

주행조건을 고려한 Traction용 BLDC 전동기 설계 및 특성 연구

김도선*, 이성형*, 손동혁*, 조윤현*, 김병국**
 동아대학교 전기공학과*, VGM**

Design and Characteristic Study of Brushless DC Motor for Traction Vehicle Considering the Running Condition

Do-Sun Kim*, Sung-Hyung Lee*, Dong-Hyeok Son*, Yun-Hyun Cho*, Byong-Kuk Kim**
 Dept. of Electrical Engineering of Dong-a University*, VGM**

Abstract - 본 연구는 차량 주행조건에 따른 주행저항을 계산하여 각각의 출력 조건을 만족하는 전동기를 설계하였다. 또한 실험계획법의 일종인 반응표면법을 적용하여 코깅 토크를 저감시켜 전동기의 특성을 향상시켰다. 유한요소법으로 d,q축 동기 리액턴스를 산출하여 Brushless DC 전동기의 자기 포화 영역에 따른 설계의 신뢰성을 평가하였다. 마지막으로 시작품 제작을 통하여 시뮬레이션과 실험 결과를 비교하였다.

그림1은 전동기 능력 곡선으로써 표 1의 파라미터를 사용하여 주행저항을 구하고, 전동기 출력 및 토크를 계산하여 나타낸 것으로 구배에 따른 정출력 영역과 정토크 영역을 확인할 수 있으며 능력 곡선의 turning point를 정격 운전 포인트(30[km/h], 300[Nm])로 선정하였다.

1. 서 론

Traction용 전동기는 전력전자 소자 개발과 제어 기술의 발전에 따라 직류전동기 방식에서 교류 유도 전동기로 그 주류가 이동하게 되었다. 하지만 소형, 경량화, 고효율과 유지보수의 편리성을 요구하는 시대적인 흐름에 따라 차세대 전동차용 견인전동기의 개발의 필요성이 대두되고 있다. 현재 각국에서 개발 중인 차세대 전동차용 견인전동기 모델은 크게 전폐형 유도 전동기, 전폐형 영구자석형 동기 전동기를 들 수 있다.[1] 모노레일은 철도 차량과 달리 저속으로 운전되며 이는 넓은 운전 속도영역이 다소 불필요하게 된다. 따라서 제어의 편리성을 고려한 BLDC 전동기를 구동원으로 한 모노레일을 개발하여 기존의 유도전동기 모노레일에서 발생하는 문제, 즉 구조적 강건성, 높은 출력 및 토크 밀도, 고효율 운전을 만족하게 된다. 본 논문에서는 모노레일 차량의 운전 조건에 따른 성능을 검토하여 BLDC 전동기를 설계하고, 실험계획법의 일종인 반응표면법(Reponse Surface method)를 사용하여 전동기의 소음 및 진동의 원인이 되는 코깅 토크를 저감하였다. 마지막으로 유한요소법을 이용한 전자계 정특성 해석 및 파라미터를 도출하여 시작품의 테스트 결과를 비교한다.

2. 운전조건을 고려한 Brushless DC Motor 설계

2.1 차량의 주행성능

차량의 주행성능은 차량의 구동력과 주행저항으로 구분된다. 구동력은 엔진에서의 힘에 의해 구동륜 타이어나 노면과의 접지 부분에서 발생하여 차량의 구동에 이용되는 마찰력이다. 주행저항은 차량의 주행을 방해하는 방향으로 작용하는 힘의 총칭이다. 따라서, 구동력이 주행저항보다 큰 경우 차량주행성능을 보장할 수 있다. 즉, 견인력(Tractive Force)은 동력차의 견인모터에서 발생된 회전력을 동력전달장치에 의해 동륜에 전달하여 주행저항에 이겨 차량을 견인하고 전진하는 힘이라 할 수 있다. 견인력은 동륜과 주행면과의 사이에 마찰력을 이용하는 것이므로 만일 동륜주에 발생한 견인력이 이 마찰력보다 크면 동륜은 공전하여 동력차는 전진할 수가 없다. 즉, 동력차가 공전을 하지 않고 가속 전진하기 위한 기본조건은 다음과 같다.

$$F > Td > R \quad (1)$$

(F:동륜과 궤도면의 마찰력, Td:동륜주 견인력, R:주행저항)

