ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 31(6), 305-313 (2021) https://doi.org/10.4283/JKMS.2021.31.6.305

Design of the Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor Using Grain-Oriented Electrical Steel for Reduction of Loss

Chang-Hyun Wi and Dong-Kuk Lim*
Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Ulsan, Ulsan 44610, Korea

(Received 17 November 2021, Received in final form 13 December 2021, Accepted 14 December 2021)

In this article, the Permanent Magnet-Assisted Synchronous Reluctance Motor (PMa-SynRM) with application of grain-oriented electrical steel (GO) is proposed for electric vehicles (EVs). Because the GO has strong magnetic performance on the rolling direction, the GO is applied partially in the stator of PMa-SynRM. By applying GO, the performance at no-load condition and load condition are increased simultaneously. Especially, the average torque increased 3.24% and the iron loss at no-load condition and load condition decreased by 13.03% and 11.17%, respectively. Finally, by reducing the stack length in proportion to the increased torque, the iron loss at no-load condition decreased by 15.85%.

Keywords : Grain-oriented electrical steel (GO), Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Motor (PMa-SynRM), iron loss, motor design

영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 손실 저감을 위한 방향성 강판 적용 설계

위창현 · 임동국*
울산대학교 전기전자컴퓨터공학과, 울산시 남구 대학로 93, 44610

(2021년 11월 17일 받음, 2021년 12월 13일 최종수정본 받음, 2021년 12월 14일 게재확정)

본 논문에서는 방향성 강판을 적용한 전기자동차용 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기가 제안되었다. 방향성 강판은 압연 방향으로 우수한 자기적 특성을 가지기 때문에 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 고정자에 부분적으로 적용되었으며, 방향성 강판의 적용을 통해 전동기의 무부하 및 부하 시의 운전 성능이 동시에 증가하였다. 특히, 평균 토크는 3.24% 증가하였고 철손은 무부하 및 부하 조건에서 각각 13.03% 및 11.17% 감소하였다. 마지막으로, 증가한 토크에 비례하여 적층 길이를 줄임으로서, 무부하 철손은 15.85% 까지 감소하였다.

주제어 : 방향성 강판, 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기, 철손, 전동기 설계

I. 서 론

최근 자동차 산업의 패러다임은 온실가스 감축을 목표로 강화되는 다양한 환경규제와 자동차 자체의 연비 향상 이슈를 해결하는 것에 초점이 맞춰져 있으며, 하이브리드 자동차 및 전기자동차와 같은 친환경적인 전력 기반 자동차의 개발과 상용화가 전세계적으로 확대되고 있다. 이에 따라 전력 기반 자동차에 사용되는 전동기 성능 개선의 필요성이 증대되고 있다. 일반적으로, 영구자석 매입형 동기전동기(IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 높은 평균 토크와 고속에서의 뛰어난 성능으로 인해, 전기자동차의 구동모터로서 IPMSM이 자주 사용된다[1]. 그러나 IPMSM을 사륜구동(AWD, All Whell Drive) 시스템의 보조 구동용 전동기로 사용할 경우 IPMSM의 단점이 부각되는 문제가 있다. AWD/4WD 시스템의 구동 및 보조 구동용 전동기는 직결로 사용되는데, 직결용 보조 구동용 전동기는 무부하시에도 직결된 회전자의 회전에 의해 무부하 철손이 발생하고, 이로 인해 IPMSM의 철손이 크다는 단점이 두드러지게 된다[2]. 이와 같은 보조 구동용 전동기의 무부하 손실을 저감하기 위해

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-52-259-1072,
Fax: +82-52-259-1686, e-mail: ldk8745@ulsan.ac.kr

IPMSM을 대신할 여러 전동기들이 연구되고 있다. 이 논문에서는, 보조 구동용 전동기로 사용하기 위해 방향성 강판을 적용한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기(PMa-SynRM, Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Motor)를 설계하였다.

PMa-SynRM은 자석 토크와 릴럭턴스 토크를 모두 활용하기 때문에 고출력 밀도와 고효율을 동시에 보장하는 장점이 있다[3]. 또한, PMa-SynRM에 사용되는 자석은 일반적으로 IPMSM의 자석으로 사용되는 희토류 자석보다 가격이 훨씬 저렴한 페라이트 자석이기 때문에, 가격 면에서도 뚜렷한 장점을 가지는 모터이다[4]. 그러나 페라이트 자석의 자속 밀도가 모터에 널리 사용되는 네오디뮴 자석에 비해 작기 때문에, PMa-SynRM은 이러한 토크 감소를 보상해줄 필요가 있다[5]. 이 논문에서는 보조 구동용 PMa-SynRM의 토크 보상을 위해 고정자에 방향성 강판을 적용하는 것을 제안한다.

방향성 강판은 자기적 이방성을 가지고 있어, 압연 방향으로 뛰어난 자기적 특성을 가지는 강판이다. 자화가 용이한 방향인 압연 방향으로는 우수한 BH 특성과 철손 특성을 가지지만, 압연의 수직 방향으로는 무방향성 강판보다 열등한 BH 특성과 철손 특성을 가진다[6,7]. 이 논문에서는 이러한 방향성 강판의 자기적 이방성을 적절히 고려하여 PMa-SynRM의 고정자에 적용하였고, 그 결과 무방향성 강판으로만 제작된 PMa-SynRM보다 우수한 성능을 가지는 것을 성공적으로 확인하였다.

