

소형 HTS SMES와 실시간 전력계통 시뮬레이터의 연계 알고리즘 제안

논문
59-1-16

Connection Algorithm Proposal of Real Time Digital Simulator with Miniaturized HTS SMES

김아롱* · 김경훈* · 김광민** · 박민원† · 유인근*** ·
심기덕§ · 김석호§ · 성기철§ · 박영일§§

(A-Rong Kim · Gyeong-Hun Kim · Kwang-Min Kim · Jin-Geun Kim · Minwon Park ·
In-Keun Yu · Kideok Sim · Seok-Ho Kim · Ki-Chul Seong · Youngil Park)

Abstract - Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) system is one of the key technologies to overcome the voltage sag, swell, interruption and frequency fluctuation by fast response speed of current charge and discharge. In order to evaluate the characteristics of over mega joule class grid connected High Temperature Superconducting (HTS) SMES system, the authors proposed an algorithm by which the SMES coil could be connected to the Real Time Digital Simulator (RTDS). Using the proposed algorithm, users can perform the simulation of voltage sag and frequency stabilization with a real SMES coil in real time and easily change the capacity of SMES system as much as they need. To demonstrate the algorithm, real charge and discharge circuit and active load were manufactured and experimented. The results show that the current from real system was well amplified and applied to the current source of simulation circuit in real time.

Key Words : SMES, RTDS, UPQC, FEM, Conduction cooling

1. 서론

초전도 에너지 저장장치 (SMES)는 빠른 반응 속도와 높은 에너지 저장효율로 인해 전력 품질 보상에 뛰어난 성능을 보인다. 특히 고온 초전도체로 이루어진 HTS SMES가 전 세계적으로 개발되고 있으며, 그 성능 역시 입증되고 있다 [1] - [5].

SMES의 에너지 충·방전은 계통의 전압과 전류의 변화에 영향을 받으며, SMES 전류의 변화는 코일 내 열을 발생시킨다. 극저온에서 저항이 0이 되는 초전도 특성을 가진 SMES는 운전손실에 의해 발생하는 열에 특히 민감하며, 액체 냉각보다 전도냉각 시스템에서 열에 의한 영향이 더 크게 나타난다. 그러므로 계통 연계 시뮬레이션에 있어 SMES의 운전 특성에 관한 고려가 필수적이다. 그러나 기존의 소프트웨어 기반 시뮬레이션은 SMES의 인덕턴스와 운전전류만으로 수행되고 있어 SMES의 중요한 특성인 운전손실, 열, 온도변화 등이 고려되지 않았다. 이런 한계를 극복하기 위해 저자들은 실제 SMES 시스템과 실시간 전력계통 시뮬레이터(RTDS)를 연계하는 알고리즘을 제안하였다 [6]. 제안된 알고리즘은 소형 SMES를 사용하여 RTDS내 계통에 연

계하는 것으로 계통의 변화에 따라 실제 SMES가 운전되므로 운전 특성을 그대로 반영할 수 있고, SMES의 용량을 사용자가 자유롭게 증폭할 수 있어 대용량 SMES의 계통연계를 위한 신뢰성 높은 사전 시뮬레이션이 가능하다. 본 논문에서는 제안된 알고리즘의 검증에 위해 실제 소형 HTS SMES를 제작하고 RTDS와 연계하여 그 결과들을 서술하였다.

2. 제안된 알고리즘

계통의 전력품질 개선을 위해 본 논문에서는 UPQC (Unified Power Quality Conditioner) - SMES 시스템을 실험 대상으로 하였다 [7] - [10]. 일반적인 UPQC-SMES 시스템은 그림 1과 같이 직렬과 병렬로 계통에 연결되어 있는 2개의 DC/AC 컨버터와 DC link에 SMES 시스템이 있는 구조이다. 계통에 직렬로 연결된 컨버터는 순간전압강하·상승 및 전압 고조파를 보상하는 역할을 하며, 병렬 컨버터는 무효 전력, 순간정전 및 전류고조파를 보상하는 역할을 한다.

