

**Inter-Phase Transformers를 이용한 고온초전도 케이블의 층간 전류 등분배 방안**

최용선\*, 임성우\*, 심정욱\*, 황시돌\*, 박인규\*\*  
 한국전력공사 전력연구원\*, 원광대학교\*\*

**A method for uniform current distribution of HTS cable using Inter-phase Transformers**

Yong Sun Choi\*, Seong Woo Yim\*, Jungwook Sim\*, Si Dole Hwang\*, In Gyu Park\*\*  
 Korea Electric Power Research Institute\*, Wonkwang University\*\*

**Abstract** - Uniform current distribution among conductor layers in HTS cables using IPTs (inter-phase transformers) was proposed. Conventional methods for current distribution, in which resistors are inserted to conductor layers, causes additional loss. In contrast, IPTs, which use magnetic coupling, make it possible that the current in parallel circuits is distributed uniformly with any load, and minimize the loss. In this study, IPTs were designed and fabricated for examination of uniform current distribution in the conductor layers of HTS cables. The ITP was designed through calculation of its impedance that can cancel the inductance of the conduction layers.

**1. 서 론**

현재 개발되고 있는 초전도 전력기기의 용량증대를 위해 필수적인 요건중의 하나는 초전도체의 직·병렬 회로 구성이다<sup>(5)</sup>. 그러나 초전도 전력기기가 상온과 극저온 부분이 분리됨으로써 초전도체와 상전도체의 접속은 불가피한 것으로 받아들여지고 있다. 때문에 초전도체의 병렬 회로는 용량증대 측면에서 볼 때 전류가 균등분배 될 때 최대의 효율이지만 실제로는 전류 불균형이 발생하여 최대 효율로 사용하고 있지 못하는 상황이다. 이러한 전류 불균형의 원인으로는 초전도체 자체의 저항은 0에 가깝지만 초전도 기기에 사용되는 초전도체의 구조와 길이에 따른 인덕턴스 성분과 병렬 회로에 부득이하게 삽입된 상전도체의 저항 그리고 상전도체와 초전도체의 결합에 따른 접촉저항이 작용하기 때문이다. 이런 요소에 의한 병렬회로의 임피던스 ( $Z = R + jX$ )의 차이로 인한 전류 불균형이 발생한다. 위와 같이 임피던스 차이로 인하여 전류 불균형이 발생하게 되면 임피던스가 낮은 병렬회로에 전류가 집중되고 임계전류( $I_c$ )를 넘어 초전도상태에서 상전도상태로 전환되어 저항을 발생시켜서 전류는 다른 초전도체로 흐르게 되면 다시 초전도 상태로 돌아 오게 된다. 즉, 상전도와 초전도 경계영역에서 저항으로 인한 손실이 발생하게 되고 최악의 경우 저항에서 발생되는 열이 축적되면 퀵치가 발생되고 초전도체는 회복되지 못하고 완전한 상전도체로 바뀌게 되면서 초전도 전력기기는 손상을 입게된다. 이러한 초전도 병렬회로의 전류 불균형을 최대한 억제하기 위하여 초전도체의 길이 나 구조를 대칭적으로 설계하지만 미세한 접촉저항의 차이를 조절하기가 곤란하기 때문에 기존에 사용되는 해결방안은 개별의 병렬회로에 접촉저항을 무시할 정도의 크기의 L이나 R를 삽입하는 방법을 택하고 있다.

본 논문은 이러한 초전도 전력기기에 사용되는 초전도체 병렬 회로의 전류 불균형을 개선하기 위한 방안으로 전력변환기기에 사용되는 IPTs(Inter-Phase Transformers)를 이용한 초전도 케이블의 전류 균등 분배 방안을 제시하였다.

