

초전도 송전 케이블용 도체의 안정성 및 기계적특성에 대한 이론적 검토

오 상수, 오 봉환, 하 동우, 조 전욱, 권 영길, 류 강식, 남 궁도*, 장 종근*
 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀, *한국전력 기술연구원

Theoretical study on the stability and mechanical property of conductor for superconducting power cable

S.S.Oh, B.H.Oh, D.W.Ha, J.W.Cho, Y.K.Kwon, K.S.Ryu, D.NamKung*, J.K.Jang*
 Applied Superconductivity Lab. KERI, *Research Center, KEPCO

Abstract

The stabilization of the conductor in superconducting power cable is very important from the view point of protection. In this study, critical thicknesses of superconducting layer of Nb₃Sn conductor and stabilizer Cu have been estimated under the adiabatic condition. The bending stress of Nb₃Sn/SUS composite superconducting tape on the curvature radius was also evaluated.

1. 서 론

송전 케이블용 초전도도체[1,2,3]는 외적 및 자속도약동의 내적인 원인에 의하여 내부에서 발열이 생기고 온도가 상승하면 임계전류특성이 저하하고 임계온도이상으로 발열이 증가할 때 안정화제 부분에서 전류분류에 의한 주열을 흡수하지 못하면 도체부가 순식간에 손상을 입게 된다. 따라서 그러한 원인이 발생하지 않도록 초전도층이 임계 두께를 계산하는 것과 실제부의 설치를 목적으로 할 경우 사고전류에 의하여 도체부에서 켄지가 일어나지 않도록 계통 시스템에서의 차단기의 용량을 고려하여 안정화제 설계를 하는 것이 필요하다. 또한 대용량 초전도도체로서 사용실적이 많은 Nb₃Sn을 도체로 할 경우 화합물특유의 취성으로 인하여 케이블코아 제작 및 냉각시에 화합물층에 응력이 작용하여 크랙이 발생하기 쉬우므로 보강재의 설계 및 코아의 곡률반경에 대한 검토가 필요하다.

본연구에서는 교류 송전케이블용 초전도 도체로서 가장 사용실적이 많은 Nb₃Sn을 선정하여 안정화 특성 및 기계적응력에 대하여 이론적으로 검토하고자 한다.

2. 초전도층의 임계 두께

교류 초전도송전 케이블의 도체부에서 초전도층은 테이프 형태로 former상에 헬릭칼방식으로 감고 동축상으로 차폐초전도층을 감는 2중 구조로 되어 있다[4]. 그림 1은 차폐초전도층을 제외한 케이블코아의 단면과 복합초전도테이프의 단면을 나타낸 것이다. 초전도케이블 코아는 헬륨이 내부로 통과하는 SUS나 Cu관에 절연지를

감고 안정화테이프를 감은 후, 그 위에 다시 복합초전도 테이프를 감는 방식이 일반적이다. 그림 1의 복합초전도 테이프의 단면은 일본 ETL에서 송전케이블용 Nb₃Sn초전도테이프로 실제 사용한 것으로 표면확산법으로 Nb₃Sn화합물층을 생성시킨 후 보강재 SUS와 안정화제 Cu를 화합물 표면에 전기도금하는 방법으로 제조하고 있다. 테이프형태의 경우에 초전도케이블 도체부의 초전도층의 임계두께를 구하기 위해서 우선 초전도층 내부의 자속분포의 거동을 이해할 필요가 있다. 제2종초전도체의 경우 그림 2에 나타내는 두께 2d의 테이프내로 외부자장이 하부임계자장치(H_a)이상이 되면 자속선이 내부로 침투하기 시작한다. Bean 모델에 의하면 초전도체 내부의 자속은 최소 B₁의 분포를 나타낸다. 내적 혹은 외적인 원인에 의하여 초전도체내에 ΔQ_s의 열이 발생하면 초전도체의 온도가 상승하고 온도가 상승하면 임계전류밀도가 떨어지게 되므로 자속 분포는 Bean 모델에 의하여 B₁에서 B₂로 바뀌고 이러한 자속도약으로 인하여 다시 내부에 (1)식에 나타내는 ΔQ의 열이 발생하게 된다. 초전도층의 임계 두께는 단열조건하에서 내부에서 발생한 열(ΔQ_s+ΔQ)과 초전도체의 열용량과의 평형방정식 (2)를 이용하여 (3),(4)와 같이 구할 수 있다. 실제 초전도층에 발생한 열은 안정화제 구리, 절연층 및 former 금속을 통하여 헬륨쪽으로 열전달이 일어나므로 dynamic 조건에서 열 평형방정식을 이용하여 임계 두께를 구할 수 있으나 (4)식과 초전도체의 열용량만을 고려한 단열조건하에서 임계 두께를 구하는 것이 가장 안전하다고 할 수 있다.

