



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 등록특허공보(B1)**

(45) 공고일자 2012년10월25일  
(11) 등록번호 10-1194717  
(24) 등록일자 2012년10월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
    **GO1R 19/255** (2006.01) **GO1R 19/25** (2006.01)  
(21) 출원번호 10-2009-0058633  
(22) 출원일자 2009년06월29일  
    심사청구일자 2009년06월29일  
(65) 공개번호 10-2011-0001214  
(43) 공개일자 2011년01월06일  
(56) 선행기술조사문헌  
    JP2004172485 A  
    KR1020090020396 A  
    JP06112042 A  
    JP2006126088 A

(73) 특허권자  
    **한국기초과학지원연구원**  
    대전광역시 유성구 과학로 169-148 (어은동)  
(72) 발명자  
    **박갑래**  
    대전광역시 유성구 신성로84번길 43-14, 303호 (신성동)  
    **추용**  
    대전광역시 서구 대덕대로 415, 105동 906호 (만년동, 상아아파트)  
    (뒷면에 계속)  
(74) 대리인  
    **공인복**

전체 청구항 수 : 총 12 항

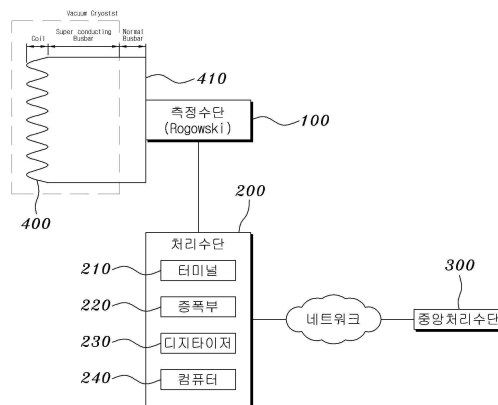
심사관 : 김주식

(54) 발명의 명칭 **초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치**

**(57) 요약**

본 발명은 초전도 토카막 장치의 초전도 코일에 흐르는 전류를 측정하여 이를 켄치 검출장치에 이용하고 하는 장치에 관한 것으로, 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치에 관한 것으로, 초전도 토카막 장치에 구비되는 초전도 코일의 켄치를 검출하기 위한 켄치 검출 장치에 있어서, 상기 초전도 코일에 전류를 공급하는 노말 버스바에 코일 전류를 측정할 목적으로 쉽게 탈부착이 가능한 측정수단, 상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 측정값을 출력하는 처리수단 및 상기 처리수단에서 검출된 측정값을 전달받아 켄치발생 여부를 확인하여 토카막 장치의 초전도 영역을 제어하는 중앙처리수단을 포함하는 한다. 이와 같이 구성되는 본 발명은 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 복잡한 설비 없이 노말 버스바에서 설치하여 용이하게 검출하여 제어할 수 있는 이점이 있다.

**대표도 - 도2**



(72) 발명자

**김영욱**

대전광역시 서구 만년남로 8, 101동 1004호 (만년  
동, 상록수아파트)

**요네가와 히로후미**

대전광역시 유성구 노은서로 222, 열매마을 103동  
901호 (지족동)

---

**특허청구의 범위**

**청구항 1**

초전도 토카막 장치에 구비되어 초전도 코일의 켄치를 검출하는 초전도 코일의 켄치를 검출하기 위한 켄치 검출 장치에 있어서,

상기 초전도 코일에 전류를 공급하는 노말 버스바에 설치되는 것으로, 상기 초전도 코일의 전류를 측정하는 측정수단;

상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 측정값을 출력하는 처리수단; 및

상기 처리수단에서 검출된 측정값을 전달받아 켄치 발생여부를 확인하여 토카막 장치의 초전도 영역을 제어하는 중앙처리수단;을 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정 장치.

**청구항 2**

제 1항에 있어서, 상기 측정수단은,

Rogowski코일을 사용하는 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 3**

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 디지털타이저; 및

상기 디지털타이저를 통해 제공되는 전압값을 수학적 모델링을 통해 해석하여 켄치 발생여부를 검출하는 컴퓨터;로 구성되는 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 4**

제 1항에 있어서, 상기 처리수단은,

초전도 토카막 장치의 1회 운전 동안 발생하는 펄스전류를 측정하며, 1회 운전 시간은 최대 300초 이내인 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 5**

제 1항에 있어서, 상기 처리수단과 중앙처리수단은,

이더넷을 통한 네트워크망으로 연결되는 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 6**

제 1항 또는 제 3항에 있어서, 상기 처리수단은,

수치적분 방식으로 초전도 코일에 흐르는 펄스 전류를 계산한 후 켄치 검출에 이용되는 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 7**

