

基于在线开关状态和 DG 角色的动态配电网拓扑分析

楼宗明¹, 章坚民¹, 庄晓丹², 钟一俊², 张亚东³, 陆献传³

(1. 杭州电子科技大学自动化学院, 浙江 杭州 310018; 2. 国网浙江省电力公司通信信息分公司, 浙江 杭州 310006;
3. 国网新昌县供电公司, 浙江 新昌 312500)

摘要: 采用 CIM 表示法对配电网综合建模, 提出一种基于开关类型及状态、DG 角色的配电网拓扑岛分解方法。根据配电网设计态结构, 静态拓扑分析准备和储存了大量的以双向开关某一端口和 DG 为功率注入点的拓扑岛子树。动态拓扑分析基于开关状态、DG 角色, 对各种情况进行逻辑判断, 并选择已储存的合适的拓扑岛子树的快速组装形成动态拓扑树, 该拓扑结构可直接用于后续潮流计算, 满足在线运算的实时性。通过该算法与传统 CIM 分析的比较, 验证了算法的高效性。

关键词: 配电网; CIM; 在线开关状态; DG 角色; 静态拓扑; 拓扑岛; 子树; 动态拓扑

Dynamic topologic analysis of distribution network based on on-line switch and DG states

LOU Zong-ming¹, ZHANG Jian-min¹, ZHUANG Xiao-dan², ZHONG Yi-jun², ZHANG Ya-dong³, LU Xian-chuan³

(1. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China; 2. Communication and Information Sub-company of Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310006, China; 3. Xinchang County Electric Power Company, Xinchang 312500, China)

Abstract: Under the comprehensive CIM based modeling, a novel topologic method is presented which divides the distribution network into series of topologic islands according to the types of switches and DGs and their operation states in the networks. According to the structure of design state of the distribution network, the static topologic analysis prepares and stores a lots of sub-trees of topologic islands with their own power supply points in one terminal of bi-directional switches or DG as the main power supply source. Based on the real time states of switches and the role of DG, the dynamic topologic analysis makes the logic reasoning to form a dynamic topologic tree of the distribution networks with the quick assembly of suitable sub-tree of topologic islands which can be directly used for further power flow calculation to meet the real time requirement of on-line mathematic operation. Through the comparison of this algorithm and traditional CIM analysis, this paper verifies the efficiency of the algorithm.

Key words: distribution system; CIM; on-line switch state; DG role; static topology; topologic island; sub-tree; dynamic topology

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)13-0064-06

0 引言

基于在线测量的动态配网潮流计算与分析, 既是配网运行可靠性、经济性、灵活性在线评估, 也是配网重构的基本模块。配电网含有分布式电源 (DG) 后, 改变了系统原有的潮流, 随着其容量的增加, 可能出现逆潮流或 DG 供电孤岛问题, 使电网的潮流分析复杂化和运行方式更为丰富^[1-2]。尽管如此, 配网闭环设计、开环运行的特性, 使得前推回代法仍然有效^[2], 其前提是基于开关与 DG 状态

的电网拓扑分析, 以快速寻找到各种可能的开环辐射拓扑。

文献[3]定义了树节点类来动态地反映节点间的链接关系, 采用队列存储节点的深度优先算法, 快速识别网络拓扑结构的变化, 并形成若干个以电源点为根的树。文献[4]首先提出把全局拓扑分成静态拓扑和动态拓扑的想法。静态拓扑仅处理排序工作, 可预先计算; 每次全局拓扑只运行动态拓扑, 由于数据已经排序, 计算速度加快。该方法基于节点开关关联表、节点支路关联表进行拓扑分析: 静态分析为拓扑分析做一些准备工作, 包括对节点开关关联表、节点支路关联表按首节点进行排序等工作, 这里的首节点就是可能的功率注入点。动态拓

