

DOI: 10.7667/PSPC171023

基于3步4阶隐式泰勒级数法的电磁暂态数值计算方法

王永^{1,2}, 张磊¹, 叶婧¹, 马骏³, 王晓勇⁴, 饶华兴¹, 谭炜东¹, 李强¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国家电网公司运行分公司上海管理处, 上海 200000; 3. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430062; 4. 江西电力景德镇供电公司, 江西 景德镇 333000)

摘要: 为解决电磁暂态数值计算中的数值振荡问题, 将一种具有无限稳定性的3步4阶隐式泰勒级数法运用于电磁暂态数值计算中。相对于隐式梯形积分法而言, 该数值积分方法既具有A-稳定性又具有无限稳定性, 且其计算精度为6阶。因而, 该方法对截断误差具有较快的衰减速率, 从而可有效地抑制数值振荡。算例结果表明, 与临界阻尼调整法相比较, 使用该方法进行电磁暂态计算, 能够采用较大的时间积分步长, 计算效率高, 可有效地避免因突变情况导致的数值振荡。

关键词: 电磁暂态计算; 隐式泰勒级数法; 临界阻尼调整法; 数值振荡

Electromagnetic transient numerical calculation method based on 3-step 4-order implicit Taylor series method

WANG Yong^{1,2}, ZHANG Lei¹, YE Jing¹, MA Jun³, WANG Xiaoyong⁴, RAO Huaxing¹, TAN Weidong¹, LI Qiang¹

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. China Shanghai Administration Bureau of State Grid Operation Company, Shanghai 200000, China;

3. State Grid Hubei Electric Power Company Economic and Technological Institute, Wuhan 430062, China;

4. Jingdezhen Power Supply Company, Jiangxi Electric Power Company, Jingdezhen 333000, China)

Abstract: In order to solve the problem of numerical oscillation in electromagnetic transient numerical calculation, a 3-step 4-order implicit Taylor series method with infinite stability is applied to the numerical calculation of electromagnetic transient. Compared with the implicit trapezoidal integration method, the numerical integration method is both A-stability and infinite stability. And it has 6 order calculation accuracy. Thus, the method has a fast decay rate for the truncation error, which can effectively suppress the numerical oscillation. The numerical results show that the proposed method can be free of numerical oscillation effectively when sudden change happens. Besides, compared with the critical damping method, using the proposed method to implement electromagnetic transient calculation can take a larger time integration step, which can get higher computational efficiency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407104).

Key words: electromagnetic transient calculation; implicit Taylor series method; critical damping adjustment method; numerical oscillation

0 引言

电力系统电磁暂态(Electromagnetic Transient, EMT)数值计算广泛应用于电力系统的诸多领域: 过电压、绝缘配合、线路保护和故障定位以及谐波分析等等^[1-4]。其基本理论与方法已由 Dommel 于 20 世纪 60 年代末建立^[5]。在电磁暂态仿真程序(Electromagnetic Transient Programs, EMTP)中, 具有

二阶计算精度且A-稳定的隐式梯形积分法被广泛用于对电路元件的微分方程差分。然而, 隐式梯形积分法不是L-稳定的, 在面对因网络拓扑变化而引起非状态量的突变时, 其将产生非原型的数值振荡^[6]。

为了抑制数值振荡现象, 国内外研究人员提出了一系列的技术途径, 其大致包括两大类^[7]: 1) 附加阻尼元件, 在 EMTP 中曾通过附加阻尼元件的方法来抑制数值振荡现象。如在电容元件上串联一个阻尼电阻。这种做法在数学上等价于采用阻尼梯形法^[6], 其缺点在于仿真精度会或多或少地受到影响。

2) 算法切换, 如 EMTP 版本 3.0^[8]中采用的临界阻尼调整法^[9] (Critical Damping Adjustment, CDA)。该算法在电磁暂态计算中, 正常情况下依旧采用隐式梯形法进行计算, 仅在系统检测到扰动时, 才将数值方法切换到半步长隐式欧拉法进行计算。该方法的主要问题在于有些突变现象难以被检测到, 导致 CDA 方法仍然无法避免数值振荡问题。

