

## 3.3kV(105A) COMPACT RACK TYPE 고압 인버터 시스템의 방열 성능 향상을 위한 열유동 해석

김 선 영,<sup>\*1</sup> 김 성 대,<sup>1</sup> 유 성 열,<sup>1</sup> 유 남 규,<sup>1</sup> 김 태 범,<sup>1</sup> 홍 찬 옥,<sup>1</sup> 고 한 서<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LS산전(주)

<sup>2</sup>성균관대학교 기계공학부

### THERMAL-FLUID ANALYSIS FOR COOLING PERFORMANCE IMPROVEMENT OF 3.3KV(105A) COMPACT RACK TYPE MEDIUM VOLTAGE INVERTER SYSTEM

S.Y. Kim,<sup>\*1</sup> S.D. Kim,<sup>1</sup> S.R. Ryoo,<sup>1</sup> N.K. You,<sup>1</sup> T.B. Kim,<sup>1</sup> C.O. Hong<sup>1</sup> and H.S. Ko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>R&D Center, LS IS Co., Ltd.

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

*With ever rising concerns about saving of fossil fuel resource, there have been an increasing demand for use of energy more efficiently. The electric motor driven inverters can be a great help to improve energy efficiency. They are also used to control the motor speed to the actual need. Therefore the use of them can lead to reduce energy consumption. In particular, the medium voltage(MV) drive systems used for pumps, fans, steel rolling mills and tractions have widespread applications in the industry. They cover power ratings from 0.4MW to 40MW at the MV level of 2.3kV to 13.8kV. The majority of the installed MV drive systems however, are in the 1MW to 4MW range with voltage rating from 3.3kV to 6.6kV. But they are required to reduce size and weight like other power electronic equipments.*

*In this paper, we studied on the 3.3kV(105A) compact rack type inverter system for improving the cooling efficiency. At first, we confirmed the tendency of temperature with computational simulation using ANSYS ICEPAK and actual experimental tests. And then we researched thermal performance improvement designs in order to reduce temperature of the transformer for the safe operation. It can reduce temperature of transformer that using pipe type flow guide in the system. As a result, we found out more efficient solution by thermal-fluid analysis.*

**Key Words :** 열유동 해석(Thermal-Fluid Analysis), 모터 구동용 인버터(Motor Driven Inverter), 고압 드라이브 시스템 (Medium Voltage Drive System), 변압기(Transformer)

### 1. 서 론

전 세계적으로 에너지 절약에 대한 요구가 많아지면서 에너지 효율을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 산업용 인버터는 자동화 설비에 사용되는 속도 제어장치로서 속도 및 전력이 필요한 유도, 동기성 기계의 토크를 제어하여 에너지 효율을 높일 수 있다. 산업용 전기에너지의 70%를 사

용하는 전동기 구동 시스템에서 현재 산업용 인버터를 적용하여 적게는 10%에서 최대 70%까지 에너지를 절약하고 있다. 최근에는 대용량 설비 시설에서도 고압 인버터 시스템 (Medium Voltage Inverter System)에 대한 수요가 급속히 늘어나고 있다[1-2]. 대용량 전동기에 인가하는 입력 전압과 주파수를 가변하여 전동기의 속도를 제어하는 고압 인버터는 중대용량의 팬(Fan), 펌프(Pump), 송풍기(Blower), 압축기(Compressor) 등의 산업 전반에 널리 사용되고 있다. 고압 인버터는 전압 범위 2.3kV에서 13.8kV, 전력 범위 0.4MW에서 40MW의 운전에 사용되는 인버터를 말하며 산업에서는 3.3kV에서 6.6kV범위의 전력 시스템에 주로 사용된다[3]. 고압 인버터 시스템의 사용범위가 많아지면서 다른 전력기와 마찬가지로

Received: June 11, 2014, Revised: August 11, 2014,

Accepted: August 11, 2014.

