

## 도체접속부 열화에 대한 수명온도상승 모델

김정태\*, 김지홍\*\*, 구자윤\*\*, 윤지호\*\*\*, 함길호\*\*\*

\* 대전대학교 전기공학과 \*\* 한양대학교 전기공학과 \*\*\* LG 산업 (주) 전력시흥기술센터

## Lifetime Temperature Rise Model for the Degradation of Electric Connections/Contacts

Jeong-Tae Kim\*, Ji-Hong Kim\*\*, Ja-Yoon Koo\*\*, Ji-Ho Yoon\*\*\*, Gil-Ho Ham\*\*\*

\* Daejin Univ. \*\* Hanyang Univ. \*\*\* LG Industrial Systems

**Abstract** - In this study, in order to find out the trends and the residual lifetime for electric connections/contacts using infrared image camera, "lifetime temperature rise model" is theoretically proposed on the base of "lifetime resistance model", and to prove this theory, experiments have been performed for various kinds of electric connections/contacts. Two suggestions have been builded up for the "lifetime temperature rise model": one is the linear relationship between the temperature rise  $\Delta K$  and contact resistance, and the other is the functional relationship between the temperature of electric connections/contacts and the operating time which ascribed in the "lifetime resistance model". From the experimental results, measured values were quite similar to the theoretical value so that two suggestions in "lifetime temperature rise model" were appeared to be correct.

## 1. 서 론

각종 전력기기의 도체 부분에 대한 전기적 접속 및 접촉에 있어서 장기간 운전시 접촉저항의 증가에 따라 발열되고 이로 인해 사고가 일어날 우려가 있다. 실제로 이러한 사고는 송전선의 단선 및 도체 접촉의 용융 등 현장에서 발생되고 있다. 아울러, 이러한 도체간의 접촉은 전력기 뿐만 아니라 반도체를 사용하는 전자회로에서도 필수적이며, 이 또한 전자회로의 과열로 인한 오동작과 과대한 전력소모를 유발한다. 따라서, 도체 접속/접촉부의 열화가 어떻게 일어나는지에 대한 연구가 면면히 이어지고 있다.

특히, 운전중인 기기에 대해 열상 카메라를 이용하여 도체 접속/접촉부나 기기의 외관 및 전자회로 기판 등을 촬영하여 국부적인 온도 상승을 측정하는 열화 진단 기법이 제시되어, 현장에서 매우 유용하게 적용되고 있다. 그러나, 아직까지는 단순한 온도의 측정에 그쳐 단순 비교로 열화에 대한 판단을 내리고 있는 실정으로, 도체 접속/접촉부의 열화 메커니즘을 적절히 적용하여 보다 구체적이고 정량적인 진단은 이루어지지 않고 있다.

IEC 60943에서는 전력기기의 도체 접속/접촉부에서 접속/접촉부 온도와 주위온도와의 차이(온도상승:  $\Delta K$ )나 주위온도의 상승( $\Delta T$ )이 기준 값을 넘을 때에는 열화가 가속된다는 이론을 제시하고 있고 이와 더불어 여러 도체 접속/접촉부의 최대 허용 온도상승과 최대 허용온도의 기준 값을 규정하였다.[1] 따라서, 이를 이용하면 열상 카메라를 이용한 열화 진단에서 절대 판정 기준을 결정할 수 있다. 그러나, 현재까지의 열화 정도는 어느 정도인지 또 앞으로 어느 정도 사용하면 사고에 이르게 될지 등의 열화 추적 및 잔여 수명에 대한 정보는 얻을 수 없다.

최근 금속의 산화/확산 이론에 따라 접속/접촉부의 접촉저항이 증가한다는 '수명 저항모델(Lifetime resistance model)'[2]이 제시되어 기본적인 접촉저항과 수명과의 관계를 설명하였으며, 도체 접속부의 접촉저항이 초기 값의 5 ~ 6 배 정도 되면 사고에 이른다는 보고[3]가 있다. 이 문헌들은 모두 도체 접속/접촉부의 접촉저항 증가로 인해 사고에 이른다는 것을 제시하고 있어, 현장에서 운전 중에 접속/접촉부의 저항을 직접 측정하기 어려우므로 현장 적용성은 거의 없다. 그러나, 접촉저항의 증가는 곧 온도상승이란 점을 고려하면, 열상 카메라의 온도 측정을 통한 열화 추적 및 잔여 수명 도출에 이 연구 결과들의 적용이 가능하다.

