

20CTAP
-C1518
67-02

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호()

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 20CTAP-C151867-02

철도차량용
무기어
추진시스템
구현을 위한
2중 회전자
구조
동기전동기
(DR-PMSM)
핵심기술
개발

최
종
보
고
서

2020

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

철도차량용 무기어 추진시스템 구현을 위한 2중 회전자 구조 동기전동기(DR-PMSM) 핵심기술 개발 최종보고서

2020. 12. 31.

주관연구기관 / 한국교통대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘철도차량용 무기어 추진시스템 구현을 위한 2중 회전자 구조 동기전동기(DR-PMSM) 핵심기술 개발’(연구개발 기간 : 2019.04.15 ~ 2020.12.31) 과제의 최종보고서 9부를 제출합니다.

2020. 12. 31.

주관연구기관명 : 한국교통대학교 산학협력단 전 문 수 (인)



주관연구기관책임자 : 박 찬 배

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C15 1867-02	해당 단계 연구 기간	2020-01-01 ~ 2020-12-31	단계구분	2 / 2						
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업									
	세부사업명										
연구과제명	대과제명	철도차량용 무기어 추진시스템 구현을 위한 2중 회전자 구조 동기전동기(DR-PMSM) 핵심기술 개발									
	세부과제명										
연구책임자	박 찬 배	해당단계 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 206,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 206,000천원						
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 명	총 연구비	정부: 370,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 370,000천원						
연구기관명 및 소속 부서명	한국교통대학교 산학협력단										
국제공동연구	해당 사항 없음										
위탁연구	해당 사항 없음										
※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음											
연구개발성과의 보안등급 및 사유	본 연구개발 대상은 별도의 보안을 필요로 하지 않음										
9대 성과 등록·기탁번호											
구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N
국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황											
구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월 일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장 소)	NTIS 등록번 호			
○ 비접촉 방식 자기식 기어와 견인전동기 일체화 ○ 영구자석형 동기전동기 회전자(내측 회전자)와 기어비를 통한 감속 특성을 지닌 폴피스(외측회전자)의 2중 회전자 구조 동기전동기(DR-PMSM) 원천기술 개발 ○ 기존 유도전동기와 기계적 감속기의 효율인 89.7%보다 높은 92% 확보 ○ 45kW급, 저속부 토크 720Nm, 저속부 속도 600RPM 특성 ○ DR-PMSM 전용 제어 알고리즘 연구 및 개발 ○ 축소형 시제품 제작 → 설계기법 및 제어기술 검증 ○ DR-PMSM 성능평가 기술 확보								보고서 면수			
								164쪽			

요약문

연구의 목적 및 내용	○ 철도차량용 무기어 추진시스템 구현을 위한 비접촉 방식의 감속기와 견인전동기가 일체화된 2중 회전자 구조 동기전동기(DR-PMSM)의 원천기술 개발 - 비접촉 방식의 감속기와 견인전동기가 일체화된 DR-PMSM 설계 기법 연구 - 45kW급 DR-PMSM 기본/상세 설계 연구 ○ 기존 IPMSM 제어방법에서 개선된 DR-PMSM용 제어 알고리즘의 연구 및 개발 - 구동용 제어 알고리즘 연구 및 구동환경을 고려한 시뮬레이션 ○ 설계 기법 검증을 위한 축소형 DR-PMSM 및 구동용 Drive 시제품 제작 ○ DR-PMSM 성능 평가 기술 확보 - 축소형 DR-PMSM의 부하장치 활용 성능 평가 방안 도출 - 축소형 DR-PMSM 및 구동용 Drive 시제품의 조합 성능 평가 연구 ○ 45kW급 DR-PMSM 보완 기술 도출																																	
연구개발성과	○ 45kW급 실모델 DR-PMSM 설계 기법 ○ DR-PMSM 제어 기술 ○ 설계/제어기법 검증용 축소형 DR-PMSM 및 구동용 Drive 시제품 ○ DR-PMSM 성능평가 기술 < 예상되는 연구개발성과 유형 > <table><tr><th rowspan="2">구분</th><th rowspan="2">논문</th><th rowspan="2">특허</th><th rowspan="2">보고서 원문</th><th rowspan="2">연구 시설·장비</th><th rowspan="2">기술요약 정보</th><th rowspan="2">소프트 웨어</th><th rowspan="2">화합물</th><th colspan="2">생명자원</th><th colspan="2">신품종</th></tr><tr><th>생명 정보</th><th>생물 자원</th><th>정보</th><th>실물</th></tr><tr><td>예상성과 (N/Y)</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>Y</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td><td>N</td></tr></table>						구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종		생명 정보	생물 자원	정보	실물	예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N
구분	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술요약 정보	소프트 웨어									화합물	생명자원		신품종																
							생명 정보	생물 자원	정보	실물																								
예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	N																							
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ DR-PMSM 적용 고출력밀도 추진시스템 설계/제어 요소 기술 및 톨 개발에 활용 ○ 비접촉 방식의 감속기와 견인전동기가 일체화된 DR-PMSM의 핵심 기술 확보를 통한 미래 신교통시스템용 친환경 추진시스템 구축을 위한 기반 기술의 확보에 활용 ○ 기존의 다양한 철도차량 및 산업계에의 기술 적용을 위한 실용화 사업 기획에 활용 ○ DR-PMSM 핵심기술의 개발을 통하여 상용화를 위한 국가 R&D 사업 도출 ○ 철도차량 제작업체 및 수요처에 기술 이전																																	
국문핵심어 (5개 이내)	2중 회전자	무기어	영구자석형 동기전동기		폴피스	철도차량																												
영문핵심어 (5개 이내)	Dual-rotor	Gear-free	Permanent magnet synchronous motor		Pole-piece	Railway vehicle																												

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	4
2. 연구수행내용 및 성과	11
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	155
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	160

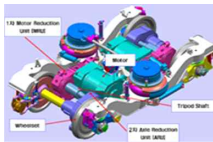
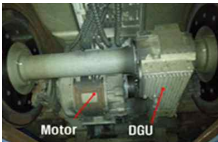
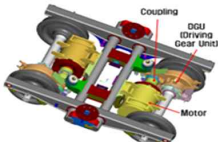
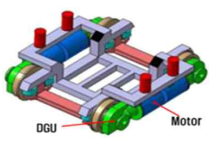
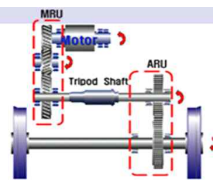
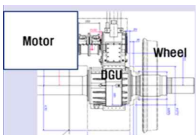
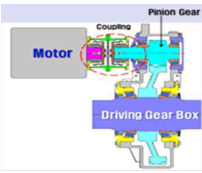
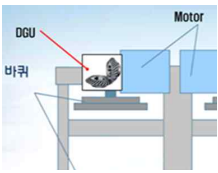
〈별첨〉 주관연구기관의 자체평가 의견서

1. 연구개발과제의 개요

가. 연구개발 배경

표 1-가-1은 기존 철도 차량별 구동장치의 구조 및 현황이다. 기존 철도차량용 구동 시스템의 견인전동기에서 출력되는 고속/저회전력은 기계적 감속기를 거쳐 휠에 저속/고회전력을 전달하게 된다. 일반적으로 트램용 구동장치의 경우 저상대차를 사용하며, 저상대차의 특성상 구동장치가 휠 내부에 설치되지 않고 휠 외부에 설치되기 때문에 기존의 기계적 감속기 구조와 달리 감속기에 차축과 수직으로 견인전동기가 체결되는 방식이 주로 적용된다. 그러나 이는 견인전동기가 감속기를 통해 차축에 병렬로 연결되는 구조이기에 전체 시스템 자체가 복잡하며 중량을 줄이는데 한계가 있다. 이러한 구조적 한계로 인해 트랜스미션 오일, 기계적 소음 및 진동에 관한 문제가 발생하며 감속기 기어 치의 마모에 의한 유지보수 비용 증가를 초래하게 된다. 기어의 마모 등은 시스템 수명을 단축시키며 이는 곧 제어의 신뢰성을 잃게 되는 것이다. 또한, 감속구동장치의 기계적 가동부위의 성능을 확보하기 위해서 지속적으로 유지보수를 필요로 하며 고장 및 손상 시 열차 운행이 중단 및 대규모 수선작업이 필연적이기 때문에 이로 인한 파급효과는 굉장히 큰 수준이다.

표 1-가-1 기존 철도차량별 구동 장치의 구조 및 현황

구분	고속철도 (KTX, KTX-산천)	고속철도 (HEMU-430X)	도시철도 전동차	무가선티램
차량				
대차				
구동 장치 구조				
특징	평행 2단 감속	평행 1단 감속	평행 1단 감속	수직 1단 감속

뿐만 아니라, 기어마모 및 베어링 손상 등의 고장 잠재요인 및 윤활유 사용에 따른 환경 문제 우려 또한 지속되고 있으며 감속기 불량으로 인한 장애 사례는 2004년부터 2014년까지 KTX 기준 21건이 발생하였으며 이는 그림 1-가-1에서 확인 할 수 있다. 열차운행 중단 사고로 인한 경제적 손실은 2건 기준 660억/년 수준이다. 2014년부터 2017년까지 서울 지하철에서 발생한 사고 및 운행 장애는 2014년에 7건, 2015년에 8건, 2016년에 17건, 2017년 상반기에 11건으로 총 43건이며 주요 원인은 시설과 전동차의 노후화에 있어 차량부품 장애(32.6%), 신호설비 등 장애(20.9%)이었다. 현재 서울 도시철도용 전동차는 57%가 21년 이상 사용된 노후 전동차이며 향후 감속기 및 견인전동기를 포함한 구동장치 부분에서의 지속적인 장애 발생이 예상된다. 이를 해결하기 위한 전동차 노후화에 따른 5년 단위의 교체 대상 물량 현황 및 예상 소요예산은 다음 표 1-가-2와 같다. 각 년차별로 대략 200량 전후의 노후 전동차에 대한 자료이며 4차 이후엔 향후 자료를 예측하여 작성되었다. 교체물량은 총 1,250량이며 총 소요예산은 17,820억원으로 상당한 손실이 발생하고 있다.

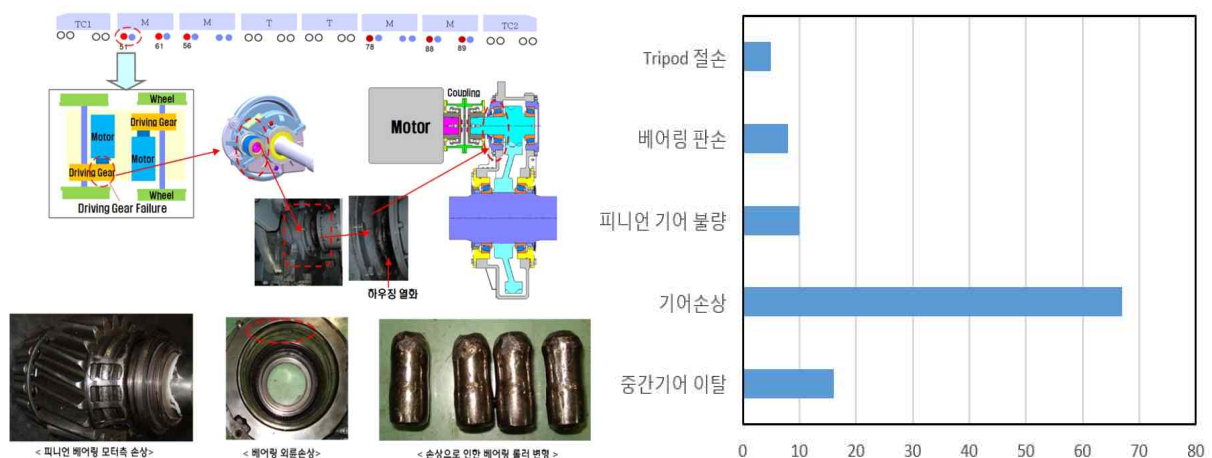


그림 1-가-1 기존의 도시철도차량(전동차) 감속구동장치 손상 사례(좌)와 기존의 KTX 감속구동장치 불량 사례(우 : KTX, 2004 ~ 2013)

표 1-가-2 서울 지하철(1~4호선) 전동차 노후화에 따른 교체 대상 물량 현황

구분	합계	1차 (2014~2018년)	2차 (2016~2020년)	3차 (2018~2022년)	4차 이후 (2019년 ~)
교체 물량	총 1,250량 (1호선 ~ 4호선)	200량 (2호선)	224량 (2호선)	196량 (2호선, 3호선)	630량 (1호선, 4호선)
소요 예산	17,820억원	2,700억원	3,024억원	2,646억원	9,450억원

나. 연구개발 필요성

기존 구동장치의 복잡성 및 구조적 한계성에 따른 경제적 손실뿐만 아니라 성능에서의 한계성 또한 존재한다. 기존 견인전동기는 유도전동기를 사용하며 효율은 최대 92%로 영구자석 동기전동기(PMSM)에 비해 상대적으로 저효율 견인전동기를 사용 중이며 기계적 감속기로 인해 약 3%의 추가적인 동력손실이 존재한다. 게다가 철도차량 종류에 따라 구동장치에 Overload Protection을 위한 추가적 장치가 필요하기에 효율은 더욱 나빠질 수 있다. 이를 개선하기 위해 최근 철도차량 견인전동기로 기존 유도전동기에서 고효율, 경량화가 가능한 PMSM 연구가 활발히 진행되고 있지만 여전히 기계적 감속기를 채용하고 있다는 단점이 존재한다. 따라서 철도차량용 구동장치에 있어서 기존의 시스템을 소형화, 경량화 및 유지보수가 용이한 시스템으로 대체할 수 있는 새로운 기술 개발이 필요한 상황이다.

2중 회전자 구조 PMSM (Dual-rotor Permanent magnet synchronous motor, DR-PMSM)은 기존의 PMSM과 다르게 외측 회전자와 내측 회전자가 각각 다른 속도로 회전하는 이중 회전자 구조이다. DR-PMSM은 내측 회전자가 저토크 특성을 가지며 외측 회전자가 고토크 특성을 갖는다. 이를 철도차량 구동용 시스템으로 적용하게 되면 고토크 특성이 나타나는 외측 회전자에 차륜이 직접 체결되는 구조가 된다.

그림 1-나-1과 그림 1-나-2는 DR-PMSM의 개념도와 PMSM 및 DR-PMSM의 구조 비교도이다. 그림에서 기계적 기어를 대신하는 마그네틱 기어 및 그것이 적용된 전동기에 대한 개념과 구조를 확인 할 수 있다. DR-PMSM은 기계식 기어 메커니즘을 이용한 감속 시스템이 갖는 다양한 문제에 대응 가능한 구조로 동력이 전달 가능하다. 또한 영구자석간의 자기력만을 이용하여 동력을 전달할 수 있는 마그네틱 기어와 PMSM을 결합한 형태로 PMSM과 비슷한 고효율 전동기이며 표 1-나-1에서 기존 유도 전동기와 DR-PMSM의 효율 비교를 확인 할 수 있다. 그림 1-나-3은 DR-PMSM의 적용을 위한 철도차량용 차륜과의 조합 방식의 분류이며 그 분류엔 독립 차륜방식과 차축정렬방식으로의 적용 등이 있다.

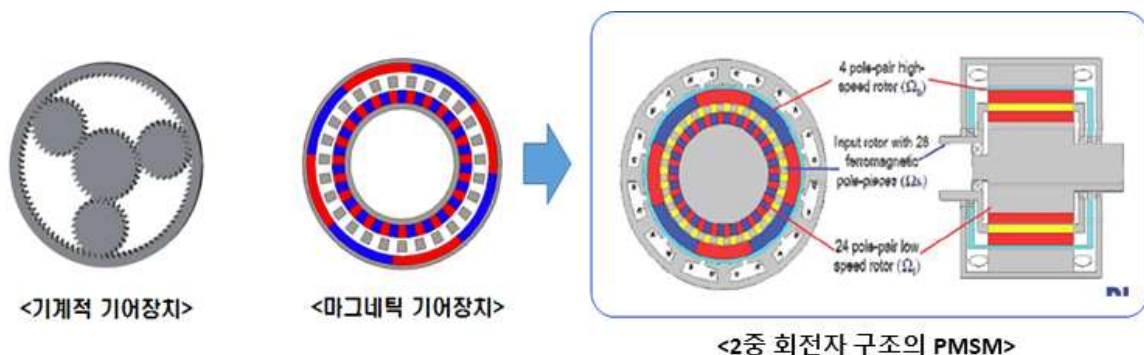


그림 1-나-1 감속기 기능이 포함된 DR-PMSM 개념도

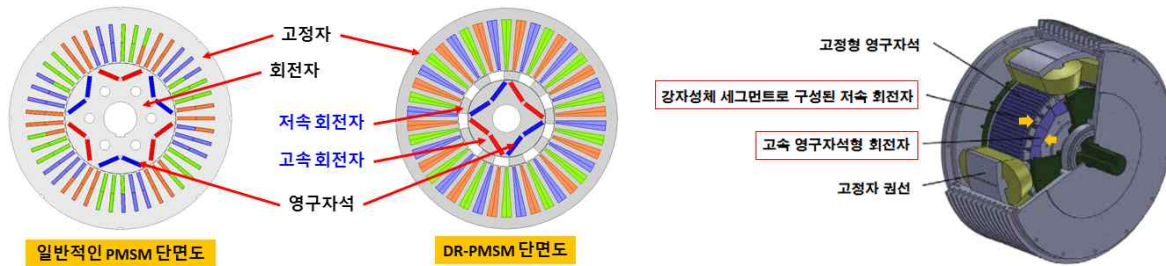


그림 1-나-2 일반적인 PMSM(좌)과 DR-PMSM(우)의 구조 비교도



그림 1-나-3 DR-PMSM의 적용을 위한 철도차량용 차륜과의 조합 방식 분류

표 1-나-1 기존 유도전동기와 기계적 감속기 효율 및 DR-PMSM 효율 비교

기존 유도전동기 + 기계적 감속기 효율	DR-PMSM 효율
$92\% \times 97.5\% = 89.7\%$	92% (▲2.3%)

최근 철도 차량의 경량화 및 저상화 연구가 활발해지며 철도차량 구동장치용 견인전동기에서 소형화를 위한 설계는 다른 전장품보다 우선 고려대상이다. 철도 차량별로 대차 하부 공간의 차이가 존재하며 그에 맞는 구동장치의 구조나 사이즈도 차이가 존재한다.

본 연구는 국내 최초의 철도차량용 DR-PMSM에 대한 연구이기에 철도차량용 견인전동기에서 용량이 가장 작은 트램용을 먼저 검토한다. 그림 1-나-4는 무가선티램 저상대차의 구조 및 기존 구동장치 구성품이다. 기존 트램의 경우 저상대차를 사용하기 때문에 대차 내부에 구동시스템을 장착할 수 있는 공간이 없어서 대차의 차륜 외측에 감속기와 견인전동기가 수직구조로 맞물려 장착되는 복잡한 구조이며 견인전동기로써 45kW급 유도전동기를 사용 중이다.

따라서 본 연구는 이를 구조적 단순화 및 고효율의 전동기로 대체하기 위해 그림 1-나-5와 같이 비접촉 방식의 감속기와 고효율의 PMSM이 일체화된 DR-PMSM의 원천기술을 개발하여 트램용 구동 시스템에 적용하고자 한다.

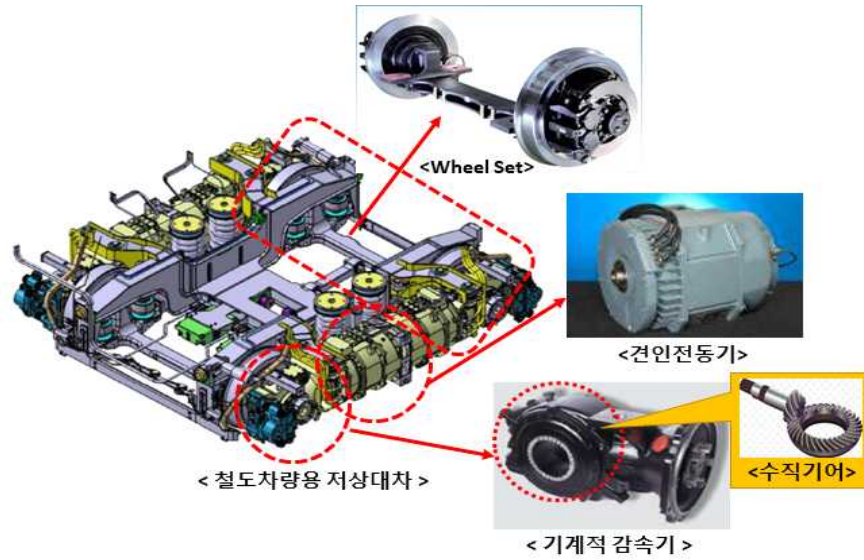


그림 1-나-4 무가선 트램 저장대차의 구조 및 기존 구동장치 구성품

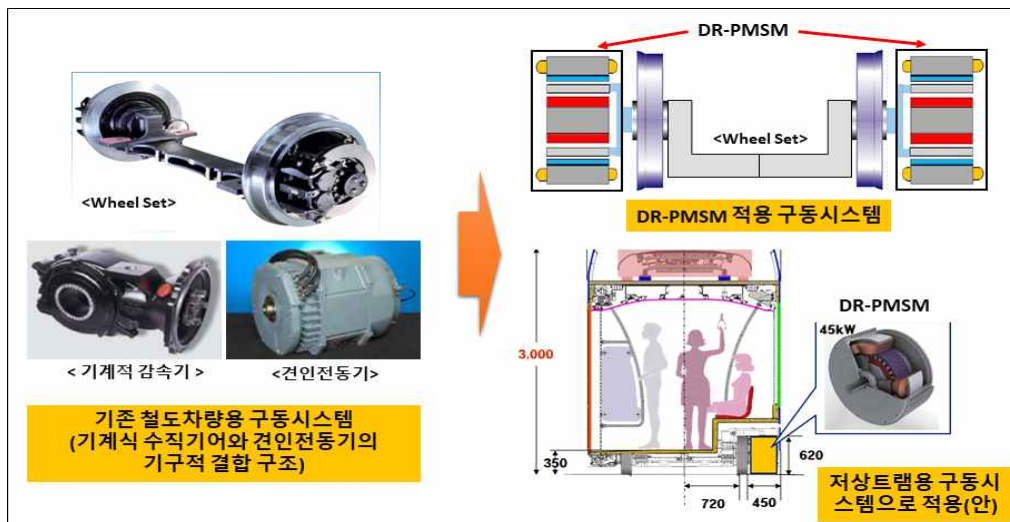


그림 1-나-5 무가선 트램 저장대차용 기존 구동시스템 개선을 위한 DR-PMSM 적용(안)

다. 연구개발 목표 및 내용

(1) 최종 목표

철도차량용 무기어 추진시스템 구현을 위한 비접촉 방식의 감속기와 견인전동기가 일체화된 2중 회전자 구조 동기전동기(DR-PMSM)의 원천기술 개발

(가) 비접촉 방식의 무기어 감속기 기능이 내재된 DR-PMSM 원천기술 개발

- ① 실모델 출력 45kW급, 효율 92% 이상
- ② 저속부 정격 시 토크 2004Nm, 저속부 속도 214rpm / 최고속도 시 토크 720Nm, 저속부 속도 600rpm

(나) 기존 IPMSM 제어방법에서 개선된 DR-PMSM 전용 제어 알고리즘의 연구 및 개발

(다) 설계 기법 및 제어기술 검증을 위한 시뮬레이션 및 축소형 시제품 제작

- ① 축소형 모델 출력 4.5kW급, 효율 92% 이상
- ② 저속부 정격 시 토크 200Nm, 저속부 속도 214rpm / 최고속도 시 토크 72Nm, 저속부 속도 600rpm

(라) DR-PMSM 성능 평가 기술 확보

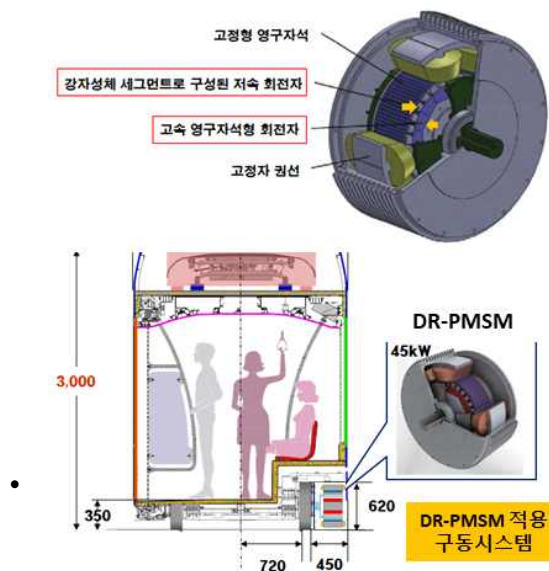


그림 1-다-1 DR-PMSM 구조 및 트램용 구동시스템 적용(안)

(2) 세부 목표

본 연구 개발의 세부목표는 다음과 같다.

(가) DR-PMSM 설계 기법 연구

(나) 45kW급 실모델 DR-PMSM 기본/상세 설계 연구

(다) 설계기법 적용 축소형 DR-PMSM 시제품 모델 기본/상세설계

(라) 설계기법 검증용 축소형 DR-PMSM 시제품 제작

(마) 설계기법 검증용 축소형 DR-PMSM 구동용 Drive 시제품 제작

(바) 45kW급 DR-PMSM 구동용 제어 알고리즘 연구

(사) 45kW급 DR-PMSM 구동환경을 고려한 시뮬레이션

(아) 45kW급 DR-PMSM의 부하장치 활용 성능 평가 방안 도출

(자) 축소형 DR-PMSM 및 Drive 시제품의 간이부하장치 활용 조합 성능
평가 연구

(차) 45kW급 DR-PMSM 보완 기술 도출

2. 연구수행내용 및 성과

가. 연구수행 내용

No.	연구 수행 내용	해당 페이지
1	연구개발 대상의 국내·외 현황	p. 12 ~
2	DR-PMSM의 개념 및 기법 연구	p. 27 ~
3	45kW급 DR-PMSM의 최종모델 도출	p. 36 ~
4	설계기법 검증을 위한 4.5kW급 DR-PMSM 기초/최종 설계 모델 도출	p. 74 ~
5	4.5kW급 DR-PMSM 시제품 제작	p. 91 ~
6	4.5kW급 DR-PMSM 제어 알고리즘 개발 및 구동 Drive 시제품 제작	p. 100
7	4.5kW급 DR-PMSM의 간이부하장치 활용 성능평가	p. 123

(1) 연구개발 대상의 국내·외 현황

(가) 국내·외 시장 동향

① 국내 시장 동향

㉠ 국기계적 감속기 시장

- 국내 기계식 감속기 시장 규모는 2011년도에 약 4천억원으로 매년 10% 정도 성장을 해 왔으며, 중소기업청의 최근 자료에 의하면, 유성감속기는 매년 10% 정도 성장하여 2010년 380억원에서 2015년엔 760억원에 이릅니다
- 기계식 기어박스 장치를 대표하는 감속기가 산업용 로봇을 비롯한 자동화 설비, 정밀기계, 의료 기기 등의 각종 자동화 장비 구동과 동력 전달 장치에 사용됨으로써 그 수요가 더욱 확대되고 있음
- 일반 동력용 감속기의 경우도 앞으로 지속적인 수요 증가가 예상되나, 국내 경기에 따라 다소 차이는 있을 것으로 예상되며, 특히 그동안 대규모의 투자가 이루어졌던 FPD 관련 산업에 적용됐던 감속기 수요가 상당히 큰 비중을 차지했으므로, 앞으로도 FPD 관련 투자의 영향이 매우 클 것으로 보임
- 또한 최근엔 산업용기기의 성능이 높아지면서 감속기의 고성능, 고정밀 요구가 더욱 높아지고 있다. 뿐만 아니라 환경 문제가 대두되면서 감속기 제조업체들은 고효율·친환경 제품들을 잇달아 출시하며 경쟁력 확보에 나서고 있음

㉡ 동기전동기 시장

- 우리나라의 동기전동기 시장은 2016년 5억 9,480만 달러에서 연평균 성장률 4.7%로 증가하여, 2021년에는 7억 4,870만 달러에 이를 것으로 전망됨

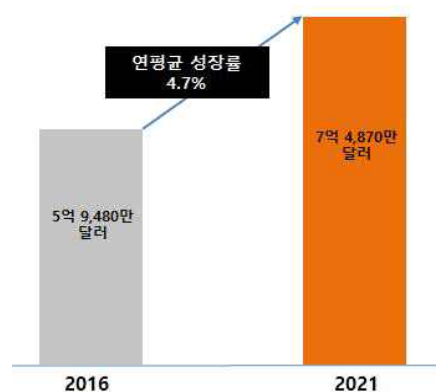


그림 2-가-1 우리나라 동기전동기 시장 규모 및 전망

- 우리나라의 동기전동기 시장은 최종 사용자 산업에 따라 석유 및 가스 산업, 화학 및 석유 화학 산업, 광업, 금속 산업, 제지 및 펄프 산업, 기타 산업으로 분류됨

- 철도산업이 포함되는 기타 산업은 2016년 2,650만 달러에서 연평균 성장률 5.4%로 증가하여, 2021년에는 3,440만 달러에 이를 것으로 전망됨

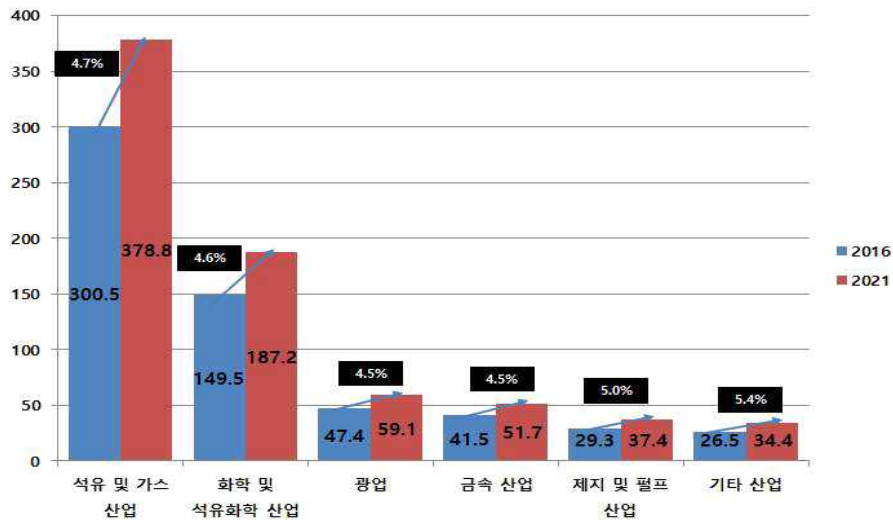


그림 2-가-2 최종 사용자 산업에 따른 우리나라 동기전동기 시장 규모 및 전망

㉔ 주요업체 동향

- DR-PMSM의 경우, 특정 분야에서 필요에 의해 먼저 시장이 형성될 가능성이 높으며, 마그네틱기어의 경우도 풍력발전 시스템 및 전기자동차 시스템 부분에서 먼저 수요시장이 형성되었음
- 이런 경향을 살펴보면 DR-PMSM의 경우도 마그네틱 기어 및 PMSM이 요구되는 풍력발전 견인시스템 부분에서 먼저 수요층이 형성될 가능성이 높으나, 일단 국내에서 DR-PMSM를 생산하는 업체는 현재 없는 상황임
- 기계식 기어박스로 대표되는 기계식 감속기 관련 업체는 최근 정부의 '최저효율제' 시행에 따른 고효율 모터 출시에 맞추어 태양광 발전시스템의 구동장치, 풍력 발전장치의 유성감속기, 전기차 및 철도용 트랜스액슬 등 그린사업의 핵심 부품으로서 감속기 제품 개발에도 주력하고 있으며, 사회적으로 환경 문제가 대두하면서 업체들은 고효율 친환경 제품들을 잇달아 출시하며 경쟁력 확보에 나서고 있음
- 대용량의 기계식 기어박스를 생산하는 기업은 효성, 두산중공업, 현대중공업, 우림기계, 현대 다이모스 등 소수에 불과하며, 일반 산업용 감속기의 경우, (주)삼양감속기, 아팩스다이나믹스 코리아, 인아오리엔탈모터, (주)국제산업기계 등이 있음
- 철도분야에서의 기계식 감속기 시장은 현대 다이모스사에서 200km/h급 간선철도 차량용 감속기 기술을 보유하고 있으나, 고속철도 시장에서는 국내의 기계식 감속기 제품도 실용화가 되지 않아 아직은 적용된 사례가 없음

② 국외 시장 동향

㉠ 기계적 감속기 시장

- 해외 기계식 감속기 시장 규모는 2010년 기준, 풍력용으로 약 43억 달러 수준이며, 2011년~2015년 연평균 10.6% 성장하여, 2015년에 65억 달러의 시장 규모가 형성됨. 전체 풍력 발전 시스템에서 기어박스가 원가에서 차지하는 비중은 12.9%이며, 기어박스의 개당 가격은 12.5~25만 달러 수준
- 풍력용 기어박스는 기어박스를 자체 제작하는 OEM(In-house)과 전문 제작하는 독립 제작사로 구분이 가능하며, GE, Gamesa, Enercon, Suzlon, Siemens 등의 선두기업은 In-house나 자회사 형태로 기어박스 자체 제작사를 보유하고 있음. 2010년 기준 업체별 세계 시장 점유율은 Winergy(30~40%), Hansen(10~20%), Bosch·Moventas(각 5~10%) 등으로 과점 시장을 형성하고 있음



그림 2-가-3 풍력용 기어박스의 해외시장 규모 변화 특성

㉡ 동기전동기 시장

- 전 세계 동기전동기 시장은 2016년 184억 1,000만 달러에서 연평균 성장률 4.15%로 증가하여, 2021년에는 225억 6,000만 달러에 이를 것으로 전망됨

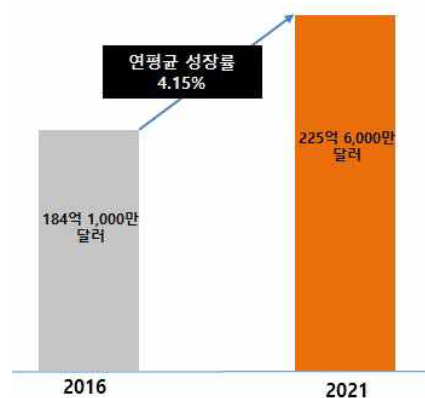


그림 2-가-4 국외 동기전동기 시장의 제품별 시장 규모 및 전망

- 전 세계 동기전동기 시장은 제품에 따라 직류식 동기전동기, 비직류식 동기전동기로 분류되며, 2016년을 기준으로 직류식 동기전동기는 61.05%의 점유율을 차지하였으며, 그 뒤를 비직류식 동기전동기가 38.95%로 뒤따르고 있음
- 직류식 동기전동기는 2016년 112억 4,000만 달러에서 연평균 성장률 3.67%로 증가하여, 2021년에는 134억 6,000만 달러에 이를 것으로 전망됨
- 비직류식 동기전동기는 2016년 71억 7,000만 달러에서 연평균 성장률 4.88%로 증가하여, 2021년에는 91억 달러에 이를 것으로 전망됨

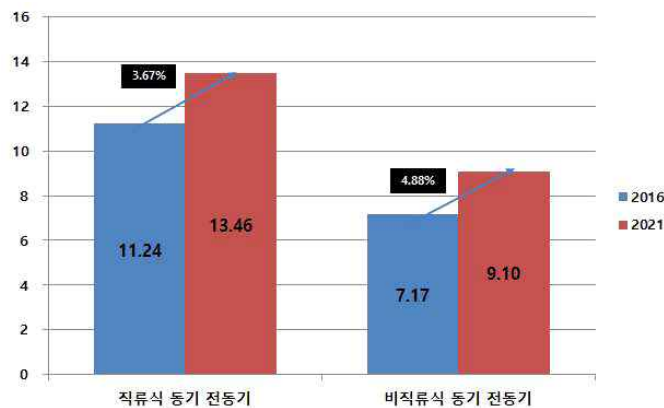


그림 2-가-5 국외 글로벌 동기전동기 시장의 제품별 시장 규모 및 전망

㉠ 주요업체 동향

- 해외에서는 마그네틱 기어 및 DR-PMSM에 대한 연구가 다수 진행되고 있지만 견인전동기용으로 실용화된 사례는 없는 상황임
- 전기자동차나 풍력발전 분야에서 마그네틱 기어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 대표적으로 영국의 Magnomatics사는 마그네틱 기어와 DR-PMSM 관련 특허를 다수 보유하고 있으며, DR-PMSM의 경우 전기자전거부터 전기자동차, 철도차량, 잠수함 추진용으로 300kW급까지 개발을 하였지만 아직 실용화 실적이 없는 상황임
- 철도 분야에서의 기계식 감속기 시장은 거의 유럽(독일)의 감속기 제작사인 VOITH에 의해 주도되고 있음
- VOITH사는 최근 고속철도용 감속기로 최고속도 440km/h까지도 주행이 가능한 감속기를 개발하였으며, 알루미늄 케이스를 적용하여 신뢰성이 향상된 감속기 개발도 진행하고 있음
- 세계 동기전동기 시장에서 주요 기업은 Toshiba Corporation (일본), ABB Ltd.(스위스), Rockwell Automation Inc. (미국), Siemens AG (독일), General Electric (미국) 등이 있음
- Toshiba Corporation (일본)
 - 모터, PLC, 조명, 전력전자, 시스템 엔지니어링, 산업 시스템 및 특수 제품을 제조 및 판매하는 업체임

표 2-가-1 Toshiba Corporation의 주요 제품

모터유형	제품명
Synchronous Motor	- Low Speed Synchronous Motors - High Speed Synchronous Motors - Large High-Speed 2-Pole Synchronous Motors - Medium-High Power Synchronous Motors

- ABB Ltd (스위스)

- 전력 및 자동화 기술을 제조하는 업체로서, 고전압 유도 모터, 저전압 모터, 저전압 AC 모터, 동기식 모터 등 다양한 모터를 판매하고 있음

표 2-가-2 ABB Ltd의 주요 제품

모터유형	제품명
Synchronous Motor	- Synchronous Direct-on-Line 4- and 6- Poles Motors - Synchronous Variable Speed 4- and 6- Poles Motors - Synchronous Direct-on-Line 8- to 40- Poles Motors - Synchronous Variable Speed 4- to 40- Poles Motors

- Rockwell Automation Inc (미국)

- 산업 자동화에 이용되는 모터 제어 제품 및 서비스를 제공하는 업체임
- 서보 드라이브와 모터 기술을 하나의 기계에 결합한 Allen-Bradley Kinetix 6000M 통합 드라이브를 출시하였음

표 2-가-3 Rockwell Automation Inc의 주요 제품

모터유형	제품명
Industrial Motors	- CM103 Totally Enclosed - CM107 Open Enclosure - CM220 Economical Totally Enclosed - CM111 Severe-Duty - CM112 IEEE 841 - CM115 Washdown-Duty - CM118 Stainless-Steel - CM211 NEMA Severe-Duty Inverter - CM212 NEMA Severe-Duty IEEE 841 - CM224 Explosion-Proof Inverter - CM201 Enclosed Small - CM202 Enclosed NEMA Frame - CM203 Vector-duty AC Motors - CM221 NEMA Frame Enclosed Inverter-Duty - CM222 NEMA Frame Inverter-Duty - CM227 NEMA Frame Inverter with Brake

Servo Motors	- LDC Series - LDL Series - VP Servo Motors - MP-Series Servo motors - RDD-Series - TL-Series Compact - Kinetics 6000 M Integrated
--------------	--

- Siemens AG (독일)
 - 저전압 모터, 서보 모터, DC 모터, 전기 모터 등 광범위한 모터를 제조 및 판매를 하는 업체임
 - 2016년 5월에 동기식 모터의 원리를 기반으로 하여 고속에서도 안전하며, 우수한 제어성을 가진 SIMOTICS 릴렉 턴트 모터를 출시하였음

표 2-가-4 Siemens AG의 주요 제품

모터유형	제품명
High Power Motors	- SIMOTICS HV Series H-modyn - SIMOTICS HV Series A-modyn
High Torque Motors	- SIMOTICS HV Series Metals
Specialized Motors	- SIMOTICS HV Series High Speed Synchronous

- General Electric (미국)
 - 전력, 항공, 헬스케어, 운동 등의 분야에서 필요한 모터를 제조 및 판매하고 있는 업체임
 - 2014년 9월에 중형 및 대형 동기식 모터의 제어 및 관리를 위해 Multilin이라는 새로운 모터 보호 시스템을 출시함

표 2-가-5 General Electric의 주요 제품

모터유형	제품명
Synchronous Motor	- Large AC Synchronous Motors - Quadramatic - Series 9000 &#8211;RCM

(나) 국내·외 논문 및 특허 현황

① 국내·외 특허 동향

㉔ 연도별/국가별 전체 특허 동향 및 개별 국가별 특허동향

- 그림 2-가-6에서 2중 회전자 구조 동기전동기 기술의 전체 특허 동향을 살펴보면, 1990년대 말부터 2000년대 후반까지는 증가하다가, 2009년에 정점을 찍고 소폭 감소하는 추세로 나타남
- 그림 2-가-7에서 2중 회전자 구조 동기전동기 기술 관련하여 한국(KR)은 165건의 특허가 출원된 것으로 나타나며, 2000년대 초반부터 소폭 증가한 후 과형을 이루는 모습을 보이다가 최근 다시 급증한 것으로 나타남
- 2중 회전자 구조 동기전동기 기술에서 미국(US)은 304건의 특허가 출원된 것으로 나타나며, 분석구간 초기부터 2000년대 중반까지 지속적으로 증가한 후 최근까지 높은 수준의 출원활동을 하는 것으로 나타남
- 2중 회전자 구조 동기전동기 기술에서 일본(JP) 특허는 304건으로 분석구간 초기부터 높은 수준의 출원을 보였으나 점차 감소하는 추세로 나타남
- 2중 회전자 구조 동기전동기 기술 기술에서 유럽(EP)은 126건의 특허가 출원된 것으로 나타나며, 분석구간 초기부터 현재까지 연 10건 내외로 타 국가 대비 적은 건의 특허를 출원하여 전반적으로 미비한 모습을 보임
- 전체 특허의 Trend는 1990년대 일본 → 2000년대 한국 → 2010년대 미국의 양상을 보임

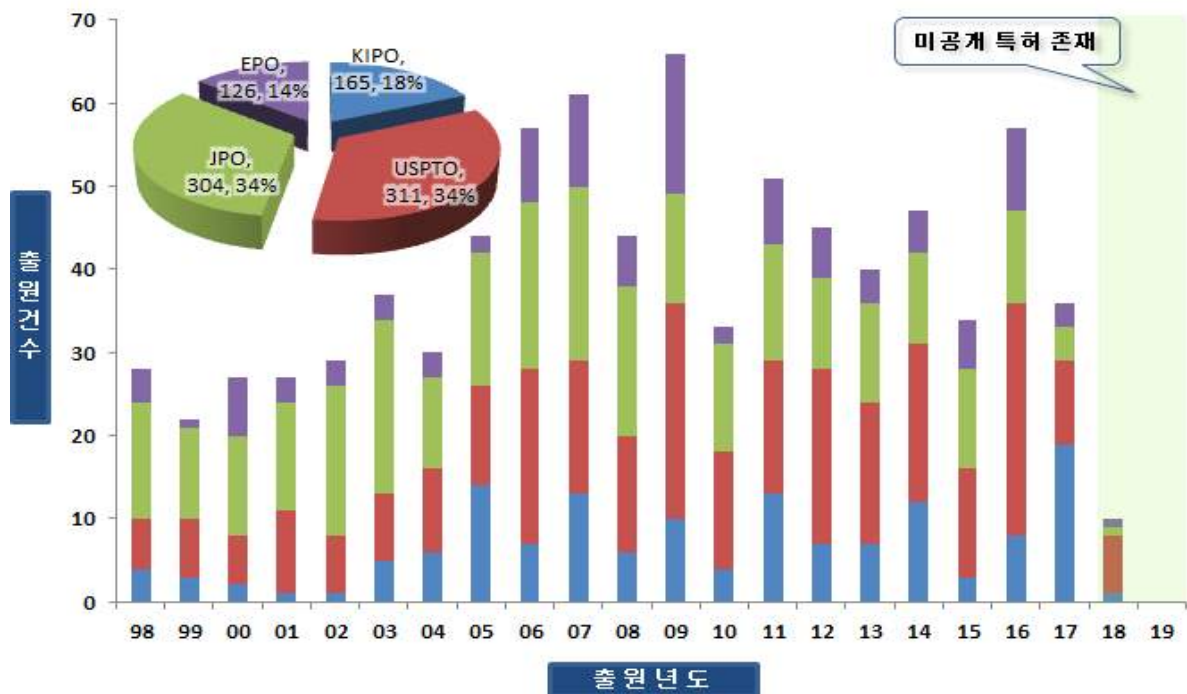


그림 2-가-6 전체 국가별, 연도별 특허 출원 동향

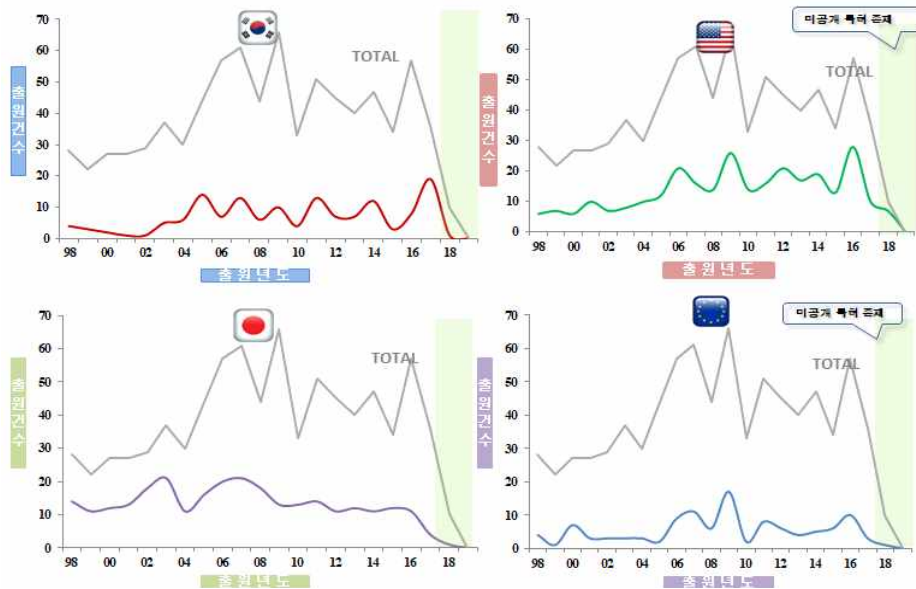


그림 2-가-7 주요출원국 연도별 출원 동향

㉠ 분류 기술별 특허 동향 및 기술 분야별 주요 출원인 동향

- 그림 2-가-8에서 2중 회전자 구조 동기전동기 기술과 관련하여 전체 출원동향을 거시적으로 살펴보면, 분석구간 초기부터 지속적으로 증가하다가 2000년대 후반에 정점을 찍고 최근까지 높은 수준의 출원양상을 보임
- 분석구간 초반부터 2000년대 중반까지는 전동기 설계 분야가 높은 수준의 출원활동을 하여 전체트렌드를 주도하였으며, 최근에는 마그네틱 기어/베어링 분야가 증가하여 전체그래프에 영향을 미치는 것으로 분석됨
- 기술분야별 점유율을 살펴보면 전동기 설계 기술분야가 36%로 높은 점유율을 차지하고 있으며, 다음으로 마그네틱 기어/베어링 기술 분야가 25%, 영구자석 설계기술 19%, 전동기 제작 기술 12%, 신뢰성 확보 기술 8%를 차지한 것으로 나타나 상대적으로 전동기 설계 기술분야를 중심으로 연구개발이 이루어지고 있음

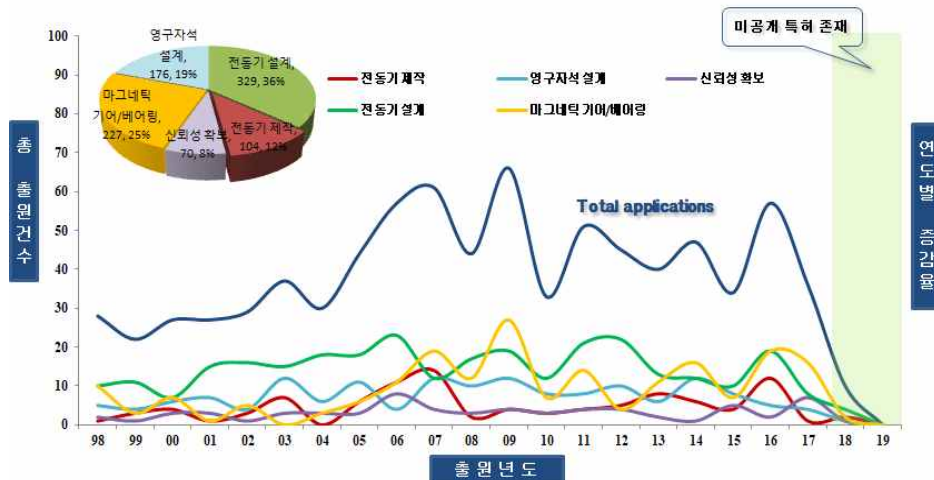


그림 2-가-8 연도별 분류 기술별 특허출원현황

- 그림 2-가-9의 전체 특허 주요 출원인 분석결과, 아모텍(한국), HITACHI(일본), Nissan(일본), Honda motor(일본), Magnomatics Limited(영국)순으로 나타남
- 국내 전자부품 제조업체인 아모텍(한국)사와 HITACHI(일본)사가 공동 최다출원인으로 각각 34건을 출원하였으며, 뒤를 이어 Nissan Motor(일본)와 Honda Motor(일본)가 각각 33건의 특허출원을 한 것으로 나타남
- 일본기업인 HITACHI, Nissan, Honda motor은 자국 내의 시장에 특허출원을 활발하게 하여 내수시장 확대에 초점을 두는 것으로 판단됨
- 최다 출원인인 아모텍사 및 HITACHI(일본)사는 국내뿐만 아니라 주요국에 모두 진출하여 해외시장 진출에 관심이 높은 것으로 판단되며 영국기업인 Magnomatics Limited사는 미국 시장에서 출원건수가 가장 많은 것으로 봐서 미국시장 선점을 꾀하는 것으로 판단됨

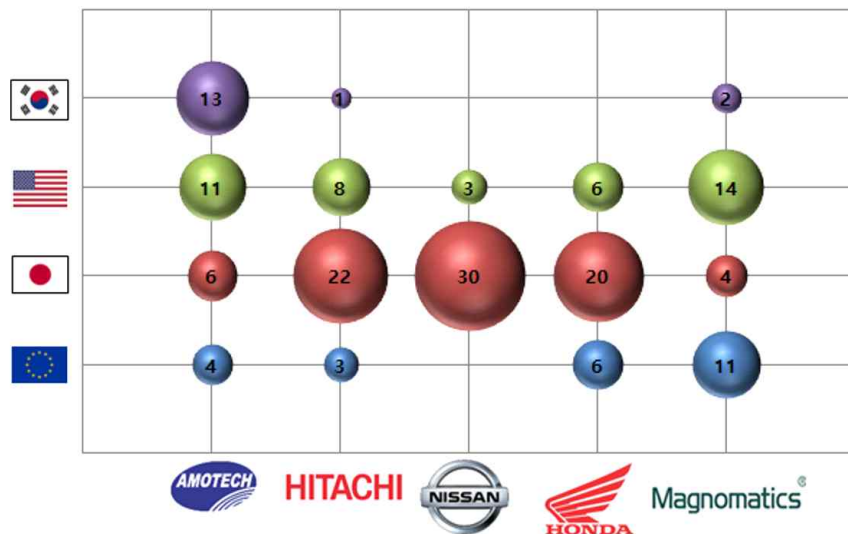
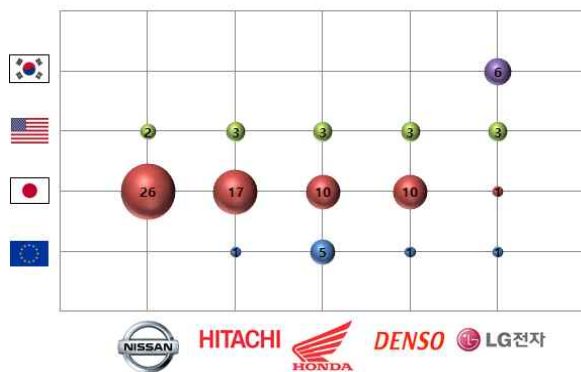


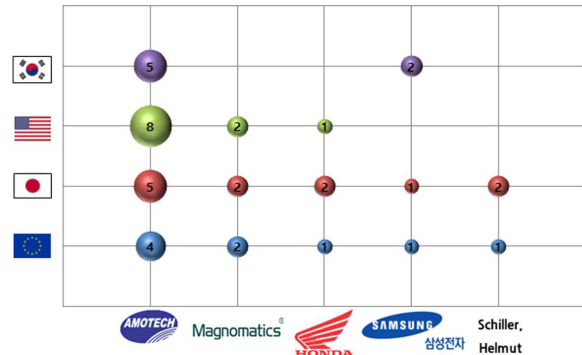
그림 2-가-9 기술별 주요출원인 특허 출원현황

- 그림 2-가-10은 기술 분야별 주요출원인 동향에 대해 표로 제시하며 그 기술은 전동기 설계, 전동기 제작, 영구자석 설계, 신뢰성 향상 및 마그네틱 기어/베어링 기술분야로 형성됨
- 그림 2-가-10 (a)의 전동기 설계 기술 관련된 특허의 주요 출원인은 일본기업인 Nissan Motor, HITACHI, HONDA, DENSO사와 한국의 LG전자사 등이 있으며 주요 출원인이 Nissan Motor, HITACHI, HONDA, DENSO사로 일본에 집중되어 있음
- 국내에 특허 출원인은 LG전자 뿐이며 이는 국내 시장에 대한 매력도가 낮은 것으로 유추 가능하며 LG전자는 자국 시장 뿐 아니라 해외시장 진출에 관심이 높은 것으로 판단됨
- 그림 2-가-10 (b)는 전동기 제작 기술분야 주요 출원인에 대한 그림이며 상위 출원인으로는 아모텍(한국) 22건, Magnomatics Limited(영국) 6건, Honda Motor(일본) 4건, 삼성전자(한국) 4건, Schiller, Helmut(독일) 3건의 출원을 한 것으로 나타남
- 아모텍사가 전동기 제작 기술분야에서 압도적인 출원활동을 보이며, 유일하게 분석대상 국가 전체에 출원하였으며, 특히 국내보다 해외 권리 확보에 적극적인 것으로 분석

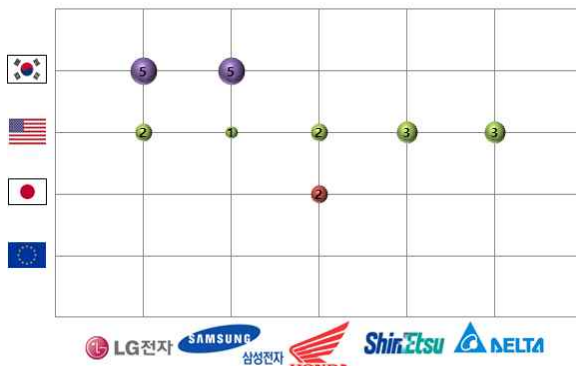
- 그림 2-가-10 (c)의 영구자석 설계 기술 분야별 주요출원인은 LG전자(한국) 7건, 삼성전자(한국) 6건, Honda Motor(일본) 4건, Shin-Etsu Chemical(일본) 3건, DELTA ELECTRONICS(타이완)으로 나타나 영구자석 설계 기술 분야는 아시아 전자기업에서 연구개발이 활발
- 주요 출원인 모두 미국시장에 진출한 것은 해당 시장의 진입장벽이 높지 않거나 시장 매력도 및 관심도가 높다고 판단되며 국내 기업은 국내시장 기반 미국시장을 준비 중이나 Shin-Etsu Chemical(일본), DELTA ELECTRONICS(타이완)사는 미국시장에서만 연구개발 중
- 그림 2-가-10 (d)의 신뢰성 향상 기술 분야의 주요 출원인은 HITACHI(일본) 7건, 선상규 7건, LG전자 7건, Honda Motor(일본) 6건, Denso(일본) 5건으로 나타나 한국과 일본국적 출원인들이 신뢰성 향상 관련 기술을 선도
- 주요출원인 중 HITACHI와 LG전자는 주요국 모두에서 출원 활동 중이며 개인출원인 선상규와 HONDA사는 자국시장 내에서만 출원하여, 자국시장에만 집중하는 것으로 확인
- 그림 2-가-10 (e)의 마그네틱 기어/베어링 기술 분야 주요 출원인은 Magnomatics(영국) 25건, Genesis Robotics(캐나다) 21건, ROLLS-ROYCE plc(영국) 18건, Active Power(미국) 11건, ResMed Motor Technologies(미국) 10건순이며 주요출원인 모두 미국시장을 중심으로 출원 활동을 보이며, 대다수의 출원인이 해외진출에 있어 적극적인 것으로 나타남
- Magnomatics(영국), ROLLS-ROYCE plc(영국)은 유럽보다 미국에서 특허출원건수가 더 많은 것이 특징적이며, 주요 국가 전체에 출원한 것으로 나타남



(a) 전동기 설계 기술분야 주요 출원인



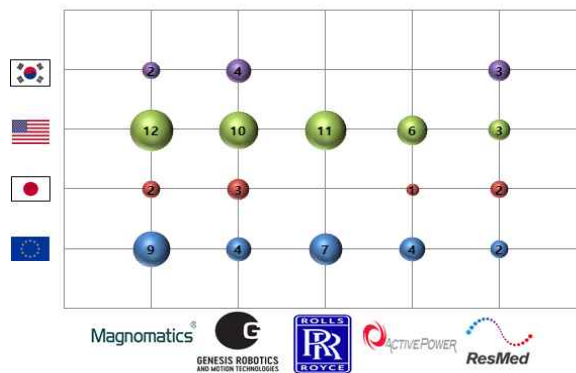
(b) 전동기 제작 기술분야 주요 출원인



(c) 영구자석 설계 기술분야 주요 출원인



(d) 신뢰성 향상 기술분야 주요 출원인

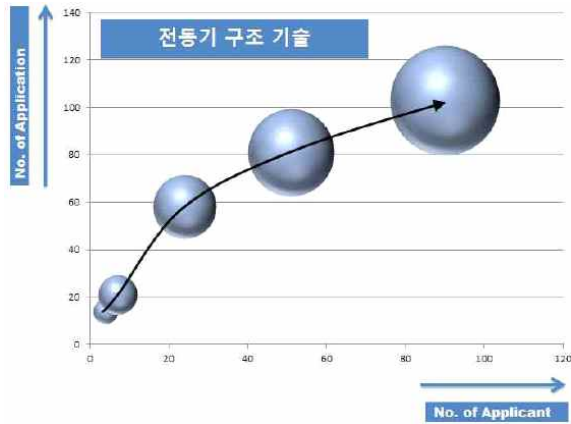


(e) 마그네틱 기어/베어링 기술 분야 주요 출원인

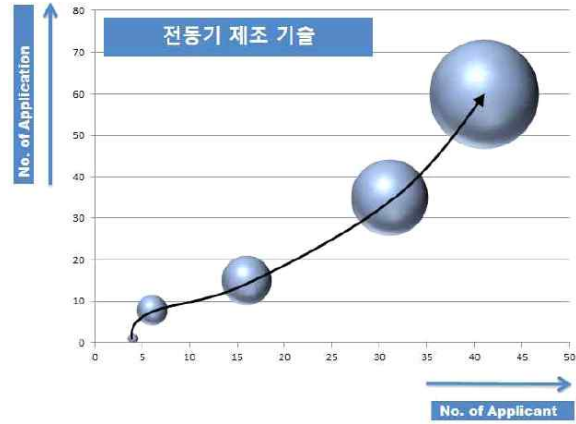
그림 2-가-10 기술 분야별 주요출원인 특허 현황

㉔ 분류 기술별 기술 성장단계 분석

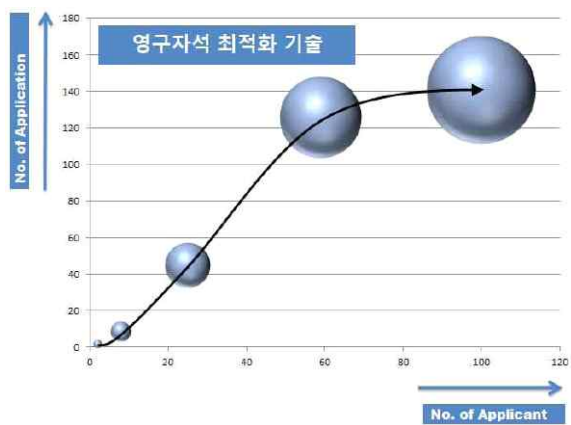
- 그림 2-가-11의 기술 분야별 기술 성장단계 분석은 이중 회전자 구조의 영구자석 동기전동기와 관련된 기술 분야의 전체 및 기술 분류별 기술위치를 포트폴리오로 나타낸 것으로 전체 특허 출원 중 최근의 특허출원 동향을 5개 구간(1구간 1991년~1996년, 2구간 1997년~2002년, 3구간 2003~2008년, 4구간 2009년~2014년, 5구간 2015년~2020년)으로 나누어 각각의 구간별 특허출원인수 및 특허출원건수를 나타내어 특허출원동향을 통한 기술의 위치를 살펴볼 수 있음
- 이중 회전자 구조의 영구자석 동기전동기 구조 기술의 기술위치는 2구간부터 5구간까지 전체적으로 특허출원인수 및 특허출원건수가 계속 증가하는 성장기 양상을 보임
- 이중 회전자 구조의 영구자석 동기전동기 제조 기술의 기술위치는 2구간부터 5구간까지 전체적으로 특허출원인수 및 특허출원건수가 계속 증가하는 성장기 양상을 보임
- 영구자석 최적화 기술의 기술위치는 2구간부터 5구간까지 전체적으로 특허출원인수 및 특허출원건수가 계속 증가하는 성장기 양상을 보이지만, 4구간부터 5구간까지 특허출원건수의 증가세가 다수 주춤하는 모습을 보임
- 이중 회전자 구조의 영구자석 동기전동기 신뢰성 확보 기술의 기술위치는 2구간부터 5구간까지 전체적으로 특허출원인수 및 특허출원건수가 계속 증가하는 성장기 양상을 보임
- 마그네틱 기어 기술의 기술위치는 2구간부터 4구간까지 특허출원인수 및 특허출원건수가 계속 증가하는 성장기 양상을 보이지만, 4구간부터 5구간까지 특허출원건수와 특허출원인수가 다소 감소하는 쇠퇴기 양상을 보임



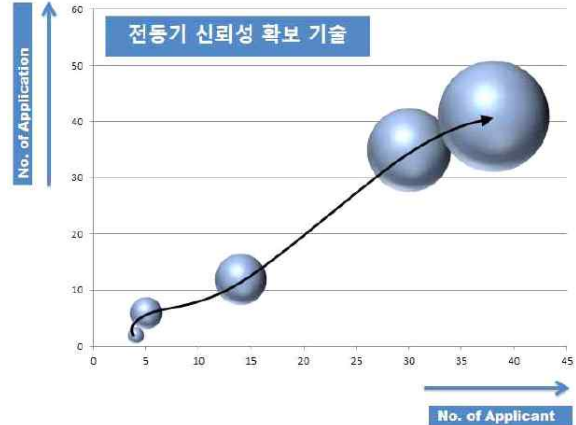
(a) 전동기 구조 기술의 성장단계



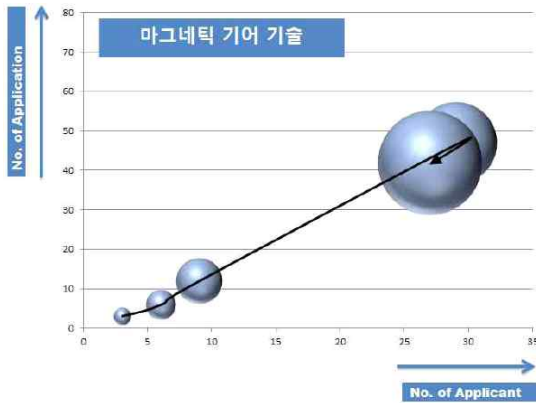
(b) 전동기 제조 기술의 성장단계



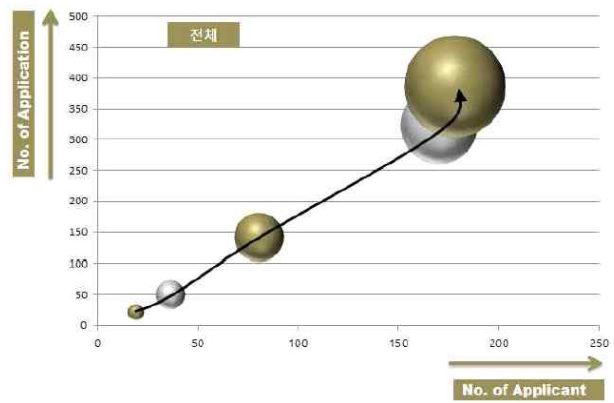
(c) 영구자석 최적화 기술의 성장단계



(d) 전동기 신뢰성 확보 기술의 성장단계



(e) 마그네틱 기어 기술의 성장단계



(f) 분류된 전체 기술의 성장단계

그림 2-가-11 기술 분야별 기술 성장단계 분석

㉠ 핵심특허 현황

- 관심 기술 분야에 대한 특허 도출 후 유효성이 검증된 유효특허를 선정함. 검토 결과 관련성이 높은 특허를 선정함

표 2-가-6 핵심특허 리스트

번호	등록(공개)번호	출원일	발명의 명칭 또는 기술내용	출원인
1	CN109617348B	2020.11.03	Permanent magnet array magnetic gear motor	Jiangsu University
2	WO2020174936A1	2020.01.21	Magnetic-geared-motor	Panasonic
3	KR2183912B1	2019.08.30	마그네틱 기어의 제작 방법	충남대학교
4	CN201811363978	2018.11.16	외부 고정자, 변조된 회전자 및 내부 회전자, 전기자 권선 및 비자기 전도성 회전 샤프트를 포함하는 새로운 유형의 영구자석 어레이 자기 기어 모터	University JIangsu
5	CN201811207994	2018.10.17	케이싱을 포함하는 콤팩트한 구조와 저소음의 동축 이중 출력 메커니즘	GUANGDONG MIDEA WHITE ELECTRICAL APPLIANCE TECH INNOVATION CENTER CO LTD MIDEA GROUP CO LTD
6	KR20200029723A	2018.09.11	에어 베리어를 갖는 마그네틱 기어	조선대학교
7	KR20200030646A	2018.09.11	브리지 일체형 폴 피스를 갖는 마그네틱 기어	조선대학교
8	CN201810440188	2018.05.08	전기 자동차용 이중 고정자 일체형 자기 유성 기어 복합 모터	Univerisity Zhaoqing
9	JP2018-029161A	2018.02.21	제어부는 토크 센서의 검출 값에 따라 폴피스 이동을 실시하는 전달 효율이 높은 자기 기어 장치	Honda motor co LTD
10	CN201711308185	2017.12.11	외부 고정자, 변조된 회전자 및 동심원으로 배열되고 외부에서 내부로 중첩된 내부 회전자를 포함하는 자기 기어 복합 모터	University Huazhong science tech
11	KR1858687B1	2017.09.14	가변 토크 마그네틱 커플링	(주)포스코 (주)피에스텍
12	KR1854723B1	2017.06.21	이중 여자 마그네틱 기어드 전동기	동아대학교
13	KR20170078494A	2017.04.28	가변 토크 마그네틱 커플링	(주)피에스텍 (주)포스코
14	CN201610928904	2016.10.31	고정자, 외부 회전자, 내부 회전자 및 회전축을 포함하는 펄드 변조 이중 회전자 브러시리스 이중 공급 풍력 발전기	Southeast University
15	CN201610817581	2016.09.12	할박 영구자석 어레이와 자기장 변조 원리를 채용한 브러시리스 듀얼 모터	Univ JIangsu
16	KR1770695B1	2016.03.21	폴 피스의 개수 및 극수의 변환이 가능한 마그네틱 기어	조선대학교
17	KR1710916B1	2016.03.21	회동형 폴 피스 모듈 및 이를 구비한 마그네틱 기어	조선대학교

18	KR1789138B1	2016.03.15	전달 토크 특성 개선을 위한 폴 피스를 갖는 마그네틱 기어	조선대학교
19	CN201510364211	2015.06.26	비접촉 변속 구동에 적합하고, 저속 회전자, 고속 회전자 및 고정자를 포함한 축 방향이 가변 속도 및 일정한 주파수를 실현할 수 있는 이중 고정자 영구자석 브러시리스 이중 공급 풍력 발전기	Univ china Petroleum
20	CN201510009922	2015.01.08		Southeast University
21	KR1669984B1	2014.09.03	돌극형 마그네틱 기어	조선대학교
22	KR1537046B1	2014.01.28	동축 마그네틱 기어	동아대학교
23	KR1501549B1	2013.10.30	마그네틱 커플링 장치 및 이를 이용한 유체펌프	한국에너지기술연 구원
24	CN201120321197	2011.08.30	외측 로터, 고정 마그네틱 링 및 외측에서 내측으로 배열되고 동축인 내측 로터를 포함하는 동축 마그네틱 기어	Southeast University
25	CN201110252784	2011.08.30	외부 회전자, 고정 자기 링 및 외측에서 내측으로 배열되고 동축인 내측 로터를 포함하는 동축 마그네틱 기어	Southeast University
26	CN201110237629	2011.08.18	비접촉식 가변 속도 드라이브 경우에 적합한 외부 회전자 집중 자기 기어	Zhejiang University
27	US8598759	2010.12.21	Magnetic gear arrangement	Rolls-Royce PLC
28	JP2011-045233A	2010.02.25	더블 마그네틱 전동기 (모터)	Yukichi Engineering & Technology Co.
29	KR1665691B1	2009.09.02	자기적 기어형 발전기, 에너지 변환 장치, 풍력 터빈 및 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환하는 방법	제너럴 일렉트릭 컴퍼니
30	JP2009-182301A	2009.08.05	입력측으로부터 입력된 토크를 자기적인 결합 상태를 이용해서 소정의 속도비로 출력측에 전달하는 자기 기어 및 그것을 탑재한 차량	Mitsubishi electric Corp
31	US9099895	2009.05.12	Magnetic pole-piece structure	Magnomatics
32	EP02255107B1	2009.02.20	VARIABLE MAGNETIC GEARS	Magnomatics
33	US7982351	2007.04.23	Electrical machines	Magnomatics

② 국내·외 논문 동향

- 표 2-가-7은 2중 회전자 구조 전동기에 대한 주요 논문 현황임 주로 마그네틱 기어에 대한 논문이 주를 이루며 마그네틱 기어를 이용한 전동기에 대한 논문도 간혹 보이나 철도차량용 2중 회전자 구조 전동기에 대한 설계 논문은 찾아보기 어려움

표 2-가-7 DR-PMSM 관련 주요 논문 현황

번호	논문제목	발표기관	저널명	게재년/월
1	편심 자석 로터의 내·외측 자기장 변조를 이용한 마그네틱 하모닉 기어	한국교통대학교	한국생산제조 학회지	2020.10

2	A Dual-Modulator Magnetic-Geared Machine for Tidal-Power Generation	University of Hong Kong	IEEE TRANS ACTIONS ON MAGNETICS	2020.08
3	마그네틱 감속기의 극수비 영향 분석	한국교통대학교	한국산학기술학회	2020.01
4	A Consequent-Pole PM Magnetic-Geared Double-Rotor Machine With Flux-Weakening Ability for Hybrid Electric Vehicle Application	University of Hong Kong	IEEE TRANS ACTIONS ON MAGNETICS	2019.07
5	Analytical Investigation of the On-Load Electromagnetic Performance of Magnetic-Geared Permanent-Magnet Machines	Chungnam National University	IEEE TRANS ACTIONS ON MAGNETICS	2018.11
6	Comparison of Radial Force at Modulating Pieces in Coaxial Magnetic Gear and Magnetic Geared Machine	Dong-A University	IEEE TRANS ACTIONS ON MAGNETICS	2018.03
7	Key Issues in Design and Manufacture of Magnetic-Geared Dual-Rotor Motor for Hybrid Vehicles	Southeast University	IEEE Transactions on Energy Conversion	2017.04
8	Motion Control and Performance Evaluation of a Magnetic-Geared Dual-Rotor Motor in Hybrid Powertrain	Southeast University	IEEE Transactions on Industrial Electronics	2016.11
9	Analysis and Control of Complementary Magnetic-Geared Dual-Rotor Motor	Southeast University	IEEE Transactions on Industrial Electronics	2016.06
10	Analysis of a Novel Magnetic-Geared Dual-Rotor Motor With Complementary Structure	Southeast University	IEEE Transactions on Industrial Electronics	2015.05
11	Design and Analysis of Magnetic-Geared Motor With Field Windings	Osaka University	IEEE Transactions on Magnetics	2014.11
12	A Novel Rotor Position Detection Method for Sensorless Control of Magnetic-Geared Permanent-Magnet Brushless Motor	Zhejiang University	IEEE Transactions on Magnetics	2013.07
13	Torque-Speed Characteristics Analysis of a Magnetic-Geared Motor Using Finite Element Method Coupled With Vector Control	Osaka University Suita	IEEE Transactions on Magnetics	2013.05

(2) DR-PMSM의 개념 및 기법 연구

(가) DR-PMSM의 구조

① 기존 시스템 한계점 및 새로운 구조의 DR-PMSM 필요성

현재까지의 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle, HEV), 전기자동차(Electric Vehicle, EV) 또는 철도차량(Railway Vehicle)용 구동장치는 대부분이 고속으로 회전하는 견인전동기와 저속의 고토크의 특성을 갖는 기계적 감속장치로 그림 2-가-12와 같이 구성되며, 최종적으로 토크가 전달되는 차축/휠로 구성된다.

