

호이스트 견인용 SRM의 스무딩 운전을 위한 DITC 기법

Huijun Wang, 이진국, 안영주\*, 안진우  
경성대학교, 부경대학교\*

A DITC Strategy of SRM for Smooth Drive of Hoist

Huijun Wang, Zhen-Guo Lee, Young-Ju An\*, Jin-Woo Ahn  
Kyungung Univ., Pukyong National Univ.\*

**Abstract** - The DITC of SRM for smooth hoist driving is presented in this paper. In the hoist system, the switched reluctance motor (SRM) is applied instead of induction motor because of high efficiency and good traction characteristic. In order to improve start-up and stop performance of hoist system, the smoothing operation sequence of SRM using DITC is proposed. According to the switching sequence and hysteric band, the instantaneous torque is controlled. Since, the proposed method uses only the turn-on angle depending on variation of load and speed, a simple DITC can be implemented. The validity is proved by simulation and experiment.

1. 서 론

최근 현대 산업의 형태가 복잡해지고, 다양한 제품이 개발됨에 따라, 호이스트의 사용에 있어서 그 기능이 단순한 수직권상에서 보다 다양한 기능이 요구되고 있다[1].

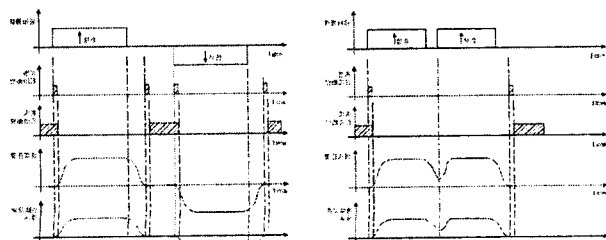
기존의 전동식 호이스트는 그 구동용 전동기로 일반적으로 산업용 유도전동기를 사용하는데, 내환경성, 내구성 및 경제성은 좋으나, 시스템의 효율이 낮고, 부드러운 초기운전이 힘들다. 유도전동기를 대신하여 다양한 형태의 전동기가 적용될 수 있으나 직류전동기의 경우, 브러시의 마모로 인한 유지 보수성이 나쁘고, BLDC나 영구자석 교류전동기의 경우, 경제성과 내환경성이 나쁜 단점이 있다. 반면, SRM(Switched Reluctance Motor)은 회전자에 권선이 없는 2중 돌극형의 구조로 기계적인 구조가 단순하고, 견고하며, 경제성이 좋다. 특히, 유도전동기에 비하여 효율이 높고, 견인특성이 우수하여, 전동식 호이스트 구동용 전동기에 적합할 것으로 사료된다.

또한, 호이스트 시스템을 사용하는 실제현장에서 작업자는 상승, 하강 및 정지 버튼만의 조작으로, 화물을 들어 올리거나 하강하게 된다. 기존의 전동식 호이스트에서는 유도전동기에 전원을 인가 또는 차단하는 방식으로 화물의 수직권상 또는 정지를 실현하며, 상권선의 접속을 바꾸는 방식으로 상승 또는 하강의 변환을 실현하였다. 이러한 호이스트 시스템은 경제성은 좋으나, 화물의 파손 및 화물에 미치는 충격을 피할 수 없다. 따라서, 고성능의 호이스트 시스템에서는 화물의 하중과 작업자의 조작과는 별도로 항상 스무딩 운전을 해야 할 필요성이 있다.

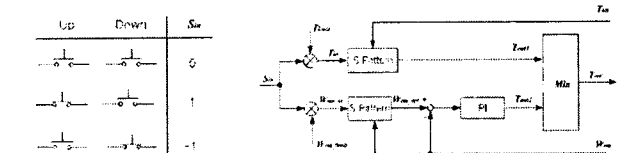
본 논문에서는 우선 먼저, 호이스트 시스템의 운전 중 스무딩 운전을 실현할 수 있는 시퀀스를 보이고, 다음으로, 구동용 전동기로 SRM을 사용한 호이스트 시스템에서 스무딩 운전을 위한 DITC(Direct Instantaneous Torque Control) 기법을 제안하였으며, 이를 수치시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.

2. 호이스트 시스템 스무딩 운전의 실현

그림 1에 호이스트 시스템의 스무딩 운전을 실현할 수 있는 조작흐름과 해당 신호파형을 나타내고 있고, 그림 2에 호이스트 시스템의 스무딩 운전 시퀀스를 실현함에 있어서, 구동용 전동기의 토크지령을 형성하는 제어 블록도를 나타내고 있다. 상승 또는 하강 버튼을 눌러 초기 기동할 시, 우선 전자브레이크를 작동시킴으로써, 기계 브레이크를 풀 후에도 여전히 정지상태에 머물도록 한다. 다음으로, 현재의 토크  $T_{load}$ 와 속도  $\omega_{rm}$ 에서 S자모양으로 토크제한 지령  $T_{in}$ 과 속도제한 지령  $\omega_{rpm-in}$ 에 추종하도록 하는 두 토크지령  $T_{out1}$ ,  $T_{out2}$ 을 얻으며, 얻어진 두 토크지령 중, 작은 값을 취해 구동용 전동기의 토크지령으로 한다.



