

## 토크분배함수를 이용한 SRM의 직접토크제어기법

안진우, 이동희, 김태형, Jianing Liang

경성대학교

## Direct Torque Control Scheme of Switched Reluctance Motor using Novel Torque Sharing Function

Jin-Woo Ahn, Dong-Hee Lee, Tae-Hyoung Kim, Jianing Liang  
Kyungsung Univ.

**Abstract** - A novel non-linear logical torque sharing function (TSF) is presented. To improve efficiency and to reduce torque ripple in commutation region, only a phase torque under commutation is regulated to produce a uniform torque. And the torque developed by the other phase remains with the previous state under a current limit of the motor and drive. If the minimum change of a phase torque reference can not satisfy the total reference torque, two-phase changing mode is used. Since a phase torque is constant and the other phase torque is changed at each rotor position, total torque error can be reduced within a phase torque error limit. And the total torque error is dependent on the change of phase torque.

To consider non-linear torque characteristics and to suppress a tail current at the end of commutation region, the incoming phase current is changed to torque increasing direction, but the outgoing phase current is changed to torque decreasing direction. So, the torque sharing of the outgoing phase and incoming phase can be smoothly changed with a minimum current cross over.

The proposed control scheme is verified by some computer simulations and experimental results.

## 1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor)이하 SRM)의 가장 큰 단점은 타 전동기에 비해 토크리플이 크다는 것이다. SRM에서 토크리플은 활성화된 상에서 다음 여자되는 상으로 전환되는 소호구간에서 크게 나타난다.[1] 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 토크리플을 감소시고 순시로 토크를 제어하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다.[2-6]

SRM의 경우 일정한 전류가 상 권선에 공급될 경우 인덕턴스의 비선형성에 따라 출력토크역시 비선형적인 특성을 가지므로 토크리플을 저감하기 위한 방법으로 간단한 직접 순시 토크 제어와 토크 분배함수를 이용한 방법들이 대안으로 제시되고 있다.

그러나 직접순시제어기법 경우 기본 제어 원리는 단순 하나, 소호구간에서 부드러운 토크의 생성을 위해서 복잡한 스위칭 규칙이 요구되어지며, 제어성능은 이에 의해 결정되는 스위칭 규칙에 의해 결정된다. 또한 직접순시제어기법을 이용할 경우에는 부가적인 전류제어기를 이용하므로 소호구간에서 일정한 토크의 발생을 위해서 종종 간단한 토크 분해 곡선이 이용 될 수 있다.

기존의 연구에서 SRM의 토크 리플 저감을 위해 선형 또는 코사인을 이용한 토크분배함수가 제안되었고 적용되었다. 선형 토크분배함수는 가장 간단한 제어이나, 전

동기의 비선형 특성을 고려하기 어렵다. 특히 실제 토크는 소호구간의 시작과 끝 주위에서 큰 토크 에러를 가진다. 이를 위해 코사인곡선을 이용한 토크분배기법이 이용되며 효과적이나, 전동기의 토크 특성에서 의해 제한되어 진다.

본 논문에서는 새로운 비선형 논리적 토크 분배함수가 제안되었다. 소호구간에서 구동효율을 증대시키고 토크리플을 감소하기 위해서 상태가 전환되는 경우 두 상 중 한상의 토크는 균일하게 유지하고 다른 상의 전류크기를 변화시켜 토크를 균일하게 하며, 요구토크를 충족시킨다. 따라서 만일 한 상에 대한 토크 지령의 최소변화가 전체 토크 지령을 만족하지 못한다면, 두상여자가 사용된다.

또한 소호구간에서 비선형 토크특성과 소호구간의 잔류전류를 고려하기 때문에 여자 될 상의 전류는 증가하는 방향으로 변화되나 소호될 상의 전류는 감소하는 방향으로 증가하게 된다. 따라서 이전 상과 다음상의 토크분배는 전류의 중첩에 의해 부드럽게 변화할 수 있다.

제안된 제어기법은 시뮬레이션과 실험을 통해 효용성을 증명하였다.

## 2. 토크 분배 함수에 의한 직접 토크제어기법

## 2.1 SRM의 직접 토크 제어

아래 식(1)과 식(2)는 일반적인 SRM의 전압방정식과 토크 방정식을 나타내고 있다. 토크SRM에서는 일정한 전류가 공급될 경우 전류의 제곱과 인덕턴스의 기울기의 곱에 해당되는 토크가 발생한다.[1-3]

$$v = L_{(\theta_m)} \frac{di}{dt} + i \frac{dL_{(\theta_m)}}{d\theta_m} \cdot \omega_m \quad (1)$$

$$T_m = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL_{(\theta_m)}}{d\theta_m} \quad (2)$$

여기서  $\theta_m$ 는 회전자위치,  $\omega_m$ 는 회전자속도,  $L_{(\theta_m)}$ 은 회전자 위치에 따른 인덕턴스를 나타낸다.

