

### 30(kVA) 초전도발전기용 계자코일 설계

백승규, 손명환, 고락길, 이언용, 배준한, 권영길, 류강식  
한국전기연구소 초전도응용연구사업팀

### 30(kVA) Superconducting generator Field coil Design

S.K.Baik, M.H.Sohn, R.K.Ko, E.Y.Lee, J.H.Bae, Y.K.Kwon, K.S.Ryu  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - Race-track type superconducting coils are used for wiggler magnets of accelerators and field coils of superconducting generators(S.C.G) and so on. The shape is different from ordinary solenoidal type magnet, so the manufacturing situation and conditions become different and moreover according to these results the output characteristics of magnet also becomes different.

In this paper we are dealing with race-track type coil design that is inserted into 30(kVA) S.C.G which will be manufactured before we make 1(MVA) S.C.G plant. The design procedure is based on two dimensional electromagnetic analysis including laplace equations in cylindrical coordinate.

#### 1. 서 론

레이스트랙형(Race-track type) 초전도자석은 가속기용 위글러(Wiggler)나 초전도 발전기에 사용되고 있고, 그 형태가 일반적인 솔레노이드형의 자석과는 달리 경기장의 트랙 형상을 띄므로 제작시의 상황과 조건이 달라지고 이에 따른 특성도 달라진다. 본 논문에서는 당 사업팀에서 1(MVA) 모델기의 전 단계로 제작하고자 하는 30(kVA) 초전도발전기의 시제품에 들어가는 계자코일의 설계방법을 소개하고자 한다. 계자코일이 초전도발전기 내에서 배치되는 위치와 차지하는 면적은 2차원적 자장해석에 그 근본을 둔 설계프로그램에서 시작된다. 그러므로 설계의 기본이 될 수 있는 설계 프로그램을 그 서두에 언급하도록 하고, 프로그램 결과에 따라서 발전기를 2차원적으로 설계하는 과정을 설명한다. 설계시 고려된 계자코일의 배치에 따라서 레이스트랙 보빈의 단면 형상을 결정하고, 축방향의 형태를 결정한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 발전기의 설계프로그램

초전도발전기의 설계시에 사용된 설계 프로그램은 2차원 전자장해석의 라플라스방정식을 사용한다[1][2]. 본 논문에서 다루고 있는 30(kVA) 초전도발전기의 경우는 계자코일의 형태가 1(MVA) 모델기에서 사용되는 새들(saddle)형과는 달리 4개의 레이스트랙(race-track) 보빈을 사용하여 제작이 된다. 따라서 설계 프로그램의 해석모델은 새들형의 계자코일 형상을 띄지만, 레이스트랙형으로 코일을 설계·배치시키므로 인하여 오차가 발생할 수 있으므로 이를 최소화하도록 코일을 설계·배치시켜야 한다.

##### 2.1.1 발전기의 사양과 프로그램

당 사업팀에서 1(MVA) 모델기의 전 단계로 제작하고자 하는 30(kVA) 초전도발전기의 사양을 표1에 정

리한다.

표 1. 시제품 초전도발전기의 사양

출 력	30[kVA]
전 압	220[V]
극 수	4극
주 파 수	60[Hz]
역 륙	0.9[lagging]

위와 같이 우리가 설계하고자 하는 발전기의 사양에 따라서 설계 프로그램에 입력한다. 설계 프로그램에 사용되는 대표적인 변수들과 플로우차트를 표 2와 그림 1에 나타낸다.

