

## 개선된 직접순시토크제어기법을 이용한 SRM의 토크리플 저감기법

안진우, 이동희, Huijun Wang, 석승훈

경성대학교

### Torque Ripple Reduction Scheme of SRM using Advanced Direct Instantaneous Torque Control Method

Jin-Woo Ahn, Dong-Hee Lee, Huijun Wang, Sung-Hun Seck  
Kyungsung Univ.

**Abstract** - In this paper, an advanced torque control scheme of SRM using DITC(Direct Instantaneous Torque Control) and PWM(pulse width modulation) is presented. Different from conventional DITC method, proposed method uses one or two switching modes at every sampling time, instead of only one switching mode. The duty ratio of the phase switch is regulated according to the torque error and simple control rules of DITC. Moreover the sampling time of control can be extended, which allows implementation on low cost microcontrollers. The proposed control method is verified by the simulations and experimental results.

#### 1. 서 론

스위치드 릴렉턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)은 간단한 구조에 따라 제작단가가 저렴하고 기구적으로 강인하며 넓은 속도범위에서 운전이 용이하고 높은 출력비를 나타내는 장점을 가지고 있다. 그러나 토크발생 기구상 타전동기에 비해 토크리플이 크고 큰 소음을 가지는 단점을 가지고 있다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 전향적 예측제어기법이나 토크 분배기법 등이 연구되어지고 있다.[1-7] 이러한 제어기법들은 이미 계산되어진 토크 프로파일 또는 전류프로파일을 이용하여 평활한 토크를 생성하는 방법을 이용하고 있다.[1-5] 이러한 제어기법의 단점은 비교적용에 대한 낮은 유연성이 발생하게 된다. 최근 직접 순시 토크 제어 기법(Direct Instantaneous Torque Control, 이하 DITC)을 이용한 방법들이 제시되고 있으며 이러한 기법을 이용하여 순시로 추정된 토크와 간편한 히스테리시스제어기법으로 출력 토크를 제어수치에 균형 있게 할 수 있다.[6-7] 이 제어기법은 높은 강인성을 큰 단점으로 하고 있으나 전형적인 히스테리시스제어에서와 같이 스위칭 주파수가 일정하지 않다는 단점을 가지고 된다.

본 논문에서는 SRM의 토크리플 저감을 위하여 일반적 인 DITC기법과 PWM기법을 결합한 개선된 제어기법을 제안하였다. 토크의 추정과 토크의 예측에 대한 연산은 DITC에 의해 수행되었으며, 스위칭에 대한 규칙은 토크의 예측에 대한 PWM을 통해 결정되었다. 제안된 기법은 시뮬레이션과 실험을 통하여 효용성을 증명하였다.

#### 2. 개선된 직접 순시 토크 제어기법

SRM은 비선형 특성에 의해 고유의 토크리플을 가지고 있다. 그러므로 도통구간동안 회전자의 위치와 토크지령에 따른 상전류의 제어가 필요하다. PWM 제어를 통해 요구되어지는 매 샘플링 주기마다 정확한 지령토크에 대한 조절이 가능하다.

동일 샘플링 구간에서 비정렬 구간에서 정렬구간까지의

인덕턴스 기울기차에 의해 제안된 제어기법은 그림 1과 같이 6개의 제어구간으로 나누어진다.

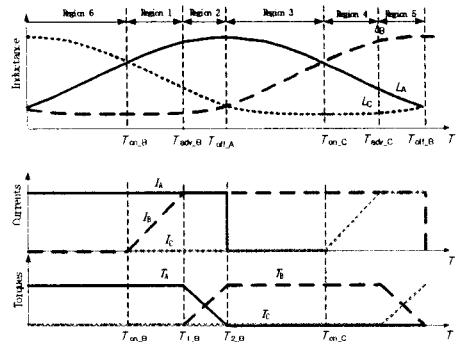


그림 1. 제안된 기법을 위한 6개 상인덕턴스 영역  
Fig. 1 Six inductance regions inductance for the proposed method

각 구간에서 그림 2와 같이 각각의 제어규칙을 가지게 된다. 그림2에서 x축은 예러상태를 나타내며 y축은 이에 따른 스위칭상태를 나타낸다.

