

Switched Reluctance Motor에서 인덕턴스 프로필에 따른 토오크 특성

◦공관식 박한웅 안진우 황영문
 국방과학연구소 해군사관학교 경상대학교 부산대학교

Torque Characteristics by the Inductance Profiles
of a Switched Reluctance Motor

◦GwanSik KONG HanWoong PARK JinWoo AHN YoungMoon HWANG
 A. D. D. Naval Academy KyungSung Univ. Pusan Nat'l Univ.

Abstract

A calculation method for predicting the instantaneous torques by the inductance profiles of a switched reluctance motor (SRM) is presented. The method considers saturation and nonlinearities in the magnetic circuits.

The inductance of SRM varies complex according to the input current waveforms and rotor position angle, thus the accurate calculation technique is needed to estimate the inductance value at arbitrary input current and rotor position angle.

This paper describes how the inductance profiles influence the torque produced by the input current of SRM and, proposes a calculation technique of the permeabilities, reluctances, current waveforms and torques of a 6/4 3-phase SRM.

1. 서 론

Switched Reluctance Motor(SRM)의 토오크는 전동기의 인덕턴스 변화에 의하여 발생되므로 토오크특성을 파악하기 위해서는 인덕턴스의 프로필을 예측하는 것이 필요하다. 전동기의 철심은 자기적으로 비선형 특성을 갖고 있어서 SRM의 입력전류와 회전자의 이동각도에 따라 자기저항인 릴럭턴스가 비선형적으로 변하므로 릴럭턴스에 의해 계산되는 전동기의 인덕턴스도 따라서 변한다. SRM을 구동시키기 위해서는 회전자 각도에 따라 특정구간에 직류전압을 인가하는데 그 때의 전류와 인덕턴스는 밀접한 관계를 가지고 변하고 있으므로 순시전류와 회전자의 임의의 각도에 대한 인덕턴스 값을 계산해야만 정확한 전류파형과 토오크 특성곡선을 얻을 수 있다.

본 논문은 자기적 비선형적 특성을 고려한 SRM의 인덕턴스를 계산하여 SRM의 전압인가 구간에 따른 전류파형과 토오크특성곡선을 구할 수 있는 해석적 방법을 제시하였다. 자기적 비선형특성은 전동기의 철심용 H-18강판의 경우를 적용시켰으며 실제 전동기를 제작하기 위한 설계 데이터를 이용하여 전류파형 및 토오크 특성을 예측하고자 한다.

2. 비선형성을 고려한 인덕턴스 프로필

SRM의 릴럭턴스는 입력전류와 회전자의 이동각도상태에 따라 변하므로 릴럭턴스의 변화요인을 자기적 비선형성에 의한 요소와 회전자의 이동각도에 따른 자로의 기하학적 형상에 관한 요소로 구성할 수 있다. 릴럭턴스를 철심에 의한 것과 공극에 의한 것으로 나누면

$$R_c = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \sum_j \frac{l_{c_j}}{A_{c_j}} \quad \text{----- (1)}$$

$$R_g = \frac{1}{\mu_0} \sum_j \frac{l_{g_j}}{A_{g_j}} \quad \text{----- (2)}$$

R_c : 철심에 의한 릴럭턴스, R_g : 공극에 의한 릴럭턴스,
 μ_r : 비투자율, μ_0 : 공극의 투자율, l_{c_j} : 철심의 자로길이,
 l_{g_j} : 공극의 자로길이, A_{c_j} : 철심자로의 단면적,
 A_{g_j} : 공극자로의 단면적

각각 식(1), (2)와 같이 된다. 인덕턴스 프로필을 예측하려면 우선 자기회로의 릴럭턴스 및 그에 관련된 비투자율을 산정하는 것이 필요하다.

2.1 비투자율의 산정

공극의 투자율은 자기적 비선형과 무관하지만 철심의 공극에 대한 비투자율인 μ_r 은 철심의 자기 포화에 따라 변한다. 비투자율의 정확한 계산은 인덕턴스와 토오크를 계산함에 있어 필수적이다.

SRM의 한 상에 대한 기저력을 F, 자속을 ϕ , 고정자자극의 자속밀도를 Bc, 고정자 자극의 단면을 Ac라 할 때

$$F = N \cdot i = \phi \cdot R \quad \text{----- (3)}$$

N: 턴 수, i: 전류, R: 릴럭턴스

$$\phi = B_c \cdot A_c \quad \text{----- (4)}$$

의 등식이 성립하고 (1), (2), (3), (4)식으로 부터 비투자율은

$$\mu_r = \frac{\frac{1}{\mu_0} \sum_j \frac{l_{c_j}}{A_{c_j}}}{\frac{Ni}{B_c A_c}} - R_g \quad \text{----- (5)}$$

식(5)가 된다.

