

大電流母線の熱伝達係数と放射効率

富山大学工学部 池田 長康, 北村 岩雄, 後藤 清治
山崎登志成, 高橋 隆一
別川製作所 澤田 邦男, 橋本 吉昭, 河村 晃一

1. ま え が き

近年、工場のFA化に伴い電気需要が増加し、それと共に受電設備と各配電盤が必要であり、これらのコンパクト化が進められている。その結果、配電盤内の母線間の距離、各母線の温度上昇などが問題となる。

母線の温度上昇は熱伝達による母線から周囲の空気への熱の移動、その空気の対流、拡散による熱の移動、それに母線から直接放射によるものなど伝熱の問題は極めて複雑である。しかしながら、最終的に落ち着く温度を知ることは大電流を扱う電気設備からは設計にとっても、設備の安全性、維持管理の上からも極めて重要である。我々はまず、配電盤内各部品の配置設計に役立つよう母線の温度上昇について実験的に調べ、次に、解析的に検討し、母線の温度の熱伝達係数と放射効率を明らかにした。

2. 実験装置と温度計測

2.1 大電流電源

500A から 1 kA のような大電流電源を考える場合、大抵の負荷抵抗は極めて小さいので電源の内部抵抗を小さくしなければ電源の内部での大きい発熱のため、種々のトラブルの原因になる。

われわれは表1に示す仕様の大電流用トランスを設計し、製作した。負荷を含めた回路は図1に示す。

このトランスからの負荷への接続は6並列の2次側トランス端子から6本の電線を並列に接続板まで持ってきて負荷に接続している。

表1 大電流用変圧器

型 式	乾式自冷	1次電圧	200V
相 数	1P	2次電圧	5V, 6並列
容 量	5kVA	2次電流	1000A
周波数	60Hz	出力側抵抗	4.3mΩ
寸 法	300×300 ×260m	重 量	50kg

2.2 供試用大電流母線

この実験に用いた大電流母線は純銅の3mm×30mmの断面をもつもので、負荷としては図1に示すように、全長6.8mである。母線は図2に示すようにこの断面を立てた場合と横にした場合について実験を行った。

2.3 温度計測

アルメル・クロメル熱電対を用い、図1および図2に示すような配置で、18点同時に計測している。

3. 実験とその結果

基本的なデータを取るために、まず、図1で示すような母線配置で電流をパラメータとして、温度計測を行った。

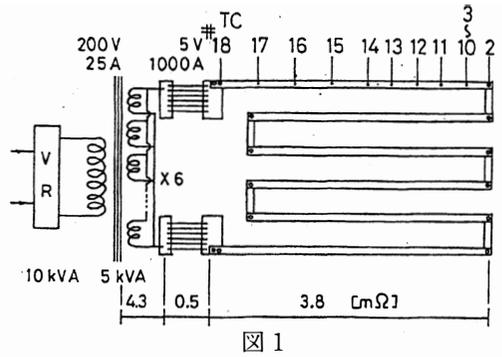


図1

3.1 母線を横に配置した場合

この場合の母線上側温度の時間推移を電流をパラメータとして、示した結果が図3である。

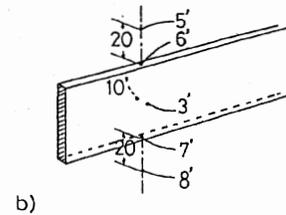
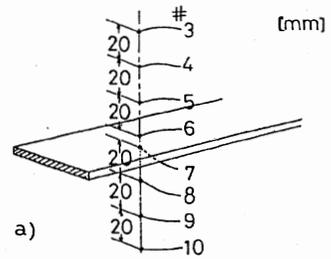


図2

3.2 母線を縦に配置した場合

この場合も母線上側温度の時間推移を電流をパラメータとして測定を行った。図4には電流700Aの場合の温度の時間推移を示す。同時に横配置の場合の結果も同時に示す。この図から縦に配置の場合は横配置の場合に比べ、平衡温度が少し低いことが分かる。縦に配置の場合の方が母線周囲の気流が流れ易く熱の除去に効果的であるためと考えられる。

4. 熱伝達係数と放射効率

熱の逸散過程は温度差に比例する熱伝達による部分と絶対温度の4乗に比例する放射による部分とがある。しかし、温度が低い場合は放射を無視することが出来ると考え、温度差に比例する熱伝達係数についてのみ、まず、考えることにする。

