

특집 : 신재생에너지

풍력발전 전력변환장치의 실 운전 기술

박 가 우*, 이 현 영**, 강 신 일**
 ((주)플라스포 기술연구소 *연구소장, **선임연구원

1. 서론

풍력발전 시스템은 운전 방식에 따라서 고정속 운전방식 (fixed rotor speed type)과 가변속 운전 방식(variable rotor speed type)으로 분류되며, Gear box를 이용하여 회전자의 속도를 높여 주는 geared type과 기어 없이 가변속 운전을 위한 gearless type으로 나눌 수 있다. 최근의 추세는 가장 발전 효율이 높은 gearless 가변속 운전 방식으로 다극 동기발전기를 사용하며, 전력 변환 장치를 이용하여 생산된 전력을 계통으로 보내주는 것이다. 본고에서는 국내에서 최초로 개발, 인증된 750kW급 풍력 발전기에 사용된 계통연계 방식의 전력 변환장치의 간단한 소개와 풍력터빈에 장착한 실 운전 경험을 중심으로 몇 가지 서술하고자 한다.

2. 본론

대용량 인버터를 구성하는 Topology에는 저압에서는 2-레벨 방식이 주로 사용되어지며, 고압에서는 멀티레벨 방식과 최근에 개발되고 있는 H-브리지방식 등이 있다. 이들 방식의 결정은 인버터를 구성하는 전력용 반도체 소자의 전압 내량의 제한 때문이다. PWM 방식의 인버터/컨버터에 가장 많이 사용되고 있는 IGBT 소자는 600V 급에서 최근에 6500V 급들이 개발되어 적용되고 있으며, 각 전압 별 최대 전류내량은

600V-300A, 1200V-3600A, 1700V-3600A, 3300V-1200A, 6500V-600A까지 Module Type으로 개발되어 사용되고 있다. 이들을 사용하여 대용량화 하는 방법에는 소자병렬, Stack병렬방식이 있다.

풍력발전시스템은 장치의 설치공간과 무게에 대한 제약으로 가장 컴팩트한 구조로 고 신뢰성의 인버터를 구성하여야 하므로 2-Level방식의 인버터를 개발사양으로 결정 하였다. 그림 1은 전력변환장치에 대한 주요 Block diagram을 나타낸다.

본 전력변환장치는 그림 1과 같이 인버터, 출력 필터, 보호 장치, 냉각장치로 구분된다. 전력변환 장치의 구성은 Back to Back 구성으로 영구자석 동기발전기에서 발생된 전력을 직류로 변환해주는 PWM 컨버터, 변환된 직류 전원을 계통

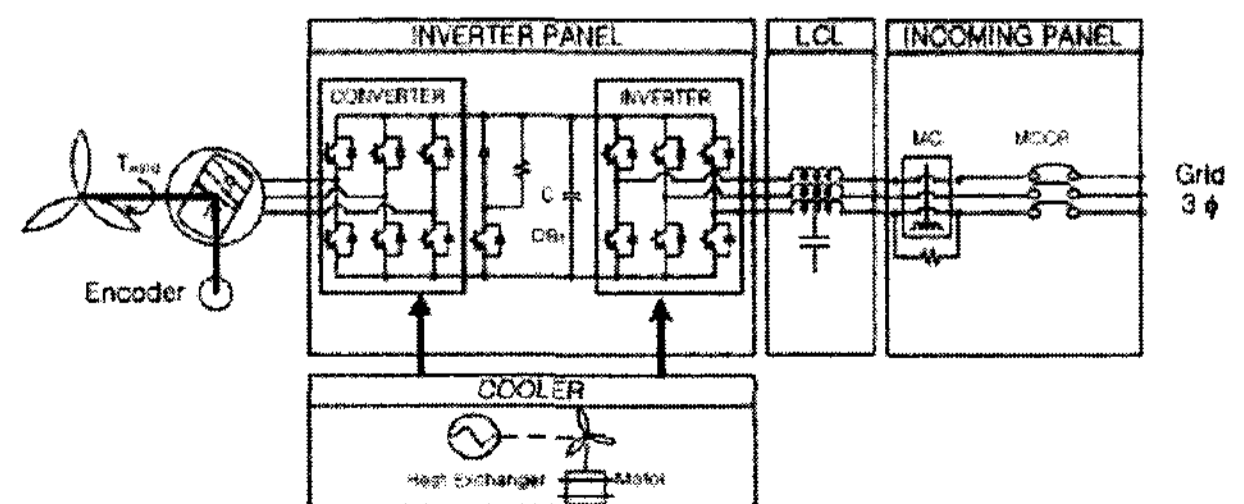


그림 1 750kw Gearless type 풍력발전용 인버터블럭도

표 1 750kw 인버터의 전기적 사양

	Parameters	Value	Unit
Output to grid	Rated grid voltage	690	[Vrms]
	Rated output power	750	[kW]
	Rated DC link voltage	1250	[V]
	Maximum output current	643	[Arms]
Input from generator	Rated input power	805	[kW]
	Rated input voltage	780	[Vrms]
	Maximum input voltage	905	[Vrms]
	Rated RPM	25	[RPM]
	Maximum RPM	29	[RPM]
	Rated input current	598	[Arms]

