

고온초전도 동기모터의 계자손실 해석 및 냉각 해석

김기찬, 이대동*
한밭대학교 전기공학과

Field Loss Analysis and Cooling Analysis of HTS Synchronous Motor

Ki-Chan Kim, Dae-Dong Lee*

Department of Electrical Engineering, Hanbat National University

요약 산업현장에서 사용되는 대형 모터는 전기자권선의 절연내력 저하 및 과열문제 등으로 인하여 정지사고의 위험이 높고 산업재해의 규모가 크므로 넓은 장소의 확보가 필요하다. 따라서 기존 모터에 비해 소형, 경량이면서 절연내력이 뛰어난 대용량 모터가 요구되어지고 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다. 초전도 모터는 기존의 발전기나 모터와 같은 회전기의 계자코일을 초전도 화하여 계자의 발생을 크게 증가시킴으로서, 기기의 효율과 출력을 높이고, 소형화 및 경량화, 안정도 향상 등의 장점을 가지고 있으므로 초전도 선체의 성능을 발휘할 수 있도록 선체의 임계온도 이하로 낮추어줄 수 있는 냉각시스템의 설계 및 해석기술이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 100HP 고온초전도 동기모터의 개념설계를 통한 계자손실 해석과 냉각시스템의 저온 열전달 해석을 수행하였다. 계자손실 해석 결과, 고온초전도 선체를 사용하게 되면 균일한 공극자속밀도가 나타남을 확인하였다. 그리고 가스네온 및 액체네온에 대한 저온 열전달 해석 결과, 고온초전도 선체의 저온 안정성을 유지하기 위해서는 액체네온 1kg/min의 유량의 사용이 적합함을 확인하였다.

Abstract Large industrial motors require a large area because of the high risk of shutdown accidents and large industrial accidents due to the lowering of the dielectric strength of the armature windings and overheating problems. Therefore, there is a demand for a large-capacity motor that has small size, light weight, and excellent dielectric strength compared with conventional motors. Superconducting motors have advantages of high efficiency and output power, low size, low weight, and improved stability. This results from greatly increasing the magnetic field generation by using superconductive field coils in rotating machines such as generators and motors. It is very important to design and analyze the cooling system to lower the critical temperature of the wires to achieve superconducting performance. In this study, a field loss analysis and low-temperature heat transfer analysis of the cooling system were performed through the conceptual design of a 100-HP high-temperature superconducting synchronous motor. The field loss analysis shows that a uniform pore magnetic flux density appears when high-temperature superconducting wire is used. The low-temperature heat transfer analysis for gaseous neon and liquid neon showed that a flow rate of 1 kg/min of liquid neon is suitable for maintaining low-temperature stability of the high-temperature superconducting wire.

Keywords : Field Loss Analysis, Heat Transfer Analysis, High Temperature Superconducting(HTS), Superconducting Coil, Synchronous Motor

1. 서론

초전도 현상이 발견됨에 따라 저항손실로 인하여 발

생되는 전기기기의 손실을 줄이려는 노력이 세계각국에서 고효율 초전도전력기기의 개발로 활발히 진행되고 있다[1-2].

*Corresponding Author : Dae-Dong Lee(Hanbat National Univ.)

Tel: +82-42-821-1089 email: ldd77@hanbat.ac.kr

Received January 5, 2018

Revised February 22, 2018

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

이 중 고온초전도(HTS : High Temperature Superconducting) 동기모터 분야는 미국의 American Superconductor사와[3-5] 독일의 Siemens사[6-7] 등과 21세기 프론티어연구개발사업 등으로 인하여 많은 연구를 수행하였다[8-10].

가공제품의 고품질화 및 생산량 증대를 위해 대형모터가 산업현장에 요구되는데, 대형 모터는 전기자권선의 절연내력이나 과열 등의 문제로 인하여 정지사고의 위험이 높아 큰 산업재해를 야기하므로 이를 방지하기 위해서는 더 넓은 설치장소를 확보하여야 한다.

그러나 기존의 대형 모터에 비해 소형·경량이면서 절연내력이 뛰어난 초전도모터는 회전기의 계자코일을 초전도 화하여 계자의 발생자장을 크게 높임으로서, 기기의 효율과 출력 및 안정도 향상시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 냉각기술의 발전으로 인하여 저온초전도 시스템에 비해 냉각시스템이 간단해져 고온초전도 기술을 회전기에 적용하여 상용화시킬 수 있는 가능성을 확보하였다[11].

