二回線直流送電線路の高精度等価回路の一考察

正員 猪野 朋 敦 (神奈川大)

名誉員 上之園 親 佐 (京 都 大)

An Examination of Highly Accurate Equivalent Circuit for Double-Circuits DC Transmission Lines

Tomoatsu Ino, Member (Kanagawa University), Chikasa Uenosono, Honorary Member (Kyoto University, Professor Emeritus)

It is pointed out that frequency dependent effects of some elements of transformation matrix of double circuits transmission line constructed by current eigen-vector formations contradict physical causal relationship. This contradiction may be a substantial factor of error for any expression of a transient program in modal frame.

This paper presents a technique to remove the contradiction and to stabilize the characteristics in low frequency by means of modification of line constant. The technique is effective for double circuits DC transmission lines with neutral lines and make the approximation process by low order transfer function simple.

Effect of the modification is included in equivalent circuits composed of integrated resistance accounted at low frequency and modified distributive line. The transient behaviour of the equivalent circuits are closely similar to these of Fourier transformation.

キーワード：送電線路，不平衡，過渡現象，等価回路

1. ま え が き

表皮効果および大地の影響を考慮した不平衡二回線架空送電線路の過渡現象解析にモード域ベルジェロン法⁽¹⁾を適用し、モード域周波数依存特性（モード伝搬特性、変換行列およびサージアドミタンス）を低次伝達関数で近似する場合、変換行列およびサージアドミタンスの実部ならびに虚部の周波数依存特性と近似特性を一致させるためには、一部要素の伝達関数の根を不安定とする必要のあることが知られている⁽²⁾。著者らは現状の固有ベクトル規格化手法⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁷⁾を用いて二回線直流および交流線路のモード変換行列系の周波数依存特性を詳細に検討した結果、前記に加えて更に周波数の変化に対する実部および虚部の局部的挙動が因果律を満足しない場合のあることを見いだした。

これらの結果は不平衡線路へのモード域ベルジェロン法の適用精度が、線路構成、対象とする周波数範囲あるいは解析時間に依存することを示している。

一方、相領域ベルジェロン⁽³⁾法では上記の問題は観測されておらず⁽⁴⁾、この点で有利であると考えられるが、相領域伝搬特性はモード領域伝搬特性の荷重和となることから、近似が複雑となる。従って、妥当な線路定数の変更で

安定な周波数依存特性が得られ、かつ線路定数変更の精度への影響が等価回路で吸収できれば、モード領域解析法はこの点で有利となる。

著者らは二回線直流線路⁽⁵⁾で、線路定数から極低周波における抵抗成分を除去した変更線路定数を用いてモード解析を実施した結果、変換行列系の周波数依存特性は因果律を満足し、かつ安定となり、また除去した抵抗成分に相当する集中抵抗と上記の変換行列系を用いて構成した分布線路からなる等価回路の過渡現象解析結果は、フーリエ解析による解とよく一致することを見いだした。上記の結果は、変換器の制御を含む直流系統の過渡現象の解析など、低周波域の周波数依存特性をも取り込む必要のある中性線方式二回線直流線路の高精度モデルの作成に有益である。

2. 二回線架空線路の周波数依存特性とそのインパルス応答の性質

不平衡線路のモード域周波数依存特性は、モード電流または電圧変換行列、モードサージアドミタンスおよびモード伝搬特性の各周波数依存特性により表される。モード域ベルジェロン法による数値解析モデルが作成できるためには、これら周波数依存特性が、少なくとも現在までの入力

と過去の応答から現在の応答を決定できる性質，すなわち因果律を満足する必要がある。この条件を満足するか否かは周波数依存特性の実部の挙動のみならず虚部の挙動にも同等に依存する。従来のモード域における取扱いは，変換行列系（モードサージアドミタンスを含む）の周波数依存特性が前記条件を満足するものとし，従って実部特性のみで近似できるとしている⁽⁶⁾。しかし，現状の固有ベクトル構成法⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁷⁾によれば，この条件は必ずしも成立するものではない。

