

RTDS 用户自定义元件模型 (UDC) 的应用方法

徐志恒¹, 钱珞江²

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250002; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 阐述了实时数字仿真器 (RTDS) 用户自定义元件模型 (UDC) 技术的数值基础, 通过以一个双调谐滤波器元件的自定义步骤为例详细描述了 UDC 技术的应用方法, 并且将自制的 UDC 元件与用 RTDS 元件库搭建的同参数双调谐滤波器元件进行了暂态仿真效果对比, 证明用 UDC 技术开发的元件模型不会降低 RTDS 的仿真质量。

关键词: 实时数字仿真; 电力系统, 用户自定义元件; 模型

Application method of RTDS user define component model (UDC)

XU Zhi-heng¹, QIAN Luo-jiang²

(1. Shandong EPRI, Jinan 250002, China; 2. School of E E, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This paper describes the basic digital knowledge of real time digital simulator (RTDS) user define component model (UDC) technique. Taking a double damper filter component as example and with transient simulation comparison between the UDC component's responses and the same one drafted from the RTDS component library, the paper validates that the UDC model has a high degree of agreement with RTDS library components.

Key words: real time digital simulation; power system; user define component; model

中图分类号: TM743 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2009)22-0141-05

0 引言

虽然 RTDS 的元件模型库已包括了十分丰富的元件模型, 在大多数场合下能够满足系统仿真的建模要求, 但有些情况下实际系统中的个别元件在 RTDS 模型库中没有相应模型或者相应模型的结构及性能与实际元件差异较大, 因此用户必须通过建立元件数值方程并编制相应计算程序创建新的 UDC 元件模型以满足系统建模需要^[1]。

1 RTDS 仿真技术的数值基础

电力系统属连续系统范畴, 从系统等值电路的角度分析, 任何复杂的电网都可由电阻、电感、电容这几个基本元件与独立电源组合而成, 换成数学角度看, 系统数学模型是由电阻、电感、电容的元件方程与已知时间函数 $V_s(t)$ 或 $I_s(t)$ 复合而成。电力系统数字仿真的实质是将连续系统数学模型近似成离散系统数值递推模型^[2]。

首先分析线性电阻元件 R , 它的数学模型为简单代数式

$$u(t)=Ri(t) \quad (1)$$

式中: u 、 i 、 R 分别表示元件的电压瞬时值、电流瞬时值和电阻值。

其时间离散的表达式亦为简单代数式

$$u_k=Ri_k \quad (2)$$

式中: k 表示时间离散分段, 即 $u_k=u(t_k)$ 、 $i_k=i(t_k)$ 数值模型等值电路的建立如图 1 所示。



图 1 电阻的计算机仿真模型建立

Fig.1 Discrete model of resistance

从图 1 中看出, 电阻元件 R 的数学解析模型电路图与数值计算模型电路图相同, 连续变量 $u(t)$ 、 $i(t)$ 直接化为离散变量 u_k 、 i_k 。进一步考察一个由电阻和独立电源组成的系统: 图 2 中, $U_s(t)$ 为 $u-t$ 函数已知的电压源。

由电阻的数值模型等值电路列写系统节点方程

$$\begin{bmatrix} G_1 + G_2 & -G_2 \\ -G_2 & G_2 + G_3 + G_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1,k} \\ u_{2,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 U_{s,k} \\ 0 \end{bmatrix}$$

这是一个易于用计算机编程求数值解的离散形式的线性代数方程组。上述简单的举例分析可得出一个重要推论：由电阻和已知电源构成的等值电路可直接作为求数值解的计算机数值递推模型。

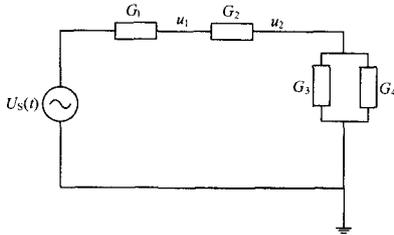


图 2 由电阻元件与已知电源组成的系统

Fig.2 The circuit composed of resistance and voltage source

其次分析电感元件，线性电感 L 的数学模型为

$$u(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

$$\text{或 } i(t) = i(t - \Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t u(t') dt'$$

