周波数変換法によるサージ入力波形推定における 誤差低減法の検討

正員 政 川 俊 康 (三菱電機)

非会員 笠 松 崇 彦 (スターネット)

正員 長 岡 直 人 (同志社大)

An Error Correction Method for an Input Waveform Estimate by Frequency Transform Method

Toshiyasu Masakawa, Member (Mitsubishi Electric Corp.), Takahiko Kasamatsu, Non-member, (Star Net Corp.), Naoto Nagaoka, Member, (Doshisha University)

This paper clarifies a source for estimate error of an input voltage waveform of a capacitive voltage divider, when a frequency transform method is applied. From experimental and numerical analyses, an offset voltage of a digital waveform recorder causes significant error to an estimated voltage waveform. Because the offset voltage acts as DC. error, the effect of the offset is quite significant for an input wave which has more DC. component such as a switching surge waveform compared with a lightning surge.

An offset voltage correction method is proposed in this paper. This method is also applicable to the surge waveform is superposed upon a steady state sinusoidal voltage. Estimated inputs corrected by the proposed method show a good agreement with input voltage wave forms.

The input voltage-waveform estimation-method with the offset correction has quite high generality, and is applicable not only to lightning but also to switching surges.

キーワード：変歪誤差補正，周波数変換法，過渡現象，EMTP

1. 緒 言

現代において、電気は我々の生活に欠かすことのできないエネルギーである。電力の安定供給のためには、事故を未然に防ぐことが必要であるが、雷事故にみられるように、これを完全に零とすることは不可能である。そこで、事故時に系統を早期に復旧することが望まれており、このためには雷撃点あるいは事故点の標定を迅速に行う必要がある。サージ波形による事故点標定は定常電圧・電流による標定法と比して高速な判定が可能であるが、サージ波形を精度良く測定することが必要である。しかしながら、高精度なサージ電圧測定には良好な分圧周波数特性を有する高価な分圧器が必要となる。そこで、時間領域法あるいは周波数領域法による数値計算により分圧特性を補正する手法が考えられる。時間領域法は、各時刻において分圧器の単位関数応答あるいはインパルス応答と分圧器出力電圧に畳込み積分を施すことにより得られる。各時間サンプルごとに数値積分を行う必要があるため、本質的に計算時間が長くなる欠点を有する。周波数領域法の一つである周波数

変換法は、周波数領域において直接分圧器の周波数特性を補正する。これには、時間-周波数変換に積分変換である数値フーリエあるいは数値ラプラス変換を要するが、FFTのアルゴリズムを導入することにより、高速に積分を実行しうる。更に、周波数領域により処理することにより、分圧器の周波数特性が実測などにより知られる場合は、等価回路が明らかでない場合にも適用しうる特徴を有する。

著者らはこれまで、商用周波数電圧の監視を目的として変電所に設置されている安価なコンデンサ形分圧器(CVT)の変歪した出力波形より、周波数変換法を用いてサージ入力波形を推定する手法について研究を行ってきた^{(1)~(5)}。本手法によれば、極めて経済的にサージ波形測定を行うことが可能となる。

この手法は雷サージ波形など極めて高い周波数成分を有する波形に対しては有効であり、実用性も高い。しかしながら観測時間が長く、比較的低い周波数成分を有する波形、例えば開閉サージの入力波形推定においては、推定精度および数値安定度が低下する傾向があった⁽⁶⁾。これは低

周波に対する CVT の分圧比が大であることにより、CVT 出力波形に含まれる低周波成分が極めて小であることによる。すなわち、入力推定においては小なる低周波成分を増幅し、入力波形を合成する必要があるため、わずかな誤差が入力推定に大なる影響を及ぼす。

本論文では、CVT スケールモデルによる実験結果を基に、開閉サージ入力波形推定時の誤差原因を明らかにする。更に、この推定誤差を低減する手法について述べ、雷サージに加え従来困難であった開閉サージ入力波形推定を実行しうるシステムを実現する。

