

# 국제 열핵융합실험로의 유도 결합된 초전도코일의 전류제어기법 검증

조종민 · 이재도 · 서재학\* · 차한주  
 충남대학교, 국가핵융합연구소\*

## Current control of the Inductively Coupled Superconducting Coils for International Thermonuclear Experimental Reactor

Jongmin Jo · Jaedo Lee · Jae Hak Suh\* · Hanju Cha  
 Chungnam National University, National Fusion Research Institute\*

### ABSTRACT

본 논문은 ITER의 플라즈마 제어를 위하여 자기적으로 결합된 초전도 PF 코일에 흐르는 전류를 제어하는 기법과 RTDS 실험결과를 분석하였다. MATLAB/SIMULINK를 이용하여 유도 결합된 4개의 초전도코일을 모델링하여 전류제어기법을 시뮬레이션하였으며, 실험은 RTDS를 이용하여 진행하였다. 각 부하전류가 전류 지령치를 추종할 때, 동시다발적으로 발생하는 상호인덕턴스와 전류 극성변화의 영향을 MIMO(Multi Input Multi Output) 시스템 기반으로 하여 각 초전도코일의 전압변화 특성을 해석하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 MIMO 시스템 특성의 유도 결합된 초전도코일의 전류제어 특성을 검증하였다.

### 1. 서론

유한한 자원과 지구 온난화에 따른 환경오염으로 인해 새로운 대체에너지원이 필수적이다. 친환경 에너지원으로서 신재생에너지와 더불어 미래 에너지 문제를 해결하기 위해 깨끗하고 안전한 핵융합 발전인 국제열핵융합실험로 (International Thermonuclear Experimental Reactor)가 차세대 에너지원으로 주목받고 있다<sup>[1]</sup>. ITER 토카막 장치는 자기장 밀폐형 진공용기로 핵융합 발전으로부터 얻은 고온의 플라즈마를 초전도코일에 의해 생성되는 강력한 자장으로부터 밀폐하는 중요한 역할을 수행한다<sup>[2]</sup>. ITER 토카막 장치에는 VS(Vertical Stabilization) PF(Poloidal Field), CC(Correction Coil) 등과 같은 다양한 초전도코일이 유도 결합된 형태로 구성되어 있다. 따라서, 각 초전도코일은 자기인덕턴스 이외에 상호인덕턴스의 영향에 의해 MIMO 시스템 특성을 갖는다. 각 초전도코일의 부하전류가 전류 지령치를 추종할 때, 주변에 위치한 다른 초전도코일이 미치는 상호인덕턴스와 전류의 극성변화에 의한 영향을 해석해야 할 필요성이 있다.

효과적인 핵융합 발전을 수행하기 위해서는 초전도코일에 안정한 부하전류가 흐를 수 있도록 MIMO 시스템의 특성을 고려한 전류제어기법이 필수적이다.

### 2. 유도결합된 초전도코일의 전류제어기법

#### 2.1 ITER 초전도 PF 코일 모델

그림 1은 4개의 초전도코일이 부하전류의 극성에 따라 자기적으로 결합된 형태의 회로이다. 초전도코일은 PF 코일이며, 초전도코일에 흐르는 부하전류는  $\pm 55\text{kA}$ , 전압제한은  $\pm 1000\text{V}$ 의 특성을 갖는다.

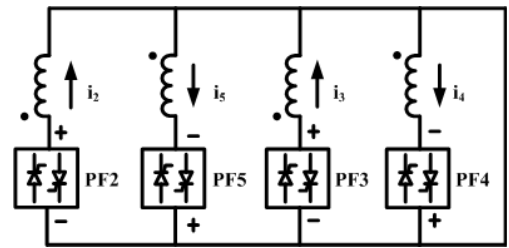


그림 1 유도 결합된 PF 초전도코일  
 Fig. 1 Inductively coupled PF superconducting coil

#### 2.2 유도 결합된 초전도코일의 전류제어기법

유도 결합된 초전도코일에 흐르는 부하전류는 자기인덕턴스와 상호인덕턴스에 의한 전류변화량으로 제어가 가능하다. 식 (1)은 각 초전도코일을 제어하기 위한 전압 지령치를 나타낸다.

