

输电断面的有功安全预防-校正负荷调整算法

钟贵和¹, 王星华¹, 甘德树², 彭显刚¹

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006; 2. 广东电网公司珠海供电局, 广东 珠海 519000)

摘要: 当输电断面支路出现重载时, 应启动预防控制措施, 避免线路过载; 当切除过载线路可能引发输电断面连锁跳闸时, 应启动过载校正措施, 消除支路过负荷; 必须切负荷时, 应尽量减少切负荷量。采用原-对偶内点法求解非线性规划模型, 获得消除支路过负荷的控制方案。为了将有功校正算法应用于机组调整能力有限的地区电网, 将有功校正的主要调整对象扩展到负荷节点。依据负荷节点对降低越限支路和重载支路潮流的综合作用提出综合灵敏度概念, 并根据该概念确定加减负荷节点。利用反向配对技术, 模拟负荷在送电端或受电端内的相邻节点间转移, 达到消除支路过负荷的目的。针对某地区电网进行仿真计算, 表明所提出控制算法的有效性。

关键词: 输电断面; 安全校正; 综合灵敏度; 负荷调整; 原对偶内点法

Load adjusted algorithm on active power prevention-correction of transmission section

ZHONG Gui-he¹, WANG Xing-hua¹, GAN De-shu², PENG Xian-gang¹

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation, Zhuhai 519000, China)

Abstract: In case of heavy load in transmission section, preventive controls should be taken to avoid transmission line overload. In case that the removal of overload lines can cause cascading trip, power correction should be executed. Load shedding should be minimized if needed. The paper applies prime-dual interior point method to solve nonlinear programming model and achieve adjustment scheme. In order to apply active power correction algorithm to the regional network where generators adjustment is limited, the major adjustment objects extend to PQ bus. According to the combined influence on the overload lines and close-to-limit line, an integrative sensitivity index is presented to ascertain whether a bus load should be increased or decreased. The equal and opposite adjustment in pairs is introduced to simulate that loads migrate in limited area, on this account transmission line overload is eliminated. The simulation results of a local grid show that the proposed algorithm is feasible.

Key words: transmission section; active power correction; integrative sensitivity; PQ bus adjustment; prime-dual interior point method

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0015-06

0 引言

“8·14”美加大停电事故后, 世界各地大停电事故仍时有发生^[1-2], 引发了世界范围内对跨区域电网有功安全控制的持续研究热潮^[3-6]。一系列事故分析表明^[1-2]: 电力系统大停电事故大多遵循相同的演化模式, 即跨区域输电断面发生故障, 导致潮流大范围转移, 并引发连锁过载跳闸, 最终造成大面积停电。然而, 一般的输电断面支路过载是由不平衡的断面功率分布引起的, 因此当输电断面稳定运行裕度不足时, 应启动有功安全的预防控制; 当断面支

路停运可能导致相关支路过载时, 应启动过载校正, 避免相关输电线路发生连锁跳闸^[7-8]。

目前, 有功安全校正方法主要有灵敏度法^[3]、优化规划法^[4-6]和智能算法^[9-10]。三类方法调整的对象均以机组出力为主, 负荷节点调整仅考虑切负荷措施。这些算法适用于具有电厂调度权的省级以上调度中心, 但是在地区电网内部, 通常可控机组数量有限或不具备电厂调度权限, 就只能通过压减负荷来消除过载, 因此这些电网的运行方式部门必须为调度部门提供各断面的功率输送极限值^[11-13]。

实际上, 电网中负荷节点调整除了作为切负荷措施外, 还有一定的功率校正能力, 如将负荷转移到相邻站点可以在一定程度上达到均衡输电断面潮流

并实现安全校正的目的。因此,本文面向地区电网调度中心的实际情况,将功率校正调整对象扩展到负荷节点,运用综合灵敏度对其进行筛选,确定加负荷节点和减负荷节点,重新构建有功功率校正的预防控制及过载校正控制模型,应用原-对偶内点法求解,并通过某地区网络的仿真结果证明其有效性。

