

회전자 돌극 설계를 이용한 다극 매입형 영구자석 동기전동기의 토크리플 저감 연구

김기찬*

¹한밭대학교 전기공학과

Study of the Reduction of Torque Ripples for Multi-pole Interior Permanent Magnet Synchronous Motors using Rotor Saliency

Ki-Chan Kim^{1*}

¹Department of Electrical Engineering, Hanbat National University

요약 본 논문에서는 전기자동차용 견인전동기로서의 다극 매입형 영구자석 동기전동기의 회전자 돌극 설계에 의한 토크리플 개선 방안을 연구하였다. 다극 매입형 영구자석 동기전동기의 경우 영구자석에서 발생하는 자속이 고정자에 쇄교되지 않고 회전자 브릿지를 통해 누설되는 자속이 크다. 이러한 누설자속을 줄여 출력밀도를 향상시키고 토크리플을 저감하기 위해 영구자석 사이의 회전자 표면에 슬릿을 적용하였다. 슬릿에 적용되는 두 설계 파라미터를 제안하고 반응표면법을 이용하여 토크리플 감소와 출력 향상 최대화 설계를 수행하였다. 자속의 포화를 고려하기 위해 본 논문에서는 2차원 유한요소법을 이용하여 특성해석을 수행하고 이를 분석하였다.

Abstract The paper reports an improvement method on torque ripples of multi-pole interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) applied to a traction motor for hybrid electric vehicles. In the case of multi-pole IPMSM, the magnetic flux generated by a permanent magnet tends to leak through the bridge of the rotor without a link with stator windings. The slit design on the rotor surface was proposed to reduce torque rippling and increase the output power by reducing the leakage flux. Two design parameters for the slit are suggested for optimal design using the response surface method. As an analysis method, the 2D finite element method (FEM) was applied to consider magnetic saturation effect.

Key Words : Interior permanent magnet synchronous motor, Response surface methodology, Torque ripple reduction

1. 서론

하이브리드 전기자동차의 동력원은 엔진과 전동기가 함께 사용되기 때문에 취부 공간이 한정적이다. 따라서 차량의 취부 구조에 맞는 전동기 설계가 이루어 져야 한다. 엔진 옆에 취부되어야 하므로 큰 직경에 비해 축 방향 길이가 짧은 박형 전동기가 주로 하이브리드 전기자동차에 사용되고, 구조상 12극에서 16극 정도의 다극 전동기가 일반적으로 적용되고 있다.

매입형 영구자석 동기 전동기는 영구자석에 의한 마

그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 이용하는 모터로써 출력 밀도가 높은 장점을 갖는다. 그러나 다극 전동기의 단점인 극 간 간격이 좁아 극 간 누설 자속이 상대적으로 크게 발생된다. 이러한 누설 자속은 전동기의 출력을 악화시킬 뿐만 아니라, 효율 또한 감소시키는 원인이 된다. 따라서 다극 매입형 영구자석 동기전동기의 누설 자속을 최대한 감소시키면서 성능 향상을 가져올 수 있는 최적 설계가 요구된다[1-3].

본 논문에서는 회전자 표면에 슬릿을 적용하여 누설 자속을 효과적으로 감소시키고, 출력 및 토크 리플을 개

*Corresponding Author : Ki-Chan Kim(Hanbat National Univ.)

Tel: +82-42-821-1090 email: kckim@hanbat.ac.kr

Received July 10, 2014

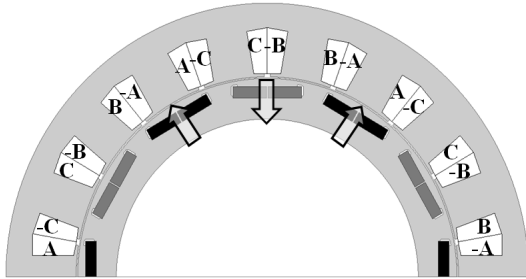
Revised August 4, 2014

Accepted October 10, 2014

선하는 방안을 제시한다. 슬릿의 형상과 관련된 2개의 설계 파라미터를 제시하고 반응표면법(Response-Surface Method : RSM)을 적용하여 출력 최대와 토크리플 감소에 대한 최적설계를 수행한다. 철심에서의 자기포화 현상을 반영하기 위해 비선형 해석 기법인 유한요소법(Finite Element Method : FEM)을 이용하여 특성해석을 수행하고, 슬릿이 존재하지 않는 기본 모델과 슬릿이 적용된 모델의 특성을 비교 분석한다.