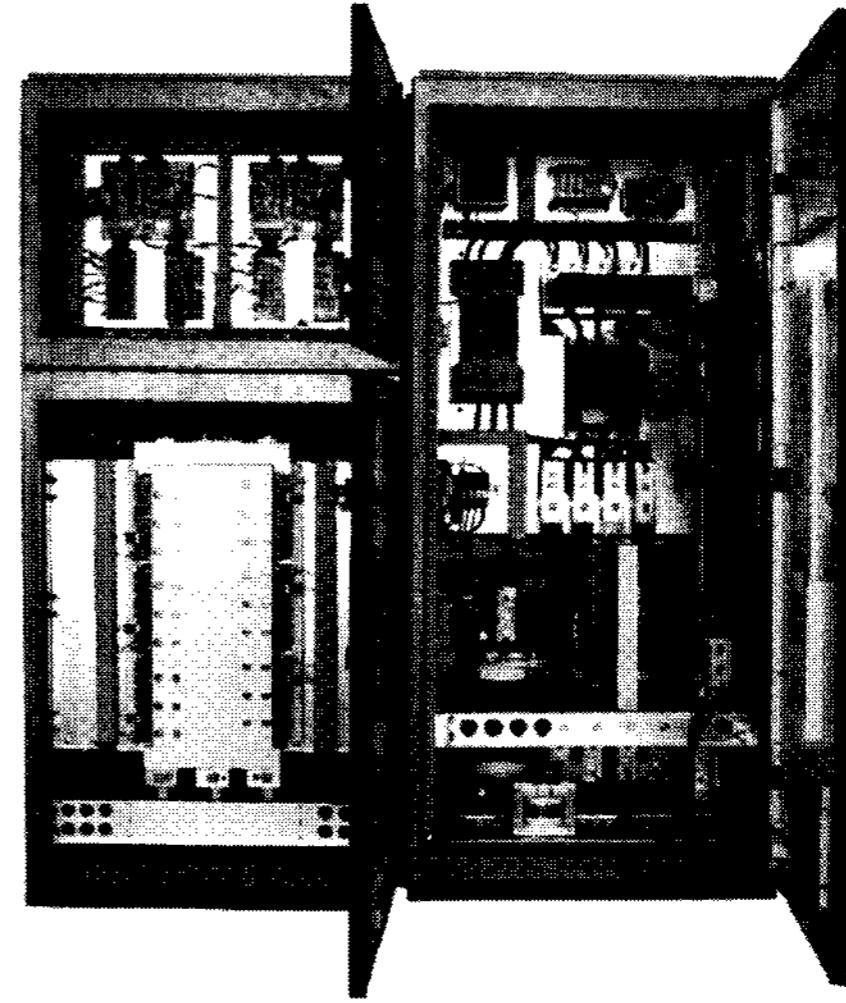


그림 2 750kw 풍력용 인버터 실물 사진

에 동기되어 다시 교류 전류로 주입하는 PWM 인버터, 돌발적인 시스템의 과속도 보호를 위한 Dynamic Braking 부로 구성되어 있다.

표 1에 750kw 풍력용 인버터의 전기적 사양을 보여준다.

인버터 시스템의 기본적인 제어 프로그램은 DC-link 전압 제어, 전류 제어 프로그램으로 구성되며 유효 및 무효전력 제어, LVRT(Low-voltage ride through) 기능 외 계통의 Sag, Swell, Unbalance, Interruption, Under/Over frequency 등의 보호 기능을 가지고 있다.

컨버터 시스템은 광범위한 속도 범위에서 동기발전기의 토크(속도)를 제어 하는 토크(속도) 제어 및 전류 제어 프로그램으로 구성되며 발전기 정출력 제어, Flicker를 위한 sequence 기능, LVRT 기능 이외에 각종 보호 기능을 가지고 있다. 기타 이러한 제어 알고리즘과 함께 시스템의 운전에 필요한 sequence 제어, offset 값 계산, fault 처리, 상위통신(RS-232, RS-485(MODBUS), CAN 등), MMI 통신 등으로 구성되어 있다.

풍력 터빈에 적용되는 전력변화장치는 주위 온도를 고려하여 내부 방열 및 냉각장치를 설계하게 되는데 냉각장치의 설치 위치에 따라서 주위 온도가 변할 수 있다. 따라서 타워의 열 흐름을 파악하여 냉각장치의 설치위치를 결정하는 것이 중요하다.

풍력발전기술은 기계, 전기, 전자, 재료 등 다양한 기술이 접목된 분야이다. 기계적인 큰 문제로 나타나는 현상은 진동, 소음이 대표적이라 할 수 있다. 하지만 작은 기계적인 문제로 발생할 수 있는 현상은 대부분 전기적인 형태로 나타난다. 출력전력이 기준보다 작게 혹은 많이 나오거나 출력전력이 흔들리거나 Fault를 발생 시킬 수도 있다. 한 예로 블레이드의 표면이 거칠어지면 출력전력이 정상일 때보다 약 10%까지 떨어질 수 있다고 알려져 있다. 따라서 하나의 문제를 해결하

기 위해서는 다양한 접근방법과 노력이 필요하다.

그림 2는 750kW 풍력발전기의 인버터 panel과 incoming panel을 배열한 모습이다. 오른쪽이 incoming panel이고 왼쪽이 inverter panel 이다. incoming panel의 전면에는 주 제어전원의 차단과 투입을 위한 차단기의 핸들을 장착하였으며 풍력발전시스템 전체에 제어전원을 공급하기 위한 40KVA, 690/380VAC의 트랜스포머는 하단에, 그리고 계통과 연결하기 위한 차단기, 제어전원용 트랜스포머, 초충회로, DPM등을 전면에 배치하였다. Dimension은 800(W) x 800(D) x 1850(H)이며, incoming panel의 상부에는 DBR이 분리형으로 설치되었다. Dimension은 800(W) x 800(D) x 2150(H)이 된다.

3. 풍력 터빈의 운전

풍력발전시스템의 운전특성은 바람의 속도에 따른 발전기의 출력파워를 최적으로 제어하는 속도 토크곡선을 갖게 되는데 적용된 시스템은 그림 3과 같은 속도 대 토크 곡선에 따라 운전된다. I, II로 표시된 구간에서는 블레이드의 효율(바람을 토오크로 전달하는 효율)이 가장 높도록 optimum tip speed ratio(Cp,max)에서 운전된다. 즉, 수식은 다음과 같다.

