

## 2003년도 대한전기학회 EMECS학회 춘계학술대회 논문집 (2003.4.24-4.26)

## 선로간 변압기를 이용한 초전도 병렬회로의 평형 전류분포

현옥배, 최용선, 심정욱, 김혜림, 황시돌

한국전력공사 전력연구원

Equal Current Distribution in Superconducting Parallel Circuits  
Using Multi-Interphase Transformers

Ok-Bae Hyun, Yong-Sun Choi, Jungwook Sim, Hye-Rim Kim, Si-Dole Hwang

Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - Small impedances in the superconducting parallel circuits cause unequal distribution of the currents in the circuits. This results in quenches or losses in some superconducting parts. This paper presents the fabrication and test results of a multi-interphase transformers(IPT) for equal current distribution in parallel circuits. Test results show that the IPT can effectively make the current distribution uniform in parallel circuits that have unequal resistances.

## 1. 서 론

초전도 전력기기의 초전도 직, 병렬회로 구성은 기기의 용량증대를 위한 필수적인 요건 중의 하나이다[1]. 시스템에 따라서 다르겠지만 전류용량의 증대를 위한 초전도체의 병렬회로 구성에는 부득이하게 상전도체와 초전도체의 접촉이 필요하게 되고 이에 따라 불필요한 내부 저항이 생기게 된다. 하지만 시스템 자체가 냉각이 되면 이러한 저항의 크기가 감소하게 되고, 각 병렬회로 내부 저항의 크기는 경우에 따라 수~수십( $\mu\Omega$ )의 크기로 매우 작게 된다. 이렇게 감소된 내부 저항은 크기가 매우 작기 때문에 임의로 조절하기가 매우 어려우며 일반적인 병렬 회로에서는 보통 무시한다. 하지만 초전도 병렬회로의 경우 초전도체에서는 저항이 없기 때문에 내부 저항의 크기가 매우 작더라도 각 내부 병렬저항들이 서로 상대적인 차이를 가지면 병렬회로에 통전되는 전류의 크기는 불균일하게 되고, 이것은 전체 시스템의 통전 전류량을 제한하게 된다. 특히 저항형 한류기를 병렬로 구성하여 운전할 경우를 보면 사고 발생 시에는 내부 저항과는 상관없이 각 한류소자의 펜치전류  $I_q$ 에 따라 사고전류를 한류하며 동일한 펜치전류군을 이루는 한류소자들을 병렬연결하면 동시에 다발적으로 동작하게 되어 큰 문제가 발생하지 않는다[2,3]. 하지만, 사고가 없는 정상상태에서 내부 저항의 상대적인 차이가 클 경우 병렬회로의 전류크기가 서로 다르게 되어 내부 저항이 낮은 한류소자로 전류가 집중될 수 있다. 이 경우 전류가 집중된 소자에서는 전류의 크기에 따라 손실이 발생하게 되며 전류의 크기에 따라 한류기 전체 시스템을 불안정하게 하는 요인이 될 수 있다.

본 논문은 이러한 초전도 병렬회로의 불평형 전류분포의 예를 보이고, 불평형 전류분포를 개선하기 위한 방안으로 전력변환장치에 사용되는 선로간 변압기(multi-interphase transformers, IPT)를 응용하여 초전도 병렬회로의 저항차이에 의한 전류분포를 동일하게 조절하는 방안을 제시하고 상전도 병렬저항을 이용한 모의실험을 통하여 가능성을 살펴보았다.

## 2. 고온초전도 병렬회로의 불평형 전류분포

고온초전도 병렬회로에서의 불평형 전류분포를 확인하기 위해 저항형 한류소자를 이용하여 병렬회로를 구성하였다. 초전도 한류소자를 병렬로 구성하기 위해서는 어느 정도 구리선을 이용한 상전도 구간이 필요하고 이런 구리선은 길이에 따라 저항 차이가 발생한다 또한 구리선과 초전도 한류소자간의 접촉저항 역시 병렬회로마다 다르게 나타난다.

