

해외 풍력발전 현황 및 전력변환시스템 기술동향

정태욱<경남대학교 전기공학과 조교수> · 황선환<경남대학교 전기공학과 조교수> · 방덕제<한국전기연구원 전기추진연구본부 전동력연구센터 선임연구원>

1 서론

전 세계적으로 온실가스 배출로 인한 지구 온난화와 화석 에너지의 고갈로 인해 풍력, 태양광, 바이오 등 신재생 에너지원에 대한 연구 개발이 다각적으로 진행되고 있는 실정이다. 특히 신재생 에너지원 중 풍력은 청정성과 다른 신재생 에너지에 비해 전력생산 단가 면에서 가장 경제성이 높은 편으로 유럽 및 미국 등의 선진국에서 자국 전력의 상당 부분을 풍력 발전에 의존하고 있다[1-4].

기존의 풍력터빈은 대부분 육상에 설치되었으나 대단위 풍력 발전 단지를 건설함에 있어 육상은 한정된 설치 장소로 인한 대규모 단지 조성의 한계와 환경과피 및 소음으로 인한 민원발생 등의 문제점이 야기되었다. 이로 인해 유럽의 경우 2008년 이후 해상 풍력 발전 설비용량이 지속적으로 증가하였음을 그림 1에서 알 수 있다. 해상풍력의 경우 육상 대비 바람이 양질이고 평균 풍속이 높은 장점이 있으며 풍력단지의 단위면적당 발생전력량을 증대시키기 위한 풍력발전 단지의 대규모화와 풍력터빈의

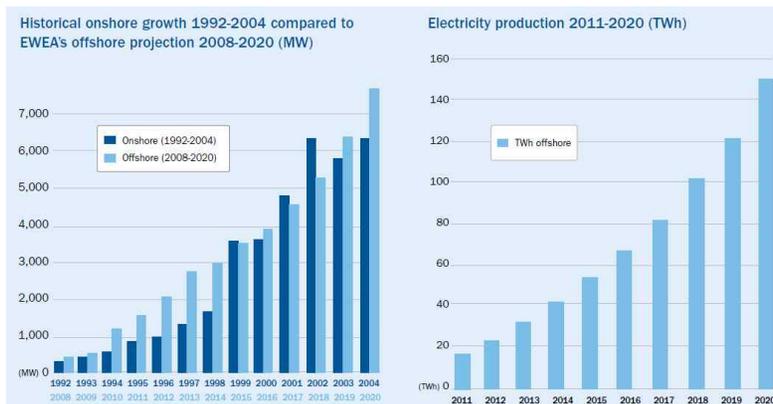
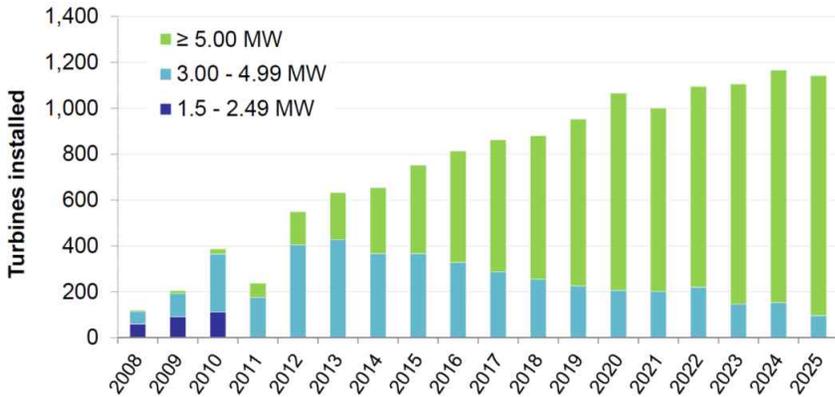


