

9-3-2020

Electromagnetic transient calculation method of VSCHVDC based on Parareal algorithms

Jie HU

College of Electrical Engineering & New Energy , Three Gorges University , Yichang 443002 , China

Nianzuo ZOU

College of Electrical Engineering & New Energy , Three Gorges University , Yichang 443002 , China

Meng YANG

Xaogan Power Supply Company Maintenance Branch , State Grid Hubei Electric Power Co , Ltd , Xiaogan 432000 , China

Jie MENG

Daye Power Supply Company , State Grid Hubei Electric Power Co , Ltd , Daye 435000 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

HU, Jie; ZOU, Nianzuo; YANG, Meng; and MENG, Jie (2020) "Electromagnetic transient calculation method of VSCHVDC based on Parareal algorithms," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 2, Article 14.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.02.014

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss2/14>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

基于 Parareal 算法的 VSC-HVDC 电磁暂态计算方法

胡 洁¹, 邹念佐¹, 杨 萌², 孟 洁³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网湖北省电力有限公司孝感供电公司检修分公司, 湖北 孝感 432000;
3. 国网湖北省电力有限公司大冶市供电公司, 湖北 大冶 435000)

摘 要:针对 VSC-HVDC 系统, 考虑 Parareal 并行计算方法的并行性与高效性特点, 提出一种电磁暂态计算问题方法, 以提高 VSC-HVDC 系统电磁暂态计算速度与数值精度。首先, 建立 VSC-HVDC 时域动态模型, 并使用 Parareal 方法进行计算, 该方法通过划分整个仿真时间为一系列子区间, 将各子区间内的初始值用一组满足网络初始条件的近似解来表示; 其次, 利用这组初始值在各子区间内单独、同时进行计算求解; 最后, 通过预估—校正的方法得到精细解。算例测试表明: 该算法可获得有效的加速比及较高的并行效率, 应用于 VSC-HVDC 系统电磁暂态数值仿真中能显著提高计算速度。

关 键 词: VSC-HVDC 系统; 时域动态模型; Parareal 算法; 预估—校正

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.02.014 中图分类号: TM744 文章编号: 1673-9140(2020)02-0107-06

Electromagnetic transient calculation method of VSC-HVDC based on Parareal algorithms

HU Jie¹, ZOU Nianzuo¹, YANG Meng², MENG Jie³

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Xiaogan Power Supply Company Maintenance Branch, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Xiaogan 432000, China; 3. Daye Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Daye 435000, China)

Abstract: In order to improve calculation speed for the electromagnetic transient of VSC-HVDC system without losing accuracy, the Parareal method is applied to the electromagnetic transient simulation of VSC-HVDC. At the beginning, the VSC-HVDC time domain dynamic model is established. Then the model is calculated by employing the Parareal method. This method can decomposed the whole simulation time into a series of subintervals and a coarse approximation of the trajectory is utilized to supply the initial conditions at each subinterval. Secondly, using this set of initial values solves the evolution problems at each subinterval concurrently and separately. Then a fine solution is obtained by using an estimate-correction method. The experimental results show that the algorithm can obtain a more effective speed ratio with a high parallel efficiency. It can improve the calculation speed of VSC-HVDC system in electromagnetic transient numerical simulations.

Key words: VSC-HVDC system; time domain dynamic model; Parareal algorithm; prediction-correction

近年来,柔性高压直流输电系统(VSC-HVDC)备受关注^[1-4]。它以脉宽调制技术(PWM)为基础,用全控型器件^[5]代替传统的半控型器件晶闸管,既能快速独立调节系统的有功和无功功率,也能对无源交流网络供电、稳定电压,提高了电力系统的稳定性。VSC-HVDC 是一个复杂的电力系统,了解它的电磁暂态特性对分析系统扰动、故障很有帮助。

VSC-HVDC 系统中含有大量电力电子设备,它们的开关频率高,使仿真模型具有很强的非线性,在电力系统中则表现为“持续快速变化的动态性能”^[6]。稳态模型无法刻画出系统的主要动态特性。文献[7]对电力电子装置进行了动态向量建模与仿真;文献[8-9]将动态向量法用于 VSC-HVDC 系统的电磁暂态仿真中,提高了计算速度,然而动态向量模型的精度低于详细时域模型的精度,应用这一模型进行仿真计算,势必会导致仿真精度下降。如何在仿真中既不失计算精度又能兼顾仿真速度,时间并行计算方法为解决这一问题提供了一个很好的技术途径。