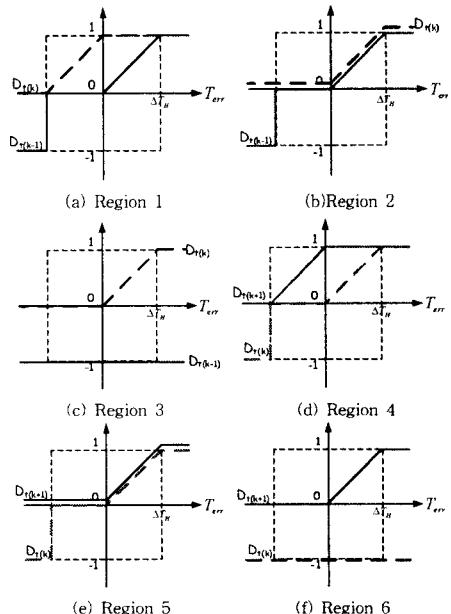


그림 2. 영역별 스위칭 모드  
Fig. 2 Switching modes for six regions

그림 2에서  $D_{t(k)}$ 는 현재상을,  $D_{t(k-1)}$ 은 이전 상을,  $D_{t(k+1)}$ 은 다음상을 의미한다. 1번 구간에서 현재 상에 대한 인덕턴스와 그 기울기는 매우 작기 때문에 현재상은 매우 작은 토크를 발생하게 된다. 따라서 이 구간에서 현재 상에 대한 2번 구간에서 현재상에 대한 빠른 전류회로가 수행되어지고, 이때 스위칭 모드는 그림 2(a)의 점선으로 표시되었다. 동시에 1번 구간에서 지령토크는 이전 상에 의해 주로 생성되고, 이때 스위칭 모드는 그림 2(a)의 실선으로 표시되었다.

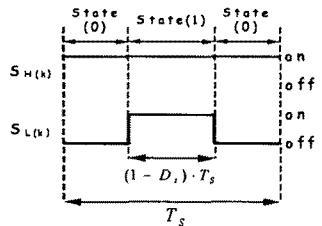
토크리플의 감소 때문에 토크가 에러가 음의 값을 가질 때 0상태 즉, 환류모드가 -1상태를 대신하여 사용하는 것이 좋다. 2번 구간에서 여자전류는 현재 상에 대해 확립되어지고 인덕턴스는 상승하게 된다. 그러므로 이 구간에서 지령토크는 현재 상과 이전 상의 토크 조합에 의해 생성된다. 3번 구간에서는 이전 상이 소호되는 구간에 위치하여 있으며, 부ток 발생을 피하기 위해 빠른 전류의 감소가 이루어져야 한다. 따라서 -1상태가 소호되는 상에서 사용되어지며 다른 상은 동일하게 유지한다.

일반적인 DITC기법은 매 샘플링주기에서 토크의 에러에 따라 -1, 0과 1의 스위칭 모드를 가지는 간단한 히스테리시스 규칙을 사용한다. 일반적인 기법에서는 매 샘플링주기에서 오직 하나의 스위칭 모드가 활성화된다. 그러나 그림 2에서 제안된 기법은 매 샘플링 주기에서 1개 또는 2개의 스위칭 모드를 사용하게 되고 스위칭모드의 활성화된 시간은 토크에러에 의해 변화된다.

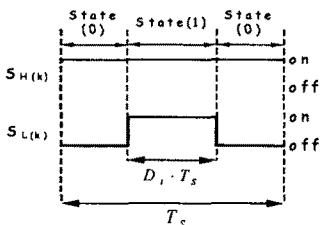
구간1의 작업의 예와 같이 현재상의 스위칭모드는 음의 토크오차인 경우 0상태와 1상태 사이에서 변경되어진다. 그리고 스위칭 모드의 뉴터비는 토크오차에 의해 그림 3(a)과 같이 나타난다. 뉴터비  $D_i$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$D_i = \text{Abs}(T_{err}) / \Delta T_H \quad (1)$$

여기서  $T_{err}$ 는 토크오차이며  $\Delta T_H$ 는 토크오차 경계치이다.