그림 1. 육상 풍력시장 대비 해상 풍력시장의 성장 동향

표 1. 2012년 세계 풍력터빈시장 상위 10개 제조사 시장 점유율, 풍력터빈 용량 및 형식

제조사(국가)	시장점유율	풍력터빈용량 / 블레이드 직경	발전기 / 드라이브 트레인
GEWIND (US)	15.5%	1.5MW / 70 - 82.5m 2.5MW / 100m 4.0MW / 110m	DFIG 3G PMSG 3G PMSG DD
VESTAS (DK)	14.0%	1.8 - 3MW / 80 - 100m 1.8 - 7MW / 80 - 164m	DFIG 3G PMSG 3G (4G)
SIEMENS (GE)	9.5%	2.3 - 3.6MW / 82 - 120m 3 - 6MW / 101 - 154m	SCIG 3G PMSG DD
ENERCON (GE)	8.2%	0.8 - 7.6MW / 48 - 126m	EESG DD
SUZLON GROUP (IND)	7.4%	0.6 - 2.1MW / 52 - 88m 2.1 - 2.25MW / 88 - 97m	IG 3G (Fixed speed) DFIG 3G
GAMESA (ES)	6.1%	0.85 - 2MW / 52 - 114m 4.5 - 5MW / 128m	DFIG 3G PMSG 3G
GOLDWIND (PRC)	6.0%	1.5 - 2.5MW / 70 - 100m	PMSG DD
UNITED POWER (PRC)	4.7%	1.5 - 3MW / 77 - 100m	DFIG 3G
SINOVEL (PRC)	3.2%	1.5 - 3MW / 60 - 113m	DFIG 3G
MINGYANG (PRC)	2.7%	1.5MW / 77 - 82m 2.5 - 3MW / 92 - 108m	DFIG 3G PMSG 2G



Source: Companies, IHS Emerging Energy Research

그림 2. 유럽 해상용 풍력터빈 용량 추이 (2008-2025)

대용량화가 가능해진다[5-7]. 또한 1985년 이후 풍력터빈의 용량 및 블레이드 (Blade) 직경의 증가 추세를 보여주고 있다.

육상용 풍력터빈과 달리 해상용 풍력터빈은 설치 및 유지보수가 어려운 환경적 특수성으로 인해 신뢰

성 향상, 가동율 증대 및 발전단가 감소에 유리한 시스템이 요구된다. 그리고 풍력터빈의 대형화로 인해 블레이드의 직경, 드라이브 트레인의 토크, 타워의 높이가 커지게 되어 각 구성품들의 중량이 더욱 증가하게 된다. 따라서 풍력터빈의 신뢰성 향상, 가동율

증대, 발전단가 감소, 경량화에 유리한 시스템의 개발이 전세계적으로 진행 중이다[9]. 또한 단위 풍력발전기의 용량이 5~10MW급으로 증대되므로 인해 대용량 전력변환장치의 필요성이 증가하고 있으며, 전체 발전량 중 풍력 발전이 차지하는 비중의 증가로 인해 유·무효 전력 제어, 고조파 규제 확대와 저전압 보상 방법(LVRT, Low Voltage Ride Through) 등 풍력 발전 관련 규정(Grid code)이 강화되었다[7].

따라서 본고에서는 해외 해상용 풍력발전 현황과 대용량 풍력 발전기의 운전 및 발전전력의 계통 연계를 위한 전력변환시스템의 기술동향에 대해 알아보고자 한다.

2. 해상용 풍력터빈 현황

2.1 해상용 풍력터빈 시장 동향[5, 8-9]

표 1은 2012년 세계 풍력터빈시장 상위 10개 제조사들의 시장 점유율, 풍력터빈용량, 블레이드 직경, 드라이브 트레인 구조를 보여주고 있다. 전체 풍력시장에서 상위 10개 제조사가 차지하는 시장점유율은 약 77%로 중국과 인도의 제조사들이 5개 포함되어 있다. 특히 중국의 GOLDWIND 사는 2011년 대비 시장 점유율 2위에서 2012년 7위로 하락하였고 SINOVEL 사 역시 점유율이 감소하고 있는 상황이다.

그림 2는 2025년까지 유럽의 해상 풍력단지에 설치될 풍력터빈 1기당 용량을 나타내고 있으며, 2015~2016년경부터는 5MW급 이상의 풍력터빈이 해상 풍력시장을 주도할 것으로 예상된다.

