한국마린엔지니어링학회지 제31권, 제4호, pp. 433~440, 2007. 5 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

토크분배함수를 이용한 SRM 윈치 시스템의 운전특성 개선

안 영 주†

(원고접수일 : 2007년 2월 20일, 심사완료일 : 2007년 4월 1일)

Driving Characteristics Improvement of SRM Winch System using Torque Sharing Function

Young-Joo An†

Abstract : In this paper a new dynamoelectric winch system is introduced which is widely applied in shipping, building, architecture and so on. Generally in the winch system the squirrel cage induction motor is used as prime mover and line voltage is directly applied to the induction motor during operation. So it is difficult to obtain the smoothing revolution, because of variation of the weight of cargo and system operating method. Based on above reasons, the switched reluctance motor (SRM) is proposed to replace the induction motor because of more reliable mechanical structure, better traction characteristic and higher efficiency compared to induction motor. And in order to solve smoothing revolution problem, instantaneous torque control method based on torque sharing function (TSF) is used. Finally the validity of the proposed method is verified through the simulation and experimental results.

Key words : Winch system(윈치시스템), Switched reluctance motor(스위치드 릴럭턴스 전동기), Torque sharing function(토크분배함수), Smoothing revolution(스무딩운전), Instantaneous torque control(순시토크제어)

1. 서 론

최근 현대 산업의 형태가 복잡해지고 제품이 다양하게 개발됨에 따라 이들 제품을 취급하기 위한 윈치 시스템이 선박, 토목, 부두, 건축, 공사장 등 각 분야에 걸쳐 광범위하게 사용되고 있으며, 그 기능 또한 단순 권상에서 보다 다양한 기능이 요구되고 있다.

윈치 시스템은 원동기의 형태에 따라 일반적으로 유압식과 전동식으로 분류된다[1]. 그 중, 유압식은 무단계 속도제어 및 스무딩 운전이 가능하지만, 가격이 비싸고 소음이 크다. 반면, 전동식은 유압식에 비해 가격이 저렴하고 효율이 높아 현재 가장 많이 사용되지만, 정격전압을 직접 전동기에 인가하는 전전압 기동방법을 사용하고 있으므로, 하중에 따라 권상 특성이 상이하게 나타나고, 스무딩 운전이 어려운 단점을 가지고 있다. 이를 극복하기 위하여 인버터를 장착한 전동식 윈치 시스템이 존재하지

† 교신저자(부경대학교 전기제어공학부) E-mail : anyj@pknu.ac.kr, Tel : 051)620-1638

만, 가격이 높아지고, 제어알고리즘이 복잡하다.

유도전동기를 대체할 구동용 전동기로는 다양한 형태의 전동기가 적용될 수 있으나, 직류전동기의 경우 가격이 비싸고, 정류자 및 브러시의 마모로 인한 유지 보수성이 나쁘며, BLDC 또는 영구자석 교류전동기의 경우 전동기 자체의 제작에 대한 경제성이 낮고, 영구자석의 사용으로 인하여 충격이나 주변의 환경적인 특성에 영향을 받는 단점이 있다. 반면, SRM(Switched Reluctance Motor: 이하 SRM)은 펄스형 여자전원에 의해 구동되는 전자기적인 구조를 갖는 전동기로서, 기계적인 구조가 매우 단순하며, 견고하여 경제성이 높다. 특히, 견인특성이 우수하며, 내환경성과 내구성이 상대적으로 우수하고, 유도전동기에 비하여 효율이 높아 전동식 윈치 시스템의 구동용 전동기에 매우 적합할 것으로 사료된다. 그러나 SRM의 출력 토크 발생 원리상 순시 토크 맥동이 크므로, 이를 적용한 윈치 시스템의 스무딩 운전을 위한 제어알고리즘이 필요하다[2]-[4].

