사병렬 초전도코일의 전류분류 측정을 위한 Rogowski 코일의 제작 및 특성 실험

Design and test results of a Rogowski coil for measurement of current distribution characteristics in 4-parallel superconducting coils

조대호[1,*], 양성은[1], 김민재[1], 안민철[2], 박동근[1], 배덕권[3], 석복렬[4], 고태국[5]

Dae-Ho Cho[1,*], S. E. Yang[1], M. J. Kim[1], M. C. Ahn[2], D. K. Park[1], D. K. Bae[3], B. Y. Seok[4], and T. K. Ko[5]

Abstract: Large critical current is one of the prerequisites for the design of superconducting electrical equipments with large power capacity. To enlarge the critical current, multiple parallel connection is inevitable. In multiple parallel superconducting coils, the difference in normal resistance of each shunt leads to unequal current distribution, which may yield burnout. Therefore, uniform current distribution is required for a stable operation of multiple parallel superconducting coils. In this paper, Rogowski coils were fabricated to measure each shunt current of a 4-parallel superconducting coil. Four Rogowski coils were installed at the copper bars, which are used as current leads in superconducting coils. As a result, linearity of the Rogowski coils was ascertained and coefficients of each coil, the ratio of voltage and current, were derived. The coefficients were compared with theoretically calculated values. Based on the coefficients, each shunt current was calculated in a 4-parallel superconducting coil, where uniform current distribution was confirmed. This paper verified the feasibility of the fabricated Rogowski coils as well as operational stability of the 4-parallel superconducting coil in 77K.

Key Words: Rogowski coil, superconductor, current distribution.

1. 서 론

초전도 전력기기의 설계에 있어서 정격 전력 용량을 제한하는 요소 중 하나는 임계 전류이다. 따라서 초전도 전력기기의 정격 전력 용량을 높이기 위해서는 초전도 코일에서 다병렬 연결을 통해 임계 전류를 증가시켜야 한다[1]. 정상 시 다병렬 초전도 코일에 인가된 전류는 각각의 병렬구조의 저항 및 인덕턴스에 반비례하게 분류된다.

[1]학생회원 : 연세대 대학원 전기전자공학부
[2]정 회 원 : 기초전력연구원
[3]정 회 원 : 충주대 공대 안전공학과
[4]정 회 원 : 현대중공업 기계전기연구소
[5]정 회 원 : 연세대 공대 전기전자공학부
*교신저자 : juny978@hanmail.net
원고접수 : 2007년 1월 4일
심사완료 : 2007년 3월 7일

초전도 코일에서도 전류 리드의 저항, 초전도체와 전류 리드를 연결하는 부분의 접촉저항 등에 의해 발생한 저항은 액체 질소 환경에서 수 mΩ에 불과하지만 그 미세한 차이와 인덕턴스에 의해 전류 분류가 이루어지므로 상대적으로 저항과 인덕턴스가 작은 각각의 병렬구조에서는 큰 전류가 편중되어 흐르게 되면서 사고 시 줄열에 의한 초전도 선재의 파단을 야기하는 등 초전도 코일의 안정성을 저해하게 된다[2-3]. 따라서 다병렬 초전도 코일의 정상적 동작을 위해서는 전류 분류의 균일성이 일정 수준 확보되어야 한다.

본 논문에서는 사병렬 초전도코일의 각 선재에 흐르는 전류분류를 측정하기 위해 Rogowski 코일을 제작하여 실험하였다. G-FRP를 골격으로 하는 네 개의 Rogowski 코일을 제작하였으며 제작된 코일의 외부적인 영향을 확인하기 위해 사병렬 초전도 한류기의 전류리드로 사용되는 구리 바를 다양한 형태로 가공하여 각 구리 바에 흐르는 전류를 측정하였고 정상시 사병렬 코일의 전류분류를 확인하였다. 측정 결과 제작된 코일에 흐르는 전류에 따라 유도되는 전압을 측정하였으며 이론적으로 계산한 수치와 비교 분석하였다.

2. 본 론

2.1. Rogowski 코일의 원리

Fig. 1은 Rogowski 코일을 이용하여 전류를 측정하는 원리를 나타낸 그림이다.

