

코일형 한류소자의 교류손실 특성

AC Loss Characteristic in the Fault Current Limiting Elements of a Coil Type

류경우^{1,a}, 마용호¹

(Ryu Kyung Woo^{1,a} and Ma Yong Ho¹)

Abstract

AC loss of a superconducting conductor has a strong influence on the economic viability of a superconducting fault current limiter, which offers an attractive means to limit short circuit current in power systems. Therefore, the AC loss characteristics in several fault current limiting elements of a coil type have been investigated experimentally. The test result shows that AC losses measured in the fault current limiting elements depend on arrangement of a voltage lead. The AC loss of a bifilar coil is smallest among the fault current limiting elements of the coil type. The measured AC loss of the bifilar coil is much smaller than that calculated from Norris's elliptical model. However, the loss measured in a meander, which is frequently used in a resistive fault current limiter, agrees well to the theoretical one.

Key Words : AC loss, Bifilar coil, Conventional coil, Fault current limiting element of a coil type, Helical coil

1. 서 론

초전도체를 상용주파수의 전력응용에 사용할 때 필연적으로 발생되는 자기적 히스테리시스현상에 기인하는 교류손실은 초전도체의 상용화에 있어서 경제성과 관련된 매우 중요한 요소이다. 그럼에도 불구하고 교류손실은 기존 구리도체의 저항손실과는 달리 전압리드의 배열에 따라서 그 측정값이 달라지는 등의 복잡한 문제로 인하여, 지금까지도 완전하게 정립되어 있지 못한 실정이다[1,2]. 또한 초전도전력응용시스템의 용량이 동일하다 할지라도 초전도체의 기하학적 배열에 따라서도 교류손실은 달라지기 때문에 형상을 최적화함으로써 초전도전력시스템의 상용화에 있어서 경쟁력을 한층

강화시킬 수 있게 된다.

초전도 전력케이블 및 변압기 등 초전도응용 중에서도 저온냉동기의 주된 열 부하로서 작용하는 교류손실 및 저온용기손실의 측면에서 가장 유리한 전력응용이라 할 수 있는 전력계통의 단락사고 시 발생하는 큰 사고전류를 매우 짧은 시간 (1/2사이클 이내)에 제한 가능한 초전도한류기에 대한 상용화 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다[3].

따라서 본 연구에서는 임계전류밀도가 ~ 100 A/mm² 정도 (77 K, 자기자계 기준)로 성능이 우수한 Bi-2223테이프를 코일형상으로 배열하여 초전도상태로 운전 중인 초전도한류소자를 모의한 샘플을 제작하였으며, 이들 샘플에 부착한 다양한 배열의 전압리드에 대한 실험을 통해 교류손실 평가 기술을 정립하였다. 또한 개발된 평가기술을 활용하여 코일형상의 한류소자에 대한 교류손실 특성을 조사하여, 현재 저항형 초전도한류기에 널리 응용되고 있는 meander형상의 한류소자에 대해 측정된 교류손실과 비교·검토를 하였다.

1. 전남대학교 공과대학 전기공학과
(광주서 북구 용봉동 300)

a. Corresponding Author : kwryu@chonnam.ac.kr

접수일자 : 2004. 12. 28

1차 심사 : 2005. 3. 3

심사완료 : 2005. 3. 10

2. 실험 샘플 및 방법

표 1에는 초전도상태 즉 60 Hz로 정상유전 중 인 코일형 한류소자에서 발생하는 교류손실에 대한 평가기술 개발 및 특성 조사에 사용된 Bi-2223 테이프의 주요 사양을, 표 2에는 본 논문의 주요 대상인 코일형 한류소자의 교류손실 특성에 대한 비교·분석을 위해 그 동안 연구개발에 널리 이용되어온 직경 100 mm인 meander형 한류소자의 사양을 각각 나타내었다[4].

그림 1에는 표 1에서와 같은 Bi-2223테이프의 길이를 동일하게 함으로서 사교시 코일형 한류소자의 저항을 동일하게 한 조건 (즉 동일 성능 조건)을 만족시키는 여러 가지의 코일형 한류소자 및 bifilar-코일의 개략도를 각각 나타내었다.

