

유한요소법을 이용한 고온초전도 동기모터 특성해석

백승규, 김석환, 손명환, 조영식, 서우교, 권영길, 류강식*
 한국전기연구원 전략기술연구단 초전도응용연구그룹
 차세대초전도응용기술개발사업단*

Performance evaluation of Superconducting synchronous motor via Finite element method

S.K. Baik, S.W. Kim, M.H. Sohn, Y.S. Jo, M.G. Seo, Y.K. Kwon, K.S. Ryu*
 KERI Applied Superconductivity Research Group
 Center for Applied Superconductivity Technology*

skbaik@keri.re.kr

Abstract - Superconducting synchronous motor using HTS(high-temperature superconducting) field windings has a lot of advantages over LTS(low-temperature superconducting) synchronous machine. A recently developed 5000[hp] HTS motor represents 1/2 reduction in weight and volume compared to an induction type conventional machine. Furthermore, 40% machine loss is reduced compared to the industry average. Based on a conceptual design, a 100[hp] HTS synchronous motor is modeled by F.E.M(Finite Element Method) and the performance is predicted in this paper

표 1 고온초전도 모터의 설계 사양

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 [A]
계자 극수	4
계자 턴수	1075 턴/극
전기자 정격전류	119 [A]
전기자 턴수	80 턴/상
전기자 슬롯수	24
축방향 직선부 길이	250 [mm]
기계실드 외경	478 [mm]
설계 효율	95.93 %

1. 서론

초전도 동기회전기는 기존의 동기회전기와는 달리 최외각의 원통형 기계실드(Machine Shield)를 제외하고는 그 내부가 모두 공극으로 구성이 된다. 따라서, 2차원의 원통좌표계에 계자코일을 배치시키면 전류방향은 모두 z축(기계의 축방향)을 향하게 되고 벡터포텐셜 또한 A_z 성분만 존재하게 된다. 이를 이용하여 라플라스 방정식을 세워서 벡터포텐셜이 구해지면 자장을 그 성분에 따라 구할 수 있다. 이러한 자장분포의 이론적인 해석방법을 이용하면 기존의 회전기가 그 전체적인 치수를 경험적으로 얻어진 자료를 바탕으로 하여 정하는 반면에, 초전도 동기회전기는 계산에 의한 설계값들을 도출할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 이론적인 설계개념을 이용하여 얻어진 100[hp] 급의 고온초전도 동기모터를 유한요소해석법을 이용하여 그 특성을 역으로 산출하여 보고자한다.



그림 1 설계된 100hp 모터의 횡단면도

2. 본론

2.1 설계된 모터의 사양

이론적인 해석방법에 의해 설계된 전동기의 사양은 표 1 과 같다. 이 결과들은 기계에서 발생될 수 있는 손실들을 고려하여 결정된 값으로서, 전기자입력이 발생되는 손실분을 제외하고도 기기의 출력이 설계치 100[hp] 이 나오도록 하였다[1]. 또한, 이에 따른 기기의 횡단면 설계도

의 1/4 을 그림 1에 보인다.

2.2 유한요소해석 모델링

설계된 모터를 4극의 전절권 형태로 전기자코일을 배치시키면 한 슬롯내에 2층으로 배열된 도체들은 모두 동일한 전류를 통전시키므로, 슬롯내의 도체들을 하나의 사각형태의 도체로서 모델링할 수 있다. 슬롯이 차지하는 사각형의 도체부는 그 전류밀도값을 $1.894[A/mm^2]$ 의 실효값을 갖도록 하여 설계시의 정격전류치와 일치시켰다. 또한, 유한요소해석시 기기 횡단면의 1/4 만 모델링하여도 대칭성에 의하여 모든 부분의 결과를 동일하게 파악할 수 있다. 계자와 전기자코일 사이에 구리원통의 저온덤퍼(Electromagnetic Shield)는 비대칭의 교번자계에 대해 계자코일을 보호하고, 기존의 동기기에서의 덤퍼와 같이 기동시 토오르크를 형성시켜주는 역할을 할 수 있다. 또한, 회전자전공용기(Rotor Cryostat)로부터 계자코일 내측으로 침투할 수 있는 복사열을 차폐시켜주는 역할도 한다. 본 설계에서는 기기의 크기를 최대한 줄이고 전기자에 의한 영향을 최소화시키기 위해 동기리액턴스를 최대한 줄여 덤퍼를 하나만 쓰도록 설계하여 보았다[2].

