

(12) 특허협력조약에 의하여 공개된 국제출원

(19) 세계지식재산권기구  
국제사무국

(43) 국제공개일  
2011년 1월 6일 (06.01.2011)



(10) 국제공개번호  
**WO 2011/002174 A2**

- (51) 국제특허분류:  
*G01R 19/255* (2006.01) *G01R 19/25* (2006.01)
- (21) 국제출원번호: PCT/KR2010/004082
- (22) 국제출원일: 2010년 6월 23일 (23.06.2010)
- (25) 출원언어: 한국어
- (26) 공개언어: 한국어
- (30) 우선권정보:  
10-2009-0058637 2009년 6월 29일 (29.06.2009) KR
- (71) 출원인 (US 을(를) 제외한 모든 지정국에 대하여): **한국기초과학지원연구원 (KOREA BASIC SCIENCE INSTITUTE)** [KR/KR]; 대전광역시 유성구 어은동 52, 305-333 Daejeon (KR).
- (72) 발명자: **김**
- (75) 발명자/출원인 (US 에 한하여): **박갑래 (PARK, Kap Rae)** [KR/KR]; 대전광역시 유성구 신성동 148-7 303호, 305-804 Daejeon (KR). **추용 (CHU, Yong)** [KR/KR]; 대전광역시 서구 만년동 상아아파트 105-906, 302-739 Daejeon (KR). **김영옥 (KIM, Young Ok)** [KR/KR]; 대전광역시 서구 만년동 상록수아파트 101-1004, 302-781 Daejeon (KR). **요네가와히로후미 (YONEKAWA, Hirofumi)** [KR/KR]; 대전광역시 유성구 지족동 열매마을 103-901, 305-769 Daejeon (KR).

(74) 대리인: 특허법인 대한 (PATENT LAW FIRM GRAND KOREA); 서울특별시 강남구 역삼동 735-36 부봉빌딩 2층, 135-080 Seoul (KR).

(81) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 국내 권리의 보호를 위하여): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), 유럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

공개:

- 국제조사보고서 없이 공개하며 보고서 접수 후 이를 별도 공개함 (규칙 48.2(g))

(54) Title: SIGNAL-PROCESSING METHOD FOR DETECTING A QUENCH OF A SUPERCONDUCTING MAGNETIC OPERATING CURRENT

(54) 발명의 명칭: 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법

(57) Abstract: The present invention relates to a signal-processing method for detecting a quench of a superconducting magnetic operating current. A quench-detecting apparatus for detecting a quench of a superconducting coil comprises: measuring means installed on a normal busbar which supplies current to the superconducting coil to measure the current of the superconducting coil; and processing means for interpreting the measurement value obtained by the measuring means through a mathematical algorithm to output a measurement value. The signal-processing method for outputting a measurement value from the processing means and detecting a quench of a tokamak system comprises: a step of removing a voltage offset from the measurement value of the secondary voltage detected by the measuring means; a step of removing the voltage noise of the second voltage using an integration method; and a step of removing the drift of a minute voltage for the voltage waveform of the secondary voltage.

(57) 요약서: 본 발명은 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법에 관한 것으로, 초전도 코일의 켄치를 검출하기 위한 켄치 검출 장치에서 상기 초전도 코일에 전류를 공급하는 노말 버스바에 설치되어 초전도 코일의 전류를 측정하는 측정수단과, 상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 측정값을 출력하는 처리수단 및 상기 처리수단에서 검출된 측정값을 전달받아 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 신호처리방법에 있어서, 상기 측정수단에 의해 검출된 2차전압의 측정치에 포함된 전압 오프셋을 제거하는 단계, 적분법을 사용하여 상기 2차전압의 전압 노이즈를 제거하는 단계 및 2차전압의 전압파형에 대한 미소전압 드리프트를 제거하는 단계를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.

WO 2011/002174 A2

## 명세서

### 발명의 명칭: 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법

#### 기술분야

- [1] 본 발명은 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법에 관한 것으로, 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위해 측정된 코일전류의 효과적인 처리방법을 위한 신호처리방법에 관한 것이다.

#### 배경기술

- [2] 최근 세계적으로 에너지 개발에 관심이 부각되면서 향후 대체 에너지를 개발하기 위해 현재 국내에서 개발 중인 핵융합 실험장치인 초전도 토카막 장치(KSTAR : Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)는 플라즈마 상태의 중수소를 강한 자기장으로 가두기 위한 토로이달(TF) 코일(TF 초전도 코일)과, 플라즈마를 발생시키고 그 위치와 모양을 제어하기 위한 포로이달(PF) 코일(PF 초전도 코일)들로 구성 및 중심 코일(CS 초전도 코일)로 구성된다.
- [3] 현재까지 개발된 초전도 코일은 지구자장의 26만 배에 달하는 13테슬라의 자장을 얻을 수 있으며, 이러한 자장은 핵융합 반응에서 요구되는 플라즈마를 만들고 가두기 위해 필요한 것이다. 따라서 초전도 코일의 핵심 기술은 '관내연선도체(CICC : Cable-in Conduit-Conductor)라고 알려진 각각의 전선을 감아 코일을 형성하여 초전도 코일을 제조함에 있다.
- [4] 관내연선도체(CICC)는 35kA급의 대전류 운전을 위해서 360 또는 486가닥의 선재를 사각형의 금속관으로 둘러싸인 방식의 도체를 사용하여 자석을 제작하는 것으로, 초전도 코일의 운전 시 침입 또는 발생하는 열을 4.5K로 냉각하기 위해 약 5기압의 초임계 헬륨을 관내연선도체로 강제 순환시킨다.
- [5] 도 1은 국내에서 제작되는 초전도 코일을 일례로 나타낸 도면이다. 도시된 바와 같이 초전도 코일(SC Magnet)은 고온의 플라즈마를 진공용기 벽에 닿지 않고 가두기 위한 것으로, 그 주요장치인 토카막장치를 보유하고 있다. 상기 토카막장치는 TF(Toroidal Field) 및 PF(Poloidal Field) 코일을 사용하여 플라즈마의 생성, 구속 및 제어를 담당한다.
- [6] TF(Toroidal Field) 및 PF(Poloidal Field)코일로 구성된 TF 초전도 코일(101)과 CS(Central Solenoid)코일로 구성된 CS 초전도 코일(103)과, PF(Poloidal Field)코일로 구성된 PF 초전도 코일(102) 및 각 초전도 코일을 연결하는 연결구조물로 이루어진다.
- [7] 상기 TF 초전도 코일(101 ; 코일)은 약 35KA의 직류전류로 운전되며, 상기 CS 초전도 코일(103)과 PF 초전도 코일(102)은 펄스운전을 하여 상호 자장변화에 의한 기전력을 토러스(도우넛) 형상의 진공용기 내부에 발생시켜 플라즈마를 생성하고 플라즈마 전류 및 TF 자장과 함께 플라즈마를 구속시키는 역할을

수행한다.

- [8] 이러한 초전도 코일은 운전 도중 AC 손실(자기장 변화에 따른 전압의 유도로 발생된 전류에 의해 발생하는 손실; 페르데이 법칙, 오옴의 법칙), 선재와 선재사이의 마찰 혹은 선재와 지지물 사이의 마찰 그리고 접촉저항에 의한 주울(Joule)열 발생 등의 연속적인 교란에너지가 존재한다. 이러한 현상으로 인해 초전도성을 잃고 상전도로 변화는 현상을 켄치(Quench)라 하며, 켄치는 선재의 온도상승을 만들게 되며 자석의 어떤 부분의 초전도성을 파괴시킨다.
- [9] 만약 초전도성을 잃게 된 영역의 최소전파영역(Minimum propagation zone ; MPZ)보다 크게 되면 상전도 영역에서의 열 발생, 냉매로의 열전달, 그리고 비열과 열전도도에 의한 열 흡수 등의 복잡한 전기적, 열적현상에 의해 상전도 영역은 그 영역을 확장하게 된다.
- [10] 이러한 과정 동안 켄치 초기 발생점은 가장 긴 시간동안 주울열 발생에 노출되어 있기 때문에 가장 높은 온도상승을 일으킨다. 국부적인 온도상승은 자석에 심각한 영향을 가져다 줄 수 있으며, 온도상승이 어느 정도 범위에 제한되어진다고 할지라도 상전도 영역에서 나타나는 수천 내지 수만 볼트의 과전압은 권선 사이 아크의 원인이 되기도 한다.
- [11] 이러한 문제점을 해소하기 위한 토카막 장치의 초전도 코일은 켄치 검출 시스템이 필요한데, 초전도 코일의 형태 및 운전 조건 등을 고려하여 능동형 켄치 방식(Active Quench Protection)이 요구된다.
- [12] 따라서 초전도 토카막 장치의 안정적인 운전을 위해 앞서 설명한 바와 같은 요소들에 의해 발생하는 켄치를 검출하는 장치가 요구되며, 또한, 24시간 가동되는 토카막 장치의 특성상 실시간으로 켄치 발생여부를 감시할 수 있는 시스템이 요구된다.
- [13] 이에 따라 본 출원인은 대한민국 특허출원 제2007-00085134호 "초전도 토카막 장치의 켄치 검출장치 및 실시간 켄치 감시시스템"을 출원한 바와 있다. 이것은 전압탭 센서를 통해 발산된 에너지를 검출하는 것으로, 켄치 검출 방식은 운전 도중에 초전도 코일에 설치된 전압탭 센서의 신호를 이용하여 켄치를 판단하며, 켄치가 검출되면 저장된 에너지가 자석이 아닌 외부의 장치에서 빠르게 소비될 수 있도록 적절한 조치를 취해줄 수 있는 기술개발을 달성하였다.
- [14] 하지만, 종래 켄치 검출장치는 코일에 부착된 전압탭 센서를 이용하기 때문에 센서 신호와 코일 전류와의 관계를 알 수 없기 때문에 코일 전류와 전압 신호의 상호 분석이 켄치 검출 장치의 안정성을 향상하기 위해서는 반드시 필수적이다.
- [15] 초전도 코일의 전류를 측정하는 장치로 가장 단순한 형태의 셉트 저항은 직접 노말 버스에 결합하는 형태이므로 설치가 어렵고, Joule 발열 문제로 장치의 대형화를 초래하며, DC current transformer(DCCT)도 직접 노말 버스에 결합하는 형태로 높은 전류를 측정하기 위해서는 매우 높은 비용이 요구되는 문제점이 있다.
- [16] 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 출원인은 노말 버스에 설치되어

코일전류를 측정함으로써 초전도 자석의 켄치 발생여부를 검출하기 위한 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 개발한 바 있으나, 초전도 코일에서 측정된 전류를 이용하여 보다 정확하게 켄치 검출여부를 확인하기 위한 신호처리개발이 필요한 실정이다.