\* Corresponding author, E-mail: skim@lsis.com

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2014.19.3.024>

© KSCFE 2014

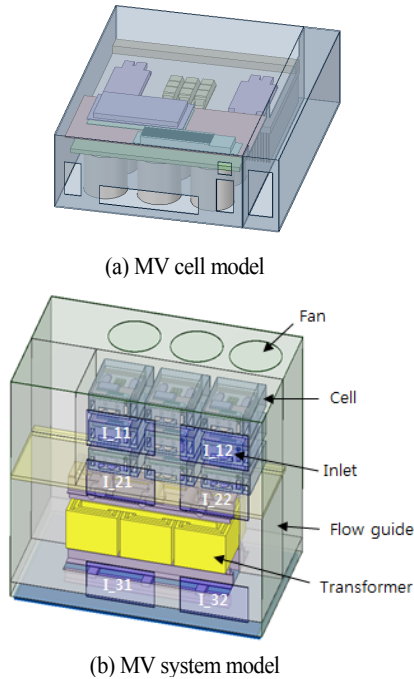


Fig. 1 Simplified model of 3.3kV(105A) MV inverter system

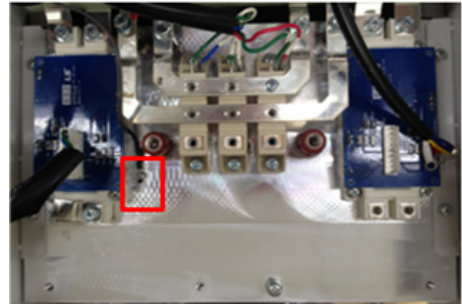
가지로 제품 경쟁력을 향상시키기 위한 소형화와 경량화에 대한 요구 또한 점점 늘어나고 있는 추세이다[4]. 그러나 열 유동 해석을 활용한 공랭식 고압 인버터 시스템의 방열 기구 설계에 관련된 국내 연구는 아직 미흡한 실정이다. 지금까지 이루어진 연구는 대부분 인버터 셀 단위에서의 공랭식 히트 싱크 최적 설계에 주안점을 두고 연구가 진행되었다[5-6].

본 연구에서는 당사에서 개발하고 있는 3.3kV(105A) 콤팩트 랙 타입(Compact Rack Type) 고압 인버터 시스템의 방열 성능을 높이기 위하여 시스템 관점에서 열유동 해석을 수행하고 실험 결과를 통해 해석의 정확성을 검증하였다. 그리고 변압기의 안전 운전 온도 조건을 만족하도록 열유동 해석 결과를 반영하여 시스템 설계안을 제시하였다.

## 2. 실험 조건 및 결과

### 2.1 실험 조건

Fig. 1은 당사에서 개발하고 있는 3.3kV(105A) 고압 인버터의 설계 모델에서 해석을 위하여 단순화한 형상으로 Space Claim을 이용하여 단순화 작업을 진행하였다. 이 시스템은 상단에 9개의 인버터 셀(cell)이 위치하고 하단에 변압기로 구성되어 있으며 냉각을 위하여 팬 3개가 설치되어 있다. 시스템 전면부의 흡입구를 통해 외부 공기가 유입되고 상단의 팬을



(a) Temperature measuring point of cell inverter

Cell U11	Cell U12	Cell U13
Cell V21	Cell V22	Cell V23
Cell W31	Cell W32	Cell W33
Transformer		
TR_R	TR_S	TR_T

(b) Temperature measuring point of transformer

Fig. 2 Temperature measuring point of MV inverter system

통해 내부의 인버터 셀과 변압기에서 발생하는 열을 방출하는 구조이다. 변압기의 온도를 효과적으로 낮추기 위하여 공기가 코일(Coil)을 직접 통과할 수 있도록 변압기 주변에 유동 가이드가 설치되어 있다.

단위 셀 실험은 입력 전원 AC 630V, 정격 부하 105A로 운전하였으며 셀 전면부의 유입 풍속과 후면부의 유출 풍속을 측정하였다. 단위 셀 실험을 통해 발열 부품들의 온도를 확인하여 부품의 최대 사용온도 범위의 80% 이하를 만족하는지 점검하였고 이 후에 동일한 운전 조건에서의 시스템 실험을 통해 변압기와 셀 온도를 측정하였다. Fig. 2는 시스템 전면에서 바라보았을 때 셀의 위치와 변압기 및 내부 셀의 온도 측정 위치를 나타내었다[7].