제 1항에 있어서, 상기 처리수단은,

상기 측정수단에서 발생하는 2차 전압을 노말 버스바에 해당하는 1차 전류에 환산하는 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 8**

제 1항에 있어서, 상기 중앙처리수단은,

초전도 버스라인을 통해 초전도 코일로 전류를 공급하는 MPS를 제어하는 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 9**

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 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 10**

삭제

**청구항 11**

초전도 토카막 장치에 구비되어 초전도 코일의 켄치를 검출하는 초전도 코일의 켄치를 검출하기 위한 켄치 검출 장치에 있어서,

상기 초전도 코일에 전류를 공급하는 노말 버스바에 설치되어 초전도 코일에 흐르는 전류를 측정하기 위한 측정 수단; 및

상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 최종값을 출력하는 처리수단;을 포함 하여 구성되는 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 12**

제 11항에 있어서, 상기 처리수단은,

상기 측정수단과 연결되는 터미널;

상기 터미널에서 제공되는 전압을 전달받는 증폭부;

상기 증폭부에서 제공되는 전압값을 수치화하는 디지털타이저; 및

상기 디지털타이저를 통해 제공되는 전압값을 수학적 모델링을 통해 해석하여 켄치 발생여부를 검출하는 컴퓨터;로 구성되는 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 13**

제 11항에 있어서, 상기 측정수단은,

Rogowski 코일을 사용하는 것을 특징으로 하는 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치.

**청구항 14**

삭제

**명세서**

**발명의 상세한 설명**

**기술분야**

[0001] 본 발명은 초전도 토카막 장치의 퀘치 검출을 위한 코일전류 측정장치에 관한 것으로, 좀 더 상세하게는 노말 버스바에 코일 전류를 측정할 목적으로 쉽게 탈부착이 가능하도록 고안된 측정수단에 의해 퀘치의 검출을 실시간으로 검출하는 퀘치 검출장치에 관한 것이다.

**배경기술**

[0002] 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.

[0003] 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.

[0004] 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.

[0005] 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.

[0006] 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.

[0007] 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.

[0008] 이러한 초전도 코일은 운전 도중 AC 손실(자기장 변화에 따른 전압의 유도로 발생된 전류에 의해 발생하는 손실 ; 페러데이 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 변화하는 현상을 퀘치(Quench)라 하며, 퀘치는 선재의 온도상승을 만들게 되며 자석의 어떤 부분의 초전도성을 파괴시킨다.

[0009] 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.

[0010] 이러한 과정 동안 퀘치 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.

- [0011] 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.
- [0012] 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.
- [0013] 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 기술 개발을 달성하였다.
- [0014] 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.
- [0015] 초전도 코일의 전류를 측정하는 장치로 가장 단순한 형태의 셉트 저항은 직접 노말 버스바에 결합하는 형태이므로 설치가 어렵고, Joule 발열 문제로 장치의 대형화를 초래하며, DC current transformer(DCCT)도 직접 노말 버스바에 결합하는 형태로 높은 전류를 측정하기 위해서는 매우 높은 비용이 요구되는 문제점이 있다.

**발명의 내용**

**해결 하고자하는 과제**

- [0016] 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 본 발명은 우선적으로 초전도 토카막 장치에서 초전도 코일의 초전도 상태를 상실케 하는 켄치를 검출하여 초전도 토카막 장치 운전의 안정성과 신뢰성을 확보하고자 하는데 그 목적이 있다.
- [0017] 또한, 켄치 검출을 위한 검출 장치를 최소화하고 설치가 매우 용이한 켄치 검출 장치를 제공하고자 하는데 그 목적이 있다.
- [0018] 또한, 켄치 발생여부를 실시간으로 감시하여 토카막 장치 운전의 안정성과 신뢰성을 확보하고자 하는데 그 목적이 있다.
- [0019] 또한, 네트워크망을 통해 여러 관리자가 어디에서든 켄치 발생 여부를 확인하여 좀 더 정확한 조치를 행할 수 있도록 하고자 하는데 그 목적이 있다.

