

초전도 에너지 저장장치를 이용한 무정전 전원장치 시스템의 연구

김 태 완, 지 호 철, 정 승 기
광운대학교 전기공학과

A Study on the Uninterruptible Power Supply(UPS) System with Superconducting Magnet Energy Storage(SMES)

Tae-wan Kim, Ho-chul Ji, Seung-gi Jeong

Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University

Abstract

Superconducting magnet energy storage(SMES) offers lower loss and more capacity than other energy storage systems. This paper deals with a configuration and a control method of uninterruptible power supply(UPS) with SMES. Proposed system is constituted of three parts-inverter, dc chopper and superconducting coil. The control system is implemented with a general-purpose DSP, TMS320C31. The results of simulation and experiment with a 10 kVA prototype show the validity of the system configuration and the control method.

1. 서론

고도의 정보화사회가 되어감에 따라 각종 정보화 기기의 사용이 급증, 이들 기기의 신뢰성을 확보하는 것이 중요한 문제로 부각되고 있다. 장치 자체의 신뢰성 뿐만 아니라 장치를 포함하는 전체 시스템 운영상의 신뢰도를 높이기 위해서는 안정적인 전원공급이 필수적인 요소라 할 수 있으며 일반적으로 상용전원이 전원의 품질 규격을 항상 만족시키지 못하기 때문에 대형 컴퓨터시스템 등과 같은 중요한 시스템에는 UPS의 적용이 필수적이다.

UPS가 임시전원으로 작용하기 위해서는 필요한 시간동안 전원 대신 부하에 에너지를 공급하는 능력을 갖추어야 하는데 이를 위해 일반적으로 축전지가 사용된다. 본 연구는 UPS 시스템에서 축전지를 초전도코일로 대체함으로써 중요한 차세대 기술의 하나로 부각되고 있는 초전도 에너지저장기술을 UPS와 결합시키는 데에 그 목적이 있다. 기존의 축전지방식이 전압의 형태로 에너지를 저장하는 데에 비하여 초전도코일은 전류의 형태로 에너지를 저장하기 때문에 이를 전력저장과 연계하여 UPS 기능을 하게 하기 위해서는 기존의 방식과는 다른 형태의 전력변환기가 필요하다. 본 논문에서는 초전도 에너지저장장치를 사용한 UPS(이하 SMES UPS라 칭함)를 위한 전력변환장치의 구성, 이에 대한 제어 방식, 그리고 그의 타당성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인한다.

2. UPS 시스템의 구성과 기본동작

SMES 코일을 UPS 시스템에 적용하기 위해서는 에너지의 수수가 양방향으로 이루어져야 하므로 코일 양단전압이 양과 음의 값을 모두 가질 수 있어야 한다. 이런 구조를 갖기 위한 전체 시스템의 구성은 SMES 코일에 에너지를 충전전하는 직류초퍼와 교류를 직류 또는 역으로 변환하는 3상 인버터가 연계되는 구조를 갖는다. 전체 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

이 UPS 시스템은 미국에서 상용화된 바 있는 Superconductivity사의 SSD(superconducting magnetic storage system)를 모델로 하고 있으나[1][2] SSD가 별도의 코일 충전회로를 사용하고 주 전력변환장치는 방전을 위한 용도로만 사용되는 반면에 여기서는 전력변환장치가 충전과 방전을 겸하고 있다는 특징을 지니고 있다. 그리고 그 기본동작은 다음의 두가지로 나타낼 수 있다.

2.1. 대기충전상태

전원이 정상적인 경우에는 정지형 교류스위치를 동작시켜 전원이 부하에 직접 접속되도록 하고 이 상태에서 전력변환장치는 교류전원측으로부터 에너지를 받아들여 초전도코일에 저장한다. 이 상태에서 초전도코일에 흐르는 전류는 전력변환장치에 의해 초기전류에서부터 설정된 전류값까지 서서히 상승하도록 제어되며 설정치에 도달하면 코일 및 전력변환장치 자체손실을 보충하기 위한 비교적 작은 양의 전력이 공급되어 설정치 부근에서 일정하게 유지되도록 한다.

