基于加权复杂网络模型的恢复路径优化方法

林振智，文福拴
（华南理工大学电力学院，广东省广州市 510640）

摘要：输电网络重构是电力系统大停电或部分停电后进行恢复的第 2 个阶段，如何确定恢复的目标骨架网络及其恢复路径序列是该阶段的主要任务。文中提出了一种新的基于加权复杂网络模型的输电网络重构优化算法，考虑了节点有功发电出力和有功负荷（特别是重要负荷）的大小以及各节点在网络中的分布情况和重要性程度，并利用了加权复杂网络模型中衡量网络枢纽性的介数指标来优化恢复路径。该算法可以得到最优的恢复路径序列和目标骨架网络，克服了现有方法在确定目标骨架网络和优化恢复路径序列这 2 个输电网络重构环节严重脱离的缺点，并在一定程度上解决了现有的恢复路径优化方法采用专家经验或分段寻优策略而无法得到最优解的问题。最后，以新英格兰 10 机 39 节点系统为例说明了所提出的方法的基本特征。

关键词：电力系统恢复；输电网络重构；复杂网络；介数
中图分类号：TM73

0 引言

为了加快系统大停电后的恢复速度，通常将整个电力系统划分为若干个子系统，然后对各个子系统同时进行恢复。每个恢复子系统内的输电网络重构优化问题包括 2 个重要环节：一是确定目标骨架网络；二是确定恢复到目标骨架网络的恢复路径序列[1]。到目前为止，国内外在优化目标骨架网络方面的研究开展得不多，发表的文献也较少，只有文献[1-2]研究了如何优化目标骨架网络，但对如何恢复到目标骨架网络亦即最优恢复路径序列没有进行研究。在恢复路径优化方面的研究成果较多。其中文献[3]采用了基于知识的专家系统来优化恢复路径。文献[4]提出了优化恢复路径的通用恢复动作法。文献[5]把网络重构分为串行恢复和并行恢复 2 个阶段来研究，并提出了串并行送电阶段路径优化算法[6]，适用于较复杂的电力系统，但该方法存在如下缺点：需要根据专家经验来判定重要负荷节点和发电厂节点；串行恢复阶段得到的优化路径只是分段最优；只考虑了线路充电电容对恢复的影响。

自 1998 年以来，复杂网络理论方面的研究不断加强[7]。随着该理论研究的不断深入，其在电力系统中的应用也逐步受到重视[8-9]。文献[10]应用加权复杂网络理论辨识电力系统脆弱线路，分析表明加权电网拓扑模型比无权网络模型更能反映节点的重要程度和实际电力系统的运行状况。另一方面，复杂网络的社团结构理论也逐渐被应用于解决电力系统问题[11]。社团结构的划分是通过不断移除介数最大的边来把 2 个或多个子网络从整个网络中划分出来。

在上述背景下，本文提出了一种新的基于加权复杂网络模型确定目标骨架网络和对恢复路径进行优化的方法。该方法可以确定目标骨架网络，同时也可以得到最优的恢复路径。解决了现有方法只能单独确定目标骨架网络或只能单独优化恢复路径序列的缺点，即克服了确定目标骨架网络和优化恢复路径序列这 2 个输电网络重构环节脱节的缺点，以及恢复路径序列优化时分段寻优的缺点。因此，本文方法适用于整个输电网络重构阶段，可以同时解决目标骨架网络确定和恢复路径序列优化这 2 个问题。

1 基于加权复杂网络模型的输电网络重构

在介绍输电网络重构优化方法之前，为了后面描述方便，先定义下面几个概念。

1）带电区域网络：是指由已充电的节点和线路组成的输电网络。在输电网络重构中，一般不关心带电区域内部具体有多少个节点以及这些节点间是通过哪些路径相连的，因此可以把它简单等效为一个电源点 S。

2）失电区域网络：是指由待充电的节点以及这些节点间的高压输电线路或变压器支路组成的输电

收稿日期：2008-08-11；修回日期：2008-11-27。
教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目（NCET-04-0818）。

