

2 MW 풍력발전기용 병렬형 Inverter 개발

최 효진¹⁾, 권 세진²⁾, 손 윤규²⁾, 서 재학²⁾, 장 성덕²⁾, 오 종석²⁾

강 신일³⁾, 이 현영³⁾, 권 오정³⁾

이 병철⁴⁾, 황 진수⁴⁾, 류 지윤⁴⁾

Development of a Parallel Inverter for 2 MW Windpower Generator

Hyojin Choi, Seijin Kwon, Yoongyu Son, Jaehak Suh, Sungduk Jang, Jongseok Oh

Sinil Kang, Hyunyoung Lee, Ohjung Kwon,

Byungchul Lee, Jinsu Hwang, Jiyeon Ryu

Key words : Wind Energy Conversion (풍력에너지변환), Parallel Inverter (병렬인버터),
Grid Connected Inverter (계통연계형 인버터), PMSG (영구자석형 동기발전기)

Abstract : 본 논문에서는 750 kW 풍력발전용 인버터를 개발한 결과와 2년 동안의 현장실증을 통하여 얻어진 경험을 바탕으로 2 MW 영구자석형 동기발전기(PMSG, Permanent Magnet Synchronous Generator)의 전력변환을 위한 병렬형 인버터의 시뮬레이션과 이를 통한 설계와 제작 및 기본시험 과정을 소개하고자 한다.[2]

subscrip

PMSG : Permanent Magnet Synchronous Generator

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

IGCT : Integrated Gate Commutated Thyristor

1. 서 론

풍력에너지의 효율적 이용과 발전 비용의 경제성 측면에서 풍력발전기는 대용량화 되고 있다. 4.5 MW에서 6 MW 해상풍력용 시제품들이 설치되어 시험되고 있다. 그림 1은 1995년 이후 설치 운전 되고 있는 풍력발전기들의 평균용량의 증가를 보여주고 있다. 대용량 풍력발전기용 PMSG는 출력전압과 주파수 그리고 이를 운전할 인버터의 제어방법이 발전기 제조원가와 밀접한 관계가 있으므로 이들 상호 유기적인 검토를 통해 결정된다. 인버터를 개발하기 위한 사양설계 시작은 적정한 전압의 결정과 전력변환부의 토폴로지를 선택하는 것에서부터 시작된다. 계통의 트랜스포머는 전압에 큰 영향을 받지 않으나, 발전기에서 계통까지 연결되는 전력설비 전체에서 보면 저압방

식은 설치비용이 다소 증가되어질 수 있다. 전압과 토폴로지의 결정은 시스템의 내구성, 신뢰성, 경제성을 확보하면서 고효율과 compact화가 가능해야 한다. 본 과제에서는 입력 트랜스포머에서 발전기까지의 모든 전력설비들을 너셀(Nacelle)에 위치시켜 저압배선길이를 최대한 짧게 구성하여 설비의 경제성과 효율을 높인 병렬형 600 Vrms 급의 2-레벨 인버터를 결정하였다. 또한 전용선로가 아닌 배전선로에 연계될 경우의 선로정수들에 의한 전력품질을 분석하기위한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 토대로 시제품을 제작하였다. 최적화된 풍력발전시스템의 개발을 위해서는 블레이드, 타워, 발전기, 기어박스, 너셀 등과 더불어 전력변환용 인버터도 함께 사양설계가 이루어져야 한다.[2][3]

1-2) 포항가속기연구소

E-mail : choihyo@postech.ac.kr

Tel : (054) 279-1543 Fax : (054) 279-1799

3) (주) 플라스코

E-mail : flap45@plasco.co.kr

Tel : (031) 909-8077 Fax : (031) 909-8079

4) 유니슨(주)

E-mail : ibc@unison.co.kr

Tel : (041) 620-3425 Fax : (041) 552-7416

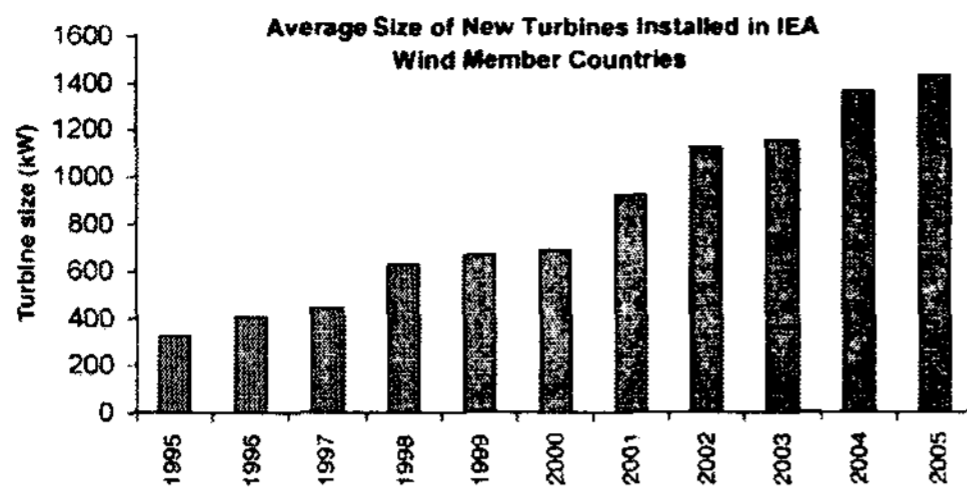


그림 1. Average size of new turbine installed in the IEA wind member countries for 1995 through 2005

