

고온초전도 베어링의 플라이휠 에너지 저장장치 응용

이준성, 성태현, 김상준
전력연구원 전력계통연구실 전기이용기술그룹

1. 머리말

플라이휠 에너지 저장기술은 높은 에너지저장밀도, 높은 에너지출력밀도, 반영구적인 수명, 환경친화성 등의 장점에 힘입어 에너지 기술분야의 새로운 장을 열어가고 있다.

플라이휠은 이미 100여 년 전부터 동력장치 등에서 회전체의 관성을 늘리고 균형을 잡아서 주기 운동을 부드럽게 유지하기 위해 사용되어 왔고, 현재에도 각종 동력기관 등에 필수적으로 쓰이고 있다. 최근에 거의 실용화에 접근한 플라이휠 무정전장치 등도 이러한 플라이휠의 응용과 맥을 같이하는 신기술 장비라고 볼 수 있다.

한편, 플라이휠 기술의 응용분야 중 전력기술에서는 위에서 언급한 장점들을 추구하는 것 이외에도, 회전시에 필연적으로 발생할 에너지 손실을 최소화하는 것이 필수적인 요소기술로서 매우 중요하다. 이러한 기술은 한마디로 회전부와 고정부의 기계적 접촉을 배제하는 무접촉 베어링 기술로서, 전자석을 이용하여 회전체의 위치를 능동적으로 제어하는 자기 베어링과 고온초전도 벌크를 이용하는 초전도 베어링으로 크게 나눌 수 있다.

능동 자기 베어링은 대부분의 정·동적 특성을 임의로 조절할 수 있다는 장점이 있는 반면, 가동시에 계속적으로 전력이 소모되고 별도의 제어 장치가 필요하며 급작스런 고장 발생에 대비해 신뢰성을 확보하기 위해서는 제어 모듈을 중복적으로 설치해야 하는 등의 약점이 있다. 한편, 초전도 베어링은 고온초전도체의 냉각 상태에 의해 베어링이 작동되므로 신뢰성이 매우 높고 제어 장치가 필요없으며 초전도체의 냉각 유지에 필요한 정도의 에너지만 소모된다는 장점이 있으나, 베어링의 강성, 감쇠력 등을 임의로 조절하기가 매우 어렵다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 이 두 베어

링을 병용하는 방식이 플라이휠 에너지 저장장치에 사용되는 베어링 기술 개발의 주류를 이루고 있다.

이 글에서는 여러 방향으로 진행되고 있는 플라이휠 에너지 저장장치와 베어링 기술 개발에 대해 간략히 소개하고자 한다.

2. 고온초전도 베어링의 특징

고온초전도체가 개발되기 전까지 초전도체의 응용은 전적으로 거시적 양자효과와 전기수송능력을 이용하는 것에 국한되어 있었고, 낮은 임계자기장으로 인해 그 전기수송능력 또한 제한되고 있었다. 고온초전도체의 개발 이후, 기존 초전도체의 거의 모든 응용처를 고온초전도체로 대체하는 연구들이 성과를 보이고 있다는 것 외에도, 고온초전도체의 열적 안정성, 높은 임계자기장, 높은 임계온도 등 많은 장점을 이용하는 새로운 응용 분야들이 탄생되었다. 고온초전도체의 자속 배척, 자속 포획력을 이용하는 자기부양기술도 그 중 하나이다. 고온초전도를 이용하는 자기부양기술 중에는 고온초전도 선재로 제작하는 초전도 전자석 기술도 포함되지만 여기에서는 벌크 형태의 응용만을 다루고자 한다.

고온초전도 재료 중 자기부양기술에 벌크의 형태로 이용되는 것은 주로 YBCO 재료인데, YBCO가 BSCCO 등에 비해 초전도 질서도의 2차원성이 약하다는 것, 즉 고온초전도 재료 내부에 층상 구조에 의해 근원적으로 존재하는 결합(intrinsic junction)이 강하여 초전도체 내부에서 자기장의 국소화를 강하게 한다는 것이 벌크 자기부양 응용을 돕는 중요한 특징이라고 본다. 고온초전도 자기부양 연구 초기에는 YBCO 외에 BSCCO, TBCCO 등 여러 재료에 대한 검토가 있었고[1], YBCO 재료를 부도체 모재(matrix)와 섞어 성형하기도 하였다[2]. 그러나 이후 중자결정법

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집

등의 용융공정에 의해 YBCO 단결정이 제작된 이후에는 YBCO의 특징점이 부각되고, 경제적으로 대면적 단결정을 제작하는 공정에 대한 연구와, 인위적으로 자속 고정력을 향상시키기 위한 연구가 계속되고 있다.