网络。

3)候选恢复路径：是指由等效电源点(即带电区域网络)与失电区域网络的节点之间相连的所有高压输电线路或变压器支路。

4)冗余线路：在候选恢复路径中，如果存在一些候选恢复路径都与失电区域网络中的某一个节点相连，则相当于等效电源点 S 与该节点之间的多回路线路，故称这些候选恢复路径为准双回路线路或准多回路线路。为了缓解输电网络重构过程中充电电容过大引起的线路末端过电压问题，故只保留这些候选恢复路径中充电电容最小的一回线路，而把其他多回路线路从候选恢复路径集中予以剔除。这里，把被剔除的多回路线路称为冗余线路。

5)冗余节点：是指在网络重构过程中，某些没有带重要负荷且不是网络的重要联络节点的节点。

1.1　电力网络拓扑模型

用加权复杂网络的思想来研究电力网络特性时，首先需要将电力网络用抽象图来表示。下面介绍在输电网络重构优化研究中需要用到的简化原则。

1)本文的研究局限于高压输电网络。对于高压输电网络，当采取并行恢复策略时，在各个子系统内部可以实行串行路径恢复。此外，为了使恢复步骤尽量简单清晰，也忽略了发电厂和变电站的主接线。

2)把黑启动路径所包含的节点合并成为一个等效电源点 S，如果合并后存在冗余线路则应予以剔除；而对失电区域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则均抽象为网络中的节点，且不考虑接地点。

3)为了减少对地电容对恢复过程的影响，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。这样做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。

4)由于候选恢复路径是带有方向性的，即电能是由带电区域通过候选恢复路径向失电区域网络提供电能的，而失电区域网络中潮流的方向是可变的，故可将其视为双向边。综合起来看，本文所研究的网络应把它看成一个有向网络。

5)所有高压输电线路和变压器支路均抽象为网络中的加权边，边的权重为折算到同一电压等级下的输电线路或变压器支路的充电电容(对于没有充电电容值的线路或支路，可赋予一个很小的值)。

6)忽略高压输电线路和变压器支路的其他电气特性参数以及电压等级的不同[12]。

经过上述简化，电力网络就被抽象为一张有向加权的稀疏连通图。

1.2　加权边介数计算方法

在实际输电网络重构过程中，除网络拓扑结构外，待启动的发电机的有功发电容量和待恢复的重要有功负荷的量以及各节点在网络中的分布情况也对恢复过程有重要影响。传统的边介数计算方法是单纯从网络拓扑结构出发的，且视各个节点对之间的最短路径的权重相等并都为 1。这样，就不能反映从等效电源点到失电区域各节点之间输送电能的各条最短路径的重要性方面的不同，也不能反映待启动的发电机节点之间和待恢复的重要负荷节点之间的相对重要性及恢复的优先级。

为了反映节点之间的相对重要性，有必要给各个节点赋予不同的节点重要度。一般而言，在输电网络重构阶段，对于负荷节点主要关注的是其重要负荷量，故可以将节点上的重要负荷量作为该节点的权重；对于待启动的发电机节点，类似地可以将有功发电容量作为该发电机节点的权重，这样就使得发电机节点与负荷节点之间具有可比性。

为了反映待恢复供电的节点之间的分布情况(即与等效电源点的距离)，引入了最短路径长度来描述节点与带电区域网络之间的距离对恢复的影响，并以该最短路径经过的边的数目计算加权电网中输电路径的最短路径长度[10]，这样就既考虑了恢复过程中的充电过电压问题，又计及了输电网络重构过程中恢复路径上待合闸线路的数目对恢复速度的影响。实际网络的共性结构表明节点间的相互作用具有局部特性，即每个节点的影响力将随着拓扑距离的增大而迅速衰减。因此，结合复杂网络的信息传输效率的概念，假定等效电源点到待恢复节点的拓扑距离对所经过的候选恢复路径介数的影响力服从参数为 2 的指数衰减趋势。因此，候选恢复路径的加权边介数[8]计算公式如下：

$$B=\sum_{j\in V_d}\frac{C_j}{2^{d_{Sj}-1}} \tag{1}$$

式中：C_j 为节点 j 的重要度，即该节点上的重要负荷量或有功发电容量；d_{Sj} 为等效电源点 S 经过所选择的候选恢复路径到失电区域中任一点 j 的最短距离；V_d 为失电区域网络所包含的节点集合。

