고압진공차단기의 정격전류상승을 위한 CAE해석

안희섭, 이종철, 최종웅, 오일성
LG산전 전력연구소

Parametric Study and Optimized Thermal Design of a High-Voltage Vacuum Circuit Breaker

Heui-Sub Ahn, Jong-Chul Lee, Jongung Choi, Il-Sung Oh
LG Industrial Systems Electrotechnology R&D Center

Abstract - In this study, the computational heat transfer of the high-voltage vacuum circuit breaker was investigated. Higher normal current-ratings and stabilized thermal characteristics become more important in existing circuit breakers in order to satisfy market needs. Increases in current-ratings have an even greater effect on the Joule heating in the main circuit of the breakers. The thermal design must account for this increase in heat produced for the breaker to meet various temperature-rise limits set by industry standards. We are studying to enhance the normal current-ratings without major frame change of our present production models. As the method used in this research, we performed the computational analysis using the commercial package, ICEPAK. We could get optimized thermal design suitable for 25% upgraded normal current-ratings through parametric study.

1. 서 론

차단기는(Breaker)는 전력계통에서 매우 중요한 역할을 하는 기기로써, 정상동작시에는 전류를 안정적으로 수용가에 공급을 하여야 하며 사고가 발생시에는 신속하게 사고전류를 차단함으로 사고의 전파를 최소화 하는데 사용되고 있다.

고도정보화 사회에서는 안정적인 전력공급이 요구되어지며, 기술의 고도화를 배경으로 이러한 기기들은 소형화, 고 신뢰도화, 경제성의 향상이 도모되고 있다. 현재 국내외 차단기의 시장추세는 정격통전전류의 크기는 점차 증가되고, 이와 반대로 제품의 크기는 점점 작아지고 있다. 정격통전전류는 차단기의 열적성능을 평가하는 중요한 요소로써 관련된 규격에서는 차단기에 정격통전전류를 인가하여 정상상태(steady-state)에서 차단기 내부의 부품온도를 측정하여 차단기의 열성능을 평가하고 있다. 차단기 내부의 열을 충분히 외부로 방열하지 못하면 차단기를 구성하고 있는 도체 및 절연물의 온도가 높아져 열화가 촉진되며 중대한 사고를 일으킨다. 예를 들면 전류가 흐르는 주회로 도체의 과열은 도체의 과열로 인한 절연파괴, 방전으로 진행하여 결국 단락이라는 커다란 사고로 연결된다. 대표적 규격기관인 IEC에서는 각 구성부품의 온도를 두 가지 방법으로 규제하고 있다[1]. 첫 번째는 각 부품의 최고온도(Maximum Temperature)이며, 두 번째는 최고온도에서 주위온도와의 차이를 고려한 허용최고온도(Permissible Temperature Rise)이다. 최고온도는 차단기의 각 부품의 재질에 따른 크립(Creep)현상등을 고려하여 설정하였으며, 허용최고온도는 제품의 장시간수명과 관계가 있다[2,3]. 또한 전류를 통전하기 위해 사용하는 동일한 도체의 경우에도 볼트등으로 단단하게 체결되어 움직일 수 없는 접속부와 차단기의 구성목적상 움직임이 필요한 접촉부와의 온도차이를 달리 규제하고 있다. 이는 움직임이 있는 도체부의 경우 프래팅(fretting)현상등에 의한 접촉저항의 증가등을 고려한 것이다. 표1은 대기에 노출된 도금된 도체에 관한 IEC의 온도상승규격을 나타낸 것이다.