본 연구에서는 100HP HTS 동기모터의 기초 개념설계를 통한 계자손실 해석 및 냉각시스템의 열전달해석을 수행하였고 그 결과를 분석하였다.

2. HTS 동기모터 개념설계

HTS 동기모터의 기초설계 기술의 확보를 위하여 100HP급 HTS 동기모터를 제안하였으며 이에 따른 기본적인 사양은 Table 1과 같다. 정격용량은 100HP, 정격속도는 1800rpm, 주파수는 60Hz이며 극수는 4극으로 설정하였다. 또한 정격전압 및 정격전류는 380V 및 119A, 계자 정격전류는 100A로 동작하도록 하였다. 고온초전도체를 동기모터에 사용하는 경우 권선은 Double Pancake형 코일을 이용하는 것이 가장 일반적이므로 Table 2와 같이 HTS 동기모터의 계자권선도 소형화를 위하여 6층의 Double Pancake를 이용하여 감았으며, 1층에서 6층까지의 턴 수는 최소 37턴에서 최대 132턴까지 계자권선의 형상을 고려하여 감았다.

또한 코일형상은 Racetrack형으로 설계하였으며, 초전도 권선 시에 발생할 수 있는 장력의 불균형으로 인한 선체의 움직임을 방지할 수 있도록 하였다.

Table 1. Design specifications of the HTS synchronous motor

Items	Design Specification
Rating capacity	100HP
Rating speed	1800rpm
Frequency	60Hz
Pole number	4
Rating voltage	380V
Rating current	119A
Field Rating current	100A

Table 2. Distribution of turn number for HTS field winding

Items	Design Specification
Wire material	BSCCO-2223
Coil shape	Racetrack type
winding types	Double Pancake type
Operating current of coil	100A
Number of phase turns	500
Number of turns 6 layer Pancake	37
Number of turns 5 layer Pancake	68
Number of turns 4 layer Pancake	60
Number of turns 3 layer Pancake	106
Number of turns 2 layer Pancake	97
Number of turns 1 layer Pancake	132

Fig. 1은 100HP HTS 동기모터의 전체도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 고온초전도 동기모터는 회전자부와 고정자부 및 초전도 상태를 유지할 수 있도록 냉매를 공급할 수 있는 냉각장치부로 크게 나눌 수 있다. 냉각 부는 고온초전도체가 적용됨에 따라, 고온초전도 성능을 유지하기 위한 장치로, 크게 냉각을 위한 냉매의 온도를 일정하게 유지하고 비등된 냉매를 액체 상태로 다시 재 응축하여 공급하는 냉동기를 중심으로 하는 부분과 냉동기로부터 주입된 냉매가 계자권선의 초전도체를 효과적으로 냉각시킬 수 있도록 계자권선부에 구성된 Cryostat부로 나누어진다.

HTS 권선용 회전자 부분은 동선 대신에 고온초전도 탭퍼, 고온초전도 계자코일, 계자코일지지 및 액체네온 저장부, 계자코일 이탈방지 내통, 회전자에서 발생하는 동력을 전달할 수 있는 토크튜브로 구성하였으며 회전자의 총 길이는 816mm, 직경은 317mm로 구성하였다. 여기서 회전자외통은 SUS303을 소재로 구성하였다. 또한,

댐퍼의 소재로서는 알루미늄이 적당한 것으로 판단되므로 본 모델의 개념설계에서도 알루미늄 소재로 선정하였다.

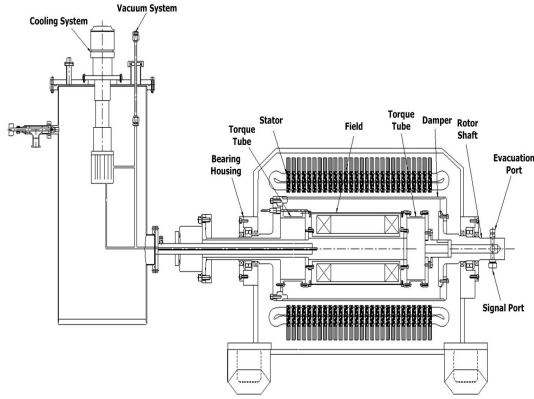


Fig. 1. Conceptual design of 100HP HTS synchronous motor

3. HTS 동기모터 계자손실 해석 및 냉각해석

3.1 계자손실 해석

Fig. 2는 HTS 동기모터의 계자손실 해석모델을 나타내고 있으며 전동기 극수는 4이고, 전기자의 정격전류는 119Arms, 계자권선의 정격전류는 100Adc이며, 차폐층의 재질은 탄소강인 S23으로 구성되었다. 본 연구에서 전자장 해석은 정상상태의 특성해석이므로 계자권선은 동기속도로 회전하고 있으므로 댐퍼층의 와전류 발생을 고려할 필요가 없으므로 회전자는 초전도 코일만으로 모델링하였다.