从式(1)可以看出：距离带电区域(即等效电源点)越远，节点负荷或发电容量对候选的恢复路径的影响(即起决定作用的程度)会逐步减弱。

虽然高压电力网络一般都是环网运行的，但是本文考虑的是加权拓扑网络，即用充电电容作为线路权重，因此节点对之间存在若干条等权重的最短路径的可能性很小。Newman 提出的边介数计算方

法视各个节点对之间的最短路径的权重相等，故不适用于加权边介数的计算。可采用传统的用于求取网络指定节点对之间最短路径的著名的 Dijkstra 算法来求取等效电源点到失电区域网络中各节点的最短路径，进而根据式(1)计算加权边介数。

1.3 输电网络重构优化方法

1.3.1 恢复路径的优化

在输电网络重构阶段，可以把整个恢复的网络分为已恢复供电的带电区域网络(即等效电源点)和待恢复供电的失电区域网络，而连接这 2 个网络的线路则为该时刻的候选恢复路径，因而选取一条候选恢复路径就相当于在这 2 个网络之间添加一条边。在优化恢复路径时，主要关注该时刻带电区域网络与失电区域网络之间候选恢复路径的介数，而不是失电区域网络内部边的介数。因此，本文的优化路径过程与社团结构的划分过程恰恰相反，故可用衡量网络枢纽性的边介数指标来优化恢复路径。

由于输电线路具有分布电容，其可能使得发电机产生自励磁现象，并使发电机机端和线路末端出现过电压，故一般优先恢复充电电容较小的线路。对于大停电或部分停电后的输电网络恢复问题，操作各线路所需的时间差别不大，而线路的充电电容则对路径恢复的优先顺序起着重要作用。这样，在恢复路径优化过程中可以把折算到同一电压等级下的输电线路充电电容作为网络拓扑模型中边的权重[5]，这与加权复杂网络模型相吻合。对于没有对地电容的变压器支路，可以将其看成理想支路，并假定其支路权值为一个很小的数。对于有载调压变压器，在输电网络重构过程中，可以通过调节分接头的位置，来降低变压器输出端的电压，以有利于其后充电空载线路。此外，为了降低高压输电线路的对地电容，对于双回线路一般先只投其中的一条，这样可以把双回线路视为一回线路看待。当从带电区域到失电区域的候选恢复路径中存在冗余线路时，可采用对双回路类似的处理方式剔除冗余线路。

除了恢复路径的充电电容对恢复过程有较大影响而必须考虑外，为了优先向重要的发电节点和负荷节点提供电能，还需要考虑发电机的有功发电容量和相关节点的重要有功负荷量以及各节点在网络中的分布情况对系统恢复的影响，只有这样，得到的优化结果才可能是最优的。

在社团结构的划分过程中，每次都是计算当前网络中所有线路的边介数，然后再移除介数最高的边。前已述及，优化恢复路径的过程与社团结构划分过程正好相反，因此在计算某条候选恢复路径的介数时，应把其余几条候选恢复路径暂时从带电区域网络与失电区域网络之间移除，这样就可以体现恢复该条路径对恢复后续阶段路径的影响。当采用这种方法得到了该阶段所有候选恢复路径的介数后，其中的介数最大者即为该阶段最优的候选恢复路径。这样，该优化问题的目标函数为：

$$\min B_l = \sum_{j \in V_d} \frac{C_j}{2^{d_{Sj}-1}} \tag{2}$$

式中：B_l 为候选恢复路径 l 的加权边介数，$l \in V_p$；V_p 为候选恢复路径的集合。

此外，当某一条候选恢复路径和其端点并入带电系统后，停电区域可能变成 2 个或多个不连通的区域。由于这些不连通区域必定与带电区域有路径相连，事实上这些路径为下一步优化过程中的候选恢复路径，因此停电区域中不连通区域的出现不会对下一步的恢复路径优化产生影响。