Table 1. IEC STandard for Temperature Rise

	접촉부	접속부
최고온도[℃]	105	115
허용최고온도[℃]	65	75

본 논문은 LG고압진공차단기의 정격통전전류 용량을 기존에 비해 약 25%정도 상승시키기 위한 최적의 열설계구조에 관한 연구이다. 도체에 전류가 흐를 때 저항에 의한 발열량은 식(1)로 표현된다. 발열량은 전류의 제곱에 비례하므로 전류를 25%상승시키면 발열량은 약 56%정도 증가한다.

$$Q = I^2 R \quad [W] \qquad (1)$$

본 연구에 사용된 차단기는 현재의 정격전류에서는 IEC규격을 만족하고 있으며 전류용량을 25% 상승시키면 규격을 만족하지 못 한다. 본 연구의 제약조건으로는 기존제품의 기본적인 외형크기는 유지하면서 정격통전전류를 상승시키는 것이다. 이러한 조건을 만족하는 차단기의 열설계를 위해 본 연구에서는 차단기의 구성부품에 대한 열적해석을 상용프로그램인 ICEPAK을 이용하여 수행하였다.

2. 차단기 구조 및 Parametric 열해석

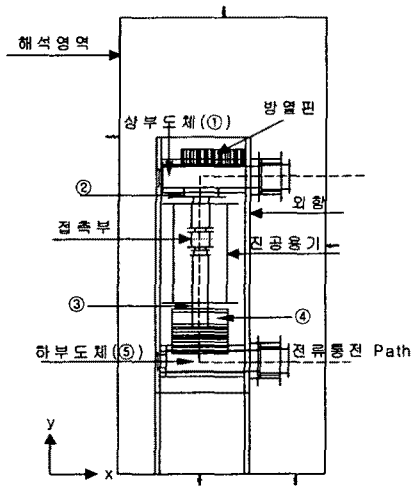

Fig. 1 Schematic Diagram of VCB

2.1 고압진공차단기 구조

그림1은 본 연구에 사용된 진공차단기를 나타낸다. 진공차단기(Vacuum Circuit Breaker)는 오일차단기(Oil Circuit Breaker)나 기중차단기(Air Circuit Breaker)에 비해 여러 가지 장점을 가지고 있기 때문에 7.2kV이상의 고압분야에서 널리 사용되고 있다[4]. 진공차단기는 크게 V.I(Vacuum Interrupter)와 V.I 상부와 하부에 연결된 도체로 구성된다. V.I는 고진공을 유지하기 위한 진공용기, 진공용기내부의 상부고정접점과 하부가동접점으로 이루어진다. 진공용기내부에는 공기가 거의 없기 때문에 접점이 분리될 때 발생하는 아크(Arc)열에 의해 이온화되는 공기의 양이 작고 따라서 쉽게 아크를 소호할 수 있다. 전기가 흐르는 도체부는 절연물로 만들어진 외함내부에 위치하고 있으며 외함은 사면이 밀폐되어 있고 상부와 하부에 부력을 이용하여 자연대류열전달을 촉진하기 위해 구멍이 뚫려있다. 상부의 구멍은 완전히 개방되어 있으며 하부구멍은 구조적인 이유로 하부면적의 약 2/3정도를 차지한다. 상부도체에 체결된 방열핀은 기존의 모델에 이미 부착되어 있으며 이것이 없는 경우에는 기존의 정격전류에 대해서도 규격을 만족하지 못한다. 진공용기내의 접촉부를 기준으로 상부는 고정접점이며 하부가동접점은 기계적 링크에 의해 구동되며 또한 이 링크에 의해 상부고정접점과 접촉할 때 충분한 접촉압력을 받게된다. 그림에서 표시된 번호는 해석결과의 온도를 비교하기 위해 임의적으로 선정한 것이다.

2.2 Parametric 열해석

본 저자들은 기존연구를 통해 본 연구에 사용된 차단기를 대상으로 각각 실험과 CAE해석을 하였으며 그 결과 해석의 신뢰도가 약 93~94%정도임을 확인하였고 이러한 결과를 바탕으로 해석에 사용된 차단기의 열해석 모델이 물리적으로 타당한 것임을 알 수 있었다[5].

