

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.010

基于控制目标松弛的输电设备过载预防控制在线决策

王业¹, 徐伟², 徐遐龄³, 郑亮², 李天然¹, 肖大军³

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210034;

2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

3. 国家电网有限公司华中分部, 湖北 武汉 430077)

摘要:基于有功灵敏度的线性规划模型可快速有效地进行预防控制策略求解,但是由直流潮流法得到的有功灵敏度忽略了电压和网损的影响,导致预防控制策略结果难以满足交流潮流校核计算精度要求。为此,文中提出一种基于控制目标松弛的输电设备过载预防控制在线决策方法。首先,根据过载安全裕度确定参与控制的关键设备及对应预想故障下的有功灵敏度;然后,通过聚类分析对有功调整措施的搜索空间进行降维;接着,建立过载预防控制在线决策的线性规划模型;最后,按预防控制有功精度将关键设备的有功限额按档位进行松弛,根据交流潮流校核结果确定最优解的搜索方向,不断逼近最优解。通过实际电网的算例分析验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词:输电设备过载;过载预防控制;在线决策;有功灵敏度;线性规划;聚类分析

中图分类号: TM734

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)01-0080-08

0 引言

输电设备过载预防控制是保证电力系统安全稳定运行的重要手段,通过调整发电机出力、切负荷等控制策略消除预想故障导致的输电设备过载,为调度运行人员提供有效的辅助决策依据,阻断潮流转移引发的连锁故障^[1-5]。过载预防控制的数学模型可以用预防性安全约束最优潮流来描述,求解同时满足基态和预想故障下约束条件的最优控制策略^[6-11]。随着电网规模的扩大,预想故障数不断增加,导致求解过程存在收敛性较差、计算耗时过长和内存占用过大的问题。因此,在保证计算精度的前提下提高过载预防控制在线决策的计算效率,可以有效预防输电设备过载导致的连锁跳闸。

目前,输电设备过载预防控制中最常用的方法是反向等量配对法,根据综合灵敏度确定各有功调整措施的调整方向和优先级顺序,然后依次等量反向配对,不断增加配对量直至消除过载^[12-14]。其优点是不存在收敛性问题,可以利用静态安全校核并行计算评估控制效果,便于考虑各类调度规则,满足工程实用化。但通过对越限支路或接近越限支路的灵敏度加权求和来计算综合灵敏度,难以保证多个支路越限的情况下能够获得最优解,当控制措

施对不同越限支路的灵敏度方向相反时,部分越限支路的过载情况甚至可能无法得到改善^[15-18]。

此外,为求解无预想故障约束的输电设备过载校正控制问题,文献[19-23]采用基于有功灵敏度的线性规划法将非线性规划模型转化为线性规划模型。相比于反向等量配对法,该方法可以获得数学意义上的更优解,且不会出现由于控制措施对不同支路灵敏度方向相反而导致越限支路过载无法改善的情况。但由于有功灵敏度是基于直流潮流模型推导得到,由此计算得到的控制策略可能无法通过交流潮流校核。文献[19]将接近越限的支路纳入线性规划模型来避免求解过程中的拉锯现象,通过限制控制措施的调节范围来保证有功灵敏度的有效性。由于控制策略未经交流潮流校核,不可避免地存在过控或者欠控的问题。文献[20]采用与平衡节点选取无关的准稳态灵敏度作为有功灵敏度,仍无法消除直流潮流与交流潮流之间的偏差。文献[21]利用在线安全分析系统对线性规划得到的控制策略进行静态安全校核,通过减小控制目标和多轮迭代来解决交流潮流校核不通过的问题。上述方法难以解决线性规划得到的控制策略交流潮流校核不通过的问题,计算得到的优化解无法满足控制精度的要求。

针对以上问题,文中提出基于控制目标松弛的输电设备过载预防控制在线决策方法。为快速有效地进行预防控制策略求解,文中根据静态安全分析得到的输电设备过载安全裕度确定参与控制的

收稿日期:2022-08-27;修回日期:2022-11-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61933005);国家电网有限公司总部科技项目“跨区电网源荷不确定性安全风险在线评估与智能防御技术”(5100-202135022A-0-0-00)

关键设备及该设备关联预想故障下的有功灵敏度,构建过载预防控制在线决策的线性规划模型。为提高计算精度,文中按预防控制的有功精度将关键设备的有功限额按档位进行松弛,根据交流潮流校核结果确定最优解的搜索方向,不断逼近最优解,确保近似最优解与最优解的偏差不大于设定的控制精度。为了进一步提高线性规划模型的计算效率,文中通过聚类分析对有功调整措施的搜索空间进行降维。实际电网的仿真算例验证了文中方法的有效性。

