

1MW 고온초전도 동기모터의 개념설계 고찰

Conceptual Design Considerations of 1MW Class HTS Synchronous Motor

백승규*, 손명환*, 이연용*, 권영길*, 문태선**, 박희주**, 김영춘**

Seung-Kyu Baik*, Myung-Hwan Sohn*, Eun-Yong Lee*, Young-Kil Kwon*,
Tae-Sun Moon**, Heui-Joo Park**, Yeong-Chun Kim**

Abstract: 1MW class superconducting synchronous motor is designed considering several conditions such as superconducting wire length, machine efficiency and size. As the machine is larger and larger, the superconducting machine shows the advantages more and more over the conventional machines. Although the advantages at 1MW rating are not so great, the design approach to get an appropriate result would be very helpful for larger superconducting synchronous machine design. Major design concerns are focused on reducing expensive Bi-2223 HTS(High Temperature Superconducting) wire which is used for superconducting field coil carrying the rating current around 30K(-243°C) while the machine efficiency is higher than conventional motors or generators with the same rating. Furthermore, some iron cored structure is considered to reduce the HTS wire requirement without bad effect on machine performances such as sinusoidal armature voltage waveform, synchronous reactance and so on.

Key Words: 1MW class, superconducting synchronous motor, superconducting wire length, machine efficiency, Bi-2223, iron cored, synchronous reactance.

1. 서 론

계자코일에 고온초전도체를 이용하여 직류 자장을 발생시키는 고온초전도 동기모터를 1MW의 정격출력을 얻을 수 있도록 설계하고자 한다. 설계시 부하각에 여유를 두어 과부하시 발생할 수 있는 탈조(pull out)를 방지하였다. 또한, 극수를 2극 또는 4극으로 변화시키면서 기기의 크기와 효율 및 고가의 고온초전도 선재의 사용량 등을 고려하여 적절한 설계안을 선정하였다. 현재 고온초전도 선재의 가격이 전체 기기의 제작비용에서 차지하는 비중이 상당히 크며, 고온초전도 선재의 사용량을 상대적으로 적게 하면 동일용량에서 전기적으로 전기자코일이 분담하는 양이 많아지므로 동손의 증가를 초래한다.

* 정 회 원: 한국전기연구원 초전도응용연구그룹

** 비 회 원: 두산중공업(주) 기술연구원

원고접수: 2004년 8월 2일

심사완료: 2004년 9월 15일

따라서 기존의 동기발전기보다 높은 효율을 가지면서 고온초전도 선재의 사용량도 비교적 적은 설계안을 여러 가지 경우에서 선택하여 기기의 제작비용을 줄이면서 기존의 동기기보다 우수한 특성을 갖도록 설계하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 설계 HTS 모터의 사양 결정

설계하고자하는 1MW 급의 고온초전도모터의 사용단자전압의 설정에는 기존 고압 모터의 사용 전압과 모터의 구동을 위해 사용되는 인버터의 전압 등을 고려하여 선택하였다. 현재 국내에서 제작되고 있는 1MW 급의 고압 유도전동기는 3300V, 4160V, 6600V로 설계되어 있으며 고압인버터는 3300V, 4160V의 출력전압을 갖는다. 따라서 판매되고 있는 고압인버터의 활용성을 고려한다면 3300V가 적당할 것으로 보인다. 본 논문에서 설계하고자 하는 초전도 모터는 담수화 플랜트와 같은 대규모의 설비에 사용되는 대용량의 모터들에 향후 적용될 것을 목표로 하였다. 따라서 이런 용도의 모터들은 선박용의 모터들과는 달리 회전속도가 빠르므로 극수를 4극(1800rpm) 또는 2극(3600rpm)으로 하여 각각 설계하여 보았다. 또한, 기술적으로 동일하게 적용할 수 있는 발전기로서의 응용을 고려하여 2극 내지 4극을 기본적인 설계 사양으로 하여 비교·검토하였다.

