

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191108

基于灵敏度及粒子群算法的输电断面功率越限控制方法对比研究

徐正清¹, 肖艳炜², 李群山³, 孙淑琴⁴, 颜文丽⁴, 吴晨悦⁴

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 210003; 2. 国家电网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007; 3. 国家电网华中电力调控分中心, 湖北 武汉 430077; 4. 吉林大学仪器科学与电气工程学院/地球信息探测仪器教育部重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要: 针对电力系统运行过程中由于负荷过重或支路开断引起输电断面内部线路可能出现越限的实际问题, 研究了有功潮流灵敏度(节点注入有功功率对线路有功功率的灵敏度)和综合灵敏度(考虑各输电断面内部线路有功越限权重时, 节点注入有功功率对输电断面有功功率的灵敏度)的计算方法。分析了粒子群优化算法, 选取断面处实际功率与目标功率值的偏差为目标函数, 得到发电机组出力进行断面越限控制。利用 IEEE39 网络模型, 采用 AP 聚类算法进行网络的分区及输电断面的识别, 对上述两种方法进行了对比分析, 验证了两者均可应用于越限控制过程中。

关键词: 输电断面; 综合灵敏度; 粒子群算法; 越限控制; 有功功率的灵敏度

Comparative study based on sensitivity and particle swarm optimization algorithm for power flow over-limit control method of transmission section

XU Zhengqing¹, XIAO Yanwei², LI Qunshan³, SUN Shuqin⁴, YAN Wenli⁴, WU Chenyue⁴

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 210003, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Hangzhou 310007, China; 3. State Grid Huazhong Electric Power Control Subcenter, Wuhan 430077, China; 4. Laboratory of Geo-Exploration and the Instrumentation Ministry of Education of China, College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: In view of the practical problem that the internal line of the transmission section may exceed the limit due to excessive load or branch break during the operation of the power system. The calculation method for the active power flow sensitivity (sensitivity of node injected active power to line active power) and comprehensive sensitivity (the sensitivity of the node injected active power to the active power of the transmission section considering the over-limit weight of each transmission section's internal lines) are studied. The particle swarm optimization algorithm is analyzed. The deviation between the actual power and the target power value at the section is selected as the objective function, and the generator's output are obtained to control the sections. With the IEEE39 network model, the AP clustering algorithm is used to partition the network and to identify the transmission sections. The two control methods are compared and analyzed. It is verified that both methods can be applied to the process of transmission-section control.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5211UZ18006K).

Key words: transmission section; comprehensive sensitivity; particle swarm optimization algorithm; over-limit control; active power sensitivity

0 引言

我国电力事业正处在快速发展时期^[1], 系统网络复杂, 可以高效地完成各电压等级的电力传输, 但同时电力系统内外部各种高危突发事件时有发生, 城市电力安全时刻面临严重威胁^[2-5]。当前实际的电力系统节点数目众多, 网架结构复杂程度高, 对网络中的所有线路运行状态参数进行监测难以完全实现^[6-7]。运行人员往往会选取输电断面, 通过监控输电断面包含的线路有功潮流是否越限^[8], 作出相应控制动作使断面有功潮流在合理的范围内^[9-11], 并优化各断面的安全裕度, 进而保证电力系统可靠稳定运行。对于断面潮流的控制策略, 尤其是负荷过重, 导致断面内部线路出现有功潮流越限的情况时, 寻找适当的调节方法, 具有重要的研究意义。

目前, 可用于输电断面潮流控制的方法较多, 常用的策略是运用一定的控制算法或依据, 优化电力系统中的机组出力及负荷分配^[12-13]。文献[14]提出了考虑控制节点对过载支路和接近极限线路共同作用的综合灵敏度概念, 采用基于原-对偶内点法的实时控制算法, 在进行非线性规划求解时, 选取接近极限的线路以及过载线路所在输电断面的约束构成关键约束集合, 然后进行变量筛选和关键线路的优先级分类, 最终达到消除输电断面过载的目的。文献[15]提出基于 $N-1$ 静态安全约束的输电断面有功潮流控制方法, 利用各种运行方式下的断面有功潮流与 $N-1$ 状态下线路有功潮流的比值变化范围来衡量断面潮流控制的合理性。文献[16]提出了一种计及暂态稳定裕度的断面功率调整方法, 根据机组出力约束、暂态稳定约束等条件建立断面功率的线性规划模型, 求解各台机组的有功调整量, 并对每次发电组合方式进行暂态稳定性校核, 最终达到调整断面功率的目的。文献[17]通过对全网进行开断模拟, 辨识出关键支路, 计算关键支路开断后其他支路的潮流转移比, 辨识出强相关支路, 动态地选取关键支路和强相关支路作为输电断面, 依据节点对支路的功率传输分布因子优选敏感机改变出力, 进行断面有功潮流控制, 但是没有考虑控制过程中同时出现新的断面越限的情况。文献[18]基于极坐标的电力系统交流潮流计算模型, 计算了支路有功潮流对节点有功注入的灵敏度, 利用功率灵敏度和负载率等指标实现对断面的控制。但是根据建立的灵敏度矩阵进行调节时, 没有给出具体的控制方案, 且选取的电力网络输电断面较为简单。

针对上述问题, 本文研究了潮流灵敏度、综合灵敏度、粒子群优化算法等, 利用了聚类算法对电力系统网络搜索来划分断面, 利用综合灵敏度结合潮流灵敏度数据对输电断面潮流进行控制, 该方法既考虑了当前断面越限的消除, 也考虑了出现新的越限断面时如何处理, 以消除断面越限。利用粒子群优化算法计算机组出力, 通过调整机组出力来消除断面越限。本文提出的两种输电断面内部线路有功潮流越限控制策略应用于 IEEE39 节点网络, 将控制方法进行了对比分析, 验证了两种控制方法在支路越限控制方面均可获得较好的效果, 实际应用时可根据系统情况酌情选择。

