

# 多端直流配电网实时仿真的模型分割方法

谈竹奎<sup>1</sup>,班国邦<sup>1</sup>,徐玉韬<sup>1</sup>,吕黔苏<sup>1</sup>,郝正航<sup>2</sup>,刘飞<sup>2</sup>

(1. 贵州电网有限公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**多端直流配电网不仅节点数量多,并且包含较多的电力电子装置,受单个仿真机处理能力的限制,多端直流配电网实时仿真实现难度大。为了实现多端直流配电网实时仿真,采用理想变压器模型法对多端直流配电网进行模型分割,以直流电网为边界,将各端换流站及其交流系统作为一个子系统,子系统之间通过理想变压器模型交互数据。最后,以 5 端直流配电网为例,将系统分割为 5 个子系统,对比分析分割模型和原模型在各种工况下的动态响应,二者动态过程基本一致。结果分析验证了所提模型分割方法的可行性和有效性。

**关键词:**模型分割;实时仿真;理想变压器模型法;多端直流配电网

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.011 中图分类号:TM743 文章编号:1673-9140(2020)05-0082-07

## Model segmentation method for the real-time simulation of a multi-terminal DC distribution network

TAN Zhukui<sup>1</sup>, BAN Guobang<sup>1</sup>, XU Yutao<sup>1</sup>, LV Qiansu<sup>1</sup>, HAO Zhenghang<sup>2</sup>, LIU Fei<sup>2</sup>

(1. Electric Science Research Institute, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550005, China;

2. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** The multi-terminal DC distribution network not only has a large number of nodes, but also contains more power electronic devices. Limited by the processing capacity of a single simulator, it is difficult to realize the real-time simulation of the multi-terminal DC distribution network. In order to realize real-time simulation of multi-terminal DC distribution network, the ideal transformer model method is utilized to model the multi-terminal DC distribution network. The DC grid is considered as the boundary, and the converter stations and their AC systems are treated as a subsystem. The subsystems exchange data through ideal transformer model. Finally, a 5-terminal DC distribution network is taken as an example and the system is divided into five subsystems. The dynamic responses in different cases of segmented method are compared with the original integral model then. The dynamic responses of the two kinds of models are nearly the same. The feasibility and effectiveness of the proposed model segmentation method is verified.

**Key words:** segmentation of model; real-time simulation; ideal transformer model; the multi-terminal DC distribution network

电源接入配电网成为了电网发展的必然趋势<sup>[1-4]</sup>。不仅如此,随着城市人口规模的不断扩大,城市用地的紧缺也成为制约电网发展的重要因素。在这样的一个背景下,基于多端直流的柔性互联城市配电网可作为城市配电网拓扑结构模式选择的一种有益补充,可以有效提升城市配电网接纳清洁能源能力。城市配电网中,分布式电源主要以光伏和风电形式接入,分布式电源接入配电网会给电网稳定性带来一定影响,为保证柔性互联的城市配电网能够安全稳定运行,开发出适用于城市配电网柔性互联系统继电保护、变流器控制等设备是十分重要的,而对这些设备的测试及验证需要硬件在环仿真技术支撑<sup>[5]</sup>。

电磁暂态实时仿真是研究电力系统动态特性常采用的技术手段之一,但电磁暂态仿真采用的计算步长小( $\mu\text{s}$ 级),当所研究的系统节点数或换流站较多时,计算量会大大增加,内存及处理器开销很大,常常造成处理器过载或内存溢出而导致计算失败。正是这个原因,目前柔性互联的城市配电网实时仿真面临很大挑战。

为了实现含有多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)、整流、逆变及直流斩波电路系统的实时仿真,已有文献提出了多种变流器简化仿真模型。文献[6-7]提出了 MMC 解析模型,虽然该模型能很好地分析 MMC 的外特性,但该模型不适合于谐波分析、均压控制等研究;文献[8-9]提出基于 MMC 平均值模型,即用受控电压源替代变流器输出,用受控电流源表征交直流接口关系,从而大大提高了仿真计算速度;文献[10]采用平均值模型法对微电网进行建模和仿真分析,大大减少了计算量,同样也加快了仿真速度。但上述方法仅能对含有耦合开关器件的电路进行加速,当系统节点数过多时,也会造成实时仿真机实时计算失败。