전기자는 철심의 포화 때문에 철심이 없는 공심구조를 구조를 가지고 있으며, 초전도체의 교류손실 때문에 전기자권선은 구리도체를 사용하였다. 본 연구에서는 HTS 모터의 전자기적 특성을 해석하기 위해서 2차원 유한요소법 상용프로그램인 Flux-2D를 사용하였고 정상상태에서의 전자기적 분포를 해석하여 모터의 토크를 계산하는 것으로 국한하였다.

Fig. 3은 전기자 반작용의 영향이 없고, 초전도 권선에 의한 모터의 전자기 특성을 해석한 결과로 계자코일만 인가했을 때의 공극에 나타나는 자속밀도 분포이며 상단부터 공극자속밀도, 공극자속밀도의 x 성분 및 y 성분을 나타내고 있다.

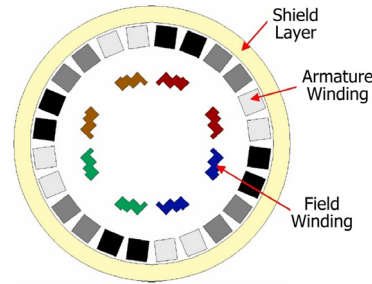


Fig. 2. Analysis model of HTS synchronous motor

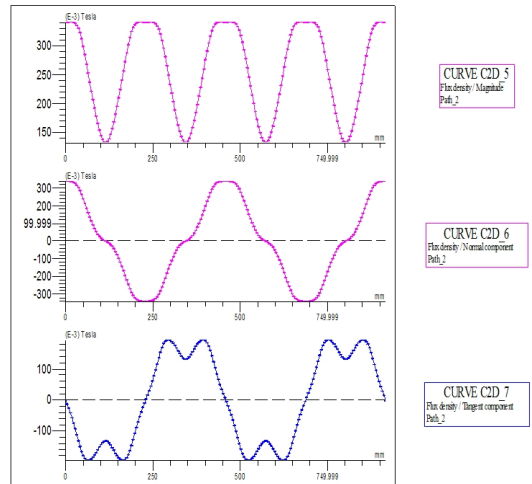


Fig. 3. Distribution of air-gap flux density(no-load)

초전도모터의 내부에는 철심이 없어서 자기포화 현상이 없으며 슬롯이 없으므로 균일한 공극자속밀도가 나타나고 있다. 해석결과 계자권선에 의한 최대자장은 0.805T이고, 초전도 코일에 수직방향으로 작용하는 자장은 0.68T로 나타나 임계자장과는 많은 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 초전도 계자권선과 전기자 권선에 전류가 인가되고, 토크 각이 90도를 이루고 있을 때의 전자기 특성을 해석한 결과로 Fig. 4는 등 포텐셜과 자속밀도에 대한 해석결과이며 Fig. 5은 전기자 반작용이 작용할 때의 공극에 나타나는 자속밀도 분포를 나타내고 있다. Fig. 5에서는 상단부터 공극자속밀도, 공극자속밀도의 x 성분 및 y 성분을 나타내고 있다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 초전도모터의 전기자에 전류가 흐르므로 전기자 반작용에 의해서 공극자속밀도가 왜곡되는 것을 알 수 있다.

해석결과 전기자 반작용이 작용할 때 정상상태에서

초전도 코일에 수직방향으로 작용하는 자장은 0.69T로 나타나고 있으며, 최대자장은 0.808T로 해석되었다. 초전도 선재는 액체 네온을 냉매로 사용하는 경우 임계전류가 200A이다. 전기자 전류에 의한 기자력과 초전도 권선에 의한 자속이 이루는 각도, 즉 토크각이 90도인 경우 계산된 토크는 1454Nm이며, 출력은 147HP이다. 초전도모터의 정밀해석을 위해서는 3차원 해석이 필요하므로 더 세밀한 분석이 필요하나 2차원 전자장 해석결과만으로 판단할 때 설계된 초전도모터는 길이방향의 설계여유가 있음을 확인할 수 있었다.

