

초전도 풍력 발전기 개발 현황 및 전망

권영길, 김호민
한국전기연구원 초전도연구센터

1. 서론

인류는 오랜 기간 동안 바람을 이용해 왔다. 풍차가 오랜 세월동안 물을 푸거나 곡물을 빻아 가루를 만드는 데 이용되고 고인 물을 바다로 퍼내기 위해 네덜란드 등지에서는 풍차를 이용하였다. 오늘날에는 전 세계적으로 바람의 힘을 이용하여 풍력발전기를 돌려서 전기에너지를 생산하여 손쉽게 에너지를 얻고 있다.

2. 풍력발전시스템

2.1. 풍력발전시스템의 개요

풍력발전 시스템은 바람의 힘을 회전력으로 전환시켜 발생하는 전기에너지를 전력계통에 연계하거나 수요자에게 직접 공급하는 발전시스템이다. 풍력발전시스템은 무공해 자연 바람을 이용하는 것이므로 친환경적이며 육지 뿐만 아니라 해상에 설치가 가능하여 국토를 효율적으로 활용하고 이산화탄소 배출을 억제하는 효과가 있다. 풍력발전은 최근 들어 기존의 발전방식과 경쟁가능한 수준의 경제성을 가지는 친환경 발전단지 건설이 가능하게 되어 수 GW 용량을 가지는 해양풍력단지 건설이 전 세계적으로 추진되고 있다. 최근 들어 독일과 덴마크를 중심으로 5 MW 이상의 대형 풍력발전기가 개발되면서 풍력발전시스템은 해상화 및 대형화 추세이다. 현재 5 MW급이 상용화 초기 단계에 있으나 증속기(Gear Box)의 잦은 고장발생 원인으로 직결(Direct Drive)방식의 발전기 요구가 증대되고 있다. 또한 6 MW급 발전시스템은 증속기 부피와 발전기 무게증가로 인해 설치 및 운전이 한계가 있다.

초전도발전기는 기존 상전도방식의 풍력발전기 대비 무게와 부피가 작고 효율이 높은 장점을 가지며 이로 인해 Direct Drive 구동

방식의 7.5 MW급 풍력용 초전도발전기 개발이 가능하다. 따라서 대규모 해상풍력발전기에 적합한 발전기의 대형화 추세에 부합하여 초전도 풍력발전기의 개발이 반드시 필요하며, 초전도 풍력 발전기 개발을 통해 기대 및 파급효과가 막대하여 차세대 성장 동력이 될 수 있고, 국내 산업기술 향상을 통한 경제 활성화, 무역수지 개선, 고용창출효과 등 국가 경제의 활성화에 기여하는 주요 성장동력의 하나가 될 것으로 예측 된다.

2.2. 풍력발전시스템 특징

풍력발전이란 공기의 유동이 가진 운동에너지의 공기역학적 특성을 이용하여 회전자(rotor)를 회전시켜 기계적 에너지로 변환시키고 이 기계적 에너지로 발생하는 유도전기를 전력계통이나 수요자에게 공급하는 것이며, 재생에너지원 중에서 풍력발전의 대표적인 특징은 설치할 장소의 풍력 자원량이나 특성의 편차가 매우 크고 그 특성에 따라 기기의 사양이나 경제성이 심하게 변화할 수 있다는 점이다. 하지만, 풍력발전은 어느 곳이나 산재되어 있는 무공해, 무한정의 바람을 이용하므로 환경에 미치는 영향이 거의 없고, 국토를 효율적으로 이용할 수 있으며, 대규모 발전단지의 경우에는 발전단가도 기존의 발전방식과 경쟁 가능한 수준의 신에너지 발전기술이다.

