

치수공차를 고려한 BLDC 전동기의 토크 특성 해석

김영균*, 홍정표*, 허진**, 성하경**

*창원대학교 전기공학과. **전자부품연구원 정밀기기연구센터

Analysis of Torque Characteristic Considering The Dimensional Tolerance of BLDC Motor

Young-Kyoun Kim*, Jung-Pyo Hong*, Hur Jin**, Ha-Kyong Sung**

*Dept. of Electrical Engineering in Changwon Nat'l Univ., **Precision Machinery Research Center in KETI

Abstract - This paper presents a method of tolerance analysis for a electric machine. Tolerance analysis technique is required to find the tolerance band of design variables and estimate the characteristic distribution of the electric machine, because that manufacturing tolerances as well as measuring errors have a great influence on the electric machine. Therefore, this paper introduces Stochastic Response Surface Methodology to achieve the tolerance analysis. As an example, the tolerance analysis is applied to the analysis of torque characteristics for a BLDC motor from the electric point of view.

수 있다. 본 논문에서는 입력과 출력의 불확실성 관계를 Hermite 다항식을 이용하여 표현하였으며, 다음식과 같다 [1], [2].

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_{i1} G_1(x_{i1}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} G_2(x_{i1}, x_{j1}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} G_3(x_{i1}, x_{j1}, x_{k1}) + L \quad (1)$$

여기서 y 는 출력, a 는 미지의 회귀계수, ξ_i 는 정규분포를 따르는 확률변수, 그리고 $G_p(\xi_i)$ 는 p 차 Hermite 다항식 항이며 아래식과 같다.

$$G_p(x_i, K, x_j) = (-1)^p e^{\frac{1}{2}x_j^2} \frac{d^p}{dx_j^p} \frac{e^{-\frac{1}{2}x_j^2}}{\sqrt{2\pi}K} \quad (2)$$

본 논문에서는 설계변수의 변동에 대한 출력값의 분포를 구하기 위해서 2차($p=2$) Hermite 다항식을 사용하였으며, 2차 Hermite 다항식은 (2)로부터 식(3)과 같이 표현된다.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_{i1} x_{i1} + \sum_{i=1}^n a_{i2} (x_{i1}^2 - 1) + \sum_{i,j} a_{ij} (x_{i1} x_{j1}) \quad (3)$$

3. 공차분석을 위한 기초 통계

전기기기의 생산 및 제작시에 필요한 설계변수의 허용 공차는 전기기기의 특성 또는 성능에 영향을 미친다. 따라서 전기기기의 대량 생산에 대한 강건성을 향상시키기 위해서 설계변수의 공차에 따른 전기기기 출력값의 변동에 대한 고찰이 필요하다. 본 논문에서는 설계변수의 공차를 설계변수의 불확실성으로 간주하고 설계변수를 확률변수로 취급함으로써 설계변수의 공차분석을 수행한다.

1. 서 론

전기기기의 설계 및 제작 시에 모든 부품에서 측정 장비의 정밀도, 기계가공 및 조립, 작업자의 노하우등에 따른 적당한 허용공차가 필요하다. 전동기의 대량 생산시 이러한 허용공차를 크게 부여할 수 있다면 전동기의 생산단가를 낮출 수 있을 것이다. 그러나 전동기의 각 부품에 대한 치수공차는 경우에 따라서 전동기의 운전효율, 출력 특성에 대한 신뢰성 등 전동기의 전기적 특성 및 성능에 영향을 미친다 [1]. 따라서 전동기의 설계변수에 대한 허용공차를 설계단계에서 전기적 특성을 고려하여 제시 한다면 전동기 제작에 있어서 강건한 전동기를 만들 수 있을 것이다.

공차분석을 위해서 Stochastic Response Surface Methodology(SRSM)를 도입하였다. SRSM은 입력변수를 확률 변수로 취급하여 출력의 분포특성을 구할 수 있다. 따라서 설계변수에 대한 공차를 불확실성으로 간주하고 SRSM을 이용하여 입력(설계변수)의 불확실성에 대한 출력의 불확실성을 예측하고 이것으로부터 설계변수의 변동에 따른 출력 분포의 변화를 분석할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 SRSM을 이용한 공차분석의 예를 들기 위해서 BLDC 전동기의 설계변수 변동에 따른 공차분석을 통해서 전동기의 토크리플 특성을 예측하였다.

