

2MW 풍력발전기용 병렬형 Inverter 개발

이 현영¹⁾, 강 신일²⁾, 권 오정²⁾
최 효진³⁾, 권 세진³⁾, 손 윤규³⁾, 서 재학³⁾, 장 성덕³⁾, 오 종석³⁾
이 병철⁴⁾, 황 진수⁴⁾, 류 지윤⁴⁾

Parallel Inverter Development for 2MW Windpower

Hyunyoung Lee, Sinil Kang, Ohjung Kwon,
Hyojin Choi, Seijin Kwon, Yoongyu Son, Jaehak Suh, Sungduk Jang, Jongseok Oh,
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 750kW 풍력발전용 인버터를 개발한 결과와 2년 동안의 현장실증을 통하여 얻어진 경험을 바탕으로 2MW 영구자석형 동기발전기(PMSG, Permanent Magnet Synchronous Generator)의 전력변환을 위한 병렬형 인버터의 시뮬레이션과 이를 통한 설계와 제작 및 기본시험 과정을 소개하고자 한다.

subscrip

PMSG : Permanent Magnet Synchronous Generator
IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT : Integrated Gate Commutated Thyristor

1. 서론

풍력에너지의 효율적 이용과 발전비용의 경제성 분석결과로 풍력발전기들은 점점 대용량화 되어가고 있다. 해상풍력에는 4.5MW에서 6MW까지 시제품들이 설치되어 시험되고 있다. 그림 1은 1995년 이후로부터 설치운전 되고 있는 풍력발전기들의 평균용량의 증가를 보여주고 있다. 대용량 풍력발전기용 PMSG는 출력전압과 주파수 그리고 이를 운전할 인버터의 제어방법들이 발전기 제조원가와 밀접한 관계가 있으므로 이들 상호간의 유기적인 검토를 통해 결정되어야 한다. 인버터를 개발하기 위한 사양설계의 시작은 적절한 전압의 결정과 전력변환부의 토폴로지를 선택하는 것에서부터 시작된다. 계통의 트랜스포머는 전압에 큰 영향을 받지 않으나 발전기에서부터 계통까지 연결되어지는 전력설비 전체에서 보면 저압방식은 설치비용이 다소 증가되어질 수 있

다. 전압과 토폴로지의 결정은 시스템의 내구성, 신뢰성, 경제성을 확보하면서 고효율과 Compact화가 가능하여야 한다. 본 과제에서는 입력 트랜스포머에서 발전기까지의 모든 전력설비들을 너셀에 위치시켜 저압배선길이를 최대한 짧게 구성하여 설비의 경제성과 효율을 높인 병렬형 600Vrms 급의 2-레벨 인버터로 결정하였다. 또한 전용선로가 아닌 배전선로에 연계될 경우의 선로정수들에 의한 전력품질을 분석하기위한 시뮬레이션을 수행하였으며 결과를 토대로 시제품을 제작하였다. 최적화된 풍력발전시스템의 개발을 위해서는 블레이드, 타워, 발전기, 기어박스, 너셀 등과 더불어 전력변환용 인버터도 함께 사양설계가 이루어져야 한다.

-
- 1,2) (주) 플라스포
E-mail : flap45@plasco.co.kr
Tel : (031) 909-8077 Fax : (031) 909-8079
 - 3) 포항공속기연구소
E-mail : choihyo@postech.ac.kr
Tel : (054) 279-1543 Fax : (054) 279-1799
 - 4) 유니슨(주)
E-mail : ibc@unison.co.kr
Tel : (041) 620-3425 Fax : (041) 552-7416

