

1MW 급 고온초전도 동기기의 전자기적 특성 해석

Analysis of Electromagnetic Characteristics of a 1MW Class HTS Synchronous Motor

백승규^{1,*}, 권영길¹, 이연용¹, 이재득¹, 김영춘², 문태선², 박희주², 권운식²

S. K. Baik^{1,*}, Y. K. Kwon¹, E. Y. Lee¹, J. D. Lee¹,
Y. C. Kim², T. S. Moon², H. J. Park², W. S. Kwon²

Abstract: On the contrary of a conventional motor with very narrow air-gap, it is difficult to calculate the accurate magnetic field distribution and the performance of an air-cored superconducting motor by 2 dimensional analysis, which does not use high permeability material except outer machine shield. This paper aims to do analysis of magnetic field and force distribution from the 3 dimensional modelling of a 1MW class superconducting synchronous motor. Especially, the field coil composed of Bi-2223 high-temperature superconductor and the outer machine shield are modelled by finite element analysis software according to their structures and the self-inductance and Lorentz force are calculated based on the 3 dimensional magnetic field calculation. Moreover, the influence of an important parameter, synchronous reactance, has been analyzed on the machine performances such as voltage variation and output power.

Key Words: superconducting motor, magnetic field, magnetic force, 3 dimensional modelling, synchronous reactance.

1. 서 론

초전도 모터나 발전기는 전기저항이 매우 적은 초전도 계자코일의 높은 전류밀도의 통전 능력으로 기존의 회전기에 사용되는 고투자율의 철심을 사용하지 않고도, 기존의 기기보다 그 크기가 1/2~1/3 정도로 작으며 1~2%의 높은 효율을 가지게 된다. 이것은 철심을 사용하는 기존 기기의 최대 허용 자속밀도가 2T 정도이지만, 내부에 철심을 사용하지 않는 초전도기는 4~5T 정도의 높은 값까지 높일 수 있으므로 기기의 체적이 크게 감소한다. 또한, 직류를 통전하는 계자에 초전도 코일을 이용하여 기존의 동선을 이용하는 코일에서 발생하는 주열 손실인 동손(Copper loss)을 없앨 수 있으며, 철심을 사용하지 않으므로 교류자장에 의한 철손(Core loss)이 크게 줄어들어 기존 기기보다 높은 효율을 갖게 된다.

반면에 공심형의 구조로 인하여 전기자코일의 리액턴스는 줄어들게 되지만, 계자코일에서 발생하는 자장이 전기자코일과 채교되는 정도가 기존의 기기보다 크게 줄어들게 되므로 그만큼 계자에서는 높은 암페어-턴(Ampere-turns)을 필요로 한다. 따라서 철심으로 구성된 슬롯에 삽입된 기존 기기의 계자코일보다 훨씬 높은 자기장이 코일에 직접적으로 작용하고 발생하는 로렌츠 힘(Lorentz force)이 매우 커서 전자기력에 의한 초전도코일의 소손을 방지해 줄 수 있도록 지지 구조를 설계하여야 한다.

본 논문에서는 1MW 급으로 설계된 초전도모터의 계자코일에 의한 자장을 3차원적으로 해석하여 코일의 저장에너지와 인덕턴스를 산정하며 전자기적인 응력을 해석하고, 동기리액턴스의 변화에 따른 정상상태에서의 기기 특성을 해석하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 동기리액턴스의 영향 분석

Fig. 1은 동기모터의 등가회로와 페이저도(phasor diagram)를 보여준다.

