

초전도연선의 fast quench에 관한 실험적 고찰

*이상진, 오윤상, 배준한, 고태국
연세대학교 전기공학과

An experimental study on the fast quench phenomenon of superconducting cable

*Sang-Jin Lee, Yun-Sang Oh, Joon-Han Bae, Tae-Kuk Ko
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

Abstract - A superconducting parallel bifilar winding with one strand in each branch was tested and analyzed. When the superconducting parallel bifilar winding was quenched by fault current, it showed the so-called 'fast quench' and the results of experiment well explained the resistance curve. Also the experiments confirm that the current redistribution of magnetically coupled strands develops new normal zones after the initial quench, and that the size of normal zones at an early stage increases almost linearly as dI/dt increases. By these results, we could explain the resistance rise of superconducting parallel bifilar winding when it is quenched by the current above the critical value.

1. 서론

일반적으로 초전도선재에서 상전도영역이 전파되어 나가는 속도는 수 내지 수십 m/sec 정도의 일정한 값으로 알려져 있는데, 최근의 몇몇 논문에서는 지금까지의 전파속도와는 다른 매우 빠른 전파속도를 보고하고 있다.[1][2] 이들 논문에 발표된 전파속도는 수 내지 수십 km/sec 정도로서 지금까지 알려진 전파속도의 대략 1000배 정도에 달한다. 이렇게 비정상적으로 빠른 전파속도를 갖는 상전도영역의 켄치를 정상적인 켄치에 대하여 'fast quench'라고 부르고 있다.[3] 이러한 fast quench는 최근에야 비로소 병렬로 이루어진 초전도 권선에서 전류가 매우 빠르게 변화할 때 발생하는 현상이라는 것이 이론적으로 받아들여지고 있는 실정이다.[4][5]

본 논문에서는 지금까지 이론적으로 밝혀진 내용을 실험을 통하여 확인하였다. 이를 위하여 두 개의 소선이 병렬로 이루어진 초전도 무유도권선을 제작하였고, 그 중 하나의 소선을 4개의 영역으로 나누어 여기에 전압탭을 설치하였다. 이렇게 제작한 초전도 무유도권선을 모의계통에 연결한 다음, 인위적으로 단락사고를 발생시켜 켄치된 후의 각 소선에 흐르는 전류 및 각 영역에 나타나는 전압파형을 관찰하였고, 이들로 부터 초전도 연선이 전류에 의하여 켄치될 때 나타나는 현상들을 규명하였다.

2. fast quench

초전도 스위치나 전력기에 초전도연선을 사용한 경우 초전도연선의 모재는 CuNi과 같이 높은 비저항을 지녀야만 한다. 일반적으로 교류손실을 적게 하면서 전송전류의 용량을 증가시키기 위해서는 절연된 각 소선을 꼬아서 연선으로 만들어야 한다. 이렇게 소선 사이의 접촉저항과 모재의 저항이 크면, 연선을 구성했을 때 켄치특성과 안정도에 많은 영향을 준다.

또한 여러 소선 사이에서 빠른 전류분류가 일어나기 때문에 그 켄치특성이 단선도체와는 매우 다르게 된다. 이러한 전류 분류는 연선의 끝인 단자를 통하여 이루어지기 때문에 켄치의 전개는 주로 연선의 여러 소선 사이의 자기결합에 의하여 결정되며, 일반적으로 하나의 상전도영역이 어떤 속도 v_q 를 가지고 전파하는 것으로는 볼 수 없다. 지금까지 발표된 논문의 결과를 보면 전류가 흐르는 초전도 연선에서 하나의 소선을 켄치시키면 연선에 흐르는 초기전송전류의 크기에 따라 세 가지로 분류됨을 알 수 있다.[3] 이 중에서 fast quench는 특히 수 km/sec에 달하는 빠른 전파속도를 나타내기 때문에 매우 흥미롭다. 이러한 현상은 이전에도 초전도연선에서 관측된 바 있으며, 각 부분이 병렬로 연결된 자석의 켄치과정과 매우 유사한 것으로 알려져 있다. 그러나, 이러한 자석에 비하여 초전도연선의 경우는 인덕턴스가 상대적으로 매우 작고, 소선 사이의 자기결합이 우수하기 때문에 이웃한 소선 사이의 전류분류가 매우 빠를 수 있는 것이다.

