

물리적인 전력소자 모델을 이용한 직·병렬운전 특성 해석

윤재학, 박건태

현대중공업(주) 기계전기 연구소

Analysis of Series and Parallel Operation Characteristics using Physical Models of Power Devices

Jae Hak Yoon and Gun Tae Park

HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO., LTD ELECTRO-MECHANICAL INSTITUTE

ABSTRACT

Power devices for high power drivers that need high switching speed (IGCT, HVIGBT) have been continuously developed. However, serial and parallel connections using several much cheaper, lower power capacity of devices than an expensive high power device are very useful methods in the aspect of cost down and high power application. Even the current and voltage unbalance problem is occurred at each devices. This unbalance characteristics are mainly caused by the differences of physical characteristics of each devices and the line inductance (stray inductance) of bus bars that consist of current path.

This paper deals simulation analysis of serial connection of IGCTs and parallel connection of IGBTs using physical model of devices. And also, introduces the method to reduce the voltage and current unbalance problem.

1. 서 론

스위칭 속도가 빠르면서 대용량 전력회로에 적합한 전력소자의 개발이 계속되고 있다. 그 대표적인 소자가 IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristor)와 HVIGBT (High Voltage Insulated Gate Bipolar Transistor)이다. 대용량 전력회로를 설계 할 때 최소 개수의 전력소자를 이용하여 구성하면 전력회로의 구조가 간단하다. 또한 고장을 일으킬 수 있는 요인이 줄어드는 장점이 있다. 그러나 일반적으로 전력소자의 정격용량이 높아짐에 따라서 소자의 가격상승의 폭이 훨씬 크다. 따라서 저가의 낮은 용량의 전력소자를 여러 개를 사용하여 전압 혹은 전류 용량을 증대 하는 방법은 제품 가격을 절감하면서 용량증대를 다양하게 구현 할 수 있는 매우 유용한 기술이다.

전력소자의 직·병렬 운전은 언급한 장점 있지만 각 소자간의 전압, 전류의 불균형(unbalance)로 인한 전력회로의 동작 이상과 이로 인한 소자 파손 등의 문제가 있다. 특히 turn on, off 때의 과도상태 불균형은 시험 때에 많은 소자의 소손을 일으킬 수 있다. 또한 대용량이라는 특성 때문에 전력회로의 기구적인 문제와 시험 설비문제로 다양한 시험이 어렵다. 따라서 전력소자의 과도상태 예측이 가능한 물리적인 전력소자 모델을 이용한 시뮬레이션 해석을 이용하게 되었다^[2].

본 논문에서는 대용량 전력회로에 사용되는 물리적인 소자모델 (IGCT, IGBT)을 이용하여 IGCT 직렬운전과 IGBT의 병렬운전 특성을 시뮬레이션 해석하였다. 시뮬레이션을 위한 IGCT(4500V, 4000A, ABB)의 물리적인 모델^{[1],[2]}은 독일의 문첸 공대에서 개발된 것을 사용하였다. 이것을 이용하여 전압 불균형 문제를 일으키는 주된 요인과, 이를 극복하기위한 방법을 제안하고 실제로 당사가 개발한 4MW급 3레벨 인버터^[5]에서 발생 할 수 있는 문제점을 예측하였다. IGBT (1700V, 800A, Eupec) 소자 모델의 경우는 Saber 시뮬레이션 도구에서 제공되는 Hefner model^[3]을(400V, 40A) 이용하였다. 이를 이용하여 2병렬 IGBT 병렬운전 특성향상을 위한 게이트 보상저항 기법^[4]을 3병렬 회로에서도 검증하였다. 또한 전류 경로에 나타나는 stray inductance 성분을 실제 실험 전력 회로와 같도록 구성하여 3병렬의 IGBT 병렬운전에서 문제가 되는 전류의 불균형 문제를 미리 해석하고 설계 및 시험하였다.

2. 전력소자 모델과 회로 구성

2.1 IGCT 소자 모델과 직렬연결 구조 및 특성
IGCT 모델의 특성에 대해서는 참고문헌[1],[2]에서 기술한 바 있다. 여기서는 3레벨 전력회로에서

사용되는 2개의 IGCT 직렬연결 특성을 해석하였다.

