

두산중공업 초전도 사업 현황

김 영 춘
두산중공업(주)

1. 서 론

현대 문명의 에너지 소비가 과도하여 에너지 고갈에 대한 우려로 여러 가지 다양한 신재생 에너지에 대한 개발이 이루어지며, 심지어 2010년 일본 후쿠시마 핵발전소 붕괴 사태로 일본의 경우처럼 에너지사용의 절약을 넘어 극단적인 제한이 이루어지는 상황이 발생하기도 한다. 현대 산업문명이 고도화는 엄청난 전력 사용량의 증가함에 따라 고효율 대용량 전기기기에 대한 요구뿐만 아니라, 지구 온난화와 자연재해 같은 환경문제와 에너지고갈 등에 대한 문제에 대한 대비가 필요하다는 의식이 높아지고 있는 것이 현실이다.

미국의 경우 전체 생산된 전기에너지 중 대용량 모터에 의한 전기 소비량이 30%를 넘어서고 있으며, 기존 대용량 모터의 효율을 약 2%정도 향상시킬 경우, 연간 20억 달러 가량의 절약효과를 기대할 수 있다. 또한, 전기에너지 생산의 60%~70%에 달하는 석탄, 석유, LNG 등 화석연료의 사용량을 줄여 지구온난화의 주원인인 CO₂ 배출량을 감축하기 위해서도 고효율 대용량 모터의 사용이 요구되고 있다.

한편, 신재생에너지의 가장 대표적인 대안이라 할 수 있는 풍력발전의 경우 점차 대용량 발전기를 적용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있는데, 풍력발전의 특성상 100m 이상의 높은 위치에 나셀을 설치해야하기 때문에 나셀의 중량이 전체 건설비용을 좌우하게 되므로 나셀에 설치되는 시스템의 중량을 줄이는 것이 매우 중요하게 된다. 따라서, 고효율 대용량의 직접구동 발전기를 적용하는 등 시스템을 경량화 하는 기술 개발이 풍력발전의 과제로 부상되었으며, 가장 유력한 대안 중의 하나로 초전도기술을 적용한 직접구동형 풍력발전기에 대한 기대가 높아지고 있는 상황이다.

이와 같이 고효율 대용량의 모터/발전기에

대한 필요성이 증대함에 따라 초전도선재를 이용한 고효율 대용량 회전기기에 대한 개발이 요구되고 있으며, 미국, 유럽을 비롯한 전문기업을 중심으로 개발을 마무리해 가는 중이다.

초전도 선재는 저온 초전도 선재와 고온 초전도 선재로 나눌 수 있다. 저온 초전도 선재를 이용한 회전기기는 액체헬륨을 이용한 극저온 냉각이 필수적이며, 이러한 액체 헬륨을 이용한 냉각은 고가의 대형 헬륨액화시스템을 사용하기 때문에 실제로 개발하여 현장에 적용된 사례는 찾기 힘든 상태이다.

최근에는 액체질소의 온도에서 초전도현상을 구현할 수 있는 고온 초전도 선재에 대한 개발이 활발하게 진행되어 상용화 수준에 도달하게 되었고, 저온 초전도 선재를 사용한 회전기기보다 자기장내 특성이 뛰어나고 냉각에서의 경제성이 있는 고온 초전도 선재를 이용한 초전도 회전기기를 구현하기 위하여 세계적으로 다수의 기업들이 고온 초전도 선재를 적용한 초전도 회전기기 개발에 매진하고 있다.

고온 초전도체는 제조 방식에 따라 인발을 통해 선재를 생산하는 1세대 고온초전도 선재와 초전도체를 박막형태로 증착하는 CC(Coated Conductor)법을 사용한 소위 2세대 고온 초전도 선재가 있다. 2세대 고온 초전도 선재는 1세대 선재보다 자장 특성이 우수하나 제조공정의 난이도가 높다. 현재 2세대 고온 초전도 선재의 안정적 양산을 위한 공정개발과 향상된 기계적 특성을 갖는 회전기기에 적합한 선재를 개발하기 위한 연구가 진행되고 있으며 머지않아 우수한 선재가 양산될 것으로 기대하고 있다.

두산중공업은 지난 10여 년간 고온 초전도 선재를 적용한 모터를 개발하여 왔고, 1세대 고온초전도 선재를 이용하여 1MW 고속 모터 개발을 성공적으로 수행하였다. 성능과 가격경쟁력을 갖춘 초전도 회전기기를 개발하기

위하여 2세대 고온초전도 선재를 적용한 5MW 선박 추진용 모터 개발을 진행하였으나 2세대 고온초전도 선재의 기술적 완성도가 낮아서 어려움을 겪었으나 적용상의 문제를 추가 개선하여 설계치를 만족하는 회전기용 초전도 계자코일 기술 개발을 구현하였다.

2. 사업 현황

정부는 2001년부터 교육과학기술부 주관으로 한 21세기 프론티어연구개발사업을 통하여, 초전도 분야에 있어서의 국가적 기술력을 향상시키기 위하여 차세대 초전도 응용기술 개발사업단 (CAST, Center for Applied Superconductivity Technology)을 발족시켰다. 이 기관은 단기간에 눈부신 연구성과를 이루기 위하여 국내 초전도 전력기기 산업의 육성을 위한 개발(DAPAS, Development of Advanced Power system by Applied Superconductivity technologies) 사업을 수행하였고 이를 통해서 단기간에 눈부신 연구개발 성과를 거둘 수 있었다.