그림 1(a)에서 원통형 실린더 위에 Bi-2223테이프를 단순히 나선형으로 권선한 경우 (이하 helical-코일), 테이프의 총 길이를 이등분하여 적층시킨 다음 원통형 실린더 위에 권선하여 각 테이프에 흐르는 전류방향을 동일하게 한 경우 (이하 conventional 코일), 마지막으로 conventional 코일 구조에서 단지 각 테이프에 흐르는 전류방향만 반대로 한 경우 (이하 bifilar-코일)의 결선을 각각 나타낸다. 또한 코일형 한류소자의 교류손실 특성에 대한 비교·검토에서 기준이 되는 테이프를 일직선으로 배열한 경우 (이하 straight)도 함께 나타내었다.

그림 1(b)에는 코일형 한류소자 중 특히 bifilar-코일에 대한 개략도를 나타내었으며, 사용된 FRP 실린더의 직경은 88 mm이다.

표 1. Bi-2223테이프의 주요 사양.

Table 1. Specification of a Bi-2223 tape.

| | |
|-----------------|------------------|
| Bi-2223/Ag/Ag합금 | 38 %/40 %/22 % |
| 테이프의 폭과 두께 | 3.1 mm × 0.17 mm |
| 필라멘트 영역의 폭과 두께 | 3.0 mm × 0.11 mm |
| 필라멘트의 두께 | 0.006 - 0.012 mm |
| 트위스트 피치 | ∞ mm |
| 필라멘트의 수 | 55 |

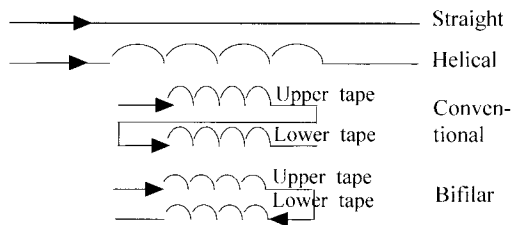
표 2. Meander의 주요 사양.

Table 2. Specification of a meander.

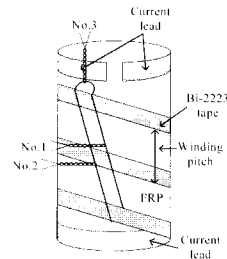
| | |
|---|----------------------|
| Au/YBCO/Al ₂ O ₃ 의 두께 | 0.1 μm/0.3 μm/500 μm |
| YBCO 폭 | 5 mm |
| YBCO 총 길이 | 1.024 m |
| YBCO 임계온도 | 84 K |

또한 No. 1, No. 2 및 No. 3은 bifilar-코일의 교류손실 측정에 필수인 전압리드로서, No. 1 및 No. 2는 각각의 하부 및 상부 Bi-2223테이프에 부착한 전압리드를, No. 3은 직렬로 연결된 상·하부 테이프 양단에 부착한 전압리드를 각각 나타낸다.

그림 2에는 그림 1과 같은 다양한 한류소자의 특성 조사에 이용된 시험장치의 개략도를 나타내었다. 특히 전압리드로부터 교류손실을 측정할 때 한류소자에 흐르는 전류와 90도 위상차가 나는 불필요한 전압은 공심(air core) 토로이드형상의



(a) 코일형 한류소자의 결선



(b) Bifilar-코일의 개략도

그림 1. 코일형 한류소자.

Fig. 1. Fault current limiting elements of a coil type.

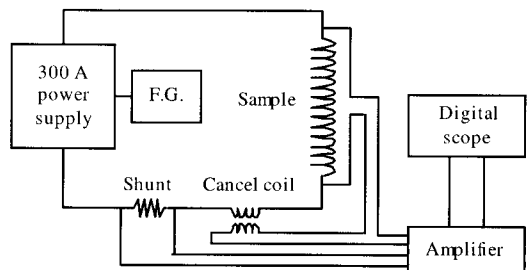


그림 2. 실험장치.

Fig. 2. Experimental setup.

Rogowski 코일을 이용하여 충분히 상쇄하였고, 한류소자의 교류손실은 전압리드로부터 측정된 전압과 한류소자에 흐르는 전류로부터 구하였으며[5], 본 연구에서 모든 실험은 액체질소 온도인 77 K에서 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

먼저 표 1의 Bi-2223테이프를 일직선상으로 배열한 straight 샘플에 교류전류를 흘릴 때 발생하는 자기자계손실 특성을 살펴보면 본 연구실의 많은 선행 연구를 통해 이미 잘 밝혀진 바 있고, 이를 요약하면 측정된 Bi 2223테이프의 자기자계손실은 타원형 Noris이론으로부터 계산된 손실과 잘 일치한다는 사실이다[6].