采用模型分割方法可以实现城市配电网柔性互联系统实时仿真,基于分组分群思想,将一个状态空间系统分割为若干个状态空间群组,每个状态空间群组对自己系统矩阵进行单独计算,实现大系统的解耦和降阶,不需要对系统元件进行大量简化处理,可大大缩短仿真计算时间<sup>[11]</sup>。将模型分割和并行计算相结合,可减轻单个处理器的计算负担,提高系统仿真规模。文献[12]基于 RT-LAB 平台实现了多端柔性直流配电网的分核并行计算,并且取得了

不错的效果;文献[13-14]基于分块思想实现了微电网并行实时仿真,分块计算结果与原模型基本一致。但以往文献不仅对开关器件做了等效处理,同时也对分布式电源简化处理,不利于研究分析元件的内部特性。为此,该文将理想变压器分割法用于多端互联的城市配电网,通过仿真验证了所提模型分割方法的有效性。

## 1 模型分割算法

模型分割的好处是对原系统进行解耦,降低系统导纳矩阵的维数,提高系统的运算效率,接口算法的选择是实现模型分割的关键因素。目前,国内外学者常采用的接口算法有:状态空间节点法、节点分裂法、阻尼阻抗法及理想变压器模型法。这其中,理想变压器模型法实现简单,仿真精度较高,常用于数字物理混合仿真方面的研究。

### 1.1 理想变压器模型法

根据接口类型的不同将理想变压器(ideal transformer model, ITM)模型法分为电压型和电流型接口,电流型 ITM 接口算法原理图如图 1 所示,为了便于对 ITM 接口原理进行分析,系统 1 由戴维南等效电源  $E_1$  和等值阻抗  $Z_1$  组成,系统 2 也采用戴维南等效法,ITM 接口将原系统分为系统 1 和系统 2 两部分,通过受控源实现 2 个系统间的信号交互。

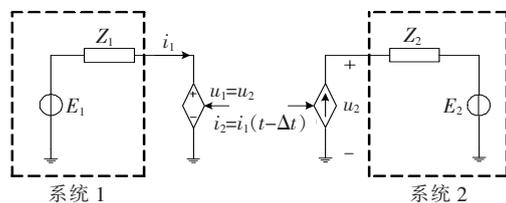


图 1 ITM 结构原理

Figure 1 ITM structure schematic diagram

电流型 ITM 接口算法的工作步骤:

1) 将系统 1 分割点的电流信号作为受控电流源的输入信号,经过延时环节后作用于受控电流源驱动系统 2 运行。

2) 将系统 2 分割点电压信号直接反馈给受控电压源,驱动系统 1 正常运行。

### 1.2 ITM 稳定判据

在分割模型的串行计算中,为了消除代数环的影响,在联解电流信号上加入一个步长的固定延时;

并行计算时,各 CPU 核之间存在一个步长的固定延时,延时将在电流信号上产生误差,设  $t$  时刻由延时引起的电流误差为  $\epsilon$ ,则在电压信号产生的误差为:

$$\begin{cases} \Delta i_2(t) = \epsilon \\ u_2 = Z_2 \cdot i_2 + E_2 \end{cases} \rightarrow \Delta u_2(t) = Z_2 \cdot \epsilon \quad (1)$$

该电压误差引入到系统 1 后,又在系统 1 电流上引入误差:

$$\begin{cases} \Delta u_2(t) = Z_2 \cdot \epsilon \\ i_1 = \frac{E_1 - u_1}{Z_1} \end{cases} \rightarrow \Delta i_1(t + \Delta t) = -(Z_2/Z_1)\epsilon \quad (2)$$

其中  $\Delta t$  为仿真步长,当将更新的电流信号引入系统 2 时,误差将以  $(Z_2/Z_1)$  倍数增大,如果  $(Z_2/Z_1) > 1$ ,误差将持续增大直到系统失稳。ITM 算法需要解决仿真数值稳定性问题。

## 2 多端互联配电网整体模型

建立多端直流互联配电网整体模型是进行模型分割接口算法分析的基础,整体模型包含交流配电网、直流配电中心、交流微电网及直流微电网。多端 MMC 换流器将交流配电网中的多回交流线路互联;每端逆变器可柔性接入交流配电网、交流微电网和直流微电网,形成多端直流配电中心及其相连的互联配电网。整体模型中需要建模的主要元件有逆变器、直流变压器和 MMC。