电磁暂态数值仿真本质上是求解微分动力学方程在时间域上的响应^[10]。文献[11-12]介绍了 2 种牛顿类求解微分方程的时间并行计算方法;文献[13]介绍了 Paraexp 并行计算方法,该方法计算效率高,主要适用于计算线性方程。VSC-HVDC 系统中存在大量非线性元件,在电磁暂态数值仿真中则反映为存在大量非线性方程,Paraexp 方法的使用便受到了限制。文献[14-16]介绍了一种由 Lions 等人提出的 Parareal 并行算法。Parareal 算法的特点在于其时间的并行性,可用于非线性方程组的计算,过程简单且收敛速度快,对于解决时间依赖性的问题十分有效。该文应用 Parareal 算法于 VSC-HVDC 系统的电磁暂态数值仿真中,以提高仿真计算的效率。

1 Parareal 算法介绍

微分方程初始值问题可描述为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}x(t) = x'(t) = f(x(t)), t \in (0, T) \\ x(t=0) = x^0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $f: R^M \rightarrow R^M$ 且 $x: R \rightarrow R^M$ 。

现将时间窗 $\Omega = (0, T)$ 进行分解:

$$\begin{cases} \Omega_n = (T_n, T_{n+1}), n = 0, 1, \dots, N-1 \\ \Delta T_n = T_{n+1} - T_n \end{cases} \quad (2)$$

考虑每个子区间 Ω_n 的求解问题:

$$\begin{cases} x'_n(t) = f(x_n(t)), t \in (T_n, T_{n+1}) \\ x_n(T_n) = X_n, n = 0, 1, \dots, N-1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 X_n 为状态变量 x 在 T_n 时刻的精确解,在每个子区间 Ω_n 内必须严格满足式(1)。

$$\begin{cases} X_0 = x^0, \\ X_n = \phi_{\Delta T_{n-1}}(X_{n-1}), n = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (4)$$

$\phi_{\Delta T_n}(\mathbf{X})$ 表示式(1)中初始值 $\mathbf{X}$ 经过 ΔT_n 时间计算得到的解。令 $\mathbf{X} = (X_0^T, \dots, X_{N-1}^T)^T$, 式(4)可表示为

$$F(\mathbf{X}) = \begin{pmatrix} X_0 - x^0 \\ X_1 - \phi_{\Delta T_0}(X_0) \\ \vdots \\ X_{N-1} - \phi_{\Delta T_{N-2}}(X_{N-2}) \end{pmatrix} = 0 \quad (5)$$

式中 $F: R^{M \cdot N} \rightarrow R^{M \cdot N}$ 。 $\mathbf{X}$ 下标表示时域子区间, X_n 为每个子区间待求的初始值,用牛顿迭代法求解该系统:

$$\mathbf{X}^k = \mathbf{X}^{k-1} - \mathbf{J}_F^{-1}(\mathbf{X}^{k-1}) F(\mathbf{X}^{k-1}) \quad (6)$$

式中 $\mathbf{X}$ 上标 k 为迭代次数; $\mathbf{J}_F$ 为雅各比矩阵。牛顿迭代可以展开为

$$\begin{bmatrix} I & & & \\ -\frac{\partial \phi_{\Delta T_0}}{\partial X_0}(X_0^{k-1}) & I & & \\ & 0 & 0 & \ddots \\ & & -\frac{\partial \phi_{\Delta T_{N-2}}}{\partial X_{N-2}}(X_{N-2}^{k-1}) & I \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X_0^{k-1} - x^0 \\ X_1^{k-1} - \phi_{\Delta T_0}(X_0^{k-1}) \\ \vdots \\ X_{N-1}^{k-1} - \phi_{\Delta T_{N-2}}(X_{N-2}^{k-1}) \end{pmatrix} \quad (7)$$

则有

$$\begin{aligned} & \{X_0^k = x^0 \\ & \{X_n^k = \phi_{\Delta T_{n-1}}(X_{n-1}^{k-1}) + \\ & \quad \phi'_{\Delta T_{n-1}}(X_{n-1}^{k-1})(X_{n-1}^k - X_{n-1}^{k-1}) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $n=1,2,\dots,N-1$ 。式(8)由牛顿迭代得到,收敛速度为二次收敛。虽然收敛速度快,但计算非线性方程的雅各比矩阵会占用计算机大量的内存且计算时间很长。为能简单快捷地计算这类方程,Parareal 算法应运而生。首先定义 2 种运算:

1) $F(T_n, T_{n-1}, X_{n-1})$ 表示采用数值算法 F 得到子区间 Ω_n 上 $\phi_{\Delta T_{n-1}}(X_{n-1})$ 的精细解;

2) $G(T_n, T_{n-1}, X_{n-1})$ 表示采用数值算法 G 得到时间点 $T_n = n \cdot \Delta T$ 时刻 $\phi_{\Delta T_{n-1}}(X_{n-1})$ 的粗糙解,亦可表示为通过采用更大的计算步长、低阶的数值方法或是一种更为简单的模型计算得到各时间点上的粗糙解。

式(8)中各部分可近似表示为

$$\begin{aligned} & \phi_{\Delta T_{n-1}}(X_{n-1}^{k-1}) = F(T_n, T_{n-1}, X_{n-1}^{k-1}) \\ & \phi'_{\Delta T_{n-1}}(X_{n-1}^{k-1})(X_{n-1}^k - X_{n-1}^{k-1}) \approx \\ & \quad [G(T_n, T_{n-1}, X_{n-1}^k) - G(T_n, T_{n-1}, X_{n-1}^{k-1})] \end{aligned} \quad (9)$$

因此,式(8)可表示为

$$\begin{aligned} & \{X_0^k = x^0 \\ & \{X_n^k = F(T_n, T_{n-1}, X_{n-1}^{k-1}) + G(T_n, \\ & \quad T_{n-1}, X_{n-1}^k) - G(T_n, T_{n-1}, X_{n-1}^{k-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

Parareal 算法迭代过程如图 1 所示,为简单起见,将 $G(T_n, T_{n-1}, X_{n-1})$ 和 $F(T_n, T_{n-1}, X_{n-1})$ 简写成图 1 中的 $G(X_{n-1})$ 和 $F(X_{n-1})$ 。综上所述,Parareal 算法的计算流程如图 2 所示。

首次迭代校正时,有 $X_1^1 = \tilde{X}_1^1 + \hat{X}_1^1 - \tilde{X}_1^0$,又因为 $\tilde{X}_1^1 = \tilde{X}_1^0$,则在 $t = T_1$ 时可得 $X_1^1 = \hat{X}_1^1$ 。以此类推,当进行第 k 次迭代校正时, T_k 时刻的粗糙解被校正为精细解。若全部完成 N 次校正,则所有时刻的粗糙解均被校正为精细解,相当于在时间窗 $(0, T)$ 采用小步长 $\Delta\delta$ 串行计算一次。用加速比 S_r 来衡量算法性能:

$$S_r = \frac{\text{CPU 串行计算耗时}}{\text{CPU 并行计算耗时}}$$

当系统数据交换量较少时,忽略数据交换耗时,加速比可表示为

$$S_r = \frac{\text{子区间数 } N}{\text{迭代收敛次数 } k}$$

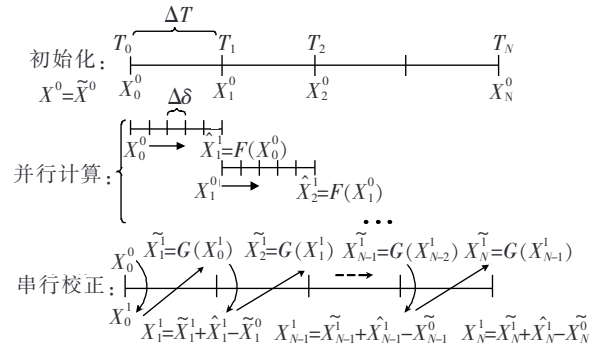


图 1 Parareal 迭代过程

Figure 1 Parareal iteration process

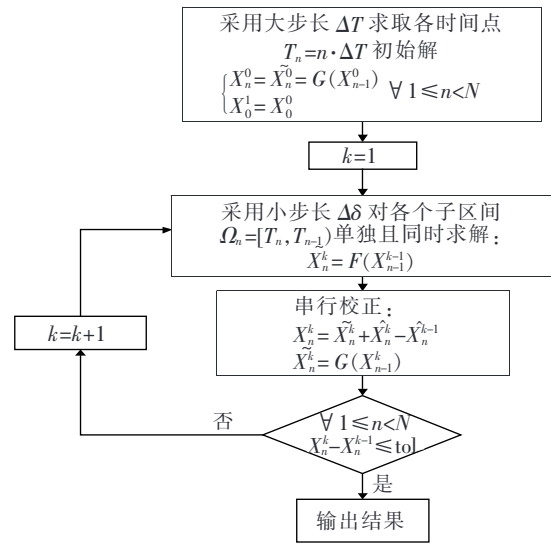


图 2 Parareal 计算流程

Figure 2 Parareal calculation flow chart

2 VSC-HVDC 动态建模

VSC-HVDC 系统两端由全控型器件组成的换流器(VSC1、VSC2)通过换流变压器与交流母线相连,VSC1、VSC2 分别工作在整流和逆变状态。VSC-HVDC 系统的详细三相拓扑电路如图 3 所示。

