

차분진화 알고리즘을 이용한 IPM형 BLDC전동기의 Notch 형상 최적화 설계 연구

An Optimal Design of Notch Shape of IPM BLDC Motor Using the Differential Evolution Strategy Algorithm

신 판 석[†] · 김 흥 욱^{*}
(Pan Seok Shin · Hong Uk Kim)

Abstract -In this paper, a cogging torque of IPM(Interior Permanent Magnet)-type BLDC motor is analyzed by FE program and the optimized notch on the rotor surface is designed to minimize the torque ripple. A differential evolution strategy algorithm and a response surface method are employed to optimize the rotor notch. In order to verify the proposed algorithm, an IPM BLDC motor is used, which is 50 kW, 8 poles, 48 slots and 1200 rpm at the rated speed. Its characteristics of the motor is calculated by FE program and 4 design variables are set on the rotor notch. The initial shape of the notch is like a non-symmetric half-elliptic and it is optimized by the developed algorithm. The cogging torque of the final model is reduced to 1.5[N·m] from 5.2[N·m] of the initial, which is about 71 % reduction. Consequently, the proposed algorithm for the cogging torque reduction of IPM-type BLDC motor using the rotor notch design seems to be very useful to a mechanical design for reducing noise and vibration.,

Key Words : BLDC motor, Notch design, Cogging torque, Differential evolution strategy, IPMSM, Optimization technique

1. 서 론

최근 전기 자동차는 안락함과 편의성을 위하여 전기자동차용 추진전동기의 진동 및 소음에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 전기자동차에 사용되는 추진용 BLDC 전동기는 브러쉬에 의한 소음이나 마모에 의한 유지, 보수가 필요 없고 내부 구조가 간단하고 저속이나 고속에서 높은 토크로 운전이 가능하며 효율과 역률이 좋은 장점이 있으므로 최근에는 IPM형 BLDC 전동기를 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

전동기의 진동 및 소음의 원인은 그림 1에 표시된 바와 같이 크게 4가지로 분류 할 수 있다. 첫째, 전동기의 외부나 내부를 통해서 흐르는 공기의 흐름에 의해 발생하는 공기역학적 원인이 있다. 둘째 베어링 등 기계적인 결함들이 원인이 있다. 셋째, 회전자와 고정자 사이가 불균형을 이룰 때 발생하고, 넷째로는 전자기적 원인으로 구분할 수 있다. 이중 진동의 전자기적인 원인은 코깅토크(Cogging Torque), 토크리플(Torque Ripple), 전자기적 인력변동성분(Excitation Force)의 3가지로 구분 할 수 있다 [1-3].

본 논문에서는 전동기의 전자기적인 원인중의 하나인 코깅토크에 대해서 다루고 있으며, 전동기의 전자기적 특성을 해석하고 회전자 표면에 최적화 기법을 이용하여 회전자 노치(notch)를 설계하여 코깅토크를 저감하는 연구를 하였다. 또한, 전자기 가진력 밀도와 진동 mode해석을 통해 전동기의 해석 및 설계에 기여할 수 있는 기본 자료를 제공하게 된다[4-7].

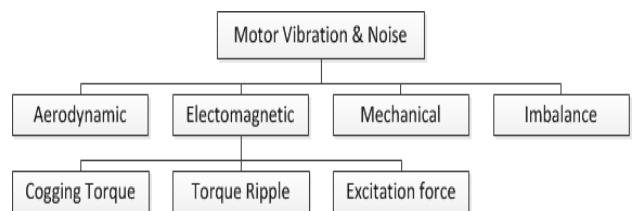


그림 1 IPM형 BLDC전동기의 진동 및 소음의 원인

Fig. 1 Sources of vibration and noise from IPM BLDC motor

2. 본 론

2.1 해석 모델

표 1은 본 연구의 해석에 사용된 BLDC 전동기의 모델 제원을 나타낸 것이다. 이 전동기는 50kW의 용량으로, 주요사양은 속도 1200~1500rpm, 정격전압 500V, 3상, 8극, 고정자 slot은 48개 이

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hongik University, Korea

E-mail : psshin@hongik.ac.kr

^{*} Dept. of Electrical Engineering, Hongik University, Korea
Received : December 24, 2014; Accepted : January 6, 2016

다. 전류는 운전에 따라 큰 차이를 가지고 있으며, 해석 시 정격 전류 값을 200A를 사용하였다.

