

회전자 내부에 철심을 배치한 고온초전도모터 설계 방안

백승균^{*}, 김석환^{*}, 손명환^{*}, 서무교^{*}, 조영식^{*}, 권영길^{*}, 류강식^{**}
한국전기연구원^{*}, 차세대초전도응용기술개발사업단

Design Considerations of HTS Synchronous Motor arranged with Magnetic Core inside of Magnet Vessel

S.K. Baik^{*}, S.W. Kim^{*}, M.H. Sohn^{*}, M.G. Seo^{*}, Y.S. Jo^{*}, Y.K. Kwon^{*}, K.S. Ryu^{**}

KERI Applied Superconductivity Research Group^{*}
Center for Applied Superconductivity Technology

skbaik@keri.re.kr

Abstract - HTS motors and generators have some advantages over LTS machines because of higher operating temperature. Very low temperature makes LTS machines need higher refrigeration cost and large facilities. However, HTS machines are expected to be comparable with conventional counterparts at smaller machine ratings than LTS generators in terms of efficiency and size. As the operating temperature increases, the magnetic flux density generated by HTS field coils decreases relatively. For example, 1000hp HTS synchronous motor developed in a few years ago has maximum field density of 1.5T. At this point, magnetic material used in conventional machines is able to pass magnetic flux easily with high permeability. In order to investigate the effect, we arranged magnetic core only inside of magnet vessel of a 100hp target machine. By way of FEM analysis, we concluded that the magnetic core can reduce amount of expensive BSCCO conductor so much.

1. 서 론

초전도 동기전동기와 발전기의 장점 중 하나는 기존의 구리로 된 계자코일을 수백 배의 전류통전 능력을 지니는 초전도코일로 대체하고 기기 무게의 대부분을 차지하는 철심을 제거하여 그 무게를 기존 전동기의 거의 절반 수준으로 떨어뜨리는 것에 있다. 이것이 가능한 이유와 필요성은 초전도선재를 사용하면 구리도체를 사용해서는 발생시킬 수 없는 3T 이상의 고자장이 가능하기 때문이며, 이러한 고자장하에서는 자성체(Magnetic Material)를 사용할 경우에 자성체 철심이 대부분 포화되어 그 투자율이 공기와 같이

되어버리므로 자성체를 사용할 이유가 없어진다. 따라서, 기존 동기기의 철심인 규소강판과 같은 자성재료는 기기의 최외각의 원통형 기계실드에만 존재하게 되며, 기존 기기의 슬롯과 치부분이 FRP 와 같은 비자성 재료가 되므로 외형률이 상당히 낮은 전압·전류 및 자장의 형태를 얻을 수 있다.

대용량의 저온초전도 동기발전기의 경우는 NbTi 와 같은 금속계선재의 계자코일에 작용하는 최대자장이 5T 정도까지 올라가게 되며, 그 용량이 작아질수록 발생 자장의 세기도 일반적으로 감소한다. 그러나, 고온초전도 전동기의 경우는 BSCCO 와 같은 세라믹계열의 고온초전도선재를 사용하여 그 동작온도를 30K 정도까지 올려서 기기를 설계하면, 이 온도에서의 발생자장은 1000마력의 경우 최대 1.5T 정도가 된다[1]. 이것은 저온초전도의 경우보다 동작온도가 25K 정도 올라가는 대신에 도체의 허용전류밀도가 상당히 낮아지고, 자장의 세기가 커지면서 테이프 형태의 고온초전도선재의 통전능력이 많이 떨어지기 때문이다. 이와 같은 1.5T 정도의 비교적 낮은 자장에서는 자성체가 크게 포화되지 않고도 기기를 설계할 수 있기 때문에 기기내부에 철심을 넣어서 설계하는 것도 고려해 볼 수가 있다. 본 논문에서는 당 연구그룹에서 과학기술부의 21세기 프론티어연구개발사업의 일환으로 진행하고 있는 고온초전도 모터개발 계획의 1단계인 100마력급 동기전동기에 이러한 방안을 적용하여 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 공심형 고온초전도 동기전동기

공심형 초전도동기기는 기존의 철심으로 채워진 동기기와는 달리 이론적인 접근을 통하여 전자장 해석을 할 수 있고, 이를 프로그램화하여 원통좌표계상에 계자 및 전기자코일과 최외각의 기계실드층을 설계할 수 있다. 이러한 과정을 통

하여 100마력급의 고온초전도 전동기를 기본적으로 설계하여 보고 철심을 이용하고자 하는 설계의 기본모델로 삼았다.