1 输电断面的搜索

输电断面定义为, 在某一基态潮流下, 有功潮流方向相同且电气距离相近的一组输电线路的集合^[19]。输电断面由电力系统不同分区之间的联络线构成, 反映了区域之间的潮流交换情况。本文利用文献[20]提出的基于聚类算法的关键输电断面搜索方法, 进行了电力系统网络的分区以及断面的搜索。组成输电断面的线路有功潮流方向相同并且输电断面是电网的割集。

根据文献[20], 需要计算电力系统网络各条线路的输电介数。输电介数定义为

$$W_k = G_k \times \frac{P_k}{P_{\max}} \quad (1)$$

式中: W_k 为线路 k 的输电介数; G_k 为线路 k 的线路介数; P_k 为线路 k 的有功潮流; P_{\max} 为网络所有线路中的最大有功潮流。

Dijkstra 算法^[21]利用贪心的思想, 用来求解无向图中指定起始点到其他所有点的最短路径。以上述输电介数作为图中边的权值, 经过迭代最终得到电力网络图中, 所有点到其余点的最短路径, 以此作为 AP 聚类算法(Affinity Propagation Clustering Algorithm)相似度矩阵构建的基础。

在 AP 算法中, 相似度 $s(i, j)$ 用来表达点 j 作为点 i 的聚类中心的能力, 电力网络中的节点可以作为图中的点, 各节点之间分别计算相似度, 即可形成相似度矩阵。本文除利用上述输电介数构建相似度矩阵外, 也考虑了一般的相似度矩阵构建方法, 将节点之间的负欧式距离作为相似度, 此时的相似度矩阵为对称矩阵。吸引度 $r(i, k)$ 表示 k 点适合作为 i 点聚类中心的程度, 归属度 $a(i, k)$ 表示 i 点选择 k 点作为聚类中心的适合程度。 $r(i, k)$ 的迭代公式为

$$r(i, k) = s(i, j) - \max[a(i, k') + s(i, k') \forall k' \neq k] \quad (2)$$

$a(i, k)$ 的迭代公式为

$$a(i, k) = \begin{cases} \min \left\{ 0, r(k, k) + \sum_{j \in \{i, k\}} \max \{0, r(j, k)\} \right\}, i \neq k \\ \sum_{j \neq k} \max \{0, r(j, k)\}, i = k \end{cases} \quad (3)$$

此外, AP 算法还涉及到参考度(Preference)这一参数, 作为 i 点能否成为聚类中心的评判标准, 可以取相似度矩阵的最小值、中值或根据实际情况选择, 但是选取不同的值, 得到的聚类中心数目往往不同。根据本算法可以筛选出电力系统网络中的节点作为聚类中心, 然后对所有节点进行分类, 从而得到不同的分区, 作为后续选取线路划分输电断面的基础。

2 基于灵敏度的断面越限控制方法

2.1 灵敏度的计算

为消除输电断面有功潮流越限的情况, 需要建立发电机节点对所有断面的综合灵敏度矩阵 \mathbf{K} , \mathbf{K} 的具体形式为

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: m 为划分的网络断面总数; n 为发电机总数。各节点注入有功功率对线路复功率的灵敏度矩阵计算公式为

$$\mathbf{L}_n = \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial \dot{\mathbf{S}}_s} = -\frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial \dot{\mathbf{U}}} \mathbf{J}^{-1} \frac{\partial \Delta \dot{\mathbf{S}}}{\partial \dot{\mathbf{S}}_s} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial P_{s1}} & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial Q_{s1}} & \cdots & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial P_{sx}} & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial Q_{sx}} & \cdots & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial P_{sn}} & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial Q_{sn}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial P_{sx}}$ 是节点 x 对线路 ij 的有功灵敏度; $\frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial Q_{sx}}$ 是节点 x 对线路 ij 的无功灵敏度。在计算结果中, 实部表示观测对象为有功功率, 虚部表示观测对象为无功功率。

其中, \mathbf{J}^{-1} 为雅可比逆矩阵, 剩余两项计算如下:

$$\frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial \dot{\mathbf{U}}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial e_i} & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial f_i} & \cdots & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial e_i} & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial f_i} & \cdots & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial e_j} & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial f_j} & \cdots & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial e_n} & \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial f_n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial e_i} = 2e_i y_{i0}^* + (2e_i - e_j + jf_j) y_{ij}^* \\ \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial f_i} = 2f_i y_{i0}^* + (2f_i - je_j - f_j) y_{ij}^* \\ \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial e_j} = -(e_i + jf_i) y_{ij}^* \\ \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial f_j} = (je_i - f_i) y_{ij}^* \\ \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial e_x} = \frac{\partial \dot{\mathbf{S}}_{ij}}{\partial f_x} = 0 \quad x \neq i, j \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{\partial f}{\partial u} = \frac{\partial \Delta \dot{\mathbf{S}}}{\partial \dot{\mathbf{S}}_s} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P_1}{\partial P_{s1}} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_{s1}} & \cdots & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial P_{sn}} & \frac{\partial \Delta P_1}{\partial Q_{sn}} \\ \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial P_{s1}} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial Q_{s1}} & \cdots & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial P_{sn}} & \frac{\partial \Delta Q_1}{\partial Q_{sn}} \\ \frac{\partial \Delta P_2}{\partial P_{s1}} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_{s1}} & \cdots & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial P_{sn}} & \frac{\partial \Delta P_2}{\partial Q_{sn}} \\ \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial P_{s1}} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial Q_{s1}} & \cdots & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial P_{sn}} & \frac{\partial \Delta Q_2}{\partial Q_{sn}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta P_n}{\partial P_{s1}} & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial Q_{s1}} & \cdots & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial P_{sn}} & \frac{\partial \Delta P_n}{\partial Q_{sn}} \\ \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial P_{s1}} & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial Q_{s1}} & \cdots & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial P_{sn}} & \frac{\partial \Delta Q_n}{\partial Q_{sn}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 0 & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & 1 \\ & & & & & & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