2. 인버터의 설계 및 제작

풍력발전시스템 개념설계 과정에서 블레이드 정격회전속도와 기어비, 발전기 회전속도가 결정된다. 이를 바탕으로 하여 개발되어질 인버터의 기본사양을 table 1에 정리하였다.

Table 1. 인버터의 기본사양

항 목	사양	
입력정격 (Generator부)	입력전압	600 [Vrms]
	입력용량	2190 [kW]
	입력주파수	221 [Hz]
	Pole Pairs	12
	cos θ	0.91
	Rated Speed	1105 [rpm]
	PWM 주파수	3500 [Hz]
	Vdc	1080 [V]
출력정격 (Grid 부)	출력전압	600 [Vrms]
	출력용량	2100 [kW]
	출력주파수	60.50 [Hz]
	cos θ	> 0.985
	PWM 주파수	3500 [Hz]
	Vdc	1050 [V]
사용 환경	냉각방식	Closed Loop Water Cooling
	사용온도	-15 ~ 40 °C
	표고	2000m 이하
	통신방식	CAN 2.0 A
	종합효율	> 97 [%]

2.1 병렬형 인버터의 구성

2 MW이하 용량의 풍력발전기 대부분은 출력전압을 600~690 V로 하고 있고, 최근에는 3-Level 이상의 Multi-레벨 인버터와 H-Bridge 인버터로 구성된 고압인버터가 개발되고 있다. 그러나 이들 고압인버터는 구성부품수의 증가로 시스템이 복잡하고 고장률(FIT, Failure in term)이 높아지는 단점이 있다. 제안된 방식은 완전히 독립된 1 MW 인버터 2 대를 병렬운전하고, 계통측의 전압 THD(왜율, Total Harmonic Distortion)와 전류 THD를 개선하기 위한 위상지연용 동기신호를

별도로 공유하며, 상호 상태의 모니터링과 부하 분담을 위한 내부 고속 CAN통신을 하는 방식으로 구성하였다. 주요 구성품으로는 계통의 감시와 보호를 위한 protection panel과 filter, 전력용 반도체인 IGBT로 구성된 주 전력변화부인 인버터 panel, 돌발적인 사고로부터 보호를 위한 DC chopper로 구성된 과전압보호부로 구성되어 있다.[4]

2.2 전력용 반도체와 평활용 콘덴서

대용량 전력변환장치를 구성하기 위한 전력용 반도체의 종류에는 GTO, Thyristor, IGBT, IGCT 등이 있다. 최근에는 대단지의 풍력발전단지에서 검토되어지고 있는 FACTS, STATCOM 등으로 IGCT의 사용이 증가되어지고 있다. 그림 2는 전압과 용량에 따라 적용 가능한 전력용 반도체의 종류를 나타내었다. IGBT는 wafer에서 단위소자를 만들어 각각 조합하여 IGBT 모듈을 구성하지만 IGCT는 한 장의 wafer가 하나의 소자로 되어있어 각종 손실을 줄일 수 있는 이점이 있다. 그러나 IGCT는 1700 V의 소자는 생산되지 않고 있으며 스위칭주파수를 높이는 것에 한계가 있으므로 본 프로젝트에서는 1700 V, 2400 A급의 Eupec사의 IGBT를 채택하였다.[5]

