

SRM의 상전환 구간 토크리플 저감을 위한 제어기법에 관한 연구

논 문
59-2-17

A Study on the Control Method for Torque Ripple Reduction during Phase Commutation

김 태 형* · 안 진 우†
(Tae-Hyoung Kim · Jin-Woo Ahn)

Abstract - In this paper, an advanced torque control scheme of Switched Reluctance Motor(SRM) using modified non-linear logical TSF (Torque Sharing Function) with PWM is presented. In the proposed control scheme, a simple calculation of PWM duty ratio and switching rules from DITC(Direct Instantaneous Torque Control) can reduce the torque ripple with fixed switching frequency. The proposed control scheme is verified by the computer simulations and experimental results.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Torque Ripple Reduction, Direct Instantaneous Torque Control, Torque Sharing Function, Pulse Width Modulation

1. 서 론

단순한 형상의 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 상호 토크를 이용하는 전동기와 달리 자기회로에서의 릴럭턴스를 이용하여 토크를 발생시키는 브러쉬리스 형태의 전동기이다.

SRM은 토크의 발생을 증가시키기 위해 회전자와 고정자가 돌극을 가지는 이중 돌극형 구조를 가지고 있다. 이로 인해 회전자 위치에 따라 인덕턴스가 변화하며, 인덕턴스 변화량과 전류의 제품에 비례하는 릴럭턴스 토크가 발생된다. 따라서 철심 적층으로 구성이 가능하여 제작이 매우 용이하다. 또한 고정자의 각 극에 집중권으로 권선이 삽입되기 때문에 제작의 용이성은 더욱 높아지게 된다. 따라서 전동기 제작을 위한 재료비 및 제작비가 타 전동기에 비해 저렴하며 기계적인 강인성이 매우 높고, 회전자 역기전력이 다른 구조의 전동기에 비해 매우 낮으므로 고속구동이 유리하다. 그러나 가진력에 의한 진동 및 소음이 다른 전동기에 비해 크고 스위칭에 의한 여자로 인해 발생하는 토크 맥동으로 인해 일정한 토크를 발생시키기 어렵다는 단점을 가진다.[1]

이중 토크맥동은 가전기기 및 산업기기 중 제어성을 요구하는 분야에 대한 SRM의 적용을 어렵게 하고 있다. 특히 상전환 구간에서 토크 맥동이 가장 크게 발생하게 되는데, 이 구간에서는 누설 자속 및 자속의 포화로 인해 회전자의 비정렬 구간과 정렬구간에서 비선형적인 인덕턴스가 발생되므로 토크맥동의 제어가 더욱 어렵다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위하여 단순한 제어기법을 이용하여 토크의 맥

동을 저감시키기 위한 토크 분배 함수(Torque Sharing Function, 이하 TSF)를 이용한 제어기법들이 제안되고 있다 [2][3][4].

본 논문에서는 상 전환구간에서 발생하는 토크의 맥동을 줄이기 위한 TSF 기법의 특성을 비교하고, 장단점을 비교하였다. 또한 문제점을 보완하여 개선된 비선형 논리적 토크 분배 기법을 제안하였다.

제안된 기법의 검증을 위해 유한요소해석과 실측을 바탕으로 한 수치해석 모델을 작성하였으며 시뮬레이션을 통하여 가능성을 확인하였고, 실험을 통해 효용성을 검증 하였다.

2. 일반적인 상전환 구간에서의 토크리플 저감기법

2.1. SRM 토크 발생원리 및 토크제어의 문제점

SRM에서 발생하는 토크는 식(1)과 같이 각 상의 토크의 합으로 표현되며, 각 상에서 발생하는 토크는 유입된 전류의 제품과 인덕턴스의 기울기의 곱에 비례하여 발생된다.

$$T_m = T_a + T_b + T_c = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{L_a(d\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{L_b(d\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{L_c(d\theta)}{d\theta} \quad (1)$$

여기서 θ_{rm} 는 회전자의 위치, ω_m 는 회전자 속도, L_a 와 L_b , L_c 는 회전자 위치에 따른 각 상의 인덕턴스를 나타내고 있다.

