

A High Efficiency Direct Instantaneous Torque Control of SRM based on the Nonlinear Model

安 珍 雨[†]
(An jinwoo)

Abstract - This paper presents a high efficiency direct instantaneous torque control (DITC) of Switched Reluctance Motor(SRM) based on the nonlinear model. The DITC method can reduce the high inherent torque ripple of SRM drive system, but drive efficiency is somewhat low due to the high current and switching loss during commutations. In order to reduce a torque ripple, a fast torque reference trajectory is selected at every instantaneous rotor position. Based on the nonlinear model of SRM, the developing torque by one phase is fixed and the other phase is regulated for minimum switchings of phase switch and variation of torque. The switching during commutation can be reduced and fast commutation can be obtained in the proposed method. As a result, drive efficiency could be improved as well as torque ripple reduction. The validity of proposed method is verified by computer simulations and comparative experiments.

Key Words : Switched reluctance motor(SRM), Direct instantaneous torque control, High efficiency drive, Torque sharing function

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 구조상, 고정자와 회전자가 모두 돌극형인 2중 돌극형으로, 회전자에는 권선이 없는 구조로 타전동기보다 기계적으로 견고하고, 관성에 대한 토크비가 높으며, 넓은 범위의 가변속 운전 등 장점이 있다. 하지만, SRM은 출력토크의 발생원리상 순시 토크 맥동이 크고 소음이 큰 단점이 있다[1]. 이러한 토크 리플은 실제 산업 시스템의 응용을 어렵게 하는 문제가 발생한다.

최근, SRM의 토크 리플을 억제하기 위한 다양한 방법들이 활발히 연구되고 있다[2]-[5]. 기존에 연구되고 있는 토크 맥동을 개선하는 방법으로 SRM의 기계적인 형상을 바꾸는 방법, 토크지령에 따라 변동하는 전류값 또는 자속값에 대한 제어를 통해 간접적으로 맥동이 적은 출력토크를 얻는 간접 순시토크 제어법[2-4], 지령토크와 순시 출력토크의 직접 비교를 통해 토크 제어를 행하는 직접 순시토크 제어법[5] 등이 있다. 그 중에서, SRM의 기계적인 형상을 바꾸는 방법은 자극의 형상을 수정하거나 각 위치에서의 공극의 크기를 수정함으로써, 토크 리플을 억제하는 방법으로 각 응용 분야에 맞게 설계를 변경해야 하는 단점이 있으며, 또한 토크 맥동을 줄이기에는 어느 정도의 한계가 있다. 간접 순시토크 제어법은 지령토크에 따라 변동하는 각 위치에서의 전

류지령 및 자속지령 값을 구하기 위해, 토크지령과 위치각에 따른 전류 또는 자속 정보가 필요하므로 시스템 구성이 복잡하게 된다. 반면, 직접 순시토크 제어법은 지령토크와 순시 출력토크로부터 바로 전압지령을 구할 수 있어 시스템 구성이 단순한 장점이 있다.

한편, 기존의 순시토크 제어시스템의 운전 효율은 평균토크 제어 방식에 비하여 비교적 낮게 되는데, 이는 SRM의 운전 중, 일부 회전자위치에서 지령토크를 출력하기 위하여 상권선에 큰 전류가 흘러야 하며, 연속적인 토크 제어를 위해 2상의 스위치가 동시에 변화하게 되므로, 스위칭 손실이 증가하게 된다.[5,6]

본 논문에서는 SRM의 토크 리플을 억제하면서, 운전 효율을 개선하기 위해서 비선형 모델을 기반으로 하는 SRM의 고효율구동이 가능한 직접 순시토크 제어법을 제안한다. 제안된 방식은 임의의 회전자 위치에서 지령토크로부터 미리 정해진 토크분배함수를 사용하여 각 상의 지령토크를 얻지 않고, SRM의 비선형 모델에 기준하여, 매 시각의 운전 상태에 따라 전체 지령토크에 대한 각 상의 토크 분배를 순시적으로 결정 하는 방식으로, SRM의 전류구간(commutation period)을 짧게 할 수 있으므로, 기존의 순시토크 제어시스템에 비해 효율을 향상할 수 있다. 그 중, 순시 출력토크 값은 상전류와 회전자 위치에 따른 토크함수를 사용하여 실시간으로 연산한다.

제안된 비선형 모델기반 SRM의 고효율 직접 순시토크 제어법은 구동시스템의 모델을 통한 다양한 수치 시뮬레이션과 실제실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.

[†] 교신저자, 正會員 : 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수

E-mail : jwahn@star.ks.ac.kr

接受日字 : 2007年 1月 31日

最終完了 : 2007年 4月 23日

2. 토크분배함수를 이용한 직접 순시토크 제어

토크리플을 저감하기 위하여 현재 가장 많이 사용하고 있는 방법은 그림 1과 같이 미리 계산 또는 측정된 토크분배함수를 이용하여 각 상의 토크지령을 얻은 후, 직접 또는 간접 순시토크를 제어하는 방법이다[3]-[5]. 토크분배함수를 이용한 직접 순시토크 제어시스템은 크게 토크분배 함수, 출력토크 연산, 히스테리시스 제어기, 스위칭 테이블, 컨버터, SRM 및 엔코더로 구성되어 있다.

