Progress in Superconductivity Vol.5 No.2 pp144-148 30 April 2004

Uniform Current Distribution among Conductor Layers in HTS Cables Using Inter-Phase Transformers

Y. S. Choi*, [a], S. D. Hwang[a], O. B. Hyun[a], S. W. Yim[a], I. G. Park[b]
[a] *Advanced Technology Center, Korea Electric Power Research Institute, Taejon, Korea*
[b] *Division of Electric and Electronic Engineering, Wonkwang University, Iksan, Korea*

Inter-Phase Transformers를 이용한 고온 초전도 케이블의 층간 전류 등분배 방안

최용선*, [a], 황시돌[a], 현옥배[a], 임성우[a], 박인규[b]

Abstract

Uniform current distribution among conductor layers in HTS cables using IPTs (inter-phase transformers) was investigated. 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. The experimental setup consisted of four IPTs and four inductors that simulate the conductor layer inductance. Each layer was designed to feed 10 A. We examined the behavior of current distribution with IPTs for various layer inductances.

Keywords : IPTs, HTS Cable, Uniform Current

I. 서론

현재 개발되고 있는 초전도 전력기기의 용량 증대를 위한 필수적인 요건 중의 하나는 초전도체의 직·병렬 회로 구성이다. 그러나 초전도 전력기기를 구성하는 초전도체의 병렬 회로는 효율 측면에서 회로마다 균일한 전류가 분배될 때 최대의 효율이지만 실제로는 전류 불균등 현상이 발생하여 최대 효율로 사용하고 있지 못하는 상황이다. 이러한 전류 불균등의 원인으로 병렬회로에서 개별의 임피던스($Z = R + jX$)가 다르기 때문이다. 임피던스 차이로 인하여 전류 불균등 분배가 발생하게 되면 임피던스가 낮은 쪽에 전류가 집중되고 초전도체는 손실이 발생하게 되며 초전도체에 전기적·열적 스트레스를 주게 된다. 이러한 초전도 병렬회로의 전류 불균등 분배를 억제하기 위한 기존 해결방안으로 병렬회로에 각각에 L 또는 R을 삽입하는 방법을 택하고 있다.

본 논문은 이러한 초전도 전력기기의 초전도체 병렬 회로의 전류 불균등을 개선하기 위

*Corresponding author. Fax : +82 42 865 7843
E-mail : hanalam@hitel.net

한 방안으로 전력변환기기에 사용되는 IPTs (Inter-Phase Transformers)를 이용한 전류 균등 분배 방안을 제시하였고 초전도 전력기기인 초전도 케이블 층간의 전류 균등 분배에 관한 방법을 제시하였다 [1].

II. 본론

1. 고온 초전도 케이블의 전류 분포

초전도 케이블의 구조는 Fig. 1과 같은 구조를 가진다. 초전도 전력기기의 하나인 초전도 케이블도 전류 용량 증대를 위한 방법으로 다량의 초전도 선재가 층을 이루는 형태를 가진다 [2].

지금까지의 초전도 케이블에서 사용하는 전류 균등 분배 방법은 케이블 설계 시 각층의 Pitch를 다르게 하여 층마다 임피던스를 똑같이 하는 방법과 층마다 R과 L을 삽입함으로써 층간 전류 균등 분배를 한다. 그런데, 첫번째 방법은 설계 오차와 제작 오차 때문에 균등화 되기 어렵고 두번째 방법은 손실(R은 열 발생, L은 무효전력 증가)을 동반하게 된다. 이러한 설계 또는 제작 상의 오차를 극복하고 손실을 줄이기 위한 방법으로 IPTs (Inter-Phase Transformers)를 이용한 전류 등분배 방안을 제안하고 기존의 방법인 인덕턴스를 추가하는 방법과 비교 실험을 시행하였다.

2. 초전도 케이블의 층간 전류 시뮬레이션

초전도 케이블의 층간 전류 분배에 관하여 시뮬레이션을 행하였으며 초전도 케이블의 층은 4층으로 하였고 최대의 임피던스 차이를 위해 동일한 권선 방향과 피치를 가정하였다. 사양은 Table 1과 같다[3].