### 2.1 逆变器建模

对逆变器仿真建模时,若需要特定分析某个逆变电路的具体特性时应采用详细建模,可以得到更细致的分析数据;若关注点是逆变器的外部特性,则常常使用平均值模型。平均值模型对变流装置电气量进行计算时,只保留了原信号的直流及低频部分,忽略了高次谐波的影响。当不需要对逆变器进行暂态过电压、过电流及谐波分析等情况时,可采用逆变器平均值模型代替详细开关模型可以减小计算量,加速仿真。

文献[15]建立图 2 所示相电压等效的逆变器平均值模型,交流侧用受控电压源替代,相电压和直流电压的关系:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{u_{dc}}{2} \begin{bmatrix} u_{PWMa} \\ u_{PWMb} \\ u_{PWMc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $u_a, u_b, u_c$  为逆变器输出相电压;  $u_{PWMa}, u_{PWMb}, u_{PWMc}$  为控制系统输出的相电压调制信号;  $u_{dc}$  为直流侧电压。

逆变器的直流侧用受控电流源替代,受控电流源的输入可根据交流侧和直流侧功率平衡原理求得,即

$$i_{dc} = \frac{P_{ac}}{u_{dc} + \epsilon} \quad (4)$$

式中  $P_{ac}$  为交流侧功率;  $u_{dc}$  为直流侧电压;  $\epsilon$  为非常小的正数。

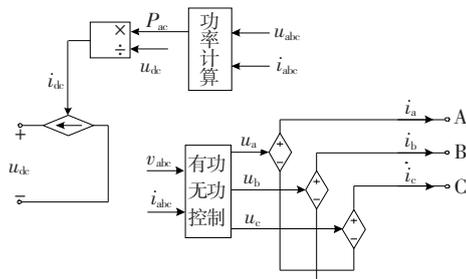


图 2 逆变器平均值模型

Figure 2 Average model of inverter

### 2.2 直流变压器建模

直流变压器平均值模型如图 3 所示,模型由 2 个受控电流源组成,二次侧采用直流电压控制,将控制器输出反馈给二次侧受控源,直流变压器一次侧受控源输入根据变压器一次侧和二次侧功率平衡求得,即

$$i_{dc1} = \frac{P_{dc2}}{u_{dc1} + \epsilon} \quad (5)$$

式中  $P_{dc2}$  为直流变压器二次侧功率;  $u_{dc1}$  为直流变压器一次侧电压;  $\epsilon$  为非常小的正数。

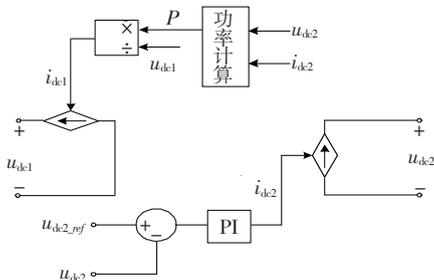


图 3 直流变压器平均值模型

Figure 3 Average model of DC transformer

### 2.3 MMC 建模

模型分割和分核计算相结合可以使多个 MMC 换流器单独运行, 当单个 MMC 换流器中子模块个数过多时, 无法实现 MMC 详细开关模型的实时建模与仿真, 所以需搭建 MMC 电磁暂态仿真提速模型。但现有的 MMC 提速模型存在各种不足, 如: 建模方法复杂、通用性不好、精度低及提速效果差等。基于文献[16]搭建图 4 所示 MMC 电磁暂态提速模型, 建模步骤如下。

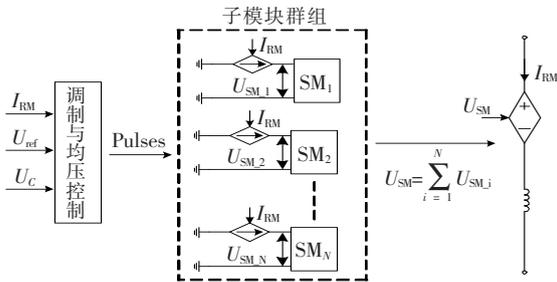


图 4 MMC 提速模型

Figure 4 Speedup model of MMC

- 1) 用受控电压源替代 MMC 的每个桥臂, 保留桥臂电抗器, 实时监测桥臂电流  $I_{RM}$ 。
- 2) 断开每个桥臂全部子模块的连接, 在每个子

模块正端连接受控电流源, 将所监测的桥臂电流  $I_{RM}$  反馈给子模块受控电流源, 监测每个子模块端口输出电压  $U_{SM,i}$ , 将监测到的每个子模块端口输出电压信号求和反馈给桥臂的受控电压源。

