

대용량 동기 발전 전동기의 회생 제동 제어 알고리즘에 관한 연구

박요집*, 강윤종*, 김장목*, 류호선**, 이주현**, 임익현**

*부산대학교 전기공학과 **한전전력연구원

A Study of regeneration braking control algorithm for Wounded-field Synchronous motor drive

Yo-Jip Park*, Youn-Jong kang*, Jang-Mok Kim*, Ho-Seon Ryu**, Joo-Hyun Lee**, Ik-Hun Lim**

*School of Electrical Engineering, Busan National University, Busan, Korea.

**Korea Electric Power Research Institute.

ABSTRACT

대용량 동기 발전 전동기 운전에는 주로 사이리스터를 이용한 정지형 주파수 변환장치(SFC : static Frequency Converter)시스템이 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 기술적인 언급이 거의 되어있지 않은 회생 제동 시스템의 개선된 제어 알고리즘을 제시하였다. 기술적 언급이 없기 때문에 실제 구동되고 있는 양수 발전소의 실측 파형을 분석하여 알고리즘을 도출하였으며 기존의 회생제동 제어에서 사용되었던 전압센서가 필요 없게 되어 경제적인 절감 효과를 유발하고 또한 제어요소의 간략화로 제어의 강인성을 확보하였다. 그리고 실험을 통하여 실효성 및 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

대용량 동기 발전 전동기는 전동과 발전 기능을 수행할 수 있는 기기이다. 이러한 발전전동기는 초기에 별도의 기동 장치를 갖추어야 한다. 초기 기동을 위한 방법으로는 기동용 전동기 기동법, 기동 권선 기동법, 정지형 주파수 변환 장치(SFC : Static Frequency Converter)기동법 등이 있다. 이중 다른 기동 방법에 비해 SFC를 이용한 기동법의 경우 1대의 SFC시스템으로 여러 대의 동기 발전 전동기에 적용이 가능하다는 장점이 있어 1970년대 후반 이후 SFC 시스템을 이용한 동기 발전 전동기의 기동이 확산되기 시작하였고, 양수 발전소에서 활용되고 있다. 동기 발전 전동기 운전을 위한 SFC시스템은 사이리스터 전력소자를 활용한 부하 전류형 인버터(LCI : Load Commutated Inverter)시스템으로 되어있다. 많은 문헌들에 의해 SFC시스템 운전 알고리즘이 제시되어 있지만 대부분이 기동 운전에 관해 언급되어 있으며 실제

가스터빈, 양수 발전소등과 같은 산업에 적용되고 있는 계통 연계 및 회생 제동에 관한 기술적 언급은 자세히 되어있지 않다.^[1-5]

본 논문에서는 SFC를 활용한 동기 발전 전동기 운전 영역 중 기술적인 언급이 거의 되어있지 않은 회생 제동에 관한 알고리즘을 제시하였다. 정격 속도에서 정지까지의 안정적이고 간략화 된 회생 제동 제어 알고리즘을 제시하였으며 실효성 및 타당성을 실험을 통하여 검증한다.

2. 부하 전류형 인버터의 회로 구성

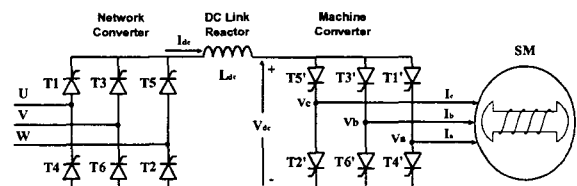


그림 1 부하 전류형 인버터 회로구성
Fig. 1 Scheme of Load commutated inverter

LCI의 전력회로의 구성을 나타내면 그림 1과 같다. 전원측 컨버터와 전동기측 컨버터, 직류단 리액터로 구성된다. 전원측 컨버터의 동작은 일정 주파수 60Hz로 동작을 하며 전동기측 컨버터는 전동기 속도에 상응하는 주파수에서 동작을 한다. 직류단 리액터는 전류 평활 및 급격한 변화를 방지하기 위한 대용량의 직류 리액터가 직류단에 직렬로 삽입되어 있다. 이 리액터의 작용에 의해 부하측에서 본 테브낭 등가 임피던스가 상당히 큰 값을 갖기 때문에 일정 전류원으로 가정할 수 있다. 따라서 회로의 동작은 전압이 아닌 전류에 의해 특징지어진다.^[1-5]

