

含分布式能源的主动配电网实时拓扑追踪

赵月辉¹, 彭钰莹², 顾全¹, 陈根军¹

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 中建电子信息技术有限公司, 北京 100037)

摘要:随着各种分布式能源接入配电网, 配电网的潮流分布随分布式能源的运行方式转换而变化, 传统仅考虑配电网拓扑结构的拓扑追踪方法不再适用, 需要考虑配电网潮流方向变化对拓扑追踪的影响。本文根据配电网中主要电力设备及其连接关系建立了拓扑模型, 基于配电网状态估计结果获取配电网的潮流分布, 结合拓扑模型以及潮流分布给出计算各开关潮流的方法, 在此基础上建立了基于潮流方向的连接节点/支路模型, 并将该模型应用于拓扑追踪。文中列举了多个拓扑追踪的应用场景, 分别描述了各应用场景下的拓扑追踪实施方法。通过实例分析可知, 文中的拓扑追踪方法充分考虑了多种分布式能源在不同运行方式下对配电网的影响, 计算方法快速、结果准确, 能够为运行人员提供调度决策支持。

关键词:主动配电网; 分布式能源; 拓扑追踪; 配电管理系统

文章编号:2096-4633(2018)06-0044-07 **中图分类号:**TM73 **文献标志码:**B

随着分布式电源 (distributed generation, DG)、储能系统 (energy storage system, ESS)、可控负荷 (controllable load, CL) 等分布式能源接入配电网, 传统的配电网控制方法已难以保证电网运行的经济性、安全性。主动配电网 (active distribution network) 通过对各种分布式能源的主动管理, 实现配电网的协调控制^[1-7]。

配电网实时拓扑追踪功能是配电管理系统 (distribution management system, DMS) 中网络拓扑模块的基础功能之一。它主要包括实时电网状态下的供电电源追踪、供电范围追踪以及动态电源着色。分布式能源的引入, 使得配电网出现更多种类的电源和负荷, 电网潮流不再是单向流动, 电网运行方式改变后可能出现孤网运行或环网运行^[8-10]。传统的拓扑追踪方法无法适应含分布式能源的主动配电网^[11-17]。

文献[14]将电网拓扑等效成开关/节点模型, 供电电源定义为变电站等值电源, 基于深度优先搜索方法, 以电压等级作为搜索方向的限制条件。文献[15]将电网等效成拓扑节点/支路模型, 将与变电站内母线所在拓扑节点相连的设备作为变电站的供电范围。文献[16]将母线作为根节点和分界点, 建立以母线作为根节点的多棵树以及不同树之间的层次关系后, 进行拓扑追踪搜索。文献[17]将馈线的出线开关和 DG 作为电源, 从 CIM 中获取各种开

关的类型并以此区分流过开关潮流方向为单向还是双向, 最后根据设定潮流方向进行拓扑追踪。文献[14-16]未考虑分布式能源对拓扑追踪的影响, 文献[17]虽然考虑了分布式电源, 但其假设一个电气岛只能有一个主供电电源, 其余分布式电源均只作为负荷, 这与实际配电网运行状态可能不一致。

主动配电网中, 分布式能源可运行于多种状态, 电网接线形式可能为辐射状或环网状, 分布式能源运行状态的改变或电网接线形式的改变会影响各电源的供电范围及各负荷的供电电源分布。本文在综合考虑多种分布式能源接入对配电网影响的基础上, 基于配电网实时状态和潮流方向, 实现了适用于任意接线方式下的配电网拓扑追踪。拓扑追踪结果严格反映了功率的流动方向, 为主动配电网的协调控制提供了基础^[18-20]。

1 主动配电网拓扑模型

主动配电网中电气设备主要包括母线、开关、刀闸、配变、馈线段和分布式能源等。各设备的拓扑连接关系由设备的端点、连接节点和拓扑节点构成。

配电网中各电气设备通常包含一个或以上的端点, 连接在一起的端点同属于一个连接节点, 通过闭合开关刀闸连接在一起的连接节点属于同一个拓扑节点。

如图1所示, 此配电网中 BUS1、BUS2 为变电站

可计算开关 BK7 的潮流。

2.2 分布式能源处理

含分布式能源的主动配电网中电源通常为以下 3 类设备：

(1) 变电站站内母线。由于配电网建模通常从变电站内的母线开始,输电网通过变电站内的母线将电能输送到配电网,因此可将其作为追踪设备的供电电源。

(2) 分布式电源(DG)。当分布式电源有功出力大于 0 时,可将其作为追踪设备的供电电源。

(3) 储能系统(ESS)。储能系统可能运行于发电状态或储能状态。当其运行于发电状态时输出有功,此时可将其作为追踪设备的供电电源。当其运行于储能状态时吸收有功,此时可将其作为负荷类设备。

