

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.019

直流配电网电磁暂态仿真并行算法研究^{*}

张 达, 江全元^{*}

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对在直流配电网快速发展的情况下日益增长的直流配电网仿真需求,对直流配电网仿真电磁暂态仿真并行算法进行了研究。开发了直流配电网电磁暂态仿真程序,搭建了光伏电池、锂电池、VSC变流器、直流变流器和交直流负荷等元器件的电磁暂态仿真模型。针对直流配电系统电力电子装置多、电力开关的控制逻辑复杂等特点,提出了适用于控制系统仿真的延时解耦并行算法以提高仿真效率,对仿真程序进行了并行优化。最后,利用双端直流配电网算例对所开发的仿真程序和所提出的并行方法进行了测试。研究结果表明,该程序能够对直流配电网系统进行准确、高效的仿真,所提出的延时解耦并行算法也是正确的而高效的,在保证计算精度的基础上,有效提高了仿真程序的效率。

关键词:直流配电网;电磁暂态;并行计算;控制系统;网络分割

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)09-1185-06

Parallel electromagnetic transient simulation of DC distribution power system

ZHANG Da, JIANG Quan-yuan

(School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the growing demand for efficient simulation of DC power distribution system along with the rapid development of DC power distribution system, study of simulation algorithm of DC power distribution system was carried out. An electromagnetic transient program for DC distribution system was developed, and models of photovoltaic batteries, lithium batteries, voltage source converter, DC-DC converter, AC/DC load and other components were built. Aiming at the complex control logic of power switches, a parallel algorithm based on time-delay decoupling was proposed to improve the simulation efficiency, which is suitable for the control system. Finally, a case of DC power distribution system was used to demonstrate the accuracy of the method developed. The results indicate that the simulation program and the parallel algorithm proposed are accurate and efficient.

Key words: DC distribution power system; electromagnetic transient; parallel simulation; control system; network partition

0 引 言

随着新能源和电力电子技术的发展和广泛应用,以及用户对电能质量及供电可靠性等要求的不断提高,现有交流配电网将面临分布式新能源接入、负荷及用电需求多样化,以及高供电可靠性等方面的巨大挑战。国内外研究资料表明,基于直流的配电网在输送容量、经济性、分布式能源接入以及提高供电质量等方

面具有比交流更好的性能,可以有效地解决现有交流配电网面临的一些问题^[1]。

直流配电系统是包含中压配电网和用户侧配电网的公共配电网,为了保证直流配电系统的安全稳定运行,发展直流配电网仿真技术,研究其复杂的暂态过程 and 动态响应就变得非常重要。

由于在直流配电网中,各器件都反应迅速,需要精细仿真,因此仿真对仿真步长要求很高;同时,在网络

收稿日期:2014-04-28

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2013AA050104)

作者简介:张 达(1989-),女,河北涿州人,主要从事电磁暂态仿真算法方面的研究. E-mail:zhangd07@126.com

通信联系人:江全元,男,教授,博士生导师. E-mail:jyq@zju.edu.cn

中控制系统逻辑复杂,需要采用仿真步长更短、基于元件线性化的电磁暂态仿真^[2-3]。

在直流配电网中,主要有两类元件:一次系统中的各类电气元件和二次系统中的各类控制元件。在进行电磁暂态仿真的时候需要分别考虑,各自求解。

电气网络的电磁暂态仿真利用了仿真步长短的特点,将单个元件进行线性化,再对线性化后的系统列写 KVL 方程,通过求解线性方程 $YU=I$ 来求解节点电压^[46]。

电磁暂态仿真中,控制系统仿真算法有两类:第一种是将各控制元件单独建模,根据信号流动方向,依次对每个元件进行仿真;第二种是将各元件离散化,建立整个控制网络的网络方程求解^[7]。第一种单元件方法系统所有元件串行处理,无法进行并行计算,速度很难得到提高^[8]。而第二种网络求解方法实现了系统的网络化求解;但是因为非线性元件无法通过常规方法离散化,必须单独计算,而且随着网络规模的扩大,计算量大规模增加,需要采取并行计算方法,将系统降阶,提高运算速度^[9]。

