

초전도 플라이휠 에너지 저장시스템을 이용한 UPS 설계

鄭煥明, 崔載昊

Design of UPS system using SMB Flywheel Energy Storage System

H. Jeoung, J. Choi

요약

본 논문에서는 현재 전력저장시스템으로써 가장 많이 사용하고 있는 배터리를 대체할 목적의 SMB(Superconductive Magnetic Bearing)를 이용한 off-line UPS에 관해 연구하였다. 영구자석의 덩어리형 고온 초전도체 위에서의 부상특성을 이용하여 베어링 문제의 해결방안에 접근함으로써 고효율의 FES를 구성하여 단상 off-line UPS에 적용하였으며 제어회로에는 80C196KC 마이크로프로세서를 사용하였고 빠른 응답을 요구하는 부분은 아날로그회로를 사용하여 구성하였다. 에너지 저장모드에서 컨버터 입력전류는 전원전압과 동상의 정현파로 제어하였으며 에너지 회생모드에서는 출력전압을 정현파로 제어하기 위해 필터커패시터전류를 직접 제어하였다. 시작 품제작을 통해 시스템의 안정된 동작특성을 확인함으로써 제안된 FES가 Off-line UPS에서의 에너지 저장매체로써 우수함을 입증하였다.

ABSTRACT

This paper presents an off-line UPS using the high temperature superconductive magnetic bearing. FES(Flywheel Energy Storage) system has good advantages in compare with lead acid battery. So, high efficiency FES using high temperature SMB(superconductive magnetic bearing) was composed in this paper. The outer rotor type of PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) as motor/generator was used for the experiment, and square wave current and sinusoidal wave control methods was compared for high efficiency operation of motor/generator. The circuit for in phase sinusoidal wave current control with EMF in the full speed range was designed and the proposed flywheel energy storage system was applied in single phase off-line UPS system. As the stable operation characteristics of prototype system was confirmed, the its excellence as energy storage device in Off-line UPS was proved.

Key Words : HTS magnetic bearings, Flywheel energy storage system, Off-line UPS.

1. 서론

본 논문에서는 초전도 베어링(Superconductive Magnetic Bearing : SMB)을 갖는 FES(Flywheel Energy Storage)을 이용한 Off-line 방식의 UPS(Uninterruptable Power Supply)시스템에 관해 연구하였다. 7최근 전산기기사용의 증가로 인해 안정된 전력 환경이 더욱 절실하게 요구되게 되었으나 일일전력사

용량의 낮시간 편중에 의한 부하율 감소와 정류기 부하와 같은 비선형 부하의 증가로 인해 전력환경은 점점 악화되고 있으며 이러한 문제점을 해결하기 위해 UPS의 사용도 증가하고 있다. UPS에서는 배터리와 같은 전력백업장치가 필수적으로 소요되며 에너지저장 매체는 크게 ECB(Electro Chemical Battery)와 EMB(Electro Mechanical Battery)로 나누어 볼 수 있으며 ECB로써 대표적인 연축전지의 경우 에너지 저장

효율이 약 60[%]로 낮고 유해가스를 발생하며 주기적으로 교체하여야 하고 재사용시 비용이 증가하는 단점이 있었다.

플라이휠 에너지 저장시스템은 EMB로써 잉여의 전력을 회전체의 회전관성에너지로 변환하여 저장한다. 다음 필요시 회생동작을 통해 사용하게 되는데 이러한 에너지 저장시스템은 반복사용에 대해 수명이 반 영구적으로 유지보수가 필요 없으며 유해가스를 발생하지 않아 환경 친화적이라는 장점이 있으나 휠 재료, 베어링, 전동발전기, 전력변환기, 진공문제등 수반되는 부분이 모두 초고속, 저손실로 운전되어야 하는 어려움을 이유로 상품화하는데 어려움이 있다. 최근 관련분야 연구개발은 활발히 진행되고 있으며^[1,2] 특히 초전도체 위에서의 영구자석의 부상력을 이용한 베어링을 사용할 경우 매우 높은 효율의 안정된 베어링 제작이 가능해짐에 따라 새로운 관심을 갖게 되었다^[3,4,5]. 한편 이러한 베어링을 사용하였을 경우 베어링 손실은 2%/일로 매우 낮은 것으로 보고되고 있다.

또한 초고속의 FES에 있어서 전동발전기의 성능이 전체 시스템효율에 미치는 영향은 매우 크기 때문에 Halbach배열의 영구자석 계자를 갖고 전기자에 공심구조를 사용한 동기전동기를 응용함으로써 철손을 제거하여 고효율의 에너지 변환을 도모하고 있다.^[1,3,7]

한편 고속 스위칭 소자를 이용한 전력변환기술의 발전으로 고속 플라이휠의 안정된 고효율 운전과 계통과 부하간의 원활하고 안정적인 전력환경을 구축하는 것이 가능하게 되었다. 특히 전압형 컨버터를 사용한 Off-line UPS의 경우 무정전 전원절환에 어려움이 있지만 단일변환기로서 컨버터로 동작시 입력전류를 정현파로 제어하고 인버터 동작시 출력전압을 정현파로 제어할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 논문에서는 초전도 FES의 구조에 관해 서술하고 전동 발전기의 선정과 Halbach 배열의 영구자석 계자를 갖는 동기전동기의 정현파와 구형파 전류 입력에 대한 전동발전기의 효율에 대해 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 입력전류를 전속도 영역에서 전동기의 역기전력과 동상 혹은 180도의 위상차를 갖도록 제어하기 위한 제어회로의 구현방법과 실험결과를 나타냈으며 입력전류는 전력저장모드와 회생 모드에서 역기전력에 대해 동상과 180도의 위상차를 갖는 정현파로 각각 제어됨을 보인다.

또한 이를 응용한 Off-line UPS 제작을 위한 제어회로를 설계하고 시뮬레이션과 실험을 수행함으로써 초전도 FES가 UPS로써 우수한 특성을 나타내고 있음을 입증하였다.

