

고온초전도 동기모터의 계자코일 단부의 영향

백승규, 권운식, 손명환, 이언용, 권영길
한국전기연구원 초전도응용연구그룹

The Field Coil End Effect of HTS Synchronous Motor

S.K. Baik, S.W. Kim, M.H. Sohn, E.Y. Lee, Y.K. Kwon
KERI Applied Superconductivity Research Group

skbaik@keri.re.kr

Abstract - The superconducting synchronous machine(S.S.M) including generator and motor has different electromagnetic structure from the conventional machine. With the help of superconductor having much higher operating current density than normal conductor, S.S.M can eliminate most of iron core filling inside of the conventional machine. This air-cored structure could be analysed and designed theoretically based on 2-dimensional(2-D) magnetic field distribution assuming that the windings are extended infinitely toward the axial direction. However, the actual structure of S.S.M has the end regions interconnecting the straight parts of the same cross-section with the 2-D model. Therefore, this actual 3-D model has smaller field distribution than the 2-D model. In this paper, we consider the effect of the end regions on the output of a HTS model motor and suggest more accurate design approach through comparison of 2-D and 3-D magnetic field analysis.

1. 서 론

초전도 동기회전기는 계자코일에 초전도코일을 사용하므로 기존의 상전도 코일을 사용할 때보다 그 전류밀도를 100 배 정도 증가시킬 수 있다. 이러한 높은 전류밀도의 통전능력을 이용하면 기존 기기의 대부분을 차지하는 철심을 사용하지 않고도 얻고자하는 기기출력이 나오도록 설계할 수 있다. Fig.1 와 같은 공심형 초전도 동기회전기의 이론적인 모델을 이용하면, 권선이 축방향으로 무한하다고 가정하여 원통좌표계에서의 자장을 이론적으로 구할 수 있다. 이러한 이론적으로 구해진 자장 값을 이용하여 기기의 축방향 길이와 Table 1 에서 보이는 횡단면의 설계 변수들을 구할 수 있다.

고정자와 회전자 사이의 공극이 1[mm] 정도 밖에 되지 않는 기존의 모터와 발전기의 경우는 철심이 기기의 내부를 거의 차지하고 있기 때문

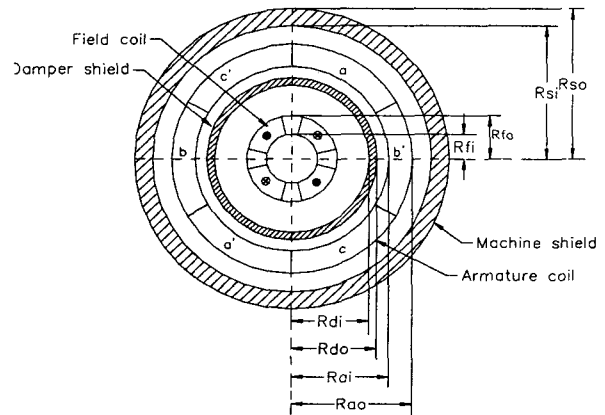


Fig. 1. 2-D analytic model of S.S.M at cylindrical coordinate

Table 1. Design parameters of S.S.M at 2-D analytic model

Parameter	Description
Rfi	계자코일(Field coil) 내반경
Rfo	계자코일 외반경
Rdi	댐퍼실드(Damper shield) 내반경
Rdo	댐퍼실드 외반경
Rai	전기자코일(Armature coil) 내반경
Rao	전기자코일 외반경
Rsi	기계실드(Machine shield) 내반경
Rso	기계실드 외반경

에, 2차원적으로 해석하여도 3차원적인 실제의 모델과 그 결과가 거의 차이가 나지 않는다. 그러나, 공심형의 구조를 띄는 초전도 회전기에서는 2차원적인 자장분포와 실제의 3차원적인 모델의 자장분포가 무시할 수 없는 차이를 가진다. 따라서, 이러한 2차원적인 접근법에 의한 오차를 줄이기 위해서 3차원적인 자장분포 해석을 통하여 더욱더 정확한 설계를 할 필요가 있다.

