

전기기기의 동적 응답에 대한 설계 민감도 해석

Design Sensitivity Analysis of Dynamic Responses for an Electric Machine

임형빈* · 정진태†
Hyungbin Im and Jintai Chung

1. 서론

브러시리스 DC (BLDC) 모터는 많은 산업분야에서 널리 사용되고 있다. BLDC 모터는 소음이 적고, 고속 회전, 높은 신뢰성을 보유하고 있다. 때문에 로봇기, 가전제품 등 많은 부분에 적용되어 사용되고 있다. 최근에는 모터의 저소음, 저진동을 위하여 더욱 정밀한 회전속도 및 토크의 컨트롤이 요구되고 있다. 모터의 성능을 개선하기 위하여 설계변수의 변화를 확인하기 위한 방법이 많은 연구자들에 의해 연구되어왔다. 민감도해석은 효과적인 방법 중 하나로 주로 구조시스템에서 사용되어왔다. 최근 BLDC 모터는 자동차산업과 의료기기산업까지 확장되어 사용되고 있다. 모터의 성능 향상에 대한 요구가 증가함에 따라 BLDC 모터에 대한 민감도 해석이 필요하게 되었다.

대부분의 모터 연구들은 주로 민감도를 모터의 제어 알고리즘과 전자기적 특성에 초점을 맞추었다. 이런 연구들의 주요 목표는 모터의 전자기적 거동이다. 그러므로 이런 연구들은 저항과 인덕턴스의 변화와 함께 전자기적 특성만을 조사한 것이 대부분이다. 실제 모터시스템은 기계적 요소와 전자기적 요소로 구성된다. 그러므로 기계적 매개변수와 전자기적 매개변수를 동시에 고려해야 한다. 본 연구에서는 직접미분법을 이용하여 모터의 매개변수에 관한 편미분 민감도방정식을 유도하고 민감도 방정식을 이용하여 기계적 매개변수와 전자기적 매개변수를 함께 고려한 민감도 해석을 수행하였다. 해석한 결과를 통하여 모터의 성능을 향상시킬 수 있는 설계변수를 제안하였다.

2. 모델링

Fig. 1은 8극, 12슬롯, 3상 BLDC 모터의 개략도이다. Fig. 1(a)는 모터의 회전자와 고정자를 나타내고 있다. Fig. 1(b)에서는 3상 Y-연결을 나타내고 있다. 권선 a, b 그리고 c는 자기인덕턴스 L_a, L_b 그리고 L_c ,

저항 r_a, r_b 그리고 r_c 를 가지고 있다.

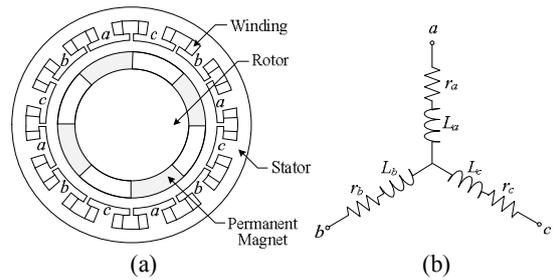


Fig. 1. Eight-pole, twelve-slot, three-phase BLDC motor: (a) the mechanical structure and (b) the Y-connection.

3. 민감도 방정식

BLDC 모터의 지배방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} - m\ddot{\theta} \sin \theta - m\dot{\theta}^2 \cos \theta + c\dot{x} + kx - (S_x/2)(\dot{q}_a^2 + \dot{q}_b^2 + \dot{q}_c^2) - M_x(\dot{q}_a\dot{q}_b + \dot{q}_b\dot{q}_c + \dot{q}_c\dot{q}_a) - \lambda_{m,x}[\dot{q}_a \sin(p\theta/2) + \dot{q}_b \sin(p\theta/2 - 2\pi/3) + \dot{q}_c \sin(p\theta/2 + 2\pi/3)] = 0 \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + m\ddot{\theta} \cos \theta - m\dot{\theta}^2 \sin \theta + c\dot{y} + ky - (S_y/2)(\dot{q}_a^2 + \dot{q}_b^2 + \dot{q}_c^2) - M_y(\dot{q}_a\dot{q}_b + \dot{q}_b\dot{q}_c + \dot{q}_c\dot{q}_a) - \lambda_{m,y}[\dot{q}_a \sin(p\theta/2) + \dot{q}_b \sin(p\theta/2 - 2\pi/3) + \dot{q}_c \sin(p\theta/2 + 2\pi/3)] = 0 \quad (2)$$