그림 2는 해석에 사용한 BLDC전동기의 단면도이다. 회전자 영구자석의 각 극은 두 개의 편으로 구성되어 있으며 그림과 같이 둔각을 형성하고 있다. 영구자석의 재질은 NdFeB 이며, 크기는 가로 27[mm] 세로 5[mm]이고 고정자의 재질은 M270-35[A]로 전체외경은 245[mm]이다. 권선방법은 전 절권 형태(slot1- slot7, slot2-slot8, ...)로서 그림 3과 같이 권선하였다

표 1 IPM형 BLDC 전동기의 사양

Table 1 Specifications of IPM type BLDC motor

용량[kW]	50	상수/극수	3상 8극
정격속도[rpm]	1,200	슬롯수	48
최고속도[rpm]	6,000	영구자석종류	NdFeB
정격전압[V]	500	정격전류	≤ 200

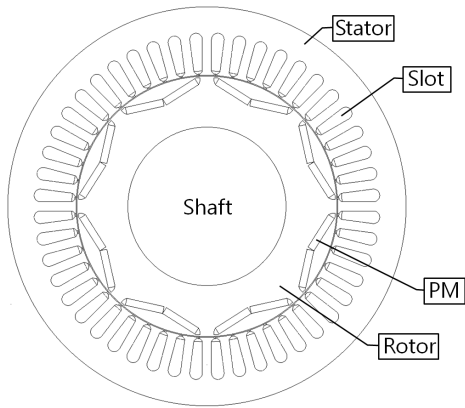


그림 2 IPM형 BLDC 전동기 모델의 단면도

Fig. 2 A cross_section of the IPM-type BLDC motor

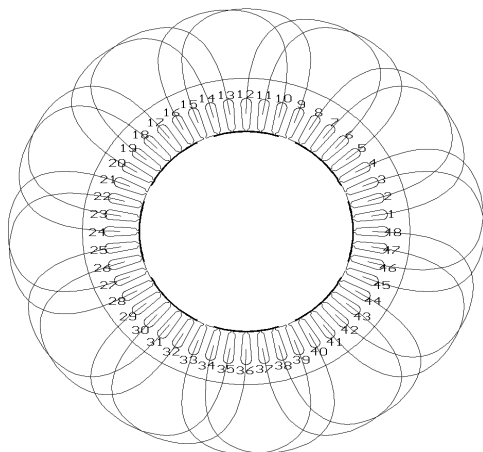


그림 3 해석모델 전동기의 권선배치 형태

Fig. 3 A winding configuration of the analyzing motor model

2.2 코깅 토크

코깅 토크는 영구자석이 부착된 회전자에 의하여 공극 중에 비교적 저차의 고조파 자속밀도와 회전자 철심 슬롯의 상호작용에 의해 발생하는 것으로 공극의 자계에너지를 위치함수로 미분하여 토크를 계산할 수 있다(가상변위의 원리). 또한, 자계에너지는 일반적으로 잘 알려진 자계에너지 밀도식을 이용하여 계산할 수 있다. 또한, 이 식은 공극 MMF 함수 $F_m(\theta)$ 과 공극퍼미언스 함수 $P(\theta)$ 로부터 식 (1)의 우측식과 같이 나타낼 수 있으며, 회전자의 위치에 대해서 미분을 하면(식 (2)) 토크를 계산할 수 있다[3, 4].

$$W(\theta) \simeq W(\theta)_{airgap} = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B^2 dV \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2\mu_0} \int_V [P(\theta) \cdot F_m(\theta, a)]^2 dV$$

$$T(\theta) = - \frac{\partial W(\theta)_{airgap}}{\partial \theta} \quad (2)$$

여기서 μ_0 는 공기의 투자율, B 는 평균자속밀도, V 는 공극의 부피를 각각 나타낸다.

코깅토크는 전동기의 진동과 소음의 원인이므로 본 논문에서는 코깅토크의 저감에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 코깅 토크는 외부회로를 연결하지 않고, 무부하 상태에서 정속회전(1200[rpm])할 때의 한 극에 걸리는 토크를 계산함으로써 확인할 수 있다. 그림 4는 기본모델의 한 자극피치(pole pitch)에서 나타나는 코깅토크 특성곡선이며 최대치는 5.2[N·m]이다.