为了提高电力系统电磁暂态仿真的效率,很多学者对分网并行进行了研究。目前分网并行算法主要有 3 种方式^[10-13]:长距离输电线路解耦法, MATE (Multi-Area Thevenin Equivalent) 方法,节点分裂法。但是这 3 种算法都是针对电力系统一次侧电气网络而提出的,并不适用于二次侧控制网络仿真。

针对上述问题,本研究在传统的控制网络电磁暂态仿真算法 (Transient Analysis of Control Systems, TACS) 的基础上,提出控制系统的时延环节解耦并行仿真算法,使得在直流配电网仿真中,控制系统并行仿真得到实现;在本研究中,电气网络和控制网络二者分别采用 MATE 算法和时延环节解耦算法进行并行计算。

1 直流配电网元件建模

目前,国内外对直流配网系统的研究还处于起步阶段,现有文献中也没有见到包含各种分布式电源、各类型负荷的完整直流配网系统的仿真模型。因此,为了深入研究直流配网的特性,有必要建立与外部交流电网相连、包含分布式电源、储能、各类型负荷的直流配网系统的仿真模型。

目前已在电磁暂态仿真程序中初步建立了电压源换流器 (VSC)、直流变压器、锂电池储能单元、光伏电池等系统元件模型。

1.1 电压源换流器 (VSC) 模型

电压源型换流器 (VSC) 的主电路拓扑结构如图 1 所示,由 6 个全控型的功率开关管 (IGBT) 构成,每个

功率开关管都反并联一个续流二极管, R 为变流器功率损耗的等效电阻, L 为变流器等效电感, C 为直流侧滤波电容。

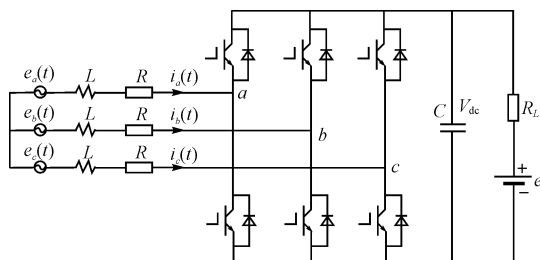


图 1 变流器电气网络拓扑结构图

本研究对电压源换流器的控制采用直接电流控制,具有双闭环的控制结构:外环控制根据变流器待实现的控制功能,如定功率控制或定电压控制等,确定变流器电网侧输出电流分量的目标值;内环控制用于实现变流器输出调制电压的控制。控制过程较为复杂,包括:ABC/DQ 变换,双闭环控制, DQ/ABC 变换, SPWM 控制^[14-16]。

1.2 直流变压器模型

双向直流变压器的拓扑结构如图 2 所示^[17]。直流变压器的原边和副边都由 4 个可控的开关管和 4 个与可控开关管反并联的二极管构成,原边和副边通过一个高频变压器相连。开关管 S_1 和 S_2 , S_3 和 S_4 , S_5 和 S_6 , S_7 和 S_8 同时开关,每个开关管以近似 0.5 的恒定占空比工作。

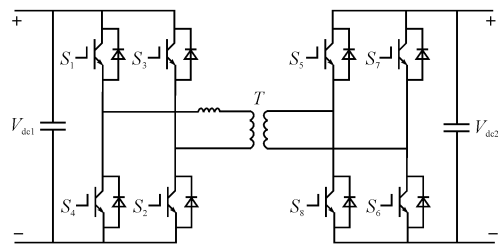


图 2 双向直流变压器拓扑结构

1.3 锂电池储能单元模型

单个锂电池的仿真模型可以根据锂电池输出电压表达式用一个可控的电压源和一个电阻相串联来建立。

锂电池的输出电压表达式为:

$$\begin{cases} V_{\text{batt}} = E_0 - Ri - \frac{KQ}{Q - it} \cdot (it + i^*) + Ae^{-Bt} & (\text{放电}) \\ V_{\text{batt}} = E_0 - Ri - \frac{KQ}{it - 0.1Q} \cdot i^* - \frac{KQ}{Q - it} \cdot it + Ae^{-Bt} & (\text{充电}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{batt} —锂电池出口电压; i —锂电池出口电流; E_0 —锂电池开路电压; R —锂电池内阻; K —极化常数; Q —锂电池容量; it —锂电池实际电荷量; A, B —锂电池特性曲线中指数区电压幅度和时间常数的逆。