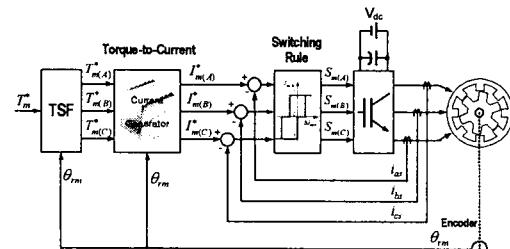


그림 1. 토크분배함수에 의한 직접 토크 제어 블록도  
Fig. 1 The Direct torque control block diagram with TSF method

실제 SRM은 비선형적인 인덕턴스로 인하여 각 전류에 따른 토크 곡선이 다르게 나타난다. 따라서 실제 전류제어는 유도전동기나 영구자석 동기 전동기 등 다른 전동기에 비해 매우 어렵다.

그림 1은 토크분배함수를 포함한 SRM의 토크 제어 블록을 나타낸 것이다. 입력토크 지령치는 회전자의 위치에 따라 각 상에 대한 토크로 구분되며, 각 상의 지령치는 '토크-전류' 테이블을 참조하여 생성된다. 스위칭 규칙은 각 상에서 전류의 오차와 히스테리시스 스위칭 테이블에 따라 생성된다.

### 2.3 제안된 토크 분배기법

본 논문에서는 높은 토크 제어 성능을 위한 직접토크 제어기법에서 새로운 비선형 토크 분배함수를 제안하였다.[7] 소호구간에서 효율을 높이고 토크리플을 줄이기 위하여 제안된 토크 분배 함수는 회전자 전체 영역에서 비선형 전류 분배 기법을 사용하였다. 그리고 토크 분배 함수는 각 상에 전류좌표에 의해 쉽게 결정될 수 있다.

소호구간에서 전체 토크의 지령은 두상의 토크 지령에 의해 구분된다.

$$T_m^* = T_{m(k)}^* + T_{m(k+1)}^* \quad (3)$$

식에서  $k+1$ 은 다음 상을 의미하며  $k$ 는 현재 상을 의미한다. 실제 토크는 앞서 제시한 것과 같이 상전류와 인덕턴스에 의해 결정되므로 식(3)은 아래와 같이 유도된다.

$$T_m^* = \frac{I_{m(k)}^2}{a^2} + \frac{I_{m(k+1)}^2}{b^2} \quad (4)$$

여기서  $a = \sqrt{\frac{2}{\partial L_{(k)} / \partial \theta_{rm}}}, b = \sqrt{\frac{2}{\partial L_{(k+1)} / \partial \theta_{rm}}}$

상기 식은 타원 방정식과 같은 형태를 취하고 있다. 소호구간에서 일정한 토크 지령에 의해 현재상과 다음상의 전류 지령치는 타원의 궤도상에 위치하게 된다. 그리고 타원의 형상과 궤도는 회전자의 위치 및 인덕턴스의 기울기 지령토크에 의해 바뀐다.

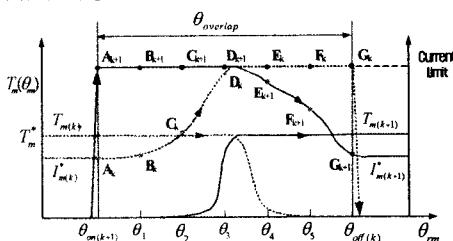


그림 2. 소호구간에서 일정한 토크발생을 위한 상전류 및 실제 토크 궤적

Fig. 2 Phase current and actual torque trajectory for constant torque production during phase commutation

그림 2는 일정한 토크를 출력하기 위해 회전자에 위치에 따라 각 상의 전류와 실제 발생되는 토크를 나타낸다. 토크곡선은 회전자와 고정자의 정렬 지점주위에서 비선형적인 특성을 가진다. 따라서 균일한 토크 발생을 위한 각상의 전류 지령은 회전자의 위치와 토크 지령의 크기에 따라 바뀐다. 그러나 실제 전류의 크기는 전동기와 구동시스템의 성능에 의해 제한되어진다. 따라서 실제 토크는 비선형적인 토크 특성에 의해 정렬구간 주위에서 지령을 만족할 수 없다. 만일 이전상의 전류가 전동기의 제한 값으로 상승되어지면 실제 토크는  $D_k$  이후

에서 감소되어진다.

