

基于整数线性规划的恢复子系统划分与 分区方案的综合评价

周光奇¹, 顾雪平¹, 马世英², 唐晓骏², 谢 岩², 李少岩¹

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003;

2. 中国电力科学研究院有限公司 电网安全与节能国家重点实验室, 北京 100192)

摘要:大停电事故发生后若系统内含有多个黑启动电源,合理的子系统划分方案将有助于各系统协调并行恢复进而缩短恢复时间。建立以子系统间联络线最少为目标的子系统划分的整数线性规划模型;通过构造“割”约束并利用高效求解器 CPLEX 对模型多次求解以获取足够多的方案;建立子系统划分方案的评价指标集,并采用变异系数法对方案进行综合评价和排序;引入摇摆节点的概念对模型进行预处理,降低决策空间规模。新英格兰 10 机 39 节点系统和 IEEE 118 节点系统的子系统划分结果验证了所提模型和方法的有效性。

关键词:系统恢复;恢复子系统划分;整数线性规划;摇摆节点;电力系统

中图分类号:TM 73

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.014

0 引言

近期极端天气导致的南澳电网大停电、网络攻击引发的乌克兰大停电等一系列大面积停电事故警示着电网运行人员大面积停电的风险依旧存在。国内外相关研究与实际运行经验表明,合理的恢复策略和方案可以加速系统恢复进程,减轻停电带来的负面影响^[1-3]。根据不同的系统结构和停电场景,文献[4]将恢复策略分为向下(Build-down)以及向上(Build-up)2种恢复模式。其中,Build-up策略指出当系统中黑启动电源不止一个时,若系统合理分区形成多个并行恢复的子系统,将有效缩短恢复时间。

社团结构是大部分实际网络的普遍特征,已有学者将其应用于电网分区、电网结构辨识等研究中^[5]。在系统恢复领域,社团结构多与子系统划分研究相关联。基于复杂网络理论的子系统划分方案具有理论依据充足、拓扑特征明显等优势,在求解时大多采用经典的凝聚、分裂算法。文献[6]应用 GN (Girvan-Newman) 分裂算法确定子系统划分方案,并通过模块度指标表征方案的合理性;文献[7]采用改进 GN 分裂算法实现了含 FCB (Fast Cut Back) 机组电力系统的快速自动分区;文献[8]提出了一种基于谱聚类的子系统划分方法。上述文献仅将电网简化为简单无权图,并未考虑电网的电气特征,而文献[9-10]则进一步研究了基于有权图和复杂网络理论的子系统划分问题,文献[11]以节点电压相似度

为依据实现子系统的划分。随着运筹学的发展和计算机运算性能的提升,数学规划方法解决大型实际优化问题的能力显著提高。国内外学者们针对子系统划分的数学规划模型及求解方法开展了相关研究^[12-13],其中文献[12]采用两步求解的思路将黑启动分区问题转化为凸二次规划问题,从而降低了问题的复杂性,但是在某些情形下子系统的连通性可能无法满足。文献[13]引入网络流的概念将黑启动电源优化配置问题建模成混合整数线性规划 ILP (Integer Linear Programming) 模型,保证了系统的连通性。此外,大多数分区方法仅针对某一目标下的最优方案开展了研究,并未考虑次优子系统划分方案的获取,缺乏对可行方案的多方面综合评估,故而所提供的决策信息不够全面。在恢复过程中系统状态复杂多变,比如最优方案子系统间的线路并列装置可能发生故障,这将影响最优方案的可行性。因此,有必要为调度人员提供备选的分区方案,有效应对意外事件的发生。基于有序二元决策图的分区方法可以保证搜索到所有可行解,但对于大规模电网,若决策变量顺序不当可能产生维数灾难^[14]。合适的子系统划分方法应获取一定数量的优化方案,一方面综合评估后可以提供丰富的决策支持信息,另一方面应避免过大的计算代价。

针对已有研究的不足,本文结合系统恢复自身特点构建了以联络线数量最少为目标的子系统划分优化的 ILP 模型。为避免单目标最优方案考虑因素过于片面,在此基础上增加线性“割”约束以获得足够多的子系统划分方案,然后提取体现网络拓扑结构的改进模块度、子系统恢复时间及无功充裕度指标对方案进一步综合评估。考虑系统分区并行恢复的实际特点,本文根据节点之间的电气距离引入摇

收稿日期:2018-06-05;修回日期:2018-11-23

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2018MS085)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2018MS085)