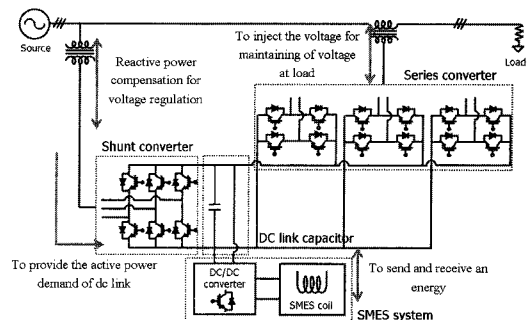


그림 1 실험에 활용된 UPQC-SMES 시스템의 구조
Fig. 1 Configuration of the proposed UPQC-SMES system

* 정 회 원 : 창원대 공대 전기공학과 박사과정
** 준 회 원 : 창원대 공대 전기공학과 석사과정
*** 시니어회원 : 창원대 공대 전기공학과 교수
§ 정 회 원 : 한국 전기연구원 선임연구원
§§ 비 회 원 : 국방기술품질원 선임연구원
† 교신저자, 정회원 : 창원대 공대 전기공학과 교수

E-mail : paku@changwon.ac.kr

접수일자 : 2009년 8월 21일

최종완료 : 2009년 11월 12일

그림 2는 본 논문에서 제안된 알고리즘의 회로도이다. SMES 시스템과 충·방전 회로는 실제로 제작이 되며, UPQC 시스템과 3상 계통은 RTDS내에 구성되어 있다. RTDS내 UPQC 시스템의 전원역할을 하는 SMES는 인덕턴스 대신 외부의 신호에 따라 바뀌는 전류원으로 구성되어 실제 SMES로부터 충·방전 되는 전류에 따라 변하게 된다. 이때 변하는 전류는 사용자가 원하는 값으로 증폭이 가능하므로 소형 SMES 만으로도 대용량 SMES의 역할을 할 수 있게 된다.

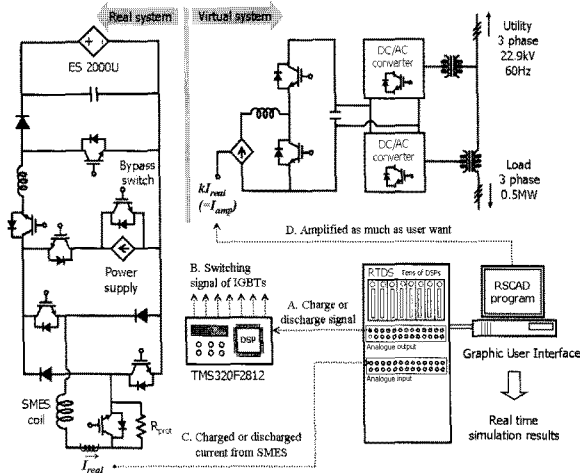


그림 2 제안된 알고리즘의 회로도
Fig. 2 Conceptual schematic diagram of the proposed algorithm

R_{prot} 은 SMES 코일을 쿨치로부터 보호하기 위한 저항이며, ES2000U™는 캐패시터 양단의 전압을 일정하게 유지시키면서 SMES로부터 에너지 방전 시 전류를 흡수하는 역할을 하게 된다. 이때 전류를 흡수하는 양은 RTDS내 계통이 흡수하는 양에 비례한다. 계통에 순간전압강하나 순간정전 발생하게 되면 RTDS의 출력단자에서 DSP로 신호를 주게 되고 (A) DSP는 IGBT에 스위칭 신호를 보내어 (B) SMES의 에너지가 방전하게 된다. 이때 방전된 전류(I_{real})는 증폭되어 RTDS내 전류원의 값으로 입력되고 (C, D) UPQC-SMES 시스템의 전원역할을 하게 된다. 순간전압상승이나 계통의 에너지가 규정된 값보다 초과하는 경우 역시 RTDS로부터 출력된 신호가 DSP로 전달되고 IGBT의 스위칭으로 인해 SMES에 에너지가 충전되며 이 결과는 RTDS 내에서 증폭되어 UPQC-SMES 시스템의 전류원에 적용된다.