2. FES와 전동발전기

2.1 FES의 원리와 구조

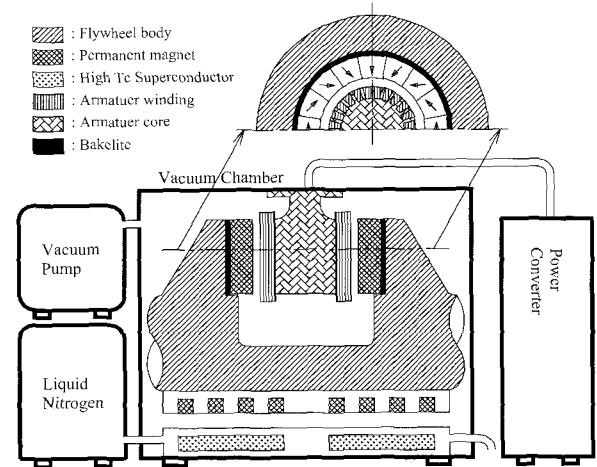


그림 1 플라이휠 에너지저장장치 단면도

Fig. 1 Cross-sectional view of the HTS magnet FES system.

그림 1에서는 덩어리형 고온 초전도체를 사용한 플라이휠 에너지 저장시스템의 구성요소와 진공 챔버내의 단면도를 나타내고 있다.

외전형의 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)이 휠 상부에 위치하고 있으며 진공 챔버내의 가장 아래에 위치한 것이 고온초전도체이고 휠 하부에는 부상을 위한 영구자석이 배치되어 있다. 원심력에 의해 영구자석에 작용하는 응력을 고르게 분포시키기 위해 베이클라이트를 추가하였다.

Meissner 효과와 pinning 효과에 의해 휠 하부에 영구자석을 갖는 플라이휠은 액체질소온도까지 냉각된 초전도체 위에서 안정된 부상특성을 나타내게 되며 고속 회전시 매우 낮은 베어링 손실특성을 보이게 된다.

반지름R[m], 무게m[Kg], 회전각속도의 최대정격과 최소정격을 각각 ω_2 , ω_1 [rad/sec]라고 하면, 회전체에 저장할 수 있는 유용에너지 E는 식 (1)과 같이 주어진다.

$$E = \frac{1}{4} m R^2 (\omega_2^2 - \omega_1^2) [J] \quad (1)$$

식 (1)에서 보는 바와 같이 사용할 수 있는 회전운동에너지는 무게에 비례하고 반지름의 제곱, 회전속도의 제곱에 비례함을 알 수 있으며 베어링의 마찰력이 운동하는 물체의 무게와 비례관계인 것을 함께 고려하

면 무게보다는 속도와 반지름을 크게 하는 것이 유리함을 알 수 있다.

본 연구에서 설계한 휠은 무게 15[Kg], 관성모멘트 0.098[Kgm²], 최대 회전수 42,000[RPM]의 SUS금속을 사용하였으며 식 (1)을 이용하면 최대 저장에너지는 240[Wh]가 되며 정상동작속도를 15000-30000[RPM]으로 설정하면 유효사용 에너지는 약 100[Wh]가 된다.

2.2 전동발전기

플라이휠에너지 저장시스템에 있어서 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 혹은 그 역으로 변환하는데 있어서 중요한 요소는 전동/발전기이며 고속 고효율을 목표로 유동기, 동기기, 영구자석동기전동기, 릴럭턴스 전동기 등이 FES를 목적으로 연구 개발되고 있다.^[1]

고속화에서 가장 큰 문제는 손실에 의한 열발생 문제이며 권선에 의한 동손 I^2R 이외에도 철손의 증가를 들 수 있으며 철손 중 와류손은 주파수에 비례하게 되고 히스테리시스 손실은 주파수의 제곱에 비례하는 코어손실을 발생하게 되어 철심제작에 많은 어려움을 겪게 된다. 시스템 제작에 있어 가장 편리하게 구현할 수 있는 형태로 유도전동기를 들 수 있다. 이 경우 전력의 저장과 회생은 유도전동기의 슬립전력 제어만으로 할 수 있으므로 제어가 간단하고 전동기 제작단가가 저렴하여 구성하기는 쉽지만 고속에서 철손의 증가로 인해 고효율을 실현하기는 용이하지 않은 실정이다. 유도전동기를 사용한 사례에서 효율은 80[%]미만으로 나타나고있다.^[6]

릴럭턴스 전동/발전기의 경우 구조가 간단하고 튼튼하기 때문에 초고속회전이 가능한 장점이 있다. 한편 효율 90%이상의 특성을 나타낼 수 있는 릴럭턴스 전동기 제작도 가능한 것으로 알려져 있으며 영구자석을 사용하는 PMSM 보다 저렴하게 구현할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 초전도 베어링을 사용할 경우 회전체가 외부와 기계적으로 단단하게 고정된 것이 아니기 때문에 시동시 회전체는 무게 중심이 아닌 자계중심으로 회전하게 되며 따라서 어느 정도의 진동은 불가피하게 된다. 이러한 측면에서 릴럭턴스 전동기를 초전도 플라이휠 에너지 저장 시스템에 적용하기 위해서는 자기베어링과 같은 축 반경방향진동을 잡아주기 위한 별도의 베어링을 추가하여야 하는 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 계자회로에 Hallbach Array 영구자석 배열을 갖고 전기자에 공심구조를 갖는 외전형의 PMSM을 선정하였다.

이와 같은 전동/발전기의 경우 영구자석 재료로서

Nd-Fe-B를 사용하여 Hallbach 배열을 구성하였기 때문에 원통 내부에서 고밀도의 일정한 자속 밀도를 얻음으로써 높은 토오크를 발생시킬 수 있어 공극설계에 있어서 여유가 있으므로 어느 정도 휠의 반경방향 진동에 대해 안정화를 도모할 수 있고 자기회로는 영구자석만으로 구성되기 때문에 손실은 전기자 코어손실 없이 권선에 의한 동손만으로 나타나게 된다^[1].

표 1에 전동/발전기의 주요 파라미터를 나타내었다.

3상 입력으로부터 기계적인 힘으로 변환되는 전력 P_{em} 과 기계적 출력 T_{em} 은 다음 식 (3)과 같이 주어진다.