풍력발전기는 지면에 대한 회전축의 방향에 따라 수평형 및 수직형으로 분류되고, 주요 구성요소로는 날개(blade)와 허브(hub)로 구성된 회전자와 회전을 증속하여 발전기를 구동시키는 증속장치(gearbox), 전기를 생산하는 발전기(Generator), 각종 안전장치를 제어하는 제어 장치, 브레이크 장치와 전력 제어장치 및 철탍 등으로 구성되며, 주요 구성품의 기술적 특징을 아래와 같이 설명한다.

- 회전자(Rotor): 바람이 가진 에너지를 회전력으로 변환시켜 주는 장치이며, 풍력발전기의 성능에 큰 영향을 미침. 효과적인 풍력 발전을 위해서는 이러한 로터의 설계가 매우 중요하며, 특히 각각의 날개(Blade)의 설계가 아주 중요한 요소로 작용함.
- 날개 (Blade): 구조적 하중 특성, 재료 성능, 블레이드 디자인 및 수명을 고려한 재료를 사용함. Glass fiber reinforced plastics (GFRP)를 많이 사용하는데 이는 가장 대표적인 내식성, 내약품성재료로서 높은 강도를 가지기 때문임. 현재 대부분의 대형 풍력발전기에 사용함. 또 날개(Blade)는 1개, 2개, 그리고 3개를 사용함.
- 3-blade 날개는 대부분의 대형 풍력발전기에 채택되고 있으며 현재 가장 안정적이고 주도적인 모델임.
- 공력블레이드 시스템: 풍력발전기의 주된 브레이크 시스템임. 스톱제어 발전기에 사용되는 전형적인 브레이크 시스템이며, 발전기 및 기계 브레이크 시스템에 과부하 방지, 블레이드 주 코드 방향이 회전면과 수직이 되도록 피치각을 90도로 회전시켜 최대의 공력저항을 발생시켜 로터를 제동시키는 방법임.
- 운전 시스템: 풍력발전기는 무엇보다 운전시스템이 중요함. 바람의 세기에 관계없이 일정한 전력의 생산이 효율에 큰 영향을 주므로 운전시스템은 매우 중요한 부분임. 운전 시스템은 날개 회전수와 그 패턴에 따라 구분됨.
- 정속회전 시스템은 바람속도가 변하더라도 회전 속도가 변하지 않는 경우를 말하며 비정속 회전(가변속 회전) 시스템은 바람의 세기에 따라 날개의 속도가 변하는 시스템을 말함.
- 정속회전 시스템은 유도 발전기와 증속장치를 사용하며 발전기의 회전수 제어가 불필요하며, 또 발전기가 견고하고 저렴하지만 설계풍속 이탈시 에너지 변환효율이 감소한다는 단점이 있음.
- 가변속 회전 시스템은 풍속증가에 맞춰 로터 회전수를 증가시킴으로서 정격 이상에서는 로터의 공력토크와 발전기의 출력이 일정하며, 설계풍속 이탈시 출력

제어로 일정회전수를 유지할 수 있음.

- 운전시스템의 제어방식은 능동제어(Active S.C.)방식과 수동제어(Passive S.C.)방식이 있는데, 능동제어방식은 가변피치를 사용하여 정확한 제어가 가능하나 구조적으로 복잡해지며 고장의 여지가 많아지는 문제점이 있음. 수동제어방식은 고정피치를 사용하고 구조가 간단하며 견고함.

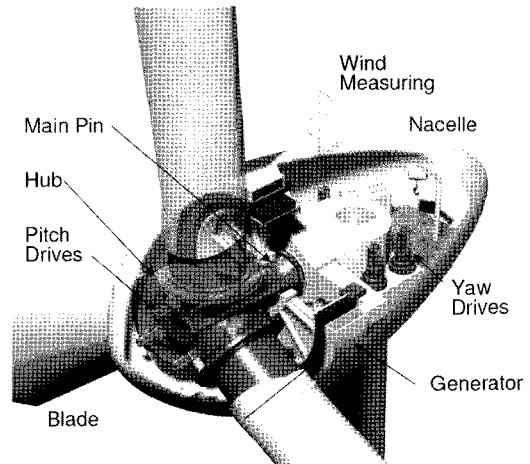


그림 1. Direct drive 방식의 풍력발전기 구조.

