

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560317

研究課題名(和文) 波尾振動性雷インパルス電圧波形校正システムの開発

研究課題名(英文) Development of Calibrator for Tail-Oscillating Lightning Impulse Waveform

研究代表者

里 周二(SATO, Shuji)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10215759

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の成果として、IEC TDGの発生する波尾振動性雷インパルス電圧波形に極めて近い波形を発生できる校正器を完成することができた。校正器は実用的な内部インピーダンスの低い抵抗式分圧器(主抵抗10kΩ)につないだ状態でもOLI-M3とほぼ同じ波形を発生することが確認された。今回製作された校正器のスイッチング素子は湿式水銀リレーに代えてMOS-FETを使うことにより、寿命・劣化の問題が解消された。また、多並列MOS-FET構成により、ドレイン-ソース間の非線形抵抗特性は問題のないレベルまで小さくすることができたのみならず、高電圧MOS-FETに特有の許容電流容量の大きさも問題とはならなくなった。

研究成果の概要(英文)：As scheduled IEC 61083-2 (Instruments and software used for measurement in high-voltage and high-current test- Requirement for software for tests with impulse voltages and currents) was issued on March 2013 and appendant TDG (Test Data Generator) was also supplied. As the results of this research, a calibrator, which is capable of generating a tail-oscillating impulse voltage waveform referred as OLI-M3 in TDG, was successfully completed. The generation is possible even when its output is connected to a low impedance (10kΩ) potential divider. By using MOS-FET instead of wetted mercury relay as a switching element of the calibrator, deterioration of the contact can be avoided. Massive parallel connection of MOS-FET makes it possible to reduce the non-linear resistive characteristics between source and drain to a negligibly small level. Also, inherent characteristics of MOS-FET in allowable current from source to drain was solved by that parallel connection.

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：波尾振動性雷インパルス電圧波形 低インピーダンス負インパルス電圧波形校正器 IEC 61083-2 TDG

1. 研究開始当初の背景

(1) 送電時の損失を低減するためには送電電圧の高圧化は不可欠であり、1100kV (UHV) 送電の計画が進行している。

高電圧化には、しかしながら試験設備の面で問題が生じる。即ち、機器の高電圧化に伴い絶縁距離は比例して大きくなり、機器の静電容量も同じく比例して増大する。この大容量静電容量を負荷とする機器にインパルス電圧発生器 (IG) で電圧を印加しようとする、IG の主キャパシタの静電容量に対し増大した負荷の静電容量の大きさが無視できない程度の大きさとなり、波頭長が IEC の要求する $1.2\mu s + 30\% = 1.56\mu s$ に収まらなくなる。この問題解決の妥協案として、負荷直前にインダクタンスを挿入することにより、全波インパルス電圧の代わりに波尾振動性インパルス電圧形を発生させ、耐压試験に用いることが認められている。

しかし、波尾振動性インパルス電圧波形を既存の測定システムで測定することに関しては、これといった指針がない。このため、本提案研究では波尾振動性インパルス電圧形を発生させることのできる低インピーダンス負荷用校正器を開発し、分圧器からの応答波形と校正器からの直結波形を測定して比較することにより、分圧器の性能評価が可能となる。

(2) また、測定システムにはデジタル・レコーダの記録データを処理するソフトウェアも含まれることから、新しい Windows ソフトウェアを開発する必要が生まれている

2. 研究の目的

(1) IEC 61083-2 に規定される波尾振動性雷インパルス電圧波形の波形パラメータの定義は標準の全波インパルス電圧波形とは異なり、波形の包絡線から決定される。このことから、実際に校正器が分圧器に繋がった状態で波尾振動性雷インパルス電圧波形を発生させ、分圧器からの応答波形と校正器からの直結波形を測定して比較することにより、分圧器の性能評価が可能となる。この目的のため、IEC 61083-2 TDG の発生する波形に準じた波高値 1000V 程度の低インピーダンス負荷校正器を作成する必要が生じた。本研究では TDG の OLI-M3 とほぼ同じ波形を発生することのできる校正器を製作する。

