

基于复杂网络社团结构的恢复子系统划分算法

林振智, 文福拴, 周 浩

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要: 并行恢复对加快大停电后系统的恢复具有十分重要的意义, 而恢复子系统的合理划分是并行恢复的基础, 但到目前为止在理论上还没有成熟的方法来指导恢复子系统的划分。在此背景下, 提出了一种新的基于复杂网络社团结构理论的恢复子系统划分算法。该算法根据黑启动机组在电网中的分布情况以及电网自身特点来划分子系统, 利用模块度指标来衡量划分结果的合理性, 并根据各个子系统分裂出来的先后次序来确定子系统之间同步并列的先后次序。克服了传统方法无法衡量划分结果合理性、不能适当确定同步并列规则或策略的缺点。最后, 以新英格兰 10 机 39 节点系统为例说明了所述方法的基本特征。

关键词: 电力系统恢复; 恢复子系统划分; 复杂网络; 社团结构; 模块度

中图分类号: TM732

0 引言

电力系统恢复按恢复过程中不同时期的特点可以分为 3 个阶段, 即黑启动阶段、网络重构阶段和负荷恢复阶段^[1]。其中, 网络重构阶段的主要目标是尽快给失电的厂站送电并建立一个稳定的网架, 为下一阶段全面恢复负荷打下基础^[2]。在网络重构这一阶段, 逐步恢复主网的网架, 并将子系统同步, 从而建立一个稳定的网架。这个阶段的系统恢复策略总体上可分为 2 种: 一种是串行恢复, 即在大多数发电机并网前对整个网络进行充电; 另一种是并行恢复, 即系统分成几个子系统同时恢复, 然后在各子系统恢复完成后同步并列, 恢复整个网络^[3-4]。因而, 在制定恢复规划时, 合理划分恢复子系统对加快大停电后的系统恢复具有重要作用。

当系统大面积停电后, 可以首先把系统划分为若干个子系统, 之后启动对这些子系统的恢复, 从而加速系统恢复过程, 缩短对停电负荷的恢复供电时间。到目前为止, 关于恢复子系统划分问题的研究较少, 而在绝大多数实际电力系统中, 如南方电网^[5]、江苏电网^[6]、广州电网^[7]等, 其恢复子系统主要根据专家经验按地域或电网所属的电力公司来划分。这些方案大多从地理上对恢复系统进行划分, 在相当程度上存在人为因素, 并且缺少理论支持。这样, 得到的恢复子系统划分结果是否合理仍是一个值得研究的问题。此外, 应该如何确定恢复子系

统间同步并列的先后次序, 在理论上也缺乏指导。

自 1998 年 Watts 和 Strogatz 提出的小世界网络^[8]和 1999 年 Barabási 和 Albert 提出的无标度网络^[9]开始, 复杂网络理论^[10]成为目前的研究热点之一。近年来, 复杂网络的概念也逐渐被应用到电力系统研究领域。目前大多数的研究主要集中在电力网络的小世界模型特性^[11]、电网脆弱性评估^[12-13]、连锁故障传播机理^[14-15]等。复杂网络的社团结构理论在许多领域也得到了应用, 如自然、社会以及生物等领域^[16-18]。电力网络本身作为一种复杂网络, 同样也具有社团结构特性, 但复杂网络社团结构理论在电力系统中的应用研究尚不多见, 目前主要集中在无功分区^[19]和同调等值^[20]上。对于大停电后的恢复, 在网络重构阶段采取并行恢复策略时, 需要把系统划分为几个恢复子系统同时恢复, 这与社团结构的思路相吻合。因此, 可以考虑用复杂网络的社团结构理论来指导恢复子系统的划分。

在上述背景下, 本文提出了一种新的基于复杂网络社团结构理论的恢复子系统划分算法, 根据电网自启动能力机组分布情况及电网结构特点来划分恢复子系统, 利用社团结构的模块度概念来评估恢复子系统划分的合理性, 从理论上为恢复子系统的划分提供决策支持。此外, 该算法可以根据各个恢复子系统分裂出来的先后次序来确定恢复子系统之间同步并列的先后次序。

