

이중 계자를 가지는 고온 초전도 동기기

박상호¹, 양형석², 김우석¹,
한국산업기술대학교¹, 한전 전력연구원²

1. 서 론

기존의 상전도(구리) 동기기는 손실이 높고, 고출력, 용량증대의 한계, 단자전압의 고압화, 설치장소의 한계와 같은 문제점을 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 초전도 회전기를 적용하면 전기자 및 계자를 공심형으로 설계가 가능하여 철손을 제거할 수 있고, 또한 철을 사용하지 않고도 높은 자기장을 얻을 수 있어 소형 경량화가 가능하다.

최근 2세대 고온초전도 선재의 비약적인 성능 발전에 힘입어, 기존의 구리선 대비 100배 이상의 대전류를 흘릴 수 있는 고온초전도 선재를 사용하여 크기를 1/2이하, 중량은 1/3이하, 효율은 1.5 ~ 2.5% 증가시킬 수 있는 초전도 동기기의 연구가 국내외에서 진행 중이다[1,2]. 최근까지 진행되어 온 고온초전도 동기기는 높은 자기장을 발생시키기 위한 계자 권선을 고온초전도 선으로 제작하는 방식의 부분 초전도 동기기의 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 초전도 동기기의 장점인 소형, 경량화를 극대화하기 위해서는 일반 구리선을 이용한 계자보다 2 ~ 4배 높은 자기장을 발생하는 초전도 계자뿐만 아니라 전류용량을 높이기 위한 전기자권선 역시 초전도화가 필요하다. 그렇지만 최근에 주로 사용되고 있는 2세대 고온초전도 선재를 사용하여 제작되는 회전기기의 경우, 계자에서 발생하는 자속 중 원주방향으로 가해지는 자속성분은 에너지 변환에는 전혀 기여를 하지 못하면서, 계자권선과 전기자권선의 고온초전도 선재의 넓은 면에 수직으로 인가되는 성분으로 임계전류를 감소시킴과 동시에 큰 교류손실이 발생하는 치명적인 문제점이 있다. 또한, 고온초전도 권선에 집중되는 높은 에너지밀도에 의해 유발되는 높은 기계적 응력 역시 초전도 회전기의 용량 증가에 또 하나의 문제점으로 지적되고 있다.

본 연구진에서는 이러한 문제점을 해결함과

동시에 계자권선과 전기자권선 모두에 고온초전도 선재를 적용하는 초전도 동기기의 실현을 위하여 이중계자 방식의 초전도 동기기를 제안하였다. 제안된 방식으로 회전기를 설계하게 되면 기존방식에 비해 원주방향 자속성분을 현격히 감소시킬 수 있어 계자권선의 임계전류의 증가 및 교류손실의 저감이 가능하고 의미 있는 수준의 효율을 가지는 초전도 동기기의 실현이 가능할 것으로 보인다. 또한 반경방향의 자속밀도는 증가되어 출력이 증가할 뿐 아니라, 계자의 분할에 의한 자기압력(Magnetic Pressure)의 분산으로 높은 에너지밀도에 노출되는 초전도 권선부의 기계적 응력(Mechanical stress) 역시 많이 감소되어 초전도 동기기의 현실화에 가깝게 다가갈 수 있는 기술이 될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 본 론

2.1 구조 및 개념

그림 1은 이중계자 동기기의 권선구조를 개념적으로 나타낸 그림이다. 전기자 권선의 내측과 외측에 각각 분리된 계자 권선을 가지고 있음을 알 수 있으며 계자 및 전기자 권선 모두에 테이프 형태의 고온초전도 선재를 적용하는 것을 가정하고 있다. 그림 1과 같이 계자 권선을 2분할하여 고온초전도 전기자 권선의 내측과 외측에 위치하도록 설계하는 경우, 전기자 권선의 내측에만 계자 권선을 위치시키는 경우와 비교하여 동일한 양의 초전도 선재를 사용하더라도 계자에 집중되는 자기장을 분산시킬 수 있으며, 전기자 권선을 구성하는 고온초전도 선재의 넓은 면에 수직으로 인가되는 원주방향 자기장을 감소시키면서 반경에 따른 자기장도 균일하게 인가할 수 있을 것으로 판단된다.

