전기자동차 압축기용 표면부착형 영구자석 전동기의 극/슬롯수 조합에 따른 특성해석 및 설계

논 문
60-10-8

Design and Analysis of Surface-Mounted PM Motor of Compressor for Electric Vehicles Applications according to Slot/Pole Combinations

최 장 영* · 박 형 일** · 장 석 명† · 이 성 호***
(Jang-Young Choi · Hyung-Il Park · Seok-Myeong Jang · Sung-Ho Lee)

Abstract - This paper deals with design and analysis of surface-mounted PM (SPM) motor for compressor of air-conditioning system for electric vehicle applications according to slot/pole combination. First, required torque-speed curve characteristics are determined from operating conditions of the compressor. Restricted conditions such as motor size limit and current density are also determined. And then, under same rated and restricted conditions, twelve models which have different slot/pole combinations each other are designed for various pole arc/pitch ratio using simple equations and 2-d finite element (FE) analyses. Designed models are analyzed and compared in terms of back-emf THD, cogging torque, torque ripple, power losses, efficiency, etc. On the basis of analysis results, it is found that the motor with a 6-pole PM rotor and a 27-slot stator has most outstanding performances in electromagnetic aspects. Finally, through the mechanical modal analysis and demagnetization analysis, it is concluded that the determined motor is most suitable for the compressor of air-conditioning system for electric vehicles.

Key Words : SPM motor, Electric vehicle, Slot/pole combination, 2-d FE analyses, Electromagnetic aspects

1. 서 론

내연기관을 갖는 자동차는 백여 년 넘게 근대 자동차 전장기술에 힘입어 그 성능이 날로 개선되어져 왔다. 그러나 배출가스로 인한 오염 및 온실효과를 줄이고, 연료의 경제적 소비를 촉진하기위해, 내연기관 자동차와 관련된 문제들을 해결할 전기자동차 또는 하이브리드 전기자동차에 대한 관심이 전 세계적으로 높아지고 있는 추세이다 [1-3]. 특히 미국에서는 캘리포니아 주를 시작으로 여러 주에서 무배기 자동차 (ZEV; Zero Emission Vehicle) 및 저공해 자동차 의무판매사항을 입법화하여 배기가스 규제를 실시하고 있다. 이러한 협약은 불이행시 선진국에서의 무역규제 조치가 이루어져, 결국 생존을 위하여 전기자동차 및 하이브리드자동차와 같은 친환경 차량 개발에 대한 연구가 국가차원에서 경쟁적으로 이루어지고 있다 [4].

전기자동차는 기존의 가솔린/디젤엔진을 갖는 자동차에 전동기를 병행하여 구동되거나 혹은 전동기만으로 구동된다. 따라서 전기자동차의 핵심기술인 견인전동기에 대한 연구가 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 활발히 이루어지고 있다. 그러나 견인전동기의 중요성에 비해 에어컨시스템의 압축기용 전동기개발에 대한 국내의 관심 및 연구는 미비한 실정이다. 그림 1은 기존의 기계식 엔진에 장착된 압축기를 보여준다. 풀리(pulley)는 체인을 통해 엔진샤프트와 항상 연결되어 회전을 계속한다 [5]. 이 때 운전자가 에어컨을 틀면 풀리쪽 전자석에 전원이 공급되어 전자기력이 발생하고 이 힘에 의해 풀리가 압축기와 결합하여 압축기를 구동하게 된다. 그런데, 엔진이 없는 전기자동차나 혹은 견인전동기로 운전 중인 하이브리드 자동차의 경우 압축기로 동력을 전달하는 엔진토크를 사용할 수 없기 때문에 압축기 전용의 전동기가 사용되어야만 한다.

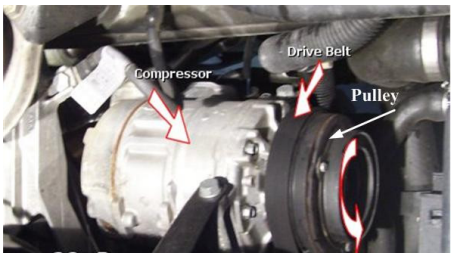


그림 1 엔진구동 자동차용 기계식 압축기
Fig. 1 Mechanical compressor driven by a belt connected with engine shaft

본 논문은 전기자동차 에어컨 시스템 압축기용 표면부착형 영구자석 전동기의 특성해석 및 설계에 대해 다루고자 한다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 먼저, 운전 조건에 따른 요구 정격 및 제한 사양을 결정한 후, 다양한 극수(4, 6, 8극)에 대해, 기본 집중권 권선 및 분포권 권선이 시행 가능한 슬롯 수 조합과 역기전력이 정현적인 슬롯 수 조합들(각 극

* 정 회 원 : 충남대학교 공과대학 전기공학과 조교수
** 준 회 원 : 충남대학교 공과대학 전기공학과 석사과정
† 교신저자, 펠로우회원 : 충남대학교 공과대학 전기공학과 교수
E-mail : smjang@cnu.ac.kr
*** 정 회 원 : 한국생산기술연구원 광주 수석연구원
접수일자 : 2011년 4월 15일
최종완료 : 2011년 9월 16일

수에 대해 4개 모델)을 선택하였다. 그 다음, 선택된 12개의 모델이 최소 영구자석 극호비(본 논문에서는 0.65)조건에서 미리 결정된 요구/제한 조건에 부합하도록 설계되었다. 이를 바탕으로 각 모델에 대해 극호비 변경에 따른 재설계가 빠르게 수행될 수 있었다. 마지막으로, 설계된 모델에 대해, 동손, 철손, 코깅토크, 역기전력 THD, 효율, 토크리플 등과 같은 전자기적 특성을 도출/비교하여, 각 극수에 대해 최적의 성능을 내는 극/슬롯수 조합과 극호비를 찾아내었다. 최종 결정된 모델에 대해서는 기계적 모달해석과 감자해석을 수행하여, 이 모델이 전기자동차 에어컨시스템의 압축기에 적합한 모델인지를 최종 확인하였다.

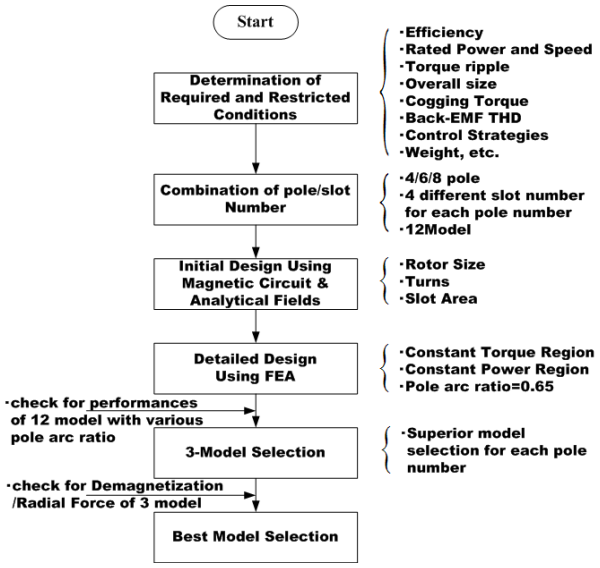


그림 2 압축기용 전동기 설계를 위한 블록도

Fig. 2 Block diagram for the design of the motor for the compressor applications

2. 전기자동차 압축기용 영구자석 전동기 설계

2.1 설계요구조건

그림 3은 전기자동차 에어컨 시스템의 압축기용 전동기 요구 토크-속도곡선이다. 차량이 정지한 경우를 포함한 저속 주행구간에서는 외기바람 유입량이 비교적 작기 때문에, 압축기 냉매 유입단과 출구단 사이의 압차를 크게 벌려 냉방을 하므로 비교적 저속(1000rpm~3500rpm)에서 높은 토크(6Nm~5Nm)를 요구한다. 고속 주행구간에서는 외기바람 유입량이 상대적으로 크기 때문에, 압축기의 압차를 작게 해도 냉방능력에 문제가 없으므로, 비교적 고속(6000rpm~8000rpm)에서 낮은 토크(4Nm~2Nm)를 요구한다. 또한, 대부분의 차량이 시내주행을 주로 한다고 하면, 주 운전 점은 3000rpm에 5.5Nm로 정해진다. 즉 압축기용 전동기는 6Nm이상의 토크를 발생시키고, 8000rpm까지 운전가능하며, 5.5Nm@3000rpm에서 가장 효율 좋은 전동기가 요구된다. 이 외에도 다음과 같은 조건들이 압축기용 전동기에 요구된다. 즉,