2.1.1 GCT 3직렬 운전특성

GCT의 직렬운전은 전력변환장치의 전류 용량을 증대하기위한 방법이다. turn off 동작의 전후에 차단전압의 불균형 발생 요인은

- (1) 각각의 GCT 내부의 물리적인 변수 차이
- (2) 게이트 신호들 간의 시간지연차이
- (3) 게이트 인덕턴스의 차이
- (4) 상기 (1)~(3)의 복합적인 문제

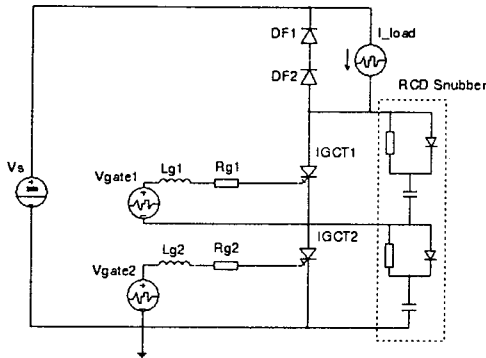


그림 1 IGCT 2병렬 시뮬레이션 회로

그림 2는 IGCT2의 게이트 신호가 30ns 지연되었고 snubber 회로가 없을 때의 전압분담을 시뮬레이션한 것이다. IGCT2가 30ns 늦게 turn on 이 되므로 초기부터 차단전압이 IGCT2에 많이 걸리게 된다.

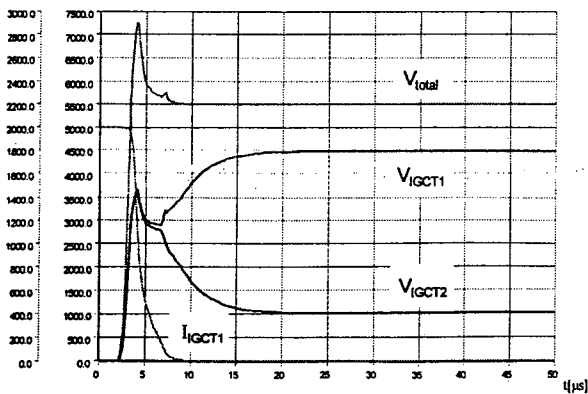


그림 2 IGCT2의 게이트신호가 30ns 늦을 때의 전류분담 (RCD Snubber 회로 없을 때)

그림 3은 이러한 문제점을 방지하기 위하여 각소자간에 RCD snubber회로를 부착하였을 경우이다. 전압 불균형이 크게 향상됨을 알 수 있다.

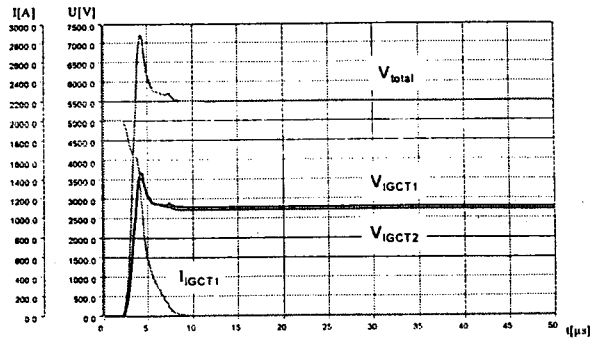


그림 3 RCD Snubber 회로가 있을 때의 전류분담

2.1.2 4MW급 3레벨 인버터

그림 4는 당사에서 개발된 4MW 인버터^[5]회로 구성도이다. 1.1.1절에서 설명한 불균형의 요인 (1)항, (3)항 (4)항에 대한 변동을 그림4에 도시된 U 상의 IGCT1, 2에 인가하였을 때의 전압 unbalance에 대한 시뮬레이션을 그림 5, 그림 6에 도시하였다.