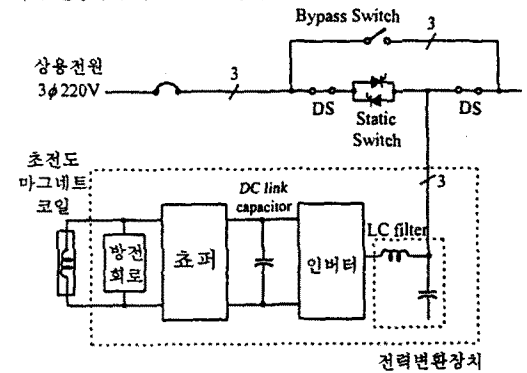


그림 1. 초전도 코일을 이용한 UPS 시스템의 구성

2.2. UPS 동작상태

정전이나 전원전압이 어느 값 이하로 감소하는 등 전원이상이 발생하는 경우에는 전원 대신 초전도코일의 에너지가 전력변환장치를 통하여 부하로 공급된다. 전력변환장치는 코일에서부터 에너지를 끌어내어 원래의 전원과 같은 전압과 위상을 지니는 파형을 출력하는 기능을 한다. 이 동작상태 중에는 정지형 교류스위치로써 전원을 차단하여 전원이 다시 정상으로 복귀하였을 때 전력변환장치의 교류출력전압이 전원전압과 차이가 생겼을 때 발생할 수 있는 돌입전류를 방지한다.

3. 인버터의 제어

전력변환장치에서 교류측 LC 필터를 포함한 인버터부의 시스템 구성은 그림 2와 같다.

그림에서 보시다시피 전압형 컨버터의 직류측에서 보면 직류전압의 극성은 항상 한쪽 방향을 유지하고 있어야 하지만 직류측 전류는 양방향 모두 가능하다. 이는 전력의 수수가 양방향 모두 가능하다는 의미이며 직류측에서 교류측으로 에너지를 전달하는 인버터로서 사용될 수도 있고 교류측에서 직류측으로 에너지를 전달하는 정류기로서 사용될 수도 있다.

인버터의 동작은 코일 충전모드와 방전모드 전체를 걸쳐 전류제어형 인버터로서 동작한다. 여기서는 인버터 교류측의 순시전류를 검출하여 각 상의 순시전류가 상위 제어기로부터 주어지는 전류지령의 기준치를 추종하도록 인버터의 스위칭 상태를 결정하는 방식으로서 디지털 제어에 적합한 예측전류제어

(Predictive Current Control) 방식[3][4]을 사용하였다.

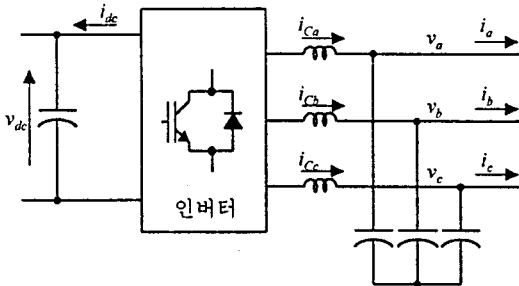


그림 2. 인버터 교류측 필터에서의 전압과 전류

인버터의 기준전류를 결정하는 제어루프는 시스템이 충전 도코일을 충전하는 모드에서 동작하는지 또는 방전하는 모드에서 동작하는지에 따라 달라지게 된다.

3.1. 충전모드에서의 제어

코일 충전모드에서는 교류측 충전전류를 일정하게 유지하기 위해 전제시스템을 통괄하는 상위제어기로부터 충전전력의 기준치가 주어진다.

그림 2에서 인버터를 통해 직류링크로 유입되는 전력은

$$p = v_{dc} i_{dc} = -(v_a i_{Ca} + v_b i_{Cb} + v_c i_{Cc}) \quad (1)$$

이 되며, 위의 식을 동기좌표축의 dq 변수로 치환하면

$$p = -(v_q^* i_{Cq}^* + v_d^* i_{Cd}^*) \quad (2)$$

이 된다. 전원전압이 3상 평형이라 하고 최전좌표축을 적절히 설정하여 $v_q^* = V_m$ (상전압의 최대치), $v_d^* = 0$ 이 되도록 하면

$$p = -V_m i_{Cq}^* \quad (3)$$

로 표현된다. 이로부터 구성된 인버터의 충전동작시 제어루프를 그림 3에 도시하였다.

