

# 交流用超電導燃線中の 各素線間電流分流

具 鳳煥<sup>o</sup> 早川直樹 大久保仁 鬼頭幸生  
名古屋大學 工學部

## Current distribution among the strands in superconducting multistrands

Bong-Hwan Oh, Naoki Hayakawa, Hitoshi Okubo, Yukio Kito  
Nagoya University

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-strand superconducting cable. The following experimental results are derived. (1)The quenching is initiated at one strand in the cable, (2)The current in the quenched strand is transferred into the other strands, (3)An avalanche of quenching is induced among the strands, (4)The central strand is quenched finally among the strands.

### 1. 序 論

交流用超電導線은 電流容量을 增加시키기 위해서 超電導素線을 여러가닥 꼬아서 만든 1次燃線, 그 1次燃線을 다시 여러가닥 꼬아서 만든 2次燃線 등으로 해서 사용하고 있다. 그러나, 그러한 超電導燃線에 交流電流를 흘리면, 燃線 全体로서의 臨界電流값이 素線 臨界電流값의 가닥數倍에 미치지 못하는 것이 實驗적으로 확인되고 있다<sup>(1)(2)</sup>. 이 現象을 일반적으로 交流電流劣化現象으로 부르고 있다. 이 交流電流劣化現象의 한 要因으로서, 素線間 혹은 1次燃線間的 인덕턴스 不均衡에 起因하는 電流分流的 不均一性을 들수 있다<sup>(1)(3)</sup>.

超電導燃線間的 電流分流에 관한 현재까지의 研究는, 超電導燃線의 臨界電流 레벨보다도 작은 電流가 흐르고 있는 定常狀態에서 檢査하고 있는 것이 全部이다. 그러한 연구에 있어서, 7가닥燃線의 경우 中心에 位置하고 있는 素線의 電流位相이 周圍에 位置하고 있는 素線의 電流位相에 比해서 180°늦고 있는것, 中心素線 電流값이 周圍素線 電流값 보다도 작게 되는것 등을 지적하고 있다. 이러한 연구에 對해, 本論文은, 7本燃線에 臨界電流레벨 以上の 電流를 흘리는 것에 의해 超電導

狀態에서 常電導狀態로 遷移(Quench)시켜, 그 과정에 있어서의 素線間 電流分流 狀況을 測定하고, 交流電流劣化現象에 對해서 檢査했다. 그 結果, ①素線間的 電流分流 不均一性에 의해, 周圍素線의 어느 한 素線이 最初로 Quench하고, ②그 Quench한 素線의 電流가 減少하고, 그 減少分이 다른 素線에 轉流한다, ③각 素線에 흐르는 電流가 增加되어, 각 素線이 순서적으로 Quench한다, ④中心素線의 電流는, Quench前에는 周圍素線 電流보다도 位相이 늦으나, 最初 素線의 Quench와 함께 급격히 電流方向을 바꿔, 7가닥燃線 中에서 항상 最後에 Quench한다. 이상과 같은 現象을 實驗적으로 立証했다. 또한, 이러한 Quench과정으로 인해, 7가닥燃線의 臨界電流값이 素線 臨界電流값의 가닥數倍의 73%밖에 되지 않음을 지적했다.

### 2. 超電導線 및 超電導코일

超電導燃線에 있어서의 電流分流 測定은 그림 1에 표시하는 素線×7가닥 構造의 1次燃線을 이용했다. 이 1次燃線은 표 1의 頂부분에 표시한 超電導素線 7가닥을 꼬아서 만든것이다. 이 1次燃線을 이용해서 표 1의 아래부분에 표시한 超電導코일을 만들었다. 코일에는, 1次燃線의 한쪽 端子를 7가닥의 素線으로 풀고, 각 素線에 Power lead (電流供給線), 스위치 및 CT를 直列로 挿入했다. 이렇게 함으로써, 어느 한 素線에만 單獨으로 電流를 흘릴수 있고, 또는 7가닥의 素線 全体에 並列로 電流를 흘릴수 있어서, 각 素線에 흐르는 電流波형을 測定할 수 있다.