- 연비향상를 위해 자동차에 사용되는 모든 부품에 대한 소형/경량화가 요구되는 추세이다. 따라서 기존 기계식 압축기 대비 크기 및 중량 측면에서 동등 혹은 우수한 전동식 압축기 개발을 위해 구동전동기의 소형/경량화가 필수이다.
- 자동차용 에어컨은 운전자가 동작한 지 수 초 내에 시원한 바람이 나와야 하므로, 평압을 잡을 시간이 없어 가전기기에 비해 피크냉방부하가 매우 크다. 즉 용량이 매우 큰 전동기가 요구된다.
- 압축기용 전동기는 견인전동기 다음으로 전력에너지 소모가 크기 때문에 매우 높은 효율이 요구된다.
- 기계식 압축기의 소음은 가솔린/디젤엔진 소음에 묻혀 비교적 문제가 되지 않았으나, 전기자동차의 경우 전동압축기의 소음이 새로운 이슈로 떠오르고 있다. 따라서 구동전동기의 진동 소음 최소화가 요구된다. 이상의 조건들을 고려하여 정해진 압축기용 전동기의 요구 사양은 표 1과 같다.

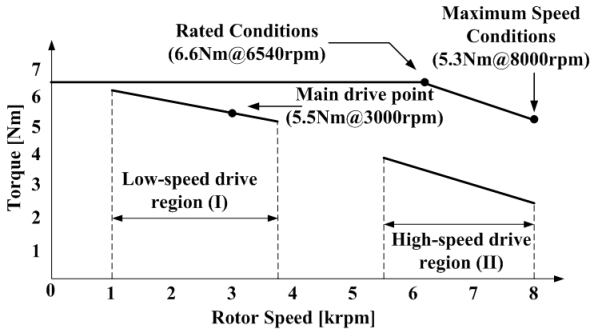


그림 3 압축기용 전동기 요구 토크-속도 곡선.

Fig. 3 Required torque-speed curve of the motor for the compressor applications.

표 1 압축기용 전동기의 설계 요구조건

Table 1 Design requirements of the motor for compressor

항 목	값	항 목	값
정격토크	6.6Nm	토크리플	정격의 8% 이하
정격/최대속도	6540rpm/8000rpm	상 역기전력 THD	10% 이하
최대출력	4.5kW	주운전점 (5.5Nm@3000rpm) 효율	92% 이상
코깅토크	0.25Nm 이하	무게	3kg 이하

2.2 설계 제한조건

그림 4는 표면부착형 영구자석 동기전동기의 전압제한원 및 전류제한원을 나타낸다. 여기서, 인버터에서 전동기로 인가 가능한 최대 전압($V_s^{\max}$) 및 최대 전류($i_s^{\max}$)는 각각 식 (1)과 식 (2)로 주어진다 [6-7].

$$i_s^{\max} = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \tag{1}$$

$$V_s^{\max} = \omega\sqrt{(L_s i_d + \lambda_f)^2 + (L_s i_q)^2} \tag{2}$$

여기서 L_s 및 λ_f는 각각 동기인덕턴스 및 영구자석에 의한 쇄교자속이고, i_d와 i_q는 각각 d축 및 q축 전류이다. 그림 4에서, a점에서 b점 구간은 표면부착형 영구자석 전동기의 최대토크전류제어 구간($i_d=0$제어)으로 ω_{base}속도까지 최대토크로 일정 토크 운전 가능한 구간이다. ω_{base}속도보다 큰 ω_1인 속도에서 전압제한원이 작아지는데, 이때의 전압제한원과 전류제한원이 만나는 교점이 2사분면에 위치하여, 음의 d축 전류 인가에 따른 약계자 제어 영역으로 넘어가게 된다. 따라서 점 b에서 점 c의 구간을 약계자 운전영역이라 한다. 한편, 영구자석 동기전동기의 경우 보통 직류입력(V_{dc})에 대해 인버터로 전압변조를 수행하여 전동기에 전압을 인가하게 되는데, 전압변조 방식에 따라 전동기 입력전압의 크기가 달라진다. 예를 들어, 전압변조방식으로 공간벡터 PWM방식을 채택한 경우, 다음과 같은 수식으로 전동기 최대입력전압이 결정된다.

$$V_s^{\max} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}\eta \tag{3}$$

여기서 η은 제어성분을 조정하는 상수로서 대개 0.9~0.95의 값을 갖는다.

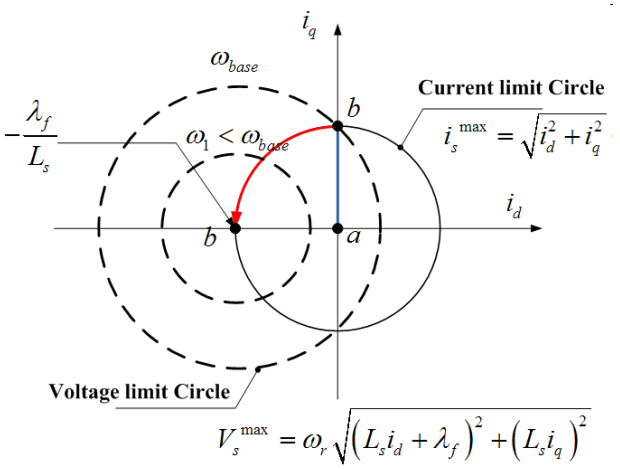


그림 4 표면부착형 영구자석 동기전동기의 전압제한원 및 전류제한원

Fig. 4 Voltage and current limit circle of the SPM motor

이상에서 알아본 바와 같이, 전동기 설계 시 제한 조건으로 인버터의 성능을 고려해야함을 알 수 있다. 또한 전동기가 압축기 내부에 위치하므로, 전동기의 크기 역시 제한조건으로 선택된다. 표 2에 압축기용 전동기의 제한 조건이 제시되었다. 여기서, 입력직류전압이 288V이고 전압변조방식이 공간벡터 PWM방식이므로 식 (3)에 의해 전동기 최대상전압은 150V가 된다. 전기자동차 에어컨시스템의 압축기용 전동기는 냉매냉각을 수행하기 때문에 전류밀도가 매우 높음을 알 수 있으며, 제시된 전동기 사이즈 제한은 압축기에 전동기가 장착될 공간에 의해 결정된 것이다.

표 2 압축기용 전동기 제한조건

Table 2 Restricted conditions of the motor for compressor

항목	값	항목	값
입력 전압	직류 288V	냉각방식	냉매 냉각
전압변조방식	공간벡터 PWM	전류밀도	$20A/mm^2$
전동기 최대 상전압	교류 150V	전동기 최대 외경/적층길이	$\phi 100/L50$

2.3 초기설계

앞에서 논의된 요구조건에서 알 수 있듯이, 전기자동차 에어컨시스템의 압축기용 전동기는 소형/경량화 되어야만 한다. 즉, 동일 사이즈에서 다음으로 주어지는 토크상수(K_m)가 최대로 되도록 자기회로를 설계해야만 한다 [8].

$$K_m = B_g R_{ro} \sqrt{K_{wb} L_{st} N_m A_s / \rho} \tag{4}$$

여기서 $R_{ro}, K_{wb}, L_{st}, N_m$ 및 ρ는 각각 회전자 외반경, 점적률, 영구자석기기 축방향길이, 극 수 및 구리의 저항률이다. 여기서 슬롯 면적 A_s는 그림 5(b)로부터 식 (5)로 표현가능하다.

$$A_s = \frac{\pi}{N_s}\left\{(R_{so} - w_{sy})^2 - (R_{ro} + g + d_{sht})^2\right\} - w_{tb}(R_{so} - w_{bi} - R_{ro} - g - d_{sht}) \tag{5}$$

여기서 N_s 및 g는 각각 슬롯 수 및 공극길이이며, $d_{sht} = d_1 + d_2 + d_3$이다. 이 외에 관련 기호는 그림 5(b)에 자세히 표현되었다. 다음으로 식 (4)에서 공극자속밀도 B_g는 그림 5(a)의 무부하시 자계분포 예측모델로부터 구할 수 있다.