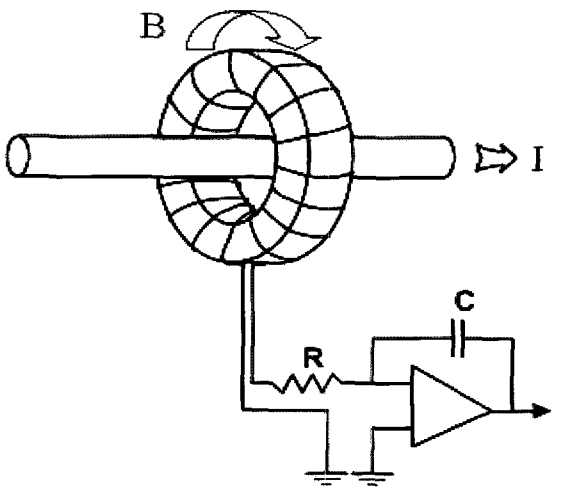

Fig. 1. Schematic of Rogowski Coil.

암페어(Ampere)법칙과 패러데이(Faraday)법칙으로부터 도체에 흐르는 전류 I에 의해 발생하는 자속 Φ의 시간적 변화에 따른 유도전압 V를 적분함으로서 전류 I를 측정할 수 있다.

암페어 법칙으로부터

$$\oint H \cdot dl = \int_0^{2\pi} H \frac{a+b}{2} d\phi = I \tag{1}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{\pi(a+b)} \tag{2}$$

패러데이 법칙으로부터

$$V_{coil} = -n\frac{d\Phi}{dt} = -nA\frac{dB}{dt} = -\frac{\mu_0 n A}{\pi(a+b)}\frac{dI}{dt} \tag{3}$$

또한 $I = I_0 \sin \omega t$라 하고 적분기를 통과하면

$$V_{out} = \frac{1}{RC}\int V_{coil}\, dt = [\frac{1}{RC}\frac{\mu_0 \omega n A}{\pi(a+b)}] I_0 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \tag{4}$$

이 된다. 여기서 a는 코일의 내경, b는 코일의 외경, A는 코일의 단면적, n은 코일의 권선 수이다. 최종적으로 주어진 전류에 대해 V_{out}은 $\frac{\mu_0 \omega n A}{\pi RC(a+b)}$ 배 증폭되고 $\frac{\pi}{2}$지연될 것임을 알 수 있다.

2.2. Rogowski 코일과 사병렬 초전도코일의 제작

사병렬 초전도 코일의 전류분류를 확인하기 위하여 G-FRP를 골격으로 하는 네 개의 Rogowski 코일을 제작하였으며 Fig. 2에서 좌측으로부터 코일 1과 2는 Lakeshore™ Cryogenic wire, 코일 3과 4는 enameled copper wire를 사용하여 각각 500, 300턴을 권선하였다. 골격의 내경과 외경 그리고 높이는 각각 25, 45, 10 mm으로 골격의 단면적이 1 ㎠가 되도록 제작하였다. 또한 사병렬 초전도코일의 전류 리드로 사용되는 구리 바의 형태에 따라 Rogowski 코일이 받는 영향을 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 I자 형태와 U자 형태로 제작하였으며 구리 바에 Rogowski 코일을 고정하기 위하여 테프론(Teflon) 테이프를 사용하였다. U자 형태에서는 실제의 사병렬 초전도 코일에서와 같이 중앙이 아닌 한 쪽으로 치우쳐 Rogowski 코일을 위치시켰다. 또한 Fig. 4와 같이 각각의 구리 바에 흐르는 전류에 의한 자기장이 Rogowski 코일에 주는 영향과 초전도 선재를 제외한 실제 구리 바만의 전류분류를 확인하기 위하여 초전도 선재만을 제외한 십자 모양의 구리 바를 제작하였다.

Fig. 5는 AMSC사의 임계전류 53 A, 두께 0.16 mm, 너비가 4.4 mm인 344 stainless 선재를 4.4 m씩 사병렬로 총 18 m를 권선한 초전도 코일의 모습이다.

