

Non-uniform Current Distribution of Multi-Strand HTS Cable

裴俊漢* · 裴德權** · 趙全旭** · 沈基德*** · 高太國§
 (Joon-Han Bae · Duck Kweon Bae · Jeon-Wook Cho · Ki-Deok Sim · Tae Kuk Ko)

Abstract - The 4-probe method with a voltage tap on terminals has been used for the measurement of the critical current of multi-strand high- T_c superconducting(HTS) cables. And the critical current of cables is obtained as the measured total current divided by the number of conductor when the terminal voltage exceeds the predetermined criterion of critical current. However, because of the non-uniform current distribution due to the different critical current, shapes, and other characteristics of each conductor, this is not applicable method to the multi-strand HTS cable. To determine the critical current of multi-strand HTS cable, the critical current of each conductor must be measured with different method. In this paper, the current distribution and the critical current of each conductors in multi-strand cable were measured with specially made pick-up coils and voltage taps. It is presented that the real critical current of multi-strand is smaller than sum of each conductors. The main cause of non-uniform current distribution is the difference between the resistances appeared in each HTS wires.

Key Words : High- T_c superconductor, multi-strand HTS cable, current share, pick-up coil

1. 서 론

1세대 고온초전도선재인 Bi-2223 선재가 성공적으로 상용화되었고 이를 사용한 여러 전자기기들의 개발이 여러 나라에서 활발히 진행중이다. 특히 부하집중지역의 전력난해소 등을 위한 고온초전도케이블은 특정지역의 변전소에 설치되는 시점에 이르렀다 [1]. 고온초전도전력케이블은 다중-스트랜드된 다층의 고온초전도선재로 구성된다. 인덕턴스 등에 의한 각 층의 전류분배에 대한 연구는 많이 보고되고 있으며 이에 따른 케이블의 설계가 이루어지고 있으나 [2-4] 같은 층에서 스트랜드된 각 도체의 전류분배에 대한 연구는 보고된 바가 드물다.

초전도체는 세가지 임계조건이 모두 만족된 상태에서 초전도성을 지나나 그 중 하나의 조건만이라도 만족되지 못하면 초전도성이 파괴된다. 따라서 실용적 관점에서 중요한 조건인 임계전류의 정확한 예측이 케이블설계단계에서 필요하다. 이는 고온초전도케이블의 동작전류를 임계전류의 얼마로 설정하는 지에 대한 기본적이고 중요한 자료가 될 것이다. 상업적으로 판매되고 있는 초전도선재의 임계전류에 어느정도 여유분이 있으나 임계전류 근처로 전송전류가 상승됨에 따라 고온초전도 선재에 발생하는 저항은 그 양이 미약할지라도

케이블 내부의 각 선재의 관점으로 보았을 때에는 무시할 수 없는 크기가 된다. 특히 고온초전도케이블을 계통에 적용하여 운전할 때 발생될 수 있는 순간적인 부하집중 등에 의한 전송전류의 증가에 의해 각 스트랜드된 선재에서 발생하는 저항차이에 의한 전류의 불균형이 발생할 경우에는 케이블에서 켄치가 발생하여 전체 계통을 위협하게 할 가능성이 있으므로 이에 대한 연구가 절실히 필요하다. 이 연구를 위해서는 각 선재의 임계전류, 전체 임계전류와 각 선재에 흐르는 전류를 측정하는 것이 필요하다. 일반적으로 임계전류를 측정하는 데에 사용되는 4단자법 만으로는 이를 모두 측정할 수 없다. 특별히 제작된 픽업코일을 사용하여 각 스트랜드로 흐르는 전류분배도를 측정하였으며, 이 값들과 각 스트랜드된 선재에 설치된 전압탭 및 공통된 전압탭으로 각 임계전류를 측정하였다.

