2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7.17-20

인덕턴스에 의한 DC모터의 비선형 T-N곡선의 산출

성 부 현* , 이 진 원, 좌 성 훈
삼성전자 중앙연구소

Calculation of Nonlinear T-N Curve of DC Motor by Inductance

Bu-Hyun Sung* , Jin-Won Lee, Sung-Hoon Choa,
Corporate R&D Center, Samsung Electronics

Abstract : DC모터의 T-N(토크-회전수)특성이 선형성을 갖는다는 사실은 널리 알려져 있다. 더욱이 인덕턴스가 작은 소형 모터의 경우에는 T-N특성이 거의 직선에 가깝게 된다. 그러나 대형모터일수록 인덕턴스가 커지므로 이 인덕턴스의 영향으로 T-N특성은 비선형의 곡선으로 변하게 된다. 이렇게 되면 모터의 출력은 직선으로 예측하였을 때 보다 실제적으로 작은 출력이 발생하게 된다. 따라서 일반적으로 DC모터를 설계할 때 T-N특성의 비선형화로 인한 출력의 감소현상을 고려하여 임의의 여유를 주고 설계하여 왔다. 그러나 효율적인 모터설계를 위하여서는 임의의 여유가 아닌, 이론적 계산에 의한 정확한 T-N특성의 곡선을 필요로 하게 된다. 하지만 아직까지 이를 위한 용이한 계산법은 마련되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 matlab을 이용하여 DC모터의 비선형 T-N곡선의 계산법을 도출하여 그 방법을 제시하고자 한다.

1. 서 론

모터의 특성중 가장 기본적인 특성은 T-N(토오크-회전수)특성이다. DC모터에서의 T-N 특성은 그림 1의 (a)와 같이 선형의 특성을 나타낸다. 그러나 모터의 인덕턴스(inductance)가 커질수록, 즉 모터가 대형화될수록 T-N 특성은 인덕턴스의 영향을 받아 그림 1의 (b)와 같이 곡선화 된다[1]. 이 현상으로 T-N특성의 선형성이 비선형화가 될뿐더러 모터의 출력도 (a)로 예상했을 때에 비하여 감소되어 나타난다. 그러므로 대형 DC모터를 설계할 때는 반드시 인덕턴스의 영향을 고려하여 T-N 특성을 설계하여야만 한다. 그러나 대부분의 경우 대형 DC모터의 T-N 특성을 설계할 때에 인덕턴스의 영향에 대비하여 경험치에 의한 마진(margin)을 주는 방법을 이용하고 있다. 이러한 대형 DC모터의 설계방법은 비효율적인 설계가 될 뿐 아니라, 모터 제작 후 또다시 설계변경을 해야만 하는 경우가 발생하기도 한다.

본 논문에서는 Matlab을 이용하여 인덕턴스의 영향에 의한 DC모터의 비선형 T-N 특성을 정확히 산출하고자 했다. 또한 DC모터에 있어서 인덕턴스의 영향에 의한 특성의 변화를 쉽게 이해하고자 Matlab의 Simulink 기능을 이용하여 시뮬레이션(simulation) 하였다.

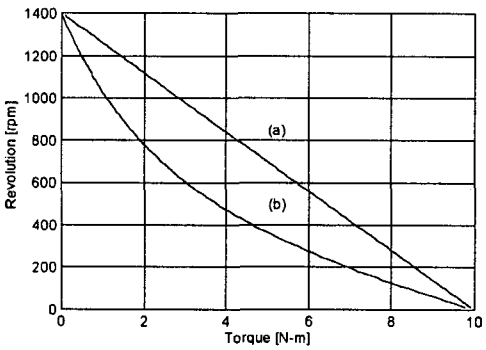

그림 1 DC모터의 T-N 곡선

2. 모 델 링

라플라스 변환된 모터방정식은 아래와 같다.

$$V(s) = RI(s) + sLI(s) + E_g(s) \quad (1)$$

$$E_g(s) = K_E N(s) \quad (2)$$

$$T(s) = sJN(s) + DN(s) + T_L(s) \quad (3)$$

$$T(s) = K_T I(s) \quad (4)$$

식 (1)과 (3)을 전류와 회전수에 관하여 정리하면 아래 식 (5), (6)과 같다.

$$I(S) = \frac{V(s) - E_g(s)}{sL + R} \quad (5)$$

$$N(s) = \frac{T(s) - T_L(s)}{sJ + D} \quad (6)$$

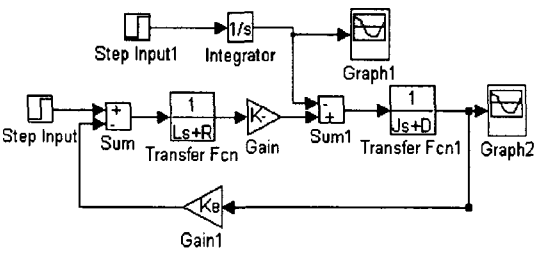

그림 2 Matlab을 이용한 DC모터의 전달함수 블록도

위의 식들에 의한 전달함수를 블록도로 그림 2에 나타

내었으며 Matlab을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 위의 블록도를 시뮬레이션하기 위한 샘플모터로서는 당 연구실에서 개발한 3상 4극의 브러시레스 DC모터를 이용하였는데 그 사양은 아래 표 1과 같다.