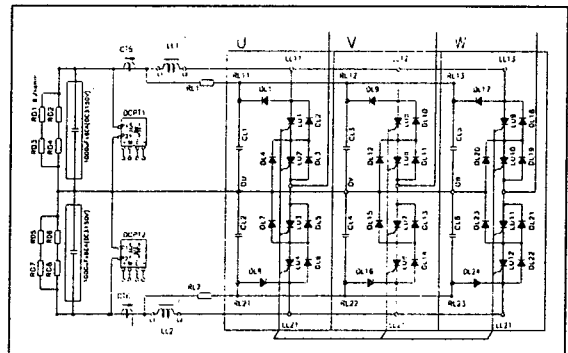


그림 4 4MW 인버터 전력회로 구성도

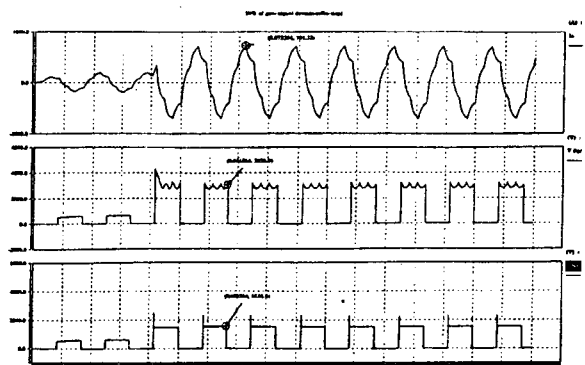


그림 5 IGCT1의 게이트 인덕턴스 10%변동시 전압변동 (6-step 운전)

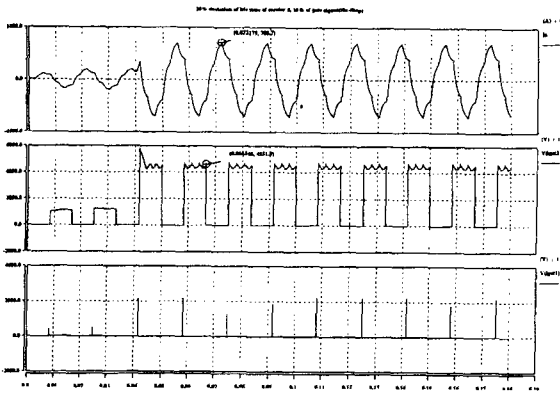


그림 6 IGBT1의 게이트 인덕턴스 10%변동과 Carrier life time (τ_H) 20% 동시 변동

그림 7은 그림4에 나타낸 U상의 IGCT1과 2에 RCD snubber회로를 부착하였을 경우에 전압 분배를 시뮬레이션 한 것이다. 나타난 바와 같이 전압 분배 특성이 크게 향상되었음을 알 수 있다.

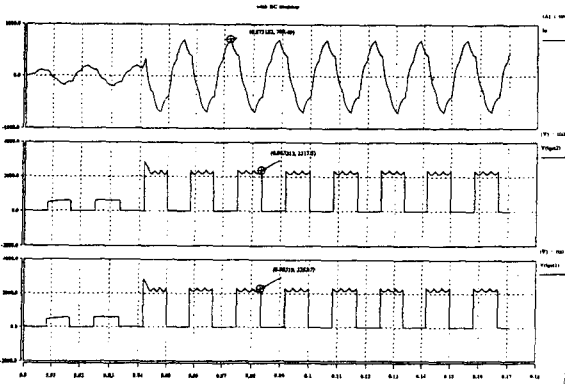


그림 7 RCD snubber회로 부착 시 전압분배

2.2 IGBT 소자 모델과 병렬연결 구조 및 특성

2.2.1 IGBT 3병렬 특성향상을 위한 R_c 보상저항

IGBT 모델은 Hefner 모델^[3]을 사용하였다. 그림은 간단한 Buck Converter 회로를 이용한 모델의

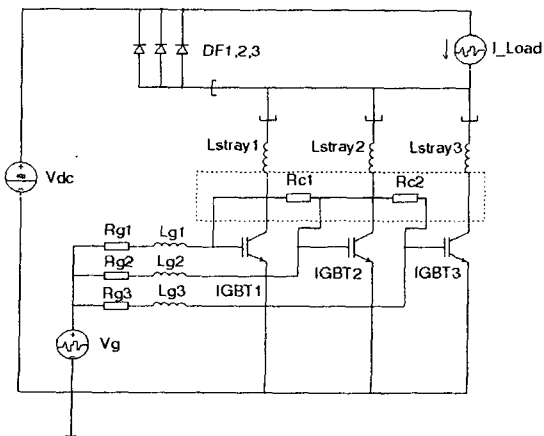


그림 8 IGBT 3병렬 시뮬레이션 회로

특성과 Tabata^[4]가 2병렬 IGBT 병렬운전 시에 게이트 신호 지연 (t_d)과 IGBT의 입력 커패시턴스 (C_{ies})의 변동에 의한 전류 불평형을 방지하기 위하여 게이트 단자간의 보상저항 (R_c)을 제안한 바 있다. 본 논문에서는 3병렬회로에 보상 저항 R_{c1} , R_{c2} 를 적용하고 시뮬레이션 검증하였다. 검증을 위하여 $L_{g1}=20nH$, $L_{g2}=40nH$, $L_{g3}=30nH$ 로 변동을 주었고, IGBT 1, 3의 C_{ies} 에 20%씩의 변동을 주었을 때 보상저항에 의하여 전류분담 특성이 크게 향상됨을 알 수 있다.