[17]

## 발명의 상세한 설명

### 기술적 과제

[18] 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 본 발명은 초전도 코일의 켄치를 검출하기 위해 코일전류를 측정하고, 측정된 전류를 효과적으로 처리하여 신뢰성 높은 켄치 발생여부 판단을 달성하기 위한 것에 그 목적이 있다.

### 과제 해결 수단

[19] 상기와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명은 초전도 코일의 켄치를 검출하기 위한 켄치 검출 장치에서 상기 초전도 코일에 전류를 공급하는 노말 버스바에 설치되어 초전도 코일의 전류를 측정하는 측정수단과, 상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 측정값을 출력하는 처리수단 및 상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 측정값을 출력하는 처리수단 및 상기 처리수단에서 검출된 측정값을 전달받아 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 신호처리방법에 있어서, 상기 측정수단에 의해 검출된 2차전압의 측정치에 포함된 전압 오프셋을 제거하는 단계, 적분법을 사용하여 상기 2차전압의 전압 노이즈를 제거하는 단계 및 2차전압의 전압파형에 대한 미소전압 드리프트를 제거하는 단계를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.

[20] 또한, 상기 전압 오프셋 제거단계에서는, 채널 2 내지 채널 5를 통해 상기 측정수단으로부터 측정되는 2차전압 출력을 접속시키고, 상기 채널간 평균은, 
$$V_{ch2-ch5} = \frac{1}{4} (V_{ch2} - V_{ch3} + V_{ch4} - V_{ch5})$$
에 의해서 산출되는 것을 특징으로 한다.

[21] 또한, 상기 전압 오프셋 제거단계에서는, 장주기의 리플 주기를 나누고, 이 주기의 정수배의 시간에 걸쳐 2차전압 파형을 측정하여 상가 평균하는 것에 의해 전압 오프셋을 산출하는 것을 특징으로 한다.

[22] 또한, 상기 미소 전압 드리프트 단계는, 수학적

[23] 
$$Round(V, \Delta V) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V}{|V|} \left[ \frac{|V|}{k_i \Delta V} \right] k_i \Delta V$$
에 의해 미소한 전압

드리프트가 잔류하고 있는 2차전압 파형을 1차전류 파형으로 환산하여 제거하는 것을 특징으로 한다.

- [24] 또한, 상기 측정수단은, Rogowski코일을 사용하는 것을 특징으로 한다.  
 [25] 또한, 상기 측정수단은, 수학적

$$I(t) = \int_0^t \frac{di}{dt} = \frac{1}{K_R} \int_0^t e_s dt$$

전압을 시간 적분하여 측정값을 산출하는 것을 특징으로 한다.

- [26] 또한, 상기 측정수단은, 상기 노말 버스바에 설치되어 이와 자기적으로 결합함에 따라 core-less 트랜스를 형성하는 것에 의해 전류를 검출하는 것을 특징으로 한다.  
 [27] 또한, 상기 처리수단은, 상기 측정수단과 연결되는 터미널, 상기 터미널에서 제공되는 전압을 전달받는 증폭부, 상기 증폭부에서 제공되는 전압값을 수치화하는 디지털라이저 및 상기 디지털라이저를 통해 제공되는 전압값을 수학적 모델링을 통해 해석하여 켄치 발생여부를 검출하는 컴퓨터로 구성되는 것을 특징으로 한다.  
 [28] 또한, 상기 전압 오프셋 제거단계에서는, 샘플마다 반복 평균한 결과에서 오프셋을 제거하는 것을 특징으로 한다.

### 발명의 효과

- [29] 상기와 같이 구성되고 작용되는 본 발명은 Rogowski코일을 통해 초전도 자석의 전류를 측정하고 오차값을 제거하여 켄치 발생여부를 정확하게 판단할 수 있는 이점이 있다.

### 도면의 간단한 설명

- [30] 도 1은 본 발명에 따른 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법의 개략적인 순서도,  
 [31] 도 2는 본 발명에 따른 채널 2 내지 채널 5에서 측정된 2차전압 파형과 채널간 평균 파형 및 2차전압 파형의 주파수 분포를 나타낸 도면,  
 [32] 도 3은 2차 파형에서 오프셋을 제거하고 5000샘플마다에 반복 평균한 결과를 나타낸 도면,  
 [33] 도 4는 채널 평균의 오프셋 적절 및 오프셋 부적절 결과를 나타낸 도면,  
 [34] 도 5는 가 적분법이 사용된 시간 파형 및 주파수 분포를 나타낸 도면,  
 [35] 도 6은 끝수 처리를 사용하지 않은 2차전류의 산출 결과를 나타낸 도면,  
 [36] 도 7은 끝수 처리의 상가평균법을 사용한 1차전류의 산출(100 A/s, 5 kS/s) 결과를 나타낸 도면,  
 [37] 도 8은 끝수 처리의 상가평균법을 사용한 1차전류의 산출(20 A/s, 5 kS/s) 결과를 나타낸 도면,  
 [38] 도 9는 본 발명에 따른 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치를 나타낸 개략도.  
 [39] <도면의 주요부분에 대한 부호의 설명>  
 [40] 100 : 측정수단 200 : 처리수단

- [41] 210 : 터미널 220 : 증폭부
- [42] 230 : 디지털라이저 240 : 컴퓨터
- [43] 300 : 중앙처리수단 400 : 초전도 코일
- [44] 410 : 노말 버스바

### 발명의 실시를 위한 형태

- [45] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법의 바람직한 실시예를 상세히 설명하면 다음과 같다.
- [46] 도 1은 본 발명에 따른 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법의 개략적인 순서도, 도 2는 본 발명에 따른 채널 2 내지 채널 5에서 측정된 2차전압 파형과 채널간 평균 파형 및 2차전압 파형의 주파수 분포를 나타낸 도면, 도 3은 2차 파형에서 오프셋을 제거하고 5000샘플마다에 반복 평균한 결과를 나타낸 도면, 도 4는 채널 평균의 오프셋 적절 및 오프셋 부적절 결과를 나타낸 도면, 도 5는 가 적분법이 사용된 시간 파형 및 주파수 분포를 나타낸 도면이다.
- [47] 도 6은 끝수 처리를 사용하지 않은 2차전류의 산출 결과를 나타낸 도면, 도 7은 끝수 처리의 상가평균법을 사용한 1차전류의 산출(100 A/s, 5 kS/s) 결과를 나타낸 도면, 도 8은 끝수 처리의 상가평균법을 사용한 1차전류의 산출(20 A/s, 5 kS/s) 결과를 나타낸 도면, 도 9는 본 발명에 따른 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치를 나타낸 개략도이다.
- [48]
- [49] 우선, 본 발명에 따른 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 장치에 대하여 개략적으로 언급한다.
- [50] 초전도 토카막 장치의 초전도 토카막 장치에 구비되는 초전도 코일의 켄치를 검출하기 위한 켄치 검출 장치에 있어서, 상기 초전도 코일(400)에 전류를 공급하는 노말 버스바(410)에 설치되어 초전도 코일에 흐르는 전류를 검출하기 위한 측정수단(100) 상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 최종값을 출력하는 처리수단(200) 및 상기 처리수단에서 검출된 측정값을 전달받아 켄치발생 여부를 확인하여 토카막 장치의 초전도 영역을 제어하는 중앙처리수단(300)을 포함한다.
- [51] 측정수단(100)은 초전도 코일 및 버스라인의 켄치 발생여부를 측정하기 위해 초전도 코일로 전류를 공급하기 위한 노말 버스바(410)에 설치되어 초전도 코일의 전류를 측정하기 위한 것으로, 본 발명의 주요 기술적 요지로 상기 측정수단으로는 노말 버스바에 설치할 수 있는 Rogowski(로고스키)코일을 사용하는 것으로 한다.
- [52] 측정대상의 전류가 흐르는 노말 버스바는 상기 Rogowski 코일과 자기적으로 결합하여 core-less트랜스를 형성한다. 따라서 노말 버스바는 1차 도체라고 불리고, 측정대상의 전류는 1차전류로 한다. 또한, 상기 Rogowski코일에서

발생하는 유도전압은 2차전압으로 한다.

- [53] 원형단면을 가진 Rogowski코일에 대해, 감은 축은 투자율을  $\mu(H/m)$ , 감은 축의 단면반경을  $r(m)$ , 주반경을  $R(m)$ , 도선의 감은 수를  $N$ 이라고 한다면, 1차전류  $I(A)$ 에 의해 Rogowski코일에 발생한 기전력  $e_s(V)$ 는 아래 수학적 식 1로 표시된다.