기계식 감속장치는 기계적 소음과 진동이 크며, 감속장치 내부 기어 치의 마모에 의한 유지보수 비용 증가가 초래하는 단점이 있다. 따라서, 최근에는 그림 2-가-13과 같이 기계식 기어의 단점을 보완할 수 있는 마그네틱 기어가 활발히 연구가 진행되고 있다. 마그네틱 기어는 물리적 접촉이 없어 마찰에 의한 접촉 경계면의 마모 및 파손이 없고, 매우 적은 소음과 진동이 없는 안전성과 내구성이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 또한 마그네틱 기어는 기계식 기어에 필요한 윤활제가 필요하지 않으며 유지보수가 필요 없고, 높은 에너지밀도를 갖는 희토류계 영구자석으로 인한 고효율 구동이 가능하다.

구동장치의 견인전동기는 기계적 출력으로 발생하는 고속/저토크가 감속장치를 거쳐서 저속/고토크로 휠에 전달되는 구조로 최근에는 유도전동기 대신 그림 2-가-14와 같이 영구자석 동기전동기로 대체되고 있다. 에너지 밀도가 높은 희토류계 영구자석을 적용함으로써, 유도전동기보다 효율과 출력밀도를 향상시킬 수 있으며, 약자속 제어를 통한 넓은 속도 가변 영역 특성을 갖는 영구자석 동기전동기로 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서, 현재 구동장치의 기술 개발 흐름은 그림 2-가-15와 같이 고속 전동기와 기계식 감속 기어에서 고속 전동기와 마그네틱 감속 기어로 연구가 진행되고 있는 실정이다.

그러나 여전히 이러한 구동 장치는 견인전동기와 기계식 또는 마그네틱 기어가 결합되는 구조이기 때문에 시스템이 복잡하며, 시스템 전체의 크기 및 무게를 증대시키는 요인이 될 수 있다. 최근에는 시스템의 경량화에 대한 요구로 인하여 연구가 활발하게 진행되면서 구동장치의 구조 및 크기 개선이 필요하다. 따라서, 구동 장치에 있어서 기존의 시스템을 고효율/소형/경량화 및 유지보수가 어렵지 않은 구조를 갖춘 시스템으로 대체할 수 있는 새로운 기술 개발이 필요한 실정이다.



그림 2-가-12 기계식 기어의 종류 중 자동차 수동 변속기(좌) 및 철도차량용 감속기(우)

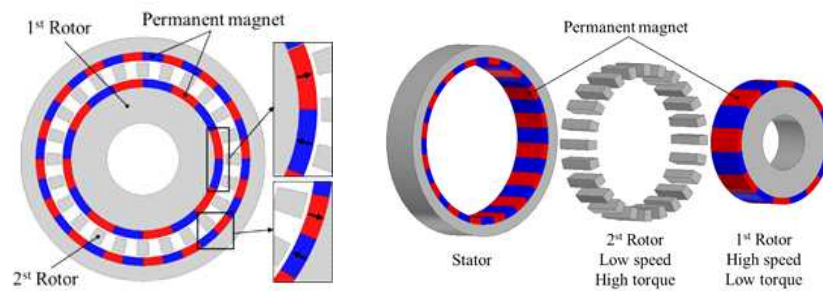


그림 2-가-13 2중 회전자 구조의 단면도(좌) 및 구성도(우)

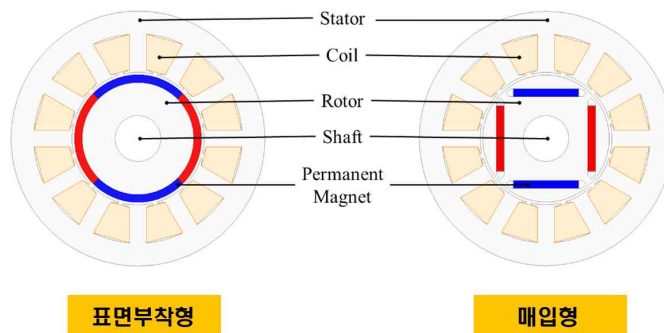


그림 2-가-14 영구자석 부착 형식에 따른 영구자석 동기전동기

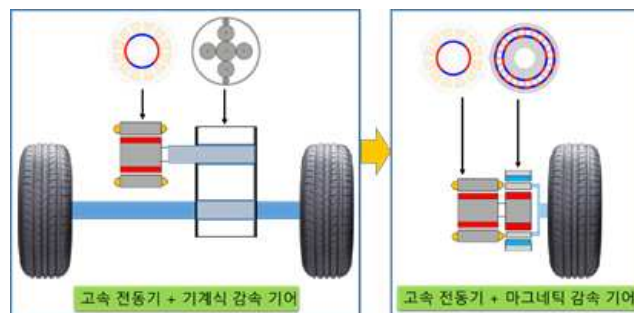


그림 2-가-15 구동장치의 기술 개발 흐름도

② DR-PMSM의 구조

DR-PMSM은 2중 회전자 구조의 동기전동기로 마그네틱 기어와 영구자석 전동기가 결합된 이중 회전자 구조로 1개의 시스템이다. 기존의 회전자는 1차 회전자로 고속 회전자로 정의되며, 2차 회전자인 폴피스가 추가된다. 이렇게 두 회전자를 이용한 2중 회전자가 마그네

틱 기어를 형성하며, 마그네틱 기어 및 영구자석 전동기의 역할을 모두 수행할 수 있는 특성을 가진다. 이는 기존 구동 장치의 장점만을 가지는 새로운 구동 장치 시스템이라고 말할 수 있다. 그림 2-가-16을 통해 DR-PMSM의 구조를 보다 상세히 살펴 볼 수 있다. 최내각 기준으로 제자 영구자석을 가지는 1차 회전자, 그리고 반경방향으로 1차 공극, 자속을 변조시키는 2차 회전자, 2차 공극, 그리고 가장 최외각에 회전자계를 발생시키는 전기자인 고정자를 가지는 구조로 되어 있다. 기존 구동 장치와 구조적인 차이점은 마그네틱 기어의 고정자에 회전자계를 발생시키기 위한 구조로 변경된 구조로 볼 수 있다.

DR-PMSM의 기본적인 특성은 제자 영구자석을 가지는 1차 회전자와 회전자계를 발생시키는 전기자인 고정자 극수의 비에 의해 기어비와 2차 회전자의 개수가 결정되고, 저속/고속 토크 또는 고속/저토크의 성분으로 변경되어 1, 2차 축에 입/출력으로 발생된다. 따라서 이러한 특성을 인해 DR-PMSM은 다양한 어플리케이션에 활용이 가능하며, 그림 2-가-17과 같이 하이브리드 전기자동차 또는 전기자동차에도 적용 가능하다. 또한, 견인전동기로 적용할 수 있는 철도차량용, 또는 전기자전거 구동용으로도 적용 가능하다. 결국 부하에 따라서 1차 회전자를 기계적인 입/출력축으로 사용할 수 있으며, 2차 회전자로도 기계적인 입/출력축으로 사용할 수 있다. 이 때, 제어 능력에 따라서 전동기 모드 또는 발전기 모드를 통하여 효율적인 구동이 가능하다.

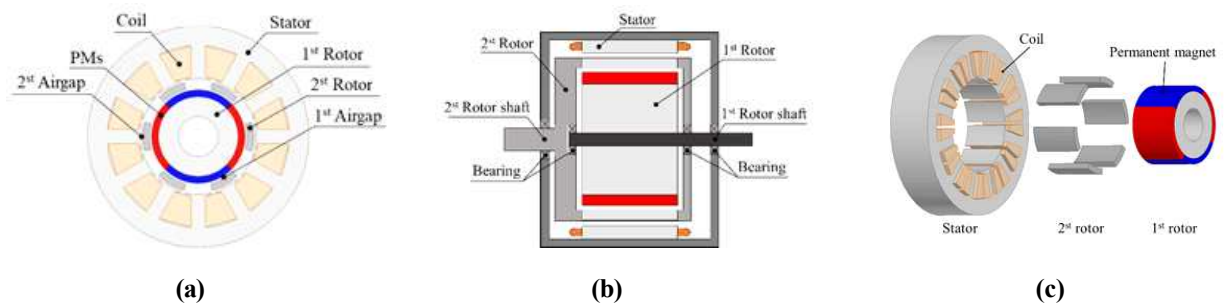


그림 2-가-16 DR-PMSM의 (a)정면도 (b)측면도 (c)구성도

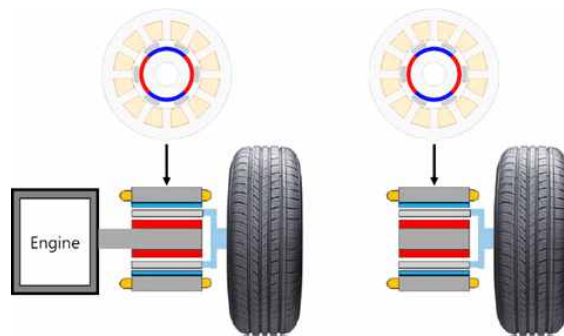


그림 2-가-17 DR-PMSM의 HEV 적용안(좌) 및 EV 적용안(우)

(나) DR-PMSM의 기초이론

① 기초특성이론

㉔ 극수 및 외측 회전자(폴피스, 자속변조철심) 개수 산정

2중 회전자 구조 영구자석 전동기(DR-PMSM)는 버니어 효과에 의한 토크 발생 원리로 일반적인 영구자석 전동기와 달리 내측 회전자(계자)의 극수와 고정자(전기자)의 극수가 달라야 한다. 결국 고정자(전기자)를 통하여 전기적인 입력이 인가되기 때문에 고정자(전기자)의 극수 기준으로 산정하면 된다. 고정자(전기자)의 최대 극수 조합은 최대 속도 및 인버터의 스위칭 주파수에 의해 달라진다. DR-PMSM은 정현적인 전류를 인가하여 구동이 되게 되고, 전기각 한 주기당 스위칭 횟수($switching(f)$)가 적어지면 원하는 정현적인 전류파형을 만들기 어렵게 된다. 따라서 경험적으로 전동기의 최대속도($MaxRPM$) 및 극수(P)를 바탕으로 식 (2.1)과 같은 수식을 참고하여 전기각 1주기당 스위칭 횟수가 15회 내외 정도면 무난하게 정현파 전류 제어가 되는 것으로 판단할 수 있다.

$$Switching(f)/\frac{MaxRPM}{60} \times \frac{P}{2} \approx 15 \quad (2.1)$$

외측 회전자(폴피스, 자속변조철심) 개수(N_{pp})의 산정은 DR-PMSM의 설계에 있어서 매우 중요한 요소이다. 버니어 효과에 따르면 외측 회전자(폴피스, 자속변조철심)에 의해 자계가 변조되는 현상이 일어나고, 이에 따라 토크가 발생하는 원리가 된다. 따라서 개수 산정은 식 (2.2)와 같이 내측 회전자 극쌍수(p_{fm})와 외측 회전자 극쌍수(p_s)의 합으로 산정된다.

$$N_{pp} = p_{fm} + p_s \quad (2.2)$$

㉕ 기어비 산정 및 토크의 관계

DR-PMSM은 내측 회전자(회전자, 계자), 외측 회전자(폴피스, 자속변조철심), 고정자(전기자)의 극수가 산정되면 각각의 극쌍수에 의해 기어비가 결정된다. 식 (2.3)의 고정자(전기자)의 극쌍수와 외측 회전자(폴피스, 자속변조철심)의 개수에 의한 기어비 G_{r1} , 식 (2.3)의 내측 회전자(회전자, 계자)의 극쌍수와 외측 회전자(폴피스, 자속변조철심)의 개수에 의한 기어비 G_{r2} 로 산정된다.

$$\begin{aligned}
 G_{r1} &= \frac{p_{fm} + p_s}{p_s} = \frac{N_{pp}}{p_s} \\
 G_{r2} &= \frac{p_{fm}}{p_s}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

또한, DR-PMSM은 내, 외측의 회전자를 가지고 있으며, 모두 기계적 출력을 내는 특이성을 갖는다. 따라서, 내측 회전자에서 발생하는 토크(T_{fm})와 외측 회전자(T_{pp})에서 발생하는 토크 또한 다르며, 식 (2.3)에서 언급한 기어비에 따라서 식 (2.4)과 같이 전기자 토크(T_s)에 의한 관계식이 성립된다.

$$\begin{aligned}
 T_{pp} &= T_s \cdot G_{r1} \\
 T_{fm} &= T_s \cdot G_{r1}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

㉔ 속도산정

DR-PMSM의 속도는 스위칭 주파수에 따라서 고정자(전기자)의 속도 ω_s 와 극수가 정해지면 내측 회전자(회전자, 계자)의 회전속도 ω_{fm} 가 산정된다. 따라서 외측 회전자(폴피스, 자속변조철심)의 회전속도 ω_{pp} 는 식 (2.5)으로 산정될 수 있다.

$$\omega_{pp} = \frac{p_{fm}}{p_{fm} + p_s} \omega_{fm} + \frac{p_s}{p_{fm} + p_s} \omega_s
 \tag{2.5}$$

② 회전속도 관계의 분석

DR-PMSM은 내측 회전자(회전자, 계자), 외측 회전자(폴피스, 자속변조철심) 및 고정자(전기자)의 회전자계의 회전속도의 관계가 매우 중요한 요소가 된다. 우리가 흔히 알고 있는 기계식 기어에서의 회전속도 관계는 치와 치가 맞물려서 돌아가는 구조이기 때문에 기어비(감속비, 증속비)만큼 정확하게 나누거나 곱하면 1차 회전자와 2차 회전자의 회전속도의 관계를 알 수 있다. 즉, 기계식 기어는 기계적 주파수에 의해 구동이 된다. 그러나 DR-PMSM은 기계식 기어에서의 속도 관계와 매우 다른 특성을 가진다. 일반적인 전동기와 마찬가지로 극수가 존재하고, 극수에 따른 전기적인 주파수에 의해 구동이 되는 원리이기 때문에 회전속도는 전기적인 주파수와 관련이 있다. 그림 2-가-17과 그림 2-가-18과 같이 각 영역의 속도의 관계는 내측 회전자(계자)의 극쌍수와 고정자(전기자)의 극쌍수의 관계가 $p_{fm} < p_s$ 일 때와 $p_{fm} > p_s$ 로 나누어서 분석할 수 있다.

내측 회전자(회전자, 계자)의 극쌍수와 고정자(전기자)의 관계가 $p_{fm} < p_s$ 일 때, 회전속도 관계의 스펙트럼은 그림 2-가-18과 같다. 내측 회전자(회전자, 계자) 부 또는 외측 회전자(폴피스, 자속변조철심) 부에 부하가 연결이 되면 요구되는 정격속도 또는 최대속도와 극수가 정해지면 전기적인 주파수가 결정되기 때문에 그림 2-가-18의 관계에 의해서 나머지 영역의 회전속도를 산정할 수 있다. 이처럼 그림 2-가-19의 $p_{fm} > p_s$ 일 때에도 같은 원리로 설명될 수 있으며, 이러한 회전속도 관계의 스펙트럼을 통해서 각각의 가속 또는 감속 상태를 쉽게 알 수 있으며, 기초 설계 시 필수적으로 고려해야 한다.

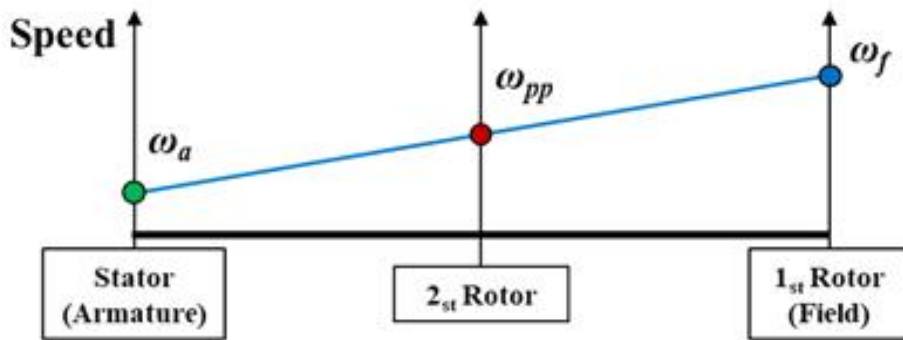


그림 2-가-18 $p_{fm} < p_s$ 일 때, 속도 관계 스펙트럼

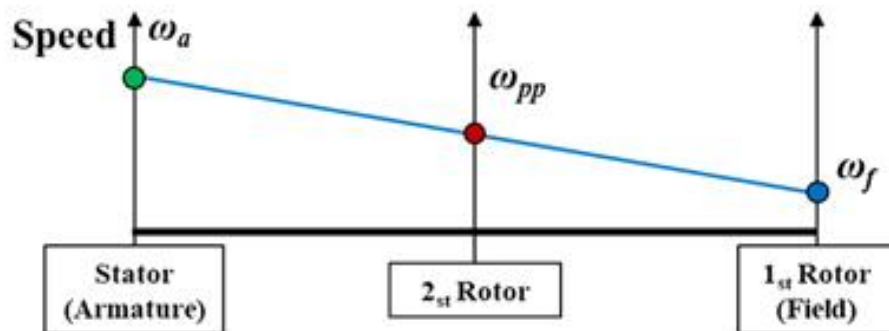


그림 2-가-19 $p_{fm} > p_s$ 일 때, 속도 관계 스펙트럼

③ 토크 관계 분석

DR-PMSM의 토크 관계는 기존 기계식 기어 및 마그네틱 기어의 토크 관계와 같다. 기계식 기어 또는 마그네틱 기어는 기어비(중속비, 감속비)의 만큼 곱하거나 나누면 토크가 쉽게 계산된다. DR-PMSM도 마찬가지로 내측 회전자(회전자, 계자) 극쌍수와 2차 외측 회전자(폴피스, 자속변조철심)의 개수 및 고정자(전기자)의 극쌍수에 의해 기어비가 산정되며, 이에 따라 각 영역의 토크는 고정자(전기자)의 극쌍수 기준으로 기어비(중속비, 감속비)에 따라 토크가 증폭 또는 감소되는 특성을 갖는다. 내측 회전자(회전자, 계자) 극쌍수와 고정자(전기자) 극쌍수의 관계가 일 때 토크 관계의 스펙트럼은 그림 2-가-20과 같으며, 반대로 1차 회전자(계자) 극쌍수와 고정자(전기자) 극쌍수의 관계가 일 때에는 토크 관계의 스

펙트럼은 그림 2-가-21과 같다. 요구되는 부하 토크 특성에 따라서 내측 회전자(회전자, 계자) 또는 외측 회전자(폴피스, 자속변조철심)에 연결할 수 있으며, 이러한 토크 관계는 기초 설계 시 필수적으로 고려해야 한다.

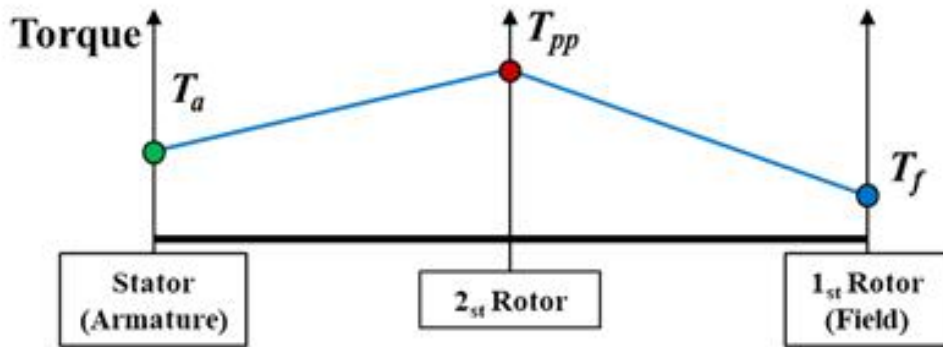


그림 2-가-20 $p_{fm} < p_s$ 일 때, 토크 관계 스펙트럼

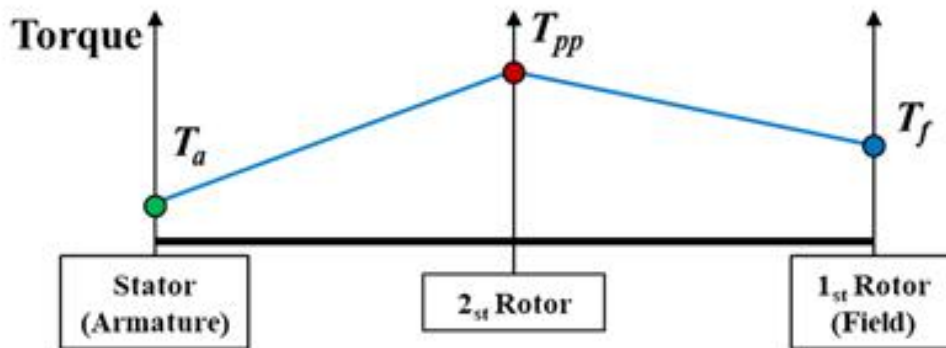


그림 2-가-21 $p_{fm} > p_s$ 일 때, 토크 관계 스펙트럼

(다) DR-PMSM의 설계 및 특성 기법 연구

① DR-PMSM의 형상 도출 위한 설계 기법 연구

그림 2-가-22는 자기등가회로법에 의한 기존 매입형 영구자석 동기전동기 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)의 설계 프로세스에 추가 구성을 한 설계기법이다. 폴피스로 구성된 외측 회전자를 설계하는 프로세스를 추가하여 DR-PMSM의 형상 도출을 가능하게 한다. 설계 기준을 설정하여 각 설계 포인트 및 제한치를 설정한다. 그 후 전기장하 및 자기장하를 고려하여 고정자와 회전자 비를 조정하며 권선타입 결정 후 영구자석과 폴피스에 대한 설계를 진행한다. 마지막으로 모델에 대한 최종적인 외경을 설정하여 최종 모델을 도출하며 설계 도중 필요한 파라미터는 그림 2-가-23에 나온 핵심 설계 방정식을 이용한다.

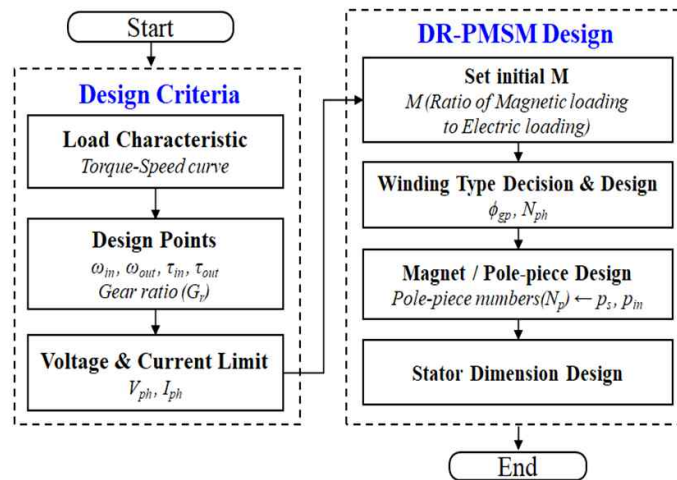


그림 2-가-22 DR-PMSM의 형상 도출을 위한 설계기법

Key design formula

$$N_p = p_{in} + p_s \quad (1)$$

$$G_r = p_{in} / p_s \quad (2)$$

$$\omega_{out} = (p_{in} / p_s) \cdot \omega_{in} \quad (3)$$

$$\tau_{out} = N_p / p_s \quad (4)$$

N_p = The number of pole-pieces
 p_{in} / p_s = The pole pairs of the inner rotor and the stator
 G_r = Gear ratio
 $\omega_{in} / \omega_{out}$ = Rotational speeds of the inner and outer rotors
 τ_{out} = Torque of the outer rotor

그림 2-가-23 DR-PMSM의 형상 도출을 위한 핵심 설계 식

② DR-PMSM의 특성 분석을 위한 해석 기법 연구

그림 2-가-24는 FEM 전용 Tool을 활용한 DR-PMSM 설계 모델의 특성 분석 프로세스이다. 앞선 전기장하 및 자기장하를 이용한 설계 기법을 통해 모델링을 진행하고, FEM 시뮬레이션 tool을 이용하여 무부하 및 부하 조건에 맞추어 해석한다. 각 조건에서의 내측 회전자 및 외측 회전자에 따라 토크, 코깅토크 및 역기전력 전자계 특성을 분석한 뒤 목표사양을 만족하는지 비교, 분석한다. 그 후 자속밀도 분포도 등을 통해 특정 영역에서의 포화도를 도출한다. 최종적으로 기계손을 제외한 영구자석 와전류손 및 철손을 고려하여 효율값을 도출해낸다.

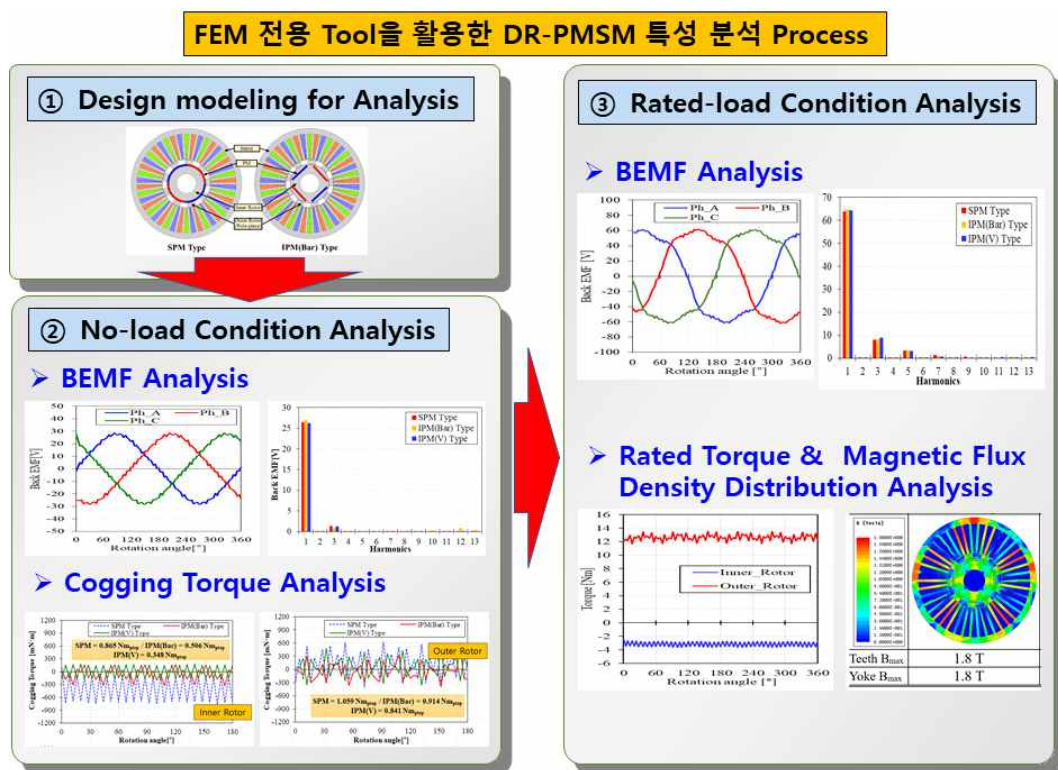


그림 2-가-24 FEM 적용 Tool을 활용한 DR-PMSM 설계 모델의 정적/동적 특성 분석 프로세스

(3) 45kW급 DR-PMSM의 최종모델 도출

(가) 무가선 트램의 제원 및 견인전동기 사양

기존 트램용 구동장치의 경우, 저장대차를 사용하기 때문에 구동장치가 휠 내부에 설치되지 않고 휠 외부에 설치되며, 공간적 제약으로 인해 차축과 수직으로 견인전동기가 체결되는 방식이 주로 적용되고 있어 구조적으로 복잡하다. 특히, 유도전동기를 사용하고 있기 때문에 고출력 및 소형/경량화의 어려움이 있으며 기계식 감속기로 인해 추가적인 동력손실이 존재한다.

이를 대체하기 위해 비접촉 방식의 감속기와 견인전동기가 일체화된 DR-PMSM의 원천 기술을 개발하고자 한다. 표 2-가-8은 무가선 트램의 견인전동기용 DR-PMSM의 설계를 위한 제원 및 사양이다. 기존 트램용 견인전동기로써 사용되고 있는 45kW급 유도전동기로써 최대 회전수가 3768rpm이며 기어비가 6.29이다. 그러나 일반적인 구동시스템과 달리 DR-PMSM은 마그네틱 기어와 영구자석 동기전동기가 일체형으로 결합되어 있어 전동기 자체적으로 기어비를 포함하고 있기 때문에 출력부인 외측 회전자의 최대 속도를 599rpm($3768\text{rpm}/6.29$)으로 선정하였다.

이를 통해 45kW급 DR-PMSM에 대한 성능곡선 및 설계 목표 사양을 표 2-가-9, 표-가-10로 도출하였다. DR-PMSM은 고정자 극수와 회전자 극수의 비율에 따라 기어비가 결정되며 이에 따라 폴피스 수가 도출이 되므로 고정자 극수에 따른 적정 슬롯 수의 선정이 필요하다. 전동기 사이즈의 경우, 일반적인 저상 트램용 견인전동기와 같이 전동기의 냉각 장치와 취부 및 조립 등을 고려해야하기 때문에 직경은 400mm 이하로 기준을 두었다.

그러나 DR-PMSM은 폴피스와 같은 구조적 특성으로 인해 사이즈를 최소화시키는 것이 어렵기 때문에 코일 길이를 줄이고자 냉각 방식으로써 수랭식을 선정하였으며 전류밀도 $9\text{A}_{\text{rms}}/\text{mm}^2$, 전류 150A_{rms} 및 점적률 65% 이하로 제한하였다. 또한, 기존 트램용 견인전동기의 전차선 전압 및 공간 벡터 변조 방식(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)을 고려하여 DC Link 전압을 750V_{dc} 로 정하였으며 이에 따라 역기전력 전압 제한치를 $433\text{V}_{\text{peak}}$ 를 기준으로 하였다. 재질의 경우, 회전자 및 고정자 Core는 35PNF1600로써 와전류손 및 철손이 적은 재질을 채택하였으며 영구자석의 경우 온도 및 역자계 감자에 유리한 NdFeB 38UH 타입을 선정하였다

표 2-가-8 45kW급 무가선 트램의 제원 및 견인전동기 사양

구분		Specification
차량 편성[5량 1편성]		20
열차 정격 속도		25 [km/h]
열차 최대 속도		70 [km/h]
가/감속도		3.5 [km/h/s]
차륜경		0.62 [m]
기어비		6.29
차량중량	공차 중량	37.5 [ton]
	만차 중량	49.5 [ton]
선로 최대 구배		6 [‰]
전차선 전압		DC 750 [V]
유도전동기	정격 속도/토크	1346 [rpm] / 319 [Nm]
	최대 속도/토크	3768 [rpm] / 114[Nm]
유도전동기 출력		45 [kW]
DR-PMSM	외측 정격 속도/토크	214 [rpm] / 2004.1 [Nm]
	외측 최대 속도/토크	599 [rpm] / 715.8 [Nm]
DR-PMSM 출력		45 [kW]
DR-PMSM 효율		92 [%]
DR-PMSM 절연등급		C중 (온도 180℃ 이상)

표 2-가-9 45kW급 유도전동기와 DR-PMSM의 성능곡선

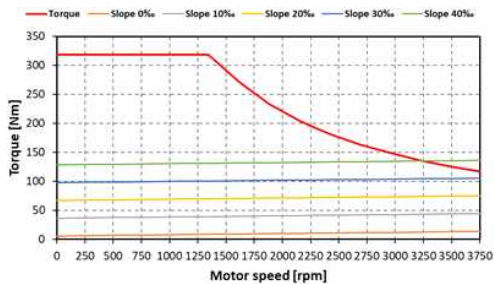
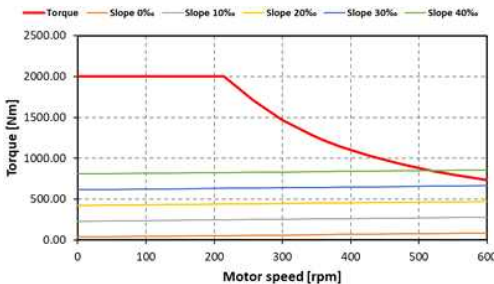
구분	유도전동기	DR-PMSM
성능곡선		
정격속도/토크	1346 [rpm] / 319 [Nm]	214 [rpm] / 2004.1 [Nm]
최대속도/토크	3768 [rpm] / 114 [Nm]	599 [rpm] / 715.8 [Nm]

표 2-가-10 45kW급 DR-PMSM의 목표 사양

구분			Specification
공통	상수/극수/슬롯 수		3 / 4 or 6 / 극수에 따른 적정 슬롯
	냉각 방식		자연냉각, 강제냉각, 수랭식
	고정자 외경		Max. 400 [mm] (기존 유도기 기준)
고정자	Coil	정격전류	150 [A_{rms}] 이하
		전류밀도	9 [A_{rms}/mm^2] 이하
		코일 점적률	65 [%]
		전차선 전압 (전압 제한치)	750 [Vdc] (433 [Vpeak])
		절연등급	C중 (온도 180℃ 이상)
	Core	재질	35PNF1600
회전자	Magnet	타입	NdFeB 38UH (소결형)
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]
	Core	재질	35PNF1600

(나) 45kW급 DR-PMSM의 설계기법 정리

① 분포권 모델 최적 설계

㉠ Radial 방향 자화 (1차 연도 모델)

45kW급 DR-PMSM 설계 기법에 있어 첫 번째 방법은 권선법을 분포권으로 설계하는 방법이다. 분포권으로 설계를 하며 SPM 타입이기 때문에 영구자석은 일반적으로 사용하는 Radial 착자 방식을 사용하였다. 분포권 모델에 Radial 방향으로 착자시킨 1차 연도 최종 모델은 4극 42슬롯을 선정하고 이를 증속비로 설계하였다.

표 2-가-11은 해당 모델에 대한 성능 곡선 및 목표사양이며 표 2-가-12는 해당 모델의 설계사양이다. 14극 42슬롯(회전자 14극, 고정자 4극) 설계하였으며 폴피스 개수는 9개이기 때문에 내측 회전자 속도 : 외측 회전자 속도에 대한 기어비가 9:14가 된다. 전류밀도 $9A_{rms}/mm^2$ 기준 설계 시 동손이 매우 높아지기 때문에 전류밀도를 최소화하는 대신 적층길이 늘려 토크 및 효율을 확보하는 방안으로 설계하였었다. 또한 냉각방식을 반폐형 자연 냉각 방식을 선택함으로써 전류밀도를 $3.5A_{rms}/mm^2$, 적층길이 500mm를 기준으로 하여 최종 모델로써 설계하였으며 이에 대한 모델 형상 및 전자계적 특성 결과는 다음의 그림 2-가-25 및 표 2-가-13, 2-가-14에 나타나있다.

외측 회전자에 대한 요구 정격 토크(2004.1Nm) 및 역기전력 전압 제한치($433V_{peak}$) 모두를 만족하며 손실 측면에서도 표 2-가-15와 같이 출력 45kW, 효율 92% 이상을 충족시키는 것을 확인하였다.

표 2-가-11 45kW급 DR-PMSM 성능 곡선 및 목표사양

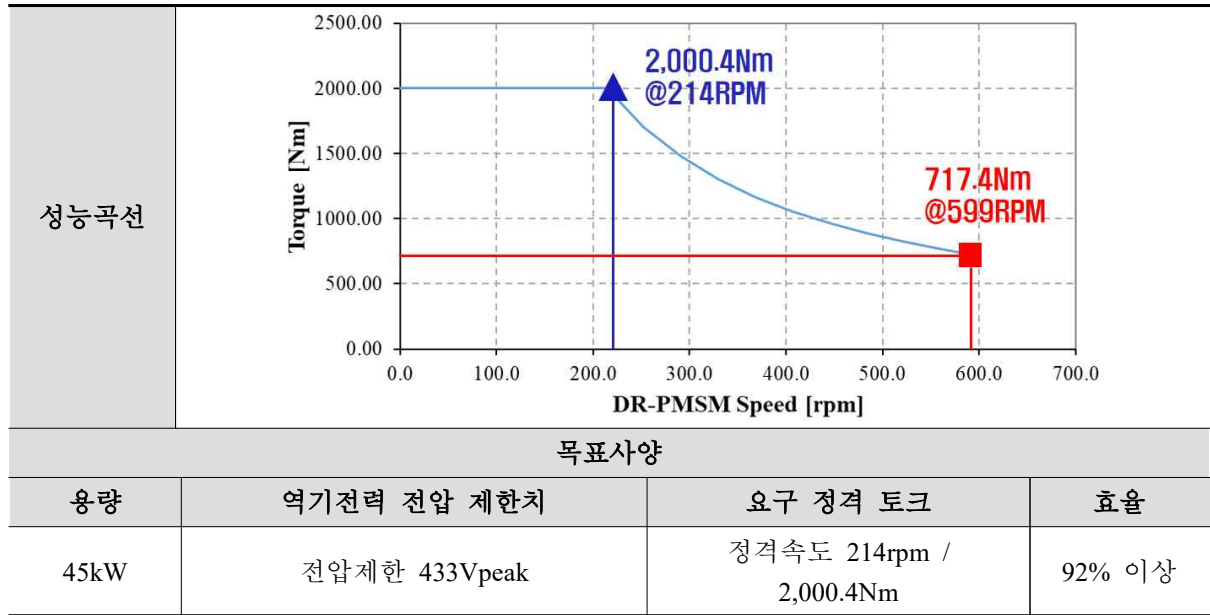


표 2-가-12 45kW급 DR-PMSM 분포권 모델(1차 연도 최종모델)의 설계 사양

구분			Specification
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 14 / 4 / 42 / 9
	냉각 방식		반폐형 자연냉각
	고정자 외경 / 내경		400 [mm] / 296 [mm]
	회전자 외경 / 내경		230 [mm] / 80 [mm]
	적층길이 / 공극길이		500 [mm] / 1.5 [mm]
	요크 폭		17.5 [mm]
	속도 (내측 회전자 / 외측 회전자)		137.6 [RPM] / 214 [RPM]
고정자	Coil	정격전류	56 [A _{rms}]
		전류밀도	3.5 [A _{rms} /mm ²]
		코일 점적률	65 [%]
		턴 수	8회 / 1layer
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750 [V _{dc}] (433 [V _{peak}])
	Core	재질	35PNF1600
회전자	Magnet	타입	NdFeB 38UH (소결형)
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]
		두께	15 [mm]
	Core	재질	35PNF1600

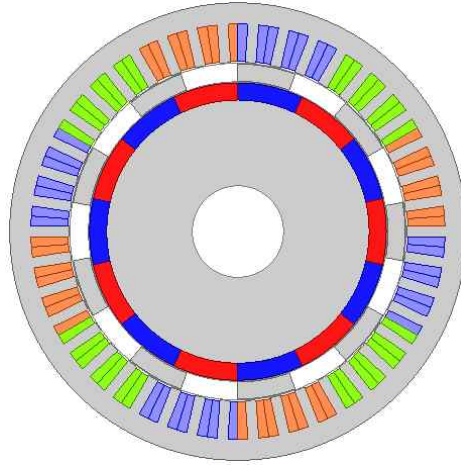


그림 2-가-25 45kW급 DR-PMSM 분포권 모델(1차 연도 최종 설계모델)의 형상

표 2-가-13 45kW급 DR-PMSM 분포권 모델(1차 연도 최종모델)의 역기전력

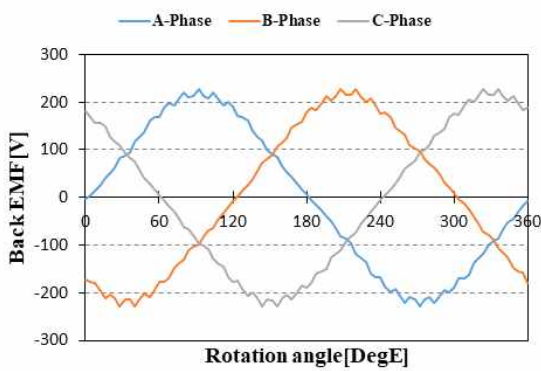
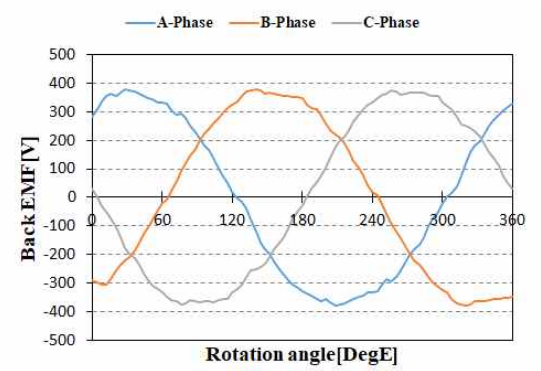
무부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)		부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)	
			
역기전력 기본파	207.2 [V _{peak}]	역기전력 기본파	380.5 [V _{peak}]
THD	6.1 [%]	THD	4.6 [%]

표 2-가-14 45kW급 DR-PMSM 분포권 모델(1차 연도 최종모델)의 코깅토크 및 토크

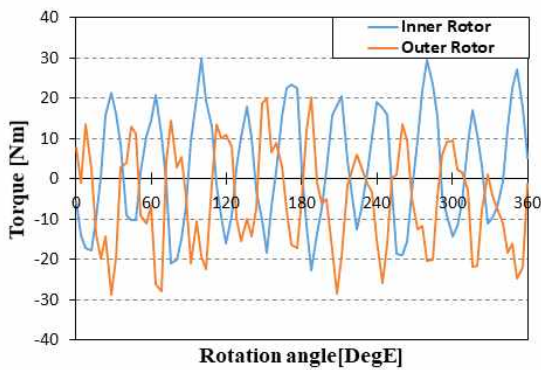
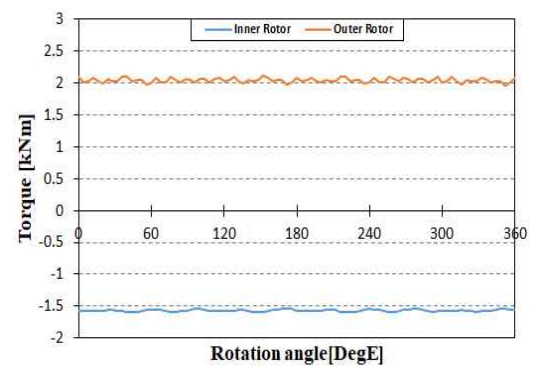
무부하 시 코깅토크 (@100℃, 214rpm)		부하 시 토크 (@100℃, 214rpm)	
			
외측 회전자	52.5 [Nm]	외측 회전자	2.04 [kNm] / 214 [RPM]
내측 회전자	49.0 [Nm]	내측 회전자	1.57 [kNm] / 138 [RPM]
		토크 리플율	7.4 [%]

표 2-가-15 45kW급 DR-PMSM 분포권 모델(1차 연도 최종모델)의 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]
동손	3,279W
철손	309W
영구자석 와전류손	126W
출력	45.7kW
효율	92.5%

㉠ Radial 방향 자화 (2차 연도 모델)

1차 연도 최종 모델은 대차에 취부가 힘들기에 극수 슬롯 수 조합은 유지한 상태에서 적층 길이를 줄이기 위한 설계 방향을 모색하였다. 외경은 유지한 상태에서 적층길이를 축소시키기 위해서 냉각방식을 변경하여 반폐형 자연냉각 방식에서 반폐형 강제공랭식으로 변경하여 전류밀도를 기존 $3.5A_{rms}/mm^2$ 에서 $5A_{rms}/mm^2$ 로 증가시켰으며, 턴 수는 8회에서 6회로 줄였다. 점적률 65% 고정시킨 상태에서 전류밀도를 증가시키며 코일 면적이 넓어졌으며 이에 따라 회전자 외경이 230mm에서 210mm로 줄어들게 되었다. 전류 밀도를 증가시키고 영구자석을 기존 10mm에서 14.5mm로 증가시키면서 추가 확보한 토크로 인해 적층길이는 500mm에서 430mm까지 줄일 수 있었다.

표 2-가-16은 2차 연도 분포권 최종설계 모델의 설계 사양이며 표 2-가-17은 정격속도에서 역기전력 특성이다. 1차 연도 최종 모델 대비 무부하 역기전력은 $207.2V_{peak}$ 에서 $109.3V_{peak}$ 로 감소하였으며 THD는 6.1%에서 4.1%로 감소하였다. 부하 시 역기전력 역시 $80.5V_{peak}$ 에서 $262.1V_{peak}$ 로 감소하였으며 THD는 4.6%에서 6.1%로 증가하였다.

표 2-가-18은 정격속도에서의 부하시 토크와 무부하 코깅토크 특성이다. 무부하 시 코깅토크는 출력 측인 폴피스 부분의 최고점에서 최저점까지의 값(peak to peak, p2p)이 1차 연도 모델의 52.5Nm에서 64.4Nm로 증가하였다. 평균 토크는 출력 측인 폴피스에서 값이 2.04kNm에서 2.11kNm로 증가하였고 토크 리플율은 7.4%에서 8.8%로 증가하였다.

표 2-가-19는 2차 연도 기초 설계모델의 손실 및 효율이다. 효율은 92.5%에서 94.6%로 증가하였으며 설계 목표사양이었던 92% 이상의 조건을 만족시킨다.

표 2-가-16 45kW급 DR-PMSM 분포권 모델(2차 연도 최종 설계모델)의 설계 사양

구분			Specification
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 14 / 4 / 42 / 9
	냉각 방식		반폐형 강제공랭식
	고정자 외경 / 내경		400 [mm] / 254 [mm]
	회전자 외경 / 내경		210 [mm] / 105 [mm]
	적층길이 / 공극길이		430 [mm] / 1.5 [mm]
	요크 폭		25 [mm]
	속도 (내측 회전자 / 외측 회전자)		137.6 [RPM] / 214 [RPM]
고정자	Coil	정격전류	115 [A_{rms}]
		전류밀도	5 [A_{rms}/mm^2]
		코일 점적률	65 [%]
		턴 수	6회 / 1layer
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750 [Vdc] (433 [V_{peak}])
	Core	재질	35PNF1600
회전자	Magnet	타입	NdFeB 38UH (소결형)
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]
		두께	14.5 [mm]
	Core	재질	35PNF1600

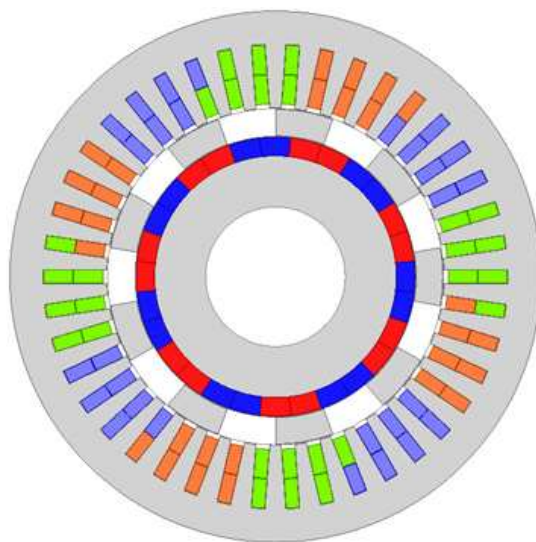


그림 2-가-26 45kW급 DR-PMSM 분포권 모델(2차 연도 최종 설계모델)의 형상

표 2-가-17 45kW급 DR-PMSM 분포권 모델(2차 연도 최종 설계모델)의 역기전력

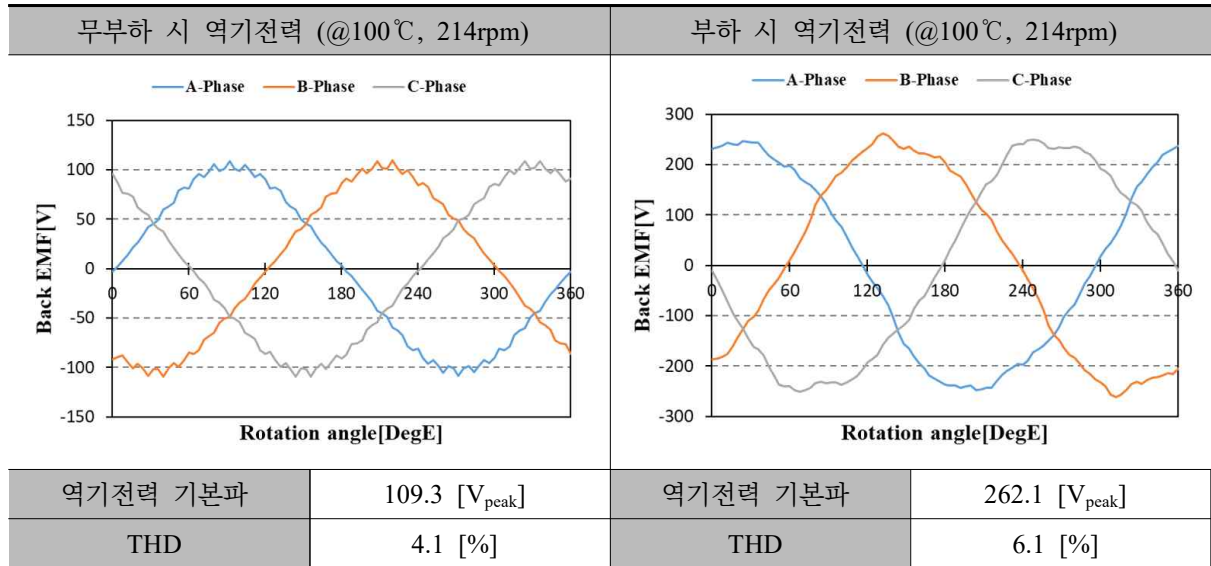


표 2-가-18 45kW급 DR-PMSM 분포권 모델(2차 연도 최종 설계모델)의 코깅토크 및 토크

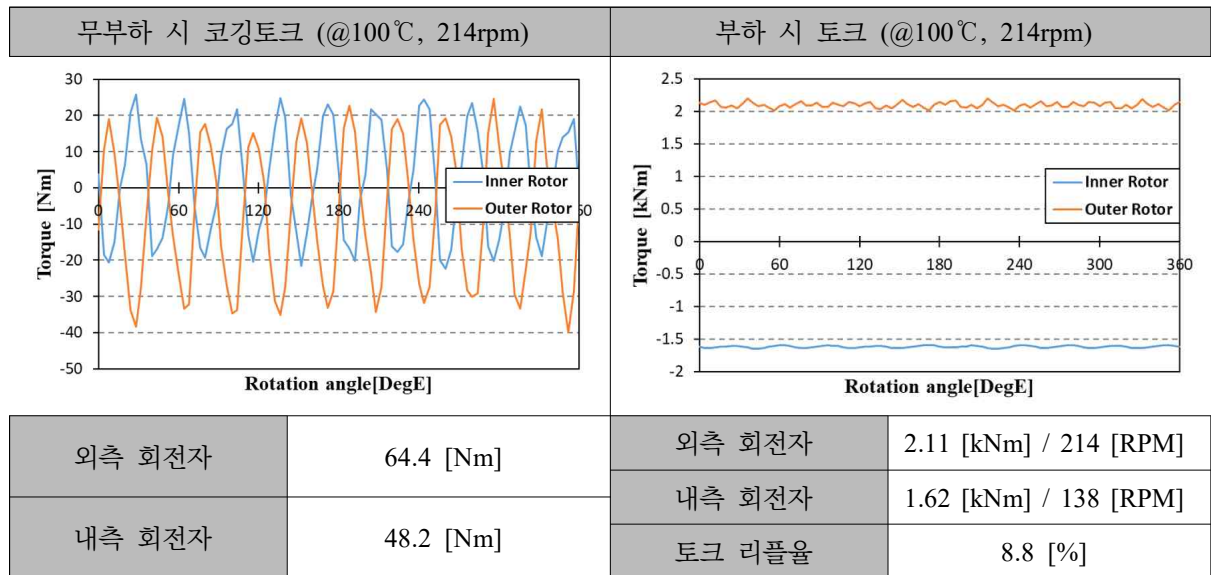


표 2-가-19 45kW급 DR-PMSM 분포권 모델(2차 연도 최종 설계모델)의 손실 및 효율

	정격속도 [214RPM]
동손	2,486W
철손	133.2W
영구자석 와전류손	63.8W
출력	47.3kW
효율	94.6%

㉔ Halbach 자화

1차 토크의 추가확보를 위한 설계 기법으로 Radial 방향으로 착자 시킨 2차 연도 분포권 최종 설계 모델에 대하여 Halbach배열을 적용하였다. 2분할 영구자석에 Halbach 자화를 설정하였다. Halbach 자화 배열을 적용시킨 영구자석은 Radial 착자 방식의 영구자석과 달리 한 극을 구성하는 각 영구자석 분할마다 자화 방향이 다르다. 표 2-가-20은 Halbach 배열을 적용한 모델의 설계 사양이며 그림 2-가-27은 그 형상이다.

표 2-가-21은 정격속도 역기전력 특성이며 1차 연도 대비 무부하 역기전력은 $207.2V_{peak}$ 에서 $111.7V_{peak}$ 로 감소하였으며 THD는 6.1%에서 1.3%로 감소하였다. 부하 시 역기전력은 $380.5V_{peak}$ 에서 $263.2V_{peak}$ 로 감소하였고 THD는 4.6%에서 5.1%로 증가하였다.

표 2-가-22는 토크 특성이며 평균토크가 9.3% 증가하였다. 코깅토크 또한 p2p가 52.5Nm에서 30.9Nm로 감소하였으며 표 2-가-23에서 손실 및 효율에서 동손이 크게 줄고 그 외 효율이 92.5%에서 94.8%로 증가하였다.

표 2-가-20 45kW급 DR-PMSM Halbach 배열 적용 모델의 설계 사양

구분			Specification
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 14 / 4 / 42 / 9
	냉각 방식		반폐형 강제공랭식
	고정자 외경 / 내경		400 [mm] / 254 [mm]
	회전자 외경 / 내경		210 [mm] / 105 [mm]
	적층길이 / 공극길이		430 [mm] / 1.5 [mm]
	요크 폭		25 [mm]
	속도 (내측 회전자 / 외측 회전자)		137.6 [RPM] / 214 [RPM]
고정자	Coil	정격전류	115 [A_{rms}]
		전류밀도	5 [A_{rms}/mm^2]
		코일 점적률	65 [%]
		턴 수	6회 / 1layer
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750 [V_{dc}] (433 [V_{peak}])
	Core	재질	35PNF1600
회전자	Magnet	타입	NdFeB 38UH (소결형)
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]
		두께	14.5 [mm]
	Core	재질	35PNF1600

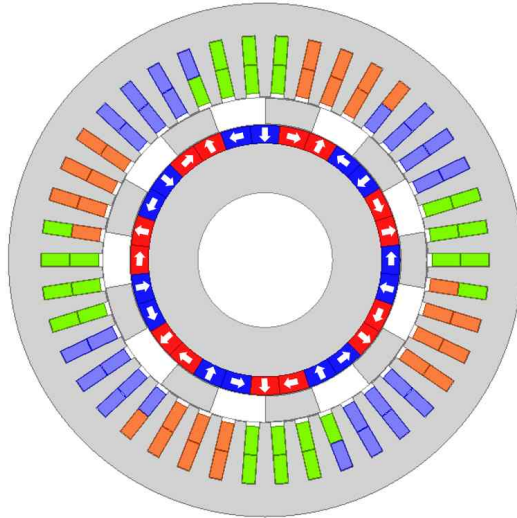


그림 2-가-27 45kW급 DR-PMSM Halbach 배열 적용 모델의 형상

표 2-가-21 45kW급 DR-PMSM Halbach 배열 적용 모델의 역기전력

무부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)		부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)	
역기전력 기본파	111.7 [V _{peak}]	역기전력 기본파	263.2 [V _{peak}]
THD	1.3 [%]	THD	5.1 [%]

표 2-가-22 45kW급 DR-PMSM Halbach 배열 적용 모델의 코깅토크 및 토크

무부하 시 코깅토크 (@100℃, 214rpm)		부하 시 토크 (@100℃, 214rpm)	
외측 회전자	30.9 [Nm]	외측 회전자	2.23 [kNm] / 214 [RPM]
내측 회전자	25.1 [Nm]	내측 회전자	1.72 [kNm] / 138 [RPM]
		토크 리플율	7.7 [%]

표 2-가-23 45kW급 DR-PMSM Halbach 배열 적용 모델의 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]
동손	2,486W
철손	133.4W
영구자석 와전류손	64.1W
출력	49.9kW
효율	94.8%

㉠ 분포권 모델 결론

앞서 살펴 본 분포권 모델의 Radial 착자 방향의 1차 연도, 2차 연도 모델 및 Halbach 자화 배열의 모델까지 세 가지 모델의 축방향으로 최소 길이는 코어의 적층길이만 430mm이다. Halbach 자화 배열 모델의 토크가 요구 토크 대비 약 10% 추가확보 되어 코어의 적층 길이를 감소시킬 수 있는 여지는 있다. 하지만 그림 2-가-28의 트램용 저장대차에 견인 전동기가 설치 될 수 있는 공간은 전동기의 외함까지 고려 시 외경은 620mm, 축 방향길이는 450mm임을 고려한다면 엔드턴 및 외함 두께까지 적용 할 때 실제로 트램용 저장대차에 장착할 수 없는 상황이다. 따라서 이를 해결하고자 엔드턴 적용 시 축방향의 길이가 분포권 보다 보다 적은 길이의 엔드턴 길이가 도출되는 집중권에 대한 검토를 진행하였다.

