

孤网全黑状态的恢复网架和分区优化算法

陈祺炜¹, 吴熙¹, 李海峰², 罗凯明², 刘林²

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力公司调度控制中心, 江苏 南京 210024)

摘要: 电网故障后解列出的孤网是电力系统的重要组成部分, 优先恢复系统中的孤立电网具有简化计算、加速电网恢复和及时带动重要负荷的优点。文中针对恢复的快速性和稳定性, 综合考虑了孤网全黑状态的分区策略和各分区的恢复网架, 引入最短启动时间算法和整数条件下的线性规划法, 提出一种全新的孤网分区优化算法。该算法以机组、负荷最短启动时间为目标函数, 以分区内的机组稳态有功、无功功率平衡为约束, 将复杂的多目标非线性规划问题简化为单目标多约束的线性规划问题。文末以新英格兰 10 机 39 节点系统作为算例验证本文算法的有效性。

关键词: 黑启动; 孤网分区; 并行恢复; 恢复网架

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)01-0074-05

随着经济的快速发展, 交直流输电和电网互联技术不断进步。系统中大量引入各种高压电气设备、大容量机组, 导致现代电力系统日趋复杂化。分布式电源等接入电网供应电源的同时, 电网抵抗大扰动能力却在不断被弱化。大规模电力系统中, 当局部电网发生严重故障时, 一旦调度人员操作不当或保护装置不正确动作, 将会引发电力系统的连锁反应, 扩大故障影响, 导致大范围停电甚至是全网的崩溃^[1]。如果能在大停电事故时, 采取合理快捷的黑启动措施, 及时排除故障, 减小对经济、社会、民生的不良影响, 具有非常重要的意义。

电网故障后继电保护相继动作, 解列出的多个孤网成为电力系统的重要组成部分。孤网黑启动就是指在全黑状态下, 不依靠大电网帮助, 仅通过孤网内部的黑启动机组带动待启动机组, 逐步实现孤网的恢复^[2]。孤网黑启动的恢复策略主要分为两类^[3]: 串行恢复和并行恢复。串行恢复对孤网内的待启动机组依次恢复, 属于接力模式, 过程冗杂繁琐, 恢复速度慢。并行恢复在技术允许的情况下将孤网的复杂机组分解为若干个分区同时黑启动。在分区内部, 一般先恢复待启动机组和输电线路, 形成特定的恢复网架, 加快全网恢复进程。本文的黑启动分区方案将建立在并行恢复的基础上。

电力系统黑启动问题一直是电力系统安全防护的重要课题之一, 备受中外学者关注。文献[4]提出了一种基于有序二元决策图的分区方法, 将分

区模型转换为布尔函数。文献[5]提出了一种以节点恢复成功率为目标的分区优化方案, 并采用交叉粒子群优化算法进行求解, 提高了黑启动成功率。文献[6]考虑了黑启动过程中设备投运失败的可能性, 建立了以路径转移系数为基础的评价函数, 以此对电力系统进行分区。文献[7]采用图论的传统方法对电力系统拓扑进行优化分区。文献[8]则采用节点电压相近度进行作为黑启动机组分区依据, 根据潮流计算的节点电压、黑启动电源的数目以及黑启动电源所在节点的电压获得电压阈值进行分区。文献[9]以恢复电网中尽可能多的发电能力为目标, 采用遗传算法求解电网黑启动分区。

可见, 常规黑启动方案只研究单个黑启动机组的恢复方法, 无法同时启动多台机组, 浪费了启动时间^[10]。此外, 近年来不断引入智能算法求解电力系统的恢复网架及分区方案, 存在计算量较大, 结果稳定性较差等问题, 难以应用于工程实践。对此, 文中综合考虑孤网恢复网架和分区策略, 以恢复时间最短为目标函数, 使尽可能多的机组在短时间内恢复, 并使得每个分区都有且只有一个黑启动机组, 以该机组为核心构建孤网各分区的恢复网架, 为黑启动后期的网架重构奠定坚实基础。