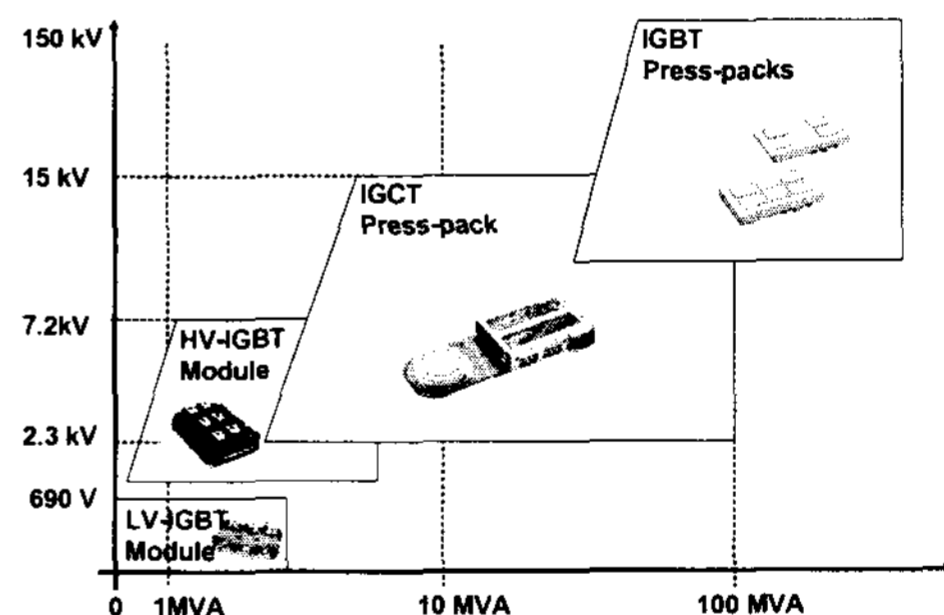


그림 2. 전압과 용량에 따른 적용 가능한 전력용 반도체의 종류

DC-링크단의 평활용 커패시터의 선정은 정격 운전에서 시스템의 허용전압리플 이내가 되도록 커패시턴스를 결정하고 이때의 리플전류가 커패시터의 허용전류 이하가 되어야 하며 정격전압은 시스템 운전시 발생할 수 있는 최대전압과 빈도가 허용수명이내가 되도록 하여야 한다. 본 시스템에서는 리플전류의 주파수가 3.5 kHz이고 설계수명이 15년 이상이어야 하므로 알루미늄 케이스의 dry type 폴리프로필렌 DC filter 커패시터를 적용하였다.

2.3 Power Stack의 열분포 해석

전력용 반도체 소자들은 이상적인 스위칭소자가 아니므로 손실이 발생하게 되어 온도를 상승시키고 chip 접합면의 온도가 125°C를 초과하게 되면 소자는 파괴 된다. 따라서 소자의 사용조건에 따른 손실을 계산하여 이를 적절히 방열시킬 수 있는 방열설계가 이루어져야 한다. 방열설계의 변수는 반도체 소자에서의 손실과 열저항계수 및 주위온도이다. 열저항계수는 반도체 소자 또는 module의 열저항과 방열판의 열저항 계수의 합이며 이는 소자 선정시 결정된 값이므로 결국 방열판의 열저항 계수가 방열설계의 최종변수가 된다. 즉, 반도체 소자의 손실과 열저항 및 주위온도가 주어지고 반도체소자의 접합면의 온도가 허용치를 초과하지 않도록 방열판의 종류나 크기 및 방열방법을 결정해야 한다. 최근에는 대부분의 반도체 제작사에서 소자의 특성들을 고려한 thermal simulation을 위한 소프트웨어를 제공하므로 시스템에서 사용하고자 하는 변수들을 입력하여 손실을 계산할 수 있다. 그림 3은 IGBT제작사인 Eupec에서 제공하는 프로그램으로 simulation한 값이며 이 결과를 토대로 냉각기와 수냉용 heatsink를 설계한다.

