

견인용 IPMSM의 신뢰성 향상을 위한 형상 설계

Shape Design of IPMSM for the Reliability Improvement of Traction Motors

이 기 덕* · 이 주*
(Ki-Doek Lee · Ju Lee)

Abstract - IPMSM for traction motor has high power density and wide operating range. But high power density causes internal temperature rise and it makes big armature reaction which causes irreversible demagnetization. And with wide operating range, rotor rotating fast gets stress from centrifugal force. For this reason, traction motor is designed to considerate stress of rotor and irreversible demagnetization for reliability. This paper explains shape design method of 120kW IPMSM accounting improvement of reliability. Finally, the validity of the analysis and the performance evaluation were verified through testing of the final model.

Key Words : IPMSM, Traction motor, Irreversible demagnetization, Stress

1. 서 론

전 세계적으로 자동차 산업에 대해 CO₂ 감축과 유해물질 사용 제한 등 환경규제와 유가 상승과 석유자원 고갈에 따른 에너지 문제가 대두되고 있다. 이에 따라 수소연료전지, 바이오디젤, 태양광, 전기 등 석유 대체 에너지를 적용한 차세대 연료자동차들이 각종 모터쇼에 출품되어 세계의 이목을 집중시키고 있으며, 이미 전 세계적으로 하이브리드 전기 자동차(HEV) 시장이 확대되고 있는 실정이다. 전기 자동차의 견인전동기로 고효율밀도, 고효율, 넓은 운전범위를 갖는 영구자석 동기전동기가 많이 연구되어 왔으며, 철도 산업도 고효율을 위해 기존 유도전동기를 영구자석 동기전동기로 대체하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다[1].

영구자석 동기전동기에 대한 대부분의 연구는 자기회로 해석을 통한 전동기 파라미터 계산 및 특성 해석에 대한 고찰 그리고 유한요소 해석을 이용한 손실 저감[2], 토크 밀도 향상[3], 토크리플 및 코킹 토크 저감[4], 최적설계[5], 불가역 감자[6], 회전자 스트레스[7] 등을 다루고 있다. 본 논문에서는 견인 전동기의 신뢰성 향상을 위해 영구자석 전동기의 불가역 감자와 회전자의 스트레스를 저감시키는 형상 설계 방법에 대해서 유한요소 해석을 통해 설명하였다. 그리고 최종 설계된 모델의 제작 후 시험을 통해 신뢰성 향상을 위한 형상 설계 방법의 타당성을 검증하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

E-mail:julee@hanyang.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

Received : March 12, 2015; Accepted : April 29, 2015

2. 본 론

2.1 견인 전동기의 부하와 설계 포인트

공기저항, 마찰저항, 최대 순항 속도, 가속성능, 등판 성능 등을 고려해 견인전동기의 부하를 산정할 수 있다. 본 논문에서 부하산정을 통해 최종적으로 결정된 순시 정격과 연속 정격의 속도-토크 특성곡선이 그림 1에 나타나 있고 이 때의 전동기의 설계 사양이 표 1에 나타나있다. 여기서 순시 정격은 1분 이내에서 구동 가능한 최대정격이고, 연속 정격은 60분 이내에서 연속적으로 구동 가능한 정격이다.

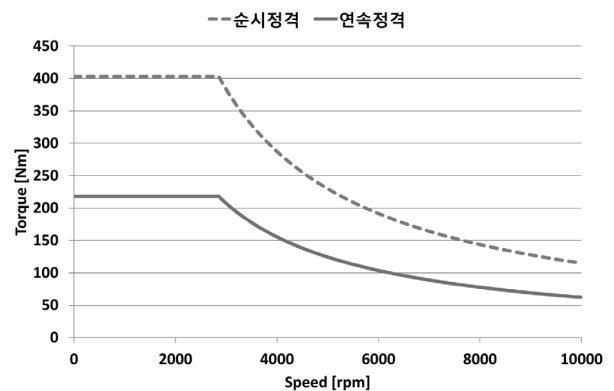


그림 1 순시정격과 연속정격의 속도-토크 특성곡선

Fig. 1 Speed-Torque characteristic curve of momentary and continuous rating

표 1 견인 전동기의 설계 사양

Table 1 Design specification of the traction motor

| 항목 | | 값 | 단위 |
|----------------|-----------|----------|--------|
| 순시 정격 (1분) | 출력 | 120 | kW |
| | 요구토크 | 403 | Nm |
| | at 정격속도 | at 2,843 | at rpm |
| | 요구토크 | 115 | Nm |
| at 최대속도 | at 10,000 | at rpm | |
| 연속 정격 (60분) | 출력 | 65 | kW |
| | 요구토크 | 218 | Nm |
| | at 정격속도 | at 2,843 | at rpm |
| | 요구토크 | 62 | Nm |
| at 최대속도 | at 10,000 | at rpm | |