[54]

[55] 수학적 식 1

$$e_s = \frac{\mu \pi^2 N}{2\pi R} \frac{di}{dt} = \frac{\mu S N}{l} \frac{di}{dt} = K_R \frac{di}{dt}$$

- [56] 여기에서  $K_R$  상기 Rogowski 코일의 상호 유도계수이다. 1차전류는 상기 수학적 식 1을 시간 적분하여 아래 수학적 식 2로 표시된다.

[57]

[58] 수학적 식 2

$$I(t) = \int_0^t \frac{di}{dt} = \frac{1}{K_R} \int_0^t e_s dt$$

- [59] 만약 1차전류가 정현파 교류전류라면, 상기 수학적 식 1과 같은 2차전압을 교류 전압계를 사용하여 측정하고, 실효전압을 실효전류로 환산하는 것에 의해, 1차전류는 간단히 산출된다. 이것에 대해 1차전류가 정현파 교류전류가 아니라면, 적분기를 사용하여 상기 수학적 식 2와 같은 시간 적분을 할 필요가 있다.

- [60] 상기 Rogowski코일의 전기특성의 등가회로는 도 3과 같이 표시된다. 여기서 감은 선의 저항은  $r_c(\Omega)$ , 자기 인덕턴스를  $L(H)$ , 감은 선의 분포용량과 동축케이블의 정전용량을 합성한 것을  $C(F)$ , 동축케이블 끝머리에서의 ringing을 방지하기 위한 damping 저항을  $R_d(\Omega)$ 로 표시한다.

[61]

- [62] 원형단면을 가진 Rogowski코일의 자기 인덕턴스  $L$ 은 아래 수학적 식 3으로 표시된다.

[63]

[64] 수학적 식 3

$$L \approx \frac{\mu \pi r^2 N^2}{2\pi R} = \frac{\mu S}{l} N^2$$

- [65] 상기 Rogowski코일의 감은 선 부분을 도 4에 나타낸 바와 같이 모델화하여 감은 선부분의 유전율을  $\epsilon(F/m)$ , 내반경을  $a(m)$ , 외반경을  $b(m)$ , 길이를

$l$

(m), 층수를  $n$ 으로 한다면, Rogowski코일의 층간용량  $C_s(F)$ 는 아래 수학적 식 4와 같이 표시된다.

[66]

[67] 수학식 4

$$C_s = \frac{4(n-1)}{3n^2} \frac{2\pi\epsilon}{1n\frac{b}{a}} l$$

[68]

위와 같이, Rogowski코일은 순수한 전압원이 아니라, 그 자체의 내부에 RLC회로를 갖는다. 특히 고주파 영역에서는 gain(동축케이블 끝머리에서의 전압

$$e_r$$

/코일에 발생하는 기전력

$$e_s$$

), 위상, 공진주파수 등의 주파수 특성에 주의가 필요하다.

[69]

처리수단(200)은 상기 측정수단인 Rogowski코일에서 측정된 값(2차전압)을 입력받아 앞서 언급한 바와 같이 수학적 모델링을 위한 소프트웨어를 통해 값을 출력한다. 더불어 상기 처리수단은 PXI 시스템을 적용한 것으로, 스캐너 방식을 이용하여 값을 해당 신호를 처리한다.

[70]

또한, 바람직하게는 앞서 설명한 수치적분을 실행하는 퍼스널 컴퓨터를 사용하여 상기 측정수단에서 측정된 값을 제공받아 해석한다. 이때 상기 측정수단(100)과 처리수단을 연결하기 전기적으로 상호 연결하기 위하여 터미널(210), 증폭부(220), 디지털라이저(230) 및 컴퓨터(240; PC)로 구성되고 이들이 순차적으로 연결되어 측정수단에서 측정된 측정값을 전달받도록 구성한다. 상기 터미널(210)은 Rogowski코일의 신호케이블이 처리수단(200)에 유입되기 전의 전기적인 단자대이며, 상기 증폭부(220)는 수치적분을 수행하기 위한 디지털 변환 전에 측정수단(100)의 아날로그 신호를 증폭하여 SNR(Signal to Noise Ratio)를 향상시키기 위한 것이다.

[71]

또한, 상기 디지털라이저(230)는 증폭부(220)에 의해 증폭된 아날로그 신호를 디지털로 변화시키고, 이 디지털 신호는 상기 컴퓨터에 의해 최종적으로 분석/처리하게 된다.

[72]

1차전류의 파형은 출력전압, 출력전류, 그것들의 변화율(slew rates), 대기시간에 의해 정의된다. Rogowski코일의 전압 측정과 1차전류 통전은 LabVIEW 프로그램에 의해 자동적으로 연동하게 된다.

[73]

중앙처리수단(300)은 상기 처리수단(200)과 연결되어 켄치 발생 여부를 실시간으로 모니터링 및 제어하기 위하여 구비되는 것으로, 상기 중앙처리수단은 상기 처리수단의 컴퓨터(240)와 이더넷을 통한 네트워크망(LAN)으로 연결되어 원거리에서 모니터링과 제어를 할 수 있으며,

- 초전도 코일로 전류를 공급하는 MPS(magnet Power Supply)의 제어도 담당한다.
- [74] 상기 처리수단에 검출된 켄치 발생여부를 실시간으로 전송하며, 중앙처리수단(중앙서버)에서는 관리자에 의한 모니터링을 통해 확인하고 MPS를 제어하여 켄치 발생 시 신속히 처리한다.
- [75] 상기 중앙처리수단은 일반적인 PC가 되며, 도면에 나타내진 않았지만, 디스플레이부, 네트워크와 연결되기 위한 인터페이스, 켄치 발생에 따른 안전 제어를 위한 설정부 등 다양한 기능을 부가되어 있다.
- [76]
- [77] 앞서 설명한 바와 같이 Rogowski코일을 측정수단으로 이용하여 초전도 코일에 흐르는 전류를 측정하여 켄치 발생여부를 확인하기 위하여 본 발명에 따른 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법을 설명한다.
- [78] 우선, 측정수단이 가진 오프셋 및 노이즈 레벨에 대해 서술한다. 1차전류의 전원의 출력이 off의 상태에서 채널 2부터 채널 5에서 측정된 2차전압 파형 및 그것들은 채널간에서 평균한 파형, 그리고 FFT를 사용한 2차전압 파형의 주파수 분포를 도 2에 나타내었다.
- [79] 2차전압 파형은 모두 오프셋 및 노이즈이다. 채널 2부터 채널 5에는 동일한 Rogowski코일의 2차전압 출력이 접속되어 있고, 채널 2 및 채널 5의 ±극성은 반전되어 있다. 여기에서 사용한 채널간의 평균은 이 극성의 반적을 고려하였고, 아래 수학적식 5와 같이 나타내었다.
- [80] 수학적식 5
- $$V_{ch2-ch5} = \frac{1}{4} (V_{ch2} - V_{ch3} + V_{ch4} - V_{ch5})$$
- [81] 수학적식 5의 계산결과에서는, Rogowski코일의 2차전압은 변화하지 않으나, 각 채널의 증폭부 및 디지털라이저가 공통으로 갖는 오프셋과 노이즈는 캔슬된다.
- [82] 도 2에 도시된 바와 같이 채널 2부터 채널 5의 2차전압 파형을 비교해보면, 전압 오프셋은 각각 -1.76, -4.76, 23.2, -15.8  $\mu\text{V}$ 이고, 채널마다에 흩어져있다. 이것에 대해 노이즈의 진폭은 어느 것이나 모두 약  $\pm 37\mu\text{V}$ 이다. 또한 주된 노이즈의 주파수는 60 Hz 이외에도, 그것보다 고주파수 영역에 넓게 분포되어 있다. 한편, 상기 수학적식 5와 같이 채널간에서 평균한 파형을 보면, 전압 오프셋은 10.5  $\mu\text{V}$ 이고, 노이즈의 진폭은  $\pm 6\mu\text{V}$ 미만이다. 또한 주파수, 분포에서 볼 수 있는 피크의 파고가 1/10이하로 저하하여, 분포가 평탄하게 되었다.
- [83] 수학적식 5에 표시된 채널간의 평균에 의해 노이즈의 진폭이 약 1/6으로 저하한 것에서 도 3에 나타낸 노이즈의 대부분은 각 채널의 평균에 의해 전압 오프셋은 캔슬되어 있지 않다는 것에서 전압 오프셋은 채널마다 흩어져 있다는 것을 알 수 있다.
- [84] 상기 측정수단이 갖는 장주기 노이즈(이른바 리플)의 주기에 대해 서술한다. 도 3에 도시된 바와 같이 2차전압 파형에서 오프셋을 제거하고, 5000샘플마다에

반복 평균한 결과를 도 4에 나타내었다.