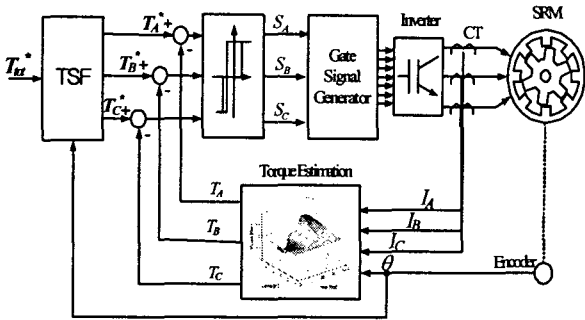


그림 1 토크분배함수를 이용한 직접 순시토크 제어시스템
Fig. 1 Direct instantaneous torque control(DITC) system using torque sharing function(TSF)

2.1 토크분배 함수

토크분배함수는 SRM의 토크 지령값이 주어지면, 현 위치 각에서 각 상의 토크 지령값을 얻는 함수이며, 일반적으로 토크리플을 저감을 고려하여 미리 계산 또는 측정되어 결정한다. SRM의 순시토크 제어시스템에서 토크리플은 주로 한 상에서 다른 한 상으로 토크 발생 메카니즘이 변경되는 전류 구간, 즉 2 상이 동시에 도통하는 구간에서 크게 발생한다. 따라서, 이 구간에서 토크 지령값에 대한 이전 상과 다음 상의 토크지령 변화추세에 따라 다양한 토크분배함수가 가능하며, 그 중, 그림 2와 같은 정현파와 선형 모양의 토크분배함수가 대표적이다.

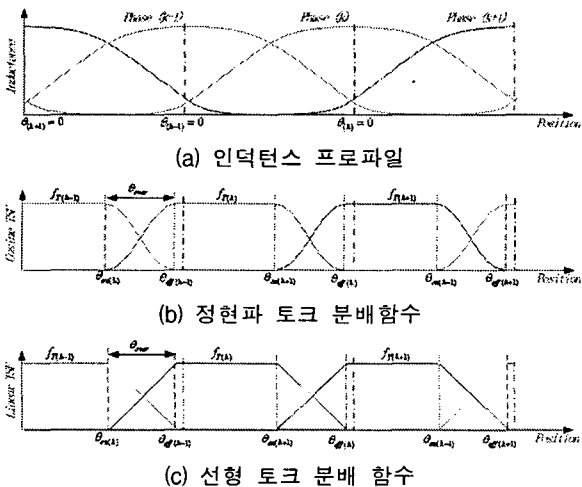


그림 2 대표적인 토크분배 함수
Fig. 2 Inductance profile and conventional TSF of SRM
(a) phase inductance profile (b) cosine TSF (c) linear TSF

그림 2의 (a)는 각 상별 인덕턴스 프로파일을 보여주고, (b)는 정현파, (c)는 선형의 토크분배함수를 각각 나타내고 있다. SRM 구동에 있어서, 효과적인 구동토크를 얻기 위해서는 반드시 회전자 위치각에 대한 정보를 얻어 각 상별로 연속적인 스위칭 여자를 해야 한다. 따라서, 회전자 위치에 따라 각 상이 순번으로 여자하게 되므로, 순시토크 제어를 위해서는 단상 운전구간과 2상 운전구간이 교번적으로 나타나게 된다. 이 관계를 수학적으로 모델링하면 다음의 표 1과 같다[[2]-[3]].

표 1 토크분배함수의 수학적 모델
Table 1 Mathematical model of TSF

	(k-1)상과 k상 2상 운전구간 $\theta_{on(k)} \sim \theta_{off(k-1)}$	k상 단상 운전구간 $\theta_{off(k-1)} \sim \theta_{on(k+1)}$
정현파	$T_{(k)}^* = \frac{1}{2} [1 - \cos(\frac{\theta_{(k)} - \theta_{on(k)}}{\theta_{over}} \pi)] T_{tot}^*$ $T_{(k-1)}^* = T_{tot}^* - T_{(k)}^*$ $T_{(k+1)}^* = 0$	$T_{(k)}^* = T_{tot}^*$ $T_{(k-1)}^* = 0$ $T_{(k+1)}^* = 0$
선형	$T_{(k)}^* = \frac{\theta_{(k)} - \theta_{on(k)}}{\theta_{over}} T_{tot}^*$ $T_{(k-1)}^* = T_{tot}^* - T_{(k)}^*$ $T_{(k+1)}^* = 0$	$T_{(k)}^* = T_{tot}^*$ $T_{(k-1)}^* = 0$ $T_{(k+1)}^* = 0$

식에서, (k-1), (k), (k+1)은 상을, 첨자 on, off는 해당 상의 지령토크가 발생, 소멸되는 시작점을, 첨자 tot는 전체값, 첨자기호 *는 지령값을 각각 나타낸다. 한편, $\theta_{over} = \theta_{off(k-1)} - \theta_{on(k)}$ 로서, 두 상의 전류구간(commutation period)을 나타낸다.

2.2 순시 출력토크의 실시간 연산

SRM 운전중, 포화된 자화곡선의 비선형성으로 인해 출력토크의 실시간 값의 수식적인 연산은 매우 어렵다. 한편, 직접 순시 토크 제어기의 제어성능은 순시 출력토크의 검출 정도와 직접적인 연관이 있다. 따라서, 순시 출력토크를 어떻게 가장 빠르고 간단하게 연산할 것인가는 관련 연구자들이 가장 관심 갖는 문제 중의 하나이다. 기존의 방법들을 정리하면, 상전류와 회전자 위치, 상전류와 자속 및 자속과 회전자 위치에 따른 토크값을 사전 실험을 통해 look-up 테이블을 만들어 사용하는 방법과 적응제어를 통해 수식적으로 연산하는 방법 및 인덕턴스 프로파일을 모델화하여 순시 출력토크를 연산하는 방법 등이 있다.

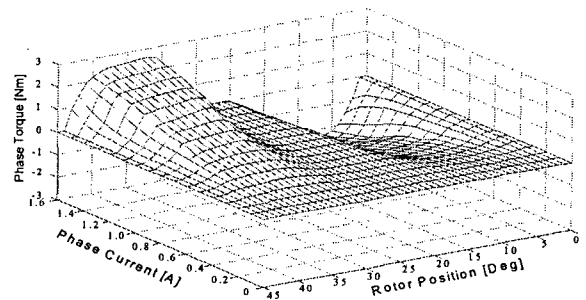


그림 3 상전류와 회전자 위치에 따른 토크
Fig. 3 Torque versus phase current and rotor position

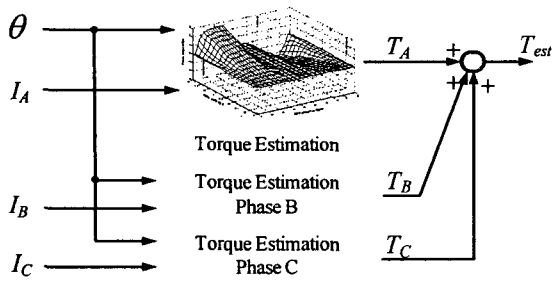


그림 4 순시 토크의 실시간 연산
Fig. 4 Online estimation of instantaneous torque

본 논문에서는 실험을 통해 그림 3과 같이 상전류와 회전자 위치에 따른 토크값을 얻어 look-up 테이블을 구성하여, 그림 4의 방식으로 임의의 회전자 위치각에서의 순시 출력 토크를 연산하는 방법을 적용하였다.

