2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2007. 7. 18 - 20

동일 형상을 갖는 연료펌프용 BLDC 전동기의 승압/이송 조건에 따른 설계 및 특성 해석

장석명[1], 박지훈[1], 고경진[1], 최상호[2], 신진화[2]
충남대학교 전기공학과[1], (주)경주전장[2]

Design and characteristic analysis of BLDC motor using fuel-pump

Seok Myeong Jang[1], Ji Hoon Park[1], Kyung Jin Ko[1], Sang Ho Choi[2], Jin Hwa Shin[2]
Dept. of Electrical Engineering Chungnan National University[1], KAES[2]

Abstract - This paper deals with design and characteristic analysis of Brushless DC (BLDC) motor using fuel-pump. First, we derived design factor from simplified design characteristic equation. Second, we decided design parameter from design factor using finite element analysis (FEA). Finally, analyze characteristics for BLDC using FEA according to load condition.

1. 서 론

자동차, 기차, 비행기 등은 원거리로 인원과 화물을 운송하는 역할을 하며, 이것은 내부에 엔진을 장착하여 동작한다. 이러한 엔진을 구동시키기 위하여 다양한 기계 장치가 사용되며, 연료를 공급하는 장비로 기계식 연료펌프가 사용된다. 기계식 연료펌프는 캠축, 편심 캠에 의해 작동되며 연료탱크의 연료를 기화기로 송출하는 역할을 한다. 연료펌프의 동작으로는 연료 흡입과 연료 송출이 있으며 연료 흡입 과정은 캠축의 연료 캠에 의하여 연료펌프 로커 암을 밀어 올리면 다이어 프레임이 아래로 당겨지고 입구밸브가 열려 연료를 흡입하는 것이며, 연료 송출의 과정은 캠이 회전하여 로커 암이 원위치로 돌아가면 스프링 장력에 의하여 다이어 프레임이 위로 올라가면 출구밸브가 열려 연료를 송출하는 것이다. 이러한 기계식 연료펌프는 로커 암, 밸브, 캠 등의 기계적 장치로 구성되고, 마찰과 부식 등의 문제점과 소음, 진동 등의 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 연료펌프용 BLDC 전동기를 설계하고, 설계된 BLDC 전동기의 특성 해석을 다루고 있다. 연료펌프용 BLDC 전동기는 승압과 이송을 위한 것이며, 승압은 유입된 연료에 압력을 가함을 의미하며, 이송은 연료를 이동시킴을 의미한다. 연료펌프에 기계식이 아닌 전동기를 사용함으로 인해 연료펌프의 장치 면적을 줄일 수 있으며, 기계적 마찰에 의한 소음과 진동면에서 우수함을 예상할 수 있다.[1][2]

2. 연료펌프용 BLDC 전동기의 설계

2.1 설계 요구 사양

연료펌프용 BLDC 전동기의 설계 요구 사양은 표 1과 같다. 연료승압용 BLDC 전동기의 경우 출력은 120W이고, 회전속도는 7,000rpm이며, 연료이송용 BDLC 전동기의 경우 각각 80W, 5,000rpm이다.

2.2 요구 사양에 따른 BLDC 전동기의 설계

승압/이송용 BLDC의 장하비는 전 자속 및 전 암페어 도체수와의 비이며, 교류 m상기의 경우 식(1)로 주어진다.[3][4]

$$M = \frac{p\Phi_g}{mk_w wI} \tag{1}$$

평형 m상기의 전동기의 발생 토크는 식(2)와 (3)으로 주어진다.

$$\tau + \tau_0 = K_\tau I = (\frac{m}{2}) \cdot \sqrt{2}\, pk_w w\Phi_g I \tag{2}$$

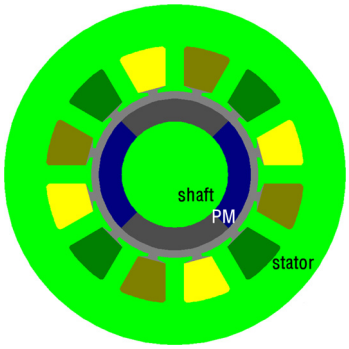
$$\tau + \tau_0 = \frac{p^2\Phi_g^2}{\sqrt{2}\, M} \tag{3}$$

여기서 τ는 정격 토크, τ_0는 무부하 토크, p는 극수, Φ_g는 자속이며, 1극의 자속 Φ_g에 대해 풀어 상수값을 계산하면 식(4)와 같다.