2.2 해상용 풍력터빈 기술동향

풍력발전시스템을 운전 방식에 따라 분류하면 발전기의 회전자 속도를 적절히 증속하기 위해 기어박스

(Gear box)가있는 정속 운전 방식(Fixed speed or Geared type)과 기어박스가 없는 직접 구동 가변속 운전 방식(Variable speed or Direct-drive)으로 구분된다. 정속 운전 방식은 구성이 간단하고 계통연계를 위한 별도의 장치를 필요치 않는 반면, 발전 출력 제어가 발전기 구조상 불가능하기에 현재 대부분의 풍력발전시스템은 가변속 운전 방식을 채택하고 있다.

본 절에서는 풍력발전시스템에 널리 적용되고 있는 가변속 풍력발전시스템에 대하여 알아본다.

2.3 기어드형(Geared) 가변속 풍력발전 [10-13]

기존 풍력 발전기의 형태에 따른 기어드형 가변속 풍력 발전 시스템을 자세히 정리하면 표 2와 같다. 기어드형 풍력 발전 시스템은 기어 박스를 통해 발전기의 회전 속도를 높이는 구조를 가지므로 풍력 발전기 자체의 무게 및 직경을 줄일 수 있다. 현재 풍력 발전 시장의 약 80%를 권선형 유도 발전기를 채택한 이중 여자 유도형 풍력 발전 시스템이 차지하고 있다. 주요 제조사로는 Vestas, Gamesa, GeWind 등 다수의 업체들이 이중여자 유도형 풍력 발전을 채택하고 있다. 농형 유도 발전기(SCIG, Squirrel Cage Induction Generator)를 이용한 풍력 발전 시스템은 지멘스(Siemens)사의 SWT-3.6-107 (SWT-2.3-82, SWT-2.3-92) 모델이 본 방식을 채택하고 있다. 3단 또는 1단 기어박스와 영구자석형 동기 발전기(PMSG, Permanent Magnet Synchronous Generator)로 구성된 풍력 발전 시스템은 Clipper사의 2.5MW 모델, Areva Multibrid의 Multibrid 5MW 모델, 그리고 Vestas의 V112-3MW 모델 등이 있다.

2.4 직접 구동형(Direct-drive) 가변속 풍력발전[14-18]

표 2. 기어드형 풍력 발전 시스템의 특성 비교

풍력발전	이중여자 유도형 풍력발전	농형 유도 풍력발전	영구자석형 동기 풍력발전
발전기	권선형 유도 발전기	농형 유도 발전기	영구자석형 동기 발전기
계통과의 연결	고정자속 계통 직결	컨버터	컨버터
운전속도 범위	동기속도 $\pm 30\%$	전 속도	전 속도
컨버터	정격용량 30% 이내	전전력 컨버터	전전력 컨버터
특징	<ul style="list-style-type: none"> - 시스템 가격 저렴 - 유·무효 전력 제어 - 계통 전압의 외란 취약 - 슬립링 유지 보수 필요 - 기어박스로 인한 유지 보수 필요, 소음 및 고장 발생의 원인 	<ul style="list-style-type: none"> - 저가의 견고한 발전기 구조 - 슬립링 존재하지 않음 - 유·무효 전력 제어 - 컨버터 제작 비용 증가 - 기어박스로 인한 유지 보수 및 점검 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 높은 발전기 효율 - 슬립링 존재하지 않음 - 기어박스로 인한 유지 보수 및 점검 요구 - 컨버터 제작 비용 증가
시스템 구성			

직접 구동형 풍력 발전은 기어드형 풍력 발전에 비해 기어 박스가 존재하지 않으므로 간단한 드라이브 트레인 구성이 가능하고 전체적으로 높은 시스템 효율을 얻을 수 있다. 이와 더불어 고장 발생 요인 감소로 인해 시스템의 신뢰성(Reliability)과 가용도(Availability)를 향상시킬 수 있다. 반면 DFIG 풍력 발전 시스템에 비해 전력 변환 장치의 제작 비용 상승과 스위칭 손실 증가를 야기하고 발전기의 직경과 무게가 크게 증가하는 문제점이 있다. 따라서 기어 박스가 필요하지 않는 직접 구동형 풍력 발전 시스템의 경우 상대적으로 발전기의 무게 및 제작 비용을 절감할 수 있는 기술 개발을 통해 제품 경쟁력을 더욱 향상시킬 수 있다. 또한 전전력 컨버터를 채택하므로 계통측으로의 안정적인 전력 공급과 높은 전력 품질을 만족시킬 수 있는 특징을 지니고 있다.

