

基于双层优化规划的线路过载控制策略

柯永超, 廖 凯, 李 波, 杨健维, 何正友

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:对于随机故障切除后潮流转移造成的过载线路,其后备保护动作可能引发连锁故障,造成大停电事故,必须闭锁后备保护并通过线路过载控制消除过载。为减少控制策略中产生的发电机组远距离功率调节的情况,提出一种基于双层优化规划的线路过载控制策略。首先,基于支路对节点电流灵敏度矩阵构建电气距离矩阵,采用层次聚类算法进行电网分区,体现不同电气距离的发电机组对过载线路功率调节效果的差异。其次,构建双层优化规划模型,上层优化目标考虑系统功率总调节量,下层优化目标考虑各相邻区域内发电机组对过载线路区域的功率减量差值。再次,根据上层目标方程求解系统功率总调节量最小的目标值,然后通过非支配排序遗传算法(NSGA-II)对下层优化模型进行求解,获取一组Pareto最优解集,通过满意度指标选择最优的源-荷功率调节控制方案,并实施控制方案消除线路过载。最后,基于IEEE 39标准节点系统验证所提控制策略的有效性和合理性。

关键词:线路过载控制策略;双层优化规划;电网分区;电气距离;NSGA-II

中图分类号:TM 71

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202107015

0 引言

近年来,世界范围内已发生多起造成重大损失的大停电事故,研究表明连锁故障是导致事故扩大的主要原因,如2018年巴西“3·21”大停电^[1]和2015年土耳其“3·31”大停电事故^[2]。连锁故障传播的一个重要原因是潮流转移引起的线路相继过载跳闸。当故障元件切除后,若能快速识别因潮流转移而导致的线路过载,闭锁线路的后备保护,并通过调节发电机组出力和切负荷的控制策略消除线路过载,避免潮流转移引起的线路相继过载跳闸,则能够有效阻断连锁故障的传播。因此,关于线路过载控制策略的研究对于预防大停电事故以及保障电网稳定运行具有重要意义。

目前受到广泛认可的线路过载控制策略包括基于灵敏度法和优化规划法这2种控制策略。基于灵敏度法^[3-5]的线路过载控制策略根据综合灵敏度大小对发电机组和负荷的调节优先级进行排序,逐轮求解控制方案并调节控制目标,直至消除线路过载,该方法无需迭代,计算过程简便,能实现系统功率总调节量最小的目标。基于优化规划法^[6-9]的线路过载控制策略根据优化目标和安全运行约束构建优化

模型,通过优化算法求解控制方案,可实现系统功率总调节量最小或补偿经济最优,并且能适应大规模的潮流控制和满足不同的要求。文献[4]将保护对象从过载线路拓展为输电断面整体,保证控制过程中输电断面不会产生新的过载;文献[5]引入虚拟控制单元概念,采用启发式搜索方式获取控制方案,能够分辨综合灵敏度相近的节点对过载线路的减载差异;文献[6]以经济补偿最小化为目标,利用非线性优化算法求解控制方案,实现补偿经济最优;文献[7]利用多目标粒子群优化算法求解控制方案,求解得到的控制方案可满足尽量少切负荷的要求。

上述控制策略均具有一定的合理性,但也存在一些不足。基于灵敏度法的线路过载控制策略在进行大范围的功率调节时,需要进行多轮调节,不利于过载的及时消除。基于优化规划法的线路过载控制策略以优化目标为导向,由于无法分辨综合功率调节系数相近的节点对过载线路功率调节效果的差异,会导致参与调节的发电机组数量增多,控制策略的合理性有待提高。同时,上述策略采用的功率调节系数,如功率灵敏度和源-荷路径分流比,无法体现发电机组和过载线路的电气距离关系,会产生远距离功率调节的情况,造成线路的网络损耗增大,不具备较好的经济性。

基于上述分析,本文以支路对节点的电流灵敏度作为电气距离,采用凝聚的层次聚类算法划分电网区域,体现不同电气距离的发电机组对过载线路功率调节效果的差异。然后,以系统功率总调节量最小为目标构建上层优化规划模型,基于电网分区结果,以优先调节电气距离较近的发电机组为目标构建下层优化规划模型。采用递进式的双层优化规

收稿日期:2020-08-24;修回日期:2021-05-21

基金项目:四川省科技计划项目(2019YFH0089,2019YJ0247);国家自然科学基金资助项目(U1766208);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51807168)

Project supported by Sichuan Science and Technology Program (2019YFH0089, 2019YJ0247), the National Natural Science Foundation of China(U1766208) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (51807168)

划法求解线路过载控制方案,在满足系统功率总调节量最小的前提下,优先调节与过载线路电气距离较近的发电机组,减少参与功率调节的发电机组数量和远距离功率调节的情况,从而获得更合理、更经济的控制方案。基于 IEEE 39 标准节点系统进行了 $N-1$ 和 $N-2$ 故障下的仿真测试,测试结果验证了本文所提线路过载控制策略的有效性与合理性。

1 电网分区方法

在线路过载控制策略中考虑电网分区,可以体现不同电气距离的发电机组对过载线路功率调节效果的差异,从而减少发电机组远距离功率调节的情况。本文借鉴电网无功-电压控制分区^[10-12]的方法进行电网分区,利用支路对节点的电流灵敏度描述支路间的差异,通过该电流灵敏度形成的电气距离矩阵映射支路在 N 维空间的位置,并定义不同支路对象在 N 维空间上的电气距离计算规则,最后通过凝聚的层次聚类算法划分电网线路区域。

