

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200652

基于原-对偶内点法的输电断面有功安全校正控制方法

孙淑琴¹, 颜文丽¹, 吴晨悦¹, 刘育杰¹, 杨博华¹, 徐正清²

(1. 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;

2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192)

摘要: 实施输电断面的识别与控制, 对于电力系统防御连锁跳闸事故的发生以及整个系统安全可靠运行具有重要意义。提出了一种基于 AP 聚类算法的输电断面识别方法, 选取各节点的负欧式距离, 即考虑地理位置实现电力网络的分区, 识别出初始的输电断面。在此基础上, 结合网络中各线路的支路开断分布因子, 将脆弱线路包含入输电断面的线路构成, 从而识别出最终的输电断面。针对输电断面的控制, 提出了一种有功安全校正方法。通过原-对偶内点法求解非线性规划模型, 进行电力网络的潮流重构, 实现消除断面内部线路的有功过载。对 IEEE14 节点和 39 节点网络进行了输电断面的识别, 并对 IEEE 39 节点和 118 节点网络进行了有功安全校正的算例分析和验证。结果表明了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 输电断面; AP 聚类算法; 支路开断分布因子; 有功安全校正

Active power flow safety correction control method of transmission sections based on a primal-dual interior point method

SUN Shuqin¹, YAN Wenli¹, WU Chenyue¹, LIU Yujie¹, YANG Bohua¹, XU Zhengqing²

(1. Laboratory of Geo-Exploration and the Instrumentation Ministry of Education of China, College of Instrumentation and

Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China; 2. Beijing Kedong Electric Power

Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Implementing the identification and control of transmission sections is of great significance for the prevention of chain trip accidents in a power system and the safe and reliable operation of the entire system. A method for identifying transmission sections based on an AP clustering algorithm is proposed. The Euclidean distance of each node is selected, i.e. the geographical division of the power network is realized to identify the initial transmission sections. On this basis, combined with the line outage distribution factor of each line in the network, fragile lines are included in the line composition of the transmission sections, and the final transmission sections are identified. Aiming at the control of the transmission sections, an active power safety correction method for the transmission sections is proposed. The non-linear programming model is calculated by the primal-dual interior point method, and the power flow reconstruction of the power network is implemented to eliminate the active overload of the internal lines of the sections. The transmission sections of the IEEE 14-node and 39-node networks are identified, and the analysis and verification of the safety correction of active power flow on the IEEE 39-node and 118-node networks are performed. The results show the feasibility and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Study and Application of Large Power Grid Pre-Dispatch Key Technology" (No. SGZJ0000KXJS1800285).

Key words: transmission sections; AP clustering algorithm; line outage distribution factor; safety correction of active power flow

0 引言

随着电力系统的不断发展, 网络规模和结构日

益复杂, 自然和人为等因素导致的极端事件所带来的安全风险也越发显著^[1]。保障电力系统的安全可靠运行, 对于国民经济的发展和社会稳定具有重要的意义^[2-6]。实际电力系统中, 输电断面对于其两侧的区域电能传输具有重要作用^[7-10], 需要对输电断面进行识别以及相应的在线监测和潮流控制^[11-12]。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“大电网预调度关键技术研究及应用”(SGZJ0000KXJS1800285)

目前,对于输电断面的识别,主要从两个角度考虑。

从电力网络中过载支路被切除后,发生潮流转移的角度,识别具体过载支路相关的并行输电断面,并结合相应指标,筛选出关键的输电断面。文献[13]提出基于模糊聚类和最短路径的关键断面确定方法。通过对各线路功率构成向量进行分类,并基于划分熵指数确定出聚类中心数,得到过载支路的初始并行输电断面。根据过载支路首末节点间的最短传输路径,支路潮流方向及分布因子得到关键输电断面。文献[14]考虑电力网络的拓扑关系和潮流分布,构建电力网络系统状态图的邻接矩阵和路径矩阵,经过一系列矩阵运算,识别出受过载支路断开影响严重的并行输电断面。但仅从图论和状态图潮流分布的角度,容易出现输电断面的误判。

根据输电断面的定义,输电断面是将电力系统分成两个互相独立的连通子区域的一组输电线路集合^[15]。从图论的角度,考虑电力网络的拓扑结构及线路特征,对网络进行分区,在此基础上,识别出输电断面的线路构成。文献[15]使用 GN(Girven-Newman)算法对网络进行分区,并对分区后出现的三台及以上变压器串供结构进行修正。然后使用 Karger 算法搜索分区后的网络割集,获取输电断面。文献[16]同样使用复杂网络社团划分中的 GN 算法,基于定义的关键介数,进行了电力网络分区。并综合考虑线路对输电网的传输贡献度及系统故障后线路的转带潮流能力识别出脆弱线路,也作为区间联络线,实现输电断面的搜索。但是 GN 算法在退化为单独的社区之后,并不能明确最终的分区数目,还需要依据其他指标来选定。文献[17]结合线路的边介数及有功潮流权重,构成传输介数,作为相似度矩阵内部的组成元素,使用 AP(Affinity Propagation Clustering)聚类算法实现系统分区。运用图论中的基本割集搜索理论及输电断面内部线路有功潮流方向一致的约束,完成输电断面的搜索。最后考虑断面安全裕度,识别出关键的输电断面。

当电力系统中的线路发生过载而被切除后,可能引发输电断面内部连锁故障^[18]。为保障输电断面的安全稳定运行,应及时对输电断面进行安全校正,消除线路过载。文献[19]提出一种荷-源协同电网静态安全校正的最优控制算法,以调整机组出力 and 切负荷的控制成本最小为目标,建立了静态安全校正控制模型,求解出机组出力的可行解。并结合灵敏度指标,得到相应切负荷的控制策略。文献[20]提出一种基于 AGC(Automatic Generation Control)的断面越限预防和校正控制方法,利用基于灵敏度的

反向等量配对法从 AGC 可控机组中选择参与优化的调节机组,同时考虑机组的调节容量等参量确定校正量,从而消除断面越限。并且结合原-对偶内点法求解非线性规划问题,目标函数为机组总有功调节量最小,确定出最终的机组调节量。但这两种方法所选取的目标函数均为优化的控制成本最小,没有把消除断面越限的具体约束条件体现出来。文献[21]提出基于功率灵敏度分析的断面潮流安全控制方法,构造了支路功率与节点功率注入之间的灵敏度指标,根据计算结果排序选择最佳控制发电机。发电机组和负荷的注入功率统一减少当前站点的 20%,然后考察线路负荷率的变化情况。但是基于灵敏度指标的控制方式,对于机组出力的调整量,需要额外根据其他参量确定,容易出现调节受限的问题。

