

커뮤테이션 구간의 토크리플 저감을 위한 SRM의 토크 분배 함수 기법

김태형, Huijun Wang, 이동희, 안진우
경성대학교

Torque Sharing Function of SRM for Torque Ripple Reduction in Commutation Region

Tae-Hyoung Kim, Huijun Wang, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn
Kyungsoong Univ.

ABSTRACT

A novel 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)은 이중 돌극형 구조의 철심에 고정자 측에 권선이 존재하는 집중권 방식을 취하고 있으며, 위치에 따른 각상의 스위칭 전환에 의해 전동력을 발생하는 원리를 가지고 있다. 이러한 전동력의 발생 원리로 인하여 상과 상간의 전환이 발생하는 구간, 즉 현재상의 전류구간에서 토크리플이 발생하게 되는 문제점을 가진다. 또한 이와 함께 토크가 발생할 수 있는 구간, 즉 인덕턴스의 변화를 가지는 구간의 시작과 끝 지점에서 인덕턴스의 비선형적인 특성으로 인해 토크의 제어가 어려워 토크리플은 더욱 심화되게 된다.^[1] 이러한 문제점을 해결하기 위해 기존의 많은 연구에서 토크리플을 감소시키기 위한 방법을 제시하였으며, 최근에는 직접토크제어기법이나 전류구간에서 상간의 토크 중첩을 통해 토크 리플을 감소시키는 토크분배함수를 이용한 기법들이 제시되고 있다. 그러나 전류구간에서

서 인덕턴스의 비선형으로 인해 토크의 제어오차가 존재하고, 구현이 어렵다는 단점을 가지고 있다.^[2-6]

본 논문에서는 전류구간에서 비선형적인 인덕턴스 특성에 영향을 받지 않고 토크의 분배를 위해 각 영역에 따른 상태를 히스테리시스 제어기법을 기반으로 한 직접토크제어기법과 논리적 토크분배함수를 사용한 토크리플 저감기법을 제안하였다. 제안된 기법은 기존에 제시된 토크 분배함수와 특성비교를 위해 실험과 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 토크분배함수를 이용한 리플저감

2.1 일반적인 SRM의 토크발생기구 및 토크리플

SRM의 경우 이중 돌극형 구조를 가진 집중권 방식의 전동기구를 가지고 있다. 이러한 구조에 의해 회전자의 극과 고정자의 극이 만나는 시점을 시작으로 인덕턴스의 변화가 일어나고 이 구간에서 상을 여자 시킬 경우 아래 식(1)과 같이 인덕턴스의 변화량에 따른 토크가 발생하게 된다. 따라서 극수에 따른 일정한 기계적인 각도차를 가진 고정자의 극을 순차적으로 여자 시킴으로써 회전력을 발생시키는 구조를 가지고 있다.

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

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

따라서 여자되는 상의 전류가 이루어지는 구간에서는 이에 따른 토크의 리플이 발생하게 된다. 또한 회전자와 고정자가 정렬되기 시작하는 시점과 완전 정렬 후 다시 어긋나기 시작하는 시점에서는 인덕턴스의 변화가 비선형적으로 일어나기 때문에 토크에 대한 고려가 어렵기 때문에 토크의 리플이 심화될 수 있다. 이러한 상태는 각상의 전류구간에서 존재하게 되므로 상의 전류구간에서 토크를 제어하여 리플을 저감시키는 것은 SRM의 토크 특성을 결정하는데 매우 중요하다 볼 수 있다.

2.2 일반적인 토크 분배함수를 이용한 직접토크제어

SRM에서 전류구간에서 토크의 리플을 저감하는 대표적인 방법은 전류 될 상과 여자 될 상의 토크를 중첩시키는 것이며, 이를 위해 직접토크제어와 토크분배함수를 이용한 기법들이 그림 1과 같이 제시되고 있다. 일반적으로 이용되는 토크분배함수의 대표적인 것으로는 그림 2와 같이 선형분배함수와 코사인 분배함수가 있다.

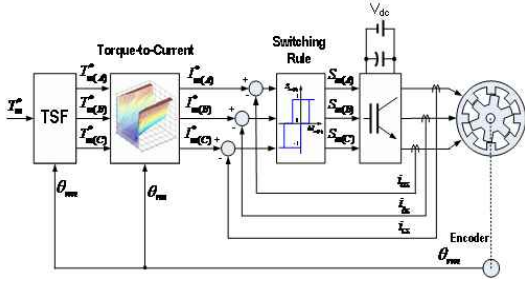


그림 1. 토크분배함수에 의한 직접 토크 제어 블록도
Fig. 1 The Direct torque control block diagram with TSF method