다음은 그림 1(a)에서 첫 번째 코일형 한류소자인 helical-코일에 대한 교류손실 평가기술과 관련된 실험으로서 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 결과는 권선피치(winding pitch, 그림 1(b) 참조)가 18 mm인 helical-코일에 상이한 3종류의 전압리드를 부착한 경우로서, 먼저 Bi-2223테이프의 가장 보편적인 배열이라 할 수 있는 straight 샘플의 교류손실 평가에 널리 적용되고 있는 전압리드인 테이프 가장자리로부터 5 mm 떨어져 배열시킨 사각형상의 전압리드(이하 edge-5mm리드) [7], 그림 1(b)에서 보는 바와 같이 helical-코일 양단에 전압리드를 납땀한 후, FRP-실린더 표면을 따라 배열한 전압리드(이하 diagonal리드) 그리고 실린더 표면으로부터 100 mm이상 떨어져 배열시킨 사각형상의 전압리드(이하 free-shaped리드)를 각각 나타낸다.

그림 3의 결과로부터 straight 샘플의 교류손실 평가기술과는 달리 Bi-2223테이프를 코일형상으로 배열한 helical-코일의 경우는 edge-5 mm리드로는 참 값의 교류손실을 측정할 수 없으며, 이는 일직선상으로 배열된 straight 샘플에서와는 달리 인접한 턴에 흐르는 전류에 의해 발생하는 교류 외부자장의 영향으로 설명될 수 있다[1]. 반면 diagonal리드 및 free-shaped리드로부터 측정된 교류손실은 동일함을 볼 수 있고, 따라서 본 연구의 주요 대상인 코일형 한류소자에 대한 교류손실 평가에서는 diagonal리드 및 free-shaped리드 중 어느 쪽을 사용해도 좋을음을 의미하고있지만 손실 평가에서 불필요한 유도성 전압이 특히 작은 diagonal리드를 기본 개념으로 하여 평가하였다.

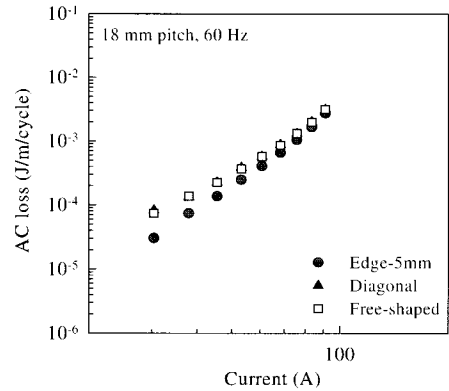


그림 3. Helical-코일에서 교류손실의 전압리드 배열 의존성.

Fig. 3. Voltage lead's arrangement dependence of the AC losses in the helical coil with a 18 mm pitch.

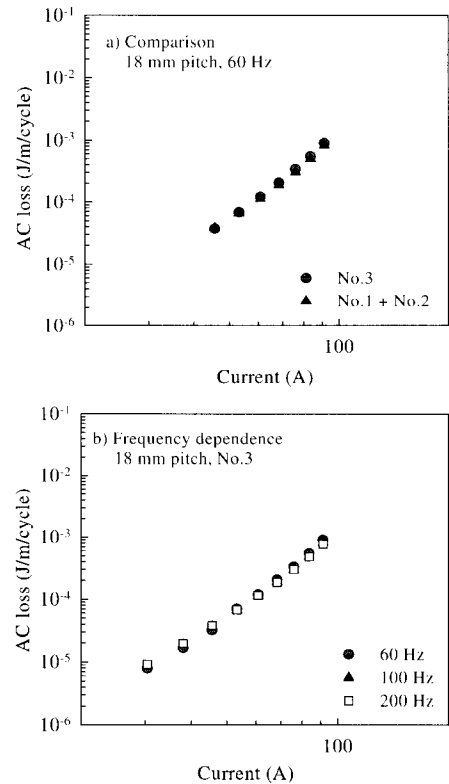


그림 4. Bifilar-코일에서 교류손실.

Fig. 4. AC losses in the bifilar coil with a 18 mm pitch.