고려된 Bi-2223 고온초전도 선재는 액체질소 온도(77K)에서 115A의 임계전류(Ic) 값을 가지며, 이를 기준 1.0으로 하여 동작온도(27~33K) 근방의 임계전류 곡선(20K, 35K)을 선재면 수직 자장(B_⊥)에 대하여 Fig. 1에 보인다. 레이스트랙(race-track)형의 계자코일은 제작후 원래의 Bi-2223 고온초전도 선재보다 낮은 임계전류 특성을 가지므로, 이를 고려하여 설계하고자 하는 초전도 모터의 계자코일 Load line을 설정하였으며 그 운전전류는 100A 정도가 코일 제작 후의 임계전류 감소분을 감안하여 적당하리라 여겨진다.

Fig. 2에서와 같이 1MW을 설계 모터의 정격용량으로 하고 정상상태에서 부하각이 90°이 되는 최대용량을 현장 적용시 부하의 변동을 감안하여 1.5MW으로 설정하였다[1]. 최대용량 1.5MW에서 전기자 도체의 전류 밀도는 강제공랭식의 기존 기기에서 사용되는 최대치인 10A/mm²으로 하였다. 이상의 과정에 의해서 결정된 고온초전도 모터의 설계 사양을 Table. 1에서와 같이 정리한다.

2.2. 극수에 따른 설계안 검토

선정된 설계 사양을 기준으로 4극, 1800rpm인 경우

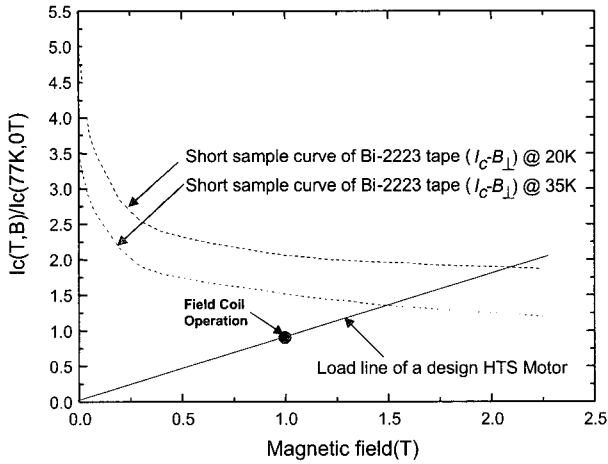


Fig. 1. Critical current curve of Bi-2223 HTS conductor according to magnetic field for determining field coil operation point.

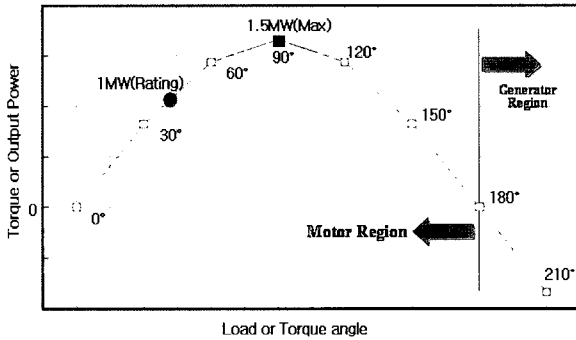


Fig. 2. Determination of rating capacity considering load angle margin.

Table 1. Design Specifications of the HTS Synchronous Motor.

정격용량	1MW
최대용량	1.5MW
정격속도	3600rpm 또는 1800rpm
주파수	60Hz
극수	2극 또는 4극
단자전압	3300V
역률	1.0
동기리액턴스	0.2p.u
계자 사용도체	Bi-2223 Tape Ic 115A@77K,0T
계자 동작전류	100A@27~33K
계자도체 단면	0.31×4mm
전기자도체 최대전류밀도	10A/mm ²
전기자도체 냉각 방식	강제공랭식

와 2극, 3600rpm인 경우를 Fortran으로 구성된 설계 프로그램을 이용하여 모터의 최외각에 존재하는 기계실드(Machine Shield)의 내경과 기기효율, 계자코일에 사용되는 고가의 고온초전도 선재량 등을 고려하여 설계해 보기로 한다.(설계과정과 이론에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [2],[3]을 참조)

2.2.1. 4극일 경우 설계안 검토

먼저 1MW 급의 고온초전도 모터를 4극으로 설계했을 경우에 최외각의 기계실드 내경의 변화에 따라 필요한 최소의 고온초전도 선재량을 검토하였다.

