

1 MVA 급 초전도발전기 설계

백승균, 손명환, 권영길, 류강식, 조영식*
 한국전기연구소 전략기술연구단 초전도응용 연구그룹, *창원대학교 전기공학과

1 MVA Superconducting Generator Design

S.K. Baik, M.H. Sohn, Y.K. Kwon, K.S. Ryu, Y.S. Jo*
 Korea Electrotechnology Research Institute
 Strategic Electrotechnology Research Center
 Applied Superconductivity Research Group
 *Changwon National University
 Department of Electrical Engineering

skbaik@keri.re.kr

Abstract - Generally superconducting generators(S. G.'s) will be classified into 2 types according to their field coil shape. The first one is race-track type and the other is saddle type. Race-track type S.G.'s have almost the same structure with conventional salient pole generators which are being used as largely small scale machines with more than 4 poles. On the other hand saddle type S.G.'s correspond to conventional cylindrical generators with 2 poles used for large turbines in power plants. In this paper 1MVA S.G. with saddle type field coil is electromagnetically designed and based on the research results from development of 30kVA S.G. with race-track type field coils in our group, other parts such as cooling systems and power leads are presented.

1. 서 론

초전도발전기의 계자코일은 크게 기존의 돌극형 발전기의 계자코일방식과 유사한 레이스트랙형(Race-track type)과 터빈발전기의 원통형 계자코일에 대응하는 새들형(Saddle type)이 있다. 따라서 레이스트랙형의 계자코일을 갖는 초전도발전기는 주로 4극이상의 다극기와 소용량기에 채택이 되어지고, 새들형은 기존의 터빈발전기가 사용되는 것과 같이 2극의 대용량발전용으로 설계되어진다. 본 논문에서는 1MVA 급의 초전도발전기를 2극의 새들형 계자코일을 갖도록 전자기적으로 설계하였으며, 당 연구그룹에서 개발한 30kVA 급의 레이스트랙형 계자코일을 갖는 발전기의 구조설계를 토대로 내부 극저온용기 및 냉매공급장치와 전류공급단자를 배치하여 보

았다. 특히 새들형의 계자코일은 슬롯이 있는 형태와 없는 형태로 분류되므로, 이 두가지 방식의 장단점을 비교하기로 한다.

2. 본 론

2.1 1MVA 급 초전도발전기의 설계과정

발전기의 설계사양을 먼저 결정하고 전기자 및 계자코일의 형태 및 점적율 등을 정하여 설계 프로그램에 입력하여 출력된 결과에 의해 횡단면 설계를 하였다. 또한 횡단면설계에 부합하도록 계자 및 전기자코일을 상세설계하고, 저온 및 상온템퍼를 배치하였다. 각 부분의 전기적 설계가 끝난 후에 30kVA 기의 설계방법을 기본으로 하여 극저온용기 및 헬륨공급장치 등을 배치하였다 [1][2].

2.1.1 설계사양의 결정

1MVA 급의 초전도발전기의 경우, 그 용량이 수십 kVA 급의 소용량기의 기준을 따를 수도 있고 수십 MVA 급의 대용량기의 설계기준을 채택할 수도 있다. 본 논문에서는 대용량의 3600rpm, 2극기를 바탕으로 초전도발전기를 설계하고자 한다. 표 1에 설계시 고려된 초전도발전기의 사양을 보인다.

초기에 사양 결정시 기존의 상전도 발전기의 KS규격에 입각하여 단자전압을 380V 로 하여

Table 1 Specifications of 1 MVA S.G.

정 격 용 량	1 [MVA]
정 격 속 도	3600 [rpm]
동기리액턴스	0.2 [p.u.]
단 자 전 압	3300 [V]
계 자 동 작 전 류	1000 [A]
계 자 극 수	2
역 륜	0.8 [lag.]
주 파 수	60 [Hz]

설계하고자 하였으나, 이 경우 전기자에 상대적으로 상당한 전류가 흐르게 되고 이에 따라 코일을 수냉각할 필요가 생기므로 시중의 승압용 변압기와의 접속도 고려하여 3300V 로 높혀서 설계하였다. 그 결과 전기자코일 도체는 공랭식이 가능한 전류밀도인 $3A/mm^2$ 로 설계프로그램에 입력하였고, 계자코일 도체의 전류밀도는 동작전류 1000A 정도를 감당하기 위해서는 사각형 도체를 주로 사용하므로 30kVA 기의 원형도체 전류밀도 $200A/mm^2$ 보다 적은 $150A/mm^2$ 로 설정하였다.

