

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.05.018

基于拓扑分割的网络可观测性分析方法

刘颖¹, 肖谭南², 邹宇¹, 夏彦辉¹, 童伟林², 王建全^{2*}

(1. 南京国电南自电网自动化有限公司, 江苏 南京 211153; 2. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对电力网络可观测性分析问题,对量测网络建模、网络拓扑可观测性分析理论、不可观测节点的影响范围等方面进行了研究,提出了一种基于拓扑分割的网络可观测性分析方法,在某42节点系统上对该方法进行了测试。该方法将带量测的电力网络建模为量测拓扑单线图,并在无注入量测节点处进行了拓扑分割,将网络分割成了多个连通子网。利用广度优先双向搜索算法对含线路潮流量测的各个子网进行了可观测性分析,在不可观测子网中分析了不可观测节点的影响范围,得到了所有可观测拓扑岛。再结合其结果对仅含注入型量测的子网进行分析,得到了剩余的可观测岛。最后将共有相同无注入量测节点的可观测岛进行了合并。算法在判断可观测性的同时,得到了全网所有的可观测拓扑岛。研究结果表明,该方法正确有效,保持了拓扑算法的快速性特点。

关键词:网络可观测性;量测单线图;拓扑分割;可观测拓扑岛

中图分类号:TM727;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)05-0515-06

Observability algorithm for power network based on topological segmentation

LIU Ying¹, XIAO Tan-nan², ZOU Yu¹, XIA Yan-hui¹, Tong Wei-lin², WANG Jian-quan²

(1. Nanjing SAC Power Grid Automation Co. Ltd., Nanjing 211153, China;

2. College of Electric Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at power network observability problem, the measurement network modeling, network topological observability analysis theory, and the influence scope of unobservable nodes was analyzed to derive a new observability analysis algorithm, which was tested on a 42-node system, based on topological segmentation. The power network with measurement was modeled as a measurement one-line graph. Using breadth first bidirectional search, observability of sub-graphs with line flow measurement was analyzed after tearing the original one-line graph apart at node without injection measurement. The influence of unobservable part in unobservable sub-graph was then determined to obtain all observable islands. Considering known observable islands, observability of sub-graphs which only had injection measurement was analyzed and observable islands in them were got. Finally all observable islands sharing same nodes without injection measurement were combined. The algorithm can get all the observable islands while observability analysis. The results indicate that the algorithm is correct, effective and maintaining the rapidity of topological method.

Key words: network observability; measurement one-line graph; topological segmentation; observable islands

0 引言

网络可观测指的是网络中有足够多并且足够广泛的分布有量测,使得系统能够完成状态估计^[1-2]。可观

测性分析算法的好坏,将直接影响状态估计的运行性能^[3-5]。

网络可观测性分析的本质是判断量测矩阵 H 是否列满秩^[6]。目前,其分析的方法主要有数值算法、拓扑算法与拓扑-数值综合算法。数值算法通过对信

收稿日期:2016-11-29

作者简介:刘颖(1972-),男,江苏涟水人,硕士,高级工程师,主要从事电力系统自动化方面的研究。E-mail: 393659972@qq.com

通信联系人:王建全,男,博士,副教授。E-mail: xiaoxh@zju.edu.cn

息矩阵^[7-8]或者格拉姆矩阵的数值操作,判断系统可观性,能够得到系统中所有的可观测拓扑岛以及完成新量测或伪量测的配置。拓扑算法建立量测、网络可观性与网络拓扑之间的关系,分析带量测的网络拓扑,判断系统可观性。拓扑-数值综合算法将两种算法结合,先通过基本拓扑算法形成拓扑岛,再将这些拓扑岛等效为超节点进行降维,最后通过数值算法判断其可观性^[9-10]。

网络拓扑可观性条件被证明后,出现了多种拓扑算法。广度优先原则双向搜索,构造最大生成树的算法(以下简称广度优先双向搜索算法)^[11],用线路潮流量测构造初始可观测拓扑森林,再通过边界注入量测的引入逐渐扩大可观测森林,并在分析过程中确认了冗余量测组合。快速可观测路径搜索法从无量测节点出发^[12],搜索无量测节点至边界节点的路径,构造了满秩生成树的算法。拓扑岛合并算法^[13-16],由已知的可观测岛出发,根据某些原则或判据,对拓扑岛进行合并。

