

38 「現在の仕事」

60歳で定年退職して、今は派遣社員として同じ職場で働いている。やっている仕事の内容は現役のとときと変わらない。定年を迎えても、再雇用制度により社員としての身分を維持しながら数年間働くのが普通だ。健康保険などのことを考えると、そうするのが最もいいからだと思う。

しかし、私としては働くのは60歳まで、その後はもっと自由に自分のやりたいことを優先したいと思っていた。それでも、まだ元気だし働く意欲がなくなったわけではないので、年金をもらえる64歳までは週3日くらいは働いてもいい。仕事は続けるが、現役のとときと違って自分の好きなこと、得意なことで会社に貢献できれば理想的だ。そんな我儘を認めてもらい、私としてはとても恵まれていると思うし満足している。

2, 009年1月末に一旦退職し、区切りのいい4月の新年度から勤務することに決めた。再就職するまで2ヶ月間の充電期間をつくり、スペインに1ヶ月半滞在。いつかはしたいと思っていた夢を実現した。セビリア市内にアパートを借り、友人家族やセビリアっ子との親交、セビリア市内の散策、アンダルシアやポルトガルなど各地を巡り、とても楽しい時間を過ごした。滞在記録の詳細は、このホームページで公開している。http://www7a.biglobe.ne.jp/~paco_poco/

会社では、デザインレビュー、技術相談などを中心に仕事をしている。

デザインレビューとは、設計図の最終段階の審査で、法規、設計性能、安全性、経済性、施工性などをチェックして記録を残し、図面修正の指示をする。若手設計者に対しては技術教育も含めている。

技術相談は、最新技術、不具合・トラブル対応、社外顕彰支援、若手技術者教育などである。自分としては、電気安全、電力技術や雷保護技術などが得意分野である。

週3日勤務なのであまり時間は無いが、残りの時間は自分でテーマを見つけて調査研究などを行っている。

これまでにやったことを簡単に紹介すると、次のようなものだ。

1. 高層ビルの外壁側面に対する落雷確率計算プログラム

雷の発生頻度は、小さいものから大きいものまで正規分布で近似できる。正規分布は確率密度であるから、一定範囲の雷発生確率の積分値を外壁面積に掛けることにより、外壁面に対する落雷確率を求めることができる。

苦労したのは正規分布を含んだ積分である。正規分布は次の式で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad \dots\dots\dots\textcircled{1}$$

ここで、 μ は中央値、 σ は分散を示す。(exp は指数関数である)

雷の発生頻度に対する実際の分布関数 $f(x)$ は、 x を雷撃距離 (雷の落ちる距離) として、 μ 、 σ はそれぞれ、 $\mu=100(\text{m})$ 、 $\sigma=40$ となる。つまり 100m の距離の雷雲からの落雷が最も多く、60m~140m の距離からの落雷が全体の 68.3%、20m~180m が 95.4%、~200m が 99.7% を占めることになる。

この積分値を求めるには、細かい幅に分割して、曲線部分を直線で近似して細かい帯状の面積を足し合わせるやり方で可能である。しかしそれでは満足できない、何とか直接求めるようにしたい。

外壁面に対する落雷確率は、正規分布を含んださらに複雑な積分になる。

① 式において、指数関数の冪乗を簡単にするために、 $x-\mu$ を新たな変数 x とする。

そうすることにより①式の積分は、次のような積分の組み合わせに分解される。

$$\int_a^b e^{-x^2} dx \quad \dots\dots\dots ②$$

$$\int_a^b x e^{-x^2} dx \quad \dots\dots\dots ③$$

$$\int_a^b x^2 e^{-x^2} dx \quad \dots\dots\dots ④$$

② は、誤差関数 (ERF 関数) という関数になるが、 a 、 b の値を指定すれば予め計算された値を直接求めることができる。

③ は、 $x^2 = t$ とおくと $dt = 2x dx$ となり、これを入れると x が打ち消しあい、結局次のようになる。

$$\int x e^{-x^2} dx = \frac{1}{2} \int e^{-t} dt = -\frac{1}{2} e^{-t} = -\frac{1}{2} e^{-x^2}$$