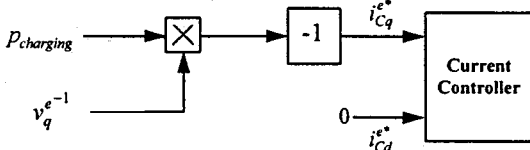


그림 3. 인버터의 충전동작시 제어

3.2. 방전모드에서의 제어

인버터의 출력전압 제어는 원래의 전원전압과 같은 크기와 위상을 갖는 기준전압을 설정하고 실제의 전압을 폐환하여 그 오차에 의해 동작하는 PI 제어기를 사용하였으며 동기좌표축상에서 제어를 행하였다.

우선 그림 2에 대해 전류 및 전압간의 관계식을 쓰면

$$C \frac{dv_a}{dt} = i_{Ca} - i_a, \quad C \frac{dv_b}{dt} = i_{Cb} - i_b, \quad C \frac{dv_c}{dt} = i_{Cc} - i_c \quad (4)$$

이 되며, 위의 식을 동기좌표축상의 변수로 치환하면

$$pCv_q^* + \omega_c Cv_d^* = i_{Cq}^* - i_q^*, \quad -\omega_c Cv_q^* + pCv_d^* = i_{Cd}^* - i_d^* \quad (5)$$

로 표현된다. 식(5)에는 q 축 성분과 d 축성분 전압 사이에 간섭 항이 존재한다. 이러한 축간 변수의 간섭을 배제하기 위한 비간섭제어를 행하는 것이 바람직하다[5][6].

전압제어기의 출력에 다음 식(6)과 같은 항을 삽입하여 간섭 현상을 줄여줄 수 있다.

$$i_{Dq}^* = \omega_c Cv_d^*, \quad i_{Dd}^* = -\omega_c Cv_q^* \quad (6)$$

그림 4에 이러한 비간섭항을 삽입한 인버터 전압제어루프를

도시하였다.

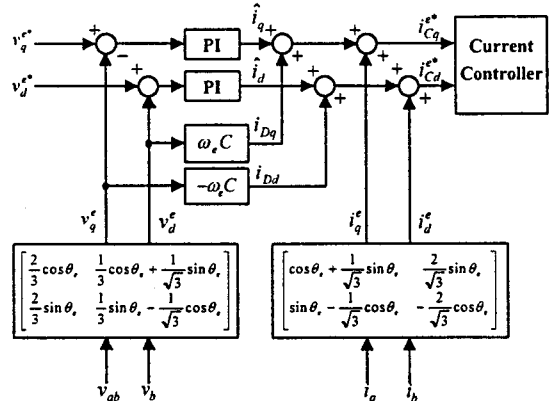


그림 4. 인버터의 방전동작시 제어

4. 직류 초퍼의 제어

그림 5에 초전도 코일과 초퍼를 함께 나타내었다. 초퍼는 코일 충전시 직류링크측에서 전압의 형태로 저장된 에너지를 코일로 전달하고 방전시에는 코일의 에너지를 직류링크 쪽으로 전달하는 역할을 한다. 그러나 코일의 전류방향을 반전시킬 이유가 없기 때문에 코일전류는 항상 한방향으로만 흐르도록 제어된다. 이 때 G1과 G2의 스위칭 상태에 따라서 코일전류의 증가모드, 감소모드 그리고 환류모드가 존재한다.

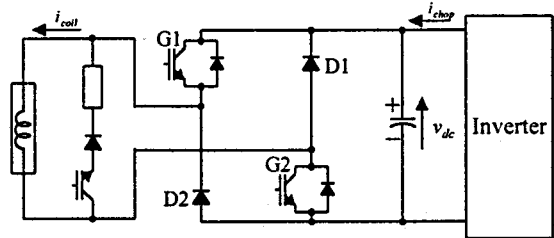


그림 5. 초퍼 및 보호회로부의 구성

이 세 상태를 이용하여 코일의 전력의 흐름을 제어하는 데 있어 두가지의 제약조건이 작용한다. 먼저 직류링크 쪽의 전압이 매우 높아서 전류증가모드에서 코일전류의 순시 상승률 (di/dt)이 대단히 크다는 점과 직류링크쪽의 커패시터 정전용량이 코일의 유도용량에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 전류 감소모드에서 커패시터 전압의 순시상승률(dv/dt) 역시 매우 큰 값이 된다는 점이다. 이는 코일의 충방전이 전류증가모드나 전류감소모드만으로 이루어질 수 없으며 스위칭 주파수를 적절히 제한하기 위해서는 이들 두 모드 및 환류모드를 적절히 결합하여 평균적인 전력의 흐름을 제어하여야 할 필요가 있음을 의미한다.