以下，〈2・1〉節では変換行列系の性質について述べ，〈2・2〉節では〈2・1〉節で引き出された変換行列の性質に関する幾つかの疑義について検討する。

〈2・1〉 変換行列系の性質 解析したモデル線路の導体配置を図1に示した。(a)図および(b)図はそれぞれ新山口幹線（電源開発）を参考とした500 kV級二回線交流線路および±650 kV級の中性線付き二回線直流線路⁽⁵⁾である。図2は前記モデル線路について，サージアドミタンスを単位実定数と置く固有ベクトル規格化法⁽⁷⁾による変換行列の周波数依存特性を示している。フーリエ変換の知識から，図2(a)で示す[3,2]要素は10 Hzから100 kHz付近での実部の変化に虚部の極性が対応していないこと，また，[1,5]要素では100 Hz付近の実部の変化に虚部の

変化が伴わないため，これら要素は因果律を満足しないことが予想される。同様の状態は(b)図に示す直流線路[3,5]要素の0.1 Hzから5 Hz付近でも観測される。これを陽に示すためにはフーリエ解析を行えばよい。

$$T_{ij}(\omega) = \sum \{K_m / (1 + j\omega T_{dm})\} + C \dots\dots\dots (1a)$$

$$T_{ij}(\omega) = G(\omega) + C_0 \dots\dots\dots (1b)$$

いま，周波数特性が(1a)式で近似できるものとする，そのインパルス応答は同程度の直流利得(K_m)をもつ項のうち，時定数(T_{dm})の大きい項は小さい項に埋もれる。従って，目的とする周波数領域でのインパルス応答の性質を調べるためには，(1b)式の $G(\omega)$ が上限周波数付近で十分減衰するよう定数 C_0 を選んだ後，更に $G(\omega)$ について窓関数 $\delta(\omega_0)$ を掛けて上限周波数(ω_0)以上を十分減衰させ，フーリエ解析を実施すればよい。

図3(a)，(b)は，それぞれ，図2(a)に示した交流線路の場合の[3,2]および[1,5]要素のインパルス応答を示し

図1 モデル二回線線路の導体配置

Fig. 1. Spacing of line conductors and other dimensions of model double circuits transmission lines.

図2 変換行列の周波数依存特性

Fig. 2. Frequency dependent effects of transformation matrix.

ている。これらのフーリエ解析で評価した周波数は[3,2]要素で100 kHz以下であり、[1,5]要素で1 kHz以下である。図中で上段は正の、下段は負の時間に対する応答を示しており、[3,2]要素では負の時間に対する応答が支配的である。また、[1,5]要素では正および負の時間に対する応答は同等となっている。これらの結果は変換行列の要素の一部は明らかに因果律に違反し、従って、変換行列系の周波数依存特性を数値モデル化する場合の本質的な誤差要因となることを示している。この問題は他のモードでも観測されるが、図2(a)に示したように交流線路の場合には10 kHz付近と比較的高い周波数でも観測されるのに比べ、(b)図に示したように直流線路では比較的低周波域で観測される。

なお、以上と同様の事態は固有ベクトルの要素の一つを単位実定数と置く規格化法⁽¹⁾⁽²⁾における変換行列およびサージアドミタンスでも観測される。

〈2・2〉 変換行列系の性質に関する検討 前節の結果は、(1)固有ベクトルに数値不安定が発生し他の要素との識別が不可となる、いわゆるモードクロスが発生に起因するのではないかと、また、(2)相領域(物理系)で因果律が満足される以上、変換行列系も自律的に因果律を満足するのではないかと疑義が生ずる。これらを単純な線路で検

図3 変換行列要素のインパルス応答
Fig. 3. Impulse response of elements of transformation matrix.