Fig. 3에서 볼 수 있는 바와 같이 기계실드의 내경이 증가할수록 필요한 선재의 최소량은 감소함을 볼 수 있으며, 고정자의 슬롯수가 증가할수록 계자에서 필요한 고온초전도 선재의 량이 많음을 볼 수 있다. 이것은 기계실드의 내경이 작을 경우 상대적으로 기기의 축방향 길이가 증가하기 때문에 사용 초전도 선재의 량이 많아지고, 고정자 슬롯수가 적을수록 고정자에 더 많은 도체를 배치시킬 수 있기 때문에 상대적으로 계자에 필요한 고온초전도 선재의 량은 줄어들게 된다.

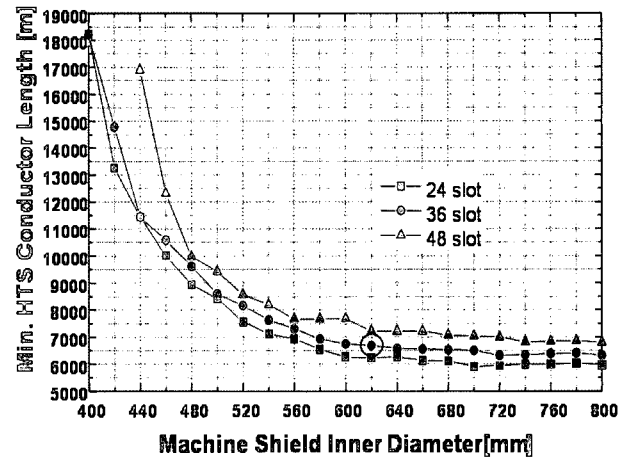


Fig. 3. Required minimum HTS conductor length according to the machine shield inner diameter and the stator slot number(4pole case).

Fig. 4에서는 Fig. 3의 고온초전도 선재의 량이 최소인 각 경우에 대하여 기기의 효율을 계산한 것이다. 기계실드의 내경이 증가할수록 기기의 축방향 길이가 감소하므로 초전도 선재의 최소 필요량이 감소하는 대신, 고정자 동선(copper wire)의 사용량이 상대적으로 증가하므로 여기서 발생하는 동손의 증가로 기기의 전체적

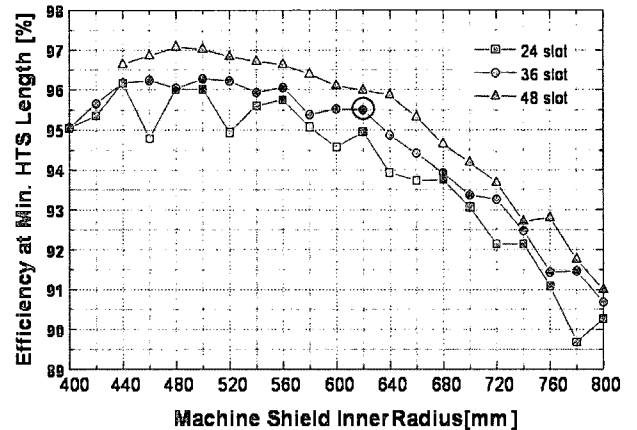


Fig. 4. Calculated machine efficiency according to the machine shield inner diameter at the minimum HTS conductor length cases of Fig. 3.

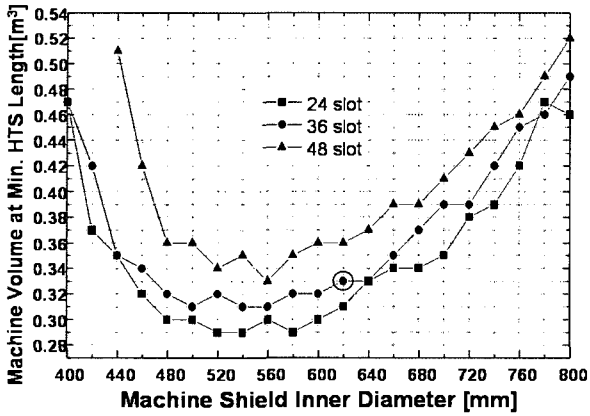


Fig. 5. Calculated machine volume according to the machine shield inner diameter at the minimum HTS conductor length cases of Fig. 3.