지금까지 이론적으로 밝혀진 결과로 판단하건대 fast quench는 전류가 켄치전류의 값을 넘을 때마다 발생하는 저항의 증가와 관련이 있고, 이는 전류가 켄치전류를 넘을 때 선재의 여러 곳에서 거의 동시에 많은 상전도영역이 발생하는 것이라고 해석할 수 있다. 즉, 전류가 임계전류를 넘어서는 순간 한 권선의 여러 점에서 거의 동시에 상전도영역이 만들어지고, 이 소선과 자기적으로 결합된 인접한 소선으로 전류가 급속히 분류되어 그 소선이 역시 켄치 된다. 또한 이렇게 켄치 되어진 소선에 흐르는 전류는 다시 최초로 켄치된 소선으로 재분류되어, 그 곳에서 또 다른 켄치를 발생시켜 결국에는 매우 빠른 시간에 선재 전체가 켄치 되는 현상이다.[4] 이러한 내용과 함께 켄치시 상전도영역의 발생시키는 자체의 변화량에 의해 결정된다는 normal zone acceleration이라고 불리는 현상이 일반적으로 받아들여지고 있다.[5]

3. 실험

본 논문에서는 2개의 소선으로 이루어진 초전도 연선을 실험적으로 접근하기 위하여 병렬 무유도권선을 제작하여 사용하였다. 초전도 연선을 직접 이용하는 경우 인덕턴스가 매우 작아 측정하기가 어려우므로 이와 동일한 성질을 갖도록 그림 1과 같이 두 개의 초전도 소선을 하나의 보빈에 반대방향으로 권선한 병렬 무유도권선을 제작하였다. 보빈의 재질은 포 베이크라이트이고, 권선에 예복시 합침은 하지 않았다. 또한 선재가 서로 닿는 것을 막기 위하여 내층은 시계방향으로 깊이 2mm의 V홈에 위치시켰고, 외층은 반시계방향의 깊이 1mm의 V홈에 위치시켰다. 권선에 사용된 초전도 선재는 모재가 CuNi인 교류용 선재로 임계전류는 1T에서 36A이고, 내층과 외층에는 각각 하나의 소선만을 사용하였다. 실험에서 사용된 초전도 선재의 제원과 이를 이용하여 제작된 초전도 무유도권선의 제원은 표 1에 나타내었다.

초전도 무유도권선의 fast quench 특성을 알아보기 위해 그림 1과 같이 초전도 무유도 권선의 외층에 5개의 전압탭을 내어 접지점용 T_0 라 하고, 접지점을 제외한 나머지 4곳을 각각 T_1, T_2, T_3, T_4 라 하였으며, 이들 전압탭에 의해 만들어지는 4개의 영역을 영역 1, 2, 3, 4라 하였다. 그리고, 켈치시 트리거 코일의 각 영역에 나타나는 전압을 표시하기 위해 전압탭 T_1 와 접지점 T_0 간의 전압을 V_1 , 전압탭 T_2 와 접지점 T_0 간의 전압을 V_2 등으로 나타내었다. 한편 트리거 코일의 내외층에 흐르는 전류는 2개의 전류단자를 내층과 외층 코일에 설치하여, 이들 전류단자에 전류도입선을 연결한 후 100A/4V Hall C.T.를 이용하여 상온에서 측정하였다.

이와 같이 제작한 초전도 무유도권선에 fast quench를 유발하기 위하여 그림 2의 회로를 구성하였다. 220V/130V의 가변할 수 있는 변압기를 주전원으로 사용하였으며, r_0, l_0 는 변압기의 내부 임피던스이다. 먼저 SW_3 이 열려있는 상태에서 SW_1 과 SW_2 를 닫아 회로에 권선의 임계전류 보다는 작은 전류가 흐르도록 하였으며, 이 상태에서 SW_3 을 단락시켜 회로전체에 흐르는 전류를 소선의 켈치전류값 이상으로 갑자기 증가시켜 무유도권선을 켈치시켰다. 또한, 전원전압을 변화시켜 가면서 전원전압에 따른 켈치전압과 전류변화를 관찰하였다.

