

## 송전급 한류형 고온초전도 케이블의 핵심기술

고태국, 송승현  
연세대학교 전기전자공학부

### 1. 서 론

최근 세계적으로 전력수요의 급격한 증가로 이를 대처하기 위한 새로운 전력 전송 시스템에 대한 요구가 증가하고 있으며, 도심지역 내 전력수요의 밀도가 높아지는 가운데 계통의 대용량화와 함께 고장전류가 증가하여 전력계통의 안정성 저하가 우려되고 있다. 이를 해결하기 위해 신재생 에너지원의 전력 수송, 스마트 그리드 연계, 장거리 전력망 계통연계를 위한 대용량, 고효율, 친환경 에너지 수송 기술의 확보가 반드시 필요한 실정이다.

초전도 기술은 에너지 분야에서 혁신을 주도하는 기술로써, 글로벌 에너지 이슈에 대해 선제적으로 대응하기 위해 국가가 주도하여 확보해야 하는 필수적인 기술이며, 이 중에서도 초전도 케이블은 특정한 환경에서 전기 저항이 '0'에 수렴하는 특성을 이용하여 기존의 구리선 송전 기술로는 불가능한 초고효율 송전을 가능하게 한다. 그러나 기존의 초전도 케이블은 낮은 임피던스 특성에 의해 계통 내 사고 발생 시 사고전류가 증가할 수 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위해, 케이블 자체의 한류 기능을 이용하여 사고전류를 제한함과 동시에 고효율, 대용량 전력 전송을 가능하게 하는 방안으로 한류형 고온초전도 케이블에 대한 연구가 필요하다.

기존에 세계적으로 활발히 연구가 진행된 고온초전도 케이블과 차별화된 성능을 갖는 한류형 고온초전도 케이블의 개발은 국내·외 관련 산업체의 기술 경쟁력 제고에도 크게 기여할 것으로 기대된다. 그렇기 때문이 이 글에서는 한류형 고온초전도 케이블 설계를 위한 핵심기술 연구에 관하여 기술하고자 한다.

### 2. 한류형 고온초전도 케이블의 구성

Co-axial 구조를 갖는 한류형 고온초전도 케

이블의 각상은 크게 포머, 통전층, 절연층, 차폐층으로 구성되며 이를 통칭하여 코어라 한다. 포머는 통전층을 지지하는 역할을 함과 동시에 사고 시, 사고전류를 bypass시키는 역할을 한다. 또한 케이블의 냉각을 위한 액체 냉매의 통로 역할을 하기도 한다. 통전층은 초전도 선재로 감겨 있으며, 정상 시, 운전전류를 통전시키며, 선재가 감기는 각도 및 방향을 조절하여 각 통전층의 인덕턴스를 균일하게 할 수 있다. 통전층에 감기는 선재의 수는 운전전류의 크기 및 선재의 임계전류에 따라 달라진다. 차폐층 또한 통전층과 마찬가지로 초전도 선재가 감겨 있는 구조이며, 통전층에 흐르는 전류와 크기는 같지만 위상이 반대인 유도 전류를 발생시킴으로써 초전도 케이블의 외부로 나가려는 자기장을 차폐하는 역할을 한다. 초전도 케이블이 극저온에서 운전될 수 있도록 하는 액체냉매의 채널은 설계자가 냉각조건을 고려하는 방식에 따라 상이하게 배치될 수 있다. 그림 1은 상기한 한류형 고온초전도 케이블의 기본 구조를 나타내고 있다.

한류형 고온초전도 케이블은 일반 초전도 케이블과 구조가 비슷하지만 포머의 유무 및 포머 단면적에 차이가 있으며, 이를 통해 한류 임피던스의 크기를 조절함으로써 감쇠되는 사고전류의 크기를 조절할 수 있다.

