

基于广义基尔霍夫电流定律的电网系统拓扑分析新算法

张晋芳¹, 钱 诚^{1,2}, 王增平¹, 张亚刚¹

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 安徽电网芜湖供电局, 安徽 芜湖 241027)

摘要: 提出一种基于广义基尔霍夫电流定律(GKCL)的系统拓扑跟踪新方法,该方法利用相量测量单元量测的支路电流、节点电压等同步相量数据,在划分网络树枝、连枝的基础上,通过判断是否满足 GKCL 来进行电气岛的快速准确判断,并采用在线跟踪与离线分析相结合的方式进一步保证快速性。以 IEEE 9 节点、IEEE 39 节点系统进行了仿真验证,结果表明新算法能够准确快速地对电气岛分离情况进行判断,可以满足系统拓扑分析实时性的要求。

关键词: 电力系统; 网络拓扑; 相量测量单元; 广义基尔霍夫电流定律; 仿真

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.008

0 引言

系统网络拓扑分析,又称为厂站间网络拓扑,是电力系统网络拓扑分析的重要组成部分,其主要作用是在厂站内拓扑分析结果的基础上完成电气岛的划分,进而与厂站内网络拓扑分析共同完成电力系统网络拓扑分析的任务^[1]。

随着我国“西电东送,南北互供”战略的实施,电网规模越来越大,系统结构越来越复杂,这就对电力系统网络拓扑分析的实时性和可靠性提出了更高的要求。然而传统电力系统网络拓扑分析算法一直存在以下三方面的问题。

a. 数据源形式较为单一。传统的电网拓扑分析算法主要利用 SCADA 采集的遥信信息,按开关状态建立网络模型,最后确定出电网结线方式。如果能够将模拟量信息也引入拓扑算法中,则有利于提高算法的容错能力。

b. 数据刷新周期较长。传统电网拓扑分析算法中的数据来源都是 SCADA/EMS 中 RTU 提供的开关量,而且相关信息没有统一时标,因此用这些非同一时刻下的开关状态来表征某一时刻的系统很可能导致拓扑错误。另外,由 SCADA/EMS 提供的数据刷新周期较长,约每 2 s 刷新一次数据^[1],这就可能使得电网拓扑分析滞后开关变位 0~2 s 甚至更长的时间。若能在拓扑分析中应用刷新频率更快的新数据源,则在满足日益复杂的电网系统对拓扑分析的实时性要求方面是很有裨益的。

c. 算法效率需要进一步提高。当前应用于系统网络拓扑分析算法主要是基于搜索法^[2-5](包括广度

优先搜索和深度优先搜索),以及在此基础上的改进算法^[6-9],这些搜索法原理简单,适应性强,但是在跟踪开关变位时存在重复搜索、效率低等问题。

WAMS/PMU 测量系统的出现为上述问题的解决带来新的契机。PMU 不仅可以获取开关量,还可以直接量测各节点电压和支路电流相量等状态信息,实时性强,一般 0.02 s 上传一次数据,而且数据都由 GPS 统一给定时标,可以准确表征同一时刻下系统的实际运行状态^[10-11]。本文将 PMU 信息引入系统网络拓扑分析部分,重点对开关变位后电气岛的划分情况进行快速跟踪和判断,为后续电力系统高级分析软件的应用提供支撑。

本文通过研究一个电气岛内所有注入电流的分布特点,提出了基于广义基尔霍夫电流定律(GKCL)的系统网络拓扑分析算法,相对于传统方法,新算法只需要搜索少量的开关状态并进行相关相量计算便可以实现对电气岛的准确划分。同时,通过利用在线跟踪与离线计算相结合的方式,可以从原理上进一步提高算法速度。文章最后算例结果表明,结合 PMU 信息的系统网络拓扑新算法能实现对电气岛的快速划分,具有良好的实时性。

1 基于 GKCL 的系统网络拓扑分析新原理

1.1 系统网络拓扑分析的电气岛跟踪难点剖析

系统拓扑分析的任务是分析整个电网的母线由闭合支路(包括线路、变压器等)联接成多少电气岛(又称子网),并求得每个电气岛的母线集合,实现电气岛的划分^[2-3]。断路器的开合状态变化影响着电力系统网络拓扑结果中母线以及电气岛的个数和组成,具体分析如下。

a. 断路器由开到合变位。

断路器变位前,其两端母线 i, j 的关系分为以下

收稿日期:2012-05-29;修回日期:2013-03-19

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50837002)

Project supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China(50837002)

3 种情况:若断路器变位前 i 与 j 为同一电气岛的两母线,则变位后电气岛不变化;若断路器变位前 i 与 j 为不同电气岛的两母线,则两电气岛融合成为一个大电气岛;若 i 与 j 有一条为新增母线,则将这条新增母线加入电气岛即可。