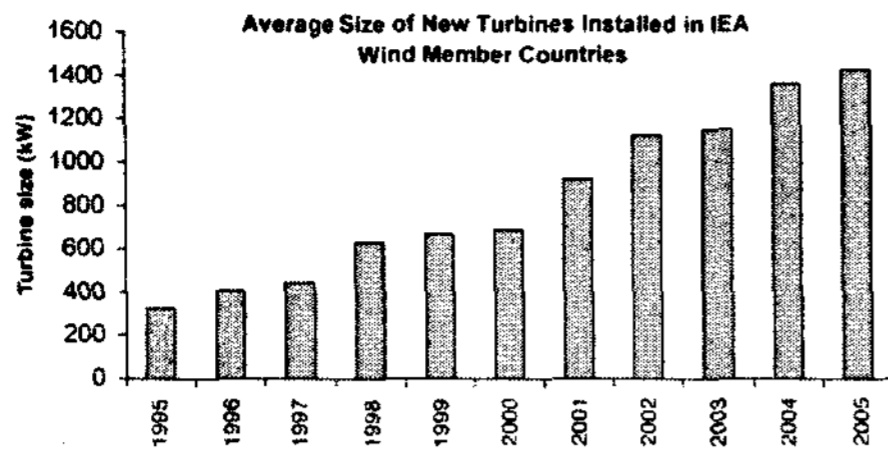


그림 1. Average size of new turbine installed in the IEA Wind member Countries for 1995 through 2005.

2. 인버터의 설계 및 제작

풍력발전시스템의 개념설계의 결과로 블레이드의 정격회전속도가 결정되고 기어비와 발전기의 회전속도가 결정되었다. 이를 바탕으로 하여 개발되어질 인버터의 기본사양을 아래의 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]
출력정격 (Grid 부)	Vdc	1080 [V]
	출력전압	600 [Vrms]
	출력용량	2100 [kW]
	출력주파수	60,50 [Hz]
	cos θ	> 0.985
	PWM 주파수	3500 [Hz]
사용 환경	Vdc	1050 [V]
	냉각방식	Closed Loop Water Cooling
	사용온도	-15 ~ 40 °C
	표고	2000m 이하
	통신방식	CAN 2.0A
	중합효율	> 97 [%]

2.1 병렬형 인버터의 구성

2MW이하의 용량의 풍력발전기들은 대부분 출력전압을 600 ~ 690V로 하고 있으며, 최근에는 3-Level이상의 Multi-레벨 인버터와 H-Bridge 인버터로 구성된 고압인버터들이 개발되어지고 있다. 그러나 이들 고압인버터들은 구성부품수의 증가로 시스템이 복잡하고 고장률(FIT)이 높아지는 단점이 있다. 제안된 방식은 완전히 독립된 1MW 인버터 2대를 병렬운전하고 계통측의 전압 THD와 전류 THD를 개선하기 위한 위상지연용 동기신호를 별도로 공유하게 되며 상호 상태의 모

니터링과 부하분담을 위한 내부 고속 CAN통신을 하는 방식으로 구성하였다. 주요 구성품으로는 계통의 감시와 보호를 위한 Protection Panel과 Filter, 전력용반도체인 IGBT로 구성된 주 전력변화부인 인버터 Panel, 돌발적인 사고로부터 보호를 위한 DC Chopper로 구성된 과전압보호부로 구성되어 있다.

2.2 전력용반도체와 평활용콘덴서

대용량 전력변환장치를 구성하기 위한 전력용반도체의 종류에는 GTO, Thyristor, IGBT, IGCT 등이 있다. 최근에는 대단지의 풍력발전단지에서 검토되어지고 있는 FACTS, STATCOM등으로 IGCT의 사용이 증가되어지고 있다. 아래 그림 2는 전압과 용량에 따른 적용가능한 전력용반도체의 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 1700V의 소자는 생산되지 않고 있으며 스위칭주파수를 높이는 것에 한계가 있으므로 본 프로젝트에서는 1700V, 2400A급의 Eupec사의 IGBT를 채택하였다.