(a) Switching mode for current phase



(b) Switching mode for out-going phase

그림 3. 구간1에 대한 스위칭 모드  
Fig. 3 Switching modes for region 1

본 논문에서는 제안된 제어기법을 비대칭 컨버터에 적용하였다. 비대칭 컨버터에 대한 스위칭 모드는 그림 4와 같다.

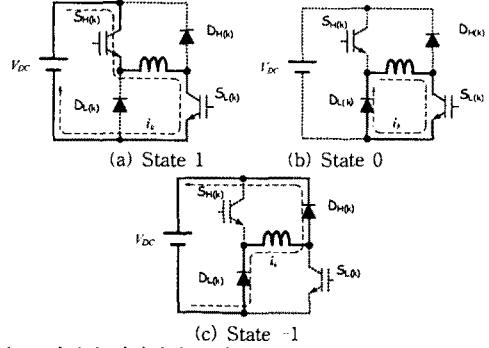


그림 4. 비대칭 컨버터의 동작모드  
Fig. 4 Operation modes of asymmetric converter

### 3. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 기법의 효용성을 증명하기 위해 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 그림 5는 순시 토크의 추정과 6개 영역의 제어 규칙 및 스위칭 패턴의 결정을 나타내고 있는 전체 시스템의 블록도이다. 그림 6은 일반적인 DITC기법을 시뮬레이션을 수행한 결과를 보여주고 있으며 그림 7은 제안된 기법의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다.

시뮬레이션 결과에서 일반적인 DITC를 이용한 제어기법에 비해 제안된 제어기법을 적용한 경우가 토크리플 및 토크에러가 크게 감소됨을 볼 수 있다.

시뮬레이션 결과의 검증을 위하여 12/8 SRM과 TMS320F2812를 이용하여 실험 시스템을 구성하였다. 순시토크는 실측된 Look-up 테이블을 사용하여 추정하였다.

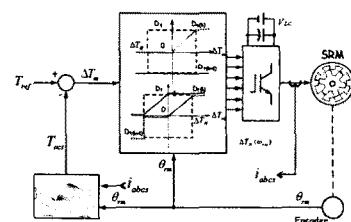


그림 5. 제안된 기법의 제어블럭  
Fig. 5 Control block diagram of proposed method

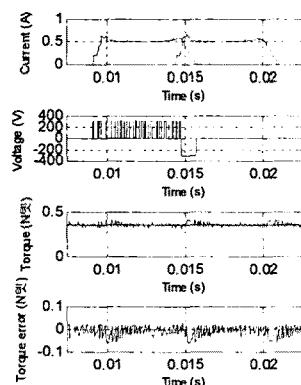


그림 6. 일반적인 DITC의 결과  
Fig. 6 Simulation results of conventional DITC

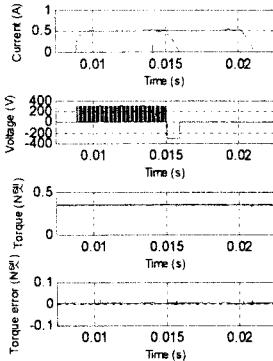


그림 7. 제안된 기법의 시뮬레이션 결과  
Fig.7 Simulation results of proposed method

그림 8은 회전자 속도가 500[rpm], 샘플링주기 30[us] 일 때의 일반적인 DITC기법의 실험결과이다. 그림 9는 제안된 제어기법의 실험결과이다. 그림 9(a)에서 샘플링 주기는 45[us]에 PWM주기는 22[kHz]이고, 그림 9(b)에서는 샘플링주기 60[us]에 샘플링주파수 6.667[kHz]이다. 그림에서 상단의 초록색선은 지령토크 보라색선은 실제 순시토크, 붉은 선은 상 전압이며, 파란 선은 상전류를 나타낸다. 그림 8과 그림 9(b)에서부터 제안된 기법이 기존 DITC기법에 비해 토크리플이 감소하였음을 확인 할 수 있다.