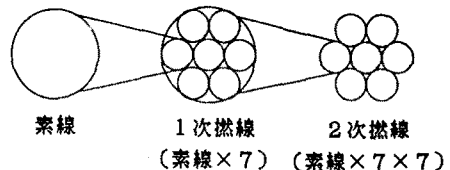


그림 1 超電導燃線

Fig.1 Superconducting cable.

표1 超電導索線の 諸元 및 超電導코일의 仕様  
Table 2. Characteristics of superconducting strand and coil.

|                        |              |
|------------------------|--------------|
| Strand Diameter        | 0.22mm       |
| NbTi filament diameter | 0.55 $\mu$ m |
| Number of filaments    | 39,546       |
| NbTi/Cu/CuNi           | 1/1.2/1.7    |
| Twist pitch            | 2.3mm        |
| Insulation(PVF)        | 100 $\mu$ m  |
| Coil Length            | 10m          |
| Number of layers       | 2            |
| Number of turns        | 28           |
| Diameter of FRP bobbin | 105mm        |
| Diameter of coil       | 113mm        |
| Height of coil         | 14mm         |

超電導코일에 있어서, 7本の Power lead (직경 4 mm, 길이 850mm) 를 직경 100mm의 원주상에 7等分해서 배치하고, 그 중앙에는 풀지않은 쪽의 7가닥撚線을 접속하기 위한 Power lead를 배치하고 있다. 이것에 의해, 각 索線에 있어서 Power lead部分의 임피던스를 가능한 같도록 했다. 3章中の 実験에서 測定한 각 索線의 Power lead의 抵抗값은 0.32m $\Omega$ 이다. 또한, 리액턴스 값은 Power lead의 幾何學的配置에 의해 계산한 결과, 60Hz에서 索線 1本당 j0.098m $\Omega$ 이다.

### 3. 7가닥撚線에 있어서의 電流分流

7가닥撚線을 감은 超電導코일에 있어서, 索線間의 電流分流 狀況을 그림2의 回路를 이용해서 測定했다. 그림에 있어서, 降圧變壓器를 통해서 超電導코일에의 通電電流 容量을 크게하고 있다. 直列콘덴서는 變壓器 및 超電導코일의 리액턴스를 상쇄시켜서, 電源에서 본 임피던스를 작게하고, 가능한 한 큰 電流를 超電導코일에 흘리기 위해 挿入한 것이다.

<3.1> 單獨通電에 의한 각 索線의 臨界電流값  
그림2의 回路에 있어서, 스위치 한개만을 닫아

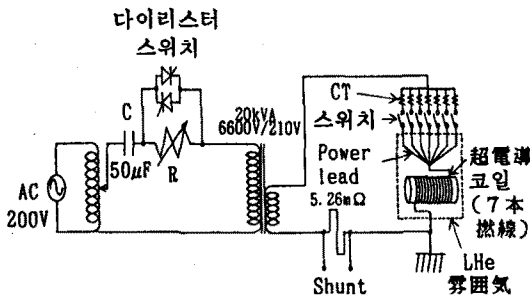


그림2 7本撚線의 電流分流 測定回路  
Fig.2 Test circuit of the current distribution in the 7-strand cable.

어는 索線 1가닥에만 單獨으로 電流를 흘린 상태에서, 그 索線의 臨界電流값을 測定했다. 다이리스터 ON상태에서, 電源電壓을 조절해, 超電導코일에 흐르는 電流를 점점 증가시켜 Quench를 발생시켰다. 이와 같이 해서 측정한 7가닥 索線의 臨界電流값 (瞬時값) 을 그림3의 ○표로 표시한다. 이와 같은 측정을 각 索線에 대해서 5회씩 했으나, 동일 索線에 있어서의 臨界電流값은 거의 같은 값이었다. 그림3으로부터, 각 索線의 臨界電流값은 63A ~ 68A (瞬時값) 의 범위안에 있음을 알 수 있다.