2.2 견인용 IPMSM의 신뢰성 향상을 위한 설계 방향

요구 사양을 만족시키는 영구자석 동기전동기의 형상과 제원이 그림 2와 표 2에 나타나 있다. 제약된 사이즈에서 목표한 토크 특성을 만족시키기 위해 자속 집중형 회전자와 권선계수가 높은 10극 12슬롯을 선택하였다. 그림 2 모델의 유한요소 해석 결과 목표한 속도 토크 성능을 만족하였다. 하지만 180도 온도조건에서 900Apeak의 전류 인가시의 감자해석 결과 그림 3과 같이 영구자석 모서리 끝단에 국부적인 불가역 감자가 발생함을 확인하였다. 영구자석의 불가역 감자가 발생하게 되면 영구자석 고유의 특성을 잃어 성능이 저하되기 때문에 불가역 감자가 발생하지 않도록 형상설계가 필요하다. 그리고 그림 4는 타행운전을 위한 12000rpm에서의 응력 해석 결과로 최대 응력이 363MPa로 안전율이 약 1.2임을 확인할 수 있다. 일반적으로 전류 인가 시 radial force가 발생하지만 그 크기가 회전에 의해 발생하는 응력에 비해 절대적으로 작기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않았다 [8]. 안전율에 대한 정확한 기준은 없지만 본 논문의 목표인 2를 만족하지 못하기에 이는 전동기가 고속으로 회전에 따라서 기계적인 변형을 가져올 수 있다. 기계적인 변형이 발생하게 되면 회전자와 고정자 사이에 간섭이 생겨 전동기가 파손될 수 있기에 안전율 향상을 위한 형상설계가 필요하다.

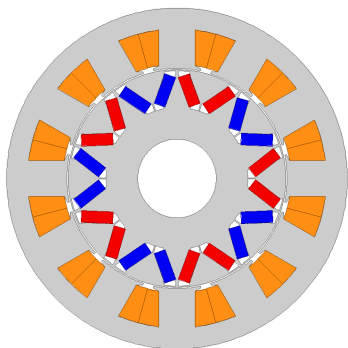


그림 2 해석을 위한 초기모델
Fig. 2 Initial model for analysis

표 2 견인 전동기의 설계 사양

Table 2 Design specification of the traction motor

| | Value | Unit |
|-----------------|---------|---------|
| Pole / slots | 10 / 12 | - |
| Outer diameter | 260 | mm |
| Stack length | 159 | mm |
| Rotor diameter | 166 | mm |
| Magnet size | 20 * 10 | mm * mm |
| Air gap | 1 | mm |
| Rib | 1 | mm |
| Stator yoke | 16 | mm |
| Shoe 1 &2 | 1.5 | mm |
| Teeth width | 27.5 | mm |
| Teeth length | 27 | mm |
| Slot opening | 8 | mm |
| Turns per phase | 24 | - |
| Turns per teeth | 6 | - |
| Parallel branch | 1 | - |