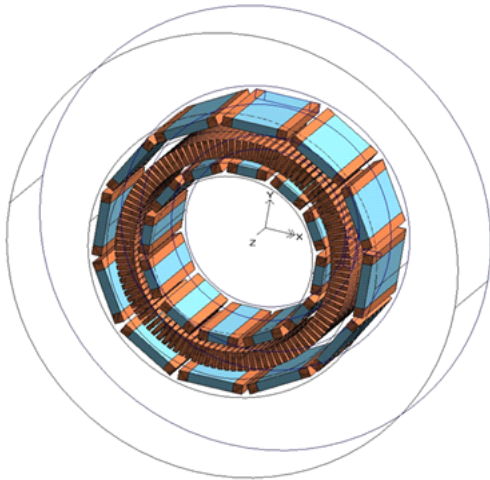


그림 1. 이중계자 고온초전도 동기기의 권선 구조.

2.2 해석 모델

전 절에서 기술한 이중 계자를 가지는 전초전도 동기기의 자기장 분포 및 임계전류와 교류손실의 예측을 위해 전자기장 시뮬레이션을 시행하기로 하고, 본 절에서는 이를 위한 해석 모델을 그림 2와 같이 총 4가지로 제시하였다. Case I은 1개의 계자 권선만 있는 기존 형태의 권선배치 형태를 나타내고, Case II는 본 연구에서 제시하는 이중 계자를 가지는 권선배치의 형태를 나타내고 있으며, 각 Case 별로 2가지씩 변화를 주어 4개의 모델을 제시하고, 각각의 해석 결과를 비교하기로 하였다.

Case I-1과 Case I-2와의 차이점은 같은 형태의 계자권선에 서로 다른 형태의 전기자 권선형태를 제시하였다. 본 모델에서 Case I-2의 전기자 권선은 Case-I의 전기자 권선보다 단면의 폭은 3배 크고, 원주방향 길이는 1/3배인 설계안을 가진다. 이중 계자를 가지는 Case II-1과 Case II-2 역시 Case I에서 제시한 형태와 같은 설계안을 가지는 전기자 권선을 각각 가지며, 그에 따라서 분할된 이중 계자권선간 거리도 서로 다르게 배치되어 있는 형태임을 그림 2를 통해 알 수 있다. 그림 2의 Case I-2의 경우 외측 계자가 없지만 Case II-2의 경우는 외측 계자를 내측으로 이동이 가능하다. 내측 계자와 전기자의 거리와 외측 계자와 전기자의 거리는 동일하게 설계하였다. 절연용기의 곡면, 절연층등을 고려하여 설계가 필요하며, 내측 계자와 외측 계자의 위치에 대한 해석이 필요하다.

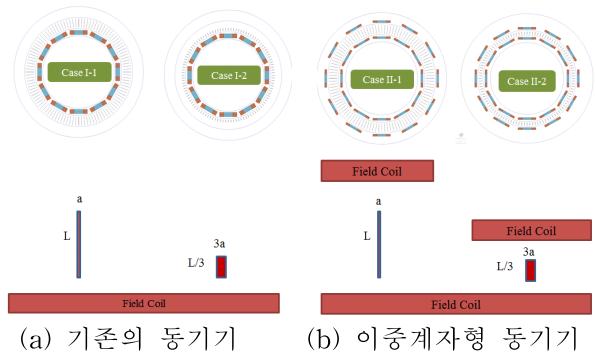


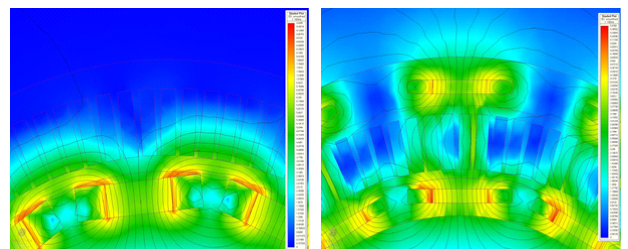
그림 2. 해석 모델.