### 2.2 실험 결과

외부 온도 21℃ 일 때 약 8시간 동안 정격 전압 3.3kV, 전류 105A로 운전 하고 난 뒤의 온도 측정 결과를 Table 1에 나타내었다. 출력 전류는 104.1A였으며 내부 셀의 온도는 47℃

Table 1 Temperature of cells and transformers

Cell temp. (℃)			Transformer temp. (℃)		
U11~U13	V21~V23	W31~W33	TR_R	TR_S	TR_T
47/47/47	51/47/51	49/49/47	80	83	74

에서 51℃, 변압기의 온도는 74℃에서 83℃로 측정되었다.

실험 결과를 통해 셀 내부의 온도가 안전 운전 조건을 충족하였으며 변압기의 온도는 사양서에 나와 있는 최대 사용 온도의 80%인 96℃ 이하로 만족하였다.

### 3. 열유동 해석 조건 및 모델

열유동 해석의 정확성을 검증하기 위하여 Fig. 1과 같이 단순화된 고압 인버터 시스템에 실험과 동일한 운전조건을 반영하여 열유동 해석을 수행하였으며, 변압기 최대 온도를 80℃ 이하로 낮추기 위한 해석 모델을 선정하고 열유동 해석을 통해 비교 검토하였다[8].

#### 3.1 해석 조건

실험과 동일 운전 조건에서 고압 인버터 시스템의 열유동 해석은 Fig. 1과 같이 단순화된 고압 인버터 셀 및 시스템 모델을 적용하였으며, 전자장비에 냉각에 특화된 ANSYS ICEPAK 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다. 정상상태 유동 현상을 해석하기 위하여 연속방정식과 운동량 방정식이 사용되었으며 열전달 현상을 지배하는 에너지 방정식이 사용되었다. 난류 유동의 해석을 위하여 Zero equation 난류 모델을 사용하였다[9]. 유동 해석을 위한 경계 조건은 Table 2에 나타내었으며, 해석격자는 비정렬 육면 격자(Hexa-unstructured mesh)를 사용하여 약 450만개로 생성하였다.

##### 3.1.1 발열 부품 및 발열량

단위 셀에서 발열부품들의 크기와 발열량은 제조사에서 제공하는 사양서와 관련 이론식을 활용하였으며, 전력 변환 소자(Power switch device)는 I사 제품, 싸이리스터(Thyristor)는 S사 제품을 사용하였다. 이 소자들의 발열량은 제조사에서 제공하는 프로그램을 통해 산출하였으며, 이 외의 주요 발열부품인 축전기(Capacitance)의 발열량은 제품 사양서에 주어진 수치를 식 (1)에 적용하여 계산하였다[10].

$$W = I_{AC}^2 \times Re + V_{DC} \times I_{DC} \quad (1)$$

여기서,  $W$ 는 Consumption of electricity by the capacitor[W],

Table 2 Boundary condition

Ambient temp.	21℃
Gravity acceleration	9.81 m/s <sup>2</sup>
Flow regime	Turbulent
Time variation	Steady
Ambient fluid	Air

$I_{AC}$ 는 Ripple current[A],  $Re$ 는 Equivalent series resistance of the capacitor,  $V_{DC}$ 는 DC Voltage[V], 그리고  $I_{DC}$ 는 Leakage Current[A]이다.

시스템에서 사용된 변압기는 정격 전압 3300V, 정격 전류 105A의 E사 제품으로 시험 성적서를 통해 발열량을 산정하였다. 아래의 Table 3에 나타난 바와 같이 고압 인버터 시스템 전체 발열량은 약 14kW이며, 여기서 단위 셀 인버터의 총 발열량은 약 0.4kW이고, 변압기의 총 발열량은 약 10kW이다.

시스템 외부에 장착된 팬은 지름 350 mm, 풍속 1540 rpm, 최대 유량 및 압력은 3600 m<sup>3</sup>/h, 100Pa인 E사 제품이 사용되었다.

