

## 加快含快速切回机组电网恢复的动态分区策略

刘昌盛<sup>1</sup>, 谢云云<sup>1</sup>, 石屹岭<sup>2</sup>, 徐珂<sup>3</sup>, 谢兵<sup>3</sup>, 殷明慧<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学自动化学院, 江苏省南京市 210094;

2. 国网江苏省电力公司检修分公司南通运维分部, 江苏省南通市 226006;

3. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏省南京市 211103)

**摘要:** 现有电网恢复研究中将快速切回(FCB)机组加入电网串行恢复序列,未充分利用FCB机组能够独立恢复周边电源和负荷的能力。与传统的黑启动水电机组相比,火电机组的FCB功能不能100%成功实施,含FCB机组的电网恢复需要根据黑启动电源情况动态分区。因此,文中在传统GN分裂算法的基础上,提出了适用于含FCB机组电网的分区恢复策略。首先,采用网络的Laplace矩阵特征值识别分区数量,同时考虑了电网分区中黑启动电源要求、功率平衡要求,以及分区划分的速度要求,建立基于改进GN分裂算法的电网分区方法,实现含FCB机组电网的快速自动分区。最后,新英格兰系统和部分江苏电网实际系统仿真结果表明,所提分区方法能够有效地对电网进行动态分区。

**关键词:** 快速切回机组; 黑启动; 并行恢复; GN算法

### 0 引言

虽然随着电力系统规模的不断扩大,系统的可靠性不断提高,但电力市场和碳排放的压力使得现代电力系统运行状态接近极限,电力系统可能发生大停电事故,如北美“8·14”大停电<sup>[1]</sup>、巴西大停电等<sup>[2]</sup>。在电力系统发生大范围停电后,需要通过黑启动电源逐步启动非黑启动机组和负荷,恢复电力供应。优化的电网恢复策略能够加快停电系统的恢复,减少停电损失,对电力系统的运行与管理具有重要价值<sup>[3-4]</sup>。

由于水电机组无需通过外部电源即可自启动,水电机组是电网恢复研究中最常见的黑启动电源<sup>[5]</sup>。但由于水电厂地理条件和机组容量限制,在区域电网中水电机组数量较少,在很多地区电网中仅配有少量抽水蓄能电站作为黑启动电源。随着技术的进步,具备快速切回(fast cut back,FCB)功能的火电机组能够在电网停电后快速调整运行状态,维持发电机在低负荷状态下运行<sup>[6]</sup>。FCB机组具有黑启动容量大,启动速度快,可以随时恢复外部电网的特点,能够加快电网的恢复<sup>[7]</sup>。

现有含FCB机组电网的恢复策略研究,主要包括FCB机组布点优化和含FCB机组电网恢复策略研究。文献[8]将FCB机组加入电网恢复优化序列中,优化电网中机组的启动顺序和恢复路径。文献[5,9]基于粒子群算法优化FCB机组的安装位置及容量。文献[10]引入序优化理论对FCB机组的安装位置进行优化。文献[11]综合考虑投资成本和经济收益,根据最优布点方案具有继承性的特点,提出采用递推法对FCB机组布点方案进行寻优。但上述研究中关于含FCB机组电网的恢复研究都将FCB机组加入电网恢复序列,由常规黑启动电源开始串行恢复。这些处理方法均未考虑到FCB机组具有黑启动电源能力,未充分利用FCB机组能够作为独立电源,主动地恢复周边电源和负荷的能力<sup>[12]</sup>,对电网恢复效率的提高有限。

由于FCB机组能够作为黑启动电源,当电网中存在水电机组和多个FCB机组时,根据电网中黑启动电源数量将电网划分成相应数量的分区,以各分区内黑启动电源为起点同时恢复各分区,使得同一时间内并行启动多台机组,则可以大大加快系统恢复进程<sup>[13-15]</sup>。因此,分区方法的选择是含FCB机组电网恢复的一个关键问题。

现有分区方法可以分为三类:凝聚算法<sup>[16-18]</sup>、分裂算法<sup>[19-23]</sup>和迭代优化算法<sup>[24-27]</sup>。前两类方法从拓扑的角度划分停电电网,最后一种除拓扑外,还考

收稿日期: 2017-02-04; 修回日期: 2017-06-24。

上网日期: 2017-08-11。

国家自然科学基金资助项目(51507080);江苏省博士后基金资助项目(1402042C)。

虑了分区对后续恢复的影响,迭代算法计算需要大量的迭代运行,计算速度较慢。凝聚算法是通过搜索与中心节点连接强度较高的节点并添加入群的方法形成分群,主要采用的是凝聚层次聚类<sup>[17-18]</sup>。该方法能够搜索到连接程度较强的节点,但对群间边界的节点分类效果较差,且可能出现分区内无黑启动电源的问题。分裂算法是通过删除联系紧密的边直至形成分群,包括 GN 分裂算法<sup>[20,21]</sup>、基于图论的分区算法<sup>[22,23]</sup>。基于图论的分区方法同样需要迭代搜索,计算速度较慢。GN 分裂算法能够很好地解决凝聚算法对于两群边界分类效果较差的问题,针对多个群组通过少数几条联络线连接的网络较为有效,电力系统具备该网络特征,故该方法对电力系统分区较为有效。但该方法存在分群数量难以自动识别、分区中功率平衡要求无法自动满足以及边介数计算量较大的问题,对传统黑启动电源数量固定不变,只需进行一次分区时可以使用。但由于火电机组 FCB 功能的实施只有 50% 的成功率<sup>[28]</sup>,含 FCB 机组电网的分区需要根据成功实现 FCB 功能的机组数量快速划分。由此,需要对现有分裂算法进行改进,使其适用于含 FCB 机组电网的分区。