在此基础上, 发电机节点对所有断面的灵敏度矩阵为发电机节点对各断面所包含的线路有功潮流灵敏度之和。

构建了发电机节点对各断面的有功灵敏度矩阵后, 计算断面越限程度并归一化, 各断面的越限程度为

$$\mathbf{C} = [c_1 \quad c_2 \quad \cdots \quad c_m]^T \quad (9)$$

式中, $c_j, j=1, 2, \dots, m$ 为超出断面限额的有名值。对断面内部各线路越限程度进行归一化, 即

$$c'_j = c_j / \sum_{i=1}^m c_i \quad (10)$$

可以得到

$$\mathbf{C}' = [c'_1 \quad c'_2 \quad \cdots \quad c'_m]^T \quad (11)$$

在发电机对各断面的有功灵敏度基础上, 计及断面内各线路的有功超限程度, 得到发电机对各断面综合灵敏度系数矩阵为

$$\mathbf{S} = \mathbf{K}'\mathbf{C}' \quad (12)$$

2.2 越限控制方法

根据综合灵敏度系数 \mathbf{S} 符号分为正灵敏度矩阵 \mathbf{S}_1 、负灵敏度矩阵 \mathbf{S}_2 、零灵敏度矩阵 \mathbf{S}_0 ; 正灵敏度矩阵按照灵敏度系数大小排序, 负灵敏度矩阵按照灵敏度系数绝对值大小排序, 同时参考节点对线路的潮流灵敏度, 确定需要调整出力的机组。然后根据灵敏度大小对相应节点上的发电机机组进行出力的调整, 具体的步骤如下:

(1) 分步调整, 每一步的调整量为 ΔP_{step} 。

(2) 按灵敏度矩阵顺序调整发电机, 并按功率等量匹配调整, 即正灵敏度矩阵调整 ΔP_{step} 、负灵敏度矩阵或零灵敏度矩阵调整 ΔP_{step} 相互抵消, 维持增加机组出力 and 减少机组出力相同; 如果发电机的裕度小于 ΔP_{step} , 则按发电机裕度调整。

(3) 每步调整时, 扫描其他断面, 如果有其他断面 A 接近限额, 将该断面作为校核条件, 根据发电机对该断面的影响, 调整灵敏度矩阵 \mathbf{S}_1 、 \mathbf{S}_2 、 \mathbf{S}_0 重新排序。计算灵敏度矩阵 \mathbf{S} 的发电机对新出现的即将越限的断面 A 的灵敏度 $\mathbf{R} = [r_1 \quad \cdots \quad r_n]^T$, 用 \mathbf{R} 来校核 \mathbf{S}_1 、 \mathbf{S}_2 、 \mathbf{S}_0 , 把对断面 A 与原越限断面产生相反作用的机组置后, 调整顺序, 即尽量满足调节出力的机组对原越限断面和断面 A 的灵敏度符号相同, 起调节相同的正向或负向有功功率的作用。例如: 当前要调整的一组发电机 i 和 j , 分别在正灵敏度矩阵 $\mathbf{S}_1 = [s_{11} \quad \cdots \quad s_{1n}]^T$ 和负灵敏度矩阵 $\mathbf{S}_2 = [s_{21} \quad \cdots \quad s_{2n}]^T$, 校对 s_{1i} 和 s_{2j} 与 r_i 和 r_j 符号是否相同。如果 s_{1i} 和 r_i 符号不同, 则判断下一台发电机灵敏度 s_{1i+1} 和 r_{i+1} 是否相同, 如果 s_{1i+1} 和 r_{i+1} 相同, 则优先调节第 $i+1$ 台机组出力来消除断面的越限情况, 而将第 i 台机组置后, 如果 s_{1i+1} 和 r_{i+1} 符号也不同, 则继续判断下一台发电机组, 以此类推。

(4) 调整一步后, 重新计算断面内部线路有功超限程度和综合灵敏度矩阵, 再进行排序, 形成 \mathbf{S}_1 、 \mathbf{S}_2 、 \mathbf{S}_0 。

如果选定的机组全部调整完毕, 还有断面越限, 计算电气岛内其余发电机与所有断面的灵敏度系数, 按照上述方法进行调整, 从而构成一种循环

的调整模式, 直至所有断面内部线路有功超限消除, 整个系统稳定运行。如果发电机全部调整完毕, 还有断面越限, 则需要建立负荷与断面的灵敏度关系, 调整负荷。

3 粒子群控制算法

3.1 粒子群算法简介

基本粒子群算法(简称 PSO 算法)是从鸟群聚集模型得到启发并应用于解决优化问题, 在 PSO 算法中, 每个优化问题的潜在解对应于搜索空间中一只鸟, 亦可将其抽象为一个粒子^[22-24]。每个粒子都拥有一个由被优化的函数(即目标函数)所决定的适应度, 及决定它们飞行方向和距离的速度。所有粒子就都追随着当前适应度最佳的最优粒子在求解空间中进行搜索^[25-28]。

在每一次迭代中, 粒子通过跟踪两个最优值来更新自己: 第一个就是该粒子迄今所找到的最优解, 这个解称为个体极值; 另一个是所有粒子迄今所找到的最优解, 这个解称为全局极值^[29-30]。

假设在一个 D 维的求解空间中, 有 N 个粒子组成一个群落, 其中第 i 个粒子的位置是一个 D 维的向量, 记为

$$\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{iD}) \quad i = 1, 2, \cdots, N \quad (13)$$

第 i 个粒子的速度记为

$$\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \cdots, v_{iD}) \quad i = 1, 2, \cdots, N \quad (14)$$

第 i 个粒子的个体极值记为

$$\mathbf{P}_{\text{best}i} = (p_{i1}, p_{i2}, \cdots, p_{iD}) \quad i = 1, 2, \cdots, N \quad (15)$$

