

## 자기적으로 결합된 초전도 마그네트의 켄치보호에 대한 연구

고락길, 배준한, 심기덕, 권영길, 류강식  
한국전기연구원 전략기술연구단 초전도응용연구그룹

### Study on the quench protective circuit for inductively coupled superconducting magnet systems

Rockkil Ko, Joonhan Bae, Kideok Sim, Youngkil Kwon, Kangsik Ryu  
Applied Superconductivity Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - We studied on effective quench protection method to prevent damage from unexpected quench of the inductively coupled superconducting magnet systems for magnetic resonance imaging. And we suggested quench protection circuit that is combined with several protection techniques. This circuit has the capacity to maintain the symmetric nature of the magnetic field and the active shielding effect and to protect shim coils during a quench.

## 1. 서 론

초전도 마그네트는 운전하는 동안 마그네트의 인덕턴스와 전류에 의존하여  $E = LI^2/2$ 만큼의 에너지가 저장된다. 초전도 MRI 마그네트의 경우 그 에너지가 수 MJ에 달하고, 전류 도입선은 외부로부터의 열침입을 최소화하기 위해 착탈식을 적용하므로 한번의 충전 후 외부로부터 전원이 차단되어 전기적으로 고립되어진 영구전류 모드로 운전되어진다. 그러므로 낮은 헬륨 레벨 또는 다른 예상치 못한 이유로 운전 중에 일어날 수 있는 켄치로부터 마그네트를 자체적으로 보호할 수 있는 특별한 전기회로가 구성되어져야 한다. 특히 능동 자기 차폐 적용 등으로 코일 섹션들은 자기적으로 결합되어 있어 켄치 발생 시 불균일한 전자기력 상쇄와 축방향 보정 코일의 보호 및 차폐 자장의 붕괴로 인한 과도 누설 자장 등의 문제가 고려되어져야 한다. 여기서 일반 충전 모드와 영구전류 모드로의 전환은 영구전류스위치(PCS; Persistent Current Switch)의 On-Off로 이루어진다. 일반적으로 잘 알려진 초전도 마그네트 시스템의 켄치 보호를 위한 방법으로는 먼저 작은 에너지의 경우 마그네트 자체로 에너지를 흡수하는 방법과 외부에 dump 저항을 다는 방법, 코일간의 유도작용을 이용하는 방법, 그리고 코일을 분할하는 방법이 있다. 초전도 MRI 마그네트의 경우 외부와 고립되어 운전된다는 점과 코일이 분할되어 권선 되어진다는 점, 자기적으로 결합되어졌다는 점등을 고려할 때, 분할된 코일 섹션들 사이에 적은 dump 저항을 달아 에너지를 분산시키는 방법이 효율적이다. 본 논문에서는 켄치로부터 초전도 MRI 마그네트를 효율적으로 보호하기 위한 회로 구성에 대해 고찰하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 코일의 분할 구성

초전도 MRI 마그네트에 적용하는 코일 분할에 의한 일반적인 켄치 보호회로는 다음과 같다. 일반적으로 6분할의 주 코일과 그 바깥쪽의 차폐 코일로 구성되는 초전도 MRI 마그네트의 분할된 코일과 dump 저항을 서로 병렬로 연결시키고, 이렇게 연결된 코일과 dump 저항 쌍들은 서로 직렬로 연결하므로써 구성된다.

일단 어느 한 코일 섹션에서 켄치가 일어나게 되면 코일은 저항을 갖게 되고, 전류의 일부가 코일과 병렬로 연결된 dump 저항으로 우회하게 된다. 이때 이 dump 저항은 켄치가 발생한 코일 내에 저장되었던 에너지의 상당량을 소진시키므로, 과열과 열적으로 유기된 용액에 의한 코일의 손상을 막게 된다. 더불어 마그네트의 각 코일 섹션들은 자기적으로 결합되어 있기 때문에 코일 전체의 자속량을 일정하게 유지시키려는 Lenz의 법칙으로 먼저 켄치가 발생한 코일 섹션의 저항이 증가되고 전류가 감소하게 되면, 동시에 그 주변의 코일 섹션에서는 임계전류이상으로 전류가 증가하게 되어 그 주변의 코일 섹션에서도 켄치를 일으킨다. 이런 현상은 다른 코일 섹션으로 계속 이어지게 되어 에너지를 분산시키게 된다. 이와 같이 마그네트를 통한 전체적인 켄치 전파는 매우 효율적으로 켄치에 의한 손상을 막을 수 있는 방법이다.