1 有功安全校正控制建模

1.1 安全校正目标函数模型

安全控制模型分为预防控制模型和过载校正模型。预防控制数学模型通过消除重载线路,均衡断面线路潮流,从而避免线路过载;过载校正模型则在切负荷量最小的目标下,调整负荷节点的有功注入,消除线路过载,同时保证不出现新的过载线路。

1.1.1 预防控制目标函数

设 ΔP_i^+ 为负荷节点 i 增加的负荷量, ΔP_j^- 为负荷节点 j 减少的负荷量,且均为正值。预防控制优化模型以最小调整量作为目标函数,即

$$\min \sum_{i \in L_+} \Delta P_i^+ + \sum_{j \in L_-} \Delta P_j^- \quad (1)$$

式中: L_+ 为所有加负荷节点的集合; L_- 为所有减负荷节点的集合。

1.1.2 过载校正目标函数

设 L_{2+} 、 L_{2-} 分别为输电断面受电端加负荷节点集和减负荷节点集,则过载校正模型的目标函数为

$$\min \left| \sum_{i \in L_{2+}} \Delta P_i^+ - \sum_{j \in L_{2-}} \Delta P_j^- \right| \quad (2)$$

系统处于紧急状态时,需进行有功校正,甚至需要切负荷,因此过载校正模型以最小切负荷量作为目标函数。

1.2 优化控制变量选择与设置

安全校正优化计算的变量是负荷节点的负荷调整量,需要考虑两个问题:1) 哪些负荷节点参与调整;2) 负荷节点的负荷调整量大小。文献[3-5]定义了综合灵敏度,以该指标的正负确定调控机组及其调整次序,本文借鉴其思路,提出针对负荷节点的综合灵敏度概念,利用反向等量调整技术,模拟负荷在节点间转移。

1.2.1 加减负荷节点选择

一般而言,均衡的输电断面潮流分布具有较好的安全性,即当输电断面受电端的总负荷增加时,如果新增的潮流能优先分配到冗余度较大的支路上,则可以保持输电断面较大的整体安全裕度,据此提出综合灵敏度的概念:节点的综合灵敏度为节点对断面线路及其他过载支路的灵敏度加权代数

和,定义为

$$I_{si} = \sum_{n \in L_{C1}} S_{ni} - \sum_{m \in L_{C2}} S_{mi} \quad (3)$$

式中: S_{ni} 、 S_{mi} 为线路 n 、 m 的有功负载分别对节点 i 负荷的灵敏度^[5-7]; L_{C1} 为过载线路和负载率大于输电断面线路负载率均值的线路集合; L_{C2} 为负载率小于或等于输电断面线路负载率均值的线路集合; I_{si} 为节点 i 的综合灵敏度,该灵敏度值越大说明减少节点负荷趋于优先降低重载线路潮流;反之,灵敏度值越小说明增加该节点负荷趋于优先增加轻载线路潮流。

由于输电断面将可调负荷节点划分为两片区域,需分别求两个节点集的综合灵敏度均值。如果节点的综合灵敏度大于其所在区域负荷节点的综合灵敏度均值,那么将该节点设为减负荷节点,否则,该节点为加负荷节点。

1.2.2 反向等量配对调整法

传统的有功安全校正算法均以反向等量配对法^[6]来获得调整方案,即为每一个加出力的机组寻找一个与之配对的减出力机组,且每一配对机组加减出力相等。将其应用延伸到负荷的配对调整:本文依据过载断面将可调负荷节点集划分为送电端、受电端两个负荷转移区域,并假设负荷可在同一区域内的任意两节点间实现转移,而不能在两区域节点之间转移,且设定单个节点的最大转出负荷量上限为该节点现有负荷的 20%。确定加减负荷调控节点后,通过求解预防、校正控制模型获得各可调节点的加减负荷量。在不切负荷的情况下,优先对同一负荷区域中灵敏度差值大的加减负荷节点进行反向等量配对调整;在必须切负荷时,则取消输电断面受电端负荷等量配对调整的约束。

