초전도 한류모듈 내 고온초전도 선재 배치에 따른 교류손실 변화

AC loss dependency on the arrangement of the HTS wires in the current limiting module for SFCL

김우석¹, 양성은², 이지영³, 김희선², 유승덕², 현옥배⁴, 김혜림^{4,*}

W. S. Kim¹, S. E. Yang², J. Y. Lee³, H. Kim², S. D. Yu², O. B. Hyun⁴, and H. R. Kim^{4,*}

Abstract: Usually, the AC loss from the superconducting element of an SFCL due to the load current is very small because it is composed of the combination of bifilar windings with very small reactance. Although the AC loss is small enough, we should be able to predict for the design and control of the cryogenic system. In fact, an SFCL for the transmission voltage class may not generate ignorable AC loss because of the inevitable space between the HTS wires for the high voltage insulation and cryogenic efficiency. To measure the AC loss dependency on the space between the 2G HTS wires with the width of 4.4 mm, we prepared an experimental setup which could adjust the distance between the wires. We used two 500-mm length HTS wires in parallel and applied the current in the opposite direction for each wire to simulate a part of a current limiting module for a high voltage SFCL. We also put two couples of voltage taps at the ends of each wire and a cancel coil in the voltage measurement circuit to compensate the reactive component from the voltage taps. In this condition, we varied the distance between the wires to investigate the change of the transport current loss. A similar experimental study with HTS wire with the width of 12 mm is now in progress.

Key Words: AC loss, HTS, fault current limiter, transmission.

1. 서 론

초전도체는 온도, 자장, 그리고 전류밀도가 특별한 조건을 만족하는 경우 전기저항이 완전히 사라지는 특성을 가지고 있으므로, 고자장의 발생을 위한 마그네트 혹은 의료기기 등에 적용되어 그 효용성을 인정받고 있다. 특히, 1980년대에 90K 이상의 임계온도를 가

지는 산화물계 고온초전도체가 발견된 이후로, 초전도체를 전력기기에 적용하고자 하는 노력이 현재까지 지속되어 왔다. 그러나 대부분의 전력기기들은 직류 전류가 인가되는 마그네트 또는 MRI/NMR등과 달리 교류를 사용하는 경우가 많으며, 교류전류 및 교류자장이 인가되는 경우 초전도체는 반자성 특성에 의하여 필연적으로 자기이력 손실을 발생하게 된다. 특히, 기기 응용을 위한 초전도선재의 경우에는 결합손실, 와전류손실 등의 추가 손실이 발생할뿐더러, 최근에 많이 사용되는 2세대 고온초전도 선재의 경우 자성을 띠는 기판에서 추가 자기이력손실이 발생할 가능성이 많다[1]. 초전도 선재에서 발생할 수 있는 이러한 손실들을 모두 합쳐 교류손실이 칭하며, 교류손실은 초전도 전력기기의 냉각효율 및 전체 기기의 경제성에 많은 영향을 주기 때문에 이를 정확히 예측하거나 줄이기 위한 노력이 필수적이다.

본 논문에서는 초전도한류기용 초전도소자에서 발생할 수 있는 교류손실을 예측하기 위한 모델링 및 초전도선재간 배열에 따른 교류손실의 변화를 추정하기 위한 기초 시험의 결과를 제시하고, 초전도한류기의 교류손실을 최소화하기 위한 기준을 제시한다.