**2. 본 론**

**2.1 고온 초전도 케이블의 전류 분포**

초전도 케이블의 코아 부분은 그림 1과 같은 구조로 이루어져 있다. 초전도 케이블에서는 전류 용량증대를 위하여 15~25개의 초전도 선재를 이용하여 층을 만드므로 이러한 층이 용량에 따라 2~5개로 구성된다. 포머를 기본으로 층을 이루게 되는데 각 층 사이에 절연층이 존재하게 된다. 코어 설계시 초전도 선재로 이루어진 개별의 층을 같은 Pitch로 선재를 감게되면 층마다 중심과의 거리가 다르게 되므로 인덕턴스 차이가 발생하게 되는데 이로인해 최악의 층으로 많은 전류가 분배된다. 다른 인덕턴스 차이에 의해 발생하는 층간 전류 불균형을 줄이기 위해 케이블 설계시 포머를 기준으로 안쪽의 층의 Pitch는 짧게 주고 외각의 층은 Pitch를 넓게하여 최대한 층간 인덕턴스를 비슷하도록 설계한다.

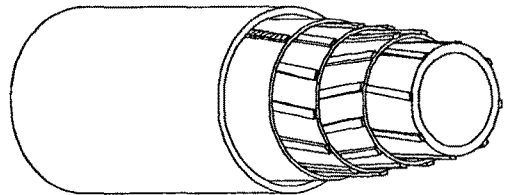


그림 1. 초전도 케이블 개략도

층간 전류 균등 분배를 위해 설계해도 설계 오차와 제작 오차로 인해 균등 분배가 이루어지지 않는다. 그래서 초전도 케이블 제작시 정격전류를 약 2배정도 송전할 수 있는 초전도 선재를 사용하여 전류가 불균일에도 초전도 케이블의 안정성을 확보한다. 이런 이유로 초전도 케이블은 많은 양에 초전도 선재를 필요로 한다.<sup>(3)</sup>

**2.1.1 초전도 케이블의 층간 전류 시뮬레이션**

본 절에서는 초전도 케이블에서 나타나는 층간 전류 분배에 대하여 시뮬레이션을 실행하였다.

시뮬레이션에 필요한 케이블은 4개의 층을 가진 케이블을 가정하였고 각각에 필요한 사양은 표 1과 같이 주어졌다.

표 1. 시뮬레이션 케이블 사양

|         |           |
|---------|-----------|
| 1층 반지름  | 12.9(mm)  |
| 2층 반지름  | 13.26(mm) |
| 3층 반지름  | 13.62(mm) |
| 4층 반지름  | 13.98(mm) |
| 차폐층 반지름 | 19.27(mm) |
| Pitch   | 0.5(m)    |
| 케이블 길이  | 1000[m]   |

여기서, 각층과 차폐층의 거리는 포머 중심으로부터 떨어진 거리를 나타내었고 Pitch는 각층마다 동일한 값을 주었다.<sup>[2]</sup>

$$L_i = L_{cable} \left( \mu_0 \frac{\pi r_i^2}{l_{pi}^2} + \mu_0 \frac{\ln\left(\frac{D}{r_i}\right)}{2\pi} \right) \quad (1)$$

$$M_{ij} = M_{ji} = L_{cable} \left( \frac{a_i a_j \mu_0}{l_{pi} l_{pj}} \pi r_i^2 + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D}{r_j}\right) \right) \quad (2)$$

여기서,  $L_{cable}$ 는 케이블의 길이,  $D$ 는 차폐층거리,  $a_i$ ,  $a_j$ 는 선재의 방향 1(시계방향), -1(반시계방향)

(1), (2)식에 따라서 구해진 값과 가상의 저항을 고려하여 표 2에 해석된 결과를 나타내었다.

표 2. 시뮬레이션 케이블의 임피던스  
(여기서,  $L_i$ 는 총 인덕턴스,  $R_i$ 는 저항,  $M_{ij}$ 는 중간 상호인덕턴스)

|    |                |     |                |
|----|----------------|-----|----------------|
| L1 | 37.486 $\mu$ H | R4  | 5m $\Omega$    |
| L2 | 35.244 $\mu$ H | M12 | 37.635 $\mu$ H |
| L3 | 33.070 $\mu$ H | M13 | 37.788 $\mu$ H |
| L4 | 30.961 $\mu$ H | M14 | 37.945 $\mu$ H |
| R1 | 10m $\Omega$   | M23 | 35.397 $\mu$ H |
| R2 | 2m $\Omega$    | M24 | 35.554 $\mu$ H |
| R3 | 1m $\Omega$    | M34 | 33.227 $\mu$ H |

이때, 저항 성분은 접속저항과 상전도체 저항을 합한 값이다. 해석된 결과를 토대로 케이블에 대한 통전 실험을 시뮬레이션 하였다.

