

DOI: 10.7667/PSPC161683

基于降维与搜索的网架重构

徐君茹¹, 叶笑莉¹, 翁毅选², 赵洁¹, 王俊¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001)

摘要: 针对寻优搜索节点较多、线路较多的复杂大电力系统时计算维数过大的问题, 提出了一种基于降维与搜索的网架重构方案。该方案结合优化蚁群算法与离散粒子群算法(DPSO)以搜索目标网架。首先, 采用优化蚁群算法搜索一条主干线路, 降低后续寻优的维数。然后, 基于已经得到的主干线路, 采用离散粒子群算法对电网的剩余部分进行搜索。利用已并网发电机组提供的发电功率, 以考虑重要负荷的综合负荷恢复量最大为目标函数进行寻优, 得到满足拓扑连通性和安全、稳定运行约束的目标网架。最后, 以 IEEE118 节点系统和湖北电网部分地区为算例, 验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 电力系统恢复; 网架重构; 蚁群算法; 离散粒子群算法; 网络连通性

Dimensionality reduction and search based skeleton-network reconfiguration

XU Junru¹, YE Xiaoli¹, WENG Yixuan², ZHAO Jie¹, WANG Jun¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Shenzhen Power Company Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: A kind of network-reconfiguration scheme based on dimension reduction and search is proposed to solve the oversize dimensions of optimal searching problem for large system that contains too many nodes and lines when using discrete particle swarm optimization. An improved ant colony and discrete particle swarm optimization (DPSO) are combined in the scheme to form skeleton networks. Firstly, an improved ant colony is used to obtain a trunk line, which could reduce the dimensions of the subsequent optimal searching. Secondly, based on the trunk line, discrete particle swarm optimization is employed in forming skeleton networks. The maximum quantity of the comprehensive recovered load, which makes important load into account, is defined as the optimization objective. The optimization must meet the constraint conditions, namely topological connectivity, safe and stable operation constrains. At last, the correctness and validity of the proposed scheme are verified by IEEE 118-bus system and part of Hubei Power Grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677137).

Key words: power system restoration; network reconfiguration; ant colony algorithm; discrete particle swarm optimization; network connectivity

0 引言

电力系统发生大停电事故后的电力系统恢复是一个漫长而复杂的过程, 一般分为机组黑启动、网架重构和负荷恢复三个阶段^[1]。网架重构是其中承上启下的阶段, 在此阶段需要充分利用恢复初期已经恢复的发电容量, 尽快给失电厂站送电并建立一个稳定的网架, 为系统的全面恢复奠定基础^[2]。

输电网络重构的研究内容一般包括优化目标骨架网络^[3-6]、优化非黑启动机组的恢复顺序^[7-8]和优化非黑启动机组的恢复路径^[6, 9-10]。本文针对目标骨架网络的优化进行研究。文献[3]以重要负荷恢复量占已恢复负荷总量的比例最高为目标, 利用离散粒子群算法求解得到满足约束条件的目标网架。文献[4]提出了一种基于节点重要度评价的网架重构策略, 以节点收缩后的网络凝聚度定量评价网络中电源和负荷的重要性, 利用网络重构效率较为全面、客观地衡量重构的效果, 采用离散粒子群算法搜索目标网架。文献[5]基于复杂网络的静态拓扑连接特

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677137); 南方电网公司科技项目(090000KK52160024)

性, 提出了一种综合考虑线路介数和节点重要度的网架重构策略, 以节点重要度和线路介数为择优指标, 采用离散粒子群算法确定目标网架。但是, 对于节点和线路较多的系统而言, 计算维数过大, 搜索空间急剧扩大, 导致搜索时间大大增加, 难以搜索到最优解。

针对大系统寻优目标网架维数过大的问题, 本文提出一种基于降维与搜索的网架重构方案。该方案结合蚁群算法和离散粒子群算法进行目标网架搜索。首先, 利用蚁群算法搜索一条包含尽可能多的重要节点和尽可能少的非重要节点的主干线路; 在此基础上, 再利用 DPSO 来搜索目标网架。由蚁群算法得到主干线路后, 系统中部分线路的状态已经确定, 降低了后续寻优问题的维数, 这样可以更快、更准地搜索到最优解。最后, 基于 Matlab 平台, 以 IEEE118 节点系统和湖北电网部分地区为算例, 验证了所提方法的正确性和有效性。