$A_k$ 에서부터  $G_{k+1}$ 까지 일정한 토크를 생성하기 위해 이전상과 다음상의 전류지령은 각상의 전체 토크에 알맞게 선택되어져야 한다.

소호구간에서는 일정한 토크 생성과 함께 현재 상의 전류는 빠르게 감소되어져야 하며 다음상의 전류는 빠르게 확립되어야 한다.

그림 2와 같이 전류의 초기 구간에서 다음상의 전류는 0에서  $A_{k+1}$ 의 지점으로 상승되어야 하며, 전류의 끝 구간에서는 이전상의 전류가  $G_k$ 에서 0으로 가능한 한 빠르게 감소하여야 한다. 제안된 토크분배함수는 구동효율을 높이고 토크리플의 감소를 위해 최소변화기법을 기반으로 한다. 한 상의 전류지령은 고정시키고 다른 상의 전류지령을 변화시켜 소호구간에서 균일한 토크를 발생시킨다.

표 1은 제안된 논리적 토크 분배함수를 나타내고 있으며 그림 3은 소호구간에서 이상적인 전류의 궤적을 나타내고 있다. 그림 3에서 타원곡선은 소호시 각 회전자의 위치에서 일정한 토크 발생을 위한 식(4)에 근거한 전류의 궤적이다.

Table 1. The proposed logical TSF in commutation region.

Conditions	Step	References of incoming and outgoing phase
$T_m < T_m^*$	First	$T_{m(k+1)}^* = \begin{cases} T_m^* - T_{m(k)} & (\text{if } I_{m(k+1)}^* < I_{\max}) \\ T_{m(k+1)} & (\text{if } I_{m(k+1)}^* > I_{\max}) \end{cases}$
	Second	$T_{m(k)}^* = T_m^* - T_{m(k+1)}^*$
$T_m > T_m^*$	First	$T_{m(k)}^* = \begin{cases} T_m^* - T_{m(k+1)} & (\text{if } I_{m(k)}^* > 0) \\ 0 & (\text{if } I_{m(k)}^* < 0) \end{cases}$
	Second	$T_{m(k+1)}^* = \begin{cases} T_{m(k+1)} & (\text{if } I_{m(k)}^* > 0) \\ T_m^* - T_{m(k)} & (\text{if } I_{m(k)}^* < 0) \end{cases}$

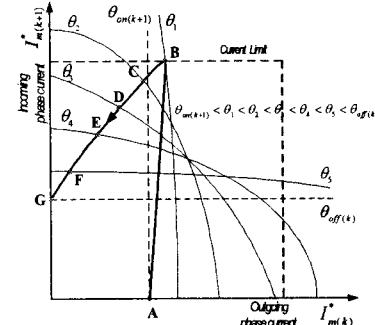


그림 3. 소호구간에서의 이상적인 전류곡선

Fig. 3 Ideal current trajectory of outgoing and incoming current at commutation region

### 3. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 제어기법의 증명을 위하여 시뮬링크를 이용한 수치해석 시뮬레이션과 실험을 통해 일반적인 제어기법과 비교를 수행하였다. 그림 4는 500[rpm] 정격토크조건에서 각 제어기법을 비교한 결과이다. 시뮬레이션 결과 제안된 기법이 기존 기법에 비해 토크리플저감 효과가 높은 것을 알 수 있다. 그림 5는 각 토크분배함수의 이용에 따른 전류궤적을 나타내고 있다.

시뮬레이션 결과를 바탕으로 제안된 기법의 검증을 위해 실험을 수행하였다. TI사의 DSP 컨트롤러인 TMS320F2812를 사용하여 제어기를 구성하고 IGBT를 이용한 비대칭 브릿지 컨버터로 전력변환기를 구성하여 실험을 수행하였다.

그림 6, 그림 7, 그림 8은 각 토크 분배함수에 따른 실험 결과를 나타내고 있다. 제안된 기법을 이용한 경우 토크리플이 감소됨을 보여준다.