풍력발전기의 구조는 로터-너셀 조립부, 지지구조부 및 기초부로 구성된다. 해상용은 육상용 풍력발전기와 달리 해상에 설치하기 위한 별도의 기초 구조물(모노파일, 중력기초 콘크리트, Tripod, Jacket, Tripile 등)이 요구되고, 이를 타워부와 연결하기 위한 연결 기술이 필요하다.

3. 풍력발전시스템 현황

약 50년 전에 현대적 개념의 200kW급 풍력발전기가 덴마크의 Gedser 해안에서 개발된 이후 1973년 오일 쇼크를 거치면서 풍력발전기의 설계 기술은 비약적으로 진보되었고, 최근 들어 독일과 덴마크를 중심으로 5 MW 이상의 대형 풍력발전기가 개발되면서 대용량 풍력발전시스템과 계통연계 기술 등 다양한 연구가 진행되고 있다. 풍력발전시스템은 해상화 및 대형화 추세로 현재 3 MW급이 상용화 초기 단계에 있으나, 201년 이후는 7MW 이상이 시장 주류가 될 것이다.

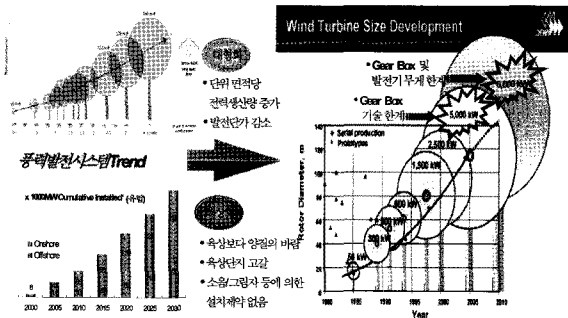


그림 2. 풍력발전기술 트렌드와 발전기 규모.

풍력발전 시장은 미국과 중국 등 초거대 시장을 거점으로 연평균 약 24% 수준으로 성장하고 있으며, 최근 공급이 수요를 따라가지 못하면서 Seller's Market으로 형성되고 있다. 2010년에 설치용량 약 4GW의 신규 풍력시스템 설치가 전망되며, 2020년 약 16GW의 시장이 형성될 것으로 예측된다. 해상 풍력의 경우, 네덜란드, 덴마크, 영국 등 유럽이 전체 시장을 주도하고 있다. 현재 5 MW급 이상 대형 풍력발전시스템이 개발 중에 있으며, Enercon사는 Multibrid 5 MW급 Prototype을 시험 중에 있다.

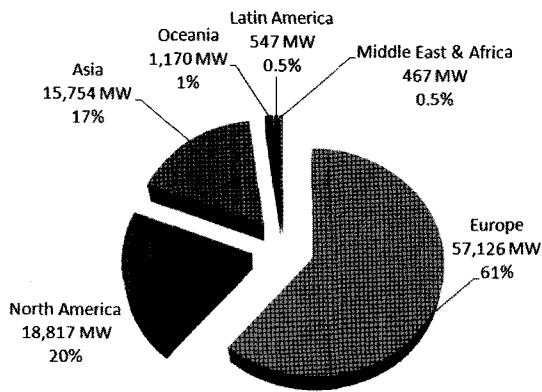


그림 3. 세계의 지역별 풍력발전기 설비 용량.