SRM에서 토크가 발생하게 되는 인덕턴스 변화 영역은 회전자와 고정자의 극호에 의해 결정된다. 일반적으로 SRM의 인덕턴스는 연산의 편의성을 위해 이상적으로 극호의 크기에 의해 그림 2의 점선과 같이 선형적으로 고려된다. 그러나 실제 인덕턴스는 자속의 누설과 철심의 포화에 의해 실선과 같이 회전자의 위치와 전류에 따라 비선형적이다.

* 정 회 원 : CMI(주) 기술연구소 선임연구원
† 교신저자, 시니어회원 : 경성대 메카트로닉스공학과 교수
E-mail : jwahn@ks.ac.kr
접수일자 : 2009년 11월 25일
최종완료 : 2010년 1월 15일

특히 이러한 비선형성은 인덕턴스의 변화가 시작되는 시점과 인덕턴스의 크기가 최대인 시점에서 심화되며, SRM의 상전환 구간은 이 구간 내에서 존재하게 된다. 따라서 이 구간에 발생하는 각 상의 토크도 비선형적이며 제어가 어려워 전체 구간 중 토크 맥동이 가장 크게 발생된다. 그러므로 이 구간의 토크 맥동을 감소시키는 것은 전체 토크 맥동의 감소에 매우 중요하다.

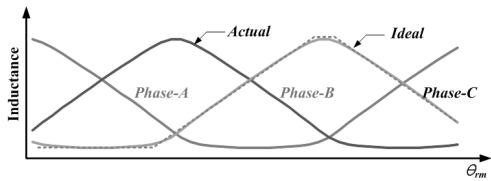


그림 2 실제와 이상적인 인덕턴스 프로파일

Fig. 2 Ideal and inductance profile

이러한 상전환 구간에서 토크의 맥동을 감소시키기 위해서는 각 상에서 발생하는 비선형적인 토크를 개별적으로 제어하고, 최대한 제어에 필요한 연산을 단순화하는 것이 필요하다. 이와 동시에 현재상과 다음상의 전환시 각 상에서 발생하는 비선형으로 발생하는 각 상의 토크에 대해 제어량을 분배하는 제어기법이 요구된다.

2.2. 일반적인 토크분배기법

그림 3은 일반적으로 토크분배함수를 적용한 경우의 제어블록을 나타내고 있으며, 그림 4는 일반적인 상전환 구간에서의 토크분배기법인 선형 토크분배함수와 Cosine 토크분배함수를 나타내고 있다. 일반적으로 3상으로 구성된 SRM의 경우 각 상의 인덕턴스의 최소·최대 구간에 따라 그림 4(a)와 같이 영역을 각 구간을 나눌 수 있고 만일 현재 B상의 여자가 이루어지고 있다면 다음 여자대상은 C상이 된다. 이때 C상의 경우 전류를 확립하기 위해서는 인덕턴스가 증가하는 θ_2 이전에 여자가 이루어져야 한다. 이와 함께 B상의 경우 부토크를 최소화하기 위해서는 회전자각 고정자가 일치하는 시점인 θ_3 이전에 B상의 전류가 0이 되어야 한다. 따라서 실제 상 전환을 위한 중첩동작을 수행하게 되는 구간이 $\theta_1 \sim \theta_3$ 내에 위치하는 것이 일반적이다.

그림 4의 (b)와 (c)는 상기의 중첩 구간에서 각 상에 대한 지령토크의 발생을 위한 분배함수의 곡선을 나타내고 있다. 그림 4의 (b)에 나타난 Linear TSF의 경우 식(3)~(5)를 통해 중첩구간에서 각 상의 지령토크를 선형적으로 생성한다. 이 기법은 연산이 매우 간단하여 일반적으로 사용되는 기법으로 적용은 매우 용이하나, 비선형구간에서 오차가 크게 발생하는 단점이 있다.