针对上述不足,本文提出基于 AP 聚类算法的输电断面识别方法,考虑地理位置筛选出聚类中心,实现电力网络的分区。将分区之间的联络线作为初始输电断面,同时利用支路开断分布因子对网络分区和初始输电断面进行校核和修正,尽量将对区域间有功潮流传输影响较大的线路选取为输电断面的线路构成,将影响较小的线路从初始输电断面中剔除。AP 聚类算法相比 GN 算法,不需要指定聚类中心数,即可根据相似度矩阵得到分区结果。在文中也给出了支路开断分布因子的具体计算方法。针对输电断面内部出现线路有功潮流过载的问题,本文给出了基于原-对偶内点法的输电断面有功安全校正方法,将目标函数设定为输电断面过载线路有功潮流与上限的差值之和,通过对电力网络进行潮流重构,实现消除输电断面内部线路有功过载。

1 电力网络输电断面的识别

1.1 AP 聚类算法识别初始输电断面

AP 聚类算法使用相似度矩阵 S 作为输入, S 中的元素 $S(i,j)$ 表征样本点 i 和 j 之间的相似程度。 S 对角线上的元素 $S(k,k)$ 表征样本点 k 成为聚类中心的能力大小,也称为偏好度(preference),算法迭代开始前,每个样本点成为聚类中心的能力应相同,因而通常统一选取为相似度矩阵 S 中的最小值或中值。同时偏好度的数值会影响最终的聚类中心的数目,值越大,代表各样本点成为聚类中心的能力越强,得到的聚类中心的数目越多。

AP 聚类算法是一种基于样本点之间信息传递的分类算法。传递的信息参数包含两项,分别是吸引力 r (responsibility)和归属度 a (availability)^[22-24]。初始化时,吸引力矩阵 R 和归属度矩阵 A 均为零矩

阵。该算法遵循的 \mathbf{R} 和 \mathbf{A} 矩阵元素的迭代过程具体如下:

$$\mathbf{r}_{n+1}(i,k) = \begin{cases} \mathbf{S}(i,k) - \max_{j \neq k} \{\mathbf{a}_n(i,j) + \mathbf{r}_n(i,j)\}, i \neq k \\ \mathbf{S}(i,k) - \max_{j \neq k} \{\mathbf{S}(i,j)\}, i = k \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{a}_{n+1}(i,k) = \begin{cases} \min \left\{ 0, \mathbf{r}_{n+1}(k,k) + \sum_{j \neq i,k} \max \{\mathbf{r}_{n+1}(j,k), 0\} \right\}, & i \neq k \\ \sum_{j \neq k} \max \{\mathbf{r}_{n+1}(j,k), 0\}, & i = k \end{cases} \quad (2)$$

式中, n 代表迭代次数。 $\mathbf{r}(i,k)$ 为从样本点 i 传递到样本点 k 的信息, 表征 k 点作为 i 点聚类中心的合适程度。

在 $\mathbf{r}(i,k)$ 的迭代式中, $\max \{\mathbf{a}_n(i,j) + \mathbf{r}_n(i,j)\}$ 值越大, 则除 k 点以外的其余样本点 j 作为 i 点聚类中心的优势越大, k 点作为 i 点聚类中心的能力被削弱。

$\mathbf{a}(i,k)$ 为从样本点 k 传递到样本点 i 的信息, 表征 i 点选择 k 点作为聚类中心的合适程度。

在 $\mathbf{a}(i,k)$ 的迭代式中, $\sum_{j \neq i,k} \max \{\mathbf{r}_{n+1}(j,k), 0\}$ 表征除 i 点以外的样本点 j 选择 k 点作为聚类中心的累积作用, 该值越大, 则 i 点选择 k 点作为聚类中心的合适程度增强。经过 $\mathbf{r}(i,k)$ 和 $\mathbf{a}(i,k)$ 的迭代过程, 实现聚类簇群的选择。

为减少迭代过程中的数据振荡, \mathbf{a} 和 \mathbf{r} 的更新引入衰减系数为 λ , λ 介于 0.5 到 1 之间。

$$\mathbf{r}_{n+1}(i,k) = \lambda \times \mathbf{r}_n(i,k) + (1-\lambda) \times \mathbf{r}_{n+1}(i,k) \quad (3)$$

$$\mathbf{a}_{n+1}(i,k) = \lambda \times \mathbf{a}_n(i,k) + (1-\lambda) \times \mathbf{a}_{n+1}(i,k) \quad (4)$$

每次迭代时, 选择满足 $\mathbf{r}(k,k) + \mathbf{a}(k,k) > 0$ 的样本点 k 作为聚类中心。直到迭代次数达到上限或者聚类中心不再发生变化, 则达到收敛, 迭代运行终止。

1.2 基于支路开断分布因子识别最终输电断面

根据文献[13]对关键输电断面的定义, 故障或过载支路开断之后有功潮流增幅较大的输电支路所组成的输电断面称为该故障或过载支路的关键输电断面。本文考虑在初始输电断面的基础上, 使用支路开断分布因子, 识别出最终的输电断面, 从而将网络中的脆弱线路也包含在输电断面中, 避免输电断面线路的漏选。

任何一条支路不管是断开还是闭合, 都会引起整个系统潮流分布的变化, 这就需要有一个指标来衡量系统各元件受该支路状态变化的影响程度。支路开断分布因子 LODF(Line Outage Distribution Factor)

反映了当电力网络中某条线路发生断开, 引起其他支路有功潮流的变化^[25-27]。

令基态情况下支路 l 的有功潮流为 P_l , 若支路 l 发生开断, 则会引起支路 k 上的潮流随之变化, 且将变化量记为 ΔP_k^l , 则两者之间的关系为

$$\Delta P_k^l = \mathbf{D}_{k-l} \times P_l \quad (5)$$

式中, \mathbf{D}_{k-l} 即为支路开断分布因子^[28]。

在直流法分析中, 根据有功平衡方程, 可以得到有功注入变化量与节点电压相角变化量的灵敏度方程为

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{B} \Delta \delta \quad (6)$$

式中, \mathbf{B} 是直流法下得到的导纳矩阵。

假设支路开断不会引起节点注入功率发生变化。开断前, 以达到稳定状态为基准, 则各节点有功变化量均为 0, 支路 $l(i,j)$ 线路潮流记为 P_l , 支路潮流流动正方向由 i 到 j 。当支路 $l(i,j)$ 发生断开, 断开后支路两端节点功率发生变化, 节点 i 改变量为 P_l , 节点 j 改变量为 $-P_l$, 则新网络节点的注入功率变化量为

$$\Delta \mathbf{P} = [0 \quad \cdots \quad P_l \quad \cdots \quad -P_l \quad \cdots \quad 0] \quad (7)$$

