

기동 방법에 따른 단상 SRM의 토크 특성 해석

(The Torque Characteristics Analysis of the Single-Phase Switched Reluctance Motor According to the Starting Method)

김준호* · 김일중**

(Jun-Ho Kim · IL-Jung Kim)

Abstract

The single-phase switched reluctance motor(SRM) has only one inductance variation and the positive torque is generated in the restricted section. So, it cannot be started by itself. To solve this problem, many researchers have addressed the several starting method for the single-phase SRM.

This paper is focused on the torque characteristics of the single-phase SRM according to starting method. The four major starting method - permanent magnet, saturable stator pole, to grade the rotor, stepped rotor pole - is selected to analyze the torque characteristics. The analysis model of each starting method is designed to changed the pole shape or inserting other material in the basic model. The torque characteristics of each analysis model is obtained by using FEM analysis. The FEM analysis is performed at incremental rotor positions over half inductance cycle in any one pole with 250AT, 500AT, 750AT. The distortion factor of each analysis model is analyzed through the FFT to compare the distortion between basic model and four analysis model.

Key Words : Single-Phase, Switched Reluctance Motor, Starting Method, Permanent Magnet

1. 서 론

단상 SRM은 구조가 간단하여 튼튼하고 구동 회로

에 필요한 소자도 적어 경제적인 측면에서 큰 매력을 가지고 있기 때문에 산업용 팬 부하 구동이나 가정용 전자제품에 적용이 가능하다[1-3]. 그러나 순차적으로 극을 여자 시켜 모든 구간에서 토크를 발생시키는 3상 SRM과는 다르게 일반적으로 단상 SRM은 하나의 여자 권선에 의해 고정자의 모든 극이 동시에 여자되어 하나의 인덕턴스 파형만을 가진다. 정방향 토크가 발생하는 구간이 제한적이므로 토크 리플이 3상 SRM에 비하여 심하고 스스로 기동을 하지 못하는 단점을 가지고 있다[4].

단상 SRM을 기동시키기 위해서는 기동 시에 정방

* 주저자 : SK이노베이션 과장
** 교신저자 : 호서대학교 기계공학과 교수
* Main author : SK Innovation, Manager
** Corresponding author : HoSeo University,
Department of Mechanical Engineering,
Professor
Tel : 042-523-8667, Fax : 042-609-8740
E-mail : mocross@nate.com
접수일자 : 2012년 5월 25일
1차심사 : 2012년 5월 31일, 2차심사 : 2012년 6월 27일
심사완료 : 2012년 7월 17일

항 토크가 발생하는 구간, 즉 인덕턴스가 상승하는 지점에 회전자를 위치시켜야 한다. 이 문제를 해결하기 위하여 지금까지 다양한 방법의 단상 SRM 기동 방법이 논문 및 특허 등을 통해 소개되었고 각 기동 방법의 특징을 고려하여 다음과 같이 구분할 수 있다. 전자석으로 구성된 별도의 기동용 보조극을 고정자에 설치하는 방법, 고정자 또는 회전자에 영구자석을 설치하는 방법, 회전자 또는 고정자 극의 형상을 변경하여 여자 전류의 크기에 따른 자기 포화를 이용하는 방법, 공극의 크기를 변화시키는 방법 등이 있다[5-7].

지금까지 발표된 다양한 기동방법이 단상 SRM의 기동 문제 해결에는 도움이 되었지만 그로 인한 단점 또한 존재한다. 전자석을 이용하는 방법은 성능 측면에서 가장 좋지만 구조가 복잡하고 제어도 어렵기 때문에 단상 SRM의 경제적인 이점과는 부합되지 않는다. 영구자석을 이용하는 방법은 운전 중에도 영구자석이 지속적으로 회전자에 영향을 미쳐 운전 특성을 나쁘게 한다. 그리고 자기 포화나 공극의 크기를 변화시키는 기동 방법은 비대칭적인 구조와 이에 따른 비대칭적인 토크, 불충분한 기동 토크, 낮은 효율 등의 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 각 기동 방법이 단상 SRM의 토크 특성에 미치는 영향을 확인하여 최적의 운전 특성을 가지는 단상 SRM의 기동 방법을 선정하려고 한다.

