SRM의 토크리플 저감을 위한 개선된 논리적 비선형 토크분배기법

김태형, 이동희, 안진우
경성대학교

Advanced Logical Non-Linear Torque Sharing Function for Torque Ripple Reduction of SRM

Tae-Hyoung Kim, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn
Kyungsung University

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

1. 서 론

단순한 형상의 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 릴럭턴스를 이용하여 토크를 발생시키는 브러쉬레스 형태의 전동기구이다. 전동기 제작을 위한 재료비 및 제작비가 타 전동기에 비해 저렴하며 기계적인 강인성이 매우 높고, 고속구동이 유리하다. 그러나 이중 돌극형 구조와 스위칭에 의한 여자로 인해 발생하는 토크 맥동 및 진동, 소음이 문제점으로 작용하고 있다[1].

SRM의 토크 제어는 다른 전동기에 비해 어렵다. 발생되는 회전자 축의 토크는 각 상에서 발생된 토크의 합으로 나타나므로, 현재상과 다음 상의 전환시 발생되는 토크 맥동은 전체 토크 제어에 영향을 끼치게 된다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위하여 단순한 제어기법을 이용하여 토크의 맥동을 저감시키기 위한 토크 분배 함수(Torque Sharing Function, 이하 TSF)를 이용한 제어기법들이 제안되고 있다[2][3].

본 논문에서는 상 전환구간에서 발생하는 토크의 맥동을 줄이기 위한 기존 TSF 기법의 특성을 비교하고, 장단점을 비교하였다. 또한 비교된 문제점을 보완하여 개선된 비선형 논리적 토크 분배 기법을 제안하였다. 제안된 TSF 기법은 기존 비선형 논리적 TSF와 같이 타원방정식에 근거를 두고 있고 있다[4]. 따라서 기존 비선형 논리적 TSF와 동일하게 선형 TSF나 Cosine TSF에 비해 오차가 적고 적용이 간편하다.

제안된 기법의 검증을 위해 유한요소해석과 실측을 바탕으로 한 수치해석 모델을 작성하였으며 시뮬레이션을 통하여 가능성을 시험하였고, 효용성을 검증하기 위하여 실험을 수행하였다.

2. 상전환 구간에서의 토크리플 저감기법

2.1 SRM 토크 발생원리 및 기구적 문제점

각 상에 일정한 전류가 공급되는 경우, 각 상에서 발생되는 토크는 식(1)과 같이 여자 전류의 제곱과 인덕턴스의 기울기의 곱에 비례하여 발생되고 식(2)와 같이 발생되는 토크의 합에 의해 전체 토크가 결정된다.

실제 SRM의 경우 인덕턴스는 자속의 누설과 철심의 포화에 의해 실선과 같이 회전자의 위치와 전류에 따라 비선형적이다. 따라서 이 구간에 발생되는 각 상의 토크 역시 비선형적이며, 전체 구간 중 토크 맥동이 가장 크게 발생되며, 이 구간의 토크 맥동을 감소시키는 것은 전체 토크 맥동의 감소에 매우 중요하다. 따라서 이전 상과 다음 상에서 발생되는 토크의 분배가 토크 맥동 감소에 매우 중요하다.

$$v = L_{(\theta_{rm})}\frac{di}{dt} + i\frac{dL_{(\theta_{rm})}}{d\theta_{rm}}\cdot\omega_{rm} \quad (1)$$

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

여기서 는 회전자의 위치, 는 회전자 속도, La와 Lb, Lc는 회전자 위치에 따른 각 상의 인덕턴스를 나타내고 있다.

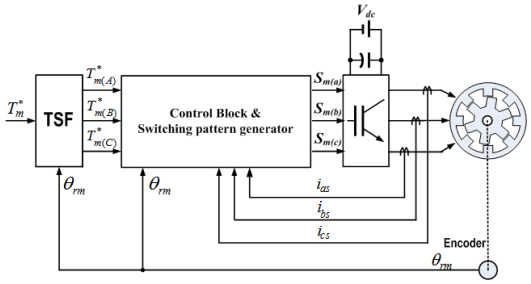
2.2 일반적인 토크분배기법

그림 1은 토크분배함수를 적용한 경우를 나타내고 있으며, 그림 2는 상전환 구간에서의 토크분배기법인 선형 토크분배함수와 Cosine 토크분배함수를 나타내고 있다.