摆节点的概念以降低决策空间规模,进而提高模型的求解效率。算例结果证明了本文模型和方法的有效性。

1 恢复子系统划分问题的建模

相比于基于随机优化技术的恢复子系统划分方法,基于线性规划技术的划分方法在最优解获取及求解效率方面具有明显的优势。但其通常采用的单目标优化机制只能保证子系统划分方案的单一指标最优,无法综合考虑多指标的协调。虽然也可以考虑对多个目标函数加权处理后再采用线性规划技术进行优化,但有些优化目标难以解析表达或者难以线性化表示,故而无法用线性规划技术进行建模处理。因此,本文构建以联络线数量最少为优化目标的单目标 ILP 模型,通过添加“割”约束实现多种可行方案的获取,然后根据建立的评价指标集对方案综合评估,在给出最优方案的同时提供多种备选分区方案。这种思路不但利用了 ILP 模型求解效率高、解的最优性能能够保证的优点,而且实现了对方案的多方面综合评估,提供了丰富的决策支持信息,避免方案过于片面。

1.1 子系统划分的 ILP 模型

(1) 目标函数。

大停电后划分恢复子系统的主要目的是通过并行恢复方式尽可能加快恢复进程,然而子系统间联络线的恢复属于子系统并列操作或者环网并列操作,需进行电压调控、合闸角调整等复杂操作以满足恢复条件,为保证恢复安全性应采取串行恢复方式。因此,制定恢复子系统划分方案时应使子系统之间的联络线尽量少,以便于更多的线路在子系统内并行恢复。此外,实际电网具有复杂网络的共同特性——社团结构,社团内部节点间的连接紧密,而社团之间的连接相对稀疏^[6]。综上,本文以子系统之间联络线最少为目标建立优化模型^[12]。如图 1 所示,子系统划分的最优方案的确定实际上就是找到满足一定约束的最优割集,本文即割集中边的数量最少。

$$\min f = |S_{\text{cut}}| \quad (1)$$

其中, $|S_{\text{cut}}|$ 表示割集中边的数量,即子系统之间的联络线数量。

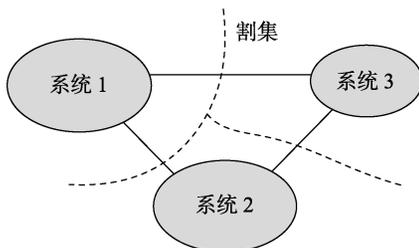


图 1 子系统划分示意图

Fig.1 Schematic diagram of subsystem partitioning

(2) 约束条件。

在确定子系统划分方案时,要综合考虑分区内黑启动电源要求、功率平衡以及系统的连通性等约束。

a. 子系统黑启动电源数量约束。

$$x_{ii} = s_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$x_{ij} - 1 + s_i \leq 0 \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j \quad (3)$$

$$x_{ij} \leq s_j \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中, n 为系统中节点的数量; x_{ij} 为表征子系统划分结果的二元决策变量,若节点 i 在节点 j 形成的子系统内则 $x_{ij} = 1$,反之 $x_{ij} = 0$;不失一般性,本文定义二元参数 s_i 表示节点 i 是否属于黑启动电源集合 V_{GBS} ,若 $i \in V_{\text{GBS}}$ 则 $s_i = 1$,反之 $s_i = 0$ 。约束式(2)保证了若节点 i 为黑启动电源,则其必为自身形成子系统内的节点;为充分发挥黑启动电源在恢复初期的作用,本文规定每个子系统内仅存在 1 个黑启动电源,为此引入式(3)所示的不等式约束;约束式(4)表示划分的子系统内必须存在黑启动电源,当节点 j 不是黑启动电源即 $s_j = 0$ 时, x_{ij} 必为 0;约束式(5)表明电网任一节点仅在一个子系统内。

b. 功率平衡约束。

为维持系统恢复过程子系统稳定运行,可以利用系统中的可调度负荷平衡机组出力^[15]。系统中大多数机组为火电机组,当机组出力低于其最小技术出力时,运行状态不稳定。为保证机组的稳定运行,需保证每个分区内均有足够的可调度负荷,即子系统内机组最小出力之和小于等于可调度负荷总量:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i P_{Gi} x_{ij} - \sum_{i=1}^n P_{Di} x_{ij} \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

其中, α_i 为机组的最小技术出力系数,一般地,燃油汽包炉的最低稳定负荷可达额定值的 25% ~ 30%,燃煤汽包炉可达额定值的 30% ~ 35%,水电机组的 $\alpha_i = 0$,即不受机组最小技术出力的限制; P_{Gi} 为位于节点 i 的机组最大出力之和; P_{Di} 为节点 i 的负荷预测值。

根据负荷的重要性的停电带来的损失,负荷一般分为 I、II 和 III 类负荷,其中 I 类负荷如医院、政府机构、调度中心等重要场所负荷,停电时间越长则带来的经济损失和社会负面影响越大。因此,划分恢复子系统时应保证子系统内有足够的发电容量保证此类负荷的恢复,即子系统内机组总容量不小于重要负荷总量:

$$\sum_{i=1}^n P_{Gi}x_{ij} - \sum_{i=1}^n \beta_i P_{Di}x_{ij} \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

