

基于电网分区的负荷恢复智能优化策略

石立宝¹, 赤东阳¹, 姚良忠², 倪以信¹, Masoud Bazargan²

(1. 电力系统国家重点实验室深圳研究室, 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055;

2. 阿海珐输配电技术中心, 斯塔福德 ST174LX 英国)

摘要: 针对电力系统大停电后的负荷快速恢复问题, 提出了一种基于电网分区的负荷恢复智能优化策略。提出了一种大停电事故后系统恢复的最优分区策略, 并在所建立的优化模型中考虑了为恢复发电机而引入的架空线路充电无功以及为恢复负荷所引入的线路合闸操作次数等影响因素。在完成对大规模系统优化分区后, 对各分区建立了一个统一的并计及网络重构因素的负荷恢复优化模型, 实现各分区负荷的并行恢复。针对上述所提出的优化模型, 通过结合传统图论理论和遗传算法, 实现基于电网分区的负荷恢复优化问题的求解。解算中, 对遗传算法进行了改进, 并针对应用遗传算法时所产生的大量不可行解问题, 提出了随机甩负荷和最短路径修补策略的处理方法, 进一步提高了算法的寻优效率和全局优化能力。以 IEEE30 节点系统为算例进行仿真分析, 验证了所提模型与方法的正确性和有效性。

关键词: 电力系统恢复; 系统分区; 扩展潮流方程; 负荷恢复; 遗传算法

Intelligent optimization strategy for load restoration considering power grid partitioning

SHI Li-bao¹, CHI Dong-yang¹, YAO Liang-zhong², NI Yi-xin¹, Masoud Bazargan²

(1. National Key Laboratory of Power Systems in Shenzhen, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. AREVA T&D Technology Centre, Stafford ST17 4LX, United Kingdom)

Abstract: In this paper, an intelligent optimization strategy for load restoration after power system blackout considering system-partitioning is presented. First of all, an optimal system-partitioning strategy for system recovery after blackout is proposed. Some influence factors involving the charging Mvar of overhead transmission lines for generator restoration, the closing operation times of transmission lines for load restoration are considered during modeling. With respect to the result of optimal system-partitioning, a unified load restoration optimization model taking into account network reconfiguration is built to realize the parallel recovery of each partition. The genetic algorithm (GA) and the traditional graph theory are combined to solve the proposed optimization models described above. Some improvements including stochastic load shedding and the shortest path repair strategies against the problem of a large number of infeasible solutions generated by utilizing the traditional genetic algorithm are made to improve the computational efficiency and the performance of global optimization of GA further during optimization. Finally, the case studies are carried out based on the IEEE-30 test system to demonstrate the effectiveness and validity of the proposed models and methods.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50977051).

Key words: power system restoration; network partitioning; extended power flow equation; load recovery; genetic algorithm

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)02-0001-07

0 引言

现代大规模互联电力系统日趋复杂, 日益增长的负荷需求、设备的相对老化、市场化的运营机制以及可再生能源的接入导致系统逐渐接近其稳定极限运行, 易在级联故障条件下引发大停电事故, 造成巨大的经济损失。近年来国内外大规模停电事故

频发, 如美、加大停电^[1]、意大利大停电、英国伦敦大停电、俄罗斯大停电以及中国海南电网大停电、雪灾导致的湖南郴州大停电等, 即为例证。事故发生后, 如何快速、安全、稳定地恢复供电是保证社会稳定、减少事故损失的最有效手段。研究相应的恢复控制策略具有重要的理论价值和现实意义。

负荷恢复是电力系统恢复控制的最终目的, 而事故后如何加快重要负荷的恢复则是负荷恢复的核心问题。近年来, 国内外学者在此方面进行了较为

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50977051)

系统的研究^[2-9]。文献[2]给出了一种考虑恢复代价最小的分区恢复方案，但是没有考虑重要负荷恢复时间尽可能短的问题。文献[3]将机组启动时约束引入到电力系统分区恢复目标中，未计及重要负荷恢复快慢的因素。文献[4]将网络重构问题表示为以重要负荷恢复量占已恢复负荷总量的比例最高为目标的非线性优化问题，采用DPSO算法给出恢复方案，但是没有考虑系统频率约束，同时没有验证算法稳定性。文献[5]将恢复问题松弛为只考虑系统稳态频率约束的0-1规划问题，采用近似算法进行求解，但是没有给出具体的网架恢复方案。文献[6]采用了扩展潮流方程考虑发电厂的一次调频效应给出了负荷恢复计划，但是这种方法必须是在网络重构基础上制定恢复计划，而实际的恢复中网络重构和负荷恢复需要协调进行，把网络重构和负荷恢复分开后会延长恢复时间。文献[7]通过引进专家系统，考虑了恢复中工业负荷的特性，通过专家系统与分析工具的结合给出了黑启动中的恢复步骤。文献[8]给出了黑启动过程中一次可以启动的最大负荷量的计算，该方法不仅考虑频率下降的因素，而且把电压降落和时间考虑在内。文献[9]根据NERC中的准则，保证发电容量与负荷量匹配、频率、电压都满足约束的条件下探讨分区问题，但没有考虑重要负荷优先恢复的因素。目前，国内外在此方面的研究多集中在基于整个系统的厂站接力式的负荷串行恢复供电，而且鲜于从整体上考虑网络重构和重要负荷恢复的智能协调优化的恢复控制策略。