2. 한류기의 교류손실 측정

2.1. 초전도한류기의 교류손실

여러 가지 초전도 전력기기들 중 초전도한류기는 초전도케이블과 더불어 비교적 교류손실이 적은 기기들 중 하나이다[2-3]. 초전도한류기는 전력계통에 직렬로 연결되어 정상 시에는 계통에 영향을 주지 않고 있다가, 단락사고 등에 의한 큰 고장전류가 흐를 때 초고속으로 특정 임피던스를 투입하여 고장전류를 제한하는 장치이다. 초전도한류기는 정상상태에서 저항성분이 없으나, 초전도소자를 구성하는 선재의 형태에 따라서 리액턴스 성분의 임피던스가 발생할 여지가 있다. 따라서 보통 무유도형 권선 등의 형태를 취하는 것이 일반적이며[4], 이는 인접 선재에 흐르는 전류의 방향이 항상 반대이므로 자기장 상쇄효과에 의하여 유도성 임피던스 성분이 줄어들게 된다. 이러한 자기장 상쇄효과는 유도성 임피던스 성분뿐 아니라 상시 교류손실도 줄이는 효과를 가져 오기 때문에, 초전도한류기는 비교적 교류손실이 매우 적은 것이 일반적이다.

이러한 초전도한류기의 초전도소자에서 발생하는 교류손실은 지금까지 개발된 비교적 작은 용량의 기기에서는 한류 동작 시 발생하는 에너지의 크기가 적고, 선재 간 전위차도 작기 때문에 선재 간 간격을 매우 적게 설계할 수 있었으므로 상시에 발생하는 교류손실 역시 무시할 만큼 작을 수 있었다. 특히 국내에서 개

¹정 회 원 : 한국전력 전력연구원 책임급연구원

²정 회 원 : 한국전력 전력연구원 연구원

³정 회 원 : 한국전력 전력연구원 위촉연구원

⁴정 회 원 : 한국전력 전력연구원 수석연구원

*교신저자 : 한국전력 전력연구원 책임연구원

원고접수 : 2012년 07월 09일

심사완료 : 2012년 09월 07일

게재확정 : 2012년 09월 07일

발되어 이천변전소에서 시범사업에 적용 중인 배전급 하이브리드형 초전도한류기의 경우 고속스위치의 적용으로 인하여 초전도소자에 고장전류가 인가되는 시간이 극히 짧아 초전도선재 간 간격을 거의 두지 않은 상태로도 동작 후 회복시간에 문제가 되지 않을 정도로 냉각 특성에 영향을 주지 않았다. 그러나 송전급 초전도한류기의 개발이 시작되면서 기존 배전급 하이브리드 초전도한류기에서 채택되었던 방식과 같이 고속스위치를 활용한 반주기 이후 한류방식이 허용되지 않음에 따라, 대단히 큰 에너지를 초전도소자가 흡수하고 방출해야 하는 상황에 이르게 되었다. 이러한 형태에서는 한류 동작 및 이후 회복 시 냉각 성능에 큰 영향을 주는 선재 간 간격을 충분히 확보하지 않을 수 없다. 이러한 설계의 변화는 초전도 한류소자에 대한 냉각 성능 및 절연 내력 확보에는 큰 도움이 되지만, 상시 교류손실이 증가하는 단점을 가지게 된다. 따라서 본 연구에서는 서로 반대방향으로 전류가 인가되는 인접한 고온초전도 선재에서 간격에 따른 교류손실의 변화를 실험적으로 측정하여 그 변화의 경향을 분석함으로써, 송전급 초전도 한류소자의 설계 시 선재 간 간격에 기준을 제시하려 하였다.

2.2. 송전급 초전도 한류모듈

송전선로에서 발생하는 고장전류는 사고의 첫 번째 피크에서 선로상에 존재하는 변압기 등의 전력기기의 파손을 초래하며, 특히 비대칭 사고에 의하여 첫 번째 사고주기에 매우 큰 피크 전류가 유입되기 때문에 이를 반드시 줄여야 한다. 따라서 송전급 초전도한류기의 초전도 한류소자에는 고장 전류의 첫 번째 피크를 포함하여 최소 3~4 주기 동안의 고장 전류가 유입되게 되며, 매우 큰 에너지를 순간적으로 발생하게 된다. 이러한 에너지의 분산을 위하여 배전급에 비해 매우 많은 양의 초전도체를 필요로 하며, 이를 효과적으로 구현하기 위해서 초전도 소자를 모듈화 할 필요가 있다. 특정한 길이와 전류용량을 가지는 초전도 모듈이 준비되면 이의 직·병렬연결을 통하여 전체 초전도 소자를 구성하게 된다. 그림 1에 본 연구진이 구상하고 있는 송전급 초전도한류기를 위한 초전도 모듈의 두 가지 형태를 보였다.