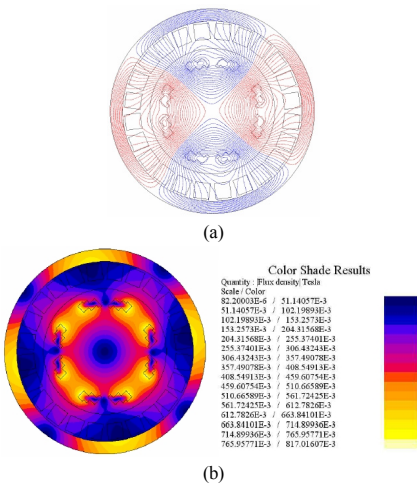


Fig. 4. Distribution of equipotential and flux density (torque degree=90)
(a) equipotential distribution (b) flux density

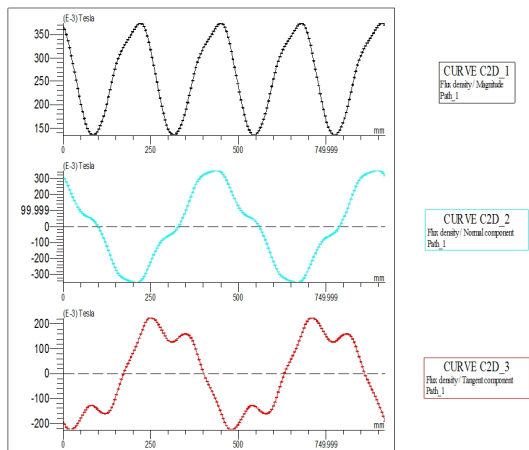


Fig. 5. Distribution of air-gap flux density (torque degree=90)

3.2 냉각 해석

HTS 모터의 성능을 발휘하기 위해서는, 초전도 선재의 온도를 33K로 유지시켜 주어야 하며, 이를 위하여 적절한 방식의 냉각장치를 구성하여야 한다.

냉각방식은 극저온 냉동기를 통하여 냉각유체가 초전도모터의 회전자부로 유입되며, 전도 냉각을 통하여 초전도 계자코일 부를 냉각하여 저온으로 유지시켜준다. Fig. 6은 설계된 HTS 모터의 회전자 단면 및 냉각구조를 나타낸 것으로 냉매 공급 관을 통하여 액체네온이 회전자 내부로 유입되며, 유입된 액체냉매는 전동기의 원심력으로 벽면으로 밀착된다. 밀착된 액체네온은 벽면에서 열 교환을 통하여 기체로 상변화 되어, 냉매가 유입된 통로를 통하여 기체 상태로 배출된다. 한편, 외부 고온부와 내부 저온부 사이를 열적으로 단열시키기 위하여 진공단열층을 두거나 기계적 실드 방법으로 단열을 시켜 외부로부터의 열침입을 최소화 한다.

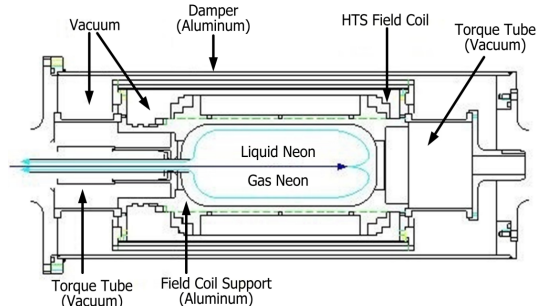


Fig. 6. Rotor structure and cooling route of HTS motor

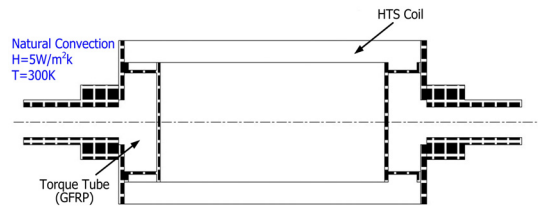


Fig. 7. Boundary condition for heat invasion calculation of HTS motor

초전도 계자코일의 운전온도에서 외부로부터의 열 침입량을 계산하기 위하여, Fig. 7과 같은 모델을 설정하였으며, 경계조건은 다음과 같다. 회전자의 축 외부는 상온으로 가정하였으며, 이때의 자연대류 열전달 계수 $H=5W/m^2K$ 로 설정하였다. 한편, 축 부로 인한 열침입량은 토크튜브의 재질, 길이 및 두께에 따라 큰 차이를 보

이며, 재질은 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics), 길이는 117mm 및 두께는 3mm이다.