2. 기본 모델 및 운전 특성

매입형 영구자석 동기 전동기의 기본모델은 적층길이 가 짧은 박형 구조이며, 12극 18슬롯의 다극 전동기로 설계를 진행하였다. 유한요소해석에 사용된 IPMSM의 모델은 Fig. 1과 같다. 권선법은 집중권이며, 영구 자석의 와전류손을 감소시키기 위하여 한 극의 자석에 브릿지(Bridge)를 적용하였다. IPMSM의 구성 및 세부 사항은 Table 1과 같다[4].



[Fig. 1] An Original model of IPMSM for 2D FEM

[Table 1] Specifications of IPMSM

Parameter	Value	Unit
No. of Slot	18	-
No. of Pole	12	-
Stator Outer	260	[mm]
Rotor Outer	188.9	[mm]
Current Limit	190	[A _{rms}]
Voltage Limit	100	[V _{rms}]
Parallel Branches	6	-

[Table 2] The characteristics of original model

Parameter	Value		Unit
Speed	1,313	2,000	[rpm]
Torque	155.94	102.32	[Nm]
Output Power	21.44	21.43	[kW]
Torque Ripple	23.27	40.55	[%]
Phase Current	190	190	[A _{rms}]
Current Angle	34.5	63	[deg]
Line Voltage	97.55	99.87	[V _{rms}]
No load magnetic flux linkage	0.058393		[Wb]

IPMSM 기본모델의 정격 속도와 최대 속도의 유한요소해석 결과는 Table 2에서 보여준다. Table 2에 나타난 바와 같이, 기본 모델의 정격 속도인 1,313rpm의 경우 상전류 190A_{rms}, 전류 위상각 34.5도에서 MTPA(Maximum Torque Per Ampere)점이 형성되며, 155.94Nm의 토크와 23.27%의 토크 리플을 발생된다. 최대 속도 2,000rpm의 경우는 약계자 제어가 적용되어 상전류 190A_{rms}, 전류 위상각 63도에서 102.32Nm의 토크와 40.55%의 토크리플이 발생된다. 정격 속도와 최대 속도에서 토크리플의 저감이 필요함을 확인 할 수 있다.

3. 토크리플 원인 및 저감 방안

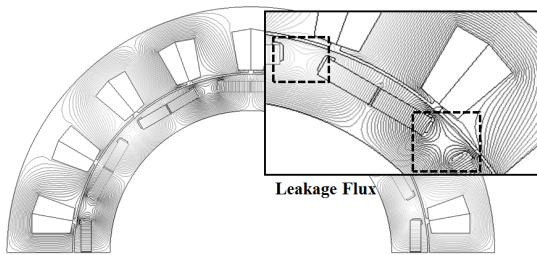
IPMSM의 평균 토크는 고정자의 q축 전류 I_q , d축 전류 I_d , 쇄교 자속 Ψ_m , d축 인덕턴스 L_d 및 q축 인덕턴스 L_q 에 의해 결정되는 것을 식 (1)에서 확인할 수 있으며, 토크의 순시 값은 식 (2)와 같이 발생된다[5].