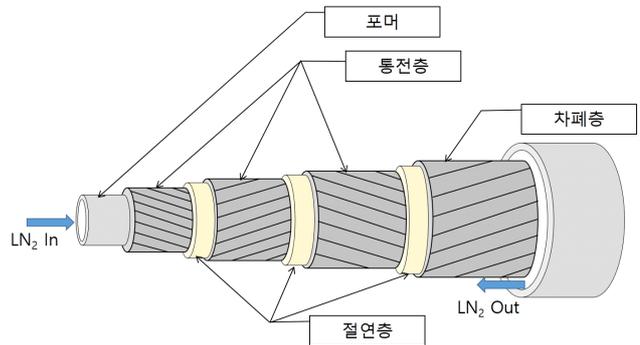


그림 1. 한류형 고온초전도 케이블 코어의 구조.

### 3. 한류형 고온초전도 케이블의 개념설계를 위한 핵심기술 제안

한류형 고온초전도 케이블은 정상 운전 시, 통전층의 초전도 선재로 통전되던 정격전류가 사고 시, 정격전류의 수십배에 달하는 사고전류를 포머로 우회시키며, 여러 설계 파라미터를 고려하여 설계된 포머의 단면적에 대응하는 한류 임피던스를 이용해 사고전류의 크기를 감소시키는 기능을 갖는다. 단위 길이 당 한류 임피던스의 크기를 결정하는 포머의 단면적 설계는 그림 2에서 보이는 설계 순서도를 따른다. X/R ratio가 고려된 비대칭 사고전류가 포머에 흐를 때 포머의 단면적 및 물성에 따라 상승되는 온도를 예측해야 하며, 사고 시간 동안 최종적으로 증가된 포머의 온도는 케이블 outlet에서 액체냉매의 가압조건을 넘지 말아야 한다.

X/R ratio는 케이블 및 케이블이 연결된 계통의 유도성 임피던스와 저항의 비로 나타내어지며, 사고 전류의 첫 peak의 크기를 증가시키기 때문에 케이블 설계 시 고려되어야 한다. 사고지속 시간은 적용개소에 따라 다르며, 배전급에서 60Hz 계통 기준 0.5초이다. 케이블 냉각을 위한 액체냉매는 inlet에서 가압되며 액체냉매의 가압된 절대 압력에 해당하는 기화 온도가 정해진다. 케이블에 사고전류가 유입될 때 포머에서는 사고지속 시간 동안 온도 상승이 발생하며, 포머와 액체냉매는 맞닿아 있기 때문에 액체냉매의 온도 또한 상승한다.

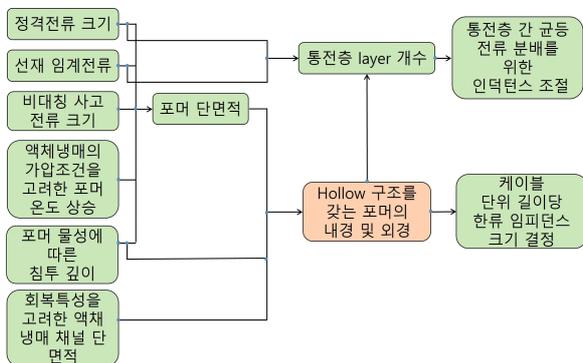


그림 2. 한류형 고온초전도 케이블 코어 설계 순서도.

포머와 액체냉매 사이의 열전달은 액체냉매의 물성 및 질량 유량등이 고려된 heat transfer function에 따르도록 설계할 수 있으며, 케이블의 inlet에서부터 outlet 방향으로 액체냉매가 순환하기 때문에 동일한 방향으로 온도 전파가 이루어진다고 가정하였다. 즉 포머와 케이블의 열전달은 케이블의 축 방향 및 반경 방향으로 이루어진다고 가정하였다. 이때 사고지속 시간 후에 outlet에서 상승된 액체냉매의 온도가 냉매의 가압조건에 따른 기화 온도를 넘지 않도록 포머 단면적의 크기를 조절해야 한다. 또한 AC케이블에서 포머에 비대칭 정현파 사고전류가 유입되기 때문에 포머 물성에 따르는 침투깊이를 계산하였으며, 최종적으로 액체냉매 채널의 단면적, 포머 단면적을 종합적으로 고려하여 속이 비어 있는 형태를 갖는 포머의 내경 및 외경이 결정된다. 통전층은 포머의 외각에 배치되기 때문에 포머의 외경이 결정되면 케이블 최내각 통전층의 내경이 결정되는데, 이때 정격전류가 흐르는 상황에서 선재의 임계전류 및 margin을 고려하여 초전도 선재 소요 개수를 결정할 수 있다. 또한 초전도 선재의 소요 개수 및 폭을 고려하게 되면 통전층의 layer 개수를 산정할 수 있다. 케이블의 포머 및 액체냉매의 온도 상승과 설계된 형상을 갖는 포머에 의한 한류 임피던스는 사고지속 시간을 미소 단위로 나누어 반복 계산되며, 이를 그림 3에 나타내었다.