通过上述方法实现了桥臂和子模块的电气解耦, 大大降低了求解 MMC 电气网络的节点导纳矩阵维数, 加快了仿真速度。

## 3 模型分割方案

### 3.1 模型分割边界

多端直流配电网典型场景如图 5 所示。该工程场景包括 3 条 10 kV 配电馈线, 各馈线通过一台 MMC 和直流配电中心相连, 交流微网和直流微网通过逆变器及直流变压器与直流配电中心相连, 可见该工程相当于五端直流配电网。在图 5 中 MMC 1、MMC 2、逆变器及直流变压器处加装 4 个 ITM 接口, 将一个系统分割为 5 个子系统, 分割边界如图 5 中虚线所示, 每个虚线框内的系统表示一个子系统。针对柔性互联城市配电网系统, 在直流网进行模型分割有以下优势。

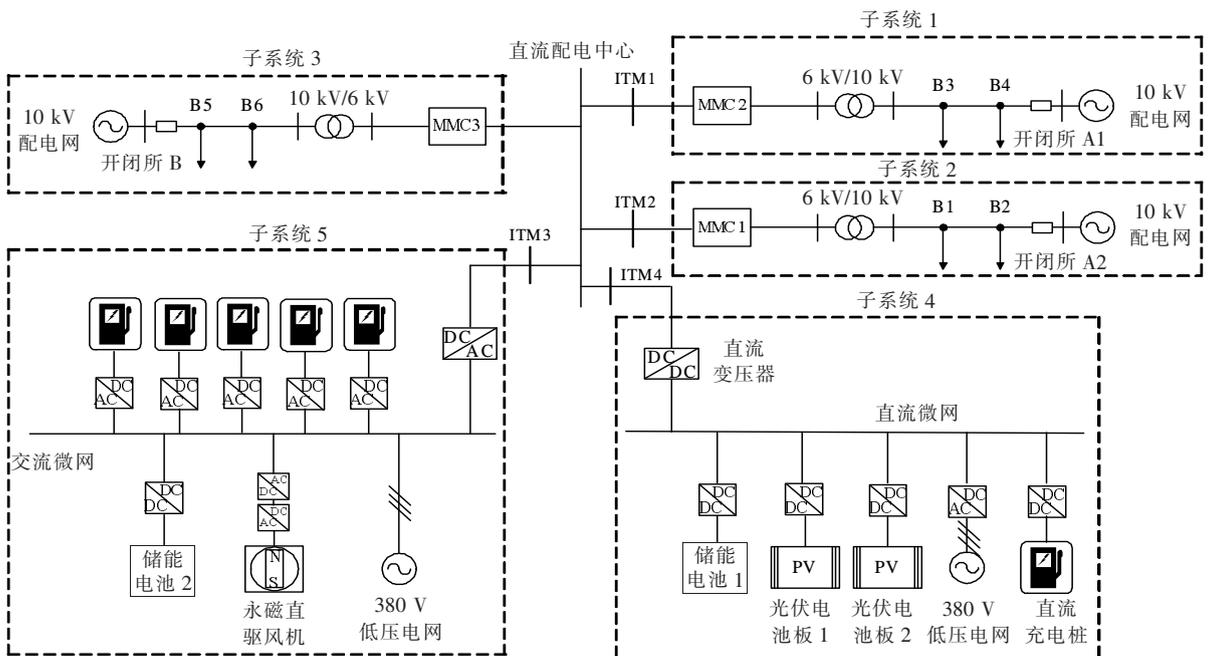


图 5 多端直流配电网

Figure 5 Multi-terminal DC distribution network

1) 能将一个大系统较为均匀的分割为多个子系统, 仿真计算加速效果更好。

2) 在直流线路上进行模型分割处理时, 可将各 MMC 模块划分到各子系统内, 避免在并行计算中因某个子系统开关数及节点数过多导致计算失败。

3) 直流网分割延时引起的误差仅表现为幅值误差, 而在交流网分割延时引起的误差既有幅值误差又有相位误差, 容易发散。

### 3.2 模型分割信号交互原理

基于 ITM 法的多端直流配电网模型分割接口及其信号交互原理如图 6 所示, 其中  $u_+$ 、 $u_-$  表示直流配电中心正负极电压;  $i_{n+}$ 、 $i_{n-}$  ( $n=1, 2, 3, \dots$ ) 表示各系统出口处正负极电流;  $\epsilon$  是一个很小的正数, 是单位步长延时引起的幅值误差。

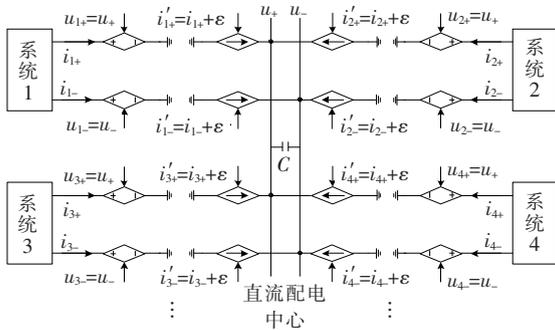


图 6 基于 ITM 法的多端直流配电网模型分割接口及其信号交互原理

Figure 6 Multi-terminal DC distribution network model segmentation interface based on ITM method and its signal interaction principle