$$\begin{aligned} V_{cmd2} &= L_{11} \frac{di_1}{dt_{11}} + L_{12} \frac{di_2}{dt_{22}} + L_{13} \frac{di_3}{dt_{33}} + L_{14} \frac{di_4}{dt_{44}} + Ri_2 \\ V_{cmd3} &= L_{22} \frac{di_2}{dt_{22}} + L_{21} \frac{di_1}{dt_{11}} + L_{23} \frac{di_3}{dt_{33}} + L_{24} \frac{di_4}{dt_{44}} + Ri_3 \\ V_{cmd4} &= L_{33} \frac{di_3}{dt_{33}} + L_{31} \frac{di_1}{dt_{11}} + L_{32} \frac{di_2}{dt_{22}} + L_{34} \frac{di_4}{dt_{44}} + Ri_4 \\ V_{cmd5} &= L_{44} \frac{di_4}{dt_{44}} + L_{41} \frac{di_1}{dt_{11}} + L_{42} \frac{di_2}{dt_{22}} + L_{43} \frac{di_3}{dt_{33}} + Ri_5 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (2)는 초전도코일들이 갖는 자기인덕턴스와 상호인덕턴스 값을  $4 \times 4$ 행렬로 표현한 것이며, 단위는 [H]이다. 식 (3)은 부하전류의 시간변화량에 해당하는 미소시간을 나타낸 행렬이다.

$$L = \begin{bmatrix} 0.4747 & 0.2394 & 0.1027 & 0.0470 \\ 0.2394 & 1.8555 & 0.4540 & 0.1832 \\ 0.1027 & 0.4540 & 1.5607 & 0.3597 \\ 0.0470 & 0.1832 & 0.3597 & 1.5557 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.05 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

#### 2.3 MATLAB/SIMULINK를 이용한 전류제어 모델링

그림 2는 MATLAB/SIMULINK를 이용한 유도 결합된 4개

의 초전도코일 전류제어 모델이다.

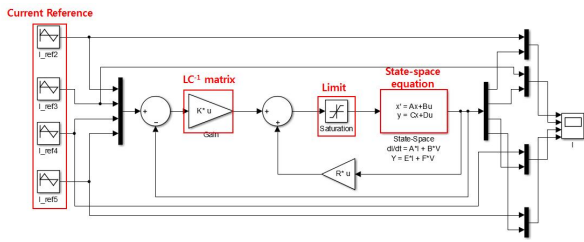


그림 2 MATLAB/SIMULINK를 이용한 초전도코일 전류제어 모델  
Fig. 2 Superconducting coil current control model

전류제어 모델의 전압 지령치는 MIMO 시스템이기 때문에 벡터에 의한 행렬식으로 식 (4)와 같이 정리할 수 있다. 초전도 코일의 부하전류는 전압 지령치를 입력으로 하는 상태 공간 방정식으로 유도될 수 있으며 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{cmd} &= L \frac{di}{dt} + Ri \\ &= LC^{-1}(I_{ref} - I) + RI \quad \because dt = C \\ &= K(I_{ref} - I) + RI \quad \because K = LC^{-1} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\dot{I} = AI + BV_{cmd} \quad \because A = L^{-1}R, B = L^{-1} \quad (5)$$

## 2.4 시뮬레이션 및 실험 결과

초전도코일 전류 지령치는 0~±55kA까지 상승하는 1/4주기 동안 PF2는 49.5초, PF 3,4,5는 198초의 전류변화 특성을 갖도록 설정하였다. 그림 3은 유도 결합된 초전도코일 전류제어기법에 대한 시뮬레이션 결과이다. 전류극성과 상호인덕턴스에 의해 주기적으로 변화하는 전압 지령치로부터 각 부하전류는 전류 지령치의 크기와 전류변화 시간을 정확히 추종하는 것을 알 수 있다.

