

DOI: 10.7652/xjtuxb201802014

双绕组电力变压器梯形网络频率响应的矩阵算法

任富强, 汲胜昌, 祝令瑜, 刘勇, 杨帆, 陆伟锋, 李熙宁
(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对双绕组电力变压器梯形网络的仿真软件建模的非完整性以及现存等效电路频率响应算法多变量求解的低效率, 围绕一种电力变压器绕组高频等效模型频率响应的矩阵计算方法开展研究, 基于等效电路的拓扑结构, 给出了利用阻抗支路矩阵和导纳支路矩阵来完整表示该等效电路的方法。其次, 通过矩阵运算, 推导了阻抗支路电流、导纳支路电流以及节点电压列向量之间的关系, 进而求解节点电压列向量, 获得等效电路的频率响应。最后, 将矩阵算法与基于电路仿真得到的频响曲线进行比较, 结果表明, 曲线相关系数较大, 吻合程度很高, 对于不含高幅值谐振峰(−500 dB 以上)的曲线, 相关系数为 10, 即两者完全吻合, 而矩阵算法的计算耗时少于电路仿真运算。上述分析表明, 在保证仿真模型完整性和精确性的同时, 提出的矩阵算法由于仅有两次矩阵取逆运算且求取的未知量较少, 具有良好的计算效率及计算精度。

关键词: 等效电路; 频率响应; 电路仿真; 矩阵运算

中图分类号: TM401 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)02-0089-07

Matrix Algorithm for Ladder Network Frequency Response Analysis of Double-Winding Power Transformer

REN Fuqiang, JI Shengchang, ZHU Lingyu, LIU Yong, YANG Fan, LU Weifeng, LI Xining
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the incomplete transformer winding model in the circuit simulation software or the low efficiency of frequency response calculation due to many unknowns in the existing algorithm, a research on a matrix algorithm to calculate the frequency response of the equivalent ladder network for double-winding transformer is conducted. Following the equivalent circuit topology, the model is completely described by the impedance branch matrix and the admittance branch matrix. By means of matrix operation, the relationships of the column vectors of impedance branch current and admittance branch current with nodal voltage are obtained. The frequency response of the equivalent circuit model is calculated by solving the nodal voltage column vector. A comparison between the simulated results of matrix algorithm and those obtained by circuit simulation indicates that the correlation coefficient (CC) becomes greater showing good agreement between them. The curves without high amplitude resonance peaks (above −500 dB) coincide perfectly with a CC of 10. The matrix algorithm takes less calculation time than simulation software. Ensuring the integrality and precision of the simulation model, the proposed algorithm is endowed with good computational accuracy and efficiency due to only twice

matrix inversions and less unknowns to be solved.

Keywords: equivalent circuit model; frequency response; circuit simulation; matrix operation

电力变压器安全可靠运行对于保障电力系统的持续运行意义重大^[1-2]。变压器绕组是发生故障损坏的主要部位,并且故障程度随着短路电流水平的提高而愈发严重^[3-4]。作为一种离线无损检测变压器绕组变形的方法,频率响应法由于具有良好的测试重复性和灵敏度得到了广泛应用^[5]。频率响应法一般通过计算不同曲线之间的相关系数来大致判断绕组变形程度^[6]。为了进一步挖掘频响曲线蕴含的绕组状态信息,更加准确诊断绕组变形^[7-8],需要研究不同变形形式下绕组高频等效电路中元件参数的变化,进而得到其频响曲线的变化规律^[9]。上述方法的关键点之一是电力变压器高频等效网络的仿真计算^[10],这也是建立变压器绕组变形与频响曲线内在联系的重要步骤。因而,研究电力变压器高频等效模型频率响应的计算方法具有重要意义。

电力变压器绕组高频等效模型包括黑箱模型、物理模型以及混合模型3类,其中物理模型能准确描述高频激励下绕组的电磁特性,应用最为广泛^[11-12]。等效梯形网络模型为国内外学者普遍使用的物理模型,考虑了绕组单元的自感互感关系以及分布电容等参量^[13-14],能够对电力变压器绕组频响特性进行精确的仿真研究。计算梯形网络的频响特性一般基于电路仿真软件。文献[15]忽略绕组二次侧影响,建立了单绕组电路模型,仿真获得变压器绕组的频响特性,对等效电路电感、分布电容等参数改变时频响曲线的变化规律进行了研究。文献[16]通过忽略单元间互感来简化计算,提取了绕组发生轴心偏移、辐向变形和轴向位移等故障时等效电路的参数,进而对不同故障状态下的绕组频响特性进行比较。文献[8]对等效电路中不同元件在不同频段的灵敏度进行了分析,仿真获得了绕组发生预紧力松动、轴向及辐向位移等故障时频响曲线在不同频段的变化规律。上述文献均基于电路仿真软件,对变压器绕组等效梯形网络的频响特性进行了研究。但是,通过仿真软件建立电路模型比较复杂,并且由于忽略了绕组二次侧以及单元间互感以简化计算,等效电路模型并不完整,有一定的计算误差。

