

用于网架重构决策的节点重要度动态评价方法

顾雪平, 李少岩, 李 凯

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 针对网架重构过程中, 待恢复节点的拓扑重要性随网络逐步恢复而发生变化的特点, 提出一种节点拓扑重要性的动态评价指标——动态节点重要度。在重构决策中, 基于当前系统恢复状态, 通过将已恢复节点合并成一个等效电源点, 构造包含及不包含等效电源点的 2 个待恢复网络, 综合考虑待评价节点的收缩对 2 个网络的影响, 计算出待评价节点的动态节点重要度指标。在此基础上, 将所定义的动态节点重要度指标用于网架重构中机组恢复的路径优化问题。新英格兰 10 机 39 节点系统算例验证了所提动态节点重要度评价指标及路径优化方法的有效性。

关键词: 黑启动; 网络重构; 动态节点重要度; 路径优化

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.013

0 引言

2000 年以来世界各国电网发生过多起大停电事故, 如 2003 年的美加“8·14”大停电、2006 年的“11·4”欧洲多国大停电、2008 年我国南方极端冰雪天气导致的大停电和 2012 年印度“7·30”大停电, 给电力系统安全稳定运行敲醒了警钟^[1-3]。特别是近期电网信息安全问题日益严峻, 更增大了电力系统大停电风险, 如 2015 年 12 月 23 日, 乌克兰电网公司 EMS 受到包括恶意软件“BlackEnergy”在内的多种网络手段攻击, 引发大范围停电^[4]; 2016 年 1 月 15 日, 以色列电力局遭受了严重的网络攻击^[5]。大停电事故的风险时刻存在, 作为电力系统安全防御的关键问题, 电力系统恢复具有重要的研究价值和巨大的现实意义。

大停电后的系统恢复过程, 涉及系统运行控制的诸多方面, 恢复过程一般要经历黑启动、网架重构和负荷恢复 3 个阶段^[6-8]。其中网架重构的主要目标是尽快给失电站送电并建立一个相对稳定的网架, 为后续的负荷全面恢复奠定基础, 这是承前启后的关键环节。文献[9]对恢复控制中的系统重构算法进行了较为系统的研究, 将网络重构划分为“串行”和“并行”2 个恢复阶段, 并给出了相应的送电路径寻优算法, 但其路径优化仅计及了线路充电电容最小化。文献[10]提出以节点收缩后的网络凝聚度定量评价电网节点的重要性, 并在此基础上进行目标网架的优化确定, 但未涉及网架重构的具体恢复过程。

文献[11]提出了一种基于加权复杂网络模型的路径优化方法, 研究了骨架网络的逐步形成过程中的支路优选问题, 但评价节点重要度时仅计及了未恢复节点的发电容量和重要负荷量, 并未考虑网络的拓扑特性。文献[12]研究了节点间的供电关系, 提出一种基于后悔思想的节点重要度评价方法, 该方法本质上是一种节点删除法, 使用节点删除前后对局部网络拓扑连通性能变动的大小来对节点的重要度进行评价。文献[13]使用一种基于重要度评价矩阵的方法来评判网络中节点重要度, 该方法在一定程度上综合了节点的全网重要性和局部重要性。但需要指出的是, 已有方法中节点重要度计算方法均是基于恢复前网络的“静态”评价方法^[10,12-15]。然而, 大停电后的系统恢复一般为多个时段次序进行的复杂过程, 采用“静态”的节点重要度评价方法, 无法反映已恢复区域的逐渐扩展对待评价节点重要度的影响, 进而会影响其在实际系统恢复过程中的应用效果。

针对现有节点重要度评价方法存在的问题, 本文研究了系统重构过程对未恢复节点重要度评价的影响, 提出了一种计及节点恢复状态的节点重要度评价指标——动态节点重要度。在进行下一时段的恢复决策时, 基于当前系统恢复状态, 构造仅含失电节点的待恢复网络和包含等效电源点的待恢复网络。基于文献[10]提出的节点收缩概念, 计算待评估节点收缩对构造网络的影响, 综合两方面因素得到动态节点重要度评价指标, 从而实现待恢复节点重要度的动态评价。之后, 针对网架重构过程中机组并行恢复的路径优化问题, 提出了综合考虑平均动态节点重要度最大、充电无功最小的路径优化决策方法。新英格兰 10 机 39 节点算例验证了所提节点重要度评价方法及发展的路径优化决策方法的有效性。

收稿日期: 2016-05-19; 修回日期: 2017-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277076); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014XS75)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277076) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014XS75)