整个群落的全局极值记为

$$\mathbf{g}_{\text{best}} = (p_{g1}, p_{g2}, \cdots, p_{gD}) \quad (16)$$

粒子根据式(17)来更新自己的速度和位置。

$$\begin{cases} \mathbf{V}_i = w\mathbf{V}_i + c_1r_1(\mathbf{P}_{\text{best}i} - \mathbf{X}_i) + c_2r_2(\mathbf{g}_{\text{best}} - \mathbf{X}_i) \\ \mathbf{X}_i = \mathbf{X}_i + \mathbf{V}_i \end{cases} \quad (17)$$

式中: c_1 和 c_2 为学习因子; w 为惯性因子; r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 的均匀随机数。式(17)的右边由三个部分组成, 第一部分反映了粒子有着维持原先运动趋势的习惯; 第二部分反映了粒子有着向自身历史最佳位置逼近的趋势; 第三部分反映了粒子间协同合作向群体最佳位置逼近的趋势^[31-32]。

综合自适应粒子群算法以及活跃目标点粒子群算法的状态转移公式改进办法, 提出了新的状态转移公式, 即

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{P}_{\text{best}i} + \beta \cdot (\mathbf{G}_{\text{best}} - \mathbf{P}_{\text{best}i}) + \alpha \cdot r \cdot \mathbf{X}_{\text{max}} \quad (18)$$

新的 α 满足:

$$\alpha = \alpha \cdot \gamma \quad (19)$$

式中: $\mathbf{P}_{\text{best}i}$ 为第 i 个粒子历史最优点的位置; \mathbf{G}_{best} 为

粒子群体历史最优点的位置; r 为随机数; β 与学习因子有关; α 为粒子随机衰减因子; γ 则反映 α 的衰减速度。

4 仿真分析

4.1 确定输电断面分区

为验证本控制方法的有效性, 对 IEEE39 节点电力网络进行了仿真验证。首先, 采用前文提到的 AP 聚类算法^[20,33]进行网络的分区, 使用线路的输电介数构成相似度矩阵, 得到两个聚类分区, 结果如图 1 所示。但是区域内的节点地理位置较远, 不符合实际电网分区的要求。使用节点间的负欧氏距离构成相似度矩阵, 即考虑节点间的地理位置来进行分区, 得到 6 个聚类分区, 结果如图 2 所示。

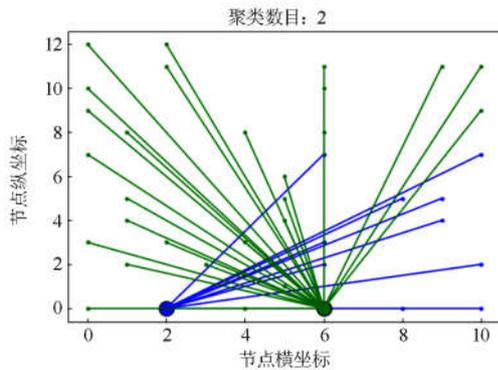


图 1 考虑输电介数的网络分区

Fig. 1 Network partition considering transmission betweenness

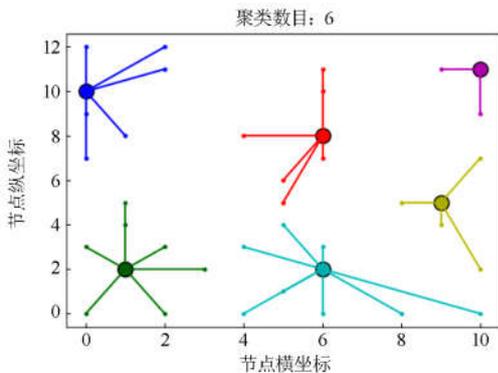


图 2 考虑地理位置的网络分区

Fig. 2 Network partition considering geographical location

在 IEEE39 节点网络的基态潮流下, 得到分区示意简图, 如图 3 所示, 同时有具体的系统分区图, 如图 4 所示。

输电断面由分区之间的联络线按照一定的潮流方向构成, 且是电网的割集。本文结合图 3 结果以及断面特征, 确定了 5 个输电断面。选取的输电断面如表 1 所示。

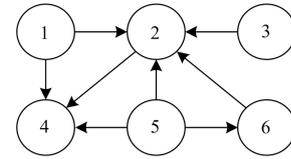


图 3 39 节点网络分区示意简图

Fig. 3 Schematic diagram of 39-node network partition

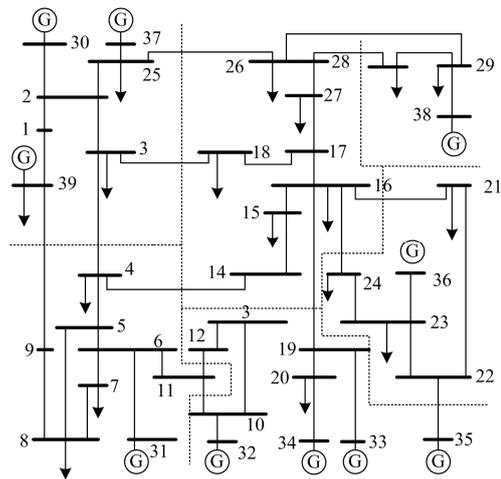


图 4 39 节点系统分区图

Fig. 4 Partition graph of 39-node system

表 1 系统输电断面搜索结果

Table 1 Search results of system transmission section

序号	断面输电包含线路
1	L ₂₅₋₂₆ , L ₃₋₁₈ , L ₃₋₄ , L ₃₉₋₉
2	L ₃₉₋₉ , L ₃₋₄ , L ₄₋₁₄ , L ₁₁₋₁₂ , L ₁₀₋₁₁
3	L ₁₀₋₁₁ , L ₁₁₋₁₂ , L ₁₃₋₁₄ , L ₁₉₋₁₆ , L ₂₂₋₃₅
4	L ₁₀₋₁₁ , L ₁₁₋₁₂ , L ₁₃₋₁₄ , L ₁₆₋₁₉ , L ₁₆₋₂₁ , L ₁₆₋₂₄
5	L ₂₆₋₂₉ , L ₂₆₋₂₈