1.4 光伏电池模型

光伏电池是利用半导体材料 PN 结的电子特性把太阳光能直接转换成电能的一种固态器件。光伏电池的等效电路如图 3 所示,由文献[18]可得到光伏电池的模型。

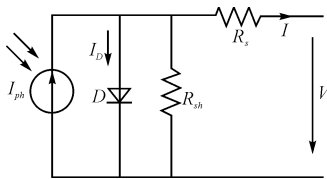


图 3 光伏电池等效电路

光伏电池的输出电流表达式可表示为不式：

$$I = I_{ph} - I_{os} \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot (V + R_s I)}{a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (2)$$

式中： I_{ph} —单晶硅的光电流强度； I_{os} —电池反向饱和电流； R_s —光伏电池的等效串联电阻； R_{sh} —光伏电池的等效并联电阻； q —电子电荷，且 $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ ； a —二极管特性因子，通常取值为 $1 \sim 1.5$ ； k —玻耳兹曼常数。

1.5 交、直流负荷模型

交流负荷模型采用的是有刀闸的定功率负荷，示意图如图 4 所示。

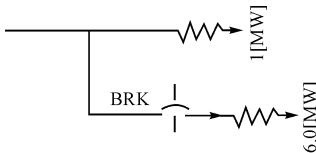


图 4 交流负荷示意图

开关 BRK 在 0 时刻的闭合的,此时交流负荷输出功率为 7 MW;在 2 s 时刻断开,交流负荷输出功率变为 1 MW。

直流负荷被简化为 1Ω 的电阻。

分析以上模型可以看出,这些模型的电气网络并不复杂,但二次侧控制网络却都比较复杂。例如 VSC 整流器中,电气网络有节点 12 个,但控制 6 个电力电子开关的控制网络却很复杂,包括 32 个节点,27 个线性的控制元件和一个较复杂的非线性元件,即 SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) 脉宽调制元件。

2 直流配电网控制系统并行仿真算法

本研究采用网络化求解方法进行控制系统求解,并提出了控制系统的时延解耦仿真算法。

2.1 控制元件电磁暂态建模方法

对于有可传递函数的函数块, $X(s) = G(s)U(s)$,都能够利用和电气网络类似的梯形差分法来进行差分化。

令：

$$G(s) = K \frac{N_0 + N_1 S + N_2 S^2 \cdots + N_m S^m}{D_0 + D_1 S^1 + D_2 S^2 \cdots + D_n S^n}, \text{其中 } m < n。$$

得到 $X(s) \cdot D(s) = K \cdot N(s) \cdot U(s)$,转化成时域的方程为：

$$D_0 x + D_1 \frac{dx}{dt} + D_2 \frac{d^2 x}{dt^2} \cdots + D_n \frac{d^n x}{dt^n} = K \left(N_0 u + N_1 \frac{du}{dt} + N_2 \frac{d^2 u}{dt^2} \cdots + N_m \frac{d^m u}{dt^m} \right) \quad (3)$$

经过线性化后可以得到：

$$Ax_0(t) - KBu_0(t) = H(t - \Delta t) \quad (4)$$

在完成每一时步的求解后,需要更新 n 个历史项,以得到下一时步的 H 。因为计算比较复杂,一般采用递归方法。

2.2 控制系统电磁暂态分析算法

将元件进行离散化后,每个元件能够得到的一阶线性方程如下式所示：

$$cx(t) = Kdu(t) + hist(t - \Delta t) \quad (5)$$

式中： c, K, d —常数； $hist(t)$ —历史项^[19-20]。

包含 4 个传递函数以及两个求和函数的系统如图 5 所示,其中,系统输入信号 $u = [u_1 \quad u_2]$,输出信号 $x_{out} = [x_4]$ 。

