

DOI: 10.7667/PSPC170515

配电自动化潮流计算测试平台设计

范闻博¹, 关石磊¹, 符金伟¹, 尹惠¹, 王丰², 凌万水²

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 上海金智晟东电力科技有限公司, 上海 200233)

摘要: 为了全面测试配电自动化高级应用功能, 借助电力系统仿真软件 DIgSILENT, 提出了配电自动化主站潮流计算高级应用功能测试的一种方法, 并搭建了测试系统。在 IEEE 33/69 节点测试系统的基础上, 针对配电网潮流计算正确性进行了验证分析。结果表明, 利用本测试系统能够对配电自动化潮流算法进行有效测试, 为配电自动化主站系统高级应用功能测试提供了有效方法。

关键词: 配电自动化主站功能测试; DIgSILENT; 配电网潮流计算; OPC 接口; 测试平台

Test bench design for distribution automation power flow calculation

FAN Wenbo¹, GUAN Shilei¹, FU Jinwei¹, YIN Hui¹, WANG Feng², LING Wanshui²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Shanghai Wiscom Sunest Power Technology Co., Ltd, Shanghai 200233, China)

Abstract: By leveraging the functions of DIgSILENT software, a method to comprehensively test the power flow functions within advanced applications of distribution automation master station is presented. The test bench is established and the results of power flow calculation of distribution network are testified with the IEEE 33/69 buses test system. The results demonstrate this test bench examines the power flow calculation of distribution network effectively and provides an valid method for testing advanced application functions of distribution automation master station.

This work is supported by Science and Technology project of State Grid Corporation of China(research and development of key technologies for operation supervision and testing platform of distribution automation system).

Key words: testing for distribution automation master station functions; DIgSILENT; power flow calculation; OPC interface; test bench

0 引言

配电自动化利用现代计算机及通信技术将配电网的实时运行、电网结构、设备、用户以及地理图形等信息集成, 实现配电网运行监控及管理的自动化、信息化。截至 2013 年 4 月底, 国家电网公司已在 26 个省(直辖市)共 64 个城市开展了配电自动化优化工程建设, 其中 30 个项目已完成工程建设并投入运行, 初步建设了涵盖范围广、建设规模大、推进速度快、应用效果好的多地区的试点智能配电网体系^[1-3]。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是衡量配电自动化水平的关键^[4-7]。配电自动化主站系统(即配电网主站)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。国家电网针对配电自动化主站的要求, 也制定了《配电自动化主站系统功能规范》作为企业标准, 并依据此对各个厂家的主站系统进行测试。文献[8]针对主站 SCADA 系统的出厂试验与现场实验的要求, 探讨了 SCADA 主站系统的普遍采用的测试方法和测试内容。然而, 针对配电自动化主站扩展功能的分析应用和智能化功能的测试, 由于缺乏测试标准、检验步骤繁琐, 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。针对配电网分

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“配电自动化系统运行监管与试验检测平台关键技术研究”与开发”

析应用软件的算法正确性,一般基于企业内部进行算法测试和验证,缺乏包含配电主站整个模型、通信、数据流过程的测试。本文针对《配电自动化系统主站功能规范》关于配电网扩展功能中高级应用测试的要求,以潮流计算功能验证为基础,研究了基于电力系统仿真软件 DIgSILENT 搭建配电自动化系统主站扩展功能测试系统的方法。针对配电网扩展功能中潮流计算的功能要求,搭建了测试案例,利用 DIgSILENT 的潮流计算结果验证了被测试主站系统潮流计算的正确性,并给出了度量指标,为配电自动化主站系统扩展功能测试,提供了方法和手段。

1 配电自动化主站的测试要求

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 等基本功能的基础上,对实时数据的完整性和准确性有较高的要求。主要包括:拓扑分析、状态估计、潮流计算、解/合环分析、负荷预测、负荷转供和网络重构。