討するため、図1(a)の導体配置から架空地線および第2および第5の導体を除去した二相二回線線路を取り上げる。この構成の線路では第1回線と第2回線は対称であるから、実定数変換行列により互いに相互結合のない第1回路および第2回路に分離でき⁽⁴⁾、個々の回路で取り扱うモード数は2個となる。

図4は前記第2回路の変換行列系に関し、固有ベクトルの要素の一つを単位実定数と置いた場合の変換行列およびサージアドミタンスを示している。前節の議論から、変換行列要素[2,1]および[1,2]、ならびに第1および第2モードサージアドミタンスは10~100 Hz付近で明らかに因果律を満足しない。一方、変換行列の第1列と第2列は明らかに互いに独立、分離されており、これらモード量から第2回路線路アドミタンスとインピーダンスの積を逆構成した場合の誤差は 10^{-12} 程度以下である。従って、疑問(1)のモードクロスは発生していないといえる。また、モード量の周波数連続化手法として本論文で使用した固有ベクト

図4 変換行列系の周波数依存特性
Fig. 4. Frequency dependent effects of transformation matrix and surge admittance.

図 5 相サージアドミタンスとその近似周波数依存特性

Fig. 5. Frequency dependent effects of the phase-surge admittance and its approximation.

ル追跡法は、モードクロスが発生を十分抑制している。

次に、疑問(2)に関し、第2回路相サージアドミタンス(Y_{2ps})と第2回路変換行列(T_{2c})およびモードサージアドミタンス(Y_{2ms})の関係は(2)式で与えられる。

$$Y_{2ps} = T_{2c} Y_{2ms} T_{2c}^t \dots\dots\dots (2)$$

ここで、実際の相サージアドミタンスは第1および第2回路相サージアドミタンスの実定数結合となるから、(2)式左辺は準物理系であり、因果律を満足する必要がある。(2)式右辺の個々の変換行列およびモードサージアドミタンスが因果律を満足すれば、前記条件は明らかに満足される。次に、図4に示した変換行列およびモードサージアドミタンスを用いて、

$$F(s) = k_c + \sum_i \frac{k_i}{1 + s t_{di}} + \sum_j \frac{k_j \zeta_j \omega_{nj} s}{s^2 + \zeta_j \omega_{nj} s + \omega_{nj}^2} \quad t_{di} > 0, \quad 2 > \zeta_j > 0 \dots\dots\dots (3)$$

(2)式により構成した第2回路相サージアドミタンスを図5に示した(図中の算定特性)。また同図に、(3)式の伝達関数による周波数依存特性近似法⁽⁴⁾による近似結果を示した。算定特性と近似特性はよく一致している。(3)式の伝達関数は因果律を満足するから、従って、相サージアドミタンスは因果律を満足しているといえる。以上から、モード変換行列系の因果律の充足は相領域系(物理系)の因果律の充足の必須条件ではないことが示された。もちろん、固有ベクトルは任意複素定数を含むから、因果律を満足する変換行列系構成法の存在を否定するものではないが、現在、有効な方法は見いだされていない。

3. 線路定数の変更による変換行列の周波数依存特性の変化

前章の解析から、直流線路では比較的低周波域で因果律

(a) 交流線路の場合

(b) 直流線路の場合

実部 ○—○—、虚部 △—△—

図 6 線路定数変更後の変換行列の周波数依存特性

Fig. 6. Frequency dependent effects of transformation matrix with modified line constant.

違反が発生するため、交流線路に比べて長時間の過渡現象解析に耐えられるモード域解析モデルが作成できる。しかし、線路故障の発生から再起動に至る解析を実施するためには、0.5ないし1秒程度までの高精度の解析モデルが必要となる。これを達成するためには、少なくとも0.1ないし1 Hz程度までの前記障害を取り除くことが望ましい。低周波域(数十 Hz以下)におけるこの障害は、元の線路抵抗から直流抵抗値を差し引けば除去できることが数値実験から見いだされた。

図6(a), (b)は図1(a), (b)に示した構成の交流および直流線路で線路抵抗値から0.001 Hzでの抵抗値(表皮効果および大地の影響を考慮して計算した線路抵抗は極低周波数(0.1~0.001 Hz)では直流抵抗に十分漸近し、相互抵抗は自己成分に比べて無視できる程度となる)を差し引いた抵抗値を用いた場合の変換行列の周波数依存特性を示している。所属するモードは異なるが、図中の各要素

図 7 抵抗変更後の変換行列要素のインパルス応答
Fig. 7. Impulse response of an element of transformation matrix with modified line resistance.