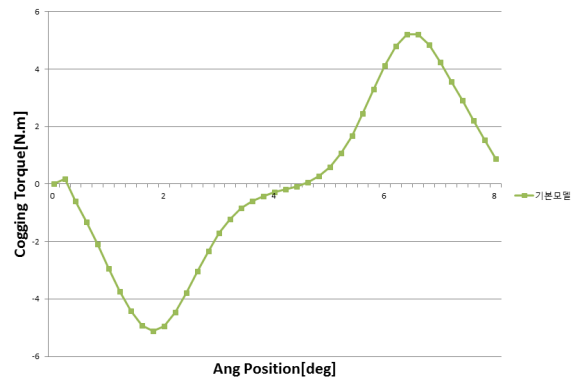


그림 4 기본모델의 코깅토크

Fig. 4 Cogging torque of the basic initial model

2.3 최적화이론 - 차분진화 알고리즘

차분진화 알고리즘(Differential evolution algorithm)은 기준 설계점을 벡터로 표현하고 두 벡터의 가중차분(weighted difference)에 임의의 세 번째 벡터를 더하여 새로운 설계점을 생성하는 과정을 반복적으로 수행함으로써 해를 탐색하는 전역최적화 알고리즘이다. 이러한 차분진화 알고리즘은 생물학적 유전 원리인 교배,

변이, 선택과정을 통해 우수한 개체들로의 진화를 모사한 유전 알고리즘과 비슷하지만 설계점들을 이진수로 인코딩(encoding)하는 과정이 없고 최적화 과정에서의 파라미터 수가 적다는 차이점이 있다. 또한 유전 알고리즘의 단점이었던 너무 복잡한 구조와 연산 대신 간단하고 합리적인 구조와 빠른 탐색 속도가 장점이다 [5, 8].

차분진화 알고리즘에서는 초기 개체군을 이루는 모든 개체들을 벡터로 표현하는데, 이들을 파라미터 벡터라고 표현한다. 집단 크기는 진화 과정에서 변하지 않는다.

$$v_{jG} \in R^D \quad (j=1, 2, \dots, N_p) \quad (3)$$

여기서 N_p 는 파라미터 벡터의 개수이고, 이 값은 최적화 과정에서 일정하며, 설계자가 문제에 따라 정의할 수 있는 샘플링 개수이다. G 는 파라미터 벡터가 몇 번째 세대인가를 표현하며 알고리즘에서는 최적화 횟수(Generation)를 의미한다. 파라미터 벡터의 차원은 목적함수를 이루는 설계변수의 개수 D 와 같으며, 초기 파라미터는 벡터 가용 영역에서 임의로 선택하되, 일반적으로 균등 확률 분포를 따르도록 한다.

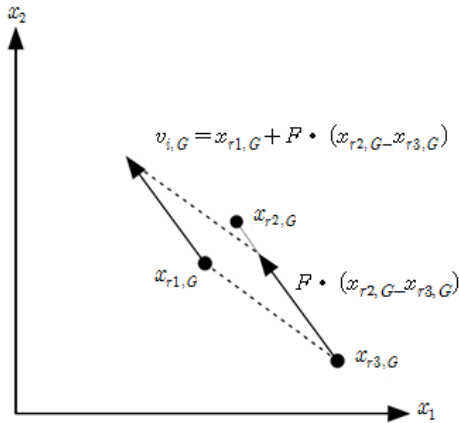


그림 5 선택된 각 개체의 벡터도

Fig. 5 Vector diagram of the selected sampling point

차분 진화는 두 개의 개체 벡터의 차이에 가중치를 곱한 것을 세 번째 개체 벡터에 더해서 교배용 벡터를 발생한다. 발생된 교배 벡터와 교배 대상 벡터가 교배 되어 새로운 벡터가 얻어진다. 이 새로운 벡터의 목적 함수 값이 교배 대상 벡터의 것 보다 좋으면 이 벡터로 교배 대상 벡터를 대체한다. 이는 유전자 알고리즘에서 사용되는 엘리트 전략과 유사한 효과를 거둘 수 있다[8].

집단에서 선택된 벡터의 거리와 방향 정보를 사용하여 벡터를 임의로 변화시키는 것이 차분 진화로 하여금 뛰어난 수렴 성능을 갖도록 해준다.

