

직접 순시 토크 제어에 의한 SRM 토크 리플 억제

이진국이동희·안진우
경성대학교

Torque Ripple Reduction of SRM using DITC

Zhen-Guo Lee-Dong-Hee Lee and Jin-Woo Ahn
Kyungshung University

Abstract - The direct instantaneous torque control (DITC) method is presented in this paper, which enables torque to be generated during all region and instantaneous torque control to be possible. The hysteresis control mode with the compared value between given torque and instantaneous output torque as input is applied in respect region. The output torque function, that is instantaneous output torque with the variation of current and position of rotor, is achieved by experiment. In this control mode the torque subsection function and current control are not needed. The turn on angle with variation of load torque and speed is only selected and turn off angle can be neglected. The validity of method is tested by simulation and experiment.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 구조상, 돌극형의 고정자와 회전자 구조를 갖고 있으며, 상권선은 간단한 집중권선 방식으로 고정자 자극에만 감겨져 있고, 회전자 자극에는 권선이 없고, 영구자석이 아니다. 따라서, SRM은 타전동기보다 기계적으로 견고하고, 관성에 대한 토크비가 높으며, 넓은 범위의 가변속 운전 등 장점이 있다. 그러나, 출력토크의 발생원리상 토크 리플이 크고 소음이 큰 단점이 있다[1]. 이에 대한 대책으로 토크 리플을 억제하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존에 연구되고 있는 토크 리플 억제방법으로는 SRM의 기계형상을 바꾸어 토크 리플을 개선하는 방법, 전류제어 등을 이용한 간접 토크 제어로 토크 리플을 개선하는 방법, 순시 출력토크와 직접 비교하여 제어하는 직접 순시 토크 제어로 토크 리플을 개선하는 방법이 있다. 그 중, SRM의 기계형상을 바꾸는 방법은 토크 리플 억제를 위한 복잡한 제어회로와 알고리즘을 필요로 하지 않지만, 토크 리플 억제를 함에 있어서 한계가 있다. 간접 토크 제어로 토크 리플을 개선하는 방법은 별도로 토크와 전류의 비선형 관계와 토크 분담함수가 필수적이다. 반면, 직접 순시 토크 제어로 토크 리플을 개선하는 방법은 SRM의 출력토크를 얻기 위한 검출기나 관측기 또는 look-up 테이블이 필요하다. 본 논문에서는 SRM의 모든 회전자 위치각에서의 순시 토크 발생 및 순시 토크 제어가 가능한 직접 순시 토크 제어법을 제안한다. 제안된 방식은 회전자 위치에 따라 기하학적으로 3개의 구간으로 나누어, 각 구간별로 지령토크와 출력토크의 비교값을 입력으로 하는 히스테리시스 제어방식을 사용하여 순시 출력토크를 제어한다. 그 중, 출력토크는 실험을 통해 얻은 상전류와 회전자 위치에 대한 토크함수를 사용하여 얻는다. 제안방식에서는 부하토크와 운전속도에 따른 스위칭 턴 온 각의 설정을 수식적으로 도출하여 제어하고, 턴 오프 각의 설정은 필요로 하지 않으므로, 번잡한 스위칭 턴 온 및 턴 오프 각의 설정문제를 해결하였다. 또한, 모든 회전자 위

치각에서의 순시 출력토크의 제어를 위해 전 영역에서 2상 도통이 가능한 방식으로 되어 있으며, 스위칭 손실의 감소를 고려한 히스테리시스 제어책을 새로 제안하였다. 한편, 제안된 직접 순시 토크 제어법은 시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성을 입증한다.

2. 직접 순시 토크 제어 알고리즘

2.1 비대칭 브릿지 컨버터회로의 상 스위칭 상태

그림 1은 SRM 구동용 컨버터 중에서 가장 많이 사용하는 비대칭 브릿지 컨버터회로로서, 제어의 다양성이 뛰어나고, 각 상의 제어가 독립적이며, 상당 두 개의 스위치와 다이오드를 가진다. 이 컨버터회로의 각 상은 스위치의 온/오프에 따라 그림 1의 (b)~(d)와 같이 상태 1, 상태 0 및 상태 -1 등 3개의 상태를 가진다.