현재 직접 구동형 풍력 발전 시장은 전기 여자형 동기 발전기(EESG : Electrical Excited Syn-

chronous Generator)와 영구자석형 동기 발전기(PMSG : Permanent Magnet Synchronous Generator)를 갖는 2가지 형태의 직접 구동형 풍력 발전 시스템이 있으며 각각의 주요 특징은 표 3과 같이 나타낼 수 있다.

전기 여자형 동기 풍력 발전 시스템의 전력 변환 장치는 전전력 컨버터로써 계통과 발전기측은 서로 전기 및 자기적으로 분리되어 있으며 유·무효 전력 제어가 가능하다. 또한 계자속 제어를 하기 때문에 영구자석형 동기 발전기와 달리 영구자석을 사용하지 않는다. 전기 여자형 동기 풍력 발전기를 적용한 풍력 발전 업체는 독일 Enercon사의 E-126(E-112, E-101, E-82 등) 모델이 있다. 반면 영구자석형 동기 풍력 발전기는 회전자측의 계자 권선과 직류 여자를 위한 여자기(Exciter) 회로 대신 영구자석에 의해 자속이 발생된다. 그리고 발전기의 발전된 전력은 전기 여자형 풍력 발전과 마찬가지로 전전력 컨버터를

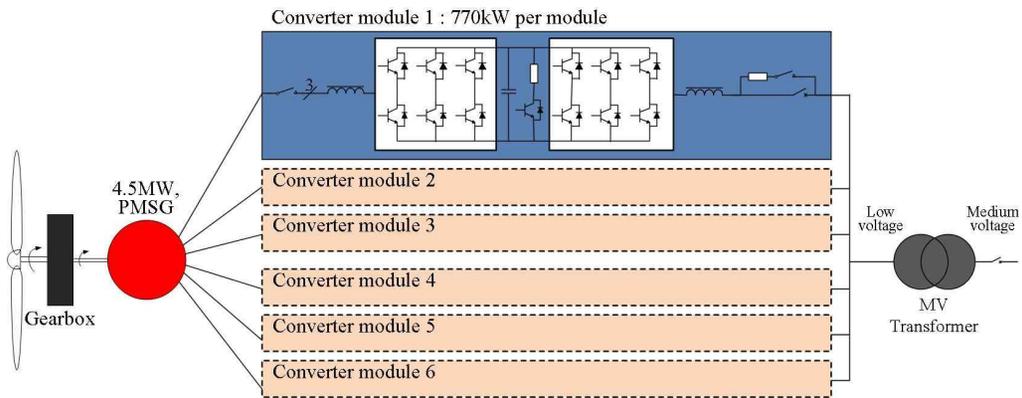


그림 3. 병렬 2-레벨 컨버터

통해 변환되어 계통으로 전달된다. 최근 풍력 발전은 시스템 구조의 단순화를 위해 회전자 회전 속도를 기계적으로 증가시키는 기어 박스를 제거하고 다극형 동기 발전기를 이용한 직접 구동형 가변속 풍력 발전기가 강세를 보이고 있다.

현재 Mitsubishi(2MW), Scanwind(3MW), Vensys(2.5MW), Goldwind(2.5MW) 등이 직접 구동형 PMSG 풍력 발전 시스템을 적용하고 있다.

표 3. 직접 구동형 풍력 발전 시스템의 특성 비교

풍력발전	전기 여자형 풍력 발전	영구자석형 동기 풍력 발전
발전기	권선 계자형 동기 발전기	영구자석형 동기 발전기
계통과의 연결	컨버터	컨버터
운전속도 범위	전 속도	전 속도
컨버터 용량	전전력 컨버터	전전력 컨버터
특징	<ul style="list-style-type: none"> - 계자 권선에 의한 발전기 무게 및 비용 증가 - 슬립링 유지 보수 필요 - 독립된 직류 여자 시스템 필요 - 계자측 손실 야기 	<ul style="list-style-type: none"> - 계자측 컨버터 사용치 않음 - 여자 시스템에 의한 손실 없음 - 슬립링 존재하지 않음 - 높은 발전기 효율 - 영구자석 사용에 의한 비용 증가 - 고온 및 회로 단락에 의한 영구자석 감자 - 발전기의 부피가 크고 무게 증가
시스템 구성		