基于此,本文提出基于改进 GN 分裂算法的含 FCB 机组电网的并行恢复策略。首先,在传统 GN 分裂算法的基础上,采用网络的 Laplace 矩阵特征值识别分区数量,同时考虑了电网分区中黑启动电源要求、功率平衡要求,以及分区划分的速度要求,建立基于改进 GN 分裂法的电网分区方法。最后,以新英格兰系统和部分江苏电网实际系统为例,验证了本文方法的有效性。

## 1 FCB 机组出力模型

具有 FCB 功能的火电机组能够在电网停电时在厂用电负荷下保持火电机组稳定运行,在电网恢复过程中向停电电网输出功率。本节介绍 FCB 机组的功能及其在电网恢复过程中的出力模型。

### 1.1 火电机组 FCB 功能

在发生大范围停电后,损失负荷的常规火电机组将停机停炉。此时,发电机停机将会使电厂停电,需要外部供电才能使辅机投入运行;锅炉停机后锅炉内压力降低,在一段时间后未启动,需要等待其冷却后才能启动。因此,常规火电机组需要在停电后的一段时间内恢复供电,否则需要等待较长时间才能恢复。

对于具有 FCB 功能的火电机组,当电网停电时,发电机失去外部负荷,汽轮机主气门将迅速关闭,开启旁路气门,保持机组功率平衡,使发电机在

厂用电负荷下保持平稳运行。FCB 功能将使停电后的火电机组保持低负荷运行,一方面可以保证机组的安全,使火电机组在停电后的波动过程中运行于安全范围内,延长设备寿命;另一方面,减少了火电机组在停电后重新启动所带来的额外费用,并且可以快速参与电网的恢复,减少了停电带来的损失。

在火电机组的 FCB 功能方面,国内外多个发电厂均对 FCB 功能进行了实验<sup>[12,29]</sup>,在电网停电后,具备 FCB 功能的火电机组具有保持机组的稳定运行,形成供电孤岛的能力。在 FCB 机组参与电网恢复方面,文献[12]对 FCB 机组空充线路进行了试验,结果表明 FCB 机组具备启动输电线路和其他停电设备的能力。因此,对于具备 FCB 功能的机组,能够充当停电电网的黑启动电源,快速恢复停电电网中的其他设备。

### 1.2 FCB 机组的出力模型

常规火电机组在电网停电后需要等待外部电力恢复后才能恢复,而在热启动时间内未能启动时,必须要达到冷启动时限才能启动。常规火电机组的出力模型<sup>[30]</sup>为:

$$P_{Gi}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq T_{Ai} \leq T_{ai} \\ K_i(t - T_{Ai} - T_{ai}) & T_{Ai} + T_{ai} \leq t \leq T_{Ai} + T_{Bi} + T_{ai} \\ P_{Mi} & t \geq T_{Ai} + T_{Bi} + T_{ai} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{Mi}$ 为机组有功出力额定值; $K_i$ 为机组爬坡率; $T_{Ai}$ 为机组预热时间; $T_{ai}$ 为火电机组带电时刻; $T_{Bi}$ 为机组爬坡时间。在  $T_{ai} + T_{Ai}$  时刻,发电机转速达到同步速并网发电;在  $T_{ai} + T_{Ai} + T_{Bi}$  时刻,机组有功出力达到  $P_{Mi}$ 。

对于成功实现 FCB 功能的火电机组,其发电机出力能够保持在厂用电负荷值,在恢复外部电网时能够根据外部电网的要求输出功率。FCB 机组的出力模型如式(2)所示,在  $T_{bi}$  时刻同步并网发电,恢复停电设备。

$$P_{Gi}(t) = \begin{cases} P_{ki} & 0 \leq t \leq T_{bi} \\ K_i(t - T_{bi}) & T_{bi} \leq t \leq T_{Bi} + T_{bi} \\ P_{Mi} & t \geq T_{Bi} + T_{bi} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{ki}$ 为 FCB 机组在并网前一直维持的厂用电负荷; $T_{bi}$ 为 FCB 机组并网发电时间。

从式(2)中可以看到,FCB 机组和黑启动电源类似,无需外部电源启动,无需预热时间,没有冷热启动时间限制,可以根据外部电网的状况恢复外部停电设备。现有研究中将 FCB 机组加入电网的恢复序列中,未能充分利用 FCB 机组的黑启动能力。