4.2 灵敏度断面控制方法仿真

发电机节点有功注入对各输电断面有功潮流的综合灵敏度数据, 如表 2 所示。

表 2 节点对输电断面的综合灵敏度数据

Table 2 Comprehensive sensitivity data of nodes to transmission sections

节点序号	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4	断面 5
30	-0.548 3	-0.5661	0.049 5	0.049 5	0
32	0.052 5	-0.5051	-0.948 9	-0.949 0	0
33	0.234 7	-0.365 2	1.054 5	1.054 2	0
34	0.235 4	-0.366 4	1.057 8	1.057 6	0
35	0.237 0	-0.368 7	-0.935 1	1.052 7	0
36	0.235 9	-0.366 9	0.064 6	1.047 0	0
37	-0.553 6	-0.534 3	0.049 3	0.049 3	0
38	0.346 8	-0.497 0	0.053 3	0.053 1	0
39	0.187 7	0.159 5	0.028 4	0.028 5	0

(1) 同时设置断面 4 中线路 L_{16-24} 的有功潮流超过极限值 5%，断面 5 中线路 L_{26-28} 的有功潮流超过极限值 5%。各发电机节点对断面的正灵敏度矩阵 S_1 和负灵敏度矩阵 S_2 的计算结果，分别如表 3 前 3 列所示。

表 3 各发电机节点对断面的灵敏度

Table 3 Sensitivity of each generator node to transmission section

发电机节点编号	正灵敏度系数	负灵敏度系数
30	0.024 7	0
32	0	-0.474 5
33	0.052 71	0
34	0.528 8	0
35	0.526 4	0
36	0.523 5	0
37	0.024 6	0
38	0.517 6	0
39	0.014 3	0

采用本控制算法， ΔP_{step} 设置为 0.5 MW。根据正灵敏度矩阵 S_1 ，优先调节节点 34、33、35、36 和 38，减少相应发电机组的有功出力，同时遵循功率等量匹配调整，根据负灵敏度矩阵 S_2 ，增加节点 32 上的发电机组有功出力。最终确定采用节点 35 和节点 38 发电机组减少出力，节点 32 发电机组增加出力，来保持系统正负有功出力等量匹配。其中，节点 35 发电机组减少 6.5 MW 的有功出力，节点 38 发电机组减少 14.5 MW 的有功出力，节点 32 发电机组增加 21 MW 的有功出力。 L_{16-24} 的有功潮流为 40.4 MW， L_{26-28} 的有功潮流为 134.5 MW，消除了断面 4 和断面 5 内部线路的有功潮流越限。

(2) 同时设置断面 1 中线路 L_{3-18} 和 L_{39-9} 的有功潮流超过极限值 7%，断面 2 中线路 L_{4-14} 的有功潮流超过极限值 3%。得到各发电机节点对断面的正灵敏度矩阵 S_1 和负灵敏度矩阵 S_2 的计算结果，如表 4 所示。

表 4 各发电机节点对断面的灵敏度

Table 4 Sensitivity of each generator node to transmission section

发电机节点编号	正灵敏度系数	负灵敏度系数
30	0	-0.553 7
32	0.036 7	-0.151 5
33	0.164 3	-0.109 6
34	0.164 8	-0.109 9
35	0.165 9	-0.110 6
36	0.165 2	-0.110 1
37	0	-0.547 8
38	0.242 8	-0.149 1
39	0.179 2	0

采用本控制算法， ΔP_{step} 仍设置为 0.5 MW。根据正灵敏度矩阵 S_1 ，优先调节节点 38、39 和 35 的有功注入，减少相应发电机组的有功出力，同时遵循功率等量匹配调整，根据负灵敏度矩阵 S_2 ，优先调节节点 30、37 和 32 的有功注入，增加相应发电机组的有功出力。所选的调节机组应尽量满足两个越限断面的综合灵敏度符号相同，起调节相同的正向或负向功率的作用，同时必须结合节点对线路的有功潮流灵敏度。例如，确定节点 35、节点 38 和节点 39 发电机组减少出力，对于断面 2 中的线路 L_{4-14} ，节点 32 对 L_{4-14} 的线路有功潮流灵敏度为 0.195 6，远大于节点 35、38、39 对 L_{4-14} 的线路有功潮流灵敏度之和，选择节点 32 发电机组增加出力，则始终达不到消除断面 2 线路越限的目的。

最终确定采用节点 35、节点 38 和节点 39 的发电机组减少出力，节点 37 发电机组增加出力，以保持系统正负有功出力等量匹配。其中，节点 35 发电机组减少 39 MW 的有功出力，节点 38 发电机组减少 25 MW 的有功出力，节点 39 发电机组减少 15 MW 的有功出力，节点 37 发电机组增加 79 MW 的有功出力， L_{3-18} 的有功潮流为 15 MW， L_{39-9} 的有功潮流为 12.5 MW， L_{4-14} 的有功潮流为 254.1 MW，消除了断面 1 和断面 2 包含线路的有功潮流越限。

4.3 基于粒子群算法的仿真分析

将粒子群算法应用于本断面控制时，所选取的目标函数是断面处实际功率与目标功率值的偏差，使其值达到最小(即最优)。最优潮流在优化过程中，所有的迭代点应满足基本的潮流平衡方程，即选取潮流平衡方程作为等式约束。而不等式约束则包括潮流断面输送功率的约束、系统母线电压上下限约束，可调发电机出力的限制。

表 5 算例 1 各发电机出力变化

Table 5 Example 1 generator output changes

发电机序号	所接节点	优化前有功/MW	优化后有功/MW	出力调整量/MW
1	30	250	1 800.72	1 550.72
2	31	572.93	416.15	-156.78
3	32	650	411.67	-238.33
4	33	632	654.38	22.38
5	34	508	521.78	13.78
6	35	650	516.25	-133.75
7	36	560	402.72	-157.28
8	37	540	700	160
9	38	830	450.08	-379.92
10	39	1 000	319.18	-680.82

