능 32BIT Digital Signal Processor(DSP)인 TMS320C33을 사용한다. 또한 통신(퍼스널 컴퓨터, TCMS)과 모니터링 및 유지보수를 위한 CPU도 역시 TMS320C33을 사용한다.

전인시스템의 제어장치는 전압형 PWM 인버터의 가변전압 가변주파수 제어방식으로 정토크, 정출력, 정전압 제어를 하며, 에너지 효율의 극대화를 발휘하도록 되어있다.

가. 제어장치의 기능은 다음과 같다.

- 시퀀스 제어
- 주회로 보호
- 게이트 제어

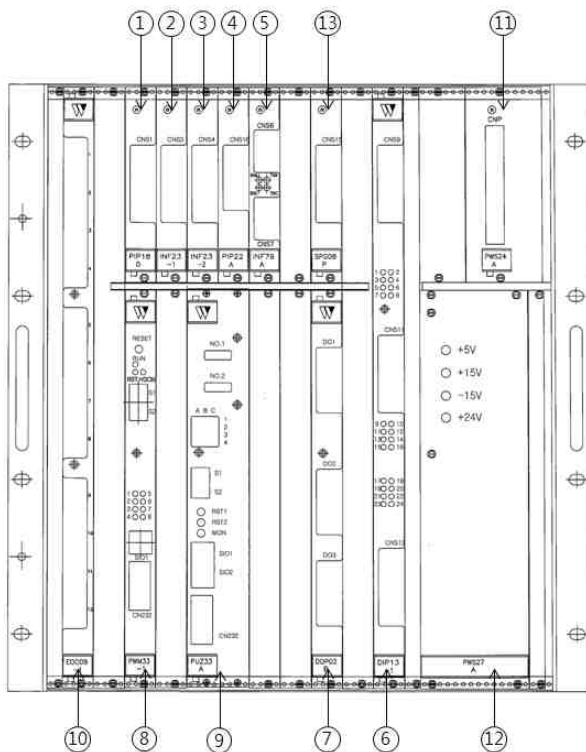


그림 3.2.1 IPMSM 전동기 제어용 보드 외형

나. 각 PCB의 기능

표. 3.2.1 IPMSM 전동기 제어용 보드의 기능

No.	PCB 명칭	기능	크기
1	PIP18	속도 센서 인터페이스 보드	3U
2	INF23.1	인터페이스 보드 아날로그 신호(인버터 입력전압, 출력전류)	3U
3	INF23.2	인터페이스 보드 아날로그 신호(인버터 입력전류, 출력전압)	3U
4	PIP22	인터페이스 보드 PWM 신호(마스콘 토크 신호, 제동 패턴 신호, 제동 피드백 신호, 가변 부하 신호)	3U
5	INF79	TIS와의 송수신 보드	3U
6	DIP13	24채널 디지털 입력 보드	9U
7	DOP02	24채널 디지털 출력 보드	6U
8	PWM33	32비트 프로세서를 가진 PWM 신호 발생 보드	6U
9	PUZ33	모니터, RS-232 통신, 시퀀스 제어보드	6U
10	E0C09	광 게이트 신호 인터페이스 보드	9U
11	PWS24	전원 공급기용 필터 보드(DC100V 입력)	3U
12	PWS27	전원 공급 보드(5V,+15V, -15V)	6U

2. IPMSM 전동기 제어용 보드의 기능

가. INF23.1, INF23.2

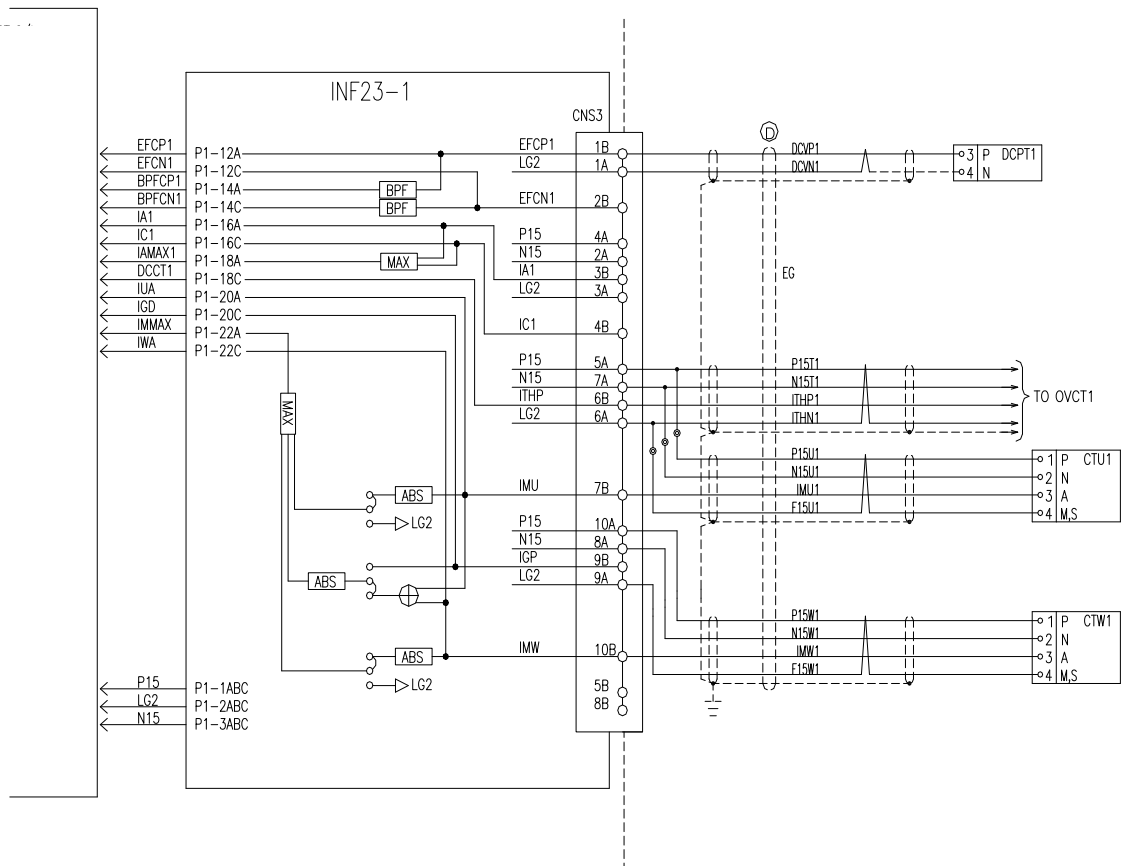


그림 3.2.2 INF23.1 보드

위의 그림은 INF23 보드의 내/외부 회로 구성을 보여준다. INF23 보드는 전압, 전류를 센싱 받는 보드이며 DC 전압 4채널, 전류 5채널을 입력받는다.

각 채널은 A/D 컨버팅을 위해 필터회로를 거쳐 PWM33과 PUZ33 보드에 입력된다.

2채널의 DC 전압은 Band Pass Filter를 거친 신호가 PUZ33 보드에 보호동작을 위해 입력되며 전류 입력은 각각 3상의 전류 2종을 입력받아 절대값으로 변환 후 최대치를 검출하여 PUZ33 보드에 입력시켜 고장검출을 위해 사용한다.

각 채널의 입력은 ISOLATION AMP를 거치지 않으므로 입력되는 신호들은 PT 나 CT로부터 절연되어 입력되는 신호들을 사용한다.

나. PIP18

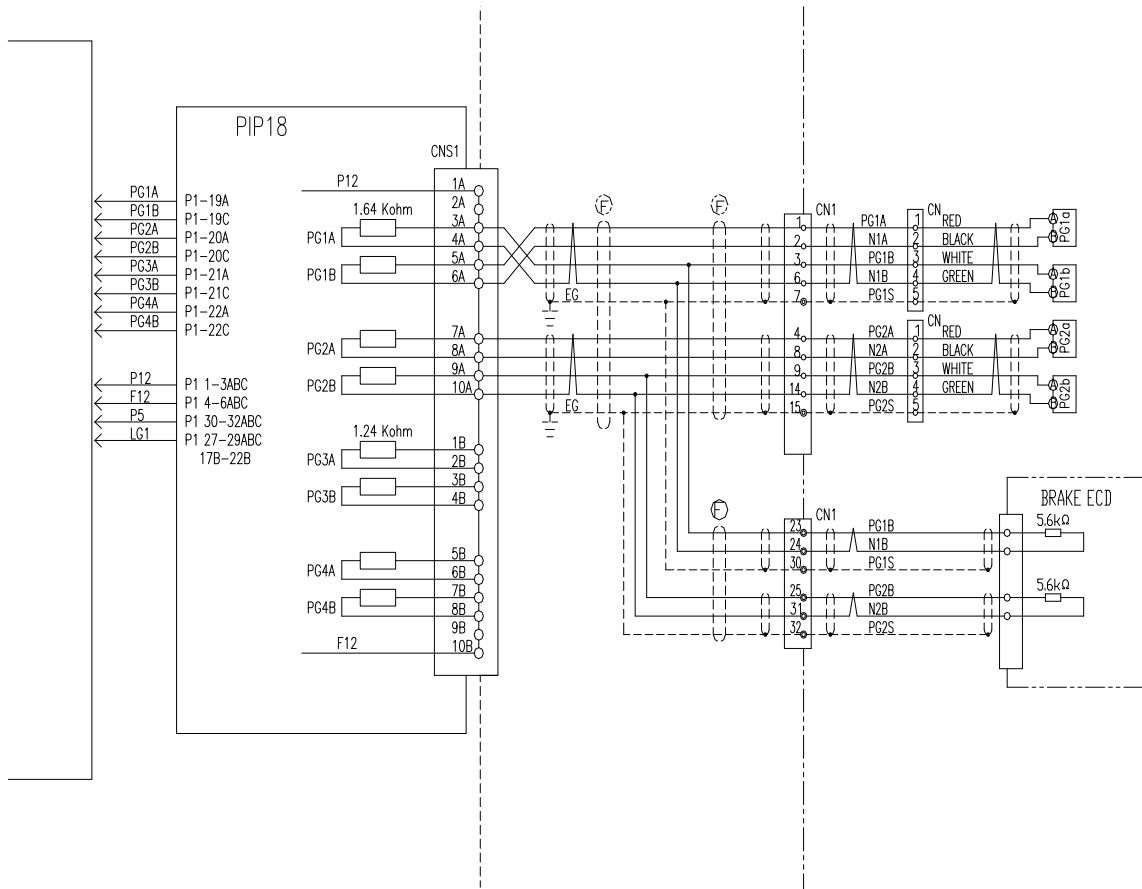


그림 3.2.4 PIP18 보드

PIP18 보드는 4개의 견인전동기 속도를 구형과 신호로 입력 받아 필터와 포토커플러를 거쳐 5V 레벨로 변환한 뒤 인버터 제어보드(PWM33)에 입력한다.

다. PIP22

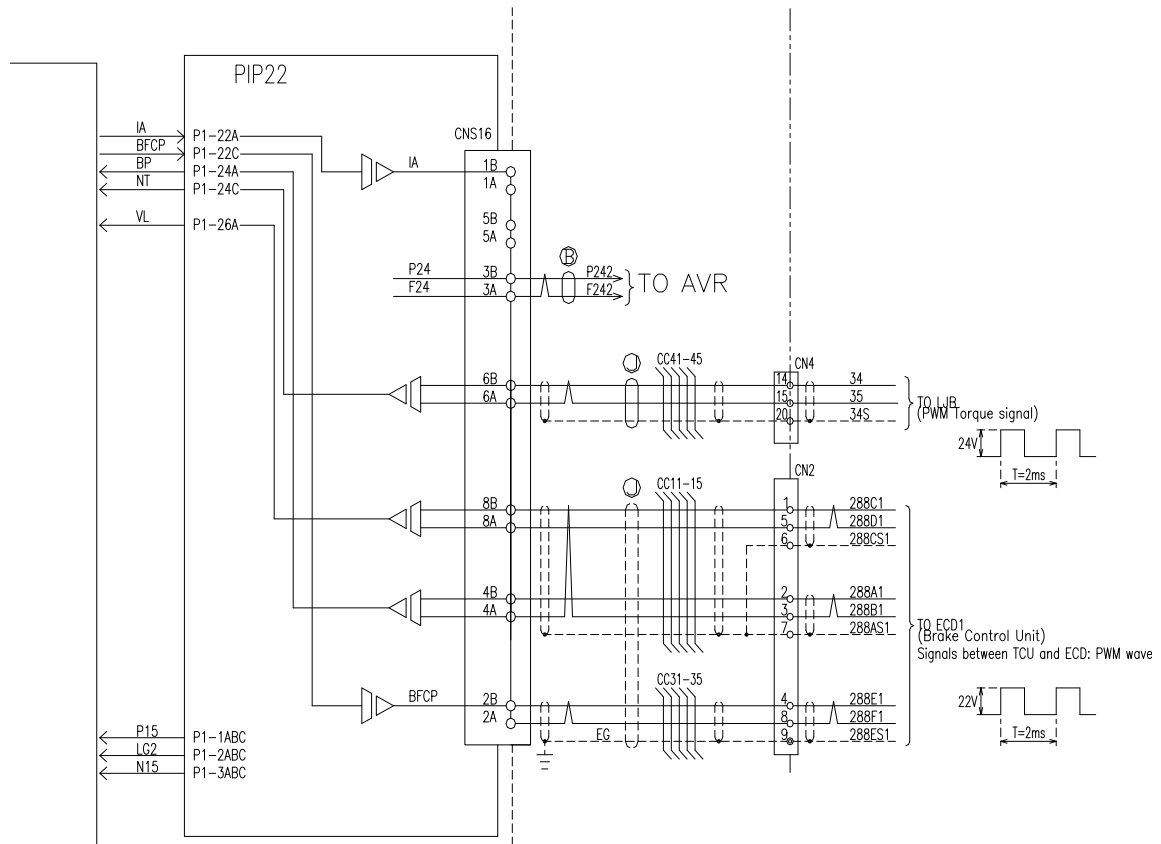


그림 3.2.5 PIP22 보드

PIP22보드는 PWM 신호등을 입력받아 제어보드(PWM33)에 입력하며, ANALOG값으로 출력한다.

입력과 출력은 모두 외부 기기와 연결되므로 ISOLATION AMP.를 통해 절연시키는 회로로 구성되어 있다. PWM 신호(24V 레벨)와 ANALOG 신호(0V ~ 10V)로 모두 입력가능하도록 설계하며 이는 내부의 점퍼 셋팅을 통하여 절환 할 수 있다.

라. INF79

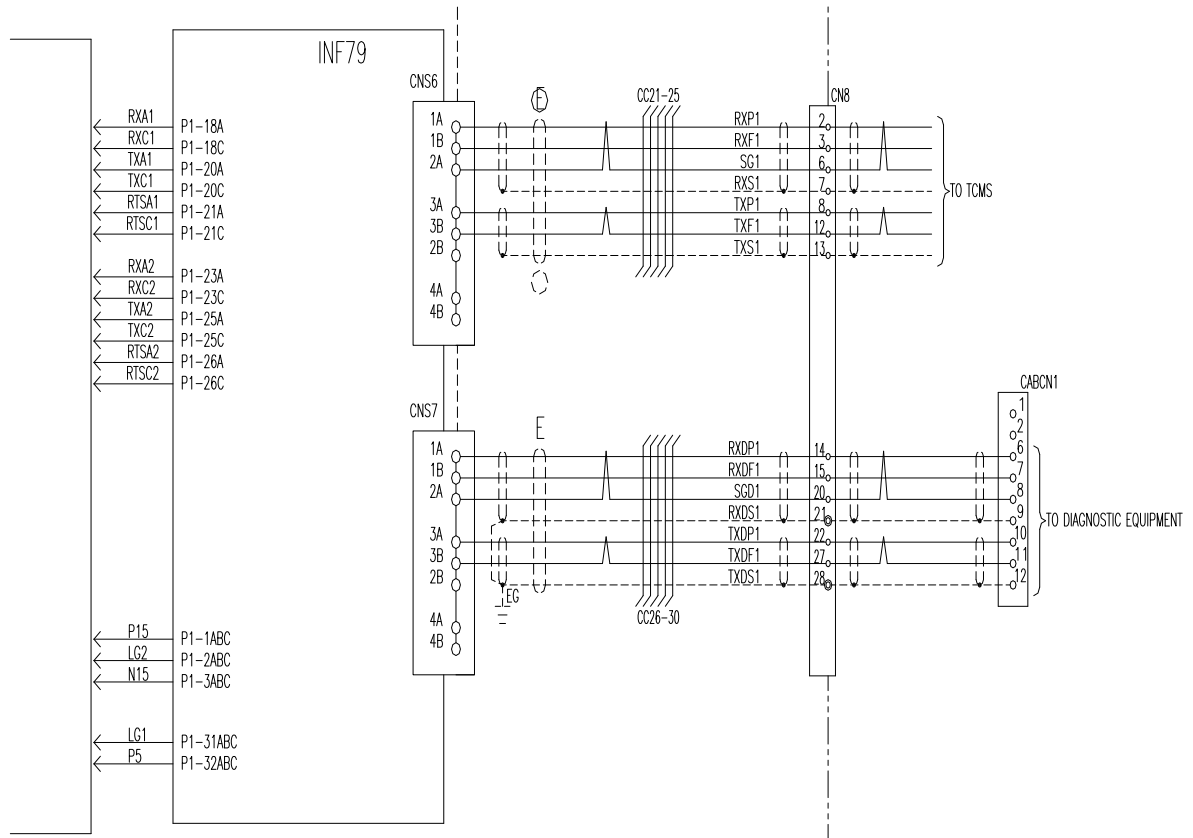


그림 3.2.6 INF79 보드

INF79 보드는 시리얼 통신 인터페이스를 담당하며 신호 및 각종 정보를 송수신하는 역할을 한다. INF79:CNS6은 시리얼 통신부이며, INF79:CNS7는 사용하지 않는다.

마. DOP02

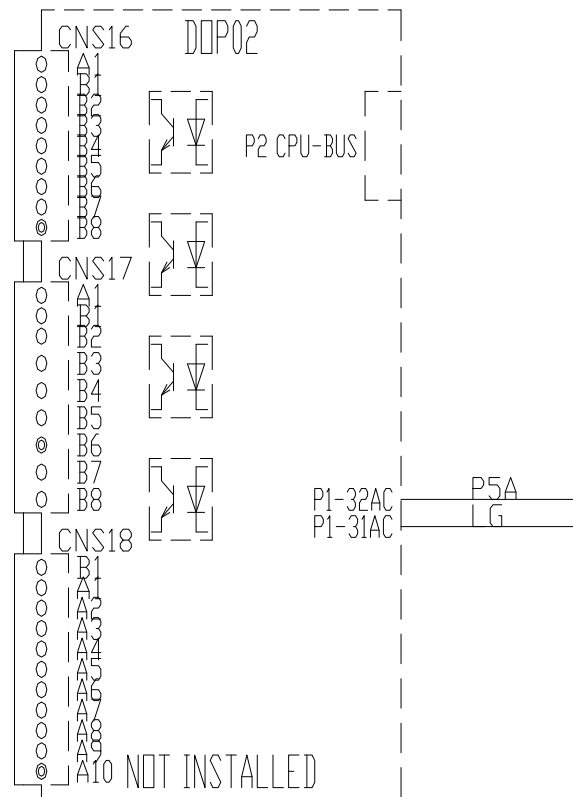


그림 3.2.7 DOP02 보드

DOP02보드는 24채널의 디지털 신호를 출력한다. 출력되는 디지털 신호는 PUZ33 보드로부터 데이터 버스를 통하여 입력되며 내부에 버퍼와 래치를 통해 24채널의 디지털 신호를 출력한다.

바. DIP13

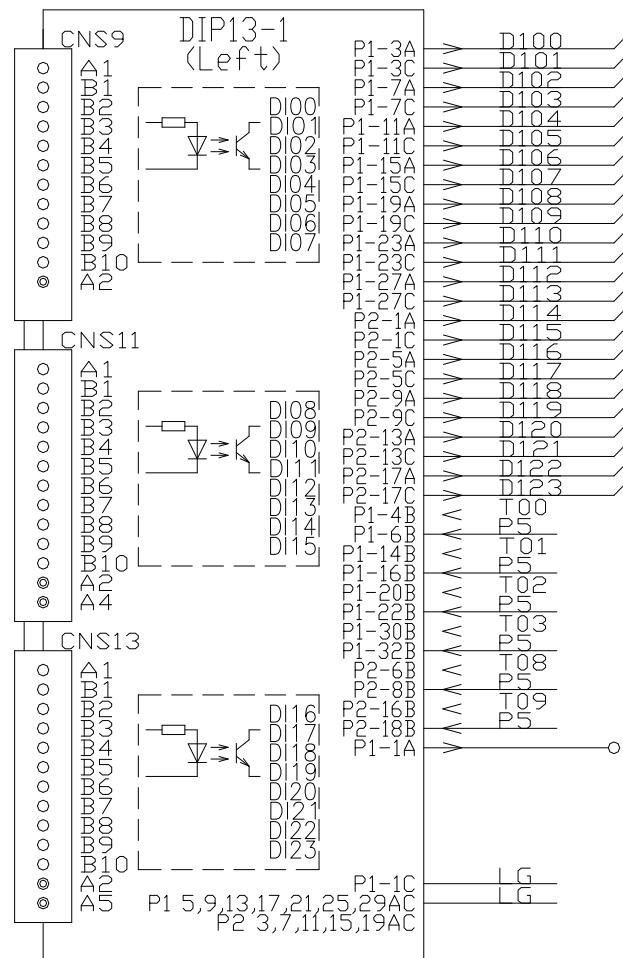


그림 3.2.8 DIP13 보드

DIP13보드는 24채널의 디지털 신호를 입력받는다. 입력되는 신호는 포토커플러를 통해 절연된 후, 5V 레벨의 신호로 변환되어 로직회로(FPGA)로 입력받아 버퍼와 랫치를 통해 PUZ33의 데이터 버스에 전달할 수 있도록 되어 있다.

사. PWM33

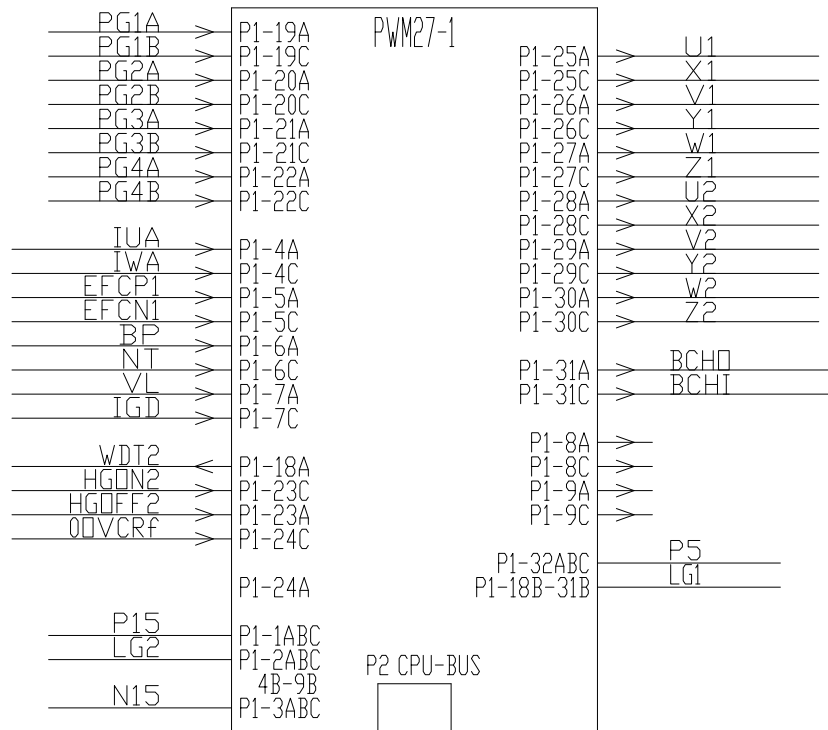


그림 3.2.9 PWM33 보드

PWM33 보드는 내부에 TMS320C33의 DSP가 2개 내장되어 있으며 각각 ACPU, BCPU라 한다. FPGA는 속도신호를 입력받아 속도를 계산하고, DSP로부터 데이터를 받아 인버터의 PWM 신호를 만들어 EOC09 보드로 출력한다.

또한 내부에는 제어를 위한 8채널의 A/D 컨버터를 내장하고 있다. 보드의 이상 유무는 WDT(Watch Dog Timer) 신호를 PUZ33 보드로 보내줌으로써 항상 감시를 하고 PWM 출력을 위한 신호는 HGON, HGOF2 신호를 PUZ33으로부터 입력받아 판단한다.

(1) PWM33 주요소자 - TMS320VC33PGEA-150

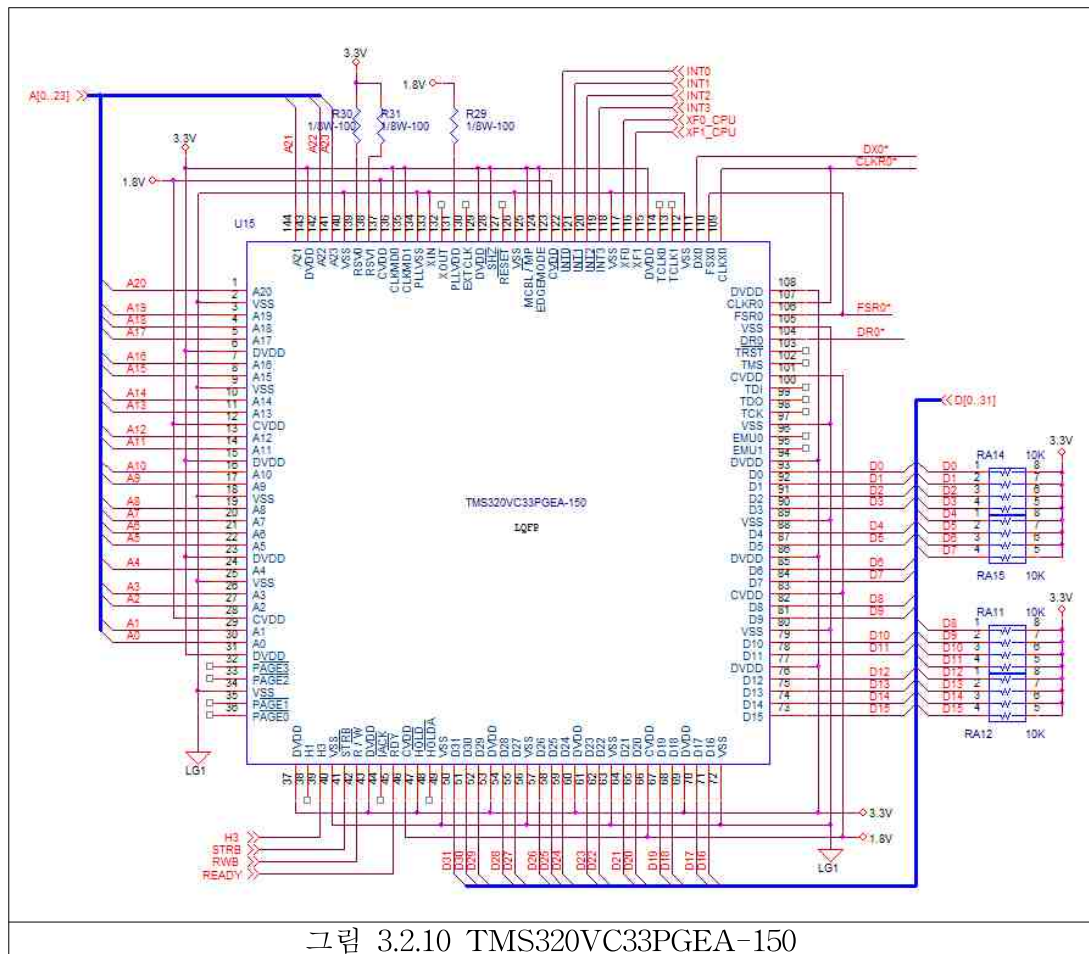


그림 3.2.10 TMS320VC33PGEA-150

표 3.2.2 TMS320VC33PGEA-150 정격

입·출력 핀 공급전압	-0.3[V]~+4[V]
core CPU 공급전압	-0.3[V]~+2.4[V]
입력전압	-1[V]~+4.6[V]
출력전압	-0.3[V]~+4.6[V]
동작온도	$-40[{}^{\circ}C] \sim +100[{}^{\circ}C]$

(2) PWM33 주요소자 - 74LVC4245A

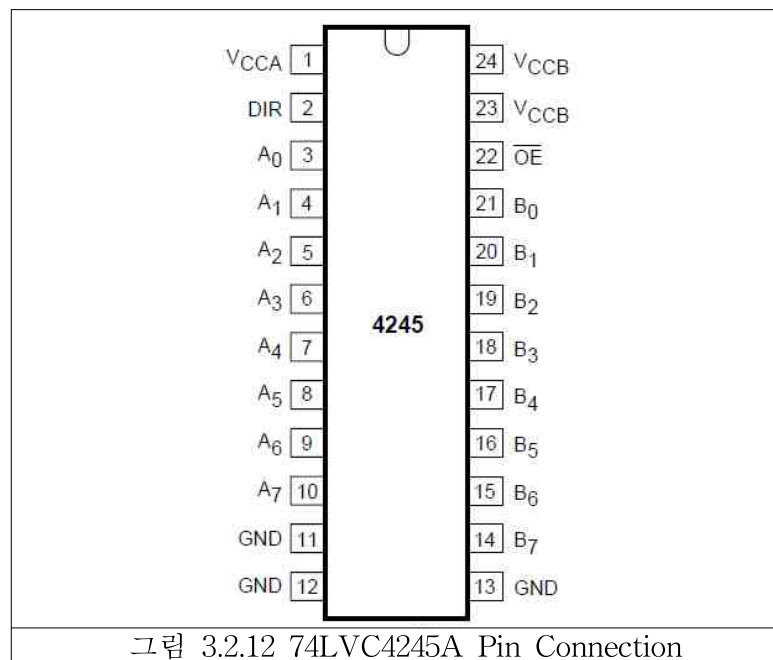
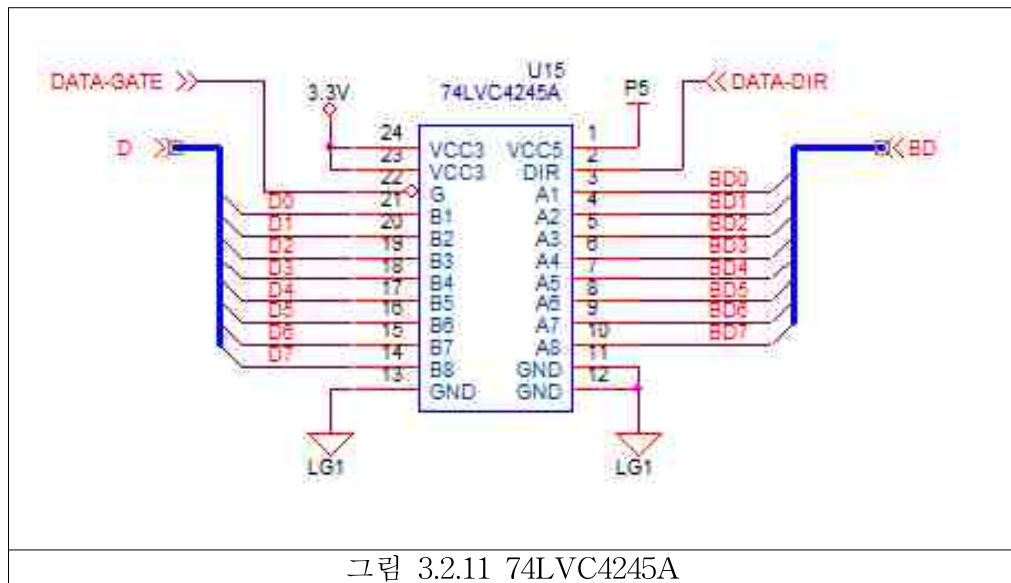


표 3.2.3 74LVC4245A 정격

V_{CCA} 공급전압	+1.5[V]~+5.5[V]
V_{CCB} 공급전압	+1.5[V]~+3.6[V]
입력전압	0[V]~+5.5[V]
출력전압	0[V]~+5.5[V]
동작온도	-40[°C] ~ +85[°C]

아. PUZ33

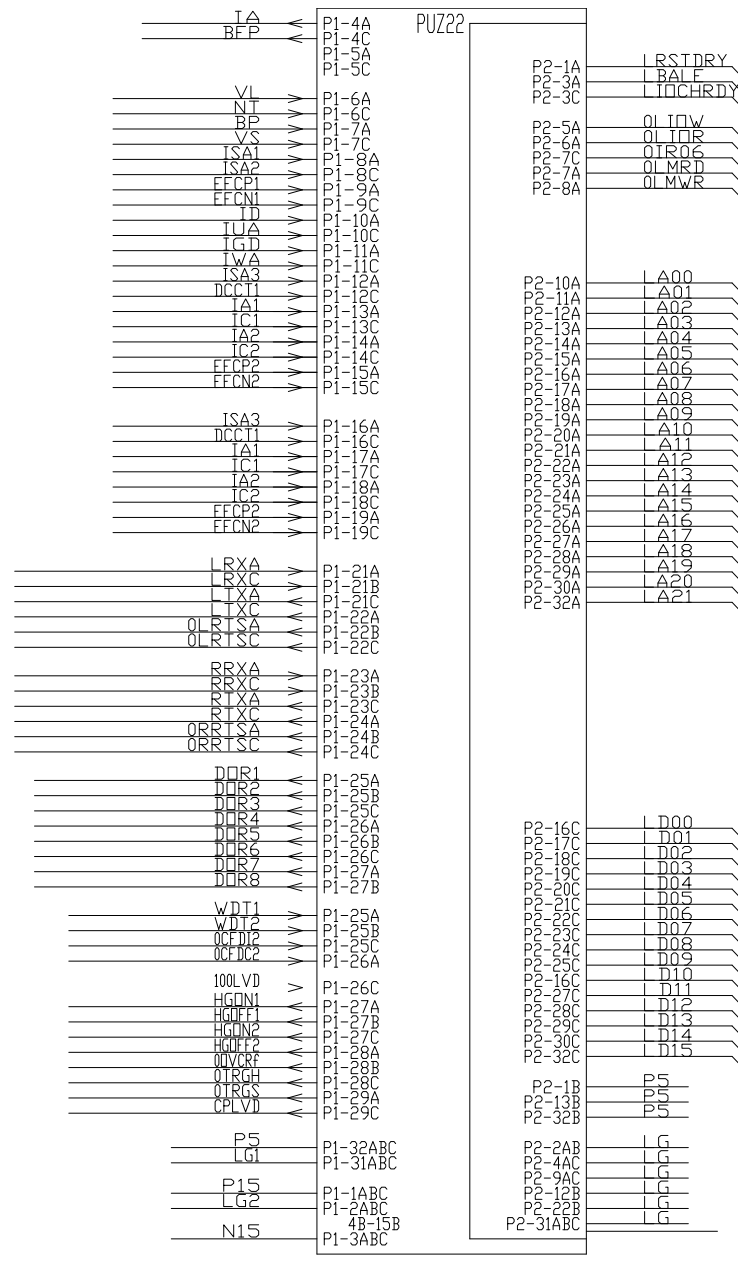


그림 3.2.13 PUZ33

PUZ33보드는 VVVF 인버터 전체의 시퀀스 제어(디지털 입력, 디지털 출력)와 고장 검출을 담당하여 PWM ON 신호를 PWM33 보드에 출력한다. 또한 내부에 8채널X2개의 A/D 컨버터를 가지고 있으며 이 신호를 모니터를 위해 고장 검출 시 내부에서 저장하고, RS232 포트로 PC로부터 고장기록을 다운로드할 수 있다.

또한 통신기능을 담당하며 전체 IPMSM 전동기용 제어보드의 메인 역할을 한다.