为进一步解决 CDA 方法所存在的问题, 文献[10]中将一种 2 级 2 阶单对角隐式 Runge-Kutta 方法应用于电磁暂态计算中, 该方法具有 L-稳定性, 因而同隐式欧拉法一样可有效避免数值振荡现象。其主要优点在于无需检测突变现象, 同样的思路还有文献[11], 其将一种 2 级 3 阶单对角隐式 Runge-Kutta 方法用于电磁暂态计算中。不同于 CDA 方法中低阶的隐式欧拉法, 文献[7]提出了一种变参数有理分式拟合法用于抑制数值振荡, 该方法通过调整参数使得算法具有 L-稳定性, 且其计算精度为 3 阶。其主要优点在于既不降低仿真精度, 又能抑制数值振荡。

为了兼顾电磁暂态计算的精度和效率, 并且有效抑制数值振荡, 本文将一种 3 步 4 阶隐式泰勒级数法应用于电磁暂态计算中。该方法具有无限稳定性, 且其计算精度为 6 阶, 其对截断误差具有较快的衰减速率, 从而可有效地抑制数值振荡。通过理论分析和算例仿真结果对比, 讨论并研究了该方法在电磁暂态计算中的特点和优势。

1 3 步 4 阶隐式泰勒级数法

考虑一阶常微分方程的初值问题。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \mathbf{x}(t) \equiv \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t)) + \mathbf{g}(t) \\ \mathbf{x}(t=0) = \mathbf{x}_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 表示时间变量; $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^{m \times 1}$ 为待求的 m 维向量函数, 称之为状态变量; $\mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t))$ 是关于时间 t 和状态变量 $\mathbf{x}(t)$ 的一维线性或非线性函数; $\mathbf{g}(t)$ 是非齐次项, 它是一个只与时间有关的稀疏列向量, 通常称作激励源; \mathbf{x}_0 是状态变量在初始时刻的值。

显式高阶泰勒级数法求解上述初值问题(1)的积分公式为

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \sum_{i=1}^p \frac{1}{i!} h^i \mathbf{x}_n^{(i)} \quad (2)$$

式中: h 为时间积分步长; $\mathbf{x}_n = \mathbf{x}(t_n)$; $\mathbf{x}_n^{(i)}$ 为 \mathbf{x}_n 的第 i 阶导数。显然, 式(2)即 $\mathbf{x}(t_{n+1})$ 在 $t=t_n$ 处的 p 阶 Taylor 展开式。从理论上讲, 只要 $\mathbf{x}(t)$ 足够光滑, 泰勒级数法可以构造“无限”阶的计算公式, 那么

显式高阶泰勒级数法在理论上是 A-稳定的^[12]。然而, 实际计算中通常采用泰勒展开式的有限阶。采用数值方法画出了 $p=1 \sim 3$ 时显式泰勒级数法的数值稳定域($\dot{\mathbf{x}} = \lambda \mathbf{x}, \lambda \in C, C$ 表示复数域), 如图 1 所示。其中, 在封闭区域的内部数值方法是稳定的。

由图 1 可知, 尽管随着 p 的增大, 显式泰勒级数法的数值稳定域有所增大, 但显式泰勒级数法不是 A-稳定的。此外, 此方法的阶数增加意味着需要求解更多的高阶导数, 这势必增加计算量, 甚至会发生数值溢出, 从而加大了对硬软件计算环境的要求^[12]。