本文提出了一种基于电网分区的负荷恢复智能优化策略。首先，根据实际系统中的黑启动机组的分布情况，建立了以最小代价和最短负荷恢复时间为目的的最优分区恢复模型；其次，针对各分区，在部分发电机恢复供电情况下，给出了一种计及网络重构因素的负荷恢复优化策略，确保在系统频率和电压允许范围内最大程度地恢复重要的负荷，最终实现各分区负荷的并行恢复。通过结合传统图论理论和遗传算法来实现所提优化模型的求解。解算时，为了避免陷入局部最优，对遗传算法进行了改进，包括采用异位交叉的方法，提高种群的多样性，以及在负荷恢复过程中，采用“切”和“补”的方法，避免了不可行解的产生，从而进一步提高了算法寻优效率和全局优化能力。

1 最优分区负荷恢复数学模型

1.1 最优分区恢复数学建模

电力系统发生大停电后，调度部门要采取积极有效的恢复方案实现系统恢复。对于大型网络，通

常根据电网的结构特点，将电网分成几个子网单独并行恢复，然后通过并网来实现整个系统恢复^[10]。这里，我们提出了一种最优分区的策略，其基本思路是：通过主干网把黑启动电源、部分非黑启动电源以及一些特别重要的负荷构成一个区域，然后根据以上的约束进行解裂。分区的原则是使重要负荷恢复时间尽可能短。一方面，对于无自启动能力的机组，通过合理分区，保证在黑启动初期，以引入最小的充电无功代价连接到黑启动机组；另一方面，引入电源点到负荷点的合闸操作次数来表示负荷恢复的快慢程度。考虑到对于重要负荷，其离电源点越近，越利于恢复，由此，引入负荷权重与负荷到电源点的最短距离的乘积来衡量重要负荷的恢复快慢程度。最终，所提最优分区策略的目标函数为：

$$\min F_1 = c \left(\sum_{i \in NA(p)_k} \frac{\sum_{j \in NL_i} Q_i^j}{\sum_{g \in NG_i} S_i^g} \right) + (1-c) \left(\sum_{i \in NA(p)_k} \sum_{m \in ND_i} \omega_i^m d_i^m \right) \quad (1)$$

式中： p 为指定的系统分区个数，由具有自启动能力的机组数量决定； $NA(p)$ 表示由若干个带有 p 个分区所形成的系统的集合； $NA(p)_k$ 表示第 k 个由 p 个分区所形成的系统； NL_i 表示第 i 个区内为了恢复所有发电机所引入的架空线路集合； NG_i 表示第 i 个区内恢复机组集合； ND_i 表示第 i 个区内的负荷集合； Q_i^j 表示第 i 个分区内第 j 条架空线路充电无功； S_i^g 为第 i 个分区内第 g 台恢复机组的容量； ω_i^m 为第 i 个分区内第 m 个负荷的权重（根据实际情况给定）； d_i^m 为第 i 个分区内第 m 个负荷到所在分区内最近的发电机组的需要投入的线路总数；系数 c 表示对这两个目标的重视程度，通常 $c \in (0,1)$ 。

所建目标函数应满足如下约束条件：

1) 黑启动电源约束。各黑启动电源必须分配到不同分区中，并且部分自身无启动能力、需尽快启动电源及需要快速恢复的重要负荷必须与一个或多个黑启动电源相连。

2) 功率平衡约束。为简化计算，近似认为发电机总容量与负荷平衡的约束条件为：

$$\sum_i P_{load} \leq \sum_i S_{generator} \quad (2)$$

3) 发电机自励磁约束。发电机的自励磁本质上是一种参数谐振，在其控制上需要预先确定能导致送电机组出现自励磁的线路长度，以此作为该机组的地理范围，并在此范围内选择被启动机组，制定相应的启动方案。本文采用式(3)^[11]判断：

