2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2001.7.18-20

회전자의 형상 변화에 의한 SRM의 Cogging Torque 저감 설계

김 동 석, 박 관 수
한국해양대학교 전기공학과

Rotor Shape Design to Decrease the Cogging Torque in SRM

Dong Sok Kim and Gwan Soo Park
Dept. Electrical Engineering, Korea Maritime University

Abstract - SRM은 회전자의 구조가 간단하고 간단한 제어장치로 구동이 가능한 장점이 있지만 Cogging Torque로 인한 소음, 진동, 토크리플 등으로 인해 SRM의 안정화 운전에 장애가 되는 단점이 있다. 이를 제거하기 위한 방법으로는 외부회로에 제어기를 도입하여 전류파형을 조절하는 방법이 있으나 이 경우 고가의 복잡한 정밀제어기를 부착해야한다. 본 연구에서는 회전자의 형상을 조절하여 Cogging Torque를 감소시키는 방법을 연구한다. 이를 위하여 유한요소법을 이용하여 설계변수의 민감도를 계산하고 최적화 기법을 사용하여 형상변경 실시를 반복하여 최적설계를 하고자 한다.

1. 서 론

현대 정보사회에서 디지털 기술이 발달함에 따라 정보기기와 같이 전동기의 입력도 디지털화하고 있으며 디지털 신호에 의하여 작동하는 전동기가 늘어나고 있다. 디지털 신호에 의한 전동기는 고주파 전류 성분이 많아짐에 따라 전동기의 Cogging Torque가 커지고 이에 따른 소음, 진동, 효율저하등의 문제가 발생하게 되었고 특히 정보기기 등과 같이 디지털 신호를 사용하는 정밀기기에서 이러한 소음, 진동, 저효율은 기기의 특성에 큰 영향을 미친다. 따라서 디지털 입력에 의한 전동기의 동작특성해석과 설계기법에 대한 연구가 필요하게 되었다.

스위치 릴럭턴스 모터(switched reluctance motor, 이하 SRM이라고 함)는 회전자의 구조가 간단하여 관성이 작고 순시 토오크 특성이 우수하고 견고한 특성을 가지고 있다. 그리고 브러시리스형으로써 제어가 간단하여 제어용 전동기로 적합하며, 전자구조 및 스위칭 드라이브를 제작면에도 유리하므로 타 전동기에 비해 제작 및 생산적측면에서도 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 SRM 드라이브는 토크 발생원리상 Cogging Torque인한 불균일 회전력이 발생한다. 이를 토크리플이라고 하는데 이로 인해 소음, 진동이 심하고 효율이 저하되며, 발열이 발생한다. 이것이 SRM의 실용화에 제약을 주고 있다. 이를 개선하기 위하여 방법으로는 정밀 제어기법을 도입하는 방식, 전류원 인버트를 사용하여 기자력 전류를 제어하는 방식, 그리고 스위치 오프시의 스위칭 패턴을 변화하는 방식등이 있다. 그러나 이것은 센서등의 추가등으로 제어회로가 복잡해지므로 제어회로가 고가가 된다.

본 연구에서는 외부제어기를 도입하는 대신 전동기의 회전자의 형상을 변경하여 전동기의 Cogging Torque를 줄이는 방법을 개발하고자 한다. 이를 위하여 SRM을 유한요소법으로 수치해석하여 민감도를 계산하고 최적화 기법으로 설계변수를 반복 계산을 실시하는 형상설계 기법으로 고조파 전류성분에 의한 전동기의 회전특성을 해석하여, 이를 바탕으로 디지털 운전을 위한 전동기의 최적설계 조건을 도출하고자 하였다.