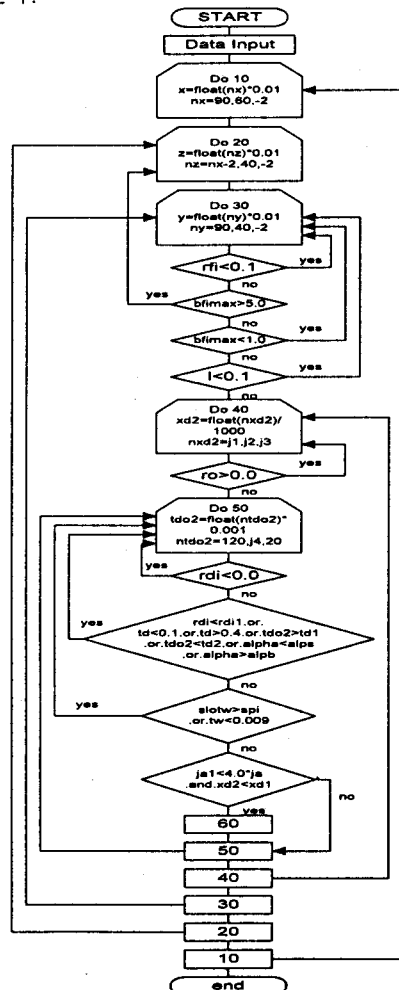


그림 1. 설계 프로그램의 플로우차트

표 2. 설계 프로그램에 사용된 기호

사용기호	사용기호의 의미
rfi	계자코일의 내반경[m]
rfo	계자코일의 외반경[m]
rdi	댐퍼실드의 내반경[m]
rdo	댐퍼실드의 외반경[m]
rai	전기자코일의 내반경[m]
rao	전기자코일의 외반경[m]
rsi	기계실드의 내반경[m]
rso	기계실드의 외반경[m]
x	$R_a/R_{a0}$
y	$R_b/R_{b0}$
z	$R_{10}/R_{a0}$
bfi_max	최대자속밀도값[T]
l	코일의 직선부길이(계자, 전기자)
xd	동기리액턴스(d축)[pu]
xd1	과도리액턴스(d축)[pu]
xd2	차과도리액턴스(d축)[pu]
tdo1	개로과도시정수(d축)
tdo2	개로차과도시정수(d축)
td	댐퍼실드의 시정수
td1	폐로과도시정수(d축)
td2	폐로차과도시정수(d축)
alpha	전기자와 회전자 사이의 간격[m]
slotw	전기자 슬롯의 폭[m]
tw	전기자 치의 내측 폭[m]
spi	전기자 슬롯퍼치의 내경[m]
ja	전기자코일의 전류밀도[A/mm <sup>2</sup> ]

d축 동기리액턴스 xd는 발전기의 정상상태 안정도와 직접적인 관련이 있고, 이 값이 작을수록 안정도의 측면에서는 더 나은 결과를 가져온다. 본 프로그램에서 설계하고자 하는 발전기에 대한 xd의 변화추이를 본 결과 그 값이 0.2[pu]일 때부터 설계 값들을 얻을 수 있었다. 기계실드의 내반경에 해당하는 rsi 값은 프로그램 서두에 그 값을 입력하도록 되어 있다. 이 값은 발전기의 단면적을 결정하는 치수이기 때문에 매우 중요한 의미를 지니게 된다. 본 설계 과정에서는 이 값을 회전자 내의 헬륨급배와 계자코일의 여자를 위한 전류리드봉이 배치될 수 있도록 그 여유를 알맞게 잡아서 0.25[m]으로 하였다.

### 2.1.2 사양에 따른 프로그램 결과

앞 절의 초전도발전기 설계 프로그램에 따른 설계 결과를 그림 2에 보인다.

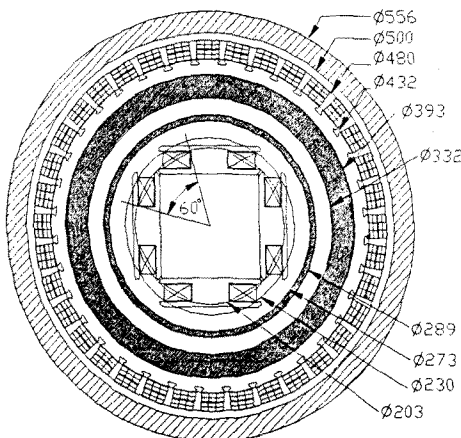


그림 2. 프로그램 결과에 따른 단면 구조

초전도 상태를 띄는 계자코일은 그림에서와 같이 60°의 권선각 안에 동일 전류 방향의 코일 쌍이 배치되도록 설계된다. 새들형의 계자코일 배치를 갖는 실제 프로그램의 결과상으로는 계자코일이 그림의 rfi(φ203)와 rfo(φ230) 사이에 배치되어야 한다. 그러나 현재 제작하고자 하는 수 십 kVA의 소용량기에서는 거의 레이스 트랙형의 코일 형상으로 제작되기 때문에, 권선각과 계자코일의 외반경 rfo는 2차원 해석상의 값으로 설정하고, 내반경 rfi를 내부로 들어가도록 배치시킨다. 이는 계자코일에 의한 자장발생시 실제적인 유기기전력과 관계되는 자속은 계자코일 외부의 것이기 때문이다. 그림 2에서는 전기자와 계자사이에 상온댐퍼(warm damper)와 저온댐퍼(cold damper) 2개가 배치되나 프로그램에서는 상온댐퍼만 구조결정시 포함된다. 저온댐퍼는 상온댐퍼가 수치적으로 결정되면 계자코일과 중간되는 지점에 두께 6내지 8(mm)의 구리원통으로 배치시킨다.

