

양수발전소 동기전동기의 기동제어 알고리즘에 관한 연구

강승우*, 박신현*, 김장목*, 임익현**, 류호선**, 김진성**

*부산대학교 전기공학과, **전력연구원

A study developing control algorithm for Pumped-Storage Synchronous motor drive

S.W. Kang*, S.H. Park*, J.M. Kim*, I.H. Lim**, H.S. Ryu**, and J.S. Kim**

*Pusan National University, **KEPRI

ABSTRACT

The large synchronous motor for the pumped-storage plant(or SFC : Static Frequency Converter) has to be brought up to 100% rated speed and synchronized with the AC power network. Starting the motor from rest is achieved by switching current into the stator winding so that interaction between this stator current and the rotor flux will cause the correct direction of torque to be developed so that the motor turns in the required direction. Starting ranges of the synchronous motor are divided into three regions. The first region is at standstill, the second that is called by the forced commutation is from standstill to 5-8% of rated speed, and the third, which is called by the natural commutation, is from 5-8% of rated speed to 100% rated speed. So this paper describes three regions of the control techniques of the pumped-storage synchronous motor drive.

1. 서론

부하 轉流형 인버터(Load Commutated Inverter : LCI)를 적용한 동기전동기는 양수 발전, 가스터빈 구동, 팬 구동 등 여러 분야에 적용되고 있다^[1]. 그림 1에서 컨버터와 직류단 리액터는 인버터측에 단방향 전류를 흘려주며 인버터는 직류단 전류를 동기전동기의 3상에 흘려준다. 인버터의 자연 전류(Natural Commutation)영역은 동기전동기의 역기전력의 크기에 좌우되며, 부하 轉流형 인버터는 복잡한 전류(Commutation)회로가 필요하지 않다. 또한 부가적인 회로없이 회생 제동이 가능하다^[2]. 이러한 부하 轉流형 인버터 시스템에 관한 연구는 선진외국에서는 1971년 이후로 지속적인 연구되고 있다^[3]. 그러나 국내에서는 거의 연구기반이 없으며, 수입에 의존하

고 있다.

본 논문에서는 동기전동기 제어를 위하여 부하 轉流형 인버터형 인버터를 이용하여 정지 상태에서부터 정격속도에 도달하는 기동제어 알고리즘을 도출한다.

2. 본론

2.1 부하 轉流형 인버터의 일반적인 회로구성^{[2],[4]}

일반적인 부하 轉流형 인버터 전력회로의 구성은 그림 1과 같다. 제어 정류기와 인버터는 단순한 3상 브릿지 회로이고, 직류 링크단의 전류를 평활하게 하고 전류가 급격히 변화하는 것을 방지하기 위한 큰 용량의 직류 리액터가 직류 링크단에 직렬로 삽입되어 있다. 이 리액터의 작용에 의해 부하측에서 본 테브난 등가 임피던스가 큰 값을 갖기 때문에 일정 전류원으로 가정할 수 있다. 따라서 회로의 동작은 전압이 아닌 전류에 의해 특정지어지는데, 여기서 해석의 편의를 위하여 모든 소자는 이상적이라고 가정한다.

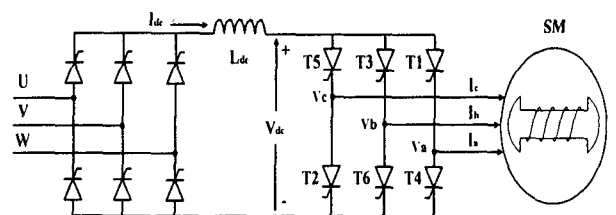


그림 1 부하 轉流형 인버터의 회로구성

Fig. 1 Scheme of load commutated inverter

그림 1과 같은 부하 轉流형 인버터에서 가능한 스위칭 순서(Switching Sequence :SS)와 동기전동기를 부하로 연결했을 때의 전류 파형을 살펴보면 그림 2와 같다.