配电网潮流计算作为配电自动化主站高级应用的一部分,是配电网分析的基础。配电网有自身的特点,其潮流计算方法多样^[9-10]。配电网的网络重构^[11]、优化分析^[12]等都涉及成百上千次的潮流计算,必须保证其计算的正确性。针对配电网潮流计算的要求,《配电自动化系统主站功能规范》主要给出了其功能要求。针对主站平台潮流高级应用的测试必须在主站平台上,基于实时量测数据进行,针对整个主站系统的数据流进行。还必须选择具有代表性的测试案例,具有可靠的对照结果进行对比分析,进而考察潮流计算方法的收敛能力和算法稳定性^[13-14]。

2 配电自动化主站的测试要求

结合以上配电自动化主站系统测试要求,本文基于 DIgSILENT 软件,利用其系统建模和模型/数据接口丰富的功能,提出了一种配电自动化主站扩展功能测试系统的方法,并依据此搭建了配电自动化主站测试平台。DIgSILENT 提供了 OPC (Object Linking and Embedding for Process Control)接口广泛应用在 SCADA 系统和过程控制。利用 DIgSILENT OPC 接口,将仿真信号转换为物理信号,利用网络传递给配电主站的数据采集与监视控制(SCADA)系统,为主站的分析控制等高级应用功能提供注入数据。同时主站针对电力系统设备的控制命令也可以通过接口传递给 DIgSILENT 仿真电网,以实现主站系统针对仿真电网的闭环控制功能测试。

DIgSILENT 提供了非常丰富而实用的元件模型和对外接口,方便搭建各种配电网网络模型^[15]。DIgSILENT 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、配电网应用分析工具等等,为验证配电自动化主站系统分析功能,提供了可靠的对照结果。针对潮流计算,DIgSILENT 提供了三种方法可供选择:经典的牛顿-拉夫逊算法、牛顿-拉夫逊电流迭代法和线性方程法(直接将所有模型作线性化处理)。算法的迭代次数和允许误差可以根据计算需要具体指定。测试系统利用 DIgSILENT 潮流计算结果作为验证主站平台潮流计算的对照结果,并依据此进行结果比较,给出测试评价。

2.1 测试系统量测数据接口设计

根据配电自动化功能规范要求,配电自动化主站平台 SCADA 系统要求支持 DL/T634《远动设备及系统》标准的 IEC60870-5-104 通信规约。DIgSILENT 支持为 SCADA 系统提供了过程控制标准接口 OPC 的数据交换方式。将以上两个接口规范打通就可以实现 DIgSILENT 和配电主站通信,进而利用 DIgSILENT 所建立的电力网络仿真模型,为主站系统注入量测数据。DIgSILENT 提供的 OPC 接口由 OPC 服务器和 OPC 客户端构成,之间通过标准 COM 和 DCOM 进行数据的交互。OPC 项(Item)代表与 OPC 服务器到数据源的一个连接,包括值(Value)、品质(Quality)、时间戳(Time Stamp)三个基本属性。每一个 OPC 项可以映射为 IEC60870-5-104 规约表述的一个遥信点或者遥测点或者遥控点或者遥调点。

配电自动化主站测试平台根据 OPC 规则,建立一个自定义 OPC Client,其与 DIgSILENT 之间通过 OPC Server 进行信息交互。通过协议转换将 OPC Client 数据转换成 IEC60870-5-104 协议类型,同配电主站之间进行数据通信。DIgSILENT 和 OPC Server 也可以根据需要定义数据更新速率,这样可以根据现场实际情况调整数据更新速率,使平台的测试效果更贴近实际。

为了方便进行规约转换点表的配置,测试平台采用配置文件的方式将 OPC Client 与 104 规约进行转换。例如,将运行数据保存成 104 规约文件形式,只需将配置文件保存 OPC Item 与 104 协议信息体地址的对应关系,配置文件的实现方式如图 1。在规约转换通信接口程序设置 OPC 项同 SCADA 点的映射关系,利用配置工具导出配置文件(包含点表)。OPC 服务端读取此配置文件,实现了 OPC Server