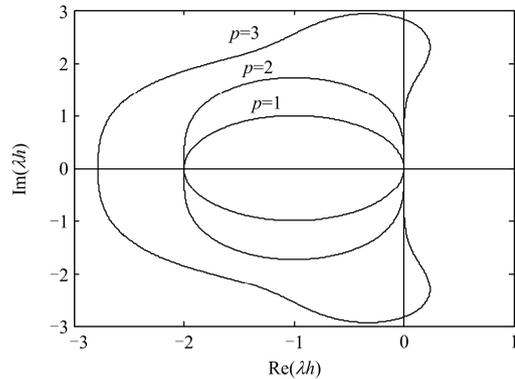


图 1 高阶显式泰勒级数法的稳定域

Fig. 1 Stability region of high-order explicit Taylor series method

显然, 显式泰勒级数法存在的问题是数值稳定性较弱, 但是高阶的泰勒级数法在电力系统暂态稳定仿真计算中得到了广泛的应用^[13-14]。为解决传统高阶 Taylor 级数法的稳定性问题, 在隐式线性多步法的基础上, 文献[12]构造出了多步高阶隐式泰勒级数法的一般计算格式, 且其数值稳定域包含了整个开左半复平面, 即该方法是 A-稳定的。文献[15]采用预估-校正的数学手段, 将传统的高阶泰勒级数法与基于指数函数 $\exp(x)$ 的 (s, s) -Padé 对角逼近差分格式相结合, 从而改进了显式高阶泰勒级数法的稳定性。文献[16]在文献[12]的基础上, 通过对 3 步 4 阶隐式泰勒级数法的计算格式进行改进, 并采用待定系数法构造出了一种 3 步 4 阶隐式泰勒级数法计算格式如下^[16]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_n = & \frac{3888}{3661} \mathbf{x}_{n-1} - \frac{243}{3661} \mathbf{x}_{n-2} + \frac{16}{3661} \mathbf{x}_{n-3} + \frac{3450}{3661} h \mathbf{x}_n^{(1)} - \\ & \frac{1530}{3661} h^2 \mathbf{x}_n^{(2)} + \frac{396}{3661} h^3 \mathbf{x}_n^{(3)} - \frac{54}{3661} h^4 \mathbf{x}_n^{(4)} \end{aligned} \quad (3)$$

采用数值方法画出了 3 步 4 阶隐式泰勒级数法的稳定域如图 2 所示。图 2 中阴影部分以外的区域为式(3)的稳定区域。显然, 算法的数值稳定域包括

了整个开左半复平面, 因而它是 A-稳定的。此外, 3 步 4 阶隐式泰勒级数法也是无限稳定的^[16]。

概括起来, 3 步 4 阶隐式泰勒级数法的计算精度为 6 阶, 局部截断误差为 $O(h^8)$ ^[16]; 在数值稳定性上, 该方法具有 A-稳定性和无限稳定性。因此, 相对于 A-稳定的 2 阶隐式梯形积分法而言, 该算法对截断误差具有较快的衰减速率, 从而可有效地抑制数值振荡, 适合用于电力系统电磁暂态计算。

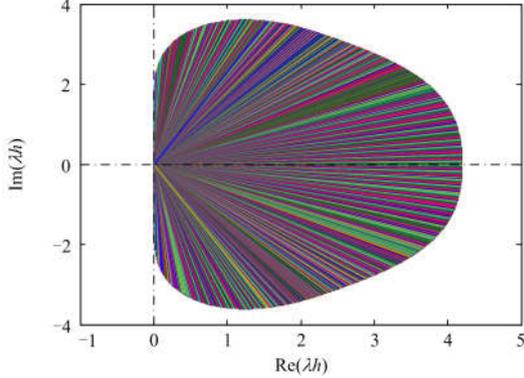


图 2 3 步 4 阶隐式泰勒级数法的稳定域

Fig. 2 Stability region of 3-step 4-order implicit Taylor series method

2 电磁暂态算例分析

从上述的分析可以看出, 3 步 4 阶隐式泰勒级数法与其他数值计算方法的本质不同之处在于其要求对状态变量求 1 至 4 阶的导数。为此, 必须建立合适的电磁暂态数值计算的数学模型以方便求取状态变量的高阶导数。

算例 1: 图 3 是一个单相工频均匀中度长输电线路在不同初相角情况下空载合闸的电磁暂态计算实例^[17]。线路的电压等级为 220 kV, 线路的其他参数已在图 3 中标出。

