基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析

于亚男，金阳忻，江全元，徐习东

(浙江大学电气工程学院，浙江 杭州 310027)

摘要：基于实时数字仿真系统 RT-LAB 建立典型“手拉手”拓扑，含分布式能源光伏、锂电池以及交直流负载的直流配电网实时仿真数学模型。利用该模型对柔性直流配电系统的启停控制、指令控制等运行方式进行暂态响应特性仿真分析。RT-LAB 实时仿真技术显著增强柔性直流配电网系统仿真的时效性和实用性。配网启动逻辑设计及软开关技术、逐级功率提升法的应用，有效减小了直流配电系统启动电流冲击及接入操作过电压。系统建模满足直流配电系统运行要求，对其启动控制及运行工况的仿真分析，为柔性直流配电工程建设进一步研究提供参考。

关键词：柔性直流配电系统；RT-LAB；实时数字仿真；运行工况；启停控制

RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network

YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, XU Xidong

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

Abstract: Based on the real-time digital simulation system RT-LAB, this paper establishes a typical mathematical simulation model of loop flexible DC distribution. The model includes photovoltaic, lithium batteries and AC/DC load. Simulation analysis of different running conditions transient response tests, such as start-stop control, command control, is made. RT-LAB significantly enhances flexible DC distribution simulation timeliness and practicability. Start-up logic design, soft-switching and progressive power upgrade method effectively reduce starting current and access operation over-voltage. It is proved that the model works well to meet the operational requirements, and the study about start-stop control and operation conditions can provide reference for further engineering construction.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2013AA050104).

Key words: flexible DC distribution network; RT-LAB; real-time digital simulation; running condition; start-stop control

中图分类号： TM743 文章编号： 1674-3415(2015)19-0125-06

0 引言

随着城市发展，用电负荷快速增加，分布式能源及储能大量并入配网，传统交流配电网在电能供应稳定性、高效性、经济性、扩展性等方面面临巨大挑战。加之电力电子技术日益成熟，高压直流输电技术广泛应用于电力系统中，直流配电成为配电网发展的又一方向。

与交流配电系统相比，直流配电系统能够减少分布式能源及直流负荷接入电网所需的换流环节，提高功率转换效率和电能质量，具有线路成本低、配电损耗少、电磁辐射小，规划拓展性强等优势[1]。

目前，国内外关于柔性直流配网系统的研究均处于试验探索阶段，研究重点集中在分布式能源并网及换流器本身控制技术分析[2-4]，系统级仿真相对较少。文献[2]建立含太阳能电池及风机的直流微网系统，提出抑制系统环流的自动控制算法；文献[3]应用 PSCAD/EMTDC 软件用 C 语言自定义控制器及分布式能源模型，研究直流微网并网及孤网能量管理算法；文献[4]搭建含电动汽车的 PSCAD/EMTDC 直流配网仿真模型，验证直流配电相对于交流配电的优势及双环拓扑的有效性。现有研究多以电磁暂态数字仿真为基础，关注多端协调控制及能量分配问题。

由于柔性直流配电系统包含大量电力电子元件，开关量较多，运用电磁暂态数字仿真技术效率较低，且无法预期硬件实现中可能存在的问题[5]。

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

数字物理系统混合实时仿真技术在一定程度上能够弥补电磁暂态数字仿真的不足，在电力电子及直流输电仿真领域已经显现优势[6-7]。文献[6]基于 RT-LAB 搭建鼠笼型全功率变流器仿真平台，进行风电变流器控制算法开发和验证。文献[7]基于RT-DS 建立含特高压的多馈线直流电网系统，研究直流输电系统故障特性。现有实时仿真多考虑控制算法及故障保护，较少涉及运行工况及启停等暂态响应分析。柔性直流配电系统由于电压源型换流器(VSC)无转动惯量且换流电抗与等效损耗电阻较小，若采用正常工作时的控制策略而不采用其他辅助措施进行启动及运行工况切换，将产生过电压过电流，危及系统安全，研究其系统启停及运行工况切换系统仿真十分有必要。