그림 4에는 현재 10 kV급 배전 계통에서 실증 시험 중인 10 MVA급 저항형 초전도한류기 시스템에 사용 중인 한류소자와 동일 구조로 된 그림 1(a)의 bifilar-코일에 대한 실험 결과를 나타내었다[8]. 그림 4에서 No. 1 및 No. 2 전압리드는 각각 bifilar-코일을 구성하는 하부 및 상부 Bi-2223 테이프에 납땜된 diagonal리드를, No. 3은 상·하부 테이프를 직렬로 연결한 bifilar-코일의 양단에 납땜한 전압리드를 각각 나타낸다.

그림 4(a)에서 No. 3 전압리드로부터 측정된 교류손실은 diagonal리드인 No. 1 및 No. 2 전압리드로부터 측정된 교류손실들의 합과 잘 일치하는 것을 볼 수 있고, 이는 bifilar-코일의 교류손실 평가에는 기본적으로는 diagonal리드인 No. 3 전압리드를 사용해도 좋을음을 의미한다. 또한 그림 4(b)의 실험결과로부터 No. 3 전압리드로부터 측정된 손실은 Bi 2223테이프 교류손실의 전형적인 특성인 주파수에 관계없이 일정함을 볼 수 있다. 이상의 결과에 근거하여 본 연구에서 주요 대상인 bifilar-코일의 교류손실 평가에서는 No. 3과 동일한 전압리드 배열을 적용하였다.

그림 5에는 농밀 길이인 표 1에서와 같은 Bi-2223테이프의 배열을 달리하여 준비한 코일형 한류소자에 대하여 측정된 교류손실을 나타내었으며, 그림 5에서 실선은 코일형 한류소자의 손실 검토에서 유익한 straight 샘플의 자기자계손실을 낸다.

그림 5로부터 코일을 구성하는 테이프의 배열에 따라 교류손실이 매우 상이해지는 것을 볼 수 있다. 또한 conventional-코일의 경우 교류손실이 가장 큰 반면 상·하부 테이프의 전류방향이 서로

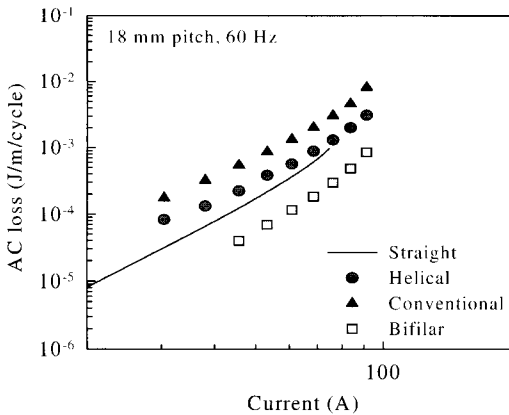


그림 5. 코일형 한류소자의 교류손실.
 Fig. 5. AC losses in the fault current limiting elements of a coil type.

반대인 bifilar-코일의 손실이 가장 작은 것을 볼 수 있고, 이는 코일형 한류소자의 설계 시, 60 Hz로 정상운전 중에 발생하는 교류손실 측면에서 볼 때는 bifilar-코일이 그림 1에서 제안된 형상 중 가장 유리함을 의미한다.

그림 6에는 bifilar 코일에서 권선피치가 교류손실에 미치는 영향에 대하여 조사한 결과를 나타내었으며, 특히 권선피치가 3 mm인 경우는 그림 1(b)에서 인접한 테이프사이의 간격이 전혀 없는 bifilar-코일을 나타낸다.

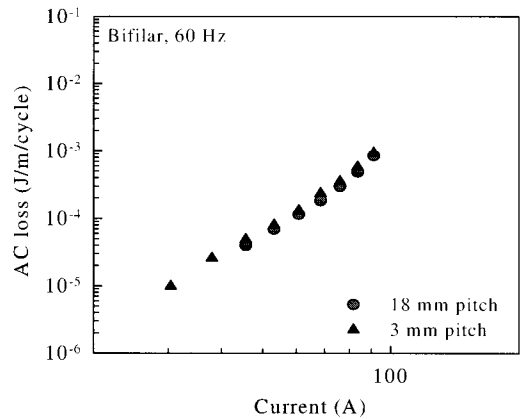


그림 6. Bifilar-코일에서 교류손실의 권선피치 의존성.
 Fig. 6. Winding pitch's dependence of the AC losses in the bifilar coil.