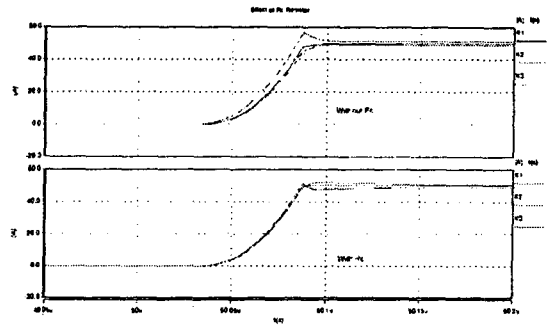


그림 9-1 Turn on시 3병렬 IGBT 전류분담 특성

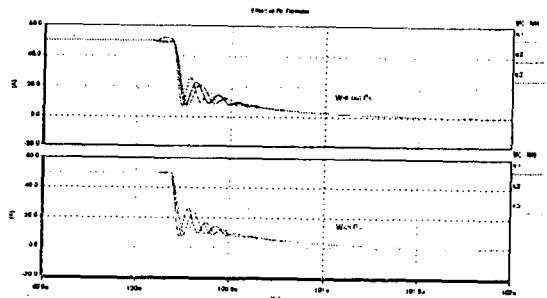


그림 9-2 Turn off시 3병렬 IGBT 전류분담 특성

2.2.2 IGBT 3병렬 시험회로

그림 10은 IGBT 3병렬운전을 시험하기위한 개략도이다. 실제적으로 IGBT 모듈 1개당 2개의 IGBT가 내장되어 있으므로 실제 배선은 그림 11과 같이 구성된다. 그림의 Bus Bar의 구조는 3상 구조로 쉽게 확장될 수 있도록 설계하였다.

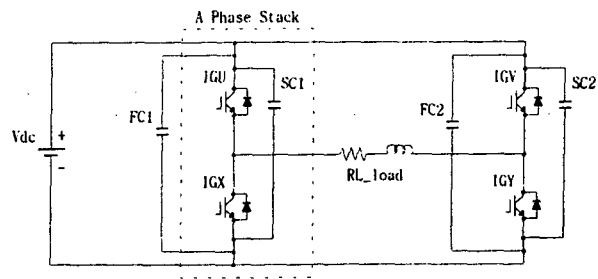


그림 10 3병렬 단상 IGBT 시험회로

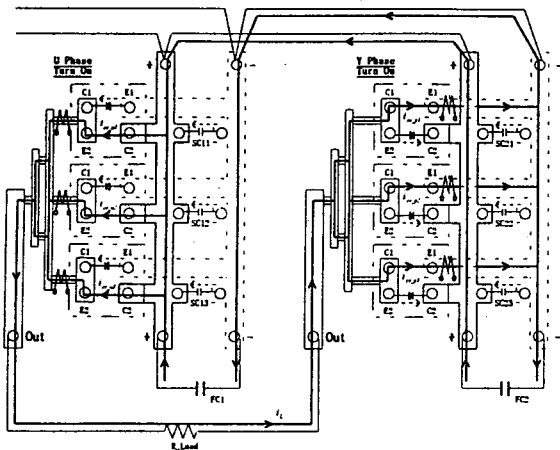


그림 11 IGBT 3병렬회로 실제 배선도

그림 12는 실제 배선도를 기본으로 1cm 당 10nH를 기준으로 wire 나 bus bar에 존재하는 stray inductance 성분을 포함하여 전력회로를 모델링 한 것이다. 이 모델을 이용하여 각각의 IGBT 간에 전류 불 평형에 많은 영향을 주는 bus bar의 영역을 알 수 있다. 따라서 수동소자의 설계 값 선정과 bus bar 제작에 많은 시간을 단축할 수 있었다.