1 网架重构的数学模型

1.1 目标函数

网架重构阶段以恢复骨干网架供电为目标, 为充分利用已并网机组提供的发电量, 保证网架重构有效地进行, 应恢复部分负荷。根据网络重构阶段负荷恢复的一般原则^[11], 应尽可能地恢复更多的重要负荷。构造目标函数如式(1)所示。

$$\max f = \sum_{i=1}^m \alpha x_i L_{im} + \sum_{j=1}^n \beta x_j L_{gej} \quad (1)$$

式中: L_{im} 、 L_{ge} 分别为重要负荷和一般负荷的功率; x 的取值为 1、0, 表示负荷是、否恢复; m 、 n 分别为重要负荷、一般负荷的个数; α 、 β 分别为重要负荷和一般负荷的权重。通过调节 α 、 β 之间的比例关系, 在充分利用已并网机组所提供发电量的同时, 尽量提高恢复负荷中重要负荷所占的比重。

1.2 约束条件

1.2.1 潮流约束

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为有功、无功注入功率; V_i 、 V_j 为节点电压; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为电导、电纳; δ_{ij} 为两电压的相角差; $i=1, 2, \dots, n$, n 、 N 为节点数。

1.2.2 发电机节点功率约束

$$\begin{cases} P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max} \\ Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{Gi \max}$ 、 $P_{Gi \min}$ 和 $Q_{Gi \max}$ 、 $Q_{Gi \min}$ 分别为发电机有功功率的上、下限和无功功率的上、下限; $i=1, 2, \dots, n$, n 为发电机的数目。

1.2.3 节点电压限制

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (4)$$

式中: $V_{i \max}$ 和 $V_{i \min}$ 分别为电压的上、下限; $i=1, 2, \dots, n$, n 为节点数。

1.2.4 线路功率限制

$$P_{li} \leq P_{li \max} \quad (5)$$

式中: $P_{li \max}$ 为线路上流过的功率极值; $i=1, 2, \dots, m$, m 为线路数。

除此之外, 目标网架还需满足连通性, 保证所有恢复节点能通过送电线路的导通建立连接关系。

2 蚁群算法与 DPSO 在网架重构中的应用

2.1 蚁群算法

蚁群算法是一种基于群体的多代理模拟进化优化算法^[12], 已被广泛应用于各类寻优问题^[13-14]。

2.1.1 优化蚁群算法

虽然蚁群算法有其独特的优势, 但传统的蚁群算法面对某些问题仍有局限性。本文在最大最小蚂蚁系统^[15]的基础上, 改进迭代过程中信息素的更新方式。每次迭代结束后信息素的更新公式如式(6)、式(7)所示。

$$\overline{\tau}_{ij}(t+n) = (1-\delta)\tau_{ij}(t) + \lambda \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (6)$$

$$\tau_{ij}(t+n) = \begin{cases} \tau_{\min} & \overline{\tau}_{ij}(t+n) \leq \tau_{\min} \\ \overline{\tau}_{ij}(t+n) & \tau_{\min} < \overline{\tau}_{ij}(t+n) < \tau_{\max} \\ \tau_{\max} & \overline{\tau}_{ij}(t+n) \geq \tau_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式(6)中, 若蚂蚁 k 在本次迭代中经过了路径 (i, j) , $\Delta \tau_{ij}^k$ 的值为 W/d_{ij} (W 为信息素强度, d_{ij} 为节点 i 、 j 之间的距离), 否则值为 0; δ 为信息素蒸发系数;

参数 $\lambda = \frac{1}{1 + e^{\frac{y_{k \max} - y}{y_{\max} - y}}}$, \overline{y} 是每次迭代所得最优值的

平均值, $y_{k \max}$ 是本次迭代所得最优值, y_{\max} 为当前所得最优值。 λ 的取值范围为 $[0, 1]$, $y_{k \max}$ 的值越大, λ 的值也越大, 这样可以较好地利用局部最优解和较优解路径, 加快算法的搜索速度。