인 효율은 감소하게 된다. 마찬가지로 슬롯수가 적을수록 계자코일에 사용되는 고온초전도 선재의 최소량은 감소하지만, 고정자 동선의 사용량이 상대적으로 증가하므로 기기의 전체적인 효율은 감소하게 된다

Fig. 4에서 기기의 효율이 95.5%(기존의 1MW 동기 기기의 효율은 95%) 이상인 설계안들 중에서 고가의 고온 초전도 선재의 사용량을 가장 적게 사용하는 슬롯수가 36이고 기계실드 내경이 620mm인 결과 선택하여 그림에 작은 원으로 표시하였다. 선택된 설계안의 사양과 횡단면을 Table 2와 Fig. 6에 보인다. Fig. 5에서는 Fig. 3의 고온초전도 선재의 량이 최소인 각 경우에 대하여 기기의 체적을 계산한 것이다. 슬롯수가 많을수록 기기의 체적이 커지며 기계실드 내경이 560mm 근방에서 가장 작음을 알 수 있다.

Table 2. Specifications of the 1MW selected design candidate with 4 poles.

극수	4극
정격 속도	1800rpm
계자코일 전체 턴 수	6700turns
최대 발생 자장	1.53T
전기자 내경부 자장	0.67T
HTS 선재 필요량	6.9km
전기자 슬롯 수	36
전기자 턴 수	190 Turns/Phase
계자코일 축방향 길이	495mm
기계실드 외경	762mm
설계 효율	95.5%

2.2.2. 2극일 경우 설계안 검토

극수를 2극으로 줄일 경우의 장점은 회전속도는 2배로 증가하지만 4극보다 기기의 크기를 줄일 수 있고 효율을 향상시킬 수 있는데 있다. 앞의 4극에서와 마찬가지로 동일한 조건에서 극수만 2극으로 하여 고온 초전도 선재의 사용량과 기기의 효율, 기기의 크기 등을 비교 검토하여 보기로 한다.

필요한 고온초전도 선재의 최소량은 Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 4극에서보다 크게 적음을 알 수 있다. 기기의 효율도 Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 4극에서보다 전체적으로 높은 값을 갖는다. 또한 4극에서 얻어진 결과들보다 기계실드의 내경이 더 작은 경

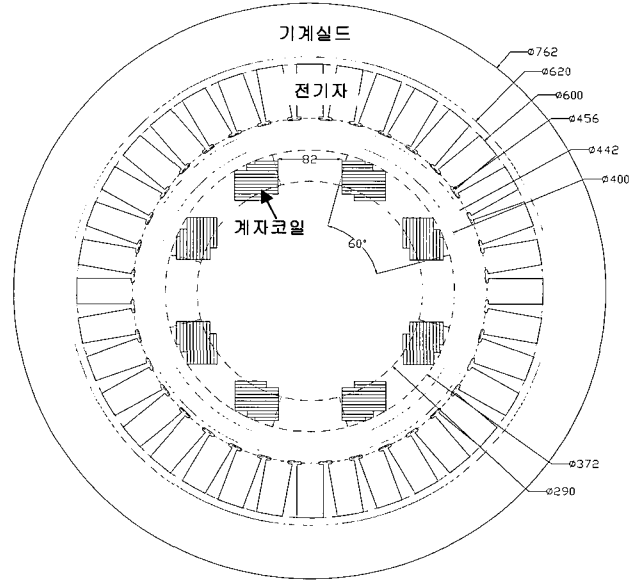


Fig. 6. Cross-sectional diagram of 1MW HTS motor with 4 poles(mm dimensions).

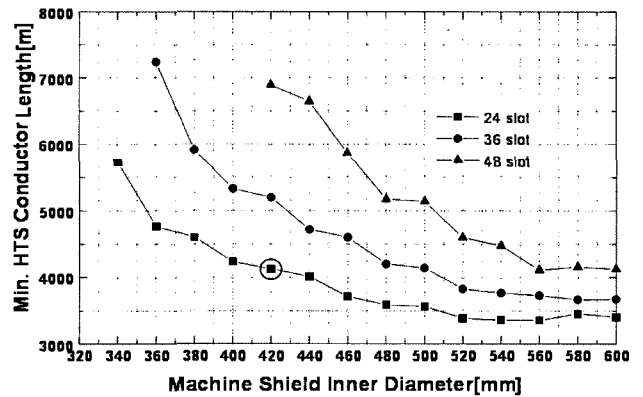


Fig. 7. Required minimum HTS conductor length according to the machine shield inner diameter and the stator slot number (2pole case).