2. 실 험

2.1 코일의 제작

도체에 흐르는 전류를 측정하는 데에는 셉트나 로그스키코 일 같은 픽업코일을 사용한다. 셉트를 사용하여 전류를 측정할 경우에는 비교적 정확한 전류를 측정할 수 있으나 다중스트랜드의 경우 각 경로마다 셉트를 설치할 수 없으며 셉트의 저항차이에 의한 전류의 분배가 일어날 수 있으므로 본 측정에는 적합하지 않다. 따라서 전류에 의해 발생하는 자장을 검출하여 그것을 전류로 환산하는 방법과 같은 간접적인 방법으로 각 스트랜드의 전류를 측정하여야 한다. 간접적인 전류측정에 사용되는 일반적인 픽업코일은 원형 도체의 전류를 측정하는 데에 적합하도록 만들어져 있다. 고온초전도케이블

* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 前任研究員 · 工博
 ** 正 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 博士課程
 *** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 研究員
 § 正 會 員 : 延世大學 電氣電子工學科 教授 · 工博
 接受日字 : 2004年 2月 14日
 最終完了 : 2004年 6月 12日

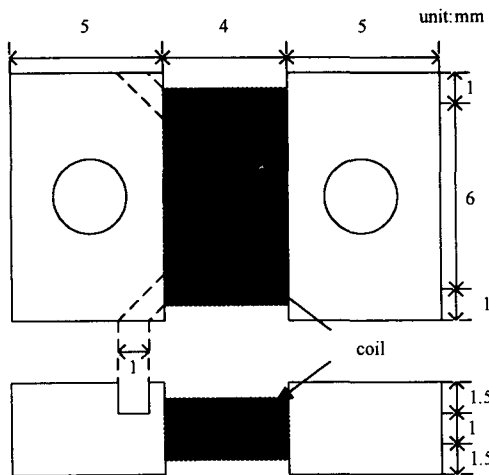


그림 1. 픽업코일의 구조
Fig. 1. Structure of pick-up coil

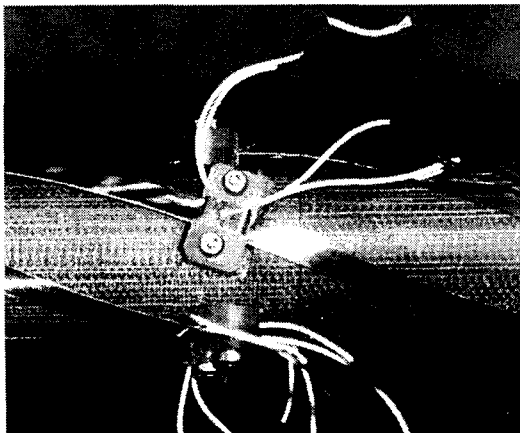


그림 2. 선재에 설치된 픽업코일
Fig. 2. Pick-up coils mounted on the each wires

은 얇은 테이프의 형태이므로 이러한 픽업코일로는 도체에 흐르는 전류를 정확히 측정하기 힘들다. 테잎 형태의 선재에 흐르는 전류를 정확하게 측정하기 위하여 그림 1과 같은 픽업코일을 설계·제작하였다. 제작한 코일을 선재 아래와 위에 설치하여 전류변화에 의한 자장변화를 검출하여 도체에 흐르는 전류를 측정하였다. 도체지름 $70\ \mu\text{m}$ 의 동선을 GFRP로 제작한 보빈 위에 감아 픽업코일을 제작하였으며 총 권선수는 152턴이었다. 그림 2는 각 선재의 아래와 위에 설치한 픽업코일의 모습을 보여준다.

2.2 실험 구성 및 실험

2, 3, 4-strand 케이블을 그림 3과 같이 제작하여 각 케이블의 전류분배를 측정하였다. 그림 3의 우측 상단은 보빈에 권선된 고온초전도선재의 단면도를 나타낸 것으로 2, 4-strand 케이블의 경우 각각 90° 의 차이를 두고 고온초전도선재를 권선하였고, 3-strand 케이블의 경우 45° 의 차이를 두고 권선하였다. 각 권선의 번호는 상부의 0을 기준으로 시계방향으로 부여하였다. 즉, 3-스트랜드 케이블의 경우 0에 설치된 권선을 HTS1으로 하여 시계방향으로 45° 간격으로

권선된 선재의 번호를 HTS2, HTS3의 순으로 부여하였다. 권선한 선재의 피치는 180 mm였으며 권선에 사용된 각 선재의 길이는 약 94 cm였다. 권선에 사용된 선재는 AMSC 사의 제품으로 제조사에 의해 인증된 최소임계임계전류 115 A(@ 77K, self-field) 이상인 스테인레스 강화선재였다. 본 실험에서 제작한 다중-스트랜드 케이블의 사양을 표 1에 나타내었다.

