

초전도다중케이블에서의 축방향자계

차귀수 심정욱 박종현 나완수* 이지광** 김동훈** 한송엽**

순천향대학교 *성균관대학교 **서울대학교

Effects of Longitudinal Field in a Multiply-Twisted Superconducting Cable

Gueesoo Cha Jung Wook Sim Jong Hyeon Park Wan Soo Na*

Ji Kwang Lee** Dong Hun Kim** Song Yop Hahn**

Soonchunhyang Univ. Sungkyunkwan Univ.* Seoul Nat'l Univ.**

Abstract

Multiply-twist cable is used for a large capacity superconducting cable because it is helpful to reduce AC losses and to increase transport current. In a multiply-twisted cable, the axis of a strand does not coincide with that of cable. Therefore, the longitudinal field is generated by the transport current. The longitudinal field changes the current distribution in the strand and generates additional AC loss. This paper calculates the longitudinal field that is applied to a strand in the multiply-twisted cable. Current distribution of a strand in the cable is also presented. 2nd level superconducting cable is chosen as an analysis model, whose current capacity is 2000A. Calculation result shows the longitudinal field cannot be neglected in low field machines such as superconducting transformer.

1. 서 론

대용량의 교류용 초전도선은 통전전류를 증대시키고 결합손실을 줄이기 위해서 여러가닥의 소선을 트위스트시킨 케이블의 형태로 제작되고 있다. 이와같이 트위스트된 초전도케이블에서는 소선의 축방향과 케이블의 축방향이 서로 다르게 된다. 대용량 초전도전력기기에서 사용되는 다중케이블에서는 최종케이블의 축방향과 소선의 축방향은 상당히 달라진다.

이에따라 초전도케이블에 흐르는 자기전류에 의해서 발생하는 자계에는 원주방향성분 뿐만이 아니라 축방향성분도 존재한다. 축방향자계성분 B_z 이 인가되면 불포화영역의 전류밀도가 변하게 되어 포화영역의 반경이 변하고 소케이블의 특성을 해석하기 위해서는 B_z 의 크기를 정확하게 계산하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 초전도케이블의 자기전류에 의해서 발생하는 축방향자계성분을 계산했다. 330A를 훌릴 수 있는 1차케이블과 2000A를 훌릴 수 있는 2차케이블에 대해서 계산했다. 계산된 B_z 이 소선에 인가되었을 때에 불포화영역의 전류밀도와 포화반경의 변화를 일정자속의 법칙을 이용해서 계산했다.

2. 초전도케이블의 구조 및 계산식

교류용 초전도케이블의 기본 단위는 필라멘트 구조로 된 극세다심형 초전도소선이다. 하나의 초전도소선에 흐를 수 있는 전류는 대략 수십 암페어 정도이므로 대전류를

흘리기 위해서는 여러가닥의 소선을 묶어서 사용하고 결합전류에 의해서 발생하는 자장을 줄이기 위해서 이들을 고아서 그림 1과 같이 케이블로 만든다. 이를 1차케이블이라 하고 여러가닥의 1차케이블을 다시 고아서 2차케이블을 만든다.

통전전류가 수천 암페어 정도이면 일반적으로 2차 또는 3차케이블을 사용한다. 그림 1은 일반적으로 많이 사용되는 7닥의 소선을 묶어서 만든 $(6+1) \times (6+1)$ 2차케이블의 구조이다.

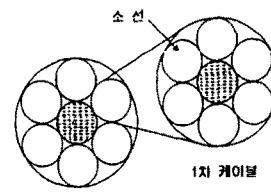


그림 1 2차케이블의 구조

그리고 각 차수의 케이블의 트위스트 방향은 시계방향 또는 반시계방향이 되고 시계방향으로 트위스트한 것을 Z 트위스트, 반시계방향으로 트위스트한 것을 S 트위스트라고 한다.

축방향 자계

이와같은 구조로 제작된 초전도케이블에서는 소선의 축방향과 케이블의 축방향이 서로 다르게 된다. 소선의 축방향을 따라서 흐르는 자기전류는 케이블의 축방향성분과 케이블의 원주방향성분으로 나눌 수 있고 자기전류에 발생하는 자계에도 원주방향성분 뿐만이 아니라 축방향성분도 존재한다. 다중케이블의 경우에 각 차수에 해당하는 케이블의 트위스트 피치가 서로 다르기 때문에 축방향자계성분은 이 트위스트 피치에 의해서 주기성을 띠게되어 직류성분과 교류성분이 혼합된 형태가 된다.