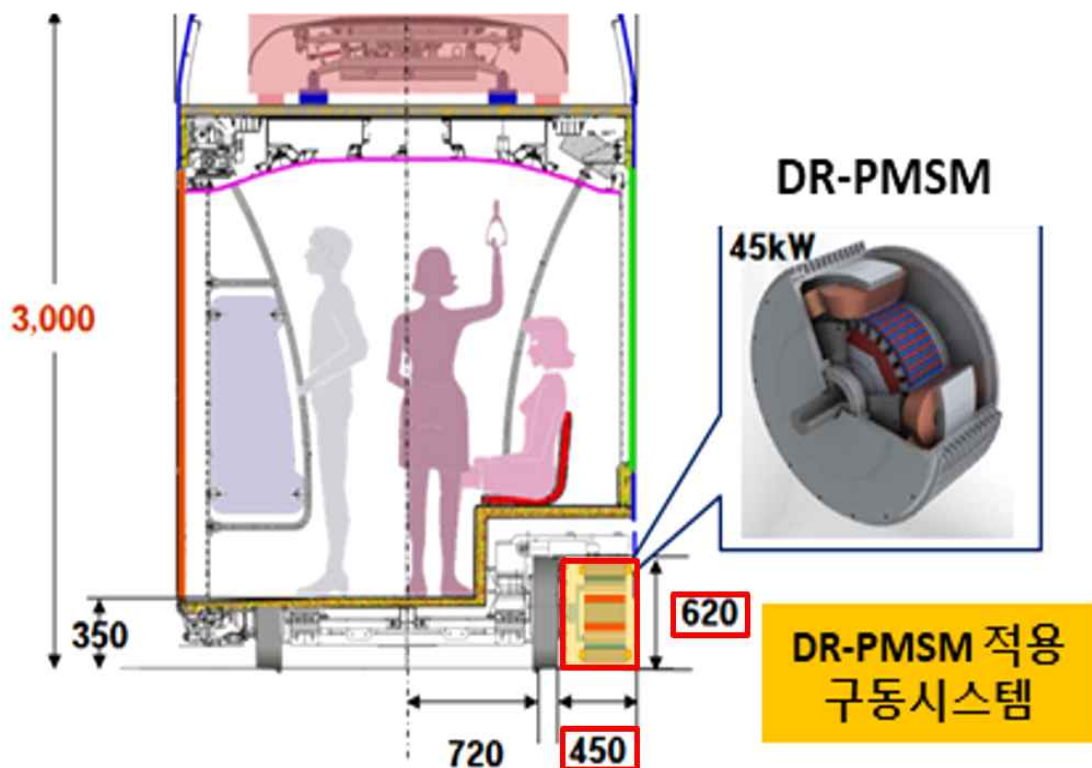


그림 2-가-28 트램용 저장 대차에 DR-PMSM 적용 시 장착 가능 공간

② 집중권 모델 최적 설계

㉞ 폴피스 개수 도출 방법에 따른 2가지 모델 검토

DR-PMSM의 폴피스 개수를 도출 하는 방법은 크게 두 가지가 존재한다. 표 2-가-24는 DR-PMSM의 폴피스 개수 및 기어비 도출 방법에 대한 설명이다. N_{pp} 는 폴피스 개수, p_{fm} 은 회전자 극쌍수, P_{fm} 는 회전자 극수, p_s 는 고정자 극쌍수, G_r 는 기어비를 의미한다.

Model 1에 적용한 폴피스 도출식은 회전자 극수와 슬롯 수의 합이 곧 폴피스의 개수가 된다. 해당 모델은 고정자 극수와 회전자 극수가 동일할 때 앞의 폴피스 도출 식을 적용할 수 있다. 기어비는 폴피스 개수에 회전자 극수를 나눈 값이 되며 속도 설정 시 내측 회전자의 속도가 외측회전자인 폴피스보다 기어비 만큼 빠른 속도로 설정된다.

그와 다르게 Model 2에 적용한 폴피스 도출식은 회전자 극쌍수와 고정자 극쌍수의 합으로 결정된다. 그리고 기어비는 폴피스 개수에 고정자 극쌍수를 나눠준 값이 된다. 해당 모델은 Model 1과 달리 고정자 토크에 기어비를 곱하면 폴피스 토크가 나오며 고정자와 회전자의 극수가 같을 필요가 없고 속도도 동기주파수로 설정된다.

표 2-가-24 DR-PMSM 폴피스 개수 도출 방법

	Model 1	Model 2
폴피스 개수	$N_{pp} = 2p_{fm} + N_{slots}$	$N_{pp} = p_{fm} + p_s$
기어비	$G_r = \frac{N_{pp}}{P_{fm}}$	$G_r = \frac{N_{pp}}{p_s}$

㉞ 집중권의 Model 1 (기초설계 모델)

Model 1에 대한 설계 사양 및 모델 형상은 표 2-가-25와 그림 2-가-29와 같다. 고정자 및 회전자의 극수는 10극으로 동일하게 설정하였다.

표 2-가-26은 정격속도 역기전력 특성이며 분포권으로 설계했던 1차 연도 최종 모델 대비 무부하 역기전력은 $207.2V_{peak}$ 에서 $308.4V_{peak}$ 로 증가하였으며 THD는 6.1%에서 12.3%로 약 2배 증가하였다. 부하 시 역기전력은 $380.5V_{peak}$ 에서 $314.6V_{peak}$ 로 감소하였으며 THD는 4.6%에서 5.8%로 증가하였다.

표 2-가-27은 Model 1의 정격속도에서 부하 시 토크와 무부하 코깅토크 특성이다. 무부하 시 코깅토크는 p2p 값이 1차 연도 모델의 52.5Nm에서 113Nm로 증가하였다. 평균 토크는 2.04kNm에서 1.58kNm로 감소했고 토크 리플율은 7.4%에서 9.3%로 증가하였다.

표 2-가-28은 Model 1에 대한 손실 및 효율이다. 동손은 약 500W 감소하였으며 그 외에 철손은 309W에서 113.6W, 영구자석 와전류손은 126W에서 1994.2W로 증가함에 따라 효율은 92.5%에서 90.3%로 감소하였으며 설계 목표사양이었던 92% 이상의 조건을 만족시키지 못한다.

표 2-가-25 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(기초설계 모델) 설계 사양

구분			Specification
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 10 / 10 / 12 / 22
	냉각 방식		반폐형 강제공랭식
	고정자 외경 / 내경		400 [mm] / 293 [mm]
	회전자 외경 / 내경		210 [mm] / 105 [mm]
	적층길이 / 공극길이		430 [mm] / 1.5 [mm]
	요크 폭		16 [mm]
	속도 (내측 회전자 / 외측 회전자)		470.8 [RPM] / 214 [RPM]
고정자	Coil	정격전류	149.5 [A_{rms}]
		전류밀도	5 [A_{rms}/mm^2]
		코일 점적률	65 [%]
		턴 수	22회 / 1layer
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750 [V_{dc}] (433 [V_{peak}])
	Core	재질	35PNF1600
회전자	Magnet	타입	NdFeB 38UH (소결형)
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]
		두께	14.5 [mm]
	Core	재질	35PNF1600

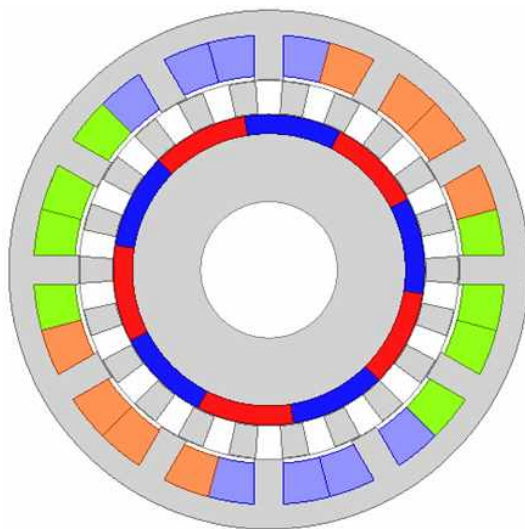


그림 2-가-29 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(기초설계 모델) 형상

표 2-가-26 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(기초설계 모델) 역기전력

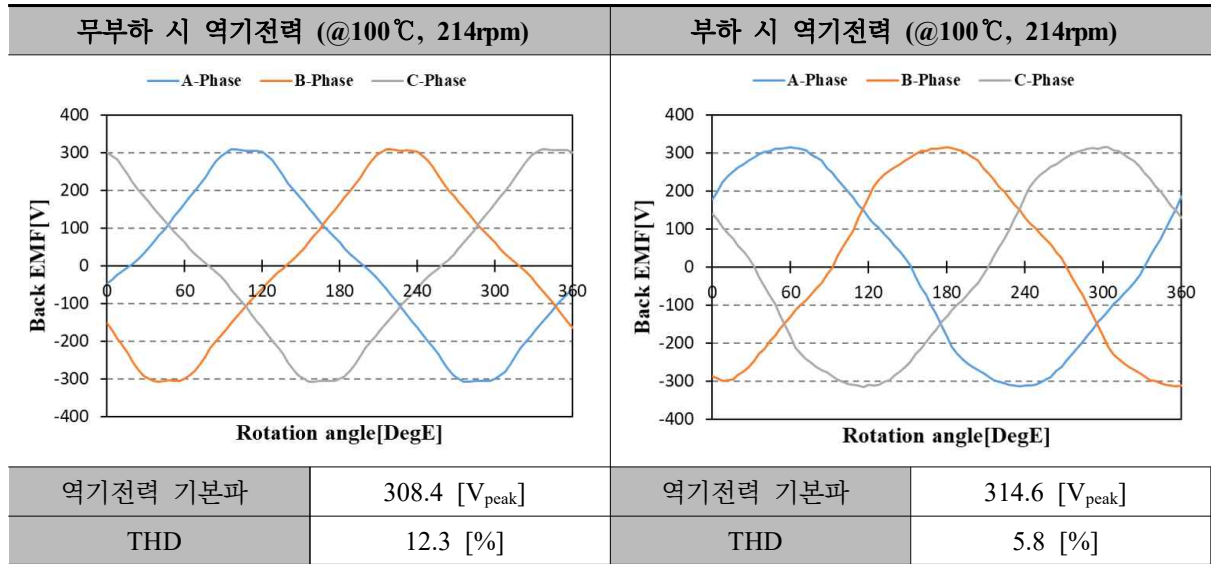


표 2-가-27 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(기초설계 모델) 코깅토크 및 토크

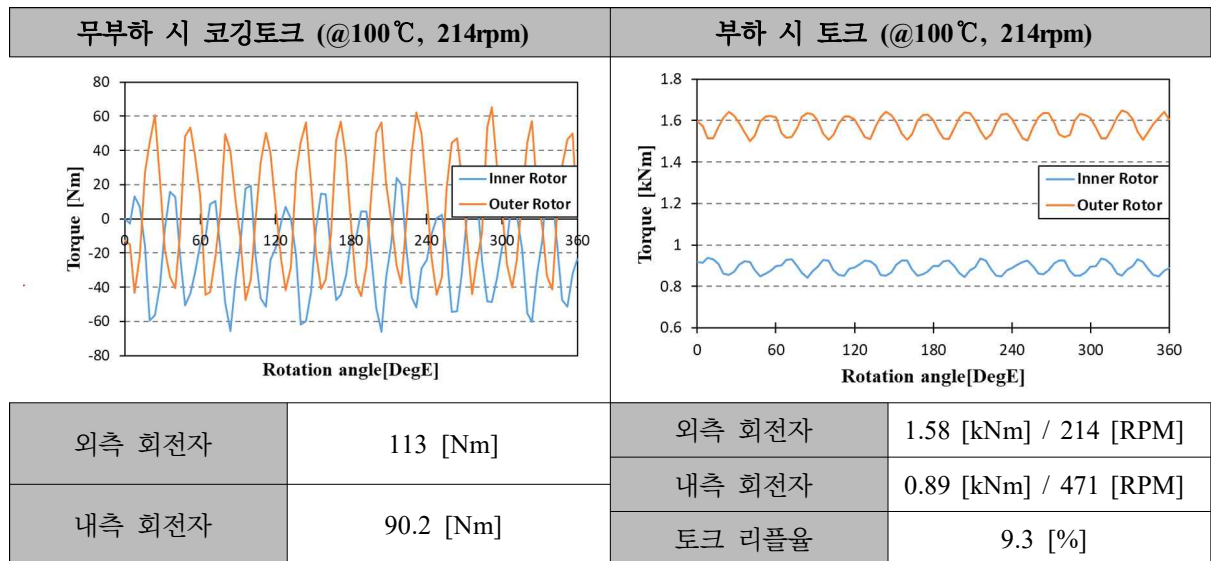


표 2-가-28 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(기초설계 모델) 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]
동손	2,718W
철손	113.6W
영구자석 와전류손	1,994.2W
출력	35.4kW
효율	90.3%

㉔ 집중권의 Model 1 (최종설계 모델)

집중권에서 Model 1의 기초 설계 모델에 대해 파라미터 조정을 통한 최적화 작업을 진행하였다. 표 2-가-29는 회전자와 영구자석 두께를 합하였을 때의 외경에 대한 폴피스 토크 분석이며 195mm에서 가장 큰 지점임을 알 수 있다. 표 2-가-30은 알파 슬롯 별 폴피스 토크이며 표 2-가-31은 영구자석과 폴피스 두께의 합은 고정된 상태로 그 비율에 대한 최적 포인트 도출 과정이다. 마지막으로 표 2-가-32은 폴피스 호율 별 폴피스 토크에 대한 값이다. 폴피스 호율이란 폴피스를 최대로 설정할 수 있는 범위에서 실제로 폴피스가 차지하고 있는 비율을 의미하며 58%에서 최대 토크를 갖는다.

추가로 기초설계에서 큰 영구자석 와전류손에 의한 효율 확보가 힘들어 와전류손을 저감시키기 위해 영구자석을 3분할하였다. 앞서 확보한 최적 포인트 적용 및 영구자석 분할에 대한 최종 설계 모델에 대한 설계 사양 및 모델 형상은 표 2-가-33과 그림 2-가-30과 같다.

표 2-가-34는 역기전력 특성에 대한 그래프 및 값이다. 기존 1차 연도 최종 모델의 역기전력 $207.2V_{peak}$ 에서 $329.8V_{peak}$ 로 증가하였으며 THD는 6.1%에서 13.6%로 약 2배 이상 증가하였다. 부하 시 역기전력은 $380.5V_{peak}$ 에서 $392.6V_{peak}$ 로 증가하였으며 THD는 4.6%에서 15.7%로 증가하였다. 표 2-가-35은 정격속도에서의 부하 시 토크와 무부하 코깅토크 특성이다. 무부하 시 코깅토크는 p2p 값이 1차 연도 최종 모델의 52.5Nm에서 172.3Nm로 증가하였다. 평균 토크는 2.04kNm에서 2.11kNm로 증가하였으며 토크 리플율은 7.4%에서 10.5%로 증가하였다.

표 2-가-36은 Model 1의 최종설계 모델에 대한 손실 및 효율이다. 동손은 약 500W 이상 감소하였으며 그 외에 철손은 309W에서 176.6W, 영구자석 와전류손은 126W에서 583.9W로 증가함에 따라 효율은 92.5%에서 91.2%로 감소하였으며 설계 목표사양이었던 92% 이상의 조건을 여전히 만족시키지 못한다.

위의 결과를 토대로 집중권에서 Model 1은 결국 외경이 400mm, 적층길이가 515mm이기 때문에 분포권 모델의 400mm, 500mm보다 오히려 코어 적층길이가 길다. 물론 엔드턴 적용 시 축 방향길이는 집중권 모델이 더 유리하나 이미 저상대차에 적용할 수 있는 공간의 한계를 넘었기 때문에 적합한 모델로 볼 수 없으며 해당 방법으로 고효율의 전동기 설계안을 도출해내기 힘들다는 것을 알 수 있다. 따라서 집중권에 대한 폴피스 개수 도출 방법이 상이한 Model 2를 설계하는 방향을 연구를 진행하였다.

표 2-가-29 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(기초설계 모델) 회전자와 영구자석 합의 외경 별 폴피스 토크

고정자 외경 고정 후 회전자 외경 조정

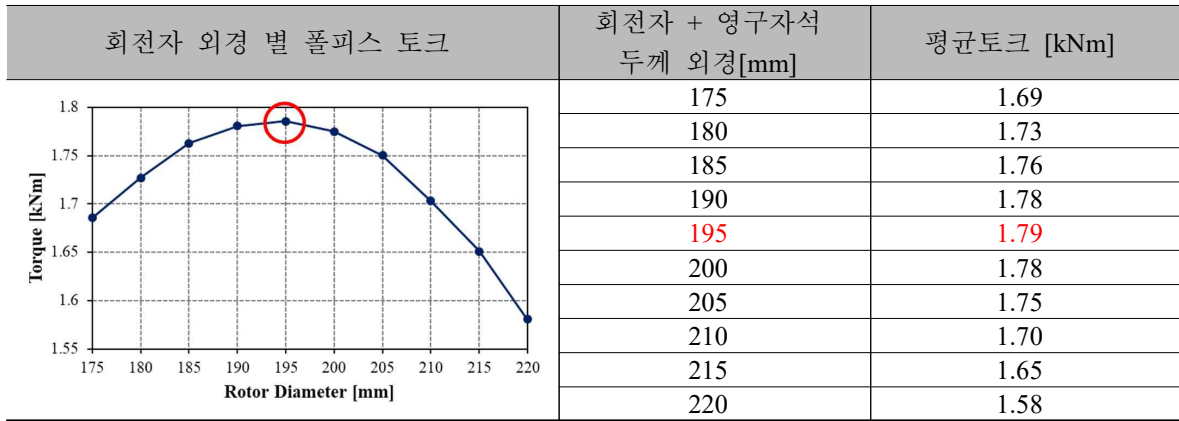
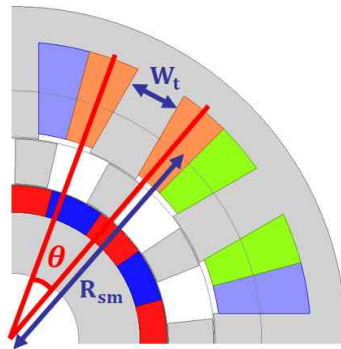


표 2-가-30 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(기초설계 모델) 알파슬롯(슬롯 폭/슬롯 피치) 별 폴피스 토크

알파슬롯 (슬롯 폭 / 슬롯피치)



$$\alpha_{slot} = \frac{R_{sm}\theta_s - W_t}{R_{sm}\theta_s}$$

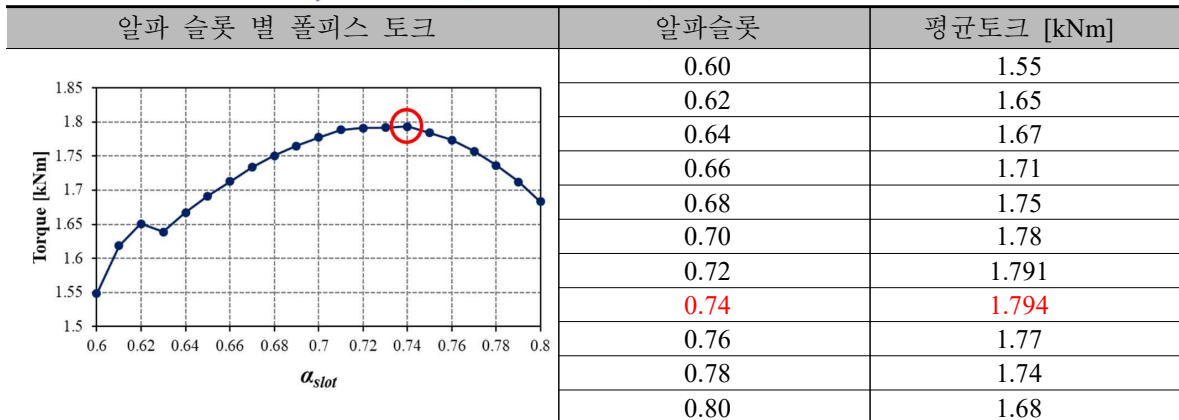
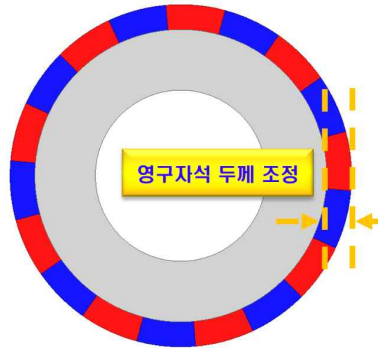


표 2-가-31 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(기초설계 모델) 영구자석 두께 별 폴피스 토크

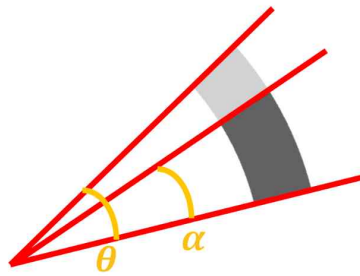
영구자석 두께 및 폴피스 두께 비율 조정



영구자석 두께 별 폴피스 토크	영구자석 두께 [mm]	폴피스 두께 [mm]	토크[kNm]
	12	27.5	1.72
	12.5	27	1.73
	13	26.5	1.74
	13.5	26	1.76
	14	25.5	1.77
	14.5	25	1.78
	15	24.5	1.79
	15.5	24	1.80
	16	23.5	1.81
	16.5	23	1.82

표 2-가-32 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(기초설계 모델) 폴피스 호율 별 폴피스 토크

폴피스 호율



$$\text{폴피스 호율} = \frac{\alpha}{\theta} \times 100$$

폴피스 호율 별 폴피스 토크	폴피스 호율 [%]	평균토크 [kNm]
	40	1.68
	43	1.71
	46	1.74
	49	1.77
	52	1.79
	55	1.80
	58	1.81
	61	1.80
	64	1.79
	67	1.77

표 2-가-33 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(최종설계 모델) 설계 사양

구분			Specification
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 10 / 10 / 12 / 22
	냉각 방식		반폐형 강제공랭식
	고정자 외경 / 내경		400 [mm] / 293 [mm]
	회전자 외경 / 내경		210 [mm] / 105 [mm]
	적층길이 / 공극길이		515 [mm] / 1.5 [mm]
	요크 폭		16 [mm]
	속도 (내측 회전자 / 외측 회전자)		470.8 [RPM] / 214 [RPM]
고정자	Coil	정격전류	207.7 [A_{rms}]
		전류밀도	5 [A_{rms}/mm^2]
		코일 점적률	65 [%]
		턴 수	20회 / 1layer
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750 [V_{dc}] (433 [V_{peak}])
	Core	재질	35PNF1600
회전자	Magnet	타입	NdFeB 38UH (소결형)
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]
		두께	16.5 [mm]
	Core	재질	35PNF1600

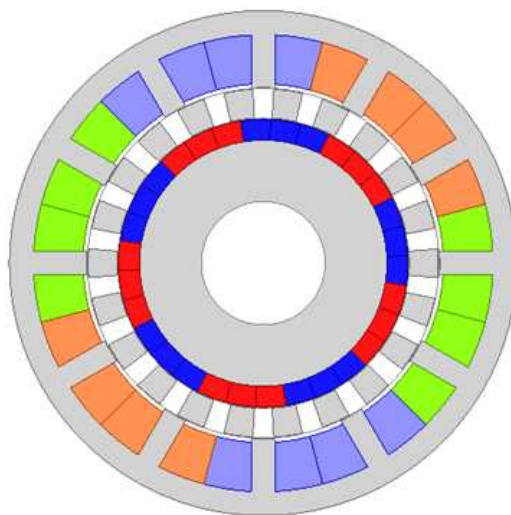


그림 2-가-30 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(최종설계 모델) 형상

표 2-가-34 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(최종설계 모델) 역기전력

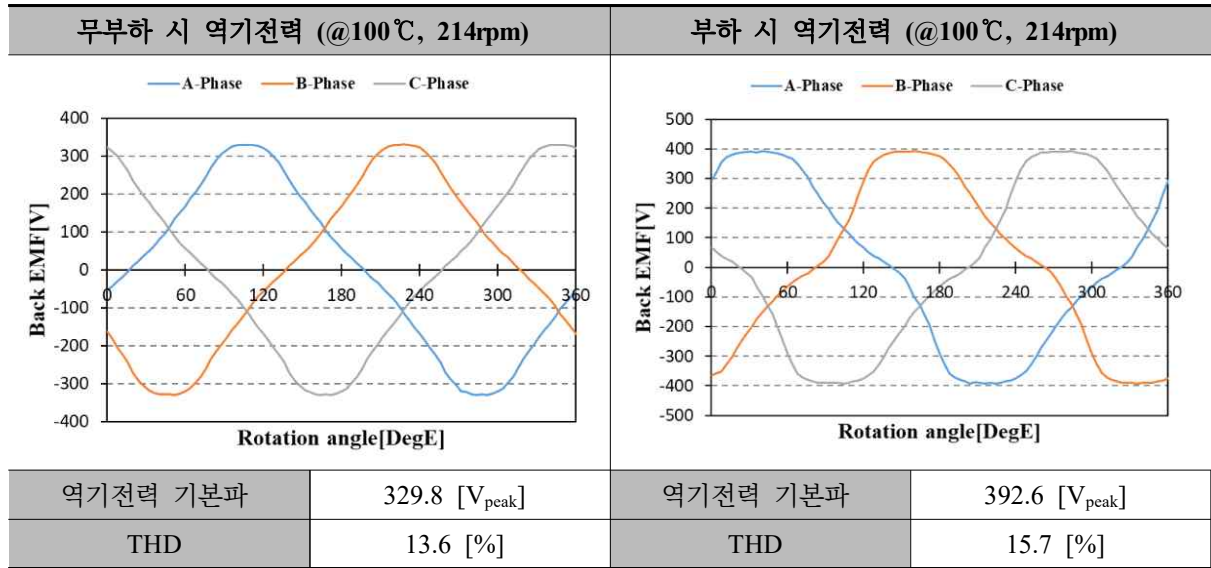


표 2-가-35 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(최종설계 모델) 코깅토크 및 토크

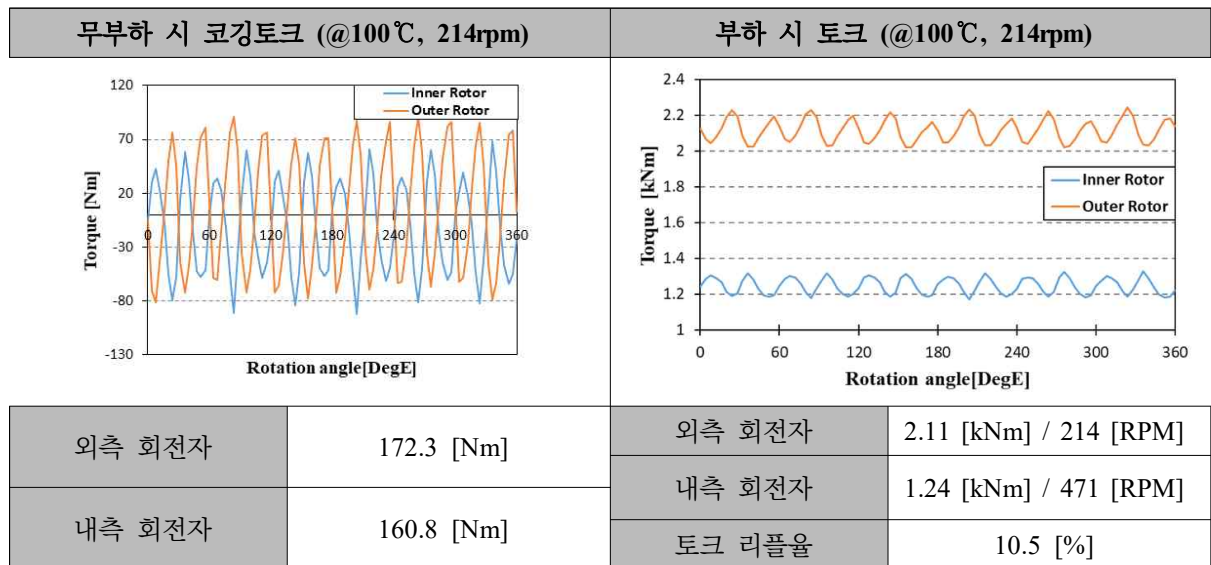


표 2-가-36 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 1(최종설계 모델) 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]
동손	3,730W
철손	176.6W
영구자석 와전류손	583.9W
출력	47.3kW
효율	91.2%

㉔ 집중권의 Model 2 (기초설계 모델)

집중권을 적용한 Model 1 설계 시 최종 모델의 사이즈 및 효율은 분포권 모델로 설계하였을 때보다 특성이 좋지 않다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 집중권 모델로 설계하되 폴피스 도출 방법이 다른 Model 2에 대한 설계를 진행하였다. 집중권에서 주로 사용되는 고정자 극수인 10, 8, 4극 및 회전자 극수 16, 18, 22, 26극에 대한 각각의 조합에 대한 전자계 특성을 비교 분석 하였다.

그림 2-가-31과 표 2-가-37은 고정자와 회전자 극수 조합에 따른 전자계 특성에 대한 비교 분석 그래프 및 표이다. 외경 및 적층길이는 각 400mm와 410mm로 고정하였으며 그에 따른 극 수 슬롯 수 조합만 변경하여 토크, 토크리플을, THD에 대한 특성 비교를 하였다. 그 결과 요구토크를 만족시키며 토크 리플을 및 THD 특성이 좋은 고정자 극 수 8극 회전자 극 수 18극이라는 조합을 도출 할 수 있었다.

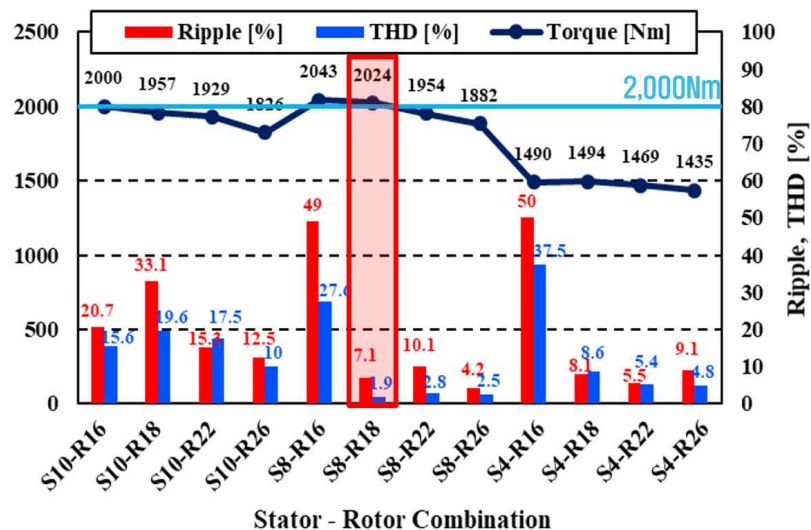


그림 2-가-31 45kW급 DR-PMSM 기준 기어비 산정식 적용한 고정자와 회전자 극수 조합에 따른 전자계 특성 비교 그래프

표 2-가-37 45kW급 DR-PMSM 기준 기어비 산정식 적용한 고정자와 회전자 극수 조합에 따른 전자계 특성

고정자 극 수	회전자 극 수	토크 [Nm]	토크리플을 [%]	부하 시 THD [%]
10	16	2,000	20.7	15.6
	18	1,957	33.1	19.6
	22	1,929	15.3	17.5
	26	1,826	12.5	10
8	16	2,043	49	27.6
	18	2,024	7.1	1.9
	22	1,954	10.1	2.8
	26	1,882	4.2	2.5
4	16	1,490	50	37.5
	18	1,494	8.1	8.6
	22	1,469	5.5	5.4
	26	1,435	9.1	4.8

Model 2의 기초설계에 대한 설계 사양 및 모델 형상은 표 2-가-38과 그림 2-가-32와 같다. 극수 슬롯 수 조합은 표 2-가-37에서 도출한 결과를 적용하여 고정자 8극, 회전자 18극이며 폴피스의 개수는 각 극쌍수의 합이므로 13개가 된다. 속도 또한 동기 주파수에 의해 설정되므로 내측회전자의 속도가 470RPM에서 155RPM으로 변경된다.

표 2-가-39는 집중권에서의 Model 2 기초설계 모델의 역기전력 특성이다. 무부하 시 역기전력은 1차 연도 최종 모델의 역기전력 값 $207.2V_{peak}$ 에서 $78.5V_{peak}$ 로 감소하였으며 THD는 6.1%에서 2.8%로 약 2배 이상 감소하였다. 부하 시 역기전력은 $380.5V_{peak}$ 에서 $257V_{peak}$ 로 감소하였으며 THD는 4.6%에서 3.2%로 감소하였다.

표 2-가-40은 정격속도에서의 부하 시 토크와 무부하 코깅토크 특성이다. 무부하 시 코깅토크는 p2p 값이 1차 연도 최종 모델의 52.5Nm에서 70.5Nm로 증가하였다. 평균 토크는 2.04kNm에서 2.06kNm로 증가하였으며 토크 리플율은 7.4%에서 7.6%로 증가하였다. 표 2-가-41는 손실 및 효율이며 1차 연도 최종모델의 효율인 92.5%에서 96.8%까지 증가시킬 수 있었다.

해당모델에서 가장 고무적인 사실은 적층길이가 기존의 모델 중 가장 짧은 410mm로 축소시킬 수 있었다는 것이다. 따라서 해당 모델에 대해 최적화 작업을 진행하였다.

표 2-가-38 45kW급 DR-PMSM 기존 기어비 산정식 적용한 기초설계 모델 설계 사양

구분			Specification
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 18 / 8 / 12 / 13
	냉각 방식		반폐형 강제공랭식
	고정자 외경 / 내경		400 [mm] / 293 [mm]
	회전자 외경 / 내경		200 [mm] / 86 [mm]
	적층길이 / 공극길이		410 [mm] / 1.5 [mm]
	요크 폭		18 [mm]
	속도 (내측 회전자 / 외측 회전자)		155 [RPM] / 214 [RPM]
고정자	Coil	정격전류	145.2 [A_{rms}]
		전류밀도	5 [A_{rms}/mm^2]
		코일 점적률	65 [%]
		턴 수	25회 / 1layer
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750 [V_{dc}] (433 [V_{peak}])
	Core	재질	35PNF1600
회전자	Magnet	타입	NdFeB 38UH (소결형)
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]
		두께	16 [mm]
	Core	재질	35PNF1600

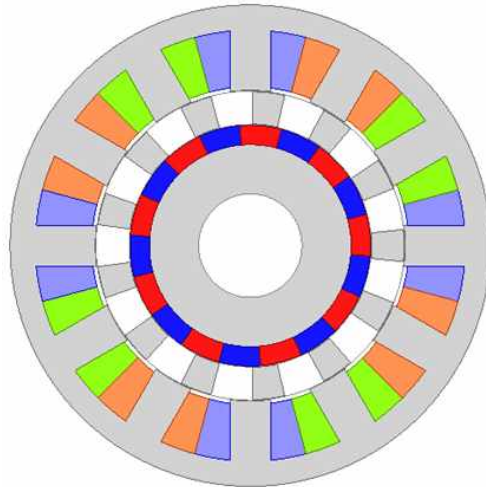


그림 2-가-32 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(기초설계 모델) 형상

표 2-가-39 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(기초설계 모델) 역기전력

무부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)		부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)	
역기전력 기본파	78.5 [V _{peak}]	역기전력 기본파	257 [V _{peak}]
THD	2.8 [%]	THD	3.2 [%]

표 2-가-40 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(기초설계 모델) 코강토크 및 토크

무부하 시 코강토크 (@100℃, 214rpm)		부하 시 토크 (@100℃, 214rpm)	
외측 회전자	70.5 [Nm]	외측 회전자	2.06 [kNm] / 214 [RPM]
내측 회전자	39.9 [Nm]	내측 회전자	1.43 [kNm] / 155 [RPM]
		토크 리플율	7.6 [%]

표 2-가-41 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(기초설계 모델) 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]
동손	1,222W
철손	97.7W
영구자석 와전류손	174.2W
출력	46.1kW
효율	96.8%

㉠ 집중권의 Model 2 (최종설계 모델)

Model 2 기초 설계 모델에 대해 각 파라미터 별 최적화 작업을 진행하였다. 표 2-가-42에서 고정자 외경은 고정 시킨 상태에서 회전자 외경을 조정하여 토크가 가장 높은 회전자 외경 185mm를 도출 하였다. 다음 표 2-가-43의 알파슬롯은 0.56에서 최적 값을 가진다. 표 2-가-44는 영구자석과 폴피스 두께의 총 합에 대한 두께를 비교 분석하였다. 폴피스 두께는 고정 시킨 상태로 영구자석 두께만 조절해가며 총 두께에 대해 비교한 결과 총 두께는 39mm이며 영구자석 두께 12mm에서 평균 토크가 가장 큰 값을 가졌다. 총 두께에 대한 결과를 도출하였으니 이제 해당 두께에서 영구자석과 폴피스 두께의 비율에 대한 최적 작업을 진행하였다. 표 2-가-45는 영구자석 두께 별 폴피스 토크로 영구자석과 폴피스 비율을 의미한다. 영구자석 두께가 14mm이며 폴피스 두께가 25mm에서 가장 큰 토크 특성을 지닌다. 마지막으로 표 2-가-46의 폴피스 호일에선 51%에서 최적 값을 갖는다. 표 2-가-47은 회전자 외경별 자속밀도를 나타낸다. 기초 설계 모델의 회전자 외경 185mm에서 발생한 치포화를 줄이기 위해 회전자 외경을 210mm까지 증가시켰다.

앞서 진행한 최적화 작업에서 도출한 최적 값들을 적용하여 최종 모델이 도출되었다. 표 2-가-48 및 그림 2-가-33은 Model 2 최종 설계모델의 설계 사양 및 모델 형상이다. 회전자 외경이 증가하며 전류가 소폭 감소하였다. 또한 Model 1의 최종모델 사이즈인 외경 400mm에 515mm에 비해 해당 모델은 외경 400mm에 코어 적층길이가 410mm이다. 표 2-가-49는 Model 2 최종설계 모델의 역기전력 특성이다. 무부하 시 역기전력은 1차 연도 최종 모델의 역기전력 값 $207.2V_{peak}$ 에서 $91V_{peak}$ 로 감소하였으며 THD는 6.1%에서 3.8%로 감소하였다. 부하 시 역기전력은 $380.5V_{peak}$ 에서 $249.8V_{peak}$ 로 감소하였으며 THD는 4.6%에서 3.8%로 감소하였다.

표 2-가-50은 정격속도에서의 부하 시 토크와 무부하 코깅토크 특성이다. 무부하 시 코깅토크는 p2p 값이 1차 연도 최종 모델의 52.5Nm에서 88.6Nm로 증가하였다. 평균 토크는 2.04kNm에서 2.25kNm로 증가하였으며 토크 리플율은 7.4%로 동일하다.

표 2-가-51은 손실 및 효율이며 1차 연도 최종모델의 효율인 92.5%에서 97.1%까지 증가시킬 수 있었다.

표 2-가-52는 45kW급 DR-PMSM 설계 기법에 따른 사이즈 및 토크 특성 비교이다. 모

든 모델의 외경은 400mm로 고정하였으며 토크는 요구 토크를 만족시키는 2kNm 이상으로 설정하였다. 사이즈에 대한 비교분석을 위해 설계된 모델에 대해 토크를 전부 2.1kNm 수준으로 맞추었을 때의 특성 값이다.

설계기법은 크게 권선법에 의해 두 가지로 나뉜다. 분포권 1차 연도 최종모델은 코어의 적층길이가 500mm이었으며 엔드턴을 적용 시 축 방향 길이는 1,015mm로 증가한다. 요구 토크는 만족하나 엔드턴과 외함을 포함하여 대차에 취부 가능한 축 방향 길이가 450mm임을 고려할 때 실제로 적용하긴 힘들다.

다음 2차 연도 모델에서는 분포권에서 착자 방식에 따라 두 가지로 나뉜다. Radial 착자의 최종 모델은 1차 연도 최종 모델 코어 적층길이에서 70mm를 줄인 430mm이다. 하지만 엔드턴 포함 길이를 고려 시 873mm이므로 실제 적용은 어렵다.

분포권 2차 연도 모델에서 착자 방식만 Radial 방식에서 Halbach 배열로 변경시켜 설계를 진행하였다. 이는 코어 적층길이를 23mm 감소시킬 수 있었으나 역시 대차에 취부는 불가능하다.

이에 분포권 대비 엔드턴 길이가 짧은 집중권으로 설계를 하였다. 집중권의 Model 1은 코어 적층길이가 515mm이나 엔드턴 포함 축방향 길이는 628mm로 지금까지 설계한 모델들 중 가장 짧다.

하지만 역시 대차에 취부는 불가능하며 이에 Model 2에 대한 설계를 진행한 결과 코어 적층길이는 385mm, 엔드턴 포함 축방향 길이는 470mm까지 감소시킬 수 있었다. 따라서 45 kW급 DR-PMSM 최종 설계는 Model 2에 대해 상대적으로 여유 공간이 많은 외경을 증가시키고 적층길이를 줄이는 방향으로 설계를 진행하였다.

표 2-가-42 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(기초설계 모델) 회전자와 영구자석 합의 외경 별 폴피스 토크

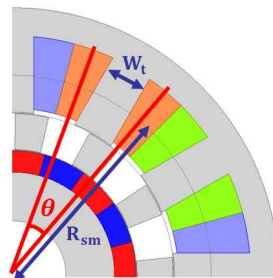
고정자 외경 고정 후 회전자 외경 조정



회전자 외경 별 폴피스 토크	회전자 + 영구자석 두께 외경 [mm]	평균토크 [kNm]
	180	2.10
	185	2.116
	190	2.115
	195	2.09
	200	2.06
	205	2.02
	210	1.97
	215	1.91
	220	1.84

표 2-가-43 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(기초설계 모델) 알파슬롯(슬롯 폭/슬롯 피치) 별 폴피스 토크

알파슬롯 (슬롯 폭 / 슬롯 피치)

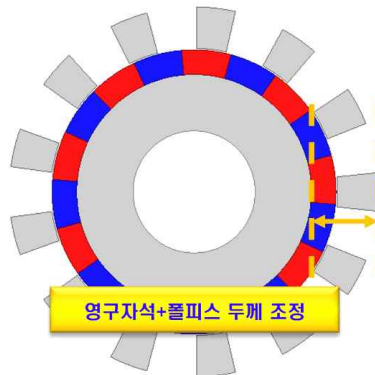


$$\alpha_{slot} = \frac{R_{sm}\theta_s - W_t}{R_{sm}\theta_s}$$

알파 슬롯 별 폴피스 토크	알파슬롯	평균토크 [kNm]
	0.50	2.11
	0.51	2.12
	0.52	2.13
	0.53	2.14
	0.54	2.14
	0.55	2.150
	0.56	2.152
	0.57	2.150
	0.58	2.14
	0.59	2.14
	0.60	2.13

표 2-가-44 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(기초설계 모델) 영구자석 및 폴피스 두께 별 폴피스 토크

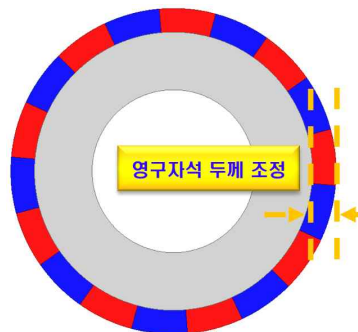
영구자석 + 폴피스 두께 조정



영구자석 및 폴피스 두께 별 폴피스 토크	영구자석 두께 [mm]	폴피스 두께 [mm]	토크[kNm]
	9	27	2.13
	10		2.15
	11		2.165
	12		2.167
	13		2.166
	14		2.162
	15		2.157
	16		2.151
	17		2.144

표 2-가-45 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(기초설계 모델) 영구자석 두께 별 폴피스 토크

영구자석 두께 및 폴피스 두께 비율 조정



영구자석 두께 별 폴피스 토크	영구자석 두께 [mm]	폴피스 두께 [mm]	토크[kNm]
	9	30	2.03
	10	29	2.08
	11	28	2.13
	12	27	2.16
	13	26	2.20
	14	25	2.23

표 2-가-46 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(기초설계 모델) 폴피스 호율 별 폴피스 토크

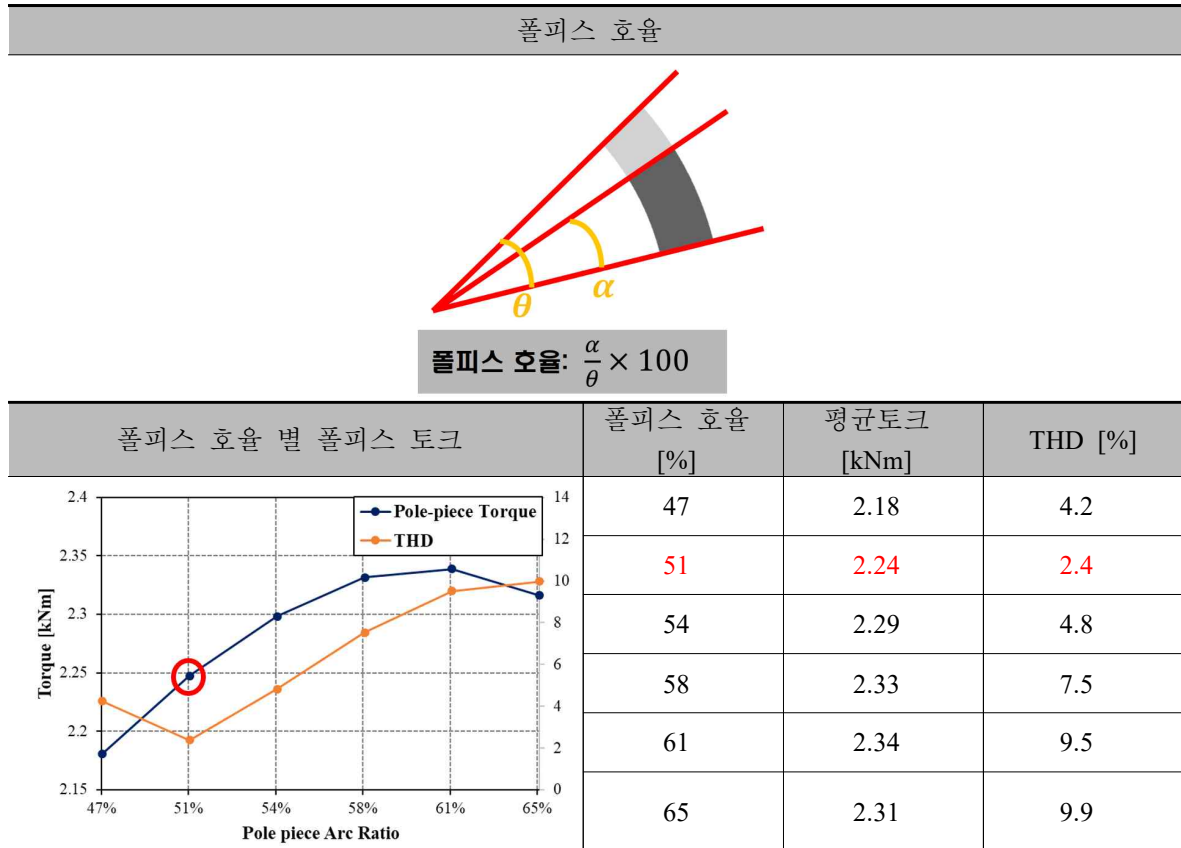


표 2-가-47 45kW급 DR-PMSM 회전자 외경별 자속밀도 비교

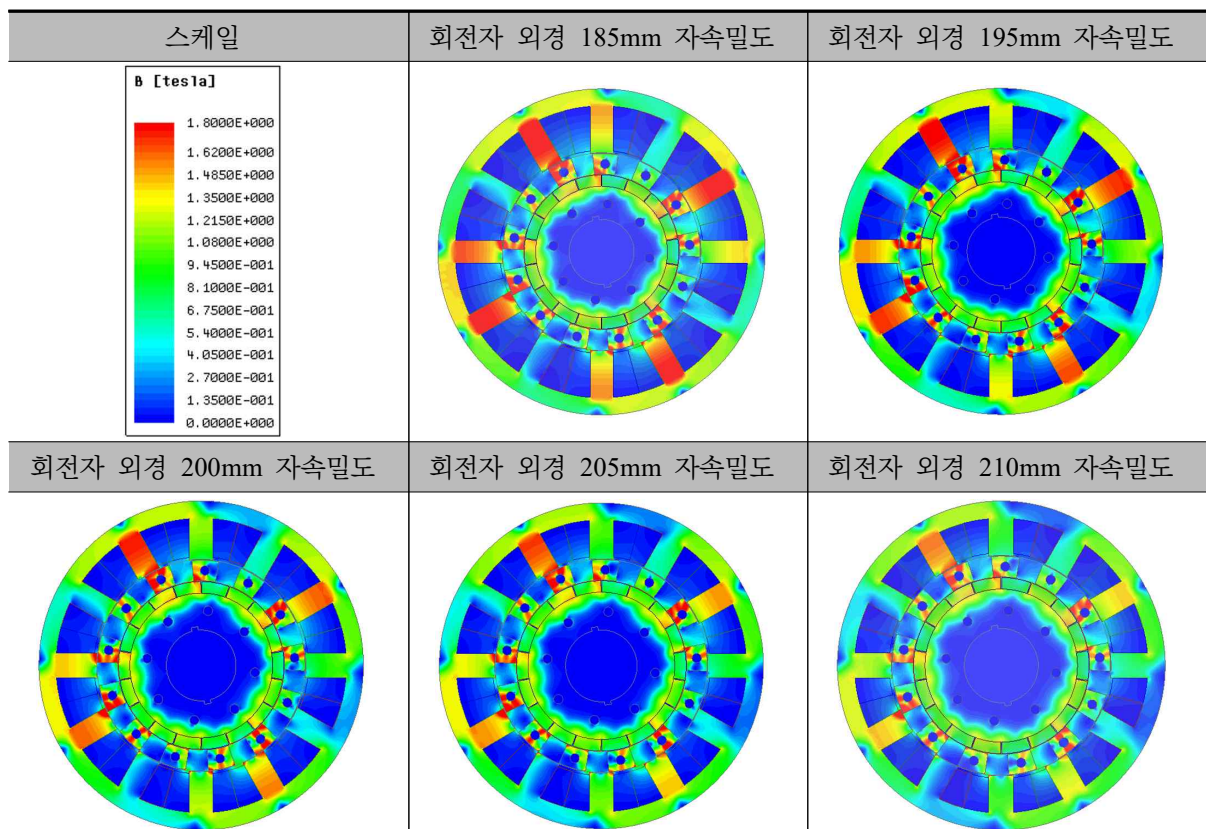


표 2-가-48 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(최종설계 모델) 설계 사양

구분			Specification
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 18 / 8 / 12 / 13
	냉각 방식		반폐형 강제공랭식
	고정자 외경 / 내경		400 [mm] / 270 [mm]
	회전자 외경 / 내경		220 [mm] / 110 [mm]
	적층길이 / 공극길이		410 [mm] / 1.5 [mm]
	요크 폭		18 [mm]
	속도 (내측 회전자 / 외측 회전자)		155 [RPM] / 214 [RPM]
고정자	Coil	정격전류	141.2 [A_{rms}]
		전류밀도	5 [A_{rms}/mm^2]
		코일 점적률	65 [%]
		턴 수	25회 / 1layer
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750 [V_{dc}] (433 [V_{peak}])
	Core	재질	35PNF1600
회전자	Magnet	타입	NdFeB 38UH (소결형)
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]
		두께	14 [mm]
	Core	재질	35PNF1600

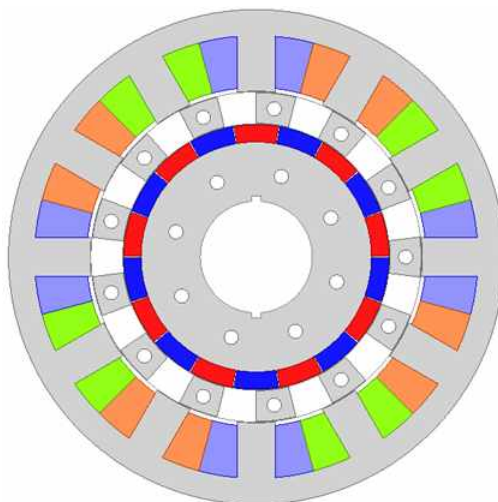


그림 2-가-33 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(최종설계 모델) 형상

표 2-가-49 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(최종설계 모델) 역기전력

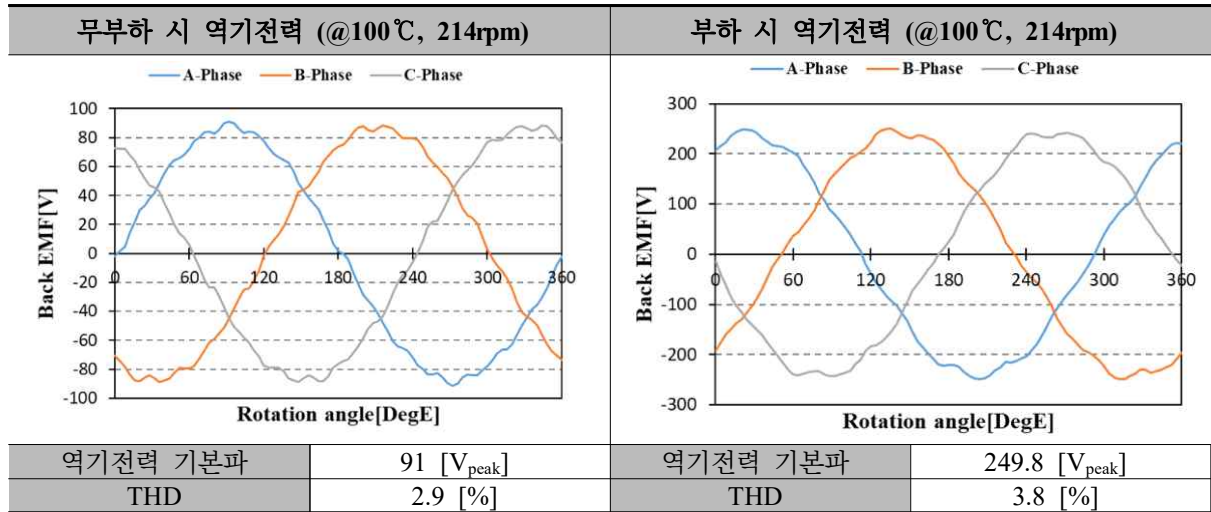


표 2-가-50 445kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(최종설계 모델) 코깅토크 및 토크

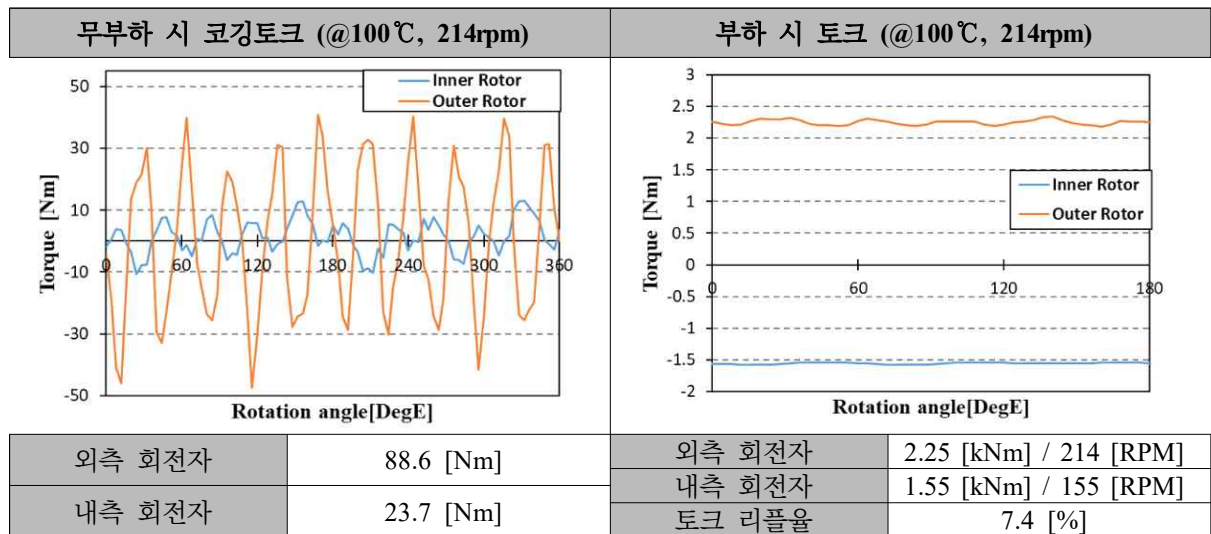


표 2-가-51 45kW급 DR-PMSM 집중권의 Model 2(최종설계 모델) 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]
동손	1,192.5W
철손	102.6W
영구자석 와전류손	215.2W
출력	50.4kW
효율	97.1%

표 2-가-52 45kW급 DR-PMSM 설계 기법에 따른 사이즈 및 토크 특성 비교

구분	분포권	분포권	분포권	집중권	집중권
	1차 연도 최종모델	2차 연도 Radial 착자	2차 연도 Halbach 자화	Model 1	Model 2
외경	400 [mm]				
코어 적층길이	500 [mm]	430 [mm]	407 [mm]	515 [mm]	385 [mm]
엔드턴 포함 축방향 길이	1,015 [mm]	873 [mm]	826 [mm]	628 [mm]	470 [mm]
외측 회전자 토크	2.04 [kNm]	2.11 [kNm]	2.10 [kNm]	2.11 [kNm]	2.11 [kNm]

(다) 45kW급 DR-PMSM의 최종설계

45kW급 무가선 트램에 적용하기 위한 DR-PMSM에 대한 설계는 앞서 진행한 것과 같이 분포권 모델을 우선적으로 설계 하였다. 분포권에서 1차 연도 최종모델은 외경 400mm에 코어 적층길이가 500mm로 도출되어 사이즈 측면에서 적절치 않았다. 그래서 2차 연도 분포권을 적용한 모델에서는 전류밀도를 $3.5A_{rms}/mm^2$ 에서 $5A_{rms}/mm^2$ 로 변경하여 최적 설계를 하였다. 최종 사이즈는 요구사항 만족하는 모델에서 외경 400mm, 코어 적층길이는 430mm이었으며 이를 개선하기 위한 방법으로 영구자석을 기존 Radial 방향으로 착자 시킨 것이 아닌 Halbach 자화를 시켜 모델을 설계하였다. 토크는 5.6% 증가하였으나 추가 확보한 만큼의 토크에 대해 적층길이를 감소시켜도 코어의 적층길이는 약 407mm이다. 게다가 분포권의 경우 권선 작업을 진행할 경우 축 방향 길이가 약 2배정도로 늘어나게 된다. 따라서 트램용 저장 대차에 취부 할 수 있는 축방향 길이인 450mm를 훨씬 웃돌게 되며 설치가 불가능하다는 것을 알 수 있다.

그렇기 때문에 권선법을 분포권 대신 집중권을 적용하여 설계를 다시 진행하였다. 집중권을 적용하되 해당 모델에 대해서 설계 방향을 크게 두 가지로 나누어 진행하였다. 폴피스의 개수를 산정하는 방법에 따라 Model 1과 Model 2로 나누어 설계하였다. Model 1은 폴피스의 개수를 산정할 때 회전자 극수와 슬롯 수의 합으로 결정된다. 또한 이 식이 성립하기 위해 고정자와 회전자의 수가 동일해야한다. 해당 모델의 최적 설계 결과 요구조건을 만족시키는 모델의 최종 사이즈는 외경 400mm에 적층길이는 515mm가 도출 되었다. 분포권을 적용 시 1차 연도 모델이 500mm, 2차 연도 모델의 Radial 착자 모델이 430mm, Halbach 자화 모델이 407mm임을 볼 때 코어 적층길이만으로는 515mm로 가장 길지만 권선작업을 하여 엔드턴을 포함한 적층길이를 고려할 시 가장 짧은 모델이 되겠다. 그럼에도 저장 대차에 적용할 수 있는 축방향 길이 공간은 450mm밖에 되지 않으므로 장착이 어렵다. Model 1의 적용이 힘들기에 폴피스 개수를 산정 시 회전자와 고정자 극쌍수 합을 이용하는 두 번째 방법을 적용하여 설계를 진행하였다. Model 2에 대해 최적 설계를 하여 도출한 최종 모델의 외경은 400mm, 410mm이었으며 모든 설계기법 중 가장 사이즈면에서 유리함을 알 수 있었다. 하지만 해당 모델 역시 축방향 길이의 장착이 불가능한 상황이다.

현재 저장 대차의 DR-PMSM 적용 가능한 공간 범위가 620mm, 450mm이다. 우선 적층길이에서 가장 유리한 Model 2를 기반으로 외함을 적용 시 그 사이즈를 고려하여 외경을 최대한 증가시키는 설계를 진행하였다. 우선 외경이 400mm에서 설계를 했었는데 이를 520mm까지 증가시켜 설계를 진행하였다.

표 2-가-53은 최종 설계 모델에 대한 설계 사양이다. 고정자 외경은 520mm이며 그 때 적층길이는 184mm까지 감소시킬 수 있었다. 턴 수는 역기전력 전압 제한을 고려하여 25회에서 22회로 조정하였다. 그림 2-가-34는 45kW급 DR-PMSM 최종 설계 모델에 대한 형상이다.

표 2-가-54는 DR-PMSM 최종 설계 모델에 대한 정격속도에서 역기전력 특성이다. DR-PMSM의 형상 타입이 SPM 타입으로 $I_d=0$ 제어를 진행하게 되며 이에 전압 제한치를 최대속도에서 만족시키는 방향으로 설계를 진행하였으며 모든 전자계 특성은 1차 연도 모델의 값과 비교를 진행하였다. 무부하 역기전력 값은 $207.2V_{peak}$ 에서 $48.37V_{peak}$ 로 감소하였으며 THD는 6.1%에서 4.5%로 감소하였다. 부하 시 역기전력 값은 $380.52V_{peak}$ 에서 $148.6V_{peak}$ 으로 감소하였으며 THD는 4.6%에서 4.7%로 증가하였다.

표 2-가-55는 정격 토크 특성이다. 우선 무부하 시 코깅토크는 $52.5Nm$ 에서 $79.2Nm$ 로 증가하였고 부하 시 정격토크는 $2.04kNm$ 에서 $2.11kNm$ 로 설계가 마무리 되었다. 토크 리플율은 7.4%에서 10%로 증가함을 확인 할 수 있다.

표 2-가-56과 2-가-57은 최대속도에서의 역기전력 및 토크 특성이다. 역기전력 값은 부하 시 역기전력이 $413V_{peak}$ 로 $433V_{peak}$ 에 비해 4.7% 여유 있는 것을 확인하였다.

표 2-가-58은 최종 모델에 대한 자속밀도 분포도 및 자속선도이다. 1.8T 기준으로 자속 밀도 분포도를 분석하였을 때 포화 문제는 없는 것을 확인 할 수 있었다.

표 2-가-59는 영구자석 감자내력에 대한 해석 결과이다. 38UH는 전동기 최대 동작온도인 $140^{\circ}C$ 에서 knee 포인트가 없기에 역자계에 의한 감자내력만 확인하였으며 그 결과 정격 전류 2배를 인가 시에도 문제 없는 것을 확인 하였다.

표 2-가-60은 최종설계에 대한 손실 및 효율이며 최종적으로 효율이 96.1%로 요구조건을 만족시키며 1차연도 최종 모델의 92.5%보다 3.6% 향상됨을 확인하였다.

표 2-가-61은 설계 기법에 따른 손실 비교이다. 손실은 열원과 밀접한 관계를 갖기에 모델별 비교 분석을 진행하였다. 집중권에서 동손이 확연히 줄어들을 알 수 있었다. 영구자석 와전류손이 분포권에 비해 증가하였으나 영구자석 와전류손의 증가폭보다 동손의 감소폭이 크기에 총 손실량은 줄일 수 있었다. 집중권 Model 2에서 대차 취부 가능성을 고려한 최종모델에서 외경을 증가시켜 최적설계를 진행하였으며 이에 동손은 $1,192W$ 에서 $1,360W$ 로 $168W$ 증가하였고 영구자석 와전류손은 $205W$ 증가하였다.

표 2-가-62는 최종모델 권선도이며 그림 2-가-35, 2-가-36, 2-가-37은 최종모델에 대한 고정자, 회전자, 폴피스 및 영구자석의 설계 도면이다.