1 复杂网络理论

1.1 电力网络简化

用复杂网络的思想来研究电力网络特性时, 首

收稿日期: 2008-07-12; 修回日期: 2009-03-19。

教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-04-0818)。

先需要将电力网络用抽象图表示。下面介绍一些在复杂网络社团结构分析中需要简化的原则:

1) 本文的研究只限于高压输电网络,不考虑配电网络、发电厂和变电站的主接线。

2) 所有高压输电线路和变压器支路均抽象为网络中的无权边,忽略高压输电线路各种电气特性参数以及电压等级的不同。

3) 电网拓扑模型中的所有发电厂节点、变电站节点和负荷节点均抽象为网络中无差别的节点,且不考虑接地点。

4) 在恢复过程中,为了减少对地电容的影响,一般先只投双回线路中的一回,因此在网络简化时可以合并同杆并架的输电线,且忽略并联电容支路,这样可以消除电网拓扑模型中的多重边和自环,使相应的图成为简单图。

5) 为了确保每个子系统至少有一台黑启动机组和一台不具有黑启动能力的发电机组,防止在黑启动阶段已经建立好的同一条黑启动路径所包含的节点在网络重构阶段被划分到不同的恢复子系统,有必要在社团结构分析之前,把黑启动路径所包含的节点合并成为一个新节点。

6) 忽略电力网络图的有向性。因为在分析复杂网络的社团结构时,忽略网络图的有向性将更有利于问题的解决^[15];事实上,在电力网络中,输电线路中潮流的方向是可变的。

经过上述简化,电力网络就能够被抽象为一张具有 n 个节点的无向、无权的稀疏连通图,可以用 $n \times n$ 邻接矩阵 \mathbf{A} 表示。

1.2 复杂网络特征参数

节点 i 的度定义为与该节点相连的其他节点的数目,即 $k_i = \sum_{j=1}^n A_{ij}$, 其中 A_{ij} 为邻接矩阵 \mathbf{A} 中第 i 行第 j 列元素。直观上看,一个节点的度越大就意味着这个节点在某种意义上越“重要”。

边介数定义为在网络所有最短路径中,通过某条边的最短路径的条数。在复杂网络拓扑结构的研究过程中,通常用边介数来衡量边在网络中的枢纽性。边介数越大,就认为该边在网络中的枢纽性越强,断开(或删除)这样的边会使网络中大量的节点对之间的最短路径变长。

高压电力网络一般都是环网运行的,因而并不是任意节点对之间都只有一条最短路径,在一些节点对之间有可能存在若干条等长度的最短路径。因此,传统的用于求取网络指定节点对之间最短路径的 Dijkstra 算法不能直接用于计算边介数。采用了由 Newman 提出的边介数计算方法,其具体求解步

骤详见文献[17]。

2 恢复子系统划分

2.1 社团结构简介

实际的复杂网络都呈现一种共同特性——社团结构,即整个网络是由若干个社团构成。在每个社团内部,节点之间的连接非常紧密,但是各个社团之间的连接相对比较稀疏^[10,17]。

传统上,图论和计算机科学中的图形分割以及社会学中的分层聚类都属于网络社团结构的分析范畴^[10]。其中,分层聚类方法是基于各个节点之间连接的相似性或者强度,把网络自然划分为各个子群。根据划分过程中是往网络中添加边还是从网络中移除边,又可将其分为凝聚算法和分裂算法。传统上,基于凝聚的分级聚类方法应用较多,其主要是通过搜索各个社团中具有高连接强度的核心节点,并优先把它添加到各自的社团。而对于具有较低连接强度的边界节点,该算法不能很好地被划分到其各自的社团中,这也正是该方法的主要缺点。而对于分裂算法,目前最为流行的是由 Girvan 和 Newman 于 2002 年提出的算法^[16],简称为 GN 分裂算法。该算法可以弥补上述传统算法的一些不足,近几年来已成为社团结构分析的一种标准算法。其具体思路为:如果一个网络包含几个社团且各个社团之间只通过少量几条互联的边连接,则各个社团之间的所有最短路径必然要经过这些互联的边,从而这些边就具有较高的边介数,通过移除这些边,就可以把隐藏在网络中的不同社团划分开。而本文所研究的电力网络恰恰是这种情形,因为在电力网络中不同子系统间一般也是通过少数几条联络线连接的。因此,本文采取 GN 分裂算法来划分大停电后的恢复子系统。