전류가 시간에 따라 변하면 코일에 전압이 유기되고 발생한 전압을 시간으로 적분한 후 미리 보정된 특정 상수를 곱해주면 픽업코일의 발생전압을 전류로 변환할 수 있는데 [5], 본 연구에서는 특정 전류상승율에 대한 상수값을 모든 코일에 대하여 보정한 후 각 스트랜드의 전류를 측정하였다. 전류분배 실험을 위하여 별도의 직류전원장치에서 전류를 공급하였으며 각 신호는 필터와 증폭기를 거쳐 저장하였다.

표 1. 다중-스트랜드 케이블의 사양
Table 1. Specification of multi-strand cables

Parameters		Specification	Remarks
pick-up coil	dia. of wire	$70\ \mu\text{m}$	
	number of turns	152 turns	
	coils / strand	2 ea	
bobbin	diameter	25.4 mm	
	length	860 mm	
	pitch	180 mm	
	Length of Cu	75 mm	
HTS wire	I_c @ 77K, self-field	$>115\ \text{A}$	reinforced wire
	matrix	Ag alloy	

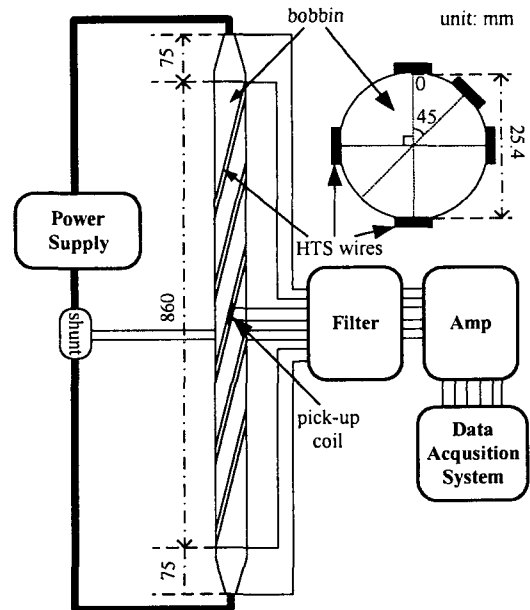


그림 3. 다중-스트랜드 케이블과 실험 구성도
Fig. 3. Schematic of multi-strand cable and experimental setup

3. 실험결과 및 고찰

3.1 2-strand 케이블의 전류분배

그림 4는 90° 간격으로 선재를 보빈에 부착시켜 제작한 2-strand 케이블의 전류분배를 나타낸다. 좌측의 전류는 각 경로를 흐르는 전류의 크기이고 우측의 전압은 각 HTS선재에 설치한 전압탭의 전압이다. 100 A/s의 증가율로 3초 동안 300A까지 전류를 증가시켰다.

초기에는 HTS2의 전류상승도가 HTS1의 전류상승도 보다 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 전류 집중 현상은 점차 심화되다, 고온초전도선재의 임계전류값 이후에서는 비슷해지는 양상을 보인다. 특히 켄치 이후에는 HTS1으로 흐르는 전류가 더 컸다. HTS1, HTS2 각 선재에 최종적으로 흐르는 전류는 151.7 A 148.3A였다. 이러한 현상을 그림 5에 나타낸 전송전류에 따라 선재에 발생된 임피던스와 연관하여 분석할 수 있다.