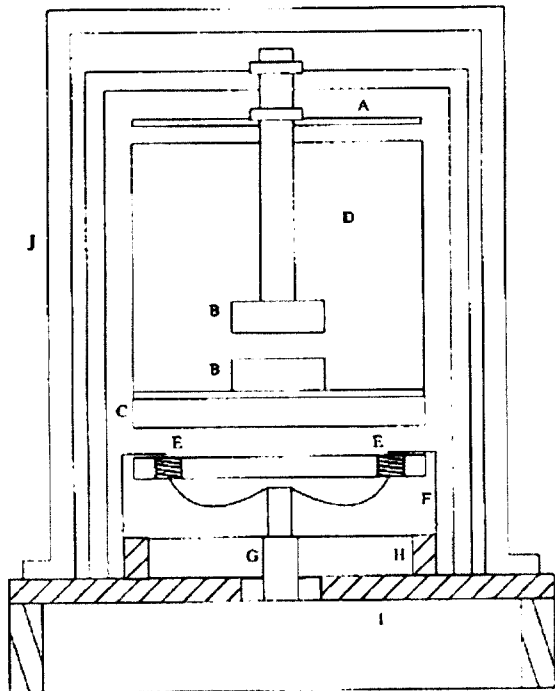
고온초전도 베어링은 일반적으로 영구자석을 포함하는 회전자와 고온초전도 벌크로 구성된 고정자로 이루어진다. 회전자를 평형 위치에 두고 고온초전도체를 냉각시킴으로써 회전자에서 발생한 자속이 고온초전도체 내부에 일부 고정되어, 회전자가 평형 위치에서 이동할 경우 발생하는 복원력으로 베어링으로서의 역할을 하게 된다.

고온초전도 벌크의 베어링 고정자로서의 성능은, 자속을 내부에 포획시켜 사용하든 반자성에 의한 자속 배척을 이용하든 어느 경우에 대해서나 초전도체의 자기장 포획 능력으로써 평가할 수 있다. 고온초전도 벌크의 최대 포획자장을 증가시키는 방법은 위에서 언급한 바와 같이 단결정을 대면적화 하는 방법과 내부 미세구조 등을 인위적으로 조절하여 자속 고정력을 향상시키는 방법이 있다. 이 중 대면적화에 의한 효과는 외부에서 제공되는 자기장이 충분히 강할 경우 최대 포획자장이 단결정의 최소 반경에 비례하며, 이러한 경우 발생될 수 있는 자기력도 초전도체의 총 면적이 같을 때 단결정의 반경에 비례하게 되는 것으로 설명할 수 있다. 단 유의해야 할 점은, 초전도체를 2차원적으로 볼 때 초전도체 내부 한 지점의 자속 포획량은 자기장에 수직 방향인 초전도체 외부의 비 초전도 영역과의 거리에 따라 결정된다는 것이다. 또한 비 초전도 영역이 초전도 영역의 내부에 존재할 경우에는 형상기하적인(topological) 이유로 이를 내부의 자속밀도가 균일한 하나의 큰 자속 고정점으로 보아야 할 것이다. 최근 국내에서도 진행되고 있는 다중 종자에 의한 대면적 결정성장 연구도 위와 같은 특성을 잘 이용하여 좋은 결과가 나올 수 있을 것이라고 기대된다.