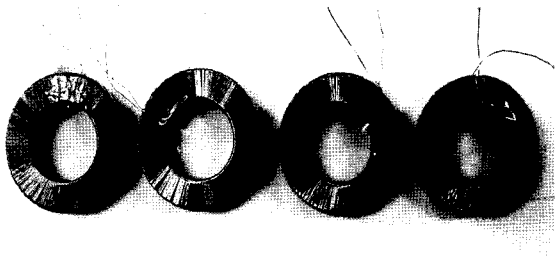

Fig. 2. Rogowski Coil.

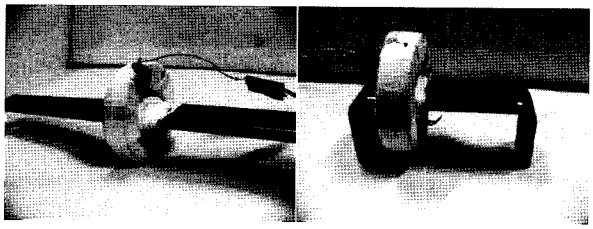

Fig. 3. I-shaped and U-shaped copper bars.

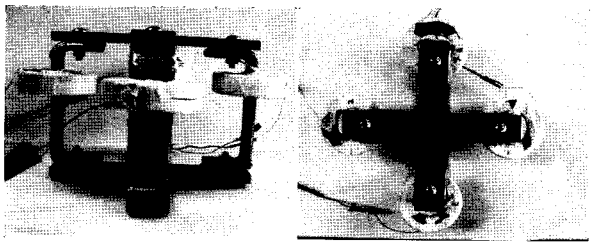

Fig. 4. Multi U-shaped copper bar.

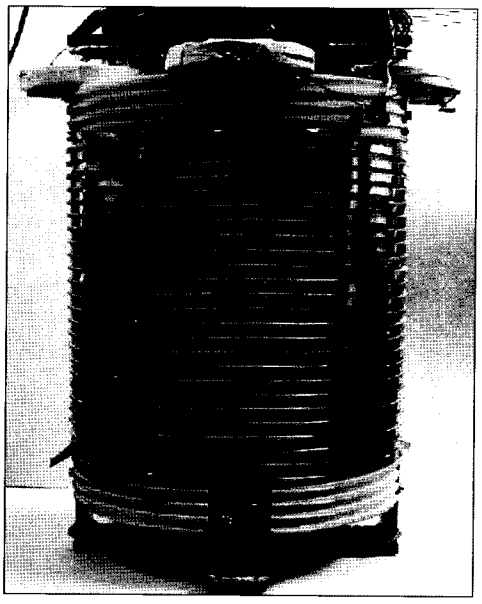

Fig. 5. 4-parallel superconducting coil.

2.3. 전류분류 실험 결과 및 분석

사병렬 초전도코일의 실험에 앞서 Rogowski 코일의 선형성과 제작된 코일의 외부적인 영향을 확인하기 위하여 각각의 코일에 다양한 전류를 흘려 그 때 나타나는 코일의 전압값을 측정하였다. 그 결과 Table 1에서와 같이 각각의 전류에 따른 전압의 비가 일정함을 알 수 있었고 전류 리드로 사용되는 구리 바의 형태에 따라서도 그 비가 일정함을 알 수 있었다. 이는 앞에서의 V/I 는 턴 수에 비례한다는 계산에서와 같이 500 턴을 권선한 코일 1, 2의 전압과 전류의 비는 0.115, 300 턴을 권선한 코일 3, 4의 전압과 전류의 비는 0.070으로 이론상의 수치와 거의 일치하는 결과임을 확인하였다. 또한 구리 바의 형태에 관계없이 이론상의 계산과 같이 전압의 $\pi/2$만큼의 지연이 나타남을 Fig. 6의 그래프를통해 확인할 수 있었다.

Table 1. The ratio of current to voltage with respect to shape of copper bars.

