開閉インパルス電圧波形パラメータの計算法

正員 里 周二 (宇都宮大学)
正員 原田 達哉 (日本工業大学)
正員 佐伯 正盛 (日本工業大学)

学生員 伊藤 智章 (宇都宮大学)
正員 脇本 隆之 (日本工業大学)

A Study on Impulse Parameter Estimation for Switching Impulse Voltage

SATO Shuji: Member, ITO Tomoaki: Student Member (Utsunomiya University),

HARADA Tatsuya: Member, WAKIMOTO Takayuki: Member and SAEKI Masamori: Member (Nippon Institute of Technology)

Approximation functions, which determine the switching impulse voltage parameters using the definition for the lightning impulse, are proposed. The paper demonstrates any waveform defined as a switching impulse voltage by the IEC can precisely be processed with negligibly small error. The details of the approximation technique are also discussed in the paper.

キーワード：開閉インパルス電圧パラメータ，雷インパルス電圧波形，函数近似

1. まえがき

開閉インパルス電圧波形は雷インパルス電圧波形と異なり，波形の絶対原点を起点としてピーク値までの時間を T_p (μsec)，ピーク値の50%に減衰するまでの時間を T_2 (μsec)を用いて， T_p / T_2 impulseと記述することがIEC60060-2で定められている。この定義に従うと波形パラメータに大きな不確かさを伴うことが知られており，雷インパルス方式の定義から開閉インパルス方式への変換法が提案されている¹⁾。今回筆者らは，従来の変換方式では記述できなかった急峻な領域の波形も精度良く変換できる近似式を開発したので詳細を報告する。

2. 開閉インパルス電圧波形定義の問題点

IEC の定める定義方法に従って開閉インパルス電圧の波形パラメータ T_p ， T_2 を定める場合に指摘されている問題点は，ピーク値に至る時刻 T_p を決定する過程にある。IEC の定める²⁾開閉インパルス電圧の最短の波頭長は $20\mu\text{sec}$ であるが，例えば $20/4000\text{impulse}$ の波形がピーク値の99.9%（ほぼ10bit分解能のデジタル計測器の量子化誤差に相当）以上である時間は $15.94\sim 28.23\mu\text{sec}$ にもわたり，真値 $20\mu\text{sec}$ に比べ61.4%もの誤差が存在する。また，標準開閉インパルス($250/2500\text{impulse}$)でも同様な誤差は15.9%にもなり，やはり T_p を精度良く決定することは難しい。

これまでアナログ測定器を使用する場合には重要ではなかったが，デジタル測定器で記録されたデータの絶対原点の決定法は困難な問題である。不正確な絶対原点を用いて T_p ， T_2 を決定することは必然的に波形パラメータに無視できない不確かさの介在する余地を残すことになる。

この問題を解消する方法は，雷インパルス電圧の定義に従うことであるが，そのような定義はまだIEC規格には盛り込まれていないので，以下に雷インパルス電圧の波形パラメータ T_{1L} ， T_{2L} から T_p ， T_2 を決定するアルゴリズムについて説明する。

3. 雷インパルス電圧波形パラメータ

図1は，雷インパルス電圧波形を記述する2重指数函数 $\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)$ の波形パラメータの定義を示したものである。

図1 雷インパルス電圧波形パラメータ

Fig. 1 Impulse voltage parameters definitions

もし， T_p ， T_2 を T_{1L} と T_{2L} の2つのパラメータの函数として，

$$T_p = T_p(T_{1L}, T_{2L}), \quad T_2 = T_2(T_{1L}, T_{2L}) \quad (1)$$

と記述することが可能なら，従来通りの雷インパルス電圧波形パラメータ決定アルゴリズムにより T_{1L} ， T_{2L} を求め，これらから簡単に T_p ， T_2 を決定することが可能となる。

この計算に入る前に次の事実を確認しておこう。 $\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)$ と時間軸方向に規格化した $\exp(-t) - \exp(-kt)$ は時間方向に α 倍だけ尺度が異なるので，これらの波形から得られる波形パラメータもやはり α 倍だけ異なるが，時間に関するパラメータ間の比（例えば T_2/T_p や T_{2L}/T_{1L} など）はどちらの波形から求めても同じものとなる³⁾。この事実をふまえ，筆者らは $\exp(-t) - \exp(-kt)$ の k を変化させ，各波形からNewton法により雷インパルス波形パラメータ（図1参照） t_{30} ， t_{90} ， t_{50} を求め，さらに規約原点 t_0 と T_{1L} ， T_{2L} を，