- [85] 원래의 파형의 샘플링 속도는 5 kS/s이기에, 반복 평균한 결과의 샘플링 속도는 1 S/s이다.
- [86] 도 4에 표시된 채널 2부터 채널 5의 2차전압 파형을 비교해 보면, 리플의 진폭은  $\pm 300$  nV에서  $\pm 400$  nV까지이고, 주기는 약 22 s이다. 한편, 수학식 1과 같이 채널간에 평균한 파형을 보면, 리플의 진폭은  $\pm 100$  nV이고, 주기는 불명료하다.
- [87] 채널간의 평균에 의해 리플의 진폭이 1/3에서 1/4 이하 한 것으로, 도 3에 표시된 리플의 대부분도 역시 각 채널의 증폭부 및 디지털라이저에 공통의 리플이라는 것을 알 수 있다. 각 채널의 리플의 주기는 약 22s이고 상당히 길기에 전압 오프셋의 측정이나 산출은 이 장주기를 고려하지 않으면 안 된다. 만일 이 주기를 무시하고 전압 오프셋을 측정하여 산출했다면 진정한 전압 오프셋에 대해 오차를 만들어낸다.
- [88]
- [89] 전압 오프셋의 제거가 적절한 경우와 부적절한 경우에 대해 Rogowski코일의 2차전압에서 환산된 전류 파형을 비교해 본다. 전류 파형을 산출하면 도 2에서 표시된 2차전압 파형에서 오프셋을 빼고 시간 적분하여 Rogowski코일의 상호 유도계수  $K_R$ 을 곱하면 된다. 여기에서 적절한 오프셋으로서 2차전압 파형을 시각 0 ~ 44 s( $2 \times 22$ s)에 걸쳐 상가 평균한 값을 사용하고, 부적절한 오프셋으로서 2차전압 파형을 시각 0 ~ 5s( $0.227 \times 22$ s)에 걸쳐 상가 평균한 값을 사용한다.
- [90] 또 여기에서 사용하는 Rogowski코일의 상호 유도계수  $K_R$ 은  $0.534483 \mu\text{H}$ 이고, 1차전류의 측정결과에 근거하여 산출된 최적치이다. Rogowski코일의 2차전압으로부터 환산된 전류 파형을 도 4에 나타낸다. 1차전류는 흐르고 있지 않기에 1차전류치는 0A이다. 도면 아래 각각 전압 오프셋을 표시했다.
- [91] 도 4의 채널 2를 보면, 적절한 오프셋( $-11.755181 \mu\text{V}$ , 44 s간 평균)의 전류 파형에서는 150 s후의 전류의 오차가 1 A정도이지만, 부적절한 오프셋( $-1.905112 \mu\text{V}$ , 5 s간 평균)에서는 전류의 오차가 약 40 A나 된다. 전자와 후자의 오프셋의 측정시간의 비는 8.8배나 되지만, 오프셋의 차는  $-150 \mu\text{V}$ 밖에 없다. 그러나 이 극소한 오프셋의 차에 의해 전류의 오차가 약 40A나 발생됐다.
- [92] 채널간의 평균을 보면, 적절한 오프셋( $10.49883 \mu\text{V}$ , 44 s간 평균)의 전류 파형에서는 150 s후의 전류의 오차가 3 A정도이고, 부적절한 오프셋( $10.45214 \mu\text{V}$ , 5 s간 평균)에서는 전류의 오차가 약 15A이다. 여기서 오프셋의 차는  $-46.7$  nV이다. 경향으로서는 채널 2의 결과와 같으나, 채널간의 평균에서는 적절한 오프셋에서의 전류의 오차가 늘어나 있다. 이것은 채널 4 ~ 5와 같은 드리프트가 큰 채널의 측정치도 평균치에 포함되어 있기 때문이다. 즉, 드리프트는 채널간의 불균일성이 심하여, 채널간의 평균에 의해 오히려 오차가 커질 경우도 있다.
- [93] 상술한 바에서 알 수 있듯이, Rogowski코일의 2차전압에서 1차전류를 정확하게 환산하기 위해서는 측정된 2차전압 파형에서 극히 정확한 오프셋을 뺄 필요가 없다. 이를 위해서는 장주기의 리플의 주기를 할 수 있는 한 정확하게

나누어, 이 주기의 정수배의 시간에 걸쳐 2차전압 파형을 측정하여 상가 평균하는 것에 의해 전압 오프셋을 산출할 필요가 있다.

[94]

[95] 다음으로 가 적분법을 행하여 측정된 2차전압 파형의 노이즈를 효과적으로 제거단계(S300)에 대해 서술한다. 1차전류의 변화 속도를  $100\text{A/s}$ 라고 하고,  $0\text{A}$ 에서  $100\text{A}$ 까지의 충전 및 방전을 10회 반복했을 경우에 대해, 수치 계산된 2차전압 파형, 측정된 2차전압 파형, 측정치를 100샘플마다 반복한 2차전압 파형, 측정치를 적분해 100샘플마다에 반복평균하고 나서 미부한 2차전압 파형을 도 5에 나타내었다. 2차전압 파형의 샘플링 속도는  $5\text{KS/s}$ 이고, 이것을 100샘플마다에 반복 평균한 파형의 샘플링 속도는  $50\text{S/s}$ 이다.

[96] 또한, 1차전류를 통전하는 60s전에는 2차전압의 측정을 개시하여 전류가 흐르고 있지 않는 상태에서의 전압 오프셋 및 노이즈도 측정했다. 도 5에 표시된 측정치는 오프셋으로서 시각  $0 \sim 44\text{s}$  ( $2 \times 22\text{s}$ )의 상가 평균치를 차감되어져 있다.

[97] 먼저 도 5의 수치 계산된 2차전압 파형을 보면, 파고치가  $53.5\mu\text{V}$ 로 상당히 낮다. 주파수성분은 저주파에서 고주파까지 조밀하게 분포하고 있으나, 주요한 성분은 저주파 영역에 있다는 것이다. 측정된 2차전압 파형을 보면, 파고치  $500\text{--}1300\mu\text{V}$ 의 노이즈가 전체를 덮고 있다.  $60 \sim 140\text{s}$ 에서 파형에 펄스형의 진폭이 있으나, 이것은 진정한 2차전압이 아니라, 전류원이 발생한 노이즈이다. 수치 계산된 전압과 측정된 전압을 비교해 보면,  $1/24$ 정도로 상당히 낮다는 것을 알 수 있다.

[98] 측정 후 100샘플마다 평균된 2차전압 파형을 보면, 파고치 약  $60\mu\text{V}$ 의 펄스가 있고, 실제 2차전압도 측정되어 있다는 것을 알 수 있으며, 동시에 파고치 약  $20\mu\text{V}$ 의 노이즈에 의해 전체가 덮여 있다. 이 파형은  $S/N$ 은 3정도이기에, 단순한 반복평균만으로는  $S/N$ 이 72배 개선되게 된다. 단, 노이즈를 좀 더 줄이기 위해 보다 많은 샘플을 평균하려고 한다면 평균 후의 샘플 수가 너무 적어지거나 고속으로 측정할 필요가 생겨 실용적이지 못하다.

[99] 디지털 low-pass 필터를 사용한 수단도 있으나, 수치 계산의 결과와 같이 펄스 파형의 주파수 성분은 저주파에서 고주파까지 조밀하게 분포되어 있기에, 강도가 강한 필터를 걸면 2차전압의 파형이 일그러져 버릴 수 있다. 노이즈 처리를 곤란하게 하는 원인은  $S/N$ 의 낮음이다. Rogowski코일은 본질적으로  $S/N$ 을 높이는 것이 어려운 수단이고, 감도(1차 2차간의 상호 인덕턴스)를 높이기 위해 단순히 센서를 거대화하면, 노이즈도 늘어나기 때문에  $S/N$ 은 개선되지 않고, 더욱이 코스트가 늘어나 제작이 어려워지거나 전기적 특성이 나빠지게 된다.

[100] 이러한 문제점 때문에 본 발명에서는 2차전압 파형을  $S/N$ 이 높은 파형으로 변환하고, 노이즈 처리를 하고 나서 역변환하면 매우 효과적이다.

[101] 따라서, 본 발명에서는 시간적분을 이용하여 2차전압 파형을  $S/N$ 이 높은 파형으로 변환하고, 반복 평균을 행하여 시간미분을 실시하였다. 이러한 과정을

본 발명에서는 가 적분법이라 칭하며, 여기에서 시간미분하지 않고 Rogowski코일의 상호 유도계수  $K_R$ 을 곱하면 전류 파형을 산출할 수 있으나, 그와 같이 하지 않는 이유는 2차전압 파형을 추가로 가공할 필요가 있기 때문이다. 측정된 2차전압 파형을 시간 적분하여 100샘플마다에 반복평균하고 나서 시간 미분한 전압 파형은 도 3 아래 표시되었다.

[102] 적분 결과의 요소수의 감소를 피하게 위해 수치적분의 방법에는 trapezium rule(1차)를 사용했다.

[103] 반복 평균만을 사용한 전압 파형과 가 적분법을 사용한 전압 파형을 비교해 보거나 가 적분법을 사용한 전압 파형에서는 고주파 노이즈가 격감하고, S/N은 약 35이다. 측정치의 S/N은 약 1/24였기에 가적분법에 의해 S/N이 약 840배나 개선되게 된다. 또 수치 계산된 전압 파형과 비교해 보면 이론적으로 예상된 2차전압(펄스)에 가까운 파형이 가 적분법에 의해 추출되었다는 것을 알 수 있다.

[104] 즉 가 적분법을 사용하여 고주파 노이즈의 제거와 펄스파형의 추출을 양립시키는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

[105] 가 적분법의 원리는 다음과 같다. 기본 각 주파수를

$\omega_o$

(rad/s)라고 한다면 측정된 2차전압은 Fourier 급수전개를 사용하여 아래 수학식 6 내지 8과 같이 근사된다.

[106] 수학식 6

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_o t + b_n \sin n\omega_o t)$$

[107] 수학식 7

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos n\omega_o t dt ; n = 0, 1, 2, \dots$$

[108] 수학식 8

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin n\omega_o t dt ; n = 1, 2, 3, \dots$$

[109] 상기 수학식 6의 초항은 직류성분을, 차항은 기본파 및 n차 고주파를 나타낸다. 파형의 전체길이와 비교하여 충분히 짧은 파장을 가진 노이즈는 고주파만으로 표시되고, 직류성분을 갖지 않는다. 여기에서,  $\sin \omega t$ 의 부정적분은 아래 수학식 9에서 나타내고,  $\sin$ 파의 진폭은 적분에 의해  $1/\omega$ 로 감소한다는 것을 알 수 있다.