전송전류가 작은 구간에서 HTS1에서 보다 큰 임피던스가

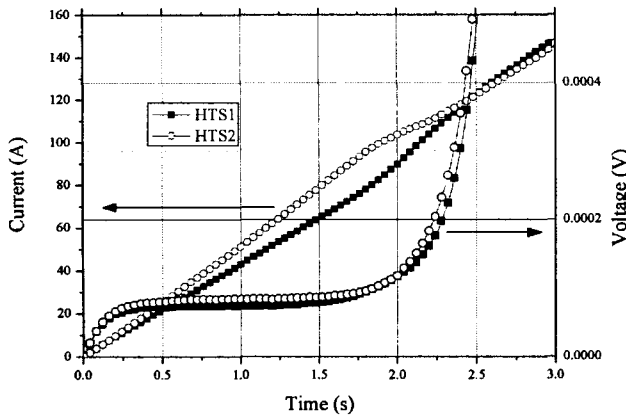


그림 4. 2-strand 케이블의 전류분배
Fig. 4. Current share of 2-strand cable

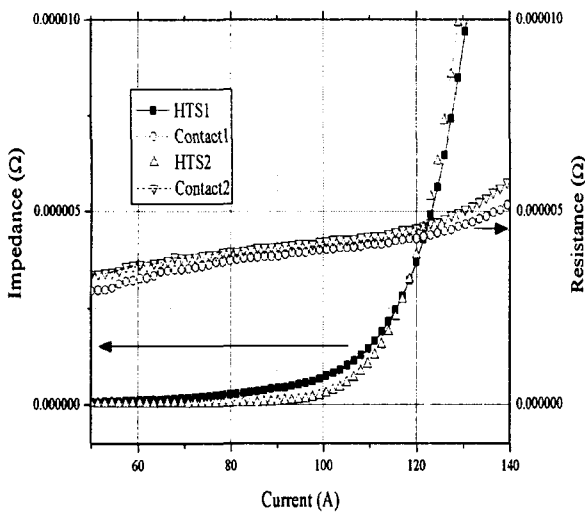


그림 5. 전송전류에 따른 각 스트랜드의 임피던스분포 및 접촉저항분포
Fig. 5. Impedance and resistance of each strand generated by transport current

발생되는 것을 볼 수 있으며 이는 전송전류 110 A 시점 이후에서 역전되어 그 이후의 구간에서는 HTS2의 임피던스값이 HTS1의 임피던스보다 더 커진다. 이러한 현상은 켄치 후 선재에서 발생하는 임피던스의 차이 때문이다. 전송전류가 임계전류 이하인 구간에서는 HTS1에서 HTS2보다 큰 임피던스가 발생하였으며 이 값의 차이는 전송전류 증가에 따라 더 커지게되어 HTS2로의 전류집중도가 더 커진 것을 볼 수 있다. 그런데 임계전류 이후의 전송전류 구간에서는 HTS1에서 발생하는 임피던스가 더 커져서 각 스트랜드로 흐르는 전류의 크기가 바뀌게 되었다. AMSC 사의 선재는 Bi-2223 다심 초전도부분과 Ag 합금 모재부분으로 구성되어 있다. 같은 공정으로 제조된 선재를 사용하였으나 모재에서 발생된 임피던스의 차이로 전송전류 증가에 따른 전류의 재분배현상이 관찰되었다. 임계전류 이하 구간에서의 최대전송전류 차이는 약 17.5 A였으며 최종 전송전류인 300A 전송시의 전송전류 차이는 3.4 A로 전류불균등 분배가 발생되었다.

이러한 실험을 하는 데에 있어서는 케이블의 접촉저항, 구리와 같은 상전도 부분 등의 저항차이보다는 각 스트랜드 사

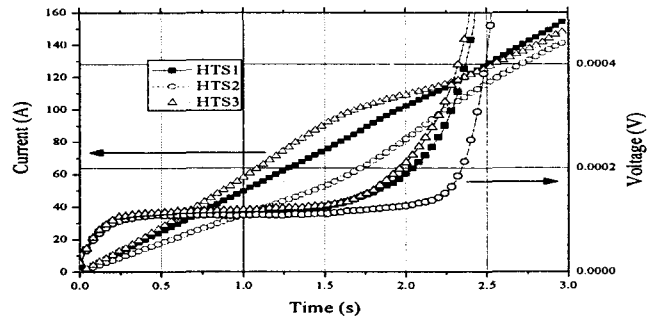


그림 6. 3-strand 케이블의 전류분배
Fig. 6. Current share of 3-strand cable

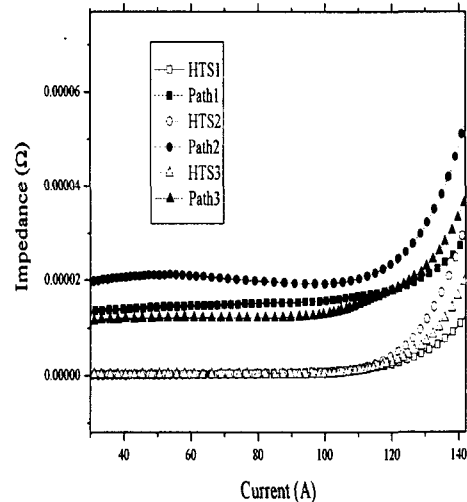


그림 7. 전송전류에 따른 각 스트랜드의 임피던스분포
Fig. 7. Impedance of each strand generated by transport current

