

# 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

罗永建<sup>1</sup>, 李晓明<sup>1</sup>, 黄彦浩<sup>2</sup>, 徐紫薇<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 对过载线路潮流进行实时安全校正, 对提高电力系统的安全运行水平具有重要的意义。现有基于灵敏度的校正算法较少考虑发电机的校正成本, 不能够保证校正方案的经济性, 故提出了一种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。首先, 分析了发电量转移分布因子的不足及准稳态灵敏度的优势。接着, 利用综合灵敏度反映节点注入功率对所有过载线路功率的综合影响, 进而筛选出对消除线路过载最有效的控制发电机集合。最后, 建立以校正经济成本最低及参与校正发电机数目最少为目标函数的优化模型, 利用混合整数线性优化方法求解模型。得到的校正方案能够在消除线路过载的情况下保证发电机运行成本较低且参与校正发电机数量较少, 实用性更强。用 IEEE 39 及 IEEE 118 节点系统进行仿真计算, 结果表明算法的快速有效性。

**关键词:** 准稳态灵敏度; 综合灵敏度; 校正成本最小化; 混合整数规划

## Real-time correction method for overloaded lines based on quasi-steady-state sensitivity and correction cost minimization

LUO Yongjian<sup>1</sup>, LI Xiaoming<sup>1</sup>, HUANG Yanhao<sup>2</sup>, XU Ziwei<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** Real-time safety correction of overload line flow is of great significance for improving the safe operation level of power systems. Existing sensitivity-based correction algorithms rarely consider the correction cost of the generator and cannot guarantee the economics of the correction scheme. Therefore, a real-time correction method for overload lines based on quasi-steady-state sensitivity and correction cost minimization is proposed. First, the shortage of the power generation transfer distribution factor and the advantages of quasi-steady-state sensitivity are analyzed. Then, the comprehensive sensitivity is used to reflect the comprehensive influence of node injection power on the power of all overloaded lines, and then the most effective control generator set for eliminating line overload is screened. Finally, an optimization model is set up with the least correction economic cost and the least number of generators involved in the correction as the objective function, and the model is solved using a mixed integer linear optimization method. The obtained correction scheme can ensure that the generator runs at a lower cost under the condition of eliminating line overload, and the number of generators involved in the correction is small, and the practicability is stronger. The IEEE 39 and IEEE 118-node systems are used to simulate the calculations, demonstrating the fast and effective algorithm.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277134).

**Key words:** quasi-steady-state sensitivity; comprehensive sensitivity; minimize correction costs; mixed integer programming

## 0 引言

电力系统某些元件因故障退出运行后会改变电网的拓扑结构, 引发潮流转移, 这可能会导致一条

或多条线路发生过载。近年来, 世界范围内发生多起因线路过载跳闸引发大规模潮流转移的大停电事故, 造成了巨大的经济损失和严重的社会影响<sup>[1-6]</sup>。因此, 采取有效的安全校正措施消除线路过载对降低大停电事故风险及提高电力系统的安全稳定水平具有重要的意义。

目前校正方法主要有灵敏度方法<sup>[7-15]</sup>和优化规划方法<sup>[16-24]</sup>。灵敏度方法根据各节点对过载线路的灵敏度,选择出较优的控制节点,该方法具有计算速度快,能够较容易实现控制量较小且控制元件数量较少的优点,但该方法较少考虑校正的经济成本。优化类方法具有较好的全局性和经济性,但该方法计算量较大,控制量较多,在线应用困难。文献[11]基于发电量转移分布因子(Generation Shift Distribution Factor, GSDF)提出了最佳灵敏度方向用于控制节点的选择,能够快速选出对消除线路过载最有效的控制节点,但却未考虑控制节点调整的经济成本。文献[15]提出一种以最小控制数为目标的线路过载消除方法,提高了校正方案的实用性。文献[19]采用综合灵敏度反映各节点注入功率对过载及重载线路功率的影响,以调整量最小化为目标,求得的控制方案能够较大程度避免新的过载线路的出现。上述校正算法一般把调整量小或者控制数少作为校正目标,忽视了校正的经济性,很可能造成成本过高使算法不实用。文献[20]用功率灵敏度反映节点注入功率对线路功率的影响,以最小经济补偿为目标函数,提高了控制的经济性。目前文献综合考虑校正经济性、调整量及控制元件数量的文献还较少。

另外,目前安全校正方法在计算节点对过载线路的灵敏度时,一般采用的是GSDF方法。而GSDF计算与平衡机的选择有关,在应用于安全校正算法中,若平衡机不同得到的控制方案也可能不同<sup>[8,25]</sup>。文献[26]提出了准稳态灵敏度(Quasi-steady-state Generation Shift Distribution Factor, QGSDF)的概念,该灵敏度计算与平衡机的选择无关,能够较好地弥补GSDF的不足且更符合电力系统的运行特性。

综合上述分析,目前过载线路校正的算法中对以下技术要点综合考虑的还较少:①校正的成本;②参与校正的发电机数目;③算法计算复杂度。针对目前研究的不足,本文综合考虑上述技术要点,提出了一种基于准稳态灵敏度的过载线路实时校正方法。利用综合灵敏度对控制发电机集合进行筛选降低算法的复杂度;构建了以校正成本最低和参与校正的发电机数目最少为优化目标的优化模型,采用GUROBI对模型进行求解。以IEEE 39节点系统及IEEE 118节点系统进行仿真和分析,验证了模型的正确性和有效性。