利用基于电路原理的算法也可以实现等效电路频响特性的计算。文献[10]将等效梯形网络的阻抗矩阵(电阻和电感串联支路)进行转化,结合电路导纳矩阵(分布电容支路),构建整体网络的矩阵形式,

得到关于网络节点电压的方程组并对其求解,但是算法多次对矩阵求逆,导致计算误差较大,且求解效率较低。文献[17]将等效电路的阻抗支路电流和节点电压作为未知量,通过阻抗或导纳矩阵来联系不同支路或节点,实现支路电流和节点电压的求解。由于计算频响特性仅利用了节点电压数据,故上述算法增加了未知量,使得计算效率下降。文献[18]中的矩阵求解算法和文献[10]类似,通过网络导纳矩阵的转化,实现节点电压及部分支路电流的求解,但是算法也存在多变量的求解问题,而且没有考虑绕组二次侧影响,此外对方程组常数项求取的关键步骤也缺乏必要推导。综合上述文献,基于电路原理算法构建的等效梯形网络模型更加完整,频率响应的求解过程更加系统化且求解效率很高。但是,上述文献对算法的推导均不够系统,没有解决网络矩阵构建以及多变量求解或者矩阵多次求逆导致的低计算效率的问题。

鉴于上述问题,针对考虑变压器绕组二次侧的等效梯形网络,本文首先构建用于描述网络的阻抗支路矩阵及导纳支路矩阵;其次,基于电路原理,获得阻抗支路电流、导纳支路电流与节点电压的关系;最后,通过节点电压列向量的求取,获得电路的频率响应。在此基础上,提出了一种不同于前述文献的求取频率响应的矩阵算法。通过与相关文献的计算结果对比,证明本文提出的算法在保证模型完整性和精确性的同时,具有良好的计算精度及计算效率。

1 矩阵算法推导

1.1 双绕组电力变压器等效梯形网络模型

图1为双绕组电力变压器的等效梯形网络模型,由电阻、电感、电容及电导等元件组成,分别表征绕组及铁心的有功损耗、电磁效应、介质损耗及电容效应。元件具体数值可以通过解析法或有限元仿真计算,也可以通过智能算法结合相关的频响数据确定^[11,17,19-20]。

在图1所示的电路中,基本梯形单元由电阻电感串联支路(阻抗支路)及电导电容并联支路(导纳支路)组成。基本梯形单元用数匝层式或饼式绕组线圈来等效,线匝数根据最高激励频率以及绕组的尺寸和结构等参数确定,并保证流过此单元线匝的电流近似恒定^[15]。在频响法的扫频范围(1~1 000

kHz)内,对于尺寸不同或结构相异的绕组,其梯形等效电路拓扑结构一致,区别仅在于基本梯形单元数的不同或单元参数计算方法的差异,故梯形等效电路适用于描述多数双绕组电力变压器的高频电磁特性,因而基于此等效电路建立的矩阵算法也普遍适用于一般结构的双绕组变压器。另外,对于同一绕组,健康或故障状态仅对应为等效网络相关单元元件参数的不同,而其拓扑结构并不改变,因而本文得到的矩阵算法对健康或故障状态绕组均适用。