여기서, E_o 는 상당 역기전력
 E_{in} 은 상당 전기자 단자 전압
 I_{an} 은 상당 전기자 전류
 R_s 는 상당 전기자 저항
 X_s 는 동기리액턴스
 δ 는 부하각
 ϕ 는 역률각

전기자 동손만을 고려한 동기모터의 출력은 다음의 식 (1)으로 주어진다.

$$P_{out} = 3E_o \cdot I_{an} \quad (1)$$

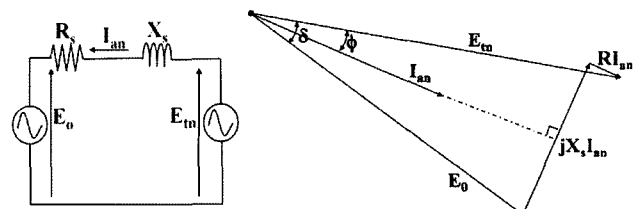


Fig. 1. Synchronous motor equivalent circuit (left) and phasor diagram (right).

¹정 회 원 : 한국전기연구원 초전도기기연구그룹

²정 회 원 : 두산중공업(주) 기술연구원

*교신저자 : skbaik@keri.re.kr

원고접수 : 2007년 2월 12일

심사완료 : 2007년 3월 14일

위의 등가회로를 바탕으로 1MW 급의 동기모터를 동기리액턴스의 변동에 따라서 특성해석을 하였다. 이 모터는 3300V의 선간 전기자 단자전압을 인가하고, 3263V의 선간 역기전력이 발생된다고 조건을 주었다. 이 역기전력 값은 Fig. 5와 6에서와 같이 해석하고자 하는 1MW 급 고온초전도 동기모터를 3차원적인 자장 해석을 통하여 계산한 값이다[1]. 전기자 코일 상저항, R_s 는 0.094 Ω 으로 두었으며 동기리액턴스는 0.1p.u에서 1.0p.u 사이에서의 값들을 주었다(기존 동기모터는 1.0p.u 정도의 값을 가지며 초전도기는 기존 동기모터보다 적은 값을 가짐). Fig. 2는 전기자 전류에 따른 출력의 변동을 보여준다. 동기리액턴스가 적을수록 정상상태시의 최대 출력은 커짐을 볼 수 있다. 즉, 초전도모터는 적은 동기리액턴스를 가지므로 상대적으로 큰 동기리액턴스를 갖는 기존 모터보다 더 높은 부하가 인가되어도 견뎌낼 수 있는 한계가 큼을 알 수 있다.

Fig. 3은 부하각 δ 의 변동에 따른 모터 출력의 변화를 보여준다. 부하각이 90°가 될 때 최대 출력이 발생됨을 알 수 있다. Fig. 4는 전기자전류의 변동에 따른 역률의 변화를 보여준다. 동기리액턴스가 적어지면 기기의 출력이 증가할 때 역률의 변동이 적음을 알 수 있다.

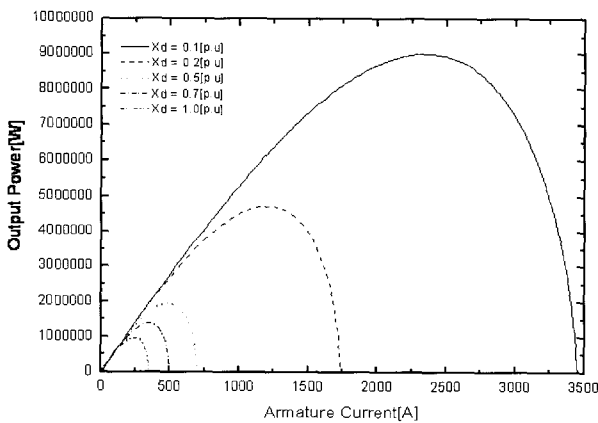


Fig. 2. Output power variation according to armature current at different synchronous reactances.

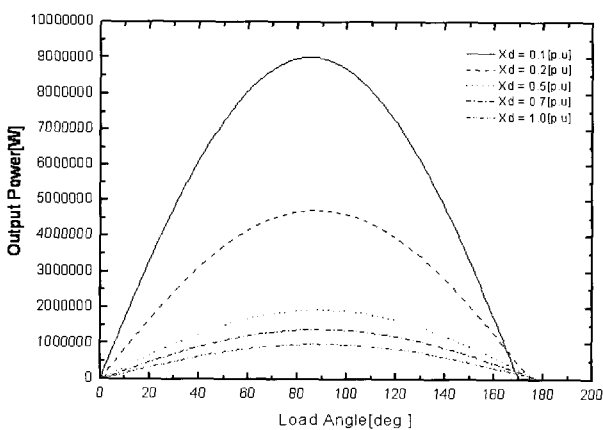


Fig. 3. Output power variation according to load angle at different synchronous reactances.