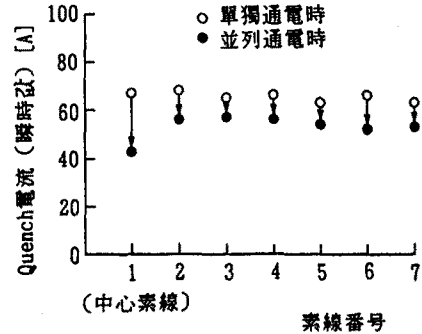


그림3 7本撚線에 있어서의 各索線의 Quench電流값의 低下

Fig.3 Degradation of the critical current of each strand in the 7-strand cable.

### <3.2> 並列通電에 의한 索線間의 電流分流

그림2의 회로에 있어서, 7개의 스위치를 全部 닫아, 7가닥의 索線에 同時에 並列로 電流를 흘렸다. 前節과 같은 방법으로 측정한 7가닥撚線으로서의 臨界電流값은 330A (瞬時값) 이다. 우선, 다이리스터가 OFF狀態에서 電源電壓 및 可變抵抗을 조절해서, 7가닥撚線으로서의 臨界電流값의 60%에 상당하는 電流 220A (瞬時값) 를 연속해서 通電했다. 그후, 다이리스터를 ON시킴으로서 可變抵抗을 突發短絡시켜 臨界電流값의 120%에 상당하는 400A의 過電流 (固有短絡電流) 를 超電導코일에 通電했다. 다이리스터는 항상 같은 位相에서 投入되도록 位相制御器를 이용했다. 이와 같이 해서 超電導코일에 Quench를 발생 시켰을때, Quench前後의 各 索線의 電流分流 波形을 그림4에 표시한다.

그림4로부터, 突發短絡 以前에 있어서는, 周圍 索線 2~7의 電流의 位相은 비교적 거의 일치하고 있으나, 中心索線 1의 電流位相은 周圍 索線의 電流位相에 비해서 約130° 낮고 있음을 알 수 있다. 또한, 中心索線의 電流값은 周圍 索線 6가닥의 平均電流값의 約58%로 작을값이다. 이와 같은 電流位相差 및 電流比는 超電導撚線에 있어서 中心索線과 周圍 索線과의 相互인덕턴스의 不均衡에 의한 것으로 알려져 있다<sup>(3)</sup>.

突發短絡 以後에는, 그림4의 확대그림의 Q1점에 있어서 索線 2의 電流가 급격히 減少하고 있다.

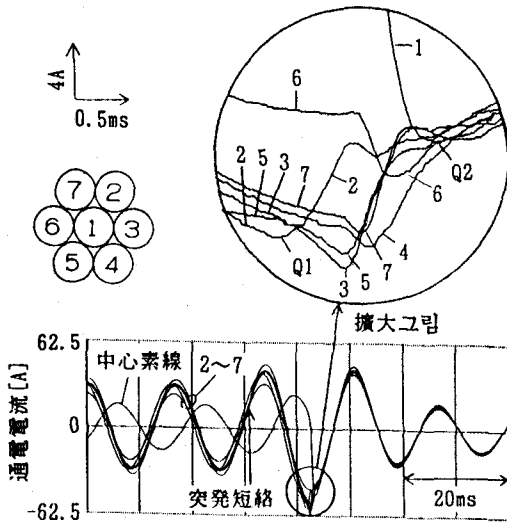


그림 4 7本撚線の並列通電時에 있어서의  
各素線の電流波形  
Fig.4 Current waveforms of each strand 1a~7a  
in the 7-strand cable at the current distribution  
test.

다른 素線電流는 減少하고 있지 않으므로, 이 時  
點에서 素線 2에 Quench가 발생한 것으로 간주하  
고 있다. Q1점 直後에는, 2의 通電電流의 減少分  
이 다른 素線에 轉流하고 있음을 알 수 있다. 특  
히, 中心素線 1에 흐르는 電流는 급격히 方向  
을 바꿔 周圍素線 2~7와 같은 方向으로 흐르기  
시작하고 있음을 알 수 있다. 素線 2의 Quench後,  
3-5-7-4-6의 순서로 차례차례 Quench가  
발생하고, 最後에 있어서 中心素線 1가 Quench하  
고 있다. Q2點 以後에는, 7가닥의 素線電流의 크  
기 및 位相이 갖추어져, Quench以前 보다도 한층  
均等하게 分流하고 있음을 알 수 있다. 이와 같  
은 並列通電 實驗을 10回 했으나, 全實驗에 있  
어서 中心素線은 7가닥 素線中에서 항상 最後에  
Quench했다.