각각의 초전도소선은 트위스트된 상태로 축방향으로 진행하므로 소선에 의해서 발생하는 자계는 Biot-Savart의 법칙을 이용해서 계산할 수 있다.

$$dB = \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times \vec{a}_z}{4\pi r^2}$$

여기서 I 는 한 가닥의 소선에 흐르는 전류이고 r 은 자계를 발생시키는 소선과 자계를 경험하는 소선사이의 거리이다. 임의의 소선에 가해지는 자계는 모든 소선에 의해서 발생하는 자계를 합해서 구할 수 있다.

식 (1)에 의해서 발생한 자계 중에서 소선의 축방향성분의 자계 B_l 은 소선의 축방향을 \vec{a} 라고 하면

$$B_l = \bar{B} \cdot \vec{a}$$

로 표시할 수 있다.

소선내의 전류분포

자기전류 또는 외부자계에 의해서 소선에 인가되는 축방향자계성분은 소선의 전류분포를 변화시킨다. 소선내에 인가되는 B_l 을 상쇄하기 위해서 불포화영역에도 흐르는 전류가 변하고 이는 다시 포화영역의 두께를 변화시킨다. 소선의 포화영역의 두께가 변하면 이에 따른 부가적인 교류손실이 발생할 뿐만 아니라 임계전류도 변하기 때문에 안정성에 영향을 미치게 된다.

여기서는 케이블에 흐르는 자기전류에 의해서 발생하는 B_l 이 소선내의 전류분포에 미치는 영향을 계산하다. 소선내의 자기화산시정수는 교류용 초전도선에 인가되는 전류의 주기에 비해서 상당히 크기 때문에 이의 영향을 무시하면 자속일정의 법칙에 의해서 불포화영역을 통과하는 자속은 항상 0이다[1].

소선내에서 반경이 다른 곳에 위치하고 있는 두 개의 필라멘트 사이를 통과하는 전체자속 ϕ 는

$$\phi_l = \phi_s + \phi_o$$

로 표시되고 여기서 s 는 자기전류에 의한 자속이고 c 는 케이블의 다른 소선에 의해서 발생하는 자속이다. 전체전류는 포화영역에 흐르는 전류 I_{sat} 와 불포화영역에 흐르는 전류 $I_{non-sat}$ 의 합으로 다음과 같이 쓸 수 있다[2].

$$I = I_{sat} + I_{non-sat}$$

3. 계산 사례

히다치에서 제작한 5T에서 2000A를 흘릴 수 있는 교류용 2차 초전도케이블을 대상으로 해서 축방향자계성분을 계산한다[3]. 케이블을 구성하고 있는 소선의 반경은 0.25mm, 필라멘트의 직경은 0.1μm이다. 1차케이블은 CuNi로 된 심선을 6개의 소선이 둘러싸고 있는 구조로서 직경은 0.75mm이고 트위스트 피치는 6mm이다. 2차케이블도 1차케이블과 같은 구조이고 직경과 트위스트 피치는 각각 2.25mm와 28.5mm로서 피치가 상당히 긴 것이 특징이다. 표 1은 해석에 사용된 2차케이블의 사양이다.

트위스트된 다중케이블에서는 각각의 소선에 흐르는 전류가 거의 일정하기 때문에 각 소선에는 55.5A의 일정전류가 흐르는 것으로 했다.

3.1 축방향자계성분

1차 케이블

1차케이블에서는 트위스트가 되어 있더라도 각 소선의 상대적인 위치가 변하지 않기 때문에 1차케이블에서 발생하는 소선의 축방향 자계성분은 일정한 값이 된다. 표 1과 같은 사양을 갖는 1차케이블이 Z방향으로 트위스트되어

표 1 2차케이블의 구조

소선	재질 직경 필라멘트 직경 필라멘트 수 NbTi:Cu:CuNi 트위스트 방향	Nb46.5wt%Ti 0.25mm 0.1μm 885,000 1:0.8:3.6 2.0mm S 또는 Z
1차 케이블	구조 직경 트위스트 피치 트위스트 방향	6개의 소선+1 CuNi소선 0.75mm 6.0mm S 또는 Z
2차 케이블	구조 직경 트위스트 피치 트위스트 방향	6개의 1차케이블+1 CuNi심선 2.25mm 28.5mm S 또는 Z

있을 때에 B_l 은 0.052T이다. 1차케이블에서 소선이 트위스트 피치동안 축방향으로 진행할 때에 소선의 중심은 원을 그리게 된다.