④ は、 $p(x) = x$ 、 $q(x) = e^{-x^2}$ とおいて部分積分 ($\int p q' = p q - \int p' q$ p', q' は微分を表す) を行うと

$$\int x^2 e^{-x^2} dx = -\frac{1}{2} \int x e^{-x^2} + \frac{1}{2} e^{-x^2} dx$$

となる。右辺の第 2 項は②で求めた誤差関数になっている。

以上のような積分値を求めることにより、落雷確率を直接計算できるようにすることができた。

雷はほとんどが屋根に落ちるが、高層ビルでは屋根ばかりでなく、建物の側面にも落ちることがある。そのための対策を、どこまでどのようにしたら合理的かを、費用対効果を考慮して判定することが可能になり有効と考えている。

2. IEC規格に基づく「雷リスク解析計算プログラム」

IEC規格とは国際電気標準会議規格のことである。

ここ10年くらい「IEC/TC64 (テクニカル・コミティー64) 建築電気設備」の国内委員会の委員として、規格作りに関わっている。

これまで技術先進国の日本は、JISなど独自の国内規格を整備して、それに基づき製品を造って来た。しかし、海外への国産品輸出のためには、日本規格だけでは受け入れられないため、国際規格と日本規格の整合化が必要である。一方、国内技術が遅れている分野では、欧米の最新技術の取り入れを行うことが必要であり、雷保護技術はその一つである。

現在、電子機器は社会にとって必要不可欠なものとなっている。雷は瞬間的な高電圧により電子回路をいとも簡単に破壊し、それは社会の混乱に繋がる。

JRは雷の被害で、信号系統がマヒし電車が止まったこともある。昔、雷の被害といえば感電や火災がその主なものであったが、今や電子機器にとって最大の脅威となっているのだ。この分野で遅れていた日本はIEC規格を取り入れ、雷対策を真剣に考えるようになった。

雷対策に関する規格 IEC 62305-2 「Risk Management」は、客観的なデータに基づき「雷リスク」を解析し、数値化して対策を検討することができる。その考え方は相当複雑であり、いかにも欧米らしい規格である。中のデータはすべて外国 (主にヨーロッパ) のもので、日本にそのまま適合するのは難しい面もあるが、日本にはデータの蓄積がないので、これをそのまま利用するしかない。

この解析プログラムは、理論的根拠に基づいているため説得力があり、これをパソコンでできるようにしたことは実用上大きな意味がある。

3. 同相多条布設ケーブルの電流不平衡に関する検討

ある工場でケーブルが過熱、発煙し火災一歩手前という事故があった。このことを少し詳しく書いてみたい。

工場やビルでは多くの電力を使うため、電力会社から受電した高圧の電力を変圧器で低圧に変換し、その電力を配電盤に送電する。事故は、変圧器から配電盤に至る太い電力ケーブルが過熱したため起こったのである。

ケーブルに電流が流れると抵抗によって発熱し、高温になるとケーブル周囲のポリエチレンなどの絶縁物が劣化し、ケーブルの寿命が短くなってしまうため、放熱を考慮しなければならない。そのために、ケーブルの間隔をできるだけ空けるのが良い。ケーブル間隔によって流せる電流が左右されるため、これは重要である。この工場では変圧器から配電盤まで、ケーブルが24本布設されていたが、スペースの関係でケーブル間隔が取れなかったため、それを考慮して流せる電流を少なく抑えて設計されていた。これは設計者として常識である。

ここまではいい。しかし、一つ重要なことを見落としていた。

工場用電力は3相電源で、電力を送電するためケーブルが3本必要で、その3本に電流の位相をずらして（タイミングをずらして）送電する。そこで注意しなければならないのは、異なる相どうしは反発し合い流れる電流に偏りができることだ。そして、当然ケーブルどうしが近ければ近いほど条件が悪くなる。これを見落としていたため、考えていたよりさらに発熱が大きくなり放熱条件の悪い中央付近のケーブルが過熱し、結局火災の一歩手前までいってしまったのだ。