$$T = \frac{0.5\pi\rho R^5}{\lambda_{opt}^3 C_{P, \max}} \cdot \omega^2$$

III 구간에서는 더 이상 블레이드 속도가 증가하지 않도록 하면서 일정한 전력을 출력하도록 한다. 이 구간에서 인버터

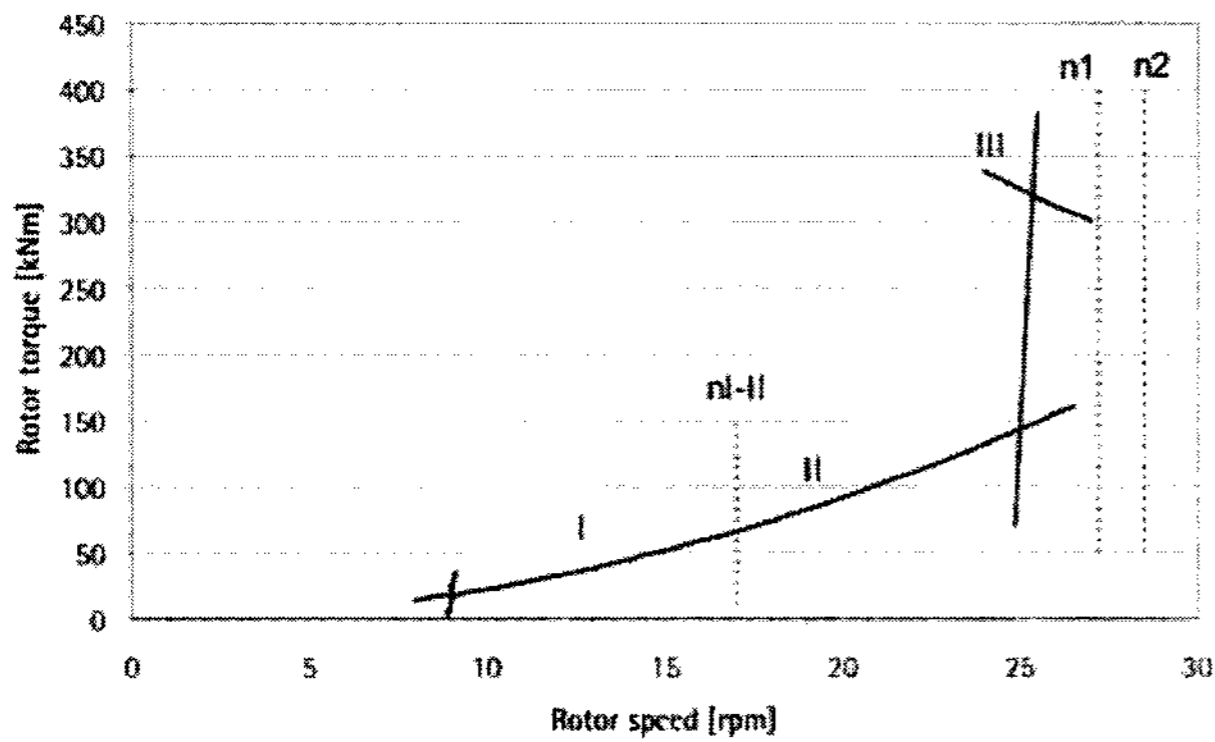


그림 3 풍력 인버터의 속도 대 토크(출력)운전 곡선

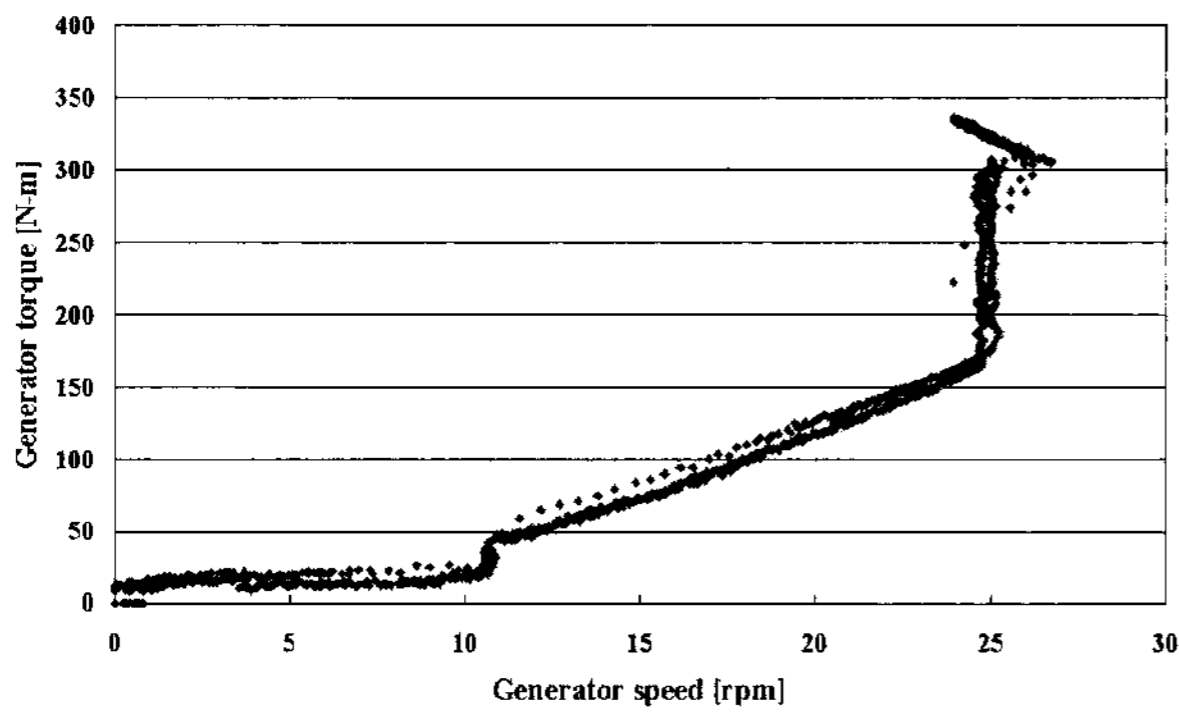


그림 4 속도대 발전기 출력곡선의 실 운전 data

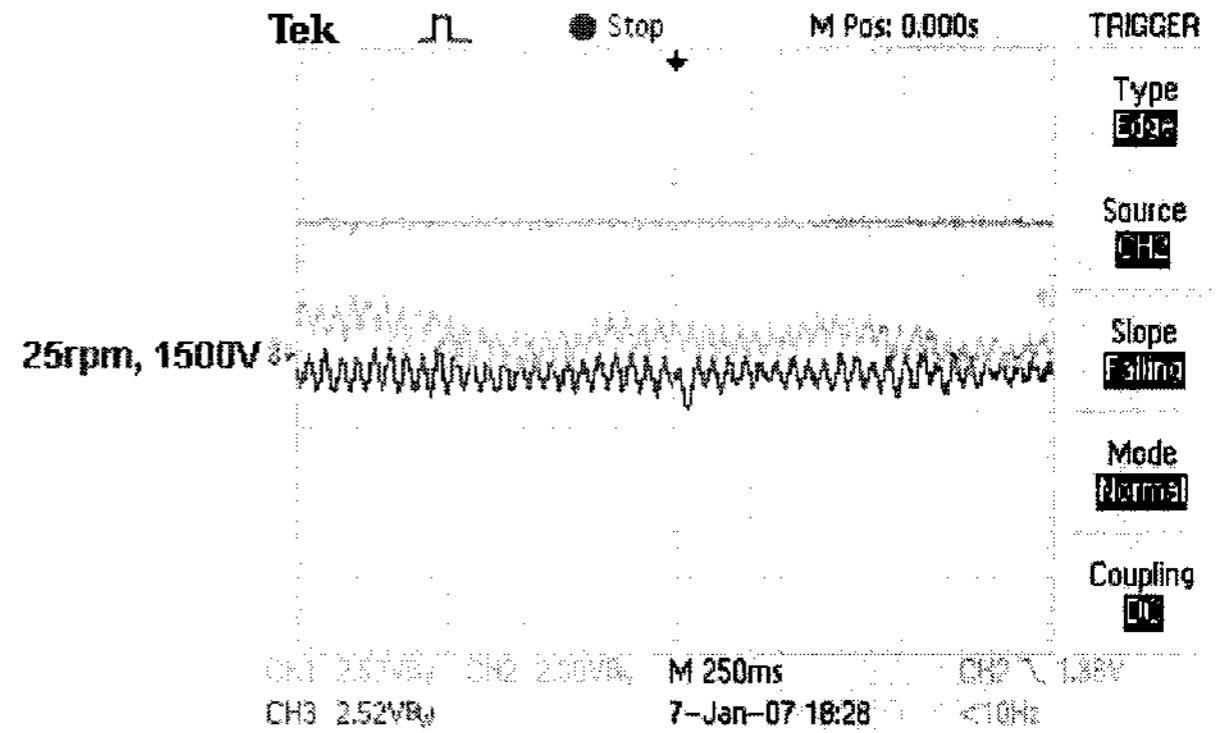


그림 5 발전기 속도에 따른 출력 전압과 전류 리플

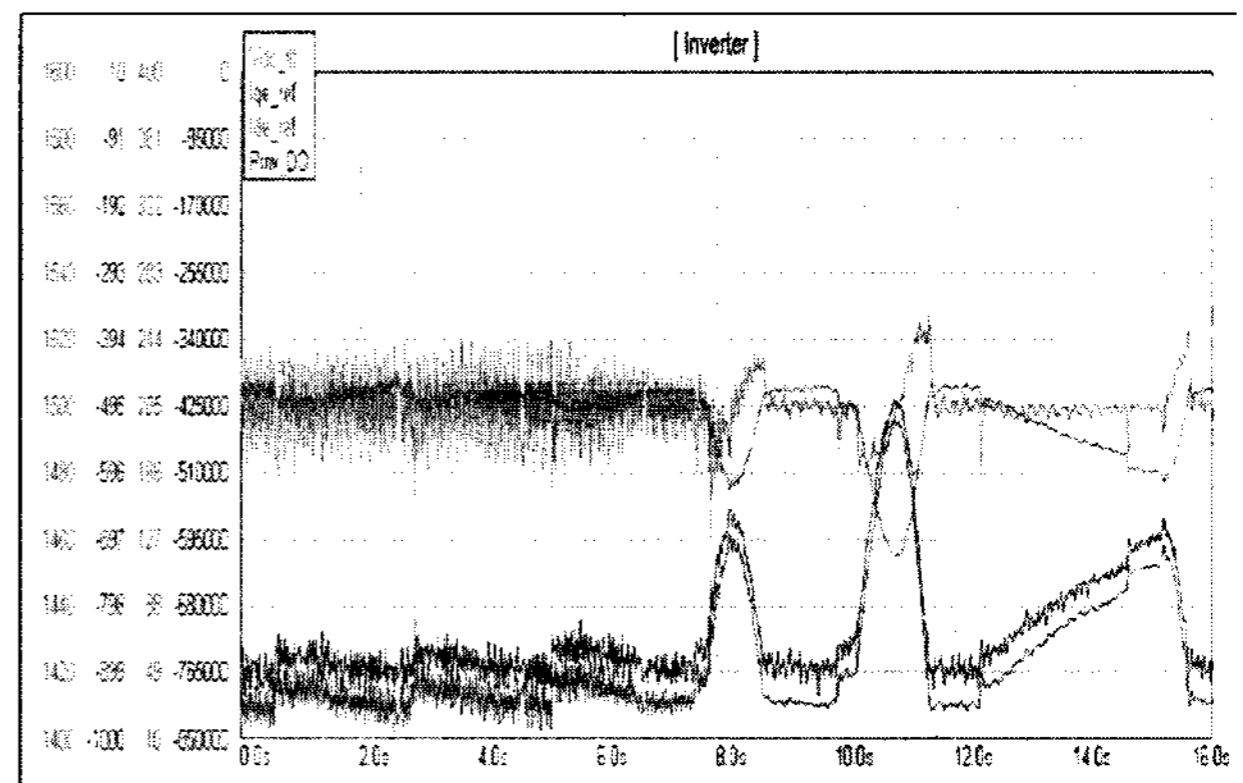


그림 6 바람에 따른 출력 파워의 변동

는 정출력 운전을 수행하게 된다.

그림 4는 은 위와 같은 속도 대 토크 곡선으로 운전했을 때 전력변환장치의 실제 출력 곡선을 보여준다.

풍력발전시스템의 각 장치는 PLC 등의 중앙제어기를 중심으로 통신으로 연결되어 있다. 이때 대부분의 장치는 전력변환장치와 발전기가 설치된 너셀 안에 위치하게 되므로 노이즈에 강한 RS-485(MODBUS), CAN 등의 통신 방식을 사용하는 것이 좋다. 또한 전력변환장치는 최대한 외부로 노이즈가 방사되지 않도록 차폐에 신경써야 한다. 이 외에도 시스템 구조상 슬립링을 사용해서 발전기 내부를 거치는 시그널이 존재한다. 그렇기 때문에 노이즈 차폐에 대해서 특히 주의해야 한다.