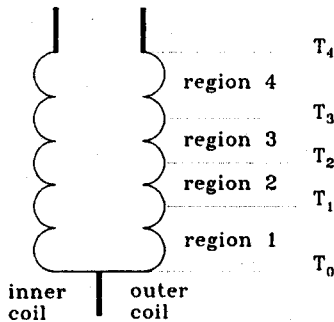


그림 1. 병렬 무유도권선에서 전압 탭의 위치도

표 1 실험에 사용된 초전도 선재 및 병렬 무유도권선의 제원

초전도 선재		
절연피막이 없을 때 직경 (mm)		0.151
절연피막을 포함한 직경 (mm)		0.170
filament diameter (μm)		0.4
filament twist pitch (mm)		1.5
insulation		Polyester varnish
matrix ratio		0.4 : 1.7 : 1
(70Cu-30Ni : 90Cu-10Ni : Nb-46.5Ti)		
DC critical current		36A @ 1T, 4.2K
초전도 병렬 무유도권선		
내측 권선	인덕턴스	10.970 mH
	상전도저항	40.970 Ω
외측 권선	선재길이	3.386 m
	인덕턴스	11.350 mH
전 체	상전도저항	41.870 Ω
	선재길이	3.470 m
	인덕턴스	0.854 μH

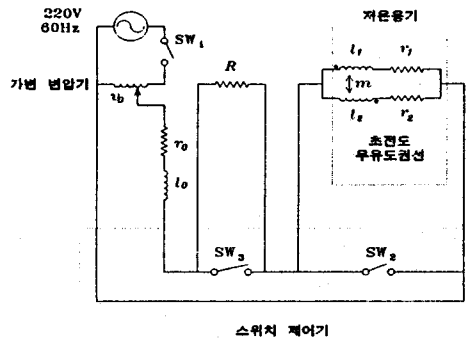


그림 2. fast quench를 위한 실험회로

4. 결과 및 고찰

그림 3은 전원전압이 40 Vrms 일 때의 실험결과로 150 ms 동안의 초전도 무유도권선의 전압과 저항곡선이며, 동일한 파형에 대하여 켈치되는 순간을 자세히 알아보기 위하여 그림 4에 5 ms 동안의 켈치전압과 각 소선에 흐르는 전류파형을 나타내었다. 먼저 그림 4의 전류파형을 보면 사고가 발생한 후 약 40 Apeak 정도에서 내층권선이 먼저 켈치되고, 내층권선에 흐르던 전류가 외층권선으로 이동하여 외층권선에 흐르는 전류가 갑자기 증가하여 외층권선도 켈치된다. 또한 외층권선이 켈치되면 여기에 흐르던 전류가 다시 내층권선으로 이동하였다가 또다시 내층권선이 켈치되는 것을 관찰할 수 있다. 전압파형을 보면 영역 4와 영역 2에서 최초로 켈치가 발생하였음을 알 수 있다. 영역 1과 3에서는 최초에는 켈치가 발생하지 않았다가 fast quench가 진행되는 동안(최초 켈치 후 1 ms 이내) 영역 1에서 또 다른 켈치가 발생하여 전파되는 것을 관찰할 수 있다. 또한 영역 3에서는 급격한 전압의 변화가 없는 것으로 보아 시간이 지남에 따라 인접한 영역에서 발생한 상전도영역이 전파해 나가는 것으로 판단된다. 이는 그림 3의 전압 파형으로도 확인할 수 있는데 시간이 지나도 영역 3의 전압은 급격한 증가없이 서서히 증가하고 있음을 볼 수 있다.

한편, 실험에서 사용한 초전도 무유도권선의 상전도저항은 약 20 Ω 정도이고, 모재는 온도에 따라 저항의 변화가 거의 없는 CuNi 합금으로 이루어져 있다. 따라서 켈치 후 무유도권선에 나타나는 저항은 온도와는 거의 무관한, 상전도영역의 길이에 의존하는 함수라고 할 수 있다. 켈치 발생 후 2 ms 동안에 권선의 저항이 4 Ω 으로 증가한 반면에, 100 ms가 지났을 때의 저항이 약 9 Ω 으로 나타났다. 이것은 77 K에서 무유도권선의 저항이 18 Ω 정도인 것을 고려해 볼 때 권선이 완전히 켈치되지 않은 상태로 켈치된 영역이 서서히 전파되어 나가고 있음을 의미하는 것이다. 또한 전압파형과 관련하여 생각해 볼 때, 최초 켈치 후 2 ms 동안에는 여러 곳에서 켈치되는 영역이 발생하고, 그 이후에는 새로운 켈치발생점이 생기는 것이 아니라 상전도영역이 켈치발생 지점으로부터 주위로 전파되는 것임을 알 수 있다.