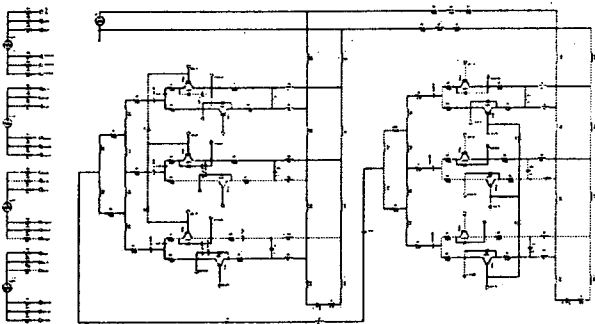


그림 12 시뮬레이션을 위한 전압, 전류 경로 모델

그림 13, 14는 bus bar의 stray inductance와 외부 수동소자 설계 값을 최적화하기 전의 시뮬레이션과 실제 시험 파형이다. 시뮬레이션 파형과 실제 시험 파형이 유사함을 알 수 있다.

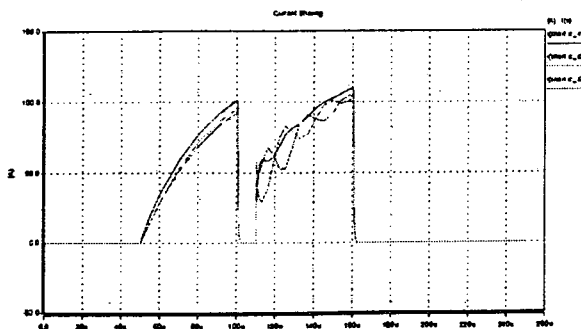


그림 13 A상 IGBT1, IGBT2, IGBT3의 전류 분담 시뮬레이션 (전력회로 최적화 이전 파형)

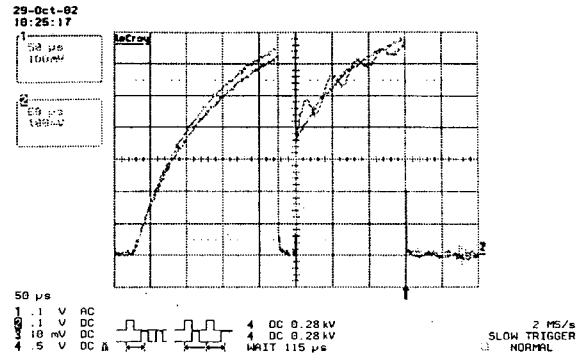


그림 14 A상 IGBT1, IGBT2의 전류 분담 실험파형 (전력회로 최적화 이전 파형)

그림 15, 16은 bus bar의 stray inductance와 외부 수동소자 설계 값을 최적화 한 후의 시뮬레이션과 실제 시험 파형이다. 전류 분담률이 크게 향상 되었음을 알 수 있다.

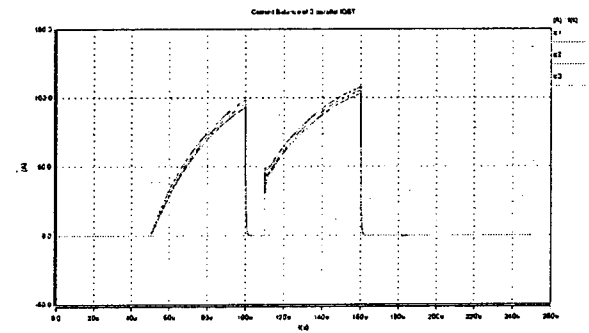


그림 15 A상 IGBT1, IGBT2의 전류 분담 시뮬레이션 (전력회로 최적화 이후)

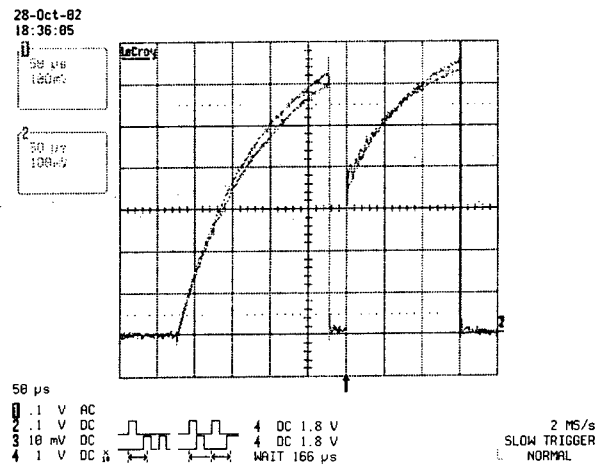


그림 16 A상 IGBT1, IGBT2의 전류 분담 실험파형 (전력회로 최적화 이후)

그림 17은 실제로 단상 3병렬 IGBT 시험회로를 나타낸 것이다. 3상 회로로 확장될 예정이다.