因此,断路器由开到合时,无论母线 i 与 j 初始归属状态如何,结果都是母线 i 与 j 所在电气岛融为同一电气岛,无需再进行连通性判断,即可实现电气岛的更新。

b. 断路器由合到开变位。

根据图论知识,可将电网中的支路分为树枝和连枝 2 种类型,针对断路器由合到开引起的不同类型支路的断开,具体影响分析如下:若连枝断开,则电气岛不变,母线编号不变;若树枝断开,则电气岛、母线都有可能改变。

综合上述分析,只有当树枝断开的时候,电气岛的划分情况才不确定,需要利用跟踪算法进行处理,以便明确划分情况。因此,系统网络拓扑分析的重点和难点集中在当开关变位造成树枝断开时,如何有效地加以跟踪,以快速准确地判断电气岛的划分情况。

在处理上述难点中,传统搜索法是从变位开关的一端母线开始,通过广度优先搜索或者深度优先搜索算法去搜寻变位开关的另外一端母线来实现电气岛的更新。如果能搜索到变位开关的另一端母线,那么开关由合到开变位不引起电气岛的分离;否则,引起电气岛的分离。显然,传统方法需要搜索大量的支路,重复进行连通性判断,进而导致跟踪断路器由合到开变位时耗时较多。

1.2 基于 GKCL 和 PMU 信息的电气岛划分新原理

PMU 在电力系统中的大量安装和使用,为电力系统实现计算和分析的同步性提供了保障。根据电路理论可得节点电压方程如下^[12-13]:

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{Y}_B \mathbf{U}_B \quad (1)$$

其中, $\mathbf{U}_B$ 是节点电压列向量, $\mathbf{I}_B$ 是节点注入电流列向量, $\mathbf{Y}_B$ 是节点导纳矩阵。

在此基础上,若仅考虑各个节点对地导纳引起的等效注入电流的影响,有式(2)成立,即:

$$\mathbf{I}_0 = \mathbf{Y}_0 \mathbf{U}_B \quad (2)$$

其中, $\mathbf{I}_0$ 是由各个节点所连线路的本节点侧对地导纳形成的等效注入电流,并规定注入网络方向为正; $\mathbf{Y}_0$ 是节点对地导纳矩阵,为一对角阵,其对角元素值为节点等效对地导纳。

进一步有:

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{I}'_B + \mathbf{I}_0 \quad (3)$$

其中, $\mathbf{I}'_B$ 是由外界注入节点电流列向量,由电源注入电流与负荷汲取电流决定,规定注入网络方向为电流

正方向。

由 GKCL 可知:

$$\sum_{i=1}^n \mathbf{I}_{Bi} = 0 \quad (4)$$

进一步,将式(2)和式(3)代入式(4)可推导出:

$$\sum_{i=1}^n (\mathbf{I}'_{Bi} + \mathbf{I}_{0i}) = \sum_{i=1}^n (\mathbf{I}'_{Bi} + \mathbf{Y}_{0i} \mathbf{U}_{Bi}) = 0 \quad (5)$$

即一个电气岛中全部注入电流之和严格等于零。在上述分析中,本文将全部注入电流分为外界注入电流 $\mathbf{I}'_B$ 和节点对地导纳等效注入电流 $\mathbf{I}_0$ 。实际在电气岛中各个节点布置的 PMU 能同步采集节点电压 $\mathbf{U}_B$ 、电源注入电流 $\mathbf{I}_G$ 和负荷汲取电流 $\mathbf{I}_L$,因此外界注入节点的电流 $\mathbf{I}'_B$ 可以由 $\mathbf{I}_G + \mathbf{I}_L$ 计算得到,而 $\mathbf{I}_0$ 则可由式(2)计算获得。

对于厂站间网络拓扑阶段开关“开”事件的跟踪难题,考虑到树枝由“合→开”,那么电气岛原来的结点树将分成了两部分,所含母线也将分成 2 个母线集合。若其中某一母线集合对应的局部网络,按照式(5)进行计算后,能够判断全部注入电流之和不等于零,则说明两母线集合之间有电流的交换,树枝开断没有引起电气岛分离;相反,若经由式(5)计算得到全部注入电流之和等于零,则说明每个母线集合自成一个电气岛,原电气岛发生分离。综上,即可实现基于 GKCL 和 PMU 信息的电气岛的跟踪。

2 基于 GKCL 的厂站间网络拓扑分析算法

2.1 算法的初始化

系统拓扑初始算法可以利用广度搜索法或者深度搜索法对电网节点进行搜索,以递增顺序进行电网节点和支路编号,电气岛初始分析完后计算每个子电气岛的节点数量,同时为各节点设置相应的电气岛标志。在搜索过程中形成每个节点的支路链表,同时设定结点树的树枝集合 $\mathbf{T}_r$ 和连枝集合 $\mathbf{C}_a$,最终形成电气岛的初始结点树。然后利用各支路参数信息,得到各个电气岛的节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}_B$ 以及节点对地导纳矩阵 $\mathbf{Y}_0$,为拓扑跟踪做好准备。