따라서 본 논문에서는 먼저 윈치 시스템의 기동과 정지 시의 스무딩 운전을 위한 시퀀스를 제시하고, 다음으로 SRM을 원동기로 사용하는 전동식 윈치 시스템에서 지령토크를 추종하도록 토크 분배함수 및 순시 토크 제어를 적용한 스무딩 운전방법을 제시한다. 또한 이를 다양한 수치시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성을 입증한다.

2. 토크분배함수를 이용한 SRM의 윈치 시스템

2.1 전동식 윈치 시스템의 스무딩 운전

전동식 윈치 시스템을 활용하는 현장에서 작업자는 화물의 상승과 하강용 버턴 조작만으로 화물을 들어 올리거나 내린다. 기존의 전동식 윈치 시스템은 대부분 구동용 전동기로 산업용 유도전동기를 사용하며, 작업자의 상승, 하강, 정지 버턴의 조작에 따라 유도전동기에 전원을 인가 또는 차단하며, 전원 상 시퀀스 절환으로 상승과 하강 동작을 수행한다. 이러한 윈치 시스템은 경제성은 좋으나, 급격한 기동과 정지로 인해 시스템의 기계적인 충격은 물론이고 화물의 파손 및 화물에 미치는 충격을 피하기 어렵다. 따라서 고성능이 필요한 윈치 시스템에서는 화물의 하중 변화나 작업자의 조작과는 별도로 항상 스무딩 운전을 해야 할 필요성이 요구된다.

스무딩 운전은 전동기 기동과 정지 및 일시 정지 후 재기동할 때 필요하며, 그림 1은 그때의 조작신호와 해당 토크 및 속도지령을 나타낸다. 그림 2는 그림 1의 토크지령과 속도지령을 얻기 위한 SRM 구동시스템의 제어 블록도이다.

상승 또는 하강 지령에 의해 기동할 때, 먼저 전기 브레이크를 작동시켜 기계 브레이크를 해제한 후에도 여전히 정지 상태에 머물도록 하고, 다음으로 지령버턴 신호에 해당하는 토크 지령 T_{in}과 속도제한 지령 ω_{rm_in}을 만들고, 이 두 개의 지령값과 현재 토크 T_{tot}와 속도 ω_{rm}을 이용하여 현재값에서 S자 모양으로 지령값에 추종하는 토크지령 T_{out1}과 속도지령 ω_{rm_ref} 를 생성한다. 또한 속도지령을 PI속도제어기의 입력신호로 하여 별도의 토크지령 T_{out2}를 얻으며, 얻어진 두 토크지령을 비교하여, 그 중, 작은 값을 선택해 SRM 구동시스템의 토크입력 T_{ref}로 사용한다.

정지 시는 기동 시의 역과정으로서 토크지령을 낮추어 속도를 0으로 도달하게 한다. 그리고 전동기가 정지됨과 동시에 전기 브레이크, 기계 브레이크가 순차적으로 동작하여 시스템을 정지 상태에 머물게 한다.

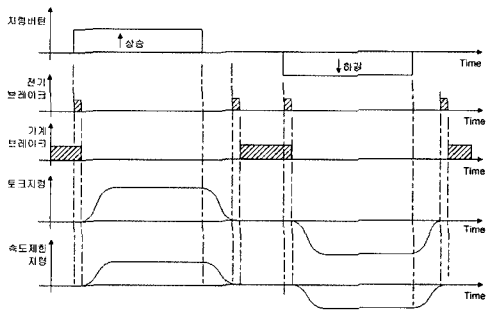
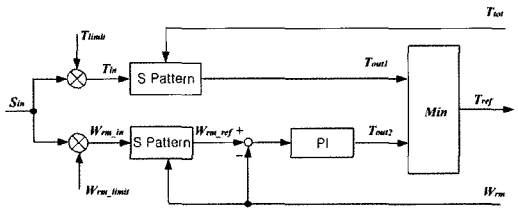


Fig. 1 Sequence for smoothing revolution of winch system at start and stop



(a) Smoothing revolution block diagram

Up	Stop	Down	S_{in}
on	off	off	1
off	on	off	0
off	off	on	-1

(b) Signal input with input button

Fig. 2 Implement of smoothing revolution

화물 권상 도중에, 상승 및 하강 버턴을 일시적으로 오프시켰다가 다시 온시키더라도 같은 원리로 전동기를 다시 기동시킬 수 있다.