(1) PUZ33 주요소자 - Z85C30

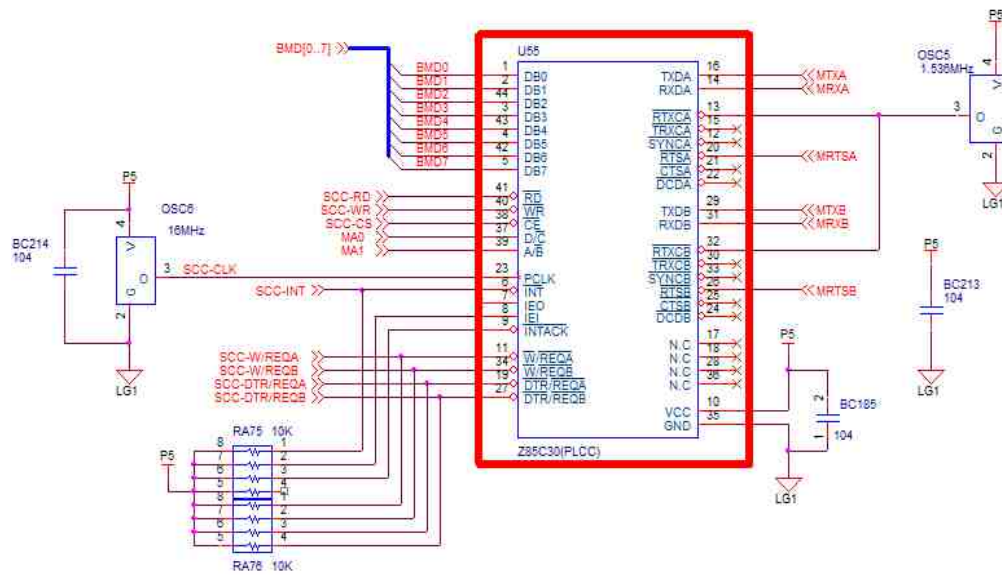


그림 3.2.14 Z85C30

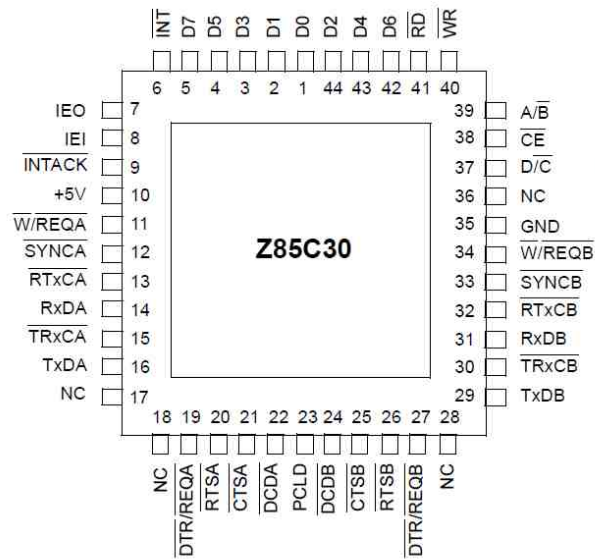


그림 3.2.15 Z85C30 Pin Connection

표 3.2.4 Z85C30 정격

공급전압	-0.3[V]~+7[V]
High Level 입력전압	+2.2[V]~+7.3[V]
Low Level 입력전압	-0.3[V]~+0.8[V]
High Level 출력전압	$V_{OH}=+2.4[V]$, $V_{OH2}=+6.2[V]$
Low Level 출력전압	+0.4[V]

자. EOC09

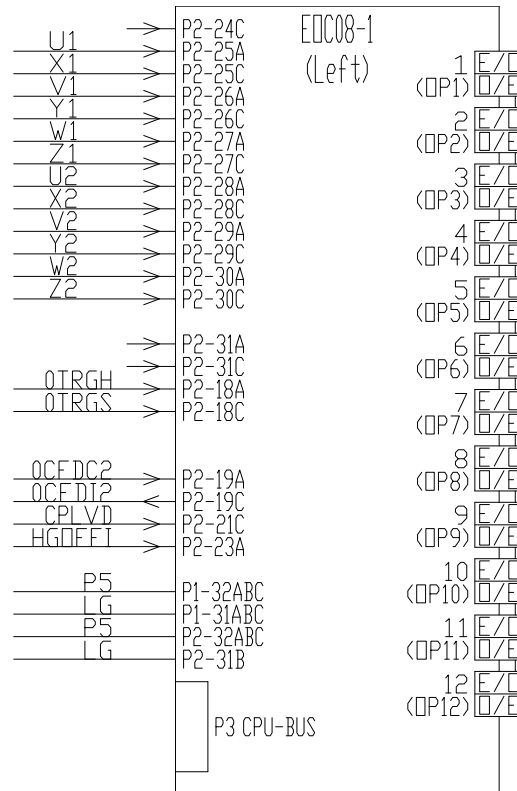


그림 3.2.16 EOC09 보드

이 보드는 12채널의 PWM33 보드로부터 5V 레벨의 PWM 신호를 입력받아 광신호로 변환하여 게이트 드라이브에 광신호를 출력하여 IGBT를 턴 온, 오프한다.

EOC09 보드의 내부에는 자체적으로 게이트 드라이브로부터 피드백 된 PWM신호를 입력받아 신호의 이상여부를 판별하여 고장신호(CFD)를 출력하도록 되어있다.

차. ISO26

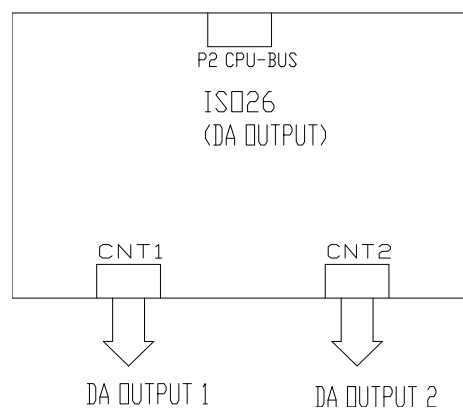


그림 3.2.17 ISO26 보드

이 보드는 내부에 8채널 X 2개의 D/A 컨버터를 내장하고 있어 PUZ33로부터 데이터를 입력받아 16채널의 아날로그 신호를 CNT1, CNT2 커넥터로 출력한다.

외부로 출력되는 아날로그 신호는 모두 별도의 전원을 사용하고 ISOLATION AMP.를 통하여 신호를 절연시킨 후 출력된다.

카. 전원 입력부

(1) PWS24

이 보드는 DC 100V의 제어기 전원을 입력받아 노이즈 필터, L-C 필터 회로를 거쳐 PWS27로 DC 100V 전원을 출력해준다.

(2) PWS27

이 보드는 DC 100V의 전원을 PWS24로부터 입력받아 DC 5V, DC $\pm 15V$, DC 12V를 출력하며 IGBT C/I 제어기의 제어전원으로 사용한다.

각 전압의 용량은 다음과 같다.

- DC 5V : 8A
- DC +15V : 3A
- DC -15V : 1A
- DC 24V(12V) : 1A

타. GATE Drive

게이트 드라이브는 인버터 스택 INV-U, INV-V, INV-W에 각각 1개씩 있으며 TCU PWM33 보드의 지령에 따라 EOC09 보드의 광신호에 따라 IGBT를 TURN ON/OFF함으로서 모터 출력 전원을 생성할 수 있는 기능을 담당한다. 최소 ON 펄스폭은 $20\mu s$ 이상이며, Dead Time은 $12\mu s$ 이다.

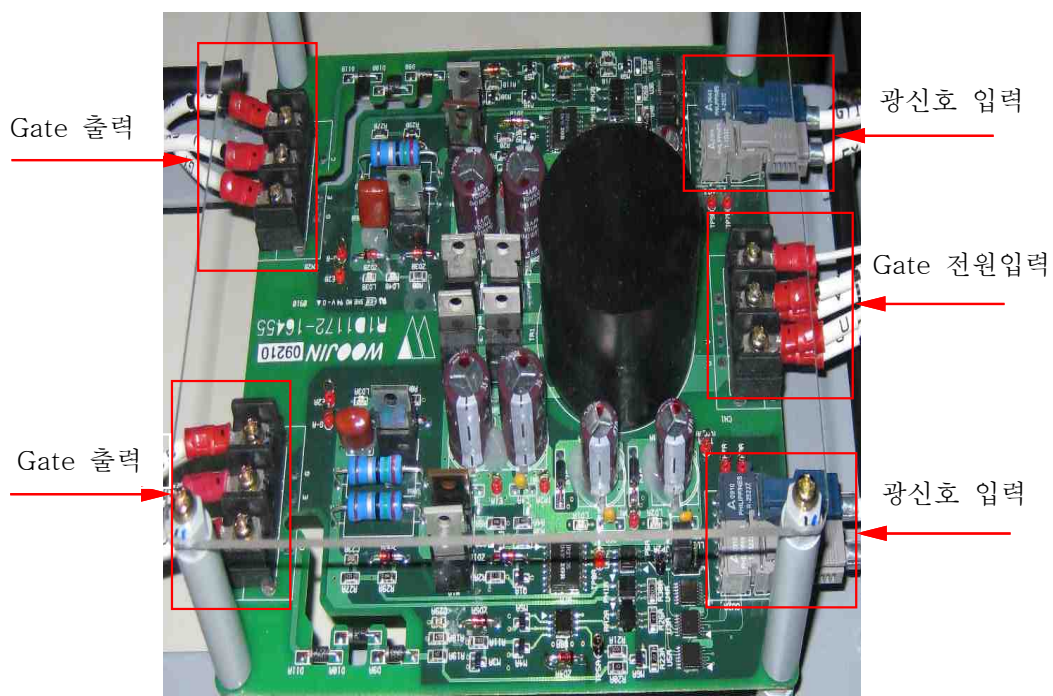


그림 3.2.18 IGBT GATE DRIVER

이 IGBT GATE DRIVER는 3300V, 1200A급 IGBT의 구동용에 적용한다.

(1) 일반성능

표 3.2.5 게이트 드라이브 일반성능

항 목	내 용
형식명칭	IGDU-A1
방식	광신호 방식
기능	소자 고장 검출, 저전압 감시
전원	AC48V - 15kHz
소비전력	10W이하 (2채널)
절연내압	5400V이상 (고압-저압회로 간)
절연저항	30MΩ 이상

(2) GATE DRIVE 외형 및 회로도

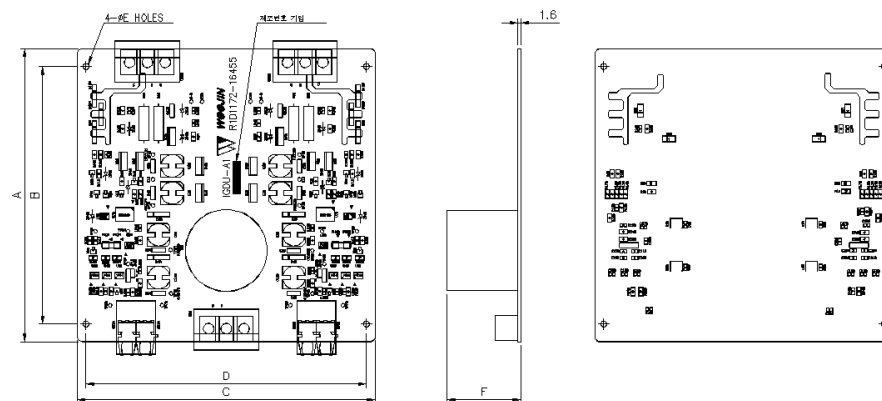


그림 3.2.19 GATE DRIVE 외형 및 회로도

IGBT는 다음 그림에 나타난 등가회로와 같이 작은 저항과 캐패시터 부하로 등가화 시킬 수 있다. IGBT의 스위칭 동작은 이 등가회로에서의 캐패시터의 충/방전을 통하여 스위칭 동작이 일어나는데 이 스위칭 동작을 위해서 다음 회로를 기본적으로 사용한다.

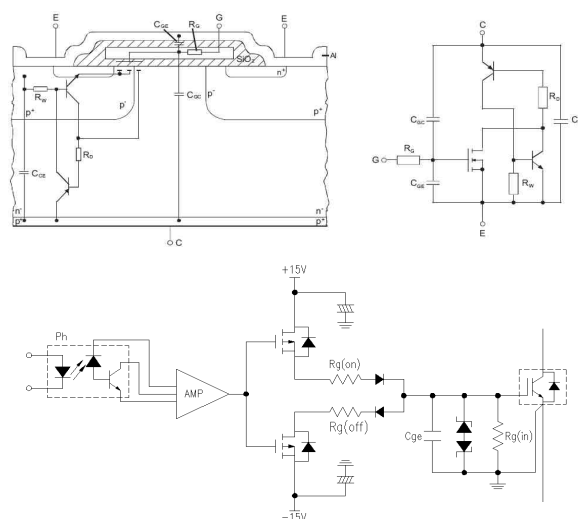


그림 3.2.20 IGBT 등가회로

3. IPMSM 전동기용 전력변환장치 설계, 제작 및 전력변환장치 시험

가. IPMSM 전동기용 전력변환장치 설계

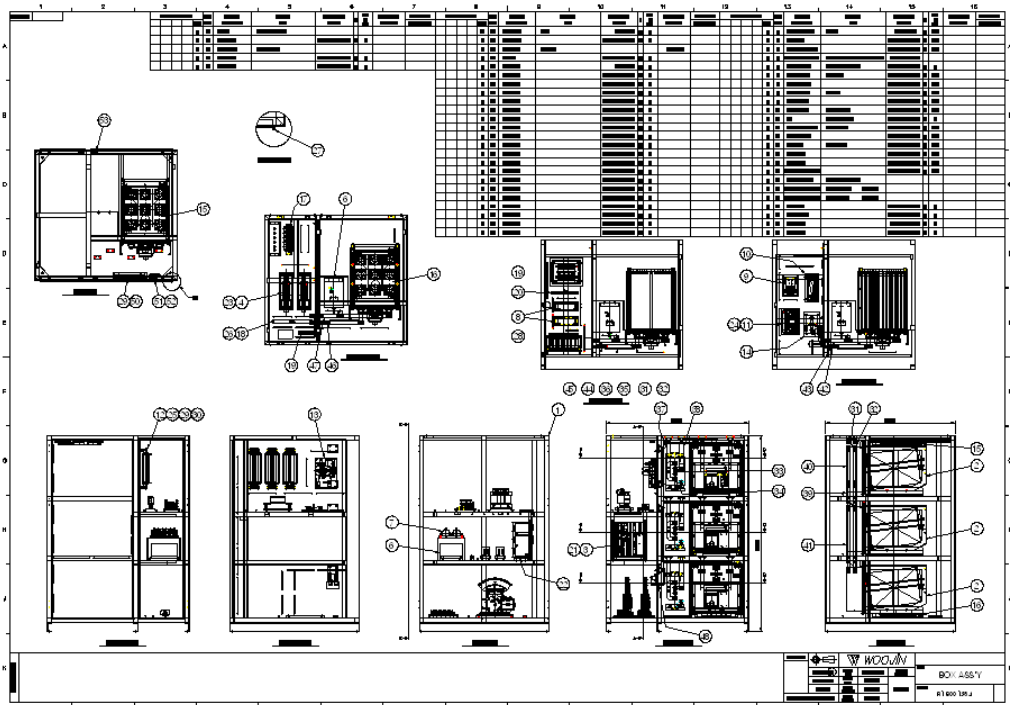


그림 3.2.21 IPMSM 전동기용 전력변환장치 BOX ASS'Y

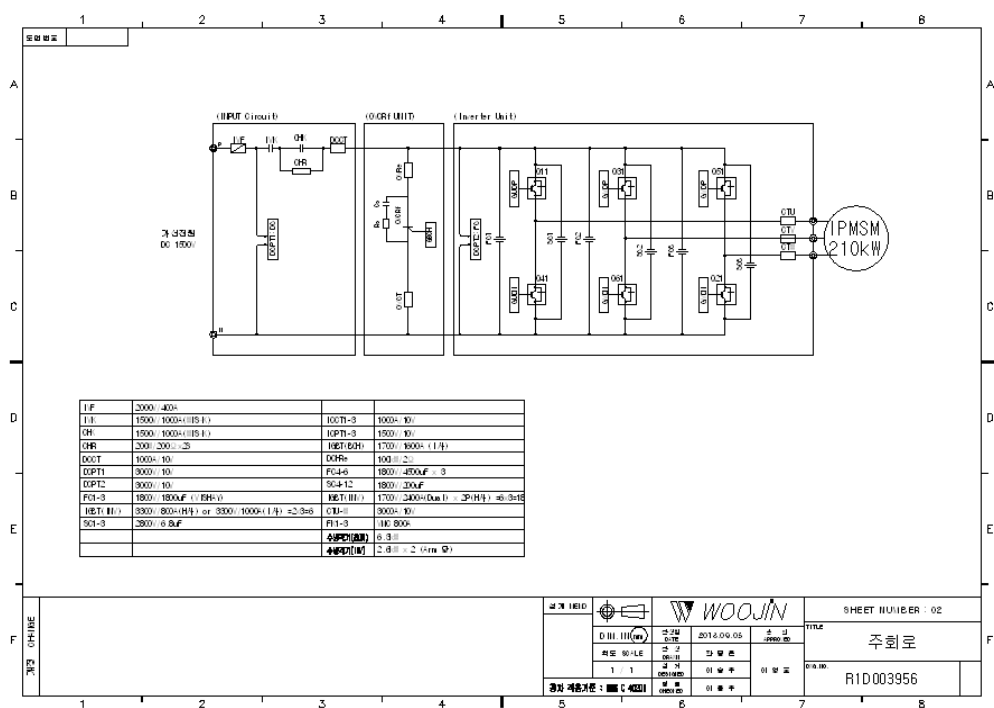
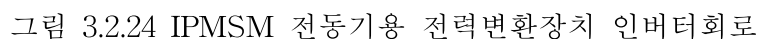
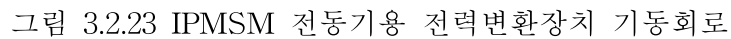


그림 3.2.22 IPMSM 전동기용 전력변환장치 주회로



다. IPMSM 전동기용 전력변환장치 시험

(1) IPMSM 전동기용 전력변환장치 시험 파형

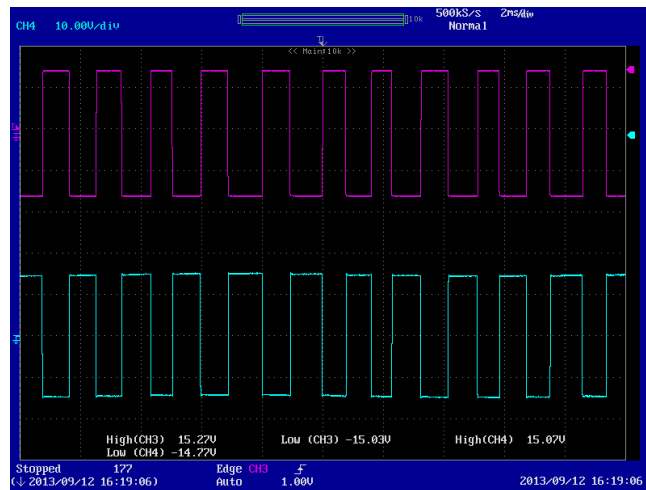


그림 3.2.27 Gate ON/OFF 파형(U-X)

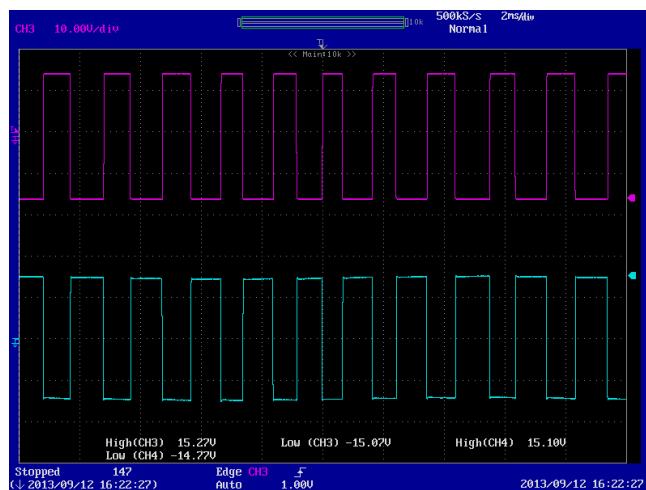


그림 3.2.28 Gate ON/OFF 파형(V-Y)

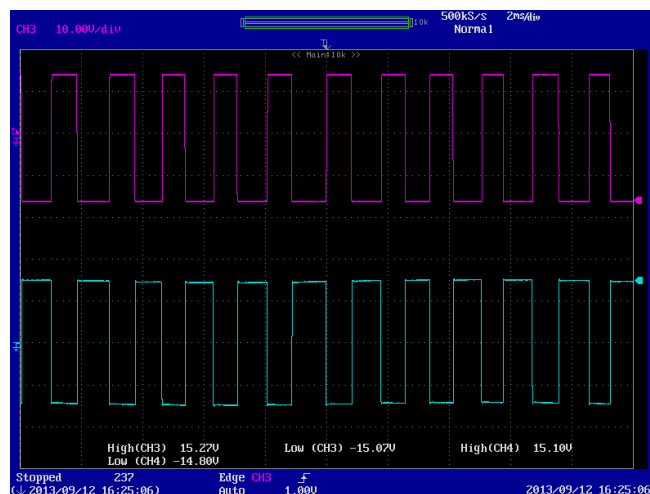


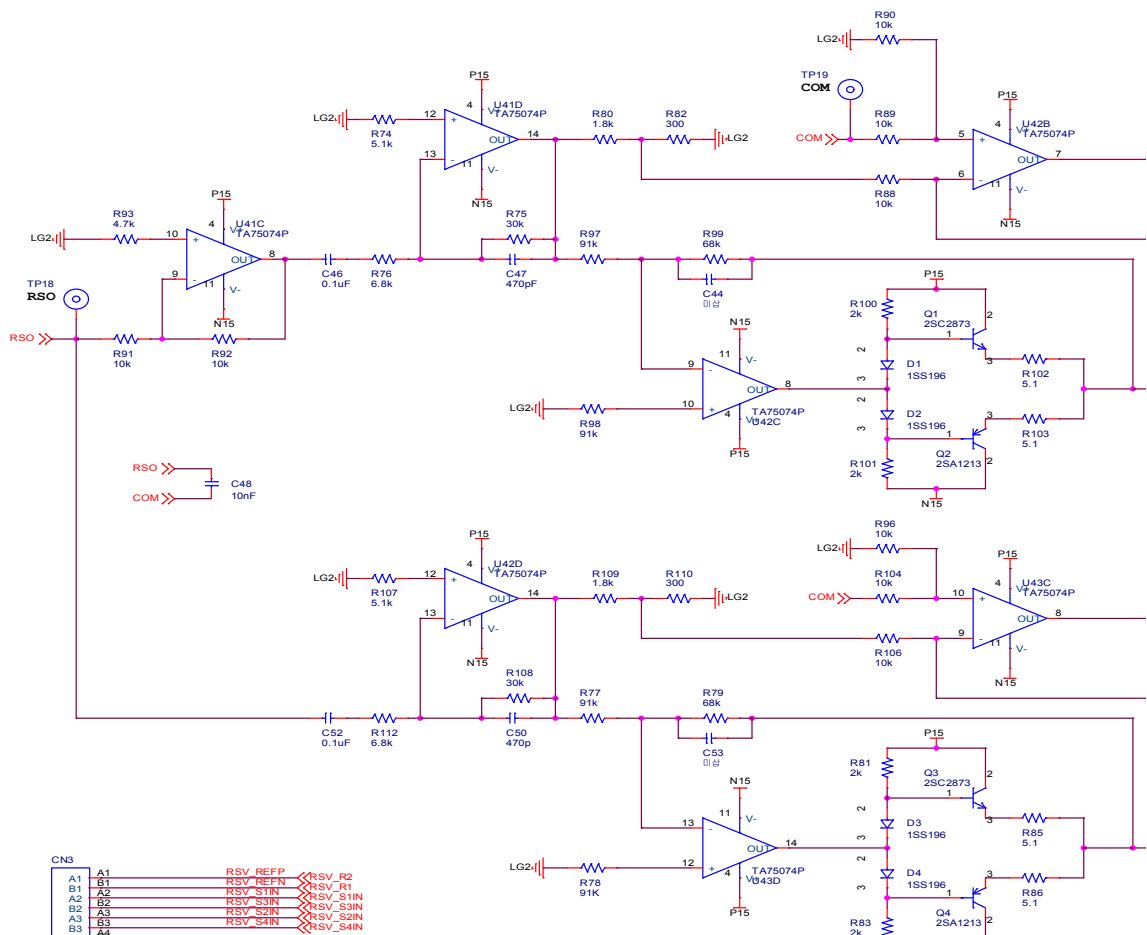
그림 3.2.29 Gate ON/OFF 파형(W-Z)

4. IPMSM 구동 드라이버 개발

가. RDC(Resolver-to-Digital Converter)

영구자석 동기전동기를 기동시키기 위해서는 회전자의 절대위치가 필수적이다. 회전자의 절대적인 위치 정보를 얻기 위해서는 회전자에 레졸버나 절대형 엔코더, 또는 자속센서(Hall effect sensor)와 같은 위치 센서를 부착하여야 한다. 본 시스템에서는 레졸버를 이용하여 절대위치를 얻기 때문에, 기존 제어용 보드에 추가로 RDC를 구성하였다. RDC를 사용하면 여자 신호의 생성과 아날로그 출력 신호를 디지털 신호와 엔코더 펄스 형태로 전환하는 것이 가능하다.

RDC의 구성은 다음과 같다.



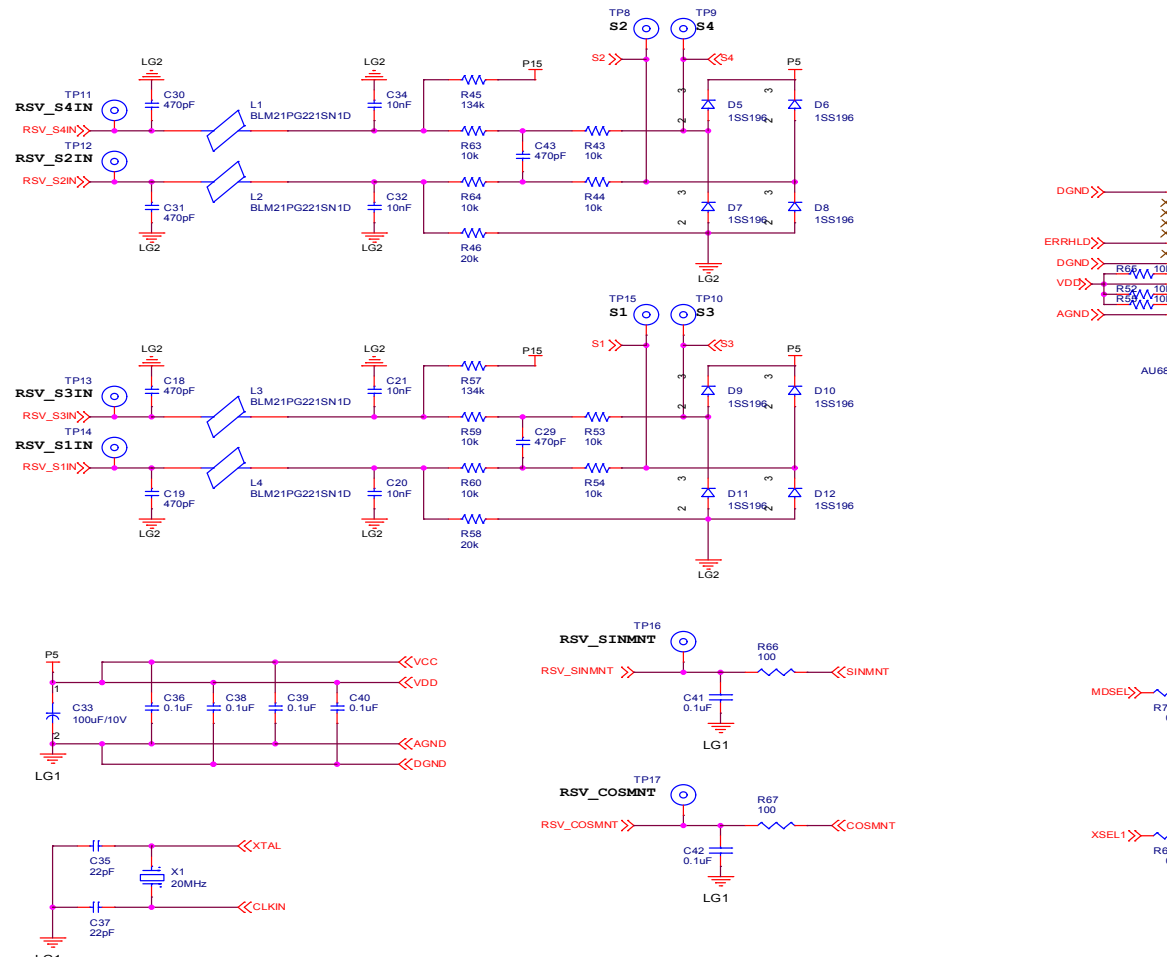


그림 3.2.31 Resolver 신호 처리부

나. 제어알고리즘

(1) 알고리즘 구성

제작한 IPMSM 전동기의 출력 토크 확인을 위해 전류제어가 가능하도록 아래의 그림과 같이 제어 알고리즘을 구성하였다.

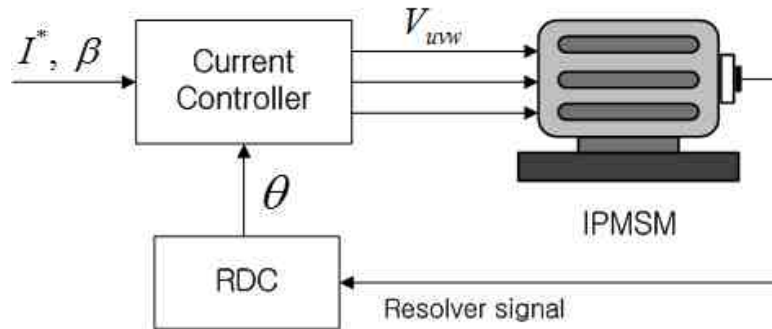


그림 3.2.32 제어알고리즘 구성

전류지령(I^*)과 제어 위상각(β)을 입력하면 d,q축 전류지령(I_{ds}^*, I_{qs}^*)으로 변환되고, IPMSM이 회전하며 실시간으로 변하는 회전자의 위치(θ)는 Resolver의 신호를 RDC에서 처리하여 전류제어에 사용하였다. 그러면 입력한 지령에 따라 u,v,w상 전압지령을 형성하여 전동기에 전력을 공급하게 된다. 이 제어 알고리즘을 이용해 속도에 따른 전류 지령을 입력하여 실험이 가능하다.

(2) 전류제어기 구성

아래 그림과 같이 PI제어기로 구성하였다.

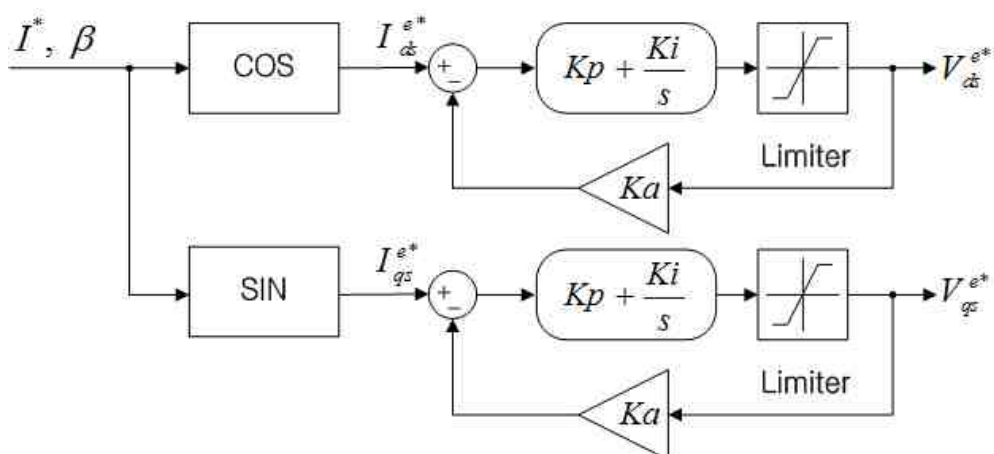


그림 3.2.33 전류제어기

(3) 시뮬레이션

알고리즘의 검증을 위해 MATLAB/Simulink로 시스템을 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 속도지령 3000rpm조건에서 속도 및 전류제어 양상과 출력 토크를 확인할 수 있다. 기저속도(2400rpm) 이후에서는 약계자 제어를 위한 d,q축 전류지령의 변화를 통해 제어 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

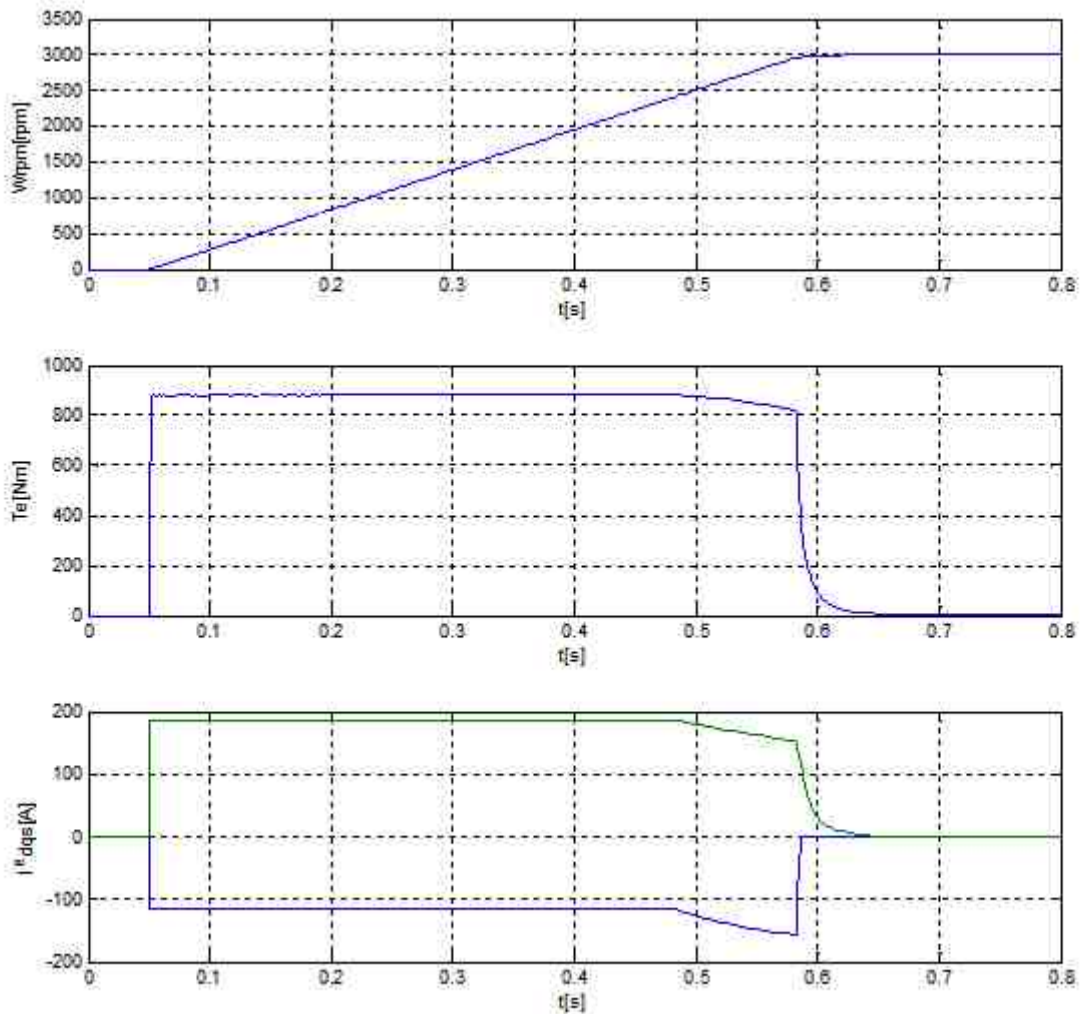


그림 3.2.34 시뮬레이션 결과(3000rpm 속도 제어)

(4) 실험파형

아래의 그림은 IPMSM의 전류제어 파형이다. IPMSM에 연결된 다이노미터에서 2400rpm으로 속도 제어를 하고 있는 조건에서, d,q축 전류지령을 서서히 증가시켰다. d,q축 전류가 지령을 잘 추종함을 파형의 추이를 통해 확인할 수 있다.