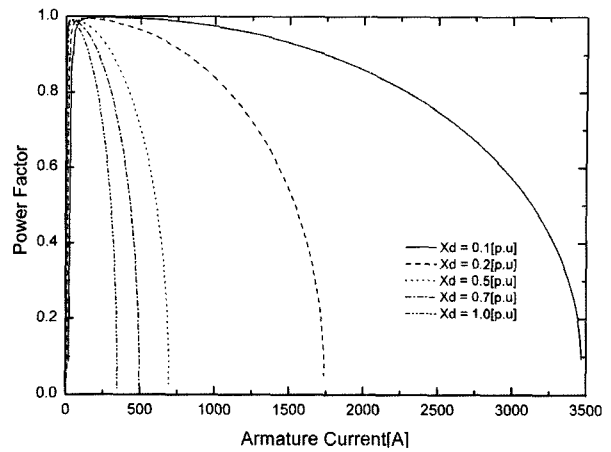


Fig. 4. Power factor variation according to armature current at different synchronous reactances.

2.2. 해석 대상 1MW 급 고온초전도 동기 모터의 구조

해석하고자 하는 고온초전도 동기 모터는 Table 1과 같은 사양을 가지고 있으며 계자코일에는 Bi-2223 고온초전도 선재를 이용하여 구성이 된다. 계자코일은 네온가스를 액화하여 냉각이 되며, 약 30K에서 초전도 상태로 150A의 동작전류를 가지도록 설계되었다. 3 차원 자장 해석의 대상이 되는 1MW 고온초전도모터의 구조를 Fig. 5와 6에 나타낸다. 3600rpm의 속도로 회전하는 동기모터이므로 계자코일(Field Coil)은 2 극으로 구성이 되며 레이스트랙(Racetrack) 형태의 팬케이크 코일(Pancake Coil)들이 적층되어 있는 구조를 갖는다. Bi-2223 테이프형 고온초전도 선재를 이용하여 제작이 되며, 한 극을 이루는 13 개의 팬케이크 코일의 턴 수와 각 부의 치수를 Table 2에 보인다. 기기의 최외각에 존재하는 기계실드(Machine Shield)는 일반 모터에 사용되는 고투자율의 구조강판으로 구성이 되며, 계자코일과 고정자코일(Stator Coil)에 의하여 발생하는 자장을 차폐시켜 주는 역할을 한다. 기계실드를 제외한 공간은 공기와 같은 투자율을 가지며, 계자코일에 150A의 동작전류를 흘렸을 때 발생하는 정자장을 해석하고 이에 따른 전자기력과 코일의 인덕턴스 등을 계산하기로 한다.

Table 1. Design Spec. of an Analysis HTS Sync. Motor.

정격용량	1MW	동기리액턴스	0.13p.u
정격속도	3600rpm	전기자 슬롯수	36
주파수	60Hz	전기자 코일 턴 수	48턴/상
극수	2극	전기자 정격전류	181.42A
정격 단자전압	3300V	전기자도체 전류밀도	7.8A/mm ²
정격 역기전력	3263V	전기자코일 동기인덕턴스	3.525mH/상
정격 역률	0.997(lag.)	전기자코일 자기인덕턴스	2.35mH/상
계자 동작전류	150A	전기자코일 저항	0.094 Ω /상
계자도체 전류밀도	115A/mm ²	전기자 냉각방식	수냉식
계자코일 턴 수	3348	계자코일 양단전압	0.1V 이하
기계실드 외경	612mm	설계 효율	97.77%