(2) また、波尾振動性雷インパルス電圧の波形パラメータの同定に関しては、デジタル・レコーダで記録された離散データから、波形パラメータを計算するソフトウェアを開発することが不可欠であるため、本研究者の所有するデジタル・レコーダ RTO1012 を PC から制御し、TCP/IP によるデータ転送、波形データから Base-Curve の計算、Base-Curve から波形パラメータの抽出を行うことのできる Windows プログラムの開発を行う。

3. 研究の方法

(1) 波尾振動性雷インパルス電圧波形

発生用低インピーダンス負荷校正器の製作に関しては、1) 主キャパシタには、少高価であっても振動の周波数領域にも周波数特性が殆ど現れない、マイカキャパシタを使用する。2) 負荷に低インピーダンスの分圧器が繋がれると、主キャパシタからの流出電流が大きくなるが、その開閉を担う素子として水銀リレーに比べ寿命の長い高耐压 MOS-FET を導入する。一般に MOS-FET はドレインソース間に流れる電流に依存する非線形抵抗が現れるが、MOS-FET を多重に並列接続することにより、この影響を無視できる程度にまで抑え込む。

(2) ソフトウェアに関しては、記録長、サンプリング間隔及びインターフェイスに問題が生じてきたデジタル・レコーダ TDS5012 に代えて RTO1012 に対応するものとする。また、ソフトウェアの核となる Base-Curve 決定アルゴリズムのみならず、得られた Base-Curve から包絡線を決定する解析を行い、その結果をソフトウェアに反映させる。

4. 研究成果

波尾振動性雷インパルス電圧発生用低インピーダンス負荷校正器の開発

(1) 校正器の素子定数の決定

図 1 は周波数領域で描かれた校正器及び負荷の等価回路である。図中の素子 R_d は分圧器を模擬したもので、5~10 kΩ 程度の外付け負荷となる。

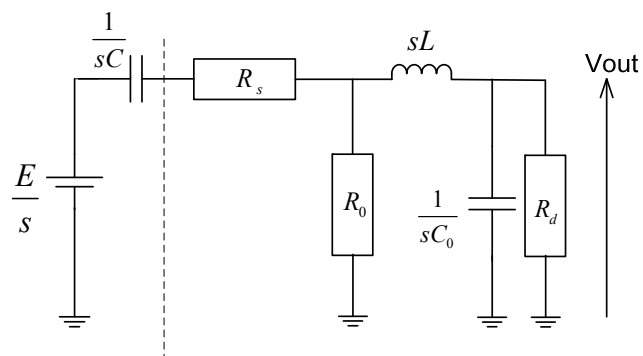


Fig. 1 Tail-Oscillating Lightning Impulse Voltage Generator Circuit

この時、出力 V_{out} の伝達関数は、

$$V_{out}(s) = \frac{d}{s^3 + as^2 + bs + c} \quad (a > 0, b > 0, c > 0, d > 0) \dots\dots\dots(1)$$

で与えられ、時間領域での関数は

$$f(A, \alpha, \beta, \omega; t) = A \left(e^{-\alpha t} - \left(\cos \omega t + \frac{\beta - \alpha}{\omega} \sin \omega t \right) e^{-\beta t} \right) \dots\dots\dots(2)$$

で与えられる。また、次式で与えられる曲線は(2)式の包絡線となるので、

$$f_e(A, \alpha, \beta, \omega; t) = A \left(e^{-\alpha t} + \sqrt{1 + \left(\frac{\beta - \alpha}{\omega} \right)^2} e^{-\beta t} \right) \dots\dots (3)$$

IEC 60060-3 の定義に従った、波尾長は(3)式の包絡線が(2)式で与えられるピーク値の 50 % に減衰する時刻を規約原点から測定した値となる。

これらの計算過程を自動化すれば、図 1 の回路素子が与えられると、一連の計算から波形の時間パラメータ (波頭長, 波尾長) はコンピュータで精度良く計算することができる。以上の流れを箇条書きにすると、以下のようになる。