실제 풍력터빈을 운전하다 보면 발전기의 연속 운전시 발전기의 내부 온도 상승에 따른 출력 변화를 볼 수가 있다. 따라서 발전기의 온도상승에 따른 내부 파라메타의 변동을 보상하여 풍력시스템을 제어할 필요가 있다. 또한 동일한 바람속도라 하더라도 계절에 따른 온도변화가 출력파위에 영향을 미치는데 이는 대기 온도에 따른 공기밀도의 영향으로 이에 대한 보상도 같이 구현되어야 함을 느끼게 된다.

그림 5는 발전기의 속도에 따른 출력파위의 리플을 보여주는 실험 파형으로 1회전당 발생되는 것으로 발전기 축과 Blade와 같은 기계적 요인에 의한 것으로 인버터 운전시 전압과 전류에 그 현상이 나타남을 확인 할 수 있다.

그림 6은 계통연계 인버터에서 최종 출력변동을 보여주는 것으로 바람의 변동에 따른 출력 파워의 변동이 1~2초 이내에 50%정도까지 변동됨을 알 수 있다.

이러한 출력변동의 응답성을 인버터 및 pitch 시스템에서 적절하게 다루지 못하면 다음에서 보여주는 바와 같이 정상적인 운전을 하지 못하고 출력제한 및 빈번한 protection 발생으로 시스템 운전이 지장을 유발하게 된다. 따라서 전체적인 시스템 관점에서 각부분의 응답성을 설계, 분석하여 제어기에도 반영되어야 한다.

