

초전도발전기의 계자권선 보호저항 선정에 관한 연구

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

Protection Resistance Determination for Field Winding in Superconducting Generator

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

Abstract - In this paper, the protection resistance determination for the field winding in superconducting generator is suggested. To protect the field winding in a generator, they usually use the external resistance to decrease the field current more rapidly when quench occurs in the winding. Since the field winding is actually separated into four sections (magnets), we have choices to insert 1, 2, and 4 external resistances. For each case, the current decay and the voltages across the winding are calculated, and we can choose the best external resistance.

1. 서 론

현재 많이 연구되고 있는 초전도 발전기는 회전하는 제자코일을 초전도체로 대체한 형태를 일반적으로 가지고 있다. 초전도 계자권선을 초전도화하게 되면, 기존 구리도체를 사용한 발전기에 비해 수백배 정도 높은 밀도의 전류를 손실없이 연속적으로 흘릴 수 있어서, 발전 손실을 60%정도 줄일수 있으며 출력을 같은 용량에 비해 2배이상 높일수 있다. 이에따라 초전도 발전기는 소형, 경량 및 고효율의 발전플랜트를 실현할 수 있는 기반이 되며, 송전설비를 갖추는 데 드는 비용을 30%정도 줄일 수 있기 때문에 차세대 고효율 발전수단으로 주목받고 있다.

이러한 초전도 발전기 관련 연구 분야 중에서 중요한 연구과제 중의 하나는 퀘칭시 초전도 계자 코일을 보호하는 분야이다. 본 논문에서는 계자 코일 내부에서 퀘칭이 발생했을 때, 초전도 계자 코일을 적절하게 보호하기 위해서 어떤 크기의 외부 보호저항을 어떠한 방법으로 연결하는 것이 가장 계자코일에 손상을 적게주는지에 대한 방법에 대하여 기술하였다. 즉, 외부에 1개의 보호저항만을 삽입했을 때, 또 2개, 4개를 삽입했을 때의 계자전류 감쇄 패턴과 계자코일 양단에 유기되는 최대전압의 크기를 비교하여 최적의 연결방법과 저항값을 선정하는 방법에 대하여 논하였다. 연구의 대상은 전기연구소에서 개발한 30KVA 초전도발전기임을 밝힌다(1).

2. 초전도발전기의 사양

그림 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 가지고 있다. 각각의 코일은 그림 2에서 나타난 바와 같이 Racetrack 형태를 가지고 있으며 이 코일의 사양을 표 2에서 정리하였다. 여기에서 자기인덕턴스는 Racetrack 코일 자신의 인덕턴스이고 상호인덕턴스는 상하, 또는 좌우 코일간의 인덕턴스를 의미한다. 상하 그리고 좌우 코일사이의 인덕턴스는 고려하지 않았다.

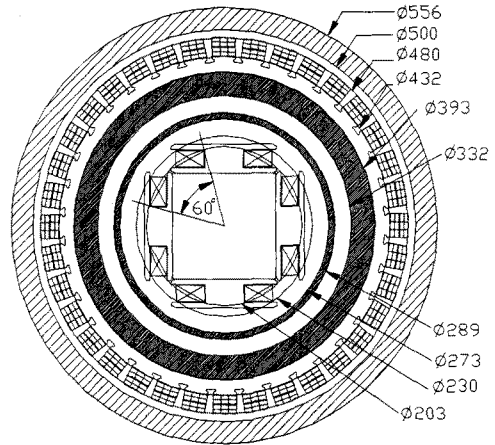


그림 1. 초전도발전기의 전체적인 구조의 단면도.

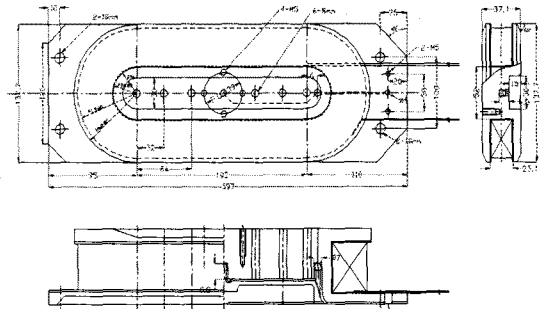


그림 2. 계자코일의 보빈 구조도.

표 1. 계자코일의 사양

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

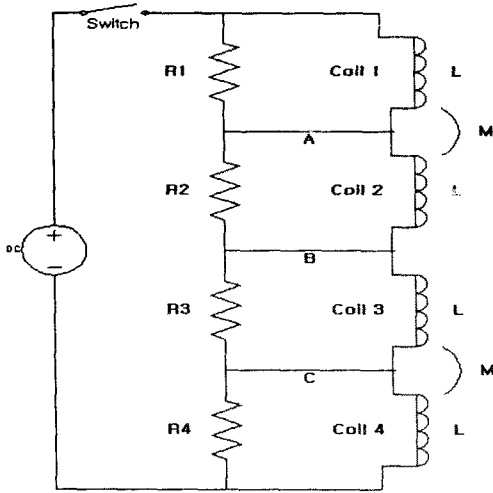


그림 3. 계자코일의 켄치보호 회로도.