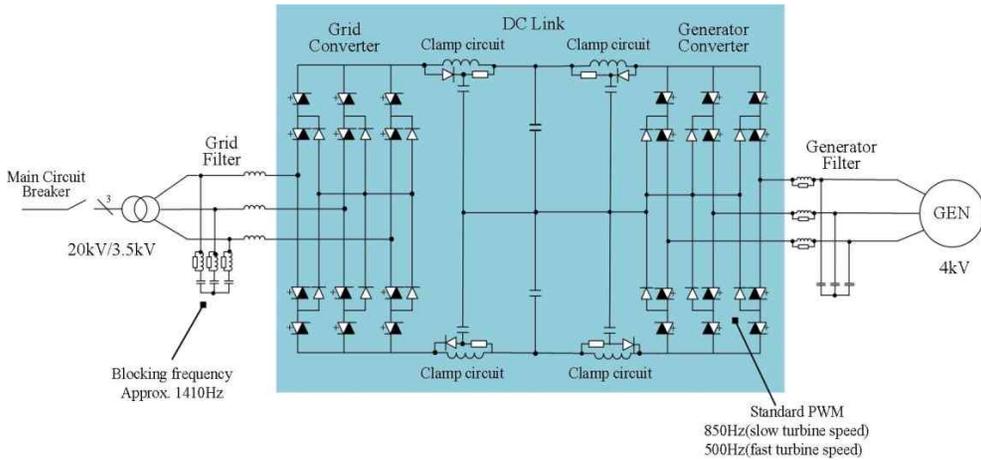


그림 4. 3-레벨 NPC 컨버터

3. 풍력발전 전력변환시스템 기술동향(6)

3.1 2-레벨 컨버터[19]

그림 3은 Gamesa사의 G10x 4.5MW 풍력 터빈 모델에 적용한 전력 변환 시스템 회로이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 2-레벨 컨버터 모듈 6개를 병렬 결선하여 전류 정격을 증대하였으며, 스위칭 소자로는 1,700V 전압 정격을 갖는 IGBT를 적용한 저전압(690V) 전력 변환 시스템을 갖는다. 기존의 2-레벨 컨버터를 채택함으로써 간단한 구조와 동일한 전력 변환 장치 구성을 통해 제작 비용을 저감할 수 있으며, 검증된 PWM 방법과 제어 방식을 적용할 수 있다. 또한 계통측 컨버터 모듈간의 PWM 위상차를 통해 고조파를 감소시킬 수 있는 특징이 있다.

3.2 3-레벨 NPC 컨버터[20]

그림 4는 ABB사의 IGCT를 이용한 3-레벨 NPC 컨버터의 전력 변환회로를 보여주고 있다. 3-레벨 NPC 컨버터는 고전압 전력 변환 시스템 구성이 가능하고 적은 수의 소자로 전력 변환 장치를 구성할 수 있다. 또한 기존의 2-레벨 컨버터에 비해 동일 스

위칭 주파수에서 전류 리플 성분이 감소하게 되며, 제어 및 회로 구성이 간단한 특징을 가지고 있다. 하지만, 낮은 스위칭 주파수(500~850Hz) 동작으로 발전기측은 dv/dt 필터가 요구되며 계통측은 고조파 감쇄를 위해 LC필터가 필요하다. 현재 ABB사의 풍력 발전 전력 변환 시스템으로 PCS1000(3~5MW)와 PCS6000(5~32MW) 제품이 출시되고 있다.

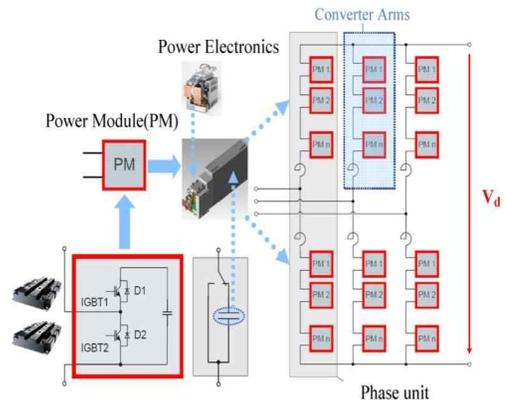


그림 5. 모듈형 멀티레벨 컨버터

3.3 모듈형(Modular) 멀티레벨 컨버터[21]