그림 1의 (가)는 고온초전도 선재를 사용하는 경우가 가장 보편적으로 사용되는 팬케이크 형태의 초전도모듈이다. 그림에서는 총 3개의 초전도 선재가 병렬로 권선되어 있으며 권선의 최 내경에 무유도 권선을 위한 선재의 접합점이 있게 된다. 이러한 형태에서는 권선 최 외경의 턴 간에 전위차가 크게 발생할 수 있는 단점이 있다. 한류 동작 시와 동작 후 회복 시에 효과적인 냉각과 전기 절연내력 확보를 위하여 보빈과 권선, 그리고 권선 내 각 턴 간에는 특정한 스페이서를 사용하여 일정한 간격을 유지하는 것이 바람직하다.

Fig 1. Configurations of HTS elements (a) Pancake type module (b) Linear bar type module.

그림 1의 (나)는 비교적 짧은 단위 초전도선재가 모두 직선으로 배열되어 있고, 각 선재의 양 단부에 접합이 존재하는 형태로, 전류는 초전도선재와 접합을 통하여 지그재그 형태로 흐르게 된다. 권선형과 마찬가지로 각 선재 사이는 일정한 간격을 두는 것이 바람직하며, 권선형과는 다르게 모든 간격에서 일정한 저전압의 전위차만 발생하게 된다는 장점이 있으며, 많은 접합점에 의한 손실이 발생한다는 단점을 가지고 있다.

2.3. 교류손실 측정

전 절에서 기술한 바와 같이 어떤 형태의 한류모듈이라도 송전급 초전도한류기에서는 선재 사이의 간격이 냉각특성과 교류손실, 그리고 상시 임피던스에 영향을 주게 된다. 그러나 선재 사이의 간격이 커질수록 냉각특성은 좋아지지만 교류손실은 증가하게 되고, 반대로 좁아질수록 냉각특성이 나빠지고 교류손실이 감소하게 되므로, 간격에 따른 손실특성을 미리 파악할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 2와 같이 두 개의 고온초전도선재에 서로 다른 방향으로 전류를 인가할 수 있는 장치를 구성하여 두 선재의 간격에 따른 교류손실을 측정하고자 하였다. 시험에 사용된 선재는 4.4mm 폭을 가지며, Stainless steel로 구성된 안정화층을 가지는 YBCO계열의 2세대 고온초전도 선재를 사용하였다. 두 개의 선재 각각에 손실에 의해 발생하는 전위차를 측정하기 위한 전압 탭을 각각 부착하였으며 이를 선재의 넓은 면이 마주 보도록 장착할 수 있는 G10 FRP 틀을 제작하여 초전도선재를 설치하였다. 장치의 한쪽 단부에는 전류리드를 설치하고 반대쪽 단부는 구리바로 연결하여 전류가 서로 반대방향으로 흐르도록 구성하였다. 시험 장치에 60 Hz의 교류전류를 인가하며 초전도 선재에서 발생하는 손실 밀도를 전기적인 방법으로 측정하기 위해 유도성 전압을 상쇄하기 위한 상쇄코일을 포함하여 그림 3과 같은 회로를 구성하였다.

Fig 2. Configuration of the experimental setup and the directions of current.

Fig 3. Circuit diagram to measure the AC loss.

Fig 4. Experimental setup for AC loss measurement.