			I자형	U자형
Coil No.	I	V	V/I	V/I
1	19.8	2.3	0.116	0.116
	39.5	4.5	0.115	
	59.2	6.8	0.115	
2	19.8	2.2	0.114	0.115
	39.5	4.5	0.114	
	59.2	6.8	0.114	
3	19.8	1.4	0.070	0.070
	39.5	2.8	0.071	
	59.2	4.2	0.071	
4	19.8	1.4	0.069	0.070
	39.5	2.8	0.070	
	59.2	4.1	0.070	

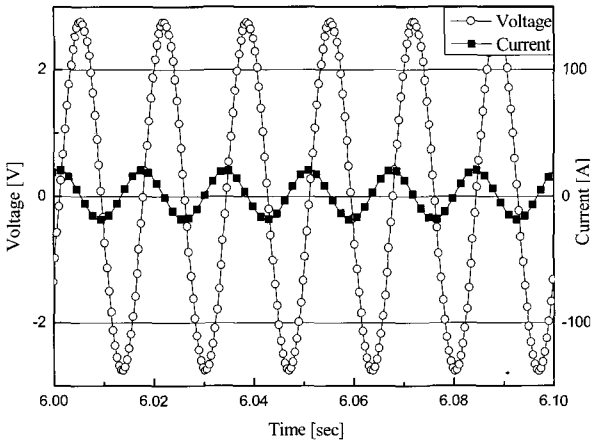

Fig. 6. Voltage graph of Rogowski coil according to current.

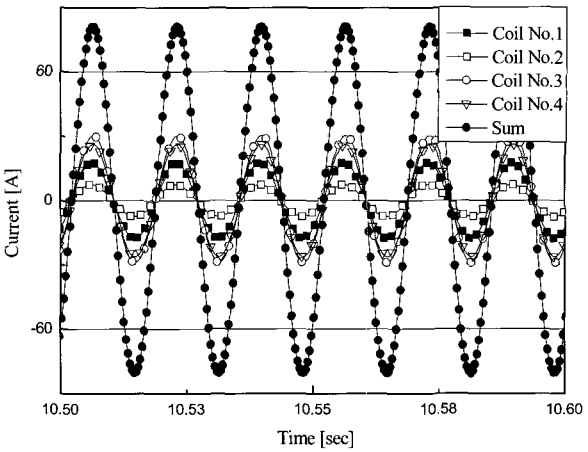

Fig. 7. Each voltage graph of multi U-shaped.

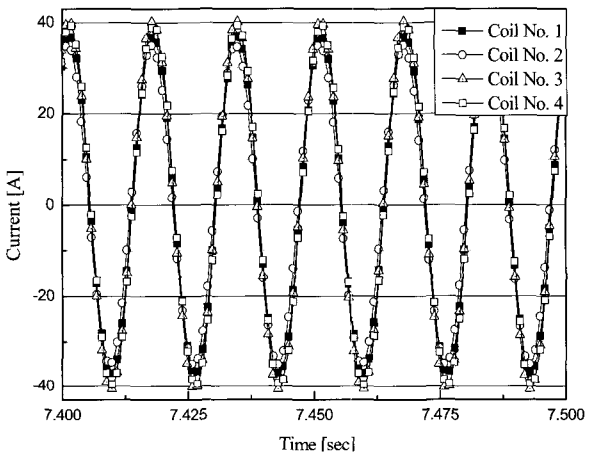

Fig. 8. Current distribution of 4-parallel superconducting coil.

사병렬 초전도코일의 전류분류 실험에 앞서 십자 모양의 구리 바에 네 개의 Rogowski 코일을 고정시켜 다양한 전류를 흘려준 결과 중 하나를 Fig. 7에 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 십자모양의 구리와 구 리 바 사이의 접촉 저항에 의해 전류분류의 문제를 보이지만 각각의 합이 80 A로서 전류분류가 이루어지지 않았을 때에도 역시 Rogowski 코일의 신뢰성을 얻을 수 있는 실험이었다. 또한 인접한 구리 바에 흐르는 전류에 기인한 자기장에 의한 영향을 확인하기 위해 사병렬중 하나의 선재에만 터미널과 절연을 하고 300 A의 전류를 인가하였을 때 절연된 선재의 Rogowski 코일에서 0.06 A의 전류가 검출되었다. 이는 0.02%의 오차로 전류분류 실험에 있어서 인접도선에 흐르는 전류에 의해서 크게 영향을 미치지 않는다고 할 수 있다.