[110]

[111] 수학적식 9

$$\int \sin wtdt = -\frac{1}{w}\cos wt + C$$

[112] 마찬가지로,  $\cos$ 파의 진폭도 적분에 의해  $1/w$ 로 감소한다. 즉 고주파만으로 나타나지는 노이즈의 진폭은 적분에 의해 격감한다는 것을 알 수 있다. 이것에 대해 진정한 2차전압은 1차전류의 시간미분에 비례하기에 적분에 의해 1차전류에 상사한 파형(예를 들면 square wave)으로 변환된다. 결과로서 측정된 2차전압을 적분하는 것에 의해, S/N이 대폭으로 개선된다. 단, 여기에서 행해진 적분은 노이즈 처리의 준비로 2차전압을 1차전류로 환산한 것은 아니다.

[113]

[114] 본 발명에 따른 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법의 마지막 단계는 미소 전압 드리프트의 제거 단계로써, 끝수 처리(양자화)를 응용하여 2차전압 파형에 잔류하는 미소하고 주기가 긴 전압 드리프트를 제거하는 방법을 설명한다.

[115] 이것은 2차전압 파형의 파고치에 대해 전압 드리프트가 충분히 작은 경우에만 유효하다. 만일 전압 드리프트가 큰 경우에는 사전에 어떠한 방법을 사용하여, 드리프트를 충분히 작게 해 둘 필요가 없다. 본 발명에서는 수학적식 1의 채널간의 평균을 이용하여 드리프트를 삭감했다.

[116] 좀 더 확실하게 드리프트를 삭감하기 위해서는 Rogowski코일의 2차전압의 극성을 전기회로로 주기적으로 반전시키는 방법을 사용하여 증폭부 및 디지털라이저에서 발생하는 전압 드리프트를 상쇄할 필요가 있다.

[117] 미소 전압 드리프트가 잔류하고 있는 2차전압 파형을 1차전류 파형으로 환산하여 본다. 1차전류의 변화속도를 100 A/s로 하고, 0 A에서 100 A까지의 충전 및 방전을 10회 반복한 경우의 측정된 2차전압 파형을 사용한다.

[118] 이것을 수학적식 5에 사용하여 채널간에서 평균하고, 오프셋을 빼고, 노이즈를 제거한다. 이렇게 얻어진 2차전압 파형 및 이 전압 파형을 적분하고 Rogowski코일의 상호 유도계수  $K_R$ 을 곱해 산출된 1차전류 파형을 도 6에 나타낸다. 여기서 전류 파형에서는 셉트저항을 사용하여 측정된 전류치가 백색으로 나타나고, Rogowski코일을 사용하여 측정된 전류치가 적색으로 나타난다.

[119] 2차전압 파형을 보면, 전압 드리프트는 거의 없는 듯이 보이나, Rogowski코일을 사용하여 측정된 전류치(적색)를 보면 전류가 흐르지 않는 기간(0 ~ 60 s)에는 -0.6 A에서 1.4 A사이에서 추이하는 드리프트가 있고, 펄스 전류가 흘렀던 기간(60 ~ 141s)에는 -3.5A에서 0A사이에 추이하는 드리프트가 있다. 드리프트의 주기는 어느 쪽이나 22 ~ 24s이다. 또한 1차전류 파형의 시각 135 ~ 141s를 확대한 도면을 보면 셉트를 사용한 측정치(백색)에 대한

Rogowski코일을 사용한 측정치의 오차는 정상부에서 -2.50A, 측정 종료 시(시간 141s)에서 -2.62A이다.

[120] 서술한 측정결과에 근거하면 2차전압에 3.4 nV의 오프셋이 있으면 1차전류의 드리프트는 150s후에 1A에 달한다. 도 6의 1차전류 파형에 보여지는 드리프트는 약 10s간에 약 1.4A 변화하고 있기에 2차전압에 잔류하는 드리프트의 파고치는 최대 71nV정도라고 추정된다. 그리고 이 잔류 드리프트는 주기 22 ~ 24s에서 끊임없이 계속 변화하고 있다는 것을 알 수 있다.

[121] Rogowski코일을 사용한 전류의 측정 수법에서, 일반적으로는 이와 같은 미소하고 주기가 긴 전압 드리프트를 완전하게 제거하는 것은 극히 곤란하다. 특히, 측정시간이 100s를 넘는 장시간의 준직류전류 파형을 실용적인 레벨에서 측정할 수 없다.

[122] 본 발명에서는 단순한 수치연산을 이용하여 미소하고 주기가 긴 전압 드리프트를 제거하는 방법을 고안하고 측정시간 약 140s의 2차전압 파형에 대해 본 발명에 따른 신호처리방법을 통해 측정시간 약 140s의 2차전압 파형에 대해 도 6에 도시된 결과와 비교하여 전류의 오차를 1/5이하로 감소시켰다. 특히, 1차전류 파형의 직류부분에서 드리프트 제로를 달성했다.

[123] 실험결과를 통해 아래에서 좀 더 상세히 설명한다.

[124] 평균처리나 필터 등을 사용해도 완전하게는 제거할 수없는 미소하고 주기가 긴 또는 불규칙한 전압 드리프트를 측정치에서 수치적으로 제거하기 위해서는, 숫의 아래 자리를 잘라 버리면(끝수 처리함)된다. 예를 들면, 파형이  $10 \pm 1\mu V$ 이고 이 중에 드리프트가  $\pm 1\mu V$ 의 불규칙한 파형이라고 한다면,  $\pm 2\mu V$  미만의 변화를 측정치에서 잘라내는 것에 의해 완전한 직류파형을 얻을 수 있다. 여기에서 측정치를  $V(V)$ , 끝수 처리의 폭을

$\Delta$

$V(V)$ 라고 하고 측정치  $V$ 의 폭

$\Delta$

$V$ 의 끝수 처리를 아래 수학적식 10과 같이 정의한다.

[125]

[126] 수학적식 10

$$Round(V, \Delta V) = \frac{V}{|V|} \left[ \frac{|V|}{\Delta V} \right] \Delta V$$

[127]

[128]  $\Delta V$

=  $2\mu V$ 를 수학적식 6에 대입하면 측정치  $V$ 는 {...,  $8\mu V$ ,  $10\mu V$ ,  $12\mu V$ , ...}와 같이  $2\mu V$ 의 배수로 끝수 처리된다. 그러나 이것으로는  $9\mu V$ ,  $11\mu V$ ,  $13\mu V$ 와 같은 정배수 이외의 수를 완전히 표현할 수 없게 되어 버리고, 사이즈  $2\mu V$ 의 양자화

오차가 문제가 된다.

- [129] 그래서 측정치의 복수 폭의 끝수 처리를 수행하고, 그것들의 상가평균치를 끝수 처리의 결과라고 한다. 1이상의 임의의 수를

$$k_i$$

라고 하고, 측정치  $V$ 의 복수 폭

$$k_i \Delta V$$

의 끝수 처리의 상가평균을 아래 수학식 11과 같이 정의한다.

[130]

[131] 수학식 11

$$Round(V, \Delta V) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V}{|V|} \left[ \frac{|V|}{k_i \Delta V} \right] k_i \Delta V$$

- [132] 다음으로 실제 수학식 11을 사용하여 미소한 전압 드리프트가 잔류하고 있는 2차전압 파형을 1차전류 파형으로 환산해 본다. 측정치는 도 6과 같은 것이고, 1차전류의 변화속도는 100A/s이다. 측정된 2차전압 파형을 수학식 1을 사용하여 채널간에서 평균하고, 앞서 설명한 바와 같이 오프셋을 제거하고 노이즈를 제거한다. 그리고 마지막으로 상기 수학식 7을 이용하여 측정치를 끝수 처리한다. 여기에서는

$$\Delta V$$

$$= 2.5 \mu V, \{$$

$$k_n$$

$\} = \{1.0, 1.1, 1.2, \dots, 1.9\}$ 로 했다. 이렇게 해서 얻어진 2차전압 파형 및 이 전압 파형을 적분하고 Rogowski코일의 상호 유도계수

$$K_R$$

를 곱하여 산출된 1차전류 파형을 도 7에 나타내었다.

- [133] 도 6과 도 7은 2차전압 파형을 비교해 보면, 도 7의 전압 파형에서는 고주파의 노이즈 및 미소한 드리프트가 대부분이 제거되어 있다. 또  $\pm 4 \mu V$ 의 확대 그림을 보면, 크기가  $4 \mu V$ 만으로 측정치를 끝수 처리한 경우에는 수치가 폭  $4 \mu V$ 의 정수배가 되기 때문에 이와 같은 작은 데이터점과 정수배 이외의 수는 존재할 수 없다. 한편, 여기에서 사용한 수법에는 복수의 폭에 대한 끝수 처리의 결과(제로를 포함)를 평균하고 있기에, 확대 그림과 같은  $4 \mu V$ 미만의 데이터 점 및 폭의 정수배 이외의 값이 존재 가능하다. 이것은 양자화 오차를 줄일 수 있는 중요한 성질이다.