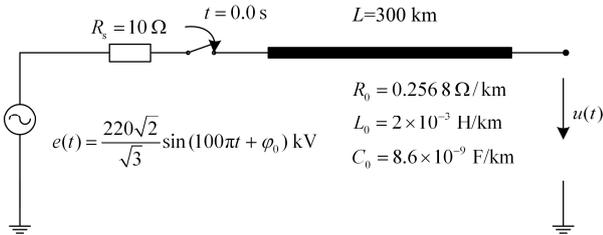


图 3 单相输电线路空载合闸示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a single phase transmission line without load being switched-in suddenly

众所周知, 用于描述图 3 所示高压输电线路电磁暂态过程的数学模型是电报方程。然而, 电报方程是双曲偏微分方程, 需要首先将其转化成如式(1)

所示的常微分方程才能采用数值方法进行电磁暂态计算^[4]。本文采用文献[18]中的 Π 型级联的集总等效电路模型对图 3 中高压输电线路进行数学建模。如图 4 所示, 将图 3 中的输电线路进行空间离散化, 并取线路的区段数 $M = 50$, 线路全长 $L = 300$ km。离散后每一段线路的电阻、电感以及电容依次为

$$r = R_0 L / M, l = L_0 L / M, c = C_0 L / M \quad (4)$$

由图 4 中的等效电路, 根据基尔霍夫电压和电流定律, 易建立如下的一阶线性常微分方程组。

$$\begin{cases} l \frac{di_m(t)}{dt} = u_m(t) - u_{m+1}(t) - ri_m(t) \\ c \frac{du_m(t)}{dt} = i_{m-1}(t) - i_m(t) \\ c \frac{du_{M+1}}{dt} = i_M(t) \end{cases}, m \in (1, M) \quad (5)$$

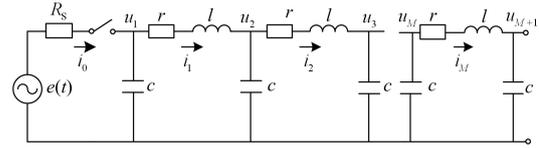


图 4 Π 型级联的集总等效电路模型

Fig. 4 Model of equivalent Π -type lumped-circuits

考虑到图 4 中线路空载合闸时线路首末两端的边界条件, 将式(5)整理成如下的矩阵形式。

$$\dot{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{y}(t) + \boldsymbol{\mu}(t) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{(2M+1) \times (2M+1)}$ 是定常稀疏矩阵; $\boldsymbol{\mu}(t)$ 是 $(2M+1)$ 维稀疏列向量, 它是电磁暂态计算的激励源; 其他表达式见式(7)。

$$\begin{cases} \mathbf{y}(t) = [i_1(t), \dots, i_M(t); u_1(t), \dots, u_{M+1}(t)]^T \\ \boldsymbol{\mu}(t) = [0, \dots, 0; e(t)/(cR_s), 0, \dots, 0]^T \\ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\mathbf{L}^{-1}\mathbf{R} & \mathbf{L}^{-1}\mathbf{P} \\ \mathbf{C}^{-1}\mathbf{Q} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中:

$$\begin{aligned} \mathbf{L} &= \text{diag}(l_{11}, l_{22}, \dots, l_{MM}), l_{ii} = l, i \in (1, M) \\ \mathbf{R} &= \text{diag}(r_{11}, r_{22}, \dots, r_{MM}), r_{ii} = r, i \in (1, M) \\ \mathbf{C} &= \text{diag}(c_{11}, c_{22}, \dots, c_{(M+1)(M+1)}), c_{ii} = c, i \in (1, M+1) \\ \mathbf{S} &= \text{diag}(s_{11}, s_{22}, \dots, s_{(M+1)(M+1)}) \\ s_{11} &= -1/(cR_s), s_{ii} = 0, i \in (2, M+1) \end{aligned}$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & & \mathbf{0} \\ & 1 & -1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & 1 & -1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{M \times (M+1)}$$

$$Q = \begin{bmatrix} -1 & & & & \mathbf{0} \\ 1 & -1 & & & \\ & 1 & \ddots & & \\ & & \ddots & \ddots & -1 \\ \mathbf{0} & & & & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{(M+1) \times M}$$