**과제 해결수단**

- [0020] 상기와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명은 초전도 토카막 장치에 구비되는 초전도 코일의 켄치를 검출하기 위한 켄치 검출 장치에 있어서, 상기 초전도 코일에 전류를 공급하는 노말 버스바에 설치되어 초전도 코일의 전류를 측정하는 측정수단, 상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 측정값을 출력하는 처리수단 및 상기 처리수단에서 검출된 측정값을 전달받아 켄치 발생여부를 확인하여 토카막 장치의 초전도 영역을 제어하는 중앙처리수단을 포함하는 구성되는 것을 특징으로 한다.
- [0021] 또한, 상기 측정수단은, Rogowski 코일을 사용하는 것을 특징으로 한다.
- [0022] 또한, 상기 처리수단은, 상기 측정수단과 전기적으로 연결되는 터미널, 상기 터미널에서 제공되는 아날로그 신호를 증폭시키는 증폭부, 상기 증폭부에서 제공되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환시키는 디지털타이저 및 상기 디지털타이저를 통해 제공되는 전압값을 수학적 모델링을 통해 해석하여 켄치 발생여부를 검출하는 컴퓨터로 구성되는 것을 특징으로 한다.
- [0023] 또한, 상기 처리수단은, 초전도 토카막 장치의 1회 운전 동안 발생하는 펄스전류를 측정하며, 1회 운전 시간은 최대 300초 이내인 것을 특징으로 한다.

- [0024] 또한, 상기 처리수단과 중앙처리수단은, 이더넷을 통한 네트워크망으로 연결되는 것을 특징으로 한다.
- [0025] 또한, 상기 처리수단은, 수치적분 방식으로 초전도 코일에 흐르는 펄스 전류를 계산한 후 켄치 검출에 이용되는 것을 특징으로 한다.
- [0026] 또한, 상기 처리수단은, 상기 측정수단에서 발생하는 2차 전압을 노말 버스바에 해당하는 1차 전류에 환산하는 것을 특징으로 한다.
- [0027] 또한, 상기 중앙처리수단은, 초전도 버스라인을 통해 초전도 코일로 전류를 공급하는 MPS를 제어하는 것을 특징으로 한다.
- [0028] 또한, 상기 측정수단은, 상기 노말 버스바에 설치되어 이와 자기적으로 결합함에 따라 core-less 트랜스를 형성하는 것에 의해 전류를 검출하는 것을 특징으로 한다.

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

- [0029] 또한, 상기 측정수단은, 수학적  $I(t) = \int_0^t \frac{di}{dt} = \frac{1}{K_R} \int_0^t e_s dt$  를 통해 전압을 시간 적분하여 측정값을 산출하는 것을 특징으로 한다.
- [0030] 또한, 초전도 토카막 장치에 구비되는 초전도 코일의 켄치를 검출하기 위한 켄치 검출 장치에 있어서, 상기 초전도 코일에 전류를 공급하는 노말 버스바에 설치되어 초전도 코일에 흐르는 전류를 검출하기 위한 측정수단 및 상기 측정수단으로부터 측정된 측정값을 수학적 알고리즘을 통해 해석하여 최종값을 출력하는 처리수단을 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.
- [0031] 또한, 상기 처리수단은, 상기 측정수단과 연결되는 터미널, 상기 터미널에서 제공되는 전압을 전달받는 증폭부, 상기 증폭부에서 제공되는 전압값을 수치화하는 디지털이저 및 상기 디지털이저를 통해 제공되는 전압값을 수학적 모델링을 통해 해석하여 켄치 발생여부를 검출하는 컴퓨터로 구성되는 것을 특징으로 한다.
- [0032] 또한, 상기 측정수단은, Rogowski 코일을 사용하는 것을 특징으로 한다.

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

- [0033] 또한, 상기 측정수단은, 수학적  $I(t) = \int_0^t \frac{di}{dt} = \frac{1}{K_R} \int_0^t e_s dt$  를 통해 전압을 시간 적분하여 측정값을 산출하는 것을 특징으로 한다.

**효 과**

- [0034] 이와 같이 구성되고 작용되는 본 발명은 초전도 토카막 장치의 운전 중 여러 가지 요인들로 인해 초전도 코일의 초전도성이 상실되는 현상인 켄치 발생을 본 발명으로 인해 기존의 켄치 검출장치의 안정성을 크게 향상시켜 초전도 토카막 장치의 안정적인 운전과 신뢰성을 확보할 수 있는 효과가 있다.
- [0035] 또한, 켄치 발생을 검출하고 이를 실시간으로 모니터링 할 수 있기 때문에 한층 더 높은 안정적인 운전과 네트워크망을 통해 어디서든지 여러 관리자가 확인할 수 있기 때문에 상황에 따라 좀 더 정확한 조치를 행할 수 있는 효과가 있다.