그림 4의 (c)와 같은 Cosine TSF의 경우 Linear TSF에 비해 오차는 적으나, 연산이 상대적으로 복잡하다. 그리고 회전자 위치에 따라 생성된 단일 곡선에 의해 토크 분배가 이루어지기 때문에 정확한 분배가 이루어지지 않아, 토크 맥동이 발생한다.

상기 Linear TSF 및 Cosine TSF 이외 토크분배함수로는 논리적 비선형 토크 분배함수가 있다. 이 함수는 기존의 TSF와 같이 고정된 수치를 가지는 분배곡선을 이용하지 않고, 전체 토크지령에 따른 각 상의 전류상태를 고려하여 가

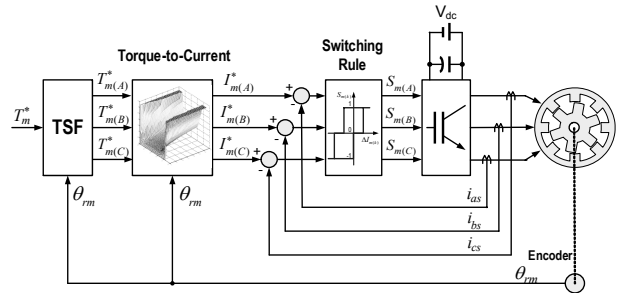


그림 3 토크분배함수를 적용한 SRM의 제어블럭

Fig. 3 Block diagram of SRM with TSF

변적으로 각 상의 지령토크를 분배한다. 이 과정에서 효율 및 응답성을 개선하기 위하여 여자되는 상과 소호되는 상의 동작을 고려하여 지령토크를 분배한다. 따라서 토크에러의 크기에 따라 각각 다른 다윈곡선 궤적상의 지령을 발생시키므로 비선형적인 SRM의 토크맥동 저감이 타 기법에 비해 우수하며, 적용 또한 간단하고 효율적인 측면에서도 개선이 가능하다.

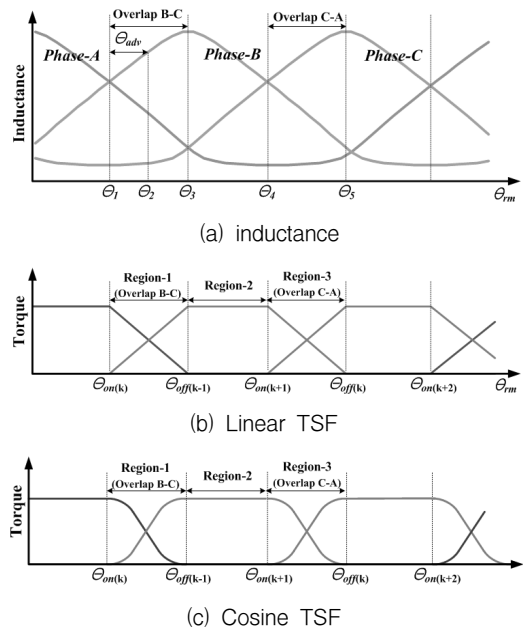


그림 4 일반적인 선형 토크 분배 함수와 코사인 토크 분배 함수 곡선

Fig. 4 Conventional cosine TSF and linear TSF curves

상기와 같은 분배함수에서 분배된 토크를 직접 순시 토크 제어기법의 경우 출력신호의 주기가 일정하지 못하고, 토크 제어 성능이 제어기의 샘플링 주기에 의존하게 된다. 따라서 전체적인 토크 제어성능의 향상을 위해서는 샘플링 주기를 짧게 설정하여야 하나, 이로 인해 스위칭 주파수가 증가하게 되고 인버터의 손실이 상승하게 된다. 또한 샘플링 주기에서 스위칭이 결정되기 때문에 그림 5에서와 같이 토크의 오차가 발생하게 된다.

