

친환경적인 에너지 활용을 위한 저속형 5MW급 고온초전도 모터 개발

김 영 춘
두산중공업(주) 기술연구원

1. 서 론

최근 전 세계적으로 에너지의 공급 문제와 환경 문제에 대한 관심이 높아지고 있고, 선진 각국에서는 고효율의 친환경적인 에너지 공급 및 이용 기술, 그리고 효율적인 에너지 절약 기술 개발을 적극적으로 추진하고 있다. 이러한 요구중 해상 수송부분에서 전기 모터로 프로펠러를 회전시키는 전기추진 선박에 대한 관심과 수요가 증가하고 있다. 이러한 전기추진 선박은 이미 크루즈선이나 LNG선, 함정 등을 중심으로 급속하게 보급되고 있으며, 에너지 절약과 더불어 온실가스 저감 등에서 큰 위력을 발휘하고 있다.

이러한 에너지 효율향상 및 친환경 신재생 에너지에 대한 핵심기술을 개발하기 위한 구체적인 전략 가운데, 초전도 응용기술의 활용이 세계 주요 국가들 사이에서 꾸준히 추진되고 있다. 전기저항이 없어 손실 없이 기존 구리선에 비하여 수십~수백 배에 이르는 높은 전류를 흘릴 수 있는 초전도 기술의 특성은 기존 전기기기 시장의 패러다임을 바꿀 만한 혁신적인 기술이다.

전기추진장치로서 초전도 모터는, 효율과 에너지밀도가 크게 증가하므로, 기존 철심을 사용하는 상전도 모터 대비 고출력, 소형/경량화가 가능해져서, 선박 내 배치의 유연성이 대폭 증가하며, POD 시스템 적용에 유리한 점 등 많은 이점을 들 수 있다. 또한, 친환경 신재생 에너지 중 현재 가장 활발한 시장이 형성되고 있는 풍력발전 시스템에 초전도 발전기의 도입도 활발한 논의와 연구가 전세계적으로 진행되는 있는 상황이다.

이 글에서는 이러한 친환경적인 에너지 활용을 위한 고온초전도 모터 개발에 있어, 연구개발 과정에 대한 간략한 소개, 개발과정 중에 얻은 구체적 연구성과, 그리고 향후 활용과 전망에 관하여 기술하고자 한다.

2. 고온초전도 모터의 연구 개발 경과

정부는 2001년부터 교육과학기술부 주관으로 21세기 프론티어연구개발사업에서 초전도 분야의 국가적 기술력 제고를 위해 차세대 초전도응용기술개발사업단 (CAST, Center for Applied Superconductivity Technology)을 설치하고, 국내 초전도 전력기기 산업의 육성을 위한 개발(DAPAS, Development of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies)을 통해서 단기간에 눈부신 연구개발 성과를 거둘 수 있었다.

두산중공업에서는 2003년부터 회사의 미래 전략사업분야 기술 및 제품을 개발하기 위해 대덕 연구단지에 미래사업기술개발센터를 설치하고, 초전도응용분야 중 초전도 발전기/모터를 전략과제로 선정하여 적극적인 투자를 지속하며 차세대 발전기 및 모터 개발에 부단한 노력을 경주하고 있다. 이를 위해서, 두산중공업은 초전도응용기술개발사업(DAPAS)중 고온초전도 모터 개발에 참여하여 협력기관인 전기연구원과 유기적이고 밀착된 기술협력을 통해서 1단계 개발에서 75kW급 모터 개발을 성공(2004년)하였고, 이어 2단계에서 추진하였던 1MW급 초전도 모터 개발도 성공(2007년)하였다.