4.1. 초퍼의 제어

초퍼의 제어는 인버터에서 전류제어가 원활히 이루어지도록 하기 위해서와 직류링크 전압을 안전한 수준으로 유지하기 위해 충전모드와 방전모드를 구분하지 않고 직류링크 전압을 일정하게 하는 것을 기준으로 하여 제어된다. 따라서 직류링크전압의 적절한 기준치의 상하로 약간의 전압변동 허용폭을 부여하여 이 범위 안에서 전압이 변동하도록 초퍼의 스위칭상태를 결정하게 된다.

4.1.1. 코일 충전모드에서의 제어

그림 6에 나타난 바와 같이 충전전력이 직류링크로 유입되면 커패시터 전압은 증가하며 전압변동허용의 상한치에 도달하면 전압을 감소시키기 위해 코일전류의 증가모드로 스위칭하고 이로 인해 직류링크 전압이 허용폭의 하한치에 도달하면 환류모드로 스위칭 상태를 절환한다. 환류모드 동안 인버터에서 유입되는 전력에 의해 다시 상한치에 도달하면 위의 과정을 반복한

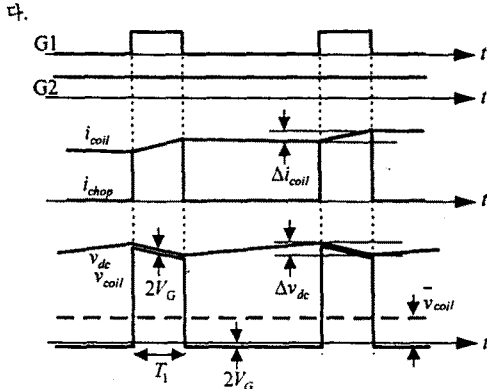


그림 6. 코일 충전시 초과 제어 동작

4.1.2. 코일 방전모드에서의 제어

전원에 이상이 발생하여 인버터가 직류링크의 에너지를 부하 쪽으로 방출할 때는 에너지가 빠져나감에 따라 직류링크의 전압이 하락하게 되며 이 경우 그림 7에 나타낸 바와 같이 전압이 전압변동허용의 하한치에 도달하면 전압을 증가시키기 위해 코일전류의 감소모드로 스위칭하며 직류링크 전압이 허용폭의 상한치에 도달하면 환류모드로 스위칭 상태를 전환한다. 환류모드 동안 인버터를 통해 유출되는 전력에 의해 전압이 다시 하한치에 도달하면 위의 과정을 반복한다.

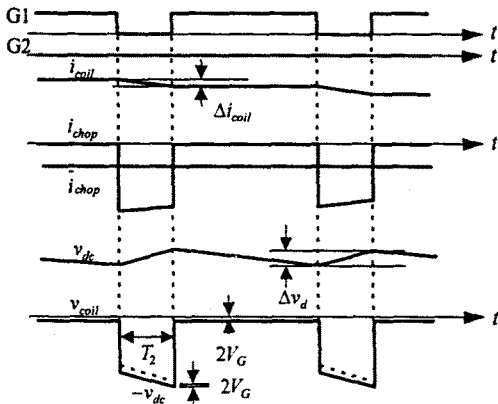


그림 7. 코일 방전시 초과 제어 동작

4.2. 제어루우프

위에서 기술한 바와 같이 코일의 충전방전모드에 따라 스위칭 신호를 변동시키는 것을 고려하여 제어루우프를 구성하면 그림 8과 같이 매우 간단하게 구성된다. 여기서 Charging /Discharging 신호는 다음 절에서 기술하는 상위 제어루우프에서 주어지는 신호이다.