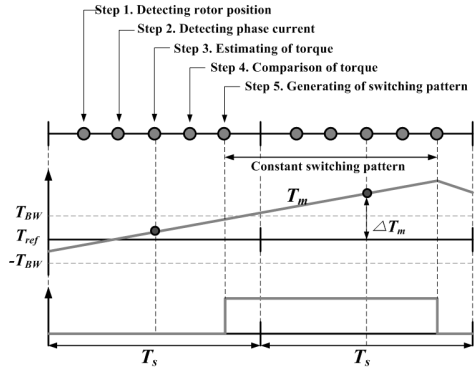


그림 5 스위칭 패턴생성 과정과 토크오차
Fig. 5 Switching pattern generating and torque error

2.3. 제안된 제어기법

본 논문에서는 상전환 구간에서 토크의 맥동을 저감하기 위해 개선된 비선형 논리적 토크 분배함수를 제안하고자 한다. 제안된 제어기법은 기존의 논리적 비선형 토크 분배함수의 기본적인 구동방법을 적용하여 그림 6과 같이 구성하였다. 그러나 비선형 토크 분배함수에서 발생하는 샘플링 주기에 의한 오차를 개선하기 위해 그림 7과 같이 단순한 연산을 통해 상전압의 폭을 결정하는 PWM기법을 적용하였다.

표 1은 논리적 상태에 따라 토크의 분배를 결정하는 방법을 나타내고 있다. 토크 분배를 위한 1차적 조건은 실제 토크 Tm과 지령토크 Tm*의 크기 비교하는 것으로 2가지 경우로 구분된다.

첫 번째 경우는 실제토크 Tm이 지령토크 Tm*보다 작을 경우로 토크를 더 발생시켜야 한다. 상전환 구간에서 토크를 발생시키는 경우 해당되는 각 상의 상태를 고려하여야 한다. 상전환 구간에서 현재 상의 토크를 크게 발생시킬 경우 상전류의 소호가 늦어지게 되어 부토크를 가져오게 되고 효율과 토크에서 좋지 않은 영향을 끼치게 된다. 그러므로 가능한 범위에서 현재 상의 토크로 지령토크를 생성시키고, 부족 부분이 발생할 경우에는 현재 상의 여자를 수행함으로써 효율 및 토크를 증가시킬 수 있다. 따라서 현재 상의 스위칭은 수행하지 않고 다음상의 제어부터 수행한다. 이때의 조건은 다음상의 상전류가 최대전류보다 작을 경우로 제한된다. 만일 다음상의 스위칭을 수행하였으나 실제토크 Tm이 지령토크 Tm*보다 여전히 작다면 현재 상에서 발생시켜야 하는 지령토크를 생성한다.

두 번째 경우는 실제토크 Tm이 지령토크 Tm*보다 클 경우로 현재상과 다음 상에서 발생하는 토크를 줄여야 한다. 이 경우에는 현재상의 토크를 먼저 감소시켜, 지령토크를 만족시킬 수 있도록 한다. 현재상의 토크를 감소시킨 경우에도 여전히 실제토크 Tm이 지령토크 Tm*보다 클 경우 다음 상의 토크를 감소하여 지령토크를 만족시키기 위한 토크 지령을 생성한다.

생성된 각 상의 전류지령은 그림 7의 토크에러와 허용 오차의 비에 의해 계산되어 $Dt = \text{Abs}(T_{err}) / \Delta TH$ 의 값을 가지며 비대칭 컨버터의 아랫상 또는 윗상의 스위치를 On-Off하게 된다.