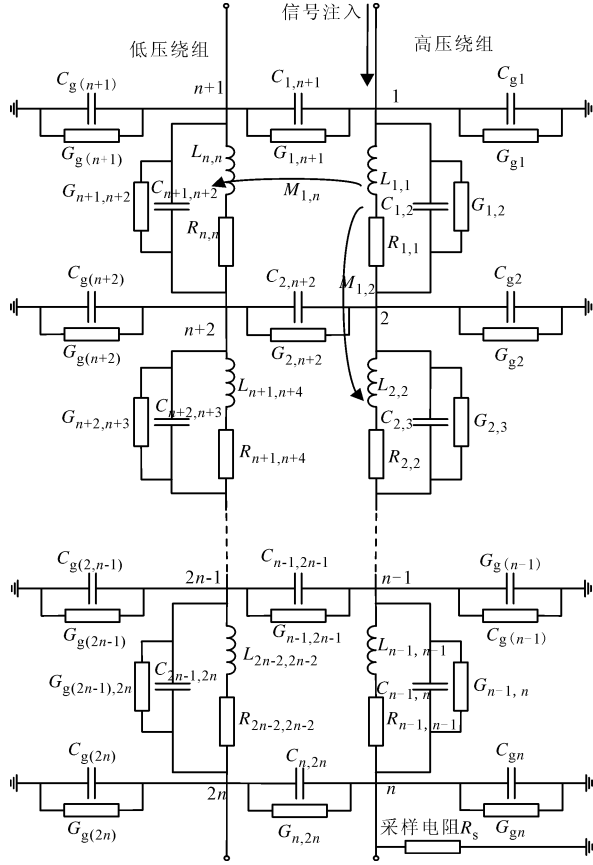


图1 双绕组电力变压器等效梯形网络

设图1中高、低压绕组的梯形单元数均为 $(n-1)$,则等效电路是由 $2(n-1)$ 个单元组成的网络。网络中需要求解的节点电压数为 $2n$,用未知量 $U_1, U_2, \dots, U_{2n}$ 表示。其次,阻抗支路电流是未知的,其数量为 $2(n-1)$,用未知量 $I_1, I_2, \dots, I_{2(n-1)}$ 表示,电流正方向规定为由较小编号节点指向较大编号节点的方向。按照关联的节点数目统计未知的导纳支路电流,其数量为 $2n$,用未知量 $i_1, i_2, \dots, i_{2n}$ 表示,电流正方向规定为流出其关联节点的方向。

1.2 阻抗支路与导纳支路的矩阵描述

求解等效梯形网络模型的频率响应,首先需要构建用于描述网络单元参数的矩阵。通过将图1中

复杂网络分解成阻抗支路与导纳支路并求取其矩阵,即可完整描述图1所示网络。

阻抗支路由电阻及电感串联构成,支路间通过阻抗支路电流相联系,故定义 $(2n-2)$ 阶方阵 $\mathbf{M}_{\text{RL}}$ 来描述频域中的阻抗支路,其形式为

$$\mathbf{M}_{\text{RL}} = \begin{bmatrix} sL_{1,1} + R_{1,1} & \cdots & sM_{1,2n-2} + R_{1,2n-2} \\ sM_{2,1} + R_{2,1} & \cdots & sM_{2,2n-2} + R_{2,2n-2} \\ \vdots & & \vdots \\ sM_{2n-3,1} + R_{2n-3,1} & \cdots & sM_{2n-3,2n-2} + R_{2n-3,2n-2} \\ sM_{2n-2,1} + R_{2n-2,1} & \cdots & sL_{2n-2,2n-2} + R_{2n-2,2n-2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; $L_{i,i}$ ($i=1,2,\dots,2n-2$)为第 i 条阻抗支路的电感值; $M_{i,j}$ ($i,j=1,2,\dots,2n-2, i \neq j$)代表编号为 i,j 的阻抗支路互感; $R_{i,j}$ ($i,j=1,2,\dots,2n-2$)为第 i 条阻抗支路的电阻(当 $i=j$ 时)或第 i,j 条支路的互阻(当 $i \neq j$ 时)^[20]。电感及电阻在网络中的具体位置参见图1。显然,在矩阵 $\mathbf{M}_{\text{RL}}$ 中,对角元素 $\mathbf{M}_{\text{RL}}(i,i)$ ($i=1,2,\dots,2n-2$)为第 i 条阻抗支路的自阻抗,元素 $\mathbf{M}_{\text{RL}}(i,j)$ ($i,j=1,2,\dots,2n-2, i \neq j$)则代表第 i,j 条阻抗支路通过互阻相互关联。 $\mathbf{M}_{\text{RL}}$ 即为阻抗支路的矩阵描述。