この工場では1相あたり4本×3相＝12本、これが2セット布設されケーブル本数は合計24本だった。専門用語で「同相多条布設ケーブルの電流不平衡」というが、これはあまり知られていない。

ケーブル本数が少なければ、知らなくてもほとんど問題にならないことや、別の理由でケーブルに余裕がありこれまでは表面化していなかったのである。

このトラブルの相談を受け、私にとって「同相多条布設ケーブルの電流不平衡」が研究テーマになった。

電線メーカーの団体である、日本電線工業会の規格の中に「同相多条布設ケーブル」についての規定があり、電流分布の計算式とともに不平衡にならないケーブル配置の考え方が示されている。それによれば、ケーブルの相の配置を“中心に対して対称”にすればよいと説明されている。

例えば、電流の3つの相をU,V,Wとすると、1相あたり2本するとき、図1-(1)、(2)のように配置すればよい。こうすれば、中心線に対して同じ相の導体が対称になるからである。

しかし、こうすればいいといわれても実際は結構大変なのである。その理由は、変圧器の端子U,V,Wに1相あたり2～4本もの、外径5cmほどの太いケーブルをつないで、それを対称に配置するのは現実には工事がかなりやっかいである。そこで、ケーブル配置は工事のしやすいように

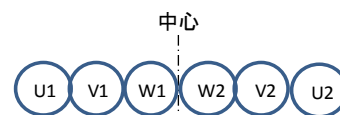


図 1-(1) 平積み配置

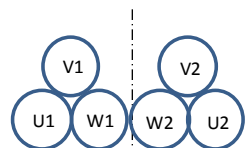


図 1-(2) 俵積み配置

U_1U_2, V_1V_2, W_1W_2 と素直に同一の相をまとめて並べておいて、あとは計算で不平衡率を求めてケーブル間隔や導体断面積で調節しようという考え方をとることが多い。そのためには、電線工業会が示したケーブルのインピーダンス（交流抵抗）の計算式が必要となる。

①は電線工業会の計算式である。これは1相あたりケーブルが2本（合計6本）の場合の、 U_1 相に対する式である。（6本のケーブルに対して6つの式が必要になる）

$$X_{u1} = 2\pi f \left[X_0 + 2 \log_e \frac{\sqrt{(S_{u1v1} \cdot S_{u1v2}) \cdot (S_{u1w1} \cdot S_{u1w2})}}{d \cdot S_{u1v1}} + j\sqrt{3} \log_e \left(\frac{S_{u1w1} \cdot S_{u1w2}}{S_{u1v1} \cdot S_{u1v2}} \right) \right] \times 10^{-7} \text{ (}\Omega/\text{m)} \dots\dots ①$$

この式で、例えば S_{u1v1} は U_1 相と V_1 相のケーブルの離隔距離を表している。

これを用いて、 U_1 相ケーブルインピーダンス (Z_{u1}) は、抵抗を R とすると $Z_{u1} = R + jX_{u1}$ となる。

ここで、 X_{u1} : U_1 相のリアクタンス（インダクタンス[誘導電圧に関する定数で、急激な電圧変化を妨げるように働く]による交流抵抗分)、 f : 周波数 (50Hz, 60Hz)、 X_0 : 自己リアクタンス、 d : 導体直径、 j : 虚数単位(電気工学では習慣的に i は電流を表すので虚数単位は i の代わりに j を用いている) 各相の電流は、それぞれ求めた各相インピーダンスの逆比で求められる。

