

스위치드 릴럭턴스 모터에서의 토오크 특성

김기봉, 표상연, 김판돌, 박윤서
삼성전자(주) 생활시스템 연구소

Torque Characteristics in Switched Reluctance Motor

Ki-Bong Kim, Sang-Youn Pho, Pan-Dol Kim, and Yoon-Sur Park
Living System R&D Center, Samsung Electronics Co.

Abstract - 스위치드 릴럭턴스 모터의 소음과 진동의 원인은 토오크의 불균일 특성에 기인한다고 볼 수 있다. 토오크는 회전자의 각도에 따라 법선 성분인 radial torque 와 접선성분인 tangential torque 로 분해될 수 있고 그 비율은 주기적으로 변화한다. 이 가운데 소음, 진동의 원인이 되는 성분은 radial torque 이며, 이 성분은 모터 구조의 설계에 따라 다른 특성을 나타낸다. 본 논문은 이에 대한 분석에서 스위치드 릴럭턴스 모터의 실용화 설계의 한 방법을 제시하였다.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 모터는 경제적인 시스템 구성, 고 효율, 견고성 등의 장점으로 가치에 대한 기대가 높아 많은 관심을 가지고 연구 개발을 시작하였으나 실용화를 위하여 갖추어야 할 몇 가지 문제, 특히 소음과 진동을 해결하지 못하여 지금까지 넓게 확산되지는 못하였다.[1] 소음과 진동의 원인은 토오크의 불균일 특성이 일차 기인한다고 볼 수 있다. 스위치드 릴럭턴스 모터는 전자제어회로에 의해 구동되므로 모터의 형상과 더불어 토오크 제어의 방법에 의해 실용화 문제를 해답을 구할 수 있다. 본 논문에서는 토오크의 특성을 정밀하게 분석함으로써 모터 설계시 저소음, 저진동의 해답을 찾으려고 노력하였다. 토오크는 회전자의 각도에 따라 법선 성분인 radial torque 와 접선성분인 tangential torque 로 분해될 수 있고 그 비율은 주기적으로 변화 한다. 이 가운데 소음, 진동의 원인이 되는 성분은 radial torque 이며 이 성분은 모터 구조의 설계에 따라 다른 특성을 나타낸다. 소음, 진동의 연구에서 볼 때는 흔히 언급하는 torque ripple 의 사용은 radial torque ripple 로 한정되어야 하며, 본 논문은 이에 대한 분석

에서 스위치드 릴럭턴스 모터의 실용화 설계의 한 방법을 제시하였다.

2. 모터의 구조 및 구동회로

본 논문에서는 3상인 두가지의 스위치드 릴럭턴스 모터를 비교하여 해석하였는데, 하나는 6-stator pole 과 4-rotor pole 구조이고 다른 하나는 12-stator pole 과 8-rotor pole 인 구조이다. 두가지 모두는 같은 외경, 공극 직경, 적층 높이를 가지고 있다. 구동회로의 방식에 따라 전류의 흐름이 달라지며, 본 논문에서는 알려져 있는 여러가지 종류의 구동회로 가운데서 Asymmetric Topology 을 채용하였다. 이와 같은 SRM 구동회로에서는 power switch 가 상권선의 상단과 하단에 걸쳐 있는데, 하단의 bias 전압은 전원의 common 되어 영전위이나 상단의 bias 전압은 상권선의 기전력이므로 매우 높은 상대 전압을 나타내게 된다. 이때의 gate 전압을 독립시키기 위하여 별도의 제어 전원을 사용하는 대신 gate drive IC 를 사용하므로 써 회로를 단순화시킨다. 또한, 위치감지를 위하여 position sensor 는 photo interrupter 를 사용함으로써 SRM 의 최대 장점인 저가격의 system 구현을 위한 회로 구성을 하였다.