因此,需要根据实现了FCB功能的火电机组数量快速重新划分电网分区,并行恢复各分区,提高电网的恢复效率。

## 2 基于改进GN分裂算法的电网分区

含FCB机组电网恢复过程中首先需要根据实现FCB功能机组的情况对电网进行分区。GN分裂算法是较为适合电网特征的分区方法,但其难以将电网划分为固定数量的分区。因此,本节对GN分裂算法进行改进,采用网络的Laplace矩阵特征值判断分区数量,考虑到后续恢复过程中的分区功率平衡要求,调整分区规模,实现针对含FCB机组电网的分区。

### 2.1 停电电网的拓扑模型及参数

对电网进行分区首先需要将电网抽象为无向图,并对图中各节点和线路定义相应的特征参数,才能使用图形分割或聚类的算法进行电网分区。将电网中的发电机节点和母线节点抽象为网络中的节点,电网中的变压器和输电线路(同杆双回线路等效为一回)抽象为无向边,不考虑配电网和发电厂内主接线,从而使停电电网等效为无向图。

为了后文描述方便,首先参考图论中的定义对后文中使用的名词进行定义,具体如下。

1) 节点的度:与该节点相连的其他节点的数量,即

$$d_i = \sum_{j=1}^m A_{ij} \quad (3)$$

式中: $A_{ij}$ 为邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 中第 $i$ 行第 $j$ 列元素。

2) 边介数:通过某条边的最短路径条数。对所有源节点,分别计算从每个源节点出发通过该边的最短路径数目,将得到的相对于各源节点的边介数相加,累加和为该边相对于所有源节点的边介数。由于主干输电网络为环形电网,各电源点与其他节点间会存在多条长度相同的最短路径,最短路径的求取需要通过Newman边介数求解方法<sup>[12]</sup>求取。

3) 节点权重:节点上发电能力与用电需求之差,有

$$k_i = P_{G,i}^{\max} - \alpha_i P_{L,i}^{\max} \quad (4)$$

其中, $P_{G,i}^{\max}$ 和 $P_{L,i}^{\max}$ 分别为节点 $i$ 上所连发电机最大有功出力及所接负荷的最大有功值; $\alpha_i$ 为一类负荷比重,表示在恢复过程中必须恢复的负荷。

### 2.2 改进的GN分裂算法

传统的GN分裂算法<sup>[20]</sup>首先计算网络中所有边的边介数,然后依次删除介数最高的边,并重新计算各边的边介数。当出现新的分区时,计算此时的模块度指标。当每个黑启动机组都在一个分区中

时,停止删除边。通过模块度指标调整分区,并校验分区是否有黑启动电源以及分区内是否功率平衡。如不满足还需要对分区进行手动调整。

从传统GN分裂算法流程中可以看到,该方法不能自动判断分区数量,且有很多步骤需要手动参与,难以适用于黑启动电源数量不确定时快速的动态分区。针对传统GN算法应用于含FCB机组电网分区的问题,需要在现有方法的基础上进行改进,以使其适用于固定分区数量的大系统分区。

#### 2.2.1 分区数量的判断

Laplace矩阵是在图论中广泛应用的表示图的一种矩阵。通过Laplace矩阵特征值数量可以判断非连通系统数是Laplace矩阵的一个重要特性<sup>[31]</sup>。对一个无向网络 $G=(V, E)$ , $V$ 为节点集, $E$ 为线路集。根据零特征值判断当前图 $G$ 分区数量的具体步骤如下。

1) 对于当前图 $G$ ,根据点与点之间的连接关系构造Laplace矩阵 $\mathbf{L}=(l_{i,j})_{n \times n}$ 为:

$$l_{ij} = \begin{cases} d_i & i=j \\ -1 & i \neq j \text{ 且 } v_i \text{ 与 } v_j \text{ 相连} \\ 0 & v_i \text{ 与 } v_j \text{ 不相连} \end{cases} \quad (5)$$

2) 计算Laplace矩阵的特征值,最小特征值为0,即 $\lambda_n \geq \dots \geq \lambda_2 \geq \lambda_1 \geq 0$ 。

3) 观察零特征值的数量。当且仅当 $G$ 为连通图时,只有一个特征值为0<sup>[31]</sup>。当 $G$ 不连通时,零特征值的数量就是不连通子系统的数量。

故在进行GN分裂过程中可以通过Laplace矩阵的特征值判断是否达到了要求的分区数量,如果满足条件,即可结束分区,从而解决了现有GN分裂算法中无法判断分区数量的问题。

#### 2.2.2 功率平衡的校验

功率平衡校验是为了保证划分的每个区域内发电机的发电能力与用电能力匹配,从而保证电网恢复过程中能够尽量多地恢复负荷。定义分区 $V_i$ 内功率平衡指标为:

$$z_i = \sum_{j \in V_i} k_j \quad (6)$$

当 $z_i$ 为正时,分区内的发电能力大于必须恢复的负荷量,才能满足电网恢复过程中的负荷恢复要求,因此,功率平衡校验的要求为:

$$z_i > 0 \quad (7)$$

当电网中的线路 $e_{ij} \in E$ 删除后,电网发生分裂,此时需要对分裂的网络进行校验。如果分裂后的电网不满足功率平衡约束,则该分区不合理,保留该线路,按边介数排序选择下一条线路删除。

