

교류용초전도연선에 있어서의 퀘칭전후의 전류분류

오 봉환⁰ 류 강식 정 대영 오 상수 하 동우 손 명환
한국전기연구소

Current Distribution in Superconducting Multistrands for AC Use before and after Quenching

Bong-Hwan Oh, Kang-Sik Ryu, Dae-Yeong Jeong, Sang-Soo Oh, Dong-Woo Ha, Myung-Hwan Shon
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

A superconducting multistranded cable is used to realize high current capacity for AC use. The critical current value of the cable to be less than the simple summation of individual critical current value of each strand. The causes for such a degradation of the critical current value have not been revealed. This paper investigates the current distribution in multistrands before and after their quenching by using 7×7-strand superconducting cable.

1. 서 론

교류용초전도 선재를 대용량 전력기에 사용하는 경우, kA급 이상의 대전류용량의 초전도선재가 필요하다. 이를 위해 교류용 초전도선재는 전류용량을 증가시키기 위해서 초전도소선(Strand)를 여러가닥 꼬아서 만든 1차연선, 이 1차연선을 다시 여러가닥 꼬아서 만든 2차연선, 3차연선등 연선형태의 선재를 이용하고 있다. 그러나, 이러한 초전도연선에 교류전류를 통전하면, 연선으로서의 임계전류값이 소선의 임계전류값의 가닥수배 보다도 적게되는 교류전류 열화현상(Degradation)이 생긴다⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 이 현상의 원인으로선 선재의 우발적 원인에 의한 퀘칭, 교류손실에 의한 선재의 온도상승, 소선간 혹은 1차연선간에 있어서의 인덕턴스 불균형에 의한 전류분류의 불균일성⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾, 낮은 자계에서의 불안정성⁽⁴⁾, 연선구조에 기인하는 세로축 성분의 자계⁽⁵⁾, 상전도 전류리드선과의 접속부에서의 국부적인 발열⁽⁶⁾ 및 연선구조의 국부적인 비대칭성⁽⁶⁾등을 들 수 있다.

본 논문에서는 이상과 같은 요인중, 소선간 혹은 1차연선간의 인덕턴스 불균형에 의한 전류분류의 불균일성에 착안하여, 7×7의 49가닥의 2차연선을 이용하여, 교류전류 열화현상에 대해서 실험적으로 고찰하였다.

2. 초전도선재 및 초전도코일의

초전도연선에 있어서의 전류분류 측정에는 그림 1에 표시하는 소선×7×7 구조의 2차연선을 이용했다. 이 2차연선은 표 1의 윗부분에 표시한 초전도소선을 49가닥 꼬아서 만든 것이다. 이 2차연선을 이용해서 표 1의 아랫부분에 표시한 초전도코일을 만들었다. 코일에는, 2차연선의 한쪽 끝을 7가닥의 1차연선으로 풀고, 각 1차연선에 파워리드(Power lead), 스위치 및 전류측정용의 CT를 직렬로 삽입했다. 이렇게하므로써, 어느 한 1차연선에만 단독으로 전류를 흘릴 수 있고, 또는 7가닥의 2차연선 전체에 병렬로 전류를 흘릴 수 있어서, 각 1차연선에 흐르는 전

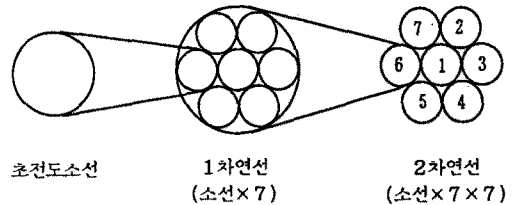


그림 1 초전도연선

Fig.1 Superconducting cable.

표 1 초전도소선의 제원 및 초전도코일의 사양
Table 1. Characteristics of superconducting strand and coil.

Strand	Diameter	0.22 mm
	NbTi filament diameter	0.55 μm
	Number of filaments	39,546
	NbTi/Cu/CuNi	1/1.2/1.7
	Twist pitch	2.3 mm
	Insulation (PVF)	10 μm
7×7-strand	Number of strands	7×7
	Diameter	2.18 mm
	Insulation(glass)	100 μm
Coil	Length	10 m
	Number of layers	2
	Number of turns	28
	Diameter of FRP bobbin	105 mm
	Diameter	117 mm
	Height	35 mm

류파형을 측정할 수 있다.