## 1 灵敏度计算

### 1.1 准稳态灵敏度

基于灵敏度对过载线路有功潮流进行控制的方法,计算灵敏度时一般采用的是GSDF,其计算式为

$$S_{l-i} = \frac{X_{mi} - X_{ni}}{x_l} \quad (1)$$

式中: $S_{l-i}$ 为节点*i*对线路*l*的灵敏度; $X_{mi}$ 和 $X_{ni}$ 为节点电抗矩阵(即 $(\mathbf{B}'_0)^{-1}$ )中的元素; $m, n$ 为线路*l*两端节点编号; $x_l$ 为线路*l*的电抗值。 $S_{l-i}$ 的物理含义为节点*i*注入有功功率增加一个单位时,线路*l*上有功功率改变量。

虽然GSDF在安全校正中具有广泛的应用,但其存在如下不足<sup>[26-27]</sup>:①由于节点电抗矩阵计算和平衡节点有关,选取不同的平衡节点将得到不同的GSDF系数。这导致即使是相同的算法,在选取不同的平衡节点时得到的校正方案可能也不同<sup>[8,25]</sup>;②隐含地假定在新的稳态运行点,全系统的功率不平衡量是由平衡机承担,这与实际电力系统的运行情况不符。以GSDF为基础的有功校正算法,需要考虑平衡节点发电机是否越限,使算法复杂且不易理解;③平衡节点对所有线路的灵敏度系数为零,使平衡节点注入功率值无法成为控制变量。在系统调节能力不足时,为消除过载会造成切负荷。如果将容量大的平衡节点有功功率作为控制变量,可能避免切负荷情况的发生。

由于GSDF的如上不足,本文校正方法计算节点对过载线路灵敏度时采用准稳态灵敏度QGSDF。QGSDF系数与平衡节点的选取无关,且平衡节点对线路的灵敏度系数不为零,使平衡节点能够参与线路潮流控制。根据文献[26]的方法可得QGSDF系数矩阵计算方法。

$$\begin{cases} \mathbf{S}^R = \mathbf{S}\mathbf{F}_u \\ \mathbf{F}_u = \mathbf{I}_G - \alpha_G \mathbf{I}_G^T \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{S}^R$ 为QGSDF系数矩阵; $\mathbf{S}$ 为GSDF系数矩阵; $\mathbf{F}_u$ 为考虑电力系统准稳态响应的变换矩阵; $\mathbf{I}_G$ 为 $N_G \times N_G$ 阶单位矩阵,其中 $N_G$ 为发电机台数; $\alpha_G$ 为 $N_G$ 台发电机承担不平衡功率的承担系数; $\mathbf{I}_G$ 为 $N_G \times 1$ 维的全1列矢量。

文献[27]指出,变换矩阵 $\mathbf{F}_u$ 因电力系统不同的准稳态物理响应而不同,需要研究具体的电力系统来加以确定。本文根据自动发电控制的原理,以各发电机备用容量大小分配各发电机的承担系数 $\alpha_G$ ,进而确定 $\mathbf{F}_u$ 。第*i*台发电机承担不平衡功率系数计算如式(3)所示。

$$\alpha_i = (P_i^{\max} - P_i^0) / \sum_{i=1}^{N_G} (P_i^{\max} - P_i^0) \quad (3)$$

式中, $P_i^{\max}, P_i^0$ 分别为发电发电机*i*最大有功出力和当前有功出力。根据式(1)一式(3)可以得到QGSDF系数矩阵。

## 1.2 综合灵敏度计算

定义综合灵敏度的目的是从所有可控发电机中选择出对消除线路过载最有利的发电机集合。本文借鉴了文献[19]综合灵敏度的概念, 其综合灵敏度的计算如式(4)。

$$\begin{cases} S_i = \sum_{l \in T} (\varepsilon_l \times S_{l,i}) \\ \varepsilon_l = \Delta f_l / \sum_{k \in T} (\Delta f_k) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $S_i$  为节点  $i$  对过载线路的综合灵敏度;  $\varepsilon_l$  为过载线路  $l$  对应的权重;  $\Delta f_l$  为过载线路  $l$  的过载量;  $T$  表示过载线路集合。可以看出, 各过载线路的权重与自身的过载量成正比。

$S_i$  绝对值越大时, 说明发电机  $i$  对消除线路过载能力越强。当  $S_i$  大于零时, 说明发电机  $i$  需要减小出力来消除过载; 当  $S_i$  小于零时, 说明发电机  $i$  需要增加出力来消除过载。

## 2 控制发电机集合筛选

电力系统中, 可用于消除线路过载的发电机数量很多。如果线路过载发生, 系统运行人员希望只调整少量发电机来消除过载, 同时保证调整的成本较低。因此, 需要从所有可控发电机中选取对消除线路过载最有效且成本低的发电机, 故提出了控制发电机集合概念。

传统基于灵敏度的校正算法以调整量最小为目标, 并没有考虑调整的经济性。这些方法在对控制发电机进行选择的时候仅仅考虑发电机对过载线路灵敏度大小的绝对值。如文献[19]根据发电机对过载线路的综合灵敏度大小进行调整优先级的分类, 此类方法选择的控制发电机未考虑发电机的校正成本, 故很难保证校正的经济性。因此, 从所有可控发电机中选出某些综合灵敏度大且经济性较好的机组是有必要的。

本文对控制发电机集合的筛选方法不仅考虑发电机对过载线路的灵敏度, 同时还考虑发电机校正的经济性。首先根据发电机对过载线路的综合灵敏度绝对值大小对发电机进行排序, 接着选取足量的发电机保证校正的经济性。具体方法如下。