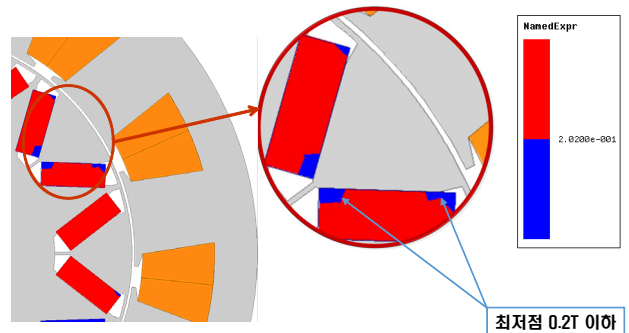


그림 3 초기모델의 감자해석 결과
Fig. 3 Demagnetization result of initial model

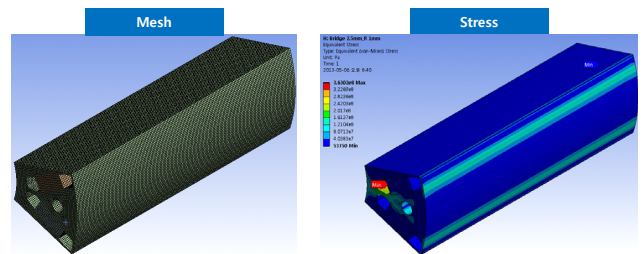


그림 4 초기모델의 응력해석 결과
Fig. 4 Mechanical stress result of initial model

2.3 영구자석의 불가역 감자를 고려한 설계

초기모델의 국부적인 불가역 감자의 발생을 저감시키기 위해

유한요소 해석을 통해 배리어 형상에 따른 영구자석의 감자 특성을 분석하였다. 그림 5는 배리어의 각도를 변수로 한 해석 결과로 배리어 각도 증가함에 따라서 검은 점선의 국부적인 감자가 저감됨을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 배리어의 각도가 증가함에 따라서 영구자석 끝단의 배리어(공기층)의 길이가 감소하여 결과적으로 영구자석 끝단의 동작점이 상승하기 때문이다. 그림 6은 브릿지 길이를 변수로 한 해석 결과로 브릿지 길이가 증가함에 따라서 검은 점선의 국부적인 감자가 저감됨을 확인할 수

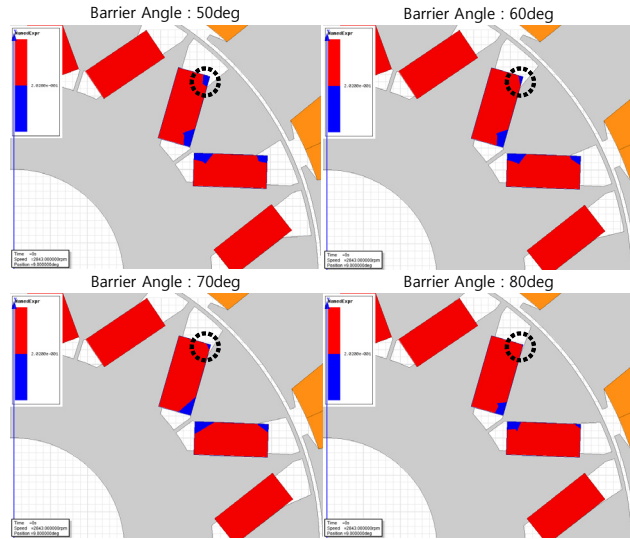


그림 5 국부적 불가역 감자 발생 저감을 위한 형상 설계 I
 Fig. 5 Shape design I for reduction of local irreversible demagnetization

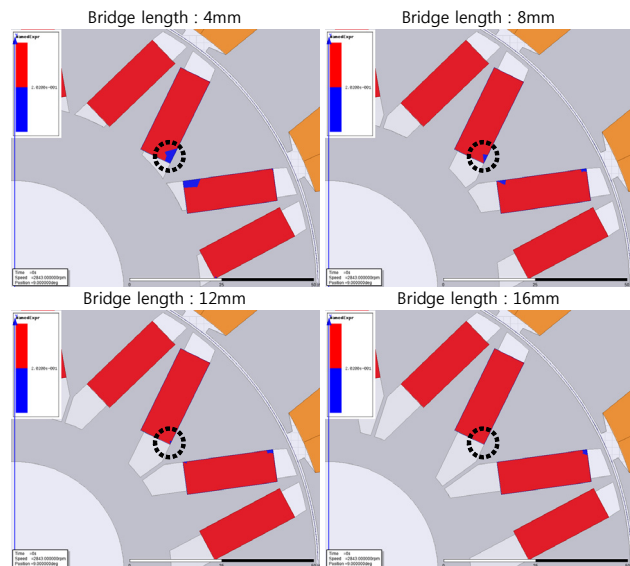


그림 6 국부적 불가역 감자 발생 저감을 위한 형상 설계 II
 Fig. 6 Shape design II for reduction of local irreversible demagnetization

있다. 이러한 이유는 브릿지의 길이가 증가함에 따라서 자기저항이 증가하여 브릿지 끝단에 집중되는 기자력을 저감시키기 때문이다[9]. 이처럼 배리어 및 브릿지의 형상에 따라서 자기 패스가 달라져 국부적으로 발생하는 영구자석의 불가역 감자를 막을 수 있다.