표 2-가-53 45kW급 DR-PMSM 1차 연도 및 2차 연도 최종 설계모델의 설계 사양

구분		Specification			
		1차 연도 최종모델	2차 연도 최종모델	비고	
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 14 / 4 / 42 / 9	3 / 18 / 8 / 12 / 13	극 수 슬롯 수 조합 변경
	냉각 방식		반폐형 자연냉각식	반폐형 강제공랭식	자연냉각 → 강제공랭
	고정자 외경 / 내경		400[mm] / 296[mm]	520[mm] / 366[mm]	400 → 520mm 296 → 366mm
	회전자 외경 / 내경		230[mm] / 80[mm]	244[mm] / 120.4[mm]	230 → 244mm 80 → 120.4mm
	적층길이 / 공극길이		500[mm] / 1.5[mm]	184[mm] / 1.5[mm]	500 → 184mm
	요크 폭		17. [mm]	22.5[mm]	17.5 → 22.5mm
	속도 (내 / 외측 회전자)		138[RPM] / 214[RPM]	155[RPM] / 214[RPM]	내측 회전자 속도 변경
고정자	Coil	정격전류	56[A _{rms}]	246.2[A _{rms}]	56 → 246.2A _{rms}
		전류밀도	3.5[A _{rms} /mm ²]	5[A _{rms} /mm ²]	3.5→5A _{rms} /mm ²
		코일 점적률	65[%]		-
		턴 수	8회 / 1layer	22회 / 1layer	8 → 22회
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750[V _{dc}] (433 [V _{peak}])		-
	Core	재질	35PNF1600		-
회전자	Magn et	타입	NdFeB 38UH (소결형)		-
		성능	Br = 1.1[T] Hc = 833.7[kA/m]		-
		두께	15[mm]	18[mm]	15 → 18mm
		Core	재질	35PNF1600	

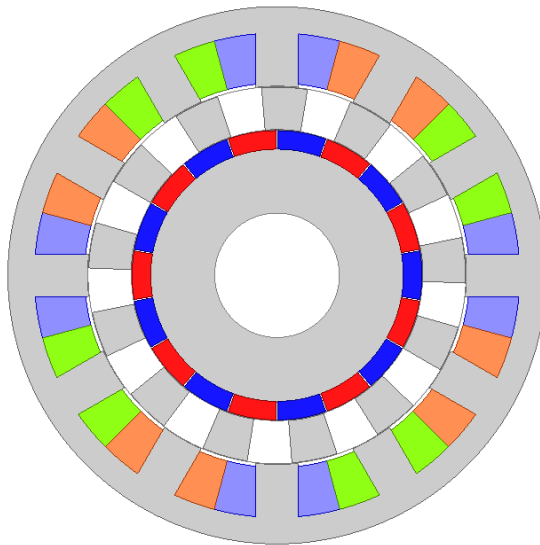


그림 2-가-34 45kW급 DR-PMSM 최종 설계모델의 형상

표 2-가-54 45kW급 DR-PMSM 최종설계 모델 역기전력 (정격속도)

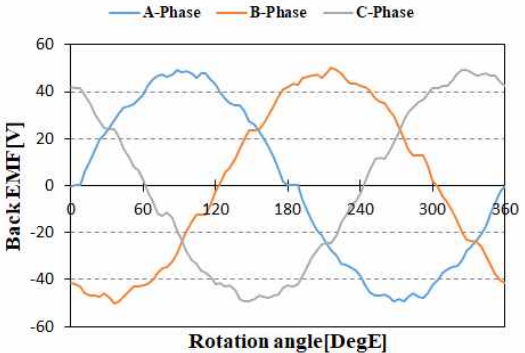
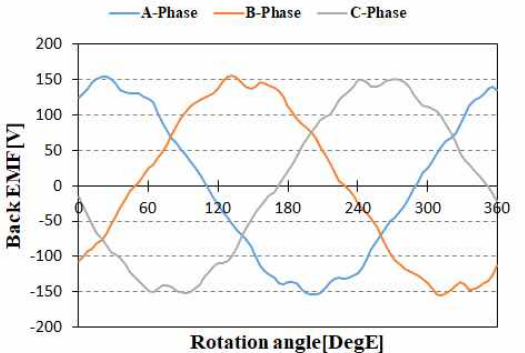
무부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)		부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)	
			
역기전력 기본파	48.37 [V _{peak}]	역기전력 기본파	148.6 [V _{peak}]
THD	4.5 [%]	THD	4.7 [%]

표 2-가-55 45kW급 DR-PMSM 최종설계 모델 코깅토크 및 토크 (정격속도)

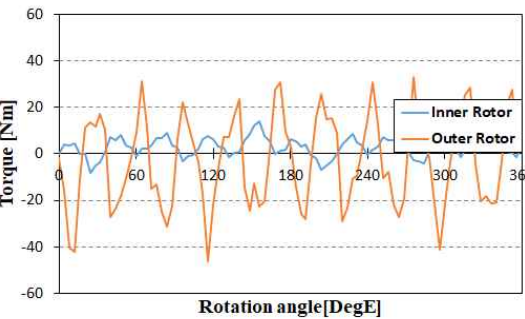
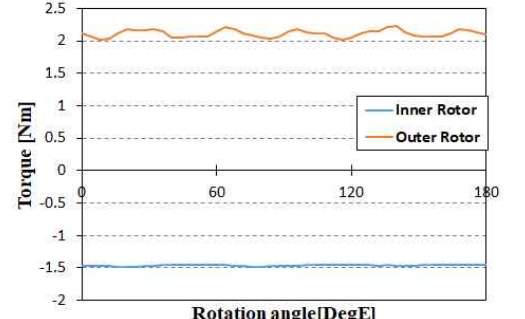
무부하 시 코깅토크 (@100℃, 214rpm)		부하 시 토크 (@100℃, 214rpm)	
			
외측 회전자	79.2 [Nm]	외측 회전자	2.11 [kNm] / 214 [RPM]
내측 회전자	23.1 [Nm]	내측 회전자	1.46 [kNm] / 155 [RPM]
		토크 리플을	10 [%]

표 2-가-56 45kW급 DR-PMSM 최종설계 모델 역기전력 (최대속도)

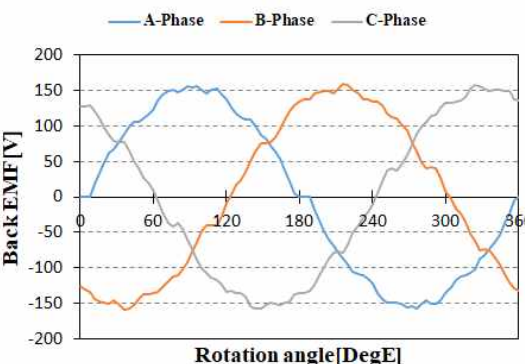
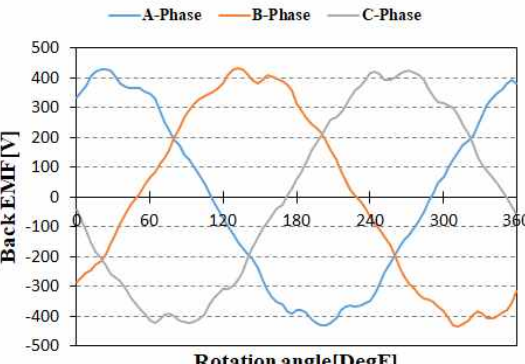
무부하 시 역기전력 (@100℃, 599rpm)		부하 시 역기전력 (@100℃, 599rpm)	
			
역기전력 기본파	153.9 [V _{peak}]	역기전력 기본파	415.6 [V _{peak}]
THD	4.5 [%]	THD	4.7 [%]

표 2-가-57 45kW급 DR-PMSM 최종설계 모델 코깅토크 및 토크 (최대속도)

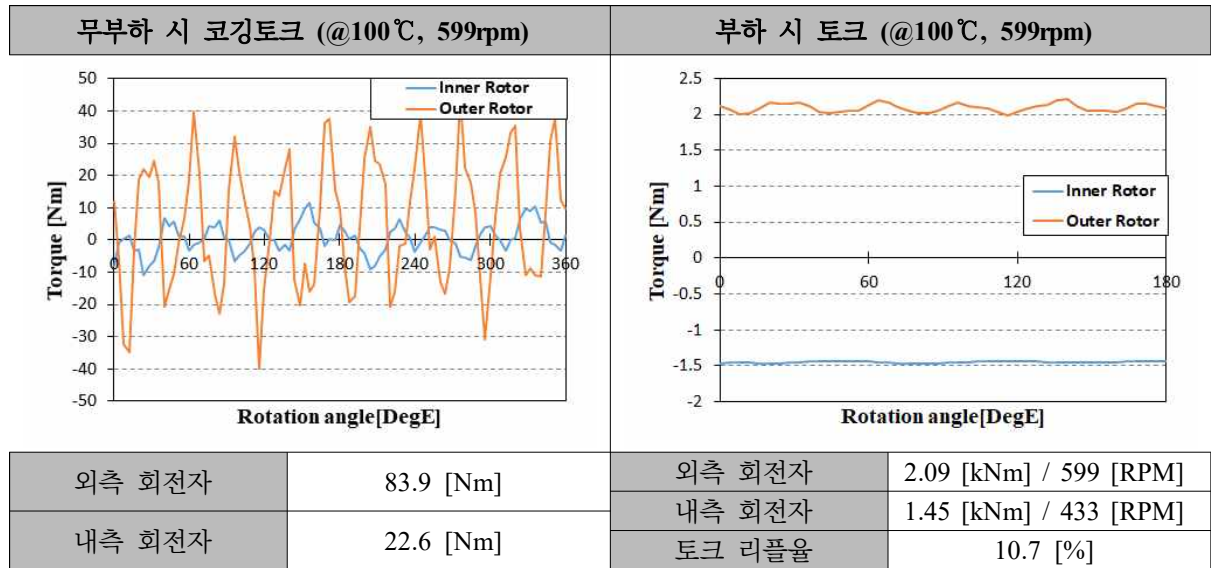


표 2-가-58 45kW급 DR-PMSM 최종설계 모델 자속밀도 분포도 및 자속선도

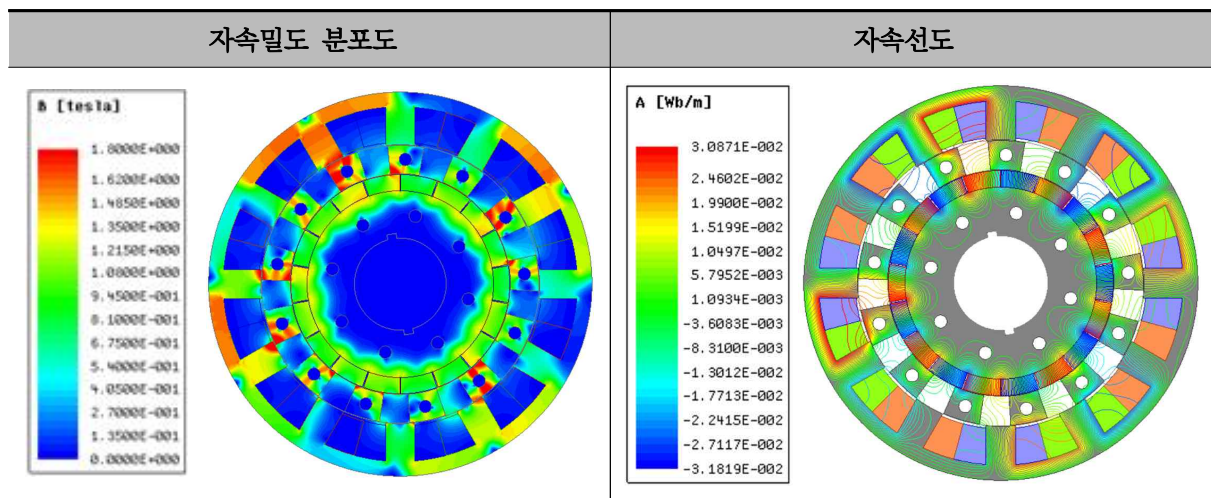


표 2-가-59 45kW급 DR-PMSM 최종설계 모델 영구자석 감자특성 분석

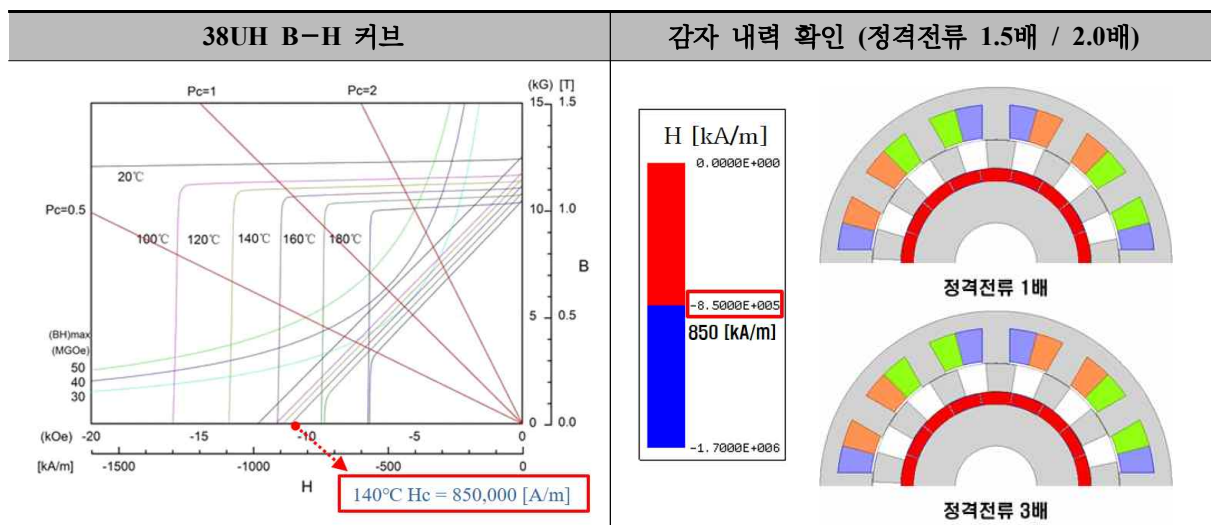


표 2-가-60 45kW급 DR-PMSM 최종설계 모델 손실 및 효율

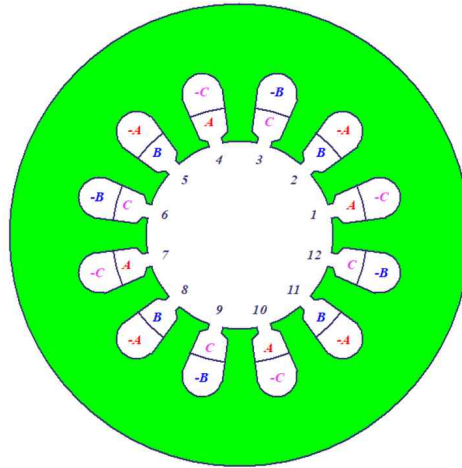
구분	정격속도 [214RPM]	최대속도 [599RPM]
동손	1,360 W	
철손	102.8W	356.1W
영구자석 와전류손	420.4W	3,200W
출력	47.4kW	131kW
효율	96.1 %	96.3%

표 2-가-61 45kW급 DR-PMSM 설계 기법에 따른 손실 비교

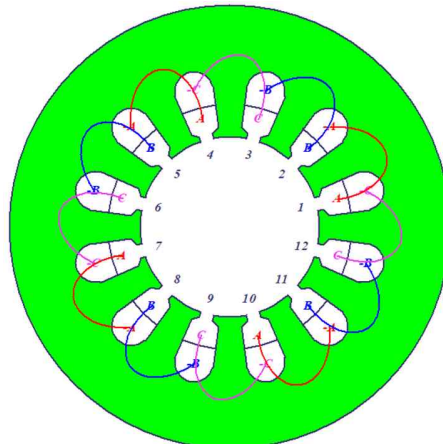
구분	분포권 1차 연도 최종모델	분포권 2차 연도 최종모델	집중권 Model 1	집중권 Model 2	집중권 최종모델
동손	3,279W	2,486W	3,730W	1,192W	1,360W
철손	309W	133W	176W	103W	103W
영구자석 와전류손	126W	64W	584W	215W	420W

표 2-가-62 45kW급 DR-PMSM 최종모델 권선도

슬롯 번호



3상 권선도



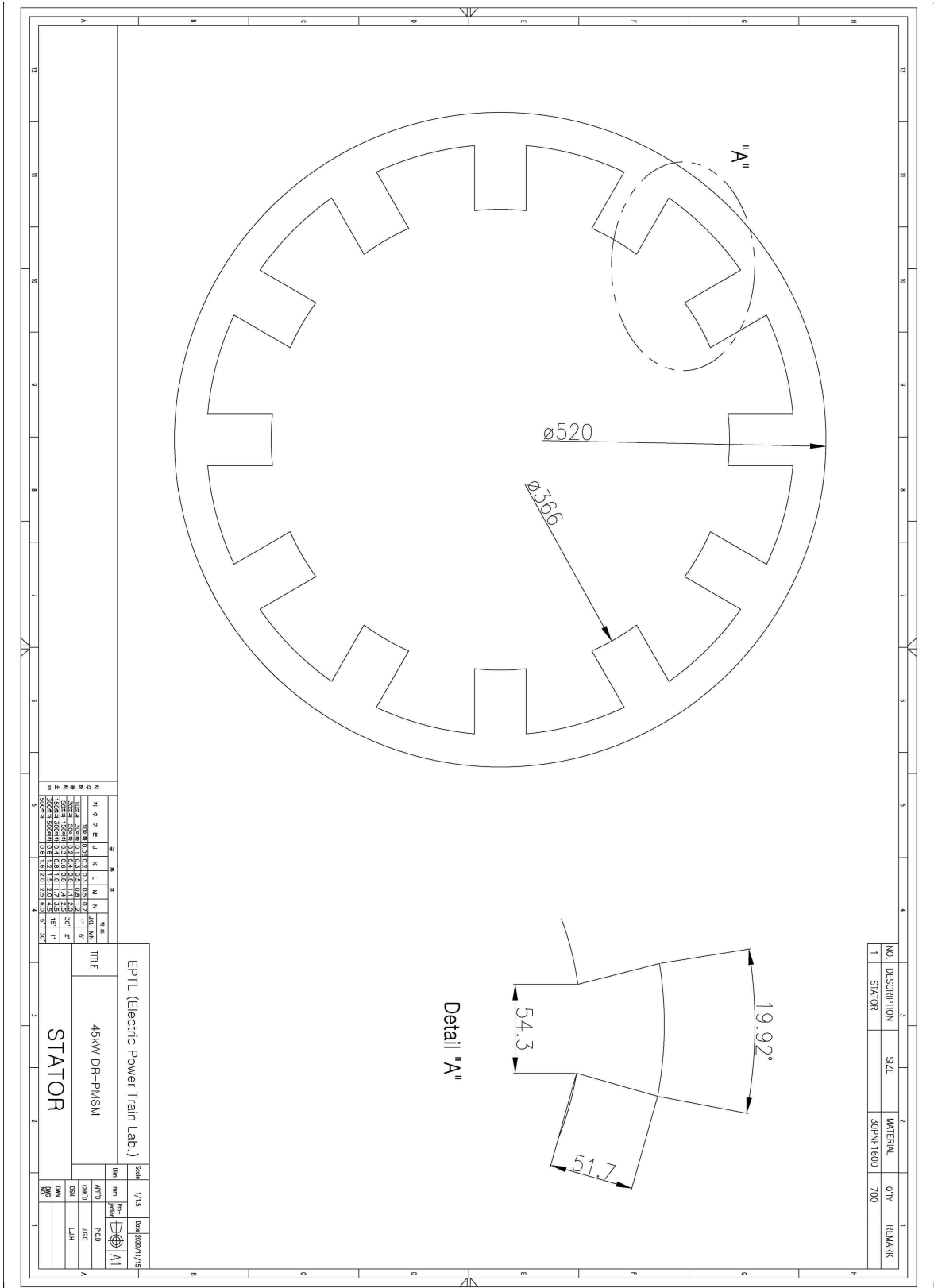


그림 2-가-35 45kW급 DR-PMSM 최종모델의 고정자 설계도

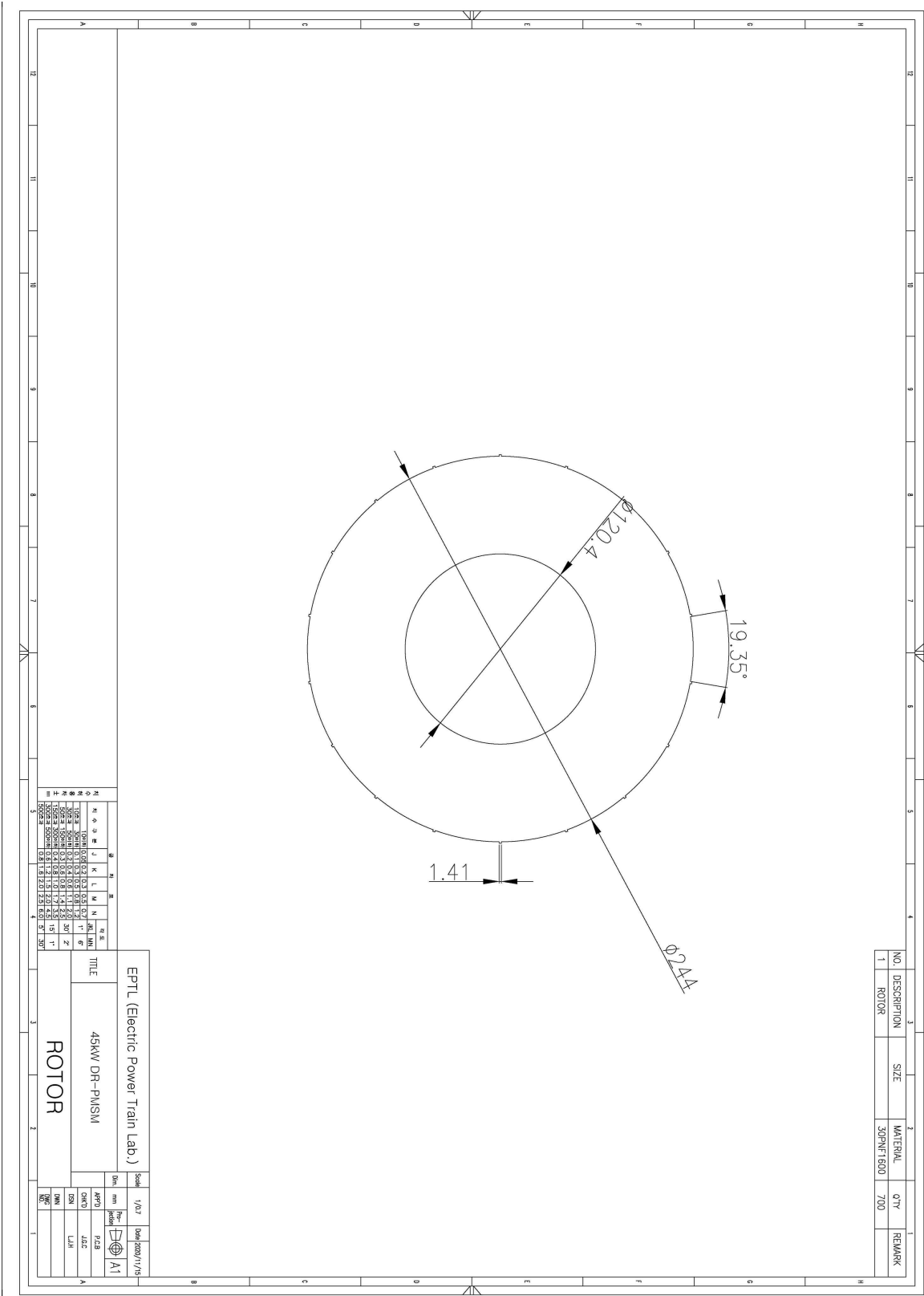


그림 2-가-36 45kW급 DR-PMSM 최종모델의 회전자 설계도

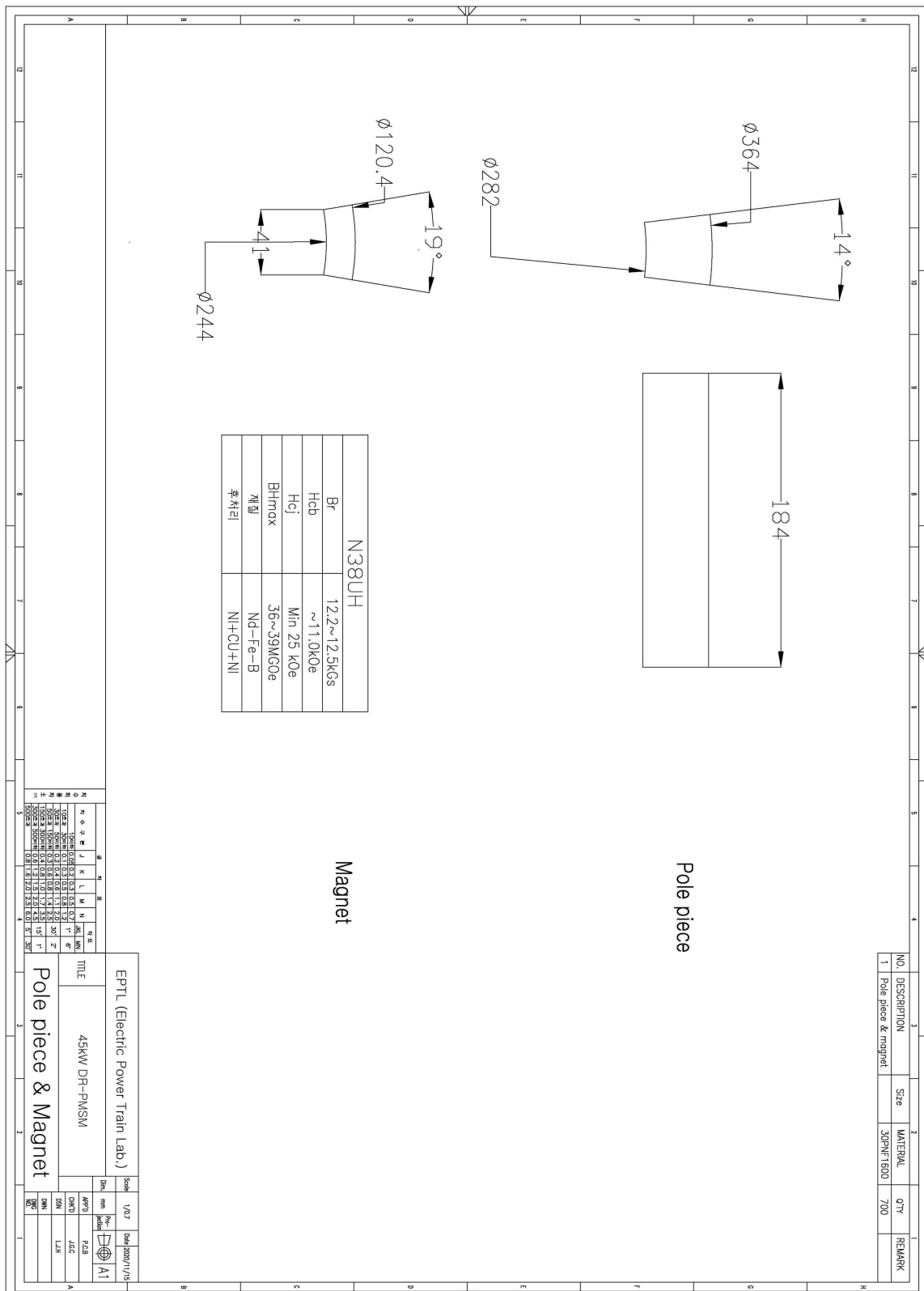


그림 2-가-37 45kW급 DR-PMSM 최종모델의 폴피스 및 영구자석 설계도

(4) 설계 기법 검증을 위한 4.5kW급 DR-PMSM 기초/최종 설계 모델 도출

(가) 4.5kW급 DR-PMSM의 기초 설계

표 2-가-63은 4.5kW급 DR-PMSM 기초 설계 모델의 성능 곡선 및 목표사양이다. 4.5kW급 DR-PMSM에 1/10 축소모델이며 정격속도에서 요구토크는 200.4Nm이다. 최대속도에서의 요구토크는 71.8Nm이며 전압제한치는 433V_{peak}이다. 해당 모델 역시 축소모델이기에 효율은 여전히 92% 이상을 목표로 한다.

표 2-가-64는 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 설계 사양이다. 고정자 외경은 250mm이고 회전자 외경은 영구자석을 제외한 길이로 97mm이다. 적층길이는 200mm이며 요크 폭은 10mm이다. 전류밀도는 5A_{rms}/mm²이며 역기전력 제한치를 고려하여 턴 수는 80회로 설정하였다. 그림 2-가-38은 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 설계 사양이다.

표 2-가-65는 4.5KW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 역기전력이다. 부하 시 역기전력 값은 54.4V_{peak}이며 THD는 1.5%이다. 무부하 역기전력 값은 168.9V_{peak}이며 THD는 4.5%이다.

표 2-가-66은 4.5KW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 토크 특성이다. 무부하 시 코깅토크는 외측 회전자인 폴피스 측에서 2.4Nm이며 부하 시 토크는 정격속도에서 191.7Nm이다. 이는 요구 토크 대비 4.3% 부족한 값이기에 최적 설계과정에서 토크를 증대할 필요가 있다. 토크 리플율은 7.6%이다.

표 2-가-67은 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 손실 및 효율 값이다. 동손은 338.7W이며 철손은 19W, 영구자석 와전류손은 3.8W, 출력은 4.29kW이다. 최종적으로 효율은 92.1%이므로 목표사양을 만족하는 것을 알 수 있다.

표 2-가-63 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 성능 곡선 및 목표사양

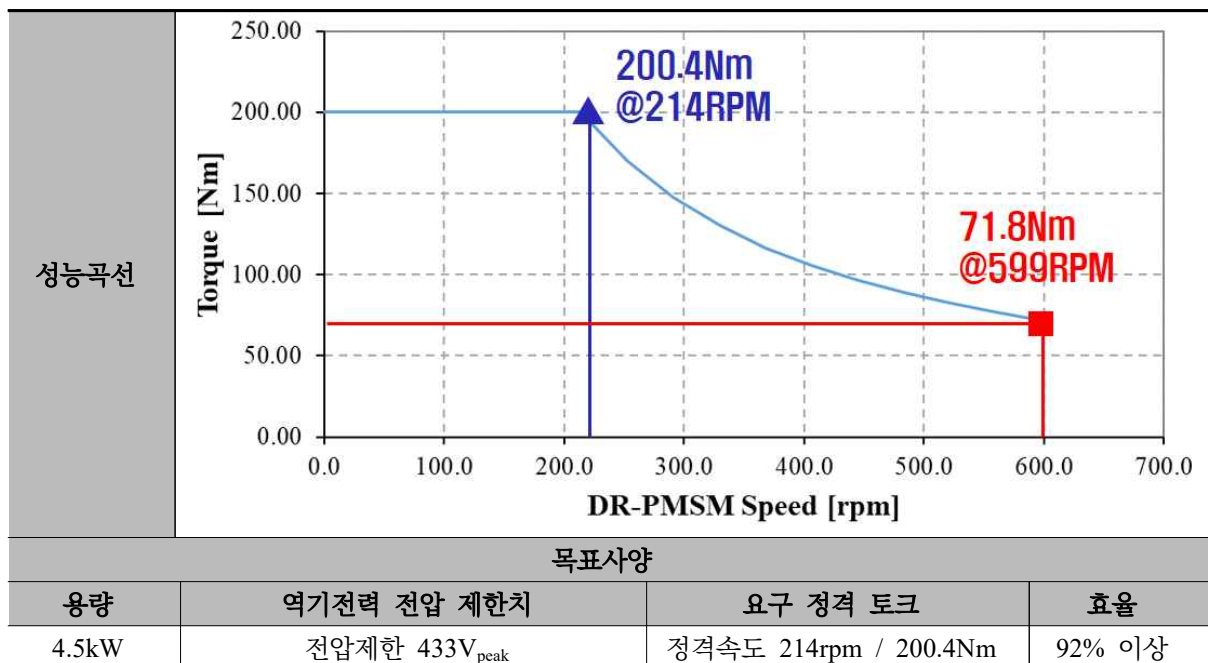


표 2-가-64 4.5kW급 DR-PMSM 기초 설계모델의 설계 사양

구분			Specification
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 18 / 8 / 12 / 13
	냉각 방식		반폐형 강제공랭식
	고정자 외경 / 내경		250 [mm] / 154 [mm]
	회전자 외경 / 내경		97 [mm] / 57.5 [mm]
	적층길이 / 공극길이		200 [mm] / 1 [mm]
	요크 폭		10 [mm]
	속도 (내측 회전자 / 외측 회전자)		155 [RPM] / 214 [RPM]
고정자	Coil	정격전류	19.03 [A_{rms}]
		전류밀도	5 [A_{rms}/mm^2]
		코일 점적률	65 [%]
		턴 수	80회 / 1layer
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750 [V_{dc}] (433 [V_{peak}])
	Core	재질	35PNF1600
회전자	Magnet	타입	NdFeB 38UH (소결형)
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]
		두께	9 [mm]
	Core	재질	35PNF1600

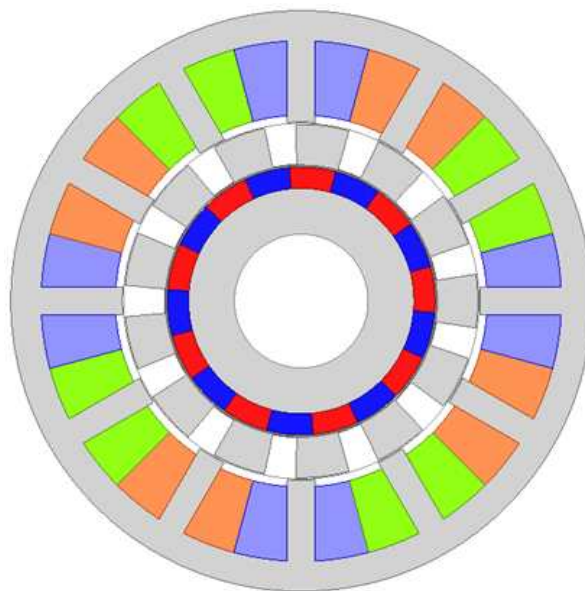


그림 2-가-38 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 형상

표 2-가-65 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델 역기전력

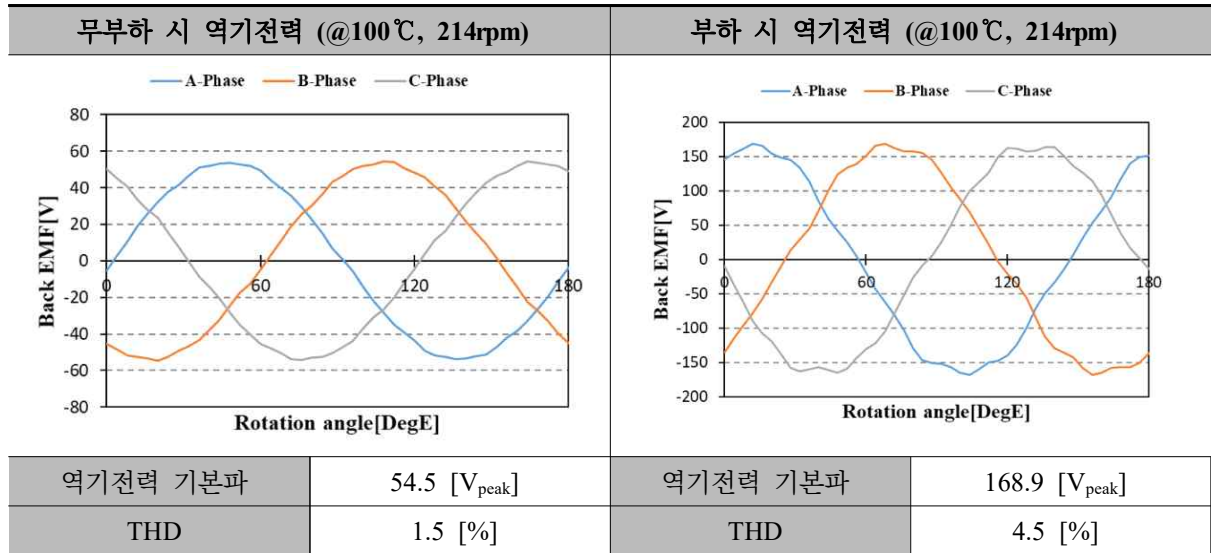


표 2-가-66 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델 코깅토크 및 토크

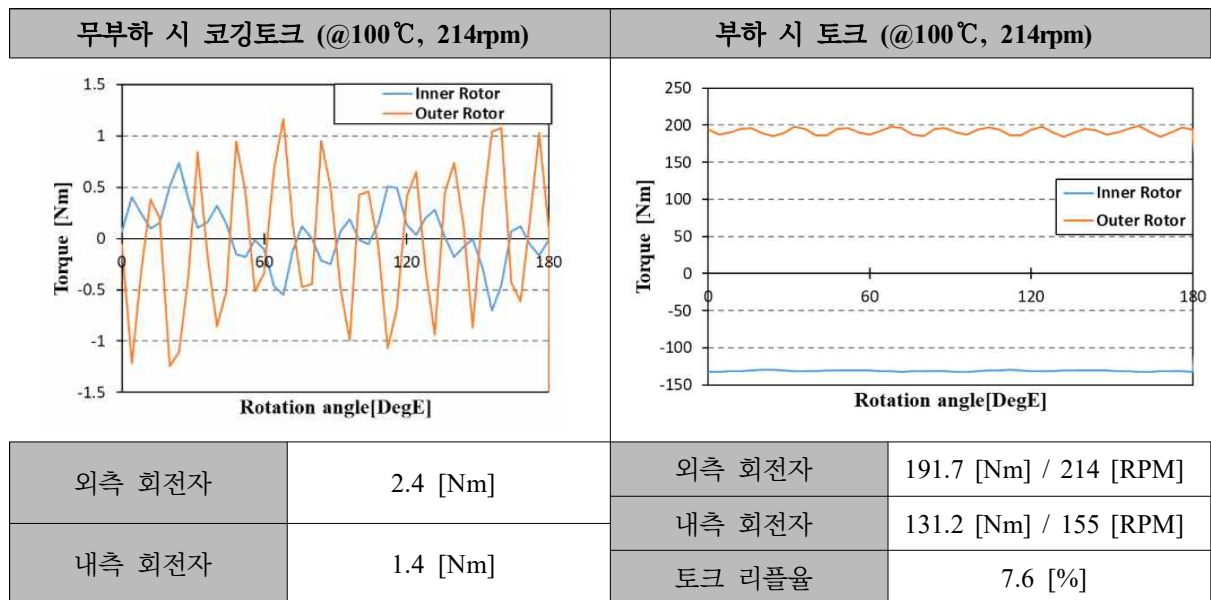


표 2-가-67 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]
동손	338.7W
철손	19W
영구자석 와전류손	3.8W
출력	4.2kW
효율	92.1%

(나) 4.5kW급 DR-PMSM의 최종 설계

4.5kW급 DR-PMSM의 기초설계 모델의 외측 회전자인 폴피스에서의 토크는 요구토크 대비 4.3% 부족하였다. 이를 확보하기 위해 최적화 작업을 진행하였다.

표 2-가-68은 4.5KW급 DR-PMSM 기초설계 모델에서 고정자 외경을 고정된 상태에서 회전자 외경을 110mm에서 5mm 단위로 증가시켰다. 여기서 회전자 외경이라 함은 단순히 회전자만의 외경이 아닌 회전자와 영구자석 두께를 합하였을 때의 외경이다. 이때 120mm에서 가장 큰 토크 특성을 갖는 것을 확인 하였다.

표 2-가-69는 알파슬롯별 폴피스 토크에 대한 특성분석이다. 슬롯 폭과 슬롯 피치의 비를 뜻하는 알파슬롯의 최대 토크 지점은 0.72이다.

표 2-가-70은 영구자석 두께와 폴피스 두께의 합을 고정된 상태에서 영구자석 두께와 폴피스 두께의 비율을 조절하는 작업을 진행한다. 영구자석 두께가 9mm이고 폴피스 두께가 17.5mm일 때 최대 토크를 갖는다.

표 2-가-71은 폴피스 극효율에 관한 최적화 작업이다. 최대토크를 확보 할 수 있는 63%를 선정하였다.

표 2-가-72는 4.5kW급 DR-PMSM 최종설계 모델의 설계사양이다. 적층길이는 기초 설계보다 10mm 증가하였다. 적층길이를 증가시켜 토크를 확보하였기에 동손을 고려하여 전류는 19.03Arms에서 16Arms로 감소시켰으며 턴 수 역시 역기전력 특성을 만족시키기 위해 80회에서 70회로 감소시켰다.

표 2-가-73은 4.5kW급 DR-PMSM 최종설계 모델에 대한 역기전력 특성이다. 무부하시 역기전력은 기초설계 모델의 $54.5V_{peak}$ 에서 $78.6V_{peak}$ 로 증가하였으며 THD는 0.2% 감소한 1.3%이다. 부하 시 역기전력은 $168.9V_{peak}$ 에서 $166.7V_{peak}$ 로 감소하였으며 THD는 4.5%에서 3.5%로 감소하였다.

표 2-가-74는 최종 설계 모델의 토크 특성이다. 무부하 시 코깅토크는 기초설계 모델의 폴피스 측인 외측 회전자에서 2.4Nm이었으며 최종설계모델에서도 2.4Nm로 동일하다. 다만 내측 회전자에서의 코깅토크가 1.4Nm에서 3.8Nm로 증가하였다. 부하 시 토크는 기초 설계 모델이 191.7Nm에서 233.4Nm로 약 22% 증가하였다. 이는 요구 정격토크인 200Nm보다 16.7% 높은 값이다. 토크 리플율은 7.6%에서 4.5%로 감소하였다.

표 2-가-75는 최종설계 모델의 손실 및 효율이다. 동손은 전류 및 상저항의 감소로 인해 338.7W에서 196.7W로 감소하였다. 철손은 19W에서 12.7W로 감소하였으며 영구자석 와전류손은 회전자와 영구자석을 합한 외경의 증가로 인해 3.8W에서 4.5W로 증가하였다. 출력은 4.2kW에서 5.2kW로 증가하였고 최종적으로 효율은 96.1%로 목표 값을 만족한다.

표 2-가-68 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 회전자와 영구자석 합의 외경 별 폴피스 토크

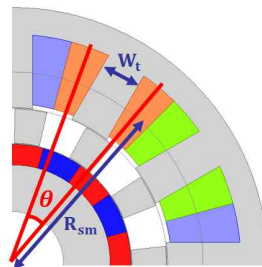
고정자 외경 고정 후 회전자 외경 조정



회전자 외경 별 폴피스 토크	회전자 + 영구자석 두께 외경[mm]	평균토크 [Nm]
	110	182.2
	115	182.8
	120	183.4
	125	180.1
	130	171.4

표 2-가-69 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 알파슬롯(슬롯 폭/슬롯 피치) 별 폴피스 토크

알파슬롯 (슬롯 폭 / 슬롯피치)

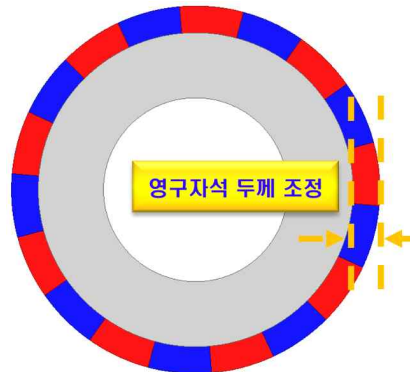


$$\alpha_{slot} = \frac{R_{sm}\theta_s - w_t}{R_{sm}\theta_s}$$

알파 슬롯 별 폴피스 토크	알파슬롯	평균토크 [Nm]
	0.65	179.9
	0.66	180.4
	0.67	181.1
	0.68	180.9
	0.69	181.1
	0.70	181.6
	0.71	181.1
	0.72	180.8
	0.73	180.7
	0.74	179.6
	0.75	178.6
	0.76	177.8
	0.77	175.8
	0.78	174.2
	0.79	172.0
	0.80	168.8

표 2-가-70 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 영구자석 두께 별 폴피스 토크

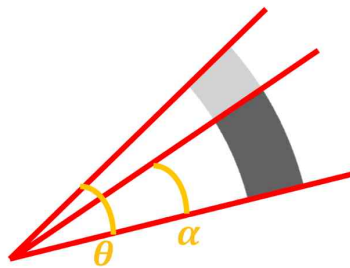
영구자석 두께 및 폴피스 두께 비율 조정



영구자석 두께 별 폴피스 토크	영구자석 두께 [mm]	폴피스 두께 [mm]	토크[Nm]
	6	20.5	180.4
	7	19.5	182.5
	8	18.5	183.4
	9	17.5	183.5
	10	16.5	183.3

표 2-가-71 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델의 폴피스 호율 별 폴피스 토크

폴피스 호율



$$\text{폴피스 호율} = \frac{\alpha}{\theta} \times 100$$

폴피스 호율 별 폴피스 토크	폴피스 호율 [%]	토크 리플율 [%]	토크[Nm]
	58	7.7	232.5
	60	7.8	234.6
	61	8.0	234.8
	63	7.6	235.1
	65	7.0	234.4

표 2-가-72 4.5kW급 DR-PMSM 최종설계 모델의 설계 사양

구분			Specification
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 18 / 8 / 12 / 13
	냉각 방식		반폐형 강제공랭식
	고정자 외경 / 내경		260 [mm] / 178 [mm]
	회전자 외경 / 내경		121 [mm] / 69.5 [mm]
	적층길이 / 공극길이		210 [mm] / 1 [mm]
	요크 폭		10 [mm]
	속도 (내측 회전자 / 외측 회전자)		155 [RPM] / 214 [RPM]
고정자	Coil	정격전류	16 [A _{rms}]
		전류밀도	5 [A _{rms} /mm ²]
		코일 점적률	65 [%]
		턴 수	70회 / 1layer
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750 [V _{dc}] (433 [V _{peak}])
	Core	재질	35PNF1600
회전자	Magnet	타입	NdFeB 38UH (소결형)
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]
		두께	9 [mm]
	Core	재질	35PNF1600

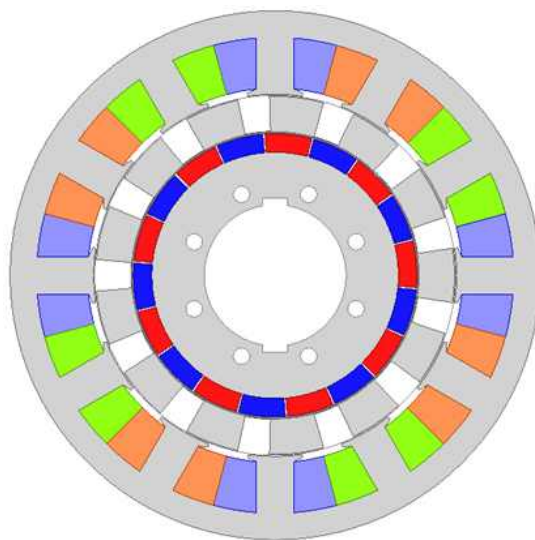


그림 2-가-39 4.5kW급 DR-PMSM 최종설계 모델의 형상

표 2-가-73 4.5kW급 DR-PMSM 최종설계 모델 역기전력

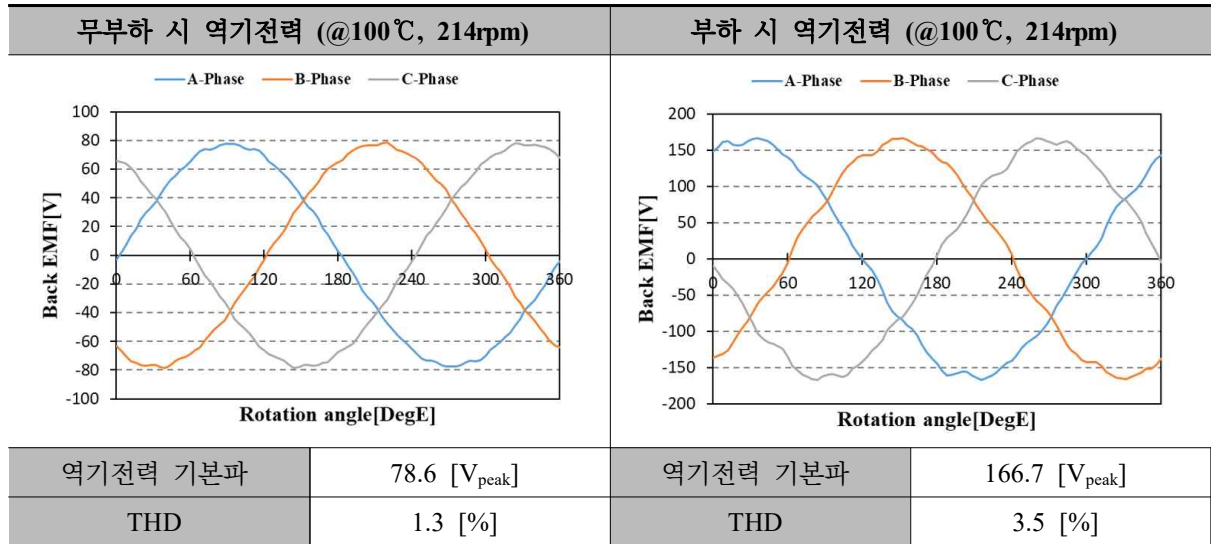


표 2-가-74 4.5kW급 DR-PMSM 최종설계 모델 코강토크 및 토크

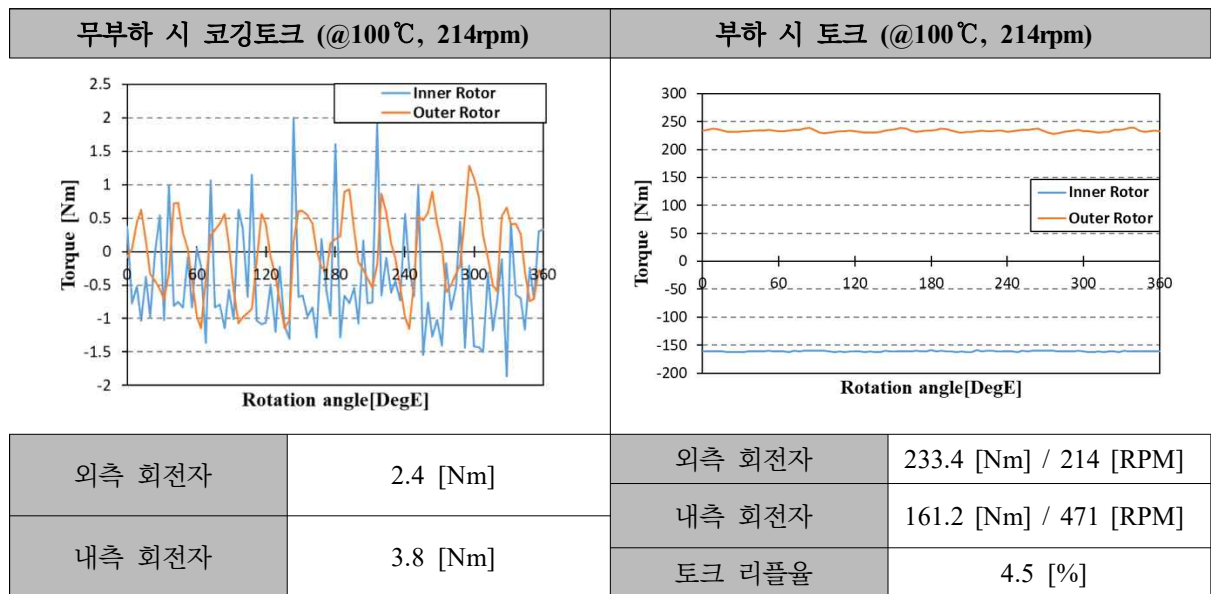


표 2-가-75 4.5kW급 DR-PMSM 최종설계 모델 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]
동손	196.7W
철손	12.7W
영구자석 와전류손	4.5W
출력	5.2kW
효율	96.1%

(다) 4.5kW급 DR-PMSM의 최종모델 구조 및 전자계 특성

앞서 4.5kW급 DR-PMSM의 최종설계 모델에 대하여 제작성을 고려하여 폴피스와 고정자에 용접부 추가 설계를 진행하였다.

표 2-가-76은 제작성을 고려하여 설계 사양이다. 중요 항목들에 대한 변동사항은 없으나 폴피스와 고정자의 용접부 및 권선법 적용에 용이한 형상으로 슬롯 형상의 수정이 진행되었다.

표 2-가-77은 최종모델 정격속도에서의 역기전력 특성이다. 전체적으로 큰 변화는 없으며 1-2% 내외로 값이 변경된 것을 알 수 있으며 표 2-가-78은 정격속도의 코깅토크 및 토크 특성이다. 코깅토크는 기존 2.4Nm에서 3.8Nm로 증가하였고 외측회전자 토크도 기존 233.4Nm에서 236.2Nm로 증가하였다. 외측 회전자인 폴피스 토크가 약 1.2% 증가하였다.

표 2-가-79는 최종모델에 최대속도에서의 역기전력 특성이며 역기전력 최대 값은 $422.1V_{peak}$ 로 제한치 대비 2.6% 여유 있다. 표 2-가-80은 최대 속도에서의 코깅 토크 및 토크이다.

표 2-가-81은 최종모델에 대한 자속밀도 분포도 및 자속선도이다. 자속밀도는 1.8T기준으로 확인하였으며 포화에 전혀 문제 없는 것을 알 수 있으며 표 2-가-82는 최종모델에 대한 감자특성분석이며 정격전류 3배에서도 감자현상이 일어나지 않는 것을 확인하였다.

표 2-가-83은 최종모델에 대한 손실 및 효율이다. 제작성을 고려한 최종모델은 최종설계 모델의 손실 및 효율에 대비하여 변동 없는 것을 알 수 있다.

표 2-가-84는 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델 권선도이며 그림 2-가-41, 2-가-42, 2-가-43 및 그림 2-가-44는 제작을 위한 고정자, 회전자, 영구자석 및 폴피스에 대한 설계도이다.

표 2-가-76 4.5kW급 DR-PMSM 기초설계 모델 및 최종모델의 설계 사양

구분			Specification	
			기초설계 모델	최종설계 모델
공 통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 18 / 8 / 12 / 13	
	냉각 방식		반폐형 강제공랭식	
	고정자 외경 / 내경		250 [mm] / 154 [mm]	260 [mm] / 178 [mm]
	회전자 외경 / 내경		97 [mm] / 57.5 [mm]	121 [mm] / 59.5 [mm]
	적층길이 / 공극길이		200 [mm] / 1 [mm]	210 [mm] / 1 [mm]
	요크 폭		10 [mm]	
	속도 (내 / 외측 회전자)		155 [RPM] / 214 [RPM]	
고 정 자	Coil	정격전류	19.03 [A_{rms}]	16 [A_{rms}]
		전류밀도	5 [A_{rms}/mm^2]	
		코일 점적률	65[%]	
		턴 수	80회 / 1layer	70회 / 1layer
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750 [V_{dc}] (433 [V_{peak}])	
	Core	재질	35PNF1600	
회 전 자	Magn et	타입	NdFeB 38UH (소결형)	
		성능	Br = 1.1 [T] Hc = 833.7 [kA/m]	
		두께	9 [mm]	
	Core	재질	35PNF1600	

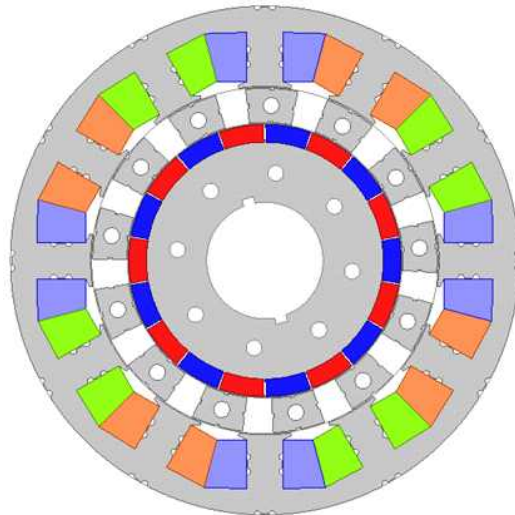


그림 2-가-40 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 형상

표 2-가-77 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델 역기전력 (정격속도)

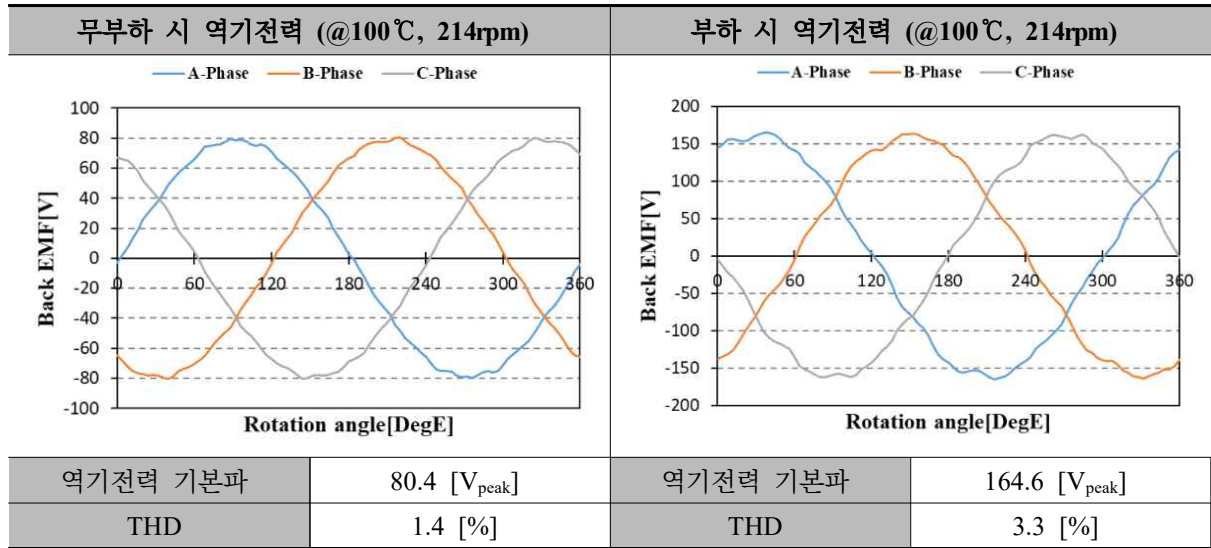


표 2-가-78 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델 코강토크 및 토크 (정격속도)

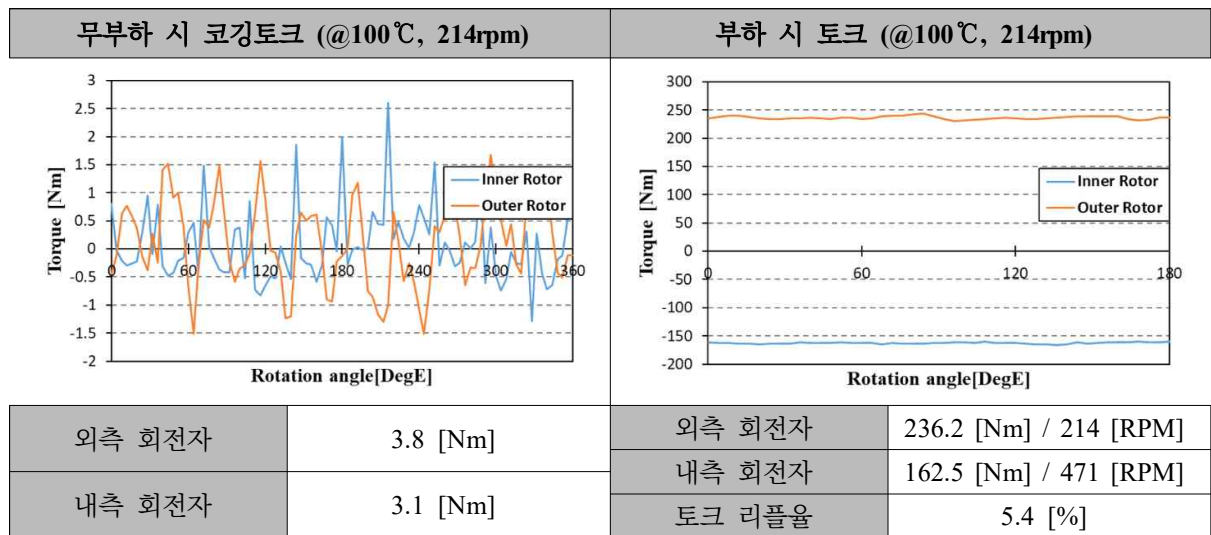


표 2-가-79 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델 역기전력 (최대속도)

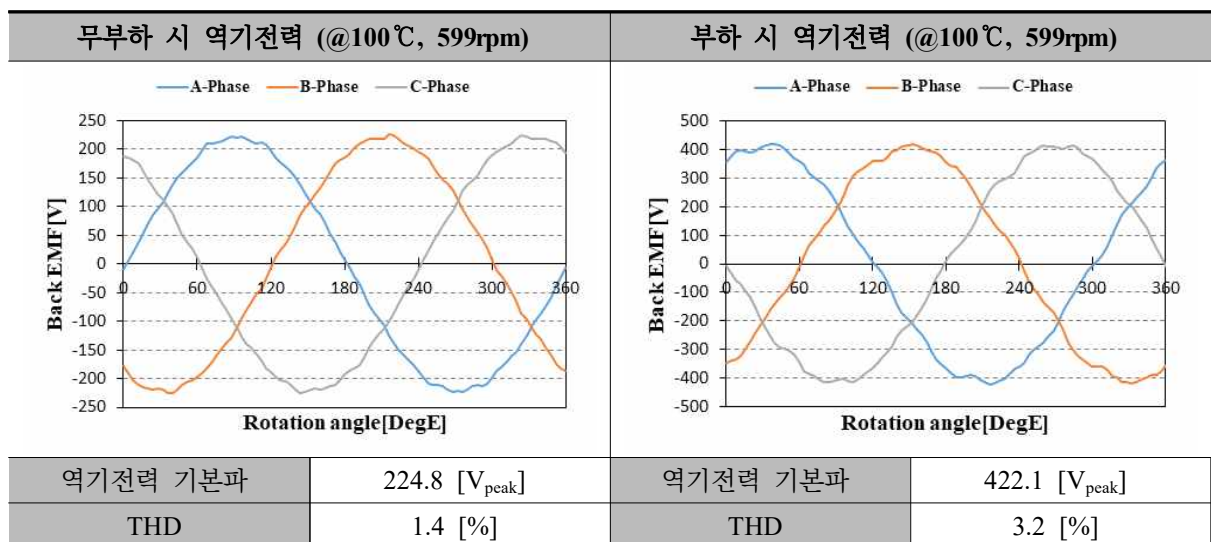


표 2-가-80 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델 코깅토크 및 토크 (최대속도)

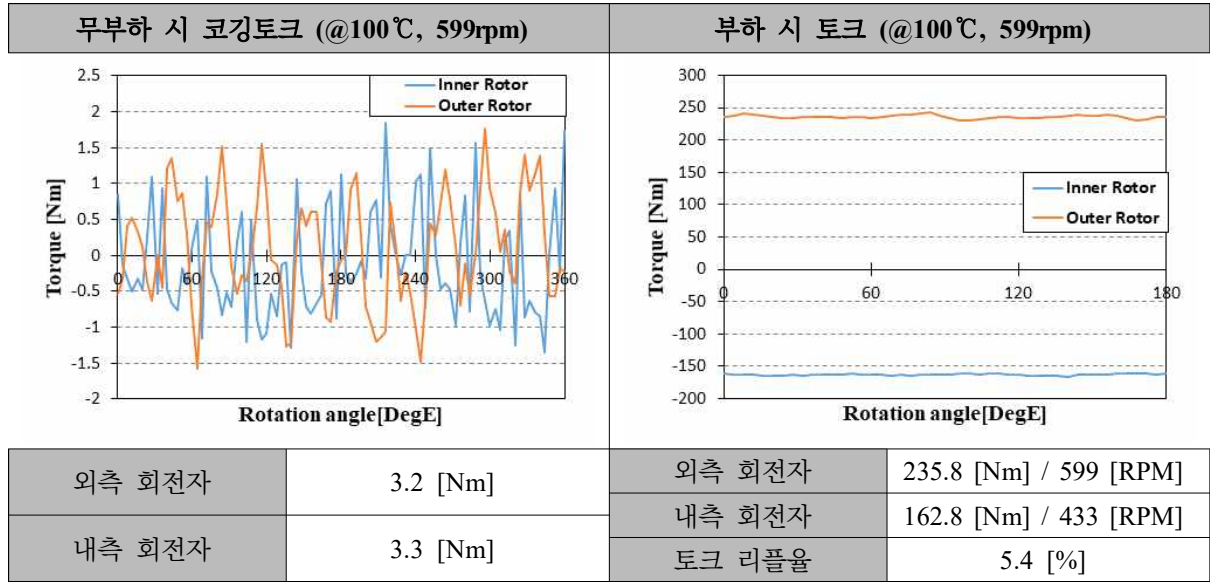


표 2-가-81 45kW급 DR-PMSM 최종모델 자속밀도 분포도 및 자속선도

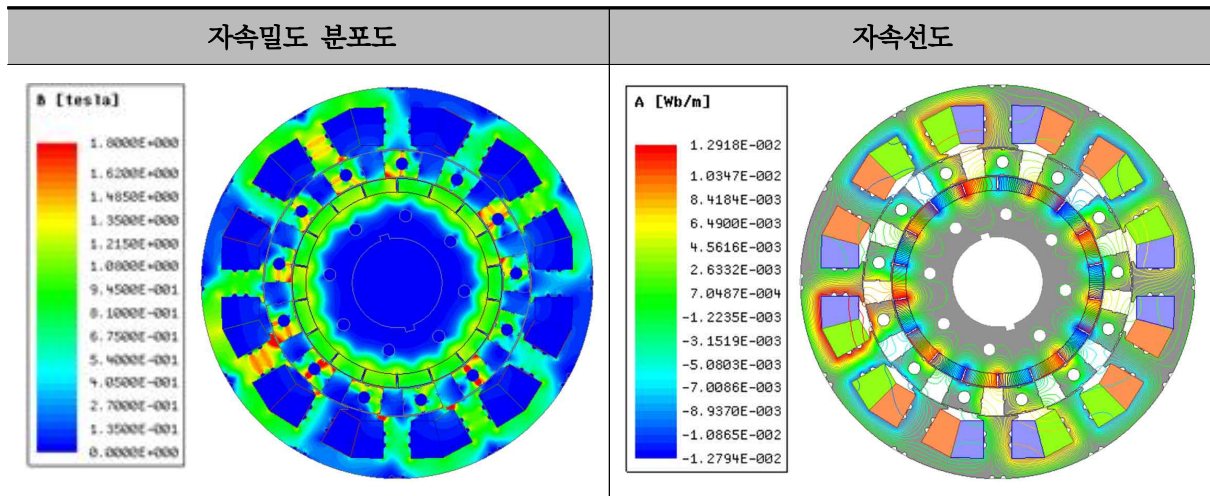


표 2-가-82 45kW급 DR-PMSM 최종모델 영구자석 감자특성 분석

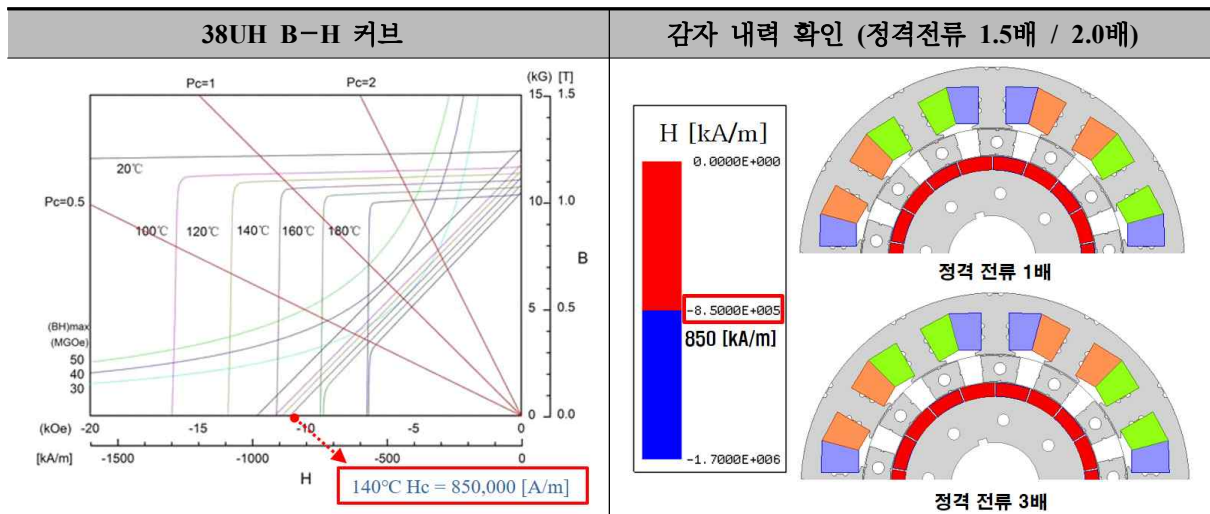
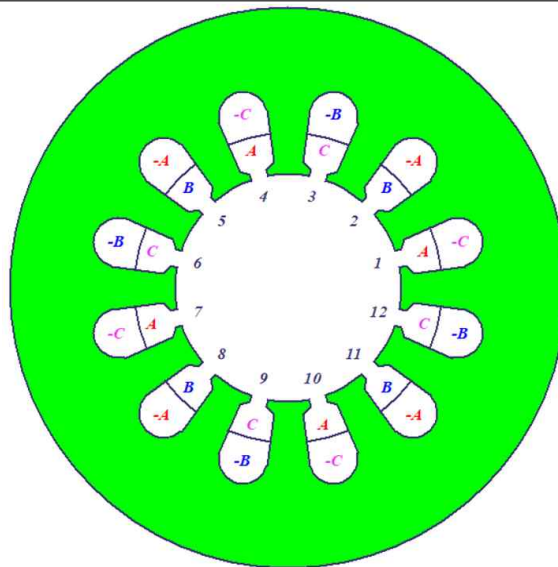