基金项目: 浙江省重点自然科学基金(LZ12E07001); 国家电网公司科技计划项目(ZDK088-2012); 浙江省电力公司2013年科技项目

扑时考虑开关状态的变化和设备的投退情况, 形成母线和电气岛; 该方法主要用于电气岛分析, 其形成的拓扑不能直接用于潮流计算。文献[5]提出基于 CIM 的配电网一体化拓扑追踪技术, 其本质是深度优先搜索和宽度优先搜索算法, 且开关变位后需重新以变电站为起点进行拓扑追踪。文献[6]把分段开关之间的所有负荷简化为一个广义节点, 用潮流计算子序列组描述其内部结构, 提出了一种按区存储的潮流计算序列创建法。文献[7]将拓扑分级、分块、分段处理, 却没有对馈线段的具体变换细节做出阐述。文献[8]推荐矩阵法的拓扑分析方法, 但前提是已知拓扑的辐射形态。文献[9]分别对 CIM 解析、拓扑分析、潮流计算进行阐述, 缺点在于未能将这三部分有效地结合成一个整体。

目前基于 CIM 的配电拓扑维护在配电生产管理系统进行, 是动态配电网分析的拓扑分析数据源。而馈线主线-支线模型或树状模型也是配网设备管理的一个常用形式, 该模型十分有利于前推回代法的潮流计算。本文基于以上特点, 以开关分解配网为开关连接的拓扑岛, 通过变换获取不同功率点的拓扑岛子树; 动态分析时, 以开关状态以及 DG 是否作为配网或孤岛的主供电电源, 调用不同的拓扑岛子树, 快速形成动态拓扑树, 为配电网快速潮流计算提供条件。

1 基于 CIM 的配电网馈线模型

就目前规模的配电网而言, 以馈线为基础单元, 一一列出“节点一支路”的关系已显得不可行, 必须充分利用开关、断路器等将馈线继续分层处理, 以满足开关变位后拓扑分析的快速性。配网具有闭环设计、开环运行的特性, 即以变电站馈线出口为起点, 通过辐射状的馈线结构将电能输送至各负荷。从 CIM 解析的结果出发, 配电网开关由出线开关 $[B_l]$ 、分段开关 $[F_m]$ 、联络开关 $[L_n]$ 、分布式电源的并网开关 $[S_j]$ 共同组成, 如图 1 所示。假设各变电站正常供电状态下的拓扑结构为配电网设计态模型, 设计态下各类开关状态 $[B_l] \equiv 1$ 、 $[F_m] \equiv 1$ 、 $[L_n] \equiv 0$ 、 $[S_k] \equiv x$, 其中“1”表示开关闭合, “0”表示开关断开, “x”表示开关为任意状态。此模型下, 各条馈线通过联络开关分隔, 而分段开关则将任意馈线分成若干馈线段, 本文将馈线段定义为拓扑岛, 各岛之间拓扑结构相互独立。

图 1 所示 8 个拓扑岛, 其内部由各种树状结构的拓扑子树组成: 以功率注入点或 DG 为根节点,

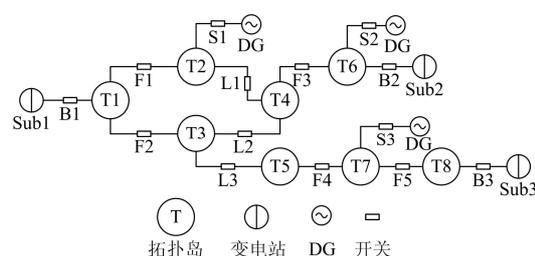


图 1 馈线与拓扑岛、各类开关的连接图

Fig. 1 Connection of feeders, topologic islands and switches

根节点所在支路为主支路; 主支路向两侧延伸形成下一级支路, 同一级支路通过命名不同顺序加以区分; 然后以该级别支路为主干线, 以此类推, 形成整个拓扑子树, 如图 2。同时, 各线路上存在负荷开关、变压器、DG 等电气设备; 对于 DG, 如果其担负馈线或孤岛运行的主供电电源, 则其承担如变电站出线的相同地位, 即作为电压控制源, 否则作为负的负荷, 相当于配变地位。假设在同一个拓扑岛内, 最多只能一个 DG 作为主供电电源, 即一旦某一拓扑岛内有一个 DG 假设为主供电电源, 则其余 DG 均只承担负的负荷作用。