表 6 算例 1 越限支路潮流变化

支路首节点	支路末节点	优化前潮流/MW	优化后潮流/MW	潮流变化量/MW	支路有功极限/MW
16	24	42.7	21.33	-21.37	40.7
26	28	141.6	110.25	-31.35	134.9

表 7 算例 2 各发电机出力变化

发电机序号	所接节点	优化前有功/MW	优化后有功/MW	出力调整量/MW
1	30	250	1305.64	1055.64
2	31	572.93	150.53	-422.4
3	32	650	569.96	-80.04
4	33	632	323.36	-308.64
5	34	508	592.69	84.69
6	35	650	671.60	21.6
7	36	560	638.36	78.36
8	37	540	381.73	-158.27
9	38	830	564.14	-265.86
10	39	1000	994.92	-5.08

表 8 算例 2 越限支路潮流变化

支路首节点	支路末节点	优化前潮流/MW	优化后潮流/MW	潮流变化量/MW	支路有功极限/MW
14	4	261.9	183.26	-78.64	254.3
18	3	34	1.69	-32.31	31.8
39	9	14.3	9.95	-4.35	13.4

表 5—表 8 分别为算例 1 和算例 2 经过粒子群计算得到的各发电机组出力的变化量以及各断面越限支路优化前后的有功潮流值。算例 1 中越限线路 L₁₆₋₂₄ 的有功潮流由 42.7 MW 优化为 21.33 MW, L₂₆₋₂₈ 的有功潮流由 141.6 MW 优化为 110.25 MW。算例 2 中越限线路 L₄₋₁₄ 的有功潮流由 261.9 MW 优化为 183.26 MW, L₃₋₁₈ 由 34 MW 优化为 1.69 MW, L₃₉₋₉ 由 14.3 MW 优化为 9.95 MW, 均低于支路有功极限, 消除了线路的越限。

4.4 越限控制算法对比分析

采用粒子群算法分别对算例 1 和算例 2 的线路越限情况进行控制, 机组优化前后出力对比以及断面越限前后潮流对比情况如图 5 至图 8 所示。

由图 5 和图 7 可知, 对于算例 1 和算例 2, 粒子群优化算法的控制方法中, 所有发电机组均参与优化调节, 机组有功出力变化量数值较大, 80% 的机组出力调整量均超出 100 MW; 相反, 在本文研

究的两种算例中, 综合灵敏度方法只调节选择 2~3 台参与优化的机组, 有功调整量数值较小。

由图 6 和图 8 所示, 经过两种方法的优化调节后, 各断面的越限线路有功潮流均低于最大有功极限, 消除了断面线路的越限情况。其中采用综合灵敏度算法调整得到的线路有功潮流更接近于线路最大极限, 如算例 1, 消除越限后, 断面 4 的线路 L₁₆₋₂₄ 有功潮流仅低于最大有功极限 0.3 MW, 断面 5 的线路



图 5 算例 1 机组优化前后有功出力对比图

Fig. 5 Example 1 comparison of active power output before and after unit optimization

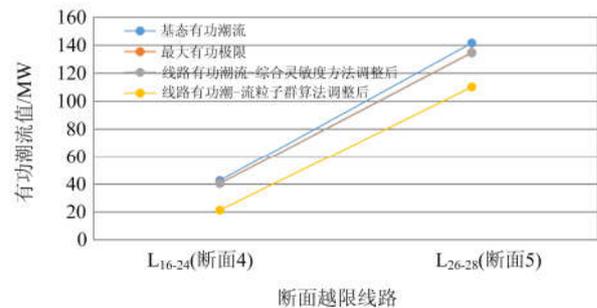


图 6 算例 1 断面线路越限消除前后有功潮流对比图

Fig. 6 Example 1 comparison of the active power flow before and after elimination of transmission section lines' over-limit



图 7 算例 2 机组优化前后有功出力对比图

Fig. 7 Example 2 comparison of active power output before and after unit optimization

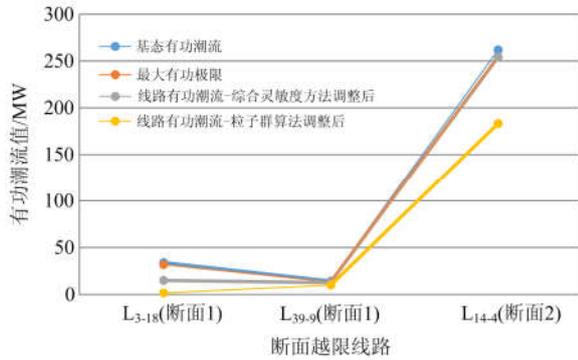


图8 算例2 断面线路越限消除前后有功潮流对比图

Fig. 8 Example 2 comparison of the active power flow before and after elimination of transmission section lines' over-limit

L₂₆₋₂₈ 仅低于最大有功极限 0.4 MW。而粒子群算法调整得到的线路有功潮流远低于线路最大有功极限, 算例 1 中, 消除越限后, 断面 4 的线路 L₁₆₋₂₄ 有功潮流低于最大有功极限 21.37 MW, 断面 5 的线路 L₂₆₋₂₈ 低于最大有功极限 31.35 MW, 消除断面线路越限的效果相对更好。

在调整过程中, 综合灵敏度算法与粒子群算法的控制方法相比, 前者对调整机组的选择考虑情况较为复杂, 按照分步长进行调节, 调节量的选取具有一定的随机性, 效率低于基于粒子群算法的控制方法。但后者参与调节的机组数量多且调整量大。实际应用时, 可以根据系统的实际情况选择合适的控制方法。