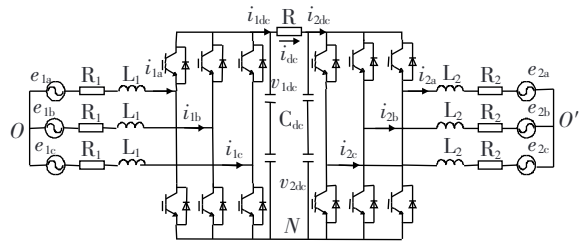


图 3 VSC-HVDC 三相电路

Figure 3 VSC-HVDC three-phase circuit diagram

对 VSC-HVDC 系统做如下假设:

1) 换流桥由理想阀元件构成,其正向漏电流

为零;

2) 系统电压、电流满足三相平衡条件且均为工频正弦波。

在同一个脉宽调制(PWM)控制下的 VSC 上、下 2 个桥臂交替导通,开关函数 $S=1$ 表示仅上桥臂导通, $S=0$ 表示仅下桥臂导通。以 VSC1 侧电路为例(VSC2 侧同理),由三相平衡条件和 KVL 可得:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{1a}}{dt} = -R_1 i_{1a} - v_{1dc} S_{1a} - \frac{v_{1dc}}{3} \sum_{j=a,b,c} S_{1j} + e_{1a} \\ L_1 \frac{di_{1b}}{dt} = -R_1 i_{1b} - v_{1dc} S_{1b} - \frac{v_{1dc}}{3} \sum_{j=a,b,c} S_{1j} + e_{1b} \\ L_1 \frac{di_{1c}}{dt} = -R_1 i_{1c} - v_{1dc} S_{1c} - \frac{v_{1dc}}{3} \sum_{j=a,b,c} S_{1j} + e_{1c} \end{cases} \quad (11)$$

用开关函数在一个开关周期内的基本波形 d_{1j} 来代替 S_{1j} :

$$d_{1j} = \frac{m_1}{2} \cos(\omega t - \delta_1 - \delta_j) + \frac{1}{2} \quad (12)$$

$$\begin{cases} 0, & j = a \\ \frac{2}{3}\pi, & j = b \\ \frac{4}{3}\pi, & j = c \end{cases} \quad (13)$$

将式(12)、(13)带入式(11)可得 VSC1 侧时域动态模型(VSC2 侧同理):

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{1a}}{dt} = -R_1 i_{1a} - \frac{m_1}{2} v_{1dc} \cos(\omega t - \delta_1) + e_{1a} \\ L_1 \frac{di_{1b}}{dt} = -R_1 i_{1b} - \frac{m_1}{2} v_{1dc} \cos(\omega t - \delta_1 - \frac{2}{3}\pi) + e_{1b} \\ L_1 \frac{di_{1c}}{dt} = -R_1 i_{1c} - \frac{m_1}{2} v_{1dc} \cos(\omega t - \delta_1 - \frac{4}{3}\pi) + e_{1c} \end{cases} \quad (14)$$

直流侧时域动态模型:

$$C_{dc} \frac{d(v_{1dc} + v_{2dc})}{dt} = i_{1dc} - i_{2dc} = \sum_{j=a,b,c} (i_{1j} d_{1j} - i_{2j} d_{2j}) \quad (15)$$

3 算例分析

VSC-HVDC 系统参数:双端电压源电压分别

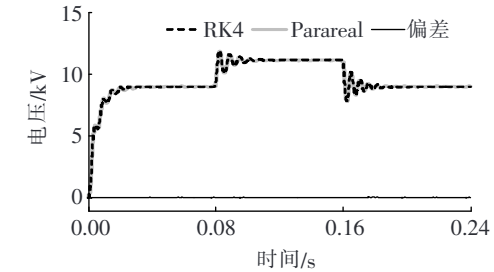
为 3、2.8 kV,系统频率为 50 Hz;VSC 是对称结构,两侧电气参数相等:电阻为 0.1Ω ,换流器电感为 $500 \mu\text{H}$,直流电容为 1 mF ,忽略开关阻抗。