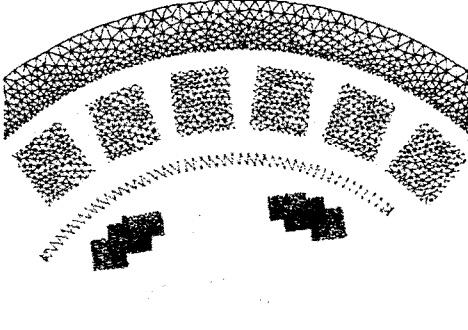


그림 2 유한요소해석을 위한 mesh 구성도

회전시의 특성과 토오르크 계산을 위하여 회전자와 전기자코일 사이에 공극영역(Air-gap region)을 별도로 설정하였다. 그림 2에 OPERA-2D 유한요소해석 방법을 이용한 회전기해석을 위한 Mesh 형태를 보여준다.

2.3 모터 특성 해석

구성된 유한요소해석 모델을 이용하여 모터의 특성을 해석하기로 한다. 우선, 고온초전도 선재로 제작이 되는 계자코일은 자장 및 온도에 따라 통전 능력에 영향을 받기때문에 여러 경우에서의 자장분포 결과들을 분석한다. 그리고, 동기 회전시의 발생 토오르크와 덤퍼에서 발생할 수 있는 와전류에 의한 손실을 구해보기로 한다.

2.3.1 자장의 영향 분석

NbTi 와 같은 저온초전도 선재를 이용한 코일은 작용하는 자장의 세기에만 의존하지만, BSCCO 와 같은 고온초전도 선재는 테이프와 같은 형태를 지니기때문에 작용하는 자장의 방향에도 의존하게 된다. 즉, 작용하는 자장이 이러한 테이프 형태의 면에 수직할 때에 선재의 임계전류가 가장 크게 감소하게 된다.

표 2 발생 자속밀도 비교

구 분	$B_{\perp max}(T)$	$B_{max}(T)$
전기자 개방시	0.5356	0.7725
토오르크각 0°	0.5269	0.9562
토오르크각 30°	0.6477	0.9451
토오르크각 60°	0.5646	0.8928
토오르크각 90°	0.5801	0.7919

먼저, 전기자코일은 통전시키지 않고 계자코일에만 동작전류를 통전하여 자장해석을 한 결과, 고온초전도 테이프면에 수직하게 작용하는 최대자장($B_{\perp max}$)은 표 2 에서와 같이 0.5356[T] 였으며 해석영역에서 발생최대자장(B_{max})도 계자코일에 분포하게 된다. 또한, 전기자코일에 3상 정격전류를 통전시켜 계자의 주자속과 전기자 주자속의 각도차에 따른 계자코일에 작용하는 자장도 분석하였다. 이 때, 주 자속간의 각도가 15° (토오르크각 30°)일 때 $B_{\perp max}$ 가 최대였으며 전기자에 정격전류 통전시에는 B_{max} 가 항상 최외각의 기계실드에서 발생하였다. 본 논문에서는 2차원적인 자장해석을 통하여 테이프형 선재면에 수직자장성분을 구해보았으나, 3차원적으로 계자코일과 기계실드를 모델링하여 해석하여도 $B_{\perp max}$ 은 계자코일의 직선부에서 발생하며 2차원 해석시보다 약간 작은 값을 가진다[3]. 이러한 해석결과는 고온초전도선재의 자장에 따른 임계전류폭선에서 기준으로 삼는 자장값을 결정하는데 이용가능하며, 실제의 계자코일 제작 후 시험을 통하여 퀀치전류와 비교하여 동작전류의 결정에도 응용할 수 있다.

2.3.2 출력 토오르크

발생되는 토오르크는 식 (1) 과 같이 원주각 θ 에 따른 Co-energy 의 변화로 구해진다.

$$T = \frac{\partial W'}{\partial \theta} \quad (1)$$

여기서, W' : 축방향 단위길이당 Co-energy

T : 축방향 단위길이당 발생토오르크

단위길이당 저장된 Co-energy W' 는 FEM으로 계산된 자장해석 결과를 이용하여 별도로 설정된 공극영역에서 (2)와 같이 계산된다.

$$W' = \int \frac{\vec{B} \cdot \vec{H}}{2} ds \quad (2)$$

그리고, 동기모터의 경우 발생토크는 전기자 주자속과 계자의 주자속이 이루는 각도에 따라 변하기 때문에, 전기자에 인가되는 3상 교류전류의 위상을 변화시켜서 자속이 이루는 각도를 변화시켰다. 이에 따른 해석결과를 그림 3에 보인다.