### 2.1 排序

根据发电机对过载线路综合灵敏度对发电机消除线路过载能力的大小进行排序。发电机集合记为  $G = \{1, 2, \dots, N_G\}$ , 发电机对过载支路的综合灵敏度记为  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{N_G}\}$ 。对  $S$  中元素的绝对值进行降序排列, 得到  $S' = \{S_{i_1}, S_{i_2}, \dots, S_{i_{N_G}}\}$ , 其下标值的顺序即为各发电机对消除线路过载能力的排序, 将

该顺序记为  $G' = \{i_1, i_2, \dots, i_{N_G}\}$ 。

### 2.2 选取

选取的控制发电机集合应满足两个要求: 1) 集合内发电机在调整容量范围内能够消除线路过载; 2) 包含灵敏度不够大但是调整成本较低的发电机。第一个要求满足消除过载约束, 第二个要求用于满足最终校正方案成本较低。

假设排序得到的前  $m$  台发电机已经能够满足要求 1。但为了满足要求 2, 需选取适量大于  $m$  的  $k$  台发电机作为控制发电机集合, 记为  $Q = \{i_1, i_2, \dots, i_m, \dots, i_k\}$ 。

适量的含义为, 控制发电机集合中发电机数量不能过多也不能太少, 过多会使后文校正优化模型变得复杂, 过少会使经济性较差。由于排序是按照灵敏度的绝对值大小从大到小排列的, 因此, 有些调整成本较高但灵敏度大的发电机排在了前边。但是, 在实际的校正过程中, 并不希望此类发电机参与校正, 因此需要使所选的发电机消除过载的能力大于过载量, 来放宽条件, 使调整成本低的发电机入选集合  $Q$ 。综上, 建立控制发电机集合筛选的约束条件如式(5)所示。

$$\begin{cases} f_l^0 + \xi \sum_{i \in Q} S_{l-i} \Delta P_i \leq \bar{f}_l & \forall l \in T \\ (P_i^{\min} - P_i^0) \leq \Delta P_i \leq (P_i^{\max} - P_i^0) & \forall i \in Q \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $f_l^0$ 、 $\bar{f}_l$  分别表示过载线路  $l$  的初始潮流值和允许最大潮流值;  $\xi$  表示校正的裕度, 其取值范围为 0 到 1;  $\Delta P_i$  为发电机  $i$  的调整量。式(5)表示机组调整出力在满足调整出力上下限约束情况下能够消除线路, 且能够调整的过载量是当前过载量的  $1/\xi$  倍。

为满足本节所述的两个条件, 控制发电机集合筛选问题转变为求解最小的  $k$  值使式(5)表示的线性方程组有解的问题。本文采用二分法来确定  $k$  值。具体步骤如下: 步骤 1) 令  $k_{\min} = 1$ ,  $k_{\max} = N_G$ ; 步骤 2)  $k = N_G$  求解线性方程组, 若无解则输出没有满足条件的  $k$ , 否则下一步; 步骤 3) 令  $k = (k_{\min} + k_{\max})/2$ , 求解线性方程组, 如果有解, 则令  $k_{\min} = k_{\min}$ ,  $k_{\max} = k$ , 否则令  $k_{\min} = k$ ,  $k_{\max} = k_{\max}$ ; 步骤 4) 判断  $k_{\min} < k_{\max}$ , 则返回步骤 3), 否则输出  $k = k_{\max}$ 。根据二分法能够快速求得最小的  $k$  值, 使式(5)表示的线性方程组有解, 进而就迅速求得了控制发电机集合。需要说明的是, 此处得到的控制发电机集合中的发电机是否参与校正, 还需要后边的校正优化模型来确定。比如说, 控制发电机集合中某发电机综合灵敏度很大, 但是校正成本过大, 那

么在后边的优化模型求解后, 该机组可能就不参与校正。

根据上述方法得到的控制发电机集合, 一方面保证了所有发电机在调整范围内能够消除过载; 另一方面, 包含调整成本低的发电机, 也能够保证最终校正方案成本较低。

### 3 校正优化模型

#### 3.1 目标函数

校正优化模型的目标是在满足消除线路过载等约束条件下, 通过合理调整发电机出力使系统总运行成本增加最少且参与校正的发电机数量尽可能得少。因此是多目标规划问题。

##### 1) 目标函数 1: 校正经济成本

对于校正的经济成本, 本文只考虑发电机的燃料费用改变量。假设第  $i$  台发电机的燃料费用函数为

$$C_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (6)$$

式中,  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  是发电机的成本系数。那么校正后系统的运行成本改变量, 即目标函数 1 如式(7)。

$$J_1 = \sum_{i \in G} C_i(P_i') - \sum_{i \in G} C_i(P_i^0) \quad (7)$$

式中:  $P_i^0$  为校正前发电机  $i$  的有功出力值;  $P_i'$  为校正后发电机  $i$  有功出力值。

##### 2) 目标函数 2: 参与校正发电机数量

$$J_2 = \sum_{i \in Q} \gamma_i \quad (8)$$

式中,  $\gamma_i$  表示发电机  $i$  是否参与调整, 参与调整时, 其值为 1, 不参与调整时, 其值为 0。

##### 3) 总目标函数表达

$$J = \tilde{J}_1 + \lambda J_2 \quad (9)$$

式中,  $\lambda$  表示目标函数 2 权重系数, 其值大于 0。 $\lambda$  值的含义为减少一台发电机愿意承担的校正成本增加量, 具体探讨放在参数  $\lambda$  设置小节。

