

300kW급 모듈형 NPC 인버터의 방열설계를 위한 열 손실 분석 적용에 관한 연구

이진규¹², 이재운², 김지원¹², 박병건^{12*}
 과학기술연합대학원대학교¹, 한국전기연구원²

The Application of Thermal Loss Analysis for Heat Dissipation Design of 300kW Modular NPC Inverter

JinKyu Lee¹², JaeWon Lee², JiWon Kim¹², ByoungGun Park^{12*}
 University of Science and Technology¹, Korea Electrotechnology Institute²

ABSTRACT

본 논문에서는 300kW급 모듈형 NPC 인버터의 방열 설계를 위해 전력반도체 스위치 소자의 손실을 분석하여 열적 특성을 고려한 인버터 모듈을 설계하고 제작을 하였다. 전력반도체 스위치의 손실은 스위칭 손실과 도통손실로 구분되며, 대부분 열 손실로 나타나기 때문에 발열량을 토대로 방열판의 구조 및 크기를 결정하였다. 인버터 높은 출력비를 얻기 위해서는 열 손실을 고려한 방열판 설계는 반드시 필요한 과정으로 설계 과정의 타당성을 검증하기 위해 PLECS를 통한 시뮬레이션과 실험 결과를 비교하였다.

1. 서 론

전력 반도체 소자는 각기 다른 최대 접합 온도가 설정되어 있으며, 이를 초과하게 되면 소자가 파괴되거나 손상을 입는다. 전력변환 시스템 설계에서 효율과 높은 출력비를 얻는 것은 중요하다. 이를 위해서는 전력 반도체 소자의 손실 해석이 필요하며, 최근 회로 시뮬레이션 해석 프로그램을 통해 얻어진 정보를 반영한 냉각시스템 설계 방법에 대한 중요성이 부각되고 있다.^[1]

전력 반도체 소자의 손실은 스위칭 손실과 도통손실의 합으로 정의할 수 있으며, 도통 손실은 소자에 흐르는 전류와 걸리는 전압의 곱으로 표현되고 스위칭 손실은 On, Off 전환 구간에서 스위치에 흐르는 전류와 걸리는 전압의 곱으로 표현할 수 있다. 특히, 스위칭 손실의 경우 회로에서 접속된 부위의 물리적 형상과 전력 반도체 소자의 특성에 따라 달라질 수 있으며, 제어 방식에 따른 스위칭 주파수 변화와 PWM 구현 방식에도 영향을 받는다. 3-레벨 NPC 인버터의 경우 일반적인 2-레벨 인버터에 비해 스위치의 개수가 2배 증가하여 스위칭 및 도통 손실이 비교적 크게 나타나지만 전력 반도체 소자의 내압이 절반으로 줄게 되며, 전압 경격이 낮은 전력 반도체를 사용할 수 있는 장점이 있고, 리플을 저감할 수 있는 성능이 있기 때문에 필터 크기 소형화에 유리하다.^[2]

인버터의 토폴로지와 전원 및 부하 등이 고려된 상태에서 열 손실 해석은 인버터 방열판의 크기를 최소화 할 수 있고, 개발 비용 및 소요되는 시간을 단축 할 수 있다. 전력 반도체 스위치에서 발생하는 열은 스위칭 손실과 도통손실에 의해 나타나며, 이를 바탕으로 계산하거나 열 손실 해석 소프트웨어를 이용하면 쉽게 방열관련 정보를 얻을 수 있다.

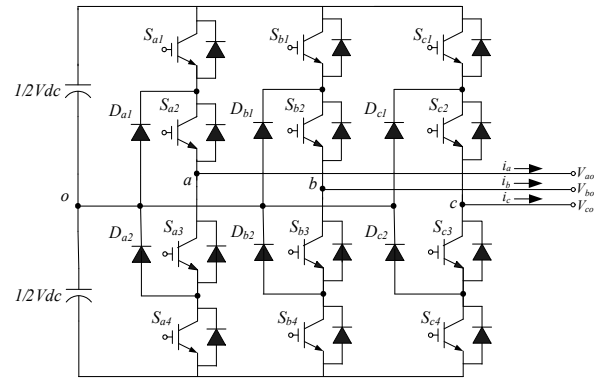


그림 1 3-레벨 NPC 타입 토폴로지
 Fig. 1 3L-NPC type topology

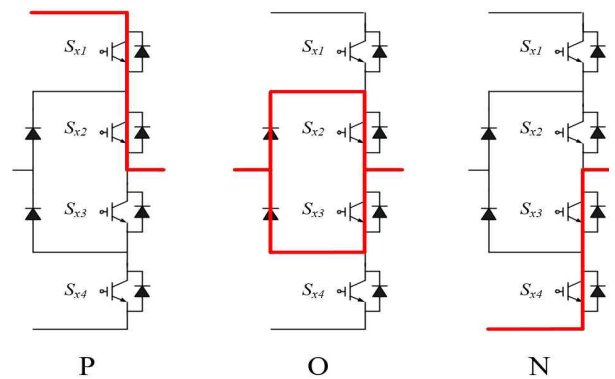


그림 2 3-레벨 NPC 스위칭 상태에 따른 전류 흐름
 Fig. 2 Current Commutations in 3L-NPC

본 논문에서는 300kW급 모듈형 NPC 인버터의 방열 설계를 위해 전력 반도체 스위치의 손실을 분석하여 열적 특성을 고려한 인버터 모듈을 설계하고 제작을 하였다.