표1. 모노레일 특성

항목	기호	항목	기호
Vehicle mass [kg]	w	Rotating mass[ton]	r_m
Drag coefficient	c_d (0.25)	Rolling resistance	f_r (0.01)
Rated velocity[km/h]	v_{rated} (40)	Max. speed of wind[m/sec ²]	v_{wind} (35)
Slop[%]	θ (15)	Acceleration[m/s ²]	a (1)
vehicle height[m]	h	vehicle width[m]	t

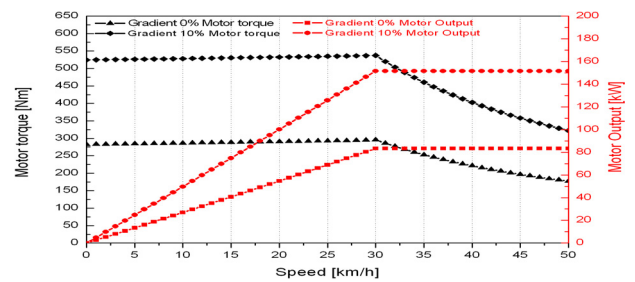


그림1. 등판능력에 따른 전동기 토크 및 출력

2.2 BLDC Motor 설계

유한요소법을 이용하여 BLDC 전동기를 설계하였다. 그림 3는 초기 설계 모델로써 slot opening, 치 폭, 영구자석 두께 등 각각의 파라미터로 설정하여 그림2와 같이 전동기 설계 흐름도를 따라 원하는 성능을 도출하기 까지 반복 설계를 실시하였다.

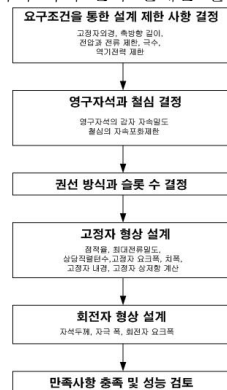


그림2. 전동기 설계 흐름도

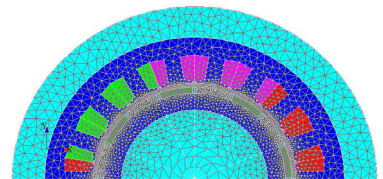
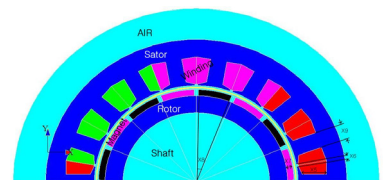


그림3. FEM 해석 모델

2.2.1 코깅토크 저감

코깅토크는 전동기내의 비균일 토크으로써, 전동기 시스템의 자기 에너지가 최소인 위치로 이동하려는 접선 방향의 힘으로 부하 전류와는 상관없이 회전자 영구자석과 고정자 슬롯의 상호 작용에 의해 발생한다. 이러한 코깅토크는 전동기의 소음과 진동의 주요 원인 되므로 전동기 설계시 반드시 고려해야 한다. 코깅토크는 영구자석이 부착된 회전자에 의하여 공극중에 비교적 저차의 고조파 자속밀도와 고정자 철심 슬롯의 상호작용에 의하여 발생된다. 본 논문에서는 실험계획법의 일종인 반응표면법을 사용하여 코깅토크를 저감하였다. 반응표면법(response surface method)은 최근 활용도가 높은 비도함수 기법 중 하나로 통계적 경험설계와 회귀모델 생성기법을 기반으로 하는 근사기법으로, 반응표면법을 적용한 최적화 알고리즘은 준 전역성을 가지면서도 해석 횟수를 줄일 수 있다는 장점이 있다. 또한 설계변수와 반응변수의 실험적 관계를 수학적 식으로 표현하기 위해 실험이나 시뮬레이션으로부터 얻은 수치 값들

로부터 근사 모델을 만들어내는 통계적 기법이다. 따라서 반응표면법은 함수관계가 확연히 밝혀져 있지 않거나 복잡한 형태를 갖는 최적화 문제를 풀 경우 매우 유용한 방법이다.