2. Stochastic Response Surface Methodology

SRSM은 기존의 Response Surface Methodology(RSM)의 확장으로 볼 수 있다. 여기서 기존의 RSM은 입력(설계)변수를 결정론적인 변수로 취급하는 반면에 SRSM은 확률(랜덤)변수로 취급한다는 것이 주요한 차이점이다 [1]. SRSM은 입력변수를 평균이 0이고 분산이 1인 정규분포를 가지는 확률변수로 다룬다. 정규분포는 수학적 함수화가 용이하여 변수들의 불확실성을 표현하는데 가장 많이 사용되는 분포이다. 만약 입력변수가 정규분포를 가지지 않는다면 적절한 확률변환을 통하여 정규분포화 시킴으로서 입력변수의 불확실성을 쉽게 다룰

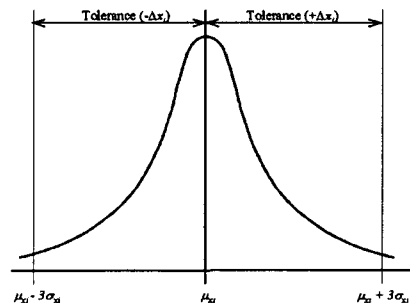


그림 1 설계변수의 확률 분포
Fig. 1 Tolerance band of design variables

따라서 설계변수의 확률분포를 그림 1과 같이 정규분포로 가정하고 설계변수의 공차를 식(4)와 같이 설계변수의 표준편차 σ 를 이용하여 설계변수 분포의 면적에 대한 비로 정의하였다 [1], [3].

$$Dx = \xi \sigma \quad (n = 1, 2, 3, L) \quad (4)$$

따라서 입력변수를 확률변수로 취급하는 SRSM으로부터 생성된 2차 Hermite 다항식 (3)으로부터 출력 y 의 분포에 대한 기본적인 통계량은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$m_y = E\{y\} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_{i,j} \quad (5)$$

$$s_y^2 = E\{(y_i - m_y)^2\} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (y_{i,j} - m_y)^2 \quad (6)$$

$$s_y = \sqrt{s_y^2} \quad (7)$$

여기서 μ_y 는 출력값의 평균, σ_y^2 는 출력값의 분산, σ_y 는 출력값의 표준편차를 각각 나타낸다.

4. 적용의 예 : BLDC 전동기의 토크특성

최근 BLDC 전동기의 수요가 급증하고 있으며, 사용분야에 따라서 엄격한 성능의 전동기가 요구되기도 한다. 예를 들면, 자동차 파워원들 구동용 전동기(EPMS) 같은 경우에는 편안하고 안락한 조타능력을 가져야 함으로 특히 토크 리플이 작아야 한다. 따라서 본 논문에서는 EPMS용 BLDC 전동기를 대상으로 설계변수에 따른 토크특성 변화에 대한 공차분석을 예로 들었다. 적용대상의 전동기는 반경방향으로 착차된 12개의 영구자석으로 구성된 회전자와 12슬롯을 가진 회전자로 구성되며, 전동기의 초기설계를 위한 파라메타는 그림 2에 나타내었다.

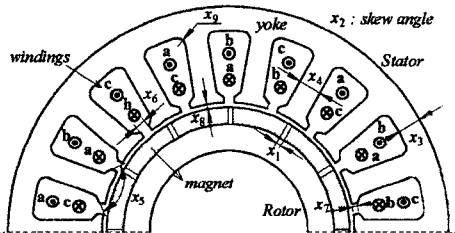


그림 2 해석 모델
Fig. 2 Analysis model and design variables

표 1 설계변수 설명
Table 1 Parameter Description

설계변수	설계초기값
x_1 : Dead zone (deg.)	18
x_2 : Skew angle (deg.)	0
x_3 : Stator yoke Thickness (mm)	4
x_4 : Tooth width (mm)	4
x_5 : Tooth shield angle (mm)	98
x_6 : Slot open width (mm)	2
x_7 : Tooth shield height (mm)	1
x_8 : Air-gap length (mm)	0.8
x_9 : Slot fillet radius (mm)	1

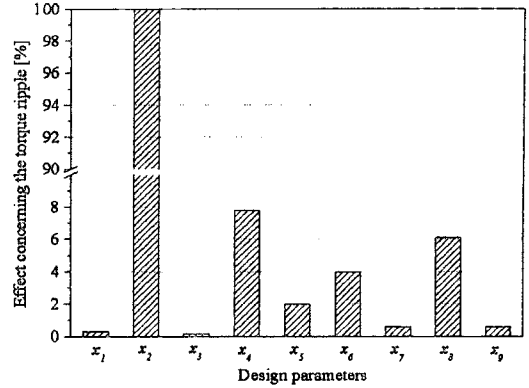


그림 3 토크리플에 대한 설계변수의 민감도
Fig. 3 Effects of design variables on the torque ripple

표 2 최적설계 결과
Table 2 Results of the Numerical Optimization

설계변수	Torque	토크리플
치폭 $x_4 = 4.2$	42 (kgf-cm)	0.42 (%)
슬롯오픈폭 $x_6 = 1.5$		
공극길이 $x_8 = 0.8$		