1.3.2 目标骨架网络的确定

目标骨架网络是网络重构要达到的最终状态，其应较为全面地覆盖电网中的重要厂站、枢纽节点和重要负荷节点，且包含在目标骨架网络中的线路的功率分布要比较合理[1]。

在实际输电网络重构过程中，发电机节点的有功发电容量和负荷节点的重要有功负荷量以及各节点在网络中的分布情况对输电网络重构也具有较大的影响。如果先优化目标骨架网络，之后再确定恢复到目标骨架网络的恢复路径序列，这样得到的结果一般不是最优的，因为这 2 个问题是相关的。可以考虑先优化恢复路径序列，使得每步得到的恢复路径序列为最优解，并剔除重构网络中的冗余线路，当重构网络中重要发电机节点和重要负荷节点都得到充电时，这时的树状网络即为目标骨架网络。

此外，目标骨架网络还必须满足运行要求，包括潮流计算的收敛性、节点电压限制以及线路或变压器的容量限制等。

1.3.3 优化算法的计算流程

综上所述，输电网络重构阶段的恢复路径优化和目标骨架网络确定的算法步骤如下：

1)对电力网络进行简化并表示为抽象图；

2)计算网络中候选路径的数目；

3)选取某条候选恢复路径 l；

4)断开其他候选恢复路径；

5)先用 Dijkstra 算法求出 d_{Sj}，再按式(1)计算该候选恢复路径的加权边介数 B_l；

6)选取另一条候选恢复路径，重复步骤 4，直到求得所有候选恢复路径的加权边介数为止；

7)对所有候选恢复路径的加权边介数进行排序，介数最大的即为首选恢复路径，其他恢复路径依

次为备选恢复路径；

8)对首选恢复路径进行充电，并将该路径在失电区域的端节点合并到带电区域(即等效电源点)之中，从候选恢复路径集合中移除该首选恢复路径，并将与首选恢复路径相连的无电的支路加入到候选恢复路径集中；

9)检查候选恢复路径集中是否有冗余线路，如果有则将其剔除；

10)回到步骤2，直到失电区域中所有重要发电机节点和带有重要负荷的节点都合并到带电区域中为止；

11)将各次迭代得到的首选恢复路径按序排列即得到最优的恢复路径序列；

12)连接计算得到的最优恢复路径序列，如此得到的树状网络即为目标骨架网络；

13)验证目标骨架网络是否满足运行要求，包括潮流计算的收敛性、节点电压限制以及线路或变压器的容量限制等，在系统恢复过程中，电压上下限和容量限制可以适当放宽，如果不满足运行要求，可调用最优潮流程序，调整各发电机组的出力或负荷功率(鉴于这方面已经有很成熟的方法，这里不再赘述)。

2　算例分析

以新英格兰10机39节点系统(见附录A图A1)为例来说明所提出的方法的有效性和合理性。假设黑启动发电机组位于节点33，其在黑启动阶段向位于节点34的非黑启动机组提供启动电源，路径为33→19→20→34；假定各个负荷节点的重要负荷量分别占其总负荷量的30%。附录A表A1列出了待启动发电机的有功发电容量数据，负荷节点的有功功率数据参见文献[13]。

首先，对算例系统进行简化，合并黑启动路径所包含的节点，即将节点19，20，33，34合并为等效电源点S。经简化后该系统就转化为一张具有36个节点和43条边的加权、有向连通网络。然后，计算各候选恢复路径的介数，各次迭代得到的计算结果如附录A表A2所示。

在第1次迭代时，只有黑启动阶段的恢复路径所经过的节点为带电区域，其他节点都为待恢复的失电区域。此时，候选恢复路径只有线路19-16，故该线路即为首选恢复路径，经计算得到该线路的介数为309.76。