5 结论

针对输电断面内部线路可能出现有功潮流越限的实际问题, 研究了有功潮流灵敏度、综合灵敏度以及粒子群优化算法, 将综合灵敏度以及粒子群方法分别应用于消除输电断面有功潮流越限的控制方案中, 得出如下结论:

(1) 在对电力系统网络分区确定输电断面后, 求取发电机组节点有功注入对输电断面有功潮流的综合灵敏度矩阵, 考虑各断面越限权重得到正和负综合灵敏度系数。正和负综合灵敏度系数按绝对值大小排序, 尤其当同一断面越限线路数目较少时, 需要结合各节点对线路的潮流灵敏度来确定调节的发电机组, 按指定步长调节出力, 遵循正负功率等量匹配的原则, 消除断面内部线路越限, 与此同时, 扫描其余断面确定是否出现包含新越限线路的断面, 保证输电断面稳定运行。利用粒子群优化算法计算各发电机组有功出力, 选取断面处实际功率与目标功率值的偏差达到最小(即最优)作为目标函

数, 通过优化计算的机组出力作为调整量从而消除断面越限, 利用 IEEE39 节点网络对两种断面越限控制方法进行了对比分析, 验证了这两种控制方法均可消除输电断面内部线路的越限。

(2) 在输电断面越限控制方面也存在两种方法各自的优势和局限性。基于综合灵敏度的断面越限控制方法适用于要求参与优化的机组数量和出力调整量少的情况, 基于粒子群算法的断面越限控制方法, 适用于消除越限后线路有功潮流远低于线路最大有功极限且调节效率高的情况。实际工作中要结合系统运行情况和要求选择相应的控制方法。

参考文献

- [1] 郭剑波. 我国电力科技现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 1-7.
GUO Jianbo. Present situation and development trend of power science and technology in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 1-7.
- [2] 高翔, 张沛超. 电网故障信息系统应用技术[J]. 电力系统自动化设备, 2005, 25(4): 11-15.
GAO Xiang, ZHANG Peichao. Application technology of network fault information system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(4): 11-15.
- [3] 杨洪耕, 明娇, 代海波. 地区电网智能告警系统的实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(2): 105-109.
YANG Honggeng, MING Jiao, DAI Haibo. Realization of intelligent alarm system for district power network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 2(2): 105-109.
- [4] ZHAI Chao, ZHANG Hehong, XIAO Gaoxi, et al. A model predictive approach to protect power systems against cascading blackouts[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 113.
- [5] YANG Yude, SONG Anjun, LIU Hui, et al. Parallel computing of multi-contingency optimal power flow with transient stability constraints[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 204-213. DOI: 10.1186/s41601-018-0095-z.
- [6] 张钰声, 锁军, 金吉良, 等. 考虑地理属性的大电网典型输电断面搜索方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(5): 54-60.
ZHANG Yusheng, SUO Jun, JIN Jiliang, et al. Study of typical transmission section searching method considering geographical attributes for large power grids[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(5): 54-60.
- [7] 谢义苗, 熊颖杰, 赖永萍, 等. 城市配电网高可靠性网架设计方案[J]. 供用电, 2019, 36(12): 55-61.
XIE Yimiao, XIONG Yingjie, LAI Yongping, et al. High-reliability grid design scheme for urban distribution

- network[J]. *Distribution & Utilization*, 2019, 36(12): 55-61.
- [8] 陆俊宇, 林声宏, 毛焯祖, 等. 基于社团发现理论的关键输电断面辨识[J]. *智慧电力*, 2017, 45(8): 51-57.
LU Junyu, LIN Shenghong, MAO Chizu, et al. Discrimination of key transmission section based on the theory of community detection[J]. *Smart Power*, 2017, 45(8): 51-57.
- [9] 莫琦, 程哲, 赵旋宇, 等. 网省间输电断面的实时协调监控[J]. *南方电网技术*, 2015, 9(1): 78-82.
MO Qi, CHENG Zhe, ZHAO Xuanyu, et al. Real-time coordination control of transmission sections between provincial and regional dispatching areas[J]. *Southern Power System Technology*, 2015, 9(1): 78-82.
- [10] 王轶禹, 王晶, 冯长有, 等. 电网系统保护在线监视研究及典型应用[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(5): 63-70.
WANG Yiyu, WANG Jing, FENG Changyou, et al. Online monitoring for large power system protection and its optimization strategy[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(5): 63-70.
- [11] 邓凯, 瞿峰, 钱伟, 等. 苏南 500 kV 统一潮流控制器保护系统及动作结果分析[J]. *电力工程技术*, 2018, 37(1): 8-13.
DENG Kai, QU Feng, QIAN Wei, et al. Analysis of protection system and action results of unified power flow controller in Suzhou 500 kV southern power grid[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(1): 8-13.
- [12] 高兆丽, 胥明凯, 丁素英, 等. 基于改进人工蜂群算法的配电网多点故障应急抢修优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(13): 107-114.
GAO Zhaoli, XU Mingkai, DING Suying, et al. Optimization scheduling of multi-fault rush repair for distribution networks based on modified artificial bee colony algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(13): 107-114.
- [13] 茅逸斐, 韩蓓, 李国杰, 等. 基于网络等效的配电网快速供电恢复策略并行化实现[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(11): 99-108.
MAO Yifei, HAN Bei, LI Guojie, et al. Parallel realization of fast restoration strategy for distribution system based on network equivalence[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(11): 99-108.
- [14] 程临燕, 郝治国, 张保会, 等. 基于内点法消除输电断面过载的实时控制算法[J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(17): 51-55.
CHENG Linyan, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Real-time control algorithm for eliminating transmission section overload based on interior point method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(17): 51-55.
- [15] 李响, 郭志忠. 基于 N-1 静态安全约束的输电断面有功潮流控制[J]. *中国电力*, 2005, 38(3): 26-28.
LI Xiang, GUO Zhizhong. Active power flow control of transmission section based on N-1 static safety constraint[J]. *Electric Power*, 2005, 38(3): 26-28.
- [16] 杨松浩, 苏福, 张保会. 计及暂态稳定约束的断面功率调整方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(9): 2531-2539.
YANG Songhao, SU Fu, ZHANG Baohui. Study on transient stability constrained transmission section active power flow adjustment method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(9): 2531-2539.
- [17] 罗钢, 易杨, 钱峰, 等. 基于潮流转移比的动态断面控制方法[J]. *陕西电力*, 2017, 45(4): 1-5.
LUO Gang, YI Yang, QIAN Feng, et al. Dynamic control method of transmission sections based on power flow transfer ratio[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2017, 45(4): 1-5.
- [18] 甘德树, 冯伯庚, 蒋芳玉, 等. 基于功率灵敏度分析的断面潮流安全控制方法[J]. *陕西电力*, 2017, 45(1): 82-85.
GAN Deshu, FENG Bogeng, JIANG Fangyu, et al. Security control method for interface power flow based on power sensitivity analysis[J]. *Shaanxi Electric Power*, 2017, 45(1): 82-85.
- [19] 周德才, 张保会, 姚峰, 等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(12): 32-38.
ZHOU Decai, ZHANG Baohui, YAO Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(12): 32-38.
- [20] 何培颖, 房鑫炎. 基于聚类算法的关键输电断面快速搜索[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(7): 97-101.
HE Peiyang, FANG Xinyan. Fast search of the key transmission sections based on clustering algorithms[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(7): 97-101.
- [21] 赵建文, 张广骁, 童晓阳. 基于 Dijkstra 算法的广域自适应跳闸策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(16): 127-134.
ZHAO Jianwen, ZHANG Guangxiao, TONG Xiaoyang. Self-adaptive tripping strategy based on Dijkstra algorithm for wide-area protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(16): 127-134.
- [22] 郭长友. 一种自适应惯性权重的粒子群优化算法[J]. *计算机应用与软件*, 2011, 28(6): 289-292.