节点等量加减负荷的过程,也就是将负荷从灵敏度较大的节点转移到灵敏度较小节点,利用两节点间的灵敏度差,实现降低越限支路潮流的目的。

1.3 等式约束条件

在确定了优化过程中负荷加减的策略后,借助断面支路潮流对节点负荷的灵敏度,可以在每一次优化计算的迭代过程中通过约束条件设定负荷增减量的大小。

1.3.1 消除支路越限的负荷调整约束

安全校正模型中求解以消除支路越限为终止条件,因此支路有功的校正量应与支路越限量相等,即

$$\sum_{j \in L_-} S_{lj} \Delta P_j^- - \sum_{i \in L_+} S_{li} \Delta P_i^+ = \Delta P_l \quad l \in C_l \quad (4)$$

式中: C_l 为越限支路集合; ΔP_l 为越限集合中线路 l

的有功功率越限量, 恒大于零; S_{li} 、 S_{lj} 为线路 l 的有功负载分别对节点 i 、节点 j 负荷的灵敏度。该灵敏度值为正说明增加 (减少) 该节点负荷会引起线路 l 的负载增加 (减少); 灵敏度值为负则说明增加 (减少) 该节点负荷, 线路 l 的负载将减少 (增加)。

在预防控制模型中, C_1 为输电断面支路负载率大于 90% 的线路集合, ΔP_l 为线路 l 距离重载的有功越限量; 而在过载校正模型中, C_1 为负载率大于 1 的输电断面支路集, ΔP_l 为线路过电量。

1.3.2 负荷调整总量的等式约束

在预防控制中, 负荷调整是模拟负荷在指定区域内转移, 因此调整前后负荷的总量应保持不变; 在不得不切负荷时, 仅对输电断面受电端进行切负荷操作, 送电端负荷总量不变。

$$\sum_{i \in L_{1+}} \Delta P_i^+ - \sum_{j \in L_{1-}} \Delta P_j^- = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i \in L_{2+}} \Delta P_i^+ - \sum_{j \in L_{2-}} \Delta P_j^- = 0 \quad (6)$$

式中: L_{1+} 为输电断面送电端加负荷节点集合; L_{1-} 为送电端减负荷的节点集; 同理, L_{2+} 为断面受电端加负荷节点集; L_{2-} 为受电端减负荷节点集。

式 (5)、式 (6) 分别表示调整后输电断面送电端、受电端加减的负荷总量相等。

1.4 不等式约束

1.4.1 非越限支路的不等式约束

有功安全校正在消除越限支路的同时, 应保证其他非越限支路不越限, 即负荷调整对非越限支路的有功校正量应小于其安全冗余量, 如式 (7) 所示。

$$\sum_{i \in L_{k+}} S_{ki} \Delta P_i^+ - \sum_{j \in L_{k-}} S_{kj} \Delta P_j^- \leq \Delta P_k \quad k \in C_k \quad (7)$$

式中: k 为非越限支路; ΔP_k 为线路 k 的有功功率越限量; S_{ki} 、 S_{kj} 与 S_{li} 、 S_{lj} 含义类同。

在实际电网中, 非越限支路不等式约束的规模可能很大, 为了减少约束条件的个数, 提高计算速度, 一般设定维数较低的约束集 C_k 。通常过载有功校正中将大于热极限电流 90% 的支路作为约束集^[14], 或将过载线路所在输电断面的所有支路作为约束集^[4]。前者约束集过于狭小, 而后者过于保守。基于以上两种考虑, 本文重新对约束集进行定义:

在预防控制模型中, C_k 包含重载支路外及负载率大于等于断面平均负载率的线路, 当输电断面的平均负载率大于 60% 时, 取整个输电断面线路作为约束集。在过载校正模型中, C_k 包含过载支路及负载率大于或等于断面平均负载率的线路, 当输电断面的平均负载率大于 70% 时, 取整个输电断面的线路作为约束集。