초전도 2차연선을 1차연선 상태로 풀어서, 각 1차연선에 파워리드를 접속한 경우, 각 1차연선에는 적은 깊이만 직렬로 임피던스가 접속되어 있는 것과 같다. 따라서, 이 파워리드의 임피던스가 균일하지 않은 경우에는 각 1차연선의 전류분류에 영향을 미칠 염려가 있다. 그래서, 각 파워리드의 임피던스 값이 가능한 같도록 7개의 파워리드 (직경 4mm, 길이 850mm)를 직경 100mm의 원주상에 7등분해서 배치하고, 그 중앙에는 풀지

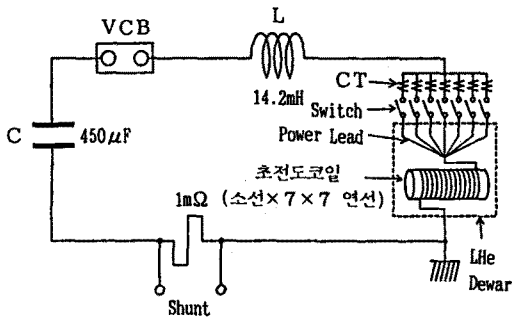


그림 2 2차연선의 전류분류 측정회로
Fig.2 Test circuit of the current distribution in the 7×7-strand cable.

얇은 쪽의 2차연선을 접속하기 위한 파워리드를 배치하였다.

3. 2차연선에 있어서의 켄치전후의 전류분류

2차연선에 있어서의 켄치전후의 전류분류 측정에는 그림 2에 표시하는 LC공진을 이용한 대전류 발생장치를 이용했다. 동회로에 있어서, 콘덴서의 충전전압을 조절하므로써 전류 제 1 파파고치 수kA, 주파수 63Hz의 감쇄진동전류를 초전도코일에 흘릴수 있다 ($L=14.2\text{mH}$, $C=450\mu\text{F}$).

<3.1> 단독통전에 의한 각 1차연선의 켄치전류값

그림 2의 회로에 있어서, 스위치를 한개만 닫은 상태에서 어떤 한 1차연선에만 단독으로 전류를 흘려서, 그 1차연선의 켄치전류값을 측정했다. 동실험에서는, 콘덴서에 2.5kV를 충전하여, 전류 제 1 파파고치 400A (순시치) 를 각 1차연선에 통전하여 켄치시켰다. 이때의 1차연선에의 통전전류 및 단자전압 파형을 그림 3에 표시한다. 동그림의 단자전압 파형에 있어서, 전류를 흘리면 선재가 켄치하고 있지 않은 상태에서도, 단자간에 코일의 인덕턴스분에 의한 전압이 발생하고 있는 것을 알수 있다. 그래서, 2차연선에 있어서의 켄치발생의 판단은 다음과 같은 방법으로 행했다. 통전전류가 감쇄진동전류이므로, 켄치가 원인이 되어 인

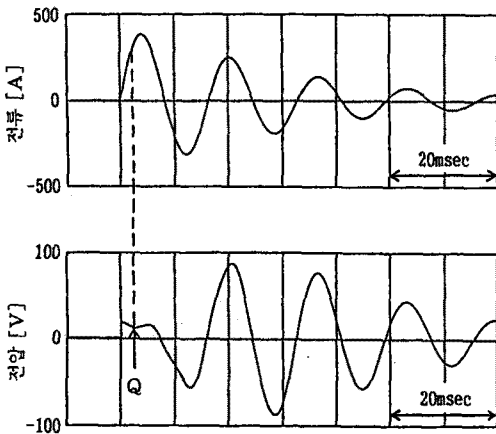


그림 3 단독통전에 있어서의 1차연선의 전류·전압파형
Fig.3 Current and voltage waveforms of a primary stranded cable in the 7×7-strand cable at the quenching current test.

덕턴스에 의한 전압으로 부터 벗어나려고 하는 변화 (그림 3의 Q점) 가 초전도코일의 양단자간 전압에 나타나는 시점을 켄치발생으로 간주하고, 그때의 전류순시치를 켄치전류값으로 하고 있다. 이와 같은 방법으로 측정된 각 1차연선의 켄치전류값을 그림 4에 ●표로 표시한다. 이 측정을 각 1차연선 별로 5회씩 했으나, 동일 1차연선에 있어서의 켄치전류값에는 변동이 거의 없었다. 그림 4로부터, 각 1차연선의 켄치전류값은 320~350 A (순시치) 의 범위에 있음을 알수 있다.