次に、正確な電流を求めて①の結果と比較してみよう。そのためには回路方程式を立てる必要がある。

②式にケーブルが6本の場合の回路方程式を示す。

$$\left. \begin{aligned} Ri_{u1} + L \frac{di_{u1}}{dt} + M_{u1u2} \frac{di_{u2}}{dt} + M_{u1v1} \frac{di_{v1}}{dt} + M_{u1v2} \frac{di_{v2}}{dt} + M_{u1w1} \frac{di_{w1}}{dt} + M_{u1w2} \frac{di_{w2}}{dt} &= E_m \sin \omega t \\ M_{u2u1} \frac{di_{u1}}{dt} + Ri_{u2} + L \frac{di_{u2}}{dt} + M_{u2v1} \frac{di_{v1}}{dt} + M_{u2v2} \frac{di_{v2}}{dt} + M_{u2w1} \frac{di_{w1}}{dt} + M_{u2w2} \frac{di_{w2}}{dt} &= E_m \sin \omega t \\ M_{v1u1} \frac{di_{u1}}{dt} + M_{v1u2} \frac{di_{u2}}{dt} + Ri_{v1} + L \frac{di_{v1}}{dt} + M_{v1v2} \frac{di_{v2}}{dt} + M_{v1w1} \frac{di_{w1}}{dt} + M_{v1w2} \frac{di_{w2}}{dt} &= E_m \sin(\omega t + 2/3 \pi) \\ M_{v2u1} \frac{di_{u1}}{dt} + M_{v2u2} \frac{di_{u2}}{dt} + M_{v2v1} \frac{di_{v1}}{dt} + Ri_{v2} + L \frac{di_{v2}}{dt} + M_{v2w1} \frac{di_{w1}}{dt} + M_{v2w2} \frac{di_{w2}}{dt} &= E_m \sin(\omega t + 2/3 \pi) \\ M_{w1u1} \frac{di_{u1}}{dt} + M_{w1u2} \frac{di_{u2}}{dt} + M_{w1v1} \frac{di_{v1}}{dt} + M_{w1v2} \frac{di_{v2}}{dt} + Ri_{w1} + L \frac{di_{w1}}{dt} + M_{w1w2} \frac{di_{w2}}{dt} &= E_m \sin(\omega t + 4/3 \pi) \\ M_{w2u1} \frac{di_{u1}}{dt} + M_{w2u2} \frac{di_{u2}}{dt} + M_{w2v1} \frac{di_{v1}}{dt} + M_{w2v2} \frac{di_{v2}}{dt} + M_{w2w1} \frac{di_{w1}}{dt} + Ri_{w2} + L \frac{di_{w2}}{dt} &= E_m \sin(\omega t + 4/3 \pi) \end{aligned} \right\} \dots\dots ②$$

ここで、 $\frac{di_{u1}}{dt}$ は U_1 相の電流の時間変化（以下同じ）、 R はケーブルの抵抗、 L は自己インダクタンス、 $M_{\circ\circ}$ は相互インダクタンス（他導体に流れる電流によって生じるインダクタンス）、 $E_m \sin \omega t$ 、 $E_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} \pi)$ 、 $E_m \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3} \pi)$ はそれぞれ波高値 E_m の正弦波 3 相交流電源で U 相、 V 相、 W 相電圧示す。

式は、 i_{u1} 、 $i_{u2} \sim i_{w2}$ に関する連立 1 階微分方程式となっている。ケーブル 1 本につき 1 つの式が必要であり、6 本の場合は 6 つの方程式になる。それぞれの式は、自相の抵抗、自己インダクタンス、他相との相互インダクタンスによって生ずる電圧変化が電源電圧に等しいとする方程式である。一見してわかるとおり、これをこのままで解くことは至難の業である。

三角関数で表された正弦波の特性を利用して、②式をオイラーの等式 $e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t$ (ω は角

周波数で、 f を周波数とすると $\omega = 2\pi f$) を用いて書き直す。

すると $e^{j\omega t}$ の微分は $\frac{d(e^{j\omega t})}{dt} \rightarrow j\omega(e^{j\omega t})$ つまり、 $\frac{d}{dt} \rightarrow j\omega$ とすることができる。