2.3 자기장 해석

그림 3은 기존의 동기기와 이중계자형 동기기의 자기장과 flux line 해석결과이다. 기존의 동기기의 계자에 인가되는 최대자속밀도는 9.4 T이며 이중계자형 동기기는 5.4 T이다. 최대 자기장에 의한 stress를 초전도 코일이 받으며, 그 값은 $B^2/2\mu_0$ 로 자기장의 제곱에 비례한다. 결과적으로 이중계자 방식이 1/3로 최대 stress가 줄어든다.

2.4 임계전류 해석

그림 4는 초전도선재 제조회사인 super power-inc사에서 제공하는 온도별 임계전류비를 나타낸 그림이다[3]. 인가되는 수직 자기장이 낮을수록 임계전류는 증가하고, 동작 전류를 높일 수 있다. 초전도선재의 사용량을 줄일 수 있으므로 경제성 확보에도 유리해진다. 그림 2(a)의 경우 전기자권선에 큰 원주방향 수직자기장이 인가되게 되고, 이 때문에 임계전류 값은 급격히 낮아지며 교류손실은 크게 증가하게 된다. 그림 2(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 이중계자형의 경우는 전기



(a) 기존의 동기기 (b)이중계자형 동기기

그림 3. 자기장과 flux line 계산 결과 비교.

자권선에 인가되는 원주방향 수직자기장 성분을 감소시킬 수 있어 임계전류는 증가시키고 교류손실은 감소시킬 수 있다.

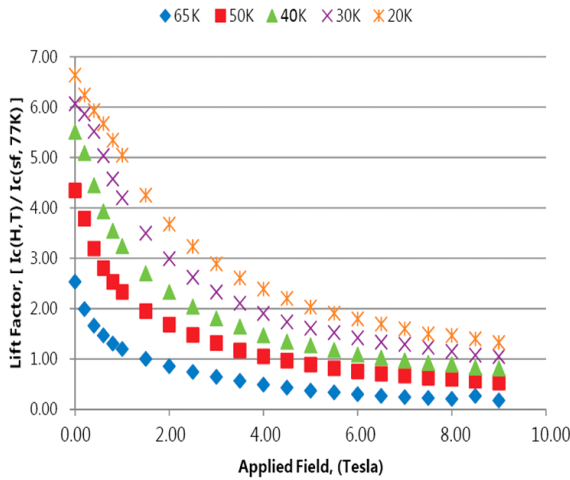
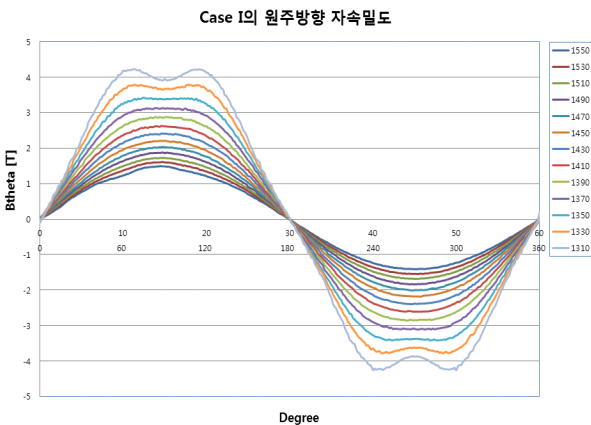
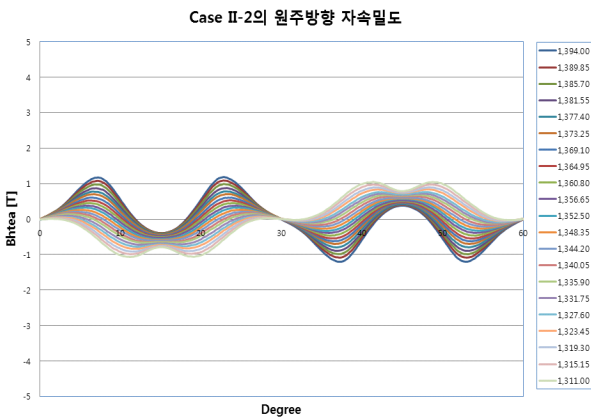


그림 4. 온도-자기장 별 임계 전류 변화.