2.2 模块度指标

虽然 GN 分裂算法可以弥补传统算法的一些不足,但是该算法本身也存在一个缺陷,即它不能确定网络的社团结构数目。此外,在不知道社团数目的情况下,GN 算法也无法确定这种分解要进行到哪一步终止^[10,17]。

为了解决上述问题,Newman 等人引进了一个衡量网络划分质量和确定最优分区数目的指标——模块度 Q ,其具体定义如下^[21]:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(c_i, c_j) \quad (1)$$

式中: m 为网络中边的总数,

$$m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij}$$

c_i 为节点 i 所在的社团;如果节点 i 和节点 j 在同一个社团内,则 $\delta(c_i, c_j) = 1$, 否则 $\delta(c_i, c_j) = 0$; $k, k_j / (2m)$ 的物理意义是如果保持各个节点的度不变,其即为形成随机网络时连接节点 i 和节点 j 的边的期望值。

因此,如果社团内部边的总数目不大于随机连接时的期望值,则 $Q = 0$ 。 Q 的上限为 1, Q 越接近 1, 就说明社团结构越明显。在实际网络中, Q 的值通常位于 $0.3 \sim 0.7$ 之间, 大于 0.7 的情形一般较少。因此,在恢复子系统的划分上,可以利用模块度的这些特性来判断恢复子系统的划分结果是否合理。

2.3 基于分裂算法的恢复子系统划分

边介数是区分一个社团的内部边和连接社团之间的边的一种有效的量度标准,因而,GN 分裂方法的基本思想是不断从网络中移除介数最大的边。对于事先不知道社团数目的网络,一般先把网络中的每个节点都分裂成一个社团,然后再用模块度来衡量应该分为几个社团最为合理。对于本文所研究的大停电后的恢复问题,由于恢复子系统可能的最大数目已经由具有黑启动能力的机组总数量所制约,因此,只要先用分裂算法把各台黑启动机组划分到不同的社团就可以停止分裂,而不必将每个节点都分裂成一个社团;然后再运用模块度来判断是否已经合理划分了恢复子系统(即模块度 Q 是否为最大值),如果划分得不够合理,则可以考虑把初步划分的恢复子系统进行适当合并,直到模块度达到最大值为止。

对由分裂算法划分得到的各个恢复子系统,最后还需对其内的有功发电容量和负荷进行检验,判断是否能够大致维持平衡;也可以通过设定一个指标(如发电和负荷不平衡量的容许值^[22])来衡量有功功率的平衡水平。此外,在恢复初期,一般优先对重要负荷进行供电,而对不太重要的负荷节点则可以等到系统足够强壮时再行恢复,只要各个恢复子系统内的发电功率能够满足总的重要负荷功率即可。对于存在严重不平衡的情况,由于处在 2 个子系统交界处的节点本身就具有一定的歧义性^[10], 可以考虑把交界节点重新划分。

在分裂过程中,各个子系统从网络中分裂出来时存在先后次序,这个次序本身体现了各个子系统之间联系疏密的程度。而且,由于分裂算法在每次移除一条边之后,会重新计算由此得到的新网络的边介数,这样,规模较大的子系统的节点数以及节点对较多。因此,这些子系统内的一些边的介数相对于规模较小的恢复子系统而言会大一些,从而规模

较大的子系统一般会首先被分裂成 2 个规模小的子系统;反之亦然。从原理上讲,根据分裂算法划分出来的各个子系统的规模相差很大的可能性较小,从而各个子系统的恢复时间相差很大的可能性也就相对较小。此外,由于在恢复子系统划分时考虑了每个子系统内部的功率平衡,因此,各个恢复子系统可以在不需要其他恢复子系统支援的情况下,保持子系统内的功率平衡;而且,在恢复初期,各个子系统的网架一般不够强壮,且子系统间的联络线两端可能存在较大的合闸相角差,此时如果对子系统进行并网,则可能会使本来就不够强壮的子系统再次受到冲击,严重时甚至会导致系统再次发生解列。因此,可以等到不同的恢复子系统的网架比较稳定之后,即每个恢复子系统都完成恢复供电之后,再采取同步并列策略。基于上述考虑,提出了下述同步并列策略,即根据子系统分裂的先后次序来指导各个恢复子系统之间的同步并列顺序。从网络中最先分裂出来的子系统与剩下的系统之间的联系比剩下的系统内部的各子系统之间的联系要稀疏,因此,该最先分裂出来的子系统应该等到其他恢复子系统同步并列完成之后才能并列。相反,最后分裂出来的恢复子系统之间的联系比较紧密,因此,在恢复子系统同步并列时,应该优先考虑最后分裂出来的子系统。因而,本算法对于恢复子系统之间的同步并列顺序可以从理论上提供指导。

