Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 20, No. 6 pp. 557-564, 2019

https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.6.557
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

반응표면분석법에 의한 매입형영구자석동기전동기의 토크와 토크리플을 고려한 설계기법

백승구*, 전창성
한국철도기술연구원 차세대철도차량본부

A Design Method Considering Torque and Torque-ripple of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Response Surface Methodology

Seung-Koo Baek*, Chang-Sung Jeon
Advanced Railroad Vehicle Division, Korea Railroad Research Institute

요 약 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)의 회전자 자석의 크기 및 위치와 고정자 슬롯의 크기는 출력 토크 및 토크 리플률 특성에 영향을 준다. 본 논문은 반응표면분석법(RSM : Response Surface Methodology, 이하 RSM)을 이용한 IPMSM의 토크와 토크 리플률(ripplerate) 향상을 위한 최적설계 방법에 대해 다룬다. 토크 출력과 토크 리플률에 영향을 주는 설계변수에 대하여 Plackett-Burmann(PB, 이하 PB)의 민감도 분석을 통해 토크 출력 및 토크 리플 두 가지 목적함수에 영향이 큰 설계변수를 도출하였다. 도출된 목적함수로부터 2차 설계변수를 선정하였으며 중심합성계획법(CCD : Central Composite Design, 이하 CCD)에 따른 실험계획표 정의 및 해석결과를 통해 RSM의 2차 회귀모형 함수를 추정하였다. 2차 회귀모형함수는 분산분석표(ANOVA table)를 활용한 검증 기준을 통해 신뢰성을 가짐을 확인하였다. 실험계획표에 따른 해석은 유한요소법(FEM : Finite Element Method, 이하 FEM) 해석 소프트웨어인 JMAG을 통하여 실험 결과를 확인하였다. 최적화된 최종 설계변수를 적용한 IPMSM의 최적설계 결과는 토크와 토크 리플률을 모두 고려할 경우, 토크 출력은 11.5 % 증가하였으며 토크 리플률은 9.1 % 감소하였다.

Abstract The characteristics of the torque and torque ripple of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) are influenced by the size and position of the rotor magnet and the size of the stator slot. This paper deals with the optimal design method for improving torque and torque ripplerate for IPMSM using Response Surface Methodology(RSM). Two objective functions of torque output and torque ripple were derived from the sensitivity analysis by Plackett-Burmann(PB) for the characteristic variables affecting torque and torque ripple. Secondary characteristic variables were selected from the derived objective function and RSM secondary regression model function was estimated by the experiment schedule and analysis results according to the Central Composite Design (CCD). The reliability of the secondary regression model was verified using ANOVA table. The analysis according to the experimental schedule was verified by JMAG(Ver. 18.0) which is Finite Element Method(FEM) software. The torque output of IPMSM applied with final characteristic variables was increased torque output by 11.5 % and the torque ripplerate was reduced by 9.1 %.

Keywords : Interior-Permanent-Magnet-Synchronous-Motor, Response-Surface-Methodology, Central-Composite-Design, Plackett-Burmann, Optimal-Design, Finite-Element-Method, Brake-By-Wire, Electro-Mechanical-Brake

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업(PK1903A1) 연구비 지원으로 수행되었습니다.
*Corresponding Author : Seung-Koo Baek(Korea Railroad Research Institute)
Tel: +82-31-460-5507 email: skbaek@krri.re.kr
Received May 16, 2019 Revised June 4, 2019
Accepted June 7, 2019 Published June 30, 2019

1. 서론

최근 전력변환장치 및 제어기술의 발전으로 IPMSM은 전기자동차, 철도차량, 공조장치 등 많은 분야에서 활용되고 있다. IPMSM은 회전자 내부에 설치된 영구자석의 구조적인 특징으로 자석에 의한 토크와 릴럭턴스 토크의 사용이 가능하여 효율이 높으며 내구성이 좋아 고속회전에 유리하다[1].