$$T = 1.5p[\Psi_m I_q - (L_q - L_d) I_d I_q] \quad (1)$$

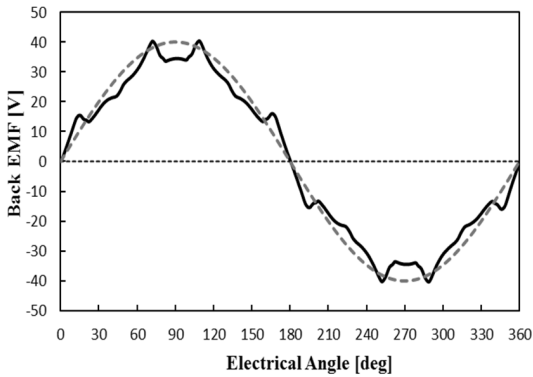
$$T = 1.5p[\Delta\Psi_m(\theta) I_q - \Delta L_{dq} I_d I_q] + T_{\text{cog}}(\theta) \quad (2)$$

식 (2)에서 보는 바와 같이, 토크 리플의 발생원인은 코깅 토크뿐만 아니라, 무부하 쇄교 자속의 변화량과 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 차이의 변화량에 따라서 결정되는 것을 알 수 있다.

기본 모델의 경우에는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 극간 누설자속이 많이 발생하며, 이는 무부하 쇄교자속량을 집중시키지 못하여 출력을 감소시킬 뿐만 아니라, Fig. 3과 같이 역기전력의 과형이 비정상적으로 발생되어 토크 리플이 높게 발생된다.

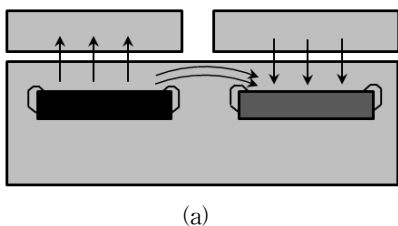


[Fig. 2] Flux distribution of Original Model

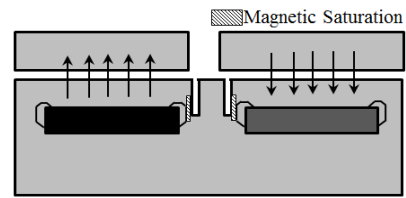


[Fig. 3] Back EMF of Original

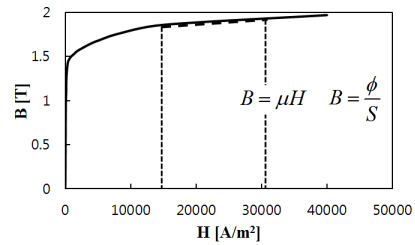
토크 리플 발생 원인인 누설자속의 저감을 위하여 기본 모델에 Fig. 4의 (b)와 같이 슬릿(slit)을 적용시켰다. 기본 모델은 Fig. 4의 (a)에서 나타낸 바와 같이 N극에서 나온 자속이 고정자를 쇄교하지 않고 회전자 내부를 통하여 S극으로 흐른다. 제안 모델은 슬릿(slit)을 적용함으로써 Fig. 4의 (b)의 붉은 상자 부분에 포화 현상이 발생하도록 하여 자기적 공극을 증가시키게 된다. 이는 자기 포화 현상이 일어날 시, Fig. 4의 (c)와 같이 철심의 투자율이 공기의 투자율과 비슷해지는 원리를 이용한 것으로서, 극 간 누설 자속의 자료가 포화되어 자기적 공극이 증가하게 된다. 자기적 공극이 증가함에 따라 극 간 누설 자속이 감소된다. 따라서 무부하 쇄교 자속은 고정자 축으로 집중될 것이며, 이에 따라 역기전력 파형 및 출력이 개선 될 것이다.



(a)



(b)

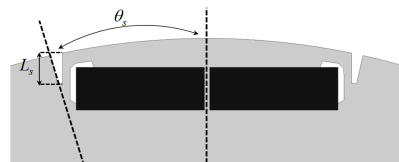


(c)

[Fig. 4] A method for the reduction of linkage flux (a) A mimetic diagram of Original model (b) A mimetic diagram of modified model with slit (c) The B-H Curve of steel on the stator

4. 반응표면 설계 요인 및 개선모델

반응표면설계를 위한 요인은 Fig. 5와 Table 3에 나타내었다.