#### 3.2 约束条件

校正优化模型的约束条件主要包括校正后消除线路过载约束和发电机出力调整上下限约束。两个约束分别表达为

$$f_l^0 + \sum_{i \in Q} S_{l-i} \Delta P_i \leq \bar{f}_l \quad \forall l \in T \quad (10)$$

$$\begin{cases} \gamma_i (P_i^{\min} - P_i^0) \leq \Delta P_i \leq \gamma_i (P_i^{\max} - P_i^0) & \forall i \in Q \\ \Delta P_i = 0 & \forall i \notin Q \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $f_l^0$  和  $\bar{f}_l$  分别为线路  $l$  的初始潮流值和允许的最大潮流值;  $T$  为过载线路的集合;  $Q$  为控制发电机集合。式(10)表示消除线路过载约束; 式(11)表示发电机出力上下限约束。

上述校正优化模型, 能够在保证线路过载消除

的同时, 使校正成本低及参与校正发电机数量较少。

#### 3.3 目标函数的线性化方法

从式(6)可以看出, 发电机的燃料费用是非线性的, 在进行优化求解时计算较复杂。本文对发电机燃料费用函数进行分段线性化来简化计算。根据文献[28-29]的线性化方法, 将发电机的燃料费用平均分成  $N$  段来线性逼近。发电机燃料费用曲线分段线性化的示意图如图 1 所示。

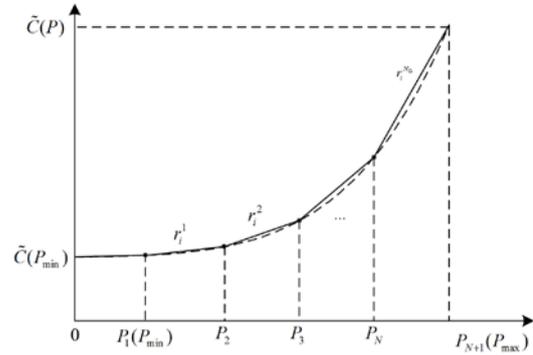


图 1 发电机燃料费用曲线分段线性化

Fig. 1 Piece-wise linearization of generator fuel cost curve

发电机燃料费用线性化后表示为

$$\tilde{C}_i(P_i) = a_i + b_i P_i^{\min} + c_i (P_i^{\min})^2 + \sum_{k=1}^N r_i^k P_i^k \quad (12)$$

其中

$$r_i^k = \frac{C(P_{i,fin}^k) - C(P_{i,ini}^k)}{P_{i,fin}^k - P_{i,ini}^k} \quad (13)$$

$$0 \leq P_i^k \leq (P_i^{\max} - P_i^{\min}) / N \quad (14)$$

$$P_i = P_i^{\min} + \sum_{i=1}^{N_c} P_i^k \quad (15)$$

式中:  $C$  和  $\tilde{C}$  分别表示燃料费用函数及其线性逼近函数;  $P_i^{\min}$  和  $P_i^{\max}$  分别表示发电机  $i$  最小和最大出力值;  $r_i^k$  表示第  $k$  段分段线的斜率;  $P_i^k$  为发电机  $i$  在第  $k$  段的出力值, 其大小由式(14)约束;  $P_{i,ini}^k$  和  $P_{i,fin}^k$  分别表示发电机  $i$  第  $k$  段最小和最大出力值。

对所有发电机燃料费用函数进行线性化处理, 进而对目标函数 1 进行线性化逼近, 表示为式(16)。

$$\tilde{J}_1 = \sum_{i \in G} (\tilde{C}(P_i') - C(P_i^0)) \quad (16)$$

式中:  $\tilde{J}_1$  表示目标函数 1 线性逼近后的函数。可以看出, 式(16)中后一项为常数, 在实际优化求解的过程中可以忽略。

#### 3.4 算法实现

通过线性化处理, 将优化模型从混合整数非线性

性规划转化为了混合整数线性规划问题, 采用 GUROBI 求解, 在 Matlab 平台上编程实现。图 2 给出了本文算法的流程图。

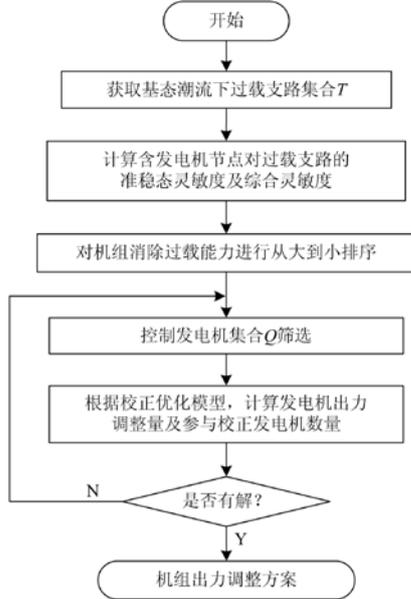


图 2 过载线路校正方法流程图

Fig. 2 Flow chart of the overload line correction algorithm

#### 4 参数设置

本文所提的过载线路校正方法有两个参数需要设置, 分别是控制发电机集合选择时的参数  $\xi$  和目标函数 2 的比重参数  $\lambda$ 。下面分别对这两个参数的赋值进行讨论。

##### 4.1 参数 $\xi$ 设置

式(5)中参数  $\xi$  值的大小, 决定了  $k$  值的大小, 间接确定了控制发电机集合中发电机的数量。从式(8)可以看出: 控制发电机集合中发电机数量较少的时候, 校正优化模型中表示发电机是否参与调整的 0-1 变量就少, 算法的复杂度也较小; 但是如果控制发电机集合中的数量很小, 就会因校正经济性较好的发电机没有包含在集合中而使校正的成本变高。因此需要选择适当的  $\xi$  值, 使控制发电机集合中发电机数量较为恰当, 一方面使模型复杂度较低, 计算快速, 另一方面保证校正的经济性。