也可表示为

$$\Delta \mathbf{P} = [0 \quad \cdots \quad 1 \quad \cdots \quad -1 \quad \cdots \quad 0]^T P_l = \mathbf{M}_l P_l \quad (8)$$

式中, \mathbf{M}_l 是节点-支路关联列矢量, 行对应节点号, 列表示支路。假设线路潮流从首端节点流向末端节点为正方向, 则 \mathbf{M}_l 在支路首端节点处值取为 1, 表示此处仅有注入功率; 在支路末端节点处值取为 -1, 表示此处仅有注出功率; 其余值为 0, 表示注入和注出平衡抵消。

当网络中支路 $l(i,j)$ 断开, 新网络的导纳矩阵也会变化, 即 \mathbf{B}_{ii} 和 \mathbf{B}_{jj} 要减去支路 l 的导纳 x_l^{-1} ; \mathbf{B}_{ij} 和 \mathbf{B}_{ji} 变为 0, 也即加上支路 l 的导纳 x_l^{-1} 。利用 \mathbf{M}_l , 可以将导纳矩阵修正量表示为

$$\Delta \mathbf{B} = \mathbf{M}_l x_l^{-1} \mathbf{M}_l^T \quad (9)$$

对于线路 $k(m,n)$, 断开前线路潮流为

$$P_k = \frac{1}{x_k} (\delta_m - \delta_n) \quad (10)$$

当线路断开, 节点电压相角发生变化, 线路潮流变为

$$P_{k\text{-new}} = \frac{1}{x_k} (\delta_m + \Delta \delta_m - \delta_n - \Delta \delta_n) = \frac{1}{x_k} (\delta_m - \delta_n) - \frac{1}{x_k} (\Delta \delta_m - \Delta \delta_n) = P_k - \frac{1}{x_k} (\Delta \delta_m - \Delta \delta_n) = P_k - \frac{1}{x_k} \mathbf{M}_k^T \Delta \delta \quad (11)$$

可以得到支路开断分布因子表达式为

$$D_{k-l} = \frac{\mathbf{M}_k^T (\mathbf{B} - \mathbf{M}_l \mathbf{x}_l^{-1} \mathbf{M}_l^T)^{-1} \mathbf{M}_l}{x_k} \quad (12)$$

令 $\mathbf{B}^{-1} = \mathbf{X}$ ，则

$$\begin{aligned} D_{k-l} &= -\frac{\mathbf{M}_k^T (\mathbf{M}_l^T)^{-1} x_l \mathbf{M}_l^{-1} (\mathbf{X} - (\mathbf{M}_l^T)^{-1} x_l \mathbf{M}_l^{-1})^{-1} \mathbf{X} \mathbf{M}_l}{x_k} = \\ &= -\frac{\mathbf{M}_k^T (\mathbf{M}_l^T)^{-1} x_l \mathbf{M}_l^{-1} (\mathbf{X} - (\mathbf{M}_l^T)^{-1} x_l \mathbf{M}_l^{-1})^{-1} (\mathbf{M}_l^T)^{-1} \mathbf{M}_l^T \mathbf{X} \mathbf{M}_l}{x_k} = \\ &= -\frac{\mathbf{M}_k^T (\mathbf{M}_l^T)^{-1} x_l (\mathbf{M}_l^T \mathbf{X} \mathbf{M}_l - x_l)^{-1} \mathbf{M}_l^T \mathbf{X} \mathbf{M}_l}{x_k} = \\ &= \frac{\mathbf{M}_k^T (\mathbf{M}_l^T)^{-1} ((\mathbf{M}_l^T \mathbf{X} \mathbf{M}_l)^{-1} - x_l^{-1})^{-1}}{x_k} = \frac{\mathbf{X}_{k-l} / x_k}{1 - \mathbf{X}_{l-l} / x_l} \end{aligned} \quad (13)$$

式中： $\mathbf{X}_{k-l} = \mathbf{M}_k^T \mathbf{X} \mathbf{M}_l$ 表示端口 k 和端口 l 两个节点之间的互阻抗； $\mathbf{X}_{l-l} = \mathbf{M}_l^T \mathbf{X} \mathbf{M}_l$ 表示端口 l 的自阻抗^[29]。

2 输电断面的有功安全校正控制

原-对偶内点法是一种有效求解非线性规划问题的算法^[30]。将自变量所满足的等式及不等式约束均添加到目标函数中，并且设置惩罚因子，对自变量可行域的边界进行了限制^[31]，当自变量的迭代点接近可行域边界时，目标函数的数值将迅速增大。一般的非线性规划模型为

$$\begin{cases} \min f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0 \\ \mathbf{g} \leq \mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq \bar{\mathbf{g}} \end{cases} \quad (14)$$

原-对偶内点法在此基础上，引入了松弛变量 \mathbf{l} 和 \mathbf{u} ， \mathbf{l} 和 \mathbf{u} 中的元素均大于零。从而将不等式约束转化为等式约束^[32-33]，改造形式如下：

$$\begin{cases} \mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} = \bar{\mathbf{g}} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} = \mathbf{g} \end{cases} \quad (15)$$

研究问题转换为如下的非线性优化问题：

$$\begin{aligned} \mathbf{L} &= f(\mathbf{x}) - \mathbf{y}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{z}^T [\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{l} - \mathbf{g}] - \\ &= \mathbf{x}^T [\mathbf{g}(\mathbf{x}) + \mathbf{u} - \bar{\mathbf{g}}] - \mu \sum_{j=1}^r \log(l_j) - \mu \sum_{j=1}^r \log(u_j) \end{aligned} \quad (16)$$

式中： \mathbf{y}, \mathbf{z} 和 \mathbf{w} 为拉格朗日乘子， $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_m]$ ， m 为等式约束个数， $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_r]$ ， $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_r]$ ， r 为不等式约束个数； μ 为惩罚因子。

在此基础上，通过对 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta w, \Delta l, \Delta u$ 进行求解，并修正对应的自变量，直至迭代次数达到上限或对偶间隙 Gap ： $Gap = \mathbf{l}^T \mathbf{z} - \mathbf{u}^T \mathbf{w}$ ，满足一定的精度，则算法运行结果达到收敛。

针对电力网络中的输电断面内部有功潮流过载的问题，采用上述原-对偶内点法进行有功安全校正，对应的原-对偶内点法数学模型如下。

自变量

$$\mathbf{x} = [P_{G1} \cdots P_{Gk} \quad Q_{R1} \cdots Q_{Rk} \quad \theta_1 \quad V_1 \cdots \theta_n \quad V_n] \quad (17)$$