Fig. 8은 냉매로 가스네온 및 액체네온을 사용할 시 냉각유량에 따른 HTS 전동기의 회전자 코일부의 평균 온도 변화이다. Fig. 8(a)은 가스 네온을 사용할 시 15, 30, 60, 120, 240 kg/min으로 냉각유량을 변화시킬 때의 온도변화를 나타낸 것으로, 초전도 계자코일의 작동온도인 33K를 만족하기 위해서는 120kg/min의 유량이 요구됨을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 8(b)는 액체네온을 사용할 시 0.1, 1.0, 1.5, 2.0 kg/min으로 냉각유량의 변화에 따른 온도변화로 1kg/min의 유량이 요구됨을 확인할 수 있다.

위의 해석결과로부터 시스템의 사용 환경, 극저온 냉동기의 사양 및 성능에 따라 적절한 냉매를 이용한 냉각 시스템을 설치하여야 하며, 가스네온인 경우 120kg/min을 만족시키기 위해서는 고속의 가스공급이 요구되므로 이를 위한 Blower 선정에 어려움이 예상된다. 따라서 시스템의 안정적인 운영을 위해서는 액체네온을 이용하는 방법을 추천한다.

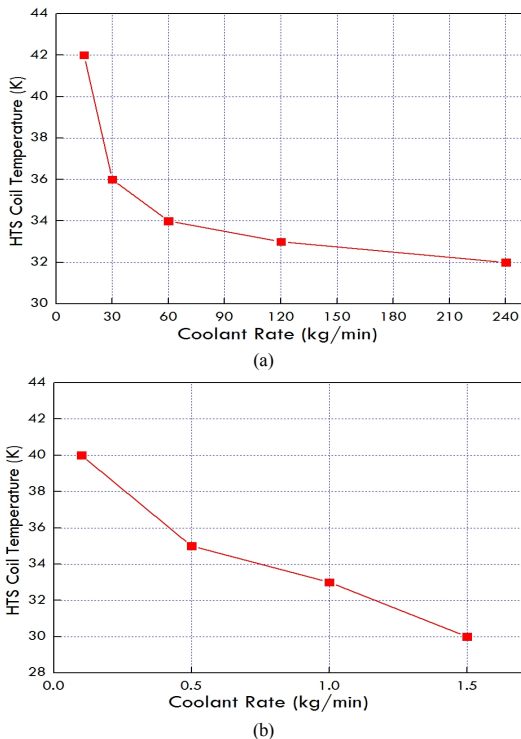


Fig. 8. Temperature changes of HTS field coil (a) gas neon amount (b) liquid neon amount

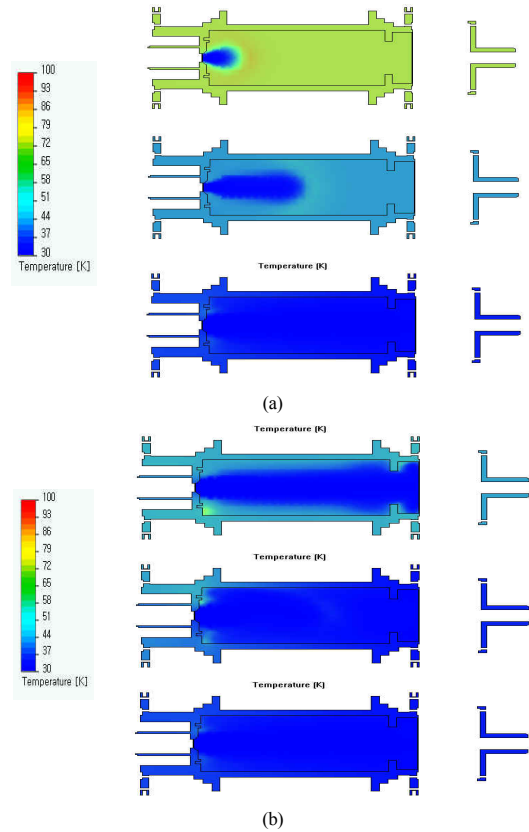


Fig. 9. Thermal stabilization process of HTS motor rotor (a) gas neon(120kg/min) (b) liquid neon(1kg/min)

Fig. 9는 열전달 해석 결과로써, 냉매를 가스네온 및 액체네온을 이용할 시, 시간이 지남에 따라 회전자부의 열적 안정화 과정 후 온도분포를 나타낸 것이다. Fig. 9(a)와 같이 가스네온을 사용하였을 때보다 Fig. 9(b)와 같이 액체네온을 사용하게 되면 회전자부의 열적 안정도가 높아 냉매재질로서 액체네온이 더 적합함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 전자장 해석을 통한 100HP HTS모터 기초 개념설계를 수행하고 계자손실해석 및 냉각해석을 수행하였으며 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 개념설계를 통해 전체 6층의 Racetrack형 Double Pancake Type의 고온초전도 계자권선을 설계하였으며, 전기자로부터의 교류자장 방지용 댐퍼와 냉각을 유지하기 위한 회전체 Cryostat을 설계하였다.