이의 인덕턴스 차이에 의해 전류가 분배되는 것이 적합하다. 그림 5의 오른쪽 Y축에 나타낸 케이블 양단의 구리부분

과 HTS 선재접합부 사이의 저항값을 보면 HTS2의 값이 HTS1의 값보다 크다. 임계전류 이하의 각 스트랜드에 대한 전류상승율은 HTS2가 크므로 전류분배에 가장 큰 영향을 미치는 것은 접촉저항 등의 저항값 차이가 아닌 전류변화에 의해 발생하는 임피던스 차이에 의한 것임을 알 수 있다.

3.2 3-스트랜드 케이블의 전류분배

그림 6과 7은 각각 45°간격으로 HTS 선재를 권선하여 제작한 3-스트랜드 케이블의 전류분배 및 전송전류에 따른 임피던스를 나타낸다. 최종적으로 HTS1, HTS2, HTS3에 흐른 전류는 각각 156.7 A, 143.2 A, 150.1 A였다. 그림 3에서 나타내었듯이 2-스트랜드 케이블과 4-스트랜드 케이블은 인덕턴스 등의 면에서 상호 대칭적인 구조이지만 3-스트랜드 케이블은 상호 비대칭구조이다. 그 이유는 각 스트랜드의 인덕턴스는 자체 인덕턴스와 상호 인덕턴스의 합으로 결정되는데 각 스트랜드는 모두 같은 구조이므로 자체인덕턴스는 동일할 것이나 권선 사이의 거리에 비례하는 상호인덕턴스의 경우에는 HTS2의 상호인덕턴스가 HTS1, HTS2 보다 클 것이기 때문이다. 이러한 이유로 HTS2로 흐르는 전류가 가장 작을 것으로 예상되었다. 그림 6에 나타난 것과 같이 HTS2로 흐르는 전류는 전원장치에서 공급하는 전류가 증가함에 따라 전류증가 기울기가 줄어드는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다. 특히 발생하는 임피던스도 HTS2의 임피던스가 가장 큰 것으로 측정되었다.

그림 7의 임피던스에서 "Path"는 전류도입부의 상전도부분을 포함한 각 스트랜드 전체의 임피던스를 나타낸 것이고 "HTS"는 HTS 선재 부분의 임피던스만을 나타낸 것이다.

그림 6에서 전류를 인가한 지 1초되는 시점에서 전류분포를 살펴보면 각 HTS1, 2, 3에 약 52, 38, 60 A의 전류가 분배되어 흘렀다. 이를 그림 7의 전류에 대한 임피던스 발생량과 비교해보면 이때의 임피던스는 Path 1, 2, 3에서 각각 14.2, 18.7, 12 $\mu\Omega$ 이었으므로 3-스트랜드 케이블에서도 임피던스 값에 반비례하여 전류증가율이 결정되었음을 알 수 있다. 특히 HTS2의 경우 가장 작은 전류가 흘렀음에도 불구하고 가장 큰 임피던스가 발생된 것을 알 수 있는데 이는 상호인덕턴스 차이에 의한 것으로 생각된다.