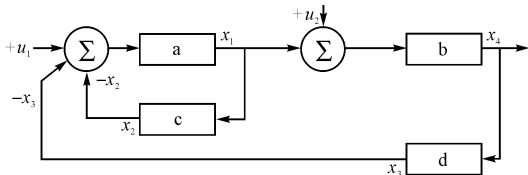


图 5 基本控制系统示意图

下面以图 5 的算例来说明,当元件离散化完成之后,是如何进行系统的网络求解的。

根据离散化后的元件格式,可以得到 4 个方程组成的方程组如下：

$$\begin{pmatrix} c_a & -K_a d_a & K_a d_a & 0 & K_a d_a & 0 \\ -K_b d_b & 0 & 0 & c_b & 0 & K_b d_b \\ -K_c d_c & c_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c_d & -K_d d_d & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} = (hist_a, hist_b, hist_c, hist_d) \quad (6)$$

可简化成：

$$[A_{xx}][x] + [A_{xu}][u] = [hist] \quad (7)$$

在进行下一步计算之前,首先要对 $[A_{xx}]$ 和 $[A_{xu}]$ 进行三角分解,然后按照如下的步骤求解未知数 $[x]$:

- (1) 计算右端项 $[hist]$;
- (2) 从上向下作前代运算;
- (3) 回带求出 $[x]$;
- (4) 更新每一块的历史项。

2.3 控制系统电磁暂态仿真并行算法

2.2 节中介绍了单个控制系统网络电磁暂态仿真的分析算法。在实际的电力系统中,由于电气元件的隔离,会出现各个子控制网络相互解耦的情况,如果采用传统的分析方法,公式(7)中的系数矩阵规模将会很大,不利于计算。另外在控制网络中,存在较多的时延环节,当仿真步长小于等于时延时,时延环节两端的网络是解耦的。为了减小公式(7)中系数矩阵的维数,提高整个仿真程序的并行效率,本研究提出了控制网络的并行仿真算法。

控制网络分网示意图如图 6 所示。子网络 ABC 为 2.2 中计算的 3 个线性控制子网络,根据上述算法,对于 3 个子网络分别有:

$$\begin{aligned} [A_{xA}][x_A] + [A_{uA}][u_A] + [A_{uBA}][x_{BA}] + [A_{uCA}][x_{CA}] = \\ [hist_A][A_{xB}][x_B] + [A_{uB}][u_B] + [A_{uAB}][x_{AB}] + \\ [A_{uCB}][x_{CB}] = [hist_B][A_{xC}][x_C] + [A_{uC}][u_C] + \\ [A_{uBC}][x_{BC}] + [A_{uAC}][x_{AC}] = [hist_C] \end{aligned} \quad (8)$$

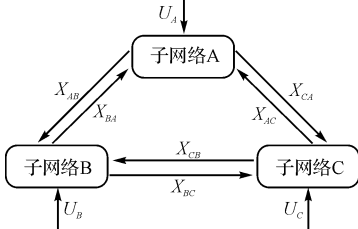


图 6 控制系统分网示意图

各参数含义如图 6 和 2.2 节说明所示。

得整体控制网络的方程如下所示:

$$\begin{pmatrix} A_{xA} & P_{BA} & P_{CA} & A_{uA} & 0 \\ P_{AB} & A_{xB} & P_{CB} & 0 & A_{uB} \\ P_{AC} & P_{BC} & A_{xC} & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \\ u_A \\ u_B \\ u_C \end{pmatrix} = (hist_a, hist_b, hist_c) \quad (9)$$

式中: P_{AB} —相对应输入/输出的关联矩阵;例如 P_{AB} —子网络 B 的输入节点与子网络 A 的内部节点的关联矩阵。

当各个子网络之间无相互关联时,各个 P 矩阵都为 0,很容易可以看出,这个时候各个子网络相互解耦,每个时步仿真只需直接分网计算各个子网络内部数据即可。

当各个子网络之间以时延环节相互联系时,公式(9)会发生如下变化:

$$\begin{pmatrix} A_{xA} & 0 & 0 & A_{uA} & 0 & 0 & 0 & P_{BA} & P_{CA} \\ 0 & A_{xB} & 0 & 0 & A_{uB} & 0 & P_{AB} & 0 & P_{CB} \\ 0 & 0 & A_{xC} & 0 & 0 & A_{uC} & P_{AC} & P_{BC} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \\ u_A \\ u_B \\ u_C \\ x_{Ahist} \\ x_{Bhist} \\ x_{Chist} \end{pmatrix} = (hist_a, hist_b, hist_c) \quad (10)$$

