IEC 60060-1 に準拠したインパルス電流波形の実現性について

正 員 里 周二* 正 員 原田 達哉**
 学生員 横山 泰三* 正 員 坂口寿美子***
 学生員 江花 崇雄* 学生員 齊藤 辰徳*

Impulse Current Waveform Compliance with IEC 60060-1

Shuji Sato*, Member, Tatsuya Harada**, Member, Taizou Yokoyama*, Student Member,
 Sumiko Sakaguchi***, Member, Takao Ebana*, Student Member, Tatsunori Saito*, Student Member

After numerous simulations, authors could unsuccessfully design an impulse current calibrator, whose output's time parameters (front time, T_1 and time to half the peak, T_2) are quite close to ideals defined in IEC 60060-1. The investigation for the failed trial was commenced. Using normalized damped oscillating waveform $e^{-t} \sin(\omega t)$, a relationship of the ratio T_2/T_1 and undershoot value are studied for all possible value for ω . With this relationship, it is derived that 1) one cannot generate an ideal wave form unless one has to accept a certain margin for the two parameters, 2) even with the allowable margin, one can generate a wave form only in a case a value for T_1 is smaller and T_2 is larger than standard values. In the paper, possible time parameter combination, which fulfils IEC 60060-1 requirements, is illustrated for a calibrator design.

キーワード：インパルス電流波形，減衰振動波形，IEC 60060-1

Keywords：impulse current waveform, damped oscillating waveform, IEC 60060-1

1. まえがき

筆者らは IEC 60060-1⁽¹⁾に定められる校正波減衰振動性インパルス電流波形発生回路の製作を計画したが，発生回路の素子定数を定め，所定の波形が発生できるかどうかを机上でシミュレーションする段階で，理想的な標準インパルス電流波形を発生する回路を実現することができなかった。この事実を詳しく解析することにより，理想的な標準インパルス電流波形の発生が不可能であることを理論的に明らかにすることができた。本論文では以下にその詳細を紹介するとともに，IEC 60060-1 の要求するインパルス電流波形パラメータの問題点を指摘する。

2. インパルス電流波形

図 1 は IEC 60060-1⁽¹⁾及び国内規格である JEC 0202⁽²⁾で定義される減衰振動性インパルス電流波形と波形パラメータ T_1, T_2, V_p を描いたものである。

特に断らない限り，本論文では正極性のインパルス電流波形を扱う。波頭長 T_1 ，波尾長 T_2 の値には各々 10% の裕度が認められている。IEC 60060-1 及び JEC 0202 が定める 4 種の減衰振動性標準インパルス電流の時間パラメータを表 1 に示す。但し，表 1 中の No.1 波形は JEC 0202 でのみ定

図 1 減衰振動性インパルス電流波形と電流パラメータ
 Fig. 1. Impulse current waveform and its parameters.

* 宇都宮大学工学部電気電子工学科
 〒321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2
 Elec. Engg., Utsunomiya University
 7-1-2, Yoto, Utsunomiya 321-8585
 ** 日本工業大学 UHV センター
 〒345-0826 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1
 UHV Labs., Nippon Institute of Technology
 4-1, Gakuendai, Miyashiromachi, Saitama 345-0826
 *** (株) 東芝 電力・社会システム技術開発センター
 〒210-0862 川崎市川崎区浮島町 2-1
 Research & Development Centre, Toshiba Co.Ltd
 Ukishima-cho 2-1, Kawasaki-ku, Kawasaki 210-0862

表 1 IEC 60060-1 に定めるインパルス電流波形
Table 1. IEC 60060-1 impulse current waveforms.