从式(6)可知, 在一次迭代后, 线路上原有的信息素按一定的比例衰减, 但本次迭代中蚂蚁经过的线路有一个增加项, 其大小与经过此路径的蚂蚁数和本次迭代所得最优值的大小有关。

2.1.2 目标函数

定义目标函数如式(8)所示。

$$\max y = a \times m - n \quad (8)$$

式中, a 为节点重要度系数, 主干线路中有 m 个重要节点和 n 个非重要节点。目标函数在重要节点与非重要节点间协调选择, 达到尽可能选择更多重要节点并排除非重要节点的目标, 并避免为排除非重要节点而舍弃与之相连的重要节点的情况。

2.1.3 “距离”的定义

在蚁群算法搜索主干线路时, 节点之间的物理距离并没有意义, 对寻优起决定作用的是节点间是否存在线路及节点是否为重要节点, 故而本文将“距离”定义为

$$d_{ij} = \begin{cases} l_k & i, j\text{-间有线路} \\ \infty & i, j\text{-间无线路} \end{cases} \quad (l_k < \infty) \quad (9)$$

$$l_k = \begin{cases} l_1 & i, j\text{均为重要节点} \\ l_2 & i, j\text{之一为重要节点} \quad (l_1 < l_2 < l_3) \\ l_3 & i, j\text{均不是重要节点} \end{cases} \quad (10)$$

本文将蚁群算法的启发因子取为距离的倒数, 蚂蚁选择某一路径的概率与对应的启发因子正相关。需要说明的是, 对于两侧均为不重要节点的线路, 本文并没有将其距离设为一个相当大的值, 避免了此路径被蚂蚁选择的概率在迭代过程中急剧减小而无法保证所得路径为全局最优。

蚁群算法只能搜索到不含任何支路的干线, 此时网架结构单一, 而且一般有剩余发电量, 因此需要继续搜索。

2.2 离散粒子群算法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是由 Kennedy 和 Eberhart 提出的一种智能优化算法^[16]。在 PSO 的每次迭代中, 用以更新粒子速度和粒子位置的公式如式(11)、式(12)所示。

$$\mathbf{v}_{id}^{k+1} = w\mathbf{v}_{id}^k + c_1r_1(p_{id}^k - \mathbf{x}_{id}^k) + c_2r_2(p_{gd}^k - \mathbf{x}_{id}^k) \quad (11)$$

$$\mathbf{x}_{id}^{k+1} = \mathbf{x}_{id}^k + \mathbf{v}_{id}^{k+1} \quad (12)$$

式中: i, d 为粒子编号和搜索空间的维数; $\mathbf{X}_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 、 $\mathbf{V}_i(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 为粒子 i 的位置和速度; $\mathbf{P}_i(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ 、 $\mathbf{P}_g(p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 分别为粒子 i 和群体当前发现的最优位置; w 为惯性系统, 计算中通常取 $0.4 < w < 1.4$ ^[17]; c_1, c_2 为学习因子, 其值不能过大也不能过小^[18]; r_1 与 r_2 为 $[0, 1]$ 上的随机数。

DPSO 是对 PSO 的位置变量作离散化处理^[4], 已被用于多个领域^[19-20]。粒子位置变量各维的取值限定为 0、1。DPSO 中粒子速度的物理含义为位置改变的概率, 仍根据式(11)更新。位置根据式(13)更新。

$$\mathbf{x}_i^{n+1} = \begin{cases} 1, & \text{if } (r_3 < S(v_i^{n+1})) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

$$S(v_i^{n+1}) = \frac{1}{1 + e^{-v_i^{n+1}}} \quad (14)$$

式中, r_3 为 $[0, 1]$ 上满足均匀分布的随机数。

应用于网架重构中时, 粒子的位置表示网架中线路的状态, 每一维对应一条线路, 0 表示线路断开, 1 表示线路连通, 线路的组合构成了网架的拓扑结构。

2.3 保证连通性的目标网架选择

在解决目标网架连通性问题时, 目前多采用连通性修复^[3,5]和增加粒子有效性检测环节^[4]这两种手段。对复杂大系统而言, 网络连通性修复较为繁琐, 目前也没有文献对此作详细介绍。而增加粒子有效性检测环节这一方法应用于复杂大系统时, 初始化时间会大大增加, 寻优效率较低。因此, 本文提出了一种保证连通性的目标网架选择方法。

