



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

토폴로지 최적화를 이용한 산업용
동기 릴럭턴스 전동기 최적설계

**Optimal Design of Industrial
Synchronous Reluctance Motor Using
Topology Optimization**

2022년 6월

울산대학교 대학원

전기·전자·컴퓨터 공학과

이 태 희

토폴로지 최적화를 이용한 산업용 동기
릴러턴스 전동기 최적설계

지도교수 임 동 국

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2022년 6월

울산대학교 대학원
전기·전자·컴퓨터 공학과
이 태 희

이태희의 공학석사 학위논문을 인준함

심사위원장 : 전태원 

심사위원 : 임동국 

심사위원 : 김상원 

울산대학교 대학원

2022년 8월

국문초록

본 논문에서는 IE4(super premium efficiency) 등급 산업용 동기 릴럭턴스 전동기(synchronous reluctance motor: SynRM)의 최적 설계에 적용할 수 있는 토폴로지 최적화(topology optimization: TO)를 제안한다.

SynRM은 회전자의 돌극성을 활용한 릴럭턴스 토크로 구동되는 전동기이다. 유도전동기보다 높은 효율을 가지며, 영구자석을 사용하지 않아서 가격이 저렴하고 안정성이 높다는 장점이 있다. SynRM의 릴럭턴스 토크를 최대화하는 최적형상은 복잡한 구조이기 때문에 기존 매개변수 알고리즘으로 탐색하기 어렵다. 따라서 형상을 작은 셀로 나누어 재질을 반전시키며 최적해를 탐색하는 TO를 적용한다. TO는 매개변수 알고리즘의 빠른 수렴성과 토폴로지 최적화 기법의 복잡하고 다양한 형상 탐색능력을 활용하기 위해서 매개변수 알고리즘을 활용한 초기 설계 및 메쉬그리드 설정과 ON-OFF 기법을 활용한 토폴로지 세부 최적화로 구성된다.

효율적인 토폴로지 탐색을 위해서 개선된 니칭 알고리즘을 SynRM의 공기 장벽을 구성하는 타원 곡률 최적화에 적용하여 초기 설계안을 얻고 설계범위에 메쉬그리드를 생성하였다. ON-OFF 기법의 최적해 탐색에 필요한 해석 횟수를 획기적으로 줄이기 위해 경계면 ON-OFF 기법을 적용하였다. 이후 불연속적인 구조에 비율기반 평탄화 기법을 적용하여 SynRM의 성능을 개선하고 제조 난도를 낮췄다. 마지막으로 스큐 기법을 이용하여 토크 리플을 줄이고 응력해석을 통해 기계적 안정성을 확인하였다. 제안한 토폴로지 최적화는 IE4 급 산업용 SynRM 최적 설계에 적용되어 요구조건을 만족하는 최적 설계안을 도출하였다.

주요어 : 니칭 알고리즘(niching algorithm), 산업용 전동기(industrial motors), ON-OFF 기법 (ON-OFF method), 스무딩 (smoothing), 동기 릴럭턴스 모터 (synchronous reluctance motor), 토폴로지 최적화 (topology optimization).

학 번 : 20205102

목 차

| | |
|--------------------------------------|----|
| 국문초록..... | i |
| 목 차..... | ii |
| 그림 목차..... | iv |
| 표 목차..... | v |
| 기호 및 약어 설명..... | vi |
| | |
| 제 1 장 서 론..... | 1 |
| 1.1 연구 배경 및 목적..... | 1 |
| 1.2 논문 구성..... | 7 |
| | |
| 제 2 장 SynRM의 구조와 수학적 모델링..... | 8 |
| 2.1 SynRM의 구조..... | 8 |
| 2.1.1 SynRM의 기본원리..... | 8 |
| 2.1.2 SynRM의 적층기법..... | 10 |
| 2.2 SynRM의 수학적 모델링..... | 12 |
| 2.2.1 등가회로 구성..... | 12 |
| 2.3 FEM을 이용한 SynRM 해석..... | 16 |
| | |
| 제 3 장 매개변수 알고리즘을 이용한 메쉬그리드 설정..... | 18 |
| 3.1 매개변수 알고리즘..... | 19 |
| 3.1.1 기존 니칭 알고리즘..... | 20 |
| 3.1.2 개선된 니칭 알고리즘:ANA..... | 21 |
| 3.1.3 알고리즘들의 수학적 예제 함수 적용..... | 24 |
| 3.2 ANA를 활용한 토폴로지 메쉬그리드 최적화..... | 26 |
| | |
| 제 4 장 토폴로지 최적화를 이용한 SynRM 최적 설계..... | 31 |
| 4.1 경계면 ON-OFF 기법..... | 32 |
| 4.1.1 기존 ON-OFF 기법..... | 32 |
| 4.1.2 제안하는 경계면 ON-OFF 기법..... | 34 |

| | |
|--------------------------|----|
| 4.2 스무딩 기법..... | 36 |
| 4.3 스큐 기법..... | 38 |
| 4.4 응력해석..... | 41 |
| | |
| 제 5 장 결론 및 향후 연구 계획..... | 42 |
| 5.1 결론..... | 42 |
| 5.2 향후 연구..... | 43 |
| | |
| 참고 문헌..... | 44 |
| Abstract..... | 48 |

그림 목차

| | |
|---|----|
| 그림 1.1. 전동기 용량별 효율 기준 및 등급 (4극 60Hz 기준)..... | 2 |
| 그림 1.2. 정격출력에 따른 유도전동기의 손실 구성..... | 3 |
| 그림 2.1. SynRM의 원리..... | 8 |
| 그림 2.2. 4극 SynRM의 회전자 예..... | 9 |
| 그림 2.3. 적층으로 인한 와전류 감소 효과의 예..... | 11 |
| 그림 2.4. 4극 SynRM의 두 가지 적층 방식. (a) ALA 회전자, (b) TLA..... | 11 |
| 회전자..... | 11 |
| 그림 2.5. SynRM의 등가회로..... | 13 |
| 그림 2.6. SynRM의 페이저도..... | 13 |
| 그림 3.1. 다중 최적점 함수의 예..... | 19 |
| 그림 3.2. (a) 기존의 ANGA와, (b) ANA의 개념도..... | 20 |
| 그림 3.3. ANA의 흐름도..... | 21 |
| 그림 3.4. LHS의 예..... | 22 |
| 그림 3.5. PSM의 예..... | 22 |
| 그림 3.6. 니체 범위에 새로운 초기점이 생성되었을 때의 예..... | 23 |
| 그림 3.7. 예제 함수의 3차원 형상 (a) 예제 함수 1, (b) 예제 함수 2..... | 24 |
| 그림 3.8. TO의 흐름도..... | 26 |
| 그림 3.9. 메쉬그리드 생성의 예 (a) 정방향 메쉬그리드, (b) 역방향..... | 27 |
| 메쉬그리드..... | 27 |
| 그림 3.10. 코어를 통해 흐르는 자속..... | 28 |
| 그림 3.11. ANA에 적용되는 목표변수..... | 28 |
| 그림 3.12. 초기 모델의 형상 및 자속밀도..... | 29 |
| 그림 3.13. ANA 적용 결과 얻어진 SynRM 모델들의 형상 및 자속밀도..... | 29 |
| 그림 4.1. ON-OFF 기법의 적용 예..... | 33 |
| 그림 4.2. 경계면 ON-OFF 기법의 적용 예..... | 35 |
| 그림 4.3. 경계면 ON-OFF 기법으로 얻은 최적 모델의 형상과 자속밀도..... | 35 |
| 그림 4.4. 스무딩 기법 적용의 예..... | 36 |
| 그림 4.5. 스무딩 기법 적용 모델의 형상과 자속밀도..... | 37 |
| 그림 4.6. 스큐 기법 적용의 예..... | 38 |
| 그림 4.7. 스무딩 기법 적용 토크 파형 비교. (a) 적용 전, (b) 적용 후..... | 39 |
| 그림 4.8. 응력해석 결과..... | 41 |

표 목차

| | |
|--|----|
| 표 1.1. 우리나라 전동기 효율규제 기준과 시행일자..... | 2 |
| 표 1.2. IE4 급 적용 가능 전동기..... | 4 |
| 표 1.3. IE5 급 적용 가능 전동기..... | 4 |
| 표 1.4. IE4 및 IE5 급 전동기 상용화 예상 시점..... | 5 |
| 표 1.5. IE4 및 IE5 급 전동기 의무사용 예상 시점..... | 5 |
| 표 1.6. 전동기 종류별 특징 비교..... | 5 |
| 표 3.1. ANGA와 ANA의 성능 비교..... | 25 |
| 표 3.2. 대상전동기의 설계 요구조건..... | 30 |
| 표 3.3. 대상 모터의 사양..... | 30 |
| 표 3.4. ANA 최적화 결과 4개 모델의 평균 토크 및 토크리플..... | 30 |
| 표 4.1. 최적화 과정에 따른 평균 토크와 토크리플 변화..... | 40 |

기호 및 약어 설명

| | |
|-------------|--|
| i_{ds} | d 축 전류[A] |
| i_{qs} | q 축 전류[A] |
| i_{do} | d 축 쇄교 전류[A] |
| i_{dq} | q 축 쇄교 전류[A] |
| v_{ds} | d 축 단자 전압[V] |
| v_{qs} | q 축 단자 전압[V] |
| r_s | 코일 상저항[Ω] |
| θ | 전류 위상각[rad] |
| w_r | 동기 전기 각속도[rad/s] |
| λ_m | 영구자석에 의한 쇄교자속[Wb] |
| λ_d | d 축 쇄교자속[Wb] |
| λ_q | q 축 쇄교자속[Wb] |
| L_d | d 축 인덕턴스[H] |
| L_q | q 축 인덕턴스[H] |
| T_{ave} | 평균 토크[Nm] |
| T_m | 자석 토크[Nm] |
| T_r | 자기저항 토크[Nm] |
| T_{max} | 최대 토크[Nm] |
| N_p | 극 수 |
| SynRM | 동기 릴럭턴스 전동기(synchronous reluctance motor) |
| SRM | 스위치드 릴럭턴스 전동기(switched reluctance motor) |
| SPMSM | 부착형 영구자석 전동기(surface-mounted permanent magnet synchronous motor) |
| IPMSM | 삽입형 영구자석 전동기(inserted permanent magnet synchronous motor) |
| LS | 라인 기동(line start) |
| IM | 유도전동기(induction motor) |
| ALA | 축 방향 적층 이방성(axially laminated anisotropy) |
| TLA | 횡 방향 적층 이방성(transversally laminated anisotropy) |
| FEM | 유한요소법(finite element method) |
| GA | 유전 알고리즘(genetic algorithm) |
| OF | 목적함수(objective function) |
| LHS | 라틴 하이퍼 큐브 샘플링(latin hypercube sampling) |
| TO | 토폴로지 최적화(topology optimization) |

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

지구 온난화로 인한 이상기후 문제에 대응하기 위해서 1997년 일본 교토에서 개최된 제3차 유엔기후변화협약(UNFCCC) 당사국총회(COP3)에서 몇몇 선진국들에 의해 교토의정서가 채택된 이후, 2015년 거의 모든 국가가 참여한 파리협정으로 확대되는 등 움직임을 꾸준히 지속하고 있다. 지구 평균기온이 6°C 상승하면 지구상의 생물 종이 90% 멸종하며, 2°C가 상승한다면 지구의 온도를 유지해주는 자연요소들이 연쇄적으로 파괴되며 6°C의 종말로 향하는 흐름을 멈추기가 어렵다 [1]. 이를 막기 위해서 파리협정은 지구 평균기온 상승을 산업화 이전 대비 2°C보다 상당히 낮은 수준으로 유지하고, 1.5°C로 제한하기 위해 노력한다는 전 지구적 장기목표 아래에 모든 국가가 2020년부터 기후 행동에 참여하며, 5년 주기 이행점검을 통해 점차 노력을 강화하도록 규정하고 있다. 이와 같은 국제적인 노력으로 전 세계적으로 재생에너지 소비를 확대해 화석연료를 덜 의존하려는 움직임이 보이며 이에 따라 지난해 석유 소비량은 9%가량 감소한 것에 반해, 태양광, 태양열 풍력 등을 비롯한 재생에너지원의 소비는 9.7% 증가했다 [2].

전 세계 전력사용량의 43~46%를 차지하는 전동기에 대한 규제도 강화되고 있다. 국제전기기술위원회(international electrotechnical commission: IEC)는 2008년에 IE1, IE2, IE3의 전동기 효율 등급을 규정한 이후 [3], 2014년에 IE4와 IE5 등급을 추가로 제시하였다 [4]. 그림 1.1은 IEC 60034-30-1에서 규정한 전동기 용량별 효율 기준 및 등급이다 [5-6]. 환경 및 에너지 문제를 해결하기 위해서 미국과 멕시코는 2010년부터 3상 유도전동기에 대한 IE3 효율을 의무화시키고 있으며 캐나다 및 EU 국가도 2011년도부터 IE3 급의 효율 전동기에 규제를 시행하였다. 이 밖의 나라에서도 IE2~IE3 수준에서 국가 표준을 정하여 시행하고 있다. 국가 전력소비량의 약 54%, 산업부문 전력소비량의 70%를 전동기가 차지하는 한국도 강도 높은 규제가 적용되고 있다 [7]. 우리나라는 2018년 10월부터 전동량에 대하여 IE3의 상향된 기준을 적용해 미달하는 전동기는 제조, 수입과 유통이 전면 금지되었다. 이에 대한 기준과 시행 일자는 표 1.1과 같다 [8]. 전동기 효율 규제가 IE2 급에서 IE3 급으로 상향된 것처럼 앞으로는 IE4 급의 전동기 효율 규제가 시행될 것으로 예측할 수 있다. 이에 따라 IE4와 IE5 등급 전동기에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [9].