2.1.2 계자코일의 형상결정

대용량기에서는 일반적으로 2극을 갖는 계자코일의 형상을 띄며 회전자축에 계자코일을 배치시키는 방법도 일반적으로 슬롯이 없는 형태와 있는 형태의 두가지로 나눌 수 있다. 슬롯이 없는 형태는 그림 1과 같이 레이스트랙의 보빈을 2극기의 권선각 안에 여러개 배치시키는 방법과 도체를 팬케이크형으로 여러개 제작하여 적층하는 방법이 있다. 전자의 방법은 권선기를 이용하여 권선하기가 편리하다는 장점이 있으나 레이스트랙이 여러개 들어가므로 조립후의 밸런싱의 문제와 냉각장치의 배치가 힘들다는 단점이 있다 [3][4].

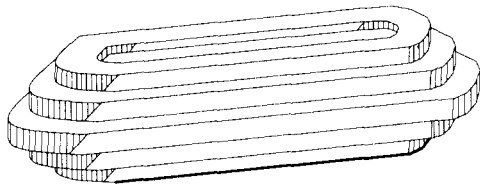


Fig.1 2pole race-track type field coils

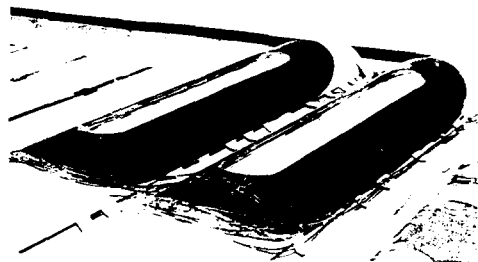


Fig.2 2pole pancake type field coils

후자의 방법은 설계프로그램의 권선배치와 거의 일치하게 제작할 수 있고 권선을 지지하기 위해 사용되는 지지부의 무게를 줄일 수 있는 장점이 있는 반면에, 권선기를 이용하여 권선하기 힘들고 수작업으로 팬케이크 코일을 제작하고 이들을 각각 접합시켜야 하는 단점이 있다. 슬롯이 없는 형태는 일반적인 대용량 동기에 대부분 사용하는 방식으로 권선이 슬롯에 삽입되어 감기므로 고도의 권선기술이 요구되며, 제작후의 기계적인 강도나 안정성에서 슬롯이 없는 형태보다 우수하다. 본 논문에서는 이들 방식중 슬롯이 없는 형태의 팬케이크형 코일을 갖는 계자코일을

중심으로 설계하고 슬롯이 있는 형태와도 비교 및 분석을 행하고자 한다.

2.1.3 횡단면 설계

앞에서 결정된 발전기의 사양에 따라서 설계 프로그램 상에 그 값을 주고, 프로그램을 여러 차례 실행시키면서 적절한 결과를 얻도록 하였다. 프로그램 입력변수의 기본이 되는 파라미터인 동기리액턴스 X_d 는 그 값이 너무 작을 경우에는 단락고장시 과도전류값이 매우 커질 수 있고, 너무 크면 정상상태 안정도가 나빠지고 기기의 크기와 무게도 커지므로 0.2p.u. 내지 0.3p.u. 으로 하기로 하였다. 또한 고정자권선의 여유도 ksaica 는 초기에 그 값을 너무 크게 잡아서 고정자치의 폭이 매우 작게 나왔지만, 그 값을 차츰 줄여서 치의 폭이 제작가능한 9mm 이상이 되도록 설계하였다. 내반경을 0.3m 로 할 경우 전기자의 전류밀도값을 초기에 언급한 수냉각 및 유냉각에 적합한 $8A/mm^2$ 정도로 하여 설계하기에 적당하나 이 방법은 전체 시스템이 더 복잡해지는 단점이 있으므로 그 값을 0.35m 로 키워서 공기냉각만으로 전기자코일의 냉각이 가능한 $3A/mm^2$ 정도로 설계하였다. 이에 따라 결정된 최종 설계단면을 그림 3에 보인다.