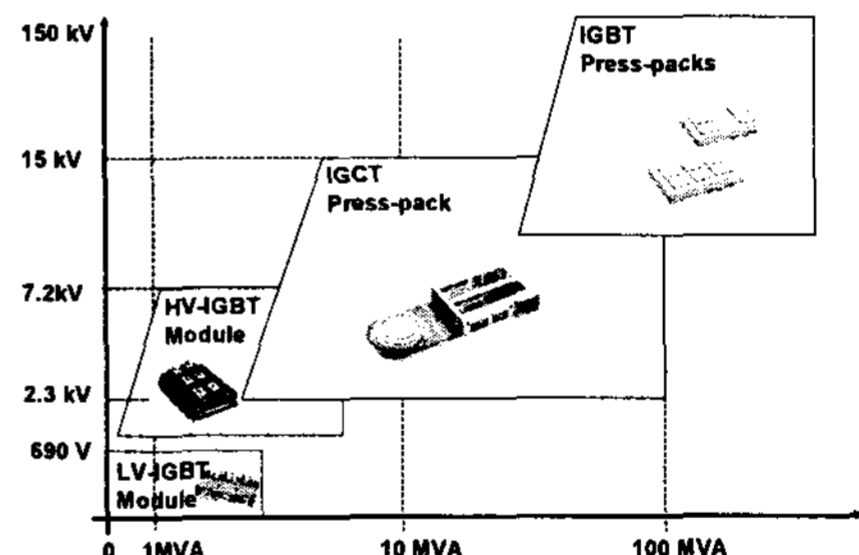


그림 2. 전압과 용량에 따른 적용 가능한 전력용반도체의 종류

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 3.5kHz이고 설계수명이 15년 이상이어야 하므로 알루미늄 케이스의 Dry Type 폴리프로필렌 DC Filer 커패시터를 적용하였다.

2.3 Power Stack의 열분포 해석

전력용반도체 소자들은 이상적인 스위칭소자가 아니므로 손실이 발생하게 되어 온도를 상승시키고 Chip 접합면의 온도가 125[°C]를 초과하

게 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 소자선정시 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. 아래 그림 3은 IGBT제작사인 Eupec에서 제공하는 프로그램으로 Simulation한 값이며 이 결과를 토대로 냉각기와 수냉용 Heatsink를 설계하여야 한다.

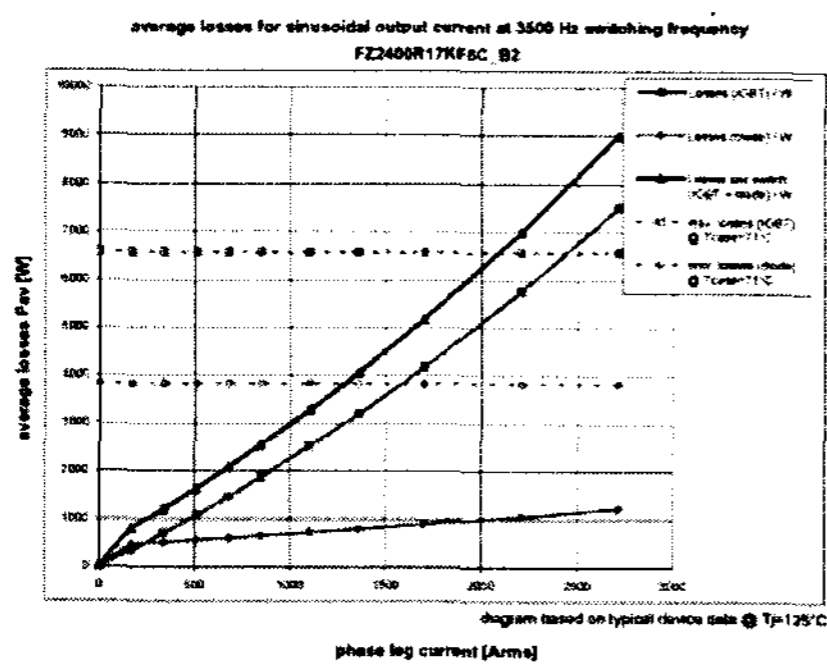


그림 3. 사용전류에 따른 IGBT와 FRD의 손실

위의 결과로부터 IGBT 한 개당 손실은 3.2[kW]가 되며 IGBT 각 부분의 열저항 계수를 계산하면 Heatsink의 Rth는 0.004[K/W]이하가 되어야 한다. 주위온도 40[°C]에서 냉각수 출구의 온도를 60[°C]로 유지할 수 있는 냉각기를 사용할 경우에 정격운전시의 IGBT 접합부의 온도는 117[°C], Case는 93.5[°C], Heatsink는 69.7[°C]가 된다. 그림 4는 각부의 온도를 나타낸다.