그림 2에서 S자 패턴은 임계감쇠응답을 갖는 2차계를 이용하였으며, 필요한 정정시간으로 이 패턴의 파라미터들을 선정하였다.

2.2 토크분배함수를 이용한 SRM의 순시 토크제어

원치 시스템의 스무딩 운전 실현에서 SRM의 출력토크 T_{tot}의 입력지령토크 T_{ref}에 대한 추종성능은 전체 시스템의 성능과 밀접한 관계가 있다. 이를 위해 토크분배함수를 이용한 SRM의 순시 토크제어를 사용하였으며[5],[6], 그때의 SRM 구동시스템 블록도를 그림 4에 나타낸다. 이 순시 토크제어 시스템은 크게 토크 분배함수부, 출력토크 연산부, 히스테리시스 제어기, 스위칭 테이블, 컨버터, SRM 및 엔코더로 구성되어 있다.

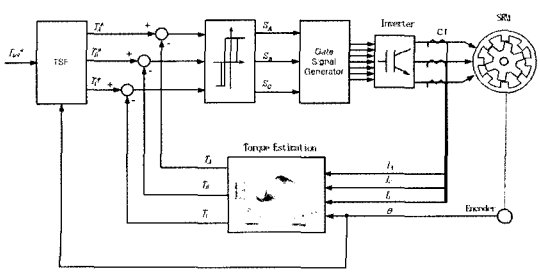


Fig. 3 Block diagram of SRM drive system

그림 3의 3상 SRM의 구동시스템에서 전력구동회로는 상당 두 개의 스위치와 다이오드를 가지는 비대칭 브리지 컨버터회로를 사용하였으며, 그림 4에 회로를 나타낸다. 이 컨버터는 제어의 다양성이 뛰어나고, 각 상의 제어가 독립적이며, 상당 두 개 스위치의 온, 오프 상태에 따라 그림 5와 같이 1, 0 및 -1 등 3개의 상태를 가진다.

그 중, 상태 1은 두 스위치가 모두 온되어, 양의 직류링크전압의 상 권선에 인가되는 상태이다. 전류확립구간에 이 상태로 연결되어 있을 시, 필요한 상전류를 신속하게 생성할 수 있고, 토크발생구간에서 이 상태로 연결되어 있을 시, 정토크를 출력하게 된다.

상태 0은 두 개의 스위치 중 하나는 오프, 다른 하나는 온되는 상태로서, 상전류가 한 개의 스위치와 다이오드를 거쳐 순환한다. 전류확립구간에서 이 상태로 연결되어 있을 시, 전류상승이 멈추게 되어, 지나치게 큰 전류확립을 면하게 하고, 토크발생구간에서 이 상태로 연결되어 있을 시, 상전류가 감소하므로, 현재 값보다 작은 정토크를 출력할 수 있다.

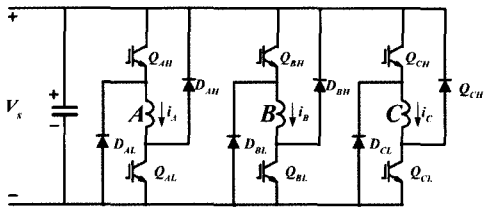


Fig. 4 Asymmetric bridge converter circuit

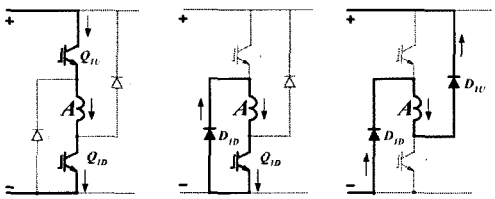
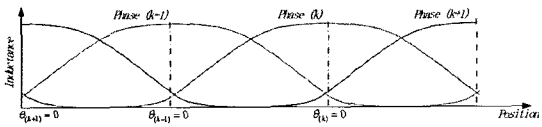