2.1.1 기본 모델의 횡단면 설계

설계프로그램을 이용하여 계자 및 전기자코일, 댐퍼와 기계실드의 원통좌표상의 반경을 결정한 후, 기기의 단면을 Fig.1 과 같이 전자기적으로 배치·설계한다[2]. 계자코일은 BSCCO-2223 테이프형 고온초전도선재가 팬케이크 모양으로 몇 개의 층을 이루어 보빈에 감기게 되고, 각 자극(pole)은 레이스트랙형의 코일로 제작이 되므로 그림에서와 같이 보빈과 계자코일이 고속회전이탈을 방지하는 덮개나 고정부 등의 여유공간을 두어 그 단면을 계단형상으로 배치시킨다. 설계된 전동기의 사양을 Table 1 에 정리한다.

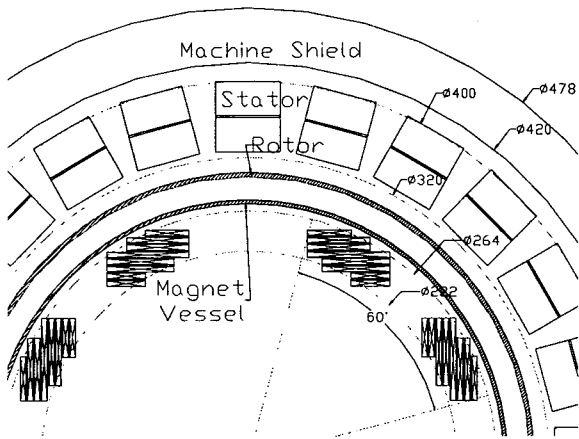


Fig. 1. Designed Cross-section of 100hp HTS Motor

Table 1. Specifications of HTS Synchronous Machine

정격출력	100[hp]
정격속도	1800[rpm]
입력전압	380[V]
계자동작전류	45.45[A]
사용선재	BSCCO-2223
계자코일턴수	1075 [turns/pole]
계자코일축방향 직선부길이	250 [mm]
극수	4
주파수	60[Hz]
역률	1.0

테이프형태의 BSCCO-2223 고온초전도 선재를 사용하여 설계 프로그램의 계산된 결과에 따라 한국당 1075 턱씩 배치시켰다. Fig.1 의 1점쇄선으로 구성된 권선각 60°와 이론적 해석으로부터 얻어진 회전자 내·외경 $\phi 222\text{mm} \sim \phi 264\text{mm}$ 안에 전류방향이 동일한 도체들이 배치된다. 설계된

팬케이크는 총 8 층으로 설계하였고 최상층부터 각각 102, 145, 145, 191, 156, 156, 90, 90 턱으로 배치시켰다. 비선형의 B-H 곡선을 갖는 철심은 기기의 최외각인 기계실드(Machine Shield)에만 존재하고, 그 외의 기기내부는 모두 공기와 같은 투자율을 갖는 공심형의 구조이다. 이 모델을 기본으로 하여 2차원 유한요소해석(FEM)을 통해 정자장해석을 해보기로 한다.

2.2 철심 배치에 따른 영향 분석

Fig.1 의 1점쇄선으로 나타나는 이론적 해석에 따른 계자코일부에서의 최대자장은 0.5727T 이었으며, 실제 팬케이크선재들이 배치되는 형태의 자장분포를 보기 위해서 도면과 동일하게 유한요소해석 모델을 구성하였다. 또한, 철심의 영향을 보기 위해서 냉매를 가두어두는 용기(Magnet Vessel) 내부에 기계실드에 사용된 것과 동일한 재료로 자성체를 배치하여 FEM 모델을 구성하여 그 영향을 보고자 한다.

2.2.1 2차원 유한요소 해석 모델

Fig.1 의 도면에 따른 FEM 해석모델과 자로의 분포를 Fig.2 에 보여준다.