除了功率大小需要保持平衡外,分区内还必须



包括黑启动电源点。如果没有黑启动电源,同样该线路不能删除,按边介数排序选择其他线路。

### 2.2.3 节点数量削减

由于边介数计算量较大,对于大规模系统,GN分裂方法的计算量非常大,计算时间较长,故需要削减待恢复系统中的节点数量,从而加快计算速度。而在停电电网中有很多节点必须分为一群,这些节点可以通过预先处理,将其简化为一个节点,从而加快计算速度。

通过对电网的分析,可以合并的节点主要有以下几类:①由于分区同步的要求,变压器支路不能作为分区联络线,变压器支路两端节点可以合并为一个节点;②对于发电机节点和负荷节点一般都可以合并到与其相连的最近的节点,故节点度为1的节点与其相连的节点可以合并;③由于大规模电网具有不同电压等级的供电电网,包含黑启动电源点的低压电网可以合并为一个节点。在节点削减过程中,保留电源节点,将非电源节点合并到电源节点上。

### 2.3 含FCB机组电网的分区流程

GN分裂法进行分区的基本思想是不断从网络中移除边介数较大的边直至达到分区目标,但在固定分区数量要求时传统的GN分裂方法难以实现。在上节所述改进方法的基础上,本节采用能够满足固定分区数量要求的GN分裂方法,同时考虑了后续恢复的功率平衡要求以及分区策略计算速度要求,对待恢复电网进行分区。

基于改进GN分裂方法的含FCB机组电网分区策略流程图见图1。主要包括以下步骤。

步骤1:根据停电电网的状态,确定待恢复网络中电源数量和位置。

步骤2:将停电电网抽象为图,将带电区域简化为一个节点,采用节点数量削减的原则削减停电电网中的节点数量。

步骤3:计算停电电网中每条边的边介数,将边介数最大的边从电网中删除。

步骤4:采用分区数量判断方法计算分区数量。

步骤5:如果分区数量为1,返回步骤3继续删除边介数最大的边。

步骤6:如果分区数量大于1,对每个分区进行功率平衡校验,如果满足功率平衡校验,返回步骤3继续分区直至分区数量满足要求;如果功率平衡校验不满足,放弃删除该边,按照边介数大小选择下一条边,返回步骤4。

步骤7:如果分区数量和功率平衡校验均满足要求,分区结束,对已删除线路两端节点进行校验,如果两端节点处于同一分区,则将该线路重新加入

该分区。

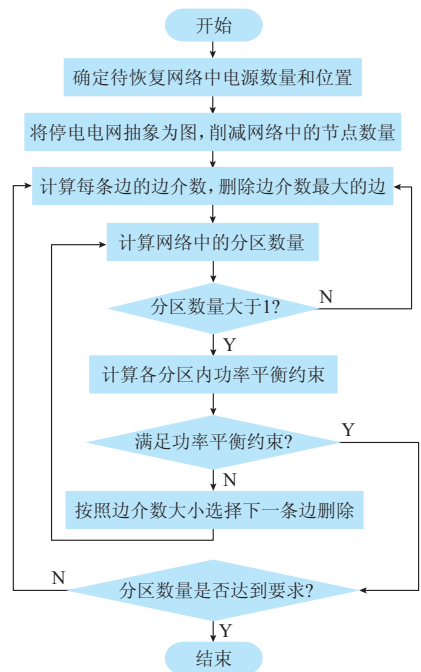


图1 基于改进GN分裂算法的含FCB机组电网分区流程

Fig.1 Partition flow chart of blackout system with FCB units based on improved GN algorithm

## 3 算例与结果分析

### 3.1 仿真场景

为了验证本文所提分区恢复策略的有效性,以新英格兰系统为例,对基于改进GN分裂算法的含FCB机组电力系统分区策略进行验证。假设变压器支路和普通输电线路的启动时间均为5 min,每台机组容量和各负荷点一类负荷如附录A表A1所示。

### 3.2 改进GN分裂算法有效性分析

#### 3.2.1 本文方法的仿真结果

假设30号发电机、31号发电机和35号发电机完成FCB技术改造。根据本文提出的节点削减方法,新英格兰系统被削减为如图2所示的结构,一共27个节点。

根据2.3节提出的分区数量判断方法,计算新英格兰系统特征值如附录B表B1所示。可以看出,第一小特征值为0,其余特征值均大于0,换言之,只有一个零特征值,可以判断出整个系统是一个连通网络。