부하 轉流형 인버터는 항상 직류 링크단의 전류가 흐를 수 있는 경로를 제공하도록 스위치 상태를 결정해야 한다. 따라서 출력전류가 모두 '0'이 되는 상태는 존재하지 않고, 한번에 부하의 2상 전류를 공급하면 각 스위치 소자는 120° 동안 도통되고, 표 1에 나타낸 것과 같은 6개의 다른 스위치 상태를 갖는다.

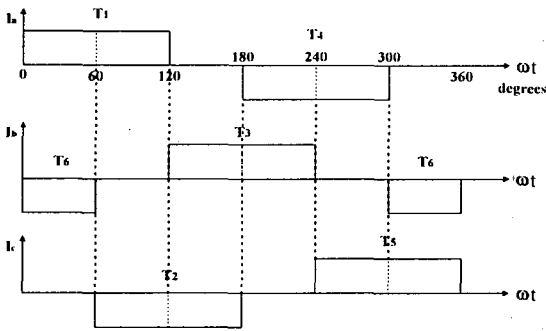


그림 2 이상적인 인버터 출력 전류

Fig. 2 Idealized output current of the inverter

표 1 인버터의 스위칭 순서와 출력전류의 관계
Table 1 Relations of switching sequence and output current

SS	1	2	3	4	5	6
전류 (T ₁ , T ₂)	(T ₁ , T ₂)	(T ₁ , T ₂)	(T ₂ , T ₃)	(T ₃ , T ₄)	(T ₄ , T ₅)	(T ₅ , T ₆)
I _a	I _a	I _a	0	-I _a	-I _a	0
I _b	-I _a	0	I _a	I _a	0	-I _a
I _c	0	-I _a	-I _a	0	I _a	I _a

2.2 부하 轉流형 인버터-동기전동기의 운전 특성 곡선

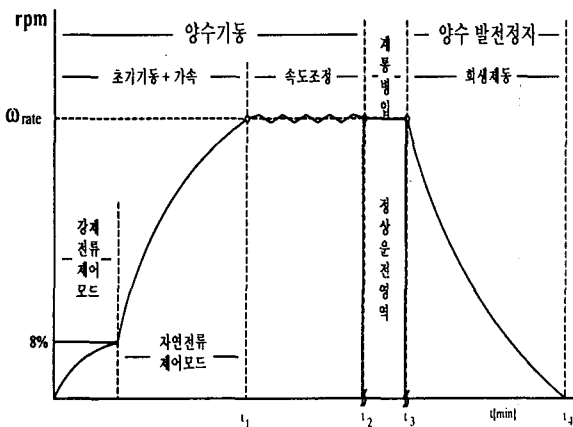


그림 3 부하 轉流형 인버터-동기전동기 운전 특성 곡선
Fig. 3 Characteristic driving curve of Load commutated inverter-Synchronous motor

그림 3은 부하 轉流형 인버터-동기전동기의 특성 곡선을 보여준다^[5]. 양수 기동과 양수 발전정지로 나뉘어지며, 양수 기동시 강제 轉流 제어와 자연 轉流 제어로 나뉘어지며, 속도 조정을 거쳐 제동에 병입된다. 양수 발전 정지 즉 회생 모드에서는 컨버터와 인버터의 역할이 바뀐다.

2.3 강제 전류(Forced commutation)

강제 轉流시 인버터측 사이리스터의 동작은 엔코더 신호를 입력받아 회전자 위치에 상응하는 인버터측 사이리스터를 턴온시킨다. 만약에 그림 4에서 회전자의 위치가 0° 에서 60° 사이라고 가정하면 그림 1에서 인버터측 사이리스터 중에 1,6번을 선택하고 이때 컨버터에서 전류가 직류 링크단으로 흐르면 전류는 사이리스터 1번, a, b 전동기 권선을 지나 사이리스터 6번의 루프로 흐르게 된다. 그림 3에 회전자의 위치에 따른 인버터측 사이리스터의 스위칭을 보여준다. 그림 5에서는 저속에서 인버터측 사이리스터를 오프하기 위하여 직류단 전류를 '0'으로 만든다. 왜냐하면 동기전동기가 정지시에서는 역기전력이 '0'이며, 저속에서는 역기전력이 작으므로 인버터측 사이리스터의 턴 오프를 보장할 수 없으므로 강제 전류(Forced Commutation)를 하여야 한다.