本文所采用的网架重构策略是先用蚁群算法搜索一条主干线路, 在此基础上, 再由 DPSO 得到目标网架。在 DPSO 寻优的过程中, 可能会出现如图 1 所示的线路状态。

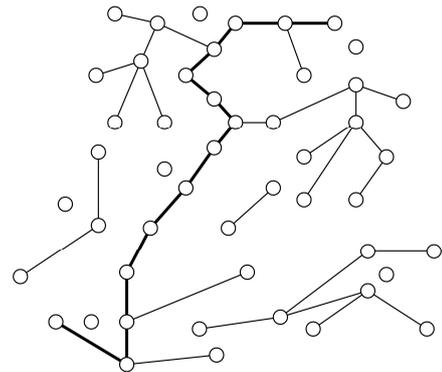


图 1 网络中的线路状态

Fig. 1 Line status in the network

图中, 粗实线表示主干线路, 对于如图 1 所示的线路状态, 只选择与主干线路连通的子网络作为网架, 据此计算目标函数值。这种处理方法忽略了与所选网架不连通的线路断开状态的影响, 将原本不满足网络连通性约束的解进行处理, 使其满足连通性约束条件, 提高了获得可行目标网架的概率。

2.4 问题的求解过程

1) 蚁群算法初始化。设置蚂蚁群规模和算法参数, 根据系统原始的网络状态及重要节点的分布, 计算“距离”、蚂蚁选择各线路的概率和 Tabu 禁忌表, 将所有蚂蚁随机放在选定的节点上。

2) 蚁群算法寻优过程。迭代计算蚁群算法寻优的目标函数值, 将所得最优解作为主干线路。

3) 初始化 DPSO。设置粒子群规模和算法参数, 随机生成粒子, 粒子的维数是系统中线路总数与主干线路所含线路数的差。

4) DPSO 寻优过程。按照 2.3 节介绍的方法选择网架, 并计算目标函数值, 将所得最优解作为目标网架。

5) 检验目标网架是否满足各种安全和稳定约束条件, 保留满足约束条件的结果。

3 算例分析

基于 Matlab 平台, 以 IEEE118 节点系统和湖北电网部分地区为算例对所提方案进行验证。

在两个算例中, 蚁群算法的蚂蚁数为 80, 迭代 100 次, 节点重要度系统 $\alpha=10$, 距离 $l_1=10$, $l_2=20$, $l_3=30$, 信息素重要程度参数 $\alpha=1$, 启发信息重要程度参数 $\beta=5$, 信息素蒸发系数 $\delta=0.2$, 信息素强度 $W=300$ 。为了提高搜索的效率, 初始化时将所有的蚂蚁都随机放在了选定的重要节点上。

两个算例中, DPSO 的粒子数为 20, 迭代 100 次。通过调试, 本文将惯性系数和学习因子的值分别取为: $w=1.2$, $c_1=1$, $c_2=3$; 将目标函数中的负荷权重系数分别取为 $\alpha=1$, $\beta=0.25$ 。

3.1 IEEE118 节点系统算例

在网架重构阶段, 系统还未全面恢复, 已并网机组的出力还未达到其最大出力, 设此时机组的出力为其最大出力的 35%, 负荷的功率因数设为 0.95。

表 1 给出了三种目标网架方案, 其中, 方案 1 为最优解, 对应的目标网架如图 2 所示, 目标网架含 43 条线路, 恢复的重要负荷占总恢复负荷的 66.91%, 占总重要负荷的 85.90%。

表 1 三种寻优方案

Table 1 Three kinds of optimization scheme

方案编号	目标网架的组成线路	目标函数值/MW
1	1, 5, 6, 13, 15, 17, 19, 25, 26, 27, 30,	1115.75
	31, 32, 38, 41, 42, 43, 45, 50, 51, 53,	
	57, 66, 68, 74, 75, 77, 79, 92, 94, 97,	
	98, 101, 102, 103, 106, 107, 108, 109,	
	110, 113, 119, 126	
2	1, 6, 13, 15, 17, 19, 24, 25, 26, 30, 31,	1056.25
	32, 41, 42, 45, 50, 53, 57, 66, 68, 74,	
	75, 77, 79, 94, 97, 98, 101, 102, 103,	
	106, 107, 108, 109, 110, 113, 119	
3	1, 5, 6, 13, 15, 17, 19, 25, 26, 45,	1000.25
	50, 53, 57, 59, 60, 61, 68, 74, 75,	
	77, 79, 92, 94, 97, 98, 101, 102,	
	103, 106, 107, 119, 126, 127, 152	