2.2 厂站间网络拓扑跟踪算法

按照初始化分析算法定义全网初始母线的集合,这个集合在第一次运行网络拓扑时保留,以后不管网络内开关状态如何变化,网络拓扑只搜索断开开关,并将搜索范围限制在同一电压等级。以开关变位事件作为进行系统拓扑分析跟踪算法的启动信息,本文着重考虑开关由合到开事件时拓扑快速跟踪实现。整个厂站间拓扑跟踪算法流程框图如图 1 所示。

2.2.1 开关发生“合”事件

对电气岛划分的影响具体如下。

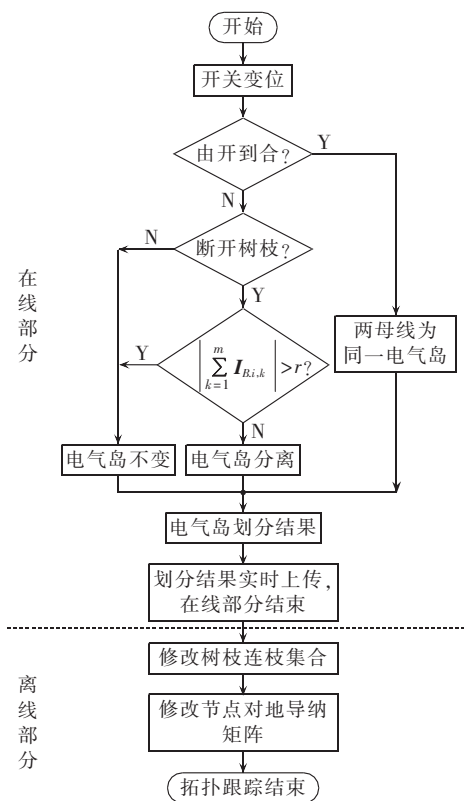


图 1 系统拓扑算法流程

Fig.1 Flowchart of system topology algorithm

a. 若开关两侧母线原来属于不同电气岛,则融合为同一电气岛。将节点数量少的小电气岛融入节点数量多的大电气岛并形成一个新的电气岛,将大电气岛的标志作为新电气岛的标志;若站内拓扑改变导致两电气岛的融合,则将变位开关两端母线中属于大电气岛的母线的编号作为新节点的编号,小电气岛中连接于合位开关的母线被新母线融合;若线路开关变位,则原来大电气岛的母线号不变,然后小电气岛的母线按照递增顺序编号排在大电气岛母线编号之后,最后将新增支路定义为树枝。

b. 原来属于同一电气岛的,则电气岛母线编号都不变,将新增支路定义为连枝。

c. 若有一条为新增母线,则将该条新增母线加入电气岛,并将该新增母线按照递增顺序编号排在电气岛母线编号之后,最后将新增支路定义为树枝。

2.2.2 开关发生“开”事件

开关由“合→开”变位,则根据第 1 节的分析结果,判断断开的支路属于连枝还是树枝。

a. 若断开的是连枝,则电气岛和母线都不变,将此次断开的连枝从原来连枝集合中去掉即可。

b. 若断开的是树枝 $l_{i,j}$,则进行如下步骤。

步骤 1 获得树枝两侧节点所属母线集合。通过搜索树枝获得所有与母线 i 相连的母线集合 B_i ,若有 m 条母线与母线 i 连通,则集合 B_i 为 $1 \times m$ 维向量;

同理可得与母线 j 连通的母线集合 B_j 。

步骤 2 获得相关电流、电压相量。从 PMU 量测的数据中获取集合 B_i 中母线的注入电流相量 $I_{B,i} = [I_1, I_2, I_3, \dots, I_m]^T$,以及集合 B_i 中母线电压 $U_{B,i} = [U_1, U_2, U_3, \dots, U_m]^T$ 。

步骤 3 计算 $\left| \sum_{k=1}^m I_{B,i,k} \right|$ 的值。集合 B_i 中各节点的注入电流相量 $I_{B,i}$ 为:

$$I_{B,i} = I'_{B,i} + Y'_{0,B,i} U_{B,i} \quad (6)$$

其中, $Y'_{0,B,i}$ 是 $l_{i,j}$ 断开后集合 B_i 中对应母线的对地导纳矩阵, $Y'_{0,B,i}(i, i) = Y_{0,B,i}(i, i) - y_{0,i,j}, y_{0,i,j}$ 是支路 $l_{i,j}$ 节点 i 侧的对地导纳。

步骤 4 测量误差阈值 r 的确定。

$$r = k_r \times m \times 0.2\% \times \max\{|I_1|, |I_2|, \dots, |I_m|\} \quad (7)$$

其中, k_r 是可靠系数,具体精确的值可依据实际运行情况进行调整,本文在第 3 节计算中 k_r 取值是 2; m 是流入该节点的等效电流个数; 0.2% 是 PMU 量测量的幅值相对误差; $\max\{|I_1|, |I_2|, \dots, |I_m|\}$ 是指集合 B_i 母线的最大注入电流幅值。

步骤 5 在线跟踪算法。若 $\left| \sum_{k=1}^m I_{B,i,k} \right| > r$,则原来的电气岛未发生分离;反之,则原来的电气岛分为两部分,其中一部分是集合 B_i 中母线组成的电气岛,另一部分则是余下母线集合 B_j 组成的电气岛。在线跟踪算法结束,上传电气岛分析的结果。