#### 3.1.2 해석 모델

해석은 아래 Table 4와 같이 설계 변경 가능한 범위를 고려하여 네 개의 모델을 선정하였다. 모델 1은 실험과 동일한 시스템으로 변압기 주변에 유동 가이드가 설치된 모델이고, 모델 2는 모델 1에서 유동 가이드가 설치되지 않은 모델이다. 모델 3은 변압기 하단 프레임(Frame)에 공기 유입구(Vent)를 낸 모델이며, 모델 4는 외부에서 공기가 변압기로 유입 되도록 시스템 하단 양 쪽에 파이프 형상의 통풍구에 공기 유입구를 만든 모델이다. 이들 네 개의 해석 모델의 결과를 비교하여 가장 효과적으로 변압기의 온도를 낮출 수 있는 설계 방안을 검토하였다.

## 4. 해석 결과 및 고찰

#### 4.1 유동 결과 및 고찰

열유동 해석을 통해 단위 셀 인버터와 변압기를 통과하는

Table 3 Heat losses of components

Sources	Quantity		W/ea	
	Cell	System	Cell	System
Power switch	2	18	109.3	-
Thyristor	3	27	60	-
Capacitance	6	54	7.7	-
Transformer	Coil	1	-	7424
	Core	1	-	2400
Transformer total heat loss			-	9824
Cell and system total heat loss			445	13830

Table 4 Thermal and fluid simulation case

No.	Fluid guide	Frame vent	Pipe vent
Model 1	O	X	X
Model 2	X	X	X
Model 3	O	O	X
Model 4	O	X	O

유동 흐름의 유속을 Table 5에 나타내었다. 히트싱크 핀 사이 평균 유속은 각 해석 모델들 모두 아홉 개 셀들의 핀 사이 평균 유속이 균일하였으며, 네 개의 해석 모델들을 비교한 결과 해석모델 2의 평균 속도가 약 1.6 m/s로 가장 작았고 해석 모델 4가 약 2.4 m/s로 가장 빠른 유속을 나타내었다. 그리고 변압기를 냉각하기 위한 시스템 전면부 하단 흡입구의 유속은 흡입구 중앙지점에서 해석모델 4가 약 4.1 m/s로 가장 높은 수치를 나타내었다.

다른 해석모델들에 비하여 해석모델 4의 경우 파이프 형상의 통풍구를 통해 더 많은 유량이 시스템에 유입되어 단위 셀의 유입속도와 시스템 하단 흡입구의 유속 모두 증가한 것으로 보인다. 해석모델 4를 제외한 다른 해석모델은 시스템에 유입되는 유량은 거의 동일하나 해석모델 2의 경우 변압기 주변에 유동가이드가 설치되지 않아 다른 모델들에 비하여 유동저항이 작기 때문에 하단부로 들어가는 유량이 증가하고 단위 셀로 유입되는 유량이 감소하였다.

4.2 온도 결과 및 고찰

4.2.1 실험 결과 온도 비교

열유동 해석 결과의 정합성을 검증하기 위하여 실험 결과와 해석모델 1의 해석 결과를 비교한 결과, 단위 셀 인버터의 경우 실험과 동일한 히트싱크 온도 측정 위치에서의 온도는 해석 결과가 실험에 비하여 약 5-9°C 낮은 온도를 나타내었다. 또한 해석결과는 9개 셀의 온도 편차가 약 1°C 내외로 거의 유사하였으나, 실험결과는 중간층 셀의 온도가 높은 경향을 보였으며 각 셀의 온도 편차가 최대 약 4°C 이내였다. 그리고 변압기의 경우 실험과 동일한 측정위치인 고압 코일 후면에서에서의 온도는 해석 결과가 실험보다 약 10°C 높았다.

이러한 온도 편차의 원인은 셀의 경우 3D 설계모델을 단순화 하는 과정에서 내부 유동을 방해하는 부스바(Busbar)와 배선 등이 생략됨으로써 해석 시 히트싱크의 유속이 실제보

다 증가된 것으로 판단된다. 또한 변압기의 경우, 실제 정격 운전에서의 정확한 발열량이 아닌 사양서에서 제시된 최대 발열량을 초기조건으로 입력하였기 때문에 해석에서의 변압기 온도가 더 높게 나온 것으로 예상된다.