서론에서 언급한 바와 같이 외함의 기본크기는 유지하면서 정격통전용량을 증가하기 위해 차단기의 열적성능에 영향을 미칠 수 있는 차단기의 구성요소를 다음과 같은 기준에 선정하였다.

1. 최소의 변경으로 최대의 효과
2. 실제 제품의 적용성(가공성, 조립성...)

이러한 기준에 의해 상/하부 도체의 단면적, 외함하부의 구멍크기, 상부도체에 체결된 방열핀 등의 세 가지를 열해석의 변경인자로 선정하였다. 기존연구의 결과[5]를 참고하면 차단기 내부의 전체발열의 70%가 V.I에서 발생하며 특히 접점에서 발열은 약 40%를 차지한다. 이러한 측면에서 차단기의 온도상승에 가장 큰 영향을 미치는 구성요소는 V.I이다. V.I내부의 접점의 단면적을 키워서 전기적 체적저항을 줄이는 방법, 접점의 접촉압력을 크게 하여 전기적 접촉저항을 줄이는 방법등이 있으나 현실적으로 V.I변경은 거의 불가능한 상황이므로 본 연구에서는 제외하였다.

한편 이러한 연구를 통해 차단기 설계자는 열설계에 대한 감각을 높일 수 있다. 도체의 단면적을 증가하거나 방열핀의 높이를 더 높게 할수록 온도강하가 더 많이 발생한다는 정성적인 사실은 알고 있지만 설계자가 더 관심이 있는 것은 실제로 얼마만큼의 온도강하가 일어나는가에 대한 정량적인 값이다. 이러한 정량적인 값에 대한 기준을 가지고 있으면 과도한 온도상승문제가 발생할 때 변경요소에 대한 정확한 선정을 할 수 있으므로 과다설계를 방지할 수 있으며 또한 부적절한 선택으로 인한 반복적인 실험을 줄일 수 있다.

기존연구에서는 그림1에 표시된 위치의 온도를 측정하여 해석결과와 비교하였다[5]. 이러한 측정점들은 모두 볼트로 연결되어 있으므로 접속부에 해당하며 접촉부는 V.I내부에 존재하고 측정이 불가능하므로 결과를 비교하기 위한 데이터에서 제외하였다. 표1에 언급된 IEC규격을 만족하기 위해서는 접속부의 온도가 각각 최고온도 115[℃], 허용최고온도 75[℃]를 넘어서는 안되며 본 연구에서는 자체의 안전율 및 해석오차를 고려하여 기준온도를 IEC규격보다 다소 낮은 온도로 선정하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 상/하부 도체 단면적의 변화

도체의 단면적을 키우면 저항의 감소로 인한 발열량의 감소와 대류열전달 면적이 증가하므로 열전달을 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 현재의 구조에서 외형의 변화없이 도체단면적은 최대 44%정도 더 증가시킬 수 있다.

표 2에 해석조건을 나타내었으며 그림 2는 각각의 경우에 대한 해석결과를 도시한 그림이다. Y축은 본 연구에서 적용한 기준온도를 단위크기로 하여 무차원화한 것이며, X축은 그림 1에 표시된 위치를 나타낸다.

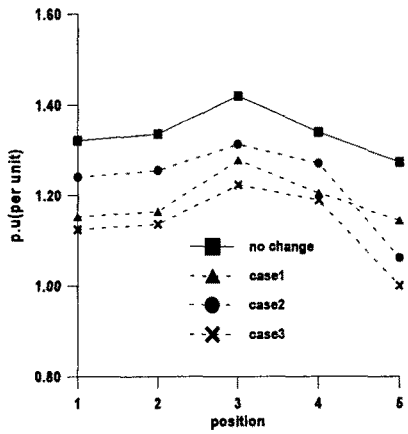

Fig. 2 Temperature Profile according to Conductor Size

Table 2. Simulation Conditions on Conductor Size

Case	변 경 내 용
Case1	상부도체 44% 증가
Case2	하부도체 44% 증가
Case3	상/하부 도체 44% 2증가

온도강하의 절대적인 값은 상/하부를 동시에 변경하는 것이 가장 좋지만 효율은 상부 도체를 변경한 것이 가장 좋은 것으로 판단된다. 두 가지를 동시에 변경한 경우에는 각각의 경우에 대한 변화량이 선형적으로 중첩되어 나타나는 것이 아니라 중첩된 값보다는 다소 작은 값의 온도강하가 일어남을 알 수 있다.