인버터 높은 출력비를 얻기 위해서는 열 손실을 고려한 방열판 설계는 PLECS Thermal Library Browser를 활용하여 회로 시뮬레이션을 통하여 전력 반도체 스위치의 발열을 예측하고 방열판 해석에 필요한 스위치의 손실을 얻었다. 이러한 회로 시뮬레이션을 이용한 방열 설계 과정의 타당성을 검증하기 위해 PLECS를 통한 시뮬레이션과 실험 결과를 비교하였다.

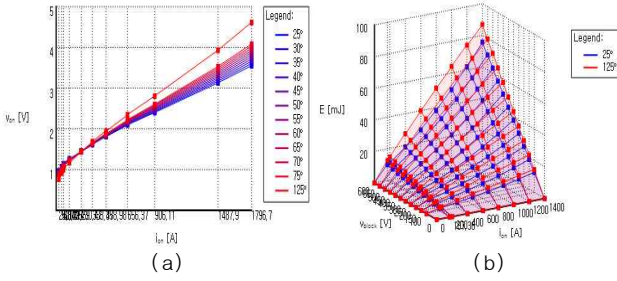


그림 3 도통손실(a)와 스위칭 손실(b)의 2차원 Look Up Table
Fig. 3 Look up Table of Conduction(a) and Switching(b) Loss



그림 4 소자의 스위칭 상태에 따른 전압 전류 파형
Fig. 4 Switching waveform of voltage and current

2. 3-레벨 NPC 인버터

그림 1과 같이 NPC 토폴로지의 경우 인버터 한 레그에 직렬로 구성되는 4개의 IGBT와 DC-Link 중성점에 연결되는 다이오드로 구성된다. 3-레벨 NPC 인버터 입력 전압은 직류전압이며, 출력 폴 전압은 $V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$ 의 상태를 가진다. 출력 전압이 $V_{dc}/2$ 에서 $-V_{dc}/2$ 로 변동하는 2-레벨 인버터에 비해 전압 변동폭이 작아 출력 전압 고조파를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 그림2와 같이 S_{x1} 과 S_{x2} 스위치가 On, S_{x3} 와 S_{x4} 가 Off될 시 스위칭 상태는 P가되며 출력 전압은 $V_{dc}/2$ 가 된다. 반대로 S_{x1} 과 S_{x2} 가 Off되고 S_{x3} 와 S_{x4} 가 On이 되면 N스위칭 상태가 되고 출력 전압은 $-V_{dc}/2$ 가 된다. 마지막으로 S_{x2} 와 S_{x3} 가 On되고 S_{x1} 과 S_{x4} 가 Off되면 스위칭 상태가 O가 되며 출력 전압은 0이 된다. 이처럼 'PON'으로 스위칭 소자의 상태가 변하면서 도통손실과 더불어 스위칭 손실이 발생하게 되고 이는 열손실로 이어진다.

3. 인버터 방열 설계모델

3.1 도통 손실

도통 손실은 식(1)처럼 전력 반도체 소자에 흐르는 전류와 소자에 걸리는 전압, On저항의 곱으로 계산할 수 있다.

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \int V_{sw}(t)i(t)dt \quad (1)$$

$$= \frac{1}{T} \int (V_{On} + R_{On}i(t))i(t)dt = V_{On}I_{avg} + R_{On}(I_{rms})^2$$

본 논문에서는 PLECS를 이용해 도통 시 소자 전압을 소자 온도의 임의의 함수로 만들어 열 손실을 계산하였으며, 이 함수는 그림 3의 (a)와 같이 2차원 Look Up Table로 표시된 Thermal Library Browser의 Conduction Loss 탭으로 정의된다.