## 2.2 계자코일의 설계와 제작

초기에 계자코일 설계시에는 그 직선부 길이를 101[mm]로 하여 설계·제작하였으나, 2차원 해석상의 결과와 실제 3차원적인 구조사이의 오차로 인하여 그 값을 늘려서 다시 설계·제작하였다.

### 2.2.1 보빈의 설계와 제작

제작하고자 하는 발전기는 4개의 회전자극을 가지므로 각 자극에 하나의 코일 보빈이 사용된다. 보빈의 재질은 비자성체를 사용하여야 하고 보통 FRP나 스테인레스강을 사용한다.

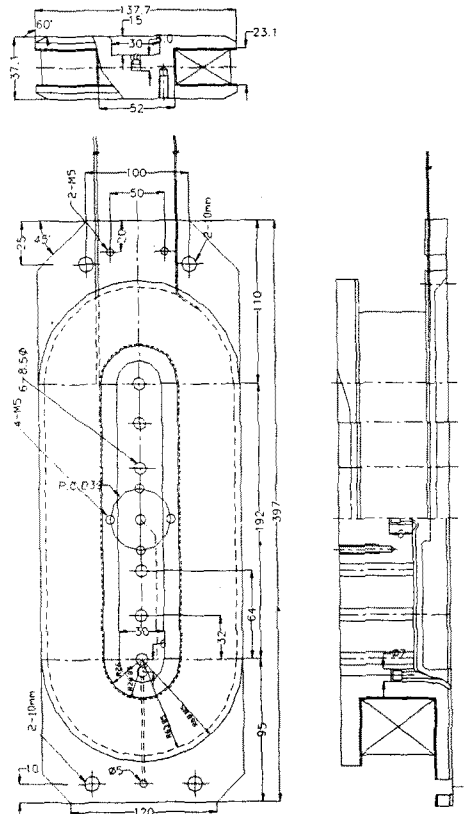


그림 3. 설계된 보빈의 구조

본 30(kVA)의 시제품에서는 회전자의 대부분이 스테인레스강으로 제작이 되고, 계자코일의 보빈 또한 이러한 스테인레스강 중에서 SUS316L을 이용하였다. 보빈의 치수 결정시 가장 고려되어야 할 부분은 보빈에 계자코일이 감긴 후 회전자내에 조립이 되었을 경우, 그림 2에서와 같은 단면의 형태를 띄도록 해야 한다는 것이다. 이 조건이 만족되지 않으면 프로그램상의 해석치와 다른 자장 분포를 띄게 된다.

### 2.2.2 코일의 설계와 제작

초기에 직선부길이를 101(mm)로 하여 보빈을 제작한 후 초전도선재를 권선한 결과 그 턴 수가 설계치의 80%에 못 미칠 정도로 감겨졌다. 이는 설계시에 권선층간의 절연지를 고려하지 못하였고 권선 간의 여유도를 고려하지 못했기 때문이었다. 이와 같은 실제 제작 상황을 고려하고 직선부의 길이도 2차원 해석치와 근사한 값을 얻을 수 있도록 보빈을 다시 설계한 것이 그림 3의 형태를 띄게 되었다. 그 자세한 횡단면 형태를 그림 4에 다시 보인다.