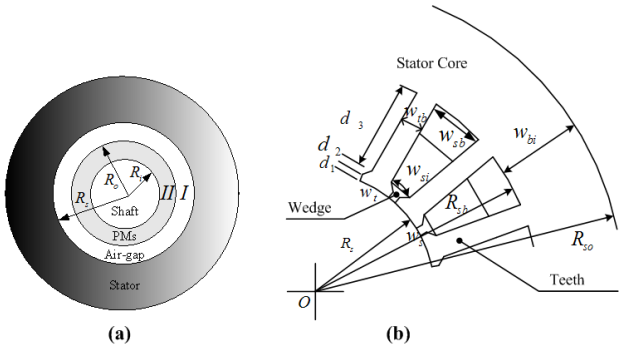


그림 5 (a) 공극자속밀도 예측을 위한 해석 모델 및 (b) 전형적인 고정자 구조 및 기호.

Fig. 5 (a) Analytical model for the prediction of air-gap flux density and (b) conventional stator structures and corresponding symbols.

일반적으로, 고정자철심 및 회전자 철심은 포화되지 않도록 설계 되므로 투자율을 무한이라 가정하였는데, 이러한 가정

으로 인해 해석영역은 단 2개의 영역 즉, 공극영역과 영구자석영역으로 국한된다. 또한, 영구자석의 투자율은 공기와 같다고 가정하였다. 한편, 영구자석 영역에는 전류가 없으므로, curl**H**=0이므로 curl**B**=μ0(curl**M**)이다. 여기서 **H**, **B** 및 **M**은 각각 자계, 자속밀도 및 영구자석의 자화이다. 자기벡터자위 **A**는 curl**A**=**B**로 정의된다. 회전기의 기하학적인 구조에 의해, 자기 벡터자위는 오직 z(축)방향 성분만을 갖는다. 즉 **A**=$A_{zn}\sin(np\theta)i_z$이다. 자기 벡터 자위의 정의를 curl**B**=μ0(curl**M**)에 대입한 후, 쿨롱 게이지 ▽•**A**=0를 적용하면 무부하시 자계분포 예측을 위한 지배방정식이 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2}A_{zn}+\frac{1}{r}\frac{\partial A_{zn}}{\partial r}-\frac{(np)^2}{r^2}A_{zn}=-np\frac{\mu_0}{r}M_n \tag{6}$$

여기서 A_{zn}은 자기벡터자위의 z방향 성분이고, μ_0는 공기의 투자율이며, n은 n차의 공간고조파 차수 이고 p는 극 쌍수를 나타낸다. $M_n=M_{rn}+M_{\theta n}/np$으로 주어지는데, 여기서 M_{rn} 및 $M_{\theta n}$은 각각 영구자석 자화 **M**의 반경방향 및 원주방향 푸리에 계수를 나타낸다. 다음으로 벡터자위의 정의로부터 식 (7)이 유도된다.

$$B_r=-\frac{np}{r}A_{zn}\cos(np\theta) \tag{7}$$
$$B_\theta=\frac{\partial}{\partial r}A_{zn}\sin(np\theta)$$

여기서 B_r 및 B_θ는 각각 반경반향 및 원주방향 자속밀도이다. 한편, 식 (6)의 일반해를 식 (7)에 대입하여 미정계수를 갖는 자속밀도 특성식을 얻을 수 있으며, 이 특성식에 다시 적절한 경계조건을 대입하여 최종적인 공극자속밀도를 식 (8)과 같이 얻을 수 있다.

$$B_g=\frac{np\mu_0\left(r^{-np-1}+R_s^{-np}r^{np-1}\right)\left(R_i^{np+1}-R_o^{np+1}\right)\left(M_{\theta n}-M_{rn}\right)}{2(np+1)} \tag{8}$$

식 (4), 식 (8) 및 그림 5(b)를 사용하여, 토크상수가 최대가 되는 압축기용 전동기의 자기회로 초기설계가 가능하다. 그림 5(b)에 사용된 기호에 대한 설명과 및 관련 공식들은 참고문헌 [8]에 자세히 제시되었다. 한편, 기본 집중권 권선 및 분포권 권선이 시행 가능한 슬롯수는 각각 극수의 1.5배 및 3배에 해당하는 슬롯수로 정해지며, 참고문헌 [8]로부터 다양한 극수에 대해 역기전력 파형이 정현적인 슬롯수 조합을 알 수 있다. 본 논문에서는 회전자 극수로 4극, 6극, 8극을 선택했다. 10극 이상의 경우 최고속도에서 운전주파수가 700Hz정도 되므로, 철손 측면에서 불리하여 배제 하였다. 한편, 각 극수에 대해 역기전력 파형이 비교적 정현적인 슬롯수 조합은 4극(15/18슬롯), 6극(27/36슬롯) 및 8극(21/30슬롯)이다.

표 3-1 4, 6, 8극 표면부착형 영구자석전동기 공통 설계 사양

Table 3-1 Common design specifications of SPM motors with 4-, 6- and 8-pole rotor

Magnet materials	NdFeB42
Magnet pole arc ratio	0.65
Air-gap length	0.5mm
Stator outer radius	50mm
Stator/Rotor materials	S10

표 3-2 4극 표면부착형 영구자석전동기 설계결과

Table 3-2 Design results of a 4-pole SPM motor

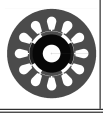
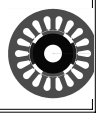
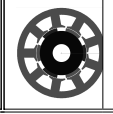
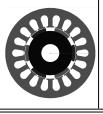
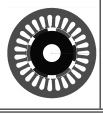
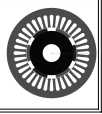
Pole number	4			
Slot Number	6	12	15	18
Outer radius of rotor	23mm	25mm	25mm	26mm
Stack length	50mm	50mm	50mm	50mm
Magnet thickness	4mm	3.5mm	3.5mm	3.5mm
Current density [A/mm^2]	16.7	16.7	16.8	17.5
Peak phase current [A]	23.7	23.7	23.9	24.9
Coil diameter /turns	0.8*2 /90	0.8*2 /68	0.8*2 /75	0.8*2 /66
Configuration				

표 3-3 6극 표면부착형 영구자석전동기 설계결과

Table 3-3 Design results of a 6-pole SPM motor

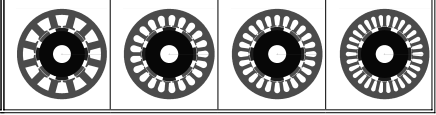
Pole number	6			
Slot Number	9	18	27	36
Outer radius of rotor	28mm	28mm	28mm	28mm
Stack length	50mm	50mm	50mm	50mm
Magnet thickness	3.5mm	3.5mm	3.5mm	3.5mm
Current density [A/mm^2]	17.2	15.3	16.7	17.3
Peak phase current [A]	24.5A	21.7A	23.8A	24.8A
Coil diameter /turns	0.8*2 /69	0.8*2 /66	0.8*2 /63	0.8*2 /60
Configuration				

2.4 상세설계

2.3절에서 얻어진 초기 모델을 바탕으로 표 1의 운전조건

(6.6Nm@6,540rpm 및 4.5kW@8,000rpm)과 표 2의 제한조건을 만족하고, 극호비가 0.65인 12개의 모델을 유한요소법을 이용하여 상세설계를 하였다. 각 모델의 형상 및 대략적인 제원이 표 3에 제시되었다. 한편, 각 모델에 대해 극호비 변화에 따른 전동기 성능을 평가할 때, 위에 언급된 운전조건을 만족하는 전동기의 재설계가 수행되어야 한다. 이는 극호비 증가에 따른 자속량 증가로 인해 역기전력, 토크, 자기포화 등의 전동기 성능이 변하기 때문인데, 이미 전체적인 사이즈가 정해졌기 때문에 전기 장하를 가변하여 비교적 빠르게 재설계가 가능하였다.

표 3-4 8극 표면부착형 영구자석전동기 설계결과
Table 3-4 Design results of a 8-pole SPM motor

Pole number	8			
Slot Number	12	21	24	30
Outer radius of rotor	29mm	28mm	30mm	30mm
Stack length	50mm	50mm	50mm	50mm
Magnet thickness	3.5mm	3.5mm	3.5mm	3.5mm
Current density [A/mm^2]	17.7	16.7	16.7	17.4
Peak phase current [A]	25.2	23.7	23.7	24.8
Coil diameter /turns	0.8*2 /64	0.8*2 /63	0.8*2 /56	0.8*2 /60
Configuration				

3. 전기자동차 압축기용 영구자석 전동기 설계 모델별 성능비교

이번 장에서는 표 3에 제시된 12 모델의 극호비 변화에 따른 전동기 재설계 모델에 대한 각 특성들을 비교할 것이다. 먼저 비교에 사용된 각 모델들은 모두 동일한 제한조건 하에서 정격 운전준건 및 최대 운전조건을 만족하도록 설계되었다.