철도차량분야에서도 모터의 회전력이 필요한 견인전동기, 출입문, 공기압축기 등 많은 분야에 IPMSM이 적용되었거나 개발 중이다. 특히, 제동분야에서는 기존의 공압식 제동장치를 대체하기 위하여 전기기계식 제동장치(EMB : Electro Mechnical Brake, 이하 EMB)의 개발이 국내·외에서 활발히 수행중이다.

EMB에 적용하기 위한 IPMSM 설계를 위해 우선적으로 고려되는 특성은 출력토크의 향상과 토크리플의 저감이다. 상용 FEM 해석툴을 사용하여 모터를 설계하는 경우, 일반적으로 출력 토크, 토크 리플 및 자속밀도 등의 해석결과 확인을 통하여 반복적인 시행착오를 거쳐 설계가 수행된다. 이러한 설계방법은 개발자의 경험적인 요인에 따라 설계시간과 결과의 차이가 크다.

최근 통계학 기반의 근사화 기법 중 RSM[2]을 통한 실험계획을 활용하여 IPMSM의 최적설계를 빠르게 진행하는 기법에 대한 연구가 수행되었다. 예로 토크 맥동(pulsation)을 줄이기 위한 회전자 형상 최적화 기법[3], 토크 리플과 진동저감 기법[4], RSM과 유전 알고리즘(GA : Genetic Algorithm)을 혼합한 토크 및 속도향상 기법[5], 그리고 RSM과 Simplex 알고리즘을 혼합한 코깅(cogging) 토크와 토크 리플저감[6] 등의 연구결과가 있다. 그러나 RSM을 활용한 대표적인 실험계획법인 CCD[7]를 활용할 경우 설계변수의 수가 5개를 초과할 경우 50회 이상의 FEM 해석이 필요하다. 따라서, IPMSM을 설계하고자 하는 목적에 맞는 설계변수의 선정뿐만 아니라, IPMSM의 출력성능에 영향을 많이 주는 주요 설계변수를 재선정하는 과정을 통하여 IPMSM의 설계 목적을 만족시키기 위한 최적화를 빠르게 수행하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 RSM의 수행에 앞서 PB[8]를 활용한 민감도 분석을 통해 설계목적에 맞는 2차 설계변수를 선정하였다. 선정된 설계변수는 CCD에 따라 최적화를 추정하여 FEM 해석수행을 최소화하고자 한다. 또한, 설계변수 선정시 토크 출력과 토크 리플 두 가지 목적함수를 고려하여 토크 출력은 증가시키고 토크 리플은 감소시키기 위한 최적설계 과정을 제안하였다. RSM의 2차의 회귀 모형함수의 검증을 위해 분산분석표를 활용하였으며 해석수행은 FEM 툴인 JMAG(Ver. 18.0)을 통하여 실험결과를 확인하였다.

2. 본론

2.1 IPMSM 최적화 과정

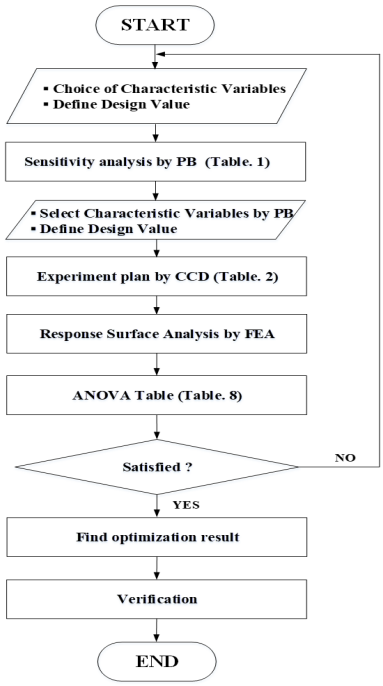

Fig. 1. Optimization procedure

Fig. 1은 IPMSM의 최적 설계를 위한 과정을 나타낸다. Fig. 1에서 보듯이 IPMSM의 설계목적에 영향을 주는 주요 설계변수(characteristic variable)를 선정하고 설계변수의 특성치(design value)를 정의한다. 특성치의 경우 최대값과 최소값의 2 수준 또는 중간값을 포함한 3 수준으로 정의할 수 있다. 특성치의 정의에서 각 변수가 가질 수 있는 제한조건에 따라 최대값과 최소값을 정의하는 것이 필요하다.