그림 1은 초전도 병렬회로의 각 병렬 전류 분포를 보기 위해 직경 2 inch  $YBa_2Cu_3O_7$ (YBCO) 박막을 이용한 저항형 초전도 한류소자 5개의 병렬 회로를 나타낸 그림이다. 실험 조건은 사고전류제한이 목적이 아니므로 사고발생 전인 정상상태를 가정하여 전체 소자에 임계전류 이하의 전류가 흐르도록 입력전압을 제한하였다. 각 한류소자의 임계전류  $I_c$ 는 17~21[A]정도이고, 전류의 크기를 용이하게 조절하기 위해  $R_o=2.5[\Omega]$ 의 저항을 사용하였다. 그림 2는 입력전압  $V_t=73[V_{rms}]$ 의 경우 전체 전류  $I_0$ 와 각 병렬 초전도한류소자에 통전되는 전류  $I_1 \sim I_5$ 이다. 이때  $I_0$ 는 40[A<sub>peak</sub>]이고 각 병렬 소자에 흐르는 전류  $I_1 \sim I_5$ 는 6.6~9.5[A<sub>peak</sub>]로 각 한류소자의 전류의 크기는  $I_c$  이하이지만 각 병렬회로의 전류는 최대 30(%)정도의 차이를 두고 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 각 병렬회로를 구성하는 한류소자들과 내부 도선 간의 접촉저항과 도선의 자체저항을 포함한 내부 저항  $r_1 \sim r_5$  때문이다. 이 내부 저항은 그 크기가 상당히 작고 병렬회로 간에 서로 상대적으로 다르기 때문에 이러한 저항의 차이를 동일하게 조절한다는 것은 매우 어려운 일이다. 이를 해결하는 방법으로는 조절이 가능한 수준의 저항을 각 병렬회로에 연결하는 방법이 있지만 이것은 또 다른 손실을 유발하기 때문에 바람직한 방법이 아니다.

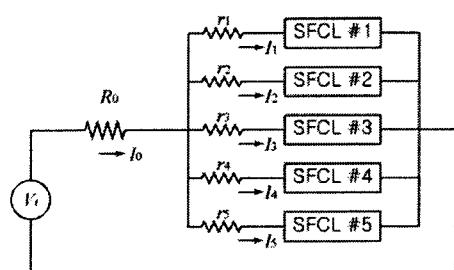


그림 1. 저항형 초전도한류기의 병렬운전시험

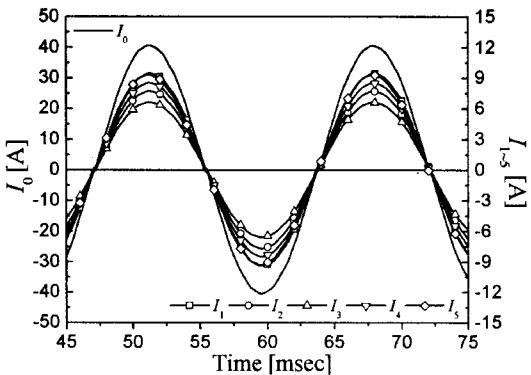


그림 2. 입력전압 73[V<sub>rms</sub>]에서의 병렬회로의 전류분포

### 3. 선로간 변압기를 이용한 병렬 전류분포 개선

IPT는 일반적으로 전력 변환기 회로의 병렬연결 시수반되는 전류의 불평형을 해결하는 방안으로 사용되어 왔다. 그 기능으로는 병렬회로의 전류차이가 발생할 경우 IPT의 상호작용에 의해 각 병렬회로에 알맞은 음의 직렬리액턴스를 발생시켜 전류의 차이를 보상하는 기능을 가지고 있다. 특징으로는 순환전류를 억제하고 병렬회로의 전류를 균등하게 분포시키는 역할을 한다[4]. 여기서는 저항형 초전도한류기의 병렬운전시 평형 전류분포를 위한 기초자료로 이용하기 위해 임의의 저항차이가 있는 6개의 병렬회로에 대하여 IPT가 없는 경우와 IPT를 사용한 경우의 각 병렬전류분포를 확인하였다.