그림 5는 Siemens사의 모듈형 멀티레벨 컨버터

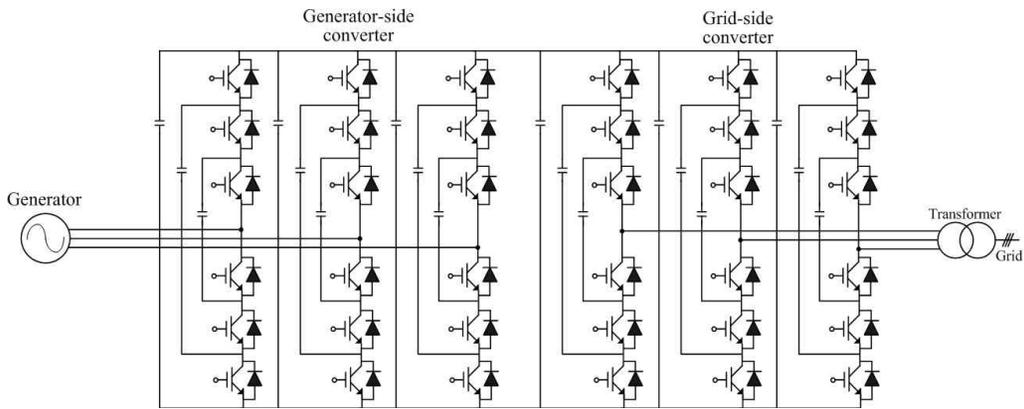


그림 6. Alstom사의 4-레벨 플라잉 커패시터 컨버터

(MMC : Modular Multilevel Converter)의 회로를 보여주고 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 모듈형 멀티레벨 컨버터의 기본 회로 구성은 다수의 하프 브릿지 회로로 구성된 모듈이 직렬로 연결되어 있다.

또한 전력 변환 장치의 모듈 구성이 가능하고 직류 고압 송전에도 적용할 수 있으며, Back to back connection에 의한 양방향 전력 전송이 가능하다. 하지만 많은 개수와 큰 용량의 직류단 커패시터가 요구되고 낮은 출력 주파수(<수 Hz)에서는 동작 불가하며 상대적으로 복잡한 제어 알고리즘이 요구된다.

3.4 플라잉 커패시터 컨버터[22]

그림 6은 Alstom사의 4-레벨 플라잉 커패시터 컨버터 회로이다. 기존의 2-레벨 컨버터에서 확장된 멀티레벨 컨버터 토폴로지 중 하나로 인버터/컨버터 시스템 연결에 의한 양방향 전력 전달이 가능하다. 계통측 출력 고조파를 저감할 수 있기 때문에 필터의 사이즈와 출력 전압 레벨의 증가로 계통측 변압기의 무게 및 사이즈 역시 감소시킬 수 있다. 반면 플라잉 커패시터 컨버터는 출력 전압 레벨의 증가에 따라 많은 커패시터가 필요하고 초기 충전회로 및 플라잉 커패시터의 전압 불균형 문제가 있기 때문에 이에 따른 추가

적인 제어 알고리즘이 필요하다.

4. 결 론

해외 풍력발전 현황과 풍력 발전기 운전 및 발전전력의 계통 연계를 위한 전력변환시스템 기술동향을 요약하면 다음과 같다.

- 풍력터빈시장은 2008년 이후 해상용 풍력터빈 시장이 급격히 성장하기 시작하였다. 이와 함께 풍력터빈의 대용량화가 가능해짐에 따라 블레이드 직경 또한 증가추세를 보여주고 있다.
- 풍력발전시스템의 경우 5MW 급 이상의 발전용량을 가지며 직접 구동형(Direct-drive) 가변속 운전이 가능한 해상용 풍력터빈 시장의 점유율이 지속적으로 확대되고 있다.
- 초대형 해상용 풍력터빈의 운전과 발전전력의 계통 연계를 위한 안정적인 전력 공급과 높은 전력 품질을 만족시킬 수 있는 고전압/대전력용 전력변환장치의 연구개발이 필요한 실정이다.