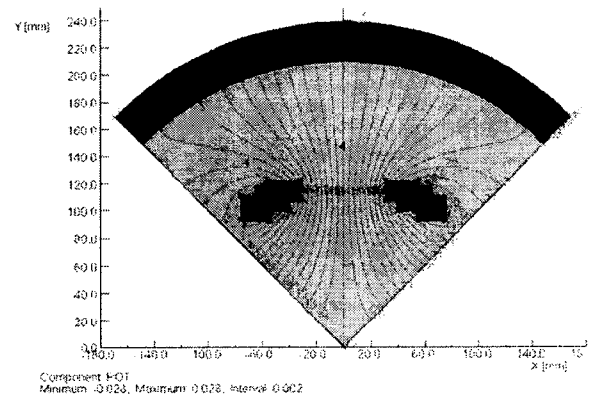


Fig. 2. 2D FEM Modeling of Fig.1

위 모델은 Vector Field 사의 OPERA-2D Software 를 이용하였고 총 4708 개의 요소를 이용하여 Mesh 를 구성하였다. 이를 통한 자속선의 분포를 그림에서 볼 수 있다. 또한, 철심을 회전자 내부에 배치시켰을 때의 영향을 보기 위해서 Magnet Vessel 안에만 기계실드와 동일한 재료의 철심으로 모델링하였다. 이는 기기의 무게를 크게 증가시키지 않고 전기자부에는 철심을 사용하지 않도록 하여 왜형률이 낮은 자장분포를 얻기 위해서이며, 전기자의 교번자계가 Magnet Vessel 과 전기자사이에 배치되는 댐퍼에 의해서 차폐가 되기 때문에 내부의 철심에는 히스테레시스나 와류손과 같은 교류손실이 거의 없을 것으로 예상이 된다. 철심은 고온초전도 코일부와 5mm 간격을 이루게 하였으며 자극면은 계자코일 외경 $\phi 264\text{mm}$ 에 의한 원호를 이루도록 하였다. 이를 Fig.3 에 자속선 분포와 함께 나타낸다.

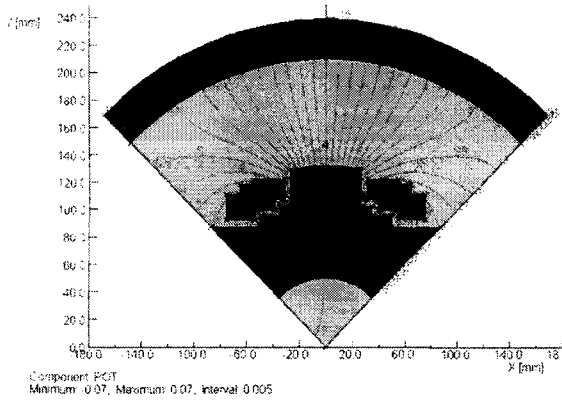


Fig. 3. 2D FEM Model arranged with Magnetic Core

2.2.2 철심 배치시의 영향 분석

두 가지 경우를 해석해 본 결과 철심을 배치시킨 것이 전기자부에서 훨씬 더 큰 자장 값을 갖는 반면에 고온초전도 테이프면에 수직으로 작용하는 자장도 이에 따라 Fig.4 와 같이 증가하였다.

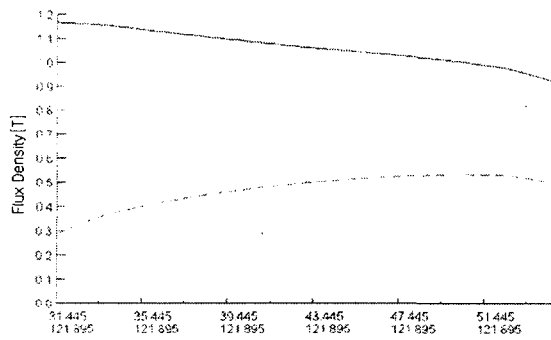


Fig. 4. Comparison of Normal Flux Density to the Surface of BSCCO Tape(Dashed; Fig.2, Continuous; Fig.3)

선재 표면에 작용하는 수직자장성분의 최대값은 8층의 팬케이크 중 가장 위에 존재하는 것의 상부를 따라 존재하며, 철심을 사용한 경우 1.167T 을 가지고 없는 경우는 0.536T 이다. 따라서 선재의 입계전류에 영향을 미치는 자장의 세기가 두배정도 차이가 나므로 철심이 있는 경우의 켄치전류가 철심이 없는 경우보다 더 떨어질 것으로 예측할 수 있다. 이것은 자장의 세기가 세어짐에 따라 얻어지는 단점이라고 할 수 있으며, 계자코일의 턴수를 적당히 줄여서 전기자의 자장 세기를 원래의 해석모델과 동일하게 맞춘다면 이 값도 크게 줄어들어서 자장에 의한 켄치전류의 감소는 그다지 크지 않을 것으로 고려된다.

전동기의 발생토크의 형태와 크기는 회전자계를 발생시키는 전기자와 계자의 주자속에 의해 영향을 받는다. 따라서, 전기자코일의 중심부(φ360mm)에서 계자코일에 의해 발생하는 성분중토크발생에 직접적으로 기여하는 radial 방향 자장성분을 상호 비교하여 보았다.