综上所述,用于恢复子系统划分的分裂算法的具体步骤如下:

- 1) 对电力网络进行简化,并用抽象图表示。
- 2) 计算网络中所有边的介数。
- 3) 找到介数最高的边并将其从网络中移除。
- 4) 判断是否出现新的分区。如果出现新的分区,则计算此时的模块度指标。
- 5) 重新计算介数最高的边被移除之后的网络中所有边的介数。
- 6) 回到步骤 3,直到各个黑启动机组所在的节点都各自在一个退化的社团为止。
- 7) 计算最后得到的分区的模块度指标,以判断恢复子系统划分的合理性。即判断最后计算的模块度指标是否为最大值,如果不为最大值,则考虑合并一部分已分裂的社团;如果达到最大值,则继续下一步骤。此外,还需判断如此划分得到的每个分区内是否包含黑启动电源,如果不是,则应将该分区与其最紧密的分区(即与其最后被划分开的分区)合并。
- 8) 统计各分区的有功发电容量和负荷,判断区域内是否基本维持平衡;如果存在严重不平衡,则考虑把处在边界上的节点重新划分,以维持子系统内

的有功发电容量和负荷基本平衡。

9)根据各恢复子系统分裂出来的先后顺序来判断各分区同步并列的顺序。

3 算例分析

以新英格兰 10 机 39 节点系统为例来验证所提出的算法的有效性和合理性。假设黑启动发电机节点号为 32,33,37,并且在黑启动阶段分别向位于节点 31,34,30 的非黑启动机组提供启动电源,其黑启动路径分别为 32→10→11→6→31,33→19→20→34,37→25→2→30。

首先,对各黑启动路径所包含的节点分别进行合并,结果如附录 A 图 A1 和表 A1 所示。经简化后该系统就转化为一个具有 29 个节点、36 条边的无权、无向的连通网络。

利用介数计算方法对各线路的介数进行计算,各次分裂算法的计算结果如附录 A 表 A2 所示。从表中可以看出,节点合并后的新网络中线路 16-17 的介数最大,其值为 204.666。根据分裂算法,首先将线路 16-17 从网络中移出,经校验系统仍未分裂成多个恢复子系统。这样,再重新计算线路 16-17 移除后网络的各条线路的介数。经过第 2 次分裂后,线路 14-15 的介数最大,其值为 360。故移除线路 14-15,经校验此时系统已分裂成 2 个恢复子系统,但仍有 2 台黑启动机组位于同一个恢复子系统,故继续分裂算法。经过第 3 次分裂后线路 3-4 的介数最大,其值为 147.934。故移除线路 3-4,经校验系统未分裂出新的恢复子系统,继续执行分裂算法。第 4 次分裂后线路 1-39 的介数最大,其值为 200。故移除线路 1-39,经校验此时系统已分裂成 3 个恢复子系统,且 3 台黑启动机组分别位于 3 个不同的恢复子系统中,故分裂算法迭代结束。

需要说明的是,在各次分裂过程中,存在后面分裂的线路介数比前面分裂的介数大的情况,这是由于每次分裂时网络中边的数目不同引起的。

从恢复子系统的分裂过程可以看出,经过 2 次和 4 次分裂之后,系统已分别分裂为 2 个和 3 个恢复子系统,经计算其社团结构的模块度分别为 0.345 7 和 0.550 5,其社团结构的树状图及其对应的模块度分布如附录 A 图 A2 所示(图中 p 表示得到新的恢复子系统的次数)。可以看出,把系统划分为 3 个子系统时的模块度值大于把系统划分为 2 个子系统时相应的量。因此,恢复子系统的最合理数目为 3 个,详细划分结果如附录 A 表 A3 所示。

