

50% フラッシュオーバ電圧の昇降法における信頼性について

大 矢 征

Reliability in Up-and-down Method of 50%-flashover Voltage

Susumu OYA

衝撃電圧試験で50%フラッシュオーバ電圧を昇降法により求める場合、従来のデータ整理の方法では標準偏差が小さく見積られるので、電力系統の絶縁設計上危険である。本論文では少数回の電圧印加で標準偏差を誤差少なく算出する方法を、電算機によるシミュレーションにより求めた結果、適当な補正をすれば良い結果を得られることがわかった。

1. ま え が き

衝撃電圧試験には数種の試験法があるが、気中ギャップやガイシ類などの自己復帰性機器の絶縁耐力限度を確めるためには、50%フラッシュオーバ試験を行っている。これは機器に多数回の電圧を印加したときに、そのフラッシュオーバ確率は印加電圧に対して正規累積分布曲線になると仮定して、この衝撃フラッシュオーバ電圧の平均値ともいふべき50%フラッシュオーバ電圧（以下 V_{50} と記す）とその標準偏差（以下 σ_0 と記す）を求める試験である。これらの推定値を求める方法として補間法と昇降法が用いられているが、昇降法の方が印加回数が少なくても精度良く V_{50} の推定値が得られるが、 σ_0 の推定値は小さめに出ることが知られている¹⁾。また電圧印加回数を多くするほど精度が高くなるが、試料によっては多数回の電圧印加が困難な場合もあり、測定条件も変わってしまうので印加回数は少ないほうが良い。

これらのことから絶縁試験は昇降法で行い、得られた結果から標準偏差を少ない誤差で推定できることが望ましい。本論文では従来の昇降法で実験を行って、データ整理に JEC-171 の方法（約半分の回数を用いるので“半回数法”という）と、実験データのすべてを用いる“全回

数法”の2つの方法を用い、上記の点について電子計算機によるシミュレーション手法を用いて検討した。

2. 昇降法による V_{50} と σ_0 の推定法

昇降法における各電圧レベルとフラッシュオーバ確率の状態は、図1に示す樹形図式で表わすことができる。 S_i は節で、放電する確率 $p_{i,i-1}$ と不放電の確率 $p_{i,i+1}$ の和は1となる。

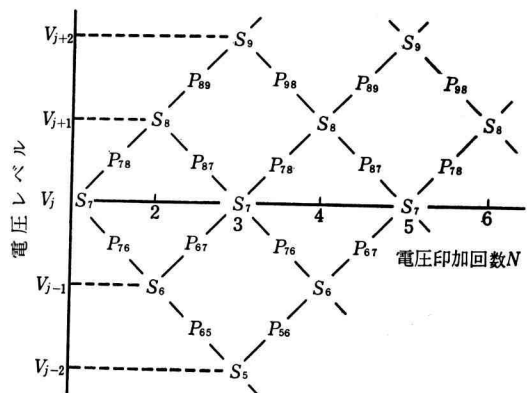


図1 昇降法の樹形図式

V_{50} の推定値 V および σ_0 の推定値 S を求めるには、数回の予備放電を行ったのちにフラッ

シオーバの不整範囲を $4\sigma_0 \sim 5\sigma_0$ と考えて、 V_{50} および σ_0 の近似値 V_{50}' , σ' を推定し、電圧の印加幅を $d=0.5\sigma' \sim 2\sigma'$ の一定間隔で変化できるようにする。最初 V_{50}' に近い V_j の電圧を印加し、放電した場合には2回目は $(V_j - d) = V_{j-1}$ の電圧を印加する。もし放電しなかった場合は $(V_j + d) = V_{j+1}$ の電圧を印加するということに、放電したら d だけ低い電圧を、放電しなかったら d だけ高い電圧を印加するという操作を N 回くり返す。

2.1 半回数法

N 回の電圧を印加後放電した回数と放電しなかった回数を比較し、回数の少ない側の各印加電圧レベルにおける度数を、電圧の低いものから高いものへ順に n_0, n_1, \dots, n_k とおき、

$$\sum_{i=0}^k n_i = n, \quad \sum_{i=0}^k i n_i = A, \quad \sum_{i=0}^k i^2 n_i = B \quad \dots\dots\dots (1)$$

を計算すれば、 V_{50} の推定値は

$$V_I = V' + d \left(\frac{A}{n} \pm \frac{1}{2} \right) \dots\dots\dots (2)$$

で求められる。ただし複号は放電しなかった回数を用いたときは+、放電した回数を用いたときは-をとる。 V' は $i=0$ に対応する電圧である。

σ_0 の推定値は

$$S_I = 1.62 d \left(\frac{nB - A^2}{n^2} + 0.029 \right) \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。