본 논문에서는 모델 시험기로 제작하고자 하는 100 마력급 고온초전도 모터를 먼저 2차원 해석이론을 바탕으로 설계한 후, 3차원적인 자장 해석과 2차원적인 해석결과를 상호 비교하여 기기의 출력에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 이를 더욱더 정확한 출력을 얻을 수 있도록 기기를

설계하는데 이용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 2차원 이론적 방법에 따른 설계 사양

공심형 초전도 동기기는 기존의 철심으로 채워진 동기기와는 달리 2차원적으로 접근하면 라플라스 방정식의 해를 구하여 자장분포를 이론적으로 유도할 수 있다. 이러한 과정들을 프로그램화하여 원통좌표계 상에 계자 및 전기자코일과 최외각의 기계실드 층을 설계할 수 있다. 이렇게 설계된 100 마력 급의 고온초전도 모터의 사양을 아래에 정리한다[1].

2.1.1 기본 모델의 횡단면 설계

설계된 전동기의 사양을 Table 1 에 정리한다. 설계 프로그램에 따라서 계자 및 전기자코일, 기계실드 등의 원통좌표상의 반경이 계산되면, 기기의 횡단면을 Fig.2 와 같이 배치·설계한다. 계자코일은 BSCCO-2223 테이프형 고온초전도선재가 더블-팬케이크(Double-pancake) 형태로 적층되고, 코일의 형상은 3차원적으로 레이스트랙(Racetrack)의 모양을 띤다.

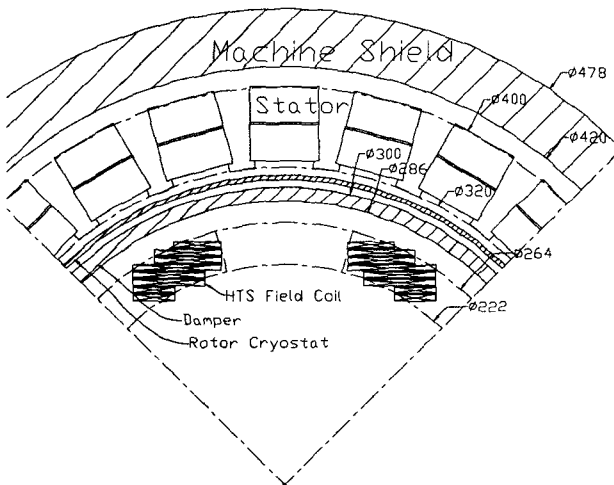


Fig. 2. Designed 1/4 Cross-section of 100[HP] HTS Motor

테이프 형태의 BSCCO-2223 고온초전도 선재를 사용하여 설계 프로그램에서 계산된 결과에 따라 한극당 1075 턴씩 배치시켰다. Fig.2 의 1점쇄선으로 구성된 계자코일의 권선 각과 이론적 해석으로부터 얻어진 계자코일의 내·외경 $\phi 222[\text{mm}] \sim \phi 264[\text{mm}]$ 안에 테이프 형태의 고온초전도 도체를 배치한다. 2차원 이론적 방법에 따른 설계 프로그램에서 계산한 계자코일의 축방향 직선부길이는 250[mm] 였으며, 단부에서는 반원형으로 구성하여 레이스트랙의 형태를 띠도록 1차적으로 설계하였다. Fig.2 와 같이 구성된 더블-팬케이크형의 레이스트랙일 경우 그 단부는 양쪽을 합하여 150[mm] 가 되었다. 따라서, 계자코일의 축방향 전체길이는 직선부와

단부를 합한 400[mm] 가 된다.

Table 2. Specifications of the designed HTS Synchronous Motor

정격 용량	100 [HP]
정격 속도	1800 [rpm]
단자 전압	380 [V]
역률	1.0
주파수	60 [Hz]
동기 리액턴스	0.1 [p.u.]
계자 동작전류	45.45 [A]
계자 극수	4
계자 턴 수	1075 턴/극
전기자 정격전류	119 [A]
전기자 턴 수	80 턴/상
전기자 슬롯수	24
축방향 직선부 길이	250 [mm]
기계실드 외경	478 [mm]
설계 효율	95.93 %

더블-팬케이크 형태의 계자코일은 최상층으로부터 각각 102, 145, 145, 191, 156, 156, 90, 90 턴으로 배치시켰다. 비선형의 B-H 곡선을 갖는 철심은 기기의 최외각인 기계실드(Machine Shield)에만 존재하고, 그 외의 기기 내부는 모두 공기와 같은 투자율을 갖는 공심형의 구조이다. 이 모델을 기본으로 하여 2차원 유한요소해석(FEM)을 해보기로 한다.

