

멀티케이블을 이용한 초전도 전력케이블의 구성에 관한 연구

A Study on the Composition of Superconducting Power Cable Using the Multi-cable

최석진¹, 이상진^{2*}, 심기택³, 조전욱³, 이수길⁴, 고태국¹

S.J. Choi¹, S.J. Lee^{2*}, K.D. Sim³, J.W. Cho³, S.K. Lee⁴, T.K. Ko¹

Abstract: The HTS power cable is composed of 2 layers for transmission and 1 layer for shield. The superconducting tapes of transmission layers and shield layer are wound in a cylindrical shape with a winding pitch. The radius of cylinder and the number of superconducting tapes are decided considering to the transmission current capacity and the critical current of superconducting tapes. The increasement of transmission current capacity will increase in volume of HTS cable system. In this paper, the composition method of superconducting power cable using the multi-cable is presented. The coated conductor tape can be wound on the smaller cylinder because it has the smaller critical bending diameter than the BSCCO tape. A small-scale cable was composed using the coated conductor tapes and a multi-cable is composed using a small-scale cable considering to transmission current capacity. Even increase of transmission current capacity, this method has advantage that the HTS superconducting power cable can be composed easily. The 22.9 kV and 154 kV superconducting power cable was composed using the presented method.

Key Words: coated conductor, multi-cable, small-scale cable.

1. 서 론

초전도 전력케이블은 R. McFee에 의해 처음으로 제안되었고, 1970년 대 초부터 미국, 일본, 유럽을 포함한 여러 나라에서 연구개발 되어왔다. 1990년대 중반에 고온초전도체의 등장과 함께 전력케이블 제조사들과 전력회사들이 상용화급 고온초전도 전력케이블의 개발에 박차를 가하고 있다[1,2].

전력부하 밀도가 높아짐에 따라 지중케이블의 대응

량화가 불가피하지만, 회선당 송전용량 증대의 한계가 있고, 복수회선 포설은 과밀화된 도심에서 부지를 확보하기가 힘들다. 초전도 케이블이 이러한 문제에 대한 대안으로 논의되고 있으며, 전력 수요의 증가에 따라 초전도 전력케이블의 용량 증가에 대한 연구가 필요하다. 초전도 전력케이블의 용량이 증가하게 되면, 초전도 전력케이블의 크기도 증가하게 된다. 초전도 전력케이블은 초전도 특성상 도체와 더불어 저온용기가 설치되어야 하고, 이에 따라 초전도 전력케이블의 크기가 매우 커지게 된다[3].

초전도 전력케이블의 용량을 증가시키기 위해서는 필요한 고온초전도 선재의 수가 증가되어야 한다. 고온초전도 선재의 수를 증가시켜 전력케이블을 구성하기 위해서는 고온초전도 선재가 감기는 원통의 반경을 증가시키거나, 고온초전도 선재의 층수를 늘려야 하며, 결국 전체 시스템의 부피를 증가시키는 요인이 된다. 또한, 이러한 과정은 제조공정이나 제조라인을 변경하여야 하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 2세대 선재를 사용한 멀티케이블을 구성하는 방법을 제시하고자 한다. 22.9kV급과 154kV급 초전도 전력케이블을 2세대 선재를 사용한 멀티케이블로 구성하는 방법과 1세대 선재를 사용한 기존의 초전도 전력케이블로 구성하는 방법에 대해 전자장 해석을 수행하였고, 전자장 해석 결과를 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1. BSCCO 선재를 사용한 초전도 전력케이블의 구성

고온초전도 전력케이블은 전력의 전송을 위한 2층의 통전층과 자장차폐를 위한 1층의 차폐층으로 구성되어 있으며, 각 통전층과 차폐층은 초전도 선재가 원통에 감겨져 있는 형태로 구성되어 있다. 원통의 반경 및

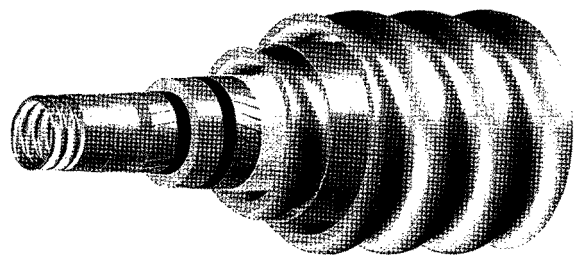


Fig. 1. A structure of the 22.9kV superconducting power cable.