$$\Delta Q = \frac{\mu_o J_c^2 d^2}{3(T_c - T_o)} \Delta T \quad (1)$$

$$\Delta Q_s + \frac{\mu_o J_c^2 d^2}{3(T_c - T_o)} \Delta T = C_s \Delta T \quad (2)$$

$$\frac{\Delta Q_s}{\Delta T} = C_s - \frac{\mu_o J_c^2 d^2}{3(T_c - T_o)} > 0 \quad (3)$$

$$d < \frac{1}{J_c} \sqrt{\frac{3C_s(T_c - T_o)}{\mu_o}} \quad (4)$$

그림 3은 완전 단열조건하에서 Nb₃Sn 초전도체의 임계전류밀도 J_c에 대한 초전도체층의 두께 d를 계산하여 나타낸 것이다. J_c가 높을 수록 임계 두께는 얇아지고 있는 것을 알 수 있다. 임계 두께 2d이상의 초전도체층을 갖는 도체는 자속도약(flux jump)에 대하여 불안정하다고 할 수 있다.

3. 안정화층의 두께

초전도케이블에 임계전류이상의 큰 사고전류가 유입되어 도체에 흐르게 되면 초전도층이 켄치를 일으키게 되므로 안정화제로 전류를 분류시켜 도체를 보호해야 한다. 초전도층에 대한 안정화제의 크기를 결정하는 것은 이러한 케이블의 보호 차원에서 반드시 필요하다고 할 수 있다. 154 kV(V_B), 3 GVA(P_B)의 정격용량의 초전도케이블을 기존의 154 kV전력계통에 연계시켜 설치한다고 할 경우, 차단기의 단락전류는 43 kA이고 0.1초 사이에 초전도케이블에 유입된다는 조건하에서 사고전류에 대한 안정화제의 적절한 두께를 검토하고자 한다. 초전도 도체의 I_c 이하의 정상운전의 경우에는 모든전류는 초전도층을 흐르므로 문제가 없으나 사고전류 I_a가 초전도케이블에 유입되어 I_c이상의 전류 ΔI(I_a - I_c)가 안정화층으로 분류되어 흐르게 되면 안정화층에는 주열이 발생하게 되고 온도가 상승하게 된다. 따라서 사고전류에 의한 도체의 허용온도상승 ΔT와 사고전류의 크기, 지속시간, 안정화층의 전기저항 및 열용량을 고려하여 적절한 안정화제의 면적을 설계해야 된다. 사고전류가 지속된 시간에 안정화층에서 발생한 주열이 단열조건하에서 케이블의 초기동작온도 T₀에서 T₀ + ΔT온도범위에서의 도체의 열용량과 같으므로 (5) 식에 의하여 안정화층의 면적S와 ΔT와의 관계를 구할 수 있다[5].

$$\int_{T_0}^{T_0+\Delta T} \alpha N S^2 dT = \int_0^{\Delta t} [I_a - I_c]^2 \rho(T) dt \quad (5)$$