1 动态节点重要度

1.1 传统的节点重要度评价方法

在一般网络中,节点所连接边的数目称为节点度数。在网络拓扑结构研究中,可以以节点度数衡量节点重要度,即认为与某节点直接相连的边越多则该节点越重要。但通过对电力网络拓扑结构的研究发现,某些关键节点并不一定具有较大的度数,故文献[10]提出,以节点收缩后的网络凝聚度来评价节点的重要度。为说明节点收缩过程,以图 1(a)所示 12 节点系统中的节点 3 为例。节点 3 收缩是指将与节点 3 直接相连接的节点合并,并以图 1(b)中的新节点 3' 代替。

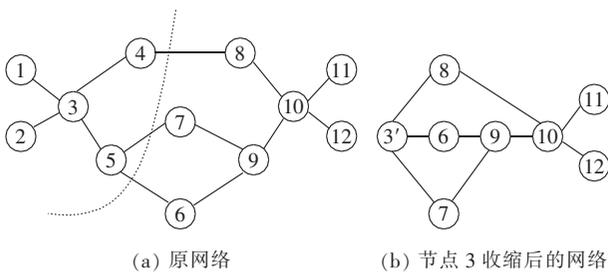


图 1 节点收缩示意

Fig.1 Schematic diagram of node contraction

则按照文献[10]中定义,节点 i 收缩后的网络凝聚度即节点 i 的重要度 α_i 定义如下:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_i &= \frac{1}{n_i l_i} \\ l_i &= \frac{\sum_{j,k \in V_i} d_{\min,jk}}{n_i(n_i-1)/2} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

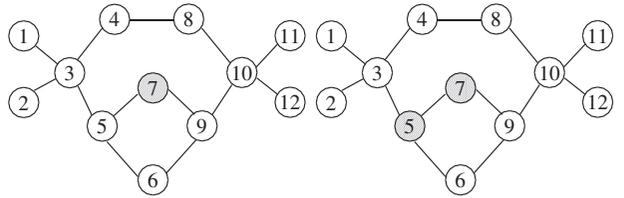
其中, n_i 为节点 i 收缩后网络中的节点数目; l_i 为收缩后网络中节点之间的平均最短路径; $d_{\min,jk}$ 为用边的数目表示的网络中任意两点 j 和 k 之间的最短距离; V_i 为收缩后的网络中所有节点组成的集合。

若节点处在网络的枢纽位置,则收缩后得到的网络 n_i 和 l_i 就越小,重要度越高。即以节点收缩后的网络凝聚度来评价节点重要度可以找到那些度可能不大,但处在网络“要塞”位置的关键节点。

实际大停电后的电力系统恢复,一般是一个分阶段实现的过程。在系统逐步恢复过程中,随着带电区域的扩展,待恢复节点对网架重构的重要性也会随之发生改变。但文献[10]所提方法,针对恢复前整个网络计算节点重要度,未计及已恢复区域对待恢复节点重要性的影响,故计算得出的节点重要度是静态指标。

以图 2 为例说明文献[10]方法的不足。在图 2(a)中,假设初始时刻除节点 7 带电外,其他节点均为失电状态。此时按照文献[10]所提方法计算节点 3 和节点 10 的节点重要度值,由于网络结构的对称性,节点 3 和节点 10 的节点重要度值应该相同。但随着恢复过程的推进,当节点 5 通过节点 7 恢复并带

电后,见图 2(b),对于待恢复的网络部分而言,显然节点 3 与节点 10 对网架重构的重要性应该是不同的。由于文献[10]方法中重要度指标是针对整个网络计算的,故无法处理当前电网各节点带电状态的差异对待恢复节点的重要性评价带来的影响。



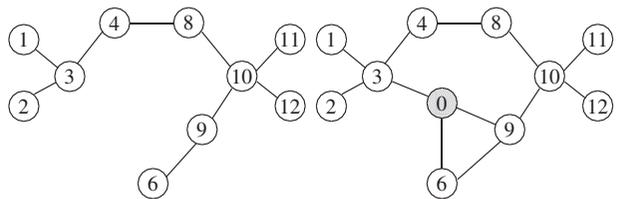
(a) 节点 7 带电的原网络 (b) 节点 5 和节点 7 带电的原网络

图 2 恢复过程给节点重要度带来的影响

Fig.2 Effect of restoration process on nodal importance

1.2 动态节点重要度

实际恢复过程中,在当前恢复状态下进行下一步恢复决策时,需要将网络的已恢复部分和待恢复部分进行区分,以已恢复部分作为电源点,评价待恢复节点对后续网架重构的重要性。本文仍采用文献[10]的节点收缩法来评价待恢复节点的重要度。首先区分带电区域与待恢复区域,构造待恢复区域的网络图。图 3(a)为图 2(b)去除已恢复节点的待恢复网络,图 3(b)为将已恢复节点合并成一个电源点 0 后的网络图。