2.3 비대칭 브릿지 컨버터회로의 상 스위칭 상태

그림 5는 SRM 구동용 컨버터 중에서 가장 많이 사용되고 있는 비대칭 브릿지 컨버터회로로서, 제어의 다양성이 뛰어나고, 각 상의 제어가 독립적이며, 상당 두 개 스위치의 온, 오프에 따라 그림 5의 (b)와 같이 1, 0 및 -1 등 3개의 상태를 가진다.

그 중, 상태 1은 두 스위치가 모두 턴 온되어, 양의 직류 링크전압이 상 권선에 인가되는 상태이다. 전류확립구간에서 이 상태로 연결되어 있을 시, 필요한 상전류를 신속하게 생성할 수 있고, 토크발생구간에서 이 상태로 연결되어 있을 시, 현재 값보다 큰 정토크를 출력하게 된다.

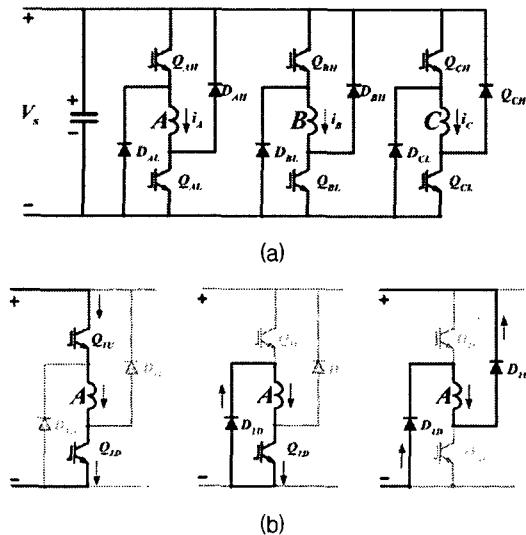


그림 5 비대칭 브릿지 컨버터회로의 상 스위칭 상태
(a) 비대칭 브릿지 컨버터회로 (b) 상태 1, 0, -1
Fig. 5 Phase switching states of asymmetric bridge converter
(a) asymmetric bridge converter (b) state 1, 0, -1

상태 0은 두 개의 스위치 중, 하나는 턴 오프, 다른 하나는 턴 온되는 상태로서, 상전류가 한 개의 스위치와 다이오드를 거쳐 순환한다. 전류확립구간에서 이 상태로 연결되어

있을 시, 전류상승이 멈추게 되어 지나친 크기의 전류확립을 면할 수 있고, 토크발생구간에서 이 상태로 연결되어 있으면 상전류가 감소하게 되므로, 현재 값보다 작은 정토크를 출력할 수 있다.

상태 -1은 두 스위치가 모두 턴 오프되어, 상전류가 있을 경우, 두 다이오드와 전원측을 통해 SRM의 잔류 자계에너지를 전원측으로 회수하므로, 토크발생구간에 이 상태로 연결되어 있으면, 상태 0보다 더 빠른 시간내에 현재 값보다 작은 정토크를 출력하도록 하고, 상전류가 없을 경우, 상권선을 전원으로부터 차단하게 하는 상태이다.

2.4 상 토크의 히스테리시스 제어

그림 2의 토크분배함수 파형으로부터, 현재 운전 중에 있는 상은 SRM의 전류확립구간과 토크발생구간에 모두 존재함을 알 수 있다. 따라서, 토크분배함수로부터 얻어지는 각 상 토크지령에 추종하도록 하는 각 상 스위칭 상태는 다음의 그림 6과 같은 히스테리시스 제어로 실현할 수 있다.

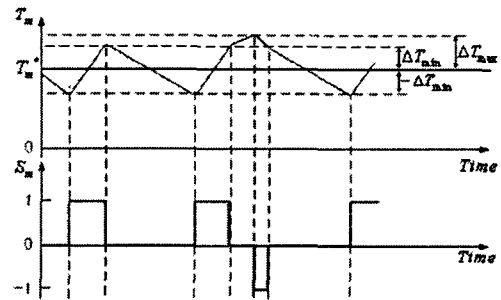


그림 6 토크 히스테리시스 개념도
Fig. 6 Torque hysteresis principle

3. 제안한 비선형 모델기반의 직접 순시토크 제어

2절에서 소개한 토크분배함수를 이용한 직접 순시토크 제어시스템에서 토크리플 저감과 고효율 운전을 동시에 구현하기는 매우 어렵다. 이는 전류와 회전자위치에 대한 SRM의 인덕턴스 프로파일의 비선형에 따라, 토크리플 저감 및 고효율 운전을 위한, 임의의 토크지령에 대한 고정된 토크분배함수가 존재할 수 없기 때문이다. 토크지령값에 따라 가변하는 토크분배함수를 사용할 수도 있지만, 이는 방대한 데이터베이스를 요구하고 있어, 실제 구현이 매우 어렵다.

본 논문에서는 SRM의 비선형 모델을 기반으로 하여, 확정적인 토크분배함수를 정하지 않고, 매 시각의 운전상태에 따라 토크분배를 다르게 하는 고효율의 운전이 가능한 직접 순시토크 제어법을 제안한다. 제안된 방식은 두 상의 스위칭이 발생하는 전류 구간을 최대한 단축시키고, 전류 구간에서 지령 토크를 추종하기 위한 스위칭 방식은 비선형 모델에 근거하여, 조건부로 한상의 토크를 유지하고 다른 한상의 스위칭만 변경하여 지령 토크를 추종하는 방식이다. 이 방식은 토크 지령을 추종하기 위해, 항상 최단 거리로 실제 토크가 움직이게 되고, 전류 구간내에서도 한 상의 스위칭 패턴만 변화하도록 설계되므로, 토크의 추종성이 우수하고, 효율을 개선할 수 있는 장점이 있다.