3.2 외함하부의 유입구 크기

차단기구조에서 언급한바와 같이 도체부는 사면이 절연물로 만들어진 굴뚝(chimney)형상의 외함으로 밀폐되어 있고 상/하부에 자연대류에 의한 유동이 발생하도록 구멍이 뚫려있어 하부는 유입구, 상부는 유출구 역할을 한다. 상부의 구멍은 완전히 개방되어 있고 하부의 구멍은 구조적인 이유로 일부부분만 개방되어 있다. 그림 3은 하부유입구의 크기에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. 온도강하 또는 상승의 원인은 유입구 크기변화에 따른 질량유량의 차이인 것으로 판단된다. 그리고 온도강하의 값이 도체크기를 변화시켰을 때보다 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이는 유동장이 자연대류에 의해 발생하므로 입구나 출구의 단면적이 변화여도 전체적인 유량의 변화폭이 그다지 크기않기 때문이다. 표 3에 해석조건과 각각의 해석조건으로부터 구해진 입구의 질량유량을 나타내었다. 표에서 나타난 바와 같이 질량유량은 유입구 단면적의 변화에 따라 각각 15%증가 또는 10%정도 감소함을 알 수 있다.

Table 3. Simulation Conditions on Inlet Size

Case	변 경 내 용	질량유량(p.u)
No change	-	1
Case1	단면적 56% 증가	1.15
Case2	단면적 44% 감소	0.9

3.3 방열핀 높이

그림 4는 방열핀의 높이를 기존보다 높게하여 해석한 결과를 나타낸 것이다. Case1은 상부 방열핀의 높이를 2배로 키웠을 때의 결과이고 Case2는 하부의 유입구 면적을 동시에 키웠을 때의 결과이다. 지금까지 언급한 다른 인자들보다 온도감소의 효과가 훨씬 증가함을 알 수 있으며 또한 기존에 사용하던 방열핀의 설계가 충분히 적절하지 못 함을 알 수 있다. 핀의 높이를 좀 더 높이면 더 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 생각하나 현재의 구조로는 더 이상 키우는 것이 불가능하다.

3.4 최적화 설계

현재까지의 연구내용을 검토하면 한 가지 인자만을 변경하여 만족할 만한 결과를 얻지 못하였고 따라서 최적화된 설계구조를 찾기위한 방법으로 기금까지 연구한 인자들을 동시에 변경하여 최적안을 찾는 연구를 수행하였다. 변경의 기본인자는 방열핀의 높이를 현재보다 2배 키우는 것으로 하였고 그 이유는 세 가지 인자 중 온도감소의 효과가 가장 크고 기존의 제품에 적용하여도 더 좋은 효과를 나타낼 수 있기 때문이다. 그리고 외함하부의 유입구의 크기는 온도감소의 효과가 미미하므로 제외하였다.