4.1 放射過程を無視した場合¹⁾

この場合、入った電気エネルギーは母線の温度上昇と温度に比例した放熱過程の損失との和で表される。すなわち、

$$C\rho V \frac{dT}{dt} + \zeta ST = I_0^2 r_0 (1 + \alpha T) \quad \dots\dots\dots (1)$$

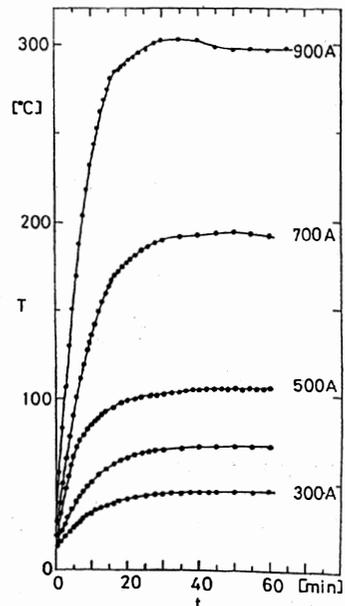


図3

となる。ここで、 T および I_0 は母線の温度とその中を流れる電流、 C 、 ρ 、 V はそれぞれ母線の比熱、密度、単位長さ当たりの体積を表し、 ζ 、 S は表面からの熱伝達係数と単位長さ当たりの表面積を表す。 r_0 は基準抵抗で、 α は抵抗の温度係数である。

今、 τ 、 H 、 A をそれぞれ

$$\tau = \frac{C\rho V}{\zeta S}, \quad H = \frac{I_0^2 r_0}{\zeta S}, \quad A = \frac{I_0^2 r_0}{C\rho V} \quad \dots\dots\dots (2)$$

とおくと、(1)式は

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau}(1 - \alpha H)T = A \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。この式は簡単にとくことができ、

$$T = \frac{H}{1 - \alpha H} \left[1 - \exp\left\{ \frac{-t}{\tau_T} \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。ただし、 τ_T は母線の温度上昇の時定数で、

$$\tau_T = \frac{H}{A(1 - \alpha H)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表される。

伝熱に関わる ζ 値を求める方法は

- 1) (3)式において、 $dT/dt=0$ とおいて、 $T(t \rightarrow \infty) = T_\infty$ の値から求める。
- 2) (5)式の温度上昇の時定数 τ_T の値から求める、

の2つの方法がある。

- 1) の方法での ζ 値

(3)式において、 $t \rightarrow \infty$ の時、 $dT/dt=0$ であるから、

$$T_\infty = \frac{H}{1 - \alpha H} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。(2)式と(6)式から、 ζ 値は

$$\zeta = \frac{I_0^2 r_0}{S} \frac{1 + \alpha T_\infty}{T_\infty} \quad [\text{W/m}^2 \text{K}] \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。 r_0 、 α 、および I_0 と T_∞ を実験より求め、 ζ 値の電流依存性を調べると、図5において○および×で示すように、一定値ではなく、非直線特性を示す。

- 2) の方法での ζ 値

この場合は(5)式の温度上昇時定数の式より、 ζ 値を求めると

$$\zeta = \frac{1}{S\tau_T} (C\rho V + \alpha I_0^2 r_0 \tau_T) \quad [\text{W/m}^2 \text{K}] \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。この式の τ_T を実験より求め、電流依存性を調べると、図5に●および▲で示すように、これも一定値ではなく、非直線特性で1)の方法で求めたの ζ 値と良い一致を示す。