표 1 샘플 모터의 사양

항 목	값	단 위
입력전압 (V)	50	volt
선간 저항 (R)	1.7	Ω
선간 인덕턴스 (L)	24	mH
관성모멘트 (J)	0.0005	$kg \cdot m^2$
토오크상수 (K_T)	0.35	N · m/A
역기전압상수 (K_E)	0.35	V · sec/rad
마찰계수 (D)	0.0005	N · m · sec/rad

3. 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션 시 전압은 스텝함수(step function)로 입력하였으며 외부부하(T_L)는 일차로 증가하는 함수로 입력하였다. 외부부하는 그림 2의 Graph 1에서 나타나도록 하였다. 또한 그에 따른 회전수의 변화는 그림 2의 Graph 2에 나타나도록 하였다. 그 결과는 각각 그림 3과 그림 4와 같다.

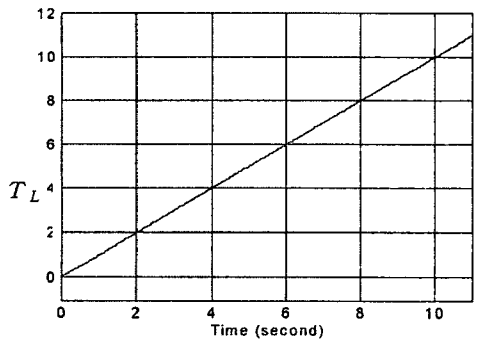

그림 3 시간에 따른 외부부하의 변화

위의 그림 3과 4는 가로축이 모두 시간 축이므로, 그림 4의 가로축을 그림 3의 외부부하로써 치환시킬 수 있다. 이렇게 하면 그림 4를, 가로축을 토오크 축으로 하는 T-N 특성의 그래프로서 볼 수 있다. 이때의 T-N 특성은 인덕턴스의 영향이 없는 선형의 특성을 보인다. 이는 블록도를 시뮬레이션 할 때 스위칭을 고려하지 않기 때문에 직류성분만 반영되어 인덕턴스에 의한 전류의 감소분이 나타나지 않기 때문이다. 실제로 모터가 스위칭 될 때 인덕턴스에 의하여 전류지연이 발생되고, 이에 의하여 전류 감소분이 나타나게 된다. 이때 전류 지연각은 아래 식 (7)과 같다.

$$\theta = \tan^{-1}\frac{X_L}{R} \tag{7}$$

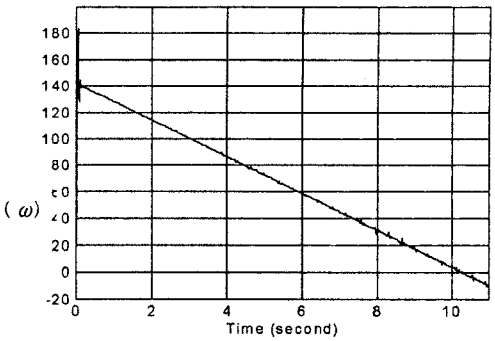

그림 4 시간에 따른 회전수의 변화

이때 임의의 회전수들에 대한 전류 지연 파형의 예를 그림 5에 나타내었다.

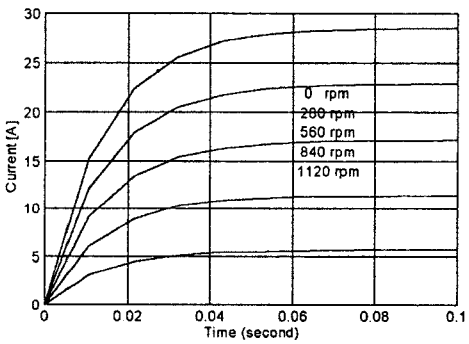

그림 5 임의의 회전수에 대한 전류의 지연 파형

3상 4극 DC모터의 스위칭에 의하여 전류가 입력되는 시간은 아래의 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{1}{2N \times 2/60} \tag{8}$$

여기서, N 은 회전수(rpm)이다.

위의 식 (8)로 부터 인덕턴스의 영향의 유무에 따른 스위칭시간 내에서의 총 입력전류의 양을 구할 수 있다.