1.1 支路对节点的电流灵敏度

线路过载控制策略通过调节源-荷节点的功率改变线路的传输功率,可以利用节点和支路的电气联系描述支路间的差异。在随机故障切除引起的线路过载过程中,电网的网络结构发生不可预测的改变,并且还会伴随功率振荡过程,因此,服务于线路过载控制的电网分区方法应具有实时性和动态性,并尽可能地不利用潮流信息。基于此,本文采用支路对节点的电流灵敏度描述支路间的差异,如式(1)所示。

$$k_{ij} = \frac{I_i}{I_j} \quad (1)$$

式中: k_{ij} 为支路 i 对节点 j 的电流灵敏度; I_i 为支路 i 的电流; I_j 为节点 j 的注入电流。

支路电流和节点注入电流之间的关系可以根据节点电压方程和支路电流方程进行推导^[13],其表达式如式(2)所示。

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{Y}_B \mathbf{A}^T \mathbf{Y}_N^{-1} \mathbf{I}_N \quad (2)$$

式中: $\mathbf{I}_B$ 为支路电流列向量; $\mathbf{Y}_B$ 为支路导纳矩阵; $\mathbf{A}$ 为节点关联矩阵; $\mathbf{Y}_N$ 为节点导纳矩阵; $\mathbf{I}_N$ 为节点的注入电流向量。

$\mathbf{I}_B$ 中包含对地支路和节点支路的电流,对式(2)进行分类整理后可得式(3)。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{B1} \\ \mathbf{I}_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{B1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{Y}_{B2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\mathbf{A}')^T \\ \mathbf{E} \end{bmatrix} \mathbf{Y}_N^{-1} \mathbf{I}_N \quad (3)$$

式中: $\mathbf{I}_{B1}$ 为节点支路的电流; $\mathbf{I}_{B2}$ 为对地支路的电流; $\mathbf{Y}_{B1}$ 为节点支路导纳矩阵; $\mathbf{Y}_{B2}$ 为对地支路导纳矩阵; $\mathbf{A}'$ 为忽略对地支路后的节点关联矩阵; $\mathbf{E}$ 为单位矩阵。

随机故障切除后,电网的对地支路电流较小,因

此电流灵敏度中忽略对地支路电流,通过节点支路电流与节点注入电流的关系描述电网线路间的差异,根据式(3)提取节点支路电流与节点的注入电流关系的表达式为:

$$\mathbf{I}_{B1} = \mathbf{Y}_{B1} (\mathbf{A}')^T \mathbf{Y}_N^{-1} \mathbf{I}_N \quad (4)$$

输电线路的电抗值一般远大于电阻值,对 $\mathbf{Y}_{B1}$ 和 $\mathbf{Y}_N$ 进行简化,仅考虑电抗值,则任一节点支路的电流可由所有节点注入电流线性表示,整理后形成的支路对节点的电流灵敏度矩阵 $\mathbf{K}$ 如式(5)所示。

$$\mathbf{K} = \mathbf{Y}_{B1} (\mathbf{A}')^T \mathbf{Y}_N^{-1} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{b1} & k_{b2} & \cdots & k_{bn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: b 为节点支路数; n 为节点数。

1.2 电气距离矩阵和距离计算规则

线路过载控制策略应尽可能地不切负荷,而通过调节发电机组功率消除线路过载,因此,电网分区主要是区分源节点功率调节的差异,忽略负荷节点与支路的关系。根据源节点的数目构造一个 N 维空间,利用支路对源节点的电流灵敏度形成电气距离矩阵。本文通过提取支路对节点的电流灵敏度矩阵 $\mathbf{K}$ 中所有包含有源节点的列向量,组成支路对有源节点的电流灵敏度矩阵 $\mathbf{K}'$ 。同时,忽略电流方向,对 $\mathbf{K}'$ 中所有元素取绝对值,形成电气距离矩阵 $\mathbf{D}$ 如式(6)所示。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{b1} & d_{b2} & \cdots & d_{bm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: m 为有源节点数; d_{ij} 为支路 i 的电流与有源节点 j 注入电流的比值的绝对值。

通过 $\mathbf{D}$ 映射各条支路在 N 维空间的位置。利用欧氏距离计算不同支路在 N 维空间上电气距离^[12],度量支路对象在 N 维空间中的相异性,计算规则见式(7)。

$$r_{dis}(\mathbf{d}_i, \mathbf{d}_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (d_{ik} - d_{jk})^2} \quad i \neq j \quad (7)$$

式中: $\mathbf{d}_i$ 和 $\mathbf{d}_j$ 分别为 $\mathbf{D}$ 中支路 i 、 j 对应的行向量。

1.3 基于层次聚类算法的电网分区方法流程及验证

层次聚类算法具有挖掘观测数据潜在关系的优势,可以根据对象间数据的相异性将对象集合划分成多个类或簇^[14-15]。基于式(6)、(7),通过凝聚的层次聚类算法实现电网分区。

层次聚类算法的凝聚过程采用离差平方和递增的方式,针对具有 m 个对象的系统,设定每个对象为一个单独的簇,合并其中任意 2 个簇,利用式(7)计算合并后的 $m-1$ 个簇内的离差平方和,即每个簇内

所有对象与对象均值的电气距离平方和,并求 $m-1$ 个簇的总离差平方和;遍历所有的两簇组合,对组合后总离差平方和增量最小的组合进行合并。该方法的原理如式(8)所示,离差平方和实质为样本方差,通过样本方差衡量支路的离散程度,方差值越小,合并后区域内部支路的离散程度越小,分区结果能考虑到整体性偏离程度最小,更为合理。

$$f_{\text{ess}} = \sum_{i=1}^{m-1} n_i E^2(x - E(x)) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{k=1}^{n_i} r_{\text{dis}}^2(d_k, \bar{d}_k) \quad (8)$$

式中: f_{ess} 为合并后的总离差平方和; $E(x)$ 为第 i 簇的期望; n_i 为第 i 簇内的支路数; k 为第 i 簇内第 k 条支路; $\bar{d}_k$ 为第 i 簇均值点的向量。

与源节点相连支路的电流仅和该源节点的注入电流相关,与其他源节点的注入电流的关联性较低,这类支路与其他支路的差异性较大,导致这类支路在电网分区结果中不满足连通性原则,所以必须对分区结果进行优化。针对电网分区结果中出现的同一分区内某条支路与其他支路无连接的情况,需确定该支路两侧相连支路所属的区域,计算该支路对区域内各源节点的电流灵敏度值,将该支路划分至电流灵敏度值最大的源节点所属的区域,使分区结果满足连通性原则。基于层次聚类算法的电网分区流程如图1所示。