표 1 전동/발전기 정수
Table 1 Motor/generator parameters

Maximum speed [rpm]	40,000	Starting current [A]	8.3
Voltage [V]	220	Acceleration time [min]	5
Torque constant [kgcm/A]	1.7034	Resistance [Ω]	0.8453
EMF constant [V/rpm]	0.0057	Self inductance [mH]	0.4855
Rated current [A]	3.1	Mutual inductance [mH]	0.1935

극수 2, 휠의 회전각속도를 ω , 한 상의 등가 권회수를 N_s 로 놓으면 계자 자속에 의한 a상 유기기전력 e_{fa} 는 아래와 같이 주어지며

$$e_{fa} = \omega N_s \phi_f \cos \omega t = \sqrt{2} E_{fa} \cos \omega t [V] \tag{2}$$

단, ω : 회전각속도[rad/sec]

N_s : 상당 등가권선수[Turn]

ϕ_f : 계자 자속[Wb]

$$P_{em} = 3 E_{fa} I_a \cos(\delta - 90^\circ) [W] \tag{3}$$

단, δ =계자자속 ϕ_f 와 I_a 의 상차각

$$T_{em} = k_t \phi_f I_a \sin \delta [N] \tag{4}$$

단, $k_t = 3 \frac{N_s}{\sqrt{2}}$, N_s :상당 등가 권선수

식 (3)과 (4)로 부터 에너지 저장시 혹은 회생시 최대 토오크를 얻기 위해서는 입력전류를 유기기전력 E_{fa} 와 동상으로 제어하여야 함을 알 수 있다.

3상 평형 회로에서 상전류에 대한 고조파 성분은 5

차, 7차, 11차, 13차, ... 로 나타나며 각 고조파를 포함한 전기자 권선에서의 동손은 식 (5)와 같이 주어진다.

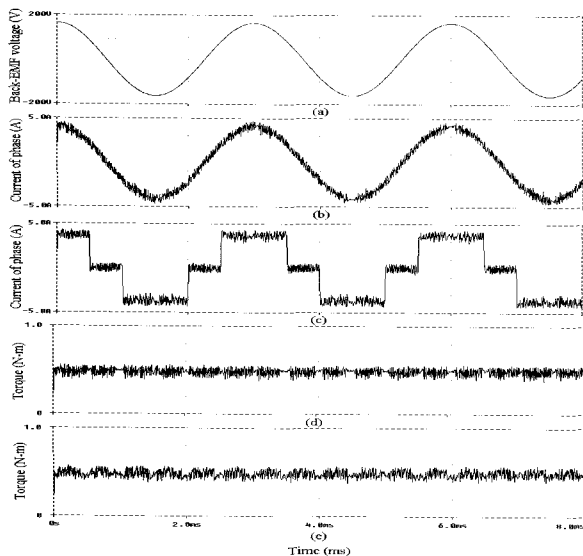


그림 2 (a) a상 역기전력, (b) 정현파 모터입력전류
(c) 구형파 모터 입력전류
(d) 정현파 전류제어시 발생 토크
(e) 구형파 전류제어시 발생 토크

Fig. 2 (a) Back-EMF of phase a.
(b) Inverter output current with sinusoidal current control.
(c) Inverter output current with square wave current control.
(d) Torque with sinusoidal current control.
(e) Torque with square wave current control.

$$P_{cop, loss} = 3 I_a^2 R_s \tag{5}$$

$$= 3 (I_{a1}^2 + I_{a5}^2 + I_{a7}^2 + I_{a11}^2 \dots) R_s$$

위에서 I_a 는 상전류의 실효치이고 I_{a5}, I_{a7}, \dots 은 i_a 의 고조파의 실효치를 의미하며 영구자석동기전동기에 있어 이러한 고조파 전류에 의한 발생토크의 평균은 기본파 전류의 한주기에 대해 0으로 가정할 수 있다.

전기자가 공심구조일 경우 와류손이나 히스테리시스 손과 같은 전기자 철손을 손실을 무시할 수 있으므로 모터효율은 식 (6)과 같이 적을 수 있다.

$$\eta_M = \frac{P_{em}}{P_{em} + P_{cop, loss}} \times 100 [\%] \tag{6}$$

그림 2에서는 히스테리시스 전류제어기법을 사용하여 전동발전기 입력전류를 유기기전력과 동상의 구형파 전류와 정현파전류로 제어하였을 경우에 있어서의 각각의 시뮬레이션 결과이다. 각각의 경우에 있어서

입력전류와 발생토크를 나타내고 있는데 구형파 전류제어시의 토크 리플이 증가되어 나타남을 알 수 있다.

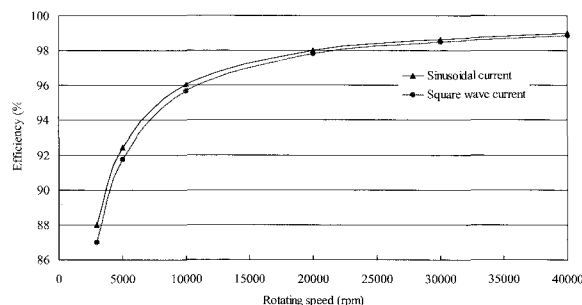


그림 3 정현파와 구형파 전류제어시 회전속도에 따른 모터 효율 비교

Fig. 3 Characteristics of efficiency-rotating speed.

그림 3은 구형파 전류입력과 정현파 전류입력시의 효율을 비교한 것이다. 손실은 동손만으로 되어 효율이 높고 구형파 전류제어와 비교하였을 경우 정현파 전류제어의 경우 효율이 높은 것으로 나타나고 있지만 효율만을 비교하였을 때 특히 고속에서 효율은 큰 차이를 보이고 있지 않음을 알 수 있다.

전동기의 전류제어회로를 구성함에 있어 구형파 전류제어는 정현파 전류제어보다 비교적 용이하다. 그러나 토크리플에 의한 휠 진동을 유발할 수 있으며 이러한 현상은 휠 형상 등과 밀접한 관계를 갖게 되는데 본 논문에서는 휠진동을 억제하고 안정된 운전을 위해 정현파 전류제어방식을 채택하였다.