本文基于实时数字仿真系统 RT-LAB 建立典型“手拉手”拓扑，含光伏、锂电池及交直流负载的柔性直流配电网实时仿真数学模型。换流器采用详细模型及平均值模型两种建模方式；将启动逻辑、功率逐级提升及软开关技术应用于模型中，对指令控制、启停控制、换流器控制切换、单站停运等运行方式进行仿真分析，为进一步研究柔性直流配电系统的运行特性提供了必要的实验依据。

1 柔性直流配电系统建模

本柔性直流配电系统研究对象为 5 端“手拉手”网络拓扑结构，包括与交流系统连接的 2 个电压源换流站，1 个光伏分布式发电系统，1 个锂电池储能系统，1 个交直流负载，网络结构如图 1 所示。

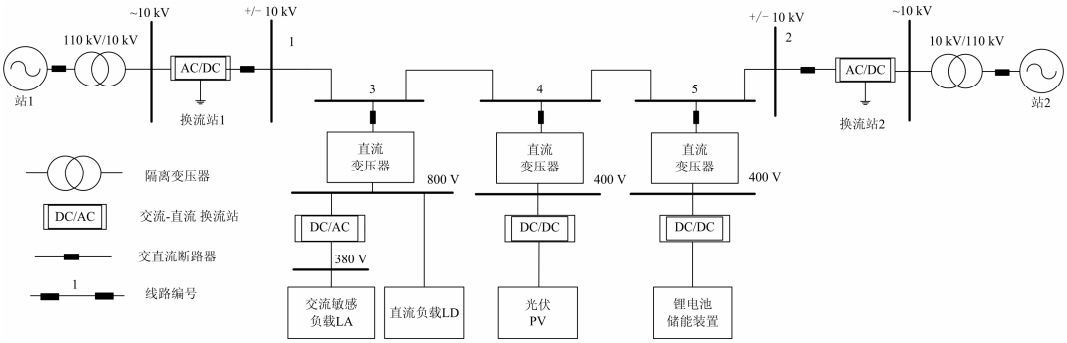


图 1 柔性直流配电系统模型示意图

Fig. 1 Model of flexible DC distribution network

(1) 电压等级：直流配电系统高压母线电压等级为±10 kV，直流微电网和储能电站母线电压等级为 400 V，交直流负载电压等级为 800 V。

(2) 控制方式：采用定电压－定功率控制及定电压－下垂控制两种控制模式，可根据运行工况进行切换。

(3) 设备参数列表见表 1。

表 1 柔性直流配电系统电源与负载容量

Table 1 Capacity of source and load in flexible DC distribution

母线编号	元件	系统说明	设备容量/kW
1、2	VSC 换流器	定电压、定功率、下垂三种控制方式	23 500
3	交直流负载	1) 直流母线电压+800 V 2) 交流母线电压~380 V 3) 交流接口单向 VSC	200
4	光伏阵列	1) 光伏串并联模块 2) 直流变压器±10 kV/400 V	120
5	储能系统	1) 锂电池 2) 直流变压器±10 kV/400 V	200

1.1 分布式能源及负载建模

光伏模型包含光伏阵列及 Boost 变换器，可设置光伏电池类型，串并联数及温度等参数，采用最大功率跟踪算法确保电能输出的高效性；可控电压源与电阻串联等效构成锂电池模型，可实现对充放电特性参数设置及荷电状态的检测；带刀闸的定功率交直流负载作为配电系统负载端，通过 VSC 换流器接入直流母线，VSC 换流器对输出交流电压进行闭环控制，电能质量较高，可供交流敏感负载使用。

1.2 直流变压器建模

直流变压器采用主动双全桥拓扑(DAB)，运用高频交流变压隔离技术及移相控制原理，实现电压等级转换和能量双向流通[8]。移相控制器采用双环控制实现低压侧定电压控制功能：外环控制将低压直流母线电压 U_{LV} 与参考值 U_{LVr} 的误差送入 PI 控制器，形成内环控制输入量的参考值 I_{LVr}。实际低压直流电流 I_{LV} 与参考值 I_{LVr} 之间的误差通过内环 PI 控制器得到移相角 φ。