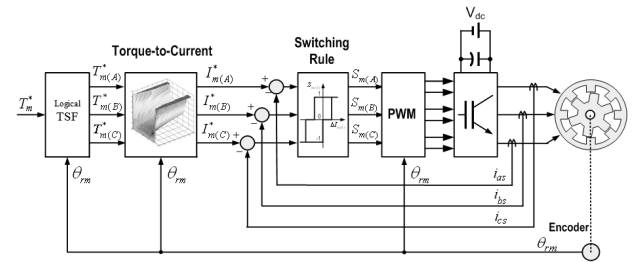


그림 6 제안된 토크분배 함수에 의한 제어블록
Fig. 6 Torque control block diagram with modified non-linear logical TSF

표 1 비선형 논리적 TSF의 토크분배 규칙

Table 1 Torque sharing rule of non-linear logical torque sharing function

Condition	Step	Torque sharing value
$T_m < T_m^*$	First	(if $I_m^*(k+1) < I_{max}$) $T_m^*(k+1) = T_m - T_m(k)$ (if $I_m^*(k+1) > I_{max}$) $T_m^*(k+1) = T_m(k+1)$
	Second	$T_m^*(k) = T_m^* - T_m^*(k+1)$
$T_m > T_m^*$	First	(if $I_m^*(k) > 0$) $T_m^*(k) = T_m - T_m(k+1)$ (if $I_m^*(k) < 0$) $T_m^*(k) = 0$
	Second	(if $I_m^*(k) > 0$) $T_m^*(k+1) = T_m(k+1)$ (if $I_m^*(k) < 0$) $T_m^*(k+1) = T_m - T_m(k)$

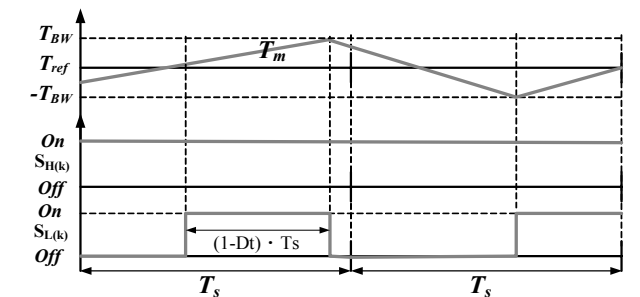


그림 7 제안된 기법의 스위칭 패턴
Fig. 7 Switching pattern of proposed method

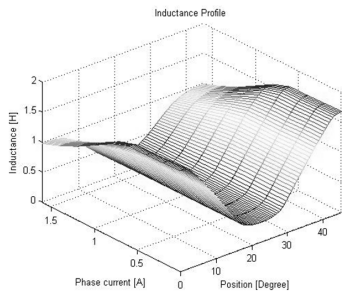
3. 시뮬레이션 및 실험결과

각 토크분배 함수를 이용한 제어기법의 특징을 살펴보고, 본 논문에서 제안한 PWM기법이 적용된 비선형 논리적 토크 분배기법의 효율성을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 표 2는 시뮬레이션과 실험에 사용된 SRM의 제원을 나타내고 있으며, 그림 8은 전동기의 실측된 인덕턴스 프로파일과 토크 프로파일을 나타내고 있다. 인덕턴스 프로파일과 토크 프로파일은 회전자 위치각에 따른 전류를 변화하여 측정하였다. 시뮬레이션은 상기 인덕턴스 프로파일과 토크프로파일을 기반으로 모델을 작성하고 Simulink를 이용하여 수행하였다.

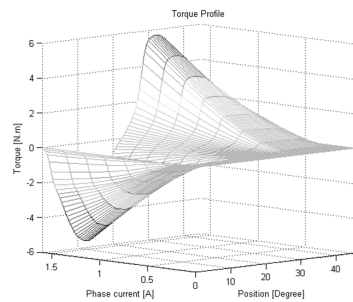
표 2 대상 전동기의 제원

Table 2 Specification of target motor

Stator pole number	12
Rotor pole number	8
Rotor slot bottom radius	30 [mm]
Rotor surface radius	36.75 [mm]
Stator slot bottom radius	56.5 [mm]
Stator outer radius	132 [mm]
Number of phase	3
Stack-length	28.7 [mm]
Air-gap length	0.5 [mm]
Stator pole arc	14.5 [deg]
Rotor pole arc	18 [deg]
Winding resistance per phase	120 [ohm]
Number of turn per pole	747