이렇게 선정된 설계변수를 통해 본 논문에서는 PB의 민감도 분석을 제안하였다. 민감도는 설계변수의 변화에 의한 목적함수의 변화율을 의미하며 민감도 분석을 통해 설계변수의 목적함수에 대한 기여도를 확인한다. PB 방

법은 설계변수 간의 교호 작용을 무시할 경우 n 개의 설계변수에 대하여 n+1 번의 실험을 수행하는 2 수준의 실험계획법이다. 실험횟수는 4의 배수로 설정되며, 설계변수의 선정에 따라 실험 횟수가 정해진다.

Table 1. PB design in 12 run

No.	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x9	x10	x11
1	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-
2	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+
3	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-
4	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-
5	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-
6	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+	+
7	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	+
8	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+
9	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-
10	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+
11	+	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Table 1은 PB 방법에 따른 설계변수와 실험횟수의 예를 나타낸다. x1 ~ x11 까지의 설계변수에 대하여 총 12회의 실험횟수를 나타내고 있으며, 파란색으로 표시된 "+" 는 설계변수의 최대값, 붉은색으로 표시된 "-" 는 설계변수의 최소값을 의미한다. PB 방법에 따른 실험결과로부터 예측할 수 있는 설계변수와 특성치의 관계를 나타내는 반응함수를 다항식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \varepsilon \qquad (1)$$

Where, x denotes characteristic variable according experimental condition, β denotes coefficient of design value, y denotes design value after experimental result, ε denotes error value and k denotes number of characteristic variable.

민감도 분석 결과에 따라 토크 출력과 토크 리플에 민감도가 큰 순서로 설계변수를 선정한 후 RSM을 통한 최적화를 수행한다.

RSM은 여러개의 설명변수 $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \cdots, \xi_k$ $x_1, x_2, x_3, \cdots, x_k$가 복합적으로 반응함으로써 어떤 반응변수 η에 영향을 주고 있을 때, 이러한 반응의 변화가 이루는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다. 여기서, 설명변수는 반응변수에 영향을 주는 인자를 말하며 ξ의 변화에 따라 η가 변화하는 반응표면의 통계적 모형을 식 (2)와 같이 함수 f의 관계로 표현한다.

$$\eta = f(x_1, x_2, x_3, \cdots, x_k) \qquad (2)$$

IPMSM 설계시 토크와 연관된 설계변수의 개수 k가 여러 개 존재하는 것이 일반적이므로 1차 모델식으로는 표현되기 어려우며, 식 (3)과 같이 2차의 회귀모형을 사용한다.

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i \le j}^{k} \beta_{ij} x_i x_j \qquad (3)$$

회귀모형을 구하기 위하여 적절한 실험을 수행해야 하는데 최소의 실험으로 2차 회귀모형을 추정할 수 있는 실험 계획법이 CCD이다. 만일 실험 설계변수 $k = 4$인 경우 CCD에 의한 실험계획표는 Table 2와 같다. 따라서, PB를 통해 선정된 설계변수에 따라 CCD의 실험계획표를 정의하고 각각의 경우에 대하여 FEM 해석툴을 활용한 해석을 수행한다. 해석결과로 도출된 2차의 회귀모형함수의 검증을 위해 분산분석표를 활용하였으며 선정된 설계변수가 유의한 인자인지의 여부를 확인한 후 최적해를 찾는다.

2.2 IPMSM 기본 설계 및 설계변수

Fig. 2는 IPMSM의 고정자와 회전자의 기본 형상설계와 각 설계변수의 위치를 나타낸다. 4극(pole) 15슬롯(slot)의 구조이며 5,000 rpm 이상의 고속 회전이 요구되고 회전자의 영구자석은 V 형태의 분할형 영구자석매입구조로 고정자의 권선방법은 분포권을 적용하였다.