2. 기동장치의 필요성

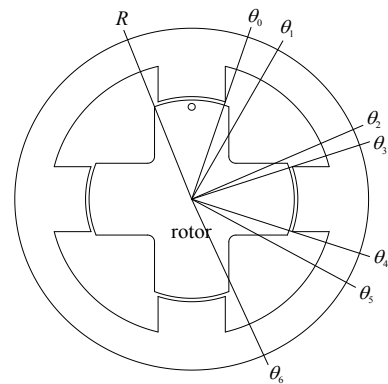
2.1 단상 SRM의 토크와 인덕턴스 파형

단상 SRM의 토크는 식 (1)과 같이 전류 i 의 제곱과 인덕턴스 L 의 기울기에 비례한다. 따라서 토크의 방향은 전류의 방향과는 무관하고 인덕턴스의 기울기에 의해 결정된다.

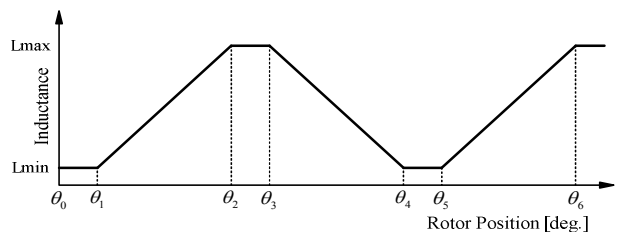
$$T_c = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \cdot \frac{1}{2} i^2 \quad (1)$$

그림 1 (a)의 4/4극 단상 SRM에서 일정한 전류

가 고정자에 흐른다고 가정하면 회전자의 축 R 이 고정자의 축 $\theta_0 \sim \theta_6$ 까지 회전했을 때, 이 구간에서의 인덕턴스 파형은 1 (b)와 같다. 그림 1 (b)의 인덕턴스 파형에서 정방향 토크가 발생하는 곳은 인덕턴스가 상승하는 $\theta_1 \sim \theta_2, \theta_5 \sim \theta_6$ 구간뿐이고, 이외의 구간은 역방향 토크가 발생하거나 토크가 전혀 발생하지 않는다. 따라서 단상 SRM이 기동을 하기 위해서는 기동 시에 회전자가 $\theta_1 \sim \theta_2, \theta_5 \sim \theta_6$ 와 같이 인덕턴스가 상승하는 지점에 위치해 있어야 한다.



(a) 4/4극 단상 SRM



(b) 인덕턴스 파형

그림 1. 4/4극 단상 SRM의 인덕턴스 파형
Fig. 1. The inductance variation of 4/4 pole single-phase SRM

2.2 단상 SRM의 회전 방향 결정

그림 1 (b)는 회전자가 시계 방향으로 회전하며 $\theta_0 \sim \theta_6$ 구간을 이동할 때의 인덕턴스 파형이다. 만약 회전자가 반시계 방향으로 회전하며 $\theta_6 \sim \theta_0$ 구간을 이동한다고 하면 $\theta_4 \sim \theta_3$ 에서 인덕턴스가 증가하고, $\theta_1 \sim \theta_2$,

$\theta_5 \sim \theta_6$ 구간에서는 인덕턴스가 감소한다. 즉 회전자와 회전자 방향에 따라 인덕턴스의 기울기는 상대적으로 되는 것이다. 이것은 그림 2를 보면 쉽게 확인할 수 있다. 그림 2 (a)는 회전자가 $\theta_1 \sim \theta_2$ 구간에 위치해 있는 것이고, 그림 2 (b)는 회전자가 $\theta_4 \sim \theta_3$ 사이에 위치해 있는 것이다. 그림 2 (a)의 회전자는 시계 방향으로 회전하고 그림 2 (b)의 회전자는 반시계 방향으로 회전한다. 따라서 단상 SRM의 회전자를 일정한 방향으로 회전시키기 위해서도 기동장치가 필요하다[8].