- [134] 도 7의 Rogowski코일을 사용하여 측정된 전류치(적색)를 보면, 전류가 흐르고 있지 않은 기간(0 ~ 60s)에서는 드리프트가 제로이고, 펄스전류가 흐른 기간(60 ~

141s)에서는 드리프트가 -0.7A에서 0A 사이에서 추이하고 있다. 또, 1차전류 파형의 시각 135 ~ 141s를 확대한 도면(맨 아래)을 보면, 셉트를 사용한 측정치(백색)에 대한 Rogowski코일을 사용한 측정치의 오차는 정상부에서 -0.31A, 측정 종료 시(시각 141s)에서 -0.28A이다. 도 6과 도 7의 1차전류의 오차를 비교하면, 도 7에서의 오차는 1/5에서 1/9이고, 측정된 2차전압에서 1차전류를 산출하는 정확도가 향상되었음을 알 수 있다.

[135]     마지막으로 전류의 변화속도 20A/s의 측정치를 사용하여 도 7과 같은 처리를 결과를 도 8에 나타낸다. 측정된 전압 파형은 도 5에 나타낸 바와 같이 파고치 1.3mV의 고주파 노이즈가 덮고 있고, S/N은 0.8%(1.124)밖에 없었으나 파고치 10 $\mu$ V의 2차전압 파형을 깨끗하게 추출할 수 있다는 것을 알 수 있다.

[136]     또한, 1차전류 파형의 시각 126 ~ 140s를 확대한 아래 도면을 보면, 셉트를 사용한 측정치(백색)에 대한 Rogowski코일을 사용한 측정치의 오차는 정상부에서 -0.56A, 측정 종료 시(시각 140s)에서 -0.23A이다. 도 7에서 나타낸 100A/s에서의 결과와 도 8의 20A/s에서의 결과를 비교하면, 전류의 오차의 크기가 같은 정도라는 것에서 본 발명의 신호처리방법을 사용하면 측정시간 100s를 넘는 장시간의 준직류전류 파형을 실용적인 레벨에서 측정할 수 있다.

[137]

[138]     이와 같이 구성되는 본 발명은 측정수단인 Rogowski코일을 통해 초전도 자석의 전류를 측정하고, 상술한 바와 같이 오차값을 제거하여 켄치 발생여부를 정확하게 판단할 수 있는 이점이 있다.

[139]     이상, 본 발명의 원리를 예시하기 위한 바람직한 실시예와 관련하여 설명하고 도시하였지만, 본 발명은 그와 같이 도시되고 설명된 그대로의 구성 및 작용으로 한정되는 것이 아니다.

[140]     오히려, 첨부된 청구범위의 사상 및 범주를 일탈함이 없이 본 발명에 대한 다수의 변경 및 수정 가능함을 당업자들은 잘 이해할 수 있을 것이다. 따라서 그러한 모든 적절한 변경 및 수정과 균등물들도 본 발명의 범위에 속하는 것으로 간주되어야 할 것이다.

[141]

## 청구범위

[청구항 1]

초전도 코일의 켄치를 검출하기 위한 켄치 검출 장치에서 상기 초전도 코일에 전류를 공급하는 노말 버스바에 설치되어 초전도 코일의 전류를 측정하는 측정수단과, 상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 측정값을 출력하는 처리수단 및 상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 측정값을 출력하는 처리수단 및 상기 처리수단에서 검출된 측정값을 전달받아 초전도 토크막 장치의 켄치 검출을 위한 신호처리방법에 있어서, 상기 측정수단에 의해 검출된 2차전압의 측정치에 포함된 전압 오프셋을 제거하는 단계; 적분법을 사용하여 상기 2차전압의 전압 노이즈를 제거하는 단계; 및

2차전압의 전압파형에 대한 미소전압 드리프트를 제거하는 단계를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법.

[청구항 2]

제 1항에 있어서, 상기 전압 오프셋 제거단계에서는, 채널 2 내지 채널 5를 통해 상기 측정수단으로부터 측정되는 2차전압출력을 접속시키고, 상기 채널간 평균은,

$$V_{ch2-ch5} = \frac{1}{4} (V_{ch2} - V_{ch3} + V_{ch4} - V_{ch5})$$

에 의해서 산출되는

것을 특징으로 하는 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법.

[청구항 3]

제 1항에 있어서, 상기 전압 오프셋 제거단계에서는, 장주기의 리플 주기를 나누고, 이 주기의 정수배의 시간에 걸쳐 2차전압 파형을 측정하여 상가 평균하는 것에 의해 전압 오프셋을 산출하는 것을 특징으로 하는 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법.

[청구항 4]

제 1항에 있어서, 상기 미소 전압 드리프트 제거단계는, 수학적

$$Round(V, \Delta V) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V}{|V|} \left[ \frac{|V|}{k_i \Delta V} \right] k_i \Delta V$$

에

의해 미소한 전압 드리프트가 잔류하고 있는 2차전압 파형을 1차전류 파형으로 환산하여 제거하는 것을 특징으로 하는 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법.

[청구항 5]

제 1항에 있어서, 상기 측정수단은,  
Rogowski코일을 사용하는 것을 특징으로 하는 초전도 자석  
운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법.

[청구항 6]

상기 측정수단은,  
수학적  $I(t)$ 를 통해 전압을 시간

$$I(t) = \int_0^t \frac{di}{dt} = \frac{1}{K_R} \int_0^t e_s dt$$

적분하여 측정값을 산출하는 것을 특징으로 하는 초전도 자석  
운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법.

[청구항 7]

제 1항에 있어서, 상기 측정수단은,  
상기 노말 버스바에 설치되어 이와 자기적으로 결합함에 따라  
core-less 트랜스를 형성하는 것에 의해 전류를 검출하는 것을  
특징으로 하는 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한  
신호처리방법.

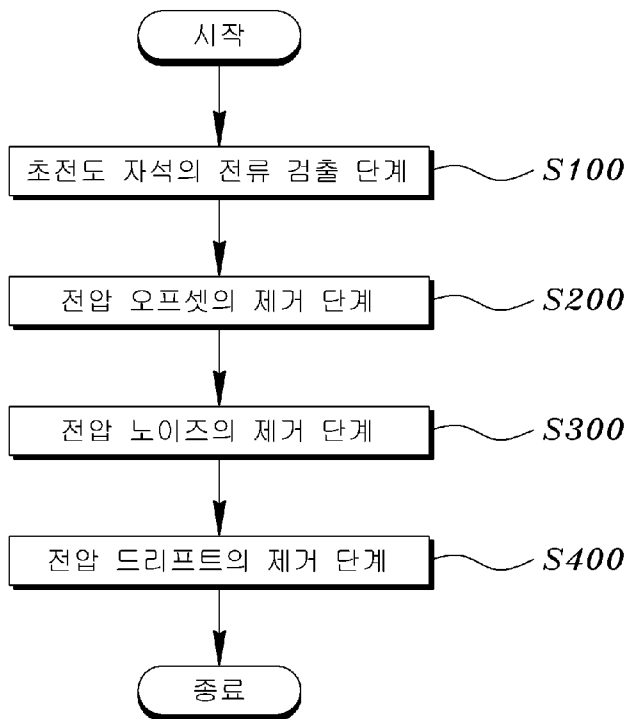
[청구항 8]

제 1항에 있어서, 상기 처리수단은,  
상기 측정수단과 전기적으로 연결되는 터미널;  
상기 터미널에서 제공되는 아날로그 신호를 증폭시키는 증폭부;  
상기 증폭부에서 제공되는 아날로그 신호를 디지털 신호로  
변환시키는 디지털라이저; 및  
상기 디지털라이저를 통해 제공되는 전압값을 수학적 모델링을 통해  
해석하여 켄치 발생여부를 검출하는 컴퓨터;로 구성되는 것을  
특징으로 하는 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한  
신호처리방법.

[청구항 9]

제 2항에 있어서, 상기 전압 오프셋 제거단계에서는,  
샘플마다 반복 평균한 결과에서 오프셋을 제거하는 것을 특징으로  
하는 초전도 자석 운전전류의 켄치 검출을 위한 신호처리방법.

[Fig. 1]



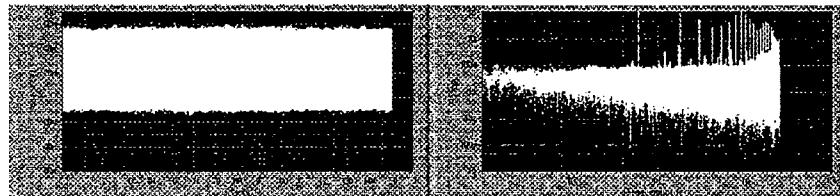
【도 2】



채널2의 시간 파형(좌) 및 주파수분포(우)



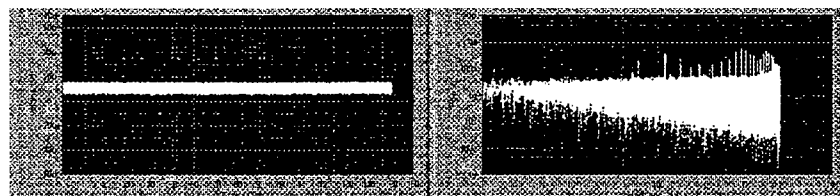
채널3의 시간 파형(좌) 및 주파수분포(우)



채널4의 시간 파형(좌) 및 주파수분포(우)

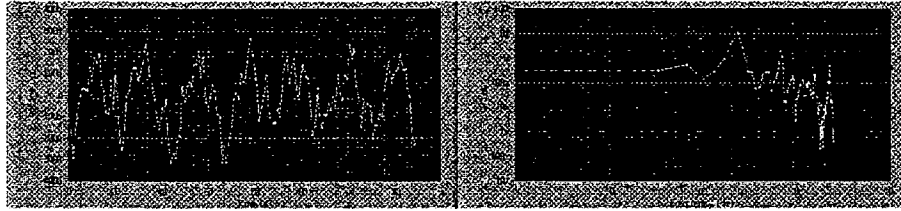


채널5의 시간 파형(좌) 및 주파수분포(우)

