

자기포화를 고려한 SRM의 토크리플 저감 제어

(Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives Considering Magnetic Saturation)

강준호* · 김재혁**

(Junho Kang · Jaehyuck Kim)

Abstract

This paper discusses study of torque ripple minimization employing an improved TDF(torque distribution function)-based instantaneous torque control to reduce acoustic noise and vibration problem of the SRM. As the flux linkage of the SRM is a nonlinear function of phase current and rotor position, design of optimal controller for the SRM is quite complicated. Hence, an accurate mathematical model considering the nonlinearity of the SRM is required. An improved TDF based torque control has been proposed in order to reduce the torque ripple at high speed operation. Dynamic simulation using Matlab/Simulink as well as Finite Element Analysis is presented. A prototype SRM for electric vehicle traction has been manufactured to validate the experimental results comparing the dynamic simulation results.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Torque Distribution Function(TDF), Torque Ripple Minimization

1. 서 론

최근 화석연료로 인한 환경오염이 심각해짐에 따라 에너지 및 환경관련규제와 세계 금융위기로 인한 경

기 침체로 유가의 급등 문제가 국제적 이슈로 대두되면서 이를 해결하기위한 연구가 진행되고 있다. 국제 에너지기구(IEA)에 따르면 모터는 산업현장에서 전 세계 전력 소비의 46%를 소비하고 있으며 주로 절단기, 연마기, 펌프, 냉동기, 공기압축기 등에 사용되고 있다[1]. 특히 하이브리드 전기자동차(HEV: Hybrid Electric Vehicle)와 전기자동차(EV: Electric Vehicle) 같은 친환경 자동차의 보급이 증가하고 자동차의 환경규제, 안전규제 강화와 더불어 자동차 편의 기능이 지능화됨에 따라 전장부품분야에서 모터의 적용이 확대되었고 이에 따라 고효율 모터의 중요성이 더욱 커지고 있다. 친환경 자동차는 내연기관에 의존하던 구동방식에서 모터와 병행하거나 모터만 구동하는 방식

* 주저자 : 전자부품연구원 광주지역본부
디지털컨버전스연구센터
** 교신저자 : 원광대학교 전기공학과 부교수
* Main author : Digital Convergence Research
Center, Gwangju Research Branch, Korea
Electronics Technology Institute (KETI)
** Corresponding author : Dept. of Electrical
Engineering, Wonkwang University
Tel : 063-850-6733, Fax : 063-850-6745
E-mail : jaehkim@wku.ac.kr
접수일자 : 2014년 3월 12일
1차심사 : 2014년 3월 18일
심사완료 : 2014년 6월 9일

으로 전동화가 급속한 발전을 보이고 있기 때문에 앞으로 세계 자동차시장에서 모터 활용이 증가할 것으로 예상되며[2-3]. 따라서 세계적으로 전기자동차에 대한 전동부품개발의 관심과 연구가 미국, 유럽, 일본을 중심으로 활발히 진행되고 있다.

현재 전기자동차 또는 산업현장에는 고효율, 고효율 영구자석을 모터의 사용이 증가되고 있는 추세이나 최근 영구자석의 주 원료인 희토류 광물이 가격상승 및 수급문제로 인해 영구자석을 사용하지 않거나 적게 사용하는 대체모터의 개발을 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 영구자석을 사용하지 않는 대표적인 비희토류 모터인 SRM(Switched Reluctance Motor)이 각광받고 있지만 이중돌극 구조로 인해 발생하는 소음·진동과 토크리플이 큰 문제를 해결하여야 더 많은 산업분야에 적용 할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 전기자동차 구동용 모터로 제작된 SRM의 토크리플을 저감시키기 위하여 TDF를 사용하였고 기존에 제시된 TDF[4]의 단점을 보완한 개선된 TDF를 제안하여 고속에서도 적용이 가능하도록 하였다. 시뮬레이션을 통해 타당성을 검토하였고 구동시험을 통하여 가능성을 검증하였다.

