

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2009-134683

(P2009-134683A)

(43) 公開日 平成21年6月18日(2009.6.18)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
G06F 17/50 (2006.01)	G06F 17/50 662G	5B046
H03H 5/00 (2006.01)	H03H 5/00	5J024
H03H 7/00 (2006.01)	H03H 7/00	

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号	特願2008-49169 (P2008-49169)	(71) 出願人	503027931 学校法人同志社
(22) 出願日	平成20年2月29日 (2008. 2. 29)		京都府京都市上京区今出川通烏丸東入玄武町601
(31) 優先権主張番号	特願2007-282612 (P2007-282612)	(74) 代理人	110000475 特許業務法人みのり特許事務所
(32) 優先日	平成19年10月31日 (2007. 10. 31)	(72) 発明者	加藤 利次 京都府京田辺市多々羅都谷1-3 同志社大学内
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(72) 発明者	井上 馨 京都府京田辺市多々羅都谷1-3 同志社大学内
		Fターム(参考)	5B046 AA08 BA03 5J024 AA01 DA01 DA25

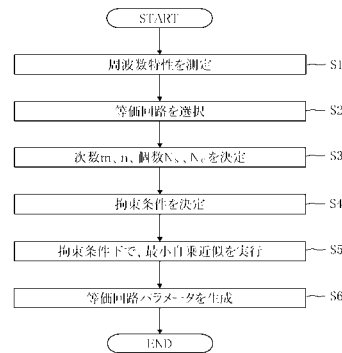
(54) 【発明の名称】 等価回路パラメータ生成装置、並びに生成方法

(57) 【要約】

【課題】測定によって得られた周波数特性を集中定数素子からなる等価回路に高精度に近似合成することができ、しかも、当該回路全体としての受動性が保証される等価回路パラメータ生成方法を提供する。

【解決手段】本発明に係る第1の等価回路パラメータ生成方法は、留数kを含んだ形式に近似された測定対象物の周波数特性と、留数kからなる等価回路パラメータを有する等価回路とを準備し(ステップS1~S3)、最小自乗近似を用いて周波数特性の留数kを算出することにより、測定対象物の周波数特性に近似した周波数特性を有する等価回路の前記等価回路パラメータを生成する方法であって、最小自乗近似を行う前に、等価回路パラメータが負とならないような留数kに関する第1の拘束条件を決定し(ステップS4)、当該第1の拘束条件下で最小自乗近似を行う(ステップS5)。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

留数 k を含んだ形式に近似された測定対象物の周波数特性と、前記留数 k からなる等価回路パラメータを有する等価回路とを準備し、最小自乗近似を用いて前記周波数特性の留数 k を算出することにより、前記測定対象物の周波数特性に近似した周波数特性を有する等価回路の前記等価回路パラメータを生成する方法であって、

前記最小自乗近似を行う前に、

前記等価回路パラメータが負とならないような留数 k に関する第 1 の拘束条件を決定し、当該第 1 の拘束条件下で前記最小自乗近似を行って留数 k を算出することを特徴とする生成方法。

10

【請求項 2】

測定対象物の周波数特性を、留数 k からなる等価回路パラメータを有する等価回路で近似するための等価回路パラメータ生成装置であって、

前記測定対象物の周波数特性を測定するとともに、測定された前記周波数特性を前記留数 k を含んだ形式に近似する測定部と、

適宜必要な情報の入力を受け付ける入力部と、

前記入力部から入力された等価回路選択データに基づいて選択された前記等価回路の前記等価回路パラメータが負とならないような前記留数 k に関する第 1 の拘束条件を決定する拘束条件決定部と、

前記測定部から前記留数 k を含む前記周波数特性に関するデータを受け取るとともに、前記拘束条件決定部から前記第 1 の拘束条件を受け取り、前記第 1 の拘束条件下で前記周波数特性の最小自乗近似を行って前記留数 k を算出し、算出された前記留数 k に基づいて前記等価回路パラメータを生成する演算部と、

20

を備えたことを特徴とする等価回路パラメータ生成装置。

【請求項 3】

測定対象物を所定の周波数範囲内で測定し、 N 個の測定周波数特性値 $X(s_i)$ (ただし、 $i = 1, 2 \dots N$) からなる周波数特性を得て、当該周波数特性を留数 k を含んだ形式に近似するとともに、前記留数 k からなる等価回路パラメータを有する等価回路を準備し、(数 1) 式から (数 3) 式を用いた最小自乗近似を行って前記留数 k を算出することにより、前記測定対象物の周波数特性に近似した周波数特性を有する等価回路の前記等価回路パラメータを生成する方法であって、

30

【数 1】

$$\min_k \|A^c k - x^c\|_2^2$$

【数 2】

$$A_i^c = [1 \quad s_i \quad a_1^s(s_i) \cdots a_{N_s}^s(s_i) \quad a_1^r(s_i) \quad a_1^i(s_i) \cdots a_{N_c}^r(s_i) \quad a_{N_c}^i(s_i)]$$

$$a_l^s(s_i) = \frac{1}{s_i - p_l^s} \quad (l = 1, 2 \cdots N_s)$$

40

$$a_l^r(s_i) = \frac{1}{s_i - p_l^c} + \frac{1}{s_i - \bar{p}_l^c}, \quad a_l^i(s_i) = \frac{j}{s_i - p_l^c} - \frac{j}{s_i - \bar{p}_l^c} \quad (l = 1, 2 \cdots N_c)$$

【数 3】

$$x^c = [X(s_1) \quad X(s_2) \cdots X(s_N)]^T$$

$$k = [k_0 \quad k_\infty \quad k_1^s \cdots k_{N_s}^s \quad k_1^r \quad k_1^i \cdots k_{N_c}^r \quad k_{N_c}^i]^T$$

(ただし、 A^c : 留数ベクトル k の係数行列、 A_i^c : 係数行列 A^c の i 行成分、 $i = 1, 2 \dots N$ 、 $s_i = j \omega_i$ (ただし、 ω_i : サンプル周波数、 $j = \sqrt{-1}$))

50

、 N_c : 任意個数、 N_s : 任意個数)

前記最小自乗近似を行う前に、(数4)式で表される、前記所定の周波数範囲内についての第2の拘束条件を決定し、

【数4】

$$A^r k > 0$$

(ただし、 A^r : 係数行列 A^c の実数部)

前記第2の拘束条件下で前記最小自乗近似を行い、留数 k を算出することを特徴とする生成方法。

【請求項4】

前記所定の周波数範囲外の任意の周波数についての第3の拘束条件を決定し、前記第2及び第3の拘束条件の下で前記最小自乗近似を行い、留数 k を算出することを特徴とする請求項3に記載の生成方法。

【請求項5】

請求項3または4に記載の方法を用いて決定される前記第2の拘束条件、または前記第2及び第3の拘束条件からなる拘束条件を用いて、測定対象物の周波数特性を、留数 k からなる等価回路パラメータを有する等価回路で近似するための等価回路パラメータ生成装置であって、

前記測定対象物の周波数特性を測定するとともに、測定された周波数特性を前記留数 k を含んだ形式に近似する測定部と、

前記留数 k に関する前記拘束条件を決定する拘束条件決定部と、

前記測定部から前記留数 k を含む前記周波数特性に関するデータを受け取るとともに、前記拘束条件決定部から前記拘束条件を受け取り、前記拘束条件下で前記周波数特性の最小自乗近似を行って前記留数 k を算出し、算出された前記留数 k に基づいて前記等価回路の前記等価回路パラメータを生成する演算部と、
を備えたことを特徴とする等価回路パラメータ生成装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、測定によって得られた周波数特性を、集中定数素子からなる等価回路に近似合成するための等価回路パラメータ生成装置、並びに生成方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、パワーエレクトロニクス分野では、システムの高周波化に伴ってEMIが大きな問題となっている。EMIは、他の電子機器に誤動作等の悪影響を及ぼすおそれがあることから、適切な対策を施すことが求められている。また、コンピュータシミュレーションによってEMI対策を検討する場合には、等価回路を構成する個々の素子の素子値(以下、「等価回路パラメータ」)をどのようにして生成し、集中定数素子からなる等価回路に近似(モデリング)するかが問題となる。

同様に、LSI分野においても、動作周波数の上昇に伴って、素子間配線による信号伝播遅延、素子間配線同士の干渉等の問題が顕在化してきている。これらのメカニズムを解析し、適切な対策を施すためにも、素子間配線のモデリングは非常に重要である。