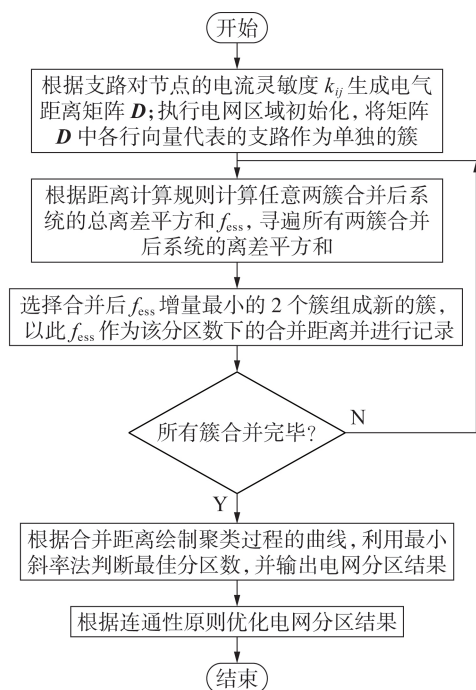


图1 基于层次聚类算法的电网分区方法流程图

Fig.1 Flowchart of power grid partition method based on clustering algorithm

本文以一个8节点10支路系统为例验证所提电网分区方法的合理性,该拓扑图如图2所示。图中,①—⑧为节点,节点①和节点⑧为源节点,其他节

点为负荷节点; L_1 — L_{10} 为支路; 括号中的数字为线路电阻标么值。运用本文所提电网分区方法得到该系统的层次聚类过程曲线如图3所示,4分区到3分区的凝聚过程如图中的虚线线段所示,该线段的斜率和合并距离的跨度均较大,系统凝聚变得困难,则4分区为最终的分区结果,具体如表1所示。由表可见, L_1 和 L_{10} 与源节点相连,导致产生独立分区。

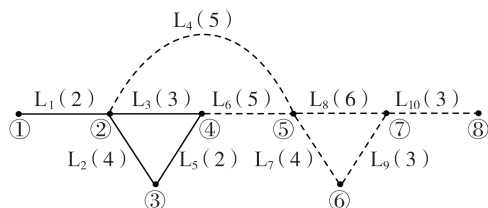


图2 8节点10支路系统的拓扑图

Fig.2 Topology diagram of 8-bus 10-branch system

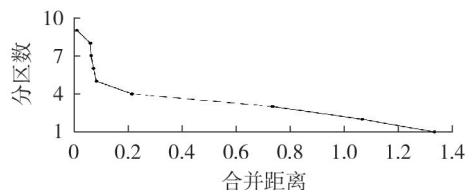


图3 图2所示系统的层次聚类过程曲线

Fig.3 Hierarchical clustering process curve of system in Fig.2

表1 优化前图2所示系统的分区结果

Table 1 Division results of system in Fig.2 before optimization

区域	区域内的线路
1	L_2, L_3, L_5
2	L_4, L_6-L_9
3	L_1
4	L_{10}

基于连通性原则对表1中的分区结果进行优化,可得最优分区结果为2分区,分别如图2中的实线和虚线所示。图2的分区结果反映了区域内部线路联系紧密、外部联系松散的特征,对于实线区域的线路,源节点①的功率调节效果显然优于源节点⑧,这说明该分区结果可以体现不同电气距离的发电机组对线路的功率调节效果的差异,验证了基于电流灵敏度的电网分区方法的合理性。由于求解支路对节点的电流灵敏度时无需潮流信息,仅需要获取设备参数和开关开断状态,不受电网规模和结构限制,可实现实时和动态分区。

2 双层优化规划模型

本文采用功率灵敏度作为调节系数,根据线路过载情况制定相应的源-荷功率调节控制方案来消除过载。该控制方案以系统功率总调节量最小作为

首要目标,以优先调节与过载线路的电气距离较近的发电机组作为次要目标。基于上述目标和电网稳定运行约束构建递进式的双层优化规划模型,通过求解该模型获取线路过载控制方案。

2.1 功率灵敏度

功率灵敏度反映了调节节点注入功率时,线路传输功率变化的剧烈程度,根据故障切除后系统稳态的潮流信息进行求解。本文采用了文献[3]中的功率灵敏度生成方法,如式(9)所示。

$$\lambda_{i,j} = \frac{k_{ij} U_{B,i} (\cos \varphi_{B,i} \cos \varphi_{N,j} + \sin \varphi_{B,i} \sin \varphi_{N,j})}{U_{N,j}} \quad (9)$$

式中: $\lambda_{i,j}$ 为支路*i*对节点*j*的功率灵敏度; $U_{B,i}$ 和 $\varphi_{B,i}$ 为支路*i*的首端(有功功率的注入端)的电压模值和相位; $U_{N,j}$ 和 $\varphi_{N,j}$ 分别为节点*j*的电压模值和相位。

任意支路传输功率的变化量可由节点的功率调节量线性近似表示,如式(10)所示。

$$\Delta P_{B,i} = \lambda_{i,1} \Delta P_{N,1} + \lambda_{i,2} \Delta P_{N,2} + \cdots + \lambda_{i,n} \Delta P_{N,n} \quad (10)$$

式中: $\Delta P_{B,i}$ 为支路*i*传输功率的变化量; $\Delta P_{N,j}$ 为节点*j*注入功率的调节量。

2.2 双层优化规划目标

2.2.1 上层优化目标

系统功率总调节量最小的上层优化目标方程为:

$$\min F = \sum_{i \in A} |\Delta P_{Gi}| + I \sum_{j \in B} |\Delta P_{Lj}| \quad (11)$$

式中: A 为可调发电机组的集合; B 为负荷切除目标的集合; ΔP_{Gi} 为发电机组节点*i*的功率调节量; ΔP_{Lj} 为负荷节点*j*的功率切除量; I 为负荷切除参与过载控制的惩罚系数,是一个极大的数,本文参考文献[6]将其设定为 10^3 。