步骤 6 离线分析算法。若电气岛未分离,则在连枝集合 C_{α} 中必然至少存在一条这样的连枝:它的一端母线在集合 B_i ,另一端母线在集合 B_j 中。从连枝集合中搜索到这样的连枝后,则定义该连枝为树枝,添加到集合 T_r 中,并从集合 C_{α} 中将该连枝删除;再令 $y'_{0\bar{u}} = y_{0\bar{u}}$,得到新的各节点对地的导纳矩阵 Y'_0 ,其中 $y'_{0\bar{u}}$ 是 Y'_0 中的节点 i 对地导纳, $y_{0\bar{u}}$ 是 Y_0 中的节点 i 的对地导纳。

若电气岛分成了 2 个电气岛,则分别从变位开关两侧母线开始,通过其树枝支路遍历其他母线,并以递增顺序对电网节点和支路自动编号,最终可得到 2 个电气岛的母线编号以及新母线编号下的树枝和连枝集合(传统的广度优先搜索法就可以完成此任务)。从而进一步得到由集合 B_i 中母线组成的电气岛的各节点对地的导纳支路 $Y_0^{(1)} = Y'_{0,B,i}$,以及由集合 B_j 中母线组成的另一个电气岛对应的各节点对地导纳矩阵 $Y_0^{(2)} = Y'_{0,B,j}$ 。

3 算法验证

3.1 IEEE 9 节点算例分析

图 2 是用 PSAT 搭建的 IEEE 9 节点模型,母线

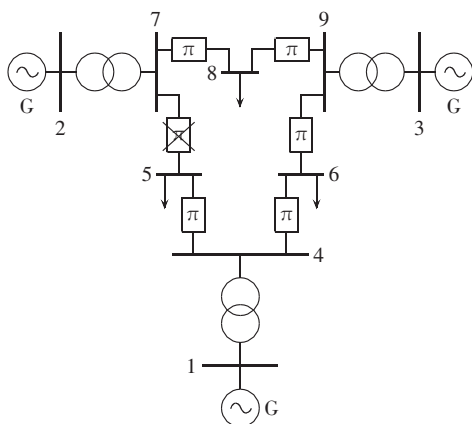


图 2 标准 IEEE 9 节点系统

Fig.2 Standard IEEE 9-bus system

1 是平衡节点,母线 2 和母线 3 是 PV 节点,其他都是 PQ 节点。若未说明,本文数据均为标幺值。设定线路单侧对地导纳为 $j0.083$,变压器的变比为 1,因此 π 型等值后变压器支路对地导纳为零,没有相应的注入电流。

3.1.1 系统拓扑初始化分析

系统网络拓扑初始化分析可得,9 个节点属于同一电气岛,节点编号如图 2 所示。

则节点对地导纳矩阵 $\mathbf{Y}_0$ 为: $\mathbf{Y}_0 = \text{diag}(0, 0, 0, j0.166, j0.166, j0.166, j0.166, j0.166, j0.166)$ 。

节点树枝集合为:

$$\mathbf{T}_r = [l_{1,4}, l_{4,5}, l_{5,7}, l_{2,7}, l_{7,8}, l_{8,9}, l_{3,9}, l_{6,9}] \quad (8)$$

连枝集合为:

$$\mathbf{C}_\alpha = [l_{4,6}] \quad (9)$$

3.1.2 系统网络拓扑跟踪算法

鉴于开关闭合与连枝断开 2 种情况下电气岛划分较为直观,本文重点分析树枝由合到开的情况。母线 5 与母线 7 之间线路 $l_{5,7}$ 上的开关“由合到开”变位,而 $l_{5,7}$ 在树枝集合 $\mathbf{T}_r$ 中,因此根据第 2 节跟踪算法,具体步骤如下。

步骤 1 获得母线集合。

通过搜索树枝获得所有与母线 5 相连的母线集合 $\mathbf{B}_5$, $\mathbf{B}_5 = [\text{母线 1}, \text{母线 4}, \text{母线 5}]$;同理可得, $\mathbf{B}_7 = [\text{母线 2}, \text{母线 3}, \text{母线 6}, \text{母线 7}, \text{母线 8}, \text{母线 9}]$ 。

步骤 2 获得相关电流、电压相量。

PMU 量测的所有外界注入电流相量 $\mathbf{I}_B$ 与母线电压相量 $\mathbf{U}_B$ 如表 1 所示,从中提取出集合 $\mathbf{B}_5$ 中母线的电流相量为:

$$\mathbf{I}_{B5} = [\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_4, \mathbf{I}_5]^T = [0.826e^{-j0.624}, 0, 1.361e^{j2.673}]^T \quad (10)$$

集合 $\mathbf{B}_5$ 中母线电压相量为:

$$\mathbf{U}_{B5} = [\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_4, \mathbf{U}_5]^T = [1.04, 1.013e^{-j0.038}, 0.989e^{-j0.088}]^T \quad (11)$$

