

### 1MW 급 고온초전도 동기 모터 설계 고찰

백승규, 손명환, 이언용, 권영길, 문태선\*, 김영춘\*, 조창호\*  
 한국전기연구원 초전도응용연구그룹, 두산중공업 기술연구원\*

#### Design Considerations of 1MW Class HTS Synchronous Motor

S.K. Baik, M.H. Sohn, E.Y. Lee, Y.K. Kwon, T.S. Moon\*, Y.C. Kim\*, C.H. Cho\*  
 Korea Electrotechnology Research Institute, Doosan Heavy Industries Co.\*

**Abstract** - A 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.

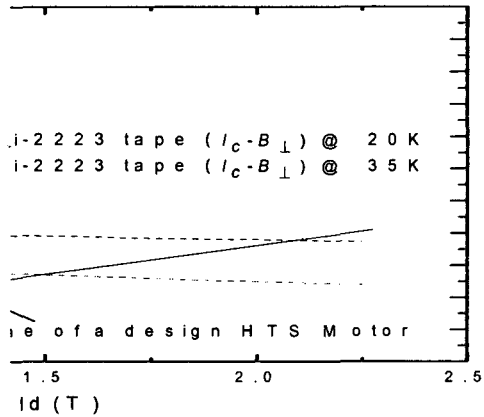


그림 1. 고온초전도 계자코일의 운전 전류 결정 곡선

## 1. 서 론

계자코일에 고온초전도체를 이용하여 직류 자장을 발생시키는 고온초전도 동기모터를 1MW의 정격출력을 얻을 수 있도록 설계하고자 한다. 설계시 부하각에 여유를 두어 부하가 정격 이상으로 인가되는 변동에도 동기속도를 잃어버리는 탈조의 발생을 억제하도록 하였다. 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 량이 많아지므로 동손의 증가를 초래한다. 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 사용 단자전압의 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, 6600V으로 설계되어 있으며 고압인버터는 3300V, 4160V의 출력전압을 갖는다. 따라서 판매되고 있는 고압인버터의 활용성을 고려한다면 3300V가 적당할 것으로 보인다.

극수는 2극 내지 4극으로 하여 회전속도가 1800rpm인 경우와 3600rpm인 경우에 대하여 각각 설계하여 보았다.

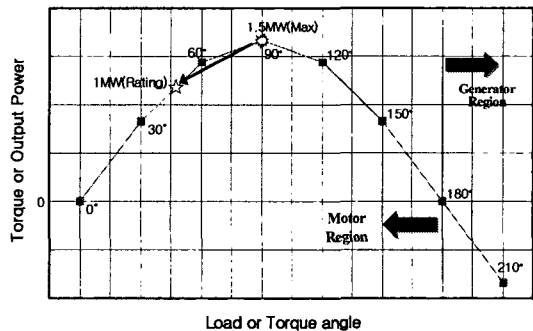


그림 2. 부하각의 여유를 고려한 정격용량 설정

계자코일에 사용할 Bi-2223 고온초전도 선재는 액체질소 온도(77K)에서 115A의 임계전류(Ic)값을 가지며, 이를 기준 전류 1.0으로 하고 선재면 수직 자장(B<sub>⊥</sub>)에 대한 임계전류 곡선을 그림 1에 보인다. 설계 전동기의 계자코일이 갖는 Load line과 고온초전도 선재의 임계전류 특성을 상호 비교하고 코일 제작후 임계전류의 감소를 고려하여 그 운전전류를 100A로 설정하였다.

그림 2에서와 같이 1MW를 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 강재공랭식의 기존 기기에서 사용되는 최대치인 10A/mm<sup>2</sup>으로 하였다. 이상의 과정에 의해서 결정된 고온초전도 모터의 설계 사양을 표 1에서와 같이 정리한다.

표 1. 고온초전도 동기 모터의 설계 사양

정격용량	1MW
최대용량	1.5MW
정격속도	1800rpm 또는 3600rpm
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
계자도체 단면	0.31×4mm
전기자도체 최대전류밀도	10A/mm <sup>2</sup>
전기자도체 냉각 방식	강제공랭식

2.2 극수에 따른 설계안 검토

선정된 설계 사양을 기준으로 4극, 1800rpm인 경우와 2극, 3600rpm인 경우를 Fortran으로 구성된 설계 프로그램을 이용하여 모터의 최외각에 존재하는 기계실드(Machine Shield)의 내반경(Rsi)과 기기효율, 계자 코일에 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 내반경의 변화에 따라 필요한 최소의 고온초전도 선재량을 검토하였다.