두산중공업에서는 2003년부터 초전도 모터/발전기 개발을 전략과제로 선정하여 적극적인 투자를 지속하며 차세대 발전기 및 모터 개발에 부단한 노력을 경주하고 있다. 이를 위해서, 두산중공업은 초전도응용기술개발사업(DAPAS)에 참여하여 고온초전도 모터 개발에 있어서 전기연구원과 협력기관으로써 기술협력을 통해서 1단계 개발에서 75kW급 모터 개발을 성공(2004년)하였고, 이어 2단계에서 추진하였던 1MW급 초전도 모터 개발도 성공(2007년)하였다. 2011년 3월에 완료된 최종 3단계에서는 1세대 고온초전도 선재에 비해 가격이 저렴하고 자장에서의 특성도 우수한 2세대 고온초전도 선재를 이용하여 세계 최대 용량과 최고성능의 고온초전도 모터 개발을 고성능/저비용으로 실현할 수 있었다. 이러한 DAPAS사업의 초전도 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

좁아져 선두그룹 수준에 도달한 것으로 평가되고 있다.

3. 사업 성과

앞 절의 끝부분에 기술한 사업적 성과이외에 가장 큰 사업의 성과로는 회전기에 적합한 2세대 고온초전도체를 구매하여 성공시켰다는 사실이다. 이뿐만 아니라 각 개발 단계를 수행하면서 대용량 초전도 모터에 필요한 설계 및 제작에 필요한 제반 핵심기술역량을 체계적으로 확보해 왔으며, 이러한 핵심기술역량은 다음과 같이 요약하여 기술할 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 수십 배 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 냉각방식은 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, 냉각

에 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 과정에서 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 실드에 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 모터 사업 전망

이러한 초전도 모터의 개발 성과로 인해 서 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 풍력 발전기 개발을 산학연 및 국제공동과제로 진행하고 있다. 선박내 전력공급용 발전기와 선박추진시스템용 초전도 모터를 적용하기 위한 선행과정으로 초전도발전기/모터의 개발 현황을 공유하고 실증 및 적용방안을 도출하기 위한 협의를 진행하고 있다. 또한, 선박의 전

력공급시스템용 초전도발전기 사업화를 위한 개발을 계획하고 있다.

선박추진 적용 이외에도 초전도발전기/모터의 활용방안으로 풍력발전 시스템이 거론되고 있다. 풍력발전기 시장이 지역이주의와 세일가스의 영향으로 활발한 시장 형성에 얼마간 방해받고 있는 건 사실이지만 그 가치가 낮아지는 것은 아닐 것으로 본다. 최근 강조되고 있는 창조경제의 거센 요구로 인해 풍력발전 시스템의 경우, 풍력발전기의 효율향상을 위해 대형 해상 단지화 추세와 더불어, 대용량기의 개발에 대한 요구가 급속하게 증대되고 있다.

그러나 현재의 상전도 발전기술로는 대용량화에 따른 중량의 증가로 제작, 설치, 유지보수 등에 있어서 당연한 제반 문제를 해결하기엔 역부족이다. 나셀에 채용할 수 있는 상전도 발전기의 무게와 부피로 인해서 발전 용량에 한계가 다가오고 있고, 증속기의 필요도 만만치 않은 부하로 작용하게 된다는 것이다. 이러한 풍력 시스템에 초전도 발전기를 적용하게 되면, 증속기가 필요 없는 저속 고토크의 발전기를 이용하여 구조가 간단해지고, 초전도 전력기기의 장점인 고집적화 에너지 구현으로 이룩하여 기기의 소형화 및 경량화가 가능해져서 철손과 동손이 제거한 고효율 대형 해상 풍력 발전 시스템의 기술적 대안으로 활용될 전망이다.

5. 결 론

지금까지 DAPAS 사업의 대표적인 연구 성과로 평가할 수 있는 2세대 고온초전도 선재로 제작된 저속형 고온초전도 모터의 개발과정, 연구 성과, 그리고 향후 활용과 전망을 기술하였다. 적합한 선재를 공급하기 위하여 품질 기준을 마련하고 선재의 품질 및 설계조건에 적합한 계자코일을 설계하여 제작 검증시험을 통해 고성능의 고온초전도 모터를 개발할 수 있었다. 고온초전도체를 사용하여 제작한 모터/발전기는 기존 구리를 사용하여 제작한 모터/발전기에 비해서 그 무게에 있어서 가볍게 만들 수 있고, 그 부피에 있어서 소형화할 수 있으며, 저속 및 낮은 부하 영역에서도

상대적으로 고효율이란 장점을 가지고 있다.

장래에 에너지 효율을 높이고 저소비 환경의 시대가 도래하면, 선박추진 또는 풍력 발전에 있어서 초전도모터/발전기를 필요로 하는 시장의 요구는 더욱 거세질 수도 있다. 한편 대용량화에 대한 초전도 모터/발전기의 경제성과 효율이 더욱 필요로 하게 되면서 기존 상전도 기기를 대체해 나갈 것으로 예상된다. 이러한 초전도 기기의 도입을 위한 기반기술에 대한 확보가 무척 중요하고 이러한 기술 및 제품의 경쟁력 확보를 위하여 두산중공업이 선도적 기업으로 큰 영향력을 행사하고 있는 실정이다.

저자이력



김영춘(金永春)

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