2.4 고속 회전시 회전자의 응력을 고려한 설계

견인 전동기는 저속 고토크 특성 때문에 회전자의 사이즈가 저토크 전동기에 비해 크다. 그리고 넓은 운전 범위를 위해 회전자가 고속으로 회전하기 때문에 결과적으로 사이즈가 큰 회전자가 고속으로 회전하게 된다. 회전자의 원심력의 경우 회전자의 질량과 무게에 비례하고 각속도의 제곱에 비례한다. 결국 견인 전동기의 경우 큰 회전자가 고속으로 회전하기 때문에 큰 원심력이 발생하게 되고 결국 회전자에 큰 응력이 발생하게 된다. 회전자 철심은 종류에 따라서 다르지만 일정 응력 이상을 받게 되면 변형이 발생한다. 회전자의 큰 변형은 고정자와의 관성으로 전동기 파손의 우려가 있기에 견인 전동기의 경우 전자기적 특성뿐만 아니라 고속에서 기계적인 안전을 고려해 회전자의 형상을 설계해야 한다. 본 논문에서도 견인 전동기가 최대 12000rpm의 회전속도를 고려해 안전율 2이상이라는 목표 성능을 위해 형상 설계를 수행하였다.

그림 7의 Model 1은 국부적인 불가역 감자를 보완한 초기 모델이며 유한요소 해석 결과가 표 3에 나타나있다. 목표한 요구 성능은 만족하지만 안전율이 1미만임을 확인할 수 있다. 안전율 확보를 위해 그림 7의 Model 2는 고정자 입력전류를 50A 향상시켜 회전자의 무게와 반지름을 줄인 모델로 안전율이 1.574까지

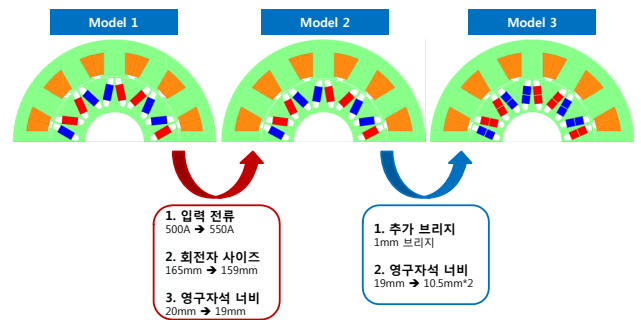


그림 7 회전자의 응력 저감을 위한 형상 설계 I
 Fig. 7 Shape design I for reduction of rotor mechanical stress

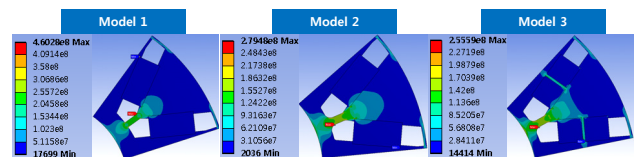


그림 8 모델 1, 2, 3의 응력 해석 결과
 Fig. 8 Mechanical stress results of model 1, 2, 3

증가함을 확인할 수 있다. 모델 3은 안전율 확보와 함께 영구자석의 와전류를 저감시키기 위해 영구자석 사이에 브릿지를 추가한 모델이다. 영구자석의 와전류가 모델 2에 비해 약 1/3으로 줄어 들고 안전율이 1.722까지 증가함을 표 3에서 확인할 수 있다.