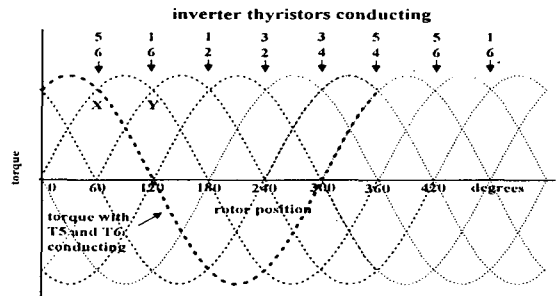


그림 4 저속에서 토크발생

Fig. 4 Principal of the low speed torque production

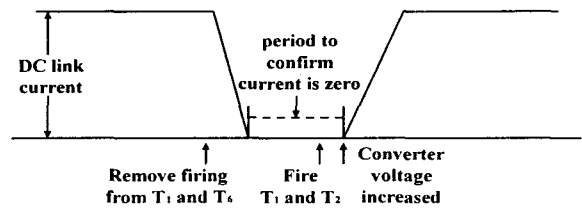


그림 5 저속에서 轉流

Fig. 5 Low speed commutation

그림 6에서는 속도가 증가함에 따라 직류단 전류와 전동기 전류 파형을 보여준다. 속도가 증가함에 따라 전류가 '0'으로 되는 구간이 상대적으로 증가하여 토크 손실이 증가한다. 그러므로 강제 轉流 모드는 정격속도의 5-8%로 전속도의 작은 비율을 차지한다.

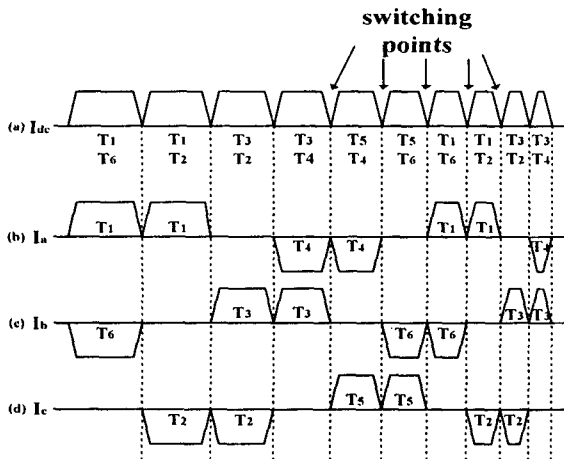


그림 6 저속에서 직류단 전류 및 전동기 전류
Fig. 6 DC link and motor current at low speed

2.3 자연 전류(Natural commutation)

정격속도의 5-8% 이상에서는 전동기의 역기전력이 인버터측 사이리스터를 턴 오프 하기 위해 충분하므로 강제 轉流 모드에서처럼 직류단 전류를 '0'으로 만들어 주지 않는다. 만약 저속과 전류의 고조파의 영향과 손실을 고려하지 않는다고 가정하면, 동기 전동기의 토크 수식은 식 (2)와 같다^[1].

$$T = K \times I_d \times \frac{V}{\omega} \times \cos \phi \quad (2)$$

여기서 T 는 평균 토크, K 는 일정 상수, I_d 는 직류단 평균 전류, V 는 동기전동기의 단자 전압, ω 는 동기전동기의 각속도 ϕ 는 역률이다.

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{V_{dc}}{1.35 \times V_s}\right) \quad (3)$$

토크의 크기는 직류단 전류 I_d 에 의해 결정되고, 토크의 방향은 역률의 부호에 따라 결정된다. 그림 7은 전체 제어 블록도를 나타낸다^[2]. I_d 는 속도 제어기, 전류 제어기에 의해 제어된다. 점호각 α 는 식 (3)에 의해 변화된다.