由于后续每次迭代的流程一样，这里以第25次迭代为例进行介绍。这次的迭代结果如附录A表A2所示，此时带电区域网络由附录A图A2所示的阴影部分所覆盖的所有节点组成，失电区域网络则由剩下的节点组成。候选恢复路径共14条，即线路10-32，5-8，6-7，16-15，39-9，16-21，29-28，4-14，17-18，10-13，11-12，22-21，26-28，3-18。其中，线路17-18与3-18，16-21与22-21，29-28与26-28分别为准双回路线路，它们在本次迭代过程中分别对节点18，21，28充电，这些线路的充电电容如附录A表A3所示。经比较可知，线路17-18，16-21，29-28的充电电容较小，故将线路3-18，22-21，26-28从候选恢复路径集中移除。此时，候选恢复路径剩下11条，经计算得知线路10-32的介数是375，为其中的最高值。这样，本次迭代的最优结果为恢复线路10-32(即最优候选恢复路径为线路10-32)，其他候选恢复路径则为备选恢复路径。

经过32次迭代后，失电区域由节点9，13，14组成，候选恢复路径为线路8-9，9-39，10-13，12-13，4-14，15-14。由于失电区域中的节点上都没有负荷，可以认为这些节点为不重要的联络节点，故无需再进行优化，算法迭代结束。

从附录A表A2可以看出，系统的最优恢复路径依次为：19-16，16-24，24-23，23-36，23-22，22-35，16-17，17-27，27-26，26-25，25-2，2-1，1-39，25-37，26-29，29-38，2-30，2-3，3-4，4-5，5-6，6-31，6-11，11-10，10-32，5-8，16-15，16-21，8-7，29-28，17-18，11-12。这样，共恢复32条线路，对32个节点充电。由于节点9，13，14上没有带负荷，可认为是不重要的联络节点，在输电网络重构阶段不予充电，等到系统恢复的主要工作已经完成并开始形成环网时，再对其充电并网。

从迭代过程中可以看出，所提出的算法可以得到最优恢复序列，能够以充电电容较小的恢复路径优先对容量较大的重要的待启动发电机节点送电，在此过程中同时也计及了送电路径中的重要负荷节点。当所有重要的待启动发电机节点都得到启动电源后，再对剩余的重要负荷节点送电，在此过程中计及了重要负荷的量及其与带电区域网络的距离，负荷量大且距离较近的节点优先恢复供电。

在优化恢复路径的过程中，当重要发电机节点和重要负荷节点都被充电后，得到的网络即为目标骨架网络，如图1所示。从图中可以看出：运用所提出的算法优化得到的结果为剔除了冗余线路和节点后的一棵树，其即目标骨架网络；该目标骨架网络覆盖了待启动机组所在的节点、重要负荷节点以及连接这些节点的重要线路。剔除的冗余线路共有4条，即3-18，6-7，21-22，26-28；剔除的冗余节点共有3个，即节点9，13，14，同时也剔除了与这些冗余节

点相连的 7 条线路,即 8-9,9-39,10-13,12-13,13-14,4-14,14-15。

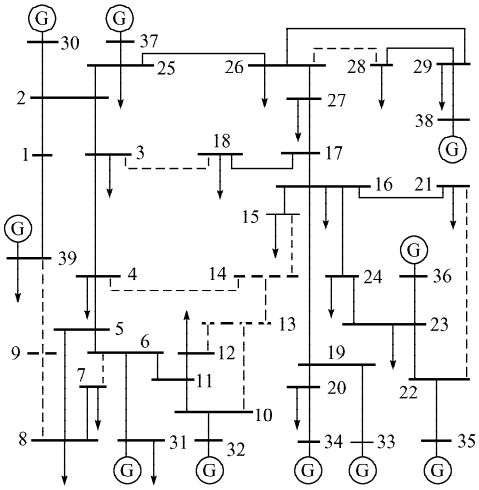

图 1 目标骨架网络

Fig. 1 Skeleton-network for reconfiguration

3 结语

采用加权复杂网络模型来优化恢复路径和确定目标骨架网络,能够计及发电机的有功发电容量和重要有功负荷的量及其分布情况,既可以得到最优恢复路径序列,也可以获得目标骨架网络。在所提出的方法中,每一步均按全过程寻优策略来优化恢复路径,在每个阶段不仅考虑了线路充电电容对恢复的影响,而且也考虑了某条线路的恢复对后续恢复工作所产生的影响。克服了现有方法在优化恢复路径时采用分段寻优和存在人为主观因素的缺点,解决了传统方法只能给出目标骨架网络或只能提供恢复路径序列,即这 2 个输电网络重构环节严重脱离的问题。本文的工作从理论上为制定输电网络重构方案提供了一种新途径。

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

参考文献

[1] 魏智博,刘艳,顾雪平. 基于 DPSO 算法以负荷恢复为目标的网络重构. 电力系统自动化,2007,31(1):38-42.
WEI Zhibo, LIU Yan, GU Xueping. DPSO algorithm based network reconfiguration of power systems for maximizing load recovery efficiency. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 38-42.

