

## 수냉식 전기자로 구성된 1 MW 고온초전도 동기모터의 설계

백승규<sup>1</sup>, 이재득<sup>2</sup>, 김석호<sup>3</sup>, 이언용<sup>4</sup>, 손명환<sup>5</sup>, 권영길<sup>6</sup>, 문태선<sup>7</sup>, 박희주<sup>8</sup>, 김영춘<sup>9</sup>, 이지영<sup>10</sup>, 홍정표<sup>11</sup>

한국전기연구원 초전도융용연구그룹<sup>1</sup>, 두산중공업(주) 기술연구원<sup>2</sup>, 창원대학교 전기공학과<sup>3~11</sup>

### Design of 1 MW High-temperature Superconducting Motor with Water-cooled Armature

S.K. Baik<sup>1</sup>, J.D. Lee<sup>2</sup>, S.H. Kim<sup>3</sup>, E.Y. Lee<sup>4</sup>, M.H. Sohn<sup>5</sup>, Y.K. Kwon<sup>6</sup>, T.S. Moon<sup>7</sup>, H.J. Park<sup>8</sup>, Y.C. Kim<sup>9</sup>, J.Y. Lee<sup>10</sup>, J.P. Hong<sup>11</sup>  
KERI<sup>1</sup>, Doosan Heavy Industries Co.<sup>2</sup>, Changwon National University<sup>3~11</sup>

**Abstract** - Superconducting synchronous motors and generators have the field coil composed of superconductor with almost zero resistance at superconducting state. Therefore, copper loss at the conventional field coil is eliminated and the superconducting machine gets higher efficiency. The armature coil of the superconducting machine is composed of copper wire and supported by non-magnetic material such as FRP (Fiber Reinforced Plastic). Although a fully-superconducting machine with superconducting armature coil has been researched, it was not developed toward industrial application because of AC transporting loss and difficulty in construction of the cooling structure and so on. This paper contains the design procedure of a 1 MW superconducting synchronous motor using high-temperature superconductor only for the field coil. Especially, the armature coil is designed by water-cooling in order to dissipate Joule heat easily. Moreover, 3-dimensional electromagnetic design is conducted to get a proper design result and reduce design errors from 2-dimensional approach.

### 1. 서 론

고온초전도 계자코일을 갖는 1 MW 정격용량의 초전도모터를 설계하고자 한다. 설계된 모터는 대형 플랜트의 냉각팬 구동이나 컴프레서 등에 사용을 목적으로 3600 rpm 의 고속이며 발전기로서의 응용과 국내의 초전도 동기회전기 개발에 중요한 모델기가 될 것이다. 기기의 용량이 커질수록 초전도를 이용하는 이점인 기기의 체적 및 중량의 감소효과를 더욱 볼 수 있으며, 설계하고자하는 1 MW 모델기에서도 기존 동급의 모터에 비하여 기기의 체적을 가능한 줄이면서 효율은 높도록 하였다. 기존 1 MW 금의 유도기와 동기기는 대부분 공랭식을 채택하므로 냉각팬과 같은 장치가 기기의 체적을 상당히 증가시킨다. 초전도모터의 전기자코일은 열전달율이 낮은 비자성재료인 FRP 으로 둘러싸여 지지가 되므로 효과적인 냉각과 기기의 체적을 더욱 줄일 수 있도록 수냉식으로 설계하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 설계 파라미터 결정

기기의 기본적 설계 파라미터인 단자전압, 주파수와 회전수는 모터의 응용분야와 기존 동급 모터의 사양 등을 참조하여 결정하였다[1]. 계자코일의 동작전류를 초전도체의 온도와 자장에 따른 특성곡선으로부터 설정하고, 전기자코일의 동작전류밀도는 사용하고자하는 Hollow Conductor 의 규격과 기존의 영구자석형 동기기의 기준

을 고려하여 결정되었다. 동기리액턴스와 역률, 전기자의 슬롯수에 따른 영향을 분석하여 설계하고자하는 1 MW 초전도모터의 사양을 결정하였다.