的自动配置功能。

DIgSILENT 利用此配置文件中定义的 OPC 标签, 将 OPC Item 配置到相应的被仿真设备的物理量上(有功、无功、电力、电压等)。通过启动 DIgSILENT 的时域仿真模式 (Time Domain Simulation), 将电网的仿真数据, 发送到 OPC Server。规约转换通信接口(OPC Client)读入配置文件的信息体地址数据, 放入实时库对应位置, 104 规约程序将此数据传递给配电主站 SCADA 系统, 实现了配电主站量测数据的注入功能。图 1 给出了 OPC 接口数据转换流程。

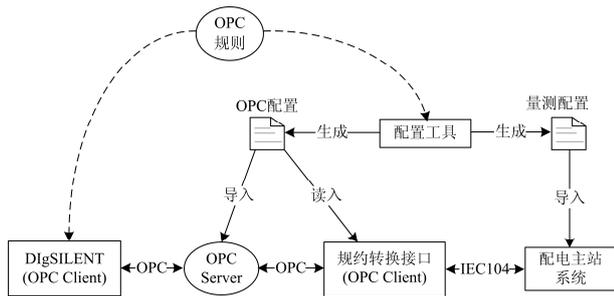


图 1 OPC 接口数据转换示意图

Fig. 1 Diagram of OPC interface data transition

2.2 测试系统量测数据接口设计

为了测试潮流的功能, 首先利用 DIgSILENT 软件搭建网络模型, 并建立电网仿真数据的 OPC 接口。配电自动化主站系统同时需要建立同 DIgSILENT 仿真网络相同的网络模型, 以满足测试电网同源性的要求。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, 此文件可以进行模型转换后, 方便生成配电自动化主站系统接受的 CIM 规范格式, 导入后即可建立网络模型。

除了网络模型, 配电自动化主站系统还要配置 SCADA 测点模型以及采集模型。其中量测模型定义了电力设备与 SCADA 量测的关联关系, 采集模型定义了同规约转换接口的通信信息。利用配置工具可以导出包含测点模型、采集模型以及量测模型的量测配置文件。利用测点模型和采集模型, 配电主站进行采集通道配置, 建立与测试系统的 104 规约通信模型。结合 CIM 网络模型和量测模型, 配电主站完成 SCADA 量测同电力设备的映射关系, 至此主站侧完成潮流计算所需对外依赖性的所有配置。

2.3 测试系统量测数据接口设计

作为配电主站系统高级应用功能的潮流计算必须基于主站基础 SCADA 功能进行, 以保证其输入同 DIgSILENT 潮流计算输入数据的一致性。由于针

对潮流计算所需 SCADA 功能主要是针对“二遥”数据, 不涉及遥控和遥调的内容, 所以只需要针对 SCADA“二遥”数据进行验证即可。在 DIgSILENT 时域仿真模式下, 改变系统运行状态(如开关变位和修改负荷有功/无功功率), 观察配电主站是否正确反馈了这些变化, 来校验数据接口的正确。

2.4 潮流计算结果比较设计

利用 DIgSILENT 软件, 建立针对配电网潮流计算的多个测试案例, 可以分别针对传统辐射状配电网、含分布式能源的配电网以及三相不平衡运行的配电网建立测试案例模型。利用 DIgSILENT 提供的潮流计算功能, 以 DGS(DIgSILENT Interface for Geographical Information Systems)格式导出潮流计算结果。这里选择 DGS 格式, 可以支持多种格式和方便定制导出内容^[16-17]。

配电主站在进行完潮流计算后, 将结果文件传给测试平台获取后, 与 DIgSILENT 导出的潮流计算结果进行比较。在确认两方的输入数据(开关位置、负荷功率、分布式能源功率)一致的基础上, 针对潮流计算结果进行分析比较, 图 2 给出了整个测试平台架构图。

