

The Analysis of Current Limiting Performance in a High -T_c Superconductor using Flux -Lock Concepts

Sung-Hun Lim^{*}, Hyo-Sang Choi^{**}, Young-Soon Kim^{*}, Seong-Ryong Lee^{***},
Byoung-Sung Han^{*}

^{*}The Research center of Industrial Technology, Engineering Research Institute, Chonbuk National University, Chonju, Korea

^{**}Power System Laboratory, Korea Electric Power Research Institute, Taejeon, Korea

^{***}Kunsan National University, Kunsan, Korea

Received 20 August 2001

자속구속개념을 이용한 고온초전도체의 전류제한 특성분석

임성훈^{*}, 최효상^{**}, 김영순^{*}, 이성룡^{***}, 한병성^{*},

Abstract

In this paper, we analyzed the fault current performance in a high-T_c superconductor(HTS) which was installed on flux-lock reactor with an external magnetic field coil covering the HTS. In this HTS fault current limiter using flux-lock concepts, the initial limiting current level can be controlled by adjusting the inductance of the coils. Furthermore, the current limiting characteristics of high-T_c superconducting FCL can be improved by applying the external magnetic field into the high-T_c superconductor. This paper discusses current limiting performance according to the inductance of the coil 1 in two cases with ac magnetic field coil or not and suggests the methods to improve the current limiting factor P_{limits} , which is defined as the ratio of the limited current I_{FCL} at the current limiting phase to the prospective short-circuit current I_{PSC} .

Keywords : flux-lock, external magnetic field, current limiting factor, prospective short -circuit current, HTS

1. 서 론

매년 증가되고 있는 전력요구와 전력공급으로 인해 사고전류의 증가와 사고시 이로 인한 피해를 줄이기 위한 기기 장치들이 개발되어 왔다. 그 중에서도 고온초전도체의 영 저항특성과 마이너효과를 이용한 저항형타입과 차

폐유도형타입의 고온초전도한류기가 개발되어 현장에 적용되기 위한 시험이 계속되고 있다 [1-5]. 저항형의 경우, 빠른 퀵치와 소형화가 가능하고 파형변화가 적으나 균일한 제작과 고전압과 기계적 및 열적인 충격에 취약한 단점을 가지고 있다. 반면 유도형의 대표적인 차폐유도형의 경우, 초전도체에 직접적인 사고전류가 흐르지 않는 점과 대용량화에 유리하나 기기의 부피가 증가하는 단점이 있고 철심사용에 따른 손실들에 대한 해석이 요구된다[4-5].

^{*}Corresponding author. Fax : +82 063 270 2394
e-mail : dolphine@shinbiro.com

그러나 위에서 언급한 고온초전도체를 이용한 대용량의 한류기에 적용하기 위해서는 고임계특성을 갖는 고온초전도체의 제조기술이 먼저 선행되어야 하는데, 저항형의 대표적인 박막형의 경우, 대용량에 적용하기 위해서는 고임계특성을 갖는 대면적의 박막제작기술이 먼저 확보되어야 하고 유도형의 경우, 튜브형태나 링 형태의 초전도체를 필요로 하기 때문에 별도의 제조기술과 이에 대한 연구가 선행되어야 한다.

본 논문에서는 고온초전도체를 이용하여 한류기에 적용시 고온초전도체 제작에 따른 재료적인 제약으로 인한 문제점을 해결할 수 있는 자속구속개념을 이용한 고온초전도 한류기의 동작원리에 대해 고찰하고 제작이 용이한 소형의 로드(Rod)형태의 고온초전도 벌크나 박막형태의 고온초전도시편을 이용하여 대용량에 적용가능함을 시뮬레이션을 통해 검증하고 적절한 설계파라미터를 조사하여 실제동작실험을 위한 설계자료로 이용하고자 한다.

II. 자속구속개념을 이용한 고온초전도 전류 제한기의 설계파라미터 및 특성해석

1) 구성 및 동작원리

자속구속개념을 이용한 고온초전도한류기의 구성은 Fig. 1과 같이, 철심코어를 매개로 벌크나 박막형태의 고온초전도시편을 포함한 코일 1, 2는 병렬로 연결되고 자계인가코일, 위상조정용 커패시터 및 직렬저항으로 이루어진 자계인가회로가 코일 3를 통해 구성된다.

