

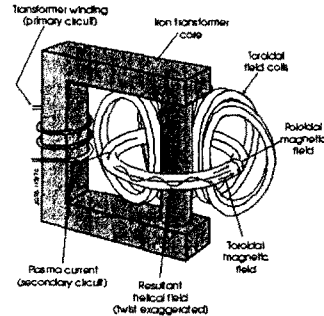
Plasma Current에 의한 Tokamak Poroidal Field Coil의 Inductance 특성

정윤도*, 이승재*, 김태중**, 김기만***, 고태국*
 연세대학교 전기.컴퓨터 공학과*, 성남기능대 전기과**, 삼성 종합기술 연구원***

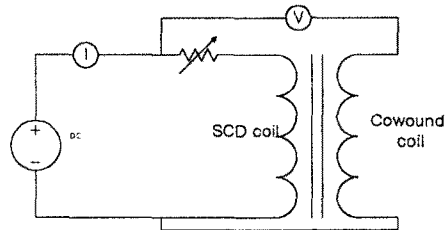
Inductance Characteristics of Tokamak Poroidal Field Coil by the Plasma Current

Yoon-Do Chung*, Seungje Lee*, Tae-Joong Kim**, Kee-Man Kim***, Tae-Kuk Ko*
 Dept. of Electrical and Computer Engineering, Yonsei University*, Dept. of EE,
 Sungnam Polytechnic College**, SAIT***

Abstract - The large scale magnets like thermalnuclear fusion devices are necessary for superconducting CICC cable. When the Cable In Conduit Conductors(CICC) is occurred by the external turbulence, the CICC occurs to quench. The CICC can be broken because the CICC spends all energy in the quench-happened spot. Therefore, it is necessary to develop measurement systems of the quench detection. The measurement systems of the relative good degree of efficiency are the voltage tap sensors. The weak points of voltage tap sensors are effected by EMF noise and inductance. The thermalnuclear fusion devices easily can't measure inductance value because of Plasma current. In the experiment, The value of inductance was estimated by FEM techniques and the decrement of Inductance value measured as long as remaining plasma current.



〈그림 1〉 KSTAR 핵융합발전기의 마그네틱 시스템



〈그림 2〉 Voltage Tap Sensor이 설치된 Tokamak Magnet의 회로도

1. 서 론

대용량의 마그넷이 필요한 열 핵융합 장치에서 쓰이는 초전도 Cable in Conduit Conductors (CICC)는 특정 외부 교란이 발생할 경우 상이 전이되는 Quench가 발생하게된다. 이때 자석에 저장되어있는 모든 에너지는 Quench가 발생한 국부적인 부분에서 모두 소비되어 초전도 Cable을 파괴시킬 수 있다. 따라서 이러한 초전도 Cable의 파괴를 막기 위한 보호 계측 시스템의 개발이 매우 중요하다. 보통의 경우 이 같은 계측 시스템으로 Voltage Tap Sensor가 많이 사용되어진다. 그러나 Voltage tap sensor의 경우 EMF노이즈에 취약하고 인덕턴스 값에 큰 영향을 받는 단점이 있다. 또한 열 핵융합 장치에서는 Plasma Current가 유기기 때문에 인덕턴스 측정이 용이하지 않다. 본 논문에서는 FEM기법을 사용하여 인덕턴스를 추정하였고 Plasma가 존재할 경우 마그넷의 인덕턴스가 감소함을 확인하여서 그때 예측한 Inductive Voltage를 이용하여 PF Coil에서의 Quench detection을 한다.[1].

코일의 인덕턴스값에 의해서 수십만 Volt의 전압이 발생한다. 그래서 Quench시의 전압을 측정하기가 어렵다. 따라서 Plasma Current에 의해 전압이 유기되는데 이것을 FEM기법을 이용하여 추정하였다. 〈그림2〉는 Tokamak Magnet에 Voltage Tap Sensor를 설치하여서 초전도 코일의 인덕턴스값을 감소시켜 PF Coil 내에서의 Quench가 발생한 지점을 detection하기 위하여 설치하였다. Plasma Current에 의해 발생된 고자장에 의해 Poroidal Field Coil의 인덕턴스값을 FEM 기법에 의해 값을 추정하였다.