3. 기존의 회생제동 시스템¹

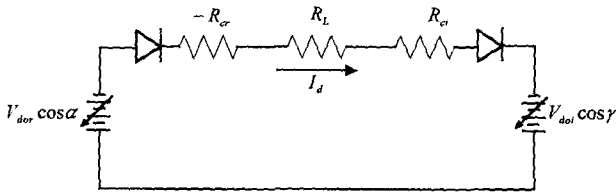


그림 2 부하 전류형 인버터 시스템의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of Load commutated inverter system

그림 2는 부하 전류형 인버터 시스템의 회생 제동 해석을 위한 등가회로이다. 여기서 R_{cr} 전원측 L에 의한 중복각 손실, R_L 직류 링크단 손실, R_{ci} 전동기측 L에 의한 중복각 이득이며 $V_{dc} \cos \alpha$ 는 전원측 컨버터 출력 직류 전압, $V_{dc} \cos \gamma$ 는 전동기측 컨버터 출력 직류 전압이다.

3.1 전동기측 컨버터 제어

전동기측 컨버터는 전동기의 발전 전압을 전원전압으로 동작하는 컨버터로서의 역할을 하게 된다. 단지 직류 링크단에서 바라본 출력 직류 전압이 역이 되는 것이 기동시와 틀리다. 정격 전류 제어를 하며 기동시 전류제어를 그대로 적용시켰다.

3.2 전원측 컨버터 제어

회생 제어시 전원측 컨버터 제어의 목적은 LCI시스템의 전류 흐름이 연속될 수 있도록 하는 것이다. $V_{dc} < V_{dc}$ 이 되도록 전원측 컨버터를 제어하여 전동기측 컨버터로부터의 전류의 흐름이 이루어질 수 있는 조건을 만들게 된다. 회생 제어시 흐르는 정상상태 직류 링크단 전류는 그림 2의 등가회로에 따라 전동기측 컨버터가 최대 전압을 출력한다고 가정하여 출력 전압 $K\omega \cos \gamma = K\omega$ 로 두고 전개하면 식 (1)과 같다.^[7]

$$I_d = \frac{V_{dc} - V_{dc}}{R_{ci} + R_L - R_{cr}} = \frac{K\omega - V_d \cos \alpha}{R_{ci} + R_L - R_{cr}} \quad (1)$$

$$V_d \cos \alpha = K\omega - I_d (R_{ci} + R_L - R_{cr})$$

여기서 R_{ci}, R_L, R_{cr} 는 측정 가능한 값이며 I_d 는 제어하고자 하는 직류 전류 값이다. 전동기측 컨버터의 최대 출력 전압인 $K\omega$ 는 전동기 속도에 비례하는 값이며 또한 계자전류의 값에도 비례한다. 회생제동이 시작되는 시기에 전동기 속도 값은 정격 속도 운전 상태이므로 일정하다. 하지만 계자 전류의 값은 계통연계시 부하의 정도에 따라 다른 상태가 될 수 있다. 계통 분리 후 일정 시간이 지난 후 회생 제동이 이루어진다. 계통 분리 후