그림 3은 2008년 기준으로 전 세계에 설치된 풍력발전기 설치용량을 나타낸다. 유럽시장이 전체 풍력발전기 설치용량 대비 61%에 이르고 있다. 2009년을 기준으로 전 세계 풍력발전기 설치수요는 미국과 중국 및 인도가 폭발적인 증가세를 보여주고 있다. 영국의 경우 자국의 풍력발전기 생산업체는 없지만 설

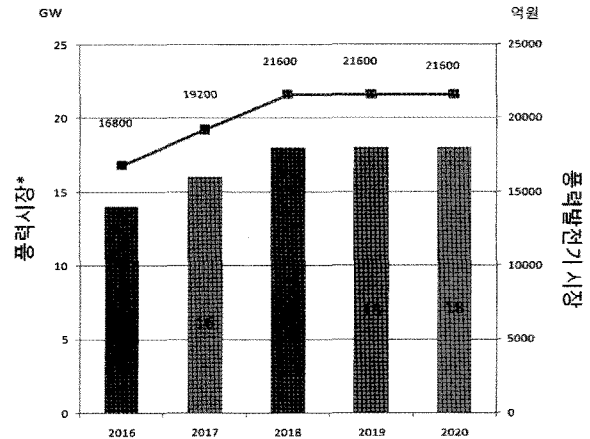


그림 4. 2020년 세계 풍력발전기 시장 전망.

치수요는 지속적으로 증가하고 있으며 특히 육상 풍력발전기 설치가 두드러진다.

전세계 총 발전량을 기준으로 2012년까지 3.53%, 2020년까지 12%가 증가가 예상되며 주요시장은 유럽, 북미 시장이며 아시아 시장은 점차 확대 되고 있고, 2016년 이후 풍력 발전시장은 5 MW 이상급이 주력 터빈으로 자리매김 할 것으로 예측되고 기존 풍력용 발전기를 초전도 발전기가 대체할 것으로 전망되고 있다.

4. 초전도발전기

4.1. 초전도 풍력발전기 개요

발전기는 기계적인 동력을 전력으로 변환하여 전기에너지를 최초 발생시키는 전기기계로 수력, 원자력, 화력, 복합발전소 등의 대형발전기와 중·소형의 발전기가 산업설비의 광범위한 분야에서 이용되고 있으며, 기존 발전기는 투자율이 높은 다량의 철심을 사용하는데, 철심은 고 자기장에서 포화되므로 출력 및 성능 향상에 걸림돌이 되고, 전기적 손실이 크게 발생하므로 에너지 효율을 저하시키고, 발전기의 부피, 무게, 소음 감소 등에 장애요인으로 작용하고 있다.

초전도발전기는 기존 발전기의 계자권선을 전기손실이 없는 초전도코일로 대체, 고자장화를 통해 소형, 경량, 고출력, 고효율화를 달성한 혁신적인 발전기이고, 초전도 발전기는 상전도 발전기에 비해 부피 및 무게 감소와 효율 상승의 이점이 있다.

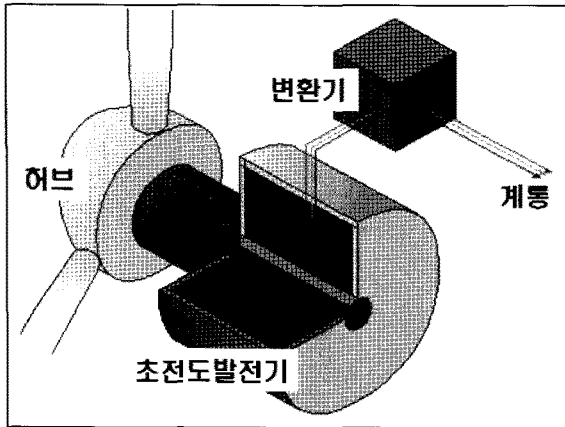


그림 5. 3세대 풍력발전기 시스템.

그림 5는 3세대 풍력발전기 시스템 구조를 나타내고 있다. 발전기는 기존 발전기에서 초전도발전기로 대체되어 작은 부피의 고효율, 대용량화 되고 블레이드의 구동축과 발전기가 직접 연결되는 직접구동 방식으로 시스템이 보다 간단하게 구성된다.