2.3 基于潮流方向的连接节点/支路模型

在进行拓扑追踪时将配电网等效成基于潮流方向的连接节点/支路模型,其中支路包括开关、刀闸、馈线段、变压器等多端设备。当有功功率流过支路设备时,支路有功功率为正的一侧连接节点定义为该支路的电源侧连接节点,支路有功功率为负的一侧连接节点为该支路的负荷侧连接节点。因此,在追踪设备的供电电源时,通常由支路的负荷侧连接节点向支路的电源侧连接节点追踪;在追踪电源的供电范围时,通常由支路的电源侧连接节点向支路的负荷侧连接节点进行追踪。

2.4 主动配电网供电电源追踪

主动配电网供电电源追踪功能是针对指定追踪设备,追踪其供电电源,并显示供电电源到追踪设备之间的供电路径上的所有设备。

供电电源追踪的流程可分为两部分,第一部分是根据追踪设备找到其供电电源,第二部分是找到供电电源与追踪设备之间的供电路径。

图 5 展示了追踪设备电源的流程。其核心思想在于从追踪设备所在的连接节点出发,根据潮流方向,沿着与有功功率流动相反的方向搜索未访问过的连接节点,并记录这些连接节点中的电源。由于追踪设备可能有多个电源供电,因此采用广度优先搜索算法向各个方向追踪设备电源时,如果当前支路的未搜索连接节点为其电源侧连接节点,则继续向此方向追踪;若为其负荷侧连接节点,则不继续向此方向搜索。TraceCNodeList1 存储了追踪电源过程中访问过的所有支路电源侧连接节点。

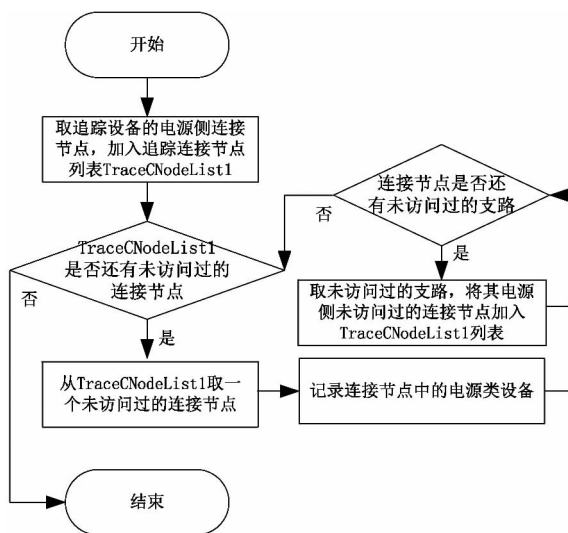


图 5 设备电源追踪流程图

Fig. 5 Flow chart of equipment power tracing

图 6 展示了搜索追踪设备与其某个供电电源之间路径的流程。其核心思想在于从电源出发,根据潮流方向,沿着有功功率流动方向寻找 TraceCNodeList1 中存储的连接节点,当搜索到追踪设备所在的连接节点后停止。在搜索过程中访问过的支路即为追踪设备到电源之间的供电路径。由于追踪供电路径中需要访问的连接节点一定在 TraceCNodeList1 中,因此在进行供电路径追踪时,避免了无效搜索,使得追踪效率得到提高。