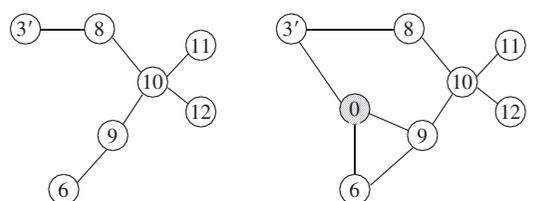
(a) 带电节点移除后的网络 (b) 带电节点收缩后的网络

图 3 动态节点重要度计算方法示意

Fig.3 Schematic diagram of dynamic importance calculation for node

现在以网络中节点 3 为例,说明本文动态节点重要度的计算方法。基于节点收缩的原理,将图 3(a)、(b)中的节点 3 与其相邻的待恢复节点进行合并,得到图 4(a)和图 4(b)。

在图 4(b)中,节点 3 收缩时,只合并待恢复的



(a) 图 3(a)网络中节点 3 收缩后的网络

(b) 图 3(b)网络中节点 3 收缩后的网络

图 4 节点 3 动态节点重要度计算方法示意

Fig.4 Schematic diagram of dynamic importance calculation for Node-3

相邻节点,等效电源点 0 仍然保留。基于图 4,待恢复节点 3 的动态节点重要度 α_{D3} 定义如下:

$$\begin{aligned}\alpha_D &= \underline{\alpha} + \frac{N_{en}}{N} (\bar{\alpha} - \underline{\alpha}) \\ \underline{\alpha} &= 1/(\underline{n}\underline{l}) \\ \underline{l} &= \sum_{\substack{i,j \in \underline{V} \\ d_{\min,ij} < \inf}} d_{\min,ij} / \underline{n}_{\text{bounded}} \\ \bar{\alpha} &= 1/(\bar{n}\bar{l}) \\ \bar{l} &= \sum_{\substack{i=0, j \in \bar{V} \\ j \neq i}} d_{\min,ij} / (\bar{n}-1)\end{aligned}\quad (2)$$

其中,带有下列划线的变量代表数据来自图 4(a),带有所划线的变量来自图 4(b),为了表达简便,各变量中代表待评价节点号的下标被省略; N 为图 2(b)所示原网络中节点数目; N_{en} 为原网络中带电节点数目; $\underline{\alpha}$ 表征失电区域待评价节点收缩后的网络凝聚度,由于随着恢复过程的进行,可能出现失电孤岛,故在计算中剔除从属于不同孤岛的节点对的影响; \underline{V} 为图 4(a)中所有节点组成的集合; \underline{n} 为 \underline{V} 集合中元素个数; \underline{l} 为图 4(a)所示网络中节点之间的平均最短路径; $d_{\min,ij}$ 定义同式(1),且需满足 $d_{\min,ij} < \inf$; $\underline{n}_{\text{bounded}}$ 为最短路径存在的节点对数,当带电节点去除不会使原图产生失电孤岛时,有 $\underline{n}_{\text{bounded}} = \underline{n}(\underline{n}-1)/2$; $\bar{\alpha}$ 表征待评价节点收缩后失电区域到等效带电点的“有向凝聚度”; \bar{V} 为图 4(b)中所有节点组成的集合; \bar{n} 为 \bar{V} 集合中元素的个数; \bar{l} 为图 4(b)所示网络中各节点到等效带电节点的平均最短路径。

需要指出的是,系统恢复初期,带电区域规模较小,此时主要任务是为主力发电厂建立送电路径,由于送电路径一般较长(以途经节点数目表征),通过较多失电节点接力式恢复将电能送达恢复目标,因此应着重关注待评价节点收缩对于失电网络凝聚度的影响;而随着网架的逐渐恢复,已恢复机组的增多,系统调节能力也逐渐增强,此时系统已逐渐具备向负荷节点供电的能力,因此调度员更加关注待评价节点收缩是否有利于后续各失电节点从带电边界获取电源。故 $\underline{\alpha}$ 与 $\bar{\alpha}$ 权重系数分别为 $(N-N_{en})/N$ 和 N_{en}/N , 即有 $\alpha_D = \underline{\alpha} + \frac{N_{en}}{N} (\bar{\alpha} - \underline{\alpha})$ 。

按照上述动态节点重要度计算方法,分别计算此时节点 3 和节点 10 的节点重要度值及动态节点重要度值,结果如表 1 所示。

表 1 节点 3 与节点 10 2 种节点重要度评价方法对比
Table 1 Comparison of nodal importance between two assessment methods for Node-3 and Node-10

评价节点	节点重要度 α	$\underline{\alpha}$	$\bar{\alpha}$	α_D
3	0.0673	0.0682	0.0673	0.0675
10	0.0673	0.0781	0.0952	0.0924