2.2.2 下层优化目标

首先,根据电网分区结果确定过载线路所属区域 A_1 ,然后根据其他区域与 A_1 的邻近情况按由近至远的顺序将其他区域逐次排列为 $A_2 \cdots A_k$,距离相同的区域则以区域内发电机组对过载线路的功率灵敏度和较大者为近,最后,考虑线路功率减载为正方向,以各相邻序列区域内发电机组对过载线路区域的功率减量差值最大为目标建立下层优化方程,如式(12)所示。

$$\begin{cases} \max f_1 = -\sum_{i \in C} \left(\sum_{i \in A_1} \lambda_{i,i} \Delta P_{Gi} - \sum_{j \in A_2} \lambda_{i,j} \Delta P_{Gj} \right) \\ \max f_2 = -\sum_{i \in C} \left(\sum_{i \in A_2} \lambda_{i,i} \Delta P_{Gi} - \sum_{j \in A_3} \lambda_{i,j} \Delta P_{Gj} \right) \\ \vdots \\ \max f_{k-1} = -\sum_{i \in C} \left(\sum_{i \in A_{k-1}} \lambda_{i,i} \Delta P_{Gi} - \sum_{j \in A_k} \lambda_{i,j} \Delta P_{Gj} \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: i 和*j*分别为各自区域内发电机组节点; C 为过载线路*l*的集合。

式(12)所示的下层优化方程为多目标方程,各单目标在相邻序列区域中考虑最大限度地调节电气距离较近区域的发电机组,目标之间相互制约,并且重要性随着距离增大而逐次递减。

2.3 电网稳定运行约束

为避免运行控制方案后发生过载线路调节不足、正常线路过载和电能质量差等情况,双层优化规划必须考虑系统稳定运行的约束条件。

1) 线路最大传输功率约束。

过载线路功率的变化量不应小于线路传输功率恢复至最大传输功率的变化量,若线路*l*过载,则其约束方程为:

$$\Delta P_{B,l} = \sum_{i \in A} \lambda_{l,i} \Delta P_{Gi} + \sum_{j \in B} \lambda_{l,j} \Delta P_{Lj} \geq P_l - \eta P_{l,\max} \quad (13)$$

式中: P_l 为过载线路*l*当前的传输功率; $P_{l,\max}$ 为过载线路*l*的最大传输功率; η 为调节裕度,本文取为0.95。

正常线路功率的变化量不应大于线路当前传输功率至最大传输功率的变化量。若线路*l*为正常线路,则其约束方程为:

$$\Delta P_{B,l} = \sum_{i \in A} \lambda_{l,i} \Delta P_{Gi} + \sum_{j \in B} \lambda_{l,j} \Delta P_{Lj} \leq \eta P_{l,\max} - P_l \quad (14)$$

2) 节点注入功率约束。

发电机组出力的约束方程为:

$$P_{Gi,\min} - P_{Gi,\text{now}} \leq \Delta P_{Gi} \leq P_{Gi,\max} - P_{Gi,\text{now}} \quad (15)$$

式中: $P_{Gi,\text{now}}$ 为发电机组节点*i*当前注入母线的有功功率; $P_{Gi,\max}$ 为该发电机组的最大允许出力值; $P_{Gi,\min}$ 为该发电机组的最小出力限值。

负荷的功率切除量的约束方程为:

$$-P_{Lj,\text{now}} \leq \Delta P_{Lj} \leq 0 \quad (16)$$

式中: $P_{Lj,\text{now}}$ 为功率调节前负荷节点*j*的有功功率。

3) 系统功率平衡约束。

$$\sum_{i \in A} \Delta P_{Gi} - \sum_{j \in B} \Delta P_{Lj} = 0 \quad (17)$$

4) 节点电压偏移约束。

系统电压应满足系统电压偏移允许值,即:

$$U_{i,\min} \leq U_{i,\text{pre}} + \Delta U_i \leq U_{i,\max} \quad (18)$$

式中: $U_{i,\text{pre}}$ 为线路过载控制策略运行前节点*i*的电压; ΔU_i 为控制策略运行后节点*i*的电压变化量; $U_{i,\max}$ 和 $U_{i,\min}$ 分别为节点*i*的电压的最大和最小允许值。 ΔU_i 与系统中各节点的有功功率变化量的关系为:

$$\Delta U_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial U_i}{\partial P_j} \Delta P_j \quad (19)$$

式中: ΔP_j 为节点*j*的功率变化量; U_i 为节点*i*的电压; P_j 为节点*j*注入的有功功率。

根据节点注入功率方程推导可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial U_i}{\partial P_i} = \frac{1}{2U_i G_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})} \\ \frac{\partial U_i}{\partial P_j} = \frac{1}{U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij})} \end{cases} \quad (20)$$

式中: G_{ii} 为节点 i 的自电导; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为节点 i 与节点 j 间的互电导和互电纳; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 电压的相位差。

5) 系统频率偏移约束。

系统频率需满足规定的频率偏差, 即:

$$f_{\min} \leq f_{\text{pre}} + \Delta f \leq f_{\max} \quad (21)$$

$$\Delta f = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta P_{Li} - \Delta P_{Gi})}{\sum_{i=1}^n (K_{Li} + K_{Gi})} \quad (22)$$

式中: f_{pre} 为线路过载控制策略运行前的系统频率; Δf 为线路过载控制策略运行后系统频率的变化量; $f_{\max}$ 和 $f_{\min}$ 分别为系统频率的最大和最小允许值; K_{Li} 为节点 i 的有功负荷频率调节效应系数; K_{Gi} 为节点 i 的发电机组的单位调节功率, 其与发电机组的调差系数有关, 若某发电机组满载运行, 则其不再参与调频, 即 $K_{Gi} = 0$ 。