$$\Phi_g = \frac{3.72}{p}\sqrt{M(\tau+\tau_o)} \tag{4}$$

여기서 장하비 M은 직류전동기 경험값으로서 $M \geq 50\times10^{-8}$, 평균적인 값으로 $M = 60\times10^{-8}$을 취하였다.
전동기의 속도 토크 특성이 직선인 점으로부터 구속시의 토크를 구하면 식(5)와 같다.

$$\tau_s = \frac{\tau N_0}{N_0 - N} \tag{5}$$



<그림 1> BLDC 전동기

<표 1> 설계 요구 사양

구분	항목	사양	
사용조건	사용전압	DC 28V	
		승압	이송
	출력	120 W	80 W
	정격속도	7,000 rpm	5,000 rpm
외형치수	고정자 외경	45.0 mm 이하	
	고정자 길이	25.0 mm 이하	
재 질	코어소재	Hyperco 50	
	자석	SmCo	
	축	STS 630	

<표 2> 설계 사양

Specification	Value
Stator Outer Radius	21 (mm)
Stator Inner Radius	11 (mm)
PM Outer Radius	10 (mm)
Shaft Outer Radius	7 (mm)
Stack Length	26 (mm)
PM Material	SmCo (1.06T)
Stator Material	Hyperco50
Shaft Material	STS 630
Pole Number	4
Phase Number	3

여기서 N_0는 무부하 회전속도, N은 정격 회전속도이며, 이상적 무부하시의 회전속도와의 관계로부터 식(6)을 얻을 수 있다.

$$\frac{N_t}{N_0} = \frac{\tau_s + \tau_0}{\tau_s} \tag{6}$$

역기전력 상수를 구하는 식(7)을 이용하여 이상적인 무부하 회전속도를 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$K_e = \frac{\pi pk_w w\Phi_g}{30\sqrt{2}} \tag{7}$$

$$N_t = \frac{V_t}{K_e} \tag{8}$$

전기자 1상의 유효 직렬권회수가 식(9)와 같다

$$k_w w = \frac{30\sqrt{2}\, V_t \tau_s}{\pi p N_0 \Phi_g (\tau_s + \tau_0)} \quad (9)$$

권선계수 k_w를 0.85~0.97로 가정하면, 직렬권수는 식(10)과 같다.

$$w = \frac{k_w w}{w} \quad (10)$$

1상의 슬롯 내의 도체수는 슬롯의 수를 S_n이라고 하면 식(11)과 같다.

$$w_c = \frac{w}{S_n/m} = \text{정수} \quad (11)$$

식 (11)로부터 권선수는 식(12)로 계산된다.

$$w = (S_n/m) \bullet w_c \quad (12)$$

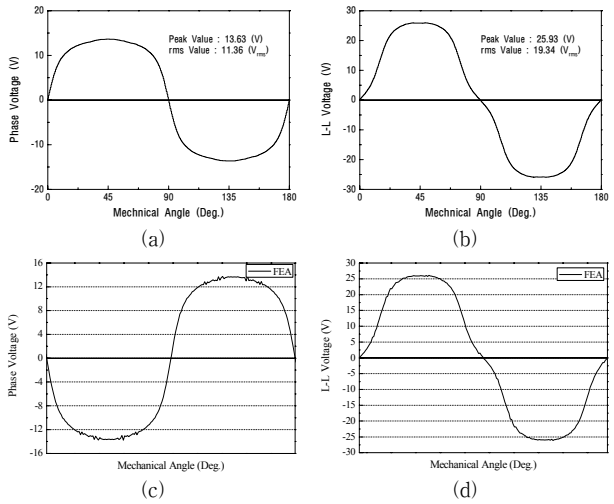
결정된 권선수 w와 자속 Φ_g와의 곱은 식(9)를 만족하여야만 한다. 따라서 1극의 자속은 재차 식(13)으로 계산하며 반복적으로 수행한다.

$$\Phi_q = \frac{w\Phi_g}{w}, \; w\Phi_g = \frac{30\sqrt{2}\, V_t \tau_s}{\pi p N_0 k_w (\tau_s + \tau_0)} \quad (13)$$