그림 1(b)의 상태 1은 두 스위치가 모두 턴 온되어, 양의 직류전압이 상 권선에 인가되는 상태이다. 전류 확립구간에서 이 상태로 연결되어 있으면, 필요한 상전류를 신속하게 생성할 수 있다. 또한, 회전자 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기가 양수인 구간에서 이 상태로 연결되면, 상전류가 증가하여 현재 값보다 큰 정토크를 출력하게 되고, 인덕턴스의 기울기가 음수인 구간에서 이 상태로 연결되면, 현재 값보다 큰 부토크를 출력

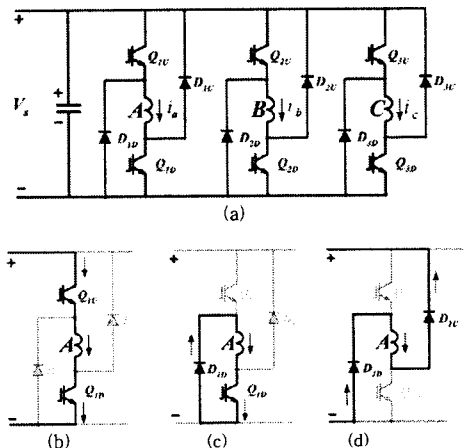


그림 1. 비대칭 브릿지 컨버터회로의 상 스위칭 상태
(a) 비대칭 브릿지 컨버터회로
(b) 상태 1 (c) 상태 0 (d) 상태 -1
Fig. 1. Phase switching states of asymmetric bridge converter
(a) asymmetric bridge converter
(b) state 1 (c) state 0 (d) state -1

하게 된다.

그림 1(c)의 상태 0은 한 개의 스위치는 턴 오프, 다른 한 개의 스위치는 턴 온되는 상태로서, 상전류는 한 개의 스위치와 다이오드를 거쳐 순환가능하다. 전류확립구

간에서 이 상태로 연결되어 있으면, 전류상승이 멈추게 되어 지나친 크기의 전류확립을 면할 수 있다. 또한, 회전자 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기가 양수인 구간에서 이 상태로 연결되면, 상전류가 감소하여 현재 값보다 작은 정토크를 출력하게 되며, 상태 1과 같이 소프트 쇼펩을 형성하여 전류 및 토크 제어를 행할 수 있다. 인덕턴스의 기울기가 음수인 구간에서 이 상태로 연결되면, 상전선에 잔류전류가 존재할 경우, 어느 정도의 부토크를 출력할 수 있다.

그림 1(d)의 상태 -1은 두 스위치가 모두 턴 오프되어, 상전류가 있을 경우, 두 다이오드와 전원축을 통해 SRM의 잔류 자계에너지를 전원축으로 회수한다. 또한, 인덕턴스의 기울기가 양수인 구간에서 이 상태로 연결하면, 현재 값보다 훨씬 작은 정토크를 출력할 수 있어, 제어의 응답성을 향상할 수 있다. 한편, 인덕턴스의 기울기가 음수인 구간에서 이 상태로 연결하면, 상전류를 신속하게 감소할 수 있으므로, 부토크 구간을 단축시켜 효율을 향상할 수 있다.

2.2 SRM 출력토크의 실시간 연산

SRM 운전중, 포화된 자화곡선의 비선형성으로 인해 순시 출력토크의 실시간 값의 수식적인 연산은 매우 어렵다. 직접 순시 토크 제어기의 제어성능은 SRM의 순시 출력토크의 검출정도와 직접적인 연관이 있다. 따라서, SRM의 순시 출력토크를 어떻게 가장 빠르고 간단하게 연산할 것인가는 SRM관련 연구자들이 가장 관심 갖는 문제 중의 하나이다. 기존의 방법으로 상전류와 회전자 위치, 상전류와 자속 및 자속과 회전자 위치에 따른 토크값을 사전 실험을 통해 look-up 테이블을 만들어 사용하는 방법과 적용제어를 통해 수식적으로 연산하는 방법, 및 인덕턴스 프로파일을 모델화하여 순시 출력토크를 연산하는 방법 등이 있다[2].

본 논문에서는 실험을 통해 그림 2와 같이 상전류와 회전자 위치에 따른 토크값을 얻어 look-up 테이블을 구성하여, 그림 3의 방식으로 임의의 회전자 위치각에서의 순시 출력토크를 연산하는 방법을 적용하였다.