(a) 정, 역 운전에서의 초기 기동과 정지 (b) 권상도중에서의 일시 정지와 재기동  
〈그림 1〉 호이스트 시스템 스무딩 운전의 시퀀스

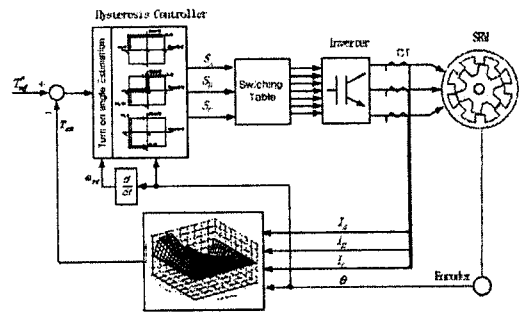


(a) 입력버튼의 조작에 따른 신호입력 (b) 스무딩 운전을 위한 제어블록도  
〈그림 2〉 호이스트 시스템 스무딩 운전의 실현

정지 시에는 기동 시의 역과정으로서 토크지령을 낮추어, 속도를 0로 도달하게 한다. 호이스트가 멈춘 후, 전자브레이크로 호이스트를 잡고, 기계 브레이크를 작동시켜, 호이스트를 정지상태에 머물게 한다. 같은 원리로 그림 1의 (b)와 같이, 화물 권상 도중, 상승 및 하강 버튼을 일시 오프하였다가 다시 온 함으로써 화물을 허공에 잠깐 멈추었다가 다시 기동할 수 있다.

3. 호이스트 시스템의 스무딩 운전을 위한 SRM의 DITC 기법

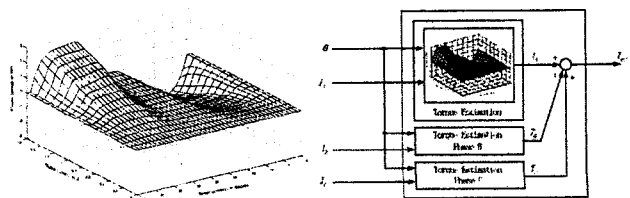
호이스트 시스템 스무딩 운전의 실현에서 구동 전동기 출력토크의 입력 토크에 대한 추종성능은 전체 시스템의 성능과 직접적인 관계가 있다. 또한, 화물의 이동 중, 화물의 파손 및 충격을 완화하려면, 구동 전동기의 출력토크 맥동이 작을 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 호이스트 구동용 SRM에 DITC 기법을 적용하였으며, 본 논문에 적용된 전체 제어 시스템 블록도를 그림 3에 보인다. 그림 3과 같이, 전체 제어 시스템은 크게 출력토크 연산부, DITC부, 인버터, SRM 및 엔코더로 구성된다.



〈그림 3〉 SRM의 DITC 시스템 블록도

3.1 출력토크의 실시간 연산

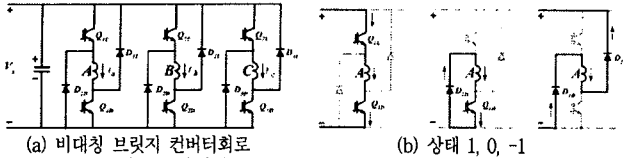
SRM 운전중, 포화된 자화곡선의 비선형성으로 인해 출력토크의 실시간 값의 수식적인 연산은 매우 어렵다. 한편, DITC의 제어성능은 SRM의 순시 출력토크의 검출정도와 직접적인 연관이 있다. 기존의 출력토크의 실시간 연산방법에는 상전류와 회전자 위치, 상전류와 자속 및 자속과 회전자 위치에 따른 토크값을 사전 실험을 통해 look-up 테이블을 만들어 사용하는 방법, 적응제어를 이용하여 수식적으로 연산하는 방법, 인덕턴스 프로파일링을 모델화하여 연산하는 방법 등이 있다. 본 논문에서는 실험을 통해 그림 4(a)와 같이 상전류와 회전자 위치에 따른 토크값을 얻어 look-up 테이블을 구성하여, 그림 4(b)의 방식으로 임의의 회전자 위치각에서의 순시 출력토크를 연산하는 방법을 적용하였다.



