

Parametric Design을 이용한 BLDC 전동기의 설계

권순오, 이석희, 김성일, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Design of BLDC motor using Parametric design

Soon-O Kwon, Seok-Hee Lee, Sung-Il Kim, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper presents the design of Brushless DC (BLDC) motor using parametric design. According to the variation of magnitude of back emf and inductance, characteristic equations of BLDC motor are solved then output power, current, and torque ripples are calculated. Therefore output characteristics of BLDC motor according to motor parameter can be easily understood, and the range of back emf and inductance satisfying required output performance can be easily found. Presented design method leads to the BLDC motor design to be simple and effective, and the optimal design of BLDC motor using parametric design for 3kW with 5000rpm is presented.

1. 서 론

역기전력과 인덕턴스는 전동기의 출력 및 특성을 나타내는 가장 중요한 파라미터이다. 따라서 전동기의 설계에서 적절한 역기전력과 인덕턴스의 선택은 전동기 설계에서 가장 중요한 비중을 차지한다. 부적절한 역기전력과 인덕턴스의 선택은 출력 불만족뿐만 아니라 출력을 만족시키기 위해 반복적인 파라미터 변경과 이에 따른 초기 설계, 특성 해석을 수반하므로 전동기 설계를 비효율적으로 만든다.

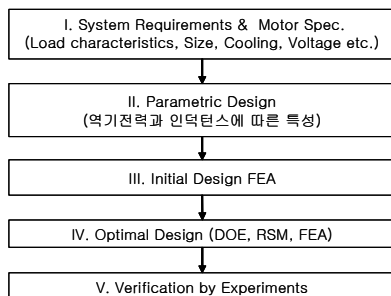
본 논문에서 Parametric design은 전압 방정식을 역기전력과 인덕턴스 변화에 따른 특성을 맵의 형태로 나타내었다. 따라서 역기전력과 인덕턴스 변화에 따른 전동기 특성 분석이 용이하며 요구되는 출력을 만족시키는 파라미터를 효과적으로 결정 할 수 있다. 역기전력과 인덕턴스의 범위가 결정되면 이를 만족하는 초기 형상 설계 및 최적 설계가 진행된다.

2. 본 론

2.1 전동기의 설계 프로세스

그림 1에 본 논문에서 적용된 BLDC 전동기의 설계 프로세스를 나타내었다. 시스템 요구 사양을 만족시키는 파라미터를 얻기 위해 두 번째 단계에서 역기전력과 인덕턴스 변화에 따른 전압 방정식을 계산하여 맵의 형태로 표현함으로써 파라미터 변화에 따른 출력 특성을 쉽게 이해할 수 있다. 또한 목표 특성을 만족시키는 역기전력과 인덕턴스의 범위를 쉽게 확인할 수 있다. 세 번째 단계에서는 두 번째 단계에서 결정된 파라미터를 갖는 초기 형상 설계를 진행한다. 역기전력과 인덕턴스의 산정은 Finite Element Analysis(FEA)를 사용하여 운전 조건에 따른 제질의 비선형적인 자기적 특성을 고려하였다.

최적 설계단계에서는 출력을 만족시키면서 코깅 토크와 토크 리플을 저감 할 수 있는 회전자 형상 치수의 최적 설계를 Design of Experiments(DOE)와 Response Surface Methodology(RSM)를 이용하여 진행하였다.



〈그림 1〉 설계 프로세스

2.2 BLDC 전동기의 Parametric Design

2.2.1 전압 방정식

Y 결선의 BLDC 전동기의 전압 방정식과 공극에서의 순시 토크는 각각 (1), (2)와 같다[1]. (1)의 전압 방정식에서 인덕턴스와 역기전력에 따라 전류가 계산되고 (2)로부터 순시 출력 토크가 결정된다. Parametric design은 인덕턴스와 역기전력 변화에 따라 (1)의 전압 방정식을 계산하여 이때의 출력, 전류, 토크 리플 등을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 R 는 1상 권선 저항, L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} 는 각 상의 자기 인덕턴스, M_{ab} , M_{ac} , M_{bc} 는 상호 인덕턴스를 나타낸다.

$$T = \frac{1}{\omega} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2)$$

2.2.2 역기전력 고조파의 고려

BLDC 전동기의 상 역기전력은 이상적으로 120°의 flat top 구간을 갖지만 실제 그러한 역기전력 파형을 갖는 전동기를 설계하기는 쉽지 않다. 따라서 parametric design 단계에서 실제적인 역기전력의 고조파를 고려하여 출력 특성을 확인함으로써 역기전력 및 인덕턴스를 만족하는 초기 모델의 설계에 시행착오를 줄일 수 있다. 역기전력의 고조파는 설계대상 모델의 극수와 슬롯 수를 갖는 대략적인 모델의 역기전력 파형을 고조파 분석하여 각 고조파의 크기를 기본파에 대한 비율로 나타낸다. 따라서 역기전력의 THD는 일정하게 유지하는 상태에서 역기전력의 크기를 변화 시킬 수 있다.