그림4는 제작 가능한 자극 폭과 slot opening 길이를 설계변수로 선정 한 후 중심합성계획법에 따라 변수 조합별 반응변수(코깅 토크)를 3차원으로 표현하였다. 그림5은 회귀분석을 시행하여 설계 변수와 반응변수에 대한 관계를 수학적 모형으로 추정 한 것으로 2차 근사 함수로 표현하면 아래 식과 같다.

$$y = 0.568x_1 + 5.294x_2 - 0.00152x_1^2 - 0.0325x_2^2 - 0.03126x_1x_2 \quad (1)$$

그림6은 초기모델과 반응표면법을 사용하여 새로 설계된 모델의 코깅 토크를 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 기존 코깅 토크의 80%가 감소됨을 확인 할 수 있다.

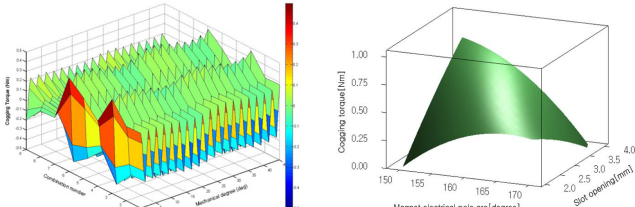


그림4. 설계변수 조합에 따른 코깅토크 그림5. 3차원 반응표면 그래프

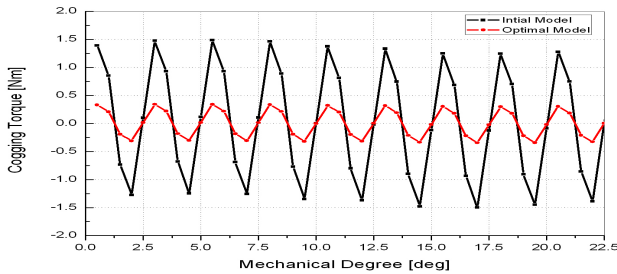


그림6. 코깅토크

2.2.2 BLDC 역기전력

고속전철용 PMSM은 약계제 제어를 통하여 광범위한 속도 영역을 구현 할 수 있는 반면 저속으로 운전되는 모노레일용 BLDC 전동기는 Six Step 방식의 인버터(구형파 제어)를 사용함으로써 제어기 제작비의 원가 절감 및 손쉬운 전동기 제어를 할 수 있는 장점이 있다. 표2은 PWM 기법에 따른 전압 이용률을 비교한 것으로 DC 링크에서 인버터를 거쳐 전동기에 공급되는 전압 한계 값이다.

표2. DC750[V]일 때 PWM 기법에 따른 전압 이용률

	상전압	선간전압	이용률
6-step	477	584	100%
SPWM	375	459	78.5%
SVPWM	433	530	90.7%

그림7은 무어차 시 회전자 속도에 따른 역기전력을 나타낸 것으로 역기전력 상수는 대략 1[V.sec]이다. 만약 인덕턴스의 영향을 무시하고 전류를 완전한 구형파라고 가정하면 역기전력(E)과 인가전압(V)을 식(2)와 같이 나타낼 수 있다. 이때 R은 상저항으로 매우 작은 값에 해당한다.

$$V = RI + E \quad (2)$$

즉 $V \approx E$ 으로써 구형파 제어 시 선간전압에 해당하는 지점에서의 속도를 전동기가 낼 수 있는 최고 속도가 된다.