표 3 모델 1, 2, 3의 해석 결과

Table 3 Analysis results of model 1, 2, 3

| | Unit | Model 1 | Model 2 | Model 3 |
|---------------------|------------|---------|---------|---------|
| Torque | Nm | 411.28 | 413.21 | 407.33 |
| Torque Ripple | Nm | 24.68 | 20.71 | 18.78 |
| Torque Ripple Ratio | % | 6 | 5.01 | 4.61 |
| Current | A_{peak} | 500 | 550 | |
| Current Phase Angle | degE | 24 | 27 | 26 |
| Copper Loss | W | 4204.87 | 4668.18 | 4668.18 |
| Core Loss | W | 881.2 | 919.1 | 903.1 |
| Magnet Loss | W | 1992 | 2055.2 | 675.5 |
| Efficiency | % | 94.41 | 94.01 | 95.03 |
| 안전율 | - | 0.956 | 1.574 | 1.722 |

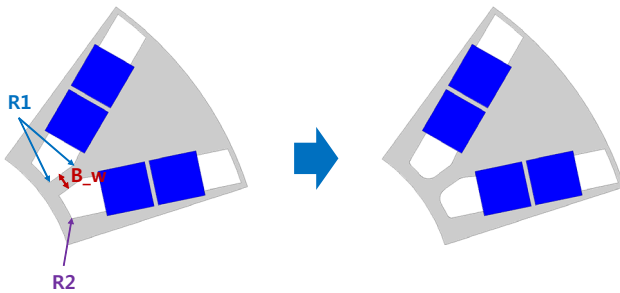


그림 9 응력의 집중을 분산시키는 형상 변수

Fig. 9 Shape variables for dispersing the mechanical stress concentration

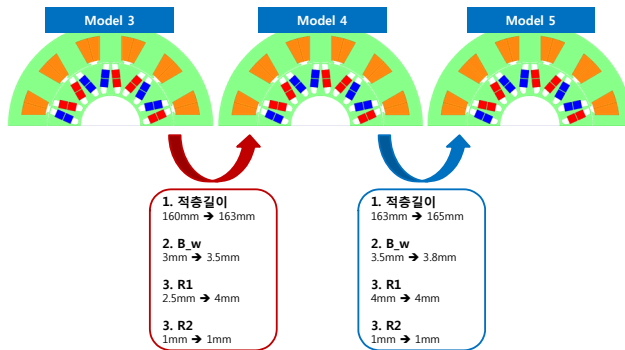


그림 10 회전자의 응력 저감을 위한 형상 설계 II

Fig. 10 Shape design II for reduction of rotor mechanical stress

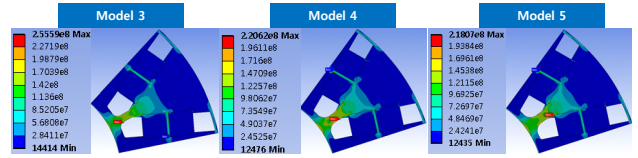


그림 11 모델 3, 4, 5의 응력 해석 결과

Fig. 11 Mechanical stress results of model 3, 4, 5

그림 9는 브릿지에 집중되는 응력을 분산시키기 위한 형상 설계를 위한 변수를 나타낸다. R1과 R2는 각진 모서리 부분을 호 형태로 하는 형상 설계 변수이며 B_w는 브릿지의 너비이다. 두 변수를 통해 형상 설계한 모델이 모델 4와 5에 나타나있고 이때의 변수는 그림 10에서 확인할 수 있다. 두 모델의 적층길이는 160mm에서 163mm와 165mm로 증가한 이유는 형상 설계에 의한 부족한 토크를 증가시키기 위해서이다. 결과적으로 모델 5는 목표한 성능을 만족시키면서 안전율 역시 2 이상을 만족시킬 수 있었다. 모델 2는 회전자의 무게와 반지름을 줄여 발생하는 원심력을 줄이기 위한 설계방향이었다. 그리고 모델 3은 영구자석 사이에 추가적인 브릿지를 통해 발생하는 응력을 3개의 브릿지로 분산시키는 설계방향이었다. 마지막으로 모델 4와 5는 가운데 브릿지의 무게와 모서리의 형상 설계를 통해 브릿지의 모서리에 집중되는 응력을 호에 분산시키는 설계방향이었다. 크게 3가지 형상 설계 방법을 통해 회전자에 발생하는 최대 응력을 저감시켜 안전율을 확보할 수 있었다.