2. SRM의 구조와 동작

2.1 SRM의 구조와 동작

SRM은 그림 1처럼 고정자와 회전자 모두 돌극이 있으며 회전자도 BLDC처럼 영구자석을 사용하지 않으므로 구조상으로는 가장 단순한 전동기이다. SRM은 고정자극 권선에 전류가 흘러 여자될 때 고정자극이 고정자의 자속쇄교를 최대로 하기위해 회전자극과 나란히 되려는 특성에 의해서 토크가 발생한다. 이로 인해 회전자가 회전하게 된다. SRM의 전력 컨버트 회로는 특정한 순간에 상권선을 여자하고 어떤 순간에는 여자를 하지 않으려는 정도에 따라 여러종류의 컨버트 회로가 사용된다. 그림 2는 이러한 SRM컨버터중 하나이다. 두 개의 스위치 T_1과 T_2가 턴온되면 상권선은 직류전원에 연결되고 전원으로부터 전류가 권선으로 흘러간다. 이 두 스위치가 턴오프되면 권선 전류는 D_1과 D_2를 통해 흐르게 되며 권선에 축적된 에너지는 전원으로 돌아가게 된다. 그렇지만 상권선에 스위칭 되는 전류는 기존 교류기에 비해 정현파형이 아니라서 시간 및 공간 고조파가 불가피하게 발생하게된다.

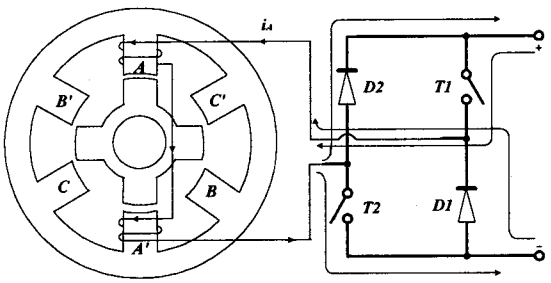

Fig 1. SRM face and convertor curcuit
그림 1. SRM의 단면과 컨버터 회로

3. SRM의 해석에 적용된 이론

3.1 전류의 상 변화에 따른 SRM의 토크

K번째 상이 여자되었을 때 발생하는 토크는 시스템의 저장에너지를 각도를 미분함으로써 얻을수 있는데 시스템의 저장에너지

$$dW_k = i_k d\lambda_k \tag{1}$$

여기서 쇄교자속 λ는

$$\lambda_k = L_k i_k \tag{2}$$

이며, 여기서 W_k는

$$W_k = \frac{1}{2} L_k i_k^2 \tag{3}$$

토크를 구하기 위해서 에너지를 각도로 미분하면 토크는

$$\frac{\partial W_k}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\partial L_k(\theta_k)}{\partial \theta} + L_k i_k \frac{\partial i_k}{\partial \theta} \quad (4)$$

전류가 동일하므로

$$T_k = \frac{\partial W_k}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i_k^2 \frac{\partial L_k(\theta_k)}{\partial \theta} \quad (5)$$

3.2 유한요소법을 이용한 해석

전자력 밀도 f는 전류밀도 J와 자속밀도 B에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$f = J \times B \quad (6)$$

Maxwell 방정식을 이용하면 식 (6)은

$$f = (\nabla \times H) \times B = \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times B) \times B \quad (7)$$

가 된다. 따라서 체적 V인 물체에 작용하는 총전자력은

$$F = \int_V f dv = \int_V \frac{1}{\mu_0} (\nabla \times B) \times B dv \quad (8)$$

로 된다. 그런데 식 (8)은 surface stress P에 의해 물체를 포함하는 임의의 표면에 대한 면적분으로 바꿀 수 있다.

$$F = \int_V \frac{1}{\mu_0} \left[(B \cdot \hat{n}) B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} \right] ds \quad (9)$$

가 된다. 식 (9)은

$$F = \int_S P ds \quad (10)$$

와 같이 쓸 수 있고, 여기서

$$P = \frac{1}{\mu_0} \left[(B \cdot \hat{n}) B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \hat{n} \right] \quad (11)$$

이며 Maxwell stress tensor로 부른다.

4. 초기 형상 해석

4.1 초기 형상의 구조와 크기

해석한 SRM은 고정자와 회전자가 각각 6극과 4극으로 이루어져 있다. 크기는 고정자의 반경이 69.95[mm]이며, 회전자와 고정자 사이의 gap은 0.6[mm]이다. 그림4는 SRM의 단면도와 치수이다.