**발명의 실시를 위한 구체적인 내용**

- [0036] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치의 바람직한 실시예를 상세히 설명하면 다음과 같다.
- [0037] 도 2는 본 발명에 따른 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치를 나타낸 개략도, 도 3은 본 발명에 따른 켄치 검출을 위한 측정수단인 Rogowski 코일의 개략도, 도 4는 본 발명에 따른 Rogowski 코일의 전기 특성의 등가회로를 나타낸 도면, 도 5는 본 발명에 따른 Rogowski 코일의 층간 용량의 모델을 도시한 도면, 도 6

은 측정수단이 노말 버스바에 설치된 상태를 나타낸 상태도이다.

- [0038] 본 발명에 따른 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.
- [0039] 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 것으로써, 상기 측정수단은 본 발명의 주요 기술적 요지에 해당하며, 상기 노말 버스바에 설치할 수 있도록 Rogowski(로고스키)코일로 구성된다.
- [0040] Rogowski코일은 원환상(toroidal)의 감은 선 및 이것의 내부를 지나는 되감은 선으로 구성되는 코일으로써, 주로 교류전류나 펄스전류의 측정에 사용된다. 일반적인 계기용 변류기(current transformer, CT)와 비교하여 Rogowski코일은 자성코어를 가지고 있지 않기 때문에 히스테리시스나 포화, 자기손실을 갖지 않으며, 소형/경량의 특징이 있다.
- [0041] 도 2는 Rogowski코일의 개념도를 나타낸 것으로, 측정대상 전류가 흐르는 노말 버스바는 상기 Rogowski 코일과 자기적으로 결합하여 core-less트랜스를 형성한다. 따라서, 노말 버스바는 1차 도체라고 불리고, 측정대상의 전류는 1차 전류로 한다. 또한, 상기 Rogowski코일에서 발생하는 유도전압은 2차 전압이라 한다.
- [0042] 원형단면을 가진 Rogowski코일에 대해, 감은 축의 투자율을  $\mu$  (H/m), 감은 축의 단면반경을  $r$  (m), 주반경을  $R$  (m), 도선의 감은 수를  $N$ 이라고 한다면, 1차 전류  $I$  (A)에 의해 Rogowski코일에 발생한 기전력  $e_s$  (V), Rogowski코일의 상호 유도계수는  $K_R$ 이며, 아래 수학적 식 1로 표시된다.

**수학적 식 1**

[0043] 
$$e_s = \frac{\mu\pi^2 N}{2\pi R} \frac{di}{dt} = \frac{\mu SN}{l} \frac{di}{dt} = K_R \frac{di}{dt}$$

[0044] 1차 전류값은 상기 수학적 식 1을 시간 적분하여 얻어지며, 이것은 아래 수학적 식 2로 표시된다.

**수학적 식 2**

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

[0045] 삭제

[0046] 1차 전류가 정현파 교류 전류라면 상기 수학적 식 1과 같은 2차 전압을 교류 전압계를 사용하여 측정하고, 실효전압을 실효전류로 환산하는 것에 의해 1차 전류는 간단히 산출된다.

1차 전류가 정현파 교류 전류가 아니라면 적분기를 사용하여 상기 수학적 식 2와 같이 시간 적분함으로써 통해 1차 전류를 산출한다.

[0047] 상기 Rogowski코일의 전기특성 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.



[0048] 원형단면을 가진 Rogowski 코일의 자기 인덕턴스 L은 아래 수학적 식 3으로 표시된다.

수학적 식 3

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

[0049]

[0050] 상기 Rogowski 코일의 감은 선 부분을 도 4에 나타난 바와 같이 모델화하여 감은 선부분의 유전율을  $\epsilon$  (F/m), 내 반경을  $a$  (m), 외반경을  $b$  (m), 길이를  $l$  (m), 층수를  $n$ 으로 한다면, Rogowski 코일의 충전용량  $C_s$ (F)는 아래 수학적 식 4와 같이 표시된다.

수학적 식 4

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

[0051]

[0052] 위와 같이, Rogowski 코일은 순수한 전압원이 아니라, 그 자체의 내부에 RLC 회로를 갖는다. 특히 고주파 영역에서는 gain(동축케이블 끝머리에서의 전압  $e_r$  / 코일에 발생하는 기전력  $e_s$ ), 위상, 공진주파수 등의 주파수 특성에 주의가 필요하다.