2차케이블

2차케이블에서는 축방향으로 진행해 나아가면서 소선상호간의 위치가 변하기 때문에 B_l 은 소선의 위치에 따라서 크기가 달라질 뿐 아니라 트위스트 방향에 따라서도 크기가 달라진다. 1차케이블과 2차케이블 모두 2방향으로 트위스트 된 것을 Z1Z2로 표시하고 1차케이블은 S로 2차케이블은 Z방향으로 트위스트 된 것을 S1Z2 표시한다. 그림 2는 Z1Z2인 경우에 맨 위쪽에 위치한 소선이 축방향으로 30mm 진행하는 동안에 중심의 변화를 그린 것으로 1차케이블에서는 원이었던 것에 비해서 2차 트위스트에 의해서 중심의 변화가 복잡해지는 것을 볼 수 있다. 2차케이블의 트위스트 피치가 1차케이블의 트위스트 피치의 정수배가 아니기 때문에 소선의 중심은 어긋나게 되는 것을 볼 수 있다. 그럼 3은 이때 소선에 인가되는 축방향 자계성분으로 직류성분과 위치에 따라서 변하는 공간고조파 성분 또는 교류성분이 존재하는 것을 볼 수 있다.

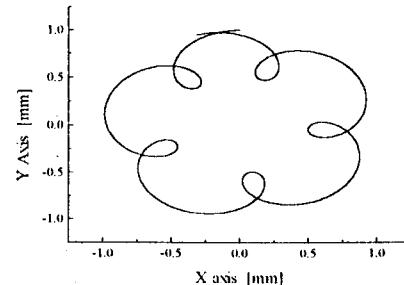


그림 2. Z1Z2인 경우에 소선의 중심변화

Fig.2 Variation of a strand center, Z1Z2

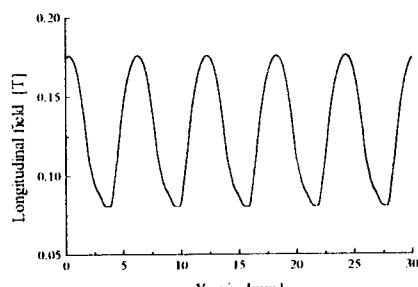


그림 3. Z1Z2인 경우에 소선에 인가되는 축방향 자계성분

Fig.3 Longitudinal field applied to a strand, Z1Z2

그림 4와 그림 5는 S1Z2로 트위스트된 경우로서 각 그림의 의미는 그림 2와 그림 3과 동일하다. 트위스트 방식이 달라졌기 때문에 맨 위에 위치한 소선의 중심의 변화가 달라지고 축방향 자계성분도 달라진 것을 볼 수 있다. Z1Z2에서 S1S2로 바뀌는 등 트위스트 방향이 완전히 바뀌면 B_1 의 방향은 바뀌지만 크기에는 변화가 없다.

FFT를 이용해서 B_1 의 직류성분과 교류성분의 최대치를 구하면 Z1Z2 일 때에 직류성분은 0.127T이고 교류성분의 최대치는 0.047T이다. Z1S2일 때에는 직류성분이 0.0259T이고 교류성분의 최대치가 0.052T로서 1차케이블과 2차케이블의 트위스트 방식이 달라지면 직류성분의 크기는 4배 이상이 변하나 교류성분의 최대치는 변화가 적은 것을 알수 있다.

초전도변압기 등에서 초전도케이블에 인가되는 자장의 세기가 0.1T 내외인 것을 고려하면 Z1Z2로 트위스트된 경우에 소선에 인가되는 0.127T의 자속밀도는 자장의 세기가 낮은 데에서 사용되는 초전도케이블의 특성을 산정할 때에 반드시 고려해야 한다.