1 过载预防控制的线性规划模型

在传统最优潮流模型基础上扩展预想故障约束条件,即可构成过载预防控制非线性规划模型,该模型包含大量基态及预想故障下的等式和不等式约束,直接求解会造成实用化困难。因此,文中在文献[19-23]的基础上,将过载校正控制的线性规划模型拓展到过载预防控制,分析有功灵敏度误差对控制策略精度的影响。

1.1 目标函数

为保证供电可靠性,预防控制中应尽量依靠调整发电机出力消除过载,避免切负荷。只有当通过调整发电机出力无法得到满足系统安全运行的控制方案时,才考虑采取相应的切负荷措施。因此,针对不同类型的有功调整措施须分别设置调整代价,使控制代价最小化的目标函数如式(1)所示。

$$\min f = \sum_{e=1}^E (c_e^+ \Delta u_e^+ + c_e^- \Delta u_e^-) \quad (1)$$

式中: E 为有功调整措施个数; c_e^+ 、 c_e^- 分别为有功调整措施 e 有功增加和有功减小的调整代价; Δu_e^+ 、 Δu_e^- 分别为有功调整措施 e 有功增加量和有功减小量,且满足 $\Delta u_e^+ > 0$, $\Delta u_e^- > 0$ 。

在实际电力系统中,有功调整措施的数目非常巨大,但其中大多数对于过载设备的有功灵敏度过小,并不具有实际意义。因此,可从中筛选出有功灵敏度大于设定阈值的有效调整措施参与控制,提高计算效率。

1.2 约束条件

设基态运行方式下节点导纳矩阵及其逆矩阵分别为 \mathbf{B}_0 和 \mathbf{X}_0 , 预想故障 j 下节点导纳矩阵及其逆矩阵分别为 \mathbf{B}_j 和 \mathbf{X}_j 。基于直流潮流模型,根据式(2)计算预想故障 j 下有功调整措施 e 对输电设备 i 的有功灵敏度 $D_{e,i,j}$:

$$D_{e,i,j} = \frac{X_{m_i,j} - X_{n_i,j}}{x_i} \quad (2)$$

式中: x_i 为输电设备 i 的电抗; $X_{m_i,j}$ 、 $X_{n_i,j}$ 分别为输电设备 i 两端节点号 m 和 n 在预想故障 j 下 \mathbf{X}_j 对应的元素。

设预想故障 j 下开断的支路为 l , 则根据式(3)确定 \mathbf{B}_j :

$$\mathbf{B}_j = \mathbf{B}_0 - \frac{1}{x_l} \mathbf{M}_l^T \mathbf{M}_l \quad (3)$$

式中: x_l 为支路 l 的电抗; \mathbf{M}_l 为支路 l 的节点-支路关联矢量。由于 \mathbf{X}_j 为 \mathbf{B}_j 的逆矩阵, \mathbf{B}_j 部分元素的变化会导致 \mathbf{X}_j 所有元素发生变化。因此,不同预想故障下的有功灵敏度与基态相比发生较大的变化。

另外,与过载校正控制只考虑基态下输电设备的过载情况不同,同一个输电设备在不同预想故障下的过载程度不同。若不同预想故障导致同一输电设备过载,则须分别计算各预想故障下有功调整措施对该设备的有功灵敏度,根据预想故障下的潮流计算结果确定有功限额。因此,线性规划模型对于不同预想故障下的同一过载输电设备,须分别建立消除输电设备过载约束。其中,根据式(4)确定预想故障 j 下输电设备 i 的有功限额 $P_{i,j}^C$:

$$P_{i,j}^C = U_{i,j} I_{i,\max} F_{i,j} \quad (4)$$

式中: $U_{i,j}$ 、 $I_{i,\max}$ 、 $F_{i,j}$ 分别为输电设备 i 的当前电压、电流值限额和当前功率因数。

综上所述,输电设备过载预防控制的约束条件包括消除输电设备过载约束、有功调整措施调节范围约束和有功平衡约束,具体如下。

(1) 消除输电设备过载约束。为保证预防控制措施实施后,基态或预想故障下的过载输电设备不过载,临近过载的输电设备的有功功率在控后也不会越限,须将过载安全裕度小于设定阈值的输电设备加入到约束中,即满足:

$$P_{i,j} + \sum_{e=1}^E D_{e,i,j} \Delta u_e \leq P_{i,j}^C \quad i \in I; j \in J \quad (5)$$