여기서, α(T) : 안정제의 비열, S : 안정화제의 단면적, ρ : 안정화제의 비저항, Δt : 0.1 sec이다. (5)식의 계산에서 Nb₃Sn의 체적이 안정화제에 비하여 아주 작기 때문에 초전도층의 열용량을 무시하였다. Cu 안정화층의 비열은 15 K 이하에서 온도의 함수로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C(T) = (105 T^{1.2} + 2.4 T^{2.4}) \quad (6)$$

Cu의 비저항은 ρ(T)는 자장의 유무와 온도, RRR값에 의존한다. 15 K 이하에서는 온도의존성이 작아지므로 자장하에서 T = 15 K, RRR = 200일 때의 값 1.143×10⁻¹⁰ Ωm을 계산에 사용하였다. 그림 4는 (5)식에서 구한 사고전류시 주열에 의한 도체의 허용온도증가분, ΔT를 흡수하는데 필요한 안정화제 Cu의 면적을 구한 후 그 두께를 계산하여 프롯트한 것이다. 그림 4의 안정화층의 두께는 직경 60 mm의 former에 안정화테이프와 복합초전도테이프를 적층하여 감았을 경우의 안정화층만의 전체 두께에 해당한다. ΔT를 낮게 설정할수록 안정화층 Cu가 두꺼워지는 것을 알 수 있고, 도체의 임계전류가 클수록 Cu층이 반비례하여 얇아지는 것을 알 수 있다.

4. 복합테이프 도체의 응력과 곡률반경

케이블용 Nb₃Sn도체는 화합물이어서 취약하기 때문에 그림 1에서도 나타냈듯이 일반적으로 보강제인 SUS를 붙인 복합체의 구조를 하고 있다. 여기서 SUS와 Nb₃Sn층으로만 이루어진 복합테이프를 가정하여 초전도체의 두께, T₁를 10 μm로 하여 보강제 SUS의 두께, T₂를 0.05, 0.1, 0.2mm로 변화시켰을 때의 케이블 코아작업시 도체에 걸리는 작용응력 과 곡률반경과의 관계를 (7)식으로 계산하여 결과를 그림 5에 나타냈다.

$$X = \frac{E_1 T_1^2 + E_2 T_2^2 + 2E_2 T_1 T_2}{2E_1 T_1 + 2E_2 T_2} \quad (7)$$

$$\sigma_s = E(T - X)/R_s < \text{초전도재료의 허용응력}$$

여기서 E₁, E₂는 SUS 및 Nb₃Sn의 탄성율로 각각, 172 GPa, 165 GPa이다. 윗식에서 σ_s는 초전도재료의 허용응력보다 작아야 한다. 따라서 R_s를 뉘 수 있는 한 크게 하는 것이 요구되고 SUS의 두께는 얇을 수록 굽힘응력이 작게 작용하게 된다.

5. 결론

초전도송전케이블용 초전도 도체로서 Nb₃Sn을 선정하여 임계두께 및 Cu안정화제의 두께를 단열조건하에서 평가하였다. 임계전류밀도가 증가할수록 Nb₃Sn의 임계두께는 지수적으로 감소하고 안정화제의 두께는 허용온도상승에 대하여 지수적으로 감소하는 것이 확인되었다. Nb₃Sn의 굽힘응력은 곡률반경과 보강제인 SUS두께에 의존하는 것으로 밝혀졌다.

본 연구는 한국전력 연구비 지원에 의한 연구 결과의 일부임.