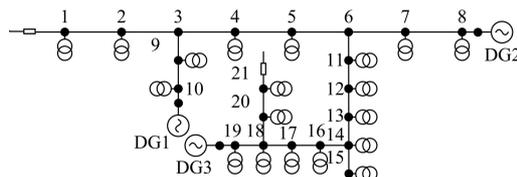


图 2 含有开关、负荷、DG 等的拓扑岛结构

Fig. 2 Topologic islands with switches, loads and DGs

2 配电网全局静态分析

为了提高开关变位后拓扑分析的速度, 本文提出把拓扑分析分为全局的静态拓扑和局部的动态拓扑。各变电站在正常情况下输送电能时, 严格处于最初的设计态, 此时 DG 均不承担主供角色。充分利用以上特点, 本文区别于其他“静态—动态”拓扑分析的重点在于: ①花费大量时间分析设计态拓扑模型; 开关变位后, 根据开关逻辑状态, 即可完成馈线、馈线段任意拓扑岛组合; ②对开关进一步细分。根据开关所处位置, 除了联络开关、分段开关、出线开关、DG 并网开关, 增加了支线开关、负荷开关等, 用于对整个系统逐级分层, 使拓扑分析更高效、更省时。

根据上述配网馈线模型, 将全局静态分析分为两个阶段: 馈线段(拓扑岛)形成、拓扑岛子树形成。其中, 重点是拓扑岛子树的形成及存储, 图 3 给出了静态拓扑流程图。

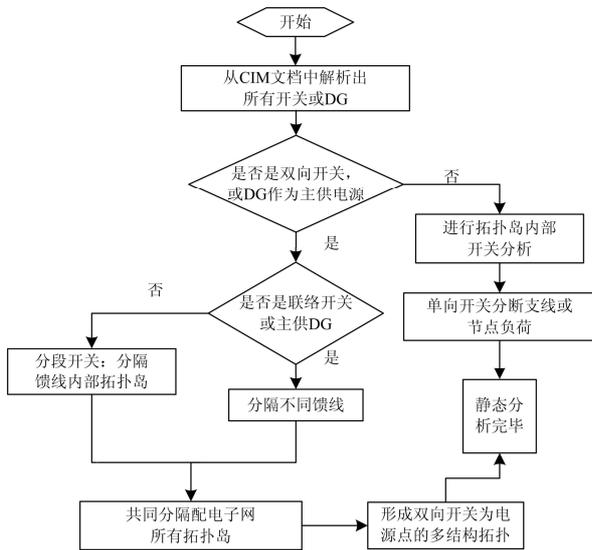


图3 静态拓扑分析流程图

Fig. 3 Static topologic analysis flow chart

2.1 馈线段的形成

联络开关、分段开关、出线开关、DG 并网开关以及新增的支线开关、负荷开关中，只有联络开关、分段开关、分支带 DG 的分支开关为双向开关，即通过此类开关的电流有两种流向，其余的开关成为单向开关。根据此特点，静态拓扑馈线段生成步骤如下。

1) 开关是双端口设备，从 CIM 中获取上述双向开关两端的设备编号 (ID) 与所属连接节点 (Connectivity Node)，每个开关 i 存两条记录，且两条记录首末节点号位置互换，如式 (1)，表明其开关是有向的，电流从首节点流向末节点。

$$Break_{i1}[ID_x, ID_y]; Break_{i2}[ID_y, ID_x] \quad (1)$$

2) 馈线为拓扑分析单位，以各变电站出线开关为起点，根据“节点-线段-节点-线段”的连接原则，首先形成馈线段的主干线。同时，每做一次连接，均需判断线段的节点是否与式 (1) 定义的某个双向开关的某一个端口相等，若是，则该次主干线形成停止，该节点即为主干线的终点；并记录下该双向开关和使用过的端口。

3) 以主干线的分叉点为起点，重复步骤 2) 的连接、判断原则，逐步生成整个馈线段。同样也记录了馈线段所连接的所有双向开关和端口。

4) 以上步骤记录的双向开关的未使用过的端口作为下一个馈线段的起点，重复步骤 2)、3)，直至生成所有拓扑岛。

2.2 拓扑岛子树的形成

通过双向开关的间隔，可以形成图 1 所示的拓扑岛、开关组合。对于配电网供电的拓扑岛，任意双向开关都有可能成为该岛的“电源点”，即功率注入点，需建立岛与开关之间的联系，如式 (2)。

$$Island_i [Break_1, Break_2, Break_3, \dots] \quad (2)$$

观察图 2，可以发现可能的 5 个功率注入点，即 2 个开关和 3 个可能承担主供角色的分布式电源 DG，因此就存在五种静态拓扑岛子树。这五种中，有一种是与配网设计态的静态拓扑子树是完全一致的，称为基准拓扑；而其余四种拓扑可以在基准拓扑上变换得到。