#### 2.1.1 동기리액턴스에 따른 영향 분석

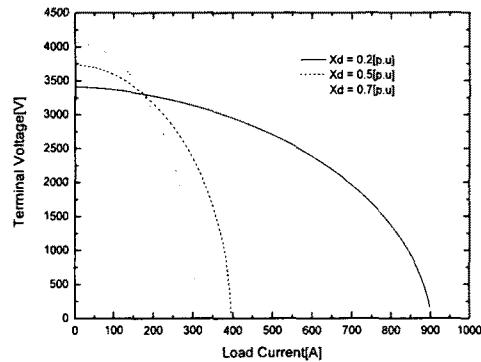


그림 1. 1 MW 기의 저항부하 발전시 동기리액턴스에 따른 단자전압의 변화

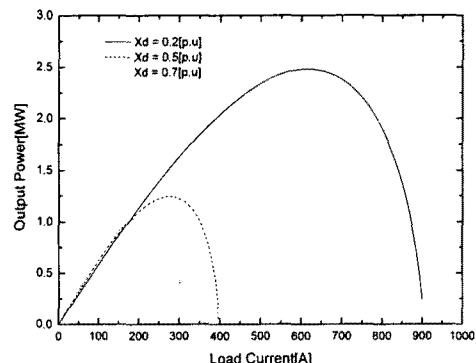


그림 2. 1 MW 기의 저항부하 발전시 동기리액턴스에 따른 기기 출력의 변화

초전도 기기는 쇠외각의 기계실드를 제외하고 모두 공극으로 이루어져 있으므로 본질적으로 기존 동기기에 비하여 매우 적은 동기리액턴스 값을 갖는다. 동기리액턴스가 적을수록 기기의 효율이 증가하고 체적이 감소하여 발전기로서 운전시 부하에 따른 전압변동도 그림 1에서와 같이 줄어든다. 동기리액턴스가 적으면 정상상태에서의 기기 특성은 좋지만 단락고장이나 부하변동시의 과도전류가 증가하는 단점이 있다. 기존의 동기발전기는

큰 동기리액턴스 (약 1.0 p.u) 때문에 부하에 따른 전압강하가 크므로 별도의 여자제어를 하더라도 15 % 이하로 전압변동율을 줄이기가 힘들다. 그러나 설계하고자하는 초전도기에서는 동기리액턴스 값을 0.5 p.u 으로 하였을 경우는 저항부하 발전시 13.2 %, 0.2 p.u 일 경우 3.5 % 의 전압변동율을 나타내었다. 본 설계에서는 외국의 개발사례를 참조하고 여자제어가 없어도 부하에 따른 전압변동율이 5 % 이하가 되도록 동기리액턴스 값을 0.2 p.u 으로 하였다.