1.4.2 负荷调整量的上下界约束

由于供电区域和配网结构的限制, 负荷通常只能在相邻站点间转移, 转移量则根据配电网中合环点的选择来控制, 因此本文将负荷节点的最大可增加负荷量及其最小可减少的负荷量设定为其现有负荷的 20%, 且节点负荷可转移的范围为断面邻近的站点。

$$0 \leq \Delta P_i^+ \leq P_{imax} - P_i \quad i \in L_+ \quad (8)$$

$$0 \leq \Delta P_j^- \leq P_j - P_{jmin} \quad j \in L_- \quad (9)$$

式中: P_{imax} 为节点 i 的最大供电负荷; P_{jmin} 为节点 j 的最小供电负荷。

1.5 优化控制模型的集成与求解

预防控制模型由式 (1)、式 (4) ~ 式 (9) 组成; 过载校正模型由式 (2)、式 (4)、式 (5)、式 (7) ~ 式 (9) 组成。本文采用原对偶内点方法求解输电断面安全的预防-校正控制模型。

原对偶内点法因具有计算快速、鲁棒性好、处理病态能力强等优点而被广泛地应用于求解电力系统的各种优化问题^[15-20]。当前求解非线性规划问题的程序丰富且功能强大, 本文以 Knitro 软件中的内点法求解。

2 算法流程

本文算法主要以重载时的预防控制和过载时的过载校正连环保护输电断面, 避免过载跳闸及其连锁跳闸的发生。由于过载校正模型可以通过切负荷来消除过载, 因此必定能获得调整方案。而预防控制算法则可能因负荷调节能力有限而得不到消除支路重载调整方案, 因此需要设定最大循环次数 K 。算法流程图如图 1。

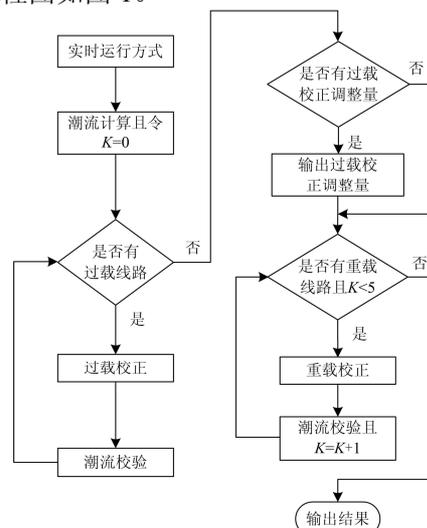


图 1 预防-校正控制算法流程图
Fig. 1 Flow chart of algorithm on active power prevention-correction

3 算例仿真

为了检验本算法的有效性, 本文以某地区电网(如图 2)夏大运行方式为基础数据, 基于 Matlab 编写程序, 通过一个过载算例和一个重载算例分析验证。

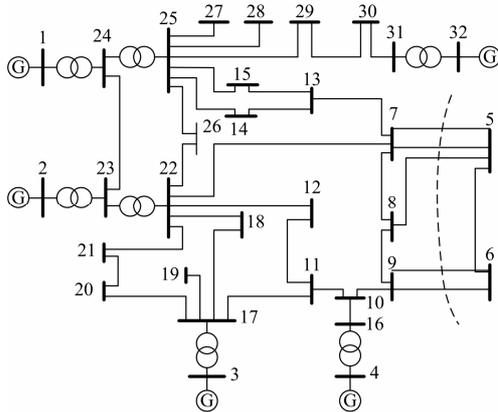


图 2 某地区电网接线图

Fig. 2 Power grid diagram of a local grid

3.1 过载校正算例仿真

设 7-5 乙线停运, 且支路 8-5 过载, 应用图论法^[21]快速识别出断面相关的支路, 即 7-5 甲线和 9-6 甲乙线三回线路, 并选定邻近输电断面的可控负荷节点 5、6、7、8、9、10、11、13、14, 具体的输电断面潮流信息如表 1。