其中： Δt 为时间步长。

为方便起见，用 i_k 表示 t (或 t_k) 时刻的电流值、 i_{k-1} 表示 $t - \Delta t$ (或 t_{k-1}) 时刻的电流值，电压值的下标表示法与电流值一样，将式 (3) 写成：

$$i_k = i_{k-1} + \frac{1}{L} \int_{t_{k-1}}^{t_k} u dt' \quad (4)$$

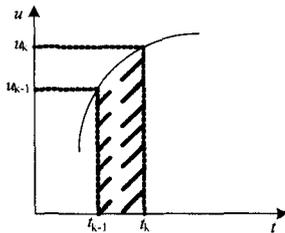


图 3 梯形积分

Fig.3 Trapezoid integral

用梯形近似积分法 (图 3) 有：

$$\int_{t_{k-1}}^{t_k} u dt' = \frac{\Delta t}{2} (u_{k-1} + u_k)$$

将式 (4) 写成差分形式：

$$i_k = i_{k-1} + \frac{\Delta t}{2L} (u_{k-1} + u_k) = \frac{\Delta t}{2L} u_k + (i_{k-1} + \frac{\Delta t}{2L} u_{k-1})$$

上式又可写成

$$\begin{cases} i_k = g_L u_k + I_{SL} \\ \text{其中 } g_L = \frac{\Delta t}{2L} \text{ 和 } I_{SL} = i_{k-1} + g_L u_{k-1} \end{cases} \quad (5)$$

公式 (5) 计算机数值递推模型也称为电感元件 L 的“瞬态值递推模型”，由数学模型转化为数值计算模型如图 4 所示。

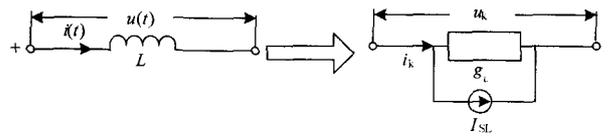


图 4 电感的仿真模型建立

Fig.4 Discrete model of inductance

图 4 中右边的数值模型等效电路(电感 L 的“瞬态值递推模型”等效电路)，由一个等效电阻 (电导) g_L 和一个等效“电流源” I_{SL} 并联组成诺顿电路，在进行第 k 步 u_k 、 i_k 计算时， I_{SL} 已由前一步的 u_{k-1} 、 i_{k-1} 得到，是已知的，可视为独立电流源。

互感元件的数学模型为

$$[u] = [L] \frac{d}{dt} [i] \quad \text{其中: } [u] = [u_1, \dots, u_n]^T, [i] = [i_1, \dots, i_n]^T$$

不难导出：

$$[g_L] = \frac{\Delta t}{2} [L]^{-1} = \frac{\Delta t}{2} [F]$$

数值模型的差分递推公式与电感 L (公式(5)) 类似，只是矩阵形式，即

$$\begin{cases} [i]_k = [g_L][u]_k + [I_{SL}] \\ \text{其中 } [I_{SL}] = [i]_{k-1} + [g_L][u]_{k-1} \end{cases} \quad (6)$$

再来分析电容 C ，它的数学模型为

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} \quad (7)$$

$$\text{或 } u(t) = u(t - \Delta t) + \frac{1}{C} \int_{t-\Delta t}^t i(t') dt'$$

同样，用梯形积分近似法，可导出 C 的差分递推公式 (电容元件 C 的“瞬态值递推模型”)：

$$\begin{cases} i_k = g_C u_k + I_{SC} \\ \text{其中 } g_C = \frac{2C}{\Delta t} \text{ 和 } I_{SC} = -i_{k-1} - g_C u_{k-1} \end{cases} \quad (8)$$

其等效电路电路为图 5。

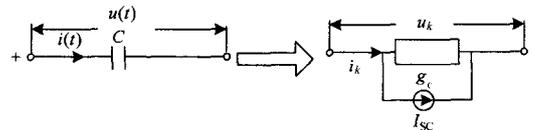


图 5 电容的仿真模型建立

Fig.5 Discrete model of capacitor

综合上述电感、电容等储能元件数值模型的推导，可得出结论：系统微分方程数学模型经梯形积

分法转化为差分方程数值递推式后, 任意时刻点 t_k 的等效计算电路仅由电阻元件和已知电源构成纯电阻形式的诺顿电路。

2 RTDS 模型数值程序结构—UDC 建模方法

UDC 元件模型由两个文件组成: 以 .dft 为后缀名的图像文件和以 .udc 为后缀名的程序代码文件。dft 图像文件对应于 RTDS 的 GUI (Graphic User Interface) 人机交互界面的元件外观, 图像是什么形状不重要 (当然应尽量直观), 重要的是该 UDC 支路元件的端点图标数目 (外接节点数) 和参数输入对话框个数要正确; udc 程序代码文件对应于元件特性的数学方程描述和数值变量定义, 是数值模型的内核, UDC 技术的主要内涵在于如何用算法语言正确地编制元件的 udc 文件。

