

源网荷不对称的配电网全三相仿真方法

马洲俊¹, 王勇¹, 朱红¹, 徐青山²

(1. 国网南京供电公司, 江苏南京 210019; 2. 东南大学电气工程学院, 江苏南京 210096)

摘要:智能配电网日趋灵活、可靠、高效和多变,源网荷三重强不对称性日趋凸显,传统经验型调度无法实现对智能配电网运行状态和发展趋势全面管控。文中首先提出了源网荷不对称下的配电网全三相运行仿真技术的总体构架;其次在构建智能配电网关键元件全三相模型的基础上,依托全三相潮流计算,进行全三相节点电压短路计算和暂/稳态仿真技术研究;最后开发基于OPEN3200系统的运行仿真平台,并在南京河西新城示范区成功应用,验证了所提方法的合理性、有效性。

关键词:智能配电网;源网荷;全三相运行仿真技术;三相潮流;稳/暂态仿真

中图分类号: TM743

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2016)06-0050-06

智能电网是未来电网发展的趋势,城市交直流多端接入、分布式电源大规模并网、主动配电网带来能量双向流动等,使得配电网中能源消耗者和提供者并存^[1]。配电网能源互联网化要求未来配电系统更加灵活和高效,分布式电源和储能等新型配电网设备即插即用;能量与信息以能量信息流的方式在能源路由器间储存转移,实现电能双向按需传输和动态平衡^[2]。与输电网不同,配电网诸多特殊之处,包括不存在大型同步旋转元件,因此无功角稳定问题;电压等级较低,馈线长度和输送容量一般都远远小于输电线路;配电网中含有大量缺相和不对称情况。

目前,国内外在智能配电网领域开展大量研究工作集中在以下几个方面^[3-5]:调度自动化鼻祖 Dyliacono 提出利用“智能调度机器人”实现传统调度规则在线运行,通过精细化调控提升电网输电能力;美国 PJM 提出先进电网控制中心和完美调度等理念,探索在完全电力市场化条件下电网滚动规划和电网实时潮流控制;国内张伯明等提出采用云计算技术搭建时间、空间和控制目标三维协调新一代 EMS 系统,实现对于全局协调优化后电网系统闭环控制。但在电网公司,配电网运行仿真研究较少,尤其是适应源网荷强三重不对称的智能配电网全三相运行仿真的研究仍为空白。国内供电部门使用的 OPEN3200 系统中针对配电网的运行管理的软件模块是配电网自动化子系统,实时数据均为单相检测值,不具备三相潮流计算、稳定分析等功能,导致现有配电网调度控制缺乏有效准确的仿真参考,无法实现对智能配电网运行状态和发展趋势全面管控。

1 全三相运行仿真技术总体构架

配电网三相负荷不对称、网络不对称、用户侧分

布式电源大多单相接入使得配电网形成了源网荷的三重不对称,在此情况下配电网潮流、短路电流计算等将发生变化,本文提出源网荷不对称下智能配电网全三相运行仿真技术的总体构架,实现对智能配电网运行状态的精细化把控,如图 1 所示。

2 机理分析及配网关键元件三相建模

智能配电网建设加速建设导致传统配电网负荷的不平衡性、网络参数及运行的不对称性变得日益突出。配电网大量分布式电源单/三相接入配电网、无源配电网变为有源配电网,传统三相对称的配电网电源变为不对称电源,形成源网荷三重不对称中的“源不对称”。其次配电网不同于输电网,配电网线路不存在三相轮换位,同时不同接线方式下的配电网三绕组变压器的阻抗具有不对称性,形成源网荷三重不对称中的“网不对称”。最后配电网靠近负荷中心,大多用电采用单相供电方式,使得配电网存在着单相/两相/三相线路供电形式共存的现象,这就形成源网荷三重不对称中的“荷不对称”。

2.1 变压器全三相仿真模型

配电网三相不平衡潮流计算、三相短路电流计算已经无法采用输电网的单相变压器模型,因此需要考虑变压器不同接线方式(包括接地方式等)带来的相位偏移问题和变压器抽头位置变化导致的非标准变比问题^[6,7],建立全三相配变模型。无连接组别变压器模型如图 2 所示。其相应的绕组阻抗为:

$$\begin{bmatrix} i_{123} \\ i'_{123} \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{T0} \begin{bmatrix} u_{123} \\ u'_{123} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在式(1)中, \mathbf{Y}_{T0} 是 6 阶方阵,而且所有参数都可以通过按自导纳与互导纳定义进行变压器短路测试实验得到,考虑节点导纳矩阵的对称性,再根据耦合的对称性以及变压器三相之间的近似对称性, \mathbf{Y}_{T0} 形式可以表示为:

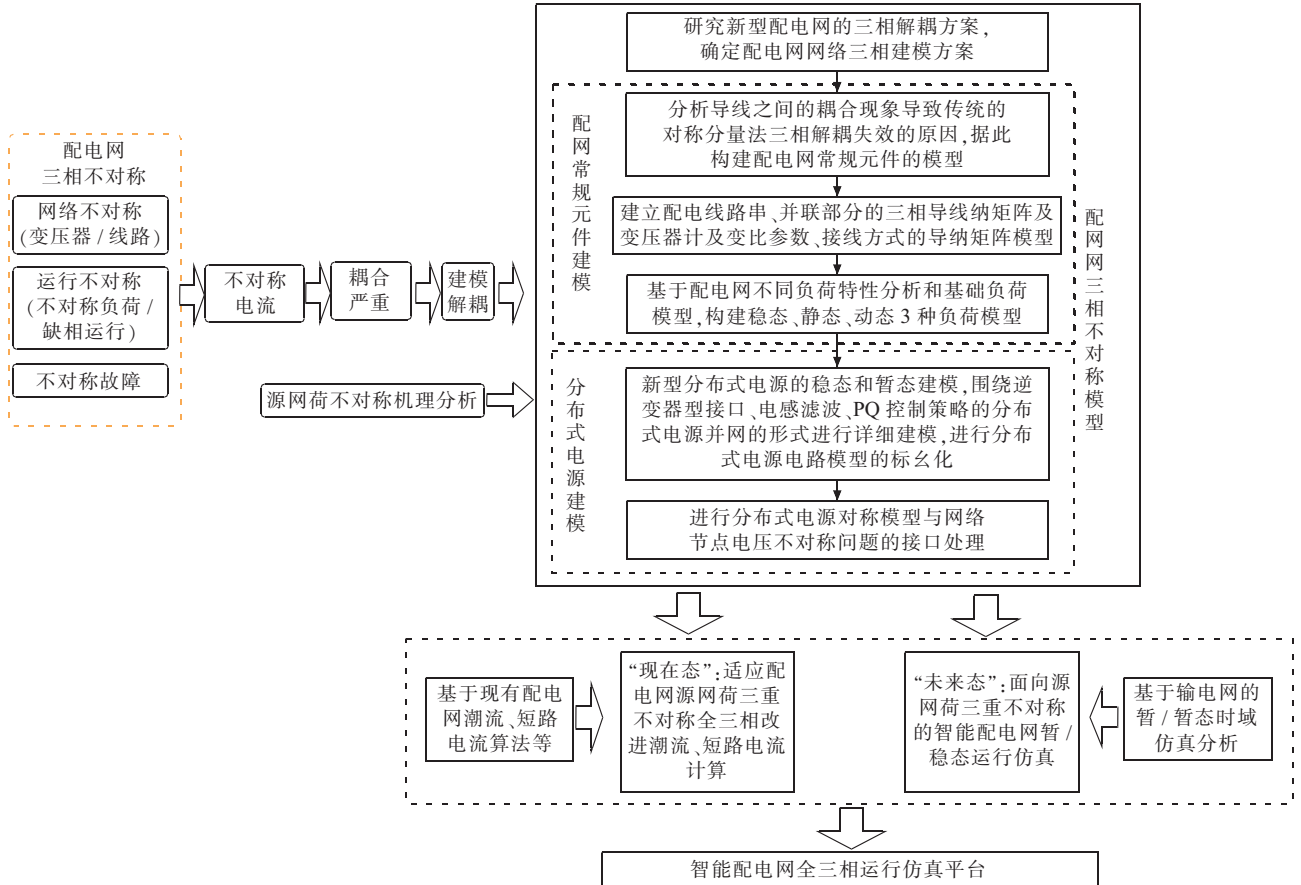


图1 源网荷不对称下的智能配电网全三相运行仿真技术总体架构图

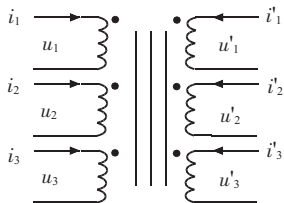


图2 无连接组别三相变压器模型

$$Y_{T0} = \begin{bmatrix} y_1 & -y_{1m} & -y_{1m} & -y_{12} & -y_{12m} & -y_{12m} \\ -y_{1m} & y_1 & -y_{1m} & -y_{12m} & -y_{12} & -y_{12m} \\ -y_{1m} & -y_{1m} & y_1 & -y_{12m} & -y_{12m} & -y_{12} \\ -y_{12} & -y_{12m} & -y_{12m} & y_2 & -y_{2m} & -y_{2m} \\ -y_{12m} & -y_{12} & -y_{12m} & -y_{2m} & y_2 & -y_{2m} \\ -y_{12m} & -y_{12m} & -y_{12} & -y_{2m} & -y_{2m} & y_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中: y_1 为一次绕组自导纳; y_2 为二次绕组自导纳; $-y_{12}$ 为一次、二次绕组同相之间互导纳; $-y_{1m}$ 为一次绕组各相之间互导纳; $-y_{2m}$ 为二次绕组各相之间互导纳; $-y_{12m}$ 为一次/二次绕组不同相之间互导纳。

考虑变压器不同接线组别及连接方式,先根据上述无任何接线组别方式下变压器导纳参数矩阵,再根据某种接线方式画出变压器接线示意图,通过接线图写出各节点电压与线圈支路电压间的关系、各节点电流与线圈支路电流之间的关系式,便可得到相应模型。

2.2 线路全三相仿真模型

配电线路模型大多采用三相 π 型等值电路,如图3所示。对于短线路,为简化计算可以忽略配电线路的对地并联导纳,但对于长的辐射型线路,对地并联导纳不能忽略^[7-9]。

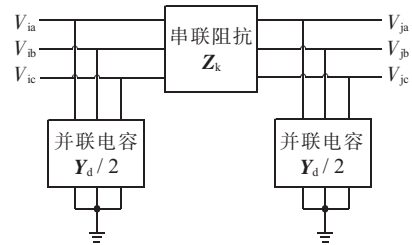


图3 配电线路三相模型

线路导纳矩阵为:

$$Y_L = \begin{bmatrix} Z_k^{-1} + \frac{1}{2}Y_d & -Z_k^{-1} \\ -Z_k^{-1} & Z_k^{-1} + \frac{1}{2}Y_d \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{式(3)中: } Z_k = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix}, Y_d = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix}, Y_d = Z_k^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix}。$$

2.3 负荷模型

配电网中负荷由于大部分为居民负荷且单相接入，且配电网三相负荷的接线方式可能是星型接线也可能是角型接线，其中缺相负荷一般采用星型接线方式。目前负荷静态模型大多采用 ZIP 模型。常用的负荷动态模型为考虑感应电动机机械暂态过程和机电暂态过程的负荷动态模型。本文采用的负荷暂态模型为恒阻抗负荷、恒功率负荷和异步电动机负荷按一定比例组合成的综合模型。

2.4 分布式电源暂稳态仿真建模

随着多类型分布式电源的接入，新型配电网出现了除 Vθ 节点和 PQ 节点外其他新的节点类型，像 PV, PI, PQ(V)。不同接口及运行方式下分布式电源稳态模型如表 1 所示。准确的分布式电源稳态模型需要根据其向网络注入有功和无功的大小及注入方式等最终运行情况来确定^[8-11]。

表 1 不同接口分布式电源的稳态模型

分布式电源	容量范围	接口形式
光伏发电	几瓦至几十兆瓦	DC/AC 变换器
储能系统	几千瓦至几十兆瓦	DC/AC 变换器
太阳能热发电	几千瓦至几十兆瓦	同步发电机
风力发电	几百瓦至几兆瓦	同步 / 异步发电机、AC/AC 变换器
小水电	几百千瓦至几十兆瓦	同步发电机
燃料电池	几十千瓦至几十兆瓦	DC/AC 变换器
微型燃气轮机	几十千瓦至几兆瓦	AC/AC 变换器
热电联产	几千瓦至几十兆瓦	同步 / 异步发电机
地热能	几百千瓦至几兆瓦	同步发电机
海洋能	几百千瓦至几兆瓦	四象限同步发电机

3 智能配电网全三相运行仿真关键技术

3.1 全三相潮流计算功能

传统配电网研究最多的潮流算法主要分为 2 类：一是适应规模大且结构为辐射状配电网的改进型牛顿拉夫逊法潮流算法，二是适合求解配电网存在的弱环、多 PV 节点问题而不断改进的的前推回代法潮流计算方法^[8-10]。