2.2 2차원 유한요소해석

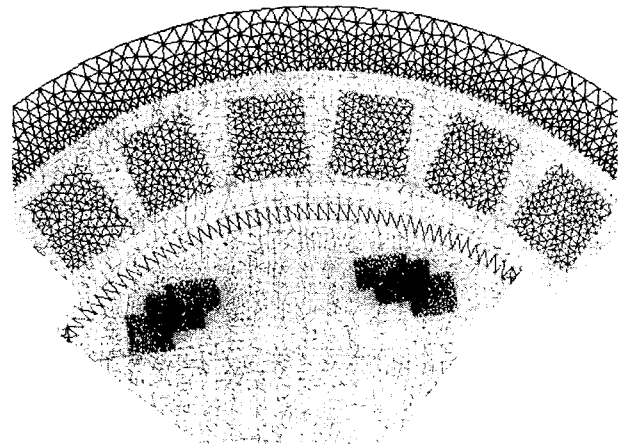


Fig. 3. Mesh-generation for 2 dimensional FEM analysis

Fig.2 와 같이 설계된 횡단면 구조를 FEM 으로 Fig.3 와 같이 그대로 모델링 하였다. 계자코일부와 전기자 코일 부는 각각 이론적 설계치와 동일한 전류밀도를 주었으며, 댐퍼(Damper)의 도전을 또한 설계상의 프로그램에 입력된 값과 동일하게 주었다.

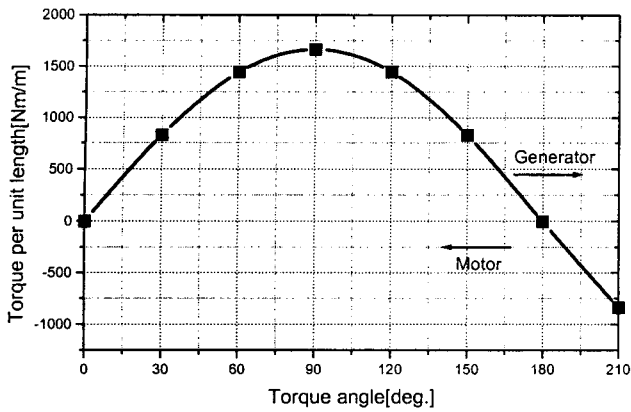


Fig. 4. FEM analysis result of generated torque according to the torque angle variation

모터와 발전기에서 발생되는 토오크는 식 (1)와 같이 원주각 θ 에 따른 코에너지(co-energy) W' 의 변화로 구할 수 있다 [2].

$$T = \frac{\partial W}{\partial \theta} \quad (1)$$

코에너지 W' 은 FEM 으로 계산된 자장 해석 결과를 이용하여 별도로 설정된 공극영역에서 식 (2) 에 의해서 계산된다.

$$W = \frac{1}{2} \int_{vol} \vec{B} \cdot \vec{H} dv \quad (2)$$

그리고, 동기모터의 경우 발생 토오크는 전기자 주자속과 계자의 주자속이 이루는 각도에 따라 변하기 때문에, 전기자에 인가되는 3상 교류의 위상을 변화시켜서 자속이 이루는 각도를 변화시켰다. 이에 따른 해석 결과를 그림 4에 보인다. 4극의 동기기에서는 전기각이 기계각의 2배이므로 회전자와 주자속과 계자의 주자속이 45° 을 이룰 경우에 90° 의 토오크각(전기각)을 이루는 최대 토오크 발생 위치가 된다. 이 때의 단위 길이당 발생 토오크는 1664(Nm/m) 였으며, 앞의 이론적 설계 결과에 따른 축방향 직선부길이 250(mm)(0.25(m))을 이용하여 기기의 출력(P_{out})을 구하면 식 (3) 에 의해 105[HP] (78.4[kW])이 나온다.

$$P_{out} = \omega \cdot T \cdot l \quad (3)$$

여기서, ω : 회전자 각속도[rad/sec]
 l : 축방향 길이

다른 각도에서는 그림에서와 같이 90° 을 기준으로 좌우 대칭인 값을 가지며, 토오크각에 따라 거의 정현적으로 감소하였다. 이 결과에서 볼 수 있듯이 2차원 해석에 근거를 둔 이론적 설계는 계자코일의 축방향 직선부 길이만으로도 설계치 정격 출력을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 2차원적인 해석은 축방향으로 코일과 기

계실드 등이 무한히 길게 뻗어져 있다고 가정한 것이기 때문에, 실제의 3차원적인 모델의 자장값보다 더 큰 값을 가지게 된다. 따라서, 이와같은 공심형 구조에서 더욱더 정확히 기기 출력을 예측하기 위해서는 3차원적인 자장해석을 할 필요가 있다.