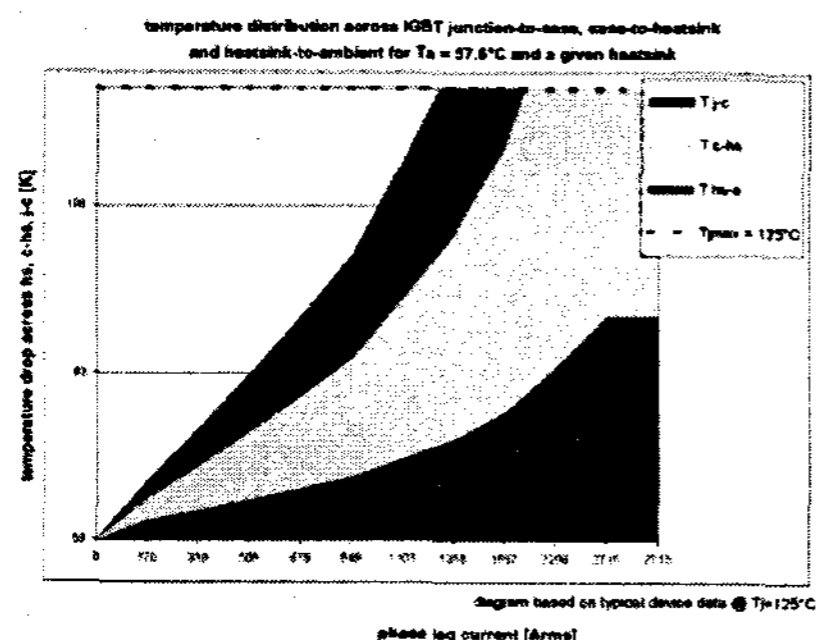


그림 4. IGBT 각부의 열분포

아래의 그림 5는 위의 설계결과로 제작된 시제품의 Inverter Panel이며 전면의 제어보드가 보이는 부분이 제어부이며 내부에 보이는 서랍식으로 구성되어진 것이 각 Leg의 주 전력변환부인 Stack부 이며 전체의 크기는 W1200mm x D1200mm x H2160mm이다. 그림 6은 제작된 Protection Panel이며 주전원의 차단용 ACB와 타워내부의 제어전원을 공급하기 위한 트랜스포머 및 계통감시를 위한 디지털파워메타와 센스들이 장착되어 있으며 크기는 W1100mm x D600mm x H2160mm이다. 이들 모두는 너셀에 위치하며 허용되어진 공간에 설치할 수 있도록 맞춤설계를 실시 하였다.