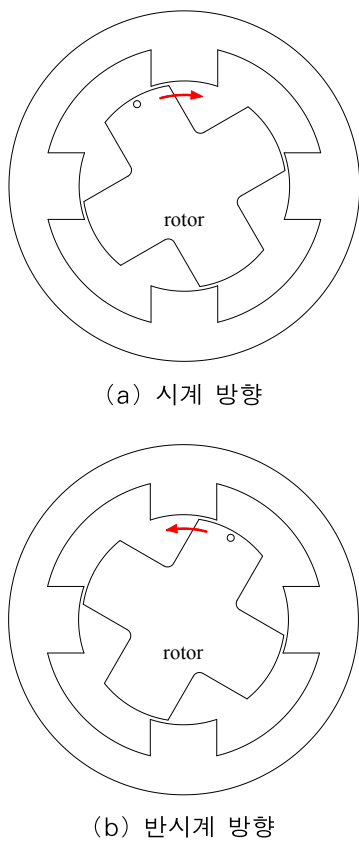


그림 2. 회전자 위치에 따른 회전자의 회전 방향
Fig. 2. Rotating direction of rotor according to rotor position

3. 해석모델 선정

기동 방법에 따른 단상 SRM의 토크 특성을 확인하기 위하여 그림 3과 같이 보편적으로 많이 사용되는 4/4극 단상 SRM을 기본 해석 모델로 선정하였다.

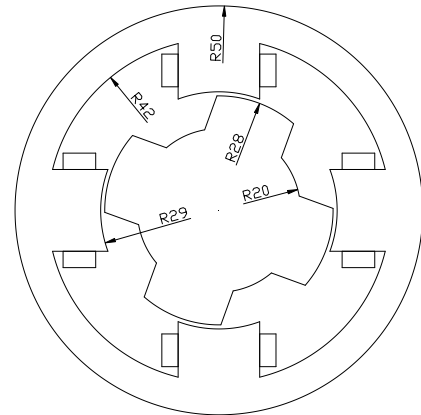


그림 3. 기본 해석 모델
Fig. 3. Basic analysis model

기본 해석 모델을 기준으로 고정자에 영구자석을 설치하거나 고정자 또는 회전자의 형태를 변경시키는 방법으로 네 가지 주요 기동방법에 따른 해석 모델을 추가하였다. 그림 4 (a)는 영구자석을 이용하는 방법, 그림 4 (b)는 자기 포화 영역을 이용하는 방법, 그림 4 (c), 4 (d)는 공극의 크기를 변화시키는 방법이다. 각각의 모델을 편의상 해석 모델 1, 2, 3, 4로 명명하였다.

해석 모델 1(그림 4 (a))에는 좌측과 우측의 고정자 극에 영구자석을 설치하였다. 해석 모델 2(그림 4 (b))는 12시와 9시 방향 고정자 극에 확장 극호를 설치하였고, 3시와 6시 방향 고정자 극에는 측면에 슬롯 형상을 추가하였다. 해석 모델 3(그림 4 (c))은 회전자 극호의 절반을 서서히 경사지게 만들어 극호의 중간부부터 공극을 조금씩 증가시켰다. 해석 모델 4(그림 4 (d))는 회전자 극호를 계단 구조로 만들어 극호 절반의 공극을 2배로 만들었다.

4. 각 기동방법에 따른 토크특성

4.1 토크 특성

기본 해석 모델과 해석 모델 1~4를 유한요소 해석을 이용하여 기자력이 250AT, 500AT, 750AT일 때의 토크 특성을 각각 구하였다. 해석 프로그램은 Maxwell V11.1을 이용하였고, 모델 1의 영구자석은 네오디뮴 계열의 NdFe35를 사용하였다. 모든 해석 모