步骤 3 计算 $\left| \sum_{k=1}^3 \mathbf{I}_{B5,k} \right|$ 的值。

支路 $l_{5,7}$ 断开后集合 $\mathbf{B}_5$ 中对应母线的对地导纳

表 1 $l_{5,7}$ 断开后 PMU 测量数据Tab.1 Data measured by PMU after trip of $l_{5,7}$

母线号	电压幅值	电压相角	注入电流幅值	注入电流相角
1	1.040	0	0.826	-0.624
2	1.025	0.233	1.599	0.126
3	1.025	0.092	0.844	-0.098
4	1.013	-0.038	0	0
5	0.989	-0.088	1.361	2.673
6	1.010	-0.015	0.939	2.805
7	1.019	0.136	0	0
8	1.011	0.070	1.048	2.875
9	1.017	0.044	0	0

注:基准值取 $S_B = 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$, $U_B = 230 \text{ kV}$ 。

矩阵 $\mathbf{Y}'_{0,B5}$ 为:

$$\mathbf{Y}'_{0,B5} = \mathbf{Y}_{0,B5} - \text{diag}(0, 0, \gamma_{0.5,7}) = \text{diag}(0, j0.166, j0.083) \quad (12)$$

进一步有:

$$\mathbf{I}_{B5} = \mathbf{I}'_{B5} + \mathbf{Y}'_{0,B5} \mathbf{U}_{B5} = [0.826e^{-j0.624}, -0.168e^{j1.533}, 1.333e^{j2.73}]^T \quad (13)$$

因此, $\left| \sum_{k=1}^3 \mathbf{I}_{B5,k} \right| = 0.57$ 。

步骤 4 测量误差阈值 r 的确定。

$$r = k_r \times m \times 0.2\% \times \max\{|\mathbf{I}_1|, |\mathbf{I}_4|, |\mathbf{I}_5|\} = 2 \times 3 \times 0.2\% \times 1.285 = 0.015$$

步骤 5 在线跟踪算法。

由 $\left| \sum_{k=1}^3 \mathbf{I}_{B5,k} \right| > r$ 可以判定,线路 $l_{5,7}$ 开断没有引起电气岛分离,因此母线编号不用变化。此时,可实时上传拓扑分析结果,在线算法跟踪结束。

步骤 6 离线分析算法。

因为电气岛没有分离,因此连枝集合 $\mathbf{C}_\alpha$ 中肯定存在这样的连枝,它的一端母线在集合 $\mathbf{B}_5$,另一端母线在集合 $\mathbf{B}_7$ 中,找到这样的连枝后,令该连枝为树枝,添加到集合 $\mathbf{T}_r$ 中,并将它从原来的集合 $\mathbf{C}_\alpha$ 中删除,本算例中该连枝为 $l_{4,6}$ 。

则 $\gamma'_{055} = \gamma_{055} - \gamma_{0.5,7} = j0.083$,同理有 $\gamma'_{077} = j0.083$,此时对地节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}_0$ 更新为: $\mathbf{Y}'_0 = \text{diag}(0, 0, 0, j0.166, j0.083, j0.166, j0.083, j0.166, j0.166)$ 。

3.2 IEEE 39 节点算例分析

图 3 是用 PSAT 搭建的标准 IEEE 39 节点系统,母线 31 为平衡节点,其余 9 个发电机节点为 PV 节点,其他节点均为 PQ 节点。

系统初始状态为 39 节点组成的 1 个电气岛。其中,选定连枝集合为:

$$\mathbf{C}_\alpha = [l_{2,3}, l_{3,18}, l_{4,14}, l_{7,8}, l_{10,11}, l_{21,22}, l_{25,26}, l_{26,29}]$$

剩余支路均为树枝,放入集合 $\mathbf{T}_r$ 中。

节点对地导纳矩阵 $\mathbf{Y}_0$ 中对角线元素如表 2 所示。

考虑树枝 $l_{16,19}$ 断开,此时有:

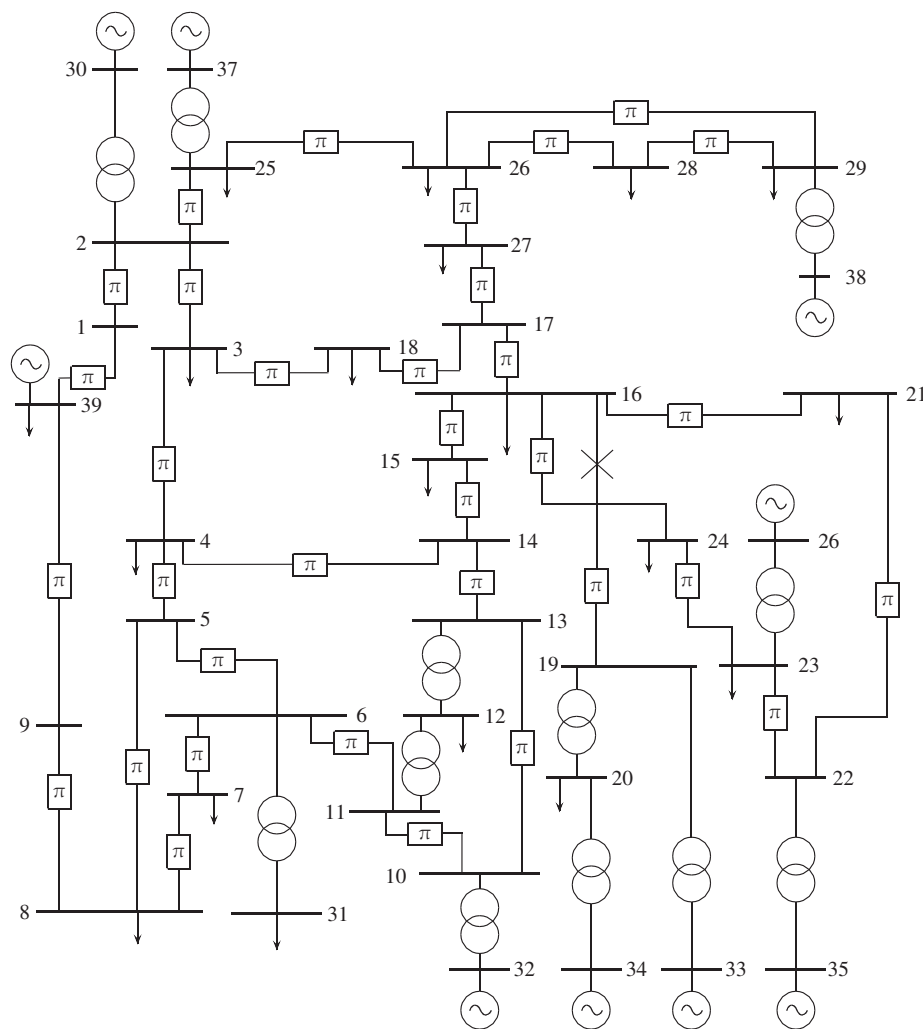


图 3 标准 IEEE 39 节点系统
Fig.3 Standard IEEE 39-bus system

表 2 IEEE 39 系统中节点对地导纳矩阵对角线元素值
Tab.2 Diagonal element of node-to-ground admittance matrix of IEEE 39-bus system

母线编号	对地导纳	母线编号	对地导纳
1	j0.7243	21	j0.2557
2	j1.8656	22	j1.8846
3	j0.3462	23	j0.2728
4	j0.2469	24	j0.2145
5	j0.1626	25	-0.0265+j1.3545
6	j2.5932	26	j1.2809
7	j0.0955	27	j0.2806
8	j0.3030	28	j0.5146
9	j0.7902	29	-0.0780+j2.1603
10	j3.1300	30	-j1.3475
11	0.0050-j0.0310	31	-j2.6168
12	-0.0100+j0.2722	32	-j3.2710
13	0.0050-j0.0142	33	0.2266-j4.5959
14	j0.3383	34	0.0247-j0.4943
15	j0.2685	35	-j1.7056
16	j0.3140	36	0
17	j0.2938	37	0.0272-j1.0506
18	j0.1728	38	0.0800-j1.5594
19	-0.4075+j8.1549	39	j0.9750
20	0.1830-j3.6013		

$$U_{B,19}=[U_{19},U_{20},U_{33},U_{34}]^T=[e^{j0.0935},0.8918e^{-j0.0067},0.997e^{j0.1867},0.982]^T \quad (14)$$

母线集合 B_{19} 中的所有外部注入电流之和为 $0.0711-j0.0775$, 节点对地导纳等效注入电流之和为 $0.0712-j0.0776$ 。 $Y'_{0,B,19}$ 中的元素参见表 2。

可得: $\left|\sum_{k=1}^4 I_{B,19,k}\right|=1.1146\times 10^{-4}, r=0.168$ 。
因为 $\left|\sum_{k=1}^4 I_{B,19,k}\right|<r$, 从而此次线路 $l_{16,19}$ 的断开使得电气岛分离, 集合 $B_{19}=[\text{母线 } 19, \text{母线 } 20, \text{母线 } 33, \text{母线 } 34]$ 组成一个电气岛, 余下所有母线组成集合 B_{16} 成为另外一个电气岛。在线算法跟踪结束。

离线分析算法: 电气岛分离成 2 个小电气岛, 其分离后新的母线划分结果如图 4 所示。

3.3 算法复杂度分析

对电力网络中树枝开断的快速跟踪是提高电力网络拓扑分析效率的一个关键问题。传统矩阵法在处理支路开断时需要重新修改表达网络一阶连通性的初始邻接矩阵, 然后以初始邻接矩阵为基础, 结合