为适合最适合辐射状配网潮流计算的前推回代法，将采用主线-支线的拓扑描述方法，即以支线作为基本单位，按支线级别将该岛五种拓扑结构经拓扑变换后存储在数据库中，以便后续调用。图 3 给出了静态拓扑流程图。

以图 2 为例，假设节点“1”为变电站正常供电状态下该拓扑岛的功率注入点，以其所在支线为主干线，形成基准拓扑；则其他 4 个拓扑的变换步骤如下。

1) 若新的根节点在原主干线末梢 (以节点“8”为例，此时 DG2 为主供电源)，则主干线所有节点逆向排列，其余级别支线均保持不变；

2) 若新的根节点在其余级别支线的末梢 (以节点“19”为例，DG3 作为主供电源；节点“21”类似)，变换过程如下：

a. 节点“19”所在支线首先转换成主干线，支线所有节点逆向排列；

b. 由于该主干线将其原上级支线分割成两部分，其逆序部分“14、13、12、11”继续作为新主干线，正序部分则成为级别为“2”的支线，重复完成此步骤；

c. 将新主干线向两侧延伸形成的下一级线路，继续组成级别为“2”的支线；

d. 余下所有支线根据其上级支线的级别，更改相应级别、顺序即可。

3 动态拓扑算法设计

当配电网因故障、运行方式改变等原因发生配网解列或重构时，必然引起开关的变位，导致网络结构发生改变。动态局部拓扑分析是根据变位后的开关状态，判断各变电站与拓扑岛的连通情况及相互连接的顺序，并最终生成相应的拓扑表示。本文提出的动态拓扑优势在于：①充分利用开关性质将

配电网化整为零：“配电子网—馈线—拓扑岛—支线—节点负荷”。②根据开关状态：闭合“1”、断开“0”，重新将配网拓扑组合成一个整体。图 4 给出了动态拓扑分析流程图。

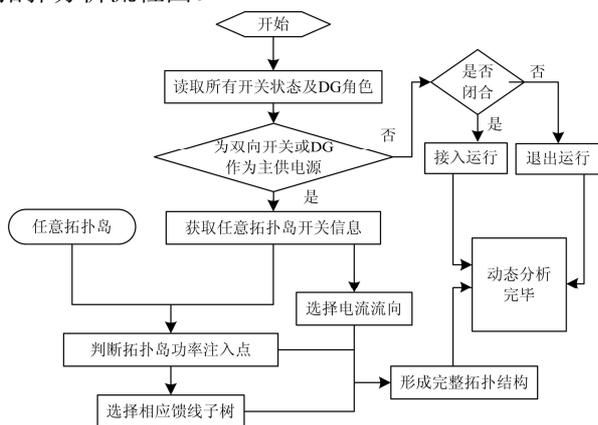


图 4 动态拓扑分析流程图

Fig. 4 Dynamic topologic analysis flow chart

3.1 根据双向开关的状态获取动态拓扑

从分层、分级角度出发，联络开关、分段开关、出线开关将配电网结构分解至“配电子网—馈线—拓扑岛”。以图 1 为例，则该配电网设计态开关状态 $t_0[B_i, F_m, L_n] = t_0[1,1,1,1,1,1,1,0,0,0]$ ，动态拓扑分析步骤如下。

1) 读取开关在任意 t_x 时刻状态信息。对于非设计态开关组合 $t_x[x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}]$ ， $x_1 \sim x_{11}$ 则可能为任意“0”、“1”值。

2) 遍历所有出线开关为闭合且作为主供电源的出线，以此开关作为起点进行该变电站后续拓扑岛连接的起点；如果均没有，说明该配网由 DG 供电（可能出现逆向潮流），则开始遍历作为主供的 DG，则首先导入该 DG 的拓扑作为起步拓扑，并检查该 DG 所在岛是否存在其他担任主供的 DG，若是，则告警并退出分析；若只有一个 DG 作为该岛的主供，则将该岛闭合的双向开关（有可能是多个）作为功率注入点的分析起点。

