

配电自动化主站网络重构功能测试设计

王 丰

(上海金智晟东电力科技有限公司, 上海 200233)

摘要: 在电力系统仿真软件 DIgSILENT 网络重构功能基础上, 提出了针对配电自动化主站网络重构功能进行测试的方法, 并构建了软件测试平台。软件测试平台基于同源性的原则构建网络模型和运行参数, 针对网络重构功能的多种运行场景、多种目标函数可能的不同计算结果进行多层次的测试验证, 以验证网络重构功能。最后针对一个配电网测试模型利用软件测试平台, 阐述了针对第三方配电自动化主站网络重构高级应用功能的测试场景, 对提出的测试方法进行验证分析, 结果表明利用本测试方法能够针对配电自动化主站网络重构算法进行有效的测试, 为配电自动化主站系统高级应用功能测试提供了有效的手段。

关键词: DIgSILENT; 网络重构; 测试平台; 高级应用功能测试

Test bed for network reconfiguration calculation of distribution automation master station

WANG Feng

(Shanghai Wiscom Sunest Power Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: Based on the network reconfiguration function of the power system simulation software DIgSILENT, this paper proposes a method for testing the network reconfiguration function of the distribution automation master station, and builds a software test platform. The software test platform builds network models and operating parameters based on the principle of homology, and conducts testing and verification for various operating scenarios of the network reconfiguration function and possible different calculation results of various objective functions to verify the network reconfiguration function. Finally, according to a distribution network test model, several test cases are used to describe the test scenario of DIgSILENT network reconfiguration algorithm, and the results demonstrate the effectiveness of this method to evaluating the functionality of state estimation algorithm.

Key words: DIgSILENT; network reconfiguration; test bed; advanced power application functional testing

0 引言

开展对配电自动化系统应用功能测试平台的研发, 是实施配电自动化系统功能指标检测及流程化测试的基础。目前, 针对配电自动化系统的测试主要集中在馈线自动化 (FA) 系统的测试上^[1-3]。配电自动化主站系统(即配电主站)是配

电自动化系统的核心部分, 主要实现配电网数据采集与监控等基本功能和电网拓扑分析应用等扩展功能, 并具有与其他应用信息系统进行信息交互的功能, 为配电网调度指挥和生产管理提供技术支撑。

网络重构属于配电自动化主站系统^[4](即配电主站)高级应用功能部分。国家电网针对配电自动化主站的要求,也制定了Q/GDW 513—2010《配电自动化主站系统功能规范》作为企业标准,并据此对各个厂家的主站系统进行测试。随着配电网规模的发展以及对配电网供电可靠性要求的提高,互联的配电线路数量增大,使得网络中的分段开关与联络开关数量越来越多。而配电网网络重构是一个非线性组合优化问题,随着开关数量的增大,优化计算量急剧增大。目前常见的网络重构算法主要有遗传算法、粒子群算法和人工神经网络等人工智能算法,以及最优流算法、支路交换算法等启发式算法^[5-9]。然而,针对配电自动化主站高级应用功能的测试,由于缺乏测试标准,检验步骤烦琐,检验过程存在较大的不确定性,还没有一个明确的实施方法,不利于配电自动化主站系统功能的全面考核。本文在研究了电力系统仿真软件DIgSILENT的网络重构模块功能的基础上,搭建了配电自动化网络重构功能测试平台。首先基于不同测试场景建立网络重构前配电网运行网络,利用DIgSILENT的潮流计算结果,基于DIgSILENT OPC接口注入配电主站量测,构建配电自动化主站网络重构的计算基础。利用此测试场景DIgSILENT网络重构不同目标的网络重构结果,与配电自动化主站的计算结果进行比较。基于此结果,验证不同优化目标下的结果,基于误差度量指标校验算法的计算结果,测试平台为配电自动化主站网络重构功能测试提供了方法和手段。