式中: $P_{i,j}$ 为预想故障 j 下输电设备 i 的有功功率值; Δu_e 为有功调整措施 e 的有功调整量,且满足式(6); I 为过载安全裕度小于设定阈值的输电设备集合; J 为预想故障集合。

$$\Delta u_e = \Delta u_e^+ - \Delta u_e^- \quad (6)$$

(2) 有功调整措施调节范围约束。有功调整措施的有功出力须满足式(7):

$$u_{e,\min} \leq u_{e,0} + \Delta u_e \leq u_{e,\max} \quad e = 1, 2, \dots, E \quad (7)$$

式中: $u_{e,0}$ 、 $u_{e,\min}$ 、 $u_{e,\max}$ 分别为有功调整措施 e 的当前有功功率、有功功率下限和有功功率上限。当有功调整措施为负荷时, $u_{e,\max}$ 设置为 $u_{e,0}$, $u_{e,\min}$ 设置为 $k_e u_{e,0}$ (k_e 为切除负荷的比例), 从而避免将该负

荷设备对应的实际负荷全部切除。

(3) 有功平衡约束。为保证系统功率平衡,所有参与调节的有功调整措施的有功调整量须满足:

$$\sum_{e=1}^E \Delta u_e = 0 \quad (8)$$

1.3 灵敏度误差分析及其影响

输电设备有功灵敏度一般是基于直流潮流法计算,而直流潮流法是由潮流方程简化处理得到。在简化过程中,直流潮流法近似认为全网各节点电压均等于额定电压,忽略支路电阻,无法考虑方式变化过程中网损和无功变化对有功潮流的影响,导致直流潮流和交流潮流之间存在误差^[24]。

以西北电网某预想故障为例,输电设备 A 有功值为 2 440.23 MW。对该输电设备设置不同的控制目标,根据有功灵敏度确定控制策略,通过交流潮流分别校核各控制策略实施后的有功潮流,与控制目标的差值如图 1 所示。

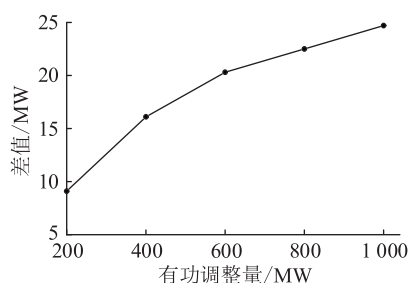


图 1 交流潮流校核值与控制目标之间的差值随有功调整量的变化

Fig.1 The difference value between AC power flow checking results and control objects with the variation of the active power adjustment

由图 1 可见,交流潮流校核后的有功值与控制目标之间存在一定差异,而在该例中交流潮流校核值大于控制目标值,存在欠控的现象。文献[24]对 IEEE 多个测试系统和实际电网算例做了大量数值仿真,指出即使是在电压标准差较小、电抗电阻比满足条件的电网中,直流潮流和交流潮流的最大相对误差也可能达到 50%。因此,难以保证上述线性规划模型求解得到的控制策略能够满足计算精度的要求。

2 基于控制目标松弛的求解策略

2.1 基本原理

作为能够在线应用的算法,输电设备过载预防控制算法须找到一个近似解,使所有预想故障下的过载设备都不存在越限,且满足一定的精度要求。由于有功灵敏度存在误差,求解得出的近似解可能与真实解存在较大差异,优化算法易出现控制量不

足或过多的情况。控制量不足导致被控输电设备仍然越限,控制量过多则会导致控制策略的经济性较差。

因此,可以将各过载设备控制目标离散化,按一定的控制精度对多维解空间进行网格划分,使交流潮流意义上的最优解被覆盖在多维解空间的范围内,并不断逼近最优解,直到过载设备控后都不存在越限,且满足一定的精度要求。以图 2 为例,设有 2 个过载设备,将其控制目标均松弛为 3 个档位,则解空间为二维空间。由图 2 可知,最优解搜索空间共可划分为 9 个子空间,子空间⑤覆盖了实际最优解 P 。设置 2 个过载设备初始计算档位值分别为 X_2, Y_2 ,即图 2 中 P_1 。在一次预防控制策略求解以及交流潮流的校核后,两设备仍然存在过载,则将档位分别为更新为 X_1, Y_1 ,即图 2 中 P_2, P_2 即为求得的近似最优解。

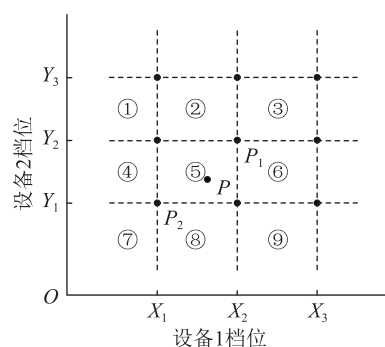


图 2 最优解搜索区域拓展示意

Fig.2 Schematic diagram of optimal solution search area expansion

2.2 求解策略

对于预想故障 j 下的过载设备 i 而言,过载设备 i 故障下的有功功率为 $P_{i,j,0}$,有功限额为 $P_{i,j}^C$ 。以 μ 为控制精度,可将其控制目标松弛为多个档位。