1.3 电压源换流器建模

换流器详细模型选用两电平 VSC，电路拓扑为标准三相桥，采用直接电流控制，具有双闭环控制结构。多端直流配电系统换流器通常采用主从控制

或下垂控制[9]。为提高可靠性，结合系统规模较小的现状以及后续工程拓展需求，换流器采用混合控制方式(即主换流站 1 采用带裕度的定电压控制，保证直流电压稳定，从换流站 2 采用带有功功率 P 作为参考变量的电压下垂控制)。

为与详细模型仿真结果对比，同时搭建平均值开关模型[10]，其结构如图 2 所示。换流器交流侧等效为 2 个受控电压源，v_{ab}，v_{bc} 为调制后所得线电压；在 SPWM 调制方式下，输出线电压的基波幅值为直流母线电压的一半；v_{ab}，v_{bc} 与输出线电压的基波幅值乘积为受控电压源幅值；直流侧等效为受控直流源形式，电流源幅值由功率平衡原则求得。

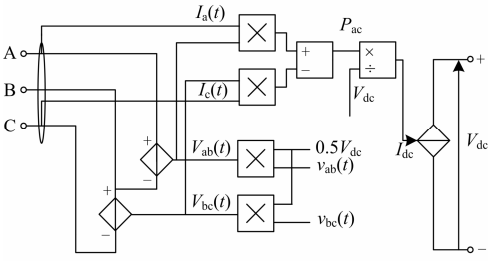


图 2 换流器平均值模型

Fig. 2 Converter average models

2　柔性直流配电系统 RT-LAB 仿真平台构架

RT-LAB 仿真系统基于 Matlab®Simulink 与 SimPowerSystem，使用 RT-LAB 平台进行实时化处理。为满足实时化仿真要求，建模需满足以下条件：

(1) 定步长仿真。兼顾实时性及电力电子动态特性体现，仿真时长通常选取 20~30 μs。

(2) 功能分块。RT-LAB 实时仿真器分为上位机(人机交互)和下位机(实时仿真计算)，模型搭建需要功能分区。

(3) 主回路分割并行。对占用仿真资源较多的主回路部分通过 RT-LAB 建模工具进行分块处理。

(4) 开关模块平均化处理。实时仿真中，IGBT 等电力电子开关器件开关状态过多会导致计算开关矩阵规模变大，影响系统实时性。采用 RT-LAB 自带开关模型 TSB(Time-Stamped Bridge)模块代替 IGBT 等电力电子开关器件。

兼顾稳定性、仿真精度和步长的平衡关系，考虑系统各部分功能、开关数量(电力电子器件、断路器、隔离开关等)，对一次系统进行划分，将主电路划分为：换流站系统(包含直流母线)、直流变压器和交直流负载系统、直流变压器和光伏系统及直流变压器和锂电池系统，如图 3 所示。考虑换流站系统规模较大，第二步对二次系统(控制保护划分)进行分割，将换流站控制划分为单独子系统，添加人机控制界面，最终模型由 6 个子系统组成，分配在 OP5600(RT-LAB 仿真器)的六个 CPU 核心中计算。

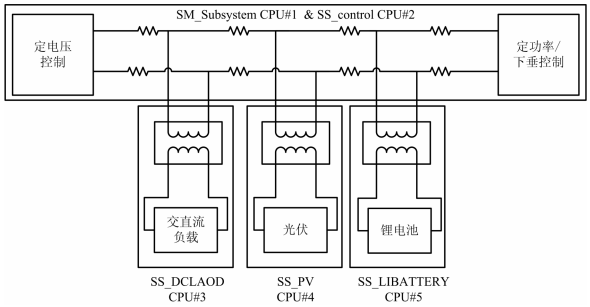


图 3 子系统拆分示意图

Fig. 3 Separation schematic diagram of subsystem

划分后的子系统有两种类型的信号输入或输出，即信号量和电气量。来自外部的信号通过 OpComm 模块链接输入子系统，可设置同步或异步通信方式。电气端子通过具有解耦功能的 Stubline 传输线链接。