계자코일의 권선각은 2극기에 적당한 120° 의 기계각에 배치시키도록 하며 권선의 점적울은 실제 제작시 발생할 수 있는 절연시의 공간확보

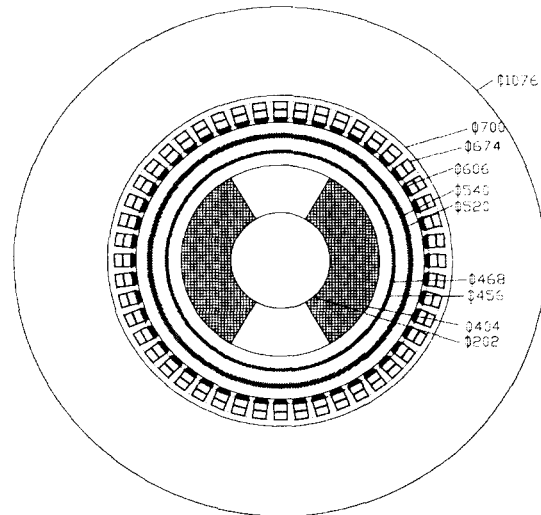


Fig.3 Crosssectional diagram of 1MVA S.G. 를 위해서 그 값을 충분히 하여 20% 정도로 설정하였다. 또한 그림상에는 계자코일이 권선이 되어지는 공간에 균일하게 분포되는 방식인 슬롯이 없는 형태로 설계가 되어 있고, 슬롯이 있는 경우는 슬롯사이에는 권선이 분포될 수 없으므로 이에 따라 권선각이 120° 보다 커지게 된다. 위의 2차원설계 결과에 따른 전기자슬롯과 코일의 상세설계 결과를 그림 4에 보인다.

그림에서와 같이 슬롯당 도체수는 6개이고 2층으로 배치되며 도체당 소선의 수는 와전류손을 줄일 수 있도록 9가닥의 평각동선을 이용하였다. 또한 슬롯의 쐐기(Wedge)는 전기자치와 같은

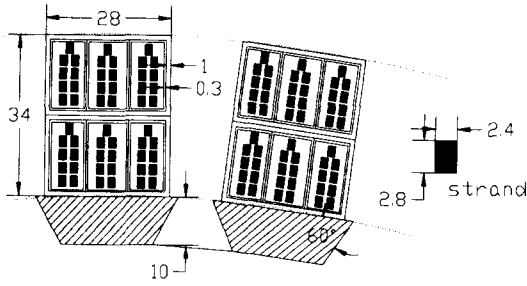


Fig. 4 Details of 1MVA stator coils

재질인 GFRP를 사용하고 그 두께는 전기자부에서의 자속밀도값이 약 1T 정도이므로 이에따라서 전기자코일이 받는 전자기력을 감당하기에 충분한 값인 10mm 정도로 하여 설계하였다.

2.1.4 축방향 및 계자코일 상세설계

그림 3의 가장 바깥층에 해당하는 기계실드는 전기자권선의 유효길이 정도로 하고 실리콘강판의 적층두께는 60mm 정도로 하는 것이 적당하며 적층강판 사이의 공기덕트의 두께는 10mm 정도로 설정하였다. 그 외의 댐퍼층의 축방향길이 결정방법은 30kVA기의 제작시 설정한 방법과 유사하다.