Fig. 5 Phase switching states

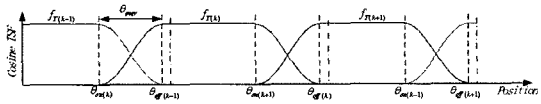
상태 -1은 두 스위치가 모두 오프되어, 상전류가 존재할 경우, 두 다이오드를 SRM의 잔류 자계에너지를 전원측으로 회수하고, 상전류가 영으로 감소하면 다이오드에 의해 상권선과 전원이 차단된

상태로 된다.

그림 3의 SRM의 구동시스템에서 전체 토크지령이 주어지면, 토크 분배함수는 현 위치에서 각 상이 필요한 토크지령을 구하는 함수이며, 일반적으로 미리 계산 또는 측정에 의해 결정된다. SRM의 순시토크 제어시스템에서 큰 토크맥동은 주로 한 상에서 다른 상으로 토크 발생이 전환되는 과정, 즉 두 상이 동시에 도통하는 전류구간에서 발생한다. 따라서 이 구간에서 전체 토크지령을 얻는 데는 이전 상과 다음 상의 토크지령 변화추세에 따라 많은 토크 분배함수가 존재 가능하며, 대표적인 것으로는 선형함수와 정현파 함수가 있다. 본 연구에서는 SRM의 전류 구간에 토크 발생 특성과 유사한 그림 6과 같은 정현파 모양의 토크분배함수를 적용한다.



(a) Phase inductance profile



(b) Cosine torque sharing function

Fig. 6 Representative torque sharing function

효과적인 구동토크를 얻기 위해서는 회전자 위치에 따라 각 상이 순차적으로 여자되어야 하므로, 한 상 운전구간과 두 상 운전구간이 교번적으로 나타난다. 이 관계를 수학적으로 모델링하면 표 1과 같다.

Table 1 Mathematical model

(k-1)상과 k상 두상 운전구간 $\theta_{on(k)}\sim\theta_{off(k-1)}$	k상 한상 운전구간 $\theta_{off(k-1)}\sim\theta_{on(k+1)}$
$T_{(k)}^{*}=\frac{1}{2}\left[1-\cos\left(\frac{\theta_{(k)}-\theta_{on(k)}}{\theta_{over}}\pi\right)\right]T_{tot}$ $T_{(k-1)}^{*}=T_{tot}^{*}-T_{(k)}^{*}$ $T_{(k+1)}^{*}=0$	$T_{(k)}^{*}=T_{tot}^{*}$ $T_{(k-1)}^{*}=0$ $T_{(k+1)}^{*}=0$

식에서, 기호 $(k-1)$, (k), $(k+1)$은 상, on, off는 해당 상의 지령토크가 발생 및 소멸되는 시작점, 첨자 tot는 전체 값, 위 첨자기호 *는 지령값을 각각 나타낸다. 한편, $\theta_{over}=\theta_{off(k-1)}-\theta_{on(k)}$이며, 두 상 운전구간을 나타낸다.

본 연구에서는 각 상의 출력토크가 토크 분배함수로부터 얻어지는 토크 지령을 추종하도록 그림 7과 같이 히스테리시스 제어기를 사용한 직접 토크 제어를 행한다.