$$KS_e > Q_{c\Sigma} \quad (3)$$

式中: S_e 为发电机容量; $Q_{c\Sigma}$ 为线路充电容量; K 为发电机的短路比。

1.2 负荷恢复建模

完成系统分区之后, 需尽快同步恢复各分区内的重要负荷。该阶段旨在满足频率安全情况下按照负荷优先级确定下一步恢复的负荷, 并给出合理的网架结构。同时, 恢复过程中应避免出现过电压、线路潮流越限等情况。由此, 所建适应于每一个分区的负荷恢复目标函数为:

$$\max F_2 = \sum_{j=1}^n \omega_j^i P_j^i X_j^i \quad i \in p \quad (4)$$

式中: n 为某个分区内的总节点数; ω_j^i 为第 i 个分区内第 j 个负荷节点的权重, 该数值由调度员根据实际系统来确定; P_j^i 为第 i 个分区内第 j 个负荷节点的负荷量; X_j^i 表示第 i 个分区内第 j 个负荷的恢复状态, 1为恢复, 否则为0。应满足的约束条件包括:

1) 计及频率特性的稳态潮流约束^[6]:

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= P_{Gi} [1 - K_{Gi} f_d] - \\ &P_{Li} [1 + K_{Li} f_d] (a_{pi} U^2 + b_{pi} U + c_{pi}) = \\ &V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i &= Q_{Gi} - Q_{Li} [1 + K_{Li} f_d] (a_{pi} U^2 + b_{pi} U + c_{pi}) = \\ &V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: P_{Gi} 、 P_{Li} 、 Q_{Gi} 、 Q_{Li} 分别为额定频率、电压下的发电机、负荷的有功、无功功率; $f_d = f - f_N$ 为频率偏差标幺值。

2) 不等式约束, 包括: 发电机有功、无功约束、线路N安全性约束、节点电压约束以及频率偏移约束:

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \quad i = 1, 2, 3, \dots, NG \quad (7)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \quad i = 1, 2, 3, \dots, NG \quad (8)$$

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

$$|P_{ij}| \leq \bar{P}_{ij} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n, i \neq j \quad (10)$$

$$|\Delta f| \leq 0.5 \quad (11)$$

式中: $P_{Gi \min}$ 及 $P_{Gi \max}$ 为 P_{Gi} 的上下限; $Q_{Gi \min}$ 及 $Q_{Gi \max}$ 为 Q_{Gi} 的上下限; U_i 为节点电压幅值; $U_{i \min}$ 及 $U_{i \max}$ 为 U_i 的上下限; NG 表示发电机台数; P_{ij} 为线路 ij 的有功功率; \bar{P}_{ij} 为线路有功的限制值; Δf 为系统的频率偏差, 本文考虑为了防止频率太低引起低频减

载动作, 故取频率偏差不超过0.5 Hz。

2 最优分区负荷恢复的算法实现

针对上述所提出的复杂模型, 本文采用遗传算法^[12-14]来进行求解。求解过程中, 对遗传算法的交叉操作、交叉、变异概率以及选择方式进行了改进, 进一步提高了算法的鲁棒性和全局收敛特性。

2.1 最优分区恢复实现的遗传算法模式

2.1.1 基因链构造

采用整数编码方式。根据系统黑启动机组个数确定编码范围, 对系统的所有节点进行编码, 每个节点的编码号代表该节点被划入的分区号, 染色体长度为该系统总节点数。以IEEE30节点为例, 若系统被划分为3个分区, 则编码构造如图1。

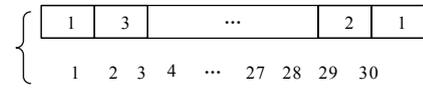


图1 最优分区基因链构造示意图

Fig.1 Construction of chromosome

2.1.2 适应度函数的确定

引入如式(12)示的增广目标函数。

$$F_E = \begin{cases} c \left(\sum_{i \in NA(p)_k} \frac{\sum_{j \in NL_i} Q_j^i}{\sum_{g \in NG_i} S_i^g} \right) + (1-c) \left(\sum_{i \in NA(p)_k} \sum_{m \in ND_i} \omega_i^m d_i^m \right) + \\ \lambda \sum_{i \in NA(p)_k} \left(\sum_{m \in ND_i} P_i^m - \sum_{g \in NG_i} S_i^g \right) \text{ 满足连通性约束} \\ S \text{ 不满足连通性约束} \end{cases} \quad (12)$$

式中: S 是一个非常大的正数, 表示对违反连通约束的惩罚; λ 为功率平衡的惩罚因子。则适应度函数 f 可取为:

$$f = 1/F_E \quad (13)$$

该函数具体求解如下:

(a) 对于黑启动电源约束, 通过上述遗传编码, 每一条基因链即确定了所有负荷和发电机所在的分区, 因此可以得出每一个分区内所包含的发电机和负荷。由于在编码时对具有自启动能力的机组编码使它们分配到不同的分区, 因此在每一个分区内通过图论的递归搜索算法求解是否存在从某一负荷或发电机到自启动发电机的路径。如果不是连通的, 则统计出不连通负荷和发电机的个数, 通过引入惩罚因子淘汰这些不合适的个体。

(b) 对于发电机黑启动过程中的充电无功部

分，可以按照式（14）求取。

$$Q_c = 2\pi fCU^2 \quad (14)$$

式中： f 为系统频率； C 为线路的充电电容； U 为系统电压幅值。故求取充电无功的问题可以转化为求解连通该分区内所有发电机最短路径问题。采用经典Dijkstra（迪杰斯特拉）算法^[15-16]从具有黑启动能力机组的发电机开始，作为最初顶点，当找到一台发电机的恢复路径后，就将该路径的长度置为一个接近0的数。这样，采用这种算法求取的路径即为连接这个分区内所有发电机的最短线路。

(c) 将该分区内所有发电机连接后，需要求取负荷到供电端的路径。由于负荷的恢复时间主要是和开关操作次数有关，故可认为由从发电端到负荷所要投入的线路数所决定。因此，可以将负荷恢复过程中所有线路权重置为1，仍然采用Dijkstra（迪杰斯特拉）算法，求解该分区内所有负荷到最近的供电端的投入线路最少的次数 d_i ，该次数即决定了负荷恢复的时间。

(d) 在分区中需要保证在每个分区内所有节点都有路径相连，同时满足基本的功率平衡关系。因此对于不满足连通性约束或者总负荷量大于总发电容量的个体，加以淘汰。

2.1.3 交叉、变异操作

采用异位交叉^[17]方式，以提高种群多样性。为了确保算法的稳定性，在进化初期，需要用较大的交叉概率和较小的变异率进行全局搜索，在进化末期，全局搜索概率逐渐减小，而通过调整变异概率增大局部搜索能力。这里采用线性的方法调整交叉、变异概率^[18]，公式如下：

$$P_c = P_{cmax} - (P_{cmax} - P_{cmin}) \times n / N \quad (15)$$

$$P_m = P_{mmin} + (P_{mmax} - P_{mmin}) \times n / N \quad (16)$$

式中： P_{cmax} 、 P_{cmin} 分别为最大和最小交叉概率； P_{mmax} 、 P_{mmin} 分别为最大和最小变异概率； n 为当前进化代数； N 为总的进化代数。

算法的流程图如图2所示。

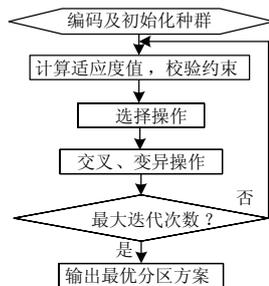


图2 最优分区恢复程序流程图

Fig.2 Flow chart of optimal system-partitioning

2.2 负荷恢复的遗传算法模式

针对模型（4），仍采用遗传算法来进行求解。求解过程中，针对不可行解的产生问题，提出了解决办法，进一步提高了算法的优化性能和解题效率。

2.2.1 基因链构造

以线路状态进行编码，0表示断开，1表示投运。染色体长度为该子系统中所有线路的数量。

2.2.2 适应度函数和约束条件处理

由于线路潮流只能在网络连通的情况下才能计算，因此，计算适应度函数之前需要判断当前网架结构的连通性。根据潮流计算的结果，构造如式（17）的适应度函数。

$$F = \sum_{i=1}^n \omega_i P_i X_i - \mu \quad (17)$$

式中： μ 为惩罚因子，对于违反有功平衡与线路容量约束、无功平衡与节点电压约束、过电压约束、频率约束的个体，分别引入相应的惩罚系数修正其适应度函数值。

2.2.3 交叉、变异操作

交叉、变异操作同最优分区。

2.2.4 不可行解的处理以及算法的优化

在应用传统遗传算法求解负荷恢复时会发现如下问题：

(a) 因初始种群随机生成，交叉、变异操作也是随机的，当某染色体所对应的系统工况为负荷量大于发电机最大出力时，潮流将不收敛，由此产生不可行解，并且该数量相当可观；

(b) 遗传算法中的任意交叉、变异操作都会破坏网络连通性，违反连通性约束，导致无法正常计算潮流；

(c) 对于 n 节点系统有 m 条线路，会产生 2^m 种状态，随着系统规模的增大，只采用遗传算法的基本操作将很难获得可行解。

针对上述问题，本文提出了一些改进措施，在完成父代群体经交叉、变异产生子代个体后，作如下处理：

(a) 对于潮流不收敛问题，提出随机切除负荷的方法。为了尽量不破坏遗传算法的随机性，为每个负荷分配随机权重，并乘以负荷本身的权重，作为最终负荷权重。每次切除总权重最小的负荷，直到总负荷量小于发电量。这样既保证不破坏搜索的随机性，又能保证重要负荷不被切除，提高了寻优效率。

