

교류용초전도연선의 교류전류열화현상의 이론적 검토

오 봉환, 나 완수, 오 상수, 류 강식
한국전기연구소

Theoretical Evaluation of Degradation in Superconducting Multistrands for AC Use

Bong-Hwan Oh, Wan-Soo Nah, Sang-Soo Oh, Kang-Sik Ryu
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

When an alternating current is supplied to a superconducting multi-stranded cable, the quench current value of the cable was observed to be less than the simple summation of individual quench current value of each strand. One of the causes for such a degradation was attributed to the nonuniform of the current distribution in multi-stranded cable due to magnetic mutual coupling among the strands. The degradation of the superconducting cable is evaluated theoretically by taking into account the magnetic coupling among the strands.

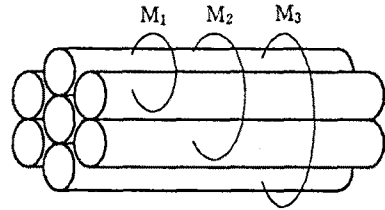
1. 서론

1983년 France의 Alstom사에서 50/60Hz의 교류에서 사용해도 교류손실이 극히 적은 극세다심형태의 교류용 초전도선재를 개발한⁽¹⁾ 이후, 초전도기술의 전력기기에의 응용이 활발히 진행되고 있다. 그 중에서도, 전력기기의 대용량화에 개발의 초점이 놓여져 있다.

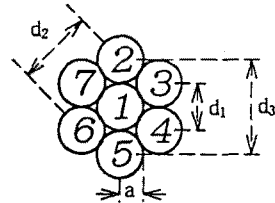
대용량전력기기의 개발을 위해서는 전류용량이 큰 초전도선재가 필요하다. 초전도선재는 전류용량을 증가시키기 위해서, 극세다심의 소선(Strand)를 여러가닥 꼬아서 연선형태로 해서 사용하고 있다. 그러나, 이 초전도연선에 교류전류를 통전하면, 소선 켈치전류치의 가닥수배보다도 작은 전류값에서 초전도연선이 켈치하는 현상이 발생한다. 이것을 일반적으로 교류전류열화현상(Degradation)이라고 한다⁽²⁾. 이 현상의 원인은 여러가지가 있으나, 그중 하나가 연선중에 있어서의 소선간의 인덕턴스 불균형에 기인하는 전류분류의 불균일성을 들수 있다⁽²⁾⁻⁽⁴⁾. 본 논문에서는, 소선간의 인덕턴스 불균형을 고려한 교류용초전도연선의 교류전류열화현상에 대해서 이론적으로 고찰한다.

2. 소선간의 전류비 및 위상차

7가닥의 소선을 꼬아서 만든 연선의 간략화 모델⁽⁵⁾을 이용해서, 각 소선에 흐르는 전류의 비 및 위상차에 대해서 고찰한다. 이 모델은, 해석을 간단히 하기 위해, 초전도선재의 twist의 영향을 무시하고 6가닥의 소선이 중심



(a) 7가닥소선에 있어서의 소선간의 자기적결합



(b) 소선번호와 소선간 거리

그림 1. 교류전류열화현상에 관한 이론적해석 모델

에 위치하는 소선 주위에 동축상으로 평행하게 배치된 것으로 한다. 이 모델을 그림1에 표시한다. 그림1의 (a)에서, 7가닥의 평행소선에 전류가 소선 단면내에서 균일하게 분포하여 흐르고 있다면, 각 소선의 자기인덕턴스 L 및 상호인덕턴스 $M_k(k=1\sim3)$ 는 다음 식으로 주어진다⁽⁶⁾.

$$L = 2\ell \left(\ln \frac{2\ell}{a} - \frac{3}{4} \right) \times 10^{-7} + L_w \quad (1)$$

$$M_k = 2\ell \left(\ln \frac{2\ell}{d_k} - 1 \right) \times 10^{-7} + M_w \quad (2)$$

$$L_w = M_w$$

여기에서, ℓ 은 소선의 길이, a 는 소선 반경, d_k 는 그림1의 (b)에 표시한 바와 같이 소선간의 중심 거리이다. 또한, L_w 및 M_w 는 각각 선재를 코일상으로 감은것에 의한 기여로 서로 같은 값이다⁽⁶⁾.