首先,将各过载设备的有功限额设为控制目标初值,即构成控制目标集合向量 P_i :

$$P_i = \begin{bmatrix} P_{1,j}^C \\ P_{2,j}^C \\ \vdots \\ P_{i,j}^C \end{bmatrix} \quad (9)$$

以此进行第 1 轮线性规划计算以及交流潮流校核。校核后,若设备 i 欠控,则更新设备 i 的控制目标,从而更新控制目标集合向量 P_i ,重新进行预防控制策略的求解。

第 N 轮求解后,若设备 i 仍欠控,则在原控制目标的基础上以精度 μ 增加一个档位,更新设备 i 的控制目标,从而更新控制目标集合向量 P_i ,并重新

进行预防控制策略的求解,直到不存在设备欠控。

每轮求解后,设备 i 的控制目标 $P_{i,j}^N$ 更新为:

$$P_{i,j}^N = P_{i,j}^C - \mu \lfloor [(P_{i,j,1} - P_{i,j}^C) / \mu + 1] + N - 1 \rfloor \quad (10)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整符号。

若每轮求解后,设备 i 不存在欠控,但仍存在其他设备欠控,则下一轮求解时,设备 i 的控制目标不再更新。

3 对有功调整措施进行聚类

从调度公平的角度出发,有功灵敏度相近的有功调整措施应按照相同比例同时调整,避免单独调整一个或有限几个调整措施。此外,将有功灵敏度相似的有功调整措施作为整体进行调节,可有效减小线性规划问题的求解规模,提高计算效率。对此,文中提出一种对有功调整措施进行聚类的方法,可兼顾调度公平性原则并提高过载预防控制的计算效率。

3.1 聚类方法

层次聚类算法在模式识别、数据挖掘等领域中得到了广泛应用,将物理或抽象对象的数据集合并组成多个类或簇的过程称为聚类。通过聚类划分到各簇中的数据应该满足同簇内的数据差异度最小、不同簇内的数据差异度最大的原则^[25-26]。

以可调机组为例,基于层次聚类算法对可调机组进行聚类的具体步骤如下。

(1) 根据机组对待控输电设备的有功灵敏度构造聚类向量 D_w :

$$D_w = \begin{bmatrix} D_{w,1} \\ D_{w,2} \\ \vdots \\ D_{w,H} \end{bmatrix} \quad w = 1, 2, \dots, G \quad (11)$$

式中: G 为机组措施的个数; H 为过载安全裕度小于设定阈值的输电设备的个数。

(2) 将每个聚类向量作为一个单个类,计算各个类之间的欧式距离,将各类间距离的最小值作为当前的合并距离。

(3) 将各类间距离最小的 2 个类合并为 1 个新类,并重新计算各个类之间的距离(类间距离采用 2 个类中所包含机组有功调整措施聚类向量之间欧式距离的最大者)。

(4) 重复步骤(3)直到某一步的合并距离大于一阈值,将前一步得到的分群数作为最优分群数。

对于可切负荷措施采用类似的方法确定最佳分群数。

3.2 有功功率整合及分摊

聚合后每一簇有功调整措施均作为一个整体参与预防控制线性规划计算,各聚合有功调整措施的调节范围包括聚合后有功增加空间和聚合后有功减少空间。设簇 c 包含 n_c 个有功调整措施,聚合后有功增加空间 ΔP_c^+ 和聚合后有功减少空间 ΔP_c^- 可由式(12)获得。对于切负荷措施而言, ΔP_c^+ 的值为 0。

$$\begin{cases} \Delta P_c^+ = \Delta P_{c,1}^+ + \Delta P_{c,2}^+ + \dots + \Delta P_{c,n_c}^+ \\ \Delta P_c^- = \Delta P_{c,1}^- + \Delta P_{c,2}^- + \dots + \Delta P_{c,n_c}^- \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\Delta P_{c,1}^+$ 、 $\Delta P_{c,2}^+$ 、 \dots 、 $\Delta P_{c,n_c}^+$ 分别为簇 c 内各有功调整措施的有功增加空间; $\Delta P_{c,1}^-$ 、 $\Delta P_{c,2}^-$ 、 \dots 、 $\Delta P_{c,n_c}^-$ 分别为簇 c 内各有功调整措施的有功减少空间。

