

스위치드 릴럭턴스 전동기의 위치제어 시스템 설계

김민희*, 백원식**, 김남훈*, 최경호***, 김동희**

*영남이공대학, **영남대학교, ***경북전문대학

A Design of Position Control System of Switched Reluctance Motor

Min-Huei Kim*, Won-Sik Baik**, Nam-Hun Kim*, Kyeong-Ho Choi***, Dong-Hee Kim**

*Yeungnam College of Sci. & Tech., **Yeungnam University, ***Kyungbuk College

ABSTRACT

This paper presents an implementation of position control system of Switched Reluctance Motor (SRM) using digital hysteresis controller. Although SRM possess several advantages including simple structure and high efficiency, the control drive system using power semiconductor device is required to drive this motor. The control drive system increases overall system cost. To overcome this problem and increase the application of SRM, it is needed to develop the servo drive system of SRM. So, the position control system of 1 Hp SRM is developed and evaluated by adaptive switching angle control. The position/speed response characteristics and voltage/current waveforms are presented to prove the capability of SRM for a servo drive application. Moreover, digital hysteresis current controller is developed and evaluated by experimental testing for the purpose of system developmental cost reduction.

1. 서 론

최근 산업의 전반적인 분야에서 자동화 및 고속화의 경향에 따라 정밀하고 빠른 응답특성을 갖는 서보 구동용 제어 시스템 개발에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 시스템 제작에 소요되는 비용을 저감하고자 하는 추세에 따라 다른 전동기에 비해 전동기 자체의 제작 단가가 상대적으로 저렴한 스위치드 릴럭턴스 전동기 (Switched Reluctance Motor, SRM)에 대한 관심이 고조되고 있다. SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조로 되어 있으며, 고정자에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 어떠한 형태의 권선이나 영구자석도 존재하

지 않는 간단한 구조로 이루어져 있다^{[1][2]}. 또한 최근에는 단점으로 대두되고 있는 특유의 진동 및 소음을 저감하기 위한 설계 및 제어기법들과 간편한 전동기 특성해석에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 이로 인해 전반적인 산업분야에서의 응용이 기대되고 있다^{[5][6]}. 그러나, SRM은 구동 특성상 전원을 짧은 시간에 순차적으로 여자시켜야 하기 때문에 전력 반도체 소자를 이용한 구동 드라이브가 필수적으로 요구되므로, 서보 구동용 시스템과 같은 용도로 SRM을 개발함으로써 타 전동기에 대한 경쟁력을 높일 수 있을 것으로 사료된다. 따라서, 본 논문에서는 TMS320F240 DSP를 적용한 SRM의 위치제어 시스템을 제시하여 실험을 통해 응답 특성을 고찰함으로써 서보 구동 시스템으로서의 SRM의 효용성을 검증하였다. DSP내에서의 연산을 통해 제어되는 디지털 전류 히스테리시스 제어기를 적용한 제안된 위치제어시스템을 1마력 SRM에 적용하여 위치 및 속도 응답특성을 확인하였다.

2. SRM의 구동특성

SRM은 회전자 위치각에 따른 인덕턴스의 변화량과 전류의 크기에 따라 토크를 발생한다. 한 상의 고정자 권선이 여자되면, 회전자는 여자된 고정자와 정렬이 되려는 방향으로 토크를 발생하여 움직이게 되고, 완전히 정렬되기 이전에 스위치를 오프한 후, 전압을 다음 상에 순차적으로 인가함으로써 연속적인 회전력을 얻게 된다.

그림 1에 나타낸 것과 같이 일반적으로 SRM의 운전 특성은 속도-토크 특성으로부터 일정토크영역, 일정출력 영역 및 출력감소영역으로 구분된다. 일정 토크 영역은 전동기가 기저속도와 정격토크 이하로 구동되는 경우이고, 전동기가 기저속도보다 높은 속도로 구동되는 영역인 일정 출력 영역에서는 속도가 증가함에 따라 출력 가능한 토크의 크기가 감소하게 된다. 또한, 일정 출력 영역에서 일정 속도 범위를 초과할 경우, 토크가 급격히 감소하는 영역으로 구분할 수 있다^[1]. 일반적으로 위치제

어를 위해서는 진동 및 소음이 적고 제어가 용이한 일정 토크영역이 적합하며, 이 영역에서는 앞서 나타낸 순시 토크의 식으로부터 알 수 있는 것과 같이, 전류를 제어함으로써 순시토크의 크기를 조절할 수 있으며, 턴온 및 턴오프 각에 따라 출력특성이 달라진다.