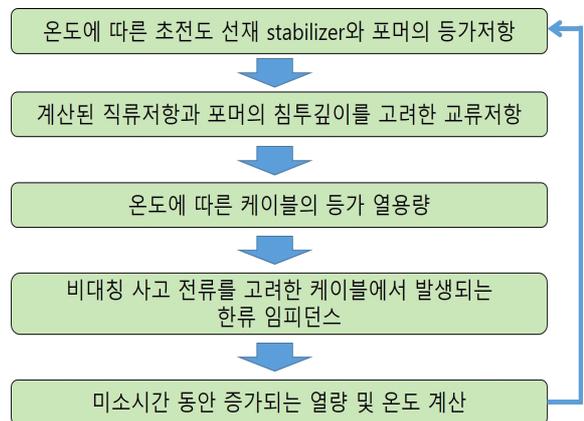


그림 3. 온도 상승 및 한류 임피던스 계산을 위한 순서도.

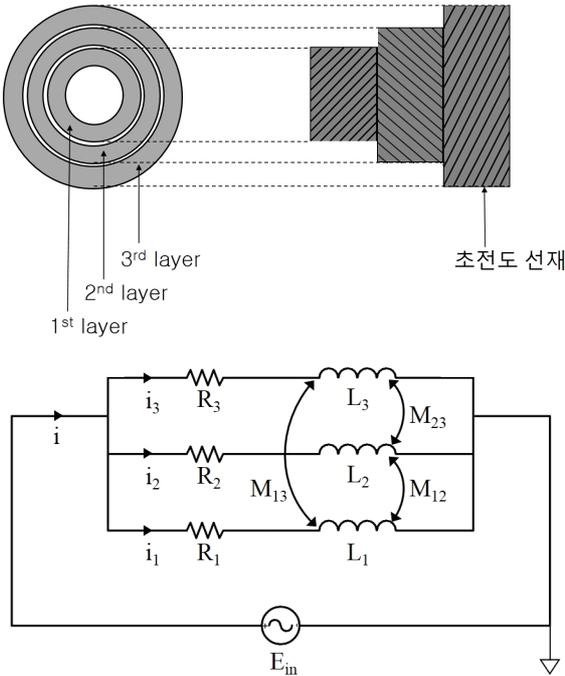


그림 4. 통전층의 배치 및 등가회로.

초전도 케이블에서 각 통전층의 직경은 각기 상이하기 때문에 인덕턴스의 차이가 발생하며, 이로 인해 불균등 전류 분배 현상이 발생하게 된다. 따라서 각 통전층의 균등전류 분배를 위해 인덕턴스 조절이 필요하여 이는 통전층에 권선되는 선재의 pitch angle( $a$ )조절을 통해 가능하다. 각 통전층의 인덕턴스를 결정하는  $a$ 의 조합을 결정하기 위하여 유전알고리즘을 이용하였다. 유전알고리즘을 이용하여  $a$ 를 찾는 과정은 그림 5와 같다. 각 통전층의 인덕턴스 계산은 아래와 같다.

$$M_{i,j} = M_{j,i} = \frac{a_i a_j \mu_0}{L_\pi L_{pj}} \pi r_i^2 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r_j}\right) \text{ for } r_j > r_i$$

여기서,  $M$ 은  $i$ 번째 layer와  $j$ 번째 layer 사이의 상호 인덕턴스,  $a$ 는 선재 감는 패턴에 따른 상수(+1 또는 -1),  $L$ 은 pitch length,  $D$ 는 회귀거리,  $r$ 은 layer의 내 반경을 의미한다. Pitch length는  $a$ 에 대응하여  $\sin(a)$ 로 나타낼 수 있으며, 도식적으로 표현하면 그림 6과 같다. 유전알고리즘에 대한 자세한 설명은 참고 문헌으로 대체 하였다.