3. SMES 시스템 설계, 해석 및 제작

HTS SMES 코일 제작을 위해 채택한 선재는 AMSC™사에서 개발된 BSCCO wire로 사양은 표 1과 같다.

표 1 BSCCO wire의 사양
Table 1 Specifications of BSCCO wire

Max. thickness (mm)	0.38 (include kaptone tape)
Max. width (mm)	4.3
I_c @ 77K (A)	142
Total length (m)	116

초전도 코일의 형태는 더블 팬케익이며 코일의 자장 해석을 위해 FEM tool인 MagNet을 이용하여 그림 3과 같이 코일의 중심자장, 수직자장 및 수평자장을 해석하였다. 해석된 코일의 인덕턴스는 9mH, 1A 일 때 중심자장은 0.0032T, 최대 수직자장은 0.00256T, 최대 수평자장은 0.00317T이다.

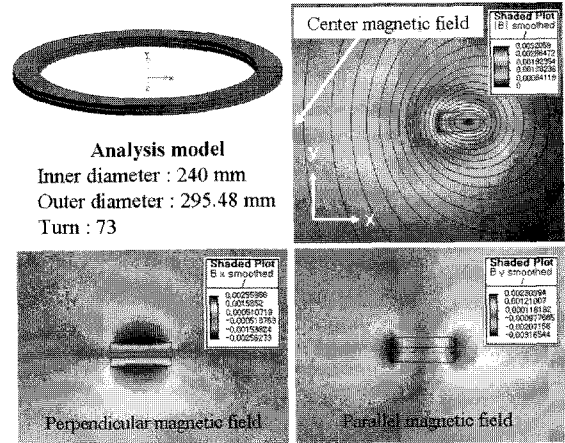


그림 3 초전도 코일의 자장 해석
Fig. 3 FEM analysis results of the superconducting coil

해석된 코일을 바탕으로 실제 초전도 선을 이용하여 코일을 제작하였다. 그림 4는 초전도 선을 알루미늄 보빈에 감는 과정이다. 각 선과의 절연을 위해 Kapton tape을 사용하였으며, 전류를 통전하여 양단 전압을 측정한 결과 해석과 같은 값인 9mH의 인덕턴스를 가짐을 알 수 있었다.

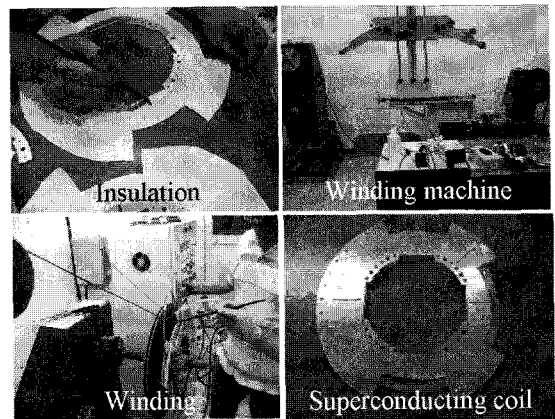


그림 4 초전도 코일 권선
Fig. 4 Winding of the superconducting coil

그림 5는 초전도 코일을 포함하여 조립된 시스템의 전체 형상이다. 외부로부터 전류가 흐르는 상온 전류리드 (metal current lead)는 1단부 냉동기에 의해 냉각되며 끝 단자는 편조선을 이용하여 초전도 전류리드 (HTS current lead)와 연결하였다. 이 때, 초전도 전류리드는 초전도를 유지하면서 약 280A까지 전류를 통전 할 수 있다 [11]. 초전도 코일의 운전온도인 20K을 유지하기 위해 2단부 냉동기는 주로 초전도 코일을 냉각하는 역할을 수행하며, 열 분배를 위해 전도바를 이용하여 코일이 냉각되도록 구성되어 있다. 그림 6은 시스템 조립 후 시간에 따라 변화하는 SMES 시스템의

각 부분의 온도를 나타낸 것으로 약 14시간 후 초전도 코일 운전온도인 20K 이하로 냉각이 되었음을 알 수 있다 [12].