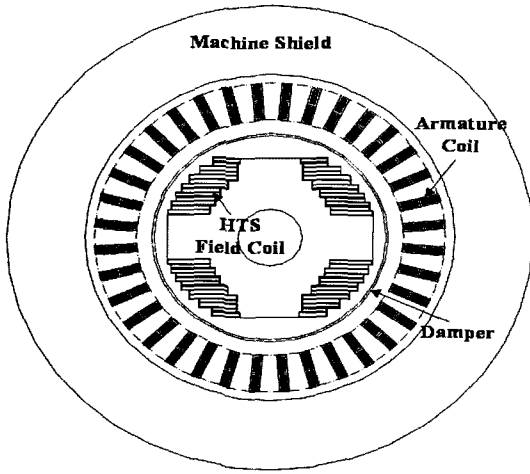


Fig. 5. Cross-section of a 1MW HTS Synchronous Motor for Analysis.

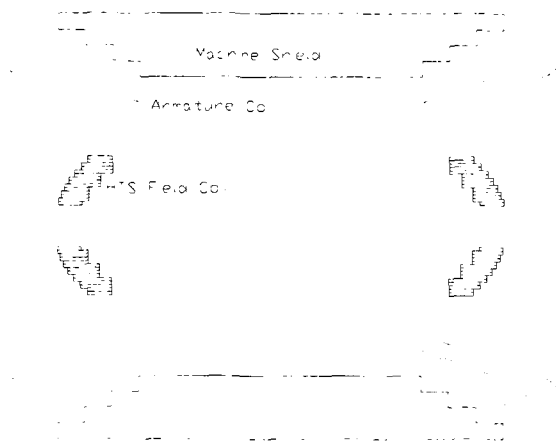


Fig. 6. Longitudinal Cross-section of a 1M HTS Synchronous Motor for Analysis.

Table 2. HTS Pancake Field Coil Construction per Pole.

팬케이크 코일 이름	코일 위치	코일 수	직선부 길이	곡선부 내반경	곡선부 외반경
SP#13	최상부	90	403mm	35mm	66.9mm
DP#12	상부 두 번째	82	403mm	38mm	66.9mm
DP#11	상부 세 번째	126	403mm	38mm	82.2mm
DP#10	상부 네 번째	126	403mm	38mm	82.2mm
DP#09	상부 다섯 번째	159	403mm	38mm	93.7mm
DP#08	상부 여섯 번째	127	403mm	49mm	93.7mm
DP#07	하부 일곱 번째	153	403mm	49mm	102.6mm
DP#06	하부 여섯 번째	126	403mm	58mm	102.6mm
DP#05	하부 다섯 번째	146	403mm	58mm	109.7mm
DP#04	하부 네 번째	129	403mm	64mm	109.7mm
DP#03	하부 세 번째	144	403mm	64mm	115.1mm
DP#02	하부 두 번째	127	403mm	70mm	115.1mm
DP#01	최하부	139	403mm	70mm	119.2mm

2.3. 1MW 급 고온초전도 모터의 3차원 정자장 해석

해석을 위해 사용된 유한요소해석 프로그램은 VECTOR FIELDS사의 OPERA-3d이며, Fig. 5, 6과 같은 자성체의 기계 실드가 존재하는 구조에 대해서 계자코일에 150A를 통전시켰을 경우 발생하는 자장을 3차원적으로 해석하였다[2]. 기계실드에 사용되는 자성체의 B-H 곡선은 Fig. 7과 같이 일반적인 모터에 사용되는 재료의 값으로 선정하였다. Fig. 8에서와 같이 자속밀도의 최대값은 2.58T이었으며 레이스트랙형의 고온초전도 코일의 곡선부 안에서 발생하였다. 발생하는 정자장에 의해서 저장되는 에너지는 식 (2)에 의해서 계산되며, 전체 영역의 1/8인 해석 영역에서 4566J이었다. 따라서 계자코일에 150A를 통전하여 발생하는 전체 저장에너지는 자장의 대칭성에 의하여 해석 영역에 저장되는 에너지의 8 배인 34,440J이며 식 (3)을 이용하여 계자코일의 인덕턴스를 구하면 3.061H 이었다[3]. 또한, 해석 영역에 존재하는 계자코일의 받는 로렌츠 힘(Lorentz force)은 X 방향으로 115,273N, Y 방향으로 -82,846N, Z 방향으로 34,087N이었다. Y 방향이 음(-)의 값을 갖는 것은 반대 축의 극에 해당하는 계자코일과의 인력에 의한 것이며, X 방향과 Z 방향의 로렌츠 힘은 코일의 바깥쪽으로 작용하게 되므로 모두 양(+)의 값을 갖는다.