(b) 对于产生的子代个体中违反网络连通性的问题，提出采用修补策略。首先，根据线路状态，采用深度优先搜索遍历所有线路，统计当前染色体

对应的线路状态所产生的孤岛数目。从已恢复供电的孤岛出发, 采用Dijkstra(迪杰斯特拉)算法求解从供电区域连通某个孤岛的最短路径, 直到所有孤岛连接起来。此时, 线路权重不再是这条线路的长度, 而是连通该线路后新引入负荷量的大小。这样处理既保证不破坏遗传算法随机性, 又能最小限度地引入不必要的负荷, 使整个网架成为连通网。应用遗传算法求解负荷恢复问题的流程图如图3所示。

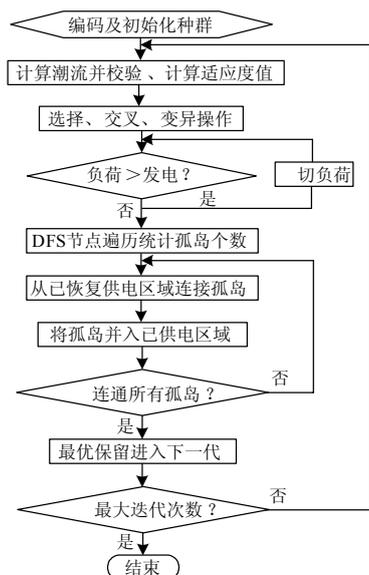


图3 负荷恢复算法流程图

Fig.3 Flow chart of load restoration in each partition

3 算例分析

以IEEE30节点标准系统为算例, 系统单线图如图4所示, 系统数据详见文献[19]。假设该系统有两台黑启动机组: 1号机组和11号机组。为了研究方便, 取1号机组容量为150 MW, 2号机组容量为100 MW, 11号机组容量为60 MW, 并设定负荷14, 15, 16, 19, 21, 24为重要负荷且需要优先恢复; 发电机机组的工频静特性系数取为25(标么值), 负荷调节效应系数取为2(标么值), 系统功率基值取为100 MVA。按照110 kV电压等级, 线路每公里充电电容 C 取为 8.7×10^{-9} F/km, 线路每公里充电无功 $Q_c = 2\pi fCU^2 = 0.033$ Mvar/km。在上述假定条件及参数情况下, 本文将从最优分区及负荷恢复两方面探讨大停电后负荷快速恢复的优化问题。仿真分析在Pentium4 3.0 GHz、4 GB内存微机, MATLABTM7.0环境下进行。

3.1 最优分区恢复

从图4中可以看出节点19, 21, 24更靠近自启动

机组11。解算时, 遗传算法执行的环境参数如表1所示。

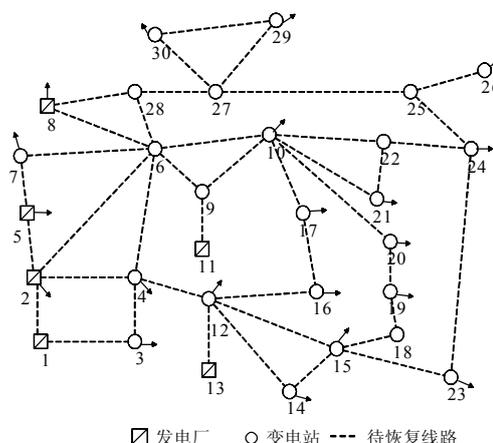


图4 IEEE30节点系统图

Fig.4 IEEE30-bus test system

表1 遗传算法环境参数

Tab.1 The environmental parameters of GAs

种群规模	遗传代数	选择方法	交叉方式	交叉率	变异率
100	30	锦标赛	异位交叉	0.95~0.4 随遗传代数线性减小	0.01~0.2 随遗传代数线性增加

为了说明算法的鲁棒性和稳定性, 图5给出了算法经过50次独立运行所得到的适应度函数值的分布情况, 运行一次所需时间大约为50 s。由图可以看出, 算法的数值稳定性很好。

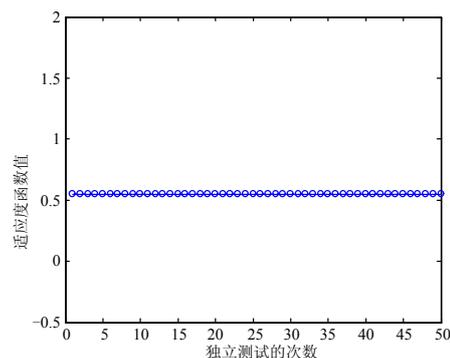


图5 独立运行50次所得适应度值分布图

Fig.5 Fitness results over 50 trials

最终分区结果如图6所示。由图6可以看出: 分区1内包含的节点个数为21, 总发电量为250.2 MW, 总负荷量为245.7 MW。分区2内包含的节点个数为9, 总发电量为60 MW, 总负荷量为52.7 MW。从对机组的分区结果可以看出在分区1内有4台非黑启动