[0053] 수치적분법이라는 것은 함수의 미분치에 가중치를 곱하고 수치적으로 가산하여 답을 구하는 수법으로, 미분방정식을 대수적으로 적분하여 답을 구하는 대수적 적분법과는 다르다. 일반적인 수법으로 Newton-Cotes formulas를 사용한 수법과 Gaussian quadrature가 있다. 이것들은 분할통치전략에 근거한 수법이고, 큰 집합에 대한 적분을 작은 집합의 적분으로 분할하고서 값을 구한다. 단, 고차적분에서는 이 수법들을 사용한 계산량은 방대해지기 때문에, Monte Carlo method와 같은 확률적 알고리즘이나 sparse grid method와 같은 최적화 알고리즘 등의 방법이 적용된다. 본 발명에서는 일반적인 Newton-Cotes formulas를 사용한 수치적분법을 사용한다.

[0054] Newton-Cotes formulas는 구분구적법에 관한 총칭으로 Newton-Cotes formulas에서 "단한 경우"의 공식과 "열린 경우"의 공식이라는 2가지가 있다. 본 발명에서는 "단한 경우"를 다루며, 이 경우의  $n$ 차 공식은 Lagrangian interpolation을 사용하여 아래 수학적 식 5와 같이 나타낸다.

수학적 식 5

$$\int_a^b f(x)dx \approx \int_a^b L(x)dx = \int_a^b \sum_{i=0}^n f(x_i)l_i(x)dx$$

$$= \sum_{i=0}^n \int_a^b f(x_i)l_i(x)dx = \sum_{i=0}^n f(x_i) \int_a^b l_i(x)dx = \sum_{i=0}^n w_i f(x_i)$$

[0055]

[0056] 여기서,  $L(x)$ 은 주어진 요소  $\{(x_0, f(x_0)), \dots, (x_n, f(x_n))\}$ 에 관한 Lagrangian interpolation에 의한 보간 다항식이다. 이 식은 Newton-Cotes formulas가 취한 값이 함수 전체가 아닌  $x_i$ 만으로 정하는 것을 의미한다. 1차에서 4차까지의 공식을 아래에 나타낸다. 적분치의 요소수는 미분치의 요소수의 (1/차수)가 되고, 예를 들면

4차의 공식이라면 1/4이 된다. 이 때문에 고차 공식에서는 요소수(시간해상도)의 감소에 주의할 필요가 있다.

[0057] 1차수 Trapezium rule

[0058] 식  $\frac{h}{2}(f_0+f_1)$ , 오차항  $-\frac{h^3}{12}f^{(2)}(\xi)$

[0059] 2차수 Simpson's rule

[0060] 식  $\frac{h}{3}(f_0+4f_1+f_2)$ , 오차항  $-\frac{h^5}{90}f^{(4)}(\xi)$

[0061] 3차수 3/8 rule

[0062] 식  $\frac{3h}{8}(f_0+3f_1+3f_2+f_3)$ , 오차항  $-\frac{3h^5}{80}f^{(4)}(\xi)$

[0063] 4차수 Bool's rule

[0064] 식  $\frac{2h}{45}(7f_0+32f_1+12f_2+32f_3+7f_4)$ , 오차항  $-\frac{8h^7}{945}f^{(6)}(\xi)$

[0065] 우선, 초전도 코일 및 초전도 버스라인의 켄치 검출을 위한 적용에 앞서 상기 Rogowski코일의 임피던스를 측정한다. 임피던스의 측정은 공지의 RCL미터를 사용하여 Rogowski코일의 저항 R(Ω), 자기 인덕턴스 L(H), 상호 인덕턴스 M(H)을 측정한다. 통전전류는 약 10mA, 교류의 주파수는 50Hz에서 1MHz까지이다. 본 발명에서 사용된 RCL미터의 일예로 FLUKE사의 PM6306이다.

[0066] 상호 인덕턴스 M은 Rogowski코일의 상호 유도계수  $K_R$ 와 같다. 이 상호 유도계수  $K_R$ 은 극히 작아 1차측에 전류 리드 1가닥을 통하게 하는 것만으로 측정할 수 없다. 그리하여 Rogowski코일의 1차측에 절연피복 도선을 100회 감아 상호 인덕턴스를 측정하고, 이 측정치의 1/100을 M 및  $K_R$ 이라고 했다.

[0067] 여기서 아래 표에 나타난 사양에 근거해 상호 유도계수  $K_R(H)$ 를 산출해본다. 1차 전류의 실효치를 I(A), 2차 전압의 실효치를 V(V), 각 주파수를  $\omega$  (rad/s), 주파수를  $f$  (Hz)라고 한다면, 상기 수학식 1에서 Rogowski코일의 상호 유도계수  $K_R$ 은 아래 수학식 6과 같이 나타난다.