在分割模型直流配电中心增设电容器, 并设置电容器的初始电压。增设电容器主要是有 2 个目的。

1) 进行初始化。分割模型仿真计算时, 在仿真初始时刻, 各联解信号从零初始时刻开始计算, 震荡过程可能会导致分割模型仿真数值失稳, 增设电容器并设置初始电压可使仿真计算从预设值开始。

2) 任何工况下都能使系统满足稳定判据, 消除波形失真问题。由前面推导可知, 接口延时引起的误差可能使仿真失稳, 直流网模型分割误差仅表现为幅值误差, 无法采用插值预测、超前预测法<sup>[17]</sup>、傅里叶变换及  $dq$  变换重构信号法<sup>[18-19]</sup> 等进行延时补偿。当系统含有储能元件时, 稳定判据中可忽略电阻的影响, 此时电流型 ITM 稳定判据为  $X1 > X2$ , 选定合适的电容值时, 即可满足稳定判据, 保证仿真

稳定性。

## 4 算例分析

模型分割是否成功一般通过比对原模型(分割前)和分割模型动态响应进行检验, 因此, 需要在相同仿真条件下, 对原模型和分割模型分别试验。仿真开始时, 使各个分布式电源出力较小, MMC 1 采用  $U_{dc}-Q$  控制, MMC 2 并网前采用  $V-f$  控制, 并网后采用  $PQ$  控制, MMC 3 采用  $PQ$  控制。在  $t=3$  s 时, MMC 2 并网,  $t=6$  s 时 B3 点发生三相接地故障,  $t=6.1$  s 时故障消失,  $t=8$  s 时 B6 点发生 AB 两相接地故障,  $t=8.1$  s 时故障消失, 仿真对比了 MMC 1、MMC 2 输出功率, 故障点 A 相电压、电流及直流配电中心电压及电流, 并行仿真结果如图 7~14 所示。

虚线表示采用 ITM 接口算法得到的并行计算结果, 实线表示原模型离线仿真结果, 由仿真结果可知, 在仿真研究的各种工况下, 原模型和分割模型具有高度的动态一致性, 仅仅是在发生扰动的情況下, 精度上有一些偏差, 但波形的走势基本一致, 且分割前后的响应速度和响应时间基本一致。