* ESI:다이오드 정류기 출력

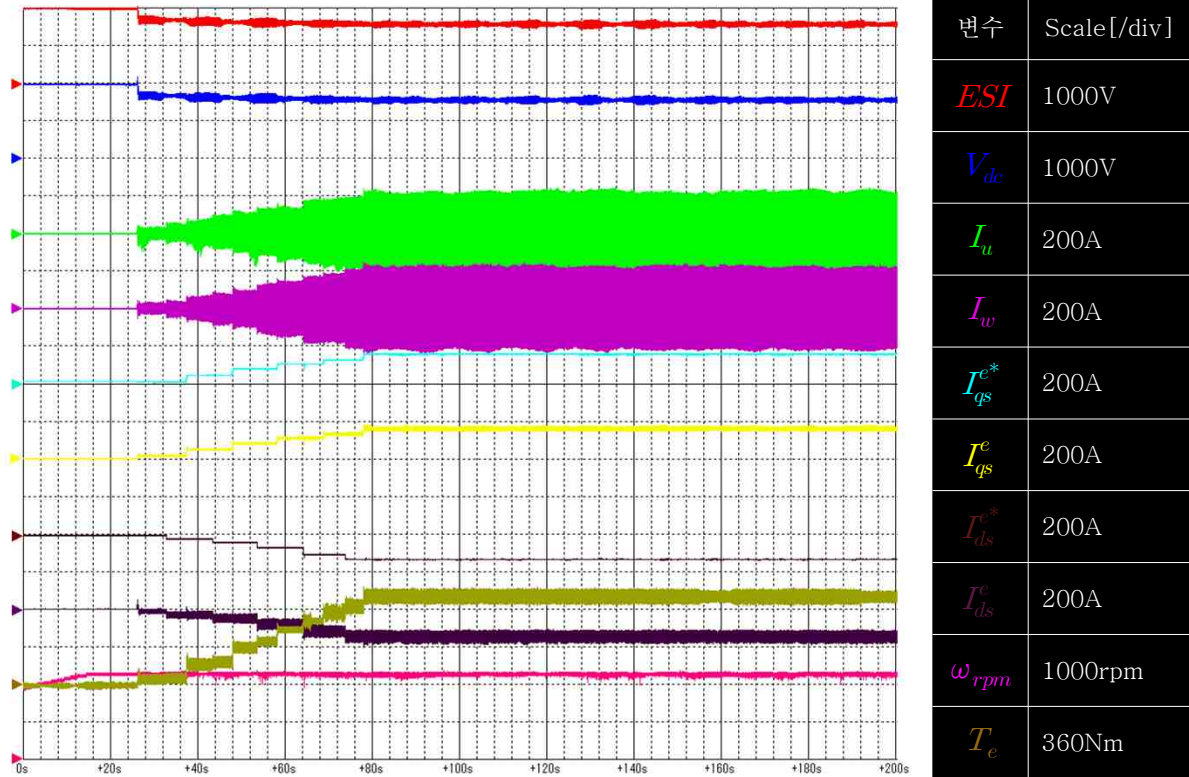


그림 3.2.35 IPMSM의 전류제어 파형

아래의 그림들은 오실로스코프로 측정한 속도별 전류제어 파형을 나타낸다.

(가) 상전류 $100A_{peak}$ 제어 파형(@2400rpm:정격속도)

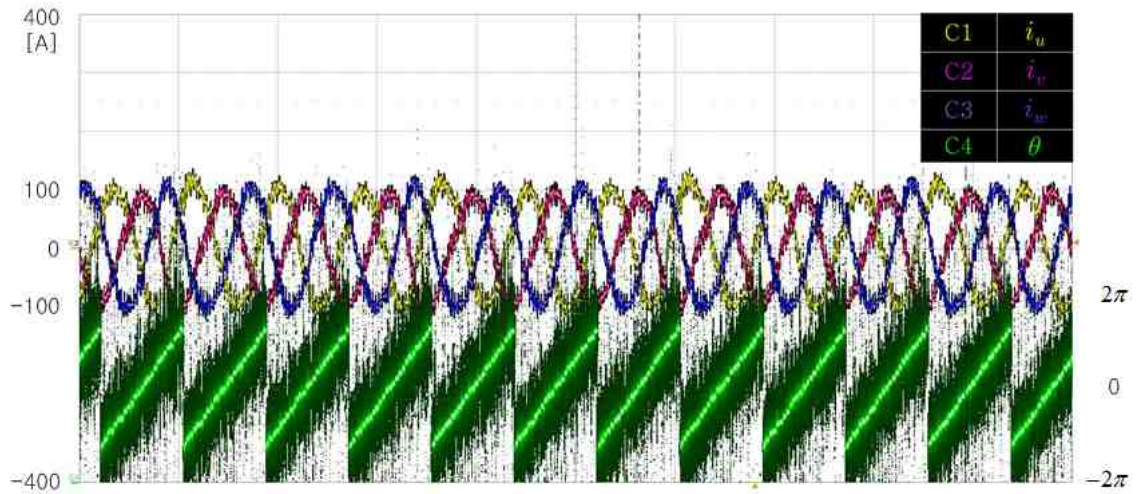


그림 3.2.36 상전류 $100A_{peak}$ 제어 파형(@2400rpm:정격속도)

위의 파형은 상전류 $100A_{peak}$, $\beta = 29^\circ (i_{ds}^* = -48.48A, i_{qs}^* = 87.46A)$ 조건에서의 전류제어 파형이다. C1,C2,C3는 각각 u,v,w상 전류를 Current Probe로, C4는 IPM의 회전자 위치(θ)를 DA(Digital-to-Analog)변환하여 오실로스코프로 측정한 결과이다. 정격속도 2400rpm에서 상전류의 크기가 100A로 제어되는 것을 확인 할 수 있다.

(나) 상전류 $220A_{peak}$ (정격전류) 제어 파형(@2400rpm:정격속도)

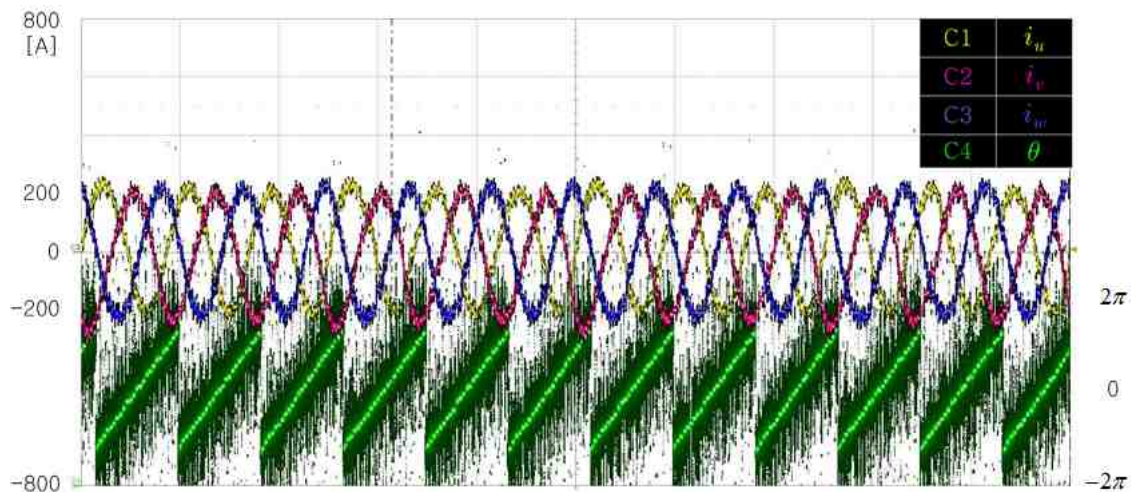


그림 3.2.37 상전류 $220A_{peak}$ (정격전류) 제어 파형(@2400rpm:정격속도)

위의 파형은 상전류 $220A_{peak}$, $\beta = 52^\circ (i_{ds}^* = -173.36A, i_{qs}^* = 135.44A)$ 조건에서의 전류제어 파형이다. 정격속도 2400rpm에서 상전류의 크기가 정격전류 220A로 제어되는 것을 확인 할 수 있다.

(다) 상전류 $100A_{peak}$ 전류제어 파형(@2600rpm:기저속도 이상)

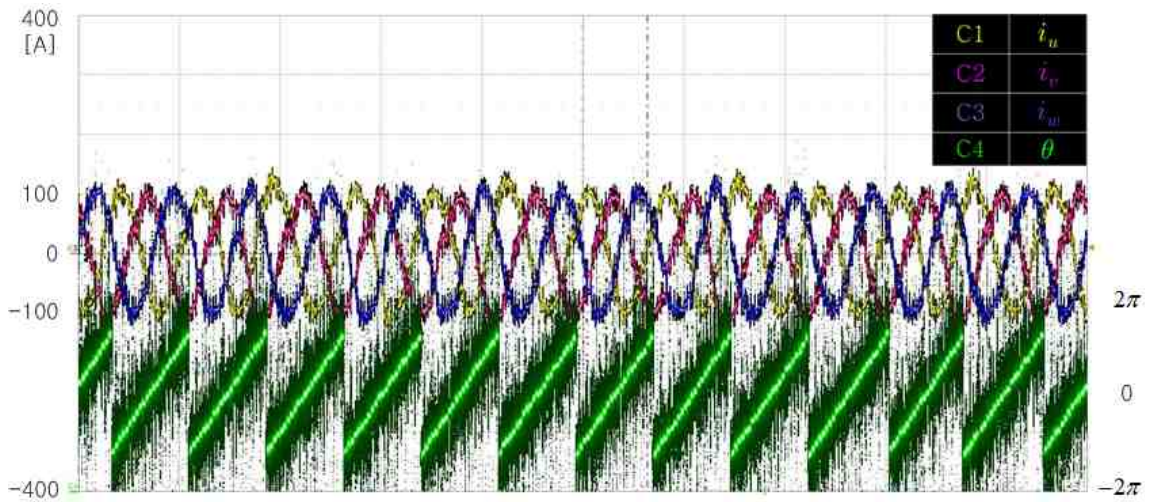


그림 3.2.38 상전류 $100A_{peak}$ 전류제어 파형(@2600rpm:기저속도 이상)

위의 파형은 상전류 $100A_{peak}$, $\beta = 33^\circ (i_{ds}^{e*} = -54.46A, i_{qs}^{e*} = 83.86A)$ 조건에서의 전류제어 파형이다. 기저속도(약계자제어가 수행되는 기준 속도, 2400rpm) 이상인 2600rpm에서 상전류의 크기가 100A로 제어되는 것을 확인함으로써, 약계자 제어가 가능함을 확인 할 수 있다.

(라) 상전류 $120A_{peak}$ 전류제어 파형(@3000rpm:기저속도 이상)

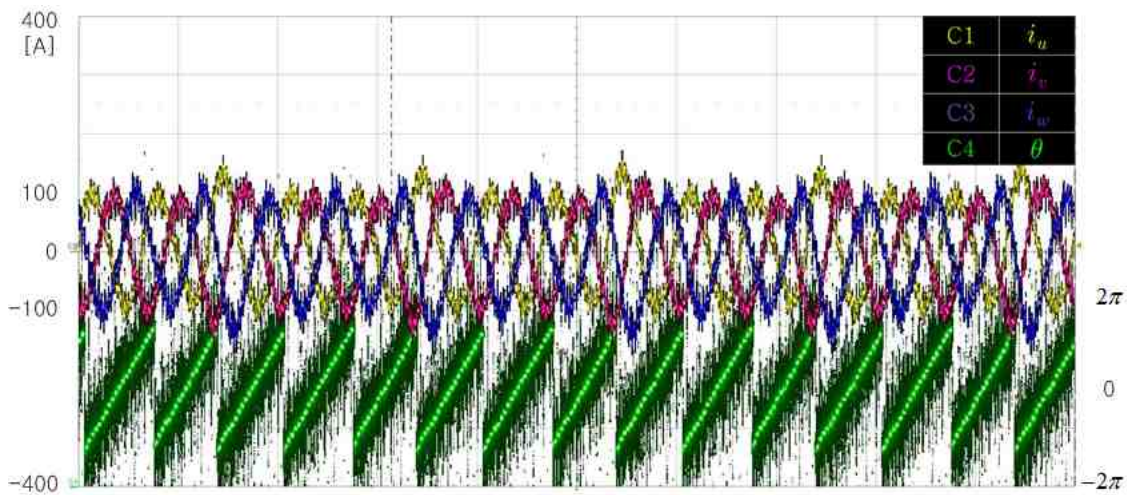


그림 3.2.39 상전류 $120A_{peak}$ 전류제어 파형(@3000rpm:기저속도 이상)

위의 파형은 상전류 $120A_{peak}$, $\beta = 53^\circ (i_{ds}^{e*} = -95.83A, i_{qs}^{e*} = 72.21A)$ 조건에서 전류제어 파형이다. 기저속도(약계자제어가 수행되는 기준 속도, 2400rpm) 이상인 3000rpm에서 상전류의 크기가 120A로 제어되는 것을 확인함으로써, 약계자 제어가 가능함을 확인 할 수 있다.

제3절 시험평가 및 분석

1. IPM 전동기에 관한 철도관련 규격조사(한양대학교)

가. 견인용 전동차 요구 조건

전동기는 빈번한 기동, 정지, 전동차의 진동 및 터널 내 먼지 등과 같은 조건속에서도 견딜 수 있어야 한다. 공기 흡입구에는 필터를 사용하고 소음발생을 최소화 하는 구조를 사용해야 한다. 고정자와 회전자는 고조파 전류에 의한 온도상승과 손실을 최소화 할 수 있는 구조여야 한다. 전동기의 기계적 허용강도는 차량의 최고허용 회전속도의 120%을 이상 만족해야 한다.

나. 철도관련 규격조사 필요성

기존 도시철도 차량 견인용 전동기 교체 시 철도 규격에 맞는 외함으로 제작하면 기존의 차량에서 전동기만 교체 후 즉시 사용 가능하다. IPM 전동기를 사용함으로써 동일 사이즈 대비 고출력 전동기로 대체 가능하고, 출력대비 전력소비량이 현저히 감소한다. 또한, 기존 유도전동기에 비해 동일출력 대비 경량화가 가능하다.

표3.3.1 전동차 견인용 전동기 정격 규격

항 목	규 격
정격전압	1,100 V, AC
출력	200KW 이상
회전속도	1950rpm 이상
효율	92% 이상
최대토크	2100Nm
최고운전속도	4950rpm
절연등급	H종 이상(IEC 349-2)

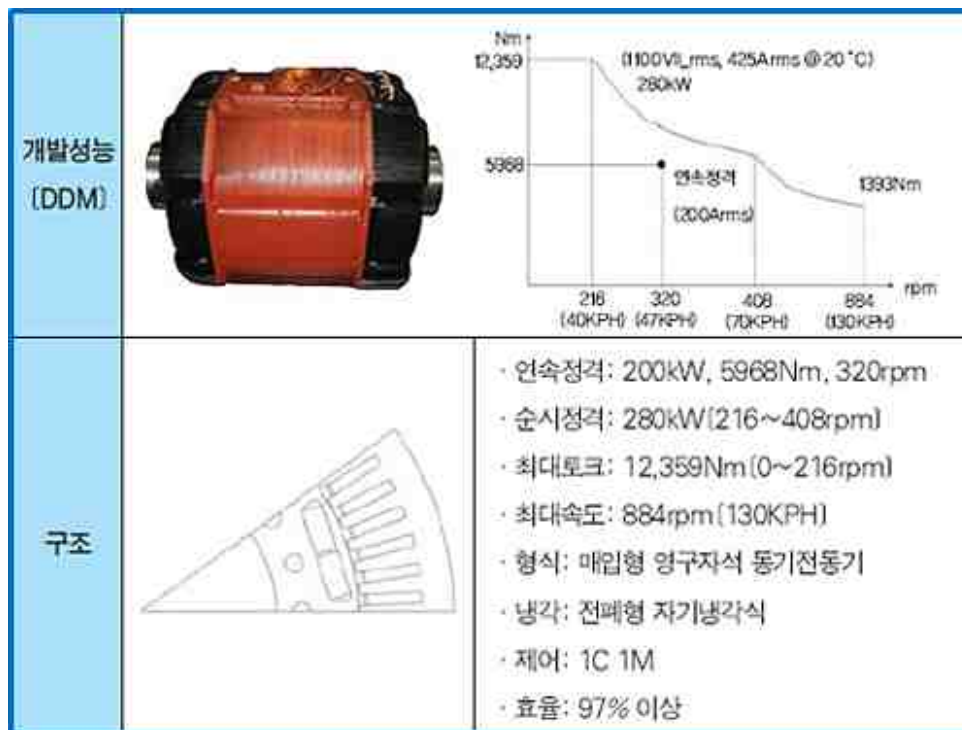


그림3.3.1 철도 규격에 따른 차세대 전동차용 전동기 개발 사양 예시



그림3.3.2 국내 철도표준규격 매뉴얼



그림 3.3.3 국외 철도표준규격 매뉴얼

2. 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준

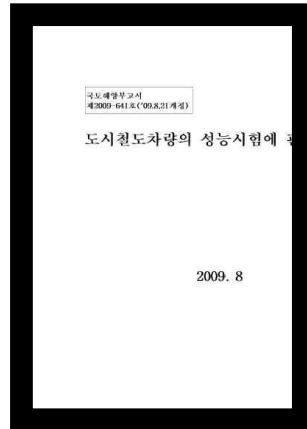


그림3.3.4 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준

가. 견인전동기 성능시험

견인전동기의 성능시험을 위해 5가지 항목의 시험(회전형전동기 : 형식시험)을 실시한다.

- 외관구조검사는 견인전동기 구성부품의 가공, 조립 및 결선 상태와 고정자 절연 등의 적합성과 구조상 손상이나 결함여부의 확인을 목적으로 한다.
- 측정시험은 견인전동기의 크기, 중량에 대한 적합성 여부의 확인을 목적으로 한다.
- 특성시험은 견인전동기의 무부하시험, 구속시험을 통하여 산출된 효율, 견인력, 역률 등의 특성을 설계치와 비교하고 실부하시험 결과에 대한 적합성 확인을 목적으로 한다.
- 절연저항시험은 견인전동기의 절연저항 측정으로 절연의 적합성을 확인한다.
- 임피던스측정은 견인전동기의 권선간 임피던스를 측정하여 권선간의 임피던스 불균형 확인을 목적으로 한다.

나. 영구자석기기의 영구자석 감자 내구성 검증 기준

다음은 A, B 대기업에서 사용되는 영구자석기기 감자 내구성 검증 방법이다. FEM 해석치는 설계한 영구자석 전동기 모델에 정격전류의 2배를 인가하여 영구자석이 감자가 되는지 확인한다. 사용한 영구자석 재질데이터의 Knee Point 기준, 그 이하로 자속밀도 값이 떨어지면 영구자석이 감자되었다고 판단할 수 있다. 이후에 정격전류를 인가한 모델의 역기전력 해석치와 감자된 영역을 제거한 모델의 역기전력 해석치 대비 오차율 5% 이하이면 감자 내구성이 확보되었다고 판단한다. 시험치는 실제 제작된 모델의 역기전력 시험치와 전동기를 약제자 영역까지 시험한 후, 무부하 역기전력 시험치 대비 오차율이 5% 이하이면 감자 내구성이 확보되었다고 판단한다.

3. 전동기 및 전력변환기 효율성 평가기술 개발 (한국기계전기전자시험연구원)

가. 장비 구성 및 활용

(1) 장비구성

- (가) 전동기/발전기 제품 평가를 위해 가장 핵심적인 장비는 ‘다이나모미터’이며, 실제 장비 가액의 대부분을 차지함
- (나) 다이나모미터 : 토크측정센서, 속도측정센서, 신호 처리기로 구성
- (다) 피시험기 전원 : 별도의 전원공급장치에 의해 전동기에 공급
- (라) 전력 제어기 및 분석기를 통하여 입력의 제어 및 측정
- (마) 주변장치: 커플링, calibration beam, weight 및 컴퓨팅 시스템

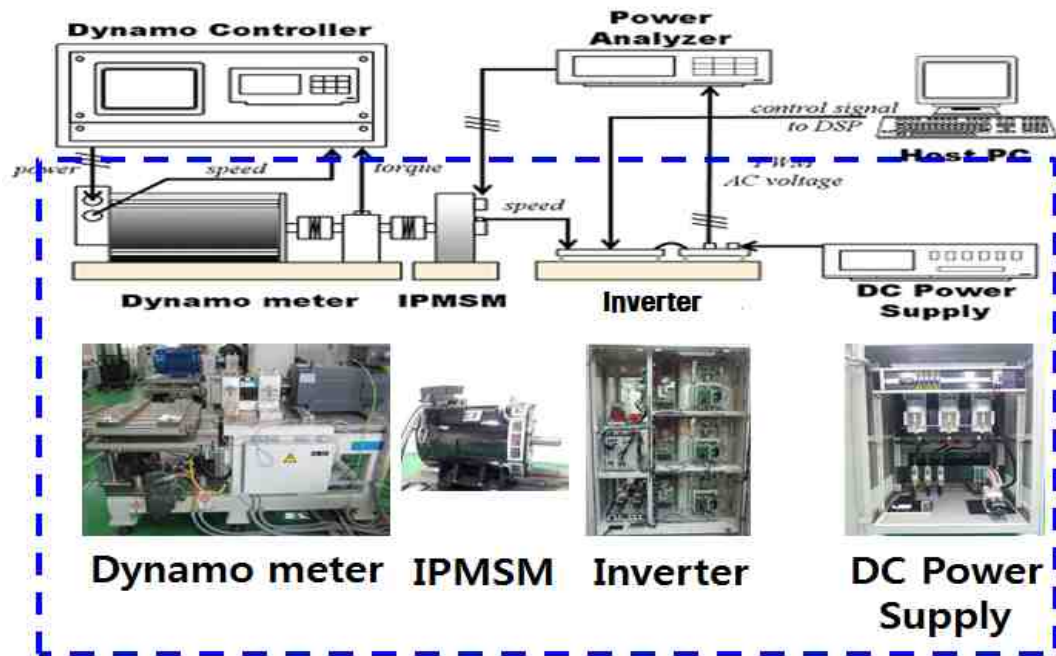


그림 3.3.5 전동기 성능평가 시스템 구성

(2) 고전압 전원공급장치

(가) 고전압 변압기

①. 일반 사항

본 고전압 변압기는 상용전원을 수전하여 제어용 전원을 공급하고 노이즈 및 고조파를 제거하여 정류기의 정류전압으로 승압하여 FULL BRIDGE DIODE 정류기에 원활한 전원을 공급하는 장치이다. 본 변압기는 상용전원을 수전하여 제어용 전원을 승압하고 공급시 1차측과 2차측 절연하여 시험평가시 1,2차측 전원분리 및 노이즈영향에 의한 장비손상을 보호한다. 전동기 품목에 대한 효율, 부하손실, 무부하 손실, 권선저항 시험 등에 적합하고, 또한 완벽한 차폐처리로 분포 정전용량 및 전자유도에 의한 노이즈의 전달을 효과적으로 방지할 수 있어야 한다.

(나) 시스템 구성

② Transformer 1 set

(voltage meter, current meter, 외함 등 포함)

(다). 주요 사양

표 3.3.2 변압기 전기적 사양

형 식	옥내용 건식자냉식
절연 계급	H중
운전 모드	델타-스타 결선
입력전압	AC 3상 380Vac
입력전류	100% : AC 577A
입력 주파수	60HZ
입력용량 / 출력용량	400KVA / 380KVA
출력전압	380V, 850V, 1060V, 1270V
출력전류	50A, 258A, 207A, 173A
정격출력 사용율	평균 90% 최대 120%(1분간)
출력 주파수	60HZ
경보기능	과전압, 과전류, 고온, 입력결상
전원표시	Power, Voltage , Current Analog Meter
온도상승	120℃
냉각방식	강제 공냉식
제어 콘트롤 및 외부단자	MCCB, BUSBAR
사용조건 (주위 온도, 습도)	-10℃~40℃ , 30~90%이내
외 함 규 격 (트랜스부)	W1000 x D1000 x H1600 mm

① 설치조건

- 설치장소 : 실내
- 주위온도 : -10℃ ~ 40℃
- 상대습도 : 30~90 % (20℃ 에 기준함.)

② 형식

- 정격의 종류 : 연속
- 종합효율 : 95%이하
- 제어방식 : 델타-스타 운전

③ 과부하 내량

- 정격전류의 120%를 1분간 통전시 이상이 없어야 한다.

④ 온도상승

- 정격부하로 연속운전시 각부의 온도상승은 온도계법으로 다음의 온도상승이내 (단, 기기주변온도는 20℃로 한다.)
- 변압기 : 120℃ (CLASS : H)

⑤ 절연사항

- 100%부하시험후 500V 절연저항계로 5Mohm 이상.

⑥ 절연내압

- 변압기1차측 : AC 2KV 60Hz 교류전압을 1분간
- 변압기2차측 : AC 2KV 60Hz 교류전압을 1분간 (단.제어회로 제외)

⑦ 구조

- 본장치는 수직 자립형 강제 공냉식으로서 냉각을 제외한 제어부는 밀폐되어 기기를 안전하게 보호한다.
- 외함의 앵글골조는 내용물을 충분히 지탱할 수 있는 재료를 사용하여 철판의 두께는 2.0mm이상의 냉각 압연 강판을 사용하였다. -전,후면 : 2.3t -측,상면 : 2.0t
- PANEL은 이동시 쉽게 옮길수 있게 상단에 EYE BOLT를 설치하며 PANEL의 무게로부터 충분히 지탱할 수 있다.
- 본 기기에 사용하는 모든부품은 KS표시 또는 동등이상의 것을 적용하였다.
- 각종 계기류는 PANEL의 전면상단에 부착하여 판독이 쉽도록 되어있다.
- 각종 동작상태의 표시램프 및 조작스위치는 전면에 배치되어 장치의 작동상태 및 조작을 쉽게할수 있도록 되어있다.
- RELAY 및 TIMER는 보전이 용이하도록 PLUG-IN TYPE 으로하고 진동으로부터 보호 되어야 하며 탈락방지용 LOCK기구를 설치하였다.
- 입력 CABLE ENTRY : BOTTOM

⑧ 입,출력 단자 및 배선

㉠ 입력단자 배치

- 교류 3상회로 : 좌우 배열인 경우--좌로부터 R상, S상, T상

㉡ 출력단자 배치

- 출력단자 : 좌우 배열인 경우--좌로부터 R상, S상, T상

㉢ 전선의 종류

- 주선로 : COPPER BUS BAR 사용
- 조작선 : 0.75 SQ AC600V급 절연전선을 사용

㉣ 사용 TERMINAL

- 반내 : Y TYPE

⑨ NUMBERING TUBE는 TERMINAL 기준 왼쪽에서 오른쪽으로 읽을 수 있음.

표 3.3.3 전선의 색상 및 단자, 절연TUBE의 색상

품목		전선색상	단자 및 TUBE 색상
AC POWER LINE		흑색	R-Ph:적색 S-Ph:흰색 T-Ph:청색
조작선	교류 직류 신호선	적색 청색 황색	백색 NUMBERING
접지		녹색	

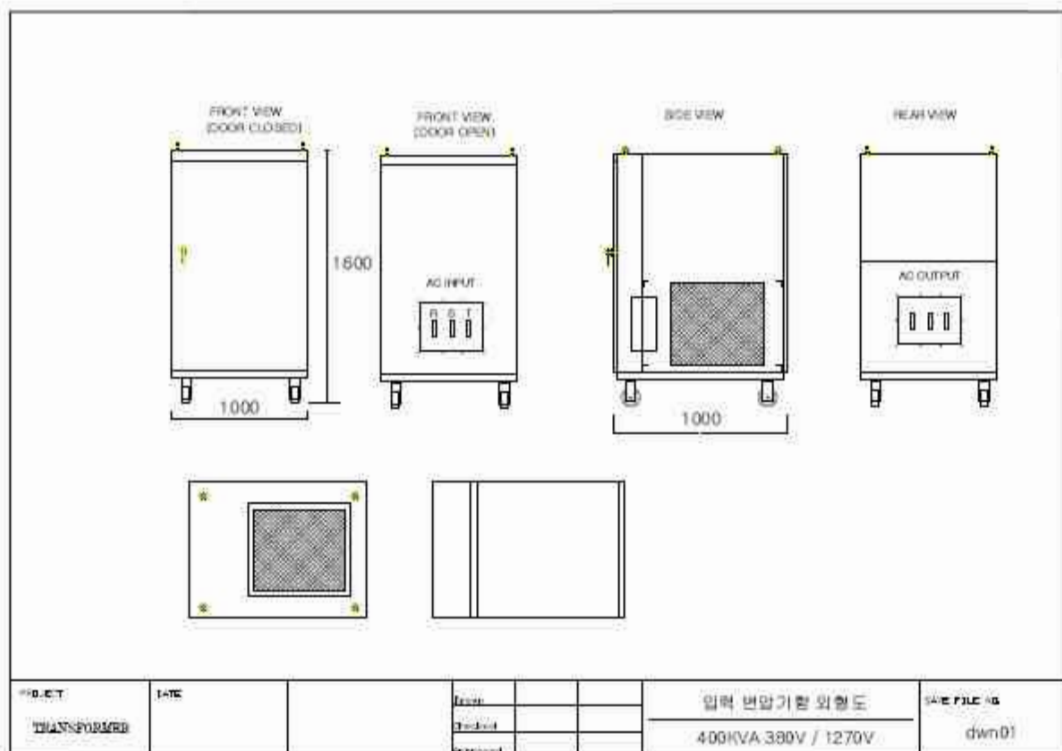


그림 3.3.6 변압기 외형도



그림 3.3.7 고전압 변압기

(3) 고전압 정류기

(가). 일반사양

본 정류기의 사양은 INVERTER 전원장치용 DIODE RECTIFIER 에 적용한다. 본 정류기는 정류기용 특수변압기에서 정류전압으로 강압하여 FULL BRIDGE DIODE 정류기를 통해 직류로 변환하는 장치이다. DIODE 의 위상제어에 의해 광범위한 전압조정은 물론 설정치에 대한 정전압, 정전류 정도가 높아 효율 높은 작업을 수행할 수 있으며 취급이 간편하고 완벽한 보호회로를 부가하여 신뢰도가 높게 제작되어 직류 전원 장치에 이용한다.

(나). 시스템 구성

① Rectifier 1 set

(고속 차단기, voltage meter, current meter, 외함 등 포함)

- 주요 사양

표 3.3.4 정류기 전기적 사양

제어방식	전파 DIODE 정류방식
사 용 소 자	INFINEON - 5800V, 1650A
교류입력전압	3상 850Vac, 1060Vac, 1270Vac
교류입력전류	3상 258A, 207A, 173A
입력 주파수	60Hz
출력용량	324KW
직류출력전압	DC 1200V, 1500V, 1800V , 10- 100% .
직류출력전류	DC 270A, 216A, 180A , 10 - 100% .
정격출력 사용율	평균 85% 최대 120%(1분간)
경보기능	과전압,과전류,고온,입력결상
전원표시	Power, Voltage , Current Analog Meter
온도상승	75℃
냉각방식	강제 공냉식
제어 콘트롤 및 외부단자	AC입력단 고속FUSE(소켓처리), DC출력단 전자접촉기(1500V 1000A), BUSBAR
사용조건 (주위 온도, 습도)	-10℃~40℃ , 30~90%이내
외 함 규 격	W1000 x D1000 x H1600 mm

(다) 설치조건

- 설치장소 : 실내
- 주위온도 : -10℃ ~ 40℃
- 표고: 해발1000M 이하
- 상대습도 : 30~90 % (20℃ 에 기준함.)

(라) 형식

- 정격의 종류 : 연속
- 종합효율 : 85%이하
- 제어방식 : DIODE PHASE CONTROL

(마) 과부하 내량

- 정격전류의 120%를 1분간 통전시 이상이 없을것.

(바) 온도상승

- 정격부하로 연속운전시 각부의 온도상승은 온도계법으로 다음의 온도 상승 이내(단, 기기주변온도는 20℃로 한다.)
- DIODE : 75℃

(사) DIODE RECTIFIER

- 정격의 종류 : 연속
- 정류방식 : 3PHASE FULL BRIDGE 6PULSE
- 제어방식 : DIODE PHASE CONTROL
- 냉각방식 : 강제 공냉식

(아) 전기적인 특성

① 입력특성

- 상수 : 3 PHASE
- 입력전압 : AC850V, AC1060V, AC1270V $\pm 5\%$
- 주파수 : 60Hz

② 출력특성

- 정격출력전압 DC 1200V, 1500V, 1800V $\pm 5\%$
- 정격출력전류 270A, 216A, 180A
- 정격출력용량 324KW

③ CURRENT LIMITS 특성

- 부하전류가 정격을 초과하여 정격전류의 110%이상 흐르면 자동적으로 빠르게 차단하여 부하전류 증가를 억제하는 CURRENT LIMITS특성을 가져야 한다.

④ 보호회로 및 경보회로

- DC 과전류 : 110% (ALARM & TRIP)
- DIODE과온 : 75℃ (ALARM & TRIP)
- 입출력회로 보호 : 고속FUSE, 전자접촉기 부착
- 과전류 및 부하단락 : 경보 및 회로 차단
- 반도체 과온 : 경보 및 회로 차단
- SURGE ABSORBER 에 의한 이상전압 발생보호

⑤ 구성기기 및 지시계기

- 출력 전압계/전류계
- 지시램프 및 원인별 고장램프
- 조작스위치
- 외부 INTERFACE 신호

(자) 구조

- 본장치는 수직 자립형 강제 공냉식으로서 냉각을 제외한 제어부는 밀폐되어 기기를 안전하게 보호한다.
- 외함의 앵글골조는 내용물을 충분히 지탱할 수 있는 재료를 사용하여 철판의 두께는 2.0mm이상의 냉각 압연 강판을 사용하였다.
- 전,후면 : 2.3t -측,상면 : 2.0t
- PANEL은 이동시 쉽게 옮길수 있게 상단에 EYE BOLT를 설치하며 PANEL의 무게로부터 충분히 지탱할 수 있다.

- 본기기에 사용하는 모든 부품은 KS표시 또는 동등이상의 것을 적용하였다.
- 각종 계기류는 PANEL의 전면상단에 부착하여 판독이 쉽도록 되어있다.
- 각종 동작상태의 표시램프 및 조작스위치는 전면에 배치되어 장치의 작동상태 및 조작을 쉽게 할 수 있도록 되어있다.
- RELAY 및 TIMER는 보전이 용이하도록 PLUG-IN TYPE 으로하고 진동으로부터 보호 되어야 하며 탈락방지용 LOCK기구를 설치하였다.
- 입력 CABLE ENTRY : BOTTOM

(차) 입,출력 단자 및 배선

① 입력단자 배치

- 교류 3상회로 : 좌우 배열인 경우--좌로부터R상,S상,T상

② 출력단자 배치

- 출력단자 : 좌우 배열인 경우--좌로부터 부극(N),정극(P)

③ 전선의 종류

- 주선로 : COPPER BUS BAR 사용
- 조작선 : 0.75 SQ AC600V급 절연전선을 사용

④ 사용 TERMINAL

- 반내 : Y TYPE

(카) NUMBERING TUBE는 TERMINAL 기준 왼쪽에서 오른쪽으로 읽을 수 있음.