제안한 직접 순시토크 제어시스템의 블록도는 그림 7과

같다. 제어시스템은 크게 직접 순시토크 제어부, 출력토크 연산부, 스위칭 테이블, 컨버터, SRM 및 엔코더로 구성되어 있다.

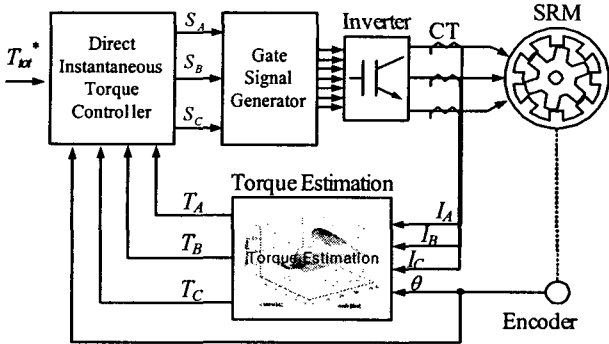


그림 7 제안한 비선형 모델기반의 직접 순시토크 제어시스템
Fig. 7 Proposed DITC system based on the nonlinear model

SRM의 순시토크 제어시스템에서 토크리플은 주로 한 상에서 다른 한 상으로 토크 발생 메카니즘이 변경되는 과정에서, 즉 두 상이 동시에 도통하는 구간에서 크게 발생한다. 따라서, 토크리플이 주어진 요구에 만족하면서, 이 구간을 가능한 작게 할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

일정 토크 지령에서, 두상 운전 구간에서 두 상의 출력토크의 합이 항상 일정하므로, 이전 상의 토크를 횡축으로, 다음 상의 토크를 종축으로 하여, 좌표계를 구성하였을 경우, 토크지령의 궤적은 다음의 그림 8과 같다.

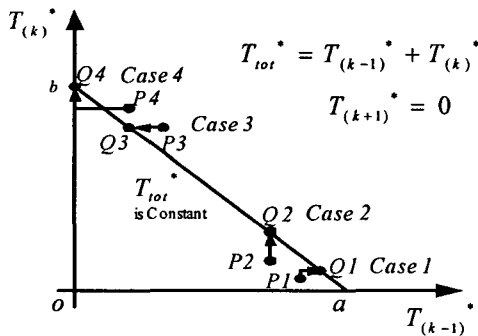


그림 8 전류 구간에서의 토크지령 궤적
Fig. 8 Torque reference trajectory in commutation region

그림 8에서 P1~P4는 두상 운전구간에서의 임의의 실제 출력토크의 위치를 나타내고 있고, Q1~Q4는 각 위치에서 토크리플의 억제하며, 스위칭 수를 감소하기 위한 토크 궤적을 나타내고 있다. 그림 8에서 Case 1, 2는 실제 출력토크 T_{tot} 가 지령토크 T_{tot}^* 보다 작을 경우로서, 토크리플의 저감과 가능한 빨리 상전환하기 위하여, 이전 상의 토크지령 $T_{(k-1)}^*$ 은 현재 값 $T_{(k-1)}$ 을 유지하고, 다음 상의 토크지령 $T_{(k)}^*$ 을 증가하게 한다. 그 중, Case 1은 $T_{(k)}^*$ 을 증가하여도 몇 스텝내에 토크지령에 도달할 수 없는 경우로서, 이는 두상 운전구간에서 특히 구간의 초기에서 다음 상인 (k) 상의 인덕턴스 변화율이 매우 작으므로 인하여, 토크리플의 저감

을 위하여 그전 상의 토크지령 $T_{(k-1)}^*$ 을 증가해야만 한다.

Case 3과 4는 실제 출력토크 T_{tot} 가 지령토크 T_{tot}^* 보다 클 경우로서, 토크리플의 저감과 가능한 빨리 상전환하기 위하여, 다음 상의 토크지령 $T_{(k)}^*$ 은 현재 값 $T_{(k)}$ 을 유지하고, 이전 상의 토크지령 $T_{(k-1)}^*$ 을 감소하게 한다. 그 중, Case 4는 다음 상인 (k) 상이 단독으로 총 지령토크 T_{tot}^* 를 형성할 수 있는 경우로서, 그전 상인 $(k-1)$ 상의 전류를 가능한 빨리 소호하는 것이 바람직하다.

따라서, 두상 운전 구간은 표 2와 같이 모델링할 수 있다.

표 2 전류 구간에서의 제안된 토크 분배 함수
Table 2 The proposed TSF in commutation region

조 건		토크 분배 함수
$T_{tot}^* > T_{tot}$	$T_{tot}^* - T_{(k-1)} < T_{(k)}max$	Case 1 $S_k = 1$ $T_{(k-1)}^* = T_{tot}^* - T_{(k)}$ $S_{(k+1)} = -1$
	$T_{tot}^* - T_{(k-1)} > T_{(k)}max$	Case 2 $T_{(k)}^* = T_{tot}^* - T_{(k-1)}$ $T_{(k-1)}^* = T_{(k-1)}$ $S_{(k+1)} = -1$
$T_{tot}^* < T_{tot}$	$T_{tot}^* > T_{(k)}max$	Case 3 $T_{(k)}^* = T_{(k)}$ $T_{(k-1)}^* = T_{tot}^* - T_{(k)}$ $S_{(k+1)} = -1$
	$T_{tot}^* < T_{(k)}max$	Case 4 $T_{(k)}^* = T_{tot}^* - T_{(k-1)}$ $S_{(k-1)} = -1$ $S_{(k+1)} = -1$

표 2의 제안된 비선형 스위칭 모델에서 $T_{(k)}max$ 는 (k) 상이 현 회전사위치에서 출력할 수 있는 최대 토크이고, 출력이 $T_{(k-1)}^*$, $T_{(k)}^*$ 와 같은 상 토크지령일 경우, 히스테리시스 제어를 통해 그 상에 인가할 스위칭 상태 $S_{(k-1)}$, $S_{(k)}$ 를 확정할 수 있다.