机组,在分区2内没有非黑启动机组,这种结果保证在给定参数条件下引入充电无功最小。从对负荷的分区结果可以看出,具有较大权重的14、15、16负荷在分区1内,负荷19、21、24在分区2内,这种结果保证了重要负荷能够更快地连接到附近的发电机。

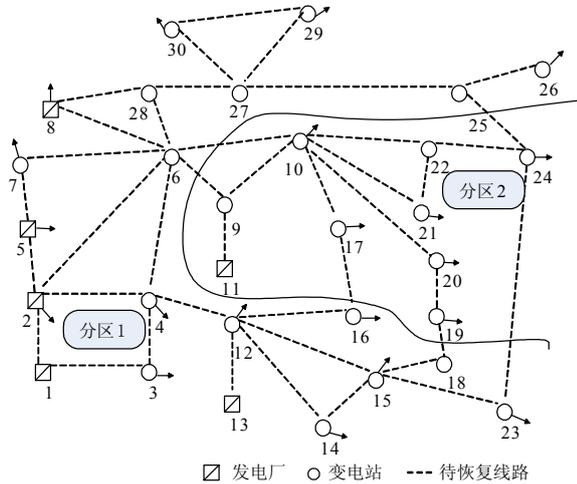


图6 最优分区结果

Fig.6 Results of optimal system-partitioning

3.2 最优分区下的负荷恢复

根据上述分区结果,分别对两个分区的负荷进行并行恢复。遗传算法执行的环境参数同表1。假设在分区1内,黑启动机组1已经启动,并且带动机组2;1、2机组分别恢复了15.5%和40%的供电功率;在分区2,黑启动机组恢复了42%的供电功率。

经仿真计算,在分区1内,得到如下两种恢复方案:

方案一(如图7所示)。

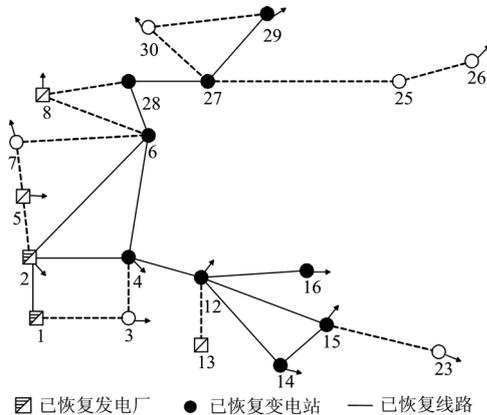


图7 第1分区内分区负荷恢复方案一

Fig.7 Scheme 1 of load restoration in the 1st partition

在第一种负荷恢复方案下,总发电出力为

39.098 MW,总负荷量为38.327 MW, $\Delta f = -0.494$ Hz,网损为0.771 0 MW。所对应的系统潮流结果如表2所示。

表2 恢复方案一下的潮流计算结果

Tab.2 Power flow results of restoration in scheme 1

节点编号	类型	P	Q	θ	V
1	发电机	0.252	0.164	0.000	1.060
2	发电机	0.139	0.120	0.001	1.045
4	负荷	0.075	0.016	0.040	1.021
6	负荷	0.000	0.000	0.035	1.026
12	负荷	0.110	0.075	0.104	1.060
14	负荷	0.061	0.016	0.116	1.049
15	负荷	0.080	0.025	0.111	1.052
16	负荷	0.034	0.018	0.108	1.054
27	负荷	0.000	0.000	0.045	1.056
28	负荷	0.000	0.000	0.037	1.025
29	负荷	0.024	0.009	0.052	1.047

在第二种负荷恢复方案下,总发电出力为38.866 MW,总负荷量38.338 MW, $\Delta f = -0.487$ Hz,网损为0.528 0 MW。

对比方案一和方案二,虽然两者恢复的负荷量是相同的,但是由于方案一投入的线路较多,网损较大,因而频率下降较大。方案二投入的线路较方案一少,网损小,因此电能质量好,而且投入线路数较少,故选择方案二进行负荷恢复为佳。此外,当节点3上线路由于故障不能正常恢复时,可以尝试采用方案一。