표 3.3.5 전선의 색상 및 단자. 절연TUBE의 색상

품목		전선색상	단자 및 TUBE 색상
AC POWER LINE		흑색	R-Ph:적색 S-Ph:흰색 T-Ph:청색
DC POWER LINE		명판부착	(+) : 적색 (-) : 청색
조작선	교류 직류 신호선	적색 청색 황색	백색 NUMBERING
접지		녹색	

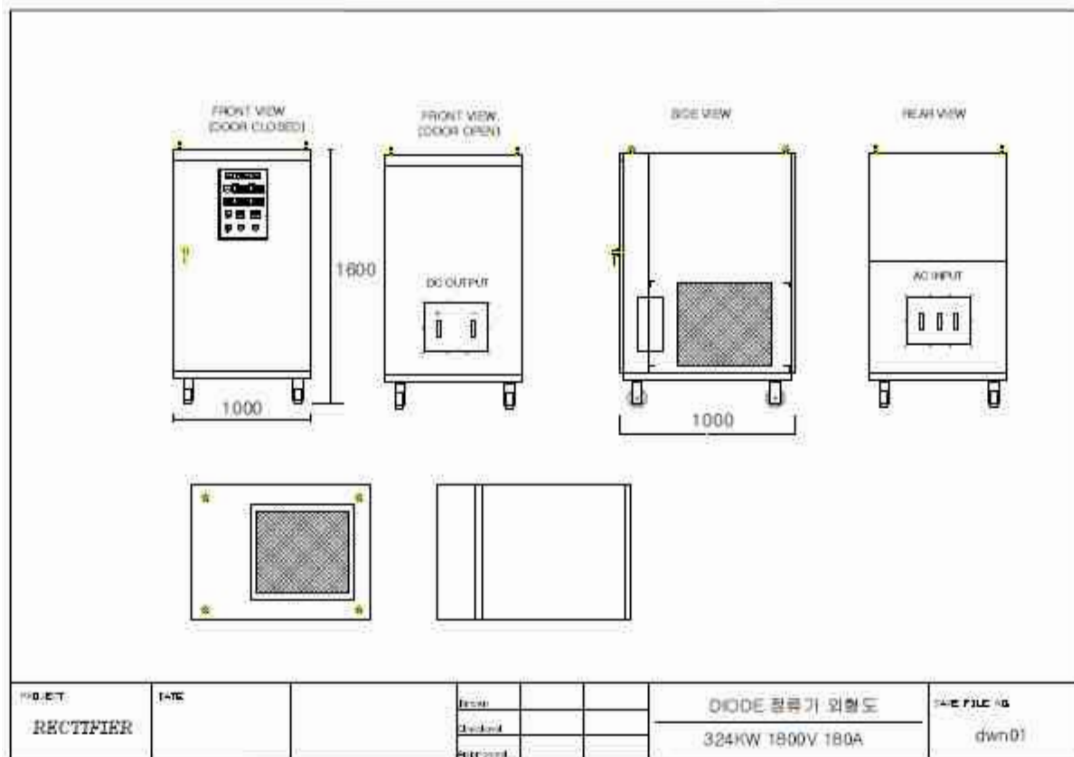


그림 3.3.8 정류기 외형도



그림 3.3.9. 고전압 정류기

- 다이나모 시스템 사양
 - 최대출력 : 280 kW
 - 최대토크 : 1,375 Nm
 - 최대속도: 3,600 rpm



그림 3.3.10. 280 kW급 다이나모 시스템



그림 3.3.11 280 kW급 다이나모 제어기

Load machine							2-pole(3600rpm)					4-pole(1800rpm)					6-pole(1200rpm)					8-pole(900rpm)				
Power	Torque	Speed	Max. Torque at rated speed	Torque at 3600 rpm	Max. speed	Max. torque Specimen	P _{out}	Min. Eff.	Load Torque(Nm)	P _{in}	Min. Eff.	Load Torque(Nm)	P _{in}	Min. Eff.	Load Torque(Nm)	P _{in}	Min. Eff.	Load Torque(Nm)	P _{in}	Min. Eff.	Load Torque(Nm)	P _{in}				
[kW]	[Nm]	[rpm]	[Nm]	[Nm]	[rpm]	[Nm]	[kW]	[%]	Rated	125%	[kW]	[%]	Rated	125%	[kW]	[%]	Rated	125%	[kW]	[%]	Rated	125%	[kW]			
							0.75	75.6	2	2.6	1.0	82.6	4	6	0.9	80	6	7.6	0.9	74	9	1.1	1.0			
							1.3	84	4	3.0	1.6	84	8	12	1.8	85.0	12	15	1.8	80.0	17	2.1	1.9			
							2.2	84	6	7.6	2.6	86.5	12	15	2.5	86.5	16	23	2.5	86.5	25	3.1	2.5			
							3.7	85.5	10	12.6	4.3	87.5	20	25	4.2	87.5	30	38	4.2	87.5	42	5.3	4.2			
5.7	18	3000	25	15	9000	25	5.5	87.5	15	19	6.3	88.5	30	38	6.2	88.5	45	56	6.2	88.5	62	7.7	6.2			
							7.5	88.5	20	25	8.5	89.5	41	51	8.4	90.2	62	78	8.3	89.5	84	104	8.4			
							11	89.5	30	38	12.3	91	60	75	12.1	90.2	90	113	12.1	89.5	121	151	12.1			
							15	90.2	41	51	16.6	91	82	103	16.5	91	123	154	16.5	90.2	165	206	16.5			
							18.5	91	51	64	20.3	91.7	101	126	20.2	91.7	152	190	20.2	90.2	203	254	20.2			
21	74	3200	100	66	10000	73	22	91	60	75	24.2	92.4	120	150	23.8	92.4	180	225	23.8	91	240	300	24.2			
							30	91.7	83	103	32.7	93	164	205	32.1	93	246	308	32.1	91	327	409	33.0			
							37	92.4	101	126	40.0	93	208	253	39.8	93	304	380	39.8	91.7	401	501	40.3			
							46	93	123	154	48.4	93.5	246	306	48.1	93.5	365	451	48.1	92.4	487	608	48.7			
							55	93	150	188	59.1	94.1	303	376	58.4	93.6	451	564	58.3	93.5	552	729	59.8			
							78	93	205	256	80.6	94.1	410	513	78.7	94.1	615	769	78.7	93.5	809	1011	80.1			
135	445	2700	555	355	7500	358	90	93.6	346	398	96.2	94.5	492	615	95.2	94.1	735	923	95.5	93.5	971	1213	95.2			
							113	93.6	391	375	117.5	95	600	743	115.8	94.5	901	1128	116.4	93.5	1186	1483	117.5			
							132	93.6	361	451	141.0	95	722	903	138.9	94.5	1082	1364	139.7							
							150	94.5	438	548	159.3	95	875	1094	163.4	94.5	1212	1541	159.3							
288	1375	2000	1718	764	3600	1641	200	94.5	547	684	211.8	95	1094	1368	218.5											

그림 3.3.12 280 kW급 다이나모 출력사양



그림 3.3.13 전력분석기 (WT3000)

(4) 시험장비 활용

210kW급 전동기 및 전력변환기 시험을 위해 다음과 같이 다이나모시스템, 고전압 정류기 및 변압기, 전력분석기 등의 장비를 활용하였다.

- 역기전력 측정시험 : 280kW급 다이나모시스템 사용
- 정토크영역 부하시험 및 기동특성시험 : 280kW급 다이나모시스템 및 고전압 전원공급장치 사용(3,300rpm 이하)
- 정출력영역 부하시험 : EV 모터 측정용 다이나모시스템 및 고전압 전원공급장치 사용(3,300 ~ 6,000 rpm)
- Safety 시험평가 : 온도상승 시험

4. 시험평가 방법(한국기계전기전자시험연구원)

가. 210kW급 IPMSM 전동기 시험

역기전력 측정방법은 다음과 같은 단계로 진행되었다.

- 210kW급 IPMSM 시험 전동기를 280kW급 다이나모 시스템의 베드에 장착
- 다이나모 시스템의 토크·속도센서 축과 시험 전동기의 축을 정렬
- 토크·속도 센서 축과 시험 전동기 축 사이에 커플링 체결
- 체결이 잘 되었는지 확인 후 시험 전동기의 3상 입력선을 오실로스코프의 전압프로브에 연결
- 다이나모 시스템의 부하 전동기 속도를 100 rpm 단위로 0 ~ 1,000 rpm 까지구동시키며, 속도에 따른 시험 전동기에서 출력되는 상전압 또는 선간전압을 오실로스코프로 측정



그림 3.3.14 다이나모 시스템 매뉴얼 모드 시험

나. 다이나모 시스템 시험

다이나모 시스템 시험은 다음과 같은 단계로 진행되었다.

- 210kW급 IPMSM 시험 전동기를 280kW급 다이나모 시스템의 베드에 장착
- 다이나모 시스템의 토크/속도센서의 축과 시험 전동기의 축을 정렬
- 토크·속도 센서 축과 시험 전동기 축 사이에 커플링을 체결
- 고전압 변압기 출력단과 고전압 정류기 입력단을 고전압 케이블로 연결
- 인버터 출력단과 전동기 3상 입력선을 연결
- 고전압 정류기 출력단과 인버터 입력단을 고전압 케이블로 연결
- 전력분석기를 정류기 출력단과 인버터 출력단에 연결
- 3상 상용전원과 고전압 변압기 입력단을 고전압 케이블로 연결
- 3상 상용전원을 변압기에 인가
- 변압기와 정류기를 통한 전압이 인버터 입력단에 공급되는지 확인
- 인버터 전원 확인 및 정상동작 여부 확인
- 다이나모 시스템으로 부하 전동기를 속도제어하여 시험 전동기를 저속(100 rpm)으로 회전시킴
- 시험 전동기가 회전하는 상태에서 인버터로 시험 전동기를 전류제어 함
- 각 속도별 토크인가 후 전력분석기를 통해 인버터 입력단의 DC link 전압 및 전류,

인버터 출력 전압 및 전류(전동기 입력 전압 및 전류), 시험 전동기의 토크 및 속도 측정

- 측정된 DC link 전압 및 전류, 인버터 출력 전압 및 전류 값을 이용하여 인버터 효율 산정
- 측정된 시험 전동기 입력 전압 및 전류, 전동기의 기계적 출력(토크, 속도) 값을 이용하여 전동기의 효율 산정

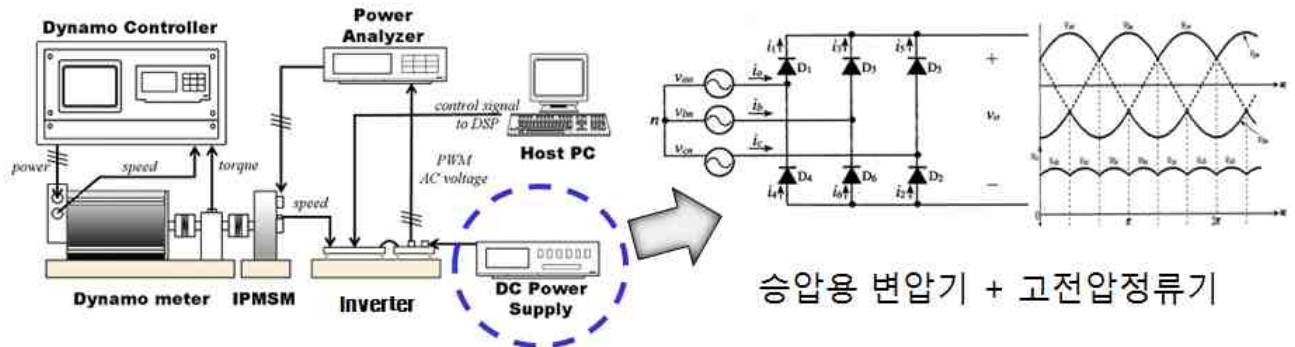


그림 3.3.15 부하시험 구성

다. 부하시험

부하 시험은 다음과 같은 단계로 진행되었다.

- 210kW급 IPMSM 시험 전동기를 280kW급 다이나모 시스템의 베드에 장착
- 다이나모 시스템의 토크/속도센서의 축과 시험 전동기의 축을 정렬
- 토크·속도 센서 축과 시험 전동기 축 사이에 커플링을 체결
- 고전압 변압기 출력단과 고전압 정류기 입력단을 고전압 케이블로 연결
- 인버터 출력단과 전동기 3상 입력선을 연결
- 고전압 정류기 출력단과 인버터 입력단을 고전압 케이블로 연결
- 전력분석기를 정류기 출력단과 인버터 출력단에 연결
- 3상 상용전원과 고전압 변압기 입력단을 고전압 케이블로 연결
- 3상 상용전원을 변압기에 인가
- 변압기와 정류기를 통한 전압이 인버터 입력단에 공급되는지 확인
- 인버터를 속도제어하여 속도별로 지령 후 시험전동기의 전압, 전류, 속도, 토크를 측정하여 기동 시 응답 특성 및 전기적, 기계적 특성을 측정. 즉, 무부하시 전압, 전류, 기동토크, 속도지령에 따른 응답 특성 측정

라. 온도상승시험

온도 상승 시험은 다음과 같은 단계로 진행된다.

- 온도상승시험은 다음의 순서로 진행하여야 함
- 만일 시험이 연속적으로 진행될 수 없는 상황이라면 시험의 온도조건을 다시 맞춘 후 진행하여야 함
- 시험 전 기동기의 온도측정 : $R_a \Rightarrow$ 주위온도에서 측정된 고정자 선간저항 $\Theta_i \Rightarrow$ 주위온도에서 측정된 고정자 권선의 온도
- 온도상승시험 : $R_N \Rightarrow$ 온도상승시험 마지막 단계에서 측정된 고정자 선간저항

- $\Theta_N \Rightarrow$ 온도상승시험 마지막 단계에서 측정한 고정자권선의 온도 $\Theta_C \Rightarrow$ 기준 냉각재 온도(물 또는 공기를 사용할 경우)
- 200kW를 초과하고 5,000kW 이하인 경우 : 120초



그림 3.3.16 온도상승시험

5. 설계 성능과 시작기의 성능비교

가. 효율 및 토크에 대한 해석과 시험의 오차

- 다이내모미터 활용한 전동기 및 전력변환기 효율 측정시험



그림 3.3.17 전동기 및 전력변환기 시험



그림 3.3.18 다이내모미터 시험 측정

나. 해석과 시험 시 무부하 역기전력 비교분석

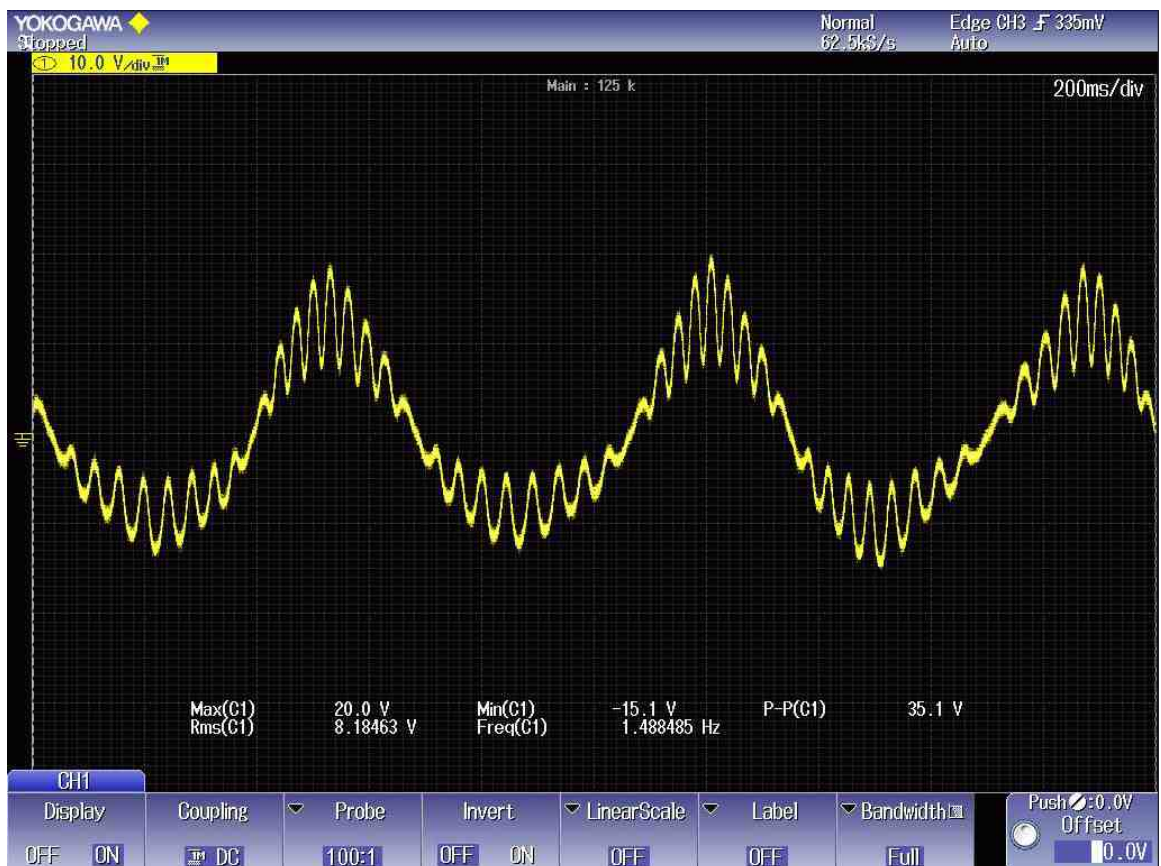


그림 3.3.19 무부하 역기전력 관성부하 시험값

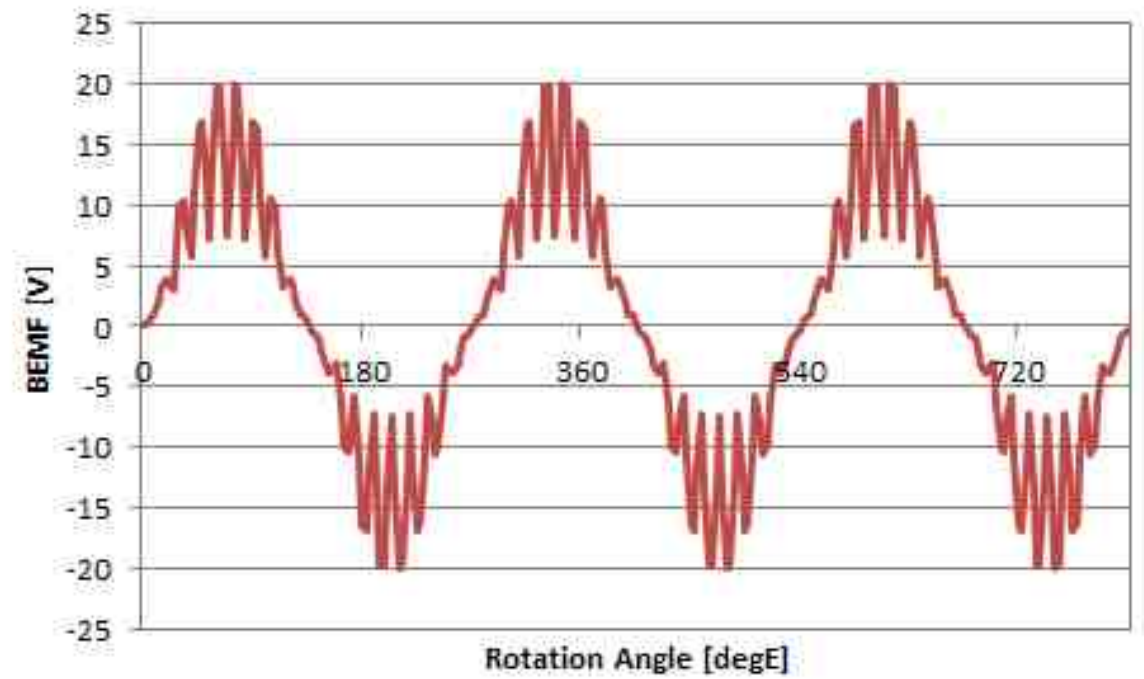


그림 3.3.20 무부하 역기전력 해석값

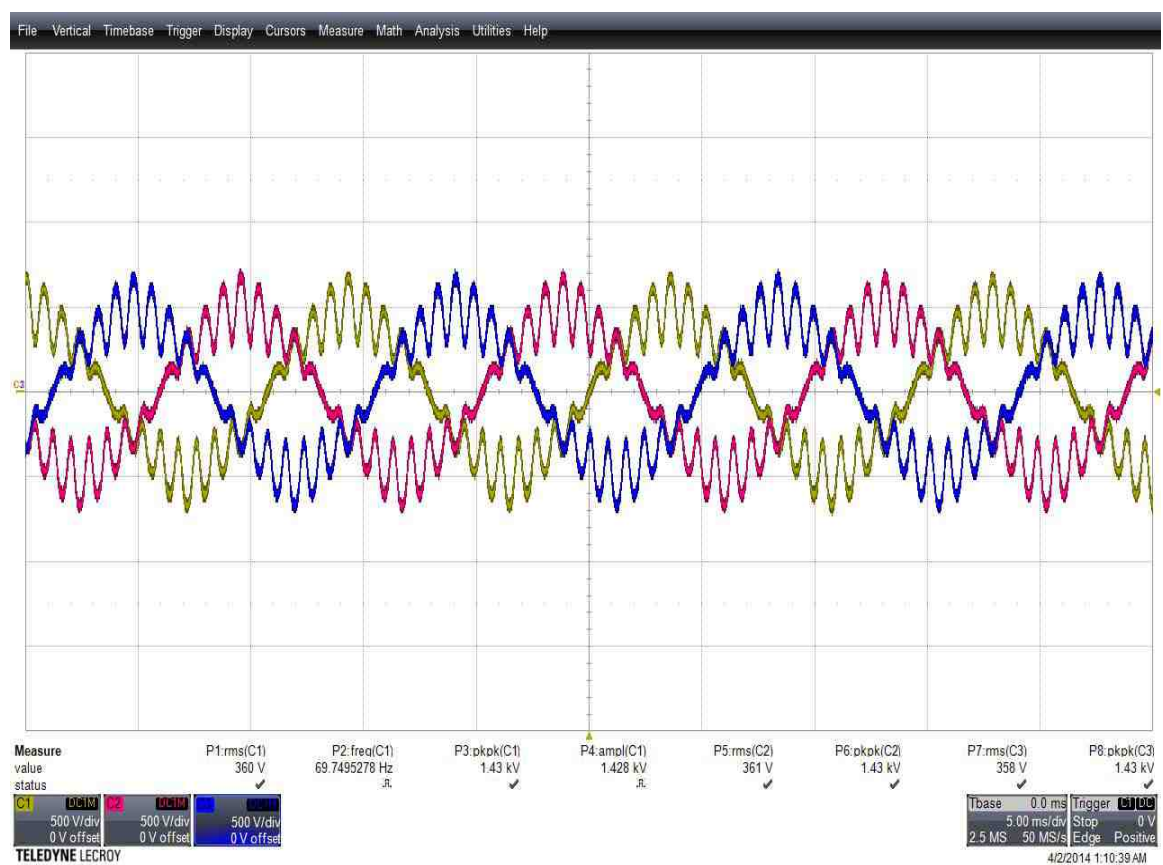


그림 3.3.21 무부하 역기전력 전력변환기 시험 값

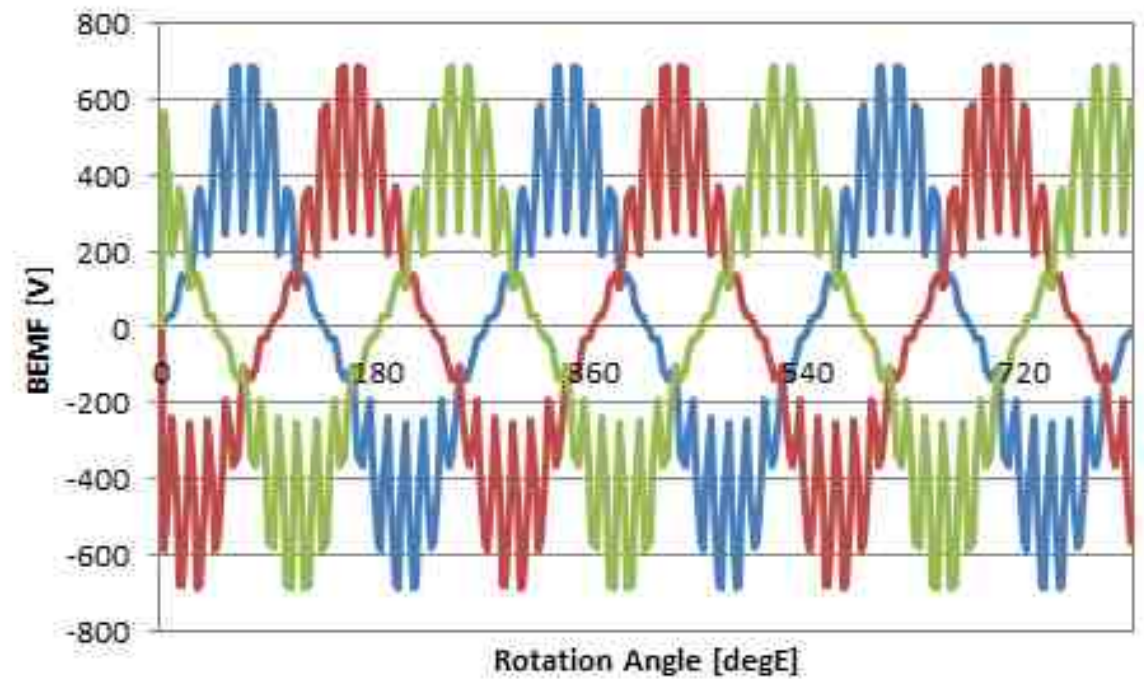


그림 3.3.22 정격속도 시 무부하 역기전력 해석 값

표 3.3.6 정격속도 시 무부하 역기전력 비교

항 목	해석 값 [V]	시험 값 [V]	오차율 [%]
역기전력 실효치	357	360	0.83

다. 해석과 시험의 오차 확인

- IPM 전동기 무부하 역기전력 해석 값 : 357[Vrms]
- IPM 전동기 무부하 역기전력 시험 값 : 360[Vrms]
- 오차율 : 0.83%

라. 해석과 시험의 오차 확인

- 최대설계효율 해석과 시험 결과 오차율의 10% 이하 범위 만족여부 확인
- 최대설계토크 해석과 시험 결과 오차율의 10% 이하 범위 만족여부 확인
- 오차율 : 최대설계효율 => 0.6%
- 최대설계토크 => 1.62%

표 3.3.7 정격운전 시 해석 및 시험 데이터(2400rpm)

구 분	해석 값	시험 값	단 위
속 도	2400	2400	rpm
토 크	861	847	Nm
출 력	216	212	kW
효 율	97.6	97	%

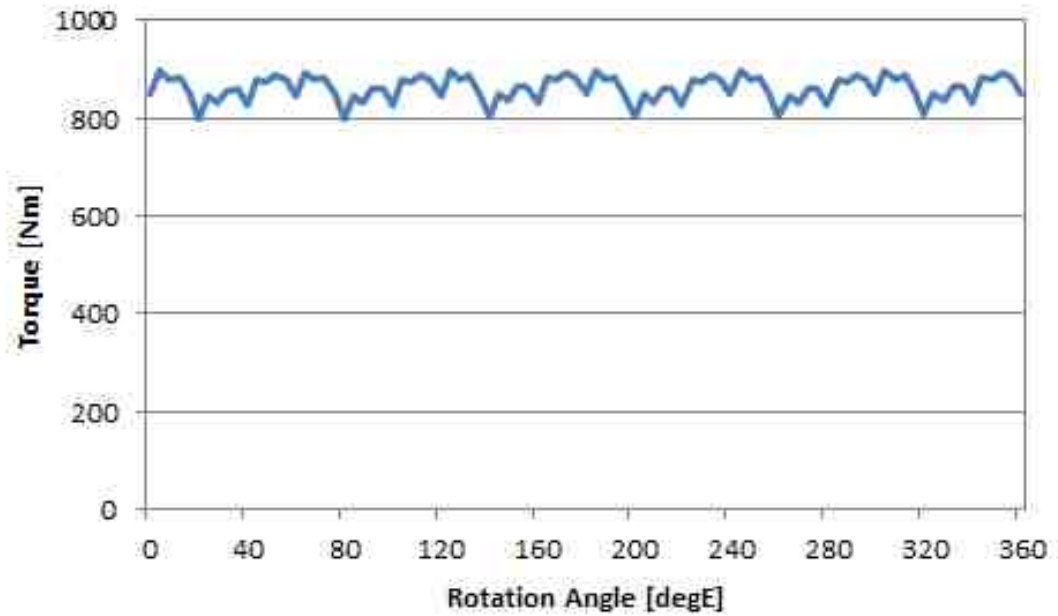


그림 3.3.23 해석 시 IPM 전동기 토크 파형(2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

마. 전동기 효율

IPM 전동기의 해석 결과 효율은 다음 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{효율} = \frac{\text{공극출력} - \text{철손} - \text{영구자석 와전류손} - \text{기계손}}{\text{공극출력} + \text{고정자동손}} \times 100\%$$

표 3.3.8 해석 시 IPM 전동기 효율

구 분	해석 값	단 위
속 도	2400	rpm
공극 토크	861	Nm
상저항	0.039	Ω
상전류	220	Apeak
동 손	2.8	kW
철 손	2.2	kW
영구자석 와전류손	0.2	kW
공극 출력	216	kW
입 력	219	kW
축 출력	214	kW
효 율	97.6	%

바. 속도별 전동기 특성 시험평가 결과 및 약계자 제어 유무 확인

철도차량용 견인전동기의 속도범위에서의 전동기 특성을 다음과 같이 확인하였다.

- 기저속도(2,400rpm) 이하의 속도에서 전동기 특성 확인
- 다이내모의 부하 전동기 용량 및 최대속도 제한과 제어 안전성을 고려한 최대속도인 3,000rpm 까지의 전동기 특성 확인

시험 결과, 기저속도 이상의 속도에서 역기전력이 전압 제한치를 넘는 것을 확인하였다. 그러므로 전류위상각을 높여서 약자속 제어를 해야만 IPM 전동기 운전이 가능하다.

표 3.3.9 속도별 전동기 특성 시험평가 결과

속 도 [rpm]	전 류 [Arms]	전류위상각 [deg]	토 크 [Nm]	효율 [%]
400	150	40	862	91.2
1400	156	40	845	96.1
1600	155	40	840	96.1
2000	155	40	835	96.6
2400	155	40	841	97.1
2600	130	41	668	97.1
2800	129	49	638	96.6
3000	87	46	372	96.5

사. 전력분석계

전력변환기 측정 장비로써 다이내모미터 시스템 연결된 전동기 시험 시스템과 연동되어 인버터에 대한 정보를 제공한다.



그림 3.3.24 전력분석계



그림 3.3.25 인버터 효율측정 시험_전력분석계

아. 인버터 효율

인버터 효율은 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\text{효율} = \frac{\text{전동기 입력}}{\text{인버터 입력}} \times 100\%$$

표 3.3.10 시험 시 인버터 효율

구 분	시험 값	단 위
인버터 입력 전압	1.619	kV
인버터 입력 전류	142	Arms
전동기 입력 전력	211	kW
효 율	97	%



그림 3.3.26 정격운전 토크 및 효율 시험평가 사진

자. 전동기 효율 측정 시스템

위 그림은 다이노미터 시스템에 연결된 전동기의 시험데이터를 산출해주는 전동기 효율 측정시스템으로서 전동기 속도를 수동으로 입력하는 방법으로 전동기가 실제 부하에 연결된 것과 동일한 조건에서 시험을 진행할 수 있다.

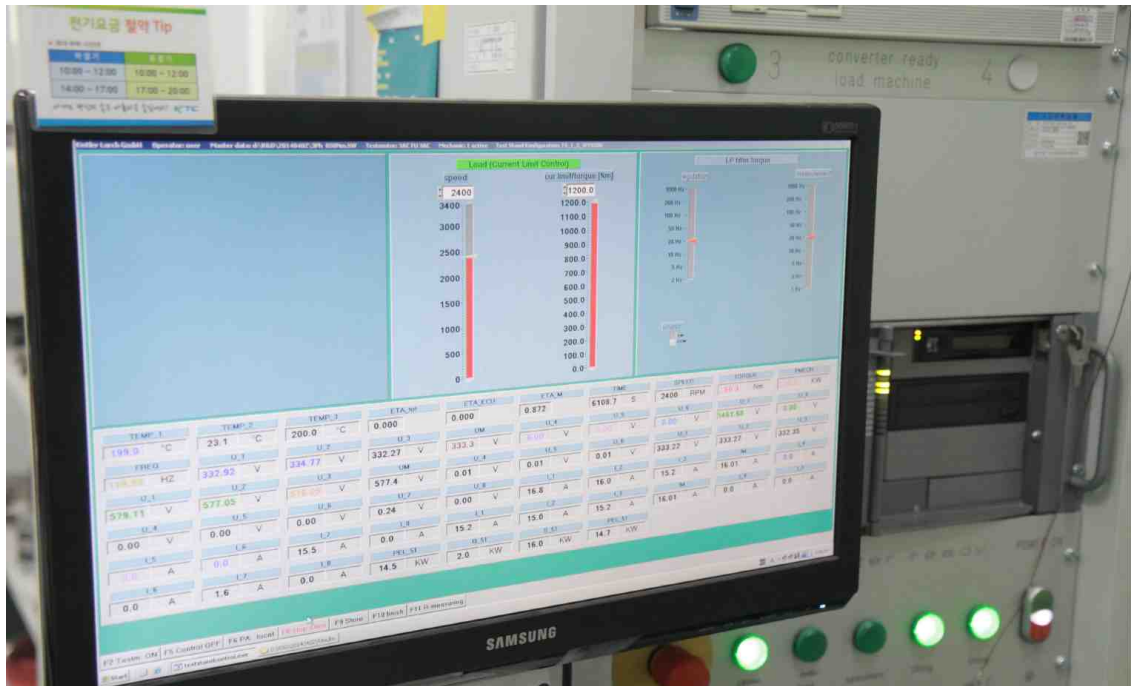


그림 3.3.27 전동기 효율 측정시스템

6. 설계 모델의 연동해석을 통한 해석치와 성능평가 시험치 비교

가. IPM 전동기의 연동해석을 위한 준비

유한요소법을 이용한 전류원 시뮬레이션이 아닌 실제 시험 평가 세트와 같은 구성의 DC링크 전압, 인버터, 전동기로 구성되는 외부회로를 구성하여 연동해석 시뮬레이션을 실시하였다.

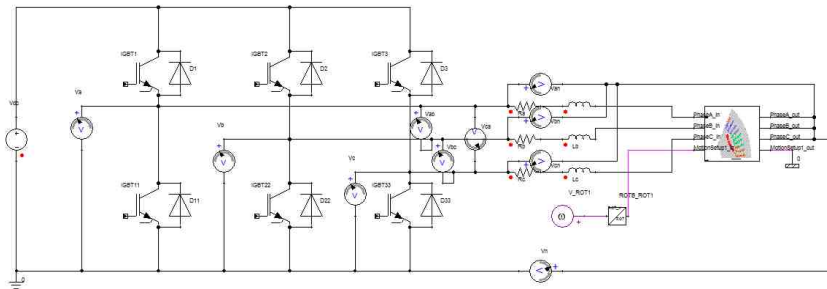


그림 3.3.28 연동해석을 위한 외부회로도

입력 상전류 220Apeak와 전류위상각 40deg 외에 여러 전동기 제어정수를 연동해석을 위해 구성된 외부회로에 입력하고 시뮬레이션을 실시한 결과, 다음과 같은 d축, q축 지령 전류를 따라 수렴하는 실제 전류를 확인할 수 있었다.

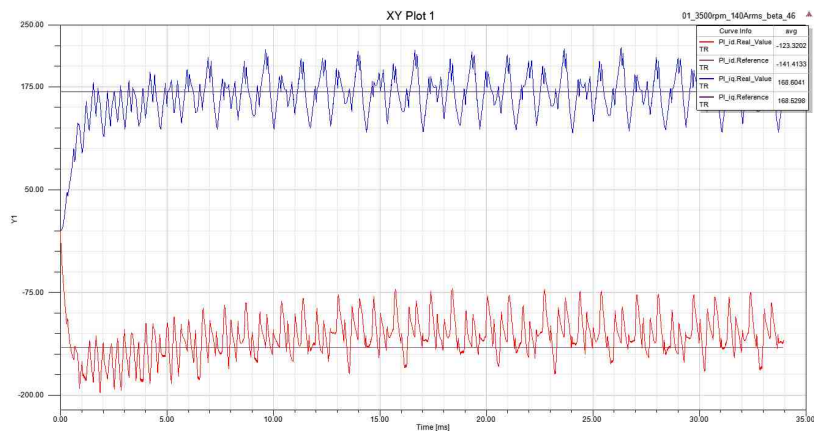


그림 3.3.29 d축, q축 지령 전류와 실제 전류(2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

나. 연동해석과 시험의 오차 확인

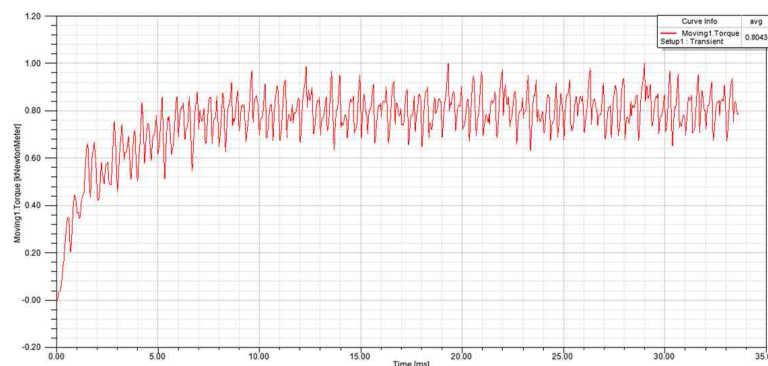


그림 3.3.30 연동해석 시 IPM 전동기의 토크 파형(2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

연동해석은 위 토크 파형에서 알 수 있듯이 과도상태를 거쳐 정상상태 값으로 수렴하는 것을 확인하기 위해 충분한 주기를 주고 해석을 실시하였다.

표 3.3.10 전류원 해석과 연동해석 결과 비교

구 분	전류원 해석	연동해석	단 위
속 도	2400	2400	rpm
공극 토크	861	804	Nm
상저항	0.039224	0.039224	Ω
상전류	220	220	Apeak
동 손	2.8	2.73	kW
철 손	2.2	2.36	kW
와전류손	0.2	1.72	kW
공극 출력	216	202	kW
효 율	97.6	96.67	%

유한요소법을 이용한 전류원 해석의 이상적인 입력조건과 달리 실제 성능시험 평가 조건과 좀 더 유사한 환경으로 해석이 가능한 연동해석의 해석값은 위 표와 같다. 전류원 해석값과 비교하여 6% 낮은 토크와 3% 낮은 효율이지만 10% 이내의 유사한 값을 가진다는 것을 확인할 수 있다.