II. 보조 구동용 PMa-SynRM

본 논문에서 타겟으로 하는 보조 구동용 PMa-SynRM의 주요 운전점과 요구 조건은 Table I에 명시되어 있다. 타겟 PMa-SynRM은 최대 출력 70 kW급의 전기 자동차 보조 구동용으로 정격 속도 2,700 RPM에서 250 Nm의 최대 토크를 요구한다. 입력 전압은 360 V_{dc}이고 상 전류 제한은 482.2 A_{pk}이다.

이러한 요구 조건 및 제한 사항을 만족하는 기존 PMa-SynRM의 형상 및 설계 제원이 Fig. 1과 Table II에 나타나 있다. 기존 PMa-SynRM은 8극 48슬롯에 레이어 당 턴수 12회를 가진 전동기이다. 코어 재질은 무방향성 강판인 35JN250을 사용하였고, 자석 재질은 Br_{min}이 0.46T인 Ferrite 12G를 사용하였다.

Table I. Requirements and operating point of the target PMa-SynRM.

Rated torque	70 [kW]
Rated power	250 [Nm]
Rotation speed	2,700 [RPM]
Rated torque ripple	33 [%]
Efficiency	98 [%]
Input voltage	360 [V_{dc}]
Limit current	485 [A_{pk}]

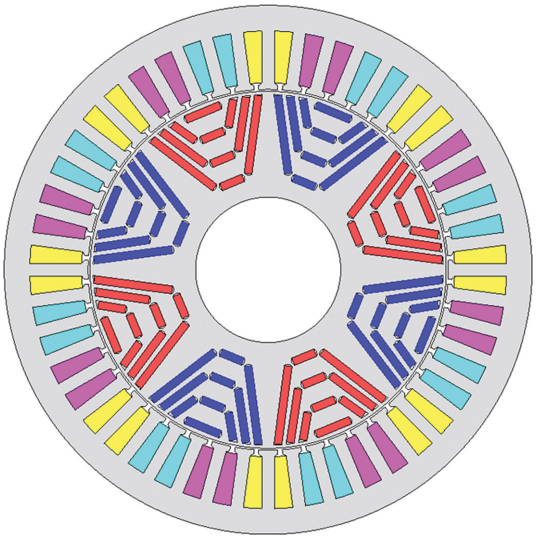


Fig. 1. (Color online) Configuration of the conventional PMa-SynRM.

Table II. Specifications of the conventional PMa-SynRM.

Pole/Slot	8/48
Turns per layer	12 turns
Parallel circuit number	4
Stator inner/outer	100/68.2 [mm]
Rotor inner/outer	67.5/27.5 [mm]
Stack length	308.7 [mm]
Air gap	0.7 [mm]
Input current	482.20 [A_{pk}]
Core material	35JN250
Permanent magnet Material	Ferrite 12G (Br_{min}: 0.46 [T])

Fig. 2에 기존 PMa-SynRM의 무부하 해석 결과가 나타나 있다. 무부하 해석은 상온(20 °C)에서 2700 RPM의 회전속도 아래 진행되었다. 무부하 해석 결과, 기존 PMa-SynRM의 상 역기전력(B-EMF, Back Electromotive Force)은 43.58 V_{rms}, 선간 B-EMF는 74.91 V_{rms}가 나왔으며, 각 역기전력의 전 고조파 왜형율(THD, Total Harmonic Distortion)은 각각 14.74%와 7.61%이 나왔다. 코깅 토크의 값은 1.94 Nm이고 무부하 철손은 113.73 W이며, 무부하 운전 시의 자속 밀도는 Fig. 2(d)에 나와 있다. Fig. 3에는 기존 PMa-SynRM의 부하 해석 결과가 나타나 있다. 부하 해석 또한 무부하 해석과 마찬가지로 상온(20 °C)과 2700 RPM의 회전속도에서 진행되었으며, 이 때의 평균 토크는 250.53 Nm이고 토크 리플은 30.83%이다. 부하 해석의 인가 전류의 첨두치는 482.20 A_{pk}로 제한 조건인 485 A_{pk}를 만족하며, 최대 운전점의 출력 토