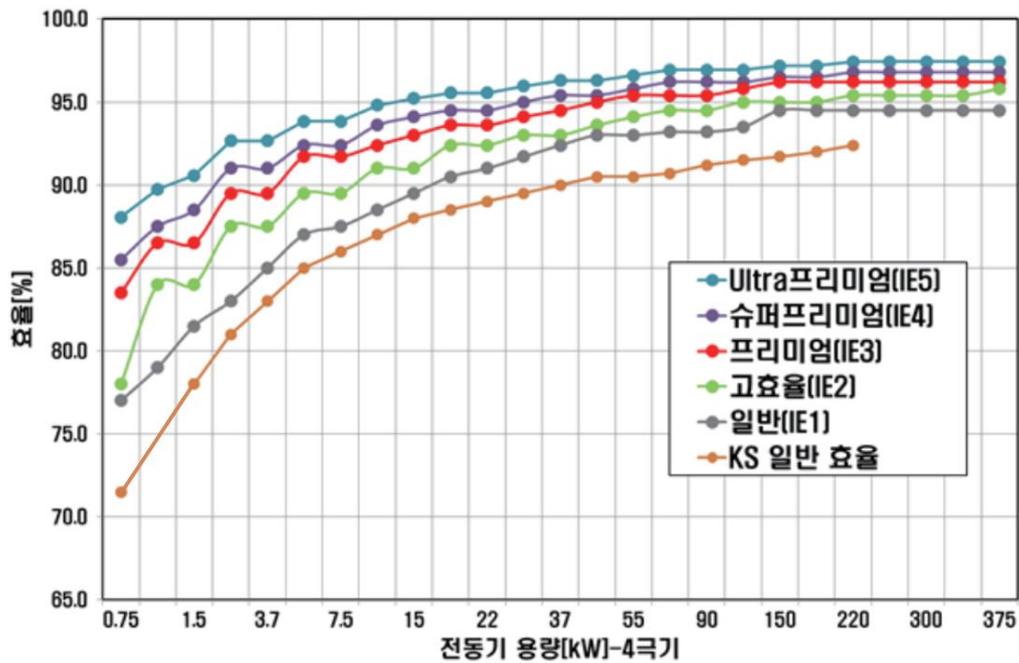


그림 1.1. 전동기 용량별 효율 기준 및 등급 (4극 60Hz 기준).

Figure 1.1. Efficiency standards and grades by motor capacity (based on 4 poles 60Hz).

표 1.1. 대한민국 전동기 효율 규제 기준과 시행 일자.

Table 1.1. Korea motor efficiency regulation standard and enforcement date.

| | | 0.75~15kW | 15~37kW | 37~200kW | 200~375kW |
|-----|------------|------------|------------|------------|------------|
| IE2 | Date | 2010.7. | 2010.1. | 2008.7. | 해당 없음 |
| | Efficiency | 효율 : 87.5% | 효율 : 93% | 효율 : 95% | |
| IE3 | Date | 2018.1. | 2018.10. | 2015.10. | 2016.10. |
| | Efficiency | 효율 : 89.5% | 효율 : 94.1% | 효율 : 95.8% | 효율 : 96.2% |

유도전동기(induction motor: IM)는 제어난이도가 낮으며, 영구자석을 사용하지 않아서 저렴하고 구조적으로 안정하다. IM은 전동기의 기본적인 형태이며 이때까지 많은 발전이 이루어져서 1930년의 37kW IM와 같은 규격의 전동기가 현재는 150kW의 출력을 낼 수 있다 [10]. 그러나 IM은 회전자의 도체 바에서 저항손실이 발생하는 구조적인 한계 때문에 대부분 IE3의 효율 등급을 가지고 있다. 그림 1.2에서 이를 확인할 수 있다. 그에 반해 SynRM은 회전자에 도체 바가 없으므로 IM보다 효율 측면에서 유리하다. “Technological Feasibility Studies for Super-Premium(IE4) & Ultra-Premium(IE5) Efficiency Motors” 보고서에서 세 종류의 전동기들의 용량별 효율 제한 제작 가능성과 상용화 및 의무사용 시기를 표 1.2~5와 같이 예상하였다. 표 1.2, 1.3 에서 IM과 라인 기동식 동기 릴럭턴스 전동기(line start synchronous reluctance motor: LS-SynRM), 라인 기동식 영구자석 전동기(line start permanent magnet motor: LSPM)의 IE4 및 IE5 적용 가능 여부를 확인할 수 있다. 용량별 타입별 실제 제작은 모두 가능하나 기준 효율을 만족하는 것이 불가능한 경우 X로 표시하였다. 라인 기동식이란 회전자에 댐핑 바를 설치하여 IM의 원리에 의해 기동 토크를 발생시키는 방식으로, 기동과 가변속 제어 시에 별도의 인버터가 필요하지 않는다는 장점이 있다 [11]. 표 1.3에서 확인할 수 있듯 IM은 250kW급의 대형 전동기가 아니라면 IE5 등급을 만족

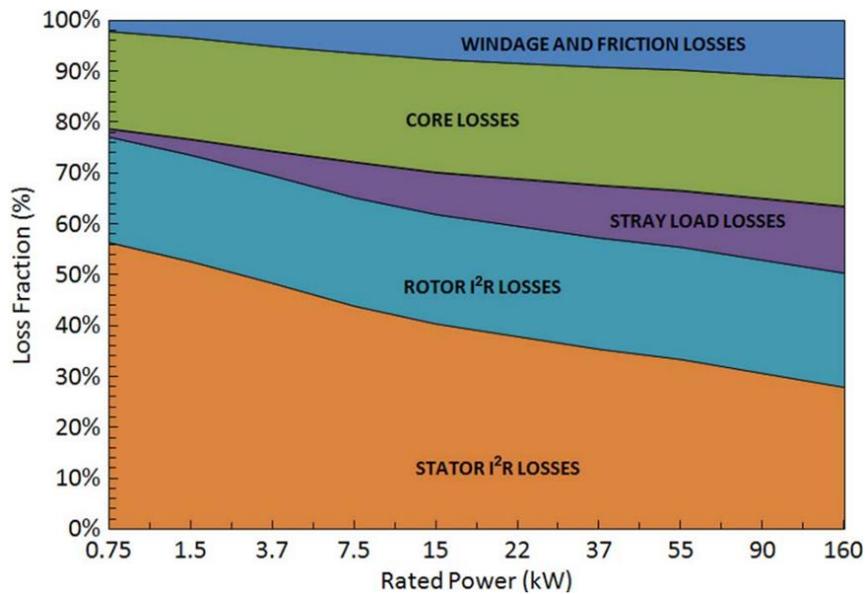


그림 1.2. 정격출력에 따른 IM의 손실 구성.

Figure 1.2. Loss composition of IM according to rated output.

하는 것이 불가능하나 LS-SynRM은 0.75kW급과 37kW급 모두 효율 등급을 만족하는 전동기 제작이 가능하다 [6, 12].

LSPM은 어떤 용량이든 제작이 가능한 전동기 타입이다. 이와 같은 영구자석을 동기 전동기는 높은 토크 밀도와 효율을 낼 수 있어서 많은 분야에 쓰인다 [13-15]. 그러나 회전자에 들어가는 희토류 영구자석이 문제가 된다. 희토류계 영구자석을 제조하기 위해서 원자재를 분리 및 정제하는 과정에서 상당한 환경 오염물질이 배출된다. 희토류 채굴 후 추출, 분리과정에서 사용되는 화학약품으로 인해서 희토류 1톤 생산 시에 황산이 포함된 6300만 리터의 독성가스와 20만 리터의 산성폐수, 1.4톤의 방사성 폐수가 발생한다 [16]. 이러한 이유로 중국이 58.3%로 전체 생산량의 절반 이상을 차지하며, 다음으로 미국 15.8%, 미얀마 12.5%, 호주 7.1% 순이다 [17]. 세계적으로 희토류 사용을 억제하고 대체재 개발과 재사용 기술 연구에 열을 올리고 있는 시점에서 희토류 영구자석을 이용한 전동기는 한정된 질량과 공간에서 큰 토크 밀도를 생성할 수 있다는 장점이 극대화되는 무인항공기, 인공위성, 자동차, 로봇 등의 이동형 어플리케이션에 주로 사용된다. 이에 반해 산업용 전동기는 앞서 말한 어플리케이션에 비해서 중량 및 공간의 제약이 심하지 않으므로 가격이 훨씬 저렴하고 안정성이 높은 SynRM이 더욱 적합하다.

표 1.2. IE4 급 적용 가능 전동기.

Table 1.2. IE4 class applicable electric motor.

| Type | 15~37kW | 37~200kW | 200~375kW |
|----------|---------|----------|-----------|
| IM | ○ | □ | □ |
| LS-SynRM | ○ | □ | △ |
| LSPM | ○ | ○ | △ |

○: already in use, □: possible, △: partially possible, ×: impossible

표 1.3. IE5 급 적용 가능 전동기.

Table 1.3. IE5 class applicable electric motor.

| Type | 0.75kW | 37kW | 250kW |
|----------|--------|------|-------|
| IM | × | × | △ |
| LS-SynRM | □ | △ | × |
| LSPM | □ | □ | △ |

○: already in use, □: possible, △: partially possible, ×: impossible

표 1.4. IE4 및 IE5 급 전동기 상용화 예상 시점.

Table 1.4. Estimated time of commercialization of IE4 and IE5 class motors.

| | 0.75kW | 37kW | 250kW |
|------------|--------|------|-------|
| IE4 | 2023 | 2023 | 2025 |
| IE5 | 2031 | 2032 | 2036 |

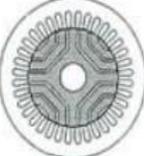
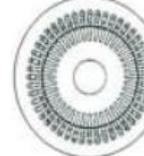
표 1.5. IE4 및 IE5 급 전동기 의무사용 예상 시점.

Table 1.5. Estimated time of mandatory use of IE4 and IE5 class motors.

| | 0.75kW | 37kW | 250kW |
|------------|--------|------|-------|
| IE4 | 2030 | 2029 | 2030 |
| IE5 | 2038 | 2037 | 2038 |

표 1.6. 전동기 종류별 특징 비교.

Table 1.6. Comparison of characteristics by type of motor.

| | SPM | IPM | SynRM | SRM | IM |
|------|---|---|---|--|---|
| 구조 |  |  |  |  |  |
| 효율 | ◎ | ◎ | △ | △ | × |
| 회전수 | ○ | ◎ | △ | ◎ | ○ |
| 토크 | ◎ | ◎ | ○ | ◎ | × |
| 토크리플 | ◎ | ○ | ○ | × | ◎ |
| 가격 | × | △ | ◎ | ◎ | ◎ |

◎: 매우 양호 ○: 양호, △: 보통, ×: 나쁨

스위치드 릴럭턴스 전동기(switched reluctance motor: SRM) 또한 SynRM과 같이 돌극형 구조로 이루어져 있으며, 그로 인한 자기저항 차이를 활용하는 전동기이다. 제작난이도가 쉽고 기계적으로 강인한 장점이 있으나, SynRM에 비해서 토크리플이 비교적 크다는 단점이 있다 [18]. 표 1.6에서 각 전동기 종류별 특징을 상대적으로 비교한 표를 확인할 수 있다. SPM과 IPM은 희토류 영구자석으로 인한 가격과 수급불안정성, IM은 효율 등급 제한문제로 인해 제외되었고, 산업용 전동기는 요구되는 출력을 일정하게 낼 수 있도록 토크리플이 작아야 하므로 토크리플이 큰 SRM 또한 제외되었다. 따라서 이 논문에서는 SynRM을 최

적 설계 전동기 종류로 채택하였다.

IE4 효율 등급을 만족하는 산업용 SynRM 설계를 위해서 전동기의 효율, 평균 토크, 토크리플과 같은 특성들을 고려해야 한다. 전동기는 비선형적인 자기 포화로 인해서 정확한 특성값을 산출하기 위해서는 유한요소법(finite element method : FEM) 해석이 필요하다. FEM은 대상을 유한요소들로 나누어 각 요소의 물리량을 합하여 전체의 특성을 얻는 방법으로 정확한 결과를 얻을 수 있어 많은 설계에 이용된다. 그러나 FEM은 필요한 연산량이 많아서 해석시간이 많이 걸린다. 해석 횟수를 최소화하며 최적 형상을 탐색하기 위해 다양한 최적화 기법들이 제안되었다 [19-22].

본 논문에서는 해석 횟수를 최소화하며 최적 형상을 찾기 위해서 토폴로지 최적화 (topology optimization : TO)를 사용하였다. TO는 설계범위의 형상 자체를 변경하여 복잡한 형상까지 탐색할 수 있는 장점이 있다. 이는 사용자의 예측 범위 내에서 최적 형상을 찾는 매개변수 최적화 기법과 대조되며, 더 다양한 모델을 탐색함에 따라 많은 해석 횟수가 필요하므로 해석 횟수를 줄이는 기법들이 필요하다.

1.2 논문 구성

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있다. 각 장의 연구 범위 및 내용은 아래와 같다.

제 1장에서는 SynRM의 주제로 설정한 연구 배경과 논문 구성에 대하여 요약하였다.

제 2장에서는 SynRM의 특성에 관해 설명하였다. SynRM의 동작 원리와 등가 회로를 통한 수학적 모델링을 수행한 뒤, 회전자 적층 형태를 비교하고 최적 설계에 적용할 구조를 선정하였다.

제 3장에서는 산업용 SynRM 설계에 TO의 적용을 위한 메쉬그리드 설정에 관해 기술하였다. 여기서 멀티모달 매개 변수 알고리즘인 개선된 니칭 알고리즘 (advanced niching algorithm: ANA)을 제안한다. ANA는 수학적 예제 함수에 적용되어 우수성을 확인하였다. SynRM 최적 설계를 위해서 요구조건과 기본적인 사양을 설정하고 ANA를 SynRM 최적 설계에 적용하여 1차 최적 모델과 메쉬그리드를 생성하였다.

제 4장에서는 1차 최적 모델에 TO를 수행하였다. 사전에 지정한 설계조건을 만족하는 최적 설계안을 도출하기 위해서 초기 최적화 모델에 경계면 적용 ON-OFF 기법을 적용하여 최적화 형상을 도출한 뒤, 추가적인 성능향상과 제작 난도를 낮추기 위해서 비율기반 평탄화 기법을 적용하였다. 이후 스큐를 적용하여 평균 토크, 토크리플 요구조건을 만족시켰고, 응력해석을 통해서 기계적인 안정성을 확인하였다.

제 5장에서는 본 논문에서 얻어진 결과를 요약하였다.

제 2 장 SynRM의 구조와 수학적 모델링

2.1 SynRM의 구조

2.1.1 SynRM의 기본원리

그림 2.1은 SynRM의 원리를 보여준다. 그림 2.1 에서 빨간색과 파란색 물체는 각각 N극 S극 자석이며 회색 물체는 철심과 같은 강자성체이다. 그림 2.1의 왼쪽 그림은 아무런 힘이 발생하지 않지만, 오른쪽 그림에서는 토크가 발생하여 막대가 시계방향으로 회전하게 된다. 자속은 자기저항이 가장 적게 발생하는 경로를 따라 흐르려고 한다. 공기는 철보다 대략 2000~6000배 더 큰 자기저항을 가지기 때문에 실제 경로가 길어도 자속은 강자성체를 따라 흐른다. 또한, 자기 저항이 작아지는 방향으로 강자성체를 정렬시키는 토크가 발생한다. 그림 2.1의 오른쪽에서 강자성체는 시계방향으로 회전한다.