따라서, 본 연구에서는 열상 카메라를 이용한 도체 접속/접촉부의 열화 추적 및 잔여수명을 도출하기 위해, 이론적으로 수명 저항모델을 근거로 수명 온도상승 모델을 제시하였다. 그리고, 여러 종류의 도체 접속/접촉부를 제작하고 오븐 속에서 전류를 인가하면서 인위적으로 열화시킨 후 정격 전류를 흘리는 온도시험을 통해 온도상승  $\Delta K$ 를 측정하고 열화에 따른 접촉저항을 측정하여, 측정된 온도상승  $\Delta K$ 와 접촉저항과의 관련성과 제시한 수명 온도상승 모델을 적절함을 입증하였다.

## 2. 본 론

## 2.1 온도상승 모델

본 연구에서는 온도상승과 열화와의 관련성을 도출하기 위해 접촉저항과 열화와의 관련성을 나타낸 '수명저항 모델 (Lifetime Resistance Model)'[2]을 적용하였다. 수명저항 모델은 접속/접촉부의 접촉저항이 시간에 따라 증가하게되어 결국 접속부의 온도상승으로 이어져 과열을 초래한다는 수명이론으로, 접촉부를 이루는 도체(예, Cu, Al 등)의 표면이 산화되고 운전중 시간이 지남에 따라 산소(산화층)의 확산으로 인해 산화층이 두꺼워지는 효과로 인해 접촉면적이 줄어들고 저항이 증가되는 메커니즘을 적용한 것이다. 이 이론의 수식은 다음과 같다.

$$R(t) = \frac{R(t=0)}{1 - \eta t^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{Q_a - \sigma \alpha^3}{2RT_a}\right]} \quad (1)$$

여기서,  $R(t)$ : 시간  $t$  후의 접촉저항,  $R(t=0)$ : 초기의 접촉저항,  $\eta$ : 초기 접촉면적( $a$ -spot)과 확산계수 등을 고려한 계수,  $Q_a$ : 확산되는 이온의 활성화 에너지,  $\sigma$ : 각 원자에 가해지는 스트레스(압력),  $\alpha^3$ : 원자의 단면적,  $\sigma \alpha^3$ : 각 원자에 가해지는 스트레스에 의해 행해진 일,  $R$ : 이상기체 상수,  $T_a$ : 접촉면적( $a$ -spot)의 절대 온도

$$T_a = \sqrt{T_0^2 + \frac{U^2}{4L}} \quad (2)$$

단,  $T_0$ : 접촉되지 않은 금속 표면의 절대온도  
 $U$ : 접촉전압  $L$ : Lorenz 상수

이 모델을 온도상승  $\Delta K$ 와 열화와의 관계로 유도하기 위해서는 접촉저항  $R$ 과 온도상승과의 관련성을 파악하여야 한다.

기본적으로 전류가 인가될 때의 발열량  $Q$ 는

$$Q = 0.24I^2 R t \quad (3)$$

로 되며, 전류  $I$ 가 일정하고 시간  $t$ 가 충분히 흘러 온도가 포화에 다다르면 도체 접촉/접촉부 온도와 주위 온도와의 차이인 온도상승  $\Delta K$ 는 일정한 값으로 된다. 이러한 상황은 도체 접촉/접촉부에 대한 온도시험에서 나타날 수 있다. (여기서, '온도시험'이란 일정한 정격 전류를 흘리면서 온도상승  $\Delta K$ 가 일정하게 포화되는 값을 측정하는 시험으로, 시험대상 도체 접촉/접촉부가 최대 허용 온도상승 기준 값의 범위 이내 인지를 판단하는 시험이다.) 온도상승  $\Delta K$ 는 (발열량  $Q$  - 열발산량)의 관계에 있을 것이므로, 온도가 포화되어 발열과 열발산이 일정하다면, 온도상승  $\Delta K$ 를 발열량  $Q$ 에 선형적으로 비례한다고 볼 수 있다. 따라서, 식 (3)에서 발열량  $Q$ 가 접촉저항  $R$ 에 비례하므로, 결국, 온도상승  $\Delta K$ 는 접촉저항  $R$ 에 선형적으로 비례한다고 가정할 수 있다. 그러므로, 상기 수명저항 모델의 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{R(t)}{R(t=0)} = \frac{\Delta K(t)}{\Delta K(t=0)} \quad (4)$$