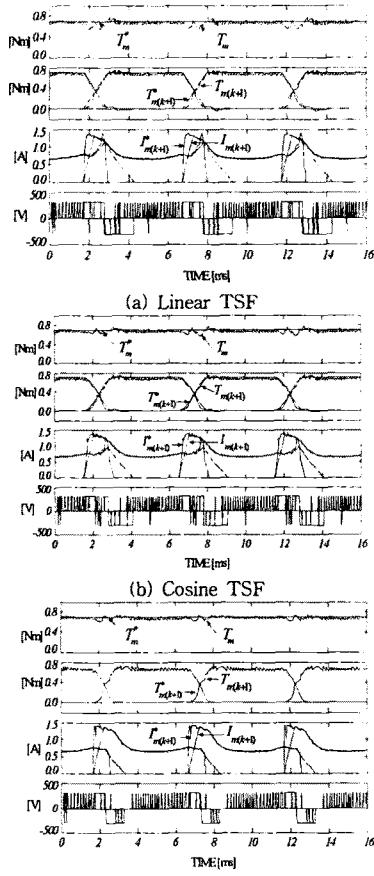


그림 4. 정격 토크에서 시뮬레이션 결과  
Fig. 4 Simulation results at 500rpm with rated torque

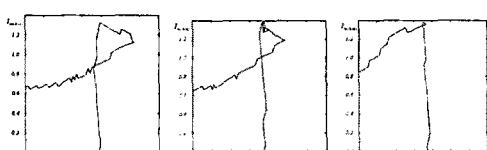
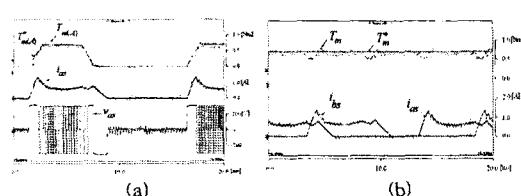
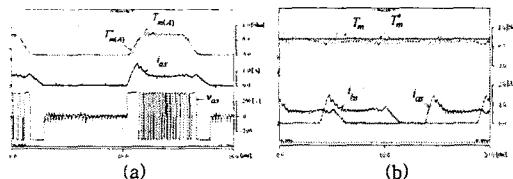


그림 5. 전류구간에서 일정토크를 위한 전류궤적  
Fig. 5 The current trajectory for constant torque in commutation region

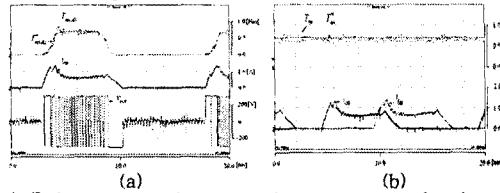


(a) Reference torque, actual torque, phase current and voltage of phase-A  
(b) Total reference torque, actual torque and phase currents  
그림 6. 일반적인 선형 토크분배함수의 실험 결과  
Fig. 6 Experimental results in conventional linear TSF(at 500[rpm])



(a) Reference, actual torque, phase current and voltage of phase A  
(b) Total reference torque, actual torque and phase currents

그림 7. 일반적인 코사인 토크분배함수를 적용한 실험 결과  
Fig. 7 Experimental results in conventional cosine TSF(at 500[rpm])



(a) Reference, actual torque, phase current and voltage of phase A  
(b) Total reference torque, actual torque and phase currents

그림 8. 제안된 토크분배함수를 적용한 실험 결과  
Fig. 8 Experimental results in case of the proposed TSF(at 500[rpm])

#### 4. 결 론

본 논문에서는 새로운 논리적 토크분배함수를 제안하였다. 구동 효율을 향상하고 소호구간에서 토크리플을 감소시키기 위해 하나의 상이 일정한 토크를 유지하도록 변화하고 다른 한상은 이전의 상태를 유지하도록 하였다. 또한 본 논문에서는 토크의 비선형성과 소호구간에서의 전류를 고려하여 다음상의 전류는 증가되는 방향으로 소호되는 상의 전류는 빠르게 감소하는 방향으로 변화시켰다. 또한 소호되는 상의 전류형상과 여자될 상의 전류 모양이 부드럽게 변화될 수 있도록 하였다.

제안된 기법은 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션과 실험을 통하여 기존의 토크 분배함수를 이용한 제어기법에 비해 높은 구동 효율과 토크리플의 저감효과가 높음을 증명하였다.

본 연구는 2007년 Brain Busan 21사업 지원에 의해 수행되었음.

#### [참 고 문 헌]

- [1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, T. T. Blenkinsop, J. Corda, and N. N. Fulton, "Variable-speed reluctance motors," in Proc. IEEE, Pt. B, vol. 127, no. 4, July 1980, pp. 253-265.
- [2] R. C. Kavanagh, J. M. D. Murphy, and M. G. Egan, "Torque ripple minimization in switched reluctance drives using self-learning techniques," in Proc. IEEE-IECON Conf. Rec.'91, pp. 289-294.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] J. N. Liang, Z. G. Lee, D. H. Lee, J. W. Ahn, "DTC of SRM Drive System Using 4-Level Converter", Proceedings of ICEMS 2006, Vol. 1, 21-23 Nov. 2006