4.2.2 해석 모델 온도 비교

선정한 네 개의 해석모델의 방열 성능을 평가하기 위하여 해석 결과를 비교한 결과를 아래의 Table 6에 나타내었다. 단위 셀 인버터의 경우 동일한 온도 타점에서의 히트싱크 표면 온도는 해석모델 4가 최대 약 3°C로 가장 낮았으며 다른 모델들의 온도 편차는 0.3°C 이내로 거의 유사했다.

변압기의 해석 모델에 따른 온도결과를 Fig. 3에 나타내었다. 실험과 동일한 측정위치인 변압기 고압 코일 후면에서에서의 온도는 해석모델 4가 가장 낮았으며 해석모델 2의 온도가 가장 높았다. 시스템 하단 양쪽에 파이프 형상의 통풍구를 만든 해석모델 4는 해석모델 1보다 약 15°C 감소하였으며 유동 가이드를 설치하지 않은 해석모델 2는 해석모델 1에 비해 약 30°C 증가하였다. 변압기 하단 프레임에 공기 유입구를 낸 해석모델 3의 온도를 해석모델 1과 비교한 결과는 해석모델 3이 약 8°C 증가했다.

해석모델 4가 다른 모델들에 비하여 단위 셀의 히트싱크 및 변압기 표면 온도가 가장 낮은 이유는 파이프 형상의 통풍구를 통해 더 많은 외부 공기가 유입되어 단위 셀의 유입속도와 시스템 하단의 유입속도가 증가하였고, 유동이 파이프 통풍구를 통해 변압기 후면을 직접 통과하여 냉각성능을 높이기 때문으로 판단된다. 해석모델 2의 변압기 온도가 가장 높은 이유는 변압기 주변에 유동 가이드를 설치하지 않음으로써 변압기를 직접 통과하는 유량이 감소하였기 때문이다. 해석모델 3의 온도가 해석모델 1에 비하여 상승하였는데 그

Table 5 Velocity of MV inverter system

Model	1	2	3	4
<b>Cell</b>	<b>Mean velocity of between fins (unit: m/s)</b>			
U11	1.94	1.67	1.84	2.33
U12	1.86	1.67	1.78	2.29
U13	1.89	1.76	1.88	2.39
V21	1.85	1.67	1.80	2.45
V22	1.79	1.63	1.68	2.45
V23	1.84	1.64	1.84	2.48
W31	1.88	1.35	1.74	2.49
W32	1.75	1.53	1.68	2.36
W33	1.82	1.60	1.80	2.50
<b>System</b>	<b>Velocity of inlet central point (unit: m/s)</b>			
I31	3.35	3.41	3.19	4.08
I32	3.31	3.56	3.21	4.04

Table 6 Temperature of MV inverter system

Model	Real	1	2	3	4
<b>cell</b>	<b>Measuring point of heatsink (unit: °C)</b>				
U11	47	41.6	41.0	41.6	39.4
U12	47	41.6	41.0	41.4	39.7
U13	47	41.1	41.0	40.7	39.4
V21	51	41.2	41.2	41.6	38.8
V22	47	42.1	42.2	42.0	39.1
V23	51	42.0	41.7	41.7	39.1
W31	49	41.7	43.1	41.7	38.8
W32	49	41.5	43.3	42.1	39.2
W33	47	41.3	42.1	41.1	38.6
Mean	48	41.6	41.8	41.5	39.1
<b>Transformer</b>	<b>Measuring point of coil (unit: °C)</b>				
TR R	74	87.7	118.6	94.7	72.9
TR S	83	89.6	121.1	97.3	75.4
TR T	80	87.7	120.3	94.7	72.2
Mean	79	88.3	120.0	95.6	73.5