(a) 기존의 동기기



(b) 이중계자 동기기

그림 5. Case별 원주방향 자속밀도.

일반 전초전도 동기기의 경우 원주방향의 최대 자속밀도는 4.22 T로 운전온도를 20 K로 운전할 경우 임계전류(@77 K)의 2.3배 정도를 인가할 수 있지만, 이중계자를 사용하는 경우 원주방향 최대 자속밀도는 1.19 T로 임계전류(@77 K)의 5배 정도의 임계전류의 인가가 가능한 것으로 나타난다.

2.5 원주방향 자속밀도 해석 결과

그림 5는 Case별 원주방향 자속밀도를 나타내었다. 그림 5(a)는 Case I의 전기자가 받는 자속밀도를 나타내었다. 제일 내측의 전기자 코일이 받는 원주방향의 자속밀도는 4.22 T로 해석되었다. 그림 5(b)는 Case II-2의 경우는 전기자 원주방향의 자속밀도를 나타내었다. 원주방향의 최대 자속밀도는 1.19 T로 해석되었다. 그림 6은 전기자가 받는 원주방향 최대 자속밀도를 나타내었다. Case I-1의 경우는 계자에 가까울수록 높은 원주방향의 자속밀도를 가지며 멀어질수록 원주방향의 자속밀도는 감소한다. 계자에 가까운 전기자 코일은 4.22 T의 원주방향 자속밀도가 인가되고 외측 코일의 경우는 1.5 T내외의 원주방향 자속밀도가 인가된다. 그러나, 모든 권선이 직렬로 연결되어 있어서 임계전류의 값은 앞절에서 설명한 대로 4.22 T에 해당되는 값으로 전기자 전체의 임계전류가 감소하게 된다. 그림 5(b)처럼 Case II-2의 전기자에 원주방향 자속밀도가 인가된다. 그림 5(b)의 결과를 원주방향의 최대 자속밀도만 나타낼 경우 그림 6처럼 나타낼 수 있다. 내측 계자와 외측 계자에 가까울수록 원주방향 자속밀도는 증가하지만 그 크기는 Case I에 비하여 아주 작다.

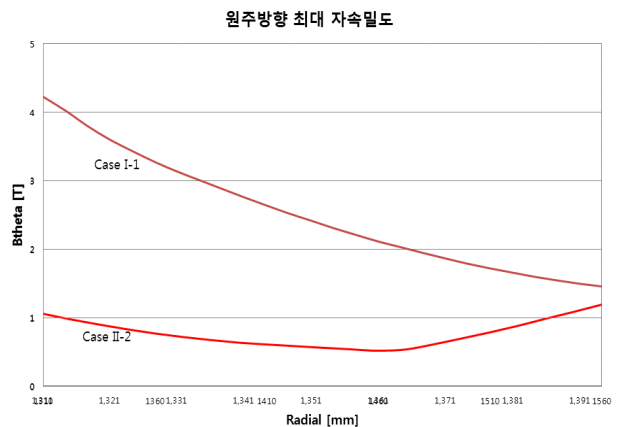
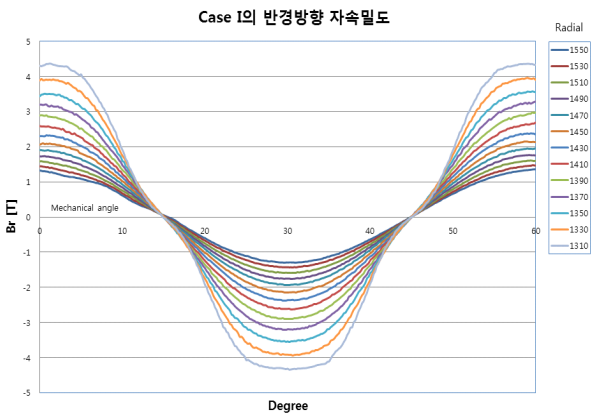