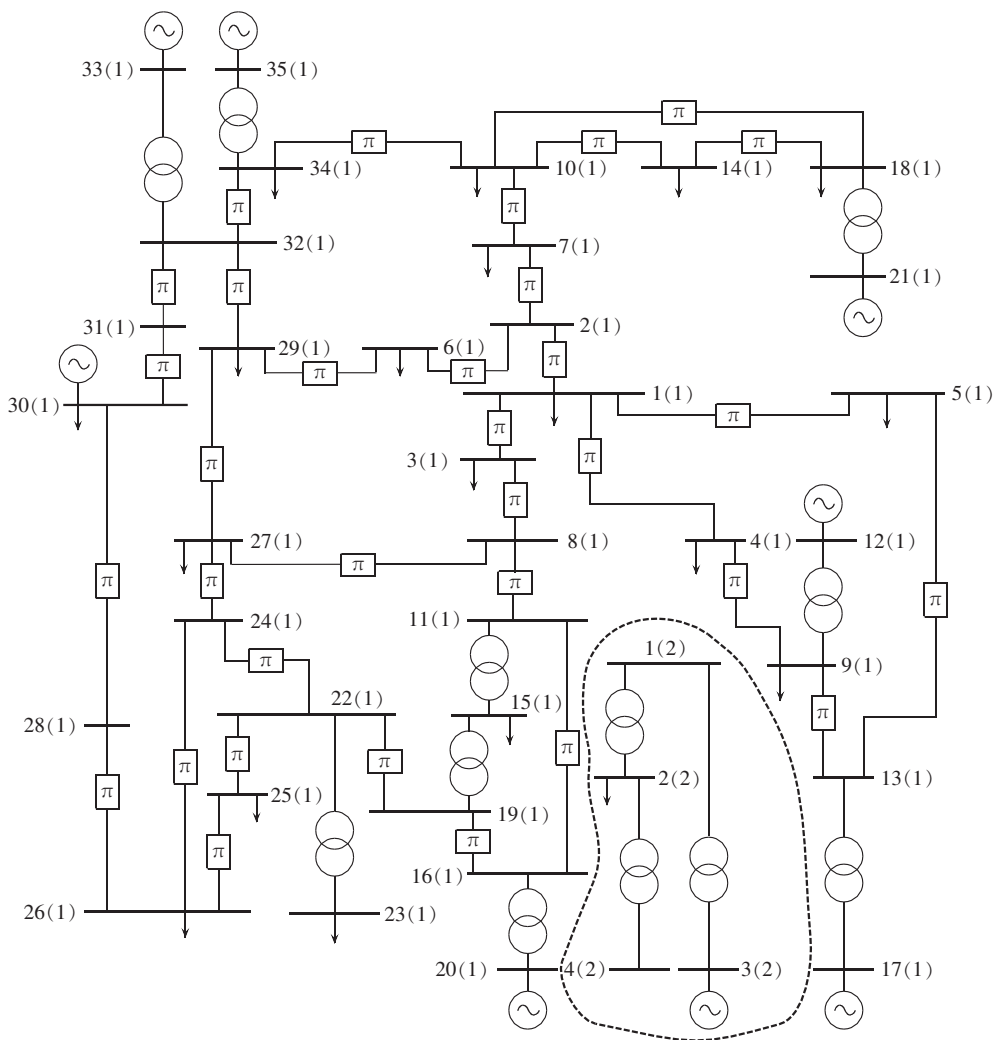


图 4 标准 IEEE 39 节点系统(支路 16-19 断开)

Fig.4 Standard IEEE 39-bus system with branch $l_{16,19}$ broken

矩阵自乘法^[14-15]、平方法^[14]以及其他改进算法^[16], 获得表达网络全局连通性的全连通矩阵。对于 n 个节点的网络, 矩阵自乘法和平方法需要的逻辑加乘运算总次数分别为 $(2n-1)n^2(n-1)$ 和 $(2n-1)n^2\log_2^{n-1}$, 随着节点数目 n 的增加, 矩阵自乘法的运算次数近似与 n^4 成比例, 平方法近似与 n^3 成比例。对于本文新方法, 在拓扑跟踪时, 首先选择开断支路两端对应母线集合数目少的一个, 设个数为 $s(s < n)$, 则在跟踪过程需 s 次代数乘、 $2s-1$ 次代数加及 1 次代数比较运算, 总计 $3s$ 次代数运算。尽管一次代数运算耗时是逻辑运算的若干倍(这里代数运算为浮点数运算, 一次浮点数除法运算耗时约相当于 40 次逻辑运算的耗时), 本文新算法对应的逻辑运算次数为 $120s$, 远小于传统邻接矩阵法的 $(2n-1)n^2(n-1)$ 和 $(2n-1)n^2\log_2^{n-1}$ 。由此可见, 本文算法能够有效地提升拓扑分析的速度, 而且具有清晰的物理意义。

4 结论

本文提出的基于 GKCL 的系统网络拓扑分析算

法将开关量与 PMU 量测的电流相量有机地结合起来, 并且利用在线跟踪与离线计算相结合的方式完成电气岛的快速划分。相对于传统方法, 基于 PMU 信息的新算法只需要搜索很少量的开关状态, 又能结合所提供的同步模拟相量, 因此, 这种混杂了开关量和模拟量的算法准确性更高。新算法避开了大规模开关状态搜索及多次连通性的判断, 能够有效提升拓扑分析的运算速度, 从而为满足电网准确性和实时性要求提供保证。

参考文献:

- [1] 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统(EMS)[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 163-173.
- [2] 万华, 李乃湖, 陈珩, 等. 基于广度优先的快速拓扑分析法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1995, 7(2): 17-23.
WAN Hua, LI Naihu, CHEN Heng, et al. A new topology processor based on width-priority[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 1995, 7(2): 17-23.
- [3] PHONGSAK D Y, IRAJ D. A topology-based algorithm for tracking network connectivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 339-346.