しかしながら、この ζ 値の非直線特性は我々の行った実験に特有なものとも考えられるので、次に、放射過程を考慮したより一般的な方法を検討する。

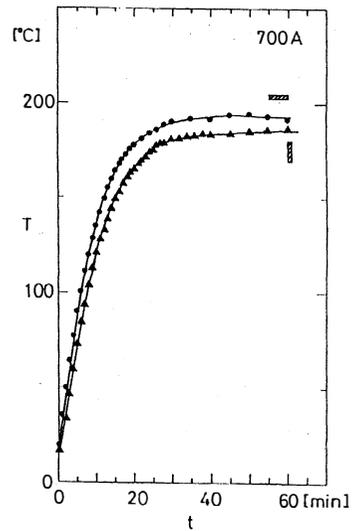


図 4

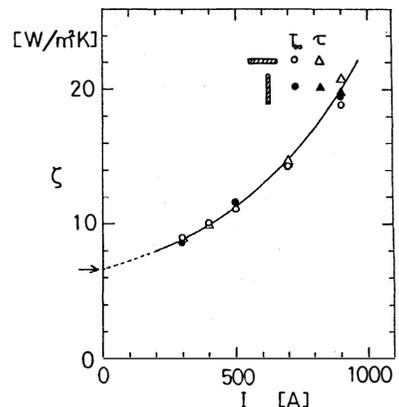


図 5

4.2 放射過程を考慮した場合

4.1節で、我々はζ値を独立な2つの方法で調べ、良い一致を見たが、このζ値の非直線性はこの実験特有のものと考えられるし、定数の電流依存性はより一般性のある結論を引き出すには好ましくない。更に、電流が大きくなり、母線の温度が上がると放射過程を考慮したより一般的な微分方程式で検討する必要がある。

放射過程を考慮したより一般的な母線の温度上昇を支配する微分方程式は

$$C\rho V \frac{dT}{dt} + \zeta ST + \lambda\sigma S\{(T+t_0)^4 - t_0^4\} = I_0^2 r_0(1 + \alpha T) \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここで、λ, σ, t₀はそれぞれ放射効率, ステファン・ボルツマン定数 (5.67×10⁻⁸ [W/m²°k⁴]) と基準温度の絶対温度である。左辺第3項は放射による熱損失を表しており、この(9)式は1階の非線形微分方程式である。この式はまた

$$\frac{dT}{dt} + \lambda A\{T^4 + 4t_0 T^3 + 6t_0^2 T^2 + 4t_0^3 T\} + \{D - \alpha B\}T - B = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

のように表される。ここで、A, B, Dはそれぞれ

$$\begin{cases} A = \frac{\sigma S}{C\rho V} \\ B = \frac{I_0^2 r_0}{C\rho V} \\ D = \frac{\zeta S}{C\rho V} \end{cases} \quad \dots\dots\dots (11)$$

である。この式は1階の非線形微分方程式であり、簡単には解くことが出来ないが、平衡温度 T_∞は求めることが可能である。今、

$$\begin{cases} dT/dt = y \\ T = x \end{cases} \quad \dots\dots\dots (12)$$

とおけば、(10)式は

$$y = -\lambda A\{x^4 + 4t_0 x^3 + 6t_0^2 x^2 + 4t_0^3 x\} + \{\alpha B - D\}x + B \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる。この式は4次の代数式である。これをxy位相平面について考えると、この式は定数項Bは正であり、4次の項は負であるので、必ず、x軸を横切り解を持つ。

今、x=0 からxが正の方向に大きくなってゆけば、すなわち、温度が上がって行くと、yは正のある値から次第に零に近づく、すなわち、温度勾配が正ではあるが次第に小さくなって行く。y=0では温度勾配は零となり、もはや温度上昇はありえない。もし、何等かの原因により、y=0の点を越え、xが大きくなるとyは負となり、xはもどらざるをえない。すなわち、dT/dt=0の温度よりも温度が上がると、温度勾配は負となり、温度は平衡点の方に戻ることになる。従って、(13)式の零点は(10)式の非線形微分方程式の解の平衡温度を示す。すなわち、(10)を直接解くということ無く平衡温度を知ることが出来る。

ここではこの伝熱に関わるζ値を一定値とし、放射過程の効率をλとして、平衡状態での温度を求め、実験結果と比較してみる。

このζ値は電流=0の場合の値とし、これを図5の実験値を外挿して求める。この実験では6.5W/m²°Cを得た。この値を用いて平衡状態の温度の放射効率依存性を計算すると図6の結果を得る。こ

の図に実験結果を重ねのせると斜線の範囲となる。これから、放射効率 λ は0.6であることが分かる。この解析で得た一定数である熱伝達係数と放射効率を用いて、 T_{∞} を計算し、図7に□で示すと極めて良い一致を示す。これから1)の解析で示した ξ 値の非直線特性は放射損失過程に起因するものと考えられる。

5. 結 論

この大電流母線の実験と解析から、次のような結論を得た：

- 1) 温度の4乗に比例する放射過程を含む母線温度の非線形微分方程式を位相平面の解析により、一定数である熱伝達係数と放射効率を用いて、最終平衡温度を求めることが可能である。