계자코일은 슬롯이 없는 형태의 새들형을 기준으로 축방향길이를 결정하였으며, 새들형코일의 상부에서 코일을 보았을 때 그 모양이 레이스 트랙을 이루도록 하였다. 이와 같은 슬롯이 없는 형태의 계자코일은 정방형의 초전도코일을 보빈에 직접 감기전에 보빈과 같은 형태의 틀을 미리 제작하고, 그 위에 각층의 코일들을 팬케이크 형태로 감아 부분별 코일을 제작한 후에 최종적으로 실제의 보빈 위에 적층하는 구조를 가진다. 각 층의 팬케이크가 적층이 된 후에 각각의 코일단부는 계자코일의 N극과 S극이 만나는 양쪽 최외각부에서 접속이 이루어지는 구조로 되어있다. 또한 층간에는 FRP로 된 절연층을 두고 접속이 된 팬케이크들을 고속회전시에 보빈에서 이탈하지 않도록 최외각에 SUS 선을 여러층 감아서 고정시키도록 한다.

그림 5에 코일의 단부(end region)구조의 단면을 보여준다. 코일들은 8개의 층으로 나누어 배치가 되고, 각층은 계단형의 FRP 지지부에 적층이 된다. 이와 같이 코일단부의 내측을 계단형

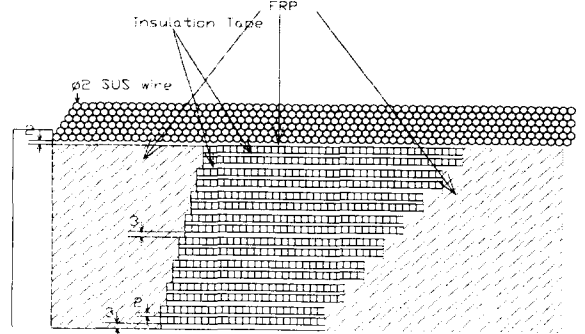


Fig.5 Crossectional diagram of field coil end

으로 구성한 것은 이 부분에서의 자장이 초전도 권선부위 중 가장 높기 때문에 자장이 적층코일의 중간층에 밀집되는 것을 분산시켜서 운전시의 계자코일 안정성을 더 높이기 위함이다. 또한 그림 6에는 이상의 과정에 의해서 결정된 1MVA 급 초전도발전기의 전체 종단면도를 보인다. 구동모터와 헬륨급배장치를 포함한 전체길이는 5.6m 이고 열교환부의 종축길이는 30kVA 기와 거의 같게 하며 전류리드의 단면적은 5배정도로 하여 동작전류의 용량을 감당하도록 하였다.

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 두가지 모델들을 상호비교하고 2차원 자장 해석을 통하여 횡단면 각부의 자장분포와 유기전압에 직접영향을 미치는 전기자부에서의 형태를 분석한다.

2.2.1 슬롯의 유무에 따른 해석

슬롯이 있는 형태의 횡단면은 그림 8과 같이 자극당의 슬롯수는 10개이고 각 슬롯들은 15°의 간격으로 배치되며 각 슬롯의 모양과 크기는 모두 같게하여 슬롯당 같은 수의 도체가 들어가게 하였다. 물론 슬롯의 크기를 정현적으로 배치하는 것도 생각해 볼 수 있으나 슬롯간의 공간부족이 문제가 되어 본 논문의 비교대상에서는 제외시켰다.