其中, β_i 为负荷节点 i 中 I 类负荷的比例, 其值一般为 10%~20%。

c. 子系统连通性约束。

此外, 各个子系统作为孤立系统, 其内部必须是连通的。本文引入网络流的概念构建子系统连通性约束。为方便处理, 本文将电网抽象成无向图 $G = (V, E)$, 边集 E 中每条边由 2 条有向弧表示。如果一条弧两端节点均在同一个子系统内, 则其一定属于该子系统。基于上述思想, 弧的状态可由二元变量 e_{ijk} 表示:

$$e_{ijk} = \begin{cases} 1 & x_{ik}, x_{jk}, s_k = 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (i, j), (j, i) \in E; k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式(9)为一非线性的逻辑表达式, 为构造 ILP 模型采用以下一系列不等式等效表达式(9)的涵义。

$$\begin{cases} e_{ijk} \leq s_k \\ e_{ijk} \leq x_{ik} \\ e_{ijk} \leq x_{jk} \\ e_{ijk} \geq x_{ik} + x_{jk} + s_k - 2 \end{cases} \quad (10)$$

定义非负整数变量 f_{ijk} 为子系统 k 中节点 i 流向节点 j 的网络流大小, 在本文中并无实际物理意义, 仅用来构建系统连通性约束。使用流量确保子系统连通的基本思想是以子系统 k 内黑启动电源为网络流唯一源点, 保证系统内所有满足 $x_{ik} = 1$ 的节点均有流量到达。

$$f_{ijk} - M e_{ijk} \leq 0 \quad (i, j), (j, i) \in E; k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$f_{ijj} = 0 \quad (i, j), (j, i) \in E; s_j = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} - \sum_{i=1}^n f_{kik} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, n; s_k = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n f_{ijk} - \sum_{i=1}^n f_{jik} \geq x_{jk} \quad j, k = 1, 2, \dots, n; s_k = 1; s_j = 0 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n f_{ijk} \geq x_{jk} \quad j, k = 1, 2, \dots, n; s_k = 1; s_j = 0 \quad (15)$$

其中, M 为一足够大的正数。

式(11)保证网络流仅能在子系统内存在的线路上流动; 式(12)、(13)说明黑启动电源节点仅作为网络流的源点, 提供网络流而不消耗网络流; 为保证子系统内所有节点连通, 需要确保网络流流经所有节点, 为方便分析, 假定除黑启动电源节点外所有节点均消耗单位流量值, 若系统内网络流供应量等于消耗量, 则能保证网络流流经所有节点, 为此, 式(13)给出了子系统内网络流提供量和消耗量的关系式, 即源点提供的网络流大小等于子系统内总节

点数减 1, 因为节点集包含了黑启动电源节点; 约束式(14)保证若节点在子系统 k 内, 则至少消耗该子系统的单位流量值; 约束式(15)表示子系统内除黑启动电源节点外任一节点至少接受单位流量, 从而确保节点能够消耗单位流量值。

基于上述变量定义, 式(1)所示的子系统划分优化模型的目标函数可进一步表示为:

$$\min f = \sum_{(i,j) \in E} \left(1 - \sum_{k=1}^n e_{ijk} \right) \quad (16)$$

1.2 子系统划分方案集的求取策略

以上建立的确定单目标最优子系统划分方案的模型仅能得到单一指标最优的方案, 无法综合考虑多指标的协调。本文通过添加额外约束来实现多套子系统划分方案的求取, 进而对所生成的方案集进行多项指标的综合评价, 以获得综合指标最优的方案。为获取更多子系统划分方案, 可以采取将已确定的方案从优化域删除后再优化的策略, 反复进行直至获得要求数量的方案或者无可行划分方案。

考虑到子系统划分方案可以视为一组相同维度的 0-1 向量, 故添加式(17)所示的整数线性“割”约束实现优化域的删减。

$$\sum_{x_{ij}^{\gamma}=1} (1-x_{ij}) + \sum_{x_{ij}^{\gamma}=0} x_{ij} \geq 1 \quad \gamma \in \Gamma; s_j = 1 \quad (17)$$

其中, Γ 为已确定的子系统划分方案集合, 随着优化的进行该集合元素数量逐渐增加; γ 为某一具体子系统划分方案; x_{ij}^{γ} 为方案 γ 中变量 x_{ij} 的具体取值。

综上, 确定子系统划分方案集的数学模型如式(18)所示。

$$\begin{aligned} \min f &= \sum_{(i,j) \in E} \left(1 - \sum_{k=1}^n e_{ijk} \right) \\ \text{s.t.} & \text{式(2)—(8)、(10)—(15)、(17)} \quad (18) \end{aligned}$$