그림 7은 인버터 토크제어기와 pitch 제어기와의 불일치로 발생하는 문제로 인버터 토크제어기의 성능도 우수하여야 하지만 pitch 제어기의 Angle 제어에 문제가 발생하면 시스템 운전이 크게 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

그림 8은 시스템 연계 운전시 공진현상을 보여주는 것으로

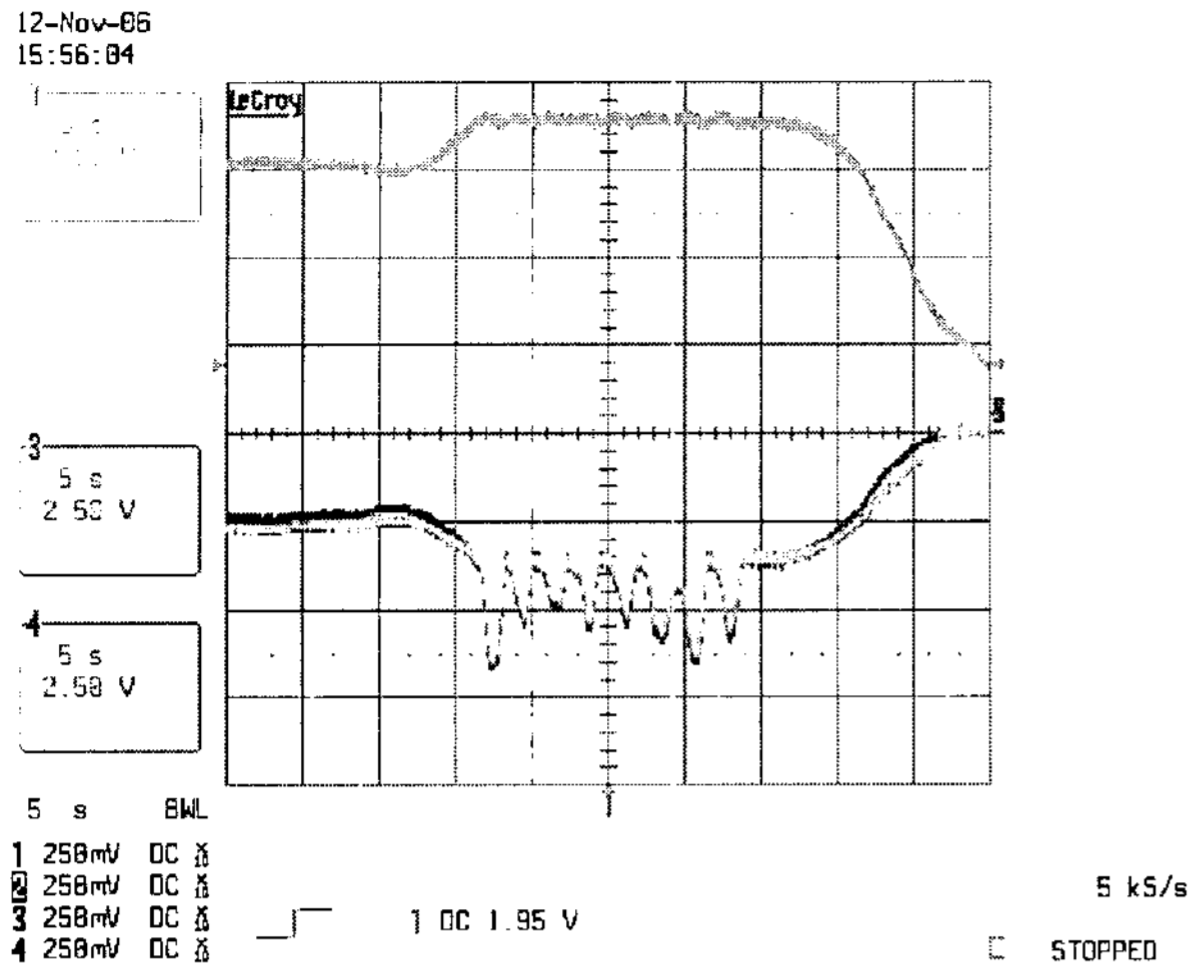


그림 7 인버터 토크제어기와 pitch제어기의 연동운전시
CH1. Wrpm(± 28 rpm) CH2. Torque_ref(± 400 kNm)
CH3. Torque_real(± 400 kNm), CH4. Power_real(± 1000 kW)

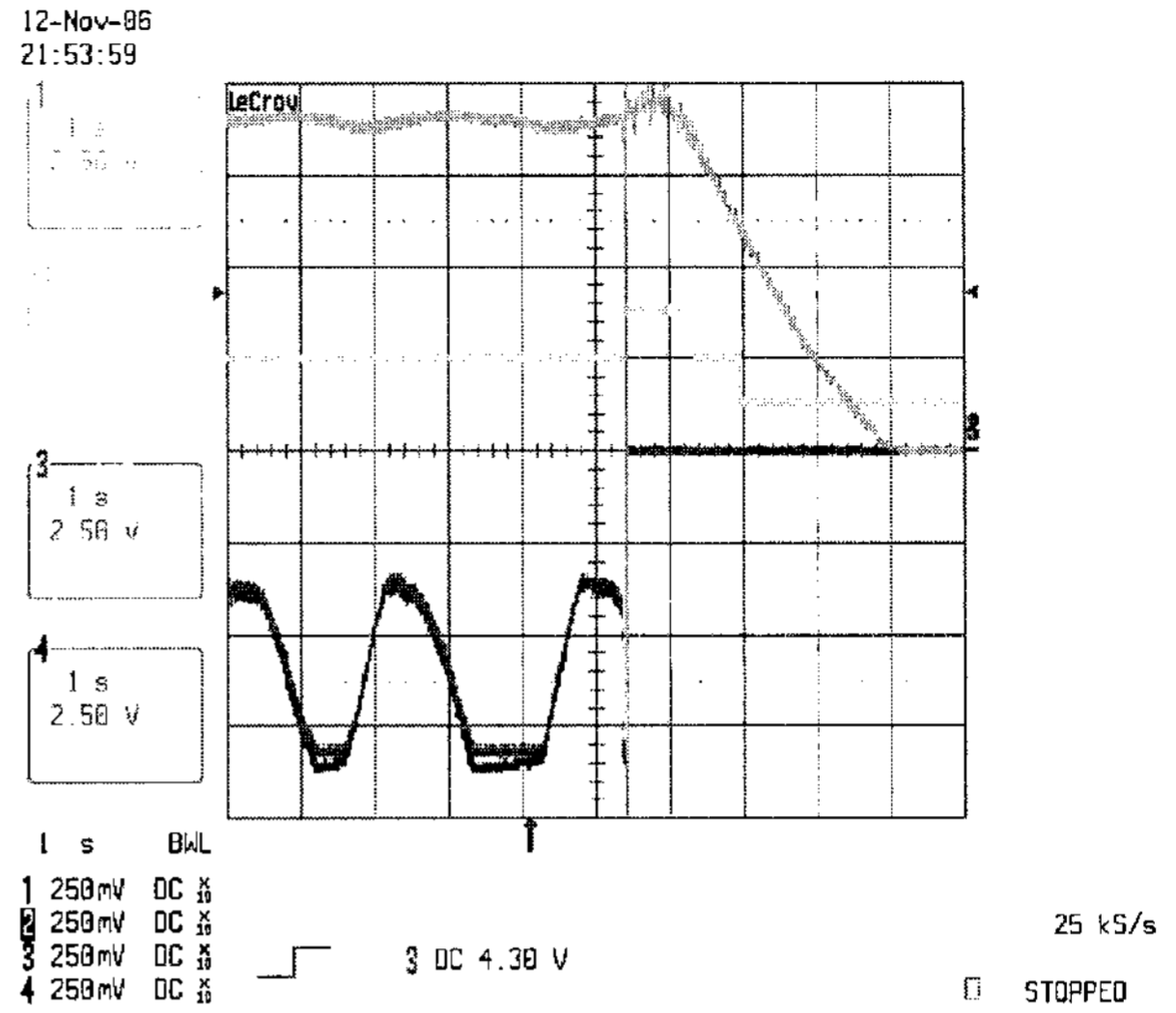


그림 9 공진시 속도증가에 따른 정지 파형
CH1. Wrpm(± 28 rpm) CH2. Flag_zone(± 8)
CH3. Torque_real(± 400 kNm), CH4. Power_real(± 1000 kW)