3. 전력변환

3.1 Off-line UPS system 원리

그림 4에서는 전력의 흐름을 통해 제안된 UPS 시스템의 원리를 나타내고 있으며 그림 5에서는 전력저장 모드와 회생모드에서의 각부 전압전류의 페이지를 보여주고 있다. 전원이 정상인 상태에서 사이리스터를 이용한 Static Switch는 On 상태이며 교류부하와 변환기의 전력은 전원에 의해 공급되게 된다. 부하에는 부하각 θ 만큼 지연된 전류가 흐르게 되며 그림에서는 컨버터 입력전류 I_c 는 전원전압과 동상의 정현파 전류로 제어되는 경우를 나타내고 있다.

따라서 그림 5(a)에서와 같이 전원전압은 부하전압과 같게 되고 전원전류 I_s 는 컨버터 입력전류 I_c 와 부하전류 I_{Load} 의 합으로 되며 커패시터 전류는 컨버터에

의해 리액터를 통해 공급되게 된다.

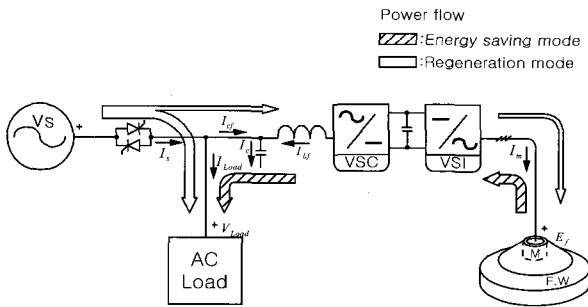
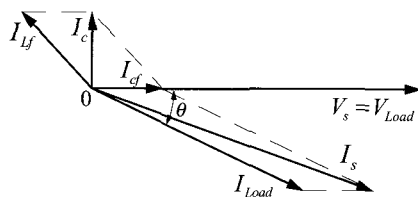
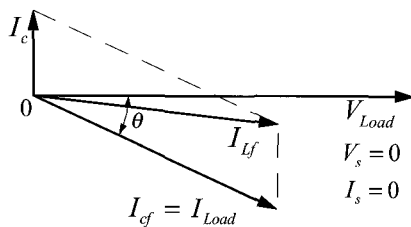


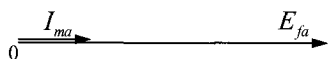
그림 4 제안된 시스템에서의 모드별 전력 흐름
Fig. 4 Power flow in proposed system



(a) 에너지 저장모드
(a) Energy saving mode



(b) 에너지 회생모드
(b) Energy regeneration mode



(c) 에너지 저장모드
(c) Energy saving mode



(d) 에너지 회생모드
(d) Energy regeneration mode

그림 5 모드별 페이저도
Fig. 5 Phasor diagram of each mode

그림 5(b)에서는 전원전압 이상발생시의 전압전류 페이저를 나타낸다. 전원전압 V_s 과 전원전류 I_s 는 0으로 되며 부하에서 요구되는 전력은 그림에서와 같이 컨

버터에 의해 공급되게 된다. 그림 5(c)-(d)는 저장모드와 회생모드에서의 a상 모터입력전류와 유기기전력을 각각 나타내고 있다. 모터입력전류는 저장모드에서 유기기전력과 동상의 전류가 되도록 제어하여 최대효율로 모터를 가속함으로써 전기적인 에너지를 휠의 운동에너지로 저장하게 되며 회생모드에서는 유기기전력과 180도의 상차를 갖도록 제어함으로써 휠에 저장된 회전운동에너지는 모터를 통해 전기적인 에너지로 회생시키게 된다.

3.2 전력변환기 구성

그림 6의 우측부분에서는 기존의 연축전지를 대체할 목적으로 FES가 EMB로써 동작할 수 있도록 구성된 주 전력회로와 제어를 위한 피드백을 좌측 부분은 단상 전원 계통과 부하에서 Off-line UPS로 동작하기 위한 전압형 컨버터의 구성도를 나타내고 있다. 에너지 저장모드에서 부하전류와 컨버터 입력전류는 Static SW를 통해 전원에서 공급하게 되며 이 때 전압형 컨버터는 전원으로부터 전력을 공급받아 직류단에 일정 직류전압을 유지하도록 제어된다.

모터드라이브를 위한 인버터는 휠의 회전속도가 정격속도가 될 때까지 가속하도록 제어되며 전원의 전기적인 에너지는 기계적인 에너지로 저장되게 된다. 이 때 모터 입력 전류는 역기전력과 동상의 정현파 전류로 제어되며 휠의 회전속도가 설정속도에 접근하면 인버터 출력단에는 휠의 설정 속도를 유지하는데 소요되는 매우 낮은 전류가 흐르게된다.

전원전압에서 정전이나 전압강하 등의 비정상적인 요인이 검출되면 전력변환기는 회생모드로 동작하게 되는데 Static SW는 Off되며 전압형 컨버터는 교류정현파 전압을 출력하도록 제어되며 인버터는 교류측에 전동발전기의 역기전력과 180도의 위상차를 갖는 정현파전류가 흘러 직류측에 일정직류전압을 유지하도록 제어된다. 컨버터제어를 위한 제어회로는 저가의 마이크로 프로세서인 80C196KC를 이용하여 구현하고 있다. 전동발전기 최대 운전 속도는 약 40000[RPM]으로 기본주파수는 약 660[Hz]에 이르게된다.

차후 더 높은 운전속도를 감안하면 이와 같이 높은 주파수 영역에서의 전동발전기 입력전류제어는 디지털 제어의 연산지연과 관련하여 어려움이 있을 것으로 예상되며 전동발전기의 입력전류를 넓은 주파수범위에서 정현파 전류로 효율적으로 제어하기 위해 전력저자모드와 회생모드에서 인버터 전류제어회로는 아날로그회로로 구성하였다.