<3.2> 병렬통전에 의한 각 1차연선간의 전류분류

우선, 예비실험으로서, 초전도코일에 이용한 2차연선과 제원이 같은 길이 150mm의 선재를 이용하여, 전절과 같은 방법으로 선재로서의 켄치전류값을 측정하였다. 그 결과 켄치전류값은 1600A (순시치) 였다. 다음에, 전류분류 측정에 있어서는, 그림 2의 회로에 있어서, 7개의 스위치를 전부 닫은 상태에서, 콘덴서에 11kV를 충전하여 전류 제 1 파파고치 1800A를 7가닥의 1차연선에 동시에 병렬로 통전하여 초전도코일에 켄치를 발생시켰다. 이와 같은 병렬통전시, 켄치전후의 각 1차연선에 있어서의 전류

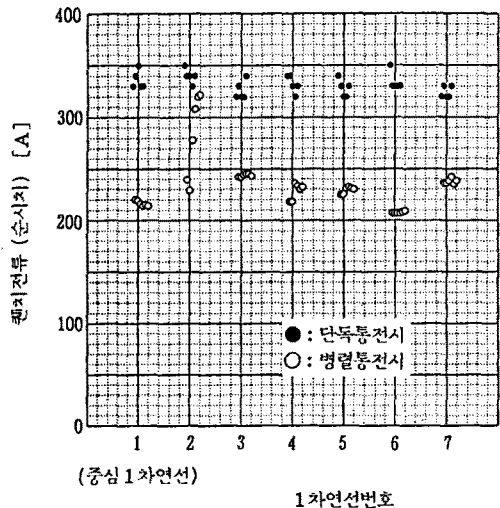


그림 4 2차연선에 있어서의 각 1차연선의 켄치전류값의 저하
Fig.4 Degradation of the quenching current value of each primary strand in the 7×7-strand cable.

분류 파형을 그림 5에 표시한다.

그림 5의 전류파형에 있어서, 통전개시부터 켄치까지는 1/2 사이클 이내의 짧은 시간이므로 별로 명백하지는 않지만, 중심 1차연선 1에 흐르는 전류는 주위의 1차연선과는 반대 방향의 -극성쪽으로 흐르기 시작하고 있음을 알수 있다. 이 때문에 중심 1차연선의 전류는, 켄치이전에 있어서 주위 1차연선 전류보다도 위상이 늦음을 알수 있다. 그림 5의 확대그림에서, Q1점에 있어서 1차연선 3의 전류가 245A (순시치) 에서 136A (순시치) 로 급격히 감소하고 있다. 이시점에서 다른 1차연선 전류는 감소하고 있지 않으므로, 이 시점에서 1차연선 3에 켄치가 발생한 것으로 간주하고 있다. Q1점 직후에는, 3의 통전전류의 감소분이 다른 1차연선에 전류(轉流)하여, 다른 1차연선의 전류가 증가하고 있음을 알수 있다. 특히, 중심 1차연선 1에 흐르는 전류는 급격히 방향을 바꿔 주위 1차연선 2~7과 같은 방향으로 흐르기 시작하고 있음을 알수 있다. 1차연선 3의 켄치 후 6-5-2-4-7-1의 순서로 차례차례 켄치가 발생하고,

4. 결 론

본 논문은 초전도소선×7×7의 2차연선을 이용해서, 각 1차연선간의 퀘치전후의 전류분류 상황을 측정했다. 그 결과 2차연선중의 어느 한 1차연선이 먼저 최초로 퀘치하고, 그 퀘치한 1차연선의 전류가 다른 1차연선에 전류(轉流)하는 것에 의해, 모든 1차연선이 차례차례 퀘치하는 현상이 나타났다. 특히, 중심 1차연선에 흐르는 전류는 퀘치이전에는 주위 1차연선에 흐르는 전류에 비해서 위상이 정반대 방향이나, 최초 1차연선의 퀘치와 함께 급격히 방향을 바꿔 주위 1차연선과 같은 방향으로 흘러, 7가닥의 1차연선중에서 항상 최후에 퀘치하는 현상을 발견하였다. 또한, 이러한 퀘치과정으로 인해, 2차연선의 퀘치전류값이 소선의 퀘치전류값의 가닥수배의 50%밖에 되지 않음을 지적했다.

(이상의 실험은 일본 나고야대학에서 행한것 임을 부기함)

[참고문헌]