3) 判断双向开关状态。联络、分段开关用于分隔各拓扑岛，它们的两个端口节点号 ID_x 、 ID_y 分别属于不同拓扑岛。若双向开关闭合，根据电流流向选择式 (1) 中开关两端节点先后顺序，以此确定变电站为起点的所有拓扑岛排列次序；如果出现某一个双向开关闭合时，2 个端口均是电流注入点，则表明出现了环流，则进行告警并退出分析。

4) 判断任意拓扑岛的功率注入点，调用静态拓扑分析存储的拓扑岛子树。根据式 (2)，不同开关状态组合形成了不同的关联拓扑岛函数或不同的拓

扑岛内的主线-支线级别与他们的连接关系。假设图 2 拓扑岛节点“1”所连开关为分段开关，节点“21”所连开关为联络开关，动态拓扑分析如下。

a. 若 t_x 时刻开关状态变为 [1,0]，若此情况下节点“1”为功率注入点，则网络拓扑为基准拓扑，此时还要检查该拓扑岛是否有 DG 担任主供电源，若有，就需要报警，退出分析；否则，就要判断该岛内是否有 DG 担负主供电源角色，若有，则调用该 DG 为主供电源的拓扑，同时检查该岛内是否还有 DG 担负主供，若有，则需要报警，退出分析；

b. 若 t_x 时刻开关状态变为 [0,1]，若节点“21”为功率注入点，调用相应拓扑岛子树，此时还要检查该拓扑岛是否有 DG 担任主供电源，若有，就需要报警，退出分析；否则，就要判断该岛内是否有 DG 担负主供电源角色，若有，则调用该 DG 为主供电源的拓扑，同时检查该岛内是否还有 DG 担负主供，若有，则需要报警，退出分析；

c. 若 t_x 时刻开关状态变为 [1,1]，则需要判断 2 个双向开关是否只有一个为功率注入点，若是，则调用该开关作为功率注入点的拓扑，同时排除该岛内存在 DG 作为主供电源的可能性，否则就要报警；若 2 个双向开关全部是功率注入点，则报警；若 2 个双向开关全部不是功率注入点，则要检查该岛内必须存在一个也只有一个 DG 作为主供电源，则调用该 DG 作为主供电源的拓扑，否则就要报警；

d. 若 t_x 时刻开关状态变为 [0,0]，则该岛变为孤岛，则该岛内只有最多一个 DG 作为主供电源的可能，若是，则调用该 DG 作为主供电源的拓扑；如果没有一个 DG 作为主供，则该岛为停电岛；如果有 2 个以上 DG 作为主供电源，则进行告警。

5) 将步骤 4) 调用的拓扑岛子树依次加入步骤 2)、3) 确定的拓扑岛组合，逐步形成最终的拓扑结构。

3.2 单向开关的处理

负荷开关、下级不带 DG 的支线开关、DG 并网开关均为单向开关，无论其开关如何变位，均不影响流过此类开关的电流方向。负荷开关的开合直接说明节点负荷是否工作，配网是否将电能输送至该节点。DG 并网开关的开合直接说明分布式电源是否对配电网或孤岛供电，可将其作为负荷值处理。下级不带 DG 的支线开关则控制连接该级别支线与其上级支线，其开合直接说明该支路及其下属子树是否接入其所属拓扑岛。上述开关类型通过获取“0”、“1”相应状态即可做出拓扑的增减，无需作任何逻辑运算，大大加速了动态拓扑分析速度。

4 算例分析

分别采用 Java 和 SQL 作为计算机程序和数据库的开发工具，来检验本研究提出分析算法的有效性。以图 1 所示拓扑为例，系统规模为：3 个变电站，8 个拓扑岛，每个拓扑岛由图 2 类似拓扑子树组成，均含有 80~100 节点不等，304 台变压器，371 个开关。