Identification	T_1 [μsec]	T_2 [μsec]
No. 1	1	2.5
No. 2	4	10
No. 3	8	20
No. 4	30	80

義されているが、本論文では簡単のため、IEC 60060-1 に定める波形と総称する。

本論文で検討される重要な点は、図 1 の「波高値とは逆極性に 20%を越えない振れ=アンダーシュート」の制約である。

インパルス電流の時間パラメータ T_1 , T_2 はピーク値の 10, 90, 50%に至る時刻 t_{10} , t_{90} , t_{50} (図 1 参照) から次式により計算される。

$$T_1 = \frac{t_{90} - t_{10}}{0.8} \dots\dots\dots (1)$$

$$T_2 = t_{50} - \frac{9t_{10} - t_{90}}{8} \dots\dots\dots (2)$$

3. インパルス電流波形発生回路と発生波形

〈3・1〉 減衰振動波形 図 2 は典型的なインパルス電流発生回路の等価回路を描いたものである。大電流を発生する必要性から、必然的に発生回路の抵抗素子 R の値は小さくなり、 C , L が回路の特性を決定する主要な素子となる。この結果、回路に発生する電流波形は図 1 に描かれるような、減衰振動曲線となることが知られている。

また、図 2 の回路方程式を解析的に解くことにより、減衰振動性インパルス電流波形と相似な、抵抗両端の電圧波形の波高値を規格化したものは次式で与えられることが知られている。

$$V = e^{-\alpha t} \sin(\omega t) \dots\dots\dots (3)$$

与えられた回路定数から、インパルス電流パラメータを計算する手順は以下の通り。

(1) 図 2 の回路定数 R , L , C から、(3)式の α , ω の値を決定する。

(2) 図 1 の波形から、アンダーシュートがピーク値の 20%以内であれば、非線形方程式を解いて t_{10} , t_{90} , t_{50} を求め(1),(2)式を用いて、時間パラメータ T_1 , T_2 及びピーク値 V_p を計算する。

筆者らはインパルス電流波形パラメータ同定プログラム開発のため、8/20 impulse を発生させる校正器の製作を計画した。しかし、上記の手続きに従って、膨大な組み合わせの R , L , C の値を選んでも、IEC 60060-1 で定義される 8/20 impulse に極めて近い波形を発生させる図 2 の回路を実現することはできなかった。

以下に、IEC 60060-1 で定義される波形が何故実現不可

図 2 インパルス電流発生回路

Fig. 2. Impulse current generator circuit.

能であるかを理論的に明らかにするとともに、IEC, JEC 両規格のインパルス電流波形パラメータに関する要求に若干の矛盾があることを指摘するとともに、インパルス電流発生回路を設計する技術者への警鐘としたい。

〈3・2〉 規格化された減衰振動波形 (3)式の減衰振動波形を定量的に取り扱うため、本論文では時間方向に相似な波形をまとめて、1つの波形と定義する。例えば、(3)式で記述される波形に比べ、時間方向に k 倍 ($k > 0$) の速さで変化する函数 $e^{-k\alpha t} \sin(k\omega t)$ の時間パラメータ T_1 , T_2 は、(1),(2)式の t_{10} , t_{90} , t_{50} が $1/k$ となるので、原波形の各々 $1/k$ となる。この時、2つの時間パラメータの比 T_2/T_1 は不変であり、原波形のものと同じにならなければならない。また、波形が(3)式で記述される限り、2つの非相似波形の時間パラメータの比が等しくなることはない。

この事実を一般化すれば、「比 ω/α が一定である(3)式の減衰振動波形では比 T_2/T_1 は常に一定となる」ことが言える。逆に、(3)式で記述される、比 T_2/T_1 が一定のすべての波形は、(3)式の指数函数部分を規格化することにより、次式でも記述できる。

$$V = e^{-t} \sin(\omega t) \dots\dots\dots (4)$$

但し、ここに、 $0 \leq \omega < \infty$

まず、(4)式の ω の値を変え、アンダーシュート量が 20%以下である条件を求める。(4)式の最大値の発生時刻とその値を (t_p, V_p) 、最小になる時刻と値を (t_b, V_b) とすれば、簡単な計算から、これらは次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} t_p &= \frac{\tan^{-1}(\omega)}{\omega}, & V_p &= e^{-\frac{\tan^{-1}(\omega)}{\omega}} \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} \\ t_b &= t_p + \frac{\pi}{\omega}, & V_b &= -e^{-\frac{\pi}{\omega}} e^{-\frac{\tan^{-1}(\omega)}{\omega}} \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

$|V_b/V_p| = 0.2$ を満たす ω の値を(5)式から計算すると、 $\omega = -\pi/\log(0.2) = 1.95198126\dots$ となる。従って、「アンダーシュート量が 20%以下である」条件を満たす ω の領域は $\omega \geq 1.95198$ であり、(1), (2)式からこの条件は $T_2/T_1 \geq 2.69570$ であることが計算される。