¹정 회 원 : 연세대학교 전기전자공학과

²정 회 원 : 위덕대학교 에너지전기공학부

³정 회 원 : 한국전기연구원

⁴정 회 원 : LS 전선(주)

*교신저자 : sjlee@uu.ac.kr

원고접수 : 2010년 01월 29일

심사완료 : 2010년 03월 11일

게재확정 : 2010년 03월 11일

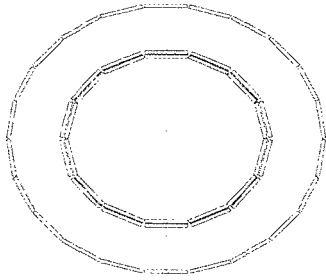


Fig. 2. A cut-view of the 22.9kV superconducting power cable.

Table 1. Specification of BI-2223 HTS tape.

Parameter	Specification
Manufacturer	AMSC
Width	4.1±0.02 mm
Thickness	0.3±0.02 mm
Material	Bi-2223/Ag/Mg STS
Manufacturing process	Powder in tube
Critical bending diameter	38 mm
Critical Current	>115 A, at 77 K, self field

초전도 선재의 수는 통전용량과 초전도 선재의 임계전류를 고려하여 정하게 된다. 초전도 전력케이블의 구성은 그림 1과 같다.

2.2. YBCO CC 선재를 사용한 소형케이블의 구성

모든 고온초전도 선재는 최소 굽힘 반경이 존재하고 최소 굽힘 반경 이하로 휘어지게 되면 초전도 선재의 손상을 가져오게 된다. 이제까지 고온초전도 전력케이블은 1세대 선재인 BSCCO 선재를 사용하여 왔다. 2세대 선재인 YBCO CC 선재는 1세대 선재보다 두께가 매우 얇으며, 또한 최소 굽힘 반경이 매우 작다. 즉, 2세대 선재를 사용하면 1세대 선재에 비해 훨씬 더 작은 반경의 케이블도 제작이 가능하게 된다. 2세대 선재를 사용한 소형케이블의 구조는 그림 3과 같다.

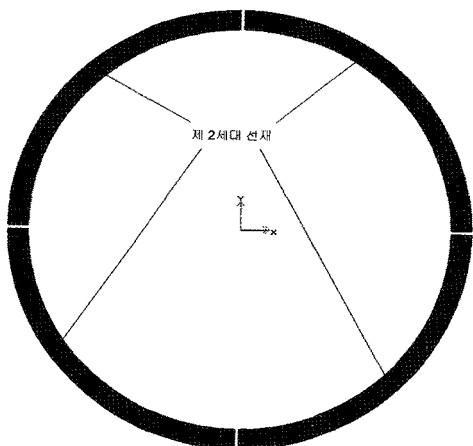


Fig. 3. The composition of small-scale superconducting power cable.

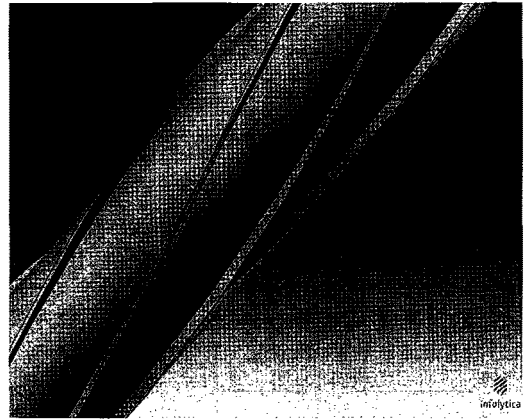


Fig. 4. The side-view of small-scale superconducting power cable.

Table 2. Specification of YBCO CC HTS tape.