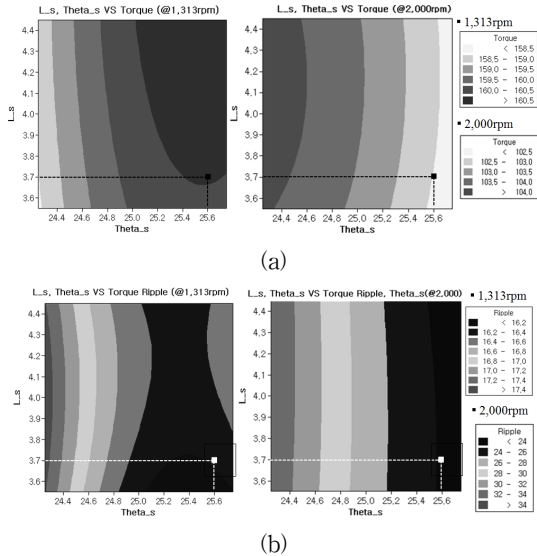
[Fig. 5] Parameters for Response-Surface Methodology

[Table 3] Values of the slit parameters for RSM

Parameter	Min.	Max.	Unit
L_s	3.7	4.3	[mm]
Theta _s (θ_s)	24.5	25.5	[deg]
Alpha(α)	1.5		-

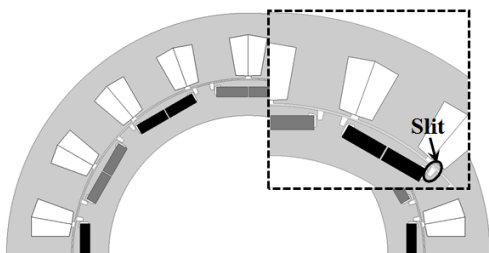
L_s 는 회전자 표면에서 슬릿의 수직방향 깊이를 의미하며, θ_s 는 원점의 수직방향에서부터 각도를 나타낸다. 반응표면설계에서 실험영역의 중심에서 축점까지의 거리를 나타내는 알파값(Alpha)은 모델 구현의 용이함을 위하여 1.5로 반응표면설계를 진행하였다. 두 요인을 이

용한 반응표면설계의 결과를 Fig. 6에서 확인할 수 있다.



[Fig. 6] Results of RSM on the slit parameters
(a) Torque (b) Torque Ripple

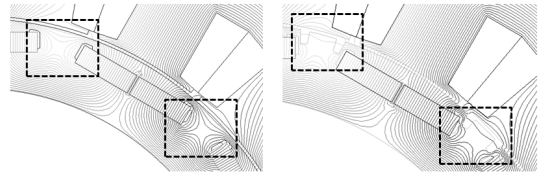
부하 시 출력의 향상과 토크 리플 저감을 위해, 우선적으로 Fig. 6의 (a)의 1,313rpm에서 토크 값과 Fig. 6의 (b)를 참고하여 L_s 는 3.7mm, Θ_{ts} 는 25.6도로 선정하였다. 이 점은 Fig. 6의 (a)에 나타난 바와 같이 1,313rpm 경우 토크가 최대가 되는 점에 존재하며, 2,000rpm에서 최대 값은 아니지만, 기본 모델의 토크 102.4Nm값 보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 6의 (b)를 통하여 1,313rpm과 2,000rpm에서 토크 리플이 최소가 되는 설계임을 확인하였다. 반응표면설계를 토대로 결정된 개선모델을 Fig. 7에서 확인할 수 있다.