对于上述初步划分的各个恢复子系统,还需校验各个恢复子系统内部的有功发电容量是否不小于

有功负荷。各个恢复子系统的有功发电容量和负荷的统计结果如附录 A 表 A3 所示(其中有有功发电容量的数据来源于文献[23])。可以看出,3 个恢复系统中的有功发电容量均大于负荷功率。恢复子系统的最终划分结果如图 1 所示。此外,当功率严重不平衡时,即各个恢复子系统内的发电功率不能满足其内总的重要负荷功率时,则可以考虑重新划分边界上的节点。例如,假定恢复子系统 1 内的发电功率比较充足,而恢复子系统 3 内的发电功率不能满足其内总的重要负荷功率,则可以考虑把节点 3 划分到子系统 1 内或者把节点 39 划分到子系统 3 内。

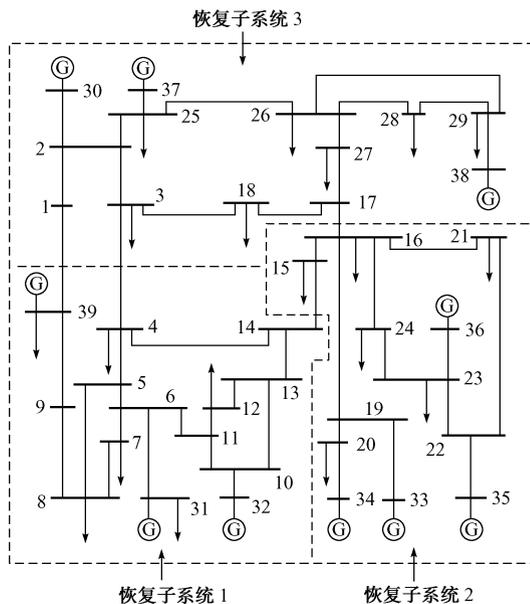


图 1 恢复子系统分区图
Fig. 1 Partitioning graph of the restoration subsystems

最后,根据各个恢复子系统被分裂出来的先后次序来指导恢复子系统之间同步并列的先后次序。由图 1 和附录 A 图 A2 可知,在第 2 次分裂时恢复子系统 2 首先与系统的剩余部分(即恢复子系统 1 和 3)分裂开来;在第 4 次分裂时系统的剩余部分又分裂成恢复子系统 1 与恢复子系统 3。从这个分裂过程可以看出,恢复子系统 1 与恢复子系统 3 之间的联系较为紧密,而恢复子系统 2 与这 2 个恢复子系统之间的联系则较为薄弱。因而,当各个恢复子系统的网架被基本恢复且并网同步运行的时机已经成熟时,应该首先对恢复子系统 1 和 3 进行同步并网,最后再进行恢复子系统 2 的同步并网。

4 结语

运用复杂网络社团结构理论来划分恢复子系

统,克服了传统的按地域或电网所属的电力公司划分时存在相当程度的人为因素的缺点,从理论上为并行恢复规划提供了一种新的决策支持方法。复杂网络中的模块度指标可以为确定恢复子系统的最优划分数目在理论上提供指导;同时,可以根据分裂过程中各个恢复子系统分裂出来的先后次序来确定恢复子系统之间同步并列的先后次序。本文所提出的方法克服了传统方法不能衡量恢复子系统划分的合理性,以及无法确定同步并列顺序的缺点。