根据线性规划计算得出的各聚合有功调整措施的调整策略,将聚合有功调整措施的有功调整量 ΔP_c 按可调空间分配至各簇内各有功调整措施。

4 计算流程

在已有静态安全分析的基础上,若存在预想故障下的设备越限或接近越限,则计算预想故障下有功调整措施的有功灵敏度,之后再分 2 个阶段进行预防控制策略求解和静态安全校核。设定以下门槛值:

(1) 过载安全裕度门槛值 $\eta_{cr,1}$, 用于确定电网预想故障下的过载设备;

(2) 过载安全裕度门槛值 $\eta_{cr,2}$, 用于确定参与计算的电网预想故障下的输电设备。

计算流程具体如下:

(1) 将电网预想故障下过载安全裕度小于 $\eta_{cr,1}$ 的设备加入到过载设备集中,若过载设备集中有过载设备,则进入步骤(2);否则,结束。

(2) 将电网预想故障下过载安全裕度小于设定门槛值 $\eta_{cr,2}$ 的设备加入到关键设备集中。

(3) 通过灵敏度分析计算预防控制措施集中有功调整措施 e 对关键设备 i 在预想故障 j 下的有功灵敏度 $D_{e,i,j}$, 将 $D_{e,i,j} \geq D_{cr}$ 的有功调整措施 e 加入到有效控制措施集中。其中, D_{cr} 为设定的有功灵敏度门槛值。

(4) 根据有效控制措施集中的有功调整措施对于所有关键设备的有功灵敏度构造聚类向量并进行聚类分析,将聚合后的每一簇有功调整措施加入到聚合措施集中。

(5) 根据各过载设备的有功限额构造控制目标向量,进行线性规划求解预防控制策略,并将聚合措施集内调整量进行分配,经交流潮流校核。若所

有设备过载安全裕度均大于 $\eta_{cr.1}$,则输出控制策略;否则,跳转步骤(6)。

(6) 根据设定的控制精度更新步骤(5)中校核后仍过载的设备的控制目标档位,重新构造控制目标向量,进行线性规划求解预防控制策略,并将聚合措施集内调整量进行分配,经交流潮流校核。若所有设备过载安全裕度均大于 $\eta_{cr.1}$,则输出控制策略;否则,跳转步骤(7)。

(7) 更新步骤(6)中校核后仍过载的设备的控制目标档位,重新构造控制目标向量,进行线性规划求解预防控制策略,并将聚合措施集内调整量进行分配,经交流潮流校核。若所有设备过载安全裕度均大于 $\eta_{cr.1}$,则输出控制策略;否则,继续重复步骤(7)。

5 仿真验证

5.1 仿真算例

文中采用西北电网某时刻数据作为算例,验证所提优化模型和求解算法的有效性。该电网有 671 台发电机、2 448 个负荷节点、2 257 条支路以及 2 902 台变压器。西北电网网架结构局部示意如图 3 所示。

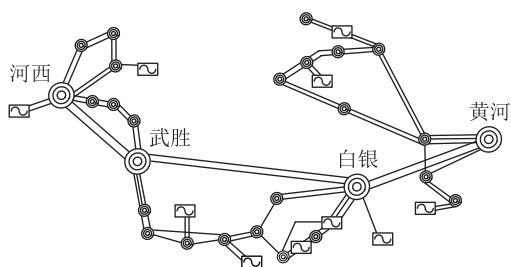


图 3 西北电网网架结构局部示意

Fig.3 Local schematic diagram of grid structure in northwest power grid

预想故障下的过载设备、关联故障及过载安全裕度如表 1 所示。本算例中的 $\eta_{cr.1}$ 、 $\eta_{cr.2}$ 分别设置为 0.00、10.00。

表 1 预想故障下设备的过载安全裕度

Table 1 Overload safety margin of equipment under anticipated faults

| 过载设备 | 关联故障 | 功率限值/ MW | 故障后功率/ MW | 过载安全裕度/% |
|---------|---------------|-------------|--------------|----------|
| 白黄 II 线 | 白黄 I 线 开断 | 4 300.0 | 4 608.1 | -7.17 |
| 河武 I 线 | 河武 II 线 开断 | 4 000.0 | 4 780.4 | -19.51 |

5.2 有功调整措施筛选

根据计算得到的有功灵敏度进行预估,确保参

与控制的有功调整措施能够消除过载的情况下,筛选出预想故障下对过载输电设备有功灵敏度大于阈值 0.005 的有功调整措施,共 459 台机组,564 个负荷设备参与控制。部分机组对过载设备的灵敏度如表 2 所示。