【0003】

従来の等価回路パラメータ生成方法としては、最小自乗近似を利用した方法が知られている。この従来の生成方法では、まず、モデリングしたい測定対象物の N 点の周波数特性 $X(s)$ をインピーダンスメータ等の測定器で測定する。得られた周波数特性は、分数多項式で表現された測定周波数特性 $X^{\wedge}(s)$ で近似することができる。なお、表記 " X^{\wedge} " は、 X の上にハット記号 " \wedge " が付されていることを意味する。

10

20

30

40

【数 1】

$$\hat{X}(s_i) = \frac{b_0 + b_1 s_i + \dots + b_m s_i^m}{1 + a_1 s_i + \dots + a_n s_i^n} \quad \dots (1)$$

ここで、 m 及び n は、モデリングしたい周波数特性の複雑さに応じて任意に決定することができる次数である。また、 $i = 1, 2, \dots, N$ 、 $s_i = j\omega_i$ (ただし、 ω_i : サンプル周波数、 $j = (-1)^i$) である。

(1) 式を展開して、部分分数で表現すると次式となる。

【数 2】

$$\hat{X}_g(s_i) = k_0 + k_\infty s_i + \sum_{l=1}^{N_s} \frac{k_l^s}{s_i - p_l^s} + \sum_{l=1}^{N_c} \left(\frac{k_l^c}{s_i - p_l^c} + \frac{\bar{k}_l^c}{s_i - \bar{p}_l^c} \right) \quad \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} p_l^c &= p_l^r + jp_l^i, & \bar{p}_l^c &= p_l^r - jp_l^i \\ k_l^c &= k_l^r + jk_l^i, & \bar{k}_l^c &= k_l^r - jk_l^i \end{aligned} \right\}$$

ここで、 N_c 及び N_s は、必要とされるモデリング精度等に応じて、任意に決定することができる個数である。

【0004】

(2) 式に含まれる $(2 + N_s + 2N_c)$ 個の留数 k は、次式によって最小自乗近似することにより、算出される。

【数 3】

$$\min_k \|A^c k - x^c\|_2^2 \quad \dots (3)$$

ここで、行列 A^c は留数ベクトル k の係数行列であり、その i 行成分は、

【数 4】

$$A_i^c = \left[1 \quad s_i \quad a_1^s(s_i) \dots a_{N_s}^s(s_i) \quad a_1^r(s_i) \quad a_1^i(s_i) \dots a_{N_c}^r(s_i) \quad a_{N_c}^i(s_i) \right]$$

$$a_l^s(s_i) = \frac{1}{s_i - p_l^s} \quad (l=1, 2, \dots, N_s) \quad \dots (4)$$

$$a_l^r(s_i) = \frac{1}{s_i - p_l^c} + \frac{1}{s_i - \bar{p}_l^c}, \quad a_l^i(s_i) = \frac{j}{s_i - p_l^c} - \frac{j}{s_i - \bar{p}_l^c} \quad (l=1, 2, \dots, N_c)$$

である。

また、(3) 式において、測定周波数特性値ベクトル x^c 及び留数ベクトル k は、

【数 5】

$$x^c = [X(s_1) \quad X(s_2) \dots X(s_N)]^T \quad \dots (5)$$

$$k = [k_0 \quad k_\infty \quad k_1^s \dots k_{N_s}^s \quad k_1^r \quad k_1^i \dots k_{N_c}^r \quad k_{N_c}^i]^T \quad \dots (6)$$

である。

ここで、(5) 式の " N " は、測定サンプル数である。また、 $X(s_N)$ は測定によって得られた N 番目のサンプル周波数における測定周波数特性値である。

【0005】

続いて、回路合成が行われる。モデリングしたい周波数特性がインピーダンスの場合、

10

20

30

40

50

(3) ~ (6) 式によって得られた $(2 + N_s + 2N_c)$ 個の留数は、図 1 及び次式で表される等価回路 (Foster の第 1 回路) に合成される。

【数 6】

$$Z(s) = R_0 + sL_\infty + \sum_{l=1}^{N_s} \frac{1}{C_l^s s + G_l^s} + \sum_{l=1}^{N_c} \frac{1}{C_l^c s + G_l^c + \frac{1}{L_l^c s + R_l^c}} \quad \dots (7)$$

ここで、図 1 に示す等価回路の等価回路パラメータは、次式によって表される。

【数 7】

$$R_0 = k_0, \quad L_\infty = k_\infty \quad \dots (8)$$

$$C_l^s = \frac{1}{k_l^s}, \quad G_l^s = -\frac{p_l^s}{k_l^s} \quad (l=1,2,\dots,N_s) \quad \dots (9)$$

$$\left. \begin{aligned} C_l^c &= \frac{1}{2k_l^r}, \quad G_l^c = \frac{-p_l^r k_l^r + p_l^i k_l^i}{2k_l^{r2}} \\ L_l^c &= \frac{2k_l^{r3}}{(k_l^{r2} + k_l^{i2})p_l^{i2}}, \quad R_l^c = \frac{-2k_l^{r2}(p_l^r k_l^r + p_l^i k_l^i)}{(k_l^{r2} + k_l^{i2})p_l^{i2}} \end{aligned} \right\} (l=1,2,\dots,N_c) \quad \dots (10)$$

なお、 R_0 と L_∞ は省略することもできる。

【0006】

一方、モデリングしたい周波数特性がアドミタンスの場合、(3) ~ (6) 式によって得られた $(2 + N_s + 2N_c)$ 個の留数は、図 2 及び次式で表される等価回路 (Foster の第 2 回路) に合成される。

【数 8】

$$Y(s) = G_0 + sC_\infty + \sum_{l=1}^{N_s} \frac{1}{L_l^s s + R_l^s} + \sum_{l=1}^{N_c} \frac{1}{L_l^c s + R_l^c + \frac{1}{C_l^c s + G_l^c}} \quad \dots (11)$$

ここで、図 2 に示す等価回路の等価回路パラメータは、次式によって表される。

【数 9】

$$G_0 = k_0, \quad C_\infty = k_\infty \quad \dots (12)$$

$$L_l^s = \frac{1}{k_l^s}, \quad R_l^s = -\frac{p_l^s}{k_l^s} \quad (l=1,2,\dots,N_s) \quad \dots (13)$$

$$\left. \begin{aligned} L_l^c &= \frac{1}{2k_l^r}, \quad R_l^c = \frac{-p_l^r k_l^r + p_l^i k_l^i}{2k_l^{r2}} \\ C_l^c &= \frac{2k_l^{r3}}{(k_l^{r2} + k_l^{i2})p_l^{i2}}, \quad G_l^c = \frac{-2k_l^{r2}(p_l^r k_l^r + p_l^i k_l^i)}{(k_l^{r2} + k_l^{i2})p_l^{i2}} \end{aligned} \right\} (l=1,2,\dots,N_c) \quad \dots (14)$$

なお、 G_0 と C_∞ は省略することもできる。

【0007】

ところが、上記した従来の等価回路パラメータ生成方法では、最終的に得られる等価回

10

20

30

40

50

路パラメータ（（８）～（１０）式、（１２）～（１４）式参照）が負の値を示す場合があった。

本来、Fosterの第１回路（図１参照）及び第２回路（図２参照）は受動性を有する集中定数素子からなり、回路全体としても受動性を示すべきものがある。しかしながら、回路の一部に負の素子値を有する集中定数素子が含まれると、当該回路は局所的に受動性を有していないことになり、回路全体としても受動性を有さない可能性がある。

したがって、従来の等価回路パラメータ生成方法で得られた等価回路の周波数特性は、現実の測定対象物と大きくかけ離れた周波数特性となる場合があった。また、当該回路を用いたシミュレーションは不安定になる場合があり、信頼性が問題となっていた。

【０００８】

上記問題の解決を試みた等価回路パラメータ生成方法として、非特許文献１に係る方法がある。

この方法では、最小自乗近似によって得られた等価回路パラメータのうち、負となった素子の素子値を強制的に“０”にすることにより、等価回路の受動性を確保している。しかしながら、この方法によって得られた等価回路は、勝手に値が変更された集中定数素子が含まれることになるので、周波数特性のモデリングの精度が問題となっていた。

【非特許文献１】J. Morsey and A.C. Cangellaris, “PRIME: passive realization of interconnect models from measured data”, IEEE Electrical Performance of Electronic Packaging, 2001, pp.47-50