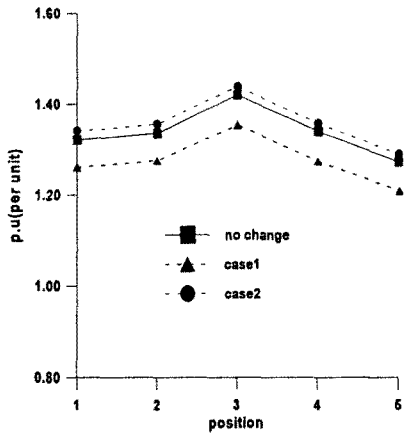

Fig. 3 Temperature Profile according to Inlet SizeSize

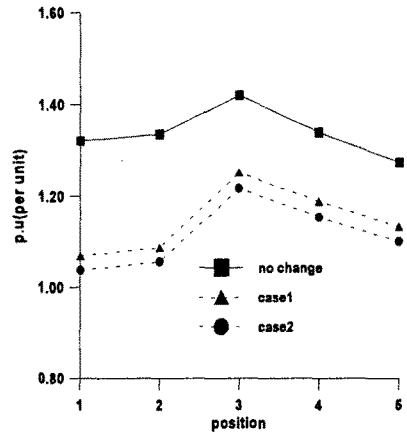

Fig. 4 Temperature Profile according to Fin Height

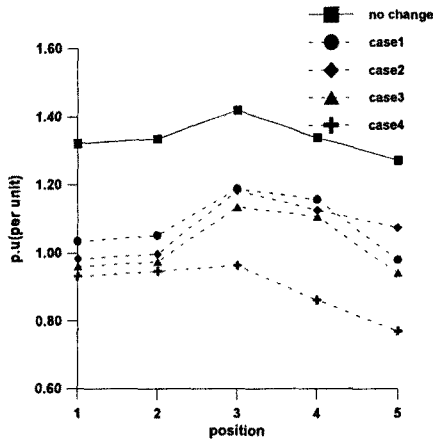

Fig. 5 Temperature Profile of Optimized Design

표 4는 해석조건을 나타내며 그림 5는 각 조건에 따른 해석결과를 나타낸다. 최종적으로 자체기준에 만족할

만한 결과를 보이는 것은 하부도체에 상부도체에 부착된 방열핀을 동일하게 사용하는 것이다. 그림 1에 나타난 바와 같이 도체의 크기를 변경하는 것은 국부적으로 온도가 높을 때 사용하기에 적합한 것으로 판단되며 전체적으로 열원의 발생이 증가시에는 온도강하의 한계가 있는 것으로 판단된다.

Table 4. Simulation Conditions for Optimized Design

Case	변경내용
Case1	상부핀 + 하부도체 단면적 증가
Case2	상부핀 + 상부도체 단면적 증가
Case3	상부핀 + 상/하부도체 단면적 증가
Case4	상부핀 + 하부도체 방열핀

4. 결 론

본 연구에서는 고압진공차단기의 온도상승에 영향을 미치는 인자에 대한 parametric연구와 기본모델의 외형을 변경하지 않고 최소한의 부품변경을 통해 현재보다 정격통전전류를 25% 상승시킬 수 있는 방법에 대해 해석적인 연구를 수행하였다.

선정된 세 가지 인자중에서 차단기의 열적성능에 가장 큰 영향을 미치는 것은 방열핀임을 알 수 있었고 이것을 기본으로 하여 다른 인자를 조합하여 최종적으로 본 연구에서의 목표인 외형을 변화시키지 않고 25% 상승된 전류에서도 규격을 만족시킬 수 있는 차단기의 열설계구조를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구에 도움을 주신 성균관대학교 기계공학부 김윤제 교수님께 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] IEC-60943., "Guidance Concerning the Permissible Temperature Rise for Parts of Electric Equipments, in particular Terminals", 2nd Edition, 1998

[2] P.G. Slade., "Electric Contacts"., Mracel Dekker, Inc., 1999

[3]Thomas E., Browne, JR., "Circuit Interruption"., Marcel Deker, Inc., 1984

[4] IEE Power Engineering Sreies 1., "Power Circuit Breaker Theory and Design", 1982

[5]H.S. Ahn., J.C. Lee., "Perdiction of Temperature Rise for Vacuum Circuit Breaker"., ICEE2002, pp. 8 94-897-