3. 토오크 계산

설계된 직경과 적층높이의 모터에 있어서 권선의 전류에 의하여 저장되는 co-energy 는 (1) 과 같이 표현되며, 에너지의 각도에 대한 미분식으로 표현되는 토오크는 (2)와 같이 표현된다.

$$W_n = \int_0^{\theta_n} \psi di \quad (J) \quad (1)$$

$$T_n = - \frac{2\psi}{\theta_n} \quad (\text{N.m}) \quad (2)$$

is constant

위의 식에서 보는 바와 같이, 토오크를 구하기 위해서는 쇄교 자속의 계산이 이루어 져야 하며 자속의 계산은 인덕턴스의 계산에서, 그리고 인덕턴스의 계산은 vector magnetic potential, A, 의 계산에서부터 출발한다. vector magnetic potential, A,의 계산은 (3)과 같은 Maxwell 방정식에서부터 구할 수 있다.

$$\nabla \times H = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J \quad (3)$$

이를 유한요소법을 적용하여 (4)의 공식을 만족하는 최적 해를 구하여 자속과 인덕턴스를 구한다.

$$\sum_{e=1}^{NTE} ([S_{ij}^e] [A_{ie}] + [F_i^e]) = [0] \quad (4)$$

여기서 [S] 는 system matrix, [F] 는 force matrix 이다.

원형좌표계에서 torque 는 접선분력과 법선 분력으로 분해될 수 있는데, 접선분력은 회전자의 회전력에, 법선 분력은 웅축력에 각각 기여하게 된다. 소음 진동의 원인이 되는 torque ripple 은 법선 성분 때문인데, 이 법선 성분은 회전자의 각도에 따라 vector 적으로 정의 값을 갖기도 하고 부의 값을 갖기도 한다. 회전자가 align 되었을 때는 정의 값을 가지므로 torque ripple 이 적게 되기 위해서는 부의 값을 갖는 법선 분력의 발생이 없도록 하며 최대 법선력과 최소법선력의 차이가 되도록 적도록 하여야 한다.

임의의 회전자 각도에서 회전자의 유효반경을 R_o , 공극 거리를 a_g , 회전자 및 고정자 극 사이의 거리를 a_e 라 할 때, 법선 분력 T_R 은,

$$\sqrt{R_o^2 + a_e^2} > R_o + a_g \quad \text{for } T_R \text{ negative}$$

$$\sqrt{R_o^2 + a_e^2} < R_o + a_g \quad \text{for } T_R \text{ positive}$$

의 부등식이 성립한다.

위와 같은 부등식에서 정의 법선 분력을 갖는 조건은

(5)와 같다.

$$a_e > ag \sqrt{1 + \frac{2R_o}{ag}} \quad (5)$$

이상의 결과에서 저소음 설계의 방법은 stator pole 과 rotor pole 사이의 간격을 (5)의 조건에 맞게 좁히도록 함이 유리하며, torque impulse 의 크기를 전 구동구간에서 줄이도록 함이 바람직하다는 결론을 얻는다.[2] 보다 일반적인 해를 얻기 위하여 그림 1과 같이 고정자와 회전자가 비동축인 경우를 가정한다. 실용에 있어서 베어링, 지지 구조물, 코아 등의 제작과정에서 허용되는 제 공차들로 인하여 비동축인 것이 대부분이다.

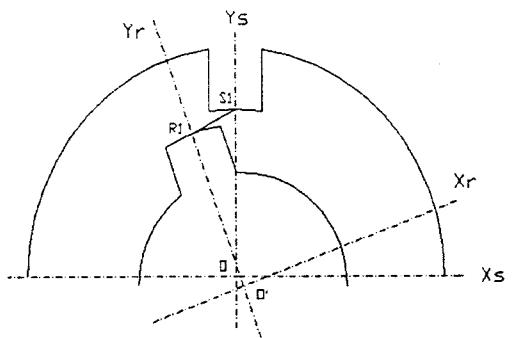


그림 1, 비동축 중심좌표를 가진 고정자와 회전자의 토오크 작용계

그림에서, L_1 은 회전자 극에서 고정자 수직 법선까지의 거리, L_2 는 회전자 극의 접선이 고정자 수직법선과 만나는 점에서 고정자 극까지의 거리, L_3 는 회전자 극에서 고정자 극까지의 거리라고 하면 토오크의 법선 성분, T_r , 과 접선성분, T_t , 는

$$T_r = T \frac{L_2}{L_3} \quad (6)$$

$$T_t = T \frac{L_1}{L_3} \quad (7)$$

인데, L_3 는 항상 정의 값을 가지므로, 법선 성분 토오크가 부의 값을 가지기 위한 조건은 L_2 가 부의 값을 가져야 하며 이를 만족하려면 부등식 (8),(9)가 성립한다.