导纳支路为分布电导与分布电容并联支路的等效,支路间通过节点电压相联系。为了在频域中描述导纳支路,先定义下式

$$\left. \begin{aligned} G_{i,j} + sC_{i,j} &= GC_{i,j}, \quad i \neq j \\ (G_{gi} + sC_{gi}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{2n} (G_{i,j} + sC_{i,j}) &= GC_i \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: i,j 为节点编号; G_{gi} 与 C_{gi} 分别代表第 i 个节点的对地分布电导与分布电容; $G_{i,j}$ 与 $C_{i,j}$ 分别代表编号为 i,j ($i,j=1,2,\dots,2n$)的节点间分布电导与分布电容。对于同一绕组上的节点, $G_{i,j}$ 与 $C_{i,j}$ 分别为绕组纵向电导与纵向电容;对于相异绕组间的节点, $G_{i,j}$ 与 $C_{i,j}$ 分别代表高低压绕组间的分布电导与分布电容。绕组对地电导、电容,纵向电导、电容及高低压绕组间分布电导、电容的计算可以参见文献[17]。电导及电容在网络中的具体位置参见图1。

类似地,定义 $2n$ 阶方阵 $\mathbf{M}_{\text{CG}}$,其形式如下

$$\mathbf{M}_{\text{CG}} = \begin{bmatrix} GC_1 & -GC_{1,2} & \cdots & -GC_{1,2n-1} & -GC_{1,2n} \\ -GC_{2,1} & GC_2 & \cdots & -GC_{2,2n-1} & -GC_{2,2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ -GC_{2n-1,1} & -GC_{2n-1,2} & \cdots & GC_{2n-1} & -GC_{2n-1,2n} \\ -GC_{2n,1} & -GC_{2n,2} & \cdots & -GC_{2n,2n-1} & GC_{2n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:元素 $\mathbf{M}_{CG}(i, j)$ 代表节点 i 通过导纳与节点 j 的电气联系。矩阵 $\mathbf{M}_{CG}$ 的对角元素为自导纳,其值为正;非对角元素为互导纳,其值为负。 $\mathbf{M}_{CG}$ 即为导纳支路的矩阵描述。式(1)与式(3)即完整描述了图1所示的等效电路网络。

1.3 阻抗支路与导纳支路电流的关系

根据基尔霍夫电流定律(KCL),可得节点的KCL方程为

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= -I_1 \\ i_2 &= I_1 - I_2 \\ &\vdots \\ i_n &= I_{n-1} \\ i_{n+1} &= -I_n \\ i_{n+2} &= I_n - I_{n+1} \\ &\vdots \\ i_{2n} &= I_{2n-2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

定义 $n \times (n-1)$ 阶矩阵 $\mathbf{A}$, 其元素 a_{ij} ($i=1, 2, \dots, n$ 且 $j=1, 2, \dots, n-1$) 的具体值为

$$a_{ij} = \begin{cases} -1, & i=j \text{ 且 } j=1, 2, \dots, n-1 \\ 1, & i=j+1 \text{ 且 } j=1, 2, \dots, n-1 \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (5)$$

根据式(4)和式(5),可以得到如下关系

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \\ i_{n+1} \\ \vdots \\ i_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_{n-1} \\ I_n \\ \vdots \\ I_{2n-2} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_{n-1} \\ I_n \\ \vdots \\ I_{2n-2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{O}$ 为 $n \times (n-1)$ 阶零矩阵; $\mathbf{B}$ 为 $2n \times (2n-2)$ 阶矩阵。式(6)即为阻抗支路电流与导纳支路电流的关系。

1.4 节点电压与阻抗支路电流的关系

基于阻抗支路的电压电流关系(VCR),可得

$$\left. \begin{aligned} (R_{1,1} + sL_{1,1})I_1 + \sum_{i=2}^{2n-2} (R_{1,i} + sM_{1,i})I_i &= U_1 - U_2 \\ &\vdots \\ (R_{n,1} + sL_{n,1})I_n + \sum_{i=1}^{2n-2} (R_{n,i} + sM_{n,i})I_i &= U_{n+1} - U_{n+2} \\ &\vdots \\ (R_{2n-2,1} + sL_{2n-2,1})I_{2n-2} + \sum_{i=1}^{2n-3} (R_{2n-2,i} + sM_{2n-2,i})I_i &= U_{2n-1} - U_{2n} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

结合式(1)、式(5)与式(7),通过观察,可以得到节点电压与阻抗支路电流关系的最终形式

$$\mathbf{M}_{RL} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{n+1} \\ \vdots \\ I_{2n-2} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T & \mathbf{O}^T \\ \mathbf{O}^T & \mathbf{A}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \\ U_{n+1} \\ \vdots \\ U_{2n} \end{bmatrix} = -\mathbf{B}^T \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \\ U_{n+1} \\ \vdots \\ U_{2n} \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.5 节点电压与导纳支路电流的关系