图 1 中，开关变位后影响拓扑岛所属变电站的开关类型为 B_l 、 F_m 、 L_n ，共 11 个。理论上存在 2^{11} 种情况，取其中典型情况做案例分析。由 3.1 节可知，该配电网设计态开关状态为 $t_0[B_l, F_m, L_n] = t_0[1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0]$ ，分析如下。

$$1) t_x[B_l, F_m, L_n] = t_x[1,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1]$$

①首先分析出线开关可知，Sub1 对应的出线开关 B1 闭合，则拓扑岛 T1 势必属于 Sub1，且通过开关的电流流向为 B1[Sub1,T1]；②判断拓扑岛 T1 其余两个功率注入点所连开关是否闭合，本例中均为闭合状态，则 T2、T3 均属于 Sub1；③判断得 L1[T2,T4]闭合，则 T4 属于 Sub1；L3[T3,T5]闭合，则 T5 属于 Sub1；④F3、F4 处于断开状态，无需添加其余拓扑岛；⑤分别对 Sub2、Sub3 采取上述分析步骤可得：Sub1[T1 T2 T3 T4 T5]、Sub2[T6]、Sub3[T8 T7]；⑥根据拓扑岛的功率注入点，选择调用静态拓扑分析存储的各拓扑岛子树，形成完整的拓扑结构。

$$2) t_x[B_l, F_m, L_n] = t_x[1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,0]$$

①首先分析出线开关可知，Sub1 对应的出线开关 B1 闭合，则拓扑岛 T1 势必属于 Sub1，且通过开关的电流流向为 B1[Sub1,T1]；②判断拓扑岛 T1 其余两个功率注入点所连开关是否闭合，本例中均为闭合状态，则 T2、T3 均属于 Sub1；③判断得 L1[T2,T4]闭合，则 T4 属于 Sub1；L2[T3,T4]闭合，则 T4 属于 Sub1；可以发现此时 T4 存在两个功率注入点，根据前述条件将发生报警，退出该条馈线的分析；④分别对 Sub2、Sub3 采取上述分析步骤可得 Sub2[T6]、Sub3[T8]；根据拓扑岛的功率注入点，选择调用静态拓扑分析存储的各拓扑岛子树，形成完整的拓扑结构；⑤此例中，由于 L3、F4、F5 断开，拓扑岛 T5 与 T7 未连接于任何变电站，为孤岛系统，可根据其内部的 DG 投切状态、出力大小选择调用相应的拓扑岛子树。

$$3) t_x[B_l, F_m, L_n] = t_x[1,1,0,1,1,1,0,0,1,0,0]$$

①首先分析出线开关可知，Sub1 对应的出线开关 B1 闭合，则拓扑岛 T1 势必属于 Sub1，且通过

开关的电流流向为 B1[Sub1,T1]；②判断拓扑岛 T1 其余两个功率注入点所连开关是否闭合，本例中均为闭合状态，则 T2、T3 均属于 Sub1；③判断得 L1[T2,T4]闭合，则 T4 属于 Sub1；F3[T4,T6]闭合，则 T6 属于 Sub1；B2[T6,Sub2]闭合，则 Sub2 属于 Sub1；可以发现此时两个变电站同时对一条馈线供电，根据前述条件将发生报警，退出该条馈线的分析；④此例中，由于 B3、F5、F4、L3 断开，拓扑岛 T5、T7、T8 未连接于任何变电站，为孤岛系统，可根据其内部的 DG 投切状态、出力大小选择调用相应的拓扑岛子树；同时 Sub3 并未对任意线路供电。

由表 1 可见，两种分析算法都需首先对设计态配网拓扑结构进行分析。采用本文算法进行二次分析时，仅需读取开关状态及设备投切等电气信息，与再次解析全局配网结构相比，节省了大量的时间。即使加上后续开关状态逻辑判断以及调用拓扑子树的时间，如表 2，在算法的总时间上仍然大大地快于传统 CIM 解析获得拓扑结构所需的时间，分析效率大为提高。同时，从动态拓扑算法设计中可知，本文提出算法首先根据开关状态判断各馈线的拓扑岛组成，若某馈线的任意拓扑岛存在多个功率注入点则会报警（此步骤对应表 2 的开关状态逻辑判断）；因此，此情况下无需对该条馈线调用拓扑子树（此步骤对应表 2 的调用拓扑子树）节省了该部分的分析时间。且表 2 为图 1 中所有拓扑岛均正常接入相应变电站的动态拓扑分析时间，其余各类情况的拓扑分析时间均小于等于该值。