表 2 部分机组对过载设备的灵敏度

Table 2 Active power sensitivity of some units to overload equipment

| 机组 | 对白黄 II 线灵敏度 | 对河武 I 线灵敏度 |
|---------|-------------|------------|
| 宁中二 G1 | -0.449 2 | -0.231 6 |
| 甘范家 12 | 0.105 2 | -0.220 5 |
| 甘景泰 G1 | 0.261 0 | -0.238 9 |
| 红沙 69__ | 0.227 6 | 0.630 8 |
| 张光 38__ | 0.226 9 | 0.628 9 |

由表 2 可以看出,部分机组对过载设备的有功灵敏度正负符号不一致,这代表着降低一个过载设备有功而调整该机组时会导致另一个过载设备有功增加。文献[19]将不同支路有功灵敏度相反的有功调整措施排除使其不参与控制,这将可能导致遗漏最优解。文中仍将此类措施纳入预防控制计算,确保控制策略的经济性。

5.3 优化结果

以 25 MW 为控制精度,将两过载设备的有功限额作为控制目标进行松弛,设置若干档位。首先,以两过载设备的有功限额为控制目标,进行第一轮线性规划计算以及交流潮流的校核。若存在设备依然欠控,则根据控制精度设置档位,更新第二轮计算的控制目标来进行求解与校核;若后面仍存在设备欠控,则增加档位,继续进行求解。

由于负荷的调整代价较高,所以最终方案只调节了机组措施。根据各机组对预想故障下过载设备的有功灵敏度构成的聚类向量,机组措施共分为 53 簇。最终方案里共有 6 簇机组实际参与调节,其有功功率调节量如表 3 所示。

表 3 参与调节的各簇有功功率调节量

Table 3 Active power adjustment of each participated cluster

| 簇编号 | 簇内机组数量 | 有功功率减少空间/MW | 有功功率增加空间/MW | 有功功率调节量/MW |
|-----|--------|-------------|-------------|------------|
| 1 | 1 | 165 | 51 | +51.0 |
| 2 | 5 | 659 | 415 | +323.6 |
| 3 | 3 | 439 | 167 | +167.0 |
| 4 | 5 | 774 | 191 | +191.0 |
| 5 | 2 | 4 | 788 | +222.9 |
| 6 | 16 | 1 304 | 252 | -955.5 |

按文中所提方法将每簇机组的有功功率按比

例分配至对应簇内机组,各方案下输电设备的控制目标以及调整后输电设备的有功功率如表4所示。

表4 对有功调整措施进行聚类的方法下
各输电设备的潮流计算结果

Table 4 The power flow calculation results of each transmission equipment under the method of clustering the active power adjustment measures

| 方案 | 过载设备 | 控制目标/ MW | 调整后有功/ MW | 调整后 裕度/% |
|----|------|-------------|--------------|-------------|
| 1 | 白黄Ⅱ线 | 4 300.0 | 4 317.8 | -0.45 |
| | 河武Ⅰ线 | 4 000.0 | 4 016.6 | -0.42 |
| 2 | 白黄Ⅱ线 | 4 275.0 | 4 291.8 | 0.19 |
| | 河武Ⅰ线 | 3 975.0 | 3 991.6 | 0.21 |

方案1对应基于线性规划直接求解得到的控制策略,线性规划与交流潮流校核分别耗时63 ms与1 342 ms,在各调整措施出力调整后,2个设备依旧存在过载。在方案1中,经交流潮流校核后2个输电设备的当前有功功率与控制目标间的差值均小于25 MW的控制精度,所以在方案2中,将各输电设备的控制目标均松弛一个档位,通过线性规划求解控制策略并进行交流潮流校核,线性规划与交流潮流校核分别耗时71 ms与1 339 ms,控后2个设备均不存在过载。

文中所提方法通过2轮线性规划的求解以及交流潮流的校核得出满足计算精度要求的解。若直接采用线性规划方法进行求解,那么2个设备依旧会存在过载,对比可见文中所提方法的优越性。

5.4 不对有功调整措施进行聚类的优化结果

若不对有功调整措施进行聚类,各方案下输电设备的控制目标以及调整后有功功率如表5所示。

表5 不对有功调整措施进行聚类的方法下
各输电设备的潮流计算结果

Table 5 The power flow calculation results of each transmission equipment without the method of clustering the active power adjustment measures

| 方案 | 过载设备 | 控制目标/ MW | 调整后有功/ MW | 调整后 裕度/% |
|----|------|-------------|--------------|-------------|
| 1 | 白黄Ⅱ线 | 4 300.0 | 4 315.9 | -0.37 |
| | 河武Ⅰ线 | 4 000.0 | 4 017.4 | -0.44 |
| 2 | 白黄Ⅱ线 | 4 275.0 | 4 291.2 | 0.20 |
| | 河武Ⅰ线 | 3 975.0 | 3 993.6 | 0.16 |