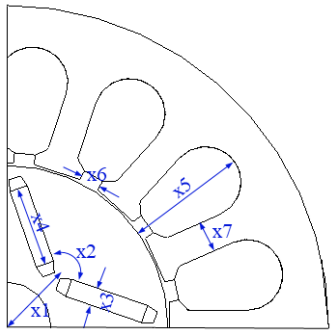

Fig. 2. Appearance of IPMSM and Position of characteristic variables

Table 2. Experimental plan table using CCD, $k=4$

No.	1	x1	x2	x3	x4	x1^2	x2^2	x3^2	x4^2	x1x2	x2x3	x3x4	x1x3	x2x4	x1x4
1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
3	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1
4	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
6	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
7	1	-1	1	1	-1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
8	1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1
11	1	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1
12	1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
13	1	1	-1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1
14	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1
15	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
16	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	1	-1.41	0	0	0	1.999	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	1.414	0	0	0	1.999	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1	0	-1.41	0	0	0	1.999	0	0	0	0	0	0	0	0
21	1	0	1.414	0	0	0	1.999	0	0	0	0	0	0	0	0
22	1	0	0	-1.41	0	0	0	1.999	0	0	0	0	0	0	0
23	1	0	0	1.414	0	0	0	1.999	0	0	0	0	0	0	0
24	1	0	0	0	-1.41	0	0	0	1.999	0	0	0	0	0	0
25	1	0	0	0	1.414	0	0	0	1.999	0	0	0	0	0	0

IPMSM의 최적화 설계를 위해 최초 설계변수의 선정이 필요하다. 설계변수의 선정은 일반적으로 IPMSM의 설계에서 토크 출력과 토크리플에 영향을 미치는 주요 설계변수 중 Fig. 2와 같이 7개를 선정하였다. Fig. 2의 x1 ~ x4는 회전자 자석의 형태에 대한 변수이며, x5 ~ x7은 고정자 슬롯의 형태에 대한 변수이다. 2.1절에서 설명한 바와 같이 각 변수는 제한 조건이 필요하다. x1 ~ x4의 경우 회전자 외경과 각 자석 사이에 물리적인 간섭이 발생하지 않는 범위에서 선정된다. 예를 들어, x2가 최소값인 경우 x1이 최대값일 때 회전자 직경에 간섭이 발생하지 않아야 하며, x3가 최대값일 경우 x2가 최대값에서 자석간 간섭이 발생하지 않아야 한다. x5 ~ x7 변수의 경우 슬롯에 와인딩(winding)하는 구리선의 분포도가 과도하여 제작이 불가능할 경우가 발생하지 않는 범위에서 최소값과 최대값이 결정된다.

Table 3은 토크 출력과 토크 리플에 영향을 줄 수 있는 주요 7개의 설계변수와 각 설계변수에 대한 3수준의 설계치를 나타낸다. Table 3의 특성치에 따라 초기 형상 설계 조건에서 FEM을 수행하였다.

초기 설계단계에서 IPMSM의 토크 출력특성은 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 보듯이 평균 토크는 약 4.08 Nm가 출력되고 있으며 토크리플을 나타내는 리플률은 0.036 Nm이다. 리플률의 크기는 식 (4)과 같이 정의한다.

$$ripplerate = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{avg}} \quad (4)$$

Where, $T_{\max}$ denotes maximum torque output, $T_{\min}$ denotes minimum torque output and T_{avg} denotes average value of torque output.