- 1) 図 1 の回路素子が与えられる。
- 2) (1)式の伝達関数の係数 a, b, c, d を計算する。
- 3) a, b, c, d から(2)式中の A, α , β , ω を計算し、(2)式のピーク値を計算する。
- 4) (2)式のピーク値の 30, 90 % に到達する時刻から波頭長 T_1 を計算する。
- 5) (3)式よりピーク値の 50 % に減衰する時刻を求め、 T_1 の計算時に同時に計算されている規約原点を使って、波尾長 T_2 を計算する。

1)~5)の過程は素子の値を種々変えて、希望する T_1 , T_2 が得られるまで繰り返される。筆者らは、種々の非振動性雷インパルス波形では望みの時間パラメータを満足する回路素子を自動計算で求めること報告しており、同様な手法を開発することも可能であるが、今回は波形の種類が 1 種類であったので、文字通り、試行錯誤によって素子パラメータを決定した。

(2) 振動性雷インパルス電圧校正器

図 2 は完成された、校正器である。負荷として 10 k Ω の順抵抗が繋がれたとき、IEC 61083-2 TDG の発生する波尾振動性雷インパルス電圧波形 OLI-M3 と殆ど同じ波形を発生することができるよう、回路素子の値が選ばれている。

図 2 中の素子の大きな特徴はスイッチング素子である。高電圧・大電流を高速に開閉するためには特別な湿式水銀リレーが用いられる

が、水銀リレーは経年変化が避けられない。EMTP を使った過渡現象シミュレーションにより、電圧波形は振動的であってもスイッチには単極性の電流が流れることを確認し、半導体スイッチ (MOS-FET) を使った。素子 1 個当たりの最大電流の制約及びドレイン~ソース間抵抗といった問題を解決するため⁽⁵⁾、許容値 1000 V, 8 A の半導体 (2SK1120) を 20 個並列に接続した。

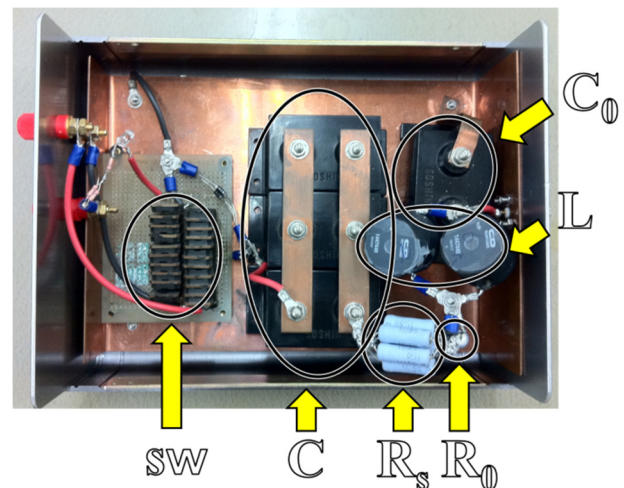


Fig. 2 Tail-Oscillating Lightning Impulse Voltage Generator Circuit

Table 1 Circuit Elements for Generating OLI-M3 Waveform

Elements in Fig. 1	Value
C	944 nF
Rs	2.85 Ω
R0	145 Ω
L	213 μ H
C0	99.3 nF
Rd	10 k Ω

回路に一定程度の大きさのインダクタンスが繋がれるので、抵抗は無誘導素子でなくても、その残留インダクタンスがインダクタンス素子の値に比べ十分小さければ問題は生じない。但し、見過ごされがちな重要な点はインダクタンス素子の許容電流量である。空芯構造でない場合、許容値の十分大きなものを選ばないと、磁束の飽和 (非線形現象) 現象が生じ、予想もしない出力波形が発生される。

