

초전도 병렬 무유도권선의 온도 해석

*오윤상, 이상진, 배준한, 고태국
연세대학교 전기공학과

The Analysis of Temperature on Superconducting Parallel Bifilar Winding

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

Abstract - A superconducting parallel bifilar winding shows the phenomenon which is known as 'fast quench'. We analyzed the temperature characteristics on the winding by computer simulation, and confirmed these by experiment. The temperature of the quenched point rose gradually as the source voltage was increased. The temperature changed radically at first, but had a gentle slope after a few milliseconds. As the source voltage was large, the initial quenched length also increased. The points in this quenched length showed almost the same temperature, but the points where initial quench had not occurred showed radical temperature gradient. We could observe that the temperature of the whole wire increased simultaneously as the fast quench occurred on the superconducting parallel bifilar winding, because a number of quenched points in that wire appeared at the same time.

1. 서 론

초전도 응용 기기는 그 특성상 켄치를 수반하기 때문에 설계할 때 온도해석을 반드시 고려해야 한다. 하지만 지금까지 발표된 초전도선재에서의 온도해석은 주로 전송전류가 임계전류 보다 작을 때로 국한되며, 또한 켄치된 원인을 극부적인 열원으로 제한한 경우가 대부분이었다. 병렬로 구성된 초전도 회로에 큰 전류가 흐르는 상태에서 또는 극단적으로 전류에 의하여 켄치될 경우 상전도영역이 매우 빠르게 전파하게 되는데, 이러한 현상을 일반적인 상전도영역의 전파를 일컫는 slow quench에 대하여 'fast quench'라고 부른다.[1],[2],[3]

본 논문에서는 기존의 제한된 온도해석을 탈피하여 초전도 병렬 무유도권선에 fast quench가 발생할 때의 저항변화[4]를 이용하여, 켄치가 발생한 지점을 알 수는 없지만, 그 지점의 온도를 회로방정식과 열전달방정식을 결합하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 해석하였고, 이를 실험으로 확인하였다. 이는 초전도권선을 이용하는 모든 초전도 응용기기에서 사고로 켄치가 발생할 경우 온도 상승의 최대치를 알 수 있다는데 의의가 있다.

2. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

2.1 해석 모델 설정

초전도 병렬 무유도권선에 fast quench를 발생시키기 위한 그림 1의 회로에서 회로방정식은 다음과 같다.

$$v_0 = (r_0 + R)i_0 + r_1 i_1 + l_0 \frac{di_0}{dt} + l_1 \frac{di_1}{dt} + m \frac{di_2}{dt} \quad (1)$$

$$v_0 = (r_0 + R)i_0 + r_2 i_2 + l_0 \frac{di_0}{dt} + m \frac{di_1}{dt} + l_2 \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$i_0 = i_1 + i_2 \quad (3)$$

여기서, v_0 : 전원전압

r_0, l_0 : 전원의 내부 임피던스

r_1, r_2 : 초전도 무유도권선의 켄치 후 상전도저항

l_1, l_2, m : 무유도권선 자체인덕턴스 및 상호인덕턴스

R : 부하저항

i_1, i_2, i_0 : 각 권선에 흐르는 전류 및 전체전류

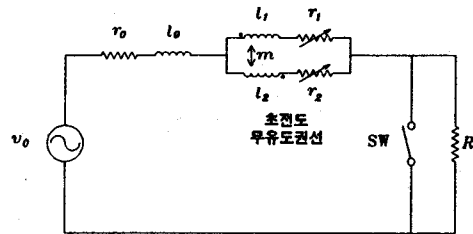


그림 1 초전도 병렬 무유도권선의 해석 모델

그림 1에서 SW는 초전도권선에 인위적으로 fast quench를 일으키기 위한 단락스위치이다. 병렬로 구성된 초전도권선에서 인접 소선간의 열전달이 없고, 선재의 단면이 매우 작아 단면 전체의 온도가 같다고 가정하면, 선재의 미소체에 체적에서 에너지보존법칙을 적용하여 선재의 길이방향(x)에 대한 지배방정식과 초기조건 및 경계조건은 다음과 같다.[5]