그림 9는 제안한 직접 순시토크 제어블록도를 보여준다.

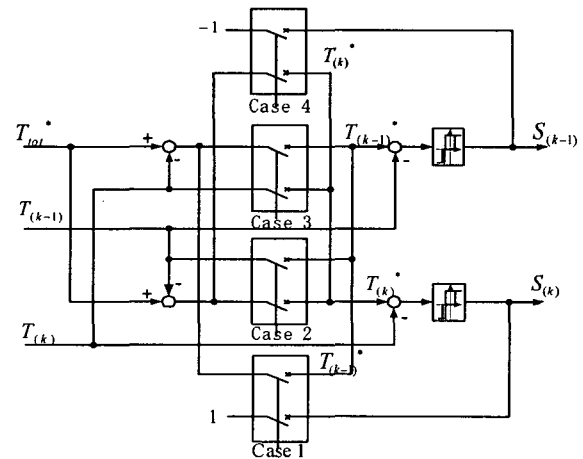


그림 9 제안한 직접 순시토크 제어블록도
Fig. 9 The proposed DITC block diagram

4. 수치 시뮬레이션 및 실험결과

4.1 수치 시뮬레이션 및 고찰

제안된 SRM 제어의 효율성을 증명하기 위해 3상, 200W의 12/8 SRM을 시뮬레이션 및 실험용으로 사용하였다. SRM의 인덕턴스와 출력토크의 프로파일은 그림 10에서 보여주는 바와 같다.

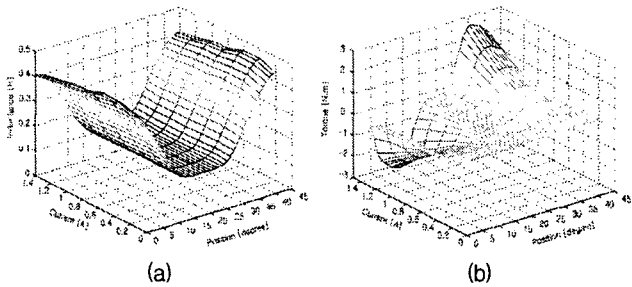


그림 10 12/8 3상 SRM의 인덕턴스 및 출력토크 프로파일
 (a) 인덕턴스 프로파일 (b) 출력토크 프로파일
 Fig. 10 Inductance and torque profile of 12/8 SRM
 (a) inductance profile (b) torque profile

제안된 SRM제어의 시뮬레이션은 Matlab m-file을 이용하여 수행하였으며, 샘플링주기는 20 μ s로 하였다.

그림 11은 정격토크 지령하에서 500[rpm]의 일정속도로 회전시, 정현파와 선형 모양의 TSF를 이용한 직접 순시토크 제어 및 제안한 직접 순시토크 제어의 시뮬레이션 결과를 보인다. 시뮬레이션 결과는 총 토크, 각 상별 토크와 전류 및 상전압 파형을 각각 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과로부터 한 상에서 다른 한 상으로 전류하는 구간에서 토크 리플이 주로 발생하며, 제안한 제어시스템의 토크리플이 기존의 정현파와 선형 모양의 TSF를 이용한 제어 시스템보다 작음을 알 수 있다.

또한, 운전효율을 비교하면, 정현파와 선형 모양의 TSF를 이용한 직접 순시토크 제어시스템의 효율이 각각 35.6%, 34.3%인 반면, 제안한 직접 순시토크 제어시스템의 효율은 39.8%로서 기존의 직접 순시토크 제어시스템보다 우수함을 알 수 있다.

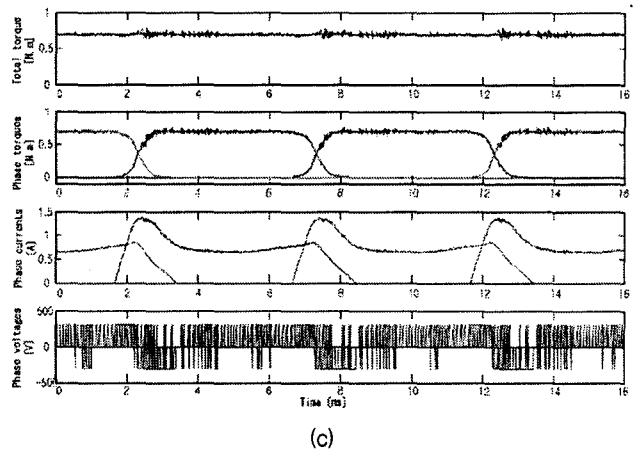
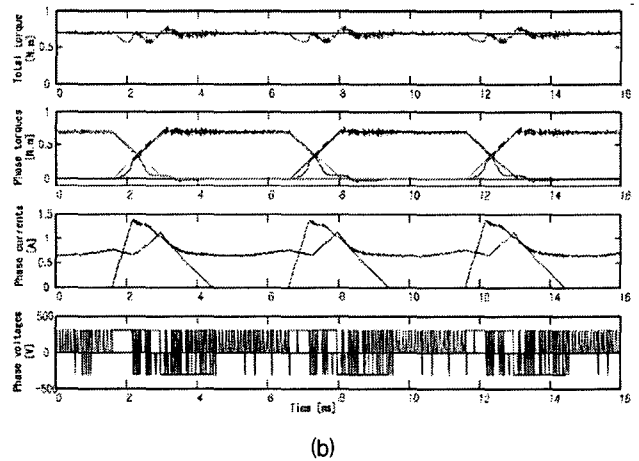
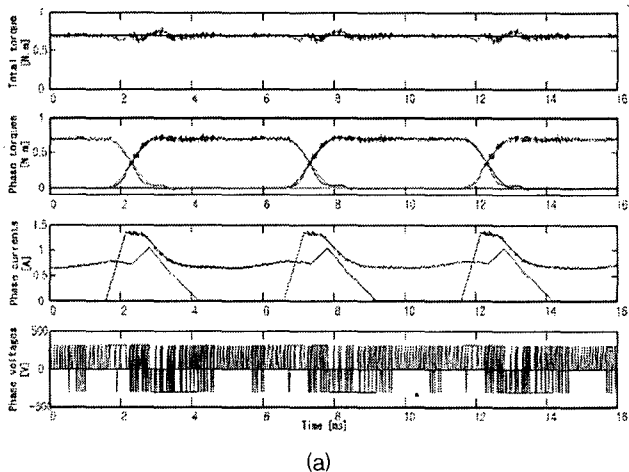