2. 시스템 설계

〈그림1〉은 KSTAR Tokamak의 Poroidal Field Coil과 그에 의한 Plasma Current의 설계모형을 나타낸 그림이다. Poroidal Field Coil에는 Plasma current에 의해서 200000A/S이상 발생하며 이로 인해 PF coil은 Quench가 발생할 경우 이때 Quench에 의해 생긴 전압은 수십mV이다. 그러나 Plasma current에 의해 전류가 200000A/S이상까지 전류가 Pumping-up 되므로 펌핑전류에 의해 초전도

3 시스템 원리

〈그림2〉에서 Quench시의 전압은 Governing Equation에 의해서 식(1)과 같다

$$v_t = v_s + v_{in} = r_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} \quad \text{-----(1)}$$

또한 $v_s = v_s + v_{in} \approx r_s i_s = v_t$ 이므로

식(2)에서 인덕턴스 값을 구할 수 있다.

$$v_s = v_t - L_s \frac{di_s}{dt} \quad \text{-----}(2)$$

따라서 Plasma Current에 의해 발생한 인덕턴스값을 FEM 기법으로 추정하고 그 값을 이용하여 Co-Wound Voltage Tap Sensor에 의해 Quench시의 전압값은 식(3)과 같다

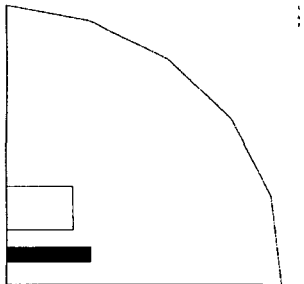
$$\begin{aligned} v_t &= v_s + v_{in} - v_{co} = r_s i_s (L_s - L_m) \frac{di_s}{dt} \\ &= r_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} \quad \text{-----}(3) \end{aligned}$$

4. 파라미터 값

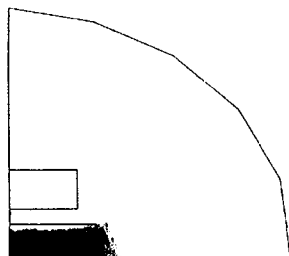
다음은 <그림2>에서 사용된 Co-wound Voltage Tap에서 사용된 파라미터값이다.

- v_t : Total Voltage
- v_s : Quench 시의 Voltage
- v_{in} : Induced Voltage
- r_s : 초전도체의 Quench 저항
- i_s : 전체전류
- L_s : 초전도 코일의 인덕턴스 값
- v_{co} : Co-Wound 된 Voltage
- L_m : Co-Wound Voltage Tap에 의한 Mutual inductance

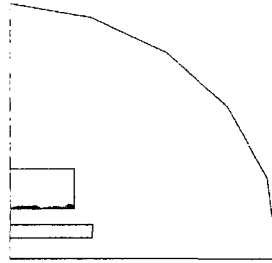
5. 시뮬레이션 결과



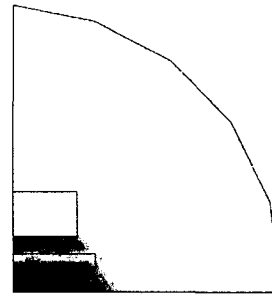
<그림 3> plasma conductivity 가 1.0e+4일때의 전류분포



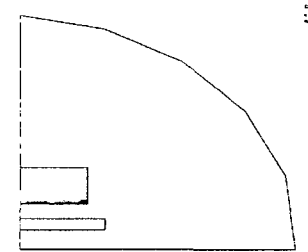
<그림 4> plasma conductivity 가 1.0e+4일때의 Flux분포