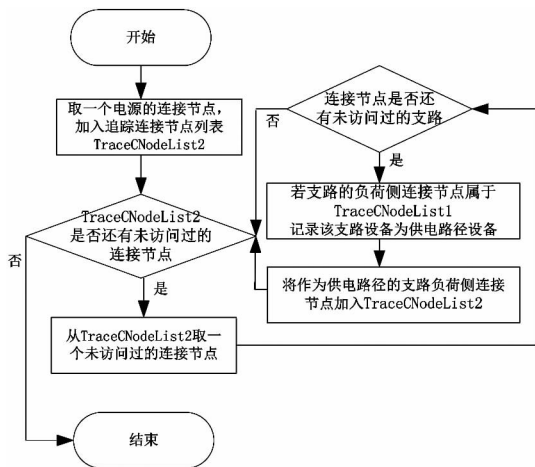


图 6 设备供电路径追踪流程图

Fig. 6 Flow chart of equipment power supply path tracing

2.5 主动配电网供电范围追踪

主动配电网供电范围追踪功能是针对指定设备,追踪其供电范围,并显示供电范围内的设备。

图 7 展示了追踪设备供电范围的流程。与图 6 的流程类似,其核心思想在于从追踪设备的负荷侧连

接节点出发,沿着有功功率流动方向进行搜索,在搜索过程中访问到的设备即为追踪设备的供电范围。

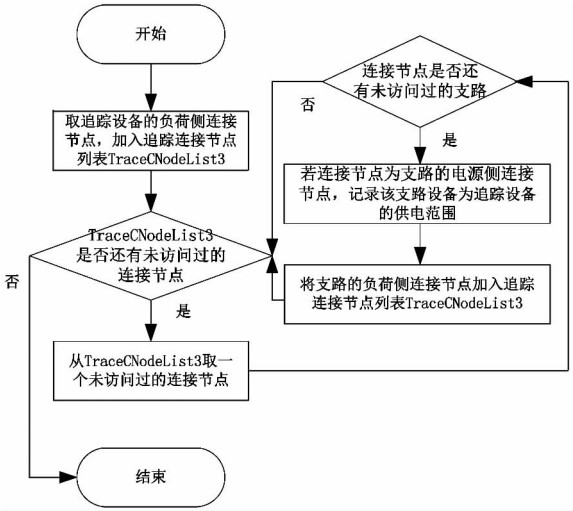


图7 设备供电范围追踪流程图

Fig. 7 Flow chart of equipment power supply range tracing

2.6 主动配电网供电电源及供电范围追踪

主动配电网供电电源及供电范围追踪是指对配电网中的指定设备在馈线图上同时显示该设备与其供电电源之间的路径,以及该设备的供电范围。通过此功能可直观的了解某一电网断面下设备在电能量传输中起到的作用。

本功能主要流程如下:

(1)按照 2.4 节所述方法,对指定设备进行供电电源追踪,记录该设备到各供电电源之间的路径上的设备。

(2)按照 2.5 节所述方法,对指定设备进行供电范围追踪,并记录该设备供电范围包含的设备。

(3)根据前 2 步记录下的设备,对指定设备到各供电电源之间的路径以及该设备供电范围进行着色。

2.7 主动配电网动态电源着色

动态电源着色功能是指根据配电网实时运行状态,对不同电源供电范围内的设备着不同颜色,从而能够在馈线环网图上直观的区分不同电源的供电范围。当电网运行方式发生改变时,各电源的供电范围通常也会发生改变,因此电源的供电范围着色应随之发生变化。

对于传统配电网,为区分各馈线的供电范围,通常选择各馈线的出线开关作为电源。当配电网含分布式能源时,电源还应该包含各分布式能源。

动态电源着色功能的主要流程如下:

(1)检查电网运行状态是否发生变化。如果开

关、刀闸分合状态发生变化,或者设备的潮流方向发生变化,则应启动一次动态电源着色。

(2)选择馈线出线开关以及分布式能源形成电源集合。其中馈线出线开关应闭合且带电,分布式能源有功出力应大于 0。

(3)依次从电源集合中取每一个未追踪过的电源类设备,按照 2.5 节所述方法对各电源进行供电范围追踪。若设备同时被多电源供电,则该设备只列入首个供电电源的供电范围。

(4)对配电网中的各带电设备按其供电电源进行着色区分。

3 算例分析

以图 1 所示配电网接线图为例,假设图 1 中分布式电源 DG1 为发电状态,储能系统 ESS1 运行于储能状态。则根据 2.2 节可知此配电网中电源类设备为母线 BUS1、BUS2 和分布式电源 DG1。

