

2차원 해석을 이용한 초전도 발전기 계자 코일의 켄치 특성

강준선 나완수 최세용 권영길* 손명환* 류강식*
 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀*

Quench Characteristics of Field Winding in a Superconducting Generator Using 2-Dimensional Analysis

Joonseon Kang Wansoo Nah Seyong Choi
 Young-Kil Kwon* Myoung-Hwan Sohn* Kang-Sik Ryu*
 Sungkyunkwan University Korea Electrotechnology Research Institute*

bigbear@ece.skku.ac.kr

Abstract - In this paper, we analyzed quench characteristics of field windings using 2 dimensional analysis. The quench origin was assumed to take place at the inner most point in the mid-plane of the coil. The temperature distribution was numerically calculated on the coil cross section using FDM analysis, and was used to estimate the normal zone resistance of the coil. Finally, we obtained voltage current characteristics of the quenched winding coils.

1. 서 론

현재 많이 연구되고 있는 초전도 발전기는 회전하는 계자코일을 초전도체로 대체한 형태를 일반적으로 가지고 있다. 초전도 계자권선을 초전도화 하게 되면, 기존 구리도체를 사용한 발전기에 비해 수 백 배정도 높은 밀도의 전류를 손실 없이 연속적으로 흘릴 수 있어서, 발전기 손실을 60%정도 줄일 수 있으며 출력을 같은 용량에 비해 2배 이상 높일 수 있다. 이에 따라 초전도 발전기는 소형, 경량 및 고효율의 발전플랜트를 실현할 수 있는 기반이 되며, 송전설비를 갖추는데 드는 비용을 30%정도 줄일 수 있기 때문에 차세대 고효율 발전수단으로 주목받고 있다. 이러한 초전도 발전기 관련 연구 분야 중에서 중요한 연구과제 중의 하나는 켄치시 초전도 계자 코일을 보호하는 분야이다. 본 논문에서는 계자 코일 내부에서 켄치가 발생했을 때, 각각의 초전도 코일 외부에 보호저항 삽입한 보호저항에 의한 온도 분포, 전류, 전압 특성을 구하는 방법에 대하여 기술하였다[1]. 연구의 대상은 전기연구소에서 개발한 30KVA 초전도 발전기임을 밝힌다[2].

2. 초전도 발전기의 사양

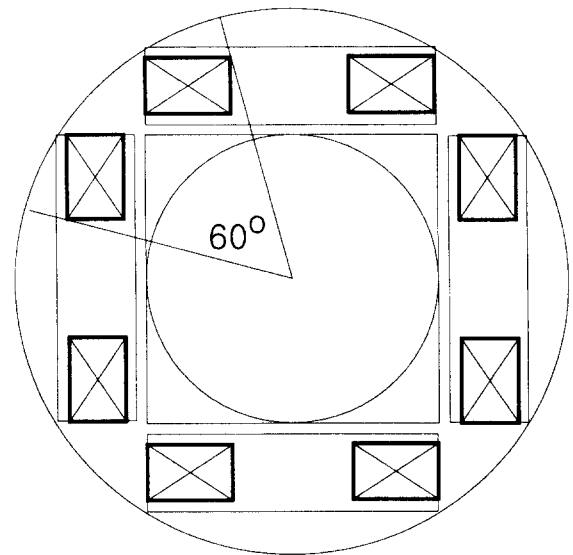


Fig. 1 Cross section of the field winding.

Table I Parameters of the field winding

보빈 한 개당 턴수	532[turns]
선재의 종류	NbTi
선재의 직경	1[mm]
선재의 임계전류치	580[A] (at 5[T])
보빈 한 개당 권선길이	약 400[m]
보빈 재질	SUS316L
자기 인덕턴스 (L)	0.056 [H]
상호 인덕턴스 (M)	0.014 [H]

Fig. 1은 본 논문에서 다루고 있는 초전도발전기 회전자의 단면을 나타낸 그림으로, 전체 계자코일은 네 개로 구성되어 있으며, 아래, 위 또는 오른쪽 왼쪽의 코일들이 서로 90도의 각도를 이루고 있는 형태이다. 따라서 상하, 좌우 코일들이 서로 쌍을 이루어 전체적으로 4개의 극을

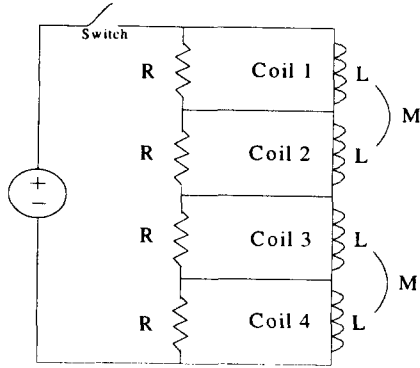


Fig. 2 Magnet circuit for the protection.