利用介数计算方法对各线路的边介数进行计算,线路16-17边介数最大,根据分裂算法,将其从网络中移除。然后构建剩余网络Laplace矩阵,并

计算其特征值,如附录 B 表 B2 所示,只有一个零特征值,可以判断出整个系统仍然是一个连通网络,该计算结果与实际情况相符。

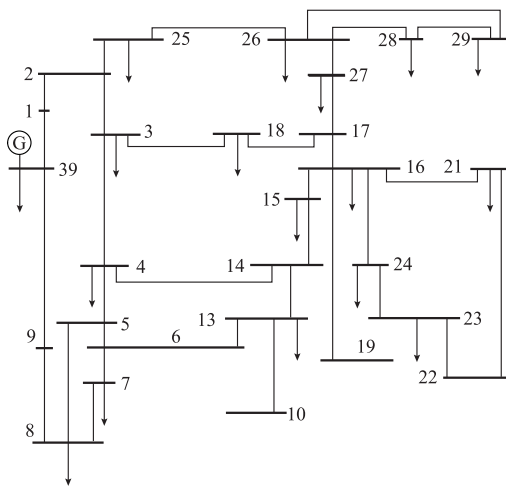


图2 削减后的新英格兰系统  
Fig.2 New England system after cutting

然后重新计算线路 16-17 移除后网络中各线路的边介数。第 2 次移除线路,移除边介数最大的线路 3-4,此时零特征值数量仍为 1,见附录 B 表 B3。

继续分裂。第 3 次移除线路,移除边介数最大的线路 8-9,移除后网络的 Laplace 矩阵的特征值如附录 B 表 B4 所示。此时零特征值数量为 2,整个网络已经被分割成 2 个互相独立的子系统。

在上述基础上继续移除。第 4 次移除线路,移除边介数最大的线路 14-15,移除后网络的 Laplace 矩阵的特征值如附录 B 表 B5 所示。此时零特征值数量为 3,整个网络已经被分割成 3 个互相独立的子系统。实际分割情况如图 3 所示,从图中可以看出,特征值计算结果与实际情况相符。

分区 1,2,3 内发电机容量分别为 2 620,2 350,1 230 MW,分区内一类负荷容量分别为 1 067,622,506 MW,功率平衡指标分别为 1 553,1 728,724 MW。可以看出,各分区内发电机出力均大于必须恢复的一类负荷容量,满足功率平衡校验要求,说明 FCB 机组分别位于 3 个分区内,即每个分区内均存在黑启动电源。对于黑启动电源数量大于 3 个的情况,重复使用本文方法,即可快速将电网划分为多个符合要求的分区。

### 3.2.2 本文改进方法与传统方法<sup>[19-21]</sup>的比较

本文改进方法在计算时间上的优势主要体现在两个方面:①以子系统数量的自动判别代替了传统 GN 分裂算法中的人工判别;②使用功率平衡指标代替传统 GN 分裂算法中人工判别是否每个孤岛中均存在黑启动电源。

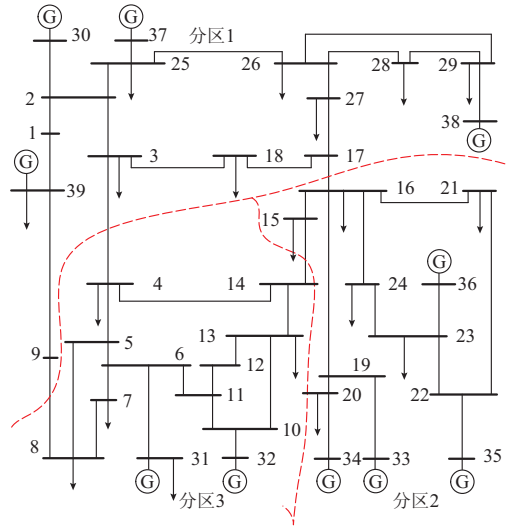


图3 新英格兰系统三分区图  
Fig.3 Partition result for New England system with three subsystems

本文仿真采用计算机配置为 Inter® Core™ i5-4200M CPU @2.50 GHz,内存 8.00 GB。传统方法和进行节点削减后的本文方法移除线路的过程如表 1 所示。

根据传统 GN 分裂算法,当第 6 次移除线路后,所有分区内部才不同时存在多个黑启动电源,但是有一个分区内部缺失黑启动电源,因此将该分区与最近分裂的分区进行合并,程序所花费的计算时间如表 1 所示。

表 1 新英格兰系统 GN 算法线路移除过程  
Table 1 Process of removing lines under GN algorithm for New England system

移除次数	传统 GN 分裂算法			改进 GN 分裂算法		
	被移除边	分区数量	计算时间/s	被移除边	分区数量	计算时间/s
1	15-16	1	23.95	16-17	1	6.312 5
2	3-18	1	50.34	3-4	1	12.719 0
3	2-25	2	77.27	8-9	2	19.281 0
4	16-17	3	93.30	14-15	3	26.156 0
5	3-4	3	108.16			
6	8-9	4	122.80			

从表 1 中可以看出,本文改进方法是传统 GN 分裂算法花费的时间代价的 21.3%,该时间还未计算手动调节分区所花费的时间。事实上,规模越大、结构越复杂、分区数量越多的电力系统,人工判别当前子系统数量的难度就越大,花费的时间和精力也就越多,本文所提出的改进方法在时间代价上的优势也就越明显。