슬롯이 없는 형태의 단면은 그림 3의 단면구조와 일치하며 계자코일의 턴수는 964 이고 동

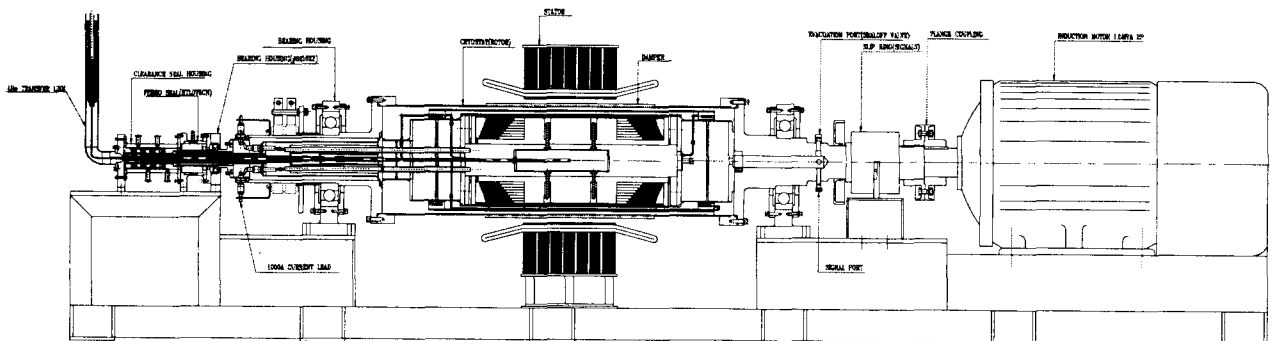


Fig. 6 Longitudinal diagram of 1MVA S.G. test set-up

작전류는 1000A이며 권선각은 120°이다. 이에 따른 2차원 FEM 해석에 따른 자장분포를 그림 7에 보인다.

슬롯이 있는 경우는 슬롯 하나당 96턴으로 권선하는 방식으로 설계하였고, 계자권선부의 최대자장은 슬롯이 있는 형태가 2.7T 정도로 슬롯이 없는 형태보다 약간 높다.

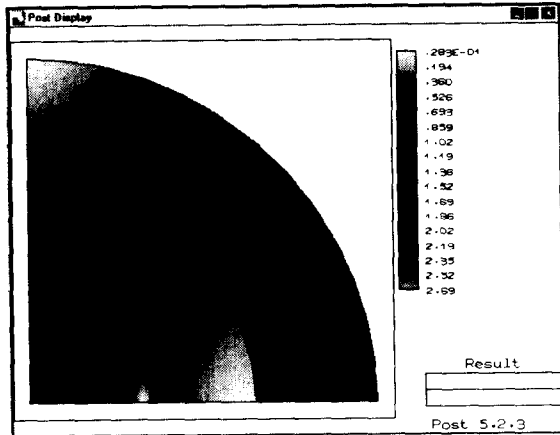


Fig. 7 2D field distribution of slotless type 1MVA S.G.

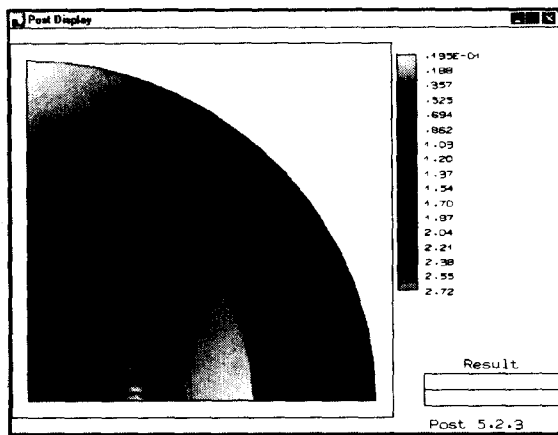


Fig. 8 2D field distribution of slotted type 1MVA S.G.

2.2.2 두가지 형태의 해석결과 비교

위의 두가지 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 전자장해석 프로그램을 이용한 두형태의 해석모델 및 그 결과를 표 2에 정리한다.

3. 결 론

본 논문에서 다룬 설계 및 해석은 2차원적 전류 및 자장분포를 근거로 한 것으로서, 실제 모

Table 2 FEM analysis results

구 분	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

델과는 약간의 차이를 보일 것으로 예상이 된다. 그러나 이러한 모델에 의한 오차는 계자코일의 동작전류값을 조정하여 우리가 얻고자 하는 출력을 얻을 수 있을 것으로 고려가 되며, 이는 당 연구그룹에서 개발한 30kVA기의 특성실험에서도 확인이 된 바 있다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 손명환, 권영길, 백승규, 고락길, 이연용, 하동우, 조영식, 김경한, 류강식, "30kVA 초전도발전기의 회전자 개발과 냉각 특성", 한국초전도·저온공학회 학술대회, pp.142~145, 1999.
- [2] 손명환, 백승규, 권영길, 장국렬, 이연용, 류강식, 박도영, 김용주, 안중보, 김국현, "30kVA 초전도발전기의 설계 및 성능평가", 한국초전도·저온공학회 학술대회, pp.146~149, 1999.
- [3] 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.
- [4] T.E. Laskaris, "High-Performance Superconducting Windings for AC Generators", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-17, No.1, pp.884~889, January 1981.