微分するという事は、もとの式に $j\omega$ を掛けること、つまり ω 倍して j を掛けるとは、 ω 倍して位相を $\pi/2$ (90°) 遅らせることになり、 $\sin \rightarrow \cos$, $\cos \rightarrow -\sin$ とすることに相当することを示している。

以上を適用すると②式は、

$$(R+j\omega L)i_{u1}+j\omega M_{u1u2}\cdot i_{u2}+j\omega M_{u1v1}\cdot i_{v1}+j\omega M_{u1uv}\cdot i_{v2}+j\omega M_{u1w1}\cdot i_{w1}+j\omega M_{u1w2}\cdot i_{w2}=E_m e^{j\omega t}$$

となり、以下同様に、あわせて6つの式ができる。これは連立1次方程式であり②式よりずっと解きやすい。このような手法を演算子法といい、微分方程式の簡易化に利用される。ただし、係数は複素数になっている。

この方程式を解けば、各相の正確な電流が求められる。この方程式についても、一般解を求めるのは非常に難しいが、パソコンの表計算ソフト（エクセルの複素数計算機能）を使い数値を入れて計算し、数値解を求めることは可能である。

①式に基づき計算した結果と、②式に基づく計算とを比較したところ、場合によって合わないケースがあることがわかった。

図2はケーブル本数9本の場合について計算したときの比較グラフを示す。

縦軸は1相分の電流を100%にした場合の1本に流れる電流の比率を示している。ケーブルは1相あたり3本なので33%が平均値である。

ケーブル配置は $U_1/U_2/U_3 \cdot V_1/V_2/V_3 \cdot W_1/W_2/W_3$ という通常最も多いと考えられるケースとした。

この場合では U_3 相と W_1 相において、②式で計算した電流値が、①式による計算値より20%以上大きくなっている。従って①式で計算した場合、実際より小さい電流で設計することになるため発熱が過剰になる可能性がある。

この差が、ケーブルの許容温度に対してどの程度の影響かを評価し、危険性を判断する必要があると考えられる。

工業会が示している①式は、あくまで簡易計算式なのである。

(といってもかなり複雑であるが)

工業会は、不平衡にならないケーブル配置の考え方を示していること、そして正しい計算式は②式のようにあまりにも複雑になるため、実用上支障ないと判断される範囲で簡略化したものと考えられる。

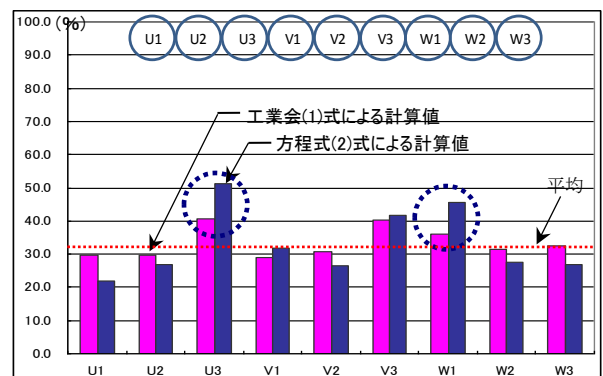


図2 UU, VV, WW 平積み配置の場合の比

日本電線工業会は、ケーブルに関する技術情報を提供している国内唯一の団体であり、その規格は全国の技術者が使っている。「同相多条布設ケーブル」については、これまでに問題が表面化していなかったためそのままになっていたが、これを放置しておくとも将来的に事故や火災の原因になる可能性がないとはいえない。

同相多条布設で注意すべき要点は、

ケーブルの温度上昇を抑えるため、放熱を考慮してケーブル間隔を確保すること。あわせて、ケーブルに流れる電流に偏りが生じないように、中心線に対して相を対称に配置すること。これが難しい場合は、不平衡による電流分布を計算し、流れる電流に見合ったケーブル断面積を選定すること。

このとき20%程度の余裕を考慮することが望ましい。その結果、思った以上にケーブルが太くなることもあるが、経済性より安全性を重視する考え方が重要である。

これを機会に電線工業会にレポートを提出して注意喚起を促す必要があると考えている。

(2012. 5. 5)