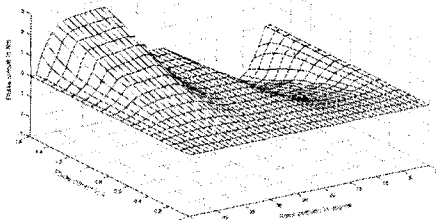


그림 2. 상전류와 회전자 위치에 따른 토크
Fig. 2. Torque versus phase current and rotor position

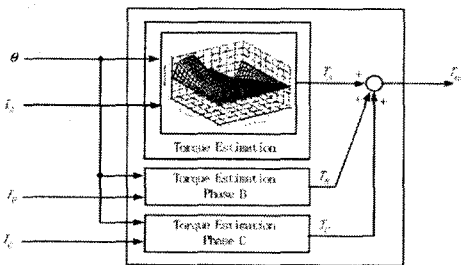


그림 3. 순시 토크의 실시간 연산
Fig. 3. Online estimation of instantaneous torque

2.3 SRM의 비선형 모델을 기반으로 하는 직접 순시 토크 제어

그림 4에 SRM의 각 상별 인덕턴스 프로파일을 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, 회전자 위치의 전 구간을 그림 4와 같이 임의의 상의 턴 온각부터 다음 상의 턴 온각까지 구간만 추출하여 연구할 수 있다. 여기서는 해석의 편의를 위하여, B상의 턴 온각부터 C상의 턴 온각까지의 구간만 연구한다. 또한, 이 구간을 SRM의 기하학적 구조에 따라 그림 4와 같이 영역 1~3으로 분할하며, 순시 토크 제어를 하기 위한 이상적인 전류와 토크파형을 그림 5에 보여주고 있다.

영역 1은 B상의 턴 온각 θ_{on-B} 부터 B상 인덕턴스의 회전자 위치각에 대한 변화율이 급격하게 변화하는 위치 θ_{1-B} 까지이다. 동시에 이 영역의 끝점 θ_{1-B} 는 그전 상인 A상의 인덕턴스의 변화율이 급격하게 작아지기 시작하는 위치이기도 하다. 이 영역은 B상에 대해서는 인덕턴스 상승구간에서 충분한 토크를 출력하기 위한 전류확립구간이며, 인덕턴스의 변화가 없으므로, 그림 5와 같이 단시간에 전류확립이 소요의 전류를 확립할 수 있지만, 순시 출력토크의 형성에 기여하지 않는다. 그러므로, 이 영역에서는 그전 상인 A상에 의해 소요의 순시토크를 출력하게 된다.

영역 2는 θ_{1-B} 부터 그전 상인 A상의 정렬위치 θ_{2-B} 까지이다. 이 구간 A상과 B상의 인덕턴스의 변화율이 모두 작으며, 정의 값이다. 따라서, 이 영역에서는 그림 5와 같이 A상의 출력토크가 작아지고, B상의 출력토크가 증가하는 구간으로서, A상과 B상 모두 순시 출력토크의 형성에 기여하며, 같은 조건하에서 B상의 도통을 우선시한다.

영역 3은 θ_{2-B} 부터 다음 상인 C상의 턴 온각 θ_{on-C} 까지이다. 이 구간 A상은 부토크 발생구간으로서 A상전류의 급격한 감소가 필요하며, A상의 출력토크가 없음이 바람직하다. 따라서, 이 영역에서는 그림 5와 같이 B상에 의해 소요의 순시토크를 출력한다.

한편, 영역 1~3의 임의의 회전자 위치각에서의 정도 높은 순시 토크 제어를 위해서는 A상과 B상 모두 도통 가능한 구조로 되어 있어야 함을 알 수 있다.

앞의 2.1절에서 소개한바와 같이, 비대칭 브릿지 컨버터회로로 SRM을 구동할 경우, 각 상은 세 개의 스위칭 상태를 갖고 있으므로, SRM의 임의의 회전자 위치각에서의 스위칭 상태는 궁극적으로 모두 9개의 스위칭 상태가 존재함을 알 수 있다.

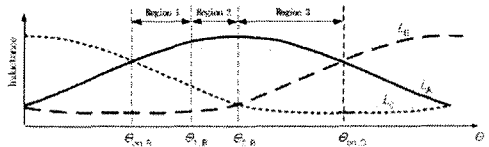


그림 4. 상 인덕턴스 프로파일
Fig. 4. Phase inductance profile

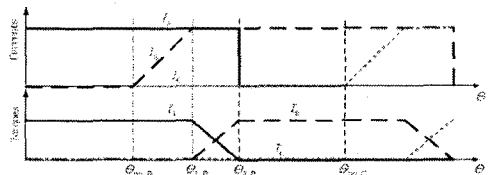


그림 5. 순시 토크 제어를 위한 이상적인 전류와 토크
Fig. 5. Ideal current and torque for instantaneous torque control

따라서, B상의 턴 온각부터 C상의 턴 온각까지 A, B상 모두 도통이 가능하며, 그때의 구체적 스위칭 상태는 각 영역의 특징에 맞추고, 스위칭 손실을 줄이는 전체조건에 의하여 다음의 그림 6과 같은 지령토크와 출력토크

의 비교값을 입력으로 하는 DITC 제어규칙을 구할 수 있다.