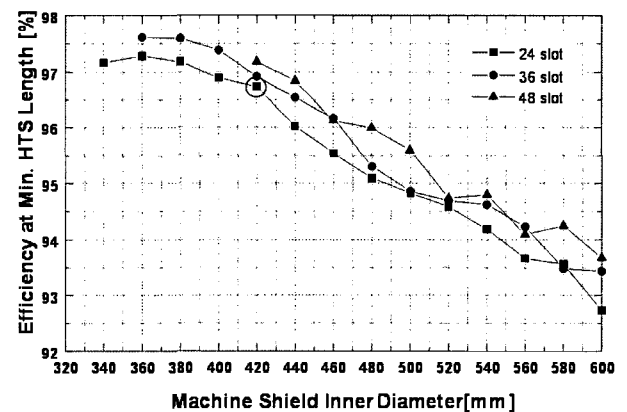


Fig. 8. Calculated machine efficiency according to the machine shield inner diameter at the minimum HTS conductor length cases of Fig. 6.

경우에도 프로그램 결과들을 얻을 수 있었다. 설계안을 선택시 기기 효율이 96.5% 이상이 되는 결과들 중에서 고가의 고온초전도 선재의 필요량이 최소인 24슬롯을 가지고 기계실드 내경이 420mm인 결과를 선택하였다. Table 3에 2극일 경우 선택된 설계안의 사양을 정리하고 Fig. 10에 횡단면 도를 보인다.

Fig. 9에서는 Fig. 6의 고온초전도 선재의 량이 최소인 각 경우에 대하여 기기의 체적을 계산한 것이다. Fig. 5의 4극의 경우보다 기기의 체적이 전체적으로 작으며 슬롯수의 변화에 대해서 체적의 변화가 상당히 큼을 알 수 있다.

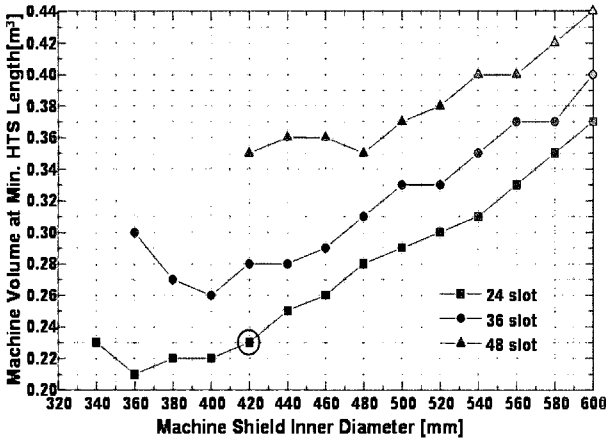


Fig. 9. Calculated machine volume according to the machine shield inner diameter at the minimum HTS conductor length cases of Fig. 6.

Table 3. Specifications of the 1MW selected design candidate with 2 poles

극수	2극
정격 속도	3600rpm
계자코일 전체 턴 수	2874turns
최대 발생 자장	1.53T
전기자 내경부 자장	0.55T
HTS 선재 필요량	3.9km
전기자 슬롯 수	24
전기자 턴 수	84turns/phase
계자코일 축방향 길이	754mm
기계실드 외경	510mm
설계 효율	96.7%

2.3. 회전자 내부에 철심을 배치한 설계안 검토

Fig. 10과 같은 2극의 설계안으로 제작할 경우 계자코일에 소요되는 Bi-2223 고온초전도 선재의 량은 표 3에서와 같이 3.9km가 필요하다. 현재, 대표적인 Bi-2223 고온초전도 선재의 제조회사인 미국의 American Superconductor 의 경우 m 당 4만원 정도에 판매하고 있으므로, 선재 구입에 소요되는 총 비용은 3,900×4만원 = 15,600 만원이 된다. 이러한 엄청난 비용은 기존의 동기 모터와의 가격 경쟁력을 매우 떨어뜨리는 요인이 되므로 이를 줄일 수 있다면 기기의 제작비용을 상당히 낮출 수 있을 것이다.