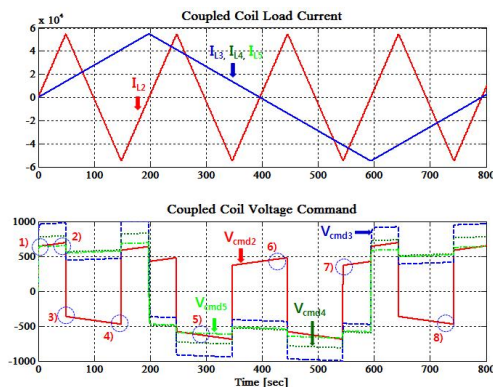


그림 3 유도 결합된 초전도코일 시뮬레이션 결과  
Fig. 3 Simulation results of the inductive coupled superconducting coil

표 1은 앞서 설명한 식 (1)의 계산결과와 그림 3의 시뮬레이션 결과를 비교하기 위해 PF2 초전도코일의 전압 지령치를 비교한 표이다. 시간변화에 따른 임의의 8개 구간에서 수식에 의한 계산 값과 시뮬레이션에 의한 결과 값이 매우 동일한 결과를 보임을 알 수 있다. 그림 4는 유도 결합된 초전도코일의 전류제어기법을 검증하기 위해 RTDS를 이용하여 실험을 진행한

Runtime 출력파형이다. 각 초전도코일의 출력전압은 자기인덕턴스와 상호인덕턴스의 전류 극성변화가 발생하는 구간에서 크기가 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 시뮬레이션 결과와 동일하게 PF2는 1/4주기 동안 49.5초, PF3,4,5는 198초의 시간변화와 ±55kA 크기변화를 갖으며, 전류 지령치를 정확히 추종하는 것으로 보아 초전도코일의 전류제어기가 정상적으로 수행하고 있음을 알 수 있다.

표 1 전압 지령치 계산 및 시뮬레이션 결과비교

Table 1 Calculation and Simulation results of voltage command

구 간	계산치	시뮬레이션	구 간	계산치	시뮬레이션
1)	635.53V	636V	5)	635.53V	635V
2)	690.53V	690V	6)	446.85V	446V
3)	364.35V	365V	7)	364.35V	365V
4)	474.35V	474V	8)	446.85	446V

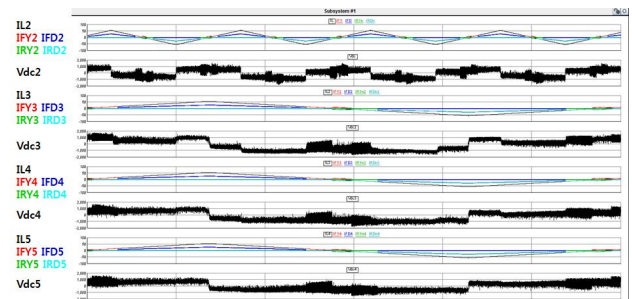


그림 4 RTDS를 이용한 초전도코일 실험결과

Fig. 4 Superconducting coil experiment results using RTDS

## 3. 결론

본 논문은 ITER의 플라즈마 제어를 위하여 자기적으로 결합된 초전도 PF 코일에 흐르는 전류를 제어하는 기법과 RTDS 실험 결과를 분석하였다. MATLAB/SIMULINK를 이용하여 전류제어기법을 구현하여 검증하였으며, 실험은 RTDS를 이용하여 진행하였다. 각 부하전류가 전류 지령치를 추종할 때, 동시다발적으로 발생하는 상호인덕턴스와 전류 극성변화의 영향을 MIMO 시스템 기반으로 하여 각 초전도코일의 전압변화 특성을 해석하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 초전도코일의 부하전류가 전류 지령치를 정확히 추종하는 동일한 결과를 얻음으로써 MIMO 시스템 특성의 유도 결합된 초전도코일의 전류제어 특성을 검증하였다.

“이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업(No. 2007 -2006995)”

## 참고 문헌

- [1] C. Neumeyer, I. Benfatto, J. Hourtoule, J. Tao, A. Mankani, F. Milani, S. Nair, I. Suh, H. Tan, M. Wang, J.S. Oh, A. Roshal, “ITER Power Supply Innovations and Advances”, Fusion Engineering(SOFE), 2013 IEEE 25th Symposium, 2013, pp. 1-8.
- [2] E. Gaio, R. Piovan, V. Toigo, I. Benfatto, “The control system of the ITER vertical stabilization converter”, 22th Symposium on Fusion Technology, September 2003, pp. 719-725.