그러나, 수명 저항 모델을 실제로 적용하려면, 접촉압력  $\sigma$ 가 일정하다고 가정하더라도 접촉점의 온도  $T_a$ 를 알아야 한다. 접촉점 부위의 온도를 실제로 측정할 수는 없으나, 도체 접촉/접촉부 표면에 열전대나 열상 카메라를 이용하여 온도를 측정할 수 있으므로 이를 적용할 수 있다고 생각된다. 즉, 접촉부위 전체의 온도를  $T_c$ 라 할 때, 접촉점 자체의 온도  $T_a$ 와 접촉부위 전체의 온도  $T_c$ 와는 차이가 있으나, 상기  $T_a$ 에 대한 식 (2)에서도 알 수 있듯이 접촉점의 온도는 주위 도체 표면의 온도에 접촉전압(접촉점의 전압강하)으로 인한 발열을 고려한 것이고, 접촉부 전체의 온도  $T_c$ 가 주위 도체의 온도에 접촉부 전체의 전압강하에 의한 발열을 고려한 것이므로, 개념적으로 유사하다.

이제 상기한 수명 저항 모델의 식 (1)을 실제 측정 가능한 값인  $T_c$ 를 이용하고 온도상승과 수명과의 관계인 수명 온도상승 모델의 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta K(t)}{\Delta K(t=0)} = \frac{1}{1 - \eta t^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{C}{T_c}\right]} \quad (5)$$

여기서,  $C = \frac{Q_a - \sigma \alpha^3}{2R}$  인 상수로서 도체 재질과 접촉방법에 따라 달라지는 값이며,  $T_c$ 는 접촉/접촉부의 절대온도 [K] 이다.

한편, 수명저항 모델을 제안한 문헌(1)에서  $T_a$ 는 접촉전압과 관련되어 상수로 놓고 있으나, 실제의 경우를

고려한 식 (5)에서는  $T_c$ 를 상수라고 할 수 없다. 왜냐하면, 열화에 따라 접촉저항이 증가하고 일정한 전류가 흐른다면 당연히 접촉전압이 증가하기 때문이다. 따라서,  $T_c$ 는 열화시간에 따라 증가되는 꼴이어야 한다.

본 연구에서는 열화와  $T_c$ 와의 관계에 대해 다시 또 하나의 가정을 하고자 한다. 이러한 가정은 상술한 내용이 근거할 수 있는데, 열화에 의해 접촉저항이 증가하기에 따라 접촉전압이 증가하고 온도상승을 야기하므로, 이러한 관련성 역시 식 (1)의 수명저항 모델에 따른다고 추정할 수 있다. 즉, 수명저항 모델의 식 (1)에서 다른 값들은 상수라 하고 저항과 수명과의 관계를 단순히 도출하면

$$R(t) \propto \frac{1}{1 - Et^{\frac{1}{2}}}$$

(단,  $E$ : 재질 및 접촉 압력 등에 따른 상수)

이며, 열화가 일어날 때 접촉저항과 접촉전압 그리고 접촉부 온도가 모두 비례 관계에 있다는 것을 고려하면  $T_c$ 의 열화시간에 따른 변화 역시 상기 꼴로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_c(t) = \frac{F}{1 - Et^{\frac{1}{2}}} \quad (6)$$

(단,  $F$ : 접촉저항과 온도의 관계에 따른 상수)

이제, 식 (6)을 식 (5)에 넣고 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta K(t)}{\Delta K(t=0)} &= \frac{1}{1 - \eta t^{\frac{1}{2}} \exp\left[-C \left(\frac{1 - Et^{\frac{1}{2}}}{F}\right)\right]} \\ &= \frac{1}{1 - At^{\frac{1}{2}} \exp\left[Bt^{\frac{1}{2}}\right]} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= \eta \exp\left[-\frac{C}{F}\right] = \eta \exp\left[-\frac{Q_a - \sigma \alpha^3}{2RF}\right] \\ B &= \frac{E}{F} = \frac{\eta \exp\left[-\frac{Q_a - \sigma \alpha^3}{2R\sqrt{T_0^2 + \frac{U^2}{4L}}}\right]}{F} \end{aligned}$$

이상과 같은 이론적인 검토에서 온도상승  $\Delta K$ 와 수명  $t$ 와의 관계를 도출할 수 있으며, 상수인  $A$ 와  $B$ 에 따라 도체 접촉/접촉부의 열화특성이 좌우된다고 할 수 있다. 즉, 상수  $A$ 와  $B$ 는 재질과 접촉의 종류에 따른 열화 계수라 할 수 있다.