### 3.3 部分 FCB 功能失效对电网分区的影响分析

为了说明大停电瞬间 FCB 机组状态不确定造

成的电网分区策略影响,假设 35 号发电机在停电瞬间 FCB 功能切换失败,失去厂用电,需要外部系统提供启动功率才能启动。

此时,调度中心从各发电厂获取各机组启停状态,即 35 号发电机停机,而 30 号发电机和 31 号发电机这两台机组保持 FCB 功能正常运行,具备黑启动能力。由黑启动电源数量可知,电网最终应被划分成两个子系统。执行本文提出的基于改进 GN 分裂算法的电网分区策略,移除线路依次为 16-17,3-4,8-9,计算时间为 19.895 s。

当两分区被划分后,计算功率平衡指标  $z_i$ 。对分区 1,分区内发电机容量为 2 620 MW,分区内一类负荷容量为 1 067 MW,功率平衡指标为 1 553 MW;对分区 2,分区内发电机容量为 3 580 MW,分区内一类负荷容量为 1 128 MW,功率平衡指标为 2 452 MW。可以看出,各分区内发电机出力均大于必须恢复的一类负荷容量,满足功率平衡校验要求,说明 FCB 机组分别位于两个分区内,即每个分区内均存在黑启动电源,且能满足一类负荷要求。最终划分结果如图 4 所示。

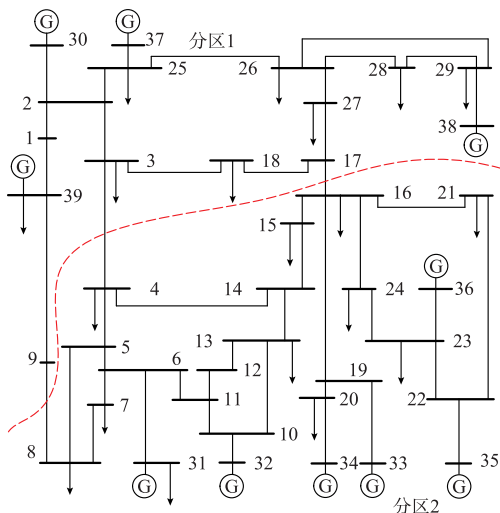


图 4 35 号机组失去 FCB 功能后新英格兰系统二分区图

Fig.4 Partition result for New England system with two subsystems when unit 35 fails to implement FCB function

上述的仿真算例表明,如果电网停电瞬间某一台机组失去了 FCB 功能,本文所提出的基于改进 GN 分裂算法的分区策略依然能够快速对停电电网进行分区,满足电网分区恢复的要求。

### 3.4 实际系统应用

本文选取了江苏部分区域电网对所提出的算法进行验证。该网络包含宜兴抽蓄、宜协、戚然新、戚墅堰燃机 1、戚墅堰燃机 2、利港和西区燃机 9 家发

电厂。假设宜兴抽蓄、西区燃机和戚然新为黑启动机组,其中西区燃机和戚然新为具备 FCB 功能的火电机组,假设 FCB 功能成功实施。移除第 1 条线路后网络 Laplace 矩阵部分特征值如附录 C 表 C1 所示,分割线为“武南—惠泉”。零特征值数量与分区数量保持一致。移除第 2 条线路后网络 Laplace 矩阵部分特征值如附录 C 表 C2 所示,分割线为“武南—政平”,此时零特征值仍为 2,实际分区结果与之对应。移除第 3 条线路后,网络 Laplace 矩阵如附录 C 表 C3 所示,分割线为“武南—岷珠”,此时零特征值为 3,实际独立的子系统数量为 3,算法结束,最终三分区结果如图 5 所示,可以看出,特征值可以快速准确地计算出分区数量。