한편, 고온초전도체의 자속 고정력 향상에 의한 효과는 작은 반경의 단결정에서도 더 높은 포획자장을 얻을 수 있다는 것으

로, 특히 베어링 회전자 자기장의 비대칭성과 회전자의 진동 등에 의해 발생하는 자기장 변화에 의한 초전도체 내부의 자속 이동을 줄여 베어링의 특성을 더 좋게 할 수 있다는 점이다. 초전도체 내부의 자속 이동은 초전도체 내에서 발생하는 비가역 손실(hysteresis loss), 회전자의 평형위치이동(levitation drift) 등을 유발시킨다. Hikihara와 Moon은 고온초전도체의 비가역 자화 특성에 의해 발생한 초전도 베어링의 혼돈적(chaotic) 동특성을 측정 분석한 바 있다[3]. 또, Hikihara 등은 중량 456 g의 시험용 회전체를 MPMG-YBCO 위에서 회전시켜 평형위치 이동 측정을 한 바 있다[4]. 이 실험의 결과를 참고하여 현실적인 플라이휠 베어링에 대해 유추하기엔 미흡한 점이 많으나, 최근에 제조되고 있는 고품질의 단결정들은 상당히 강한 자속 고정력을 가지고 있어 플라이휠 베어링에 적절하게 사용 가능하리라 본다. 그림 1은 Coombs 등이 제작한 플라이휠 장치의 개략도이다[5]. 이것은 베어링 고정자에 영구자석을 사용하여 회전자 자석과의 인력으로 대부분의 정하중(static load)을 담당하게 하고 고정자 고온초전도체로 고정력을 발휘하도록 한 것으로, 축 방향으로의 평형위치이동을 줄임과 동시에 초전도 베어링에서 발생하는 여러 종류의 회전 손실을 줄이기 위한 구성이다.

고온초전도 베어링에서 회전자 영구자석으로는 주로 Nd-B-Fe 자석을 사용한다. 이 종류의 자석은 잔류자속밀도(Br)가 1.1~1.3 T 정도이고, 보자력(Hc)은 상온에서 14 kOe 정도이며 온도 변화에 따른 보자력의 변화도 커서 -40 °C 정도에서 24 kOe에 달하게 된다. 그러나 이 자석으로 이루어진 일반적인 베어링 회전자에서 고정자 고온초전도체에 가하는 자기장은 자기 저항(magnetic reluctance)에 의한 감자 효과로 인해 수천 가우스 정도로 한정되게 된다. 이 정도의 자기장은 단결정 YBCO의 성능 한계에 못 미치므로 고온초전도 베어링의 하중 지지력과 강성을 제한하는 큰 요인이 되고 있다. 따라서 영구자석의 자속 경로를 효율적으로 구성하여 초전도체에 가해지는 자기장을 강화하는 방



Key:
 A - Loading/positioning plate B - Support Magnets
 C - Stability Magnets D - Flywheel
 E - (ring of) Superconductors F - Cryocooler Shield
 G - Cryocooler H - Radiation Shield Supports
 I - Base Plate J - Chamber

Not To Scale

그림 1. 베어링 고정자에 영구자석과 고온 초전도체를 병용하여 제작한 수직축형 플라이휠 장치. 참고문헌 [5]에서 발췌.

안이 여러모로 고안되었다. 이 방안들은 대체적으로 자석의 극 배열을 조정하여 자기장과 고온초전도체와의 상호 작용을 극대화하는 방법과, 자속 경로를 강자성체로 구성하여 자기 저항을 줄이는 방법을 혼합한 것으로, 적용 대상인 플라이휠 장치의 구성에 따라 다양함을 보인다.

회전자 영구자석은 고온초전도 베어링의 회전 손실의 가장 많은 부분을 차지하는 또다른 문제점을 가지고 있다. 이것은 회전 방향으로 자기장이 불균일하게 발생하는 문제이다. 이로 인해 회전자가 고속으로 회전할 때 고정자의 전도체 부분에서 와전류 손실이 발생하고, 고온초전도체에서는 비가역 손실이 발생하는데, 후자는 단결정 품질의 개선을 통해 많이 감소되고 있는 실정이다. 이 문제를 해결하기 위해서 회전자의 자석을 회전 방향에 대해 소형의

단일체로 제작하거나, 자석의 고정자 방향에 강자성 재료를 부착하여 자기장 강도를 균일화하는 방안 등이 고안된 바 있으나, 뚜렷한 해결책은 되지 못하고 있다. 장차 플라이휠 장치의 대량생산이 이루어져 대형 자석을 착자하여 사용할 수 있게 된다면 이 문제에 대한 약간의 개선이 이루어지리라 본다. 또, 고정자가 여러 개의 초전도 단결정으로 구성되어 있는 등의 여러 이유로, 고정자에서 유도되는 자기장이 회전 방향으로 균일하지 않음으로 인해 회전자 자석과 도체 부분에서 발생하는 와전류 손실 또한 존재한다. Terentiev 등은 위의 여러 요소에 의한 회전 손실을 측정 분석한 바 있다[6].