## 2.2 실험 결과 및 고찰

상기한 바와 같이 "수명저항 모델"로부터 본 연구에서 제시하는 "수명 온도상승 모델"로 유도하는 데에는 크게 두 가지의 가정을 세웠다. 즉, 온도상승  $\Delta K$ 가 접촉저항에 선형적으로 비례한다는 것과 접촉/접촉부의 절대온도  $T_c$ 가 "수명저항 모델"에 나타난 함수적인 관계로서 운전시간에 따라 열화된다는 것이다. 따라서, 실험적인

결과로서 이들에 검증을 통해 "수명 온도상승 모델"의 열화 추이를 입증할 수 있다.

### 2.2.1 실험방법

본 연구에서 제시한 수명 온도상승 모델을 실험적으로 입증하기 위해 본 연구에서는 여러 종류의 접촉/접속 재료를 오븐 속에 설치하고 오븐의 온도를 상승시킴과 동시에 도체 정격 이상의 전류를 흘려 가속 열화를 수행하였다. 가속열화에 따른 환산 운전시간은 IEC 60943(1)에 입각하였으며, 열화 도중 및 열화 후 정격 전류를 흘리는 온도시험과 접촉저항의 측정을 통해 열화에 따른 온도상승과 접촉저항의 변화를 관찰하였다. 지면관계상 자세한 내용은 생략한다.

### 2.2.2 $\Delta K$ 와 수명과의 상관관계식에 대한 검증

온도상승  $\Delta K$ 가 접촉저항에 선형적으로 비례한다는 "수명 온도상승 모델"의 가정을 입증하기 위하여, 온도상승  $\Delta K$ 와 수명과의 상관관계를 실험 결과로부터 정리한 것이 그림 1이다. 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 각종 접속/접속의 경우에 온도시험시의 접속/접속부와 주위온도와의 차이인 온도상승  $\Delta K$ 는 실험적인 오차를 포함하고는 있지만 접촉저항과 서로 직선적으로 비례하는 것으로 나타나, 상기한 가정이 적절하였다는 것을 입증하고 있다.

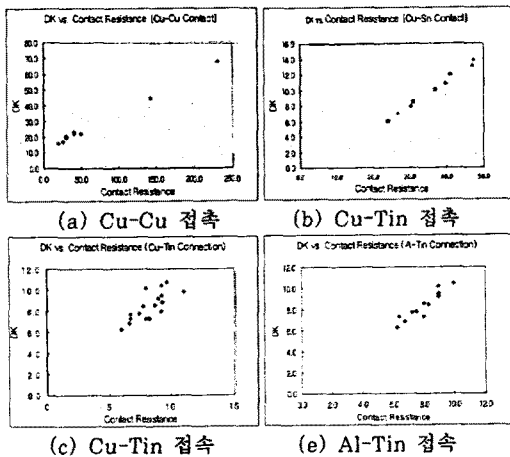


그림 1. 여러 종류에 따른 접촉저항과  $\Delta K$ 의 관계

### 2.2.3 열화시간(환산운전시간)과 수명과의 관련성

상기한 가정 중 둘째 가정인 접속/접속부의 절대온도  $T_c$ 가 "수명저항 모델"에 나타난 함수적인 관계로서 운전시간에 따라 열화된다는 것은 결국 최종적인  $\Delta K(t)$ 와 운전시간  $t$ 의 관계식인 식 (7)으로부터 도출한 곡선이 실험 결과와 부합되는가를 확인하는 것이 된다. 이에 따라, 본 연구에서는 실제 열화시간을 식 (8)의 수명반감 계수를 고려한 환산 운전시간을 계산하고 이 때의 측정된 온도시험 데이터인  $\Delta K$  값을 그래프에 플로팅하였다. 그리고, 이 측정값들을 토대로 식 (7)에서 열화계수  $A$ 와  $B$ 를 구하여 그 접속/접속 종류에 대한 추정 수명곡선을 도출한 후 같은 그래프에 그렸다.