4.2. 초전도 발전기 구조

그림 6은 초전도발전기의 구조를 보여주고 있다. 각 부분에 대한 명칭과 특징은 다음과 같다:

- 회전자 : 발전기의 회전하는 부분으로 계자권선, 토크튜브, 댐퍼를 포함한 회전부 조립체.
- 고정자 : 발전기의 회전하지 않는 부분으로 전기자권선, 복합재코어를 포함한 고정부 조립체.
- 초전도 계자권선 : 회전자의 핵심부분으로 외부로부터 전기를 받아서 강력한 자석을 만드는 초전도 코일.
- 토크튜브 : 회전축에 전달된 힘을 계자권선부에 전달하며, 외부로부터 냉각된 초전도권선으로의 열침입을 차단하는 부품.
- 댐퍼 : 외부의 전자장 변화에 의해 초전도계자권선에 인가되는 교란을 차단할 목적으로 설치하는 변동자속 차폐막.
- 전기자권선 : 발전기에서 운동에너지가 전기에너지로 변환되어 전기를 발생시키는 권선.
- 복합재코어 : 초전도권선에서 발생한 강

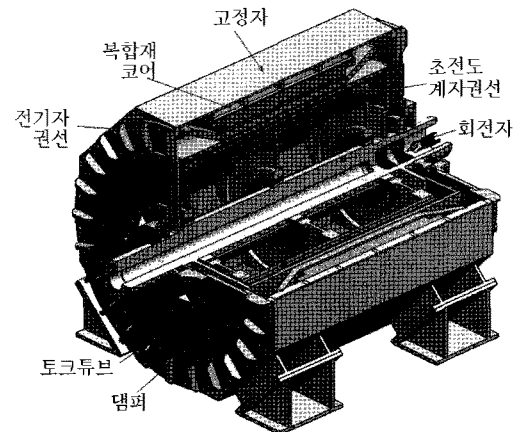


그림 6. 초전도 발전기 구조 및 명칭.

력한 자장을 전기자권선에 전달하고, 전기자권선을 지지하는 구조물.

- 주변장치 : 그 외에도 초전도권선에 전기를 공급하는 여자기 및 초전도권선 냉각을 위한 냉각장치 등으로 구성.

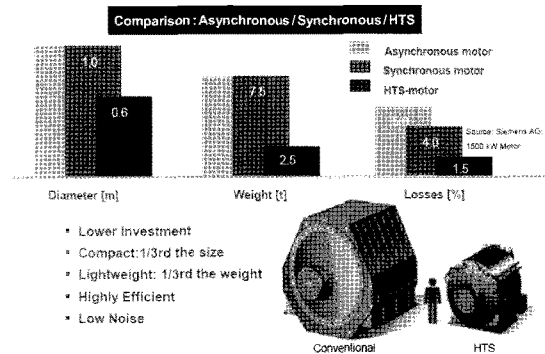


그림 7. 유도기, 동기기와 초전도 회전기의 부피, 무게 및 손실 비교.

그림 7은 동일한 용량의 유도기 및 동기기와 초전도 회전기를 크기, 무게 및 손실에 관하여 비교하였다. 크기는 기존 회전기 대비 약 40%가 줄어들고 무게는 33%로 가벼워진다. 그리고 효율은 최대 70% 가량 줄일 수 있다.

4.3. 초전도풍력발전시스템

풍력발전시스템의 대형화 추세에 따라 기존 시스템인 경우 Multibrid, Integrated Type, Multi PM 등 다양한 모델이 개발 중에 있으며, 초전도 발전기의 적용을 위한 기술개발이 미국과 유럽에서 연구되고 있다.

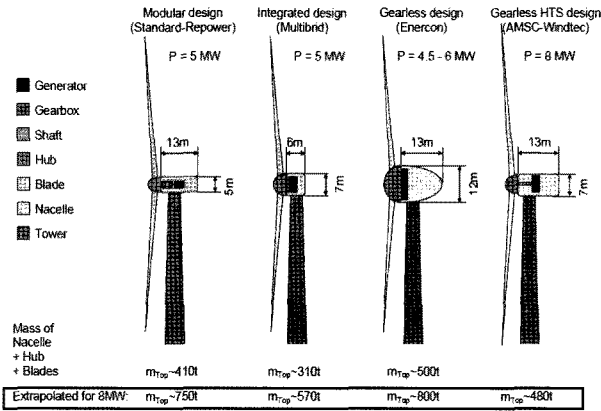


그림 8. 상전도 풍력발전터빈과 초전도발전터빈 비교.