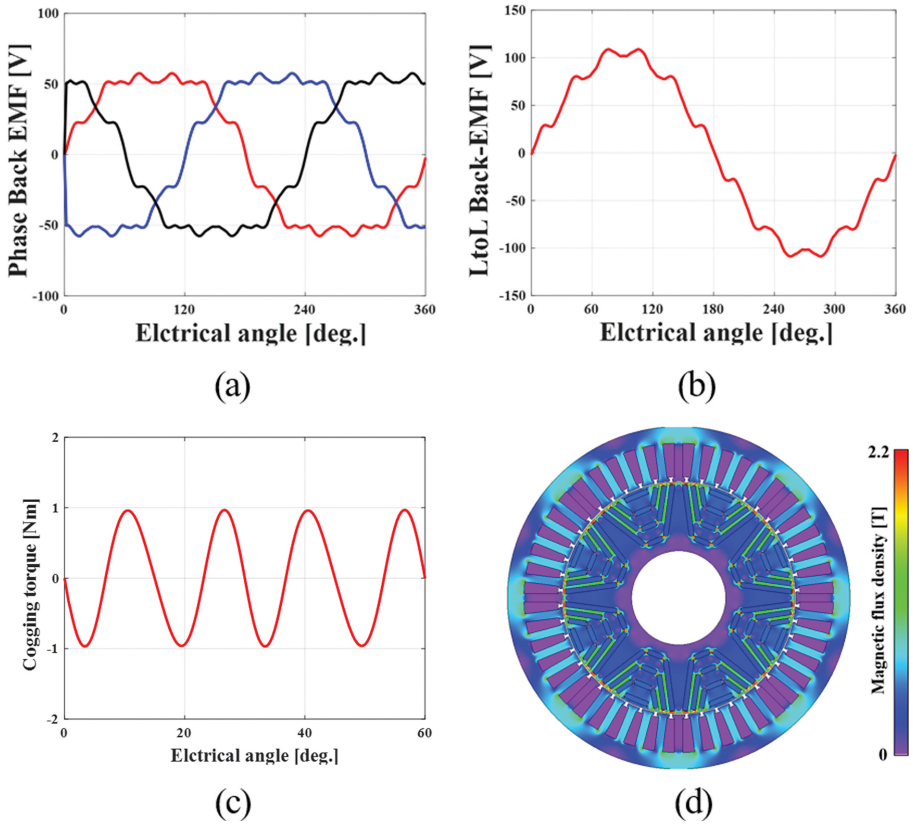


Fig. 2. (Color online) No-load condition analysis result of the conventional PMa-SynRM. (a) Phase B-EMF. (b) Line-to-line B-EMF. (c) Cogging torque. (d) Magnetic flux density plot.

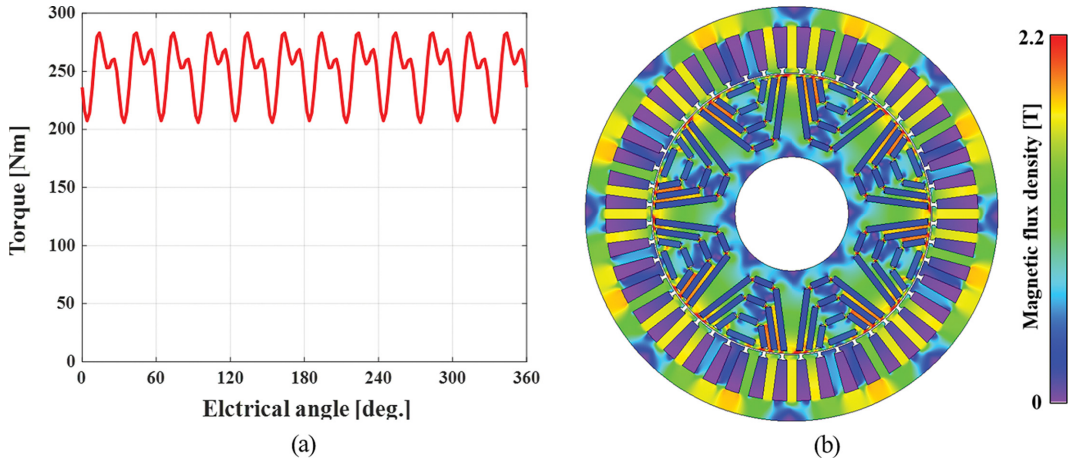


Fig. 3. (Color online) Load condition analysis result of the conventional PMa-SynRM. (a) Torque at maximum operating point. (b) Magnetic flux density plot at maximum operating point.

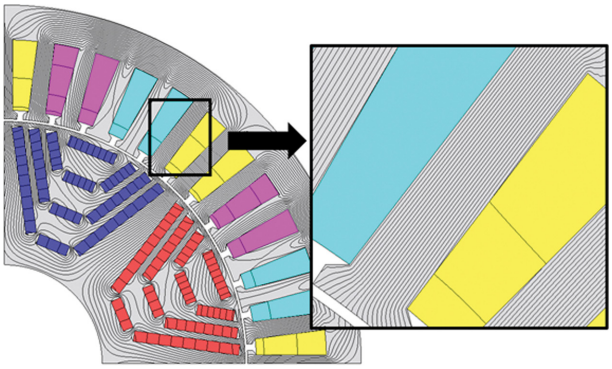
크 또한 제한 조건인 250 Nm를 만족하였다. 최대 운전점에서 운전시 기존 PMa-SynRM의 자속 밀도가 Fig. 3(b)에 나타나 있고, 부하 운전시 철손은 회전자, 고정자의 요크, 치에서 각각 60.29 W, 284.74 W, 309.22 W로 총 654.25 W이고 최대 출력은 70.84 kW이다.

III. 방향성 강판을 적용한 PMa-SynRM 설계

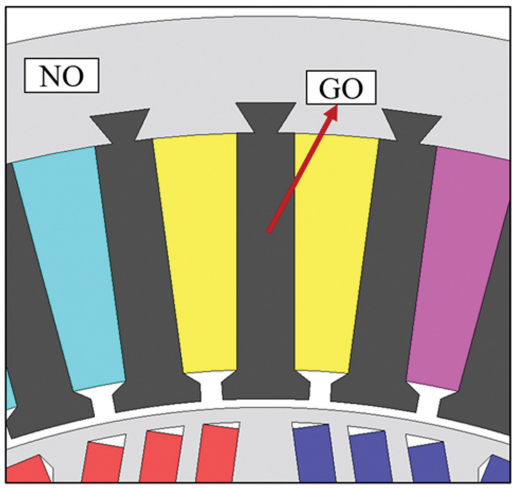
방향성 강판(GO, Grain-Oriented electrical steel)은 자기적 이방성을 가지고 있어, 자속이 강판을 관통하는 방향에 따라 자기적 특성과 철손 특성이 달라지는 강판이다[6,7]. 자속이