1 DIgSILENT软件网络重构功能介绍

DIgSILENT提供了非常丰富且实用的元件模型^[10],方便搭建各种配电网网络模型。具有非常丰富的电力系统分析功能,包括AC/DC潮流计算、最优潮流、故障分析、动态仿真、谐波分析、保护分析和配电网应用分析工具等。DIgSILENT的网络重构模块(Tie Open Point Optimization)主要是针对多联络馈线的联络点的优化,其优化目标可以是网损、网络

可靠性或者两者的组合。除了多种优化目标,DIgSILENT还可以设置多种约束条件,包含电压约束、线路潮流约束和参与优化的开关选择等。针对可靠性指标可以采用系统平均停电频率指标(SAIFI)或者停电的功率来表示。DIgSILENT为验证网络重构功能,提供了多种目标函数的计算结果。DIgSILENT网络重构的设置界面如图1所示。

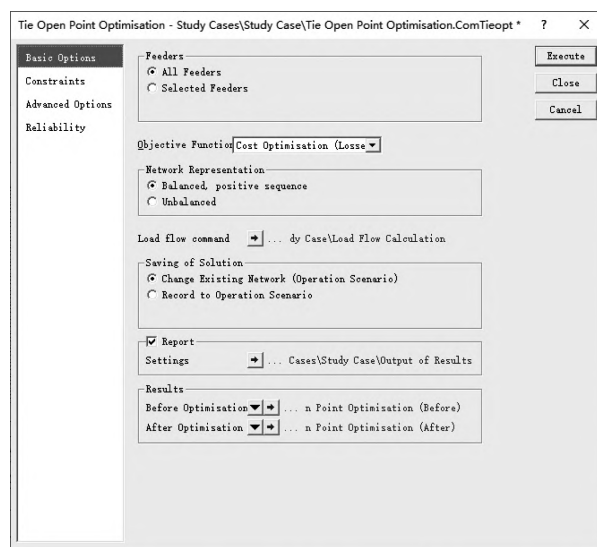


图1 DIgSILENT网络重构界面

Fig. 1 User interface for tie open point optimization in DIgSILENT

2 基于DIgSILENT接口的测试方法设计

配电自动化主站系统是配电自动化系统的核心。配电网的分析应用功能是配电自动化主站系统的扩展功能,必须建立在配电SCADA^[11]等基本功能的基础上,利用实时采集的量测数据完成基础数据的准备。测试平台必须具备提供配电自动化主站量测数据的功能。

针对配电自动化主站网络重构测试平台测试数据、测试模型和测试结果接口的要求,DIgSILENT分别利用以下三种接口方式满足。

1) 利用DIgSILENT OPC (Object Linking and Embedding for Process Control) 接口,将仿真信号转换为物理信号,利用网络转递给配电主站的数据采集与监视控制(SCADA)系统,

为主站高级应用提供基础量测数据。

2) 利用DIgSILENT提供的CIM (Common Information Model) 模型导出接口, 将被测试网络模型以CIM格式导出给配电主站系统, 实现模型一致性的要求^[12]。

3) 利用DIgSILENT的DGS(DIgSILENT Interface for Geographical Information Systems) 格式文件, 将DIgSILENT的标准网络重构计算结果数据定制导出, 为验证被测试配电自动化网络重构计算提供闭环校验功能。整个闭环测试流程如图2所示。