그림 2.2는 4극 SynRM의 예이다. d (direct) 축 방향으로는 철심으로 구성되어 있어서 자속의 흐름이 원활하다. 그러나 q (quadrature) 축 방향으로는 공기로 구성된 자속 장벽으로 인하여 d 축보다 훨씬 큰 자기저항이 존재하며 자속이 흐름을 방해한다. d 축에서 일정 각도만큼 앞선 위상으로 회전자계를 외부에서 꾸준히 인가하여 SynRM에 토크를 발생시킬 수 있다.

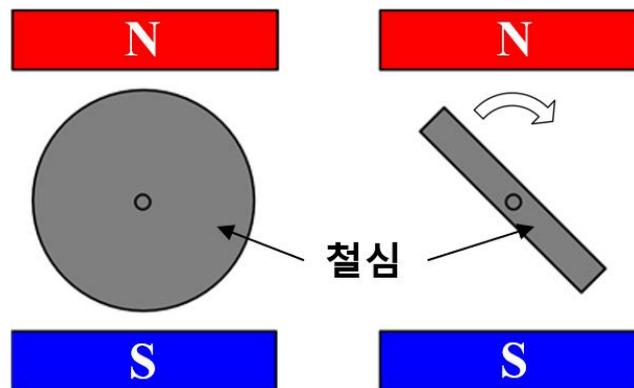


그림 2.1. SynRM의 원리.

Fig. 2.1. Principles of SynRM.

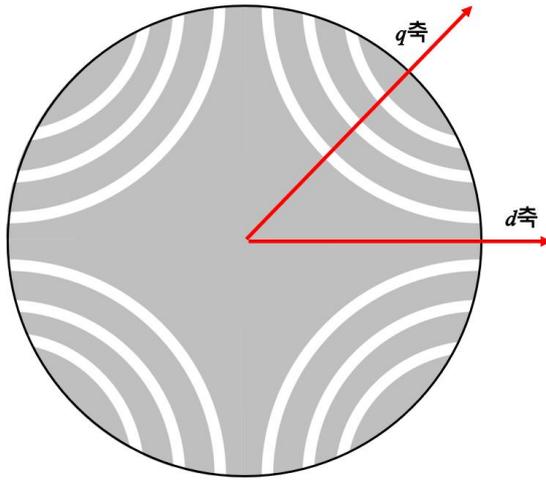


그림 2.2. 4극 SynRM의 회전자 예.

Fig. 2.2. Example of a rotor of a 4-pole SynRM.

2.1.2 SynRM의 적층 기법

SynRM의 회전자의 철심은 그림 2.3과 같이 축 방향 적층 이방성(axially laminated anisotropy: ALA) 회전자와 횡 방향 적층 이방성(transversally laminated anisotropy: TLA) 회전자로 나눌 수 있다. 고정자의 철심은 교류전류가 변화하며 축과 직교하는 평면에서 자속의 방향이 변하므로 횡 방향 적층 방법이 유일하지만, 회전자는 벡터 제어되는 회전자계와 같은 속도로 회전하므로 d 축으로 자속이 흐르고 q 축으로는 거의 흐르지 않는 상태가 유지되기 때문에 전동기의 축 방향으로도 적층할 수 있다. 두 적층 기법은 그림 2.3에서 확인할 수 있다.

ALA 회전자는 철심을 축 방향으로 절단하여 와전류를 최소화한다. 공기 장벽을 따라 적층하여 서로 다른 형태의 강판을 여럿 만들어서 리벳을 사용해 축에 고정하여 제작된다. ALA 회전자는 브릿지가 존재하지 않아서 브릿지에 의한 누설자속이 발생하지 않는다는 장점이 있다. 그러나 곡면 형태의 서로 다른 여러 강판을 제작해야 해서 설계 및 제작이 어렵고 이는 곧 제작단가의 상승으로 이어진다. 또한, 리벳에 의한 누설자속이 발생하며, 브릿지가 존재하지 않아서 기계적으로 불안정하다. 그리고 회전자에 비틀림을 줘서 토크리플을 감소시키는 스큐 기법을 적용하기가 어렵고 출력 증감 조절을 위한 설계수정이 필요하면 3D 도면 여러 장을 수정하여야 한다. 이에 반해 TLA 회전자는 다른 전동기의 회전자와 같이 프레스 공법을 통해서 쉽게 생산할 수 있으며, 쌓인 강판의 개수를 조절하여 축 방향 길이를 변경하여 간단하게 출력 조절을 할 수 있다. TLA 회전자는 토크리플을 획기적으로 줄일 수 있는 스큐 기법을 적용하기에도 적합하다. 도면 수정이 필요할 때도 2D 도면 하나만 수정하면 되며, 최적화 알고리즘을 통한 최적 설계안 탐색도 쉽다. 또한, 브릿지 부분으로 인해서 기계적 안정도가 높고, 조립 과정도 단순하다.

ALA 회전자는 TLA 회전자와 비교하면 돌극비를 크게 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 생산성과 설계변경의 자유도에서 TLA 회전자가 크게 유리하므로 SynRM 설계 문제에 보편적으로 많이 쓰인다 [23-24]. 따라서 이 논문에서도 TLA 회전자를 채택하였다.

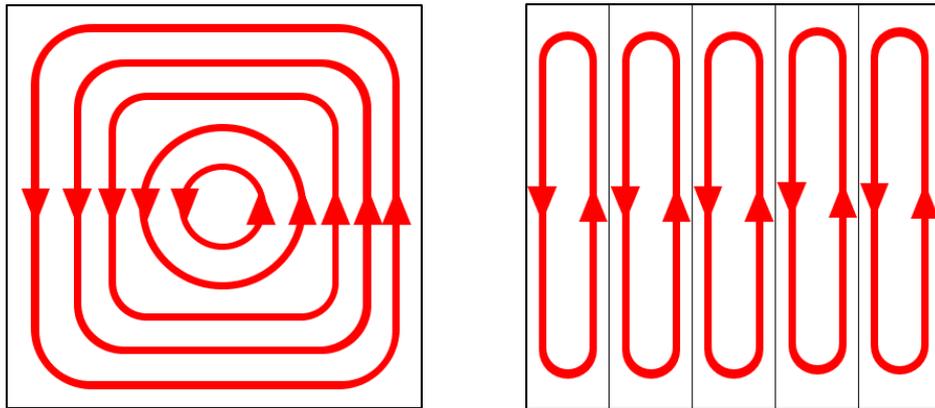
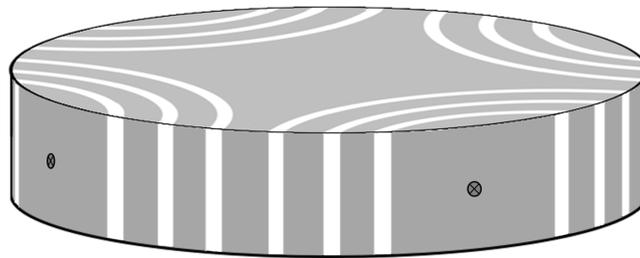
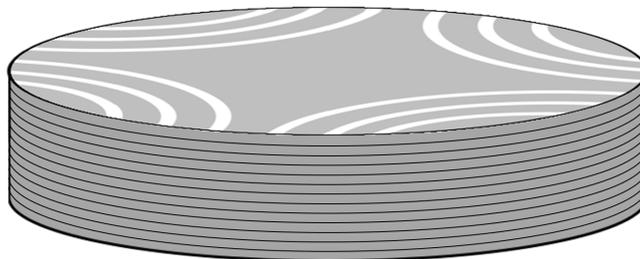


그림 2.3. 적층으로 인한 와전류 감소 효과의 예.

Fig. 2.3. An example of the effect of reducing eddy currents due to lamination.



(a)



(b)

그림 2.4. 4극 SynRM의 두 가지 적층 방식.

(a) ALA 회전자, (b) TLA 회전자.

Fig. 2.4. Examples of anisotropic structures of the rotor.

(a) ALA rotor, (b) TLA rotor.

2.2 SynRM의 수학적 모델링

2.2.1 등가회로 구성

SynRM은 d - q 축의 자기저항 차이를 가지는 회전자에 회전자계가 쇄교하며 발생하는 자기저항 토크에 의해 구동된다. 여기서 d - q 축의 자기저항 차이를 돌극성(saliency)이라고 하며 그 비율을 돌극비(saliency ratio)라고 한다. SynRM에서 발생하는 토크는 돌극비에 비례하므로 높은 토크를 갖기 위해 돌극비를 최대화한 설계가 필요하다. 돌극비를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\xi = \frac{L_{ds}}{L_{qs}} \quad (2.1)$$

전동기의 특성을 해석하기 위해서는 먼저 등가회로를 살펴볼 필요가 있다. 그림 2.5는 SynRM의 등가회로이며, 그림 2.6은 손실을 무시한 SynRM의 페이지도이다. d 축과 q 축의 자기저항이 달라서 두 개의 등가회로가 존재하며, r_c 는 철손저항, r_s 는 동손저항이다. 그림 2.5의 등가회로를 활용하여 d 축과 q 축의 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d}{dt} L_d i_{do} - \omega_s L_q i_{qo} \quad (2.2)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d}{dt} L_q i_{qo} - \omega_s L_d i_{do} \quad (2.3)$$

d 축과 q 축의 전류방정식은 다음과 같다.

$$i_{ds} = i_{dc} + i_{do} = i_{dc} + \frac{1}{r_c} (L_d \frac{d}{dt} i_{do} - \omega_r L_q i_{qo}) - \omega_s L_q i_{qo} \quad (2.4)$$

$$i_{qs} = i_{dc} + i_{do} = i_{dc} + \frac{1}{r_c} (L_d \frac{d}{dt} i_{do} - \omega_r L_q i_{qo}) - \omega_s L_q i_{qo} \quad (2.5)$$

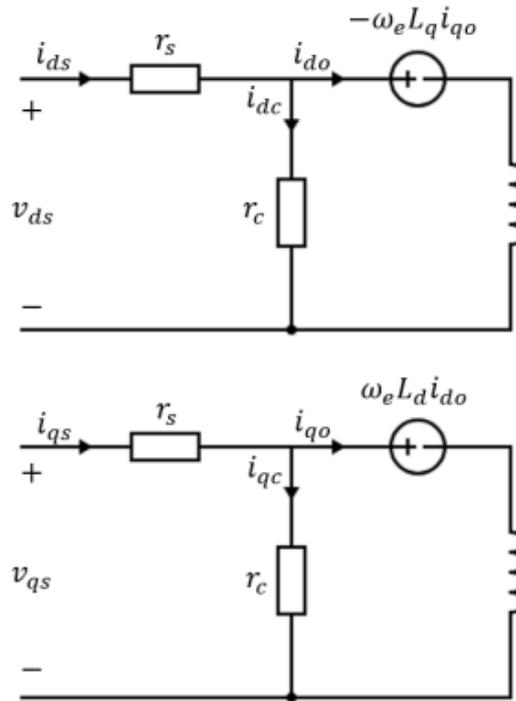


그림 2.5. SynRM의 등가회로.

Fig. 2.5. Equivalent circuit of SynRM.

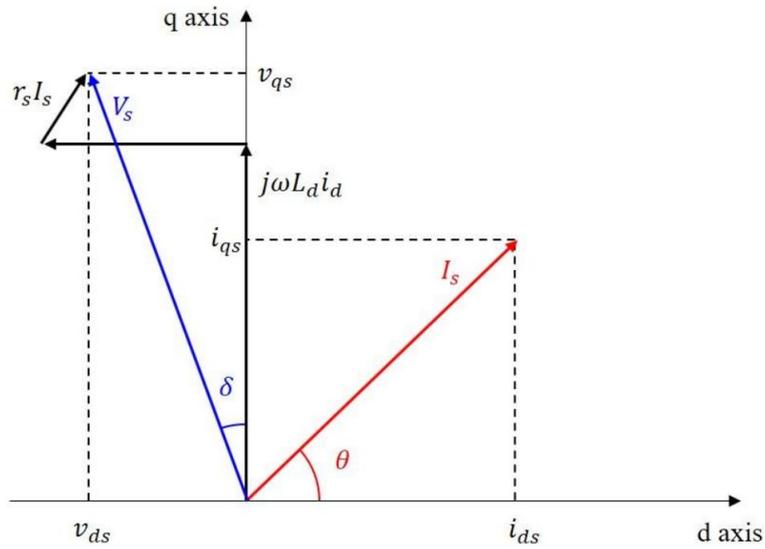


그림 2.6. SynRM의 페이저도.

Fig. 2.6. Phasor diagram of SynRM.

전류 식으로 구해진 인덕턴스를 이용해서 저항과 철손이 없는 상태의 SynRM의 토크 수식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_m i_m \sin \beta \quad (2.6)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs} \quad (2.7)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_{ds} - L_{qs}) I_m^2 \sin 2\theta \quad (2.8)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\xi - 1) \frac{E_m^2 \sin 2\theta}{\omega L_{ds}} \quad (2.9)$$

여기서 λ_m 는 쇠교자속, θ 는 전류각 P 는 극수를 나타낸다. 위의 식으로부터 토크는 돌극비에 따라 변화하며, 전류 위상각 $\theta = \pi/4$ 에서 $i_{dm}i_{qm}$ 최대가 되며, 이때 최대 토크가 나타남을 확인할 수 있다 [25]. 그림 2.6의 페이지도를 사용하여 다음과 같은 수식으로 역률을 표현하는 것이 가능하다.

$$PF = \frac{V_{qs} \sin \gamma - V_{ds} \cos \gamma}{\sqrt{V_{qs}^2 + V_{ds}^2}} \quad (2.10)$$

여기서 γ 는 기자력의 각이다. 최대 역률을 알아내기 위해서 다음 수식을 이용해서 역률 식을 변경한다.

$$V_{qs} = \omega_e L_{ds} L_{qs} \quad (2.11)$$

$$V_{qs} = -\omega_e L_{ds} L_{qs} \quad (2.12)$$

$$PF = \frac{V_{qs} \sin \gamma - V_{ds} \cos \gamma}{\sqrt{V_{qs}^2 + V_{ds}^2}} \quad (2.13)$$

이를 적용하여 최대 역률을 계산해보면 $\theta = \tan^{-1} \sqrt{\xi}$ 일 때 식 2.12의 값을 가지게 된다. 이때 k 는 기기 상수로 SynRM의 고정자 저항을 무시한다면 1이 된다. 따라서 역률에서도 돌극비가 중요하게 작용하는 것을 확인할 수 있다 [25-26].

$$PF = \left(\frac{L_d}{L_q} - 1 \right) / \left(\frac{L_d}{L_q} + 1 \right) k = \frac{\xi - 1}{\xi + 1} k \quad (2.14)$$

다음은 전동기에서 매우 중요한 요소인 손실과 효율에 대한 모델링이다. SynRM의 전자계 효율은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$\eta = \frac{\omega T_e}{\omega T_w + W_{copper} + W_{iron}} \times 100 \quad (2.15)$$

저속 운전의 경우에선 철손은 동손에 비해 매우 작으므로 효율을 다음 식처럼 표현할 수 있다 [27].

$$\eta = \frac{\omega T_e}{\omega T_e + 3R_s I_s^2} = \left(1 - \frac{3R_s I_s^2}{\omega T_e}\right) \quad (2.16)$$

식 2.11에서 전류보다 토크가 클수록 효율이 향상됨을 알 수 있다. 토크는 돌극비에 영향을 받으므로 SynRM의 특성에 전반적으로 돌극비가 주요하게 작용하며, 토크, 역률, 효율 향상을 위해서 돌극비를 최대화하는 설계가 필요하다.