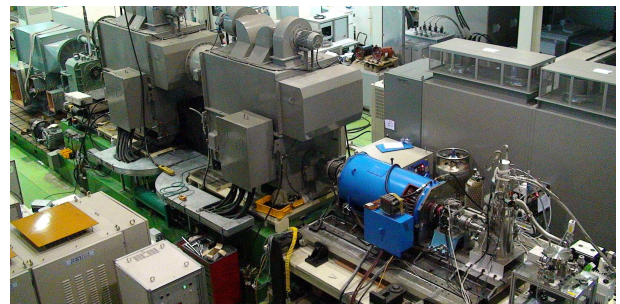


그림 1. 1MW급 초전도 전동기 부하시험장면.



그림 2. 5MW급 초전도 전동기 부하시험 준비.

이러한 1단계와 2단계의 모터 개발단계를 거치는 동안 두산중공업은, 초전도 모터의 상용화를 위한 제반 핵심기술인 초전도 회전기의 최적 설계 및 해석 기술, 극저온 회전자의 냉각시스템, 단열 구조 설계 및 제작기술, 고자장 초전도 도체 기술 등이 확보할 수 있었다. 이로 인해 초전도 모터에 있어서 해외 선진사와의 기술 격차 또한 현저하게 좁아졌다. 그리고, 2011년 3월에 완료된 최종 3단계 저속형 5MW급 고온초전도 모터 개발에 이르러서는, 1G HTS 선재에 비해 가격이 저렴하고 자장에서의 특성도 우수한 2G 선재를 채용하여 세계 최대 용량과 최고성능의 고온초전도 모터 개발을 고성능/저비용으로 실현할 수 있었다.

3. 초전도 모터 개발에 따른 연구성과

본 고온초전도 모터는 최초 기획 단계부터 상용화를 목표로 하였기 때문에, 각 개발 단계를 수행하면서 대용량 초전도 모터에 필요한 설계 및 제작에 소요되는 제반 핵심기술역량을 체계적으로 확보해 갈 수 있었다. 이러한 핵심기술역량은 다음 몇가지로 요약할 수 있다.

첫째, 대용량 초전도 모터 설계 프로그램 개발을 들 수 있다. 초전도 모터는 회전하는 계자코일을 초전도 상태로 유지시키기 위한 냉각시스템과 단열구조가 반드시 필요하므로, 기존 회전기에 비해서 회전자와 고정자 코일 사이의 공극이 수십배 커진다. 그래서, 이러한 초전도 모터는 기존 모터의 전자기적 설계에서 일반적으로 사용하는 모터의 단면부만을 고려한 2차원 해석만으로는 해석 오차가 커지게 되는데, 정확한 설계와 동특성 해석을 위해서는 3차원 수치해석을 통한 설계가 요구된다. 그러나, 3차원 수치해석은 정확도가 높지만, 해석시간이 2차원 수치해석에 비해서 긴 단점을 가지고 있다. 그래서, 새로 개발한 초전도 모터 설계 프로그램에서는 3차원 등가 자기회로방법을 적용시킨 자체 해석 프로그램을 구현하여 이러한 단점을 보완하였고, 효율적인 설계 프로세스를 확립하였다.

둘째, 대용량 냉각시스템 설계 기술을 확보할 수 있었다. 1, 2단계의 고온초전도 모터에서는 냉매를 자연 순환시키는 thermo-syphon 냉각방식을 채용하였다. 그러나, 3단계의 저속형 5MW 모터의 경우, 1, 2단계에서 개발한 모터에 비해 모터용량이 커지면서 모터의 부피 또한 증가하게 되어 thermo-syphon 냉각방식으로는 초전도 코일의 균일한 냉각이 거의 불가능하였다. 따라서, 대형 초전도 응용기기에서 균일한 냉각이 가능한 극저온 냉매의 강제 순환형 냉각 방식을 새로 고안하여 냉각 시스템에 적용하였다. 여기서, 저유량 구간에서 불안정성을 가지는 기존의 원심형 극저온 액체 펌프 대신 자체 개발을 통해서 저렴한 재생터빈 방식의 극저온 액체 펌프를 적용하였고, 냉각에 필요한 냉매의 순환 유량도 줄게 되었다. 이로 인해 5MW 고온초전도 모터 냉각 시스템의 높은 신뢰성과 경제성을 얻을 수 있었다.