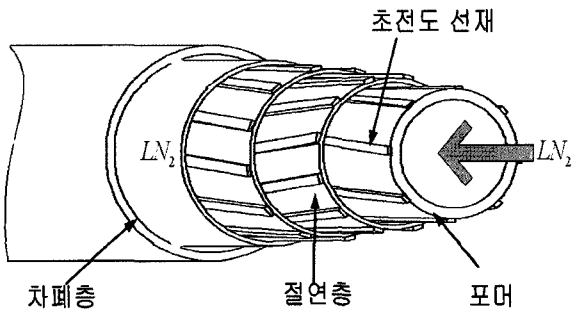

Fig. 1. Schematic diagram of HTS cable

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

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

여기서, L_{cable}은 케이블의 길이, D는 차폐층 거리, a_i, a_j는 선재의 방향(1: 시계 방향, -1 : 반시계 방향)

Table 2에서 나타난 바와 같이 오차 없이 제작되는 초전도 케이블에서 인덕턴스의 차이 즉, 최대 ΔL은 6.53 μH의 차이를 가진다. 이 값은 시뮬레이션의 결과이므로 실제 케이블의 제작 과정에서는 증가 또는 감소 할 수 있다.

Table 1. Simulation parameters for HTS cable

1층 반지름	12.90[mm](+1)
2층 반지름	13.26[mm](+1)
3층 반지름	13.62[mm](+1)
4층 반지름	13.98[mm](+1)
차폐층 반지름	19.27[mm](+1)
Pitch	0.50[m]
케이블 길이	1000[m]

Table 2. Self and mutual inductance in layers of HTS cable

인덕턴스		상호 인덕턴스	
L1	37.49 μH	M12	37.63 μH
L2	35.24 μH	M13	37.79 μH
L3	33.07 μH	M14	37.95 μH
L4	30.96 μH	M23	35.39 μH
		M24	35.55 μH
		M34	33.23 μH

3. IPTs (Inter-Phase Transformers)

IPTs는 전력 변환 장치의 일종으로써 다른 임피던스를 가진 병렬 회로를 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 캐피시터의 저주파 공진 현상이 없고 특히 간단한 구조로 추가 구동 장치가 필요하지 않다는 점이다. Fig. 2에서 IPTs의 기본 구조와 등가회로를 나타내었다 [4].

IPTs에서 등가회로는 권선비 1:a와 KVL에 의해

$$V_1 = \frac{Z_2 - Z_1 a}{(a+1)a} I_1$$
$$V_2 = -\frac{(Z_2 - Z_1 a)a}{a+1} I_2 \quad (3)$$

로 대치된다. 즉, 임피던스를 일치시키기 위해 보상 임피던스(양의 임피던스, 음의 임피던스)가 발생한다.

본 논문에서는 IPTs의 기본 원리에서 확장된 Multi –Interphase Transformers에서 Secondary loop configuration을 이용하여 초전도 케이블의 층간 인덕턴스 차이에 따른 전류 불균등 현상을 개선하여 전류 균등 분배 가능성을 확인하였다.