在某些企业自备电网,故障后的电网,量测配置可能无法满足全网可观的要求。在规划阶段,可以增加新量测配置实现网络可观;在运行阶段,可以增加伪量测配置以完成状态估计,也可以在各个可观测岛内进行状态估计。上述方案的实现,都要求在快速可观性分析的同时,得到网络中所有的可观测岛。但目前的拓扑算法,在识别仅由注入型量测构成的可观测拓扑岛,以及确定不可观测节点影响的范围上存在困难,所以难以得到网络中所有的可观测拓扑岛。

本研究以广度优先双向搜索算法为基础,提出一种基于拓扑分割的网络可观性分析方法。

1 量测网络建模

对于可观测网络,只要其中存在一个节点电压幅值量测,选定参考节点,即可进行状态估计。对于可观测岛,除了至少一个节点电压幅值量测以外,还需要有至少一个相角量测,或者在岛内选择参考节点以完成状态估计。

拓扑类方法为判断网络可观性,需要进行量测网络建模。一般将有功、无功量测分为两类:注入型量测和线路潮流量测。为方便分析,已知某含量测的连通图 G^0 ,对含量测的连通网络进行处理,形成量测拓扑单线图(以下简称单线图)。单线图不反映电压量测的情况。对于实际系统,如果有功、无功量测成对出现,那么仅需要形成一张单线图进行判断,如果有功、无功量测位置不同,那么需要分别形成单线图进行分析。

42 节点系统及其中线圈如图 1 所示。图 1(a) 为原系统图。经过如下操作:① 线路潮流量测,不论仅一端有还是两端都有,均记为存在;② 合并并联线路,成为单线,只要原并联线路中有线路潮流量测,则生成的单线有线路潮流量测;③ 对于没有线路潮流量测,两端也没有注入型量测的线路,直接删去;④ 最后出线度为 0 的节点为不可观测节点,且这些不可观测节点对剩余网络的可观性没有影响。得到图 1(b) 的量测单线图 G^m 。

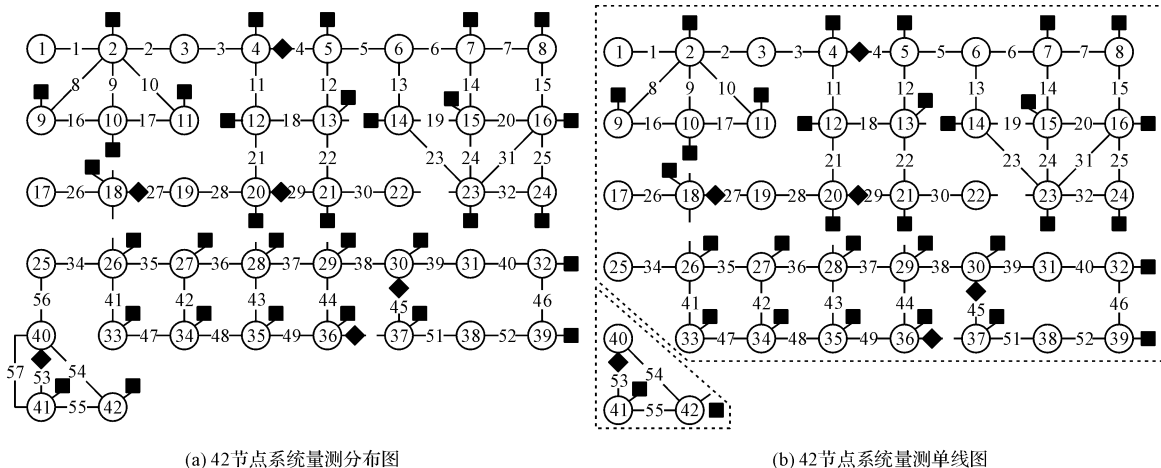


图 1 42 节点系统及其单线图

方块 — 注入型量测;菱形 — 线路潮流量测

本研究的量测拓扑可观性分析均在单线图上进行。单线图 G^m 中包括:① 潮流量测支路;② 无潮流量测支路;③ 注入型量测节点;④ 无注入量测节点。无注入量测节点中,不被潮流量测支路覆盖的节点称为

