

EPS 전동기의 기계적 응답성 향상 설계

Design for EPS Motor to Improve Mechanical Response

저자 (Authors)	위성혁, 유준열, 홍정표 Sung-Hyeok Wi, Jun-Yeol Ryu, Jung-Pyo Hong
출처 (Source)	한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회 , 2018.11, 462-466(5 pages)
발행처 (Publisher)	한국자동차공학회 The Korean Society Of Automotive Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07593146
APA Style	위성혁, 유준열, 홍정표 (2018). EPS 전동기의 기계적 응답성 향상 설계. 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회 , 462-466
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.***.168.122 2019/05/22 10:31 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

EPS 전동기의 기계적 응답성 향상 설계

위 성 혁 · 유 준 열 · 홍 정 표*

한양대학교 미래자동차공학과

Design for EPS Motor to Improve Mechanical Response

Sung-Hyeok Wi · Jun-Yeol Ryu · Jung-Pyo Hong*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

Abstract : Since the motor for EPS(Electric Power Steering) is an automobile part involved in wheel operation, it is necessary to consider the mechanical response as well as the electrical performance in design stage. Electrical and mechanical performance can be estimated by using both analytical method and finite element method. However, finite element method has the disadvantage such as hard preprocessing and long analysis time. Therefore, in this paper, it is aimed to estimate the electromechanical parameters through mathematical modeling and to improve the mechanical response efficiently by using the voltage equation and the motion equation with the simulink block model. In addition, the speed controller is designed to improve mechanical response. Finally, the mechanical response results of the base model and the improved model are compared through finite element method.

Key words : Electric performance(전기적 성능), Electric power steering(전동식 조향 보조 장치), Equation of motion(운동방정식), Mechanical response(기계적 응답성), Voltage equation(전압 방정식)

Nomenclature

B : magnetic flux density, T
 D : diameter, m
 l : length, m
 H : magnetic field strength, A/m
 I : current, A
 J : moment of inertia, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
 k_w : winding factor
 K_e : back electro-motive force constant, Vs/rad
 K_t : torque constant, Nm/A
 K_p, K_I : P-gain, I-gain
 L : inductance, H
 M : mass, kg
 N : number of series turns, per phase
 A : area, m^2
 T : torque, Nm

λ : flux linkage, Wb
 R_a : resistance, Ω
 R_m : reluctance, A/Wb
 V : voltage, V
 μ_{rec} : recoil permeability
 ω : angular velocity, rad/s
 t_m : thickness of permanent magnet, m
 p : pole pair

Subscripts

g, rem, m, a : airgap, remanent, magnet, armature
 $r, sh, mag, core, slot$: rotor, shaft, magnet, core, slot
 stk, e, c : stack, electrical, coil
 d, q : d -axis, q -axis

* 홍정표, E-mail: hongjp@hanyang.ac.kr.

1. 서론

산업 전반에 걸쳐 전동화가 진행됨에 따라 전동기를 사용한 차량 부품에 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 조향 장치에서는 전동기를 이용한 전동식 조향 보조 장치(EPS : Electrical Power Steering)가 많이 이용된다. EPS는 운전자의 안정성과 직결되기 때문에, EPS 전동기는 운전자의 스티어링 휠 조작에 빠르게 반응해야 한다. 따라서 EPS 전동기는 전기적 성능뿐만 아니라 기계적 응답성도 고려해서 설계해야만 한다.

전기적 성능 및 기계적 응답성을 검토하기 위해서는 전자기 및 동역학 해석을 동시에 진행해야 한다. 하지만, 전자기 및 동역학 해석을 유한요소해석(FEM : Finite Element Method)으로 진행할 경우, 전처리 과정이 어려우며 해석 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 파라미터의 수학적 모델링 및 전압방정식, 운동방정식을 전달함수로 표현하여 FEM 대비 해석 시간을 줄이고, 이를 통해 파라미터 변화에 따른 전기적 성능 및 기계적 응답성의 개선 방향을 제시한다. 추가적으로 속도제어기를 설계하여 기존 모델의 기계적 응답성을 향상시켰다.