2 基于 ILP 的子系统划分模型求解

2.1 模型预处理

本文将子系统划分建模为组合优化问题, 随着系统规模增大, 决策空间将呈爆炸式增长。求解模型时需要大量的计算资源和较长的计算时间, 不利于在大规模电力系统中的应用。因此有必要对模型预处理, 缩小决策空间以提高模型的求解效率。根据恢复控制特点, 本文从以下 3 个方面对决策空间进行预处理。

a. 图的简化。

当节点度为 1 时, 该节点可以与其相连的节点合并成一个节点, 删除系统内独立环, 因变压器支路不能作为系统之间的联络线, 故支路两端的节点将合并成一个节点。上述建模过程是在已知设备完全可靠的基础上完成的, 但是实际恢复过程中部分线路可能具有较高的故障率, 如受网络攻击、所处自然

环境相对恶劣等情形,若恢复中遇到此类情形在方案优化前可以对高故障率线路进行预处理,即若这些线路停运不影响整体系统连通性时,可将此类线路置为停运状态,即删除无向图中对应的边;否则将无自启动能力的失电孤岛中的节点与边从系统中移除,以保证待划分系统的连通性。

b. 残存带电孤岛的处理。

系统崩溃的过程中,系统某部分区域可能通过紧急控制及时与故障区域解列,形成稳定运行的孤岛。在系统恢复过程中,该区域能够为停电区域提供功率支持,可以视为启动电源。为适应本文建立的优化模型,取其中的机组 j 等效作为黑启动电源。由于带电区域的厂站不能分在不同的子系统内,故令 $x_{ij}=1(i \in E_j)$,其中 E_j 为机组 j 所在的带电区域。

c. 摇摆节点的概念。

基于“就近原则”的网络化简策略,在确定主动解列方案时极大地提高了计算效率^[16]。一般而言,节点之间的电气距离越小,节点之间的联系越紧密。系统分区恢复时希望子系统内节点之间电气联系尽可能紧密,因此本文假定黑启动电源主要负责其附近的待恢复厂站。而线路的电抗值在一定程度上反映了线路两端节点的电气距离,故本文通过 Dijkstra 算法计算某节点到各个黑启动电源的电气距离,当该节点到任意 2 个黑启动电源的电气距离之差在一定阈值内时,称该节点为摇摆节点,即只需要对这些摇摆节点进行决策,若阈值取值合适会大幅降低决策空间的规模,优化模型求解效率将显著提高。

$$L_{ij-ik} = |D_{ij} - D_{ik}| \quad j, k = 1, 2, \dots, t; j \neq k \quad (19)$$

其中, L_{ij-ik} 为节点 i 到两黑启动机组的电气距离之差; j 和 k 表示黑启动电源节点的编号; t 为划分的子系统总数; D_{ij} 为节点 i 到电源节点 j 的最短电气距离,以线路电抗为权重采用 Dijkstra 算法求得。注意对于带电区域等效的黑启动电源,其余节点到该等效黑启动电源的电气距离为到该区域内所有节点的平均电气距离。若 L_{ij-ik} 的值小于等于某一阈值 σ , 即 $L_{ij-ik} \leq \sigma$ 时,则认为该节点可由机组 j 和 k 当中任一黑启动电源恢复;反之,取与其距离近的机组作为该节点的黑启动电源。

需要注意的是,阈值的选择对子系统划分策略的制定具有重要影响。如果阈值过大,摇摆节点的数量较多,网络简化效果不明显,求解效率不会显著提高;反之,则会造成决策空间过小,可能会错过某些可能最优解。

2.2 模型的求解方法

本文建立的关于恢复子系统划分方案集生成的模型为标准的 ILP 模型,具有成熟的求解算法,如分支定界法、割平面法等。目前,市场上已有多种高效

的数学规划问题求解器,比如 CPLEX 求解器能够高效求解包括线性规划、混合 ILP 等数学规划模型,已经在电网规划、经济调度等方面有广泛应用。因此,本文在通用代数建模系统 GAMS (General Algebraic Modeling System) 上建立相应模型并多次调用 CPLEX 求解器获取恢复子系统划分方案集。具体计算流程见图 2。

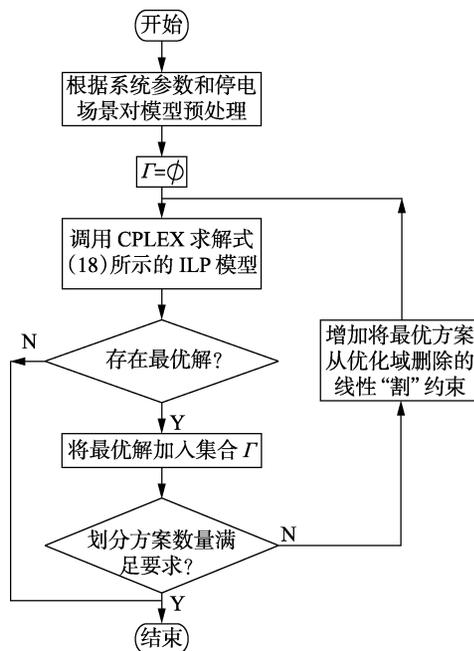


图 2 恢复子系统划分方案集求解流程图

Fig.2 Flowchart for solving restoration subsystem dividing scheme set

3 子系统划分方案的综合评价

3.1 评价指标集的建立

a. 改进模块度指标。

电网具有明显的小世界网络特性,因此文献[6]提出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,但其仅将电网抽象成简单无向无权图,忽略了电气参数的影响。为体现系统内部厂站的电气联系,本文以线路电抗的倒数为权重构建有权图^[10],其值越大表明节点之间的联系越紧密,采用式(20)计算改进模块度指标 Q 。