3. 실험장치의 구성 및 실험 결과 검토

3.1 실험장치의 구성

부하 轉流형 인버터-동기전동기 시스템의 디지털 제어는 TI사의 TMS320VC33을 사용하여 구현하였다. 전류 제어기의 제어주기는 300[μ s] 그리고, 속도 제어 주기는 30[ms]의 샘플링 주기를 갖도록 설정하였다. 그림 8은 전체 하드웨어 블록도를 보여준다. 3상 전원을 입력받아 사이리스터 컨버터에 연결하고, 전압센서에 의해 입력 전원을 센싱하여 DSP 보드의 A/D 컨버터로 입력된다. 디지털 점호 제어를 위해 DSP보드에서 제어각 연산 및 디지털 점호를 제어하고, 컨버터측 사이리스터 게이트를 점호하기 위한 신호를 EPLD에서 생성한다. 사이리스터 인버터측 디지털 점호 제어를 하기 위해서 EPLD로 입력된 엔코더 신호에 DSP보드에서 디지털 점호를 제어한다. 전류 제어기를 위해 직류단 전류를 센싱하여 DSP보드의 A/D 컨버터로 입력된다. 회전자에 여자 전류를 투입하기 위한 여자기의 디지털 점호 제어를 위해 여자기 출력 전류를 A/D 컨버터로 입력받아 전류 제어기에 의해 제어한다.

3.2 실험 결과

그림 9에서 (a)는 속도가 0-1800[rpm]에 대한 스텝 응답을 보여준다. 그리고 (b), (c)는 직류단 전류, 전동기 A상 전류를 보여준다.

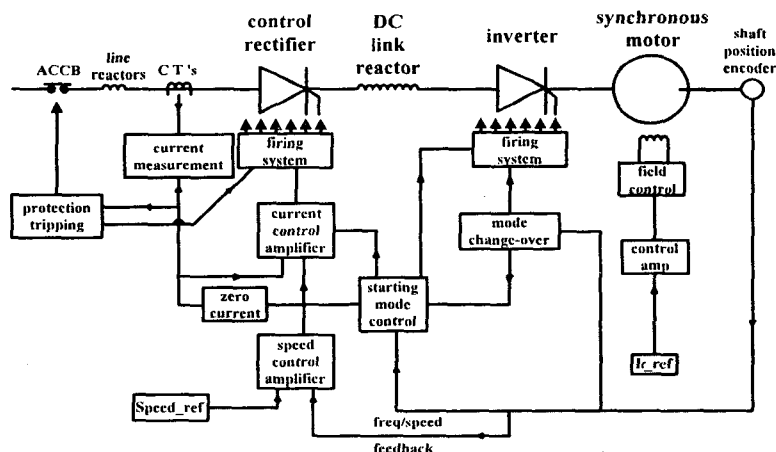


그림 7 부하 轉流형 인버터-동기전동기 제어 블록도
Fig. 7 Load commutated inverter-synchronous motor control blo