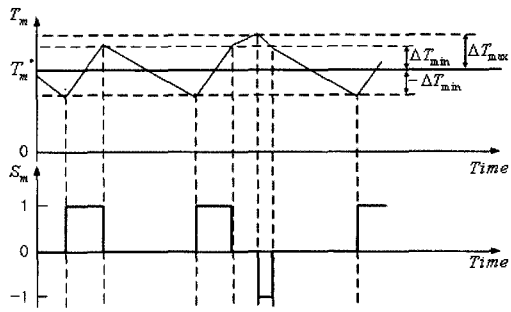


Fig. 7 Hysteresis control of phase torque

전동기 토크는 회전자 위치에 따른 코에너지의 변화율로서 표현될 수 있으며, 다음 식 (1)과 같다.

$$T(i,\theta)=\frac{\partial W_c}{\partial\theta}=\frac{\partial}{\partial\theta}\int_0^i\psi di \qquad (1)$$

또한, 전동기 회전자의 임의의 위치에서 얻어지는 순시 출력토크는 전동기 특성상 비선형적이기 때문에 출력 토크와 회전자 위치, 상전류의 관계를 나타낸 그림 8을 사용한 룩업테이블로부터 구한다.

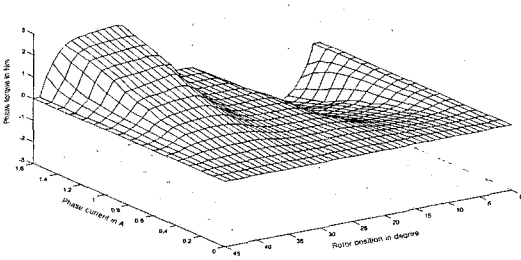


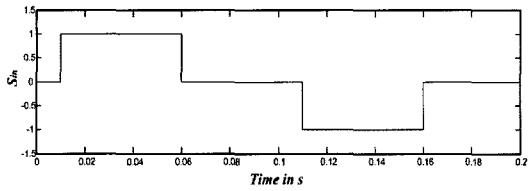
Fig. 8 Torque versus phase current and rotor position

3. 수치 시뮬레이션 및 실험 결과

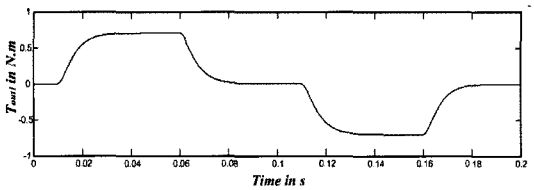
3.1 수치 시뮬레이션 및 고찰

3.1.1 스무딩 운전을 위한 토크 및 속도지령

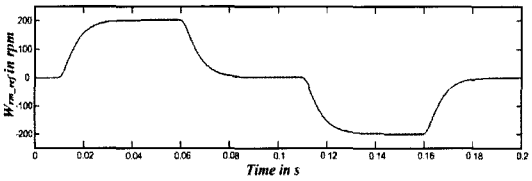
그림 9는 윈치 시스템의 스무딩 운전을 위한 입력버턴의 조작에 따른 토크와 속도제한 지령을 보여주고 있다. 운전지령은 상승→정지→하강→정지의 순서로 하였으며, 각각 0.01[s], 0.06[s], 0.11[s] 및 0.16[s]에 발생한다. S자 패턴을 실현하는 2차계의 정정시간은 25[ms]로 설정하였다.



(a) Input given signal waveform



(b) Torque reference in S pattern for smoothing revolution



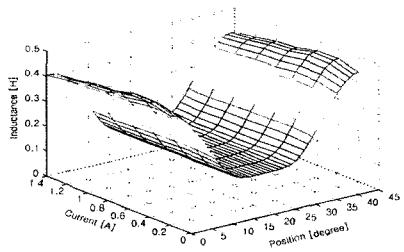
(c) Speed reference in S pattern for smoothing revolution

Fig. 9 Torque and speed reference for smoothing revolution

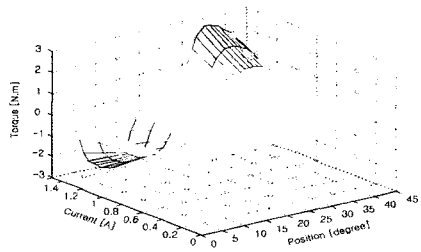
그림으로부터 스텝형태의 운전지령에 대해 SRM 구동시스템의 스무딩 운전을 위한 S자 모양의 지령토크와 지령속도가 얻어지는 것을 알 수 있다.