7가닥의 연선에 있어서 소선간의 상호인덕턴스는, 그림1에서 알 수 있는 바와 같이, 주위의 소선은 서로가 기하학적으로 대칭이므로 같은 값을 갖는다. 따라서, 주위 6

가닥에는 동일한 전류가 흐른다. 각 소선에 흐르는 전류를 측정하기 위해서 각 소선마다 직렬로 삽입한 파워리드의 임피던스를 Z 로 해서 7가닥 연선의 양단간 전압을 구한다. 주위 ②~⑦의 소선에 흐르는 전류를 i_{out} , 중심 ①의 소선에 흐르는 전류를 i_{in} 으로 하고, 양단전압을 V 로 하면 다음 식이 성립한다.

$$V = \{j\omega(L + 2M_1 + 2M_2 + M_3) + Z\} i_{out} + j\omega M_1 i_{in} = j\omega 6M_1 i_{out} + (j\omega L + Z) i_{in} \dots (3)$$

식(3)에 의해, 중심소선에 흐르는 전류와 주위소선에 흐르는 전류와의 비 i_{in}/i_{out} 를 구하고, $d_2 = \sqrt{3}d_1$, $d_3 = 2d_1$ 의 관계를 대입하면, 다음식이 성립한다.

$$\frac{i_{in}}{i_{out}} = \frac{Z_0 + j\omega 2 \times 10^{-7} (\ln \frac{d_1}{6a} + \frac{1}{4})}{Z_0 + j\omega 2 \times 10^{-7} (\ln \frac{d_1}{a} + \frac{1}{4})} \quad (4)$$

여기에서, $Z_0 = Z/\ell$ 은 초전도선재(10m)의 단위길이로 환산한 직렬임피던스이다. 식(4)에, 7가닥 초전도연선의 각 소선간의 전류분류 실험에 이용한 초전도선재의 사양을 참고해서[참고문헌(3),(4)], $a=0.1\text{mm}$, $d_1=0.22\text{mm}$, 주파수 $f=60\text{Hz}$ 를 대입하면 다음 식으로 된다.

$$\frac{i_{in}}{i_{out}} = \frac{Z_0^2 - jZ_0 1.35 \times 10^{-4} - 4.447 \times 10^{-9}}{Z_0^2 + 6.13 \times 10^{-9}} \quad (5)$$

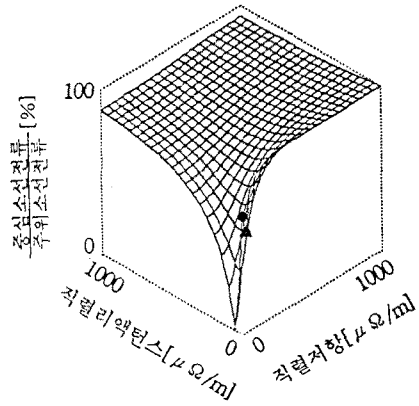
식(5)에 있어서, 직렬임피던스 Z_0 에 대한 주위소선 전류 i_{out} 와 중심소선 전류 i_{in} 과의 전류비를 그림2의 (a)에, 위상차를 (b)에 표시한다. 양 그림은 직렬임피던스를 저항분과 리액턴스분으로 나누어서 3차원으로 표시한 것이다. 직렬임피던스를 삽입하지 않은 경우, 즉 $Z_0=0$ 일때는 식(5)에 의해 다음의 결과를 얻는다.