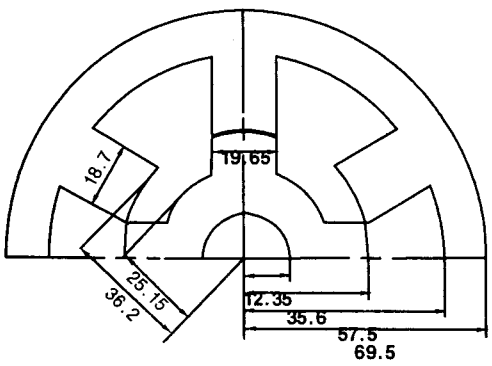

그림 2. SRM의 단면도와 치수

4.1 입력전류와 해석결과

권선에 여가한 전류는 5×10^7[A/m²]로 가정하였다. 그림 1의 코일 전류 B,B'와 C,C'에 전류를 흘려서 최적의 토크를 해석하였다. 또한, 입력전류를 그림 3와 같이 5°(1주기:25°~29°) 중첩하여 주었다. 이렇게 해석한 결과 평균토크는 10.75[Nm]이며, 토크리플은 32.9[%]였다. 그림 4은 이때의 토크모양이다.

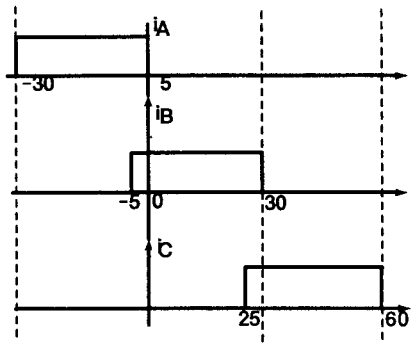

그림 3. 입력전류 형태 및 중첩정도

그림 4. 유한요소법을 이용하여 해석한 변형전의 토크

5. 형상설계 및 해석결과

5.1 Rotor의 형상변형

회전자극의 폭을 회전방향쪽만 그림5와 같이 늘렸다. 입력전류는 변형전(그림 3.)과 동일하게 주었다. 그 결과, 평균토크는 10.00[Nm]이며, 토크리플은 98.94[%]였다. 그림 6.은 이때의 토크파형이다.

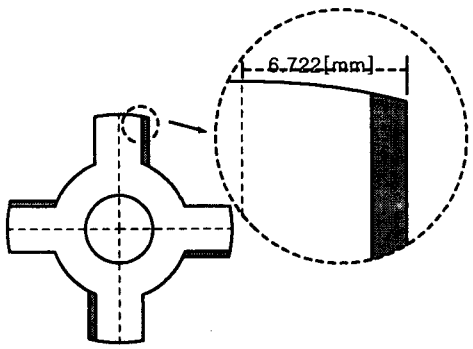

그림 5. 변형된 회전자의 형상

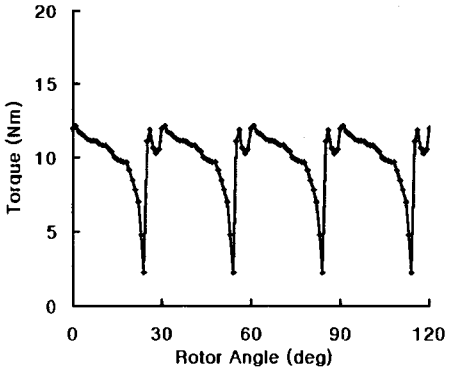

그림 6. Rotor의 형상 변형
다른 조건은 변형전과 동일하게 줌

5.2 주기의 시작지점 변경과 중첩추가

각 주기의 시작점과 끝점을 변형전보다 5°앞당겼다. 또 각주기(한주기:0°~29°)에 있어서 중첩부분(0°~5°:추가부분 와 25°~29°)을 5°추가하였다. 그리고 입력전류의 크기는 변형전과 동일하게 주었다.
그 결과, 평균토크는 10.73[Nm]이며, 토크리플은 28.72[%]였다. 그림 7은 전류입력방법 이며, 그림 8은 이때의 토크형태이다.