그림 3은 6개의 저항  $R_1 \sim R_6$ 과 6-IPT로 구성된 병렬회로에 직렬저항  $R_0$ 가 연결된 회로이다. 병렬저항  $R_1, R_2$ 는  $0.5[\Omega]$ ,  $R_3, R_4$ 는  $1[\Omega]$ ,  $R_5$ 는  $2[\Omega]$ ,  $R_6$ 는  $3[\Omega]$ 으로 구성되어 전체 병렬저항의 합은  $0.15[\Omega]$ 으로 매우 작다. 따라서 전류의 크기를 제한하기 위해  $2.5[\Omega]$ 의 직렬저항  $R_0$ 를 연결하였다. 6-IPT는 6개의 발이 있는 철심에  $2[mm]$ 에나멜선을 각각 100번씩 권선하여 내철형 변압기 형태로 제작하였다. IPT의 각 내부저항은  $0.23[\Omega]$ 으로 IPT의 내부저항을 포함한 전체 병렬저항의 합은  $0.2[\Omega]$ 이다. 따라서 회로의 전체 저항은 IPT가 없는 경우와 있는 경우에 대하여 각각  $2.65[\Omega]$ 과  $2.7[\Omega]$ 으로 IPT를 설치하면  $1.9\%$ 정도 전체 저항이 증가한다. 표 1은 실험에 사용된 6-IPT의 사양이다.

그림 4는 입력전압 22[V<sub>rms</sub>]에 대하여 IPT가 없는 경우 전체 전압과 각 병렬회로의 전류의 분포를 나타낸 그림이다. 각 병렬전류의 크기가 서로 다르게 분포함을 알 수 있고, 이는 저항크기의 비에 따른 것이다.

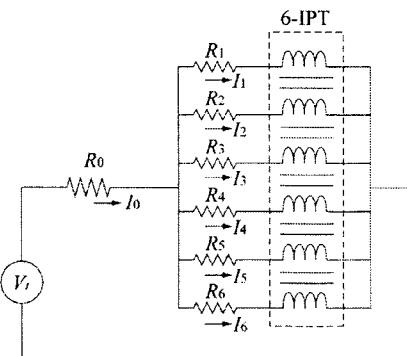


그림 3. 6-IPT가 포함된 6개의 병렬회로

표 1. 6-IPT의 사양

|       |         |          |           |
|-------|---------|----------|-----------|
| 철심 높이 | 74[mm]  | 발의 수     | 6         |
| 철심 폭  | 176[mm] | 발당 권선수   | 100(turn) |
| 철심 두께 | 25[mm]  | 권선의 지름   | 1.5[mm]   |
| 창 높이  | 42[mm]  | 권선의 내부저항 | 0.23[Ω]   |
| 창 폭   | 16[mm]  |          |           |

병렬 전류의 분포는  $0.5 \sim 3.4[A_{peak}]$  사이로 분포하여 크게는  $85.3\%$ 의 전류차이를 나타내고 있다. 초전도 한류기의 정상적인 운전의 경우 초전도 한류기 자체는 저항이 없고 내부저항 역시 매우 작겠지만 비율적으로 볼 때 내부저항의 상대적인 차이가 크게 생기면 그럼 2에서 보는 바와 같이 병렬 전류의 분포가 불균일하게 된다. 이러한 전류분포를 상대적인 비율로 한류기의 경우에 대입해 보면, 한류기의 안정성 입장에서 볼 때 결코 바람직하지 않으며 각 초전도 한류소자에 흐르는 병렬전류의 크기가 가장 큰 전류를 기준으로 전체 전류의 크기를 맞춰야 하기 때문에 전체전류의 크기가 감소될 수밖에 없다.

그림 5는 병렬회로에 6-IPT를 사용한 경우의 전체 전압과 각 병렬회로에 흐르는 전류이다. 여기서 보면 6-IPT를 통한 병렬회로에서는 그림 4의 결과와는 달리 불균일한 전류분포가 개선된 것을 볼 수 있다. 각 병렬회로의 전류는  $1.78 \sim 2.02[A_{peak}]$ 로 전류차이의 비율이  $11.9\%$  이내로 감소함을 알 수 있다.  $11.9\%$ 의 차이가 나는 것은 이상적인 구조의 IPT일 경우 전류의 비율을 정확히 동일하게 조절할 수 있지만 실험에 사용된 6-IPT의 경우 각 병렬 전류의 차이에 의해 IPT의 각 발에 쇄교되는 자속이 균등하게 분배되는 구조가 아니기 때문이다[4]. 또한, 실험에 사용된 병렬 저항의 크기와 차이가 6-IPT가 감당하기에 큰 값이기 때문에 사료된다. 표 2는 병렬회로에 IPT가 없는 경우와 있는 경우에 따라 비교한 각 병렬회로의 전류이다.