2. 기계적 응답성 산정

전동기의 응답성을 산정하기 위하여 전기 및 기계 파라미터를 수학적으로 모델링한다. 이를 통해 특정 파라미터 변화에 따른 전기 및 기계 파라미터를 산정한다.

2.1 전기 파라미터 산정

본 절에서는 전기 파라미터를 수학적으로 모델링한다. 전기 파라미터에는 공극자속밀도, 쇄교 자속, 역기전력, 역기전력 상수, 전기자 저항 및 인덕턴스가 있다.

2.1.1 쇄교자속 산정

SPMSM 타입의 전동기의 경우, 공극자속밀도는 식 (1)과 같으며, 쇄교자속은 턴 수 및 권선 계수를 고려하여 식(2)와 같이 산정한다.

$$B_g = \frac{B_{rem}}{\frac{\pi D_r}{4pl_m} + \frac{2\mu_{rec}l_g}{t_m}} \quad (1)$$

$$\lambda = k_w NB_g A \quad (2)$$

2.1.2 역기전력 산정

역기전력은 패러데이 법칙에 의해 쇄교자속의 시간변화량으로 다음의 식 (3)과 같이 정의된다.

$$E_m = \omega_e \lambda = \omega_e \frac{4}{\pi} \frac{k_w ND_r l_{stk}}{2p} \frac{B_{rem}}{\frac{\pi D_r}{4pl_m} + \frac{2\mu_{rec}l_g}{t_m}} \quad (3)$$

2.1.3 전기자 저항 산정

전기자 저항은 코일의 길이와 단면적을 고려하여 다음의 식 (4)와 같이 산정한다.

$$R_a = \frac{l_c N}{\sigma A_c} \quad (4)$$

2.1.4 인덕턴스 산정

d, q 축 인덕턴스는 FEM를 통해 산정하고 식 (5)의 관계로부터 턴 수 및 자기저항 변화에 따른 인덕턴스를 산정한다.

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (5)$$

2.2 기계 파라미터 산정

2.2.1 관성모멘트 산정

회전자 표면에 부착된 영구자석은 속이 빈 원기둥이라는 가정 하에 관성모멘트는 식 (6)으로 다음과 같이 산정한다.

$$J = \frac{1}{2} M_{core} \left\{ \frac{D_{sh}^2}{4} + \left(\frac{D_r}{2} - t_m \right)^2 \right\} + \frac{1}{2} M_{mag} \left\{ \left(\frac{D_r}{2} - t_m \right)^2 + \frac{D_r^2}{4} \right\} \quad (6)$$

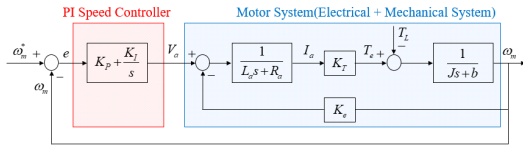


Fig. 1 Block diagram of base model

2.3. 기계적 응답성 산정

앞에서 수학적으로 모델링된 파라미터들을 통해 전압에 대한 기계적 속도의 전달함수를 산정하고, 이를 *simulink*를 사용해 모델링한다. 이를 통해 회전자 외경 및 전기자 턴 수 변화에 따른 전기적 성능 및 기계적 응답성을 산정한다. 기계적 응답성은 기계적 속도의 *rising time*과 *overshoot*을 통해 판단한다. *rising time*은 정상상태의 90%에 도달하기까지의 시간이다.

2.3.1 블록 다이어그램

식 (7) 및 식 (8)의 전압방정식 및 운동방정식은 Fig. 1와 같은 블록 다이어그램으로 표현된다. 이 때, 각각의 파라미터들은 앞에서 언급한 수학적 모델링을 통해서 산정한다.

$$V_a = R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} + e_a \quad (7)$$

$$T_e = J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + T_L \quad (8)$$

3. 기계적 응답성 향상 설계

3.1 대상 모델

본 논문에서는 Fig. 2에 나타낸 EPS용 6극 9슬롯 표면부착형 영구자석 동기전동기를 대상으로 한다.