- (2) 전자장 수치해석을 통해 고온초전도 선재 표면에 수직으로 작용하는 자장이 최대 0.808T로 나타남을 확인하였고, 철심을 사용하지 않음으로 인하여 균일한 공극자속밀도가 나타남을 확인하였다.
- (3) 냉각시스템의 열전달 해석을 통해 100HP HTS 모터에 적용되는 고온초전도 선재의 저온 안정성을 유지하기 위해서는 액체네온이 적합하며 이를 이용할 경우 1kg/min의 냉각 유량이 필요함을 확인하였다.

References

[1] B. Gamble, G. Snitchler and T. MacDonald, "Full Power Test of a 36.5 MW HTS Propulsion Motor," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 1083-1088, June, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2093854>

[2] T. Yanamoto, M. Izumi, M. Yokoyama and K. Umemoto, "Electric Propulsion Motor Development for Commercial Ships in Japan," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2333-2343, December, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2495134>

[3] J. P. Voccio, B. B. Gamble, C. B. Prum and H. J. Picard, "125 HP HTS Motor Field Winding Development", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 7, no. 2, pp. 519-522, June, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1109/77.614555>

[4] D. Aized, B. B. Gamble, A. Sidi-Yekhlef, J. P. Voccio, D. I. Driscoll, B. A. Shoykhet and B. X. Zhang, "Status of the 1,000 hp HTS Motor Development", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 9, no. 2, pp. 1197-1200, June, 1999.
DOI: <https://doi.org/10.1109/77.783514>

[5] G. Papst, B. B. Gamble, A. J. Rodenbush and R. Schöttler, "Development of synchronous motors and generators with HTS field windings", *Superconductor Science and Technology*, vol. 10, no. 12, pp. 924-926, December, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/10/12/013>

[6] G. Nerowski, J. Frauenhofer, G. Ries, W. Nick and H.-W. Neumüller, "Advances and Prospects of HTS Rotating Machine Development at Siemens", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Denver, USA, June 6-10, pp. 1-4, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2004.1373240>

[7] M. Frank, J. Frauenhofer, P. van Hasselt, W. Nick, H.-W. Neumüller and G. Nerowski, "Long-Term Operational Experience With First Siemens 400 kW HTS Machine in Diverse Configurations," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 13, no. 2, pp. 2120-2123, June, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2003.813013>

[8] S. K. Baik, M. H. Sohn, E. Y. Lee, Y. K. Kwon, T. S. Moon, H. J. Park and Y. C. Kim, "Effect of Synchronous Reactance and Power Factor on HTS

Synchronous Machine Design and Performance," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 16, no. 2, pp. 1489-1492, June, 2006.

DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.864460>

[9] H. M. Kim, Y. S. Yoon, Y. K. Kwon, Y. C. Kim, S. H. Lee, J. P. Hong, J. B. Song, and H. G. Lee, "Design of Damper to Protect the Field Coil of an HTS Synchronous Motor," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 3, pp. 1683-1686, June, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2009.2017842>

[10] S. K. Baik and G. S. Park, "Load Test Analysis of High-Temperature Superconducting Synchronous Motors," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1683-1686, June, 2009. Art. no. 5206604, June, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2530662>

[11] R. Sato, B. Felder, M. Miki, K. Tsuzuki, H. Hayakawa and M. Izumi, "Helium-Neon Gas Mixture Thermosyphon Cooling and Stability for Large Scale HTS Synchronous Motors," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, Art. no. 5200704, June, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2013.2241592>

김기찬(Ki-Chan Kim)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 ~ 2005년 1월 : 현대중공업 기계전기연구소 선임연구원
- 2008년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2009년 1월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전기기기 및 제어, 전기자동차 구동시스템

이대동(Dae-Dong Lee)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한밭대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2014년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 조교

<관심분야>

고속철도, 전기화차 진단