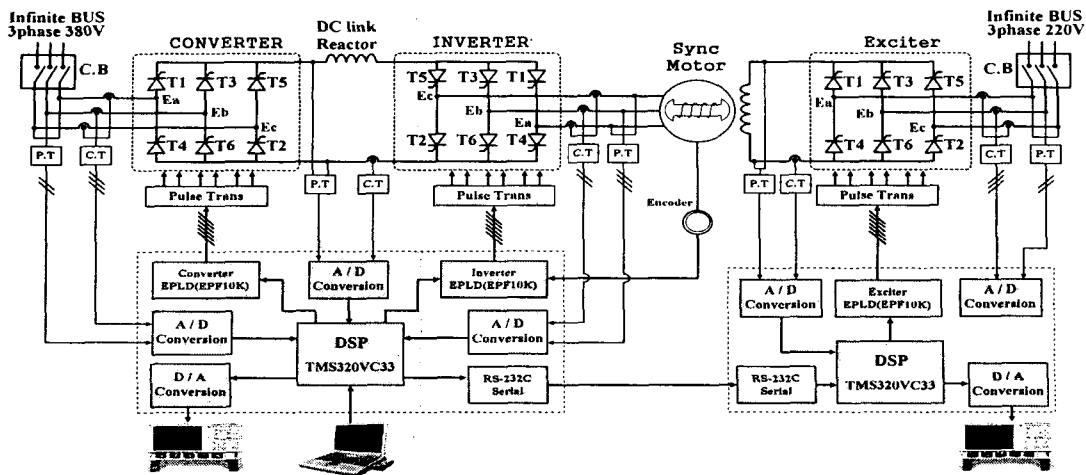


그림 8 부하 轉流형 인버터-동기전동기 전체 구동 블록도

Fig. 8 Overall drive block diagram of load commutated inverter-synchronous motor

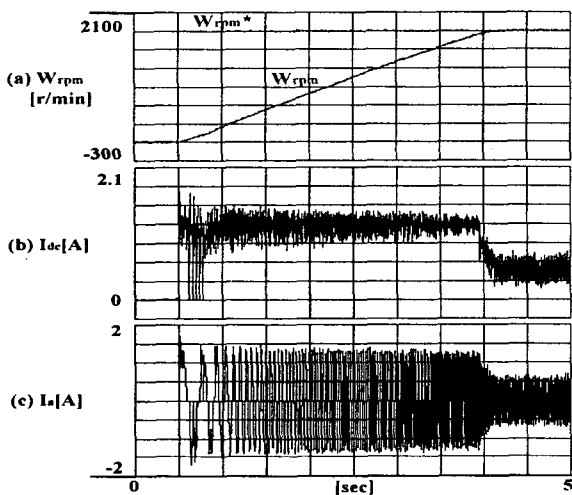


그림 9 LCCSI 시스템의 가속특성

(a) 전동기 속도 (b) 직류링크전류 (c) 전동기 A상 전류
Fig. 9 Acceleration characteristic of LCCSI system
(a) Speed (b) DC-link current (c) motor A-phase current

이 그림에서 알 수 있는 것은 0.5-0.8초 사이는 강제 轉流 구간으로 그림 (b)의 직류단 전류가 0-1.2[A]로 변하는 것을 알 수 있다. 4초 이후에는 동기전동기가 정격 속도에 도달하는 것을 보여준다. 가속 구간이 아니므로 인가되는 전류 크기는 줄어들음을 알 수 있다.

그림 10은 기동 부분을 확대하였다. 컨버터에서 출력되는 전류는 한주기 즉 16.67[msec]동안 6개의 리플 성분을 포함한다. 최초 기동시 직류단 전류가 65[msec]동안 리플은 23개가 존재한다. 그러므로 60[Hz]의 정류 맥동에 의한 전류 맥동임을 실험 결과로부터 알 수 있다. 그리고 그 이후의 시점은 동기전동기의 속도가 점차적으로

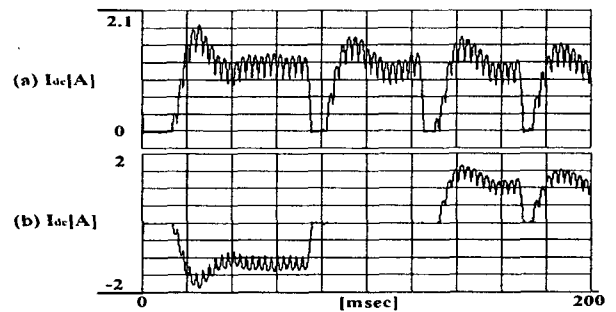


그림 10 강제 轉流

(a) 직류링크전류 (b) 전동기 A상 전류

Fig. 10 Forced commutation
(a) DC-link current (b) motor A-phase current

로 증가되어 직류단 전류가 흐르는 구간이 점차로 짧아짐을 알 수 있다.

그림 11은 강제 轉流 모드에서 자연 轉流 모드로 전환 시 실험 파형을 보여준다. 강제 轉流에서는 전류가 '0'이 되는 구간이 존재하지만, 자연 轉流에서는 직류단 전류가 연속적으로 흐르는 것을 볼 수 있다. 맥동 성분이 속도가 증가함에 따라서 점차적으로 줄어들고 있음을 알 수 있다.

그림 12는 가속시 1750[rpm]에서 실험 과정을 보여준다. 동기전동기의 운전 주파수가 약 58[Hz]이므로 동기전동기 A상 입력 전류에 리플 성분이 줄어들음을 알 수 있다.