Table 3. Characteristic variables and values

No.	Characteristic Variables	Design Value	Min.	Max.
x1	Magnet Position(mm)	9.6	9.3	9.9
x2	Magnet Angle(deg)	124	121	127
x3	Magnet Thickness(mm)	2.05	1.7	2.4
x4	Magnet Width(mm)	10.6	10	11.2
x5	Slot Depth(mm)	15.5	15	16
x6	Slot Openning(mm)	1.8	1.3	2.3
x7	Slot Width(mm)	4	3.5	4.5

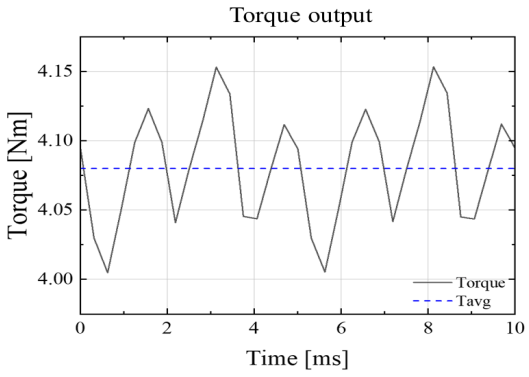

Fig. 3. Torque output of initial design for IPMSM

2.3 PB를 통한 민감도 분석

앞 절에서 설명한 바와 같이 CCD에 의한 실험횟수를 줄이기 위한 방법으로 민감도 분석을 통한 실험적 방법인 PB를 활용하였다.

Table 4는 Fig. 2에 정의된 총 7개의 설계변수에 대하여 PB에 따른 민감도 분석을 위한 실험계획표를 나타낸다.

Table 4. Experimental plan table for PB sensitivity analysis

No.	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7
1	9.9	127	1.7	11.2	16	1.15	1.75
2	9.3	127	2.4	10	16	1.15	2.25
3	9.9	121	2.4	11.2	15	1.15	2.25
4	9.3	127	1.7	11.2	16	0.65	2.25
5	9.3	121	2.4	10	16	1.15	1.75
6	9.3	121	1.7	11.2	15	1.15	2.25
7	9.9	121	1.7	10	16	0.65	2.25
8	9.9	127	1.7	10	15	1.15	1.75
9	9.9	127	2.4	10	15	0.65	2.25
10	9.3	127	2.4	11.2	15	0.65	1.75
11	9.9	121	2.4	11.2	16	0.65	1.75
12	9.3	121	1.7	10	15	0.65	1.75

Table 5. FEM Simulation result according to PB table

No.	Torque	Ripplerate
1	3.751014	0.0551219
2	3.454052	0.032837
3	4.930175	0.0738358
4	3.802328	0.0537602
5	3.391918	0.0498197
6	4.321468	0.0859758
7	3.540613	0.0851086
8	3.292723	0.0774699
9	3.969451	0.0516353
10	4.004879	0.0357787
11	4.178737	0.075874
12	3.121089	0.0760062

Table 5는 Table 4의 PB 실험계획표에 따른 FEM 해석결과를 나타낸다. FEM 결과는 토크 출력과 리플률 두 가지의 목적함수에 대하여 식 (1)의 반응함수식을 토크출력과 리플률의 수식으로 나타내면 식 (5)-(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = 3.81 + 0.13x_1 - 0.10x_2 + 0.18x_3 + 0.35x_4 - 0.13x_5 + 0.04x_6 + 0.19x_7 \quad (5)$$

$$Y = 0.0628 + 0.0071x_1 - 0.0117x_2 - 0.0095x_3 + 0.0006x_4 - 0.0040x_5 - 0.0003x_6 + 0.0011x_7 \quad (6)$$

반응함수식에 따라 민감도 우선순위를 판단하기 위해 식 (5)-(6)를 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 보듯이 토크 출력에 민감한 인자는 자석의 길이(x4), 슬롯의 간격(x7), 자석의 두께(x3), 자석위치(x1), 슬롯깊