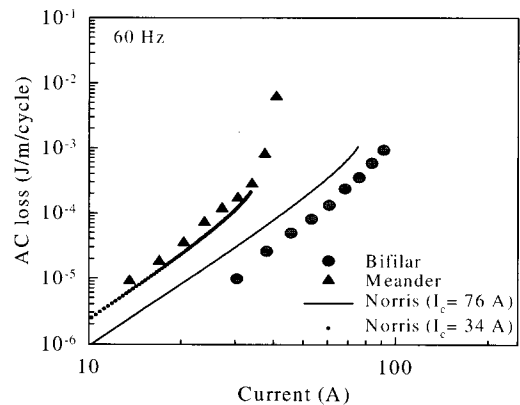


그림 7. Bifilar 코일과 meander형 한류소자의 교류손실 비교.
 Fig. 7. Comparison of the AC losses between the two different fault current limiting elements.

그림 6으로부터 권선피치가 18 mm이하인 경우에는 피치에 관계없이 측정된 교류손실이 일정함을 볼 수 있고, 이는 권선피치가 매우 큰 bifilar-코일을 제외하고는 인접한 테이프에 흐르는 교류전류에 의한 영향이 거의 동일함을 의미한다.

그림 7에는 현재 세계적으로 연구개발 중인 저항형 한류기 시스템에서 널리 이용되고 있는 한류소자인 표 2의 meander형 한류소자에 대해 측정된 교류손실과 본 연구의 주요 대상인 bifilar 코일의 손실을 비교한 결과를 나타내었으며, 그림 7에서 실선은 각각의 한류소자에 대해 측정된 임계전류(meander의 I_c 는 34 A, bifilar의 I_c 는 76 A)와 Norris이론으로부터 계산된 손실을 나타낸다.

그림 7로부터 meander형 한류소자에 대해 측정된 교류손실은 Norris이론으로부터 계산된 손실과 잘 일치하는 반면 그림 1의 코일형 한류소자 중 교류손실이 가장 작은 bifilar-코일의 경우는 측정된 교류손실이 계산된 손실보다 매우 작은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

이상의 코일형 한류소자에 대한 교류손실 평가 기술 개발 및 특성 연구와 관련하여 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고온초전도테이프를 코일형상으로 배열한 코일형 한류소자의 경우는 straight 샘플의 교류손실 평가기술과는 달리 인접한 띠에 흐르는 교류전류의 영향 때문에 diagonal리드 또는 free-shaped리드 배열로 해야한다.
- 2) 또한 코일형 한류소자의 교류손실은 코일을 구성하는 테이프의 배열에 매우 의존하며, 그 중에서도 상·하부 테이프의 전류방향이 서로 반대인 bifilar-코일의 교류손실이 가장 작고, 이는 권선피치에 의존하지 않는다.
- 3) 고온초전도체료에 무관한 교류손실 특성으로부터 한류소자의 임계전류 및 길이가 동일하다고 가정할 때, 본 연구의 주요 대상인 bifilar-코일의 교류손실이 현재 연구개발 중인 저항형 한류기 시스템에서 널리 이용되고 있는 meander형 한류소자보다 작다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 류경우, 김현준, “자장방향이 적층 Bi-2223도체의 자화손실에 미치는 영향”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 1호, p. 77, 2003.
- [2] 류경우, 최병주, “인접 교류전류가 Bi-2223테이프의 통전손실에 미치는 영향”, 전기전자재료학회논문지, 14권, 3호, p. 251, 2001.
- [3] W. Paul and M. Chen, “Superconducting control for surge currents”, IEEE Spectrum, p. 49, 1998.
- [4] 현옥배, 김해림, 심정욱, 오일성, 이방욱, 강종성, 박권배, 조승연, 김동락, 정원목, 양형식, “저항형 고온초전도 한류기 개발”, 연구보고서, 한국전력공사전력연구원, 과학기술부, p. 61, 2004.
- [5] 류경우, 최병주, “전류분포가 3본-도체의 임계전류/교류손실 특성에 미치는 영향”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 5호, p. 418, 2003.
- [6] 허대행, “실용 고온초전도테이프의 통전손실 특성”, 석사학위논문, 전기공학과, 전남대학교, p. 27, 2004.
- [7] K. Ryu, K. B. Park, and G. Cha, “Effect of the neighboring tape’s ac currents on transport current loss of a Bi-2223 tape”, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, p. 2220, 2001.
- [8] S. Elschner, F. Breuer, M. Noc, T. Rettelbach, H. Walter, and J. Bock, “Manufacturing and testing of MCP 2212 bifilar coils for a 10 MVA fault current limiter”, IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, p. 1980, 2003.