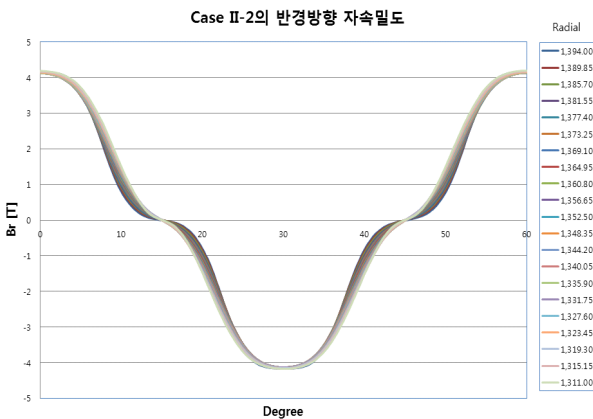
그림 6. Case별 원주방향 최대 자속밀도.

2.6 반경방향 자속밀도 해석 결과

반경방향 자속밀도는 원주방향 자속밀도와는 달리 반경방향 자속밀도가 높을수록 출력은 증가하게 된다. 그러므로 반경방향 자속밀도는 증가시키도록 설계하여야 한다. 그리고 반경방향 자속밀도가 일정할수록 턴간 발생전압은 일정하게 되므로 계자와의 거리와 상관없이 일정하게 설계하여야 한다. 그림 7은 Case별 반경방향 자속밀도를 나타내었다. 그림 8은 반경방향 최대 자속밀도를 거리에 대하여 나타내었다. Case I의 경우는 전기자가 계자의 가까울수록 자속밀도가 크고 멀어질수록 자속밀도가 작아진다. 이 경우 계자와 가까운 전기자의 경우 턴간 전압이 높고 계자에서 멀리 떨어져있을 경우 전압이 낮아지게 된다. Case II-2의 경우는 거리에 상관없이 일정한 값을 가지므로 턴간 발생전압이 일정하고 Case I에 비하여 높은 것을 알 수 있다.



(a) 기존의 동기기



(b) 이중계자 동기기

그림 7. Case별 반경방향 자속밀도.

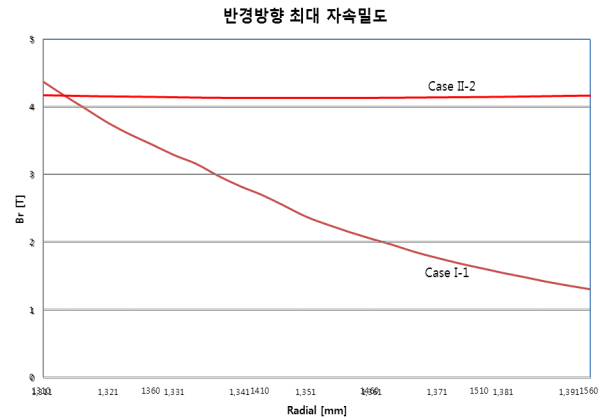


그림 8. Case별 반경방향 최대 자속밀도.

2.7 결과

본 연구에서는 고온 전초전도 동기기의 동작온도를 20 K으로 가정하였다. 해석 결과에 의하면 고온초전도 이중 계자권선에 인가되는 최대 기계적 응력은 기존의 동기기의 경우에 비해 1/3로 감소한다. 수직자기장이 4.22 T에서 1.19 T로 감소함으로써 Case I-1의 임계전류보다 Case II-2의 임계전류는 2배 이상 증가한다. Case I-2의 경우는 계자와 전기자 코일의 거리가 감소함으로써 출력은 144 %로 증가하였으나 손실도 128 %로 증가하였다. 또한 Case I의 경우는 전기자 위치에 따라 발생하는 턴간 전압이 다르게 된다. 이중계자 방식은 반경방향 자속밀도는 증가하여 표 1과 같이 Case II-1의 경우는 출력이 112 % 증가하고 교류손실은 30 %로 감소하였다. Case II-2의 경우 출력은 185 % 증가하는 손실은 25 %로 감소하는 해석결과를 얻었다. 만약에 출력을 10 MW로 동일하게 할 경우 계자의 자기장을 Case II-2의 경우 계자의 초전도 선재를 55 %이하를 사용하고도 동일 출력을 얻을 수 있다. 표 2는 Case별 출력을 동일하게 했을 경우 교류손실을 비교하였다. Case I-1에 비해 Case II-2의 경우가 교류손실이 13 %로 해석되었다. 이중계자 방식은 발생하는 턴간 전압이 위치에 상관없이 일정하다.