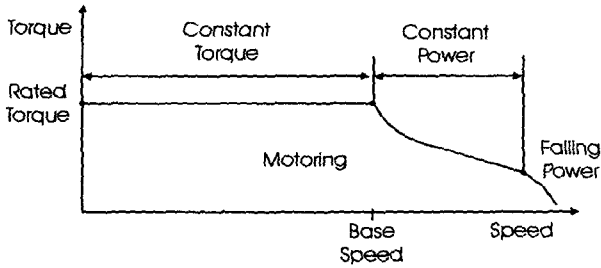


그림 1 SRM의 속도-토크 특성
Fig. 1 Torque/speed characteristic of SRM

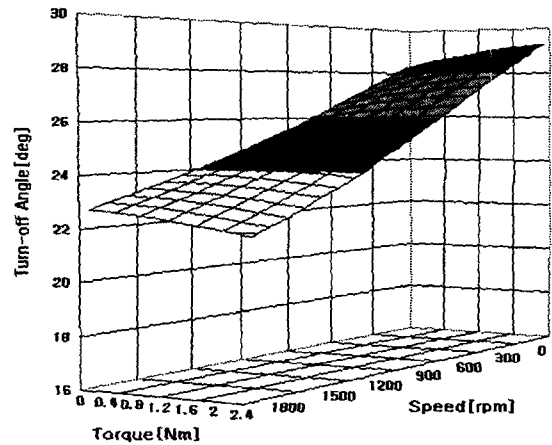


그림 3 산정된 토크 및 속도에 따른 턴-오프 각
Fig. 3 Determinated turn-off angle to the torque and speed

3. SRM 제어시스템

3.1 스위칭 각 제어

SRM은 펄스 형태의 여자방식으로 토크가 발생되므로 토크리플이 크고, 이로 인해 발생하는 진동, 소음 그리고 고정자 형상의 변이 등이 실용화에 큰 장애가 되어왔다. 따라서 토크 리플을 저감하여 진동과 소음을 줄이고자 하는 연구들이 활발하게 이루어지고 있다.^{[6][7][10][11]}

일정 속도 및 부하에 적용되는 SRM 구동에 있어서는 스위칭 각을 일정하게 두고 제어를 수행하였으나, 위치 제어기와 같은 가변속도 및 가변부하에 SRM을 적용하기 위해서는 속도 및 부하에 따라 적정 스위칭 각을 적용함으로써 효율 및 응답특성을 개선할 수 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션 및 실험을 통해 산정된 일정토크 영역에서의 스위치 턴온, 턴오프 시점을 스위칭 각도제어를 통해 적용되도록 하였으며 그림 2와 3은 산정된 턴온각과 턴오프각을 나타내고 있다.

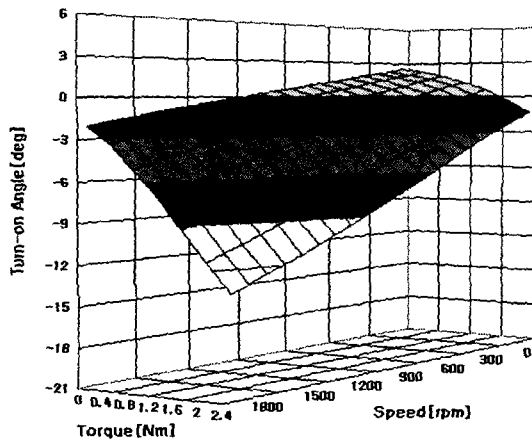


그림 2 산정된 토크 및 속도에 따른 턴-온 각
Fig. 2 Determinated turn-on angle according to the torque and speed