如果配电网中不含弱环、不含 PV 节点，则采用三相前推回代潮流算法；否则采用通用三相牛拉法，如果三相牛拉法没有收敛，采用“单相前推回代 + 三相牛拉法”，潮流计算流程图如图 4 所示。

3.2 基于矩阵变换的三相短路计算方法

传统对称分量法计算短路电流在本文计算过程中遇到了无法跨越的瓶颈，配电网通常环型结构设计、开环方式运行，支路参数 R/X 的比值较大；单相负荷、主干馈线上的单相和两相“辐射状支链”以及不相等的三相负荷同时存在；中性点非有效接地，使得传统的对称

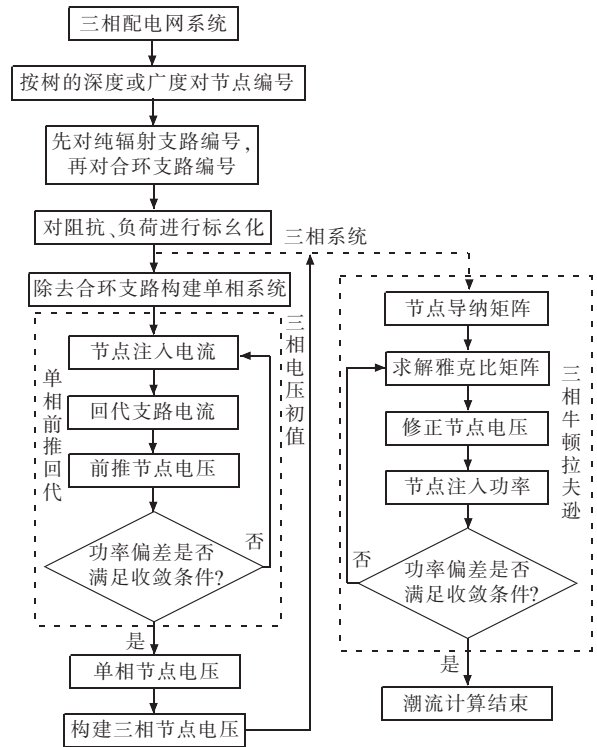


图 4 三相潮流计算流程图

分量法不再适合于配电网的短路电流计算，这些都直接导致对称分量法解耦失效^[9,10]。因此，配电网短路计算必须采用 abc 全耦合模型。

短路情况下电压不能维持在正常水平，所以负荷并不能按潮流计算时的方法处理，采用 $Z = \frac{U^2}{S}$ 计算负荷的等值阻抗，其中 U 为潮流计算得到的电压，S 为负荷参数 P+jQ。将得到的阻抗值并入节点导纳矩阵 $Y_{kk} = Y_{kk} + Z_k^{-1}$ ，此时除平衡节点外各节点将不存在负荷，即各节点的注入电流均为 0，新的网络方程为：