그림 5는 선택된 각 개체의 벡터 도를 나타내는 것이다. 교배용 벡터는 벡터 $x_{i,G}$ ($i=1, 2, \dots, Popsiz$) 집단에서 랜덤하게 선택된 서로 다른 3개의 벡터로부터 식 (4)와 같이 만든다.

$$v_{i,G+1} = x_{r1,G} + F \cdot (x_{r2,G} - x_{r3,G}) \quad (4)$$

여기서 r_1, r_2, r_3 은 $[0, Popsiz-1]$ 범위의 서로 다른 정수이고, $0 \leq F \leq 2$, $i \neq r_1, r_2, r_3$ 이다. F 는 선택된 교배 대상 벡터들의 차이 $(x_{r2,G} - x_{r3,G})$ 를 제어하는 파라미터로 0과 2사이의 값을 갖는다. $v_{i,G+1}$ 을 발생하기 위해 선택된 벡터 $x_{r1,G}$ 는 $v_{i,G}$ 와 관련이 없는 집단에서 랜덤하게 선택된 개체이다.

차분 변화를 통해 얻어질 벡터는 위 식의 교배용 벡터와 교배 대상 벡터인 $x_{i,G}$ 를 교배하여 만들어진 것이다.

생성된 벡터의 다양성을 증가시키기 위해 주로 균일 교배과정을 식 (5)와 같이 이루어진다.

$$x'_{i,G+1} = (x_{1i,G+1}, x_{2i,G+1}, \dots, x_{di,G+1}) \quad (5)$$

$$x'_{ji,G+1} = (x_{ji,G+1} * x_{ji,G}) \quad j=1, \dots, d \quad (6)$$

여기서 *는 교배 연산자로 균일 교배가 주로 사용된다. 균일 교배는 식 (7)과 같다.

$$x'_{ji,G+1} = \begin{cases} v_{ji,G+1}, & \text{if } rand \leq C_r \\ x_{ji,G}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, $rand$ 는 0과 1사이의 랜덤 변수이고, C_r 은 교배율이다. 교배 후 만들어진 개체의 생존 여부는 $x'_{i,G+1}$ 과 $x_{i,G}$ 의 성능 비교를 통해 이루어진다.

이러한 과정은 설계자가 정해준 세대 횟수만큼 반복하며, 결국 목적 함수 값이 작은 파라미터 벡터들로 구성된 개체군이 만들어진다. 이 벡터 중 가장 작은 목적 함수 값이 전역해가 된다.

그림 6은 전체적인 차분진화 알고리즘의 순서도를 보인다[5]. 전체해석 공간에서 목적함수, 집단크기, 돌연변이 인자, 교차변이 인자 등을 정의하여 임의로 각 개체를 초기화시키고, 집단내의 모든 목적함수를 평가한다. 돌연변이에 의한 시험벡터를 생성하여 목적함수를 계산하고 그 결과를 비교하여 미리 정해진 오차범위 안에 들어올 때까지 차분진화 과정을 계속하게 된다.

2.4 회전자 notch 형상 최적화

2.4.1. 회전자 notch 모델과 설계 변수

IPM형 BLDC 전동기의 코깅토크를 저감시키기 위하여 회전자 표면에 그림 7과 같은 반타원형 모양의 노치(notch)를 설계하여 제작을 하며, 노치의 크기와 형상에 따라서 공극의 자속밀도분포가 상이해지고 코깅토크 특성이 달라지게 되므로 노치형상의 최적설계가 필요하게 된다. 그림 8은 연구모델인 IPM 전동기의 단면(그림 2) 중에서 8개의 극이 경계조건에 의해서 반복되므로, 1극만을 해석하기 위해서 선택한 FEM 해석모델로서, 반타원형 노치를 최적설계하기 위하여 4개의 설계변수를 선정하여 그림에 나타낸 것이다. 그림 8과 같이 노치의 설계변수는 노치와 노치사이의 아치각(θ_n), 노치의 원호각(α_n), 노치의 길이(l_n), notch의 깊