### 2.2 자장의 대칭성 유지

초전도 MRI 마그네트의 코일은 축 대칭으로 권선되어 자장 또한 축 대칭을 이루게 된다. 그러나 켄치가 발생되면 자장은 더 이상 자장의 대칭성을 유지하지 못하게 되어 코일과 자장 차폐 사이에는 매우 큰 전자기력이 발생하게 되므로 마그네트 지지대의 설계에 영향을 미치게 된다. 이를 해결하기 위해서 dump 저항을 축에 대해 대칭적으로 연결된 코일 쌍에 병렬로 연결함으로써 대칭 평면에 대해 대칭적으로 위치한 코일은 항상 동일한 전류가 흐르도록 유지시켜 불균일한 전자기력을 상쇄시킬 수 있다.

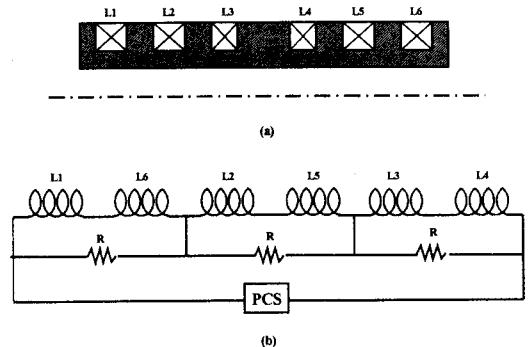


그림 1 (a)6분할의 주 코일

(b)자장 대칭성 유지를 위한 켄치 보호 회로

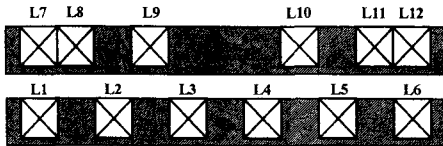
그림 1은 일반적인 주코일의 구조와 자장의 대칭성을 유지할 수 있는 회로 구성을 보여준다. 만일 L2 코일에서 켄치가 발생되면 이 코일과 대칭 위치에 있는 L5 코일

에도 L2에 흐르는 감소된 전류와 동일한 전류가 흐르게 되어 자장의 대칭성을 유지하게 된다.

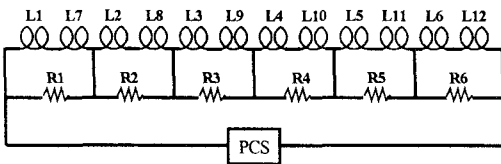
### 2.3 능동 차폐 마그네트 보호

현재 임상용으로 쓰이는 초전도 MRI 마그네트의 경우 강자장 발생으로 인한 주변의 누설 자장의 영향을 최소화시키기 위해 주요일 바깥쪽에 능동차폐코일을 두어 역자장을 발생시켜 누설 자장을 상쇄시키는 능동차폐기술을 적용한 마그네트를 기본적으로 사용하고 있다. 그렇기 때문에 병원에서 사용하는 능동차폐기술 적용 이전의 마그네트를 사용한 MRI 시스템에 비해 설치 공간을 대폭 줄일 수가 있게 되었다. 하지만 능동차폐 마그네트의 퀸치 발생으로 인한 자장의 변화는 차폐 자장의 붕괴로 이어지므로 마그네트 주변 특히, 정밀한 전자장비 등은 순간적으로 강한 누설자장에 노출되어 큰 손상을 입을 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해서는 퀸치 발생 시 자장을 발생시키는 주요일의 섹션과 차폐 코일의 섹션을 서로 직렬 연결시키고 이를 dump 저항과 병렬 회로를 구성한다. 그러면 퀸치 발생으로 인한 전류 감소를 자장 발생 코일과 차폐 코일이 모두 동시에 동일한 전류값을 경험하므로 차폐효과는 계속 유지되게 된다.

그림 2는 능동 차폐 마그네트용 퀸치 보호 회로를 나타내고 있으며, L1~L6는 자장을 발생시키는 주요일의 코일이고, L7~L12는 누설 자장을 상쇄시켜주는 차폐 코일이다.



(a)



(b)

그림 2 (a)능동차폐형 MRI 코일

(b)능동차폐형 MRI 코일용 퀸치 보호 회로

### 2.4 퀸치 백 히터(Quench back heater)

초전도 MRI 마그네트의 경우 안전을 위해서 에너지를 최대한 빨리 분산시켜 소진시키는 것이 가장 이상적이다. 퀸치 에너지의 소진은 저항에 의해 이루어지므로 마그네트의 퀸치를 빠르게 확산시켜 마그네트 전체적으로 저항을 갖도록 하여 퀸치 에너지가 분산되도록 한다. 이는 퀸치가 발생한 양단의 dump 저항에 전압 탭을 구리나 알루미늄 같은 금속 조각에 연결시켜 우회된 전류로 임의의 초전도 권선부를 가열하여 퀸치를 유발시키는 퀸치 백 히터로 가능하다.