3.3 4-strand 케이블의 전류분배

그림 8과 9는 4-스트랜드 케이블의 전류분포와 임피던스 변화를 각각 나타낸다. 4-스트랜드 케이블은 90° 간격으로 선재를 배치하여 제작하였다. 즉 각 권선사이의 상호인덕턴스가 상호대칭인 구조이다. 전원장치의 전류 상승률은 250 A/s였으며 600 A까지 상승시켰다. 켄치 이전의 전류분배를 보면 HTS3에 가장 많은 전류가 흘러 저항이 가장먼저 발생하였다. 그런데 그 발생 경향이 다른 스트랜드의 것과 다르다. 다시 말해, 전형적인 초전도 선재의 V-I 곡선이 아닌 초전도 부분에 상전도부분이 공존하는 구간에서 측정된 V-I 곡선의 양상을 보인다. HTS3에서 발생한 저항에 의해 HTS3의 전류증가율이 감소하고 다른 스트랜드의 전류증가율이 증가한 것을 볼 수 있다. 그런데, 켄치 이후의 결과는 특이한 양상을 나타낸다. 그림 8의 우측에 나타난 전압값의 전압값을 보면 HTS3가 가장 먼저 켄치되었다. 켄치가 이루어지면서 HTS3의 전류상승율이 감소하였으나 켄치 이후에 다시 증가

하여, 최종적으로는 HTS3에 가장 많은 전류가 집중되었다. 최종적으로 HTS 1, 2, 3, 4 각 경로로 흐른 전류는 각각 143.5, 143.4, 168.9, 144.2 A였다. 대칭구조에서는 이론적으로 25% 전류가 각각 분배되어야 하나 이번 실험의 결과에서 전류가 가장 많이 집중된 HTS3의 전류분배율은 28.15%로 3% 정도 많은 전류가 집중되었다. 최종적인 전류의 분배는 HTS 선재가 켄치한 이후의 전류분배이다. 이 결과는 도재에서 발생한 저항 이외에 켄치 이후의 전류분배에 영향을 미치는 요소가 있을 수 있는 가능성을 말해주고 있으나 그 원인에 대한 추후 분석이 필요하다.

3.4 다중스트랜드 케이블의 임계전류 평가

표 2는 본 연구에서 수행한 3가지 다중-스트랜드 케이블에서 각각 스트랜드별로 측정된 임계전류값과 각 다중-스트랜드 케이블 전체에서 측정된 임계전류값이다. 다중-스트랜드 케이블의 임계전류는 모두 각 스트랜드의 임계전류를 모

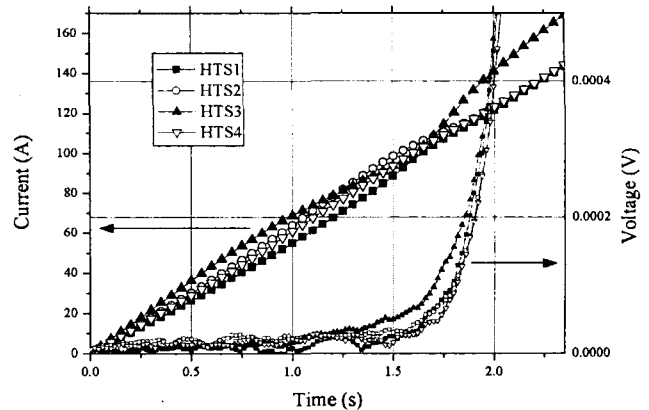


그림 8. 전송전류에 따른 각 스트랜드의 임피던스분포
Fig. 8. Current share of 4-strand cable

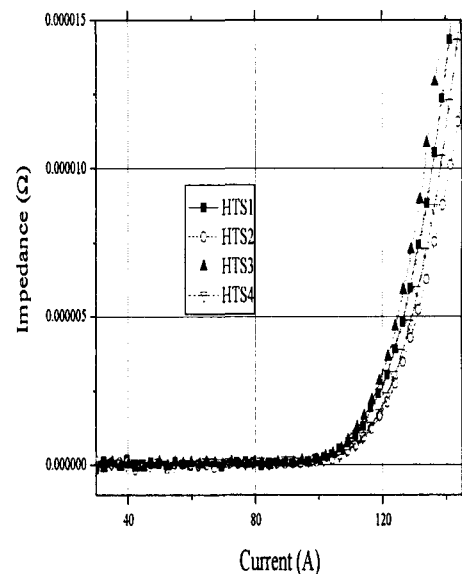


그림 9. 4-strand 케이블의 임피던스분포
Fig. 9. Impedance of each strand generated by transport current