셋째, 개발된 모터의 획기적 경량화 구현하기 위해 고정자 부분을 모듈형 복합재 공심으로 설계하여 5MW 고온초전도 모터에 적용하였다. 초전도 모터의 계자코일은 높은 전류 밀도로 운전하게 되므로, 코일의 기자력에 의한 공극자속밀도는 전기자 철심의 포화 자속 밀도를 훌쩍 넘어서게 된다. 그래서, 초전도 모터는 계자와 전기자 코일 모두 철심이 없는 공심(air-core)형태가 적용된다. 저속형 5MW 고온초전도 모터에서는 공기와 투자율이 같은

비자성체이면서 탄소강에 비해서 매우 가볍고 질긴 복합재인 GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics)를 이용하여 고정자에 위치하는 전기자 코일을 지지하는 구조로 설계하여 제작하였다. 이와 더불어서 고정자 및 전기자 코일의 형상 설계 과정중 모터의 효율 개선을 위한 몇 가지 노력이 추가되었다. 모터의 용량이 증가하면서 전기자 코일의 동손에 의한 발열량 또한 증가하고, 이로 인해 전기자 코일 도체 온도가 상승하며 전기자 저항이 커지게 되는 악순환이 거듭되면서 전기자의 동손은 더욱 커지게 된다. 이러한 전기자 코일의 동손에 의한 발열을 냉각하기 위해서 공냉이 가능한 모듈화된 전기자 구조 및 전자기 철드에 수냉 방식을 적용시켜 고정자 내부가 안정적으로 냉각되도록 고려하였다. 또한, 전기자 코일은 eddy current 손실을 줄이기 위해서 도체를 소선화하고 원가 절감을 위해 평각 동선을 사용하는 등 제작과정 및 운전상의 경제성도 확보하였다.

넷째, 고온초전도 모터의 가장 핵심이라고 할 수 있는 계자코일의 제작 프로세스 확립이다. 고온초전도 선재로 권선되는 계자코일의 안정된 제작과 향후 사업화를 위해서, 권선 작업의 표준화와 코일 부품의 규격화, 그리고 코일 성능평가를 위한 체계적인 품질 검사 항목을 선정하였다. 이로 인해 거의 동일한 전자기적인 특성을 가지는 계자코일이 제작될 수 있었다.

다섯째, 이렇게 제작된 모터의 전체적인 성능 평가를 위해서 대용량 초전도 모터 장기 실증평가 설비를 구축하였다. 국내의 경우, 한국전기연구원을 비롯한 몇몇 기관에서 모터 및 발전기 시험설비를 구비하고 있으나, 본 과제에서 개발한 대용량 고온초전도 모터의 장기간 연속적으로 시험 및 평가할 수 있는 설비를 갖춘 기관이 거의 없으며, 미국의 CAPS 정도가 5MW급 초전도 모터 신뢰성 시험 설비를 보유하고 있다. 개발과정에서 두산중공업은 사내에 6MW까지 장기 신뢰성 시험 및 평가가 가능한 부하 및 제반 시험 설비를 구축하였다.

이러한 고온초전도 모터 개발중에 얻을 수 있었던 핵심기술역량들은 기술 및 가격 경쟁력과 설계/제작의 표준화 및 품질 개념의 정립을 통한 RAMS (Reliability, Availability, Maintainability, Serviceability)가 확보된 상용화

모델의 개발을 위한 것이었다.

4. 초전도 모터의 향후 활용과 전망

이러한 초전도 모터의 개발 성과로 인해 예상되는 향후 활용과 전망은 크게 선박용 초전도 전기추진체계와 해상용 대형 풍력발전 시스템에서의 활용으로 나눌 수 있다. 이는 미국의 AMSC, 독일의 Siemens, 영국의 Converteam 및 일본의 IHI, Kawasaki 등의 선진사들의 개발 목표 및 추이를 보아도 명확하게 알 수 있다.