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left(A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(i,j) \quad (20)$$

其中, m 为电网中所有线路权重之和,即线路电抗的倒数之和; A_{ij} 为电网连接矩阵中的元素,若节点 i, j 之间存在线路,则 A_{ij} 为线路电抗的倒数,反之为 0,显然 $m = \sum_{i,j} A_{ij}/2$; k_i 为节点 i 的加权度,即节点直接连接的线路权值之和; $\delta(i,j)$ 为指示节点 i, j 是否在同一子系统的二元参数,若节点 i 和 j 在同一子系统则 $\delta(i,j) = 1$, 否则 $\delta(i,j) = 0$ 。为体现改进模块度指

标的有效性,计算了图 3 所示 12 节点系统 3 种子系统划分方案的 2 种模块度指标,表 1 列出了相应结果。

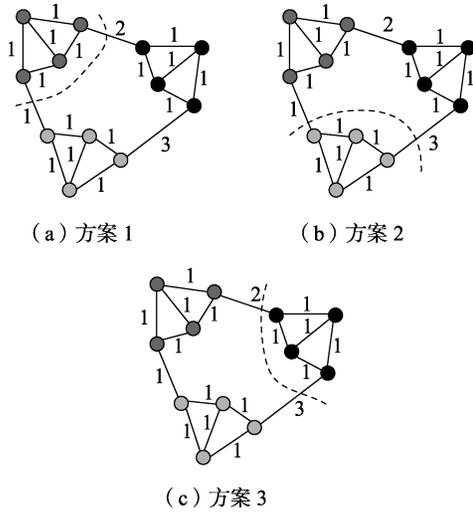


图 3 12 节点系统子系统划分示意图

Fig.3 Schematic diagram of subsystem partitioning for 12-bus system

表 1 2 种模块度对比

Table 1 Comparison of modularity between two methods

方案	模块度	
	无权图	有权图
1	0.333 3	0.449 0
2	0.333 3	0.401 4
3	0.333 3	0.353 7

b. 子系统恢复时间。

子系统划分的目的是为了实现每个子系统的并行恢复,加快系统恢复进程,故划分方案中子系统建立相应的恢复网架的时间越短越好,包括各子系统所需最长时间 T_{max} 和子系统之间恢复等待时间 T_{wait} 两方面。本文恢复网架的时间主要考虑线路的恢复时间,以恢复时间为线路权重,采用 Prim 算法求解每个子系统的最小生成树即可获得子系统的恢复时间 T_k ,进而可以获得 T_{max} 和 T_{wait} 。

$$T_{max} = \max \{ T_1, T_2, \dots, T_t \} \quad (21)$$

$$\begin{cases} T_{wait} = \sqrt{\frac{1}{t} \sum_{k=1}^t (T_k - G)^2} \\ G = \sum_{k=1}^t T_k / t \end{cases} \quad (22)$$

c. 无功充裕度。

系统恢复期间,过电压问题是影响系统安全的重要因素。一般而言,系统中无功备用容量越大,其电压稳定裕度越大。因此,在划分子系统时,应尽量使各子系统中无功充足。为此,本文定义了无功充裕度 Q_m 指标:

$$Q_m = \min \left\{ \frac{Q_{G,k} + Q_{L,k}}{Q_{C,k}} \mid k = 1, 2, \dots, t \right\} \quad (23)$$

其中, $Q_{G,k}$ 和 $Q_{L,k}$ 分别为子系统 k 的发电机无功进相能力总和及无功负荷之和; $Q_{C,k}$ 为经并联电抗补偿后子系统 k 内线路充电无功功率之和。无功充裕度的含义是子系统内有足够的无功负荷平衡线路的充电无功,尽可能避免无功不足引起的电压问题。

3.2 方案综合评价方法

计算所有方案的上述指标后,需要对方案进一步决策优化。为避免指标之间量纲和数量级对决策结果的影响,首先对数据进行标准化处理,然后采用注重指标客观信息的变异系数法^[17]对方案进行综合评估,为调度人员提供决策支持。

4 算例分析

为了验证本文所提模型和方法的有效性,本文采用新英格兰 10 机 39 节点系统和 IEEE 118 节点系统进行了算例验证。优化模型在 GAMS 平台建立,其中 ILP 模型调用 CPLEX 求解器求解。模型预处理和多属性决策在 MATLAB 平台完成。计算采用普通 PC 机,配置为 Intel(R) Core(TM) i5 CPU,安装内存为 8 GB。