표 4 모델 3, 4, 5의 해석 결과

Table 4 Analysis results of model 3, 4, 5

| | Unit | Model 3 | Model 4 | Model 5 |
|---------------------|------------|---------|---------|---------|
| Torque | Nm | 407.33 | 407.85 | 409.43 |
| Torque Ripple | Nm | 18.78 | 21.58 | 22.34 |
| Torque Ripple Ratio | % | 4.61 | 5.29 | 5.45 |
| Current | A_{peak} | 550 | | |
| Current Phase Angle | degE | 26 | 27 | 26 |
| Copper Loss | W | 4668.18 | 4733.97 | 4777.98 |
| Core Loss | W | 903.1 | 918.3 | 934.7 |
| Magnet Loss | W | 675.5 | 697.9 | 714.9 |
| Efficiency | % | 95.03 | 94.96 | 94.92 |
| 안전율 | % | 1.722 | 1.994 | 2.018 |

3. 시 험

앞에서 설명한 자속 집중형 영구자석 동기전동기의 신뢰성 향상을 위한 형상 설계 방법을 통해 목표한 성능을 만족시키는 최종 모델을 설계하였다. 모델 4와 5의 경우 안전율 면에서는 유리하였지만 적층길이 증가에 따른 출력밀도 감소하기에 최종 모델을 출력 밀도와 안전율을 고려해 모델 3으로 결정하였다. 최종

설계된 모델의 성능 평가를 위한 제작 모델이 그림 12에 나타나 있다. 그림 13은 제작된 전동기가 다이나모미터에 결합된 시험 환경을 보여주고 있다. 그림 14는 온도 측정을 위한 NTC가 삽입된 위치를 나타내며 영구자석의 불가역 감자 발생 여부를 판단하기 위해서 그림 15는 전동기의 내부 온도를 약 150도까지 포화 시킨 후 약 500A의 큰 전류를 인가시킨 결과이다. 인버터 소자의 안정성을 고려해 최대 허용 전류인 900A보다 낮지만 목표 최대 토크를 발생하는 500A에서 시험을 수행하였다. 500A의 큰 전류의 인가로 전동기 내부 온도는 약 180도까지 증가하였고 이때의 전류 인가 전후의 역기전력이 그림 16에 나타나 있다. 만약 이 조건에서 영구자석 불가역 감자가 발생하였다면 전류 인가 전후의 역기전력이 차이를 보여야 하지만 동일한 역기전력이기에 영구자석 불가역 감자가 발생하지 않았음을 알 수 있다. 그림 16의 경우 2843rpm에서의 무부하로 운전할 때의 기전력이고, 표 5의 경우 정격 토크 발생을 위해 500A, 25degE의 전류가 인가되었을 때의 결과이다. 표 5는 정격속도인 2843rpm과 최대 속도인 10000rpm에서의 성능을 시뮬레이션과 시험의 결과를 비교한 데이터이다. 10000rpm에서의 일정 시간동안의 테스트 동안 기계적

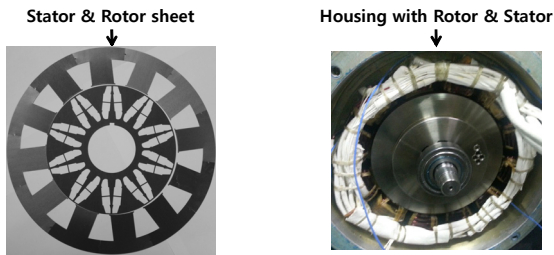


그림 12 제작된 모델 [9]
Fig. 12 Manufactured model [9]

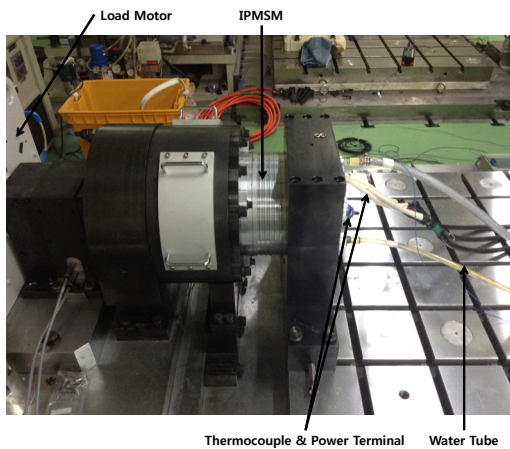


그림 13 시험 셋트 [9]
Fig. 13 test set [9]