の周波数依存特性は、高周波域で図2に示した線路抵抗変更前の要素の特徴に類似している。この高周波域での類似性はすべての要素で観測されるため、線路抵抗の変化により変更前の要素が、高周波域での周波数依存特性が類似な変更後の要素に移行すると考えてよい。従って、交流線路の場合、図2(a)の[1,5]要素は図6(a)の[1,2]要素に移行すると考えられ、10 Hz から 100 Hz 付近の比較的低周波域で観測された因果律違反は解消している。これを陽に示すため、図7に[1,2]要素のフーリエ変換結果を示した。明らかに負の時間に対する応答は無視できる。同様の結果は直流線路でも観測され、図2(b)の[3,5]要素で観測された0.1から5 Hz 付近での因果律違反は解消されている[図6(b)の[3,1]要素参照]。なお、中性線方式500 kV 級および800 kV 級の二回線直流線路、大地帰路方式二回線線路についても、低周波域における因果律違反の解消に対し同様の結果を得ている。

直流二回線線路の場合、変換行列系の因果律違反は比較的低周波域で発生するため、この方法により解消できるが、図6(a)の[3,6]要素で示すように、交流二回線線路の高周波域で発生する因果律違反は解消されない。従って、提案した方法はすべての二回線架空線路に適用できるものではない。図2と図6の比較、特に図2(b)の[3,4]要素と図6(b)の[3,3]要素の比較から、本章で述べた方法は、また低周波域の周波数依存効果を安定化する。従って、周波数依存特性を低次伝達関数で近似する場合⁽²⁾、近似が容易となり、近似精度は向上する。この直流線路の例では、最大値に対する残留誤差の比は0.01から100 kHzの範囲で4%以下であった。

なお、以上の解析で使った線路定数（抵抗、インダクタンスなど）の計算にはEMTP⁽⁸⁾を用いた。

4. 等価回路とその精度の検討

直流線路に対し、前章で得られた分布線路モデルおよび除去した直流抵抗成分に相当する集中抵抗から等価回路が構成できれば、因果律違反による誤差を回避した過渡現象解析モデルが構成できる。従来、分布線路の表現方法とし

図 8 検討した等価回路
Fig. 8. Equivalent circuits for examination.

図 9 モデル回路
Fig. 9. Model circuits.

て、無損失分布線路および集中抵抗からなる等価回路表現がある⁽⁹⁾。この方法では線路抵抗の周波数依存特性を組み込むことは困難である。しかし、この等価回路の無損失分布線路を前章の分布線路に置き換えれば、前記周波数依存性は組み込まれ、従って高精度の等価回路が期待できる。

上記の理由から、図8に示す等価回路を取り上げ検討した。(b)図の等価回路Iは変更線路定数を用いて構成した分布線路（以後、修正分布線路と呼ぶ）の両端に、除去した抵抗成分の1/2に相当する抵抗を接続した回路であり、(c)図の等価回路IIは線路長（375 km）を二分し、両端に1/4、中間に1/2の抵抗を接続した回路である。また、(a)図は修正分布線路を示しており、精度の比較のため取り上げた。

図9に試験を実施したモデル回路を示した。(a)図は電圧応答の検討を主とした回路であり、電源端子を除き、すべて開放端である。開放端では両端に接続される抵抗成分の効果はないから、等価回路に対し最も過酷な試験とな

る。(b)図は電流応答の検討を主とした回路であり、電源端子以外は接地端である。

前記2回路に対し、元の線路のフーリエ解析による時間解と前述した修正分布線路、等価回路IおよびIIにモード域ベルジェロン法を適用したときの時間解を比較した。図中の抵抗はプログラム作成上の便宜のためのものであり、直流抵抗成分(本線: 3.75Ω , 中性線: 7.5Ω)に比べ十分小さい。なお、励振電圧波形は窓関数として周知であり、 f_0 付近以下の周波数を同一のウェイトで評価できる下記(4)式の時間関数および周期パルス(周期: 1秒, デューティ比: 50%)の一部を用いた疑似ステップとした。

$$e(t) = \sin\{2\pi f_0(t - t_0)\} / 2\pi f_0(t - t_0) \\ t_0 = 1/2f_0, \quad (0 < t < 2t_0) \quad \dots\dots\dots (4)$$

図10(a), (b)は図9(a)の回路で、送電端第1相を(4)式に示した電源で励振したときの、受電端第1(R1)および第5相(R5)の電圧波形を励振電圧のピーク値に対する

図10 フーリエ変換と等価回路による電圧波形の比較

Fig.10. Comparison among voltage wave shapes calculated with Fourier transformation and simulated with equivalent circuits M, I and II.