### 2.1.2 역률, 효율, 슬롯수, 기계실드 내반경 영향

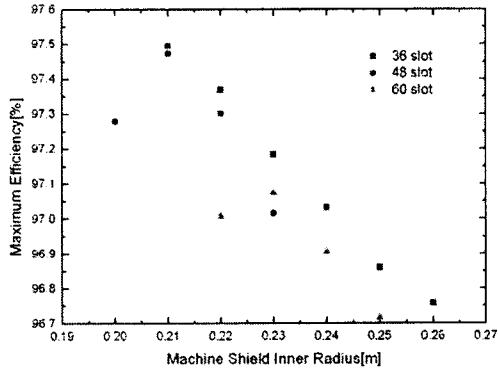


그림 3. 전기자 슬롯수와 기계실드 내반경에 따른 최대 설계 효율

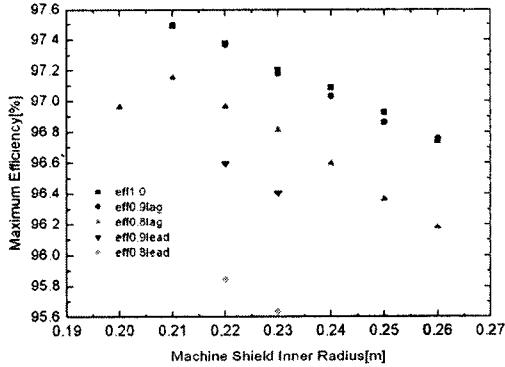


그림 4. 역률과 기계실드 내반경에 따른 최대 설계 효율

기계실드의 내반경을 변화시키면서 전기자 슬롯수에 따라서 얻어지는 기기의 효율을 계산하였다. 기계실드의 내반경이 직을수록 전기자코일에 작용하는 자장의 세기가 커지므로 코일의 턴 수가 줄어들고 동순이 감소하여 기기효율이 대체적으로 높아진다. 슬롯수를 변화시키면서 설계 조건들을 만족시키는 결과들 중에서 얻어지는 가장 높은 효율들의 변화를 그림 3, 4 에 나타내었으며 기계실드의 내반경이 0.21 m 일 때 가장 높은 효율을 얻을 수 있었다. 발전기로서 운전시는 부하에 따라서 기기의 역률이 결정되지만 모터의 경우는 역기전력에 따라서 역률을 가변시킬 수 있다. 적절한 역률값의 설정을 위해서 그림 4 와 같이 역률을 진상(lead), 지상(lag)으로 가변시키면서 계산된 최대 효율을 비교하였다. 전상운전 시에는 역기전력이 단자전압보다 커지므로 전기자코일의 턴 수와 동순의 증가로 효율이 지상운전시보다 적어짐은 볼 수 있다. 역률 1.0 근방에서 효율이 가장 높아짐을 볼 수 있으며 지상역률 0.9~1.0 구간에서 설계안을 선정하였다.

### 2.2 적정 설계안 선정

그림 6 와 같은 설계 순서도로 구성된 설계프로그램에 따라서 기기효율이 가장 높은 구간인 지상역률 0.9~1.0에서의 효율 계산 결과들을 그림 5에 보인다. 얻어진 결과들 중에서 효율이 높으면서 계자코일에 사용되는 고가의 Bi-2223 고온초전도 선재의 사용량이 비교적 적은 것을 선택하였다. 이에 따라서 얻어진 1 MW 고온초전도모터의 설계 사양을 표 1에 나타낸다.