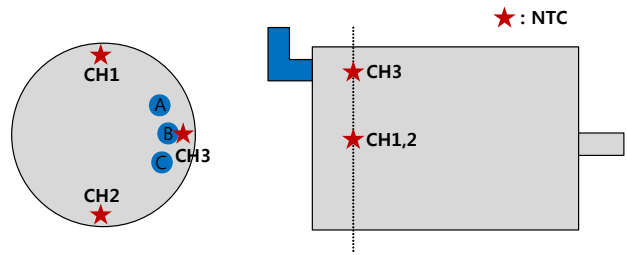


그림 14 온도 측정을 위한 NTC 삽입 위치 [9]
Fig. 14 NTC insertion position for the temperature measurement [9]

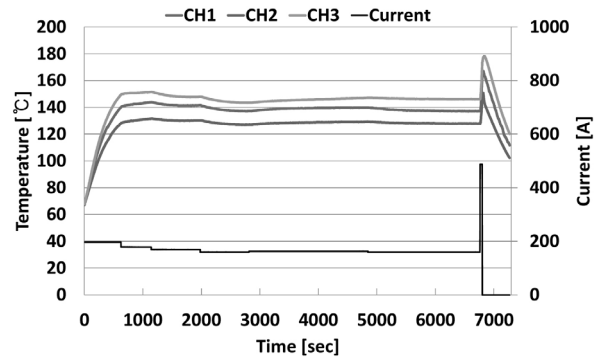


그림 15 온도포화를 고려한 최대부하 시험 결과 [9]
Fig. 15 Maximum load test result considering the saturation temperature [9]

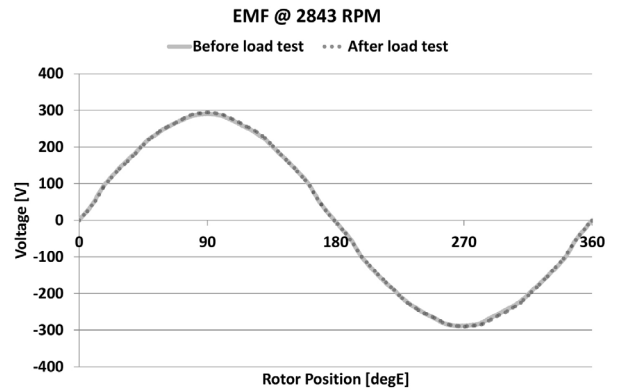


그림 16 최대부하 테스트 전후의 역기전력 [9]
Fig. 16 Back-EMF before and after maximum load test [9]

인 간섭이 발생하지 않음은 회전자 안전율이 타당함을 알 수 있다. 표 5에 결과로 두 속도에서 목표한 성능을 만족시키며 시뮬레이션과 시험 사이의 가장 큰 예외의 경우 약 6프로 발생하고 있으나 이는 시험 환경에 따라 발생 가능한 오차 범주로 시뮬레이션 결과가 타당하다고 판단할 수 있다 [9].

표 5 정격속도와 최대속도에서의 시뮬레이션과 시험 결과 비교[9]

Table 5 Results comparison between the simulation and experiment at the rated speed and maximum speed [9]

| RPM | | Torque [Nm] | Efficiency [%] | Power factor [-] | Induced voltage [V _{peak}] |
|-------|----------|-------------|----------------|------------------|--------------------------------------|
| 2843 | Sim. | 402.21 | 95.09 | 0.65 | 260.35 |
| | Exp. | 402.57 | 95.50 | 0.68 | 250.38 |
| | Error[%] | 0.09 | 0.43 | 5.17 | 3.98 |
| 10000 | Sim. | 106.70 | 96.81 | 1.00 | 365.32 |
| | Exp. | 106.93 | 97.28 | 0.95 | 356.00 |
| | Error[%] | 0.21 | 0.48 | 4.48 | 2.62 |

4. 결 론

본 논문은 견인용 전동기로 120kW 급 자속 집중형 영구자석 동기전동기를 소개했다. 자속 집중형 영구자석 동기전동기는 운전 환경에 따라서 국부적인 불가역 감자와 회전자의 큰 응력이 발생할 수 있기에 전동기의 신뢰성을 고려해 설계해야 한다. 영구자석 불가역 감자의 발생을 막는 형상설계 방법과 회전자의 발생하는 응력을 저감시키는 형상 설계 방법에 대해서 설명하였다. 결과적으로 목표한 성능뿐만 아니라 신뢰성을 고려한 최종모델을 도출할 수 있었고, 제작 후 약 180도에서 최대부하 테스트와 최고속도인 10000rpm에서의 부하테스트를 통해 목표한 성능뿐만 아니라 영구자석의 불가역 감자와 회전자의 안전율의 타당성을 검증할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.2013R1A2A1A01015171).