[2] LIU Yan, GU Xueping. Skeleton-network reconfiguration based on topological characteristics of scale-free networks and discrete particle swarm optimization. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3): 1267-1274.

[3] PARK Y M, LEE K H. Application of expert system to power system restoration in sub-control center. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 629-635.

[4] WU J S, LIU C C, LIOU K L, et al. A Petri net algorithm for scheduling of generic restoration actions. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 69-76.

[5] 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.

[6] 周云海,胡翔勇,罗斌. 基于案例推理的大停电恢复系统设计. 电力系统自动化,2007,31(18):87-90.
ZHOU Yunhai, HU Xiangyong, LUO Bing. Design of a case-based reasoning system for power system restoration. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 87-90.

[7] 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.

[8] 曹一家,陈晓刚,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识. 电力自动化设备,2006,26(12):1-5,31.
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5, 31.

[9] 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.

[10] 丁明,韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估. 中国电机工程学报,2008,28(10):20-25.
DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25.

[11] 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.

[12] 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.

[13] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, GAN Deqiang. A MATLAB power system simulation package [EB/OL]. [2008-07-02]. http://www.pserc.cornell.edu/matpower/.

林振智(1979—),男,博士研究生,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:电力系统故障诊断与系统恢复和电力市场。E-mail: fushuan.wen@gmail.com

(下转第 103 页 continued on page 103)

(上接第 15 页　continued from page 15)

A New Optimization Method for Determining Restoration Paths Based on Weighted Complex Network Model

LIN Zhenzhi, *WEN Fushuan* (South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The transmission-network reconfiguration is the second step of power system restoration after a complete blackout or a local outage. The most important issues in this step are to determine the optimal skeleton-network for reconfiguration and to optimize the sequence of restoration paths. Based on the weighted complex network model, a new transmission-network reconfiguration method is presented. The generation capacity of non-black-start generators and that of the important loads, as well as the distribution and importance degree of each bus, are taken into account in the proposed method. The weighted edge betweenness, which reflects the importance of each edge in the network interconnection, is employed to direct the optimization of restoration paths, and the global optimal sequence of restoration paths could then be obtained. The optimal skeleton-network in which important generation and load buses are included could also be obtained. Hence, the problem associated with the existing methods in which the restoration paths and the skeleton-network are separately optimized could then be solved at least to some extent by using the proposed method. The shortcomings of the existing methods for optimizing restoration paths based on the experience of experts or the section-searching strategy could be overcome. Finally, the New England 10-unit 39-bus system is employed to illustrate the essential features of the proposed method.

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; transmission network reconfiguration; complex network theory; betweenness