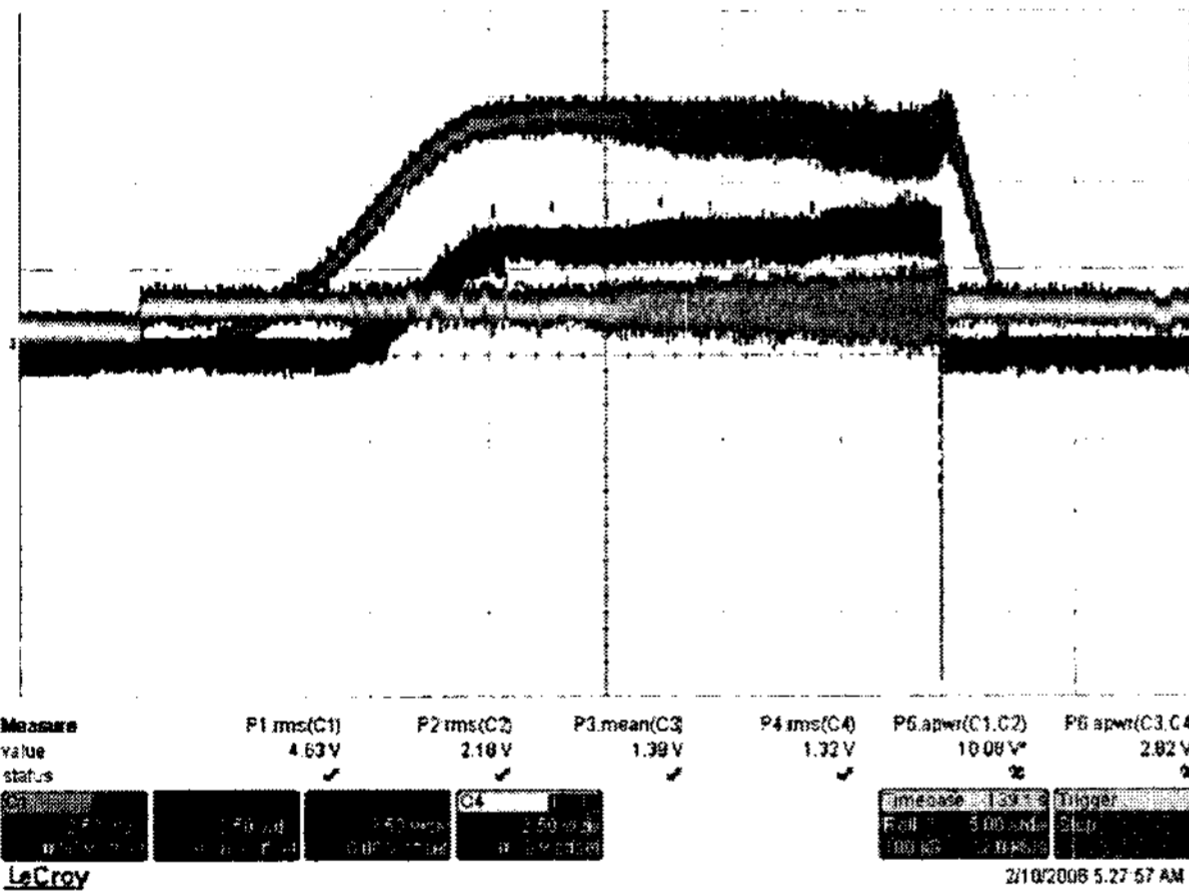


그림 8 속도 증가에 따른 공진 현상

기계적 공진주파수와 발전기 출력 주파수와의 공진(약 12.5hz)으로 시스템이 정지되는 것을 보여준다.

이와 같은 현상은 대부분의 기계적 시스템을 운전하게 되면 발생할 수 있는 문제로 이의 제어를 원할이 수행하기 위해서는 notch/damper 필터와 같은 공진을 회피할 수 있는 기능이 구현 되어야 한다.

그림 9는 속도대비 발생 토크 운전영역에서 해당 영역으로 전이 못하고 바람의 속도가 증가하여 헌팅중 Over speed 영역으로 들어가 Stop 되는 현상을 보여준다.

그림 10은 위와 같은 여러 문제점을 해결한 뒤 비교적 정상적으로 운전 되는 과정을 보여주는 그림이다.