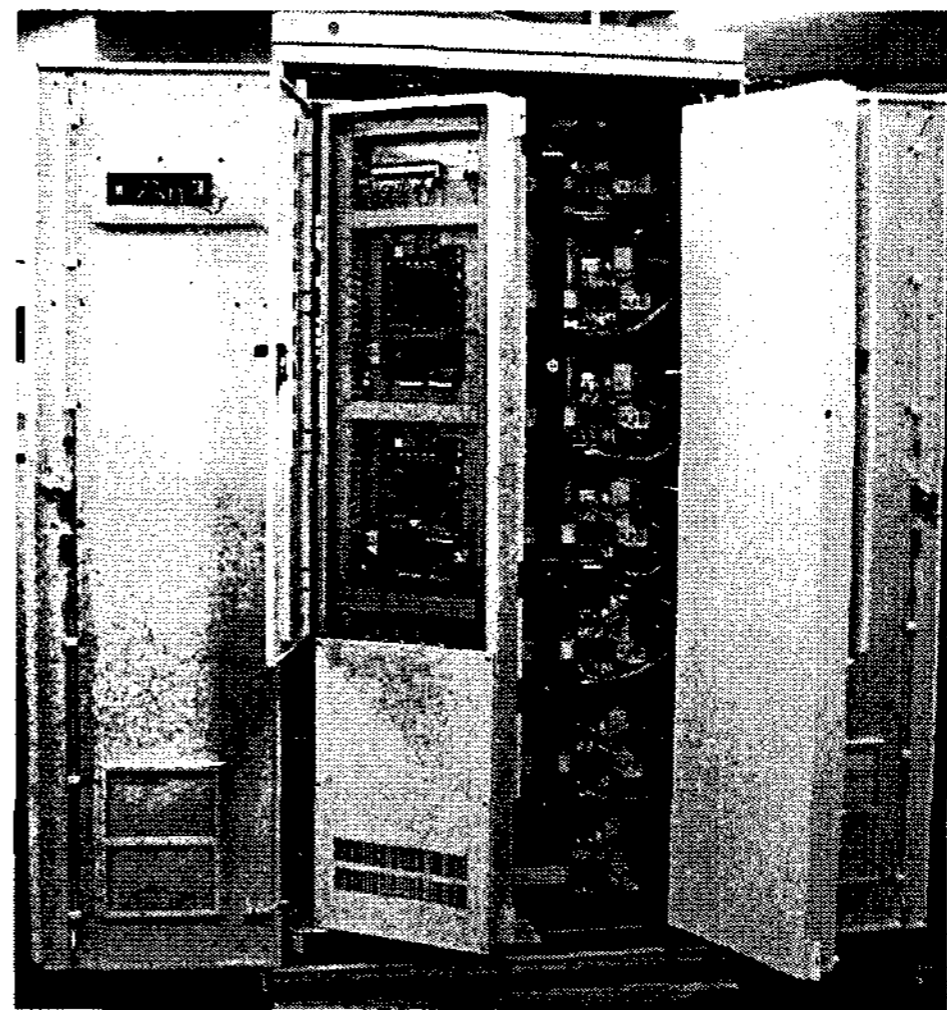


그림 5. 2MW PMSG용 인버터(W1200mm x D1200mm x H2160mm)

3. 시뮬레이션 모델

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

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

아래의 Table2는 설계된 시스템의 파라메타를 검증하기 위한 입력 Data이다.

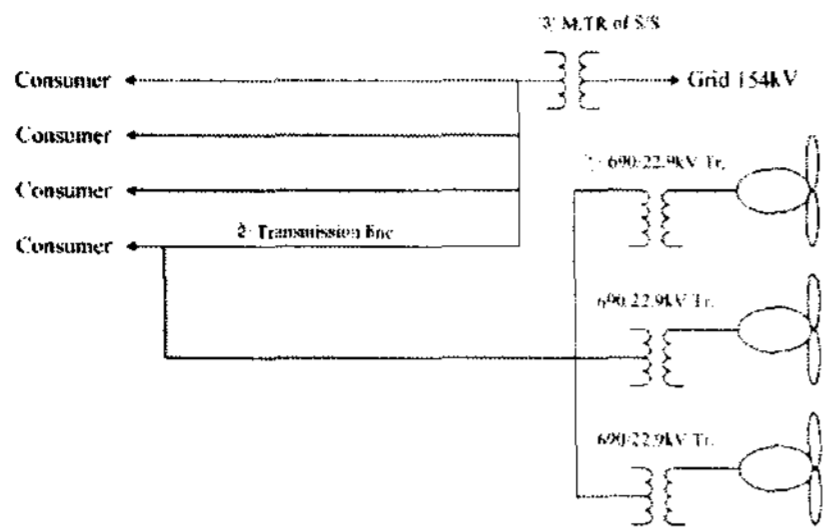


그림 7. 배전선로 연계시의 계통

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
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]
600V/22.9kV, TR		2.0m + j0.00581
22.9/154kV, TR	0.0369 + j1.153	
송전선로	1.475 + j3.989	

위의 결과로 구축된 시뮬레이션 모델은 그림 8에 나타내었다.