3.2 디지털 히스테리시스 제어기

SRM은 전류의 제곱에 비례하여 토크를 생성하므로 전류를 일정하게 유지하는 것이 중요하며, 이를 위해 일반적으로 op-amp를 사용하여 아날로그방식으로 구현된 히스테리시스 제어기를 많이 사용하였다. 그러나, 아날로그방식으로 구현된 히스테리시스 제어기는 히스테리시스 밴드를 정확히 조정하거나 가변하기가 힘들고 주파수가 가변된다는 문제점들이 있다. 따라서 본 논문에서는 아날로그 히스테리시스 제어기의 문제점을 해결하고, 전체적인 시스템의 개발단가를 낮추기 위해 소프트웨어적으로 구현된 디지털 히스테리시스 제어기를 사용하였다. 그림 4는 디지털 히스테리시스 전류제어기의 블록도를 나타낸 것이다.

히스테리시스 비교기는 응용분야에 따라 여러 가지 형태가 될 수 있으며, 적용 형태에 따라 제어시스템의 동작영역, 성능, 인버터의 스위칭 주파수가 결정된다. 그림 5와 그림 6은 대표적인 토크 히스테리시스 비교기의 동작원리를 나타내었다. 그림 5는 2-레벨 히스테리시스 비교기를 나타내고 있으며, 지령전류와 실제전류를 비교한 후 스위칭 패턴을 결정하여 0과 1의 신호를 발생한다. 그림 6은 전동기의 회전방향에 관계없이 3-레벨 히스테리시스 비교기를 쓰는 방식이고, 스위칭 패턴을 결정하여 1, 0, -1의 신호를 발생한다. 본 논문에서는 2-레벨 히스테리시스 비교기를 사용하였으며, 히스테리시스 전류제어기의 샘플링 주파수는 10[kHz]로 설정하였고, 밴드는 전류지령의 3%로 설정하였다. 디지털 히스테리시스 제어기의 경우에는 n번째 읽은 전류를 n+1번째 제어 주기에서 사용하고, n번째에 결정된 히스테리시스 제어기의 스위칭 패턴을 n+1번째 제어주기에서 인가하기 때문에 제어특성이 아날로그 히스테리시스 제어기에 비해서 나쁘다는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 DC link 전압을 낮게 하거나, 전류제어주기의 주파

수를 매우 높게 하면 어느 정도 극복할 수 있다^{[3][8]}.

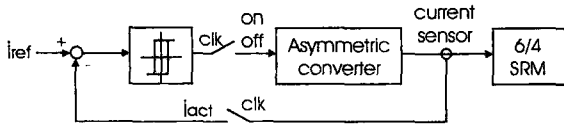


그림 4 디지털 히스테리시스 전류제어기의 블럭도
Fig. 4 Block diagram of digital hysteresis current controller