系统拆分完成后，添加 ARTEMIS Guide 和初始化模块。ARTENUS Guide 模块对 SPS 模块搭建的模型进行离散化，执行精确的定步长计算，提供 Tustin 及其他离散方法。模型采用 State-Space Nodal(SSN)算法，融合状态空间法和节点法，实现对电路的准确离散，便于开关元器件的计算。初始化模块，初始化自定义变量，简化建模复杂度。

RT-LAB 仿真模型如图 4 所示，可外接控制保护装置等设备实现硬件在环仿真测试。

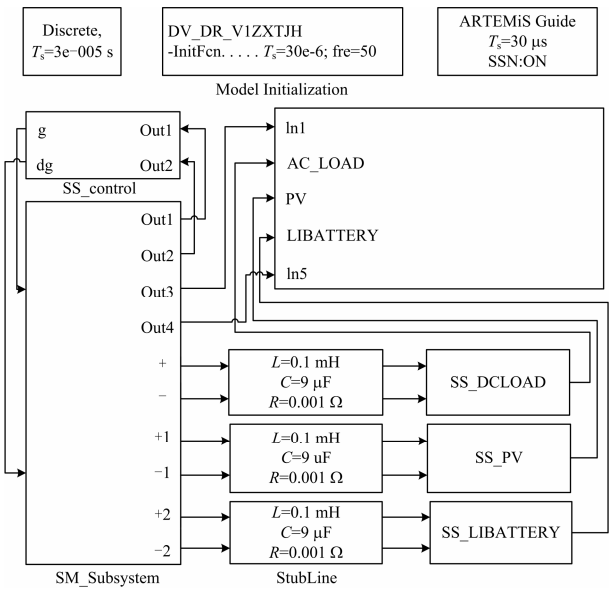


图 4 RT-LAB 仿真模型

Fig. 4 RT-LAB simulation model

3　启动及接入控制

启动及接入控制是柔性直流配电系统工程应用过程中需要解决的一个重要问题[11]。通常启动控制方法通过先封锁 IGBT 等可关断器件的触发脉冲，由桥臂反并联二极管构成整流电路实现对直流侧电容充电。当直流侧电容电压上升到一定值时，切换到正常控制方式。

对于采用混合控制方式的控制系统采用如图 5 所示启动接入逻辑。主换流器站 1 定电压启动，从换流站 2 先断开直流线路，采用定电压控制启动，当直流电压达到额定值时接通直流线路，切换到正常定有功功率控制方式，功率指令值逐级上升至额定值。分布式能源接入按照交直流负载、锂电池储能系统、光伏阵列依次接入，切除与接入反序。