코일 1, 2, 3의 턴수를 각각, n_1, n_2, n_3 라 하고 각 코일에서 유기되는 전압을 V_1, V_2, V_3 라 하면 그림 1에 표시한 방향으로 코일을 감을 경우 각 코일의 전압은 다음식과 같이 표현된다.

$$v_1 = n_1 \frac{d\phi}{dt}, v_2 = -n_2 \frac{d\phi}{dt}, v_3 = n_3 \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

사고전에는 고온초전도체의 양단전압은 0이 되므로 코일 1과 2의 양단전압은 같게 되어 다음식이 성립된다.

$$(n_1 + n_2) \frac{d\phi}{dt} = 0 \quad (2)$$

여기서 $n_1 + n_2 \neq 0$ 때문에 $d\phi/dt = 0$ 이 성립되며 각 코일에 쇄교하는 자속은 시간적으로 변하지 않고 구속되어 있다. 또한 각 코일의 전압은 모두 0이기 때문에 ($v_1 = v_2 = v_3 = 0$), 코일 3에는 전류가 흐르지 않으므로 고온초전도체로 자계인가는 이루어지지 않게 되므로 이로 인한 임계전류저하는 발생되지 않게 된다. 또한 정상시에는 철심에 교류자속이 발생되지 않으므로 철손이 발생되지 않는 점이 특징이다.

사고가 발생되어 임계전류를 넘는 전류가 고온초전도시편에 흐르게 되면 쇄교자속에 시간변화가 생겨 각각의 코일에 전압이 유기되고 이와 동시에 코일 3에 전류가 흐르게 되어 벌크나 박막형태로 제작된 고온초전도시편에 교류자계가 인가된다. 이때 인가된 교류자계로 인해 고온초전도체의 상전도저항은 증가하게 된다.

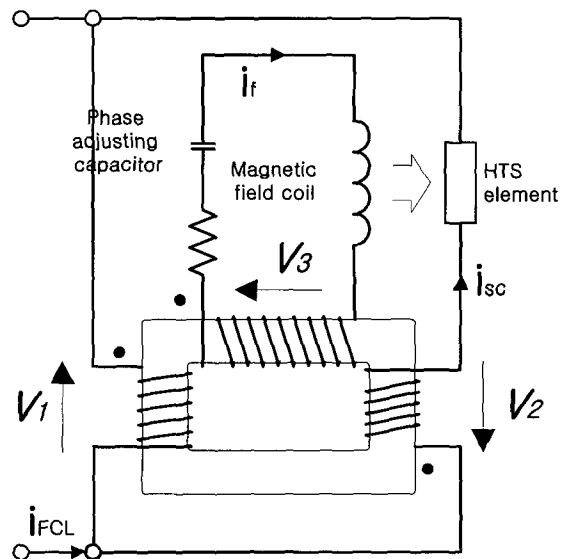


Fig. 1. Scheme of the Flux-Lock type HTSC Fault Current Limiter

2) 특성해석을 위한 모델 및 설계 파라미터 결정

위와 같은 자속구속개념을 이용한 고온초전도한류기의 해석을 위한 등가회로(Fig. 2)로부터 고온초전도시편에 흐르는 전류(I_{SC})와 한류기전체에 해당되는 등가한류임피던스(Z_{FCL}) 및 자계인가회로에 흐르는 전류(I_F)는 다음과 같이 표현된다.

$$Z_{FCL} = \frac{j\omega L_1 R_{SC}}{R_{SC} + j\left\{\omega L^2 + \frac{\omega L_3}{R_3} R_{SC}\right\}} \quad (3)$$

$$I_{SC} = \frac{j\omega \sqrt{L_1 L} \cdot I_{FCL}}{R_{SC} + j\left\{\omega L^2 + \frac{\omega L_3}{R_3} R_{SC}\right\}} \quad (4)$$

$$I_F = \frac{j \frac{\omega \sqrt{L_1 L_3}}{R_3} R_{SC} I_{FCL}}{R_{SC} + j\left\{\omega L^2 + \frac{\omega L_3}{R_3} R_{SC}\right\}} \quad (5)$$

여기서 L_1, L_2, L_3 는 각 코일이 인덕턴스이며 R_3 는 자계인가회로의 저항성분, I_{FCL} 은 선로에서 한류기쪽으로 유입되는 전류를 나타낸다. 위 식에서 L 은 $L = \sqrt{L_1} \pm \sqrt{L_2}$ 으로 \pm 의 부호는 1,2차권선에 의한 자속의 증감방향에 따라 결정된다.