한편, 철심의 자화특성 곡선으로부터 얻을 수 있는 실험적 비투자율 μ_r 은 식(6)과 같다.

$$\mu_r = \frac{B_c}{\mu_0 H_c} \quad \text{----- (6)}$$

H_c : 철심의 단위길이당 암페어. 턴

식(5)의 등식내에 있는 임의의 전류값에 대한 적정 비투자율은 식(5), (6)을 자속밀도 B_c 에 대하여 그린 비투자율의 교점으로 부터 비투자율을 산정할 수 있다. 제작예정인 1Hp 6/4 SRM의 설계 데이터를 적용시켜 식(5)의 각각의 전류값에 대한 비투자율을 계산하였다.

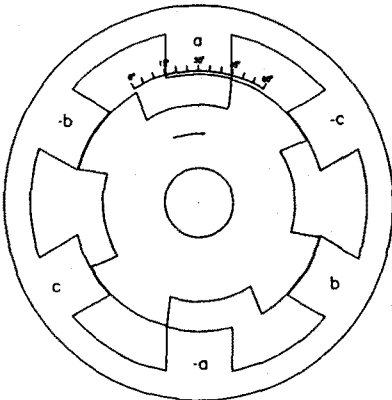


그림1. 1마력 6/4 SRM
Fig. 1. 1Hp 6/4 SRM

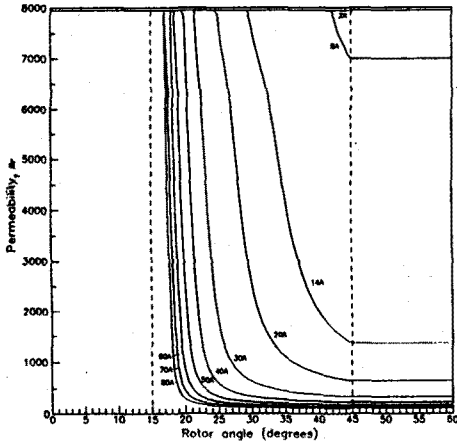


그림2. 산정된 비투자율
Fig. 2. Calculated permeability

산정된 비투자율은 전류와 회전자각도에 관한 함수이므로 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_r = \mu_r(\theta, i) \quad \text{----- (7)}$$

θ : 회전자의 이동각도

2.2 인덕턴스 프로파일

식(7)에 의해 산정된 비투자율과 관련된 릴럭턴스값은

$$R(\theta, i) = \frac{1}{\mu_r(\theta, i)\mu_0} \sum_j \frac{l_{c_j}}{A_{c_j}} + \frac{1}{\mu_0} \sum_j \frac{l_{g_j}}{A_{g_j}} \quad \text{----- (8)}$$

식(8)과 같이 된다.

인덕턴스를 계산하기 위하여 전동기의 기자력에 관한 등식 및 자속쇄고에 관한 등식으로 인덕턴스와 릴럭턴스에 관한 등식을 유도하면

$$L(\theta, i) = \frac{N^2}{R(\theta, i)} \quad \text{----- (9)}$$

식(9)가 되고 회전자 각도 및 전류에 대해 나타난 인덕턴스 프로파일은 그림3과 같다.

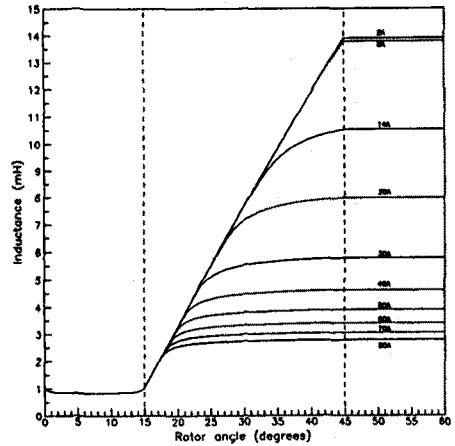


그림3. 인덕턴스 프로파일
Fig. 3. Inductance Profiles

2.3 토오크의 계산

자기적 coenergy를 W_c 라 할때, 전류, 인덕턴스와의 관계식은

$$W_c = \frac{1}{2} i^2 \cdot L(\theta, i) \quad \text{----- (10)}$$

식(10)과 같이 되고 이때 토오크 $T(\theta, i)$ 는

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W_c(\theta, i)}{\partial \theta} \quad \text{----- (11)}$$

식(11)이 되므로 식(10), (11)에 의해서 토오크는

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} i^2 \frac{d}{d\theta} L(\theta, i) \quad \text{----- (12)}$$

식(12)로 된다.

위의 식을 이용하여 토오크를 계산한 결과는 그림4와 같다.

그림4에서 나타난 토오크의 특징은

- 1) 전류값이 클수록 자기포화에 의해 인덕턴스 변화구간이 좁아져서 토오크 생성구간 폭이 좁아지며 토오크의 크기는 전류의 제곱에 비례하므로 매우 커진다.
- 2) 회전자의 이동각도가 0° - 7.5° 구간까지는 인덕턴스의 감소로 인하여 역방향의 토오크가 발생한다.