表 1 は上で述べた計算で定められた回路素子の実測値である。

波尾振動性雷インパルス電圧波形の波形パラメータ同定プログラムの開発

(2)式は簡略化されたものなので、一般化すると規約原点を考慮した(2)'式がデジタル・レコーダからのデータから Base-Curve $f(A, \alpha, \beta, \omega, \tau; t)$ を定めるときの用いる式となる。

$$f(A, \alpha, \beta, \omega, \tau; t) = A \left(e^{-\alpha(t-\tau)} - \left(\cos \omega(t-\tau) + \frac{\beta-\alpha}{\omega} \sin \omega(t-\tau) \right) e^{-\beta(t-\tau)} \right) \dots\dots\dots (2)'$$

未知数 $A, \alpha, \beta, \omega, \tau$ は、ベース・カーブと実測・データ (x_k, y_k) , $k = 1, 2, \dots, n$ の差の重み (w_k) 付き自乗和、

$$S = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^n w_k (f(A, \alpha, \beta, \omega, \tau; x_k) - y_k)^2 \dots\dots\dots (4)$$

を最小にするような条件から決定される(この手法は**最小自乗法**と呼ばれる)。この手法より派生する非線形連立方程式を解くことについての詳細は既に報告されているので、本論文での説明は省略する。

さて、Base-Curve を構成する5個の未知数 $A, \alpha, \beta, \omega, \tau$ が決定されると、三角関数の合成に関する次式の関係から、

$$\left| \cos \omega t + \frac{\beta-\alpha}{\omega} \sin \omega t \right| \leq \sqrt{1 + \left(\frac{\beta-\alpha}{\omega} \right)^2} \dots\dots\dots (5)$$

(2)'式の包絡線 f_e (Base-Curve を包む上部・下部2本の曲線が考えられるが、上部の曲線を採用する) は、(3)式で記述される。

図3はTDGでOLI-M4として与えられているデジタル・データを提案するアルゴリズムで処理したものであるが、包絡線 (Test-Curve) は期待した通りの振る舞いをしていることが確認できる。

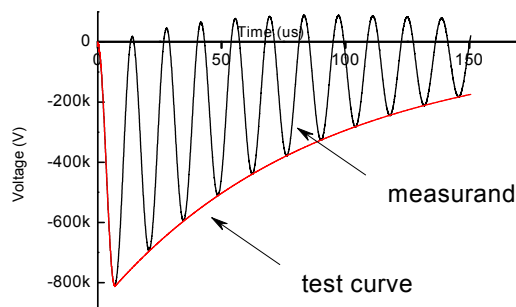


Fig. 3 Parameters Evaluation of TDG OLI-M4

計算された、波高値、波頭長、波尾長の値は

$U_p = -810672.40 \text{ V}$, $T_1 = 4.936 \text{ us}$, $T_2 = 68.915 \text{ us}$, $F = 72014.11 \text{ Hz}$ (振動周波数) であった。

以上のように、波尾振動性雷インパルス電圧波形を発生する校正器はハードウェア、ソフトウェア両面から予定されていた研究の目的を満たすものを製作することができたと言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

[1] S. Sato, H. Ikeda, S. Nishimura, Y. Taniguchi, H. Shimizu and K. Harada: "V-t Characteristics of Vacuum Interrupter After Large Current Interruption", IEEE Trans. Plasma Science, Vol.39, No.6, pp. 1354-1357, June 2011

[2] Yoshifumi Okamoto, Yusuke Tominaga and Shuji Sato: "Topological Design for 3-D Optimization Using Combination of Multistep Genetic Algorithm with Design Space Reduction and Nonconforming Mesh Connection", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 48, No. 2, pp. 515-518 (2012)

[3] Yusuke Tominaga, Yoshifumi Okamoto, Shinji Wakao and Shuji Sato, "Binary-based Topology Optimization of Magnetic Shielding by a Hybrid Evolutionary Algorithm Combining Genetic Algorithm and Extended Compact Genetic Algorithm", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 49, No. 5, pp. 2093-2096 (2013)