$$A_w C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_w \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + h 2\pi r (T_{He} - T) + i^2 \frac{\rho}{A_w} \quad (4)$$

$$T = T_{He} \quad (\text{at } t = 0) \quad (5)$$

$$A_w \frac{dx}{2} C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = A_w \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} + h 2\pi r \frac{dx}{2} (T_{He} - T) + i^2 \frac{dx/2}{A_w} \rho \quad (\text{at } x = 0) \quad (6)$$

$$T = T_{He} \quad (\text{at } x = \infty) \quad (7)$$

여기서, $T[K]$; x 에서의 온도
 $T_{He}[K]$; 냉매(액체헬륨)의 온도
 $A_w[m^2]$; 선재의 단면적(cross section area)
 $r[m]$; 선재의 반지름(radius)
 $C_v[J/m^3K]$; 선재의 정적비열(volumetric specific heat)
 $\lambda[W/mK]$; 선재의 열전도도(thermal conductivity)
 $h[W/m^2K]$; 열전달계수(heat transfer coefficient)
 $\rho[\Omega \cdot m]$; 비저항(resistivity)

2.2 수치해석을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션을 위한 알고리즘은 그림 2와 같다. 먼저 식 (1)~(3)의 회로방정식을 해석하고, 전류가 임계전류보다 커지면 di/dt 에 비례하는 초기퀠치영역을 선재에 발생시킨다. 이렇게 발생한 저항을 이용하여 초기 퀠치거리를 구하고, 그 때 선재에 흐르는 전류를 식 (4)~(7)의 열전달방정식으로 보낸다. 열전달방정식에서는 선재 각 부분의 온도를 계산하여 출력하고, 온도가 임계온도 보다 크게 된 지점의 저항을 합산하여 다시 회로방정식으로 보낸다. 회로방정식에서는 열전달방정식으로 부터 저항을 받아 각 권선에 흐르는 전류를 재계산한 다음 이를 다시 열전달방정식으로 보내 온도계산에 반영되도록 한다. 식 (1)~(3)의 회로방정식에서는 4차의 Runge-Kutta formula with adaptive stepsize control을 적용하였고, 식 (4)~(7)의 열전달방정식의 해는 유한차분법을 이용하여 구하였다.[6]

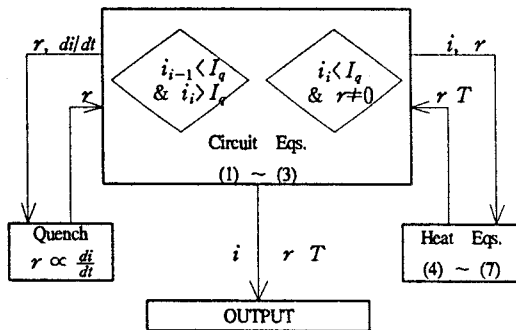


그림 2 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 알고리즘

한편, 수치해석에서는 미소시간 Δt 동안에 모든 물질상수를 온도에 독립인 것으로 가정하므로, 온도변화가 심한 경우 오차가 커지게 되어 이에 대한 보정이 필요하다. 본 논문에서는 매 시간단계 마다의 온도변화를 계산하여 이 값이 설정치 보다 커지면 물질상수를 보정하여 다시 계산하도록 하였다. 온도변화에 대한 물질상수의 값은 참고문헌을 이용하였다.[1],[7]

2.3 결과

그림 3과 그림 4는, 초전도 병렬 무유도권선에서 전원전압을 변화시켜 가면서 퀠치시점을, 퀠치발생점($x=0$ m) 및 그 주변의 온도변화 곡선이다. 먼저 전원 전압이 70 V일

때의 그래프를 보면 퀠치발생점을 중심으로 $x=0.2$ m까지는 거의 동시에 70 K까지 상승하고, 이후에는 120 Hz의 주파수로 보다 완만하게 증가한다. 이것은 퀠치 후 초전도 권선에 흐르는 잔류전류의 주파수와 판재된 값이다. $x=0.3$ m인 지점은 초기퀠치 발생후 약 1 ms후에야 비로소 열이 전도되어 퀠치되고, 1 ms가 지난 현재의 전류가 처음의 전류에 비하여 매우 작기 때문에 $x=0.3$ m인 지점의 온도가 50 K 까지만 증가하였음을 볼 수 있다. $x=1$ m인 지점은 초기퀠치 발생 후 약 7 ms에 퀠치되었는데 전도가 상당히 느려진 것을 알 수 있다.