방향성 강판의 압연 방향으로 관통할 경우, 무방향성 강판(NO, Non-Oriented electrical steel)과 비교했을 때 더 뛰어난 자기적 특성과 철손 특성을 가지는 반면, 압연 방향에 수직으로 관통할 경우에는 오히려 무방향성 강판보다 안 좋은 자기적 특성과 철손 특성을 가진다. 따라서, 전동기에 방향성 강판을 적용할 때에는 이러한 압연 방향과 자속의 진행 방향을 고려하여 적절히 배치할 필요가 있으며, 자속 경로와 방향성 강판의 배치가 적절히 이루어졌을 때, 토크의 증가와 동시에 철손의 감소에 따른 효율 증가 효과를 기대할 수 있다.

앞서 해석한 PMa-SynRM의 성능 향상을 목표로 방향성 강판을 적용시키기 위하여 기존 PMa-SynRM의 자속 경로를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4(a)에서 확인할 수 있듯이, 일반적으로 회전자의 자속 경로는 회전자에 삽입된 자석의 배치 및 극 수에 따라 철심에 흐르는 자속 경로가 바뀌게 된다. 따라서 전동기의 회전자는 자속 경로와 압연 방향을 고려하여 배치해야 하는 방향성 강판을 적용시키기에는 적합하지 않다.



(a)

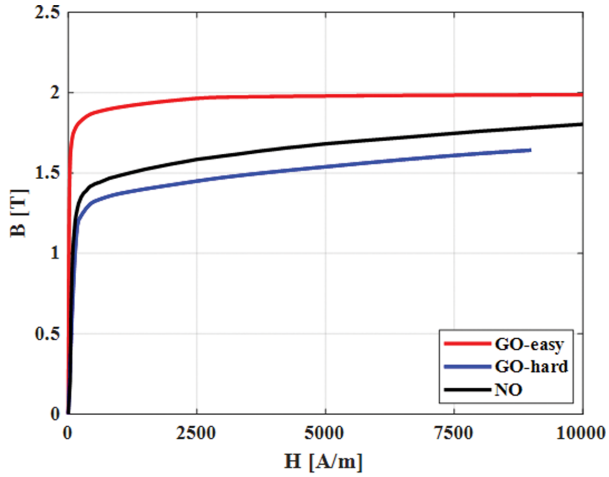


(b)

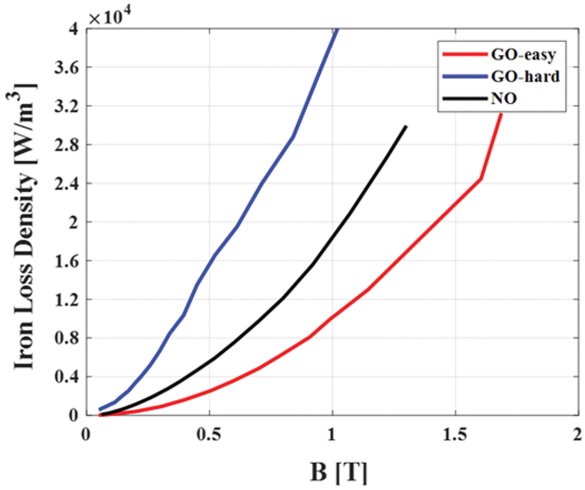
Fig. 4. (Color online) Flux path of the conventional PMa-SynRM and the application of the grain-oriented electrical steel. (a) Flux path at the load condition. (b) Teeth with grain-oriented electrical steel applied.

반면 고정자의 경우, 치와 요크 부분에서 각각 자속 경로의 경향이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 고정자의 치에서는 회전자에서 넘어온 자속이 치를 따라 일정한 방향으로 흐르지만, 요크는 치에서 나오는 자속이 수평 방향으로 퍼지기 때문에 자속 경로가 일정하다고 보기 어렵다. Fig. 4(a)의 기존 PMa-SynRM 모델의 자속 경로를 반영하여 이 논문에서는 Fig. 4(b)와 같이 고정자의 치에만 방향성 강판을 적용시켜 자속이 최대한 방향성 강판의 압연 방향으로만 흐르도록 유도된 모델을 제작하였다.

이 논문에서 제안하는 방향성 강판이 적용된 PMa-SynRM의 해석에 사용된 방향성 강판은 35ZH135이다[2]. Fig. 5에 이번 해석에 사용된 방향성 강판(35ZH135)과 무방향성 강판(35JN250)의 자기적 특성 곡선들이 비교되어 있다. Fig. 5(a)



(a)



(b)

Fig. 5. (Color online) Magnetic characteristic curve comparison of the grain-oriented electrical steel and non-oriented electrical steel. (a) B-H curve comparison. (b) B-Iron Loss Density curve comparison at 100 Hz.