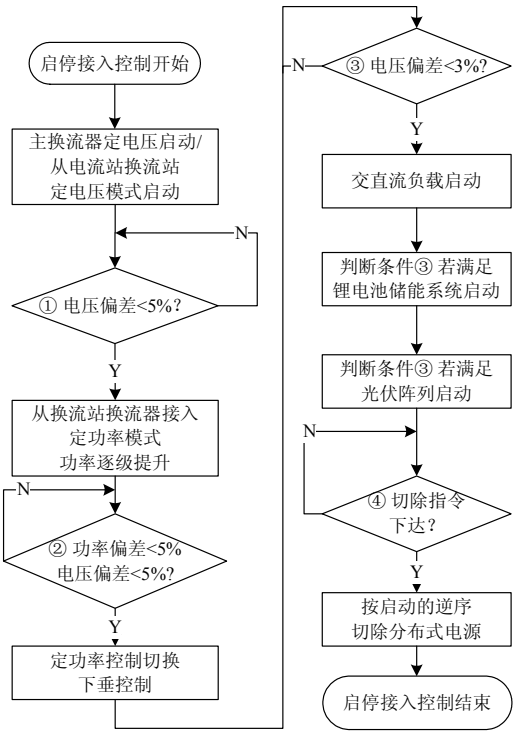


图 5 启动接入控制框图

Fig. 5 Start-up and access control diagram

除启动控制外，串联限流电阻能有效减小启动充电电流，软开关技术能够有效减小接入过电压过电流。VSC 换流站采用串联限流电阻启动，分布式能源采用软开关接入。

4　仿真分析

为验证所建立 RT-LAB 模型及其控制的有效性，对系统的运行特性进行仿真分析，考察其在指令控制、启停控制、换流器控制切换以及定电压换流器故障停运时系统暂态稳态响应。

4.1 换流器指令控制及模式切换

为验证换流器控制性能及指令响应速度，首先对换流器进行单独测试，充分利用 RT-LAB 人机控制界面操作优势，通过交换界面，手动改变功率标幺值、电压、下垂斜率等参数，结果如表 2 所示。

表 2 换流器测试结果

Table 2 Testing results of the converters

控制方式	响应速度/s	稳定时间/s	稳态误差/%
定电压控制	0.05	0.25	2.5
定功率控制	0.05	0.20	2.3
下垂控制	0.02	0.20	2.0

系统运行在稳态时，直流电压稳定在给定电压值，下垂控制模型下垂控制效果与计算值相符。当指令变化时，直流电压和系统输出功率变化的响应时间在 0.1 s 内且不发生超过10%超调，负载各端直流变压器高/低压侧电压波动在 0.2 s 内恢复正常。换流器控制指令跟踪迅速，稳态值正确，为后续配网系统实现上层指令与换流器控制器的对接提供条件。

主从换流器模型可实现定电压、定功率、下垂控制三种控制方式。在实际系统中，控制方式的切换过程直接关系到启停控制及其他故障保护控制策略的实现。

本文研究的配网系统从换流器设定为定功率控制、下垂控制两种工作模式，通过 RT-LAB 人机交互界面进行控制模式切换，模型控制具备平滑切换功能，两端换流站直流电压和系统输出功率变化的响应时间在 0.2 s 以内且超调小于 5%，切换后稳态值与下垂控制计算值相符，系统及分布式能源、负载维持正常运行。

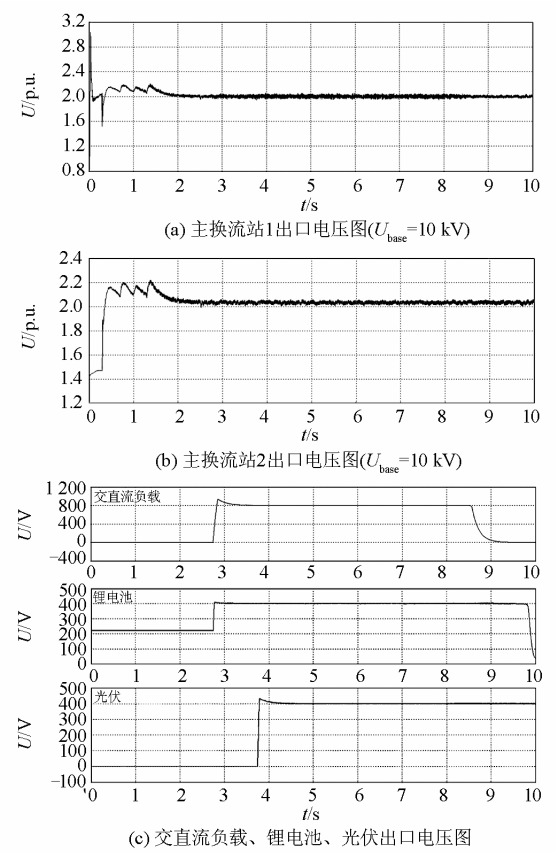
4.2 系统启停控制

按图 5 启动接入逻辑进行直流配电系统启停及控制方式切换试验，仿真时间为 10 s，用专业软件 Scopeview 对系统进行实时仿真录波，节点电压如图 6 所示。