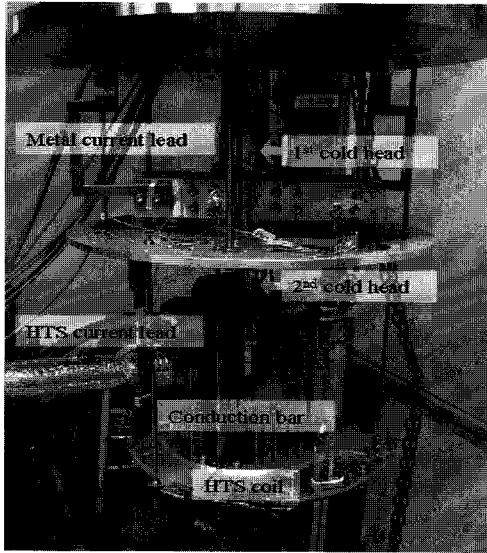


그림 5 조립된 SMES 마그넷 코일의 형상
Fig. 5 Configuration of assembled SMES magnet coil

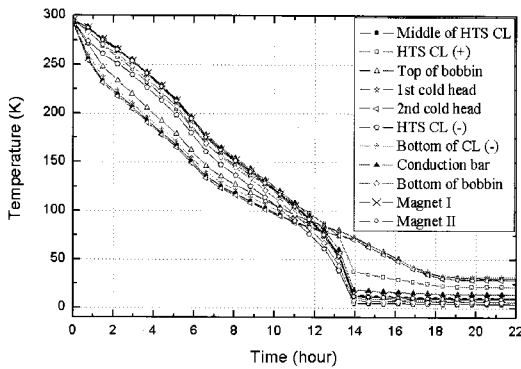


그림 6 전도냉각 시스템의 온도변화
Fig. 6 Temperature variation by conduction cooling system

4. RTDS와의 연계 알고리즘 실험

제작된 SMES와 RTDS의 연계 확인을 위해 충·방전회로를 제작하고 알고리즘 검증을 위한 실험을 하였다. 표 2는 제작된 시스템의 사양을 나타낸 것이며, 그림 7은 제작된 충·방전회로와 IGBT 스위칭을 위한 DSP, 계통이 모의될 RTDS와 RTDS의 아날로그 신호 입·출력을 위한 GTA0, GTAI 카드이다.

SMES에 통전한 실제 전류는 70A이며, RTDS내 반영된 전류의 증폭율은 약 15.8로 최대 1.1kA로 통전하는 것을 시뮬레이션 하였다. 연계 결과 확인을 위해 전류의 충·방전에 대한 실험을 진행하였으며 이때, RTDS내 반영되는 전류와 UPQC 시스템의 동작확인을 위해 계통에 병렬로 연결된 DC/AC 컨버터로 DC link 전압을 제어하도록 모의하였다. 그림 8은 RTDS내 신호에 의해 실제 SMES에 전류가 충전되는 파형과 이때 전류가 RTDS내 전류원으로 증폭되는 것을 나타낸 것이다.

표 2 제작된 충·방전회로의 사양

Table 2 Specifications of charge and discharge circuit

Devices	Rating	Number
IGBT	600A 1200 volt	7
Inductor	5mH 200A	1
Diode	380 A	3
power supply	700A 15 volt	1
DSP	TMS320F2812	1
GTAI card	± 10 volt	1
GTAO card	± 10 volt	1