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【０００９】

そこで、本発明は、測定によって得られた周波数特性を集中定数素子からなる等価回路に高精度に近似合成することができ、しかも、当該等価回路全体としての受動性が保証される等価回路パラメータ生成装置、並びに生成方法を提供することを課題とする。

【課題を解決するための手段】

【００１０】

本発明者等は、上記課題を解決するために鋭意検討を重ねた結果、最小自乗近似を行う前に、（１）各等価回路パラメータが負となることを禁止し、局所的に見ても全体として見ても等価回路の受動性が確保されるような拘束条件、または（２）個々の等価回路パラメータが負となることは許容しつつ、等価回路全体としての受動性が確保されるような拘束条件を決定し、その条件下で最小自乗近似を行うことを見出し、本発明を完成させた。

【００１１】

すなわち、本発明に係る第１の等価回路パラメータ生成方法は、留数 k を含んだ形式に近似された測定対象物の周波数特性と、前記留数 k からなる等価回路パラメータを有する等価回路とを準備し、最小自乗近似を用いて前記周波数特性の留数 k を算出することにより、前記測定対象物の周波数特性に近似した周波数特性を有する等価回路の前記等価回路パラメータを生成する方法であって、前記最小自乗近似を行う前に、前記等価回路パラメータが負とならないような留数 k に関する第１の拘束条件を決定し、当該第１の拘束条件下で前記最小自乗近似を行って留数 k を算出することを特徴とする。

【００１２】

また、本発明に係る第１の等価回路パラメータ生成装置は、測定対象物の周波数特性を、留数 k からなる等価回路パラメータを有する等価回路で近似するための等価回路パラメータ生成装置であって、前記測定対象物の周波数特性を測定するとともに、測定された前記周波数特性を前記留数 k を含んだ形式に近似する測定部と、適宜必要な情報の入力を受け付ける入力部と、前記入力部から入力された等価回路選択データに基づいて選択された前記等価回路の前記等価回路パラメータが負とならないような前記留数 k に関する第１の拘束条件を決定する拘束条件決定部と、前記測定部から前記留数 k を含む前記周波数特性に関するデータを受け取るとともに、前記拘束条件決定部から前記第１の拘束条件を受け取り、前記第１の拘束条件下で前記周波数特性の最小自乗近似を行って前記留数 k を算出

10

20

30

40

50

し、算出された前記留数 k に基づいて前記等価回路パラメータを生成する演算部と、を備えたことを特徴とする。

【0013】

また、本発明に係る第2の等価回路パラメータ生成方法は、測定対象物を所定の周波数範囲で測定し、 N 個の測定周波数特性値 $X(s_i)$ (ただし、 $i = 1, 2 \dots N$) からなる周波数特性を得て、当該周波数特性を留数 k を含んだ形式に近似するとともに、前記留数 k からなる等価回路パラメータを有する等価回路を準備し、(数10)式から(数12)式を用いた最小自乗近似を行って前記留数 k を算出することにより、前記測定対象物の周波数特性に近似した周波数特性を有する等価回路の前記等価回路パラメータを生成する方法であって、

10

【数10】

$$\min_k \|A^c k - x^c\|_2^2$$

【数11】

$$A_i^c = [1 \quad s_i \quad a_1^s(s_i) \cdots a_{N_s}^s(s_i) \quad a_1^r(s_i) \quad a_1^i(s_i) \cdots a_{N_c}^r(s_i) \quad a_{N_c}^i(s_i)]$$

$$a_l^s(s_i) = \frac{1}{s_i - p_l^s} \quad (l = 1, 2 \cdots N_s)$$

$$a_l^r(s_i) = \frac{1}{s_i - p_l^c} + \frac{1}{s_i - \bar{p}_l^c}, \quad a_l^i(s_i) = \frac{j}{s_i - p_l^c} - \frac{j}{s_i - \bar{p}_l^c} \quad (l = 1, 2 \cdots N_c)$$

20

【数12】

$$x^c = [X(s_1) \quad X(s_2) \cdots X(s_N)]^T$$

$$k = [k_0 \quad k_\infty \quad k_1^s \cdots k_{N_s}^s \quad k_1^r \quad k_1^i \cdots k_{N_c}^r \quad k_{N_c}^i]^T$$

(ただし、 A^c : 留数ベクトル k の係数行列、 A_i^c : 係数行列 A^c の i 行成分、 $i = 1, 2 \dots N$ 、 $s_i = j\omega$ (ただし、 f_i : サンプル周波数、 $j = (-1)$)、 N_c : 任意個数、 N_s : 任意個数)

30

前記最小自乗近似を行う前に、(数13)式で表される、前記所定の周波数範囲内についての第2の拘束条件を決定し、

【数13】

$$A^r k > 0$$

(ただし、 A^r : 係数行列 A^c の実数部)

前記第2の拘束条件下で前記最小自乗近似を行い、留数 k を算出することを特徴とする。

【0014】

上記第2の等価回路パラメータ生成方法は、好ましくは、前記所定の周波数範囲外の任意の周波数についての第3の拘束条件を決定し、前記第2及び第3の拘束条件の下で前記最小自乗近似を行い、留数 k を算出することを特徴とする。

40

【0015】

また、本発明に係る第2の等価回路パラメータ生成装置は、上記第2の等価回路パラメータ生成方法を用いて決定される前記第2の拘束条件、または前記第2及び第3の拘束条件からなる拘束条件を用いて、測定対象物の周波数特性を、留数 k からなる等価回路パラメータを有する等価回路で近似するための等価回路パラメータ生成装置であって、前記測定対象物の周波数特性を測定するとともに、測定された周波数特性を前記留数 k を含んだ形式に近似する測定部と、前記留数 k に関する前記拘束条件を決定する拘束条件決定部と、前記測定部から前記留数 k を含む前記周波数特性に関するデータを受け取るとともに、前記拘束条件決定部から前記拘束条件を受け取り、前記拘束条件下で前記周波数特性の最

50

小自乗近似を行って前記留数 k を算出し、算出された前記留数 k に基づいて前記等価回路の前記等価回路パラメータを生成する演算部と、を備えたことを特徴とする。

【発明の効果】

【0016】

本発明に係る等価回路パラメータ生成装置、及び生成方法によれば、測定によって得られた周波数特性を集中定数素子からなる等価回路に近似合成するにあたり、事前に、(1)各等価回路パラメータが負となることを禁止し、局所的に見ても全体として見ても等価回路の受動性が確保されるような第1の拘束条件、または(2)個々の等価回路パラメータが負となることは許容しつつ、等価回路全体としての受動性が確保されるような第2の拘束条件を算出しておき、いずれかの条件下で最小自乗近似を行うことによって、少なく

10

とも回路全体としての受動性を確保しつつ、高精度に当該周波数特性を再現する等価回路を得ることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0017】

[第1の等価回路パラメータ生成方法]

以下、添付図面を参照して、本発明に係る第1の等価回路パラメータ生成方法について説明する。本方法では、各等価回路パラメータが負となることを禁止することにより、局所的に見ても全体として見ても等価回路の受動性が確保されるような拘束条件が決定される。

【0018】

具体的には、本生成方法において、等価回路パラメータは図3に示すようなフローで生成される。すなわち、本生成方法では、はじめに、モデリングしたい測定対象物の周波数特性をインピーダンスメータ等の測定器で測定し(図3のステップS1)、使用する等価回路を選択し(ステップS2)、当該周波数特性に応じて次数 m 、 n 、及び個数 N_c 、 N_s を決定する(ステップS3)。等価回路は、例えば、一般的な等価回路であるFosterの第1回路(図1参照)、及びFosterの第2回路(図2参照)等から選択される。なお、等価回路の選択(ステップS2)は、ステップS1の前、またはステップS3とS4の間に行ってもよい。

20

【0019】

続いて、本生成方法では、最小自乗近似を実行する前に、各素子の素子値が負とならないような拘束条件を決定する(ステップS4)。そして、その拘束条件下で、(3)式による最小自乗近似を行う(ステップS5)。なお、ステップS5は、公知の数値解析ソフトウェアを用いることで容易に行うことができる。