目标函数 $f(\mathbf{x})$ 定义为

$$f(\mathbf{x}) = \min \sum_{k=1}^h (P_k - \bar{P}) \quad (18)$$

式中， h 为所有输电断面内部总有功潮流过载线路数目。目标函数设为过载线路基态有功潮流与有功潮流最大值的差值之和，对过载线路的有功潮流极限进行了约束。

等式约束为

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{is} - U_i \sum_{j=1}^n U_j \begin{bmatrix} G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + \\ B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \end{bmatrix} = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{is} - U_i \sum_{j=1}^n U_j \begin{bmatrix} G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - \\ B_{ij} \cos(\delta_i - v_j) \end{bmatrix} = 0 \\ i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (19)$$

式中： P_{is} 为各节点的有功注入功率； Q_{is} 为各节点的无功注入功率。

不等式约束为

$$\begin{cases} \underline{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi} \\ \underline{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri} \\ \underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \\ \underline{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij} \end{cases} \quad (20)$$

其中

$$P_{ij} = -V_i^2 G_{ij} + V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (21)$$

使用原-对偶内点法对输电断面有功安全进行校正，采用的方法实际上是利用该优化算法实现电力网络的潮流重构，调整发电机组的有功和无功出力以及各节点电压幅值和相角，使输电断面内部有功过载线路的有功潮流低于上限，从而实现消除过载。

使用原-对偶内点法进行潮流重构，实现有功安全校正时，由于实际的电力系统规模庞大，节点数目众多，存在无法获得可行解的问题。这种情况下，可以调整电力网络的不等式约束，改变支路有功，节点电压幅值上下限值，即调整 \mathbf{l} 和 \mathbf{u} 的值，松弛约束。

3 输电断面划分

选取 IEEE14 节点网络进行算例分析。使用 AP

聚类算法, 得到 4 个聚类中心, 分别是 2,4,10 和 12 节点。每个聚类中心与归属该中心的节点组成相应的子区域, 整个网络即被划分为 4 个子区域。

在分区的基础上, 依据文献[34]对初始断面的定义, 初始断面是电网中的最小割集。选取 IEEE14 节点网络的初始输电断面如表 1 所示。

表 1 IEEE14 节点网络的初始输电断面

Table 1 Initial transmission sections of IEEE 14-node network

输电断面序号	线路构成
1	15-6, 14-5, 12-3, 12-4
2	14-5, 12-3, 12-4, 16-11, 113-14
3	16-11, 113-14, 17-8, 17-9, 14-9

计算 IEEE14 节点网络各线路的支路开断分布因子。先分别计算各支路断开后网络中其余支路有功潮流的分布因子。然后将各支路的所有开断分布因子绝对值相加, 结果如附录中的表 1 所示。使用该分布因子计算结果修正分区和输电断面的线路构成。值越大, 表明该线路更易过载, 脆弱程度越高, 尽量包含入输电断面中。值越小, 表明安全裕度相对更大, 从初始输电断面中剔除。

根据 IEEE14 节点网络的支路开断分布因子计算结果, 17-8 的分布因子数值较小, 说明该支路不易受网络中其他支路开断的影响, 应从初始输电断面中剔除。最终确定的输电断面如表 2 所示, 最终确定的分区结果如图 1 所示。

表 2 IEEE14 节点网络的最终输电断面

Table 2 Final transmission sections of IEEE14 node network

输电断面序号	线路构成
1	15-6, 14-5, 12-3, 12-4
2	14-5, 12-3, 12-4, 16-11, 113-14
3	16-11, 113-14, 17-9, 14-9

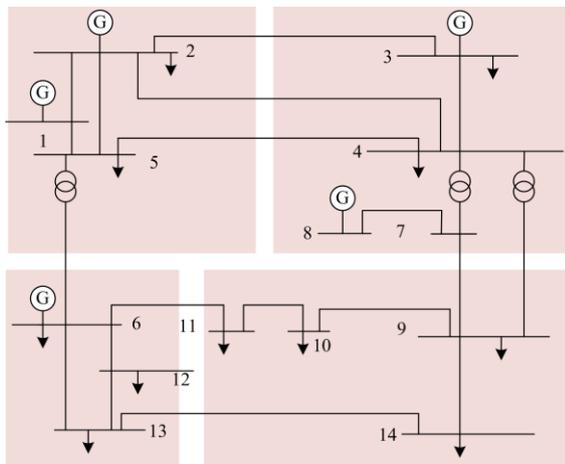


图 1 IEEE14 节点网络分区结果

Fig. 1 IEEE14-node network partition results

选取 IEEE39 节点进行算例分析。使用 AP 聚类算法, 可以得到 2,7,17,20,29 和 36 节点这 6 个聚类中心。同样, 每个聚类中心与归属该中心的节点自成为一个子区域, 整个网络被划分为 6 个子区域。

在分区基础上, 寻找电力网络中的割集作为初始输电断面并计算支路开断分布因子, 计算结果如附录中的表 2 所示。

由于区域联络线 122-35 的分布因子较小, 从初始输电断面中剔除, 修正为 121-22 和 122-23。最终确定的分区结果如图 2 所示, 最终确定的输电断面如表 3 所示。

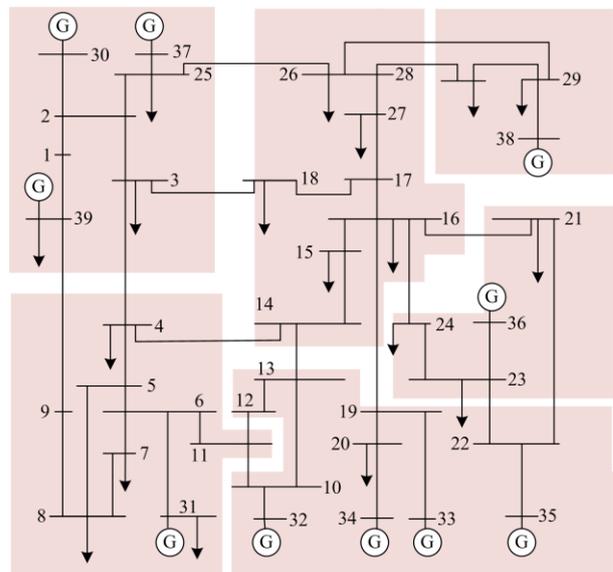


图 2 IEEE39 节点网络分区结果

Fig. 2 IEEE39-node network partition results

表 3 IEEE39 节点网络的最终输电断面

Table 3 Final transmission sections of IEEE39 node network

输电断面序号	线路构成
1	125-26, 13-18, 19-39, 13-4
2	19-39, 13-4, 14-14, 111-12, 111-10
3	111-12, 111-10, 113-14, 116-19, 121-22, 122-23
4	111-12, 111-10, 113-14, 116-19, 116-21, 116-24
5	126-28, 126-29