2.3 FEM을 이용한 SynRM 해석

FEM은 해석대상을 작은 유한요소로 나누어 각각의 물리량을 계산한 뒤 벡터 합을 통해서 전체 시스템의 특성을 얻는 방법이다. 전동기특성 산출과 같은 전자계 해석이 필요할 때 맥스웰 방정식으로 유도되는 편미분 방정식을 푸는 방법으로 물리량을 매우 정확하게 얻을 수 있어서 SynRM 최적 설계에 사용하기 적합하다.

맥스웰 방정식은 전자계 간의 발생과 형성을 나타내는 편미분 방정식이다. 정지된 자계에서 전기장 및 자기장의 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.17)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = \vec{J}_0 \quad (2.18)$$

식 (2-17)과 (2-18)는 각각 자속 보존의 법칙과 앙페르의 주회법칙을 의미한다. 식에서 \vec{B} 는 자속 밀도, \vec{H} 는 자장의 세기, \vec{J}_0 는 전류 밀도이다. 식 (2-17)에 벡터 항등식을 적용하면 다음과 같다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.19)$$

여기서 \vec{A} 는 자기 벡터 포텐셜을 의미하며, 전자계 FEM해석에서 지배방정식을 유도하는 데 사용된다. SynRM의 자속밀도는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad (2.20)$$

식 (2.20)에 식 (2.19)를 대입하면 다음과 같은 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_0 \quad (2.21)$$

식 (2-21)의 지배방정식을 활용해서 의미 있는 해석결과를 얻기 위해서 해석 영역을 작은 삼각형 형태의 유한요소로 나누고, 각각의 삼각형의 자기 벡터 포텐셜은 무게중심에서 작용한다고 가정하여 지배방정식의 해를 구해서 전체 해석 영역의 자기 벡터 포텐셜을 구할 수 있고, 이것을 통해 자속밀도, 토크 및 철손을 계산한다. 페루프를 형성하는 한 턴의 코일에 쇄교하는 자속량 Φ 는 (2-22)과 같이 정리되고, 코일에 총 쇄교하는 자속량 λ 는 (2-23)과 같다.

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint_C \vec{A} \cdot d\vec{l} \quad (2-22)$$

$$\lambda = N\Phi \quad (2-23)$$

전동기에서 발생하는 역기전력은 다음과 같이 시간에 따른 쇄교 자속 λ 의 변화율로 표현된다.

$$E = \frac{d\lambda}{dt} \approx \frac{\Delta\lambda}{\Delta t} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta} = \omega \frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta} \quad (2-24)$$

맥스웰 스트레스 텐서법(Maxwell Stress Tensor Method)을 이용한 전동기 토크는 다음과 같이 표현된다.

$$T = \frac{1}{N} \frac{1}{\mu_0} \sum_{r=r_r}^{r_s} \int_0^{2\pi} B_n B_t r^2 d\phi \quad (2-25)$$

여기서, r_s 는 고정자 내경 반지름, r_r 은 회전자 외경 반지름, N 은 r_s 와 r_r 사이에 설정한 텐서 라인의 개수, r 은 텐서라인 반지름, B_n 은 텐서라인에 놓여있는 노드의 반경방향 자속 밀도, B_t 는 텐서라인에 놓여있는 노드의 접선방향 자속 밀도를 의미한다.

제 3 장 매개변수 알고리즘을 이용한 메쉬그리드 설정

전기기기 설계 문제에서는 다양한 요구조건을 고려하고 비교하여야 한다. 전동기의 가장 중요한 요소인 평균 토크, 토크리플 효율 등에서부터, 출력밀도, 기계적 응력, 전압, 전류 제한과 같은 부가적이지만 중요한 요소들도 고려해야 한다. 전자기기는 철심의 자속 포화 등으로 인해 비선형적인 특성을 가지므로 이를 만족할만한 정확도로 해석할 수 있는 FEM을 사용하여 해석을 진행한다. FEM은 1943년에 리하르트 쿠란트가 진동시스템의 근사해를 시스템 범함수의 변분원리를 이용해 수치 해석을 하는 방법을 제안한 것이 시초로, 해석대상을 상호 작용하는 다수의 유한요소로 나눈 뒤 각각의 유한요소에 등가 방정식을 적용하여 결과정보를 얻을 수 있다. 현대 공학에서는 고성능 컴퓨터를 활용하여 훨씬 빠르고 정확한 FEM 해석을 수행할 수 있고 응력해석, 열 해석, 전자기 해석 등의 분야에서 널리 쓰인다. FEM의 해석 정확도는 매우 뛰어나지만, 연산과정에 해석시간이 많이 필요하다. 최적 형상을 찾는데 필요한 해석횟수를 최소화하기 위해 많은 최적화 기법들이 도입되었다 [19-22, 28-29].

TO는 설계구역을 작은 셀들로 나누고 셀들의 재질을 변화시키는 방법으로 진행된다. 이와 같은 방법은 복잡하고 다양한 형상을 탐색할 수 있어서 SynRM과 같은 복잡한 형상을 가진 전동기 최적 설계에 적용하기 적합하다. TO를 적용하기 위해서는 설계대상 지역에 메쉬 그리드를 생성하여 전체 구역을 작은 셀들로 나누는 작업이 필요하다. 셀을 나누는 방식에 따라서 TO 과정의 효율이 크게 달라지기 때문에 설계대상의 특징에 적합한 메쉬그리드 설정이 중요하다. 이 논문에서는 멀티모달 매개변수 알고리즘인 ANA를 메쉬그리드 생성에 적용하기 위해 목적함수를 평균 토크로 설정하고 타원의 장축과 단축을 설계변수로 설정하였다.

3.1 매개변수 알고리즘

비선형적인 자속 포화로 인해서 전동기의 특성은 그림 3.1과 같이 다수의 최적점을 갖는 복잡한 함수일 확률이 높다. 이러한 목표함수에서 최적점들을 모두 찾을 수 있다면 각각의 장단점을 고려하여 요구조건을 만족하는 최적 설계안을 찾아내는 데 유리하다. 니칭 알고리즘은 대표적인 다중 최적점 탐색 알고리즘 중 하나이다. 니칭 알고리즘은 하나의 최적점을 찾은 후 그 최적점 주위에 탐색 금지구역인 니체 범위를 설정하여 찾은 최적점과는 다른 최적점을 탐색할 수 있다 [30]. 기존 니칭 알고리즘은 효율적으로 다중 최적점을 탐색할 수 있는 알고리즘이지만 그림 3.2.(a)와 같이 니체 범위 설정으로 인해 근처의 지역 최적점이 누락되는 문제가 있다 [19].

제안하는 ANA는 탐색 경로에 기반을 둔 부채꼴의 확률형 니체 범위를 도입하여 지역 최적점 누락문제를 해결하였다. ANA는 수학적 예제 함수에 적용되어 우수한 성능을 검증하였으며, 이후 SynRM의 최적 메쉬그리드 탐색에 적용되었다.

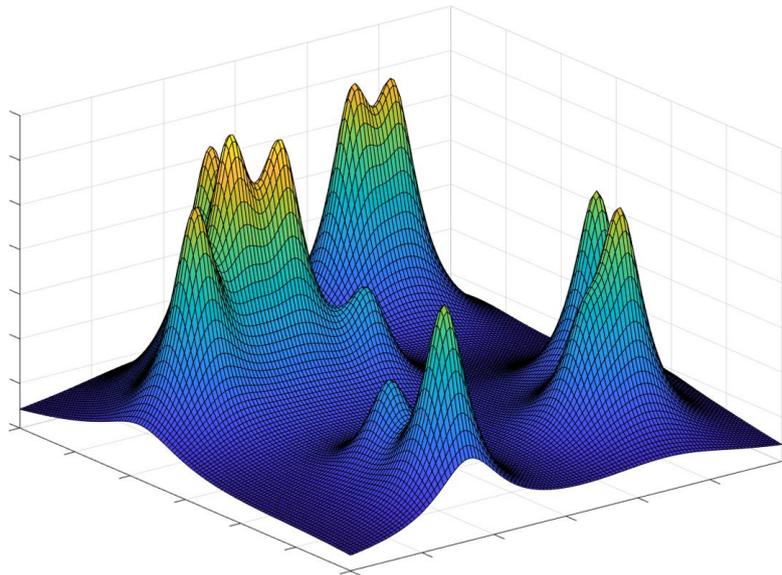
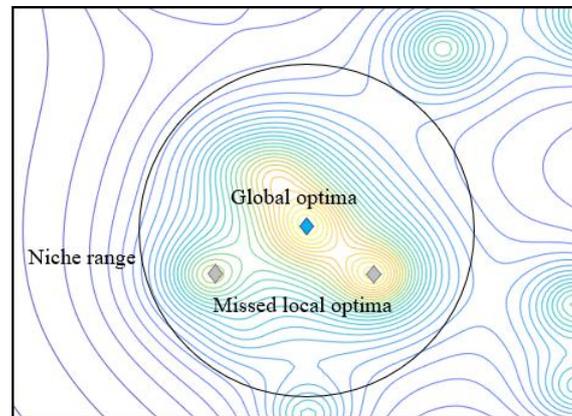


그림 3.1. 다중 최적점 함수의 예.

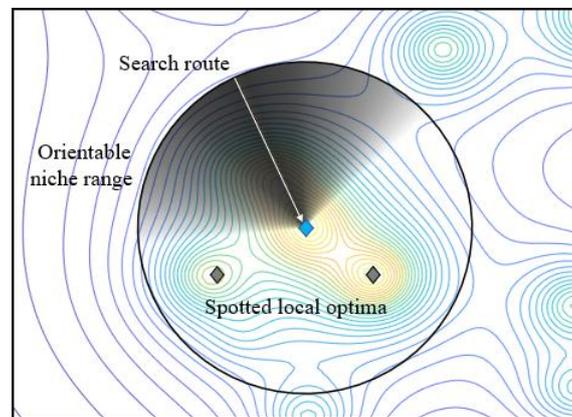
Fig. 3.1. An example of multi-modal function.

3.1.1 기존 니칭 알고리즘

니칭 알고리즘은 니체 범위 설정 방법에 따라서 Sharing, Deterministic crowding, Restricted competition selection(RCS) 등의 여러 종류가 있다. RCS 기법을 사용하는 자동 튜닝 니칭 유전 알고리즘 (auto-tuning niching genetic algorithm : ANGA)은 가장 보편적인 니칭 알고리즘중 하나이다 [30]. 전역최적점 하나를 찾기 위한 알고리즘인 유전 알고리즘에 니체 범위를 도입하여 다중 최적점을 효율적으로 탐색할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3.2. (a) 기존의 ANGA와, (b) ANA의 개념도.

Fig. 3.2. Concept diagram of (a) existing ANGA, (b) ANA.

3.1.2 개선된 니칭 알고리즘:ANA

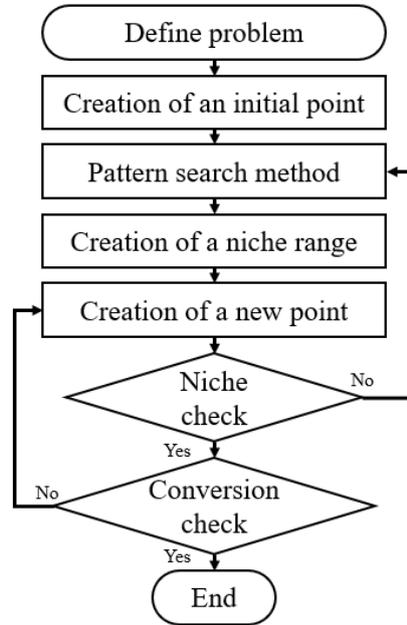


그림 3.3. ANA의 흐름도.

Fig. 3.3. Flowchart of ANA.

ANGA는 균등한 분포의 최적점들을 찾는 데 유용하지만 그림 3.2.(a)처럼 최적점들이 밀집한 형태의 목표함수에서는 ANGA의 니체 범위에 의해 지역 최적점이 누락된다. 이 문제를 해결하기 위해 ANA에서는 탐색 경로에 기반을 둔 부채꼴 형 니체 범위를 적용했으며, 탐색이 가능한 것을 그림 3.2.(b)에서 확인할 수 있다.

그림 3.3은 ANA의 흐름도이다. ANA는 다음과 같은 과정으로 진행된다.

Step 1) 문제 정의

최적화 목표함수와 알고리즘이 적용될 변수들을 설정한다.

Step 2) 시작점 생성

목표함수의 효율적인 탐색이 가능하도록 탐색 범위 내에 라틴 하이퍼 샘플링 (Latin hypercube sampling: LHS)을 통해 시작점을 생성한다. LHS는 그림 3.4와 같이 목표 범위를 격자로 나누어 가로 열과 세로 열에 각각 하나의 점만 생성하는 표본 기법이다 [31-32].

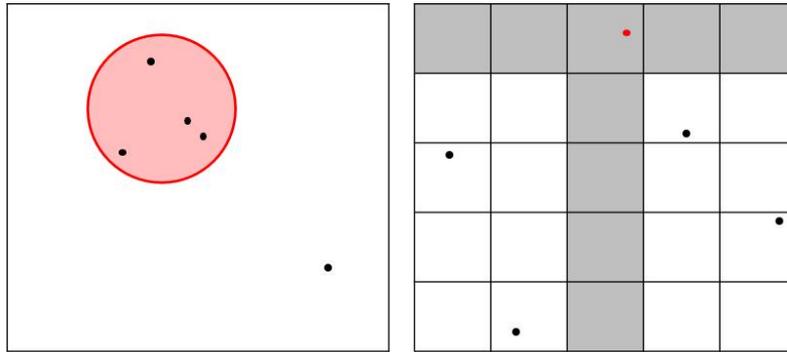


그림 3.4. LHS의 예.

