

## 2극 초전도 동기기 설계법 고찰

백승규, 손명환, 이연용, 권영길, 류강식, 조영식\*  
한국전기연구원 초전도응용연구그룹, 창원대학교 전기공학과\*

### Design Considerations of 2-pole Synchronous Superconducting Rotating Machine

S.K. Baik, M.H. Sohn, E.Y. Lee, Y.K. Kwon, K.S. Ryu, Y.S. Jo\*  
Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon Univ.\*

**Abstract** - Generally large synchronous rotating machines with 2 poles have more merits than the others with more than 2 poles. Superconducting synchronous rotating machines also have the same tendency, but they have different structure from conventional ones because of no magnetic core inside of the rotor. As the result, design approaches of the superconducting field coils are also different, which would be classified into 2 types according to their coil shapes. The first one is race-track type and the other is saddle type. Race-track type machines have almost the same structure with conventional salient pole generators which are being used as largely small scale machines with more than 2 poles. On the other hand saddle type machines correspond to conventional cylindrical generators with 2 poles used for large turbine system in power plants. In this paper several types of superconducting field coils are introduced for 2 pole superconducting machine design and then the feasibility of each type is considered. Moreover, based on the consideration, 1MVA superconducting generator(S.G.) with saddle type field coil is designed electromagnetically.

## 1. 서 론

일반적으로 동기 회전기의 극수가 많아질수록 동일 용량에서 기기의 전체적인 체적이 커지게 되므로, 특히 대용량으로 갈수록 비용절감과 효율향상의 측면에서 2극의 형태가 채택이 된다. 초전도 동기 회전기의 계자코일은 크게 기존의 돌극형(Salient Pole type) 동기기의 계자코일 형태와 유사한 레이스트랙형(Race-track type)과 터빈발전기에 주로 사용되는 원통형 계자코일(Cylindrical-rotor Field Winding)에 대응한다고 할 수 있는 새들형(Saddle type)이 있다. 따라서 레이스트랙형의 계자코일을 갖는 초전도 동기기기는 주로 4극 이상의 다극기와 소용량기에 적용하기 쉽고, 새들형은 기존의 터빈발전기가 사용되는 것과 같이 2극의 대용량 발전용으로 적용할 수가 있다. 동일 용량에서 초전도 동기기를 4극 대신에 2극으로 제작할 경우 기기의 체적과 중량이 줄어들고 계자코일에 사용되는 초전도 선재의 사용량이 절반 정도로 줄어들기 때문에, 현재 전력케이블과 발전기 또는 모터에 사용하기 위해 개발된 BSCCO-2223 와 같은 고온초전도 선재의 경우 그 가격이 \$250/kA-m (77K, self-field) 정도로 상당히 높으므로 선재에 사용되는 비용을 상당히 줄일 수 있을 것으로 예측이 된다. 본 논문에서는 이러한 대용량기로의 적용을 위한 2극의 초전도 동기기용 계자코일의 설계방

법들을 고찰해 보고, 이를 바탕으로 1MVA 급의 초전도 발전기를 2극의 새들형 계자코일을 갖도록 전자기적으로 설계하여 보았다. 특히 새들형의 계자코일은 슬롯이 있는 형태와 없는 형태로 제작할 수 있으며, 이 두 가지 방식의 장단점을 비교한 후 설계시 적용하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 계자코일에 따른 형상 고찰

지금까지 연구된 초전도 대용량 동기기(발전기)에서는 일반적으로 2극을 갖는 계자코일의 형상을 띄며 회전자 축에 계자코일을 배치시키는 방법도 일반적으로 슬롯이 없는 형태와 있는 형태의 두 가지로 나눌 수 있다. 슬롯이 없는 형태는 그림 1과 같이 레이스트랙의 보빈을 2극기의 권선각 안에 여러 개 배치시키는 방법과 그림 2와 같이 도체를 팬케이크형으로 여러 개 제작하여 적층하는 방법이 있다. 전자의 방법은 권선기를 이용하여 권선 하기가 편리하다는 장점이 있으나 레이스트랙이 여러 개 들어가므로 조립후의 밸런싱의 문제와 냉각장치의 배치가 힘들다는 단점이 있다.