$$R_p + ag < \frac{R_p}{\cos \theta} \quad (8)$$

$$\theta < \cos^{-1}\left(\frac{R_p}{R_p + ag}\right) \quad (9)$$

계산의 예로써, 반경 R_p 가 30 mm, 공극거리가 0.3 mm인 경우에서의 각도는 8.07도이다. 즉, 2병렬회로로 구성된 계에서는 이러한 조건을 만족하나 6/4 pole SRM과 같이 단일 구성된 계에서는 이 조건을 만족하지 못함을 알 수 있다. 분해된 radial torque의 회전각 및 구동 시간에 따른 분포는 그림 2와 같다. 그림 3은 pole 간의 간격을 줄이기 위하여 같은 2개의 병렬회로를 가지며 극수를 2배로 하는 구조인 경우에서의 자속 흐름이며, 그림 4는 torque impulse를 줄이기 위하여 회전자극에 pole shoe를 만든 경우의 자속 흐름이다. 이러한 형상 변화는 torque impulse의 급격한 발생을 억제하여 소음 진동의 크기를 줄이는데 목적이 있다.[2]

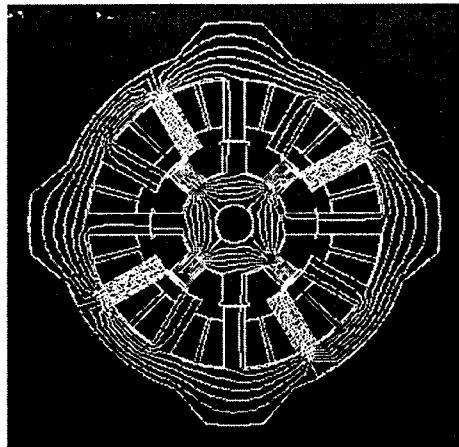


그림 4. Pole shoe 와 두개의 병렬회로를 가진 3상 SRM에서의 자속흐름

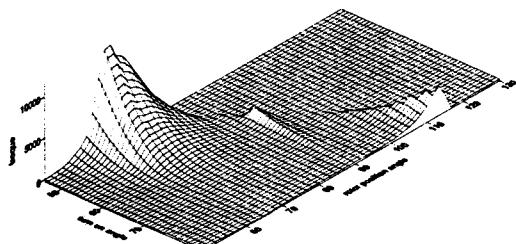


그림 2. Radial Torque 분포

【참 고 문 헌】

- [1] G.W. Buckley, "Switched reluctance Motor for the Appliance Industry", Appliance Manufacturer Conference & Exposition, Sep. 1995
- [2] Ki-Bong Kim, "Field Analysis of Low Acoustic Noise Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.33, No.2, March 1997

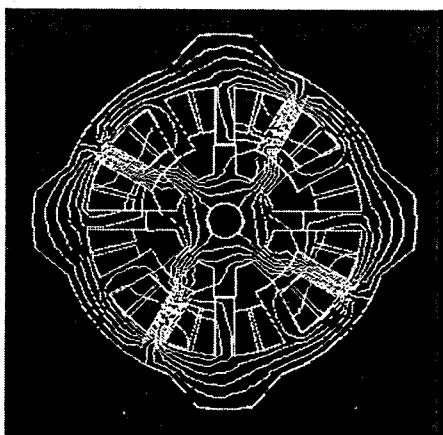


그림3, 두개의 병렬회로를 가진 3상 SRM의 자속