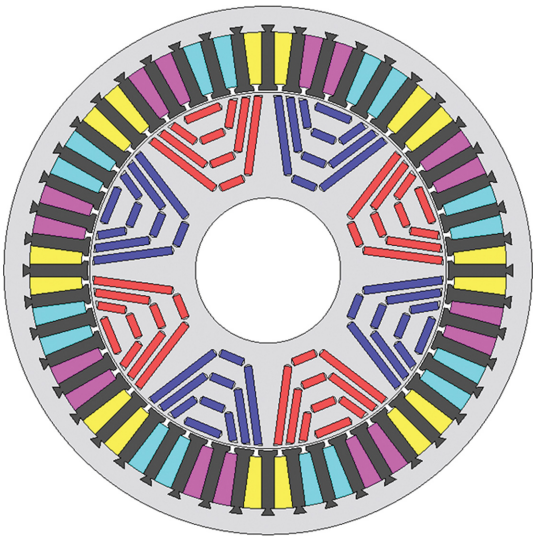


Fig. 6. (Color online) Configuration of the proposed PMa-SynRM with partially applied grain-oriented electrical steel.

그래프와 Fig. 5(b) 그래프는 각각 자속밀도 대 자계의 세기(B-H) 특성 곡선과 자계 세기 대 철손 밀도(B-W) 특성 곡선이다. Fig. 5의 그래프에서 빨간색 및 파란색 곡선은 각각 방향성 강판의 압연 방향 및 압연의 수직방향에서의 특성 곡선을 나타내고 있으며, 검은색 곡선은 무방향성 강판의 특성 곡선을 나타내고 있다. Fig. 5(a) 그래프에서 볼 수 있듯이, 자속이 방향성 강판의 압연 방향으로 통과할 때는 무방향성 강판보다 B-H 특성에서 굉장히 우수하지만, 그렇지 않을 때는 오히려 무방향성 강판보다 특성이 나빠지는 것을 확인할 수 있다. 마찬가지로 Fig. 5(b) 그래프에서는 압연 방향에서의 방향성 강판의 철손 밀도 특성이 무방향성 강판에 비해 우수하

Table III. Specifications of the GO applied PMa-SynRM model in this paper.

Pole/Slot	8/48
Turns per layer	12 turns
Parallel circuit number	4
Stator inner/outer	100/68.2 [mm]
Rotor inner/outer	67.5/27.5 [mm]
Stack length	308.7 [mm]
Air gap	0.7 [mm]
Input current	482.20 [A_{pk}]
Core material	35JN250
Core material (Stator teeth)	35ZH135
Permanent magnet Material	Ferrite 12G (Br_{min}: 0.46 [T])

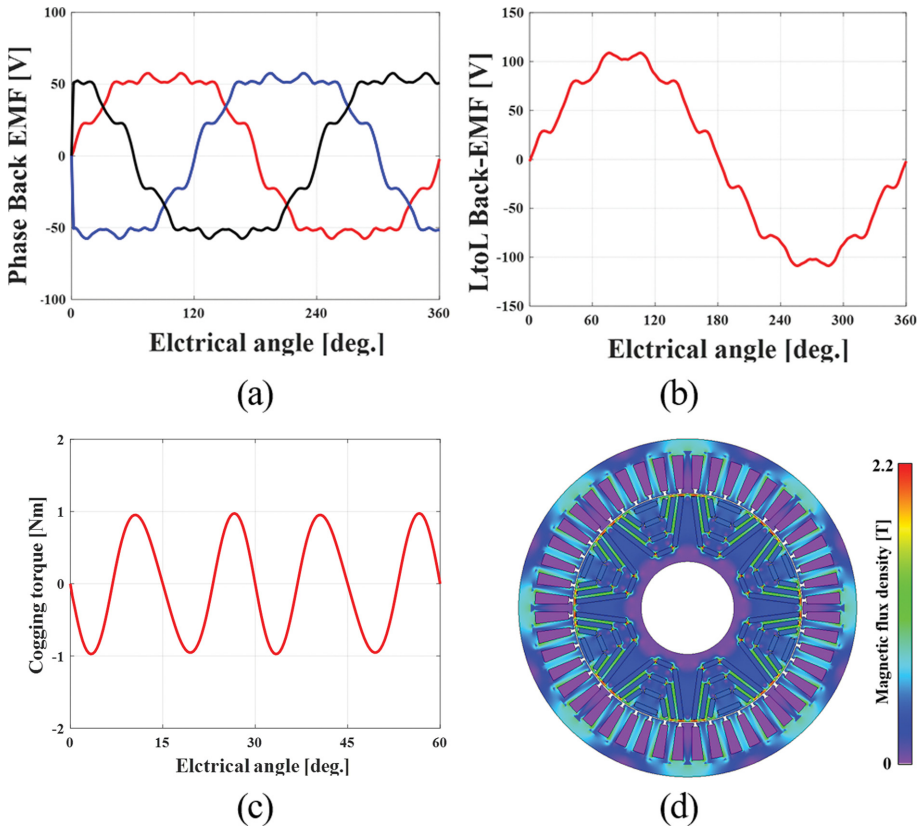


Fig. 7. (Color online) Analysis result of the GO applied PMa-SynRM model at no-load condition. (a) Phase B-EMF. (b) Line-to-line B-EMF. (c) Cogging torque. (d) Magnetic flux density plot.