2.2 全回数法

実験終了後、2.1と同様に各電圧レベルにおける度数 n_{j+i} を求める。このとき中央値を含むようなレベルを $j=0, i=0$ にとって、 $n_{-\alpha}, n_{\beta}$ ($\alpha, \beta > 0$) を度数のある最低、最高レベルの回数とするとき

$$\sum_{i=-\alpha}^{\beta} n_i = N, \quad \sum_{i=-\alpha}^{\beta} i n_i = A, \quad \sum_{i=-\alpha}^{\beta} i^2 n_i = B \quad \dots\dots\dots (4)$$

とおけば、 V_{50} の推定値 V_I と、このときの標準偏差 S_I' は次式で計算される。

$$V_I = V' + dA/N \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$S_I' = d \sqrt{\frac{NB - A^2}{N(N-1)}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

V' は n_0 のときの電圧値で、 S_I' は後述の方法により補正を要する。

3. 昇降法のシミュレーション

3.1 実験過程

2章で述べた実験の要領をシミュレートするには、 V_{50} を0に、 σ_0 を1に正規化しておいて、1回ごとに正規乱数を発生して各電圧レベルとの関係に基づいてフラッシュオーバの判定を行い、次のレベルを決定する。

シミュレーション数は電圧印加回数 N のものを100回ずつ計算して、推定値 V と S の平均値と、その標準偏差 σ_v, σ_s を両方法について求めた。

3.2 マルコフ過程

図1の過程を有限マルコフ連鎖と考えたとき、電圧レベル V_j におけるフラッシュオーバ率を p_j とすれば、表1の推移確率行列が得られる ($p_1=0, p_n=1$)。

表1 推移確率行列 (太線の中)

| | | | | | | |
|-----------|-------|---------|---------|-----|-----------|-------------|
| 本期の 状態 | S_1 | S_2 | S_3 | | S_{n-1} | S_n |
| S_1 | 0 | $1-p_1$ | 0 | ... | 0 | 0 |
| S_2 | p_2 | 0 | $1-p_2$ | ... | 0 | 0 |
| S_3 | 0 | p_3 | 0 | ... | 0 | 0 |
| | | | | | | |
| S_{n-1} | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | $1-p_{n-1}$ |
| S_n | 0 | 0 | 0 | ... | p_n | 0 |

たとえば、 $d=\sigma_0, V_{50}$ を図1の S_7 と仮定すると、 S_6 では約 15.9% 放電するから

$$P_{65} \doteq 0.159, \quad P_{67} \doteq 0.841$$

同様に

$$P_{76} = 0.500, \quad P_{78} = 0.500$$

$$P_{87} \doteq 0.841, \quad P_{89} \doteq 0.159$$

⋮
⋮

というように累積正規分布関数から $P_{i,i-1}$ と $P_{i,i+1}$ の行列の要素が求まる。

いま第 M 期の状態確率ベクトルを $\mathbf{P}^{(M)}$ 、初期状態ベクトルを $\mathbf{P}^{(0)}$ 、推移確率行列を P と

すれば、公式から

$$P^{(M+1)} = P^{(M)} \cdot P \dots\dots\dots (7)$$

$$P^{(M)} = P^{(0)} \cdot P^M \dots\dots\dots (8)$$

である。一般に完全エルゴード的なマルコフ連鎖では、(8)式の計算を十分に長い期間行くと、初期状態ベクトルの値にかかわらず状態確率ベクトルは固有値となる。

昇降法の状態をこのようにして計算した値は確率密度となるので、累積分布関数から標準偏差 S_M は次のようになる (図4参照)。

$$d/S_M = 1.12(d/\sigma_0)^{0.41} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $S_I' = S_M$ と考え、 S_I' の補正係数を K とおけば、 $\sigma_0 = S_I' K = S_M K$ となるから

$$K = \sigma_0/S_M = 1.12(d/\sigma_0)^{-0.59} \dots\dots (10)$$

となる。

4. 推定値 V および S について

3.1 節で求めた結果について、半回数法と全回数法の値を比較検討し、適度な印加回数を求める。

4.1 V の考察

V の平均値はほとんど正規化した零となり、真の 50% フラッシュオーバー電圧と標準偏差の比、すなわち変動係数 σ_0/V_{50} が 10[%] であっても両方法による差は 0.2[%] 以下と小さいので、どちらの方法を用いても大差なく V の推定をすることができる。

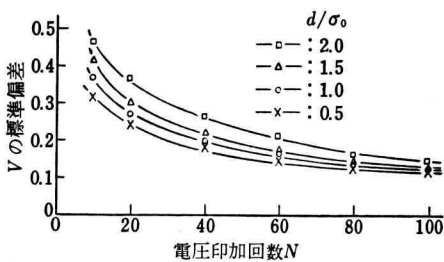


図2 V の標準偏差

V の標準偏差は、図2に示すように回数が多い程小さく、また d/σ_0 が小さい程小さく求まる。半回数法の σ_v は全回数法より各 N に対して約 $100/N$ [%] 大きな値となっているので、