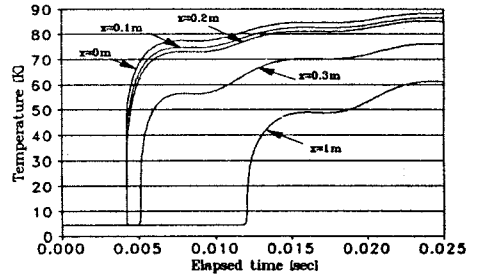


그림 3 전원전압 70V일 때의 퀠치시 온도변화

전원전압이 100 V일 때는 퀠치발생점을 중심으로 $x=0.3$ m까지 온도상승이 거의 동시에 이루어진다. 또한 초기에 상승하는 온도도 80 K 정도로, 이는 전원전압에 비례하는 것으로 시뮬레이션 결과 밝혀졌다. 즉 전원전압이 클 수록 초기에 온도상승이 발생하는 영역이 더 커지며, 그 온도도 비례하여 올라가는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 온도상승이 발생한 부분과 그렇지 않은 부분 사이에 급격한 온도구배가 발생하였음을 의미한다. $x=1$ m인 지점이 퀠치되는 시간은 온도상승에 의존한다는 것을 알 수 있다.

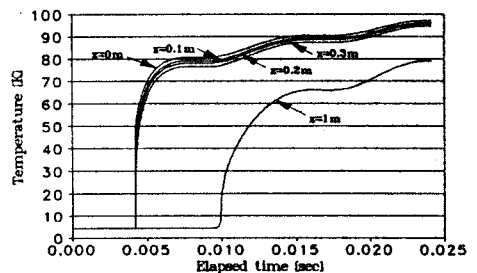


그림 4 전원전압 100V일 때의 퀠치시 온도변화

3. 실험 및 고찰

시뮬레이션을 확인하기 위하여 2-strand 초전도 병렬 무유도권선을 제작하였다. 실험에 사용된 초전도 선재의 제원 및 제작된 초전도 병렬 무유도권선의 제원은 표 1과 같다. 보빈의 재질은 fiber bakelite이고, 권선후 에폭시 함침은 하지 않았다. 또한 자기결합계수를 높이기 위하여 하나의 보빈에 권선하였으며, 선재가 서로 닿아 열전달이 일어나는 것을 막기 위하여 내층은 시계방향으로 깊이 3 mm의 V홈에 위치

시켰고, 외층은 반시계방향으로 깊이 1 mm의 V홈에 위치시켰다. 선체의 권선시 장력은 0.8 kgf로, 이는 최대장력의 약 70 % 정도이다. 권선에 사용된 초전도선체는 모재가 CuNi인 교류용선체로 임계전류는 1 T에서 36 A이고, 내층과 외층에는 각각 하나의 소선만을 사용하였다. 한편, 그림 1과 같은 회로에 권선의 임계전류 보다 작은 전류가 흐르는 상태에서, SW를 닫아 회로전체에 흐르는 전류를 갑자기 증가시켜 권선에 fast quench가 일어나도록 하였다. 같은 동작을 전원 전압을 변화시켜 가면서 실시하여, 그에 따른 변화를 관찰하였다. 측정값은 각각의 권선에 흐르는 전류와 네 지점에 나타나는 전압 및 이를 기준으로 하는 각 영역의 온도이다.