지만, 자속의 진행 방향이 압연 방향에 수직일 경우에는 무방향성 강판보다 특성이 안 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 종합적으로 보았을 때, 자속이 방향성 강판을 관통하는 방향에 따라 방향성 강판의 자기적 특성이 변화하고, 무방향성 강판의 자기적 특성은 그 차이의 중간 정도 되는 것을 Fig. 5에서 확인할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 Fig. 6과 같이 기존의 PMa-SynRM 모델에 방향성 강판을 적용시킨 새로운 PMa-SynRM 모델을 제안하였다. Fig. 4(a)에서 확인한 자속 경로를 최대한 활용하기 위해 기존 모델의 고정자의 치 전체에 방향성 강판을 적용하였으며, Fig. 4(b)와 Fig. 6에서 치에 적용된 방향성 강판과 요크의 무방향성 강판을 기구적으로 고정하기 위해 치 상단에 이음부를 만들어 치와 요크를 안정적으로 결합한 것을 확인할 수 있다. Table III에는 방향성 강판이 적용된 모델의 설계 제원이 나타나 있다. 앞서 해석한 기존 PMa-SynRM에 방향성 강판을 부분적으로 적용시킨 것 외에는 전부 동일한 것을 확인할 수 있다.

방향성 강판이 적용된 PMa-SynRM 모델의 무부하 및 부하 해석 결과가 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타나 있다. 먼저, 무부하 해석은 기존 PMa-SynRM과 동일한 조건인 상온(20 ºC)과 2700 RPM의 회전속도에서 진행되었으며, 이때 상 B-EMF는 43.64 V_{rms}, 선간 B-EMF는 75.00 V_{rms}가 나왔으며, 기존 PMa-SynRM 대비 각각 0.14%, 0.12% 증가하였다. 반면 상 B-EMF의 THD와 선간 B-EMF는 14.72%, 7.48%로 기존 모델 대비 각각 –0.14%, –1.71% 감소하였다. 무부하 운전 시 철손은 98.91 W로 기존 모델의 113.73 W 대비 13.03% 감소하였다. 앞서 말했듯이, 보조 구동용 전동기는 무부하 시에도 불가피한 회전에 의해 철손이 발생하기 때문에 무부하 철손이 13%가량 감소된 것은 중요한 개선 사항이다. 무부하 해석의 상세한 결과 비교를 Table IV에 나타냈다.

부하 해석 또한 기존 PMa-SynRM과 동일한 조건 아래 해석하였으며, 인가 전류 역시 제한 조건을 만족하는 482.20 A_{pk}를 인가하였다. 최대 운전점의 출력 토크는 258.64 Nm이며, 이는 요구 조건인 250 Nm를 만족함과 동시에 기존 모델 대비 3.24% 증가하였다. 토크가 증가하였기 때문에 출력 또한 3.24% 증가한 73.13 kW이다. 철손은 회전자, 고정자의 요크, 고정자의 치에서 각각 62.61 W, 296.37 W, 222.20 W로 총 581.19 W이며 기존 모델 대비 철손이 11.17% 저감되었다. 특히, 방향성 강판이 적용된 치 부분에서 철손이 약 30%가량 감소한 것을 확인할 수 있다. 토크 리플은 32.60%로 기존 모델 대비 5.74% 증가하였지만, 제한 조건인 33% 이하를 만족한다. 결과적으로, 토크가 증가함과 동시에 철손

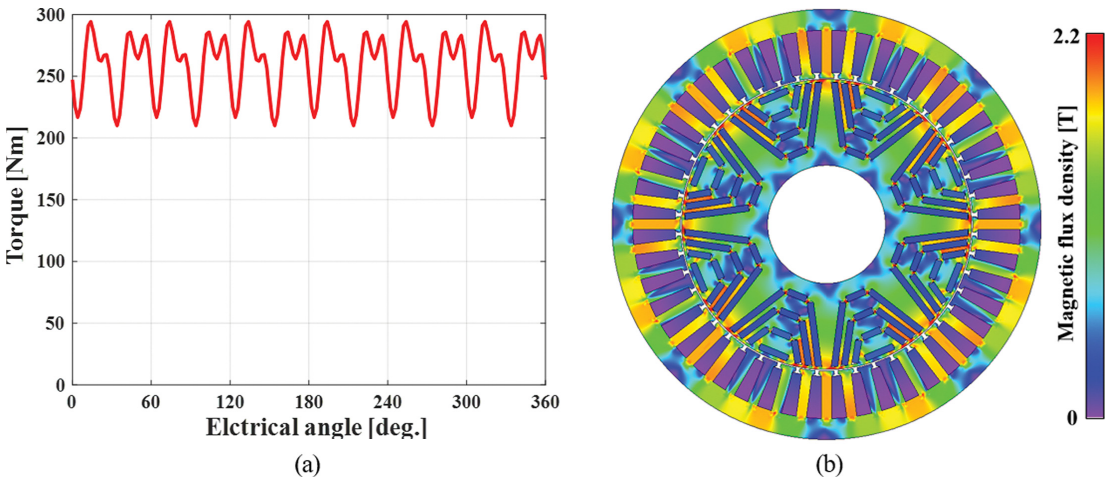


Fig. 8. (Color online) Load condition analysis result of the GO applied PMa-SynRM model. (a) Output torque at maximum operating point. (b) Magnetic flux density plot at maximum operating point.

Table IV. Analysis result comparison of the conventional and the GO applied PMa-SynRM model at no-load condition.

	Initial model	GO applied model	Difference [%]
Phase B-EMF [V_{rms}]	43.58	43.64	+0.14
LtoL B-EMF [V_{rms}]	74.91	75.00	+0.12
Phase BEMF THD [%]	14.74	14.72	–0.14
LtoL BEMF THD [%]	7.61	7.48	–1.71
Cogging torque [$Nm_{pk\text{-}pk}$]	1.94	1.95	+0.48
No-load iron loss [W]	113.73	98.91	–13.03

Table V. Analysis result comparison of the conventional and the GO applied PMa-SynRM model at load condition.