首先从状态估计获取潮流断面,其结果如图 3 所示,获得馈线段、变压器这两类设备的潮流流向。

然后根据 2.1 节所述方法,计算配电网中各开关两侧的潮流,计算结果如图 2 所示。根据各支路设备的潮流方向,设置各支路设备的电源侧连接节点和负荷侧连接节点。基于潮流方向的连接节点/支路模型如下表所示。

表 基于潮流方向的连接节点/支路模型

Tab. The connectivity node / branch model based on power flow direction

支路	电源侧连接节点	负荷侧连接节点
BK1	CN1	CN2
BK2	CN16	CN15
BK3	CN7	CN6
BK4	CN5	CN3
BK5	CN13	CN10
BK6	CN11	CN12
BK7	CN5	CN9
FS1	CN2	CN3
FS2	CN15	CN13
FS3	CN6	CN5
FS4	CN10	CN11
FS5	CN9	CN10
DT1	CN3	CN4
DT2	CN5	CN8
DT3	CN13	CN14

对变压器 DT1 进行供电电源追踪的步骤如下:

(1)取支路 DT1 的电源侧连接节点 CN3,加入追踪连接节点列表 TraceCNodeList1。

(2)从 TraceCNodeList1 中取出未访问过的连接节点 CN3,置其为已访问过。沿着与有功功率流动相反的方向进行广度优先搜索,依次将连接节点 CN2、CN5、CN1、CN6、CN7 加入 TraceCNodeList1。

(3)搜索 TraceCNodeList1 中各连接节点中的电源类设备,得到变压器 DT1 的两个电源:母线 BUS1 和分布式电源 DG1。

(4)取母线 BUS1 所在连接节点 CN1,沿着有功功率流动方向寻找 TraceCNodeList1 中存储的连接节点,依次将连接节点 CN1、CN2、CN3 加入到连接节点追踪列表 TraceCNodeList2,并记录支路 BK1、FS1 为母线 BUS1 到追踪设备 DT1 间的供电路径。即供电路径设备为开关 BK1 和馈线段 FS1。

(5)取分布式电源 DG1 所在连接节点 CN7,沿着有功功率流动方向寻找 TraceCNodeList1 中存储的连接节点,依次将连接节点 CN7、CN6、CN5、CN3 加入到连接节点追踪列表 TraceCNodeList2,并记录支路 BK3、FS3、BK4 为分布式电源 DG1 到追踪设备 DT1 间的供电路径。即供电路径设备为开关 BK3、BK4 和馈线段 FS3。

对开关 BK3 进行供电范围追踪的步骤如下:

(1)取支路 BK3 的负荷侧连接节点 CN6,加入追踪连接节点列表 TraceCNodeList3。

(2)从 TraceCNodeList3 中取出未访问过的连接节点 CN6,置其为已访问过。沿着有功功率流动的方向进行广度优先搜索,依次将连接节点 CN5、CN3、CN9、CN8、CN4、CN10、CN11、CN12 加入 TraceCNodeList3。

(3)记录追踪过程中访问过的支路 FS3、BK4、BK7、DT2、DT1、FS5、FS4、BK6。即开关 BK3 的供电范围为开关 BK4、BK6、BK7,变压器 DT1、DT2,馈线段 FS3、FS4、FS5 和储能系统 ESS1。

对 BK3 进行供电电源及供电范围追踪的步骤如下:

(1)对开关 BK3 进行供电电源追踪,该设备到其供电电源路径上的设备包括分布式电源 DG1、开关 BK3。

(2)对开关 BK3 进行供电范围追踪,该设备

供电范围内的设备包括开关 BK4、BK6、BK7,变压器 DT1、DT2,馈线段 FS3、FS4、FS5 和储能系统 ESS1。

(3)对前 2 步中的设备进行着色。

对图 1 进行动态电源着色的步骤如下:

(1)根据本案例中假设的配电网运行状态可知,出线开关 BK1、BK2 为闭合且带电,分布式电源 DG1 有功出力大于 0,储能系统 ESS1 有功出力小于 0。因此,电源集合中的设备包括开关 BK1、BK2 以及分布式电源 DG1。