$$\begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \\ \dots \\ I_{ka} \\ I_{kb} \\ I_{kc} \\ \dots \\ I_{na} \\ I_{nb} \\ I_{nc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11_{1a}} & Y_{11_{1b}} & Y_{11_{1c}} & \dots & Y_{1k_{1a}} & Y_{1k_{1b}} & Y_{1k_{1c}} & \dots & Y_{1n_{1a}} & Y_{1n_{1b}} & Y_{1n_{1c}} \\ Y_{11_{2a}} & Y_{11_{2b}} & Y_{11_{2c}} & \dots & Y_{1k_{2a}} & Y_{1k_{2b}} & Y_{1k_{2c}} & \dots & Y_{1n_{2a}} & Y_{1n_{2b}} & Y_{1n_{2c}} \\ Y_{11_{3a}} & Y_{11_{3b}} & Y_{11_{3c}} & \dots & Y_{1k_{3a}} & Y_{1k_{3b}} & Y_{1k_{3c}} & \dots & Y_{1n_{3a}} & Y_{1n_{3b}} & Y_{1n_{3c}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{k1_{1a}} & Y_{k1_{1b}} & Y_{k1_{1c}} & \dots & Y_{kk_{1a}} & Y_{kk_{1b}} & Y_{kk_{1c}} & \dots & Y_{kn_{1a}} & Y_{kn_{1b}} & Y_{kn_{1c}} \\ Y_{k1_{2a}} & Y_{k1_{2b}} & Y_{k1_{2c}} & \dots & Y_{kk_{2a}} & Y_{kk_{2b}} & Y_{kk_{2c}} & \dots & Y_{kn_{2a}} & Y_{kn_{2b}} & Y_{kn_{2c}} \\ Y_{k1_{3a}} & Y_{k1_{3b}} & Y_{k1_{3c}} & \dots & Y_{kk_{3a}} & Y_{kk_{3b}} & Y_{kk_{3c}} & \dots & Y_{kn_{3a}} & Y_{kn_{3b}} & Y_{kn_{3c}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1_{1a}} & Y_{n1_{1b}} & Y_{n1_{1c}} & \dots & Y_{nk_{1a}} & Y_{nk_{1b}} & Y_{nk_{1c}} & \dots & Y_{nn_{1a}} & Y_{nn_{1b}} & Y_{nn_{1c}} \\ Y_{n1_{2a}} & Y_{n1_{2b}} & Y_{n1_{2c}} & \dots & Y_{nk_{2a}} & Y_{nk_{2b}} & Y_{nk_{2c}} & \dots & Y_{nn_{2a}} & Y_{nn_{2b}} & Y_{nn_{2c}} \\ Y_{n1_{3a}} & Y_{n1_{3b}} & Y_{n1_{3c}} & \dots & Y_{nk_{3a}} & Y_{nk_{3b}} & Y_{nk_{3c}} & \dots & Y_{nn_{3a}} & Y_{nn_{3b}} & Y_{nn_{3c}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_{1a} \\ U_{1b} \\ U_{1c} \\ \dots \\ U_{ka} \\ U_{kb} \\ U_{kc} \\ \dots \\ U_{na} \\ U_{nb} \\ U_{nc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中，节点导纳矩阵为恒阻抗并入网络后的新的节点导纳矩阵；左侧只有平衡节点注入电流 I_{1a}, I_{1b}, I_{1c} 是未知量，其余均为 0；右侧电压矩阵中除了平衡节点电压 U_{1a}, U_{1b}, U_{1c} 是已知量，其余均为未知量。

发生短路故障时,节点导纳矩阵不变,只改变网络边界条件,只要方程个数等于未知量个数,便可通过矩阵变换进行求解,计算流程如图5所示。

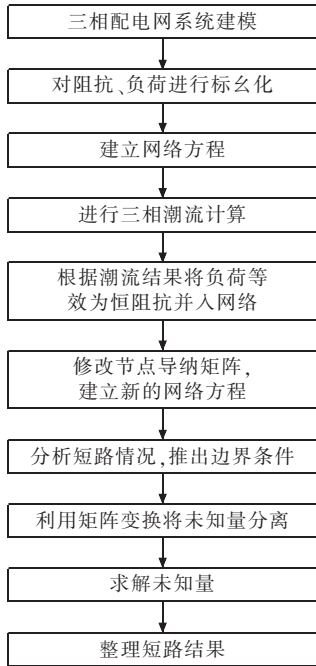


图5 三相短路计算流程图

3.3 暂/稳态运行仿真方法

配电网中各元件模型、网络模型以及二者之间的接口模型构成全配电网的数学模型,其运行问题任何时刻都可以看作满足一组联立的微分方程组和代数方程组的数学问题^[11,12],其静态电压稳定性分析如图6所示。

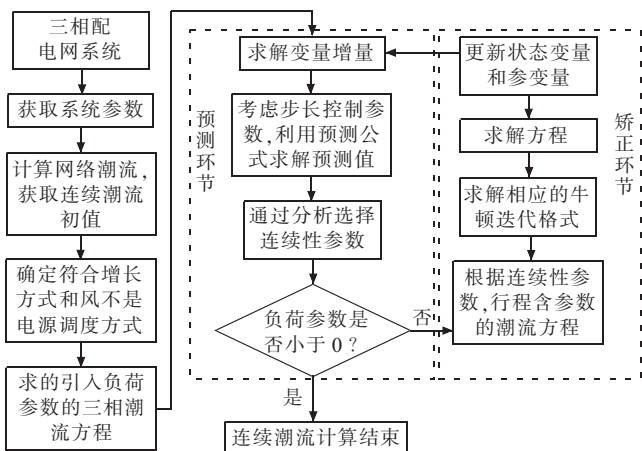


图6 静态电压稳定算法流程图

在配电网三相潮流的基础上,结合给定参数求解各代数量、状态量初值,将各负荷、分布式电源中能够并入网络的恒阻抗部分并入网络,继而在初值和新网络基础上不断求解代数方程和微分方程,遇到故障和操作时,作网络修改或变量增减处理,并进行代数量跃变计算,仿真一直到给定时间界限结束^[9],暂态仿真一般过程如图7所示。