基于导纳支路的VCR,即可得到节点电压与导纳支路电流的关系,其形式如下

$$\left. \begin{aligned} U_1 GC_1 - \sum_{i=2}^{2n} (G_{1,i} + sC_{1,i})U_i &= i_1 \\ &\vdots \\ U_k GC_k - \sum_{i=1}^{2n} (G_{k,i} + sC_{k,i})U_i &= i_k \\ &\vdots \\ U_{2n} GC_{2n} - \sum_{i=1}^{2n-1} (G_{2n,i} + sC_{2n,i})U_i &= i_n \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

结合式(2)、式(3)与式(9),即可得到节点电压与导纳支路电流的最终形式

$$\mathbf{M}_{CG} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{2n-1} \\ U_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ i_{2n-1} \\ i_{2n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(10)即为节点电压与导纳支路电流的联系。

1.6 节点电压列向量的求解

式(6)、式(8)与式(10)建立了阻抗支路电流、导纳支路电流与节点电压三者之间的联系。对于频率响应的求解仅需节点电压值,因而在上述3式中,消去阻抗支路及导纳支路电流列向量,即得到关于节点电压的方程组

$$(\mathbf{B}\mathbf{M}_{RL}^{-1}\mathbf{B}^T + \mathbf{M}_{CG})\mathbf{U} = \mathbf{M}\mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{0}$ 为 $2n$ 维 0 值列向量; $\mathbf{M}$ 为 $2n$ 阶方阵,其元素 $\mathbf{M}(i, j)$ 代表编号为 i 的节点电压与编号为 j 的节点电压间的电气联系。

直接求解式(11)是不可行的。由于 $\mathbf{U}(1, 1)$ 为进行频率响应测试时施加的激励,即向量 $\mathbf{U}$ 的第1个元素为已知量,故需要将式(11)进行进一步变换。

取列向量 $\mathbf{U}$ 删除第1个元素 $\mathbf{U}(1, 1)$ 得到的 $(2n-1)$ 维未知列向量为 $\mathbf{U}'$ 。将矩阵 $\mathbf{M}$ 中表征其他节

点电压与 $U(1,1)$ 关联的第 1 行元素删除得到矩阵 $\mathbf{M}_1$ 。取 $\mathbf{M}_1$ 的第 1 列构成 $(2n-1)$ 维列向量 $\mathbf{N}_1$, 取 $\mathbf{M}_1$ 的剩余部分作为 $(2n-1)$ 阶方阵 $\mathbf{N}$ 。经过上述变换后即可得到下式

$$\mathbf{N}\mathbf{U}' = -\mathbf{U}(1,1)\mathbf{N}_1 \tag{12}$$

通过求解非齐次线性方程组 (12), 即可解得 $\mathbf{U}'$, 即 $(2n-1)$ 个未知节点电压。最后, 通过下式得到等效电路的频率响应

$$H = 20\log\left(\frac{U'(n,1)}{U(1,1)}\right) \tag{13}$$

式中: $U'(n,1)$ 表示列向量 $\mathbf{U}'$ 的第 n 个元素, 对应图 1 中编号为 $(n+1)$ 节点的电压值, 即采样电阻的电压。

2 绕组频率响应的计算

本节基于电路仿真软件 PSPICE (Version 16.5) 与 Simulink (MATLAB Version 8.5), 利用提出的矩阵算法来计算变压器绕组等效梯形网络的频率响应, 验证矩阵算法的准确性以及计算的高效性, 包含变压器单绕组模型、考虑单元互感的单绕组模型以及双绕组模型共 3 个计算案例。

2.1 算例模型及参数

算例 1 绕组梯形等效电路由 7 个单元组成, 参数来源于文献[21], 各单元的参数相等, 其自感、纵向电容、对地电容以及采样电阻值分别为 41.426 mH、19.8 pF、1 214.286 pF 以及 50 Ω。文献忽略了对频率响应测试结果影响较小的开路二次侧及数值较小的绕组电阻以简化计算。综上, 绕组梯形网络简化为如图 2 所示的等效电路。对于简化后的单绕组模型, 只需要将双绕组梯形网络矩阵算法中表征二次侧梯形单元的参数删除即可。