2. 周波数変換法を用いた入力信号推定

〈2・1〉 入力推定の原理 CVT をはじめとする二端子対回路網の出力信号波形から入力信号波形を推定する一手法として、周波数変換法による数値計算法がある。その原理について以下に述べる^{(7)~(9)}。

入力信号および出力信号を $v_{in}(t)$, $v_{out}(t)$ とする。回路の特性が線形時不変であると仮定すると、これらの関係は周波数領域で求式で与えられる。

$$V_{out}(s)=F(s) V_{in}(s) \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $V_{in}(s)=\mathcal{L} v_{in}(t)$: 入力信号周波数応答、

$V_{out}(s)=\mathcal{L} v_{out}(t)$: 出力信号周波数応答、 $F(s)$:

周波数領域伝達関数、 $\mathcal{L}$: ラプラス・フーリエ順変換

従って、入力信号推定は伝達関数 $F(s)$ の逆関数 $G(s)$ を求め、(1)式の逆演算を実行することにより実現できる。この $G(s)$ は伝送関数と呼ばれる。

$$G(s)=1 / F(s) \\ = V_{in}(s) / V_{out}(s) \cdots \cdots \cdots (2)$$

$$V_{in}(s)=G(s) V_{out}(s) \cdots \cdots \cdots (3)$$

$$v_{in}(t)=\mathcal{L}^{-1} V_{in}(s) \cdots \cdots \cdots (4)$$

ここで、 $\mathcal{L}^{-1}$: ラプラス・フーリエ逆変換

(2), (3)式に示す計算を数值的に行う場合、離散順逆変換の精度が問題となる。本論文では、順変換として折返し誤差を生じない直線近似ラプラス変換 (LLT)⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾を、逆変換として LLT と良好な変換対をなす高速逆ラプラス変換 (IFLT)⁽¹²⁾⁽¹³⁾を用いる。

実測により得られる出力信号は測定時の雑音を含む。更に、近年過渡現象測定に用いられるデジタルサンプリング波形記憶装置は、量子化誤差および大地電圧レベルのずれ (以下、オフセットと呼ぶ) を含む。これらはいずれも入力波形推定時に誤差原因となる。

〈2・2〉 CVT スケールモデルの入力推定 実測データに対する入力波形推定の精度を検討するため、図1に示す CVT スケールモデルを製作し、伝送関数 $G(s)$ をラプラス演算子 s の有理関数モデルを用いて入力波形を推定した。モデル回路における C_1 と C_2 はコンデンサ形分圧器を構成する。 L_2 と R_2 は漂遊インダクタンスおよび導線抵抗でその値は小であるが、大なる C_2 との直列共振周波数が比較的低下するため、分圧比の周波数特性に大きな影響

図 1 CVT モデル
Fig. 1. A model of CVT.

表 1 CVT モデル定数

Table 1. Circuit parameters of the CVT model.

	モデル 1	モデル 2
C_1	0.022 μ F	0.22 μ F
C_2	2 μ F	2 μ F
R_2	65 m Ω	65 m Ω
R_3	32 Ω	variable
L_2	0.36 μ H	0.36 μ H
L_3	20 mH	20 mH

図 2 雷サージ波形推定結果
Fig. 2. A result for a lightning surge.

を及ぼす。 L_3 , R_3 はドレーンコイルのインダクタンスおよびその巻線抵抗を表現する。 C_2 と L_3 による並列共振周波数はさきの直列共振周波数より低く、更に L_3 が出力端子に対して並列接続されるため、低周波成分に対しては L_3 が大なる影響を及ぼす。各回路定数設定値を表1に示す。

電源として標準雷インパルスを表1のモデル1に示す定数を有する CVT モデルに印加した場合の入出力波形 V_{in} , V_{out} および推定結果 V_{est} を図2に示す。出力電圧は C_2 と L_2 の共振により、波頭部において高周波振動が観測されるが、これより得られる入力波形推定結果は入力波形と良好に一致している。特に、高周波成分により定まる波頭部においては誤差はほとんど観測されない。波頭部と比べて低周波成分が支配的となる平坦部では若干の差異が観測されるが、本例に見られるような最大観測時間が数十 μ s 程度の雷サージ波形に対しては、周波数変換法による推定結果は入力波形に良好に一致している。

これに対し、最大観測時間を 10 ms 程度とし、単位関数状の電圧をモデル1に印加した場合の入出力波形および

図3 開閉サージ推定結果
Fig. 3. A result for a switching surge.