3.1 역기전력특성

표 4는 표 3에 제시된 다양한 극/슬롯수 조합모델들에서 각 모델별 역기전력 THD가 최소가 되는 극호비에서 기본파 크기를 100으로 표현했을 때, 각 고조파 차수 별 크기를 나타낸다. 표 4에서 알 수 있듯이, 전형적인 집중권 모델 (4극/6슬롯, 6극/9슬롯, 8극 12슬롯)과 분포권 모델 (4극/12슬롯, 6극 18슬롯, 8극 24슬롯)의 경우, 그렇지 않은 모델(비대칭 권선 분포를 갖는 모델)보다 역기전력 THD가 매우 높음을 알 수 있다. 또한, 전형적인 집중권 모델의 역기전력 THD는 분포권 모델의 역기전력 THD보다 비교적 작음을 알 수 있다. 이는 집중권의 경우 구조상 단절권 권선이 시행되므로, 특정 고조파(3의 배수에 해당하는 차수)가 존재하지 않기 때문이다. 각 극수에 대해 슬롯수가 작을수록 역기전력 THD가 최소가 되는 극호비가 큼을 알 수 있다. 한편, 영구자석 동기전동기의 경우 역기전력 THD가 작을수록, 토크 이용률이 높아지나(또는 동일 토크를 내기 위해 더 작은 전류를 필요로 한다.), 토크리플의 경우 특정 고조파 차수와 관련되기 때문에 반드시 역기전력 THD에 비례하는 것은 아니다. 예를 들어, 표 4에서 4극 6슬롯 모델의 역기전력 THD가 4극 12슬롯 모델의 역기전력 THD보다 2배 이상 작지만, 두 모델의 토크 리플은 별 차이가 없다. 이에 대한 결과와 이유는 3.2절에서 자세히 다룰 것이다.

표 4 다양한 극/슬롯수 전동기에 대해 역기전력 THD가 최소인 극호비에서 각 고조파 크기.
Table 4 The amplitude of each harmonic component at pole arc/pitch ratio which makes THD of the back-emf minimum for SPM motors with various pole/slot numbers.

모델		THD	고조파 차수					
극수	슬롯수 (극호비)		3	5	7	9	11	13
4	6 (0.9)	9.5%	0	7.9	0.4	0	4.6	2.7
	12(0.95)	23%	21.5	7.8	2	0	0	0
	15(0.75)	2%	1	0	1.1	1.3	0	0
	18(0.75)	2.6%	1	1.9	1.2	0	0	0.8
6	9(0.85)	12%	0	4	2.5	0	2.2	1.3
	18(0.8)	20%	21.5	5.2	0	1.3	3	1.2
	27(0.75)	3.3%	2.3	2.2	0	0	0	0.7
	36(0.75)	7.3%	3.2	3.5	3.1	3.9	2.8	2.2
8	12(0.8)	8.7%	0	7.4	3.9	0	2.5	0
	21(0.7)	2%	0.2	0.9	1.6	0.8	0	0
	24(0.7)	9.9%	0.7	7.9	4	2.2	3.8	1.6
	30(0.7)	1.6%	0.7	0.4	1.3	0.3	0.3	0

3.2 토크 특성

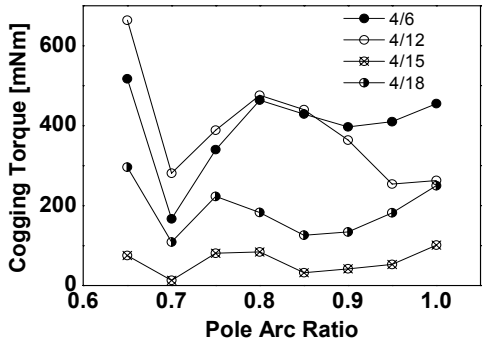
3.2.1 코깅토크

그림 6은 표 3에 제시된 다양한 모델들에 대한 극호비에 따른 코깅토크 특성을 나타낸다. 각 모델에 대해 극호비가 코깅토크에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 한편, 참고문헌 [9]는 코깅토크 관점에서 극/슬롯수 조합에 대한 'goodness factor' C_T를 다음과 같이 제시하였다.

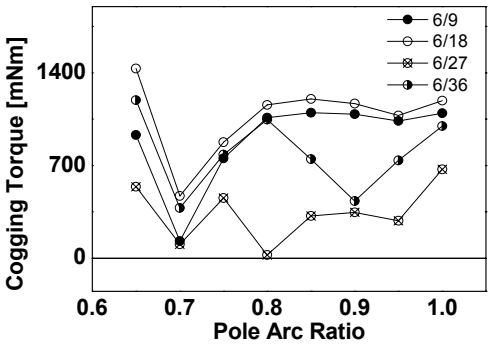
$$C_T = \frac{2pQ_s}{N_c} \tag{9}$$

여기서 p는 극쌍 수이고, Q_s는 슬롯수이며, N_c는 극수와 슬롯수의 최소공배수이다. 한편, 그림 6(a)에 제시된 4극/6슬롯, 4극/12슬롯, 4극/15슬롯 및 4극/18슬롯 모델에 대한 C_T는 각각 2, 4, 1 및 2이다. 참고문헌 [9]에 의하면, C_T가 클수록 코깅토크가 작아진다고 하였는데, 실제로 그림 6(a)에서 알 수 있듯이, 4극 15슬롯 모델의 코깅토크가 가장 작음을 알 수 있다. 같은 이유로, 6극/27슬롯 모델 및 8극/21슬

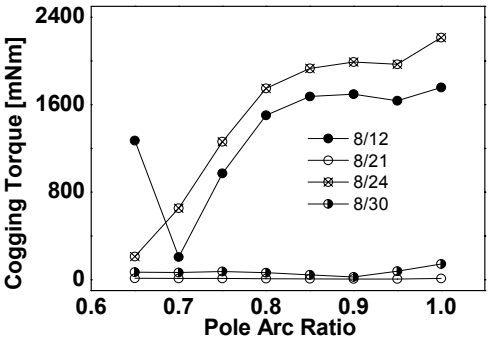
롯 모델의 C_T가 각 극수모델에 대해 작은 값을 가지므로, 이에 상응하여 코깅토크 값 역시 각 극수모델에 대해 가장 작음을 알 수 있다. 표 1의 압축기용 전동기 설계요구조건에서 코깅토크 값은 0.25Nm보다 작아야 하는데, 이를 만족하는 각 극수에 대한 슬롯수 모델은 4극 15슬롯, 6극 27슬롯 및 8극 21슬롯 모델들임을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 6 다양한 극/슬롯수 모델에 대한 극호비에 따른 코깅 토크 특성: (a) 4극, (b) 6극 및 (c) 8극

Fig. 6 The variation of cogging torque according to pole arc/pitch ratio for the SPM motors with various pole/slot numbers: (a) 4 pole, (b) 6 pole, and (c) 8 pole

3.2.2 토크 리플

그림 7은 표 3에 제시된 다양한 모델들에 대한 극호비에 따른 토크리플 특성을 나타낸다. 그림 7에 제시된 특성들은 정격토크 (6.5Nm)조건에서 얻어진 것들이다. 3.1절에서 언급했듯이, 토크리플은 역기전력 및 상 전류에 함유된 고조파 성분과 관련이 깊다. 일반적으로 영구자석 동기전동기 설계시, 전동기 입력전류는 정현적이라 가정되므로, A상 전류에 대해 수식으로 표현하면 식 (10)과 같다 [8].

$$i_a(\theta) = I_1 \cos(\theta) \tag{10}$$

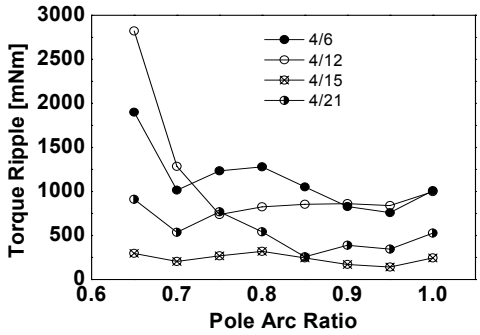
여기서 I_1는 상 전류의 기본파 성분 크기이다. 고조파가 함유된 A상 역기전력 역시 식 (11)과 같이 표현될 수 있다.