3.1.2 토크분배함수를 이용한 SRM의 순시 토크 제어의 시뮬레이션

시뮬레이션과 실험에서 사용한 3상 SRM은 정격출력이 200[W]이고, 극수가 12/8이다. 인덕턴스와 출력토크의 프로파일은 그림 10에 나타낸다.



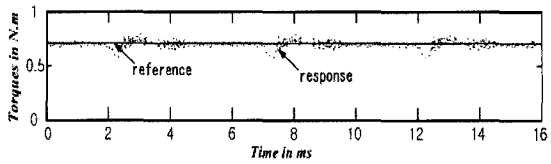
(a) Inductance profile



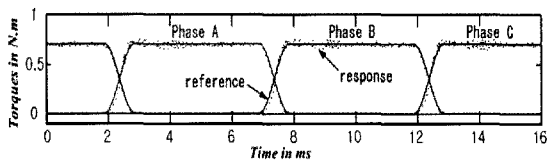
(b) Torque profile

Fig. 10 Inductance and torque profile of 12/8 SRM

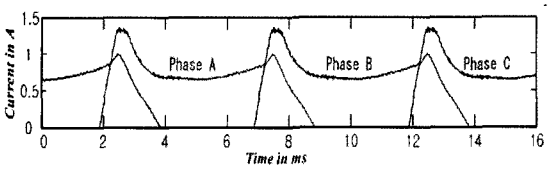
그림 11은 500[rpm] 속도에서 정격 0.7[Nm]의 토크지령을 주었을 때의 전체토크와 각 상별 토크, 전류 및 전압 파형에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림으로부터 SRM의 출력토크는 실시간으로 지령토크에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.



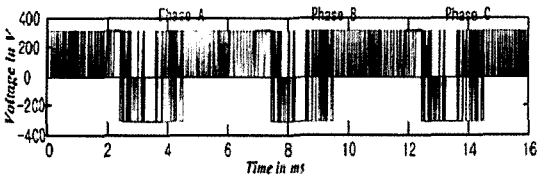
(a) Torque reference and response



(b) Phase torques reference and response

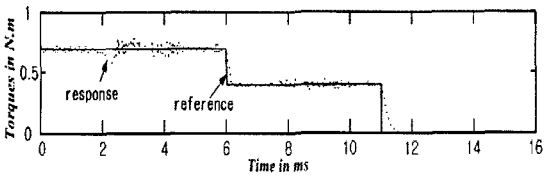


(c) Phase current

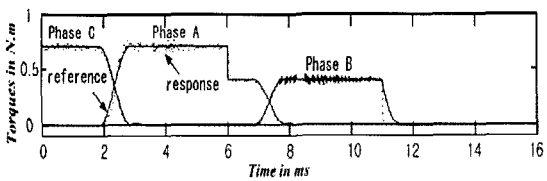


(d) Phase voltage

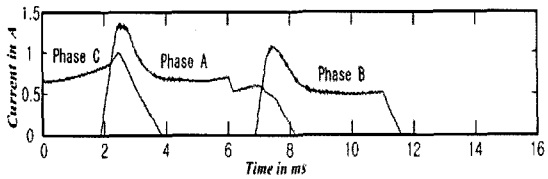
Fig. 11 Simulation results of instantaneous torque control under the constant torque command