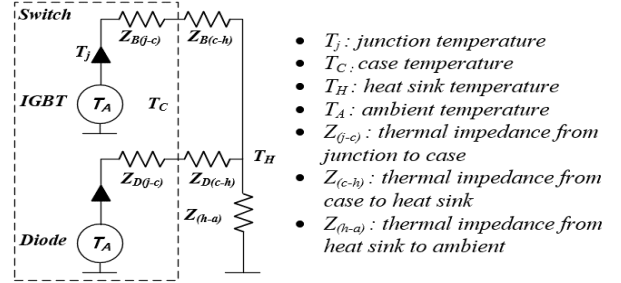


그림 5 방열판 설계를 위한 열 모델
Fig. 5 Thermal model for Heat sink design

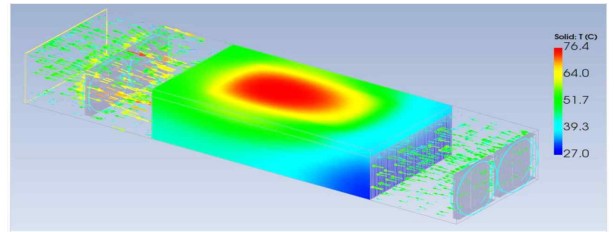


그림 6 방열판 설계
Fig. 6 Heat sink design

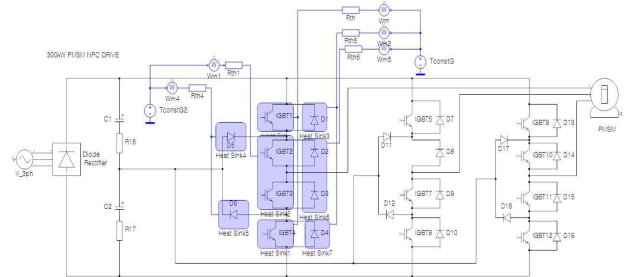


그림 7 3-레벨 NPC 열 손실 분석 PLECS 시뮬레이션 회로
Fig. 7 PLECS Simulation circuit for 3L-NPC Heat loss analysis

3.2 스위칭 손실

스위칭 손실은 그림 4와 같이 전력 반도체 소자가 On상태에서 Off상태로 혹은 그 반대의 상태로의 전환이 순간적으로 이루어지지 않고, 그 값이 0보다 훨씬 크기 때문에 전력손실로 발생하며, 식 (2)와 같이 On, Off시 에너지 손실과 스위칭 주파수, 전압 전류의 관계로 표현할 수 있으며, 그림 3의 (b)와 같이 2차원 Look Up Table로 표시된다.

$$P_{On,Off,loss} = E_{On,Off} \times f_{sw} = \frac{V_{On,Off}}{V_{test}} \times \frac{I_{On,Off}}{I_{test}} \times E_{On,Off} \times f_{sw} \quad (2)$$

3.3 방열판 설계

도통손실과 스위칭 손실을 바탕으로 해석한 열 손실의 계산의 핵심 요소는 방열판 설계로 이어진다. 방열판은 소자의 열 손실을 흡수하는 기능을 하며, 방열판에서 대기로의 열전달 과정은 그림 5와 같이 열 저항과 열 커패시턴스의 합인 열 임피던스로 모델링이 가능하다. 각 방열판은 내부 열 커패시턴스를 가지며, 방열판으로 흡수된 열 손실 에너지들은 방열판의 온도를 높게 된다. 본 논문에서는 그림 6과 같이 내부 방열판을 설계하였다. 방열판 설계는 공냉식 구조로 앞 뒤 4개의 팬으로부터 냉각이 되며 공기흐름으로 인해 뒤로 갈수록 온도가 높아지는 경향이 나타나게 된다.

표 1 300kW 시뮬레이션 파라미터

Table 1 300 KW Simulation Parameters

Parameter	Value	Unit				
Rated Power	300	kW				
Line Frequency	60	Hz				
Rated Voltage	380	V				
Rated Current	580	A				
DC link Voltage	600	V				
DC link Current	500	A				
Switching Freq	1000	Hz				
Thermal	Z(j-c)					
Impedance	Sec1	Sec2	Sec3	Sec4	Sec5	Sec6
RiIGBT (K/W)	0.022	0.010	0.006	0.010	0.002	0.002
riIGBT(S)	3.380	0.630	0.108	0.031	0.005	0.004
RiDiode	0.010	0.033	0.023	0.027	0.006	0.003
riDiode	8.270	1.880	0.466	0.048	0.012	0.001

표 2 소자의 손실 및 온도 시뮬레이션 결과(1상)

Table 2 Device loss and Temperature Simulation Result(1-phase)

	IGBT1	IGBT2	IGBT3	IGBT4	Total
SW _{Loss} (W)	11	2.8	2.7	10.7	27.2
Cond _{Loss} (W)	388	490	491	390	1759
Junction °C	93.6	105.1	105.4	89.7	-
HeatSink °C	72	78	78	72	-
	In_D1	In_D2	In_D3	In_D4	-
SW _{Loss} (W)	0.45	0.002	0.0004	0.47	0.9225
Cond _{Loss} (W)	11.6	11.6	12.03	12.01	47.24
Junction °C	35	34	34	35	-
HeatSink °C	28.7	27.4	27.2	28.5	-
	Clamp_D1		Clamp_D2		-
SW _{Loss} (W)	4.2		3.97		8.17
Cond _{Loss} (W)	165.1		164.8		329.9
Junction °C	65.3		65.6		-
HeatSink °C	55		55		-