1 系统建模

1.1 目标函数

孤网内含有黑启动机组、待启动机组和负荷三类节点。分区可以将这三类节点进行合理的划分和规划, 实现以下 3 个主要目标: (1) 以最短时间恢复电力系统中的重要输电线路。(2) 以最短时间恢

收稿日期: 2016-08-26; 修回日期: 2016-10-12

基金项目: 国家电网公司科技项目(电网黑启动过程中利用直流输电的电网恢复技术研究)

复电网的发电能力。(3) 以最短时间建立恢复网架。因此需要将相关线路所需的恢复时间设定为线路权重(详见 1.3),使用最短恢复时间算法对线路加权进行计算,确定黑启动电源到任意节点的最短恢复时间。综上所述,以任意一个待启动机组到黑启动机组所需的恢复时间最短为目标,待启动机组最优分组问题的目标函数可以描述为:

$$\begin{cases} f = \min \sum_{g=1}^m [s_{1g}, s_{2g}, \dots, s_{ng}] \cdot [b_{1g}, b_{2g}, \dots, b_{ng}]^T \\ \text{s.t. } s_{1g} + s_{2g} + \dots + s_{ng} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, m 为待启动机组数量; $[s_{1g}, s_{2g}, \dots, s_{ng}]^T$ 表示编号为 g 的待启动机组是否属于黑启动机组的布尔变量。例如,当 $s_{cg} = 0 (1 < c \leq n; 1 \leq g \leq m)$, 则表明 g 号待启动机组不属于 c 号黑启动机组所在的分区。此外, $[b_{1g}, b_{2g}, \dots, b_{ng}]^T$ 中任意元素表示待启动机组 g 到各个黑启动机组所需最短启动时间。

1.2 约束条件

黑启动分区策略必需保证后续系统恢复过程中的安全稳定,因此在分区过程中需要注意相关的约束条件。具体包含如下三部分:

(1) 黑启动机组约束,即黑启动机组需要分入不同的分区中,此外,待启动机组需要平均分入不同的分区中,保证各个分区的机组容量平衡。

$$\sum_{g=1}^m s_{ag} \leq \frac{m}{n} + 1 \quad a = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

(2) 功率平衡约束,各分区内的黑启动机组容量、待启动机组容量以及重要负荷供需平衡。

$$\alpha_1 P_{Ga} \leq \sum_{k=1}^l p_k y_{ak} \leq \beta_1 P_{Ca} \quad a = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式(3)中: P_{Ca} 为分区 a 中机组的有功容量之和; p_k 为负荷消耗的有功功率; α_1 和 β_1 为约束系数; y_{ak} 表示 k 号负荷节点与 a 号黑启动机组的从属关系。

(3) 无功平衡约束,各分区内线路的充电无功总和不应大于黑启动机组的进相无功上限,以保证系统的电压平衡,此外系统中多余的无功需要进行补偿或消耗。

$$\alpha_2 Q_{Ca} \leq \sum_{k=1}^l q_k y_{ak} \leq \beta_2 Q_{Ga} \quad a = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: Q_{Ca} 为分区 a 中机组的无功容量之和; q_k 为负荷消耗的有功功率。

1.3 输电线路启动时间

结合文献[11]所引入的时间参数,可以为电力系统中每一条线路设置启动时间,以此作为线路的权重,进行 1.1 的目标函数计算。

线路操作人员基于经验,将线路的恢复时间划

分为乐观估计时间 t_A , 悲观时间 t_B 和最可能的估计时间 t_M , 故线路恢复时间的均值和方差为:

$$t_r = (t_A + 4t_M + t_B)/6 \quad (5)$$

$$\sigma_r = (t_B - t_A)/6 \quad (6)$$

假设黑启动电源 n 到待启动机组 m 之间由 j 条线路组成,则恢复时间的均值和方差为:

$$t_{ij} = \sum_{i=1}^j (t_A + 4t_M + t_B)/6 \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} = \sum_{i=1}^j (t_B - t_A)/6 \quad (8)$$