(a) 상전류와 회전자 위치에 따른 토크 (b) 순시 토크의 실시간 연산 블록도  
〈그림 4〉 SRM 운전 중, 출력토크의 실시간 연산

### 3.2 비대칭 브릿지 컨버터회로의 상 스위칭 상태의 설정

그림 5는 SRM 구동용 컨버터 중에서 가장 많이 사용하는 비대칭 브릿지 컨버터회로로서, 제어의 다양성이 뛰어나고, 각 상의 제어가 독립적인 장점이 있으며, 두 개의 스위치의 온상태에 따라 그림 5의 (b)와 같이 상태 1, 상태 0 및 상태 -1 등 3개의 상태를 가진다. 그 중, 상태 1은 두 스위치가 모두 턴 온되어, 양의 직류링크전압이 상 권선에 인가되는 상태, 상태 0은 한 개의 스위치는 턴 오프, 다른 한 개의 스위치는 턴 온되는 상태로서, 상 전류는 한 개의 스위치와 다이오드를 통해 흐른다. 상태 -1은 두 개의 스위치가 모두 턴 오프되어, 상 전류가 있을 경우, 두 다이오드와 전원측을 통해 SRM의 잔류 자계에너지를 전원측으로 회수하는 상태이다.

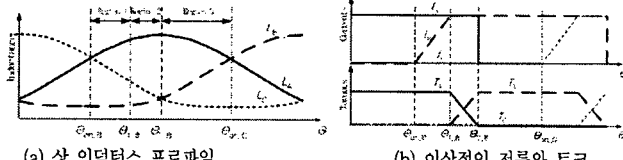


(a) 비대칭 브릿지 컨버터회로 (b) 상태 1, 0, -1  
**<그림 5> 비대칭 브릿지 컨버터회로의 상 스위칭 상태**

### 3.3 비선형 모델을 기반으로 하는 DITC 알고리즘

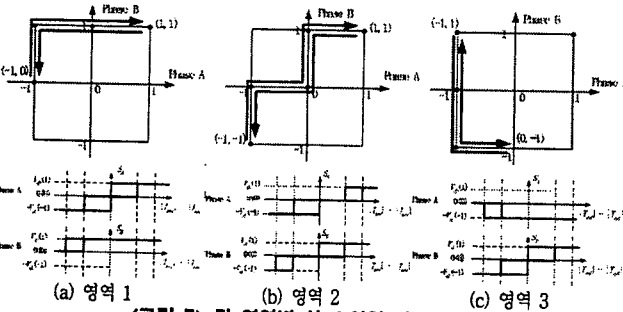
그림 6(a)에 SRM의 각 상별 인덕턴스 프로파일을 나타내고 있다. SRM 구동에 있어서, 효과적인 구동토크를 얻기 위해서는 반드시 회전자의 위치각에 대한 정보를 얻어 각 상별로 연속적인 스위칭 여자를 해야 한다. 따라서, 회전자 위치에 따라 각 상이 순번으로 여자하게 되므로, 회전자 위치의 구간을 그림 6(a)와 같이 임의의 상의 턴 온각부터 다음 상의 턴 온각까지 구간만 추출하여 해석할 수 있다. 여기서는 해석의 편의를 위하여, B상의 턴 온각부터 C상의 턴 온각까지의 구간만 보여주고 있다.

또한, 이 구간을 SRM의 기하학적 구조에 따라 그림 6(a)와 같이 영역 1~3으로 분할하며, 각 영역에서 DITC를 하기 위한 이상적인 전류와 토크 파형을 그림 6(b)에 보여주고 있다. 그 중, 영역 1은 B상의 턴 온각  $\theta_{on-B}$  부터 B상 인덕턴스의 회전자 위치각에 대한 변화율이 급격하게 변화하는 위치  $\theta_{1-B}$ 까지이고, 영역 2는  $\theta_{1-B}$ 부터 그전 상인 A상의 정렬위치  $\theta_{2-B}$ 까지이다. 이 구간 A상과 B상의 인덕턴스의 변화율이 모두 작으며, 양의 값이다. 영역 3은  $\theta_{2-B}$ 부터 다음 상인 C상의 턴 온각  $\theta_{on-C}$ 까지이다.



(a) 상 인덕턴스 프로파일 (b) 이상적인 전류와 토크  
**<그림 6> SRM의 DITC를 위한 각 상별 이상적인 전류와 토크**

SRM의 구동회로가 비대칭 브릿지 컨버터회로일 경우, 각 상은 세 개의 스위칭 상태를 갖고 있으므로, SRM의 임의의 회전자 위치각에서의 스위칭 상태는 모두 9개의 스위칭 상태가 존재하게 된다. 그림 6(b)의 각 상별 이상적인 전류와 토크파형을 토대로, 스위칭 손실을 줄이도록 하는 추가 조건에 의하여 다음의 그림 7과 같은 지령토크와 출력토크의 비교값을 입력으로 하는 DITC 제어규칙을 얻을 수 있다.