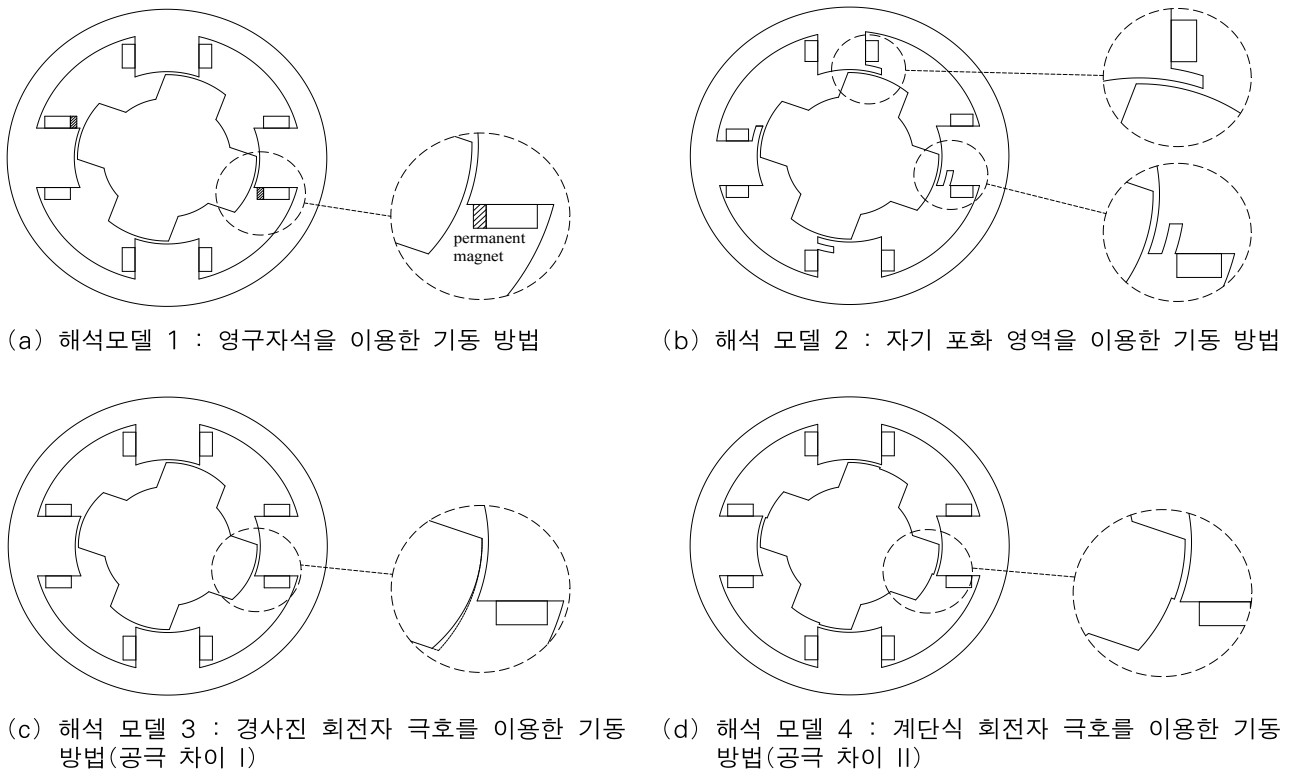


그림 4. 각 기동 방법에 따른 해석 모델
 Fig. 4. Analysis model for each starting method

델의 회전자를 반시계 방향으로 0.25°씩 회전시키면서 정방향 토크가 발생하는 0°~45°까지의 토크를 해석

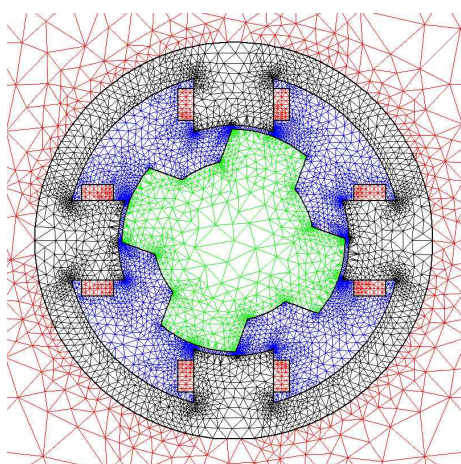


그림 5. 기본 해석모델의 요소 분할도
 Fig. 5. Element mesh for basic analysis model

하였다. 그림 5는 기본 해석 모델의 요소 분할을 나타낸 것이고 그림 6은 각 해석 모델이 기동 위치에 있을 때의 자속 밀도 분포와 자속의 흐름을 나타낸 것이다. 그림 7, 8, 9는 기자력이 각각 250AT, 500AT, 750AT 일 때의 토크 특성 곡형을 나타낸 것이다.