이러한 고가의 고온초전도 선재의 소요량을 줄일 수 있는 방안으로서 회전자의 내부에 자성재료인 Invar (철-니켈 합금)와 같은 철심을 배치시키는 방법을 사용하고 있다[4]. 대부분의 기존 회전기의 내부를 차지

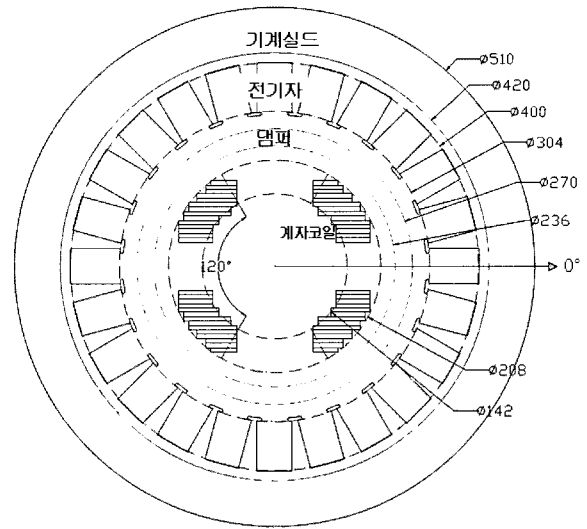


Fig. 10. Cross-sectional diagram of 1MW HTS motor with 2 poles(mm dimensions).

하는 철심은 2T 이상이 되면 그림 13에서와 같이 자기적으로 포화되기 시작하여 투자율이 감소하게 된다.

본 논문에서 다룬 설계안들은 고온초전도 선재의 소요량을 줄이고 회전자 내부에 철심을 배치시키는 것을 고려하여 계자에서의 발생 자장을 1.5T 정도로 유지시켰다. 설계하고자 하는 1MW 급 정도의 용량에서는 발생 자장을 3T 이상의 고자장으로 할 경우, 2극의 설계안에서 10km 정도의 고온초전도 선재가 필요하였다. 따라서 기존의 상전도 기기와의 가격 경쟁력을 고려한다면 고자장으로 설계하는 것보다는 본 논문에서 다루고 있는 바와 같이 비교적 낮은 자장 값으로 설계하여 경제성을 확보하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 그러나 10MW 이상의 대용량기로의 적용시에는 고자장으로 설계하는 것이 기기의 체적이나 경제성을 고려해 볼 때 유리할 것으로 보인다.

Fig. 10의 2극 설계안에서 전기자 중심부(φ352mm)를 따르는 radial 방향의 자속밀도(Br)의 분포를 Fig. 11에 보인다. 전기자에서의 Br 성분의 세기는 모터의 출력에 비례하고 그 형태는 역기전력의 파형을 결정한다. 이때의 자장의 최대값은 0.441T였다.

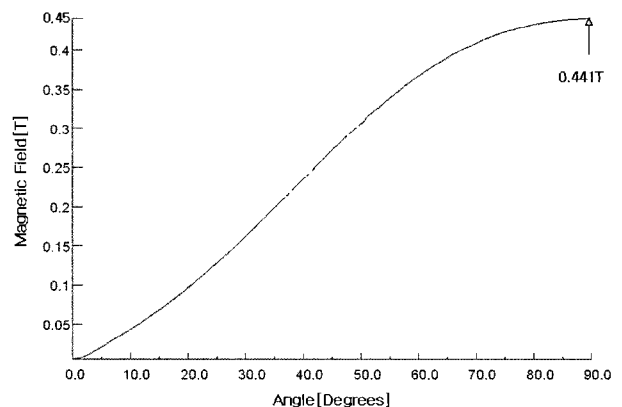


Fig. 11. Radial flux density distribution along the stator middle diameter(φ352mm) at 2pole design result(Fig. 10).