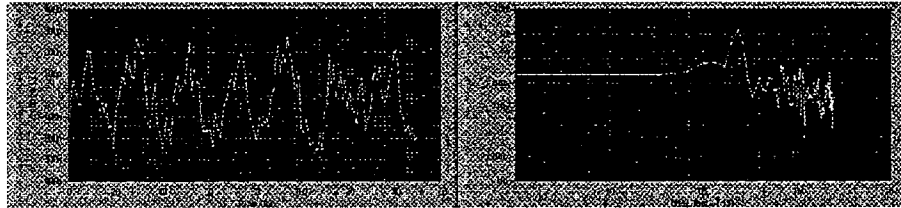


채널간 평균의 시간 파형(좌) 및 주파수분포(우)

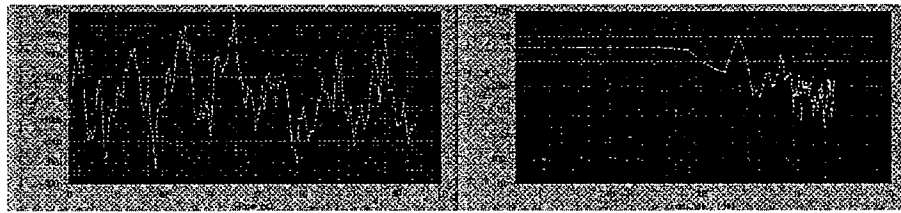
【도 3】



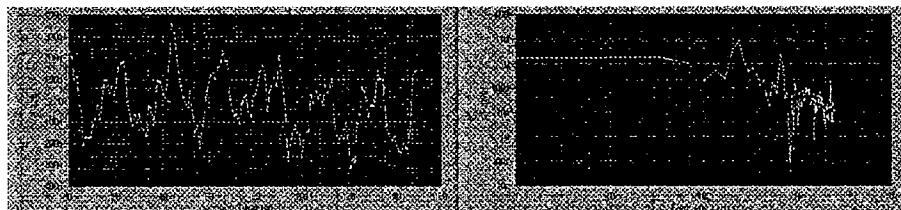
채널2의 시간 파형(좌) 및 주파수분포(우)



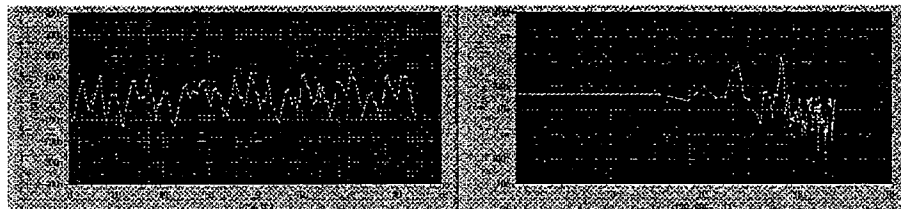
채널3의 시간 파형(좌) 및 주파수분포(우)



채널4의 시간 파형(좌) 및 주파수분포(우)

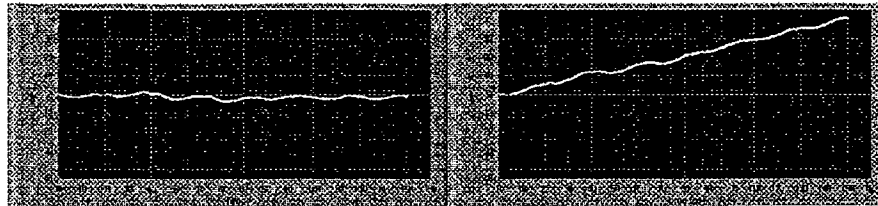


채널5의 시간 파형(좌) 및 주파수분포(우)

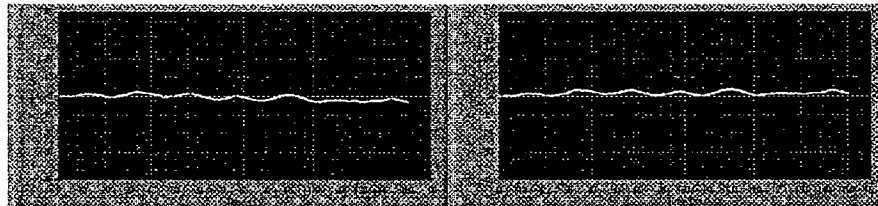


채널간 평균의 시간 파형(좌) 및 주파수분포(우)

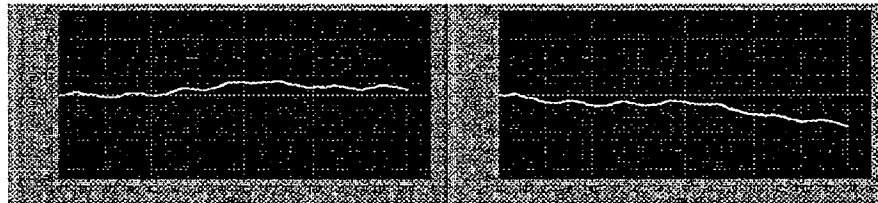
【도 4】



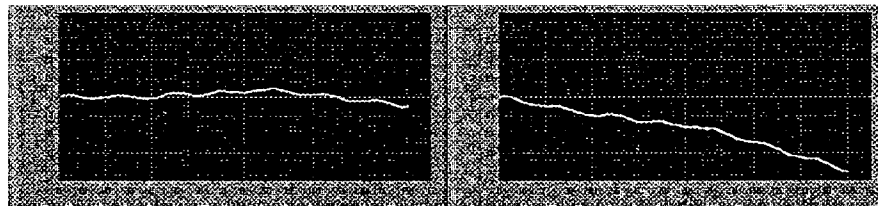
채널2의 offset 적절(좌,  $-1.755181 \mu\text{V}$ ) 및 offset 부적절(우,  $-1.905112 \mu\text{V}$ )



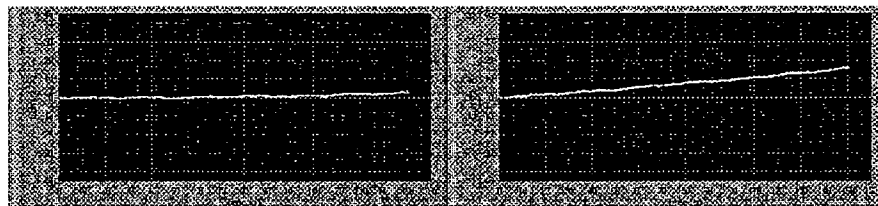
채널3의 offset 적절(좌,  $-4.738734 \mu\text{V}$ ) 및 offset 부적절(우,  $-4.755118 \mu\text{V}$ )



채널4의 offset 적절(좌,  $23.22273 \mu\text{V}$ ) 및 offset 부적절(우,  $23.29466 \mu\text{V}$ )

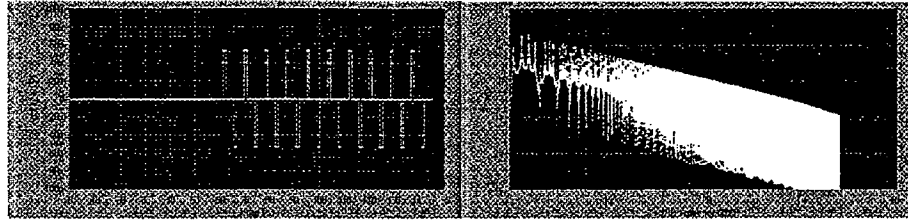
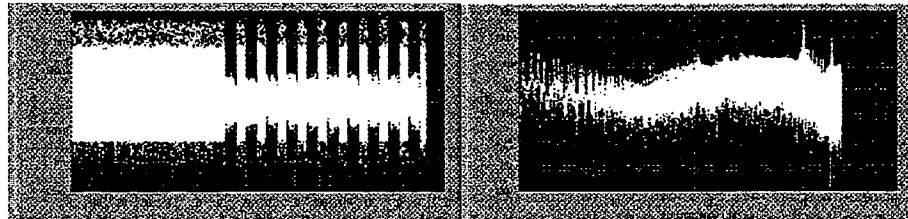
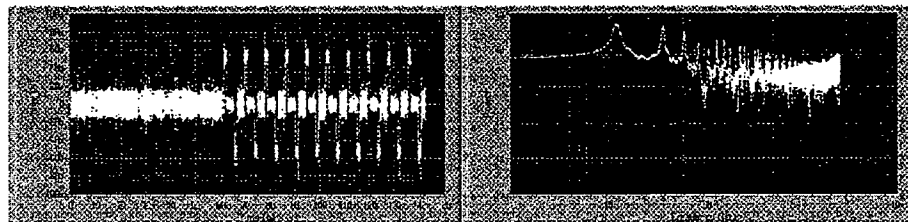
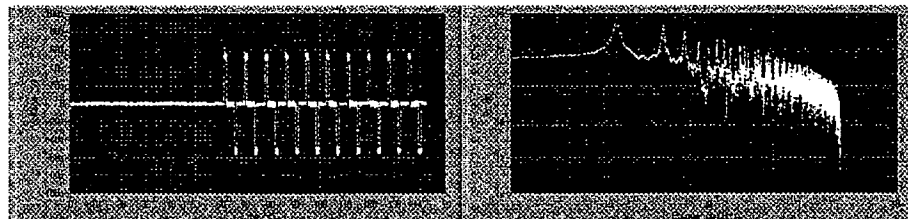