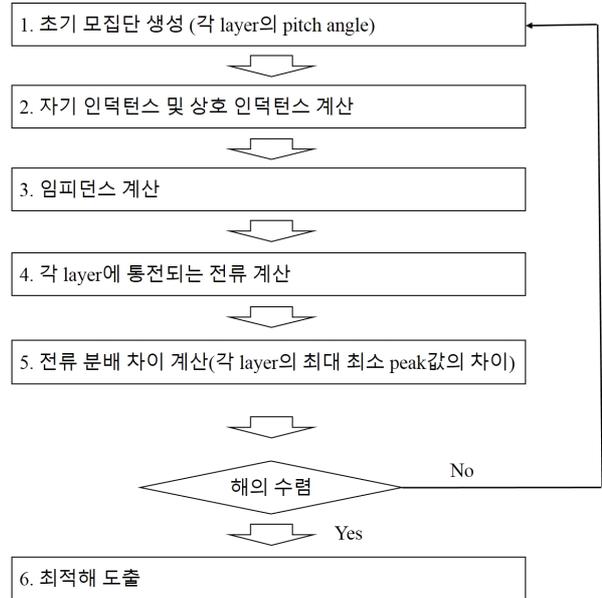


그림 5. 각 layer의 균등전류 분배 계산을 위한 순서도.

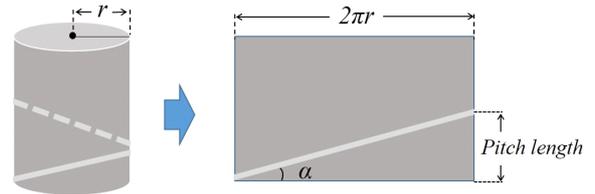


그림 6. Pitch length의 도식.

#### 4. 맺음말

본 연구는 한국전력공사 전력산업 기초 연구과제의 일환으로 한류형 고온초전도 케이블의 핵심기술을 개발하기 위한 것이다. 과제 수행을 통해 회복특성을 고려한 한류형 고온초전도 케이블의 코어 개념설계 및 정상 시 균등전류분배를 위한 기초 프로그램 개발이 목적이며, 이를 통한 관련 분야 고급 인력 양성을 기대하고 있다.

#### 참고문헌

[1] 심기덕, "22.9kV, 50MVA급 고온 초전도 전력케이블 코어의 설계 및 통전특

성에 관한 연구” 연세대학교 대학원 학위 논문 2011년 2월

- [2] S. Kruger Olsen et al., "Loss and Inductance Investigations in a 4-layer Superconducting Prototype Cable Conductor", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 833-836, 1999
- [3] Kwak, N-S., and J. Lee, "An implementation of New Selection Strategies in a Genetic Algorithm-Population Recombination and Elitist Refinement", Engineering Optimization, Vol. 43(12), pp. 1367-1384, 2001
- [4] K. Sim, S. Kim, J. Cho, H. Jang, and S. Hwang, "Design and Current Transporting Characteristics of 80 kV Direct Current High Temperature Superconducting Cable Core," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, No. 3, Jun. 2013, Art. ID. 5401804.
- [5] K. Sim et al., "DC critical current and AC loss measurement of the 100m 22.9 kV/50MVA HTS cable", Phys. C, Supercond., vol. 468, pp. 2018-2022, Dec. 2008.

## 저자이력



고태국(高太國)

1955년 07월 04일생. 1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EE AP 졸업(M.SC), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph.D), 1986-1988년 Assistant professor, Cleveland State University, Ohio, USA, Dept. of Electrical Engineering, 현재 연세대학교 전기전자공학부 교수



송승현(宋承鉉)

2013년 숭실대학교 전기공학부 졸업, 현재 연세대학교 전기전자공학부 박사과정 재학 중