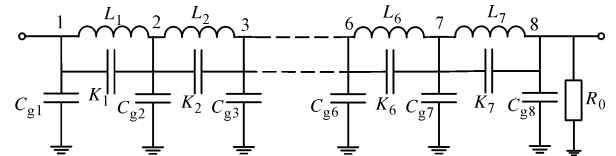


图 2 算例 1 单绕组 7 梯形单元模型

算例 2 来源于文献[18], 为包含 10 个梯形单元的单绕组变压器模型, 对比算例 1, 其仿真单元数目增加并计及了单元间互感, 等效电路与图 2 类似。单元的电感、自感、纵向电容、对地电容以及采样电阻值分别为 0.137 Ω、10.32 mH、22.54 pF、200 pF 以及 50 Ω。单元间互感有 9 个, 其值分别为 5.815、2.978、1.615、0.912、0.551、0.231、0.056、0.024 及 0.011 mH。

算例 3 为双绕组等效电路的计算, 来源于文献

[9], 共包含 20 个梯形单元, 文献忽略了单元间互感耦合作用。其等效电路图与图 1 类似, 相关参数如表 1 所示。表中的物理量 R_i 、 L_i 、 K_i 、 C_{gi} 、 C_{bji} 与 G_j ($i=1,2,\dots,10$ 且 $j=1,2,\dots,11$) 分别表示单元的电感、电感、纵向电容、对地电容、高低压绕组间的分布电容与电导。

表 1 算例 3 双绕组 20 梯形单元模型相关参数

绕组	R_i/Ω	$L_i/\mu\text{H}$	K_i/pF	C_{gi}/pF	C_{bji}/pF	G_j/mS
高压绕组	1.2	180	13	3 000	5 000	0.143
低压绕组	0.5	65	26	3 000	5 000	0.143

2.2 算例计算结果

采用电路仿真软件建立的仿真电路与图 2 类似, 在模型的节点 1 施加幅值为 1 的扫频电源。对于扫频模式的实现, 在 PSPICE 中可以将仿真模式设为 AC Sweep/Noise, 在 Simulink 中则通过编程来实现。通过绕组末端的采样电阻得到响应端的正弦波幅值 U_0 , 最后通过下式计算得到电路的频率响应

$$H = 20\log U_0 \tag{14}$$

利用 3 种方法计算得到的 3 个算例中绕组等效梯形网络的频率响应汇总分别如图 3~图 5 所示。通过矩阵算法计算得到考虑单元间互感的频率响应曲线见图 4。

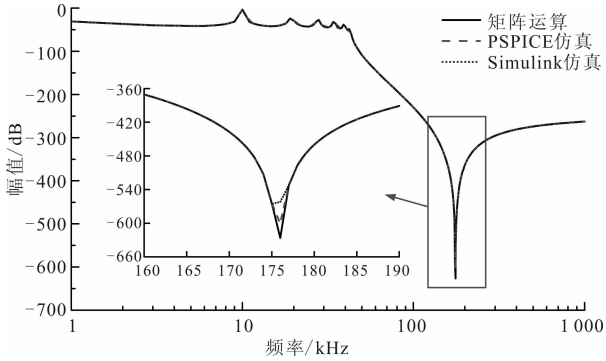


图 3 算例 1 频率响应的计算结果

2.3 计算结果分析

由 2.2 节中的计算结果可知, 对于上述 3 个算例, 除极少数频段 (高幅值谐振峰对应频段附近) 计算结果有差别外, 通过矩阵算法以及软件仿真得到的计算结果完全一致。为了量化不同计算方法的结果差异, 分别计算矩阵算法与两种仿真得到的频响曲线的相关系数, 如表 2 所示, 表中全频、低频、中频及高频表示的频率范围为 1~1 000 kHz, 1~100 kHz, 100~600 kHz, 600~1 000 kHz。组 1 为矩阵算法结果和 PSPICE 仿真结果的相关系数; 组 2 为