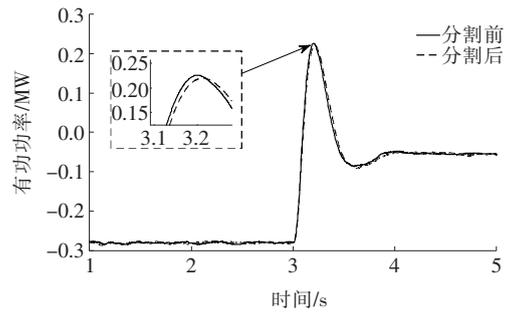


图 7 MMC 1 输出功率仿真结果

Figure 7 Output power simulation result of MMC1

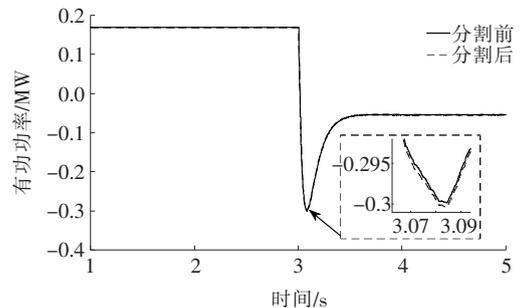


图 8 MMC 2 输出功率仿真结果

Figure 8 Output power simulation result of MMC 2

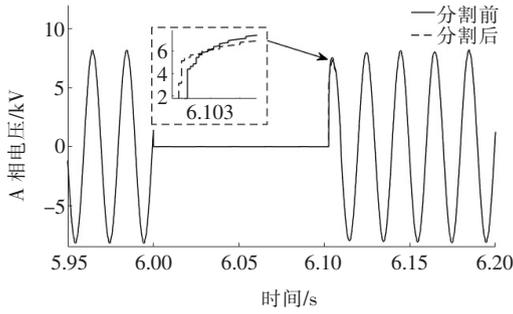


图 9 三相短路故障点 A 相电压

Figure 9 Three-phase short-circuit fault point phase-A voltage

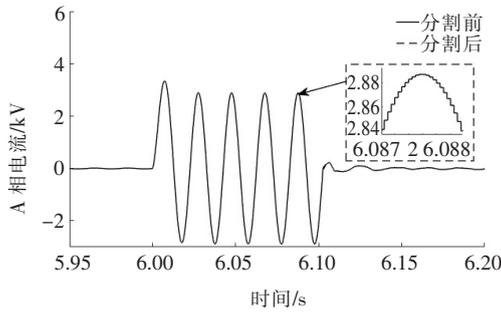


图 10 三相短路故障点 A 相电流

Figure 10 Three-phase short-circuit fault point phase-A current

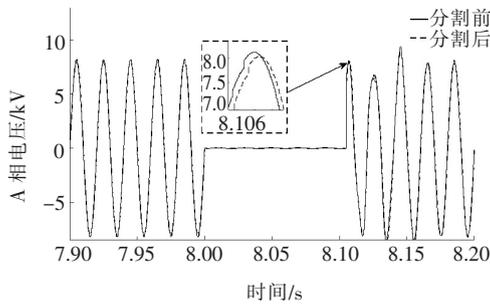


图 11 两相接地短路故障点 A 相电压

Figure 11 Two-phase grounding short-circuit fault point phase-A voltage

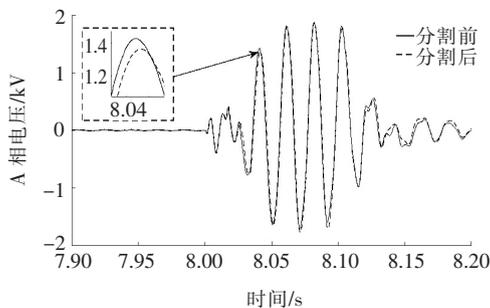


图 12 两相接地短路故障点 A 相电流

Figure 12 Two-phase grounding short-circuit fault point phase-A current

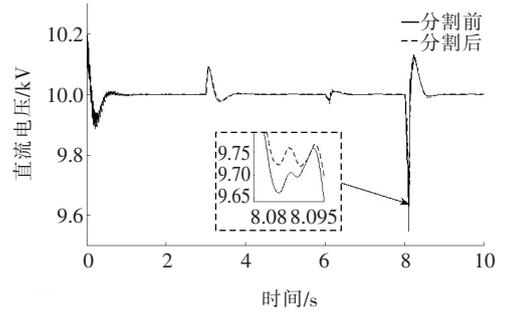


图 13 直流配电中心电压

Figure 13 DC distribution center voltage

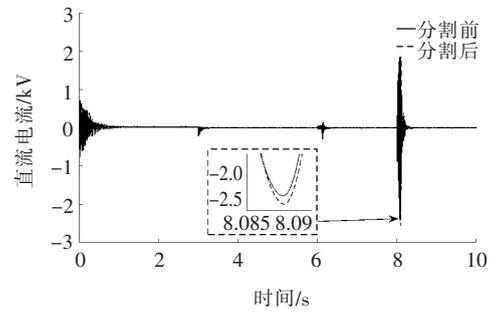


图 14 直流配电中心电流

Figure 14 DC distribution center current

### 5 结语

在含有大量开关器件及节点数的柔性互联城市配电网的实时仿真中,即使对模型中的众多开关器件进行简化处理,但也可能导致仿真机无法对所要仿真的模型进行实时化处理。基于此,该文提出采用理想变压器模型分割法,在直流配电中心进行分割处理,将一个大系统进行大幅度的解耦及降阶处理,大大减少了存储量及预计算量,将模型分割及并行计算相结合,大大减少单个仿真机的计算压力,加速仿真。仿真结果表明,在各种工况下原模型和分割模型具有高度动态一致性,仅仅是在暂态过程中精度有一些偏差。

仿真结果表明,该文所提出的模型分割方法是可行的,但应当说明,在发生大扰动情况下,所提出的接口算法还有较大的提升空间,以提高接口算法的精确性。

### 参考文献:

[1] 王珍意,黄文杰,赵川,等. 含分布式电源的中压柔性直流配电网研究[J]. 电力科学与技术学报,2020,35(1):

- 102-108.  
WANG Zhenyi, HUANG Wenjie, ZHAO Chuan, et al. Research on flexible medium voltage DC distribution network with distributed generation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 102-108.
- [2] 赵政嘉,李海波,赵宇明,等. 多类型分布式电源接入下的低压交流与直流配电网运行经济性对比[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(12): 50-61.  
ZHAO Zhengjia, LI Haibo, ZHAO Yuming, et al. Operational economic comparison of low voltage AC and DC distribution networks with multi-type distributed generation integration [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 50-61.
- [3] 孔祥玉,尧静涛,崔凯,等. 考虑分布式电源接入的区域配电网规划投资决策方法[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 41-48.  
KONG Xiangyu, YAO Jingtao, CUI Kai, et al. Investment decision-making method for regional distribution network planning considering distributed generations [J]. Electric power, 2020, 53(4): 41-48.
- [4] 叶斌,王祺,代磊,等. 适应分布式电源接入的配电网过流保护整定策略[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 74-80.  
YE Bin, WANG Qi, DAI Lei, et al. Over-current protection setting strategy on distribution network adapting to distributed generators access [J]. Smart Power, 2018, 46(6): 74-80.