등가회로의 지배방정식을 가지고 자속구속개념을 이용한 고온초전도한류기의 차단동작특성

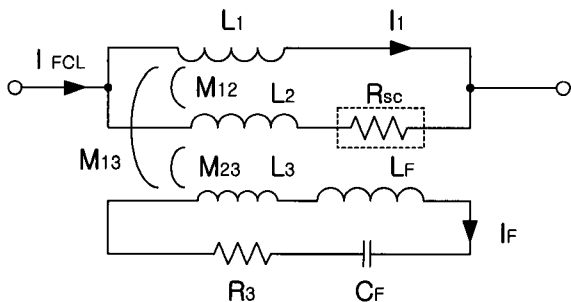


Fig. 2. Equivalent circuits of flux-lock type HTSC-FCL with ac magnetic field coil

에 대한 해석을 수행하였으며 동작특성을 나타내는 지표로서 한류임피던스 [$Z_{lim \ it}$]와 한류비 [$P_{lim \ it}$]를 파라미터로 해서 권치용량 [$R_{SC} I_C^2$]과 1차측 인덕턴스에 따라 별크나 박막형태로 제작된 고온초전도시편 단독으로 동작되는, 즉 저항형으로 동작시와 비교분석하였다.

3) 수치해석에 의한 특성해석

등가회로로부터 구한 방정식의 해를 구하기 위해 수치해석법으로 FDM(Finite Difference Method)을 이용하였으며 이를 이용한 지배방정식은 아래와 같이 전개되고 단락사고시의 동작특성을 구현하기 위해 사용한 고온초전도시편과 1,2,3차코일의 사양을 Table 1에 나타내었다.

고온초전도시편의 외부자계인가에 따른 임계전류의 감소와 상전도저항의 증가를 참고문헌 [6]를 참고하여, 수치해석에 적용한 인가자계에 따른 상전도저항과 임계전류와의 관계를 Fig. 3에 나타내었다.

$$R(n) = \begin{bmatrix} R_{in} + R_{load} & R_{in} + R_{load} + R_{sc} & 0 \\ 0 & -R_{sc} & 0 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix}$$

Table 1. Specification on Superconducting Rod, Coil Inductance, Main Voltage, Line Impedance and Load

Parameter	Unit
Main & Load	
Main voltage	400 [V]
Line Impedence	
Rin	0.08 [Ohm]
Lin	1.2 [mH]
Load Impedence	25 [Ohm]
Coil Inductance & Series Resistance	
L1	80 [mH]
L2	50 [mH]
L3	10 [mH]
R3	100 [Ohm]
Superconducting Rod	
Ic	30 [A]
Rn	10 [Ohm]

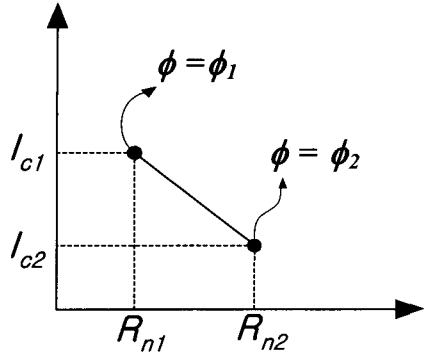


Fig. 3. Normal conduction resistance and critical current dependent on ac magnetic field

$$X(n) = \begin{bmatrix} (L_{in} - M_{12}) & (L_{in} + L_2) & M_{23} \\ (L_1 + M_{12}) & -(M_{12} + L_2) & -(M_{13} + M_{23}) \\ -M_{13} & M_{23} & (1/C_F)(\Delta t)^2 + L_F + L_3 \end{bmatrix}$$