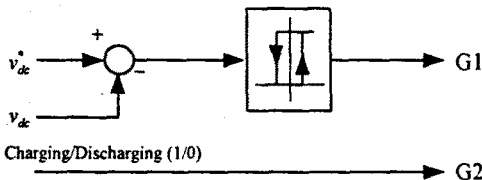


그림 8. 초과 제어루우프

5. 전체 시스템의 제어

5.1. 전체 제어루우프

그림 9에 전체 제어시스템의 블록도를 도시하였다. 전원전압의 이상 검출시 정지형 교류스위치(static switch)가 차단되고 인

버터는 방전모드제어로 즉시 전환된다. 반대로 전원전압이 원래의 상태로 돌아오면 인버터 출력전압의 위상이 전원전압의 위상과 일치되게끔 동기화 제어를 행한 다음 양자간의 전압과 위상이 어느 오차 범위 내에 들었을 때 충전모드로 전환한다.

충전전력의 기준치는 그림에서 보는 것처럼 코일전류의 오차에 의해 결정된다. 코일전류의 오차를 비례제어기(P-controller)에 입력하고 그 출력을 포화시키면 초기충전시에는 일정 충전전력 제어상태로 동작한다.

이와 같이 인버터 제어를 행하는 동안 초과에서는 직류링크 전압을 일정히 하는 제어를 행하며 이를 통해 간접적으로 인버터에서 유입되거나 인버터를 통해 유출되는 전력과 코일의 충전방전 전력이 일치되도록 하는 작용을 한다.

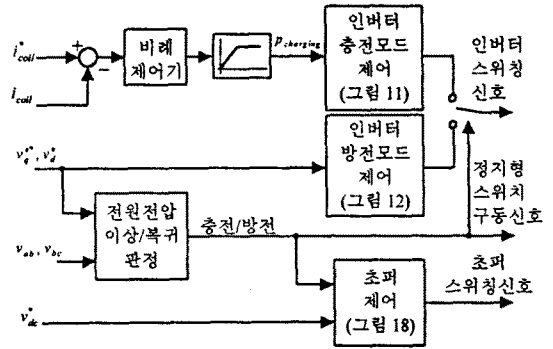


그림 9. SMES UPS 시스템의 전체 제어구성

5.2. 시스템의 동작 특성

그림 9의 제어루우프에 의해 시스템의 제어가 행하여질 때 충전 및 방전과정에서의 각종 변수의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

5.2.1 충전 과정에서의 동작

그림 10은 충전동작시의 전압과 전류, 전력 및 충전에너지의 변화를 보여주고 있다. 충전동작시 인버터에 인가되는 충전전력 기준치는 제어기 출력이 포화되는 판계로 일정한 값으로 주어진다. 그러나 맨 처음 코일의 전류가 0에 가까울 때는 코일에 직류링크전압이 전부 걸리며 이 기간중에는 코일 전류가 직선적으로 상승한다. 이 때 직류링크 전압이 일정하다고 하면 인버터에서 커패시터 쪽으로 흐르는 전류의 평균치는 코일전류와 같다고 할 수 있다. 이에 따라 입력전력은 제어기에서 주어지는 충전전력의 기준치와 일치할 때까지 직선적으로 상승한다. 실제로 있어 이 구간은 거의 무시할 수 있을 정도로 짧은 구간이다.

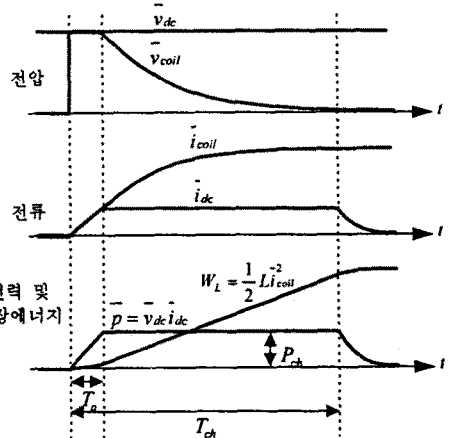


그림 10. 일정 충전전력제어시의 동작

코일전류가 어느 값 이상을 넘어서게 되면 일정 충전전력이 유지되며 코일에 축적되는 에너지는 직선적으로 상승한다. 이에

따라 코일 전류는 평방근 함수의 꼴로 상승한다. 이 과정 중 직류링크전압이 일정한 값으로 유지된다고 할 때 인버터 측에서 유입되는 전류의 평균치 역시 일정한 값을 유지한다. 한편 코일 전류의 상승에 따라 코일에 인가되는 전압의 평균치는 하강하며 최종적으로는 거의 0에 가까운 값으로 수렴한다.