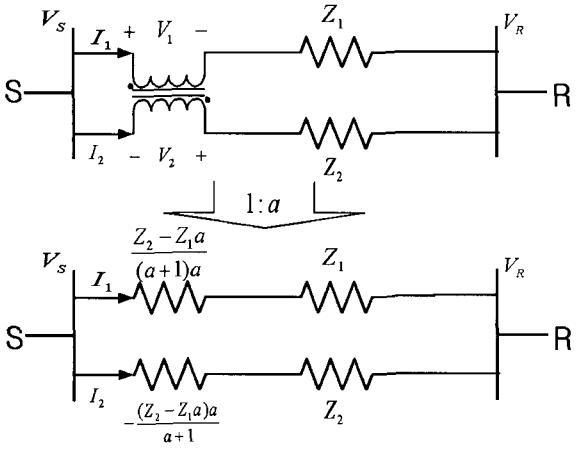

Fig. 2. Basic and equivalent circuit of IPTs

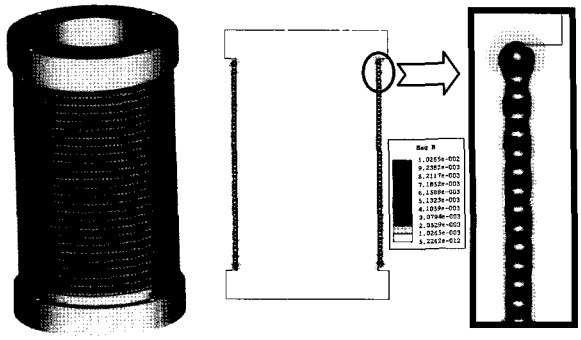

Fig. 3. Configuration of the fabricated IPTs and magnetic field distribution

4. Multi - IPTs(Inter-Phase Transformers)

Multi – IPTs의 Secondary loop configuration를 만들기 위하여 지름 5 cm, 높이 7.5 cm의 원기둥에 동선을 교호 배치 방법으로 25[turn]을 권선하여 총 4개의 IPTs를 제작하였다.

제작된 IPTs의 인덕턴스는 18 μH ~ 20 μH를 가진다. 최대 ΔL은 2 μH로써 약 10%의 오차를 가진다. 이는 결과에 영향을 줄 수도 있는 오차이나 권선의 턴수가 적고 수제작이라는 점에서 줄이기가 어렵다. 제작된 IPTs의 자계해석은 Fig. 3에 나타나듯이 교호 배치 때문에 권선 사이에 자기 상쇄가 발생되는 것을 확인 할 수 있다.

5. IPTs 실험

제작된 IPTs의 전류 균등 분배 실험을 위해 인덕턴스가 다른 부하를 제작하였다. 부하의 조건으로 같은 저항을 가지고 있지만 인덕턴스의 분포는 10 μH ~ 21 μH로 최대 ΔL은 11 μH를 가지게 하였으며 저항 성분을 줄이기 위해 IPTs와 부하 모두를 액체 질소에서 실험 하였다. 실험의 개략도는 Fig. 4에 나타내었다. 투입된 전류는 27 A의 전류를 10 cycle동안 투입하였다. 구리선 저항은 액체질소에서 약 8mΩ을 가졌다.

Fig. 5 a)는 부하만을 연결한 결과로 임피던스 차이에 의해 전류 불균등 분배가 발생하였고 Fig. 5 b)는 IPTs를 연결한 결과인데 IPTs 간의 ΔL에 의해 최대 전류 Peak가 10%정도 차이가 나타난다. 실험의 기본 주파수는 60 Hz를 사용했다. 결과적으로 IPTs의 추가로 인한 전류 균등 분배는 이루어 졌다.

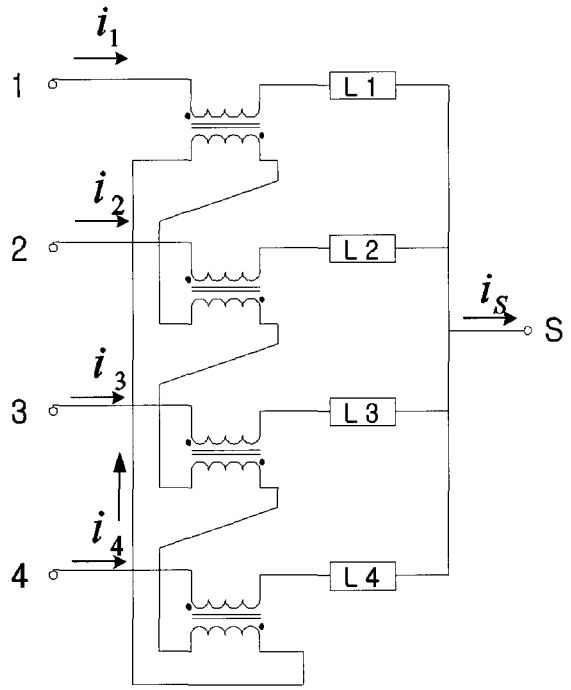

Fig. 4. Test of secondary loop configuration in IPTs

이때, 결과의 전류 균등 분배가 L이 추가됨에 따라 발생된 현상인지 확인하기 위해 IPTs 그리고 같은 용량의 L을 바꾸어 고주파수 (1 kHz)의 전류를 투입하여 실험하였다. 1 kHz의 주파수를 사용한 이유는 주파수에 비례하는 인덕턴스 성분을 증폭하기 위해서다.