회전자 내부에 철심을 배치하면 전기자에서의 자장값은 상승하게 되므로, 계자코일에 사용되는 고온초전도 선재량을 감소시켜서 초기의 설계안이 갖는 그림 11의 자장값 이상이 된다면 1MW의 정격 출력을 낼 수 있다. 회전자 내부에 철심을 배치시키고 고온초전도 계자코일의 턴 수를 Fig. 10의 설계치인 2874턴에서 960턴으로 줄인 경우의 횡단면과 자속선의 형태를 Fig. 12에 보인다. 이 때 내부에 배치시킨 철심과 기계실드의 유한요소 해석에는 Fig. 13과 같이 기존의 모터에 일반적으로 사용되는 재료의 B-H 곡선을 이용하였다. Fig. 14에 Fig. 12의 형태에서 전기자 중심부(∅352mm)를 따르는 Br의 분포를 보여준다. 자장의 분포가 Fig. 10의 공심형의 설계안에서와 같이 정현파에 가까운 형태이며, 그 최대값은 Fig. 11의 0.441T 보다 높은 0.463T를 가졌다. Fig. 12와 같이 계자코일의 턴 수를 960턴으로 줄였을 경우에 사용되는 Bi-2223 고온초전도 선재의 길이는 1.3km이며 구입비용은 1,300X4만원 = 5,200만원이 된다. 따라서 Fig. 10과 같은 원래의 설계 모델로 제작시 소요되는 선재 비용을 3배 이상 줄일 수 있다는 결론이 된다.

이상에서와 같이 철심을 회전자 내부에 부분적으로 배치시켜도 유기전압의 파형에 영향을 미치는 전기자

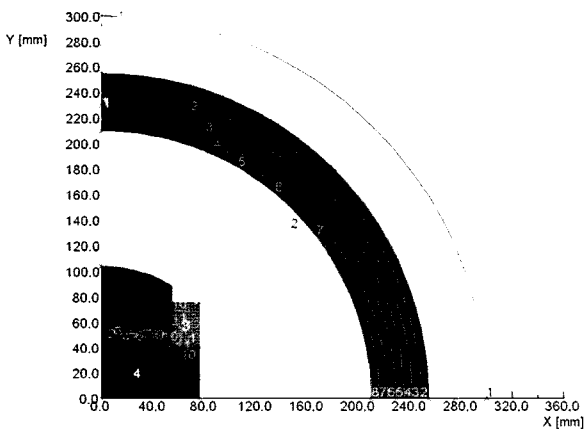


Fig. 12. Iron-core insertion and the total field coil turn reduction from 2874 to 960 at 2pole design model(Fig. 10)(1/4 analysis model).

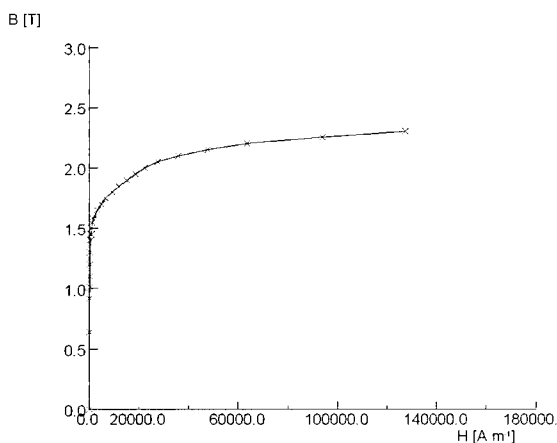


Fig. 13. B-H curve of the iron-core and the machine shield for Finite Element Analysis.

에서의 자장분포가 철심이 없었을 때와 마찬가지로 정현적이면서 고가의 고온초전도 선재의 사용량을 크게 감소시킬 수 있다. 이와 같은 방식으로 철심을 배치시켜도 전기자코일과 철심과의 거리가 기존의 모터에 비하여 상당히 크므로 전기자코일의 인덕턴스가 그다지 증가하지 않을 것이므로 동기리액턴스의 증가는 매우 작다고 볼 수 있다. 또한 철심의 재료로 적절한 Invar은 저온에서의 열수축이 매우 적고 강도가 강하며 투자율이 높은 특성을 가지므로 제작시 충분히 활용이 가능할 것으로 보인다. 반면에 철심을 사용하면 계자코일을 지지하는데 사용되는 알루미늄 대신에 비중이 높은 철이 사용되므로 기기의 중량이 증가하고 고속회전시 회전자의 발란싱에 더 어려움이 있을 것으로 보인다.