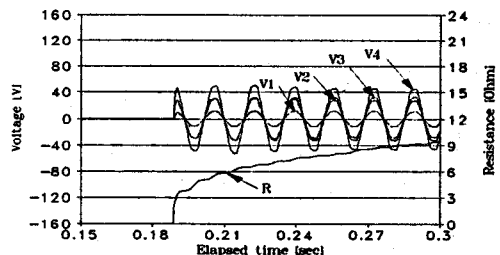


그림 3. 전원전압 40 Vrms 일 때의 전압, 저항파형

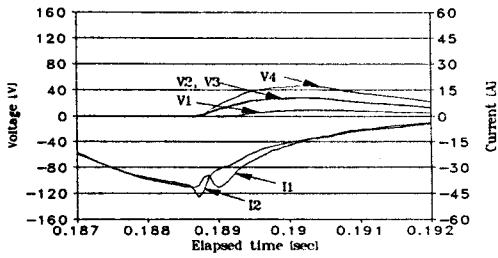


그림 4. 전원전압 40 Vrms 일 때의 전압, 전류파형

전원전압이 70 Vrms 일 때는 최초로 영역 3과 영역 4에서 동시에 퀸치가 발생하였고, 각 권선에 흐르는 전류가 퀸치시 서로 이동하면서 영역 1에 또 다른 새로운 상전도영역을 발생시켰다.(그림 5) fast quench 가 상전도영역의 전파 보다는 새로운 상전도영역이 발생하는 것에 영향을 받는다는 또 다른 증거로 영역 2는 퀸치되지 않은 상태에서 퀸치된 영역과는 떨어져 있는 독립된 영역인 영역 1에서 전압이 상승하는 것을 들 수 있겠다. 한편 1, 3, 4의 영역에서 발생한 상전도영역에서는 시간이 지나도 전압상승이 거의 없는 것으로 보아 full quench가 일어났다고 판단된다. 반면에 초기에 퀸치가 발생하지 않은 영역 2에서는 전압이 급격한 상승 없이 서서히 증가하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 주위에서 발생한 상전도영역이 서서히 전파되는 것으로 해석할 수 있다. 또한 그림 5의 실험 결과를 보면 측정된 저항곡선의 주기는 약 8.3 ms로 관측되었고, 이는 전파속도가 전류의 값에 비례한다는 기존의 실험내용과 일치하는 것이다. 최초 퀸치 발생 후 약 2 ms 동안에 저항이 5 Ω까지 상승한 반면 이후의 100 ms 동안에는 저항상승이 8 Ω에 그쳤다.

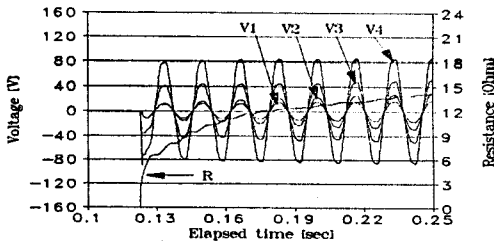


그림 5. 전원전압 70 Vrms 일 때의 전압, 저항파형

전원전압이 100 Vrms 일 때는 상전도영역이 발생하는 곳을 알 수 없을 정도로 매우 빠른 시간에 퀸치가 진행된다.(그림 6) 전압파형을 보면 사고 순간에 초전도 무유도권선의 모든 영역에서 quench가 발생하고, 전압이 더이상 증가하지 않은 것으로 보아 full quench가 일어났다고 판단된다. 이러한 내용은 저항곡선으로 확인할 수 있는데, 최초 퀸치 발생 후 약 20 ms 후에 초전도 무유도권선의 77 K 저항인 18 Ω에 다다르고 그 값이 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