4.1 算例 1

首先采用新英格兰 10 机 39 节点系统进行测试,图 4 给出了系统示意图,该系统包含 39 个节点,46 条线路。其中,假定节点 30、33 机组具有自启动能力,作为系统的黑启动电源构建恢复子系统。参数设置如下:水电机组的最小技术出力系数 α_i 设置为 0,即机组不受最小技术出力的限制,火电机组的 α_i 取 0.35;负荷节点的 I 类负荷比例设置为 20%;每条线路的恢复时间取 [3,6] min 之间的随机数,且在优化过程中保持不变。

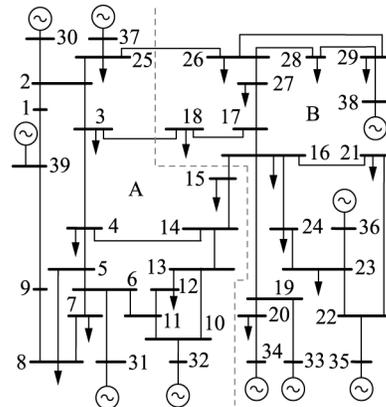


图 4 新英格兰 10 机 39 节点系统

Fig.4 New England 10-machine 39-bus system

采取与文献[12]类似的方法初步简化系统,尤其注意线路 11-12、12-13、19-20 为变压器支路,故节点 11、12、13 在同一子系统,节点 19、20 在同一子系统。本文取子系统之间联络线数量在前 30 的方

案,即集合 I 中元素个数为 30。CPLEX 求解器收敛相对间隙设置为 0.001%,在 GAMS 中调用 CPLEX 求解建立的 ILP 模型,耗时 7.25 s 确定了具体的划分方案。采用变异系数法对方案集进行综合评估取最优方案,指标的权重向量 $W=[0.185\ 0, 0.229\ 9, 0.222\ 7, 0.362\ 4]^T$,进而获得各个方案综合评价值。表 2 给出了综合评价值前 5 的划分方案和指标值,图 4 中虚线表示最优方案。

表 2 子系统划分方案及指标值

Table 2 Subsystem partitioning schemes and corresponding index values

方案	子系统间联络线	Q	$T_{\max}, T_{\text{wait}}/\text{min}$	Q_m	综合评价
1	3-18, 15-16, 25-26	0.413 6	81.9, 1.53	2.286	0.931 4
2	14-15, 17-18, 25-26	0.414 1	82.1, 2.38	2.265	0.918 5
3	3-18, 14-15, 25-26	0.438 4	83.3, 2.55	2.199	0.896 0
4	15-16, 17-18, 25-26	0.387 2	85.8, 6.46	2.285	0.883 6
5	2-25, 3-18, 14-15	0.427 0	91.8, 11.0	2.278	0.862 4

通过对比方案 1 和方案 3,可以发现仅线路 15-16 和线路 14-15 不同。若选择方案 1 进行分区恢复,当调度人员在恢复过程中获知线路 15-16 的并列装置故障,只需对方案微调改用线路 14-15 实现系统并列。假定节点 30、33 机组形成的子系统分别为子系统 A、B,仅断开线路 16-19 形成的两子系统仍满足约束条件,但是该方案的 Q 指标值为 0.097 并且 A、B 系统的恢复时间分别为 141.4 min 和 16.8 min,不仅形成的社团结构特征不明显,而且恢复时间相差太大,不利于恢复操作的进行。相比而言,方案 1 形成的两子系统 Q 指标值为 0.413 6,有明显的社团结构特征,同时两者最大恢复时间 T_{\max} 为 81.9 min 且恢复等待时间 T_{wait} 仅为 1.53 min,有助于恢复的并行完成,加快恢复进程。

为分析算例 1 可行解的具体分布,本文方法耗时 163.52 s 找到所有 307 种可行解,以 3(24) 表示 24 种方案系统间联络线为 3 条(后同),则解的分布为 1(1)、2(2)、3(24)、4(67)、5(116)、6(97)。算例 1 的规模相对较小,获取所有可行解的时间代价却很大。若系统规模扩大随之而来的计算代价将无法估量,因此有必要对模型进行预处理,比如系统中待恢复厂站距离黑启动电源不应过远。

4.2 算例 2

算例 1 系统规模相对较小,计算时间较短,故未充分考虑模型的预处理。为进一步证明本文方法的有效性以及说明模型预处理的作用,本文采用 IEEE 118 节点系统算例进行了验证。IEEE 118 节点系统的简化图如图 5 所示,图中未注明机组与负荷的分布情况。假定节点 12、66、89 为黑启动电源,其余参数设置不变。