为方便 $\mathbf{y}(t)$ 对时间求高阶导数, 故采用状态变量增维的方法将式(6)转化为齐次线性微分方程。

$$\dot{\bar{\mathbf{y}}} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{y}} \\ \Delta \dot{\mathbf{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{E} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \bar{\mathbf{y}} \quad (8)$$

式(8)中:

$$\Delta \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ \delta(t) \end{bmatrix}, \quad \alpha(t) = \frac{e(t)}{cR_s} = \frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{3}cR_s} \sin(100\pi t + \varphi_0),$$

$$\delta(t) = \frac{220\sqrt{2}}{\sqrt{3}cR_s} \cos(100\pi t + \varphi_0); \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 100\pi \\ -100\pi & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_{11} \\ \vdots \\ \mathbf{e}_{(2M+1)1} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{e}_{i1} = [0 \quad 0], i \in (1, 2M+1), i \neq M+1,$$

$$\mathbf{e}_{(M+1)1} = [1 \quad 0].$$

由式(8)可知, $\bar{\mathbf{y}}(t)$ 对时间求 p 阶导数的一般表达式为

$$\bar{\mathbf{y}}^{(p)} = \mathbf{B} \bar{\mathbf{y}}^{(p-1)} = \mathbf{B}^p \bar{\mathbf{y}}, p \geq 1 \quad (9)$$

至此, 便可根据式(3)求解式初值问题(8)。显然, 本文采用3步4阶隐式泰勒级数法进行电磁暂态计算需要首先借助单步4阶显式泰勒级数法启动计算^[12]。计算时, 初相角 $\varphi_0 = \pi/2$, 本文方法的时间积分步长 $h = 8.0 \times 10^{-5}$ s, CDA方法的计算步长 $h = 1.0 \times 10^{-6}$ s。相应的输电线路末端电压计算结果分别见图5和图6。

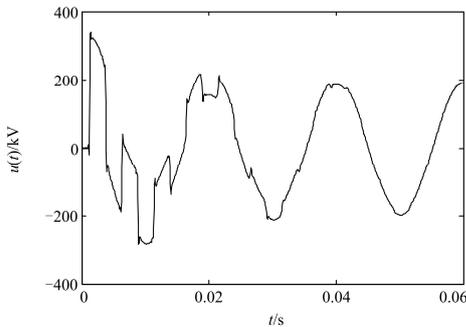


图5 3步4阶隐式泰勒级数法计算线路末端电压的结果

Fig. 5 Terminal voltage of transmission line calculated by 3-step 4-order implicit Taylor series method

对比图5和图6, 显然由于3步4阶隐式泰勒级数法在数值上是无限稳定的, 且对截断误差具有较快的衰减速率, 因而其计算结果没有产生数值振荡。

相反, CDA方法因未能检测到线路首端的突变现象, 导致计算结果产生了持续的、“虚假的”数值振荡。

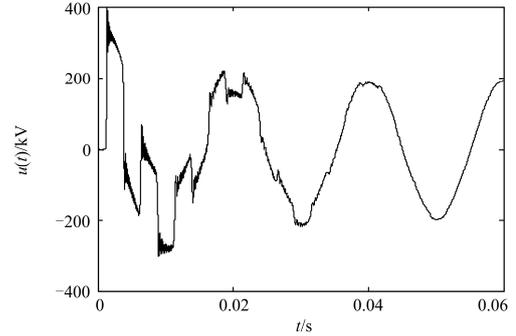


图6 CDA方法的计算线路末端电压的结果

Fig. 6 Terminal voltage of transmission line calculated by CDA method

算例2: 图7是一无损传输线的仿真实例, 传输线的分布参数已在图中给出, 激励源为阶跃电压源 $e_i = 60\varepsilon(t)$ V, 电源内阻 $r_s = 100 \Omega$, 负载为纯电阻 $r_L = 200 \Omega$, 负载电压记为 u_L 。