Fig.1 2pole race-track type field coils



Fig.2 2pole saddle type field coil

후자의 방법은 원통좌표계의 자장해석을 기본으로 하는 설계프로그램의 권선 배치와 거의 일치하게 제작할 수 있으므로 더 정현파에 가까운 자장분포를 전기자부에서 얻을 수 있고, 권선을 지지하기 위해 사용되는 지지부의 무게를 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에, 일반적인 권선기를 이용하여 권선 하기가 힘들고 팬케이크 코일

들을 각각 권선한 후 이들을 서로 접합시켜야 하는 단점이 있다. 또 다른 형태인 슬롯이 있는 2극 계자코일은 일반적인 대용량 동기에 대부분 사용하는 방식으로 권선이 슬롯에 삽입되어 감기므로 고도의 권선 기술이 요구되고 부서지기 쉬운 BSCCO 와 같은 테이프형 고온 초전도 선재를 응용하기 힘든 단점이 있으나, 제작후의 기계적인 강도나 안정성에서 슬롯이 없는 형태보다 우수하다. 본 논문에서는 이들 방식 중 그림 2와 같은 슬롯이 없는 2극 새들형을 중심으로 설계하고 슬롯이 있는 형태와도 비교 및 분석을 행한다.

## 2.2 설계법 적용

앞에서 설명한 방식들 중에서 그림 1과 같이 레이스 트랙을 여러 개 결합하는 방식은 미국의 General Electric 에서 20MVA 급에 적용한 경험이 있으며, 슬롯이 없는 새들형은 일본의 Hitach 에서 50MW 급에 적용하여 전기적 출력을 얻는데 성공하였고 슬롯이 있는 새들형도 Super-GM 에서 70MW 급에 적용하여 장기간 운전시험까지 마친 것으로 알려지고 있다. 여기서는 대용량기로의 확대 적용이 용이한 후자의 두 가지 경우를 기초로 하여 1MVA 급에 적용시켜 보기로 한다 (1)(2).

### 2.2.1 횡단면 설계

1MVA 급의 초전도발전기의 경우, 그 용량이 수십 kVA 급의 소용량기의 기준을 따를 수도 있고 수십 또는 수백 MVA 급의 대용량기의 설계기준을 채택할 수도 있다. 소용량기의 설계방법은 4극기의 기준을 따른다고 볼 수 있을 것이고, 대용량기는 앞에서 언급한 바와 같이 2극기의 형태를 설계기준으로 한다고 할 수 있겠다. 이 두 가지 경우를 용량, 동기리액턴스, 전기자 전압 및 전류, 계자전류 등을 같은 조건으로 놓고 1MVA 급에서 몇몇 설계사양들을 수식적으로 계산하여 본 결과 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 2극기에서 대체적으로 나타낸 값들을 얻을 수 있었다. 단지, 4극기는 초전도 계자코일에 작용하는 최대 자속밀도가 2극기보다 작고, 발전기로 사용할 경우 60Hz 의 출력 전압 및 전류를 얻기 위해 1800rpm 의 원동기를 사용하여야 하는 반면에 2극기는 3600rpm 으로 회전시켜야 한다는 차이 정도만 존재하게 된다. 또한 전동기로 사용한다면 4극기의 경우 동일 속도를 얻기 위해서 구동 인버터의 스위칭 주파수가 2극기의 2배가 되어야 할 것이다.

Table 1 Comparison of Calculated Machine Parameters of 1MVA S.G.

구 분	2-pole type	4-pole type
정격속도	3600[rpm]	1800[rpm]
기기체적	1.30[m <sup>3</sup> ]	1.39[m <sup>3</sup> ]
기기중량	2025[kg]	3481[kg]
계자코일 턴수	964	1248
계자도체 길이	2669[m]	4915[m]
최대 자속밀도	3.01[T]	2.06[T]
기기효율	97.37[%]	96.74[%]

따라서, 본 논문에서는 앞에서 언급한 바와 같이 대용량의 3600rpm, 2극기를 바탕으로 초전도발전기를 설계하고자 한다. 계자코일 도체는 동작전류 1000A 정도를 감당하기 위해서는 단면이 사각형인 NbTi 초전도 선을 사용한다. 결정된 발전기의 사양에 따라서 Fortran 으로 짜여진 설계프로그램 상에 그 값을 주고, 프로그램을 여러 차례 실행시키면서 적절한 결과를 얻도록 하였다. 프로그램 입력변수의 기본이 되는 파라미터인 동기리액턴스 Xd 는 그 값이 너무 작을 경우에

는 단락고장시 과도전류값이 매우 커질 수 있고, 너무 크면 정상상태 안정도가 나빠지고 기기의 크기와 무게도 커지므로 0.2p.u. 내지 0.3p.u. 으로 하였다. 이에 따라 결정된 최종 발전기설계 사양과 단면을 표 2와 그림 3에 보인다.

Table 2 Design Specifications of 1MVA S.G.