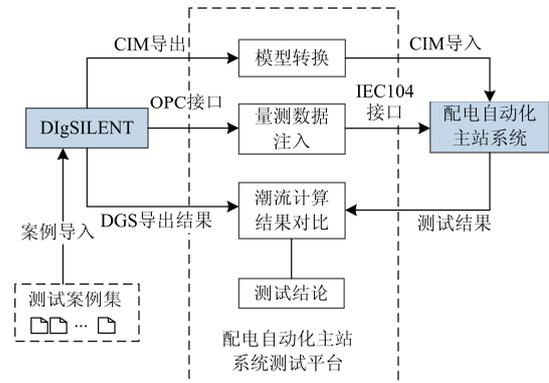


图 2 测试平台架构示意图

Fig. 2 Architecture of test bench

3 测试过程的设计

在 DIgSILENT 中预先建立用于配电网潮流计算的仿真测试网络模型, 设计其量测输出(给主站注入)。将测试案例模型以 CIM 格式导出给测试平台。进行潮流计算, 将计算结果以 DGS 格式导出给测试平台, 计算结果包括各节点电压和支路潮流。

测试平台利用配置工具配置针对主站注入的测点以及同 OPC Item 的对应关系, 将仿真测试过程中, 配电主站需要的网络运行信息(有功、无功、电流、电压、开关量测、控制点等)进行配置, 将其导出到 OPC 服务端。配电主站导入模型(网络模型,

量测模型),完成对外依赖性配置,完成配电主站测试前的准备工作。

激活 DIgSILENT 的仿真案例,启动 DIgSILENT 时域仿真。验证 OPC 服务端数据正常,验证规约转换通信接口实时库数据正常。配电主站同规约转换通信接口通信正常,至此配电主站测试平台准备完成。通知配电主站进行潮流计算,将计算结果导出到配电主站测试平台。测试平台将 DIgSILENT 潮流结果文件同测试平台导入结果文件进行比较,给出测试结论。

4 配电自动化主站的测试要求

4.1 基于算法收敛性的判断

潮流计算的收敛能力是衡量算法的重要指标。针对配电网的特殊情况,对算法的收敛性有了更高的要求。利用测试平台可以针对不同网络进行收敛性测试,方便搭建 IEEE 33/69 母线模型的配电网络,进行潮流收敛性的测试。

4.2 基于潮流计算准确性的结果评价

如被测主站潮流计算收敛或过早收敛,可以针对潮流计算结果,如:节点电压的幅值和相角,各个支路潮流(有功和无功),同 DIgSILENT 参考结果进行比较,来衡量计算结果的准确性。

欧式距离(Euclidean Metric)是一个通常采用的距离定义,指在 n 维空间中两个点之间的真实距离,它定义于欧几里得空间中。 n 维空间中两个点 $A(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 与 $B(b_1, b_2, \dots, b_n)$ 间的欧氏距离,可以表示为式(1)。

$$D_{AB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2} \quad (1)$$

针对多个母线节点和多条支路的潮流计算结果。可以将对照组的潮流计算结果(DIgSILENT 结果)和测试组的潮流计算结果,理解为空间中的两组向量,通过计算向量之间的距离来衡量潮流结果的总体偏差。同时,列出偏差较大的几个点,以对潮流计算单点的误差给出的判断。其中,比较计算结果对象可以选为节点电压(幅值或相角),也可选择线路潮流(有功功率或无功功率)。

另外可以通过计算两个向量的平均相对误差,作为评估计算算法相对误差的指标。平均相对误差表示为式(2)。

$$|e| = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{|\hat{x}_i - x_i|}{|x_i|} \right) \quad (2)$$

式中: \hat{x}_i 为测试组的计算结果向量; x_i 为对照组结果向量, n 为向量个数; T 为测试轮数(此处选为 1)。

5 算例分析

5.1 IEEE 33 节点配电网测试算例

在 DIgSILENT 中搭建 IEEE 33 节点算例^[18]模型,如图 3 所示。使用 DIgSILENT 潮流计算模块,选择交流潮流计算,单相模式,经典牛拉法,迭代次数为 25 次,节点功率误差选 0.01 kVA,母线电压计算结果如表 1 所示。