$$(J + me^2)\ddot{\theta} - m\dot{x} \sin \theta + m\dot{y} \cos \theta - (p/2)\lambda_m[\dot{q}_a \cos(p\theta/2) + \dot{q}_b \cos(p\theta/2 - 2\pi/3) + \dot{q}_c \cos(p\theta/2 + 2\pi/3)] = 0 \quad (3)$$

$$S\ddot{q}_a + M(\ddot{q}_b + \ddot{q}_c) + r_s\dot{q}_a + (S_x\dot{x} + S_y\dot{y})\dot{q}_a + (M_x\dot{x} + M_y\dot{y})(\dot{q}_b + \dot{q}_c) + (p/2)\lambda_m\dot{\theta} \cos(p\theta/2) + (\lambda_{m,x}\dot{x} + \lambda_{m,y}\dot{y}) \sin(p\theta/2) = v_a \quad (4)$$

$$S\ddot{q}_b + M(\ddot{q}_a + \ddot{q}_c) + r_s\dot{q}_b + (S_x\dot{x} + S_y\dot{y})\dot{q}_b + (M_x\dot{x} + M_y\dot{y})(\dot{q}_a + \dot{q}_c) + (p/2)\lambda_m\dot{\theta} \cos(p\theta/2 - 2\pi/3) + (\lambda_{m,x}\dot{x} + \lambda_{m,y}\dot{y}) \sin(p\theta/2 - 2\pi/3) = v_b \quad (5)$$

$$S\ddot{q}_c + M(\ddot{q}_a + \ddot{q}_b) + r_s\dot{q}_c + (S_x\dot{x} + S_y\dot{y})\dot{q}_c$$

† 한양대학교 기계공학과

E-mail : jchung@hanyang.ac.kr
Tel : (031) 400-5287, Fax : (031) 406-6964

* 한양대학교 대학원 기계공학과

$$\begin{aligned}
& + (M_x \dot{x} + M_y \dot{y})(\dot{q}_a + \dot{q}_b) \\
& + (p/2)\lambda_m \dot{\theta} \cos(p\theta/2 + 2\pi/3) \\
& + (\lambda_{m,x} \dot{x} + \lambda_{m,y} \dot{y}) \sin(p\theta/2 + 2\pi/3) = v_c
\end{aligned} \quad (6)$$

본 연구에서는 민감도 방정식을 유도하기 위해 직접미분법을 사용하였다. 직접미분법을 사용하여 운동방정식을 각각의 매개변수에 관하여 미분하였다. 이 미분방정식이 민감도 미분방정식이다. BLDC 모터의 민감도방정식은 모터의 변수 중 하나인 s 에 관한 편미분 방정식이다. 식 (1)-(6)을 s 에 관하여 편미분하여 다음과 같은 민감도 방정식을 얻었다.

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{s}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{s}} + \mathbf{K}_s \mathbf{s} = \mathbf{f}_s \quad (7)$$

4. 결과 및 고찰

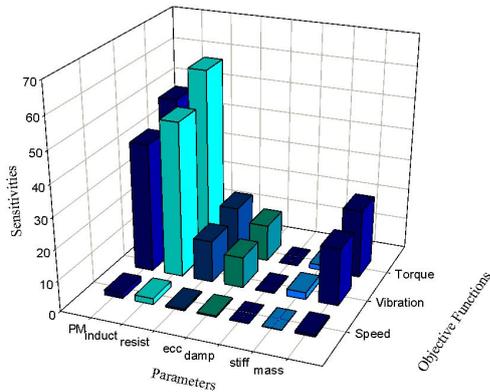


Fig. 2. Sensitivities of the objective functions for the parameters.