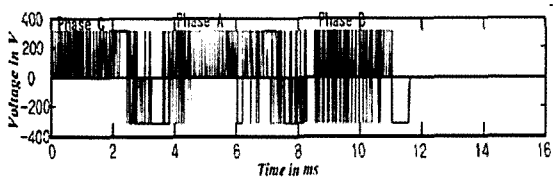
(a) Torque reference and response



(b) Phase torques reference and response



(c) Phase current



(d) Phase voltage

Fig. 12 Simulation results of instantaneous torque control under the variable torque command

그림 12는 500[rpm] 속도에서 0.7→0.4→0[N.m]의 토크지령을 주었을 때의 전체 토크와 각 상별 토크, 전류 및 전압 파형에 대한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과로부터 스텝형 지령 토크 변동에 대해서도 SRM의 출력토크는 실시간으로 지령토크를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

3.2 실험 및 고찰

그림 13은 순시 토크제어 실험을 위한 시스템을 보여주고 있다.

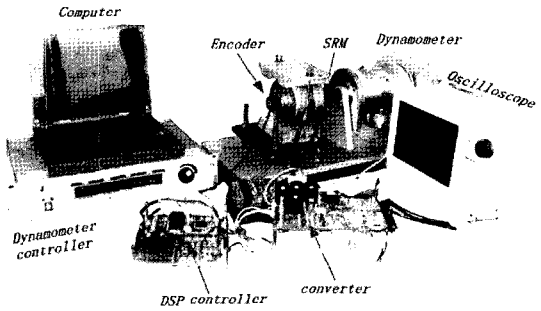
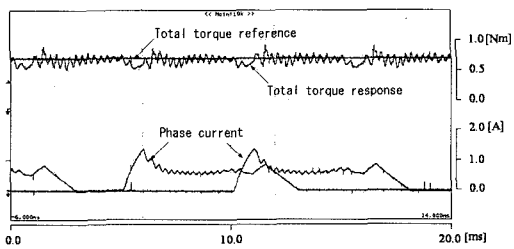


Fig. 13 Instantaneous torque control experimental system

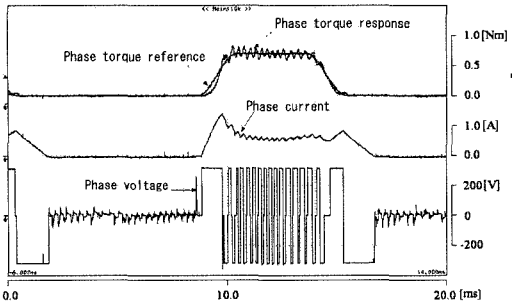
실험에 사용한 장치는 극수가 12/8인 SRM이고, 제어기는 T.I사의 TMS320F2812-150[㎒]를 사용하였으며, 부하장치는 부하토크 조절이 가능한 다이나모미터를 사용하였다.

3.2.1 SRM의 순시 토크제어 실험

그림 14는 정격토크 0.7[N.m], 500[rpm]의 정속도 운전 실험결과이다. 상이 전환되는 구간에



(a) Total torque reference and response, phase currents



(b) Phase torque reference and response, phase current and phase voltage

Fig. 14 Experimental results of instantaneous torque control

서는 각 상의 토크지령으로 정현파 토크 분배함수를 적용한 것이다. 실험결과로부터 SRM의 출력토크는 지령토크에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 입력버턴에 의한 윈치 시스템의 실험결과

그림 15는 실험에 사용된 SRM을 적용한 전동식 윈치 시스템의 사진이다. 브레이크는 48[V]의 직류전압 인가 시 해제된다.