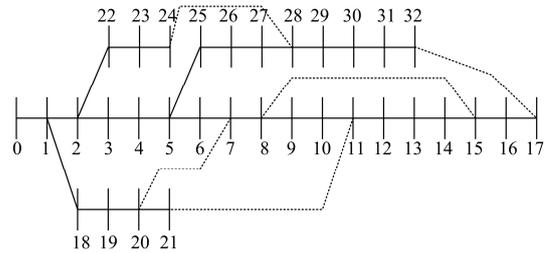


图 3 IEEE 33 节点系统示意图

Fig. 3 IEEE 33 bus system diagram

表 1 IEEE 33 母线节点系统 DIgSILENT 潮流计算结果

Table 1 DIgSILENT 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/(°)
0	12.660 0	0	17	11.559 7	0.495 1
1	12.622 4	0.014 5	18	12.615 7	0.003 7
2	12.444 0	0.096 0	19	12.570 4	-0.063 3
3	12.349 3	0.161 7	20	12.561 5	-0.082 7
4	12.255 6	0.228 3	21	12.553 4	-0.103 0
5	12.022 7	0.133 9	22	12.398 6	0.065 1
6	11.978 6	-0.096 5	23	12.314 1	-0.023 7
7	11.917 2	-0.060 4	24	12.272 0	-0.067 4
8	11.837 9	-0.133 5	25	11.998 2	0.173 3
9	11.764 2	-0.196 0	26	11.965 8	0.229 5
10	11.753 4	-0.188 8	27	11.820 9	0.312 4
11	11.734 4	-0.177 3	28	11.716 9	0.390 3
12	11.657 0	-0.268 5	29	11.671 9	0.495 6
13	11.628 3	-0.347 2	30	11.619 2	0.411 2
14	11.610 4	-0.384 9	31	11.607 6	0.388 1
15	11.593 0	-0.408 2	32	11.604 0	0.380 4
16	11.567 4	-0.485 4	—	—	—

同标准算法计算结果几乎无差,可以作为衡量被测主站潮流结果的参考。

测试一:潮流算法节点收敛精度设为 10 kVA

如配电主站运行正常,配电主站潮流算法可靠时,潮流计算各个结点的功率失配量会由此设定精

度决定。此时,以 DIgSILENT 潮流计算结果为参考,选择不同计算对象(节点电压幅值,节点电压相角,支路有功或支路无功)分别计算的欧式距离结果如表 2 所示。

表 2 IEEE 33 节点测试案例欧式距离结果(测试 1)

Table 2 Euclidean distance results for IEEE 33 bus system (test case 1)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.000 154	0.000 39	2.738	1.944

表 3 给出最大偏差误差的绝对值。针对节点电压幅值,节点电压相角,支路有功或支路无功的平均相对误差结果如表 4 所示。

表 3 IEEE 33 节点测试案例潮流最大误差(测试 1)

Table 3 Maximum error for IEEE 33 bus test system (test case 1)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.000 042	0.000 154	1.109	0.763

表 4 IEEE 33 节点潮流平均相对误差(测试 1)

Table 4 Average relative error for IEEE 33 bus test system (test case 1)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.000 024	0.000 363	0.000 398	0.000 440

测试二:潮流算法的节点收敛精度设为 500 kVA 当被测试算法给出的节点收敛精度较大(500 kVA)时,会导致迭代过早结束的情况,其结果必然是偏差更大。表 5 和表 6 分别给出以 DIgSILENT 潮流结果为参考,针对节点电压幅值/相角、支路有功功率和无功功率计算得出的欧氏距离和最大绝对值误差。表 7 给出了平均相对误差结果。

表 5 IEEE 33 节点测试案例欧式距离结果(测试 2)

Table 5 Euclidean distance results for IEEE 33 bus system (test case 2)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.0244 2	0.086 67	451.418	317.694

表 6 IEEE 33 节点测试案例最大误差(测试 2)

Table 6 Maximum error for IEEE 33 bus system (test case 2)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.006 41	0.032 78	202.677	135.141

表 7 IEEE 33 节点潮流平均相对误差(测试 2)

Table 7 Average relative error for IEEE 33 bus test system (test case 2)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.003 851	0.065 619	0.061 934	0.065 226

由以上结果可以看到,相对支路的有功和无功潮流,电压的欧式距离相差较小,选取支路潮流做为计算对象,可以从度量上更准确地衡量潮流计算的偏差情况。比较欧式距离结果可以反映总体潮流计算的偏差情况,结合平均相对误差可以更全面地衡量潮流计算结果的计算精度。