	Initial model	GO applied model	Difference [%]
Average torque [Nm]	250.53	258.64	+3.24
Torque ripple [%]	30.83	32.60	+5.74
Output power [kW]	70.83	73.13	+3.24
Copper loss [W]	467.70	467.70	+0
Iron loss [W]	654.25	581.19	−11.17
Efficiency [%]	98.44	98.59	+0.15

Table VI. Specifications of the proposed PMa-SynRM model in this paper.

Pole/Slot	8/48
Turns per layer	12 turns
Parallel circuit number	4
Stator inner/outer	100. [mm]
Rotor inner/outer	67.5/27.5 [mm]
Stack length	298.7 [mm]
Air gap	0.7 [mm]
Input current	482.20 [A_{pk}]
Core material	35JN250
Core material (Stator teeth)	35ZH135
Permanent magnet Material	Ferrite 12G (Br_{min}: 0.46 [T])

이 감소하여 효율 또한 기존 모델 대비 0.15% 증가한 것을 Table V에서 확인할 수 있다. 마찬가지로 상세한 부하 해석의 결과 비교 또한 Table V에 나타냈다.

Table VI에는 본 논문에서 제안하는 적층 길이가 감소된 방향성 강판 적용 PMa-SynRM 모델의 설계 제원이 나타나 있다. 앞서 해석한 방향성 강판 적용 PMa-SynRM 모델이 기존 모델보다 3.24% 큰 토크와 출력을 갖기 때문에, 적층 길이가 3.24% 만큼 감소된 것이 차이점이며 그로 인해 감소된 상 저항 외에는 모든 설계 변수가 동일하다. 그 해석 결과는 Fig. 9와 Fig. 10 및 Table VII과 Table VIII에 나타

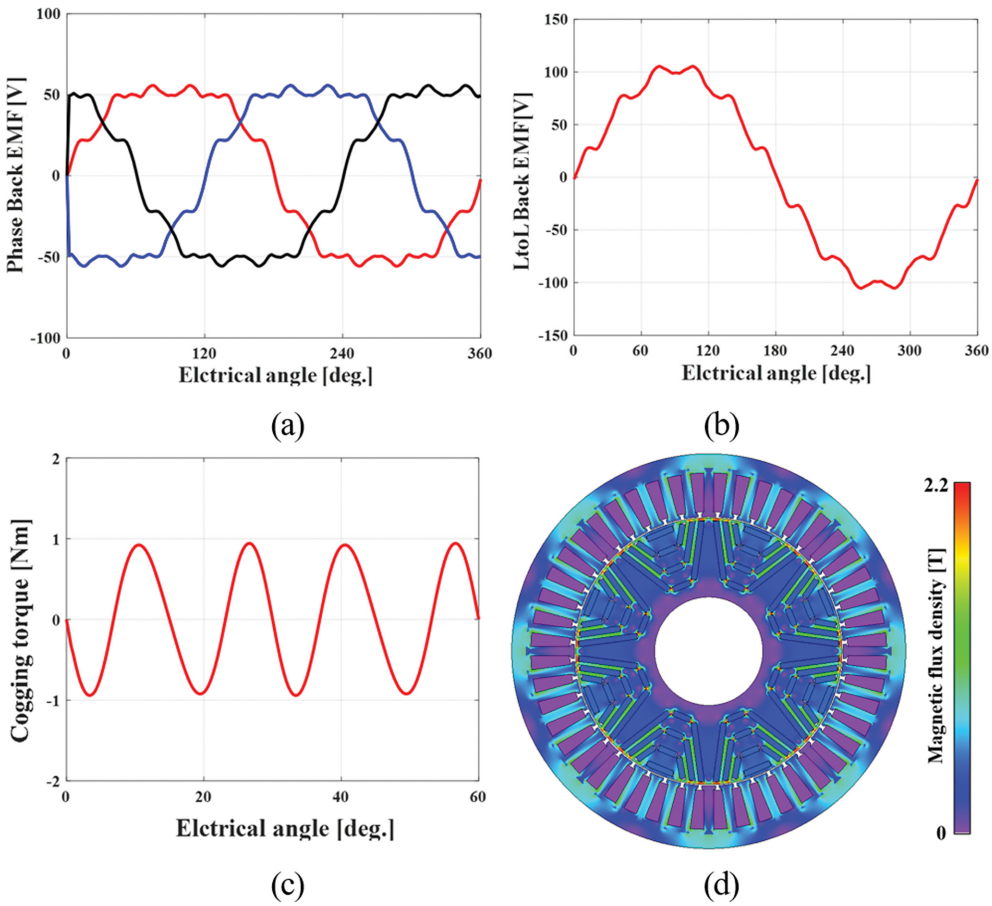


Fig. 9. (Color online) Analysis result of the proposed PMa-SynRM model at no-load condition. (a) Phase B-EMF. (b) Line-to-line B-EMF. (c) Cogging torque. (d) Magnetic flux density plot.