Fig. 2는 회전속도, 전자기 토크, 및 진동에 대한 각 변수들의 민감도이다. 코일의 턴수가 가장 민감하고, 회전자 시스템의 댐핑이 가장 둔감하다는 것을 알 수 있다. 또한, 전자기 토크가 변수들에 대해 상당히 민감하고, 상대적으로 회전속도는 둔감하다는 것을 알 수 있다.

민감도 해석을 통하여 개선된 모터의 설계변수를 도출할 수 있다. Fig. 3은 개선된 모터의 전자기 토크, 회전속도, 그리고 진동을 나타내고 있다.

5. 결론

모터설계에 있어서 전자기적 설계변수가 기계적 설계변수에 비해 좀 더 민감하다는 것을 확인하였다. 특히, 코일의 턴수는 BLDC 모터시스템에서 가장 민감한 설계변수임을 알 수 있었다. 가장 민감한 설계변수부터 설계하는 것이 모터 성능향상에 효과적이다. 그러나 모터의 속도와 토크를 향상하기

위한 설계에서 댐핑과 강성을 제거하였다. 그 이유는 속도와 토크는 댐핑과 강성의 변화에 대해서 비선형적으로 증가하기 때문이다. 민감도 해석 결과를 통해서 가장 둔감한 설계변수를 제거하고 BLDC 모터의 설계범위를 설정하였다. 폴 팩토리얼 방법을 통해서 목적함수의 시간응답을 설정된 범위에서 계산하였다. 이 과정을 통해서 향상된 모터 설계변수를 얻었다.

후 기

이 논문은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-521-D00020).

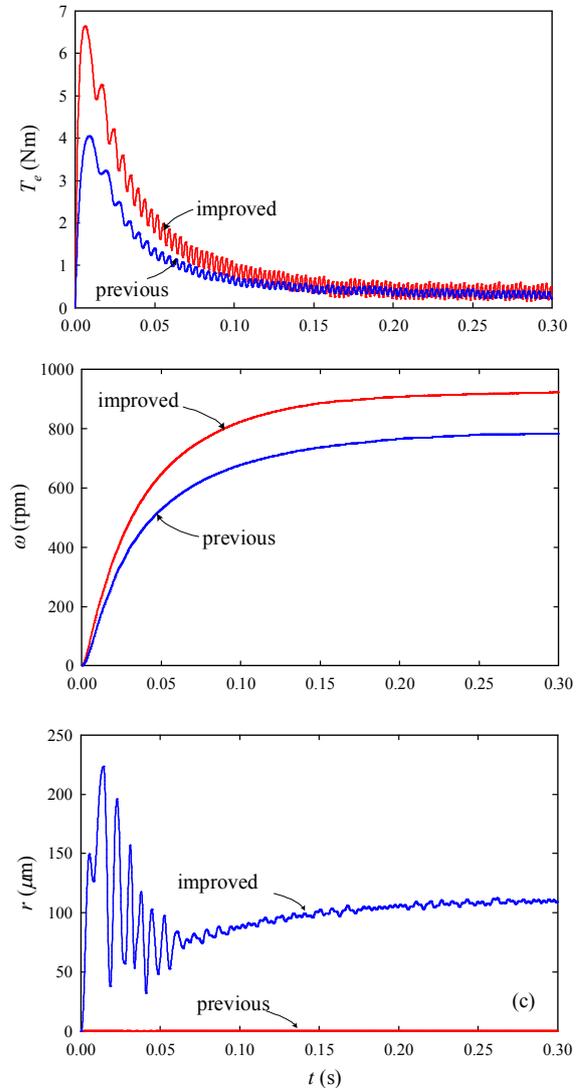


Fig. 3. Time histories of the objective functions in the previous and improved design: (a) the electromagnetic torque, (b) the rotating speed, and (c) the radial displacement.