그림 8은 5~8MW급의 여러 형태의 풍력발전터빈에 대한 너셀의 크기 및 시스템 무게를 비교해 주고 있다. 각각의 터빈 종류는 증속기와 고속형 5MW급 터빈, 다중 고속형 발전기와 소형 증속기 결합형, 저속형 영구자석 동기발전기와 8MW급 직접구동방식 초전도발전기이다. 각 모델을 8MW급으로 산정하였을 경우 무게가 최대 40% 적게 나가게 되어 경제성면에서 초전도발전기 시스템이 훨씬 유리하고 유지보수도 증속기가 없는 직접구동형이기 때문에 용이하다(표 1. 참조). 이와 같이 초전도발전기 적용은 풍력발전 시스템 제작비용 및 무게 절감이 가능하며, 6 MW급 해상 풍력 발전시스템의 효율이 1% 높아지면, 연간 300MWhr의 추가적인 전력 생산이 가능하다.

표 1. 발전기 분야의 시장 요구사항 (5~6 MW급 풍력발전기 기준).

구분	기존제품	요구사항	초전도제품
가격수준 (%)	100	< 100	≈ 100
요구수명 (%)	100	> 100	>> 100
운전효율 (%)	95~98	95~98	98~99
사용선재	구리	N/A	초전도선
유지보수	보통	보통	우수
건설비용 (%)	100	< 100	< 70
크기 (%)	100	< 100	30~50
중량 (%)	100	< 100	30~50

초전도발전기는 그림 9에서 보여 지는 바와 같이 영구자석형 풍력발전시스템 대비 가격이 저렴하며, 8 MW의 경우 25%의 가격 절감 효과가 있고, 일반 발전기에 비해 무게 및 부피가 1/3~1/4 정도로 경량화 시킬 수 있어 총 건설비용을 30% 이상 감소할 수 있다. 대용량 초전도발전기의 장점은 다음과 같다.

- 고장이 가장 많은 기어박스를 제거하여 고장감소에 의한 유지비용 감소 가능
- 고효율 운전으로 경제성 우수, 저부하 특성이 우수하여 풍력발전에 적합
- 대용량기로 제작이 가능하여 단지 내 시스템의 수를 줄일 수 있음

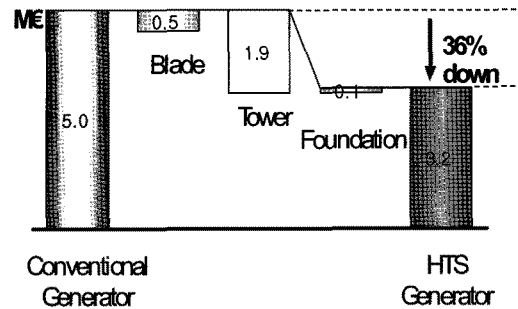


그림 9. 기존 풍력시스템과 초전도시스템의 설치비용 비교.

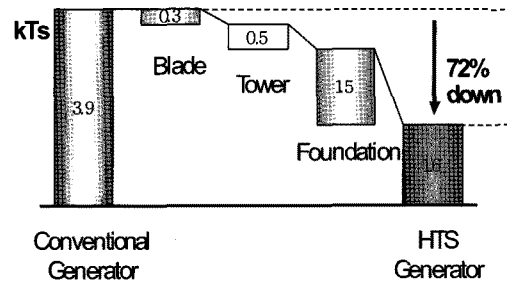


그림 10. 기존 풍력시스템과 초전도시스템의 무게 비교.