为提高模型求解效率,引入摇摆节点概念降低决策空间的规模。表 3 给出了不同阈值 σ 下的决策

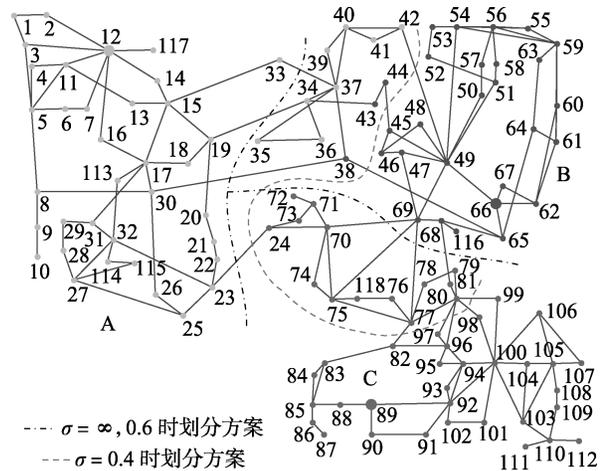


图 5 IEEE 118 节点系统及子系统划分方案

空间规模、解的分布以及计算时间。表 4 给出了不同阈值下黑启动电源可以恢复的节点集合,能够看出黑启动电源可恢复节点数量随阈值的减小而减少。比如,节点 1—14 距离节点 89 相对较远,明显不能由节点 89 恢复,在表 4 中体现为节点 89 的可恢复节点集合不包含节点 1—14。

表 3 不同 σ 值的决策空间规模及计算结果

Table 3 Decision space scale and computation result for different values of σ

σ	决策空间规模	前 20 解的分布	计算时间/s
∞	3^{115}	7(5), 8(15)	43.25
0.6	$2^{32} \times 3^{82}$	7(5), 8(15)	33.65
0.4	$2^{88} \times 3^{24}$	9(20)	20.33

表 4 不同 σ 值下的各黑启动电源可恢复节点集合

Table 4 Restorable node set of each black-start unit for different values of σ

σ	黑启动电源节点	可恢复节点
0.6	12	1-65, 67-87, 93-101, 103-118
	66	1-11, 13-88, 91-118
	89	15, 17-41, 43, 53-56, 59-65, 68-116, 118
0.4	12	1-65, 67-83, 94-100, 103-118
	66	1-11, 13-87, 92-118
	89	76-79, 82-112, 118

综上,随着阈值的减小,决策空间规模缩减程度不断增大,计算时间越来越短。当 $\sigma=0.6$ 时,解的分布情况与不考虑摇摆节点的情景下大致相同,且计算时间减少 10 s 左右;当 $\sigma=0.4$ 时,计算时间减少到原来的一半,但是排除了某些可行解。这说明阈值的选择对决策结果有重要影响,需要调度人员对电网相对熟悉。摇摆节点的引入可能会排除一些可行解,但是大幅提高了模型求解效率,而且系统规模越大,效果越明显。

经过模型的求解以及变异系数法对方案集综合评价后,表 5 列出了不同阈值下的相对最优方案,具体划分方案如图 5 所示。

表 5 不同 σ 值子系统划分方案及指标值Table 5 Subsystem partitioning schemes and corresponding index values for different values of σ

σ	子系统间联络线	Q	$T_{\max}, T_{\text{wait}}/\text{min}$	Q_m
$\infty, 0.6$	8	0.599 0	185.45, 18.5	1.861
0.4	9	0.577 5	191.63, 25.4	1.915

算例结果说明选择合理的阈值判断系统中的摇摆节点可以有效降低决策空间的规模,同时能够避免一些不合适的划分方案,这为本文提出的模型和方法应用于实际大规模电力系统提供了可能性。

5 结论

本文建立了子系统划分的 ILP 模型,保证了解的全局最优性。在单一优化目标的基础上,通过“割”约束的添加获取足够数量的子系统划分方案集,结合建立的评价指标集和变异系数法对方案进行综合评估,为调度人员提供丰富合理的子系统划分方案。摇摆节点概念的引入有效降低了决策空间规模,提高了模型的求解效率。算例结果表明,本文方法对于一定规模的电力系统具有求解速度、解的收敛性和丰富性等多方面优势,模型预处理的思路为提出的方法应用于大规模实际系统提供了可能性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 顾雪平,李少岩,李凯. 用于网架重构决策的节点重要度动态评价方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):89-95.
GU Xueping, LI Shaoyan, LI Kai. Dynamic assessment of nodal importance for decision-making of network reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4):89-95.
- [3] 唐斯庆,张弥,李建设,等. 海南电网“9·26”大面积停电事故的分析与总结[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):1-7.
TANG Siqing, ZHANG Mi, LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on September 26th-causes and recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1):1-7.
- [4] ADIBI M M, FINK L H. Power system restoration planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1):22-28.
- [5] 魏震波. 复杂网络社区结构及其在电网分析中的应用研究综述[J]. 中国电机工程学报,2015,35(7):1567-1577.
WEI Zhenbo. Overview of complex networks community structure and its applications in electric power network analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7):1567-1577.
- [6] 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.
- [7] 刘昌盛,谢云云,石屹岭,等. 加快含快速切回机组电网恢复的动态分区策略[J]. 电力系统自动化,2017,41(19):46-53.