综上, 对于给定的各条线路, 求取出电力网络中, 其余线路断开后, 对该条线路有功潮流的支路开断分布因子, 然后将各分布因子取绝对值, 并得到累加之和, 即为该条支路最终的支路开断分布因子。数值越大, 表示该线路的有功潮流更易受到其他支路开断的影响, 将其包含入输电断面的线路构成中, 应对其有功潮流进行重点监测。数值越小, 线路有功潮流受到其余线路开断的影响越小, 则从

输电断面中剔除。

对于 IEEE14 节点网络, 17-8 的支路开断分布因子为 1, 相比其余支路开断分布因子更小, 将 17-8 从输电断面 3 中剔除, 划分到子区域内。

对于 IEEE39 节点网络, 122-35 的支路开断分布因子为 1, 121-22 和 122-23 的支路开断分布因子为 5, 相较 122-35 数值更大, 输电断面的线路组成中, 增加了 121-22 和 122-23, 剔除了 122-35。对于 IEEE14 和 IEEE39 网络发电机出口线路, 其开断分布因子数值为 1, 数值较小, 考虑将类似线路从输电断面中剔除。选取各子区域内部以及初始子区域联络线路且满足支路开断分布因子数值较大(一般大于 5, 结合具体电力网络各线路支路开断分布因子相对值确定), 作为输电断面新增线路, 较小者从初始输电断面线路构成中剔除。

4 有功安全校正算例分析

选取 IEEE39 节点网络作为研究对象, 输电断面的线路构成采用表 3 的识别结果。假设网络中的输电断面线路有功过载如表 4 所示。

采用原-对偶内点法进行有功安全校正。通过求解非线性规划数学模型, 对电力网络进行潮流重构, 发电机组在有功安全校正前后的出力情况如图 3 所示。原-对偶内点法对偶间隙变化曲线如图 4 所示。

表 4 算例 1 输电断面线路有功安全校正前后情况

Table 4 Example 1 active power flow of transmission section lines before and after active power safety correction control

输电断面	过载线路	基态有功潮流/MW	有功安全极限/MW	校正后有功潮流/MW
1	125-26	3.650 9	3.3	3.226 1
1	13-18	1.735 4	1.4	1.390 6
3	113-14	2.342 1	2.1	2.063 7

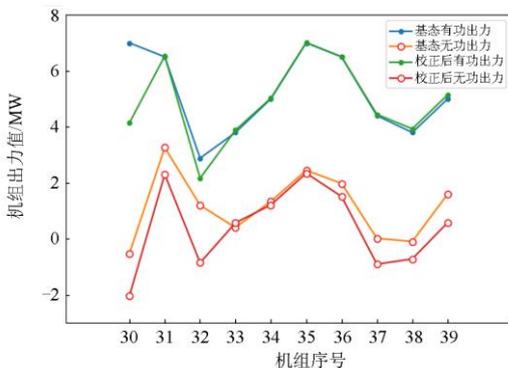


图 3 算例 1 发电机组有功安全校正前后的出力情况

Fig. 3 Example 1 output of generators before and after active power safety correction control

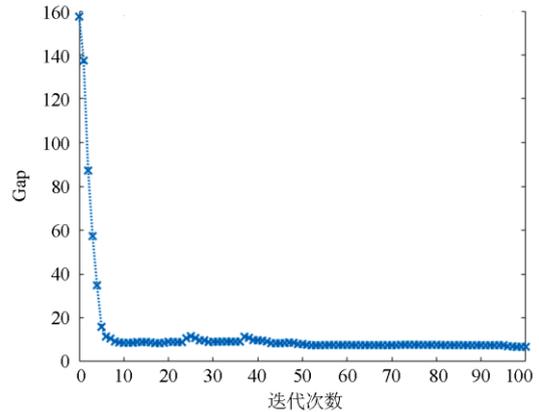


图 4 算例 1 原-对偶内点法对偶间隙变化曲线

Fig. 4 Example 1 dual gap of primal-dual interior point method

图 3 给出了输电断面内部线路出现有功过载的情况下各发电机组的基态出力, 即校正前的有功和无功出力, 同时也给出了校正后的发电机组有功和无功出力。调节发电机组的有功和无功出力后, 由表 4 可知, 原过载线路校正后的有功潮流处于有功安全极限的范围内, 消除了输电断面内部线路有功过载。

算例 2 设置了 IEEE39 节点网络输电断面内部线路有功过载的另外一种情况, 具体数值如表 5 所示。

表 5 算例 2 输电断面线路有功安全校正前后情况

Table 5 Example 2 active power flow of transmission section lines before and after active power safety correction control

输电断面	过载线路	基态有功潮流/MW	有功安全极限/MW	校正后有功潮流/MW
1	19-39	-3.276 3	3	-3
3	116-19	-1.950 1	1.7	-1.7
3	121-22	-6.808 4	6.5	-6.351 4
4	116-21	-4.052 3	3.6	-3.6

利用原-对偶内点法, 对电力网络进行潮流重构, 发电机组在有功安全校正前后的出力情况如图 5 所示, 各发电机的有功和无功出力在校正前后均发生了相应的变化。原-对偶内点法对偶间隙变化曲线如图 6 所示。通过调节发电机组的有功和无功出力, 由表 5 可知, 原过载线路校正后的有功潮流同样处于有功安全极限的范围内, 消除了输电断面内部线路有功过载。

算例 3 设置了 IEEE118 节点网络输电断面内部线路有功过载的另外一种情况, 具体数值如表 6 所示。

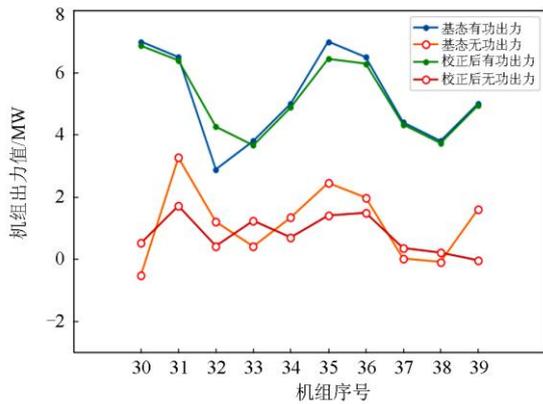


图5 算例2-发电机组有功安全校正前后的出力情况
Fig. 5 Example 2-output of generators before and after active power safety correction control