정격 용량	1[MVA]
정격전압	3300[V]
정격전류	175[A]
역률	0.8[지상]
주파수	60[Hz]
극수	2
정격 속도	3600[rpm]
계자 전류밀도	150[A/mm <sup>2</sup> ]
계자 정격 전류	1000[A]
계자 턴수	964
전기자 전류밀도	3[A/mm <sup>2</sup> ]
전기자 슬롯 수	48
전기자 매극매상당 턴수	48
동기리액턴스	0.2[p.u.]
계산 효율	97.37[%]

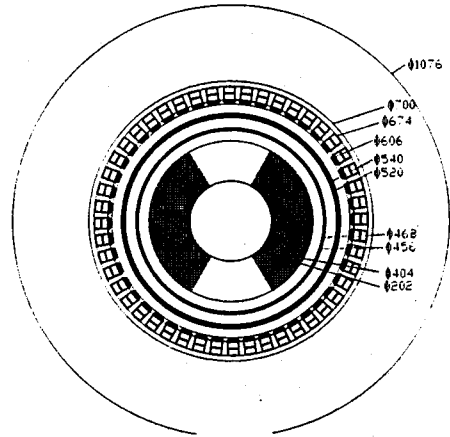


Fig.3 Cross-sectional diagram of 1MVA S.G.

계자코일의 권선각은 2극기에 적당한 120° 의 기계각에 배치시키도록 하며, 권선의 점적율은 실제 제작시 발생할 수 있는 절연시의 공간확보를 위해서 그 값을 충분히 하여 20% 정도로 설정하였다. 그림 상에는 수식적인 자장해석 모델과 똑같이 계자코일을 분포시킬 수 있는 슬롯이 없는 형태로 배치가 되어 있으며, 슬롯이 있는 경우는 슬롯이 없는 경우에서 얻어진 전체턴수를 여러 개의 슬롯에 배치시키면 된다. 또한 슬롯사이에는 권선이 분포될 수 없으므로 계자코일이 배치되는 전체 권선각이 설계치 120° 보다 약간 커지게 되며, 본 논문에서 설계하고자 하는 그림 3과 같은 1MVA 급의 2차원 원통좌표계의 횡단면 설계결과를 바탕으로 슬롯의 배치를 고려해 본 결과 20개의 슬롯을 배치할 수 있었다 (4).

### 2.2.2 설계방법의 비교 및 고찰

본 절에서는 이상에서 기준모델로 삼은 슬롯이 없는 형태의 계자코일과 이 모델을 약간 변형시켜 슬롯이 있는 형태의 계자코일을 설계하여, 이 두 가지 모델들을 상호비교하고 2차원 자장해석을 통하여 횡단면 각부의

자장분포와 유기전압에 직접영향을 미치는 전기자부에서의 자장분포를 분석한다. 슬롯이 있는 형태의 횡단면은 그림 5와 같이 자극당의 슬롯 수는 10개이고 각 슬롯들은 15°의 간격으로 배치되며 각 슬롯의 모양과 크기는 모두 같게 하여 슬롯당 같은 수의 도체가 들어가게 하였다. 물론 슬롯의 크기를 정현적으로 배치하는 것도 생각해 볼 수 있으나 슬롯간의 공간부족이 문제가 되어 본 논문의 비교대상에서는 제외시켰으며, 수백 MW 급의 대용량기에서는 이러한 배치법도 가능할 것으로 여겨진다[3].

### 2.2.3 두 가지 형태의 해석결과 비교

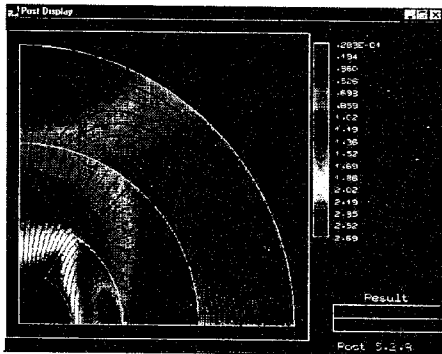


Fig. 4 2D field distribution of slotless type 1MVA S.G.

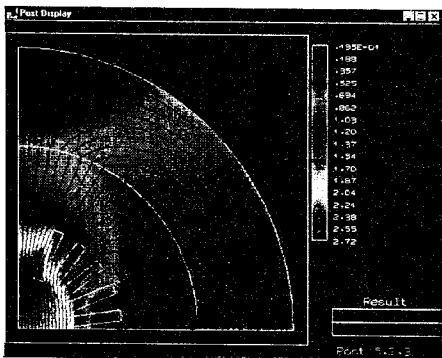


Fig. 5 2D field distribution of slotted type 1MVA S.G.