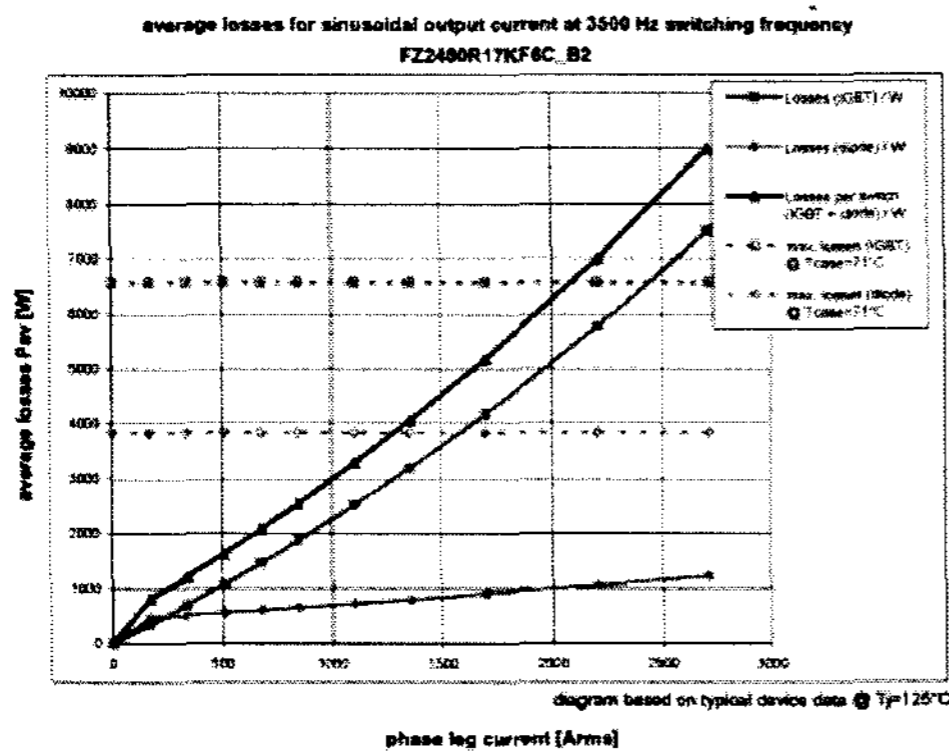


그림 3. 사용전류에 따른 IGBT와 FRD의 손실

위의 결과로부터 IGBT 한 개당 손실은 3.2 kW가 되며 IGBT 각 부분의 열저항 계수를 계산하면 heatsink의 Rth는 0.004 K/W이하가 되어야 한다. 주위온도 40°C에서 냉각수 출구의 온도를 60°C로 유지할 수 있는 냉각기를 사용할 경우에 정격운전시의 IGBT 접합부의 온도는 117°C, case는 93.5°C, heatsink는 69.7°C가 된다. 그림 4는 각부의 온도를 나타낸다.

그림 5는 제작된 시제품의 inverter panel이며 전면의 제어보드가 보이는 부분이 제어부이며

내부에 보이는 서랍식으로 구성되어진 것이 각 leg의 주 전력변환부인 stack부이다.