在图 2(b)中,以节点 7 为电源,恢复节点 5 之

后,带电区域逐渐扩大,此时节点 3 和节点 10 的重要度也应随之发生变化。由表 1 可知,传统重要度指标不能反映此时两节点重要度的差别。而动态节点重要度则可以弥补这一不足,且有 $\alpha_{D10} > \alpha_{D3}$ 。由图 3 不难看出,节点 10 与节点 3 相比,处在失电部分的中心地带,故相比较而言,节点 10 的恢复更利于带电网架的铺开,加速后续恢复进程。可见,动态节点重要度可以用于指导网架重构中目标节点的评价和选择,满足恢复过程中对节点重要度评估的实际需求。

2 基于动态节点重要度的路径优化

网架重构阶段的主要恢复目标是尽快给失电电厂站送电并建立一个稳定的网架,为下一阶段负荷的全面恢复打下基础。而网架的逐步建立,其关键是在每一时步中优化送电路径。若仅考虑充电无功最小化,路径优化问题为典型的局部最小树问题,文献[16]和文献[17]分别给出了基于遗传算法和最短路径算法的求解思路。系统恢复初期无功问题突出,但随着机组恢复进程的推进,系统无功调节能力增强,期望优化得到的路径在保持系统稳定运行的同时,能更有利于后续恢复过程。因此,本文提出一种基于动态节点重要度的路径优化决策方法,首先搜索确定满足约束条件的路径集合,其次以最小化充电无功、最大化动态节点重要度为目标,确定最优恢复路径。

2.1 送电路径方案搜索

文献[18]对系统恢复中黑启动阶段的恢复路径需满足的运行约束进行归纳总结,提出了扩展黑启动方案中黑启动电源到各被启动电厂途径厂站数目不宜超过 8 个的假定。而在实际的机组恢复方案制定过程中,由于一次设备的操作需要时间且有一定失败风险,送电路径途径变电站的个数亦不宜过大^[19],距离已恢复区域过远的电厂可以安排到后续恢复过程。

假定将研究电网转化为一正费用无向连通图 $G=(V,E)$,其中 V 为代表厂站的点集, E 为代表支路的边集,在边集 $E(G)$ 上定义一费用函数 $f: E(G) \rightarrow \mathbf{Z}^+$ (根据工程实际,其值取为考虑高抗或者抵抗补充后本线路在额定电压下的剩余充电功率)。本时步之初已恢复的节点和线路集合分别为 V_{en} 和 E_{en} ,本时步需要为若干未恢复电厂节点 $v_{iNBS} (v_{iNBS} \in V_{NBS}, i=1,2, \dots, N_{NBS}, N_{NBS}$ 为当前待恢复电厂节点集合 V_{NBS} 中元素的个数)优化恢复路径,调度员根据当前系统恢复状态,给定的路径深度为 D_{\max} 。则路径搜索算法描述如下。

步骤 1: 将电网中已恢复节点 V_{en} 收缩为一等效电源点 v_{en} ,收缩过程中,若存在一个失电节点通过多条支路与带电节点相连的情况,只保留充电无功最小的一条支路。

步骤 2: 搜索确定等效带电点 v_{en} 到本时步各被启动电厂节点 v_{iNBS} 距离满足 $D_{en-NBS} \leq D_{max}$ 的路径集合, 路径用线路编号描述, 组成集合 R_i (若路径 $r \in R_i$, 则有 $r \in E - E_{en}$, 即 r 既为路径方案集合的元素, 又是部分失电支路组成的集合)。

步骤 3: 置循环次数 $m=2$, $R_{tmp2}=R_1$, 其中 R_{tmp2} 为连通等效电源点 v_{en} 与前 m 个待恢复节点 (v_{1NBS} , $v_{2NBS}, \dots, v_{mNBS}$) 的树状路径集合, 若 $N_{NBS}=1$ 则转到步骤 5。

步骤 4: 计算集合 R_{tmp2} , 首先计算笛卡尔积 $R_{tmp1}=R_{tmp2} \times R_m = \{ \langle r_{tmp2}, r_m \rangle | (r_{tmp2} \in R_{tmp2}) \wedge (r_m \in R_m) \}$, 然后通过映射 $g: R_{tmp1} \rightarrow R_{tmp2}$, $\forall \langle r_1, r_2 \rangle \in R_{tmp1}, g(\langle r_1, r_2 \rangle) = r_1 \cup r_2$ 得到新的 R_{tmp2} , 最后删除集合 R_{tmp2} 中含有环结构的路径, 完成更新。

步骤 5: 令 $m=m+1$, 若 $m \leq N_{NBS}$, 则转到步骤 4, 否则子树集合 $\Gamma=R_{tmp2}$ 即为送电路径方案集。