表 1 输电断面负载信息

Table 1 Load rate of transmission section

| 支路 | 负载率 | 安全极限 | 冗余量 |
|--------|-------|------|--------|
| 8-5 | 1.078 | 1 | -0.078 |
| 7-5 甲线 | 0.851 | 1 | 0.149 |
| 9-6 乙线 | 0.617 | 1 | 0.383 |
| 9-6 甲线 | 0.609 | 1 | 0.391 |

由具体潮流信息可知: 过载校正模型中的越限集为支路 8-5, 约束集为支路 7-5 甲线。通过计算, 得到越限集和约束集支路对节点负荷的灵敏度。据公式(3)计算各负荷节点的综合灵敏度, 并通过比较节点的综合灵敏度和所在区域综合灵敏度均值的大小确定加减负荷节点属性, 如表 2。

由于节点 9 的负荷可调量较小, 因此不参与调节。在机组不参与调节的情况下, 求解过载校正模型得各节点的调整量 ΔP (详见表 2), 按区域内节点之间综合灵敏度差值大的优先进行反向等量配对的原则, 获得负荷调节的控制方案: 从节点 10 转移 38.4 MW 负荷到节点 7; 从节点 11 转移 29.7 MW 负荷到节点 8, 同时转移 18.7 MW 负荷到节点 7;

另外从节点 5 转移 70.4 MW 负荷到节点 6。调整后表 1 中输电断面四回线路的负载率分别为 0.999、0.811、0.681、0.671, 所以该方案是可行的。

表 2 灵敏度及加减负荷节点信息

Table 2 Sensitivity and PQ bus information

| 节点 | S_{ij} | | | | I_{si} | 属性 | ΔP /MW |
|-----|----------|----------|----------|----------|----------|----|----------------|
| | 8-5 | 7-5 甲 | 9-6 甲线 | 9-6 乙线 | | | |
| 5 | 0.2697 | 0.4238 | 0.0761 | 0.0772 | 0.54022 | - | -70.4 |
| 6 | 0.2332 | 0.2775 | 0.1885 | 0.1912 | 0.1310 | + | 70.4 |
| 100 | 0.1673 | 0.1290 | -0.15222 | -0.15444 | 0.6029 | - | -38.44 |
| 11 | 0.0807 | 0.0619 | -0.0734 | -0.0744 | 0.2904 | - | -48.2 |
| 14 | -0.0356 | -0.0280 | 0.0307 | 0.0311 | -0.1254 | + | 0 |
| 13 | -0.0417 | -0.0331 | 0.0359 | 0.0364 | -0.1471 | + | 0 |
| 8 | 0.1155 | -0.2186 | 0.0444 | 0.0450 | -0.1925 | + | 29.7 |
| 7 | -0.05600 | -0.04422 | 0.0484 | 0.0491 | -0.19788 | + | 56.9 |

注: 表中属性一列, “+”表示该节点为加负荷节点, “-”表示该节点为减负荷节点, 下表相同。

结果表明: 利用综合灵敏度选取加减负荷节点, 并通过反向等量配对技术, 模拟局部负荷的重新分配, 有效地改善了输电断面潮流, 在机组不参与调节时也能消除支路越限, 从而避免了切负荷。

3.2 预防控制算例仿真

设 7-5 乙线停运, 且支路 8-5 重载, 与上算例相同, 快速搜索断面支路及邻近负荷节点。具体的输电断面潮流信息如表 3。

表 3 输电断面负载信息

Table 3 Load rate of transmission section

| 支路 | 负载率 | 安全极限 | 冗余量 |
|--------|-------|------|--------|
| 8-5 | 0.945 | 0.9 | -0.045 |
| 7-5 甲线 | 0.757 | 0.9 | 0.243 |
| 9-6 乙线 | 0.568 | 0.9 | 0.432 |
| 9-6 甲线 | 0.560 | 0.9 | 0.440 |