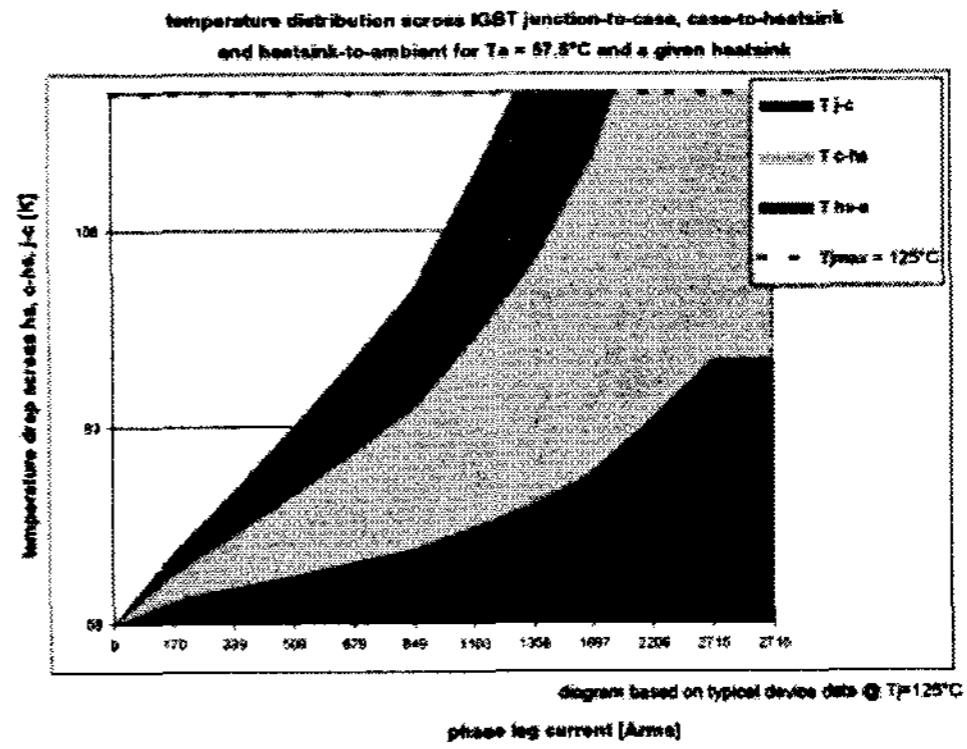


그림 4. IGBT 각 부위의 열분포

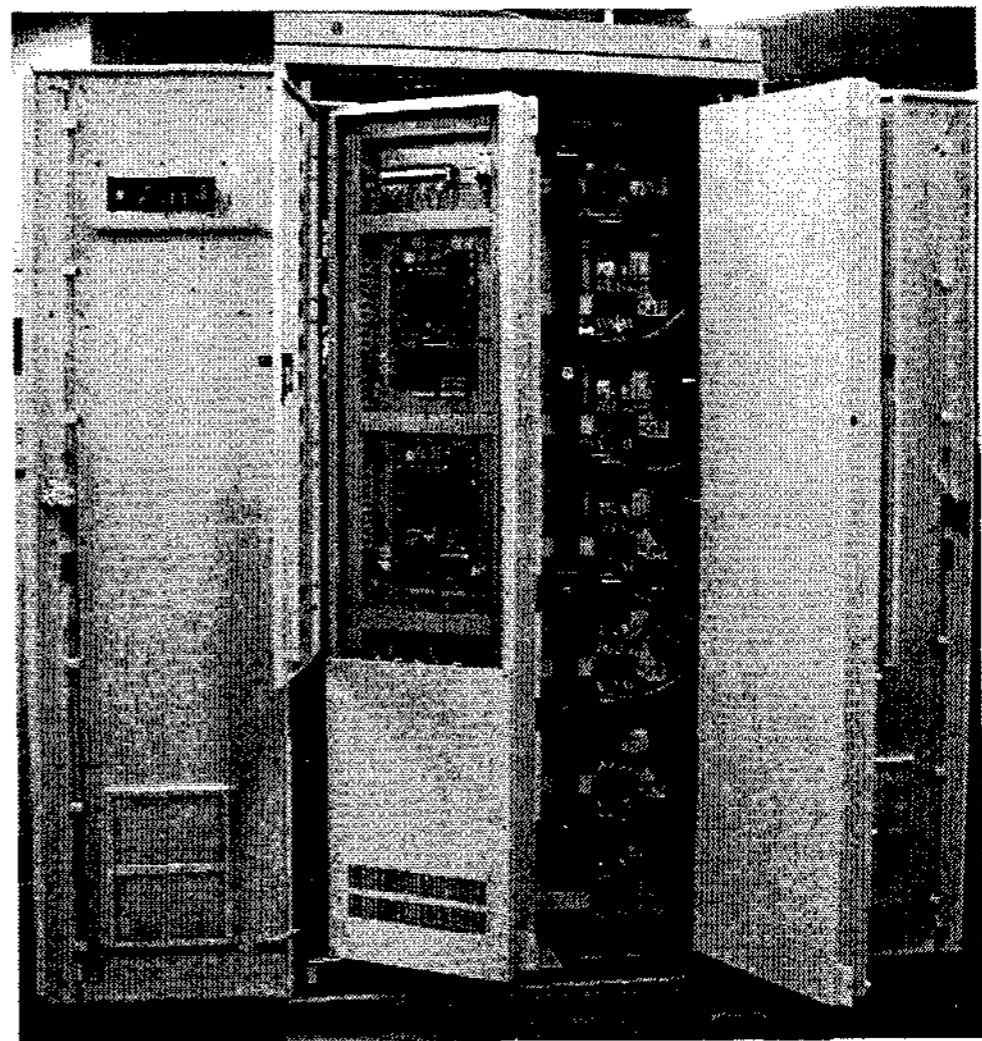


그림 5. 2 MW PMSG용 인버터 (W)1200mm x (D)1200mm x (H)2160mm

그림 6은 제작된 protection panel 이며 주전원의 차단용 ACB(Air Circuit Breaker)와 타워내부의 제어전원을 공급하기 위한 트랜스포머 및 계통감시를 위한 디지털과워메타와 센스들이 장착되어 있다. 모든 장치는 너셀에 위치하며, 허용된 공간에 설치할 수 있도록 맞춤설계를 실시하였다.

3. 시뮬레이션

풍속으로부터 블레이드와 기어박스를 거쳐 발전기까지 입력되는 에너지를 발전기의 일정토크로 입력하여 발전기와 인버터를 시뮬레이션하였다.