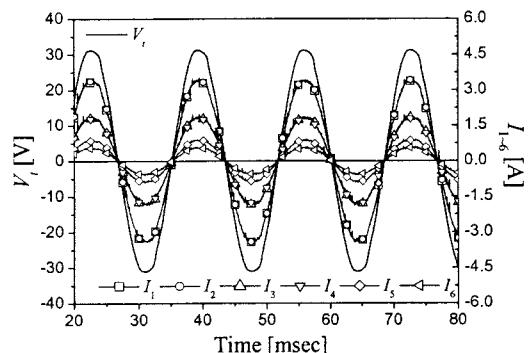


그림 4. IPT가 없는 경우의 각 병렬전류분포

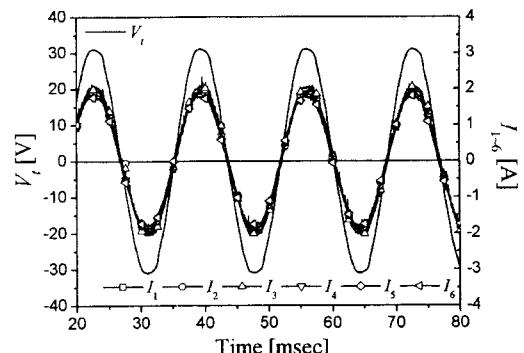


그림 5. IPT가 있는 경우의 각 병렬전류분포

표 2. 각 회로의 저항값과 입력전압 22(V<sub>rms</sub>)에서의 각 전류분포

| Resistance<br>[Ω]               | R <sub>0</sub> | R <sub>1</sub> | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>5</sub> | R <sub>6</sub> |
|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                 | 2.55           | 0.5            | 0.5            | 1              | 1              | 2              | 3.1            |
| Current<br>[A <sub>peak</sub> ] | I <sub>0</sub> | I <sub>1</sub> | I <sub>2</sub> | I <sub>3</sub> | I <sub>4</sub> | I <sub>5</sub> | I <sub>6</sub> |
| no IPT                          | 11.8           | 3.4            | 3.39           | 1.81           | 1.79           | 0.88           | 0.55           |
| IPT                             | 11.3           | 1.92           | 1.93           | 2.02           | 1.86           | 1.78           | 1.91           |

그림 6은 병렬회로에 IPT가 없는 경우와 있는 경우의 전체 전압과 전체전류를 나타낸 그림이고 그림 7은 같은 경우의 전체 전압과 병렬회로 양단의 전압을 나타낸 그림이다. 그림 6을 보면 IPT가 없는 경우와 있는 경우의 전체 전류가 각각 11.8[A<sub>peak</sub>]와 11.3[A<sub>peak</sub>]로 IPT를 사용할 경우 전체 전류가 약 4.2[%]정도 감소하였다. 또한 IPT가 있을 경우 입력 전압과 전체 전류의 위상차는 1.1°로 측정되었다. 여기서보면 병렬 회로에 IPT가 있는 경우가 없는 경우보다 전체 저항이 1.9[%] 정도 증가한 것에 비해, 전체 전류의 차이는 저항의 증가분보다 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이것은 6-IPT의 내부저항뿐만 아니라 다른 성분이 포함되었기 때문이다. 그럼 7을 보면 IPT가 없을 경우 전체 병렬회로 양단의 전압강하는 약 1.7[V<sub>peak</sub>]로 측정되지만, 6-IPT가 포함된 전체 병렬회로 양단의 전압은 2.85[V<sub>peak</sub>]로 전체 전압과의 위상은 13° 정도 차이가 나게 측정되었다. 여기서보면 그림 7의 6-IPT가 없는 경우의 전압강하는 전체 전류 11.8[A<sub>peak</sub>]에 따른 0.146[Ω]의 병렬 저항의 크기만큼의 전압강하가 발생됨을 알 수 있다. 하지만 그림 7의 6-IPT가 있을 경우 병렬회로에서의 전압강하는 전체 전류 11.3[A<sub>peak</sub>]에 대하여 병렬회로의 저항 0.195[Ω]만 고려할 경우에 해당하는 전압강하 2.2[V<sub>peak</sub>]보다 더 크게 나타났고, 이것은 IPT를 설치함으로써 생기는 전체 저항의 증가분 외에 IPT의 누설 또는 철심에 의한 자화 리액턴스 성분과 철손 성분이 더 추가되기 때문임을 알 수 있다. 6-IPT가 포함된 병렬전압 V<sub>P</sub>와 전체 전류 I<sub>0</sub>, 그리고 위상차 14.1°(=13°+1.1°)를 이용하여 저항성분과 리액턴스 성분들을 분리해보면 저항성분은 0.245[Ω], 리액턴스 성분은 61.4[mΩ]으로 계산된다. 따라서 6-IPT 병렬회로의 내부저항은 0.195[Ω]이므로 내부저항성분을 빼면 철손은 0.05[Ω]으로 계산된다. 따라서 초전도한류기의 병렬운전에 IPT를 적용할 경우 이러한 문제를 개선해야 한다.