无量测节点。图 1(b) 中无注入量测节点有{1, 3, 6, 17, 19, 22, 25, 31, 38, 40},除了{19, 40}以外,都是无量测节点。经过连通性判断,得到 N_c 个连通子图 $G^m(i)$, $i = 1, 2, 3, \dots, N_c$ 。图 1(b) 有 2 个连通子图,由虚线框

标出。 $G^m(1)$ 为包含节点 1 ~ 39 的子图, $G^m(2)$ 包含节点 40 ~ 42 的子图。

2 网络拓扑可观测性引理及推论

为了在单线图中分析网络可观测性,需要如下定义与引理。对于 G^m 中第 i 个包含 $n(i)$ 节点的单线连通子图 $G^m(i)$:

引理 1(拓扑可观测性条件)。当且仅当单线图中存在一个包含所有节点的最大生成树, 树中各量测分配满足量测分配条件, 即该树为满秩树时, 网络可观测。对于某注入型量测 x , 如果被分配给某支路 b , 那么记作 $A(b) = x$; 对于某潮流量测支路 b_m , 其量测仅可以分配给该支路, 记为 $A(b_m) = b_m$ 。那么量测分配条件如下: 对不同支路 b_1 和 b_2 , $A(b_1) \neq A(b_2)$; 潮流量测支路 b_m , $A(b_m) = b_m$; 某无量测支路 b_{um} , 仅有其两端节点的注入量测可以被分配给 b_{um} 。

引理 2。如果单线图中存在一颗关键树, 该树满足量测分配条件, 并包含了所有的无注入量测节点, 剩余不在该树上的所有节点均有注入型量测, 则网络可观测。

引理 3。仅由潮流量测支路构成的拓扑岛为可观测拓扑岛。仅以潮流量测支路可以形成初始可观测拓扑森林 $F(i)$, 包含 $N_F(i)$ 个可观测拓扑树 $F(i, t)$, $t = 1, 2, 3, \dots, N_F(i)$ 。 $F(i, t)$ 中任一注入型量测节点, 若其所连支路非 $F(i, t)$ 连支, 则它是边界节点。

引理 4。若 $G^m(i)$ 存在一颗满秩生成树, 且存在潮流量测支路, 那么对于 $G^m(i)$ 中任意一个无量测节点, 必然存在一条不包含潮流量测的路径, 连接该无量测节点与边界节点, 且路径上所有节点除了无量测节点外, 均为注入型量测节点。根据这些引理, 可得到如下推论:

推论 1。对于仅含有注入型量测的 $G^m(i)$, 如果存在 $n(i)$ 个或者 $n(i) - 1$ 个注入型量测, 则拓扑可观测。

证明: $G^m(i)$ 是连通图, 必然可以以任意节点为根节点, 形成一颗包含 $n(i)$ 个节点 $n(i) - 1$ 条树支路的最大生成树。若该树上有 $n(i)$ 个注入型量测, 则取任意点为根节点, 若该树上有 $n(i) - 1$ 个量测, 则取无量测节点为根节点, 形成一颗树, 每选一条树支路, 就把远离根节点的注入型量测分配给该树支路, 直至覆盖所有节点, 该生成树满足量测分配条件, 为满秩树, 根据引理 1, 拓扑可观测。

推论 2。对于 $G^m(i)$, 潮流量测生成森林包含 $N_F(i)$ 个子树, 边界节点数量为 $n_b(i)$, 不在 $F(i)$ 中的无量测节点数量为 $n_{um}(i)$, 如果 $n_b(i) < N_F(i) - 1 +$

$n_{um}(i)$, 则拓扑不可观测。

证明: 根据引理 4, 边界节点的作用有两种, 一种是形成连通 $F(i)$ 中两子树的路径, 一种是形成覆盖无量测节点的路径。 $N_F(i)$ 个子树至少需要 $N_F(i) - 1$ 个边界节点用来形成路径将其连接构成 1 颗树, $n_{um}(i)$ 需要 $n_{um}(i)$ 个边界节点形成由边界节点至无量测节点的路径。若 $n_b(i) < N_F(i) - 1 + n_{um}(i)$, 则无法满足引理 4, 说明不存在满秩生成树, 不满足引理 1, 拓扑不可观测。

推论 3。对于 $G^m(i)$, 若所有无潮流量测支路的两端节点均为注入型量测节点, 无注入量测节点仅作为潮流量测支路的端点, 即不含有无量测节点, 那么 $G^m(i)$ 可观测。