[4] Takaaki Furukawa, Masato Ueda, Akiko. Kumada, Kunihiko Hidaka, Hisatoshi Ikeda, Shuji Sato, Seisuke Nishimura, Hiroyuki Shimizu, Tetsu Shioiri and Mitsutaka Honma: "Influence of Current Interruption on V-t Characteristics of Vacuum Interrupters", IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 41, No. 8, pp. 1896-1903, August, (2013)

[5] Shuji Sato, Yuya Saikawa, Seisuke Nishimura, Hiroyuki Shimizu, Yoshifumi Okamoto and Hisashi Ikeda: "Parameters Determination for a.c. Voltage and Current Waveforms Generated by IEC 61083-4 TDG", IEEJ Trans. B, Vol. 133, No. 12, pp. 1001-1008 (2013)

[学会発表] (計 22 件)

[1] S. Sato, S. Nishimura, Y. Okamoto, H. Shimizu, Y. Saikawa: "Parameters Determination of Tail-Oscillating Lightning Impulse Voltage Waveform", International Symposium on High Voltage Engineering, C-010 CD-ROM 6-page paper, Hannover, Germany, August 2011

[2] S. Sato, S. Nishimura, Y. Okamoto, H. Shimizu: "Impulse Current Waveform Parameters Determination with Non-Linear (ZnO) Load", International Symposium on High Voltage Engineering, C-011 CD-ROM 5-page paper, Hannover, Germany, August 2011

[3] 里 周二, 岡本 吉史:「裁断波インパルス電圧波形から裁断点を決定する新しい手法の提案」, 宇都宮大学企業交流会, 電-6, 2011年9月

[4] 仲山 雄貴, 佐々木 啓之, 里 周二, 西村 誠介, 清水 博幸, 岡本 吉史:「波尾振動性雷インパルス電圧波形校正器の試作」, 第2回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-11-34, ETG-11-34, pp. 115-116, 2012年2月

[5] 才川 友也, 里 周二, 西村 誠介, 清水 博幸, 岡本 吉史:「IEC 61083-4 TDG 短時間交流電圧・電流波形の同定」, 第2回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-11-35, ETG-11-35, pp. 117-118, 2012年2月

[6] 里 周二, 才川 友也, 西村 誠介, 清水 博幸, 岡本 吉史:「裁断波雷インパルス電圧波形の裁断時刻の決定」, 第2回電気学会東京支部栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-11-36, ETG-11-36, pp. 119-120, 2012年2月

[7] 里 周二, 西村 誠介, 清水 博幸, 才川 友也, 岡本 吉史:「IEC 61083-4 TDG 定常 a.c. 電圧・電流波形解析について」, 平成24年電気学会全国大会, 808-A3:エネルギー変換・輸送 サージ・高電圧(Ⅲ), 7-084, pp. 124-125, 2012年3月

[8] 才川 友也, 里 周二, 西村 誠介, 清水 博幸, 岡本 吉史:「IEC 61083-4 TDG 短時間交流電圧・電流波形の同定」, 平成24年電気学会全国大会, 808-A3:エネルギー変換・輸送 サージ・高電圧(Ⅲ), 7-085, pp. 126-127, 2012年3月

[9] 里 周二, 才川 友也, 西村 誠介, 清水 博幸, 岡本 吉史:「裁断波雷インパルス電圧波形の裁断時刻の決定」, 平成24年電気学会全国大会, 808-A3:エネルギー変換・輸送 サージ・高電圧(Ⅲ), 7-086, pp. 128-129, 2012年3月

[10] 里 周二, 西村 誠介, 岡本 吉史, 清水 博幸, 仲山 雄貴:「波尾振動性雷インパルス電圧波形校正器の試作」, 平成24年電気学会全国大会, 808-A3:エネルギー変換・輸送 サージ・高電圧(Ⅲ), 7-087, pp. 130-131, 2012年3月

[11] 里 周二, 仲山 雄貴, 西村 誠介, 清水 博幸, 岡本 吉史:「二次分圧器を考慮した160kV制動容量型雷インパルス電圧測定用分圧器の開発」, 平成24年電気学会全国大会, 808-A3:エネルギー変換・輸送 サージ・高電圧(Ⅲ), 7-088, pp. 132-133, 2012年3月