$$e_a = k \cdot V_{DC} \cdot \left(\frac{e^{1st}}{e^{1st}} \sin \omega t + \frac{e^{3rd}}{e^{1st}} \sin 3\omega t + \frac{e^{5th}}{e^{1st}} \sin 5\omega t \dots \right) \quad (3)$$

여기서 k 는 DC link 전압에 대한 상역기전력의 비율, V_{DC} 는 DC link 전압, e^{1st} , e^{3rd} , e^{5th} 는 각각 1차, 3차, 5차고조파를 나타낸다.

2.3 역기전력과 인덕턴스에 따른 출력 특성

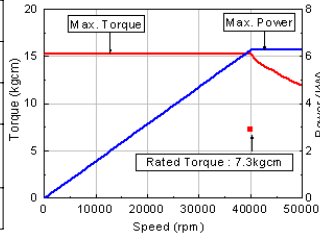
식 (1) ~ (3)을 이용하여 다음과 같은 조건하에 역기전력과 인덕턴스의 변화에 따른 전동기 특성 계산을 수행한다.

- 상 역기전력변화는 DC-link 전압에 대한 비율로 나타낸다.
- 자기 인덕턴스 변화 범위는 초기에는 가능한 넓게 설정하고 출력 확보 영역이 대략적으로 확인되면 범위를 축소하여 특성을 확인한다.
- 상호 인덕턴스는 자기 인덕턴스의 -1/2 이다.
- 역기전력 크기에 따른 THD는 일정하다.
- 철손과 기계손은 고려하지 않는다.

BLDC 전동기의 parametric design을 5000rpm, 6.3kW급 초고속 전동기 설계에 적용하였다. 설계 대상 전동기의 주요 사양은 표 1과 같고 출력 특성은 그림 2와 같다. 대상 전동기는 매입형 연구자석 타입으로 최종 형상은 그림 7과 같다.

〈표 1〉 설계 전동기의 주요 사양

DC link 전압	290
출력(최대/연속, kW)	6.3/3
최대/기저 속도(rpm)	50000/4000
출력 토크 (최대 / 연속, kgcm)	15.3/7.35
극수/슬롯수	4/24



〈그림 2〉 출력 특성

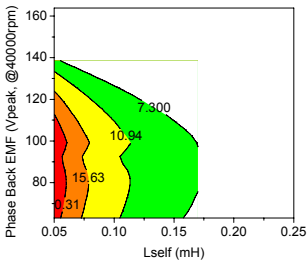
2.3.1 Parametric design

표 1의 사양으로부터 상역기전력은 DC link 전압의 25 ~ 65%, 자기 인덕턴스는 0.05 ~ 0.25mH 범위 내에서 각 파라미터 변화에 따른 4000rpm에서 최대 출력, 전류, 토크 리플을 그림 3 ~ 그림5에 나타내었다.

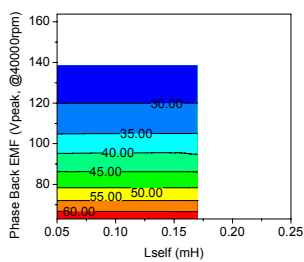
상역기전력은 4000rpm에서 DC link 전압의 25 ~ 65%인 63 ~ 164V 까지 나타내었다. 그림3에서 상역기전력이 143V 이상이면 인덕턴스 값에 관계없이 요구되는 출력인 7.3kW(손실 포함)를 만족 시킬 수 없음을 알 수 있다. 또한 인덕턴스가 커질수록 출력이 감소하는 양상을 나타낸다.

그림 4는 입력 전류 특성을 나타내며 역기전력에 반비례한다. 그림 5는 토크 리플을 나타낸다. BLDC 전동기의 토크 리플은 역기전력 크기에 의존 하며 적절한 역기전력의 선택으로 저감 할 수 있음을 알 수 있다. 그림3 ~ 그림5의 결과로부터 상 역기전력은 4000rpm에서 105 ~ 115V, 자기 인덕턴스는 0.1~0.14mH영역을 목표 파라미터로 결정 하였다.

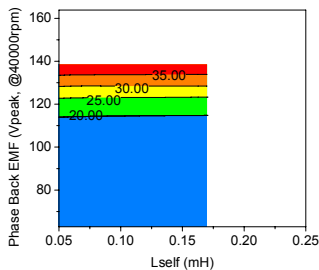
목표 파라미터가 결정되면 그 파라미터를 갖는 초기 형상 설계를 수행 하고 초기 형상에 대한 파라미터 산정은 FEA를 이용하여 재질의 비선형성을 고려하여 산정 하였다 [2].