Table 3 2D FEM analysis results

구분	slotless type	slotted type
Node number	2394	2964
Element number	4685	5819
최대 자속밀도[T]	2.69	2.72
전기자 자속밀도[T]	0.84	0.78
FFT[%] (3rd Harmonics)	0.58	3.66

슬롯이 없는 형태의 단면은 그림 3의 단면구조와 일치하며 계자코일의 턴 수는 964 이고 동작전류는 1000A이며 권선각은 120°이다. 슬롯이 있는 경우는 슬롯 하나당 96턴으로 배치하였고 슬롯간 기계각은 15°를 이루며, 계자권선부의 최대자장은 슬롯이 있는 형태가 2.7T 정도로 슬롯이 없는 형태보다 약간 높다. 위

의 두 가지 형태의 모델에 대하여 유기전압의 파형에 직접적인 영향을 미치는 전기자코일부에서의 Radial 방향의 자장분포 파형을 비교 및 분석하여 보았다. 슬롯이 있는 경우가 약간의 고조파 성분을 더 포함하였으나 양쪽 모두 왜형률이 매우 적은 값을 가져서 출력 전압의 파형에는 그다지 이상이 없을 것으로 여겨진다. FLUX2D 전자기해석 프로그램을 이용한 두 형태의 해석모델 및 그 결과를 표 3에 정리한다.

### 3. 결론

본 논문에서 다룬 설계 및 해석은 2차원적 전류 및 자장분포를 근거로 한 것으로서, 실제 모델과는 약간의 차이를 보일 것으로 예상된다. 그러나 이러한 모델에 의한 오차는 계자코일의 동작 전류값을 조정하여 우리가 얻고자 하는 출력을 얻을 수 있을 것으로 고려가 되며, 이는 당 연구그룹에서 개발한 30kVA 기의 특성실험에서도 확인이 된 바 있다[5]. 2극기의 장점은 언급한 바와 같이 효율향상과 기기의 체적 감소 측면에서 유리하고 4극기에서 보다 2배 정도로 선재를 줄일 수 있을 것으로 예측이 되며, 용량이 커질수록 더 유리하다. 이렇게 되면 현재 연구되고 있는 초전도 회전기의 제조비용을 상당한 비중에 차지하고 있는 초전도 선재의 사용량을 상당히 줄일 수 있게 되고, 이로써 동급의 회전기에서 상당한 가격 경쟁력을 확보할 수 것으로 예상이 된다. 특히, 세계적으로 고온초전도 선재를 전력기기에 응용하려는 연구가 상당히 진전되어 있어서 BSCCO-2223 선재같은 경우는 수 km 정도로 제작하여 130A/mm<sup>2</sup>(@77K, self-field) 정도의 공학적으로 이용 가능한 임계 전류값을 갖는 상업적인 선재들이 나오고 있다. 또한, 이러한 선재들은 세라믹계의 고온초전도 선재의 단점인 기계적인 강도를 상당히 보강하여 높은 신뢰성을 지닌 것으로 알려지고 있다. 따라서 이러한 향상된 선재 기술들을 이용하면 모터나 발전기의 2극의 계자코일과 같은 제작하기 힘든 경우들도 응용이 가능할 것으로 예상이 된다.

MVA 급의 대용량의 초전도발전기는 초전도 계자코일을 복잡한 형상으로 권선하는 것이 기술의 핵심이며 기술의 난이도 측면에서도 다른 어떤 부분보다 중요하고 힘이 들며, 이러한 기술들은 그 적용범위도 넓어서 입자가속기에 쓰이는 새틀형 코일이나 MHD 발전용의 초전도코일 등에도 적용이 가능할 것으로 사료된다. 앞으로 이러한 초전도기술들을 실제 적용시키기 위한 노력 및 기술적인 뒷받침에 대한 연구들이 필요하며 지속되어야 할 것으로 고려된다.

### [참 고 문 헌]

- [1] N. Maki, K. Yamaguchi, M. Takahashi, R. Shiobara, "Development of Superconducting AC Generator", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.24, No.2, pp.792~795, March 1988.
- [2] JA Fealey, WD Jones, TA Keim, TE Laskaris, "Comprehensive Test and Evaluation of a 20 MVA Superconducting Generator", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.6, pp.1484~1491, June 1985.
- [3] K. Yamaguchi, N. Maki, R.S. Shiobara, "Rotor Design of a 1000MW Superconducting Generator", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.4, No.2, pp.244~249, June 1989.
- [4] 백승규, 손명환, 권영길, 류강식, 조영식, "1MVA 급 초전도발전기 설계", 한국초전도·저온공학회 학술대회 논문집, pp.158~161, 2000년 2월.
- [5] S.K. Baik et al., "A 30kVA Superconducting Generator Development and Basic Tests", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.10, No.1, pp.947~950, March 2000.