- [5] 刘科研,刘永梅,盛万兴,等. 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 81-87.  
LIU Keyan, LIU Yongmei, SHENG Wanxing, et al. Maximal allowable DG penetration capacity calculation considering voltage constraints [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 81-87.
- [6] Antonopoulos A, Angquist L, Nee H P. On dynamics and voltage control of the modular multilevel converter [C]//2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain; IEEE, 2009.
- [7] Ahmed N, Angquist L, Norrga S, et al. Validation of the continuous model of the modular multilevel converter with blocking/deblocking capability [C]//10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2012), Birmingham, UK; IET, 2012.
- [8] 周诗嘉,林卫星,姚良忠,等. 两电平 VSC 与 MMC 通用型平均值仿真模型 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 138-145.  
ZHOU Shijia, LIN Weixin, YAO Liangzhong, et al. Generic averaged value models for two-level VSC and MMC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 138-145.
- [9] 章正国,张健,宣羿,等. 基于 MMC 平均值模型的柔性直流输电系统海底电缆故障过电压计算 [J]. 高压电器, 2014, 50(2): 99-104.  
ZHANG Zhengguo, ZHANG Jian, XUAN Yi, et al. Overvoltage calculation of submarine cable in VSC-HVDC systems based on MMC average value model [J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2): 99-104.
- [10] 艾欣,金鹏,韩晓男,等. 基于平均值模型的微电网建模及仿真分析 [J]. 现代电力, 2013, 30(5): 1-6.  
AI Xin, JIN Peng, HAN Xiaonan, et al. Modeling and simulation of microgrid based on average model [J]. Modern Electric Power, 2013, 30(5): 1-6.
- [11] Dufour C, Mahseredjian J, Bélanger J. A combined state-space nodal method for the simulation of power system transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 928-935.
- [12] 李巍巍,陈俊,陈名,等. 多端柔性直流配电网 RT-LAB 实时仿真研究 [J]. 广东电力, 2015, 28(10): 78-82+86.  
LI Weiwei, CHEN Jun, CHEN Ming, et al. RT-LAB real-time simulation research for multi-terminal VSC-DC power distribution network [J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(10): 78-82+86.
- [13] 王潇,张炳达,乔平. 一种面向微电网实时仿真的分块分层并行算法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 104-111.  
WANG Xiao, ZHANG Bingda, QIAO Ping. A block hierarchical parallel method for real-time simulation of microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 104-111.
- [14] 张弛,曾杰,赵丹,等. 微电网分块并行实时仿真算法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(2): 56-61.  
ZHANG Chi, ZENG Jie, ZHAO Dan, et al. Block parallel method for real-time simulation of microgrid [J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2017, 29(2): 56-61.