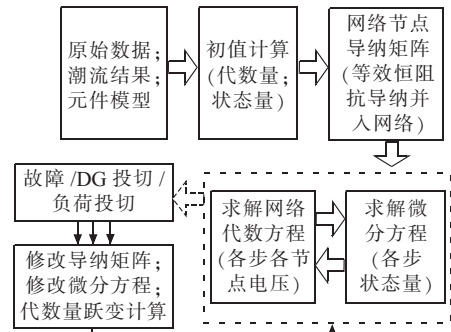


图7 配电网暂态仿真一般过程

4 离线/在线运行仿真平台开发

基于上述章节的理论和关键技术研究,开发了智能配电网离线/在线运行仿真平台并实现了与传统配电自动化系统无缝对接。在平台的基础支撑层,元件模型参考标准 CIM 模型,采用构建的全三相模型;数据库设计完成仿真平台数据的存储与展现,利用 XML 文件进行数据处理;高级应用层,拓扑检测完成从仿真平台获取网络参数,仿真计算包括潮流计算、静态电压稳定计算、短路计算以及时域仿真计算,且均为全三相算法;用户交互层,提供人机交互方式;数据访问实现了配电自动化系统与本仿真平台的数据交互。整体平台架构如图8所示。仿真平台具备离线和在线仿真功能,具体实现方式如图9所示。

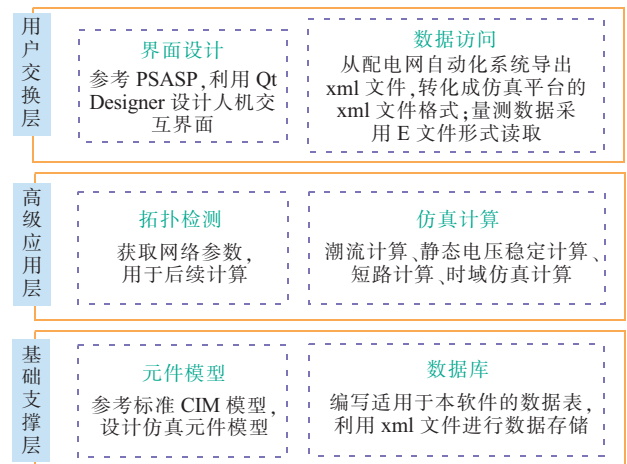


图8 仿真平台整体架构

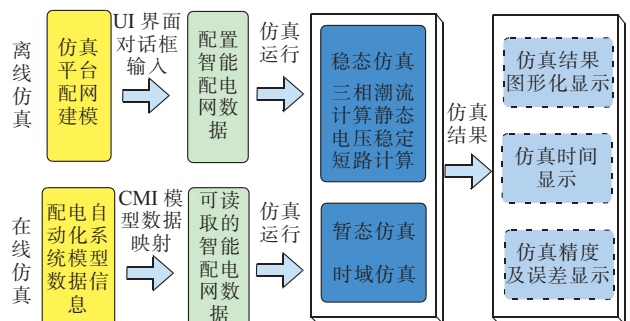


图9 仿真平台功能实现

仿真平台基于 QT 平台开发,完全采用面向对象架构设计,各个元件、UI 文件、算法模块、数据存储模块之间完全解耦,彼此之间通过成员函数的方式进行通讯和信息交换。电力系统元件基于 CIM 模型构建,其他模块之间设计了一整套完整、高效、易于维护和扩展的结构体系。

5 工程实践

依托南京河西智能配电网精细化调度示范工程进行了研发平台的示范应用。试点范围内共有馈线 110 余条,线路长度约 540 km,最大负荷功率约为 900 MW,辖区范围内分布着光伏和风光储等分布式电源 7 个,总功率 5000 kW。以南京河西新城中胜变和双闸变为例,展示平台运行仿真情况。对该网络进行潮流计算得到电网的各节点三相电压,如图 10 所示。