2. SRM의 수학적 모델링

본 논문에서 사용된 6/4극 SRM의 구조는 그림 1과 같으며 이중 돌극 구조와 여자 방식에 따라 상간의 상호인덕턴스를 무시한 각 상의 전압방정식은 상저항의



그림 1. 3상 6/4 SRM
Fig. 1. Three-Phase 6/4 SRM

전압강하와 쇄교자속 변화율의 합으로 나타내며 다음 식 (1)과 같다[5].

$$v = Ri + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \tag{1}$$

$$= Ri + \left(L(\theta, i) + i \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial t} \right) \frac{di}{dt} + \omega \cdot i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta}$$

여기서 R은 상저항, i 는 상전류, λ 는 쇄교자속, L은 상전류와 회전자위치에 따른 인덕턴스이다. θ 는 회전자의 위치이다.

토크 · 속도방정식은 다음과 같으며

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \tag{2}$$

J는 회전자 관성, B는 마찰계수, ω 는 회전자 속도이며, T_e 와 T_L 는 각각 토크와 부하토크이다.

토크는 회전자의 위치에 대한 자계 에너지의 변화에 따라 표현되는 Co-energy, W의 편미분 항으로 전류의 선형성을 가정하면 식 (3)와 같이 표현된다.

$$T_e = \left. \frac{\partial W(\theta, i)}{\partial \theta} \right|_{i=constant} \cong \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \tag{3}$$

식 (3)에서 토크 부호는 전류의 방향과는 무관하고 인덕턴스의 기울기에 따라 바뀌기 때문에 정토크를 내기 위해서는 그림 2와 같이 인덕턴스가 상승하는 구간에서 여자 될 수 있도록 스위칭 각을

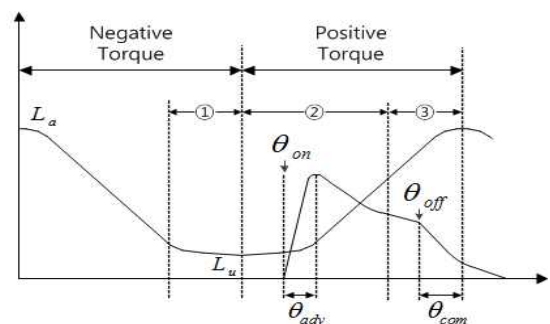


그림 2. 회전자위치에 따른 SRM의 토크 영역
Fig. 2. Torque region of SRM with respect to rotor position

조절해야 한다. 그림 2에서 θ_{adv} 는 회전자와 고정자가 정렬하기 시작하는 위치를 기준으로 미리 턴 온 시키기 위한 선행각이고 θ_{com} 는 회전자와 고정자가 정렬한 위치를 기준으로 미리 턴 오프시키는 선행각이다. θ_{on} 와 θ_{off} 는 여자시키기 위해 스위치를 온, 오프시키는 각이다. 그림 2의 구간①은 고속구동 시 빠른 전류확립을 위한 추가로 선행각을 증가시킬 수 있는 구간이며, 구간②는 인덕턴스가 상승하는 구간동안 전류 소호시 부토크를 생성하지 않는 구간이며, 구간③은 전류 소호시 부토크를 생성할 수 있는 구간이다.

3. 순시토크 제어를 위한 TDF

SRM의 토크는 인덕턴스가 상승하는 구간에서 전류를 인가하면 정토크를, 하강하는 구간에 전류를 인가하면 부토크를 발생시킨다. 선형적인 인덕턴스 상승 구간에서 일정한 전류를 흐르게 하면 일정한 토크가 발생되지만 실제적으로는 자기포화로 인해 인덕턴스가 선형적이지 않고 포화되므로 토크도 일정하게 발생되지 않아 리플이 발생한다. 평균토크는 인덕턴스의 비선형성을 고려하지 않고 지령전류와 턴 온, 턴 오프각에 의해서 정해지기 때문에 상전환 구간에서 발생하는 토크리플을 저감시키는데 한계가 있다. 따라서 전환구간에서 토크 지령을 유지하거나 일정한 토크를 발생시키기 위해서는 비선형적인 인덕턴스 변화율에 따라 상전류를 변화시켜야 하기 때문에 그림 2과 같이 TDF를 통해서 각 상의 전류지령 값을 제어해야 한다.