- YOU Hongcheng, CAI Xu. Direct-coupled DC transformers applied to DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2516-2525.
- [11] 卢林煜,王鲁杨,柏扬,等. 面向能源互联网的固态变压器中双有源桥直流变换器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 141-150.
- LU Linyu, WANG Luyang, BAI Yang, et al. Research on dual-active-bridge DC-DC converter in solid state transformer for energy internet [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 141-150.
- [12] 魏晓光,王新颖,高冲,等. 用于直流电网的高压大容量 DC/DC 变换器拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(S1): 218-224.
- WEI Xiaoguang, WANG Xinying, GAO Chong, et al. Topologies research of high voltage and high power DC/DC converters used in DC Grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 218-224.
- [13] 杜娟,赵兴勇. 基于扰动观察法的光伏发电系统 MPPT 控制策略[J]. 电力学报, 2017, 32(4): 269-274.
- DU Juan, ZHAO Xingyong. Control strategy of MPPT of photovoltaic system based on perturbation and observation method[J]. Journal of Electric Power, 2017, 32(4): 269-274.
- [14] 蔡洁,夏向阳,李明德,等. 高压直流输电模块化多电平换流器拓扑研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 54-59.
- CAI Jie, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. Study of MMC topologies in HVDC system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 54-59.
- [15] 高朋,胡学浩,温家良,等. 基于大规模子模块群的 MMC 建模与快速仿真算法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1226-1232.
- GAO Peng, HU Xuehao, WEN Jialiang, et al. A large-scale submodule group based algorithm for modeling and high-speed simulation of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1226-1232.
- (上接第 88 页 Continued from page 88)
- [15] 江斌开,王志新. 基于 VSC-MTDC 的平均值建模与控制策略[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(3): 1-8.
- JIANG Binkai, WANG Zhixin. Average-value modeling and control strategy of VSC-MTDC[J]. Electric machines and Control, 2018, 22(3): 1-8.
- [16] 许建中,赵成勇,刘文静. 超大规模 MMC 电磁暂态仿真提速模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 114-120+11.
- XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, LIU Wenjing. Accelerated model of ultra-large scale MMC in electromagnetic transient simulations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 114-120+11.
- [17] 张宏俊,郝正航,陈卓,等. 适用于模块化多电平换流器实时仿真的建模方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 120-126.
- ZHANG Hongjun, HAO Zhenghang, CHEN Zhuo, et al. Modeling method for real time simulation of modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 120-126.
- [18] 辛业春,江守其,李国庆,等. 柔性直流输电系统数字物理混合仿真改进阻尼阻抗接口算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 90-97.
- XIN Yechun, JIANG Shouqi, LI Guoqing, et al. Improved damping impedance interface algorithm of power hardware-in-the-loop simulation for flexible DC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 90-97.
- [19] 李国庆,江守其,辛业春,等. 柔性高压直流输电系统数字物理混合仿真功率接口及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1915-1924.
- LI Guoqing, JIANG Shouqi, XIN Yechun, et al. A novel interface algorithm of power hardware-in-the-loop simulation for MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1915-1924.