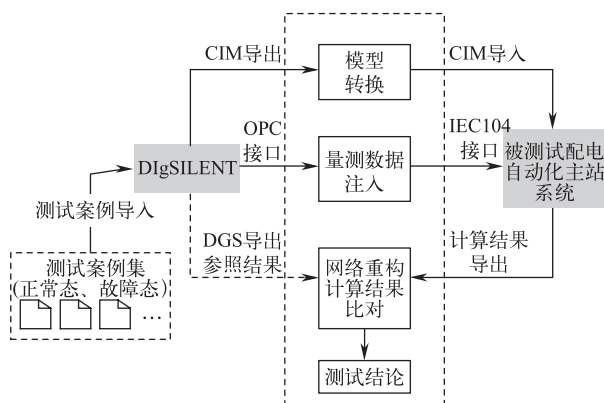


图2 网络重构测试平台架构示意图

Fig. 2 Network reconfiguration testing platform components diagram

2.1 测试系统量测数据接口设计

本测试设计利用OPC与104规约协议转换模块, 完成DIgSILENT实时运行数据与主站SCADA的数据交互。测试平台利用配置工具根据配电主站SCADA针对开关遥信和有功、无功、电流以及电压遥测数据要求, 生成包含OPC标签(标签定义了量测数据的位置和类型)、OPC Item与104协议信息体地址的对应关系、OPC Server访问方式和数据类型的配置文件。OPC Server读取此配置文件, 实现了OPC Server的自动配置功能。同时, 配置工具根据通道配置要求和设备量测配置要求, 生成通道配置文件和量测配置文件。配电主站导入此文件, 结合网络模型, 完成SCADA功能所需配置要求。整个配置流程如图3所示。

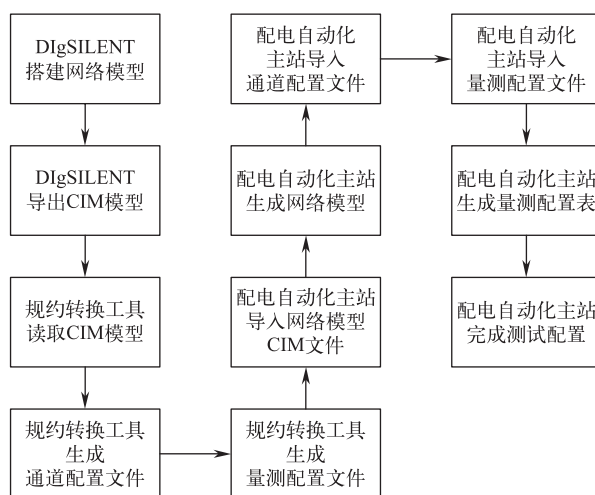


图3 配电自动化主站配置流程

Fig. 3 Configuration procedure for distribution master station

由于DIgSILENT的时域仿真模式 (Time Domain Simulation), 支持将电网的仿真数据利用OPC规约发送到OPC Server。针对每一需要传递的实时数据需要配置OPC标签进行标识, 同时规约转换工具 (OPC Client) 需要建立此标识同104规约点表的映射关系。

DIgSILENT利用配置文件中定义的OPC标签^[13-14], 将OPC Item配置到相应的被仿真设备的量测量上(有功、无功、电压和电流)。当启动时域仿真模式 (Time Domain Simulation, TDS)^[15]时, 开启OPC接口功能, 将OPC Item所关联的量测域的值通过接口传递给配电主站SCADA系统。

2.2 测试平台的模型接口

测试平台必须保证配电主站和DIgSILENT网络模型的一致性。DIgSILENT支持多种模型导出方式, 包括支持基于IEC 61970 CIM的ENTSO-E 2009规范的模型导出格式, 此文件进行模型转换后, 方便生成配电自动化主站系统接受的CIM规范格式, 导入后建立网络模型^[16]。

2.3 网络重构测试结果比较设计

网络重构在正常运行状态下, 可改变常开开关的位置, 提高配电网运行的经济性; 故障运行状态下断开故障点分段开关, 隔离故障, 对非故障电网进行网络重构, 为非故障失电负荷恢复供电。因此

测试平台的测试案例集包括正常态和故障态，针对同一网架不同情况的重构结果进行验证。

测试案例指定了网络重构前的系统运行状态,包括网络拓扑、负荷大小和分布式能源出力等状态信息。DIgSILENT基于测试案例启动时域仿真模式(Time Domain Simulation, TDS),为配电站提供高级应用功能需要的量测数据。另一方面,DIgSILENT需要计算出重构前的潮流分布和网络重构后的结果,为结果比较做准备。图4给出了DIgSILENT网络重构测试准备的数据流。