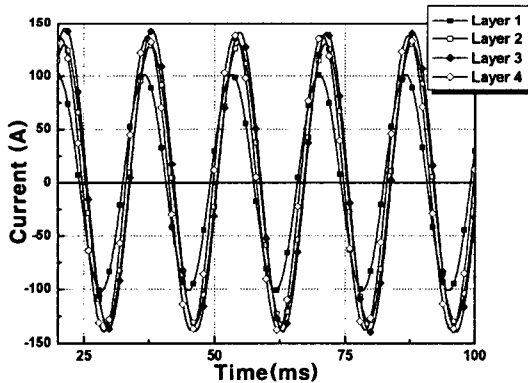


그림 2. 초전도 케이블 중간 전류 분배

모의된 케이블에 500V의 전압을 인가하고 부하저항을 1 $\Omega$ 으로 설정했을 경우 나타난 중간 전류 분배를 그림 2에 도시하였다. 표2에서 1m $\Omega$ 에서 10m $\Omega$ 의 가장된 저항 성분을 삽입하였고 초전도체의 경우 정상상태에서는 저항이 0에 가깝기 때문에 임의로 주어진 저항 성분만 남겨 된다. 이러한 결과로 나타난 그림 2의 전류 분포는 인덕턴스 성분뿐만 저항의 차이에 의해서도 중간 전류는 서로 다른 크기와 위상을 가지고 분포됨을 알 수 있다. 여기서, 모의된 초전도 케이블의 전체 길이가 1000(m)임을 고려하면 길이로 인한 작지 않은 인덕턴스 때문에 m $\Omega$ 의 저항차이에도 크게 전류 불균형이 일어나지 않고 있다. 그러나, 짧은 길이의 초전도체인 경우는 인덕턴스 성분이 거의 없기 때문에  $\mu$ 의 저항차이에도 심한 전류 불균형이 발생된다.<sup>[5]</sup>

## 2.2 IPTs(Inter-Phase Transformers)

IPTs는 전력 변환 장치의 일종으로써 서로 다른 임피던스를 가진 회로의 병렬 운전시 자기 상쇄를 이용하여 보상 임피던스를 발생시킴으로 회로의 임피던스를 같게 만들어 주어 전류 균등 분배 기능을 가진다. 또한, IPTs가 다른 전력 보상 기기보다 뛰어난 장점으로는 직렬 인덕터의 무효 전력의 증가나 직렬 캐피터의 저주파 공진 현상이 없고 특히 간단한 구조로 추가 구동 장치가 필요하지 않다는 점이다. 그림 3에서 IPTs의 기본 구조를 나타냈다.<sup>[4]</sup>

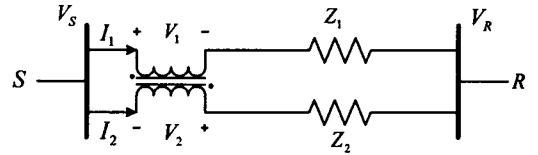


그림 3. IPTs 기본 회로

$$V_1 = \frac{Z_2 - Z_1 a}{(a+1)a} I_1 \quad (3)$$

$$V_2 = -\frac{(Z_2 - Z_1 a)a}{a+1} I_2$$

위의 그림 3에서 IPTs의 권선비가 1:a이면 KVL에 의해서 식 (3)의  $V_1$ 과  $V_2$ 가 얻어진다. 얻어진  $V_1$ 과  $V_2$ 를 삽입한 등가회로는 그림 4에 나타냈다. 여기서 얻어진 값이 IPTs의 보상 임피던스가 된다.