표 1. 기존의 전초전도 동기기의 출력과 교류손실 해석 결과.

Power			
Case I-1	Case I-2	Case II-1	Case II-2
10.0 MW	14.4 MW	11.2 MW	18.5 MW
100 %	144 %	112 %	185 %
AC loss analysis of armature coils			
776 kW	992 kW	230 kW	196 kW
100 %	128 %	30 %	25 %

표 2. Case별 출력 동일시 교류손실.

Power			
Case I-1	Case I-2	Case II-1	Case II-2
776 kW	754 kW	196 kW	98 kW
100 %	97 %	25 %	13 %

3. 결 론

본 연구에서는 기존의 전초전도 동기기와 이중계자형 전초전도 동기기에 대해 전자기장 해석을 통한 특성의 비교분석을 수행하였다. 임계전류의 경우 기존의 동기기 대비 2배 더 많은 전류를 인가할 수 있으므로 선재의 사용량을 절반 수준으로 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 출력도 기존에 비하여 185 % 증가하였으므로 동일한 출력을 내기위하여 계자의 선재량을 55 %만 사용하고도 동일한 출력이 가능하다. 또한 원주방향 자기장이 감소함으로써 전체 발생하는 교류손실은 13 % 감소할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 또한 기존 동기기와는 달리 이중계자는 계자간 거리 조절이 가능하므로, 이중계자간 거리의 최적화를 통한 고효율의 우수한 전초전도 동기기의 실현이 이론상 가능할 것으로 생각된다. 그러나 구조에 대한 연구와 동작상황에 따른 전기적, 기계적 특성에 대한 연구가 필요하다. 향후 전초전도 동기기 고효율, 고성능화 연구를 위해서 기존의 초전도 동기기와 이중계자 방식의 동기기에 대한 연구를 지속

적으로 할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 지원을 받아 수행된 것임. [과제번호 : R17XA05 -34]

참고문헌

- [1] S. Fukui, J. Ogawa, Takao Sato, O. Tsukamoto, N. Kashima and S. Nagaya, "Study of 10 MW-Class Wind Turbine Synchronous Generators With HTS Field Windings", IEEE TRANS. ON APP. SUPERCON., Vol. 21, No. 3, pp. 1151-1154, 2011
- [2] 한국초전도산업협회, "초전도 기술 산업화 로드맵 보고서", 미리출판, 10월, 2016.
- [3] Superpower INC, "SuperPower INC", <http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>, (2017.07.10.)

저자이력



박상호(朴相浩)
1993-1996년 한국해양대학교 전기공학과 공학사,
1997-2001년 한국해양대학교 전기공학과 공학석사,
2001-2004년 한국해양대학교 전기공학과 공학박사,
현재 한국산업기술대학교 에너지전기공학과 조교수



양형석(梁炯皙)
2001년 Uni. of Tukuba 구조공학과 공학박사 (저온공학 전공)
2002-2009 한국기초과학지원연구원 선임연구원

2009-현재 한전 전력연구원
책임연구원



김우석(金佑錫)
1990-1996년 서울대학교 전
기공학부 공학사,
1996-1998년 서울대학교 전
기공학부 공학석사,
1998-2002년 서울대학교 전
기컴퓨터공학부 공학박사,
현재 한국산업기술대학교 에너
지전기공학과 조교수