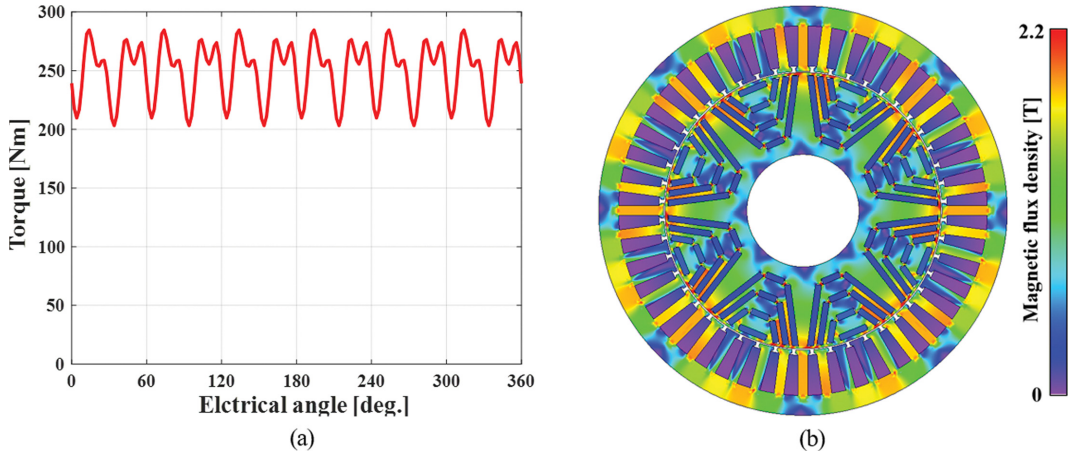


Fig. 10. (Color online) Load condition analysis result of the proposed PMa-SynRM model. (a) Output torque at maximum operating point. (b) Magnetic flux density plot at maximum operating point.

Table VII. Analysis result comparison of the conventional and proposed PMa-SynRM model at no-load condition.

	Initial model	Proposed model	Difference [%]
Phase B-EMF [V_{rms}]	43.58	42.23	–3.10
LtoL B-EMF [V_{rms}]	74.91	72.57	–3.12
Phase BEMF THD [%]	14.74	14.72	–0.02
LtoL BEMF THD [%]	7.61	7.48	–0.13
Cogging torque [$Nm_{pk\text{-}pk}$]	1.94	1.88	–3.09
No-load iron loss [W]	113.73	95.70	–15.85

Table VIII. Analysis result comparison of the conventional and proposed PMa-SynRM model at load condition.

	Initial model	Proposed model	Difference [%]
Average torque [Nm]	250.53	250.20	–0.13
Torque ripple [%]	30.83	32.60	+5.74
Output power [kW]	70.83	70.74	–0.13
Copper loss [W]	467.70	456.10	–2.48
Iron loss [W]	654.25	562.37	–14.04
Efficiency [%]	98.44	98.58	+0.14

나 있다. 그림과 표에 나와 있듯이 적층 길이를 저감한 최종 제안 모델 역시 설계 제한 조건들을 모두 만족하고 있음을 알 수 있다. 최종 제안 모델의 주목할 만한 점은 기존 모델 대비 무부하 철손이 15.85% 감소한 점이며, 단순히 기존 모델에 방향성 강판을 적용했을 때보다 적층 길이까지 감소한 최종 모델의 무부하 철손이 더 크게 감소했다는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결　　론

본 논문에서는 PMa-SynRM의 고정자에 방향성 강판을 부분적으로 적용하여 전기자동차 보조 구동용 PMa-SynRM의 성능을 개선하였다. 고정자의 치에 해당하는 부분에 방향성 강판을 적용한 결과 토크, 무부하 철손, 부하 철손, 효율이 각각 3.24%, –13.03%, –11.17%, 0.15% 개선되었으며, 전기자동차 보조 구동용으로 사용되는 전동기에서 발생하는 무부하 철손의 문제를 효과적으로 개선하였음을 알 수 있다. 또한, 3%가량 개선된 토크를 활용하여 적층 길이를 저감한 모델을 제안하였고 무부하 철손이 기존 모델 대비 15.85% 감소하였으며 저감된 적층 길이를 통해 전동기의 소형화 및 경량화를 기대할 수 있다. 혹은 적층을 저감하는 대신 회전자에 인가되는 전류 밀도를 감소시켜 열적인 면에서 전동기 운전을 유리하게 할 수 있으며, 이를 통해 이 논문의 연구가 기존 전기 자동차에 사용되는 모터의 크기와 무게 등이 자동차 자체에 의해 제한됨으로써 발생하는 문제들을 효율적으로 해결할 수 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2021년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업(2021RIS-003)과 2019년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2019R1F1A1061132).

References

[1] D.-K. Lim, K.-P. Yi, S.-Y. Jung, H.-K. Jung, and J.-S. Ro, IEEE Trans. Magn. **51**, 8207504 (2015).

[2] N. Denis, S. Takeda, K. Fujitani, K. Fujisaki, and S. Odawara, J. Magn. Soc. Jpn. **42**, 62-71 (2018).

[3] Y. Kong, M. Lin, M. Yin, and L. Hao, IEEE Trans. Magn. **54**, 8108705 (2018).

[4] D. S. Lee, Y. J. Kim, and S. Y. Jung, J. Magn. **18**, 216-219 (2013).

[5] D. Ngo, M. Hsieh, and T. A. Huynh, IEEE Trans. Magn. **55**, 8106108 (2019).

[6] M. C. Guimarães, F. L. Alcântara, R. U. C. Moreira, N. E. F. Lima, and J. G. Ank, IEEE Trans. Magn. **52**, 2002704 (2016).

[7] J. Ma, J. Li, H. Fang, Z. Li, Z. Liang, Z. Fu, L. Xiao, and R. Qu, IEEE Trans. Industry Applications **53**, 5327-5337 (2017).