5.2 IEEE 69 节点配电网测试算例

在 DIgSILENT 中搭建 IEEE 69 节点算例模型^[18],利用上面步骤搭建配电站侧网络模型以及量测模型后,针对配电站潮流计算算法进行测试。同样,分别针对不同的收敛精度,计算其欧氏距离和平均相对误差值。

测试一:潮流算法节点收敛精度设为 10 kVA

针对测试一,表 8 和表 9 分别给出以 DIgSILENT 潮流结果为参考,针对节点电压幅值/相角、支路有功功率和无功功率计算得出的欧氏距离和最大绝对值误差。表 10 给出了平均相对误差结果。

表 8 IEEE 69 节点测试案例欧式距离结果(测试 1)

Table 8 Euclidean distance results for IEEE 69 bus system (test case 1)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.000 17	0.000 44	2.930	2.832

表 9 IEEE 69 节点测试案例潮流最大误差(测试 1)

Table 9 Maximum error for IEEE 69 bus test system (test case 1)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.000 02	0.000 207	1.301	0.875

表 10 IEEE 33 节点潮流平均相对误差(测试 2)

Table 10 Average relative error for IEEE 69 bus test system (test case 2)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.000 052	0.000 231	1.109	0.763

测试二:潮流算法的节点收敛精度设为 500 kVA 同样方法,针对测试二,表 11 和表 12 分别给出以 DIgSILENT 潮流结果为参考,针对节点电压幅值/相角、支路有功功率和无功功率计算得出的欧氏距离和最大绝对值误差。表 13 给出了平均相对误差结果。

表 11 IEEE 69 节点测试案例欧式距离结果(测试 2)

Table 11 Euclidean distance results for IEEE 69 bus system (test case 2)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.047 31	0.167 34	619.864	473.158

表 12 IEEE 69 节点测试案例最大误差 (测试 2)

Table 12 Maximum error for IEEE 69 bus system (test case 2)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.007 29	0.043 23	289.091	195.184

表 13 IEEE 33 节点潮流平均相对误差 (测试 2)

Table 13 Average relative error for IEEE 69 bus test system (test case 2)

电压/kV	相角/(°)	有功/kW	无功/kvar
0.004 463	0.076 312	0.075 806	0.080 792

由以上 IEEE 69 节点配电系统的潮流计算测试结果, 同样可以利用欧式距离值和平均相对误差指标反映潮流计算的计算精度。

6 结论

本文根据配电自动化主站系统潮流高级应用测试的需要, 提出了一种利用 DIgSILENT OPC 接口实现配电自动化主站系统量测注入的方法, 并在此基础上, 开发了面向配电自动化主站系统量测模型的规约接口模块以及配置工具, 搭建了配电自动化主站功能测试平台。设计了基于 DIgSILENT 动态仿真 OPC 接口的配电自动化主站潮流计算测试过程, 为配电自动化主站系统其他高级应用的测试打下了基础。

在利用以上测试方法, 针对配电自动化高级应用潮流计算测试时, 本文按照 IEEE 33 和 69 节点配电网模型, 搭建了测试案例, 利用设计的测试过程, 对潮流计算功能进行测试, 并采用欧式距离指标结合平均相对误差指标针对潮流计算的算法精度进行评估。算例表明, 欧式距离指标结合平均相对误差指标可以给出潮流计算精度的度量, 可以为验证配电自动化主站潮流算法提供依据。

参考文献

[1] 徐丙垠, 李天友, 薛永端. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 38-41.
XU Bingyin, LI Tianyou, XUE Yongduan. Smart distribution grid and distribution automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 38-41.

[2] 刘东, 丁振华, 滕乐天. 配电自动化实用化关键技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(7): 16-19.
LIU Dong, DING Zhenhua, TENG Letian. Practicability key technology & its development of distribution automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(7): 16-19.

[3] 刘健, 赵树仁, 张小庆. 中国配电自动化的进展及若

干建议[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 6-10.
LIU Jian, ZHAO Shuren, ZHANG Xiaoqing. Development of distribution automation in China and some suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 6-10.