2.3 2차원과 3차원의 자장분포 비교

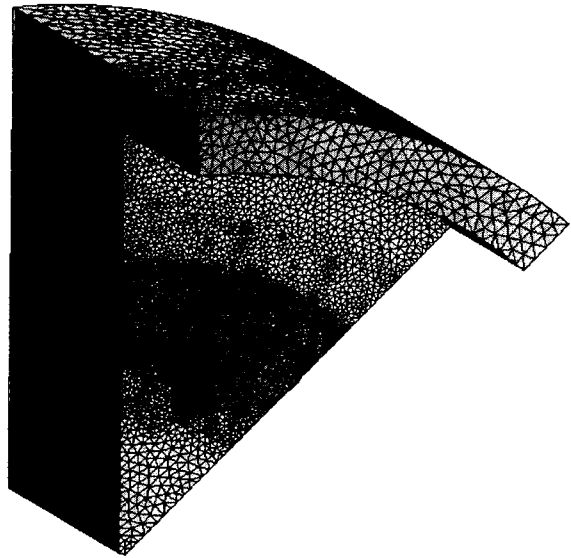


Fig. 5. Mesh-generation for 3 dimensional FEM analysis

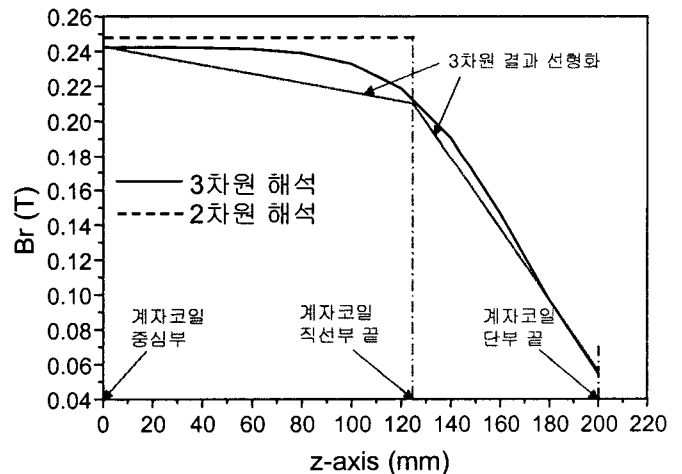


Fig. 6. Comparison of Br distributions along the armature coil at 2-D and 3-D analysis

앞의 2차원 해석 결과와 비교하기 위해서 3차원으로 기기를 모델링 한다. 레이스트랙형의 계자코일을 이루는 4개의 더블-팬케이크들의 축방향 직선부 길이가 2차원 해석시의 토오크 계산을 위한 축방향 길이와 같도록 250(mm)으로 모두 동일하게 하였기 때문에, 계자코일의 축방향 단부의 형상은 반원형으로 감겨진 코일부가 계단식으로 적층되는 형상을 띄고 있다. Fig.5에서는 이와 같은 방법으로 유한요소해석을 위해 3차원

적으로 기기를 모델링한 형상을 보여준다. 자장의 대칭성과 주기성을 고려하면 그림에서와 같이 3차원 공간 중에서 1/16 만 모델링 하여도 기기의 모든 영역에서의 자장분포를 구할 수 있다. 최외각의 기계실드는 계자코일의 단부에서 발생하는 자속을 모두 전기자에서 쇄교가 가능하도록 계자코일의 축방향 전체길이(400[mm])와 같도록 설정하였다[3].

계자코일에 동작전류를 인가하였을 때, 기기의 출력과 직접적으로 관련이 되는 Br 성분을 전기자 중심부인 반경 $\frac{R_{ai} + R_{ao}}{2}$ 에서 계자코