系统频率允许偏差范围较小 (通常为 $[-a, a]$, $a \in [0.2, 0.5]$ Hz), 此时负荷有功功率和频率静态特性接近线性关系, 取额定频率处的斜率作为有功负荷的频率调节效应系数 K_{Li} , 则有:

$$K_{Li} = \frac{dP_{Li}}{df} = \frac{P_{LiN}}{f_N} (a_1 + 2a_2 + 3a_3) \quad (23)$$

式中: f_N 为系统运行的额定频率; P_{LiN} 为系统运行在额定频率时节点 i 的有功负荷; $a_1 - a_3$ 分别为频率次方 1—3 下有功负荷与 P_{LiN} 的百分比。

2.4 模型求解

递进式的双层优化规划模型中, 上层优先决策, 下层服从上层, 并在上层决策的允许范围内完成自身优化, 制定更合理的线路过载控制策略。上层优化模型考虑上层优化目标和电网稳定运行约束, 采用线性优化方法求解, 获得系统功率总调节量最小的目标值 f_0 和控制方案, 并计算控制方案中发电机组功率总调节量 f_{G0} 。下层优化模型考虑下层优化目标和电网稳定运行约束, 同时增加一个发电机组功率总调节量 f_G 的不等式约束为:

$$f_{G0} - \sigma < f_G < f_{G0} + \sigma \quad (24)$$

式中: f_{G0} 为系统功率总调节量最小时发电机组功率调节量的目标值, σ 为该目标值的邻域半径。该目标值对应的控制方案一般是唯一的, 若考虑在该目标值的 σ 邻域内即可, 则控制方案理论上无数种。采用非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 求解该目标值

σ 邻域内满足下层优化规划方程的 1 组 Pareto 最优解集, 关于 NSGA-II 的详细流程和 Pareto 最优解集的描述详见文献 [16]。

Pareto 最优解集的每个个体都位于最优前沿, 此时需要考虑下层优化规划中各单目标的决策占优性, 根据各单目标的重要性构建满意度指标 λ_{OED} , 通过该指标选择最优的控制方案。

$$\max \lambda_{\text{OED}}(x_i) = m_1 f_1^i + m_2 f_2^i + \cdots + m_{k-1} f_{k-1}^i \quad (25)$$

式中: $f_1^i, f_2^i, \cdots, f_{k-1}^i$ 为 Pareto 最优解集中某个解 x_i 在下层优化规划中的各单目标值; $m_1, m_2, \cdots, m_{k-1}$ 为优先因子, 根据单目标的重要性设定 $m_1 \gg m_2 \gg \cdots \gg m_{k-1}$ 。计算 Pareto 最优解集中所有解的满意度值, 选择满意度指标最大的解作为最优的控制方案。

3 线路过载控制策略

线路过载控制策略的流程图如附录 A 图 A1 所示, 具体步骤如下:

1) 随机故障切除后, 快速识别潮流转移而导致的线路过载并闭锁后备保护, 然后运行本文所提的线路过载控制策略;

2) 进行电网分区;

3) 计算功率灵敏度;

4) 构建并求解以系统功率总调节量最小为目标的上层规划模型;

5) 计算上层优化目标最优下的 f_{G0} , 采用 NSGA-II 求解 f_{G0} 的 σ 邻域内的 1 组 Pareto 最优解集, 通过满意度指标 λ_{OED} 判断并选择最优控制方案;

6) 按照所求最优控制方案调节发电机组出力 and 切除负荷容量;

7) 校验系统潮流状态, 判断线路过载是否消除, 若有则根据功率调节后的潮流信息重新形成功率灵敏度矩阵, 再次求解控制方案并进行功率调节, 直至消除线路过载。

4 算例分析

基于 IEEE 39 标准节点系统对本文所提线路过载控制策略 (方法 1) 的有效性和合理性进行验证, 并将方法 1 与仅考虑系统总功率调节量最小的单目标优化法 (方法 2) 和灵敏度法 [3] (方法 3) 进行对比。系统中发电机组的最大输出功率和线路的最大传输功率采用文献 [17] 提供的参数进行设定。

4.1 N-1 故障下消除线路过载

线路 6-11 发生故障后被切除, 运行电网分区程序, 系统的最优分区为 5 分区, 系统分区图见附录 A 图 A2。图中, 过载线路 4-14 在区域 2 中, 过载线路 10-13 和 13-14 在区域 3 中。线路过载控制策略运行前系统的线路过载率分布图见附录 A 图 A3。图中, 红色区域为过载线路 4-14、10-13 和 13-14 的过载情

况,对应的过载率分别为 1.09、1.03 和 1.06。采用方法 1 获取控制方案,上层优化模型获得的系统总调节量目标值为 115.28 MW,通过满意度指标选择的最优控制方案见表 2,发电机组 31 增发 57.64 MW,发电机组 32 减发 57.64 MW。

表 2 $N-1$ 故障下的 3 种方法的线路过载控制方案

Table 2 Line overload control scheme of three methods under $N-1$ fault

控制目标节点	控制目标功率调节量 / MW		
	方法 1	方法 2	方法 3
31	57.64	57.64	58.08
32	-57.64	-57.64	-58.08
功率总调节量 / MW	115.28	115.28	116.16

过载线路 4-14、10-13、13-14 的最大允许传输功率分别为 500、600、600 MW,运行方法 1 所得的控制方案后,过载线路 4-14、10-13、13-14 的传输功率分别为 495.31、558.39、576.76 MW,线路过载情况得以消除。

方法 1 得到的控制方案运行后,线路过载率分布图见附录 A 图 A4,对比图 A3 和图 A4 中的线路过载率分布情况可知,除参与功率调节的区域外,其他区域的线路过载率在控制方案运行前后未发生变化,也没有出现新的过载线路。与方法 3 相比,方法 1、2 的功率总调节量较小,经济性更好;3 种方法的控制目标节点相同,由于过载区域内发电机组 31、32 的可调量较大,控制方案不需要外部区域的发电机组参与,这种情况下,方法 1、2 能获得一致的效果。