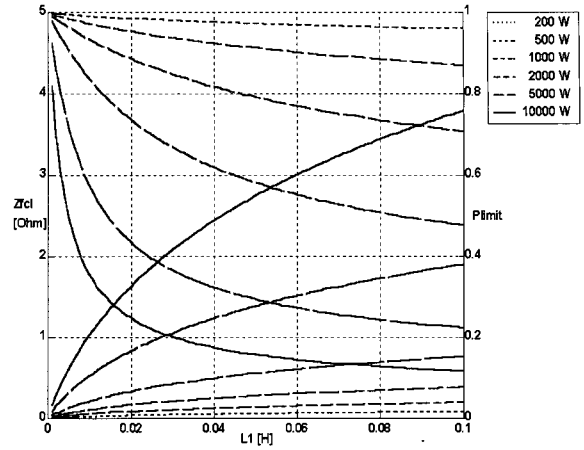
$$I(n) = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_F \end{bmatrix}, \quad \Delta I(n) = \begin{bmatrix} \Delta I_1 \\ \Delta I_2 \\ \Delta I_F \end{bmatrix}, \quad E(n) = \begin{bmatrix} E \sin \omega t \\ 0 \\ -V_C \end{bmatrix}$$

$$\Delta I(n) = X(n)^{-1} E(n) \Delta t - X(n)^{-1} R(n) \cdot I(n) \cdot \Delta t$$

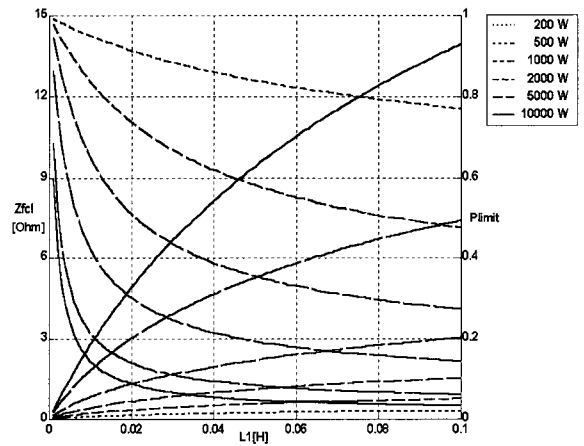
III. 특성 시뮬레이션 및 결과 분석

자속구속을 이용한 고온초전도한류기의 동작 특성을 고온초전도시편 단독으로 동작할 경우와 자계인가를 위한 제 3권선을 설치하지 않은 경우 및 설치한 경우의 3가지 경우에 대해 비교분석하였으며 이를 위해 차단특성을 비교할 수 있는 파라미터로 전체 한류임피던스 (Z_{FCL})와 한류비 (P_{limit})를 권치용량 ($R_{SC} I_C^2$)과 1차코일의 인덕턴스(L_1)의 함수로 전개하였다.

Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 자속구속개념을 이용한 고온초전도한류기는 권치용량과 1차측 인덕턴스가 증가함에 따라 한류임피던스가 증가함으로써 한류비가 향상되는 것을 확인할 수 있다. 이는 본 한류기가 대용량에 적용가능함을



(a) Without ac magnetic field coil



(b) With ac magnetic field coil

Fig. 4. Dependence of both equivalent limited impedance (Z_{FCL}) and current limiting factor (P_{limit}) of FCL on quench power and inductance of primary coil

을 보여주는 결과이기도 한다. 또한 자계인가 코일인 제 3권선이 설치된 경우의 한류 임피던스 및 한류비가 설치되지 않은 경우보다 향상되는 것을 확인할 수 있다.

이에 대한 고찰을 검증하기 위해 수치해석을 적용하여 시뮬레이션한 결과를 그림 5, 6에 제시하였고 고온초전도시편 단독인 저항형으로 동작시와 자속구속개념을 이용한 경우의 자계인가코일의 존재여부에 따라 제한되는 선로전류(I_1)의 크기 및 각각에 설치된 고온초전도시

편에 직접 도통되는 전류(I_{sc})를 비교하였다.

자계인가코일이 설치된 경우의 선로전류가 단독으로 동작시보다 비교적 작게 제한되는 것을 볼 수 있는 반면 설치되지 않은 경우엔 단독 동작시보다 별다른 제한이 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있는데 이는 앞의 그림 4에서 확인할 수 있듯이 자계인가코일이 설치된 경우의 한류임피던스가 설치되지 않은 경우보다 전체적으로 크게 나타나는 것과 일치한 결과이다.