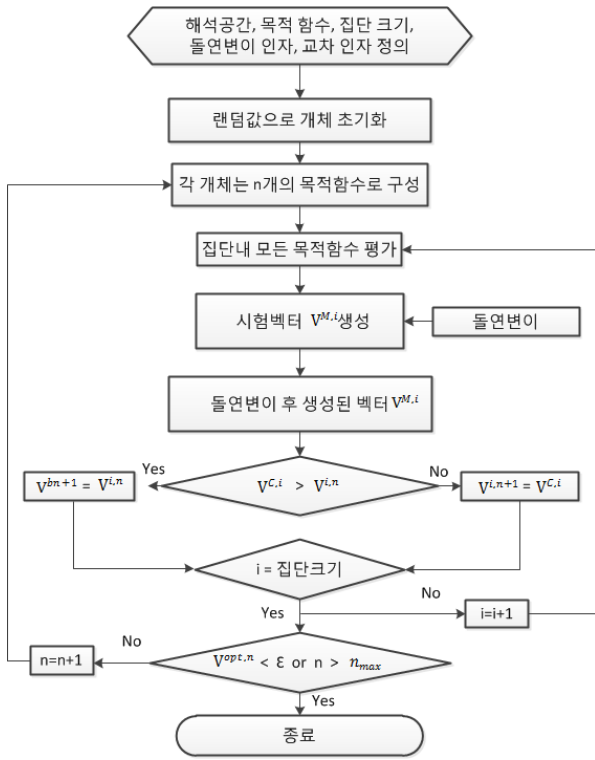


그림 6 차분진화 알고리즘의 순서도
 Fig. 6 Flow chart of the differential evolution strategy algorithm

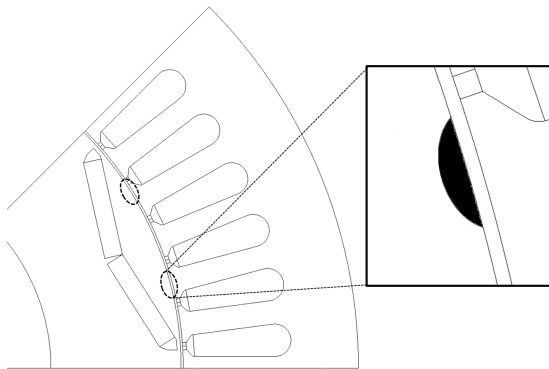


그림 7 회전자 표면에 설계된 반 타원형의 Notch형상
 Fig. 7 A half elliptical notch shape on the rotor surface

이(d_n)로 설정하였다. 해석모델의 기본적인 특성을 분석하기 위하여 회전자 표면에 노치가 없는 경우와 반타원형 노치가 있는 경우의 자계를 해석하였다. 그림 9는 회전자 표면에 노치가 없는 기본모델과 노치가 있는 경우의 코깅토크의 변화를 보여주는 그래프이다. 기본모델의 코깅토크 최대치는 5.22[N·m]이며, 반타원형 노치가 설치된 모델의 코깅토크 최대치는 3.89[N·m]로서 코깅토크의 최대값이 약 25% 감소하였다.

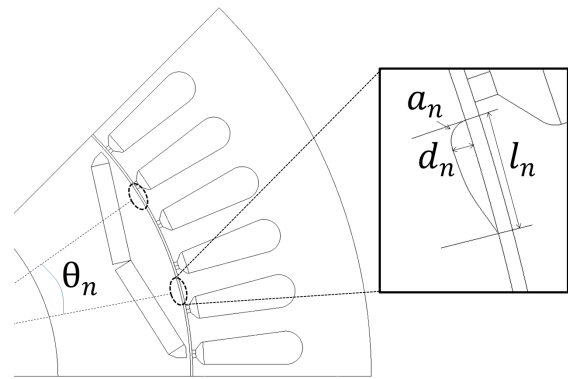


그림 8 FEM 해석모델과 최적설계를 위한 설계변수
 Fig. 8 FE Analyzing model and design variable for optimization design

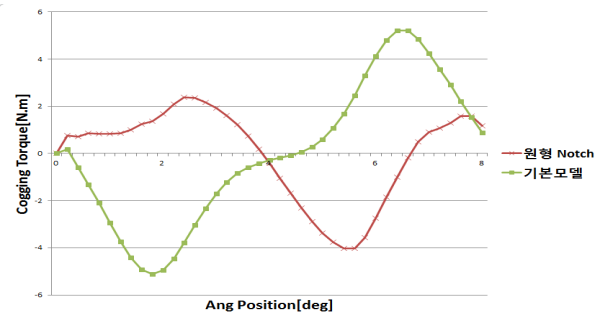
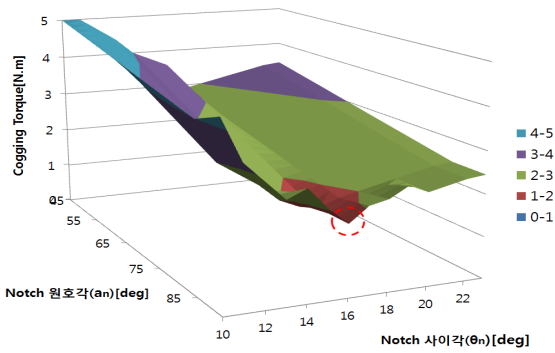