〈그림 3〉 출력 특성



〈그림 4〉 입력 전류



〈그림 5〉 토크 리플

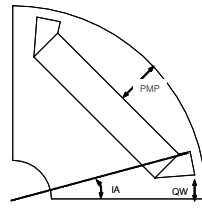
2.3.2 최적 설계

목표 파라미터를 갖는 초기 형상 설계 후 출력, 코깅 토크, 토크 리플을 목적 함수로 하여 DOE와 RSM을 이용한 최적 설계를 수행하였다. DOE를 위한 변수는 그림 6과 같고 RSM에서는 목적 함수에 영향이 적은 설계 변수 QA를 제외하였다. 각각의 경우 회전자 외경, 적층 길이, 영구자석 제적은 동일하게 유지 하였다. FEA를 이용하여 인덕턴스와 역기전력, 코깅 토크를 산정 하였고 산정된 파라미터를 이용하여 전압 방정식으로부터 출력 및 토크 리플, 전류 등을 계산 하였다.

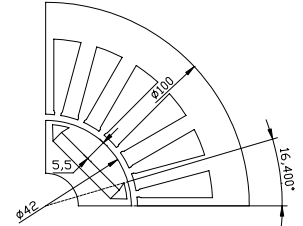
그림8은 RSM 결과로 설계변수인 IA와 PMP의 코깅 토크와 토크 리플을 나타낸다. 설계 변수의 전 범위 내에서 최대 출력을 만족 하며 IA가 16.4° PMP가 5.5mm 일 때 최소의 코깅 토크와 토크 리플을 갖는다.

그림 9는 4000rpm에서 손실을 포함한 출력 파워를 얻을 수 있는 토

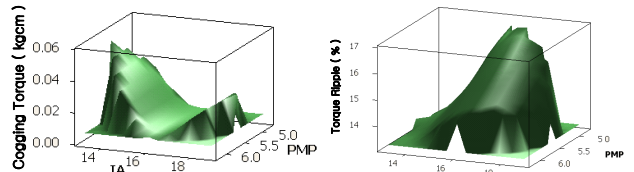
크와 전류 파형을 나타내었다. 토크 리플은 Parametric design 단계에서 확인한 결과와 유사하며 설계 변수의 범위 내에서는 토크 리플이 변수에 따라 13% ~ 17% 변화하므로 토크 리플 저감을 위한 형상 최적 설계는 커다란 효과를 얻지 못함을 알 수 있다.



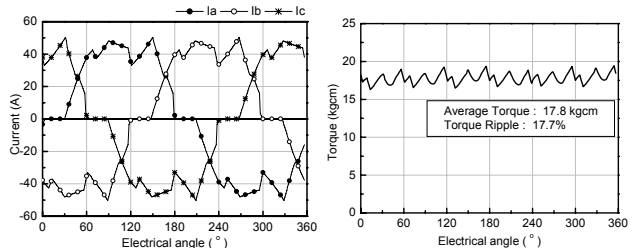
〈그림6〉 설계변수



〈그림7〉 최적 설계형상1/4 model



〈그림8〉 반응 표면



〈그림 9〉 출력 토크, 입력 전류 (4000rpm 7.3kW)

3. 결 론

인덕턴스와 역기전력 변화에 따른 BLDC 전동기의 출력, 전류, 토크 리플을 확인함으로써 파라미터의 각 특성에 대한 영향을 쉽고 빠르게 이해 할 수 있다. 또한 요구되는 출력을 만족 시키는 전동기 파라미터 영역을 결정하고 그 파라미터를 갖는 전동기 설계를 진행함으로써 BLDC 전동기의 설계를 빠르고 효과적으로 진행할 수 있다. 또한 역기전력의 고조파 성분을 고려하여 특성을 계산함으로써 설계의 효율성을 더욱 높일 수 있다.

BLDC 전동기의 토크 리플 저감을 위해 회전자 형상 치수를 변수로 하는 최적 설계를 수행 하였지만 토크 리플은 역기전력의 크기에 지배적인 영향을 받으며 회전자 형상 치수에는 상대적으로 적은 영향을 받았다. 설계된 전동기는 시험을 통해 설계결과를 검증할 계획이다.

[참 고 문 헌]

[1] J.R. HENDERSHOT Jr and TJE Miller, "DESIGN OF BRUSHLESS PERMANENT MAGNET MOTORS", MAGNA PHYSICS PUBLISHING AND CLARENDON PRESS, 1994.
 [2] Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Guen-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Jin Hur, "Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magn., vol. 42, no. 4, April 2006.