方案二(如图8所示)。

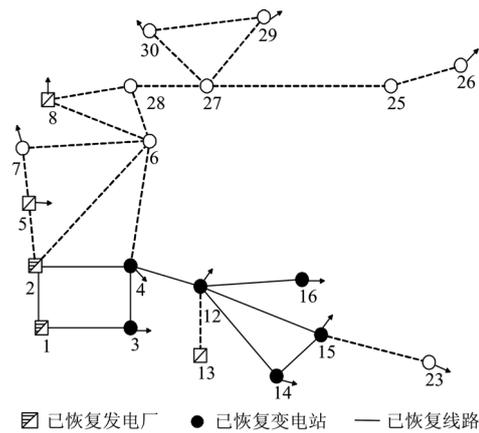


图8 第1分区内分区负荷恢复方案二

Fig.8 Scheme 2 of load restoration in the 1st partition

同理,可以得到在当前发电能力下在分区2的恢复方案,如表3所示。

表3 分区2内负荷恢复方案

Tab.3 Load restoration results in the 2nd partition

线路恢复顺序	投入线路
1	(11—9)
2	(9—10)
3	(10—20)
4	(20—19)
5	(10—22)
6	(22—24)

其中, 总发电量为26.351 MW, 总负荷量为26.087 MW, $\Delta f = -0.108$ Hz。由计算结果可知, 具有较大权重的负荷节点19和24得到了恢复, 而21节点虽然也是重要负荷, 但是由于负荷量太大, 在当前的发电调节能力下还不能恢复, 需要尽快恢复足够发电量才能保证下一时步恢复这个重要负荷。此时频率下降0.108 Hz, 满足电能质量的要求。

4 结论

本文针对电力系统大停电后的负荷快速恢复问题, 提出了一种基于电网分区的负荷恢复智能优化策略。首先, 以恢复代价最小和重要负荷优先恢复为目标进行分区。在每个子系统内, 研究了在发电机具备一定发电能力下, 如何快速恢复尽可能多的重要负荷。在寻优过程中, 引入了计及频率偏差的潮流方程, 对线路潮流、节点电压、系统频率做了校验, 同时, 采用改进遗传算法, 避免了不可行解的产生, 大大提高了搜索效率。经过仿真测试, 该算法具有较好的稳定性和全局收敛特性。

所提方法应用于大规模电网停电后的负荷恢复问题时, 可在系统正常运行时进行合理分区, 降低系统的计算规模; 然后针对每个分区并行进行负荷恢复计算, 进一步减少计算时间。此外, 所得到的若干最优负荷恢复方案, 可为电力调度人员应对网络恢复过程中的不确定因素提供更多的选择。

参考文献

- [1] US-Canada Power Outage Task Force. Final report on the August 14th 2003 blackout in the United States and Canada [EB/OL]. <http://www.ferc.gov>.
- [2] 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): 26-28.
LIU Ying-shang, WU Wen-chuan, FENG Yong-qing, et al. Black-start zone partitioning based on ordered binary decision diagram method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 26-28.

- [3] 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 Xue-ping, HAN Zhong-hui, LIANG Hai-ping. Optimization of parallel restoration through power system partitioning after blackout[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 41-46.
- [4] 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[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 38-41.
WEI Zhi-bo, LIU Yan, GU Xue-ping. DPSO algorithm based network reconfiguration of power systems for maximizing load recovery efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 38-41.
- [5] 周云海, 闵勇. 负荷的快速恢复算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 74-79.
ZHOU Yun-hai, MIN Yong. Optimal algorithm for fast load recovery[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 74-79.
- [6] 陈小平, 顾雪平. 基于遗传模拟退火算法的负荷恢复计划制定[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 171-175, 182.
CHEN Xiao-ping, GU Xue-ping. Determination of the load restoration plans Based on genetic simulated annealing algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 171-175, 182.
- [7] Adibi M M, Kafka R J, Milanicz D P, et al. Expert system requirement for power system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1592-1600.
- [8] QU Han-bing, LIU Yu-tian. Maximum restorable load for substation during power system restoration[C]. //International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing: 2009: 1-4.
- [9] HOU Yun-he, LIU Chen-ching, ZHANG Pei, et al. Constructing power system restoration strategies[C]. //International Conference on Electrical and Electronics Engineering. Bursa: 2009: 1-8.
- [10] 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.
ZHOU Yun-hai, MIN Yong. Optimal algorithm for system reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 67-70.
- [11] 郭嘉阳, 吴涛, 张仁伟, 等. 华北电网“黑启动”试验研究[J]. 华北电力技术, 2001(5): 3-18.
GUO Jia-yang, WU Tao, ZHANG Ren-wei, et al. Test and research of black start in north China power network[J]. North China Electric Power, 2001(5): 3-18.
- [12] 熊信银, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

(下转第12页 continued on page 12)