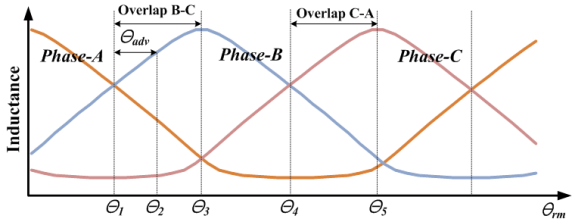
3상으로 구성된 SRM의 경우 인덕턴스에 따라 그림 2의 (a)와 같이 구간을 나눌 수 있고 만일 현재 B상의 여자가 이루어지고 있다면 다음 여자대상은 c상이 된다. 이때 C상의 경우 전류를 확립하기 위해서는 인덕턴스가 증가하는 Θ_2이전에 여자가 이루어져야 한다. 이와 함께 B상의 경우 부토크를 최소화하기 위해서는 회전자가 고정자가 일치하는 시점인 Θ3이전에 B상의 전류가 0이 되어야 한다. 따라서 실제 상 전환을 위한 중첩동작을 수행하게 되는 구간이 Θ1~Θ3 내에 위치하는 것이 일반적이다.

그림 2의 (b)는 선형 분배함수에 의한 토크분배로 연산이 매우 간단하여 일반적으로 사용되는 기법으로 적용이 매우 용이하나, 비선형구간에서 오차가 크게 발생하는 단점이 있다.

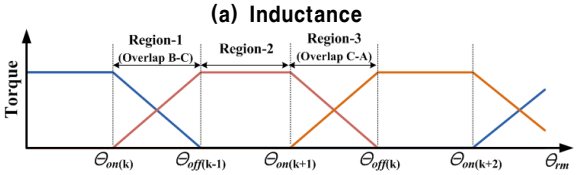
그림 2의 (c)는 Cosine 분배함수에 의한 토크분배로 선형 분배함수에 비해서는 연산이 복잡하나, 선형 분배함수에 비해 비선형구간에서 오차가 작게 발생한다.



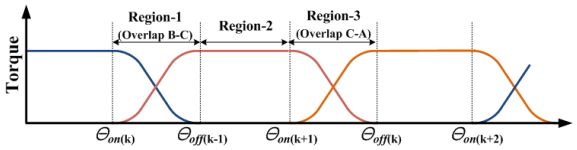
〈그림 1〉 토크분배함수를 적용한 SRM의 제어블럭



(a) Inductance



(b) Logical Torque Sharing Function



(c) Cosine TSF

〈그림 2〉 기존 토크 분배 함수를 적용한 SRM의 제어블럭

상기 선형 분배 함수와 Cosine 분배함수의 경우 단일 곡선에 의한 토크분배로 인해 토크의 분배가 제대로 이루어지지 않으며, SRM의 비선형성을 완전하게 추종하지도 못한다. 또한 현재상과 다음 상의 여자 에

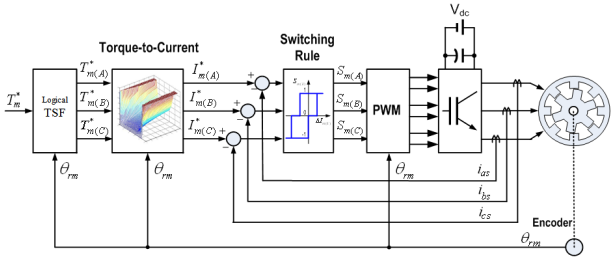
너지의 효용성을 제대로 반영하지 못하기 때문에 효율 측면의 문제도 가진다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제어가 단순하고, 상의 여자 상태를 고려한 비선형 논리적 토크분배함수가 제안되고 있다. 이 토크분배함수는 타원방정식을 기본으로 하여 상간 토크를 분배하며, 높은 운전효율로 유지하기 위한 조건을 고려하여 표 1과 같이 동작된다.

<표 1> 논리적 비선형 토크 분배함수의 제어규칙

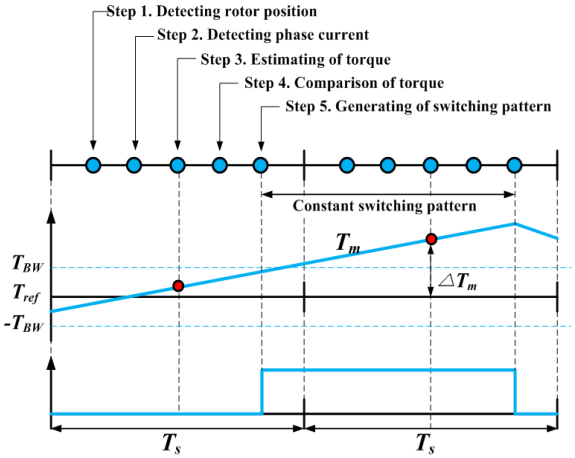
Condition	Step	Torque sharing value
$T_m < T_m^*$	First	$(\text{if } I_{m(k+1)}^* < I_{\max})\ T_{m(k+1)}^* = T_m^* - T_{m(k)}$ $(\text{if } I_{m(k+1)}^* > I_{\max})\ T_{m(k+1)}^* = T_{m(k+1)}$
	Second	$T_{m(k)}^* = T_m^* - T_{m(k+1)}^*$
$T_m > T_m^*$	First	$(\text{if } I_{m(k)}^* > 0)\ T_{m(k)}^* =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