4.2 $N-2$ 故障下消除线路过载

线路 6-7、13-14 发生故障后被切除,运行电网分区程序,系统的最优分区为 4 分区,系统分区图见附录 A 图 A5,过载线路 5-6、6-11 和 10-11 均在区域 3 中。线路过载控制策略运行前系统线路过载率分布图见附录 A 图 A6。图中,红色区域为过载线路 5-6、6-11 和 10-11 的过载情况,对应的过载率分别为 1.018、1.328 和 1.036。采用方法 1 获取控制方案,上层优化模型获得功率总调节量目标值为 383.54 MW,下层优化模型选择的最优控制方案见表 3。

表 3 $N-2$ 故障下的线路过载控制方案

Table 3 Line overload control scheme of three methods under $N-2$ fault

控制目标节点	控制目标功率调节量 / MW		
	方法 1	方法 2	方法 3
30	56.79	12.77	0
32	-191.79	-191.77	-195.24
35	0	0	16.24
36	0	20	20
37	0	24	24
38	35	35	35
39	100	100	100
功率总调节量 / MW	383.58	383.54	391.08

对比 3 种控制方案的结果,方法 1 和方法 2 均只需要 1 轮调节即可消除线路过载,而方法 3 需要经过 5 轮的增减节点配对和调节过程才能消除过载,主要原因是方法 3 每次只有 2 台发电机组参与功率调节,若发电机组可调节量较小导致过载无法消除时,必然要根据功率调节后的潮流信息再次进行功率调节,而方法 1、2 每次参与调节的发电机组不受限制,因此可以快速消除过载。方法 1 实际参与线路过载控制的发电机组为 4 台,方法 2、3 参与线路过载控制的发电机组均为 6 台,由于方法 1 能让与过载线路区域较近的区域内发电机组尽可能多地参与功率调节,所以参与功率调节的发电机组数目减少,控制方案更合理和易于实施。

运行表 3 中的 3 种控制方案后的传输功率、最大传输功率见表 4,采用方法 1—3 后的系统网损分别为 49.624、50.82、51.046 MW。根据表 4 及系统网损可知,3 种方法均消除了线路过载问题,方法 1 比方法 2 的系统网损降低了 1.196 MW,比方法 3 的系统网损降低了 1.422 MW。

表 4 $N-2$ 故障下运行控制方案后的传输功率、最大传输功率

Table 4 Transmission power and maximum transmission power after operation of control schemes under $N-2$ fault

过载线路	传输功率 / MW			最大传输功率 / MW
	方法 1	方法 2	方法 3	
5-6	1032.44	1033.77	1015.98	1200
6-11	450.25	450.31	444.03	480
10-11	443.44	443.55	430.11	600

由表 3 可知,方法 1 与方法 2 的不同在于发电机组 36、37 的不再参与控制,而功率不足部分则完全由发电机组 30 承担,这样虽然增加了 0.04 MW 的系统功率总调节量,但是参与功率调节的发电机组更少,且降低了 1.196 MW 的系统网损。产生差异的主要原因是功率灵敏度仅能反映节点注入功率变化对线路功率的影响程度,并不能体现两者的电气距离远近,因此仅考虑功率灵敏度的控制策略会产生远距离功率调节的情况,功率调节的影响范围也会变大,相应的网损会增加。方法 1 采用基于双层优化规划法的线路过载控制策略,通过电网分区体现不同电气距离的发电机组对线路的功率调节效果的差异,在保证系统总功率调节量最小的前提下,进一步考虑让与过载线路所属区域距离较近区域内的发电机组获得尽可能大的功率调节效果,从而避免远距离功率调节的情况。方法 1 具有更好的经济性,在断线或者严重的设备故障等情况下,故障恢复时间较长,假设本算例中故障恢复时间为 1 d,则在本算例中将节约 28.704 MW·h 的电能,且故障恢复时间

越长,方法1的经济性越明显。

方法1获取的控制方案运行后,线路过载率分布图见附录A图A7,对比图A6、A7中的线路5-6、6-11和10-11的过载率分布情况可知,控制方案运行后3条线路的过载率分别为0.86、0.938和0.739,均已小于1,线路过载情况得以消除。与4.1节中相同,除参与功率调节的区域外,图A7中其他区域的过载率在控制方案运行前后未发生变化,也没有产生新的过载线路,控制方案对其他区域的线路潮流影响较小。

5 结论

本文提出了基于双层优化规划法的线路过载控制策略,与潮流转移识别算法配合,在随机故障后闭锁后备保护,通过源-荷功率调节消除线路过载,能阻断过载型连锁故障的传播,对维持电网稳定运行具有重要意义。算例分析结果表明本文所提线路过载控制策略获取的控制方案具有明显的优势,可得到如下结论。

1)本文根据支路对节点的电流灵敏度进行电网分区,不受电网规模和结构限制,能实现实时和动态分区。算例分析结果表明,分区结果能体现不同电气距离的发电机组对线路的功率调节效果的差异,表明该分区方法的合理性。

2)采用基于双层优化规划法的线路过载控制策略,不仅能保证系统功率总调节量最小,还能尽量调节与过载线路所属区域较近的区域发电机组,进行大范围潮流控制时,能减少参与调节的发电机组数目,控制方案更合理和易于实施。