3. 플라이휠 에너지 저장장치에의 적용

플라이휠 에너지 저장장치는 회전체 축의 방향에 따라 수직축형과 수평축형으로 나눌 수 있고, 이러한 분류는 회전체에 가해지는 중력이 베어링이 지지해야 할 기본 부하라는 면으로 볼 때 자연스러운 것이다. 베어링의 설계도 축의 방향에 따라 달라질 수밖에 없는데, 특히 고온초전도 베어링의 경우에는 초전도체와 자석간의 인력과 척력이 다르므로 최적화를 위해 더욱 전체 시스템이 반영된 설계가 필요하다.

수직축 플라이휠은 중력 방향과 회전축의 방향이 같기 때문에 베어링이 회전 대칭적인 조건에서 작동하게 된다. 따라서 고온초전도 쓰러스트(thrust)베어링을 사용할 경우 초전도체의 하중 지지력을 최대한으로 이용할 수 있고, 앞서 언급한 평형위치이동이 큰 문제가 되지 않는다는 장점이 있다. 근래에 설계 개발되고 있는 플라이휠 에너지 저장장치의 대부분이 수직축형으로 구성되고 있으며, 여기서 초전도 베어링은 주로 정하중으로 이루어진 회전축 방향의 부하를 담당하기 위해 쓰여지고 복수의 능동형 자기 베어링이 반경 방향의 위치 제어를 위해 사용된다. 이러한 구성은 베어링이 회전 대칭적으로 작동한다는 점 이외에도 에너지 저장 휠을 축 방향으로 비대칭적으로 자유롭게 구성할 수 있고, 회전축의 직경에 대한 제약이 적어 회전체의 고유탄성 모드를 적절히 조절하여 설계할 수

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집

있다는 등의 많은 장점이 있다. 반면, 반경 방향의 회전체 위치 제어를 위한 베어링이 추가로 필요하고, 회전체를 크게 장축화할 경우 부수적인 건설비용이 많이 소요된다는 것 등은 단점으로 들 수 있다.

아래의 그림 2는 Miyagawa 등이 제작한 수직축형 플라이휠 에너지 저장장치의 구성도이다[7]. 회전체의 정하중은 하부에 위치한 고온초전도 쓰러스트베어링에 의해 지지되고, 반경 방향의 위치 제어는 전자석 베어링에 의해 이루어진다. 축 방향 안정성을 위해 상부에 축 방향 전자석 베어링이 추가로 설치되었다. 고속 회전시의 원심 변형에 견딜 수 있도록 고안된 탄소섬유복합재 플라이휠이 회전축의 상하로 부착되었다. 이런 형태는 종축 회전관성을 횡축 회전관성에 비해 최소화하여 회전 운동의 안정성을 추구하기 위한 구성이다. 이 플라이휠 장치는 30,000 rpm에서 저장 에너지 479 Wh를 달성했다고 보고되었다. 또한 동 저자들은 이 장치의 각종 요소에 의한 에너지 손실률을 분리 측정하여 보고한 바 있다[8].

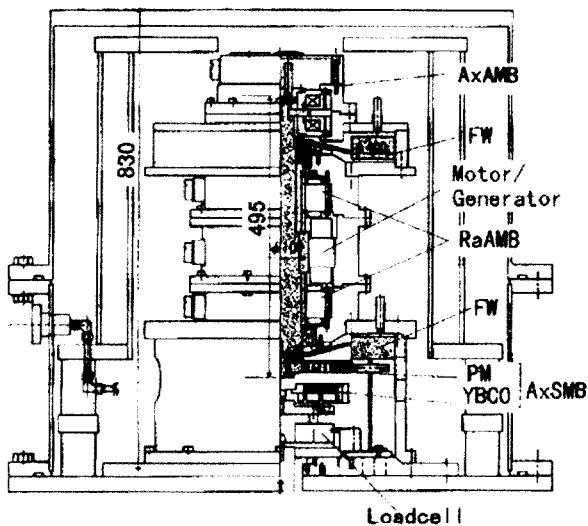


그림 2. 고온초전도 베어링과 전자석 베어링을 혼용한 0.5 kWh급 수직축형 플라이휠 에너지 저장장치. 참고문헌 [7]에서 발췌.