코일전류가 최종 목표치 부근에 도달하면 충전전력의 기준치는 충전전력 상한치 아래로 감소하고 이와 같은 비율로 인버터 직류측 전류도 감소하여 최종적으로 정상상태에 도달한다. 정상 상태에서는 평균 코일전압과 인버터 직류측 전류가 0에 가까운 매우 낮은 값으로 유지되면서 시스템 내부의 손실만을 보충하고 있는 대기운전상태에 있게 된다.

5.2.2. 방전 과정에서의 동작

그림 11은 방전동작시의 제반 변수의 변화를 보여주고 있다. 코일이 방전될 동안 인버터에 의해 교류출력전압이 일정하게 제어되고 있다고 하면 부하의 임피던스가 그 기간 중 변화하지 않는 한 방전 역시 일정한 전력으로 이루어지고 있는 것으로 생각할 수 있다.

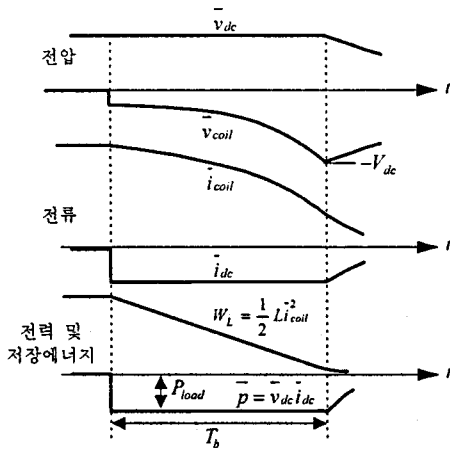


그림 11. 일정 방전전력제어에서의 동작

직류링크전압이 일정하게 제어되고 있다고 할 때 부하전력이 일정하면 인버터 직류측 전류도 일정한 값으로 유지된다. 그리고 코일의 에너지는 직선적으로 감소한다. 이에 따라 코일의 전류는 평방근함수의 꼴로 감소해 나가며 코일에 가해지는 전압의 평균치는 증가한다. 코일 평균전압의 최대 한계는 직류링크 전압이 되며 평균전압이 이 값에 도달하면 인버터가 더 이상 출력전압을 일정하게 유지할 수 없는 상태에 이르게 된다.

6. 시뮬레이션

시스템의 동작 특성을 예측하기 위해 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)을 이용하여 시뮬레이션을 행하였다. 표 1에 사용된 제정수를 나타내었으며 그 결과를 그림 12에서 16까지 나타내었다.

표 1. 시뮬레이션에 적용된 시스템의 제정수

변수명	설명	값
L	초전도코일 인덕턴스	0.2[H]
i_{coil}^*	초전도코일 기준전류	150[A]
n_{samp}	한주기 당 샘플링 수	150[회]
V_{dc}^*	직류측 기준전압	230[V]
R_{load}	부하	10[Ω]
L_f	인버터 출력측 필터의 인덕턴스	0.6[mH]
C_f	인버터 출력측 필터의 커패시턴스	300[μF]

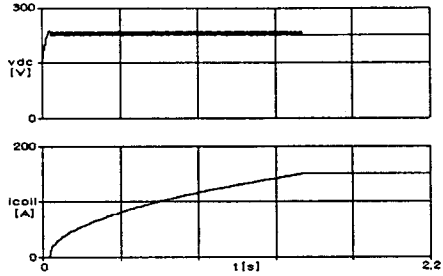


그림 12. 충전시 직류링크 전압과 코일전류

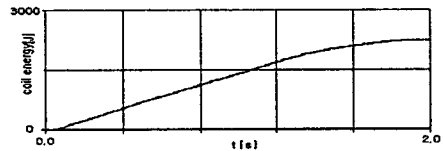


그림 13. 충전시 코일의 에너지변화

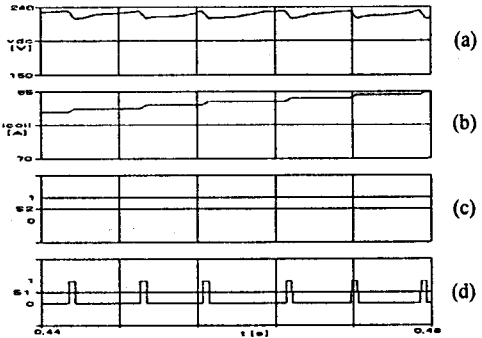


그림 14. 충전시 (a)직류링크 전압과 (b)코일전류, (c)(d)초퍼의 스위칭 신호(s1,s2)