3. 초전도선재의 발열 특성

초전도 필라멘트와 구리 매트릭스로 구성된 초전도 선재는 임계 전류 또는 임계 온도를 넘어서면 초전도 상태에서 상전도상태로 전이되게 된다. 이때 초전도 필라멘트의 저항이 구리의 저항보다 매우 커지므로 전류 분할 (current sharing) 이 이루어져 전류는 구리 매트릭스로 흐르게 된다. 이 때 초전도 선재 단위 부피당 발생하는 열 $g(T)$ 는 다음과 같다[2].

$$g(T) = \frac{\rho_m I_{c0}^2}{A_{cd} A_m} \left(\frac{T - T_{op}}{T_c - T_{op}} \right) \quad (T_{op} \leq T \leq T_c) \quad (1)$$

여기서, T 는 온도, T_{op} , T_c 는 각각 동작온도, 임계 온도, ρ_m 은 구리 매트릭스의 비저항, I_{c0} 는 동작온도에서의 임계전류, A_{cd} , A_m 은 각각 전체 초전도 선재 단면적, 구리 매트릭스의 단면적이다. 일반적으로 이 열 전달은 선재방향 뿐만아니라 선재와 선재사이의 절연체를 통해서도 진행된다. 본 고에서는 초전도 선재에서의 발열특성을 간단히 $T_{op} < T_c$ 일 때에는 초전도상태이고 $T_{op} > T_c$ 일 때에는 상전도상태로 가정하여 계산하였다. 또 국부적으로 야기된 켄치는 본 고에서 다루지 않았으며, 코일 전체가 갑자기 상전도 영역으로 전이되었다는 가정하에 각 계산을 진행하였다. 이러한 가정하에서 본 초전도 발전기의 Racetrack 코일 1개당 저항은 표 1의 사양과 식 (1)에서부터 0.1137 Ω 으로 계산된다[4]. 식 (1)을 이용하고 또 국부적인 온도상승으로 야기된 켄치에 의한 코일의 보호에 대해서는 향후 다른 곳에서 발표 될 예정이다.

4. 초전도 발전기 계자권선 보호회로

그림 3은 초전도발전기의 계자권선과 켄치 보호회로를 나타낸 개념도이다. 앞에서 잠깐 언급했듯이 코일1과 코일2이 한 조, 코일3과 코일4가 한 조를 이루어서 전체 4개의 극을 가지는 quadrupole coil의 형상을 보여주고 있다. 각 코일의 인덕턴스, L은 모두 같고 코일

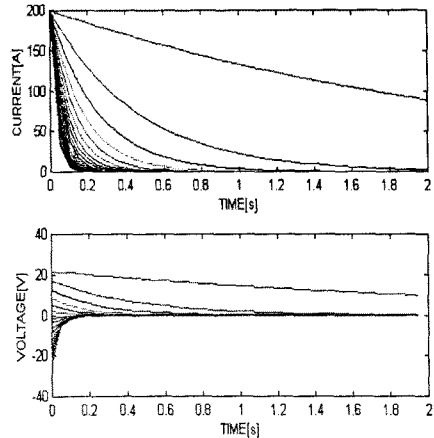


그림 4. 보호저항이 한 개일 때의 저항값의 변화에 따른 전류, 전압 특성곡선.

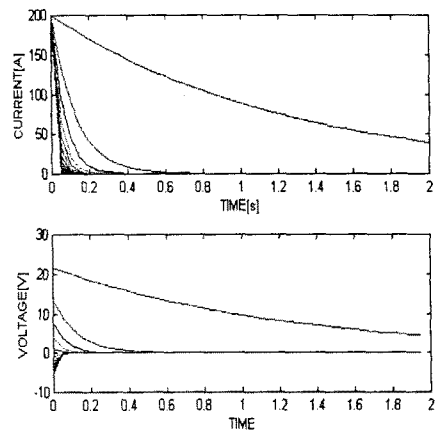


그림 5. 보호저항이 두 개일 때의 저항값의 변화에 따른 전류, 전압 특성곡선.

1과 코일2, 그리고 코일3과 코일4의 상호 인덕턴스는 M이고, 두 극은 서로 90도를 이루므로 두 극 사이에는 상호 인덕턴스는 없는 것이 일반 초전도 MRI나 NMR의 다층구조를 가지는 초전도 코일 시스템 (multi-sectioned coil) 과 다른 점이다. R1, R2, R3, R4는 각 코일에 병렬로 연결된 켄치 보호 저항이다.

5. 보호저항의 선정

본 절에서는 그림 3의 회로에서 보호 저항이 한 개인 경우(A,B,C가 없는 경우), 두 개인 경우(A,C가 없는 경우), 네 개인 경우의 보호 특성을 알아보고, 각각의 경우를 비교하여 보기로 한다[3] 또, 켄치가 발생한 순간에 켄치보호회로가 동작하여 전원의 스위치를 off시켜주는 이상적인 경우에 대하여 해석을 하였다[2].