附录 A　算例分析数据与结果

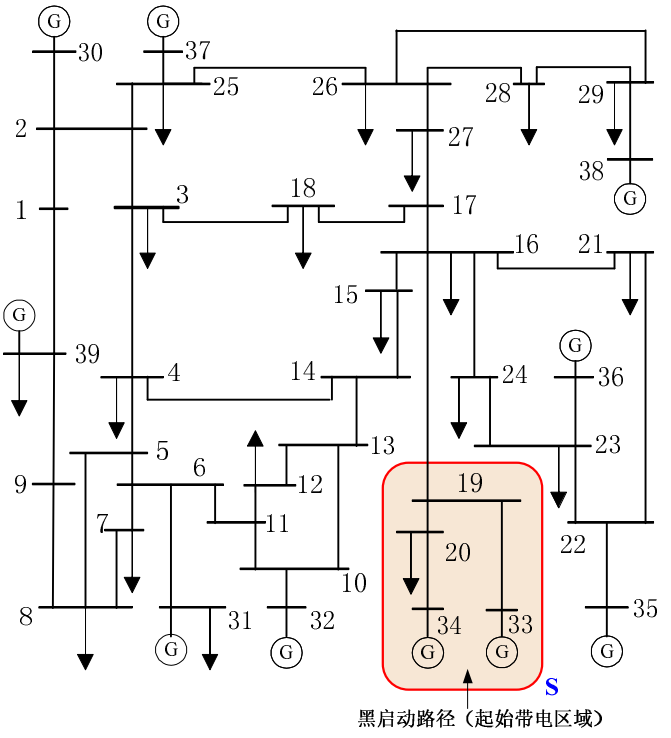

图 A1　新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig.A1　The New England 10-unit 39-bus power system

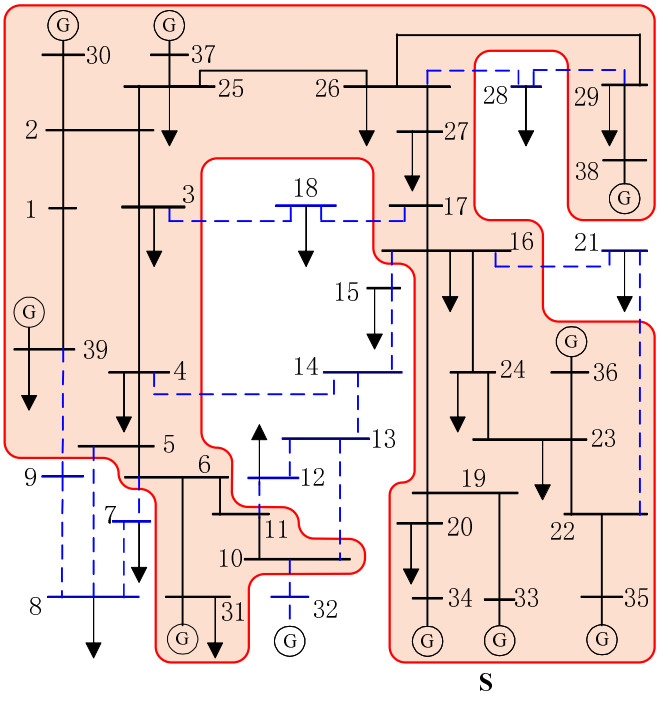

图 A2 第 25 次迭代时的恢复网络

Fig. A2　Restoration network in the 25th iteration

表 A1　待启动发电机的有功发电容量

Table A1　Generation capacities of generators to be activated

节点号	有功发电容量（MW）	节点号	有功发电容量（MW）
30	350.00	36	660.00
31	1145.55	37	640.00
32	750.00	38	930.00
35	750.00	39	1100.00

表 A2　每次迭代得到的结果

Table A2　Results obtained in each iteration

序号	候选恢复路径	
	最优路径（介数）	备选路径（介数）
1	19-16 (309.76)	————
2	16-24 (199.37)	16-21 (191.17)　16-17 (159.64)　16-15 (137.00)
3	24-23 (306.15)	16-21 (185.38)　16-17 (159.64)　16-15 (137.00)
4	23-36 (330)	23-22 (208.05)　16-17 (159.64)　16-15 (137.00)　16-21 (134.85)
5	23-22 (208.05)	16-17 (159.64)　16-15 (137.00)　16-21 (134.85)
6	22-35 (375)	16-17 (159.64)　16-15 (137.00)　16-21 (41.10)
7	16-17 (159.64)	16-15 (137.00)　16-21 (41.10)
8	17-27 (220.96)	17-18 (202.41)　16-15 (138.02)　16-21 (41.10)
9	27-26 (357.63)	17-18 (201.10)　16-15 (137.69)　16-21 (41.10)
10	26-25(367.63)	26-29(290.48)　17-18(190.23)　26-28(168.41)　16-15(134.98)　16-21(41.10)
11	25-2(348.06)	25-37(320)　26-29(290.48)　26-28(168.41)　17-18(166.03)　16-15(128.93)　16-21(41.10)
12	2-1(383.88)	25-37(320)　26-29(290.48)　2-3(185.68)　2-30(175)　26-28(168.41)　16-15(123.46)　17-18(110.61)　16-21(41.10)
13	1-39(767.77)	25-37(320)　26-29(290.48)　2-3(185.68)　2-30(175)　26-28(168.41)　16-15(123.46)　17-18(110.61)　16-21(41.10)
14	25-37(320)	26-29(290.48)　2-30(175)　26-28(168.41)　2-3(163.31)　16-15(112.28)　39-9(104.34)　17-18(99.43)　16-21(41.10)
15	26-29(290.48)	2-30(175)　26-28(168.41)　2-3(163.31)　16-15(112.28)　39-9(104.34)　17-18(99.43)　16-21(41.10)
16	29-38(465)	2-30(175)　2-3(163.31)　16-15(112.28)　39-9(104.34)　17-18(99.43)　16-21(41.10)　29-28(30.90)
17	2-30(175)	2-3(163.31)　16-15(112.28)　39-9(104.34)