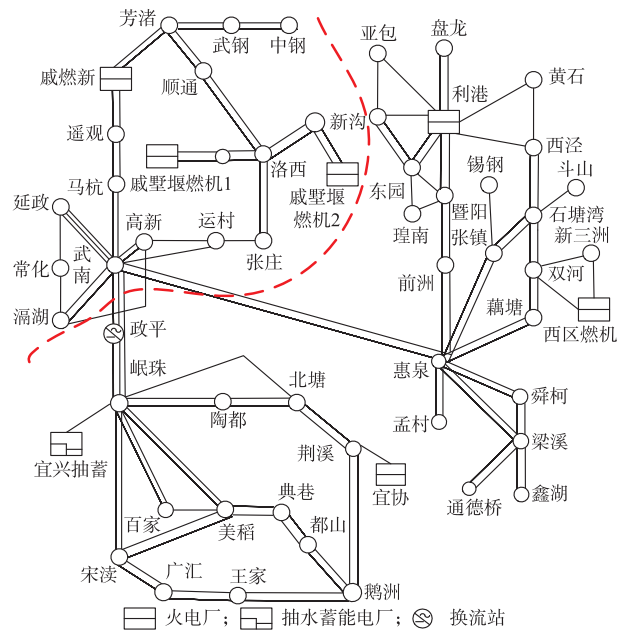


图 5 江苏部分系统三分区图

Fig.5 Partition result for parts of Jiangsu power system with three subsystems

## 4 结语

经过 FCB 功能改造的传统火电机组能够在电网大停电后保持发电机运行,在电网恢复过程中作为黑启动电源。本文提出了基于改进 GN 分裂算法的含 FCB 机组电网的并行恢复策略。对停电后的电网,根据电网中保证正常运行的 FCB 机组数量,采用改进 GN 分裂算法快速将电网分为多个分区,并行恢复各分区,实现电网的快速恢复。仿真结果表明,本文提出的改进 GN 分裂算法能够根据黑启动机组数量自动将电网划分相应数量的分区,并校验分区的功率平衡和每个分区内至少包含一个黑启动机组的要求。

后续研究将会致力于建立考虑网架重构的动态分区优化模型,使其能够考虑本文研究中所忽略的分区对后续恢复的影响,进一步提高电网恢复的速度。

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

## 参考文献

- [1] 薛禹胜.综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8·14”大停电的警示[J].电力系统自动化,2003,27(18):1-5.  
XUE Yusheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster—lessons from the eastern interconnection blackout in 2003 [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 1-5.
- [2] 林伟芳,孙华东,汤涌,等.巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J].电力系统自动化,2010,34(7):1-5.  
LIN Weifang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis and lessons of the blackout in Brazil power grid on November 10, 2009[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.
- [3] HOU Yunhe, LIU C C, SUN Kai, et al. Computation of milestones for decision support during system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1399-1409.
- [4] 宋坤隆,谢云云,殷明慧,等.应用网络流理论的停电系统恢复路径混合整数线性优化模型[J].电力系统自动化,2017,41(3):25-32.DOI:10.7500/AEPS20160330007.  
SONG Kunlong, XIE Yunyun, YAN Minghui, et al. Mixed integer linear optimization model for path restoration of blackout system based on network flow theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 25-32. DOI: 10.7500/AEPS20160330007.
- [5] 李剑辉,卢恩,王宁.基于系统恢复时间最短的快速切负荷机组布点方案[J].广东电力,2013,26(5):63-66.  
LI Jianhui, LU En, WANG Ning. Optimal placement of FCB units for the shortest duration of a system restoration [J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(5): 63-66.
- [6] 王立地,姚金环.FCB功能的成功应用与一种新的实现方案[J].自动化仪表,2004,25(6):48-52.  
WANG Lidi, YAO Jinhuan. Successful application of FCB and a new implementation strategy [J]. Process Automation Instrumentation, 2004, 25(6): 48-52.
- [7] LU E, QIN Z, LIU M, et al. Increasing black start capacity by fast cut back function of thermal power plants [J]. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2013, 2(1): 60-66.
- [8] 刘皓明,丁帅,卢恩,等.含快速切负荷功能火电机组的电力系统黑启动策略[J].电力系统自动化,2013,37(9):23-28.  
LIU Haoming, DING Shuai, LU En, et al. A power system black-start strategy considering thermal power units with FCB function [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 23-28.
- [9] LIU H, WU J, HOU Y. Optimal allocation of FCB thermal power units for increasing power system restoration capability [J]. International Journal of Power and Energy Systems, 2014, 34(4): 155-161.
- [10] 卢恩,宁健,刘皓明,等.应用序优化理论快速切负荷机组布点方案[J].电网技术,2014,38(5):1216-1222.  
LU En, NING Jian, LIU Haoming, et al. An ordinal optimization based locating scheme of fast cut back thermal power units [J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1216-1222.
- [11] 刘崇茹,熊岑,吴旻昊,等.综合考虑投资成本和经济收益的快速切回机组布点方案[J].电力系统自动化,2015,39(4):46-51. DOI:10.7500/AEPS20131023010.  
LIU Chongru, XIONG Cen, WU Minhao, et al. An FCB unit placement scheme considering investment cost and economic benefit [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 46-51. DOI: 10.7500/AEPS20131023010.
- [12] ZENG Kaiwen, WEN Jinyu, MA Longpeng, et al. Fast cut back thermal power plant load rejection and black start field test analysis [J]. Energies, 2014, 7(5): 2740-2760.
- [13] FINK L H, LIOU K L, CHEN-CHING L. From generic restoration actions to specific restoration strategies [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(2): 745-752.
- [14] ADIBI M, CLELLAND P, FINK L, et al. Power system restoration—a task force report [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(2): 271-277.
- [15] 陈彬,王洪涛,曹曦.计及负荷模糊不确定性的网架重构后期负荷恢复优化 [J].电力系统自动化,2016,40(20):6-12. DOI: 10.7500/AEPS20151130012.  
CHEN Bin, WANG Hongtao, CAO Xi. Load restoration optimization during the last stage of network reconfiguration considering load fuzzy uncertainty [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 6-12. DOI: 10.7500/AEPS20151130012.
- [16] DONETTI L. Detecting network communities: a new systematic and efficient algorithm [J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2004(10): 10012.
- [17] 梁海平,顾雪平.基于谱聚类的黑启动子系统划分 [J].电网技术,2013,37(2):372-377.  
LIANG Haiping, GU Xueping. Black-start network partitioning based on spectral clustering [J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 372-377.
- [18] QUIRÓS-TORTÓS J, WALL P, DING L, et al. Determination of sectionalising strategies for parallel power system restoration: a spectral clustering-based methodology [J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116: 381-390.
- [19] NEWMAN M E J, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks [J]. Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 69: 026113.
- [20] 林振智,文福拴,周浩.基于复杂网络社团结构的恢复子系统划分算法 [J].电力系统自动化,2009,33(12):12-16.  
LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, ZHOU Hao. A new algorithm for restoration subsystem division based on community structure of complex network theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 12-16.
- [21] LIN Z Z, WEN F S, CHUNG C Y, et al. Division algorithm and interconnection strategy of restoration subsystems based