表 1 两种拓扑分析方法的比较

方法	首次 CIM 分析时间/s	二次 CIM 分析时间/s	读取开关、设备状态时间/s
传统算法	1 200	1 200	0
本文算法	1 200	0	0.010

表 2 动态拓扑分析时间

开关状态逻辑判断/s	调用拓扑子树/s	总拓扑时间/s
0.015	0.016	0.031

5 结束语

静态全局拓扑分析与动态局部拓扑分析的结合使用，使得原本复杂的基于在线测量的拓扑分析简单化。具体体现为：通过 CIM 解析、静态数据准备、动态信息获取将配电网分级、分层，大大地缩

小了相应位置搜索范围, 以满足任意庞大、复杂的配电网拓扑在线分析的通用性与快速性需求。静态拓扑为“拆解”过程, 将配电网作为整体, 拓扑岛为单元, 开关为连接元件, 以支线作为基本单位, 花费大量时间进行拓扑拆解。动态拓扑为“整合”过程, 根据同种开关类型的逻辑组合以及 DG 是否作为主供电源, 判断配电网的连通状况, 生成相应拓扑, 速度大为加快。

参考文献

- [1] 王艳玲, 韩学山, 周晓峰. 含分布式电源的主从联合系统扩展连续潮流计算[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 93-100.
WANG Yan-ling, HAN Xue-shan, ZHOU Xiao-feng. Expanded continuous power flow calculation of master-slave joint power system with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 93-100.
- [2] 张立梅, 唐巍. 计及分布式电源的配电网前推回代潮流计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 123-129.
ZHANG Li-mei, TANG Wei. Back/forward sweep power flow calculation method of distribution networks with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 123-129.
- [3] 刘莉, 姚玉斌, 陈学允, 等. 10 kV 配电网拓扑结构的识别及实用潮流计算[J]. 继电器, 2000, 28(2): 17-19.
LIU Li, YAO Yu-bin, CHEN Xue-yun, et al. Topology structure identification and flow calculation of 10 kV distribution network[J]. Relay, 2000, 28(2): 17-19.
- [4] 姚玉斌, 晋文转, 靳力. 配电网快速网络拓扑分析算法[J]. 继电器, 2005, 33(19): 31-35.
YAO Yu-bin, JIN Wen-zhuan, JIN Li. Fast topologic method for a distribution network[J]. Relay, 2005, 33(19): 31-35.
- [5] 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(3): 59-63.
CHEN Gen-jun, GU Quan. A CIM-based integrative network tracing method for power distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 59-63.
- [6] 张炳达, 李广福. 一种配电网重构中潮流计算序列的快速建立方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 27-32.
ZHANG Bing-da, LI Guang-fu. A rapid establishment method of power flow calculation sequence for reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 27-32.
- [7] 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(1): 61-64.
HAN Guo-zheng, XU Bing-yin. Circuit oriented topology analysis of medium-voltage distribution network[J]. Southern Power Grid Technology, 2011, 5(1): 61-64.
- [8] 刘莉, 赵璇, 姜新丽. 基于层次矩阵的配电网拓扑分析与潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 91-94.
LIU Li, ZHAO Xuan, JIANG Xin-li. Distribution network topology analysis and flow calculation based on layer matrix[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 91-94.
- [9] 徐华月, 章坚民, 王跃强. 基于 CIM 和配电自动化系统的配网快速潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 45-48.
XU Hua-yue, ZHANG Jian-min, WANG Yue-qiang. A fast algorithm of load flow calculation in distribution systems based on CIM and distribution automation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 45-48.

收稿日期: 2013-09-25; 修回日期: 2013-11-16

作者简介:

楼宗明(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电力系统运行与控制;

章坚民(1962-), 男, 通信作者, 教授, 主要研究方向为电力及能源系统自动化、信息化建模及优化运行; E-mail: zhangjmhzcn@hdu.edu.cn

庄晓丹(1981-), 男, 工程师, 主要研究方向为智能电力系统运行与控制。