토크 리플저감을 위한 최적설계를 수행하기에 앞서, 다구치 실험계획법(L_{12})을 이용하여 9개의 설계변수중에서 토크리플에 영향을 주는 주요한 인자를 조사하여 그림 3에 나타내었다 [4]. 스큐(x_2)가 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 치폭(x_4), 슬롯오픈폭(x_6), 공극길이(x_8) 등이 주요한 인자로 판명되었다. 여기서 스큐는 코깅토크의 주기를 고려하여 1 슬롯피치 만큼 부여하는 것으로 고정하고 치폭(x_4), 슬롯오픈폭(x_6), 공극길이(x_8) 등 3가지 설계변수를 가지고 토크 리플저감을 위한 최적설계를 수행하고, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 그리고 이 결과를 이용하여 치폭(x_4), 슬롯오픈폭(x_6), 공극길이(x_8)에 대한 공차분석을 수행하였다. 여기서 전동기의 토크리플은 식(8)과 같이 정의하였다.

$$T_{Ripple} = \frac{T_{Peak to peak}}{2 T_{Mean}} \quad (8)$$

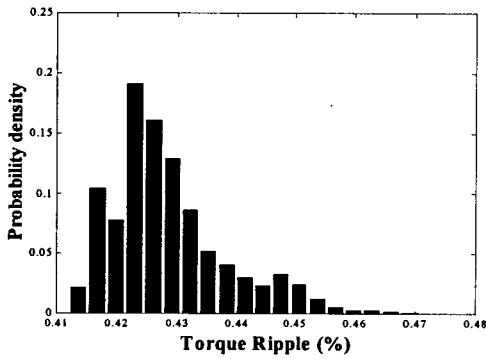
여기서 $T_{Peak to peak}$ 는 발생토크의 최대·최소 값의 차이이고, T_{Mean} 는 발생토크의 평균값이다.

5. 해석 결과

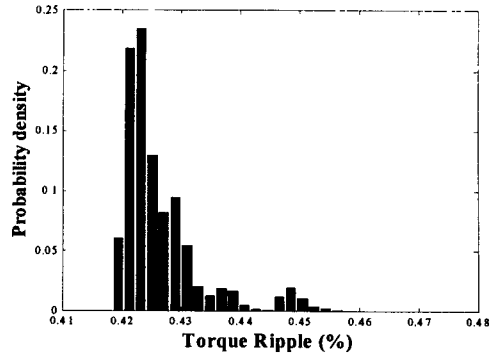
본 논문에서는 설계변수의 공차를 표현하기 위해서 설계변수의 평균값과 표준편차를 이용하였다. 표 2에 나타낸 최적설계 결과를 각 설계변수의 평균값으로 정의하고 각 설계변수의 공차에 대한 표준편차 값은 식(4)로부터 구하였다. 이렇게 정의된 입력변수의 불확실성을 식(3)에 대입하여 출력의 분포를 구하였다. 이때 실험계획법으로서는 3³요인 배치법을 이용하였다.

그림 4는 설계변수의 공차가 3σ 수준에 기초하여 5%로 관리되고 있다고 가정하였을 때, 전동기의 토크리플 및 평균토크에 대한 산포를 나타낸다. 만약 생산되는 전동기의 토크특성에 대한 산포를 줄이고 싶다면, 각 설계변수에 대한 공차를 5%보다 더욱 엄격하게 관리하면 될 것이다. 이를테면, 설계변수 모두 1% 공차를 부여한다면 전동기의 토크 특성에 대한 산