(2)取开关 BK1,搜索其供电范围,包含设备 FS1、DT1。

(3)取开关 BK2,搜索其供电范围,包含开关 BK5、BK6,馈线段 FS2、FS4,变压器 DT3,储能系统 ESS1。

(4)取分布式电源 DG1,搜索其供电范围,包含开关 BK3、BK4、BK7,馈线段 FS3、FS5,变压器 DT2。

(5)对设备开关 BK1、馈线段 FS1、变压器 DT1 着颜色 1;对开关 BK2、BK5、BK6,馈线段 FS2、FS4,变压器 DT3、储能系统 ESS1 着颜色 2;对设备分布式电源 DG1,开关 BK3、BK4、BK7,馈线段 FS3、FS5、变压器 DT2 着颜色 3。

4 结论

含分布式能源的主动配电网实时拓扑追踪,解决了传统拓扑追踪功能无法适应主动配电网中潮流不再单向流动的问题。对多种分布式能源建立其各种运行状态下的拓扑追踪模型,真实反映了分布式能源各种运行状态对电网拓扑追踪的影响。基于状态估计实时断面计算开关两侧潮流,获得配电网全网设备的实时潮流分布。通过建立基于潮流方向的连接节点/支路模型,提供统一的搜索方向约束判断,减少无效搜索,提升搜索效率。

该拓扑追踪方法适用于多种配电网接线方式及分布式能源的各种运行方式,可以满足对主动配电网实时拓扑追踪功能的需求,并具有良好的扩展性。

参考文献:

- [1] 尤毅,余南华,张晓平,等. 主动配电网分布式能源分区消纳实时协调控制[J]. 南方电网技术,2015,9(08):71-76.

- [2] YOU YI, YU Nanhua, ZHANG Xiaoping, et al. Real-time coordinating control of regional consumption of distributed energy source in active distribution network [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9 (08): 71–76.
- [3] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10–16.
- [4] YOU YI, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10–16.
- [5] 林威, 刘东, 李庆生, 等. 基于分布式模型预测控制的主动配电网区域协同控制 [J]. 南方电网技术, 2016, 10(12): 10–15 + 23.
- [6] LIN Wei, LIU Dong, LI Qingsheng, et al. Area coordinate control of active distribution network based on distributed model predictive control [J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(12): 10–15 + 23.
- [7] 钟清, 张文峰, 周佳威, 等. 主动配电网分层分布控制策略及实现 [J]. 电网技术, 2015, 39(06): 1511–1517.
- [8] ZHONG Qing, ZHANG Wenfeng, ZHOU Jiawei, et al. Hierarchical and distributed control strategy for active distribution network & its implementation [J]. Power System Technology, 2015, 39(06): 1511–1517.
- [9] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电网系统可行技术的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 12–18.
- [10] FAN Mingtian, ZHANG Zuping, Su Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 12–18.
- [11] 夏坊, 彭志伟, 李鹏程. 主动配电网技术的研究现状与发展 [J]. 贵州电力技术, 2016, 19(09): 9–12.
- [12] XIA Fang, PENG Zhiwei, LI Pengcheng. Research status and development of active distribution network technology [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2016, 19(09): 9–12.
- [13] 卢人杰, 邹晓松, 袁旭峰. 含分布式能源的主动配电网规划研究 [J]. 贵州电力技术, 2015, 18(01): 58–61 + 76.
- [14] LU Renjie, ZOU Xiaosong, YUAN Xufeng. Study on the active power distribution network planning of distributed energy [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2015, 18(01): 58–61 + 76.
- [15] 陈海焱, 陈金富, 段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(01): 35–40.
- [16] CHEN Haiyan, CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong. Study on power flow calculation of distribution system with DGs [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(01): 35–40.
- [17] 丁明, 郭学凤. 含多种分布式电源的弱环配电网三相潮流计算 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 35–40.
- [18] DING Ming, GUO Xuefeng. Three-phase power flow for the weakly meshed distribution network with the distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 35–40.
- [19] 杨雄, 卫志农, 孙国强, 等. 主动配电网三相解耦潮流算法 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(02): 186–195.
- [20] Yang Xiong, Wei Zhinong, Sun Yonghui, et al. Three-phase decoupled power flow algorithm for active distribution networks [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(02): 186–195.
- [21] 周步祥, 刘欣宇. 基于网络图形的配电网拓扑分析方法及应用 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 67–70.
- [22] ZHOU Buxiang, LIU Xinyu. Network graph-based power distribution network topology analysis and its application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 67–70.
- [23] 张伟, 周步祥. 基于有向支路的配电网拓扑分析方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 38–41.
- [24] ZHANG Wei, ZHOU Buxiang. Topology analysis method of distribution network based on vector branch [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 38–41.
- [25] 李飞, 黄琦, 纪元, 等. 内存对象数据库在输配电网平台并发拓扑分析中的应用 [J]. 贵州电力技术, 2016, 19(11): 29–34.
- [26] LI Fei, Huang Qi, Ji Yuan, et al. Application of memory object database in the concurrent topology analysis of transmission and distribution network platform [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2016, 19(11): 29–34.
- [27] 陈根军, 顾全. 基于 CIM 的配电网一体化追踪拓扑 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(03): 59–63.
- [28] CHEN Genjun, GU Quan. A CIM-based integrative network tracing method for power distribution systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(03): 59–63.
- [29] 韩国政, 徐丙垠. 面向馈线的中压配电网拓扑分析 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(01): 61–64.
- [30] HAN Guozheng, XU Bingyin. Circuit oriented topology analysis of medium-voltage distribution network [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(01): 61–64.
- [31] 刘秀玲, 王洪瑞, 王永青, 等. 配电网图形系统框架模型和供电路径分析的改进 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 45–48 + 71.
- [32] LIU Xiuling, WANG Hongrui, WANG Yongqing, et al. Improvement on the Framework and supply path analysis of intelligent electrical graphic system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 45–48 + 71.
- [33] 楼宗明, 章坚民, 庄晓丹, 等. 基于在线开关状态和 DG 角色的动态配电网拓扑分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 64–69.
- [34] LOU Zongming, ZHANG Jianmin, ZHUANG Xiaodan. Dynamic topologic analysis of distribution network based on on-line switch and DG states [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 64–69.
- [35] 刘志明, 邓昆玲. 分布式光伏接入中低压配电网安全配置关键技术研究 [J]. 内蒙古电力技术, 2016, 34(06): 12–16.
- LIU Zhiming, DENG Kunling. Research on safety configuration key technology of distributed photovoltaic connecting to mid and low voltage distribution network [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2016, 34(06): 12–16.