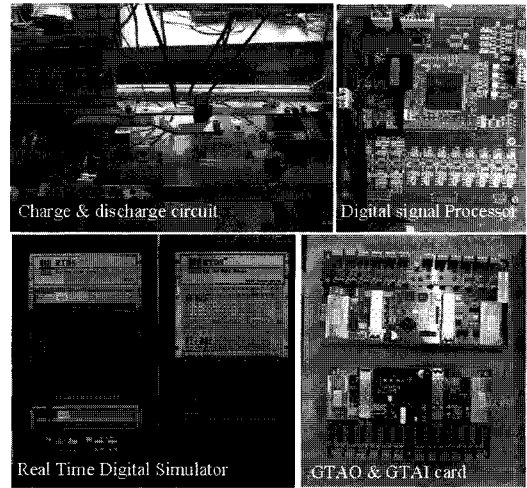


그림 7 제작된 충·방전회로와 RTDS
Fig. 7 Charge and discharge circuit and RTDS

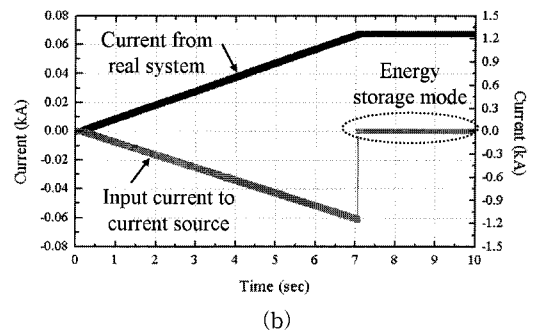
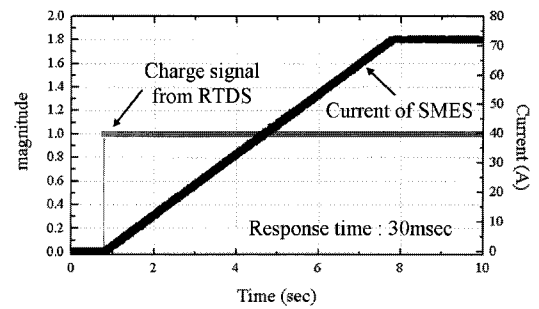


그림 8 충전시 SMES 전류변화 (a) 충전신호와 SMES 전류 (b) 실제 SMES 전류와 RTDS내 증폭된 전류
Fig. 8 Current variation during charging (a) current charge signal and SMES current (b) real SMES current and amplified current in RTDS

그림 8(a)는 RTDS로부터 신호가 출력된 경우, SMES에 전류가 충전되는 것으로 충전신호가 출력된 이후 SMES로 전류가 충전되기까지 약 30msec의 속도 차이를 보였다. 그림 8(b)는 SMES에 충전된 전류와 RTDS내 증폭되어 적용된 전류를 나타낸 것으로, RTDS내 전류원으로부터 계통으로 방전하는 방향이 (+) 이므로 충전 시 전류는 (-) 방향이 된다. SMES에 에너지가 저장되어 있는 경우, UPQC-SMES 시스템과 계통 사이에 에너지 변화가 없어야 하므로 0으로 제어하였다.

SMES를 충전하는 경우, UPQC-SMES 시스템의 dc link 전압은 병렬 컨버터에 의해 일정하게 유지되어야 한다. 그림 9는 충전 시 dc link 전압의 변화를 나타낸 것이다. 10kV로 유지되고 있던 DC link 전압이 최대 200volt로 변동하였으나 다시 10kV로 유지되고 있음을 볼 수 있다.

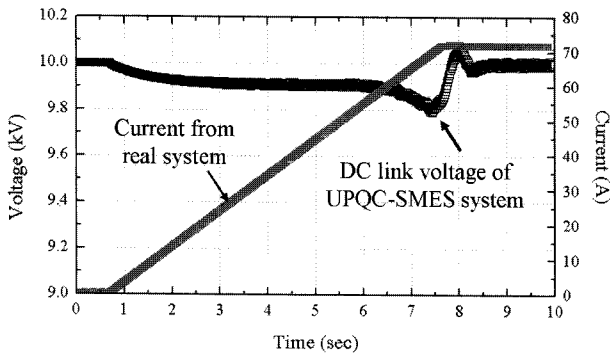


그림 9 SMES 에너지 충전 시 dc link 전압
Fig. 9 DC link voltage during charge mode of SMES

SMES 전류 변화는 코일 내의 자장을 변화시켜 급속으로 이루어진 보빈에는 와전류 손실을, 초전도 코일에는 자화손실을 발생시켜 시스템에 열이 발생하게 된다. 그림 10은 충전 시 SMES 시스템의 온도 변화를 나타낸 것이다. 10A/s의 속도로 충전하였으며, 초전도 코일과 보빈에서 기준 온도보다 최대 1K 상승하였다. 하지만 운전온도 목표인 20K이하로 계속 유지되고 있는 것을 볼 수 있다.