그림 11 정토크 지령하에서의 직접 순시 토크 제어 시뮬레이션 결과 (a) 정현파 TSF (b) 선형 TSF (c) 제안한 직접 순시토크 제어

Fig. 11 Simulation results of DITC under the constant torque command (a) cosine TSF (b) linear TSF (c) proposed DITC

4.2 실험 및 고찰

그림 12에 직접 순시 토크 제어 실험 시스템을 보여주고 있다. 실험에서 사용한 12/8 SRM의 파라미터는 시뮬레이션과 동일하고, DSP는 TI사의 TMS320F2812-150[MHz]를 사용하였으며, 제어의 샘플링주기는 20 μ s로 하였다. 부하장치는 부하토크 조절이 가능한 다이내모메터를 사용하였다.

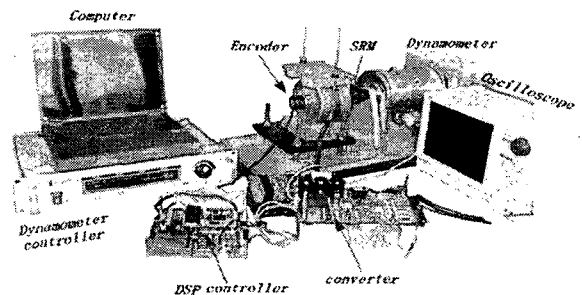
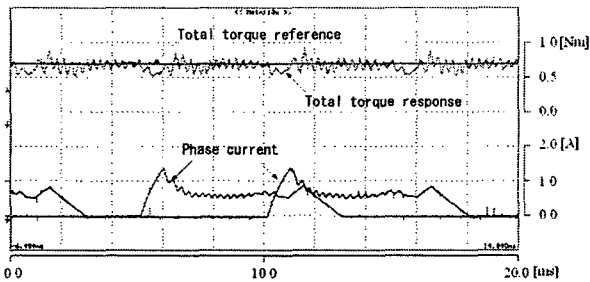


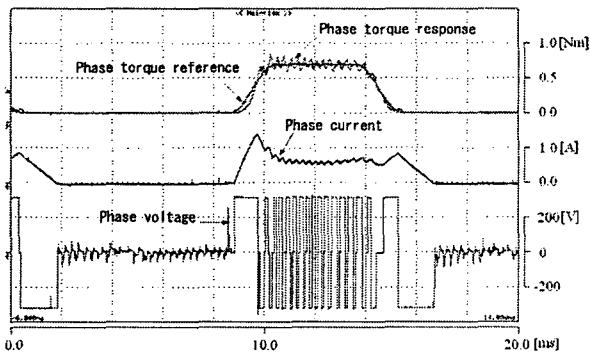
그림 12 실험 환경
 Fig. 12 Experimental configuration

그림 13, 14 및 15에 정격토크 지령하에서 500[rpm]의 일 정속도로 회전시, 정현파와 선형 TSF를 이용한 직접 순시 토크 제어 및 제안한 직접 순시토크 제어의 실험 결과를 보 인다. 실험 결과로부터 시뮬레이션과 마찬가지로 한 상에서 다른 한 상으로 전류하는 구간에서 토크리플이 주로 발생하 며, 제안한 제어시스템의 토크리플이 기존의 정현파와 선형 모양의 TSF를 이용한 제어 시스템보다 작음을 알 수 있다.

또한, 운전효율을 비교하면, 정현파와 선형 모양의 TSF를 이용한 직접 순시토크 제어시스템의 효율이 각각 41.3%, 38.8%인 반면, 제안한 직접 순시토크 제어시스템의 효율은 44.1%로서 기존의 시스템보다 우수함을 알 수 있다.



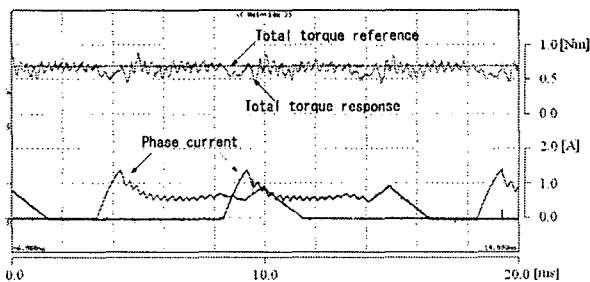
(a)



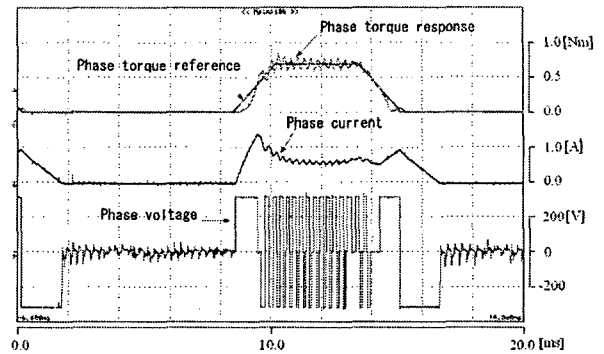
(b)

그림 13 정토크 지령하에서의 정현파 TSF를 이용한 직접 순시토크 제어 실험 결과 (500[rpm]) (a) 총 지령토크, 총 출력토크 및 상전류 파형 (b) 상 토크지령과 토크응답, 상전류, 상전압 파형