$$k_a(\theta) = K_1 \cos(\theta) + \sum_{n=3,odd}^{\infty} K_n \cos(n\theta) \tag{11}$$

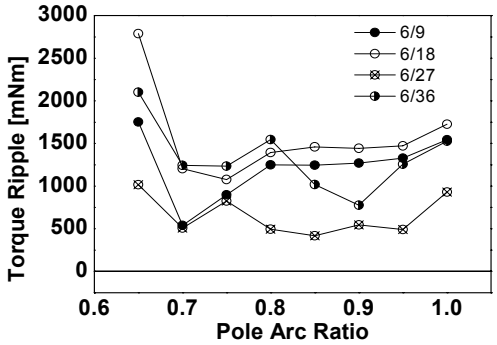
식 (10) 및 식 (11)로부터 영구자석 동기 전동기의 토크는 식 (12)로 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= k_a(\theta) i_a(\theta) + k_a(\theta - 2\pi/3) i_a(\theta - 2\pi/3) + \\ &\quad k_a(\theta + 2\pi/3) i_a(\theta + 2\pi/3) \\ &= \frac{3}{2} K_1 I_1 + \\ &\quad \frac{1}{2} \sum_{n=3,odd}^{\infty} K_n I_1 \left[1 + 2\cos\left\{ (n \pm 1) \frac{2\pi}{3} \right\} \right] Ks\{(n \pm 1)\theta\} \end{aligned} \tag{12}$$

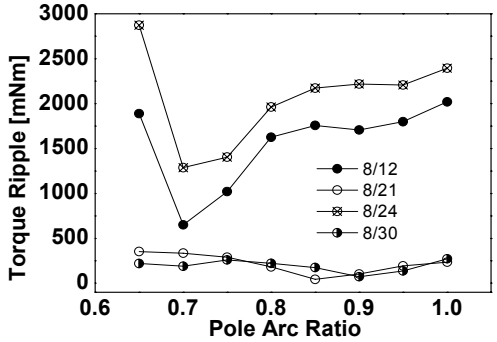
식 (12)에서 우변 첫 번째 항은 전자기 토크를 나타내고, 두 번째 항은 토크리플을 나타낸다. 토크리플은 역기전력에 함유된 고조파 성분과 관련이 깊음을 알 수 있는데, 만약 $n = 6q \mp 1$인 경우 (여기서 q는 정수) 즉, 역기전력의 고조파 성분 n이 3의 배수가 아닌 홀 수 이면, 식 (12)의 $[1 + 2\cos\{(n \pm 1)2\pi/3\}]$ 성분이 3이 되므로, 토크 리플 성분이 존재하게 되며, 이 리플성분의 크기는 고조파 성분의 크기에 비례하게 된다. 예를 들어, 표 4에서 8극/12슬롯 모델의 경우 THD가 최소가 되는 극호비는 0.8이지만, 그림 7 (c)로부터 토크리플이 최소가 되는 극호비는 0.7임을 알 수 있다. 이는 극호비가 0.7일 때의 THD가 높지만, 5, 7, 11고조파성분의 크기가 극호비가 0.8일 때 보다 작음을 의미한다. 또한, 표 4에서 6극 9슬롯 모델의 역기전력 THD가 6극 18슬롯 모델의 역기전력 THD보다 2배 정도 작지만, 두 모델의 토크 리플은 별 차이가 없음을 그림 7(b)로부터 알 수 있다. 표 1의 압축기용 전동기 설계요구조건에서 토크리플은 정격의 8% (대략 0.53Nm)이하여야 하는데, 이를 만족하는 각 극수에 대한 슬롯수 모델은 4극 15슬롯, 6극/27슬롯 및 8극 21슬롯 모델들임을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 7 다양한 극/슬롯수 모델에 대한 극호비에 따른 토크 리플 특성: (a) 4극, (b) 6극, 및 (c) 8극

Fig. 7 The variation of torque ripple according to pole arc/pitch ratio for the SPM motor with various pole/slot numbers: (a) 4 pole, (b) 6 pole, and (c) 8 pole

3.3 손실특성 및 효율

3.3.1 동손

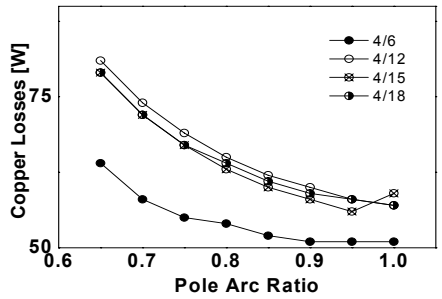
그림 8(a), (b) 및 (c)는 표 3에 제시된 다양한 모델들에 대해, 주 운전 구간에서의 극호비 변화에 따른 동손특성을 나타낸다. 각 극수모델에 대해, 극호비가 증가할수록 즉, 자기장하가 커질수록 전기장하는 감소하므로 동손이 작아짐을 알 수 있다. 또한, 극수가 커질수록 동손이 감소하며, 전형적인 집중권 모델들(4극/6슬롯, 6극/9슬롯 및 8극/12슬롯)의 동손이 가장 작은데, 이는 구조상 단부권선의 저항이 작아 동손이 작기 때문이다. 한편, 그림 8에 제시된 결과는 식 (13)으로 주어지는 간단한 방정식을 이용하여 계산되었다.

$$P_{cu} = \frac{3}{2} I_1^2 R_{ph} \tag{13}$$

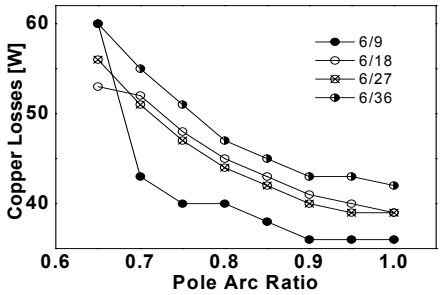
여기서 R_{ph}는 상당 저항이다.

3.3.2 철손

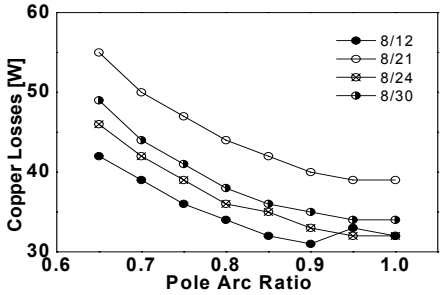
그림 8(d), (e) 및 (f)는 표 3에 제시된 다양한 모델들에 대해, 주 운전구간에서의 극호비 변화에 따른 철손특성을 나타낸다. 각 극수모델에 대해, 극호비가 증가할수록 즉, 자기장하(고정자 코어 내 자속밀도)가 커지기 때문에 철손이 증가함을 알 수 있다. 또한, 극수가 커질수록 철손이 증가하는데, 이는 구동 주파수가 증가하기 때문이다. 한편 철손은 강판제작자가 제공하는 정확한 철손데이터, 이로부터 유도된 철손 계수, 고정자 코어 내에서의 자계 거동 분석(회전자계 및 교번자계 분리)등의 복잡한 과정을 거쳐 계산될 수 있다. 이러한 일련의 철손 계산과정은 계산 시간 측면에서 매우 불리하기 때문에, 본 논문에서는 상용소프트웨어를 사용하여 철손을 예측하였으며, 그 결과는 각 모델의 철손에 대한 동일비교 측면에서 타당성을 확보할 것으로 사료된다.