회생 제동 시작 전 전동기 단자전압은 순수 전동기의 역기전력이다. 따라서 이때의 전동기 단자전압을 검출하여 회생 제동이 시작되는 시점($t=0$)의 $K\omega_{t=0}$ 값을 알 수 있다.^[7-9] 전동기의 3상 단자전압을 검출하여 2상 동기좌표계로 변환한 q축 전압은 3상 단자 전압의 최대값과 같게 된다. Vqe 전압을 검출하여 $K\omega_{t=0}$ 값을 구하면 식 (2)와 같고 이후의 시간을 $t>0$ 인 시점이라 가정하여 $K\omega_{t>0}$ 값은 전동기 속도에 비례하므로 식 (3)과 같다.^[6-7]

$$K\omega_{t=0} = \frac{V_{qe}}{\sqrt{2}} \times \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \quad (2)$$

$$K\omega_{t>0} = \frac{\omega_{rpm}}{1800} \times K\omega_{t=0} \quad (3)$$

$K\omega$ 값을 검출하여 식 (1)에 의해 원하는 전류 크기의 제어를 보장하면서도 인가할 수 있는 전원측 컨버터 출력 전압의 최대값을 알 수 있게 된다. 그림 3은 LCI-동기전동기 시스템의 회생 제동 제어 전체 블록도를 나타낸다

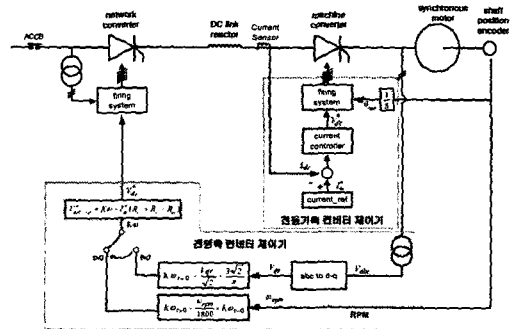


그림 3 기존의 회생 제동 제어 블록도
Fig. 3 Conventional braking control block diagram of regeneration

3.3 저속에서의 불분명한 제어 영역 발생

회생 제동 제어 알고리즘을 확인하면 전원측 컨버터는 전류제어기가 동작을 하게 되어 출력 전압을 제어하는 모드로 제어하며 전동기측 컨버터는 직류단 전류를 제어하는 모드로 동작한다. 초기 동작시 정해지는 $K\omega$ 값은 속도 변화에 줄어들게 되며 에너지 흐름은 전원측으로 흐르게 된다. 그래서 식 (4)와 같은 조건을 만족하면 전원측 컨버터 점호각을 조절하게 되는 것이다. 시간이 지남에 따라 속도가 줄어들게 되고 속도의 감속과 함께 $K\omega$ 값 또한 줄어들게 된다. 그러면 식 (5)와 같은 조건을 만족하는 저속 구간이 존재하게 된다.

$$K\omega > I_d (R_{ci} + R_L - R_{cr}) \quad (4)$$

$$K\omega < I_d (R_{ci} + R_L - R_{cr}) \quad (5)$$

전원측 컨버터의 제어전압값은 음의 값을 가지게 되며

점호각이 기동시에 가지는 $0^\circ \sim 90^\circ$ 사이의 값을 가지게 되며 이는 전원측 컨버터 동작이 에너지를 받는 상태에서 에너지를 내는 기동시의 형태로 바뀌는 식 (6)과 같은 수식을 가지게 된다.

$$V_d \cos \alpha = -V_d \cos \alpha \quad (6)$$

이때 전동기측 컨버터의 경우 점호각이 0° 에 가깝게 되어 불분명한 제어 구간이 발생하게 된다. 이를 그림 4에서 확인한다.

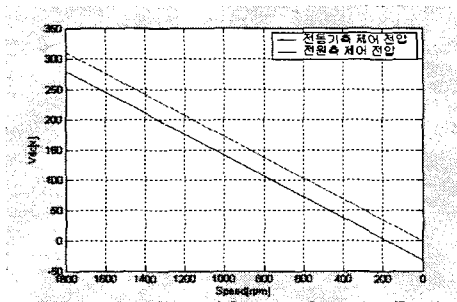


그림 4 회생시 전원 및 전동기측 제어 전압
Fig. 4 Source and motor control voltage at regeneration

그리고 에너지 흐름은 전동기측으로 흐르게 된다. 그래서 저속 영역에서는 기동시와 같은 형태의 시스템으로 구성되며 이로 인해 모터의 역회전 등의 문제를 발생시킨다.