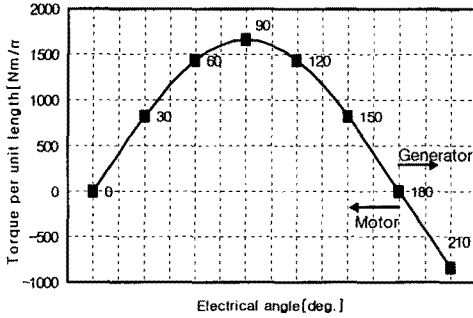


그림 3 토크각도의 변화에 따른 발생토크

회전자 주자속과 계자의 주자속이 45° 을 이룰 경우에 4극기에서는 전기자각과 기계각이 2배 차이가 나므로, 90° 토크각을 이루는 최대토크 발생위치가 된다. 이 때의 단위길이당 발생토크는 1664[Nm/m] 이며, 이론적 설계결과에 따른 축방향 직선부길이(0.25[m])를 이용하여 기기의 출력(P_{out})을 구하면 식(3)에 의해 105[hp](78.4[kW]) 정도가 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, 토크각에 따라 거의 정현적으로 감소하였다. 토크각 0° 와 180° 에서는 원주각 θ 에 따라 Radial 방향의 자속이 완전히 정현적인 분포이면 발생토크가 0 이 되지만, 자장을 Fourier 분석하여 보면 계자와 전기자 자속 모두 고조파가 섞여 있어서 약간의 값을 가짐을 알 수 있었다.

2.3.3 댐퍼의 와전류 손실

동기속도 1800[rpm] 으로 회전시 댐퍼에서 발생하는 와전류손실을 계산하여 보았다. 전기자와 계자의 주자속이 동기속도로 회전하지만 계자와 동기속도로 회전하는 원통형의 저온댐퍼에는 와전류가 유기되었으며, 이는 전기자 자속의 고조파성분에 의한 것임을 알 수 있었다. 그림 3의 여러가지 조건 중에서 토크각이 0° 일 경우 가장 큰 값을 가졌으며, 3상 전원 인가후의 시간에 따른 와전류손실을 그림 4에 보인다.

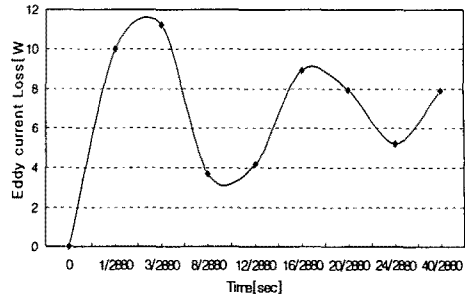


그림 4 동기속도 회전시 저온댐퍼의 와전류 손실

계산시 설정한 저온댐퍼의 도전율은 5×10^8 [Siemens/m] 이며 80[K] 에서의 구리 도전율 값을 기초로하여 설정하였다. 와전류손실은 전기자전류 인가 후 1/960[sec]에서 11.22[W] 의 최대값을 가졌고 시간이 갈 수록 극부적인 최대값들이 점차 감소함을 확인할 수 있었다. 여기서 발생하는 손실 10[W] 정도가 지속적인 열에너지로 발생된다고 보면, 이는 극저온 냉동기로 충분히 냉각시킬 수 있는 용량이라고 보여진다.

3. 결 론

본 논문에서 다룬 설계 및 해석은 2차원적 전류 및 자장분포를 근거로 한 것으로서, 실제의 3차원적인 자장값보다 약간 큰 값을 가진다. 하지만, 본 논문에서 계산시 고려한 축방향길이는 계자코일의 직선부만 고려하였고 전기자 역시 계자코일의 축방향 직선부길이와 동일하다고 가정한 것이기때문에, 실제 제작시 더하여지는 계자와 전기자코일의 단부의 영향이 고려된다면 설계치 100[hp] 의 출력은 얻어질 것으로 예상된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도용용기술개발 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] T.Suryanara, J.L.Bhattacharya, K.S.N.Raju, K.A.Durga Prasad, "Development and Performance Testing of a 200 kVA Damperless Superconducting Generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 4, pp.330~336, December 1997
- [3] 이정중, 조영식, 주진홍, 홍정표, 권영길 "100hp급 고온초전도 모터의 자장분포특성", 한국초전도·저온공학회 2002년도 논문집, p.312~314, 2002. 2