- GUO Changyou. A particle swarm optimization with adaptive inertia weight[J]. Computer Applications and Software, 2011, 28(6): 289-292.
- [23] 张英男. 改进的粒子群优化算法(PSO和DPSO)研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- ZHANG Yingnan. The improved particle swarm optimization algorithms: APSO and DPSO[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [24] 张志宇. 粒子群优化算法的改进研究及其应用[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- ZHANG Zhiyu. Modification and application of particle swarm optimization[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [25] 汪泳涛, 汪琳红, 罗松涛. 新型混合粒子群算法在电力系统最优潮流计算中的应用[J]. 可再生能源, 2013, 31(6): 34-37.
- WANG Yongtao, WANG Linhong, LUO Songtao. The application of novel hybrid particle swarm algorithm for optimal power flow calculation of power systems with considering wind power integration[J]. Renewable Energy, 2013, 31(6): 34-37.
- [26] 田跃军. 粒子群算法改进及其在电力系统的应用[J]. 电子测试, 2015(19): 47-48.
- TIAN Yuejun. Improvement of particle swarm algorithm and its application in power system[J]. Electronic Test, 2015(19): 47-48.
- [27] 阎帅, 刘子旗, 刘昊城, 等. 粒子群算法研究与进展[J]. 现代工业经济和信息化, 2019(3): 19-20.
- YAN Shuai, LIU Ziqi, LIU Haocheng, et al. Research and development of particle swarm optimization[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2019(3): 19-20.
- [28] 王晨, 周毅. 基于粒子群算法的输电能力经济性优化[J]. 广东电力, 2019, 32(3): 126-131.
- WANG Chen, ZHOU Yi. Numerical economy optimization of power transfer capacity based on particle swarm optimization algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(3): 126-131.
- [29] 薛洪波, 伦淑娴. 粒子群算法在多目标优化中的应用综述[J]. 渤海大学学报: 自然科学版, 2009, 30(3): 265-269.
- XUE Hongbo, LUN Shuxian. A review on application of PSO in multi-objective optimization[J]. Journal of Bohai University: Natural Science Edition, 2009, 30(3): 265-269.
- [30] 单葆国, 李昊洋, 霍沫霖, 等. 基于粒子群优化改进 Gompertz 模型的终端电能消费量分析[J]. 供用电, 2018, 35(11): 54-58.
- SHAN Baoguo, LI Haoyang, HUO Molin, et al. Analysis of terminal power consumption using improved gompertz model based on particle swarm optimization[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(11): 54-58.
- [31] 刘航英, 邱晓燕, 李华. 基于改进粒子群算法的计算及电压稳定约束的最优潮流计算[J]. 机电信息, 2009(30): 75-77.
- LIU Hangying, QIU Xiaoyan, LI Hua. Optimal power flow calculation based on improved particle swarm optimization algorithm and voltage stability constraints[J]. Mechanical and Electrical Information, 2009(30): 75-77.
- [32] 黄亚峰, 刘思驿, 庞松岭, 等. 基于自适应权重 PSO 算法的分布式光伏并网极限容量计算[J]. 广东电力, 2020, 33(4): 34-40.
- HUANG Yafeng, LIU Siyi, PANG Songling, et al. Calculation of ultimate capacity of network on acceptance of distribution PV system based on adaptive weight PSO algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(4): 34-40.
- [33] 唐伟, 南璐, 石玉东, 等. 复杂网络理论下的电网分区及输电断面搜索方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(16): 198-204.
- TANG Wei, NAN Lu, SHI Yudong, et al. Power grid partition and transmission section searching method based on complex network theory[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(16): 198-204.

收稿日期: 2019-09-11; 修回日期: 2019-11-19

作者简介:

徐正清(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析, 电力系统培训仿真; E-mail: xuzhengqing@sgepri.sgcc.com.cn

肖艳炜(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为调度自动化及电力现货市场技术; E-mail: xiaoyw@zju.edu.com

孙淑琴(1969—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统仿真计算技术, 新能源发电及并网技术。E-mail: sunsq@jlu.edu.cn

(编辑 许威)