4. 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 300kW급 모듈형 3-레벨 NPC 인버터의 열 손실 분석을 통한 방열설계를 위해 그림 7과 같이 PLECS 시뮬레이션을 구성하여 수행하였다. 모듈은 Vincotech사의 70-W424 NIA800SH-M800F를 사용하였고, 전체적인 시뮬레이션 파라미터는 표1과 같다. IGBT소자와 클램핑 다이오드에 Thermal Editor를 이용한 스위칭 손실, 도통 손실, 열 임피던스 데이터 파라미터를 입력하였으며, 결과 값은 설정된 대기온도와 Heat Sink를 통해 도출할 수 있었다. 도출된 결과는 1 Phase에 대한 결과로 표2와 같이 열 손실은 약 2.1kW로 나왔다. 3 Phase 시스템 전체적으로 봤을 때는 6.3kW로 인버터의 효율은 97.9%로 계산되었다. 소자의 최고 온도는 약 101°C, Heat Sink 최고 온도는 78°C로 나왔다. 시뮬레이션 결과를 검증하기 위한 3-레벨 NPC 모듈형 실험장치는 그림 8과 같으며, 시뮬레이션을 바탕으로 실험 시 그림 9와 같이 NPC 모듈 4개 포인트에 온도 센서를 부착하여 실제 발생하는 열을 측정하였고, 표 3을 통해 전체적인 실험 결과가 시뮬레이션을 수행한 결과와 유사한 것을 볼 수 있으며, 발생한 오차는 시뮬레이션과 실험 환경의 실제 대기온도 차이로 인한 결과로 분석된다.

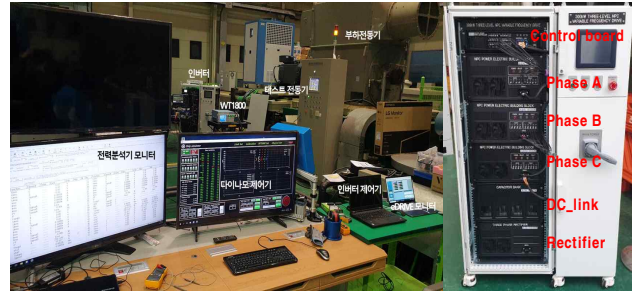


그림 8 모듈형 3-레벨 NPC 시스템
Fig. 8 Module Type 3L-NPC System

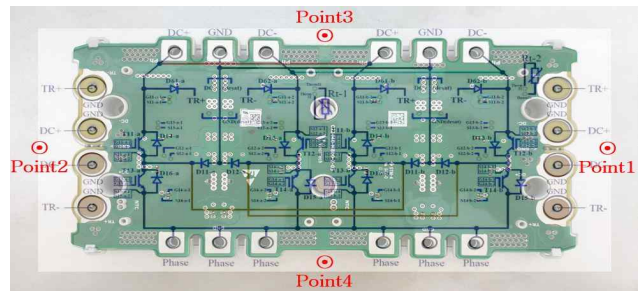


그림 9 Vincotech 3레벨-NPC 모듈 온도 측정 포인트
Fig. 9 Vincotech 3L-NPC Module Temperature Point

표 3 3레벨-NPC 모듈 실제 온도 측정 결과

Table 3 3L-NPC Module Temperature of Experiment Result

	Point1	Point2	Point3	Point4
Heat Sink(°C)	71	74	55	60

6. 결론

본 논문에서는 300kW급 모듈형 NPC 인버터의 방열 설계를 위해 열 손실을 분석하여 열적 특성을 고려한 인버터 모듈의 방열 설계를 하였다. 시뮬레이션 모델과 실제 인버터 모듈의 결과가 거의 일치함을 확인하였고, 이를 통해 본 논문에서 분석한 열 손실 분석에 대한 타당성을 검증하였다. 향후 다양한 조건의 인버터 시스템 개발에 있어서 손실 분석 모델이 적용 가능하며, 스위칭 기법에 따른 손실 분석을 통해 최적화된 방열 설계가 가능하다. 이는 실제 시스템 설계 시 비용절감과 개발 기간을 단축할 수 있다.

본 연구는 2020년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업(No.20A01017) 연구결과임

참고 문헌

[1] Nasim Arbab, "Thermal Modeling and Analysis of a Double-Stator Switched Reluctance Motor", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 30, Issue 3, pp. 1209-1217, 2015, September.
[2] J. Dionisio Barros, "Optimal Predictive Control of Three-Phase NPC Multi레벨 Converter for Power Quality Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, Issue 10, pp. 3670-3681, 2008, October.