为了讨论  $\xi$  值的大小对控制发电机集合中发电机的数量和校正成本的影响。设置如下的仿真场景: 基态情况下, IEEE 118 节点系统中线路 8-5 和线路 60-61 上有功率值为 -301.19 MW 和 -107.08 MW, 假设其热稳定极限分别为 241 MW 和 85.7 MW, 负载率都为 1.25。详细仿真方法为: 让  $\xi$  值在 0.2~1 之间以 0.04 的步长变化; 对应每个  $\xi$  值, 根据式(5)

选择控制发电机集合; 接着根据控制发电机集合, 在  $\lambda=0$  的情况下, 计算校正优化模型, 得到校正的成本。根据上述场景及仿真方法得到如图 3 的仿真结果。控制发电机集合中发电机的数量和校正成本随  $\xi$  变化的曲线分别记为  $h(\xi)$  和  $g(\xi)$ 。

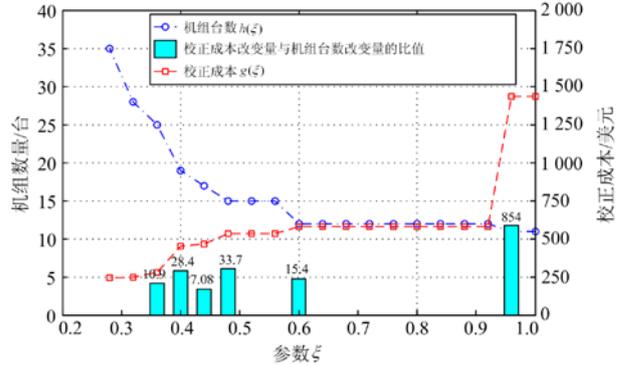


图 3 控制发电机集合中发电机数量及校正成本随参数  $\xi$  变化曲线

Fig. 3 Curve of the number of units in the control unit set and the correction cost with parameter  $\xi$

从图 3 中可以看出, 随着  $\xi$  的增加, 控制发电机集合中发电机的数量减小, 校正成本增加。如果  $\xi$  值接近 1, 那么校正成本就会太高; 如果  $\xi$  接近 0.2, 那么发电机数量过多就会使校正优化模型变复杂。下面对如何选出一个合适的  $\xi$  值, 使控制发电机集合中的数量较少且校正成本较低进行讨论。

图 3 中两条曲线中每个阶跃点的含义为发电机减小  $h(\xi_k) - h(\xi_k + \Delta\xi)$  台, 那么成本就会增加  $g(\xi_k + \Delta\xi) - g(\xi_k)$ , 其比值表示为式(17)。

$$\frac{g(\xi_k) - g(\xi_k + \Delta\xi)}{h(\xi_k + \Delta\xi) - h(\xi_k)} \quad (17)$$

对于每一个  $\xi_k$  计算式(17), 如果其值大于某较大阈值, 说明控制发电机集合中发电机台数减少一台会使成本增加很多, 就不应该再减少控制发电机集合中的发电机数量。此时对应  $\xi_k$  既能满足发电机数量不过多且校正经济性较好。从左到右搜索第一个满足该条件  $\xi_k$ , 该值能在发电机数量和校正成本之间进行很好的平衡。假如某较大阈值为 10, 那么就该仿真场景来说, 合适的  $\xi$  值即为 0.36。

按照上述仿真方法并通过大量的仿真表明, 图 3 对所有仿真场景适用。为了找到较为普适的  $\xi$  值, 设置如下的仿真场景: 在 IEEE 118 节点系统中任意选定两条基态潮流值大于 60 MW 的线路, 并假定这两条线路的过载量为 25%, 得到 630 种仿真场景; 接着使用上述的仿真方法找到每种场景下合适的  $\xi$

值；最后绘制  $\xi$  值的频数直方图和累计概率分布图如图 4 所示。

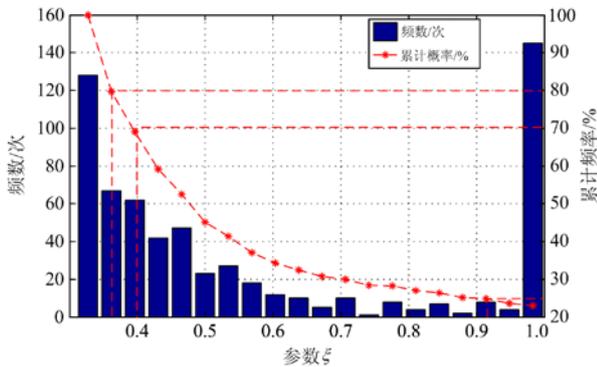


图 4 630 种仿真场景下合适的参数  $\xi$  频数分布直方图及累计概率分布图

Fig. 4 Frequency distribution histograms and cumulative probability distribution maps of suitable parameter  $\xi$  in 630 simulation scenarios

从图 3 中可以看出，假如选择  $\xi = 0.36$ ，该值在约 80% 的场景下，会选择过多的发电机使算法复杂；假如选择  $\xi = 0.92$ ，该值在约 75% 的场景下，会使校正的成本过大。很明显，这两种情况，都不能在发电机数量和校正成本做好平衡。如果更看重校正的经济性，可以选择较小的  $\xi$  值，反之可以选择较大的  $\xi$  值。