方案1中线性规划与交流潮流校核分别耗时1 039 ms与1 337 ms;方案2中线性规划与交流潮流校核分别耗时1 051 ms与1 345 ms。可见,对有功调整措施聚类的交流潮流校核结果相比于不聚类不会引入太大误差,但将有功调整措施聚类的方

法可以大大减少线性规划的求解时间,有效提高计算效率,并且可以实现按比例同时调节灵敏度相近的机组。以表3中簇编号5中的2台机组甘景泰G1、甘景泰G2为例,这2个机组对过载设备的有功灵敏度完全相同,但不对机组聚类时,2个机组中只有甘景泰G1增出力,这不符合实际的运行要求。显然将有功调整措施进行聚类的过载预防控制方法更为合理,且该方法有效减小了线性规划的求解规模,计算效率更高,可见文中所采用对有功调整措施聚类方法的有效性和优越性。

6 结语

文中提出一种基于控制目标松弛的输电设备过载预防控制在线决策方法。根据过载安全裕度确定参与控制的关键设备及对应预想故障下的有功灵敏度,建立过载预防控制在线决策的线性规划模型;按预防控制的有功精度将关键设备的有功限额按档位进行松弛,将最优解覆盖在多维解空间的范围内,不断逼近最优解,有效提高计算精度;通过聚类分析对预防控制措施的搜索空间进行降维,实现对有功灵敏度相近的有功调整措施的同时调节,提高了计算效率,保障了调度公平性。仿真结果验证了所提方法的正确性和实用性。

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] 胡源,薛松,张寒,等.近30年全球大停电事故发生的深层次原因分析及启示[J].中国电力,2021,54(10):204-210.
HU Yuan, XUE Song, ZHANG Han, et al. Cause analysis and enlightenment of global blackouts in the past 30 years[J]. Electric Power, 2021, 54(10): 204-210.
- [3] 石辉,张思远.省级电网静态安全在线辅助决策优化建模[J].电力系统自动化,2015,39(20):98-102.
SHI Hui, ZHANG Siyuan. Optimization modeling of static security online decision support for provincial power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 98-102.
- [4] 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.
- [5] 宣晓华,周野,宋晓芳,等.基于系统与元件动态交互量分析的电力系统连锁故障事故链识别方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(2):101-109.

- XUAN Xiaohua, ZHOU Ye, SONG Xiaofang, et al. A novel searching method of fault chains for power system cascading outages based on quantitative analysis of dynamic interaction between system and components[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2):101-109.
- [6] 韦延宏, 夏小琴, 任先成, 等. 基于可行空间并行的安全约束最优潮流[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6):205-209.
WEI Yanhong, XIA Xiaoqin, REN Xiancheng, et al. Security constrained optimal power flow based on parallel adjustment space[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6):205-209.
- [7] 郭瑞鹏, 边麟龙, 宋少群, 等. 安全约束最优潮流的实用模型及故障态约束缩减方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13):161-168.
GUO Ruipeng, BIAN Linlong, SONG Shaoqun, et al. Practical model of security constrained optimal power flow and reduction methods for contingency constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13):161-168.
- [8] 李捷, 王鹏, 杨林峰. 预想事故安全约束最优潮流问题的并行多中心校正内点算法[J]. 微电子学与计算机, 2014, 31(2):137-141.
LI Jie, WANG Peng, YANG Linfeng. Parallel multiple centrality correctors interior point method for ESC-OPF[J]. Microelectronics & Computer, 2014, 31(2):137-141.
- [9] 阳育德, 冯彦维, 韦化. 基于补偿法的预防性静态安全控制[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12):47-54.
YANG Yude, FENG Yanwei, WEI Hua. Preventive static security control based on compensation method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12):47-54.
- [10] 阳育德, 陶琢, 刘辉, 等. 电力系统静态安全最优潮流并行计算方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1):99-105.
YANG Yude, TAO Zhuo, LIU Hui, et al. Parallel computation methods for static security-constrained optimal power flow of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):99-105.
- [11] WEINHOLD R, MIETH R. Fast security-constrained optimal power flow through low-impact and redundancy screening[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6):4574-4584.
- [12] 周晓宁, 徐伟, 胥传普, 等. 计及负荷转供措施的电网设备过载辅助决策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23):61-66.
ZHOU Xiaoning, XU Wei, XU Chuanpu, et al. The assistant decision-making for power grid equipment overloading considering load transfer actions[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23):61-66.
- [13] 马明, 刘强, 沈凤杰, 等. 输电设备过载与断面功率越限在线控制决策[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6):26-32.
MA Ming, LIU Qiang, SHEN Fengjie, et al. On-line auxiliary decision-making for overload control of power transmission equipment and sections[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6):26-32.
- [14] 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.
- [15] 程临燕, 张保会, 郝治国, 等. 基于综合灵敏度分析的快速控制算法研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4):46-49.
CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Fast control algorithm based on integrative sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4):46-49.
- [16] ZENG L, CHIANG H D. Toward an online minimum number of controls for relieving overloads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):1882-1890.
- [17] 方勇杰, 鲍颜红, 徐伟, 等. 电力系统安全稳定预防控制在线计算方法的评述[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11):199-207.
FANG Yongjie, BAO Yanhong, XU Wei, et al. A review of online calculation methods of preventive control for power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11):199-207.
- [18] 鲍颜红, 冯长有, 徐泰山, 等. 电力系统在线安全稳定综合辅助决策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1):104-110.
BAO Yanhong, FENG Changyou, XU Taishan, et al. Online security and stability comprehensive auxiliary decision-making of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1):104-110.
- [19] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种基于连续线性规划技术的在线静态安全校正算法[J]. 电网技术, 2005, 29(5):25-30.
ZHAO Jinquan, CHIANG Hsiaocong, ZHANG Boming. A successive linear programming based on-line static security corrective control approach[J]. Power System Technology, 2005, 29(5):25-30.
- [20] 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.
- [21] 刘阳, 夏添, 汪旸. 区域电网内多输电断面有功协同控制策略在线生成方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7):204-210.
LIU Yang, XIA Tian, WANG Yang. On-line generation method of active power coordinated control strategy for multiple transmission sections in regional power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7):204-210.
- [22] 罗永建, 李晓明, 黄彦浩, 等. 基于准稳态灵敏度和校正成本最小化的过载线路实时校正方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23):1-10.
LUO Yongjian, LI Xiaoming, HUANG Yanhao, et al. Real-time correction method for overloaded lines based on quasi-steady-state sensitivity and correction cost minimization[J]. Power