入力推定結果を図3に示す。出力波形は L_3 と C_2 の共振により、750 Hz程度の正弦波状の振動が観測されるが、推定結果にはこの振動は観測されない。高周波成分が支配的である波頭部の推定精度は高いものの、時間の経過につれて精度が低下することが明らかである。この一因に、CVT等価回路定数すなわち伝送関数 $G(s)$ の精度が考えられる。雷サージと比較して、開閉サージに対しては低周波成分が大なる影響を及ぼすため、図1における C_2 、 L_3 、 R_3 の定数設定には注意を要する。実機において、これらの素子定数はブリッジなどで比較的精度良く測定ができるうえ、図3における出力波形の振動周期および減衰からも容易に求める⁽⁴⁾。後者により求めた定数の精度は波形測定精度に依存するが、デジタルサンプリングを用いた波形測定によれば読取誤差を低減し、十分な精度で定数を求める。しかしながら、回路定数の誤差を極力小としても、図3に示す入力波形とその推定値の差異は依然観測される。周波数変換法によるCVT開閉サージ入力波形推定を実用性の高いものとするためにはこの原因を解明し、推定精度を改善することが必要である。

3. オフセットの補正

〈3・1〉 オフセットの影響 ステップ入力波形推定時の誤差原因を明らかにするため、図1に示す回路の C_1 を $0.22 \mu\text{F}$ とし、 R_3 を可変とした場合（モデル2）について同様に入力推定を行った。 R_3 が小となるに伴い入力推定の精度は悪化し、推定誤差の絶対値はいずれの場合も時間経過に伴って増加することが明らかとなった。例として、 R_3 を 32Ω 、 500Ω とした場合の入力推定結果をそれぞれ図4に示す。

C_2 と L_3 の共振による振動は R_3 が約 190Ω で臨界的となる。 R_3 が大となるにつれて出力波形は振動性から減衰性へと変化し、出力波形に含まれる直流成分は次第に増加する。図4より、出力波形に含まれる直流成分が小となると、推定誤差が増大することが観測される。なお、出力波形を解析的に計算し、これより入力推定を行った場合誤差は観測されず、図3、図4に示す誤差は実測波形を用いたとき特有の現象である。すなわち、出力に含まれる直流成分

図4 R_3 による推定誤差の影響
Fig. 4. Effects of R_3 on estimation error.

図5 オフセット電圧による推定誤差の影響
Fig. 5. Effects of offset voltage on estimation error.

が小である振動性の場合出力信号測定値に混入する直流誤差の相対量が増大するため、推定誤差が大となると推論できる。CVTの変歪誤差補正を高精度に実行するためには、CVT分圧回路内のドレーンコイル抵抗 R_3 を増加させればよい。しかしながら、 R_3 を増加させると C_2 の放電に要する時間が大となるため、 R_3 の上限は制限を受ける。

実測時に混入する直流誤差の主因はオフセットである。何らかの原因で出力波形の大地電圧レベルがずれて記録されていた場合、記録された波形は実際の波形にオフセット分の直流が重畳したものとなる。また、記録に伴う波形の量子化によっても、最小分解能以下の情報が失われるため直流成分に同様な誤差を生じる。

オフセットが入力推定結果に与える影響を検討するため、コンピュータ上で入力推定のシミュレーションを行った。図2に示す回路に振幅5Vを有する単位関数電圧を入力したときの出力波形を解析的に計算し、オフセットの影響を調査するため直流成分を種々加えて入力波形を推定する。この結果を図5に示す。同図より、オフセットによる推定誤差は波頭部において小であり、平坦部で大となる傾向を有する。この結果より、最大観測時間が大なる場合の入力推定誤差の一因はオフセットであることが明らかとなった。

また、時刻6msにおける推定誤差とオフセット値との関係を図6に示す。同図より推定誤差はオフセット値とほ

図 6 誤差-オフセット電圧特性
Fig. 6. Error vs. offset voltage characteristics.