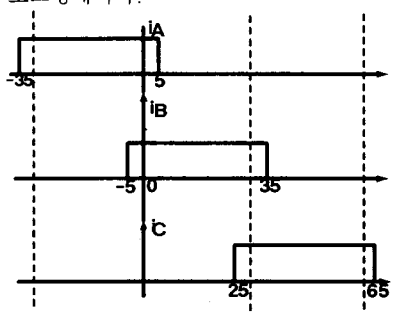

그림 7. 입력전류

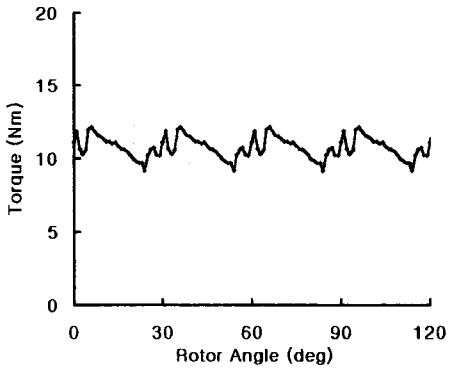

그림 8. 중첩부분 추가에 따른 토크파형

5.3 각주기의 시작점과 끝점만 변화를 줌

각주기의 시작점과 끝점을 변형전 보다 5도 압당기도 중첩정도는 변형전과 동일하게 각주기(한주기:0°~29°)당 5도씩(한주기의 중첩부분: 25°~29°)만 주었다. 그 결과, 평균토크는 10.89[Nm]이며, 토크리플은 25.49[%]였다. 그림 9는 이때의 토크파형이다.

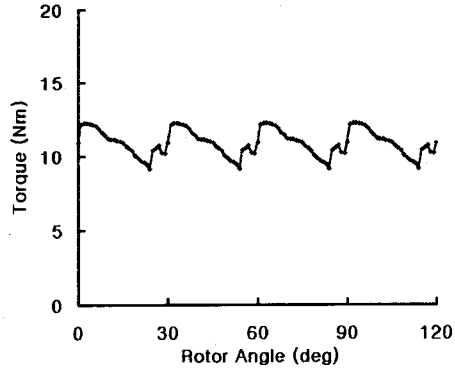

그림 9. 중첩시점만 변화, 중첩정도는 동일

6. 결 론

본 연구에서는 SRM의 소음, 진동 및 토크 리플의 원인이 되는 Cogging Torque 줄이기 위한 방법으로 SRM의 회전자 형상을 최적설계 하고자한다. 먼저 SRM의 초기형상을 유한요소법을 사용하여 각각의 회전각도에 대한 토크를 해석하였다. 이를 바탕으로 토크 리플을 산출한 결과 토크리플이 32.9[%]인 것으로 해석이 되었다. 이를 줄이기 위해 본 논문에서는 Rotor 극의 폭을 변화시켜보았다. 그 결과 토크리플이 25.49[%]로 줄어들었다. 변형전보다 토크리플을 낮추는데는 성공하였으나 이 정도의 토크리플에도 여전히 소음과 진동이 존재한다. 따라서, 본 논문을 토대로 Cogging Torque를 줄이기 위한 새로운 형상변형을 통한 최적설계를 계속하여야 한다. 지금까지는 선형성에 맞춰 해석해왔으므로, 비선형성이 고려된 유한요소법을 이용한 해석이 필요하며, 이를 토대로 민감도 계산과 최적화기법을 적용하여 형상변형을 반복하여 Cogging Torque를 최소화 하여야한다.

[감사의 말]
본 논문은 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소의 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

[1] Sayeed Mir, Malik E. Elbuluk, Iqbal Husain, "Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Using Adaptive Fuzzy Control" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. 35, NO. 2, pp. 461-468, 1999, March/April.
[2] 하경호, 홍정표, 김규탁, "스위칭에 따른 전자기 가진력에 의한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자 변위해석" 전기학회 논문지, 49권, pp. 20-26, 2000, 1월.
[3] 오석규, 정태구, 박한웅, 안진우, 황영문, "SRM 드라이브의 강인한 운전을 위한 PLL 제어방식" 전기학회 논문지, 48권, pp. 461-466, 1999, 9월.
[4] 황영문, 정태구, 오석규, 추영배, "SRM 직류여자 전류방식에 의한 진동, 소음의 저감 대책에 관한 연구" 전기학회 논문지, 49권, pp. 1-8, 2000, 1월.
[5] Ciro Attainese, Vito Nardi, Aldo Perfetto, and Giuseppe Tomasso, "Vectorial Torque Contral: A Novel Approach to Torque and Flux Control of Induction Motor Drives" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, Vol. 35, NO. 6, pp. 1399-1405, 1999, November/December.