この実験では熱伝達係数 ξ は $6.5[W/m^2\text{C}]$ 、放射効率 λ は0.6である。

- 2) 大電流母線の縦と横の配置による最終平衡温度の相違は縦配置の場合が横配置の場合に比べ、温度は低くなる。母線周囲の対流による効果と考えられる。

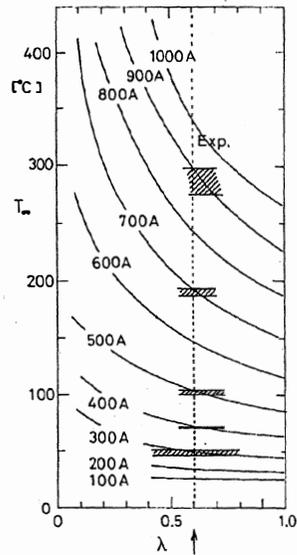


図 6

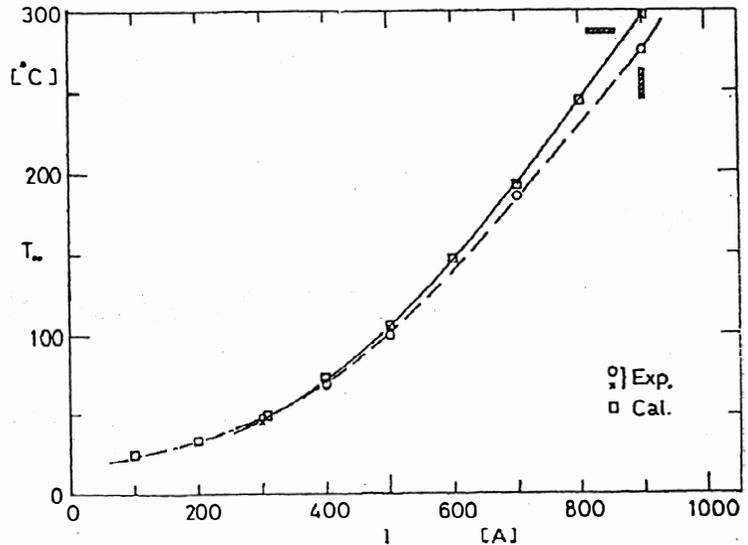


図 7

参 照 文 献

- 1) 宮地 巖：電工学概論 コロナ社 (1965)

Heat transfer coefficient and radiation efficiency of high electric current bus

Toyama University Nagayasu Ikeda, Iwao Kitamura, Seiji Goto,
Toshinari Yamazaki, Takakazu Takahashi,
Betsukawa Seisakusho Kunio Sawada, Yoshiaki Hashimoto,
Kohichi Kawamura

Recently, electric power demand goes on increasing. It is necessary to more electric substations and small cubicles. It is also wanted to compact gears and substations. This situation results in the narrow distance arrangement of the current buses and the handling of the high current and high temperature of the buses. Since the temperature rise of the bus is due to many heat transfer factors in the vicinity of the bus surface, it is analysed inclusively in this paper. From the engineering aspect, that is, the design aspect, it is important to know two fundamental values of heat transfer coefficient and radiation efficiency necessary to decide the final temperature of the bus. The temperature are known from the method of phase plane of the nonlinear differential equation on the temperature rise including the radiation loss with their values. The calculated temperature is consisted with the experimental ones.

〔英文和訳〕

大電流母線の熱伝達係数と放射効率

富山大学工学部 池田 長康, 北村 岩雄, 後藤 清治
山崎登志成, 高橋 隆一
別川製作所 澤田 邦男, 橋本 吉昭, 河村 晃一

最近、電力需要が増加してきており、より多くの変電設備やキュービクルが必要である。これはまた、コンパクトな装置や変電設備を求めている。このような事情から、狭い間隔での電流母線の配置やこれら母線が大電流で、しかも高い温度で取り扱わなくてはならなくなっている。母線の温度上昇はその表面周辺での多くの熱伝達因子によるが、この論文では、この温度上昇を総括的に解析した。工学的すなわち設計の立場から、母線の最終温度を決める基本的な2つの値、熱伝達係数と放射効率を知ることは重要である。この温度はこれらの値を用いて放射損失の項をもつ温度上昇に関する非線形微分方程式を位相平面の方法で知ることが出来る。この計算で求めた値と実験値とは一致を見た。