사고시 각각의 고온초전도시편에 직접 도통되는 전류는 자계인가코일이 설치된 한류기에서 작게 도통되고 있는 것을 볼 수 있고 이는 자계인가코일을 갖는 자속구속개념을 이용할 경우, 소용량의 즉 임계전류가 작은 고온초전도체시편을 이용하여 기존의 저항형인 단독으로 동작시보다 큰 사고전류를 제한할 수 있음을 보여준다.

마지막으로 코일 3의 직렬저항에 따른 한류임피던스와 한류비의 변화에서 볼 수 있듯이 (Fig. 7) 자속구속개념을 이용하여 자계인가코일이 설치된 고온초전도한류기 설계시 적절한 한류임피던스를 얻을 수 있도록 직렬저항을 고려해서 삽입해야 되는 것을 확인할 수 있다.

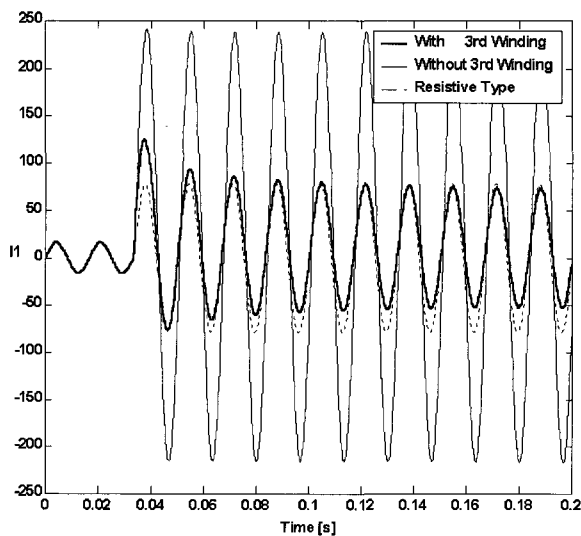


Fig. 5. Line current waveforms limited by FCL in short accident

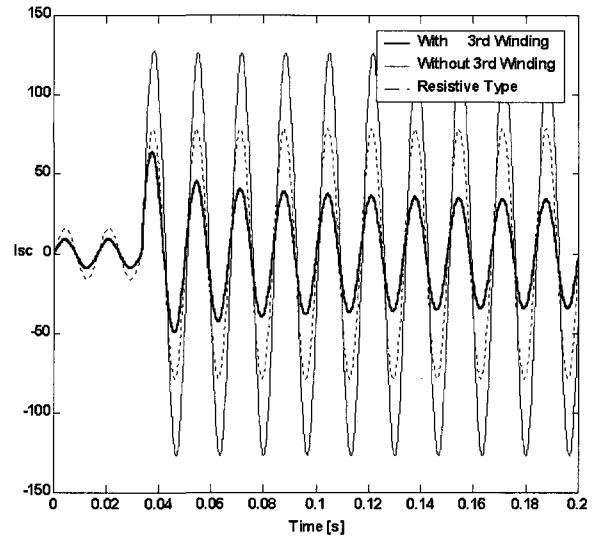


Fig. 6. Current waveforms passing through the Rod type superconducting element in short accident

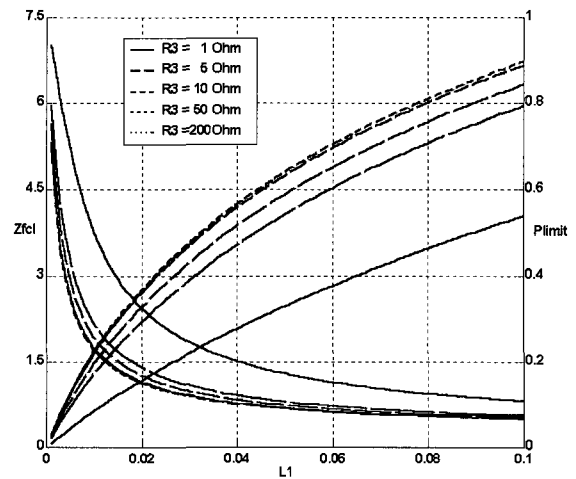


Fig. 7. Equivalent limited impedance (Z_{FCL}) and current limiting factor (P_{limit}) of FCL dependent on series resistance of 3rd winding