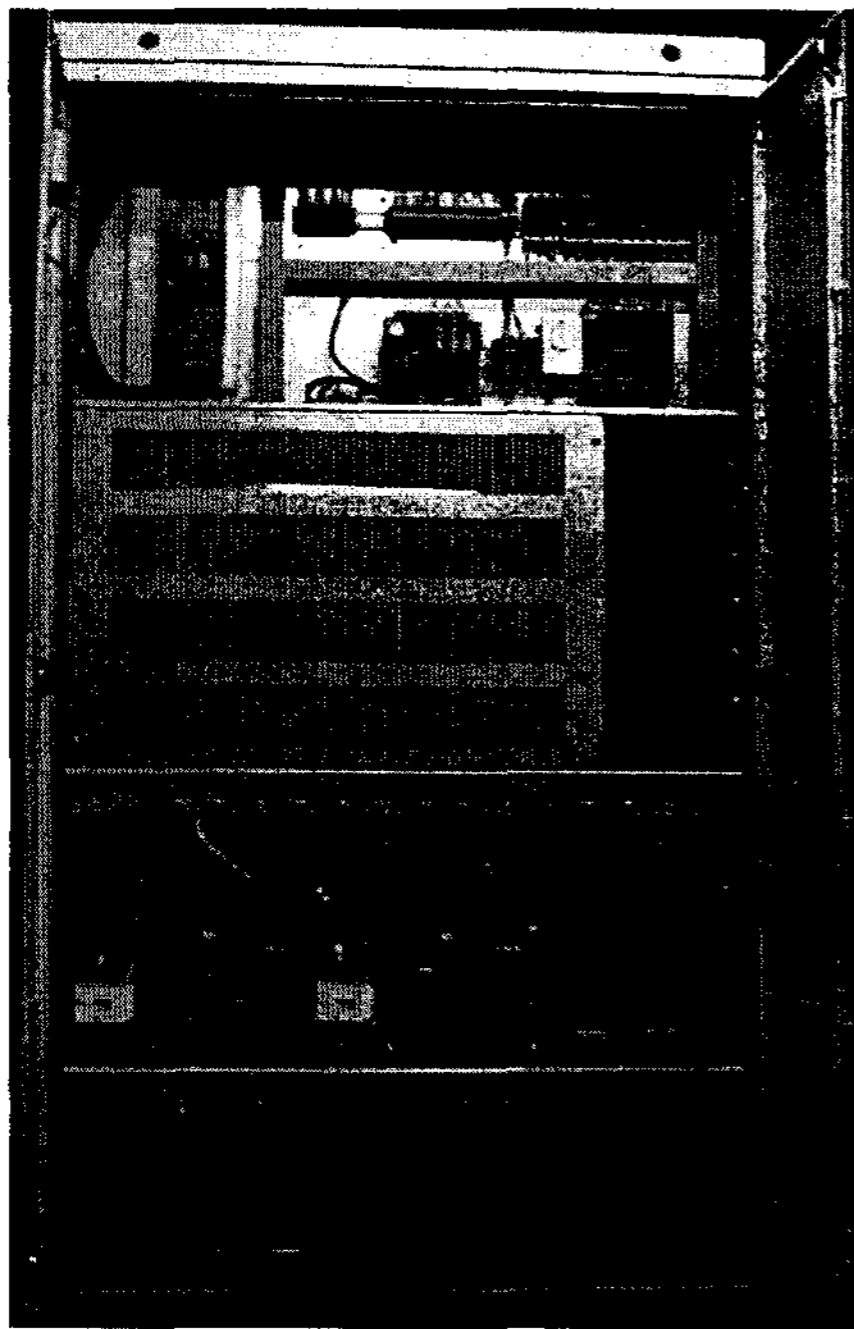


그림 6. 2 MW 인버터용 protection panel
(W)1100mm x (D)600mm x (H)2160mm

3.1 시뮬레이션 모델링

계통의 모델은 정격출력 상태에서의 H/W시스템의 설계변수 그리고 전압 THD, 전류 THD를 검증하기 위한 것으로써 그림7의 대관령 실증단지를 참고하였다. ②의 전송선로는 OC-W 240SQ, 10 km로 하였으며, 연계지점은 ①의 위치에 600 V/22.9 kV, 2.5 MVA의 변압기를 설치하여 인버터를 설치하는 것으로 하였으며, ③의 주 변압기는 22.9/154 kV, 45 MVA가 설치되어 있다. 본 논문에서는 정상상태에 대한 해석이므로 연계지점에서 154 kV의 주변압기까지의 사이에 부하는 없는 것으로 추정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

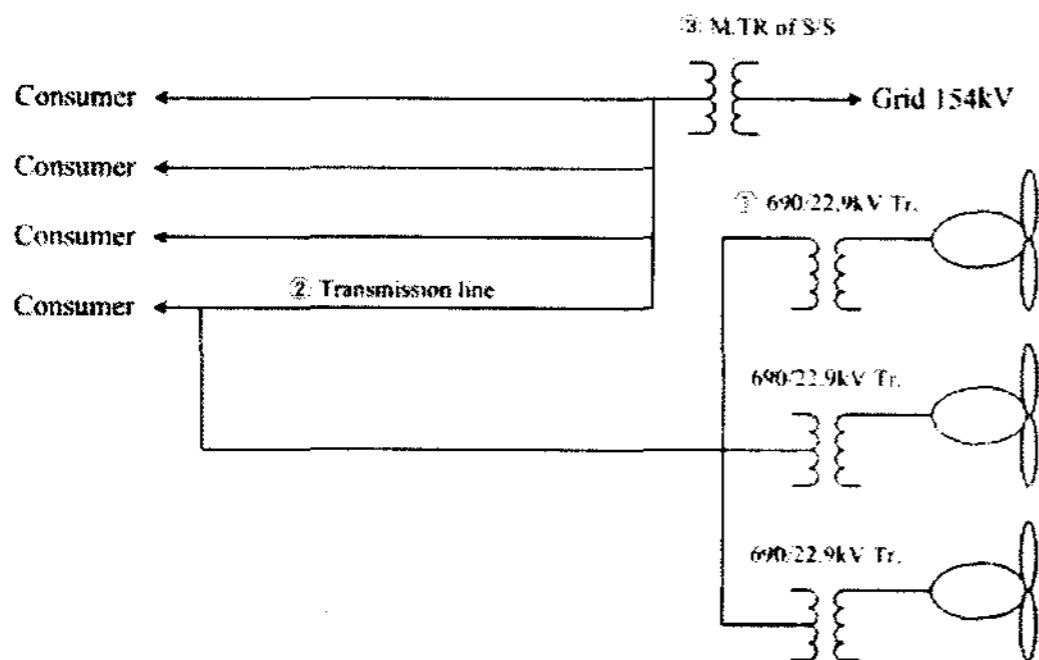


그림 7. 배전선로 연계시의 계통

Table 2는 설계된 시스템의 파라메타를 검증하기 위한 입력 data이다. 위의 결과로 구축된 시뮬레이션 모델을 그림 8에 나타내었다.