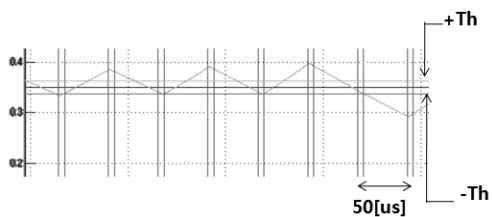
(a) Inductance Profile



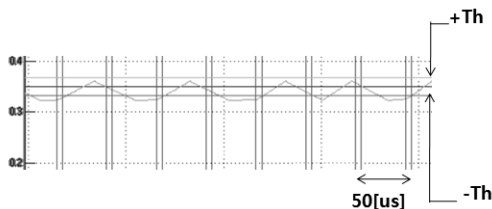
(b) Torque Profile

그림 8 대상전동기의 인덕턴스 및 토크특성

Fig. 8 Inductance and torque characteristic of target motor



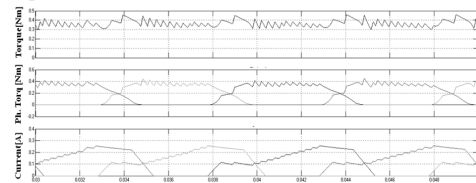
(a) Direct torque control



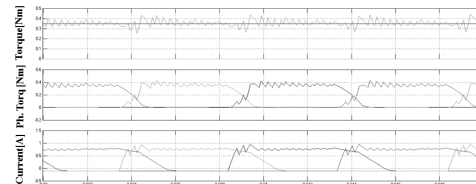
(b) Direct torque control with PWM

그림 9 직접순시제어와 PWM을 적용한 직접순시 제어의 특성

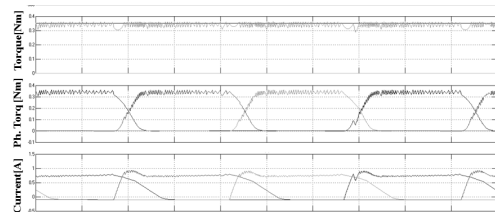
Fig. 9 Characteristic of direct torque control and direct torque control with PWM



(a) Linear TSF



(b) Non-linear logical TSF



(c) Proposed non-linear logical TSF with PWM

그림 10 토크분배함수에 따른 시뮬레이션 결과

Fig. 10 Simulation results according to TSF

그림 9는 히스테리시스를 기반으로 한 직접토크제어와 본 논문에서 제안한 PWM 연산기법을 통한 직접토크제어의 정상상태 특성을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 일반적인 히스테리시스 기반의 제어를 수행할 경우 매 샘플링시간에 따라 오차가 오차범위를 초과하여 발생하고 있으나, 제안된 기법의 경우 오차 범위 내에서 제어가 이루어짐을 확인할 수 있다.

그림 10은 각 토크분배함수를 이용한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과에서 정상상태 및 상전환 구간에서 제안된 제어기법이 낮은 토크리플을 가지며 제어가 이루어짐을 알 수 있다.

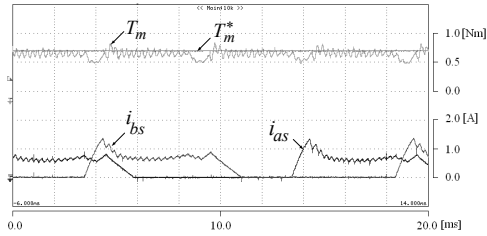
시뮬레이션 결과를 바탕으로 각 토크제어기법에 대한 실험을 수행하였으며, 결과는 그림 11과 같다. 실험결과에서도 제안된 제어기법이 시뮬레이션의 결과와 동일하게 제안된 제어기법에서 정상상태 및 상전환 구간에서 낮은 토크 리플을 발생시키고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

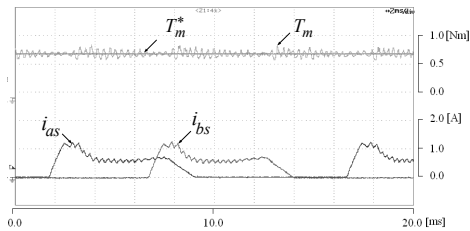
본 논문에서는 상 전환구간에서 발생하는 토크의 맥동을 줄이기 위하여 Linear TSF, Cosine TSF, Non-linear logical TSF 기법의 특성을 비교하고, 장단점을 비교하였다. 또한 샘플링시간에 의해 발생하는 문제점을 보완하기 위해 간단한 PWM연산을 통하여 스위칭 패턴을 개선한 비선형 논리적 토크 분배 기법을 제안하였다.