수평축 플라이휠은 중력 방향이 회전축과 직교하기 때문에 베어링에 걸리는 하중이 회전축에 대해 비대칭적이다. 이 경우에는 회전축 반경 방향으로 부양력과 고정력을 제공하기 위해 일반적으로 고온초전도

저어널(journal)베어링을 사용한다. 이 베어링은 동일 하중의 쓰러스트베어링에 비해 다량의 고온초전도체를 필요로 하고 평형위치이동 문제에 더 취약하다는 단점이 있는 반면에, 추가적인 반경방향 제어의 필요성이 비교적 적고 축 방향으로의 자기 고정도 강하다는 장점이 있다. 또 수평축형 구성에서는 저렴한 건설비용으로 회전체를 장축화할 수 있을 것으로 본다. 베어링의 저어널부가 회전체를 변형 모드에 취약하게 만들 수 있다는 점이 현재 걸림돌이 되고 있으나, 이 문제는 다체 연결된 회전체의 설계로 극복할 수 있을 것이라 생각한다.

고온초전도 저어널베어링은 초전도체의 부피에 비해 하중 지지력이 작기 때문에 회전자 자석을 포함한 자성체의 더욱 효율적인 설계가 요구된다. 대표적으로 회전축 방향으로 자화된 실린더형 자석을 같은 극끼리 접합시켜 베어링 저어널을 구성하는 방법이 있는데[9], 이 경우 자석 극면 사이에 자석 재료의 보자력에 근접하는 강력한 자기장이 형성됨에 따라 자구(magnetic domain)의 자화 방향이 변동되어 국소적인 자기장 강화 효과를 반감시키는 것으로 보인다. 이 문제를 해결하기 위해 영구자석으로 자속 경로를 구성하는 방안이 고안되었으나, 이를 실용화하기 위해서는 반경 방향으로 균일한 자화가 가능한 강력한 자석 재료의 개발이 필요하다. 이 외에도 저어널베어링 고정자를 영구자석을 포함한 복합형으로 구성하여 하중 지

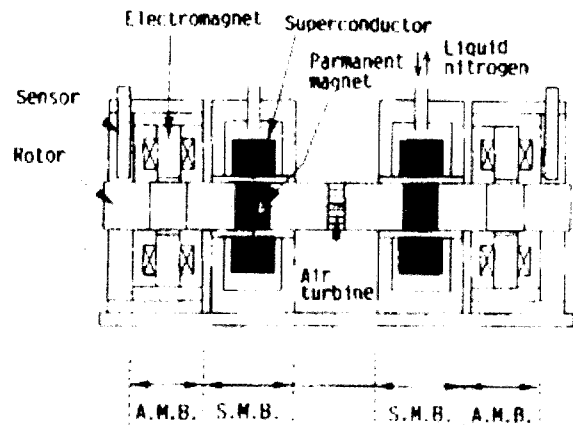


그림 3. 고온초전도 저어널베어링과 전자석 베어링을 병용한 수평축 회전 실험장치의 구조도. 참고문헌 [11]에서 발췌.

지력을 강화하고 평형위치이동 문제를 해결하는 방안이 제안되기도 하였다[10].

Komori 등은 고온초전도 저어널베어링을 사용하여 수평축형 회전체를 부양시키고 전자석 베어링으로 제어하는 회전 동특성 측정 실험을 행하였다[11]. 그림 3은 실험체의 구성도이다. 이 실험은 고온초전도 베어링의 취약한 강성을 보완하고 평형 위치이동을 억제하기 위해 부가적으로 사용한 전자석 베어링의 진동 제어 성능에 초점을 두고 있다. 일반적인 전자석 베어링의 성능은 기존 기술로도 확보되었다는 측면에서 본다면 이 실험을 수평축형 플라이휠 에너지 저장장치에 대한 본격적인 접근으로 보기는 어려우나, 고온초전도 저어널베어링의 정하중 지지 및 보조적인 반경방향 위치제어 역할을 확인하였다는 의미가 있다고 본다.

한편, 전력연구원에서는 고온초전도 저어널베어링을 사용하고 7 Wh의 에너지 저장용량을 가지는 수평축형 플라이휠 장치 시작품을 제작하여 선보인 바 있고, 이를 바탕으로 섬유복합재 플라이휠을 채용하고 무접촉 전동발전기와 전력변환장치 등을 포함한 본격적인 500 Wh급 수평축형 플라이휠 에너지 저장장치를 제작 중이다.