그림 13은 1800[rpm]에 도달후 정상 상태의 실험 파형을 보여준다. 정상 상태에 도달한 후에는 가속구간에서의 전류의 크기보다는 감소함을 실험적으로 알 수 있다.

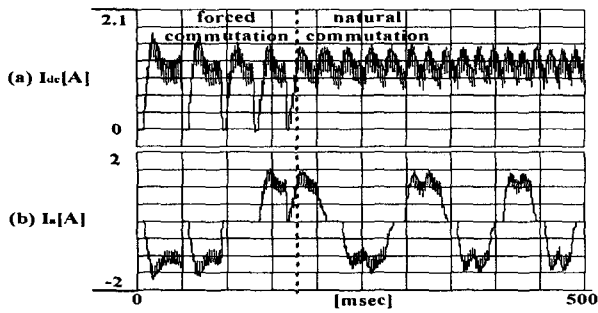


그림 11 모드 변환 파형
 (a) 직류링크전류 (b) 전동기 A상 전류
 Fig. 11 Mode change waveforms
 (a) DC-link current (b) motor A-phase current

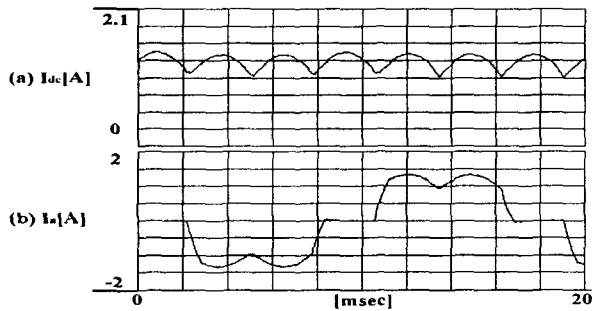


그림 12 1750[rpm]에서 자연 轉流
 (a) 직류링크전류 (b) 전동기 A상 전류
 Fig. 12 Natural commutation at 1750[rpm]
 (a) DC-link current (b) motor A-phase current

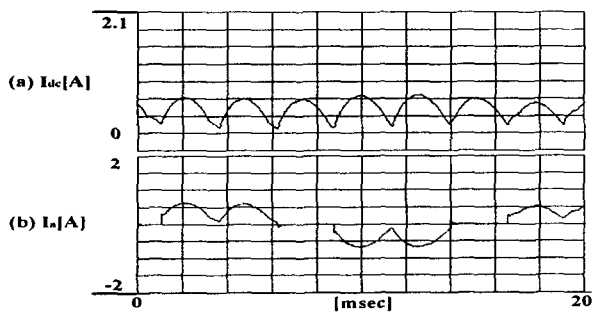


그림 13 1800[rpm] 도달후 정상상태에서 전류 파형
 (a) 직류링크전류 (b) 전동기 A상 전류
 Fig. 13 Current waveforms at 1800[rpm]
 (a) DC-link current (b) motor A-phase current

4. 결 론

본 논문에서는 대용량 동기 전동기의 기동 알고리즘을 구현했다. 강제 轉流시 부가적인 회로가 없이 컨버터의

점호각 제어에 의해 회전자 위치를 따라 인버터측 사 이리스터를 턴 오프할 수 있음을 보였다. 향후에는 정격 속도에 도달한 후 계통에 연계하는 방법과 회생 제동 방 법에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Beat Mueller, Thoma Spinanger, Dieter Wallstein, "Static Variable Frequency Starting and Drive System for Large Synchronous Motors", IAS pp. 429-438, 1979.
- [2] David Finney, "Variable frequency AC motor drive systems", Peter Peregrinus Ltd., pp. 202, 1988.
- [3] T.A.Lipo, "Recent progress in the development of solid-state AC motor drives", IEEE Trans. Pow. Elec., vol. 3, no. 2, pp. 105-116, 1998.
- [4] 목형수, "GTO-직류전원을 병용한 부하 轉流식 전류형 인버터에 관한 연구", 서울대학교 공학박사논문, pp. 11-12, 1992.
- [5] 월간자동제어계측, "대용량 동기 발전전동기 회전수 제어", pp. 76-82, 1997. 7.