Table 1 Condition in design

항목	수치	항목	수치
DC 전압	12V	D_r	84mm

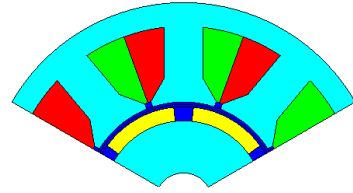


Fig. 2 Configuration of the target motor for EPS

3.2 파라미터 변화를 통한 향상 설계

기계적 응답성 향상 설계 시, Table 1와 같은 조건에서 진행하였다. 이 때, 목표 *rising time*은 0.083msec. 이하로 한다. 식 (8)에서 알 수 있듯이 *rising time*에 가장 큰 영향을 주는 파라미터는 관성 모멘트이다. 따라서, 기계적 응답성 향상을 위해 회전자 외경에 따른 기계적 응답성을 검토한다. Fig. 3 및 Table 2는 회전자 외경에 따른 기계적 응답성 경향을 나타낸다. 회전자 외경이 감소함에 따라 관성 모멘트의 감소로 *rising time*이 감소함을 알 수 있다. 하지만, 최소 회전자 외경인 30mm 모델에서도 목표 *rising time*을 만족하지 않는다. 따라서, 전기자 상당 직렬 턴 수를 변화시킴으로써, 전기자 기자력을 증가시켜 추가적인 기계적 응답성 향상을 검토한다. Fig. 4는 턴 수에 따른 기계적 속도, Table 3은 턴 수 변화에 따른 *rising time*, *overshoot* 및 효율을 나타낸다. 이를 통해, 전기자 턴수가 증가함에 따라 *rising time*은 감소하는 경향이 있다. 기계적 응답성 향상 설계 결과, 회전자 외경을 30mm, 턴 수를 36으로 설계하여 목표 기계적 응답성을 만족하는 모델을 설계하였다.

3.3 제어기를 통한 향상 설계

앞서 설계된 모델의 경우, 목표 *rising time*을 만족하지만, 기존 모델에 비해 *overshoot*이 증가한다. 따라서, 본 절에서는 기존 개선 모델에 속도 제어기를 통해 추가적인 *overshoot* 개선 설계를 진행하였다. 이 때 속도 제어기는 PI 제어기로 설계한다.

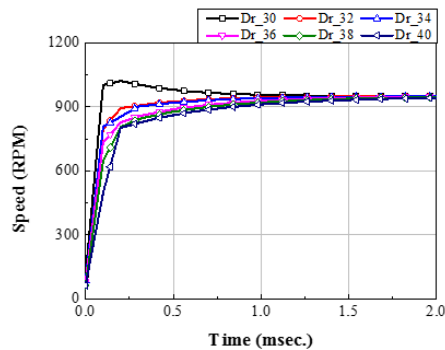


Fig. 3 Mechanical response according to rotor diameter

Table 2 Mechanical response according to rotor diameter

Rotor diameter(mm)	Moment of inertia(kg · m ²)	Rising time(msec.)	Overshoot(%)
30	21.39	0.084	7.44
32	27.71	0.162	0
34	35.44	0.204	0
36	44.44	0.300	0
38	55.19	0.370	0
40	67.77	0.464	0

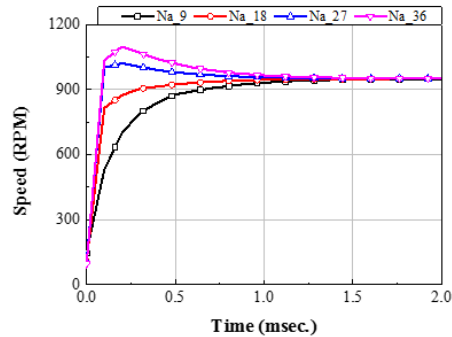


Fig. 4 Mechanical response according to coil turns

Table 3 Mechanical response according to coil turns

Number of series turns per phase	Rising time(msec.)	Overshoot (%)	Efficiency (%)
9	0.440	0	82.89
18	0.168	0	82.92
27	0.084	7.44	80.63
36	0.082	15.498	75.12