IV. 결 과

본 논문에서는 고온초전도체를 이용하여 한류기에 적용시 고온초전도체 제작에 따른 재료적인 제약으로 인한 문제점을 해결할 수 있는

자속구속개념을 이용한 고온초전도 한류기의 동작원리에 대해 고찰하고 벌크형태 및 박막형태로 제작된 작은 임계전류를 갖는 소형의 고온초전도체 시편을 이용하여 한류임피던스를 증가시킴으로서 보다 큰 사고전류를 제한할 수 있을 뿐 아니라 보다 큰 용량에 적용시 유리함을 시뮬레이션을 통해 분석, 검증하였다. 본 논문을 통하여 적절한 설계파라미터를 조사함으로써 실제동작실험을 위한 설계자료로 이용하고자 한다

References

- [1] R. K. Smith, P. G. Slade, M. Sarkozi, E. J. Stacey, solid state Distribution Current Limtter and Circuit Breaker Application: Requirements and control Strategies ", Ieee Trans. on Power Del., Vol. 8, pp.1155-1164, Jul., 1993
- [2] V. D. Pham Y. Laumoud T. Verhaege* A. Fevrier* M. Collet M. Bekhaled, "Towards The Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., VOL. 6, No. 2, pp. 801-808, April 1991
- [3] Min seok Joo and Tae Kuk Ko, "The Analysis of the Fault Currents According to Core Saturation and Fault Angles in an Inductive High-Tc superconducting Fault Curret Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., NO. 2, pp. 62-67, VOL. 6, JUNE 1996
- [4] B. Gronoll, G. Ries, W. Schmidt, H.-P. Kraemer, B. Seebacher, B. Utz, R. Nies and H.-W. Newmuller, Siemens AG, "Resistive Fault Current Limiters with YBCO films - 100kVA Functional Model", IEEE Trans. on Appl. Supercond., NO. 2, pp. 656-659, VOL. 9, JUNE 1999
- [5] H. Kado and M. Ichikawa, "Performance of A High-Tc Superconducting Fault Current Limiter -Design of A 6.6kV Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Appl. Supercond., NO. 2 pp. 993-996, VOL. 7, JUNE 1997
- [6] K. Kato, T. Noda, H. Shimizu, et al., "Increase in Transient Resistance of Bi2223 Superconducting Bulk by Applying External Magnetic Field", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 11, pp. 2094-2097, March, 2001
- [7] C. A. Falcone, J. E. Beehler, W. E. Mekolites and J. Grazen, "Current Limiting Device - A Utility's Need", IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, pp.1768-1775, Nov., 1974.
- [8] E. Thuries, et al., "TOWARDS THE SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER", IEEE Trans. on Power Del., Vol. 6, pp. 801-808, April, 1991.
- [9] W. paul, J. Rhyner, Th. Baumann and F. Platter, "Fault Current Limiters Based on High Temperature Superconductors", Inst. Phys. Conf. Ser. No 148, pp.73-78, (1995)
- [10] E. M. Leung, et al., "High Temperature Superconducting Fault Current Limiter Development", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp.985-988, Jun., 1997.
- [11] Lembit Salasoo, "Comparison of superconducting fault limiter concepts in electric utility applications", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 5, pp.1079-1082, Jun., 1995.
- [12] T. Matsumura, T. Uchii, Y. Yokomizu, "Development of Flux-Lock-Type Current Limiter with High-Tc Superconducting Element", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp.10011004, Jun., 1997.
- [13] J. R. Cave, D. W. A. Willen, R. Nadi, W. Zhu, A. Paquette, R. Boivin and Y. Brissette, "Testing and Modelling of Inductive Superconducting Fault Current Limiters", IEEE Trans. on Appl. Supercond., Vol. 7, pp.832-835, Jun., 1997.
- [14] Willi Paul and Makan Chen, "Superconducting control for surge currents", IEEE Spectrum, pp. 49-54 May, 1998.