표 3.3.11 연동해석 및 성능시험평가 결과 비교

구 분	연동해석	성능시험평가	단 위
속 도	2400	2400	rpm
토 크	804	847	Nm
출 력	202	212	kW
효 율	96.67	97	%

연동해석치와 시험치 비교 결과 목표했던 15% 이하의 오차율을 만족시켰다.

- 오차율 : 최대설계효율 => 0.33%
최대설계토크 => 5.08%

제4장 실용화를 고려한 설계 및 제작

제1절 전폐형 구조를 고려한 전자계 기반 IPMSM 설계

2차년도에 제작된 1차 시작기는 전폐형 구조를 고려하지 않고 최고 성능을 목표로 설계 하여 대부분 달성치를 만족하였다. 3차년도 설계에서는 실용화를 고려하여 전폐형 구조 전동기 제작에 설계 초점을 맞추었다. 3차년도에 제작된 2차 시작기의 설계는 제2장에 기재되어 있는 1차 시작기와 동일한 방식으로 진행 되었다. 3차년도 설계과정에서는 추가적으로 자석의 배치가 삼각형 모양을 이루는 Triangle 타입 영구자석 전동기를 설계 하고 1차 시작기와 비교를 통해 타당성을 검토 하였다.

1. 전동기 설계과정

가. 1차 시작기와 triangle 모델의 성능 비교

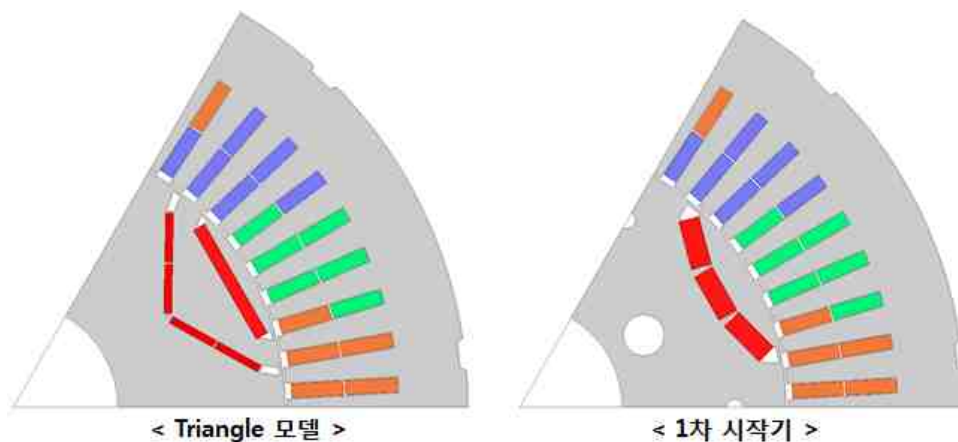


그림 4.1.1 1차 시작기와 triangle 모델

표 4.1.1 1차 시작기와 triangle 모델의 성능 비교

Model	속도 [rpm]	토크 [Nm]	리플율 [%]	총 손실 [W]	효율 [%]	전류밀도 [Arms]	전류 [Apeak]
Triangle 모델	2400	863.3	15.0	4976.1	97.7	5.27	220
1차 모델	2400	860.1	11.2	4596.0	97.9	5.27	220

트라이앵글 타입의 전동기는 표에서 보는 바와 같이 동일 입력에 대해 더 큰 토크를 발생 시키고 적은 토크리플로 동작 할 수 있지만, 회전자 요크에 충분한 공간이 없어 회전자의 공기순환로 확보에 어려움이 따른다. 또한 자석을 얇게 배치함으로써 발생하는 역자계에 의한 감자 위험이 있어 2차 시작기에도 1차 시작기에 사용된 U 타입 전동기를 채택하였다.

나. 3차년도 전동기 설계 포인트

(1) 전폐형 구조

(가) 회전자 공기순환로 확보

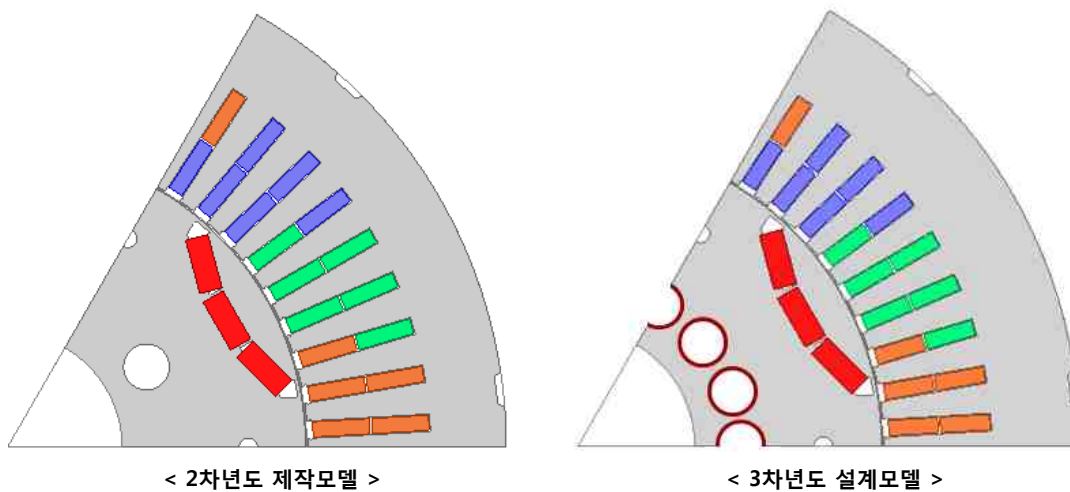


그림 4.1.2 2차년도 제작모델과 3차년도 제작모델

회전자에 원형 구멍을 뚫어 철심의 열 방출 면적을 늘리고 공기의 순환을 용이하게 하였다. 3000rpm에서 안전율 1.8이상을 유지하면서 출력토크에 영향을 최소화 하도록 설계 하였다. 고정자 요크에 순환로를 만들어 확인 해 보았으나 순환구멍이 클 경우 전동기 외경의 크기가 많이 증가하고 순환 구멍을 작게 할 경우 오히려 열의 순환을 방해할 수 있으므로 공기순환로는 회전자에만 적용하였다.

(나) 전류밀도 확보

- 고정자 권선 전류밀도 경감 : $5.7\text{Arms}/\text{mm}^2 \rightarrow 4.0\text{Arms}/\text{mm}^2$

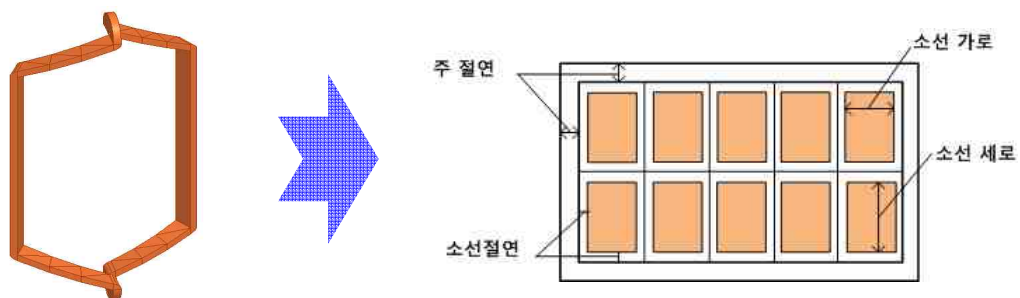


그림 4.1.3 형권 -각동선(좌) 및 소선 모양 및 절연(우)

표 4.1.2 시작기와 2차 제작모델 비교

	시작기	2차 제작모델
슬롯 면적[mm ²]	391.4	335.46
점적률[%]	33	58
순동면적[mm ²]	129.16	194.57

제작 기술력의 향상으로 한 슬롯에 동의 점적률을 33%에서 58%까지 상승시켰다. 전 폐형을 고려하여 열의 발생을 줄이기 위해 전류밀도를 낮추었다. 반폐형 구조로 설계된 1차 시작기의 외부와의 공기 순환을 차단하고 1시간 정격운전 하였을 경우 외부온도 20℃에서 최고온도가 약 140℃까지 상승하였다. 수학적 해석을 통해 약 270℃ 까지 상승할 것이라 판단하였다. 전동기에서 발생하는 손실 값이 열 발생량과 비례 할 것이라 판단하여 전류밀도 5.7Arms로 설계된 1차시작기에서 대비 전류밀도 1.7Arms 낮아진 4Arms로 설계 하였다. 그 결과 전동기의 최외각이 435mm에서 430mm로 감소하였다.

(다) 회전자 강성 해석

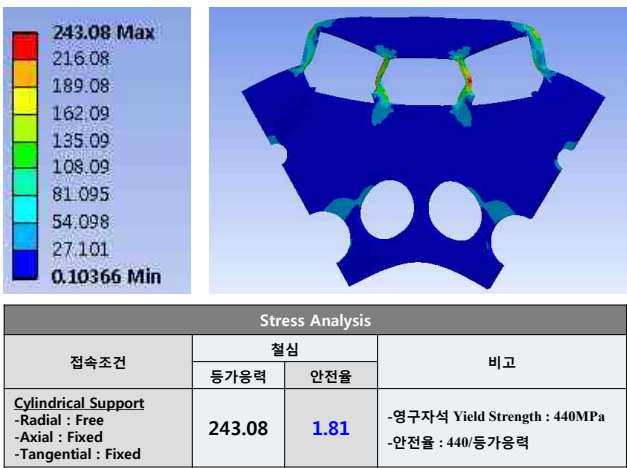


그림 4.1.4 강성해석 결과

강성해석은 1차 시작기 설계시와 동일하게 이루어졌다. 강성해석 프로그램을 사용하여 회전자의 순환구멍의 크기와 위치에 따라 안전율을 확인하였고 목표치 1.8이상을 만족하며 출력 성능이 최대가 되는 회전자를 설계하였다.

(라) 영구자석 감자 확인

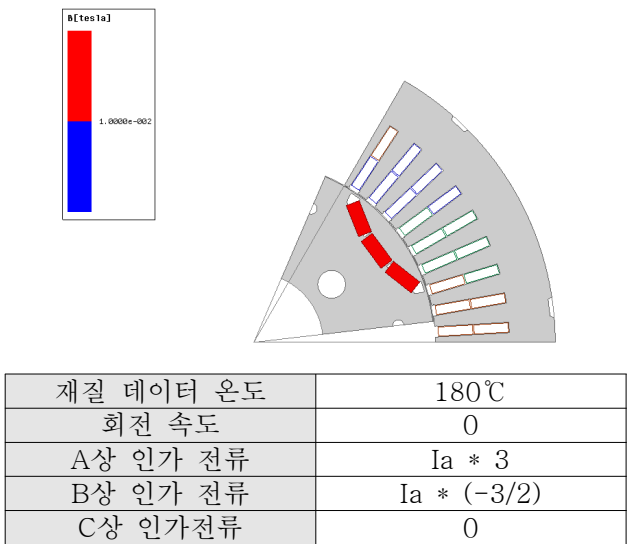


그림 4.1.5 영구자석 감자 확인 결과

유한요소 해석 프로그램을 이용하여 고온에서의 영구자석 감자에 대한 위험성을 판단하였다. 전동기가 포화온도에 도달했을 때 인버터의 고장으로 인해 최대 전류가 흘렀을 경우를 고려하여 자석의 자속밀도는 180℃에서의 자속밀도 값으로 설정하고 권선에는 정격전류의 3배 전류를 인가하여 확인하였다.

(마) 최종 설계모델

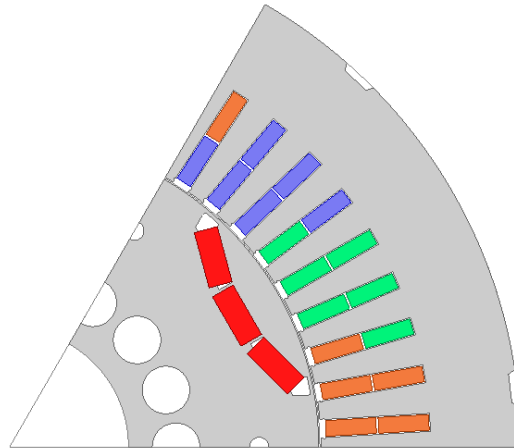
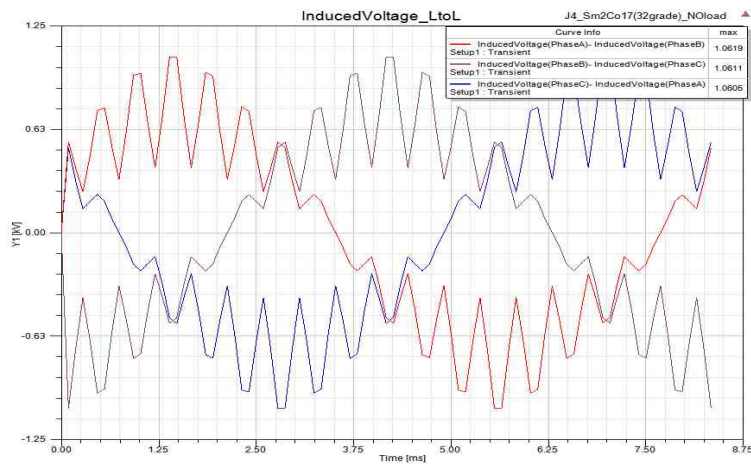


그림 4.1.6 최적설계 모델

3차년도 제작된 2차 시작기는 회전자에서는 순환구멍의 위치와 직경이 중요 설계 변수가 되어 강성을 만족하고 출력토크의 영향을 주지 않는 크기와 위치에 배치하였다. 고정자의 경우 외경의 길이, 슬롯의 폭, 슬롯의 길이를 조절 하여 전류밀도를 4Arms로 하는 최소 외경 길이를 택하였다.



Max Value : 1061.9[V]

그림 4.1.7 최적설계 모델의 무부하 역기전력 파형 (2400rpm)

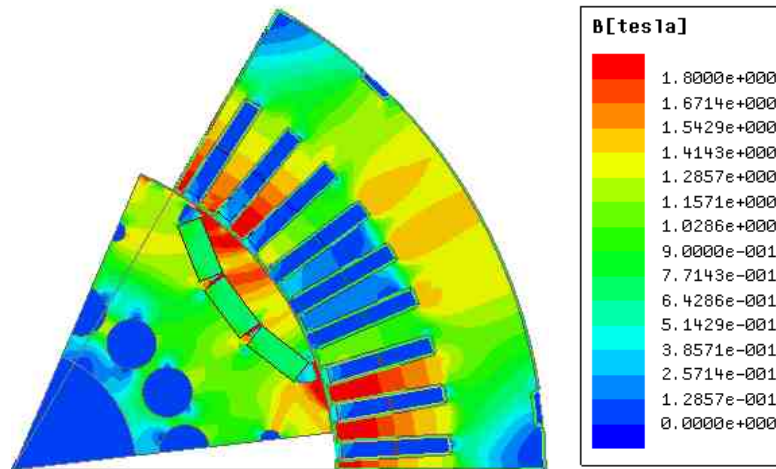


그림 4.1.8 최적설계 모델의 자속밀도분포도 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

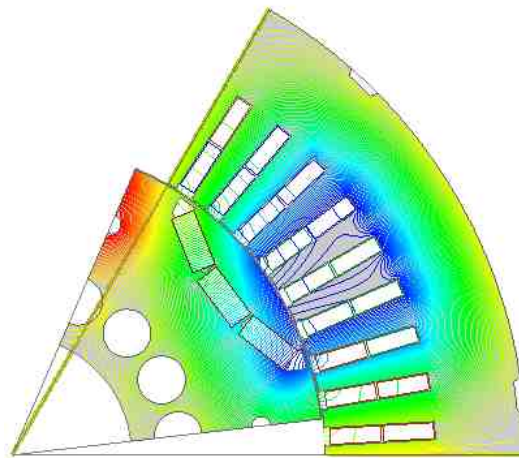
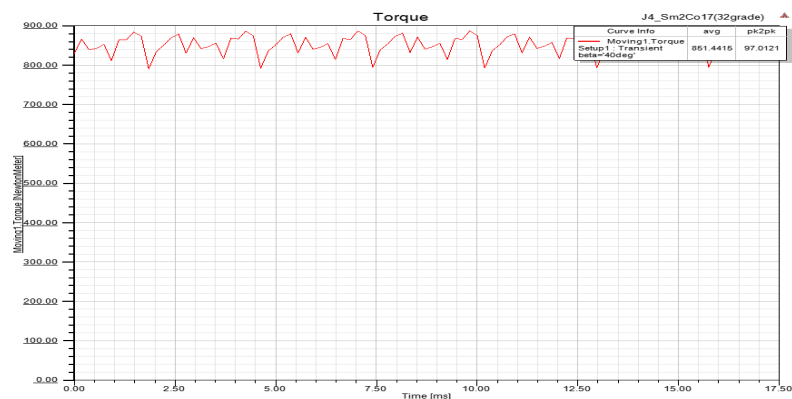


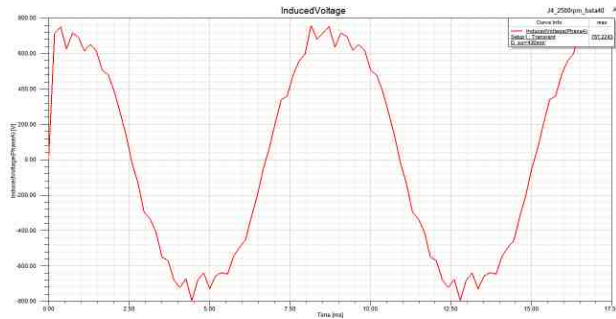
그림 4.1.9 최적설계 모델의 자속선도 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)



Max Value : 851.44[Nm]

pk2pk : 97.01[Nm]

그림 4.1.10 최적설계 모델의 토크 파형 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)



Max Value : 757.22[V]

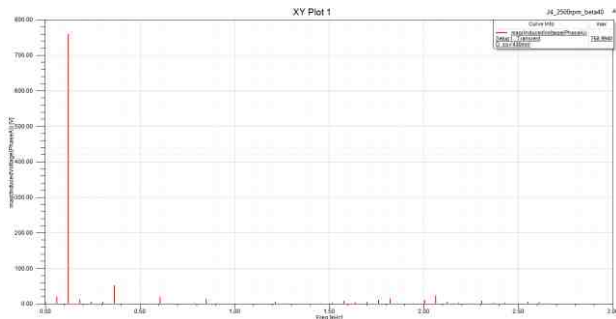
그림 4.1.11 최적설계 모델의 역기전력 파형 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

역기전력 제한치는 아래와 같다. DC 입력을 1500V를 받아 마진을 10%로 두었을 때 역기전력이 779V 이상의 값을 가지면 정상동작 할 수 없다.

$$DC_Link = 1500[V]$$

$$SVPWM = \frac{1500}{\sqrt{3}} \approx 866[V]$$

$$Control\ of\ safety\ factor\ 10\% \approx 779[V]$$



Max Value : 758.99[V]

그림 4.1.12 최적설계 모델의 역기전력 고조파분석 (2400rpm, $\beta=40\text{deg}$)

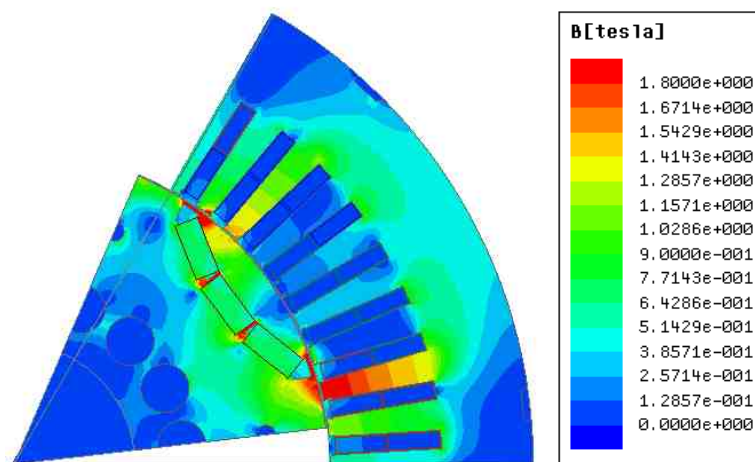


그림 4.1.13 최적설계 모델의 자속밀도분포도 (6000rpm, $\beta=76\text{deg}$)

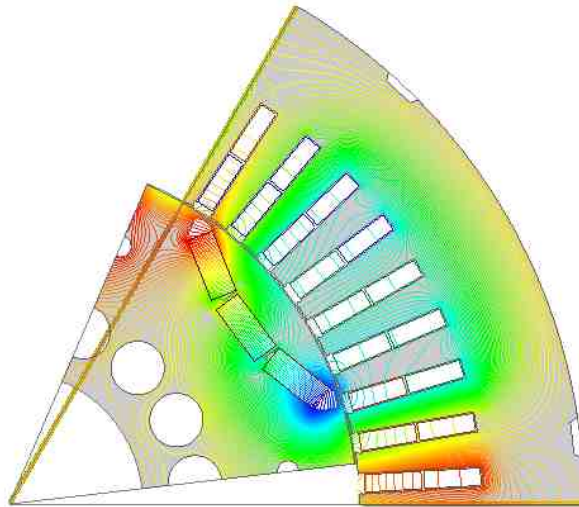
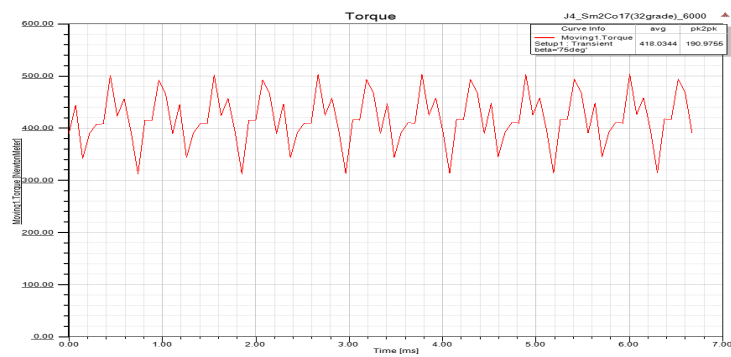


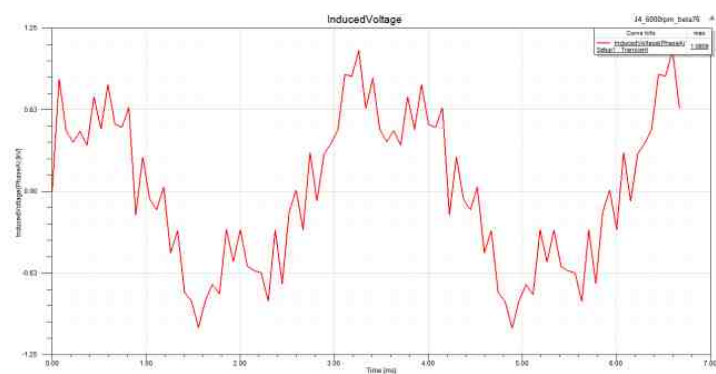
그림 4.1.14 최적설계 모델의 자속선도 (6000rpm, $\beta=76\text{deg}$)



Max Value : 418.03[Nm]

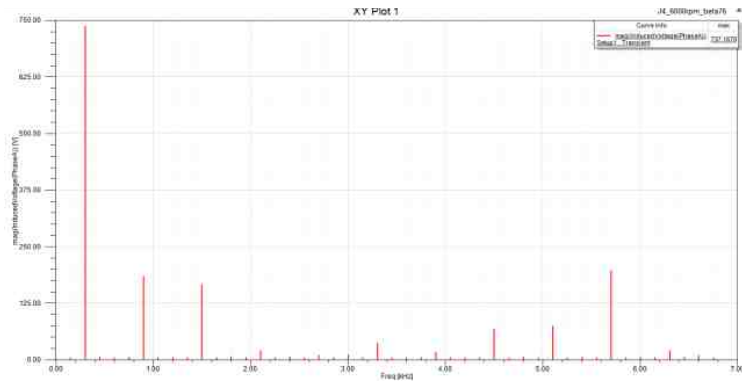
pk2pk : 190.98[Nm]

그림 4.1.15 최적설계 모델의 토크 파형 (6000rpm, $\beta=76\text{deg}$)



Max Value : 1080.9[V]

그림 4.1.16 최적설계 모델의 역기전력 파형 (6000rpm, $\beta=76\text{deg}$)



Max Value : 737.17[V]

그림 4.1.17 최적설계 모델의 역기전력 고조파분석 (6000rpm, $\beta=73\text{deg}$)

2. 연구수행 내용 및 결과

가. 최종 설계모델 및 1차 시작기 비교

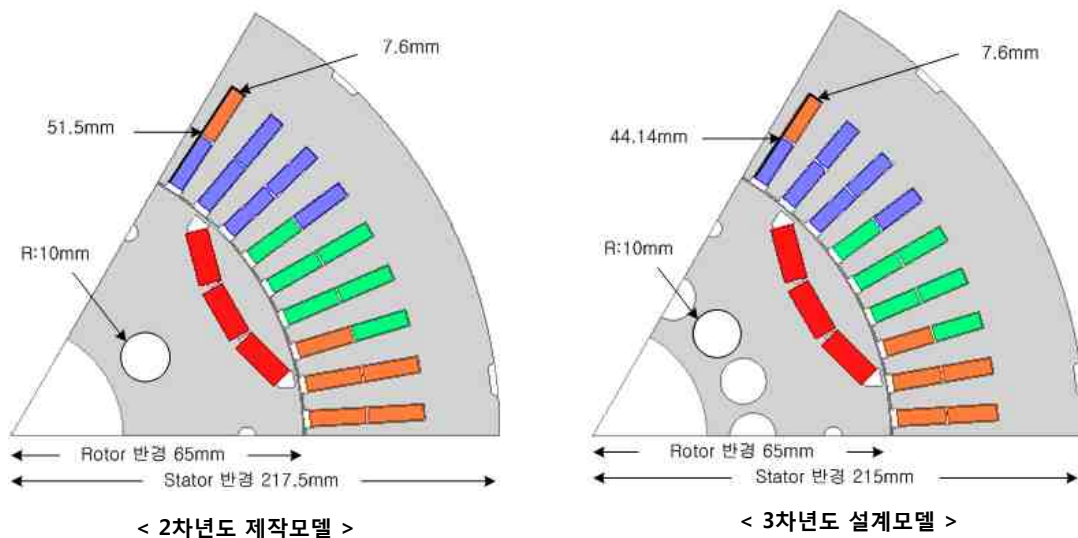
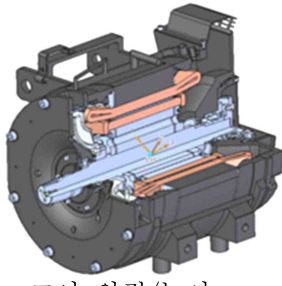
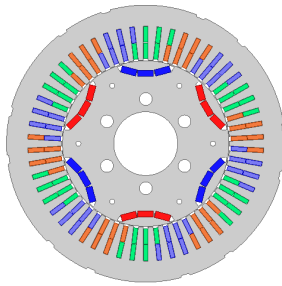
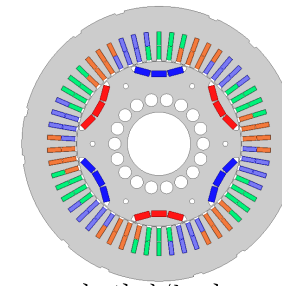


그림 4.1.18 2차년도 제작모델과 3차년도 설계모델

1차 시작기와 2차 시작기는 동일한 사이즈의 회전자를 갖는다. 여기에 공기순환로를 추가하여 전동기의 무게를 줄이고 열의 순환을 원활하게 하였다. 전류밀도를 낮추기 위해 고정자의 슬롯면적을 변형하였다. 각동선을 사용하기 때문에 직사각형 구조를 유지하였으나 점적률을 증가 시켜 슬롯의 길이는 줄이는 반면 전류밀도를 감소시켰다. 전동기의 직경또한 5mm 감소시켜 전동기 총 질량을 감소시켰다. 그 결과 출력밀도가 실차 적용 견인용 유도전동기 대비 50% 상승하였다.

표 4.1.3 유도전동기, 1차 시작기, 2차 시작기 비교

	유도전동기(7호선)	1차 시작기	2차 시작기
형상	 코어 외경/높이 = 515/220mm	 코어 외경/높이 = 435/220mm	 코어 외경/높이 = 430/220mm
용량	210kW	210kW	210kW
전기설계 부분 부피	4.58×107mm ³	3.27×107mm ³	3.19×107mm ³
전기설계 부분 중량	357kg	249kg	237kg
출력밀도	0.588kW/kg	0.869kW/kg	0.886kW/kg
유도기 대비 향상율	-	47.7%	50.7%

출력을 거의 동등하게 유지하는 반면 공기순환로 확보와 전동기 외경 축소 설계로 전동기 중량을 249kg에서 237kg으로 줄였다. 그 결과 7호선에 사용되는 유도기 대비 출력밀도를 50.7% 향상 시켰다.(이때 출력밀도 산정은 전동기 출력을 중량으로 나누어 구한다.)

나. 1차 시작기 vs 2차 시작기 비교

표 4.1.4 설계모델 스펙 비교

	1차 시작기	2차 시작기	Unit
상저항	39.224	36.232	mΩ
고정자 직경	435	430	mm
회전자 직경	260	260	mm
적층 길이	220	220	mm

표 4.1.5 설계 모델 성능 비교

	속도 [RPM]	토크 [Nm]	공극 출력 [kW]	토크 리플율 [%]	전류밀도 [Arms/ mm ²]	철손 [W]	자석손 [W]	동손 [W]	출력밀도 [kW/kg]	모터 효율 [%]	증가 율 [%]
1차 시작기	2400	860.8	216.3	11.7	5.27	1903	46	2848	0.879	97.81	47.7
2차 시작기	2400	850.6	213.8	11.4	4.00	1741	57	2635	0.886	97.95	50.5 9

제2절 전폐형 전동기 외함 설계

1. 전동기 외함 형식 선정

- 가. 차량용 견인전동기는 제한된 좁은 공간에 설치하여야 하므로 냉각성능이 우수한 개방형 통풍냉각방식을 채용하여 소형·경량화시킨다.
- 나. 영구자석 회전자형 동기전동기는 개방형 통풍냉각방식으로 하면 냉각풍에 포함된 쇳가루나 쇳조각이 회전자의 자력에 의하여 회전자에 달라붙어 회전자와 고정자가 접촉되는 사고가 발생할 우려가 있다.
- 다. 따라서 영구자석 동기전동기는 먼지가 들어갈 수 없도록 전폐형으로 하여야 한다.
- 라. 전폐형 전동기는 내부에 먼지가 쌓이지 않으므로 정기적으로 분해·청소할 필요가 없어 유지보수에 유리하다.

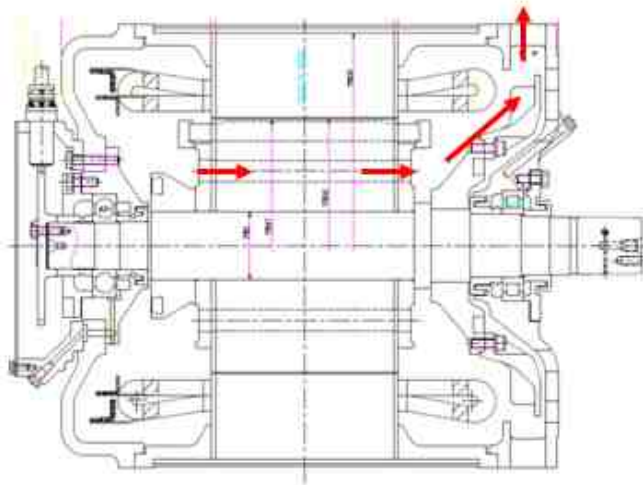
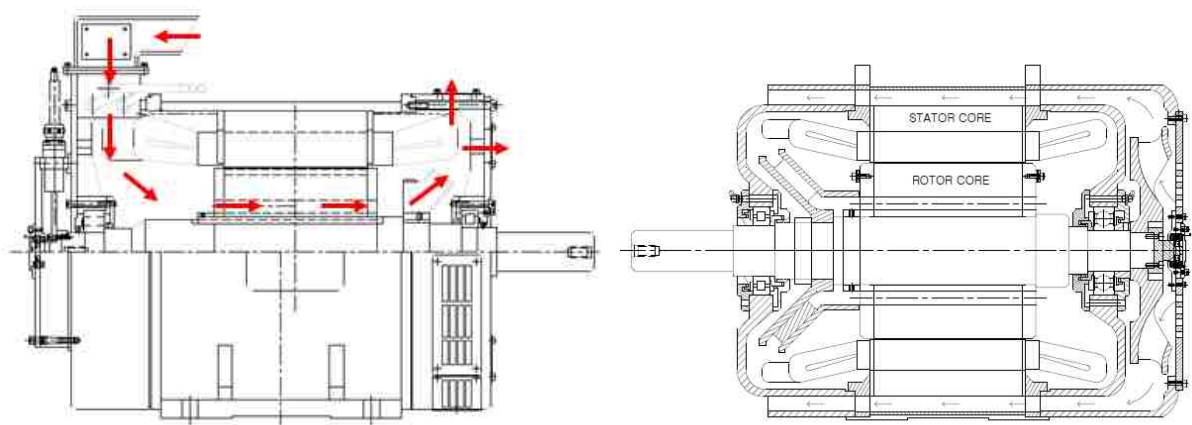


그림 4.2.1 기존의 유도 전동기 구조



< 1차 시작기, 개방형 >

< 2차 시작기, 전폐형 >

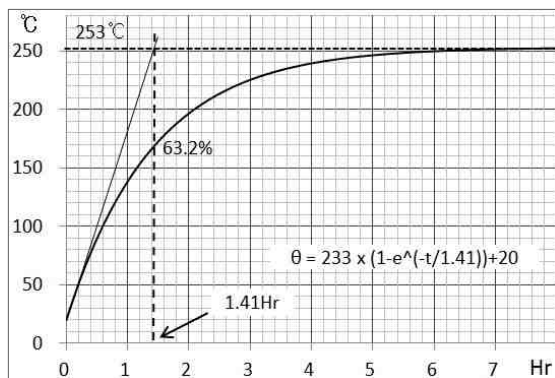
그림 4.2.2 1차 시작기와 2차 시작기의 구조 비교

2. 냉각팬 없는 전폐형 검토

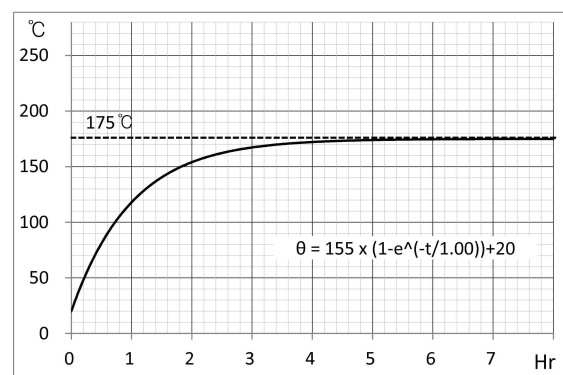
- 가. 개방형은 냉각효과가 충분하여 온도상승을 우려할 필요가 없었지만 전폐형은 온도 상승을 검토해 보아야 한다. 따라서 발열량과 냉각능력의 변화를 검토하여야 한다.
- 나. 기존 유도전동기는 효율이 94.8%이고 IPMSM 시작품의 효율은 98.3%이므로 손실은 11.5kW에서 3.6kW로 감소한다. 손실이 시간당의 발열량이므로 IPMSM은 유도전동기 대비 시간당의 발열량이 1/3로 감소한다.
- 다. 냉각팬 없는 전폐형으로 제작하였을 때 온도상승치가 얼마나 될지를 추정하기 위하여 제1차 시작기의 모든 통풍구를 폐쇄하고 온도상승 시험을 실시한 결과 주위온도 20℃에서 1시간 동안의 온도상승은 160K, 온도포화 시의 온도상승은 230K가 되었다.

3. 냉각 구조 개선

- 가. IPMSM을 통풍팬이 없이 시험한 결과로는 1시간 동안에 160K 만큼이나 온도가 상승하였으므로 제2차 시작기는 통풍 팬을 부착하여 냉각하기로 하였다.
- 나. 내선(內扇)에 의해 기기 내 공기를 순환시킴과 동시에 외선(外扇)에 의해 기기 밖의 공기를 전동기 주위에 설치한 통풍로로 통과시켜 냉각효과가 높아지도록 한다.
- 다. 또한 내외부 기류의 방향이 서로 반대가 되도록 함으로서 내외부 공기가 맞닿은 격벽을 따라 내외부 기류의 온도구배 방향이 동일하게 되어 냉각효율이 높아지도록 하였다.