虽然本文在划分恢复子系统时考虑了电力网络的拓扑结构、发电与负荷的平衡等影响恢复过程的重要问题,但仍有许多问题有待研究。例如,如何保证各恢复子系统在规模上的平衡,以及如何更客观地判断子系统交界处的哪些节点具有歧义性等。这些都是下一步将要着重研究的重要问题。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 高远望,顾雪平,刘艳,等. 电力系统黑启动方案的自动生成与评估. 电力系统自动化,2004,18(13):50-54,84.
GAO Yuanwang, GU Xueping, LIU Yan, et al. Automatic derivation and assessment of power system black-start schemes. Automation of Electric Power Systems, 2004, 18(13): 50-54, 84.
- [2] 周云海,闵勇. 恢复控制中的系统重构优化算法的研究. 中国电机工程学报,2003,23(4):67-70,188.
ZHOU Yunhai, MIN Yong. Optimal algorithm for system reconstruction. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 67-70, 188.
- [3] LINDENMEYER D, DOMMEL H W, ADIBI M M. Power system restoration—a bibliographical survey. Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(3): 219-227.
- [4] 李志民,刘迎春,李卫星,等. 电力系统恢复典型案例分析. 电力系统自动化,2003,27(2):60-64.
LI Zhimin, LIU Yingchun, LI Weixing, et al. Analysis of typical system restoration examples. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 60-64.
- [5] 湛军,曾勇刚,杨晋柏,等. 南方电网黑启动方案. 电力系统自动化,2006,30(9):80-83,87.
CHEN Jun, ZENG Yonggang, YANG Jinbai, et al. Black-start scheme for China Southern power grid. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 80-83, 87.
- [6] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复. 北京:中国电力出版社,2007.
- [7] 蔡述涛,张尧,荆朝霞. 地方电网黑启动方案的制定. 电力系统自动化,2005,29(12):73-76.
CAI Shutao, ZHANG Yao, JING Zhaoxia. Discussion on the black start scheme of regional power systems. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 73-76.
- [8] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [9] BARABÁS A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks. Science, 1999, 286: 509-512.
- [10] 汪小帆,李翔,陈关荣. 复杂网络理论及其应用. 北京:清华大学出版社,2006.
- [11] 孟仲伟,鲁宗相,宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析. 电力系统自动化,2004,28(15):21-24.
MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.
- [12] ALBERT R, ALBERT I, NAKARADO G L. Structural vulnerability of the North American power grid. Physical Review E, 2004, 69(2).
- [13] 丁明,韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法. 电力系统自动化,2006,30(8):7-10,40.
DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 7-10, 40.
- [14] CARRERAS B A, LYNCH V E, DOBSON I, et al. Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackouts. Chaos, 2002, 12(4): 985-994.
- [15] 丁明,韩平平. 小世界电网的连锁故障传播机理分析. 电力系统自动化,2007,31(18):6-10.
DING Ming, HAN Pingping. Study of failure spreading mechanism in the small-world power grid. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 6-10.
- [16] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community structure in social and biological networks. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001, 99(12): 7821-7826.
- [17] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks. Physical Review E, 2004, 69(2).
- [18] PALLA G, DERENYI I, FARKAS I, et al. Uncovering the overlapping community structure of complex networks in nature and society. Nature, 2005, 435: 814-818.
- [19] NI X, MEI S. A novel decomposition and coordination algorithm for complex network and its application to power grid. Journal of Control Theory and Application, 2008, 6(1): 123-128.
- [20] 倪向萍,梅生伟. 基于复杂网络社团结构理论的同调等值算法. 电力系统自动化,2008,32(7):10-13.
NI Xiangping, MEI Shengwei. Coherency-based dynamic equivalence algorithm with community structure of complex network theory. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 10-13.
- [21] CLAUSET A, NEWMAN M E J, MOORE C. Finding community structure in very large networks. Physical Review E, 2004, 70(6).
- [22] 刘源祺,刘玉田. 基于调度分区的电力系统解列割集搜索算法. 电力系统自动化,2008,32(11):20-24.
LIU Yuanqi, LIU Yutian. An islanding cutset searching approach based on dispatching area. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 20-24.

(下转第 42 页 continued on page 42)

[23] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, GAN D. A MATLAB power system simulation package[EB/OL]. [2008-05-02];://www.pserc.cornell.edu/matpower/.