3.1 算例 1

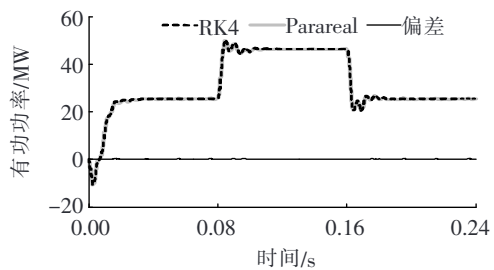
当 $t=0.08 \text{ s}$ 时,VSC 一侧调制比由 0.9 降低到 0.6,然后在 $t=0.16 \text{ s}$ 时恢复初始值,总仿真时长为 0.24 s 。观察在此扰动下系统有功功率、直流电压及交流电流的变化情况。

采用 Parareal 算法并行计算与四阶 Runge-Kutta 算法串行计算得到的直流电压及有功功率如图 4 所示。在 Parareal 并行算法中,各子区间初始值预估使用隐式梯形法,子区间内使用四阶 Runge-Kutta 算法并行计算。选取大步长 ΔT 为 1 ms ,小步长 $\Delta \delta$ 为 0.1 ms 。

算法收敛性测试结果如表 1 所示,在不同的并行度 N 下,Parareal 算法相对于传统串行算法获得的加速比曲线如图 5 所示,可以看到,加速比随并行度的增大而增大。



(a) 直流电压



(b) VSC1 侧有功功率

图 4 算例 1 仿真结果

Figure 4 Simulation results of case 1

表 1 算法收敛性测试结果

Table 1 Algorithmic convergence test results

并行度	迭代收敛次数
5	168
10	104
20	52

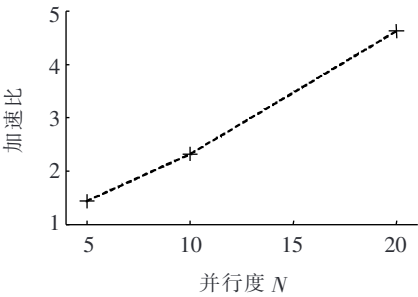


图 5 加速比曲线

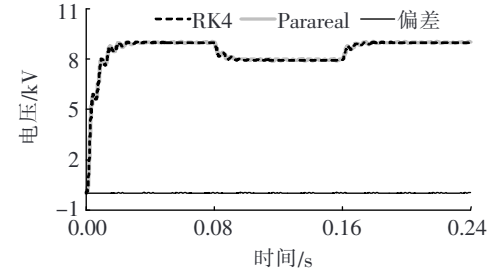
Figure 5 Speedup ratios curve

3.2 算例 2

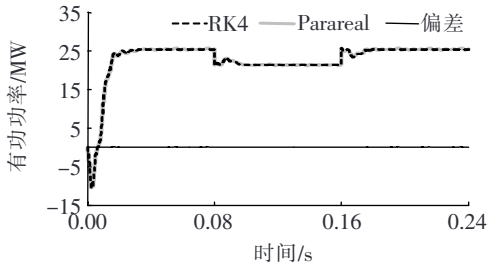
当 $t=0.08\text{ s}$ 时,VSC 一侧受到扰动,电压由初始值 3 kV 降低到 2.5 kV ,然后在 $t=0.16\text{ s}$ 时恢复初始值,总仿真时长为 0.24 s 。观察在此扰动下系统有功功率、直流电压及交流电流的变化情况。

采用 Parareal 算法并行计算与四阶 Runge-Kutta 算法串行计算得到的直流电压及有功功率如图 6 所示。计算方法与步长选取如算例 1。

算法收敛性测试结果如表 2 所示,在不同并行度 N 下,Parareal 算法相对于传统串行算法获得的加速比曲线如图 7 所示,不难看出,使用 Parareal 并行算法能显著提高系统计算效率,获得有效的加速比。