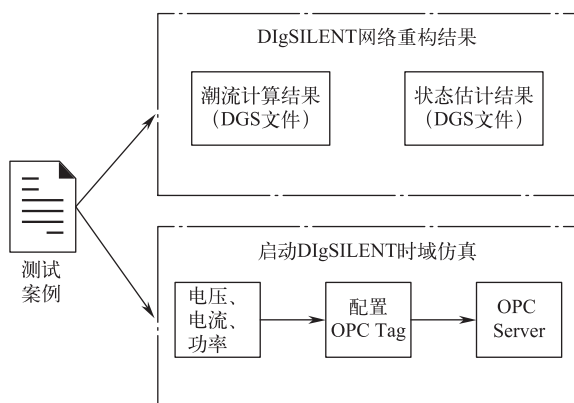


图 4 DIgSILENT 网络重构测试数据流

Fig 4. DIgSILENT network reconfiguration test data flow

网络重构作为配电主站系统高级应用功能，其功能受量测配置的影响比较大，必须首先检查DIgSILENT OPC接口同配电主站通道正常，为测试提供准备。在DIgSILENT时域仿真模式下，可以灵活改变系统量测信息运行状态（如开关变位和设备有功/无功量测），观察配电主站是否正确反馈了这些变化，校验接收数据的正确性。

图4中测试案例可以包括针对每一种测试场景运行DIgSILENT支持的计算模块（如潮流、网络重构等）。计算结果可以通过DGS格式的文本文件导出，同时用户可以方便利用格式定义文件，针对DGS的输出域进行定制，满足测试系统针对DIgSILENT的数据要求^[17]。针对网络重构的结果数据包括两部分：①重构前的系统潮流数据，包括当前潮流分布、系统网损等信息；②重

构后的结果数据, 包括重构后网络的潮流分布、系统网损和开关状态变化数据等。

图5给出了DIGSILENT定义的可以进行DGS数据导出的对象（表）的配置界面。单击表格对象后，可以针对导出的域进行配置。图6给出了潮流计算的导出域。

Data Manager - \Felix\DSG Export Definitions LF :					
	Name	Type	Object modified	Object modified by	
Database					
Configuration					
Library					
System					
File					
CloseLogTestCase					
FoxSubs - OPC					
FoxSubs - DP(1)					
FoxSubs - DP(2)					
SetTestCase					
DSG Export Definitions LE					
Recycle Bin					
Settings					
BKDef		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
ChRef		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
ChVee		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
Etwkm		DigiS	2011/8/29 3:38:46 T(DigiS)		
EtwBranch		DigiS	2016/10/12 2:34:38	Administrator[1]	
EtwComp		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
EtwCoup		DigiS	2011/8/29 3:38:56 T(DigiS)		
EtwDtl		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
EtwFeeder		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
EtwGenstat		DigiS	2016/10/11 9:08:07	Administrator[1]	
EtwLine		DigiS	2016/10/12 2:49:33	Administrator[1]	
EtwResec		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
EtwLoad		DigiS	2016/10/12 2:18:43	Administrator[1]	
EtwLodv		DigiS	2016/10/12 2:19:06	Administrator[1]	
EtwLodvp		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
EtwMet		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
EtwPhylo		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
EtwPntf		DigiS	2016/10/12 2:19:51	Administrator[1]	
EtwSubstat		DigiS	2010/11/7 5:27:31		
EtwSVs		DigiS	2011/8/29 3:39:37		
EtwSysm		DigiS	2016/10/12 2:41:14	Administrator[1]	
EtwTsm		DigiS	2016/10/10 10:06:55	Administrator[1]	
EtwToow		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
EtwTr2		DigiS	2016/10/12 2:45:22	Administrator[1]	
EtwTr3		DigiS	2011/8/29 3:40:03 T(DigiS)		
EtwUnet		DigiS	2016/10/12 2:21:30	Administrator[1]	
EtwZone		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
Infdifer		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
Infrifl		DigiS	2009/2/11 12:05:56		
Infrifort		DigiS	2009/2/17 10:28:37		
Infrifrefl		DigiS	2009/2/17 10:28:37		