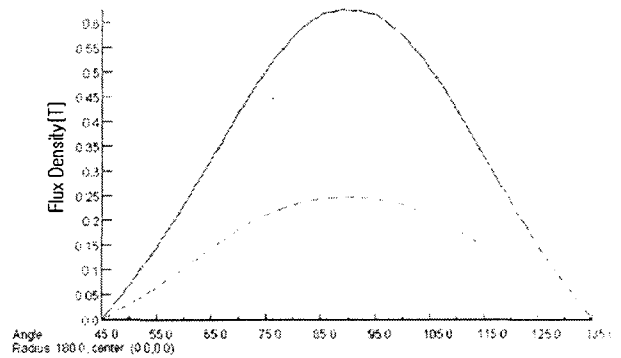


Fig. 5. Comparison of Radial Flux Density at armature coils(Dashed; Fig.2, Continuous;Fig.3)

Fig.5 의 점선으로 표시된 것이 원래의 해석모델에 의한 자장분포이며 실선이 철심을 배치시켰을 때의 형태를 보여준다. 두 경우 모두 상당히 정현파에 가까운 분포를 보였으며, 철심을 배치시킨 경우는 0.626T 의 최대값을 가지고 없는 것은 0.247T 의 최대값을 가진다. 따라서, 철심을 사용하면 선재량을 훨씬 줄여도 전기자부에서 얻고자하는 자장의 세기를 얻을 수 있다는 결과가 된다. 이렇게 되면 한국당 1km 정도 필요한 고가의 고온초전도 선재의 사용량을 절반이하로 줄일 수 있을 것이다. 이러한 결과를 이용하여 선재 사용량을 줄여서 그 자장을 해석해 보기로 한다.

2.3 선재량 감소 후 영향 분석

기준으로 삼은 철심이 없는 경우는 100마력급의 전동기 출력을 갖도록 설계가 되어있으므로, 철심을 배치한 경우에 철심이 없는 경우와 동일한 설계조건을 갖기 위해서는 계자에 의한 전기자부에서의 자장세기를 같은 값을 가지도록 선재량을 감소시키면 될 것이다.

2.3.1 선재량 감소 후 해석 결과

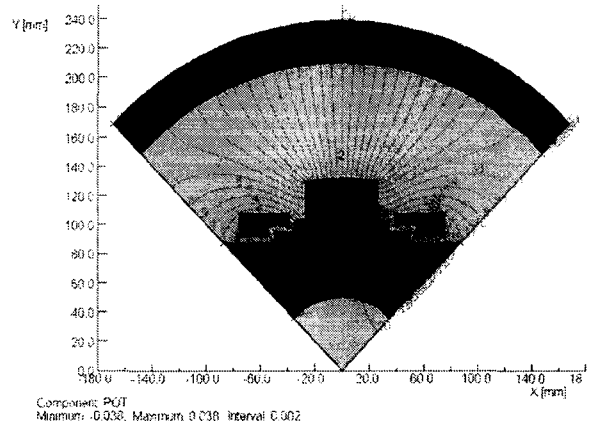


Fig. 6. 2D FEM Model reducing amount of HTS Coil

Fig.1 에 보이는 8층의 팬케이크 중에서 102, 145, 145, 191 의 턴수를 가지는 상부의 4개 팬케이크를 제거시킨 후 FEM 모델링을 하고자 한다. 이렇게 되면 초기 설계시 암페어-턴의 45.77%

에 해당하는 값을 갖게 된다. 이에 따라 구성된 형태는 Fig.6 과 같고 총 3582 개의 요소를 사용하여 Mesh 를 나누었으며 동일한 계자코일 동작 전류값으로 해석하였다. 마찬가지로 BSCCO 테이프면에 수직으로 작용하는 자장성분은 최상부 팬케이크의 상부를 따라 존재하며 이 값을 Fig.4 의 점선으로 나타난 철심을 사용하지 않은 경우와 상호 비교한다.