3.4 변화하는 제어 상수

기존의 제어에 사용되는 제어 수식 4에서 전원측 및 전동기측 리액터에 의해서 생기는 손실인 R_{cr} , R_{ci} 값을 확인해 보면 식 (7)과 같다.^[7]

$$R_{cr} = \frac{3}{\pi} \omega L_c = \frac{3}{\pi} \times 2\pi f L_c \quad (7)$$

$$R_{ci} = \frac{3}{\pi} \omega L_i = \frac{3}{\pi} \times 2\pi f L_i$$

R_{cr} 값은 일정한 주파수 60Hz를 가지며 42.118mH 을 가진다. 그값은 15.16Ω 이다. R_{ci} 값의 L_i 값은 116.506mH 값을 가지지만 f 값은 속도에 의해서 항상 변하기 때문에 일정하지 않다 이렇게 속도 변화에 따른 R_{ci} 값의 변화를 가지게 될 것이며 식(1)에 의해 제어되는 I_d 값이 1A 라고 하면 R_{ci} 의 변화에 따른 제어 전압의 변화를 확인하면 그림 5와 같다. 저속일 경우에는 제어의 문제를 발생시킨다.

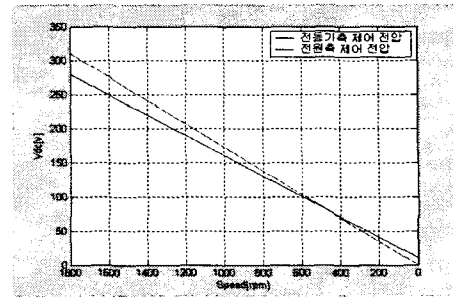


그림 5 회생시 전원 및 전동기측 제어 전압
Fig. 5 Source and motor control voltage at regeneration

4. 제안하는 회생 제동 제어기 설계

기존 회생 제동 제어의 문제점을 해결하기위해 새로운 제어기를 설계하였다. 기존에 사용되었던 전압센서 및 프로그램 내부에서의 d-q변환 그리고 제어 상수들의 불필요, 회생제동의 알고리즘의 간략화로 실제 회생제동 시간이 줄어들었다. 이상의 저속 영역에서의 전동기 제어 불투명 문제를 해결할 수 있는 전원측 및 전동기측 컨버터의 새로운 제어 방식을 제안한다.

4.1 전원측 컨버터 설계

부하 전류형 인버터는 회생시에도 전류의 흐름은 기동시와 같은 방향으로 흐르게 해야 한다. 이는 다른 전력용 소자를 사용할 경우와 사이리스터로 구성하였을 경우의 구별되는 특징이다. 실제 기동시의 제어기를 그대로 사용할 경우 회생 제동 제어시 음의 전류 지령치를 출력시키게 되고 동일한 방향으로 전류를 흘려야 되는 부하 전류형 인버터 시스템에서는 사용할 수 없게 된다. 그래서 기동시 사용되는 전원측 컨버터 제어기를 그대로 사용할 수 없게 되는 것이다. 회생 제동 제어시 문제가 되는 전류 지령치 값은 속도 값이 계속적으로 내려가기 때문에 음의 값을 유지하게 된다. 이 값은 실제 측정하는 Idc 값과의 연산에 의해서 Ierr 값이 생성되며 이는 전류제어기로 들어가게 된다. 이때 입력되는 Idc_err 값은 식 (8)과 같이 표현되며 초기 상태에서는 Idc_ref 값이 음의 값으로 유지되고 Idc 값은 0의 값을 유지하므로 식 (9)와 같이 된다.