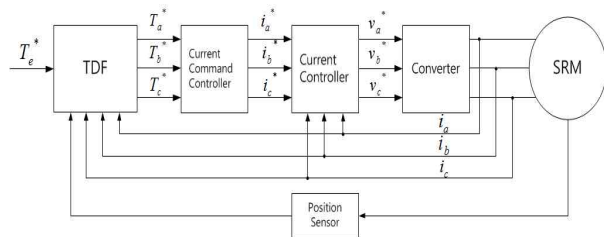


그림 3. TDF를 이용한 3상 SRM의 토크제어 블록도
Fig. 3. Block diagram of TDF-based torque control of three-phase SRM

3.1 기존의 TDF

R. Krishnan[46]에 의해 제안된 TDF는 SRM의 상호인덕턴스를 고려하였으나 일반적으로 SRM의 경우 상간의 간섭이 적어 상호인덕턴스가 자기 인덕턴스보다 매우 작으므로 본 논문에서는 상호인덕턴스를 고려하지 않은 TDF 식을 적용하였다.

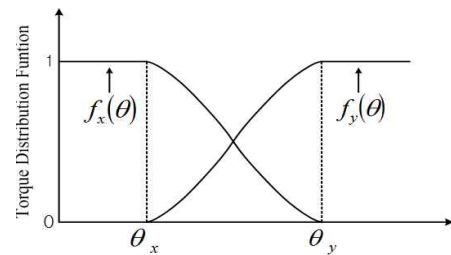


그림 4. 상전환 구간에서의 TDF
Fig. 4. TDF at commutation region

그림 4는 소호되는 상(outgoing phase)과 점호되는 상(incoming phase)간의 상전환 구간에서의 각 상의 TDF ($f_x(\theta)$, $f_y(\theta)$) 변화를 예시로 나타낸 그림이며 상전환 구간의 순시토크는 다음과 같다.

$$T_c^* = T_x^* + T_y^*, \quad T_x^* = \frac{1}{2} g_x i_x^2 = f_x T_c^*, \quad T_y^* = \frac{1}{2} g_y i_y^2 = f_y T_c^* \quad (4)$$

식 (4)에서 T_x^* 와 T_y^* 는 각각 소호되는 상과 점호되는 상의 순시지령토크이며, g_x 와 g_y 는 각각 소호되는 상과 점호되는 상의 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화율이다.

$$g_x = \frac{dL}{d\theta} = \frac{2T_c}{i^2}, \quad g_y = \frac{dL}{d\theta} = \frac{2T_c}{i^2} \quad (5)$$

3.2 개선된 TDF

기존의 TDF를 사용하여 토크제어 시 저속에서는 토크리플이 낮게 잘 제어 되고 있음을 확인하였지만 고속회전 시 토크리플이 크게 발생하는 부분이 나타났다. 이러한 토크리플이 발생한 원인은 기존의

TDF에서 고속회전 시 전류 확립이 어렵다는 단점을 발견하였다. 그림 5는 지령전류와 실제전류의 차이를 보여주고 있다. 전류확립을 위해서 그림 2과 같이 θ_{adv} 를 만큼 미리 턴 온시켜 주지만 기존의 TDF에는 인덕턴스가 하강하는 구간에서는 적용이 되지 않기 때문에 좀 더 빠른 전류확립을 요구하는 rpm에서는 요구하는 토크를 내지 못하여 토크리플이 발생하게 된다. 3상 6/4 SRM에서 스트로크 각이 30° 이므로 θ_{adv} 를 최대 15° 까지 늘이면 인덕턴스의 기울기가 양의 방향이 되어 양의 토크가 발생되고, θ_{adv} 가 15° 이상이 되면 인덕턴스의 기울기가 음의 방향이 되어 부토크가 발생하는 구간이지만 그 크기가 작고 빠른 전류 확립을 통해 토크리플을 줄이기 위해서 θ_{adv} 를 15° 이상 줄 수 있도록 기존의 TDF를 개선하였다.