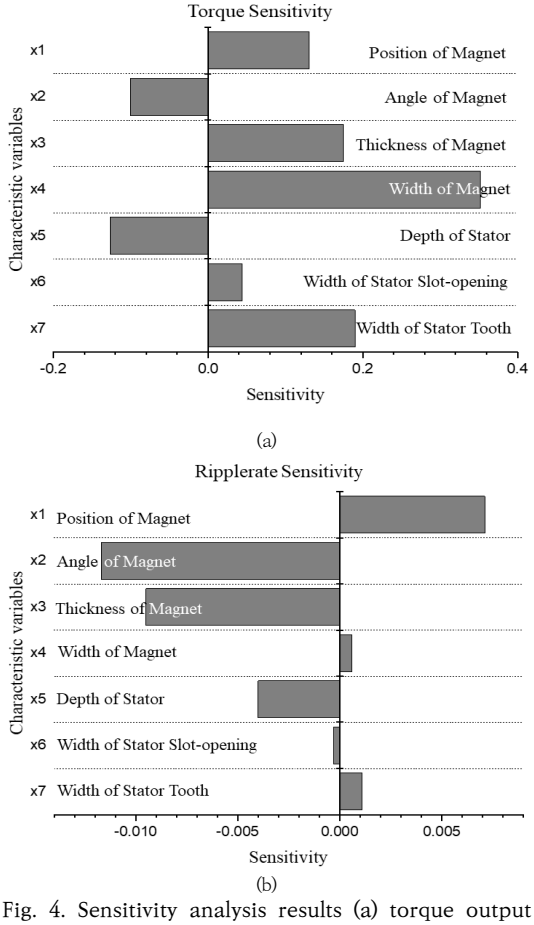

Fig. 4. Sensitivity analysis results (a) torque output (b) ripplerate

이(x5), 자석각도(x2) 및 슬롯 오프닝(x6)의 순으로 나타난다. 여기서, x3 및 x6 인자의 경우 토크 출력은 증가하고 리플률이 감소하는 경향을 보이므로 설계변수의 값을 최대값으로 고정할 수 있으며, x5 인자는 리플률이 감소하지만 토크출력도 함께 감소하므로 설계변수의 값을 최소값으로 고정한다. x2의 경우 토크는 감소하지만 리플률의 감소분이 가장 크므로 최적화 분석을 위한 인자에 포함할 필요가 있다. 따라서, 고정된 설계변수를 제외한 x4, x7, x1 및 x2를 RSM을 위한 설계변수로 선정한다.

2.4 RSM 최적화

PB 민감도 분석에서 선정된 설계변수는 총 4개이며, RSM의 CCD를 활용한 실험계획표는 Table 2와 같다. Table 2에서 1은 최대값, -1은 최소값 ±1.414는 최대 및 최소값의 1.414배에 해당하는 값을 의미한다. 따라서 각 설계변수의 값을 입력하여 Table 6과 같은 총 25번의 FEM을 위한 실험계획표가 작성된다.

Table 6. CCD table for optimal design

No.	x1	x2	x3	x4
1	10	1.75	9.3	121
2	10	1.75	9.3	127
3	10	1.75	9.9	121
4	10	1.75	9.9	127
5	10	2.25	9.3	121
6	10	2.25	9.3	127
7	10	2.25	9.9	121
8	10	2.25	9.9	127
9	11.2	2.25	9.9	127
10	11.2	2.25	9.9	121
11	11.2	2.25	9.3	127
12	11.2	2.25	9.3	121
13	11.2	1.75	9.9	127
14	11.2	1.75	9.9	121
15	11.2	1.75	9.3	127
16	11.2	1.75	9.3	121
17	10.6	2	9.6	124
18	9.7516	2	9.6	124
19	11.4484	2	9.6	124
20	10.6	1.6465	9.6	124
21	10.6	2.3535	9.6	124
22	10.6	2	9.1758	124
23	10.6	2	10.0242	124
24	10.6	2	9.6	119.758
25	10.6	2	9.6	128.242

Table 7. FEM result according to CCD

No.	Torque	Ripplerate	Remark
1	3.475921	0.041414	
2	3.294321	0.031825	
3	3.704046	0.06227	
4	3.537188	0.038801	
5	3.849131	0.05429	
6	3.622971	0.033484	
7	4.101258	0.067409	
8	3.90414	0.051529	
9	4.602701	0.04544	Selected
10	4.803675	0.054968	Selected
11	4.338758	0.027455	
12	4.569678	0.049028	Selected
13	4.217963	0.038849	
14	4.399868	0.088504	
15	3.984285	0.039196	
16	4.181004	0.045112	
17	4.081839	0.036474	
18	3.561739	0.056707	
19	4.552253	0.033154	Selected
20	3.761041	0.035914	
21	4.298723	0.045835	
22	3.908821	0.03111	
23	4.250142	0.043382	
24	4.210788	0.046088	
25	3.936988	0.028627	