표 2-가-83 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델 손실 및 효율

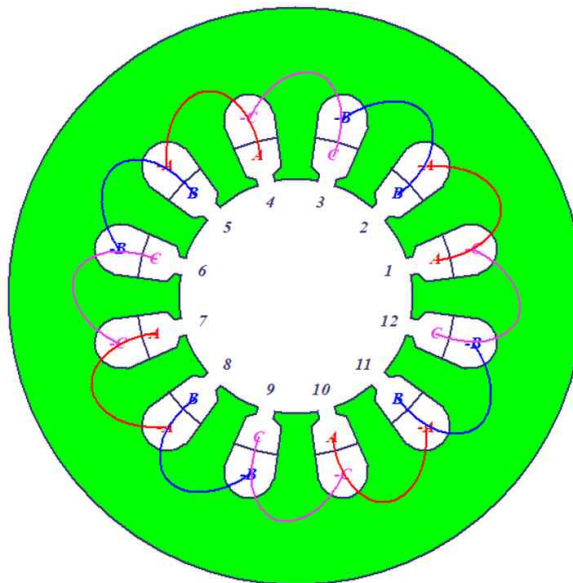
구분	정격속도 [214RPM]	최대속도 [599RPM]
동손	196.7W	
철손	12.7W	45.09W
영구자석 와전류손	4.5W	35.96W
출력	5.3kW	14.8kW
효율	96.1%	98.1%

표 2-가-84 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델 권선도

슬롯 번호



3상 권선도



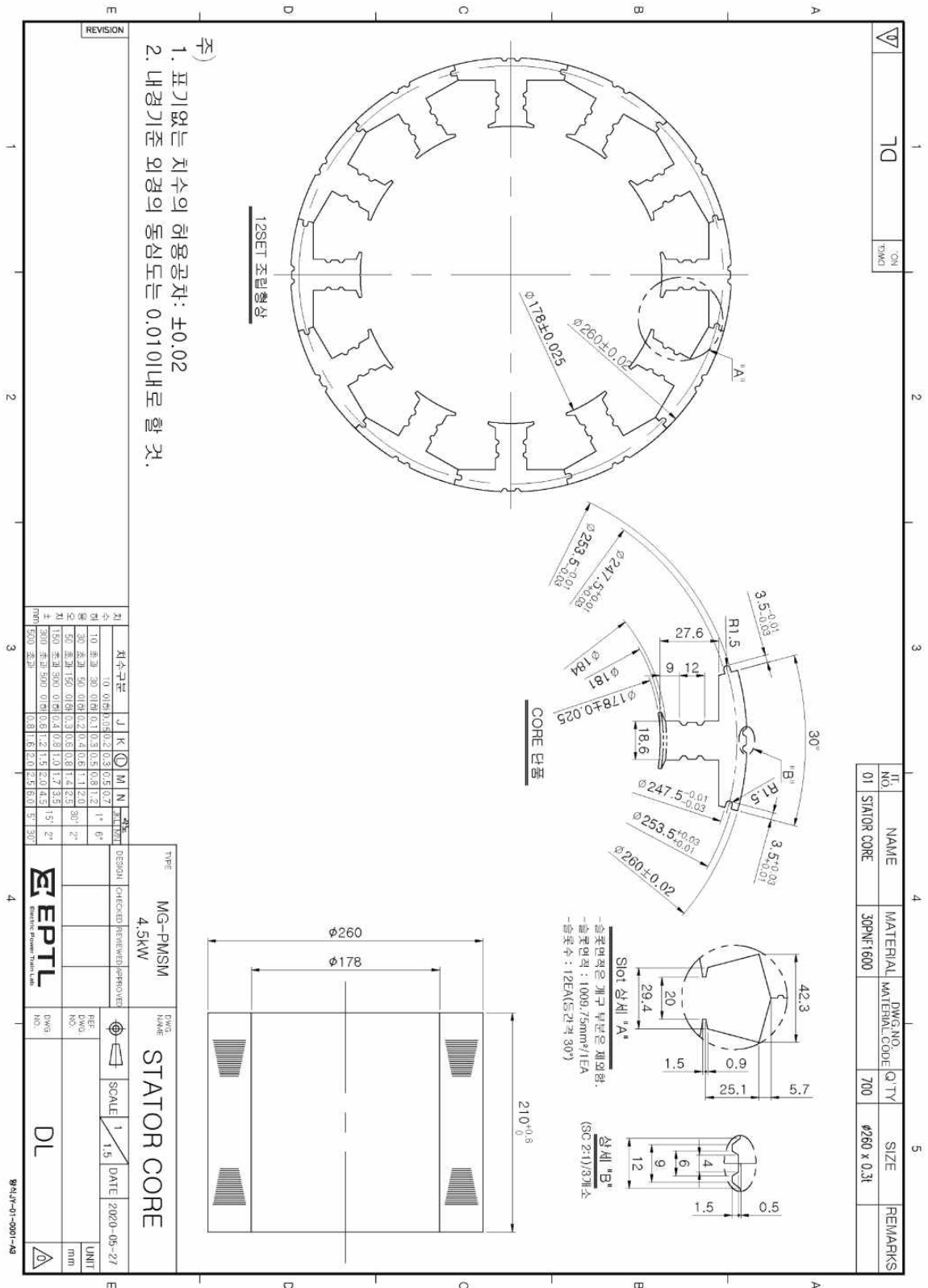


그림 2-가-41 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 고정자 설계도

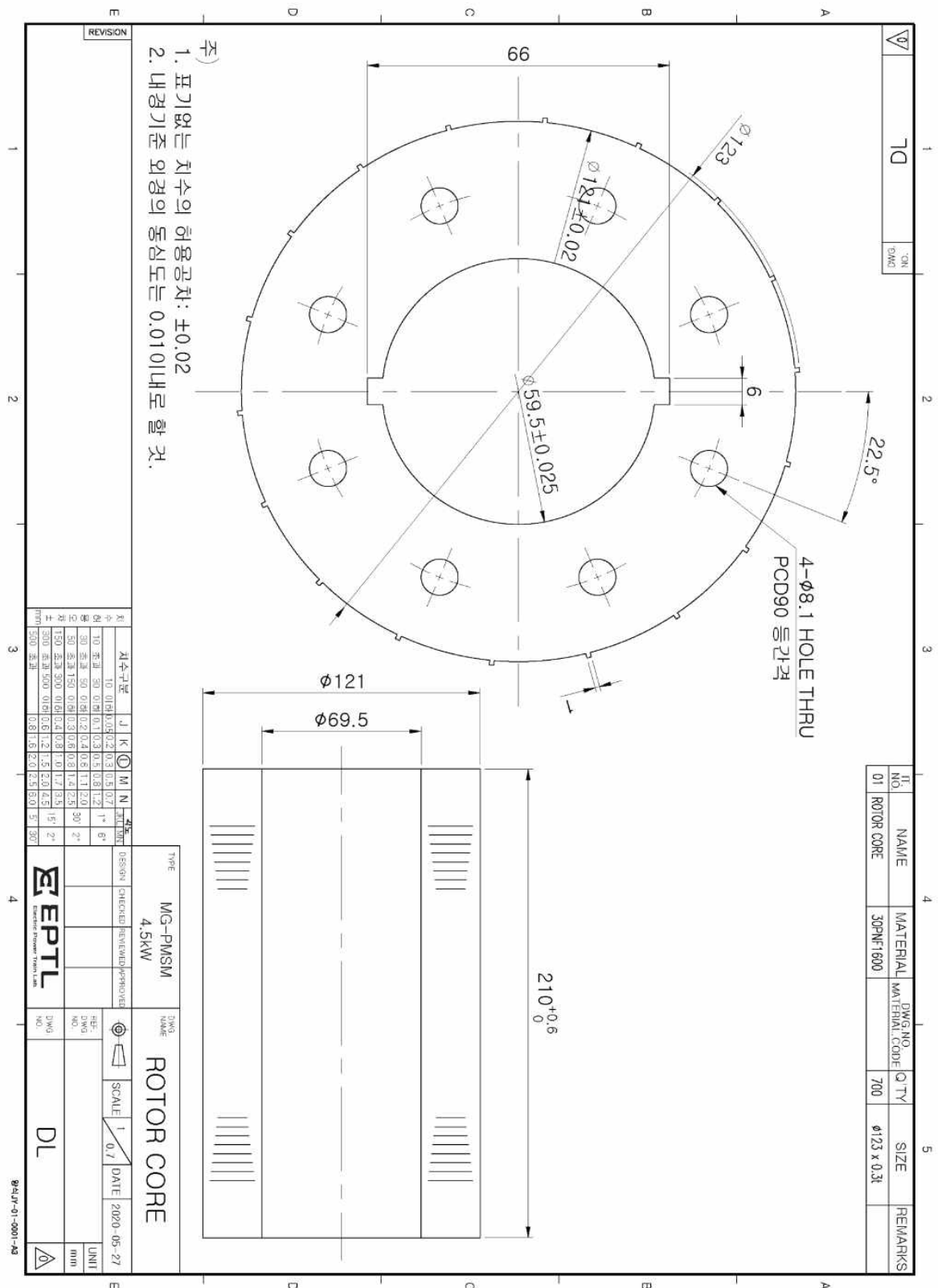


그림 2-가-42 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 회전자 설계도

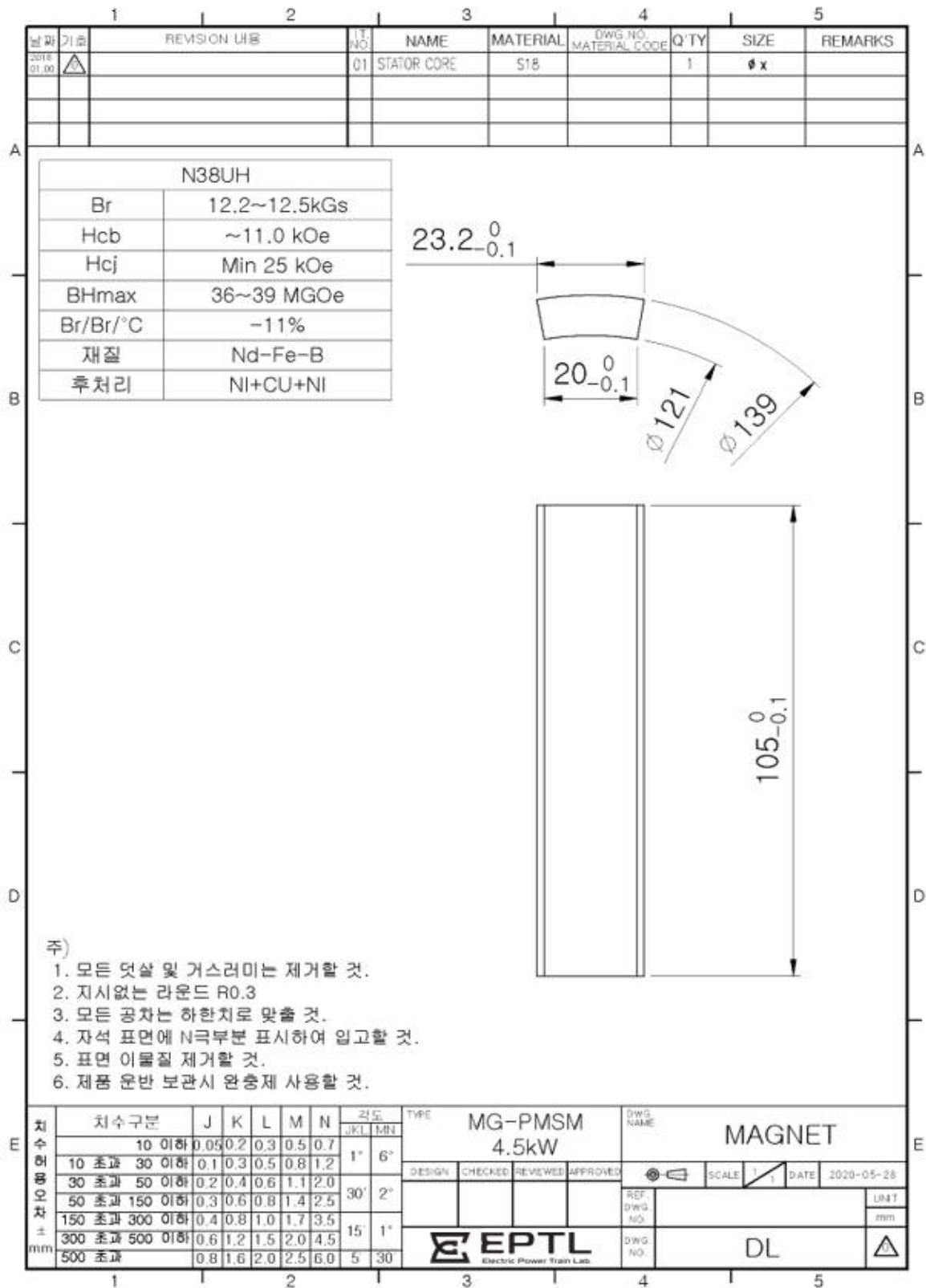


그림 2-가-43 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 영구자석 설계도

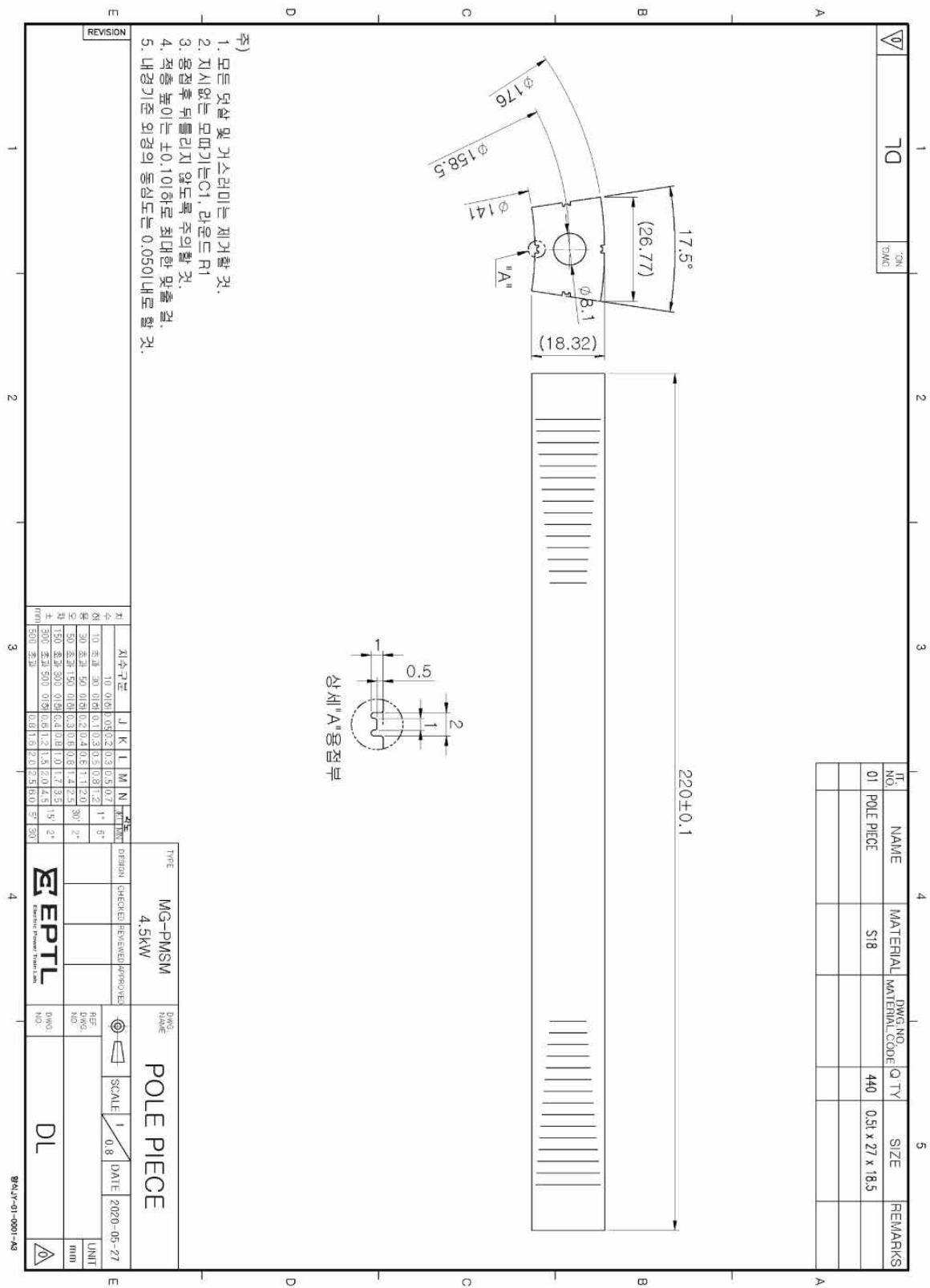


그림 2-가-44 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 폴피스 설계도

(5) 4.5kW급 DR-PMSM의 시제품 제작

(가) 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 제작 : 폴피스 사이에 충전재 없는 모델

앞서 설계한 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 1차 시제품 제작은 다음과 같이 진행하였다. 표 2-가-85는 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품의 고정자 관련한 부품이다. 고정자 철심은 분할코어를 이용하여 제작을 진행하였으며 권선을 감기위한 지그를 따로 제작하였다. 각 분할코어에 대해 보빈과 인슐레이터를 결합시켰으며, DR-PMSM 구동 시 폴피스 회전자의 위치 정보를 파악하는데 필요한 레졸버를 준비하였다. 표 2-가-86은 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품의 고정자 제작 공정을 보여준다. 고정자는 분할코어 방식으로 제작이 되며, 각 분할코어에 대해 권선 작업을 하였으며, 각 분할코어의 권선 작업이 끝난 후 분할코어의 백요크부를 서로 맞게 삽입하여 고정자의 조립을 완료하였다.

표 2-가-85 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품의 고정자 관련 부품

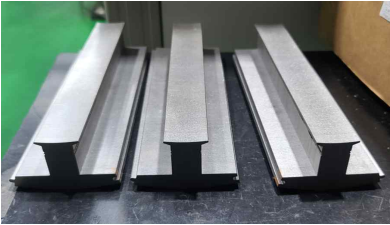
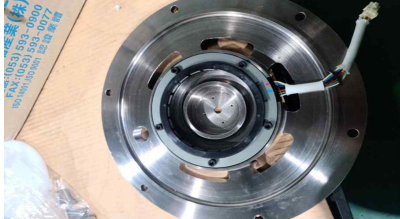
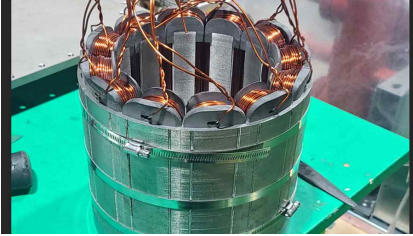
고정자 철심	고정자 권선 지그
	
고정자 철심에 보빈과 인슐레이터 결합	레졸버
	

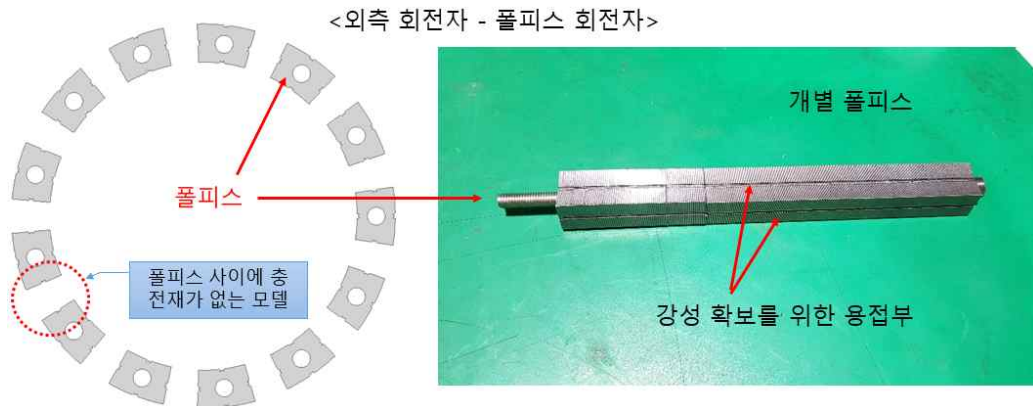
표 2-가-86 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품의 고정자 제작 공정

고정자 권선 작업	고정자 분할코어의 백요크부 조립
	
고정자 분할코어의 조립 및 권선 끝선 정리	고정자를 외함에 삽입하여 조립 완료
	

4.5kW급 DR-PMSM의 1차 시제품 제작 시 외측 회전자를 구성하는 폴피스는 적층코어 방식으로 제작하였다. 적층코어 구조이기에 개별 폴피스의 비틀림 강성 확보를 위하여 4개의 측면에 대해 용접을 실시하였다. 하지만 외측 회전자(폴피스)를 내측 회전자와 함께 조립하는 과정에서 내측 회전자를 구성하는 영구자석의 인력을 폴피스가 견디지 못하고 강성 부족에 의한 비틀림 문제가 발생하였다. 표 2-가-87은 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품의 외측 회전자(폴피스) 제작 및 조립 시 비틀림 문제 발생 내용을 보여준다. 외측 회전자(폴피스)의 제작 시 폴피스 사이에 기계적 강도 확보를 위한 충전재를 넣지 않은 것이 주요 원인으로 파악이 되었다. 따라서 외측 회전자(폴피스)의 기계적 강도 확보를 위한 1차 시제품의 수정 보완 설계가 요구되었다.

표 2-가-87 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품의 외측 회전자(폴피스) 제작 및 비틀림 문제 발생

1차 시제품의 외측 회전자(폴피스) 단면 구조(폴피스 사이에 충전재가 없는 모델) 및 단품 제작



외측 회전자(폴피스) 조립 과정 중 내측 회전자 영구자석의 자력을 견디지 못하고 비틀림 발생



내측 회전자(영구자석 회전자)



(나) 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계

표 2-가-88은 기존 외측 회전자(폴피스) 구조/형상 및 개선된 외측 회전자(폴피스) 구조/형상을 보여준다. 기존의 외측 회전자의 경우, 개별 폴피스가 떨어져 있는 구조이므로 비틀림 강도가 취약할 수 밖에 없었으며, 수정 설계에서는 이 부분에 대한 보완 방법을 강구하였다. 이와 같은 문제를 해결하고자 먼저 개별 폴피스 사이를 브리지로 서로 연결하는 구조를 제안하였다. 추가적으로 각 폴피스 사이의 슬롯을 비자성, 비전도성을 갖는 에폭시 충전재로 채워주는 구조를 제안하였다.

표 2-가-88 기존 외측 회전자(폴피스) 구조/형상 및 개선된 외측 회전자(폴피스)

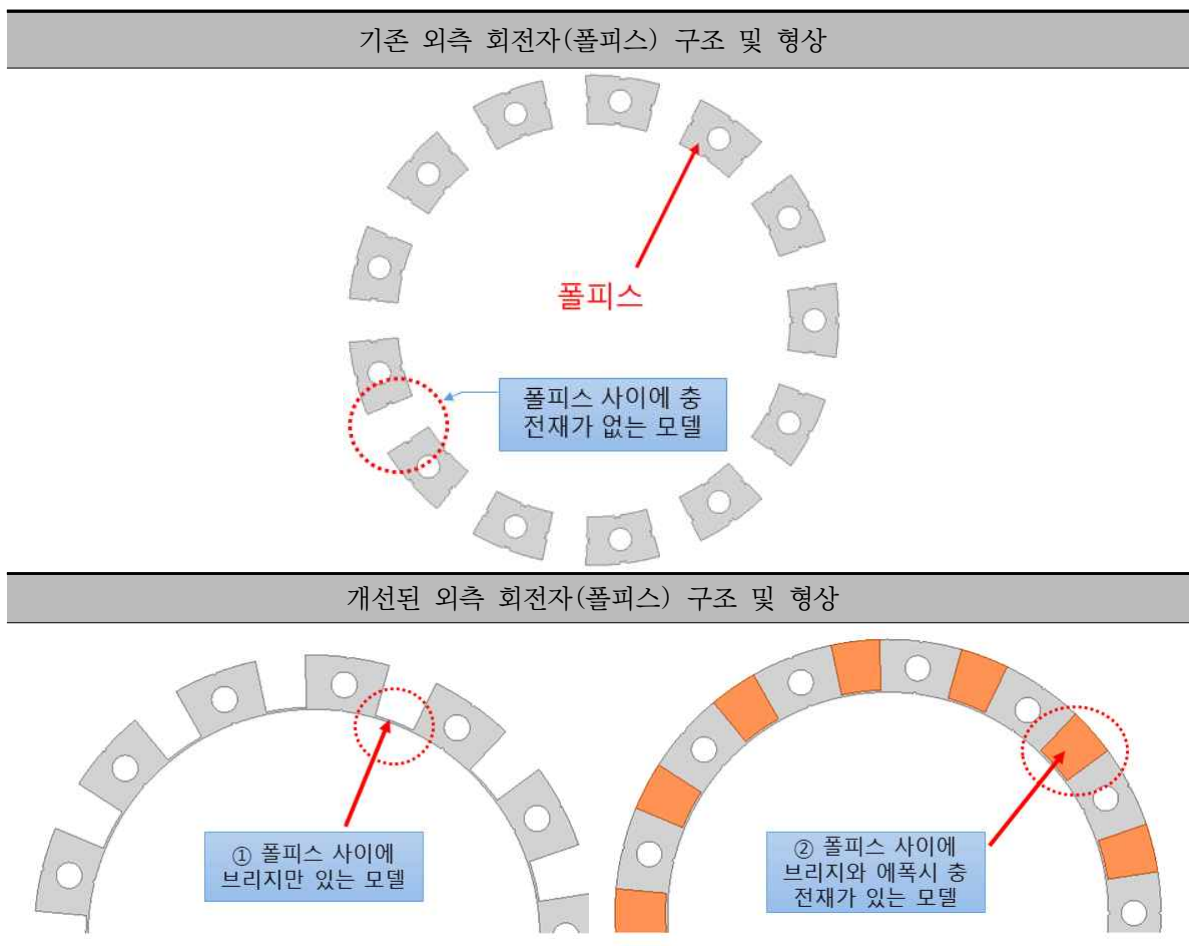


그림 2-가-45는 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델의 폴피스 브리지 두께에 따른 평균토크 특성 그래프를 보여준다. 폴피스의 비틀림 강성 확보를 위해 개별 폴피스 사이를 브리지로 연결하는 경우, 브리지의 두께가 두꺼워지면 강도가 확보되는 반면에 브리지를 통해서 누설 자속이 발생하기 때문에 발생 토크가 감소하게 된다. 따라서 요구 토크를 만족하면서 가장 두꺼운 두께의 브릿지는 0.7mm이며, 해당 두께를 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델에 적용하여 특성 변화 여부를 확인하기 위하여 전자기적 특성 분석

을 수행하였다. 그림 2-가-46은 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델의 단면도를 보여준다. 1차 시제품 모델에서 외측 회전자의 폴피스 사이에 브리지가 추가되었으며, 다른 부분에서는 변경 사항이 없다.

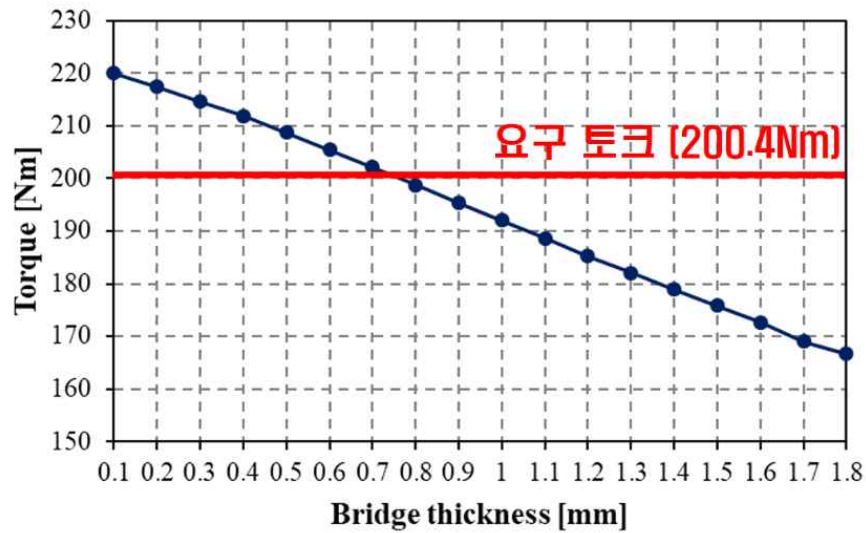


그림 2-가-45 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델의 폴피스 브리지 두께에 따른 평균 토크 특성

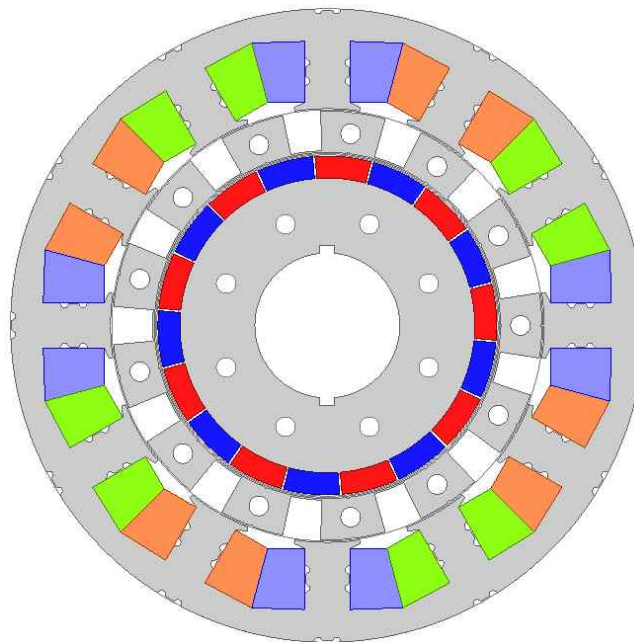


그림 2-가-46 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델의 단면도

표 2-가-89은 1차 시제품 수정 설계 모델의 역기전력 특성을 보여준다. 무부하 역기전력은 1차 시제품 대비 14.8% 감소한 $68.5V_{peak}$ 이며 THD는 동일하게 1.4%이다. 부하 시 역기전력은 0.9% 상승한 $166.1V_{peak}$ 이며 THD는 0.1% 감소한 3.2%이다. 표 2-가-90는 무부하

코깅토크와 부하 토크 특성을 보여준다. 무부하 코깅토크의 p2p는 폴피스 축의 3.8Nm에서 3.3Nm으로 감소하였으며, 부하 정격토크는 14.3% 감소한 202.5Nm이며, 요구토크 대비 1.1% 여유가 있다. 토크 리플율은 5.4%에서 6.3%로 증가하였다. 표 2-가-91 및 2-가-92은 최대속도에서의 역기전력 및 토크 특성을 보여준다. 최대 속도 부하 시 역기전력은 424.6V_{peak}이며, THD는 3.2%이다. 역기전력 제한치에 약 2% 여유가 있으며, 토크는 202.5Nm로 요구 토크보다 1.3% 높다. 표 2-가-93는 1차 시제품 수정 설계 모델에 대한 자속밀도 및 자속선도를 보여주며, 포화 문제와 관련하여 1.8T 기준 이상 없다. 표 2-가-94은 1차 시제품 수정 설계 모델에 대한 손실 및 효율 특성을 보여준다. 동손은 동일하며, 철손은 12.7W에서 13.9W로 증가하였으나 영구자석 와전류손은 4.5W에서 3.7W로 감소하였다. 1차 시제품 수정 설계 모델의 효율은 정격속도에서 95.5%, 최대속도에서 97.9%로 요구조건을 만족함을 확인할 수 있다. 결론적으로 외측 회전자의 폴피스 사이에 브리지를 추가함으로써 비틀림 강도를 증가시키면서 전자기적 요구 특성을 만족하는 45kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델을 도출하였다.

표 2-가-89 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델 역기전력 (정격속도)

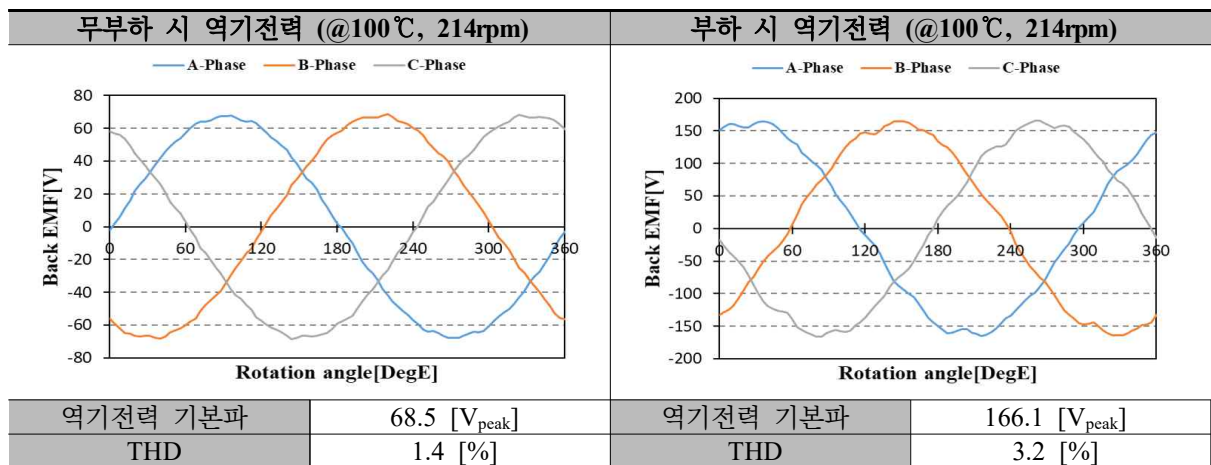


표 2-가-90 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델 코깅토크 및 토크 (정격속도)

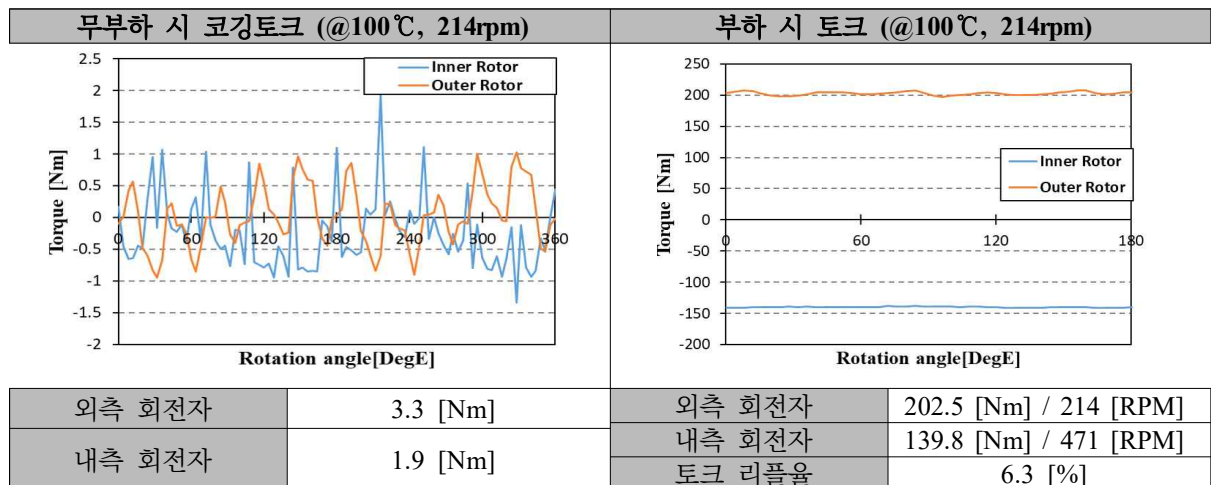


표 2-가-91 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델 역기전력 (최대속도)

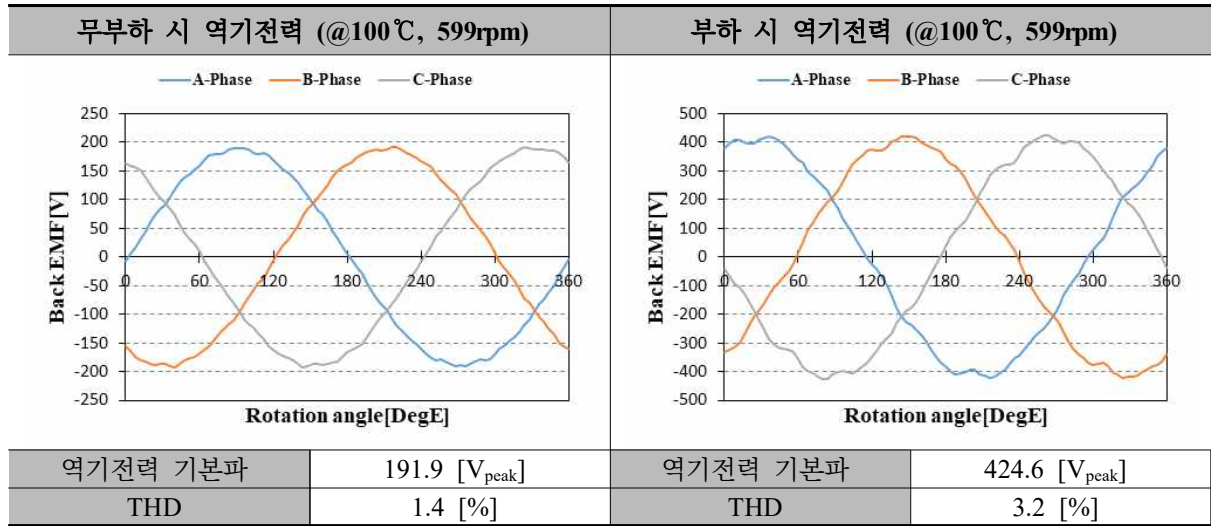


표 2-가-92 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델 코강토크 및 토크 (최대속도)

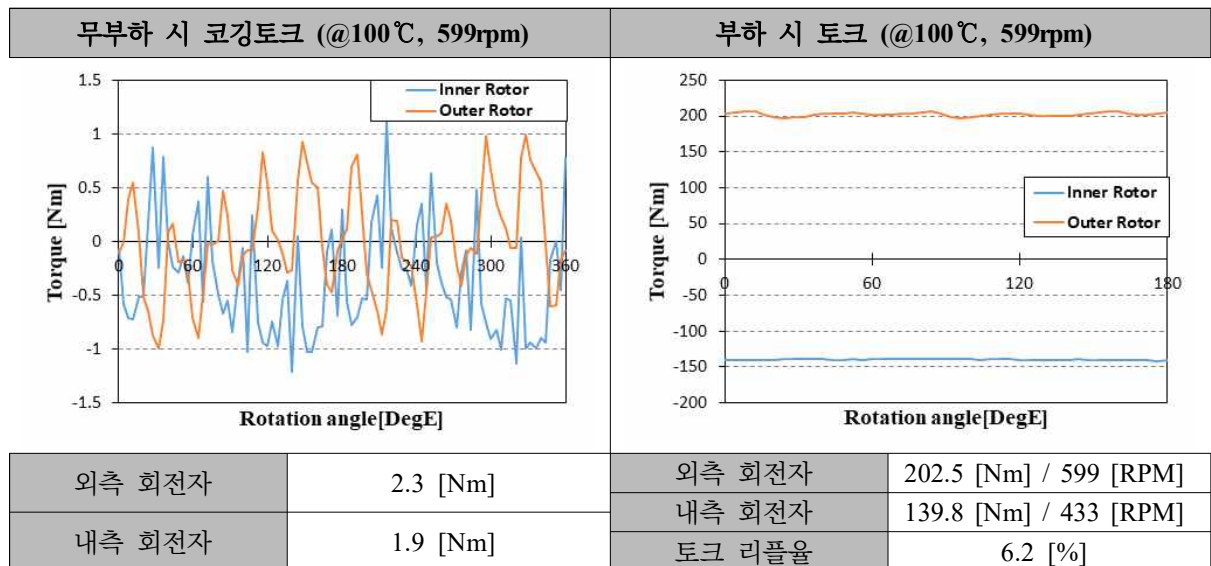


표 2-가-93 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델 자속밀도 분포도 및 자속선도

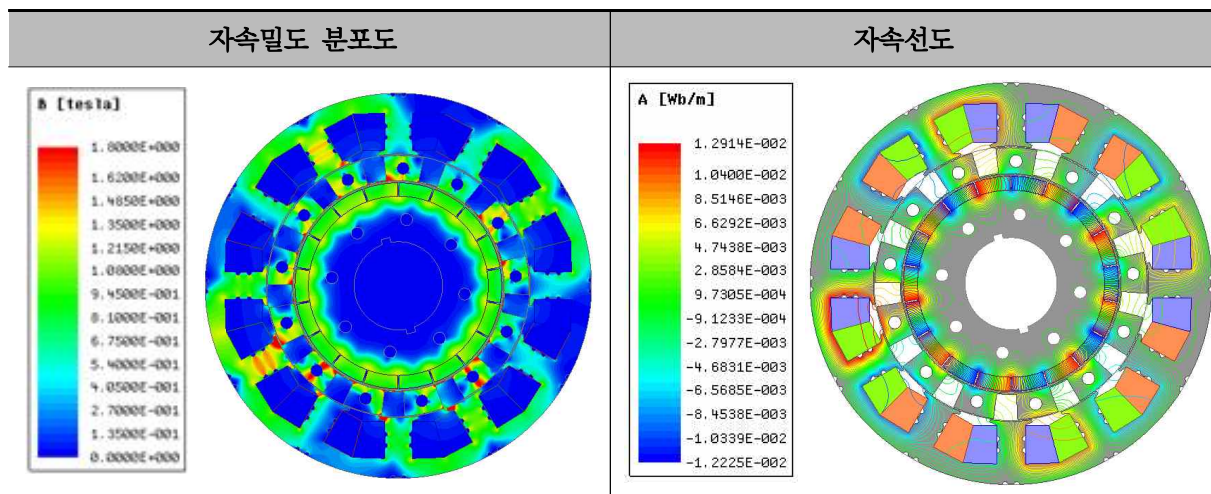


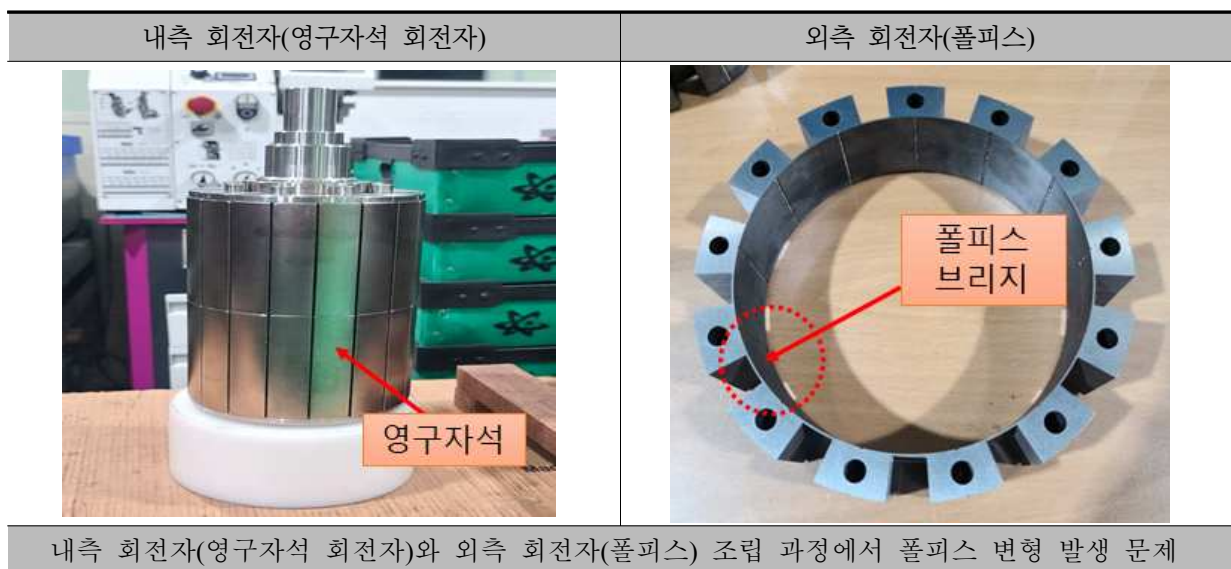
표 2-가-94 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품 수정 설계 모델 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]	최대속도 [599RPM]
동손	196.7W	
철손	13.9W	45.8W
영구자석 와전류손	3.7W	28.9
출력	4.5kW	12.7kW
효율	95.5%	97.9%

(다) 4.5kW급 DR-PMSM 2차 시제품 제작 : 폴피스간 브리지 및 충전재가 있는 모델

본 연구에서는 4.5kW급 DR-PMSM 1차 시제품의 외측 회전자(폴피스)를 보완 설계하여 2차 시제품 제작을 진행하였다. 먼저 개별 폴피스 사이를 브리지로 서로 연결하는 구조를 갖는 외측 회전자를 제작하였다. 표 2-가-95는 4.5kW급 DR-PMSM 2차 시제품의 내측 회전자(영구자석 회전자)와 외측 회전자(폴피스 브리지 적용) 제작 공정을 보여준다. 표 2-가-95에서 보는 바와 같이, 외측 회전자를 내측 영구자석 회전자와 조립하는 과정에서 1차 시제품에서와 유사하게 폴피스 부가 영구자석의 인력을 견디지 못하고 변형이 발생하는 문제가 있었다. 따라서 추가적으로 폴피스 사이의 슬롯을 비자성, 비전도성 에폭시 충전재로 채워주는 구조로 외측 회전자 2차 시제품을 다시 제작하였다.

표 2-가-95 4.5kW급 DR-PMSM 2차 시제품의 내측 회전자(영구자석 회전자)와 외측 회전자(폴피스 브리지 적용) 제작 및 조립 과정에서 폴피스 변형 발생 문제



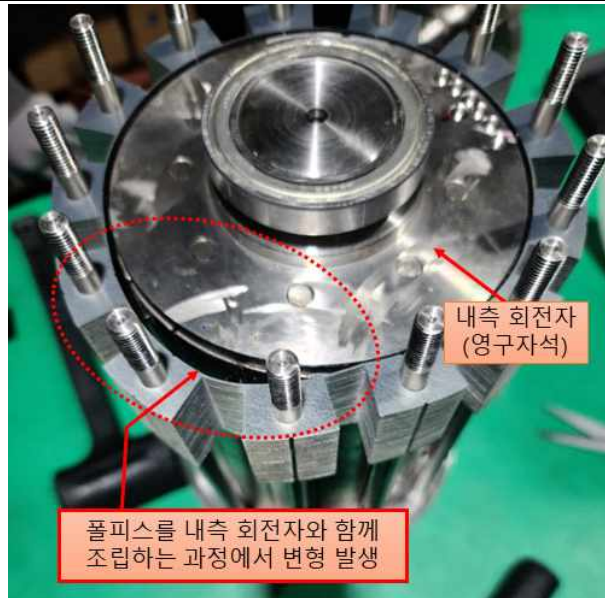
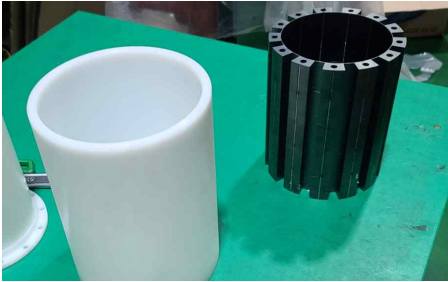


표 2-가-96은 4.5kW급 DR-PMSM 2차 시제품의 외측 회전자에 브리지와 에폭시 몰딩 충전재를 적용하여 제작하는 공정과 최종으로 고정자에 2중 회전자를 조립하는 공정을 보여준다. 폴피스를 적층한 후 슬롯부의 에폭시 몰딩을 위하여 몰딩 지그를 제작하였다. 지그 내부에 폴피스 적층 코어를 넣은 후 지그 내부에 액체 상태의 에폭시를 주입한 후 에폭시를 굳혀서 외측 회전자 제작을 완료하였다. 외측 회전자를 제작한 후 내측 회전자와 결합하여 2중 회전자를 만들고, 2중 회전자를 고정자에 최종적으로 조립을 하여 4.5kW급 DR-PMSM 2차 시제품 제작을 완료하였다.

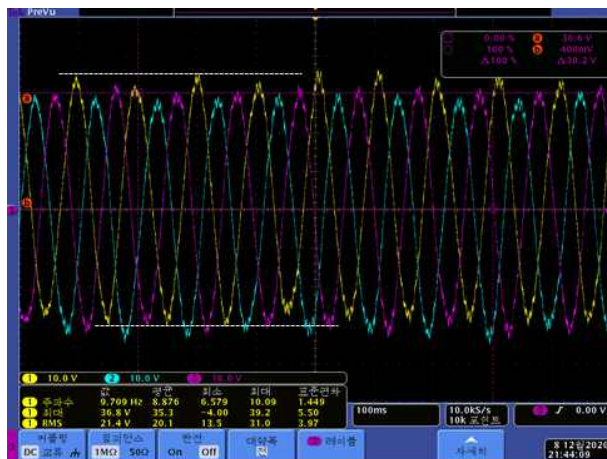
표 2-가-96 4.5kW급 DR-PMSM 2차 시제품의 브리지/에폭시 몰딩 충전재 적용 외측 회전자 제작 공정 및 최종 조립 공정

외측 회전자(폴피스) 제작을 위한 에폭시 몰딩 지그	에폭시 몰딩 적용 외측 회전자(폴피스)
	
내측 회전자에 외측 회전자(폴피스) 결합	DR-PMSM의 2중 회전자 완성품
	

DR-PMSM 고정자에 2중 회전자 결합 / 제작이 완료된 4.5kW급 DR-PMSM 2차 시제품



그림 2-가-47은 최종 조립을 완료한 4.5kW급 DR-PMSM 2차 시제품의 무부하 역기전력 측정 결과를 보여준다. 그림 2-가-46에서 보는 바와 같이, 10Hz (92rpm)에서 역기전력 파형을 살펴보면 3상 불평형이 심하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 외측 회전자(폴피스)의 에폭시 몰딩에 의한 제작 과정에서 회전자 편심에 의한 공극 불균일이 발생하여 무부하 역기전력의 3상 불평형이 발생한 것이다. 결론적으로, 추가 보정을 위한 제작비용과 제작 시간을 고려해볼 때, 에폭시 몰딩에 의해 제작된 외측 회전자의 편심을 보정할 수 있는 방법이 없기에, 회전자 편심을 고려하면 이후 성능시험에 제약이 있을 것으로 본다.



(a) 10Hz (92rpm)



(b) 16Hz (147rpm)

그림 2-가-47 4.5kW급 DR-PMSM 2차 시제품의 무부하 역기전력 파형 (3상 불평형 발생)

(6) 4.5kW급 DR-PMSM 제어 알고리즘 개발 및 구동 Drive 시제품 제작

(가) 4.5kW급 DR-PMSM 제어 알고리즘 도출 및 구동 환경을 고려한 시뮬레이션 구성 및 검증

① 실제 구동 환경 고려 시뮬레이션 구성 및 제어 알고리즘 검토

영구자석 동기전동기는 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)와 표면 부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM, Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor)로 나눌 수 있다. 본 연구의 DR-PMSM은 IPMSM, SPMSM과 유사하게 영구자석 회전자를 적용한 동기전동기의 일종이다. 따라서 DR-PMSM의 제어 방식을 결정하기 위하여 영구자석 동기전동기의 제어 방식으로부터 접근을 시도하였다. 우선 영구자석 동기전동기의 수학적 모델링을 설명하고, 수학적 모델링을 기반으로 모터의 타입을 결정하고 그에 맞는 제어 시뮬레이션 구성을 하였다. 또한 실제 구동 환경인 다이내모 시스템을 활용한 부하 특성 실험을 시뮬레이션으로 모사하여 결과를 확인하였다.

㉔ 일반적인 영구자석 동기전동기의 전압 방정식

IPMSM의 전압 방정식 모델에서 3상 전압 방정식을 전기자 권선에 의한 전압 강하 성분과 전기자 쇄교자속 변화에 의한 전압 강하로 구성되며 식 (2.6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_a &= R_s i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \\ v_b &= R_s i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \\ v_c &= R_s i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \end{aligned} \quad (2.6)$$

v_a, v_b, v_c 는 3상 고정자 전압, i_a, i_b, i_c 는 3상 고정자 전류, $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 는 각 상의 쇄교자속, R_s 는 고정자 상 저항을 나타낸다. 이때 $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 는 식 (2.7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_a &= L_{aa} i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + \Phi_{fa} \\ \lambda_b &= L_{ba} i_a + L_{bb} i_b + L_{bc} i_c + \Phi_{fb} \\ \lambda_c &= L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L_{cc} i_c + \Phi_{fc} \end{aligned} \quad (2.7)$$

L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} 는 각 상의 자기 인덕턴스, $L_{ab}, L_{ac}, L_{ba}, L_{bc}, L_{ca}, L_{cb}$ 는 상호 인덕턴스를 나타내며, $\Phi_{fa}, \Phi_{fb}, \Phi_{fc}$ 는 각 상에 영구자석에 의해 발생하는 쇄교자속을 나타낸다. IPMSM은 역 돌극성의 특성을 가지기 때문에 회전자의 위치에 따라 자화 인덕턴스의 크기가 변한다.

따라서 자기 인덕턴스는 식 (2.8), 상호 인덕턴스는 식 (2.9)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_{aa} &= L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta \\ L_{bb} &= L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ L_{cc} &= L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} L_{ab} &= -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) \\ L_{bc} &= -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta + \pi) \\ L_{ca} &= -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.9)$$

L_{ls} 는 누설 인덕턴스를 나타내고, L_A 는 자화 인덕턴스의 평균값, L_B 는 자화 인덕턴스의 변동분을 나타낸다. SPMSM의 경우 고정자 인덕턴스 식에서 $L_B = 0$ 으로 모델링이 가능하다. 앞서 구한 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 이용하여 IPMSM의 고정자 인덕턴스를 나타내면 식 (2.10)과 같다.

$$\begin{aligned} L_s &= \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta + \pi) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta + \pi) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2(\theta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.10)$$

영구자석에 의한 쇄교자속도 회전자의 위치에 따라 변화하기 때문에 IPMSM의 총 고정자 쇄교자속은 식 (2.11)과 이 표현된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{abc} &= L_s i_{abc} + \Phi_{fabc} \\ &= \begin{bmatrix} L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\theta & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{3}\right) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta + \pi) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta + \pi) & L_{ls} + L_A - L_B \cos 2(\theta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.11)$$

따라서 위와 같은 식을 처음 식에 대입하여 정리하면 IPMSM의 3상 전압 방정식은 식 (2.12)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_{aa} & pL_{ab} & pL_{ac} \\ pL_{ba} & R_s + pL_{bb} & pL_{bc} \\ pL_{ca} & pL_{cb} & R_s + pL_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \omega_r \Phi_f \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin \left(\theta - \frac{2}{3} \pi \right) \\ \sin \left(\theta + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

앞서 도출한 영구자석 동기전동기의 전압 방정식이 쇠교자속을 미분하여 시변 계수를 갖는 미분 방정식으로 표현됨을 알 수 있다. 이러한 시변 미분 방정식의 경우 매우 복잡하여 전압 v_a, v_b, v_c 에 대한 응답인 i_a, i_b, i_c 의 값을 예측하는데 어려움이 따른다. 따라서 일반적으로 영구자석 동기전동기의 전압 방정식을 단순화하기 위해 3상의 전압 방정식을 2상의 전압 방정식으로 변환하여 사용하며, 2상 좌표계는 고정자의 a상을 기준으로 하는 정지 좌표계($d^s - q^s$)와 동기 속도로 회전하는 회전자를 기준으로 하는 회전 좌표계($d^e - q^e$)로 나누어진다. 3상의 전압 방정식을 정지 좌표계로 변환하여도 해석이 복잡하기 때문에, 회전 좌표계로 변환하면 식 (2.13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_s + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \Phi_f \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

여기서, v_d^e, v_q^e 는 d, q축 고정자 전압, i_d^e, i_q^e 는 d, q축 고정자 전류, L_d, L_q 는 d, q축 인덕턴스, p 는 미분 연산자를 표현하며 IPMSM의 d, q축 인덕턴스는 식 (2.14)와 같이 나타낼 수 있다. SPMSM의 경우 $L_B = 0$ 이므로 d, q축 인덕턴스는 같아지기 때문에 식 (2.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_d = L_{ls} + \frac{3}{2}(L_A - L_B), L_q = L_{ls} + \frac{3}{2}(L_A + L_B) \quad (2.14)$$

$$L_d = L_{ls} + \frac{3}{2}L_A, L_q = L_{ls} + \frac{3}{2}L_A \quad (2.15)$$

영구자석 동기전동기의 d-q축 동기 좌표 변환을 이용하여 전동기의 입력 전력을 표현하면 식 (2.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{in} = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (2.16)$$

앞에서 구한 d-q축 고정자 전압을 입력 전력 식에 대입하면 식 (2.17)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{3}{2} \left(\left(R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_r \lambda_q \right) i_d + \left(R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \lambda_d \right) i_q \right) \\ &= \frac{3}{2} \left(R_s (i_d^2 + i_q^2) + i_d \frac{d\lambda_d}{dt} + i_q \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \Phi_f i_q + \omega_r (L_d - L_q) i_d i_q \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

$R_s(i_d^2 + i_q^2)$ 는 고정자 동손, $i_d \frac{d\lambda_d}{dt} + i_q \frac{d\lambda_q}{dt}$ 는 자기 에너지 변동분, $\omega_r \Phi_f i_q + \omega_r (L_d - L_q) i_d i_q$ 는 영구자석 전동기의 기계적 출력을 나타낸다. 이 기계적 출력을 $\omega_m (= \frac{2}{P} \omega_r)$ 로 나누면 식 (2.18)과 같이 영구자석 동기전동기의 토크를 나타낼 수 있다. 여기서 P 는 극수이다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} [\Phi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2.18)$$

식 (2.18)에서 영구자석 동기전동기의 토크에 필요한 d-q축 인덕턴스 (L_d , L_q), 극수 P , 쇄교자속 Φ_f 에 대한 값을 이용하여 PSIM을 활용해 PMSM 모델을 구성하였다. 구성된 PMSM 모델의 d-q축 인덕턴스 (L_d , L_q)값을 확인하면 일반적인 표면 부착형 영구자석 동기전동기와 같이 돌극성이 없는 특성을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 특성을 보이는 DR-PMSM의 제어를 위해 $i_d = 0$ 제어 방법을 채택한다.

㉠ $i_d = 0$ 제어

매입형 영구자석 동기전동기의 토크는 식 (2.18)에서 보이듯 영구자석의 자속 Φ_f 와 q축 전류 i_q 가 상호작용하여 발생하는 영구자석 토크 성분 $\Phi_f i_q$ 뿐만 아니라, d축과 q축의 인덕턴스 차이에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크 성분 $(L_d - L_q) i_d i_q$ 로 결정된다. 반면 표면 부착형 영구자석 동기전동기의 경우 매입형 영구자석 동기전동기와 다르게 d축과 q축 인덕턴스의 차이가 없어 릴럭턴스 토크 성분을 갖지 않아 식(2.19)에서 보이듯 d축 전류 i_d 는 토크 발생에 어떠한 기여도 하지 않는다. 따라서 주어진 고정자 전류를 최대한으로 이용하기 위해서는 고정자 전류를 모두 토크 성분 전류인 q축 전류 i_q 로 할당하는 것이 효율적이다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} \Phi_f i_q \quad (2.19)$$

즉, 표면 부착형 영구자석 동기전동기의 벡터 제어시 그림 2-가-48에 보이듯 자속 Φ_f 가 발생하고 있는 위치에 있는 d축 전류 i_d 를 0으로 제어하고 모든 고정자 전류 I_s 를 q축 전류 i_q 로 사용하도록 한다.

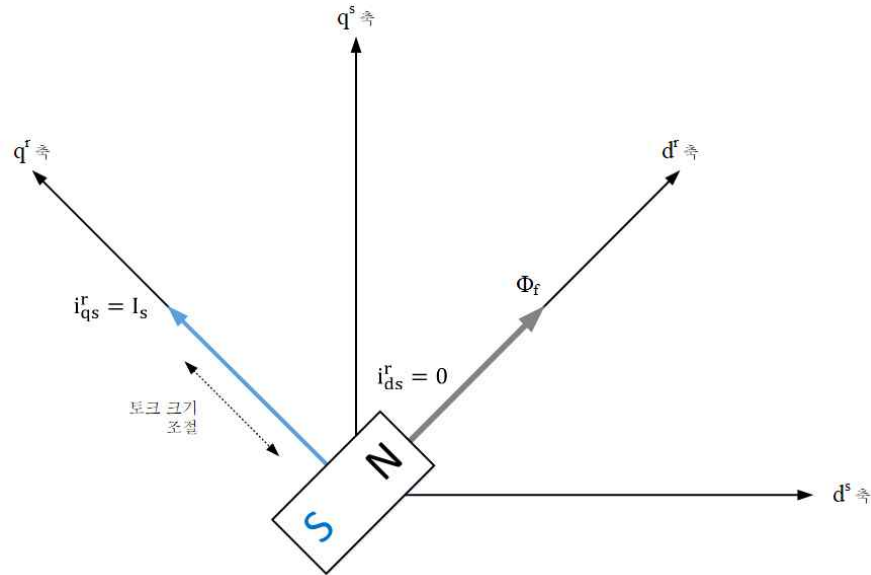


그림 2-가-48 표면 부착형 영구자석 동기전동기의 벡터 제어 전류

$$i_d = 0, \quad i_q = I_s \quad (2.20)$$

따라서 위와 같이 전류를 제어하면 단위 전류당 최대 토크 운전이 가능하며, 표면 부착형 영구자석 동기전동기의 효율적인 구동 조건은 $i_d = 0$ 이라 할 수 있다.