30

【0020】

例えば、モデリングしたい測定対象物の周波数特性がインピーダンスの場合、ステップS3において、図1に示すFosterの第1回路が等価回路として選択される。

この等価回路において、 R_0 、 L が負とならない条件は、(8)式より、

【数14】

$$k_0 \geq 0, \quad k_\infty \geq 0 \quad \dots (15)$$

40

また、(9)式より、 C_1^s 、 G_1^s が負とならない条件は、

【数15】

$$k_l^s \geq 0 \quad (l=1,2,\dots,N_s) \quad \dots (16)$$

さらに、(10)式より、 C_1^c 、 G_1^c 、 L_1^c 、 R_1^c が負とならない条件は、

【数 1 6】

$$k_l^r \geq 0, \quad -p_l^r k_l^r + p_l^i k_l^i \geq 0, \quad -p_l^r k_l^r - p_l^i k_l^i \geq 0 \quad (l=1,2,\dots,N_c) \quad \dots (17)$$

となる。

【0021】

(15) ~ (17) 式の条件を行列・ベクトル形式で表現すると、

【数 1 7】

$$Dk \geq 0 \quad \dots (18)$$

10

となる。ここで、行列 D は、

【数 1 8】

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & 1 & 0 & 0 & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 1 & 0 & & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -p_1^r & p_1^i & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & -p_1^r & -p_1^i & & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & -p_{N_c}^r & p_{N_c}^i \\ 0 & 0 & 0 & & 0 & 0 & 0 & & -p_{N_c}^r & -p_{N_c}^i \end{bmatrix} \quad \dots (19)$$

20

30

である。

ステップ S 4 で決定された (18) 式の条件 (以下、「第 1 の拘束条件」) 下でステップ S 5 の最小自乗近似を行うことで、すべての素子値が負とならないことが保証された留数ベクトル k を算出することができる。なお、(19) 式の行列 D を、以下、「第 1 の拘束条件行列」と称する。

【0022】

最後に、本生成方法では、ステップ S 5 で算出された留数を (15) ~ (17) 式に代入し、選択した等価回路における各集中定数素子の素子値である等価回路パラメータを生成する (ステップ S 6)。

【0023】

40

以上のように、本発明に係る第 1 の等価回路パラメータ生成方法によれば、事前に決定された第 1 の拘束条件下で最小自乗近似を行うことにより、負の素子値を含まない等価回路パラメータを生成することができる。

また、第 1 の拘束条件によれば、すべての素子値が負とならないように調整されるとともに、この調整に伴って、他の素子値が最小自乗近似の過程で調整されるので、等価回路全体としての周波数特性の精度が悪化するのを防ぐことができる。

さらに、本発明に係る第 1 の等価回路パラメータ生成方法で得られる等価回路は、負となっていた幾つかの素子値が “0” になるので、当該等価回路を用いたシミュレーションを簡略化及び高速化することができる。

【0024】

50

続いて、本発明に係る第1の等価回路パラメータ生成方法によってモデリングされた等価回路の周波数特性と、従来から行われている他の方法によってモデリングされた等価回路の周波数特性とを比較した実験結果について説明する。

【0025】

(比較実験1-1:乾式進相コンデンサ、Fosterの第2回路)

本比較実験では、50 μ Fの乾式進相コンデンサを2個直列に接続したものを測定対象物とし、その周波数特性をインピーダンスメータで測定した。また、本比較実験では、等価回路としてFosterの第2回路を選択し、次数 $m=2$ 、 $n=3$ の下で個数 $N_s=1$ 、 $N_c=1$ とし、最小自乗近似を行った。

なお、前記の通り、次数 m 、 n 、及び個数 N_s 、 N_c は任意に決定することができる。基本的に、個数 N_s と N_c を大きくするとモデリングの精度が上がるが、最小自乗近似の計算に時間を要することとなる。また、個数 N_s 及び N_c によるモデリング精度の向上には限界があり、一定以上にしてもほとんどモデリング精度は向上しない。

10

【0026】

(12)~(14)式より第1の拘束条件を決定し、その条件下で最小自乗近似を行うと、最終的に、以下に示す等価回路パラメータが得られた。

【数19】

$$G_0 = 0\text{mS}, \quad C_\infty = 0\text{pF}$$

$$L_1^s = 16.67\mu\text{H}, \quad R_1^s = 707.8\Omega$$

$$L_1^c = 0.7780\mu\text{H}, \quad R_1^c = 0.04789\Omega, \quad C_1^c = 26.41\mu\text{F}, \quad G_1^c = 0\text{mS}$$

20

上記等価回路パラメータから明らかのように、本発明に係る第1の等価回路パラメータ生成方法では第1の拘束条件下で最小自乗近似を行うため、負の値を有する集中定数素子が存在しない。

【0027】

第1の拘束条件を使用することなく、単に最小自乗近似を行った場合(以下、「従来方法」)に得られた等価回路パラメータは、以下の通りである。

【数20】

$$G_0 = -0.3330\text{mS}, \quad C_\infty = -4.484\text{pF}$$

$$L_1^s = 7.487\mu\text{H}, \quad R_1^s = 317.9\Omega$$

$$L_1^c = 0.7858\mu\text{H}, \quad R_1^c = 0.04845\Omega, \quad C_1^c = 26.14\mu\text{F}, \quad G_1^c = -2.838\text{mS}$$

30

この方法では、素子 G_0 、 C_∞ 、 G_1^c が負の素子値となり、少なくとも等価回路の局所的な受動性が損なわれてしまっている。また、従来方法では、等価回路全体としての受動性を確保するような調整が一切行われていない。したがって、この等価回路パラメータを用いた等価回路は、全体として見ても受動性が保証されていない。

【0028】

さらに、比較のために、従来方法において得られた等価回路パラメータのうち、負となった素子値を無理やり“0”とし、他の素子値について何ら調整を行わない場合(以下、「比較方法」)についても実験を行った。比較方法で得られた等価回路パラメータは、以下の通りである。

40

【数21】

$$G_0 = 0\text{mS}, \quad C_\infty = 0\text{pF}$$

$$L_1^s = 7.487\mu\text{H}, \quad R_1^s = 317.9\Omega$$

$$L_1^c = 0.7858\mu\text{H}, \quad R_1^c = 0.04845\Omega, \quad C_1^c = 26.14\mu\text{F}, \quad G_1^c = 0\text{mS}$$

【0029】

50

図 4 に、測定によって得られた乾式進相コンデンサの周波数特性、及び上記 3 つの方法によって得られた等価回路の周波数特性を示す。

図 4 (A) に示すアドミタンス特性については、いずれの方法に係る周波数特性も乾式進相コンデンサの周波数特性 (測定値) をよく再現している。また、図 4 (B) に示す位相特性については、100 Hz、1 ~ 10 MHz 付近の帯域において、比較方法に係るグラフは誤差が比較的大きい。これは、負となった素子値を、無理やり“ 0 ”にし、他の素子値を調整しなかったためだと思われる。

なお、従来方法に係るグラフは、アドミタンス及び位相の両特性において乾式進相コンデンサの周波数特性 (測定値) をよく再現しているが、前記の通り、従来方法に係る等価回路は全体として受動性が保証されていない。したがって、この等価回路は、乾式進相コンデンサの周波数特性とかけ離れた特性を示すおそれがある。

10

【 0 0 3 0 】

(比較実験 1 - 2 : トロイダルコア、F o s t e r の第 1 回路)

本比較実験では、500 μH のトロイダルコアを測定対象物とし、その周波数特性をインピーダンスメータで測定した。また、本比較実験では、等価回路として F o s t e r の第 1 回路を選択し、次数 $m = 5$ 、 $n = 6$ の下で個数 $N_s = 0$ 、 $N_c = 3$ とし、最小自乗近似を行った。

【 0 0 3 1 】

(8) ~ (1 0) 式より第 1 の拘束条件を決定し、その条件下で最小自乗近似を行うと、最終的に、以下に示す等価回路パラメータが得られた。

20

【 数 2 2 】

$$\begin{aligned} R_0 &= 0.1003\Omega, & L_\infty &= 145.9\text{nH} \\ C_1^s &= 0\text{pF}, & G_1^s &= 0\text{mS} \\ C_1^c &= 171.8\text{pF}, & G_1^c &= 21.41\text{mS}, & L_1^c &= 19.27\text{nH}, & R_1^c &= 0\Omega \\ C_2^c &= 104.2\text{pF}, & G_2^c &= 6.278\text{mS}, & L_2^c &= 285.8\text{nH}, & R_2^c &= 0\Omega \\ C_3^c &= 37.24\text{pF}, & G_3^c &= 117.0\mu\text{S}, & L_3^c &= 484.4\mu\text{H}, & R_3^c &= 0\Omega \end{aligned}$$