그림 7(250AT)에서 모델 1의 토크 특성 곡형은 영구자석 기자력의 영향으로 기본 모델과 형태는 비슷하지만 좌측으로 약 2° 이동되었다. 모델 2의 경우에는 고정자 극의 측면 슬롯과 확장 극호가 영향을 미칠 만큼 기자력이 충분히 높지 않아 기본 모델과 거의 유사하다. 모델 3은 전반적으로 왜형이 심하게 나타나 기본 모델과 완전히 다르게 나타났다, 모델 4는 공극이 커지기 전까지는 기본 모델과 거의 같지만 공극이 커지는 지점부터는 토크가 급격히 왜곡되었다. 그림 8(500AT)에서 모델 1은 영구자석 기자력에 의한 디텐트 토크가 여자 전류

기동 방법에 따른 단상 SRM의 토크 특성 해석

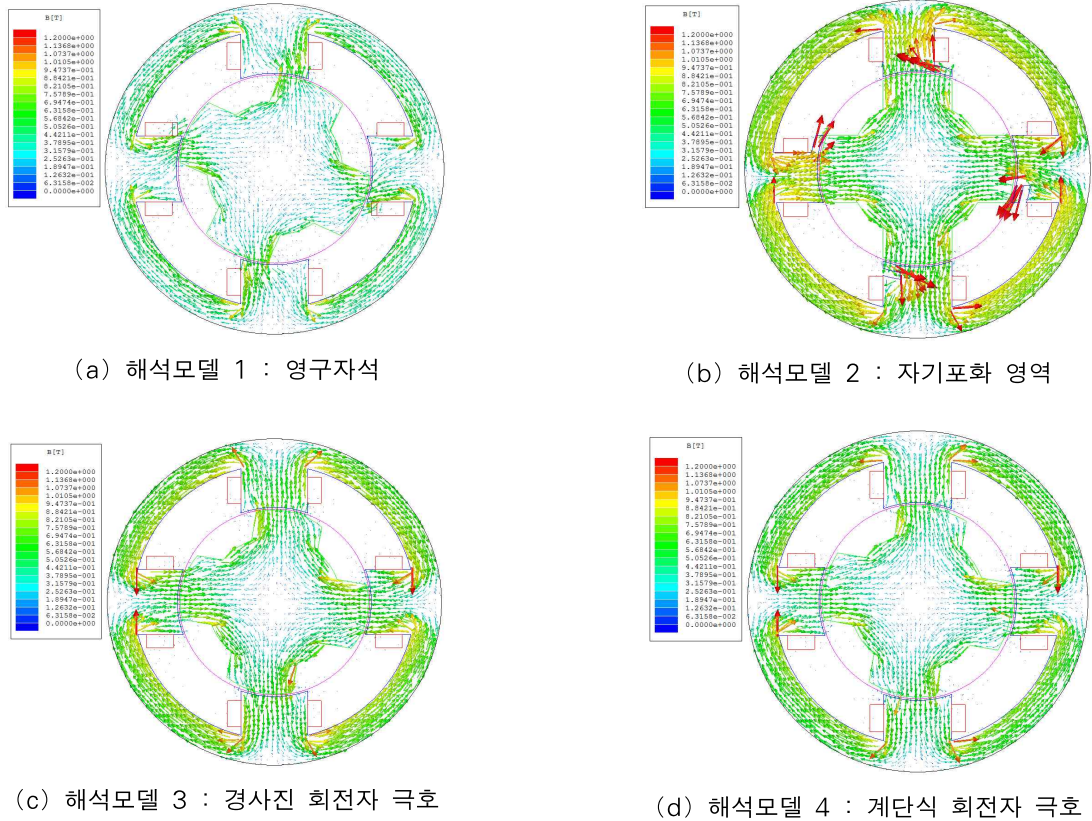


그림 6. 기자력이 500AT일 때 기동 위치에서의 자속 밀도 분포
 Fig. 6. Magnetic flux density at the starting position with 500AT