Parameter	Specification
Manufacturer	SuperPower
Width	4 mm
Thickness	0.055 mm
Critical bending diameter	11 mm
Critical Current	>80 A, at 77 K, self field

2.3. 소형케이블을 결합한 멀티케이블의 구성

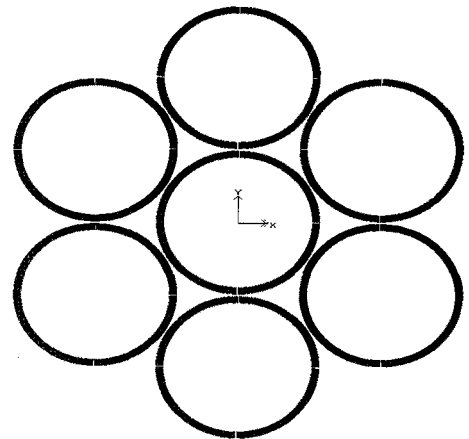


Fig. 5. The composition of 22.9kV multi cable using the small-scale superconducting power cable.

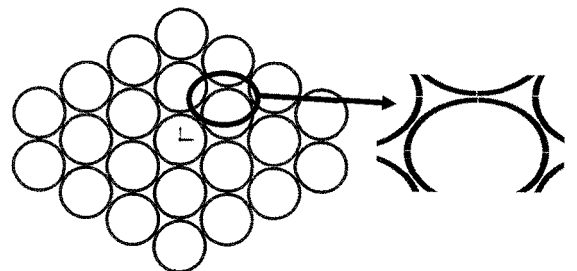


Fig. 6. The composition of 154kV multi cable using the small-scale superconducting power cable.

그림 3과 같이 구성된 소형케이블을 결합하여 멀티케이블을 구성한다. 멀티케이블의 용량은 필요한 전류 용량에 맞게 구성하여야 하며, 통전용량에 맞게 구성을 한 후 맨 바깥층에 차폐층을 구성하게 된다. 22.9kV급과 154kV급으로 구성된 멀티케이블은 그림 5, 6과 같다.

2.4. 기존의 초전도 전력케이블과 멀티케이블의 비교
 22.9kV급 초전도 전력케이블에 대하여 상용 전자장 해석프로그램인 MagNet을 사용하여 전자장 해석을 수행하였다. 1세대 선재를 사용한 초전도 전력케이블과 멀티케이블로 구성된 초전도 전력케이블의 자장 분포는 다음 그림 7, 8과 같다. 초전도 전력케이블은 전류 분류 문제를 해결하기 위하여, 피치를 가지고 트위스트 되는 데, 트위스트는 교류 손실 등과 매우 밀접한 관계가 있다. 본 논문에서는 교류 손실은 고려하지 않고, 초전도 선재의 수직 자장 및 초전도 전력 케이블의 부피에 대한 비교를 하기 위하여, 전자장 2D 해석을 진행하였다.

멀티케이블의 경우, 통전용량에 맞게 안쪽에 소형케이블을 이용하여 멀티케이블을 구성하였고, 맨 바깥쪽에 차폐층을 구성하였다. 해석에 사용된 22.9kV급 두 초전도 전력케이블 모두 입력 통전전류는 한국 전기연구원에서 개발하고 있는 22.9kV급 초전도 전력케이블의 통전전류와 같은 1260Arms이며, 통전을 위하여 사

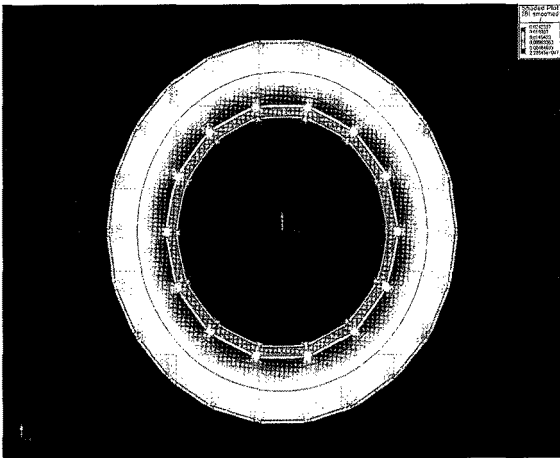


Fig. 7. magnetic flux density distribution of the 22.9kV superconducting power cable.

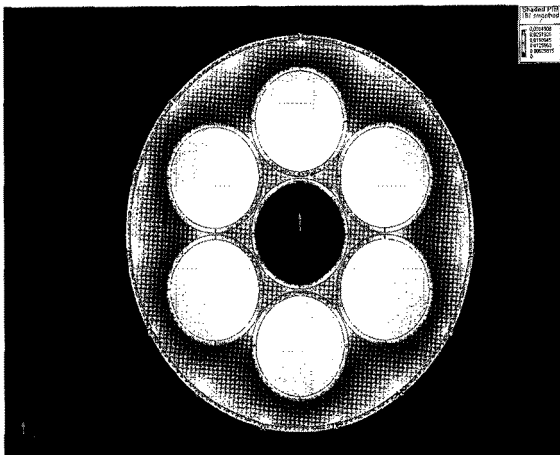


Fig. 8. magnetic flux density distribution of the 22.9kV multi cable.