上記等価回路パラメータから明らかのように、本発明に係る第 1 の等価回路パラメータ生成方法では、第 1 の拘束条件下で最小自乗近似を行うため、負の値を有する集中定数素子が存在しない。

30

【 0 0 3 2 】

従来方法によって得られた等価回路パラメータは次の通りである。

【 数 2 3 】

$$\begin{aligned} R_0 &= 67.33\Omega, & L_\infty &= 70.34\text{nH} \\ C_1^s &= -18.77\text{pF}, & G_1^s &= -11.87\text{mS} \\ C_1^c &= 303.0\text{pF}, & G_1^c &= 80.10\text{mS}, & L_1^c &= 9.737\text{nH}, & R_1^c &= -1.361\Omega \\ C_2^c &= 98.70\text{pF}, & G_2^c &= 5.058\text{mS}, & L_2^c &= 305.8\text{nH}, & R_2^c &= 2.760\Omega \\ C_3^c &= 37.04\text{pF}, & G_3^c &= 0.1151\text{mS}, & L_3^c &= 487.9\mu\text{H}, & R_3^c &= 15.88\Omega \end{aligned}$$

40

この方法では、素子 C_1^s 、 G_1^s 、 R_1^c が負の素子値となり、少なくとも等価回路の局所的な受動性が損なわれてしまっている。

【 0 0 3 3 】

また、比較方法によって得られた等価回路パラメータは次の通りである。

【数 2 4】

$$R_0 = 67.33\Omega, \quad L_\infty = 70.34\text{nH}$$

$$C_1^s = 0\text{pF}, \quad G_1^s = 0\text{mS}$$

$$C_1^c = 303.0\text{pF}, \quad G_1^c = 80.10\text{mS}, \quad L_1^c = 9.737\text{nH}, \quad R_1^c = 0\Omega$$

$$C_2^c = 98.70\text{pF}, \quad G_2^c = 5.058\text{mS}, \quad L_2^c = 305.8\text{nH}, \quad R_2^c = 2.760\Omega$$

$$C_3^c = 37.04\text{pF}, \quad G_3^c = 0.1151\text{mS}, \quad L_3^c = 487.9\mu\text{H}, \quad R_3^c = 15.88\Omega$$

【0034】

10

図5に、測定によって得られたトロイダルコアの周波数特性、及び上記3つの方法によって得られた等価回路の周波数特性を示す。

図5(A)に示すインピーダンス特性については、従来方法及び本発明に係る第1の生成方法で得られた周波数特性は、いずれもトロイダルコアの周波数特性(測定値)をよく再現している。一方、比較方法に係るグラフは、10kHz以下の帯域で他の方法に比べて誤差が大きくなっている。さらに、比較方法で得られた周波数特性は、全周波数帯域において、トロイダルコアの位相特性(測定値)を全く再現できていない(図5(B)参照)。

なお、比較実験1と同様に、従来方法で得られた周波数特性は、インピーダンス及び位相の両特性においてトロイダルコアの周波数特性(測定値)をよく再現しているが、前記の通り、従来方法に係る等価回路は全体として受動性が保証されていない。したがって、この等価回路は、トロイダルコアの周波数特性とかけ離れた特性を示すおそれがある。

20

【0035】

以上をまとめると、本発明に係る第1の等価回路パラメータ生成方法では、測定によって得られた測定対象物の周波数特性を集中定数素子からなる等価回路に近似合成するにあたり、事前に、各素子の値が負とならないような第1の拘束条件を算出しておき、その条件下で最小自乗近似を行う。これにより、受動性を損なうことなく、高精度に測定対象物の周波数特性を再現することができる。

【0036】

[第2の等価回路パラメータ生成方法]

30

続いて、添付図面を参照して、本発明に係る第2の等価回路パラメータ生成方法について説明する。本生成方法では、等価回路全体としての受動性が確保されるような拘束条件が決定される。その一方で、本生成方法では、個々の等価回路パラメータが負となることは禁止されないため、等価回路が局部的に受動性を失うことは許容される。

つまり、第2の等価回路パラメータ生成方法では、第1の等価回路パラメータ生成方法よりも緩和された拘束条件下で最小自乗近似を行う。これにより、第1の等価回路パラメータ生成方法で得られる等価パラメータよりも、さらにモデリング精度の高い等価回路パラメータが得られることが期待できる。

【0037】

具体的には、本生成方法において、等価回路パラメータは図3に示すようなフローで生成される。すなわち、本生成方法では、上記した第1の等価回路パラメータ生成方法と同様にして、ステップS1からステップS3を行う。

40

【0038】

続いて、本生成方法では、最小自乗近似を実行する前に、個々の等価回路パラメータが負となることは許容しつつ、等価回路全体としての受動性が確保されるような拘束条件を決定する(ステップS4)。そして、その拘束条件下で、(3)式による最小自乗近似を行う(ステップS5)。なお、ステップS5は、公知の数値解析ソフトウェアを用いることで容易に行うことができる。

【0039】

等価回路が全体として受動性を有するためには、その等価回路の抵抗成分が正であるこ

50

とが必要である。したがって、第2の等価回路パラメータ生成方法における拘束条件（以下、「第2の拘束条件」）は、

【数25】

$$A^r k > 0 \quad \dots (20)$$

となる。ここで、係数行列 A^r は係数行列 A^c （(4)式参照）の実数部であり、

【数26】

$$A^r = \text{Re}(A^c) \quad \dots (21)$$

10

で表される。

ステップS4で決定された(20)式の条件下でステップS5の最小自乗近似を行うことで、等価回路が全体として受動性を有することが保証された留数ベクトル k を算出することができる。

【0040】

最後に、第2の等価回路パラメータ生成方法では、ステップS5で算出された留数を(8)～(10)式、または(12)～(14)式に代入し、選択した等価回路における各集中定数素子の素子値である等価回路パラメータを生成する(ステップS6)。

【0041】

20

以上のように、本発明に係る第2の等価回路パラメータ生成方法によれば、事前に決定された第2の拘束条件下で最小自乗近似を行うことにより、等価回路全体としての受動性が確保された等価回路パラメータを生成することができる。

また、第2の拘束条件は、局所的に受動性が失われることを禁止するものではないので、個々の等価回路パラメータの自由度が高い。したがって、第2の等価回路パラメータ生成方法によれば、第1の拘束条件を使用して得た等価回路よりも、さらにモデリング精度の高い等価回路を得ることができる。

【0042】

続いて、本発明に係る第1及び第2の等価回路パラメータ生成方法によってモデリングされた等価回路の周波数特性と、従来から行われている他の方法によってモデリングされた等価回路の周波数特性とを比較した実験結果について説明する。

30

【0043】

(比較実験2：積層セラミックコンデンサ、Fosterの第2回路)

本比較実験では、220nFの積層セラミックコンデンサを測定対象物とし、その周波数特性をインピーダンスメータで測定した。また、本比較実験では、等価回路として G_0 と C を省略したFosterの第2回路を選択し、次数 $m = 8$ 、 $n = 9$ の下で個数 $N_s = 1$ 、 $N_c = 4$ とし、最小自乗近似を行った。

【0044】

(20)式に示す第2の拘束条件下で最小自乗近似を行い、算出された留数 k を(13)及び(14)式に代入すると、最終的に、以下に示す等価回路パラメータが得られた。

40

【数27】

$$\begin{aligned} L_1^s &= 5.944\text{nH}, & R_1^s &= 1.071\text{k}\Omega \\ L_1^c &= 8.509\text{nH}, & R_1^c &= 1.730\Omega, & C_1^c &= 1.424\text{nF}, & G_1^c &= -17.46\text{mS} \\ L_2^c &= 17.36\text{nH}, & R_2^c &= 31.80\text{m}\Omega, & C_2^c &= 1.952\text{nF}, & G_2^c &= 25.26\text{mS} \\ L_3^c &= 14.11\text{nH}, & R_3^c &= 42.50\text{m}\Omega, & C_3^c &= 5.567\text{nF}, & G_3^c &= 28.07\text{mS} \\ L_4^c &= 2.062\text{nH}, & R_4^c &= 4.495\text{m}\Omega, & C_4^c &= 215.2\text{nF}, & G_4^c &= -36.79\text{mS} \end{aligned}$$