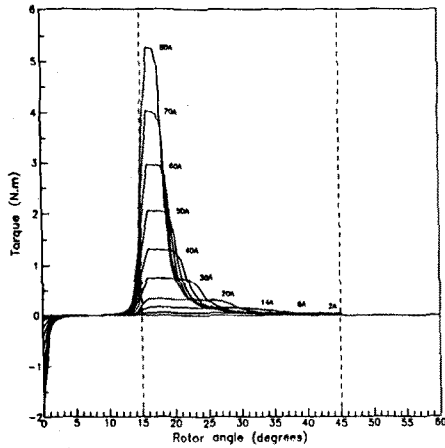


그림4. 토오크 특성
Fig. 4. Torque characteristics

3. 전압 인가시 전류, 토오크의 계산

3.1 전압동식

SRM에 전압을 인가하는 방법은 그림5(b)에서의 같이 인덕턴스가 최소값을 갖는 구간사이에서 회전자각도 θ_{on} 에서 +E전압을 인가한 후 인덕턴스 상승구간 사이의 회전자 각도 θ_{off} 에서 인가전압을 -E로 전환시킨다. 전압스위칭기구는 그림5(a)와 같은 회로를 사용할수 있다.

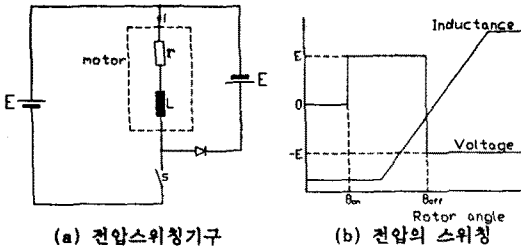


그림5. 전압의 스위칭
Fig. 5. Voltage Switching

전동기의 회전수가 일정할 때 전압동식은 다음과 같다.

$$E = [r + \omega \frac{d}{d\theta} L(\theta, i)]i + L(\theta, i) \frac{di}{dt} \quad \text{--- (13)}$$

ω : 회전자의 각속도, r : 고정자 권선저항

3.2 전류해

식(13)으로부터 그림6 (b)의 구간별 전류해를 구하면

i) $\theta_{on} - \theta_{off}$ 구간 :

$$i = \frac{E}{r + \omega \frac{d}{d\theta} L(\theta, i)} \left[1 - e^{-\frac{r + \omega \frac{d}{d\theta} L(\theta, i) (\theta - \theta_{on})}{L(\theta, i) \omega}} \right] \quad \text{--- (14)}$$

ii) θ_{off} 이상 구간 :

$$i = i_0 e^{-\frac{r + \omega \frac{d}{d\theta} L(\theta, i) (\theta - \theta_{off})}{L(\theta, i) \omega}} \left[1 - e^{-\frac{r + \omega \frac{d}{d\theta} L(\theta, i) (\theta - \theta_{off})}{L(\theta, i) \omega}} \right] \quad \text{--- (15)}$$

i_0 : $\theta = \theta_{off}$ 에서 초기전류값

3.3 전류파형, 토오크

설계된 SRM의 각 상에 스위칭 구간별로 $E=305(VDC)$ 를 인가하며 각 상의 권선저항 $r=94(m\Omega)$, 속도=3000(rpm)의 데이터를 적용했을 때 스위칭 각도에 따른 전류파형 및 토오크를 식(14), (15)에 의해 계산하였다.

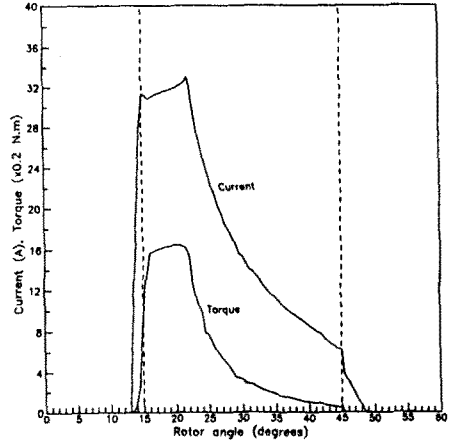


그림6. 전류파형 및 토오크
Fig. 6. Current waveform and torque

4. 결 론

SRM에서 자기회로의 비선형성을 고려하여 릴럭턴스를 해석함으로써 전류와 회전자 각도에 따른 인덕턴스 프로필을 구했으며, 인가전압구간에 따른 전류파형을 계산하였다. 또 구해진 입력전류와 인덕턴스 프로필을 이용하여 출력토오크를 계산할 수 있으므로 여러가지 조건에서 전동기의 토오크 특성을 파악할 수 있다. 시뮬레이션에 사용한 전동기 정수는 1HP 6/4 3 ϕ SRM으로 실제 제작을 위해 설계된 값이다.

5. 참고 문헌

- 1) P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, "Variable-speed switched reluctance motors", IEE Proc., Vol.127, Pt.B, No.4, July 1980
- 2) Slobodan Vukosavić, Victor R.Stefanović, "SRM Inverter Topologies : A Comparative Evaluation" IEEE Trans. I.A., Vol 27, No.6, Nov. 1991
- 3) J.M.Stephenson, J.Čorda, "Comparison of torque and current in doubly salient reluctance motors from nonlinear magnetisation data", IEEE Proc., Vol.126, No.5, May 1979