**수학식 6**

[0068] 
$$K_R = \frac{V}{\omega I} = \frac{V}{2\pi f I}$$

[0069] V=0.2 V, I = 630A,  $f$  = 60Hz를 상기 수학식 6에 대입하면,  $K_R=0.84 \mu H$ 이다. 단 이 값은 출고된 Rogowski코일의 기본 사양값에 근거한 계산치로, 만일 사양이 틀릴 경우에는 이 계산치는 정확하지 않다.

[0070]

항목	사양
1차 전류	630A(*)
2차 전압	200mV(*)
변류비 오차	±1.0%
위상각 오차	±60분

Case 재질	Nylon6 GF 30%(black)
Wire 재질	Teflon
Wire 길이	80mm(twisted)
코일 molding	Epoxy(black)

- [0071] 앞서 설명한 바와 같이 측정수단으로 사용되는 상기 Rogowski코일의 사양과 그의 해석을 위한 수학적 모델링은 일실시예에 불과할 뿐, 얼마든지 변경될 수 있다는 것은 물론이다.
- [0072] 이처럼 Rogowski코일과 수치적분을 실행하는 후술한 처리수단을 사용하여 100A정도의 작은 펄스전류를 140s 정도의 장시간에 걸쳐 측정한다. 적분 처리하는 리얼타임의 아닌 먼저 Rogowski코일의 2차 전압을 측정하는 동안에 1차 도체에 펄스전류를 반복 흐르게 하여 그것을 끝낸 후에 측정된 2차 전압을 컴퓨터를 사용하여 처리한다. 펄스전류 정상부의 길이는 3s정도이고, 전류변화 속도는 20 내지 500A/s이다.
- [0073] 처리수단(200)은 상기 측정수단인 Rogowski코일에서 측정된 값(2차 전압)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.
- [0074] 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), 디지털타이저(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 변환전에 측정수단(100)의 아날로그 신호를 증폭하여 SNR(Signal to Noise Ratio)를 향상시키기 위한 것이다.
- [0075] 또한, 상기 디지털타이저(230)는 증폭부(220)에 의해 증폭된 아날로그 신호를 디지털로 변화시키고, 이 디지털 신호는 상기 컴퓨터에 의해 최종적으로 분석/처리하게 된다.
- [0076] 1차 전류의 파형은 출력전압, 출력전류, 그것들의 변화율(slew rates), 대기시간에 의해 정의된다. Rogowski코일의 전압 측정과 1차 전류 통전은 LabVIEW 프로그램에 의해 자동적으로 연동하게 된다.
- [0077] 검출된 샘플링 속도는 채널 당 10kS/s이나, 2점마다 평균치를 산출하여 속도를 5kS/s로 떨어뜨린 후에 측정치를 상기 컴퓨터에 기록한다. 이와 같은 속도로 측정하는 이유는 상기 증폭부(220)의 low-pass필터의 주파수 10kHz에 될 수 있는 가까운 속도로 샘플링 하는 것에 의해 aliasing noise를 가능한 줄이기 위해서이다.
- [0078] 이처럼 본 발명은 노말 버스라인에 설치되어 여기에 흐르는 전류에 따른 자기적 결합에 의해 측정수단에서 발생하는 2차 전압을 측정수단을 통해 검출하고 이를 처리수단에 의해 검출하여 초전도 코일에 흐르는 전류를 측정하여 초전도 코일과 초전도 버스라인의 켄치 검출에 이용될 수 있다.
- [0079] 또한, 본 발명에 따른 다른 실시예로 켄치 발생여부를 실시간으로 모니터링하고 이를 제어하기 위한 구성이 제안된다.
- [0080] 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 원격지에서 모니터링과 제어를 할 수 있으며, 초전도 코일로 전류를 공급하는 MPS(magnet Power Supply)의 제어도 담당한다.
- [0081] 상기 처리수단에 검출된 켄치 발생여부를 실시간으로 전송하며, 중앙처리수단(중앙서버)에서는 관리자에 의한 모니터링을 통해 확인하고 MPS를 제어하여 켄치 발생 시 신속히 처리한다.
- [0082] 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.
- [0083] 이와 같이 구성되는 본 발명은 저비용의 Rogowski코일을 이용하여 초전도 코일과 초전도 버스라인의 켄치 검출

을 위해 노말 버스바(normal bus bar)에 설치하여 초전도 코일의 켄치 발생여부를 용이하게 검출할 수 있는 이점이 있다.