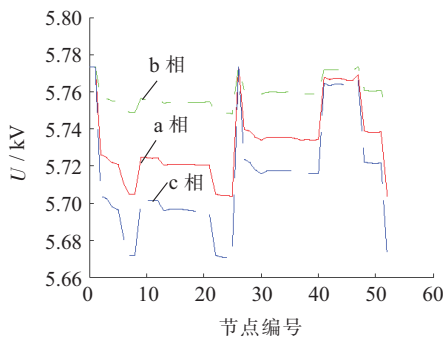


图 10 潮流计算节点三相电压

短路故障设置在和府奥园 2 号线,0.1 s 时发生 ab 两相接地短路,仿真总时间 0.5 s,结果如图 11 所示。

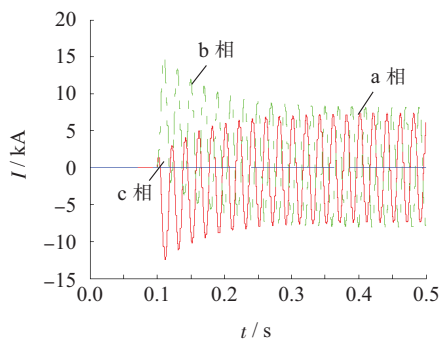
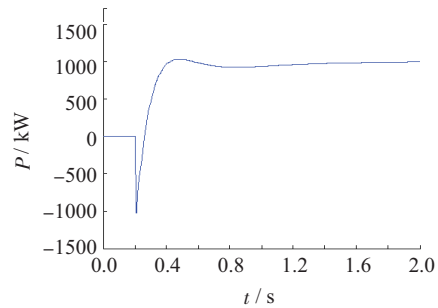


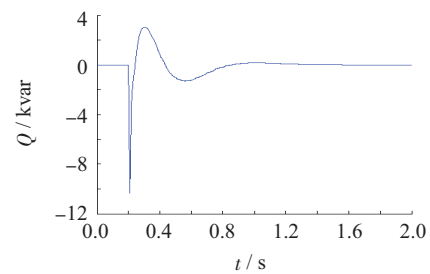
图 11 短路点对地三相电流

通过模拟网络短路故障,计算短路发生后的电网的“未来态”,根据配电网的不同“现在态”制定与之相适应的故障处理策略。设置场景为 0.2 s 时将分布式电源 PV2 接入节点 8,1.5 s 时切除分布式电源 PV3,分布式电源 PV2 和 PV3 的有功出力均为 1000 kW,无功为 0。PV2 和 PV3 的有功无功曲线以及周围节点的电压曲线如图 12、图 13 所示。

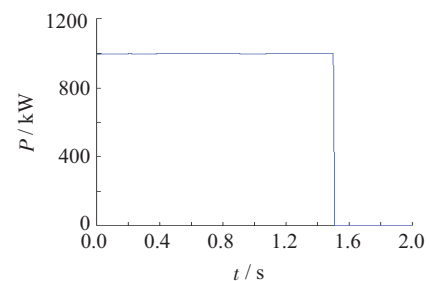
可见分布式电源接入或者切除对于配电网三相造成了不同程度的影响。通过对分布式电源的接入涉及暂态稳定性研究可以确定其是否可以投切。当 PV3 的



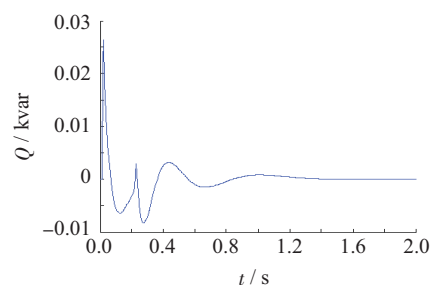
(a) PV2 有功曲线



(b) PV2 无功曲线

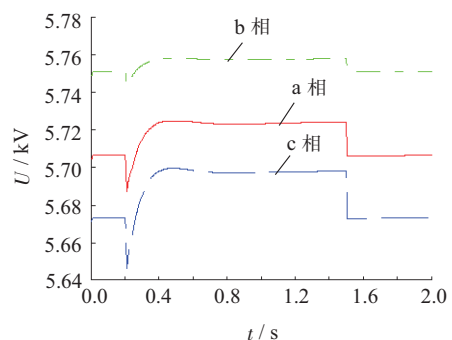


(c) PV3 有功曲线



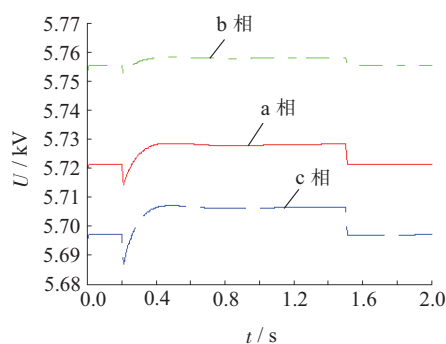
(d) PV3 无功曲线

图 12 分布式电源接入点有功无功曲线



(a) 节点 8 电压曲线(PV2 接入点)