4. 맺음말

플라이휠 에너지 저장장치에 필수적인 기술로는 무접촉 베어링 기술 이외에도 냉각기술, 전동발전기 기술, 전력변환기술, 휠 제작기술 등이 있다. 이 중 가장 핵심이 되는 분야는 고 에너지저장밀도를 가지는 휠 제작기술이라고 볼 수 있다. 휠이 큰 회전관성을 가지면서 고속 회전시의 응력을 견딜 수 있으려면 재료의 중량 대비 인장강도가 커야 한다. 일반적인 강철이 이론적으로 약 30 Wh/kg의 에너지저장밀도를 가질 수 있음에 비해, Graphite T-1000 등 최근의 섬유복합재들은 최대 수백 Wh/kg의 이론적인 에너지저장밀도를 가질 수 있다고 알려져 있다[12]. 근래에는 이 종의 원통형 섬유복합재를 압축응력하에서 조립하여 휠의 에너지 저장밀도를 높이는 연구가 진행되고 있고[13], 이러한 휠을 이용하여 제작한 플라이휠 장치도 보고되

고 있다[14].

플라이휠 에너지 저장기술의 가장 중요한 기술적 성공 요건을 들라면, 낮은 에너지 손실률과 높은 에너지 저장밀도를 구현하는 것이라 할 수 있을 것이다. 고온초전도 베어링 기술이야말로 복합재 휠 기술과 함께 이 두 요건을 만족시키기 위한 최적의 기술이라고 보여지며, 인류의 새로운 에너지 저장방식을 구현하는 열쇠가 될 것으로 믿는다.

참고문헌

1. P. Z. Chang, F. C. Moon, J. R. Hull, and T. M. Mulcahy, *J. Appl. Phys.* **67** (9), 4358 (1990).
2. B. R. Weinberger, L. Lynds, and J. R. Hull, *Supercond. Sci. Technol.* **3**, 381 (1990).
3. Takashi Hikihara and Francis C. Moon, *Physics Letters A* **191**, 279 (1994).
4. Takashi Hikihara, Hitoshi Adachi, Shunsuke Ohashi, Yoshihisa Hirane, and Yoshisuke Ueda, *Physica C* **291**, 34 (1997).
5. T. Coombs, A. M. Campbell, R. Storey, and R. Weller, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** (2), 968 (1999).
6. A. N. Terentiev, H. J. Lee, C.-J. Kim, G. W. Hong, *Physica C* **290**, 291 (1997).
7. Y. Miyagawa, H. Kamenno, R. Takahata, and H. Ueyama, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** (2), 996 (1999).
8. Hironori Kamenno, Yasukata Miyagawa, Ryouichi Takahata, and Hirochika Ueyama, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** (2), 972 (1999).
9. M. Komori, A. Tsuruta, S. Fukata, and T. Matsushita, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (2), 634 (1995).
10. 이준성, 성태현, 한상철, 김진중,

초전도전기기기 및 시스템 분야 특집

Proceedings of the 8th Korean Conference on Materials and Applications of Superconductivity (KCMAS'98), 225 (1998).

11. Mochimitsu Komori, Masahiro Kumamoto, and Hirotugu Kobayashi, IEEE Trans. Appl. Supercond. **8** (2), 79 (1998).
12. Jack G. Bitterly, "Flywheel Technology - Past, Present, and 21st Century Projections", IEEE AES Systems Magazine, August 1998, p13.
13. Koun Takahashi, Shintarou Kitade, and Akira Hamamoto, Proceedings of the First Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-1), 228-1 (1998).
14. Thomas M. Mulcahy, John R. Hull, Kenneth L. Uherka, and Ralph C. Niemann, IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (2), 297 (1999).



김상준
1951년 2월 7일생
1986년 서울산업대학교 전기공학과 졸업 1987년 발송배전기술사 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1993년 장영실상 수상 1999년 고려대학교 대학원 재료공학과 졸업(박사) 현재 한전 전력연구원 전기이용기술그룹장
관심분야 : 고온초전도, 전력케이블, 전기재료, 설비진단, 고전압

저자이력



이준성
1972년 2월 14일생
1995년 포항공과대학교 물리학과 졸업 1997년 동 대학원 물리학과 졸업(석사)
현재 한전 전력연구원 일반연구원



성태현
1959년 10월 9일 생
1982년 한양대학교 공대 무기재료공학과 졸업 1987년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사) 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(공학박사) 1991- 92년 ISTE C 근무 1992-95년 MIT Post. Doc. 현재 한전 전력연구원 책임연구원.