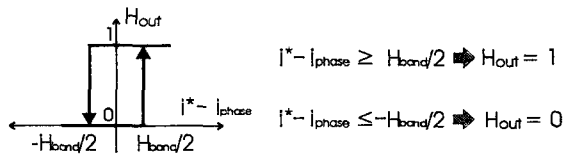


그림 5 2-level 히스테리시스 비교기
Fig. 5 2-level hysteresis comparator

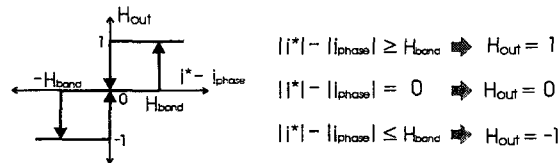


그림 6 3-level 히스테리시스 비교기
Fig. 6 3-level hysteresis comparator

3.3 위치제어 알고리즘

본 논문에서 적용된 SRM의 폐루프, 위치제어시스템의 제어도를 그림 7에 나타내었다. 위치제어기의 입력과 엔코더로부터 추정된 실제 위치와의 오차는 비례미분제어기(PD)를 통해 연산되고, 그 출력이 속도제어기의 입력이 된다. 또한, 속도 오차는 비례적분제어기(PI)를 통해 연산되고, 전류 지령 i^* 를 생성한다. 이 전류 지령은 구현된 디지털 히스테리시스 제어기내에서 전류(轉流)로직 제어기(Commutation logic controller)의 정보를 바탕으로 해당되는 3상중의 어느 한 상의 전류와 비교해서 출력 펄스를 발생시킨다. 각도제어기는 엔코더 신호로부터 계산된 속도와 전류로부터 계산된 토크에 적합한 턴온/턴오프 시점을 결정하여 전류 로직 제어기로 보낸다. 그리고 위치제어루프에는 비례미분제어기를 사용하여 정밀한 제어가 가능하도록 구성하였다^{[1][3][7]}.

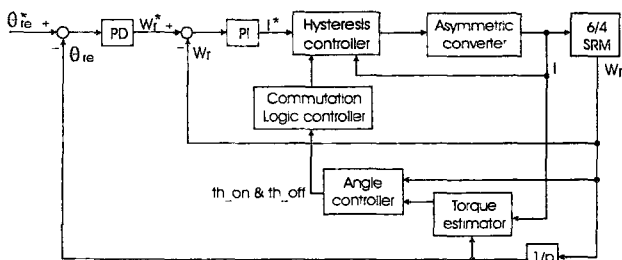


그림 7 제안된 위치제어 시스템의 블럭도
Fig. 7 Block diagram of suggested position control system

4. 제어시스템 구성

본 논문에서 구성한 전체 시스템의 블럭도는 그림 8과 같다. 이 시스템은 DSP보드와 PC사이에 직렬 포트를 통해 통신을 하도록 구성되어 있으며, 모든 제어기는 F240DSP내에서 디지털방식으로 구성하여 제어기의 구성이나 설계를 용이하게 하였다.

컨버터는 SRM을 구동하기 위해서 일반적으로 많이 사용되는 비대칭 브리지 컨버터로 구성하였으며, 정격이 1200[V], 75[A]인 Semikron사의 IGBT SMK75GAL과 SMK75GAR을 사용하였다. 게이트 드라이브는 Semikron사의 SKHI71을 사용하였으며, 부하토크는 Leroy Somer사의 3000[rpm], 50[Nm], 정격의 FP. 15/30 파워드 브레이크를 사용하여 제어하였다. 회전자 위치정보는 1회전당 600[pulse]를 출력하는 omron사의 E6H-CWZ3E 엔코더를 사용하였다.

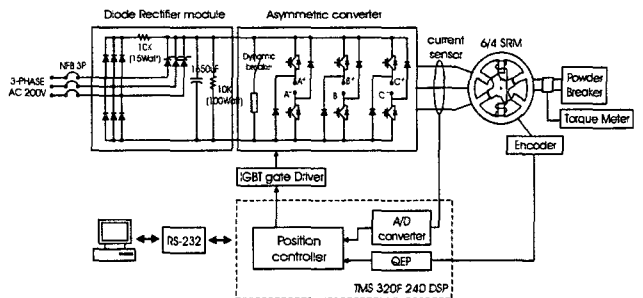
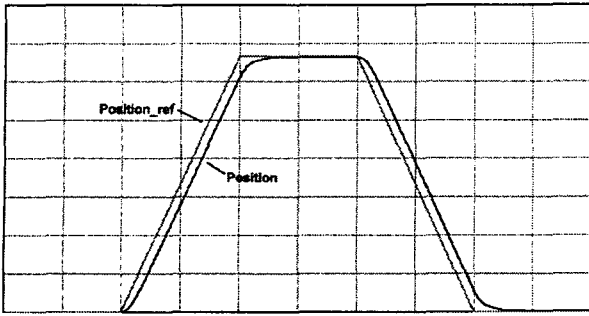