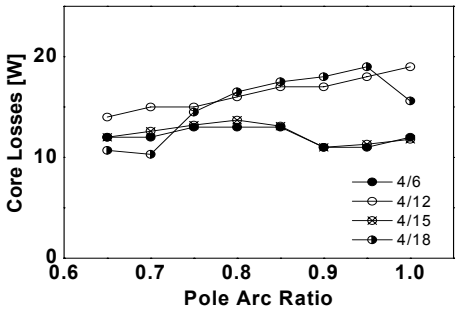
(a)



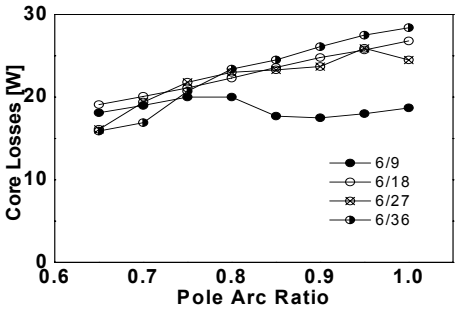
(b)



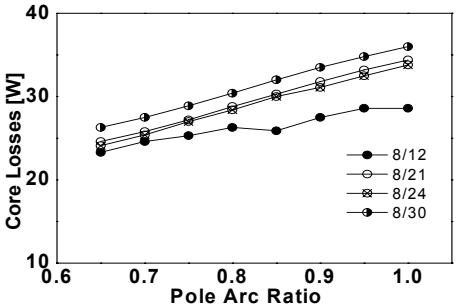
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 8 다양한 극/슬롯수 모델에 대한 극호비에 따른 손실 특성: 동손((a) 4극, (b) 6극 및 (c) 8극)과 철손((d) 4극, (e) 6극 및 (f) 8극)

Fig. 8 The variation of power losses according to pole arc/pitch ratio for the SPM motor with various pole/slot numbers: copper losses ((a) 4 pole, (b) 6 pole, (c) 8 pole) and core losses ((a) 4 pole, (b) 6 pole, (c) 8 pole)

3.3.3 효율

지금까지 전기자동차 압축기용 전동기의 극수/슬롯수 조합에 따른 다양한 모델들에 대해 극호비에 따른 ,코깅토크, 토크리플, 역기전력 THD 및 손실특성에 대한 결과를 제시하였다. 이 결과들로부터, 각 극수에 대해 성능이 가장 우수한 슬롯수 조합 즉, 4극/15슬롯, 6극/27슬롯 및 8극/21슬롯 모델을 선별하였다. 그림 9는 선별된 모델들에 대해 주 운전구간에서의 극호비에 따른 효율 특성을 나타낸다. 6극 27슬롯 모델의 경우, 극호비가 효율에 미치는 영향은 비교적 작은 편이며, 극호비가 0.6이상인 극호비에 대해 표 1에 제시된 요구 효율 역시 만족함을 알 수 있다. 또한, 선별된 다른 두 모델에 비해 가장 우수한 효율 특성을 보임을 알 수 있다. 한편, 그림 9의 효율은 기계적 손실 즉, 베어링 마찰손과 풍손이 고려된 효율이며, 각 손실은 식 (14) 및 (15)로 주어진 특성식을 사용하여 간단히 계산되었다 [10]. 소형기기의 베어링 마찰손은 식 (14)로 계산가능하다.

$$P_{fr} = k_{fr} G_r \omega_r \qquad [mW] \tag{14}$$

여기서 $k_{fr} = 1-3$사이의 값을 갖고, G_r은 kg 단위로 표현되는 회전자 중력이며, ω_r은 회전자 속도이다. 회전속도가 6,000rpm 정도이면서, 팬이 없는 소형기기의 풍손은 식 (15)로 계산 가능하다.

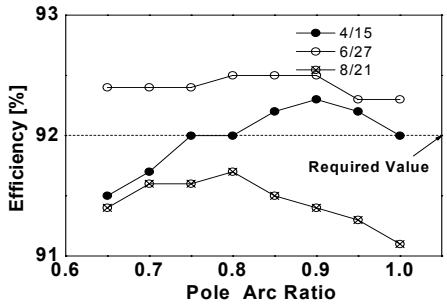


그림 9 다양한 극/슬롯수 모델에 대한 극호비에 따른 효율 특성

Fig. 9 The variation of efficiency according to pole arc/pitch ratio for the SPM motor with various pole/slot numbers

$$P_{wind} = 0.5 R_{ro}^2 L_{st} \omega_r^3 \qquad [\mu W] \tag{15}$$

3.4 진동특성

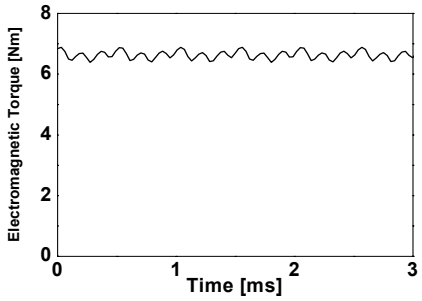
본 논문은 지금까지 논의된 모델들의 성능으로부터 극호비 0.8의 영구자석을 갖는 6극/27슬롯 모델이 표 1에 제시된 요구 성능과 표 2에 제시된 제한사양을 모두 만족하는 가장 우수한 모델이라고 결론 내렸다. 그러나 6극/27슬롯 모델의 경우, 분수 슬롯 조합으로 비대칭 권선 구조를 갖고 있어, 전동기 진동/소음 측면에서 불리할 것으로 예측되며, 특히, 극호비가 0.8인 경우 코깅토크는 매우 작지만, 토크 리플이 정격의 약 7%로 고정자 진동의 가진원 역할을 할 것으로 사료된다. 따라서 전동기 고정자의 모달해석을 통해, 영구자석에 의해 고정자에 작용하는 수직력과 토크리플이 전동기 고정자의 진동 고유주파수와 일치하는지를 알아볼 필요가 있다.

그림 10은 전동기가 6,540rpm의 속도로 회전할 때, 토크가 최대가 되도록 하는 전류 크기 및 위상각 조건에서의 토크 파형 및 FFT 분석결과를 나타낸다. 그림 10(b)에서 0고조파 성분은 직류 성분으로 평균 토크 값을 나타내며, 3.2.2절에서 논의된 바와 같이, 토크리플의 고조파 성분은 6고조파만 존재함을 알 수 있다. 한편, 정격속도 6,540rpm으로 운전될 때, 기본파 주파수는 327Hz이므로, 토크리플 고조파 차수 즉, 6, 12, 18고조파에 대응되는 주파수는 각각 1,962Hz, 3,924Hz 및 5,886Hz 임을 알 수 있다. 또한, 주 운전영역 속도 3000rpm에서 기본주파수는 150Hz이므로, 토크리플 성분의 주파수는 900Hz, 1,800Hz, 2,700Hz가 된다. 각 운전속도에 대응되는 토크리플 주파수에서의 토크 크기가 고정자 진동의 가진원 역할을 할 것으로 사료된다. 따라서 고정자 구조의 고유진동수가 이러한 토크리플의 주파수 성분과 부합하지 않도록 고정자 형상 설계를 진행해야 할 것이다.

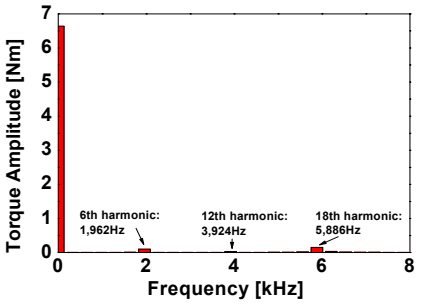
그림 11은 최대토크를 발생하는 전류 크기 및 위상각 조건에서의 수직력 특성을 나타낸다. 그림 11(a)에 수직력밀도 파형은 유한요소해석법을 사용하여 다음 수식으로부터 얻어질 수 있다 [11].

$$F_r = \frac{B_g^2}{2\mu_0} \tag{16}$$

여기서 B_g는 부하 시 자속밀도 즉, 영구자석에 의한 자속밀도와 전기자 전류에 의한 자속밀도의 합으로 주어지거나, 무부하시 자속밀도 즉, 영구자석에 의한 자속밀도만으로 주어질 수 있다. 그림 11(a)로부터, 전기자 반작용 자계로 인해 부하 시 자속밀도가 무부하시 자속밀도에 비해 감소함을 유추할 수 있다. 매극 매상당 슬롯수가 1.5인 6극 27슬롯 구조의 전동기에서 수직력 고조파 차수가 $h=(2k-1)p$, $k=1,2,3...$임을 그림 11(b)로부터 알 수 있다. 따라서 각 운전속도에 대응되는 수직력에 의한 고정자 가진원 주파수를 예측할 수 있다. 한편 그림 11(c)로부터, 6극 27슬롯 전동기 모델의 수직력 분포가 전기적 한주기 즉, 기계적으로 60도 간격으로 대칭적이므로, 진동소음 측면에서 유리할 것으로 사료된다. 표 5는 운전속도영역에 따라 토크 리플과 수직력이 고정자 가진원으로 작용할 수 있는 주파수를 나타낸 것이다. 여기서 수직력의 가진원 주파수는 해당 고조파 차수에 2배한 값으로부터 구해진다. 그림 12는 6극 27슬롯 전동기 모델의 모달해석 결과와 각 모드에서의 고유진동수 크기를 나타낸다. 설계된 전동기가 단품으로 사용되지 않고, 압축기 내부에 결합되어 운전되므로 고정자 권선이 고려된 그리고 압축기 하우징과 결합된 모달해석이 수행되어야만 정확한 고유진동수 예측이 가능하다. 그럼에도, 본 논문에서 제시한 결과는 향후 압축기가 결합된 고정자 모달해석결과에서 회피해야할 고유진동수를 제시했다는 측면에서 의미가 있다고 사료된다. 표 5는 모달해석에 사용된 고정자 강판의 재질특성이다.