이상과 같은 並列通電에 의한 Quench실험에 있  
어서 측정한 各素線의 臨界電流값을 그림 3에 ●  
표로 함께 표시하고 있다. 그림 3으로 부터, 7가  
닥素線 全部에 있어서, 並列通電時의 臨界電流값이  
單獨通電時의 臨界電流값 보다도 低下되어 있는  
것을 알 수가 있다. 이와같은 臨界電流값의 低下  
要因으로서, 並列通電에 의해 各素線에 印加되는  
磁界 및 電磁力에 의한 微振動, 各素線의 冷却條  
件의 차이, 撚線構造의 局部的인 非對稱性<sup>(4)</sup> 등을  
들 수 있다. 또한, 이와 같이 各素線의 臨界電流값이  
低下하는 것에 의한 7가닥 撚線으로서의 臨界電  
流값의 低下比率은, 前節에서 測定한 바와 같이  
各素線의 平均臨界電流값을 65A(瞬時값)로 할  
경우 素線臨界電流값의 各數倍의 73%밖에 되지  
않는다.

이와 같은 交流電流劣化現象을 抑制하기 위해  
는, 中心素線 대신에 CuNi(Cupronickel) 혹은 SUS  
(Stainless steel) 등의 常電導線材를 이용 함으로  
서 中心素線에는 電流가 흐르지 않도록 하는 것  
이 効果的이다. 이렇게 함으로서, 超電導線材 全  
體로서의 電流密度를 다소 희생하더라도, 素線의  
各數倍에 가까운 臨界電流값이 얻어 질것으로 期  
待된다.

#### 4. 結 論

本論文은 超電導素線×7本の 1次撚線을 이용하  
서, 各素線間의 電流分流 狀況을 測定했다. 그결과  
撚線中의 어느 한 素線이 먼저 最初로 超電導狀  
態에서 常電導狀態로 遷移(Quench)하고, 그Quen  
ch한 素線의 電流가 다른 素線에 轉流하는 것에  
의해, 모든 素線이 차례차례 Quench하는 現象이  
나타났다. 특히, 中心素線 電流는 Quench前에는 周  
圍素線 電流에 비해서 位相이 늦으나, 最初 素線  
의 Quench와 함께 급격히 方向을 바꿔, 7가닥의  
素線中에서 항상 最後에 Quench하는 現象을 發見  
했다. 또한, 이러한 Quench과정으로 인해, 撚線의  
臨界電流값이 素線 臨界電流값의 各數倍의 73%  
밖에 되지 않음을 지적했다.

#### 【參考文獻】

- (1) 鳥居, 秋田, 石川, 植田, 塚本: 「交流超電導7本  
撚り線のインダクタンスバランスの検討」, 電氣学  
會 静止器研究會資料, SA-91-47 (1991)
- (2) 吳, 石川, 早川, 大久保, 鬼頭: 「交流用超電導よ  
り線間における常電導遷移電流レベルの不均一性」  
電學論B, Vol.112, No.3, pp.278 - 279 (1992)
- (3) K.Funaki, M.Nakashima, M.Iwakuma, M.Takeo and  
K.Yamafuji: "Instability in kiloamp class a.c.  
superconducting cables", Cryogenics, Vol.31,  
pp.594 - 597 (1991)
- (4) 船木, 岩態, 竹尾, 山藤, 高橋, 藤井, 中田, 星野  
嶋田, 米田, 佐佐木, 藤岡, 熊野, 鈴木: 「1000kVA  
級超電導トランス用大用量導体の開發」, 電氣學會  
静止器研究會資料, SA-91-66 (1991)