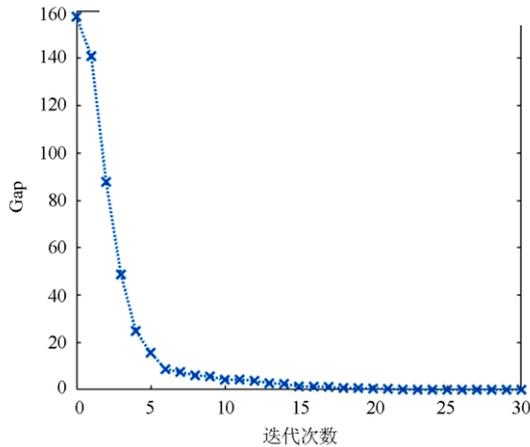


图6 算例2原-对偶内点法对偶间隙变化曲线

Fig. 6 Example 2 dual gap of primal-dual interior point method

表6 算例3 输电断面线路有功安全校正前后情况

Table 6 Example 3 dual gap of primal-dual interior point method

输电断面	过载线路	基态有功潮流/MW	有功安全极限/MW	校正后有功潮流/MW
1	l23-24	0.711 4	0.60	0.409 0
2	l38-65	1.080 0	0.9	0.613 5
3	l82-83	-0.159 1	0.13	-0.053 4

利用原-对偶内点法, 对电力网络进行潮流重构, 通过调节发电机组的有功和无功出力, 由表6可知, 原过载线路校正后的有功潮流处于有功安全极限的范围内, 消除了输电断面内部线路有功过载。

通过对比各算例输电断面线路校正后有功潮流与有功安全极限, 验证了使用原-对偶内点法进行潮流重构, 可以消除断面线路有功潮流越限。通过对比图4, 图6, 图7各算例对偶间隙变化曲线, IEEE

118节点网络迭代完成后得到的对偶间隙数值介于200~250之间, 存在收敛性不足的问题。且三种算例在运行时, IEEE 118节点网络的迭代计算轮次多, 运行时间长。对于节点数目众多的大网络系统, 需要进一步改进算法模型, 提升算法运行的性能和收敛性。

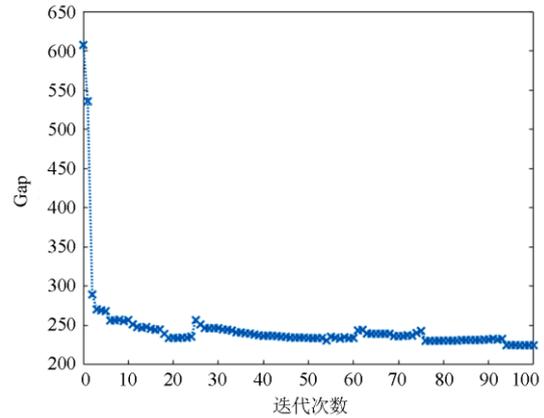


图7 算例3原-对偶内点法对偶间隙变化曲线

Fig. 7 Example 2-dual gap of primal-dual interior point method

5 结论

本文研究了输电断面识别以及有功安全校正方法, 得出如下结论:

1) 针对输电断面的线路识别, 首先考虑采用AP聚类算法进行电力网络的分区, 将各节点之间的负欧式距离作为聚类算法中相似度矩阵的元素组成, 算法运行得到的聚类中心与归属该中心的节点将作为一个子区域。根据输电断面的定义, 对子区域间的联络线取基本割集, 作为初始输电断面。结合支路开断分布因子对初始输电断面修正, 获得最终输电断面的线路构成。AP聚类算法不需要指定分区数目, 避免了GN算法可能需要根据模块度等指标来确定最优分区结果的不足。结合支路开断分布因子, 筛选出网络中容易受其他支路开断影响的支路, 进而对初始输电断面进行修正, 保证了将脆弱线路或者安全裕度较低的线路也加入输电断面线路构成, 更便于运行人员对重要的且易过载线路进行在线监测。

2) 针对输电断面有功安全校正, 预设断面内部线路有功过载情况, 利用原-对偶内点法对电力网络进行潮流重构, 在目标函数以及松弛变量中均对输电断面过载线路的有功潮流进行了限制, 体现出了消除断面越限的具体约束条件。同时直接利用原-对偶内点法进行迭代寻优, 确定发电机组的有功出

力校正方案，克服了现有控制方法需要额外根据其他参量选择校正措施，且容易出现调节受限的问题。最终实现消除断面线路有功过载，通过标准算例验证了算法的有效性。

3) 在实际运行中，AP 聚类算法的分区结果受相似度矩阵的参数选取，参数选取不当，容易导致分区结果散乱。采用原-对偶内点法进行输电断面线路有功过载安全校正时，收敛效果受松弛变量，即

电力网络中不等式约束上下限的影响。当出现无可行解的情况时，可以进一步松弛不等式约束。对于节点数目较大的网络，容易出现性能及收敛性不足的问题。针对上述问题，需要在后期的研究中寻找更适当的电气参量进行输电断面划分以及潮流重构的方法，并对原有方法进行改进，实现输电断面线路有功过载的消除，完成有功安全校正。

附录

表 1 IEEE14 节点网络支路开断分布因子计算结果

Table 1 Line outage distribution factor of IEEE 14-node network branches

线路	1—2	1—5	2—3	2—4	2—5	3—4	4—5	4—7	4—9	5—6
支路开断分布因子	3.824 2	3.824 2	3.891 3	3.454 8	3.37	3.891 3	4.417 4	5.154 6	4.207 1	7.009 4
线路	6—11	6—12	6—13	7—8	7—9	9—10	9—14	10—11	12—13	13—14
支路开断分布因子	6.644	3.584 8	4.007 9	1	5.154 6	6.644	6.712 3	6.644	3.584 8	6.712 3

表 2 IEEE39 节点网络支路开断分布因子计算结果

Table 2 Line outage distribution factor of IEEE 39-node network branches

线路	2—1	39—1	3—2	25—2	2-30	4—3	18—3	5—4	14—4	6—5
支路开断分布因子	10.998 1	10.998 1	8.056 1	8.553 5	1	8.282 5	7.883 4	7.583 2	7.344 7	5.295 7
线路	8—5	7—6	11—6	6—31	8—7	9—8	39—9	11—10	13—10	10—32
支路开断分布因子	4.558 1	4.728 5	8.349 1	1	4.728 5	10.998 1	10.998 1	6.914 4	6.914 4	1
线路	12—11	12—13	14—13	15—14	16—15	17—16	19—16	21—16	24—16	18—17
支路开断分布因子	4.727 3	4.727 3	8.349 1	9.352 4	9.352 4	9.352 4	50.683 5	5	5	7.883 4
线路	27—17	19—20	19—33	20—34	22—21	23—22	22—35	24—23	23—36	26—25
支路开断分布因子	8.553 5	9.987 6	1	1	5	5	1	5	1	8.553 5
线路	25—37	27—26	28—26	29—26	29—28	29—38	—	—	—	—
支路开断分布因子	1	8.553 5	3	3	3	1	—	—	—	—