< 1차 시작기 >



< 2차 시작기 >

그림 4.2.3 1차 시작기와 2차 시작기의 온도 상승 곡선

4. 세부 개선 사항

가. 브라켓트 구조 개선

부하측 및 반부하측 브라켓트에 외부 공기 통로를 추가하였다.

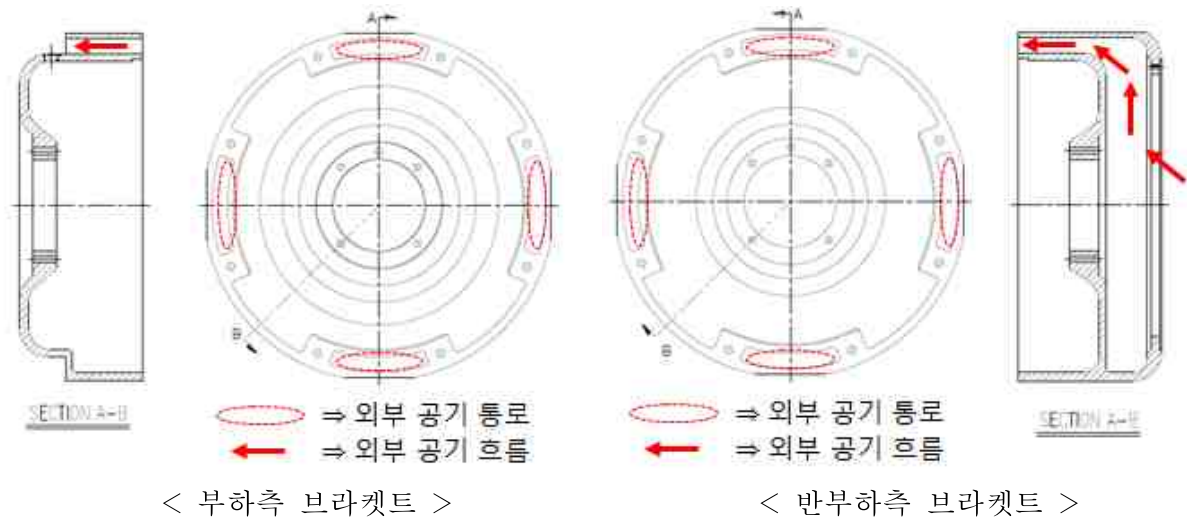


그림 4.2.4 2차 시작기 부하측 및 반부하측 브라켓트 구조

나. 프레임 ASS'Y 구조 개선

고정자 CORE의 외측에 외부 공기 통로(적색 점선)와 내부 공기 통로(청색 점선)를 갖는 구조이다.

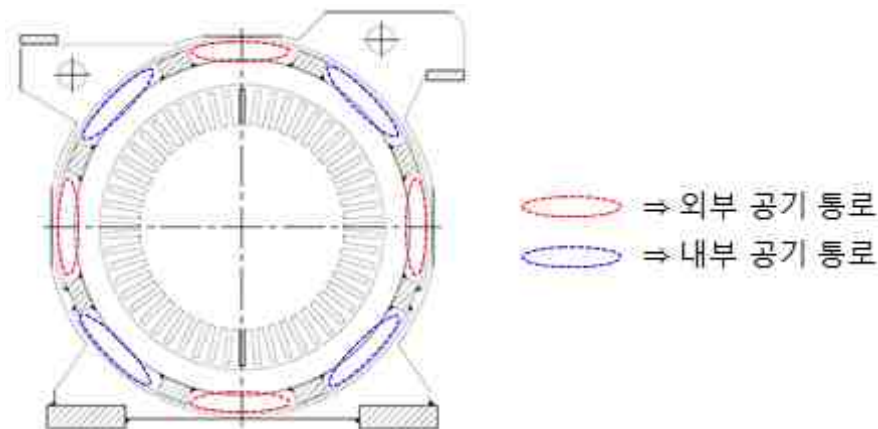


그림 4.2.5 2차 시작기 프레임 ASS'Y 구조

다. 외부 및 내부 공기 흐름

(1) 외부 공기 흐름

반부하측의 외부 팬을 통하여 유입된 공기는 반부하측 브라켓트의 외부 공기 통로를 통하여 프레임 ASS'Y의 외부 공기 통로를 통하면서 고정자 외피를 냉각시킨 후 부하측 브라켓트의 공기 통로를 통하여 외부로 배출된다.

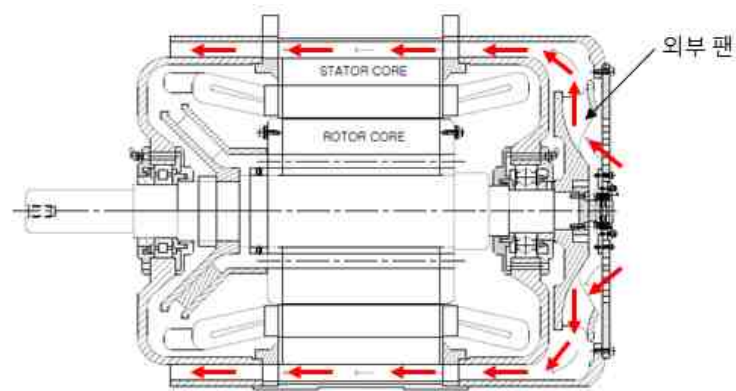


그림 4.2.6 외부 공기 흐름도

(2) 내부 공기 흐름

모터 내부 팬에 의하여 회전자 모터 내부의 공기는 고정자의 외피 부분을 통하면서 열을 방출하고, 다시 모터 내부와 회전기 내부를 통하면서 내부의 공기를 순환시키는 구조이다.

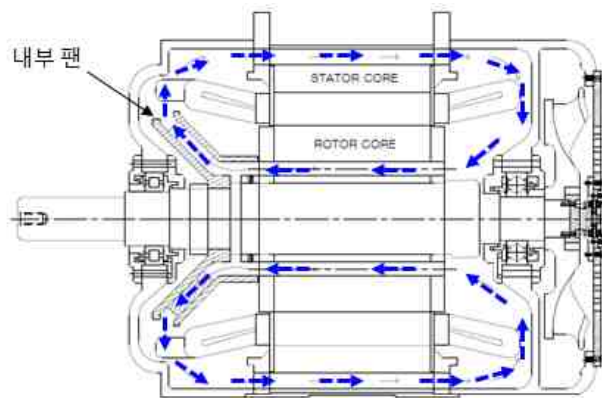


그림 4.2.7 내부 공기 흐름도

5. 전동기 외함 구조

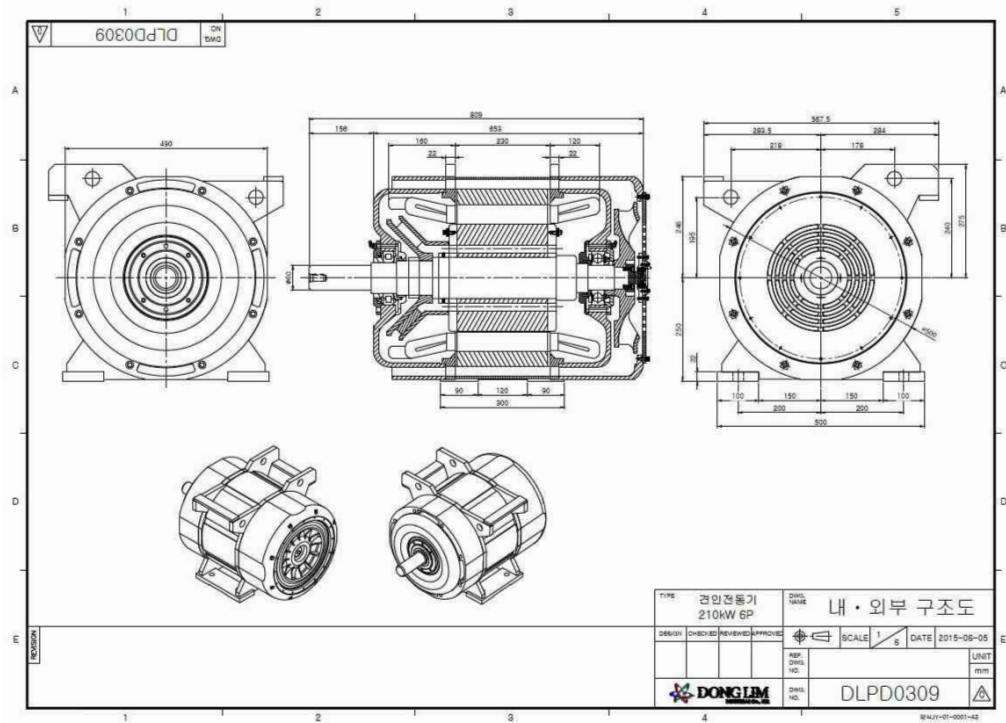


그림 4.2.8 전폐형 외함 구조도

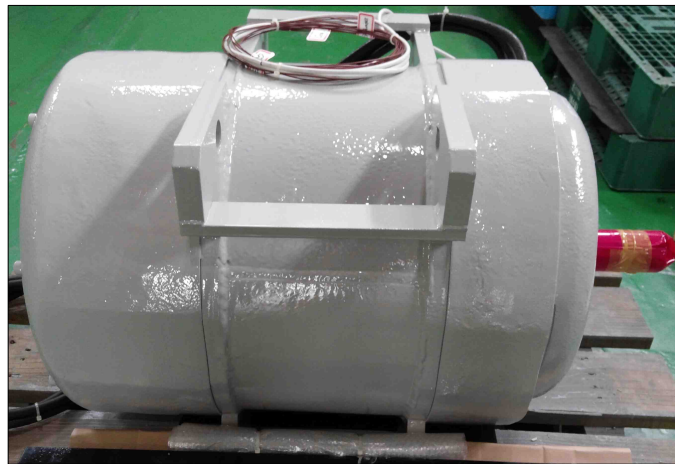


그림 4.2.9 전폐형 외함 (2차 시작기 완제품)

제3절 실차 적용을 고려한 전력변환기 설계

1. IPMSM 구동을 위한 차량용 추진 제어장치 설계

도시철도 차량에 탑재 될 추진 제어장치의 크기를 고려하여 전력변환기를 구성하고 있는 부품들을 배치, 설계하였다.

가. 추진 제어장치 외형도

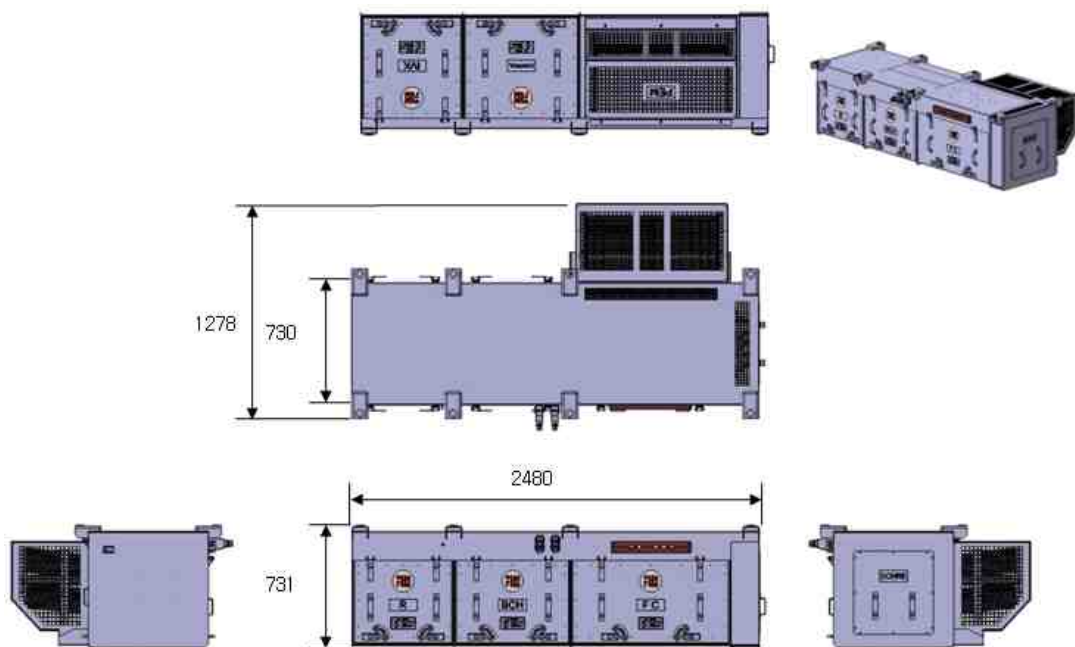


그림 4.3.1 추진 제어장치 크기 및 형상

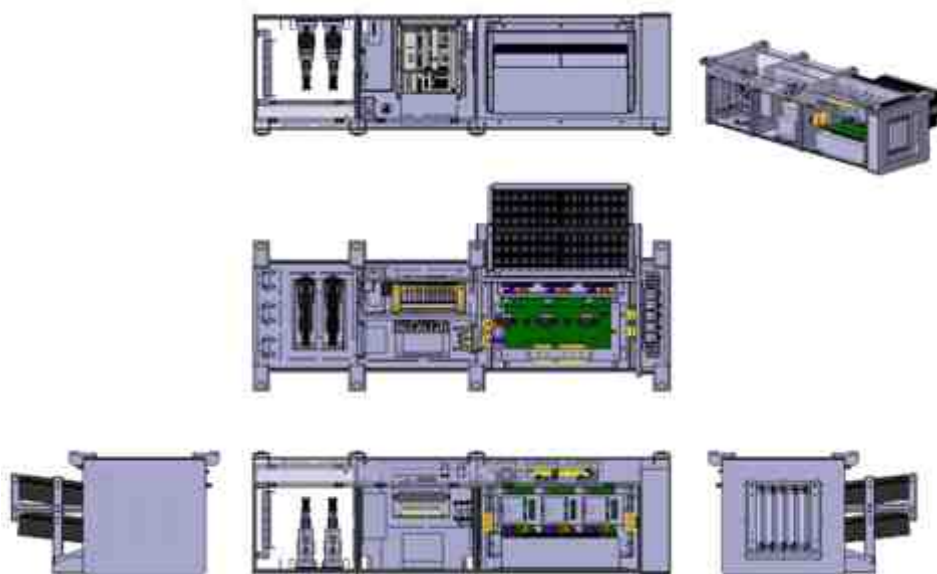


그림 4.3.2 추진 제어장치 내부 형상

- 크기 : 2480×1278×731mm (가로×폭×높이)
- 무게 : 약 750kg

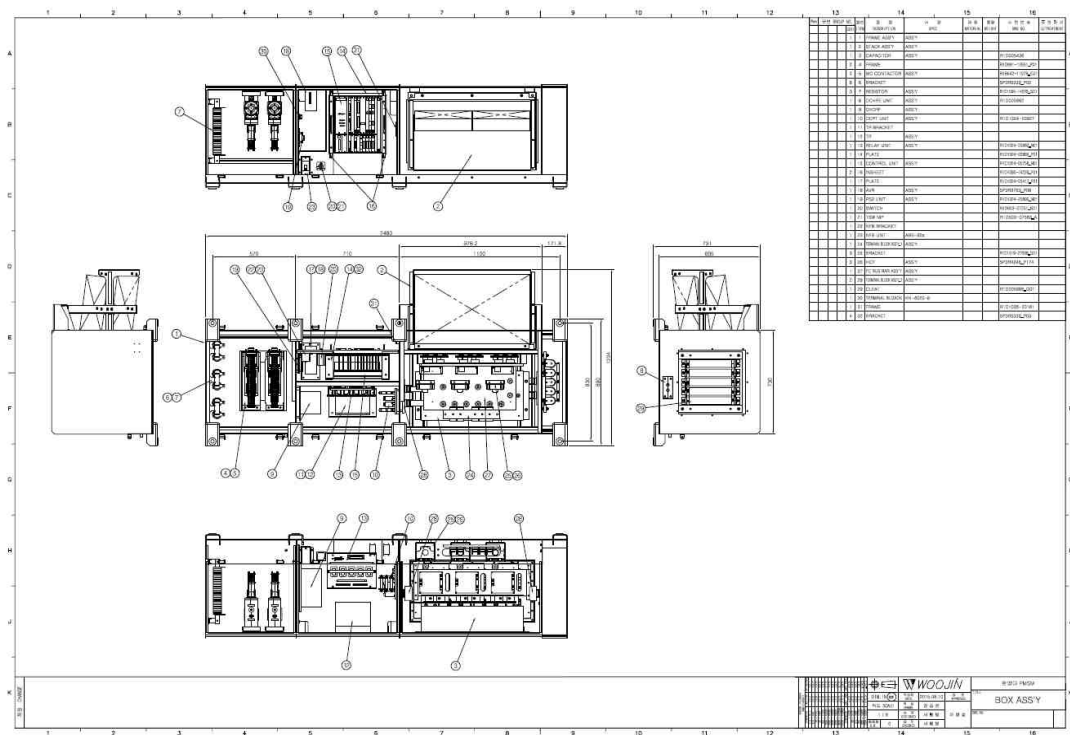


그림4.3.3 IPMSM 전동기용 추진 제어장치 BOX ASS'Y

나. 추진 제어장치 회로도

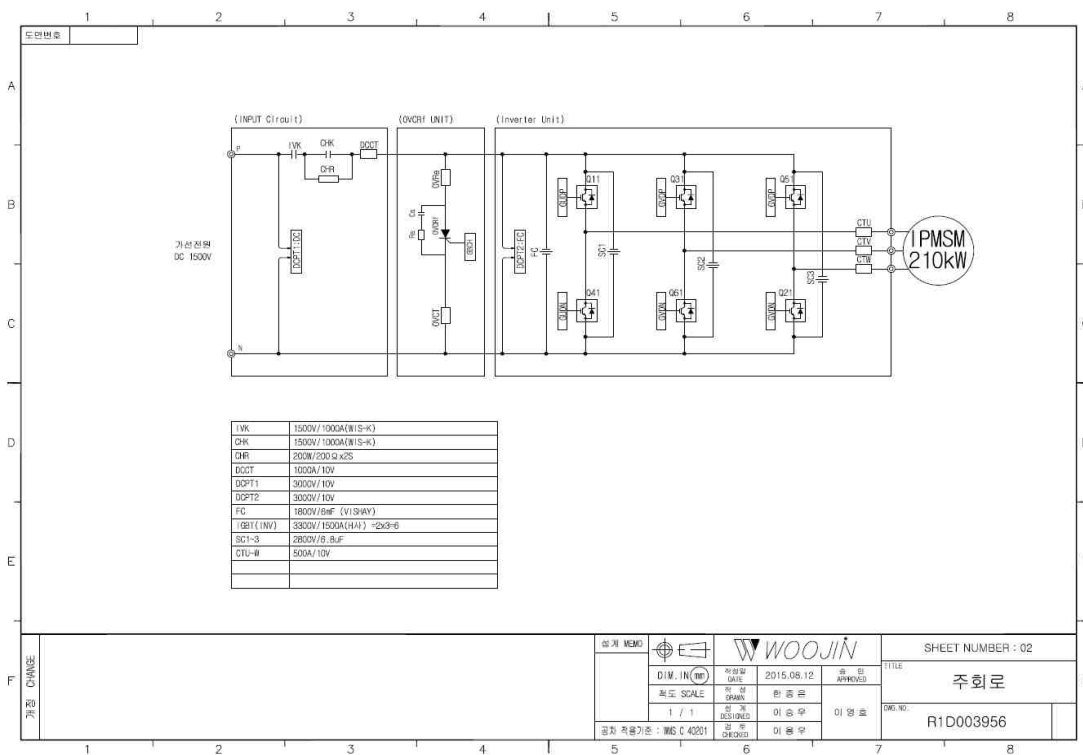


그림 4.3.4 IPMSM 전동기용 추진 제어장치 주회로

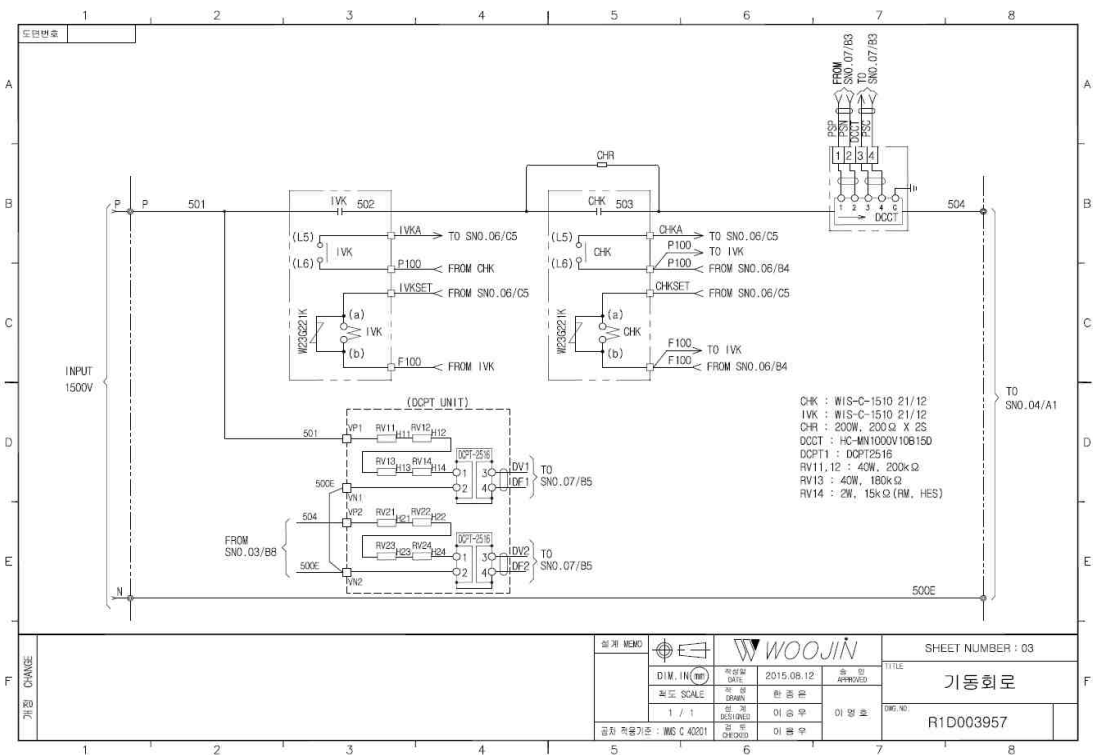


그림 4.3.5 IPMSM 전동기용 추진 제어장치 기동회로

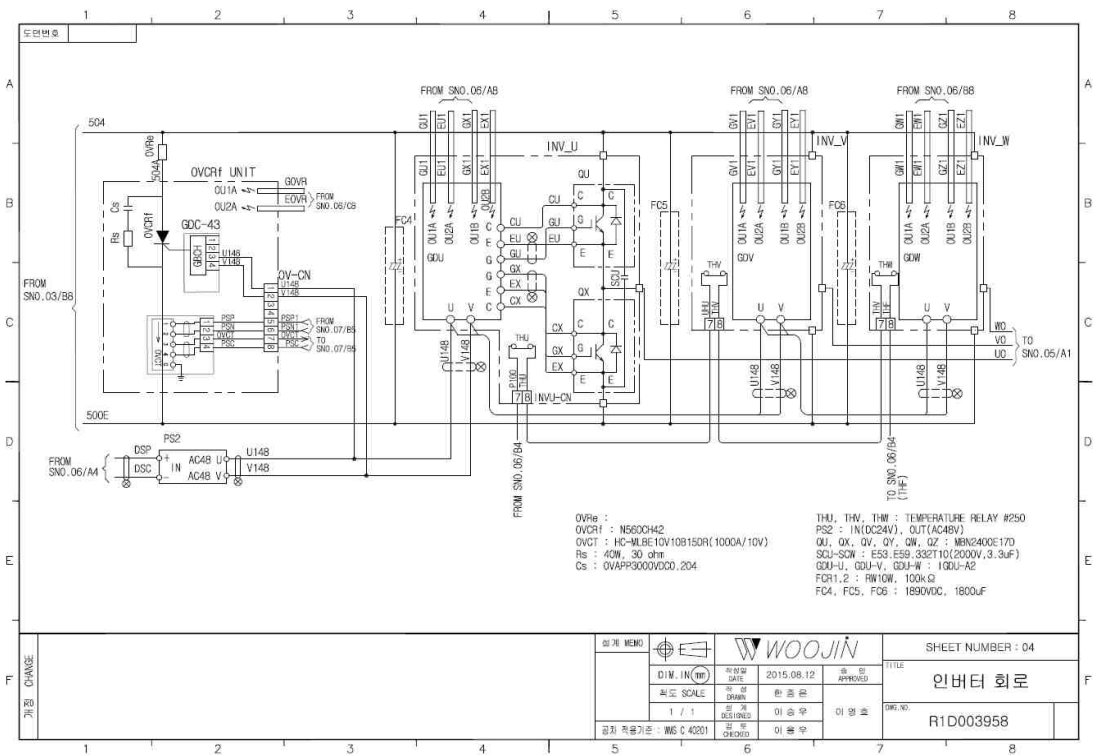


그림 4.3.6 IPMSM 전동기용 추진 제어장치 인버터회로

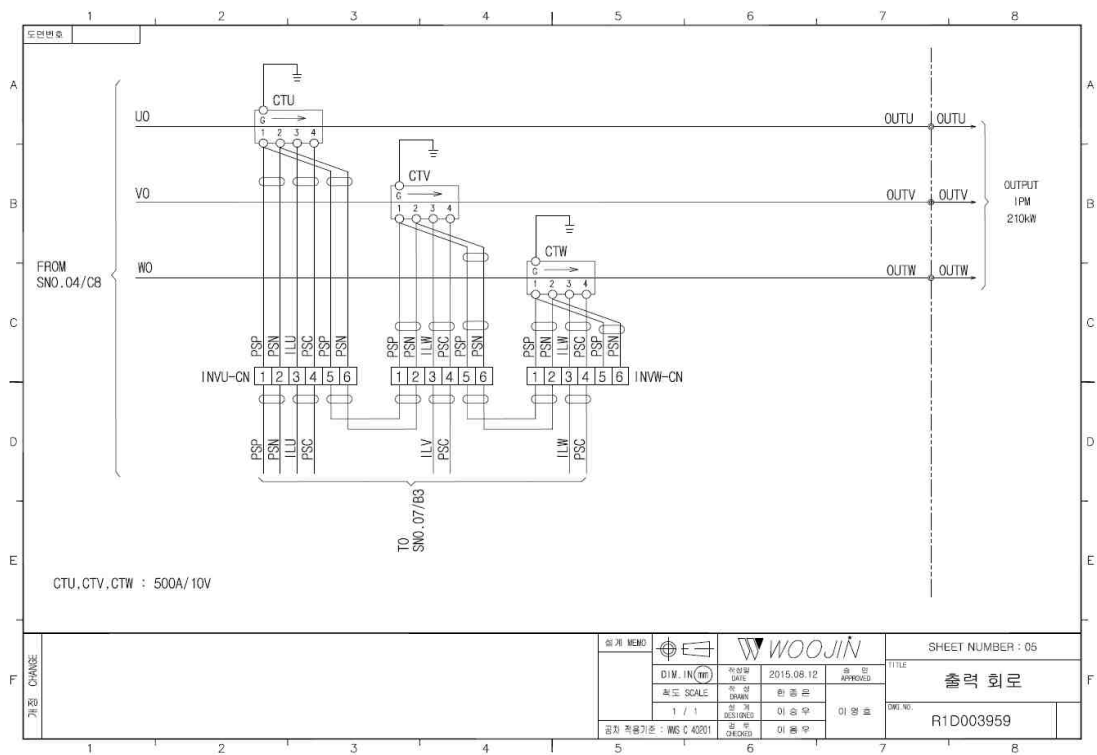


그림 4.3.7 IPMSM 전동기용 추진 제어장치 출력회로 -

2. 회전자 제작

회전자 제작 또한 1차 IPMSM 시작기와 다르지 않다. 내부 순환로 확보를 위해 샤프트와 영구자석 사이의 공간에 내부 순환로를 확보하였다. 축에 대한 세부공정 또한 1차 제작과정과 같기 때문에 이는 생략하도록 한다. 아래 그림은 완성된 회전자 모습과 도면을 나타낸다.