일의 축방향 중심부를 원점으로 하여 Z-axis 방향으로 계산하였다. Fig.6 에서 보는 바와 같이 레이스트랙형 계자코일의 직선부에서 실선의 곡선으로 나타나는 3차원의 해석결과가 2차원 해석결과 보다 약간 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 또한, 2차원 해석 시에는 계자코일의 직선부 구간만으로도 원하는 정격출력을 얻을 수 있었으나, 이와 비교하여 3차원 해석결과를 볼 때 계자코일의 단부 구간에서도 Br 성분이 상당히 존재하므로 이에 따른 출력의 여유분이 존재함을 알 수 있다. 이러한 출력의 여유분이 어느 정도 되는지 알아보기 위해서, Fig.6 의 3차원 해석 결과를 두 구간으로 나누어 선형화하여 보았다. 첫 번째 구간은 계자코일의 축방향 중심부 위치에서 레이스트랙의 직선부가 끝나는 위치이며, 두 번째 구간은 레이스트랙의 직선부가 끝나는 위치에서 반원형의 단부가 축방향으로 끝나는 지점의 전기자 중심부에서의 Br 값을 연결하여 선형화하였다. 첫 번째 구간의 선형화된 자장의 평균값은 0.2275[T] 이며, 2차원 해석에 의해서 구해진 0.2474[T] 보다 약간 작은 값이다. 이 구간에서 2차원 해석에 따라 구한 기기의 출력은 105[HP] 이었고 발생하는 토오크는 자장의 세기에 비례하므로, 식(3)에 의해서 발생하는 출력도 자장의 세기에 비례한다고 할 수 있다. 따라서, 3차원 해석 결과를 선형화시켜 레이스트랙형의 계자코일의 직선부에 의해 발생하는 기기출력은 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_{out\text{직선부}} = \frac{0.2275}{0.2474} \times 105 = 96.6[HP] \quad (4)$$

마찬가지 방법으로 두 번째 구간에서의 선형화시킨 자장의 평균값은 0.134[T] 이고, 계자코일의 단부에 해당하는 축방향의 길이는 150[mm] 이므로 이 영역에서 더해지는 기기출력은 식(5)와 같이 계산할 수 있다.

$$P_{out\text{단부}} = \frac{0.134}{0.2474} \times 105 \times \frac{150}{250} = 34.12[HP] \quad (5)$$

따라서, 3차원 자장분포를 선형화하여 예측되는 전체 기기출력은 식(4)와 (5)의 결과를 합하면 130.67[HP] 가 된다. 즉, 2차원의 이론적 자장해석을 기본으로 한 설계방식에 의해 결정된 기기

의 축방향 길이를 레이스트랙 형태의 계자코일의 직선부 길이와 일치시키면, 계자코일의 단부에 의해 더해지는 출력이 상당히 많음을 알 수 있다. Fig.6 와 같이 단순히 선형화시킨 경우에도 100[HP] 의 설계 값보다 30% 정도 단부에 의한 영향이 더해짐을 볼 수 있다.

3. 결 론

공심형의 초전도 회전기는 회전자 내부가 모두 공기와 같은 투자율을 가지고, 전기자 코일부까지도 기존 회전기의 공극과 같은 형태를 띤다. 그러므로, 상전도 회전기와 비교하여 2차원적인 자장해석과 실제적인 자장 분포는 큰 차이를 보이게 된다. 앞의 본문에서 자장을 해석해 본 바와 같이 축방향 직선부의 길이가 250[mm] 인 100[HP] 급의 설계된 고온초전도 모터의 경우, 축방향의 직선부에서는 2차원적인 해석과 큰 차이를 보이지 않지만 계자코일의 단부에서는 자장이 급격히 감소하는 분포를 띤다. 이러한 단부에서의 감소 요인을 고려해 볼 때 충분한 기기 출력을 얻기 위해서는, 2차원 해석시 원하는 출력이 얻어지는 축방향 길이만큼 계자코일의 직선 부를 설정해주는 것이 바람직할 것으로 고려된다. 또한 더욱더 정확한 설계를 위해서는 본 논문에서와 같이, 계자코일의 단부에 의한 영향과 직선부에 의한 영향을 모두 고려하여 정확한 출력치가 나오도록 기기의 형상이나 설계 변수들을 조정하는 것이 바람직할 것으로 여겨진다.

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

[참 고 문 헌]

- [1] 백승규, 손명환, 김석환, 권영길, "손실을 고려한 초전도 동기전동기 설계", 한국초전도·저온공학회논문지, 3권 2호, pp.21~26, 2001. 11
- [2] 백승규, 김석환, 손명환, 조영식, 서무교, 권영길, 류강식, "유한요소법을 이용한 고온초전도 동기모터 특성해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, pp.720~722, 2002. 7
- [3] 조영식, 서무교, 백승규, 김석환, 손명환, 권영길, 이정중, 홍정표, "해석적 방법을 이용한 초전도 회전기의 3차원 자계 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, pp.616~618, 2002. 7