가지고 있다. 각각의 코일은 Racetrack 형태를 가지고 있으며 이 코일의 사양을 Table I에서 정리하였다. 여기에서 자기인덕턴스는 Racetrack 코일 자신의 인덕턴스이고 상호인덕턴스는 상하, 또는 좌우 코일간의 인덕턴스를 의미한다. 상하 그리고 좌우 코일사이의 인덕턴스는 고려하지 않았다.

3. 상전도 영역(Normal zone) 성장 모델

초전도 상태에서 상전도 상태로의 상전이(Phase transition)는 전자기적인 요인 또는 열적인 요인에 의해서 일어날 수 있으며 두 가지가 복합적인 요인으로 일어날 수 있다. 그러나 초전도 선재에 전류가 흐르고 있는 경우에는 전자기적인 요인보다는 전적으로 열의 진행에 의존한다. 따라서 퀘칭현상을 설명하는 방정식으로 다음 식 (1)과 같은 열평형 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\nabla \cdot (k \nabla (T)) + P_f(T) = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 k 는 열전도도 [Watt/m·K], $P_f(T)$ 는 줄발열량 [Watt/m³], C 는 열용량 [J/m³·K]이다[3].

3.1 상전도 영역의 진행 속도

초전도체 내의 상전도 상태(normal state)의 전파 속도는 마그네트 권선내의 내부전항을 결정하는 데에 중요한 역할을 담당한다. 일반적으로는 전파속도의 정상상태를 가정하여, 속도가 v 인 진행과 해법을 사용하여 전개한다.

선재 축방향 전파속도 (Longitudinal propagation velocity)와 횡방향 전파속도 (Transverse propagation velocity)의 상대적인 비중은 마그네트의 크기 및 선재의 두께 크기에 의존한다. 횡방향 전파 우세 마그네트의 경우는 상전도 영역이 에폭시를 통해 전달되는 시간이 코일의 주위를 따라 전달되는 시간보다 빠르기 때문이다. 이 두 시간을 정량적으로 표현해보

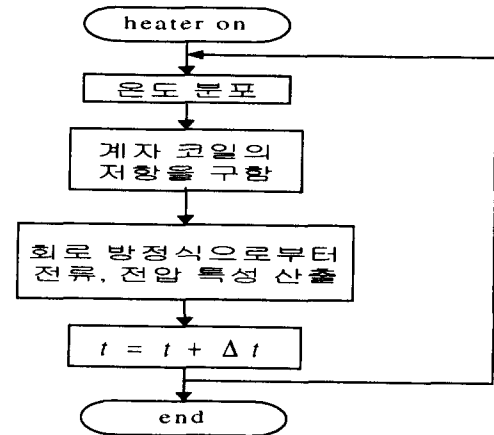


Fig. 3 A block diagram showing the computational sequence used in simulation quench code.

면 식 (2)과 같다. 즉, 이 식이 성립하면 횡방향 전파 우세 마그네트가 된다.

$$\frac{U_t}{U_l} > \frac{d}{\pi \cdot D} \quad (2)$$

U_t , U_l 는 각각 상전도 영역의 횡방향 속도, 축방향 속도, D 는 코일의 반경, d 는 선재의 반경이다. 본 연구의 계자코일의 경우 횡방향 우세 마그네트이며, 퀘칭이 발생한 순간 코일 한 턴(turn)이 이미 상전도 상태임을 가정하여 상전도 영역 성장 모델을 해석하였다. 즉, 상전도 영역의 횡방향 전파만을 고려하여, 계자 코일의 단면을 2차원으로 성장 모델을 해석하였다[4][5].

4. 초전도 발전기 계자권선 보호 회로

Fig. 2는 초전도발전기의 계자권선과 퀘칭 보호회로를 나타낸 전기 회로도이다. 앞서서도 언급했듯이 코일1과 코일2가 한 조, 코일3과 코일4가 한 조를 이루어서 전체 4개의 극(quadrupole)을 가지는 코일의 형상을 보여주고 있다. 각 코일의 인덕턴스, L 은 모두 같고 코일1과 코일2, 그리고 코일3과 코일4의 상호 인덕턴스는 M 이고, 두 극은 서로 90도를 이루므로 두 극 사이에는 상호 인덕턴스는 없다. R 은 각 코일에 병렬로 연결된 퀘칭 보호 저항이다.