证明: $G^m(i)$ 是满足推论 3 条件的连通图, 那么以其中任意节点为根节点构造一棵最大生成树, 那么该树必然满足推论 3 条件。将树中线路潮流量测分配给所在树支路, 而无潮流量测树支路的两端节点均含有注入型量测, 将远离根节点的注入型量测分配给该树支路。显然该树满足引理 1, $G^m(i)$ 可观测。

以上引理与推论不仅适用于 $G^m(i)$, 对于 $G^m(i)$ 的子图同样适用。引理 3、推论 1、推论 2 以及推论 3 可通过量测分布情况直接判断网络可观测性。

3 基于拓扑分割的网络可观测性分析方法

广度优先双向搜索算法构造生成树的过程, 物理意义清晰明确, 在分析的同时得到冗余量测组合。但该算法与现有各拓扑算法一样, 在判断系统不可观测后, 无法继续分析得到网络中所有的可观测拓扑岛。其原因在于, 该算法缺乏识别仅由注入型量测构成的可观测拓扑岛的手段, 未明确不可观测节点的影响范围。

根据引理 2 与推论 1, 可以判断仅含注入型量测的子网的拓扑可观测性。为确定不可观测节点的影响范围, 本研究引入拓扑分割。

3.1 拓扑分割

对任意连通单线图, 在进行可观测性之前, 可在无注入量测节点处进行拓扑分割, 其本质是在无注入量测节点处进行节点撕裂。拓扑分割算法的方法如下:

步骤 1: 任意连通单线图 g , 将与无注入量测节点相连的无潮流量测线路以及无量测节点从中删去形成 $\bar{g}$;

步骤 2: 判断 $\bar{g}$ 连通性, 形成各个连通子图;

步骤 3: 将与各子图中注入型量测节点相连的无注入量测节点及相连线路加入该子图中, 完成拓扑

分割。

步骤 2 中,需要对网络进行连通性判断。判断连通性的方法有很多,针对电力网络高度稀疏的特点,采用基于支路搜索并标记节点的算法^[17],算法具有通用性。

以 $G^m(i)$ 为例进行说明。用拓扑分割算法完成 $G^m(i)$ 拓扑分割后,将形成 $N_c(i)$ 个用于可观测性分析的子图 $C(i,j), j = 1, 2, 3, \dots, N_c(i)$, 构成连通子图集 $C(i)$ 。

其中,存在 $N_{CL}(i)$ 个包含线路潮流量测的子图 $C_L(i,k), k = 1, 2, 3, \dots, N_{CL}(i)$, 构成连通子图集 $C_L(i), C_L(i,k)$ 中可能包含多个 $F(i,t)$;

存在 $N_{CN}(i)$ 个不含线路潮流量测,仅含注入型量测的连通子图 $C_N(i,p), p = 1, 2, 3, \dots, N_{CN}(i)$, 构成连通子图集 $C_N(i)$ 。显然: $C(i) = C_L(i) \cup C_N(i)$, $N_{CN}(i) = N_c(i) - N_{CL}(i)$ 。

根据推论 3, $\bar{G}^m(i)$ 中的各个连通子图不含无注入量测节点,均为可观测的,结合引理 1,可知 $\bar{G}^m(i)$ 中各连通子图均有一颗满足量测分配条件的最大生成树。随后将无注入量测节点及相连线路加入其中,得到各个 $C(i,j)$ 。 $C(i,j)$ 的生成树当于在原最大生成树上加入无注入量测节点。显然,无注入量测节点中,无量测节点位于原最大生成树的叶节点或者根节点,其余则位于潮流量测线路端点。

各 $C(i,j)$ 的生成树间仅通过无注入量测节点关联,其内部量测无法分配给其他子图,无注入量测节点构成了边界,使得 $C(i,j)$ 的可观测性具有了一定的独立性。 $C_L(i)$ 中各子图的可观测性相互独立,采用广度优先双向搜索算法判断可观测性。为便于分析不可观测节点影响范围,优先搜索生成覆盖 $C_L(i,k)$ 内部所有 $F(i,t)$ 的树,再覆盖无注入量测节点。 $C_N(i)$ 中满足推论 1 的子图,以及存在一个已知可观测拓扑岛共有其所有无注入量测节点的子图,为可观测的。