Fig. 13 Experimental result of DITC using cosine TSF under the constant torque command (at 500[rpm]) (a) total torque reference and response, phase currents (b) phase torque reference and response, phase current and phase voltage



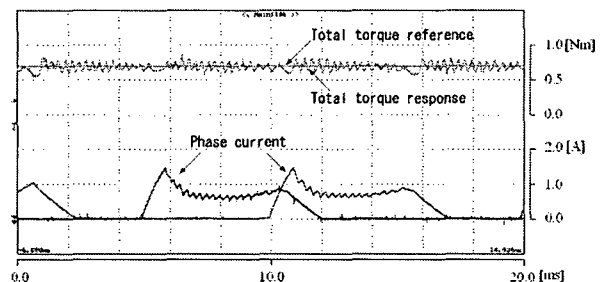
(a)



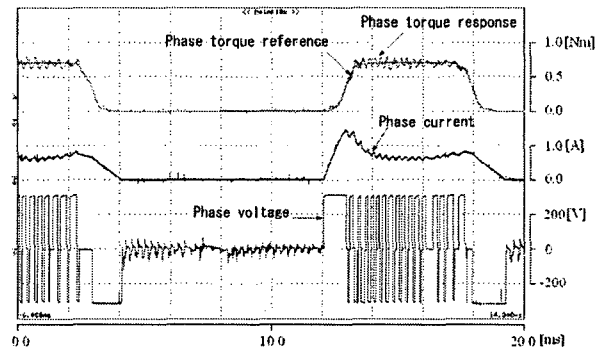
(b)

그림 14 정토크 지령하에서의 선형 TSF를 이용한 직접 순시토크 제어 실험 결과 (500[rpm]) (a) 총 지령토크, 총 출력토크 및 상전류 파형 (b) 상 토크지령과 토크응답, 상전류, 상전압 파형

Fig. 14 Experimental result of DITC using linear TSF under the constant torque command (at 500[rpm]) (a) total torque reference and response, phase currents (b) phase torque reference and response, phase current and phase voltage



(a)

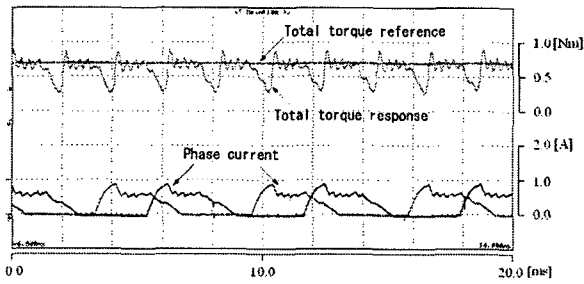


(b)

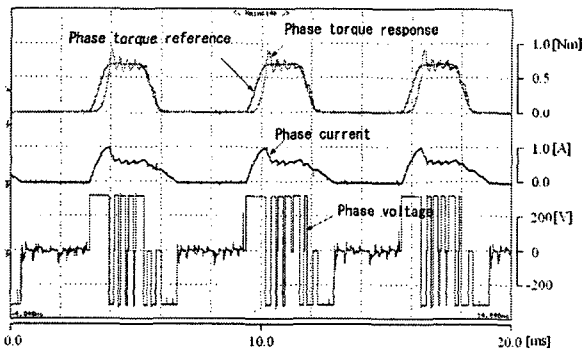
그림 15 정토크 지령하에서의 제안한 직접 순시토크 제어 실험 결과 (500[rpm]) (a) 총 지령토크, 총 출력토크 및 상전류 파형 (b) 상 토크지령과 토크응답, 상전류, 상전압 파형

Fig. 15 Experimental result of proposed DITC under the constant torque command (at 500[rpm]) (a) total torque reference and response, phase currents (b) phase torque reference and response, phase current and phase voltage

그림 16, 17 및 18에 정격토크 지령하에서 1200[rpm]의 일정속도로 회전시, 정현파와 선형 모양의 TSF를 이용한 직접 순시토크 제어 및 제안한 직접 순시토크 제어의 실험 결과를 보인다. 실험 결과로부터 회전자 속도가 증가할수록 3가지 기법을 사용한 직접 순시토크 제어 시스템의 토크리플이 모두 증가하지만, 상대적으로 제안한 제어시스템의 토크리플이 작음을 알 수 있다. 이는 제안한 직접 순시토크 제어기를 사용하였을 경우, 주어진 토크리플을 만족하는 속도범위가 넓다는 것을 보여준다.



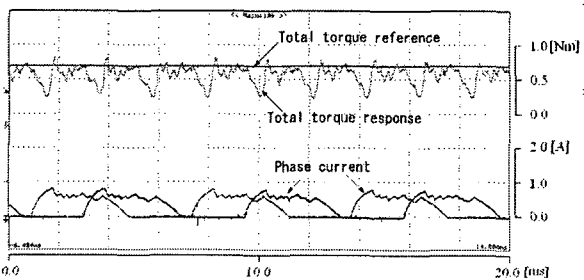
(a)



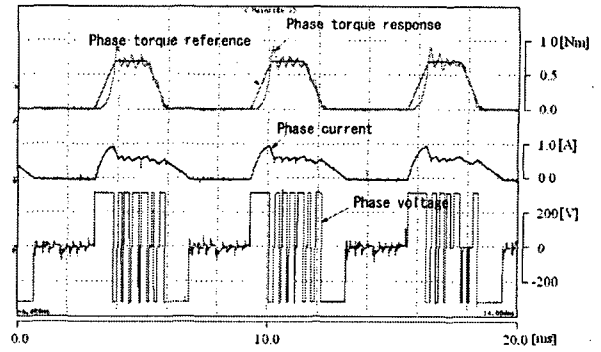
(b)

그림 16 정토크 지령하에서의 정현파 TSF를 이용한 직접 순시토크 제어 실험 결과 (1200[rpm]) (a) 총 지령토크, 총 출력토크 및 상전류 파형 (b) 상 토크지령과 토크응답, 상전류, 상전압 파형