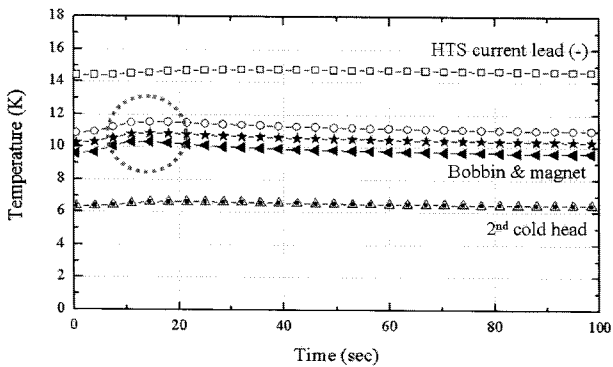
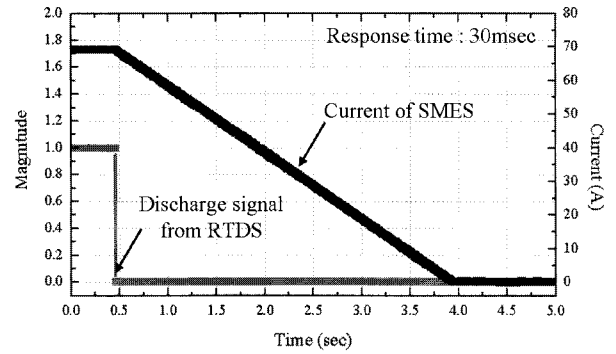


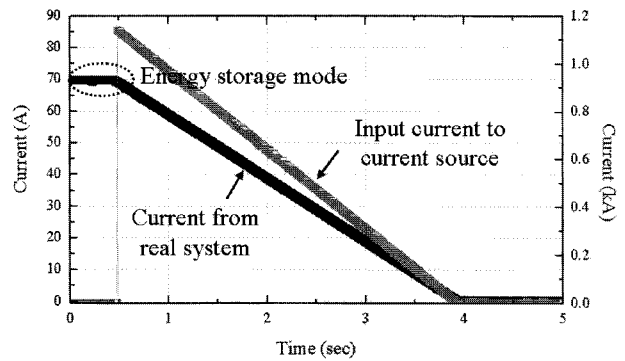
그림 10 SMES의 전류 충전으로 인해 변화한 온도
Fig. 10 Temperature variation by charge mode of SMES

충전 시와 마찬가지로 증폭율이 약 15.8일 경우, SMES의 전류를 70 ~ 0A까지 20A/s의 속도로 방전한 과정을 그림 11에 나타내었다. 그림 11(a)는 RTDS로부터 신호가 출력된

경우 SMES에 전류가 방전하는 것이며 충전과 마찬가지로 신호가 출력된 이후 SMES로부터 전류가 방전하기 시작하는 반응 속도는 약 30msec 이다. 그림 11(b)는 SMES로부터 방전된 전류와 RTDS내 계통으로 방전되는 전류를 나타낸 것이며 방향은 (+), 에너지 저장 상태인 경우 0으로 제어되고 있다.



(a)



(b)

그림 11 방전 시 SMES 전류변화 (a) 방전신호와 SMES 전류 (b) 실제 SMES전류와 RTDS내 증폭된 전류

Fig. 11 Current variation during discharging (a) current discharge signal and SMES current (b) real SMES current and amplified current in RTDS

실제 SMES로부터 에너지를 방전하는 경우 역시 UPQC-SMES 시스템의 DC link 전압은 병렬 컨버터에 의해 그림 12와 같이 일정하게 유지되어야 한다.