比で示している。図中の A および M, I, II はそれぞれフーリエ変換による厳密時間解および修正分布線路、等価回路 I, II の時間解を示している。(a) 図 $f_0 = 20 \text{ Hz}$ の場合、励振相受電端 (R1 端子) の電圧波形は M, I, II とともに厳密解 A によく一致している。一方、被誘導相 (R5 端子) の電圧波形では、等価回路 II による解は厳密解とよく一致するが、修正分布線路および等価回路 I による解には相当の誤差が残る。(b) 図 $f_0 = 2 \text{ kHz}$ の場合には励振相、被誘導相に関わらず、修正分布線路、等価回路 I および II の解は厳密解によく一致している。

図11(a), (b)はそれぞれ、図9(b)の回路で、送電端第1相を $f_0 = 20 \text{ Hz}$ および 2 kHz で励振したときの受電端第1(R1)および第5相(R5)の電流波形を励振相送電端 (S1 端子) への流入電流のピーク値に対する比で示している。電圧波形の場合と同様に等価回路 II では励振相、被誘導相とともに厳密解とよく一致している。一方、修正分布線路の応答は $f_0 = 2 \text{ kHz}$ では良好であるが、 $f_0 = 20 \text{ Hz}$ では大きな誤差を生成する。等価回路 I では $f_0 = 20 \text{ Hz}$ の場合の誘導電流に若干の誤差が発生している。

図12は図9(a)の回路で送電端第1相に疑似ステップ電圧を印加した場合の受電端第1相および第5相の電圧波形を示している。(a)図は(b)図に示す同一試験結果の時

図11 フーリエ変換と等価回路による電流波形の比較

Fig.11. Comparison among current wave shapes calculated with Fourier transformation and simulated with the equivalent circuits M, I and II.

図 12 疑似ステップ電圧に対する応答電圧波形
Fig. 12. The voltage response wave shapes to the step voltage constructed by the edge part of cyclic pulse.

図 13 ステップ電圧に対する応答電圧波形
Fig. 13. The voltage wave shapes for the step response.

間軸を拡大したものである。図中、S は元の分布線路のフーリエ解析結果を示しており、M、I および II は前記記号と同じである。疑似ステップ電圧の構成に使用した周波数は 3 kHz 未満であり、従って、フーリエ解析結果に

は 3 kHz 以上の元の分布線路の周波数特性は反映されない。一方、同一疑似ステップ入力に対する等価回路の応答には、3 kHz 以上の周波数成分が含まれる。以上を考慮すれば、励振相受電端電圧波形[(a), (b)図の R1 端子電圧]は、元の分布線路のフーリエ解析結果、修正分布線路、等価回路 I および II とともに、相当よく一致しているといえる。一方、被誘導相[(a), (b)図の R5 端子電圧]の電圧波形では時間の経過とともに、フーリエ解析結果ならびに等価回路 II と修正分布線路ならびに等価回路 I の応答に相当の差異が発生する。

次に、等価回路 I および II の長時間解析に対する安定性および定常値の精度を検証するため、前述のモデル回路(a)にステップ電圧を印加したときの応答を検討した。図 13 に受電端電圧波形を示している。同図から、長時間解析における安定性は十分であるといえる。また、検討したモデル回路では線路の線間および大地に対するコンダクタンスは考慮していないため、ステップ応答の最終値は静電分圧で与えられる。等価回路 II のステップ電圧印加後 0.5 秒時点の電圧と静電分圧値は、線間距離最小の R2 端子で 0.26 pu (静電分圧値 0.24 pu)、最大の R6 端子で 0.13 pu (静電分圧値 0.11 pu) となっており、線路の不均衡に基づく誘導電圧の差異をよく表現している。