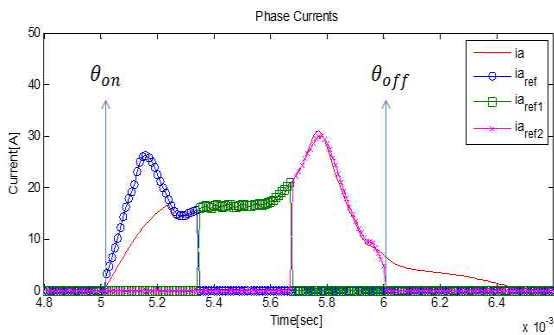


그림 5. 지령전류와 실제전류의 차이
Fig. 5. Difference of current reference and actual current

다음 표 1은 개선된 TDF를 토크지령값으로 나타낸 표이다. 고속구동에서 토크리플을 저감시키기 위해서 빠른 전류확립이 필요하여 그림 2의 구간 ①영역에서도 전류를 인가하였다. 구간 ①은 인덕턴스가 하강하는 구간으로 부토크를 발생시키지만 고속구동에서 빠른 전류확립을 통해 토크를 낼 수 있도록 하기 위하여 기존의 TDF를 개선시켰다. 구간 ②는 인덕턴스가 상승하는 구간이므로 정토크를 내며 이전 상에서 소호되지 못한 전류에 의해 부토크가 발생한 것을 보상해주었으며, 구간 ③은 전류를 소호시킬 경우 부토크가 크게 발생하지 않도록 한다.

표 1. 개선된 TDF
Table 1. Improved TDF

Angle	T_a^*	T_b^*	T_c^*
$0^\circ \sim 15^\circ$	0	$\frac{1}{2}g_b i_b^2 + \frac{1}{2}g_a i_a^2$	$\frac{1}{2}g_c i_c^2$
$15^\circ \sim 30^\circ$	0	$\frac{g_b^2}{g_b^2 + g_c^2} T_e^*$	$\frac{1}{2}g_c i_c^2 + \frac{1}{2}g_b i_b^2$
$30^\circ \sim 45^\circ$	$\frac{1}{2}g_a i_a^2$	0	
$45^\circ \sim 60^\circ$	$\frac{1}{2}g_a i_a^2 + \frac{1}{2}g_c i_c^2$	0	$\frac{g_c^2}{g_a^2 + g_c^2} T_e^*$
$60^\circ \sim 75^\circ$		$\frac{1}{2}g_b i_b^2$	0
$75^\circ \sim 90^\circ$	$\frac{g_a^2}{g_a^2 + g_b^2} T_e^*$	$\frac{1}{2}g_b i_b^2 + \frac{1}{2}g_a i_a^2$	0

여기서 사용된 g_x 와 g_y 는 인덕턴스의 기울기로서 자기포화를 고려하면 식 (6)와 같이 전류와 위치에 따른 3차원 관계를 가지며 그림 6과 같이 그래프로 나타낼 수 있다. 이를 look-up 테이블로 미리 구성하여 정확한 인덕턴스 기울기를 이용하여 토크제어를 하도록 하였다.

$$g_x = \frac{dL(\theta, i_x)}{d\theta} = \frac{2T_e(\theta, i_x)}{i^2}, \quad g_y = \frac{dL(\theta, i_y)}{d\theta} = \frac{2T_e(\theta, i_y)}{i^2} \quad (6)$$

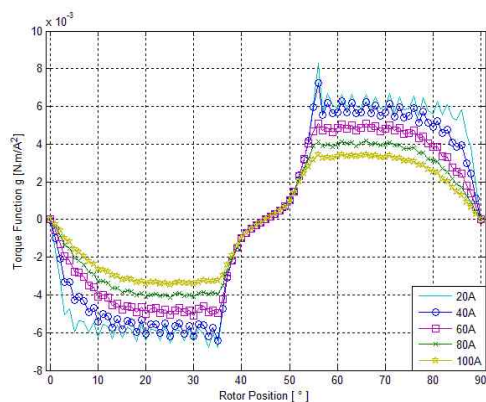


그림 6. 제작된 3상 6/4 SRM의 토크함수(g)
Fig. 6. Torque Function (g) of manufactured 3-phase 6/4 SRM

4. 시뮬레이션 결과

4.1 전기자동차 견인 용 SRM

전기자동차 견인용으로 만들어진 SRM의 제원은 표 2과 같으며 정확한 성능검증을 위해 유한요소해석법 (FEA: Finite Element Analysis) 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 해석하였다.