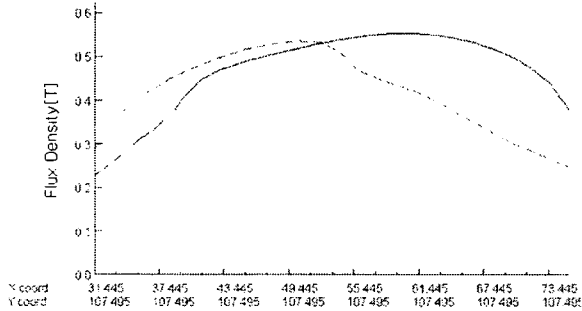


Fig. 7. Comparison of Normal Flux Density to the Surface of BSCCO Tape(Dashed; Fig.2, Continuous; Fig.6)

Fig.7 에서와 같이 실선으로 표시된 철심을 사용하고 선재를 감소시킨 경우, 수직자속밀도가 0.553T 이며 Fig.2 의 기본 해석모델의 값인 0.536T 와 별로 차이를 갖지 않음을 알 수 있다. 따라서, 자장에 의한 동작전류감소는 거의 나지 않으리라 예측할 수 있다. 선재를 감소시킨 모델은 레이스트랙형의 계자코일이 단부에서 굽혀지는 반경이 39.5 mm 인 반면에 원래의 모델은 31.5 mm 가 되므로 굽힘반경에 따른 통전능력 저하도 더 적을 것으로 기대된다. 또한 선재를 감소시킨 모델은 턴수가 절반이하가 되기 때문에 선재간의 전자기력에 의한 마찰빈도가 줄어들고 이에 따른 기계적인 영향으로 인한 코일의 통전능력도 더 적게 감소할 것으로 보여진다. 계자에 의한 전기자 중심부에서의 자장세기를 비교하면 Fig.8 과 같다. 실선으로 표시된 선재를 감소시킨 경우, 0.306T 의 최대 자장값을 가지며 이는 철심을 사용하지 않은 원래의 해석모델보다 24% 나 큰 값이다. 해석모델로 삼은 철심의 모양은 내부에 직경 100 mm 의 빈 공간을 두었으나, 자장은 철심의 자극부위에서 높은 값을 가지고 요오크부위에서는 그렇게 높은 값을 가지지 않는다. 따라서 빈 공간의 직경을 더욱더 크게 제작을 한다면 철심에 의한 무게 증가를 더 줄일 수 있다. 실제로 철심이 없는 경우도 철심이 들어가는 공간에 알루미늄이나 스테인레스강과 같은 비자성 금속재료가 들어간다. 그러므로, 철심에 의한 기기전체의 무게 증가는 그다지 크지 않을 것으로 예상된다.

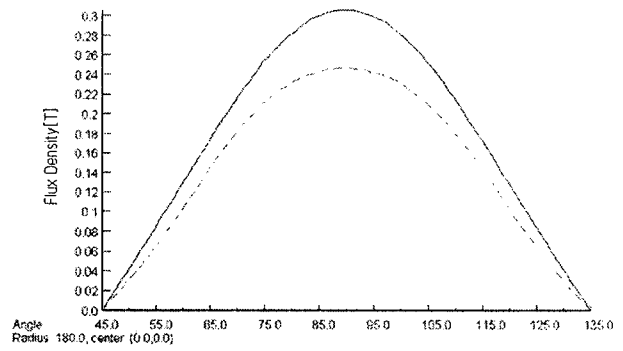


Fig. 8. Comparison of Radial Flux Density at armature coils (Dashed; Fig.2, Continuous; Fig.6)

3. 결 론

공심형의 초전도회전기는 초전도선재의 월등한 통전능력으로 기존기기 중량을 대부분 차지하는 철심을 사용하지 않고도 전기자와 충분한 전자기력을 일으키게 할 수 있다. 기존기기에 사용되는 철심은 3T 이상의 고자장이 되면 자기적으로 완전히 포화가 되어 투자율이 공기와 같게 되어 버린다. 하지만 2T 이하에서는 공기보다 수백·수천배의 투자율을 가지므로 고온초전도선재를 사용할 때 자장이 철심을 크게 포화시키지 않는 범위에 있다면, 본 논문에서와 같이 철심을 부분적으로 사용하는 것도 고려해볼 수 있을 것이다. 설계된 100마력급의 전동기는 한국당 1km 정도의 선재를 필요로 하며, 2000년 6월 현재 American Superconductor 에서 제작되는 고온초전도선재의 가격은 \$18.6/m 이었다. 따라서, 설계된 기기를 제작하는데는 $\$18.6 \times 1000 \times 4 = \74400 의 고온초전도선재 사용비용이 든다. 반면에, 본 논문에서와 같이 철심을 이용한 방법을 적용한다면 고온초전도 선재에 필요한 비용을 절반이하로 줄일 수 있을 것이다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

[참 고 문 헌]

[1] B. Zhang, D. Driscoll, V. Dombrovski, "Development Status of a 1,000 HP Superconducting Motor", Proceedings of the 2000 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference, pp.81~85, 2000
 [2] 백승규, 손명환, 김석환, 권영길, "손실을 고려한 초전도 동기전동기 설계", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp.21~26, 2001. 11