(a) 直流电压



(b) VSC1 侧有功功率

图 6 算例 2 仿真结果

Figure 6 Simulation results of case 2

表 2 算法收敛性测试结果

Table 2 Algorithmic convergence test results

并行度	迭代收敛次数
5	185
10	104
20	54

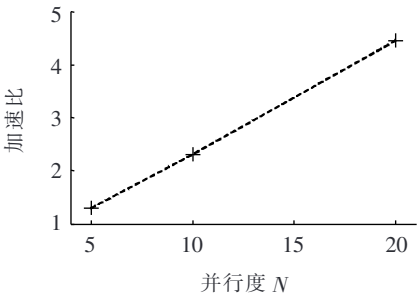


图 7 加速比曲线

Figure 7 Speedup ratios curve

4 结语

将 Parareal 算法应用于 VSC-HVDC 系统的电磁暂态数值仿真中,算例结果表明:该方法可直接在时域内反应 VSC-HVDC 系统的电磁暂态特性,较动态向量模型而言具有更高的精度。其次,Parareal 算法并行度高、收敛速度快,能有效提高 VSC-HVDC 系统电磁暂态数值仿真速度,大大节约了计算时间。

参考文献:

[1] 刘正茂,唐欣,肖茂. 连接 VSC-HVDC 的弱电网低频振荡研究[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(1):34-40.
LIU Zhengmao,TANG Xing,XIAO Mao. Study on low frequency oscillation of weak grid connected to VSC-HVDC[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2016,31(1):34-40.

[2] 李国庆,孙银锋,吴学光. 柔性直流输电稳定性分析及控制参数整定[J]. 电工技术学报,2017,32(6):231-239.
LI Guoqing,SUN Yinfeng,WU Xueguang. VSC-HVDC stability analysis and control parameter setting [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(6):231-239.

[3] 任明辉,霍超,李武龙,等. 含多端 VSC-HVDC 的交流直流混合网络潮流计算方法研究[J]. 智慧电力,2019,47(4):59-65.
REN Minghui, HUO Chao, LI Wulong, et al. Power flow calculation method of AC/DC hybrid network with multi-terminal VSC-HVDC[J]. Smart Power,2019,47(4):59-65.

[4] 傅春翔,汪天呈,郇洪柯,等. 用于海上风电并网的柔性

- 直流系统接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 119-126.
- FU Chunxiang, WANG Tiancheng, LI Hongke, et al. Study on grounding methods of VSC-HVDC for off-shore wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 119-126.
- [5] 刘长富, 张玉龙, 竺炜, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统下垂控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 47-53.
- LIU Changfu, ZHANG Yulong, ZHU Wei, et al. Improved droop control strategy for MMC-MTDC system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 47-53.
- [6] 黄宇鹏, 汪可友, 李国杰. 基于权重数值积分的电力电子开关仿真插值算法[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 150-155.
- HUANG Yupeng, WANG Keyou, LI Guojie. A weight-number integrated based interpolation algorithm for simulation of power electric circuit[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 150-155.
- [7] 戚庆茹, 焦连伟, 陈寿孙, 等. 运用动态相量法对电力电子装置建模与仿真初探[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 6-10.
- QI Qingru, JIAO Lianwei, CHEN Shousun, et al. Application of the dynamic phasors in modeling and simulation of electronic converters[J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(9): 6-10.
- [8] Yao S, Bao M, Hu Y, et al. Modeling for VSC-HVDC electromechanical transient based on dynamic phasor method[C]//2nd IET Renewable Power Generation Conference, Beijing, China, 2013.
- [9] 孙棚, 孔力. VSC-HVDC 系统的动态相量法建模仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 44-47.
- SUN Xu, KONG Li. Modeling and simulation analysis of VSC-HVDC system with dynamic phasors method[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(1): 44-47.
- [10] 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. Progress on algorithm of electromagnetic transient simulation for electric power system[J]. Automation of Electric Power System, 2009, 33(7): 97-103.
- [11] Fabozzi D, Chieh A S, Haut B, et al. Accelerated and localized Newton schemes for faster dynamic simulation of large power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4936-4947.
- [12] Scala M L, Brucoli M, Torelli F, et al. A Gauss-Jacobi Block-Newton method for parallel transient stability analysis of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1168-1177.
- [13] Gander M J, Güttel S. PARAEXP: A parallel integrator for linear initial-value problems[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2013, 35(2): C123-C142.
- [14] Gurralla G, Dimitrovski A, Pannala S, et al. Parareal in time for fast power system dynamic simulations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 1820-1830.
- [15] Martin J. Gander, Stefan Vandewalle. Analysis of the Parareal time-parallel time-integration method[J]. SIAM Journal on Scientific Computing, 2007, 29(2): 556-578.
- [16] Gander M J, Vandewalle S. On the superlinear and linear convergence of the parareal algorithm[J]. Lecture Notes in Computational Science & Engineering, 2007, 55: 291-298.