udc 文件由变量定义和运算代码构成, 总体结构及各部分的作用说明见表 1。

表 1 RTDS 元件模型的 udc 文件结构

Tab.1 Configuration of RTDS UDC model program

类别名	作用说明
NODES	全局变量, 定义节点电压变量, 变量类型只能是浮点型
INJS	全局变量, 定义节点等效注入电流源, 变量类型只能是浮点型
INPUT	全局变量, 定义输入信号变量, 主要用于受控元件模型
OUTPUT	全局变量, 定义输出变量, 用于计算结果显示和 D/A 输出
DATA	局部变量, 存放来自 dft 界面的输入物理参数值并定义一些模型参数的数据类型, 通常与 RAM 部分联合设计
STATIC	静态变量, 存放当前步长的计算结果, 作为下一步长递推计算中的已知数据
RAM	局部函数, 定义模型参数与 dft 输入物理参数的关系式, 与 DATA 部分联合设计, 其中的参数运算由编译器完成, 不影响实时步长
CODE	局部程序体, 包括一个步长内的全部运算程序, 通常也需在此定义一些临时变量。这里是 RTDS 的唯一实时运算程序区

RTDS 的所有元件模型 (包括 UDC 元件模型) 从电路学的角度观察, 实质上可视作小型端口网络子系统, 每个元件的特性等效为一个端口网络的节点方程, 系统模型由各元件端口网络连接而成, 相当于系统的节点方程是由元件的子系统节点方程叠加而成。

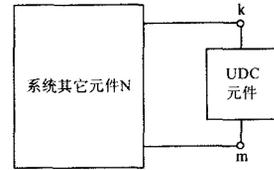


图 6 含 UDC 元件的 RTDS 系统

Fig.6 Network including UDC component

对于含有一个 UDC 元件模型 (假设为 2 端点, 如图 6 所示) 的 RTDS 系统, 以上标 (U) 表示 UDC 元件支路、上标 (N) 表示其它元件支路, 系统的节点方程可写为

$$\begin{bmatrix} G_{11}^{(N)} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & G_{1n}^{(N)} \\ \vdots & \ddots & & & & & \vdots \\ \vdots & & G_{kk}^{(N)} + G_{kk}^{(U)} & \cdots & G_{km}^{(U)} & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & G_{kn}^{(U)} & \cdots & G_{nm}^{(N)} + G_{nm}^{(U)} & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & & \ddots & \vdots \\ G_{n1}^{(N)} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & G_{nn}^{(N)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_k \\ \vdots \\ V_m \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^{(N)} \\ \vdots \\ I_k^{(N)} + I_k^{(U)} \\ \vdots \\ I_m^{(N)} + I_m^{(U)} \\ \vdots \\ I_n^{(N)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式 (9) 实际上是由下列式 (10)、式 (11) 两个节点方程组成, 且系统节点电压 V_k 、 V_m 的解是两个方程解的简单相加。

$$\begin{bmatrix} G_{11}^{(N)} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & G_{1n}^{(N)} \\ \vdots & \ddots & & & & & \vdots \\ \vdots & & G_{kk}^{(N)} & \cdots & 0 & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & 0 & \cdots & G_{nm}^{(N)} & \vdots & \vdots \\ \vdots & & & & & \ddots & \vdots \\ G_{n1}^{(N)} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & G_{nn}^{(N)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_k \\ \vdots \\ V_m \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1^{(N)} \\ \vdots \\ I_k^{(N)} \\ \vdots \\ I_m^{(N)} \\ \vdots \\ I_n^{(N)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} G_{kk}^{(U)} & G_{km}^{(U)} \\ G_{km}^{(U)} & G_{mm}^{(U)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_k^{(U)} \\ I_m^{(U)} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式 (11) 为 UDC 元件的节点方程, 由用户自行创建。编制 udc 文件, 即通过变量定义来形成节点方程, 而通过 CODE 程序代码来形成该方程的解的运算式, 编程语言采用 C 语言格式, 但 for、while 等循环语句和 goto 循环体在程序中被禁止使用, 以避免运算量超出实时步长的允许限度。

3 UDC 二次开发技术及其模型校验实例

以双调谐滤波器元件为例, 它是滤波器中较复杂的一类, 所谓双调谐滤波器是由一个 L_1C_1 串联谐振电路和一个 L_2C_2 并联谐振电路串联而成。尽管滤

波器中 LC 元件的接线结构是固定的, 但电阻 R 的配置数量和接线位置则在工程设计时有多种选项, RTDS 元件库的现成双调谐滤波器模型很可能结构不相配。如用单个的现成 R、L、C 元件组合, 则占用较多的节点资源, 相应减小了系统的建模规模, 降低了 RTDS 的使用效率, 所以有必要用 UDC 方法按实际工程结构创建新的模型。