一方、(3)式で記述される波形は 2つの極限状態の間に収まる。即ち、臨界制動 ($\omega/\alpha = 0$) と非減衰 ($\omega/\alpha = \infty$) の場合である。

具体的には、図2の回路でL, C が一定であれば、R の値が大きいき雷インパルス電圧を記述することで良く知られている2重指数関数、R の値が小さいとき減衰振動関数、2重指数関数から減衰振動関数に移る過程が臨界制動状態と呼ばれる。また、R の値が零であれば非減衰となりいつまでも振動を維持する。

臨界制動と非減衰の2つの場合について、時間パラメータ T_1, T_2 の比の数値的な制約を把握しておく。

〈3・3〉 臨界制動 もし、(3)式の ω が α に比べて十分小さい場合、波形は臨界制動状態となり、ピーク値及びピーク値発生時刻で規格化された波形は以下の式で与えられる(図3参照)。

$$V = t e^{-t} \dots\dots\dots (6)$$

Newton 法により、(6)式の臨界制動波形から(1)、(2)式を用いて T_1, T_2 を計算し、比 T_2/T_1 の値を計算すると、 $T_2/T_1 = 3.80466\dots$ を得る。(注、ピーク値の30%, 90%, 50%から計算される雷インパルス電圧の時間パラメータではこの比は $T_2/T_1 = 3.46998$ となる。) この事実から、減衰振動波

図3 臨界制動インパルス電流波形

Fig. 3. Critical damping impulse current waveform.

図4 振動性インパルス電流波形

Fig. 4. Oscillatory impulse current waveform.

形の時間パラメータの比には、 $T_2/T_1 < 3.80466$ なる関係が成立していなければならない。

〈3・4〉 非減衰 他方、(3)式の ω が α に比べて十分大きいと、波形の減衰時定数 $1/\alpha$ は振動周期に比べ、限りなく大きいと考えることができる。 $\alpha = 0$ の場合は $\omega (> 0)$ の値の如何にかかわらず、常に非減衰条件は満足されるが、ここでは簡単のため $\omega = 1$ とした場合を取り扱う。このとき、比 T_2/T_1 を一定とする波形の代表的なものは次式で与えられる(図4参照)。

$$V = \sin(t) \dots\dots\dots (7)$$

(7)式で記述される波形の時間パラメータの比 T_2/T_1 は $2.07554\dots$ となる。

4. 時間パラメータの比

前章で明らかにされた事実から、全ての減衰振動性のインパルス電流波形の時間パラメータの比 T_2/T_1 は(6)、(7)式で定義される波形の時間パラメータの比の中に収まっていなければならないことが判る。

比 T_2/T_1 を非制動振動波形の場合(アンダーシュート100%)、臨界制動(アンダーシュート0%)、について計算し、拘束条件を求めると、 $2.07554 < T_2/T_1 < 3.80466$ となる。一方、(4)式について、アンダーシュート20%の条件を非線形方程式を解いて求めると、 $\omega = 1.95198\dots$ のとき、 $T_2/T_1 = 2.69570\dots$ となる。以上より、IEC 60060-1 を満足する波形の時間パラメータの比は

$$2.69570 < T_2/T_1 < 3.80466 \dots\dots\dots (8)$$

を満足しなければならないことが明らかとなった。

5. 標準波形と時間パラメータの比

表1に示された IEC 60060-1 に定義される 1/2.5, 4/10, 8/20, 30/80 impulse の4種類の減衰振動波形が標準インパルス電流波形の実現可能性を本論文で紹介した手法により吟味してみよう。

図5はこれらの波形の時間パラメータを横軸、縦軸にとり、IEC 60060-1 で許容される10%の裕度を考慮して描いた、標準インパルス電流の時間パラメータの許容領域である。例えば、1/2.5 impulse の波形(図5(a)参照)では裕度を考慮しない標準インパルス電流では T_2/T_1 の比2.5は(8)式で定義される領域を外れており(より小さい)、所定の条件を満足することができず、図2に現れる回路素子の値をどのように選んでも、正確な1/2.5 impulse 波形を発生することができないことが判る。また、10%裕度を考慮した、1.1/2.25 impulse 波形はいかなる受動回路からも発生できない(発散振動波形のみ可能)ことも理解される。

なお、4/10, 8/20 impulse は T_2/T_1 の比が1/2.5 impulse と同じになるので図5(a)の横軸・縦軸の数値を各々4, 8倍したものであることがわかる。

図 5 インパルス電流波形と有効領域

Fig. 5. Impulse current waveforms and their effective areas.