그림 2.(a)는 Cu-Tin 접속의 경우 도출된 결과로서 본 실험의 데이터와 이로부터 구한 추정 곡선 및 이 접속의 도체 허용 온도상승 기준 값인 35K(1)를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 환산 운전시간 30년이 지난 이후에 허용 온도상승 기준 값 보다 크게 나타나고 있어, 결과적으로 본 연구에서 구한 열화의 추이가 적합하다는 것을 즉, "수명 온도상승 모델"이 적합

하다는 것을 입증하고 있다.

한편, 그림 2.(b)는 Cu-Cu 접속의 경우로서, 이 때의 허용 온도상승은 35K(1)이며 그림에 나타난 바와 같이 대략 25년의 수명에서 한계에 다다른 것을 알 수 있다. 이것은 초기의 온도상승값인  $\Delta K_0$ 가 약 18K 정도로 높게 나타났기 때문이며, Cu-Cu 접속의 경우에도 높은  $\Delta K_0$ 를 나타내는 것으로 보아 구리의 재질에 따른 특성이란 판단할 수 있다.

한편, 그림 2.(c)는 알루미늄-주석도금구리 접속의 경우로서, 한계 온도상승인 50K(1)에 비추어 수명은 30년 이상인 것으로 나타났다.

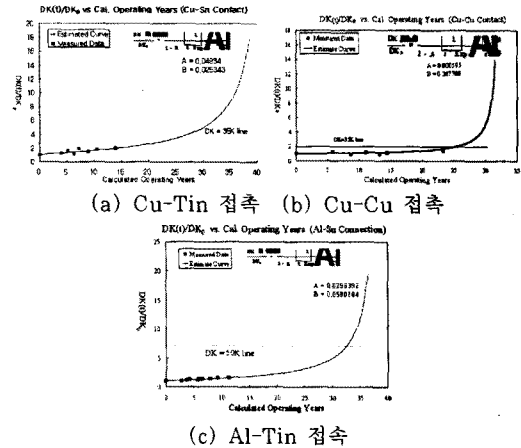


그림 2. 여러 접속/접속에서  $\Delta K$  vs. 환산 운전시간

본 연구에서는 시간상 실험을 충분히 수행하지는 못하여 실험 데이터가 충분하지는 않았다. 그러나, 그림에 나타난 바처럼 기본적으로 식 (7)에 의해 도출된 추정 수명곡선이 예상 수명(30년) 정도에 이를 때의  $\Delta K/\Delta K_0$  값이 5 이상으로 나타나, 접촉저항이 초기 값의 5 ~ 6 배 정도 되면 사고에 이른다는 보고[3]와 상당한 일치를 보이므로, 일단 본 연구에서의 이론 및 실험이 타당성을 갖는다고는 할 수 있다. 하지만, 본 이론의 입증을 위해서는 보다 많은 실험과 현장에서의 측정 데이터가 필요하다고 생각된다.

### 3. 결 론

본 연구에서 제시한 수명 온도상승 모델이 실험을 통해 적합함을 알 수 있었으며, 이를 이용하여 각종 접속/접속에 대한 현장 적용시의 기초 자료로 활용할 수 있다고 판단된다. 즉, 열상카메라 등을 이용하여 현장에서 측정값이 한계온도나 허용 온도상승 기준값 이상이라면 즉시 '교체' 판단을 내릴 수 있으나, 정상적인 값이거나 약간 높게 나올 경우에 상기한 관계를 적용할 수 있다. 주기적으로 접속부의 온도와 전류를 관측하여 데이터 베이스를 구축하고 그 데이터를 본 연구에서 도출한 열화 패턴에 적용하면 대체적인 열화 정도를 파악할 수 있고 나아가 수명 예측도 가능하리라 사료된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] IEC 60943, 2nd Ed, 1998-01
- [2] M.Sun et al., *IEEE Trans. on Com., Pack. & Manu. Tech., Part B*, Vol.22, No.1, pp.60, 1999
- [3] B.W.Callen et al., *45th Holm Conf. on Electrical Contacts*, pp.63-76, 1999