- [4] 朱文东,刘广一,于尔铿,等. 电力网络局部拓扑的快速算法[J]. 电网技术,1996,20(3):30-33.
ZHU Wendong,LIU Guangyi,YU Erkeng,et al. The fast calculation method of local power network topology[J]. Power System Technology,1996,20(3):30-33.
- [5] YAO Yubin,WANG Dan,WANG Chuanqi,et al. A fast method of local network topology[C]//Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System. Guangzhou,China:[s.n.],2008:42-47.
- [6] 祝滨,仇晋. 基于矢量坐标搜索法的地区电网网络拓扑方法的研究[J]. 电力自动化设备,2003,23(2):63-65.
ZHU Bin,QIU Jin. Research of a network topology method based on vector coordinates[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(2):63-65.
- [7] 宋少群,朱永利,于红. 基于图论与人工智能搜索技术的电网拓扑跟踪方法[J]. 电网技术,2005,29(19):45-49.
SONG Shaoqun,ZHU Yongli,YU Hong. A power network topology tracking method based on graph theory and artificial intelligence search technique[J]. Power System Technology,2005,29(19):45-49.
- [8] 于红,朱永利,宋少群. 图形数据库一体化的厂站接线拓扑分析[J]. 电力自动化设备,2005,25(11):83-86.
YU Hong,ZHU Yongli,SONG Shaoqun. Station topology analysis with graphic database integrative technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(11):83-86.
- [9] 梅念,石东源,段献忠. 基于图论的电网拓扑快速形成与局部修正新方法[J]. 电网技术,2008,32(13):35-39.
MEI Nian,SHI Dongyuan,DUAN Xianzhong. A novel method for fast power network topology formation and partial revision based on graph theory[J]. Power System Technology,2008,32(13):35-39.
- [10] PHADKE A G,THORP J S. Synchronized phasor measurements and their applications[M]. New York,USA:Springer,2008:1-3.
- [11] 王增平,张晋芳,钱诚. 基于同步测量信息的电网拓扑错误辨识方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):1-6.
WANG Zengping,ZHANG Jinfang,QIAN Cheng. Topology error identification based on synchronized measurements for power network[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):1-6.
- [12] 张伯明,陈寿孙,严正. 高等电力网络分析[M]. 北京:清华大学出版社,2008:24-32.
- [13] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,1995:135-195.
- [14] 于雨,陈云山,王大为. 电网连通性检测方法的探讨[J]. 电力学报,1999,14(3):183-188.
YU Yu,CHEN Yunshan,WANG Dawei. The study of testing method of electric network connection[J]. Journal of Electric Power,1999,14(3):183-188.
- [15] 王湘中,黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识[J]. 电网技术,2001,25(2):10-12,16.
WANG Xiangzhong,LI Xiaolan. Topology identification of power network based on incident matrix[J]. Power System Technology,2001,25(2):10-12,16.
- [16] 姚玉斌,王丹,吴志良,等. 方程求解法网络拓扑分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):79-83.
YAO Yubin,WANG Dan,WU Zhiliang,et al. Network topology analysis by solving equations[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(1):79-83.

作者简介:

张晋芳(1985-),男,河北石家庄人,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:zhangjinfang_305@126.com);
钱诚(1987-),男,安徽池州人,硕士,研究方向为电力系统继电保护;

王增平(1964-),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,主要从事微机保护、变电站综合自动化等方面的研究;

张亚刚(1978-),男,河北保定人,博士,主要从事非线性动力学、电力系统广域保护等方面的研究。

Network topology analysis algorithm based on generalized Kirchhoff current law

ZHANG Jinfang¹,QIAN Cheng^{1,2},WANG Zengping¹,ZHANG Yagang¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University,Beijing 102206,China;2. Wuhu Power Supply Bureau of Anhui Power Grid Corporation,Wuhu 241027,China)

Abstract: A topology tracking method based on the GKCL(Generalized Kirchhoff Current Law) is proposed, which uses the synchronous phasor data provided by PMUs(Phasor Measurement Units),such as branch current and nodal voltage,identifies the conformance of network tree and link branches with GKCL to quickly and precisely detect the electrical islands. The combination of online tracking and offline analysis guarantees the real-time performance of the proposed method. Simulation results for IEEE 9-bus system and IEEE 39-bus system verify that the proposed method identifies the electrical islands precisely and quickly, satisfying the requirement of system topology analysis for real-time performance.

Key words: electric power systems; electric network topology; phasor measurement unit; generalized Kirchhoff current law; computer simulation