林振智(1979—),男,博士,现在博士后流动站从事研究工作,主要研究方向:电力系统恢复及电力系统稳定控制。
E-mail: zhenzhi.lin@gmail.com

文福拴(1965—),男,通信作者,特聘教授,博士生导师,主要研究方向:电力市场及电力系统故障诊断与系统恢复。
E-mail: fushuan.wen@gmail.com

周浩(1963—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力市场。E-mail: zhouhao_ee@zju.edu.cn

A New Algorithm for Restoration Subsystem Division Based on Community Structure of Complex Network Theory

LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, ZHOU Hao
(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The bottom-up strategy is one of the most important and indispensable restoration approaches for ensuring fast power supply restoration to end users. Reasonably dividing restoration subsystems is an essential step for speeding up the restoration procedure with the bottom-up strategy. Based on the community structure of the complex network theory, a new algorithm for dividing restoration subsystems is proposed. The locations of black-start units and the characteristics of the power grid are taken into account in the algorithm. Then, the modularity index is employed to evaluate the rationality of the division results, and the sequence of interconnecting the subsystems could be determined according to the sequence that every subsystem separates from the system in the divisive process. Some problems existing in the traditional methods, such as how to evaluate the rationality of the dividing results and how to sequentially interconnect the subsystems, could be solved by using the proposed algorithm. Finally, the New England 10-unit 39-bus system is employed to illustrate the essential features of the proposed algorithm.

This work is supported by the Program for New Century Excellent Talents in University of China (No. NCET-04-0818).

Key words: power system restoration; division of restoration subsystem; complex network theory; community structure; modularity index

附录 A 算例分析结果

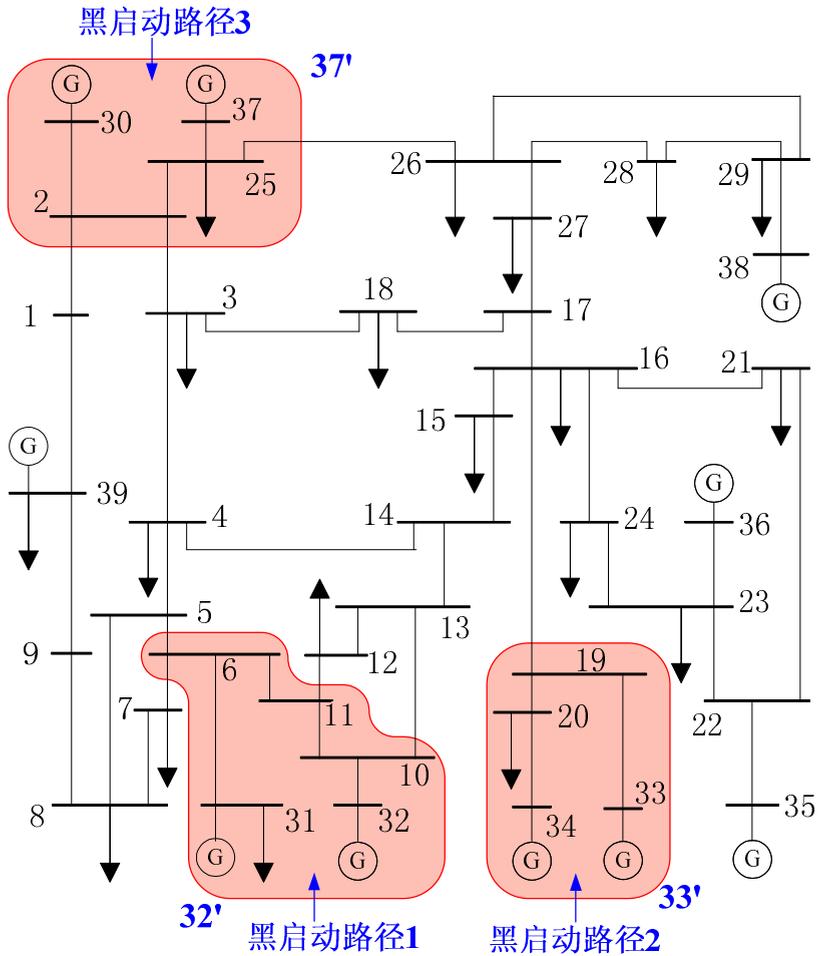


图 A1 新英格兰 10 机 39 节点系统
Fig. A1 New England 10-machine 39-bus power system

表 A1 黑启动路径上的节点合并结果
Table A1 Combination of the buses in black-start paths

黑启动路径	合并的节点号	合并后的新节点号
1	6, 10, 11, 31, 32	32'
2	19, 20, 33, 34	33'
3	2, 25, 30, 37	37'