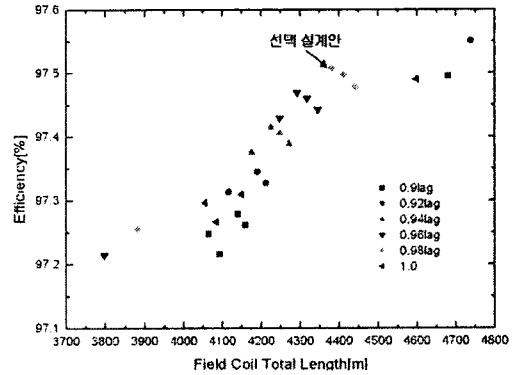


그림 5. 역률에 따른 설계효율과 고온초전도 선재 필요량 비교

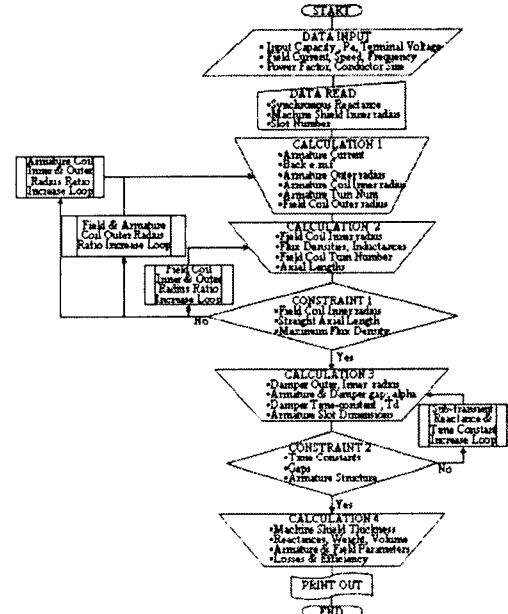


그림 6. 설계 순서도

표 2 1 MW 고온초전도모터의 선택 설계안 사양

정격용량	1 MW	최대발생자장	2.3 T
정격속도	3600 rpm	전기자내경부자장	1.1 T
주파수	60 Hz	제자도체전류밀도	115 A/mm <sup>2</sup>
극수	2	전기자정격전류	189 A
단자전압	3300 V	전기자슬롯수	36
역률	0.98 (지상)	전기자상당코일턴수	60
동기리액턴스	0.2 p.u	전기자도체전류밀도	10.5 A/mm <sup>2</sup>
제자동작전류	150 A	전기자도체방각	수냉식
제자단면	3254	설계 효율	97.51 %

전기자코일에 사용되는 도체는 폭 8 mm, 두께 3 mm이며 내부에 폭 6 mm, 높이 1 mm 의 수냉각을 위한

통로가 존재하는 Hollow Conductor 으로서, 정격전류에서의 전류밀도가  $10.5 \text{ A/mm}^2$ 이며 기존의 영구자석 동기전동기의 수냉식 설계 범위를 만족한다[2]. 기존의 1 MW 급 유도기의 효율은 94.6 % 정도이며 동기기의 효율은 95 % 정도이므로 설계된 초전도모터의 설계 효율이 2.5 % 정도 높다. 냉각을 위한 냉동기에 소모되는 전력을 고려한다 하더라도 2 % 정도 높은 효율값을 갖는다.

### 2.3 3차원 해석을 통한 설계 보완

그림 6 와 같은 설계에서는 기기의 축방향 길이가 무한하다고 가정하여 해석적으로 자장분포를 구하는 2차원적인 접근 방법을 바탕으로 한다. 초전도 기기는 최외각의 기계실드를 제외한 내부는 모두 공극이므로, 공극이 매우 적은 기존의 회전기와는 달리 2차원적인 접근 방법으로는 오차가 상당히 존재하게 된다. 이러한 자장분포의 차이와 축방향의 구조에 따른 영향을 분석하기 위하여 그림 7 와 같은 경우에 따라서 3차원적인 특성해석을 수행하였다.