$$t_0 = 1.5 t_{30} - 0.5 t_{90} \quad (2)$$

$$T_{1L} = (t_{90} - t_{30}) / 0.6, \quad T_{2L} = t_{50} - t_0 \quad (3)$$

と計算した。一方、 T_p は 2 重指数関数から解析的に計算可能であり、 T_2 は t_{s0} に他ならないことは明らかであろう。

4. 雷インパルス電圧波形パラメータと開閉インパルス電圧波形パラメータ

前節で述べた手続きに従って得られた T_{1L} , T_{2L} , T_p , T_2 を種々の k の値について求め、横軸を T_{2L}/T_{1L} にとり、縦軸を T_p/T_{1L} 及び T_2/T_{1L} と無次元化したグラフに描くことにより、 T_{1L} , T_{2L} が既知であれば T_p , T_2 を読み取ることは可能である⁴⁾。しかし、グラフの読み取りには個人差があり、また、小さなグラフから読み取られた数値は誤差の入り込む余地が大きい。

5. 近似函数

グラフの読み取り誤差の問題を解決するため以下に近似函数を提案する。

描かれた T_p/T_{1L} 及び T_2/T_{1L} のグラフの $T_{2L}/T_{1L} \approx 3.4700$ 近傍（非振動減衰開閉インパルスは常にこの値が 3.4700 より大きい。）及び T_{2L}/T_{1L} が極めて大きな場所での函数の振る舞いから漸近曲線を求め、2 つの漸近曲線を滑らかに結ぶ近似函数を仮定し、近似函数の不定パラメータを最小 2 乗法及び重みフィルター法³⁾により最適化した。最終的に得られた近似式は次の 2 つである。但し、 $x = T_{2L}/T_{1L} - 3.4700$ と定義する。なお、(5) 式中、 a_1 が 2 度現れているのは誤植ではない。

$$T_p/T_{1L} = a_1 x / (1 + a_2 x^{0.9} + a_3 x^{0.8} + a_4 x^{0.7} + a_5 x^{0.6}) + a_6 \quad (4)$$

$$a_1 = 0.052667, a_2 = 0.14171, a_3 = -0.46697$$

$$a_4 = 0.78714, a_5 = -0.24746, a_6 = 1.2415$$

$$T_2/T_{2L} = x - a_1 + a_1 / (1 + a_2 x^{a_3}) + a_4 \quad (5)$$

$$a_1 = 0.044888, a_2 = 0.28339, a_3 = 0.88181$$

$$a_4 = 3.3253$$

図 2 (4) 式の誤差分布

Fig. 2 Error distribution using eqn.(4)

図 2, 3 は (4), (5) 式で与えられる近似函数の誤差分布を描いたものである。いずれの場合も「誤差の符号が交互に反転し、かつ最大誤差の大きさがほぼ等しい」という、ミニマックス条件を満たす最適函数であることが判る。

図 3 (5) 式の誤差分布

Fig. 3 Error distribution using eqn.(5)

6. 近似函数の評価

前節で紹介した近似函数を実際の開閉インパルスに適用してその誤差を評価してみよう。最も急峻な 20/4000impulse を与える 2 重指数関数の波形に (4), (5) 式を適用したところ、20.0003/4000.0017impulse となり、誤差は 0.0015% となった。また最も緩慢な 300/1000impulse の場合においても、299.978/1000.02impulse となり、誤差は 0.0072% と、やはり極めて小さいことが確認できる。

7. まとめ

開閉インパルス電圧波形パラメータを雷インパルス電圧波形パラメータの定義から変換する近似式を提案し、広範囲の波形に対し、精度良い近似式であることを確認した。

(平成 13 年 4 月 16 日受付, 平成 13 年 6 月 5 日再受付)

参考文献

- 1) 脇本 隆之, 里 周二, 原田 達哉, 佐伯 正盛: 「開閉インパルス電圧の高精度波頭長算出法の提案」, 電気学会論文誌 B, Vol.118-B, No.5, pp.548-554, 1999
- 2) IEC 61083-1 "Digital recorders for measurements in high-voltage impulse tests", 1991
- 3) 里 周二, 加藤 巧二, 伊藤 智章, 坂口 寿美子: 「雷インパルス 2 重指数関数パラメータの計算法」, 電気学会論文誌 A, Vol.120-A, No.11, pp.1000-1006, 2000
- 4) 里 周二, 加藤 巧二, 伊藤 智章, 原田 達哉, 脇本 隆之, 佐伯 正盛: 「開閉インパルス電圧波形パラメータの計算法」, 平成 12 年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 B, No.548, pp.459-460, 2000 年 8 月