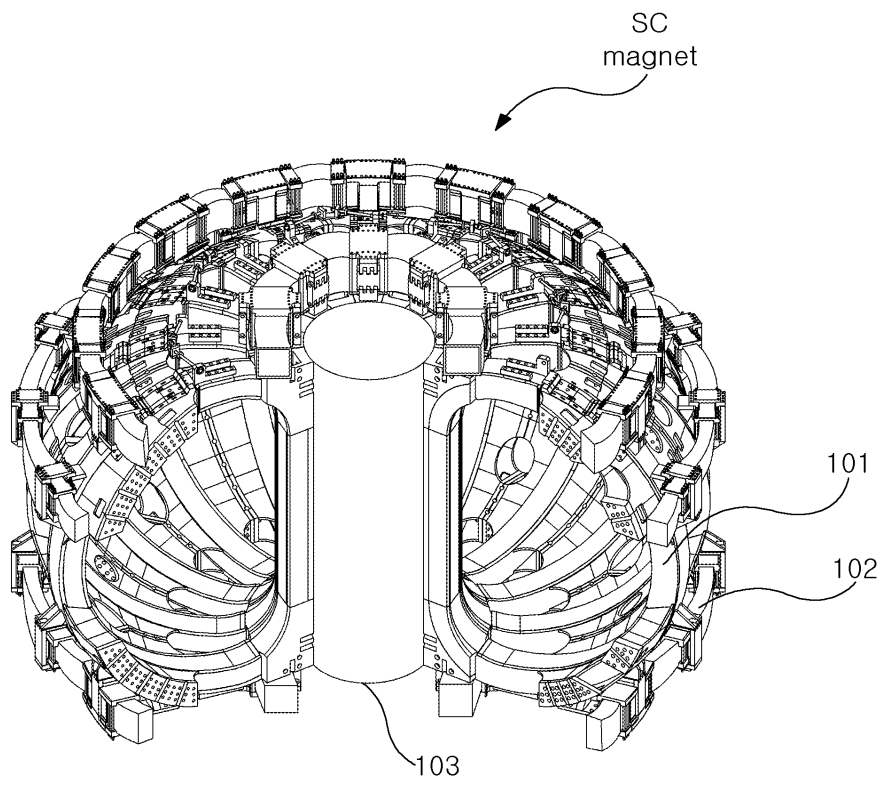
- [0084] 또한, 24시간 운전되는 토카막 장치의 초전도 코일(자석)에서 발생하는 켄치를 실시간으로 중앙처리수단을 통해 관리자에 의한 모니터링과 제어가능하고 이에 따른 긴급 상황에서도 신속한 조치를 행할 수 있게 된다.
- [0085] 이상, 본 발명의 원리를 예시하기 위한 바람직한 실시예와 관련하여 설명하고 도시하였지만, 본 발명은 그와 같이 도시되고 설명된 그대로의 구성 및 작용으로 한정되는 것이 아니다.
- [0086] 오히려, 첨부된 청구범위의 사상 및 범주를 일탈함이 없이 본 발명에 대한 다수의 변경 및 수정이 가능함을 당업자들은 잘 이해할 수 있을 것이다. 따라서 그러한 모든 적절한 변경 및 수정과 균등물들도 본 발명의 범위에 속하는 것으로 간주되어야 할 것이다.