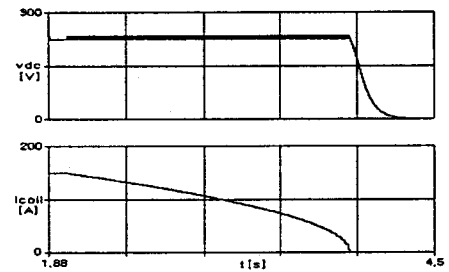


그림 15. 방전시 직류링크 전압과 코일전류

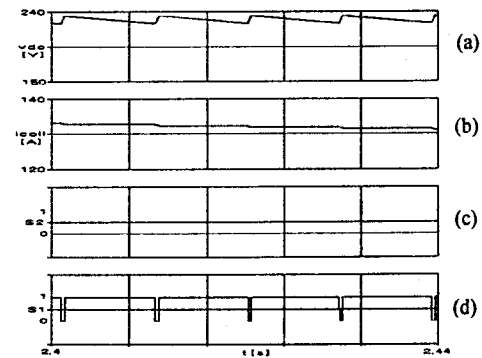


그림 16. 방전시 (a)직류링크 전압과 (b)코일전류, (c)(d)초퍼의 스위칭 신호(s1,s2)

7. 실험결과

시뮬레이션과 같은 제정수에서 실험하였으며 부하는 60W 전동 부하를 사용하였다. 결과를 그림 18에서 23 까지 나타내었다.

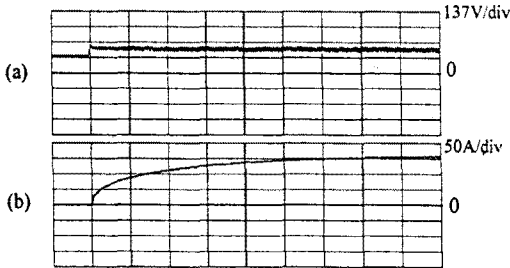


그림 18. 초기충전에서의 (a)직류링크전압과(b)코일전류(1s/div)

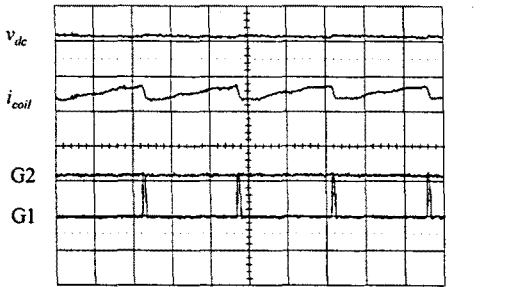


그림 19. 충전모드에서 코일전류(i_{coil}), 직류링크전압(v_{dc}), 초퍼 스위칭 신호(G1,G2) (20ms/div)

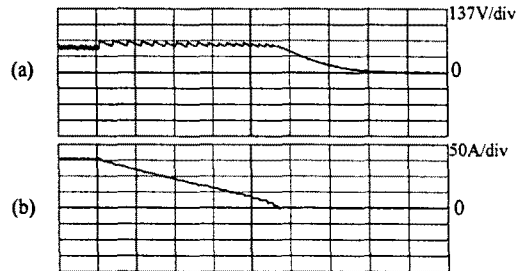


그림 20. 방전모드에서 (a)직류링크전압과 (b)코일전류 (1s/div)

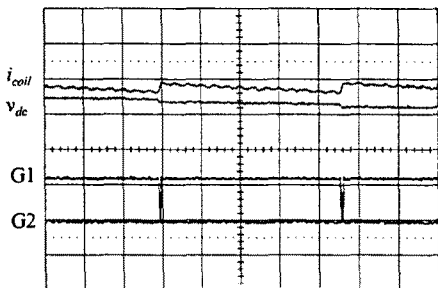


그림 21. 방전모드에서 직류링크전압(v_{dc}), 코일전류(i_{coil}), 초퍼 스위칭 신호(G1,G2) (0.1s/div)

8. 결론

본 연구는 초전도코일에 전력변환기술을 응용한 사례로서 국내에서는 아직 이루어진 바가 없는 내용이며 100KVA급 시스템 제작을 목표로 하고 있으며 10KVA급의 축소모델을 제작하여 실험하였다.