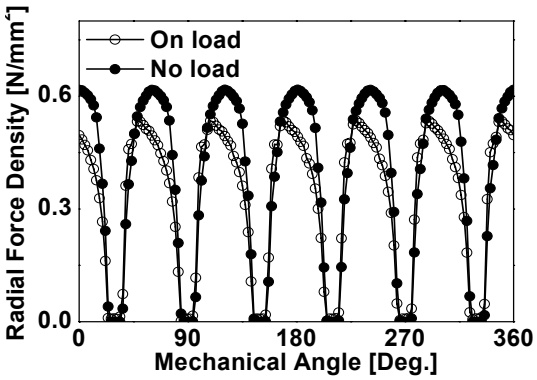
(a)



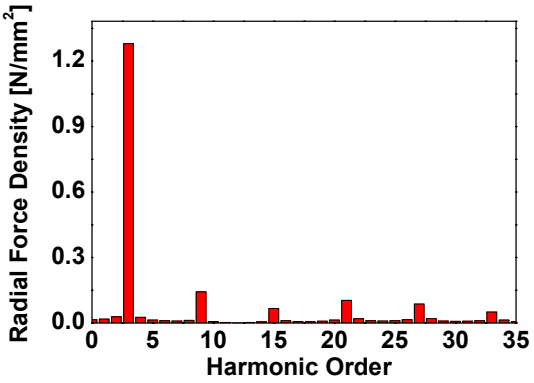
(b)

그림 10 회전속도 6540rpm에서 최대토크를 발생하는 전류 크기 및 위상각 조건에서의 토크 특성: (a) 파형 및 (b) FFT 분석결과

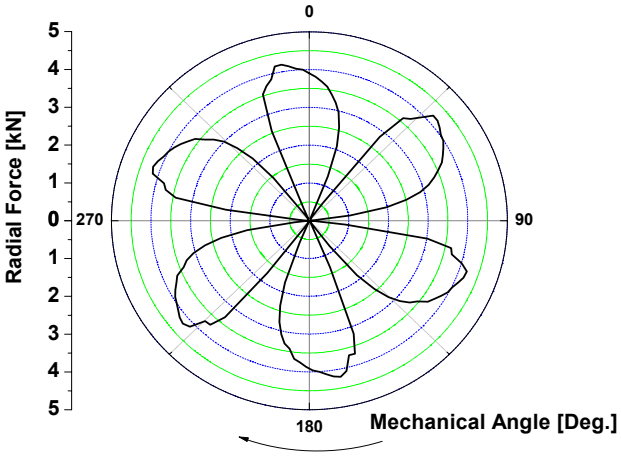
Fig. 10 Torque analysis results at amplitude and phase angle of current which makes the electromagnetic torque maximum under rotor speed of 6540rpm: (a) waveform and (b) FFT analysis results



(a)



(b)



(c)

그림 11 최대토크를 발생하는 전류 크기 및 위상각 조건에서의 수직력 특성: (a) 수직력 밀도 분포, (b) FFT 분석결과 및 (c) 수직력 분포 특성

Fig. 11 Radial force analysis results at amplitude and phase angle of current which makes the electromagnetic torque maximum: (a) radial force density distribution, (b) FFT analysis results and (c) radial force distribution

표 5-1 회전속도에 따른 토크 리플의 주파수
Table 5-1 Frequency of torque ripple with rotor speed

고조파차수 / 운전속도	토크 리플		
	6	12	18
3,000rpm	900Hz	1,800Hz	2,700Hz
6,540rpm	1,962Hz	3,924Hz	5,886Hz
8,000rpm	2,400Hz	4,800Hz	7,200Hz

표 5-2 회전속도에 따른 수직력의 주파수
Table 5-2 Frequency of radial force with rotor speed

고조파차수 / 운전속도	수직력					
	3	9	15	21	27	33
3,000rpm	900 Hz	2,700 Hz	4,500 Hz	6,300 Hz	8,100 Hz	9,900 Hz
6,540rpm	1962 Hz	5,886 Hz	9,810 Hz	13,734Hz	17,658Hz	21,582Hz
8,000rpm	2,400 Hz	7,200 Hz	12,000Hz	16,800Hz	21,600Hz	26,400Hz

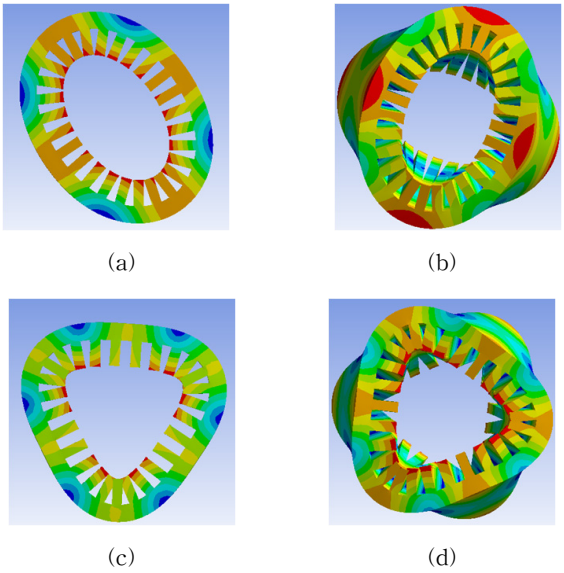


그림 12 6극 27슬롯 전동기의 고정자 모달해석: (a) 1st mode (1,898Hz), (b) 2nd mode (3,645Hz), (c) 3rd mode (4,759Hz) and (d) 4th mode (7,825Hz)
Fig. 12 Modal analysis for the stator of SPM motor with 6-pole rotor and 27-slot stator : (a) 1st mode (1,898Hz), (b) 2nd mode (3,645Hz), (c) 3rd mode (4,759Hz) and (d) 4th mode (7,825Hz)

표 6 고정자 강판의 재질 특성
Table 6 Physical properties of electrical steel.

Items	Value (unit)
Young's modulus	200 (GPa)
Poission ratio	0.3
Density	7600(kg/m^3)
Yield Point	485×10^6 (N/m^2)

3.5 감자특성

영구자석 감자는 크게 온도에 의한 감자와 전기자 반작용 자계에 의한 감자로 구분되며, 감자 해석시 이 둘을 모두 고려해야만 한다. 특히, 전기자동차 에어컨시스템의 압축기용 전동기의 경우 높은 전류밀도 및 콤팩트한 사이즈로 인해 영구자석 감자해석이 설계단계에서 반드시 수행되어야만 한다. 그림 13은 영구자석의 감자해석을 위한 흐름도이다. 먼저, 전동기 최대운전온도 및 최대전류를 선정해야 하는데, 본 논문에서는 각각 140°C 및 100A로 선정하였다. 선정된 값은 설계된 전동기(6극 27슬롯 모델)의 평시 운전온도(75°C) 및 정격전류(23A)에 비해 매우 높은 값인데, 이는 예측 불가능한 온도상승 및 인버터 트립전류를 고려한 값이다. 다음으로 그림 14에 제시된 바와 같이, 유한요소법에 의해 계산된 무부하시 공극자속밀도로부터 공극선을 그리고, 전기자 전류에 의한 외부자계역시 계산 후 공극선에 평행한 부하선을 표시한다. 여기서 전기자 전류에 의한 외부자계는, 최대토크를 발생하게 하는 전류 위상각 조건 및 최대 인버터 전류 조건하에서 얻어졌다. 결과적으로 부하선이 감자곡선의 굴곡점(knee point)위로 위치하므로, 불가역 감자가 발생하지 않음을 알 수 있다. 마지막으로, 그림 15에 제시된 바와 같이, 유한요소법을 이용하여 영구자석의 부분감자 발생여부를 판별하게 된다. 그림 15(a) 및 (b)에 제시된 결과는 각각 최대토크를 발생시키는 전류 위상각 및 인버터 트립전류 조건에서의 자속밀도 분포와 그림 2에 제시된 최대 운전속도조건 즉, 약계자 운전조건에서의 자속밀도 분포를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 영구자석 부분의 자속밀도는 두 운전조건 모두에서 0.35T 이상으로, 그림 14의 굴곡점 자속밀도 (약 0.32T)와 비교하여 높기 때문에, 부분 감자의 우려가 없음을 알 수 있다.