영역 1에서 A상에 의해 순시 출력토크를 형성하고, B 상은 전류확립을 해야 하므로, 그림 5(a)와 같이 (1,1)과 (0,1)상태가 포함되어 있어야 한다. 또한, 순시 토크 제어의 응답성을 고려하여 출력토크를 신속하게 감소시키게 하는 (-1,1)와 (-1,0)상태를 후보로 둔다.

영역 2에서 B상전류가 이미 확립되어, 토크가 출력할 것이고, A상 출력토크는 인덕턴스의 상승분이 급격하게 감소하여 출력토크가 감소한다. 따라서, 그림 5(b)와 같이 가능한 B상에 의해, 즉, (0,1)과 (0,0)상태로 소요의 순시 토크를 출력하고, 부족한 부분은 A상이 보충하는 방식이 바람직하다.

영역 3에서 A상이 부토크 발생구간에 위치해 있으므로, 가능한 -1의 상태이고, B상에 의해 순시 토크를 출력하므로, 그림 5(c)와 같이 (-1,0)과 (-1,1)상태가 포함되어 있어야 한다.

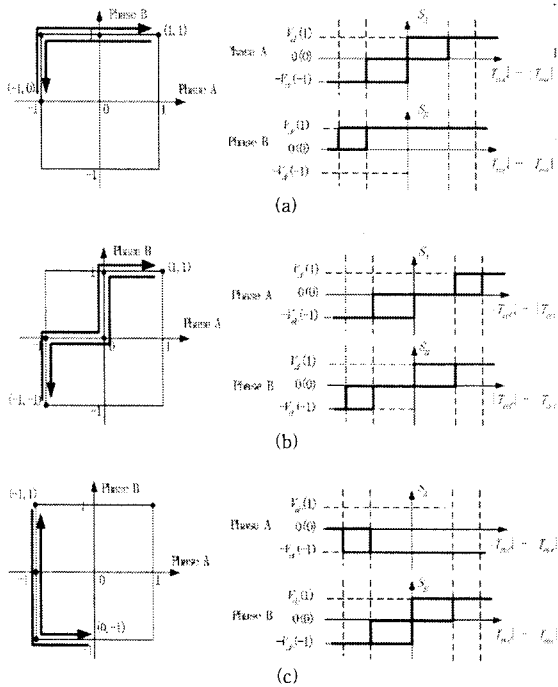


그림 6. 각 구간별 스위칭 기법
(a) 영역 1 (b) 영역 2 (c) 영역 3
Fig. 6. Each region Switching schemes
(a) region 1 (b) region 2 (c) region 3

2.4 직접 순시 토크 제어의 턴 온각의 설정

앞 절의 순시 토크 제어를 사용하여 SRM을 구동할 경우, 각 상의 턴 온각의 설정이 매우 중요하다. 턴 온각이 작을 경우, θ_{1-B} 위치에서의 B상의 전류가 소요의 순시 토크를 출력하기 위한 값보다 크게 되어, 효율이 떨어지게 된다. 턴 온각이 클 경우, B상이 필요한 전류를 확립할 수 없어, 소요의 순시 토크를 출력할 수 없게 된다. 따라서, 이 절에서는 그림 5의 이상적인 전류와 토크 파형을 기반으로, SRM의 수학적모델을 기반으로 턴 온각의 값을 수식으로 얻는다.

그림 5의 B상 전류파형으로부터 θ_{1-B} 위치와 θ_{2-B} 위치에서의 전류값은 같다. 즉,

$$i_{1-B} = i_{2-B} \quad (1)$$

한편, θ_{1-B} 위치에서의 B상 전류는 SRM의 전압방정식에 근거하여 다음과 같이 구해진다.

$$i_{1-B} = \frac{V_{dc}(\theta_{1-B} - \theta_{on-B})}{L_{min}\omega_{re}} \quad (2)$$

식에서, L_{min} 는 상 인덕턴스의 최소값을, ω_{re} 는 SRM의 회전속도, V_{dc} 는 직류링크전압을 각각 나타낸다.