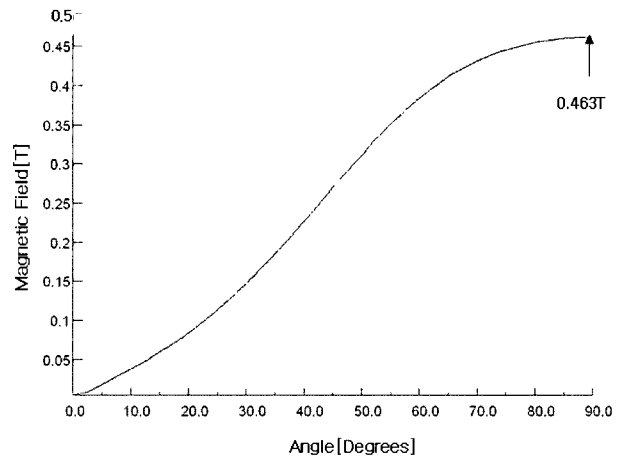


Fig. 14. Radial flux density distribution along the stator middle diameter(∅352mm) at Fig. 12 model.

3. 결 론

정격용량 1MW의 고온초전도 동기 모터를 정상상태시에 최대용량이 1.5MW가 되도록 실제 적용시의 부하변동을 감안하여 설계하였다. 설계된 초전도 모터는 현재 미국에서 개발 중인 선박용과는 달리 중동에 시설되는 담수화 플랜트나 발전소 등에 이용되는 수 MW 급에 적용하는 것을 목표로 한다. 따라서 이러한 모터들은 설비의 냉각이나 펌프(pump) 등에 사용되기 때문에 고속으로 회전하며 2극 내지 4극으로 구성이 된다.

설계안의 선정 시에서는 기존의 1MW 급 동기기보다 높은 효율을 가지고 고가의 고온초전도 선재를 적게 사용하도록 하여 기기의 경제성을 높이도록 하였다. 4극의 경우와 2극의 경우를 각각 설계하여 상호 비교한 결과 2극인 경우가 기기의 체적과 고온초전도 선재의 요구량뿐만 아니라 효율에서도 우수한 결과를 선택할 수 있었다. 선택된 설계안들은 계자코일부에서의 발생자장이 1.5T 정도이므로 회전자 내부에 철심을 사용하면 2극의 설계안에서도 현재 수준의 고온초전도 선재의 가격으로 1억원 이상의 고온초전도 선재 절감 효과를 볼 수 있었다. 향후 더욱더 효과적인 설계를 위해서 설계 후보들에 대한 전기자에서 발생하는 열의 영향과 전자력 등에 관한 검토가 필요하리라 여겨진다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Paul C. Krause, "ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY", McGraw-Hill Book Company, 3권 2호, pp.240~260, 1987.
- [2] 백승규, 손명환, 김석환, 권영길, "손실을 고려한 초전도 동기전동기 설계", 한국초전도·저온공학회 논문지, 3권 2호, pp.21~26, 2001. 11.
- [3] 백승규, 손명환, 김석환, 이연용, 권영길, "100HP 급 고온초전도 모터의 설계 및 성능해석", 한국초전도·저온공학회논문지, 4권 2호, pp.31~37, 2002. 11.
- [4] M. Frank, P. van Hasselt, W. Nick, H.-W. Neumueller, J. Frauenhofer, G. Nerowski, "Long Term Operational Experience with First Siemens 400kW HTS Machine in Diverse Configurations", ASC 2002 contribution 2LB03.

저 자 소 개



백승규(白承珪)
 1972년 11월 19일생. 1995년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원.



손명환(孫明煥)
 1963년 4월 21일생. 1986년 부산대학교 물리학과 졸업, 1988년 동대학원 물리학과 졸업(이학석사), 1998년 동대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원.



이연용(李彦容)
 1960년 5월 13일생. 1984년 창원기능대학 전기공학과 졸업, 1988년~현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임기사.



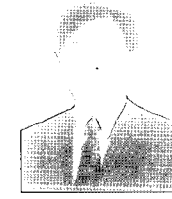
권영길(權永吉)
 1959년 7월 28일생. 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1990년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1990년~1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 그룹장.



문태선(文泰善)
 1965년 6월 3일생. 1993년 부산대학교 물리학과 졸업, 1996년 동대학원 물리학과 졸업(이학석사), 현재 두산중공업(주) 기술연구원 선임연구원.



박희주(朴希柱)
 1970년 9월 25일생. 1995년 한국해양대학교 기계공학과 졸업, 1997년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 두산중공업(주) 기술연구원 주임연구원.



김영춘(金永春)
 1964년 12월 26일생. 1986년 금오공과대학교 기계공학과 졸업, 1991년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 두산중공업(주) 기술연구원 선임연구원.