由图 6 可知实际启动顺序为：定电压换流站(0 s)、定功率－下垂换流站(0.3 s)、锂电池储能系统(2.7 s)、交直流负荷(2.7 s)、光伏分布式发电系统(3.7 s)，启动顺序与启动逻辑一致。

若采用正常工作时的控制策略，去除启动逻辑，逐级功率启动及软开关技术，系统各端同时启动，20 kV 母线电压超调 25%，对比可知采用控制策略后，系统启动响应速度较快，稳态误差减小。

定功率换流站接入会对直流母线电压造成一定



(a) 主换流站1出口电压图(U_{base}=10 kV)

(b) 主换流站2出口电压图(U_{base}=10 kV)

(c) 交直流负载、锂电池、光伏出口电压图

图 6 仿真测试图 1

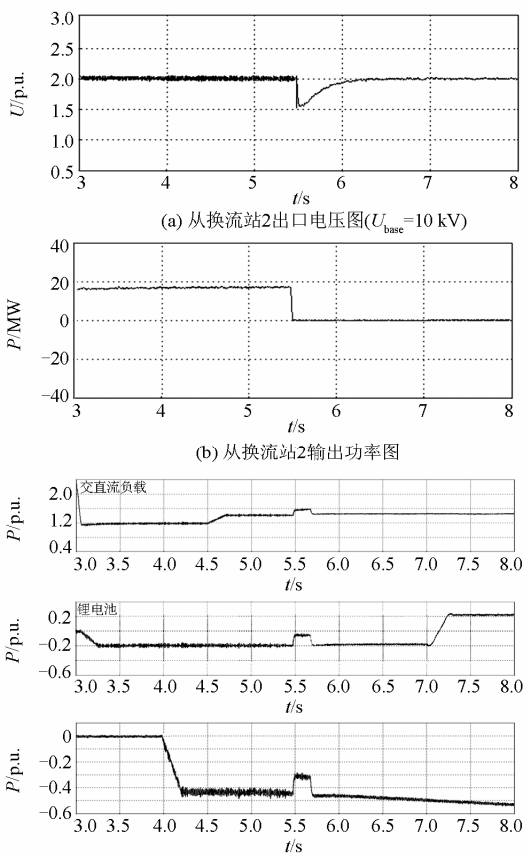
Fig. 6 Diagram of simulation test one

冲击，采用分段上升功率方式能够有效降低过电压，在电压功率稳定时进行定功率控制模式与下垂控制模式切换，由于工作点稳定，切换可以平滑进行，对功率电压无影响；分布式能源切入直流配网时，会对母线电压造成一定影响，采用软开关策略，有效减小接入电压冲击。

4.3 定电压 VSC 停运测试

配电网正常工况下采用定电压－下垂控制模型，系统电压由定电压换流器建立支持，极端故障时，定电压换流器停运，下垂控制端换流器需在短时间内稳定系统电压功率，维持配电系统正常运行。通过人机界面切断定电压控制换流器开关，模拟定电压换流器故障停运工况，分析下垂控制稳定性能。为测试效果明显，选定下垂斜率为 10。

仿真结果如图 7 所示，定电压换流站停运前后系统运行稳定，而且下垂控制模型下垂控制效果与计算值相符。下垂控制端及时跟踪由于定电压端停运所造成的功率缺口，直流电压和系统输出功率变化的响应时间在 0.5 s 以内。系统直流电压由于下垂控制作用有一定的增加，但由于直流变压器低压侧具备稳压功能，交直流负荷、锂电池储能系统及光伏分布式发电系统的直流出口处电压保持稳定，分布式能源功率输出正常。



(a) 从换流站2出口电压图(U_{base}=10 kV)

(b) 从换流站2输出功率图

(c) 交直流负载、锂电池、光伏功率输出(P_{base}=10 kW)