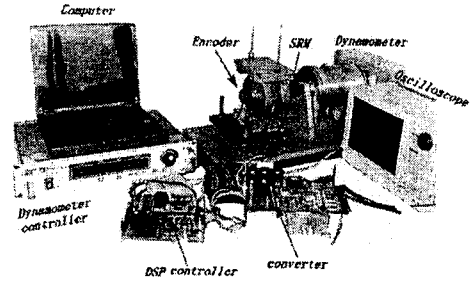
(a) 영역 1 (b) 영역 2 (c) 영역 3  
**<그림 7> 각 영역별 상 스위칭 상태 천이도**

### 4. 실험 결과 및 고찰

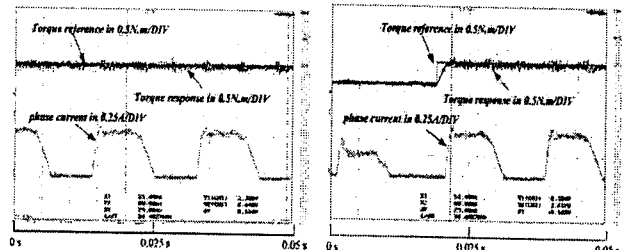
그림 8에 제안한 직접 순시 토크 제어 실험시스템을 보여주고 있으며, 실험에서 사용한 SRM은 200[W], 3상, 12/8극 전동기이다. 실험에서 DSP는 T.I사의 TMS320F2812-150[MHz]를 사용하였으며, 제어 샘플링주기는 50[μs]로 설정하였다. 그리고 부하장치는 부하토크의 크기가 조절 가능한 다이나모미터를 사용하였다.

그림 9에 DITC 시스템의 실험 결과를 보인다. 그림 9의 (a)와 (b)는 각각 0.7[N.m]의 정토크 지령과 0.2~0.7[N.m]의 스텝토크 지령하에서의 지령 토크, 출력토크, A상 전류 파형을 보인다. 실험결과로부터 양호한 순시 토크제어가 이루어짐을 알 수 있다.

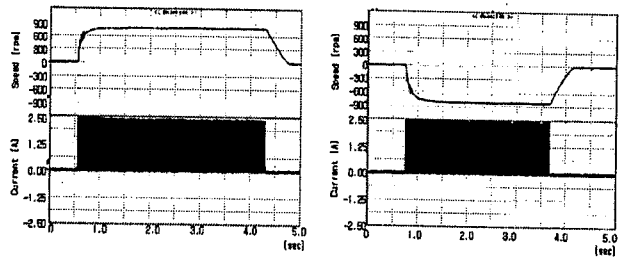
그림 10에 호이스트 시스템의 스무딩 운전 실험결과를 보인다. 그림 10의



**<그림 8> DITC 실험 장치**



(a) 정토크 지령 (0.7[N.m]) (b) 스텝 토크 지령 (0.2~0.7[N.m])  
**<그림 9> DITC 시스템의 실험 결과**



(a) 수직 상승 (b) 수직 하강  
**<그림 10> 호이스트 시스템의 스무딩 운전 실험 결과**

(a)와 (b)는 화물을 수직으로 상승 및 하강할 경우, 정속도 지령 하에서 기동, 운전, 정지과정을 포함한 실험결과를 보인다. 실험결과로부터 화물을 수직으로 상승 및 하강할 경우, 속도가 스무딩하게 변화함을 보이므로, 화물의 파손 및 충격이 크게 완화될 것이라고 기대된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 유도전동기에 비해 효율이 높고, 우수한 견인특성을 갖는 SRM을 구동용 전동기로 사용한 호이스트 시스템에서 화물을 수직으로 권상할 경우, 화물의 파손 및 충격을 완화하기 위한 대책으로 스무딩 운전을 실현할 수 있는 시퀀스를 제시하고, 이를 위한 DITC 기법을 제안하였다. 제안된 DITC 기법은 지령 토크와 출력 토크의 비교값을 입력으로 하는 히스테리시스 제어방식을 사용하여 순시 출력 토크를 제어한다. 또한, 제안된 DITC 기법은 부하토크와 운전속도에 따른 스위칭 턴 온 각의 설정만 요구하는 특징이 있다. 한편, 제안된 DITC 기법은 시뮬레이션과 실제실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력연구원(과제번호: R2005-B-109)주관으로 수행된 과제임.

### [참고 문헌]

- [1] 라병훈, 이종률, 이현우, "삼상 양방향 교류 전압 제어기를 이용한 호이스트용 통합 드라이브 시스템에 관한 연구", 경남대학교 공학기술연구소 연구논문집 제20권, pp. 117-129, 2002
- [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
- [4] 이진국, 이동희, 안진우, "직접 순시 토크 제어에 의한 SRM 토크 리플 억제", 2006년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템분회 춘계학술대회 논문집, pp. 87-90, 2006
- [5] 안진우, "스위치 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, pp. 1-454, 2004.