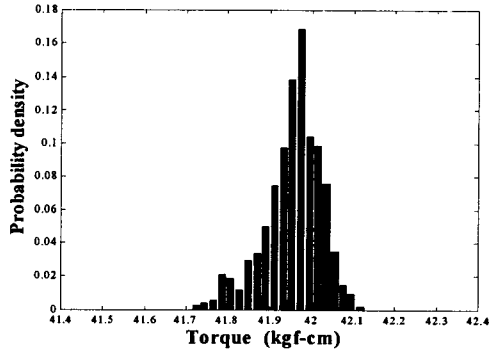
또는 더욱 평균값 근처로 줄어 들것이다. 그러나 이처럼 모든 설계변수에 대하여 엄격하게 공차를 부여한다면 과도한 공차관리로 인하여 경우에 따라서는 불필요한 노력과 비용증가를 유발할 수 있다. 따라서 토크특성에 대한 설계변수의 민감도를 조사하여 일부 설계변수의 공차를 엄격하게 하고 특성 민감하지 않은 나머지 설계변수의 공차는 느슨하게 관리할 필요성이 있다. 따라서 그림 5에 설계변수의 변동범위내의 민감도를 재조사하여 나타내었다. 민감도 재조사 결과로부터 공극길이에 대해서만 공차를 1% 수준으로 부여했을 때의 출력에 대한 분포를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 분포는 그림 4의 분포와 비교해 볼 때, 전동기의 토크 특성에 대한 산포가 많이 줄어들었다.



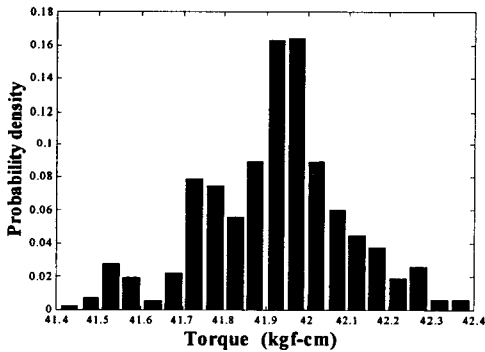
(a) 토크리플에 대한 확률분포



(a) 토크리플에 대한 확률분포



(b) 토크에 대한 확률분포



(b) 토크에 대한 확률분포

그림 4 모든 설계변수의 공차가 5% 일때, 출력의 확률분포
Fig. 4. Distribution of outputs at the design variable tolerance of 5 (%)

그림 6 설계변수의 공차를 $x_4, x_6:5(\%), x_8:1(\%)$ 로 관리 할 경우, 출력의 확률분포

Fig. 6. Distribution of outputs at each design variable tolerance of $x_4, x_6:5(\%)$ and $x_8:1(\%)$

이와 같이 특성에 민감한 특정 변수에만 엄격하게 공차를 부여하더라도 모든 설계변수에 엄격한 공차를 부여한 효과를 낼 수 있으며 아울러 생산측면에 있어서 노력과 비용을 절감할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 논문에서는 전기적인 관점에서 BLDC 전동기의 토크특성을 예로 들어, SRSMS를 이용하여 설계변수의 공차분석을 수행하였다. 전기기기의 생산 공정에 있어서 여러 가지 원인에 의해서 설계변수에 변동이 발생하고 또한 이것은 기기의 특성 및 성능에 영향을 준다. 따라서 BLDC 전동기뿐만 아니라 모든 전기기기를 생산함에 있어서 설계변수에 대한 공차관리는 필요하다. 설계단계에서 효과적으로 설계변수에 대한 공차범위를 제시해 줄 수 있다면 생산되는 전기기기의 성능에 대한 강건 성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Young-Kyoun Kim et al, "Torque Characteristics Analysis Considering the Tolerance of Electric Machine by Stochastic Response Surface Method ", *Proceeding of IAS' 2002*, pp.752-758, October 2002
- [2] R. G. Ghanem and P. D. Spanos, *Stochastic Finite Elements: A Spectral Approach*, Springer-Verlag, New York, 1991.
- [3] C. M. Creveling, *TOLERANCE DESIGN A HANDBOOK FOR DEVELOPING OPTIMAL SPECIFICATIONS*, Addison-Wesley, 1995.
- [4] M. S. Phadke, *QUALITY ENGINEERING USING ROBUST DESIGN*, Prentice hall, 1989.

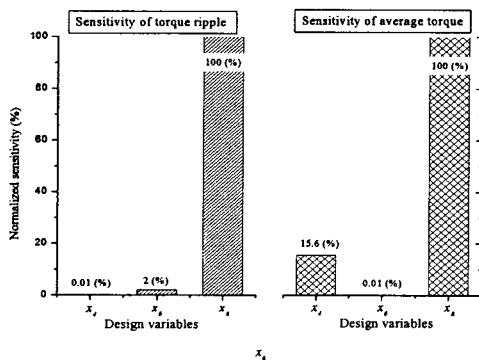


그림 5 각 설계변수의 민감도
Fig. 5. Sensitivities of each design variable