3)考虑电网分区的过载控制策略能够区分功率灵敏度相近的线路间的电气距离差异,控制策略考虑各区域中发电机组的调节效应,避免了远距离功率调节情况下网损增加的问题,对正常线路的潮流影响也较小,具有更好的经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 易俊,卜广全,郭强,等.巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示[J].电力系统自动化,2019,43(2):1-6.
YI Jun, BU Guangquan, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Brazilian Power Grid on March 21, 2018 and its enlightenment to power grid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 1-6.
- [2] 李保杰,李进波,李洪杰,等.土耳其“3.31”大停电事故的分析及对我国电网安全运行的启示[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5788-5795,6021.
LI Baojie, LI Jinbo, LI Hongjie, et al. Analysis of Turkish blackout on March 31, 2015 and lessons on China Power Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5788-5795, 6021.
- [3] 徐岩,郅静.基于功率灵敏度的线路过载划区域紧急控制策略[J].电工技术学报,2015,30(15):60-72.
XU Yan, ZHI Jing. A zone-divided emergency control strategy for overload lines based on power sensitivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 60-72.
- [4] 牟颖,张保会,薄志谦.防止输电断面连锁过载的快速控制算法[J].电力系统自动化,2017,41(3):39-45.
MU Ying, ZHANG Baohui, BO Zhiqian. Fast control algorithm for preventing cascading overload on transmission section[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 39-45.
- [5] 任建文,何培成,何宸.基于虚拟控制单元与启发式搜索的线路过载紧急控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(3):33-38,69.
REN Jianwen, HE Peicheng, HE Chen. Emergency control strategy against line overload based on virtual control units and heuristic search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 33-38, 69.
- [6] 徐岩,郅静,樊世通.基于功率灵敏度和经济补偿最小化的线路过负荷紧急控制方法[J].电力自动化设备,2017,37(1):118-123.
XU Yan, ZHI Jing, FAN Shitong. Line overload emergency control based on power sensitivity and minimized economic compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 118-123.
- [7] 任建文,魏俊姣,谷雨峰.基于多目标粒子群优化算法的连锁跳闸预防控制[J].电力自动化设备,2016,36(7):53-59.
REN Jianwen, WEI Junjiao, GU Yufeng. Preventive control based on multi-objective particle swarm optimization algorithm for cascading trips[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 53-59.
- [8] 姜臻,苗世洪,刘沛,等.一种基于粒子群优化算法的转移潮流控制策略[J].电力系统自动化,2010,34(18):16-20,31.
JIANG Zhen, MIAO Shihong, LIU Pei, et al. A particle swarm optimization based power flow transferring control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 16-20, 31.
- [9] 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.
- [10] 王耀耀,张伯明,孙宏斌,等.一种基于专家知识的电力系统电压/无功分级分布式优化控制分区方法[J].中国电机工程学报,1998,18(3):221-224.
WANG Yaoyu, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. A expert knowledge based subarea division method for hierarchical and distributed electric power system voltage / VAR optimization and control[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 221-224.
- [11] 郭庆来,孙宏斌,张伯明,等.基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J].电力系统自动化,2005,29(10):36-40,54.
GUO Qinglai, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in Mvar control space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40, 54.
- [12] 赵晋泉,刘傅成,邓勇,等.基于映射分区的无功电压控制分区算法[J].电力系统自动化,2010,34(7):36-39,56.
ZHAO Jinquan, LIU Fucheng, DENG Yong, et al. Network partitioning for reactive power / voltage control based on a mapping division algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 36-39, 56.
- [13] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等.基于广域同步测量系统的预防连锁跳闸控制策略[J].中国电机工程学报,2007,27(19):32-38.
XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. Study on

- wide area measurement system based control strategy to prevent cascading trips[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 32-38.
- [14] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究[J]. 软件学报, 2008, 19(1): 48-61.
SUN Jigui, LIU Jie, ZHAO Lianyu. Clustering algorithms research[J]. Journal of Software, 2008, 19(1): 48-61.
- [15] LAGONOTTE P, SABONNADIÈRE J C, LEOST J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486.
- [16] 冯士刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 146-151.
FENG Shigang, AI Qian. Application of fast and elitist non-dominated sorting genetic algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(12): 146-151.
- [17] ATHAY T, PODMORE R, VIRMANI S. A practical method for the direct analysis of transient stability[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(2): 573-584.

作者简介:



柯永超

柯永超(1993—),男,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制(**E-mail**:keyongchao@hotmail.com);

廖凯(1989—),男,四川巴中人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统分析、稳定和控制等(**E-mail**:liaokai_lk@hotmail.com)。

(编辑 任思思)

Line overload control strategy based on bi-level optimization programming

KE Yongchao, LIAO Kai, LI Bo, YANG Jianwei, HE Zhengyou

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: For the overload line caused by power flow transferring after random fault removal, its backup protection action may cause cascading failure, resulting in blackout. Therefore, it is necessary to block backup protection and eliminate overload through overload control. In order to reduce the remote power regulation in the control strategy, an overload control strategy based on bi-level optimization programming is proposed. Firstly, the electrical distance matrix is constructed based on the current sensitivity matrix of branch to node, and the hierarchical clustering algorithm is used to partition the power grid, which reflects the difference of power regulation effect of generators with different electrical distances on overload lines. Secondly, a bi-level optimization programming model is constructed. The upper level optimization objective considers the total power regulation of the system, and the lower level optimization objective considers the power reduction difference of each adjacent region to the overload line area. Thirdly, according to the upper objective equation, the objective value of the minimum total power regulation is solved, and then NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) is used to solve the lower optimization model to obtain a set of Pareto optimal solutions. The optimal source-load power regulation control scheme is selected by satisfaction index, and the control scheme is implemented to eliminate line overload. Finally, the effectiveness and rationality of the proposed control strategy are verified based on IEEE-39 standard bus system.

Key words: line overload control strategy; bi-level optimization programming; power grid partition; electrical distance; NSGA-II