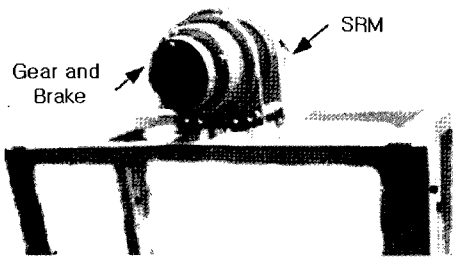
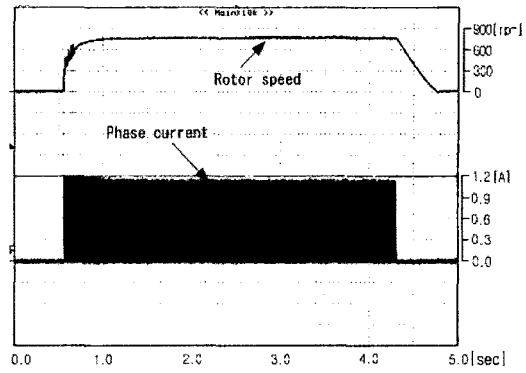
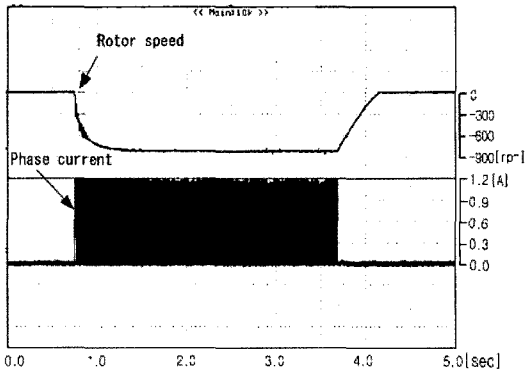


Fig. 15 Configuration of SRM winch system

그림 16은 윈치 시스템의 스무딩 운전 시 전동기 속도 및 상전류를 측정한 결과이다. (a)와 (b)는 각각 화물이 수직으로 상승 또는 하강할 경우, 기동, 운전 및 정지과정을 포함한 것이다. 실험결과로부터 화물을 상승 또는 하강시킬 경우, 속도가 부드럽게 변화되는 것을 알 수 있으며, 이로부터 기기의 충격, 화물의 파손 및 충격이 크게 완화될 것으로 기대된다.



(a) When move up



(b) When move down

Fig. 16 Experimental results when move up and down

4. 결 론

본 논문은 유도전동기에 비해 효율이 높고, 우수한 견인특성을 갖는 SRM을 구동용 전동기로 사용한 윈치 시스템의 스무딩 운전 및 이를 구현하기 위한 순시토크 제어법을 제시하였다. 스무딩 운전을 위한 토크, 속도 지령은 스텝 운전지령으로부터 2차 지연계의 S자형 토크 지령으로 변환되고, 이 지령에 따른 전동기 발생 토크는 토크 분배함수를 이용한 순시 토크제어법을 사용하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 제시한 방법의 타당성을 확인하였다. 실험결과로부터 본 시스템의 운전방법을 윈치 시스템에 적용할 경우, 시스템의 기계적인 충격, 화물의 파손 및 충격 등이 감소될 수 있음을 기대할 수 있다.

참고문헌

[1] 일본 DAIDO(大同) 중기제작사 웹페이지, "http://www.urban.ne.jp/home/daido/pdTop.htm".

[2] 안진우, "스위치 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, pp. 1-454, 2004.

[3] 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, pp. 83-88, 1996.

[4] 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, pp. 1232-1242, 2005.

[5] C. Choi, S. Kim, "A New Torque Control Method of a Switched Reluctance Motor Using a Torque-Sharing Function", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 38, no. 5, pp. 3288~3290, 2002.

[6] B. A. Griffin, "High performance winch and synthetic rope systems for workboats, tug boats, and commercial marine applica- tions", OCEANS '04. MTS/IEEE TECHNO- OCEAN'04, Vol. 4, pp. 1900 - 1903, 2004.

저 자 소 개

안영주(安永珠)

1957년생, 1986년 부산공업대학교 전기공학과 졸업, 1995년 부산대학교 전기공학과(공학박사), 2007년 현재 부경대학교 공과대학 전기·제어공학부 부교수