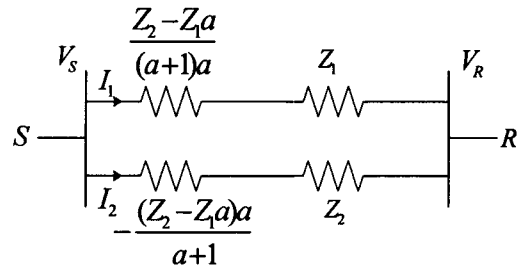


그림 4. IPTs 등가 회로

IPTs의 설계시 고려할 사항은 크게 3가지로 나뉜다. 첫째로, IPT의 용량 즉, 변압기의 턴 수이다. IPTs의 권선비는 등 분배일 경우 1:1로 잡고 용량은 그림 3의 회로에서 보면 식(3)에 따라  $\frac{Z_2 - Z_1}{2}$ 의 보상임피던스를 발생시킬 수 있을 정도의 L이면 된다. 둘째로, 철심 코어인데 IPTs가 없는 상태의  $I_1$ 과  $I_2$ 의 차이에 의해 발생하는 자기의 크기로 인해 포화되지 않으면 된다. 셋째로는 사용되는 코일의 허용 전류 용량만 고려하면 된다. 만약, 철심 없는 설계를 위해서는 자기가 최대한 상쇄되는 구조로 만들면 된다.

### 2.2.1 Multi-Interphase Transformers

본 절에서는 다중 병렬 회로를 위한 Multi-IPTs 중 N-IPT와 Secondary Loop를 가진 IPTs를 제시한다.

그림 5에 도시된 N-IPTs는 한 개의 코어로 다수의 병렬 회로를 처리 할 수 있다. N-IPTs의 장점으로 다른 Multi-IPTs에 비해 적은 양의 코일로 사용할 수 있지만 단점으로는 코어의 구조를 자기 상쇄측면에서 대칭적으로 만들기가 어려워 3개 이상의 N-IPTs는 사용되고 있지 않다.<sup>[4]</sup>

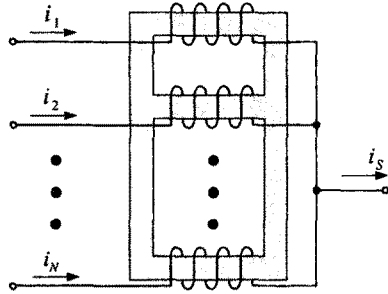


그림 5. N-IPTs

그림 6에서는 위의 N-IPTs를 보완한 Secondary Loop를 가진 IPTs를 나타냈다. 특징으로는 코일의 수가 N-IPTs보다 2배 사용되지만 독립된 코어를 사용함으로써 자기 상쇄에 구속되지 않아 배치가 자유롭고 개수에 제한이 없으며 또한, 코어를 제거한 형태도 가능하다. 개별적인 IPTs의 2차측이 연결되는 구조이다.

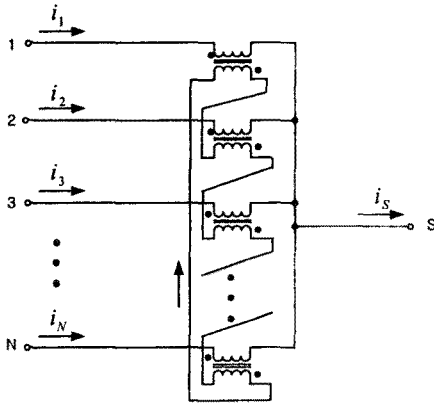


그림 6 Secondary Loop를 가진 IPTs

### 2.2.2 N-IPTs의 자계 해석

본 절에서는 N-IPTs에 대해 서로 다른 전류가 투입 상태의 자계분포와 전류 재분배가 이루어진 즉, 안정된 상태에 대한 자계분포를 해석하였다.

해석모델은 6개의 Leg를 가진 N-IPTs에 대하여 실행되었으며 자기 비대칭적인 구조로 해석하였다. 코어는 가로 170[mm], 높이 60[mm]이다. 코어의 권선 사이의 폭은 10[mm]이다.