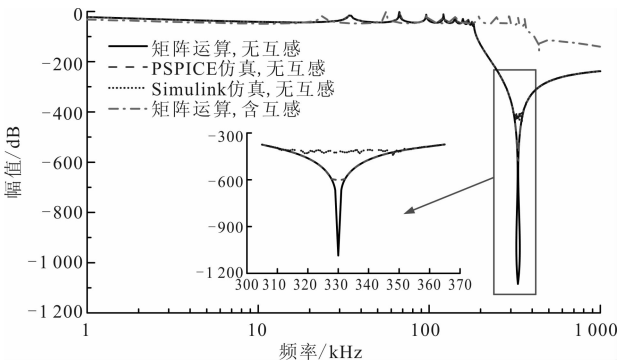


图 4 算例 2 频率响应的计算结果

矩阵算法结果和 Simulink 仿真结果的相关系数。

表 2 3 个算例频响曲线的相关系数

算例	相关系数							
	全频段		低频段		中频段		高频段	
	组 1	组 2	组 1	组 2	组 1	组 2	组 1	组 2
1	4.13	3.35	10	10	3.53	2.74	10	10
2	2.02	1.51	10	10	1.85	1.35	10	10
3	10.00	10.00	10	10	10.00	10.00	10	10

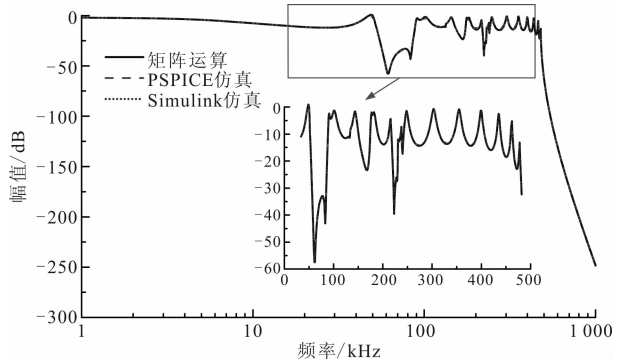


图 5 算例 3 频率响应的计算结果

通过相关系数判断,对于算例 1,3 条曲线的相似度很高,由图 3 可知,其差异在中频段的最大谐振峰,即 176 kHz 处幅值约为 -600 dB 的谐振峰附近,而其他频率点完全重合;算例 2 与算例 1 类似,差异集中于 330 kHz 处的最大谐振峰附近;对于算例 3,3 种计算方法的结果完全一致。算例 1 与算例 2 中的差异是由仿真软件的设定以及数据在不同软件之间传递产生的截断误差所致。在最大谐振峰处,等效电路会发生电流谐振,此时绕组中的电流最小,采样电阻得到的电压最低。在算例 1 中, -600 dB 谐振峰对应的采样电阻电压仅为 10^{-30} ,算例 2 中对应电压更低。这些极低数值小于电路仿真软件的最小分辨值,故计算结果出现误差。在算例 3 中,由于频率响应的增益较小(最大峰值仅约为 -250 dB),计算结果完全吻合。由此可知,矩阵算法的计

算结果准确,即使在频率响应曲线的幅值差异较大时,依然保持很高的精度。

在同一台计算机上,利用相同的 MATLAB 软件执行矩阵算法和 Simulink 仿真以及运行 PSPICE 程序的计算耗时汇总于表 3。3 者的计算耗时可以通过编程或者访问软件日志文件获得。由表 3 可知,矩阵算法的计算效率与 PSPICE 软件相当。由于 M 文件与 Simulink 程序之间频繁的数据传递等原因,Simulink 仿真计算耗时较长。综合比较 3 种方法,认为矩阵算法的计算效率很高。

表 3 3 个算例的计算耗时比较

算法	计算耗时/s		
	算例 1	算例 2	算例 3
矩阵运算	0.20	0.22	0.51
PSPICE 仿真	0.30	0.30	0.90
Simulink 仿真	265.82	290.95	756.01

对于算例 2,在电路仿真软件中,当梯形单元数较多时,实现在所有单元间引入互感的难度较大。但是,基于矩阵算法,可以通过式(1)方便引入单元间互感,此时的频响曲线如图 4 所示,可见考虑互感与否得到的频响曲线差别较大。由于互感是绕组单元电磁耦合的重要参数,引入互感使等效电路更加符合绕组实际状态,可保证建模的完整性,故在仿真时必须将单元间互感考虑在内^[18]。由图 4 可知,在考虑单元间互感时,频率响应曲线谐振点有向高频偏移的趋势,且曲线幅值在下降。频率响应曲线幅值下降意味着采样电阻电压升高,此时的计算结果会更加准确。因而,通过矩阵算法可以引入互感,可保证仿真模型的完整性,使等效模型更加符合绕组实际状态,得到的仿真结果也更加精确。