上記等価回路パラメータから明らかなように、本発明に係る第2の等価回路パラメータ

50

生成方法では、局所的に受動性が損なわれることは禁止されないもので、幾つかの集中定数素子が負の値を示している。

【 0 0 4 5 】

本発明に係る第 1 の等価回路パラメータ生成方法によって得られた等価回路パラメータは次の通りである。

【 数 2 8 】

$$\begin{aligned} L_1^S &= 6.138\text{nH}, & R_1^S &= 1.106\text{k}\Omega \\ L_1^C &= 8.636\text{nH}, & R_1^C &= 1.650\Omega, & C_1^C &= 1.446\text{nF}, & G_1^C &= 0\text{mS} \\ L_2^C &= 17.62\text{nH}, & R_2^C &= 226.5\text{m}\Omega, & C_2^C &= 1.924\text{nF}, & G_2^C &= 3.684\text{mS} \\ L_3^C &= 14.01\text{nH}, & R_3^C &= 112.8\text{m}\Omega, & C_3^C &= 5.601\text{nF}, & G_3^C &= 0\text{mS} \\ L_4^C &= 2.057\text{nH}, & R_4^C &= 4.133\text{m}\Omega, & C_4^C &= 215.7\text{nF}, & G_4^C &= 0\text{mS} \end{aligned}$$

10

この方法では、局所的に見ても全体として見ても等価回路の受動性が確保されるような第 1 の拘束条件下で最小自乗近似を行うので、負の値を示す集中定数素子は存在しない。

【 0 0 4 6 】

従来方法によって得られた等価回路パラメータは次の通りである。

【 数 2 9 】

$$\begin{aligned} L_1^S &= 5.947\text{nH}, & R_1^S &= 1.072\text{k}\Omega \\ L_1^C &= 8.510\text{nH}, & R_1^C &= 1.732\Omega, & C_1^C &= 1.423\text{nF}, & G_1^C &= -17.65\text{mS} \\ L_2^C &= 17.36\text{nH}, & R_2^C &= 32.16\text{m}\Omega, & C_2^C &= 1.953\text{nF}, & G_2^C &= 25.22\text{mS} \\ L_3^C &= 14.11\text{nH}, & R_3^C &= 42.69\text{m}\Omega, & C_3^C &= 5.568\text{nF}, & G_3^C &= 28.00\text{mS} \\ L_4^C &= 2.062\text{nH}, & R_4^C &= 4.507\text{m}\Omega, & C_4^C &= 215.2\text{nF}, & G_4^C &= -38.08\text{mS} \end{aligned}$$

20

この方法では、 G_1^C と G_4^C が負の素子値となり、少なくとも等価回路の局所的な受動性が損なわれてしまっている。また、この方法では、等価回路全体としての受動性を確保するような調整が一切行われていないので、等価回路全体としても受動性が保証されていない。

30

【 0 0 4 7 】

また、比較方法によって得られた等価回路パラメータは次の通りである。

【 数 3 0 】

$$\begin{aligned} L_1^S &= 5.947\text{nH}, & R_1^S &= 1.072\text{k}\Omega \\ L_1^C &= 8.510\text{nH}, & R_1^C &= 1.732\Omega, & C_1^C &= 1.423\text{nF}, & G_1^C &= 0\text{mS} \\ L_2^C &= 17.36\text{nH}, & R_2^C &= 32.16\text{m}\Omega, & C_2^C &= 1.953\text{nF}, & G_2^C &= 25.22\text{mS} \\ L_3^C &= 14.11\text{nH}, & R_3^C &= 42.69\text{m}\Omega, & C_3^C &= 5.568\text{nF}, & G_3^C &= 28.00\text{mS} \\ L_4^C &= 2.062\text{nH}, & R_4^C &= 4.507\text{m}\Omega, & C_4^C &= 215.2\text{nF}, & G_4^C &= 0\text{mS} \end{aligned}$$

40

【 0 0 4 8 】

図 6 に、測定によって得られた積層セラミックコンデンサの周波数特性、及び上記 4 つの方法によって得られた等価回路の周波数特性を示す。

図 6 (A) に示すアドミタンス特性については、いずれの方法で得られた周波数特性も積層セラミックコンデンサの周波数特性 (測定値) をよく再現している。また、図 6 (B) に示す位相特性については、各方法で得られた周波数特性は、特に 30 ~ 60 MHz 付近の帯域において誤差を有しているものの、各方法で得られた周波数特性同士にはほとんど差異がないように見える。

50

【 0 0 4 9 】

しかしながら、図 6 (B) に示す位相特性の低周波領域を拡大した図 7 によれば、特に 5 M H z 以下の帯域において、各方法に係る等価回路の周波数特性はかなり異なっていることが分かる。

まず、単に最小自乗近似を行っただけの従来方法に係る周波数特性は、5 0 0 k H z 以下の帯域において位相が 9 0 ° を超えている。これは、従来方法によって得られた等価回路が、全体として受動性を有していないことを示している。次に、比較方法に係る周波数特性は、積層セラミックコンデンサの周波数特性 (測定値) に対する誤差が非常に大きい。これは、負となった素子値を無理やり “ 0 ” にし、これに伴う他の素子値の調整を行わなかったためだと思われる。

10

【 0 0 5 0 】

本発明に係る第 1 の等価回路パラメータ生成方法に係るグラフは、積層セラミックコンデンサの周波数特性 (測定値) をよく再現している。また、本発明に係る第 2 の等価回路パラメータ生成方法に係るグラフは、第 1 の生成方法よりもさらに誤差が少なく、積層セラミックコンデンサの周波数特性 (測定値) を高精度に再現している。これは、局所的に受動性が損なわれることを許容することにより、個々の等価回路パラメータの自由度が高くなったためだと思われる。

【 0 0 5 1 】

なお、第 2 の拘束条件に別の拘束条件 (以下、「第 3 の拘束条件」) を追加して、2 以上の拘束条件の下で最小自乗近似を行ってもよい。以下、その方法について説明する。

20

【 0 0 5 2 】

上記第 2 の等価回路パラメータ生成方法では、測定対象物の周波数特性に基づいて拘束条件を決定し、その拘束条件の下で最小自乗近似を行っている。上記してきたように、この方法によれば、測定を行った周波数領域における等価回路の受動性が保証される。一方、第 2 の等価回路パラメータ生成方法では、測定を行っていない周波数領域については何ら拘束がかけられていないので、等価回路の受動性は保証されない。

【 0 0 5 3 】

図 9 に、一例として、比較実験 2 で使用した積層セラミックコンデンサの周波数特性を 3 0 0 k H z ~ 3 G H z の範囲で測定し、その周波数特性を第 2 の等価回路パラメータ生成方法で近似して得た位相特性を示す。このグラフから明らかなように、測定範囲外である 1 0 0 k H z 以下 (厳密には、3 0 0 k H z 以下) の領域において、位相は 9 0 ° を超えている。これは、当該周波数領域において、等価回路が受動性を有していないことを意味している。同様に、位相が - 9 0 ° を下回る場合は、その周波数において等価回路が受動性を有していないことを意味する。

30

第 3 の拘束条件によれば、このような測定範囲外の周波数領域における受動性をも保証することができる。

【 0 0 5 4 】

具体的には、第 3 の拘束条件を用いた方法において、等価回路パラメータは図 8 に示すようなフローで生成される。すなわち、本方法では、第 2 の等価回路パラメータ生成方法で等価回路パラメータが生成された後に (ステップ S 1 ~ S 6) 、当該等価回路パラメータを用いた等価回路の検証が行われる (ステップ S 7) 。検証は、測定範囲外における等価回路の位相の絶対値が 9 0 ° を超えているか否かによって行われる。位相の絶対値が 9 0 ° を超えていない場合は (ステップ S 7 の “ N o ”) 、測定範囲外においても受動性は保証されているので、当該フローはそのまま終了する。

40

【 0 0 5 5 】

一方、位相の絶対値が 9 0 ° を超えている場合は (ステップ S 7 の “ Y e s ”) 、拘束をかける周波数が選択される。図 9 に示すように、周波数が低くなるにつれて位相が 9 0 ° を超えて大きくなっていくような場合には、拘束をかける周波数として 0 H z が選択される。そして、その周波数における周波数特性の実数成分が正 ((2 0) (2 1) 式参照) であるという第 3 の拘束条件が追加される (ステップ S 8) 。その後、第 2 及び第 3 の