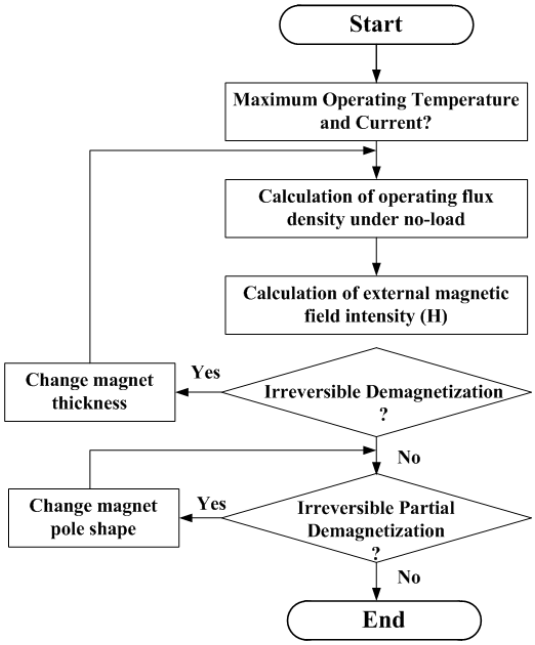


그림 13 영구자석 감자해석 흐름도
Fig. 13 Flow chart for demagnetization analysis of permanent magnets

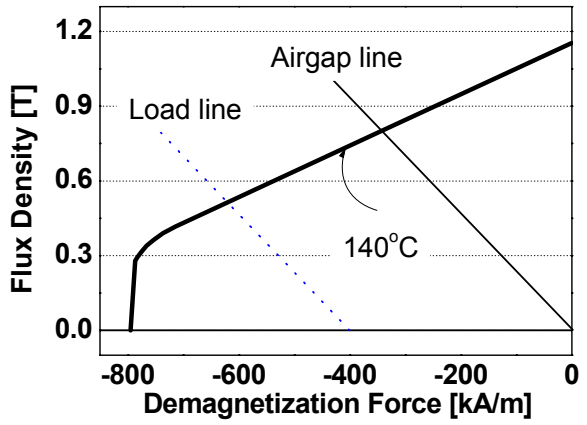
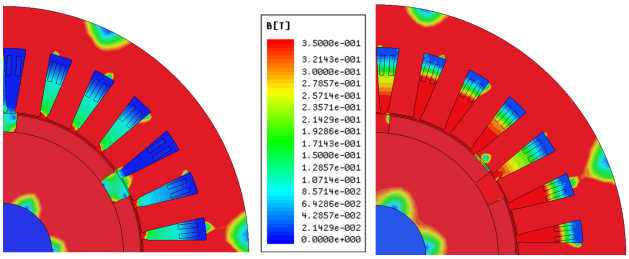


그림 14 영구자석 감자해석 결과

Fig. 14 Permanent magnet demagnetization analysis results



(a) (b)

그림 15 영구자석 부분 감자 해석: (a) 최대토크를 발생시키는 전류 위상각 및 인버터 최대전류 조건 및 (b) 최대속도에서의 약계자 운전조건

Fig. 15 Partial demagnetization analysis results under (a) amplitude of the inverter's trip current and phase angle of current which makes the electromagnetic torque maximum and (b) the conditions of field-weakening operation at maximum speed

5. 결 론

본 논문은 전기자동차 에어컨 시스템 압축기용 표면부착형 영구자석 전동기의 극/슬롯수 조합에 따른 특성해석 및 설계에 대해 다루었다. 압축기 운전 조건 및 자동차 요구사항을 반영하여 전동기 요구 정격 및 제한 사양이 결정되었다. 결정된 요구/제한 조건에 부합하도록, 본 논문은 설계방정식과 유한요소법을 이용하여 서로 다른 극/슬롯수를 갖는 12개의 전동기 모델을 설계하였다. 12개의 기본 모델을 바탕으로 전동기 성능과 밀접한 설계변수인 극호비를 각 모델에 대해 변경하여 재설계를 진행함으로써, 각 모델에 대해 극호비에 따른 성능변화를 조사할 수 있었다. 즉, 각 모델에 대해 극호비에 따른 동손, 철손, 코깅토크, 역기전력 THD, 효율, 토크리플 등과 같은 전자기적 특성을 도출 및 비교할 수 있었다. 이를 바탕으로 전체 모델들 중에서 최적의 성능을 내는 극/슬롯수 조합과 극호비를 찾아내었다. 마지막으로 최종 결정된 전동기 모델에 대해, 기계적 모달해석과 감자해석을 수행하여, 전기자동차 에어컨시스템의 압축기에 가장 적합한 표면부착형 영구자석 전동기를 제시하였다.

참 고 문 헌

[1] C. C. Chan and K. T. Chau, *Modern Electric Vehicle Technology*. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 2001.

[2] M. Eshani, K. M. Rahman, and H. A. Toliyat, "Propulsion system design of electric and hybrid vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 44, no. 1, pp.19-27, Feb. 1997.

[3] K. T. Chau and C. C. Chan, "Emerging energy-efficient technologies for hybrid electric vehicles", *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 4, pp.821-835, Apr. 2007.

[4] 김기찬, "EV/HEV용 매입형 영구자석 동기전동기의 최적설계 및 제어특성연구", 한양대학교 박사학위논문, 2008.

[5] http://www.2carpros.com

[6] 설승기, "전기기기제어론", 홍릉과학출판사, 2009년.

[7] Edward Carl Francis Lovelace, Optimization of a magnetically saturable interior permanent-magnet synchronous machine drive, phd 2000.

[8] Duane Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, The Writers' Collective, 2003.

[9] Z. Q. Zhu and David Howe, "Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines," *IEEETran.Energy Conversion*, vol. 15, no. 5, pp. 407-412, Dec 2000.

[10] Jacek F. Gieras and Mitchell Wing, *Permanent Magnet Motor Technology*, Marcel Dekker, Inc., 2002.

[11] Z. Q. Zhu, Z. P. Xia, L. J. Wu and G. W. Jewell, "Influence of slot and pole number combination on radial force and vibration modes in fractional slot PM brushless machines having single- and double-layer winding," *IEEE ECCE 2009*, pp. 3443-3450, 2009.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (2010T100100455) 주관으로 수행된 과제임.

저 자 소 개

최 장 영 (崔 璋 英)

1976년 10월 20일 생. 2003년 충남대학교 전기공학과 학사 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 박사 졸업. 2009년 ~ 현재 충남대학교 전기공학과 조교수.

Tel : 042-821-7610.

E-mail : choi_jy@cnu.ac.kr

박 형 일 (崔 璋 英)

1986년 10월 20일생. 2009년 충남대 전기·전자·통신교육과 학사 졸업. 2009년 ~ 2011년 현재 충남대학교 전기공학과 대학원 석사과정.

Tel : 042-821-7608

E-mail : phi1201@cnu.ac.kr

장 석 명 (張 錫 明)

1949년 7월 3일생. 1986년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년 미국 Univ. of Kentucky (방문연구교수), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 2004년~2005년 당학회 부회장, 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부문회 회장 역임.

Tel : 042-821-5658

E-mail : smjang@cnu.ac.kr

Homepage : http://sems.cnu.ac.kr

이 성 호 (李 成 浩)

1971년 11월 1일생. 1997년 충남대 전기공학과 학사 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 박사 졸업. 2003~2007년 LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소 요소기술그룹 선임연구원. 2007년 ~ 현재 한국 생산기술연구원(KITECH) 광주 연구센터/부품 소재팀 수석연구원 및 연구부문장

Tel : 062-6006-350

E-mail : shlee07@kitech.re.kr