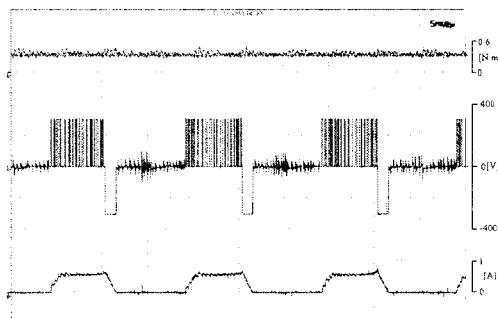
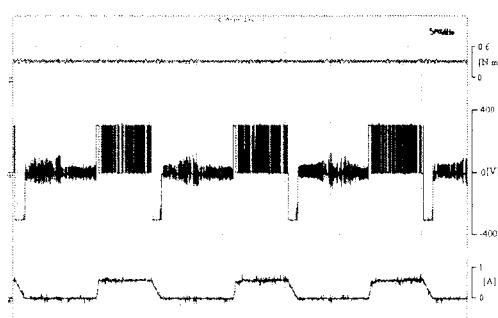
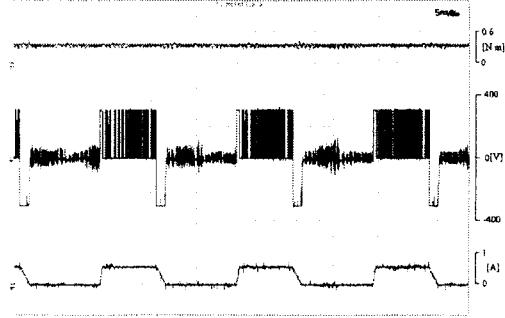


그림 8. 일반적인 DITC 기법 실험결과  
Fig. 8 Experiment results with conventional DITC



(a) (sampling time: 45μs, PWM frequency:22kHz)



(b) (sampling time: 60μs, PWM frequency:16.667kHz)

그림 9. 제안된 기법의 실험결과  
Fig. 9 Experiment result with proposed method

본 연구는 산업자원부와 전력기반조성사업센터의 지원에 의하여 대학전력연구센터 육성·지원사업 (I-2007-0-261-01)으로 수행된 과제임.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 SRM의 토크리플저감을 위한 DITC와 PWM을 결합한 제어기법을 제안하였다. 제안된 기법에서는 SRM의 비선형 특성을 고려하여 토크구간을 6개의 영역으로 나누어 각 영역에 따른 제어규칙을 제안하였다. 상스위치의 뉴터비는 토크에러와 DITC의 간단한 제어에 의해 생성된다. 또한 PWM기법을 이용하여 기존 DITC에서 문제가 되던 불균일한 스위칭주기를 개선하였다. 제안된 제어기법은 시뮬레이션과 실험을 통해 토크리플이 감소하였음을 증명하였다.

#### 【참 고 문 헌】

- [1] 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 PESC92, 1992, pp. 857-860.
- [2] K. M. Rahman, A. V. Rajarathnam, and M. Ehsani, "Optimized instantaneous torque control of switched reluctance motor by neural network," in Conf. Rec. IEEE-IAS, vol. 1, 1997, pp. 556-563.
- [3] A. M. Stankovic, G. Tadmor, Z. Coric, and I. Agirman, "On torque ripple reduction in current-fed switched reluctance motors," IEEE Trans. Ind.Electron., 1999.
- [4] S. Mir, M. Elbuluk, and I. Husain, "Torque ripple minimization in switched reluctance motors using adaptive fuzzy control," in Conf. Rec. IEEE-IAS, vol. 1, 1997, pp. 571-578.
- [5] Iqbal Husain, "Minimization of torque ripple in SRM drives," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 49, no. 1, Feb. 2002, pp. 28-39.
- [6] R. B. Inderka, R. W. De Doncker, "DITC-Direct Instantaneous Torque Control of Switched Reluctance Motor Drives," in 37st Annual Meeting of IEEE Industrial Application Society IEEE-IAS, vol. 37, 2002.
- [7] 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