향후 초대형 해상용 풍력터빈이 주를 이룰 것이며, 선진 풍력터빈 제조사들의 경우 연구개발을 통해 기술 격차를 더욱 벌려 시장 경쟁력을 높일 것으로 예상되는바 국내 풍력산업 역시 10MW급 이상의 초대형

해상용 풍력터빈 관련 연구개발의 지속적인 투자가 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Chen, Z., Blaabjerg, F. "WIND ENERGY-The World's Fastest Growing Energy Source," IEEE Power Electronics Society Newsletter, Vol.18, No. 3, 2006.
- [2] Florence, J., "Global wind power expands in 2006," http://www.earth-policy.org/index.php?indicators/C49/wind_power_2006, last accessed June 2009.
- [3] GMEC, "Global Wind 2009 Report," Mar. 2010.
- [4] 방덕제, "유럽의 해상풍력 시장 및 기술동향," 한국마린엔지니어링학회지, 제36권, 제5호, pp. 558~567, 2012.
- [5] Global Wind Energy Council, "Global Wind Statistics 2012," Feb. 2013.
- [6] 황선환, "대용량 직접 구동형 풍력 발전을 위한 멀티 모듈 영구자석형 횡자속 발전기의 제어 특성 연구," 부산대학교, 박사학위논문, 2011.
- [7] Bang, D., "Design of transverse flux permanent magnet machines for large direct-drive wind turbines", PhD-thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2010.
- [8] BTM Consults, "World Market Update 2012," Mar. 2013.
- [9] Dale, M., HIS-Emerging energy research, "Europe offshore wind supply chain: Responding to Growth," in Proc. EWEA (European Wind Energy Association) 2011, Brussels, Belgium, Mar. 14-17 2011.
- [10] Siemens, "SWT-3.6-107-New dimensions," 2009.
- [11] Clipper, "Recent advances in wind turbine technology and the contribution of power electronics to wind generated electricity," APEC 2007, Mar. 2007.
- [12] Areva Wind GmbH, Offshore windpower M5000, 2010.
- [13] Vestas, V112-3.0MW.
- [14] Enercon, E-126, 7.0MW.
- [15] Mitsubishi Heavy Industries Mitsubishi new wind turbines, MWT-1000A & MWT-S2000, 2003.
- [16] VENSYS ENERGY, Vensys 90/100 technical details, 2009.
- [17] Goldwind, Direct drive permanent magnet wind turbine experience, 2010.
- [18] GE, 4.0-110 Offshore wind turbine, 2010.
- [19] Jens Birk and Bjorn Andresen, "Parallel-connected converters for optimum reliability and grid performance in the Gamesa G10x-4.5MW wind turbine," EWEA 2008.
- [20] Peter K. Steimer, "Medium voltage frequency converters for MW wind turbines, ABB," 2002.
- [21] H. J. A. Knaak, "Modular multilevel converters and HVDC/FACTS: A success story," in Proc. EPE 2011, pp. 1-6, 2011.
- [22] Converterteam, Multilevel-Umrichter mit floating capacitors, 2008.

◇ 저 자 소 개 ◇



정태욱(鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~2006년 LG전자 DAC연구소 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임 연구원. 2007년~현재 경남대학교 전기공학과 조교수.

Tel : (055)249-2628

Fax : (0505)999-2161

E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr



황선환(黃善煥)

1978년 7월 15일생. 2004년 부산대학교 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2011~2012년 플로리다 주립대 박사후과정. 2012년~현재 경남대학교 전기공학과 조교수.

Tel : (055)249-2744

Fax : (0505)999-2161

E-mail : seonhwan@kyungnam.ac.kr



방덕제(方德濟)

1971년 5월 17일생. 1996년 부경대학교 기계설계공학과 졸업. 1998년 동 대학원 냉동공학과 졸업(석사). 1998~1999년 한국전기연구원 메카트로닉스연구그룹. 2000~2001년 한서엔지니어링 과장. 2002~2006년 신성이엔지 기술연구소 선임연구원. 2006~2010년 네덜란드 Delft University of Technology 전기공학과 졸업(박사). 2011년 3월~11월 현대중공업 기계전기연구소 수석연구원. 2011년 12월~현재 한국전기연구원 전기추진연구본부 전동력 연구센터 선임연구원.

Tel : (055)280-1487

E-mail : djbang@keri.re.kr