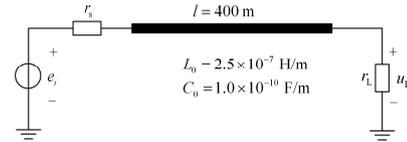


图7 测试电路2

Fig. 7 Test circuit 2

采用电报方程对算例2进行建模, 并采用文献[19]中的离散方法对电报方程进行空间上离散。在此基础上可以得到算例2的形如式(6)的一阶常微分方程^[20], 进而采用3步4阶隐式泰勒级数法进行求解。计算参数: 传输线的空间离散区段数 $M = 100$, 本文方法的时间积分步长 $h = 5.0 \times 10^{-8}$ s, CDA方法的计算步长 $h = 5$ ns。两种方法相应的传输线末端负载电压计算结果分别见图8和图9。

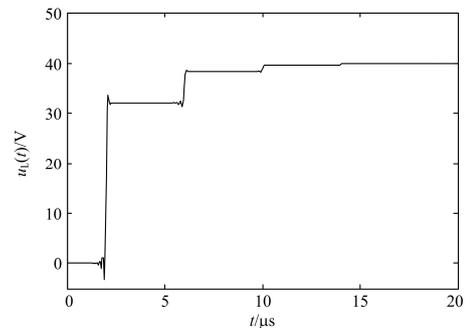


图8 3步4阶隐式Taylor级数法计算传输线负载电压的结果

Fig. 8 Load voltage of transmission line calculated by 3-step 4-order implicit Taylor series method

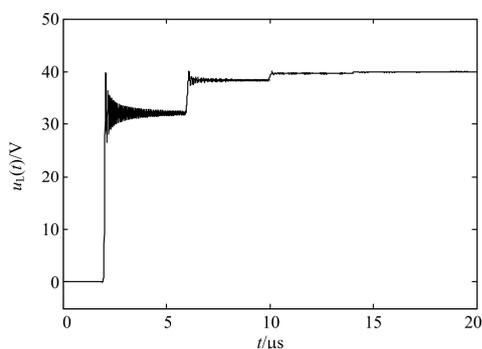


图 9 CDA方法计算传输线负载电压的结果

Fig. 9 Load voltage of transmission line calculated by CDA method

显然,从图 8、图 9 中可以看出:当阶跃电压信号从传输线始端传至末端时,本文方法的计算结果没有出现数值振荡现象;相反,CDA 方法则出现了严重的数值振荡。

3 结论

本文将一种 3 步 4 阶隐式泰勒级数法用于电磁暂态计算中。该方法具有 A-稳定性以及无限稳定性,且其计算精度为 6 阶。该算法对截断误差具有较快的衰减速率,从而可有效地抑制数值振荡现象。该方法与现有电磁暂态数值计算方法的区别在于其在仿真中需要求解状态量的高阶导数,且能采用 10 倍于 CDA 方法的较大积分步长。概括起来,采用本文方法进行电磁暂态仿真能够在提高计算效率的同时有效地避免数值振荡。