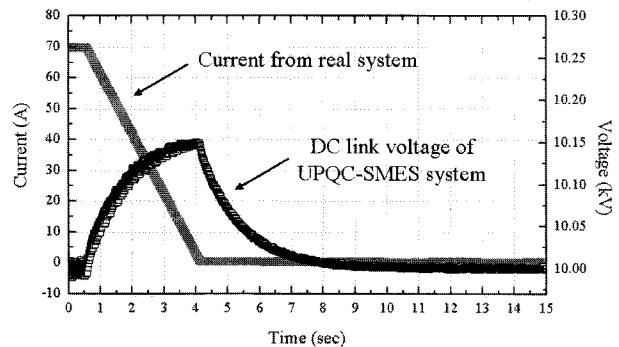


그림 12 SMES 에너지 방전 시 dc link 전압
Fig. 12 DC link voltage by discharge mode of SMES

그림 13은 방전 시 SMES 시스템의 온도 변화를 나타낸 것으로 전류 충전 시 속도보다 2배 상승하였으므로 보다 급격한 온도 변화 곡선을 발견할 수 있다. 초전도 코일과 보빈에서 기존 온도보다 최대 2K 상승하였으나 운전온도 20K 이하로 계속 유지되고 있는 것을 볼 수 있다.

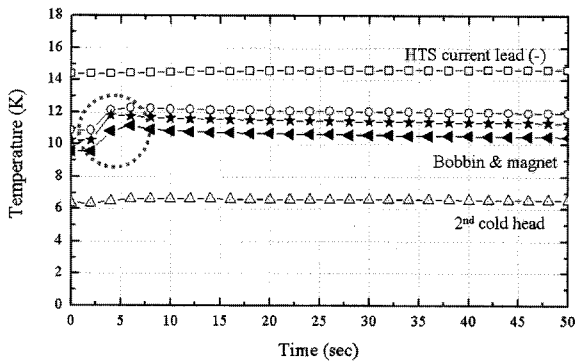


그림 13 SMES의 전류 방전에 따른 온도 변화
Fig. 13 Temperature variation by discharge mode of SMES

5. 결 론

본 논문에서는 대용량 SMES의 계통 적용에 있어 신뢰성 높은 사전 시뮬레이션을 가능하게 하기 위한 알고리즘을 제안하고 이를 검증하기 위해 소형 SMES를 포함한 시스템을 제작, RTDS와 연계한 결과를 기술하였다. 실험을 통해 얻은 결과에 따라 소형 SMES에 충·방전 되는 전류가 RTDS 내 사용자가 원하는 증폭율로 증폭이 가능하며 UPQC-SMES 시스템의 전류원에 적용되어 계통에 반영됨을 알 수 있었다. SMES에 에너지 충전 시 발생하는 전류, 전압, 온도 변화는 계통의 순간전압 상승 등을 보상하는 단계에 적용되며 SMES로부터 에너지 방전 시 발생하는 전류, 전압, 온도 변화는 계통의 순간전압감하나 순간정전을 보상하는 단계에 적용된다. 향후 출력이 일정하지 않은 분산전원으로 인해 변동하는 계통의 주파수를 SMES를 이용하여 안정화 했을 때 계통과 SMES의 변화에 대해 실험 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발 사업의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

[1] Karasik, V., Dixon, K., Weber, C., Batchelder, B. Campbell, G. and Ribeiro, P., "SMES for power utility applications: a review of technical and cost considerations," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 9, No. 2, JUNE 1999
[2] H.K. Yeom, S.J.Park, Y.J.Hong, D.Y.Kho, K.C.Seong, H.J.Kim and T.B.Seo, "An experiment study of the conduction cooling system for the 600kJ HTS SMES", IEEE Trans. Appl. Supercond, VOL.18, No.2, JUNE 2008