3.2 不可观测节点影响范围

拓扑分割后, $C(i,j)$ 可观测性间的独立性,使得不可观测节点对各 $C(i,j)$ 的影响同样是相互独立的。若 $C_L(i,k)$ 不可观测,则一定有无注入量测节点不在最大生成树上,这些无注入量测节点即为不可观测节点。若 $C_N(i,p)$ 不可观测,则 $C_N(i,p)$ 中所有无注入量测节点都是不可观测节点。这些不可观测节点的存在,会导致与之相邻的注入型量测节点的量测无效,相应节点成为无注入量测节点,之后需要重新进行拓扑分割才可继续判断可观测性。所以不可观测节点影响范围判断的方法如下:

步骤 1: 确定 $C(i,j)$ 中的不可观测节点: $C_L(i,k)$

中不在最大生成树上的无注入量测节点, $C_N(i,p)$ 中的所有无注入量测节点;

步骤 2: 将这些量测置为无效,相应节点成为新的无注入量测节点,删去不可观测节点以及与之相连的无潮流量测线路,得到缩小后的子图 $\bar{C}(i,j), \bar{C}_L(i,k)$ 或 $\bar{C}_N(i,p)$;

步骤 3: 在 $C(i,j)$ 分析结果基础上判断 $\bar{C}(i,j)$ 可观测性。若 $\bar{C}(i,j)$ 可观测,则结束,否则转步骤 4;

步骤 4: 将 $\bar{C}(i,j)$ 进行拓扑分割,得到的各新子图将用于后续判断。

经过上述步骤后,原不可观测的 $C(i,j)$ 被缩小、分割,形成新的待分析子图。随着子图的缩小、分割,最终成为可观测拓扑岛,或者所有节点都被删去。从而分析出了原子图不可观测节点的影响范围。

3.3 可观测性分析算法

由上述分析可知,由于 $C_N(i)$ 的可观测性分析依赖于已知可观测拓扑岛, $C(i,j)$ 的可观测性分析具有明确的顺序性。本研究以广度优先双向搜索算法为基础,引入拓扑分割,结合引理与推论,提出基于拓扑分割的网络可观测性分析算法。

算法流程图如图 2 所示。

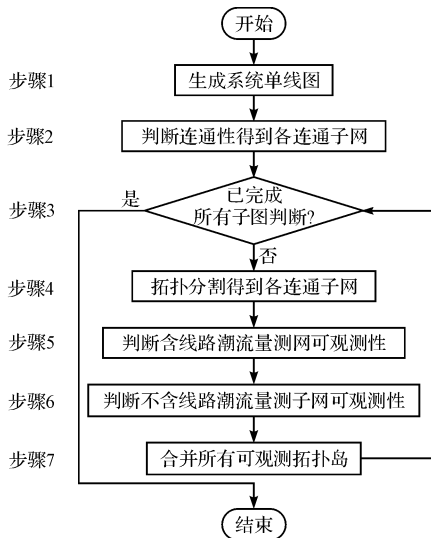


图 2 算法流程图

经过上述步骤判断后,不仅判断了网络可观测性,同时得到了网络中所有的可观测拓扑岛、冗余量测以及不可观测子网。

4 算例分析

以图 1(a) 的 42 节点系统为例进行说明。步骤 1 和步骤 2 用于形成单线图,其结果如图 1(b) 所示。形成两个子网 $G^m(1)$ 和 $G^m(2)$,其中易判断 $G^m(2)$ 是可观测的,现对 39 节点子网 $G^m(1)$,执行步骤 3 至步骤 7。

步骤3。共有4个线路量测拓扑子树{4},{27},{29},{45,50},8个边界注入量测节点{4,5,18,20,21,30,36,37},9个无注入量测节点,8个无量测节点,无量测节点过多,网络拓扑不可观;