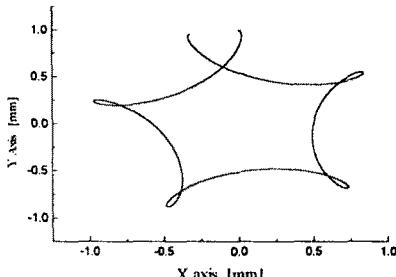


그림 4. S1Z2인 경우에 소선의 중심변화
Fig.4 Variation of a strand center, S1Z2

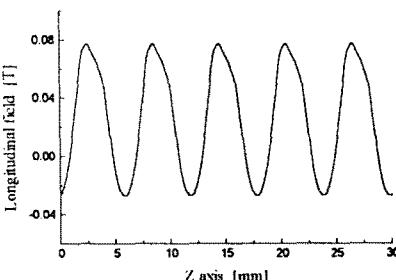


그림 5. S1Z2인 경우에 소선에 인가되는 축방향 자계성분
Fig.5 Longitudinal field applied to a strand, S1Z2

3.2 소선내의 전류분포

직경이 0.25mm이고 트위스트 피치가 2.0mm인 소선에서의 전류분포를 계산하면 다음과 같다. 그림 6은 소선이 케이블이 되지 않은 상태로 즉 소선 한 가닥만 있는 경우와 소선이 1차케이블내에 위치하는 경우의 트위스트 방향에 따른 전류분포이다. 포화영역에서의 전류밀도는 일정하다고 가정했고 소선에 흐르는 전류는 55.5A로서 일정한 경우이다. 그림 7은 2차케이블 내에 위치하고 있는 소선내의 전류분포이다. 그림 6과 그림 7 모두에서 트위스트의 방향이 바뀌면 인가되는 축방향자장의 세기가 변하게 되어 포화영역의 반경이 바뀌는 것을 볼 수 있다.

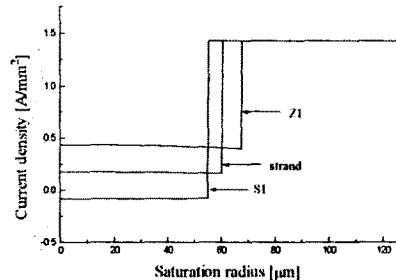


그림 6 소선과 1차케이블의 경우에
트위스트방식에 따른 소선내에서의 전류분포
Fig.6 Current distribution of a strand,
one strand and 1st level cable

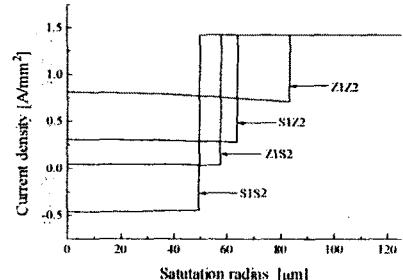


그림 7 2차케이블의 경우에 트위스트방식에
따른 소선내의 전류분포
Fig.7 Current distribution of a strand, 2nd level cable

결 론

대전류를 흘리기 위해서 사용하는 다중케이블에서는 트위스트의 영향에 의해서 축방향자계성분이 발생한다. 축방향자계성분은 트위스트방식에 따라서 크기가 변하고 소선에서 포화영역의 두께를 변화시킨다. 본 연구에서는 다중케이블에 흐르는 자기전류에 의해서 발생하는 축방향 자계의 크기를 수치적인 방법으로 구했고 이것이 소선내의 전류분포에 미치는 영향을 보였다.

본 연구는 통산산업부의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1]. N. Amemiya, et al., "Influence of Longitudinal Magnetic Field on Thermomagnetic Instability in AC Superconducting Cables," Cryogenics, Vol.33, No.9, 1993, pp.889-899
- [2]. K. Funaki, et al., "Theoretical Evaluation of Longitudinal AC Losses in Large-Capacity Superconducting Cable for 50/60Hz Use," Cryogenics, Vol.33, No.2, 1993, pp.190-198
- [3]. T. Taniguchi and R. Takahashi, "Dependence of Quench Current and AC Losses on Twist Directions and Annealing of AC superconducting Cables," ICEC16, May, Japan, 1996
- [4]. H. Kanetake, et al., "Experimental Evaluation of Longitudinal Field Loss in Multiply-Twisted Superconducting Cable for AC Use," Cryogenics, Vol.35, No.5, 1995, pp.327-332