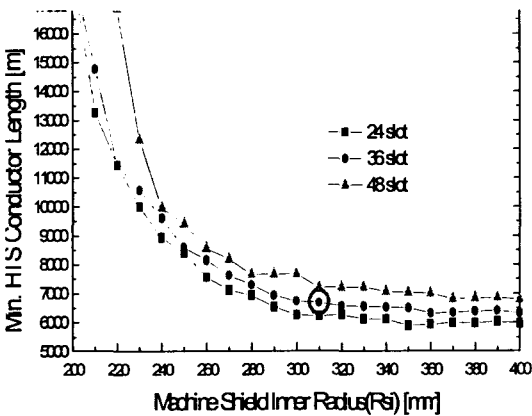


그림 3. 기계실드 내반경의 변화에 따른 고온초전도 선재의 최소 필요량(4극 설계시)

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

그림 4에서는 그림 3의 고온초전도 선재의 양이 최소인 각 경우에 대하여 기기의 효율을 계산한 것이다. 기계실

드의 내반경이 증가할수록 사용되는 초전도 선재의 양이 감소하는 대신 고정자 동선의 사용량이 상대적으로 증가하므로 여기서 발생하는 동손의 증가로 기기의 전체적인 효율은 감소하게 된다. 마찬가지로 슬롯수가 적을수록 고정자 동선의 사용량이 상대적으로 증가하므로 기기의 전체적인 효율은 감소하게 된다.

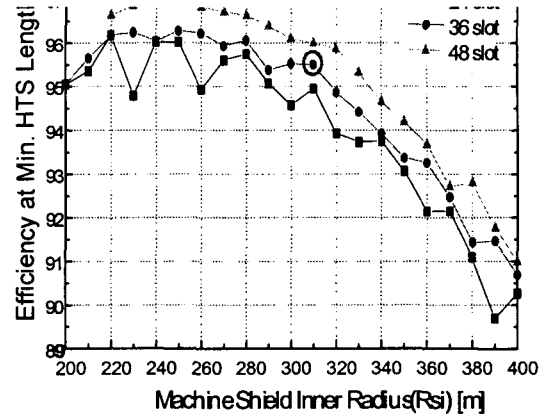


그림 4. 기계실드 내반경의 변화에 따른 기기 효율 변화(4극 설계시)

표 2. 4극 설계시 1MW 급 고온초전도 모터의 선택 설계 사양

극수	4극
정격속도	1800rpm
계자 턴 수	6700turns
최대 발생자장	1.53T
전기자 내경부자장	0.67T
HTS 선재 필요량	6.9km
전기자 슬롯수	36
전기자 턴 수	190 Turns/Phase
계자코일 축방향길이	495mm
기계실드 외경	762mm
설계 효율	95.5%

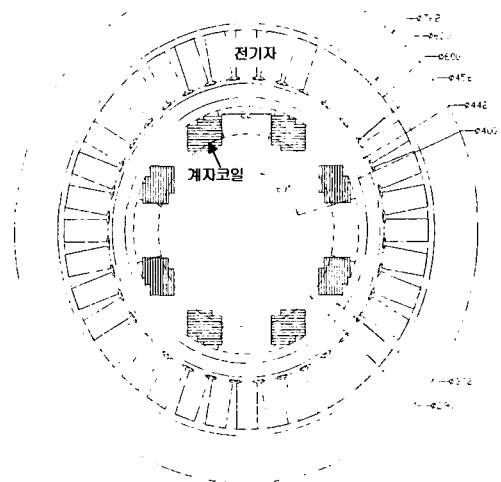


그림 5 1MW급 고온초전도 모터 횡단면 (4극 설계안)

그림 2, 3과 같이 도출된 여러 가지 설계안 중에서 고가의 고온초전도 선재의 량을 적당히 줄이면서 기기의 효율도 기존기에 비하여 떨어지지 않는 설계안을 선택하여 그림에 원으로 표시하였다. 선택된 설계안의 사양과 횡단면을 표 2와 그림 5에 보인다.