발전기의 속도 변동에도 출력과위를 일정하게 유지됨을 알

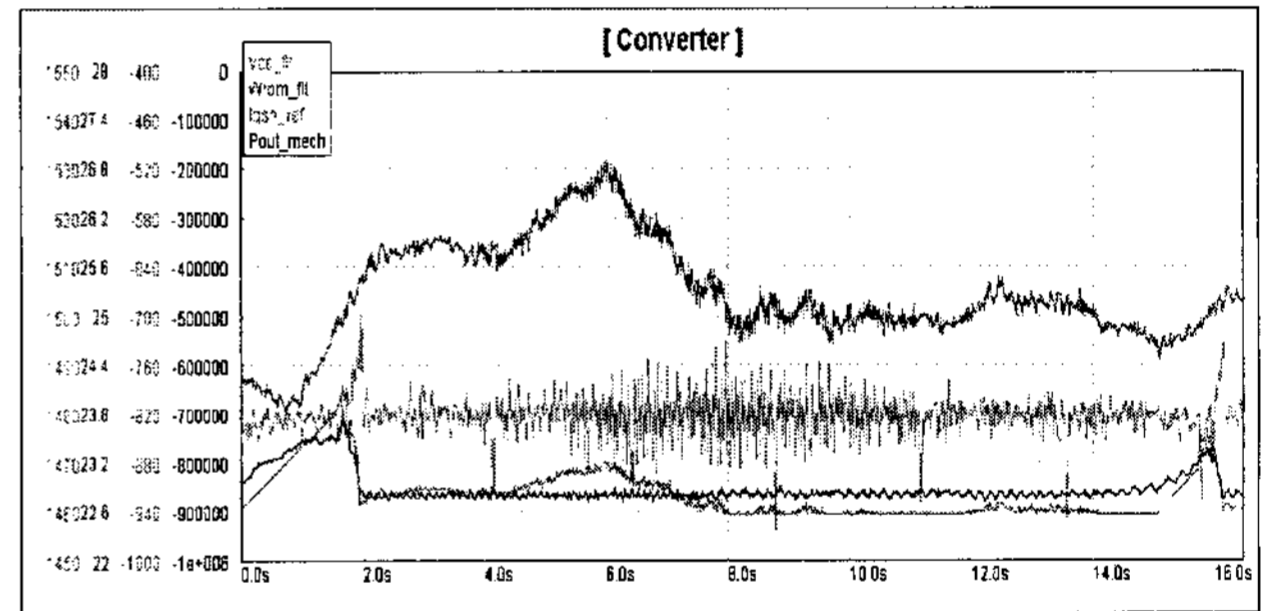


그림 10 발전기 출력 변동에 따른 일정 출력 운전 파형

수 있다.

이와 같이 풍력시스템을 실 운전하게 되면 실험실에서 격지 못한 여러 현상들이 나타나게 된다.

상기와 같은 다양한 조건과 실 환경 하에서의 실증시험 운전 경험을 바탕으로 제품의 신뢰성 확보와 기술의 축적이 이루어지는 것은 어찌 보면 당연한 일이고 그러한 과정이 필수 과정이라 여겨진다.

4. 기술 동향

최근 세계적으로 이슈가 되고 있는 풍력발전 기능은 크게 LVRT, Flicker, Harmonics이다. LVRT는 계통의 저전압 혹은 영전압 상황에서도 풍력발전기가 정상운전을 하는 능력을 말한다. 또한 이러한 상황에서 유효전력 뿐만 아니라 무효전력을 자유롭게 제어할 수 있어야 한다. 전체 발전용량에서

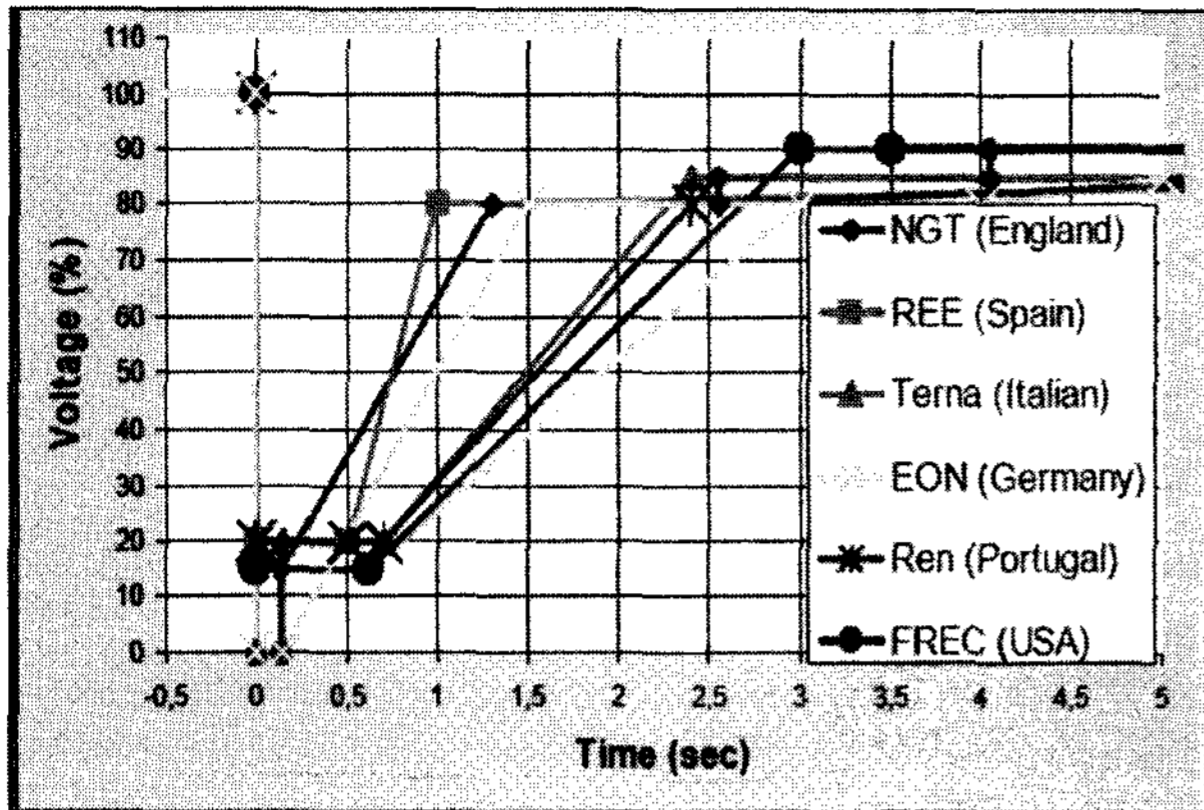


그림 11 계통 저전압에 따른 각국의 기준

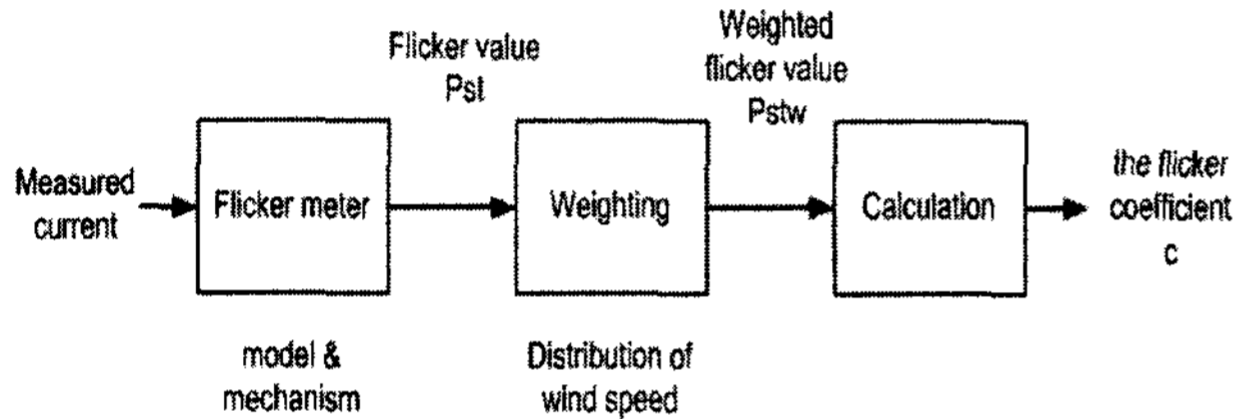


그림 12 플리커 처리 절차

풍력 발전기가 차지하는 부분이 점차 커짐에 따라서 그 중요성이 높아지고 있다. DFIG 방식의 발전기에서는 crow-bar를 이용한 방법을 주로 사용하고 있으며 PMSM 방식의 발전기에서는 Dynamic braking resistor를 이용한 방식이 주를 이루고 있다. 본 인버터에서 사용한 방식은 Dynamic braking resistor를 이용한 방법과 컨버터의 출력 제어를 연동하여 사용하고 있다.