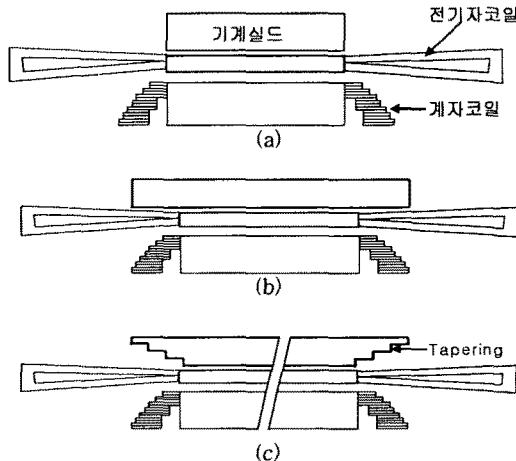


그림 7. 3차원적 영향 해석을 위한 축방향 형상 비교

횡단면의 코일과 기계실드의 배치는 앞 절에서 결정된 2차원적 접근방법을 통하여 결정이 되었다. 그림 7 의 (a) 은 투자율이 높은 규소강판으로 구성되는 기계실드의 축방향 적층길이를 2차원적 접근방법을 통하여 결정된 레이스트랙(Racetrack) 형 계자코일의 축방향 직선부길이로 두었다. (b) 은 기계실드가 반원형의 계자코일 단부를 축방향으로 모두 덮도록 한 구조이다. (a) 와 같은 경우는 역기전력이 설계치보다 적어서 정격에서 전기자코일의 전류가 설계치보다 높았다. 이는 3차원적인 자장분포가 2차원적인 분포보다 값이 적고, 계자코일의 단부에서 발생하는 자장을 역기전력의 발생에 이용하지 못하기 때문이다. (b) 의 경우는 역기전력이 설계치보다 높아서 정격에서 전기자코일의 전류가 설계치보다 낮았다. 이는 2차원적인 접근방법에서는 계자코일의 단부에서 발생되는 자장이 고려되지 않았기 때문이다. 따라서 계자코일에서 발생하는 자장을 최대한 이용하고 전기자코일의 축방향길이 증가에 따른 동기리액턴스의 증가를 줄이기 위하여 (c) 와 같은 구조를 채택하였다. 계자코일의 단부 영역에서 기계실드에 계단 형태로 Tapering 을 두어 다이아몬드형의 전기자코일 단부가 굽혀지도록 하여 회전자와의 접촉을 없애고 코일의 축방향 직선부길이가 계자코일의 직선부길이와 동일하게 하였다. Tapering 을 주면 그림 (b) 와 같이 주지 않은 경우보다 역기전력이 약간 감소하나 여전히 초기 설계치보다 높은 값을 갖는다. 따라서 설계치의 역기전력을 갖도록 축방향 직선부

의 길이를 감소시켜서 최종 설계안을 도출하였다.

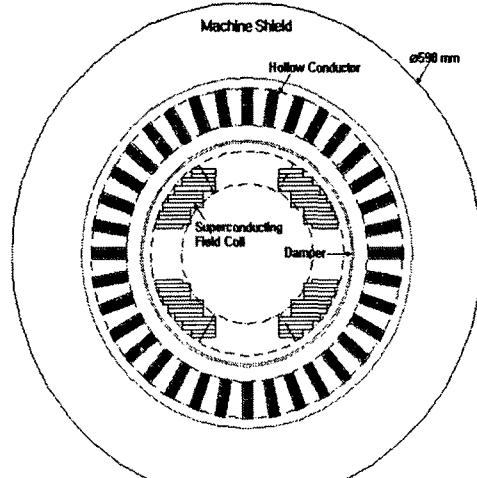


그림 8. 설계된 IMW 고온초전도 동기모터의 횡단면

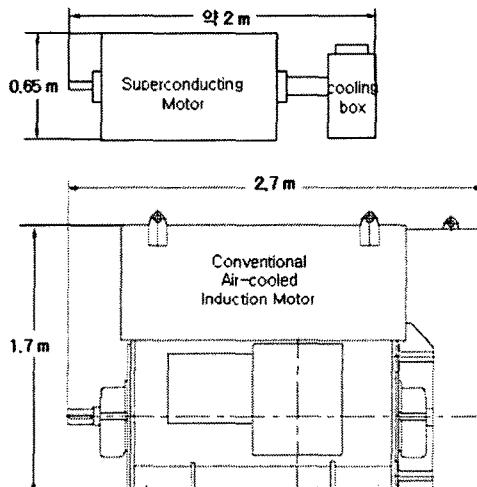


그림 9. 기존의 1 MW 공랭식 유도전동기와 크기 비교

### 3. 결 론

1 MW 의 고온초전도 동기전동기를 전기자를 수냉식으로 냉각하도록 설계하였다. 설계시 기기의 효율을 높이고 2차원적인 설계에 의한 오차를 3차원적인 접근 방법을 통하여 축방향 길이를 줄이도록 하였다. 동급의 기존 공랭식 유도전동기와 비교할 때 1/5 이하로 기기의 체적을 줄일 수 있었다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도용용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 백승규, 손명환, 이언용, 권영길, 문태선, 김영준, 조창호, “1 MW 급 고온초전도 동기 모터 설계 고찰”, 대한전기학회 학제학술대회 논문집, B권, pp.809-811, 2004
- [2] J.R. Hendershot Jr. and T.J.E. Miller, “DESIGN OF BRUSHLESS PERMANENT-MAGNET MOTORS”, Magna physics publishing and clarendon press, pp.12-5, 1994