㉔ 비례적분 전류 제어기

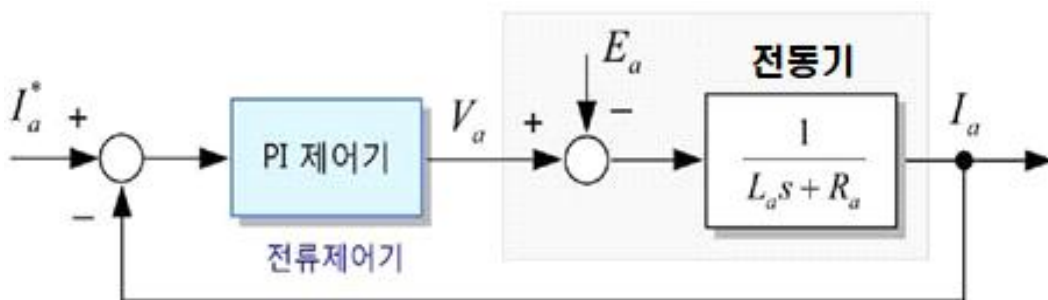


그림 2-가-49 전류 제어기를 포함하는 전동기 제어 구성도

영구자석 동기전동기는 간단히 고정자 저항 R_s 과 고정자 인덕턴스 L_s 의 $1/(L_s \cdot s + R_s)$ 의 회로로 표현할 수 있다. 이 경우 전류 오차에 대한 비례적분 전류 제어기의 출력 전압은 식 (2.21)과 같다.

$$V_a^* = (K_{pc} + \frac{K_{ic}}{s})(I_a^* - I_a) = \frac{K_{pc}(s + 1/T_c)}{s}(I_a^* - I_a) \quad (2.21)$$

$1/T_c (= K_{ic}/K_{pc})$ 는 비례적분 전류제어기의 절점 주파수이다. 전류 제어기의 비례 이득 K_{pc} 및 적분 이득 K_{ic} 에 따라 오차 발생 시 전동기에 인가되는 전압 지령 V_a^* 이 달라지는 것을 알 수 있다. 비례적분 제어기에서 그 제어 이득 값을 결정하는 방법은 여러 가지가 있으나, 일반적으로 극점-영점 상쇄 기법(Pole-Zero Cancellation)을 사용하여 이득을 결정하는 방법을 사용한다. 이 기법을 적용하면 전동기 자체의 전류 응답 특성을 제거하고 제어기 이득으로 그 응답 특성이 결정되도록 할 수 있다. 그림 2-가-48로부터 전류 제어 시스템의 개루프 전달함수를 구해보면 식 (2.22)와 같다.

$$G_{\omega}(s) = \frac{K_{pc}(s + K_{ic}/K_{pc})}{s} \left(\frac{1/L_s}{s + R_s/L_s} \right) \quad (2.22)$$

비례적분 제어기의 영점($-K_{ic}/K_{pc}$)이 전동기의 전류 제어 특성을 결정하는 극점($-R_s/L_s$)을 상쇄하도록 하는 극점-영점 상쇄 기법을 적용하면, 즉 비례적분 제어기의 절점 주파수가 고정자 회로의 시정수와 같다면($1/T_c = K_{ic}/K_{pc} = R_s/L_s$), 식 (2.23)과 같이 개루프 전달함수를 얻을 수 있다.

$$G_{\omega}(s) = \frac{1}{L_s s / K_{pc}} \quad (2.23)$$

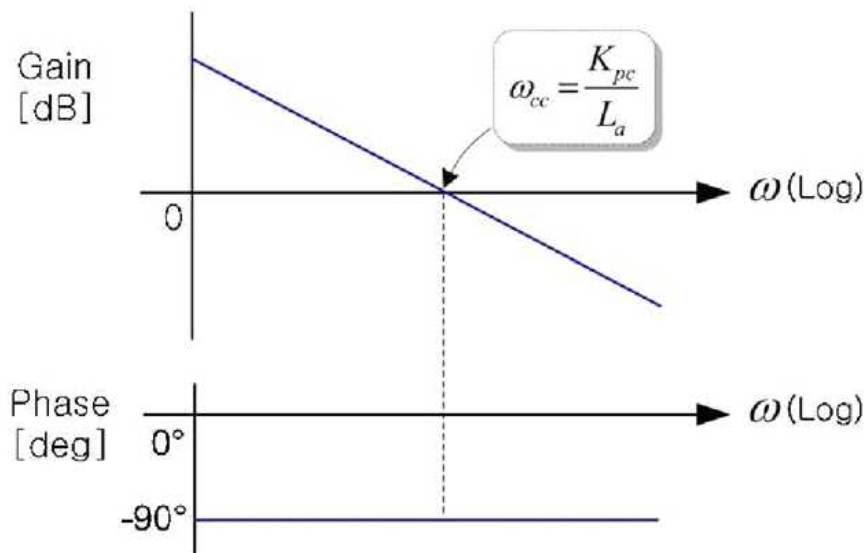


그림 2-가-50 개루프 전달함수의 주파수 응답 특성

식 (2.13)의 개루프 전달함수의 주파수 응답 특성은 그림 2-가-50와 같다. 이 경우 이득 $G_{co}(j\omega) = 1$ (또는 0dB)이 되는 이득 교차 주파수에서 위상이 -90° 로서 -180° 보다 크므로 위상 여유가 양이 되므로 이 시스템은 안정적이다. 그림 2-가-50의 개루프 주파수 응답 특성에서 이득이 0dB(크기 = 1)를 통과하는 주파수를 이득 교차 주파수 ω_{cc} 라 하며, 식 (2.23)으로부터 $\omega_{cc} = K_{pc}/L_s$ 가 된다.

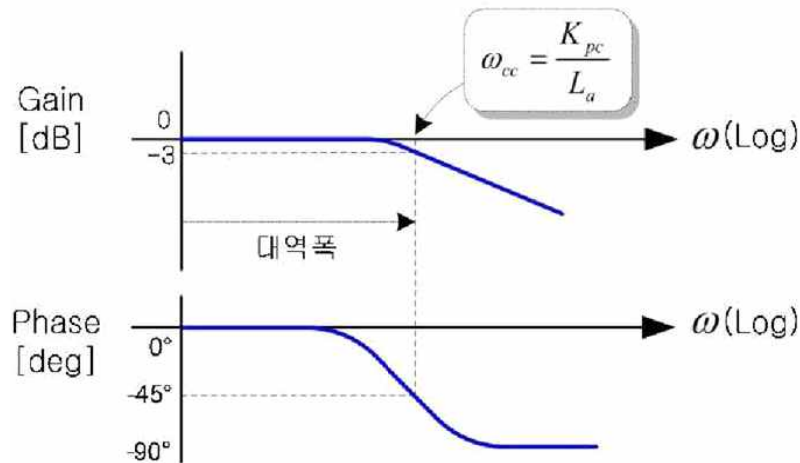


그림 2-가-51 폐루프 전달함수의 주파수 응답 특성

이 개루프 주파수 응답의 이득 교차 주파수 ω_{cc} 는 폐루프 주파수 응답의 차단 주파수가 된다. 이것은 교차각 주파수 ω_{cc} 가 비례적분 전류 제어 시스템의 대역폭(Bandwidth)이 된다는 의미이다. 식 (2.23)으로부터 폐루프 전달함수를 구하면 식 (2.24)와 같고, 이에 대한 주파수 응답 특성이 그림 2-가-50과 같다.

$$G_{cc}(s) = \frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{G_{co}(s)}{1 + G_{co}(s)} = \frac{1}{L_s s / K_{pc} + 1} = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \quad (2.24)$$

식 (2.24)로부터 $\omega_{cc} = K_{pc}/L_s$ 가 된다. 식 (2.24)로부터 극점-영점 상쇄 기법을 적용한 경우 전동기의 실제 전류는 지령 전류를 차단주파수 ω_{cc} 를 갖는 1차 저역통과필터(1st-order Low Pass Filter)를 거친 값으로 됨을 알 수 있다. 이것은 변동 정도가 ω_{cc} 보다 작은 전류 지령에 대해 직류 전동기의 실제 전류는 응답 지연은 있지만 그 지령을 잘 추종한다는 것을 의미한다.

1차 저역 통과필터 형태로 표현된 폐루프 전달함수에서 차단 주파수는 그 전달함수의 이득이 직류 이득 크기의 -3dB (크기 = $1/\sqrt{2}$)가 되는 주파수이다. 식 (2.24)의 폐루프 전달함수에서 차단 주파수를 구해보면 $G_{cc}(j\omega) = \omega_{cc}/(j\omega + \omega_{cc}) = 1/\sqrt{2}$ 에 의해 차단 주파수는 ω_{cc} 가 된다. 이것은 개루프 주파수 응답의 교차각 주파수와 같다.

이와 같이 비례적분 제어기의 영점이 시스템 즉, 전동기의 극점과 상쇄되도록 설계하면 식 (2.24)로부터 전류 제어기는 직류 이득이 1이며 안정하면서도 빠른 응답 특성을 가지는 1차 지연 요소로 동작한다. 전류 제어 시스템이 1차 시스템으로 표현되므로 오버슈트가 발생되지 않으며, 정상상태까지의 도달 시간은 시스템 제어 시정수 $1/\omega_{cc}$ 의 4배 정도가 된다.

이러한 비례적분 전류 제어기에서 원하는 제어 대역폭을 얻기 위한 비례 이득과 적분 이득 값의 설정방법은 다음과 같다. 필요한 전류 제어 대역폭 ω_{cc} 가 주어지면 이를 달성하기 위해 요구되는 비례 이득 K_{pc} 는 $\omega_{cc} = K_{pc}/L_s$ 로부터 $K_{pc} = L_s \cdot \omega_{cc}$ 로 변환되며, 적분 이득 K_{ic} 는 극점과 영점 상쇄 조건 $T_c = K_{pc}/K_{ic} = L_s/R_s$ 로부터 $K_{ic} = (R_s \cdot K_{pc}/L_s) = R_s \cdot \omega_{cc}$ 로 설정한다.

㉠ Anti-Windup 제어기

적분 제어기를 사용하면 정상상태 오차를 제거할 수 있지만 계속해서 오차를 누적하는 특성에 의해 제어기가 원하는 출력을 시스템에 인가해 주지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 전류 제어기에서 지령 전압을 출력하면 이를 전력 변환 장치에서 실제로 만들어 주어야 하지만, 이용 가능한 전원 전압 크기의 제한으로 인하여 전력 변환 장치에서 그 지령을 생성해줄 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 이 경우 적분기는 그 오차를 계속해서 적분하게 되어 값이 크게 증가되는데, 이를 Wind-up 현상이라 한다. 이러한 현상을 방지하기 위해 적분기의 값을 제어기 출력의 가능 여부에 따라 적절한 제한이 필요하다.

적분기 누적을 방지하는 기법 중 동특성이 가장 좋다고 알려진 역계산에 의한 방법이 주로 사용된다. 역계산에 의한 방법에서는 제한기의 입력과 출력값의 차이를 Anti-windup 이득만큼 증폭하여 적분기의 누적을 줄여준다.

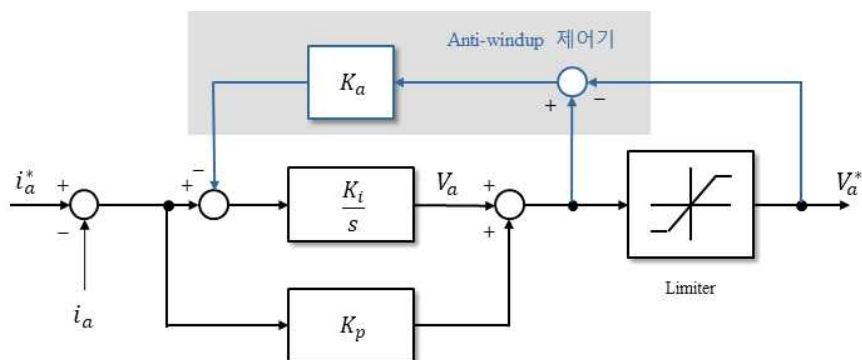


그림 2-가-52 역계산에 의한 적분기 누적 방지 제어

그림 2-가-52는 Anti-Windup 제어기가 있는 경우로 전류 제어기의 출력값은 식 (2.25)와 같다.

$$V_a = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_a^* - i_a) - \frac{K_a K_i}{s} (V_a - V_a^*) \quad (2.25)$$

출력 제한이 발생한 경우 실제 전동기의 인가전압은 V_a^* 이므로 이로부터 전동기의 실제 전류는 식 (2.26)으로부터 결정된다.

$$V_a^* = (R_a + sL_a)i_a + e_a \quad (2.26)$$

여기서 역기전력 e_a 은 전향 보상되었다고 가정하고, 식 (2.15)과 식 (2.16)을 빼서 전류 제어기의 비례 이득과 적분 이득을 적용하여 실제 전류로 정리하면 식 (2.27)과 같다.

$$i_a = \left(\frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \right) \left[i_a^* - \frac{s + K_a K_i}{s K_p + K_i} (V_a - V_a^*) \right] \quad (2.27)$$

여기서 출력 전압의 제한이 발생하거나 제거될 때 실제 전류에 과도현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 그런데, 누적 방지 제어기 이득을 $K_a = 1/K_p$ 로 설정하면 식 (2.27)이 식 (2.28)과 같이 정리되어 과도현상이 발생하지 않게 된다.

$$i_a = \left(\frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \right) \left[i_a^* - \frac{1}{K_p} (V_a - V_a^*) \right] \quad (2.28)$$

앞서 설명한 비례 적분 전류제어기에 대한 이론을 바탕으로 그림 2-가-53와 같이 전류 제어기 모델을 구성하였다. 빠른 응답 특성을 보이면서 정상상태 오차를 제거할 수 있도록 비례적분 제어기를 이용했으며, 적분기의 누적 현상을 잡아 적분 값이 포화하지 않도록 Anti-Windup 제어기를 추가하였다,

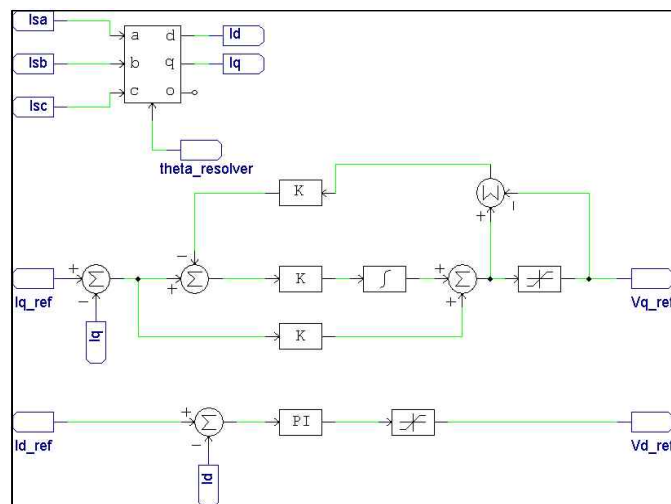


그림 2-가-53 PSIM 활용 전류 제어기 모델

그림 2-가-54처럼 속도 제어기는 전류 제어기 보다 바깥 루프에 위치하도록 하였으며, 전류 제어기와 같이 빠른 응답 특성과 정상상태 오차 제거를 위해 비례적분 제어기를 채택하였다.

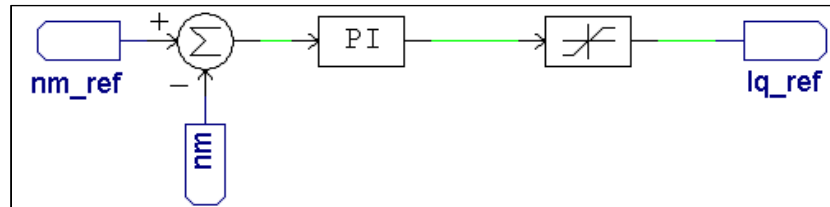


그림 2-가-54 PSIM 활용 속도 제어기 모델

이후 전류 제어, 속도 제어, $i_d = 0$ 를 위해 그림 2-가-53과 그림 2-가-54을 수식화 하여 최종적으로 C기반에 제어부로 구성하였다

㉠ SVPWM 제어

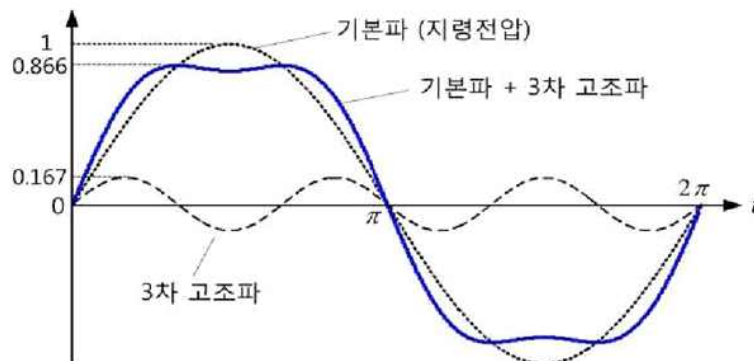


그림 2-가-55 3차 고조파 주입의 원리

전류 제어기를 통해 생성된 d축과 q축의 지령 전압(V_{ds}^* , V_{qs}^*)을 좌표 변환을 통해 abc 축 정지 좌표계로 변환하여 3상에 해당하는 지령 전압을 생성한다. 지령 전압에 3차 고조파 주입 변조 방식을 적용하여 SVPWM 제어 방법으로 구동한다. 그림 2-가-54와 같이 어떤 원하는 전압 지령(= 상전압의 기본파)에 그와 동상의 3차 고조파 성분을 더해주는 경우 결과적인 전압 지령의 최대치는 원래 전압 지령의 최대치보다 작아지기 때문이다. 이러한 3차 고조파 주입 변조 방식은 SPWM 방식보다 최대치가 15.5% 더 큰 기본파 전압을 생성할 수 있다. 따라서 식 (2.29)와 같이 3상에 해당하는 지령 전압을 이용해 간단하게 3차 고조파를 만들어 주입하여 SVPWM 제어 방법을 구동한다.

$$v_{sn} = -\frac{V_{abc.max} + V_{abc.min}}{2} \quad (2.29)$$

② 축소형 DR-PMSM용 제어 알고리즘 구현 및 적용(무부하 조건)

축소형 DR-PMSM용 제어 알고리즘 구현을 앞서 설명한 내용에 맞춰 시뮬레이션을 설계했고, 이를 통해 $J\frac{dw}{dt} = T_e - T_L - Bw$ 에서 값을 0으로 설정한 후의 무부하 특성을 먼저 확인하였다. 외부 부하는 존재하지 않지만 표 2-가-97와 같이 모터의 관성, 마찰, 권선 저항 값으로 인해 모터의 무부하 구동이 가능하다. 따라서 그림 2-가-58과 같이 지령 속도인 1000[rpm]으로 도달하는 것을 확인할 수 있고 인가 전류도 적은 양이지만 3상 통전으로 잘 구동되는 것을 확인 할 수 있다. 또한 표 2-가-98, 그림 2-가-58과 같이 설계 해석 치와 시뮬레이션의 값이 비교적 수렴한다는 것 또한 확인할 수 있다.

표 2-가-97 4.5kW급 DR-PMSM 모델의 설계 및 전기적 사양

Parameter	Value	Parameter	Value
Number of Pole	8	Stator Resistance	0.669367[Ω]
d-axis Inductance	0.0424236[H]	q-axis Inductance	0.0424236[H]
Inertia	0.0796458[kg·m ²]	Back EMF Constant	338.1429[V _{pk} /krpm]

표 2-가-98 4.5kW급 DR-PMSM 모델의 설계 해석 및 무부하 시뮬레이션 값 (속도지령 1,000 rpm)

구분	Maxwell 설계 해석 값	PSIM 시뮬레이션 결과
고정자 속도	973 [rpm]	963 [rpm] (ΔN 3.7%)
고정자 토크	0 [Nm]	0.038 [Nm]
운전 주파수	64.9 [Hz]	64.2 [Hz]
3상 전류	0 [A _{rms}]	0.06 [A _{rms}]

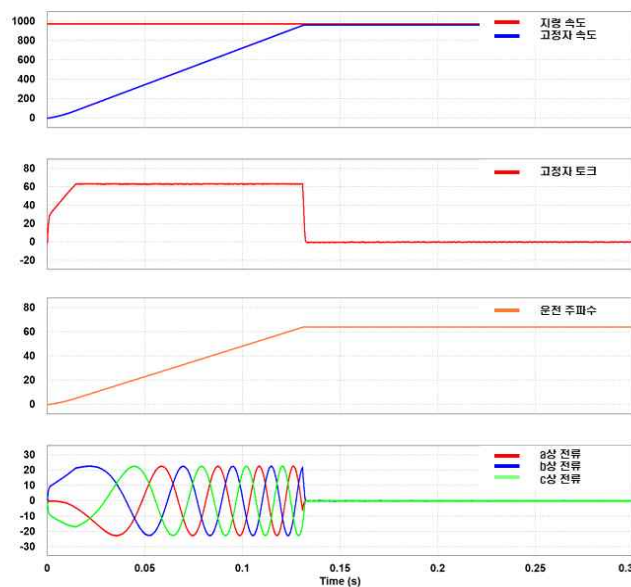


그림 2-가-58 PSIM 활용 4.5kW급 DR-PMSM의 무부하시 시뮬레이션 결과

③ 축소형 DR-PMSM용 제어 알고리즘 검증(부하 조건)

부하 조건에서의 축소형 DR-PMSM용 제어 알고리즘 구현을 앞서 설명한 내용에 맞춰 시뮬레이션을 설계했고, 이를 통해 $J\frac{dw}{dt} = T_e - T_L - Bw$ 에서 T_L 값을 30[Nm]로 설정한 후의 특성을 확인하였다. 그림 2-가-57과 같이 지령 속도인 1000rpm으로 도달하고 난 후에 속도가 유지되기 위해선 식 (2.19)의 값이 T_L 값 만큼의 토크를 유지해야하기 때문에 7.59A_{rms} 값의 전류로 구동되어 지령을 잘 수렴하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 표 2-가-99, 그림 2-가-59과 같이 Maxwell 설계 해석 값으로 고정자 속도는 973rpm, 고정자 토크는 30Nm이며 PSIM 시뮬레이션 결과는 고정자 속도 959rpm, 고정자 토크는 29.95Nm로 속도는 1.44%, 토크는 0.1% 오차율을 가진다. 즉, 설계 해석 값과 시뮬레이션 결과가 큰 오차범위 없이 수렴에 가까운 것을 확인하였다.

표 2-가-99 4.5kW급 DR-PMSM 모델의 설계 해석 및 부하 30[Nm] 시뮬레이션 값 (속도지령 1,000 rpm)

구분	Maxwell 설계 해석 값	PSIM 시뮬레이션 결과	오차율
고정자 속도	973 [rpm]	959 [rpm] (ΔN 4.1%)	1.44 [%]
고정자 토크	30 [Nm]	29.95 [Nm]	0.17 [%]
운전 주파수	64.9 [Hz]	63.9 [Hz]	1.56 [%]
3상 전류	7.588 [A _{rms}]	7.59 [A _{rms}]	0.02 [%]

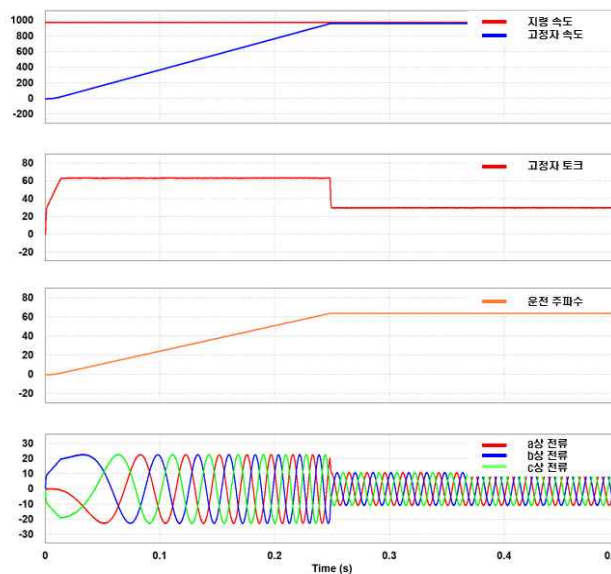


그림 2-가-59 PSIM 활용 4.5kW급 DR-PMSM의 부하 30[Nm] 시뮬레이션 결과

(나) 축소형 DR-PMSM 구동을 위한 인버터 시제품 제작 및 제어보드 검증

축소형 DR-PMSM 구동을 위해 필요한 기능들을 탑재한 제어보드 설계하였다. 제어 MCU는 TI社의 TMS320F28335를 사용하였고 주변 회로의 전원공급부인 Power회로를 설계하였다. 기능적인 부분에서는 인버터 스위치 구동 신호주입을 위한 PWM(Pulse Width Modulation)기능, 모터의 위치정보 연산을 위한 레졸버 수신기능, 전류제어를 위한 Analog-to-Digital Converter 기능을 활성화 할 수 있도록 MCU주변회로를 설계하여 제작하였다.

① 인버터 시제품 제작

축소형 DR-PMSM의 구동을 위한 인버터의 경우, 직류(DC, V_{dc}) 전압이 약 539V로 비교적 낮아서 전력반도체 소자 및 직류 커패시터의 내압에 부담이 크지 않으므로, 그림 2-가-60과 같이 2-Level 인버터 구조를 채택하여 시제품을 제작하였다.

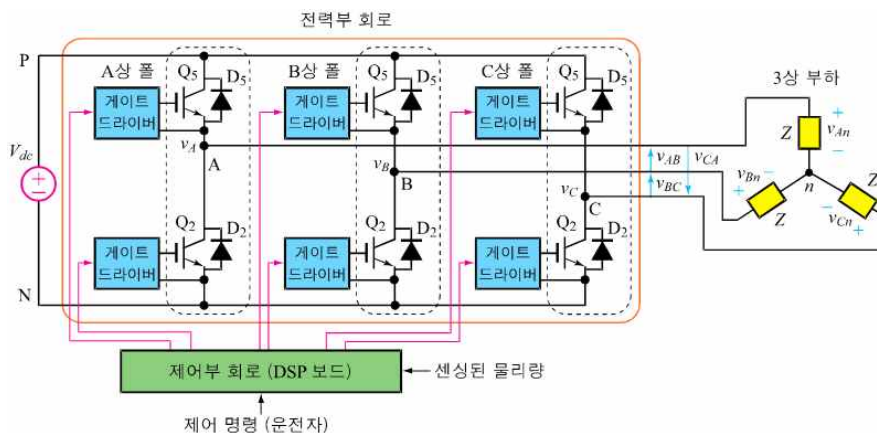


그림 2-가-60 2-Level 인버터의 구조

㉞ 스위치(IGBT) 소자

축소형 DR-PMSM의 구동을 위한 4.5kW급 인버터의 구성 항목 중, 스위치 소자의 경우 인가되는 전압스트레스는 직류(DC, V_{dc}) 전압이므로 539V이며, SVPWM의 제어방식을 채택할 경우 부하 전동기에 인가되는 상전압(V_{An} , V_{Bn} , V_{Cn})의 기본과 크기는 ‘직류(DC, V_{dc}) 전압/ $(3)^{0.5}$ ’이므로 약 311V가 되며 실효값($311V/(2)^{0.5}$)은 220V가 된다.

반면 3상 교류 전력의 경우, 유효 전력 성분($4.5kW$)은 $3 \times V_{An,rms} \times I_{An,rms} \times \sin(Q_v - Q_i)$ 이므로 설계된 축소형 DR-PMSM의 임피던스를 고려한 전압과 전류의 위상 차 ($Q_v - Q_i$)가 30° 라면, 고정자 상전류($I_{An,rms}$, $I_{Bn,rms}$, $I_{Cn,rms}$)의 실효값은 약 14A가 된다. 따라서 고정자 상전류의 최대값은 약 20A가 된다. 이러한 고정자 상전류의 최대값(20A)은 전력반도체 소자인 스위치(IGBT) 소자에 흐르게 된다.

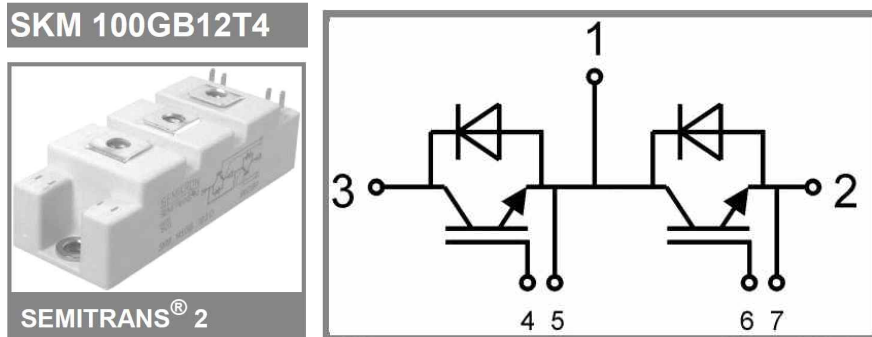


그림 2-가-61 SEMIKRON社의 SKM100GB12T4의 소자

따라서 스위치(IGBT) 소자에 인가되는 전압스트레스(539V)와 전류스트레스(20A)를 고려하여 1,200V/100A급의 SEMIKRON社의 SKM100GB12T4의 소자를 선정하였다. SEMIKRON社의 SKM100GB12T4의 소자는 그림 2-가-59와 같이 1개의 모듈에 2개의 IGBT 소자를 포함하는 2-in-1 구조를 갖는다.

그림 2-가-61과 같은 2-Level 인버터를 구성하기 위해서는 2-in-1 구조의 SKM100GB12T4 소자를 3개가 필요하다.

㉠ 직류 커패시터 소자

2-Level 인버터의 직류 단 전압의 안정화를 위해 그림 2-가-62과 같이 직류 단에 Jianghai社의 400V/4,700 μ F급 전해커패시터(C_1 , C_2)를 직렬로 연결하였다. 또한 직렬로 연결된 커패시터에 인가되는 전압의 균형을 위해 47k Ω /15W급의 저항을 각각의 400V급 전해커패시터(C_1 , C_2)에 병렬로 연결하였다. 직류 단 전압(539V)이 균등하게 분배된다면 각 전해커패시터에 인가되는 전압은 269.5V이며, 47k Ω 의 저항에서 발생하는 손실은 $(269.5V)^2/47k\Omega$ 이므로 1.55W이므로 충분한 여분을 가지고 설계되었다.

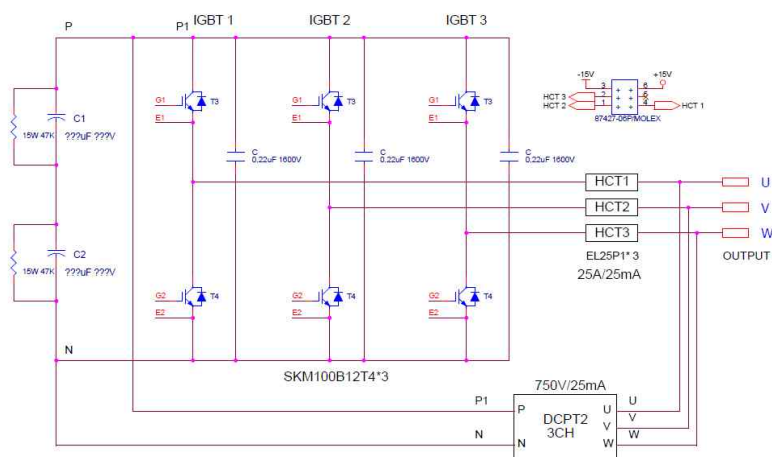


그림 2-가-62 4.5kW급 축소형 2-Level 인버터의 회로도

㉔ 전류 센서

4.5kW급 축소형 DR-PMSM을 구동하기 위해서는 전류 제어가 필수적이며, 이러한 전류 제어를 위해 각 상전류를 센싱하기 위한 그림 2-가-63과 같은 ABB社의 EL25P1의 전류 센서 3개가 채택되었다. ABB社의 EL25P1은 전류형 센서이며, 1차 및 2차 측의 턴 수비가 1 : 1,000이므로 1차 측에서 2차 측으로 변환되는 전류비는 0.001이 된다. 따라서 전동기의 고정자에 흐르는 최대 상전류는 약 20A이므로, 전류 센서의 2차 측으로 변환되는 최대 전류는 0.02A가 된다.

여기서 전압으로 변환하기 위해 110Ω 을 전류 센서의 2차 측에 병렬로 달아주면 전류 센서의 최대 출력전압은 2.2V가 된다. 또한 전류 센서를 구동하기 위한 전원 전압은 $\pm 15V$ 이다.

Without primary bus bar		EL25P1	
With primary bus bar		EL25P1BB	
Nominal primary current		A r.m.s.	25
Measuring range	@ $\pm 15V$ ($\pm 5\%$)	A peak	± 55
Max. measuring resistance	@ $I_{p,max}$ & $\pm 15V$ ($\pm 5\%$)	Ω	142
Min. measuring resistance	@ I_{pN} & $\pm 15V$ ($\pm 5\%$) & $70^{\circ}C$	Ω	100
Min. measuring resistance	@ I_{pN} & $\pm 12V$ ($\pm 5\%$) & $70^{\circ}C$	Ω	0
Turn number			1000
Secondary current at I_{pN}		mA	25
Rms accuracy at I_{pN}	-20 ... $+70^{\circ}C$, sinus 50Hz	%	$\leq \pm 0.5$
Offset current	@ $+25^{\circ}C$	mA	$\leq \pm 0.2$
Linearity		%	≤ 0.1
Thermal drift coefficient	-20 ... $+70^{\circ}C$	$\mu A/^{\circ}C$	7
Delay time		μs	≤ 0.1
di/dt correctly followed		A / μs	≤ 200
Bandwidth	-1dB	kHz	≤ 200
Max. no-load consumption current	@ $\pm 15V$ ($\pm 5\%$)	mA	≤ 20
Secondary resistance	@ $+70^{\circ}C$	Ω	≤ 63
Dielectric strength Primary/Secondary	50 Hz, 1 min	kV	3
Supply voltage	$\pm 5\%$	V dc	$\pm 12 \dots \pm 15$
Voltage drop		V	≤ 3
Mass (EL type)		kg	0.020
Mass (MP and EL...BB types)		kg	0.027
Operating temperature		$^{\circ}C$	-20 ... $+70$
Storage temperature		$^{\circ}C$	-25 ... $+85$

그림 2-가-63 ABB社의 EL25P1의 사양

㉕ 게이트 드라이버

1,200V/100A급의 SEMIKRON社의 SKM100GB12T4의 소자를 구동하기 위해서는 게이트 드라이버가 요구된다. 이를 위해 게이트 드라이버로써 동일 제조사(SEMIKRON社)의 SKHI 22B H4(R)을 선정하였다. 그림 2-가-64는 SEMIKRON社의 게이트 드라이버인 SKHI 22B H4(R)의 내부 구조를 나타낸다.

그림 2-가-64와 같이 SEMIKRON社의 게이트 드라이버는 input1과 input2에 2개의 PWM 신호를 받을 수 있으며, 2개의 PWM 신호는 5V(High)/0V(Low)의 레벨로 받을 수 있다. 또한 게이트 드라이버를 구동하기 위한 전압(V_s)은 15V가 된다.

반면 인가 된 5V(High)의 레벨을 갖는 PWM 신호는, 절연형 변압기를 통해 15V(High) 레벨을 갖는 PWM 신호로 변환되어 ‘게이트와 에미터 사이의 게이트 전압’으로 인가된다. 또한 변압기의 1차 측 0V(Low) 레벨을 갖는 PWM 신호는 15V를 입력으로 받는 절연형

DC/DC 컨버터를 통해 7V를 형성하며, 0V(Low) 레벨을 갖는 PWM 신호는 변압기의 2차 측에서 -7V(Low) 레벨을 갖는 PWM 신호로 변환되어 ‘게이트와 에미터 사이의 게이트 전압’으로 인가된다.

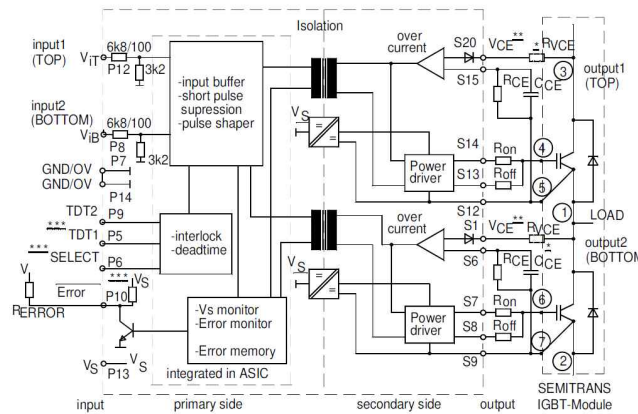


그림 2-가-64 SEMIKRON社의 SKHI 22B H4(R)의 내부 구조

결론적으로 그림 2-가-64과 같이 SEMIKRON社의 게이트 드라이버는 5V(High)/0V(Low)의 레벨을 갖는 2개의 PWM 신호를 절연시켜 15V(High)/-7V(Low)의 레벨을 갖는 2개의 PWM 신호로 변환하며, 1개의 게이트 드라이버에서 2개의 IGBT 소자를 구동할 수 있다.

3개의 2-in-1 IGBT 소자, 3개의 게이트 드라이버, 2개의 직류 커패시터, 2개의 밸런싱 저항, 3개의 전류 센서로 구성된 4.5kW급 축소형 2-Level 인버터의 시제품은 그림 2-가-65와 같다.

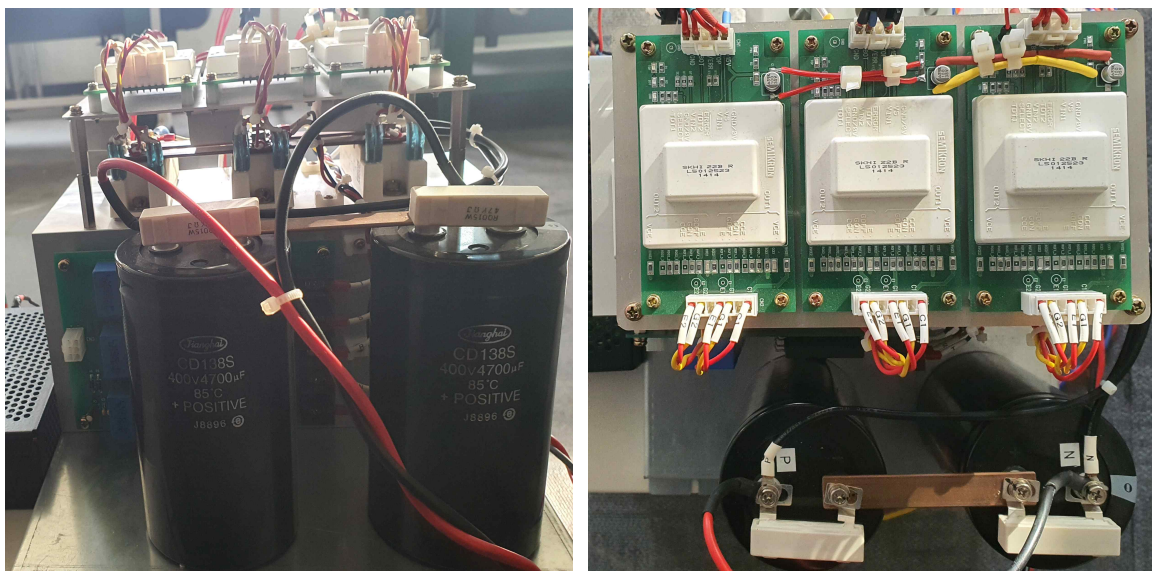


그림 2-가-65 4.5kW급 축소형 2-Level 인버터의 시제품(좌: 측면 사진, 우: 상측 사진)

② 제어보드 제작 및 검증

㉔ 축소형 DR-PMSM 구동용 MCU

그림 2-가-66의 TMS320F28335는 32bit CPU로 모터제어에 있어 유용하게 쓰일 수 있는 기능이 많이 탑재된 MCU이다. 탑재된 기능으로는 모터제어에 필요한 ADC, ePWM, QEP 채널이 장착되어있으며 SPI, SCI, CAN, I2C와 같이 여러 통신 기능까지도 포함하고 있다. 따라서 본 과제의 DR-PMSM 구동하기 위한 제어보드 구축에 필요한 MCU로 선정하고 설계 및 제작을 진행하였다.



그림 2-가-66 DR-PMSM 구동용 MCU - TI社 TMS320F28335

㉕ PWM 회로구현 및 검증

TMS320F28335에는 PWM채널이 기본 2채널과 예비 1채널, 총 3채널이 지원된다. 따라서 본 과제에 사용된 MCU에는 동시에 2대의 모터까지 충분히 제어가 가능하다. 주변회로로는 PWM 신호를 인버터의 스위치로 넘겨주기 위해 74HC244 버퍼를 이용한 주변회로를 설계하였다. 이를 통해 3.3V로 출력되는 MCU의 PWM신호를 인버터 스위치인 IGBT로 5.5V의 신호를 넘겨줄 수 있다.

DR-PMSM 구동용 제어보드의 PWM 검증위해 10kHz의 PWM 신호를 출력하였고 그림 2-가-69와 같이 오실로스코프를 이용하여 파형을 확인하였다. 그림 2-가-69의 출력파형은 그림 2-가-67의 PWM1A와 PWM1B채널의 출력을 나타낸 것으로 두 파형이 서로 상보적으로 작동하는 것을 확인할 수 있다. 또한 3상 통전이 필요한 벡터제어에서는 반드시 Dead Time을 주어 각 파형의 사이에 일정 간격으로 떨어져있도록 하여 스위치의 고장을 방지한다.

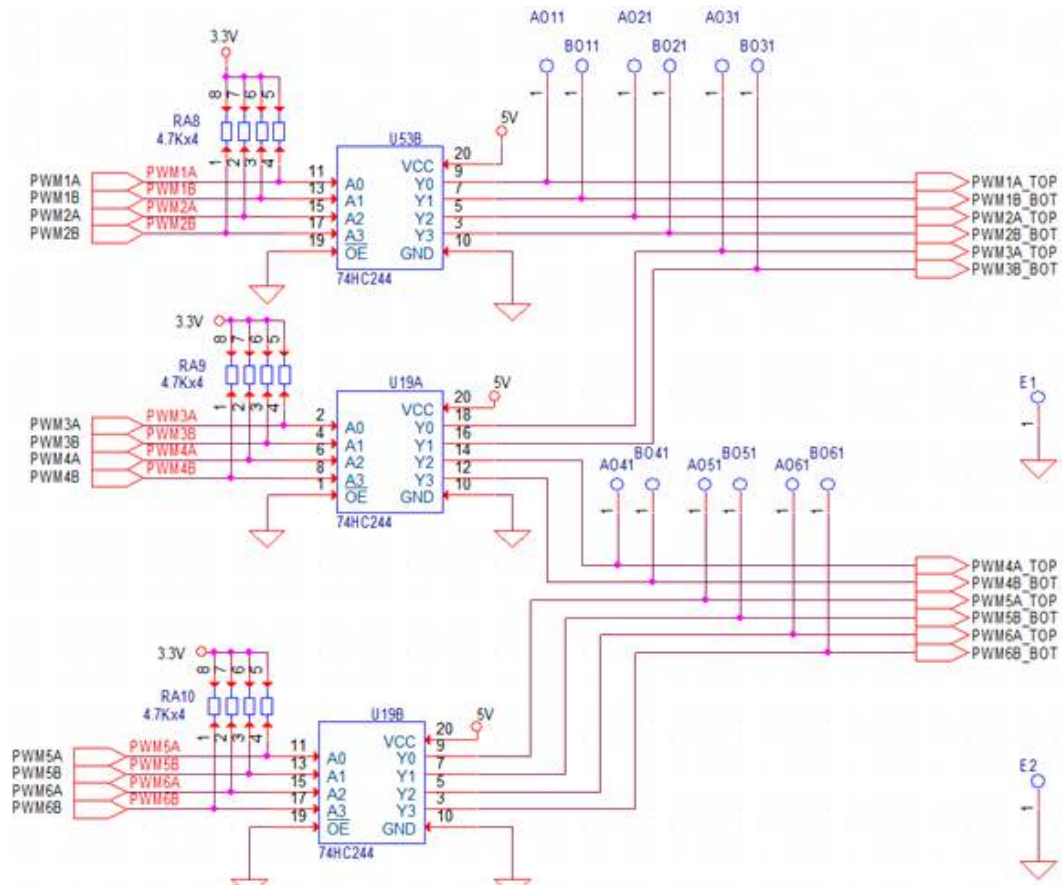


그림 2-가-67 74HC244를 이용한 PWM 주변회로 설계

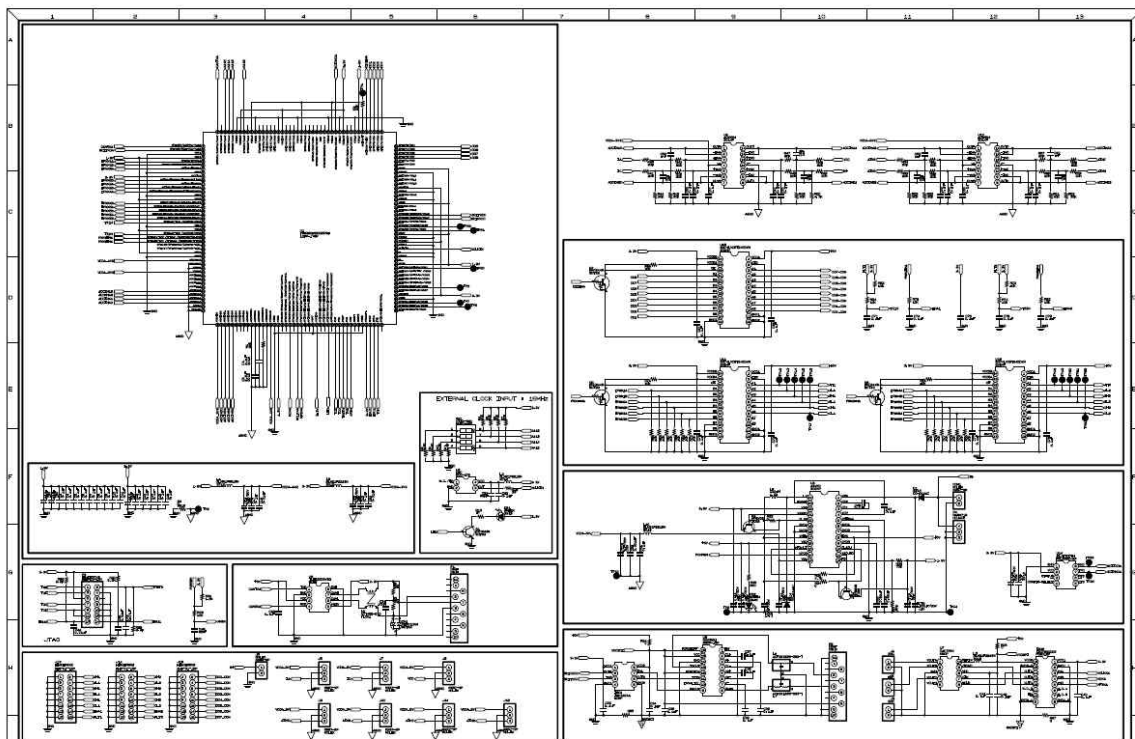


그림 2-가-68 MCU 및 PWM의 주변 회로도



그림 2-가-69 오실로스코프를 이용한 10kHz의 PWM 신호 출력파형 (DeadTime Gap : 1.3 usec)

㉔ 레졸버 회로 구현 및 검증

모터를 구동하는데 있어 위치정보를 습득하기 위해 사용되는 위치 센서로는 엔코더, 레졸버, 홀 센서 등이 있다. 그 중 레졸버는 진동, 충격 등 내환경성에 우수하고 사용온도범위가 넓은 소형 센서라는 장점을 가지고 있다. 그림 2-가-70과 같이 두 개의 고정자 권선이 배치되고 하나의 레졸버 회전자(여자 권선 혹은 자성체)로 구성되어 배치되어있다. 식 (2.30)과 같이 회전자에 일정한 정현파 교류전압($V_m \sin \omega t$)을 인가하거나 자성체의 경우 회전을 하면 자속의 변화로 인해 90°로 배치되어있는 고정자 코일에는 다음과 같이 회전자의 각도 θ 에 따라 변하는 전압이 얻어진다.

$$V_{rotor} = V_m \sin \omega t$$

$$V_{statorA} = V_m \sin \omega t \sin \theta$$

$$V_{statorB} = V_m \sin \omega t \sin(\theta + 90) = V_m \sin \omega t \cos \theta \quad (2.30)$$

$$\frac{V_{statorA}}{V_{statorB}} = \frac{V_m \sin \theta}{V_m \cos \theta} = \tan \theta$$



그림 2-가-70 레졸버 센서와 내부 구성

레졸버에서 발생하는 위치, 속도 정보를 판단하기 위해 그림 2-가-71과 같이 Analog Devices社의 AD2S1210-EP의 소자를 사용하였다.

그림 2-가-72와 같이 MCU로부터 레졸버 세팅에 필요한 정보를 AD2S1210-EP의 SDI(12번 핀)에 전달한다. 여기서 AD2S1210-EP에서 발생하는 반전 상태를 갖는 Peak-to-peak 3.6V의 2개의 교류 전압(/EXC, EXC)이 발생하며 2개의 교류 신호의 차이, 즉 Peak-to-peak 7.2V의 교류 전압이 레졸버에 인가된다. 인가 된 교류 여자 전압에 의해 90도의 위상차를 갖는 Cos 및 Sin 신호(COS/COSLO, SIN/SINLO)가 레졸버로부터 AD2S1210-EP로 들어오며 이는 위치 및 속도 정보로 변환하여 SDO(11번 핀)를 통해 MCU로 전달된다.

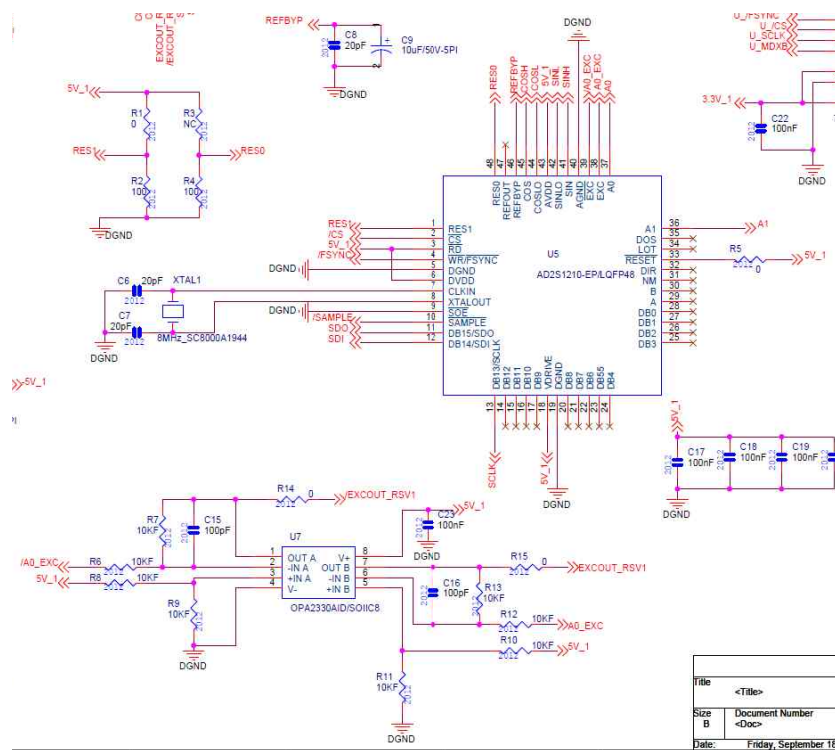


그림 2-가-71 AD2S1210-EP를 이용한 레졸버 주변회로 설계

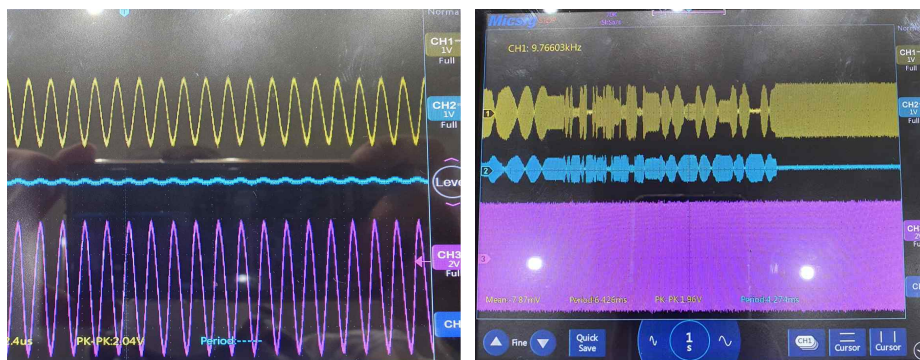


그림 2-가-72 오실로스코프를 이용한 레졸버 신호 출력파형

그림 2-가-72의 왼쪽 그림은 회전자가 정지한, 즉 레졸버의 일정 위치에서 오실로스코프를 이용한 레졸버 신호의 출력파형을 나타낸다. 보라색 파형은 AD2S1210-EP로부터 형성되어 레졸버에 인가되는 Peak-to-peak 7.2V의 여자 전압을 나타낸다. 또한 노란색 파형 및 하늘색 파형은 레졸버의 일정 위치에서의 Cos 및 Sin 신호를 나타낸다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이, 90도의 위상차를 갖는 것을 살펴볼 수 있다.

그림 2-가-72의 오른쪽 그림은 회전자를 이동시키는 상황에서 오실로스코프를 이용한 레졸버 신호의 출력파형을 나타낸다. 보라색 파형은 AD2S1210-EP로부터 형성되어 레졸버에 인가되는 Peak-to-peak 7.2V의 여자 전압을 나타낸다. 또한 노란색 파형 및 하늘색 파형은 회전자가 이동하는 상황에서의 Cos 및 Sin 신호를 나타낸다. 그림에서 살펴볼 수 있듯이, 2신호의 Envelope 성분은 90도의 위상차를 갖는 것을 살펴볼 수 있다.

㉠ ADC 회로 구현 및 검증

TMS320F28335에서 지원되는 ADC(Analog-to-Digital Converter)기능은 센서와 같은 외부에서 출력되는 전압신호를 입력으로 받아들이는 역할을 한다. 기본적으로 16개의 채널로 구성되어있고 각각 0~3V 전압신호를 12bit로 변환하여 0~4095까지의 디지털 신호로 변환시켜 값을 입력받는다. 본 과제의 DR-PMSM의 전류제어 구동에 있어 3상 전류를 측정하기 위한 전류 센서는 반드시 필요하다. 그림 2-가-73은 전류 센서에서 출력되는 전압신호를 MCU에 입력레벨인 0~3V로 변환하여 MCU의 ADC입력으로 활용하기 위하여 설계된 ADC 주변회로이다.

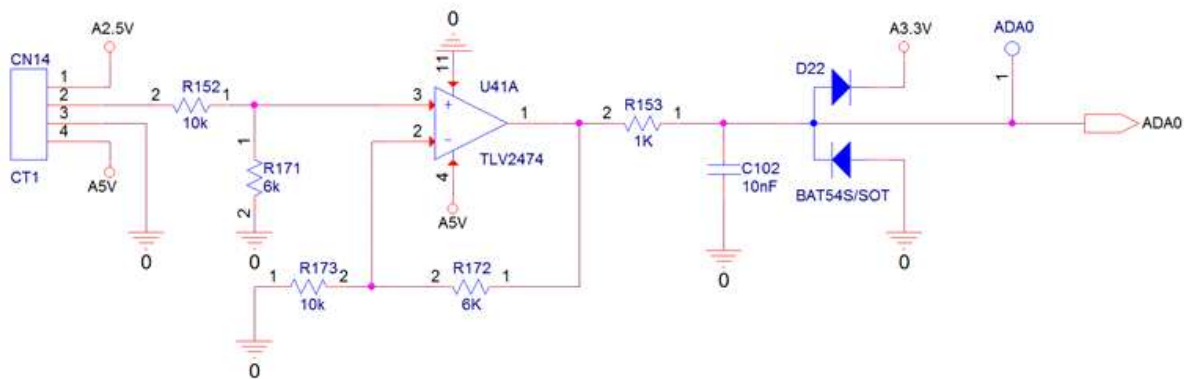


그림 2-가-73 전류센서를 사용하기 위한 ADC 주변회로 설계

ADC 기능 확인을 위해 전류 센서를 통해 입력받은 전류 데이터를 DAC (Digital-to-Analog Converter) 기능을 활용하여 다시 전압값으로 출력하는 방식을 사용하였다. 전류센서를 통해 입력받은 전류데이터와 실제 전류프로브로 측정한 전류값의 위상과 크기가 같은지를 확인하는 방식으로 DR-PMSM의 ADC기능을 확인 및 검증하였다.

그림 2-가-74는 RL부하에 임의로 전류를 인가하고 전류센서값(DAC)과 실제 측정 값(전류 프로브)를 비교한 파형이다. 이 검증 실험을 통해 실제 전류프로브를 통해 측정한 값과 MCU에 입력되는 전류 센서의 신호가 일치함을 확인하였다.

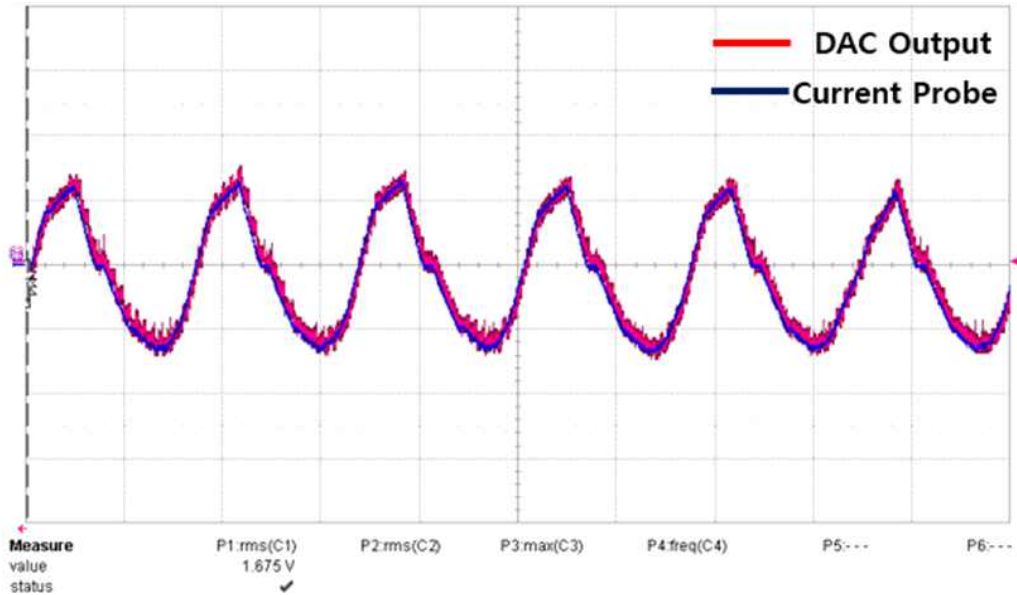


그림 2-가-74 DAC 및 전류프로브를 이용한 제어보드 ADC 검증 실험

그림 2-가-75는 앞에서 설명한 MCU, PWM, ADC, 레졸버 회로를 이용하여 제작된 제어보드의 시제품을 나타낸다. 다음 그림과 같이 총 4개의 단으로 구성되어 있으며, 젤 아래층의 경우 MCU 및 PWM 기능을 포함한 PCB를 나타낸다. 또한 아래로부터 2번째 층은 전류제어를 위한 ADC 기능을 포함한 PCB를 나타내며, 아래로부터 3번째 층은 속도 및 위치를 파악하기 위한 레졸버 기능을 포함한 PCB를 나타낸다. 최상단 층의 경우 MCU, PWM, 레졸버 기능을 위해 사용되는 IC에 전원을 공급하기 위한 전원단을 나타낸다.



그림 2-가-75 제어보드의 시제품

(7) 4.5kW급 DR-PMSM의 간이부하장치 활용 성능 평가

(가) 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가 관련 현황

① 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가 관련 국내 규격

현재 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가와 관련된 국내 규격은 IEC 국제규격을 번역하여 기술적 내용 및 규격서의 서식을 변경하지 않고 작성한 한국산업규격이다. 먼저 전기 견인 철도차량용 및 도로차량용 회전기기와 관련하여 컨버터 구동형 교류전동기 이외 기기의 개별 요구사항(KSC-IEC 60349-1)과 컨버터 구동형 교류전동기의 개별 요구사항(KSC-IEC 60349-2) 관련 규격이 있다. 또한 철도용 전기설비와 관련하여 철도용 전력변환장치 특성 및 시험방법(KSC-IEC 61287-1)과 전기 견인용 인버터 구동 교류전동기 및 제어장치의 조합시험 방법(KSC-IEC 61377) 규격이 있다. 마지막으로 철도용 전기설비의 복합시험과 관련하여 초퍼 구동형 직류 견인전동기 및 제어기(KSC-IEC 61377-2)와 전기견인용 간접 변환기 구동 교류전동기 및 제어장치의 조합시험 방법(KSC-IEC 61377-3) 규격이 있다. 철도차량용 추진장치의 성능 시험평가 관련 규격 및 주요내용을 표 2-가-100에 정리하였다.

표 2-가-100 철도차량용 추진장치의 성능시험평가 관련 규격

규격	주요 내용	관련 국제 규격
KSC-IEC 60349-1 : 전기 견인 철도 차량용 및 도로 차량용 회전기기-제1부: 컨버터 구동형 교류전동기 이외 기기의 개별 요구 사항	- 전기적으로 추진되는 철도차량 및 도로차량에 사용되는 회전기 가운데 전력변환장치로 구동되는 교류 전동기를 제외한 기기에 적용 - 견인전동기, 엔진 구동 주발전기, 주 전동발전기, 보조전동기, 보조발전기, 보조전동발전기 등을 포함	IEC 60349-1
KSC-IEC 60349-2 : 전기 견인 철도 차량용 및 도로 차량용 회전기기-제1부: 컨버터 구동형 교류전동기의 개별 요구 사항	- 전기적으로 추진되는 철도차량 및 도로차량에 사용되는 컨버터 구동형 교류 전동기에 적용 - 전기적 입력은 전력변환장치에 의해 이루어지는 전동기에 적용	IEC 60349-2
KSC-IEC 61287-1 : 철도용 전기설비-철도용 전력변환장치-제1부 : 특성 및 시험방법	- 철도차량에 장착하는 전력전자 변환장치에 적용 - 모든 종류의 변환기 및 견인용 변환기와 보조 변환기에 대한 특별 규정도 제공 - 교류전차선, 직류전차선, 자동급전을 고려하고 있으며, 트롤리 버스와 같은 기타 견인차량에도 적용 가능	IEC 61287-1
KSC-IEC 61377 : 철도용 전기설비-전기 견인용 인버터 구동 교류전동기 및 제어장치의 조합 시험 방법	- 전동기, 인버터 및 이들의 제어장치의 조합에 적용 - 전압원/전류원 인버터로 구동되는 동기/비동기전동기 조합에 적용 - 인버터, 교류전동기 및 관련 제어시스템을 구성하는 전기구동장치의 성능특성 확인에 적용	IEC 61377

• KSC-IEC 61377-2 : 철도용 전기설비의 복합시험-제2부 : 초퍼 구동형 직류 견인전동기 및 제어기	▪ 전동기, 초퍼 및 제어기로 이루어진 복합 시스템에 적용 ▪ 초퍼 컨버터에 의해 구동되는 연속직류전동기/개별 여자된 직류전동기 조합에 적용되며 이와 관련된 제어시스템으로 이루어진 전기구동장치의 성능특성 확인에 적용	IEC 61377-2
• KSC-IEC 61377-3 : 철도용 전기설비의 복합시험-제3부 : 전기견인용 간접 변환기 구동 교류전동기 및 제어장치의 조합 시험 방법	▪ 전동기, 인버터 및 이들의 제어장치의 조합에 적용 ▪ 간접 변환기, 교류전동기 및 관련 제어시스템을 구성하는 전기구동장치의 성능특성 확인에 적용 ▪ KS C IEC 61377에서 추가적으로 공급전압의 급격한 변화/부하의 급격한 변화시 특성시험 및 간섭시험, 고장조건 등이 포함됨	IEC 61377-3

② 철도차량용 DR-PMSM 추진시스템의 성능시험평가 항목 도출

일반적으로 전기철도차량의 추진장치는 차량의 운행에 필요한 전력 및 동력을 공급하기 위한 컨버터/인버터를 포함한 전력변환장치와 차륜에 회전력을 전달하는 견인전동기로 구성된다. 따라서 철도차량용 DR-PMSM 추진시스템의 성능시험평가도 일반 철도차량용 추진시스템과 동일하게 추진제어용 인버터와 견인전동기 각각의 단품 성능시험과 추진제어용 인버터와 견인전동기를 조합 구성한 성능시험으로 구분할 수 있다. 표 2-가-101은 철도차량용 DR-PMSM 추진장치의 단품 성능시험 항목을 보여준다. 철도차량용 DR-PMSM의 단품 성능시험은 정현파 전원 및 인버터에 의한 스위칭 전원을 사용한다. 표 2-가-102는 철도차량용 DR-PMSM 추진시스템의 조합 성능시험 항목을 보여준다. 철도차량용 DR-PMSM 추진시스템의 조합 성능시험은 차량에 설치되는 DR-PMSM, 인버터, 주간제어기, 필터 리액터 등 관련 기기를 조합하여 시험하며, 실제 가선전원 조건 및 실제 차량에 설치되었을 경우(1C1M)와 거의 동등한 조건에서 시험평가를 수행한다.