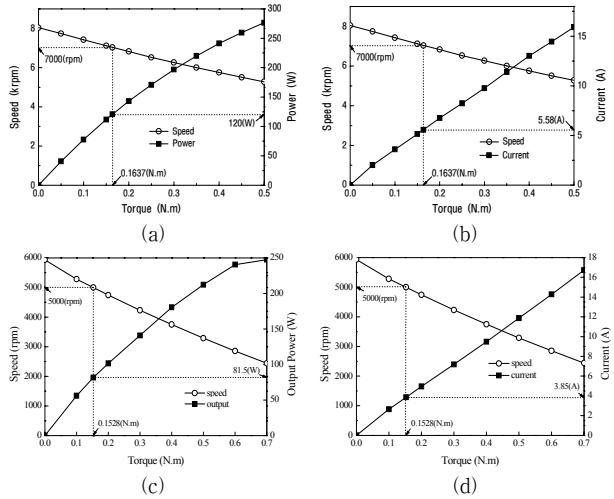
3. 유한요소해석에 의한 BLDC 전동기의 특성 해석

3.1 BLDC 전동기의 무부하 특성 해석

승압/이송용 BLDC 전동기의 설계 요구 사양은 표 1과 같으며, 동일한 설계 사양에 대하여 권선수를 달리하였을 때 유한 요소 해석을 수행하여 설계의 타당성을 검증하며, 부하에 따른 특성 해석을 수행하고자 한다. 그림 3은 무부하시 설계 사양에 대한 BLDC 전동기의 유한 요소 해석 결과를 보여주고 있다. 그림 3(a),(b)는 승압용 BLDC 전동기의 상전압과 선간전압을 보여주고 있으며, 그림 3(c),(d)는 이송용 BLDC 전동기의 해석 결과를 보여주고 있다.



〈그림 3〉 무부하시 유한 요소 해석 결과



〈그림 4〉 부하에 따른 유한 요소 해석 결과

3.2 BLDC 전동기의 부하에 따른 특성 해석

연료펌프의 승압/이송에 따른 BLDC 전동기의 설계 요구 사양에 따른 설계 사양을 간소화된 설계 특성식을 이용하여 도출하였다. 설계 사양에 의한 BLDC의 무부하 특성 해석을 통해 특성식의 타당성을 입증하였으며, 유동적인 사항을 고려하여 부하에 따른 토크, 속도, 전류 그리고 출력을 해석하였으며, 해석 결과는 표 3과 4에 나타내었다. 표 3은 승압용 BLDC 전동기의 부하에 따른 특성 해석 결과이며, 표 4는 이송용 BLDC 전동기의 해석 결과이다. 그림 4(a),(b)는 표 3에 대한 결과이고, 그림 4(c),(d)는 표 4에 대한 해석 결과이다.

〈표 3〉 승압용 BLDC 전동기의 부하에 따른 특성 해석 결과

Torque(N.m)	Speed(rpm)	Current(I_{dc})	Output Power(W)
0	8042	0	0
0.05	7744	2.0091	40.5475
0.10	7423	3.6027	77.7335
0.15	7121	5.1454	111.8506
0.1637	7037	5.5769	120.6326
0.20	6830	6.7665	143.0472
0.25	6524	8.2403	170.7979
0.30	6265	9.7679	196.8208
0.35	6001	11.4003	219.9481
0.40	5756	13.0181	241.1068
0.45	5508	14.4491	259.5584
0.50	5279	15.9134	276.4078

〈표 4〉 이송용 BLDC 전동기의 부하에에 따른 특성 해석 결과

Torque(N.m)	Speed(rpm)	Current(I_{dc})	Output Power(W)
0	5932.22	0	0
0.1	5279.32	2.64542	56.07764
0.15278	4999.87	3.85437	81.57677
0.2	4741.81	4.94757	101.49564
0.3	4229.91	7.18591	140.80713
0.4	3748.65	9.47853	180.30145
0.5	3291.02	11.8745	212.31197
0.6	2854.56	14.2736	240.46253
0.7	2440.87	16.7241	247.56902

4. 결 론

기계식 연료펌프는 기계 장비에 의한 마찰과 소음이 발생하며, 기계적인 결합에 의한 손실과 잦은 부품의 교체가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 BLDC 전동기를 이용한 연료펌프를 설계/해석하였으며, 해석된 결과는 유한 요소 해석을 통해 타당성을 검증하였다. 우선 간이화된 설계 특성식을 이용하여 설계 요구 사양을 만족하는 설계 사양을 계산하였으며, 계산된 설계 사양을 이용하여 유한 요소 해석을 통해 요구 사양을 만족하는 지를 해석하였다. 해석된 결과는 무부하에 따른 상전압과 선간전압을 이용하여 비교하였고, 부하의 변화에 따른 특성 해석을 통하여 유동적인 상황에 대한 특성을 해석하였다.

[참 고 문 헌]

[1] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Oxford, 1994.

[2] D. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, Mc-Graw Hill, 2003.

[3] Z. Q. Zhu, David Howe, Ekkehard Bolte and Bernd Ackermann, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part I: open-circuit field," IEEE Trans. vol 29, Jan. 1993.

[4] K. Ng, Z. Q. Zhu and D. Howe, "Open-circuit field distribution in a brushless motor with diametrically magnetized pm rotor, accounting for slotting and eddy current effects," IEEE Trans. vol 32, Sept. 1996.