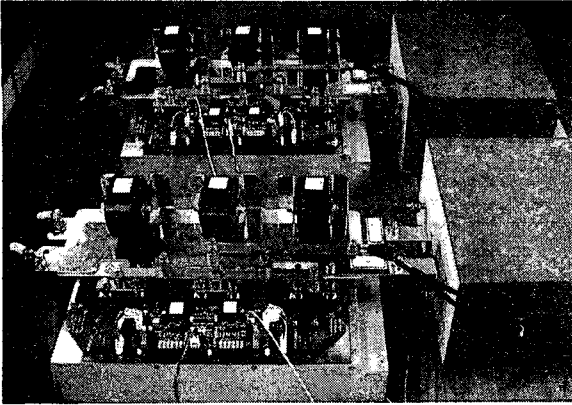


그림 17 단상 3 병렬 IGBT 시험회로

3. 결 론

본 논문은 물리적인 전력소자 모델을 이용하여 IGCT 2직렬 운전 특성과 IGBT 3병렬운전 특성을 해석하였다.

1. IGCT의 경우 내부 변수와 게이트 신호의 지연 및 게이트 인덕턴스의 변동에 매우 민감함을 알 수 있다. 시뮬레이션 변동요인을 변동률을 10~20% 하였을 경우에 실제 전압 분담률의 변동은 50% 이상임을 알 수 있다. 실제 당사가 개발한 3레벨 4MW 인버터의 실험에서 이와 같은 전압변동은 관측이 되지 않았으므로, 실제 내부 변수의 변동은 10%를 훨씬 못 미칠 것으로 판단된다. 그러나 내부 변수변동에 매우 민감함을 고려하면, 참고문헌 [6]과 같이 IGCT 3직렬 운전부터는 동작을 보장하기 위해서는 작은 용량의 RCD snubber회로가 필요함을 알 수 있다. 또한 GCT의 gate driver는 소자 제작사로부터 공급되고 있으므로, 장시간의 사용으로 인한 게이트 신호의 변동을 보수 유지 차원에서 유의해야 한다.
2. Simple Buck Converter를 이용한 시뮬레이션 결과 IGBT는 내부 변수변동(C_{ies})과 게이트 인덕턴스 변동을 20%~50%로 인가하였을 경우 전류 분담률의 변동은 최고 20% 미만임을 알 수 있었다. 실제 시험회로의 전압, 전류 경로 모델을 이용한 시뮬레이션 결과로 wire나 bus bar의 stray inductance 및 snubber 커패시터와 같은 외부요인이 전류 불평형을 만드는 주된 원인임을 알 수 있었다.

향후 과제로서, 온도 특성에 의한 불균형 그리고 실제 사용소자와 같은 정격의 물리적인 모델 전력소자 모델 연구를 통하여 다양한 전력회로 개발에 이용할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] H. Kuhn and D. Schröder, "Circuit Simulation of Hard-Driven IGCT for snubberless Operation using a Physically Based Model", Proc. of IPEC, Tokyo, 2000.
- [2] 윤재학, D. Schröder, "물리적인 전력소자 모델을 이용한 대용량 인버터 시뮬레이션 기술", 전력전자 학계학술 대회.
- [3] Allen R. Hefner, Jr., Daniel M. Diebolt, "An Experimentally Verified IGBT Model Implementation in the Saber Circuit Simulator", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 9, No. 5, pp. 532-542, Sept. 1994.
- [4] Masafumi Tabata, Seiki Igarashi, Kazuo Kuroki, "Control Method of Current Balancing for Parallel Connected IGBTs", Proceedings of 1998 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs, Kyoto, pp. 101-104.
- [5] 박영민, 한기준, 최세경, 정명길, 이세현 "4MW급 고압 인버터 개발", 전력전자학회 논문집 제6권 제5호, 2001년 10월.
- [6] A. Nagael, S. Beenet, P. K. Steimer, O. Apeldoorn "A 24MVA Inverter using IGCT Series Connection for Medium Voltage Application", IAS Chicago, October 2001.