그림 8 제어시스템의 블럭도
Fig. 8 Block diagram of the control system

5. 실험 결과

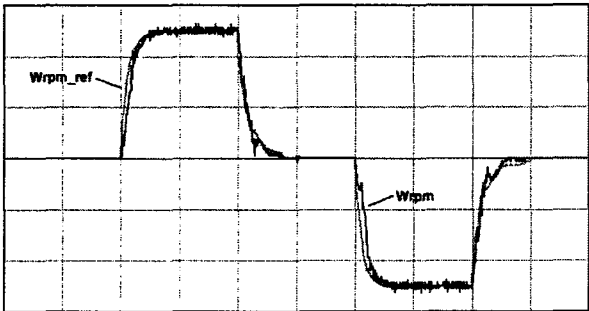
그림 9와 10은 제안된 위치제어시스템에 의한 응답특성을 나타내었다. 그림 9는 500[rpm], 1[Nm]인 경우의 위치응답특성으로, (a)는 위치제어 응답특성, (b)는 속도 제어, (c)는 3상 전압파형, (d)는 3상 전류파형, (e)는 확장된 3상 전압파형을 보여준 것이다. 그림 10은 2000[rpm], 1[Nm]인 경우의 응답특성으로, (a)는 위치제어 응답특성, (b)는 속도제어, (c)는 3상 전압파형, (d)는 정상상태에서 확장된 3상 전압파형, (e)는 3상 전류파형, (f)는 확장된 3상 전류파형을 보여준 것이다.

제어기는 위치와 속도지령을 보다 빠르고 정확하게 추종하도록 시행오차를 통하여 결정된 값을 사용하였다. 그림 9(e)의 500[rpm]에서의 전압 확대 파형으로부터 디지털 히스테리시스 제어기에 의해 전압이 선포되어 인가되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 10(d)는 2000[rpm]에서의 전압 확대 파형이며 속도가 증가함에 따라 단일 펄스 형태의 전압이 인가됨을 알 수 있다.



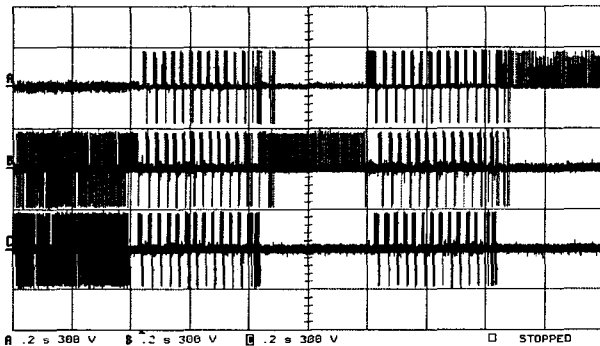
(0.5[rev]/div, 0.2[sec]/div)

(a) 위치제어 응답특성



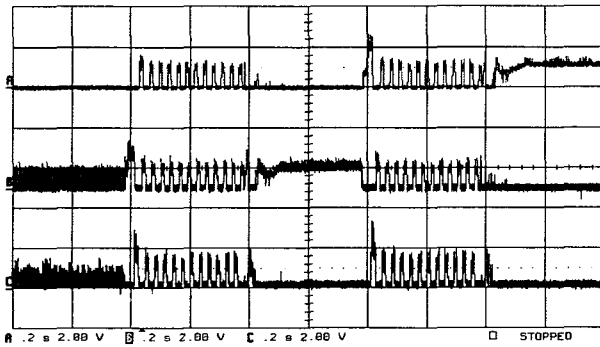
(200[rpm]/div, 0.2[sec]/div)

(b) 속도제어 응답특성



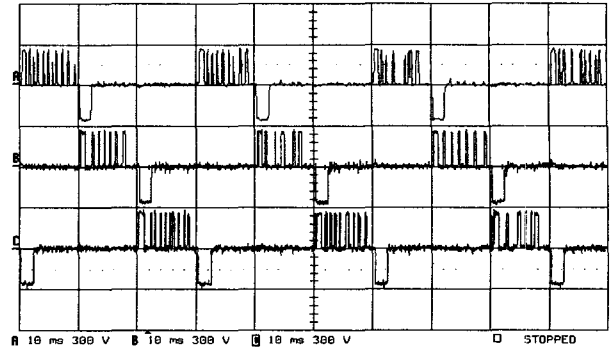
(300[V]/div, 0.2[sec]/div)