[4] 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.
WU Junhua, WEN Yanjun, ZHAO Yue, et al. Technology of online simulation system for distribution automation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 50-53.

[5] 翁之浩, 刘东, 柳劲松, 等. 基于并行计算的馈线自动化仿真测试环境[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 43-46.
WENG Zhihao, LIU Dong, LIU Jinsong, et al. A feeder automation simulation test environment based on parallel computation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 43-46.

[6] 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.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHAO Shuren, et al. A coordinated method of host and terminal injection for fault isolation and restoration testing of distribution automation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(7): 118-122.

[7] 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.
LING Wanshui, LIU Dong, CHEN Xin, et al. A quantitative method of reliability evaluation for feeder automation algorithm and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 71-75.

[8] 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.
LI Dong, YAN Hongman, DING Zhenhua, et al. Research on integration testing technology for main station in SCADA system[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 62-67.

[9] 杨杉, 同向前, 王海燕, 等. 换流器限流状态下的配电网潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 1-6.
YANG Shan, TONG Xiangqian, WANG Haiyan, et al. Power flow calculation for distribution network under the current limiting status of grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 1-6.

[10] 李佩杰, 罗翠云, 白晓清, 等. 一种求解多相混合配电网潮流的扩展序分量法[J]. 电力系统保护与控制,

- 2016, 44(3): 15-23.
- LI Peijie, LUO Cuiyun, BAI Xiaoqing, et al. An extended sequence components method for solving multiphase power flow in distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 15-23.
- [11] 初壮, 窦孝祥, 于群英. 考虑风电随机性的多场景配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 132-138.
- CHU Zhang, DOU Xiaoxiang, YU Qunying. Multi scene distribution network reconfiguration considering the randomness of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 132-138.
- [12] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 多时间尺度下基于主动配电网的分布式电源协调控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 192-198.
- YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Multi-time scale coordinated control of distributed generators based on active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 192-198.
- [13] 孙秋野, 陈会敏, 杨家农. 牛顿类潮流计算方法的收敛性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2196-2200.
- SUN Qiuye, CHEN Huimin, YANG Jianong. Analysis on convergence of Newton-like power flow algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2196-2200.
- [14] 范翔, 严正, 赵文恺, 等. 提高电力系统潮流计算收敛性方法的比较分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11): 57-63.
- FAN Xiang, YAN Zheng, ZHAO Wenkai, et al. Comparative analysis among prevailing methods for enhancing convergence of power flow calculation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(11): 57-63.
- [15] 吕涛, 韩祯祥. 电力系统仿真软件 DIgSILENT 介绍[J]. 华东电力, 2004, 32(12): 37-41.
- LÜ Tao, HAN Zhenxiang. Introduction of power system simulation software DIgSILENT[J]. East China Electric Power, 2004, 32(12): 37-41.
- [16] 刘庆, 张东英, 刘燕华, 等. BPA 电网模型自动导入 DIgSILENT 的研究和开发[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 112-117.
- LIU Qing, ZHANG Dongying, LIU Yanhua, et al. Research and development of BPA grid model imported to DIgSILENT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 112-117.
- [17] 董炜, 潘秋萍, 雷金勇, 等. BPA 与 DIgSILENT 动态模型 的比较与数据转换[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 140-146.
- DONG Wei, PAN Qiuping, LEI Jinyong, et al. Comparison and data conversion between dynamic models of bpa and DIgSILENT[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 140-146.
- [18] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

收稿日期: 2017-04-11; 修回日期: 2017-06-06

作者简介:

范闻博(1979-), 女, 硕士, 高工, 主要从事智能配电设备与系统、配电自动化测试技术、配网状态检修等技术研究; E-mail: fanwenbo@epri.sgcc.com.cn

关石磊(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事配电自动化系统及设备检测技术研究; E-mail: guanshilei@epri.sgcc.com.cn

符金伟(1988-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事配电自动化系统及设备检测技术研究。E-mail: fujinwei@epri.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)