将启动时间作为输电线路的加权函数应用于目标函数的计算中。

2 分区算法的设计

2.1 黑启动分区个数

文献[12]已经提出了黑启动分区个数的考虑原则,即在电力系统解列后产生的孤网中,当黑启动机组个数 n 小于待启动机组个数 m 时,分区数 s 等于黑启动机组个数,反之等于待启动机组个数,在此不进行证明。

$$s = \min(n, m) \quad (9)$$

2.2 最短启动时间算法

根据 1.1 的目标函数可知,孤网分区算法求解需要每一个机组、负荷节点相对于任意一个黑启动机组的最短启动时间,因此文中拟采用最短启动时间算法进行计算,详细步骤如下:

(1) 初始化:起始点设置为 $ds = 0$, 集合 ps 为空,并标记起始点 s , 记 $k = s$, 连通图中其他所有节点设为未标记点。

(2) 检验从所有已标记的点 k 到其直接连接的未标记的点 j 的距离,并设置:

$$d_j = \min[d_j, d_k + l_{kj}] \quad (10)$$

其中, l_{kj} 为从点 k 到 j 的直接连接距离。

(3) 选取下一个点:从所有未标记的节点中,选取 d_j 中最小的一个 j , 并将该点进行标记。

(4) 检查是否所有的点都已经标记,如果都标记,则退出算法, d_j 为所求的最短启动时间,否则重复步骤 2,3。

2.3 节点分区算法

本文 1.1 节的目标函数可以用线性规划的方法进行求解,再考虑到充当变量的分区机组矩阵 S_g 取值非 0 即 1, 故采用 0-1 线性规划法进行求解。0-1 型整数线性规划是一类特殊的整数规划,它的变量取值仅为 0 或 1, 其模型如下:

$$\min f = c^T x \quad (11)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \\ x_j \text{ 取 } 0 \text{ 或 } 1 (j = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_n)^T$, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, $\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times n}$, $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_m)^T$ 。

此时的决策变量被称为为 0-1 变量,或布尔变量。在实际问题中,如果引进 0-1 变量,就可以把各种需要分别讨论的线性、非线性规划问题统一在一个问题中进行讨论了。

2.4 分区算法的实现步骤

孤网黑启动分区算法要求严格按照目标函数和约束条件对系统中的黑启动机组、待启动机组和负荷三类节点进行合理分区。本节重点旨在综合前文的思路,建立一套完整的数学分区模型,求解各个分区的最优恢复网架,使得分区内的待启动机组、负荷节点从黑启动机组中获取启动功率的时间最短,并考虑黑启动机组约束,使各分区的容量达到平衡。

假设孤网中含有 n 台黑启动机组, m 台待启动机组, 1 个负荷节点。为搭建分区模型,首先构造 n 行 m 列的分区机组矩阵 \mathbf{S} 和 n 行 1 列的分区负荷矩阵 \mathbf{Y} , 矩阵 \mathbf{S} 由 m 个 n 维向量 \mathbf{S}_g 组成, 其中 $\mathbf{S}_g = [s_{1g}, s_{2g}, \dots, s_{ng}]^T$; 矩阵 \mathbf{Y} 由 1 个 n 维向量组成其中 $\mathbf{Y}_k = [y_{1k}, y_{2k}, \dots, y_{nk}]^T$ 。其中 g 和 k 分别为任意待恢复机组编号和任意负荷节点编号 ($1 \leq g \leq m; 1 \leq k \leq l$); 向量中的元素分别表示待启动机组、负荷节点是否属于黑启动机组的布尔变量,即孤网中所有黑启动机组和 g 号待启动机组、 k 号负荷节点的从属关系。可见矩阵 \mathbf{S} 和 \mathbf{Y} 能充分反映孤网内所有待启动机组、负荷节点和黑启动机组之间的从属关系。

再构造一个 n 行 m 列的机组恢复时间矩阵 \mathbf{B} 和 n 行 1 列的负荷恢复时间矩阵 \mathbf{C} , $\mathbf{B}_g = [b_{1g}, b_{2g}, \dots, b_{ng}]^T$; $\mathbf{C}_k = [c_{1k}, c_{2k}, \dots, c_{nk}]^T$ 。其中任意元素表示待启动机组 g 和负荷节点 k 到各个黑启动机组所需的最短启动时间,该矩阵中数值的计算方法可以运用 2.2 中描述的最短启动时间算法。