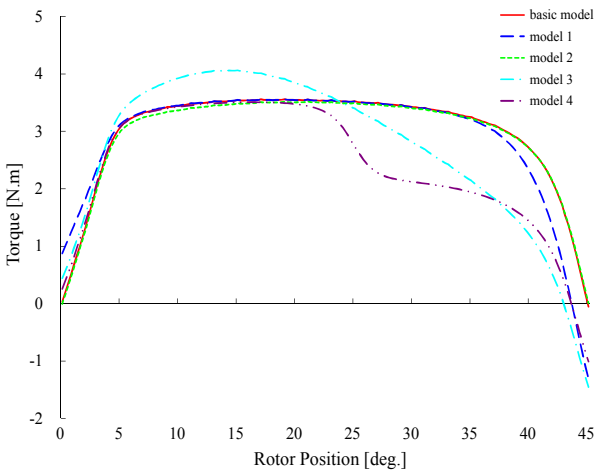


그림 7. 기자력이 250AT일 때 기동 방법에 따른 토크 특성 파형
 Fig. 7. Torque characteristic waveform according to starting method with 250AT

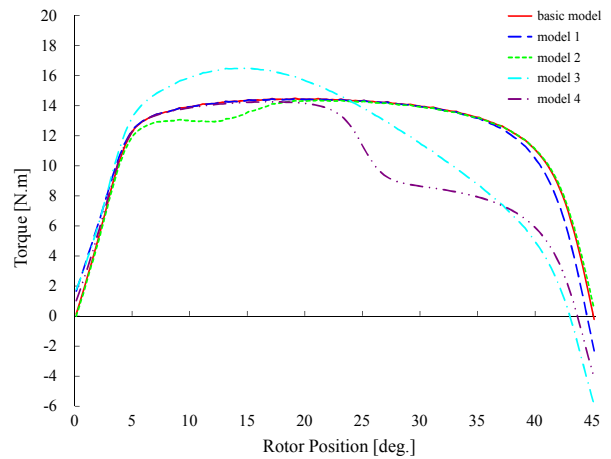


그림 8. 기자력이 500AT일 때 기동 방법에 따른 토크 특성 파형
 Fig. 8. Torque characteristic waveform according to starting method with 500AT

에 의한 토크에 비해 상대적으로 감소하여 기본 모델과 거의 유사해 졌다. 모델 2는 여자 전류에 의한 기자력이 높아져 측면 슬롯과 확장 극호의 영향이 증가하여 5°~17° 부근에서 조금 왜형이 발생되었다. 이런 현상은 기자력이 750AT인 그림 9에서 더욱 심해졌다. 그림 9(750AT)에서 모델 1은 기본 모델과 거의 비슷하고 모델 2는 5°~17° 부근에서 발생하는 왜형이 더욱 심해져 움푹 파인 형상을 보이고 있다. 모델 3과 모델 4의 토크 특성 파형은 기자력에 관계없이 동일한 형태를 보이고 있다.

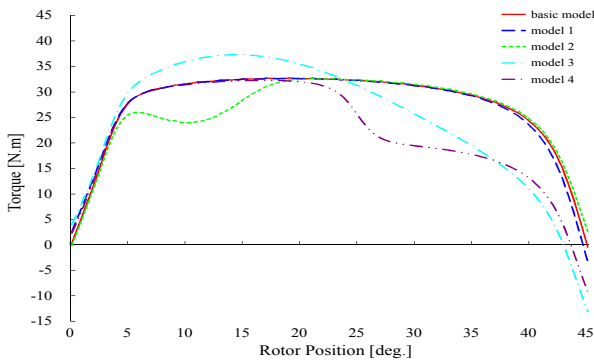


그림 9. 기자력이 750AT일 때 기동 방법에 따른 토크 특성 파형
 Fig. 9. Torque characteristic waveform according to starting method with 750AT

4.2 토크 특성 파형의 왜형 분석

해석을 통해 얻은 기동 방법에 따른 토크 특성 파형이 기본 모델과 비교하여 어느 정도 왜형이 되었는지 확인하기 위해 FFT 분석을 하였다. 그림 10, 11, 12는 기자력이 각각 250AT, 500AT, 750AT일 때 기본 모델의 토크 특성 파형과 각 기동 방법의 토크 특성 파형과의 차이를 고조파 별로 나타낸 것이다.