- (1) 吳鳳煥·石川和明·早川直樹·大久保仁·鬼頭幸生: 「交流用超電導より線間におけるクィチ前後の電流分流」, 電氣学会論文誌B, Vol.113, No.3, pp.246-251 (1993)
- (2) K.Funaki, M.Nakashima, M.Iwakuma, M.Takeo, K.Yamafuji: "Instability in kiloamp class ac superconducting cables", Cryogenics, Vol.31, pp.594-597 (1991)
- (3) 鳥居·秋田·石川·植田·塚本: 「交流超電導7本撚り線のクィチメカニズムの検討」, 電氣学会静止器研究会資料, SA-91-47 (1991)
- (4) A.Fevrier, A.Gueraud, J.P.Tavernier, Y.Laumont, A.Lacaze: "Thermoelectromagnetic stability of ultrafine multifilamentary superconducting wires for 50-60 hertz use", IEEE Trans. MAG-25, No.2, pp.1496-1499 (1989)
- (5) 船木·岩熊·竹尾·山藤: 「大容量交流用超電導線における縦磁界成分による交流損失の評価」, 平成4年電氣学会全国大会論文集, No.1690 (1992)
- (6) 船木·岩熊·竹尾·山藤·高橋·藤井·中田·星野·嶋田·米田·佐々木·藤岡·熊野·鈴木: 「1000kVA級超電導トランス用大容量導体の開発」, 電氣学会静止器研究会資料, SA-91-66 (1991)
- (7) 吳鳳煥·早川直樹·大久保仁·鬼頭幸生: 「 교류초전도연선중의각소선간 전류분류」, 1992년도 하계학술대회논문집(B), pp.765-767 (1992)

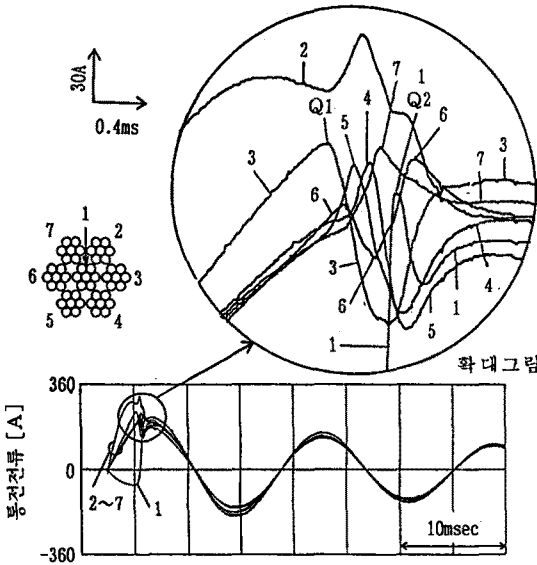


그림5 2차연선의 병렬동전시에 있어서의 각 1차연선의 전류파형
Fig.5 Current waveforms of each primary stranded cable 1~7 in the 7×7-strand cable.

최후에 중심 1차연선 1이 Q2점에서 퀘치하고 있다. Q2점 이후에는, 7가닥의 1차연선 전류의 크기 및 위상이 갖추어져, 퀘치이전 보다도 한층 균등하게 분류하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 실험을 6회 하였으나, 전 실험에 있어서 중심 1차연선은 7가닥의 1차연선 중에서 항상 최후에 퀘치하였다. 각 1차연선의 퀘치전류값을 그림 4에 ○표로 함께 표시하고 있다. 동그림으로부터, 1차연선 1, 3~7의 퀘치전류값은 비교적 같아지고 있으나, 2의 퀘치전류값만이 230A~320A(순시치)의 범위에 분포하고 있다. 또한, 병렬동전시의 퀘치전류값이 단독동전시의 퀘치전류값 보다도 저하되어 있는 것을 알 수 있다. 이와 같은 퀘치전류값의 저하 요인으로서, 병렬동전에 의해 각 1차연선에 인가되는 자계, 전자력에 의한 미세한 진동 및 냉각 조건의 차이등을 들 수 있다.

3.3 초전도연선에 있어서의 퀘치전류값의 열화비율

그림 5에서 보이는 바와 같이, 중심에 위치하는 1차연선에 흐르는 전류가 주위에 위치하는 1차연선에 흐르는 전류에 비해서 위상이 정반대인 것에 의한 교류전류 열화비율은, 소선 1가닥의 퀘치전류값을 65A(?)으로 할 경우, 2차연선 49가닥 전체의 퀘치전류값은 $65 \times (7 \times 7) = 3185A$ (순시치)이다. 이에 비해서, 전 절에서 측정된 150mm의 2차연선으로서의 퀘치전류값은 1600A(순시치)이다. 따라서, 열화비율은 $1600/3185=50\%$ 이다. 즉, 초전도선재의 전류용량을 증가시키기 위해, 초전도소선을 49가닥 꼬아서 2차연선으로 하였다 해도, 2차연선으로서의 동전전류 용량은 소선의 동전전류용량의 49배에 달하지 않음을 의미한다. 이와 같은 교류전류열화의 방지책으로서, 중심에 위치하는 소선 또는 1차연선 대신에 CuNi(Cupronickel)선 혹은 SUS(Stainless steel)선 등을 이용하는 것이 유효하리라 생각된다. 이렇게 하므로서 소선의 가닥수배에 가까운 퀘치전류값이 얻어지리라 기대된다.