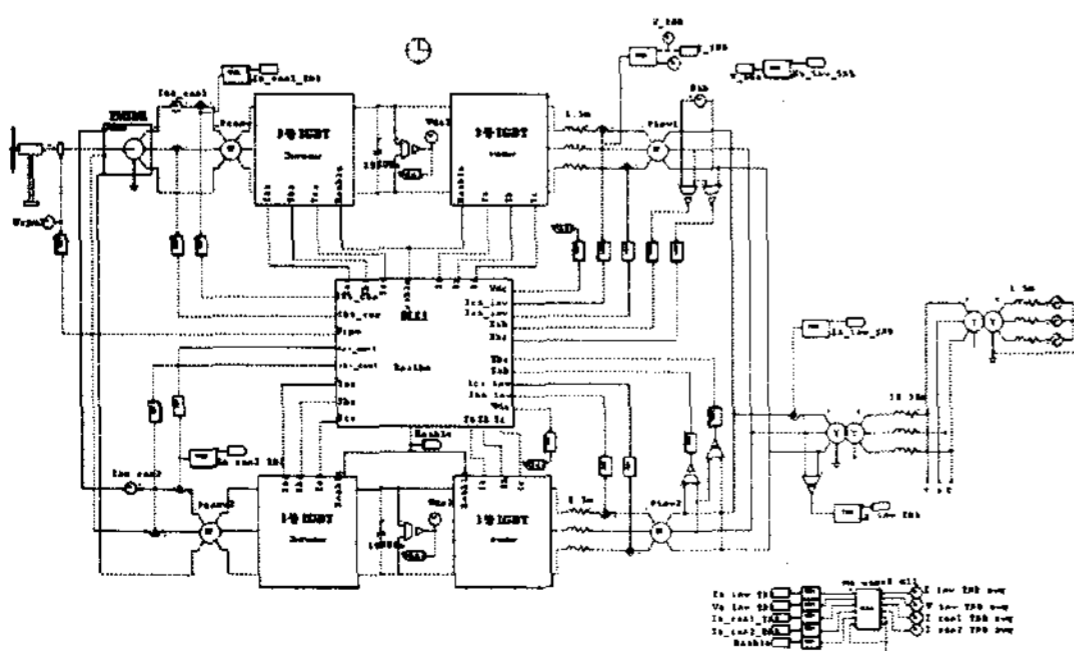


그림 8. 2MW 풍력발전용 인버터 모델

3.1 시뮬레이션 결과

대용량 인버터는 손실의 증가로 PWM주파수를 높이는 것에는 한계가 있으며 이로 인하여 계통에는 큰 용량의 필터가 필요하게 된다. 본 프로젝트에서는 이를 보완하기 위하여 90도의 위상이 지연된 병렬형 인버터를 적용함으로써 실제로는 7kHz의 스위칭을 하는 효과를 볼 수 있다. 그림 9와 10은 위상을 지연된 비동기와 그렇지 않은 경우의 파형을 보여주고 있다.