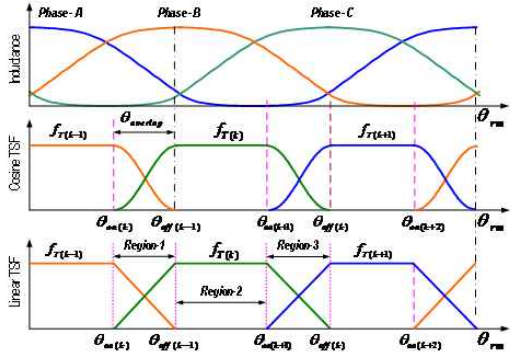


그림 2. 인덕턴스에 따른 일반적인 토크분배함수
Fig. 2 Conventional torque sharing function according to inductance

$$f_{T(k)} = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{\theta_{rm} - \theta_{on(k)}}{\theta_{overlap}} \pi \right) \right] \quad (2)$$

$$f_{T(k)} = \frac{\theta_{rm} - \theta_{on(k)}}{\theta_{overlap}} \quad (3)$$

그림 2와 같이 SRM에서 각상의 인덕턴스 변화에 따른 제어 구간을 구분하면 각 상의 영향에 따라 토크가 발생하는 구간을 3개의 구간으로 구분할 수 있다. $f_{T(k-1)}$ 구간과 $f_{T(k+1)}$ 구간에서는 한 상에 의해 토크가 발생하는 구간이며 cos함수에서나 선형함수를 이용한 제어기법에서나 같은 제어방식을 가진다. 그러나 상의 전환이 발생하는 구간에서는 cos함수를 이용한 토크분배에서는 식 (2)를 선형함수를 이용한 토크분배에서는 식(3)을 이용하여 지령토크를 생성하여 이를 위한 전류 제어를 수행한다. 선형함수를 이용한 토크분배는 인덕턴스의 비선형구간에서 비교적 큰 토크오차가 존재하게 된다. cos함수를 이용한 토크 분배함수의 경우 인덕턴스의 비선형성에 따른 토크지령을 완전히 생성 할 수는 없으며, cos연산을 수행하여야 하므로 이에 따른 시스템의 부담을 가져올 수 있다.

2.3 제안된 토크 분배함수

본 논문에서는 전류구간에서 효율을 높이고 토크리플을 줄이기 위하여 비선형성을 고려한 토크분배함수를 제안하였으며, 회전자 전체 영역에서 각 상에 전류좌표에 의해 쉽게 결정될 수 있도록 하였다.^[7] 제안된 기법에서 전류구간의 토크지령은 아래 식(4)와 같이 두상의 토크 지령에 의해 구분된다.

$$T_m^* = T_m^*(k) + T_m^*(k+1) \quad (4)$$

식에서 k+1은 여자 될 상을 의미하며 k는 전류 될 상을 의미한다. 실제 토크는 앞서 제시한 것과 같이 상전류와 인덕턴스에 의해 결정되므로 식(1)은 타원의 방정식에 의해 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 식에 의해 전류구간에서 전류 될 상과 여자 될 상의 전류 지령치는 타원의 궤도상에 위치하게 된다. 이때 타원의 형상과 궤도는 회전자의 위치 및 인덕턴스의 기울기 지령토크에 의해 변화하게 된다. 그림 3은 각 회전자의 위치에 따라 일정한 토크 생성을 위해 여자 될 상과 전류될 상에 인가될 전류의 궤적을 나타내고 있다.

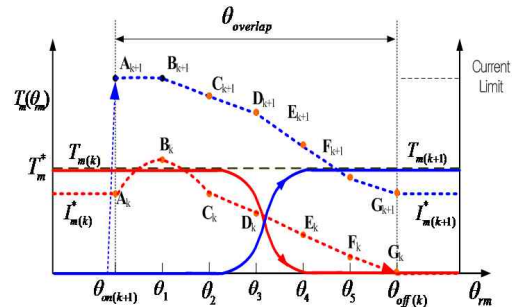


그림 3. 일정한 토크발생을 위한 상전류 및 토크 궤적
Fig. 3 Phase current and torque trajectory for constant torque production during phase commutation

표 1은 제안된 논리적 토크 분배함수의 동작을 나타내고 있다. 제안된 기법은 지령치와 실제토크의 관계에 따라 크게 4가지의 형태로 구분된다. 만일 실제 토크가 지령토크보다 작을 경우 다음 상을 여자 하여 토크를 발생시키게 된다. 만일 다음 상을 여자하여 발생시킨 토크가 지령토크보다 부족하며 여자된 상의 전류를 시스템의 전류용량으로 인하여 상승시킬수 없을 때 이전 상을 함께 여자하여 토크를 생성하여 일정한 토크를 발생시킨다.

생성된 토크가 지령토크보다 클 경우 현재 상을 소호하여 발생하는 토크를 줄인다. 만일 현재 상을 소호시켜도 발생토크가 지령토크 보다 크다면 여자 될 상의 전류를 감소시켜 요구토크를 만족시켜준다.

표 1. 제안한 TSF 규칙

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	$T_m(k+1) = \begin{cases} T_m(k+1) & (\text{if } I_m^*(k) > 0) \\ T_m^* - T_m(k) & (\text{if } I_m^*(k) < 0) \end{cases}$

상기와 같은 4가지의 경우를 수행하여 전류구간에서 일정한 토크를 발생시킬 수 있으며, 이를 표 1과 그림4에 나타내었다.