### 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 고온초전도 선재의 사용량과 기기의 효율, 기기의 크기 등을 비교 검토하여 보기로 한다.

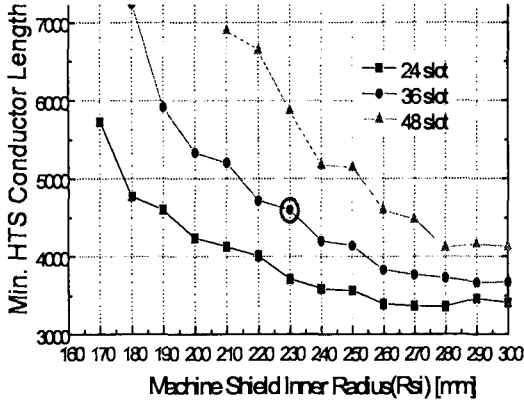


그림 6 기계실드 내반경의 변화에 따른 고온초전도 선재의 최소 필요량(2극 설계시)

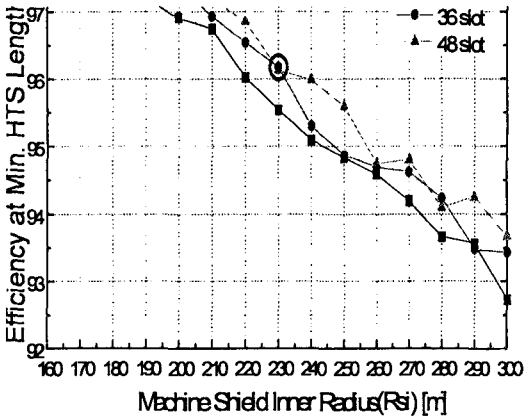


그림 7 기계실드 내반경의 변화에 따른 기기 효율 변화(2극 설계시)

필요한 고온초전도 선재의 량은 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 4극에서보다 크게 적응을 알 수 있다. 기기의 효율도 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 4극에서보다 전체적으로 높은 값을 갖는다. 앞에서와 마찬가지로 이러한 여러 가지 설계안 중에서 고온초전도 선재의 사용량이 비교적 적고 효율 면에서도 적절한 설계안을 선택하였다. 위의 그림에서 작은 원으로 표시된 선택된 설계안은 기계실드의 내반경이 230mm인 경우로서 고정자의 슬롯 수는 36개이고 효율은 96.2% 이었다. 표 3에 2극일 경우 선택된 설계안의 사양을 정리하고 그림 8에 횡단면 도를 보인다.

표 2. 2극 설계시 1MW 급 고온초전도 모터의 선택 설계 사양

극수	2극
정격속도	3600rpm
계자 턴 수	3052turns
최대 발생자장	1.51T
전기자 내경부자장	0.47T
HTS 선재 필요량	4.9km
전기자 슬롯수	36
전기자 턴 수	80turns/phase
계자코일 축방향길이	785mm
기계실드 외경	552mm
설계 효율	96.2%

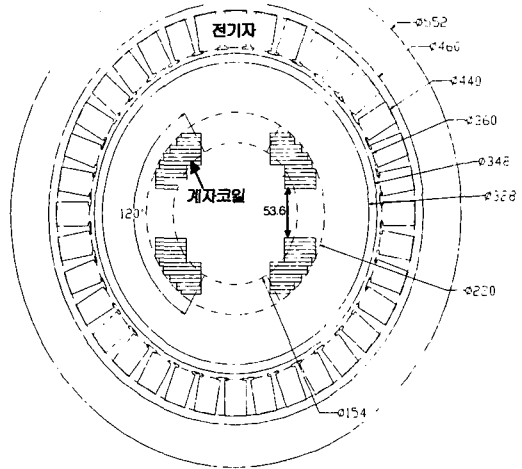


그림 8 1MW급 고온초전도 모터 횡단면(2극 설계안)

### 3. 결 론

4극의 경우와 2극의 경우를 각각 설계하여 상호 비교한 결과 2극인 경우가 기기의 체적과 고온초전도 선재의 요구량 뿐만 아니라 효율에서 모두 우수한 결과를 선택할 수 있었다. 선택된 설계안들은 계자코일부에서의 발생자장이 1.5T 정도이므로 본문에는 언급하지 않았으나 코일 내부에 철심을 사용하면 2극의 설계안에서도 현재 수준의 가격으로 1억 4천만원 정도의 고온초전도 선재 절감 효과를 볼 수 있었다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도 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·저온공학회는논문지, 3권 2호, pp.21~26, 2001. 11
- [3] 백승규, 손명환, 김석환, 이연용, 권영길, "100HP 급 고온초전도 모터의 설계 및 성능해석", 한국초전도·저온공학회는논문지, 4권 2호, pp.31~37, 2002. 11