그리고, θ_{2-B} 위치에서의 B상 전류는 SRM의 토크방정식에 근거하여 다음과 같이 구해진다.

$$i_{2-B} = \sqrt{\frac{2T_{ref}}{\partial L_B / \partial \theta}} \Big|_{\theta = \theta_{2-B}} \quad (3)$$

식에서, T_{ref} 는 지령토크값을 나타낸다.

따라서, 식 (1)~(3)을 연립하여 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\theta_{1-B} - \theta_{on-B} \propto T_{ref}^{1/2} \omega_{re} \quad (4)$$

2.5 직접 순시 토크 제어 시스템의 구축

그림 7은 제한한 직접 순시 토크 제어 시스템의 블록도이다. 전체 제어 시스템은 크게 출력토크 연산부, 직접 순시 토크 제어기, 인버터, SRM 및 엔코더로 구성되어 있다.

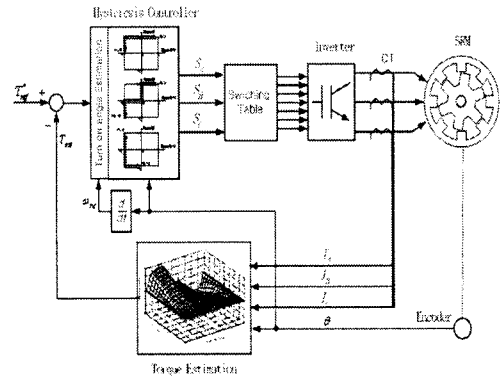


그림 7. 직접 순시 토크 제어 시스템의 블록도
Fig. 7. Block diagram of DTIC system

3. 수치 시뮬레이션 및 실험 결과

시뮬레이션에서 사용한 프로그래밍 언어는 MATLAB의 M파일이고, SRM은 3상, 12/8극 전동기이다. 그림 8에 200[rpm]의 속도에서 0.7[N.m]의 토크지령을 주었을 때의 토평 토크와 각 상별 토크, 전류, 스위칭 상태 및 인덕턴스 파형을 보인다. 턴 온각은 0[degree]이고, 시뮬레이션 결과로부터 SRM의 출력 토크는 실시간으로 지령 토크에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

그림 9에 0.3[N.m]의 토크지령하에서, 턴 온각의 변화에 따른 토평 토크와 상 전류파형을 보인다. 시뮬레이션 결과로부터 턴 온각을 크게 하면 충분한 전류를 확립할 수 없어, 토크 제어가 이루어지지 않음을 보이고, 턴 온각을 작게 하면 토크 제어는 이루어지지만, 전류확립구간이 길어지므로 하여, 실제 전류가 필요전류보다 크게 되면서 효율이 저하되게 됨을 알 수 있다.

그림 10은 제한한 직접 순시 토크 제어 실험 시스템을 보여준다. 실험에서 DSP는 T.I사의 TMS320F2812-150[MHz]를 사용하였으며, 제어 샘플링주기는

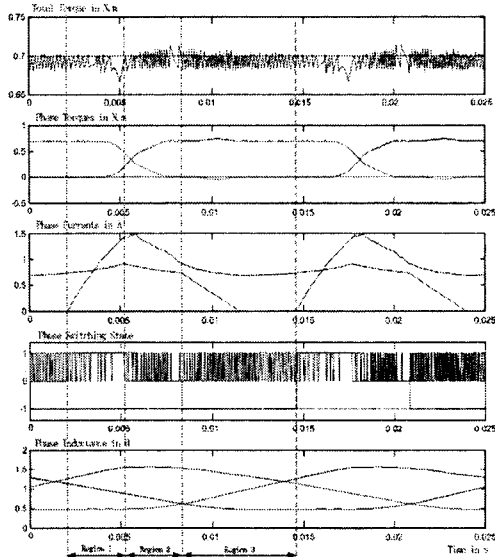


그림 8. 정토크 지령하에서의 시뮬레이션 결과
Fig. 8. Simulated result under the constant torque command