由具体潮流信息可知: 预防控制模型中的越限集为支路 8-5, 约束集也是支路 7-5 甲线。通过计算, 得到越限集和约束集支路对节点负荷的灵敏度。据式(3)计算各负荷节点的综合灵敏度 I_{si} , 并通过比较节点的综合灵敏度和所在区域综合灵敏度均值的大小确定加减负荷节点属性, 如表 4。

节点 9 的负荷可调量小于最低限值, 因此不参与调节。在机组不参与调节的情况下, 求解预防控制模型得各节点调整量 ΔP (详见表 4), 得到负荷调节的控制方案: 从节点 5 转移 93.3 MW 负荷到节点 6。通过潮流验证, 调整后表 2 中四回线路的负载率分别为 0.899、0.742、0.599、0.591, 线路重载消除, 所以该方案是可行的。

算例结果表明: 在地方电网无权调动电厂出力

的情况下, 也能通过实时的预防控制措施, 尽量避免支路过负荷, 从而保证系统的安全稳定运行。

表 4 灵敏度及加减负荷节点信息

Table 4 Sensitivity and PQ bus information

| 节点 | S_{ij} | | | | I_{si} | 属性 | $\Delta P/\text{MW}$ |
|----|----------|---------|---------|---------|----------|----|----------------------|
| | 8-5 | 7-5 甲 | 9-6 甲线 | 9-6 乙线 | | | |
| 5 | 0.2750 | 0.4294 | 0.0776 | 0.0787 | 0.5480 | - | -93.3 |
| 6 | 0.2358 | 0.2797 | 0.1902 | 0.1930 | 0.1323 | + | 93.3 |
| 10 | 0.1675 | 0.1292 | -0.1522 | -0.1544 | 0.6033 | - | 0 |
| 11 | 0.0809 | 0.0620 | -0.0734 | -0.0745 | 0.2907 | - | 0 |
| 14 | -0.0355 | -0.0279 | 0.0307 | 0.0312 | -0.1253 | + | 0 |
| 13 | -0.0416 | -0.0329 | 0.0360 | 0.0365 | -0.1470 | + | 0 |
| 8 | 0.1156 | -0.2185 | 0.0445 | 0.0451 | -0.1924 | + | 0 |
| 7 | -0.0559 | -0.0440 | 0.0485 | 0.0492 | -0.1977 | + | 0 |

4 结论

为了提高输电断面的安全稳定性, 本文提出输电断面有功安全的预防-紧急实时控制算法, 为了扩大该算法的适用范围, 本文进行了以下改进:

1) 把负荷节点作为有功安全校正的主要调整对象, 应用反向等量配对技术, 模拟现实调度中的负荷转移。

2) 为更好发挥负荷节点的调节能力, 提出均衡越限支路所在的输电断面潮流的综合灵敏度, 并以此判断出加减负荷节点。

3) 为了减少非线性规划的约束条件, 提升非线性规划的计算的速度, 对越限输电断面的冗余度进行评估, 并以此选择约束条件。

通过对某地区电网的计算仿真, 验证了本算法的有效性。

参考文献

- [1] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 167-174.
TANG Yong, BU Guang-quan, YI Jun. Analysis and lessons of the blackout in Indian Power Grid on July 30 and 31, 2012[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 167-174.
- [2] 方勇杰. 美国“9.8”大停电对连锁故障防控技术的启示[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 1-7.
FANG Yong-jie. Lessons from September 8, 2011 Southwest America blackout for prevention and control of cascading outages[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 1-7.
- [3] 张保会, 姚峰, 周德才, 等. 输电断面安全性保护及其

关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 1-7.

ZHANG Bao-hui, YAO Feng, ZHOU De-cai, et al. Study on security protection of transmission section and its key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 1-7.

- [4] 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 Lin-yan, HAO Zhi-guo, ZHANG Bao-hui, 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.

- [5] 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 Lin-yan, ZHANG Bao-hui, HAO Zhi-guo, et al. Fast control algorithm based on integrative sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 46-49.

- [6] 邓佑满, 黎辉, 张伯明, 等. 电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 5-8.

DENG You-man, LI Hui, ZHANG Bo-ming, et al. Adjustment of equal and opposite quantities in pairs for strategy of active power security correction of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 5-8.