综上所述,待启动机组最优分组问题可描述为:

$$\begin{cases} \min \sum_{g=1}^m [s_{1g}, s_{2g}, \dots, s_{ng}] \cdot [b_{1g}, b_{2g}, \dots, b_{ng}]^T \\ \text{s.t.} \quad s_{1g} + s_{2g} + \dots + s_{ng} = 1 \\ \sum_{g=1}^m s_{ag} \leq \frac{m}{n} + 1 \quad a = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (13)$$

首先求解式(13),其中加入了黑启动机组约束条件,即 1.2 中所提及的约束条件 1。这样可避免待启动机组的分配不均匀问题,同时初步保证各分区机组容量的平衡。式(9)采用 0-1 线性规划法求

解,解得黑启动机组和待启动机组的从属情况。

$$\begin{cases} \min \sum_{k=1}^l [y_{1k}, y_{2k}, \dots, y_{nk}] \cdot [c_{1k}, c_{2k}, \dots, c_{nk}]^T \\ \text{s.t.} \quad y_{1k} + y_{2k} + \dots + y_{nk} = 1 \\ \alpha_1 P_{Ga} \leq \sum_{k=1}^l p_k y_{ak} \leq \beta_1 P_{Ga} \quad a = 1, 2, \dots, n \\ \alpha_2 Q_{Ga} \leq \sum_{k=1}^l q_k y_{ak} \leq \beta_2 Q_{Ga} \quad a = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (14)$$

其次求解式(14),通过负荷节点的合理分配满足孤网分区的有功功率平衡和无功功率相对平衡,即 1.2 中所提及的约束条件 2 和 3。文中先对待启动机组分区后再计算每个分区的有功和无功容量,按需求对各个分区划入负荷节点以平衡相关功率,得到所有负荷的分区结果。该方程同样可使用 0-1 线性规划求解。详细流程如图 1 所示。

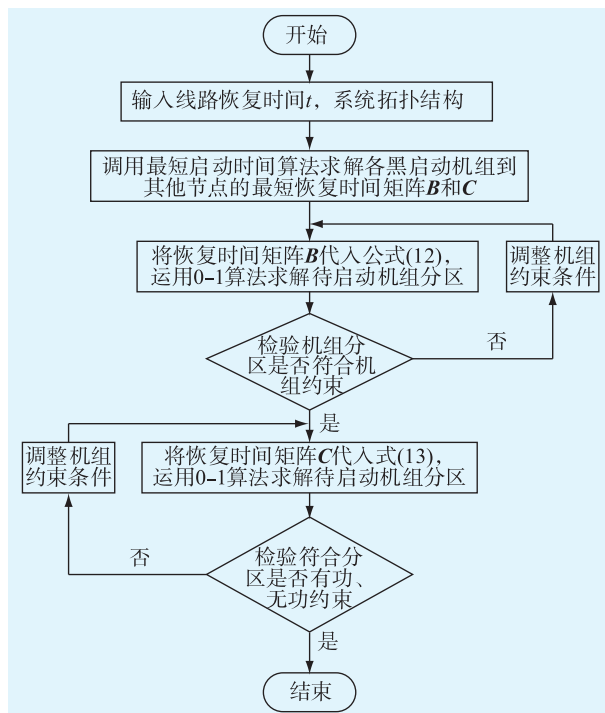


图 1 分区算法

3 算例分析

在 Matlab 平台上编写程序,算例采用 ieee39 节点系统,系统结构如图 2 所示。假设节点 30,31 和 34 为黑启动机组节点,32,33,35,36,37,38,39 为待启动机组,剩下的节点即为负荷节点。