有功功率从 1000 kW 上升到 2000 kW,中胜变网络节点三相电压普遍不同程度升高,支路潮流有所减少。通过仿真计算,可精确分析分布式电源接入后对配电网三相的影响,从而合理设置分布式电源出力,寻求较为合适的接入容量、相别和地点。



(b) 节点 13 电压曲线(离 PV2 和 PV3 较远)

图 13 距离分布式电源接入点不同位置处电压

平台根据迎峰度夏及特殊运行方式,合理安排停电计划 173 项,调整运行方式 76 次,根据电网的“现在态”和“未来态”对源网荷不对称情况下配电网重载、故障等异常情况进行运行仿真,对快速诊断处理各类异常及恶劣天气条件下的突发故障具有很好的辅助作用,平均缩短故障处理时间 15~20 min。

6 结束语

本文在分析源网荷不对称机理基础上,通过数学和电路理论分析得出对称分量法无法适用于网络不对称的配电网,然后研究了建立配电网关键元件全三相模型的一般性建模思路。结合本文所提的源网荷不对称下配电网全三相运行仿真技术总体构架,研究了配电网全三相潮流计算和节点电压短路计算以及暂/稳态仿真技术,依托南京河西智能配电网精细化调度示范工程,一体化开发完成了智能配电网全三相运行仿真平台并进行了工程实践,为源网荷三重不对称下的配电网精细化调度控制提供技术手段,对于新形势下的智能配电网能源精细化互联互通具有借鉴意义。

参考文献:

[1] 刘涤尘,彭思成,廖清芬,等.面向能源互联网的未来综合配电网

- 系统形态展望[J]. 电网技术,2015,39(11):3023-3034.
- [2] 徐成,梁睿,程真何,等.面向能源互联网的智能配电网安全态势感知[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):13-18.
- [3] DYLIACCO T E. Enhancing Power System Security Control [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(3):38-41.
- [4] OTT A L. Development of Smart Dispatch Tools in the PJM Market [C]//Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, USA: IEEE, 2011:1-3.
- [5] 张伯明,孙宏斌,吴文传.三维协调的新一代电网能量管理系统[J]. 电力系统自动化,2007,31(13):1-6.
- [6] 吴文传,张伯明.变压器详细模型推导与三相配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化,2003,4(27):1-4.
- [7] 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.
- [8] 李鹏,王成山,黄碧斌,等.分布式发电微网系统暂态时域仿真方法研究——(一)基本框架与仿真算法[J]. 电力自动化设备,2013,33(2):33-39.
- [9] 徐青山,刘中泽,陈潇鹏,等.含分布式电源的配电网三相时域仿真[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):22-30.
- [10] 车仁飞,李仁俊,李玉忠.基于叠加原理的配电网短路电流计算[J]. 电力系统自动化,2001,25(24):22-25.
- [11] 李鹏,王成山,黄碧斌,等.分布式发电微网系统暂态时域仿真方法研究——(二)建模、设计与实现[J]. 电力自动化设备,2013,33(3):15-19.
- [12] 吴争荣,王钢,李海锋,等.含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):130-138.

作者简介:

马洲俊(1986),男,江苏无锡人,工程师,研究方向为配电网调控运行;

王勇(1974),男,江苏盐城人,高级工程师,研究方向为配电网调控运行管理;

朱红(1971),女,江苏常州人,研究员级高级工程师,研究方向为配电自动化;

徐青山(1979),男,江苏姜堰人,博士生导师,研究方向为新能源发电与智能配电网。

Three-phase Operation Simulation Method of Intelligent Distribution Network with Source-Grid-Load Asymmetry

MA Zhoujun¹, WANG Yong¹, ZHU Hong¹, XU Qingshan²

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The intelligent distribution network is becoming more and more flexible, reliable, efficient and multivariate. As the strong source-grid-load triple asymmetry in the distribution network is increasingly prominent, the traditional empirical dispatching method can't fully control the operation state and development trend of distribution network. In this paper, the overall framework of three phase operation simulation technology of the intelligent distribution network with the source-grid-load asymmetry is put forward. Secondly, the steady and transient three-phase models of key components are established and the three-phase power flow is calculated. On these basis, the three-phase node voltage short-circuit calculation and steady/transient simulation technologies are thoroughly studied. Finally, an operation simulation platform is developed based on the OPEN3200, and successfully applied to Nanjing Hexi CBD which verifies the rationality and the effectiveness of the proposed methods.

Key words: intelligent distribution network; source-grid-load; three-phase operation simulation technology; three phase power flow; steady/transient simulation