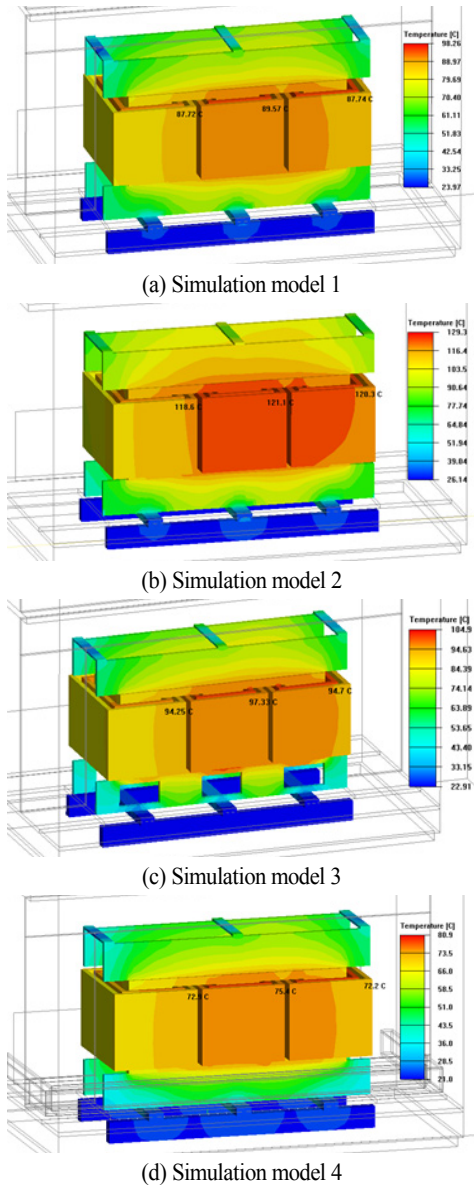


Fig. 3 Temperature distribution of transformer

이유는 외부에서 들어온 공기가 프레임 공기 유입구를 지나면서 변압기를 통과하는 유량이 감소하는 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 당사에서 개발하고 있는 3.3kV(105A)급 고압 인버터 시스템의 열유동 해석을 수행하였으며 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 해석의 정합성을 검증하였다. 또한

변압기의 온도를 낮출 수 있는 해석 모델을 제안하여 냉각 성능을 비교 검토하였으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 고압 인버터의 실험 결과와 해석 결과는 전체적으로 약 10% 내외의 해석 오차가 있으며, 앞 절에서 언급한 바와 같이 오차의 원인은 해석모델의 단순화와 예측된 발열량의 차이로 판단된다.
- (2) 네 가지 해석모델을 비교한 결과 셀과 변압기 모두 시스템 하단 양쪽에 파이프 형상의 공기 유입구를 만든 해석 모델 4의 설계안이 가장 효과적인 방열 성능을 나타내었으며, 향후 제품설계에 반영할 예정이다.

### References

- [1] 2010, Kim, H. and Na, S., "LSMV Multi-level Inverter Development and Application," *KIPE 2010 Meeting*, pp.311-313.
- [2] 2011, Lee, S., "Medium Voltage Drive Apply Water Supply Facility for Energy Efficiency Improvement," *KIEE 2011 Summer Meeting*, pp.1037-1038.
- [3] 2006, Wu, B., "High-Power Converters and AC Drives," *IEEE Press*, New Jersey, pp.3-5.
- [4] 2009, Boglietti, A., "Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines," *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, Vol.56, pp.871-880.
- [5] 1998, Jeon, C., "Cooling of an In-line Array of Heat Sources with Air-Cooled Heat Sinks," *KSME 1998 Autumn Conference*, Vol.2, pp.229-234.
- [6] 2004, Lee, J., "Design of a Heat Dissipation System for the 400kW IGBT Inverter," *Journal of Power Electronics*, Vol.9, pp.350-355.
- [7] 2011, Zhen, Y.E., "Simulative Analysis of Traction Motor Cooling System Based on CFD," *Electric Information and Control Engineering (ICEICE)*, 2011 International Conference, pp.746-749.
- [8] 2013, Kim, S., "The Optimal Design of Heatsink for 4kW Photovoltaic Inverter by Using Thermal and Fluid Simulation," *KSCFE 2013 Spring Conference*, pp.248-254.
- [9] 2012, Mock, J., "A Comparative Evaluation Between Computational and Experimental Heat Fluid Dynamics for 1.5 MVA High Voltage Inverter System," *KSCFE 2012 Spring Conference*, pp.87-92.
- [10] 1975, Hayatee, F.G., "Heat Dissipation and Ripple Current Rating in Electrolytic Capacitors," *Electro-component Science and Technology*, Vol.2, pp.109-114.