참고문헌

- [1] M.Suenaga et al. : IEEE Trans. on Mag, MAG-11 (1975)231
- [2] E.B.Forsyth : Supercond. Sci. Technol. 6(1993)699.
- [3] J.D.Thompson, M.P.Maley and L.R.Newkirk
IEEE Trans. on Mag. MAG-13 (1977)429
- [4] 일본 ETL 조사보고 제 224호(1993) p.161
- [5] 오상수 외: 전기재료연구회 1995년도 춘계 논문집 p.80

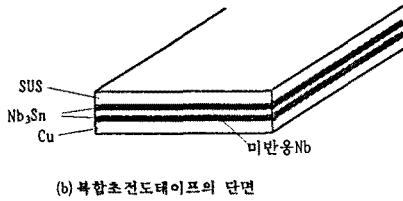
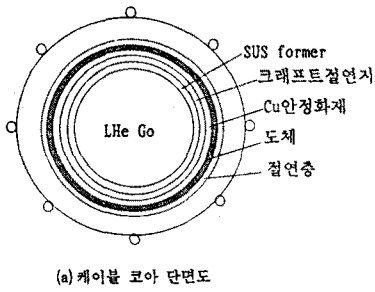


그림 1 초전도케이블 코어부의 단면 구조

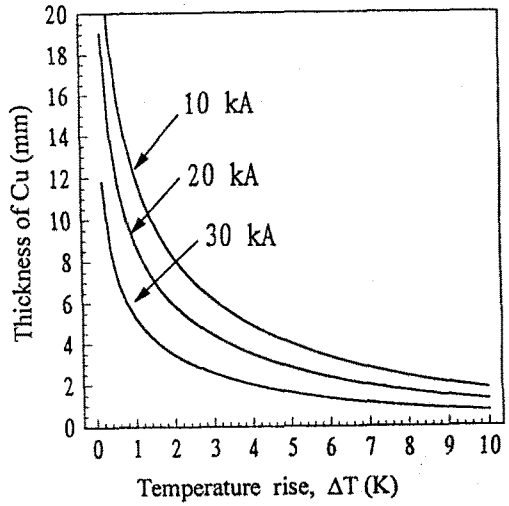


그림 4 허용온도상승에 대한 Cu 안정화층의 두께

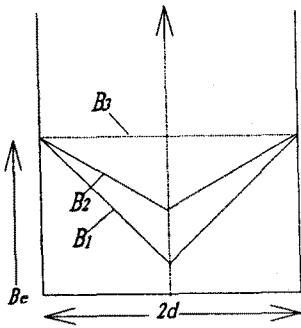


그림 2 Bean 모델에서의 자속선 분포

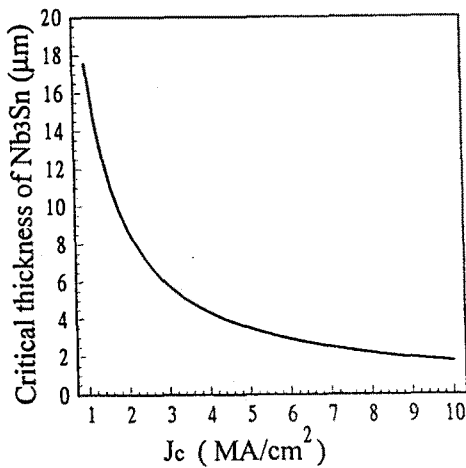


그림 3 임계전류밀도에 대한 Nb_3Sn 초전도층의 임계두께 $d(2d$: 전체두께)

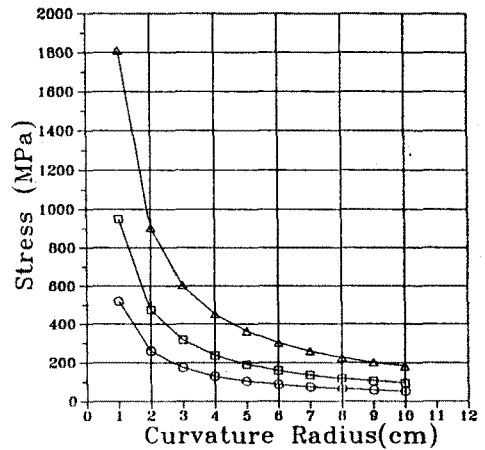


그림 5 SUS/ Nb_3Sn 복합도체의 곡률반경 과 굽힘응력의 변화(SUS두께 0.05mm (○), 0.1mm (□), 0.2mm (△))