$$\frac{i_{in}}{i_{out}} = -0.73 = 0.73 \angle -180^\circ$$

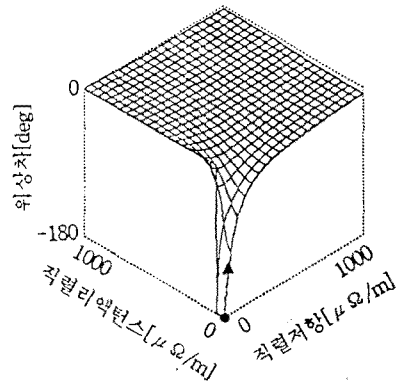
즉 중심소선에 흐르는 전류의 크기는 주위소선에 흐르는 전류의 73% 밖에 되지 않고, 또한 위상은 완전 반대방향의 -180° 차이가 있음을 알 수 있다. 이들의 값을 그림2의 (a) 및 (b)에 \bullet 표로 표시한다. 참고문헌 (3), (4)의 실험에서, 각 소선에 흐르는 전류를 측정하기 위해서 삽입한 파워리드의 임피던스는 $Z_0=0.032+j0.0098m\Omega$ 이다. 이 값을 식(5)에 대입하면,

$$\frac{i_{in}}{i_{out}} = -0.355 - j0.491 = 0.61 \angle -126^\circ$$

으로 된다. 즉 중심소선의 전류는 주위소선의 전류에 대해서, 크기에서는 61%, 위상차는 126° (지상)로 계산된다. 이들 값을 그림 2에 \blacktriangle 표로 표시한다. 참고문헌 (3)에서 측정된 실험치는 전류비 58%, 위상차 130° (지상)로, 계산치와 잘 일치하고 있다.



(a) 전류비



(b) 위상차

그림 2. 중심소선과 주위소선과의 전류비 및 위상차

3. 펜치전류치의 열화

중심소선에 흐르는 전류와 주위소선에 흐르는 전류와의 불균일성을 고려해서, 7가닥연선 및 7×7 가닥연선의 펜치전류치를 평가한다.

먼저 7가닥연선에 대해서 고찰한다. 각 소선에 흐르는 전류를 측정하기 위한 직렬임피던스를 삽입하지 않았을 때, 즉 $Z_0=0$ 인 경우, 중심소선에 흐르는 전류는 주위소선에 흐르는 전류에 대해서 크기는 73%, 위상은 -180° 의 차이가 있음을 2장에서 기술했다. 이것은 소선 각각의 펜치전류치가 균일하다고 하여도, 주위소선에 흐르는 전류가 중심소선에 흐르는 전류보다도 먼저 펜치레벨에 도달하는 것을 의미한다. 따라서, 주위 6가닥의 소선에는 똑같은 전류가 흐른다고 가정하고, 소선의 각 펜치전류치를 일률적으로 I_6 , 7가닥연선의 펜치전류치를 I_7 으로 하면,

$$I_7 = 6I_6 - 0.73I_6 = 5.27I_6 \quad (6)$$

으로 된다. 이것은 전류용량을 증가시키기 위해서 소선을 7가닥 꼬아서 연선으로 하였다 해도, 7가닥연선의 펜치전류치는 소선 1가닥의 펜치전류치의 7배로는 되지 않고 5.27배 밖에 되지 않음을 의미한다. 즉 펜치전류치는 75%로 열화하는 것으로 된다. 이것을 참고문헌 (3)에서

표 1 켄치전류치의 열화비율

(a) 소선×7의 1차연선

	실험치	계산치
소선의 켄치전류치 [A]	65	
소선의 가닥수배 [A]	65×7=455	
1차연선의 켄치전류치 [A]	330	343
1차연선의 켄치전류치 / 소선의 가닥수배 [%]	73	75

(b) 소선×7×7의 2차연선

	실험치	계산치
소선의 켄치전류치 [A]	65	
소선의 가닥수배 [A]	65×47=3185	
2차연선의 켄치전류치 [A]	1600	1815
2차연선의 켄치전류치 / 소선의 가닥수배 [%]	50	57