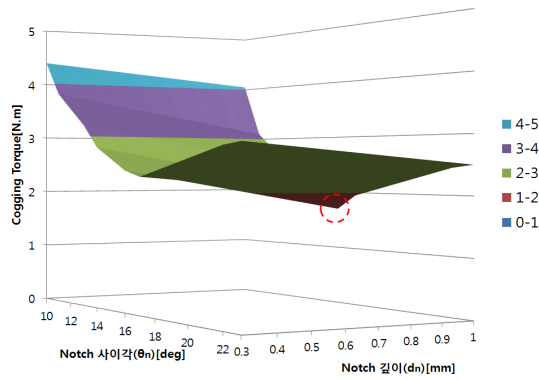
그림 9 기본모델과 반원형 Notch설치모델의 코깅토크
 Fig. 9 Cogging torque of the initial and the half-elliptical notch model

2.4.2 설계변수 변화에 따른 코깅토크 변화

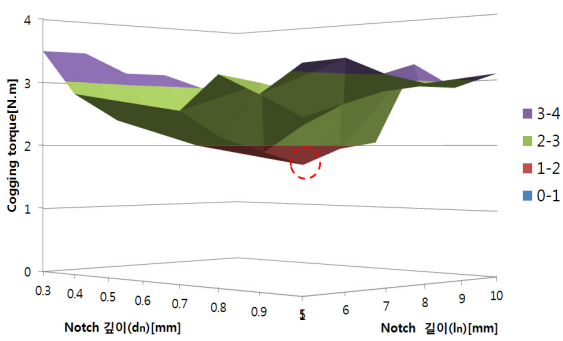
회전자 노치의 최적설계를 위하여 그림 8과 같이 notch에 대한 4개의 설계변수(노치 사이각(θ_n), 노치의 원호각(a_n), 노치의 길이(l_n), notch의 깊이(d_n))를 각각 변화시키면서 코깅토크를 계산하고 최적화 알고리즘에 따라서 최적점을 찾게 된다. 세 개의 설계변수를 고정시킨 후 하나의 변수만을 변화시켜 코깅토크의 최적점을 도출하는 경우에는 나머지 변수들의 변화에 따라 최적점이 아닐 수 있으므로, 최소한 두 개의 설계변수를 고정시킨 후 나머지 두 개의 변화에 따른 코깅토크를 해석함으로써 최적화 설계변수의 범위를 최소화 할 수 있게 된다. 그림 10(a)는 $d_n=0.6$ [mm], $l_n=8$ [mm]로 고정시켰을 때 a_n , θ_n 변화에 따른 코깅토크의 변화를 본 것이며, 그림 10(b)는 $a_n=90^\circ$, $l_n=8$ [mm]로 고정시켰을 때 θ_n , d_n 변화에 따른 코깅토크의 변화를 나타낸 것이다. 그리고, 그림 10(c)는 θ_n , a_n 을 각각 고정시켰을 때 d_n 과 l_n 의 변화에 따른 코깅토크를 계산한 것이다. 이와 같이 설계변수를 변화시키면서 최적점을 찾는 여러 가지 방법이 있을 수 있으나, 본 연구에서는 4개의 설계변수(l_n , a_n , d_n , θ_n)을 각각 변화시키면서 차분진화 알고리즘을 이용하여 최적점을 찾아서 설계하



(a) d_n, l_n 을 고정, a_n, θ_n 변화에 따른 코깅토크



(b) a_n, l_n 을 고정, θ_n, d_n 변화에 따른 코깅토크



(c) θ_n, a_n 을 고정, d_n, l_n 변화에 따른 코깅토크

그림 10 변수변화에 따른 코깅토크 변화

Fig 10 Cogging torque profiles as function of design variables

게 된다.

2.4.3 노치(Notch)형상과 최적화 해석결과

IPM 전동기의 코깅토크를 저감시키기 위해 회전자 표면에 4개의 변수를 가지는 노치를 설계하고 이를 차분진화 알고리즘을 이용하여 최적화 하였다. 최적화한 결과, 노치 사이각 $\theta_n = 15.75^\circ$,

노치의 원호각 $a_n = 85^\circ$, 노치의 길이 $l_n \cong 7.65$ [mm], 노치깊이 $d_n = 0.6$ [mm]일 때 코깅토크가 최소화 되며 노치의 형상은 원호를 이용한 비대칭형이 된다.(그림 11 참조)