3.1 分区个数

比较黑启动机组和待启动机组的个数,取两者中的最小值 3 为黑启动分区个数。

3.2 机组分区

以节点 30,31,34 分别为分区 1、分区 2、分区 3

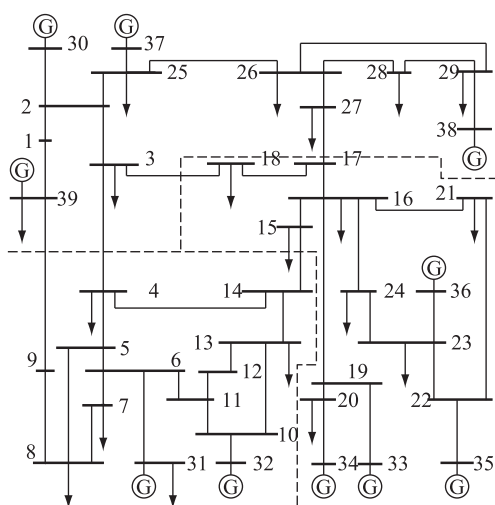


图2 新英格兰10机39节点系统分区结果

的源节点。针对7台待启动机组构造7个恢复时间矩阵。分别以节点32,33,35,36,37,38,39为末节点进行最短启动时间计算,求解数值放入7个3维恢复时间矩阵 B_1, B_2, \dots, B_7 中。对于系统中任意一个待启动节点,如节点37,从3个分区的黑启动机组获取启动功率的时间分别为6 min,20 min,19 min,这样节点37所对应的恢复时间矩阵为 $[6, 20, 19]^T$,待启动机组的恢复时间向量如表1所示。

表1 新英格兰10机39节点系统中待恢复机组的恢复矩阵

节点	$T1/\text{min}$	$T2/\text{min}$	$T3/\text{min}$	恢复时间矩阵
32	21	24	12	$[21, 24, 12]$
33	16	8	24	$[16, 8, 24]$
35	21	19	29	$[21, 19, 29]$
36	21	19	29	$[21, 19, 29]$
37	6	20	19	$[6, 20, 19]$
38	13	21	26	$[13, 21, 26]$
39	8	24	15	$[8, 24, 15]$

将求解得到的恢复时间矩阵代入公式12,可以求得分区机组矩阵为:

$$S = [S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6 S_7] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

由求解得到的分区机组矩阵可得,节点37,38,39与黑启动节点30同属于分区1;节点33,35,36与黑启动节点34同属于分区2;节点32与黑启动节点31同属于分区3。

3.3 负荷分区

在得到待启动机组分区后,可以继续进行负荷分区的计算。负荷分区计算与待启动机组分区相类似,取系数 α_1, β_1 为0.8, α_2, β_2 为1.2,分别以3个黑启动节点为源点,29个负荷节点为末端进行最

短启动时间计算,构造29个3维恢复时间矩阵,代入式(14)计算,得到的分区结果如表2所示。

表2 新英格兰10机39节点负荷节点分区结果

分区	负荷节点
1	1,2,3,25,26,27,28,29
2	4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14
3	15,16,17,18,19,20,21,22,23,24

对所求节点进行整理划分,可知负荷节点1,2,3,25,26,27,28,29属于黑启动机组30所在的分区1;负荷节点4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14属于黑启动机组31所在的分区2;负荷节点15,16,17,18,19,20,21,22,23,24。得到如图2所示的分区结果。

为证明本算法的有效性,将文中方法与文献[13]所求得的分区恢复网架进行比较分析。文献[13]将39号待启动机组划入黑启动机组31所在的分区,启动所需时间为15 min,而文中将39号机组划入黑启动机组30所在的分区,启动所需时间为10 min。除此以外,文献[13]所求得的分区1中负荷消耗有功功率超过机组发出有功17%,分区2机组发出的无功功率较负荷高出13%;文中采用了相关的约束条件进行计算,功率不平衡量可以保证在5%以内。因此采用文中的分区方法和恢复网架更有利于孤网黑启动。

4 结束语

将最短启动时间算法和整数线性规划法相结合应用于孤网黑启动分区优化,将孤网中机组的恢复时间和分区的负荷容量统一考虑,提出一套完整的孤网全黑状态下的恢复网架和分区优化算法。该算法以最短时间恢复孤网中的重要输电线路、发电能力、恢复网架为目标,求解出各机组、负荷以及输电线路所属的分区,构建恢复网架。同时以分区内的机组稳态有功功率、无功功率平衡为约束,充分保证孤网分区的合理性和系统黑启动的稳定性。

参考文献:

- [1] 范钧慧,徐楠,刘皓明.含分布式风光电源的配电系统故障恢复策略[J].江苏电机工程,2014,33(1):1-4.
- [2] MOREIRA C L, RESENDEFO, LOPES J A P. Using Low Voltage Microgrids for Service Restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(1):395-403.
- [3] 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.
- [4] 刘映尚,吴文传,冯永青.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.
- [5] 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.