以上の解析結果から、等価回路 II は誘導をも含めて元の周波数依存特性を精度良く維持しているといえる。また、修正分布線路は、その構成からの当然の帰結であるが、低周波域の応答に難点があり、等価回路 I では低周波域の誘導に対する精度に難点が残るといえる。しかし、等価回路 I は励振相の応答に対する精度は十分であるから、励振相の解析が主体となる場合、等価回路 II に比べて計算時間の点で有利となる。

なお、受電端第 1 相にステップ電圧を印加した場合の同相受電端の最大過電圧は等価回路 I および II で 1.94 pu であった。

5. ま と め

二回線架空線路の過渡現象解析にモード域ベルジェロン法を適用する場合、現状の固有ベクトル構成法に基づく変換行列系の一部は必ずしも因果律を満足するものではなく、従ってこれが変換行列系の周波数依存特性を表現する場合の本質的な誤差要因となることを明らかにした。また、中性線方式二回線直流線路における前記障害を除去する方法について述べた。この方法に関し以下がいえる。

- (1) 線路抵抗から極低周波数での抵抗を除去すれば変換行列系の周波数依存特性は因果律を満足する。
- (2) 周波数依存特性の低周波域の安定性が増し、近似が容易となる。
- (3) (1)に基づいて構成された等価回路 II の解は厳密解とよく一致する。

なお、二回線交流線路においては、モード領域の取扱いに変換行列系周波数依存特性の虚部の表現が困難であり、

従って高精度の解析のためには、相領域での解析が推奨される。

終りに、本論文が将来の長距離送電線路の解析の一助となれば幸いである。

(平成5年7月14日受付, 同5年12月13日再受付)

文 献

- (1) L. Marti: "Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices", *IEEE Trans Power Delivery*, 3, 1099 (1988)
- (2) 猪野: 「二回線直流送電線路における周波数依存効果の高精度表現法」, 電学論 B, 110, 395 (平2-5)
- (3) H. Nakanishi & A. Ametani: "Transient calculation of a transmission line using superposition law", *IEE Proc.*, 133, Pt. C, 263 (1986)
- (4) 猪野: 「不平衡送電線路における周波数依存特性の一近似手法」, 電学論 B, 113, 1446 (平5-12)
- (5) UHV 送電特別委員会報告書 (昭60-5)
- (6) A. Dabuleanu & A. Semlyen: "Modelling of transposition and double circuit transmission lines in switching surge calculation", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-94, No. 2, 242 (1975)
- (7) 猪野: 「不平衡線路における周波数依存効果の新表現」, 電学論 B, 109, 337 (平元-7)
- (8) EMTP RULE BOOK, Bonneville Power Administration, April (1982)
- (9) H. W. Dommel: "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transient in Single and Multi phase Networks", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-88, No. 4, 388 (1969)

猪 野 朋 敦

(正員) 1943年7月8日生。1968年3月神奈川大学工学部電気工学科卒業。1970年3月同大学大学院電気工学専攻修士課程修了同年4月同大学電気工学科勤務, 現在に至る。この間, 1982年7月より1年間カナダ・マニトバ大学電気工学科およびマニトバ HVDC 研究センターに在籍。主として, 交直連係系統の制御保護の研究に従事。

上之國 親 佐

(名誉員) 1919年3月27日生。1943年9月京都帝国大学工学部電気工学科卒業。同年10月満州電業(株)入社。1947年7月東京商工局。同年12月日本発送電(株)入社。電力再編成で(財)電力中央研究所技術研究所勤務。1964年4月同所電力第2部長兼塩原試験場長。1967年1月京都大学工学部教授。1982年4月同名誉教授, 関西電力(株)顧問, 摂南大学教授(1990年3月退職), 現在に至る。その間, 電力系統の計画, 運用, 系統絶縁設計, 同期機の定態および動的特性, 高電圧工学などに属する研究に従事。工学博士。日本学術会議会員(12,13,14期, 第5部), 1991年, 文部省核融合科学研究所評議員。1979年度電気学会会長。1956, 1976年電気学会論文賞, 1962, 1968年同進歩賞, 1964年同電力賞, 1981年同功労賞, 1966 科学技術庁長官賞受賞。