표 2. SRM 제원
Table 2. Specifications of the prototype SRM

Spec.	값	단위
정격전압	300	V
정격전류	100	Arms
정격속도	12,000	rpm
정격토크	9.1	N.m
효율	92	%
고정자 외경	180	mm
회전자 축 지름	25	mm
적층두께	60	mm

유한요소해석을 통해서 입력전류와 회전자 위치에 따른 인덕턴스와 토크프로파일을 그림 7과 그림 8 같이 얻을 수 있다. 얻은 인덕턴스와 토크 프로파일을 적용하여 Matlab를 이용해서 기존의 TDF와 개선된 TDF를 각각 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다.

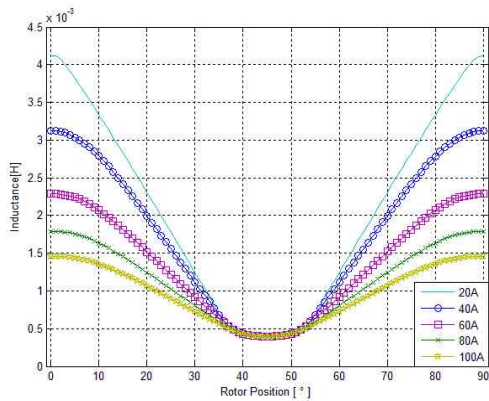


그림 7. 제작된 6/4 SRM의 인덕턴스 프로파일
Fig. 7. Inductance profiles of prototype 6/4 SRM

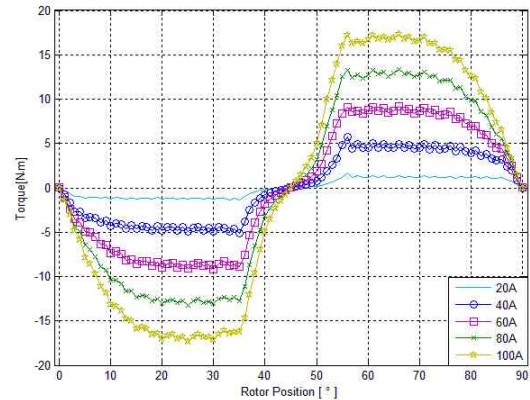


그림 8. 제작된 3상 6/4 SRM의 토크 프로파일
Fig. 8. Torque profiles of prototype 6/4 SRM

4.2 시뮬레이션 결과

그림 9는 10,000rpm에서 기존 TDF를 사용한 시뮬레이션 결과로 A, B, C상의 전류파형과 토크파형을 나타낸 그래프이다. 10,000rpm에서는 평균토크가 $4.43\text{N} \cdot \text{m}$ 이고 토크리플이 56.26%로 지령토크인 $5\text{N} \cdot \text{m}$ 에 미치지 못하여 토크리플도 크게 나타났다. 이는 기존TDF의 문제점인 고속회전 시 전류확립이 되지 않아 나타난 토크리플이다.

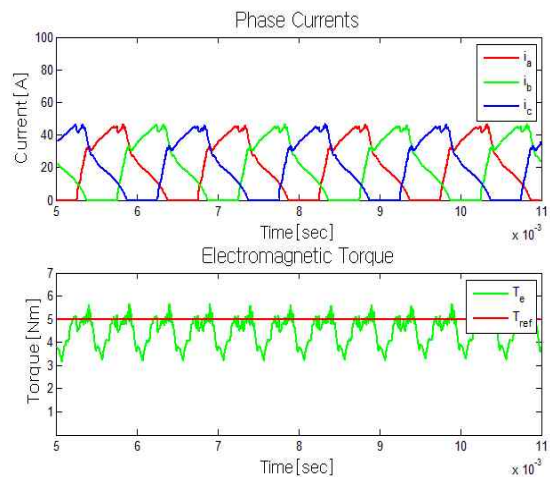


그림 9. 10,000rpm에서 기존 TDF를 사용한 전류와 토크파형
Fig. 9. Simulated current and torque waveforms using the conventional TDF method

그림 10은 10,000rpm에서 기존 TDF를 사용한 시뮬레이션 결과로 전류파형과 토크파형을 나타낸 그래프이다. 평균토크는 $4.97\text{N}\cdot\text{m}$ 이고 토크리플은 37.65%로 나타났다. 상전환시 약간 높게 나타나는 부분이 보이지만 지령토크인 $5\text{N}\cdot\text{m}$ 를 잘 유지하는 것을 볼 수 있다.