표 2-가-101 철도차량용 DR-PMSM 추진장치의 단품 성능시험 구분

구성품	시험항목	형식시험	전수시험
철도차량용 DR-PMSM 추진제어용 인버터	외관구조 및 측정검사	⊙	⊙
	냉각시험	⊙	
	보호검출 기능 시험	⊙	⊙
	제어 기능 시험	⊙	⊙
	경부하 시험	⊙	⊙
	소음 / 온도 시험	⊙	
	효율 측정 시험	⊙	
	공급 과전압 / 과도 에너지 시험	⊙	
	절연저항 및 내전압 시험	⊙	⊙
	부분 방전 시험	⊙	
	안전 요구 시험	⊙	
	진동 / 노이즈 시험	⊙	
철도차량용 DR-PMSM	외관구조 및 측정검사	⊙	⊙
	온도 상승 시험	⊙	
	특성 시험	⊙	⊙
	과속 시험	⊙	⊙

	소음 시험	⊙	
	절연저항 및 내전압 시험	⊙	⊙
	진동 시험	⊙	⊙

표 2-가-102 철도차량용 DR-PMSM 추진시스템 조합 성능시험 구분

시험항목	형식시험
온도상승 시험	⊙
특성 시험 •토크시험 •DR-PMSM 발열상태의 토크 특성시험 •DR-PMSM 냉각상태의 토크 특성시험 •전 토크영역에서의 속도시험 •효율 특성시험	⊙
보호시스템 시험 •제어장치 전원시험 •인버터 입력전압 변동시험 •정전 시험 •회생부하 시험	⊙
환경 시험	⊙
유도장애 시험	⊙
신뢰성 시험	⊙

(나) 45kW급 DR-PMSM의 부하장치 활용 성능평가 방안도출

45kW급 DR-PMSM의 부하 장치를 활용하여 축소형 DR-PMSM와 Drive의 조합 성능시험 방법은 다음과 같이 구성하여 성능평가 방안을 도출하였으며, 평가 방안은 그림 2-가-76에 도시하였다.

- 간이 부하장치(M-G set)의 동작 테스트
- 간이 부하장치(M-G set)를 활용한 무부하 시험
- 간이 부하장치(M-G set)를 활용한 부하 시험

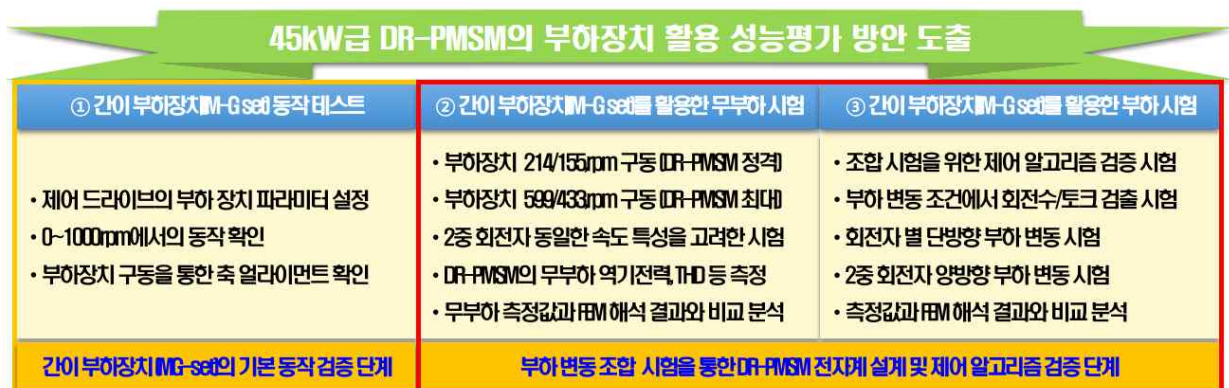


그림 2-가-76 45kW급 DR-PMSM의 부하장치 활용 성능평가 방안

① 간이 부하장치(M-G set) 동작 테스트

- ㉠ 제어 드라이브를 통한 부하장치 파라미터 설정 및 부하 속도별(0~1000rpm) 동작 확인
- ㉡ 부하용 모터(2대), 토크 센서(2대), 축소형 DR-PMSM(1대) 시작품, 커플링 등 테스트 베드 상부에 결합 후 속도별 부하용 모터 구동을 통한 축 정렬 상태 확인

② 간이 부하장치(M-G set)를 활용한 무부하 시험

- ㉠ 영구자석 및 폴피스 회전자 속도는 기어비에 의한 속도 차이에 의해 회전하므로, 부하 시 속도 기준으로 부하용 모터를 통한 영구자석 회전자 및 폴피스 회전자 정격속도 214rpm/155rpm, 최대속도 599rpm/433rpm에서 구동하고, 계측 장비를 통한 선간 또는 상 역기전력 측정(주파수 및 실효값 확인)
- ㉡ 2중 회전자의 동일한 속도 특성을 가정하여 200rpm/400rpm/600rpm에서 구동하고, 정격속도 및 최대속도에서의 동일한 측정 수행
- ㉢ 무부하 시험을 통한 역기전력 실효값 및 주파수, 전고조파 왜율(THD) 등의 측정값과 FEM 해석 결과와의 비교 분석

③ 간이 부하장치(M-G set)를 활용한 부하 시험

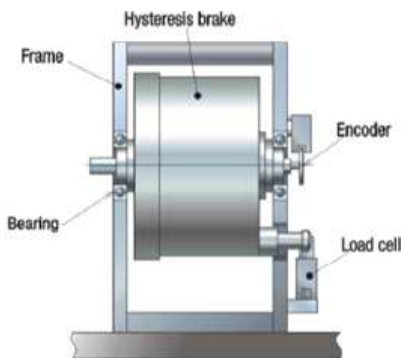
- ㉠ 축소형 DR-PMSM 및 구동용 Drive의 조합 성능 평가 수행을 위한 제어 알고리즘 검증 시험
- ㉡ 부하장치를 통한 정격 및 부하 변동 조건에서 영구자석/폴피스 회전자 측의 회전수 및 토크 검출 시험
- ㉢ 영구자석 회전자 측 단방향 부하 변동 시험 및 폴피스 회전자 측 단방향 부하 변동 시험
- ㉣ 영구자석/폴피스 회전자 양방향 부하 변동 시험
- ㉤ 속도에 따른 부하 변동 시험(경부하, 중부하, 정격부하) 시 역기전력, 전고조파 왜율(THD), 토크 특성 등 측정값과 FEM 해석 결과와의 비교 분석

(다) 4.5kW급 DR-PMSM 및 구동 Drive의 조합 성능평가를 위한 간이부하장치(M-G set) 설계 및 제작

본 과제의 DR-PMSM의 출력 및 부하 특성 실험을 위해서는 다이نام 시스템이 필요하다. 그림 2-가-77은 전체 다이نام 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 그림 2-가-78은 일반적인 모터 부하시험을 하기 위해 사용되는 다이نام의 시스템을 나타낸다. 다이نام 시스템은 크게 부하의 종류에 따라 그림 2-가-78의 (a)와 같은 파우더 브레이크를 이용한 시스템과 (b)와 같은 서보모터를 이용한 시스템이 있다.



그림 2-가-77 일반적인 다이남 시스템 장비 구성



(a) Brake type Dynamometer



(b) Servo motor type Dynamometer

그림 2-가-78 모터 다이남 시스템의 종류

일반적인 모터의 경우 고정자에 인가하는 회전자계로 인해 회전자가 동기되어 모터의 축을 통해 출력을 발생시킨다. 따라서 그림 2-가-78과 같은 다이남 시스템에 회전자의 축에 부하를 연결하여 출력 특성을 확인할 수 있다. 하지만 본 과제의 DR-PMSM은 일반적인 모터와 다르게 2중 회전자 구조의 동기모터로서 그림 2-가-79와 같이 외측에 회전자 축과 내측 회전자 축이 모터 양단에 배치된 구조로 존재한다. 또한 고정자에서 주입하는 회전자계에 따라서 두 회전자의 출력특성이 다르게 나타나기 때문에 모터 부하시험에 필요한 다이남도 일반적인 다이남이 아닌 모터에 맞는 다이남이 반드시 필요하다.



그림 2-가-79 DR-PMSM의 회전자 구조

따라서 그림 2-가-79과 같은 모터의 부하특성을 확인하기 위해서는 일반적인 다이نام로를 사용해서는 출력특성 검증을 충족할 수 없다. 이를 해결하기 위해서는 양방향 부하를 인가해줄 수 있는 2중 회전자 구조 동기전동기 부하장치인 M-G set을 설계 및 제작하였다.

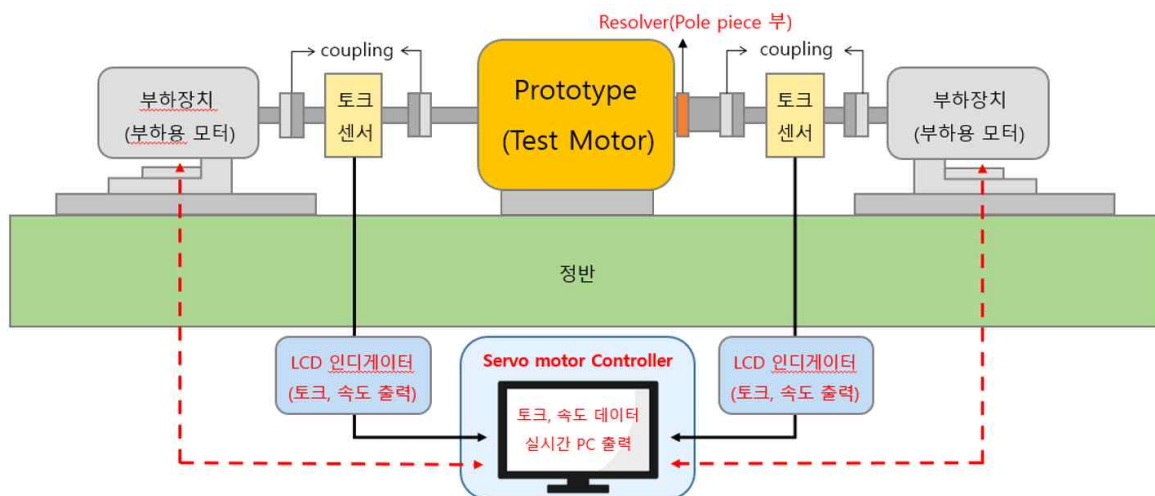


그림 2-가-80 DR-PMSM 부하시험을 위한 M-G set 구조

그림 2-가-80은 DR-PMSM의 부하특성 실험을 하기 위한 M-G set의 구성도이다. 다이نام로는 서보모터 타입을 활용하고, 두 개의 회전자 축에 연결할 커플링과 각각의 토크센서를 연결하는 방식으로 구성하였다. 또한 서보모터와 모터 사이의 부하를 측정하기 위해 반드시 서보모터의 정밀한 제어가 필요하므로 두개의 서보모터에 서보모터 전용 드라이버를 각각 연결하도록 구성하였다.

그림 2-가-80의 구성도를 바탕으로 실제 제작된 모터, 서보모터, 커플링, 토크센서 등의 구성품들의 치수 및 높이를 고려하여 M-G set 설계를 진행하여 그림 2-가-81과 그림 2-가-82와 같이 배치될 수 있도록 다이نام로 시스템을 설계 제작하였다.

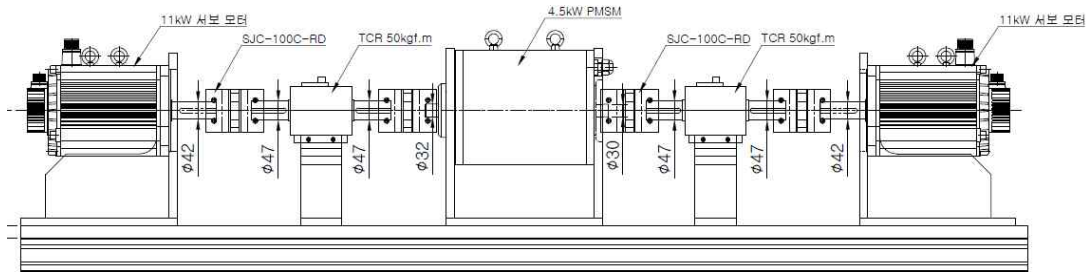


그림 2-가-81 실측 치수를 고려한 M-G set 설계도



그림 2-가-82 실측 치수를 고려하여 제작된 M-G set

부하용 서보모터는 Higen社의 범용 제품을 적용하였다. 본 연구에서 요구하는 부하 모터의 경우, 저속(200 rpm급)에서 고토크(200Nm)를 필요로 하는데, 일반적인 범용 제품의 경우 10kW급 이하의 용량이 작은 모터에서는 요구 사양을 만족하는 제품이 없었으며, 이를 위해 별도의 주문 제작이 필요한 상황이었다. 과제 내에서 시험장치 제작 비용의 한계와 시간 제약의 문제로 인해 저속에서 가능한 한 가장 큰 토크를 발생시킬 수 있는 모델(FMATN110AB00)을 적용하였다. 부하용 서보모터의 사양은 그림 2-가-82에서 보는 바와 같이, 연속 최대 용량 11kW, 연속 최대 속도/토크 1500rpm/70Nm 급이다. 부하용 서보모터의 토크 사양으로 인하여, DR-PMSM 성능시험은 정격속도 214 rpm에서 정격토크 200Nm까지 시험을 진행할 수 없으며, 부하 모터의 연속 최대 토크 용량인 70Nm까지 부하를 낮추어서 시험을 진행해야 하며, 성능시험에 이를 반영하여 경부하 성능시험으로 진행하였다.

부하용 서보모터의 구동을 위한 서보모터 드라이브는 11kW급 인버터(Higen社 FDA-7000)로 설치하였고, 최대 3000rpm까지 정밀한 속도제어가 가능하도록 설계되었다. M-G set의 경우 양측에 서보모터가 배치되어있기 때문에 각각의 특성을 확인하기 위해 2개의 서보 드라이브가 필요하다. 그림 2-가-83은 11kW급 서보모터 전용 드라이브 2개를 서보모터 컨트롤 박스에 배치 및 결선하여 M-G set 구동부를 제작하였다. 따라서 그림 2-가-83과 2-가-84는 DR-PMSM을 포함한 M-G set과 컨트롤 박스의 실제 제작 모델을 나타내고 있고 이를 통해서 본 과제의 DR-PMSM의 모터 부하 특성실험을 진행할 수 있다.



그림 2-가-83 M-G set 구동을 위한 2개의 서보모터 드라이브 및 인버터



그림 2-가-84 서보모터 드라이브를 포함한 M-G set



그림 2-가-85 서보모터 드라이브를 포함한 최종 M-G set

(라) 간이부하장치 적용 시제품의 성능시험 및 전자기적 특성 평가

본 절에서는 간이부하장치(M-G set)를 적용하여 DR-PMSM 시제품의 성능시험을 구성하고, 무부하 및 부하 시 성능시험을 수행하여 4.5kW급 DR-PMSM의 전자기적 특성에 대한 해석적 데이터와 실험적 데이터의 검증 연구를 진행하였다. 해당 시험에서 무부하란 인버터를 구동하지 않은 상태에서 서보모터(부하모터)를 구동하여 정격, 최대 및 외측 회전자인 폴피스와 내측 회전자인 영구자석 회전자의 속도를 동일하게 설정하여 측정한 시험이다. 그림 2-가-86은 간이부하장치(MG-set) 적용 4.5kW급 DR-PMSM 성능시험을 위한 구성도이다. DR-PMSM은 영구자석 회전자와 폴피스 회전자의 2개의 축으로 기계적 출력 특성을 가지므로, 구성된 부하용 모터를 통한 출력 토크를 측정할 수 있다. 그리고 성능시험을 위한 전원 단으로 슬라이드와 DC Power Supply를 구성하여 DR-PMSM 제어기, 인버터 등에 전원을 공급하고, 전자기적 특성을 계측하기 위한 오실로스코프를 구성하였다. 성능시험은 무부하 시험, 부하 시험을 하였으며, 온도 조건은 상온 20℃에서 시험을 진행하여야 하나, 계절적 요인과 시험 환경의 난방 한계 요인으로 상온 10℃ 이하 조건에서 진행하였다.

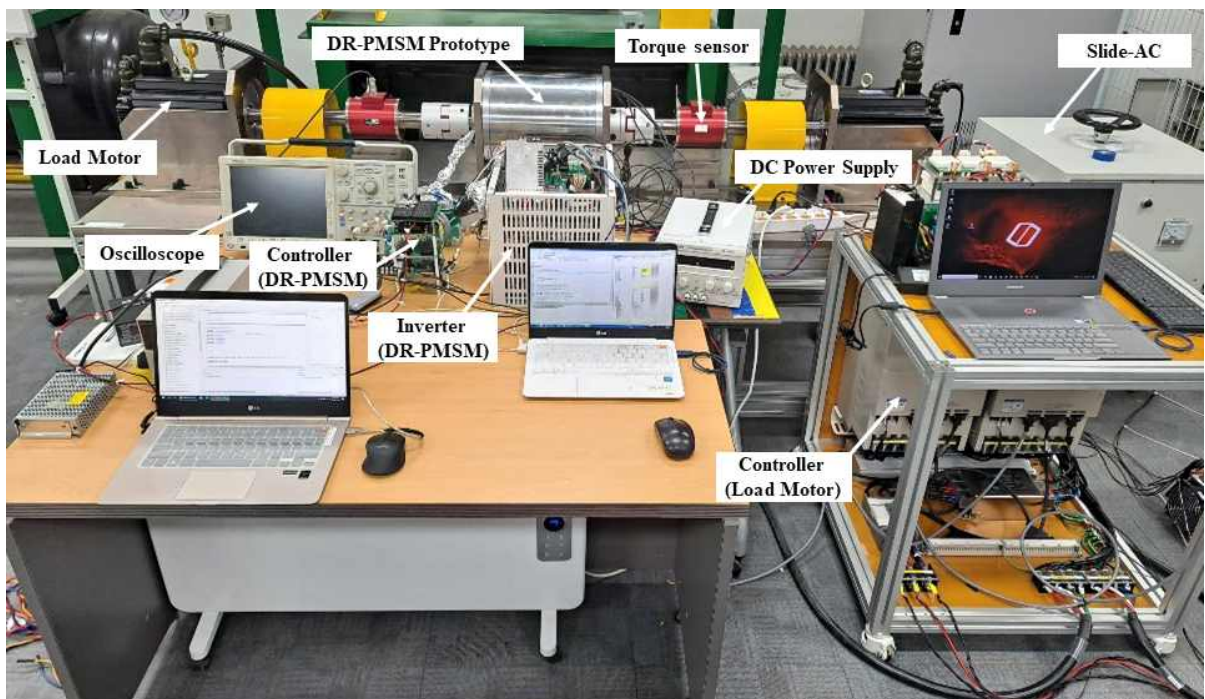


그림 2-가-86 간이부하장치 적용 4.5kW DR-PMSM의 성능시험 구성도

① 무부하 시험

㉔ 정격속도(폴피스-영구자석 회전자 다른 속도 조건)

정격속도에서 무부하 시험을 수행하였으며, DR-PMSM의 정격속도는 폴피스 회전자 속도 214rpm, 영구자석 회전자 속도 155rpm 기준에 따라 폴피스와 영구자석 회전자 속도에 맞게 부하용 전동기를 각각 구동하여 DR-PMSM 시작품 2개의 축을 동시에 회전시켰다. 이러한 시험방법은 부하 시 기어비에 의한 각 회전자의 속도 차이에 의한 설정과 외부에서 회전자를 회전시켜 주면 발전기 모드로, 영구자석에 의하여 고정자 코일에 자속이 쇄교되며, 쇄교된 자속에 의해 역기전력이 발생하므로 DR-PMSM의 설계된 전자계 해석 결과와 비교하여 성능을 확인할 수 있다. 이때 고정자 3상 코일의 역기전력 파형을 오실로스코프를 활용하여 측정하였으며, 상 역기전력 실효값 A상 기준 $50.8V_{rms}$, 주파수 22.75Hz의 결과를 얻었고, 측정된 파형은 그림 2-가-87 (좌)과 같다.

그림 2-가-87의 우측 그림은 무부하 시 FEM의 전자계 해석과 성능시험의 3상 역기전력 파형을 비교한 그림이다. FEM을 통한 전자계 해석은 성능시험의 온도 조건과 동일한 상온 20℃ 기준, 1주기에 따른 스텝을 전기각 4° 씩 분할하여 해석을 수행하였다. 그림 2-가-88은 무부하 시 전자계 해석과 성능시험의 A상 역기전력에 대한 FFT 분석 결과이다. FFT 분석 조건은 전자계 해석 결과와 성능시험 결과를 통하여 두 결과 모두 A상 역기전력을 전기적으로 2048개로 분할하여 샘플링하고, Excel 프로그램을 통하여 FFT 분석(샘플링 수 2n 펄수 조건)을 수행하였다. FFT 분석 결과는 A상 역기전력 기본파 기준 전자계 해석과 성능시험 $72.3V_{peak}$, $68.6V_{peak}$ 의 결과를 얻었으며, 전고조파 왜율(THD)은 전자계 해석 6.5%, 성능시험 4.1%의 결과로 모두 10% 이내이며, 모터 성능에 영향이 크지 않는 수준으로 판단하였다. 표 2-가-103은 정격속도에서 최종적인 전자계 해석과 성능시험의 비교 분석 결과표이다. 역기전력 실효값, 역기전력 기본파, 주파수의 오차율은 최소 0.4%, 최대 5.1%의 결과를 얻었다.

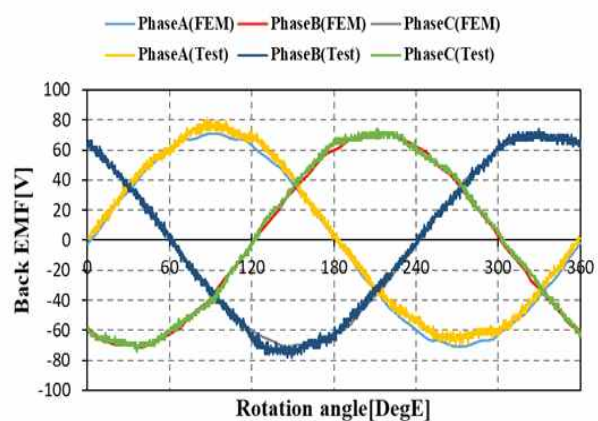
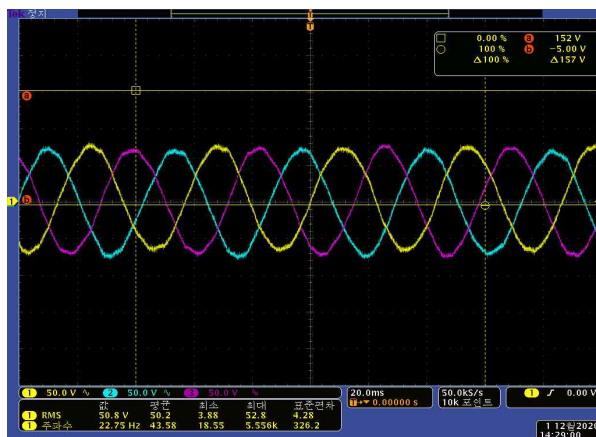


그림 2-가-87 (좌)부하용 모터를 통한 정격속도에서의 3상 무부하 역기전력 측정 파형 및
(우)무부하 시 전자계 해석과 성능시험의 3상 역기전력 파형 비교
(@ 정격속도 폴피스 214rpm/영구자석 155rpm)

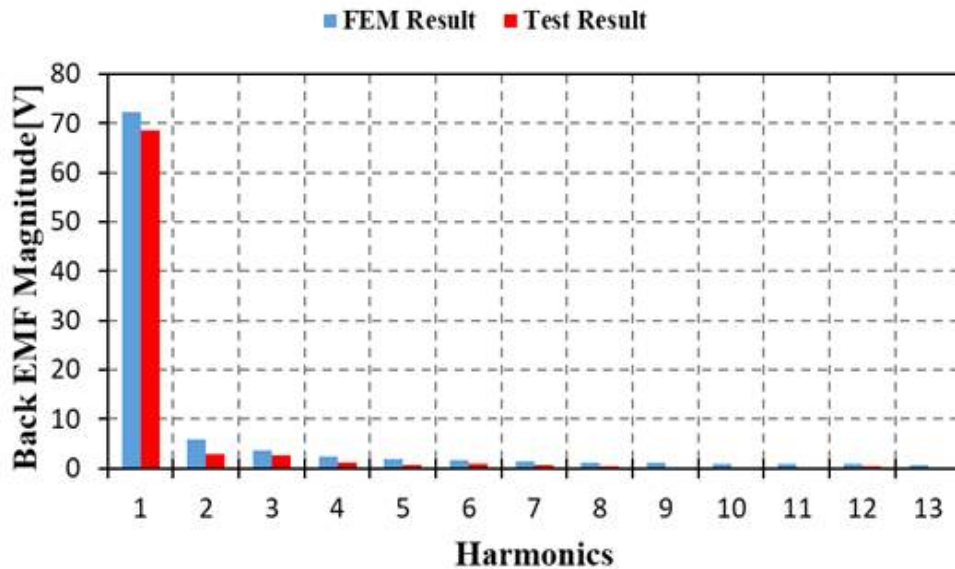


그림 2-가-88 무부하 시 전자계 해석과 성능시험의 A상 역기전력 FFT 분석
(@ 정격속도 폴피스 214rpm/영구자석 155rpm)

표 2-가-103 정격속도에서 전자계 해석과 성능시험의 비교 분석 결과

구분	Maxwell 설계 해석 값	성능시험 결과	오차율 [%]
역기전력 실효값 [V_{rms}]	50.0	50.2	0.4
역기전력 기본파 [V_{peak}]	72.3	68.6	5.1
주파수 [Hz]	23.18	22.75	1.9

㉔ 최대속도(폴피스-영구자석 회전자 다른 속도 조건)

최대속도에서 정격속도와 동일한 방법으로 무부하 시험을 수행하였으며, DR-PMSM의 최대속도는 폴피스 회전자 속도 599rpm, 영구자석 회전자 속도 433rpm 기준에 따라 폴피스와 영구자석 회전자 속도에 맞게 부하용 전동기를 각각 구동하여 DR-PMSM 시작품 2개의 축을 동시에 회전시켰다. 이 때 고정자 3상 코일의 역기전력 파형을 오실로스코프를 활용하여 측정하였으며, 상 역기전력 실효값 A상 기준 $145.0V_{rms}$, 주파수 65.03Hz의 결과를 얻었고, 측정된 파형은 그림 2-가-89 (좌)와 같다.

그림 2-가-89 우측 그림은 무부하 시 FEM의 전자계 해석과 성능시험의 3상 역기전력 파형을 비교한 그림이다. FEM을 통한 전자계 해석은 성능시험의 온도 조건과 동일한 상온 20℃ 기준, 1주기에 따른 스텝을 전기각 4° 씩 분할하여 해석을 수행하였다.

그림 2-가-90은 무부하 시 전자계 해석과 성능시험의 A상 역기전력에 대한 FFT 분석 결과이다. FFT 분석 조건은 두 결과 모두 A상 역기전력을 전기적으로 4,096개로 분할하여 샘플링 하였으며, 정격속도의 조건과 동일한 방법으로 Excel 프로그램을 통하여 분석하였다. FFT 분석 결과는 A상 역기전력 기본파 기준 전자계 해석과 성능시험 $190.8V_{peak}$, $194.9V_{peak}$ 의 결과를 얻었으며, 전고조파 왜율(THD)은 전자계 해석 6.4%, 성능시험 7.5%의 결과로 모

두 10% 이내이며, 모터 성능에 영향이 크지 않는 수준으로 판단하였다. 표 2-가-104는 최대속도에서 최종적인 전자계 해석과 성능시험의 비교 분석 결과표이다. 역기전력 실효값, 역기전력 기본파, 주파수의 오차율은 최소 0.2%, 최대 3.4%의 결과를 얻었다.

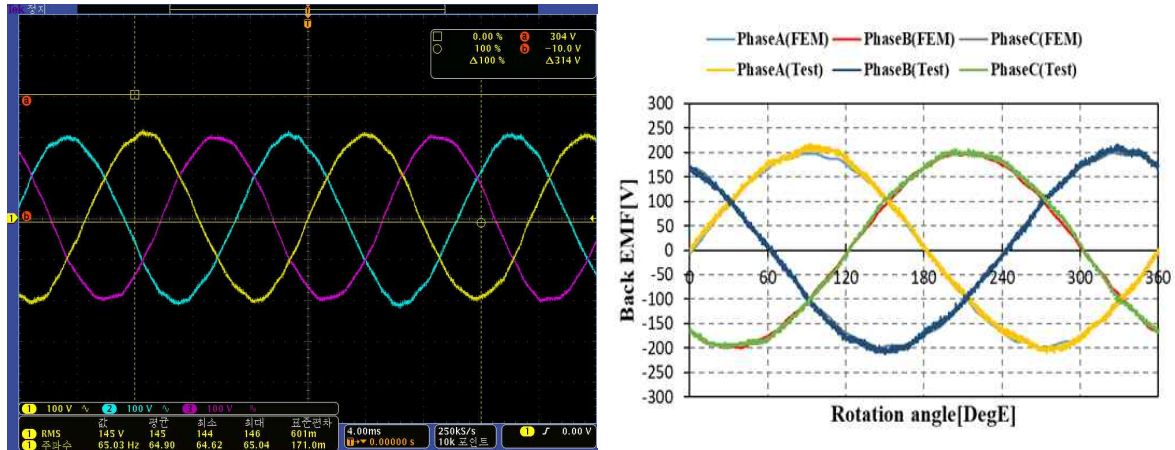


그림 2-가-89 (좌)부하용 모터를 통한 최대속도에서의 3상 역기전력 측정 파형 및 (우)무부하 시 전자계 해석과 성능시험의 3상 역기전력 파형 비교 (@ 최대속도 폴피스 599rpm/영구자석 433rpm)

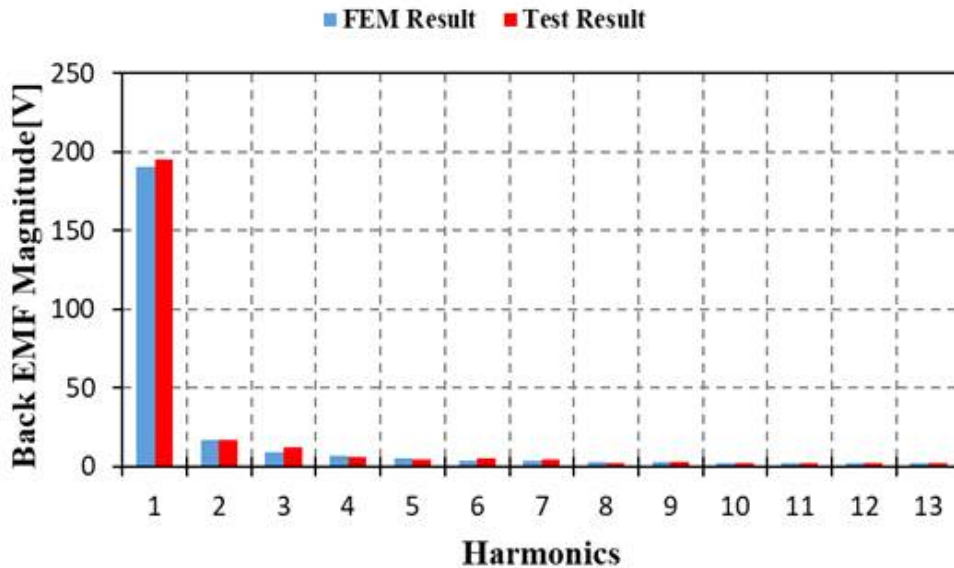


그림 2-가-90 무부하 시 전자계 해석과 성능시험의 A상 역기전력 FFT 분석 (@ 최대속도 폴피스 599rpm/영구자석 433rpm)

표 2-가-104 최대속도에서 전자계 해석과 성능시험의 비교 분석 결과

구분	Maxwell 설계 해석 값	성능시험 결과	오차율 [%]
역기전력 실효값 [V_{rms}]	140.0	145.0	3.4
역기전력 기본파 [V_{peak}]	190.8	194.9	2.1
주파수 [Hz]	64.89	65.03	0.2

㉔ 폴피스 / 영구자석 회전자 동일 속도 조건

DR-PMSM의 정격속도와 최대속도는 기어비에 의해 폴피스 회전자와 영구자석 회전자의 회전속도는 다르다. 따라서 앞에서는 정격속도 및 최대속도에서의 부하 시 속도차이를 적용하여 무부하 시로 가정하였고, 부하용 모터를 이용하여 무부하 구동 시 3상 역기전력 측정을 하였다. 여기서 시험 환경은 정격속도 및 최대속도 시와 동일한 기준으로 설정하였으며, 또 다른 특성으로 폴피스 회전자와 영구자석 회전자의 속도가 같을 때를 가정하여 실험을 진행하였다. 2중 회전자 모두 동일한 속도이며, 부하용 모터를 구동하여 200rpm, 400rpm, 600rpm를 설정하고, 각 속도마다 3상 역기전력을 측정하였다. 측정 후 FEM을 통한 전자계 해석 결과와 비교 분석하였으며, 여기에서는 역기전력 실효값 및 주파수만 비교 분석하였다.

그림 2-가-91의 좌측 그림은 부하용 모터를 통한 2중 회전자의 동일한 속도 200rpm 시 3상 역기전력 측정 파형이며, A상 역기전력 실효값 30.2V_{rms}, 주파수는 13.42Hz로 고정자 8극을 기준으로 역산했을 때 약 201rpm이 계산된다. 이 때 FEM 해석 결과와의 비교는 우측 그림과 같으며, 실험에 의한 측정 파형과 거의 일치한 것을 확인할 수 있다.

그림 2-가-92의 좌측 그림은 부하용 모터를 통한 2중 회전자의 동일한 속도 400rpm 시 3상 역기전력 측정 파형이며, A상 역기전력 실효값 60.5V_{rms}, 주파수는 26.57Hz로 고정자 8극을 기준으로 역산했을 때 약 398rpm이 계산된다. 이 때 FEM 해석 결과와의 비교는 우측 그림이며, 실험에 의한 측정 파형과 거의 일치한 것을 확인할 수 있다.

그림 2-가-93의 좌측그림은 부하용 모터를 통한 2중 회전자의 동일한 속도 600rpm 시 3상 역기전력 측정 파형이며, A상 역기전력 실효값 88.4V_{rms}, 주파수는 39.81Hz로 고정자 8극을 기준으로 역산했을 때 약 597rpm이 계산된다. 이 때 FEM 해석 결과와의 비교는 우측그림이며, 실험에 의한 측정 파형과 거의 일치한 것을 확인할 수 있다.

표 2-가-105는 2중 회전자의 속도가 동일한 조건에서 최종적인 전자계 해석과 성능시험 비교 분석 결과이다. 상 역기전력 실효값, 주파수에서 오차율은 최소 약 0.5%, 최대 4.8%의 결과를 얻었다.

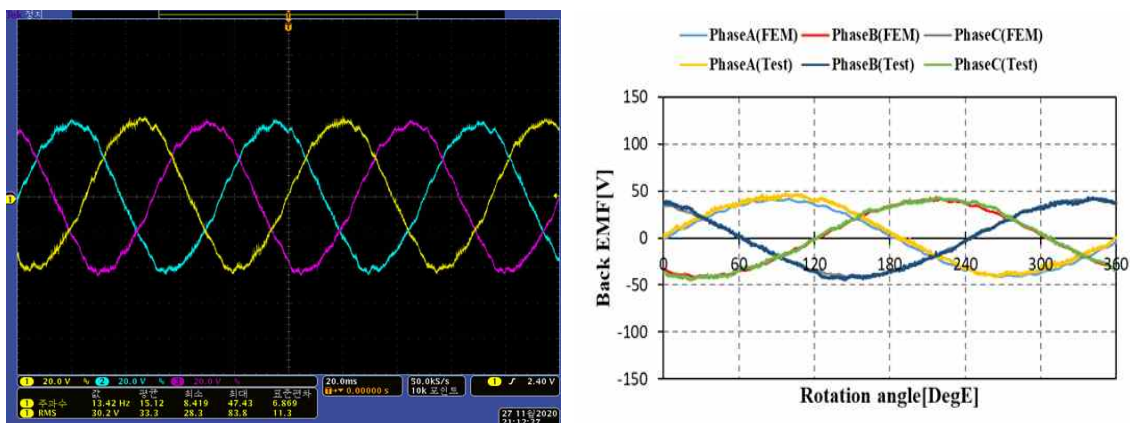


그림 2-가-91 (좌)부하용 모터를 통한 2중 회전자의 동일한 속도 200rpm에서
3상 역기전력 측정 파형 및
(우) 무부하 시 2중 회전자 동일한 속도 200rpm에서 전자계 해석과 성능시험의 3상 역기전력 파형 비교

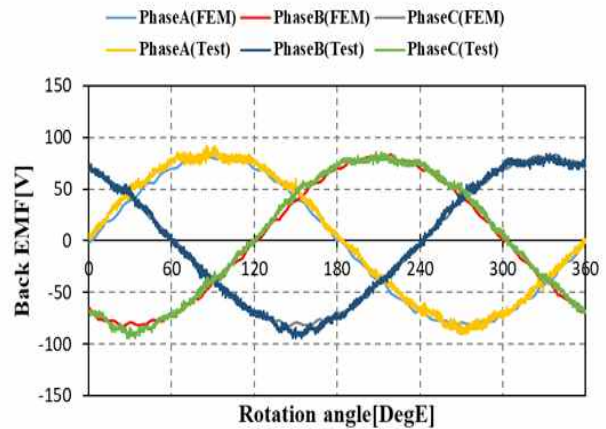
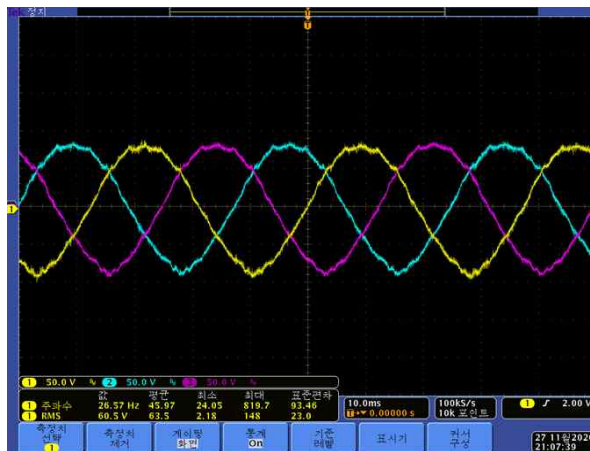


그림 2-가-92 (좌)부하용 모터를 통한 2중 회전자의 동일한 속도 400rpm에서
3상 역기전력 측정 파형 및
(우)무부하 시 2중 회전자 동일한 속도 400rpm에서 전자계 해석과 성능시험의 3상 역기전력 파형 비교

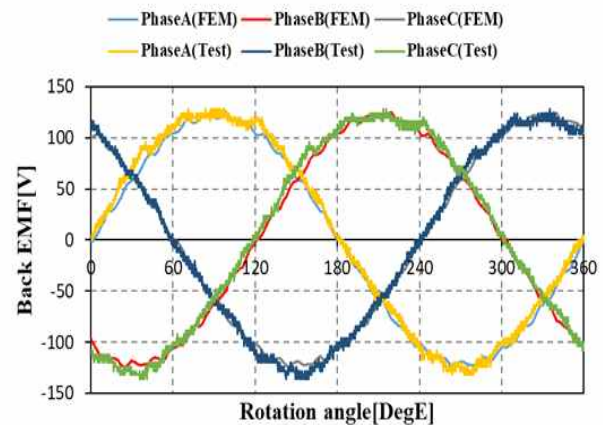
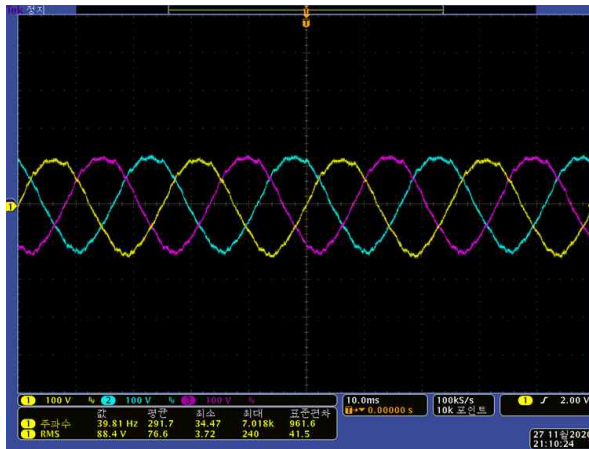


그림 2-가-93 (좌)부하용 모터를 통한 2중 회전자의 동일한 속도 600rpm에서
3상 역기전력 측정 파형 및
(우)무부하 시 2중 회전자 동일한 속도 600rpm에서 전자계 해석과 성능시험 비교 분석 결과

구분	200rpm		400rpm		600rpm	
	역기전력 실효값 [V _{rms}]	주파수 [Hz]	역기전력 실효값 [V _{rms}]	주파수 [Hz]	역기전력 실효값 [V _{rms}]	주파수 [Hz]
전자계 해석	28.8	13.35	57.6	26.71	86.4	40.07
성능시험	30.2	13.42	60.5	26.57	88.4	39.81
오차율 [%]	4.6	0.5	4.8	0.5	2.3	0.6

결론적으로, 무부하 성능시험을 통하여 4.5kW급 축소형 DR-PMSM 시제품의 영구자석 회전자, 폴피스 회전자, 고정자 권선이 설계 사양대로 정상적으로 제작이 되었음을 확인할 수 있었다. 다만 폴피스 회전자의 편심 문제는 여전히 해결되지 않은 상태로 남아 있다.

② 부하 시험

본 연구에서는 간이부하장치(M-G set)의 서보모터를 이용하여 4.5kW급 DR-PMSM에 동적 부하를 적용하면서 DR-PMSM 구동용 인버터를 이용하여 DR-PMSM을 구동 제어하는 성능시험을 진행하였으며, 성능시험 결과를 통해 DR-PMSM 시제품의 부하 조건에서의 전자기적 성능을 검증하였다. 그림 2-가-85의 M-G set을 이용한 성능시험은 다음과 같은 순서로 진행을 하였다. 첫 번째로 서보모터를 구동하지 않은 무부하 상태에서 시뮬레이션을 통해 정립한 제어 알고리즘을 적용한 인버터 구동을 진행하여 구동 특성을 확인하였다. 두 번째로 부하상태의 구동 특성을 확인하기 위한 부하를 M-G set의 서보모터를 통해서 부하를 인가한 후 시험을 진행하였다.

㉠ M-G set을 이용한 무부하 인버터 구동 시험

그림 2-가-94의 좌측 그림은 4.5kW급 DR-PMSM의 시제품을 이용하여 구동 알고리즘을 검증하기 위하여 M-G set의 서보모터의 부하를 인가하지 않은 상태에서 구동 실험을 한 결과를 나타낸다. DR-PMSM의 구동을 위한 회전자계를 생성하기 위하여 인버터 구동전류를 8Hz 5.22A로 인가하였다. 이 결과를 통해 구동 특성을 확인해 보면 폴피스 회전자는 24rpm, 영구자석 회전자 -17rpm의 속도로 구동되는 것을 확인할 수 있었으며, 폴피스의 회전방향과 영구자석의 회전방향이 반대인 것으로 확인되었다. 그림 2-가-94 우측 그림은 인버터 구동전류 11Hz 5.64A를 인가하여 특성을 확인한 그림이며, 이때 폴피스 회전자의 속도는 34rpm, 영구자석 회전자의 속도는 -25rpm임을 확인할 수 있었다.

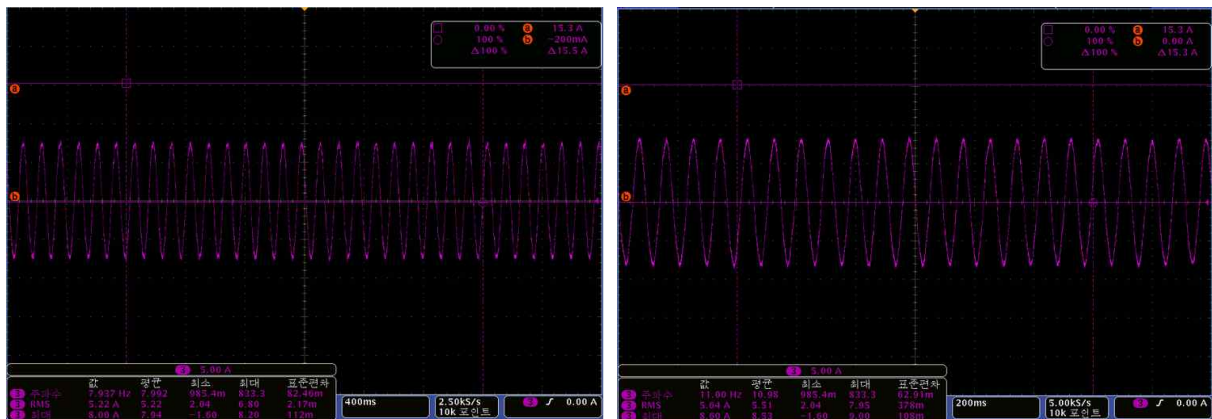


그림 2-가-94 (좌)무부하 인버터 구동 A상전류 파형 (5.22A, 8Hz) 폴피스 정방향(24rpm), 영구자석 축 역방향(15rpm) 및
(우)무부하 인버터 구동 A상전류 파형 (5.64A, 11Hz) 폴피스 정방향(34rpm), 영구자석 축 역방향(25rpm)

결론적으로 4.5kW급 DR-PMSM의 폴피스 회전자와 영구자석 회전자가 구동 시에는 서로 반대방향으로 회전하는 것을 확인하였으며, 시제품의 특성을 재확인하기 위해 서보모터의 폴피스 회전자를 정방향, 영구자석 회전자를 역방향으로 구동하는 시험을 진행하였다. 그림 2-가-95 좌측 그림은 저속 구간에서의 무부하 역기전력, 그림 2-가-95 우측 그림은 고속구간

에서의 무부하 역기전력을 재측정한 결과를 보여준다.

그림 2-가-95에서 보는 바와 같이, 폴피스와 영구자석 회전자가 서로 반대방향으로 구동될 경우, 좌측 그림의 저속 구간에서 폴피스 회전자의 속도가 60rpm, 영구자석 회전자의 속도가 -43rpm일 때의 인버터 구동 상전류의 주파수가 19.27Hz인 것을 확인할 수 있다. 두 회전자의 속도가 동일하고 같은 방향으로 회전할 경우, 각 회전자의 속도와 극수와의 관계에 의해 인버터 구동 전원의 주파수는 6.5Hz가 발생하여, 두 회전자가 서로 다른 방향으로 회전할 경우와 약 3배의 주파수 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그림 2-가-94 우측 그림에서 보는 바와 같이, 고속 구간으로 폴피스 회전자의 속도가 120rpm, 영구자석 회전자의 속도가 -87rpm일 때 인버터 구동 전원의 주파수는 39.06Hz이며, 양쪽 회전자의 동일 방향 구동의 경우 인버터 구동 전원 주파수 13Hz와 약 3배의 주파수 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 본 시험을 통하여 DR-PMSM의 경우, 인버터 구동 전원주파수와 영구자석 회전자, 폴피스 회전자의 속도 관계를 확인해 보면, 기존의 영구자석 동기전동기의 구동 전원주파수를 도출하는 식인 식 (2.31)에 의해 결정되는 것이 아니라, 식(2.32)에 의해서 구동용 인버터의 전원 주파수를 도출해야 함을 확인할 수 있었다.

$$f = \frac{n \cdot P}{120} \quad (2.31)$$

$$f = \left| \frac{P_{fm} \cdot \omega_{fm} - N_{pp} \cdot \omega_{pp}}{60} \right| \quad (2.32)$$

결론적으로, 그림 2-가-94에서 보는 바와 같이, DR-PMSM의 무부하 시 인버터 구동 성능 시험을 통하여 DR-PMSM의 두 회전자가 서로 역방향으로 회전을 하는 경우의 전원주파수는 두 회전자가 동일 방향으로 회전할 경우에 비해 3배 높게 요구되는 것을 확인하였으며, 이로 인해 부하 성능시험 시의 최고속도 가능 범위가 1/3 가량 감소하였음을 확인할 수 있었다.

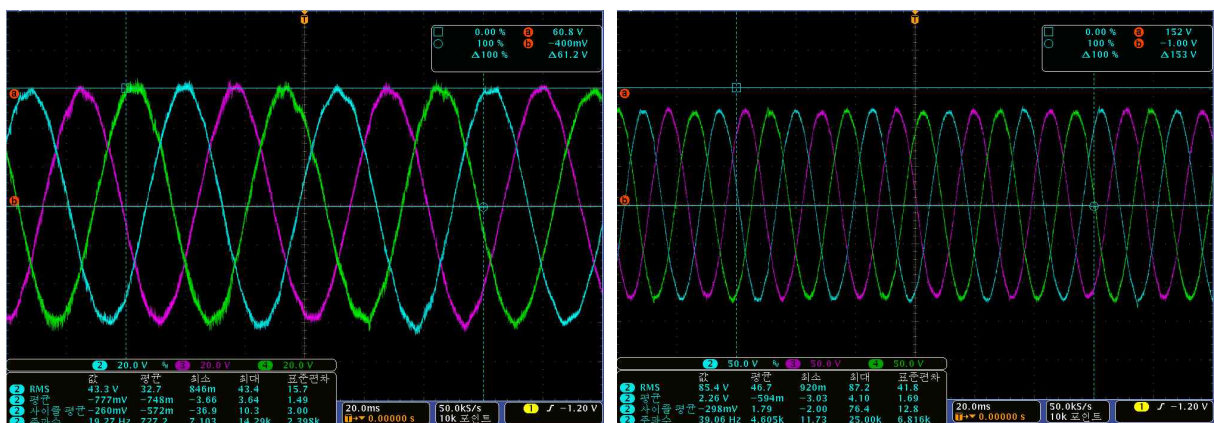
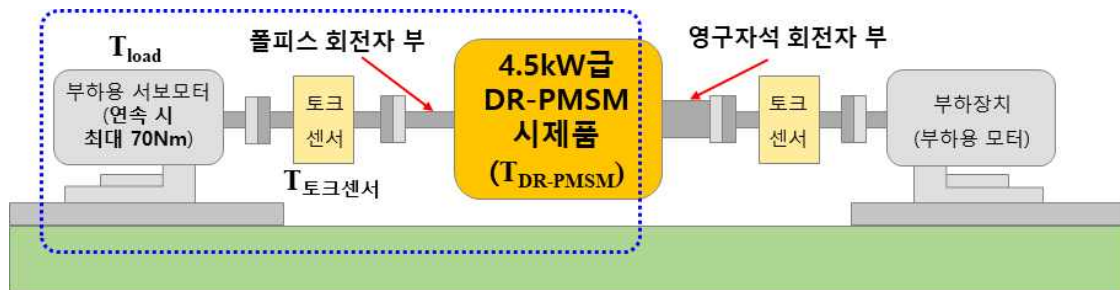


그림 2-가-95 (좌)무부하 역기전력(19.27Hz) 폴피스 정방향(60rpm), 영구자석 축 역방향(43rpm) 및
(우)무부하 역기전력(39Hz) 폴피스 정방향(120rpm), 영구자석 축 역방향(87rpm)

㉠ M-G set을 이용한 부하 인버터 구동 시험

본 연구에서는 M-G set을 이용하여 4.5kW급 DR-PMSM의 부하 성능시험을 수행하였다. 그림 2-가-96 (상)에서 보는 바와 같이 부하성능시험 환경을 구성하였으며, 폴피스 축의 서보모터와 영구자석 축의 서보모터를 이용해 동적 부하 실험을 진행하였다. M-G set의 서보모터는 각 축에 속도제어를 적용하고, 4.5kW급 DR-PMSM 구동용 인버터를 이용한 전류제어를 적용하여 동적 부하를 인가하였다. 부하시험은 M-G set의 속도 지령을 통해 각 속도별 인가전류를 변화시키면서 발생하는 토크를 측정하였다. 그림 2-가-96 (하)는 M-G set을 활용한 부하성능시험의 가능 범위를 보여준다. 그림 2-가-96 (하)에서 보는 바와 같이, 구동용 인버터의 전압 사양 한계와 부하용 서보모터의 부하토크 한계로 인하여 부하성능시험은 부하용 서보모터 기준 최대 토크 70Nm, 최대 속도 200rpm 이내에서 수행이 가능하다.



부하 성능시험 시의 토크 발생 관계식

$$T_{DR-PMSM} - T_{load} = T_{\text{토크센서}} \Rightarrow T_{DR-PMSM} = T_{load} + T_{\text{토크센서}}$$

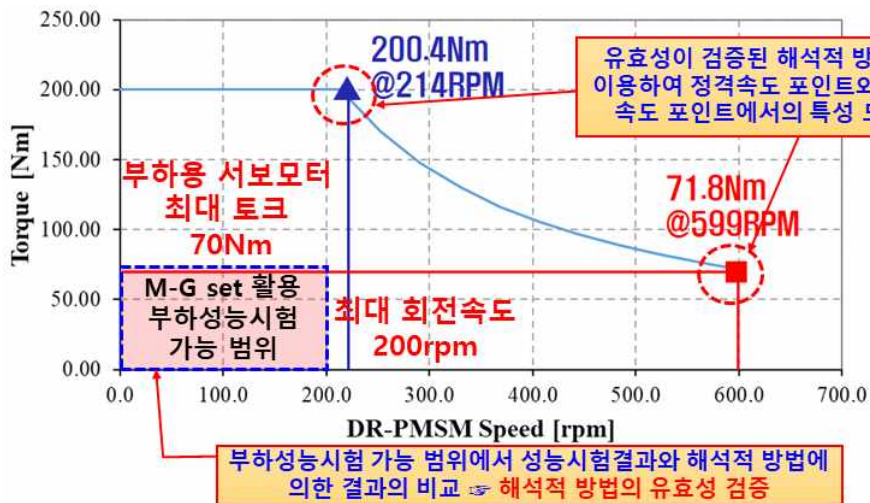


그림 2-가-96 (상)부하성능시험 시 DR-PMSM의 토크 측정 방안 및
(하)M-G set 활용 부하성능시험 가능 범위

그림 2-가-97의 좌측 그림은 폴피스 회전자 속도 20rpm, 영구자석 축 회전자 속도 -14 rpm의 구동 조건에서 3A의 전류를 인가하였을 때의 파형이며, 그림 2-가-97의 우측 그림은 상기의 조건에서 측정한 폴피스 축의 토크 파형이다. 폴피스 축의 발생 토크는 약 41.272Nm으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

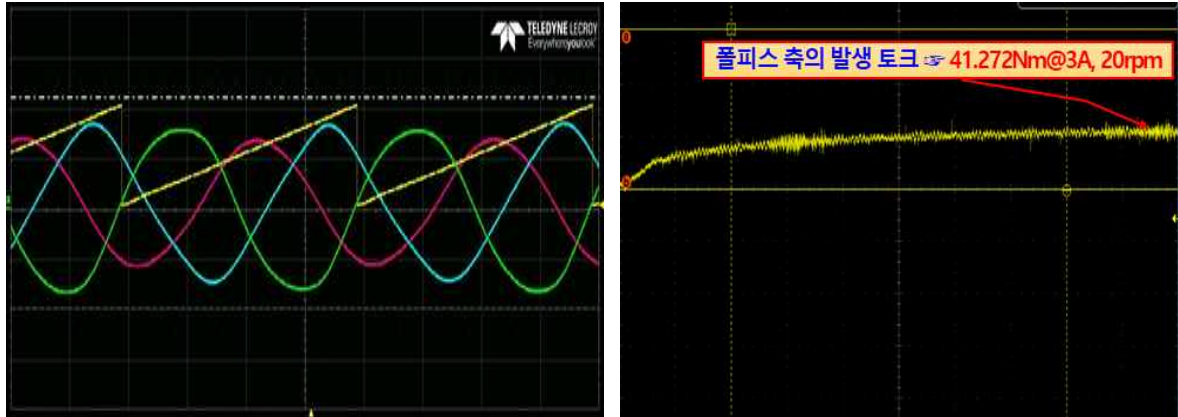


그림 2-가-97 (좌)부하 시험 3상 전류 위상(6.5Hz, 3A) 폴피스 축 20rpm, 영구자석 축 -14rpm
(Yeollow : DR-PMSM 전기각, Blue : A상, Green : B상, Red : C상) 및
(우)M-G set을 이용한 부하 시험 토크 파형 ($T_{DR-PMSM}$: 41.272Nm)

추가적인 성능시험 조건으로 폴피스 축 속도 30rpm 영구자석 축 회전자 속도 -22 rpm의 구동 조건에서 6A의 전류를 인가하였다. 그림 2-가-98의 좌측 그림과 우측 그림은 3상 전류 위상과 발생 토크 파형 결과를 보여준다. 그림 2-가-98에서 보는 바와 같이, 상기의 조건에서 폴피스 축의 발생 토크는 86.177Nm으로 수렴되는 것을 확인하였다. M-G set 및 기계적 오차로 인하여 부하 실험 중 토크 리플이 발생하고 있지만 비교적 안정된 수렴 값을 타나내는 것을 확인할 수 있었다.

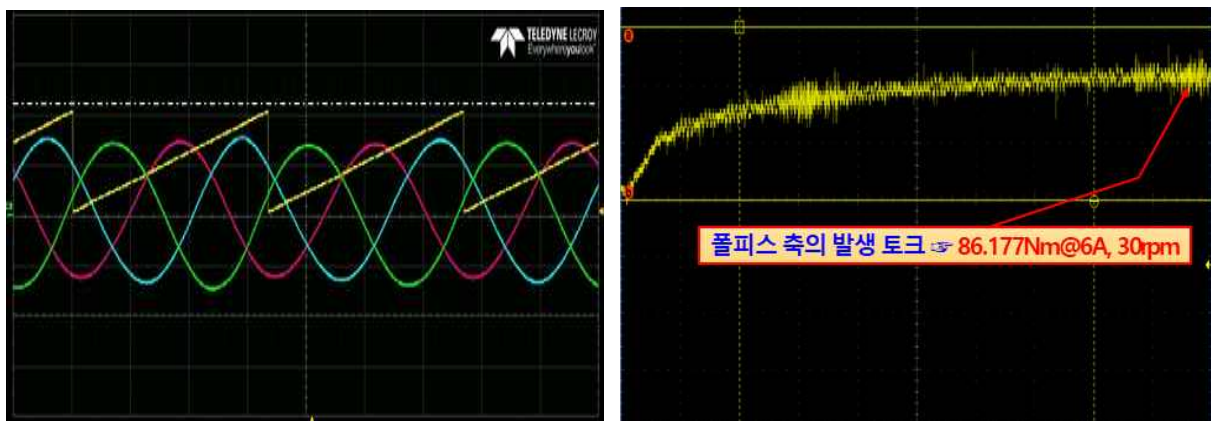


그림 2-가-98 (좌)부하 시험 3상 전류위상 (9.75Hz, 6A) 폴피스 축 30rpm, 영구자석 축 -22rpm (Yeollow : DR-PMSM 전기각, Blue : A상, Green : B상, Red : C상) 및
(우)M-G set을 이용한 부하 시험 토크파형($T_{DR-PMSM}$: 86.1771Nm)

앞서 실험한 동일 시험 조건으로 식(2.32)의 관계를 이용하여 인버터 구동전원 주파수에 해당하는 서보모터 속도 부하 조건에서의 전류값을 스텝별로 인가하여 동적 부하시험을 추가적으로 진행하였으며, 시험 결과값을 표 2-가-106에 정리하였다. 시험 환경의 M-G set 부하용 서보모터의 부하토크 최대량은 연속 운전 조건에서 70Nm이며, 10℃ 이하의 저온 시험 환경을 고려하고, 서보모터의 온도상승을 모니터링 하면서 인버터 구동전류 8A 입력까지 시

험을 진행하였다. 또한 DR-PMSM의 부하시 발생하는 유도기전력의 크기는 설계 시 고려했던 영구자석 회전자와 폴피스 회전자가 같은 방향으로 회전하는 조건에 비해 3배 증가하였으며, 시험 환경에서 사용할 수 있는 전원 전압과 정류기의 Capacitor 용량의 문제로 인해 전원주파수를 10.83Hz 조건까지만 실험을 진행하였다. 성능시험 결과값의 오차는 M-G set에 DR-PMSM 시제품의 장착 시 측정될 상의 비정렬 오차, DR-PMSM 시제품의 폴피스 회전자 제작 공차로 인해 발생한 편심으로 인한 토크 리플 오차가 발생하여 평균값으로 계산하였다. 각 부하 조건에 따라 오차가 발생하지만 전류 대비 일관된 경향성을 나타내는 것을 표 2-가-106을 통해 확인할 수 있었다.

표 2-가-106 성능시험설비(M-G set) 사양을 고려한 4.5kW급 DR-PMSM의 동적 부하시험($T_{DR-PMSM}$) 결과

전류 \전원주파수 (폴피스 회전자)	4.33[Hz] (20rpm)	5.41[Hz] (25rpm)	6.5[Hz] (30rpm)	7.58[Hz] (35rpm)	8.66[Hz] (40rpm)	9.75[Hz] (45rpm)	10.83[Hz] (50rpm)
1[A_{rms}]	12.187Nm	12.621Nm	13.72Nm	15.155Nm	15.484Nm	15.484Nm	15.505Nm
2[A_{rms}]	25.529Nm	24.703Nm	25.634Nm	27.069Nm	26.411Nm	26.929Nm	28.273Nm
3[A_{rms}]	41.923Nm	40.201Nm	41.272Nm	40.376Nm	41.209Nm	42.091Nm	42.203Nm
4[A_{rms}]	57.449Nm	56.413Nm	54.551Nm	56.371Nm	56.77Nm	55.783Nm	56.903Nm
5[A_{rms}]	74.592Nm	72.1Nm	73.045Nm	74.242Nm	74.172Nm	73.052Nm	74.606Nm
6[A_{rms}]	90.496Nm	91.007Nm	89.096Nm	90.174Nm	88.27Nm	86.177Nm	-
7[A_{rms}]	106.631Nm	106.267Nm	108.927Nm	104.972Nm	103.754Nm	-	-
8[A_{rms}]	125.419Nm	124.775Nm	124.81Nm	123.305Nm	-	-	-

③ 부하 시험 결과와 수치해석적 방법(FEM)에 의한 결과의 비교 분석

본 연구에서는 4.5kW급 DR-PMSM의 특성에 맞게 정립된 제어 알고리즘을 기반으로 전류제어를 통한 부하시험 결과와 부하시험 조건과의 동일한 방법으로 수치해석적 방법(FEM)에 의한 결과값과의 비교 분석을 수행하였다. 표 2-가-107은 4.5kW급 DR-PMSM의 부하성능시험(전류제어)에 따른 폴피스 회전자의 속도별 토크($T_{DR-PMSM}$) 측정 결과를 보여주며, 표 2-가-108은 DR-PMSM의 성능시험과 동일한 조건에서의 수치해석적 방법(FEM)에 의한 폴피스 회전자의 토크 해석 결과를 보여준다. 그림 2-가-99는 DR-PMSM($T_{DR-PMSM}$)의 성능시험 결과와 수치해석적 방법(FEM)에 의한 결과 사이의 오차율 비교를 보여준다. 그림 2-가-99에서 보는 바와 같이, 폴피스 회전자의 발생 토크 관련 부하성능시험 결과와 수치해석적 방법(FEM)에 의한 해석결과를 비교 분석하면 오차율이 1~12%까지 존재함을 확인할 수 있었다. 특히 입력전류가 큰 영역과 회전 속도가 큰 영역에서 오차가 크게 발생하는 경향을 보였는데, 이는 앞에서 다룬 바와 같이, 성능시험용 M-G set에 DR-PMSM 시제품의 장착 시 측정될 상의 비정렬 오차, DR-PMSM 시제품의 폴피스 회전자 제작 공차로 인해 발생한 편심으로 인한 토크 리플 오차가 누적되어 토크가 크게 걸리거나 회전속도가 빠른 조건에서 진동이 크게 발생하는 문제로 인하여 오차가 커진 것으로 보인다.

결론적으로, 축소형 시험모델인 4.5kW DR-PMSM의 토크 출력 특성을 알아보기 위해 영구자석 축과 폴 피스 축에 M-G set을 제작하여 서보모터를 연결하여 저속, 고속 영역의 무 부하 역 기전력 측정 시험을 진행하였고, 해석값과 시험값의 오차율이 크지 않은 것을 확인하였다. 부하시험의 경우 시험 환경에서 사용할 수 있는 전원 전압과 정류기의 용량 문제로 인하여 저속영역의 부하시험만을 수행하였다. 축떨림이 상대적으로 작은 27Nm~75Nm의 토크 및 25rpm~45rpm의 속도 조건(부하시험조건)에서는 해석값과 실험값이 5% 이내의 오차를 보이므로, 축떨림 현상을 해결할 시에 고속/고토크 영역의 부하시험에서도 해석값과 실험값이 5% 이내의 오차율 달성이 가능할 것이다. 비교한 그림 2-가-99에서 보는 바와 같이, 4.5kW급 DR-PMSM의 폴피스 회전속도에 따른 입력전류별 발생 토크의 해석값과 시험값 사이에 비교한 결과, 진동이 크게 발생하지 않는 안정된 운전 영역에서는 5% 내의 오차율을 일정하게 유지하는 경향을 확인할 수 있었으며, 부하성능시험값과 해석적 방법(FEM)에 의한 계산값 사이의 비교 분석을 통하여 그림 2-가-100의 수치해석적 방법(FEM) 기반 부하성능시험 데이터의 경향에 따른 제어 가능 여부에 대한 확장성을 예측할 수 있다. 이에 따라 성능시험의 설비 사양을 높인다면 정립된 DR-PMSM의 제어 알고리즘 기반 전류 제어 기법을 적용하여 전 영역에서의 고효율 운전 제어가 가능할 것이다.