그림 12의 그래프는 기본모델과 동일 위치에 반원형으로 노치를 설계한 모델 및 최적화한 비대칭 노치모델의 3 가지에 대한 코깅토크를 비교한 것이다. 각각의 코깅토크의 최대치는 기본모델 5.2 [N.m], 반원형 노치는 2.3 [N.m], 최적화 모델은 1.5 [N.m]이다. 표 2에 나타난 바와 같이 동일한 위치에 노치를 설계하여도 노치의 형상에 따라 다른 감소율을 보임을 알 수 있으며, 코깅토크가 감소함에 따라 토크 또한 감소함을 알 수 있다. 그림 13은 각각의 토크를 비교한 것으로 최대치가 각각 447.6 [N.m], 437.6 [N.m], 439.0 [N.m]로 최적화 모델이 초기모델에 비하여 1.8% 감소함을 알 수 있다. 이것은 노치로 인하여 공극자속밀도가 약간 감소하기 때문인 것으로 분석되었다. 표 2는 각각 모델의 코깅토크의 최대치를 기술하고 초기모델과의 비교한 감소율을, 표 3은 각 모델의 토크최대치와 초기모델에 대한 토크의 감소율을 나타낸 것이다.

공극의 전자력은 전동기의 가진력으로 작용하며 소음과 진동의 원인이 되며, 슬롯과 치(teeth)에서 발생된 코깅토크와 전자력에 의한 진동해석과 이를 최소화하는 여러 가지 연구들이 수행되었다[7-9].

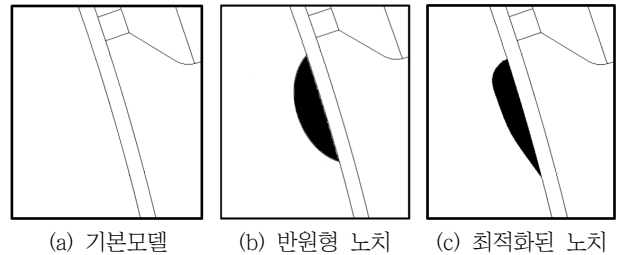


그림 11 각 모델의 노치형상 비교

Fig. 11 Notch shape of the proposed model

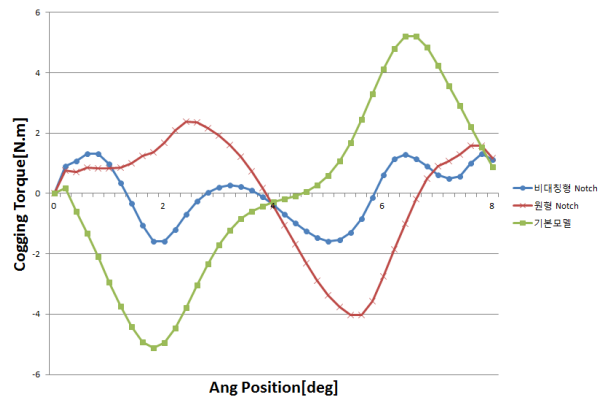


그림 12 기본 모델과 최적화 모델과의 코깅토크 비교

Fig. 12 Comparison of cogging torque between the basic model and the optimized

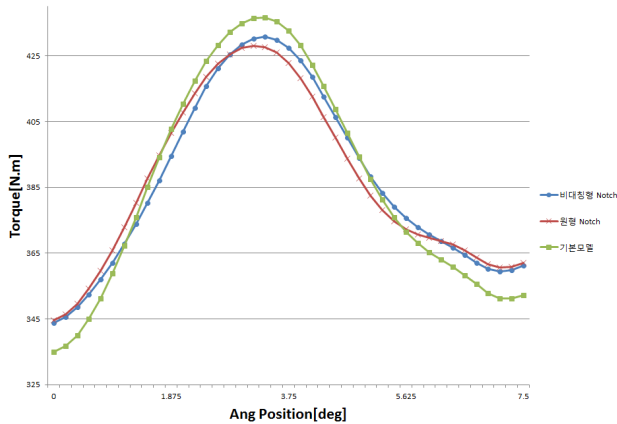


그림 13 기본 모델과 최적화 모델과의 Torque
 Fig. 13 Torques of the initial and optimized model

표 2 각 모델의 코깅토크 비교

Table 2 Comparison of the maximum cogging torque between the basic and the optimized model

모델 구분	코깅토크 최대치 [N·m]	감소율 [%]
기본모델	5.20	0
원형 Notch	2.33	55.2
최적화 모델	1.51	71.0

표 3 각 모델의 최대 Torque 비교

Table 3 Comparison of the maximum torque between the basic and the optimized model