50

拘束条件の下で再度最小自乗近似が行われ、等価回路パラメータが生成される（ステップ S 5、S 6）。結局、図 9 に示す一例では、測定範囲外である 0 Hz における周波数特性の実数成分について第 3 の拘束条件が追加され、第 2 及び第 3 の拘束条件の下で最小自乗近似が行われる。

なお、拘束をかける周波数の選択方法は上記したものに限定されず、例えば、実際に計算を行って得られた等価回路の周波数特性の中で、位相の絶対値が最も大きい周波数（図 9 に示す一例では、30 Hz）で拘束をかけるようにしてもよい。

【0056】

続いて、第 2 及び第 3 の拘束条件の下で得られた等価回路の検証が行われ（ステップ S 7）、位相の絶対値が 90° を超えている場合は新たな拘束条件が追加される（ステップ S 8）。以下、位相の絶対値が 90° を超えなくなるまで、ステップ S 5 からステップ S 8 が繰り返し実行される。

10

【0057】

この方法を用いて、比較実験 2 と同一の測定対象物（積層セラミックコンデンサ）、条件（次数 $m = 8$ 、 $n = 9$ 、個数 $N_s = 1$ 、 $N_c = 4$ ）で最小自乗近似を行うと、最終的に、以下に示す等価回路パラメータが得られた。

【数 3 1】

$$\begin{aligned} L_1^S &= 5.942\text{nH}, & R_1^S &= 1.071\text{k}\Omega \\ L_1^C &= 8.508\text{nH}, & R_1^C &= 1.729\Omega, & C_1^C &= 1.424\text{nF}, & G_1^C &= -17.36\text{mS} \\ L_2^C &= 17.36\text{nH}, & R_2^C &= 31.61\text{m}\Omega, & C_2^C &= 1.952\text{nF}, & G_2^C &= 25.28\text{mS} \\ L_3^C &= 14.11\text{nH}, & R_3^C &= 42.41\text{m}\Omega, & C_3^C &= 5.567\text{nF}, & G_3^C &= 28.11\text{mS} \\ L_4^C &= 2.062\text{nH}, & R_4^C &= 4.491\text{m}\Omega, & C_4^C &= 215.2\text{nF}, & G_4^C &= -36.36\text{mS} \end{aligned}$$

20

【0058】

図 10 に、測定によって得られた積層セラミックコンデンサの周波数特性（300 kHz ~）、第 2 の等価回路パラメータ生成方法、及び第 2 の拘束条件と第 3 の拘束条件とを併用した方法によって得られた等価回路の周波数特性（30 Hz ~）を示す。

前記の通り、第 2 の等価回路パラメータ生成方法に係る周波数特性は、測定範囲外である 300 kHz 以下の領域において位相が 90° を超え、受動性が大きく損なわれている。これに対して、第 3 の拘束条件を追加した方法に係る周波数特性は、当該領域においても位相が 90° を超えることはない。

30

つまり、第 3 の拘束条件を追加した方法によれば、測定範囲外の周波数領域における受動性をも保証することができる。

【0059】

[等価回路パラメータ生成装置]

また、本発明は、上記各等価回路パラメータ生成方法を用いた等価回路パラメータ生成装置として実現することもできる。

【0060】

図 11 は、本発明に係る第 1 の等価回路パラメータ生成方法を用いた等価回路パラメータ生成装置の一構成例を示すブロック図である。等価回路パラメータ生成装置 1 に備えられた入力部 4 及び出力部 7 は、例えば、キーボード、液晶ディスプレイである。当該装置で等価回路パラメータを生成するユーザは、出力部 7 を参照して、入力部 4 を介して必要な指示を当該装置に与える。

40

【0061】

入力部 4 に測定開始の指示が入力されると、測定部 3 は、測定対象物 10 に微小な電流または電圧を出力し、測定対象物 10 の周波数特性を測定する（図 3 のステップ S 1 に相当）。測定部 3 による測定は、プローブ 2 を介して行われる。測定によって得られたデータは、演算部 5 に送られ、メモリ等の記憶装置（図示せず）に格納される。

50

【 0 0 6 2 】

続いて、使用可能な等価回路が選択肢として出力部 7 に表示され、そのうちの 하나가入力部 4 を介して選択される（ステップ S 2 に相当）。そして、入力部 4 を介して、最小自乗近似に用いる次数 m 、 n 、及び個数 N_s 、 N_c が入力される（ステップ S 3 に相当）。入力された次数、個数、及び等価回路の選択情報も、また、メモリ等の記憶装置に格納される。

【 0 0 6 3 】

続いて、演算部 5 に含まれる拘束条件生成部 6 は、記憶装置に格納された情報を参照して、第 1 の拘束条件行列 D を生成する（ステップ S 4 に相当、(19)式参照）。そして、演算部 5 は、第 1 の拘束条件行列 D 、記憶装置に格納された測定対象物 10 の周波数特性データ、次数 m 、 n 、及び個数 N_s 、 N_c を用いて、(3)式による最小自乗近似を実行する（ステップ S 5 に相当）。さらに、演算部 5 は、最小自乗近似によって得た留数に基づいて、選択した等価回路における各集中定数素子の等価回路パラメータを生成する（ステップ S 6 に相当）。

第 2 の等価回路パラメータ生成方法を用いる場合は、第 1 の拘束条件行列 D の代わりに(20)式で表される第 2 の拘束条件を生成し、その条件下で(3)式による最小自乗近似を実行する（ステップ S 5 に相当）。

【 0 0 6 4 】

生成された等価回路パラメータは、出力部 7 に表示される。また、等価回路パラメータ生成装置 1 は、必要に応じて、生成された等価回路パラメータを電子データ（例えば、CSV形式）に変換して出力することもできる。

【 0 0 6 5 】

以上、本発明の好ましい実施形態について説明したが、本発明は上記構成に限定されるものではない。

例えば、使用する等価回路は Foster の第 1 及び第 2 回路に限定されず、他の等価回路を使用することができる。

また、第 1 に等価回路パラメータ生成方法における拘束条件行列は(19)式に示したものに限定されず、例えば、各行を定数倍しても同一の作用効果を得ることができる。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 6 6 】

【 図 1 】 等価回路として用いられる Foster の第 1 回路図である。

【 図 2 】 等価回路として用いられる Foster の第 2 回路図である。

【 図 3 】 本発明に係る等価回路パラメータ生成方法のフローチャートである。

【 図 4 】 本発明に係る第 1 の等価回路パラメータ生成方法、従来方法、及び比較方法で、乾式進相コンデンサの周波数特性を近似したグラフであって、(A) はアドミタンス特性、(B) は位相特性のグラフである。

【 図 5 】 本発明に係る第 1 の等価回路パラメータ生成方法、従来方法、及び比較方法で、トロイダルコアの周波数特性を近似したグラフであって、(A) はインピーダンス特性、(B) は位相特性のグラフである。

【 図 6 】 本発明に係る第 1 及び第 2 の等価回路パラメータ生成方法、従来方法、及び比較方法で、積層セラミックコンデンサの周波数特性を近似したグラフであって、(A) はアドミタンス特性、(B) は位相特性のグラフである。

【 図 7 】 図 6 (B) に示す位相特性の低周波領域を拡大したグラフである。

【 図 8 】 第 3 の拘束条件を追加して最小自乗近似を行う等価回路パラメータ生成方法のフローチャートである。

【 図 9 】 本発明に係る第 2 の等価回路パラメータ生成方法、及び第 3 の拘束条件を追加して最小自乗近似を行う等価回路パラメータ生成方法で、積層セラミックコンデンサの周波数特性（位相特性）を近似したグラフである。