图 5 DIgSILENT DGS 数据导出

Fig. 5 DGS export settings for network reconfiguration results

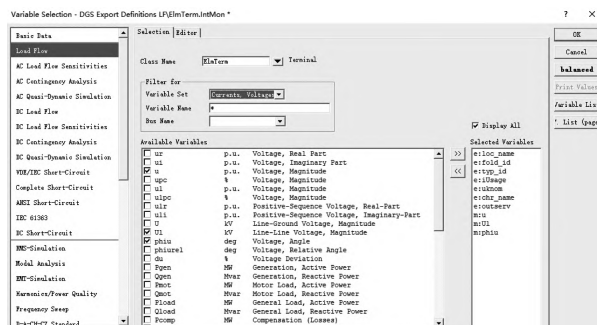


图 6 母线电压 DGS 数据导出配置

Fig. 6 DGS export settings for bus node voltage

针对网络重构的计算结果，可以将多个对象结果导出，包括节点电压、线路负载率和馈线损耗等数据。将所有的馈线损耗加和可以计算出总网损。图7给出了网络重构计算结果的导出配置。

DGS文件第一行为表头信息，从第二行起为数据记录。使用者可以方便利用Excel工具将其导入显示，基于编程将其中的数据进行解析并生成网络重构结果数据（网损大小、开关开合等）。

5 算例分析

在DIgSILENT中搭建四变电站配电网测试算例模型，如图9所示，DIgSILENT的模型包括10 kV配电网模型（开关、馈线、母线、分布式能源设备和负荷设备）和四个变电站（CZ1、CZ2、CZ3和CZ4）通过35 kV/10 kV变压器连接到35 kV母线，然后利用四条35 kV线路Line1、Line2、Line3和Line4连接到同一条母线（BUS-35），通过此母线连接等效无穷大电源。配置包括各个开关设备的有功/无功量测、单端设备（负荷、分布式能源和储能设备）的

有功/无功量测和母线的电压量测。10 kV各条馈线段的电阻/电抗都取为 $0.01\ \Omega$ ，分布式能源和储能设备的功率设为0，各个负荷的有功/无功分别为300 kW和100 kvar；35 kV连接外电网线路电阻和电抗分别取为 $0.21\ \Omega$ 和 $0.373\ \Omega$ 。所有10 kV/0.380 kV配电变压器参数为：空载电流百分比0.5%，空载损耗3 kW，短路电压百分比4%，短路损耗16.5 kW，额定容量为2 MV·A。35 kV/10kV变压器参数为：空载电流百分比0.9%，空载损耗1.76 kW，短路电压百分比6.5%，短路损耗14.6 kW，额定容量为12.5 MV·A。