Fig. 3.4. An example of LHS.

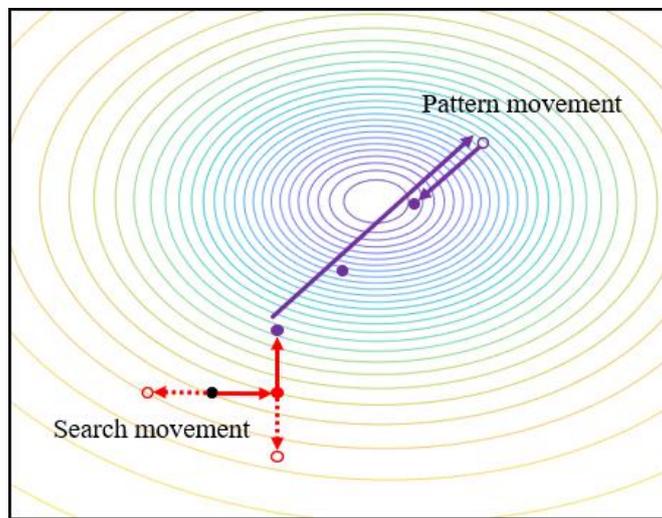


그림 3.5. PSM의 예.

Fig. 3.5. An example of PSM.

Step 3) 패턴 탐색 기법 [20, 33-35]

패턴 탐색은 패턴 탐색 방향을 선택하는 탐색 이동과 최적의 지점으로 빠르게 이동하는 패턴 이동으로 구성된다. 그림 3.5에서 빨간색 화살표는 탐색 이동을 나타내고 보라색 화살표는 패턴 이동을 나타낸다. 탐색 이동은 각 변수에 대해 단위 거리 $+d$, $-d$ 를 차례로 탐색하여 최적 이동 방향을 찾는다. 그다음 패턴 이동을 수행하며 경로상에서 최적점을 찾고, 다시 탐색 이동을 수행한다. 탐색 이동 결과 현재 지점이 가장 적합하면 d 값을 절반으로 감소시키고 탐색 이동을 재실행한다. d 의 값이 미리 지정된 종료 조건 상수보다 작아지면 현재 지점을 최적 지점으로 결정하고 패턴 탐색을 종료한다.

Step 4) 니체 범위 생성

최적점을 찾은 후에는 부채꼴 형의 니체 범위를 생성한다. 니체 범위 생성은 그림 3.6처럼 탐색 경로의 거리 d 만큼을 반지름으로 하는 원에서 경로의 각도 θ 에 따라 니체 범위가 생성되며, 각도에 따른 중복해 판정 확률 P 는 식 0에서 1 사이의 값으로 3.1과 같이 설정된다. 식에서 θ_p 는 니체 범위의 각도를 정의하는 값이며, 사이각 $\Delta\theta$ 가 θ_p 보다 크다면 P 가 0이 되어 중복된 탐색으로 간주되지 않는다.

$$\Delta\theta = |\theta - \theta'| \tag{3.1}$$

$$P = \begin{cases} 0 & \Delta\theta > \theta_p \\ (\theta_p - \Delta\theta) / \theta_p^2 & \Delta\theta < \theta_p \end{cases} \tag{3.2}$$

Step 5) 새로운 시작점 생성

LHS을 통해 새로운 시작점을 생성한다.

Step 6) 니체 확인

새로운 시작점이 이전 탐색 과정에서 생긴 니체 범위 내에 들어오면 식 3.1을 통해서 P 를 구하고 0과 1 사이의 무작위 난수를 생성하여 P 보다 작다면 최적점 탐색을 진행한다.

Step 7) 수렴 확인

새로운 해가 연속 N 회 이상 중복으로 간주되었을 때 최적점을 모두 탐색했다고 판단하고 알고리즘을 종료한다.

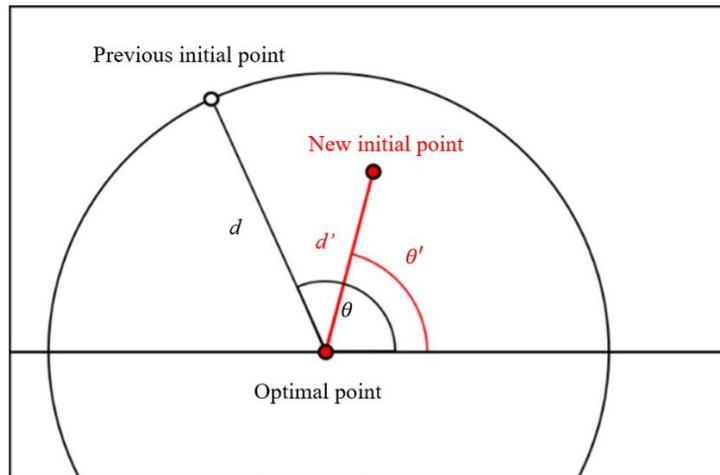
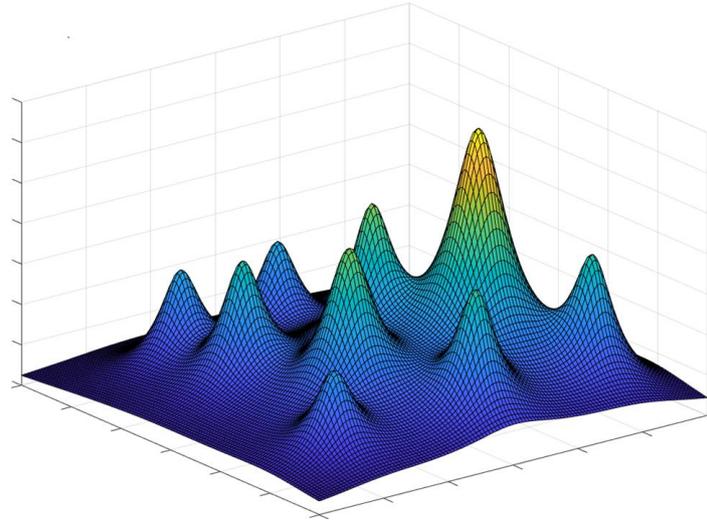


그림 3.6. 니체 범위에 새로운 초기점이 생성되었을 때의 예.

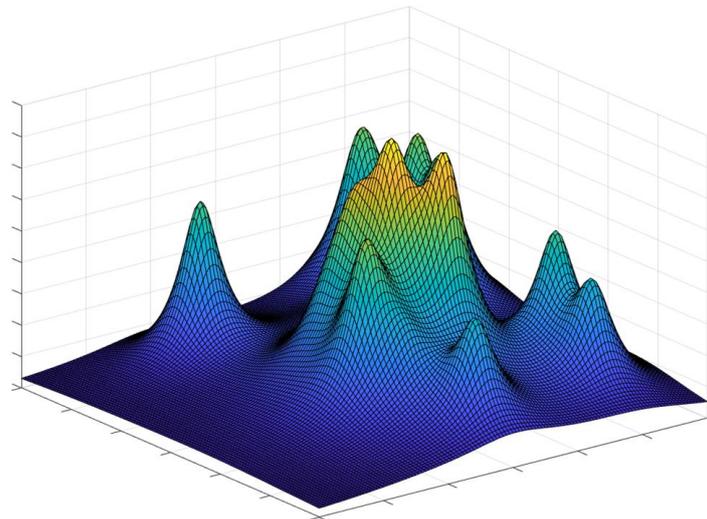
Fig. 3.6. Example when a new initial point is created in the niche range.

3.1.3 알고리즘들의 수학적 예제 함수 적용

ANA의 우수성을 확인하기 위해서 수학적 예제 함수 2개에 적용하여 기존 ANGA와 성능을 비교하였다. 예제 함수의 형태는 그림 3.7에서 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 3.7. 예제 함수의 3차원 형상 (a) 예제 함수 1, (b) 예제 함수 2.

Fig. 3.7. 3-D plot of the test functions (a) Test function 1, (b) Test function 2.

표 3.1.에서 각각의 알고리즘을 예제 함수에 적용한 결과를 확인할 수 있다. 함수 호출횟수는 각각의 알고리즘을 100회 반복적용한 평균 횟수이며, 정확도는 찾아낸 최적점 개수를 전체 최적점 개수로 나누어 계산되었다. 수학적 예제 함수 적용 결과 ANA는 기존 ANGA보다 적은 함수 호출횟수로 정확한 결과를 얻어낸다.

표 3.1. ANGA와 ANA의 성능 비교.

Table 3.1. Comparison of the test function application results.

| Test function 1 | Function call iteration | Accuracy (%) |
|------------------------|--------------------------------|---------------------|
| ANGA | 2421 | 86.8 |
| ANA | 1008 | 98.0 |
| Test function 2 | Function call iteration | Accuracy (%) |
| ANGA | 3553 | 91.4 |
| ANA | 1508 | 97.0 |

3.2 ANA를 활용한 토폴로지 메쉬그리드 최적화

그림 3.8은 TO의 전체 흐름도이다. 본격적인 토폴로지 기법을 적용하기 위해서 설계구역을 지정하고 메쉬그리드를 설정해야 한다. 2장에서 고투크, 고효율의 SynRM 설계를 위해서 돌극비를 최대화하는 설계가 필요하다는 것을 확인했다. 돌극비는 회전자의 d , q 축 릴럭턴스 차에 의해 발생하기 때문에 그림 2.2와 같은 형상의 회전자를 설계범위로 지정하였다. 그림 3.9는 원형 철심에 자기장을 인가했을 때의 자속선을 보여준다. 이는 d 축 자속의 흐름을 나타내며, 이 자속선과 유사한 공기 장벽을 생성하면 d 축 릴럭턴스 증가는 최소화하며 q 축 릴럭턴스를 증가시킬 수 있다. 그림 3.9는 두 개의 메쉬그리드 생성 예를 보여준다. 그림 3.9.(a)는 그림 3.10과 비슷한 형태의 형상을 만들기 적합하지 않으나 그림 3.9.(b)는 그림 3.10의 자속선과 유사한 형태로 셀들이 구성되어 있음을 확인할 수 있다. 그러나 그림 3.10에서 자속선은 완벽한 원형이 아니다. 따라서 최적의 공기 장벽 형상을 찾기 위해서 ANA를 사용해서 공기 장벽 형상 최적화를 진행한다.

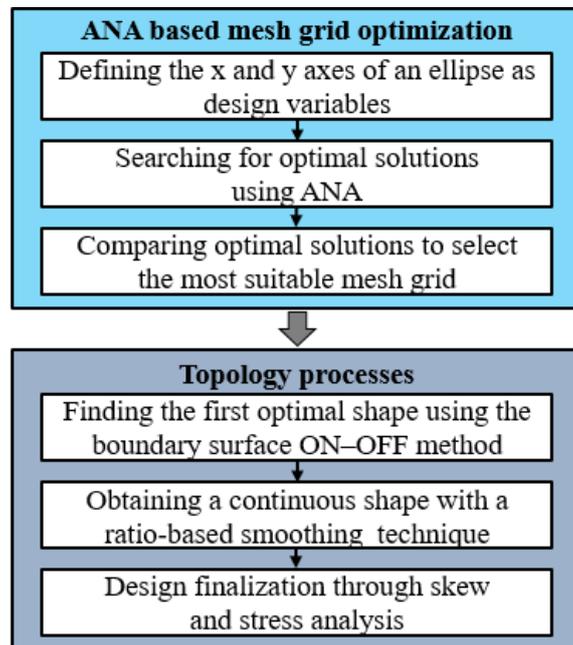


그림 3.8. TO의 흐름도.

Fig. 3.8. Flowchart of Topology Optimization.

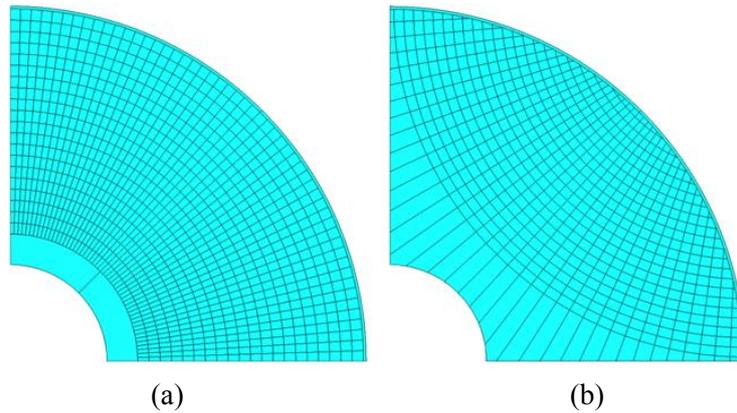


그림 3.9. 메쉬그리드 생성의 예 (a) 정방향 메쉬그리드, (b) 역방향 메쉬그리드.

Fig. 3.9. An example of meshgrid generation

(a) Forward meshgrid, (b) Reverse meshgrid.

최적화 대상은 펌프, 벨트 등에 사용되는 15kW급 SynRM이다. 산업용 전기 모터의 성능은 토크 밀도와 토크리플에 의해 결정된다. 토크 밀도가 높을수록 주어진 볼륨에서 더 큰 출력이 발생하고 토크리플이 작을수록 진동과 소음이 줄어든다. 표 3.2.에서 산업용 IE4 SynRM의 설계 요구조건을 확인할 수 있다. 15kW급 4극 전동기의 정격 토크는 79.6Nm이며, 전동기의 소음 진동의 원인이 되는 토크 리플은 10% 이하로 제한하였다. IE4 기준 효율은 93.9%이지만 설계에 사용되는 시뮬레이션 조건에는 기계적인 손실이 적용되지 않기 때문에 목표 효율은 1.1%의 마진이 추가된 95%로 설정하였다. 또한, 대상 전동기의 정격, 최대속도는 각각 1800, 3600 rev/min이며, 전동기를 구성하는 철심인 50JN290의 항복 응력은 414Mpa로 최대속도에서의 최대 응력이 항복 응력을 넘지 않는 설계가 필요하다. 표 3.3.에서 대상 전동기의 자세한 사양을 확인할 수 있다. 그림 3.11의 45° 모델을 대칭 시켜서 4극 SynRM의 회전자 90° 주기 모델을 구성한다. 4개의 원형 공기 장벽을 삽입하여 기초적인 SynRM 형상을 만들었고, 공기 장벽을 구성하는 가장 큰 타원의 장축과 단축을 설계변수로 지정하였다. 가장 큰 타원의 구조에 따라 나머지 작은 타원들은 비례하여 생성된다. 메쉬그리드 생성에 적용할 ANA의 목표함수는 평균 토크의 크기로 설정하였다. FEM 툴을 사용해 토크 1주기 파형을 산출하고, 결과로 산출된 스텝 별 토크 값을 평균 내어 구할 수 있으며, 토크리플은 토크 파형 1주기 내에서 최댓값과 최솟값의 차이를 평균 토크로 나눈 값이다. 초기 모델의 형상과 자속밀도는 그림 3.12와 같고, 초기 모델의 평균 토크와 토크리플은 각각 80.22 Nm, 48.10%이다.