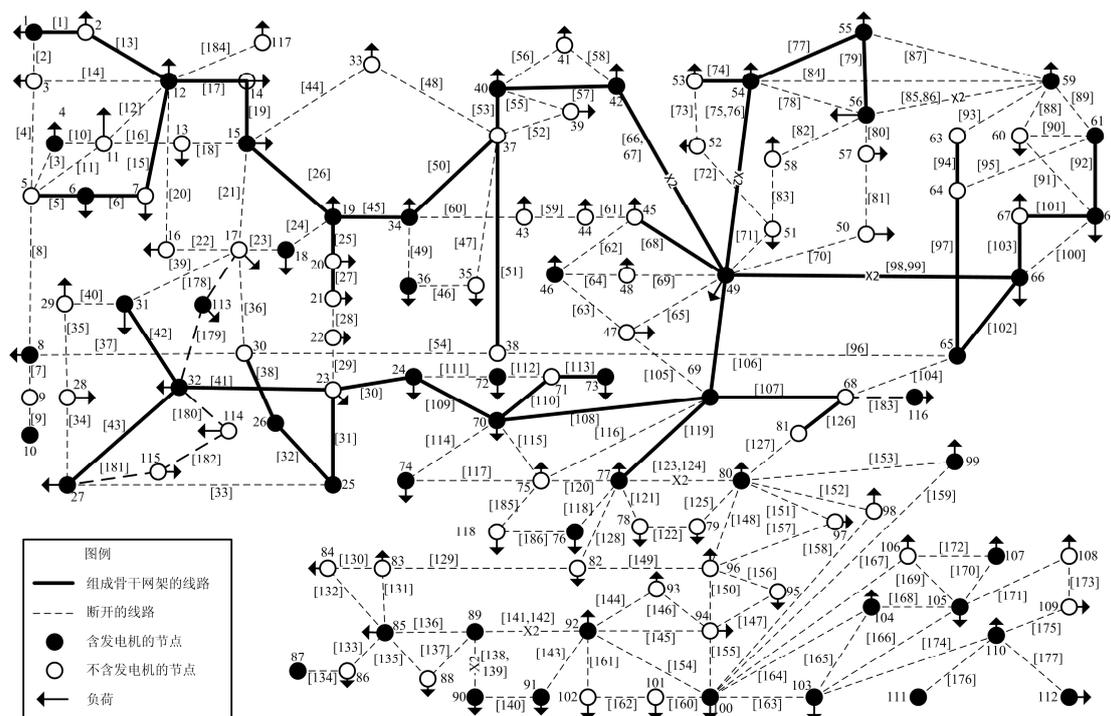


图 2 IEEE118 节点系统的目标网架图

Fig. 2 Objective network of IEEE 118-bus system

3.2 湖北电网部分地区算例

所选择的湖北部分电网包含 126 个节点、244 条线路和 16 个发电厂。设此时已并网机组的出力为

其最大出力的 35%，负荷的功率因数设为 0.95。所得目标网架如图 3 所示，包含 52 条线路，恢复的重要负荷占总恢复负荷的 68.78%，占总重要负荷的 87.45%。