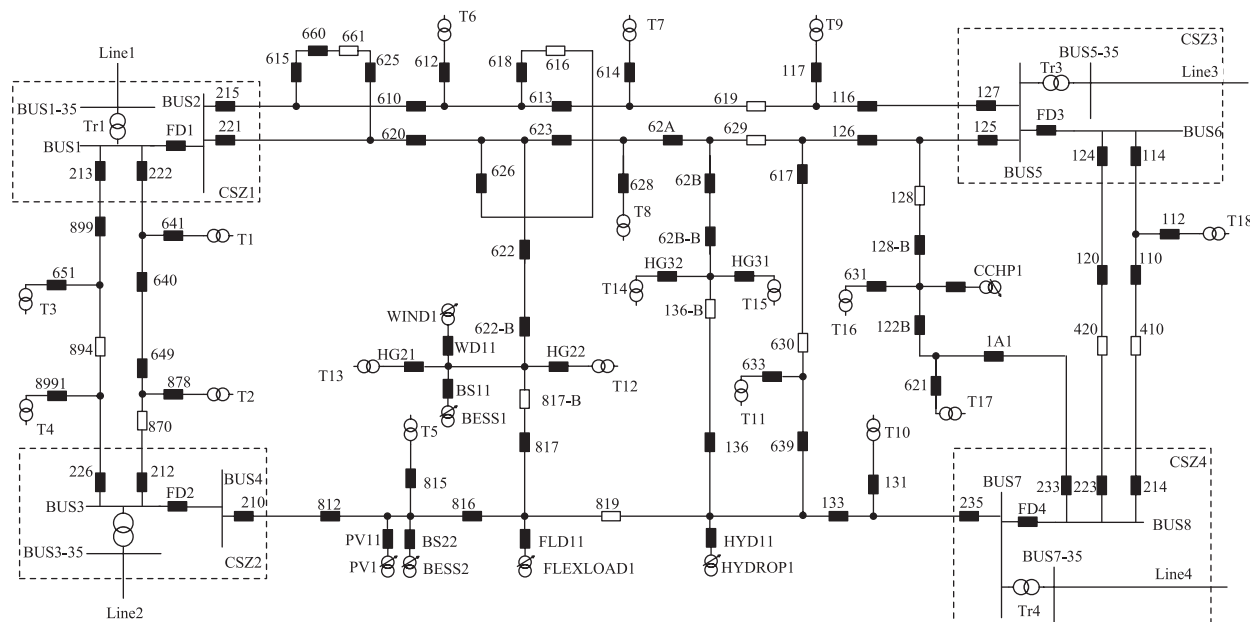


图9 四变电站配电系统示意图

Fig. 9 Four substations distribution power system diagram

以下针对不同的测试案例，执行DIgSILENT网络重构计算，对计算结果进行评估。利用DIgSILENT潮流计算模块，选择交流潮流计算，经典牛拉法，最大迭代次数为25次，节点功率误差选 $0.01\ \text{kV}\cdot\text{A}$ ，母线电压计算结果见表2。

选择优化目标为网损，进行DIgSILENT网络重构计算。此时，整个网络的开关状态变化见表3。

表2 主要母线节点DIgSILENT潮流计算结果

Tab. 2 Bus node voltage power flow solution for IEEE 33 bus system

母线	电压幅值 /kV	电压相角 (°)	母线	电压幅值 /kV	电压相角 (°)
BUS-35	35.000	0	BUS3	9.981	-0.189 9
BUS1-35	34.967	-0.040 3	BUS4	9.981	-0.189 9
BUS3-35	34.993	-0.007 5	BUS5	10.008	0.151 0
BUS5-35	35.004	0.007 1	BUS6	10.008	0.151 0
BUS7-35	35.044	0.040 5	BUS7	10.064	0.522 8
BUS1	9.955	-0.493 4	BUS8	10.064	0.522 8
BUS2	9.955	-0.493 4			

表 3 基础案例的开关优化结果

Tab. 3 Breaker changes for base case

序号	开关名称	初始状态	变化状态
1	122B	合	开
2	613	合	开
3	622	合	开
4	62A	合	开
5	649	合	开
6	128	开	合
7	619	开	合
8	629	开	合
9	870	开	合
10	817-B	开	合

网络重构后，全网网损由0.307 347 MW变为0.253 410 MW。

案例一：将新能源和三联供机组出力应用，出力情况见表4。进行网络重构计算，结果见表5。

表 4 案例一新能源出力情况

Tab. 4. New energy source power of case 1

序号	新能源名称	有功功率（MW）
1	PV1（光伏）	1
2	WIND1（风机）	1
3	CoGen1（三联供）	3

表 5 案例一的开关优化结果

Tab. 5 Breaker changes for base case

序号	开关名称	初始状态	变化状态
1	122B	合	开
2	133	合	开
3	1A1	开	合
4	819	开	合

网络重构后，全网网损由0.292 305 MW变为0.278 659 MW。可以看出，由于新能源的加入，某些馈线上的功率支撑能力增强，会导致此馈线承担更多的负载，以达到负载均衡的目标，最终减少网损。