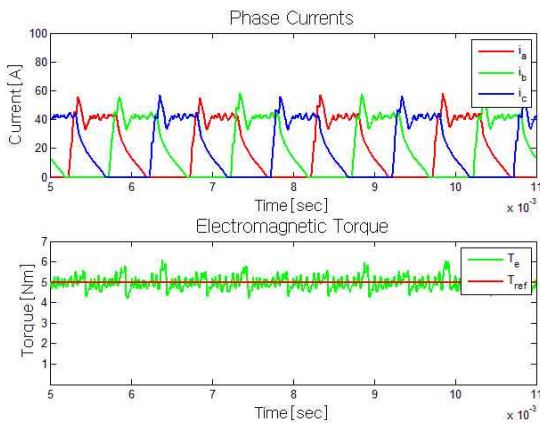


그림 10. 10,000rpm에서 개선된 TDF를 사용한 전류와 토크파형
Fig. 10. Currents and Torque waveforms simulated using improved TDF

개선된 TDF의 타당성을 입증하기 위해서 기존의 TDF와 시뮬레이션 하여 비교 분석 하였다. 표 3은 기존 TDF와 개선된 TDF의 결과를 비교해보기 위해 작성한 표이다. 몇 개의 특정 rpm을 제외한 속도영역에서 개선된 TDF의 토크리플이 낮게 나왔고 특히 고속의 경우 평균토크가 지령토크인 $5\text{N}\cdot\text{m}$ 에 미치지 못했던 부분이 개선되어 지령토크를 잘 유지하는 모습을 확인 하였다. 토크리플이 다소 높아지는 경향이 보이지만 기존 TDF에 비해 좋은 성능을 보이고 있으므로 개선된 TDF의 타당성을 확인 수 있다.

5. 실험 결과

시뮬레이션을 통해 개선된 TDF의 타당성을 확인하였고 실험을 통해 검증하기 위해 그 특성을 확인하였다. 그림 11은 제작된 시작품에 대한 구동시험을 위한 실험환경을 보여준다. 그림 12와 그림 13은 각각 실험

표 3. 기존 TDF와 개선된 TDF의 시뮬레이션 결과 비교

Table 3. Comparison of simulation result of existing TDF and improved TDF

rpm	Torque Ripple (%)		Average Torque (N · m)	
	기존 TDF	개선된 TDF	기존 TDF	개선된 TDF
1,000	24.26	20.82	5.03	5.05
2,000	23.71	22.59	5.02	5.04
3,000	22.15	21.09	5.02	5.04
4,000	20.45	20.60	5.01	5.03
5,000	21.75	21.30	5.01	5.02
6,000	21.23	21.31	5.00	5.00
7,000	21.05	26.68	4.98	4.95
8,000	25.49	20.83	4.95	4.92
9,000	37.95	29.17	4.82	4.96
10,000	56.26	37.65	4.43	4.97

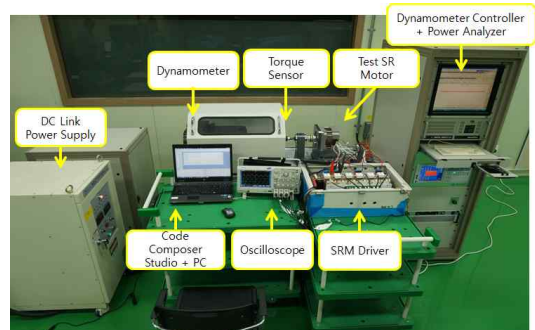


그림 11. SRM 구동시스템 실험장치
Fig. 11. Experimental setup of SRM drive system

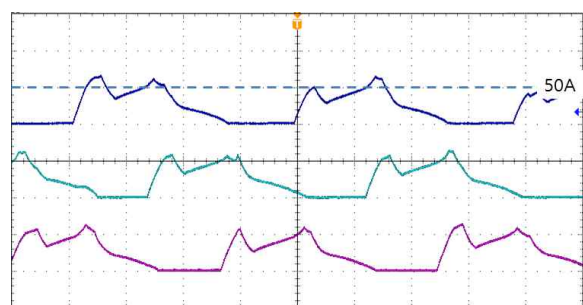


그림 12. 10,000rpm에서 개선된 TDF를 사용한 전류 파형
Fig. 12. Current waveforms at 10,000rpm using improved TDF