그림 11은 각 나라별 저전압 한계를 보여주고 있다. 최저 0 전압에 대해서도 풍력 발전기는 Fault를 발생시키지 않고 계통에 연결되어 있어야 하는 것을 볼 수 있다.

Flicker는 계통 외란에 의해서 발생하는 램프의 깜빡임으로 정의된다. 즉, 풍력발전기가 계통전압에 얼마나 영향을 줄 수 있는지를 나타내는 지표라고 할 수 있다. 이는 IEC 61400-21에 규정하고 있으며 계통 연계 풍력 터빈의 전력 품질 특성(Flicker)을 나타내기 위해 결정되어야 할 사항에 대한 정의와 사양, 측정절차 등이 언급되어 있다. 플리커는 그림 12와 같은 절차로 측정된다.

플리커는 측정된 전류를 가상의 계통 임피던스(플리커 meter)에 입력하여 나오는 전압을 기준으로 측정한다. 이때 풍속은 몇 분 혹은 몇 시간에 대한 값이지만 풍력 발전기가 설치된 사이트의 정확한 풍속을 반영했다고 보기 어려우므로 이전 몇 년간의 풍속확률분포(Weighting)로 환산하여

표 1 750kw Wind turbine 사양

Parameter	Value
Design Class	IEC Class IA
Nominal Power	750 kW
Rotor Diameter	50 m
Rotational Speed	9~28 rpm, 25 rpm (rated)
Hub height	50 m
Operating Range	Cut-in : 3 m/s Rated : 12 m/s Cut-out : 25 m/s
Generator Type	Radial Flux. Permanent
Drive Train	Direct Drive System
Yaw Control	Electric Motor
Power Control	Pitch Regulation
Tower	Tubular Steel Tower
Safety System	Aerodynamic & Mechanical Brake

반영 한다. 또한 사람이 램프의 깜빡임을 인지하는 가장 주된 주파수는 약 8.8Hz이므로 이 주파수에 해당하는 성분엔 큰 weighting factor를 준다.

플리커의 원인으로서는 풍속의 변화, 타워 그림자 효과, 무효 전력 변동, 제어 방식 등이 있다. 이 중에 풍속의 변화가 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있지만 풍력 시스템 운전 방식에서도 고려되어야 한다.

기존에도 Harmonics에 대해서는 자주 언급되어 왔지만 아직까지 풍력 인버터에 대한 직접적인 Harmonics 규정은 나와있지 않았다. 일반적으로 IEC61000-3-6에 정의된 중고압 이상의 Harmonics 규정에서 저압으로 환산한 값을 사용하고 있었다.

국제적으로 관련 규정을 마련하고 있으며 기본파의 정수배 Harmonics(60~2000Hz) 뿐만 아니라 Inter harmonics (60~2000Hz, 6.25Hz step), Higher harmonics (2~9kHz, 200Hz step)까지 규정하고 있다. 이미 유럽의 성능평가, 인증 협력체(MEASNET)에서는 그와 같은 규정을 마련해놓고 있다.

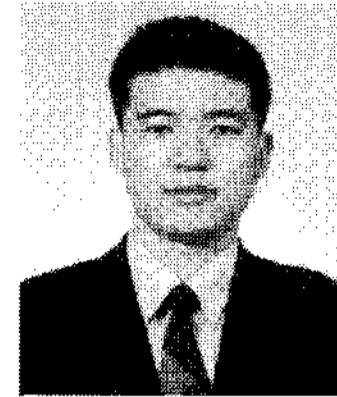
5. 결론

풍력발전기술은 기계, 전기, 전자, 재료 등 다양한 기술이 접목된 분야이다. 하나의 문제에 대해서 복합적인 해석이 필요하고 상호협력이 무엇보다 중요하다. 현재 국내에서 750kW급 풍력발전기는 양산이 이루어지고 있고 2MW급, 2.5MW급 풍력 발전기가 국내에서 개발진행중이며 일부기술

은 어느 정도 기술 확보가 이루어졌다고 볼 수 있다. 하지만 일부 기술이 앞서간다고 하여 전반적인 풍력발전기술이 높아질 수는 없는 분야이므로 전체 시스템 관점에서 서로의 기술 접목과 교류가 있어야 될 것으로 본다. 앞서서도 언급 하였듯이 다양한 현상의 문제점들이 해결되어지는 것 또한 각각의 기술부분에서 적극적으로 참여하였기에 이루어질 수 있는 것이었다고 볼 수 있다. 아직도 선진외국 업체와 비교해 시간과 비용의 투자가 절대적으로 불리한 상황에서도 국내 중공업 및 중전기 산업의 기반 하에 빠르게 접근되어지는 것은 다행한 일이라 여겨진다. 그리고 전력전자 응용기술의 한 부분으로 풍력용 전력변환장치가 차지하는 비중이 낮지 않은 상황에서 앞으로 이 분야에서의 중요성 또한 커지고 있다고 볼 수 있다.

이러한 풍력발전을 포함한 신재생에너지 관련 분야에서 전력전자 엔지니어들에게는 다양한 응용기술에 따른 더 많은 노력이 요구되어지고 있어 어려움이 뒤따르겠지만 이 분야에 종사하는 우리들에게는 이러한 필요성 증가가 다행이지 않나 생각한다. 그리고 이 분야의 기술 또한 국내 엔지니어에 의해 세계적인 수준이 되는 그날을 기약하며 본고를 여기서 마치고자 한다. ■■■

〈 필 자 소 개 〉



박가우

1992년 2월 대전 산업대학 전자공학과 졸업.
1995년 2월 충북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 충북대(공박). 1994년~2003년 포스콘 기술연구소 선임연구원. 2004년~현재 (주)플라스포 상무이사. 연구소장.



이현영

2002년 2월 울산대 제어계측공학과 졸업. 2004년 2월 동 대학원 전기전자정보시스템공학과 졸업(석사). 2004년 1월~현재 (주)플라스포 기술연구소 과장.



강신일

2002년 2월 전북대 전기공학과 졸업. 2004년 2월 동 대학원 대체에너지학과 졸업(석사). 2004년 1월~현재 (주)플라스포 기술연구소 과장.