表 3 IEEE118 节点网络支路开断分布因子计算结果

Table 3 Line outage distribution factor of IEEE 39-node network branches

线路	5—8	25—26	17—30	37—38	59—63	61—64	65—66	68—69	80—81	1—2
支路开断分布因子	9.474 2	9.581 5	7.982 6	8.979 1	6.375 8	5.635 2	7.164 7	7.550 8	8.181 2	5.739 9
线路	1—3	4—5	3—5	5—6	6—7	8—9	9—10	4—11	5—11	11—12
支路开断分布因子	5.739 9	4.990 4	6.140 8	6.278 7	6.278 7	1	1	4.990 4	4.580 5	5.840 4
线路	2—12	3—12	7—12	11—13	12—14	13—15	14—15	12—16	15—17	16—17
支路开断分布因子	5.739 9	4.748 1	6.278 7	7.628 8	7.850 7	7.628 8	7.850 7	7.583	6.094 9	7.583
线路	17—18	18—19	19—20	15—19	20—21	21—22	22—23	23—24	23—25	25—27
支路开断分布因子	5.798 7	5.798 7	11.345 5	5.764 8	11.345 5	11.345 5	11.345 5	15.116 9	8.275 6	7.641 3
线路	27—28	28—29	8—30	26—30	17—31	29—31	23—32	31—32	27—32	15—33
支路开断分布因子	6.902 2	6.902 2	9.474 2	9.581 5	6.067 9	6.902 2	8.398	5.286 6	5.007 7	8.131 7
线路	19—34	35—36	35—37	33—37	34—36	34—37	37—39	37—40	30—38	39—40
支路开断分布因子	8.753	4.241	4.241	8.131 7	4.241	5.184 6	5.634 3	5.311	9.376 7	5.634 3

续附表 3

线路	40—41	40—42	41—42	43—44	34—43	44—45	45—46	46—47	46—48	47—49
支路开断分布因子	5.834 4	5.508 4	5.834 4	12.013 2	12.013 2	12.013 2	6.111 8	5.345 1	5.186 9	5.855 9
线路	42—49	45—49	48—49	49—50	49—51	51—52	52—53	53—54	49—54	54—55
支路开断分布因子	11.027 6	6.22	5.186 9	7.539 4	7.394 6	6.978 7	6.978 7	6.978 7	6.839 7	3.276 6
线路	54—56	55—56	56—57	50—57	56—58	51—58	54—59	56—59	55—59	59—60
支路开断分布因子	3.929 6	3.568 6	7.539 4	7.539 4	6.981 7	6.981 7	5.298 4	5.767 2	5.534	5.230 8
线路	59—61	60—61	60—62	61—62	63—64	38—65	64—65	49—66	62—66	62—67
支路开断分布因子	4.647	3.885 8	3.828 1	4.052 3	6.375 8	11.846 9	8.129	8.091 4	5.367 2	6.072 2
线路	66—67	65—68	47—69	49—69	69—70	24—70	70—71	24—72	71—72	71—73
支路开断分布因子	6.072 2	10.019 8	8.409 6	7.326 4	6.792 2	9.610 5	10.719 7	10.719 7	10.719 7	1
线路	70—74	70—75	69—75	74—75	76—77	69—77	75—77	77—78	78—79	77—80
支路开断分布因子	5.270 4	5.0158	5.688 9	5.270 4	6.979 4	5.858 6	5.885 4	5.348 2	5.348 2	5.553
线路	79—80	68—81	77—82	82—83	83—84	83—85	84—85	85—86	86—87	85—88
支路开断分布因子	5.348 2	8.181 2	7.302 7	10.241 1	5.705 7	5.809 7	5.705 7	1	1	5.975 8
线路	85—89	88—89	89—90	90—91	89—92	91—92	92—93	92—94	93—94	94—95
支路开断分布因子	5.593 2	5.975 8	4.831 7	4.831 7	6.731 6	4.831 7	5.300 4	4.744 1	5.300 4	4.811 3
线路	80—96	82—96	94—96	80—97	80—98	80—99	92—100	94—100	95—96	96—97
支路开断分布因子	4.708 8	7.279 2	4.576 8	5.365 6	6.709 4	6.708 5	4.945 7	5.797 8	4.811 3	5.365 6
线路	98—100	99—100	100—101	92—102	101—102	100—103	100—104	103—104	103—105	100—106
支路开断分布因子	6.709 4	6.708 5	6.422 2	6.422 2	6.422 2	4.157 9	3.968 7	3.808 3	3.879 7	4.771 8
线路	104—105	105—106	105—107	105—108	106—107	108—109	103—110	109—110	110—111	110—112
支路开断分布因子	4.113 9	3.880 6	3.389 4	5.948 4	3.389 4	5.948 4	5.948 4	5.948 4	1	1
线路	17—113	32—113	32—114	27—115	114—115	68—116	12—117	75—118	76—118	110—112
支路开断分布因子	7.67	7.67	5.399 3	5.399 3	5.399 3	1	1	6.979 4	6.979 4	—

参考文献

- [1] 李雪亮, 田鑫, 郝露茜, 等. 基于概率潮流风险计算的电网优化规划方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 90-99.
LI Xueliang, TIAN Xin, HAO Luxi, et al. Research on probability power flow risk calculation based optimization method of power grid planning[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 90-99.
- [2] 刘建锋, 张科翌, 高亮, 等. 基于继电保护信息与改进谱聚类分析的电网故障区域识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 37-43.
LIU Jianfeng, ZHANG Kezhao, GAO Liang, et al. Power grid fault region identification algorithm based on relay protection information and improved spectral clustering analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 37-43.
- [3] 李更丰, 邱爱慈, 黄格超, 等. 电力系统应对极端事件的新挑战与未来研究展[J]. 智慧电力, 2019, 47(8): 1-11.
LI Gengfeng, QIU Aici, HUANG Gechao, et al. New challenges and future research prospects in power system against to extreme events[J]. Smart Power, 2019, 47(8): 1-11.
- [4] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 239-249. DOI: 10.1186/s40601-019-0136-2.
- [5] 郑一鸣, 刘石, 刘浩军, 等. 220 kV 电力电缆线路合闸操作过电压分析[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 153-158.
ZHENG Yiming, LIU Shi, LIU Haojun, et al. Closing switching overvoltage analysis of 220 kV power cable transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 153-158.
- [6] KHAN W A, BI Tianshu, JIA Ke. A review of single phase adaptive auto-reclosing schemes for EHV transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 205-214. DOI: 10.1186/