式中: $x_{Ahist}, x_{Bhist}, x_{Chist}$ —一时延时刻之前的 x_A, x_B, x_C 值。

在 T 时刻时是已知的,与当前状态下需要求的 x_A, x_B, x_C 相互独立。因此可得调整后的方程如下,可得此时 3 个子网络仍然相互解耦。计算时首先根据子网络之间的数据交换来计算方程右侧历史项,然后各个子网络分网并行计算。

$$\begin{pmatrix} A_{xA} & 0 & 0 & A_{uA} & 0 & 0 \\ 0 & A_{xB} & 0 & 0 & A_{uB} & 0 \\ 0 & 0 & A_{xC} & 0 & 0 & A_{uC} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \\ u_A \\ u_B \\ u_C \end{pmatrix} = \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} hist_a \\ hist_b \\ hist_c \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 & P_{BA} & P_{CA} \\ P_{AB} & 0 & P_{CB} \\ P_{AC} & P_{BC} & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{Ahist} \\ x_{Bhist} \\ x_{Chist} \end{pmatrix}$$

3 算例分析

本研究采用的测试算例系统为如图 7 所示的双端直流多电压等级配网系统,包含光伏电池、锂电池储能系统和交直流负载。系统两端都与无限大电网相连,左端 VSC 整流器实现的是定电压控制,使得整流器输出电压稳定为 15 kV,右端 VSC 整流器进行定功率控

制,使得整流器交流侧稳定输出功率为 10 MW。保证在负荷、光伏、锂电池出力变化的时候,系统都能够稳定运行,并且直流母线上各个节点的电压都保持在 15 kV 左右。直流母线上通过直流变压器连接光伏电池和锂电池向系统输送电能,以及通过逆变器和直流变压器分别于交、直流负载相连接。系统中所有的元件都基于 EMTF 程序进行建模,模型如第 1 小节所述。为了保证仿真的准确性,仿真步长为 5 μs,仿真总时长为 1 s。

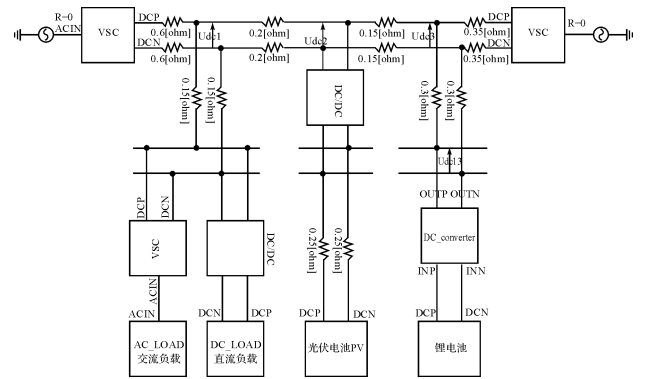


图7 测试算例系统电路图

如图 7 所示,上述算例共包括 3 个 VSC 整流器,3 个 DC/DC 直流变换器,光伏电池,锂电池,直流负载和交流负载。在自然情况下,上文中已经提到,在这些模块中,VSC 整流器电气网络和控制系統都较其他模块为复杂,尤其是控制系统,包括 32 个节点,27 个线性的控制元件和一个较复杂的非线性元件,即 SPWM 脉宽调制元件。因为非线性元件不能按照一般的离散化方法来建模,需要单独计算。所以如果将整个 VSC 模块作为一个子分区,那么分区内部,线性部分和 SPWM 的仿真仍是串行的,极大降低了仿真效率,也导致了系统中分区的不平衡,降低了系统的并行度。因此要将 VSC 模块拆分成线性部分和 SPWM 两个子分区。在 VSC 中,为了模拟真实的系统运行状况,在 SPWM 之前,增加了一个时步的时延。利用这个时延,就可以将线性部分和 SPWM 进行解耦,作为两个分区并行计算。