- on complex network theory[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(6): 674-683.
- [22] QUIRÓS-TORTÓS J, PANTELI M, WALL P, et al. Sectionalising methodology for parallel system restoration based on graph theory[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(11): 1216-1225.
- [23] 梁海平,郝杰,顾雪平.计及节点恢复成功率的黑启动分区恢复方案优化[J].电工技术学报,2012,27(11):230-238.  
LIANG Haiping, HAO Jie, GU Xueping. Optimization of system partitioning schemes for black-start restoration considering the successful rate of node restoration [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 230-238.
- [24] SARMADI S A N, DOBAKSHARI A S, AZIZI S, et al. A sectionalizing method in power system restoration based on WAMS[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(1): 190-197.
- [25] LIU W, LIN Z, WEN F, et al. Sectionalizing strategies for minimizing outage durations of critical loads in parallel power system restoration with bi-level programming[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 71: 327-334.
- [26] 刘映尚,吴文传,冯永青,等.基于有序二元决策图的黑启动分区搜索策略[J].中国电机工程学报,2008,28(10):26-31.  
LIU Yingshang, WU Wenchuan, FENG Yongqing, et al. Black-start zone partitioning based on ordered binary decision diagram method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 26-31.
- [27] 顾雪平,韩忠晖,梁海平.电力系统大停电后系统分区恢复的优化算法[J].中国电机工程学报,2009,29(10):41-46.  
GU Xueping, HAN Zhonghui, LIANG Haiping. Optimization of parallel restoration through power system partitioning after blackout[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 41-46.
- [28] 赵伟.珠海发电厂1号机组甩负荷试验[J].广东电力,2000,13(6):59-61.  
ZHAO Wei. Load rejection tests for Unit 1 in Zhuhai power plant[J]. Guangdong Electric Power, 2000, 13(6): 59-61.
- [29] HUANG W, ZHANG X, ZHANG Z. Research and study of FCB test based on conventional configuration [C]// International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), September 9-11, 2011, Ningbo, China: 4448-4450.
- [30] SUN Wei, LIU C C, ZHANG Li. Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1357-1366.
- [31] VON LUXBURG U. A tutorial on spectral clustering[J]. Statistics and Computing, 2007, 17(4): 395-416.

刘昌盛(1965—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统防灾减灾与供电恢复。E-mail: liucs\_cq@163.com

谢云云(1985—),男,通信作者,博士,讲师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析。E-mail: yunyun-xie@163.com

石屹岭(1992—),男,硕士,主要研究方向:电力系统防灾减灾与供电恢复。E-mail: 543087174@qq.com

(编辑 蔡静雯)

## Dynamic Partition Strategy for Fast Restoration of Power Systems with Fast Cut Back Units

LIU Changsheng<sup>1</sup>, XIE Yunyun<sup>1</sup>, SHI Yiling<sup>2</sup>, XU Ke<sup>3</sup>, XIE Bing<sup>3</sup>, YIN Minghui<sup>1</sup>

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Nantong Operation and Maintenance Division, Maintenance Branch Company of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nantong 226006, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** The current restoration strategy for power systems with fast cut back (FCB) units is to restore units in sequence, in which the FCB units' ability of restoring surrounding power sources and loads has not been fully utilized. Compared with conventional hydropower units, the FCB function of thermal units cannot be implemented for all units. It is necessary to dynamically partition the power system with FCB units according to the number of energized units. Therefore, this paper proposes a dynamic partition strategy for the restoration of the power system with FCB units based on the conventional Girvan Newman (GN) algorithm. Firstly, by using Laplacian matrix eigenvalues of power network to identify the number of subsystems, an improved Girvan Newman (GN) algorithm is built to divide the blackout system. Meanwhile, the dividing speed and the balance between black-start units and loads in a subsystem are taken into account in network division. Finally, simulation results in the New England system and part of Jiangsu power system show that the method proposed is able to effectively partition the power system with FCB units.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51507080) and Jiangsu Provincial Postdoctoral Research Funds (No. 1402042C).

**Key words:** fast cut back (FCB) units; black-start; parallel restoration; GN algorithm