Table 7은 Table 6의 실험계획표에 따른 FEM 결과에서 토크 출력과 리플률을 나타낸다. Table 7에서 보듯이 토크 출력만을 고려한 경우 case 10이 최대 토크 출력을 나타내고 있으며 최초 설계조건과 비교할 경우 약 17.6 %가 증가했음을 확인할 수 있다.

Table 8. ANOVA table

Fator	Regression variation	Residual variationF	Sum
S	3.664021	0.000148	3.664169
F	k	n-k-1	n-1
V	0.916005	0.000007	
F0	123475.400229		
F(σ)	4.43		

회귀 모형함수의 검증을 위해 분산분석표를 활용하면 Table 8과 같다. Table 8에서 보듯이 F0〉F(0.01)이므로 추정된 회귀모형 함수가 신뢰성을 갖는다. 따라서 식(3)에 따른 2차 회귀모형 결과식은 식(7)과 같이 표현된다.

Find

$$x_1, x_2, x_3, x_4 \tag{7}$$

to minimize

$$\begin{aligned} Y = & -4.0829 - 0.3505x_1 - 0.1879x_2 \\ & - 0.1219x_3 + 0.0985x_4 + 0.0131x_1^2 \\ & + 0.0266x_2^2 + 0.0018x_3^2 + 0.0046x_4^2 \\ & - 0.0041x_1x_2 - 0.0067x_2x_3 - 0.0055x_3x_4 \\ & + 0.0034x_1x_3 + 0.008x_2x_4 + 0.0024x_1x_4 \end{aligned}$$

Fig. 5는 Table 7의 FEM 결과를 x-y 평면에 그래프로 나타내었다. Fig. 5에서 보듯이 원으로 표시된 case는 최적화 전의 해석결과와 비교하여 토크의 출력이 증가한 그룹이다. case 10은 최대 토크를 출력하지만 리플률이 2배 수준으로 증가 되었다. 또한, case 9 와 case 12의 경우는 case 19와 유사한 토크 출력을 보이지만 case 19의 경우 리플률의 크기가 상대적으로 작은 결과를 보이므로 case 19를 최적해로 선정하였다.

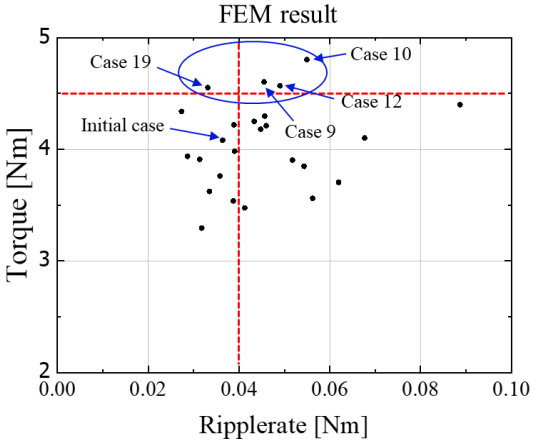

Fig. 5. FEM Simulation result for torque and ripplerate

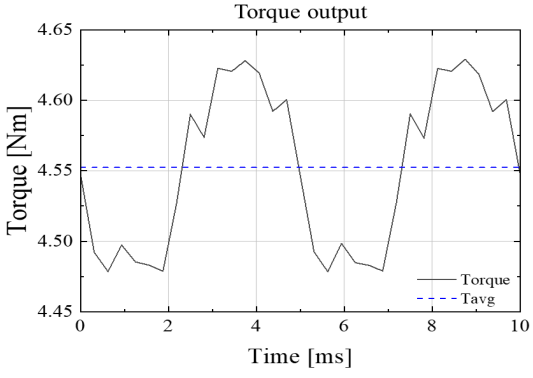

Fig. 6. Torque output of optimized design for IPMSM

Fig. 6은 Table 6의 case 19의 특성치에 따른 토크 출력특성 파형을 나타낸다. Fig. 6에서 보듯이 평균 토크는 4.55 Nm로 최초 설계조건과 비교할 경우 약 11.5 % 증가하였으며, 리플률은 0.033 Nm로 약 9.1 % 감소하는 결과를 얻었다.