3.1 程序准确性验证

首先验证仿真程序的正确性。笔者选取代表性的线路选取直流线路节点电压 U_{dc1} ,将电磁暂态仿真串、并程序的仿真数据与 PSCAD 的计算结果进行比较。串、并程序对比图如图 8 所示,线路电压由 0 上升,经过 0.25 s 左右的时间,达到稳定点 15 kV,并保持稳定。在图 8 中 3 条曲线是完全重合的,而 PSCAD 与并行仿真程序的误差不超过 10^{-8} ,PSCAD 与并行程序误差分析如图 9 所示。该数据表明电磁暂态仿真串、并

行程序的仿真结果是正确的。

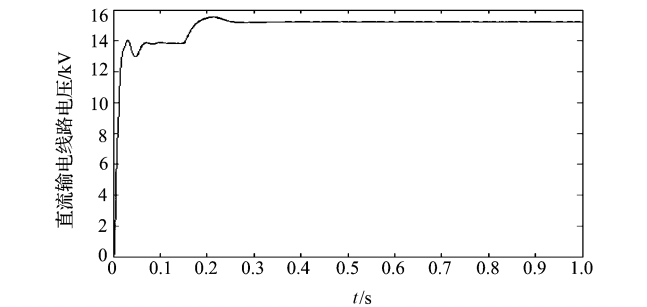


图8 串并程序对比图

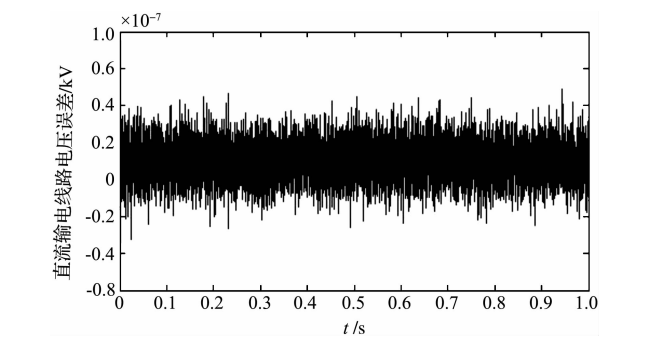


图9 PSCAD 与并行程序误差分析

3.2 并行仿真程序效率分析

为了检验时延解耦并行仿真算法能否对程序的效率有提高作用,本研究采用了 3 种不同的分区方案,对系统进行仿真。以下 3 个方案都采用 10 个计算机核心进行仿真:

方案 1:不采用时延解耦并行仿真算法,电气网络仿真采用传统的 MATE 算法,每一个模块作为一个子分区,共分为 10 个小的电气网络子分区,所有模块的控制网络作为一个大的分区进行串行计算;

方案 2:采用延时解耦并行仿真算法,每一个模块作为一个子分区,共分为 10 个小的电气网络子分区,以及 10 个控制网络子分区;为了最大效率地提高并行度;

方案 3:采用延时解耦并行仿真算法,并对 VSC 整流器模块进行解耦拆分,拆成 VSC 线性部分和 SPWM 两个子分区。这样共分为 10 个小的电气网络子分区,以及 13 个控制网络子分区包括 3 个 VSC 线性部分和 3 个 SPWM 子分区,相应的采用 13 个核心进行并行计算。

仿真时长为 1 s 时,各个方案的仿真时间如表 1 所示。

表 1 不同分区方案仿真时间对照表

分区方案	方案 1	方案 2	方案 3
仿真时间/s	161.961	113.325	97.382

从以上结果可以得知,与不采用时延解耦算法的方案 1 相比,采用了并行计算的方案 2 和方案 3 都在保证程序的正确性的基础上,提升了程序的计算效率;