- s41601-019-0133-5.
- [7] 苗世洪, 马帅, 尚亚男, 等. 基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 39-45.
MIAO Shigong, MA Shuai, SHANG Yanan, et al. A fast recognition method of transmission section based on cut-vertex and path search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 39-45.
- [8] 程临燕, 张保会, 郝治国, 等. 基于线路功率组成的关键输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 50-56.
CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Fast search for key transmission section based on power component of line[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 50-56.
- [9] 宋扬, 哈恒旭, 胡希同. 防止输电断面连锁过载的安全保护分析[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2010, 24(5): 48-51.
SONG Yang, HA Hengxu, HU Xitong. Analysis on security protection of preventing the transmission section chain overload[J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 24(5): 48-51.
- [10] 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. Fast elimination of overload in transmission line section based on simplified primal-dual interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 51-55.
- [11] 谭宏亮, 王禹. 一种识别电网关键输电断面的新方法[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 71-75.
TAN Hongliang, WANG Yu. A new method for identifying key transmission sections of power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(20): 71-75.
- [12] 唐晓骏, 张正卫, 韩民晓, 等. 适应多直流馈入受端电网的柔性直流配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 57-64.
TANG Xiaojun, ZHANG Zhengwei, HAN Minxiao, et al. VSC-HVDC configuration method suitable for multi-DC feeding receiving power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 57-64.
- [13] 林济铿, 杨添劼, 胡世俊, 等. 基于模糊聚类 and 最短路径的关键输电断面确定新方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 134-141.
LIN Jikeng, YANG Tiankai, HU Shijun, et al. A new search method of key power flow transfer section based on random fuzziness clustering algorithm and shortest path algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 134-141.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 任建文, 魏俊姣. 基于 GN 分区的输电断面快速搜索[J]. 现代电力, 2015, 32(3): 42-48.
REN Jianwen, WEI Junjiao. Fast searching of transmission section based on GN partition[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(3): 42-48.
- [17] 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 Peiying, FANG Xinyan. Fast search of the key transmission sections based on clustering algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 97-101.
- [18] 杨欢欢, 鲍颜红, 张金龙, 等. 一种基于 UPFC 的安全稳定在线预防控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 22-29.
YANG Huanhuan, BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, et al. An on-line preventive control method for security and stability based on UPFC[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 22-29.
- [19] 王艳松, 卢志强, 李强, 等. 基于源-荷协同的电网静态安全校正最优控制算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 73-80.
WANG Yansong, LU Zhiqiang, LI Qiang, et al. Optimal control algorithm for static safety correction of power grid based on source-load coordination[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 73-80.
- [20] 张小白, 高宗和, 钱玉妹, 等. 用 AGC 实现稳定断面越限的预防和校正控制[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 85-89.
ZHANG Xiaobai, GAO Zonghe, QIAN Yumei, et al. Implementation of preventive and remedial control for tie line overload by use of automatic generation control[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 85-89.
- [21] 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.
- [22] 刘晓勇, 付辉. 一种快速 AP 聚类算法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2011, 41(4): 20-23.
LIU Xiaoyong, FU Hui. A fast affinity propagation clustering algorithm[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2011, 41(4): 20-23.
- [23] GAO Qinghe, WANG Yawei, CHENG Xiuzhen, et al. Identification of vulnerable lines in smart grid systems based on affinity propagation clustering[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5163-5171.
- [24] 徐卫东, 聂一雄, 周文文, 等. 固体绝缘开关柜局部放电模式识别优化算法[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 100-107.
XU Weidong, NIE Yixiong, ZHOU Wenwen, et al. Optimization algorithm for partial discharge pattern recognition of solid insulated switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 100-107.
- [25] 许丹, 罗治强, 李旻, 等. 考虑安全约束及电量执行的年度发电与检修联合优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 133-139.
XU Dan, LUO Zhiqiang, LI Min, et al. A combined optimization model for annual generation and maintenance scheduling considering safety constraints and power execution[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 133-139.
- [26] 陈益超, 林涛, 程军照, 等. 基于支路开断分布因子的线路状态脆弱性研究[J]. 分布式能源, 2018, 3(5): 11-15.
CHEN Yichao, LIN Tao, CHENG Junzhao, et al. Line state vulnerability based on line outage distribution factor[J]. Distributed Energy, 2018, 3(5): 11-15.
- [27] 韩学山, 李晓波. 考虑元件长期载荷容许条件的最大可用输电能力的实用计算方法[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 10-15.
HAN Xueshan, LI Xiaobo. Practical calculation method of maximal available transfer capability considering long-term load permissible condition of power transmission components[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 10-15.
- [28] 许丹, 罗治强, 李旻, 等. 考虑安全约束及电量执行的年度发电与检修联合优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 133-139.
XU Dan, LUO Zhiqiang, LI Min, et al. A combined optimization model for annual generation and maintenance scheduling considering safety constraints and power execution[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 133-139.
- [29] 李立德, 林韩, 蔡金锭, 等. 基于支路开断分布因子的严重故障筛选[J]. 电力与电工, 2013, 33(2): 15-18.
LI Lide, LIN Han, CAI Jinding, et al. Serious fault filtering based on line outage distribution factor[J]. Electric Power & Electrical Engineering, 2013, 33(2): 15-18.
- [30] 袁越, 久保川淳司, 佐佐木博司, 等. 基于内点法的含暂态稳定约束的最优潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 14-19.
YUAN Yue, KUBOKAWA J, SASAKI H, et al. Interior point method based optimal flow with transient stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 14-19.
- [31] 池哲浩, 张洪梁, 赵连杰. 电力系统最优潮流的计算方法[J]. 黑龙江电力, 2011, 33(5): 343-345.
CHI Zhehao, ZHANG Hongliang, ZHAO Lianjie. Optimal power flow calculation method for electric power system[J]. Heilongjiang Electric Power, 2011, 33(5): 343-345.
- [32] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 116-134.
- [33] WU Weiping, HU Zechun, SONG Yonghua. A new method for OPF combining interior point method and filled function method[C] // 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), July 17-21, 2016, Boston, MA, USA: 97-101.
- [34] 赵峰, 孙宏斌, 张伯明. 基于电气分区的输电断面及其自动发现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 42-46.
ZHAO Feng, SUN Hongbin, ZHANG Boming. Electrical zone division based automatic discovery of flowgates[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 42-46.

收稿日期: 2020-06-08; 修回日期: 2020-10-22

作者简介:

孙淑琴(1969—), 女, 博士, 教授, 主要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

颜文丽(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统仿真计算技术; E-mail: yanwl18@mails.jlu.edu.cn

吴晨悦(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统仿真计算技术。E-mail: cywu19@mails.jlu.edu.cn

(编辑 姜新丽)