#### 2.4.1 퀸치 확산

dump 저항의 양을 줄이고, 효율적으로 퀸치 에너지를

흡수하기 위해서는 마그네트에서 퀸치가 발생되었을 때 코일 전체로 퀸치가 빠르게 확산되어야 하고 초전도 영구전류 스위치도 퀸치되어 저항값을 가져야 한다. 영구전류스위치의 퀸치를 위해서는 일반적으로 영구전류스위치의 열적 트리거를 위한 히터 외에 퀸치 백 히터를 구성하고, 마그네트의 빠른 퀸치 확산을 위해서는 마그네트 전체 양단에 퀸치 백 히터들을 병렬로 연결시키고 이를 각 dump 저항 양단의 전압 탭과 연결시켜줌으로써 가능하다. 여기서 퀸치 백 히터로는 구리와 알루미늄 같이 저항이 온도에 따라 강하게 의존하는 금속이어야 한다. 왜냐하면 마그네트의 저항이 증가함에 따라 전압이 증가하여 퀸치 백 히터에 의해 초전도 영구전류스위치의 온도가 높아져 영구전류스위치는 저항을 갖게 되고 이때 퀸치 백 히터의 저항 또한 온도에 따라 증가하게 되어 자체 가열이 감소하여 온도가 제한되기 때문이다. 만일 퀸치 백 히터의 저항이 일정하게 유지된다면 매우 빨리 타 버리게 될 것이다.

그림 3은 마그네트 퀸치와 동시에 영구전류스위치와 코일 전체를 빠르게 퀸치시킬 수 있는 퀸치 보호 회로를 나타낸다.

#### 2.4.2 보정 코일 보호

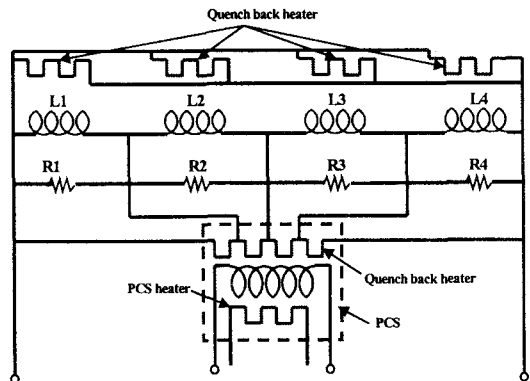


그림 3 히터 백 히터를 이용한 빠른 퀸치 보호 회로

초전도 MRI 마그네트의 각 코일 섹션들은 자체 인덕턴스 뿐만 아니라 서로간의 상호 인덕턴스가 존재하게 된다. 그중 보정 코일의 경우 기하학적인 구조에 의해 방사 방향(radial)의 보정 코일과 축 방향의 보정 코일 중 흡수 항은 상호 인덕턴스가 존재하지 않지만, 축 방향의 짝수 항의 보정 코일인  $Z^2, Z^4, Z^6$ 와 주 코일과는 상호 인덕턴스가 존재하게 된다. 주 코일의 퀸치 발생 시 수천 암페어의 전류가 이 보정 코일로 유도된다. 그렇기 때문에 보정 코일의 구조적인 이탈과 타 버려서 단선되는 것을 막기 위해 매우 빨리 반응되어지는 보정 코일 보호 장치가 필요하다.

그림 4는 보정 코일 보호를 위한 회로 구성을 나타낸다. 이 기술은 위의 주 코일의 영구전류스위치를 퀸치시키기 위한 회로와 비슷하나 dump 저항의 전압 탭이 보정 코일용 영구전류스위치의 퀸치 백 히터로 연결된 것이다 다르다. 이 회로는 주 코일 중 어느 하나에서 퀸치가 발생되면 자장은 변하기 시작하며 축 방향의 보정 코일의 전류는 급격히 증가하기 시작하고, dump 저항에 위치한 전압 탭에서는 주 코일의 상전도 상태의 저항에 대략적으로 비례하는 전압이 제공되어 보정 코일용 영구전류스위치의 퀸치 백 히터로 전류가 우회되어 영구전류스위치를 퀸치시키게 된다. 이때도 퀸치 백 히터로는 구리 또는 알루미늄 금속을 사용하며 액체 헬륨 온도부터 온도가 증가되어 저항이 커지게 된다. 반면 dump 저항(R1~

R5은 주 코일과 연관된 큰 전류가 이동하므로 stainless steel과 같은 금속을 사용하여 cryostat 온도에서 일정한 저항을 갖게 한다.