3. 시험결과 및 고찰

그림 4에 실제 시험 장치를 액체질소로 냉각하기 직전의 모습을 보였다. 시험은 액체질소의 대기압에서 비등점인 77.3 K에서 시행하였으며 설치 전 각 선재의 임계전류를 측정된 결과 운전온도에서 약 86 A의 임계전류가 측정되었다. 이를 근거로 하여 시험 장치에 저 전류부터 약 5 A 단위로 전류를 증가시키며 발생하는 손실을 전기적으로 측정하였고 선재의 임계전류 근방인 전류 실효치 55 A 정도까지 증가시켰다. 동일한 과정을 선재 1개만 있는 경우에 측정하였고, 선재 2개가 있는 경우 그 사이의 간격을 2 mm 단위로 증가시키며 측정하였다. 그림 5에 각 측정 결과를 Norris의 전송전류손실 계산 수식에 의한 계산 결과와 같이 나타내었다.

Fig 5. Results of the AC loss measurement (a) in linear scale (b) in log scale

그림 5에서 보인 것과 같이, 작은 크기의 전압을 측정할 때 발생하는 측정 오차가 어느 정도 보이지만, 전체적인 경향은 파악할 수 있었다. 측정 결과의 타당성을 조사하기 위하여 단일 초전도 선재의 전송전류손실을 예측하는데 비교적 정확하다고 알려져 있는 Norris의 수식을 타원모델과 평판모델 모두를 계산하여 그 결과를 같이 나타내었다. 일반적으로 박막형 2세대 고온초전도 선재의 전송전류손실은 Norris의 평판모델에 의한 계산 결과와 비슷한 경향을 보이는 것으로 알려져 있으나, 본 측정에 사용된 선재와 같은 Ni-W 합금으로 제작된 기판을 사용하는 경우에 기판의 자성에 의한 자화손실에 의해 좀 더 큰 손실이 발생하는 것으로 측정되곤 한다. 또한 안정화제에 발생할 수 있는 와전류 손실 등이 추가되므로 실제 측정 손실은 좀 더 크게 나타날 수 있다. 측정 시 선재의 양단 전압의 측정에 의하는 전기적인 측정으로 전송한 모든 손실이 포함된다. 본 측정에서도 단일 선재의 교류손실 측정 결과 Norris의 타원모델에 더 근접한 측정 결과를 보이는 것을 알 수 있으며, 예측하였던 바와 같이 서로 반대방향의 전류를 가지는 두 선재의 간격이 작아질수록 전반적으로 손실의 크기가 줄어드는 현상을 관찰할 수 있다. 그림 5의 (가)에서는 통전 전류의 크기가 비교적 커서 임계전류의 80 % 이상에서의 특성을 보이기 위해 linear scale로, (나)에서는 저 전류에서 특성을 보이기 위해 log scale로 손실밀도의 측정결과를 나타내었다.

또한 일반적인 교류손실의 측정결과가 선재 간 간격에 대해 변화하는 특성을 보이기 위해서 임계전류의 약 89 %에 해당하는 전송전류에서 단일 선재에서 Norris의 타원모델 수식에 의해 예측되는 손실에 대한 각 측정 손실의 비율을 그림 6에 나타내었다. 그림 5와 그림 6에서 관찰할 수 있는 바와 같이 4.4 mm 폭을 가지는 2세대 고온초전도 선재의 경우 서로 반대방향의 전류를 가지는 선재의 간격이 약 2 mm 정도에서 단일 선재에 대한 예측손실의 약 60 % 정도로 손실밀도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 단일선재에서의 손실 측정값이 Norris의 수식에 의한 예측값과 동일하지 않기 때문에 해당 전류에서의 실제 단일선재 손실 측정값이 예측값의 약 80% 정도인 것을 고려해 볼 때, 선재 간 간격이 6 mm 이상이 되면 교류손실의 감소 효과는 거의 없는 것으로 관측된다. 실제로 교류손실이 감소하는 효과를 보기 위해서는 선재 간 간격이 약 2 mm 이하가 되어야 단일 선재에 비하여 약 75%의 손실 감소 효과를 볼 수 있으며, 간격이 약 2 mm 이하에서 더 줄어들수록 손실이 급격히 감소함을 관찰할 수 있었다.

Fig 6. AC loss characteristics according to the distance between the nearby HTS conductors.