**도면의 간단한 설명**

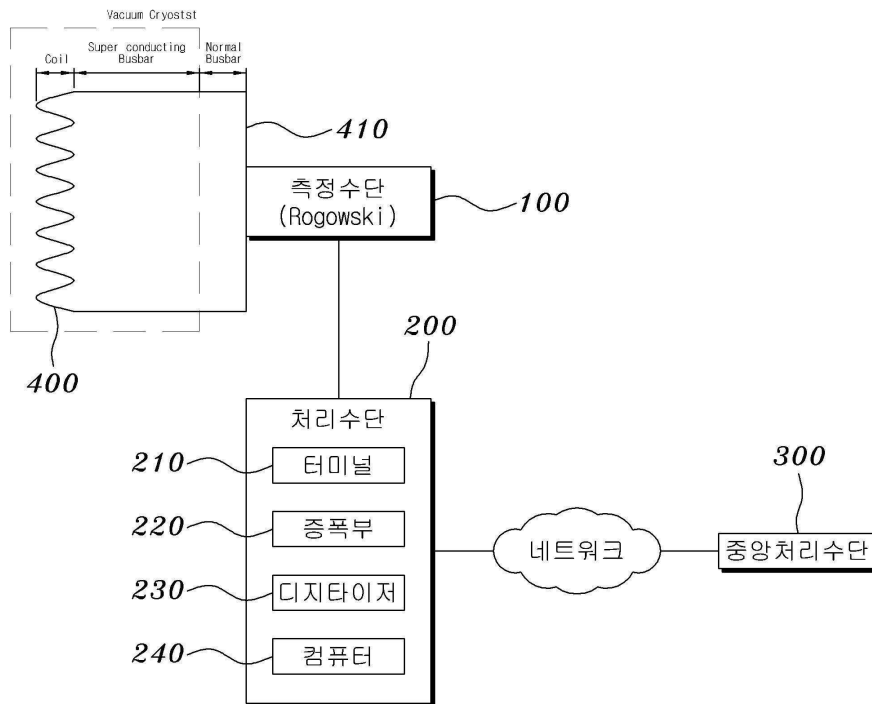
- [0087] 도 1은 초전도 토카막 장치에 구성되는 초전도 코일 시스템의 부분 절개도,
- [0088] 도 2는 본 발명에 따른 초전도 토카막 장치의 켄치 검출을 위한 코일전류 측정장치를 나타낸 개략도,
- [0089] 도 3은 본 발명에 따른 켄치 검출을 위한 측정수단인 Rogowski 코일의 개략도,
- [0090] 도 4는 본 발명에 따른 Rogowski 코일의 전기특성의 등가회로를 나타낸 도면,
- [0091] 도 5는 본 발명에 따른 Rogowski 코일의 층간 용량의 모델을 도시한 도면,
- [0092] 도 6은 측정수단이 노말 버스바에 설치된 상태를 나타낸 상태도.
- [0093] <도면의 주요부분에 대한 부호의 설명>
- [0094] 100 : 측정수단                      200 : 처리수단
- [0095] 210 : 터미널                        220 : 증폭부
- [0096] 230 : 디지털타이저                240 : 컴퓨터
- [0097] 300 : 중앙처리수단                400 : 초전도 코일
- [0098] 410 : 노말 버스바

도면

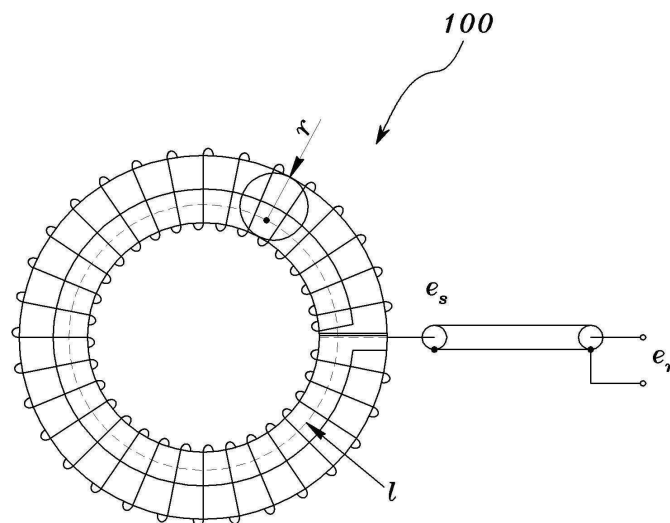
도면1



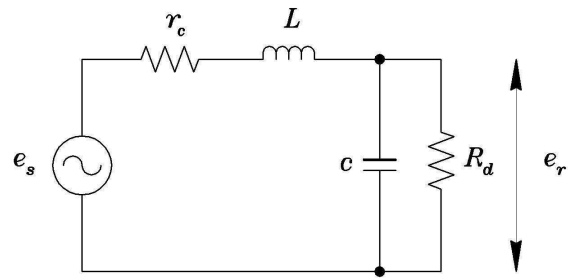
도면2



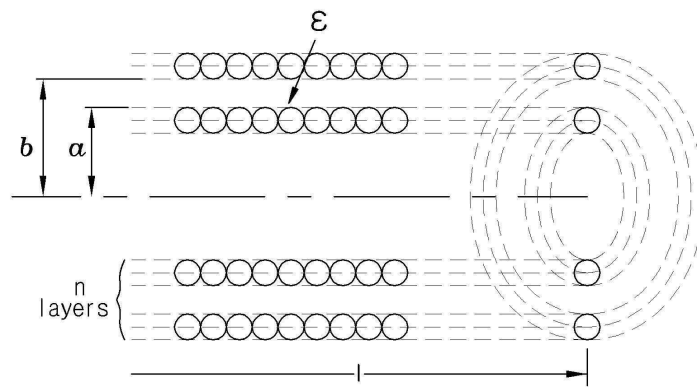
도면3



도면4



도면5



도면6