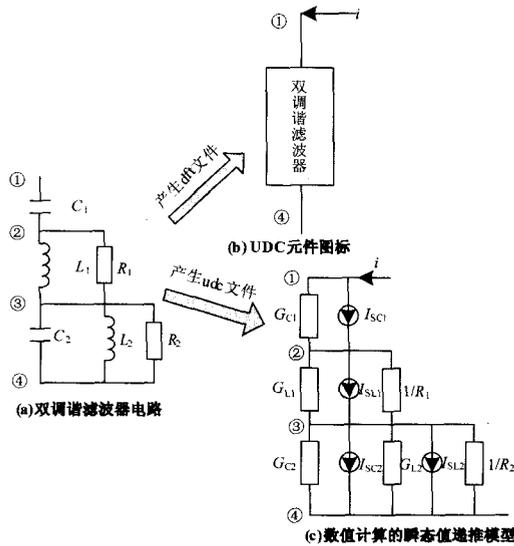


图 7 双调谐滤波器及其 UDC 数值模型

Fig.7 Double damper filter and discrete model circuit

图 7 给出了双调谐滤波器电路及其 UDC 等效计算模型。其中图 7 (a) 是一个两级电感并联电阻结构的双调谐滤波器电路, 如果用现成 RLC 元件组建, 则有 4 个端点和 6 条支路。如果考虑将该滤波器建

成如图 7 (b) 所示的两端点单支路模型, 即端点②、③作为内部节点被消除掉, 则可节省 2 个节点资源。

根据前述的数值模型理论, 可得出滤波器的离散数值模型等效电路如图 7 (c) 所示, 该电路节点方程组的独立维数为 3 维, 设节点④为参照点, 则元件特性方程 (节点方程) 为

$$\begin{bmatrix} G_{C1} & -G_{C1} & 0 \\ -G_{C1} & G_{C1} + G_{L1} + \frac{1}{R_1} & -(G_{L1} + \frac{1}{R_1}) \\ 0 & -(G_{L1} + \frac{1}{R_1}) & G_{L1} + \frac{1}{R_1} + G_{C2} + G_{L2} + \frac{1}{R_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1(t_k) - V_4(t_k) \\ V_2(t_k) - V_4(t_k) \\ V_3(t_k) - V_4(t_k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_{SC1}(t_{k-1}) \\ I_{SC1}(t_{k-1}) - I_{SL1}(t_{k-1}) \\ I_{SL1}(t_{k-1}) - I_{SC2}(t_{k-1}) - I_{SL2}(t_{k-1}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

设图 7 (a) 中节点①、④的电压 V_1 、 V_4 和支路电流 i 为滤波器模型的特性变量 (其中 i 为 V_1 、 V_4 的关联变量), 因为只有这几个量在整个系统模型中反映两端点单支路 UDC 滤波器元件的特性, 所以式 (12) 中的 V_2 、 V_3 必须表示成 V_1 、 V_4 、 i (V_1, V_4) 的表达式。

在具体设计 udc 程序文件时, 为了减少每个步长内的运算量, 尽量将参数的整理运算置于 RAM 区, 使 CODE 代码区的程序尽可能简短, 作者基于这一优化设计原则按式 (12) 编制出了双调谐滤波器 udc 文件程序。