[Fig. 7] Modified Model

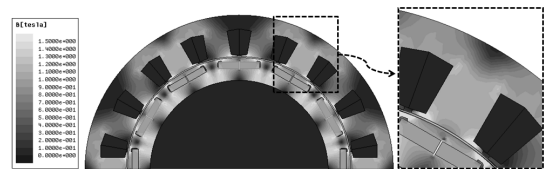
5. 특성 비교

개선 모델은 Fig. 8의 선속도에서 보는 것과 같이 기본 모델과 비교 시 슬릿에 의하여 자석 브릿지 옆의 림이 포화가 되며, 극 간 자기적 공극이 증가하여 극 간 누설자속이 감소된 것을 확인할 수 있다. 또한 슬릿에 의해 고정자 측면으로 통하는 선속이 증가하며, 이는 Fig. 9와 같은 무부하시 자속밀도 분포를 나타내게 한다.

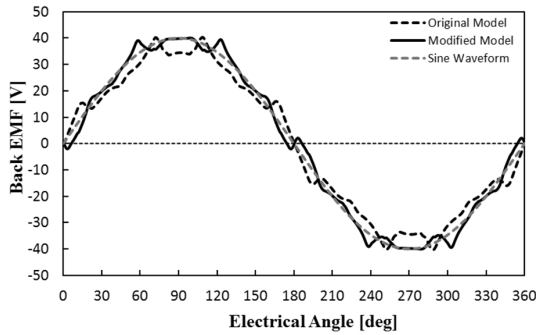


[Fig. 8] Comparison of Flux Line at 1,000rpm (No load)
(a) Original Model (b) Modified Model

슬릿이 자속을 집중시켜 무부하 쇄교자속은 약 9.73% 증가하며, 이는 Fig. 9에서 보는 것과 같이 전체적인 자속 밀도를 증가시키며 특히 티스 부분에서 자속밀도 증가가 많이 발생하였다. 따라서 상 역기전력 값은 26.15V_{rms}에서 28.55V_{rms}로 상승시켰으며, 기본 모델의 역기전력 파형을 더 정현적인 파형으로 개선시킬 수 있다. 역기전력 파형의 개선은 Fig. 10에서 나타낸다.



[Fig. 9] Comparison of magnetic flux density at 1,000rpm (No load)
(a) Original Model (b) Modified Model



[Fig. 10] Comparison of Back EMF at 1,000rpm (No load)

정격 속도(@1,313rpm) 운전 시 개선 모델과 기본 모델의 비교를 위하여 각각 모델에 상전류 190A_{rms}, 전류 위상각 34.5도를 동일하게 인가하여 유한요소해석을 진행하였다. 개선 모델의 토크는 기본 모델에 비하여 약 4.6% 상승한 163.14Nm가 발생하였으며 토크리플은 약 6% 감소하였다. 개선 모델의 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 차이는 감소하여 릴럭턴스 토크의 사용비율은 감소하였지만, 무부하 자속의 증가로 인해 마그네틱 토크가 많이 증가하였다. 또한 자속의 변화량이 개선되어 토크 리플이 감소한 것을 알 수 있다. 정격 속도에서 자세한 수치는 Table 4를 통하여 확인할 수 있으며, Fig. 11을 통하여 기본 모델과 개선 모델의 정격 속도에서의 토크 파형을 확인할 수 있다.

[Table 4] Comparison of the parameters at rated speed(@1,313rpm)

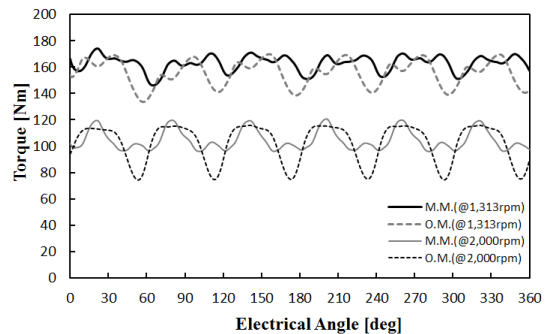
Parameter	Value		Unit
Torque	155.94	163.14	[Nm]
Output Power	21.44	22.43	[kW]
Torque Ripple	23.27	17.18	[%]
Phase Current	190	190	[A _{rms}]
Current Angle	34.5	34.5	[deg]
Line Voltage	97.55	95.27	[V _{rms}]
No load magnetic flux linkage	0.05839	0.06408	[Wb]
d-axis Inductance	0.2596	0.2585	[mH]
q-axis Inductance	0.4099	0.3924	[mH]