步骤4。完成原单线图于无注入量测节点处的拓扑分割,用于可观测性分析的各子图如图3所示。

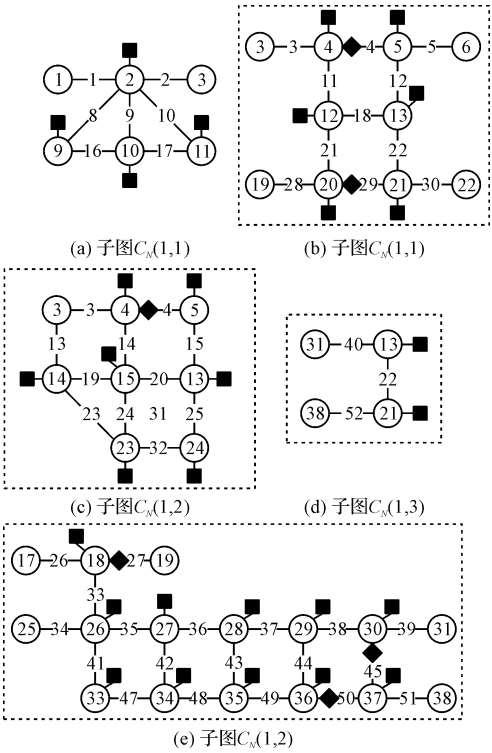


图3 拓扑分割后用于可观测性分析的各子图

步骤5。对含有线路潮流量测的子图 $C_L(1,1)$ 和 $C_L(1,2)$,利用广度优先双向搜索算法进行可观测性分析,分析结果如图4所示。

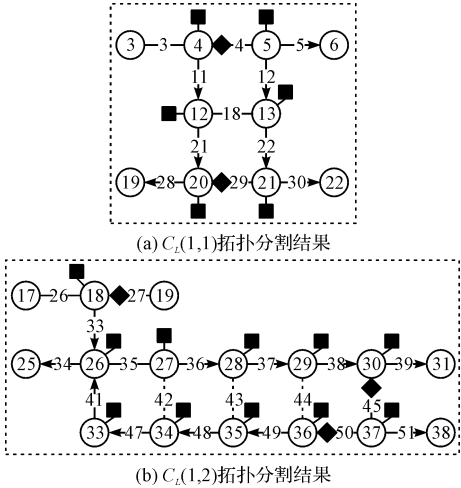


图4 子图 $C_L(1,1)$ 、 $C_L(1,2)$ 可观性分析结果

其中,箭头表示量测分配,箭头起点的注入型量测被分配给该支路,与线路潮流量测组成生成树;无箭头指向的无量测节点为不可观测节点;虚线表示未用该

线路成树。

子图(b)、(e) 均不可观测。运用不可观测节点影响范围判断算法分析不可观测节点影响范围,并完成拓扑分割。各新子图加入,重复上述步骤,最终得到图5所示的可观测拓扑岛。没有共用无注入量测节点的可观测拓扑岛,不进行合并,结果仍如图5所示。

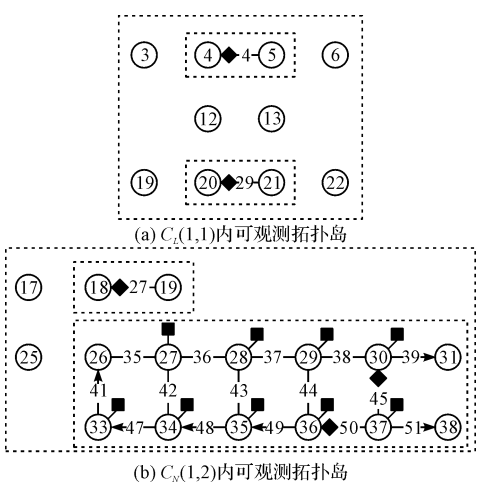


图5 子图 $C_L(1,1)$ 、 $C_L(1,2)$ 中的可观测拓扑岛

步骤6。对子图(a)、(c)、(d) 分析可观测性:(a) 不可观测,节点1,3为子图(a) 不可观测部分;(c) 满足推论1,可观测;(d) 的两个无量测节点31,38在子图(d) 中同一个可观测拓扑岛上,所以(d) 可观测。

对子图 $C_N(1,1)$,分析不可观测节点的影响,节点1,节点3不可观测,则节点2注入量测失效,删除线路{1,2},剩余连通部分满足推论1,可以观测,得到结果如图6所示。