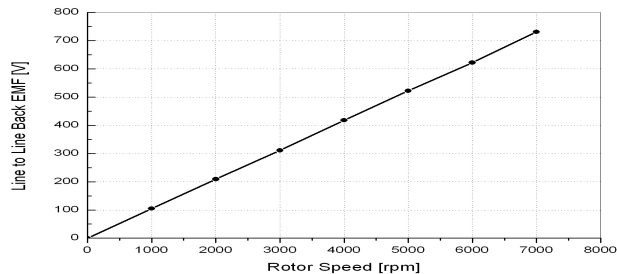


그림7. 속도에 따른 역기전력

2.2.3 BLDC 성능

표3에서는 BLDC 전동기 사양을 나타내고 있다. 앞서 언급한 주행조건을 만족하기 위하여 15:1의 감속기어를 사용하였다. 그림9는 2상 구동 BLDC 전동기에 정격전류 300[A]를 인가하였을 시 회전자 위치에 따른 정토크 곡선을 나타내고 있다. 이때 전동기 최대 토크 사양을 만족하고 있다. 그림10은 고정자 전류를 증가시켰을 경우 d, q 축 리액턴스 곡선으로써 설계된 전동기는 SPM타입으로써 각축의 리액턴스는 동일하다. 그리고 정격전류를 고려한다면 현재의 전동기는 자기포화 한계지점에서 설계되었다고 할 수 있다. 그림11은 시작품 전동기의 다이내모 테스트 결과를 보여주고 있다. 테스트 모터의 용량이 140[kW]를 넘지 못하기 때문에 최대출력 150[kW]까지의 성능을 도출하지 못하였다.

최대출력	150	kW
연속출력	100	kW
최대토크	450	N.m
효율	90	%
DC link 전압	750	V
최고속도	5000	rpm
Reduction gear ratio	15:1	

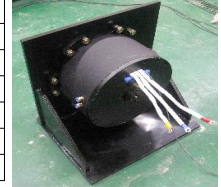


표3. BLDC 전동기 사양 그림8. BLDC 전동기 시작품

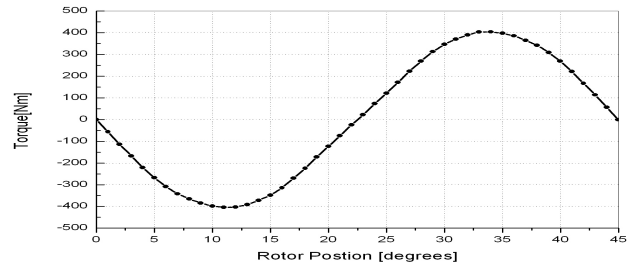


그림9. 전류 300[A], 2상 구동 시 정토크

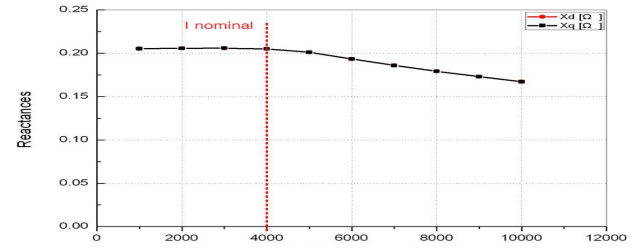


그림10. 고정자 전류에 따른 d,q 축 리액턴스

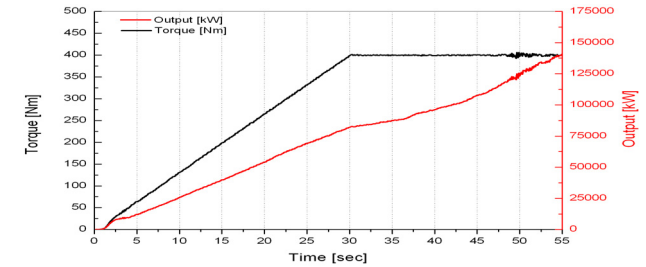


그림11. BLDC 전동기 시작품 성능테스트

3. 결 론

본 논문은 주행조건을 고려한 traction용 BLDC 전동기의 설계 및 특성을 연구하였다. 구배에 따른 차량의 견인력과 전동기의 토크 및 속도를 각각 선정, 계산하여 이를 만족하는 SPM 타입의 BLDC 전동기를 설계하였다. 그리고 전동기 특성 향상을 위하여 실험계획법의 일종인 표면 반응법을 사용하여 코깅 토크를 저감하였다. 또한 유한요소법으로 리액턴스를 구하여 자기 포화 영역을 알아보았다. 마지막으로 시작품 제작을 통하여 해석결과의 타당함을 입증하였다. 추후 동일 모델의 2상구동과 PWM 백터 제어 구동의 특성을 비교하여 넓은 속도 영역을 필요로 하는 traction용 전동기의 적용을 연구한다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성 사업의 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김철근, 김재학, 송홍중, 손인석, 오계형, "차세대 전동차 기술개발 동향", 한국철도학회06 춘계학술대회 논문집, pp 284-294, 2006
- [2] 광상업, "차량 구동용 다층 매입형 영구자석 전동기의 특성해석 및 설계", 공학박사논문, 2007