최대 속도(@2,000rpm) 운전 시 각각의 모델에 상전류 190A_{rms}, 전류 위상각 63도로 동일하게 인가하여 유한요소해석을 진행하였다. 개선 모델의 토크는 기본 모델에

비하여 약 2.2% 증가하였으며 토크 리플은 약 17% 감소한 것을 Table 5에서 확인할 수 있다. 또한 선간 전압이 96.02V_{rms}로 감소하여 전압 제한에 비교적 여유가 있으므로 출력이 증가할 것이라고 예상된다. Fig. 11을 통하여 기본 모델과 개선 모델의 최대 속도에서의 토크 파형을 확인할 수 있다.

[Table 5] Comparison of the parameters at rated speed(@2,000rpm)

Parameter	Value		Unit
Torque	102.32	104.60	[Nm]
Output Power	21.43	21.91	[kW]
Torque Ripple	40.55	23.62	[%]
Phase Current	190	190	[A _{rms}]
Current Angle	63	63	[deg]
Line Voltage	99.87	96.02	[V _{rms}]
No load magnetic flux linkage	0.05839	0.06408	[Wb]
d-axis Inductance	0.2921	0.2863	[mH]
q-axis Inductance	0.4652	0.4448	[mH]



[Fig. 11] Comparison of Torque waveform at each speed

6. 결론

다극 IPMSM의 토크리플 개선을 위하여 회전자 표면에 슬릿을 적용하였다. 반응표면설계를 통하여 슬릿을 설계하고, 설계된 슬릿을 기본 모델에 적용하여 유한요소해석을 함으로써 결과값을 도출하였다.

슬릿에 의하여 고정자의 코일에 쇠교자속을 증가시키고 극 간 누설자속을 감소시켜 역기전력 파형을 개선시키고 출력을 증가시켰다. 슬릿 적용 시 d축, q축 인덕턴스 차이를 감소시켜 릴럭턴스 토크의 사용량이 감소되지만, 무부하 쇠교자속량이 증가되어 평균 토크가 감소되

는 것을 확인하였으며, 또한 역기전력 파형을 개선시켜 토크리플을 감소시키는 것을 확인하였다.

References

- [1] K. Wang, Z. Q. Zhu and G. Ombach, "Average Torque Improvement of Interior Permanent-Magnet Machine Using Third Harmonic in Rotor Shape" *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol.61, no. 9, pp. 5047-5057, Sep. 1990.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2013.2286085>
- [2] K. Yamazaki and H. Ishigami, "Rotor-Shape Optimization of Interior-Permanent-Magnet Motors to Reduce Harmonic Iron Losses" *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol.57, no. 1, pp. 61-69, Jan. 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2025285>
- [3] S.-K. Lee, G.-H. Kang, J. Hur, and B.-W. Kim, "Stator and Rotor Shape Designs of Interior Permanent Magnet Type Brushless DC Motor for Reducing Torque Fluctuation" *IEEE Trans. Magn.*, vol.48, no. 11, pp. 4662-4665, Nov. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2012.2201455>
- [4] K. Yamazaki, Y. Fukushima and M. Sato, "Loss Analysis of Permanent-Magnet Motors With Concentrated Windings-Variation of Magnet Eddy-Current Loss Due to Stator and Rotor Shapes" *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.45, no. 4, pp. 1334-1342, Jul/Aug. 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2009.2023393>
- [5] Z. Azar, Z. Q. Zhu, and G. Ombach "Influence of Electric Loading and Magnetic Saturation on Cogging Torque, Back-EMF and Torque Ripple of PM Machines" *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 10, pp. 2650-2658, Oct. 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.2012.2201493>

김기찬(Ki-Chan Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과(전기공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2005년 1월 : 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원
- 2008년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과(전기공학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 교수

<관심분야>
전기기기, 전기제어