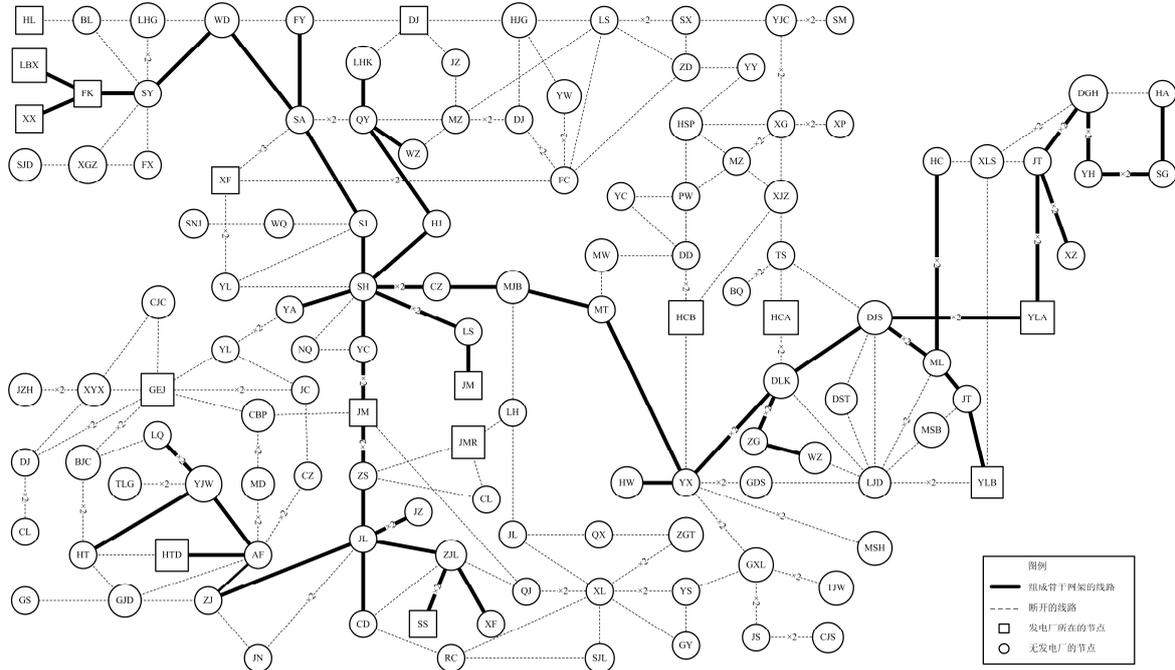


图 3 湖北电网部分地区的目标网架图

Fig. 3 Objective network of part of Hubei Power Grid

由两个算例的结果可以看出，在负荷恢复总量一定的前提下，本文得到的目标网架恢复了大部分重要负荷，这对最大限度地减小电力系统停电造成的损失有重要意义。

将本文所提的方法与仅使用 DPSO 搜索目标网架的方法进行比较，结果如表 2 所示。可以看到，引入蚁群算法后，最优解和最差解的值都有所增大，平均计算时间也减少了，即所提方法的搜索效果更佳。

表 2 所提方法与 DPSO 的比较

Table 2 A comparison of the proposed method and DPSO

算法	IEEE118 节点系统			湖北电网部分地区		
	最优解/ MW	最差解/ MW	平均 计算 时间/ min	最优解/ p.u.	最差解/ p.u.	平均 计算 时间/ min
本文 方法	1115.75	909.5	22.54	45.5496	35.9102	29.97
DPSO	1020.5	830.75	26.23	41.3783	33.3869	33.69

4 结语

针对离散粒子群算法搜索节点和线路数较多的大系统时计算维数过大的问题，本文提出了一种基

于降维与搜索的网架重构策略，以考虑重要负荷的综合负荷恢复量最大为目标寻优，得到满足拓扑连通性和安全、稳定运行约束的目标网架。由仿真结果可以看到，相较于只采用离散粒子群算法的搜索策略，本文所提方法能寻找到更优的结果，并缩短了计算时间，即搜索性能更佳，能更快、更准确地确定目标网架。

参考文献

- [1] ADIBI M M, FINK L H. Power system restoration planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 22-28.
- [2] 刘玉田, 王洪涛, 叶华. 电力系统恢复理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [3] 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): 38-42.
WEI Zhibo, LIU Yan, GU Xueping. DPSO based skeleton-network reconfiguration for recovering load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 38-42.
- [4] 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.