그림 4에서 나타난 곡선은 본 논문에서 제안된 타원의 방정식 형태의 토크분배에 의한 전류의 궤적으로 상의 전류가 궤적 상에 존재할 경우 일정한 토크를 가지게 된다. 상전류의 궤적은 회전자의 위치에 따라 다르게 나타나며 이상적인 궤적을 따라 감에 따라 일정한 토크를 유지하게 된다.

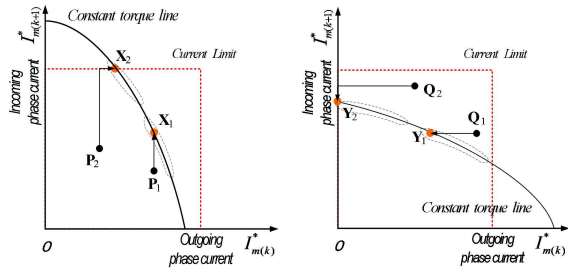


그림 4. 제안된 토크분배함수의 토크리플저감 전략
Fig. 4 Torque ripple reduction with proposed torque sharing function

3. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 제어기법의 증명을 위하여 수치해석을 통한 시뮬레이션과 실험을 통해 일반적인 제어기법과 비교를 수행하였다. 그림 5는 500[rpm] 정격토크조건에서 각 제어기법을 비교한 결과이다. 시뮬레이션 결과 제안된 기법이 기존 기법에 비해 토크리플저감 효과가 높은 것을 알 수 있다.

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

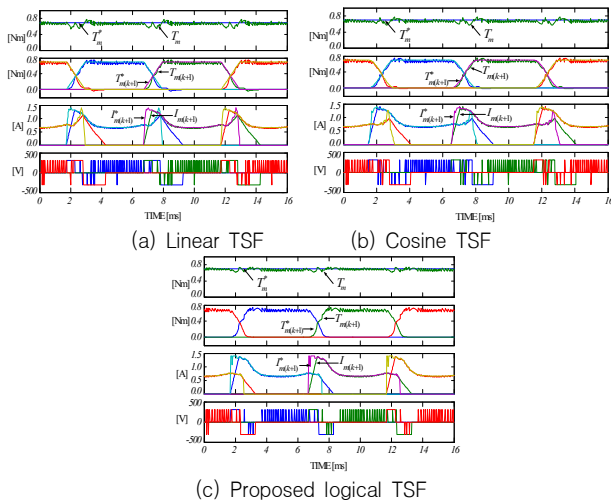
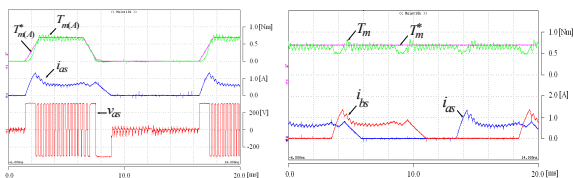
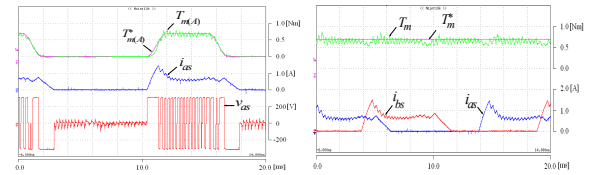


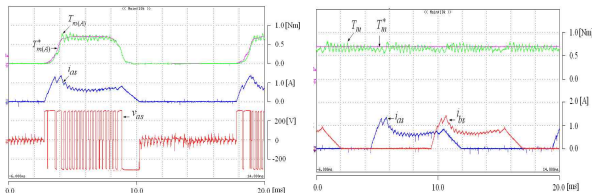
그림 5. 정격토크에서 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation results at 500rpm with rated torque



(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 실험결과
Fig. 6 Experimental results in conventional linear TSF



(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 실험결과
Fig. 7 Experimental results in conventional cosine TSF



(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 실험결과
Fig. 8 Experimental results in case of the proposed TSF

4. 결론

본 논문에서는 SRM의 전류구간에서 발생하는 비선형적인 특성을 고려한 새로운 방식의 논리적 토크분배함수와 이를 이용한 직접토크제어기법을 통해 토크리플을 저감하는 기법에 대해 제안하였다. 제안된 기법은 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션과 실험을 통하여 기존의 토크 분배함수를 이용한 제어기법에 비해 높은 구동 효율과 토크리플의 저감효과가 높음을 증명하였다.

본 연구는 산업자원부 대학전력연구센터 육성·지원사업 (I-2007-0-261-01)에 의한 마이크로그리드연구센터 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] 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.
- [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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] J. N. Liang, Z. G. Lee, D. H. Lee, J. W. Ahn, "DITC of SRM Drive System Using 4-Level Converter", Proceedings of ICEMS 2006, Vol. 1,21-23 Nov. 2006