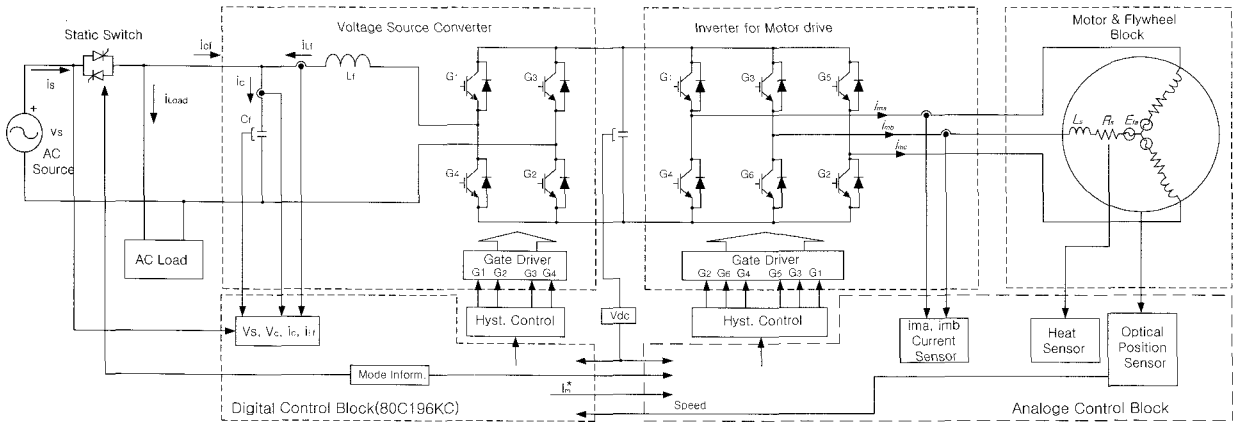


그림 6 전력변환기 블록도
Fig. 6 Power converter block diagram

3.3 인버터회로의 정현파 전류 제어

고속의 PMSM 운전에 있어서 가장 편리한 방식은 전압/주파수 일정제어를 사용한 120도 혹은 180도 동통방식이다.

본 연구에서와 같이 초전도 베어링을 사용하는 시스템에 있어서는 휠의 회전축이 없으므로 회전중심은 회전속도가 가속됨에 따라 자계중심에서 무게중심으로 변화가고 전기자 전류에 의한 토크 리플은 휠의 불안정을 초래할 수 있기 때문에 정현파로 제어되어야 한다. 또한 인버터 출력전압 기본과주파수는 최대 약 660[Hz]에 이르기 때문에 전류제어에 어려움이 따르게 된다.

따라서 본 논문에서는 위와 같은 운전조건을 만족시키고 고효율 운전을 실현하기 위한 방법으로 인버터 출력전류는 히스테리시스 전류제어기법을 사용하여 제어하였으며 그림 7에서 보는바와 같은 정현파 출력전류의 기준값 발생회로를 구성하였다.

계자회로를 높은 잔류자속밀도를 갖는 영구자석을 사용할 경우 전기자 반작용은 무시할 수 있다. 따라서 각 상의 유기기전력은 회전자 위치정보로부터 구할 수 있게 되는데 위치정보에 사용된 광센서는 180도의 구형파 출력으로 되며 그림 7의 PLL (Phase Lock Loop)에 입력된다.

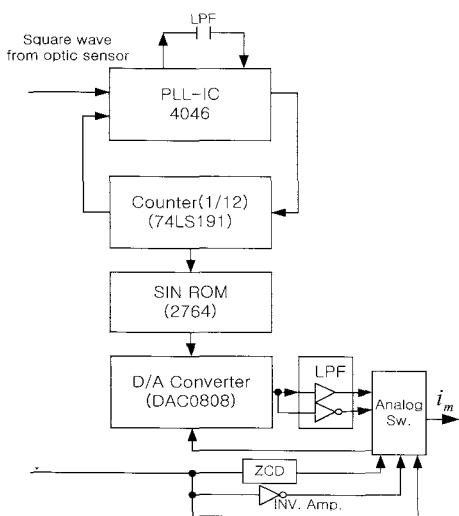
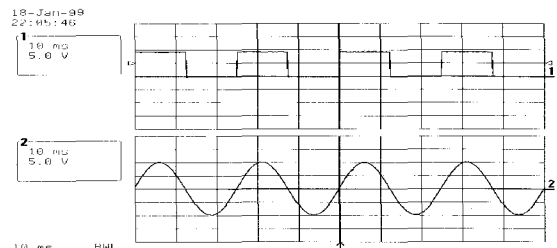
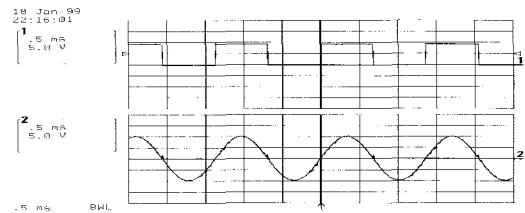


그림 7 정현파 전류기준값 발생회로
Fig. 7 Circuit diagram of sinusoidal current reference generation.



(a) 40[Hz]



(b) 730[Hz]

그림 8 PLL에 의한 정현파 전류기준 파형
Fig. 8 Sinusoidal reference current waveform

약 700Hz까지 기준이되는 구형파 위상과 정현파 위상이 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. PLL회로는 구형파 입력과 분주된 신호의 에러를 검출하기 위한 배타적 OR Gate, VCO(Voltage Coupled Oscillator), 에러값을 평활화 하여 VCO의 입력으로 사용하기 위한 LPF(Low Pass Filter), 12진 카운터로 구성된다. 분주된 신호는 ROM(Read Only Memory)에 기록된 정현파 데이터를 출력하기 위한 어드레스 입력으로 사용되며 ROM의 정현파 출력 데이터는 D/A Converter를 통해 아날로그 데이터로 변환되게 된다.

전류기준값을 출력하는데 있어 4상의 승산이 필요하게 되는데 본 연구에서는 고가의 아날로그 승산소자를 사용하지 않고 그림 7에서 보는 바와 같이 D/A Converter (DAC0808)와 연산증폭기 ZCD(Zero Crossing Detector)를 사용하여 아날로그 스위치와 결합하여 4상한의 승산이 가능하도록 구성하였다.

넓은 속도 범위에 걸쳐 PLL특성을 얻고 동시에 빠른 동기특성을 얻기 위해서 LPF의 설계는 매우 중요하게 된다. 설계된 회로의 동작범위는 최저 주파수 40[Hz]에서 최고 720[Hz]로써 휠의 설계사양을 만족한다. 40[Hz]미만의 주파수 범위에서는 PLL의 동작주파수를 벗어 나게 됨으로 구형파 PWM을 사용하여 기동하도록 하였다. 그림 8에서는 제안된 회로의 PLL입력(상부)과 출력(하부)을 보이고 있는데 잘 동기되고 있음을 볼 수 있다.