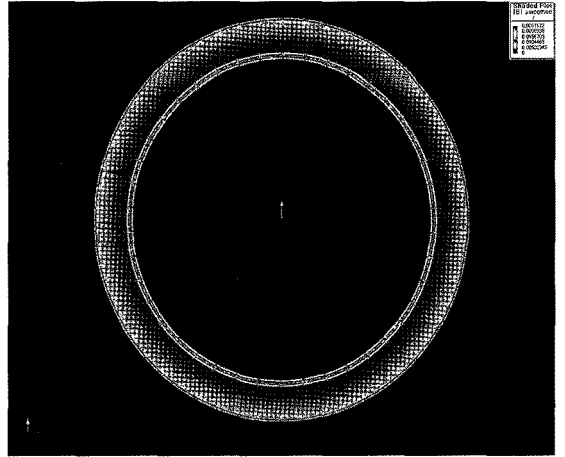


Fig. 9. magnetic flux density distribution of the 154kV superconducting power cable.

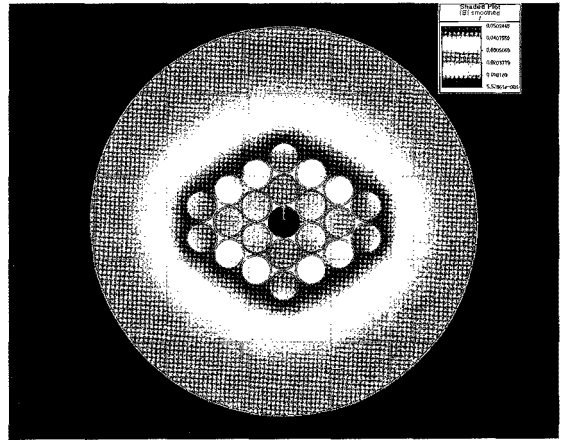


Fig. 10. magnetic flux density distribution of the 154kV multi cable.

용된 초전도 선재의 개수는 28개이다. 각 도체에 동일한 전류가 흐르도록 선재의 pitch를 설계하였으므로, 동일한 전류가 흐른다고 가정할 때, 통전층이 2층으로 구성되어 있으므로 각 통전층에 흐르는 전류는 630Arms이고, 통전층과 차폐층의 도체 한 개에 흐르는 전류는 각각 45 Arms, 57.27 Arms가 된다[3]. 1세대 선재를 사용한 초전도 전력케이블의 경우 차폐층에 사용된 초전도 선재의 개수는 22개이며, 2세대 선재를 사용한 멀티케이블의 경우 사용된 초전도 선재의 개수는 15개이었다.

전자장 해석을 수행한 결과, 1세대 선재를 사용한 초전도 전력케이블의 경우 최대 자장과 최대 수직 자장 모두 약 0.024 [T]가 나왔으며, 2세대 선재를 사용한 멀티케이블의 경우 최대 자장과 최대 수직 자장 모두 약 0.031 [T]가 나왔다. 초전도 특성상 초전도 선재는 수직 자장에 매우 민감하며, 수직 자장에 따라 초전도 선재의 임계전류 및 교류손실이 달라지게 된다. 멀티케이블의 수직 자장이 1세대 선재를 사용한 초전도 전력케이블의 수직 자장보다 약 0.007 [T] 높게 나왔으며, 선재의 임계전류는 약 3A정도 차이가 나며, 그 크기가 그리 크지 않다고 판단이 되었다 [4].

통전층만 고려할 때 22.9kV의 경우, 멀티케이블로 구성된 초전도 전력케이블의 반경은 약 9.55mm, 기존의 1세대 선재를 이용한 초전도 전력케이블의 반경은 10.35mm로 부피가 약 15% 감소하였다.