표 1 실험에 사용된 초전도선체 및 병렬 무유도권선의 제원

초전도 선체		
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 (A)		36 @ 1T, 4.2K
초전도 병렬 무유도권선		
내측 권선	인덕턴스 (mH)	10.970
	상전도저항 (Ω)	40.970
	선재길이 (m)	3.386
외측 권선	인덕턴스 (mH)	11.350
	상전도저항 (Ω)	41.870
	선재길이 (m)	3.470
전 체	인덕턴스 (μH)	0.854

그림 5는 전원전압이 100 V일 때 초전도권선의 세 지점에서 실제 측정된 온도곡선이다. 시뮬레이션의 결과와 비교하기 위하여 사고각은 90도로 고정하였다. 측정점 사이의 거리는 약 1 m 정도로, 그림 4의 시뮬레이션 결과와는 달리 세 곳의 온도가 거의 동시에 올라가는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과 켄치발생점을 중심으로 수십 cm 정도는 온도 상승이 동시에 발생한다. 앞의 전체적인 내용을 고려해 볼 때, 이것은 초전도 권선의 여러 곳에서 켄치가 발생하였다는 것을 의미하는 것이다.

반면에 그림 6의 저항 상승 곡선을 보면 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션에서는 초기저항값이 하나의 normal zone의 저항값과 같다고 가정하였다. 그리고 초기저항값을 켄치될 당시의 di/dt 값에 비례하도록 결정하였다. 그러나 실제로는 전체저항값은 같지만 보다 작은 저항이 초전도권선의 여러영역에 걸쳐 나타난다는 사실을 알 수 있다. 이것은 다른 논문에 발표된 fast quench의 내용과 동일한 것이다.[3]

4. 결 론

초전도 병렬 무유도권선에서 fast quench가 발생할 경우의 온도를 해석하였다. 전원전압이 증가할 수록 켄치발생점의 온도가 높아졌고 또한 선체의 여러 곳에서 켄치가 발생하기 때문에 권선 전체에서 온도가 고르게 상승하는 것을 알았

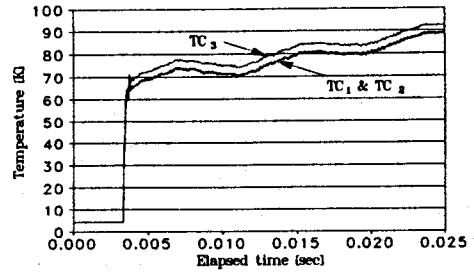


그림 5 전원전압 100V일 때 켄치시 측정된 온도변화

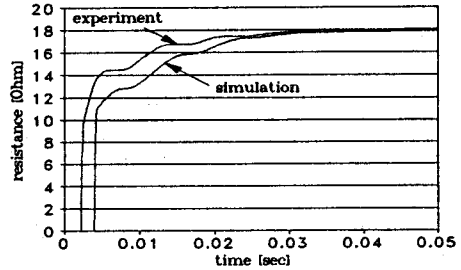


그림 6 실험과 시뮬레이션에서 저항발생 곡선의 비교

다. 이러한 결과는 초전도 사고전류제한기 등의 초전도 병렬 무유도권선을 사용하는 초전도기기의 설계 및 보호에 매우 유용하게 이용되리라 생각된다.

참고문헌

- [1] M. Iwakura, et al., "Abnormal quench process with very fast elongation of normal zone in multi-strand superconducting cables," *Cryogenics*, Vol.30, 1990, pp.686-692
- [2] 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 magn.*, Vol.28, No.1, pp.735-738, Jan. 1992
- [3] 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 magn.*, Vol.28, No.1, pp.739-742, Jan. 1992
- [4] 이상진, 배준한, 오윤상, 고태국, 고요, "초전도 무유도권선의 켄치시 저항변화에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 심사중
- [5] Tae-Kuk Ko, Yun-Sang Oh and Sang-Jin Lee, "Optimal design of the superconducting persistent current switch with respect to the heater currents & the operating currents", *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, 1995 (to be published)
- [6] W.H. Press, B.P. Flannery, S.A. Teukolsky and W.T. Vetterling, *Numerical recipes in C*, Cambridge: Cambridge University Press, 1988
- [7] H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Oxford: Clarendon Press, 1978