2.2 送电路径方案的优化决策

路径的优化决策应该计及送电路径的传输功率能力大小、途经节点的节点类型和重要负荷量等多个方面^[11, 18, 21-22]。由于本文对路径优化决策的研究主要服务于动态节点重要度有效性的证明, 故路径评价只计及充电无功、平均动态节点重要度 2 个关键指标。选取充电无功小的送电路径, 可以减少为平衡系统无功而被迫投入的负荷量, 加快系统恢复进程。此外, 根据本文第 1 节的讨论可知, 网络逐步重构过程中, 各节点的动态节点重要度不尽相同, 这使得送电路径的选取具有很强的后效性。由于路径恢复一般需要大量一次设备操作, 故最优送电路径应以尽量少的操作恢复尽量多的重要节点, 因此选取平均动态节点重要度作为路径优选指标。两指标定义如下:

$$\begin{cases} f_{l1} = \sum_{i=1}^N c_i^1 Q_i \\ f_{l2} = \sum_{j=1}^N c_j^2 \alpha_{Dj} / \sum_{j=1}^N c_j^2 \end{cases} \quad (3)$$

其中, f_{l1} 表征某送电路径方案无功指标; f_{l2} 表征该送电路径的平均动态节点重要度指标; N_1 为全网支路总数; c_i^1 表示该送电路径是否包含路径 i , 包含为 1, 否则为 0; Q_i 为线路 i 的充电无功功率; c_j^2 表示该送电路径是否经过节点 j , 经过为 1, 否则为 0; α_{Dj} 为节点 j 的动态节点重要度。

对于送电路径备选方案集 Γ , 定义综合评价指标 f_L :

$$f_L = \beta \frac{f_{L1} - \min_{j \in \Gamma} f_{L1,j}}{\max_{j \in \Gamma} f_{L1,j} - \min_{j \in \Gamma} f_{L1,j}} + (1-\beta) \frac{\max_{j \in \Gamma} f_{L2,j} - f_{L2}}{\max_{j \in \Gamma} f_{L2,j} - \min_{j \in \Gamma} f_{L2,j}} \quad (4)$$

其中, β ($\beta \in [0, 1]$) 为折中系数, 表征综合指标中两指标所占比重。采用主观赋权法, 由调度人员结合系统

恢复状态和恢复目标, 根据经验确定对应的 β 值。则计算各方案综合评价指标 f_L 值最大的便是最优送电路径, 其余为次优备选方案。

本文提出的网架重构阶段机组恢复的路径优化流程如图 5 所示。

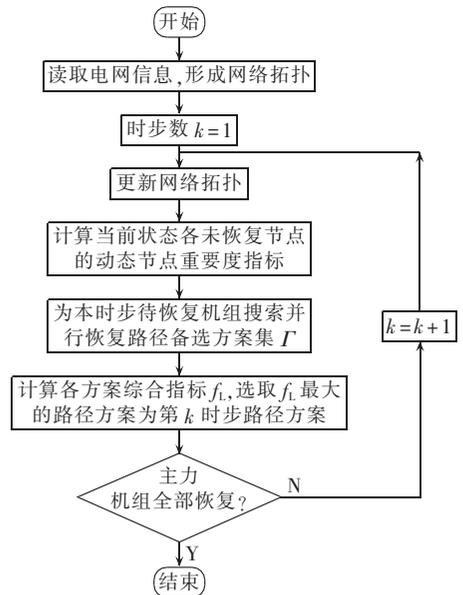


图 5 机组恢复路径优化流程图

Fig.5 Flowchart of unit restoration path optimization

3 算例分析

以文献[20]给出的机组恢复方案为例说明本文提出的动态节点重要度指标和路径优化方法的有效性, 新英格兰 10 机 39 节点系统节点和线路编号如图 6 所示。其中, 节点 33 为水电机组, 被选定为黑启动机组, 其他机组均为火电机组。机组额定功率、启动功率等参数详见文献[20]。假设系统全部停电, 以 33 号机组为黑启动电源, 调度员期望以 4 个时步完成系统主力火电机组的恢复, 且优化确定的机组恢

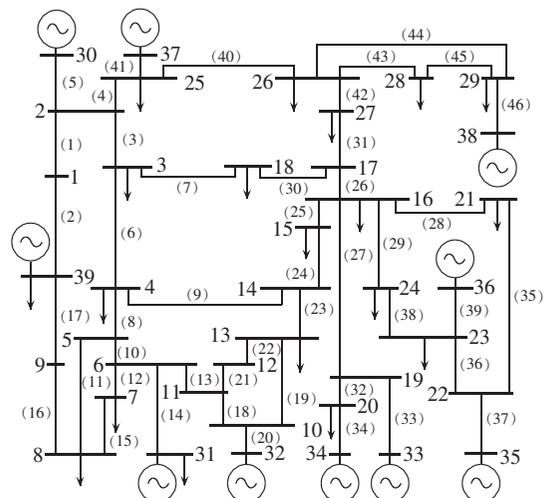


图 6 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig.6 New England 10-unit 39-bus system