5.1 보호저항이 1개일 때의 전압전류특성

보호저항을 한 개로 선택한 경우, 켄치가 코일1에서

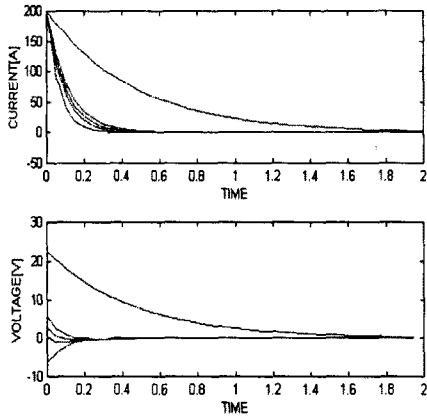


그림 6. 보호저항 네 개일 때의 저항값의 변화에 따른 전류, 전압 특성 곡선.

발생하였다고 가정하고, 이 때 저항을 $r(t) = r$ 라고 한다면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$(4L + 4M) \frac{dI(t)}{dt} + (R + r)I(t) = 0 \quad (2)$$

그리고 계자코일 양단에 걸리는 전압 V 는,

$$V(t) = r \cdot I(t) + 4(L + M) \frac{dI(t)}{dt} \quad (3)$$

이며, 그림 4에서는 보호저항의 변화에 따른 전압, 전류파형을 나타냈다. 전류의 특성은 저항이 증가할수록 빠른 감소율을 보이고, 계자 코일 양단의 전압 특성은 저항이 증가할수록 전압 크기는 양의 방향에서 음의 방향으로 변하는 것을 볼 수 있다.

5.2 보호저항이 2개일 때의 전압전류특성

코일 1에서 퀀치가 발생하였을 경우 코일 1과 코일 2에 흐르는 전류에 대한 회로 방정식은 다음과 같다

$$(2L + 2M) \frac{dI(t)}{dt} + (R + r)I(t) = 0 \quad (4)$$

코일 3, 코일 4에 대한 전류도 위 식과 같이 나타낼 수 있으며 이것은 두 개의 코일 군(group)의 상호인덕턴스가 없기 때문이다. 그리고 코일 1, 코일 2 양단에 걸리는 전압은 다음 식으로 표현할 수 있다

$$V(t) = r \cdot I(t) + (2L + 2M) \frac{dI(t)}{dt} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)는 기본적으로 식 (2)와 (3)과 같은 패턴을 가지고 있으며 따라서 전류감쇄와 전압특성들 모두 비슷한 형태를 보이며, 그림 5에서 이것을 나타내었다.

5.3 보호저항이 4개일 때의 전압전류특성

역시 코일 1에서 퀀치가 발생하였을 경우 코일 1과 코일 2에 흐르는 전류와 코일 1, 코일 2 각각에 걸리는 전압은 다음 식 (6), 식 (7)과 같다.

$$I_1'(t) = L \frac{R_1 + r_1(t)}{M^2 - L^2} I_1(t) - \frac{MR_2}{M^2 - L^2} I_2(t) \quad (6)$$

$$I_2'(t) = \frac{LR_2}{M^2 - L^2} I_2(t) - M \frac{R_1 + r_1(t)}{M^2 - L^2} I_1(t)$$

$$V_1(t) = r_1(t) I_1(t) + L \frac{dI_1(t)}{dt} + M \frac{dI_2(t)}{dt} \quad (7)$$

$$V_2(t) = L \frac{dI_2(t)}{dt} + M \frac{dI_1(t)}{dt}$$

그림 6은 코일 1에서의 전류 특성과 전체 계자 코일 양단에 걸리는 전압 특성을 나타내었다. 보호 저항이 네 개인 경우에도 앞의 경우와 비슷한 특성을 갖는다.

6. 결론

퀀치가 발생하면 이를 감지하여 계자 코일과 전원의 연결은 끊어지고 코일에 저장된 에너지는 퀀치 보호 저항에서 소비가 되면서 계자 전류는 감소하게 된다. 이때, 전체 계자코일 양단에 전압이 유기된다. 이 유기되는 최대 전압이 최소가 되도록 보호저항을 선정해야 한다. 그림 4, 그림 5, 그림 6에서 각 경우에 따른 전류, 전압 특성 결과에 따라 보호저항이 한 개일 때 약 2.8Ω, 보호저항이 두 개일 때 약 4.55Ω, 보호저항이 네 개일 때는 약 0.7Ω으로 저항값을 선정했을 때, 전체 계자코일 일에 유기되는 최대 전압이 최소가되는 즉, 가장 안전하게 계자코일을 보호할 수 있는 보호저항값임을 알 수 있다.

본 연구는 한국전기연구소의 지원에 의한 연구이며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] "STAR PROJECT 연구개발사업 연차실적·계획서(과제명: 차세대 고효율 발전플랜트 기술개발)", p19-21, 1999
- [2] Yukikazu Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets Design and Operational Issues", Plenum Press·New York and London, p210-215, 1994
- [3] Yukikazu Iwasa, "Case Studies in Superconducting Magnets Design and Operational Issues", Plenum Press·New York and London, Ch 8, 1994
- [4] Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press Oxford, p209-217, 1983