표 2. 다중스트랜드 케이블의 임계전류

Table 2. Critical currents of multi-strand cables

구분		임계전류 A	전체 임계전류/ 각 임계전류 합
2-strand cable	HTS1	103.6	212.3/203.7= 0.959
	HTS2	108.7	
	whole	203.7	
3-strand cable	HTS1	103.6	318.6/317.6= 0.997
	HTS2	106.3	
	HTS3	108.7	
	whole	317.6	
4-strand cable	HTS1	109.4	443.5/420.7= 0.949
	HTS2	112.4	
	HTS3	109.1	
	HTS4	112.6	
	whole	420.7	

두 더한 값보다 작은 값을 나타내었다. 3-스트랜드 케이블의 경우에는 각 스트랜드의 임계전류를 모두 더한 값과 케이블의 임계전류값이 거의 같다고 말할 수 있으나 다른 경우에는 4-5% 정도 낮은 임계전류값이 측정되었다. 이러한 현상은 각 선재의 특성이 동일하지 않은 것이 가장 큰 원인이다. 즉, 전송전류에 따라 Bi-2223 선재에 발생하는 저항에 차이가 나서 각 스트랜드로 전류가 동일하게 분류되지 않는 것이 다중-스트랜드 케이블의 임계전류가 작게 측정된 가장 큰 원인이다. 특히 임피던스가 많이 발생하거나 임계전류가 작은 스트랜드와 그렇지 않은 각 스트랜드로 흐르는 전류는 재분배가 일어나는 것이 이번 연구결과로 측정되었다.

4. 결 론

본 논문은 고온초전도 다중-스트랜드 케이블의 불균등 전류분포를 연구하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 다중-스트랜드 케이블에서 불균등 전류분포가 일어나는 가장 큰 원인은 전송전류에 의해 발생하는 임피던스의 차이 때문이다.
2. 각 스트랜드 사이의 임계전류 차이 및 특성차이에 의해 전체 다중-스트랜드 케이블의 임계전류가 감소된다. 본 연구에서 확인한 최고 감쇄율은 약 5%이다.
3. 각 스트랜드 사이에서 상호인덕턴스에 대한 불균형이 발생할 경우 불균등 전류분포는 심화되나 전체임계전류 감소율은 가장 작았다.
4. 대칭구조의 다중-스트랜드 구조에서도 전류상승에 따른 임피던스 발생율의 차이에 따라 각 스트랜드 사이에서 전류 재분배 현상이 발생한다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] N.J. Kelley, C. Wakefield, M. Nassi, P. Corsaro, S. Spreafico, D. W. Von Dollen and J. Jipping, "Field demonstration of a 24-kV warm dielectric HTS cable." IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 2461-2466, 2001
- [2] S. Kruger Olsen, C. Traholt, O. Tonnesen, M. Daumling and J. Ostergard, "Loss and Inductance Investigation in 4-layer Superconducting Prototype Cable Conductor," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 833-836, 1999
- [3] M. Daumling, "A Model for the Current Distribution and ac Losses in Superconducting Multi-Layer Power Cable," Cryogenics 39, pp. 759-765, 1999
- [4] C. Traholt, Kruger Olsen, O. Tonnesen, M. Daumling, F. Hansen, C.N. Rasmussen and D. Wilen, "Measuring the Current Distribution in a 10 m long high Temperature Superconducting Cable Conductor," Physica C 372-376, pp. 1567-1570, 2002
- [5] James W. Nilsson and Susan A. Riedel, Electric Circuits, pp. 230, 2001

저 자 소 개



배 준 한 (裴 俊 漢)

1966년 4월 30일생, 1992년 건국대 전기공학과 졸업, 1994년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원



배 덕 권 (裴 德 權)

1971년 8월 16일 생, 1998년 광운대학교 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 현재 연세대학교 대학원 전기전자공학과 박사과정



심기덕 (沈基德)

1973년 2월 1일 생, 1997년 연세대 전기공학과 졸업, 1999년 동대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 연구원



고태국 (高太國)

1955년 7월 4일생, 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve University 공학석사, 1986년 동 대학원 공학박사, 1986~88년 미국 Ohio Cleveland State University 조교수, 1996~ 대한전기학회 평의원, 1997~초전도국제표준화위원회 (IEC/TC90) 국제전문위원, 현재 연세대학교 전기전자공학 교수, 현재 초전도·저온공학회 부회장



조전욱 (趙全旭)

1960년 3월 2일 생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업, 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업 (공학박사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임 연구원