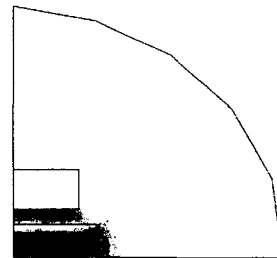
<그림 5> plasma Conductivity 가 1.0e+8일때의 전류분포



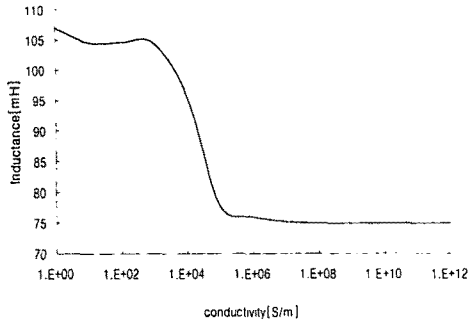
<그림 6> plasma Conductivity 가 1.0e+8일때의 flux분포



<그림 7> plasma conductivity 가 1.0e+12일때의 전류분포



<그림 8> plasma conductivity 가 1.0e+12일때의 Flux분포



〈그림 9〉 Plasma Cunductivity에 따른 인덕턴스 값의 변화

〈그림 3〉은 Plasma Conductivity가 1.0e+4일때 PF Coil과 Plasma의 전류분포를 FEM기법으로 Simulation한 결과이다. 〈그림 4〉는 Plasma Conductivity 1.0e+4일때 PF Coil과 Plasma의 Flux분포를 FEM기법으로 Simulation한 결과이다. 〈그림 5〉는 Plasma Conductivity가 1.0e+8일때 PF Coil과 Plasma의 전류분포를 FEM기법으로 Simulation한 결과이다. 〈그림 6〉은 Plasma Conductivity 1.0e+8일때 PF Coil과 Plasma의 Flux분포를 FEM기법으로 Simulation한 결과이다. 〈그림 7〉는 Plasma Conductivity가 1.0e+12일때 PF Coil과 Plasma의 전류분포를 FEM기법으로 Simulation한 결과이다. 〈그림 8〉은 Plasma Conductivity 1.0e+8일때 PF Coil과 Plasma의 Flux분포를 FEM기법으로 Simulation한 결과이다. 〈그림 9〉은 Plasma conductivity 값의 변화에 따른 PF Coil의 인덕턴스 값의 변화를 나타낸 것이다. Plasma의 Resistivity의 값은 대체로 구리 보다는 크지만 그값이 수백KV정도이다. Plasma의 resistivity 는 식(4)의 Spitzer의 식을 이용해서 결정했다.[2]

$$\eta \approx 3 \times 10^{-8} Z_{eff} T_e^{-\frac{3}{2}} \text{-----(4)}$$

6. 결론

Plasma Current에 의해서 PF Coil의 인덕턴스값을 추정 한 결과 Plasma Current에 의해서 PF Coil의 인덕턴스값이 감소함을 발견했다. Plasma의 Conductivity가 1일 때 104.551mH 였고 Conductivity가 1.0e+4일 때 95.78mH였고 Conductivity가 1.0e+5일 때 인덕턴스 값이 76mH 정도로 감소함을 알았다. 따라서 Plasma Current에 의해서 PF Coil에서의 인덕턴스값이 현저하게 감소하는 것을 발견하였고 이것을 이용하여, PF Coil Ramping-Up시 나타나는 Inductive Voltage를 추정 할 수 있다.

[참고문헌]

[1] Yong Chu, HoMin Kim, TaeKuk Ko, KiMan Kim, "The Response Characteristics of Cowound Voltage Sensors in Cable-in-Conduit Conductor", IEEE Transaction. on Applied Superconductivity, 1999.6, vol.9, no.2, pp1157-1160

[2] E W Laing "Tokamak Plasma: A Complex Physical System" 1992, pp183