综合以上讨论，本文选择  $\xi$  值为 0.4，在 70% 的仿真场景下该值能使校正成本较低。

#### 4.2 参数 $\lambda$ 设置

为了给  $\lambda$  赋一个合理的值，首先了解  $\lambda$  的实际含义。因此进行如下仿真，仿真场景同 4.1 节，也是线路 8-5 和线路 60-61 过载。具体仿真方法为：取  $\xi$  值为 0.4，计算得到控制发电机集合；接着，设置  $\lambda$  的值从 1 到 60 变化以 1 的步长变化，求解校正优化模型，得到校正成本与参与校正发电机数量随  $\lambda$  变化的关系；进一步求校正成本改变量和发电机数量改变量的比值；最后，以发电机台数为横坐标绘制仿真结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出，参与校正发电机数量改变时，校正成本与参与校正发电机数量的比值接近等于参数  $\lambda$  的值。因此可以得出如下结论：参数  $\lambda$  值的实际含义为，为了减少一台参与校正的发电机愿意承担的经济成本。如果系统运行人员更看重校正的经济性，可以将参数  $\lambda$  设置的小一点；反之可以将参数  $\lambda$  设置的大一点。本文后边的算例仿真都设置  $\lambda$  的值为 10。

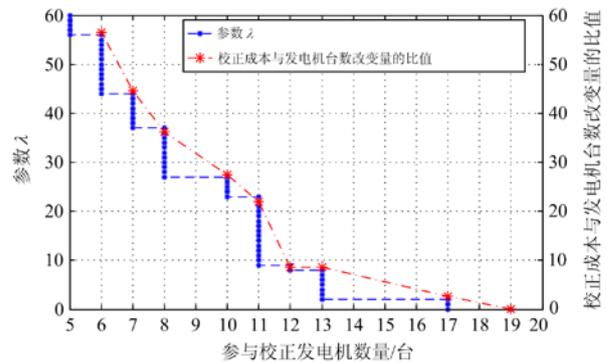


图 5 参与校正发电机台数和参数  $\lambda$  的关系图

Fig. 5 Curve of the number of generator units participated in the correction with parameters  $\lambda$

### 5 算例分析

将本文方法定义为方法 1，将基于 GSDF 的本文方法(即计算灵敏度时采用 GSDF 而不是 QGSDF)定义为 2，将文献[16]基于 GSDF 以调整量最小为优化目标的方法定义为方法 3。在 Matlab 中利用优化规划方法编程实现 3 种方法，当系统出现过载的时候，使用这三种方法制定校正方案。分别使用 IEEE 39 和 IEEE 118 节点系统对 3 种方法的参与校正发电机数量、校正成本、总调整量及计算时长四个方面验证本文所提方法的快速有效性。

#### 5.1 仿真 1

IEEE 39 节点系统其系统接线图如图 6 所示。IEEE 39 节点系统中，线路 4-14 和线路 16-24 上功率分别为 -301.19 MW 和 -107.08 MW，线路有功功率的参考方向为首节点指向末节点，假设其热稳定

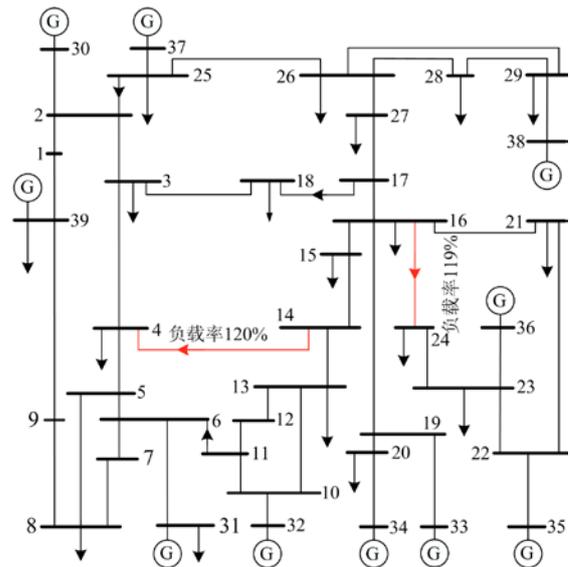


图 6 IEEE 39 节点系统

Fig. 6 IEEE 39-bus system

限制分别为 250 MW 和 90 MW, 负载率分别为 1.20 和 1.19。由于该系统的可控发电机数量只有 10 台, 是否对控制发电机集合进行筛选对算法复杂程度影响不大, 因此将所有机组都包含在控制发电机集合内。

表 1 给出了发电机节点对过载线路的灵敏度及综合灵敏度。利用三种方法求解校正方案得到的结果如表 2 所示, 三种方法的校正成本等指标如表 3 所示。

### 5.2 仿真 2

IEEE 118 节点系统含有 118 条线路和 54 台发电机。IEEE 118 节点系统中, 线路 8-5 和线路 60-61 上功率分别为-301.19 MW 和-107.08 MW, 线路有功功率的参考方向为首节点指向末节点, 假设其热稳定限制分别为 250 MW 和 90 MW, 负载率分别为 1.20 和 1.19。

表 1 发电机节点对过载线路的灵敏度

Table 1 Sensitivity of generator buses to overloaded lines

节点	准稳态灵敏度		综合灵敏度
	对 $I_{6-11}$	对 $I_{23-24}$	
36	-0.112 1	0.467 2	0.286 0
32	-0.491 5	-0.008 4	0.246 8
35	-0.112 1	0.344 1	0.225 7
31	0.269 4	-0.008 4	-0.141 6
39	0.113 1	-0.008 4	-0.061 9
34	-0.112 1	-0.008 4	0.053 1
33	-0.112 1	-0.008 4	0.053 1
38	-0.053 4	-0.008 4	0.023 1
37	-0.023 8	-0.008 4	0.008 0
30	-0.015 9	-0.008 4	0.004 0