- [7] 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): 55-59.

ZHANG Xiao-bai, GAO Zong-he, QIAN Yu-mei, 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): 55-59.

- [8] 张保会. 广域动态信息条件下电网安全紧急控制的研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8): 1-8.

ZHANG Bao-hui. Study on network security, stability and emergency control system based on wide area dynamic information[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(8): 1-8.

- [9] WANG Peng-xiang, LIU Wen-ying, LIU Zheng-yi. Application of machine learning methods in active power

- security correction of power system[C] // Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on, Wuhan, China, June 25-27, 2010: 476-479.
- [10] CHEN Yun-ping, YE Jian. Active power security correction in power market using genetic algorithms[C] // Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on, 2002, 2: 933-937.
- [11] 任国威, 赵娟, 任瑞. 提高信阳电网与主网受电断面输送极限研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 126-129.
REN Guo-wei, ZHAO Juan, REN Rui. Research of enhancing transmission interface capacity between Henan and Xinyang networks[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 126-129.
- [12] 王艳玲, 韩学山, 周晓峰. 基于扩展潮流的输电断面最大传输能力[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 20-24, 31.
WANG Yan-ling, HAN Xue-shan, ZHOU Xiao-feng. The total transfer capability of cross-section of transmission line based on expanded power flow[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 20-24, 31.
- [13] 张晓东, 陈迁, 余晓鹏, 等. 河南电网输电能力可信性风险评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 52-57, 64.
ZHANG Xiao-dong, CHEN Qian, YU Xiao-peng, et al. Study on credibility theory-risk evaluation of Henan grid transfer capability[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 52-57, 64.
- [14] 吴际舜, 侯志俭. 利用带上、下界变量的线性规划法求解有功安全校正问题[J]. 电力系统自动化, 1985, 8(1): 12-20.
- [15] 柳进, 常修猛, 柳焯. 内点法在偶对潮流优化中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(5): 29-33.
LIU Jin, CHANG Xiu-meng, LIU Zhuo. Application of interior point method in optimization of coupling pair power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(5): 29-33.
- [16] 钱科军, 袁越, 文学鸿. 基于原-对偶内点法的复杂电力系统电压崩溃校正控制[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 27-31.
QIAN Ke-jun, YUAN Yue, WEN Xue-hong. Corrective control for voltage collapse of complex power system based on primal-dual interior point method[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 27-31.
- [17] 余娟, 颜伟, 徐国禹, 等. 基于预测-校正原对偶内点法的无功优化新模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 146-151.
YU Juan, YAN Wei, XU Guo-yu, et al. A new model of reactive optimization based on predictor corrector primal dual interior point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 146-151.
- [18] 邸弢, 李华强, 范锴. 基于奇异值分解和内点法的交直流系统无功优化[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 158-163.
DI Tao, LI Hua-qiang, FAN Pei. Reactive power optimization of AC/DC power system based on singular value decomposition and interior point method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 158-163.
- [19] 黎静华, 韦化. 基于模式搜索算法的电力系统机组组合问题[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 121-128.
LI Jing-hua, WEI Hua. A general pattern search algorithm for electric power system unit commitment problems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 121-128.
- [20] 缪楠林, 刘明波, 赵维兴. 电力系统动态无功优化并行算法及其实现[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 150-157.
MIAO Nan-lin, LIU Ming-bo, ZHAO Wei-xing. Parallel algorithm of dynamic reactive power optimization and its implementation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 150-157.
- [21] 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 De-cai, ZHANG Bao-hui, YAO Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 32-38.

收稿日期: 2013-10-12; 修回日期: 2013-12-11

作者简介:

钟贵和(1989-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统运行与控制研究; E-mail: 792531622@qq.com

王星华(1972-), 男, 副教授, 从事电力系统分析、电网优化与控制研究;

甘德树(1970-), 男, 工程师, 助理技术专家, 从事变电运行、电力系统调度、运行方式分析及管理工作。