复顺序为:31→30/37/32→35/39/34→36/38,此时需要为各时步机组恢复优化送电路径。设各时步路径深度上限均为 $D_{max}=10$ 。将本文提出的基于动态节点重要度的路径优化算法记为方法 1。作为对比,将式(3)中节点 j 的动态节点重要度 α_{Dj} 项改为传统节点重要度 $\alpha_j^{[9]}$,相应的第二项路径评价指标 f_{l2} 改为平均节点重要度 f'_{l2} ,路径搜索和评价方法不变,记为方法 2,2 种方法的对比结果如表 2 所示。

大停电后系统恢复之初,由于只有黑启动机组并网发电,而其进相运行能力有限,所以要着重注意优化降低送电路径的空载充电无功功率;而随着机组陆续并网出力,系统可以吸收更多空充高压线路的容性无功,此时应将平均动态节点重要度作为主要优化目标。故在算例中 4 个时步的折中系数 β 分别取 0.8、0.6、0.4 和 0.2。从表 2 可以看出,2 种方法为第 2 时步、第 4 时步确定的路径有所不同,这主要是由于动

态节点重要度指标考虑了待恢复节点拓扑重要性随网络逐步恢复而发生改变的客观情况。为进一步说明动态节点重要度指标的基本特征,按照方法 1 给出的各时步网架恢复过程,求取各时步之初排名前列的动态节点重要度和节点重要度,如表 3 所示。

从表 3 可以看出,第 1 时步 2 种方法所得数值和排名重合度较高,这是因为此时已恢复节点集合仅包含黑启动电源节点, α_{Dj} 值主要由 α 决定,而 α 计算时带电节点集合去除后的网络与原网络差别不大。随着网架逐渐恢复,待恢复节点规模逐渐减小,导致动态节点重要度数值有增大的趋势,且 2 种方法给出的排名也有了显著的区别。此外,各失电节点动态节点重要度的排序在不同时步也不尽相同,如第 3 时步,节点 9 的动态节点重要度高于节点 8,而第 4 时步节点 8 的重要度更高些,这说明动态节点重要度反映了网架恢复状态,能够为网架重构阶段的系统恢复提供更加合理的决策支持。

表 2 2 种机组恢复路径寻优算法结果对比
Table 2 Comparison of optimized unit restoration paths between two algorithms

时步	β	恢复机组	方法 1		方法 2			
			f_{l1}	f_{l2}	送电路径	f_{l1}	f'_{l2}	送电路径
1	0.8	31	1.1568	0.0066	33→19→16→15→14→4→5→6→31	1.1568	0.0064	33→19→16→15→14→4→5→6→31
		30			16→17→27→26→25→2→30			16→17→18→3→2→30
2	0.6	37	1.5662	0.0127	16→17→27→26→25→37	1.1283	0.0061	16→17→18→3→2→25→37
		32			6→11→10→32			14→13→10→32
3	0.4	35			16→24→23→22→35			16→24→23→22→35
		39	2.0623	0.0342	2→1→39	2.0623	0.0059	2→1→39
		34			19→20→34			19→20→34
4	0.2	36			23→36			23→36
		38	1.0290	0.0800	26→29→38	1.5902	0.0060	17→27→26→29→38

表 3 各时步之初动态节点重要度
Table 3 Initial nodal importance for different steps

时步	排名	节点重要度		动态节点重要度	
		节点编号	指标值	节点编号	指标值
1	1	16	0.00721	16	0.00741
	2	4	0.00661	4	0.00682
	3	14	0.00657	14	0.00677
	4	3	0.00654	3	0.00676
	5	17	0.00652	2	0.00673
2	1	3	0.00654	2	0.01543
	2	17	0.00652	26	0.01472
	3	2	0.00651	25	0.01412
	4	26	0.00645	29	0.01333
	5	25	0.00621	1	0.01329
3	1	3	0.00654	22	0.03940
	2	13	0.00614	23	0.03940
	3	18	0.00610	9	0.03485
	4	22	0.00610	39	0.03485
	5	23	0.00610	8	0.03419
4	1	3	0.00654	29	0.08858
	2	13	0.00614	8	0.08286
	3	18	0.00610	38	0.08167
	4	29	0.00606	7	0.07686
	5	8	0.00606	9	0.07686