2.3 개선된 논리적 비선형 토크 분배 함수

본 논문에서는 상전환 구간에서 토크의 맥동을 저감하기 위해 개선된 비선형 논리적 토크 분배함수를 제안하고자 한다. 제안된 제어기법은 기존의 논리적 비선형 토크 분배함수와 같이 타원식을 기본으로 하여 구성하였다. 이 비선형 논리적 토크분배기법의 경우 직접토크 순시제어를 사용하는데 직접 순시 토크제어기법의 경우 출력신호의 주기가 일정하지 못하고, 토크 제어 성능이 제어기의 샘플링 주기에 의존하게 된다. 따라서 전체적인 토크 제어성능의 향상을 위해서는 샘플링 주기를 짧게 설정하여야 하나, 스위칭 주파수가 증가하게 되고 인버터의 손실이 상승하게 된다. 따라서 본 논문에서는 허용오차의 크기에 대한 실제 오차의 크기에 대한 비율을 통해 신호의 폭을 결정하는 PWM 방식을 적용함으로써 동일한 샘플링 시간에 여러 번의 스위칭을 통해 간단하고 정밀하게 스위칭을 수행하는 개선된 비선형 논리적 토크 분배함수를 제안하였다.



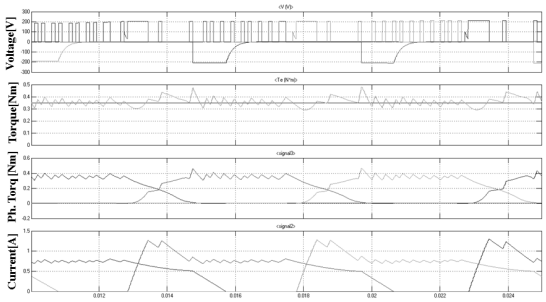
<그림 3> 개선된 비선형 논리적 토크분배함수의 제어블럭



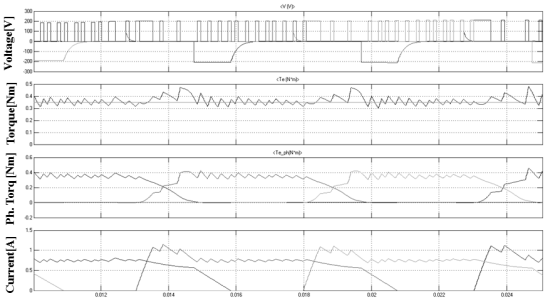
<그림 4> 샘플링 오차에 의한 직접 수시제어의 토크오차

3. 시뮬레이션 및 실험결과

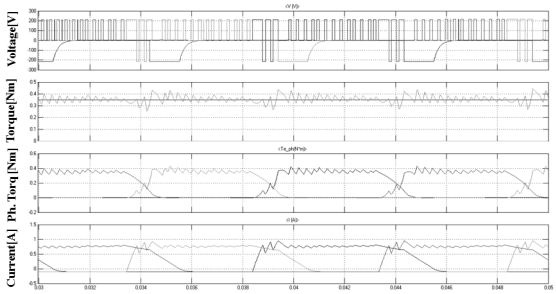
그림 5에서 그림 11까지는 본 논문에서 제시된 각 토크분배함수에 의한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 조건은 500[rpm]이며 샘플링 시간은 100[us]로 설정하였다. 선형 TSF, Cosine TSF, 기존 논리적 비선형 TSF의 경우 DITC를 기반으로 제어되었으며, 개선된 제어기법의 경우 제안된 PWM방식에 의한 제어를 적용하여 수행하였다.



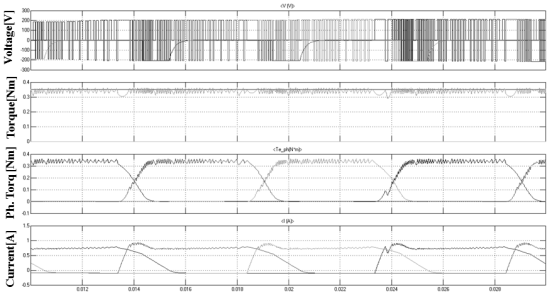
<그림 5> 선형 토크 분배 함수를 통한 시뮬레이션



<그림 6> 코사인 토크 분배 함수를 통한 시뮬레이션



<그림 7> 비선형 논리적 토크분배함수를 통한 시뮬레이션



<그림 11> 개선된 비선형 논리적 토크분배함수를 통한 시뮬레이션

4. 결 론

본 논문에서는 상 전환구간에서 발생하는 토크의 맥동을 줄이기 위한 TSF 기법의 특성을 비교하고, 장단점을 비교하였다. 또한 비교된 문제점을 보완하여 개선된 비선형 논리적 토크 분배 기법을 제안하였다. 제안된 기법의 검증을 위해 유한요소해석과 실측을 바탕으로 한 수치해석 모델을 작성하였으며 시뮬레이션을 통하여 가능성을 시험하였고, 실험을 통하여 검증하였다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한
에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

[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] 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.