- System Protection and Control, 2020, 48(23): 1-10.
- [23] 顾雪平, 张尚, 王涛, 等. 安全域视角下的有功安全校正优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 17-24.
GU Xueping, ZHANG Shang, WANG Tao, et al. Optimization control strategy for active power correction from perspective of security region [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 17-24.
- [24] 赵晋泉, 叶君玲, 邓勇. 直流潮流与交流潮流的对比分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 147-152.
ZHAO Jinquan, YE Junling, DENG Yong. Comparative analysis on DC power flow and AC power flow [J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 147-152.
- [25] 李敏, 陈果, 沈大千, 等. 基于改进凝聚层次聚类算法的变压器绕组及铁心故障诊断研究[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 236-242.
LI Min, CHEN Guo, SHEN Daqian, et al. Research on fault diagnosis of transformer winding and core based on the improved agglomerative hierarchical clustering algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 236-242.
- [26] 郑乐, 徐青山, 冯小峰. 基于层次聚类算法与ISA-LSSVM的短期负荷预测研究[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(5): 51-57.
ZHENG Le, XU Qingshan, FENG Xiaofeng. Short-term load forecasting based on hierarchical clustering algorithm and ISA-LSSVM [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(5): 51-57.

作者简介:



王业

王业(1997),男,硕士在读,研究方向为电力系统安全稳定控制(E-mail:ycwangye@163.com);

徐伟(1982),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统稳定分析与控制相关工作;

徐遐龄(1980),女,博士,研究员级高级工程师,从事电网调度运行与控制相关工作。

An online decision-making method for the overload preventive control of transmission equipment based on the control objects relaxation

WANG Ye¹, XU Wei², XU Xialing³, ZHENG Liang², LI Tianran¹, XIAO Dajun³

(1. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210034, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China)

Abstract: The preventive control strategy can be solved quickly and effectively through the linear programming model based on active power sensitivity. However, the active power sensitivity obtained by the DC power flow method ignores the influence of voltage and network loss, which makes the control strategy checked by AC power flow difficult to meet the accuracy requirement. For this reason, an online decision-making method for overload preventive control of transmission equipment based on the control objects relaxation is proposed. Firstly, the key equipment is determined by overload security margin, and the active power sensitivity of adjusting measures to key equipment under different post-fault operating conditions is calculated. Secondly, the active power adjusting measures are clustered. Thirdly, a linear programming model for overload preventive control online decision-making is established. Finally, the active power limit of key equipment is relaxed according to the active power accuracy of preventive control, and the search direction of the optimal solution is determined by AC power flow calculation. The correctness and effectiveness of the proposed method are verified through the analysis of the actual power grid.

Keywords: overload of transmission equipment; overload preventive control; online decision-making; active power sensitivity; linear programming; clustering analysis

(编辑 钱悦)