먼저, 6-Leg 각각에 160A turn, 140A turn, 120A turn, 100A turn, 80A turn, 60A turn을 순서대로 투입 후 해석하였다. 해석된 결과는 그림 7 (a)에 나타내었다. 결과를 보면 작은 철심을 사용하였음에도 코어는 포화되지 않았고 각각의 코일이 인접한 부분에 많은 양의 자계가 분포되고 있으므로 자기 상쇄가 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한 자계가 철심을 통하여 형성됨을 확인할 수 있다.

위의 방법과는 다르게 6-Leg에 동일한 전류인 100A turn을 투입하였을 경우의 해석 결과는 그림 7 (b)에 나타내었다. 자기 상쇄가 이루어져 코어의 중심에는 적은 자계가 분포하는 반면 자기 비대칭적인 구조로 인하여 코어의 끝에 많은 자계가 분포된다.

위의 해석결과는 불균형한 전류로 인한 자계가 코어를 통하여 서로에게 영향을 미쳐 자기적으로 안정된 상태로 도달하려는 것을 확인할 수 있다.

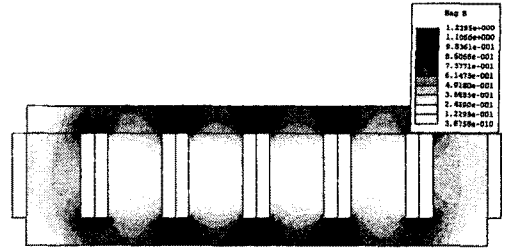


그림 7 (a) 상이 전류에 따른 IPTs의 자계분포

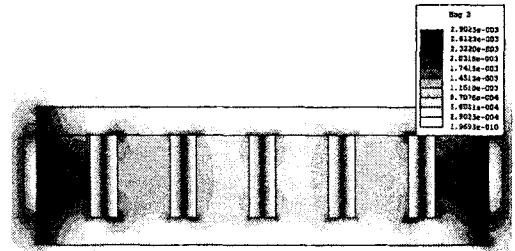


그림 7(b). 동 전류에 따른 IPTs의 자계분포

### 3. 결 론

본 논문에는 초전도 케이블의 중간 전류분배 문제의 해결방안으로 IPTs를 제안하였다. 초전도 케이블과 같은 초전도 전력기는 내용량과 작은 저항이 기본적인 요소이다. 때문에 IPTs의 제작시 초전도 선재를 펜 케익 형태로 제작하면 작은 면적에 충분한 L의 발생과 0에 가까운 저항을 얻을 수 있다. 초전도 케이블용 IPTs는 임피던스 차이가 수[mΩ]의 차이이므로 공심형 보다 철심형이 유리하다. 또한, 층의 개수가 2개는 기본형 IPTs, 3개는 N-IPTs, 3개 이상의 경우는 Secondary Loop를 가진 IPTs의 형태가 바람직하다.

### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] IN GYU PARK, SEON IK KIM, "Modeling and Analysis of Multi-Interphase Transformers for Connecting Power Converters in Parallel", IEEE PESC '97 Conf. Rec., Vol.2, pp.1164-1170, 1997
- [2] Ji-kwnag Lee, Guesoo Cha, "AC Loss Calculation of a Multi-layer HTS Transmission Cable Considering the Twist of Each Layer", IEEE, Vol. 11, No. 1, pp.2433-2436, 2001
- [3] Svetlomid Stavrev, Bertrand Dutoit, Chris Friend, "Response of Bi-2223 tapes to over-critical current excursions", PHYSICA C, pp.69-74, 2000
- [4] 박인규, "Impedance-Compensated Power Transmission Circuit", 국제특허출원번호 PCT/KR00/00843, 2000
- [5] 현옥배, 최용선, 심정욱, 김해림, 황시돌, "선로간 변압기를 이용한 초전도 병렬회로의 평형 전류 분배", 2003년도 대한전기학회 EMECS학회 춘계학술대회 논문집, pp.140-142, 2003