결과를 측정된 상전류와 토크의 파형이고 평균토크는 5.12이고 토크리플은 19.72%로 나타났다.

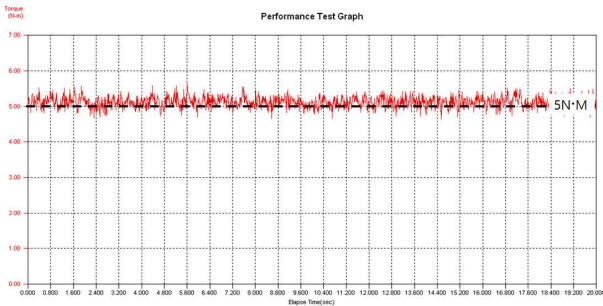


그림 13. 10,000rpm에서 개선된 TDF를 사용한 토크 파형

Fig. 13. Torque waveform at 10,000rpm using improved TDF

6. 결 론

본 논문에서는 6/4 SRM의 적용분야를 넓히기 위해 단점중 하나인 토크리플 저감을 목적으로 TDF를 사용하였다. R.Krishnan가 제안한 방법인 토크 방정식에 의해서 구해진 인덕턴스의 기울기 함수로 구현한 TDF를 응용하였다. R. Krishnan가 제안한 기존 TDF는 저속에서는 토크리플이 낮게 잘 제어되었지만 고속회전 시 토크리플이 크게 발생하는 부분이 나타났다. 이러한 토크리플이 발생한 원인은 기존의 TDF에서 고속회전 시 전류 확립이 어려워 지령토크를 유지하지 못하는 단점을 발견하였다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 전류확립을 빠르게 하기 위해 턴 온 구간을 넓히는 개선된 TDF를 제안하여 고속에서도 토크리플을 저감시킬 수 있도록 하였다. 개선된 TDF의 타당성확인을 위해 속도영역별로 시뮬레이션 비교를 하였고 이를 바탕으로 실험을 통해 입증하였다.

Acknowledgement

본 논문은 2012년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2012R1A1A1015767)을 받아 수행된 것임. 또한 본 과제는 전라북도 R&D지원사업의 지원(2013A11)을 받아 수행된 것임.

References

- [1] Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems, International Energy Agency, 2011.
- [2] Trend in Electric Vehicle Market, KETI (2010).
- [3] Trend in Hybrid Vehicle Industry, KETI (2011).
- [4] Han-Kyung Bae and R. Krishnan, "A novel approach to control of switched reluctance motors considering mutual inductance", Industrial Electronics Society, vol.1369 - 374, 2000.
- [5] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna physics publishing and clarendon press, 1993.
- [6] R. Krishnan, "Switched reluctance motor drive", Modeling, Simulaion, Analysis, Design, and Applications, 2001.

◇ 저자소개 ◇



강준호(姜俊鎬)

1988년 6월 23일생. 2012년 원광대 전기전자 및 정보공학부 졸업. 2014년 2월 원광대학교 전기공학과 석사과정 졸업. 2014년 3월~현재 전자부품연구원 광주지역본부 디지털컨버전스연구센터연구원.



김재혁(金宰赫)

1973년 4월 25일생. 1999년 한양대 전기공학과 졸업. 1998년 11월~2000년 6월 UL Korea, 엔지니어로 근무. 2004년 Univ. of Wisconsin-Madison 졸업(석사). 2010년 5월 Virginia Tech 졸업(박사). 2010년 1월~6월 Ramu Inc. Senior Engineer로 근무. 현재 원광대학교 전기공학과 조교수.