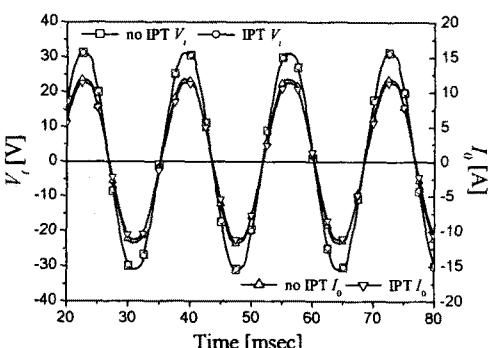


그림 6. IPT 유무에 따른 입력전압 및 전체전류

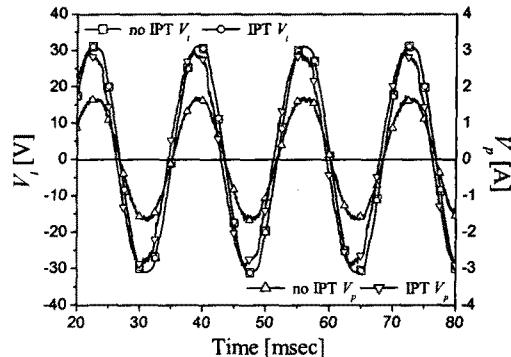


그림 7. IPT 유무에 따른 입력전압과 병렬회로의 전압

### 3. 결 론

초전도 한류기의 병렬운전시 내부저항의 상대적인 차이로 인하여 병렬회로에서의 각 전류분포가 다르게 분포한다는 것을 실험을 통하여 확인하였다. 또한 이러한 부분을 해결하기 위해 각각 크기가 다른 상전도 저항으로 구성된 병렬회로에 IPT를 이용하여 병렬회로전류를 균등하게 분배할 수 있음을 확인하였다. 또한, 본 실험의 6-IPT 이용한 병렬회로의 문제점으로는 IPT를 설치함으로 추가되는 내부저항과 철손에 의한 순질, 자체 리액턴스 등으로 전체 임피던스가 증가되어 동일한 전압조건에 대해 전체 전류가 감소되는 부분과 IPT의 구조적인 문제로 각 발의 자속이 균등하게 쇄교되지 못하기 때문에 병렬전류의 크기를 정확히 같게 조절할 수 없는 단점도 발견하였다. 하지만 초전도한류기의 경우는 병렬 내부저항의 크기는 수[μΩ]정도의 크기로 매우 작다. 따라서, IPT 권선부분을 내부저항 및 철손이 제거되도록 고온초전도테이프를 이용하여 공심형으로 제작하고 리액턴스가 충분히 보상되도록 구조적으로 개선된 IPT를 사용하면 가능하리라고 사료된다.

### 감사의 글

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

### (참 고 문 헌)

- [1] 차상도, 김혜림, 최효상, 현옥배, "박막 저항형 초전도 한류기의 용량증대를 위한 방안," 2002 대한전기학회 하계학술대회, pp.790-792, 2002
- [2] H.-R Kim, H.-S. Choi, K.-B. Park, O.-B. Hyun and S.-D. Hwang, "Quench properties of superconducting fault current limiters connected in parallel," *Progress in superconductivity*, Vol.3, No.2, pp.224-228, 200
- [3] 최효상, 김혜림, 차상도, 현옥배, 황시돌, "전류제분기에 의한 저항형 초전도 한류기의 펜치 특성," 2002 대한전기학회 하계학술대회, pp.336-338, 2002
- [4] I. Park and S. Kim, "Modeling and Analysis of Multi-Interphase Transformers for Connecting Power Converters in Parallel," in *IEEE PESC '97 Conf. Rec.*, Vol.2, pp.1164-1170, 1997