3.4 전압형 컨버터 제어

그림 9에서는 시뮬레이션과 실험에 적용한 전압형 컨버터의 컨버터 모드와 인버터 모드의 제어 블록도를 나타내고 있다. 컨버터 모드에서 제어기는 일정 직류 전압 V_{dc} 을 유지하도록 제어되는데 필터 커패시터 앞단 전류 i_{cf} 가 전원전압 v_s 와 동상의 정현파가 되도록 제어한다. 그림 9에서 보는 바와 같이 i_c 는 i_{cf} 와 i_{Lr} 의 합으로 주어진다. 따라서 직류전압 기준값 V_{dc}^* 과 피드백값 V_{dc} 의 에러의 PI응답을 구하고 전원 위상을 곱한 다음 i_c 와의 차를 구하여 인덕터 전류기준값 i_{Lr}^* 으로 한다. 인덕터 전류 피드백값과 기준값을 이용하여 히스테리시스 전류제어를 하도록 구성하였다.

인버터 모드는 크게 커패시터 기준전류값 i_c^* 제어를 위한 루프와 교류전압제어 v_c 를 위한 루프로 구성된다.

커패시터 전류의 기준값 i_c^* 은 교류전압기준값의 미분

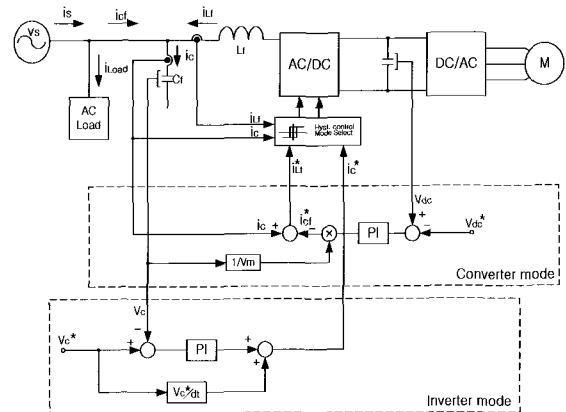


그림 9 전압형 컨버터 제어 블록도
Fig. 9 Voltage source converter control block diagram

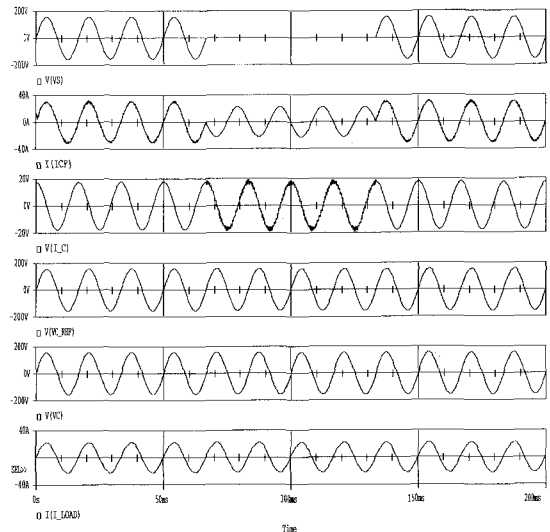


그림 10 전압형 컨버터 시뮬레이션 파형
Fig. 10 Simulation result from VSC control

치와 커패시터전압에러의 합으로 주어지며 컨버터 모드에서와 마찬가지로 히스테리시스 전류제어기법을 이용하여 i_c 피드백값이 기준값 i_c^* 을 추종하도록 한다. 히스테리시스 전류제어의 경우 컨버터 모드로 동작시 인덕턴스의 크기는 스위칭 주파수와 매우 밀접한 관계가 있다. 인덕턴스가 너무 작을 경우 스위칭 주파수가 스위치의 정격을 초과하게 될 수 있으며 전류고조파 차수도 상당히 증가하게 된다. 상대적으로 인덕턴스가 클 경우 이것은 인버터로 동작시 정류기 부하와 같은 비선형 부하에 대한 응답에 지연요소로 작용하게 된다. 커패시턴스가 작을 경우는 인버터로 동작시 교류 출력전압에 고조파가 많이 나타나게 되며 크

게 될 경우 컨버터 모드에서 무효전류가 증가되게 되고 스위칭손실이 커지게 된다. 따라서 동일한 L_f 값으로 인버터와 컨버터로 동작시킬 경우 L_f 는 스위칭소자의 동작주파수에 의해서 제한되는 결과를 가져오게 된다.

그림 10에서는 컨버터 동작과 인버터 동작시의 저항 부하에 대한 시뮬레이션 파형을 나타내고 있다. 전원전압 v_s 로부터 초기는 전력 저장모드(컨버터 모드)이며 중간부분은 전력회생모드(인버터 모드)를 다시 저장모드로의 동작을 보여주고 있다. 커패시터 앞단의 입력전류 i_{cf} 는 교류전원전압과 동상의 정현파로 제어되고 있음을 알 수 있으며 전력 회생모드에서는 부하전류가 흐르고 있음을 알 수 있다. 출력교류전압은 전압기준치와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 시뮬레이션에서 사용한 L_f 와 C_f 는 각각 1.7[mH]와 200[μ F]이며 부하저항은 12.5[ohm]을 사용하였다. 전원전압은 교류 110[V]/60[Hz]로 가정하였으며 히스테리시스 전류제어시 밴드는 ± 2 [A]로 설정하였다.

위의 시뮬레이션에서는 정전감시시간을 고려하지 않고 모드변환을 실시하였으며 유도성이나 용량성 부하, 정류기부하와 같은 비선형 부하에 대해서도 고찰하여야 할 것으로 보인다.

3.5 마이크로 프로세서에 의한 제어

그림 11과 12에서는 80C196KC 프로세서에서의 프로그램 흐름도와 입출력을 나타내고 있다.

피이드백 된 전원입력 v_s 의 ZC(Zero Crossing)신호를 외부인터럽트 EXINT로 인가하고 외부 인터럽트가 걸리면 166[μ s]로 설정된 소프트웨어 타이머 인터럽트가 동작하여 반복주기를 실행하게 된다. 듀티비 50[%] 주파수 15.63[kHz]의 PWM 출력을 2분주하여 약 8[kHz]의 구형파를 얻고 이 신호를 이용하여 Static switch를 구동함과 동시에 저역통과 필터를 거쳐 아날로그회로에서 에너지저장모드와 회생모드의 기준값으로 사용한다.