기존 선박의 전기 추진체계에서 발전기와 모터를 초전도 기기로 대체하면, 손실률이 10%이하로 낮아지게 된다. 또한, 예상되는 이점은 선박의 추진효율 증대, 추진체계의 경량화 및 소형화로 에너지 손실이 기존의 디젤 엔진보다 감소된다는 것이다. 이러한 초전도 발전기와 모터의 활용으로 인한 에너지 절약과 CO₂ 배출량 감소는 2025년 기준 연간 10.8TWh의 에너지절감 효과와 1.6Mts수준의 탄소저감효과를 기대할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

DAPAS 사업에서 고온초전도 모터 개발 과제가 종료된 이후에도 대형국책과제로서 10MW이상급 초전도 모터 개발이 추진되고 있고, 이를 위해서 이미 군산연의 관련 기관으로 구성된 협의체가 운영되고 있다.

이 협의체를 통해 선박내 전력공급용 발전기와 선박추진시스템용 초전도 모터를 적용하기 위한 선행과정으로, 초전도발전기/모터의 개발 현황을 공유하고 실증 및 적용방안을 도출하기 위한 협의를 진행하고 있다. 또한, 선박의 전력공급시스템용 초전도발전기 사업화를 위한 개발을 계획하고 있다.

한편, 또다른 초전도발전기/모터의 활용 방안으로 풍력발전 시스템이 거론되고 있다. 최근 강조되고 있는 녹색기술과 신재생에너지에 대한 거센 요구로 인해 풍력발전기는 가장 활발한 시장이 형성되고 있는 상황이다. 풍력발전 시스템의 경우, 풍력발전기의 효율향상을 위해 대형 해상 단지화 추세와 더불어, 대용량기의 개발에 대한 요구가 급속하게 증대되고 있다.

하지만, 현재 해결해야 하는 당면 과제로서, 나셀에 채용할 수 있는 발전기의 무

계와 부피로 인해서 발전 용량에 한계가 있고, 발전 효율을 향상시키기 위한 증속기가 필요하다는 것이다. 이러한 풍력 시스템에 초전도 발전기를 적용하게 되면, 증속기가 필요 없어 구조가 간단해지고, 초전도 전력기기의 장점인 고에너지밀도 구현으로 인한 기기의 소형화 및 경량화가 가능해진다. 또한 초전도 발전기는 철손과 동손이 거의 없으므로, 고효율 대형 해상 풍력 발전 시스템의 기술적 대안으로 활용될 전망이다.

5. 결 론

이상 DAPAS 사업의 대표적인 연구성과로서, 2G 고온초전도 선재로 제작된 세계 최대 용량과 최고 성능을 자랑하는 저속형 5MW 고온초전도 모터의 개발과정, 연구성과, 그리고 향후 활용과 전망을 보았다. 고온초전도 발전기 및 모터는 기존 상전도 발전기 및 모터에 비해서 소형/경량화와 고효율이란 장점을 가지고 있다. 앞으로 친환경적인 에너지 활용을 위해서 전기추진 선박 및 풍력 발전에 대한 시장의 요구는 더욱 거세질 전망이다. 그리고, 이러한 시장에 필요한 기기의 대용량화로 인해 초전도 발전기 및 모터의 경제성과 효용이 더욱 향상되면서 기존 상전도 기기를 대체해 나갈 것으로 예상된다. 이러한 초전도 기기의 도입은 에너지 사용 합리화를 위한 기술 전략의 일환으로 친환경 에너지 활용의 국제적인 대안이 될 것으로 기대된다.

저자이력



김영춘(金永春)

금오공대 기계공학과, KAIST 기계공학과 공학박사, 현재 두산중공업(주) 기술연구원 수석연구원