は比例関係にある。この理由は以下のように説明できる。

出力信号 $v_{out}(t)$ にオフセット ε が加わったとするとその周波数応答も以下のように変化する。

$$v_{out}'(t) = v_{out}(t) + \varepsilon \quad (5)$$

$$V_{out}'(s) = V_{out}(s) + \varepsilon/s \quad (6)$$

ここで、 $V_{out}'(t)$ ：オフセットを付加した出力信号、 $V_{out}'(s)$ ： $v_{out}'(t)$ の周波数応答

この出力信号より (3) 式を用いて入力推定を行うと以下となる。

$$\begin{aligned} V_{est}(s) &= G(s) V_{out}'(s) \\ &= G(s) \{ V_{out}(s) + \varepsilon/s \} \\ &= V_{in}(s) + \varepsilon G(s)/s \\ &= V_i(s) + \varepsilon H(s) \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{est}(t) &= v_{in}(t) + \varepsilon \mathcal{L}^{-1} H(s) \\ &= v_{in}(t) + \varepsilon h(t) \quad (8) \end{aligned}$$

ここで、 $H(s)$ ：伝送関数の単位関数応答

(8) 式の第 2 項はオフセットに起因する推定誤差を表している。すなわち、ラプラス変換の線形性より推定誤差はオフセットに比例することがわかる。また、特に図 1 に示す回路の場合、漂遊インダクタンスおよび微小抵抗を無視すると、 $H(s)$ の時間応答 $h(t)$ は以下となる。

$$\begin{aligned} h(t) &= (C_1 + C_2)/C_1 - L_3/C_1 R_3^2 + t/C_1 R_3 \\ &\quad + (L_3/C_1 R_3^2) \exp(-R_3 t/L_3) \quad (9) \end{aligned}$$

(9) 式は時間に比例する項と指数的に減衰する項を有する。従って、十分に時間が経過すれば前項が支配的となり、オフセットによる誤差は時間の増大とともに増加することが明らかである。更に C_1, R_3 が増大すれば、この誤差が小となることも容易に知られる。これらの誤差特性は図 5 に見られる特性と一致している。

〈3・2〉 オフセット補正 前節での検討により、出力信号のオフセットが入力推定結果に与える影響が明らかとなった。次に問題となるのは、出力に含まれるオフセットの値を推定する手法である。オフセットの値が推定できれば、その値を出力信号から差し引くことによって精度の高い入力推定を実行し得る。

オフセットの補正は、入力信号に何の制約条件も含まない一般の場合には極めて困難である。しかし、推定対象を

図 7 オフセット補正フロー図
Fig. 7. A flowchart of the proposed offset correction method.

図 8 オフセット補正を施した入力推定波形

Fig. 8. An estimated input waveform applying the offset correction method.

電力系統のサージ電圧波形に限定すれば、その入力波形が有すると考えられる条件を仮定することによりオフセットを補正することが可能である。サージ現象は十分に時間が経過すれば零に収束するため、観測時間後半の入力値は容易に求め得る。オフセット ε を含む CVT 出力信号を $v_{out}(t)$ とすると (7), (8) 式により誤差を含む推定結果 $v_{est}(t)$ が得られる。ある時刻 $t = t_x$ における入力 $v_{in}(t_x)$ が明らかである場合、 ε は (8) 式より求めうる。

$$\varepsilon = \{v_{est}(t_x) - v_{in}(t_x)\} / h(t_x) \quad (10)$$

すなわち、オフセット誤差を消去した入力推定値 $v_{est}'(t)$ は (8), (10) 式より次式で与えられる。

$$\begin{aligned} v_{est}'(t) &= v_{est}(t) - \{v_{est}(t_x) - v_{in}(t_x)\} h(t) / h(t_x) \\ &\quad \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