표 2-가-107 DR-PMSM의 부하성능시험(전류제어)에 따른 폴피스 회전자의 속도별 토크($T_{DR-PMSM}$) 결과

전류 \ 속도	20rpm	25rpm	30rpm	35rpm	40rpm	45rpm	50rpm
8[A_{rms}]	125.4Nm	124.8Nm	124.8Nm	123.3Nm	-	-	-
7[A_{rms}]	106.6Nm	106.3Nm	108.9Nm	105.0Nm	103.8Nm	-	-
6[A_{rms}]	90.5Nm	91.0Nm	89.1Nm	90.2Nm	88.3Nm	86.2Nm	-
5[A_{rms}]	74.6Nm	72.1Nm	73.0Nm	74.2Nm	74.2Nm	73.1Nm	74.6Nm
4[A_{rms}]	57.4Nm	56.4Nm	54.6Nm	56.4Nm	56.8Nm	55.8Nm	56.9Nm
3[A_{rms}]	41.9Nm	40.2Nm	41.3Nm	40.4Nm	41.2Nm	42.1Nm	42.2Nm
2[A_{rms}]	25.5Nm	24.7Nm	25.6Nm	27.1Nm	26.4Nm	27.0Nm	28.3Nm
1[A_{rms}]	12.2Nm	12.6Nm	13.7Nm	15.2Nm	15.5Nm	15.5Nm	15.5Nm

표 2-가-108 DR-PMSM ($T_{DR-PMSM}$)의 성능시험 결과와 수치해석적 방법(FEM)에 의한 결과 비교

전류 \ 속도	20rpm	25rpm	30rpm	35rpm	40rpm	45rpm	50rpm
8[A_{rms}]	111.4Nm	111.4Nm	111.4Nm	111.4Nm	-	-	-
7[A_{rms}]	97.6Nm	97.6Nm	97.5Nm	97.5Nm	97.5Nm	-	-
6[A_{rms}]	83.6Nm	83.6Nm	83.6Nm	83.6Nm	83.6Nm	83.6Nm	-
5[A_{rms}]	69.7Nm	69.7Nm	69.7Nm	69.7Nm	69.7Nm	69.7Nm	69.7Nm
4[A_{rms}]	55.8Nm	55.8Nm	55.8Nm	55.8Nm	55.8Nm	55.8Nm	55.8Nm
3[A_{rms}]	41.8Nm	41.8Nm	41.8Nm	41.8Nm	41.8Nm	41.8Nm	41.8Nm
2[A_{rms}]	27.9Nm	27.9Nm	27.9Nm	27.9Nm	27.9Nm	27.9Nm	27.9Nm
1[A_{rms}]	14.0Nm	13.9Nm	14.0Nm	14.0Nm	13.9Nm	13.9Nm	14.0Nm

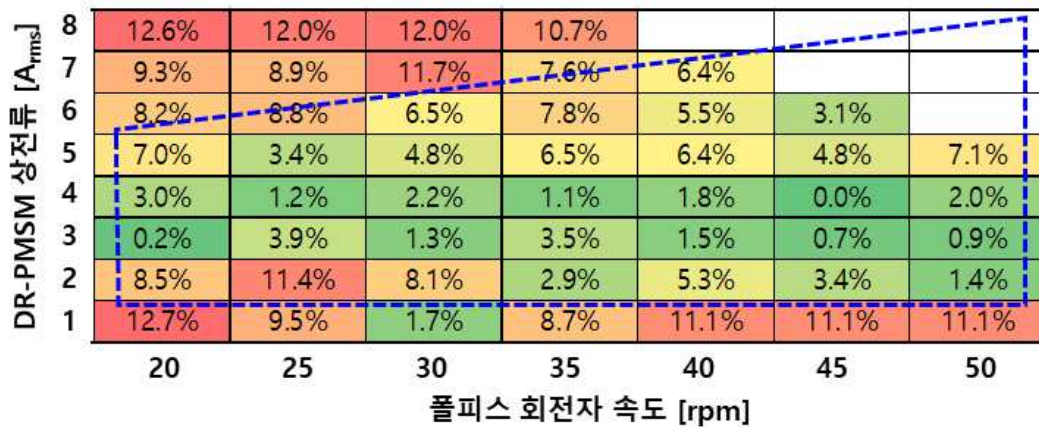


그림 2-가-99 DR-PMSM($T_{DR-PMSM}$)의 성능시험 결과와 수치해석적 방법(FEM)에 의한 결과 사이의 오차율 비교



그림 2-가-100 수치해석적 방법(FEM) 기반 부하성능시험 데이터의 경향에 따른 제어 가능 여부에 대한 확장성

(마) 부하성능시험을 통한 45kW급/4.5kW급 DR-PMSM의 보완설계

① 부하성능시험에 의한 DR-PMSM의 전원주파수 및 유도기전력 특성

본 연구에서는 4.5kW급 DR-PMSM 시작품의 무부하 및 부하시험을 수행하였다. 무부하 시험은 2개의 부하전동기를 구동함으로써, DR-PMSM을 발전기 모드로 구현하여 영구자석 회전자와 폴피스 회전자의 회전에 의해 유기되는 고정자의 3상 역기전력을 측정하였고, 측정된 값과 FEM 해석값과의 비교 분석을 수행하였다. 그리고 부하 시험은 전류 제어를 통해 폴피스 회전자의 속도별 발생 토크 특성을 확인하였다. 특히 부하 시험에서는 3상 입력 전류 인가 시 영구자석 회전자와 폴피스 회전자가 서로 반대 방향으로 회전하는 것을 확인할 수 있었으며, 이 때 입력 전원주파수 및 유도기전력을 측정된 결과, 식 (2.31)에 의해 설계 시 계산된 주파수값 대비 3배 큰 값이 얻어지며, 이로 인하여 고정자에 유기되는 기전력 역시 계산된 값보다 3배 커지는 것을 확인할 수 있었다. FEM 해석에서의 전압값 대비 3배

값을 갖는 것을 확인하였다. 결과적으로, 초기 설계 시 DR-PMSM의 전원주파수를 실험값의 1/3로 계산하였기 때문에, 역기전력 제한값도 1/3배로 작게 설계하는 문제가 있었다. 따라서 최종적으로 45kW급 DR-PMSM과 4.5kW급 DR-PMSM의 전원주파수를 보정하여 최종 설계 모델을 도출하였다.

② 전원주파수 도출식 보정에 따른 45kW급/4.5kW급 DR-PMSM 보완 설계모델 도출

DR-PMSM에서 전원주파수는 자속에 반비례, 손실(철손)에 비례하며, 유도기전력은 자속에 비례, 전압 제한치에 절대적이다. 따라서 전원주파수가 증가하여 유도기전력이 증가하여도 자속은 일정하기 때문에 발생 토크도 일정할 것이다. 그러나 전원주파수의 증가는 손실 및 전압 제한치에 큰 영향을 끼치므로 새로운 운전주파수 식 (2.32)를 바탕으로 45kW급/4.5kW급 DR-PMSM 보완 설계모델을 각각 도출하였다.

• 45kW DR-PMSM 보완 설계모델 전자계 특성

본 연구에서는 45kW급 DR-PMSM의 수정 보완 설계를 진행하였으며, 보완 설계된 45kW급 DR-PMSM의 설계 사양은 표 2-가-109에서 보는 바와 같다. 전원주파수가 커지면서 유도기전력이 변경되어 턴 수와 상전류 값을 수정했다. 정격전류는 기존 $246.2A_{rms}$ 에서 $773.8A_{rms}$ 로 증가, 턴 수는 22회에서 7회로 감소했다. 표 2-가-115는 최종설계와 보완설계 모델에서의 손실 및 효율 특성을 보여주며, 전원주파수가 증가하였기 때문에 손실이 증가하여 최종적으로 정격속도에서 효율은 0.7%, 최대속도에서는 2.9% 감소된 결과를 얻을 수 있었다.

표 2-가-109 45kW급 DR-PMSM 2차 연도 최종모델 및 보완 설계모델의 설계 사양 비교

구분			Specification		
			2차 연도 최종모델	보완 설계모델	비고
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수		3 / 18 / 8 / 12 / 13		-
	냉각 방식		반폐형 강제공랭식		-
	고정자 외경 / 내경		520[mm] / 366[mm]		-
	회전자 외경 / 내경		244[mm] / 120.4[mm]		-
	적층길이 / 공극길이		184[mm] / 1.5[mm]		-
	요크 폭		22.5[mm]		-
	속도 (내 / 외측 회전자)		155[RPM] / 214[RPM]		-
고정자	Coil	정격전류	246.2[A_{rms}]	773.8[A_{rms}]	246.2 → 773.8 A_{rms}
		전류밀도	5[A_{rms}/mm^2]	5[A_{rms}/mm^2]	
		코일 점적률	65[%]		-

		턴 수	22회 / 1layer	7회 / 1layer	22 → 7회
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750[V _{dc}] (433 [V _{peak}])		-
회 전 자	Core	재질	35PNF1600		-
	Magn et	타입	NdFeB 38UH (소결형)		-
		성능	Br = 1.1[T] Hc = 833.7[kA/m]		-
		두께	18[mm]		-
	Core	재질	35PNF1600		-

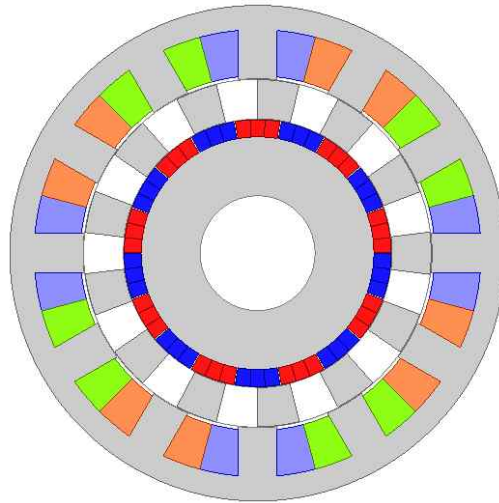


그림 2-가-101 45kW급 DR-PMSM 보완 설계모델의 형상

표 2-가-110 45kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 역기전력 (정격속도)

무부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)		부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)	
역기전력 기본파	46.32 [V _{peak}]	역기전력 기본파	144.16 [V _{peak}]
THD	1.0 [%]	THD	2.3 [%]

표 2-가-111 45kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 코강토크 및 토크 (정격속도)

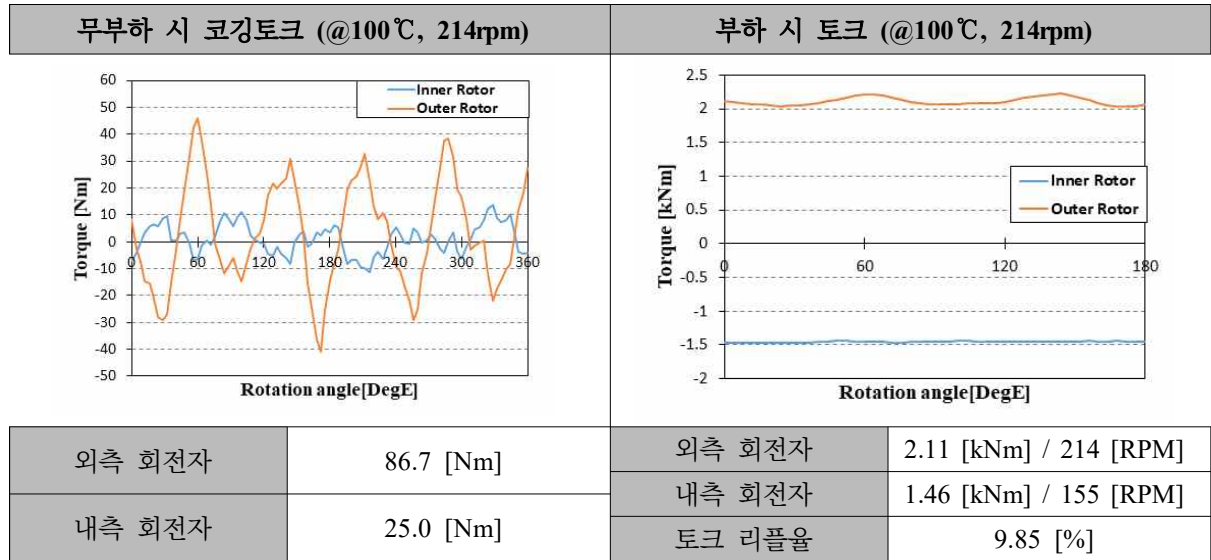


표 2-가-112 45kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 역기전력 (최대속도)

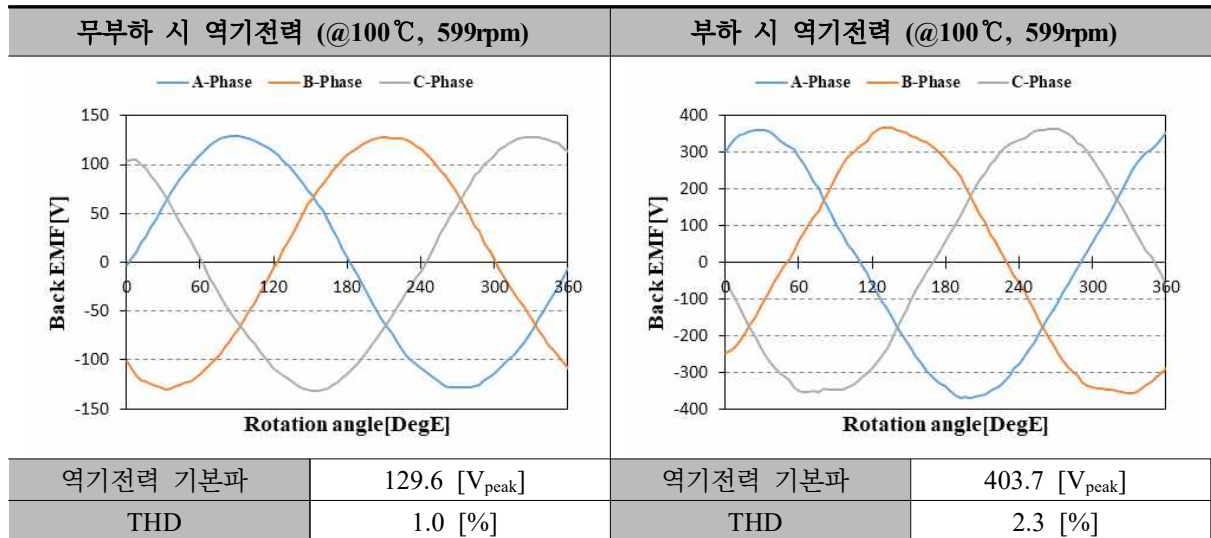


표 2-가-113 45kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 코깅토크 및 토크 (최대속도)

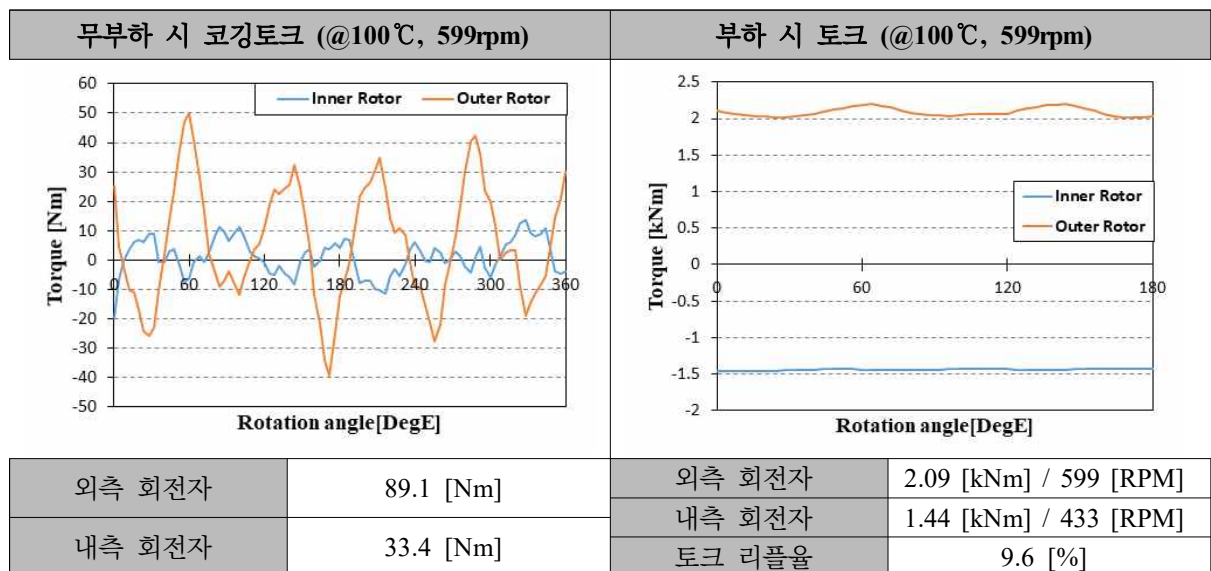


표 2-가-114 45kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 자속밀도 분포도 및 자속선도

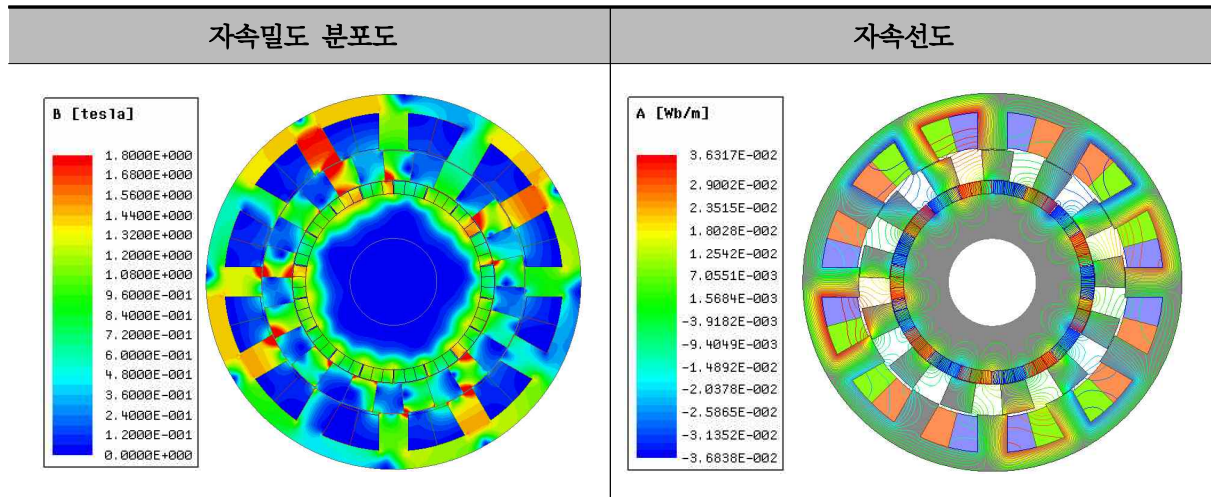


표 2-가-115 45kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]		최대속도 [599RPM]	
	최종설계	보완설계	최종설계	보완설계
동손	1,360W	1,036W	1,360W	1,036W
철손	102.8W	349.6W	356.1W	1,402.5W
영구자석 와전류손	420.4W	810.2W	3,200W	6,310.6W
출력	47.4kW	47.3kW	131kW	131kW
효율	96.1%	95.4%	96.3%	93.4%

• 4.5kW DR-PMSM 보완 설계모델 전자계 특성

본 연구에서는 4.5kW급 DR-PMSM의 수정 보완 설계를 진행하였으며, 수정 보완 설계된 4.5kW급 DR-PMSM의 설계 사양은 표 2-가-116에서 보는 바와 같다. 정격전류는 기존 16A_{rms}에서 56A_{rms}로 증가, 턴 수는 70회에서 20회로 변경되었다. 표 2-가-122는 최종설계와 보완설계 모델에서의 손실 및 효율 특성을 보여주며, 전원주파수가 증가하였기 때문에 손실이 증가하여 최종적으로 정격속도에서 효율은 2.3%, 최대속도에서는 3.8% 감소된 결과를 얻을 수 있었다.

표 2-가-116 4.5kW급 DR-PMSM 2차 연도 최종모델 및 보완 설계모델의 설계 사양 비교

구분		Specification		
		2차 연도 최종모델	보완 설계모델	비고
공통	상수/회전자 극수/고정자 극수/슬롯 수/폴피스 개수	3 / 18 / 8 / 12 / 13		-
	냉각 방식	반폐형 강제공랭식		-
	고정자 외경 / 내경	260 [mm] / 178 [mm]		-
	회전자 외경 / 내경	121 [mm] / 59.5 [mm]		-
	적층길이 / 공극길이	210 [mm] / 1 [mm]		-
	요크 폭	10 [mm]		-
	속도 (내 / 외측 회전자)	155[RPM] / 214[RPM]		-

고정자	Coil	정격전류	16[A _{rms}]	56[A _{rms}]	16 → 56A _{rms}
		전류밀도	5[A _{rms} /mm ²]	5[A _{rms} /mm ²]	
		코일 점적률	65[%]		-
		턴 수	70회 / 1layer	20회 / 1layer	70 → 20회
		DC-link 전압 (전압 제한치)	750[V _{dc}] (433 [V _{peak}])		-
회전자	Magnet	재질	35PNF1600		-
		타입	NdFeB 38UH (소결형)		-
		성능	Br = 1.1[T] Hc = 833.7[kA/m]		-
		두께	9 [mm]		-
	Core	재질	35PNF1600		-

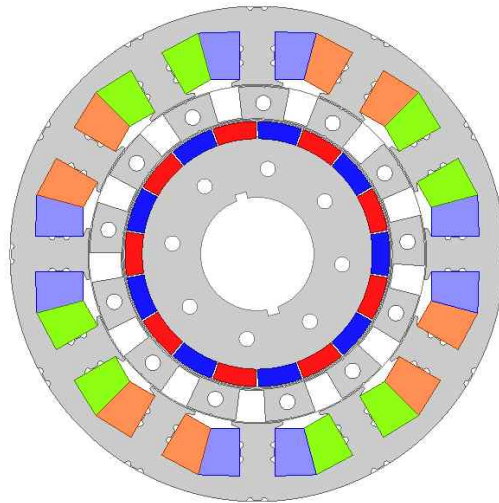


그림 2-가-102 4.5kW급 DR-PMSM 보완 설계모델의 형상

표 2-가-117 4.5kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 역기전력 (정격속도)

무부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)		부하 시 역기전력 (@100℃, 214rpm)	
역기전력 기본파	57.96 [V _{peak}]	역기전력 기본파	141.7 [V _{peak}]
THD	0.7 [%]	THD	0.9 [%]

표 2-가-118 4.5kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 코강토크 및 토크 (정격속도)

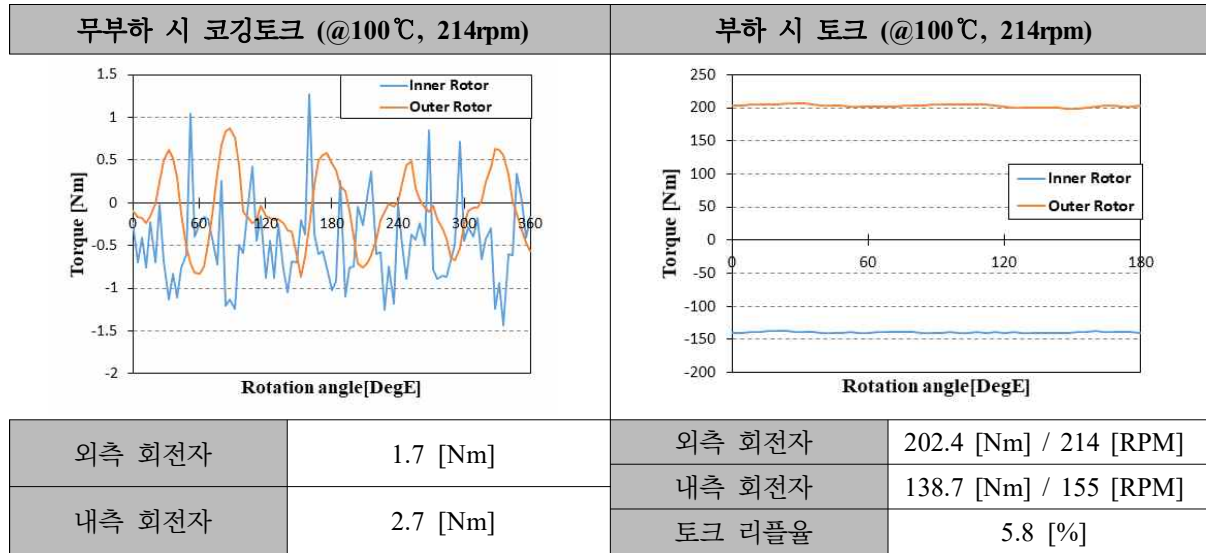


표 2-가-119 4.5kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 역기전력 (최대속도)

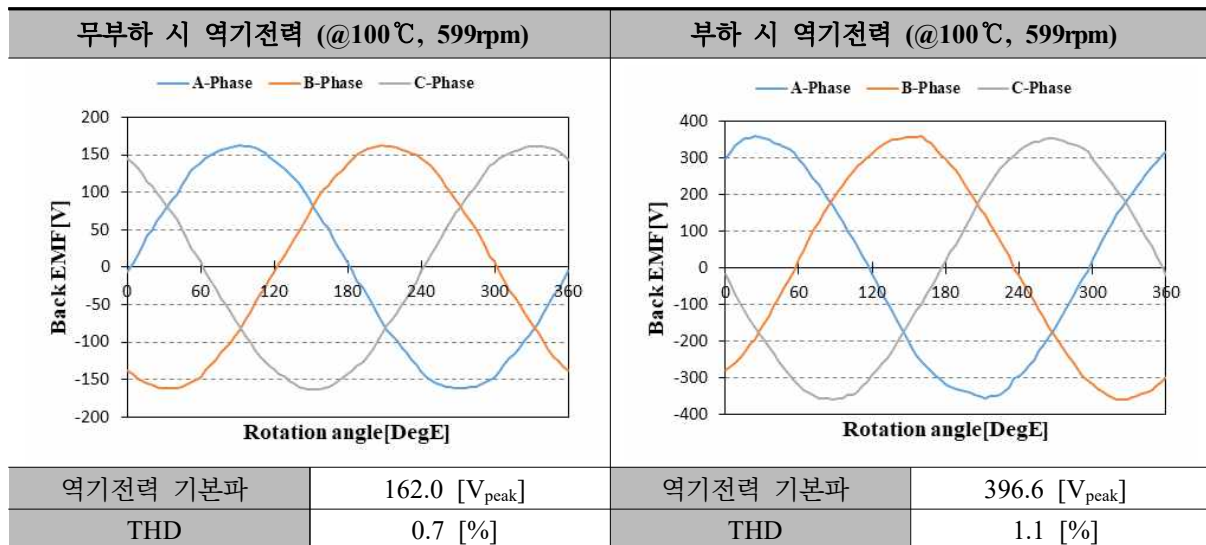


표 2-가-120 4.5kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 코깅토크 및 토크 (최대속도)

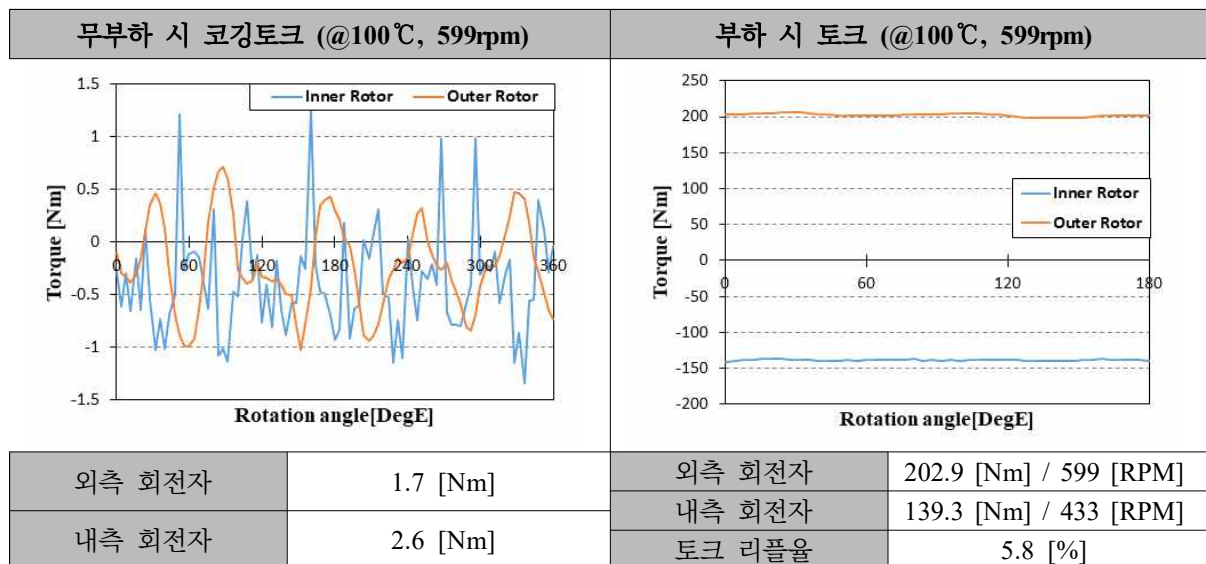


표 2-가-121 4.5kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 자속밀도 분포도 및 자속선도

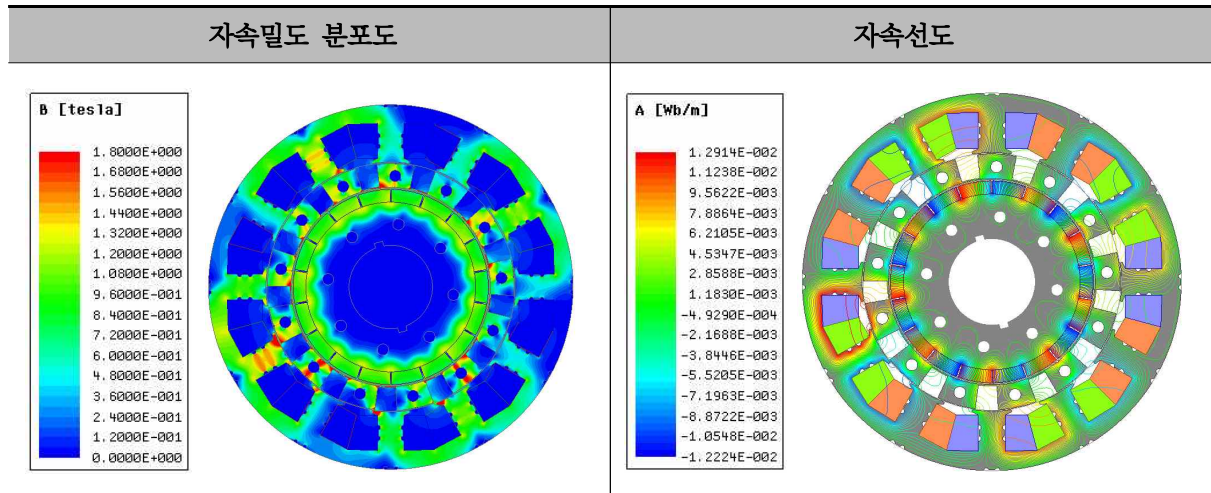


표 2-가-122 4.5kW급 DR-PMSM 보완설계 모델 손실 및 효율

구분	정격속도 [214RPM]		최대속도 [599RPM]	
	최종설계	보완설계	최종설계	보완설계
동손	196.7W	197.5W	196.7W	197.5W
철손	13.9W	52.9W	45.8W	200.9W
영구자석 와전류손	3.7W	43.4W	28.9W	336.2W
출력	4.5kW	4.5kW	12.7kW	12.6kW
효율	95.5%	93.8%	97.9%	94.3%

(바) 간이부하장치 적용 시제품의 성능시험 및 제어알고리즘 구현 평가

① 축소형 DR-PMSM용 제어 알고리즘 적용(무부하 조건)

앞서 검증된 축소형 DR-PMSM용 제어 알고리즘을 적용하여 $J \frac{dv}{dt} = T_e - T_L - B\omega$ 에서 값을 0으로 설정하여 수정 보완된 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 무부하 특성을 확인하였다. 외부 부하가 없어도 모터의 관성, 마찰, 권선 저항 값으로 인해 모터의 무부하 구동이 가능하다. 따라서 그림 2-가-103과 같이 지령 속도인 1,043[rpm]에 근접하게 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 표 2-가-124, 그림 2-가-103과 같이 설계 해석 치와 시뮬레이션의 값이 비교적 수렴한다는 것 또한 확인할 수 있었다.

표 2-가-123 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 설계 및 전기적 사양

Parameter	Value	Parameter	Value
Number of Pole	8	Stator Resistance	0.062967[Ω]
d-axis Inductance	0.003680143[H]	q-axis Inductance	0.003680143[H]
Back EMF Constant	96.62[V _{pk} /krpm]		

표 2-가-124 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 설계 해석 및 무부하 시뮬레이션 결과 (속도지령 1,043 rpm)

구분	Maxwell 설계 해석 값	PSIM 시뮬레이션 결과
고정자 속도	1043 [rpm]	1032 [rpm] (ΔN 1.1%)
고정자 토크	0 [Nm]	0.06 [Nm]
운전 주파수	69.55 [Hz]	68.81 [Hz]
3상 전류	0 [A _{rms}]	0.25 [A _{rms}]

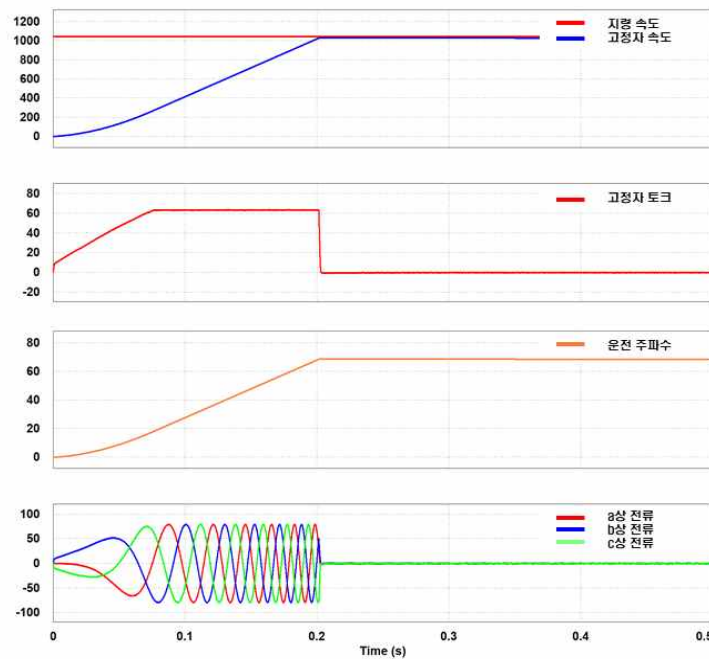


그림 2-가-103 PSIM 활용 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 시뮬레이션 결과

② 축소형 DR-PMSM용 제어 알고리즘 적용(부하 조건)

앞서 검증된 축소형 DR-PMSM용 제어 알고리즘을 적용하여 $J\frac{dw}{dt} = T_e - T_L - Bw$ 에서 T_L 값을 7[Nm]로 설정한 후의 부하 조건에서의 특성을 확인하였다. 그림 2-가-103과 같이 지령 속도인 1,043rpm으로 도달하고 난 후에 속도가 유지되기 위해선 식 (2.19)의 값이 T_L 값 만큼의 토크를 유지해야하기 때문에 6.21A_{rms} 값의 전류로 구동되어 지령을 잘 수렴하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 표 2-가-125, 그림 2-가-104와 같이 Maxwell 설계 해석 값으로 고정자 속도는 1,043rpm, 고정자 토크는 7Nm이며 PSIM 시뮬레이션 결과는 고정자 속도 1,032rpm, 고정자 토크는 6.95Nm로 속도는 1.05%, 토크는 0.71% 오차율을 가진다.

표 2-가-125 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 설계 해석 및 부하 7[Nm] 시뮬레이션 값 (속도지령 1,043 rpm)

구분	Maxwell 설계 해석 값	PSIM 시뮬레이션 결과	오차율
고정자 속도	1043 [rpm]	1032 [rpm] (ΔN 1.1%)	1.05 [%]
고정자 토크	7 [Nm]	6.95 [Nm]	0.71 [%]
운전 주파수	69.55 [Hz]	68.76 [Hz]	1.14 [%]
3상 전류	6.20 [A_{rms}]	6.21 [A_{rms}]	0.16 [%]

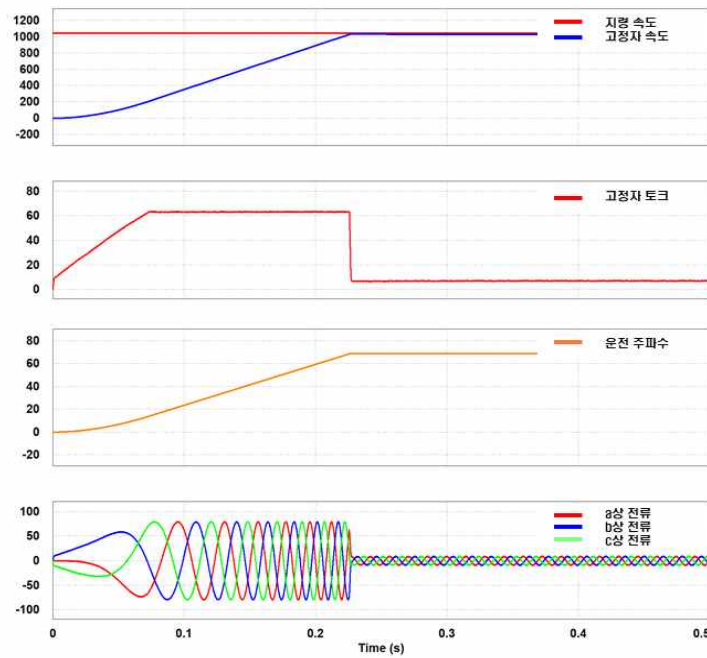


그림 2-가-104 PSIM 활용 4.5kW급 DR-PMSM 최종모델의 부하 7[Nm] 시뮬레이션 결과

나. 연구개발 성과

(1) 논문 게재 성과

표 2-나-1 국내·외 논문 게재성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	권/호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	Improvement of Cogging Torque Characteristics of Magnetic-Geared PMSM for Railway Vehicles using Pole-piece Skew	한국철도 학회논문집	박찬배	VOL.22, NO.9	대한민국	(사)한국 철도학회	비SCI	2019.09
2	이중 회전자 구조의 영구 자석 동기전동기의 제어기 법에 관한 연구	한국철도 학회논문집	이재범	VOL.22, NO.11	대한민국	(사)한국 철도학회	비SCI	2019.11
3	Performance verification of DR-PMSM for traction system according to permanent magnet shape	AIP Advances	박찬배	Vol.10, 025105	미국	AIP Publishing	SCI급	2020.02
4	Optimal design of a 314kW -class IPMSM for railway vehicles using hydrogen fuel cells	AIP Advances	임재현	Vol.10, 025115	미국	AIP Publishing	SCI급	2020.02
5	A Review of State-of-the-art Techniques for PMSM Parameter Identification	Journal of Electrical En gineering & Technology	이형우	Vol.15, Issue 3	대한민국	(사)대한 전기학회	SCI급	2020.03
6	도시철도차량 견인용 IPMSM의 외함일체형 수냉각장치 설계 연구	한국철도 학회논문집	박찬배	VOL.23, NO.5	대한민국	(사)한국 철도학회	비SCI	2020.05
7	저상트램용 2중 회전자 구조 영구자석형 동기전동기의 기어비 변경에 따른 특성 비교 연구	한국철도 학회논문집	정거철	VOL.23, NO.7	대한민국	(사)한국 철도학회	비SCI	2020.07
8	무가선 트램의 추진시스템 사양 분석 및 마그네틱 기어 설계 전략	한국철도 학회논문집	박찬배	VOL.23, NO.8	대한민국	(사)한국 철도학회	비SCI	2020.08

(2) 특허 성과

표 2-나-2 특허 출원 / 등록 성과

번호	특허명	국명	출원			등록			기여율
			출원인	출원일	출원 번호	등록인	등록일	등록 번호	
1	폴피스 비틀림 강성 확보를 위한 링이 적용된 이중 회전자 구조 동기전동기	대한민국	박찬배	2019 11.15	10-2019-0146427	-	-	-	100
2	견인모터와 마그네틱 감속기를 이용한 철도차량용 일체형 구동장치	대한민국	박찬배	2020 08.31	10-2020-0110362	-	-	-	100
3	철도차량용 직접 구동시스템 구현을 위한 견인전동기와 마그네틱 기어의 회전자 체결구조	대한민국	박찬배	2020 10.28	10-2020-0141318	-	-	-	100
4	마그네틱 가이드 동기전동기가 적용된 트램 구동시스템	대한민국	박찬배	-	-	박찬배	2020 11.25	10-2185392	100

(3) 국내 및 국제 학술회의 발표

표 2-나-3 국내·외 학술회의 발표 성과

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	22nd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG 2019)	박찬배	2019.07.18	"Jussieu Campus" of the Sorbonne University, Paris, France	프랑스
2	Magnetism and Magnetic Materials 2019 (MMM 2019)	임재현	2019.11.06	Rio All-Suite Hotel & Casino, Las Vegas	미국
3	Magnetism and Magnetic Materials 2019 (MMM 2019)	박찬배	2019.11.07	Rio All-Suite Hotel & Casino, Las Vegas	미국
4	2019년도 한국철도학회 정기총회 및 추계학술대회	임재현	2019.11.15	휘닉스 제주	대한민국
5	2020년도 한국철도학회 온라인 춘계학술대회	임재현	2020.07.07	온라인 개최	대한민국
6	2020년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템 부문회 정기총회 및 추계학술대회	김성휘	2020.10.30	제주오션스위즈	대한민국
7	2020년도 한국철도학회 정기총회 및 추계학술대회	임재현	2020.11.12	제주 해비치 호텔&리조트	대한민국

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 연구 목표 및 목표 달성 여부

(1) 정성적 목표 및 달성 여부

표 3-가-1 정성적 연구목표 및 달성여부

연구 목표	목표 달성 여부	비중 (%)	달성도 (%)
○ 비접촉 방식의 감속기 및 견인전동기의 일체화 된 2중 회전자 구조 동기전동기 설계 기술 개발	○ 2중 회전자 구조 동기전동기 (DR-PMSM) 설계 기법 연구 완료 - DR-PMSM의 두 가지 특성식에 대한 비교 분석 완료 - 저장대차에 적합한 DR-PMSM 최적의 설계 기법 도출 ○ 45kW급 DR-PMSM 기본 / 상세 설계 연구 완료 - 요구 조건을 만족 시키는 파라미터 최적화 완료 - IPMSM과는 다른 DR-PMSM의 고유 특성 분석	30	30
○ 기존 IPMSM 제어 방법에서 개선된 DR-PMSM용 제어 알고리즘 연구 및 개발	○ 구동용 제어 알고리즘 연구 - IPMSM 제어 이론 바탕 구동시스템 수학적 모델링 도출 완료 - 벡터전류제어 적용 순시 토크 제어 알고리즘 모델링 도출 완료 - 상용 해석 Tool 활용 DR-PMSM 순시 토크 제어/성능 확인 ○ 축소형 4.5kW급 DR-PMSM에 대한 실제 구동 환경 고려 시뮬레이션 구성 및 제어 알고리즘 검토 - 제어 알고리즘 구현 및 검증 완료	30	30
○ 설계 기법 검증을 위한 축소형 DR-PMSM 및 구동용 Drive 시제품 제작	○ 45kW급 DR-PMSM 설계를 기반으로 축소형 4.5kW 설계 - 45kW급 DR-PMSM에 적용된 설계 기법을 기반으로 4.5kW 기초/최종 설계 완료 - 4.5kW급 DR-PMSM 시제품 제작을 위한 모델링 완료 - 4.5kW급 DR-PMSM 실제 제작 시 필요 사항 검토 및 제작성 문제에 대한 해결 방법 도출 완료 ○ 4.5kW급 DR-PMSM 인버터 시제품 제작 및 제어 보드 검증 - DR-PMSM 구동을 위한 기능 탑재 제어보드 설계완료 - 인버터에 대한 소자 채택 및 설계 완료 후 제작완료 - 제어보드 검증을 위한 PWM 회로구현 및 검증 완료 - 레졸버 및 ADC 회로 구현 및 검증완료 후 제어보드 시제품 제작	25	25
○ DR-PMSM 성능 평가 기술 확보	○ 4.5kW급 DR-PMSM 부하장치 활용 성능 평가 방안 - 간이 부하장치 동작 테스트 평가 방안 도출완료 - 간이 부하장치를 활용한 무부하 시험에 대한 방법 도출완료 - 간이 부하장치를 활용한 부하 시험 방법 도출 완료	15	15
합계		100	100

(2) 정량적 목표 및 달성 여부

- 본 연구사업의 성과점검 기준표에 명시된 정량적인 성과 100% 이상 달성
- 논문 성과목표 대비 200% 달성(목표 논문 4건 대비 4건 초과 달성 : SCI-E급 논문 2건, KCI급 논문 2건)
- 특허 출원 및 등록 성과목표 대비 100% 달성(목표 출원 3건/등록 1건)
- 시제품 제작 성과목표 대비 100% 달성(목표 시제품 2건)
- 인력양성 성과목표 대비 100% 달성(석사 졸업생 2명)
- 보고서 성과목표 대비 100% 달성(목표 보고서 2건)
- 기술요약정보 성과목표 대비 100% 달성(석사 기술요약정보 2건)

표 3-가-2 정량적 성과목표 및 달성여부

구분	핵심 성과물 (level1)	단위 성과물 (level2)	당해단계 성과목표				실적목표/달성치	
			질적목표(측정방법)		목표치/달성치	검증방법		
주관	1	45kW급 DR-PMSM 설계 기술 개발	1-1 철도 차량 구동용 45kW급 DR -PMSM 설계 기법	①	기본설계/상세설계 데이터 도출 (제작시양서 대비 설계결과 비교)	출력 45kW / (보완 전)출력 47kW (보완 후)47kW 효율 92% 이상 / (보완 전)효율 9 6.1% (보완 후)95.4% 토크 720Nm / (보완 전)토크 21 10Nm (보완 후)2110Nm 속도 600rpm / 속도 600rpm달성 완료	설계서 및 도면	특허 : 출원1/1건 등록 1건 논문 : 1/3건 시제품 : 1건 S/W : 1건
				②	전자기적 특성해석 데이터 도출 (제작시양서 대비 특성 데이터 비교)	특성분석 데이터 / 특성분석 데이터 도출 완료	수치해석적 특성 분석 보고서로 평가	
				③	최종설계 도면 (도면 확인)	출력 45kW / (보완 전)출력 47kW (보완 후)47kW 효율 92% 이상 / (보완 전)효율 9 6.1% (보완 후)95.4% 토크 720Nm / (보완 전)토크 21 10Nm (보완 후)2110Nm 속도 600rpm / 속도 600rpm달성 완료	최종 제작도면	
		45kW급 DR-PMSM 제어 기술 개발	1-2 축소형 DR -PMSM 및 구동용 Drive 시제품	①	축소형 DR-PMSM 시제품 (시제품의 간섭하장치 활용 출력/토크/속도 측정)	출력 4.5kW / (보완 전)출력 4 5kW 달성 (보완 후)4.5kW 효율 90% 이상 / (보완 전)효율 95.5%(보완 후)93.8% 고토크부 정격 시 토크 200Nm@214rpm / (보완 전, 후) 토크 202Nm 최고속도시토크 72Nm @ 600rpm / (보완 전, 후) 만족 202Nm	수치해석적 설계/특성 분석보고서상 의 계산값과의 비교 평가	특허 : 출원1/1건 등록1/1건 논문 : 1건 시제품 : 2/2건 S/W : 1건 인력양성 : 1/1건
				②	축소형 구동 Drive 시제품 (시제품의 간섭하장치 활용 입출력 전압/전류 측정)	출력 6kVA급 시제품 / 출력 6kVA급 시제품 제작 완료	시뮬레이션 설계/특성 분석보고서상 의 계산값과의 비교 평가	
				①	시스템 모델링 기반 제어 알고리즘 도출 (시뮬레이션 Tool 활용 알고리즘 유효성	최적 알고리즘 도출 / 최적 알고리즘 도출 달성	시뮬레이션 결과 검증 결과보고서로 평가	

			제어 알고리즘		분석)			S/W : <u> </u> 건 보고서 : <u> </u> 1/1건 기술요약정보 : <u> </u> 1/1건 인력양성 : <u> </u> 1/1건
				②	제어알고리즘 성능 분석 데이터 (시뮬레이션 Tool 활용 제어성능 계산)	토크/속도 제어 오차율 5% 이내 만족 / 토크/속도 제어 오차율 5% 이내 달성	시뮬레이션 결과의 목표치와의 비교 분석 및 검증 결과보고서	
				③	제어기 시간영역 성능 만족 (상능시험설비를 활용 제어성능 확인)	상능시험 설비를 활용 제어 알고리즘 성능-안정도 검증 / 알고리즘 성능-안정도 검증완료	제어 특성 분석보고서	
				①	성능평가(안) (전문가 자문 실시)	2중회전자 구조의 성능평가 방법 도출 / 성능평가 방법 도출 완료	전문가 자문을 통한 유효성 검증	
3	DR-PMSM 성능 평가 기술 개발	3-1	축소형 DR-PMSM 및 구동 Drive 간이 부하 장치 활용 성능 평가 기술	②	출력, 효율, 속도, 토크 성능 계측 데이터 (상능시험설비를 활용 측정)	출력 4.5kW / (보완 전)출력 4.5kW 달성 (보완 후)4.5kW 효율 90% 이상 / (보완 전)효율 95.5%(보완 후)93.8% 고토크부 정격 시 토크 200Nm @ 214rpm / (보완 전, 후) 토크 202Nm 최대속도 시 토크 72Nm @ 600rpm / (보완 전, 후) 만족 202Nm	시험 성적서	특허 : 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문 : <u> </u> 1/2건 시제품 : <u> </u> 건 S/W : <u> </u> 건 보고서 : <u> </u> 1/1건 기술요약정보 : <u> </u> 1/1건
계								특허 : 출원 <u> </u> 3/3건 등록 <u> </u> 1/1건 논문 : <u> </u> 4/8건 시제품 : <u> </u> 2/2건 인력양성 : <u> </u> 2/2건 보고서 : <u> </u> 2/2건 기술요약정보 : <u> </u> 2/2건

나. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

(1) 목표 미달성 부분의 원인 분석

- 해당 사항 없음

(2) 차후 대책

본 연구에서는 전체 연구 기간에 대해 정성적, 정량적 목표를 모두 달성하였다. 본 연구를 통해 철도차량용 무기어 추진시스템 구현을 위한 비접촉 방식의 감속기 및 견인전동기의 일체화를 위한 2중 회전자 구조 동기전동기(DR-PMSM)에 대한 원천기술 개발을 완료하였다. DR-PMSM 설계 기법 연구 및 45kW급 DR-PMSM에 대한 기본 및 최적 설계를 완료하였으며, 이를 바탕으로 1/10 축적비를 적용한 4.5kW급 축소형 DR-PMSM에 대한 설계 및 제작을 완료하였다. 그리고 이를 제어하기 위해 기존 IPMSM 제어 방법에 대해 수학적 모델링 기반 모터 타입 결정 후 그에 적합한 시뮬레이션을 구현한 개선된 제어방법을 제안하였으며, 시험값과 해석값의 비교 결과 오차가 1.5% 내외임을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 실제 구동에 필요한 제어보드와 인버터에 대해 설계 및 제작을 완료하였으며, 4.5kW급 축소형DR-PMSM의 성능평가를 위한 방안 도출 및 성능시험을 수행하였다.

다만, 본 연구에서 4.5kW급 DR-PMSM 시제품 제작과 성능시험을 거치면서 추가보완이 필요했던 부분은 다음과 같이 정리가 가능하다.

☞ DR-PMSM 시제품의 제작 완성도 미흡에 따른 성능시험 범위의 한계

- 4.5kW급 DR-PMSM의 시제품 제작 시 외측 회전자(폴피스) 측의 총 2회에 걸친 재가공 및 수정 공정을 거쳐서 3번의 외측 회전자(폴피스) 시제품까지 제작이 되었지만, 최종 조립을 완료한 4.5kW급 DR-PMSM 2차 시제품의 2중 회전자 편심 문제를 해결할 수 없었다.
- 2중 회전자의 편심은 결국 3상 전류 불평형 현상을 야기시키고, 이로 인해 DR-PMSM의 전류제어 성능에 큰 영향을 주어 고속영역에서의 제어성이 떨어지는 문제가 발생하였다.

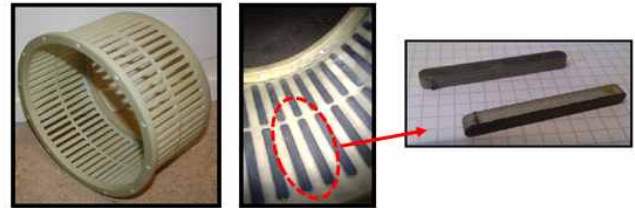
본 연구에서 다룬 DR-PMSM은 2중 회전자 2중 공극을 갖고 있기에 기존의 견인전동기와 구조 자체가 매우 다르며, 구동원리 및 설계 방법이 상이하기에 용량에 따라 DR-PMSM의 특성을 예측하기 어렵다. 이를 해결하기 위해서는 현재까지 정립된 설계 기법을 토대로 DR-PMSM의 정확한 성능 예측을 위한 설계 및 해석 기법의 고도화 연구가 필수적이다. 또한 이를 구동하기 위한 DR-PMSM용 제어 기법 및 알고리즘 정립에 관한 추가적인 연구 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서 검토된 선행 연구 결과를 토대로 DR-PMSM을 도시철도차량 구동용 시스템에 적용시키기 위한 추가 연구를 진행할 계획이다. 향후 추진할 추가 연구에서는 본 연구에서 미흡했던 DR-PMSM 시제품 외측(폴피스) 회전자 제작 및 강성 확

보 기술과 관련하여 다음의 내용을 적용할 계획이다.

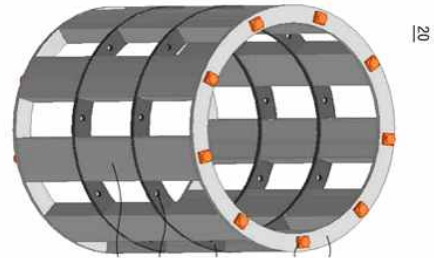
- ① FRP(Fiber-glass Reinforcement Plastics, 강화플라스틱) 재질 고강도봉과 엔드링 적용
- ② FRP 외측 회전자 프레임에 SMC(Soft magnetic composite, 연자성 복합재료)로 만든 폴피스 삽입 구조 적용
- ③ 외측 회전자의 비틀림 강성 확보를 위해 적층 코어 중간에 비자성 SUS 강화링을 삽입하는 구조 적용



① FRP 재질 고강도봉과 엔드링 적용



② FRP rotor 프레임에 SMC 폴피스 적용



③ 비틀림 강성 확보용 비전도성 재질의 강화링 적용

그림 3-나-1 DR-PMSM의 폴피스 회전자 시제품 제작 완성도를 높이기 위한 차후 대책

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 연구개발 성과의 활용 계획

본 연구개발성과의 활용 계획은 다음과 같다.

① 신교통 시스템용 추진시스템 구축을 위한 기반 기술 확보 및 교통 분야 신성장 동력 창출에 활용

☞ 기존 대중교통 대비 경제성과 친환경성에서 유리한 미래 신교통 시스템이 주목 받고 있다. 이에 DR-PMSM의 연구개발 및 그 성과는 신교통 시스템용 추진시스템 구축을 위한 기반 기술 확보 및 교통 분야 신성장 동력 창출을 가능하게 할 것이다.

② DR-PMSM 기술에 대한 원천 기술 확보를 통한 관련 분야에서의 기술선점 및 해외 수출, 세계 시장 개척에 활용

☞ 해당 기술에 대한 원천 기술 확보는 기술이 적용 및 응용되는 분야에서의 기술선점이 가능하며 이는 기술의 해외 수출 및 세계 시장 개척에 활용될 수 있다.

③ DR-PMSM 설계 및 제어 기술의 실용화를 통해 철도차량 및 전기자동차 구동시스템 제작업체 및 수요처에 관련 기술의 이전에 활용

☞ 또한 연구개발을 통해 얻어진 설계/제어관련 데이터와 그 노하우는 DR-PMSM 설계 및 제어 요소 기술의 발전 및 응용의 초석이 되며 이를 상용화하기 위한 과정에서도 보다 현실적으로 구현 가능한 방향에 대해 제시 할 수 있으며 전기철도차량 및 전기자동차 구동 시스템 제작업체 및 수요처에 대해 관련 기술의 이전이 가능하다.

④ 전기철도차량 및 전기자동차 구동시스템의 고효율화를 위한 발전 전략 수립의 기초 및 정부 정책 수립의 기초 자료로 활용

☞ 본 연구 사업에서 도출된 연구 결과물은 체계적인 관리가 가능하도록 구성이 되었으며, 전기철도차량 및 전기자동차 구동시스템의 고효율화를 위한 발전 전략 수립의 기초 및 정부 정책 수립의 기초 자료로 활용이 가능하다.

⑤ DR-PMSM을 적용 범위 확대를 위해 K-AGT(한국형 표준 고무차륜 경전철)에 적용 방안 검토 및 현장적용성 확보를 위한 적용가능성 범위 제시

☞ 본 연구 사업에서 도출된 연구 결과물은 국내 최초 45kW급 무가선 트램용 견인전동기를 대상으로 검토한 연구이며, 적용 범위 확대를 위해 고무차륜 방식으로 개발된 K-AGT에 적용하는 방안 검토 및 적용가능성에 대한 범위를 제시할 수 있다.

☞ K-AGT 구동장치의 견인전동기는 3상 110kW급 농형 유도전동기이며, 치차비 6.833을 가지는 1단 감속 차동기어방식으로 구성되어 있고, 동력대차의 차동기어와 견인전동기의 공간에 DR-PMSM의 적용을 위해 차동기어를 제거하고 고무차륜 간의 공간에 DR-PMSM을 적용하여 차축정렬방식의 새로운 구동장치로 제시할 수 있다.

☞ 본 연구에서 적용되는 트램은 저상대차 구조로 전동기 취부공간에 제한을 갖지만,

K-AGT는 상대적으로 높은 대차구조로 인해 공간활용도가 높아서 적용이 가능하다.

※ 취부 공간: 트램[차륜경(620mm)/축방향길이(450mm)], K-AGT[차륜경(445mm)/축방향길이(1,000mm)]

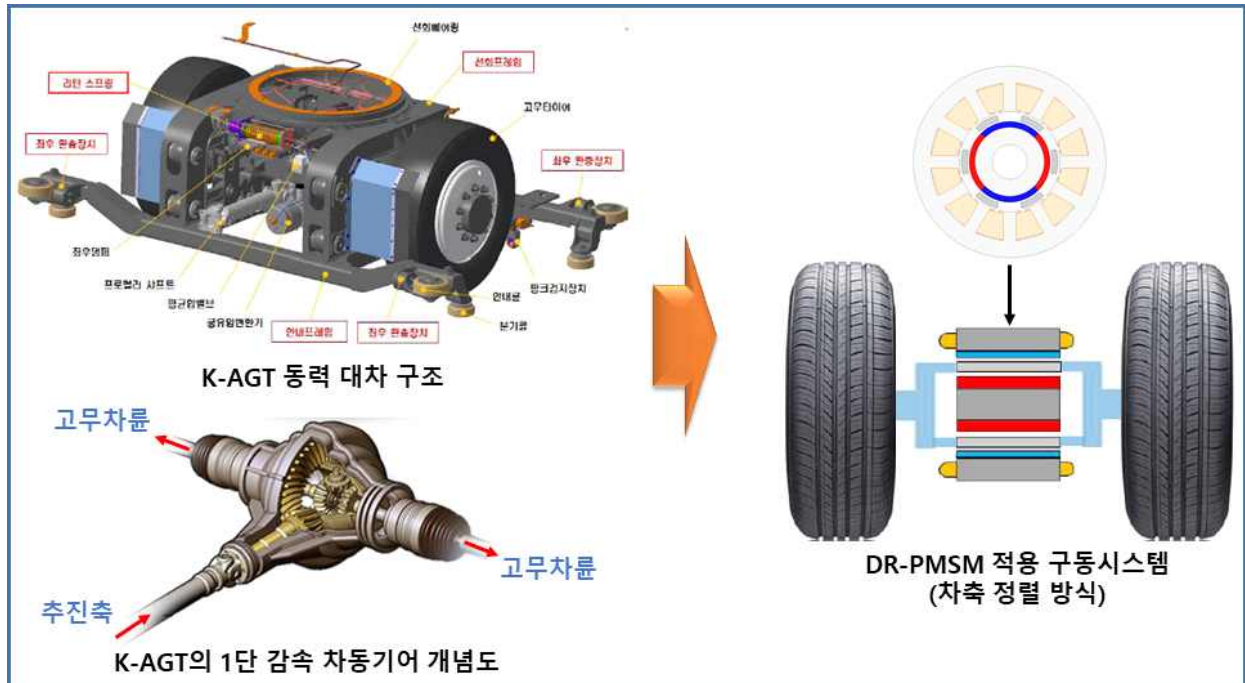


그림 4-가-1 K-AGT의 기존 구동시스템 개선을 위한 DR-PMSM 적용(안)

⑥ DR-PMSM을 적용 범위 확대를 위한 도시철도차량 구동용 시스템에 적용시키기 위해서 2021년도 DR-PMSM 기술 개발 연구에 활용

- ☞ 본 연구에서 검토된 선행 연구 결과를 토대로 DR-PMSM을 도시철도차량 구동용 시스템에 적용시키기 위해서 DR-PMSM 기술 개발 연구를 아래와 같이 2단계로 구분하여 진행할 계획이다.
- ☞ 또한, 도시철도차량용 DR-PMSM의 실용화 기술 개발 연구사업에서 철도 안전법 및 철도차량기술기준에 의거한 인증과 검증기준을 정립할 계획이다.

- 1단계 : 도시철도차량용 DR-PMSM의 핵심기술 개발 연구
 - 2021년도에 착수하는 국토교통부 철도차량부품 연구개발사업 중 “마그네틱 기어드 방식 동력전달시스템 개발(2021년~2025년, 4년 9개월)” 사업에 제안
 - 철도차량용 210kW급 DR-PMSM 핵심기술 개발 연구 추진
- 2단계 : 도시철도차량용 DR-PMSM의 실용화 기술 개발 연구
 - 도시철도차량에 DR-PMSM 기술을 적용시키기 위한 실용화 기술 개발 사업을 향후 2026년부터 착수하는 철도차량부품 연구개발사업에 포함시켜 진행할 계획임

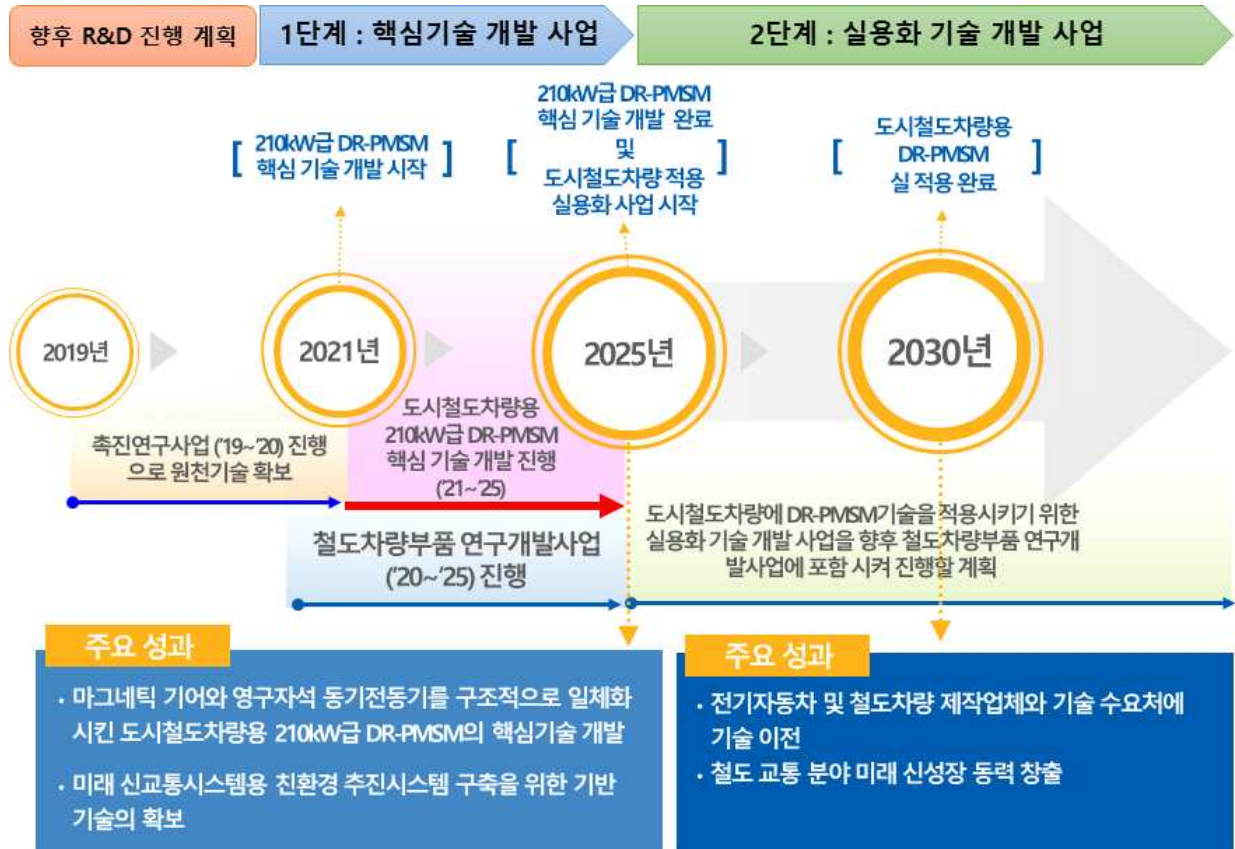


그림 4-가-2 향후 DR-PMSM 기술 관련 R&D 진행 계획

비매 품/무료



주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진 사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.