综上,基于矩阵算法计算变压器绕组等效梯形网络模型的频率响应,具有很高的计算精度以及计算效率,并且能够保证模型的完整性,使等效模型更加符合绕组的实际状态。

3 结 论

本文针对双绕组电力变压器等效梯形网络模型,首先构建描述网络的阻抗支路和导纳支路矩阵,其次基于电路原理,获得支路电流和节点电压间的关系,最后通过矩阵运算求解节点电压列向量,从而得到等效电路的频率响应。通过矩阵算法与电路仿真软件计算结果相对比,证明了本文矩阵算法的计算精确性和高效性。另外,在矩阵算法中,可以通过

更改相应的矩阵将单元间互感考虑在内,使计算模型更加精确完整。综上所述,通过矩阵算法得到变压器绕组的频率响应是兼顾计算精度、计算效率以及保证计算模型完整性的最优方法。

参考文献:

- [1] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
- [2] 刘勇, 杨帆, 张凡, 等. 检测电力变压器绕组变形的扫频阻抗法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4505-4516.
- LIU Yong, YANG Fan, ZHANG Fan, et al. Study on sweep frequency impedance to detect winding deformation within power transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4505-4516.
- [3] 朱叶叶, 汲胜昌, 张凡, 等. 电力变压器振动产生机理及影响因素研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(6): 115-125.
- ZHU Yeye, JI Shengchang, ZHANG Fan, et al. Vibration mechanism and influence factors in power transformers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(6): 115-125.
- [4] 张凡, 汲胜昌, 祝令瑜, 等. 短路冲击下变压器振动频响函数研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(2): 97-103, 154.
- ZHANG Fan, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Frequency response function of short circuit vibration for power transformer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(2): 97-103, 154.
- [5] REYKHERDT A A, DAVYDOV V. Case studies of factors influencing frequency response analysis measurements and power transformer diagnostics [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(1): 22-30.
- [6] RYDER S A. Diagnosing transformer faults using frequency response analysis [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(2): 16-22.
- [7] KIM J W, PARK B, JEONG S, et al. Fault diagnosis of a power transformer using an improved frequency-response analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 169-178.
- [8] 王曙鸿, 张海军. 一种基于模型修正的变压器绕组变形定量诊断方法: CN105180792A[P]. 2015-07-01.
- [9] ABU-SIADA A, HASHEMNIA N, ISLAM S, et al. Understanding power transformer frequency response analysis signatures [J]. IEEE Electrical Insulation

Magazine, 2013, 29(3): 48-56.

- [10] BJERKAN E. High frequency modeling of power transformers [D]. Trondheim, Norwegian: Norwegian University of Science and Technology, 2005: 192-195.
- [11] SHABESTARY M M, GHANIZADEH A J, GHAREHPETIAN G B, et al. Ladder network parameters determination considering nondominant resonances of the transformer winding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 108-117.
- [12] RASHTCHI V, RAHIMPOUR E, REZAPOUR E M. Using a genetic algorithm for parameter identification of transformer RLCM model [J]. Electrical Engineering, 2006, 88(5): 417-422.
- [13] ABEYWICKRAMA N, SERDYUK Y V, GUBANSKI S M. High-frequency modeling of power transformers for use in frequency response analysis (FRA) [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2042-2049.
- [14] SHINTEMIROV A, TANG W H, WU Q H. A hybrid winding model of disc-type power transformers for frequency response analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 730-739.
- [15] 张震. 变压器绕组变形检测装置的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013: 18-27.
- [16] 陈晓晗. 基于有限元法的电力变压器绕组变形检测与识别的仿真研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015: 42-55.
- [17] ABEYWICKRAMA K B, SERDYUK Y V, GUBANSKI S M. Exploring possibilities for characterization of power transformer insulation by frequency response analysis (FRA) [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1375-1382.
- [18] 朱明林. 频响分析法及其模型辨识检测和诊断变压器绕组变形的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2001: 12-20.
- [19] PODOLTSEV A D, NILANGA K G, ABEYWICKRAMA K B, et al. Multiscale computations of parameters of power transformer windings at high frequencies: part I Small-scale level [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(11): 3991-3998.
- [20] PODOLTSEV A D, ABEYWICKRAMA K B, SERDYUK Y V, et al. Multiscale computations of parameters of power transformer windings at high frequencies: part II Large-scale level [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(12): 4076-4082.
- [21] 武剑利. 频响分析法检测变压器绕组变形的理论研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004: 21-22.

(编辑 杜秀杰)