[3] A.R. Kim, G.H. Kim, J.H Kim, M. H. Ali, M.Park, I. K. Yu, H.J. Kim, S.H. Kim and K.C. Seong, "Operational Characteristic of the High Quality Power Conditioner with SMES," IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 8, No.2, 2008
[4] Ishikawa T., Akita S., Taniguchi S., Kohso S., and Tanaka, T., "Power system stabilization by SMES using current-fed PWM power conditioner", Power Electronics Specialists Conference, Vol. 1, pp. 334-401, 1988.
[5] P.Tixador, M., Deleglise, A. Badel, K. Berger, B. Bellin, J. C. Vallier, A. Allais, and C. E. Bruzek, "First Tests of a 800kJ HTS SMES," IEEE Trans. Appl. Supercond. VOL.18, No.2, JUNE 2008
[6] A.R. Kim, H.Y. Jung, J.H Kim, M. H. Ali, M. Park, I. K. Yu, H.J. Kim, S.H. Kim and K.C. Seong, "A Study on the Operation Analysis of the Power Conditioning System with Real HTS SMES Coil," Elsevier Physica C, Vol.468, pp.2104-2110, 2008
[7] Yunping Chen, Xiaoming Zha, Jun Wang, Huijin Liu, Jianjun Sun and Hongha i Tang, "Unified Power Quality Conditioner (UPQC): the Theory, Modeling and Application", Proceedings. PowerCon2000. Vol. 3, pp 1329-1333, 2000
[8] L.Gyugyi, "Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems", IEE PROCEEDINGS-C, Vol.139, No.4, JULY 1992
[9] H. Fujita and H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series- and Shunt-Active Filters", IEEE Trans. on Power electronics, Vol.13, No.2, March 1998
[10] Malabika Basu, Shyama P.Das and Gopal K. Dubey, "Comparative evaluation of two models of UPQC for suitable interface to enhance power quality", Elsevier, Electric power systems research 77, 2007, pp.821-830
[11] H.Y. Park, K.M. Kim, D.W. Kim, A.R. Kim, M.Park, I.K. Yu, S.H. Kim, K.D.Sim and M.H. Sohn, "Desing and manufacturing of HTS current lead for 10kJ SMES", KIEE 2009
[12] K.M. Kim, A.R. Kim, J.K Kim, H.Y. Park, M.Park, I.K. Yu, S.H.Kim and K.D. Sim, "Heat load characteristic analysis of conductio cooled 10kH HTS SMES", KIEE 2009

저 자 소 개



김 아 룡 (金 아 룡)

1983년 7월 6일생. 2006년 국립창원대학교 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



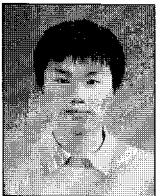
김 경 훈 (金 慶 勳)

1982년 10월 1일생. 2006년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2006년 8월 ~ 2007년 2월 한국전기연구원 신재생 에너지 그룹 위촉연구원, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



심 기 덕 (沈 基 德)

1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도 응용 센터 선임연구원 및 동 대학원 전기공학과 박사과정



김 광 민 (金 光 民)

1981년 9월 10일생. 2009년 창원대학교 전기공학과 수료, 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정



김 석 호 (金 錫 鎬)

1975년 3월 2일생, 1997년 KAIST 기계공학과 졸업, 1999년 동대학원졸업 (공학석사), 2005년 동대학원 졸업(공학박사), 2005년 ~ 현재 한국전기연구원 초전도 응용 센터 선임연구원.



박 민 원 (朴 敏 遠)

1970년 2월 12일생, 1995년 창원대 전기공학과 졸업, 2002년 일본 오사카대학 대학원 전기공학과 졸업(공학석사, 공학박사), 2001년 10월 ~ 2004년 8월 한국 전기연구원 차세대 초전도 응용기술 개발 사업단 기술팀장, 2004년 9월~현 창원대학교 전기공학과 조교수



성 기 철 (成 耆 哲)

1956년 2월 20일생, 1980년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2002년 창원대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도 응용 센터 센터장



유 인 근 (劉 仁 根)

1954년 2월 18일생, 1981년 동국대학교 졸업, 1983년 한양대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년 6월 ~ 1988년 2월 한국 전기연구원 선임연구원(지중송전연구실장), 1988년 3월 ~ 현 창원대학교 전기공학과 교수



박 영 일 (朴 榮 一)

1962년 2월 1일생, 1987년 부산 대학교 기계설계공학과 졸업, 2009년 창원대학교 산업대학원 기계공학과 졸업 (공학석사) 1990년 9월 ~ 현재 국방기술품질원 기동화력센터 근무 선임연구원