에너지 저장모드에서 프로세서는 Port1과 PWM1를 통해 컨버터입력전류 기준값 $i_{L_f}^*$ 과 모터입력 전류기준값 I_m^* 를 각각 출력하게 되며 I_m^* 는 PLL 회로에 입력되어 위상값과 곱해져서 i_m^* 를 구하게 된다.

그림 11에서 Samp_seq는 전원 한주기 내에서 소프트웨어 타이머 인터럽트 회수를 카운팅하며 증가하는 변수이다. 정밀한 정전감시를 위해 전원전압 v_s 과 반

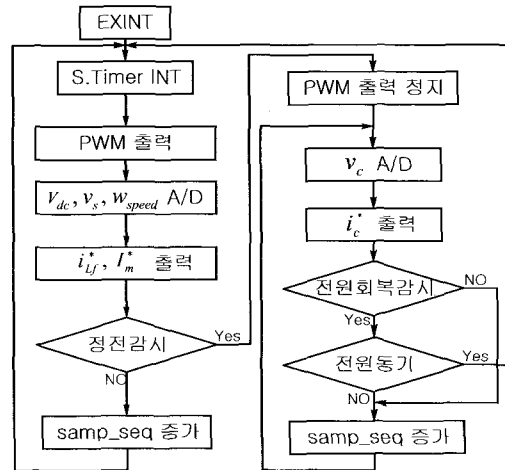


그림 11 프로세서 프로그램 흐름도
Fig. 11 Flow chart of microprocessor program

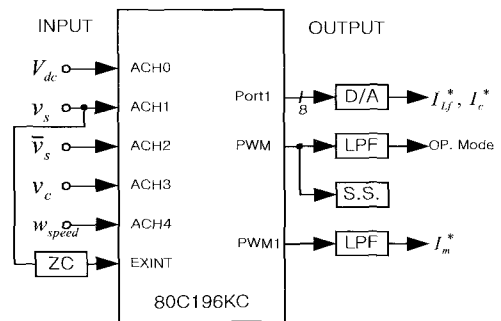


그림 12 마이크로 프로세서 입·출력
Fig. 12 Input and output of microprocessor

전원전압 v_s 을 별도의 A/D채널로 입력하여 감시하게 되며 정전시 발생시점에서 모드변환하기까지 시간은 약1[ms]를 갖도록 설정하였다.

정전으로 인식되어 회생모드가 결정되면 PWM출력이 정지되어 Static switch가 Off되고 모터전류기준값은 아날로그 회로로 넘겨진다. 회생모드에서 프로세서는 커패시터 전류기준값을 출력하게 되며 전원회복여부를 판단하고 전원동기를 시점을 검출하게 된다. 전원이 회복되고 동기시점을 검출하면 PWM이 출력되어 에너지 저장모드로 동작하게 된다.

4. 실험결과

그림 13은 초전도 베어링과 볼 베어링을 사용한 FES의 자연감속특성을 나타내고 있다. 초전도베어링의 경우 9000[rpm]에서 약60[W]의 손실이 나타났으며 매우 안정된 회전 특성을 나타내었다.

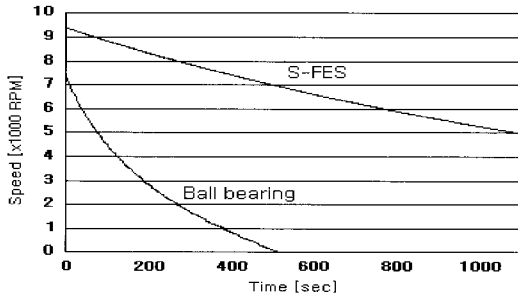


그림 13 자연감속 특성
Fig. 13 Characteristics of natural spin down

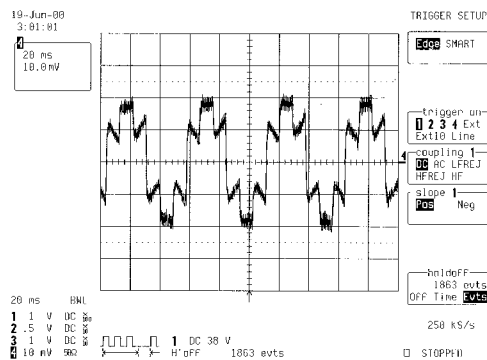


그림 14 저속에서의 모터 입력전류(구형파 PWM)
Fig. 14 Motor input current at starting mode

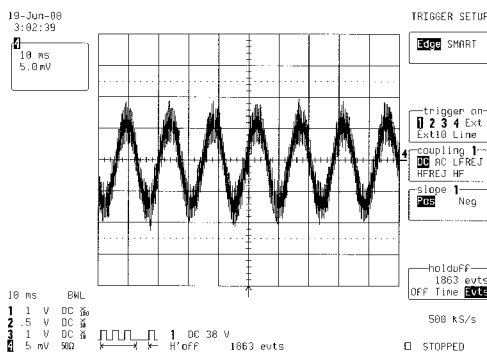


그림 15 고속에서의 모터 입력전류(정현파 PWM)
Fig. 15 Motor input current at motoring mode

볼 베어링의 경우 매우 빠른 감속특성을 보임으로 손실이 많음을 알 수 있다. 그림 14와 15에서는 모터 입력 전류를 나타내고 있다. PLL회로가 정상동작하기 전의 저속에서는 구형파 PWM을 사용하기 때문에 입력전류의 고조파가 많은 것을 볼 수 있으며 PLL이 정상동작하였을 경우 정현파로 제어됨을 알 수 있다.

그림 16에서는 약 270도 부근에서 정전 발생시 1[kW] 저항부하에서 부하전압과 전원전류를 나타내고 있다.