5. 풍력용 초전도발전기 기대효과

5.1. 풍력용 초전도발전기 개발현황

미국에서는 AMSC사가 10MW급 초전도발전기를 개발 중에 있으며 회전속도는 11RPM, 무게는 120톤이다. 한편 유럽의 영국과 독일의 Converteam사와 Znergy사는 8MW급 초전도발전기를 개발 중에 있고, 회

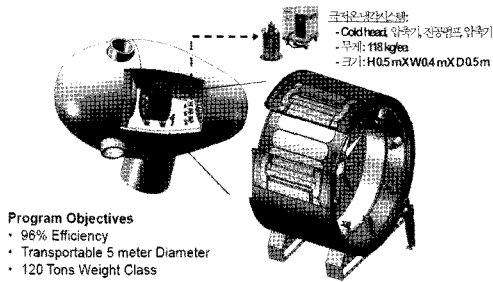


그림 11. 미국 AMSC사에서 개발 중인 10MW급 초전도발전기.

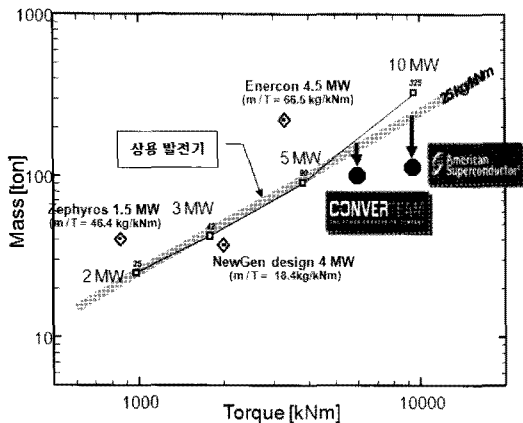


그림 12. 풍력용 발전기 용량 대비 체적 비교.

전속도와 무게는 12RPM, 100 톤 정도로 예상된다.

5.2. 풍력용 초전도발전기 기대효과

풍력용 초전도발전기는 Enercon에서 개발 완료한 무게가 200톤이나 되는 4.5MW급 Direct-drive 방식의 상전도 발전기와 비교했을 때 기술적 기대효과와 경제적·산업적 기대효과는 다음과 같다.

- AMSC는 초전도 발전기의 무게를 동일한 용량의 상전도 발전기에 1/3 수준으로 예상.
- 8 MW급 초전도 발전기의 극저온 유지를 위해서는 3대의 극저온 냉동기가 요구되며, 극저온 냉각시스템의 무게와 크기는 전체 시스템의 무게 및 크기에 영향력이 적음.

- 풍력발전단지의 용량이 증대 할수록 발전기 1기당 용량의 증대가 요구되는데 계통 측면에서 발전기의 개수가 증가할수록 계통 연계망 구성 및 운영이 난이도가 급격히 높아짐.
- 풍력발전기를 5 MW급 이상으로 용량증대가 이루어지면 계통구성이 보다 단순해지고 유지보수가 용이해 짐.
- 기존 발전기의 기술적 한계를 극복하고, 새로운 기술 패러다임을 열고 있는 초전도 기술을 적용하여, 녹색성장을 견인할 고효율화, 소형 경량화, 고신뢰성을 보장하는 신개념의 대용량 초전도발전기를 개발하여 에너지 절약, 전력품질 향상, 친환경, 고부가가치를 창출하는 새로운 산업영역의 개척이 가능.
- 최근 산업사회의 고도화에 따라 에너지사용량 증가에 따른 수급의 문제와 더불어 정보 통신 분야의 급속한 발달추세 및 지구환경보전을 위한 Green Round 협정 등 구체적인 전력품질의 질적인 고도화 요구에 부합.
- 초전도 기술의 적용을 통해 얻을 수 있는 기술적 효과는
 - 기존 발전기 대비 70 %의 대폭적인 손실을 저감할 수 있어서 0.3 ~ 2 % 이상의 효율 증가 가능
 - 회전자의 운전전류손실에 의한 열 발생으로 thermal cycling(반복 열충격)에 의한 수명 저하 문제를 해결할 수 있어서 수명증가.
 - 고전류밀도가 가능하여 고자장을 구현할 수 있으므로 1/3~1/5 수준의 소형화 및 경량화의 구현이 가능함.
 - 소형, 경량화 가능에 따라 제품 제작비용의 저감 및 건설비용의 절감이 가능함.
- 또한, 산업 전략적 측면에서는
 - 양질의 전기에너지를 생산
 - 에너지 자원의 절약효과
 - 새로운 전원설비 확충 압력의 완화
 - 전력계통 및 전기시스템 전반의 효율 및 안정도 향상
 - CO2가스 배출억제에 기여할 수 있음.