154kV급 두 초전도 전력케이블 모두 통전층의 통전

전류는 3750Arms이며, 통전을 위하여 사용된 초전도 선재의 개수는 1세대 선재를 사용한 초전도 전력케이블의 개수는 84개, 2세대 선재를 사용한 멀티케이블의 경우 92개이다. 차폐층에 사용된 초전도 선재의 개수는 각각 54개, 52개이었다. 전자장 해석을 수행한 결과, 1세대 선재를 사용한 초전도 전력케이블의 경우 최대 자장과 최대 수직 자장 모두 약 0.026 [T]가 나왔으며, 2세대 선재를 사용한 멀티케이블의 경우 최대 자장과 최대 수직 자장 모두 약 0.050 [T]가 나왔다. 22.9kV급과 마찬가지로 멀티케이블의 수직 자장이 1세대 선재를 사용한 초전도 전력케이블의 수직 자장보다 약 0.024[T] 높게 나왔고, 선재의 임계전류는 약 10A의 차이를 보였다.

통전층만 고려할 때 154kV의 경우, 멀티케이블로 구성된 초전도 전력케이블의 반경이 약 20.1mm, 기존의 1세대 선재를 이용한 초전도 전력케이블의 반경이 29.4mm로 부피가 약 49% 감소하였다.

멀티케이블의 제작을 위해서는 멀티케이블로 제작하였을 때, 소형케이블의 pitch에 따른 구성 방법, 통전층 접속, 통전시 교류 손실, 사고 전류 bypass 등 많은 다른 요인들을 고려하여 상세설계를 하여야 할 것이다. 그러나, 전체 시스템의 부피와 제조 공정만을 고려할 때 2세대 선재를 사용하여 소형 케이블을 제작하고, 소형케이블을 결합하여 멀티 케이블을 구성하는 방법이 큰 장점을 가지고 있다고 볼 수 있다.

3. 결 론

1세대 선재는 2세대 선재보다 두께가 두꺼우며, 최소 굽힘 반경이 매우 커서, 조그마한 원형에 제작을 못하는 단점이 있다.

본 논문에서는 2세대 선재를 이용하여 조그마한 원형에 소형케이블을 제작하고, 이를 조합하여 전력케이블을 구성한다.

2세대 선재를 이용한 멀티케이블 구성의 경우, 기존의 초전도 케이블 구성에 비하여 부피가 22.9kV급의 경우 약 15%, 154kV급의 경우 약 49% 줄어드는 효과를 보였다.

본 논문에서 제시한 방법을 사용하면, 용량이 커지면서 부피가 커지는 단점을 해소하고, 또한 용량이 증가됨에 따라 전력케이블 제작 공정을 모두 바꾸는 번거로움 없이 조합하는 소형케이블의 수를 늘려서 전력케이블을 제작할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 성기철, "배전급 초전도 전력케이블 개발", 차세대

초전도 응용기술개발 사업단 연차보고서, 2002.
 [2] Bolza, A, Metra, P, Nassi, M, and Rahman, M. M, "Recent developments in HTS power cable applications", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 7, pp 339 - 344, 1997.
 [3] J. W. Cho, K. C. Seong, K. S. Ryu, and T. K. Ko, "A Design and Test of HTS Power Cables and Feasibility Study of HTS Power Transmission System in KOREA," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 10, pp 1150 - 1153, 2000.
 [4] Hayashi, K, Hikata, T, Kaneko, T, Ueyama, M, Mikumo, A, Ayai, N, Kobayashi, S, Takei, H and Sato, K, "Development of Ag-Sheathed Bi2223 Superconducting Wires and Their Applications", presented at The 2000 Applied Superconductivity Conference, September 17-22, 2000.

저 자 소 개



최석진(崔錫鎭)
 1974년 6월 10일생, 1998년 연세대학교 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정.



이상진(李相鎭)
 1962년 3월 3일생, 1988년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수.



심기덕(沈基德)
 1973년 2월 1일생, 1997년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원.



조전욱(趙全旭)
 1960년 3월 2일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2001년 연세대학교 전기공학과 졸업(공학박사), 1990년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원.



이수길(李秀吉)
 1970년 2월 2일생, 1992년 광운대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 공학박사 수료, 1996년~ 현재 LS전선(주) 중앙연구소 수석연구원.



고태국(高太國)

1955년 7월 4일생. 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (M.Sc), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (Ph.D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국 초전도·저온공학회 회장.