4. 결 론

본 연구에서는 송전급 초전도한류기의 한류모듈 설계와 관련하여 고온초전도선재에서 발생할 수 있는 교류손실의 예측에 필요한 모델 시험을 실시하고, 고온초전도 선재 간 간격에 따른 교류손실의 변화를 시험적으로 분석하였다. 송전급 초전도한류기를 위한 한류모듈이 갖추어야 할 특성에 의해 선재간 간격이 반드시 필요하다고 판단되며, 이에 따른 교류손실의 시험적 예측을 위해 반대방향의 전류를 가지는 두 개의 초전도선재에서 발생하는 손실을 측정하였다. 본 연구에서는 Ni-W계열의 기판을 사용하는 4.4 mm 폭을 가지는 2세대 고온초전도 선재를 사용하였으므로, 모든 고온초전도선재에 해당되지는 않을 것으로 판단된다. 특히 다른 폭 넓이를 가지는 선재를 사용하여 같은 시험을 실시하면 다른 결과를 얻을 수 있을 것이라 생각된다. 그러나, 그 경향은 비슷할 것으로 예상되며 선재의 폭에 비례하는 측정결과가 나올 것으로 추정되나, 이는 실험으로 검증해야 할 것이다. 따라서 본 연구진에서도 비슷한 종류의 12 mm 폭을 가지는 선재를 사용하여 동일한 실험을 실시할 계획이며, 이에 따라 초전도 한류모듈을 제작하여 손실 측정 시험을 추가 실시할 예정이다.

감사의 글

본 과제는 지식경제부 한국에너지기술평가원의 전력산업융합원천기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 박명진, 김우석, 이지광, 오상수, 하홍수, 김호섭, 고락길, 유상임, 문승현, 최경달, "SmBCO Coated Conductor의 교류손실 측정", 한국초전도저온공학회논문지, v.10, no.1, pp.52-56, 2008년 3월.
- [2] 장현만, 이창영, 김춘동, 심기덕, 조전욱, "교류손실 및 안정성을 고려한 22.9kV 초전도 케이블 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1210-1212, 2005년 7월.
- [3] 나진배, 장재영, 황영진, 강형구, 고태국, "저항형 초전도 한류기 적용을 위한 다양한 고온초전도 선재의 특성 연구", 2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1013-1014, 2011년 7월.
- [4] 김진섭, 황영진, 나진배, 최석진, 김영재, 이지호, 이우승, 장기성, 고태국, "초전도 선재 조합에 따른 비대칭 무유도성 코일의 교류손실 특성 연구", 한국초전도저온공학회논문지, v.13, no.1, pp.17-21, 2011년 3월.

저 자 소 개

김우석(金佑錫)

1970년 6월 12일생, 1996년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2002년 동대학원 전기컴퓨터공학부 졸업 (공학박사), 현재 전력연구원 책임급 연구원.

양성은(梁盛銀)

1978년 12월 3일생, 2003년 연세대학교 공과대학 기계전자공학부 졸업, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 전력연구원 일반연구원.

이지영(李志榮)

1987년 1월 24일생, 2010년 충남대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 현재 전력연구원 위촉연구원.

김희선(金喜宣)

1986년 8월 13일생, 2008년 KAIST 기계공학과 졸업, 2010년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 전력연구원 일반연구원.

유승덕(劉承德)

1974년 11월 20일생, 1997년 한밭대학교 전기공학과 졸업, 2001년 충남대학원 전기공학과 졸업(공학석사) 현재 전력연구원 일반연구원.

현옥배(玄鉦培)

1953년 2월 11일생, 1976년 연세대학교 물리학과 졸업, 1987년 아이오와 주립대학교 물리학과 졸업(이학박사), 현재 전력연구원 수석연구원.

김혜림(金蕙林)

1957년 3월 15일생, 1979년 서울대학교 물리학과 졸업, 1991년 코넬대 물리학과 졸업(이학박사), 현재 전력연구원 책임연구원.