제안된 기법의 검증에 위해 유한요소해석과 실측을 바탕으로 한 수치해석 모델을 작성하였고 시뮬레이션을 통하여

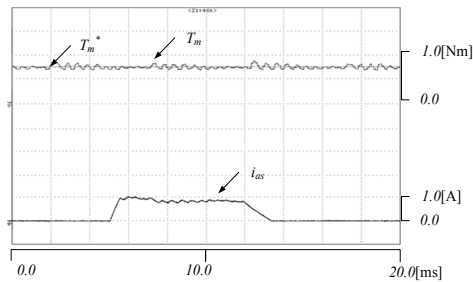
가능성을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 다른 토크 분배함수를 이용한 제어기법에 비해 토크맥동이 낮게 나타났으며 실험을 통해 이를 검증하였다.



(a) Linear TSF



(b) Non-linear logical TSF



(c) Proposed non-linear logical TSF with PWM

그림 11 토크분배 함수에 따른 실험결과

Fig. 11 Experimental results according to TSF

감사의 글

본 연구는 2009년도 경성대학교 학술연구과제지원에 의하여 이루어진 연구로서, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, T.T. Blenkinsop, J. Corda, and N. N. Fulton, "Variable-speed reluctance motrors," in Proc. IEEE, Pt. B, vol. 127, no. 4, July 1980, pp. 253-265.
 [2] K. Ohyama, M. Naguib, F. Nashed, K. Aso, H. Fujii, H. Uehara, "Design using finite element analysis of a switched reluctance motor for electric vehicle," Journal of Power Electronics, vol.6, no.2, April 2006, pp. 163-171.
 [3] J. W. Ahn, T. H. Kim, D. H. Lee, "Performances of

SRM for LSEV," Journal of Power Electronics, vol.5, no.1, Jan. 2005, pp. 45-54.

[4] D. S. Schramm, B. W. Williams, and T. C. Green, "Torque ripple reduction of switched reluctance motors by phase current optimal profiling," in Proc. IEEE-PESC Conf. Rec.'92, pp. 857-860.
 [5] J. C. Moreira, "Torque ripple minimization in switched reluctance motors via bi-cubic spline interpolation," in Proc. IEEE-PESC Conf. Rec.'92, pp. 851-856.
 [6] S. A. Bortoff, R. R. Kohan, and R. Milman, "Adaptive control of variable reluctance motors : A spline function approach," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 45, June 1998, pp. 433-444.
 [7] C. H. Choi, S. H. Kim, Y. D. Kim, and K.H. Park, "A new torque control method of a switched reluctance motor using a torque-sharing function," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 38, no. 5, September 2002, pp. 3288-3290.

저 자 소 개



김 태 형 (金 泰 亨)

1977년생. 2003년 경성대 전기공학과 졸업
 2009년 8월 동 대학원 산업시스템공학
 전기공학전공 졸업(박사) 2009년 8월~현
 재 씨엠아이 주식회사 기술연구소 선임
 연구원

Tel : 055-231-7933

E-mail : kimth772@ks.ac.kr



안 진 우 (安 珍 雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸
 업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업
 (박사). 1992년~현재 경성대 메카트로닉
 스공학과 교수. 2008년 7월~현재 지식경
 제부지정 고령친화이지라이프 RIS사업단
 장, 스마트메카트로닉스연구센터장

Tel : 051-663-4773

Fax : 051-624-5980

E-mail : jwahn@ks.ac.kr