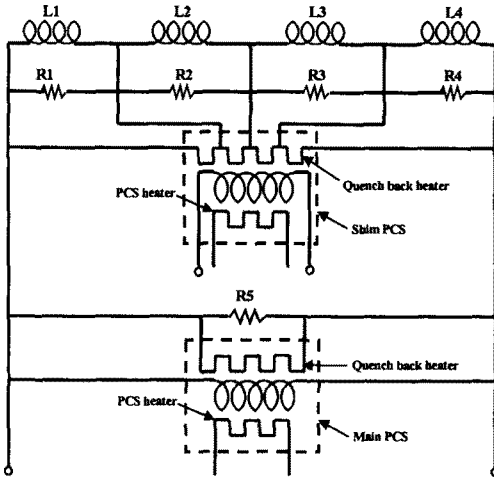


그림 4 보정 코일 보호용 퀀치 보호 회로

### 2.5 복합 퀀치 보호 회로

지금까지의 기술한 퀀치 보호 회로를 바탕으로 초전도 MRI 마그네트의 여러 특성을 고려한 종합적인 퀀치 보호 회로를 제안하고자 한다. 그림 2(b)와 같은 능동 차폐 기술을 적용한 초전도 MRI용 마그네트의 코일 구성에 대해서 제안하는 회로 구성은 그림 5와 같다.

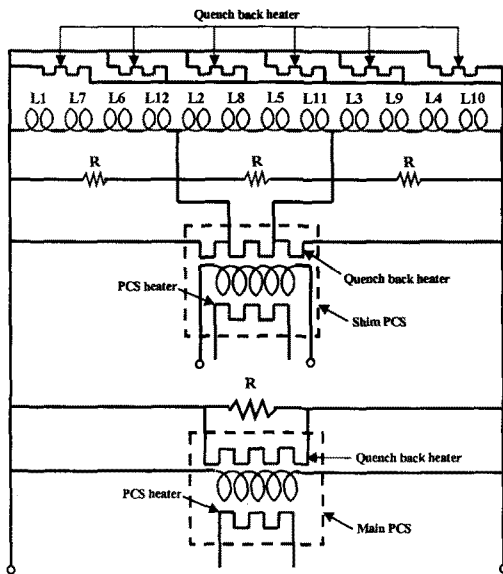


그림 5 제안된 복합 기술이 적용된 퀀치 보호 회로

이 회로는 기본적으로 코일 분할을 통해 에너지를 분산시키고, 코일의 섹션 구성을 주 코일과 차폐 코일, 그리고 그 코일의 대칭 평면에 대해 대칭 위치의 코일로 구

성함으로써 자장의 대칭성과 능동 차폐 효과를 동시에 유지시킬 수 있다. 또한 PCS의 빠른 퀀치와 코일의 빠른 퀀치 전파가 가능하도록 주 코일용 영구전류스위치와 각 섹션의 코일에 퀀치 백 히터를 적용하였으며, 더불어 축 방향의 보정 코일을 보호하도록 구성되어 있다. 이 회로의 구현은 위에서 기술한 각 적용기술과 동일하다.

### 3. 결 론

초전도 MRI 마그네트를 예상치 못한 퀀치로부터 안전하게 보호하기 위해서는 코일 전체로 퀀치 현상을 빠르게 확산시키는 것이 매우 효과적이다. 더불어 초전도 MRI 마그네트만이 갖는 특성을 고려한 기술을 접목시켜 퀀치 보호 회로 구성해야 한다.

본 연구를 통해 제안한 퀀치 보호 회로의 특징은

1. 코일의 분할을 통한 에너지의 분산
2. 자장의 대칭성 유지
3. 능동 차폐 기술의 유지
4. 퀀치 백 히터를 통한 PCS의 빠른 퀀치 유도
5. 퀀치 백 히터를 통한 코일 전체의 빠른 퀀치 유도
6. 보정 코일의 보호

로 퀀치 발생 시 마그네트를 매우 효과적으로 보호할 수 있을 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 한국전기연구소, 보건복지부, "고자장 자기공명영상 장치 및 초전도 자석 개발(연차실적·계획서)", 2000
- [2] Martin N. Wilson, "Superconducting magnets", Clarendon press OXFORD, pp219~231, 1983
- [3] R. E. Schwall, "Protection system for inductively coupled magnets", IEEE Transactions on magnetics, Vol. 27, No. 2, pp1700~1703, March 1991
- [4] Peak, "Persistent protective switch for superconductive magnets", US Patent 5361055, 1994
- [5] Rios, "MR magnet wiring harness circuit", US Patent 4680666, 1994
- [6] Gross, "Quench-protecting electrical circuit for a superconducting magnet", US Patent 5731939, 1998
- [7] Bird, "Quench protection for actively shielded magnet", US Patent 5644233, 1997
- [8] Jones, "Superconductive circuit for controlling quench events", US Patent 4764837, 1988

### 감사의 글

본 연구는 보건복지부에서 시행한 선도기술·의료공학 기술개발 사업(HMP-98-G-1-015)에 의하여 지원되었으며, 이에 감사 드립니다.