Table 4 Result of designed motor

	Base model $D_r=40\text{mm}$ $N=27$	Improved model $D_r=30\text{mm}$ $N=36$	Improved model with PI controller $D_r=30\text{mm}$ $N=36$
Rising time(msec)	0.464	0.082	0.058
Overshoot(%)	0	15.50%	under 1%

PI 제어기는 P gain과 I gain의 비율에 따라 시스템의 안정도가 변화한다. I gain/P gain 값이 증가할수록 시스템의 정상상태 오차는 개선되지만, 시스템 자체는 불안정해진다. 반면 I gain/P gain 값이 감소할수록 정상상태 오차는 커지지만, 시스템 자체의 안정성은 증가한다. 따라서, 대상 모델 또한 I gain, P gain 값에 따라 시스템의 rising time과 overshoot이 다양한 양상으로 나타난다. 본 논문에서는 simulink에서 제공하는 P, I gain 튜너를 이용해 최적의 P, I gain을 결정했다.

3.4. 향상 설계 결과

Table 4는 기존 모델, 제어를 반영하지 않은 개선 모델, 그리고 제어를 반영한 개선 모델의 기계적 응답성 결과를 나타낸다. 기존 모델의 rising time은 0.464msec. 였다. 앞서 개선 설계를 진행한 모델(회전자의 외경 30mm, 턴 수 36)의 경우 rising time은 0.082msec로, 기존 모델 대비 82.33%만큼 감소하였다. 추가적으로 PI제어를 반영한 모델의 rising time은 0.058msec로, 기존 모델 대비 87.5%만큼 감소하였다. 따라서, 파라미터 변화 및 제어를 반영함으로써 기존 모델 대비 기계적 응답성을 향상시킬 수 있었다.

4. 결론

EPS 전동기 설계 시, 전기적 성능 및 기계적 응답성이 중요하다. 하지만, FEM을 통해 전기적 성능 및 기계적 응답성을 예측하는 경우, 해석 시간이 매우 오래 걸리는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 전기-기계 파라미터를 수학적 모델링을 통해 산정하고, 전압 방정식 및 운동 방정식을 simulink 모델로 구성하여 전기적 성능 및 기계적 응답성을 예측하였다. 기계적 응답성의 지표는 기계적 속도의 rising

time이다.

또한, 회전자의 형상 및 전기자 턴 수에 따른 기계적 응답성 향상 설계를 진행하고, 추가적으로 속도 제어를 이용하여 EPS 전동기의 응답 특성을 향상시켰다. 향상 설계 결과, 최종 모델의 rising time은 0.058msec로 기존 모델 대비 87.5%만큼 감소하였다. 이 때, overshoot은 1% 미만이다.

이를 통해 수학적 모델링을 통해 전동기의 파라미터 변화에 따른 전기적 성능 및 기계적 응답성 경향을 파악하고, 전동기 설계에 반영할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- 1) Jeong-Min Lee, Jin-Cheol Park, Myung-Hwan Yoon, and Jung-Pyo Hong, "Analysis of PMSM Characteristic for EPS according to Pole and Slot Combination considering the Effect of Static Eccentricity of Rotor", KSAE Conf, 1355-1360, 2017
- 2) Dong-Min Kim, Sung-Woo Hwang, Seung-Hee Chai, and Jung-Pyo Hong, "Response Characteristics of EPS Motor According to Rotor Shape", KSAE Conf, 1307-1312, 2014
- 3) Su-Eog Cho, Jeong-Hwan Lee, and Cheul-U Kim, "A Study of Improvement on the Quickness of Current controller for Permanent Magnet Synchronous Motor", Journal of the KIIEE, Vol. 21, No. 8, 136-143, 2007
- 4) Jin-Seok Kim, Seung-Wook Kim, and Dong-Hoon Choi, "Response Time Optimization of a Motor Actuator for a Hydraulic Brake", KSME Conf, 1799-1801, 2016