그림 5.1.3 완성된 2차 회전자

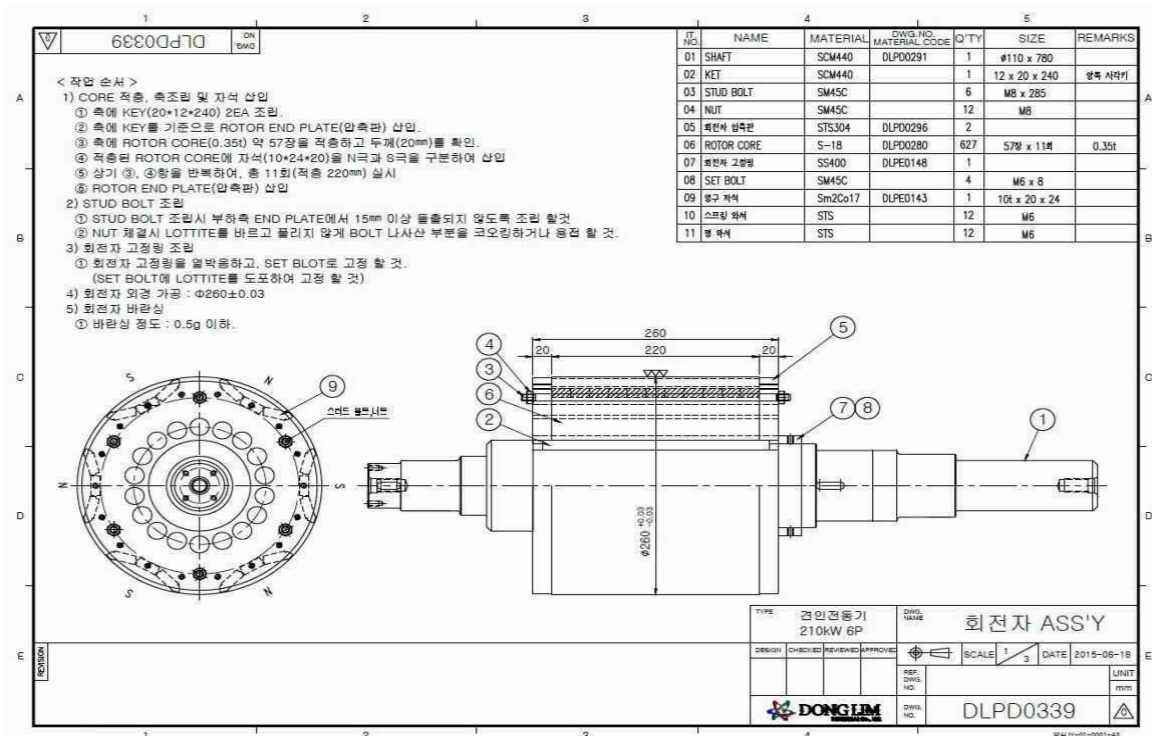


그림 5.1.4 2차 회전자 도면

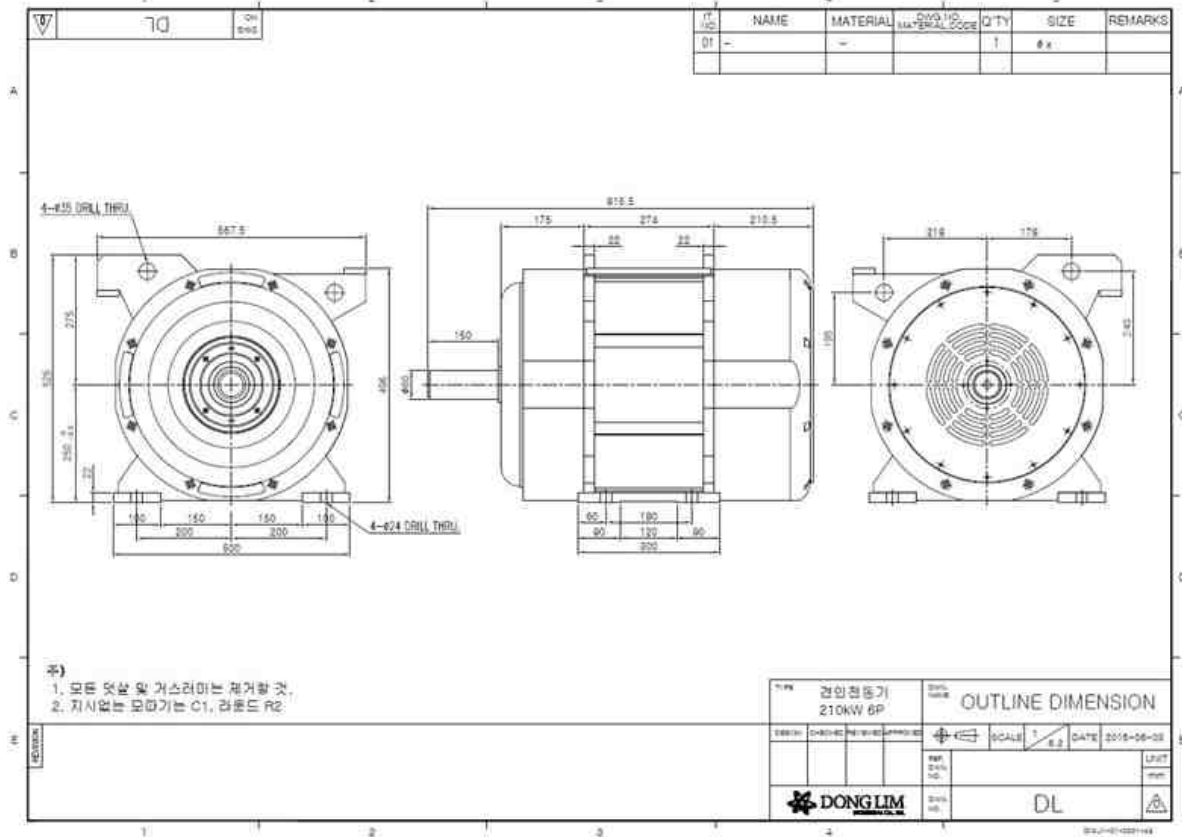


그림 5.1.5 외형도 도면

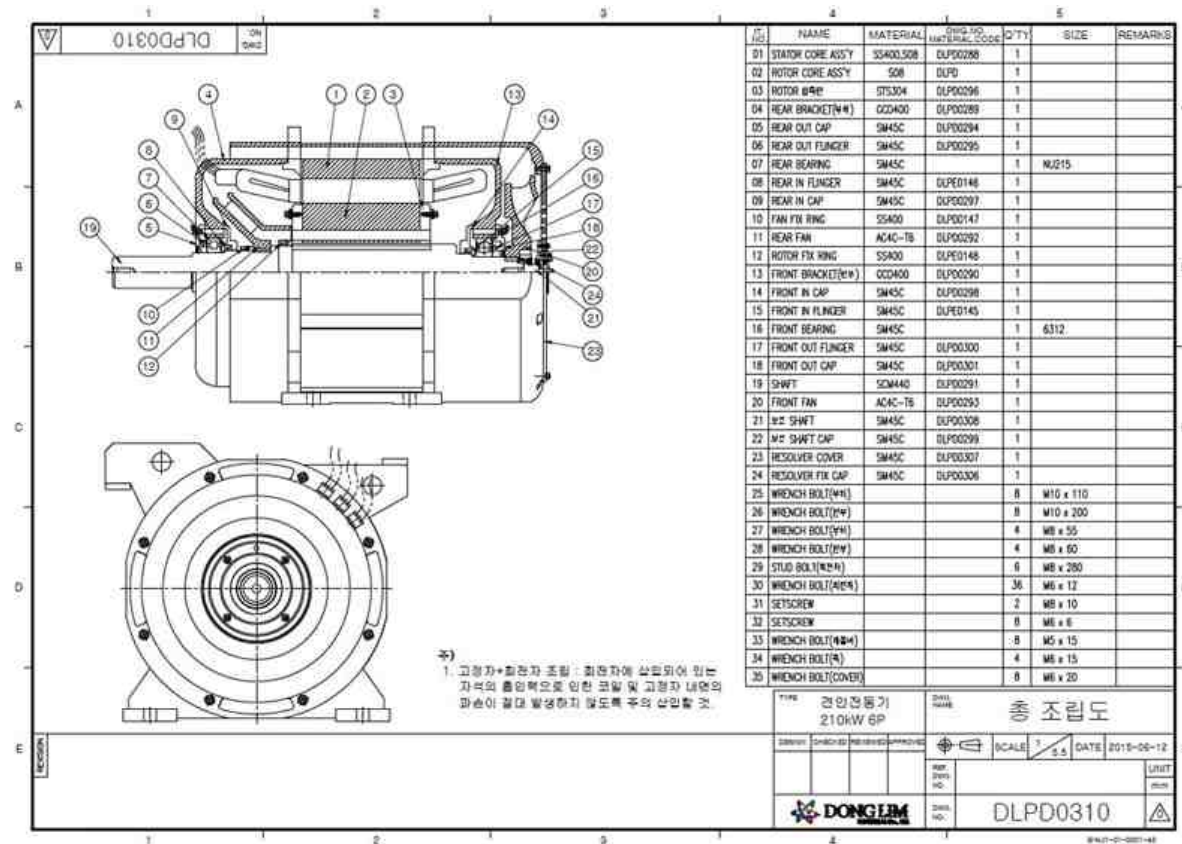


그림 5.1.6 조립도 도면

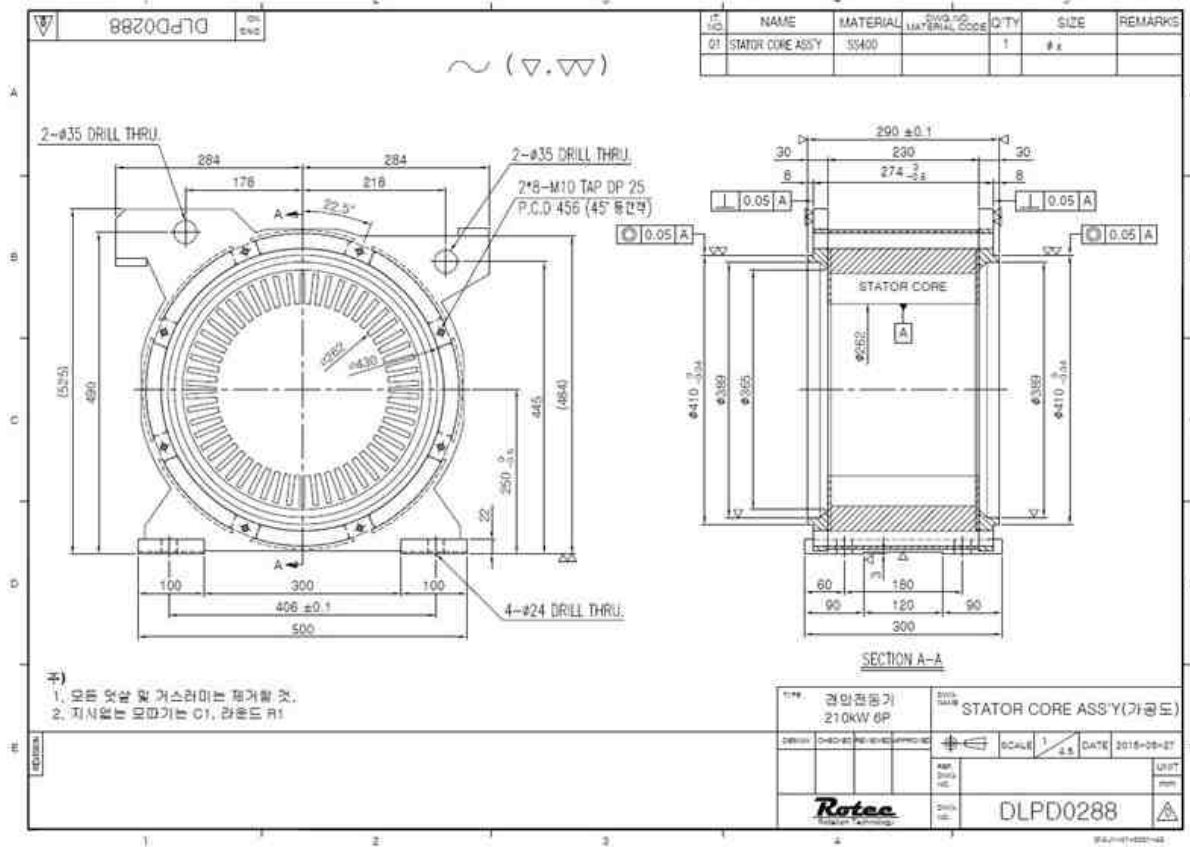


그림 5.1.7 고정자 도면

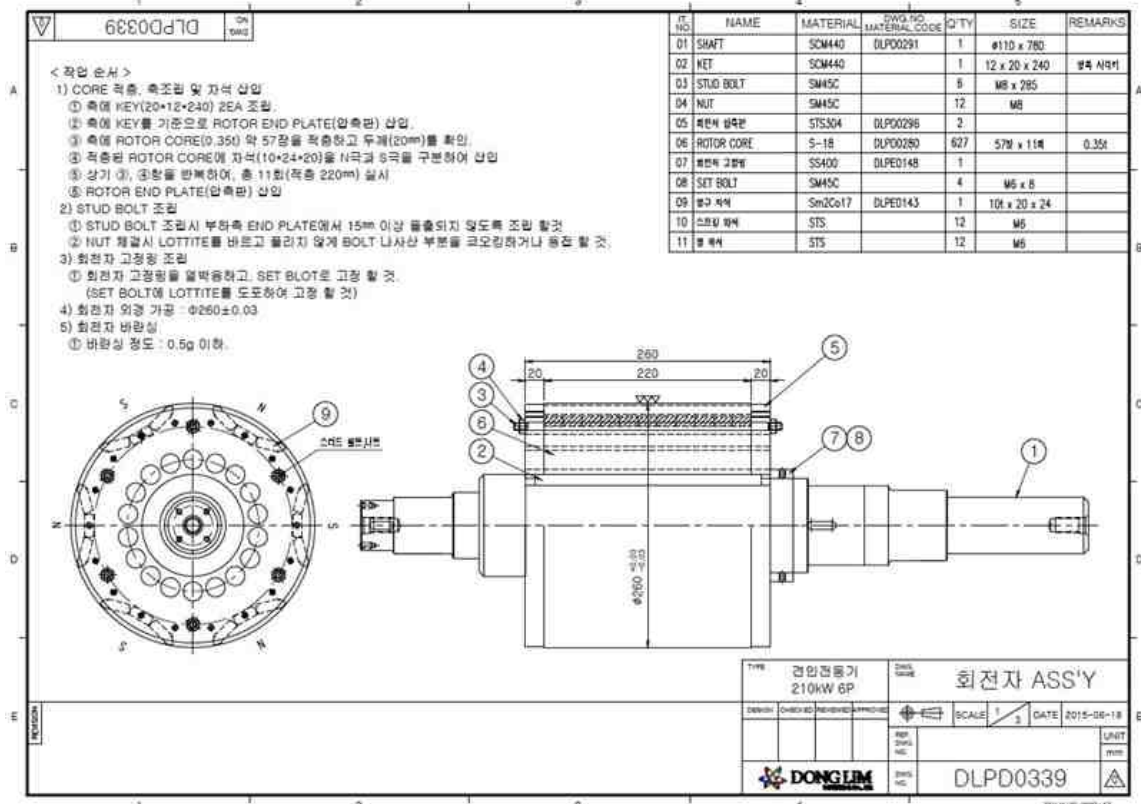


그림 5.1.8 회전자 도면

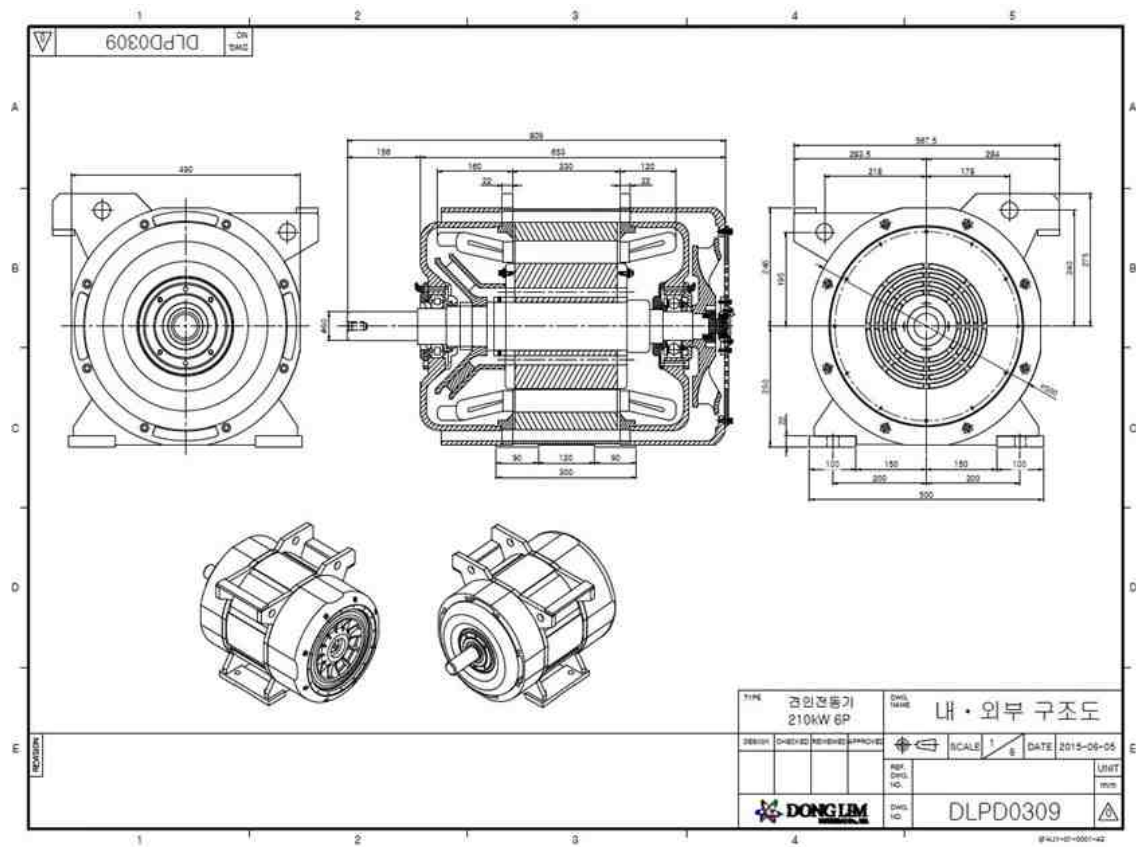


그림 5.1.9 구조도 도면

제2절 2차 전력변환기 제작

1. 실차 적용을 고려한 IPMSM 전동기용 전력변환기 제작



그림 5.2.1 IPMSM 전동기용 전력변환장치

2. 추진 제어장치 사양

표 5.2.1 추진 제어장치 사양

항 목		사 양
제어 방식		VVVF
전압 제어		PWM 제어
냉각 방식		FAN을 이용한 공기 냉각
정격 용량		210 [KVA]
상대 습도		30~90[%] (단, 결로가 없을 것)
입력	입력 전원	DC 1500V
출력	출력 전압	3상, 1100V
전압 검출기		DC 1,500V/5V
Power Unit		IGBT Module : 3300V, 1500A x 3군
스누버 캐패시터		2000V, 200uF- 3군
전원 Unit		Gate전원 : AC 48V Gate 전원용 DC 전원 : DC 24V

3. 추진 제어장치 성능시험 결과

가. IGBT 게이트 특성 시험

Gate ON시 전압($+15V \pm 2.2V$), Gate OFF시 전압($-15V \pm 2.2V$), Dead Time($12\mu s \pm 2\mu s$)을 오실로스코프로 측정하여 확인하고 정상 동작 여부를 판단한다.

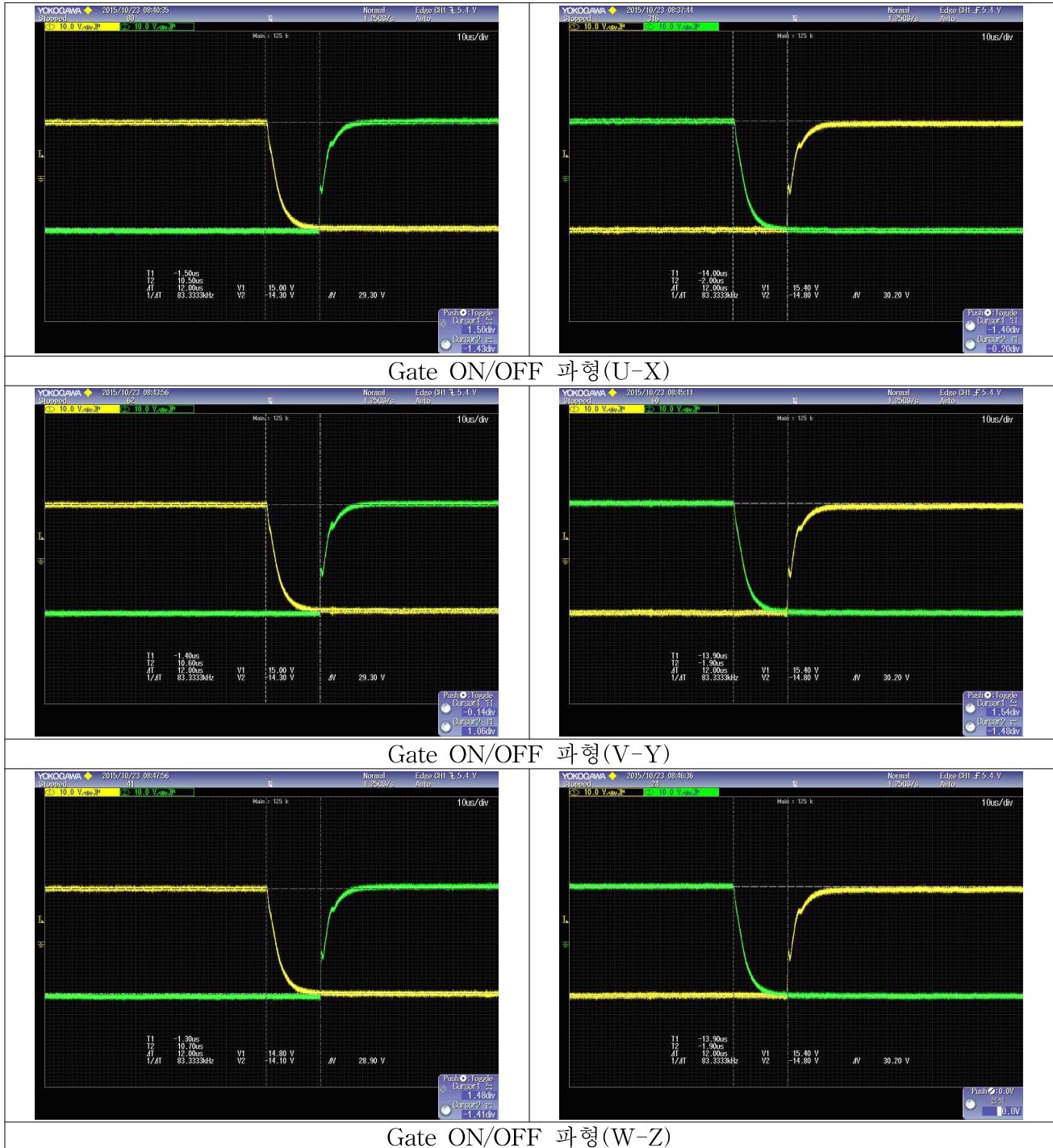


그림 5.2.2 IGBT 게이트 전원 출력 특성 시험



그림 5.2.3 IGBT 게이트 출력 파형 확인(U,V,W)

나. 경부하 시험

VVVF 인버터에 정격 전압을 인가하고 R-L 부하를 연결하여 3상 전류치를 측정하고 출력 전류가 평형을 유지하는지 확인한다.

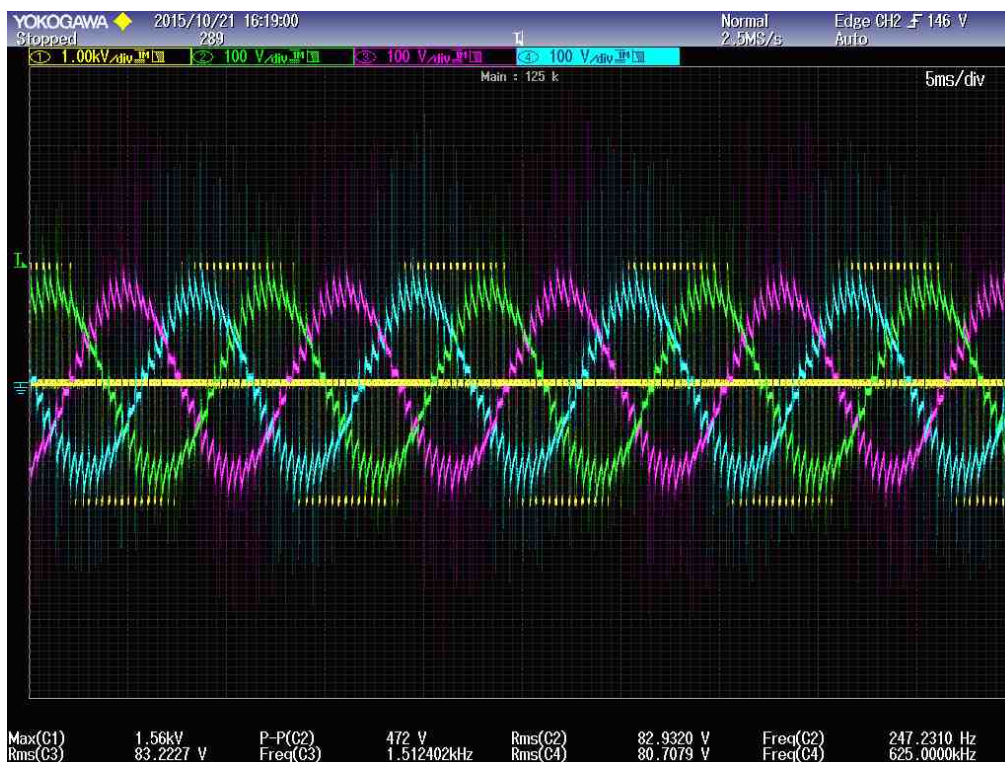


그림 5.2.4 인버터 출력부 부하 전류

4. 2차 IPMSM 적용 실험 결과

가. 상전류 $220A_{peak}$ 제어 파형(@2400rpm:정격속도) : 오실로스코프 측정

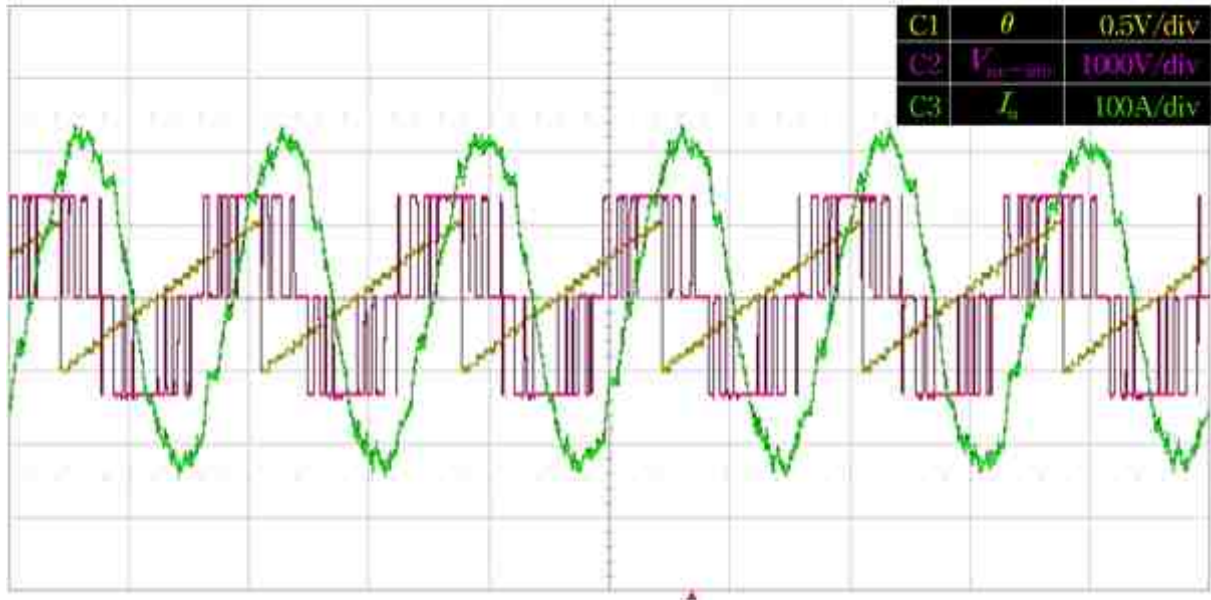


그림 5.2.2 상전류 $220A_{peak}$ 제어 파형(@2400rpm:정격속도)

위의 파형은 상전류 $220A_{peak}$, $\beta = 40^\circ$ ($i_{ds}^* = -141.4A$, $i_{qs}^* = 168.5A$) 조건에서의 전류제어 파형이다. C3(u상 전류) 파형에서 볼 수 있듯이, 정격속도 2400rpm에서 상전류의 크기가 정격전류 $220A$ 로 제어되는 것을 확인 할 수 있다.

나. 상전류 $220A_{peak}$ 제어 파형(@2400rpm:정격속도) : 레코더 측정

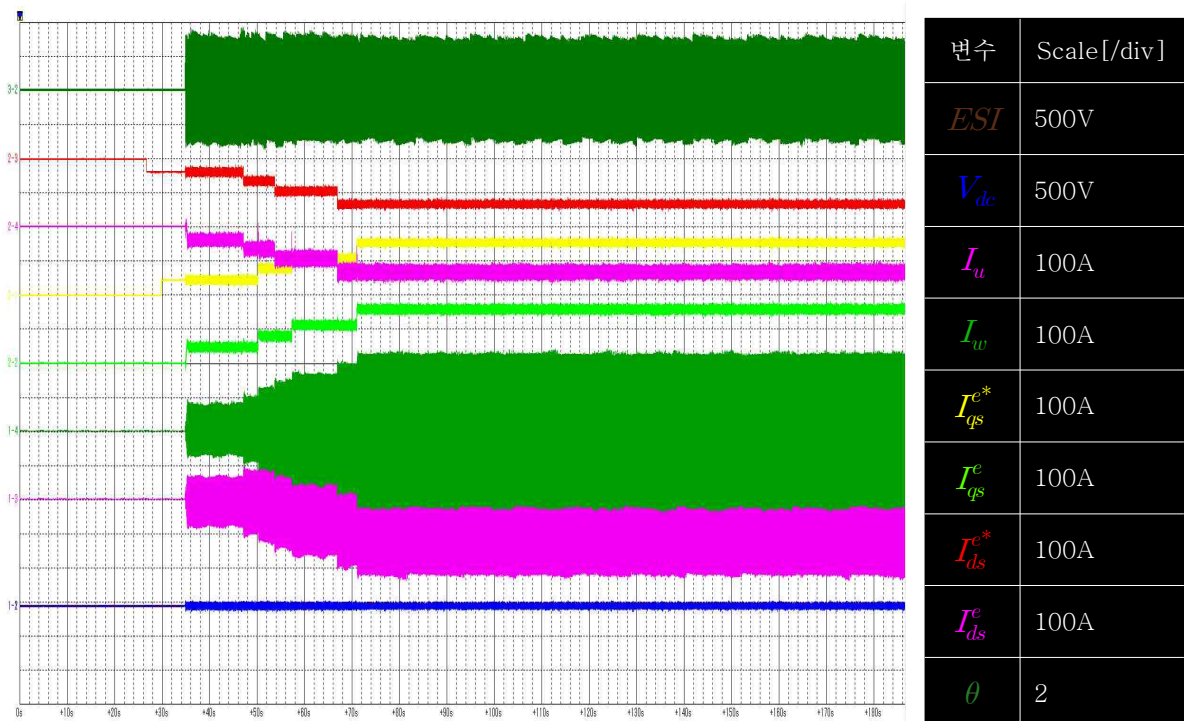


그림 5.2.3 정격 전류 제어 파형@2400rpm

위의 파형은 IPMSM의 전류제어 파형이다. IPMSM에 연결된 다이내모미터에서 2400rpm으로 속도 제어를 하고 있는 조건에서, d,q축 전류지령을 서서히 증가시켰다. d,q축 전류가 지령을 잘 추종함을 파형의 추이를 통해 확인할 수 있다.

다. 정격 전류 제어 시 토크 값 측정 파형 : 다이내모미터 측정

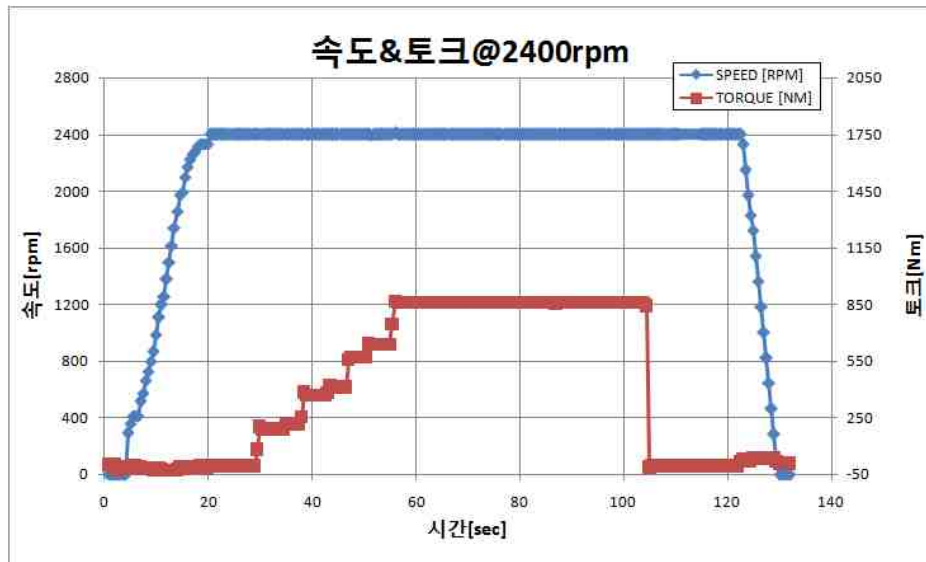


그림 5.2.4 정격 전류 제어 시 속도, 토크 파형@2400rpm(정격속도)

정격 속도(2400rpm)에서 전류 지령 220Apeak, $\beta=40^\circ$ ($i_{ds}^{e*}=-141.4A$, $i_{qs}^{e*}=168.5A$) 조건으로 제어 시, 토크는 약 857Nm로 측정 되었다.

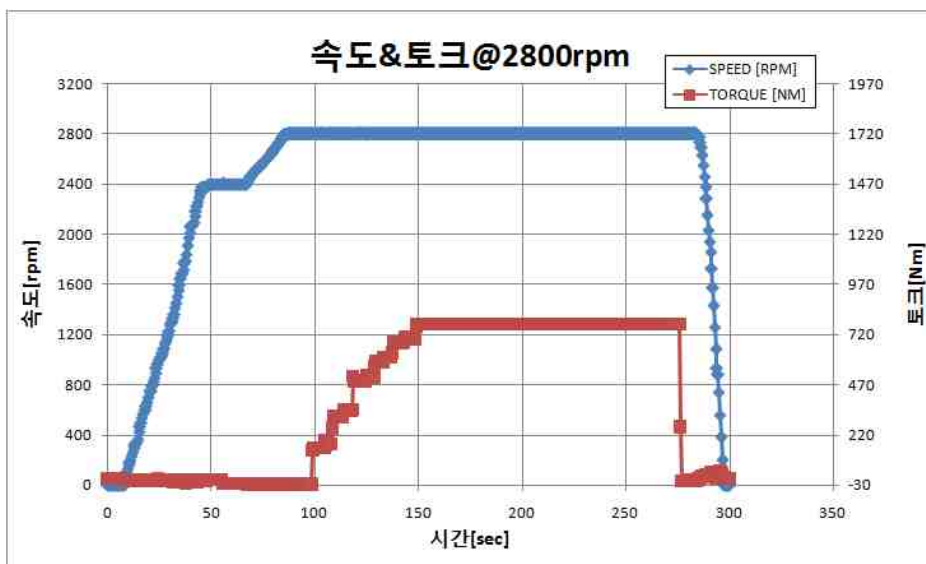


그림 5.2.5 정격 전류 제어 시 속도, 토크 파형@2800rpm(약자속 영역)

약자속 영역(2800rpm)에서 전류 지령 220Apeak, $\beta=52^\circ$ ($i_{ds}^{e*}=-173.3A$, $i_{qs}^{e*}=135.4A$) 조건으로 제어 시, 토크는 약 770Nm로 측정 되었다. 약자속 영역에서의 구동 여부 및 출력을 확인하였다.

제3절 시험평가 및 분석

2차 시작기(전동기, 전력변환기)에 대한 성능 평가 시험은 1차 시작기와 같은 방식으로 이루어졌다.

1. 연구개발결과 요약

가. 최대설계토크

표 5.3.1 최대설계토크

항목	해석치[Nm]	시험치[Nm]	오차율[%]
토크	848.13	835	1.57

나. 최대설계효율

표 5.3.2 최대설계효율

항목	해석치[%]	시험치[%]	오차율[%]
효율	97.95	97.0	0.97

다. 전동기 효율

6. 시험 결과

시험 항목	시험 방법	단위	시험결과
전동기 효율	- 상온 상태에서 전동기를 정격 속도(2 400 /min), 정격 출력(210 kW)로 운전시킨 후 전동기의 전기적 입력과 기계적 출력을 측정함.	%	97.0
전력변환기 (인버터) 효율	- 상온 상태에서 전동기를 정격 속도(2 400 /min), 정격 출력(210 kW)로 운전시킨 후 전력변환기의 DC입력과 AC출력을 측정함.	%	98.3
비고 - 상온 : 23.5 ℃, 권선 : 35.0 ℃			

그림 5.3.1 전동기 효율 성적서

라. 유도전동기 대비 출력밀도 향상

표 5.3.3 출력밀도 비교

항목	제작모델 (kW/kg)	유도기 (kW/kg)	상승률[%]
출력밀도	0.886	0.588	50.7

마. 최대 강성 확보

- 6000RPM 구동시 안전율 1.81로 매우 안정함 (목표치 : 1.8)

바. 영구자석 감자 내구성 확보

- FEM 프로그램 해석 결과 180℃에서 감자 발생하지 않음

사. 약계자 시험 후, 감자 내구성 검증

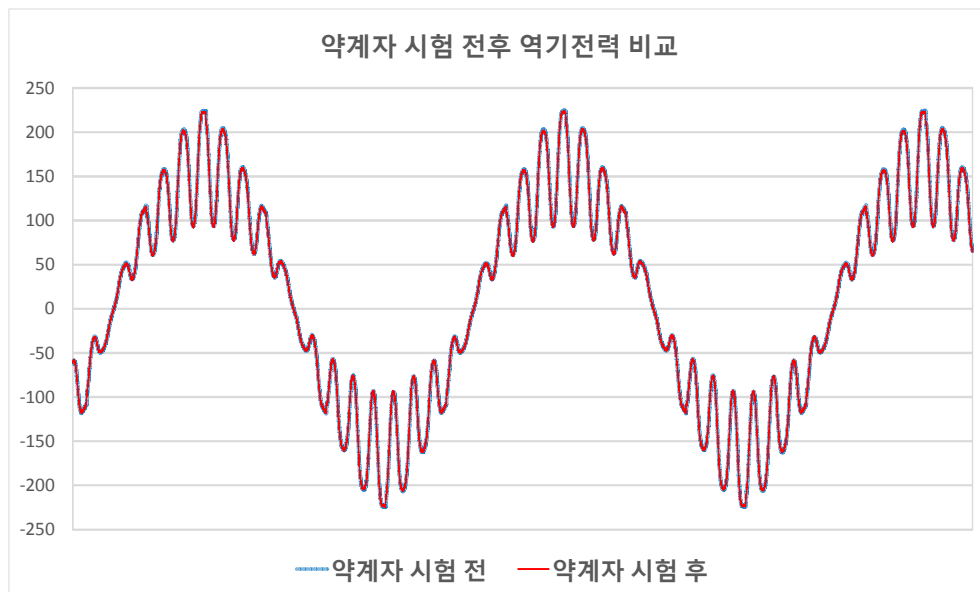


그림 5.3.2 감자 내구성

표 5.3.4 A상 기준 역기전력의 RMS 값 비교

항목	약계자 시험 전[Vrms]	약계자 시험 후[Vrms]
역기전력	120.3	119.6

아. 연동해석 시뮬레이션 정확도

표 5.3.5 연동해석 시뮬레이션 정확도

항 목	연동해석	성능시험평가
속 도[RPM]	2400	2400
토 크[Nm]	848.13	835
출 력[kW]	213.16	210
효 율[%]	97.95	97.0

- 연동해석치와 시험치 비교 결과 목표였던 오차율 7% 이내 만족함
- 오차율 : 최대설계효율 => 0.97% (목표치 3%)
 최대설계토크 => 1.85% (목표치 3%)
 출력 => 1.50% (목표치 3%)

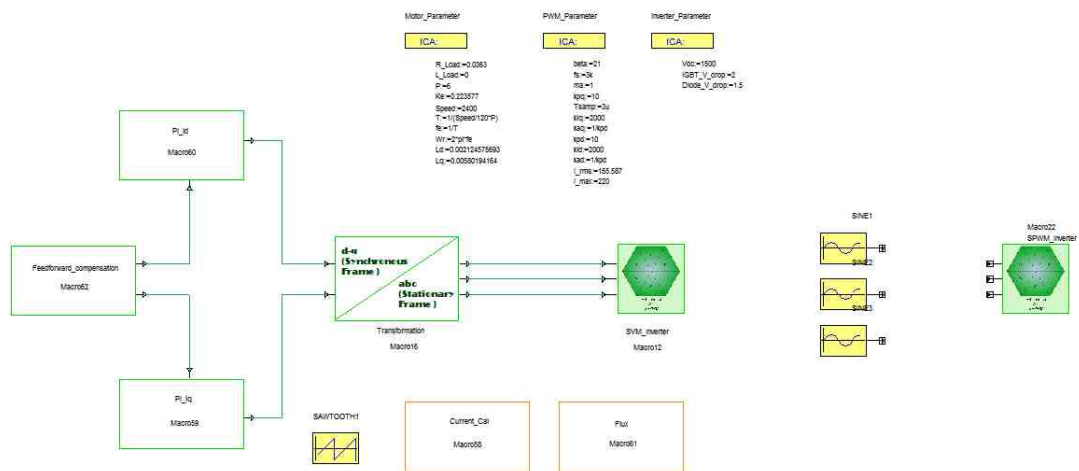
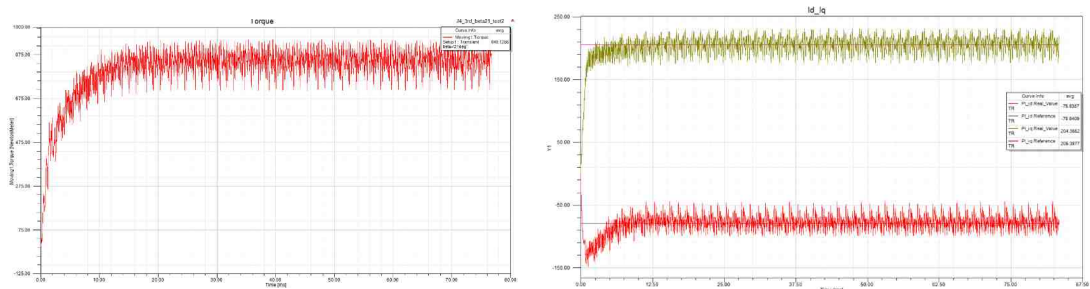


그림 5.3.3 연동해석 구성도



<Torque 파형>

<Id, Iq 파형>

그림 5.3.4 Torque, Id, Iq파형

자. 제어 알고리즘 개발 (약계자 제어)

표 5.3.6 정격속도와 약계자 영역

항 목	정격속도 영역(2400RPM)	약계자 영역(2800RPM)
토크[Nm]	835.98	770.45
출력[kW]	210.09	225.9
모터 효율	0.970	0.963
인버터 효율	0.983	0.985
시스템 효율	0.954	0.949

차. 전력변환기 효율

6. 시험 결과

시험 항목	시험 방법	단위	시험결과
전동기 효율	- 상온 상태에서 전동기를 정격 속도(2 400 /min), 정격 출력(210 kW)로 운전시킨 후 전동기의 전기적 입력과 기계적 출력을 측정함.	%	97.0
전력변환기 (인버터) 효율	- 상온 상태에서 전동기를 정격 속도(2 400 /min), 정격 출력(210 kW)로 운전시킨 후 전력 변환기의 DC입력과 AC출력을 측정함.	%	98.3
비고 - 상온 : 23.5 ℃, 권선 : 35.0 ℃			