なお、測定値 $v_{out}'(t)$ に雑音が入混している場合は t_x を複数点与え、(10) 式に示す演算を行い、その平均値により ε を与えればよい。本論文で提案するオフセット補正法のフロー図を図 7 に示す。

図 3 に示す例 (モデル 1) において最大観測時間における入力値 ($=1.21$ V) を仮定し、オフセットを修正して入力波形推定を行った例を図 8 に示す。本例においては (10) 式における t_x を約 8 ms としているため、この時刻近傍における推定精度は高い。時刻 5 ms 近傍で観測される出力電圧波形に雑音のみみられるにもかかわらず、推定結果はオフセット補正を行わない場合 (図 3) に比して誤差を

1/2 程度低減している。これより、本論文で提案するオフセット補正法は、雑音に対しても安定であることが明らかである。

〈3・3〉 周期性定常解を用いたオフセット推定 図 7 に示すように、オフセット補正値を求めるためにある時刻 t_x の真の入力電圧を知る必要がある。入力電圧波形がインパルス状であることが明らかであれば、十分時間が経過した時刻の値が零となることより、 $v_{in}(t_x)=0$ として実行すればよい。しかし、電力系統の電圧測定においては、入力電圧は商用周波数交流電圧が重畳している場合が考えられる。この場合、ある時刻における真の入力電圧を知るとは困難であるが、例えば充電線路に開閉サージが重畳した場合、時間が十分に経過した後の CVT 入力電圧 $v_{in}(t)$ は商用周波数 f_c の振動を有すると考えられる。この周期性を利用すれば、前述の時刻 t_x における入力値 $v_{in}(t_x)$ を与えることなく、自動的にオフセット補正を行うことができる。過渡現象が十分に減衰した時刻を t_x とすると、オフセット誤差を含む CVT 出力電圧により入力を推定した結果は(8)式により得られる。

$$\left. \begin{aligned} v_{est}(t_x) &= v_{in}(t_x) + \varepsilon h(t_x) \\ v_{est}(t_x + T) &= v_{in}(t_x + T) + \varepsilon h(t_x + T) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $T=1/f_c$

入力波形の周期性を仮定すれば(12)各式の差よりオフセット ε が得られる。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \{v_{est}(t_x) - v_{est}(t_x + T)\} / \{h(t_x) - h(t_x + T)\} \\ \therefore v_{in}(t_x) &= v_{in}(t_x + T) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

図 9 に送電線を L 型等価回路 2 段で表現した CVT を含む投入サージモデル回路を示す。図中の L_0 は線路インダクタンスと変圧器漏れインダクタンスを表現する。スイッチを閉じたときの、線路終端に接続した CVT 出力電圧より入力推定を行った結果を図 10 に示す。出力電圧は

図 9 投入サージモデル回路
Fig. 9. An model circuit for switching surge.

図 10 投入サージ推定結果
Fig. 10. Estimated inputs for switching surge.

CVT 内の共振により、高周波の振動が観測される。図において、 V_{est} は本論文で提案したオフセット補正法を適用しなかった場合の推定結果、 V_{est}' は提案法を適用した結果である。図から、オフセット誤差により V_{est} は〈3・1〉節に示すように、発散傾向を示すことが明らかである。本節で提案した周期性を仮定したオフセット補正法により入力推定した結果 V_{est}' は極めて良好に入力波形を表現していることが明らかである。なお、(13)式によるオフセット修正は周期性定常解に収束する場合のみでなく、 T を適当な時間間隔にとることにより、直流定常解に収束する場合にも適用しうる。