채널5의 offset 적절(좌,  $-15.78902 \mu\text{V}$ ) 및 offset 부적절(우,  $-15.66389 \mu\text{V}$ )

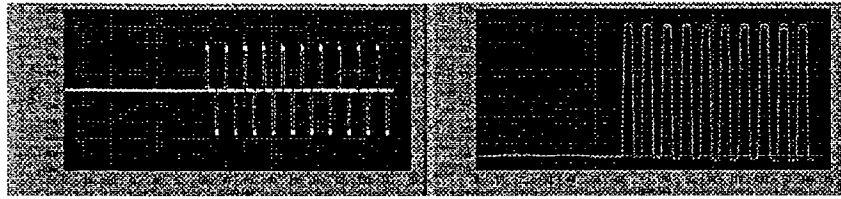


채널평균의 offset 적절(좌,  $10.49883 \mu\text{V}$ ) 및 offset 부적절(우,  $10.45214 \mu\text{V}$ )

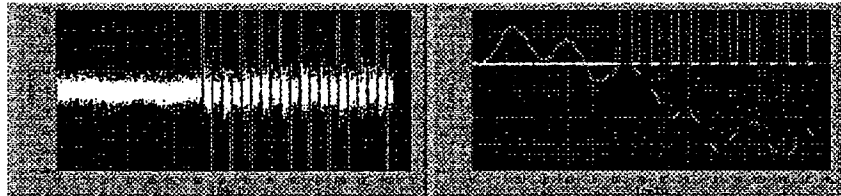
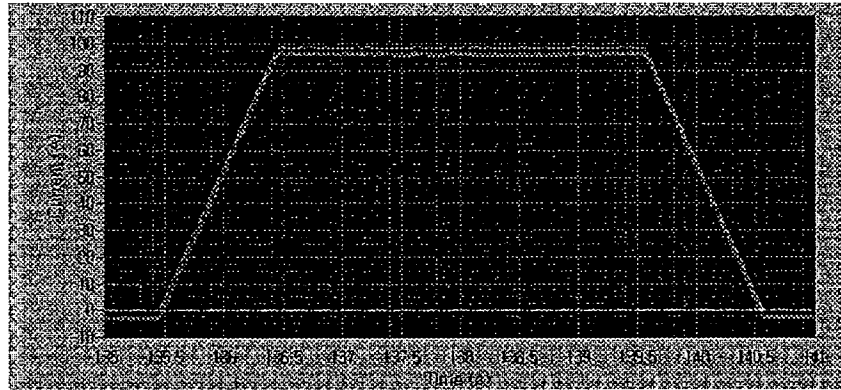
【도 5】

수치 계산된 시간 파형(좌, y축  $\pm 100 \mu\text{V}$ ) 및 주파수분포(우)측정된 시간 파형(좌, y축  $\pm 1.5 \text{ mV}$ ) 및 주파수분포(우)100샘플마다에 평균된 시간 파형(좌, y축  $\pm 100 \mu\text{V}$ ) 및 주파수분포(우)가 적분법을 사용된 시간 파형(좌, y축  $\pm 100 \mu\text{V}$ ) 및 주파수분포(우)

【도 6】

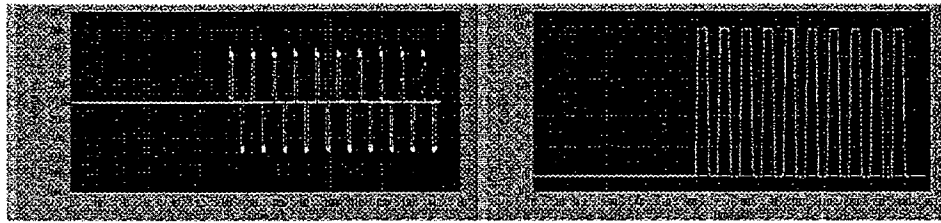


2차전압 시간 파형(좌) 및 1차전류 시간 파형(우, 백색은 셉트, 적색은 Rogowski코일)

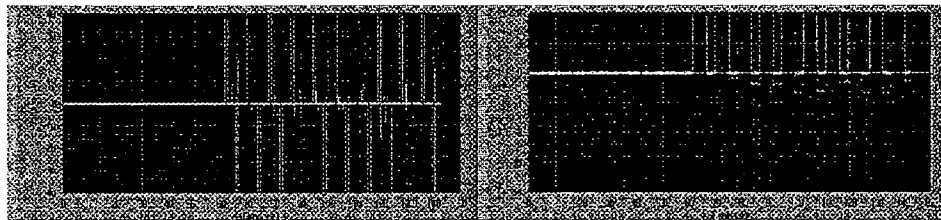
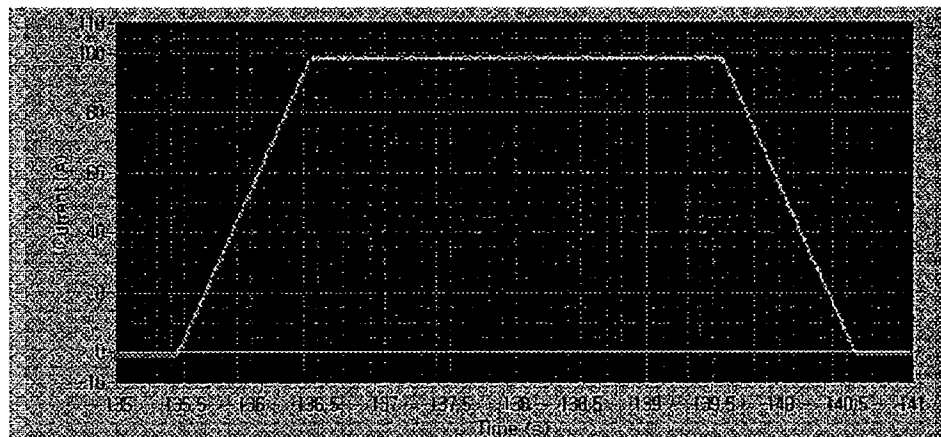
2차전압 시간 파형(좌,  $\pm 4 \mu\text{V}$ 를 확대) 및 1차전류 시간 파형(우,  $-4 \text{ A}$ 에서  $2 \text{ A}$ 를 확대)

1차전류 시간 파형(시각 135-141 s를 확대)

【도 7】

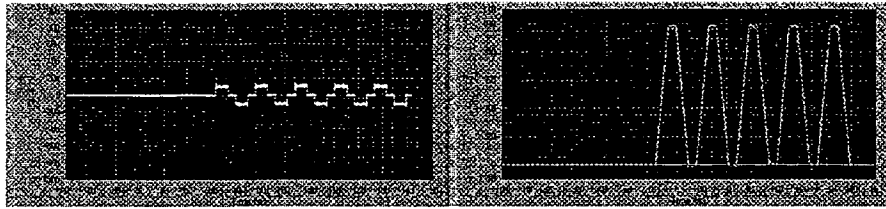


2차전압 시간 파형(좌) 및 1차전류 시간 파형(우, 백색은 셉트, 적색은 Rogowski코일)

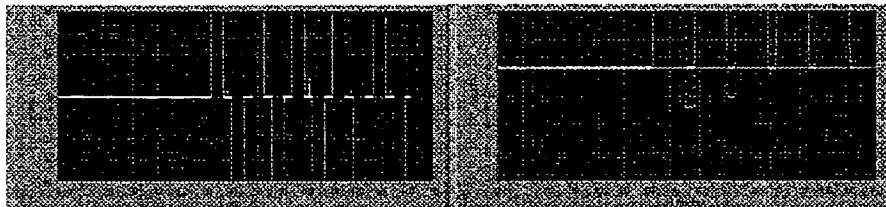
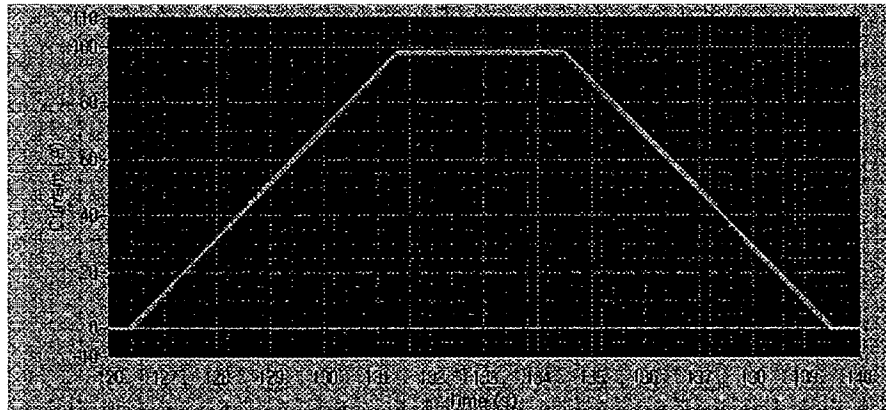
2차전압 시간 파형(좌,  $\pm 4 \mu\text{V}$ 를 확대) 및 1차전류 시간 파형(우, -4 A에서 2 A를 확대)

1차전류 시간 파형(시각 135-141 s를 확대)

【도 8】



2차전압 시간 파형(좌) 및 1차전류 시간 파형(우, 백색은 셉트, 적색은 Rogowski코일)

2차전압 시간 파형(좌,  $\pm 4 \mu\text{V}$ 를 확대) 및 1차전류 시간 파형(우,  $-4 \text{ A}$ 에서  $2 \text{ A}$ 를 확대)

1차전류 시간 파형(시각 126-140 s를 확대)

[Fig. 9]