少数回の実験では全回数法のほうが信頼性のある測定ができることになる。

以上のことから誤差 3 [%] 以内、信頼度 95 [%] で V_{50} を求めるに要する実験回数は図3に示すようになる。

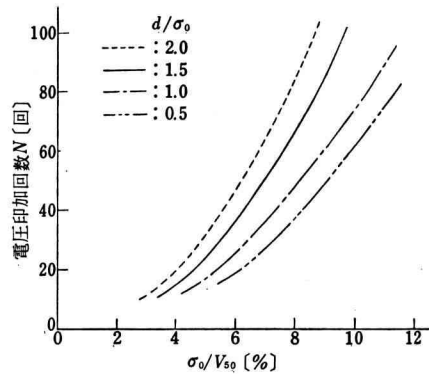


図3 必要電圧印加回数

図2と図3から、一般に標準波形の衝撃電圧では σ_0/V_{50} が小さいので、 N は 20 回位でも十分であるが、開閉サージ電圧では σ_0/V_{50} が 5~10 [%] あるので、ある程度回数を増さなければならぬことがわかる。

4.2 S の考察

V_{50} から $3\sigma_0$ 低い電圧では、フラッシュオーバー確率は 0.2 [%] 以下と考えられるが、昇降法では σ_0 の推定値 S が小さく見積られるので、

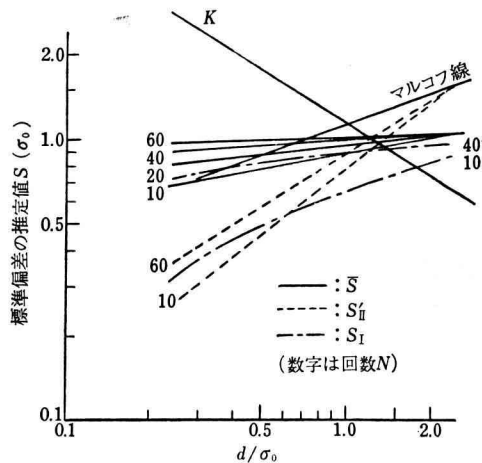


図4 標準偏差の推定値

電力系統の絶縁設計を行う上で危険である。図4に示すように半回数法では、 N が小さく、かつ d/σ_0 が小さいときには、 S_I は非常に小さく見積られ、文献1)では補正係数を掛けて σ_0 の推定をしているが、パラメータに真の σ_0 が入っているので正確な補正係数とはならない。

全回数法により求めた S_I' に、マルコフ過程で求めた補正係数 K を掛けると図4の \bar{S} のようになり、やはり N が小さく、 d/σ_0 が小さいと推定値は小さく出る。この図から σ_0 を推定するには、 d/S_I' の値をマルコフ線上にとり、そのときの d/σ_0 における印加回数による補正值 \bar{S} を d/S_I' の値に掛けた値を新たにマルコフ線上にとって、そのときの d/σ_0 から σ_0 の近似値 S_I を求めることができる。

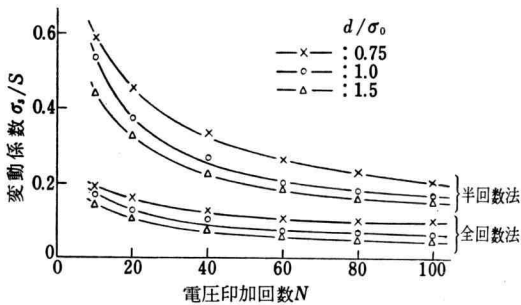


図5 標準偏差の変動係数

印加回数と S の変動係数の関係は図5に示すように、全回数法のほうが変動が少なく、したがって誤差も少なく信頼性のある値が求まるこ

とになる。

5. む す び

昇降法のデータ整理にシミュレーション手法を用いて検討した結果、つぎのことがわかった。

- (1) V_{50} に近い値は両方法とも大差なく求まるが、少数回の実験では全回数法のほうが信頼性のあるデータが得られる。しかし全回数法では最初に加える電圧が V_{50} に近い値である必要がある。
- (2) 標準偏差の推定は、半回数法では小さめに推定され、絶縁設計上危険であるので補正を要するが、真の σ_0 が不明なので適当な補正ができない。
- (3) 全回数法による推定は、図4によって補正を行えば精度良く、信頼性のある値を推定することができる。特に d/σ_0 が小さいときや、 N が小さいときに有効である。

以上のことから、昇降法のデータ整理にはJEC-171によるよりも、全回数法による方が良い結果が得られる。

終りに本研究に関し有益なご教示を賜った大日日本電線木下勝弘博士に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 河野・笈川：電学誌 87, 1618 (昭42-8)