Fig. 16 Experimental result of DITC using cosine TSF under the constant torque command (at 1200[rpm]) (a) total torque reference and response, phase currents (b) phase torque reference and response, phase current and phase voltage



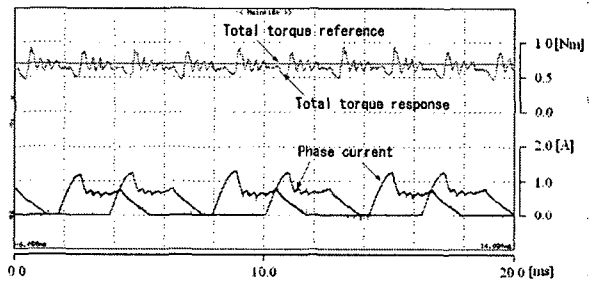
(a)



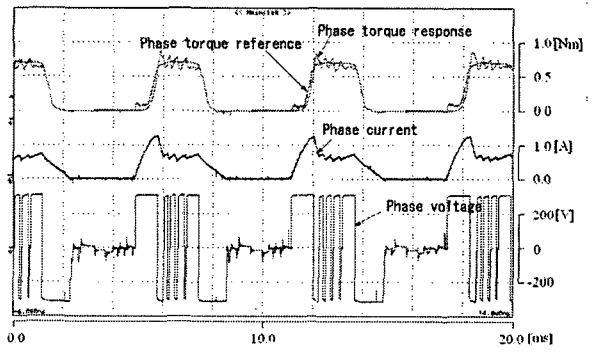
(b)

그림 17 정토크 지령하에서의 선형 TSF를 이용한 직접 순시토크 제어 실험 결과 (1200[rpm]) (a) 총 지령토크, 총 출력토크 및 상전류 파형 (b) 상 토크지령과 토크응답, 상전류, 상전압 파형

Fig. 17 Experimental result of DITC using linear TSF under the constant torque command (at 1200[rpm]) (a) total torque reference and response, phase currents (b) phase torque reference and response, phase current and phase voltage



(a)



(b)

그림 18 정토크 지령하에서의 제안한 직접 순시토크 제어 실험 결과 (1200[rpm]) (a) 총 지령토크, 총 출력토크 및 상전류 파형 (b) 상 토크지령과 토크응답, 상전류, 상전압 파형

Fig. 18 Experimental result of proposed DITC under the constant torque command (at 1200[rpm]) (a) total torque reference and response, phase currents (b) phase torque reference and response, phase current and phase voltage

그림 19는 정격 토크지령하에서 제안한 알고리즘과 기존의 TSF를 각각 이용한 직접 순시토크 제어시스템의 운전효율을 보여주고 있다. 비교 그래프를 통해, 제안한 알고리즘을 적용한 직접 순시토크 제어시스템의 효율이 기존의 TSF를 이용한 직접 순시토크 제어시스템에 비해 높음을 알 수 있다.

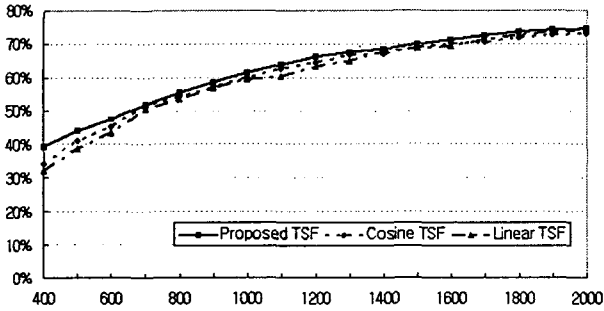


그림 19 정토크 지령하에서 직접 순시토크 제어시스템의 운전효율 비교

Fig. 19 Efficiency comparison of DITC system under a constant torque command

5. 결 론

본 논문에서는 SRM의 비선형 모델을 기반으로 하는 고효율이 가능한 새로운 직접 순시토크 제어법을 제안하였다. 기존의 직접 순시토크 제어방식은 미리 정해진 토크분배함수를 이용하여 각 상의 지령토크를 구하고, 이를 추종하는 출력토크를 발생하도록 전동기의 순시토크를 제어한다. 그러나 이와 같은 제어시스템은 토크리플 저감과 고효율 운전을 동시에 실현하기 힘든 단점이 있다. 반면, 제안한 직접 순시토크 제어시스템은 확정적인 토크분배함수를 사용하지 않고, 매 순간 전동기의 운전상태에 따라 총 지령토크의 각 상 배분을 다르게 하는 동시에, 각 상의 스위칭을 최소화하도록 하여 고효율의 운전이 가능하다는 장점이 있다. 제안한 직접 순시토크 제어법은 다양한 수치시물레이션과 실제 실험을 통해, 기존의 방식에 비해 토크리플 저감과 고효율 운전이 가능함을 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 2006학년도 경성대학교 학술지원연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, T. T. Blenkinsop, J. Corda and N. N. Fulton, "Variable Speed Reluctance Motors", IEEE Proc., July 1980, Pt. B, Vol. 127, No. 4, pp. 253-265.
- [2] I. Husain and M. Eshani, "Torque ripple minimization in switched reluctance motor drives by PWM current control," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 11, no. 1, 1996, pp. 83 - 88.
- [3] K. Russa, I. Husain and M. E. Elbuluk, "Torque-ripple minimization in switched reluctance machines over a wide speed range," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 34, no. 5, 1998, pp. 1105 - 1112.
- [4] N. T. Shaked, R. Rabinovici, "New procedures for minimizing the torque ripple in switched reluctance motors by optimizing the phase-current profile," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 41, No. 3, 2005, pp. 1184 - 1192.
- [5] N. H. Fuengwarodsakul, M. Menne, R. B. Inderka and R. W. De Doncker, "High-Dynamic Four-Quadrant Switched Reluctance Drive Based on DITC," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 41, 2005, pp. 1232 - 1242.
- [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, 2002, pp. 3288 - 3290.
- [7] 안진우, 스위치드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어, 2004

저 자 소 개



안진우 (安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수.