$$I_{dc_err} = I_{dc_ref} - I_{dc} \quad (8)$$

$$I_{dc_err} = I_{dc_ref} \quad (9)$$

그래서 Idc_ref 값은 음의 값을 가지게 되며 이로 인해 Idc_err 값 또한 음의 값을 유지해야하지만 음의 값에 대한 전류제한을 걸어 두었기 때문에 0의 값을 출력시킨다. 그래서 컨버터의 점호각이 90° 에서 제어되어 출

력을 0으로 만든다. 결국 전류가 DC 단으로 흐르지 않아 회생 제동 제어가 되지 않고 전동기의 회전에너지로 모두 소모되게 된다. 일반 제어기를 그대로 사용하였을 경우 회생 제동은 되지 않는다. 회생 제동 제어시 요구되는 조건을 확인하면 아래와 같다.

- 1) I_{dc} 값은 항상 양의 값을 가진다.
- 2) I_{dc_ref} 값은 항상 음의 값을 가진다.
- 3) I_{dc_err} 값은 0을 향해서 가야한다.

위의 조건을 만족하기 위한 식 (10)를 유도 하였다.

$$I_{dc_err} = -(I_{dc_ref} + I_{dc}) \quad (10)$$

초기의 상태에서는 I_{dc_ref} 값이 음의 값으로 유지되고 I_{dc} 값은 0 이므로 수식에 의해서 I_{dc_err} 값은 양의 값을 갖게 된다. 전류제어기 내의 V_{dc_limit} 값에 의해서 V_{dc_ref} 값은 0을 가지게 된다. 그렇게 되면 식 (11) 수식에 의해서 I_{dc} 값은 상승하게 된다.

$$I_{dc_err} = -I_{dc_ref} \quad (11)$$

시간이 지나 I_{dc} 값이 I_{dc_ref} 값을 넘는 순간이 생기게 되면 다시 I_{dc_err} 값이 음의 값을 가지게 되어 DC-Link 단 전류는 제어가 되는 것이다. 이는 전원측 컨버터를 에너지 회생 모드로 점호각을 가지게 만든다. 그리고 DC 단 전류가 일정한 값을 유지 할 수 있을 때까지 그 값을 유지하면서 점호각을 조절하게 된다.

4.2 전동기측 컨버터 설계

기존의 전동기측 컨버터에서 사용되었던 DC단 전류를 제어하기 위한 제어기는 전원측의 새로운 제어기 설계로 불필요하게 된다. 그래서 기존의 제어방식보다 제어 방법이 간단해진 일정 점호각 제어를 한다. 이는 일정하게 점호각을 유지하여 속도에 따른 변하는 역기전력 값을 모두 출력시키게 하였다.

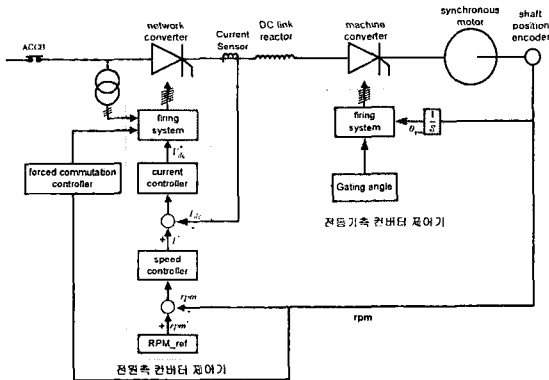


그림 6 제안하는 회생 제어 블록도
Fig. 6 Proposed control block diagram of regeneration braking

5. 실험결과

5.1 회생 제동 제어

그림 7, 8, 9는 기존의 회생 제동 제어 시스템을 이용한 회생 제동을 한 파형을 나타낸다. 저속영역에서의 불안정한 제어로 인해 그림 7에서 속도가 음의 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 그림8에서 DC-Link 전압의 평균 값이 양의 값을 가지고 있으며 그림 9에서도 전류값이 양의 값을 가지고 있음을 알 수 있고 정지해야 할 사항이지만 계속적인 에너지 공급으로 역회전이 계속되고 있는 것이다.