[12] S. Sato, Y. Saikawa, Y. Okamoto, S. Nishimura and H. Shimizu: "Parameters Determination for a.c. Voltage and Current Waveforms", IPEC 2012, No. P0216, pp. 578-582, Ho-Chi Ming, December, 2012

[13] 富永 悠介, 岡本 吉史, 若尾 真治, 里 周二:「逐次線形計画法による材料密度ベースの位相最適化手法を用いた磁気回路設計」, 電気学会静止器・回転機合同研究会資料, SA-13-12/RM-13-12, pp. 61-66, 2013年1月

[14] 圓谷 友紀, 岡本 吉史, 藤原 耕二, 里 周二:「周波数領域辺有限要素解析より得られる複素対数線形方程式に対する前処理付き COMRTR 法に関する検討」第3回電気学会東京支部栃木・群

馬支所合同研究発表会, ETT-12-33, ETG-12-33, pp. 88-91, 2013年2/3月

[15] 才川 友也, 里 周二, 岡本 吉史, 西村 誠介, 清水 博幸: 「IEC 61083-4 TDG の発生する過渡 a.c.波形処理法の提案」第3回電気学会東京支部 栃木・群馬支所合同研究発表会, ETT-12-100, ETG-12-100, pp. 276-277, 2013年2/3月

[16] S. Sato, Y. Saikawa, Y. Okamoto, S. Nishimura and H. Shimizu: “Parameters Determination for a.c. Voltage and Current Waveforms <IEC 61083-4 TDG Waveform Analyses>” 静止器, 開閉保護, 新エネルギー・環境, 電力技術, 高電圧, 電力系統技術合同研究会資料, SA-13-30, SP-13-2, FTE-13-2, PE-13-2, HV-13-62, PSE-13-18, pp. 7-13, Bangkok, Thailand, 2013年3月

[17] 才川 友也, 里 周二, 岡本 吉史, 西村 誠介, 清水 博幸: 「IEC 61083-4 TDG の発生する過渡 a.c.波形処理法の提案」平成25年電気学会全国大会予稿集, Vol. 7, No. 083, pp. 122-123, 2013年3月

[18] S. Sato, T. Furukawa, M. Ueda, K. Hidaka, H. Ikeda, A. Kumada, S. Nishimura, H. Shimizu, T. Shioiri, M. Homma: “Investigation on Influence of Current Interruption on V-t Characteristics of Vacuum Interrupters”, ARDAC 2013, Poster Presentation, Abu-Dhabi, UAE, March, 2013

[19] S. Sato: “High voltage testing technique of impulse voltage”, Advisory Committee on Electricity Transmission and Distribution (ACTAD), Oral Presentation with 34 Power Point Pictures, Guilin City, China, March, 2013

[20] S. Sato: “Development of a Potential Divider for Reference Measuring System in Japan”, Electrical Power Engineering and Related Syandardization for New Age, M-J Traditional Seminar 2013, Tokyo, October, 2013

[21] 八木 崇明, 里 周二, 東部 真季, 岡本 吉

史: 「デジタルレコーダ・コントロールプログラムの開発」第4回電気学会東京支部 栃木・群馬支所合同研究発表会, ETG-14-50, ETT-14-50, pp. 152-155, 2014年3月

[22] 里 周二, 東部 真季, 西村 誠介, 清水 博幸, 岡本 吉史: 「プロトタイプ 320kV 制動容量型分圧器の耐圧試験」平成26年電気学会全国大会予稿集, Vol. 7, No. 067, pp. 108-109, 2014年3月

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.ee.utsunomiya-u.ac.jp/~satolab/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

里 周二 (SATO, Shuji)
宇都宮大学 大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10215759

(2) 研究分担者

岡本 吉史 (OKAMOTO, Yoshifumi)
宇都宮大学 大学院工学研究科・助教
研究者番号: 40415112

(3) 連携研究者

()

研究者番号: —