[36] 王钊,徐备,张师. 分布式储能对配电网电压稳定的影响分析[J]. 广东电力,2017,30(05):48-51.
WANG Qian,XU Bei,ZHANG Shi,et al. Analysis on influence of distributed energy storage on voltage stability of power distribution network[J]. Guangdong Electric Power,2017,30(5):48-51.

[37] 刘志明,邓昆玲. 分布式光伏接入中低压配电网安全配置关键技术研究[J]. 内蒙古电力技术,2016,34(06):12-16.
LIU Zhiming, DENG Kunling. Research on safety configuration key technology of distributed photovoltaic connecting to mid and low voltage distribution network [J]. Inner Mongolia Electric

Power,2016,34(06):12-16.

收稿日期:2018-05-08

作者简介:



赵月辉(1987),男,硕士,工程师,从事调度自动化和配网自动化系统高级应用研究及开发工作。

(本文责任编辑:范斌)

Real-time topology tracing for active power distribution network with distributed energy

ZHAO Yuehui¹, PENG Yuying², GU Quan¹, CHEN Genjun¹

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102 Jiangsu, China;

2. CSCEC Electronic Information Technology Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: With a variety of distributed energy resources access to the distribution network, the power flow in distribution network varies with different operation modes. Traditional network topology tracing method which only considers the topology structure of distribution network is no longer applicable, the influence of power flow direction change on topology tracing needs to be considered. In this paper, a topology model is established according to the main power equipment and their connection in distribution network. The power flow of distribution network can be obtained based on state estimation results. Combined with topology model and power flow in distribution network, a computation method for breakers power flow is presented. The connectivity node / branch model based on power flow direction is established, and the model is applied to topology tracing. The application scenarios of multiple topology tracing are enumerated, and the implementation methods of topology tracking are described respectively in each application scenario. In this paper, the example analysis shows that the topology tracing method fully considers the influence of a variety of distributed energy resources on the distribution network under different operating modes. The calculation method is fast and the result is accurate, and it can provides dispatch decision support for the operator.

Key words: active distribution network; distributed energy resources; topology tracing; distribution management system