그림 10, 11, 12는 제안하는 회생 제동 제어 시스템을 이용하여 회생제동을 한 파형을 나타낸다. 그림 10은 기존의 방법보다 2배 가량 정지 속도의 감소를 보여주고 있다. 그림 11은 정지후에도 일정시간 점호각을 하다 멈추는 것을 보게 된다. 그림 12는 속도에 맞춰서 0에 도달함을 알 수 있다. 이러한 실험 결과 파형으로부터 제안된 회생 제동 제어 알고리즘이 실용적이고 타당성이 있음을 알 수 있다.

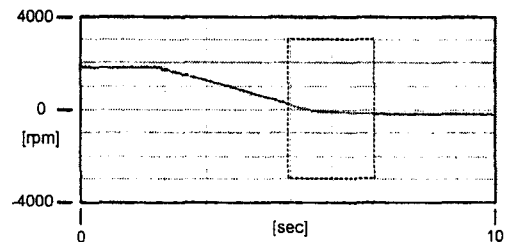


그림 7 기존의 회생 제동시 전동기 속도
Fig. 7 Motor speed at conventional regeneration breaking control system

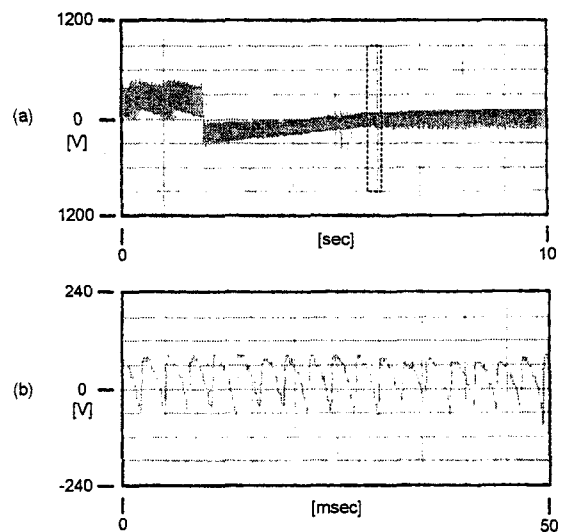


그림 8 기존의 회생제동 제어 시스템 특성
(a)직류 링크 전압 (b)직류 링크 전압 확대 파형
Fig. 8 conventional regeneration breaking control system
(a)DC-Link voltage (b)extension of DC-Link voltage

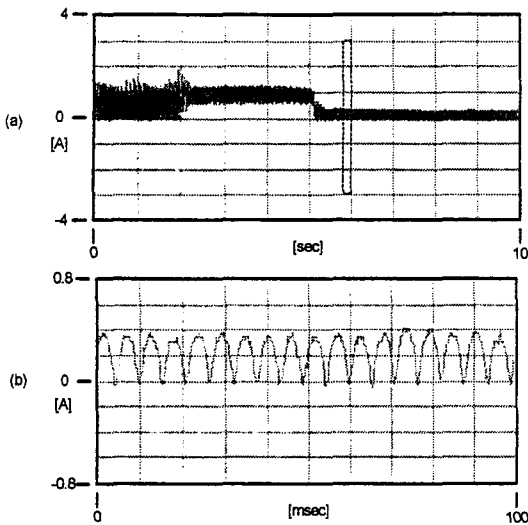


그림 9 기존의 회생제동 제어 시스템 특성
(a)직류 링크 전류 (b)직류 링크 전류 확대 파형
Fig. 9 conventional regeneration breaking control system
(a) DC-Link current (b)extension of DC-Link current

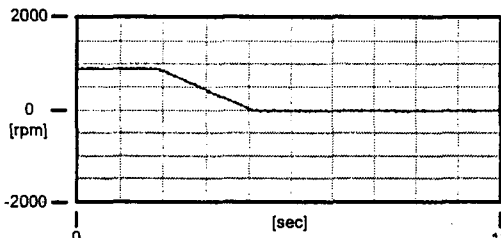


그림 10 제안하는 회생 제동 제어 시스템 특성
전동기 속도
Fig. 10 Proposed regeneration breaking control system Motor speed