表 2 仿真 1 中 3 种方法对应的校正方案

Table 2 Correction scheme corresponding to three

methods for simulation 1

节点	发电机调整量			
	方法 1	方法 2		方法 3
	平衡机 G31	平衡机 G31	平衡机 G39	平衡机 G39
36	-24.940 0	-24.940 0	-28.342 8	-77.135 3
31	0	0	-28.658 7	0
32	-51.595 6	-51.589 4	-68.001 4	-34.538 6
35	-70.416 4	-70.416 2	-65.825	0
39	50.711 0	50.711 0	0	111.573 9
30	42.891 4	42.891 4	78.251 4	0
37	0	0		0
38	53.339 5	53.333 2	83.908 2	0
33	0	0	0	0

表 3 仿真 1 中 3 种方法的校正成本等指标

Table 3 Correction cost and other indicators of three

methods for simulation 1

指标	方法 1	方法 2		方法 3
	平衡机 G31	平衡机 G31	平衡机 G39	平衡机 G39
Q 中发电机数量	10	10	10	—
参与校正发电机数量	6	6	6	3
校正成本	214.781 2	214.769 9	265.490 3	376.299 6
总调整量	293.893 9	293.881 2	324.329 3	223.247 8
耗时	0.400 3	0.410 6	0.380 3	0.065 6

表 4 给出了发电机节点对过载线路的灵敏度及综合灵敏度。利用 3 种方法求解校正方案得到的结果如表 5 所示, 3 种方法的校正成本等指标如表 6 所示。

根据仿真 1 和仿真 2 的结果得到如下结论。

1) 由表 3 和表 6 可知, 对比方法 1 和方法 3 得到的校正方案的各项指标可以发现, 方法 1 参与校正发电机数量和总调整量都略大于方法 3, 但经济成本却显著小于方法 3。方法 1 的校正成本与方法 3 校正成本的比值分别为 57% 和 37%。可见, 随着系统规模的增大, 方法 1 的经济优势更加明显。主要原因是系统规模增大, 可控机组增多, 不单以灵敏度为控制机组筛选的方法 1, 能够让更多校正经济成本低的机组参与调整。因此, 方法 1 得到的校正方案具有更高的实用价值。

2) 由表 3 和表 6 可知, 对两个不同规模的系统仿真, 方法 1 的计算时长都小于 1 s, 其计算时长并没有随系统规模的增大而迅速增大, 计算速度能够

表 4 发电机节点对过载线路的灵敏度

Table 4 Sensitivity of generator buses to overloaded lines

节点	准稳态灵敏度		综合灵敏度
	对 $I_{8-5}$	对 $I_{60-61}$	
4	-0.574 4	-0.002 5	-0.423 1
6	-0.524 6	-0.002 5	-0.386 4
1	-0.507 3	-0.002 5	-0.373 6
12	-0.464 2	-0.002 4	-0.341 8
8	0.302 7	-0.002 6	0.224 0
10	0.302 7	-0.002 6	0.224 0
15	-0.092 4	-0.002 0	-0.067 7
61	0.032 8	-0.156 0	0.065 1
19	-0.061 0	-0.001 9	-0.044 5
26	0.050 6	-0.002 9	0.038 1
18	-0.045 6	-0.002 2	-0.033 1
65	0.033 5	-0.014 1	0.028 4

表 5 仿真 2 中 3 种方法对应的校正方案  
Table 5 Correction scheme corresponding to three methods for simulation 2

节点	发电机调整量			
	方法 1	方法 2		方法 3
	平衡机 G69	平衡机 G69	平衡机 G113	平衡机 G69
4	33.735 6	0	0	35.170 9
6	0	35.596 9	24.392 2	0
1	0	0	0	0
10	-23.591 5	-25.970 0	-37.770 6	0
61	-33.754 7	-33.494 7	-39.275 81	-11.049 3
15	-20.880 0	-20.880 0	-20.880 0	0
65	79.284 4	79.541 5	73.524 3	100.000 0
19	-21.580 6	-21.580 6	0	0
18	-13.223 2	-13.223 2	0	0
69	0	0	0	-124.221 6

表 6 仿真 2 中 3 种方法的校正成本等指标  
Table 6 Correction cost and other indicators of three methods for simulation 2

指标	方法 1	方法 2		方法 3
	平衡机 G69	平衡机 G69	平衡机 G113	平衡机 G69
	Q 中发电机数量	15	12	13
参与校正发电机数量	7	7	5	4
校正成本	246.001 3	253.964 8	321.053 5	732.640 0
总调整量	226.050 0	230.286 9	195.842 9	146.220 2
耗时	0.758 3	0.817 4	0.713 3	0.058 5

满足实时应用的需求。通过大量仿真发现, 控制发电机集合中的发电机数量对方法 1 的计算速度影响较大, 但其数量并不随系统规模的增大而迅速增大。因此, 对于较大规模系统的线路过载校正, 本文方法 1 也能较快得到校正方案。

3) 由表 2 和表 5 可以看出, 方法 2 得到的校正方案会因平衡机的不同而不同。方法 3 因计算灵敏度采用 GSDF 也存在相同的问题。当选用的平衡机不同, 方法 2、方法 3 得到不同的校正方案虽然都能达到消除过载的要求, 但是却不易理解。另外, 方法 2、方法 3 中平衡机不能参与校正。相比于方法 2 和方法 3, 方法 1 不存在这样的问题, 再次验证本文方法的优越性。

## 6 结论

本文提出一种基于准稳态灵敏度的过载线路实时校正方法。利用综合灵敏度反映节点注入功率对

所有过载线路功率的综合影响, 进而选出对消除线路过载最有效的控制发电机集合, 降低了算法的复杂度。以校正经济成本最低及参与校正发电机数目最少为目标, 并利用混合整数线性优化方法求解得到校正方案。该方案能够在消除线路过载的情况下保证校正的经济性和实用性。经过大量仿真计算, 验证了本文方法的有效性。