1) 인덕턴스의 영향을 반영할 때

$$I_1 = \int_0^T I_0\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)dt \tag{9}$$

2) 인덕턴스의 영향을 반영안할 때

$$I_2 = I_0 \times T \tag{10}$$

그림 6에 위의 식 (9), (10)을 회전수에 대해서 그래프로 나타내었다. 그림 6에서 볼 때 두 그래프의 차이를 구별하기 쉽지 않으므로, 그림 7에서는 고회전 영역에서만의 세부적인 그래프를 나타내었다. 그림 7을 보았을 때 인덕턴스의 영향유무에 따라서 입력되는 전류의 양이 크게 차이가 나게 됨을 확인할 수 있다. 인덕턴스의 영향 유무에 따른 전류량의 비(current ratio)를 p 라하고

아래의 식(11)로서 나타내면, 그림 8과 같은 그래프로서 전류량의 비를 표현할 수 있다.

$$p = \frac{I_1}{I_2} \times 100 \tag{11}$$

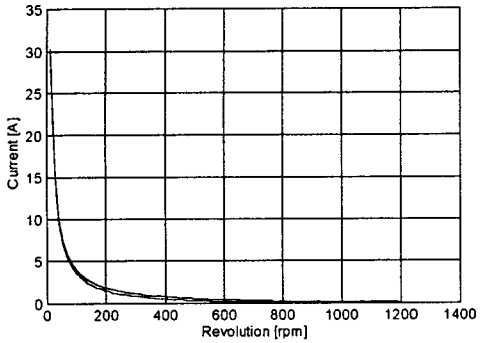

그림 6 전회전 영역에서의 인덕턴스 영향 유무에 따른 입력전류의 차이
(상) 인덕턴스 영향 미반영
(하) 인덕턴스 영향 반영

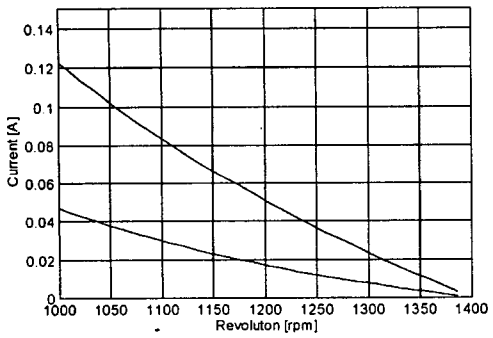

그림 7 고회전 영역에서의 인덕턴스 영향 유무에 따른 입력전류의 차이
(상) 인덕턴스 영향 미반영
(하) 인덕턴스 영향 반영

인덕턴스의 영향 유무에 따른 각각의 토오크는 아래 식과 같다.

$$T_1 = K_T I_0 p \tag{12}$$

$$T_2 = K_T I_0 \tag{13}$$

따라서 회전수는 아래 식과 같이 계산된다.

$$N_1 = \frac{60}{2\pi} \times \frac{V_a - I_0 R p}{K_E} \tag{14}$$

$$N_2 = \frac{60}{2\pi} \times \frac{V_a - I_0 R}{K_E} \tag{15}$$

식 (12),(13),(14)와 (15)를 이용하면 그림 9와 같이 인덕턴스의 영향에 의한 T-N곡선을 산출할 수 있다. 그림 8에서 볼 때 회전수가 높아질수록 전류량의 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 전류량의 차이가 커지는데도 불구하고 그림 9의 고회전 영역에서 T-N곡선의 차이가 적어지는 이유는, 식 (8)에서처럼 고회전 영역에서는 스위칭시간이 0에 가까워지기 때문에 총 입력전류가 각각의 경우 모두 0에 수렴되기 때문이다.

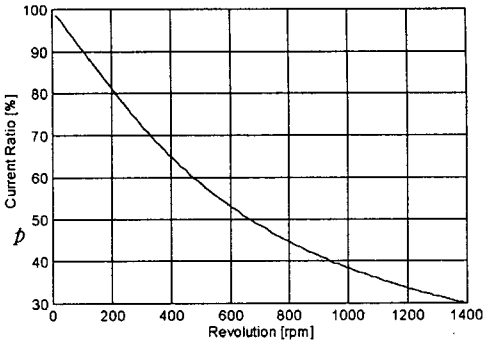

그림 8 인덕턴스 영향 유무에 따른 전류량의 비 p

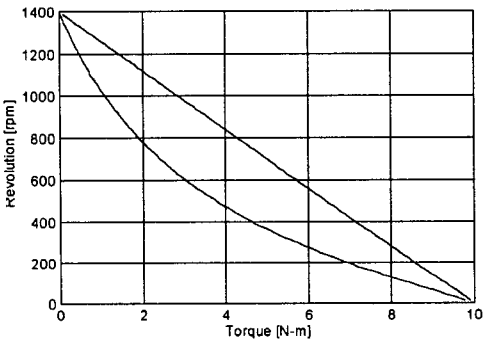

그림 9 Matlab에 의하여 산출된 T-N곡선
(상) 인덕턴스 영향 미반영
(하) 인덕턴스 영향 반영

4. 결 론

DC모터의 T-N특성이 인덕턴스 영향에 의하여 곡선화되는 것을 모터 설계 시에 예측하는 것은 매우 중요하다. 하지만 이를 산출하는 방법은 일반화 되어있지 않다. 본 논문에서는 대형 DC모터가 인덕턴스의 영향에 의하여 곡선화된 T-N특성의 정량적인 값을 산출할 수 있는 방법을 Matlab을 이용하여 도출하였다. 그리고 이 과정에 있어서 T-N특성이 곡선화되는 원리 또한 Matlab을 이용하여 세부적으로 다룸으로써 이해하기 용이하도록 하였다.

[참 고 문 헌]

[1] J.R. Hendershot Jr. and TJE Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press Oxford, pp. 5/39-5/42, 1994.