최적화 결과는 그림 3.13과 표 3.3에서 확인할 수 있다. 모델 a는 가장 큰 평

균 토크를 가졌으며 모델 d는 가장 작은 토크리플을 가졌다. 최적화 결과모델들은 모두 평균 토크 요구조건은 만족하였으나 토크리플 요구조건을 만족하지 못하였으므로 가장 토크리플이 작은 모델 d를 1차 최적 모델로 선정하였다.

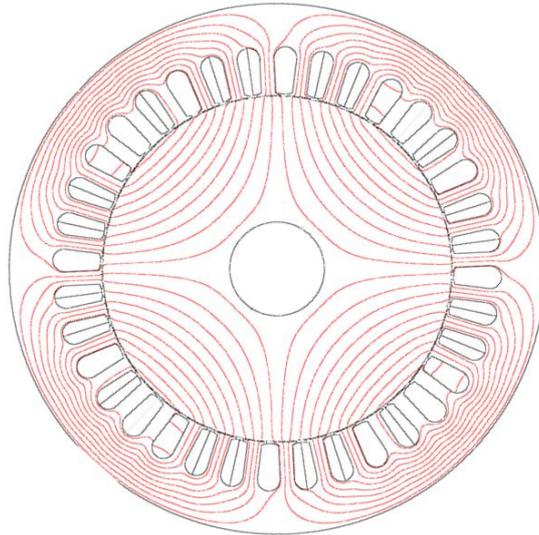


그림 3.10. 코어를 통해 흐르는 자속.

Fig. 3.10. Magnetic flux flowing through the core.

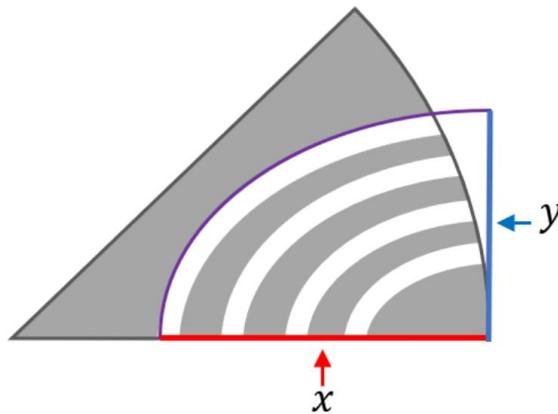


그림 3.11. ANA에 적용되는 설계변수.

Fig. 3.11. Design variables applied to ANA.

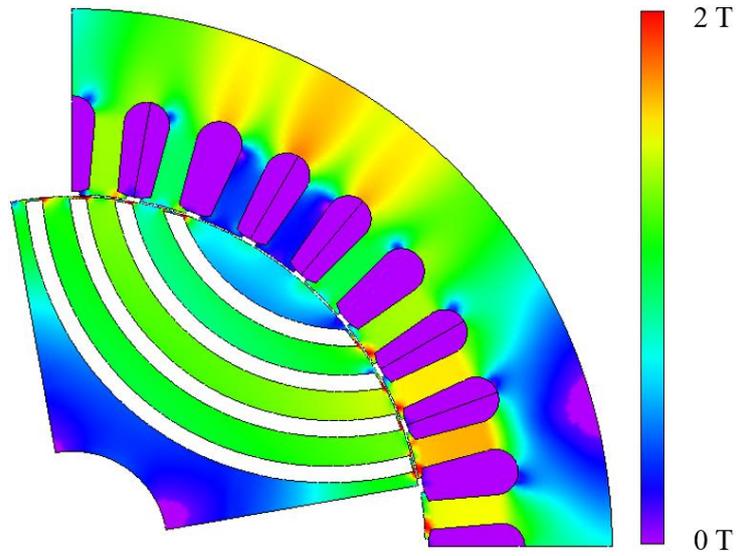


그림 3.12. 초기 모델의 형상 및 자속밀도.

Fig. 3.12. Shape and magnetic flux density of the initial model.

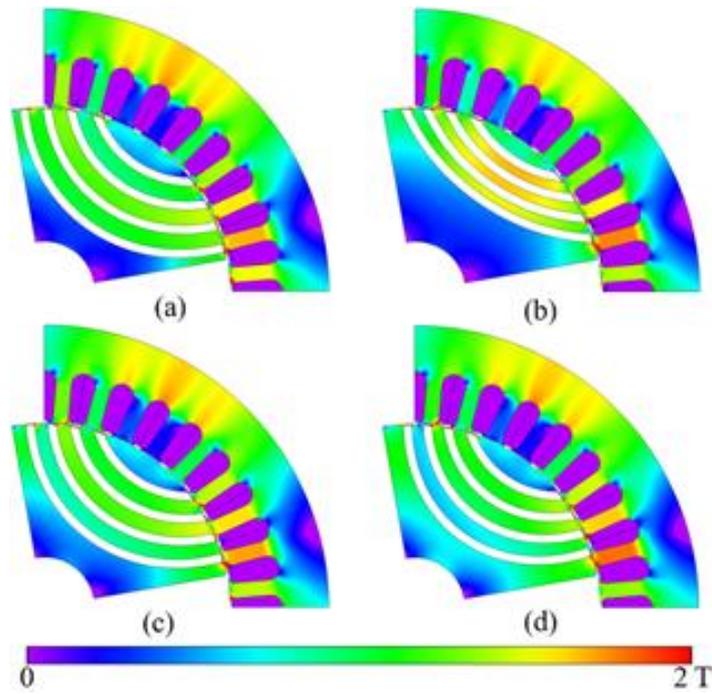


그림 3.13. ANA 적용 결과 얻어진 SynRM 모델들의 형상 및 자속밀도.

Fig. 3.13. Shape and magnetic flux density of SynRM models obtained as a result of ANA application.

표 3.2. 대상 전동기의 요구조건.

Table 3.2. Requirements of an objective motor.

| Requirement | Value |
|-----------------------------------|-----------|
| Rated power [kW] | 15 |
| Rated torque [Nm] | 79.6 |
| Torque ripple [%] | 10 |
| Efficiency at rated operation [%] | 95 |
| Rated speed/Max speed [rev/min] | 1800/3600 |
| Yield stress [MPa] | 414 |

표 3.3. 대상 전동기의 사양.

Table 3.3. Specifications of an objective motor.

| Parameter | Value |
|------------------------------------|----------|
| Number of poles | 4 |
| Number of slots | 36 |
| Stator outer / inner diameter [mm] | 240/170 |
| Rotor outer / inner diameter [mm] | 169.2/46 |
| Air gap [mm] | 0.8 |
| Stacking length [mm] | 205 |
| Material of core | 50JN290 |

표 3.3. ANA 최적화 결과 4개 모델의 평균 토크 및 토크리플.

Table 3.3. Comparison of the test function application results.

| Model | Average torque (Nm) | Torque ripple (%) |
|-------|---------------------|-------------------|
| a | 90.04 | 18.64 |
| b | 85.79 | 24.34 |
| c | 89.54 | 22.99 |
| d | 87.76 | 18.45 |

제 4 장 토폴로지 최적화를 이용한 SynRM 최적 설계

TO를 적용할 때 구성된 재질의 개수에 따라서 탐색할 수 있는 모델이 지수적으로 증가한다. PMSM의 회전자에 자석이 삽입되고 IM의 회전자에 도체 바가 삽입되는 데 반해 SynRM의 회전자는 철심만으로 구성되어 있다. 세 가지 이상의 재질로 구성된 다른 전동기의 회전자와는 달리, SynRM의 회전자는 공기와 철심 두 가지 재질로만 이루어져 있으며, PMSM은 곡선으로 제작하기 힘든 자석이 들어가기 때문에 회전자의 도면에 직선 형태의 구조가 많으나, SynRM의 경우, 높은 돌극비를 갖기 위해 회전자 도면이 대부분 곡선으로 이루어진다. 복잡한 형상을 최적화할 때 설계변수를 지정하고 매개변수 알고리즘에 대입하여 최적화를 진행하면 다양한 형상을 탐색하기가 힘들다. 이에 반해 토폴로지 최적화는 다양한 복잡한 형상을 탐색하기에 적합하므로 SynRM 최적 설계에 유리하다. 따라서 TO를 SynRM 최적 설계에 적용한 다양한 방법이 제안되었다 [35-38].

그림 3.8의 하단부에서 토폴로지 최적화의 순서도가 나타나 있다. 먼저 ANA를 이용한 최적 설계로 얻은 도면을 이용해서 메쉬그리드를 나누고 경계면 ON-OFF 기법을 적용한다. 이후 불연속적인 형태의 도면에 비율기반 평탄화 기법을 적용하여 제작난이도를 낮추고 추가적인 성능향상을 얻는다. 마지막으로 토크리플을 줄이기 위한 스큐를 적용하고 응력해석을 통해 기계적인 안정성을 확인한다.

4.1 경계면 ON-OFF 기법

4.1.1 기존 ON-OFF 기법

ON-OFF 기법은 대표적인 토폴로지 최적화 기법의 하나로, 모든 셀에 대해서 재질을 변경한 모델을 해석하며 목적함수가 커지는 칸의 재질을 변화시켜서 결과적으로 더 높은 최적값을 갖는 형상을 찾는 데 사용된다. ON-OFF 기법의 전체 프로세스를 그림 4.1을 통해서 설명한다.

먼저 초기 형상에서 셀의 재질을 하나씩 변경하여 기대 이득을 계산한다. 그림 4.1.(1)은 초기 형상이며, 그림 4.1.(2)는 초기 형상의 좌상단 셀(1, 1)의 재질이 반전된 형상이다. 그림 4.1.(1)의 목적함수(OF)가 10, 그림 4.1.(2)의 목적함수가 9로 계산된다면 해당 셀은 반전하였을 때의 이득은 -1이 된다. 이 과정을 전체 셀에 반복한 결과를 그림 4.1.(3)에서 확인할 수 있다. 이때 주의할 점은 각 셀에 적힌 값은 기대 이득이며, 변경된 이득이 다른 셀과 같이 변경되면 해당 셀 하나만 변경했을 때와는 결과가 달라질 수 있다. 그림 4.1.(4)는 기대 이득이 양수인 셀을 보여준다. 작은 기대 이득을 가진 셀은 파란색, 큰 기대 이득을 가진 셀은 보라색으로 표시하였다. 양의 기대 이득을 갖는 모든 셀을 반전시키면 그림 4.1.(5)와 같이 모양에 과도한 변형이 발생하여 변화된 목표함수 값이 오히려 낮아질 수 있다 [39]. 한 번에 많은 셀이 변경될 때 기대 이득이 존재하던 셀이 목표함수 값에 오히려 부정적인 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 이런 현상을 방지하기 위해서 기대 이득이 양수인 셀들 전체가 아닌 큰 기대 이득을 갖는 보라색 칸들만 반전시켜서 그림 4.1.(6)의 결과를 얻을 수 있다. ON-OFF 기법은 전체 알고리즘에서 최적점에 근접한 상태에서 정확한 최적점을 찾아내는 결정론적 알고리즘이라고 할 수 있다. 그림 4.1의 과정을 반복하며 형상의 변화가 없을 때 ON-OFF 기법을 종료한다.

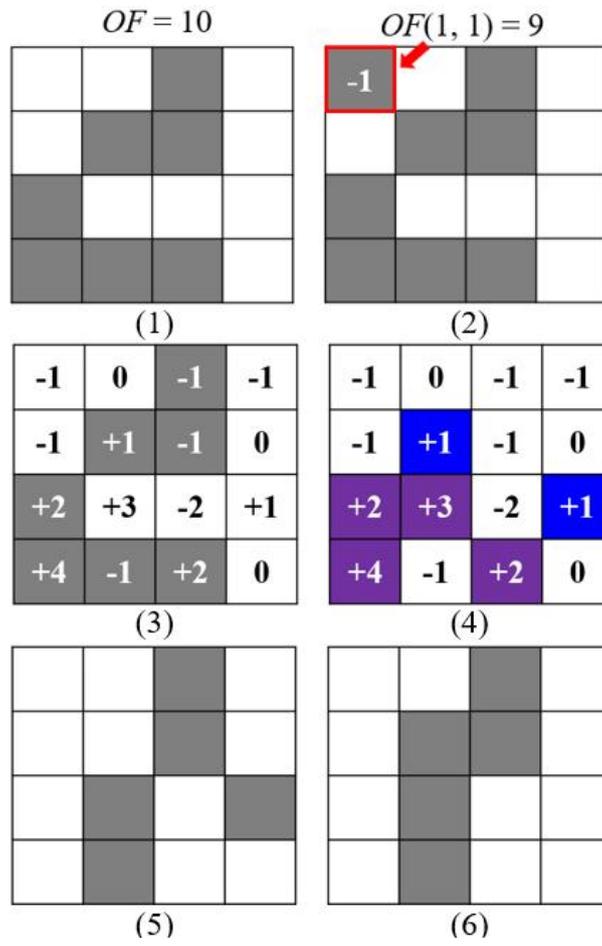


그림 4.1. ON-OFF 기법의 적용 예.

Fig. 4.1. Application example of ON-OFF method.

4.1.2 제안하는 경계면 ON-OFF 기법

ON-OFF 기법은 최적 형상을 효과적으로 찾아내는 방법이지만 메쉬그리드를 구성하는 셀의 개수만큼의 해석이 필요하다. 셀의 개수가 많아야 더욱 정확한 결과물을 얻을 수 있는 TO의 특성상 스텝마다 많은 횟수의 해석이 필요하고 이는 최적화 과정에 많은 시간이 걸림을 의미한다. 이 논문에서는 해석횟수를 줄이기 위해서 재질 경계면에 있는 셀에만 ON-OFF 기법을 적용하는 경계면 ON-OFF 기법을 제안한다. 그림 4.2에서 Same으로 표시된 빨간색 셀은 주위 8칸이 모두 같은 재질이다. 그러나 Different로 표시된 파란색 셀은 경계면에 위치하여 주변 8칸이 다른 재질로 구성되어 있다. 여기서 파란색 셀은 기존 ON-OFF 기법을 적용하여 재질을 반전한 해석을 수행하고 빨간색 셀은 수행하지 않는다. 빨간색 셀처럼 같은 재질로 둘러싸인 셀은 재질을 반전하였을 때 목표함수 값에 긍정적인 변화가 일어날 확률이 비교적 낮다. 최적점 탐색에 유용하지 않은 해석을 배제하여 전체 최적화 과정의 진행속도를 증가시켰다.