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

$$L = \frac{2W_H}{I^2} \quad (3)$$

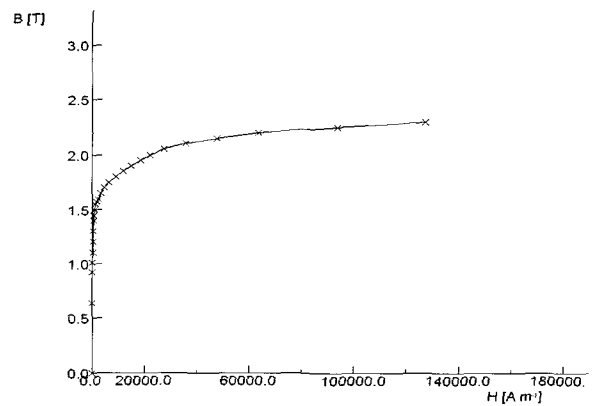


Fig. 7. B-H Curve of Machine Shield for Analysis.

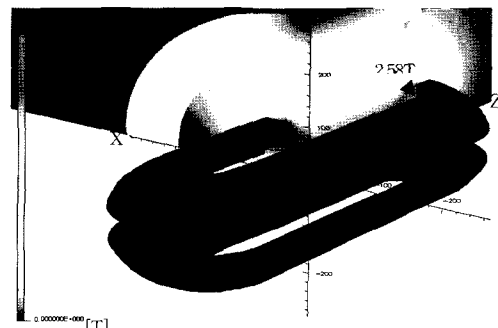


Fig. 8. Magnetic Flux Density Distribution at 150A Field Coil Excitation.

테이프 형태의 고온초전도 선재는 선재 면에 작용하는 자장의 각도에 따라 그 임계전류가 영향을 받으며 각도가 수직에 가까울수록 임계전류가 낮아진다. 코일의 임계전류를 가장 크게 저하시키는 선재면 수직방향 자장성분은 Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 코일의 직선부에서는 X 방향으로 나타나며, 그 최대값($B_{\perp max}$)은 코일의 축방향 중심부인 $Z=0$ 평면에서 1.36T으로 코일의 상부에 나타난다. 또한 전체 계자코일에 작용하는 수직 자장의 평균값($B_{\perp avg}$)은 0.52T였다. 이 값들을 기준으로 해석 대상 1MW 초전도모터 계자코일의 Load Line과 사용된 Bi-2223 고온초전도 선재의 온도에 따른 수직 자장 대 임계전류 곡선을 Fig. 10에 나타낸다. 설계된 계자코일의 운전전류는 30K에서 150A이며 임계전류 곡선의 안쪽 영역에 있음을 알 수 있다.

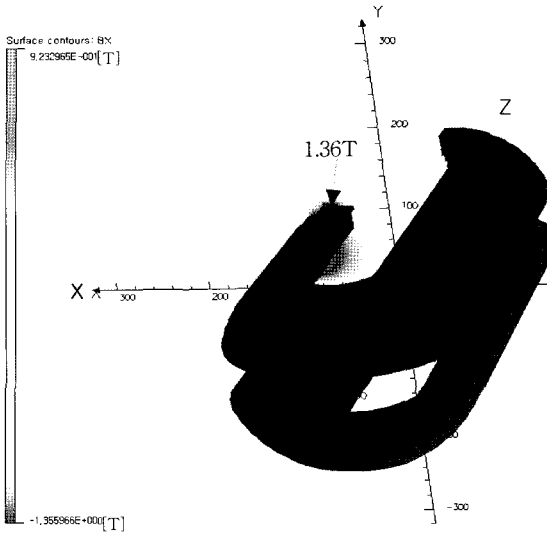


Fig. 9. X-direction Magnetic Flux Density Distribution at 150A Field Coil Excitation.