4. 結 言

本論文では、安価な分圧器の変歪した出力波形より入力波形を推定する変歪誤差補正の誤差の主因が、測定時に混入するオフセット誤差であることを明らかにした。更に、周波数変換法による変歪誤差補正においてオフセットを修正し、入力推定を高精度に行う手法を開発した。本手法は、これまで困難であった開閉サージなどの比較的低周波成分を有する入力波形推定を可能とし、コンピュータを用いた分圧器変歪誤差補正システムの実用性の向上および適用範囲の拡大に寄与する。更に本手法は、高電圧測定のみならず、多様な分野に応用可能であると考えられる。

最後に、本研究をすすめるにあたり貴重な御助言を賜った関西電力(株)、日新電気(株)の関係者各位および本学雨谷昭弘教授に謝意を表する。

(平成 5 年 6 月 4 日受付)

文 献

- (1) 長岡・松川：「雷サージに対する CVT 分圧応答特性の検討 第 1 報数値ラプラス変換による誤差補正」，平 2 電気関係学会関西支部連大，G4-38
- (2) 政川・長岡・松川：「雷サージに対する CVT 分圧応答特性の検討 第 2 報集中定数回路」，平 2 同上，G4-39
- (3) 政川・長岡・松川：「雷サージに対する CVT 分圧応答特性の検討 第 3 報 Z 変換による変歪誤差補正」，平 3 電気学会全大，No. 1239
- (4) 政川・長岡：「分圧器出力波形変歪誤差補正法に関する一検討」，電気学会電力技術研資，PE-91-49 (平 3)
- (5) 政川・長岡：「開閉サージに対する CVT 入力波形変歪誤差補正法の検討」，平 4 電気学会全大，No. 1203
- (6) 政川・笠松・長岡：「入力波形推定における誤差低減法の検討 第 1 報オフセットの補正法」，平 4 電気関係学会関西支部連大，G4-9
- (7) A. Pappoulis: Signal analysis, p.92 (1977) McGraw-Hill, Inc.
- (8) 瀧：伝送回路学 (第 2 版)，p. 75 (昭 53) 共立出版
- (9) W. H. Chen: Linear network design and synthesis, p. 45 (1964) McGraw-Hill, Inc.
- (10) 長岡・雨谷：「直線近似フーリエ・ラプラス順変換」，第 2 回ソフトウェアコンファレンス (昭 61)
- (11) N. Nagaoka & A. Ametani: "A development of a generalized frequency-domain transient analysis program-FTP", IEEE Trans. PWRD, PWRD-3, 1996 (1988)
- (12) A. Ametani: "The application of the fast Fourier transform to electrical transients phenomena", Int. J. Elect. Eng. Educ., 10, 277 (1973)
- (13) D. J. Wilcox: "Numerical Caplace transformation and Inversion", *ibid.*, 15, 247 (1978)
- (14) W. S. Meyer: EMTTP rule book (1984) B. P. A.

政 川 俊 康 (正員) 1967 年 12 月 23 日生。1991 年 3 月同志社大学工学部電子工学科卒業。1993 年 3 月同志社大学大学院電気工学専攻博士課程前期修了。同年 4 月三菱電機(株)入社。情報システム研究所にて音声合成技術の研究に従事。

長 岡 直 人 (正員) 1957 年 10 月 21 日生。1982 年同志社大学工学部電気工学専攻博士課程前期修了。1985 年 4 月同大学工学部電気工学科助手, 1988 年同講師, 1992 年同助教授, 現在に至る。主として, 電力系統に発生する過渡現象シミュレーションおよび数値計算モデルの開発に従事。IEEE, 電子情報通信学会, 電気設備学会会員。

笠 松 崇 彦 (非会員) 1969 年 3 月 22 日生。1993 年 3 月同志社大学工学部電子工学科卒業。同年 4 月スターネット(株)入社。同社システム技術部にて通信ネットワークに用いる交換機の保守・運用に従事。