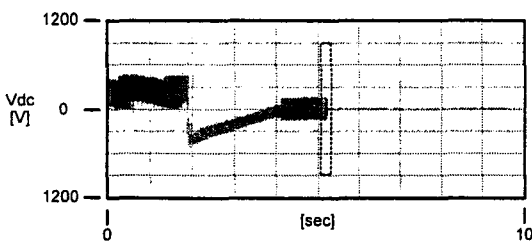


그림 11 제안하는 회생 제동 제어 시스템 직류
링크 전압
Fig. 11 DC-Link voltage of proposed regeneration breaking control system

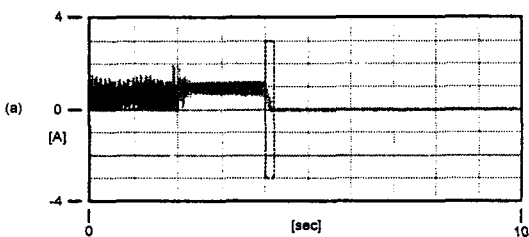


그림 12 제안하는 회생 제동 제어 시스템 직류
링크 전류
Fig. 12 DC-Link current of proposed regeneration breaking control system

6. 결 론

본 논문은 이에 거의 자료가 전무한 회생 제동 제어 시스템에서 기존의 회생 제동 제어 시스템이 가지는 문제점을 수정 보완하여 안정적인 회생 제동 제어 알고리즘을 도출하였다. 국내 SFC시스템에 관련된 운전 매뉴얼 및 기술 자료가 거의 없기 때문에 산업체의 필요성 혹은 사전 기술 연구로서 얻을 수 있는 정보가 제한되어 있다. 따라서 본 논문은 이러한 기술적 자료의 부족을 보완하고 현재 전량 수입에 의존하고 있는 SFC 시스템에 관한 제어알고리즘을 도출하여 SFC 기술 저변 확대 및 국산화 개발에 기초 자료가 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] David Finney, "Variable frequency AC motor drive systems" Peter Peregrinus Ltd. 1988 p202-274.
- [2] F. Pender, R. Lubasch, A. Vonmard, "Static equipment for starting pumped storage plant, synchronous condensers and gas turbine sets", Brown Boveri Rev. 61 1974 (9/10) pp. 440-447.
- [3] O. Kolb, F. Pender, V. Suchanek, "Static starting equipment for gas turbosets", Brown Boveri REV. 66 1979 (2) 104-112.
- [4] Colby, R.S.; Otto, M.D.; Boys, J.T."Analysis of LCI synchronous motor drives with finite DC link inductance", Electric Power Applications, IEE Proceedings B [see also IEE Proceedings-Electric Power Applications], Volume: 140 Issue: 6 , Nov 1993,Page(s): 379 -386.
- [5] Beat Mueller, Thomas Spinanger, and Dieter Wallstein, "Static Variable Frequency Starting and Drive System for Large Synchronous Motors", IEEE IAS 1979, 13B, pp429-438.
- [6] P.C. sen, "Thyristor DC drives", John Wiley & Sons, N.Y., 1981.
- [7] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc, pp. 500-523, 2003.
- [8] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr, Stephen D. Umars, "Electric Machinery," from McGraw-Hill Book Company, 1983.
- [9] P. C. Krause, "Analysis of Electrical Machinery," from McGraw-Hill Book Company, 1987.
- [10] Texas Instrument, "TMS320VC33 user'guide," 1999.
- [11] 이영복, "대용량 전력 변환용 사이리스터 디지털 점호제어" 전력전자 학술대회 2003. 제 2권 pp565-568
- [12] 박신현, "정지형 주파수 변환 장치를 활용한 대용량 동기 발전 전동기 운전 에 관한 연구", 전력전자학회 논문지 제 8 권 6호, pp.496-503, 2003.12.