그림 5.3.5 전력변환기 효율 성적서

카. 시험평가 사진



그림 5.3.6 시험평가 사진

제6장 연구목표 달성 및 효과

제1절 연구개발 최종목표 달성도

1. 최종 성과지표 및 달성수준

성과검증 기준 (3차년도)					
성과지표		목표치	측정방법	검증 방법	결과
1	최대설계효율	3% 이하	해석과 시험의 오차	보고서 발표	해석치 : 97.95% 시험치 : 97.0% 오차율 : 0.97%
2	최대설계토크	3% 이하	해석과 시험의 오차	보고서 발표	해석치 : 848.13Nm 시험치 : 835Nm 오차율 : 1.57%
3	전동기 효율	97% 이상	다이나모미터 시험 측정	성적서 발급	성적서 대체
4	유도전동기 대비 출력밀도 향상	50% 이상	유도기 해석 결과와 IPM 전동기 측정 결과 비교	보고서 발표	유도기 : 0.588kW/kg IPM : 0.886kW/kg 향상률 : 50.7%
5	최대 강성 확보	안전율 1.8 이 상 및 파손 유 무	FEM 응력 해석치와 최대속도 구동 시 파손 유 무	보고서 발표	파손 없음 안전율 : 1.81
6	영구자석 감자 내구성 확보	5% 이하	감자영역을 제거한 역기전 력 해석치와 제거하지 않은 해석치 대비 오차율	보고서 발표	해석 시 감자 없음
7	약계자 시험 후, 감자 내구성 검증	5% 이하	역기전력 시험치와 약계자 시험 후, 역기전력 시험치 대비 오차율	보고서 발표	오차율 : 0.58%
8	연동해석 시뮬레이션 정확 도	7% 이하	해석과 시험의 출력오차	보고서 발표	오차율 : 1.50%
9	제어 알고리즘 개발	MTPA제어와 약계자 제어 유무	다이나모미터 조합시험 측정	보고서 발표	제어프로그램 개발
10	전력변환기 효율	95% 이상	다이나모미터 시험 측정	성적서 발급	성적서 대체
11	전동기 및 전력변환기 출력 및 효율 측정시 험	성적서 발급	다이나모미터 시험 측정	성적서 발급	성적서 대체

목표		1차		2차		3차		최종 달성치	증빙
		목표	달성	목표	달성	목표	달성		
1	시제품 제작	1	1	1	1	2	2	4	실물 사진 및 도면
2	소프트웨어(S/W) 등록건수	0	0	0	0	1	1	1	프로그램 등록증
3	논문 및 논문게재(SCI 또는 SCIE급)	1	1	0	0	2	2	3	학회등록증(1차년도) 학술지 해당 페이지 사본(3차년도)
4	특허출원/등록	2	3	1	1	3	4	8	출원번호통지서

가. 시제품 제작 : 전동기 2, 인버터 2 제작

나. 소프트웨어 등록 : 영구자석 동기전동기 제어프로그램 제작 1

다. 논문게재 :

- Multi-rate optimal controller design for electromagnetic suspension systems via linear matrix inequality optimization C. H. Kim,¹ H. J. Park,¹ J. Lee,¹ H. W. Lee,² and K. D. Lee
- Analysis of Motor Performance According to the Inductance Design of IPMSM Ki-Doek Lee¹, Hyung-Woo Lee², Ju Lee¹, and Won-Ho Kim

라. 특허출원/등록 :

- 등록번호 : 10-1389414
출원명칭 : 커패시터를 이용한 전류전달 방식의 동기기
- 등록번호 : 10-1452443
출원명칭 : 다자유도 구동장치
- 출원번호 : 10-2013-0032657
출원명칭 : 영구자석 동기전동기의 회전자 자석을 이용한 절대 위치 검출
- 출원번호 : 10-2014-0060475
출원명칭 : 개방슬롯 전동기
- 출원번호 : 10-2014-0086056
출원명칭 : 다자유도 전동기 시험장치
- 출원번호 : 10-2015-0087261
출원명칭 : 회전자 오버행 구조를 가지는 고속구동용 영구자석 전동기 및 이에 사용되는 차폐부
- 출원번호 : 10-2015-0077448
출원명칭 : 고출력을 위한 돌극비 최대 구조를 갖는 전동기 및 이를 구성하는 회전자의 제조 방법
- 출원번호 : 10-2015-0146127
출원명칭 : q축 인덕턴스를 감소시키는 영구자석 전동기 및 이에 포함되는 회전자

제2절 연구개발 성과의 효과분석

1. 기존 기술과의 차이점

가. 견인용 영구자석 동기전동기

표 6.2.1 도시철도차량 견인용 유도전동기

항목	1세대 전동기	2세대 전동기
모델		
전동기 Type	유도전동기	유도전동기
출력 (kW)	205	210
크기 (mm)	D520 x H270	D515 x H220
중량(외함 제외) (kg)	452	357
출력밀도 (kW/kg)	0.454	0.588
효율 (%)	93	93
냉각방식	자기공랭	자기공랭

- 최근 철도차량 분야에서 에너지 절감을 위해 구성품들의 경량화 연구가 활발히 진행
- 표 6.2.1과 같이 1세대 전동기에서 2세대 전동기로 넘어가면서 출력밀도를 증가시킴
- 도시철도차량 견인용 전동기는 근본적으로 유도전동기를 사용하기 때문에 기술 포화
- 본 과제의 주목적인 에너지 절약을 위해서는 구동시스템의 고효율, 소형 및 경량화를 위해 높은 자속밀도의 영구자석을 사용한 영구자석 전동기로 대체가 필요

표 6.2.2 2세대 전동기, 최종 모델 비교

	2세대 전동기	최종 모델
용량	210kW	210kW
전기설계 부분 부피	4.58×107mm ³	3.19×107mm ³
전기설계 부분 중량	357kg	237kg
출력밀도	0.588kW/kg	0.886kW/kg
유도기 대비 향상율	-	50.7%

나. 전폐형 하우징

- 일반적으로, 철도차량용 견인전동기는 철도차량의 하부에 위치한 대차의 차축에 설치되기 때문에 외부에 노출되는 구조
- 영구자석 전동기의 경우, 철도 궤도 환경의 영향으로 차량의 운영 시 전동기로 이물질의 출입을 원천적으로 막을 수 있는 전폐형 외함이 필수
- 전폐형 외함은 외부와의 열교환을 위한 별도의 장치가 없어 열적으로 냉각이 어려워지는 문제를 갖음

- 이러한 열 문제를 해결하기 별도로 냉각장치를 추가함
- 본 과제의 연구결과물인 “강제공랭식 전폐형 외함”은 아래 그림 6.2.1과 같이 추가적인 냉각장치 없이도 전동기의 열적인 문제를 해결할 수 있음

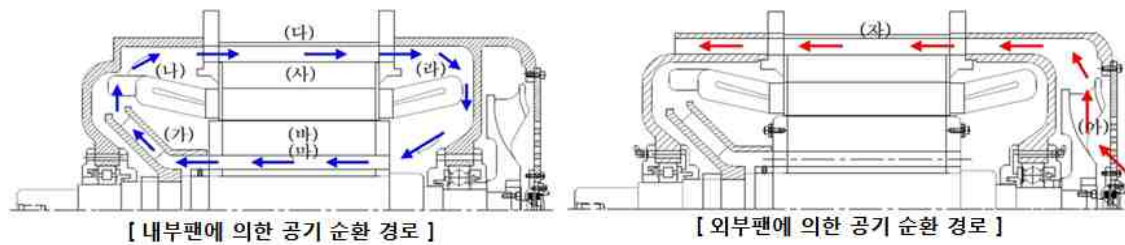


그림 6.2.1 전폐형 외함 공기 순환 경로

1. 기술적 기대성과

가. 차세대 철도차량 핵심장치기술 확보

- IPM 전동기는 많은 비선형 특성과 다양한 설계 변수를 갖기 때문에 설계가 어려움
- 본 과제의 IPM 전동기 설계 기법을 통해 도시철도뿐만 아니라 경전철이나 고속전철에도 적용 가능하므로 경전철과 고속전철의 경량화, 고효율화에 파급 효과가 클 것으로 기대됨

나. 도시철도차량의 운행 특성을 고려한 IPM 전동기 제어 알고리즘 개발

- 가속구간과 감속구간에서 부하 급증과 급감 모드를 고려한 인버터의 제어 알고리즘 개발을 통한 기존 철도차량 및 산업용 인버터의 모터 제어성능 개선이 기대됨

다. 철도차량용 IPM 전동기 성능 인증체계 구축

- IPM 전동기를 장착한 철도차량 제작 시 다수의 전동기 업체가 성능인증을 받고 부품 공급이 가능하게 됨

2. 사회·경제적 파급효과

가. 건인용 전동기 효율 향상을 통한 도시철도 운행비 절감

- 한국철도공사 소유 수도권 지하철의 건인용 전동기 효율 4% 향상 시, 연간 약 25억원의 전력요금 절감 가능
- 한국철도공사 이외에 서울메트로와 서울도시철도공사로 확대시, 더 많은 전력요금 절감 가능
- 건인용 전동기 출력밀도 향상으로 더 많은 전력요금 절감 가능

나. 차세대 철도차량 핵심장치기술 확보를 통한 세계철도시장에서의 기술경쟁력 향상

- 도시철도차량 건인용 IPM 전동기 설계기술은 용량이 더 큰 고속철도용 IPM 전동기 설계의 기반 기술이 될 수 있음
- 연간 213조원 규모의 세계철도시장에서 출력밀도와 효율이 우수한 IPM 전동기 설계기술을 보유함으로써 기술경쟁력을 높일 수 있음

제3절 실용화를 위한 추가 연구의 필요성

실용화를 위하여 차량에 탑재되는 주변장치와의 조합시험(인터페이스 시험), 본선시운전을 통한 성능시험 및 현차 시험을 통한 신뢰성 검증까지 수행하여야 한다.

본 개발과제를 통해 도출된 연구결과물에 대하여 “도시철도차량 기술기준”에서 요구하는 성능, 신뢰성 검증을 위해 추가 연구가 필요하다.

1. 현차 시험 및 내구성 시험

본 연구과제에 따른 기술개발 결과를 사업화하고자 도시철도법에서 요구하는 품질인증을 취득하고 현차에 장착하여 그 신뢰성과 성능을 확보할 필요가 있다. 영구자석식 견인전동기를 포함하는 추진시스템의 차량 장착을 위해 기존차량과의 전기/기구적 인터페이스를 확인하고 구조변경 및 보완설계로 최적화된 시스템을 설계/제작하는 방향으로 나아가야한다.

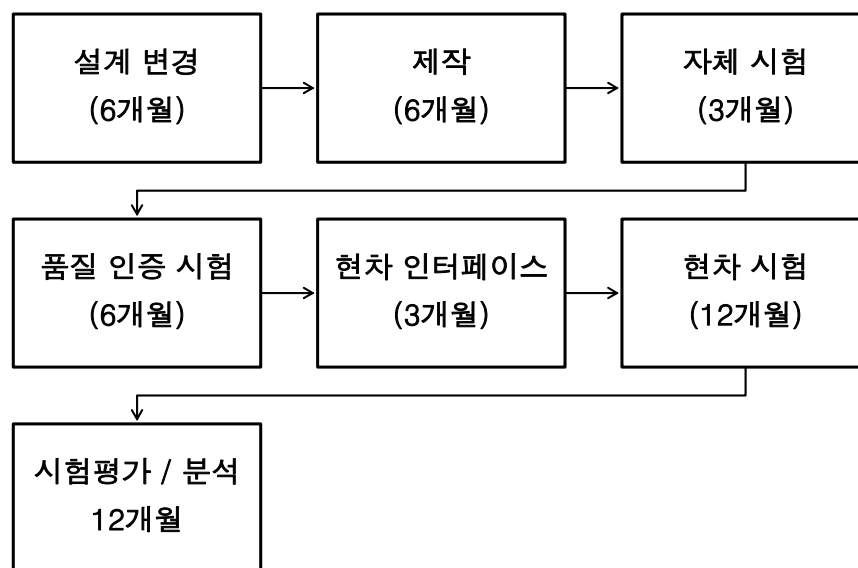


그림 6.3.1 현차 시험 및 내구성 시험 계획 순서도(총 3년)

<현차 시험 및 내구성 시험 세부 이행 사항>

- 사용자 요구사항 분석
- 현차시험 대상 차량 자료 조사
- 현차시험용 시제품 보완 설계 (견인전동기, 추진제어장치)
- 각 장치별 인터페이스 설계
- 현차 자료 조사
- 구성품, 조합시험, 완성차, 본선 시운전 절차서
- 추진제어시스템의 RAMS 적용 연구 및 LCC 향상방안 연구
- 현차 시험용품 제작
- 공인기관(3자)을 통한 구성품, 조합시험
- 현차 취부시험 (각 부 기능시험)
- 내구성 검증을 위한 완성차 및 본선시운전(6개월 또는 100,00Km)
- 유지보수 매뉴얼 제작
- IM 시스템과 PMSM 시스템과의 효과 분석

2. RAMS 향상 방안 연구 및 LCC 분석 연구 필요

RAMS는 크게 H/W, S/W로 분류되며 H/W RAMS 적용을 위해 각 단품별 BOM 데이터를 정리하여 신뢰도 예측모델을 연구하였고 향후 S/W RAMS 적용을 위해서는 소프트웨어 요구사항 명세기준서 작성, 소프트웨어 설계명세서 작성, 소프트웨어 코드표준서 및 소프트웨어 시험계획서, 절차서, 결과서 등이 필요하다.

가. RAMS 개요

최근 철도 서비스의 품질 및 효율을 평가하는 중요 성능 지표로서 RAMS 지표가 사용되고 있다. 철도 시스템 품질에 대한 기대 및 요구 수준이 높아짐에 따라 운영 및 유지보수 단계에서도 RAMS 목표의 설정 및 지속적인 달성이 필요하다. 또한 철도차량에서 RAMS의 구현은 승객의 안전 및 시스템 사용자들의 원활한 동작을 위해서 필수 불가결한 요소이다.

따라서 시스템의 설계단계에서부터 제작, 그리고 시스템을 설치하고 운용하기까지 철저한 검증 작업을 통해 설계자와 사용자가 원하는 동작과 안전성을 갖고 있는지를 확인하는 것이 중요하며 이러한 검증 작업을 통해 시스템을 신뢰할 수 있게 된다.

시스템의 신뢰도를 검증하고 분석하는 방법은 그 목적에 따라 다르며 방법 또한 다양하다. 특히 다수의 부품으로 구성된 시스템의 경우 그 구성 요소에 대한 개별적인 정보를 정확하게 파악하는 것은 어려운 일이며 많은 시간이 요구되는 경우가 대부분이다. 이런 이유로 시스템의 신뢰도를 평가하는 작업은 현재의 분석 대상인 시스템의 과거 이력자료 또는 경험 제원을 이용하는 방법이 있으며 이러한 자료의 활용이 불가능한 경우에는 표준화된 모델을 적용하여 분석하는 방법을 사용한다.

3. 동기전동기 절연열화 진단

전동기의 열화측정 장비로 절연열화를 진단하여 전동기의 노화 정도를 알 수 있다. 전동기 열화측정 장비를 이용하여 전동기의 3가지 부문(절연저항, 분극지수, 유전정접)을 측정하여 전동기의 열화 정도를 판단한다.

가. 절연저항 (MEG, Insulation Resistance) : 절연물에 직류 전압(E)를 인가했을 때 절연물을 통해 흐르는 전류(I)로 나눈 값을 말한다.

나. 분극지수 (Polarization Index) : 직류 고전압을 인가했을 때의 전류-시간 특성으로부터 흡습, 오손, 절연 결함 등의 상태를 판단하려는 시험이다. 직류 고전압을 인가할 때 전류는 충전전류, 흡습전류, 누설전류의 3성분으로 되어 있는데, 절연물이 흡습, 오손 상태에 있으면 시간의 경과에 따라 거의 일정하게 누설전류 성분의 비율이 커지므로 분극지수는 '1'에 가깝게 된다. 일반적으로 1.5 이하일 때 흡습 상태로 판단한다.

다. 유전정접 ($\tan \delta$) : 교류전압을 인가하면 절연물에는 근소한 전력손실을 수반한 저항분이 존재하며 이때의 전력손실을 '유전손' 이라 한다. 이때 발생된 유전손 때문에 흐르는 전전류 I는 인가전압 V보다 90° 앞선 충전전류 I_c , 인가전압 V와 동상인 손실전류 IR과의 합성값이며, 전전류 I는 충전전류 I_c 보다 약간 늦어 전력손실이 발생한다.

유전체 내부에서 열로 소모되는 전력손실(유전손실) W 는 ' $W = VI\cos\theta$ '가 된다. $\cos\theta$ 는 진상 90° 에 상당히 근접하게 되면 ' $\cos\theta = \sin\delta \approx \tan\delta$ '의 근사식이 성립되기 때문에 전력손실은 ' $W = VI\cos\theta \approx VI\tan\delta \approx \omega CV^2\tan\delta$ '로 표현된다. 여기서 δ 를 유전손실각, $\tan\delta$ 를 유전정접(正接)이라 하며, 유전손실과 $\tan\delta$ 는 비례 관계에 있다. 전동기 열화측정 3부분에 대한 판정방법으로서 아래 판정표에 따라 전동기의 열화 수준을 판단한다.

판정 항목 및 기준	불량 양호				
	1	2	3	4	5
MEG(MΩ)	$\leq 100 <$	$\leq 500 <$	$\leq 1000 <$	$\leq 5000 <$	
PI	$\leq 1.0 <$	$\leq 1.5 <$	$\leq 2.0 <$	$\leq 2.5 <$	
$\tan \delta$	$\geq 5.0 >$	$\geq 3.5 >$	$\geq 2.0 >$	$\geq 1.5 >$	
$\Delta \tan \delta$	$\geq 2.0 >$	$\geq 1.5 >$	$\geq 1.0 >$	$\geq 0.5 >$	

그림 6.3.2 현차 시험 및 내구성 시험 계획 순서도

4. FMECA 분석

가. FMECA 목적

FMECA의 실시 목적은 하나의 고장모드 그리고 그것의 영향에 관한 분석기법을 제시하는 것이다. 이러한 목적을 안전도 해석이라는 영역까지 확대하여 FMECA의 실시목적은 요약하면 다음과 같다.

- 시스템 운용의 안전성을 높이는 설계 방법을 선택하는 기준을 제시한다.- 초기 설계단계에서 시스템의 경계에 있는 문제를 명확히 한다. 즉 여기서 경계란 고장모드 또는 원인 등에 대한 정확한 식별에 관한 문제를 해결할 수 있다는 의미이다.
- 시스템 또는 서브시스템의 안전성에 치명적인 단일의 고장모드에 대한 영향 및 원인등을 명확히 한다.
- 초기 단계에서 시험계획을 세우는 기준을 제시한다.
- 시스템의 안전성 예측, 평가 또는 기타 안전성 연구에 대해 정성적, 정량적인 데이터를 제공한다. 즉 특정 목적에 맞는 FMECA Worksheet에 고장모드와 원인 그리고 영향 등을 기록하여 관리한다. 따라서 FMECA는 하나의 시스템에 대한 이력서라고 생각 할 수 있다.

FMEA (불량유형별 효과분석)											
공정기능	잠재적 불량유형	불량유형의 잠재적효과	영향 력S	불량유형의 잠재원인	발생 빈도 O	현재의 관리방법	검출 력D	SO	APN	개선대책	담당자
권선 절연 보강	정형 권선의 피복 손상	절연파괴로 인한 권선 소손	8	정형권선 취급 부주의	5	샘플링 육안검사	5	40	200	전수 육안검사	
권선 절연 보강	권선절연파괴	절연파괴로 인한 권선 소손	8	절연테이핑 방법 불량	3	무검사	8	24	192	교육실시	
권선 절연 보강	권선절연파괴	절연파괴로 인한 권선 소손	8	권선용접부 절연 미흡	4	샘플링 육안검사	6	32	192	전수 육안검사	
권선용접	권선저항 부적합	전동기 특성치 부적합	7	권선용접작업 부적합	5	육안검사	8	35	280	저항 측정	
권선외인딩	권선저항 부적합	전동기 특성치 부적합	7	권선 턴수 부적합	4	무검사	4	28	112	저항 측정	
프레임 가공	에어갭 불균형 발생	소음, 진동 발생	6	가공작업 부적합	5	샘플링 검사	5	30	150	전수 검사	
브라켓트 가 공	에어갭 불균형 발생	소음, 진동 발생	6	가공작업 부적합	6	샘플링 검사	5	36	180	전수 검사	
축 가공	베어링 예압량 부적합	베어링 발열 발생	6	베어링 자리 가공 치수 부적합	5	샘플링 검사	5	30	150	전수 검사	
자석 삽입	자속량 부적합	전동기 특성치 부적합	8	자석 배치 부적합	5	무검사	7	40	280	전수 검사	
인술선 번호 부착	인술선 번호 부착 부적합	전동기 회전방향 부적합	4	결선작업 부적합	5	무검사	8	20	160	전수 검사	

그림 6.3.3 FMECA 분석의 세부 항목

5. 유지 보수 측면에서의 SWOT 분석

Strength	Weakness	Opportunity	Threaten
? 전폐 구조로서 먼지, 습기 침투 방지 ? 정기적 분해청소, 수리 주기 대폭 연장 ? 습기에 의한 권선 절연파괴, 소손 방지 ? 전폐 구조로서 내부소음 차단 ? 회전자 분해조립 용이	? 개방형보다 방열효율 감소 ? 열에 의한 영구자석 감자발생 우려 ? 역자계에 의한 영구자석 감자 우려 ? 강한 자력으로 보수작업 주의 필요	? 신기술 선점으로 해외 수출 기회 확장 ? 탄소 배출 규제에 에너지 효율 증시 ? 전기차 등 유사 견인차로의 기술 확대	? 자원 편중으로 희토류 단가 급증 우려

그림 6.3.4 유지 보수 측면에서의 SWOT 분석

영구자석식 전인전동기는 기존 유도전동기에 비해 소비전력 절감, 전폐형 구조에 의한 회전 소음 감소, 회전자의 분해조립이 유도기보다 유리한 장점이 있으며, 추진제어시스템 측면에서는 자속 위치를 개별로 제어하여야 하기 때문에 구성상 개별 제어가 필요하다. 유도기의 추진시스템은 1C1M, 1C2M, 1C4M 등 시스템 구성이 유연한 반면 영구자석식은 개별 제어로만 진행되어야 하나 센서리스제어가 용이하다.

제7장 결론

본 연구의 최종 목표는 도시철도차량 견인용 유도전동기를 영구자석식 동기전동기로 대체 개발하는 것이다. 일반적으로 영구자석을 사용하면 릴럭턴스토크 뿐만 아니라 마그네틱토크를 추가적으로 사용할 수 있다. 회토티계 금속을 사용하는 영구자석 전동기는 비회토티계 전동기 대비 출력밀도가 높다. 또한 비회토티계 전동기 대비 높은 효율로 운전이 가능한데 그 이유는 다음과 같다.

입력 전력량과 제어에 의존하여 구동되어지는 비회토티계 전동기는 동손이 크고, 동일한 회전 속도를 기준으로 영구자석식 전동기 대비 권선에 입력되는 많은 입력에 의하여 철손 또한 크게 발생한다. 그에 비해 영구자석 전동기는 영구자석 내에서 발생하는 영구자석 손실이 추가적으로 발생하지만 그 영향의 정도가 적고, 영구자석에서 발생하는 자속으로 인해 고출력 발생에 유리하기 때문에 비회토티계 전동기 대비 상대적으로 동손의 비중을 감소시켜 고효율을 달성할 수 있다.

하지만 고출력밀도, 고효율이라는 강한 장점을 갖는 영구자석 전동기가 아직까지 도시철도차량 견인용 전동기로써 역할을 하지 못하는 이유는 현실적인 대체 비용 이외에도 크게 2가지로 분류할 수 있다.

첫째로, 전동기 하우징 구조를 반폐형이 아닌 전폐형 하우징으로 설계 및 개발하여야 한다. 영구자석식 회전자를 갖는 전동기에 반폐형 하우징을 치부할 경우, 전동기와 외부가 개방되어 있는 구조이기 때문에 씻가루 등 여러 이물질들이 강한 자력을 갖는 회전자에 달라붙을 우려가 있고, 그로 인해 얇은 공극이 일정하게 유지되어지지 않아 전동기 성능 저감을 야기할 수 있기 때문이다. 또한 전동기 유지보수에도 기존의 유도전동기와 비교하여 경쟁력이 떨어진다.

둘째로, 타행운전 시 시스템 안정성 확보와 동기전동기 제어 최적화가 이뤄져야 한다. 1C4M으로 병렬 운전되어지는 유도전동기와 달리, 영구자석식 동기전동기의 경우 전력변환기 1대당 1대의 전동기를 벡터 제어하여 운전할 수 있는 1C1M 시스템이다. 또한 기존 유도전동기의 전력변환기 크기에 이와 같은 운전 시스템이 가능하도록 설계되어야 한다. 타행 운전 시, 영구자석에서 발생하는 자속에 의해 권선에 유기되는 유기기전력이 클 경우, 전력변환기가 소손되어질 수 있기 때문에 이 부분에 대해서도 소자선정, 차단회로 설계 등이 고려되어야 한다.

본 과제 1, 2차년 기간에는 기존의 실차용으로 장착되어져 있는 유도전동기를 비교군으로 하여 영구자석식 동기전동기를 설계하였다. 유한요소해석법을 이용하여 설계된 전동기의 전자기적 특성 및 기계적 강성에 대해 분석하였다. 전동기 제작과 동시에 이를 구동하기 위해 전력변환기 또한 제작하였다. 정격속도인 2400rpm과 약계자 제어를 위한 최대속도 6000rpm까지 전류위상각을 조절하며 제어할 수 있도록 제어알고리즘 개발과 용량에 맞는 소자들을 적절히 선정하였다. 제작되어진 1차 전동기와 전력변환기를 이용하여 공인인증시험기관인 한국기계전기전자시험연구원에서 시험하고 공인인증시험성적서 확보를 통해 성능에 검증 및 타당성을 증명하였다.

3차년도에는 성과목표가 실용화를 위한 연구 방향으로 수정된 만큼 전동기의 전자기적 설계

및 전폐형 하우징의 기구적 설계에 대한 연구를 심도있게 진행하였다. 유도전동기 대비 출력밀도 향상을 50%까지 올리면서 전폐형 하우징구조에 대한 열문제를 고려하여 열원인 고정자 동선에 흐르는 전류밀도를 최대한 줄이기 위한 설계를 진행하였다. 이에 대해 제작업체와 협의하여 제작 가능한 권선 점적률에 대한 심도있는 검토 및 설계에 적용하여 출력밀도 향상과 전류밀도 저감을 동시에 진행할 수 있었다.

전폐형 하우징에 대한 연구는 이미 일본에서 실용화 수준에 도달하였기 때문에 최대한 특허를 회피하면서 내부 열순환 및 냉각이 가능하도록 연구 및 설계를 진행하였고, 2차 전력변환기는 실차에 치부될 수 있도록 실차적용 사이즈로 재설계 및 제작을 진행하였다. 설계된 2차 전동기와 2차 전력변환기는 1차 시제품과 같이 공인인증시험기관에서 시험하였고 동일하게 시험 성적서를 발급하여 성능검증 및 타당성을 증명하였다.

제8장 참고문헌

- [1] 정태철, 장익상, 김미정, 이기덕, 이재준, 한정호, 전현호, 이주, “150kW 급 견인용 IPMSM의 d-q축 전류제어와 유한요소법의 연동해석을 통한 성능 분석”, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 524-525, 2012.7.
- [2] Chan-Bae Park, Hyung-Woo Lee, Byung-Song Lee and Ju-Lee, "A study on the iron-loss reduction of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Transit", IEEE, Transportation Electrification Conference and Expo, pp. 1-4, June. 2012.
- [3] Ki-Doek Lee, Ju-Lee, "Design to Reduce Cost and Improve the Mechanical Durability of IPMSM in Traction Motors", 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회논문지, Vol. 28, No. 5, pp. 106-114, 2014.5.
- [4] LIU Shengxue, SHENG Yifa, "Efficiency Optimization of IPMSM for Urban Rail Traction Based on switching frequency optimization control", IEEE, Chinese Control Conference, pp. 1997-2001, July. 2011.
- [5] Quoc Khanh Nguyen, Johannes Schuster, Jorg Roth-Stielow, "Energy Optimal Control of an Electrically Excited Synchronous Motor used as Traction Drive", 전력전자학회, ICPE 논문집, pp. 2789-2795, 2015.6.
- [6] 정대성, 이현동, “HEV용 매입형 영구자석 동기전동기의 출력밀도 향상설계”, 한국자동차공학회, 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회, pp. 3035-3039, 2010.11.
- [7] 이두희, 진강환, 권순환, 김성제, 김윤희, “IPMSM이 적용된 차세대 고속철도 견인시스템의 전류 및 속도제어기 설계”, 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회 논문지, Vol. 24, No. 8, pp. 70-77, 2010.8.
- [8] A.Lopez-de-Heredi, C.Calleja, A.Lertxundi, A.Aranburu, "Stator current and power factor optimization in an IPMSM for railway traction application", IEEE, Power Electronics and Applications, pp. 1-10, Sept. 2011.
- [9] 김원호, 배재남, 장익상, 이주, “Traction Motor 설계에 관한 연구”, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp. 1395-1401, 2010.7.
- [10] 이기덕, 이주, “견인용 IPMSM의 신뢰성 향상을 위한 설계”, 대한전기학회, 전기학회논문지, Vol. 64, No. 5, pp. 817-823, 2015.5.
- [11] 함상관, 김광수, 이중우, 양승국, 엄석기, 이주, “견인용 IPMSM의 전자계 해석 및 열해석”, 대한전기학회, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 624-625, 2010.7.
- [12] 박동규, 진강환, 장진영, 김성제, 김윤희, “다중 인버터 구동 고속전철 시스템의 IPMSM 파라미터 변동에 따른 운동 특성 고찰”, 대한전기학회, 전기학회 논문지, Vol. 60, No. 4, pp. 193-199, 2011.12.
- [13] 정거철, 박찬배, 오세영, 이주, “도시철도차량 견인용 IPMSM의 구조 특성에 따른 회전자형상 설계에 관한 연구”, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집, pp. 597-602, 2014.10.
- [14] 정거철, 박찬배, 정태철, 이주, “도시철도차량용 IPMSM의 Magnet Segment 변화에 따른 특성 분석에 관한 연구”, 대한전기학회, 전기학회논문지, Vol. 64, No. 10, pp. 1486-1492, 2015.10.

- [15] 박찬배, 김재희, 이준호, “도시철도차량의 운행패턴을 고려한 견인용 IPMSM의 열 특성 분석”, 대한전기학회, 전기학회논문지, Vol. 63, No.3, pp. 431-436, 2014.3.
- [16] 박문수, 홍현석, 최태준, 함상환, 이주, “영구자석 감자를 고려한 사마륨 코발트($\text{Sm}_2\text{CoSUB17SUB}$) 자석을 이용한 도시철도차량 견인용 IPMSM의 설계”, 대한전기학회, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp. 900-901, 2015.7.
- [17] 박찬배, 김재희, 이수길, 이준호, 정신명, 이병송, “철도차량 견인용 IPMSM의 수냉각장치 특성 연구”, 한국자동차공학회, 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회, pp. 1363-1364, 2013.11.
- [18] 박찬배, 이준호, 이병송, “철도차량용 IPMSM의 Water-cooling Jacket 설계 연구”, 대한전기학회, 전기학회논문지, Vol. 62, No. 10, pp.1475-1480, 2013.10.

별지 #1. 기존 유도전동기의 장애 사례 및 이에 대한 대책

견인전동기는 회전자와 고정자, 외함(프레임)등으로 구분되어 있으며, 온도 특성에 의한 과열 현상, 장기간 사용시는 먼지 유입에 의한 절연 파괴, 베어링의 전기적 전식현상, 속도센서의 이상 등의 문제가 발생할 우려가 있다. 따라서 견인전동기는 일정 기간 사용 후 전반검사(오버홀)시 재함침, 베어링 교체 등의 보완작업을 통하여 유지보수를 실시해야 한다.

표 1. 기존 유도전동기의 고장 사례 원인 및 보완책

분류	원인	보완책	비고
과전동	- 기초 및 구조적 불량일 때 - 공진적 원인일 경우 - 불완전한 결합일 경우	- 전반적 시스템을 확고히 하여 진동에 원인을 사전에 차단함.	
소음	- 회전부분의 간격이 없어졌을 경우 - 베어링 불량일 경우 - 구조적 불량일 경우	- 구조적 부분을 더 확고히 하여 사전에 차단함.	
과전류	- 정격전압 보다 높게 인입전압이 가해졌을 경우 - 정격전류 보다 높게 입력이 됐을 경우	- 주위상태, 정격열량, 피운 전장비를 필요로 한 마력들을 미리 확인하여 사전에 차단함.	
운전열	- 모터 방열 구조 불량일 경우 - 베어링 불량일 경우 - 인버터 불량일 경우	- 지속적인 유지보수로 원인들을 사전에 차단함.	
	- 전동기에 걸리는 부하가 불량일 경우		
베어링 파손	- 무적잘한 주유로 인한 과열 - 잘못된 결합 - 과부하 - 기계적 치수 및 조립 불량 - 설치중 파손 - 진동 - 부식 - 규격 오류	- 구조적 부분을 더 확고히 하여 사전에 차단함.	
전동기 소손	- 코일 및 상간에 절연 파괴로 인한 고정자 철심에 의한 단락 - 제어장치 불량	- 적절한 절연에 관한 부품을 사용하며 작업 중에도 수시로 절연부분을 확인하여 사전에 차단함.	

별지 #2. 철도차량 견인전동기 정격속도 산정 및 설계 방법

전동차 구동용 견인시스템은 전력전자와 제어기술의 발달로 저항 및 초퍼 제어에 의한 직류전동기 방식에서 인버터 제어에 의한 유도전동기 제어방식으로 획기적인 발전을 이루었다. 유도전동기 자체 기술력도 발전하면서 아래 표 1과 같이 90년대 1세대 유도전동기에서 2000년대 2세대 유도전동기로 바뀌면서 보다 소형, 경량화 및 고효율, 고출력밀도를 달성하게 되었다.

표 1. 도입년도 별 유도전동기

서울메트로 4호선 (도입년도 1994년)	서울메트로 2호선, 3호선 (도입년도 2005년)
형 식 : 3상 농형 유도전동기	형 식 : 3상 4극 농형 유도전동기
용 량 : 200kW	용 량 : 210kW
연속정격 : 1100V, 130A, 66.5Hz, 1945rpm	연속정격 : 1100V, 136A, 75Hz, 2200rpm
기어비 : 7.07	기어비 : 8.00
냉각 방식 : 자기통풍방식	냉각 방식 : 자기통풍방식
절연 등급 : 200 Class	절연 등급 : 200 Class
중량 : 785kg	중량 : 650kg

이러한 발전은 기술적 완성 단계에 들어서면서, 기존 시스템에서 보다 개선된 방향을 기대하기가 어렵지만, 전력전자 기술의 급속한 발전으로 고속 스위칭이 가능한 IGBT 소자가 상용화되면서, 철도차량용 직접 구동용 동기전동기의 개별제어가 가능하게 되었고, 전동기의 고속 운전이 가능하게 되었다. 전력용 반도체 소자의 발전으로 제어 가능한 스위칭 주파수에 여유가 생기면서 표 1과 같이 기어비를 높이고 전동기의 정격 속도를 증가시킬 수 있다. 이는 동일 출력 내에서 토크를 줄이고, 전동기 사이즈를 소형화 및 경량화 시킬 수 있도록 가능케 한다. 시스템의 경량화는 철도차량의 운전연비와 효율 측면에서 매우 효과적이다. 본 과제의 주된 목표인 철도차량 시스템의 Energy saving을 위해서는 전동기 자체 개발이 아닌, 철도차량의 추진 시스템을 전체적으로 고려한 전동기 설계가 이뤄져야 한다.

본 과제를 통해 연구 개발된 매입형 영구자석식 동기전동기는 정격속도 2400rpm, 정격용량 210kW, 최대속도 6000rpm으로 문제없이 제어되도록 설계하였다. 비교군인 2세대 유도전동기의 정격속도는 2200rpm, 정격용량은 210kW로 두 전동기의 정격속도가 같지 않다. 따라서 전동기만의 출력밀도를 비교하는데 무리가 있다. 하지만 위와 같이 발전된 전력용 반도체 소자를 이용하여 제어가 안전하게 될 수 있다면, 동일 출력 내에서 전동기를 소형화, 경량화를 통해 철도차량의 연비와 효율을 향상시켜 본 과제의 주목적인 에너지 절감을 달성하는 것이 바람직하다.