- LIU Changsheng, XIE Yunyun, SHI Yiling, et al. Dynamic partition strategy for fast restoration of power systems with fast cut back units [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19):46-53.
- [8] 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.
- [9] 刘玉田,谭冰雪. 大电网恢复适应性分区方法[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(2):49-54.
LIU Yutian, TAN Bingxue. Adaptive partition method for large power system restoration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2):49-54.
- [10] QUIROS 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(11):381-390.
- [11] 梁海平,顾雪平. 基于节点电压相近度的黑启动子系统划分方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(14):81-86.
LIANG Haiping, GU Xueping. Black-start subsystem partitioning based on similarity of nodes voltage [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14):81-86.
- [12] 孙磊,张璨,林振智,等. 大停电后电力系统黑启动分区的两步策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):14-21.
SUN Lei, ZHANG Can, LIN Zhenzhi, et al. Two-step strategy for black-start zone partitioning of power system after blackout [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9):14-21.
- [13] QIU F, WANG J, CHEN C, et al. Optimal black start resource allocation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3):2493-2494.
- [14] 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.
- [15] LI C, HE J, ZHANG P, et al. A novel sectionalizing method for power system parallel restoration based on minimum spanning tree [J]. Energies, 2017, 10(7):1-21.
- [16] 吴学娟,沈沉,向学军,等. 主动解列策略求解过程中的网络化简[J]. 中国电机工程学报,2008,28(7):7-12.
WU Xuejuan, SHEN Chen, XIANG Xuejun, et al. Network simplification for active splitting strategy searching [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7):7-12.
- [17] 黄冰,李勇,谭益,等. 用于解决电网输电阻塞的机组降压运行方案多阶段优选方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):144-150.
HUANG Bing, LI Yong, TAN Yi, et al. Multi-stage optimization of voltage-reduced unit operation against transmission congestion [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):144-150.

作者简介:



周光奇

周光奇(1993—),男,山东济宁人,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;

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；

马世英(1969—),男,山东安丘人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统仿真分析、源网协调控制技术；

唐晓骏(1979—),男,河南南阳人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为电力系统分析、稳定和控制在等；

谢岩(1990—),男,山西运城人,工程师,硕士,研究方向为电力系统分析、运行与控制；

李少岩(1989—),男,河北保定人,讲师,博士,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)。

Restoration subsystem division based on integer linear programming and comprehensive evaluation of dividing schemes

ZHOU Guangqi¹, GU Xueping¹, MA Shiyang², TANG Xiaojun², XIE Yan², LI Shaoyan¹

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: If there are several black-start units in the system after blackout, a reasonable subsystem division scheme will help sub-systems be restored in parallel and shorten the restoration time. An integer linear programming model for subsystem division is established, which takes the minimize number of tie lines between sub-systems as its objective. The “cut” constraint is constructed and the high-efficiency solver CPLEX is adopted to solve the model several times for obtaining abundant schemes. The evaluation index set of subsystem division schemes is set up, and the variation coefficient method is used to comprehensively evaluate and sort the schemes. The concept of swing node is introduced to pre-process the model for reducing the size of decision space. The subsystem division results of New England 10-machine 39-bus system and IEEE 118-bus power system verify the effectiveness of the proposed model and method.

Key words: power system restoration; restoration subsystem division; integer linear programming; swing node; electric power systems

(上接第 90 页 continued from page 90)

Reliability analysis of IEC61850 substation automation system based on cyber-physical interface matrix

LI Yong¹, CHEN Yu¹, CAI Ye², CAO Yijia¹, WEN Ming³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Province Collaborative Innovation Center of Clean Energy and Smart Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410014, China;

3. Economic Research Institute of State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410004, China)

Abstract: With the deepening interaction between communication control network and physical device network in power system, the comprehensive reliability of the cyber-physical-based substation automation system needs to be studied urgently. The actual IEC61850 substation automation system is taken as an example, whose cyber-physical integrated framework is established based on the main wiring of substation. The influences of the cyber protection components on the main physical equipment are classified, and the cyber-physical interface matrix is proposed to represent the probabilities of fault propagation categories. The reliability analysis method of substation automation system is put forward considering the influence of cyber layer. And the reliability of an actual substation is calculated to verify the correctness of the proposed method. The reliability indexes are further analyzed with an example, and results show that the fault in cyber layer will obviously increase the power loss of the whole system, while it has relatively smaller influence on the risk of cascading fault. Finally, the sensitivity analysis of information transmission delay is implemented, which shows that the changing magnitude of expected demand not supplied increases significantly with the increase of the transmission delay rate of process bus.

Key words: cyber-physical system; IEC61850; substation automation system; Monte Carlo method; cyber-physical interface matrix; reliability analysis