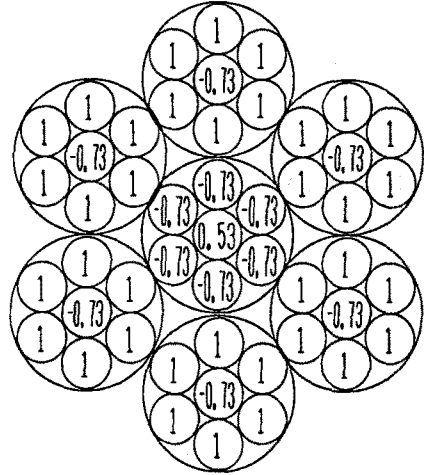


그림 3. 7×7가닥 연선에 있어서의 각 소선전류의 크기 및 방향

의 실험치와 비교해서 표1의 (a)에 표시한다. 표로부터, 실험치는 73%, 계산치는 75%로 양자는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

다음에 7×7가닥연선에 대해서 고찰한다. 7×7가닥연선은 소선을 7가닥 꼬은 연선(1차연선)을, 다시 7가닥 꼬은 연선(1차연선×7의 2차연선)을 의미한다. 여기에서는, 각 1차연선을 한조로해서, 위의 소선×7의 1차연선과 동일하게 생각한다. 주위 1차연선의 켄치전류치를 식(6)으로부터 5.27I_c로 하면, 중심 1차연선의 켄치전류치는

$$5.27 I_c \times (-0.73) = -3.85 I_c$$

로 된다. 따라서, 2차연선으로서의 켄치전류치를 I_{7×7}으로 하면 I_{7×7}은 다음 식으로 주어진다.

$$I_{7 \times 7} = 6 \times 5.27 I_c - 3.85 I_c = 27.8 I_c$$

즉 7×7가닥연선의 켄치전류치는 소선 켄치전류치의 49배가 되지않고, 27.8배에 지나지 않음을 알 수 있다. 이 7×7가닥연선에 있어서 각 소선에 흐르는 전류의 크기 및 방향을 표시한것이 그림3이다. 그림3에서는, I_c=1로 규격화해서 표시하고 있다. 표1의 (b)는 참고문헌 (4)에서의 실험치와의 비교를 표시하고 있다. 표1의 (b)로부터, I_{7×7}/(7×I_c)는 실험치가 50%, 계산치가 57%로 양자는 거의 일치하고 있다.

4. 결 론

본 논문은 초전도연선의 간략화 모델을 이용해서, 각 소선간의 인덕턴스 불균형에 기인하는 교류전류열화현상에 대해서 이론적으로 검토하였다. 그 결과, 중심소선에 흐르는 전류가 주위소선에 흐르는 전류에 대해서 크기는 73%, 위상은 완전 역방향의 -180°의 위상차를 갖는 것

을 알았다. 이로 인해서, 소선×7가닥의 1차연선에 있어서의 켄치전류치는 소선 가닥수배의 75%, 소선×7×7가닥의 2차연선에 있어서는 소선 가닥수배의 57% 밖에 되지 않음을 지적했다.

[참고문헌]

- (1) P.Dubots, et al. : "NbTi wires with ultra-fine filaments for 50-60 Hz use : Influence of the filament diameter upon losses", IEEE Trans. MAG-21, pp. 177-180 (1985)
- (2) K.Funaki, et al. : "Instability in kiloamp class a.c. superconducting cables", Cryogenics, Vol.31, pp.594-597 (1991)
- (3) 오봉환 외, : "교류용초전도연선중의 각 소선간 전류분류", 1992년도 하계학술대회논문집(B), pp.765-767 (1992)
- (4) 오봉환 외, : "교류용초전도연선중에 있어서의 켄치전류 후의 전류분류", 1993년도 하계학술대회논문집(B), pp.1081-1083 (1993)
- (5) 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)