		17-18(99.43)	16-21(41.10)	29-28(30.90)	
18	2-3(163.31)	16-15(112.28) 16-21(41.10)	39-9(104.34) 29-28(30.90)	18(99.43)	
19	3-4(206.33)	16-15(104.76) 29-28(30.90)	39-9(100.58) 17-18(23.70)	16-21(41.10)	
20	4-5(215.80)	4-14(91.46) 16-21(41.10)	39-9(89.89) 29-28(30.90)	16-15(81.73) 17-18(23.70)	
21	5-6(372.88)	5-8(179.78) 16-15(81.73) 17-18(23.70)	4-14(91.46) 16-21(41.10)	39-9(89.89) 29-28(30.90)	
22	6-31(574.16)	6-11(97.39) 16-15(71.60) 16-21(41.10)	5-8(95.84) 4-14(71.19) 29-28(30.90)	6-7(74.22) 39-9(47.92) 17-18(23.70)	
23	6-11(97.39)	5-8(95.84) 4-14(71.19) 29-28(30.90)	6-7(74.22) 39-9(47.92) 17-18(23.70)	16-15(71.60) 16-21(41.10)	
24	11-10(193.82)	5-8(95.84) 4-14(71.19) 16-21(41.10)	6-7(74.22) 11-12(54.15) 29-28(30.90)	16-15(71.60) 39-9(47.92) 17-18(23.70)	
25	10-32(375)	5-8(95.84) 39-9(47.92) 4-14(24.32) 11-12(7.28)	6-7(74.22) 16-21(41.10) 17-18(23.70)	16-15(48.16) 29-28(30.90) 10-13(12.64)	
26	5-8(95.84)	6-7(74.22) 16-21(41.10) 17-18(23.70)	16-15(48.16) 29-28(30.90) 10-13(12.64)	39-9(47.92) 4-14(24.32) 11-12(7.28)	
27	16-15(48.16)	16-21(41.10) 4-14(24.32) 11-12(7.28)	8-7(35.07) 17-18(23.70) 8-9(0)	29-28(30.90) 10-13(12.64)	
28	16-21(41.10)	8-7(35.07) 11-12(1.28)	29-28(30.90) 10-13(0.64)	17-18(23.70) 4-14(0.32)	8-9(0)
29	8-7(35.07)	29-28(30.90) 10-13(0.64)	17-18(23.70) 4-14(0.32)	11-12(1.28) 8-9(0)	
30	29-28(30.90)	17-18(23.70) 4-14(0.32)	11-12(1.28) 8-9(0)	10-13(0.64)	
31	17-18(23.70)	11-12(1.28)	10-13(0.64)	4-14(0.32)	8-9(0)
32	11-12(1.24)	10-13(0.64)	4-14(0.32)	8-9(0)	
33	————	12-13(0)	4-14(0)	8-9(0)	

表 A3　线路充电电容比较表

Table A3　Comparisons of the charging capacitances of lines

准双回路线路	线路充电电容（p.u.）
17-18	0.1319
3-18	0.2138
29-28	0.2490
26-28	0.7802
16-21	0.2548
22-21	0.2565