5. 결 론

본 절에서는 Fig. 2 회로에 나타나 바와 같이 각 코일에 퀘칭 보호저항이 병렬로 연결된 경우에 대하여 상전도 영역 성장에 따른 퀘칭 특성을 알아보았다. 퀘칭이 발생한 순간에 퀘칭 보호회로가 동작하여 전원의 스위치를 off시켜 주는 이상적인 경우로 가정하고, 코일1 하나에 대해서만 해석하였다.

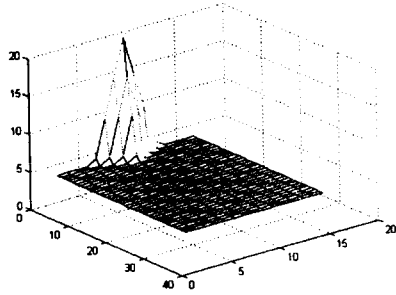


Fig.4 Temperature distribution at=0 sec.

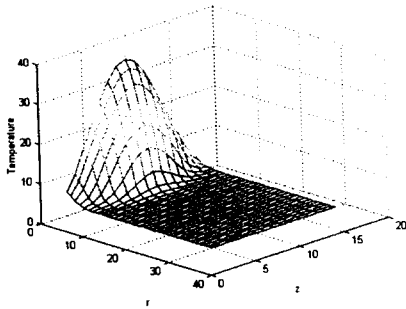


Fig.5 Temperature distribution at=0.01 msec.

Fig. 3은 2차원 해석 모델의 프로그램 흐름도이다. 흐름도에서 알 수 있듯이 식 (1)을 이용하여 계자 코일의 온도 분포 구하고, 이 온도 분포로부터 알 수 있는 코일의 저항, 그리고 Fig. 2 회로도에서 유도한 상태 방정식 (3)을 이용하여 계자 코일에 흐르는 전류와 식 (4)로부터 코일 양단에 걸리는 전압 특성을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_1(t)}{dt} \\ \frac{di_2(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \frac{R_1 + r_1(t)}{M^2 - L^2} & -M \frac{R_2}{M^2 - L^2} \\ -M \frac{R_1 + r_1(t)}{M^2 - L^2} & L \frac{R_2}{M^2 - L^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$v_1(t) = r_1(t) i_1(t) + L \frac{di_1(t)}{dt} + M \frac{di_2(t)}{dt} \quad (4)$$

$$v_2(t) = L \frac{di_2(t)}{dt} + M \frac{di_1(t)}{dt}$$

Fig. 4, Fig. 5는 앞의 과정을 통해 얻은 코일 단면적의 온도 분포를 나타낸 것이다. 이 두

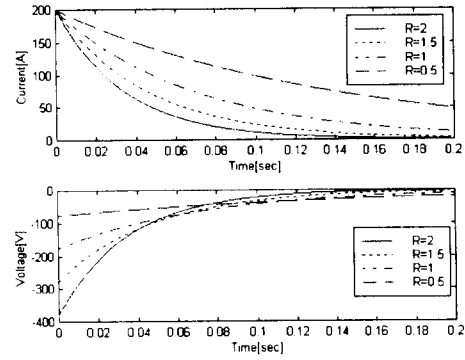


Fig. 6 The characteristics of current, and voltage for coil 1.

그림으로부터 시간에 따른 상전도 영역이 퍼져나가는 특성을 알 수 있다. Fig. 6은 상전도 영역 성장에 따른 코일의 전류, 전압 특성을 나타낸 것이다. 보호 저항이 클수록 전류는 빠른 감소 패턴을 갖고, 전압은 코일 양단에 높은 전압이 유지 됨을 알 수 있다.

위와 같이 2차원 해석 통해 초전도 발전기 계자 코일의 켄치 특성을 알 수 있었다.

본 연구는 한국전기연구소의 지원에 의한 연구이며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 강준선, 나완수, 권영길, 손명환, 류강식, "초전도발전기의 계자권선 보호저항 선정에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회, A, p238-240, 1999
- [2] "STAR PROJECT 연구개발사업 연차실적·계획서 (과제명: 차세대 고효율 발전플랜트 기술개발)", 1999
- [3] Yukikazu Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets Design and Operational Issues", Plenum Press, Ch. 6, 1994
- [4] 나완수, "초전도 마그네트의 켄치 특성에 관한 연구", 공학박사학위논문, p7-25, 1991
- [5] A. Ishiyama, H. Matsumura, W. Takita, and Y. Iwasa, "Quench propagation analysis in adiabatic superconducting windings", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 2, March 1991