- [5] 王亮, 刘艳, 顾雪平, 等. 综合考虑节点重要度和线路介数的网络重构[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 29-33.
WANG Liang, LIU Yan, GU Xueping, et al. Skeleton-network reconfiguration considering node importance and line betweenness[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 29-33.
- [6] 杨智豪, 牟龙华, 刘仲. 微电网黑启动中考虑 DG 特性与线路投入顺序的串行恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 17-23.
YANG Zhihao, MU Longhua, LIU Zhong. A serial restoration strategy considering characteristics of DG and line restoration sequence for black start of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 17-23.
- [7] 王江宇, 刘艳. 基于重构方案线路投运风险最小的机组恢复顺序优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 68-75.
WANG Jiangyu, LIU Yan. Optimization of unit's restoration sequence based on minimizing of lines' restoration risk corresponding to reconfiguration scheme[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 68-75.
- [8] 刘艳, 张华. 基于失电风险最小的机组恢复顺序优化方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 46-53.
LIU Yan, ZHANG Hua. Optimization of unit's restoration sequence based on minimal outage risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 46-53.
- [9] 孙磊, 刘伟佳, 林振智, 等. 计及线路投运风险的电力系统恢复路径优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 75-82, 95.
SUN Lei, LIU Weijia, LIN Zhenzhi, et al. Optimization of line's restoration sequence considering line operation risk[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 75-82, 95.
- [10] 刘翔宇, 胡雪凯, 胡文平, 等. 考虑线路操作时限和恢复概率的机组启动路径优化[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 24-29.
LIU Xiangyu, HU Xuekai, HU Wenping, et al. Optimization of unit restoration sequence considering line start-up time and restoration probability[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 24-29.
- [11] 钟慧荣, 顾雪平, 朱玲欣. 黑启动恢复中网架重构阶段的负荷恢复优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 26-32.
ZHONG Huirong, GU Xueping, ZHU Lingxin. Optimization of load restoration during network reconfiguring process of black-start restoration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 26-32.
- [12] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics — Part B Cybernetics, 1996, 26(1): 29-41.
- [13] 廖清芬, 王乙斐, 唐飞, 等. 大电网互联格局下的解列断面双阶段搜索方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 739-746.
LIAO Qingfen, WANG Yifei, TANG Fei, et al. Dual-stage method for islanding surface searching under interconnected power system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 739-746.
- [14] 石鑫, 朱永利. 面向输电线路监测的无线传输网络 QoS 保障技术研究[J]. 中国电力, 2015, 48(3): 39-43.
SHI Xin, ZHU Yongli. Research on QoS support technology of wireless transmission networks for transmission line monitoring[J]. Electric Power, 2015, 48(3): 39-43.
- [15] 谢璐玲, 宋彦斌, 杨坦, 等. 求解车辆路径问题的改进 MMAS 算法[J]. 计算机技术与发展, 2016, 26(3): 27-30, 35.
XIE Liling, SONG Yanbin, YANG Tan, et al. An improved NMAS for vehicle routing problem[J]. Computer Technology and Development, 2016, 26(3): 27-30, 35.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C] // IEEE International Conference on Neural Networks, Proceedings, 1995, 4: 1942-1948.
- [17] SHI Y, EBERHART R C. Parameter selection in particle swarm optimization[C] // Proceedings of the 7th International Conference on Evolutionary Programming VII. Springer-Verlag, 1998: 591-600.
- [18] EBERHART R C, SHI Y, EBERHART R C, et al. Particle swarm optimization: developments[C] // Applications, and Resources, Proc Congress on Evolutionary Computation 2001 IEEE Service Center, Seoul, Korea, 2001: 259-263.
- [19] 田园, 胡炎. 计及保护和断路器动作不确定性的隐性故障检测模型[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2896-2903.
TIAN Yuan, HU Yan. Analytic model of hidden failure detection considering uncertainty of protection action and circuit breaker tripping[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2896-2903.
- [20] 刘晓静. 基于离散粒子群算法的含风电场电力系统机组组合研究[J]. 中国电业(技术版), 2015(5): 46-49.
LIU Xiaojing. Unit combination research of power systems integrated with wind farm based on the discrete particle swarm algorithm[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2015(5): 46-49.

收稿日期: 2016-10-11; 修回日期: 2016-12-28

作者简介:

徐君茹(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: xujunru@whu.edu.cn

叶笑莉(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: xlye@whu.edu.cn

翁毅选(1984—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定与控制, 新能源接入后大电网自动发电控制。E-mail: yixuan_weng@163.com

(编辑 魏小丽)