【 図 10 】 図 9 に示す位相特性の低周波領域を拡大したグラフである。

【 図 11 】 本発明に係る等価回路パラメータ生成装置の一構成例を示すブロック図である

10

20

30

40

50

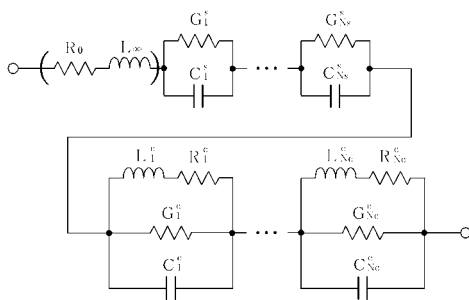
。

【符号の説明】

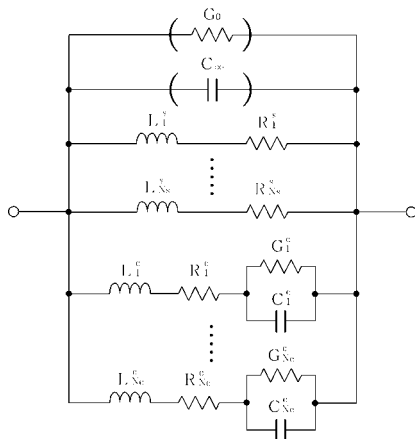
【0067】

- 1 等価回路パラメータ生成装置
- 2 プローブ
- 3 測定部
- 4 入力部
- 5 演算部
- 6 拘束条件生成部
- 7 出力部
- 10 測定対象物

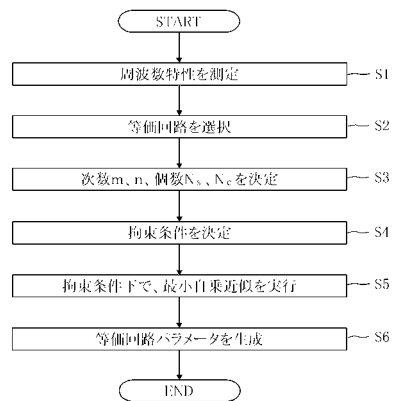
【図1】



【図2】

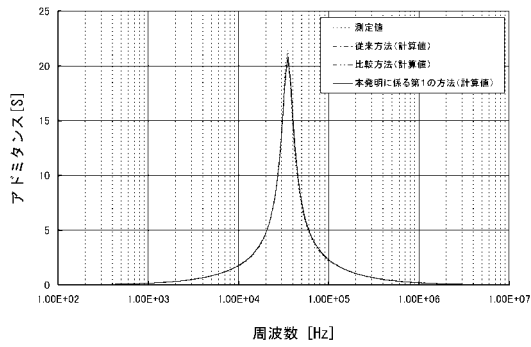


【図3】

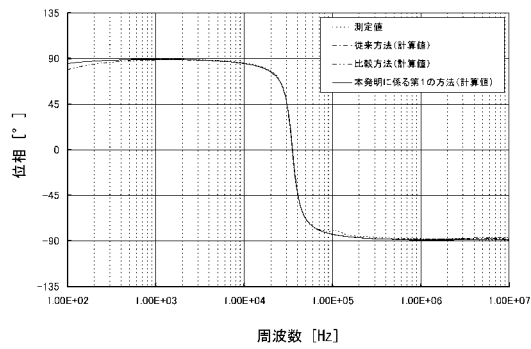


【 図 4 】

(A)

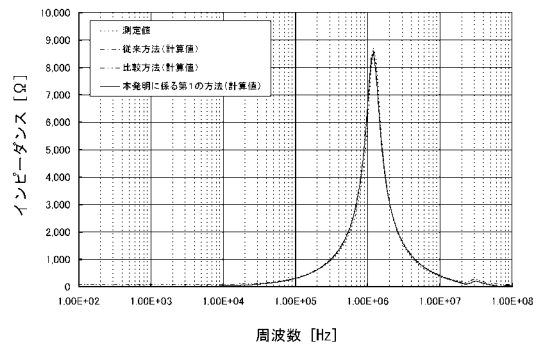


(B)

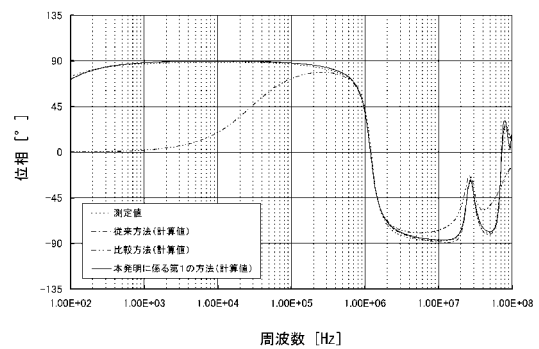


【 図 5 】

(A)

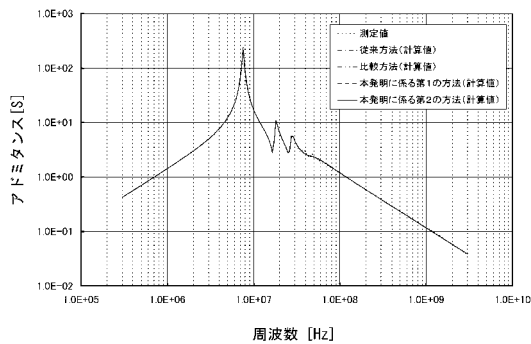


(B)

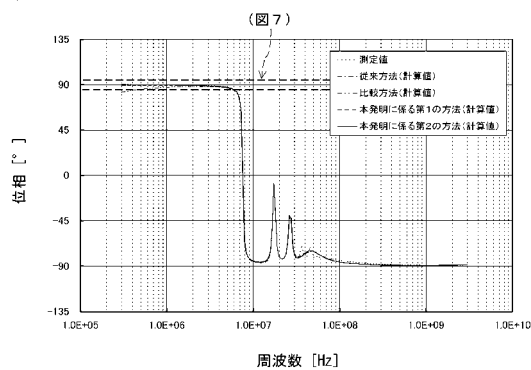


【 図 6 】

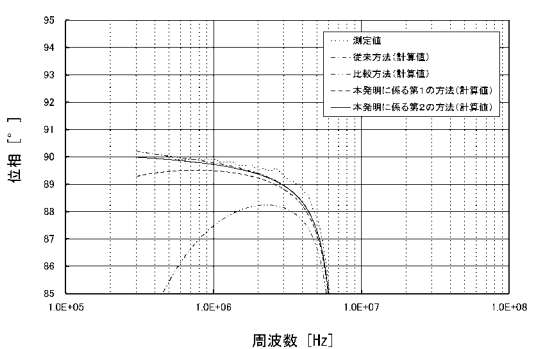
(A)



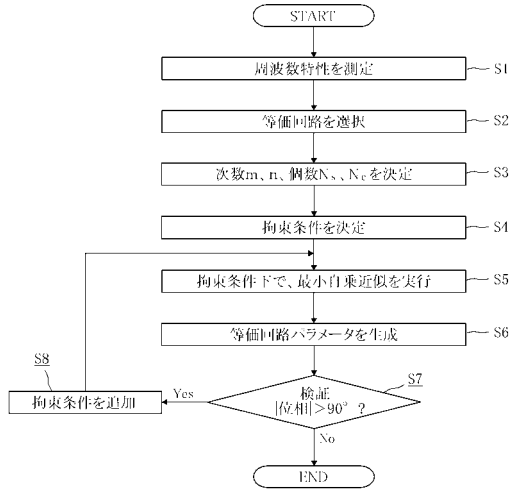
(B)



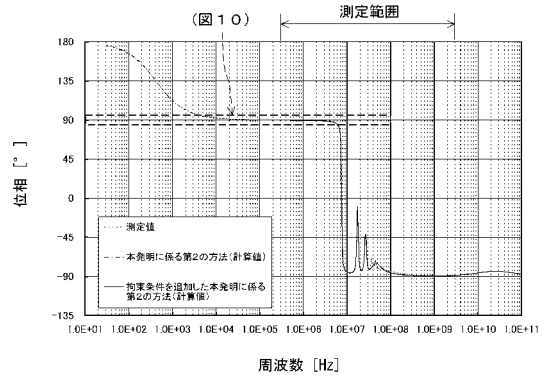
【 図 7 】



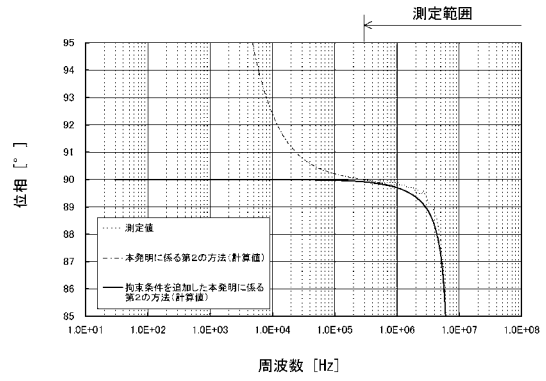
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】



【 図 11 】