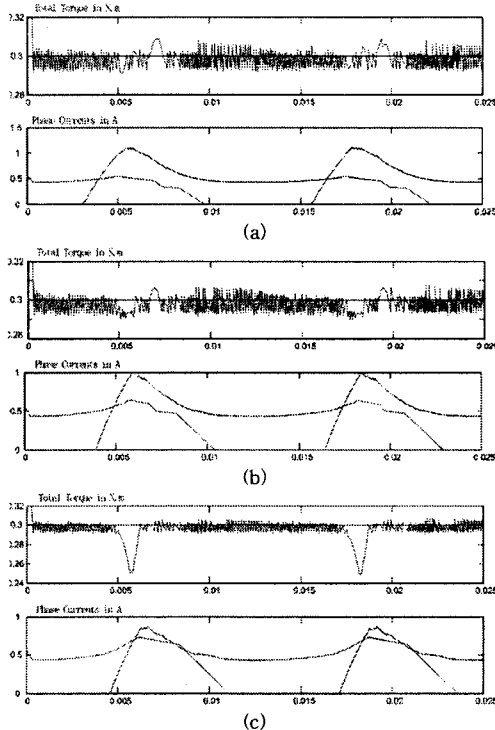


그림 9. 턴 온각의 변화에 따른 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulated result with turn on angle
(a) 1.2[deg.] (b) 2.2[deg.] (c) 3[deg.]

50[μ s]로 설정하였다. 그리고 부하장치는 부하토크의 크기가 조절 가능한 다이내모미터를 사용하였다.

그림 11과 그림 12에 직접 순시 토크 제어 시스템의 실험결과를 보이다. 그림 11은 0.15[N.m]의 정토크지령하에서의 지령토크, 출력토크, A,B상 전류 파형을 보이고, 그림 12는 SRM에 0.15[N.m]의 스텝 토크지령하에서의 실험결과 파형을 보인다. 실험결과로부터 양호한 토크제어가 이루어짐을 알 수 있다.

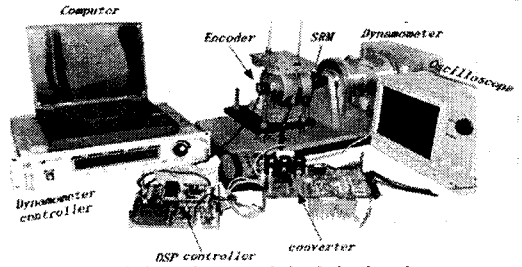


그림 10. 직접 순시 토크 제어 실험 시스템
Fig. 10. DITC experimental system

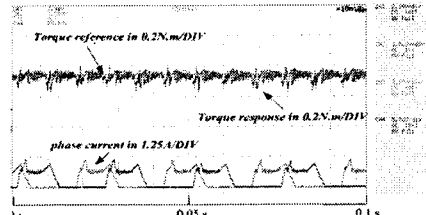


그림 11. 직접 순시 토크 제어 시스템의 실험결과
Fig. 11. Experimental result of DITC system (0.15[N.m])

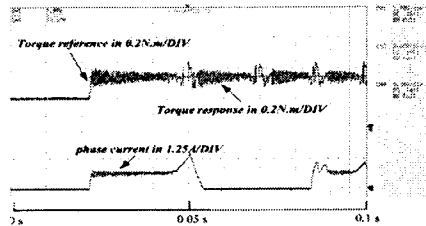


그림 12. 직접 순시 토크 제어 시스템의 실험결과
Fig. 12. Experimental result of DITC system (0 -> 0.15[N.m])

4. 결 론

본 논문에서는 SRM의 모든 회전자 위치각에서의 순시 토크 발생 및 순시 토크 제어가 가능한 직접 순시 토크 제어법을 제안하였다. 제안된 방식은 지령토크와 출력 토크의 비교값을 입력으로 하는 히스테리시스 제어 방식을 사용하여 순시 출력 토크를 제어한다. 또한, 본 제안 방식에서는 부하토크와 운전속도에 따른 스위칭 턴 온 각의 설정을 수식적으로 도출하였으며, 턴 오프 각의 설정을 필요로 하지 않는 특징이 있다. 한편, 제안된 직접 순시 토크 제어법은 시뮬레이션과 실제실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원 (과제번호: R-2005-B-109) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] 안진우, "스위치 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, pp. 1-454, 2004.
- [2] Inderka, R.B., De Doncker, R.W., "DITC-direct instantaneous torque control of switched reluctance drives", 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Volume 3, pp. 1605 - 1609, 2002. 10
- [3] Girardin, M., "Torque control of a three-phase direct reluctance motor", ISIE '97., Proceedings of the IEEE International Symposium on Volume 2, pp. 511 - 516