Table 2. 시뮬레이션 파라메타

구분	Parameter	Value
발전기 부	정격출력	2390 [kVA]
	정격전류	2291 [A]
	정격전압	603 [V]
	Pole	12
	Rated RPM	1106 [rpm]
	출력주파수	221.3 [Hz]
	전기자 저항	0.8 [mΩ/Ph]
	동기인덕턴스	0.097 [mH]
	PWM 주파수	3.5 [kHz]
	DC 커패시턴스	10000 [uF]
Grid 부	정격출력	2120 [kVA]
	정격전류	2040 [A]
	정격전압	600 [V]
	출력주파수	60 [Hz]
	DC Voltage	1080 [Vdc]
	필터인덕턴스	0.5 [mH]
	PWM 주파수	3.5 [kHz]
	DC 커패시턴스	10000 [uF]
600 V/22.9 kV, TR	2.0m + j0.00581	
22.9/154 kV, TR	0.0369 + j1.153	
송전선로	1.475 + j3.989	

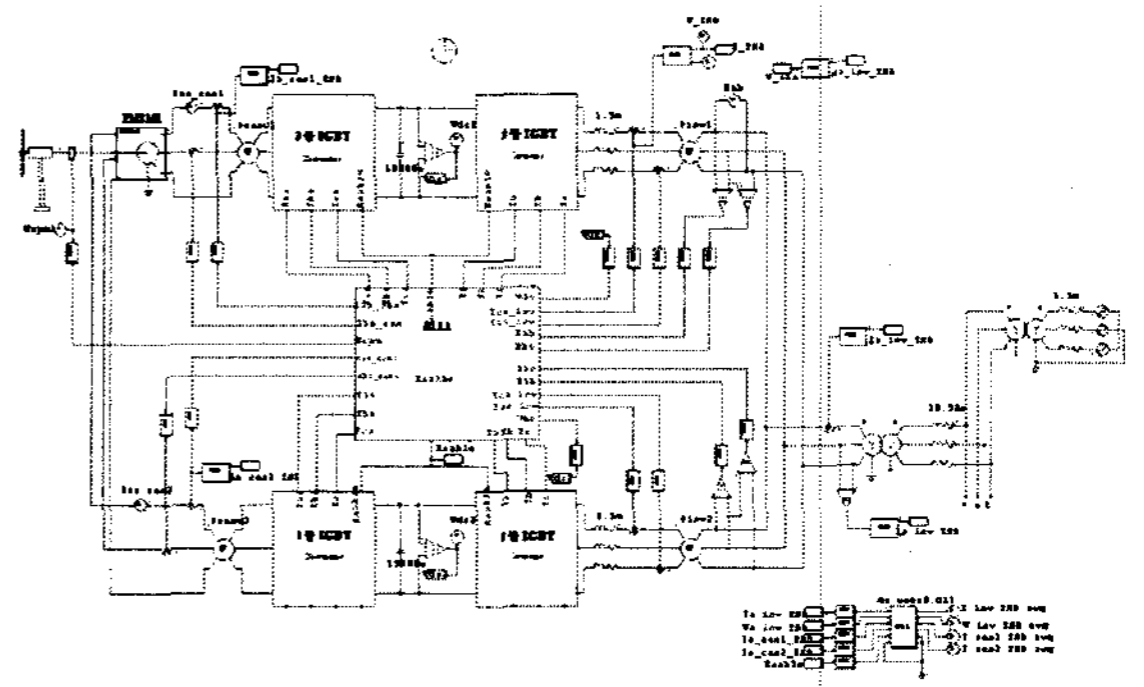


그림 8. 2 MW 풍력발전용 인버터 모델

3.2 시뮬레이션 결과

대용량 인버터는 손실의 증가로 PWM 주파수를 높이는 것에는 한계가 있으며 이로 인하여 계통에는 큰 용량의 필터가 필요하게 된다. 본 프로젝트에서는 이를 보완하기 위하여 90도의 위상이 지연된 병렬형 인버터를 적용함으로써 실제로는 7 kHz의 스위칭을 하는 효과를 볼 수 있다. 그림 9와 그림 10은 동기 스위칭의 경우와 위상이 지연된 비동기 스위칭의 경우에 대한 출력파형을 보여주고 있다.

시뮬레이션 결과 전압 THD는 8.85%에서 5.44%로 개선되었으며 전류 THD는 3.98%에서 1.02%로 개선된 결과를 얻었다.