- reforms[J]. Journal of Regulatory Economics, 2002, 20 (1): 103-132.
- [5] 李立颖, 彭建春, 江辉. 一种综合阻塞成本分摊与金融输电权的阻塞管理方法[J]. 继电器, 2005, 33(3): 1-5. LI Li-ying, PENG Jian-chun, JIANG Hui. A congestion management method integrating the allocation of congestion costs with financial transmission right[J]. Relay, 2005, 33(3): 1-5.
- [6] 黄继民, 罗毅芳, 薛年华. 电力市场中输电权及市场力问题综述[J]. 电网技术, 2002, 26 (12): 66-70. HUANG Ji-min, LUO Yi-fang, XUE Nian-hua. A survey of transmission rights and market rights in electricity markets[J]. Power System Technology, 2002, 26 (12): 66-70.
- [7] Bushnell J. Transmission rights and market power[J]. The Electricity Journal, 1999, 12 (8): 77-85.
- [8] Joskow P L, Tirole J. Transmission rights and market power on electric power networks[J]. Rand Journal of Economics, 2000, 31 (3): 450-487.
- [9] Sarkar V, Khaparde S A. A comprehensive assessment of the evolution of financial transmission rights[J]. Transactions on Power Systems, 2008, 23 (4): 1783-1795.
- [10] Pritchard G, Philpott A. On financial transmission rights and market power[J]. Decision Support Systems, 2005, (40): 507-515.
- [11] Steven Stoft. Financial transmission rights meet Cournot: how TCCs curb market power[J]. The Energy Journal, 1999, 20 (1): 1-24.
- [12] 宋依群, 侯志俭, 文福栓, 等. 电力市场中三种寡头竞争模型的市场力分析比较[J]. 电网技术, 2003, 27 (8): 10-15. SONG Yi-qun, HOU Zhi-jian, WEN Fu-shuan, et al. Comparison of market power in the three oligopoly models of electricity market[J]. Power System Technology, 2003, 27 (8): 10-15.

收稿日期: 2010-02-02; 修回日期: 2010-04-09

作者简介:

郭兴磊 (1980-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力技术经济; E-mail: guoxinglei2008@hotmail.com

张宗益 (1964-), 男, 工学博士, 经济学博士, 博士生导师, 主要研究方向为电力经济、能源经济;

汪 锋 (1982-), 男, 博士, 主要研究方向为电力技术经济。

(上接第 7 页 continued from page 7)

- XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. The application of the genetic algorithmic in the power system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [13] 许议勋, 陆拯, 郭志忠. 基于遗传算法的电力系统分层信息故障诊断方法[J]. 继电器, 2000, 28(10): 15-18. XU Yi-xun, LU Zheng, GUO Zhi-zhong. Layered information fault diagnosis based on genetic algorithm[J]. Relay, 2000, 28(10): 15-18.
- [14] 杨建军, 战红, 陈宪国. 基于遗传算法并避免不可行解的配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 43-46. YANG Jian-jun, ZHAN Hong, CHEN Xian-guo. Optimization of distribution network reconfiguration of avoiding infeasible solutions based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(17): 43-46.
- [15] 殷人昆. 数据结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007. YIN Ren-kun. Data structure[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
- [16] 张玮, 潘贞存, 李磊. 一种基于线路相关集的大电网继电保护隐藏故障算法[J]. 继电器, 2007, 35 (22): 2-5, 22. ZHANG Wei, PAN Zhen-cun, LI Lei. Analysis of hidden failures of protection in bulk power system based on RCTL[J]. Relay, 2007, 35 (22): 2-5, 22.
- [17] 钟国坤, 曾碧, 余永权. 遗传算法及其异位交叉问题的研究[J]. 计算机工程, 2003, 29 (3): 115-117. ZHONG Guo-kun, ZENG Bi, YU Yong-quan. Study of genetic algorithms with different location mutations[J]. Computer Engineering, 2003, 29 (3): 115-117.
- [18] 张顶学, 关治洪, 刘新芝. 基于捕食搜索策略的遗传算法研究[J]. 计算机应用研究, 2008, 25 (4): 1006-1012. ZHANG Xiang-xue, GUAN Zhi-hong, LIU Xin-zhi. Genetic algorithm based on predatory search strategy[J]. Application Research of Computers, 2008, 25 (4): 1006-1012.
- [19] Wu F F, Liu W H. Detection of topology errors by state estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(1): 176-183.

收稿日期: 2010-07-21; 修回日期: 2010-12-21

作者简介:

石立宝 (1971-), 男, 副教授, 主要从事风电分析与应用, 电力系统恢复控制, 电力系统优化运行等方面的研究; E-mail: shilib@sz.tsinghua.edu.cn

赤东阳 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统恢复控制方面的研究。