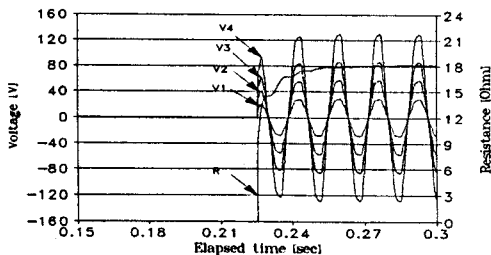


그림 6. 전원전압 100 Vrms 일 때의 전압, 저항파형

한편 퀸치 초기의 저항변화율, 즉 fast quench시 나타나는 상전도영역의 크기는 초전도 무유도권선이 초전도 사고전류제한기 등의 전력기에 응용될 때 매우 중요한 요소로서 이미 몇몇 논문에서 보고한 바 있다.[5] 지금까지 fast quench시 나타나는 상전도영역의 크기는 전류변화율에 의하여 주로 영향을 받는 것으로 알려지고 있는데, 이를 확인하기 위하여 퀸치 후 최초 10 msec 동안에 발생하는 저항의 크기에 대하여 전류변화율을 계산해 보았다.(그림 7) 여기서 전류변화율은 퀸치되기 직전의 전류의 변화량이며, 이는 부하저항과 전원 내부 임피던스 값이 고정되면 전원전압과 사고각에 의하여 영향을 받는다. 즉, 전원전압이 높을 수록, 같은 전원전압에 대해서는 사고각이 90°일 때 가장 크다. 그래프를 보면 전류변화율에 대하여 퀸치 초기에 발생하는 상전도 저항의 값이 거의 선형적으로 변화하는 것을 알 수 있다.

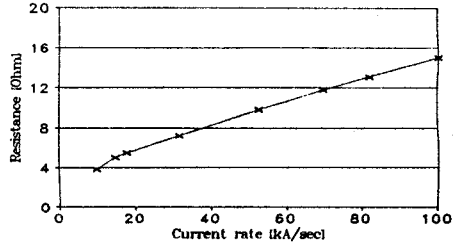


그림 7. 전류변화율에 대한 초기저항의 변화

4. 결 론

초전도 연선의 퀸치특성을 확인하기 위하여 초전도 병렬무유도권선을 제작하여 전류에 의한 퀸치실험을 하였다. 초전도 병렬무유도권선이 전류에 의하여 퀸치되면, 초기에는 fast quench가, 그 이후에는 slow quench가 발생한다. 또한 fast quench라는 것은 전류의 권선간의 계분류에 의하여 많은 수의 작은 상전도영역이 반복해서 만들어지는 현상이며, slow quench라는 것은 이렇게 발생한 상전도영역이 전파해 나가는 현상이라 할 수 있다. 또한 퀸치 초기에 발생하는 상전도영역의 크기는 퀸치 순간의 전류변화율에 비례하고, 상전도영역의 전파속도는 전송전류에 비례함을 알았다.

본 연구를 통해 얻어진 결과는 초전도 사고전류제한기 등과 같이 퀸치 순간에 큰 저항변화율을 요구하는 스위칭기에 매우 유용하게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 참고문헌

- [1] M. Iwakuma, et al., "Abnormal quench process with very fast elongation of normal zone in multi-strand superconducting cables," *Cryogenics*, Vol.30, pp.686-692, 1990
- [2] D. Ito, et al., "Development of 500 KVA AC superconducting coil", *Proc. ICFC-12*, Southampton, 1988, pp. 719-723D
- [3] V.S. Vysotsky, V.N. Tsikhon, and G.B.J. Mulder, "Quench development in superconducting cable having insulated strands with high resistive matrix (part 1, experiment)", *IEEE Trans. on MAG*, Vol.28, No.1, Jan., pp.735-738, 1992
- [4] G.B.J. Mulder, L.J.M. van de Klundert, V.S. Vysotsky, "Quench development in superconducting cable having insulated strands with high resistive matrix (part 2, analysis)," *IEEE Trans. on MAG*, Vol.28, No.1, Jan., pp.739-742, 1992
- [5] N.A. Buznikov, A.A. Pukhov and A.L. Rakhmanov, "The Normal Zone Acceleration in Superconductor with Changing Current", *IEEE Trans. on magn.*, Vol. 30, No. 4, pp.1994-1997, July 1994