本文所提方法综合考虑校正成本和参与校正发电机数量等因素, 使算法的实用性更强。但本文消除过载的措施只有调整发电机出力, 接下来将从把调整措施拓展到调整移相器、网络切换、切除负荷等来进行研究。

## 参考文献

- [1] 林伟芳, 孙华东, 汤涌. 巴西“11·10”大停电事故分析及启示[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 1-5.  
LIN Weifang, SUN Huadong, TANG Yong. Analysis and enlightenment of Brazil's “11·10” blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 1-5.
- [2] 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 Honglian, WANG Yu. A new method for identifying key transmission sections of power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(20): 71-75.
- [3] 易俊, 卜广全, 郭强. 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): 7-15.  
YI Jun, BU Guangquan, GUO Qiang. Analysis of the “3.11” blackout in Brazil and its implications for China's power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 7-15.
- [4] 宣晓华, 周野, 宋晓芳, 等. 基于系统与元件动态交互量化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.
- [5] 周剑, 罗添允, 李智勇, 等. 基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 31-38.  
ZHOU Jian, LUO Tianyun, LI Zhiyong, et al. Comprehensive evaluation of power failure based on improved extension analytic hierarchy process[J]. Power

- System Protection and Control, 2019, 47(3): 31-38.
- [6] APPASANI B, MOHANTA D K. A review on synchrophasor communication system: communication technologies, standards and applications[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(4): 383-399. DOI: 10.1186/s41601-018-0110-4.
- [7] BIJWE P R, KOTHARI D P, ARYA L D. Alleviation of line overloads and voltage violations by corrective rescheduling[J]. IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(4): 249-255.
- [8] 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.
- [9] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于灵敏度和潮流熵的线路过负荷控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 58-66.  
YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Control strategy for line overload based on sensitivity and power flow entropy[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 58-66.
- [10] 陈浩, 张英敏, 曾琦, 等. 真双极 MMC-HVDC 系统线路过载紧急控制策略[J]. 电测与仪表, 2019, 56(4): 107-114.  
CHEN Hao, ZHANG Yingmin, ZENG Qi, et al. An emergency control strategy for line overload in bipolar MMC-HVDC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 107-114.
- [11] 任建文, 凌霞. 基于最佳灵敏度向量和差异系数的线路过载紧急控制策略[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2017, 44(4): 13-18.  
REN Jianwen, LING Xia. Emergency control strategy for overload circuits based on optimal sensitivity vector and diversity factor[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2017, 44(4): 13-18.
- [12] 任建文, 李莎, 严敏敏, 等. 基于潮流跟踪算法的线路过负荷紧急控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 111-116.  
REN Jianwen, LI Sha, YAN Minmin, et al. Emergency control strategy for line overload based on power flow tracing algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 111-116.
- [13] 聂宏展, 王禹. 多支路开断潮流自转移和互转移识别算法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(1): 35-40, 114.
- NIE Hongzhan, WANG Yu. Research on self and mutual transferring identification algorithm for multi-branch removal power flow[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(1): 35-40, 114.
- [14] 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 Youman, LI Hui, ZHANG Boming, et al. Reverse isometric pairing adjustment method for active power safety correction strategy of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 5-8.
- [15] 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.
- [16] 毛思杰, 贾燕冰, 张琪. 计及过载线路发热严重程度的紧急控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 34-42.  
MAO Sijie, JIA Yanbing, ZHANG Qi. Research on emergency control method considering severity of overheating of overload line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 34-42.
- [17] 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, JIANG Xiaodong, ZHANG Boming. A successive linear programming based on-line static security corrective control approach[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 25-30.
- [18] 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.  
JIANG Zhen, MIAO Shihong, LIU Pei, et al. A power flow control strategy based on particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 16-20.
- [19] 程临燕, 郝治国, 张保会, 等. 基于内点法消除输电断面过载的实时控制算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(17): 51-55.  
CHENG Linyan, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Real-time control algorithm for eliminating overload of transmission section based on interior point method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(17): 51-55.
- [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. Method for emergency control of line overload based on power sensitivity and economic compensation minimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 118-123.
- [21] 贾宏杰, 穆云飞, 余晓丹. 基于直流潮流灵敏度的断面潮流定向控制[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 34-38.
- JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Sectional power flow directional control based on DC power flow sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 34-38.
- [22] 程临燕, 张保会, 郝治国. 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. Research on fast control algorithm based on comprehensive sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(4): 46-49.
- [23] 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 chain overload of transmission section[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 39-45.
- [24] 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. Multi-objective particle swarm optimization algorithm for chain trip prevention control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 53-59.
- [25] 沈瑜, 夏清, 康重庆. 发电联合转移分布因子及快速静态安全校核算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 17-21.
- SHEN Yu, XIA Qing, KANG Chongqing. Distribution factor of power generation joint transfer and fast static safety check algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 17-21.
- [26] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [27] 孙宏斌, 张伯明. 准稳态灵敏度的分析方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 9-13.
- SUN Hongbin, ZHANG Boming. New sensitivity analysis method under quasi-steady-state for power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 9-13.
- [28] SOROUDI A. Power system optimization modeling in GAMS[M]. Springer International Publishing AG, 2017.
- [29] 吴雄, 王秀丽, 王建学, 等. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1-8.
- WU Xiong, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Economic generation scheduling of a microgrid using mixed integer programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 1-8.

收稿日期: 2020-01-14; 修回日期: 2020-03-12

作者简介:

罗永建(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 2018202070026@whu.edu.cn

李晓明(1955—), 男, 通信作者, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制. E-mail: xml@whu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)