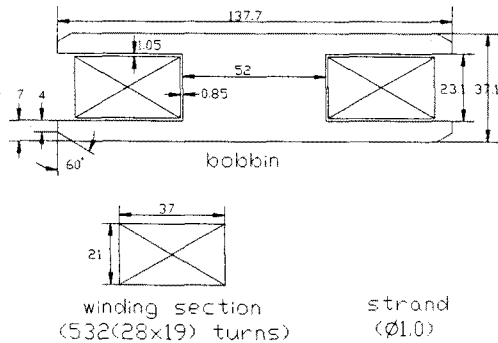


그림 4. 계자코일과 보빈의 횡단면 상세도

초기 프로그램 상에는 계자코일의 점적율(packing factor)을 0.7로 하여 설계하였다. 하지만 실제 층간에 삽입되는 절연지를 고려하여 점적율을 계산한 결과 그 값이 0.5447이 되었다. 따라서 이러한 제작시의 영향을 다시 프로그램에 포함시켜 설계하였다. 제작시 사용된 계자코일의 사양을 표3에 보인다.

표 3. 제작시의 계자코일 사양

보빈 한 개당 턴 수	532[turns]
선재의 종류	NbTi
선재의 직경	1[mm]
선재의 임계전류치	580[A] (at 5[T])
선재의 필라멘트 수	60개
보빈 한 개당 소요 선재 길이	약 400[m]
보빈 재질	SUS316L

계자코일의 선재는 직경 1(mm)의 NbTi 초전도 선을 사용하였다. 프로그램의 결과로 얻어지는 선재의 직경은 1.13(mm)정도이나 실제 이러한 선재를 구할 수 없으므로 이에 가장 가까운 1(mm)의 초전도 선을 사용하였다. 이에 따르는 계자코일 도체 단면적의 차이는 그 턴 수를 늘려서 보충하였다. 즉, 프로그램의 결과상으로 얻어지는 턴 수는 427(turns)이지만, 더 가는 선재를 사용하는 대신 턴 수를 늘려 표 3과 같은 532(turns)로 제작하였다.

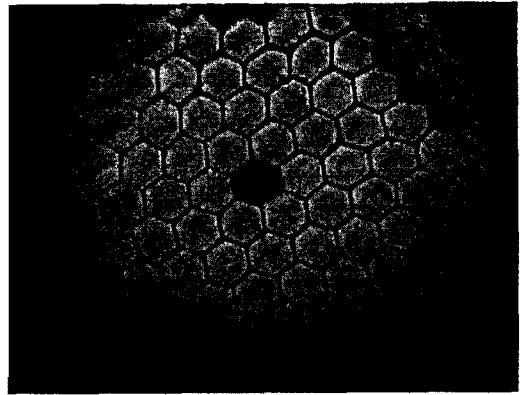


그림 5. 사용된 초전도 선재의 단면



그림 6. 권선 작업이 끝난 보빈의 형태

## 3. 결 론

본 논문에서 다루고 있는 초전도발전기의 계자코일은 당 사업팀에서 목표로 삼고있는 1(MVA)의 전 단계로 제작하고자 하는 30(kVA) 초전도발전기의 시제품에 들어가는 것으로서 4극으로 설계된 사양에 따라 각 극에 대응하는 보빈을 스테인레스강을 이용하여 제작하였다. 보빈의 설계시에는 발전기의 전체적인 배치를 결정하는 2차원 자장해석에 근거를 둔 설계 프로그램을 이용하였고, 이에 따라 보빈을 지지하는 축 또한 설계 및 제작되었다. 완성된 레이스트랙(race-track)형 계자코일의 보빈에 초전도 코일을 권선할 때에는 일반적인 슬레노이드형 코일과 그 구조가 다르기 때문에, 레이스트랙의 직선부에서 코일 사이에 공간이 생겨서 안정하게 밀착되지 못하는 단점이 발생하게 된다. 이는 초전도 선의 여자 특성을 저하시키므로 직선부를 발전기의 자장분포에 거의 영향을 주지 않는 범위에서 원호형으로 가공하여 계자코일의 안정성을 향상시키는 연구도 진행 중에 있다. 이것은 실험을 통하여 그 사실을 입증하였고 이와 같이 직선부를 곡면 처리한 결과, 훨씬 더 높은 임계전류치를 얻을 수 있었다. 앞으로 이러한 설계과정에 따라 발전기 각 부분들의 치수를 결정하고 설계·제작하고자 한다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 백승규, 권영길, 손명환, 류강식 "초전도발전기의 2차원 자장해석에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, A 권, pp.273~275, 1997년
- [2] 市川正樹, "超伝導發電機の設計法一考察", 교토대학공학부 전기공학과 학사논문, pp.36~46, 平成9年