계자코일의 축방향 중심 위치($Z=0$)에서 X-Y 평면에 의한 코일의 한 쪽 횡단면(S-극)을 Fig. 11에 보여주며, 13 개의 고온초전도 팬케이크가 적층된 공간에 그림에 표시된 벡터의 크기와 방향으로 자장이 발생한다. 발생한 자장에 의해서 코일의 단면에 로렌츠 힘의 분포는 코일의 전류밀도 \vec{J} 와 이에 작용하는 자장 \vec{B} 의 벡터적으로 볼 수 있으며 Fig. 12와 같이 나타난다(여기서, \vec{J} 의 방향은 +Z 축 방향). $\vec{J} \times \vec{B}$ 의 분포를 통하여 계자코일의 한 극에 작용하는 로렌츠 힘은 반대쪽 극과 인력으로 작용하는 성분과 코일의 바깥쪽으로 작용하는 성분이 지배적임을 알 수 있다.

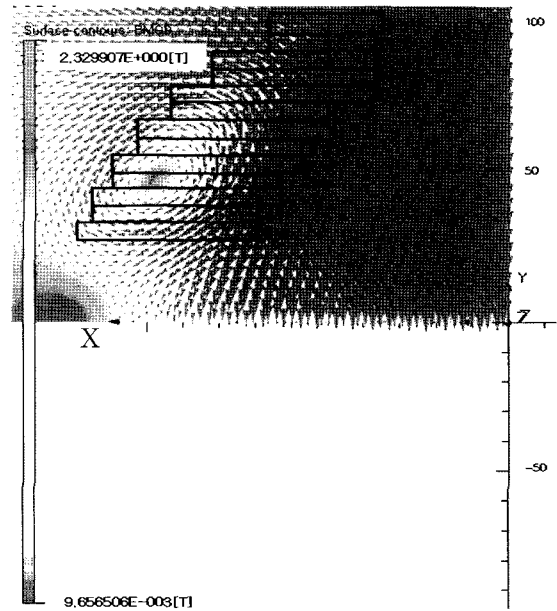


Fig. 11. Magnetic Field Distribution around Field Coil on X-Y Plane($Z=0$).

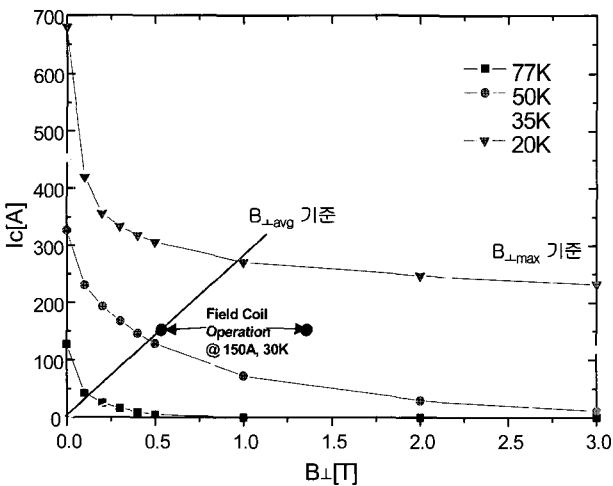


Fig. 10. Field Coil Load Lines of the 1MW HTS Motor and Magnetic Field Vs. Critical Current Curves of Superconductor.