(c) 3상 전압파형



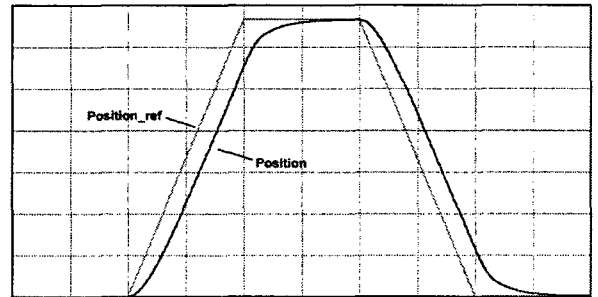
(4.4[A]/div, 0.2[sec]/div)

(d) 3상 전류파형



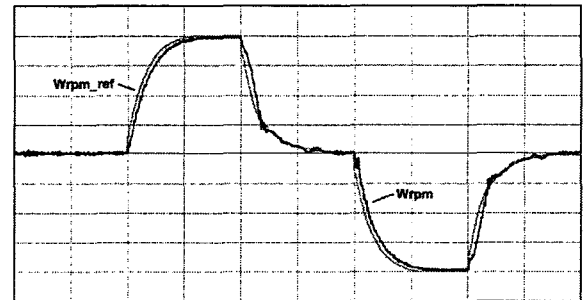
(300[V]/div, 10[msec]/div)

(e) 정상상태에서의 확장된 3상 전압파형
 그림 9 500[rpm], 1[Nm]에서 제안된 시스템의 응답특성
 Fig. 9 Response characteristics of the suggested system at 500[rpm] and 1[Nm]



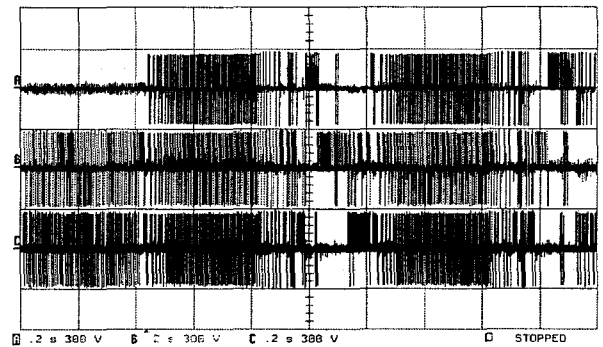
(2[rev]/div, 0.2[sec]/div)

(a) 위치제어 응답특성



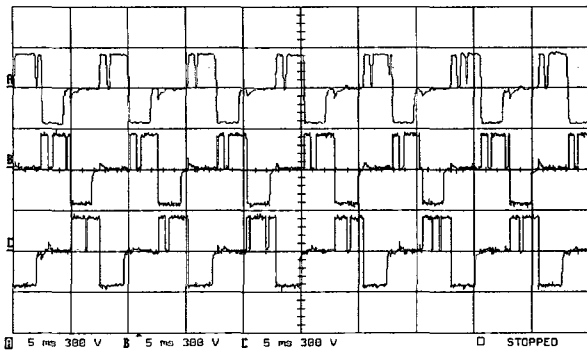
(500[rpm]/div, 0.2[sec]/div)

(b) 속도제어 응답특성



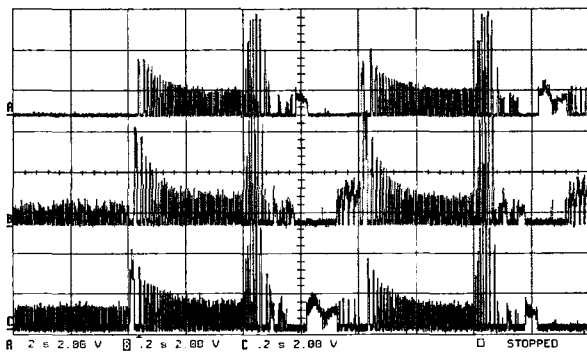
(300[V]/div, 0.2[sec]/div)