表 A2 线路介数计算结果
Table A2 Results of edge betweenness

线路	介 数			
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次
1-37'	106.334	98.400	71.400	198
1-39	73	65.066	56.066	200
37'-3	146	246.466	120.466	73
37'-26	149.666	210.200	129.200	145
3-4	140.334	336.934	147.934	移 除
3-18	89.666	105.800	60.800	45
4-5	145.834	158.434	95.434	61
4-14	132.500	332.500	62.500	33
5-32'	52.334	56.466	56.466	50
5-8	87.834	96.300	51.300	119
32'-7	45.834	45.300	27.300	49
32'-12	21.500	23.500	23.500	33
32'-13	54.666	52	16	36
7-8	30.500	31.034	31.034	67
8-9	68.334	76.400	49.400	192
9-39	51	59.066	50.066	198
12-13	34.500	32.500	14.500	5
13-14	117.166	112.500	40.500	11
14-15	184.666	360	移 除	移 除
15-16	188.666	336	16	16
16-17	204.666	移 除	移 除	移 除
16-33'	56	56	16	16
16-21	140	140	20	20
16-24	140	140	20	20
17-18	85.666	65.800	38.800	23
17-27	145.666	37.134	28.134	29
21-22	100	100	20	20
22-23	16	16	16	16
22-35	56	56	16	16
23-24	100	100	20	20
23-36	56	56	16	16
26-27	133.666	50.200	41.200	57
26-28	52	52	34	34
26-29	104	104	68	68
28-29	4	4	4	4
29-38	56	56	38	38

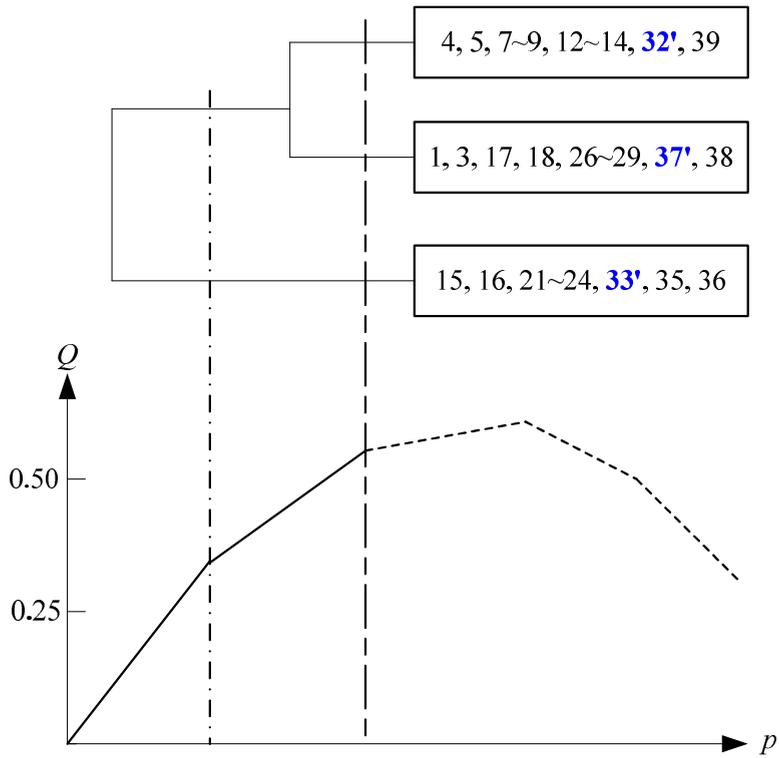


图 A2 社团结构的树状图及其对应的模块度分布
 Fig. A2 The dendrogram and modularity of the community structure

表 A3 恢复子系统划分结果
 Table A3 Division of the restoration subsystems

划分的子系统 编号	在新网络中 包含的节点号	在原网络中 包含的节点号	有功发电容量 (MW)	负荷的有功功率 (MW)
1	4, 5, 7~9, 12~14, 32', 39	4~14, 31, 32, 39	2995.55	2377.50
2	15, 16, 21~24, 33', 35, 36	15, 16, 19~24, 33~36	2750.00	2159.10
3	1, 3, 17, 18, 26~29, 37', 38	1~3, 17, 18, 25~30, 37, 38	1920.00	1613.50