기자력이 250AT일 때, 모델 1과 모델 2는 기본과 성분의 차이는 적지만 3 고조파와 5 고조파 성분의 차이에서 모델 2가 모델 1에 비해 작기 때문에 전체적으로는 모델 2가 조금 더 기본 모델과 비슷하다. 모델 3과 4는 기본과 성분의 차이뿐만 아니라 3, 5, 7 고조파 성분의 차이에서도 모델 1, 2에 비해 상당히 높게 나왔다. 기자력이 500AT일 때는 상황이 반전되어 모델 1이 모

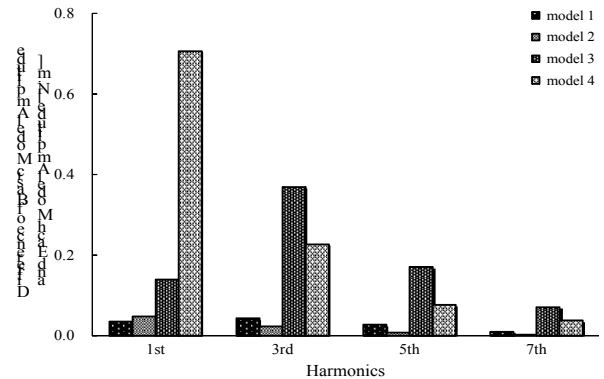


그림 10. 기자력이 250AT일 때 기동 방법에 따른 토크 특성 파형의 FFT 분석 및 기본 모델과 각 모델과의 고조파 성분 차이

Fig. 10. FFT analysis of torque characteristic waveform according to starting method and difference of basic model and each model with 250AT

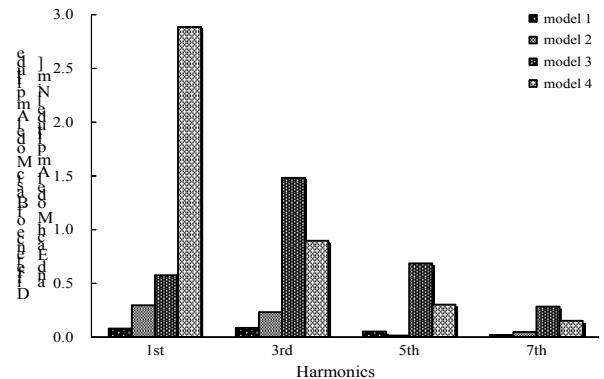


그림 11. 기자력이 500AT일 때 기동 방법에 따른 토크 특성 파형의 FFT 분석 및 기본 모델과 각 모델과의 고조파 성분 차이

Fig. 11. FFT analysis of torque characteristic waveform according to starting method and difference of basic model and each model with 500AT

델 2에 비해 기본과와 3 고조파 성분의 차이가 각각 3.7배, 2.7배 만큼 작아져 모델 1이 모델 2에 비해 훨씬 더 기본 모델과 비슷하다. 750AT일 때는 모델 2의 왜형이 더욱 심해져 기본과와 3 고조파 성분의 차이가 모델 1에 비해 각각 10.8배, 13.5배 커졌다. 특히 기본과 성분의 차이는 모델 3보다도 높아 기자력이 커질수록 모델 2의 왜형이 심각하게 증가하는 것을 확인하였다.