경계면 ON-OFF 기법은 그림 3.11과 같이 4극 회전자의 45° 모델의 공기 베리어 구조 최적화에 적용되었다. 각 공기 베리어를 구성하는 선들이 하나의 곡선으로 이루어져 있던 ANA로 얻어진 초기 형상인 그림 3.13 (d)에 메쉬그리드를 설정하고 경계면 ON-OFF 기법을 적용하여 목적함수인 평균 토크가 더 큰 모델을 탐색하였다.

경계면 ON-OFF 기법을 적용하여 탐색한 최적 모델의 형상과 자속밀도를 그림 4.3에서 확인할 수 있다. 공기 베리어들의 두께가 증가하는 방향으로 최적화가 진행되었으며 공기 베리어의 곡률 또한 초기 모델과 달라졌다. 해당 모델의 평균 토크와 토크리플은 각각 90.02 Nm, 28.11%이다. 평균 토크가 증가하였으나 불연속적인 구조가 자속 흐름에 부정적인 영향을 주므로 토크리플도 증가하였다. 따라서 다음 절의 스무딩 기법을 적용한다.

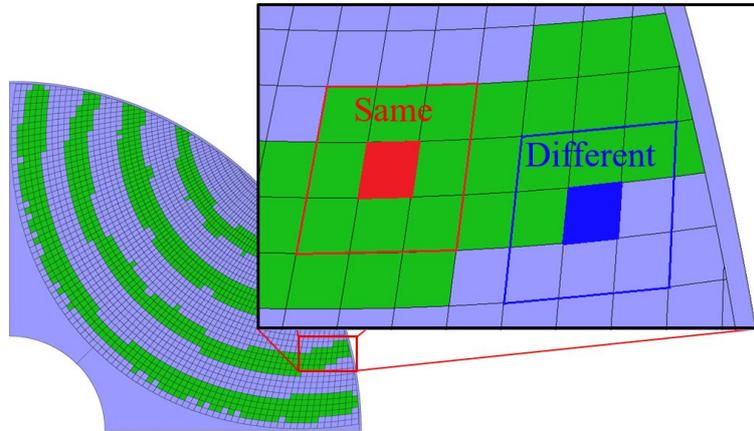


그림 4.2. 경계면 ON-OFF 기법의 적용 예.

Fig. 4.2. Application example of boundary surface ON-OFF method.

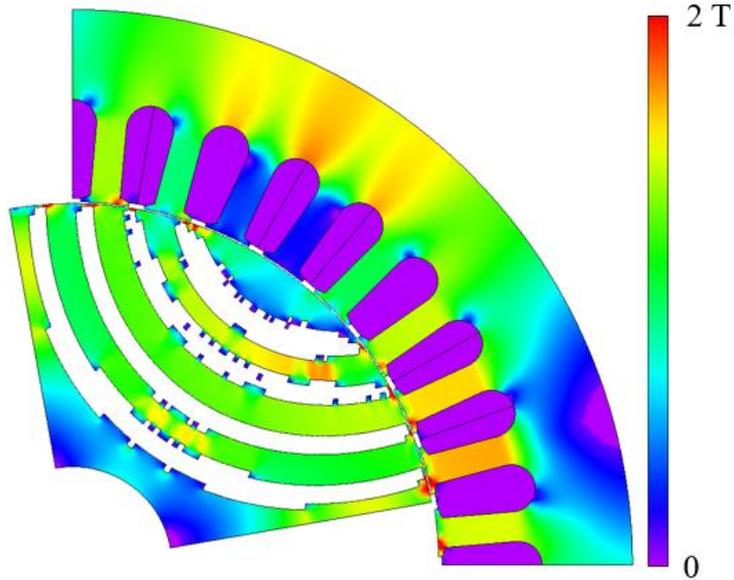


그림 4.3. 경계면 ON-OFF 기법으로 얻은 최적 모델의 형상과 자속밀도.

Fig. 4.3. The shape and magnetic flux density of the optimal model obtained by the interface ON-OFF technique.

4.2 스무딩 기법

ON-OFF 방식과 같은 TO를 사용하여 도출한 최적점은 그림 4.3에서 보이듯 불연속적인 구조로 되어 있으며, 이는 일반적인 전동기의 강판 제작 방법인 프레스 공법으로 제작하기 힘들다. 또한, 그림 3.9에 나타난 것처럼 전동기의 회전자에 흐르는 자속은 연속적인 곡선이다. 따라서 불연속적인 구조는 자속 흐름에도 부정적인 영향을 주며 이는 전동기의 성능저하조건이다. 따라서 제작 난도를 낮추고 추가적인 성능향상을 위해서 불연속적인 구조를 연속적인 곡선으로 바꿔주는 스무딩 기법을 적용한다.

그림 4.4는 스무딩 기법이 적용되는 예이다. 그림 3.3의 오른쪽의 빨간색 선이 스무딩 기법을 적용한 후 수정될 경계면이며, 하늘색 부분은 공기에서 철심으로 대체되는 부분이고 분홍색 부분은 철에서 공기로 대체될 부분이다. 앞서 말한 두 종류의 영역이 비슷하게 스무딩 라인을 설정하여 적용 전후로 철심의 면적이 크게 달라지지 않도록 한다. 그림 4.5에서 ON-OFF 기법으로 얻은 최적 모델에 스무딩 기법을 적용한 형상과 자속밀도를 확인할 수 있고, 해당 모델의 평균 토크와 토크리플은 각각 91.24 Nm, 11.21%이다. 자속 흐름에 친화적인 연속적인 구조로 인해 평균 토크 값이 상승하였으며, 토크리플 또한 많이 감소하였다.

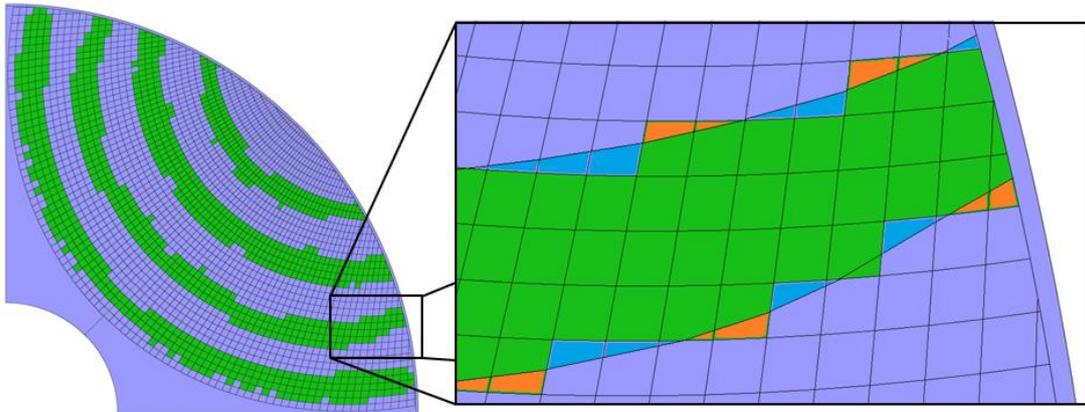


그림 4.4. 스무딩 기법 적용의 예.

Fig. 4.4. An Example of applying smoothing technique.

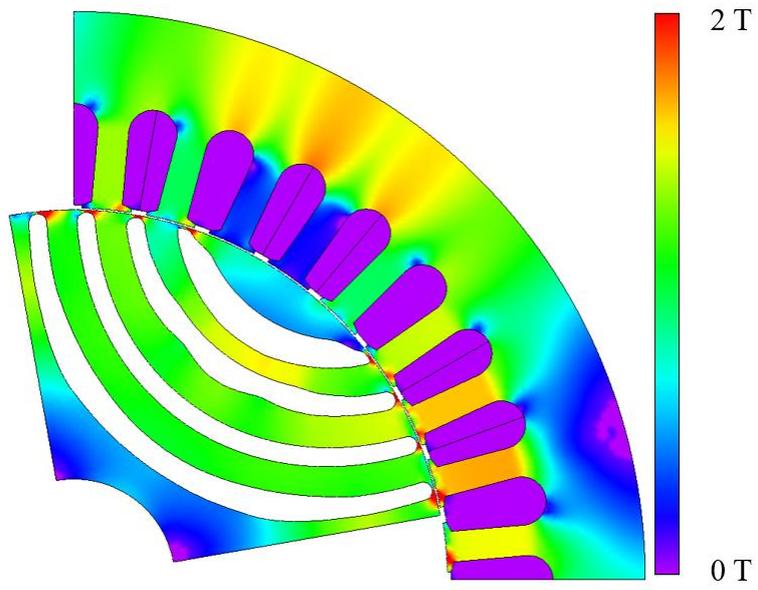


그림 4.5. 스무딩 기법 적용 모델의 형상과 자속밀도.

Fig. 4.5. Shape and magnetic flux density of smoothing technique applied model.

4.3 스큐 기법

스무딩 기법을 적용하여 토크리플을 많이 감소시켰으나 토크리플 요구 조건인 10%를 만족하지 못했다. 추가적인 토크리플 감소를 위해서 스큐 기법을 적용한다. 스큐 기법은 적층된 회전자를 축 방향으로 나누어 2개 이상의 층을 만들고 각 층을 다른 각도로 비트는 방법이다. 적절한 각도로 스큐 기법을 적용하면 평균 토크는 조금 감소하지만, 각 층이 만들어낸 토크 파형이 상쇄되어 토크리플을 크게 줄일 수 있다 [24]. 그림 4.6은 스큐 기법을 적용한 방법의 예를 보여주고 그림 4.7은 토크 결과 그래프를 보여준다. 표 4.1에서 지금까지의 최적화 과정에 따른 평균 토크와 토크리플 변화를 볼 수 있다. 스큐 모델은 평균 토크 및 토크리플의 요구조건인 79.6 Nm, 10%를 만족하였으며, 손실 해석 결과 468.43W의 손실과 97.22%의 효율로 IE4 급 효율 요구조건도 달성하였다.

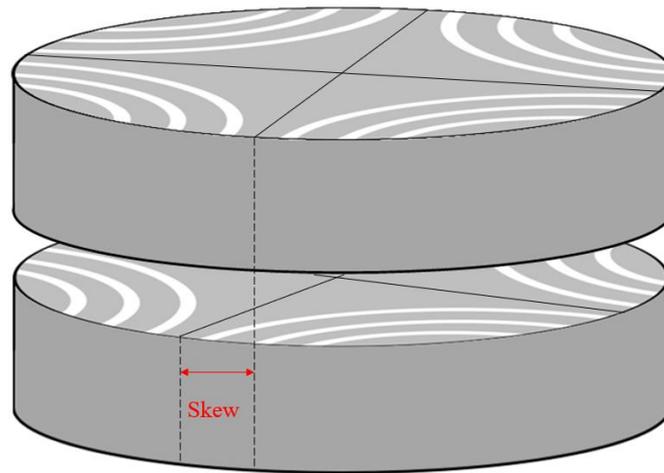
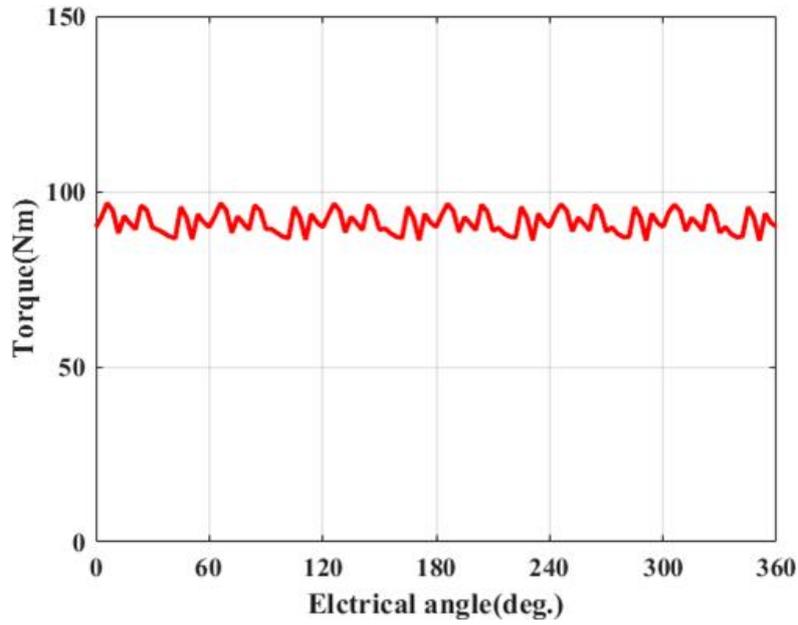
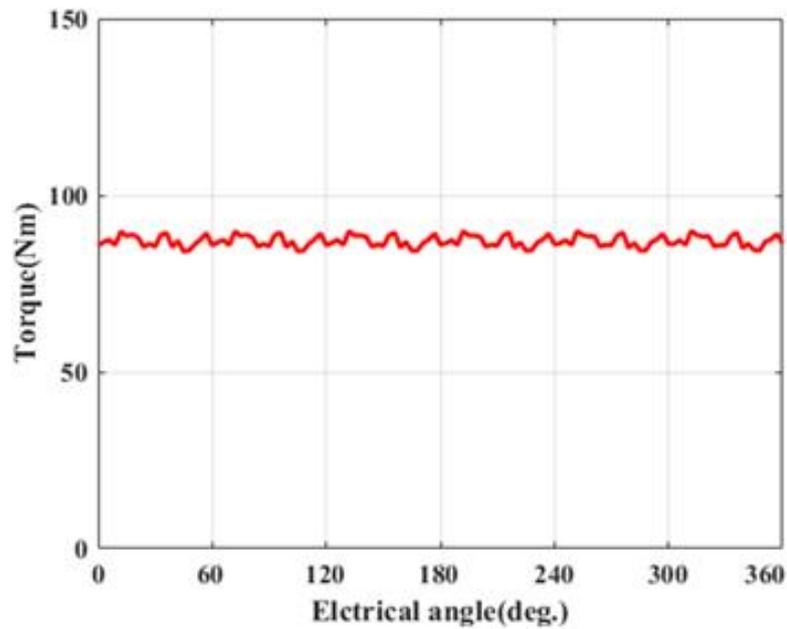


그림 4.6. 스큐 기법 적용의 예.

Fig. 4.6. Example of applying skew technique.



(a)



(b)

그림 4.7. 스무딩 기법 적용 토크 파형 비교. (a) 적용 전, (b) 적용 후.
 Fig. 4.7. Comparison of torque waveform with smoothing technique applied. (a) Before application, (b) After application.