(c) 3상 전압파형



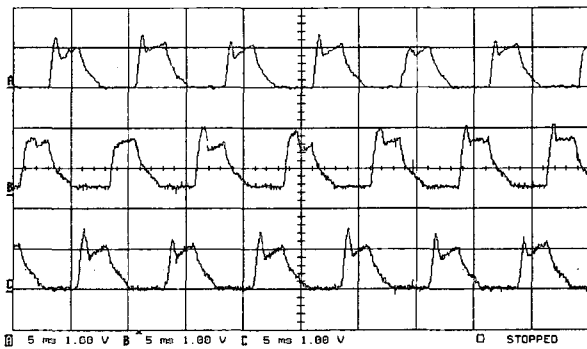
(300[V]/div, 5[msec]/div)

(d) 정상상태에서의 확장된 3상 전압파형



(4.4[A]/div, 0.2[sec]/div)

(e) 3상 전류파형



(2.2[A]/div, 5[msec]/div)

(f) 정상상태에서의 확장된 3상 전류파형

그림 10 2000[rpm], 1[Nm]에서 제안된 시스템의 응답특성
Fig. 10 Response characteristics of the suggested system at 2000[rpm] and 1[Nm]

6. 결 론

본 논문에서는 최근 관심이 고조되고 있는 SRM을 서보 구동용 시스템으로 적용하기 위한 위치제어시스템의 응답특성에 관해 연구하였다. 또한 DSP내에서의 연산을 통해 제어되는 디지털 히스테리시스 제어를 적용함으로써 시스템 개발과 구현을 보다 용이하게 하였으며, 제

시된 제어시스템의 검증을 위하여 실제 시스템을 구성하여 응답특성을 고찰하였다. 이 결과 우수한 위치제어 응답특성이 얻어졌으며, 이는 SRM을 적용한 서보구동용 전동기 제어시스템의 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] T.J.E. Miller, *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newnes Press, 2001.
- [2] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives*, CRC Press, 2001.
- [3] B.K. Bose, *Power Electronics and Variable Frequency Drives*, IEEE Press, 1997.
- [4] Hassan Moghbelli, Gayle E. Adams, Richard G. Hoft, "Performance of a 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors", *IEEE Trans. on IA.*, Vol. 27, No. 3, pp. 531~538, May/June, 1991.
- [5] 최경호, 김동희, 노채균, 김민희, "스위치드 리럭턴스 전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구", *전력전자학회 논문지*, 제 6권, 제 4호, pp. 333~340, Aug., 2001.
- [6] 최경호, 김남훈, 백원식, 김동희, 노채균, 김민희, 황돈하, "드릴용 SRM의 최적운전을 위한 스위칭각 산정", *대한전기학회 논문집*, Vol. 50B, No. 11, pp. 575~582, Nov., 2001.
- [7] H.C. Lovatt, J.M. Stephenson, "Computer-optimised smooth torque current waveforms for switched reluctance motors", *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 144, No. 5, Sep., 1997.
- [8] P.C. Kjaer, J.J. Gribble T.J.E. Miller, "High -grade control of switched reluctance machines", *IEEE Trans. on IA.*, Vol. 33, No. 6, pp. 1585~1593, Nov./Dec., 1997.
- [9] F. Blaabjerg, P.C. Kjaer, P.O. Rasmussen, C. Cossar, "Improved Digital Current Control Methods in Switched Reluctance Motor Drives", *IEEE Trans. on PE.*, Vol. 14, No. 3, pp. 563~572, May, 1999.
- [10] 오석규, 성세진, "맥동 토크 저감을 위한 스위치드 리럭턴스 전동기 구동에 관한 연구", *전력전자학회 논문지*, Vol. 2, No. 2, pp. 49~56, June, 1997.
- [11] 안진우, 오석규, 황영문, "SRM의 정밀속도제어를 위한 순시스위칭각 제어방식", *전력전자학회 논문지*, Vol. 2, No. 3, pp. 20~25, Sep., 1997.