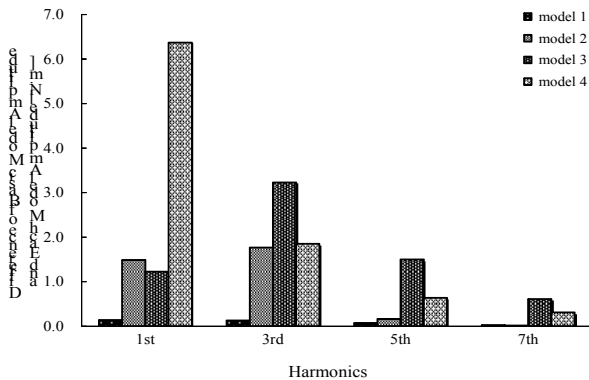


그림 12. 기자력이 750AT일 때 기동 방법에 따른 토크 특성 파형의 FFT 분석 및 기본 모델과 각 모델과의 고조파 성분 차이

Fig. 12. FFT analysis of torque characteristic waveform according to starting method and difference of basic model and each model with 750AT

5. 결 론

기동 방법에 따른 단상 SRM의 토크 특성을 확인하기 위하여 영구자석을 이용한 방법, 자기 포화 영역을 이용한 방법, 공극의 차이를 이용한 방법 등 보편적으로 많이 사용되는 네 가지 방법에 대한 해석 모델을 선정하였다. 그리고 선정된 해석 모델의 토크 특성을 유한요소 해석을 이용하여 구하였고 FFT 분석을 통하여 왜형의 정도를 정량적으로 확인하였다.

FEM과 FFT를 통한 해석 및 분석 결과로부터 영구자석을 이용하는 기동 방법은 낮은 토크 영역에서 높은 토크 영역까지 비교적 안정적인 토크 특성을 나타내 구동 시스템이 요구하는 토크에 구애받지 않고 폭넓게 적용이 가능함을 확인하였다. 자기 포화 영역을 이용한 기동 방법은 낮은 토크 영역에서는 안정적인 토크 특성을 나타내지만 높은 토크 영역으로 갈수록 왜형이 심해져 낮은 토크 영역에서 사용되는 구동 시스템에 적합함을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 : 20110020).

References

- [1] H.R. Bolton, D.A.G. Pedder, "Low Cost Reluctance Drive System for Low Power, Low Speed Application", Proceedings of IEE Conference on Variable Speed Drives, 1979, pp.88-92.
- [2] C.C. Chan, "Low-Cost Electronic-Controlled Variable-Speed Reluctance Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.IE-34, No.1, 1987, pp.95-100.
- [3] Jun-Young Lim, Yun-Chul Jung, Sang-Young Kim, Jung-Chul Kim (2001), "Single Phase Switched Reluctance Motor for Vacuum Cleaner", ISIE2001, Volume 2, pp.1393-1400.
- [4] Lee J.H., Oh Y.W., Lee E.W., Manufacturing Prototype and Characteristics Analysis of Disk type Single Phase SRM by 3D Finite Element Method, The Transactions of KIEE, Vol. 48, B, No.6, pp.316-321, 1999.
- [5] R. Krishnan, A.M. Staley, "A Novel Single-Phase Switched Reluctance Motor Drive System", The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001, pp.1488-1493.
- [6] K.Y. Lu, P.O. Rasmussen, S.J. Watkins, F.Blaabjerg, "A New Low-Cost Hybrid Switched Reluctance Motor for Adjustable-Speed Pump Applications", IEEE Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting, Vol.2, 2006, pp.849-854.
- [7] J.E. Fletcher, A. Helal, B.W. Williams, "Starting the Single-Phase Switched Reluctance Motor Using Rotor Shorting Rings", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.21, No.4, 2006, pp.848-854.
- [8] Jun-Ho Kim, Eun-Woong Lee, Jong-Han Lee, "Design of the Starting Device Installed in the Single-Phase Switched Reluctance Motor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.43, No.4, 2007, pp.1741-1744.

◇ 저자소개 ◇



김준호 (金俊鎬)

1974년 3월 15일생. 1998년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2002년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002~2011년 LS산전 근무. 2011년~현재 SK이노베이션 근무.
Tel : (042)523-8667
email : mocross@nate.com



김일중 (金一中)

1958년 12월 15일생. 1980년 충남대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992~2005년 주성대학 전기과 교수. 2006년 (주)일신엔지니어링 기술연구소장. 2007년~현재 호서대학교 기계공학과 교수.
Tel : 041-540-5805
email : ijkim@hoseo.edu