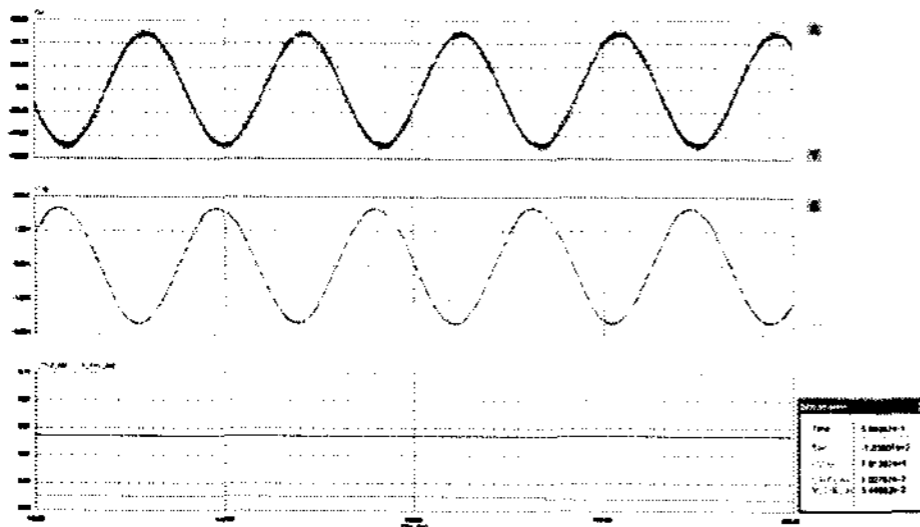


그림 9. 병렬인버터의 동기스위칭
(계통단자전압, 출력전류, 전압전류 THD)

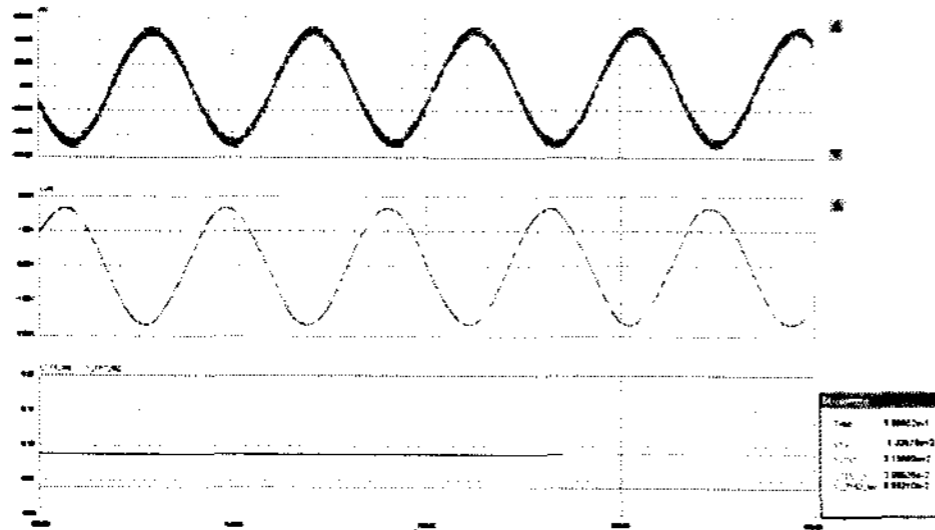


그림 10. 병렬인버터의 90도 비동기스위칭
(계통단자전압, 출력전류, 전압전류 THD)

4. 결 론

본 논문에서는 풍력발전용 2 MW 영구자석형 동기발전기의 제어를 위한 저압 2병렬 인버터의 설계와 시제품 제작 결과를 소개하였고, 비동기 병렬 인버터방식을 적용하여 전력 품질이 향상됨을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이를 검증하기 위한 시뮬레이터용 10 kW 발전기와 인버터도 제작되어 기본적인 시험을 완료하였으며 상세한 제어시험이 진행되고 있다. 또한 2 MW 인버터의 단락시험(arm단락)에서는 V_{ce_spike} 가 338 V로 만족할 만한 결과를 얻었으며 정격출력에서의 온도 시험 결과에서도 설계값과의 오차범위 내에 있음을 확인 하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 에너지관리공단에서 출연한 '2 MW PMSG형 풍력발전시스템 개발' 연구과제로 수행되었습니다.

References

- [1] 손윤규, 서재학, 권세진, 장성덕, 오종석, 황진수, 강신일, 박가우, 권오정, 정진화, 한경섭, 전중환, "750 kW gearless 풍력발전기 인버터 시험," 한국신재생에너지학회 2005년 춘계학술대회논문집 pp. 59-63.
- [2] IEA, 2006, "IEA Wind Energy Annual Report 2005," pp. 16-17.
- [3] Anders Grauers, "Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines," Technical Report No.292, 1996
- [4] Jüürgen K. Steinke, Oscar Apeldoorn "Applying the Experience of Industrial High-Power Converter Design to Windpower Conversion," ABB Schweiz AG.
- [5] "Power Devices for Self-commutated Inverters from ABB", ABB, 2004