案例二：在基础案例开关变化的基础上，将负荷LD9、LD11和LD16增大一倍到2 MW，进行网络重构计算。结果见表6。

表 6 案例二的开关优化结果

Tab. 6 Breaker changes for case II

序号	开关名称	初始状态	变化状态
1	128	合	开
2	619	合	开
3	122B	开	合
4	613	开	合

可以看到，由于BUS5负载过重，将通过开关切换由BUS2和BUS8的馈线进行分担。网络重构后，网损由0.369 10 MW变为0.366 146 MW。

由以上两个测试案例可以看出，针对不同的负载状况和新能源的接入情况，DIgSILENT网络重构给出了合理的计算结果。可以作为基准，从开关变化和网损变化两个方面对配电自动化主站网络重构计算结果进行测试验证。

6 结束语

本文根据DIgSILENT网络重构模块的功能，利用DIgSILENT接口实现配电自动化主站系统网络模型搭建、量测配置和量测注入，并在此基础上搭建配电自动化主站网络重构功能的测试。DIgSILENT可以灵活搭建测试模型，利用DIgSILENT动态仿真OPC接口数据，写入OPC Server。通过规约转换程序，将OPC Server中的量测数据转换为IEC 60870-5-104规约数据，注入被测试配电自动化主站系统，实现网络重构测试平台的搭建，并基于此构建了针对网络重构功能全方位测试的测试场景。

利用以上方法，本文基于DIgSILENT搭建了配电网四变电站模型，并在此基础上应用不同的负载水平和新能源接入情况，对网络重构模块进行测试验证。结果表明基于DIgSILENT的网络重构计算可以灵活方便搭建多种网络重构测试场景，有效验证了网络重构的计算结果，为验证配电自动化主站网络重构计算结果提供了手段。

参考文献

[1] 吴俊华，温彦军，赵月，等．配电网自动化在线

- 仿真系统技术论述[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 50-53.
- [2] 刘健, 张小庆, 赵树仁, 等. 主站与二次同步注入的配电自动化故障处理性能测试力法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(7): 118-122.
- [3] 凌万水, 刘东, 陈新, 等. 馈线自动化算法可靠性的量化评价方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 71-75.
- [4] 刘健, 沈兵兵, 赵江河, 等. 现代配电自动化系统[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2013.
- [5] 吴本悦, 赵登福, 刘云, 等. 一种新的配电网网络重构最优流模式算法[J]. 西安交通大学学报, 1999, 33(4): 22-24.
- [6] 刘蔚, 韩祯祥. 基于最优流法和遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 29-33.
- [7] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网网络重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98-103.
- [8] 吕林, 罗绮, 刘俊勇, 等. 基于多种群分层粒子群优化的配电网网络重构[J]. 电网技术, 2008, 32(S2): 42-45.
- [9] 余健明, 蔡利敏. 基于改进遗传算法的配电网网络重构[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 71-74.
- [10] 吕涛, 韩祯祥. 电力系统仿真软件DIgSILENT介绍[J]. 华东电力, 2004, 32(12): 37-40.
- [11] 刘东, 闫红漫, 丁振华, 等. SCADA主站系统集成测试技术研究[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 62-67.
- [12] 陈云辉, 刘东, 凌万水, 等. 主动配电网协调控制的仿真测试平台[J]. 电力系统自动化, 2015, 9(9): 54-60.
- [13] 黄春光, 刘锋涛. OPC技术在电力设备监测系统中的应用[J]. 继电器, 2006, 34(20): 36-39.
- [14] 杨庆柏, 赵春元, 张玉艳. OPC技术及其应用方向[J]. 沈阳电力高等专科学校学报, 2003, 5(4): 20-22.
- [15] FRANCISCO M. Gonzalez-Longatt, José Luis Rueda. PowerFactory applications for power system analysis[M]. Berlin: Springer, 2014.
- [16] 董越, 孙宏斌, 吴文传, 等. EMS中公共信息模型导入/导出技术[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(3): 10-14.
- [17] 孙雯, 戎晓雪, 别朝红, 等. 基于DIgSILENT数据接口DGS的含风电电力系统随机潮流分析[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(10): 102-110.

作者简介

王丰（1973—），男，硕士，工程师，主要从事智能配电网、配电自动化、调度自动化等研究。

（收稿日期：2022-10-18）