以第 3 时步为例分析同时为多台机组优化送电路径的情形。该时步需要为节点 35、39 和 34 处的机组恢复优化确定送电路径。基于第 2 时步执行完的网架结构,计算此时各失电节点的动态节点重要度值。首先搜索确定初始路径集,搜得满足条件的路径方案如表 4 所示。其次,通过 f_{l1} 和 f_{l2} 这 2 个指标的综合加权得到 f_l 值,选取兼顾充电无功、平均动态节点重要度指标最优的方案 4 作为本时步送电路径方案。若方案 4 在执行过程中某线路出现故障,可尝试其他方案。最终得到恢复网架如图 7 所示。

表 4 第 3 时步备选路径方案
Table 4 Candidate restoration schemes of third step

编号	备选路径方案支路组成	f_{l1}	f_{l2}	f_l
1	(1)(2)(28)(32)(34)(35)(37)	1.9600	0.0335	0.4000
2	(12)(15)(16)(17)(28)(32)(34)(35)(37)	2.2827	0.0337	0.1916
3	(11)(16)(17)(28)(32)(34)(35)(37)	2.2393	0.0339	0.3723
4	(1)(2)(29)(32)(34)(36)(37)(38)	2.0623	0.0342	0.7436
5	(12)(15)(16)(17)(29)(32)(34)(36)(37)(38)	2.3850	0.0342	0.4377
6	(11)(16)(17)(29)(32)(34)(36)(37)(38)	2.3416	0.0345	0.6408

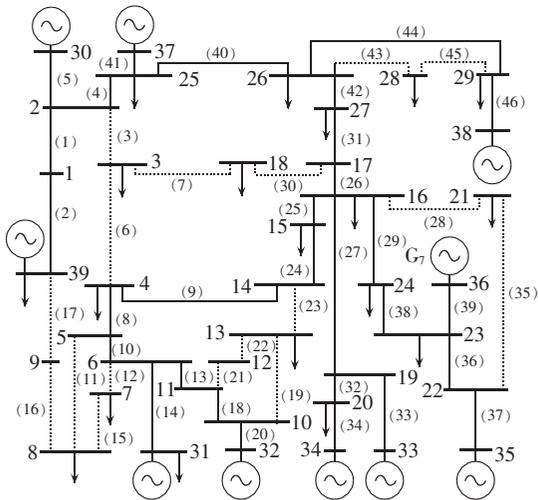


图7 机组恢复过程完成后的网架
Fig.7 Network after unit restoration

4 结论

本文提出了一种基于考虑节点恢复状态的动态节点重要度评价方法,该方法相比于传统的“静态”评价方法,考虑了网架重构过程中待恢复节点的拓扑重要性随网络逐步恢复发生变化的特点。在决策过程中,基于当前系统实际恢复状态,构造仅含失电节点的待恢复网络和包含等效电源点的待恢复网络,综合考察待评价节点收缩对2个网络的影响,得出动态节点重要度指标。在此基础上,将所定义的动态节点重要度指标用于网架重构中恢复路径的优化问题,提出了基于动态节点重要度的路径优化决策方法。算例结果表明动态节点重要度指标克服了以往静态评价方法的不足,能够为网架重构阶段的系统恢复提供更加合理的决策支持。

参考文献:

[1] U.S.-Canada Power System Outage Task Force. Final report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada: causes and recommendations[EB/OL]. [2016-03-20]. <http://www.nerc.com>.

[2] 薛禹胜,肖世杰. 从印度大停电透视电力系统的广义阻塞[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 1-8.
XUE Yusheng, XIAO Shijie. Through the India's blackout to perceive the generalized congestions in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 1-8.

[3] 高翔,庄侃沁,孙勇. 西欧电网“11·4”大停电事故的启示[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 25-31.
GAO Xiang, ZHUANG Kanqin, SUN Yong. Lessons and enlightenment from blackout occurred in UCTE Grid on November 4, 2006[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 25-31.

[4] 郭庆来,辛蜀骏,王剑辉,等. 由乌克兰停电事件看信息能源系统综合安全评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 145-147.
GUO Qinglai, XIN Shujun, WANG Jianhui, et al. Comprehensive security assessment for a cyber physical energy system: a lesson

from Ukraine's blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 145-147.

[5] 赵俊华,梁高琪,文福拴,等. 乌克兰事件的启示:防范针对电网的虚假数据注入攻击[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 149-151.
ZHAO Junhua, LIANG Gaoqi, WEN Fushuan, et al. Lessons learnt from the Ukrainian blackout protecting power grids against false data injection attacks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 149-151.

[6] FINK L H, LIOU K L, LIU C C. From generic restoration actions to specific restoration strategies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 745-752.

[7] 刘强,石立宝,周明,等. 现代电力系统恢复控制研究综述[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(11): 104-110, 114.
LIU Qiang, SHI Libao, ZHOU Ming, et al. Survey of power system restoration control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(11): 104-110, 114.