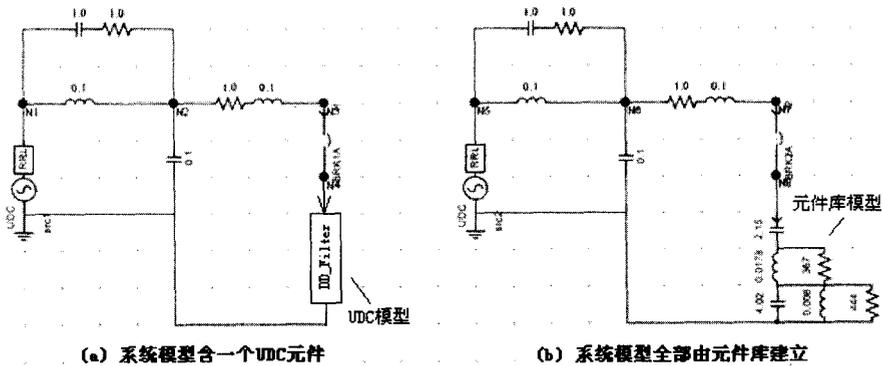


图 8 双调谐滤波器 UDC 模型的 RTDS 验证试验

Fig.8 Validation test case for double damper filter

为了对 UDC 元件模型进行校核和验证, 我们可采用“标准实例测试校核法”, 即在同一个 RTDS 实例中建立两个独立的子系统模型, 如图 8 所示。

实例中, 子系统 (a) 的双调谐滤波器元件为 UDC 模型, 子系统 (b) 的双调谐滤波器元件由现成 RLC

元件组合作为对照标准, 两者参数相同; 除此之外, 两个子系统其它结构参数完全一样, 并且滤波器投切开关的合闸受控于同一个控制信号, 以便两个子系统受到相同的暂态扰动。取子系统末端电压和滤波器电流在开关合闸前后的暂态波形为比较量, 电压和电流

的仿真结果分别如图 9 和图 10 所示。

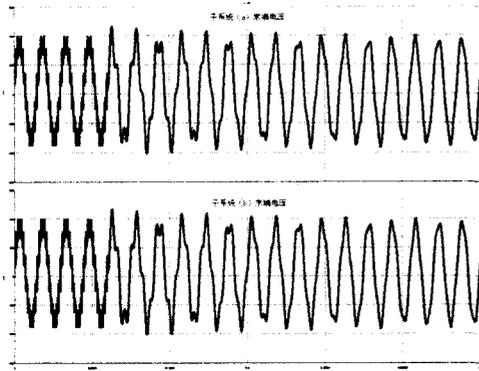


图 9 两个子系统末端电压暂态波形的比较

Fig.9 Transient voltage responses of UDC component and RTDS library component

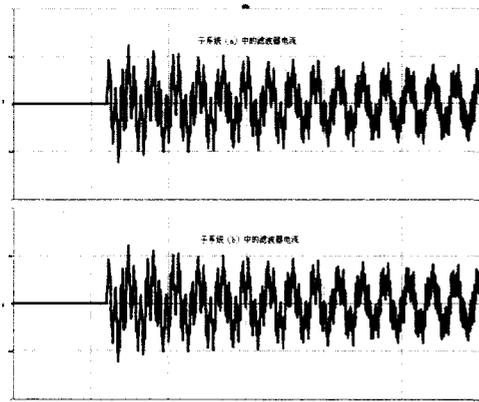


图 10 两个子系统中滤波器电流暂态波形的比较

Fig.10 Transient current responses of UDC component and RTDS library component

以上结果显示, 两个子系统中相应的变量暂态变化过程完全相同, 这证明了由 UDC 方法创建的双调谐滤波器元件模型是十分精确的。

4 结论

本文所提出的 RTDS 自定义元件 (UDC) 技术方法具有可操作性强高、所建元件模型精度高的优点。应用 UDC 技术开发元件模型不仅能够解决 RTDS 元件库中现有元件不足的问题, 还能够有效节省 RTDS 整个模型的节点数量、从而在相同硬件资源的条件下扩大仿真规模, 提高 RTDS 设备的利用效率。

参考文献

- [1] Dommel H W, Meyer W S. Computation of Electromagnetic Transients[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62: 983-993.
- [2] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 李永庄, 林集明, 曾昭华, 译. 北京: 水利电力出版社, 1991.

收稿日期: 2008-11-27; 修回日期: 2009-01-15

作者简介:

徐志恒 (1971-), 男, 硕士, 高工, 从事电力系统实时数字仿真及继电保护试验研究; E-mail: xuzhiheng@sohu.com

钱路江 (1961-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统仿真技术的研究工作。

(上接第 133 页 continued from page 133)

- [10] 余江, 周红阳, 黄佳胤, 等. 接地极线路不平衡保护的相关问题研究[A]. 2007 第十一届全国保护和控制学术研讨会[C]. 2007.
- [11] 翟永昌. 高压直流输电系统直流保护配置的可靠性分析[J]. 南方电网技术研究, 2006, 2 (2): 13-16. ZHAI Yong-chang. Analysis of the Protection Credibility in HVDC Transmission System[J]. Southern Power System Technology Research, 2006, 2 (2): 13-16.
- [12] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

出版社, 2004.

收稿日期: 2008-11-10

作者简介:

朱韬析 (1980-), 男, 工程师, 目前从事直流输电维护工作; E-mail: taoxi_zhu@hotmail.com

汲广 (1976-), 男, 工程师, 目前从事直流输电管理工作;

毛海鹏 (1978-), 男, 工程师, 目前从事直流输电技术管理工作。