본 논문에서 제작된 Rogowski 코일의 선형성과 안정성이 입증되었으므로 Fig. 4와 같이 사병렬 초전도 코일 각각의 선재에 제작한 Rogowski 코일을 붙여 20 A부터 160 A까지 20 A간격으로 전류의 변화를 주어 그에 따른 전압을 측정하였다. 각각의 전류에 대하여 그 결과의 경향이 모두 같았으며 Fig. 8에서 보는바와 같이 각각의 선재는 35 A에서 40 A로 측정되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 사병렬 초전도코일의 전류분류 측정을 위하여 두 쌍의 서로 다른 종류의 Rogowski 코일을 제작하였으며 사병렬 초전도 한류기의 전류 리드로 사용되는 구리 바를 I자와 U자 그리고 십자 형태로 제작하여 실험하였다. I자와 U자 형태의 구리 바를 통한 실험에 의해 형태와 코일의 종류와 관계없이 전압과 전류의 비는 일정한 선형성을 보였으며 단지 전압은 코일에 감은 턴 수에만 비례한다는 사실을 확인할 수 있었으며 이는 이론적 계산과도 일치함을 알 수 있었다. 또한 십자 형태의 실험을 통해 본 논문에 제작된 Rogowski 코일이 전류분류와 상관없이 안정적임을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 액체 질소 내에서 사병렬 초전도코일의 전류 분류를 측정한 결과 20 A에서 160 A까지 전류에서 각각의 선재가 전류를 분담하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 초전도 코일의 정상적 동작을 하기위한 전류 분류의 균일성이 일정 수준 확보되었다고 판단할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Nalty, K, Zowarka, R. Holland. L, "Instrumentation for EM Launcher Systems," IEEE Transactions on Magnetics, Vol 20, Issue 2, pp. 328-331. March 1984.

[2] D. K. Bae, Y. S. Yoon, H. Kang, M.C.Ahn, S. Lee, T.K.Ko, "Current sharing in multi-stacked HTS solenoid coil," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.25, NO.3, pp. 791-795, June 2004.

[3] J. W. Sim, Y. S. Choi, H. R. Kim, O. B. Hyun, "Equal current distribution in parallel circuits of resistive superconducting fault current limiters using multiple superconducting inter-phase transformers," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.15, NO.2, pp. 2122-2125, June 2005.

저 자 소 개

조대호(趙大鎬)
1978년 04월 12일생, 2004년 단국대 공대 전자공학과 졸업, 현재 연세대학원 전기전자공학부 석사과정.

양성은(梁盛銀)
1978년 12월 3일생, 2003년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.

김민재(金民宰)
1979년 7월 27일생, 2006년 연세대학교 공대 전기전자공학과 졸업, 현재 동 대학원 전기전자공학과 석사과정

안민철(安敏哲)
1976년 9월 20일생, 1999년 연세대 공대 전기공학과 졸업, 2001년 동 대학원 전기·컴퓨터공학과 졸업(공학석사), 2006년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사). 현재 기초전력연구원 연구원.

박동근(朴東瑾)
1980년 11월 4일생, 2003년 연세대 공대 기계전자공학부 졸업, 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사), 현재 동 대학원 전기전자공학과 박사과정.

배덕권(裵德權)
1971년 8월 16일생, 1998년 광운대학교 전기공학과 공학사, 2000년 동 대학원 전기공학과 공학석사, 2005년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사) 2005년 9월~2006년 8월 한국기계연구원 선임연구원, 현재 충주대학교 안전공학과 전임강사.

석복렬(石福烈)
1971년 2월 16일생. 1994년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1994년 10월~1995년 8월 국제단기교환유학생(일본 큐슈대학). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 3월 일본 큐슈대학 시스템정보과학연구과 졸업(공학박사). 2000년 4월~2001년 3월 일본 통상산업성 공업기술원 특별연구원(AIST fellow). 현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 책임연구원.

고태국(高太國)
1955년 7월 4일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (M.SC), 1986년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업 (Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대학교 전기전자공학과 교수, 현재 한국초전도·저온공학회 부회장.