附录 A

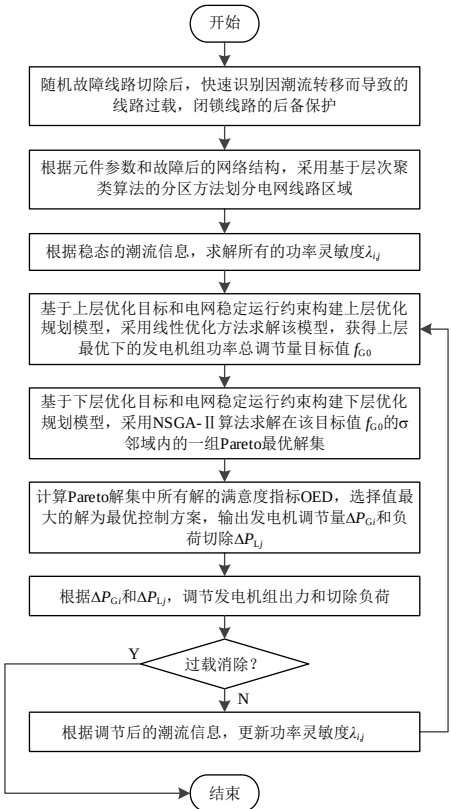


图 A1 线路过载控制策略的流程图

Fig.A1 Flowchart of line overload control strategy

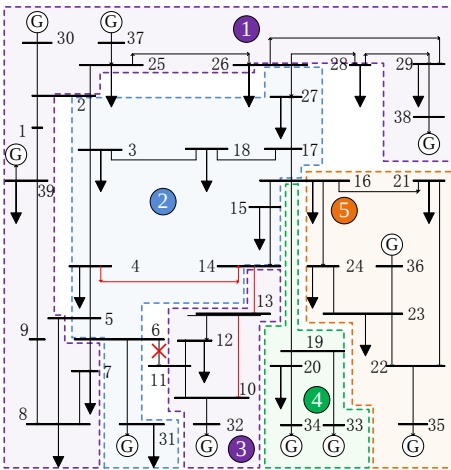


图 A2 故障线路 6-11 切除后的系统分区图

Fig.A2 System partition after removal of fault line 6-11

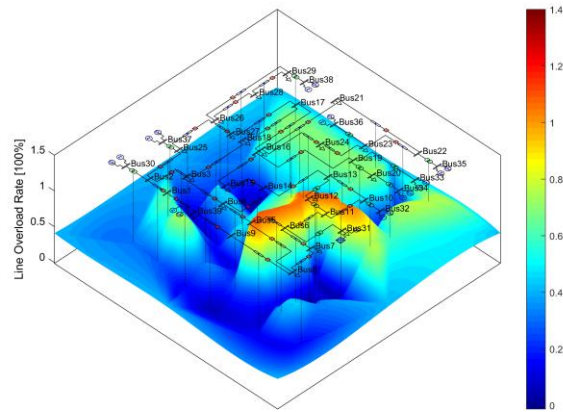


图 A3 $N-1$ 故障下控制方案运行前的线路过载率分布图

Fig.A3 Distribution diagram of line overload rate before operation of control scheme under $N-1$ fault

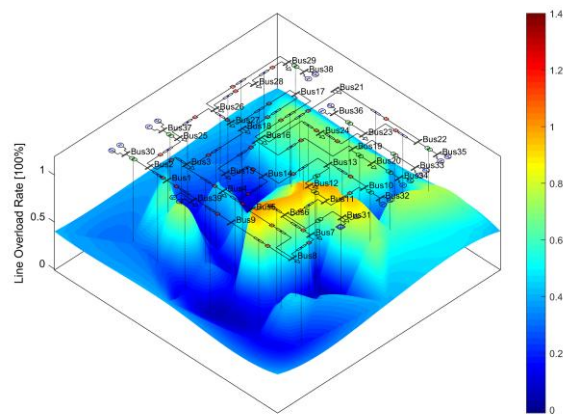


图 A4 $N-1$ 故障下控制方案运行后的线路过载率分布图

Fig.A4 Distribution diagram of line overload rate after operation of control scheme under $N-1$ fault

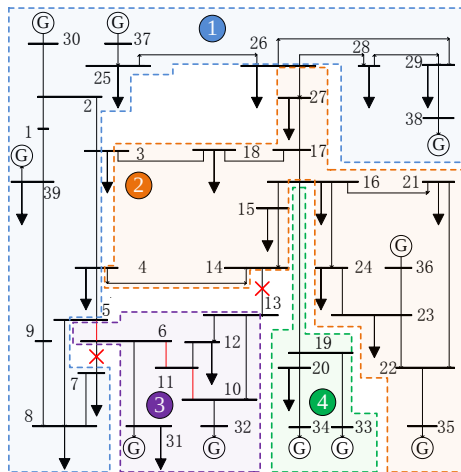


图 A5 故障线路 6-7、13-14 切除后的系统分区图

Fig.A5 System partition diagram after removal of fault lines 6-7 and 13-14

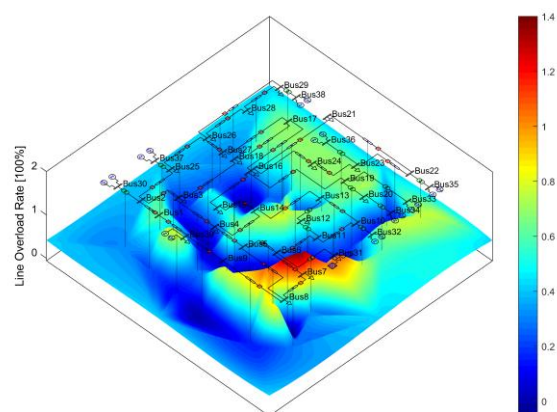


图 A6 $N-2$ 故障下控制方案运行前的线路过载率分布图

Fig.A6 Distribution diagram of line overload rate before operation of control scheme under $N-2$ fault

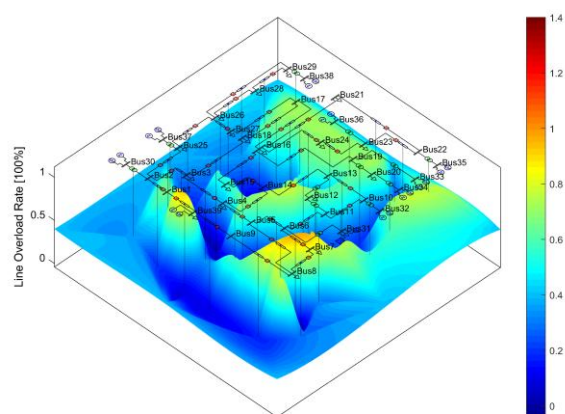


图 A7 $N-2$ 故障下控制方案运行后的线路过载率分布图

Fig.A7 Distribution diagram of line overload rate after operation of control scheme under $N-2$ fault