图 7 仿真测试图 2

Fig. 7 Diagram of simulation test two

4.4 换流器详细模型及平均值模型对比

平均值模型能够提供较精确的外部特性，但由于忽略了开关频率等导致的高频谐波分量，无法仿真电力电子器件实际充放电特性，其仿真结果过于理想化。

以启停控制为例，比较直流母线电压差别。详细模型经过滤波处理后，存在相对较大高频波动，与系统实际特性相符，而平均值模型，需设置较大的直流侧稳压电容，且波形无法反映直流母线电压纹波。

可见平均值模型虽然能够简化拓扑结构，降低计算量，节约硬件资源，但在研究系统启停，指令控制及 VSC 停运等工况的暂态仿真时，具有局限性，使用详细模型更能反映系统实际特性。

5 结论

1) 本文建立含光伏、储能、交直流负载的五端柔性直流配电系统模型，在解决模型拆分、子系统

通信、并行处理优化等问题的基础上，利用 RT-LAB 开发实时仿真数学模型，显著增强系统仿真的时效性和实用性。

2) 本文关注直流配电系统惯性较小，易产生较大电压波动的问题，开发启动逻辑，将软开关技术，逐级功率提升法应用于柔性直流配电系统实时仿真中，有效减小过电压。通过仿真分析研究指令控制、启停控制、换流器控制切换及换流器故障停运等运行工况，模型响应速度快且稳定效果好。

实时仿真模型建立简化及分析研究为柔性直流配电系统理论及工程应用的进一步研究提供了一定的参考依据，具有借鉴意义。

参考文献

[1] 周逢权, 黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 62-67.
ZHOU Fengquan, HUANG Wei. Study on the key technology of DC distribution power network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62-67.

[2] ITO Y, ZHONG Y, AKAGI H. DC microgrid based distribution power generation system[C] // 2004 The 4th International Power Electronics and Motion Control Conference, Xi'an, China: IEEE, 2004: 1740-1745.

[3] LEE J, HAN B, CHOI N, et al. DC micro-grid operational analysis with detailed simulation model for distributed generation[C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECEE) 2013, Atlanta, September 12-16, 2010: 3153-3160.

[4] DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Modeling and simulation of DC distribution network based on distributed energy[C] // 2013 2nd Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA), Toronto, December 23-24, 2013: 990-994.

[5] 李亚楼, 穆清, 安宁, 等. 直流电网模型和仿真的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 127-135.
LI Yalou, MU Qing, AN Ning, et al. Development and challenge of modeling and simulation of DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 127-135.

[6] 何舜, 张建文, 蔡旭. 风电变流器的 RT-LAB 硬件在环仿真系统设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 43-48.
HE Shun, ZHANG Jianwen, CAI Xu. Realization and design of wind power converter model based on RT-LAB HIL system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 43-48.

[7] 谭涛亮. 含特高压直流的多馈入直流电网 RTDS 建模[J]. 电力建设, 2013, 34(9): 55-60.
TAN Taoliang. Modeling of multi-infeed DC grid including UHVDC based on RTDS[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(9): 55-60.

[8] 赵彪, 宋强, 刘文华, 等. 用于柔性直流配电的高频链直流固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4295-4303.
ZHAO Biao, SONG Qiang, LIU Wenhua, at al. High-frequency-link DC solid state transformers for flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4295-4303.

[9] MAKNOUNINEJAD A, QU Z, LEWIS F L, et al. Optimal, nonlinear, and distributed designs of droop controls for DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2508-2516.

[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] 冯明, 李兴源, 李宽, 等. 多端柔性直流输电系统启动控制及其仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 60-65.
FENG Ming, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Control and simulation of VSC-MTDC start-up procedure[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 60-65.

收稿日期：2014-12-17； 修回日期：2015-02-12

作者简介：

于亚男(1991-)，女，硕士研究生，研究方向为柔性直流配电系统控制与仿真；E-mail：czjuyyn0501@126.com

金阳忻(1991-)，男，硕士研究生，研究方向为柔性直流系统控制与稳定；

江全元(1975-)，男，通信作者，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统高性能计算、新能源发电与储能应用。

(编辑 周金梅)