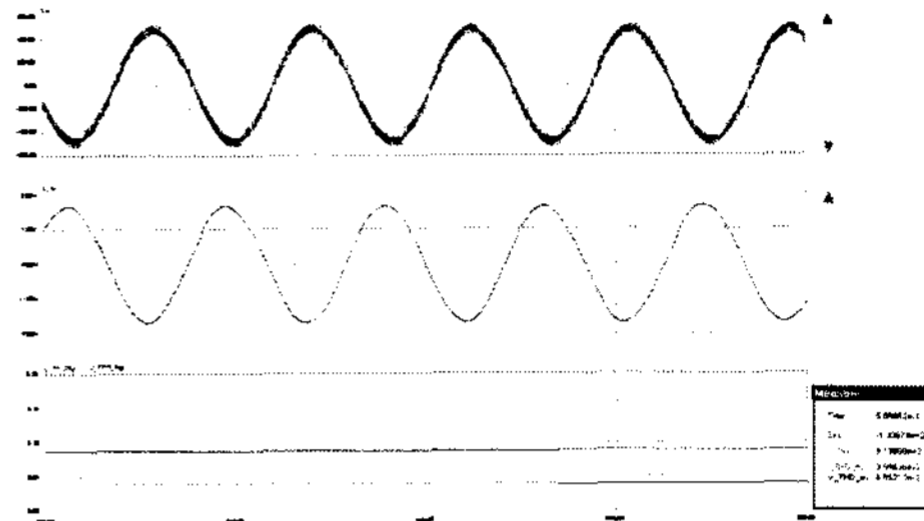


그림 9. 병렬인버터의 동기스위칭 (계통단자전압, 출력전류, 전압전류 THD)

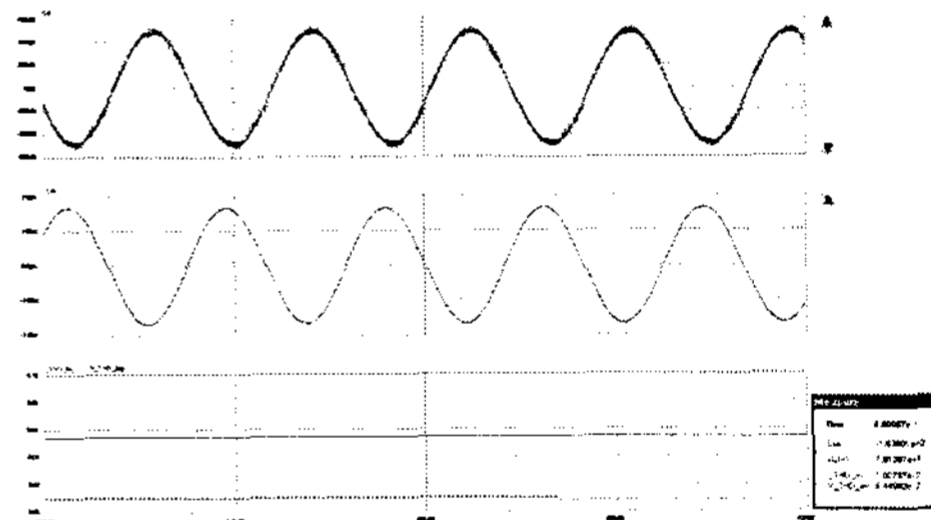


그림 9. 병렬인버터의 90도 비동기스위칭 (계통단자전압, 출력전류, 전압전류 THD)

시뮬레이션 결과 전압THD는 8.85%에서 5.44%로 개선되었으며 전류THD는 3.98에서 1.02%로 개선된 결과를 얻었다.

4. 결론

본 논문에서는 풍력발전용 2MW 영구자석형 동기발전기의 제어를 위한 저압 2병렬인버터의 설계와 시제품제작결과를 소개하였고 제안된 비동기 병렬인버터에 의한 전력품질이 향상됨을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이를 검증하기 위한 시뮬레이터용 10kW 발전기와 인버터도 제작되어 기본적인 시험을 완료하였으며 상세한 제어시험이 진행되고 있다. 또한 2MW 인버터의 단락시험(ARM단락)에서는 Vce_spike가 338V로 만족할 만한 결과를 얻었으며 정격출력에서의 온도시험 결

과에서도 설계값과의 오차범위 내에 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 ***** 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] IEA, 2006, "IEA Wind Energy Annual Report 2005" pp. 16-17
- [2] Jürgen K. Steinke, Oscar Apeldoorn "Applying the Experience of Industrial High Power Converter Design to Windpower Conversion" ABB Schweiz AG.
- [3] Anders Grauers "Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines " Technical Report No.292, 1996
- [4] "Power Devices for Self-commutated Inverters from ABB", ABB, 2004