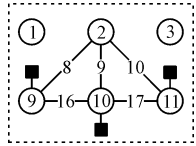


图6 $C_N(1,1)$ 中的可观测拓扑岛

步骤7。合并共有同一个无注入量测节点的可观测拓扑岛,结果如图7所示。

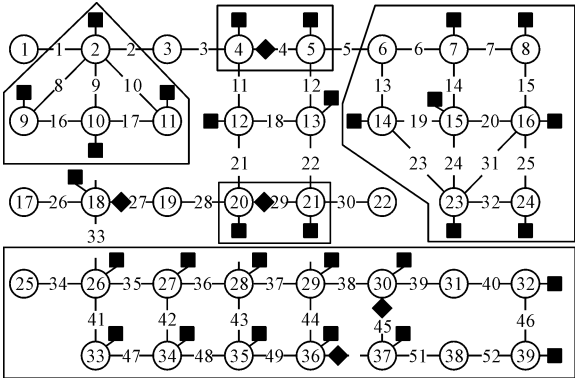


图7 $G^m(1)$ 可观测性分析结果

框内为各可观测拓扑岛。点填充方框表示失效的注入型量测。

不可观测部分: 节点 $\{1, 3, 12, 13, 17, 22, 25\}$, 支路 $\{1, 2, 3, 5, 11, 12, 18, 21, 22, 26, 28, 30, 33, 34\}$ 。

至此, 得到了整个网络的所有可观测岛和不可观测子网。

5 结束语

本研究提出了一种基于拓扑分割的网络可观性分析方法。该方法在无注入量测节点处进行拓扑分割; 之后对各连通子图单独判断可观测性, 对不可观测部分按其影响范围逐渐缩小拓扑网络, 直至判断出各可观测拓扑岛; 最后将共有同一个无注入量测节点的拓扑岛进行合并, 得到全网所有的可观测岛。

该方法解决了现有拓扑方法无法在分析网络可观性的同时, 得到网络中所有可观测岛与不可观测子网的问题。通过对分析过程中形成的不可观测子图进行分析, 可以实现新增量测配置或者伪量测配置。

参考文献 (References):

- [1] 吴丽丽, 黄飞腾, 翁国庆. 基于状态估计的电能质量监测点优化配置研究[J]. 机电工程, 2016, 33(3): 331-335.
- [2] MONTICELLI A. Electric power system state estimation[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88(2): 262-282.
- [3] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.
- [4] 金 杰, 章坚民, 张承来, 等. 基于非线性最小二乘法的热电厂状态估计[J]. 机电工程, 2010, 27(7): 65-68.
- [5] 常鲜戎, 樊 瑞. 计及零注入节点约束的混合量测分区状态估计方法[J]. 电网技术, 2016, 39(8): 2253-2257.
- [6] WU F F, MONTICELLI A. Network observability: theory[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, 1985, PER-5(5): 1042-1048.

- [7] GOU B, ABUR A. A direct numerical method for observability analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(2): 625-630.
- [8] ALMEIDA M, ASADA E, GARCIA A. Power system observability analysis based on gram matrix and minimum norm solution[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(4): 1611-1618.
- [9] KORRES G N, KATSIKAS P J. A hybrid method for observability analysis using a reduced network graph theory[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(1): 295-304.
- [10] 王珍意, 周良松, 张步涵. 基于降阶雅可比矩阵的电力系统状态估计可观测性分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33(10): 1-4.
- [11] KRUMPHOLZ G R, CLEMENTS K A, DAVIS P W. Power system observability: a practical algorithm using network topology[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, 1980, 99(4): 1534-1542.
- [12] 顾锦汶, 陆春良. 网络拓扑可观测性的快速可观测路径搜索法[J]. 电力系统自动化, 1993, 11(12): 22-26.
- [13] 邓佑满, 张伯明. 网络可观测性的拓扑分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1993, 33(4): 8-12.
- [14] 张海波, 张伯明, 孙宏斌, 等. 电力系统状态估计可观测性分析中关于量测岛合并的理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 46-49.
- [15] 张海波, 张伯明, 孙宏斌, 等. 基于潮流定解条件的电力系统状态估计可观测性分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 54-58.
- [16] 张海波, 陈 璐. 一种改进的基于潮流定解拓扑可观测性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 89-95.
- [17] 黄家栋, 罗伟强, 赵永强, 等. 两种新的电网连通性分析快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 16-18.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

刘 颖, 肖谭南, 邹 宇, 等. 基于拓扑分割的网络可观性分析方法[J]. 机电工程, 2017, 34(5): 515-520.

LIU Ying, XIAO Tan-nan, ZOU Yu, et al. Observability algorithm for power network based on topological segmentation[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(5): 515-520.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>