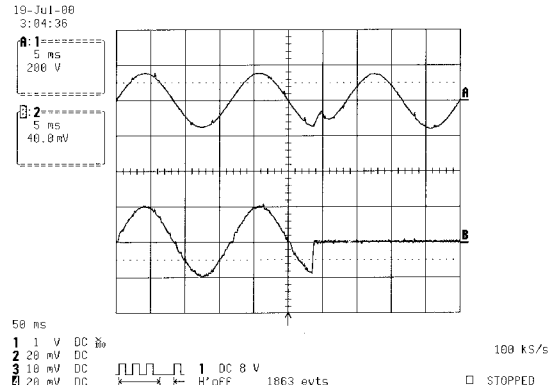


그림 16 정전 발생시의 부하전압과 전원전류 파형
Fig. 16 Load voltage and source current at power fault

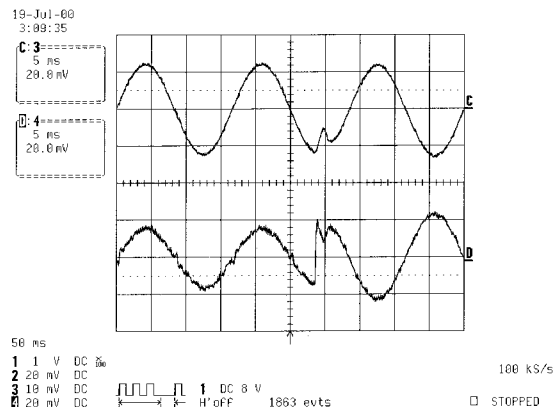


그림 17 정전 발생시 부하전류와 컨버터 입력전류
Fig. 17 Load current and converter input current at power fault

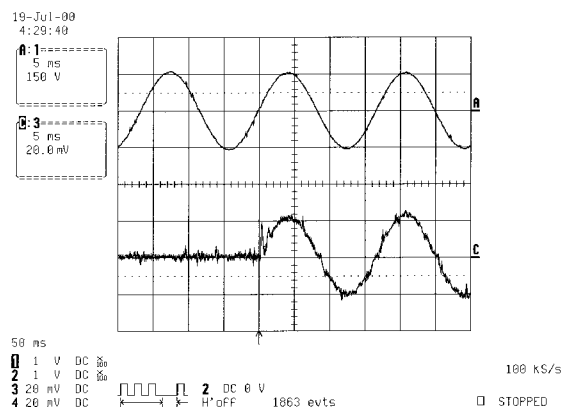


그림 18 동기 투입시 전원전압과 전류
Fig. 18 Source voltage and current

약 3[msec]의 비교적 짧은 시간동안 과도현상이 나타남을 알 수 있다.

그림 17에서는 부하전류와 커패시터 앞단입력전류 i_{cf} 를 보이고 있다. 저항부하이므로 전원전압과 동상의 전류로 되므로 정전발생전 i_{cf} 는 전원과 동상의 정현파 전류로 제어되고 있음을 알 수 있으며 정전시 부하에 전력을 공급하고 있음을 알 수 있다

그림 18에서는 전원회복 후 동기투입시점에서의 전원전압(상)과 전원전류(하)를 나타낸다. 피크성 전원전류가 나타남을 볼 수 있는데 이것은 마이크로 프로세서에 의해 전원동기를 검출하여 S.S.가 동작하기까지 약 200-300[μ sec]가 소요되는데 따라 발생하는 과도전류이다. 이 부분의 수정이 필요할 것으로 보인다.

5. 결론

40,000[rpm], 15[Kg], 0.084[Kg-m²], 240[Wh]의 제원을 갖는 SUS 금속 플라이휠을 사용한 초전도 플라이휠 에너지 저장시스템을 이용한 Off-line UPS에 관한 연구를 수행하였다.

전동/발전기에는 계자에 Halbach 배열을 갖는 원통형 영구자석 동기전동기를 제작하고 실험하였으며 전력변환기는 토크리플을 최소화하고 고효율을 실현하기 위해 모터 입력 전류를 역기전력과 동상 또는 180도의 위상을 갖는 정현파로 제어 하였다.

최고 10,000[rpm]까지 가속하였으며 매우 안정된 회전특성과 낮은 베어링마찰을 확인함으로써 플라이휠 에너지 저장장치로써 우수한 특성을 나타내고 있음을 보였다. Off-line UPS에 적용하기 위한 전력변환기 및 제어회로를 구성하고 시뮬레이션을 수행하였으며 약 1[kW]의 저항부하에 대한 실험 결과로부터 제안된 에너지 저장시스템이 Off-line UPS의 에너지 저장매체로써 우수한 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다.

차후 에너지 회생동작의 속응성을 개선하여 다이오드 정류기와 같은 비선형 부하에 대한 특성을 계속 연구 할 예정이다.

참고 문헌

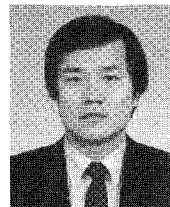
- [1] Richard F. Post, et. al., "A High-Efficiency Electro-mechanical Battery," Proc. of IEEE, vol. 81, no. 3, pp. 462-474, 1993.
- [2] Hull, J, et al., "Revolutionary Bearing Creates Efficient Energy Storage Device," Logos, vol. 12, no. 1, 1994.
- [3] Shirou Nakamura, "Flywheel Technologies and High Tc Superconductivity," ISTE Journal, vol. 6, no. 1, pp. 43-50, 1993.
- [4] S. Zannella, et. al., "High-Tc Superconducting Magnetic Bearings for Rotation-Based Devices," IL NUOVO CIMENTO, vol.16D, no. 12, Dec., 1994.
- [5] Hidekazu Teshima, "Ring-shaped Flywheel Energy Storage Systems with Superconducting Levitation," in Proc. of PCC-Nagaoka '97, pp.701-706.
- [6] Itaru Andoh, Akira Moriyama, Isao Takahashi, "Development of a High Efficiency Flywheel UPS using 3 Arms Inverter/Converter," T. IEE Japan, Vol.116-D, No. 11, '96.
- [7] 정환명, 최재호 외 "초전도 플라이휠 에너지저장 시스템 개발" 전력전자학회 논문지, 제4권, 제5호, 1999. 10.

저자 소개



정환명(鄭煥明)

1967년 10월 9일생. 1993년 충북대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



최재호(崔載昊)

1955년 9월 27일생. 1979년 서울대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1981년~1983년 중경공업전문대학 전자과 전임강사. 1983년~현재 충북대 전기전자공학부 교수. 1993년~1994년, 1997년~1998년 University of Toronto (Visiting Professor). 당 학회 편집이사.