SMES UPS 시스템의 제어는 코일충전전류제어와 직류링크전압제어, 그리고 전원이상 발생시 출력전압제어가 주축이 된다.

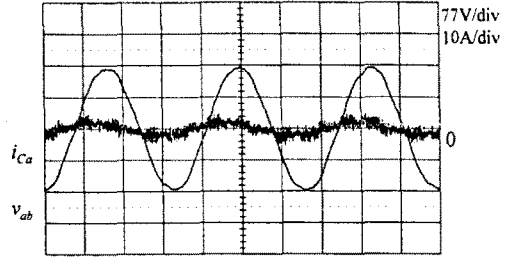


그림 22. 방전모드에서 전원의 선간전압과 인버터 교류측 전류(5ms/div)

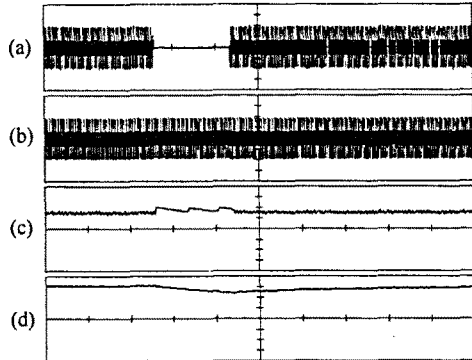


그림 23. 순간정전시 각부의 파형. (a) 주전원전압, (b) 인버터 교류측 전압, (c) 직류링크전압, (d) 코일전류 (0.5s/div)

이상의 제어방식을 컴퓨터시뮬레이션 프로그램을 작성하여 모의실험을 수행한 결과 예측한 바의 성능이 구현될 수 있음을 확인하였고 실제 제작된 마이크로프로세서 제어기에 제어 알고리즘을 적용하여 실험을 행함으로써 원하는 바의 제어동작이 성공적으로 수행됨을 확인하였다. 그리고 제작된 전력변환기의 각 부분이 정상적으로 가동되어 전체적으로 초전도코일의 충전 및 방전시에 원활한 동작뿐 아니라 순간적인 정전에 대한 대응 역시 원활히 이루어짐을 확인하였다.

향후 과제로는 시스템 내부손실의 최소화와 목표한 용량의 시스템 제작뿐만 아니라 부하 급변 시와 같은 과도상태에서 시스템이 안정하게 동작하도록 하며 정전 뿐 아니라 순간적인 전압의 함몰(voltage sag) 등과 여러 전원장애에 적절히 대응하는지를 확인, 상용화된 UPS와 같은 수준의 성능에 도달할 수 있는 가능성을 모색하는 것이다.

참고문헌

- [1] M. A. Daugherty, W. E. Buckles, G. A. Knudtson, D. L. Mann, and P. W. Stephenson, "SSD Operating Experience," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 3, No. 1, pp. 204-206, March 1993.
- [2] W.E. Buckles, M.A. Daugherty, B. R. Weber, and E. L. Kosteci, "The SSD: a Commercial Application of Magnetic Energy Storage," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 3, No. 1, pp. 328- 331, March 1993.
- [3] A. Nabae, S. Ogasawara, and H. Akagi, "A Novel Control Scheme for PWM Controlled Inverters," IEEE Industry Applications Society Annual Meeting Conference Records, pp. 473-478, 1985.
- [4] J. Holtz, and S. Stadtfeld, " A Predictive Controller for the Stator Current Vector of AC Machines Fed from Switched Voltage Source," IPEC, Tokyo, pp. 1665-1675, 1983.
- [5] O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, and H. J. Hegner, "A Voltage Control Strategy for Current-Regulated PWM Inverters," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 11, no. 1, pp. 7-15, Jan. 1996.
- [6] 나운기, 김태완, 정승기, "UPS 용 3상 인버터의 LC 필터단 출력전압 제어방식 비교연구", 대한전기학회 학계학술대회, pp. 312-317, 1996.