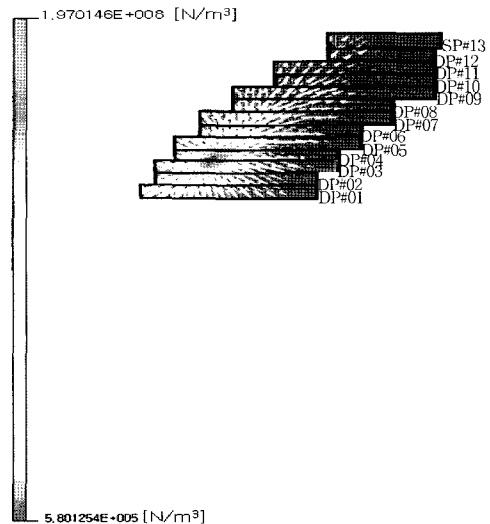


Fig. 12. $\vec{J} \times \vec{B}$ Distribution acting on Field Coil on X-Y Plane($Z=0$).

3. 결 론

동기 모터의 중요한 파라미터인 동기리액턴스의 변화에 따른 기기의 출력 특성을 등가회로를 바탕으로 해석하였다. 초전도 동기 모터와 같이 동기리액턴스가 적으면 기기가 감당할 수 있는 부하가 커지므로 안정도가 높아짐을 알 수 있었다. 또한, 3차원 유한요소해석을 통하여 1MW 급 고온초전도 동기모터의 계자코일의 자기인덕턴스와 로렌츠 힘을 계산하였다. 고온초전도 계자코일에 작용하는 자장을 성분별로 해석하여 코일의 임계전류를 가장 크게 저하시키는 코일의 선재면에 수직인 성분의 분포를 구할 수 있었으며, 코일 내부에 작용하는 로렌츠 힘의 분포를 알 수 있었다. 본 해석을 통하여 설계된 초전도 계자코일에는 발생하는 전자기력에 대응할 수 있는 외부 지지구조를 반드시 사용하여야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

참 고 문 헌

- [1] 백승규, 손명환, 이언용, 권영길, 문태선, 박희주, 김영춘, "수냉식 1MW 고온초전도 동기모터의 설계," 한국초전도·저온공학회는문지, 7권 3호, pp. 21~28, 2005년 9월.
- [2] OPERA-3d Reference Manual, Version 8.0, Vector Fields, March 2001.
- [3] William H.Hayt, JR., Engineering Electromagnetics, 5th edition, pp. 297~300, McGraw-Hill, 1989.

저 자 소 개



백승규(白承珪)
1972년 11월 19일생, 1995년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1997년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도기기 연구그룹 선임연구원.



권영길(權永吉)
1959년 7월 28일생, 1982년 부산대학교 기계공학과 졸업, 1984년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1990년 동대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 1990년~1991년 한국기계연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구원 초전도기기 연구그룹 그룹장.



이언용(李彦容)
1960년 5월 13일생, 1984년 창원기능대학 전기공학과 졸업, 1988년~현재 한국전기연구원 초전도기기 연구그룹 책임기사.



이재득(李在得)
1975년 9월 7일생, 2001년 창원대학교 공과대학 전기공학과 졸업, 2003년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정, 한국전기연구원 초전도기기 연구그룹 위촉연구원.



김영춘(金永春)
1964년 12월 26일생, 1986년 금오공과대학교 기계공학과 졸업, 1991년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 두산중공업(주) 기술연구원 책임연구원.



문태선(文泰善)
1965년 6월 3일생, 1993년 부산대학교 물리학과 졸업, 1996년 동대학원 물리학과 졸업(이학석사), 현재 두산중공업(주) 기술연구원 선임연구원.



박희주(朴希柱)
1970년 9월 25일생, 1995년 한국해양대학교 기계공학과 졸업, 1997년 동대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 현재 두산중공업(주) 기술연구원 주임연구원.



권운식(權雲植)
1976년 2월 2일생, 1998년 경상대 공과대학 기계공학과 졸업, 2004년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2002년 9월~2004년 10월 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 위촉연구원, 2004년 11월~현재 두산중공업(주) 기술연구원 주임연구원.