[8] 顾雪平,赵宝斌,刘文轩. 结合多目标优化与灰色关联决策的负荷恢复方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 6-13.
GU Xueping, ZHAO Baobin, LIU Wenxuan. Load restoration based on multi-objective optimization and grey incidence decision-making[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 6-13.

[9] 周云海,闵勇. 恢复控制中的系统重构优化算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 67-70, 188.
ZHOU Yunhai, MIN Yong. Optimal algorithm for system reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 67-70, 188.

[10] 刘艳,顾雪平. 基于节点重要度评价的骨架网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 20-27.
LIU Yan, GU Xueping. Node importance assessment based skeleton-network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 20-27.

[11] 林振智,文福拴. 基于加权复杂网络模型的恢复路径优化方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 11-15.
LIN Zhenzhi, WEN Fushuan. A new optimization method for determining restoration paths based on weighted complex network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 11-15.

[12] 张璨,林振智,文福拴,等. 基于后悔思想的网络重构两步策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 46-52, 75.
ZHANG Can, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. A two stage strategy for network reconfiguration based on the concept of regret[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 46-52, 75.

[13] 朱海南. 大停电后的机组恢复顺序优化研究[D]. 济南:山东大学, 2015.
ZHU Hainan. Studies on generator start-up sequence after power system major blackout[D]. Ji'nan: Shandong University, 2015.

[14] 孙璞玉,张焰,罗雯清. 考虑网架覆盖率与分散度的网架重构优化[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 271-278.
SUN Puyu, ZHANG Yan, LUO Wenqing. Optimization of backbone network reconfiguration considering network coverage rate and dispersion degree[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 271-278.

[15] 傅子昊,孙磊,林振智,等. 基于节点重要度评价矩阵的网络重构双层优化策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 37-42.

- FU Zihao, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Bi-level network reconfiguration optimization based on node importance evaluation matrix[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 37-42.
- [16] 刘强, 石立宝, 倪以信, 等. 电力系统恢复控制的网络重构智能优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 8-15.
- LIU Qiang, SHI Libao, NI Yixin, et al. Intelligent optimization strategy of the power grid reconfiguration during power system restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 8-15.
- [17] GU Xueping, ZHONG Huirong. Optimisation of network reconfiguration based on a two-layer unit-restarting framework for power system restoration[J]. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2012, 6(7): 693-700.
- [18] 李少岩, 顾雪平, 梁海平. 给定恢复目标的扩展黑启动方案路径优选[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 59-64.
- LI Shaoyan, GU Xueping, LIANG Haiping. Energizing path optimization for extended black-start schemes with given recovery targets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 59-64.
- [19] 朱海南, 刘玉田. 考虑线路投入顺序的网架重构机组恢复多目标优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 53-59.
- ZHU Hainan, LIU Yutian. Multi-objective optimization of units restoration during network reconstruction considering line restoration sequence[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 53-59.
- [20] 刘艳, 张凡, 顾雪平. 大停电后的机组投运风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 106-113.
- LIU Yan, ZHANG Fan, GU Xueping. Risk assessment for restoring units following large-scale blackout[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 106-113.
- [21] 赵达维, 刘天琪, 唐健. 基于路径和节点权重因子的黑启动路径寻优新方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 13-18.
- ZHAO Dawei, LIU Tianqi, TANG Jian. A new method for black-start path optimization based on path and node weight factors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 13-18.
- [22] 王大江, 顾雪平, 贾京华. 一种扩展黑启动方案恢复效果的评估方法[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3360-3365.
- WANG Dajiang, GU Xueping, JIA Jinghua. A method to access restoration effect of extended black-start scheme[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3360-3365.

作者简介:



顾雪平

顾雪平(1964—),男,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统安全防御和系统恢复、电力系统安全稳定评估与控制、智能技术在电力系统中的应用等;

李少岩(1989—),男,河北保定人,博士研究生,主要研究方向为电力系统安全防御和系统恢复(E-mail:shaoyan.li@ncepu.edu.cn);

李凯(1992—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统安全防御和系统恢复。

Dynamic assessment of nodal importance for decision-making of network reconfiguration

GU Xueping, LI Shaoyan, LI Kai

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Since the topological importance of a node to be restored changes during the network reconfiguration, a dynamic index of nodal importance is proposed to dynamically assess the topological importance of node. During the decision-making of network reconfiguration, the restored nodes are merged into an equivalent power source based on the present restoration state of system. Two networks to be restored, with and without the equivalent power source, are thus formed, the effect of node contraction for a node to be assessed on these two networks is comprehensively evaluated and the dynamic importance of that node is thus calculated. The proposed index is applied to the path optimization of unit restoration during the decision-making of network reconfiguration. New England 10-unit 39-bus system is taken as an example to verify the effectiveness of the proposed index and path optimization method.

Key words: black start; network reconfiguration; dynamic node importance; path optimization