参考文献

- [1] ROOSTAEE S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y
- [2] 吴继维,童晓阳,廖小君,等.基于零序差动阻抗的输电线路保护新原理研究[J].*电力系统保护与控制*, 2017, 45(10): 11-17.
WU Jiwei, TONG Xiaoyang, LIAO Xiaojun, et al. Transmission line protection principle based on zero sequence differential impedance[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(10): 11-17.
- [3] 王成山,李鹏,王立伟.电力系统电磁暂态仿真算法研究进展[J].*电力系统自动化*, 2009, 33(7): 97-103.
WANG Chengshan, LI Peng, WANG Liwei. Progresses on algorithm of electromagnetic transient simulation for electric power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(7): 97-103.
- [4] 王大鹏,魏佩瑜,王婧,等.输电线路暂态计算与分析方法的发展与展望[J].*继电器*, 2007, 35(6): 10-15.
WANG Dapeng, WEI Peiyu, WANG Jing, et al. Development and prospect of transmission line analysis and calculation theories[J]. *Relay*, 2007, 35(6): 10-15.
- [5] DOMMEL H W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, 88(4): 388-399.
- [6] 刘益青,陈超英.用以消除数值振荡的阻尼梯形法误差分析与修正[J].*中国电机工程学报*, 2003, 23(7): 57-61.
LIU Yiqing, CHEN Chaoying. Errors analysis and correction of damping trapezoidal integration for eliminating numerical oscillations[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(7): 57-61.
- [7] 迟永宁,舒德兀,张春朋,等.交流弱电网中用于抑制数值振荡的变参数有理分式拟合算法[J].*电网技术*, 2016, 40(6): 1792-1796.
CHI Yongning, SHU Dewu, ZHANG Chunpeng, et al. A parameterized rational-fraction fitting algorithm for numerical oscillation suppression in weak AC grid[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(6): 1792-1796.
- [8] 商莹,于玉铭,邹振宇,等.非线性电路暂态仿真中消除数值振荡的改进方法[J].*电力系统保护与控制*, 2011, 39(7): 142-146.
SHANG Ying, YU Yuming, ZOU Zhenyu, et al. An advanced method of non-linear circuit eliminating numerical oscillation in electromagnetic transient simulation[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(7): 142-146.
- [9] LIN Jiming, MARTI J R. Implementation of the CDA procedure in the EMTP[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1990, 5(2): 394-402.
- [10] NODA T, TAKENAKA K, INOUE T. Numerical integration by the 2-stage diagonally implicit Runge-Kutta method for electromagnetic transient simulations[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(1): 390-399.
- [11] 杨萌,汪芳宗.基于 2 级 3 阶单对角隐式 Runge-Kutta 法的电磁暂态计算方法[J].*电力系统保护与控制*, 2017, 45(6): 68-73.
YANG Meng, WANG Fangzong. 2-stage 3-order diagonally implicit Runge-Kutta method for electromagnetic transient calculation[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(6): 68-73.

- [12] 徐英, 郭志忠. 多步高阶隐式泰勒级数法暂态稳定计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 11-15, 20.
XU Ying, GUO Zhizhong. Transient stability calculation by implicit multi-step Taylor series method[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 11-15, 20.
- [13] 郭志忠, 柳焯. 快速高阶 Taylor 级数法暂态稳定计算[J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(3): 8-16.
GUO Zhizhong, LIU Zhuo. Fast transient stability calculation by higher order Taylor series expansions[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(3): 8-16.
- [14] XIA Daozhi. On-line transient evaluation by system decomposition aggregation and high order derivatives[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(7): 2033-2046.
- [15] 刘书君, 杨虎, 安学利. 基于一类新的预估-校正策略的电力系统暂态稳定快速仿真算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 32-37.
LIU Shujun, YANG Hu, AN Xueli. Fast simulation algorithm for power system transient stability based on a new predictor-corrector strategy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 32-37.
- [16] 张芳, 仇雪芳, 李传栋. 电力系统中长期过程动态仿真的组合积分算法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 113-120.
ZHANG Fang, QIU Xuefang, LI Chuandong. Combined integral method for mid/long-term dynamic simulation of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 113-120.
- [17] 戴仁昶, KEVIN K W C, LAURENCE A, 等. DTS 中长距离输电线路的电磁暂态仿真[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 7-10.
DAI Renchang, KEVIN K W C, LAURENCE A, et al. Electromagnetic transient stability simulation of long distance transmission line in DTS[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 7-10.
- [18] 崔翔. 无损传输线物理模拟的集总电路级联数目确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2561-2570.
CUI Xiang. Chained number of lumped-circuits for physical analogy of the lossless transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2561-2570.
- [19] CANGELLARIS A C, PASHA S, PRINCE J L, et al. A new discrete transmission line model for passive model order reduction and macromodeling of high-speed interconnections[J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 1999, 22(3): 356-364.
- [20] WANG F Z, YANG M. Fast electromagnetic transient simulation for over-voltages of transmission line by high order Radau method and V -transformation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3639-3645.

收稿日期: 2017-07-10; 修回日期: 2017-11-13

作者简介:

王 永(1990—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统电磁暂态计算; E-mail: yongwang2015wy@163.com

张 磊(1986—), 男, 博士, 讲师, 主要从事大规模新能源接入后电力系统优化运行与控制等研究; E-mail: leizhang3188@163.com

叶 婧(1986—), 女, 博士, 主要从事电力系统优化运行等研究。E-mail: yejing2000310@163.com

(编辑 姜新丽)