- 최근 들어 2세대 고온 초전도 선재의 개발과 신공법의 등장으로 근시일내에 초전도 선재의 가격이 구리선 가격보다 싸지게 되어 초전도 기술을 적용한 발전기 시장도 머지않아 패러다임의 변화가 예측됨.
- 최근 유가 급등 및 친환경·녹색기술에 대한 요구로 풍력발전 등에 대한 수요가 급증하고 있고, 풍력시스템의 효율을 좌우하는 핵심기기인 풍력발전기의 성능향상을 위해 초전도 풍력발전기의 개발에 대한 기대가 큼.
- 초전도 발전기 개발을 통해 획득된 초전도 응용기술은 초전도 모터, 플라이휠 초전도 전력저장장치, 동기 조상기, 회전형 동기 콘덴서 등의 관련 기기 기술개발에 직접적으로 이용이 가능한 핵심 기술로서, 파급효과가 큼.
- 초전도의 전기에너지분야 응용에 있어서 선도적인 역할을 담당하는 것이 발전분야 응용으로 이는 다른 어떤 분야보다도 기술의 파급 효과가 지대함.

6. 결 론

세계 선진국에서는 초전도 발전기가 21세기의 자원, 에너지, 환경문제를 해결할 수 있는 가장 확실한 해결책 중의 하나이며, 개발 성공 시 부가가치가 높고, 여타 기술에 비해 기술의 파급효과가 월등히 크다는 것을 인식하여 초전도 발전기 기술개발을 국가 전략적인 대형과제로 선정, 장기적인 개발전략을 수립, 강력한 산·학·연 공동연구체계를 구성하여 연구개발을 추진하고 있다. 이에 우리나라도 초전도 발전기 기술개발을 통해 전력기기 산업을 한 단계 upgrade시켜 새로운 활력을 불어넣고, 21세기 기술제국주의에 대처하며, 국가 녹색 성장 및 일자리 창출에 기여할 수 있는 성장동력이 되는 산업 제품기술을 확보하는 것이 필요하다.

참고문헌

- [1] Asger B. Abrahamsen "Development towards a superconducting direct driven multipole generator for future wind turbines", NEMS symposium Hoor, Aug. 2008.
- [2] H. Li and Z. Chen, "Overview of Different Wind Generator Systems and their Comparisons", IET Renewable Power Generation Jour., vol.2, no. 2, 2008, pp.123-138.
- [3] DEWI, Wind Turbine Development Program Report, 2007
- [4] 그린에너지 전략로드맵, 지식경제부, May, 2009.

저자이력



권영길(權永吉)

1982년 부산대학교 공대 기계공학과 졸업, 1984 동 대학원 기계공학과 졸업 (공학석사), 1990 동 대학원 기계공학전공(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도연구센터, 책임연구원.



김호민(金鎬民)

1970년 8월 23일생, 2002년 연세대학교 전기전자공학과 졸업 (공학박사), 2002년~2004년 M.I.T. Francis Bitter Magnet Lab. Post-Doctoral Research Associate, 2004년~2007년 LG산전(주) 전력연구원 선임연구원, 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 선임연구원.