3. 결론

본 논문에서는 RSM을 이용한 IPMSM의 최적화 설계를 수행하였다. RSM의 실험계획표에 따른 해석조건의 횟수를 최소화하기 위해 PB 민감도 분석을 수행하였으며, 토크 출력과 리플률을 동시에 고려한 설계변수를 선정하였다. 최초 7개의 설계변수를 민감도 분석을 통해 4개의 설계변수로 정의하였으며 이를 통하여 총 25 case의 RSM 실험계획표를 구성하고 FEM을 수행하였다. 해석결과 최대 토크만을 고려할 경우 최초 설계조건 대비 17.6 %의 토크 출력을 향상시키는 결과를 보였다. 그러나, 리플률을 함께 고려할 경우 최초 설계조건 대비 토크 출력은 약 11.5 %가 증가하고 리플률은 약 9.1 % 감소하는 결과를 얻었다.

향후 본 논문의 설계결과를 반영한 IPMSM을 제작하여 최적화 설계 방법에 대한 실험적인 검증 연구가 진행될 예정이다.

References

[1] T. M. Jahns, G. B. Kliman, T. W. Neumann, “Interior Permanetn-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives”. *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. IA-22, No. 4, pp.738-747, July/August, 1986.

[2] R. H. Myers, D. C. Montgomery. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. John Wiley & Sons, Inc. 1995.

[3] Y. H. Im. S. K. Hwang, S. M. Jang, J. Y. Choi, and J. H. Choi, “Analysis of Torque Pulsation Considering Interior Permanent Magnet Rotor Rib Shape Using Response Surface Methodology”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 48, No. 2, pp.979-981, 2012.

[4] T. Ishikawa, M. Yamada, and N. Kurita, “Design of Magnet Arrangement in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Response Surface Methodology in Consideration of Torque and Vibration”, *IEEE Trans on Magnetics*, Vol. 47, No. 5, pp.1290-1293, 2011.

[5] L. Jolly, M. A. Jabbar, and L. Qinghua, "Design optimization of permanent magnet motors using response surface methodology and genetic algorithms," *IEEE Transaction. Magnetics*, Vol. 41, No. 10, pp.3928-3930, 2005.

[6] W. G. Yim, K. O. An, J. H. Seo and H. K. Jung, "A Study on Notch Shape Optimization for Interior Permanent Magnet Motor based on the Response Surface Method and Simplex Method," *KIEE conference*, pp.90-92, 2010.

[7] S. H. Park, "Design of Experiments," Minyoung Publishing Co., 2009.

[8] R. L. Plackett, J. P. Burman, "The Design of Optimum Multifactorial Experiments," *Biometrika*, Vol. 33, No. 4, pp.305-325, 1946.
DOI: https://doi.org/10.1093/biomet/33.4.305

백 승 구(Seung-Koo Baek) [정회원]

- 2003년 2월 : 충북대학교 대학원 전자공학과 (전자공학 석사)
- 2017년 2월 : 아주대학교 대학원 전자공학과 (전자공학 박사)
- 2003년 1월 ~ 2005년 7월 : SIEMENS automotive 연구원
- 2005년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

〈관심분야〉
고속열차 추진시스템, 전력전자, 자동제어

전 창 성(Chang-Sung Jeon) [정회원]

- 1998년 2월 : 서울대학교 대학원 기계공학과 (기계공학 석사)
- 2015년 2월 : 아주대학교 학원 기계공학과 (기계공학 박사)
- 2000년 1월 ~ 2004년 7월 : 다산네트웍스 주임연구원
- 2005년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

〈관심분야〉
철도차량 동역학, 기계공학