실험 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 결과를 보면 IPTs의 삽입은 거의 영향이 없는 반면 L을 삽입 경우 약 2배 전압이 검출 되었다. 즉, IPTs의 추가로 인한 손실은 적다.

III. 결론

초전도 케이블의 층간 인덕턴스 차이에 의한 전류 불균형을 해결하기 위한 방법으로 IPTs의 사용을 제안하였고 실험으로 가능성을 증명하였다. 또한, IPTs의 삽입에 따른 손실이 거의 없음을 확인하였다. 실제의 초전도 케이블은 장선화를 위해 접합이 필수적이다. 접합부에선 두개의 초전도 케이블의 결합을 위해 층간의 분리 후 같은 층을 접합하게 된다. 이

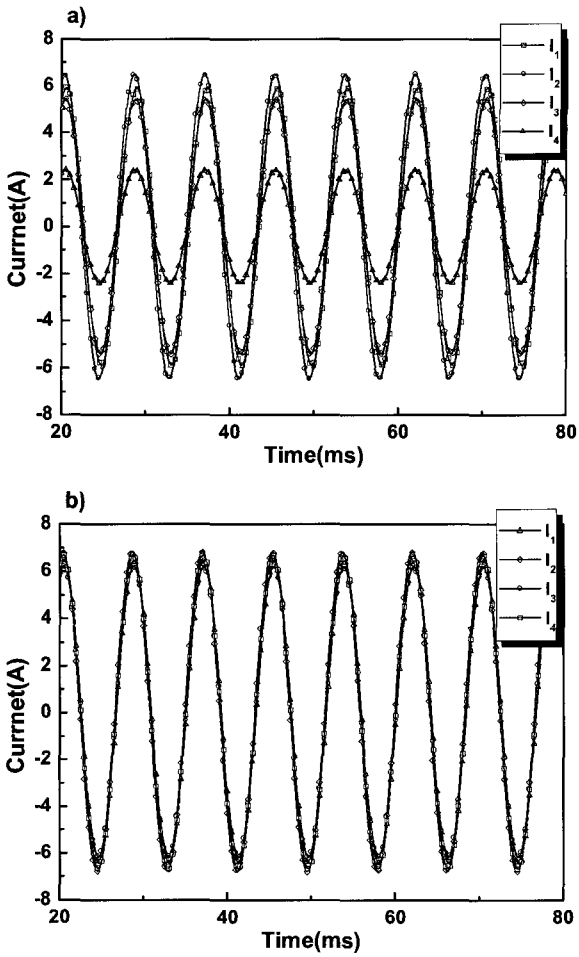

Fig. 5. a) 60Hz, 27A Only Load, b) 60Hz, 27A With IPTs

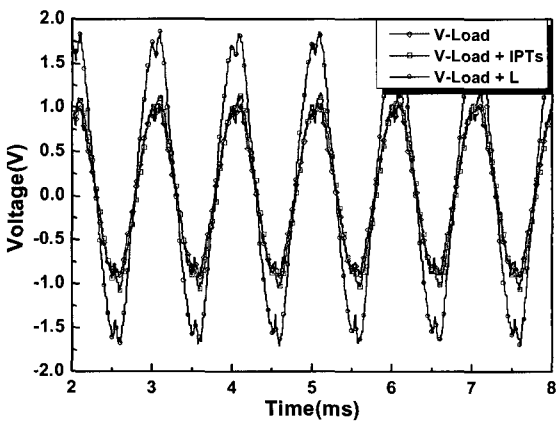

Fig. 6. Voltage changes in the circuit when the current of 27 A, 1 kHz was applied

때, 저온 초전도나 Coated Conductor를 이용한 IPTs를 삽입하게 되면 적은 부피를 가지고 층간의 전류를 균등하게 분배할 수 있는 접합부를 만들 수 있다.

Acknowledgments

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

References

[1] Svetlomir Stavrev, Bertand Dutoit, Chris Friend, "Response of Bi-2223 tapes to over-critical current excursions", PHYSICA C, pp.69-74, 2000.

[2] 박인규, "Impedance-Compensated Power Transmission Circuit", 국제특허출원번호 PCT/KR00/00843, 2000.

[3] Ji-kwnag Lee, Gueesoo 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.

[4] 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.