모델 구분	Torque 최대치 [N·m]	감소율 [%]
기본모델	447.62	0
원형 Notch	437.63	2.23
최적화 모델	439.07	1.79

3. 결 론

IPM전동기의 진동발생의 전자기적 원인으로서는 코깅토크, 토크리플 및 전자기적 인력 변동 성분 등이 있다. 본 논문에서는 전자기적 원인에 주목하여 전동기의 코깅토크를 최소화하기 위하여 회전자에 4개의 변수를 가진 비대칭형 반타원형 형상을 가지는 노치를 설계하고 차분진화 알고리즘을 이용해 최적형상을 도출하고 특성을 분석하였다. 차분진화 알고리즘은 두 벡터의 가장 차분에 임의의 벡터를 합하여 새로운 설계점을 생성하는 방법으로 최적점을 찾는 알고리즘이다. 설계검증 모델로 50 kW, 8극/48slot IPM전동기를 선택하였으며, 회전자표면에 설계된 노치는 4개의 설계변수, 즉 노치 사이각(θ_n), 노치의 원호각(α_n), 노치의 길이(l_n), 노치의 깊이(d_n)로서 정의되었으며, 최적화 결과 최적점

은 각각 $\theta_n = 15.75^\circ$, $\alpha_n = 85^\circ$, $l_n \cong 7.65[\text{mm}]$, 깊이 $d_n = 0.6[\text{mm}]$ 이다. 전동기의 특성해석 결과, 코깅토크는 5.2[N·m]에서 1.51[N·m]로 71[%] 감소하여 상당히 의미 있는 설계가 된 것으로 사료된다. 이때 노치로 인한 전체 최대토크는 약 1.8% 감소하였으나 IPM전동기 전체의 운전특성에는 어떤 영향을 미치는 것은 아니며, 코깅토크의 저감으로 진동과 소음이 크게 저감될 것으로 예상된다. 본 연구에서 제시한 최적화 기법과 적용방법에 대한 것은 IPM형 정밀전동기 설계에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 미래창조과학부의 재원으로 과학벨트기능지구지원사업의 지원(2015K000468)과 홍익대학교 학술연구진흥비에 의해서 지원된 연구임

References

- [1] Hee-Jun Chung, "A Vibration Analysis for Large Scale BLDC Motor by Electromagnetic Exciting Force", Master's thesis of Hongik University, 2008.
- [2] Han-deul Kim, Chul Kim, Pan Seok Shin, et. al., "A Magnetic Exciting Force Analysis of the Large Scale BLDC Motor", Proceedings of the KIEE EMECS Autumn Annual Conference 2005, pp. 83-85, 2005.
- [3] Ho Youn Kim, "A Study on the Minimization of Torque Ripple for EV IPMSM using Rotor Notch", Master's thesis of Hongik University, 2012.
- [4] P. S. Shin, S. H. Woo, C. S. Koh, "An Optimal Design of Large Scale Permanent Magnet Pole Shape Using Adaptive Response Surface Method With Latin Hypercube Sampling Strategy", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, no.3, pp. 1214-1217, March 2009.
- [5] Seok Bum Noh, et. al., "The Optimization of Fuzzy Prototype Classifier by using Differential Evolutionary Algorithm", Proceedings of KIIS Fall Conference 2013, Vol. 23, No. 2. pp. 187-188.
- [6] Tae Seok Chung, et. al., "The Design of Radial Magnetic Force Equilibrium for Reduction of Vibration and Noise in IPM Type BLDC Motor", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 62, No. 11, pp. 1535-1540, 2013.
- [7] Gyu-Won Cho, and et. al., "The Optimization of Rotor Shape for Constant Torque Improvement and Radial Magnetic Force Minimization", The Transactions of KIEE, vol. 61, pp. 64-69, 2012.

- [8] Nyambayar Baatar, "Modified Differential Evolution Algorithm for Single and Multiobjective Optimization Problems.", Doctoral Thesis, Chungbuk National University, pp. 44-86, 2014.

저 자 소 개



신 판 석 (Pan Seok Shin)

1977. 3. 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989. 12. (미) Rensselaer Polytechnic Institute 졸업(Ph.D.). 1981. 1~1993. 2 한국전기연구원. 1993. 3~현재 홍익대학교 전자·전기공학과 교수



김 흥 욱 (Hong Uk Kim)

2013. 2. 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2015. 2. 홍익대학교 대학원 전기공학과 졸업. 2015. 4~현재 (주)유라테크 연구원