- [6] 梁海平, 芦佳硕, 顾雪平. 基于恢复路径转移系数的电网黑启动分区策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 1-7.
- [7] 张磊, 张璨, 林振智, 等. 大停电后电力系统黑启动分区两步策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 14-21.
- [8] 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.
- [9] 顾雪平, 韩忠晖, 梁海平. 电力系统大停电后系统恢复的优化分区算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 41-46.
- [10] 门冉, 高小涛, 盛昌栋. 含分布式风光电源的配电系统故障恢复策略[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(1): 9-12.
- [11] MOTA A A, MOTA L T M, MORELATO A. Dynamic Evaluation of Reenergization Times During Power Systems Restoration[C]//IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, Latin American, Sao Paulo, 2004.
- [12] 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, 02(1): 190-197.
- [13] 林振智, 文福拴, 周浩. 基于复杂网络社团结构的恢复子系统规划算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 12-16.

作者简介:



陈祺炜

陈祺炜(1994—),男,江苏南京人,硕士研究生在读,研究方向为电力系统安全防御和系统恢复;

吴熙(1987—),男,江苏靖江人,副研究员,研究方向为电力系统低频振荡、次同步振荡、新能源发电技术、FACTS建模与分析;

李海峰(1973—),男,河北怀安人,研究员级高级工程师,从事电网调度运行管理工作;

罗凯明(1978—),男,贵州惠水人,高级工程师,从事电网调度运行管理工作;

刘林(1985—),男,江苏泰州人,博士,从事电网调度运行管理工作。

Recovery Network and Partition Optimization Algorithm of Isolated Networks Under the Full Black State

CHEN Qiwei¹, WU Xi¹, LI Haifeng², LUO Kaiming², LIU Lin²

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Dispatch and Control Center, Nanjing 210024, China)

Abstract: The isolated grid which is splitting after the grid fault has become an important part of the power system. Giving priority to the isolated grid restoration has the advantage of simplifying calculation, accelerating the recovery and restoring the important load in time. It needs to be divided into several partitions in the total black state. This paper is aimed at the rapidity and stability of the restoration, comprehensively considering isolated network partitioning strategy and the restoration skeleton, introducing the shortest path algorithm and integer linear programming, proposing a new optimization algorithm for isolated network partitioning. The algorithm makes the shortest start time of unit as the objective function, constructed by the active power and reactive power balance of the unit to simplify a complex multi objective nonlinear programming problem as a single objective and multi constrained linear programming problem. New England 10-Machine 39-Bus System is used as an example to verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: black-start; isolated network partition; parallel recovery; recovery network

(上接第 69 页)

Research of Online Alerting Technology for Bus Switching Reliability

HUANG Zhechen¹, YUAN Yubo¹, ZHANG Xiaoyi¹, ZHANG Ming², WANG Siman³

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

3. Nanjing Guodian Nanzi Grid Automation Co. Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: Reliable pull-up detection and prevention of misuse warning in the operation of heat-drop bus has been a difficult problem of daily operation and maintenance of substations. In this paper, a computation method is proposed based on research on influence of system operation and contact resistor on switch currents and unbalance of three phase. With state information in bus coupler and transmission line collected, a remote forewarning method for bus switching is studied based on switcher current and degree of three-phase unbalance. The technology combined with bus protection and background monitoring system, is integrated in the model of bus protection of traditional substation or smart substation, and installed in five-anti system to forewarning the danger in bus switching. The reliability of the method is verified by simulation and operation data of actual substation.

Key words: bus switching; substation operation; five-anti lock; bus protection