6. むすび

減衰振動性標準インパルス電流波形の時間パラメータと、電気的な回路から実際に発生される波形の時間パラメータの条件を検討し、発生波形の時間パラメータの取りうる領域を明示した。この結果、発生可能な波形の時間パラメータでは、10%の裕度内に存在しながら波頭長 T_2/T_1 は標準値より小さく、波尾長 T_2 は標準値より大きくした波形を（図 5 中の塗り潰された領域の位置が矩形の中心の左上にあることに注意）目安にすれば発生波形の選定が容易であることを明らかにした。

また、基準測定システムを目的とした校正波発生器を製作する際に重要となる、波形パラメータが裕度の限界値をとる波形の発生器は、図 5 の塗り潰された領域が多の場合矩形領域の角を含まないことから、製作不可能である場合の多いことが確認された。

負荷（図 2 中の抵抗）として、避雷器で使われるような

非線形素子を使うと、電流波形のピーク付近で抵抗は減少し、コンデンサに蓄積された電荷は、線形素子の場合に比べ早く減衰し、本論文で論議したアンダーシュートの問題は生じない可能性もある。しかし、非線形素子を使った場合、波形パラメータはコンデンサの充電電圧の関数となり、校正波発生器として使うことはできない。非線形素子の特性を考慮した波形パラメータについては、別途報告する計画である。

また、本研究の結果に基づき校正波インパルス電流発生器が製作され、所定の性能を示したことを報告する⁽³⁾。

謝 辞

卒業研究の一環として本研究に参加し、ソフトウェア、ハードウェアの製作の協力された、伊セ崎 祐幸（現、㈱日本電設工業）、田代 和生（現、㈱三菱ビルテクノサービス）両君に心から感謝いたします。

（平成 16 年 4 月 30 日受付，平成 16 年 11 月 11 日再受付）

文 献

- (1) High Voltage Test Techniques, Part 1, General Definition and Test Techniques, IEC 60060-1, Geneva (1994)
- (2) JEC 0202 : 「インパルス電圧・電流試験一般」, 電気学会電気規格調査会標準規格 (1994) (in Japanese)
JEC 0202 : “Impulse Voltage and Current Tests in General”, Standard of the Japanese Electrotechnical Committee (1994)
- (3) S. Sato, T. Harada, and T. Saitou : “Impulse Parameters Determination for Digitally Measured Impulse Current Record”, 2004 National Convention Record IEE Japan, Vol.7, No.7, pp.110-111 (2004) (in Japanese)
里 周二・原田達哉・斎藤辰徳 : 「インパルス電流波形パラメータ同定プログラムの開発」, 平成 16 年電気学会全国大会, Vol.7, No. 7, pp.110-111 (2004)

里 周二 (正員) 1973 年九州大学工学研究科電気工学専攻修士課程修了。現在, 宇都宮大学助教授。工学博士。

原田達哉 (正員) 1952 年東京工業大学大学院特別研究生修了。工学博士。日本工業大学客員教授。IEEE Life Fellow.

横山 泰三

(学生員) 2005 年宇都宮大学工学研究科(博士前期課程)電気電子工学専攻修了。同年, (株)スタンレー電気勤務。

坂口 寿美子

(正員) 1994 年お茶の水女子大学理学部物理科卒。(株)東芝、電力・社会システム技術開発センター、送変電機器開発部、高電圧技術担当。

江花 崇雄

(学生員) 2004 年宇都宮大学工学部電気電子工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科(博士前期課程)電気電子工学専攻進学。

齊藤辰徳

(学生員) 2004 年宇都宮大学工学部電気電子工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科(博士前期課程)電気電子工学専攻進学。