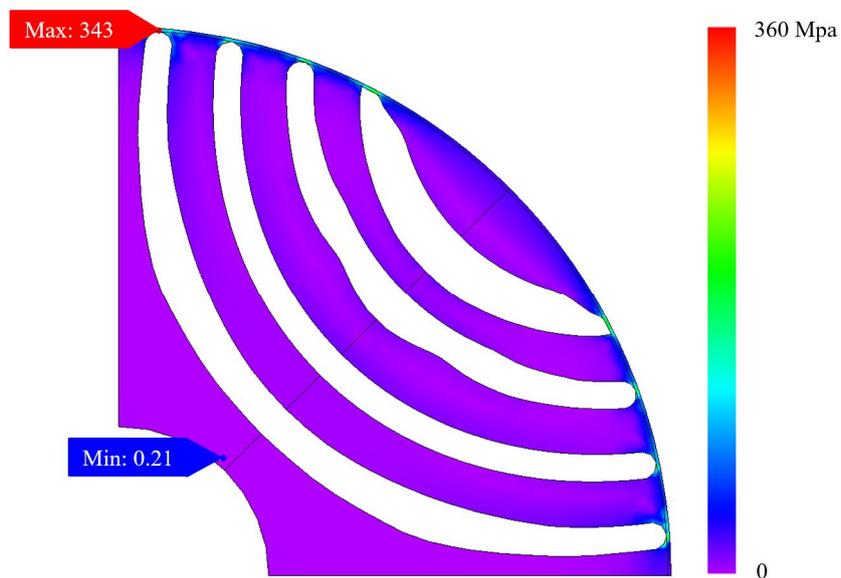
표 4.1. 최적화 과정에 따른 평균 토크와 토크리플 변화.

Table 4.1. Average torque and torque ripple change according to the optimization process.

| Model | Average torque (Nm) | Torque ripple (%) |
|--------------|----------------------------|--------------------------|
| Initial | 80.22 | 48.10 |
| NA | 87.76 | 18.45 |
| ON - OFF | 90.02 | 28.11 |
| Smoothing | 91.24 | 11.21 |
| Skew | 87.01 | 6.65 |

4.4 응력해석

최적화 결과모델의 기계적 안정성을 확인하기 위해서 응력해석을 진행하였다. 최대속도인 3600rpm에서의 응력해석 결과는 그림 4.8과 같다. 50JN290 강판의 항복 응력은 414MPa이며 해석결과의 최대 응력은 343MPa로 2.67의 안전계수를 가지고 이는 해당 모델이 충분한 기계적 안정성을 가지고 있음을 의미한다.



(b)

그림 4.8 응력해석 결과.

Fig. 4.8 Results of the stress analysis.

제 5 장 결론 및 향후 연구 계획

5.1 결론

본 논문에서는 산업용 IE4 SynRM 최적 설계 문제에 TO를 적용하여 요구사항을 만족하는 설계안을 도출하였다. 이 논문에서 제안하는 TO는 매개변수 알고리즘을 이용해 전동기의 특성에 맞는 자속 친화적인 메쉬그리드를 설정하였으며, 경계면 ON-OFF 기법을 적용하여 기존 ON-OFF 기법보다 해석시간을 65% 이상 줄였다. GTA의 우수한 성능은 단계별로 개선된 토크 크기, 감소한 토크리플 및 기계적 안정성으로 확인되었다. 최종 모델은 평균 토크 87.01 Nm, 토크리플 6.65%, 손실 468.43W, 효율 97.22%, 안전계수 1.21로 초기에 설정한 설계 목표를 만족하였다.

이러한 장점을 바탕으로 제안된 TO는 다양한 성능 요소를 고려해야 하는 최적의 모터 설계 문제에 널리 사용될 것으로 기대된다.

5.2 향후 연구

TO는 형상을 근본적으로 바꾸며 최적화를 진행하는 매력적인 알고리즘이다. 그러나 해석횟수가 많이 필요해서 연구에 오랜 시간이 걸린다는 단점이 있다. 이번 연구는 목적함수를 토크 하나로 지정하고 최적화를 진행하였다. 그러나 토크리플, 효율 등 여러 개의 목적함수를 한 번에 고려하면서 최적 설계를 찾아간다면 더욱 의미 있는 연구결과가 산출될 것이다. 파레토 프론트 셋은 여러 개의 목적함수를 고려하기에 적합한 방식이다. 토폴로지의 수많은 해석 가능성과 파레토 프론트 셋이 결합한다면 가치 있는 데이터들을 훨씬 효율적으로 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 토폴로지 최적화를 더욱 개선하기 위해 같은 재질의 셀들을 한 영역에 묶는 자동화 코드를 개발하고 있다. 많은 셀이 있는 각 영역으로 구성된 모델은 FEM 툴을 사용해 분석하는 데 많은 시간이 걸린다. 이 자동화 코드는 소요 시간을 크게 줄여준다. 위에 언급한 내용이 보완된다면 TO의 성능을 크게 향상할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] Mark Lynas, "Six Degrees Our Future on a Hotter Planet", National Geographic Society, Oct. 7th. 2008.
- [2] BP statistical review of world energy 2021.
- [3] I. E. Commission and others, "Rotating Electrical Machines-Part 30:Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-Code)," IEC 60034-30, 2008.
- [4] IEC 60034-30-1 Ed. 1.0, "Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code)," 2014
- [5] 강도현, 전연도, 한필완, 최재학, 박병건, 이성인, "초고효율(IE5) 전동기 보급 정책 및 기술 동향", 대한전기학회, 전기의 세계, 6, 2017.
- [6] A. T. de Almeida, F. J. T. E. Ferreira, and G Baoming, "Beyond induction motors-technology trends to move up efficiency," IEEE Trans. Ind. Appl., vol 50, no. 3, pp. 2103-2114, 2014.
- [7] "대한민국2050 탄소중립 전략", 대한민국 정부, 2020.
- [8] 산업통상자원부 에너지자원실 신재생에너지정책단 에너지수요관리과 2018년 10월 1일 보도자료
- [9] 장기봉, "전동기 시스템의 효율 규제에 관한 국제 동향", 전기학회 논문지, vol. 67, no. 10, pp. 1298-1302, 2018.
- [10] "프리미엄급 고효율 3상 유도전동기 개발", 한국전기연구원 지식경제부, 2011.10.
- [11] 유희충, 이상돈, 이주, "유도전동기 대체 라인기동식 동기형 릴럭턴스 전동기 회전자의 설계 연구", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65, No. 11, pp. 1813-1819, 2016.
- [12] Study Committe A1.47 Working Group "Technological Feasibility Studies for Super-Premium(IE4) & Ultra-Premium(IE5) Efficiency Motors"
- [13] Jin C.-S.; Jung D.-S.; Kim K.-C.; Chun Y.-D.; Lee H.-W.; Lee J.; "A study on improvement magnetic torque characteristics of IPMSM for direct drive washing machine", IEEE Trans. Magn. 45(6):2811 - 2814, 2009.
- [14] Jung H.; Kim D.; Lee C.-B.; Ahn J.; Jung S.-Y.; "Numerical and experimental design validation for adaptive efficiency distribution compatible to frequent operating range of IPMSM", IEEE Trans. Magn. 50(2):1 - 3, 2014.
- [15] Kim K.-C.; Koo D.-H.; Hong J.-P.; Lee J.; "A study on the characteristics due

- to pole-arc to pole-pitch ratio and saliency to improve torque performance of IPMSM”, IEEE Trans. Magns. 43(6):2516 - 2518, 2007.
- [16] 이종민, “중국 희토류 자원무기화, 그 위력과 한계”, 포스코경영연구원.
- [17] 김경훈, 박가현, “우리나라와 주요국의 희토류 공급망 현황 및 시사점”, 한국무역협회 국제무역통상연구원, 18호, 2021.
- [18] 이치우, “자동차용 릴럭턴스 전동기의기술개발 동향”, 한국자동차공학회, 35 권 10호, 24-30, 2013.
- [19] Kang, Y.-R.; Son, J.-C.; Lim, D.-K.; “Optimal Design of IPMSM for Fuel Cell Electric Vehicles Using Autotuning Elliptical Niching Genetic Algorithm” IEEE Access 2020, 8, 117405 - 117412.
- [20] Lee, T.-H.; Kang, Y.-R.; Son, J.-C.; Lim, D.-K.; “Optimized Design of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Using Oriented Auto-tuning Niching Algorithm” J. Electr. Eng. Technol. 2021, 16, 1495 - 1503.
- [21] Son, J.-C.; Ahn, J.-M.; Lim, J.-W.; Lim, D.-K.; “Optimal Design of PMa-SynRM for Electric Vehicles Exploiting Adaptive-Sampling Kriging Algorithm”, IEEE Access 2021, 9, 41174-41183.
- [22] Liu, X.; Fu, W.N.; “A Dynamic Dual-Response-Surface Methodology for Optimal Design of a Permanent-Magnet Motor Using Finite-Element Method”, IEEE Trans. Magn. 2016, 52.
- [23] Vagati, A.; Canova, A.; Chiampi, M.; Pastorelli, M.; Repetto, M.; “Design Refinement of Synchronous Reluctance Motors Through Finite-Element Analysis”, IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 36, 1094-1102, 2000.
- [24] Abeyrathne, I.P.; Toulabi, M.S.; Filizadeh, S.; “Design Optimization and Performance Prediction of Synchronous Reluctance Motors”, In Proceedings of the 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 7-10 Oct. 2018.
- [25] Jeong, S.-W.; “Optimal Design of IE4 Super Premium Efficiency Synchronous Reluctance Motor for Industrial Application” Master’s Thesis. Department Electrical and Information Engineering, Seoul University: Seoul, Korea, 2020.
- [26] 차주경, “신경망 대리모델 기반 NSGA-II의 개발과 EV 구동용 동기 릴럭턴스 전동기의 다목적 최적 설계”, 성균관대학교 일반대학원, 석사학위논문, 2021.
- [27] T. Matsuo and T. A. Lipo, "Field oriented control of synchronous reluctance machine", in Power Electronics Specialists Conference, PESC '93 Record., 24th

- Annual IEEE, 1993, pp. 425-431, 1993.
- [28] Dilettoso, E.; Salerno, N.; “A Self-Adaptive Niching Genetic Algorithm for Multimodal Optimization of Electromagnetic Devices”, IEEE Trans. Magn. 2006, 42, 2006.
- [29] Maruyama, T.; Igarashi, H. An Effective Robust Optimization Based on Genetic Algorithm. IEEE Trans. Magn. 2008, 44, 990 - 993.
- [30] Sareni B, Krahenbuhl L, “Fitness sharing and niching methods revisited. IEEE Trans Evol Comput”, 2(3):97 - 106, 1998.
- [31] Pan Seok Shin, Sung Hyun Woo, Yanli Zhang, Chang Seop Koh An, “Application of Latin Hypercube Sampling Strategy for Cogging Torque Reduction of Large-Scale Permanent Magnet Motor”, IEEE Trans. Magn. Vol. 44, Issue 11, 2008.
- [32] Kent R. Davey, “Latin Hypercube Sampling and Pattern Search in Magnetic Field Optimization Problems”, IEEE Trans. Magn. Vol. 44, Issue 6, 2008.
- [33] Kim, J.-K.; Cho, D.-H.; Jung, H.-K. ; Lee, C.-G.; “Niching genetic algorithm adopting restricted competition selection combined with pattern search method”, IEEE Trans. Magn. Vol. 38, Issue 2, 2002.
- [34] J. P. Lawrence, Kenneth Steiglitz, “Randomized Pattern Search”, IEEE Trans. Comp. Vol. C-21, Issue 4, 1972.
- [35] Wi, C.-H.; Lim, D.K.; “Tornado Optimization With Pattern Search Method for Optimal Design of IPMSM” IEEE Trans. Magn. Vol. 58, Issue 2, 2022.
- [36] Lee, T.-H.; Lee, J.-H.; Yi, K.P.; Lim, D.K. “Optimal Design of a Synchronous Reluctance Motor Using a Genetic Topology Algorithm”, Processes, Vol. 9, pp. 1778, 2021.
- [37] Watanabe, K.; Suga, T.; Kitabatake, S.; “Topology Optimization Based on the ON/OFF Method for Synchronous Motor”, IEEE Trans. Magn. Vol. 54, pp. 7201104. 2018.
- [38] Kim, Y.-S.; Park, I.-H.; “Topology Optimization of Rotor in Synchronous Reluctance Motor Using Level Set Method and Shape Design Sensitivity“, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 20, pp. 1093-1096, 2010.
- [39] Sato, S.; Sato, T.; Igarashi, H.; “Topology Optimization of Synchronous Reluctance Motor Using Normalized Gaussian Network”, IEEE Trans. Magn. Vol. 51, pp. 8200904, 2015.
- [40] Im, C.-H.; Jung, H.-K.; Kim, Y.-J.; “Hybrid Genetic Algorithm for

Electromagnetic Topology Optimization”, IEEE Trans. Magn. Vol. 39, No. 5, 2003.

Abstract

Optimal Design of Industrial Synchronous Reluctance Motor using Topology Optimization

Tae-Hee Lee

Dept. of Electrical, Electronic
and Computer Engineering
The Graduate School
University of Ulsan

In this paper, a topology optimization (TO) that can be applied to the optimal design of an IE4 (super premium efficiency) grade industrial synchronous reluctance motor (SynRM) is proposed.

SynRM is a motor driven by reluctance torque utilizing the saliency of the rotor. SynRM has a higher efficiency than an induction motor, and since SynRM does not use a permanent magnet, therefore, has the advantages of low price and high stability. The optimal shape that maximizes the reluctance torque is difficult to explore with the existing parametric algorithm because it is a complex structure. Therefore, TO is applied, which is a method to search for an optimal solution while changing the material by dividing the shape into small cells. TO utilizes the fast convergence performance of the parametric algorithm and the complex and diverse shape search ability of the topology optimization technique, it consists of an initial design using a parametric algorithm, mesh grid setting, and topology detailed optimization using ON-OFF technique.

For efficient topology search, the improved niching algorithm was applied to the optimization of the elliptic curvature constituting the air barrier of SynRM to obtain an initial design plan and to create a mesh grid within the design range. The boundary ON-OFF technique was applied to dramatically reduce the number of analyzes required for the optimal solution search of

the ON-OFF technique. Afterwards, the ratio-based planarization technique was applied to the discontinuous structure to improve the performance of SynRM and lower the manufacturing difficulty. Finally, torque ripple was reduced by using the skew technique and mechanical stability was confirmed through stress analysis. The proposed topology optimization was applied to the IE4 class industrial SynRM optimal design to derive the optimal design that satisfies the requirements.

keywords : niching algorithm, industrial motors, ON-OFF method, smoothing, synchronous reluctance motor, topology optimization.

Student Number : 20205102