References

[1] Y. Wu, Z. Yang, B. Lin, H. Liu, R. Wang, B. Zhou, and J. Hao, "Energy consumption and CO2 emission impacts of vehicle electrification in three developed regions of China," Energy Policy, vol. 48, pp. 537-550, Sep. 2012.

[2] Hyung-Woo Lee, Chan-Bae Park and Byung-Song Lee, "Core-loss Reduction on Permanent Magnet for IPMSM with Concentrated Winding," JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR RAILWAY, vol.15, no.2, pp.135-140, April 2012.

[3] J. Choi, Y. Chun, and P. Han, "Design of high power

permanent magnet motor with segment rectangular copper wire and closed slot opening on electric vehicles," Magn. IEEE Trans., vol. 46, no. 6, pp. 2070-2073, 2010.

[4] Seung-Bin Lim, Hyun-Jong Park, Dong-Woo Kang, Sang-Hwan Ham and Ju Lee, "Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Design for Torque Ripple Reduction in EPS," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 24, no. 8 pp. 27~31, 2010.

[5] Kwangduck Kim, Dongsu Lee, Sang-Yong Jung, Jong-Wook Kim, Cheol-Gyun Lee, "Optimal Design of Interior PM Synchronous Machines Using Randomly-Guided Mesh Adaptive Direct Search Algorithms," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 61, No. 2, FEB, 2012.

[6] Cheol-Min Kim, Gyu-Won Cho, Gyu-Tak Kim, "The Rotor Barrier Design of the BLDC Motor Consider that Irreversible Demagnetization of Permanent Magnets," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 63, No. 1, pp. 48~53, 2014.

[7] Jae-Woo Jung; Byeong-Hwa Lee; Do-Jin Kim; Jung-Pyo Hong; Jae-Young Kim; Seong-Min Jeon; Do-Hoon Song, "Mechanical Stress Reduction of Rotor Core of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.48, no.2, pp.911,914, Feb. 2012.

[8] Won-Ho Kim, "A Stress Analysis Method for the Rotor Design of an IPMSM Considering Radial Force," Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 9 No. 3, 2014.5, 888-892.

[9] Ki-Doek Lee ; Won-Ho Kim ; Chang-Sung Jin ; Ju Lee, "Local demagnetisation analysis of a permanent magnet motor," IET Electric Power Applications, Vol. 9, No. 3, March 2015, p. 280-286.

저 자 소 개



이 기 덕(Ki-Doek Lee)

He received B.S degree in electrical engineering from Incheon University. He received M.S degree and Ph.D. degree in electrical engineering from Hanyang University. He is currently a post doctor of the BK21 Plus Eco-friendly electrical

energy conversion and management technical business team at Hanyang University since 2015. His research interests are design, analysis and control of motor/generators; power conversion systems.



이 주(Ju Lee)

He obtained his B.S. and M.S. degrees from Hanyang University, Seoul, Korea in 1986 and 1988, respectively. He obtained his Ph.D. from Kyusyu University, Fukuoka, Japan, in 1997. He worked as an Assistant Researcher at the Agency for Defense Development from 1989 to 1993 and with the Korea Railroad Research Institute in 1997 as Chief of the Division on Light Subway Systems. He joined Hanyang University as Professor of the Department of Electrical Engineering in September 1997. His main research interests include electrical machinery and drives; electromagnetic field analysis; new transformation systems, such as hybrid electric vehicles and high-speed electric trains; and standardization. Dr. Lee was recognized by the Japan Electric Society as the writer of the Best Paper in 1995. He is a member of the IEEE Industry Applications Society, Magnetics Society, and Power Electronics Society. He has been a member of the editorial staff of the Korean Institute of Electrical Engineers since 1998 and a member of the editorial board of the International Journal of Electrical Engineering since 2000. In addition, he has been the Korea National Committee Secretary of the IEC/TC2 since 1999. He is also the General Manager of the Human Resource Development Center for Electric Machine and Devices, Seoul, Korea.