而方案 3 中,对 VSC 控制器的解耦使得各个分区的规模大小变得更为相似,减弱了系统各个分区规模大小的不平衡程度,进一步提升了计算效率。

为了进一步研究控制系统并行仿真策略对控制系统仿真的影响,单步仿真的耗时统计如表 2 所示。

表 2 不同分区方案单步仿真耗时对照表

分区方案	方案 1	方案 2	方案 3	耗时减少百分比/%
电气网络耗时/ μs	28	30	27	3.57
控制网络耗时/ μs	43	24	18	53.49

由表 2 可以看出,应用延时解耦并行算法之后,控制网络的单步耗时减少了 58.14%,效率提升了一倍以上,充分证明了本研究提出的算法是有效提高了仿真效率。算例中,控制系统包含 13 个分区,采用了 13 个计算核心对系统进行并行计算,但耗时的减少并未达到相应的大规模减小。造成该问题的主要原因可能是在实际的电力系统中,并行计算分区很难实现理想的平衡状态。时延解耦并行算法中,只能在子分区之间没有直接相连或者通过时延环节相连时,才能进行分区间的解耦,分网方式还不够灵活,需要进一步研究。

4 结束语

本研究开发了直流配电网电磁暂态仿真程序,另外搭建了光伏电池,锂电池,VSC 变流器等系统的电磁暂态仿真模型;针对直流配电网的特点,提出了适用于控制网络的时延解耦分网并行仿真算法,并在仿真程序中得到了实现,验证了算法的正确性。并且利用该算法有效提高了直流配电网的仿真效率。

本研究搭建了包含光伏电池和储能的双端直流配电网算例,仿真结果证明该程序能够进行一定规模的直流配电网电磁暂态仿真。而本研究提出的网络并行计算方法也是正确而高效的。

参考文献 (References):

[1] 岳程燕,周孝信,李若梅. 电力系统电磁暂态实时仿真中并行算法的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(12):1-7.
[2] 马骏超,江全元,余 鹏,等. 直流配电网能量优化控制技术综述[J]. 电力系统自动化,2013(24):89-96.
[3] 岳程燕. 电力系统电磁暂态与机电暂态混合实时仿真的研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2004.

[4] 徐春明. HVDC 电磁暂态仿真的算法研究[D]. 天津:天津大学电气与自动化工程学院,2009.
[5] 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.
[6] 汤 涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化,2002,26(17):66-70.
[7] DOMMEL H W,李永庄,林集明,等. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京:水利电力出版社,1991.
[8] LASSETER R H, ZHOU J. TACS enhancements for the electromagnetic transient program[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,1994,9(2):736-742.
[9] BUI L X, CASORIA S, MORIN G, et al. EMTF TACS-FORTRAN interface development for digital controls modeling[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,1992,7(1):314-319.
[10] 陈来军,陈 颖,许 寅,等. 基于 GPU 的电磁暂态仿真可行性研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(2):107-112.
[11] 陈来军,陈 颖,梅生伟. 一种隐式同步策略及其在电磁暂态并行计算中的应用[J]. 电工电能新技术,2010(2):9-12.
[12] CHEN X, LONG X, GAO X, et al. TACS: A Transparent Application Bandwidth Management System[C]// Proceeding of the 9th IEEE International Conference on Computer and Information Technology. Xiamen:[s. n.],2009:46-51.
[13] MARTI J R, LINARES L R. Real-time EMTF-based transients simulation[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,1994,9(3):1309-1317.
[14] 张 钊,陈 涛,周 勇. 永磁同步电机自服控制系统建模与仿真[J]. 兵工自动化,2014,33(4):75-78.
[15] 李周清. 基于 AnSoft 的永磁同步电机建模与仿真[J]. 机电工程技术,2012(4):44-48.
[16] 尹明等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略[J]. 电网技术,2007(15):61-65.
[17] REED G. Modeling, Analysis, and Validation of a Preliminary Design for a 20 kV Medium Voltage DC Substation[C]// Energytech. Cleveland:[s. n.],2011:1-8.
[18] 钱 军. 面向负荷的光伏电池和燃料电池建模及其等效描述[J]. 电网技术,2011,35(4):135-142.
[19] BONATTO B D. EMTF modelling of control and power electronic devices[D]. University of British Columbia,2001.
[20] ALMGREN M, FRODIGH M, HANSSON B, et al. Adaptive Channel Allocation in TACS[C]// Proceeding of the IEEE Global Telecommunications Conference. Singapore:[s. n.],1995:1517-1521.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式: