

# 10 kV 线路首端负荷安全域边界的估算方法

竺 炜<sup>1</sup>, 高 琪<sup>1</sup>, 李爱元<sup>2</sup>, 周彦尧<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410114;2.国网湖南省电力有限公司株洲供电公司,湖南 株洲 412000)

**摘 要:**10 kV 线路的主线具有单端注入的母线功能,其末端容易出现低电压问题。将主线压降约束转变为出线负荷约束,可为安全运行与规划提供极大便利,故提出首端负荷安全域边界的估算方法。首先针对沿线众多的台区负荷,基于分段压降特征,提出主线压降快速估算的力矩法;然后将实际台区负荷分布,等效为沿线均衡分布附加若干重载点的特征形式,更加符合实际情况;最后基于力矩法得到线路首端负荷与压降的关系,进而得到首端负荷安全域边界的线性化方程。算例结果表明,力矩法的压降分析和安全域边界分析都能满足工程精度要求。基于首端负荷安全域边界可得到 10 kV 线路的承载裕度,便于负荷控制和配网滚动规划,具有较好的工程应用价值。

**关 键 词:**10 kV 线路负荷分布;主线压降;力矩法;首端负荷安全域;线性化边界方程

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.01.013 中图分类号:TM712 文章编号:1673-9140(2023)01-0114-08

## Estimation method of security region boundary of 10 kV line head end load

ZHU Wei<sup>1</sup>, GAO Qi<sup>1</sup>, LI Aiyuan<sup>2</sup>, ZHOU Yanyao<sup>2</sup>

(1.School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.Zhuzhou Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

**Abstract:** Due to bus bar function of single-ended injection for 10 kV main line, the end-terminal is prone to suffering low voltage problems. Transforming the main line voltage drop constraint into the outlet load constraint can provide great convenience for the safe operation and planning of power grid. Therefore, an estimation method of the first-end load security region boundary is proposed in this paper. Aiming at the numerous station loads along the line, a torque method for rapid estimation of the voltage drop across the main line basing on segmented voltage drop characteristics is proposed. Then the actual station load distribution is equivalent to the characteristic form of balanced distribution along the line with several heavy load points, which is more consistent with the actual situation. Based on the moment method, the relationship between the load at the head end of the line and the voltage drop is obtained, and finally the linearized equation of the safety zone boundary of the head load is obtained. The results of the calculation examples show that the voltage drop analysis and safety zone boundary analysis of the moment method satisfy the engineering accuracy requirements. Based on the boundary of the first-end load safety zone, the load margin of the 10 kV line can be obtained, which is convenient for load controlling and rolling distribution network planning, and has good engineering application value.

**Key words:** 10 kV line load distribution; main line voltage drop; moment method; head end load security region; linearized boundary equation

收稿日期:2021-03-11;修回日期:2021-05-19

基金项目:国家自然科学基金(52077009);湖南省教育厅重点项目(20A013);湖南省株洲市供电公司科技项目(SGHNZZ00YYJS1901552)

通讯作者:竺 炜(1968—),男,博士,教授,主要从事电力系统稳定分析与控制研究;E-mail:738660686@qq.com

电压等级越低的线路,一般功角越小。在允许的压降范围内,10 kV架空线路的功角一般只有 $3^\circ$ 左右<sup>[1]</sup>。因此,10 kV线路的静态稳定性主要考虑主线末端的电压安全。这也是保障全台区电压合格水平的关键问题<sup>[2-3]</sup>。目前,线路选型的依据主要是经济电流密度,出发点是限制线路的发热和线损<sup>[4]</sup>。但是,影响10 kV主线末端电压的因素还包括线路长度、台区负荷分布等。即使电流密度在正常范围内,主线末端电压也未必在安全范围内<sup>[5-6]</sup>。文献[7]通过P-Q-U几何特性分析,得出了输电线路首、末端的负荷安全域。只要首端或末端的负荷在其安全域内,就可以保持末端电压处于安全水平<sup>[8-9]</sup>。同理,如果能够将10 kV主线的压降约束转化为线路首端的P、Q约束,就可以得到首端负荷安全域的边界。在运行时,就可以得到线路的承载裕度,以便进行负荷控制;在规划时,可以基于线路承载裕度及年度变化,选择滚动规划时间点、扩容线型以及无功配置等,具有较好的实际价值。

10 kV线路首端负荷安全域边界取决于主线沿线压降特性。然而,10 kV线路的拓扑结构复杂,具有“鱼骨型”特征,其主线具有母线功能,挂载着若干支线及数量多达几十甚至上百的台区变。而且,台区负荷随机性大,故沿线负荷分布方式复杂,导致主线末端电压水平评估非常困难<sup>[10-13]</sup>。在沿线负荷分布建模方面,文献[14-15]提出沿10 kV主线电压损耗估算方法,但负荷的实际分布情况远比设定情况复杂;文献[16-17]分别构建末端电压的非线性估算模型和BP神经网络模型,采用多个样本进行回归分析及训练求解,但模型生成取决于有限样本的负荷分布形式。在算法方面,若采用通常的潮流计算方法,由于10 kV配网台区变节点数量巨大,10条10 kV线路的潮流计算量就与省级主网相当。针对台区负荷随机性大的10 kV线路电压水平评估,非线性复数运算的潮流分析,工程计算缺乏直观便利。而且,受已知条件的灰色影响,精确潮流计算对提升评估准确性的作用也不大。因此,10 kV主线电压水平评估算法的精度应与负荷分布模型精度匹配。目前,工程上一般采用“负荷矩法”<sup>[18-19]</sup>,但该方法假设所有台区负荷功率因数恒定,这与实际情况不符。因此,本文研究10 kV主线末端电压的

快速估算方法,分析沿线负荷分布特征并构建分布模型。在末端压降快速估算的基础上,研究首端负荷安全域边界的估算方法。

## 1 10 kV 主线压降快速估算的力矩法

### 1.1 分段交流线路的压降模型

设分段交流线路L的模型如图1所示,两端节点分别为*i*、*j*,线路首、末端电压分别为 $U_i$ 、 $U_j$ ,电压相位差为 $\theta_{ij}$ ,线路阻抗为 $Z_L = R_L + jX_L$ ,阻抗角为 $\alpha$ ,潮流方向由*i*到*j*。

由前期研究可知<sup>[1]</sup>,分段线路的压降为

$$\Delta U_{ij} = \frac{|Z_L| S_{ri}}{U_i} = \frac{|Z_L| S_{rj}}{U_j} \quad (1)$$

其中, $S_{ri}$ 、 $S_{rj}$ 为压降 $\Delta U_{ij}$ 对应的首、末端功率圆弧上的最小视在功率,即该圆弧距原点的最小值,如图2所示。

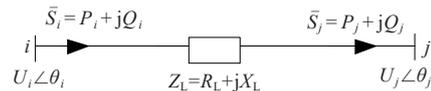


图1 分段交流线路简化等值模型

Figure 1 Simplified equivalent model of sectional AC line

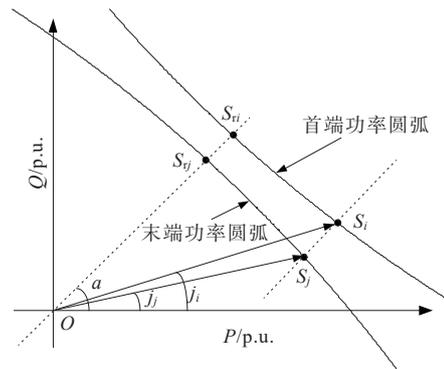


图2 首、末端功率圆弧及最小视在功率

Figure 2 Terminal power of sectional AC line

前期研究<sup>[1]</sup>表明:

$$\begin{cases} r_{iL} = \frac{U_i U_j}{|Z_L|} \gg S_{ri} = \frac{U_i \cdot \Delta U_{ij}}{|Z_L|} \\ r_{jL} = \frac{U_i U_j}{|Z_L|} \gg S_{rj} = \frac{U_j \cdot \Delta U_{ij}}{|Z_L|} \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,首、末端功率圆的半径分别比 $S_{ri}$ 、 $S_{rj}$ 大一个数量级。另外,线路的电压等级越低,阻抗角一般越小,10 kV架空线路阻抗角一般小于

输电线路。例如 LGJ-120 线型阻抗角为  $51^\circ$ , 10 kV 电缆阻抗角更小。故可将圆弧线性化, 如图 2 所示, 并由三角关系可得:

$$S_{ij} \approx S_j \cdot \cos(\alpha - \varphi_j) \quad (3)$$

其中,  $S_j$ 、 $\varphi_j$  分别为末端负荷的视在功率、功率因数角。

由于一般  $U_j$  在 1 p.u. 附近, 且满足:

$$\frac{\partial S_{ij}}{\partial \Delta U_{ij}} \gg \frac{\partial S_{ij}}{\partial U_j} \quad (4)$$

由式(1)可得分段线路压降近似为

$$\Delta U_{ij} \approx S_{ij} \cdot |Z_L| \quad (5)$$

## 1.2 10 kV 主线首末端压降快速估算的力矩法

设某 10 kV 主线首端为节点 0, 末端为节点  $n$ , 台区变节点为 1、2、 $\dots$ 、 $n$ , 各台区变的负荷分别为  $\tilde{S}_j, j=(1, 2, \dots, n-1, n)$ , 各台区变到线路首端的阻抗为  $Z_{0j}, j=(1, 2, \dots, n-1, n)$ , 如图 3 所示。

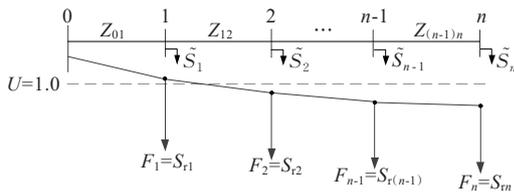


图 3 10 kV 主线负荷分布及压降特性

Figure 3 Load distribution and voltage drop characteristics of 10 kV main line

由式(3)可得到各台区变负荷对应的  $S_{ij}, j=(1, 2, \dots, n-1, n)$ 。针对图 3 所示的 10 kV 线路, 若不计线损, 可推导出主线首、末端的压降, 即

$$\Delta U_{0n} \approx S_{r1} \cdot |Z_{01}| + \dots + S_{r(n-1)} \cdot |Z_{0(n-1)}| + S_n \cdot |Z_{0n}| = \sum_{j=1}^n (S_{rj} \cdot |Z_{0j}|) \quad (6)$$

由图 3 可知, 10 kV 主线的电压降落类似于横杆在分布重载下的下垂。若将各台区变负荷所在功率圆弧上最小视在功率  $S_{ij}$  看成该节点所受的重力, 则由式(6)可知, 主线的首、末端压降, 等于横杆所受的力矩之和, 故称为压降估算的“力矩法”。

传统的“负荷矩法”, 一般假设所有的台区负荷为恒功率因数, 即分段压降为

$$\Delta U_{ij} \approx U_0 \cdot P \cdot l \quad (7)$$

其中,  $U_0$  为线型对应的固定电压系数,  $l$  为分段主线长度。

由于 10 kV 架空线阻抗角接近  $45^\circ$ , 台区负荷有

功、无功对压降的作用相当, 各台区功率因数实际并不相等, 故负荷矩法太粗略。而“力矩法”的分段压降考虑了台区负荷不同的功率因数, 如式(3)、(5), 更符合实际情况。

## 1.3 主线压降估算力矩法的精度分析

式(6)所示的“力矩法”, 忽略了分段线损, 并假设分段的末端电压为 1 p.u., 如式(1)、(5)的差异, 看似产生了误差, 但实际误差相互抵消, 具体原因如下。

1) 沿线压降的陡度具有递减特性, 如图 3 所示。一般主线前部电压大于 1.0 p.u., 后部电压小于 1.0 p.u., 式(5)导致的分段压降误差在主线前、后部分相反, 可部分抵消式(6)全线压降的累积误差。

2) 若负荷较重线损较大, 应有更多的分段电压将小于 1.0 p.u.。此时, 相比式(1)、(5)分段压降增大, 导致式(6)的全线压降增大, 正好与线损因素吻合。

因此, 力矩法看似粗略, 但却正好符合了 10 kV 主线压降的实际特征, 在估算主线末端电压时具有较好的精度。

## 2 10 kV 线路首端负荷安全域的边界分析

### 2.1 主线沿线负荷分布的等效形式

10 kV 主线长度一般不超过二十几公里, 总负荷一般不超过 1 000 kV · A, 沿线的负荷密度一般不超过 1 000 kV · A/km。虽然台区变的间隔不同, 负荷大小不同, 但数量一般多达几十甚至上百, 平均间隔一般只有几百米, 部分抵消了分布负荷的随机性。除了少数重载点外, 沿线分布的负荷密度大体相当。故从压降特性角度, 一般可将 10 kV 主线沿线的负荷分布等效为均衡分布负荷附加若干重载点。

### 2.2 沿线负荷均衡分布时的线路首端安全域边界

设沿线有  $n$  个等效台区负荷且均衡分布, 即负荷的间距、大小相等, 如图 4 所示。其中,  $Z_0$  为分段阻抗, 阻抗角为  $\alpha$ ,  $\tilde{S}_0$  为台区负荷复功率,  $S_{r0}$  为  $\tilde{S}_0$  所在功率圆弧上的最小视在功率。

根据式(6), 可得该主线首、末端压降为

$$\Delta U_{0n} \approx \frac{n(n+1)}{2} |Z_0| \cdot S_{r0} = \frac{|Z_L| S_{r0\Sigma}}{2} \quad (8)$$

式中,  $|Z_L| = n|Z_0|$  为主线的阻抗模值;  $S_{r0\Sigma} = nS_{r0}$ , 近似为线路首端负荷功率  $\tilde{S}_{0\Sigma}$  在功率圆弧上的最小视在功率。

令  $\Delta U_{S_n}$  为 10 kV 主线给定的最大安全压降值, 根据式(8), 可得该线首端负荷安全域边界圆弧上的最小视在功率  $S_{rH}$  (即边界指标) 为

$$S_{rH} \approx \frac{2\Delta U_{S_n}}{|Z_L|} \quad (9)$$

由于  $S_{rH}$  的复功率点在过原点且斜率为  $\tan \alpha$  的直线上, 故该复功率点在  $P$ - $Q$  空间的坐标为  $(S_{rH} \cos \alpha, S_{rH} \sin \alpha)$ 。为便于工程应用, 将圆弧线性化, 如图 5 所示, 可得该线首端负荷安全域的边界方程为

$$Q = S_{rH} \sin \alpha - (P - S_{rH} \cos \alpha) \cot \alpha \quad (10)$$

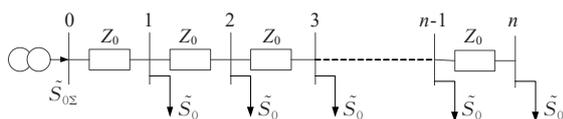


图 4 台区负荷均衡分布的 10 kV 主线

Figure 4 10 kV main line with balanced load distribution in substation area

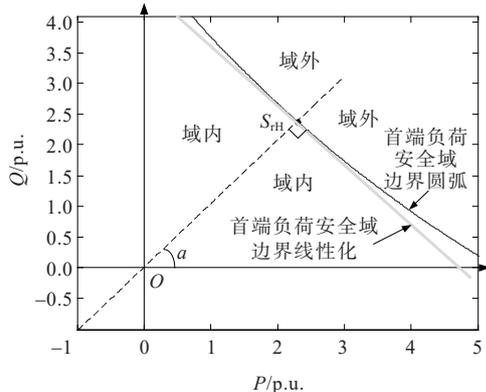


图 5 首端负荷安全域的边界线性化

Figure 5 Boundary linearization of head end load security region

### 2.3 附加若干重载点时的首端安全域边界修正

假设 1 只附加 1 个重载点, 其距首端的长度占比为  $\eta$  (主线总长度为基数 1), 负荷占比为  $\mu$  (以出线总负荷为基数 1); 其他均衡分布的台区负荷总占比为  $1-\eta$ , 如图 6 所示。本文分析了首端负荷安全域边界的修正方法。根据式(8), 均衡分布的台区负

荷导致的主线压降为

$$\Delta U_{0n0} \approx (1-\mu) \frac{|Z_L| S_{r0\Sigma}}{2} \quad (11)$$

根据式(6), 重载点导致的主线压降为

$$\Delta U_{0n1} \approx \mu \eta |Z_L| S_{r0\Sigma} \quad (12)$$

由式(11)、(12)可得主线压降为

$$\Delta U_{0n} = \Delta U_{0n0} + \Delta U_{0n1} \approx (1-\mu + 2\mu\eta) \frac{|Z_L| S_{r0\Sigma}}{2} \quad (13)$$

令主线压降为最大安全压降  $\Delta U_{S_n}$ , 由式(13) 可得, 该种台区负荷分布形式下的线路首端负荷安全域边界指标为

$$S_{rHU1} \approx \frac{2\Delta U_{S_n}}{(1-\mu + 2\mu\eta) |Z_L|} = \frac{S_{rH}}{1-\mu + 2\mu\eta} \quad (14)$$

故首端负荷安全域边界的修正量为

$$\Delta S_{rHU1} = S_{rHU1} - S_{rH} = \frac{\mu - 2\mu\eta}{1-\mu + 2\mu\eta} S_{rH} \quad (15)$$

修正后的首端负荷安全域的边界方程为

$$Q = S_{rHU1} \sin \alpha - (P - S_{rHU1} \cos \alpha) \cot \alpha \quad (16)$$

修正过程如图 7 所示。

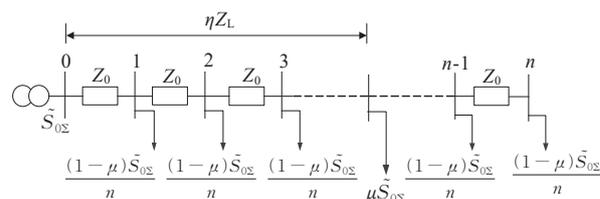


图 6 台区负荷均衡分布附加 1 个重载点

Figure 6 One overload point is added to the load balanced distribution in the station area

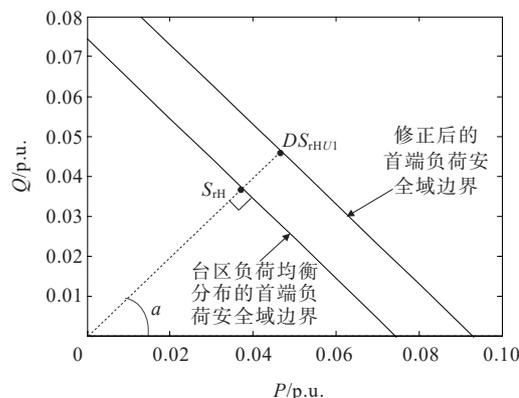


图 7 附加 1 个重载点后首端线性负荷安全域的边界修正

Figure 7 Boundary modification of head end linear load security region after adding one overload point

假设2 附加  $m$  个重载点,距首端的长度占比分别为  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m$ , 负荷占比分别为  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m$ ; 其他均衡分布的台区负荷总占比为  $1 - \sum_{i=1}^m \mu_i$ 。

同理,可得到该种台区负荷分布形式下的首端负荷安全域的边界指标为

$$S_{\text{HUm}} \approx \frac{2\Delta U_{S_{0n}}}{\left(1 - \sum_{i=1}^m \mu_i + 2 \sum_{i=1}^m \mu_i \eta_i\right) |Z_L|} = \frac{S_{\text{H}}}{1 - \sum_{i=1}^m \mu_i + 2 \sum_{i=1}^m \mu_i \eta_i} \quad (17)$$

其首端负荷安全域的边界方程为

$$Q = S_{\text{HUm}} \sin \alpha - (P - S_{\text{HUm}} \cos \alpha) \cot \alpha \quad (18)$$

## 2.4 首端负荷安全域边界的合理性分析

1) 假设台区负荷分布呈“前重后轻”特点。

若出线负荷不变,重载负荷分布在主线的前半段,大电流经过的主线长度较短,压降较小,故末端电压会较高。此时,  $2\eta < 1$ , 由式(14)可得  $S_{\text{HUm}} > S_{\text{H}}$ , 即首端负荷安全域变大,修正量为正,如图7所示。表明修正结果与实际情况相符。

2) 假设台区负荷分布呈“前轻后重”特点。

在出线负荷不变的情况下,重载负荷在主线的后半段,重载流经的主线距离较长,导致压降较大,末端电压较低。此时,  $2\eta > 1$ , 由式(14)可得首端负荷安全域变小,修正量为负。表明修正结果与实际情况相符。

## 3 算例分析

### 3.1 主线压降的力矩法估算验证

如图8所示的10 kV主线算例模型中,线路型号为LGJ-95,全长为8.9 km,共有6个台区变,且各台区变之间的距离不均衡,分段长度分别为  $L_{01}=1$  km、 $L_{12}=1.8$  km、 $L_{23}=1.6$  km、 $L_{34}=2$  km、 $L_{45}=1.5$  km、 $L_{56}=1$  km。6个台区变随机给定2组负荷数据,如表1所示。分别采用通用程序PSASP和本文提出的力矩法分析末端电压,计算结果如表2所

示。表2表明2种方法的计算结果非常接近,证明力矩法分析10 kV主线末端电压的精度较好。

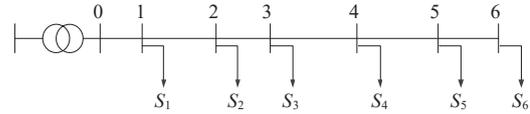


图8 10 kV主线算例模型

Figure 8 10 kV main line calculation example model

表1 2组台区负荷数据

Table 1 Two sets of area load data

台区变负荷	不同负荷组数据/(MV·A)	
	1	2
$S_2$	1.20+j0.60	1.20+j0.60
$S_3$	1.10+j0.59	1.10+j0.59
$S_4$	0.90+j0.28	0.90+j0.28
$S_5$	1.30+j0.62	1.30+j0.62
$S_6$	0.38+j0.09	0.38+j0.09
$S_7$	0.30+j0.10	1.20+j0.60

表2 2种算法得到的末端电压值

Table 2 Terminal voltage obtained by the two algorithms

负荷组	PSASP末端电压值/p.u.	力矩法末端电压值/p.u.
1	0.940	0.940
2	0.889	0.895

### 3.2 沿线负荷均衡分布时的安全域边界验证

以图4为例,10 kV主线共有12个台区变,且每个台区变的负荷相等,主线长度12 km,线路型号为LGJ-95,阻抗角  $\alpha$  为  $46^\circ$ 。设定线路首、末端电压限值分别为1.05、0.9 p.u.,即最大安全压降  $\Delta U_{S_{0n}} = 0.15$  p.u.。根据式(9)、(10),可得到首端负荷安全域边界,如图9所示。

从大到小,依次假设14组均衡的台区负荷功率,采用PSASP程序,分别求得主线末端的电压,如表3所示。将14个首端负荷点及对应的末端电压幅值都标在图9中。

由表3、图9可知,若线路首端负荷在其安全域外,则末端电压低于安全下限0.9 p.u.;若负荷点在域内,则末端电压高于0.9 p.u.。该算例结果表明,得到的台区负荷均衡分布下的首端负荷安全域边界是准确的。

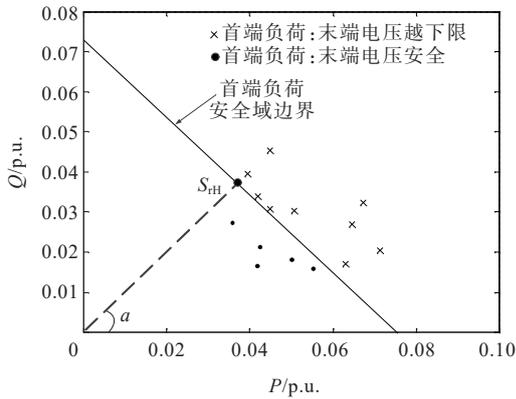


图 9 台区负荷均衡分布时首端负荷安全域的边界校验

Figure 9 Boundary verification of the head-end load security region when the load balance of the station area is distributed

表 3 负荷均衡分布时出线功率、末端电压与域边界

Table 3 Outgoing line power, terminal voltage and region boundary when load is balanced

序号	首端负荷复功率/p.u.	首端负荷与边界关系	末端电压/p.u.	末端电压是否安全
1	0.067 2+j0.032 3	域外	↓ 0.840	越下限
2	0.044 9+j0.045 3	域外	↓ 0.857	越下限
3	0.064 6+j0.027 0	域外	↓ 0.858	越下限
4	0.071 5+j0.020 4	域外	↓ 0.860	越下限
5	0.050 7+j0.030 4	域外	↓ 0.878	越下限
6	0.039 4+j0.039 7	域外	↓ 0.881	越下限
7	0.063 1+j0.017 1	域外	↓ 0.885	越下限
8	0.041 9+j0.034 0	域外	↓ 0.888	越下限
9	0.044 9+j0.030 5	域外	↓ 0.890	越下限
10	0.055 2+j0.015 9	域内	0.903	安全
11	0.050 1+j0.018 1	域内	0.908	安全
12	0.036 7+j0.027 5	域内	0.914	安全
13	0.042 3+j0.021 4	域内	0.916	安全
14	0.041 6+j0.016 6	域内	0.929	安全

### 3.3 沿线附加重载点时的安全域边界验证

以图 6 为例,设重载点位于主线全长 40% 处,即  $\eta = 0.4$ ,重载点占总负荷的 60%,即  $\mu = 0.6$ ,主线长度和线路型号与文 3.2 算例一样,最大安全压降  $\Delta U_{s,n} = 0.15 \text{ p.u.}$ 。根据式(14)、(16),得到线路首端安全域边界如图 10 所示。

依次假设 14 组首端负荷,采用 PSASP 程序分别求得主线末端的电压,如表 4 所示。将各首端负荷点及对应的末端电压幅值都标在图 10 中。

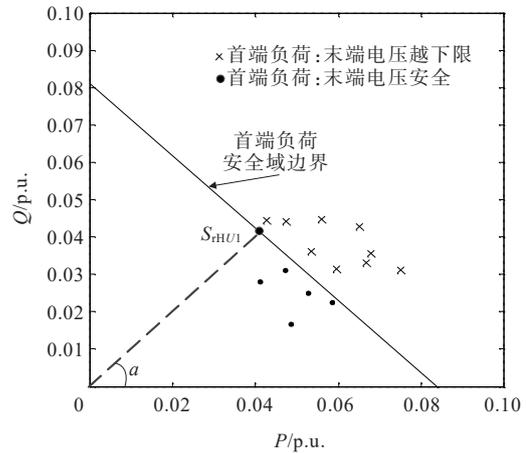


图 10 附加重载点后首端负荷安全域的边界校验

Figure 10 Boundary checking of head end load security region after adding heavy load point

表 4 负荷非均衡分布时出线功率、末端电压与域边界

Table 4 Outgoing line power, terminal voltage and region boundary when the load is unbalanced

序号	首端负荷复功率/p.u.	首端负荷与边界关系	末端电压/p.u.	末端电压是否安全
1	0.064 9+j0.042 8	域外	↓ 0.855	越下限
2	0.075 1+j0.031 1	域外	↓ 0.861	越下限
3	0.067 8+j0.035 7	域外	↓ 0.864	越下限
4	0.056 1+j0.044 8	域外	↓ 0.867	越下限
5	0.066 9+j0.033 0	域外	↓ 0.871	越下限
6	0.047 4+j0.044 3	域外	↓ 0.883	越下限
7	0.059 5+j0.031 6	域外	↓ 0.887	越下限
8	0.053 4+j0.036 3	域外	↓ 0.888	越下限
9	0.042 7+j0.044 4	域外	↓ 0.891	越下限
10	0.058 4+j0.022 6	域内	0.907	安全
11	0.047 0+j0.031 2	域内	0.909	安全
12	0.052 5+j0.025 0	域内	0.911	安全
13	0.041 0+j0.028 2	域内	0.925	安全
14	0.048 4+j0.016 9	域内	0.934	安全

由表 4、图 10 可知,得到的附加 1 个重载点的首端负荷安全域边界是准确的。

## 4 说明

10 kV 主线的沿线负荷分布变化会导致首端负荷安全域边界的变化,所以本文称为“估算”。实际应用时,一般选择典型日的重负荷(低电压)运行方式进行分析计算,用以对 10 kV 配网的大量线路进

行安全承载水平评估,可得到10 kV线路的承载裕度,便于负荷控制和配网滚动规划。

10 kV线路众多,台区数量大且状态数据准确性和完整性难以保证,线路参数也不准,线路低电压问题难以预判。故实际情况是:往往在发生低电压情况后,才开始进行低电压治理,导致低电压情况难以消除;另一方面,线路改造缺乏依据,难以进行“靶向”规划。本文提出的估算方法,就是针对实际中的问题,虽然针对具体少量线路可能会出现较大误差,但对大量线路的“筛选”,还是具有实际意义的。

加入运行状态大数据分析,结合线路负荷安全域分析方法,采用数据驱动方式,是提升安全域边界估算可靠性的途径,这也是本文接下来的研究方向。

## 5 结语

针对10 kV沿线台区数量众多、负荷分布复杂的情况,本文提出了主线末端电压及首端负荷安全域的快速估算方法:

1) 基于分段压降特征,提出了全线压降分析的力矩法,便于快速估算且满足工程分析精度要求;

2) 将复杂的台区负荷分布归结为沿线均衡分布附加若干重载点的特征形式,更加符合实际情况;

3) 基于沿线负荷分布特征及力矩法,得到线路首端负荷与压降的关系,进而得到首端负荷安全域的边界方程。

基于首端负荷安全域,运行时可直观掌握末端电压的安全裕度,规划时便于线路选型和无功配置,故本文具有重要的工程应用价值。

### 参考文献:

[1] 竺炜,许珊,尹军,等.电网的分散负荷安全域及其应用(一)电网静态安全的分散负荷安全域[J].中国电机工程学报,2021,41(8):2691-2705.  
ZHU Wei, XU Shan, YIN Jun, et al. Distributed load security domain and its application (I): line load security domain for grid static security[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(8):2691-2705.

[2] 韩祯祥,曹一家.电力系统的安全性及防治措施[J].电网技术,2004,28(9):1-6+12.  
HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 1-6+12.

[3] 陈为化,江全元,曹一家,等.基于风险理论和模糊推理的电压脆弱性评估[J].中国电机工程学报,2005,25(24):20-25.  
CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia, et al. Voltage vulnerability assessment based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 20-25.

[4] 肖峻,崔艳妍,王建民,等.配电网规划的综合评价指标体系与方法[J].电力系统自动化,2008,32(15):36-40.  
XIAO Jun, CUI Yanyan, WANG Jianmin, et al. A hierarchical performance assessment method on the distribution network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(15): 36-40.

[5] 刘颖英,徐永海,肖湘宁.地区电网电能质量综合评估新方法[J].中国电机工程学报,2008,28(22):130-136.  
LIU Yingying, XU Yonghai, XIAO Xiangning. Analysis of new method on power quality comprehensive evaluation for regional grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 130-136.

[6] 李睿.低压配电网电压质量问题分析与治理[J].电工技术,2020(1):110-112.  
LI Rui. Analysis and treatment of voltage quality problems in low-voltage distribution network[J]. Electric Engineering, 2020(1): 110-112.

[7] 竺炜,陶琼.基于电压水平约束的负荷安全域研究方法[P].中国专利:CN101944741A,2011-01-12.  
ZHU Wei, TAO Qiong. Research methods of load security region based on the voltage level constraint[P]. ZL: CN101944741A, 2011-01-12.

[8] 竺炜,凌晨,张玉龙,等.基于电压水平约束的电网负荷安全域[J].中国电机工程学报,2016,36(23):6389-6400+6604.  
ZHU Wei, LING Chen, ZHANG Yulong, et al. Grid load security domain based on voltage level constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6389-6400+6604.

[9] 竺炜,张玉龙,茹梁,等.基于负荷安全域的10 kV配网无功配置方法研究[J].电力科学与技术学报,2016,31(4):73-79.  
ZHU Wei, ZHANG Yulong, RU Liang, et al. Research on reactive power configuration method of 10 kV distribution network based on load security region[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 73-79.

[10] 李妍,段余平,邱军,等.环网配电网电压暂降分析的

- 临界比距法[J]. 电网技术,2006,30(11):51-55.
- LI Yan, DUAN Yuping, QIU Jun, et al. Critical percentage method of meshed distribution networks for voltage sag analysis[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 51-55.
- [11] 王宾,潘贞存,徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术,2004,28(2):56-59.
- WANG Bin, PAN Zhencun, XU Bingyin. Analysis of voltage sags in distribution system[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 56-59.
- [12] 王宾,潘贞存,徐文远. 配电系统电压跌落幅值估算分析[J]. 中国电机工程学报,2005,25(13):29-34.
- WANG Bin, PAN Zhencun, XU Wenyuan. Voltage sags profiles estimation for power distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 29-34.
- [13] 金勇,刘俊勇,李红伟,等. 基于功率流的混合配电网潮流计算方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):15-21+27.
- JIN Yong, LIU Junyong, LI Hongwei, et al. Power flow calculation method of mixed distribution network based on power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 15-21+27.
- [14] 赵俊光,王主丁,乐欢. 中压配电网规划中馈线电气计算的估算方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(16):98-102.
- ZHAO Junguang, WANG Zhuding, YUE Huan. Estimation method for electrical calculation of feeders in middle voltage distribution network planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 99-102.
- [15] 向婷婷,王主丁,刘雪莲,等. 中低压馈线电气计算方法的误差分析和估算公式改进[J]. 电力系统自动化,2012,36(19):105-109.
- XIANG Tingting, WANG Zhuding, LIU Xuelian, et al. Error analysis and improvement of voltage/power loss estimation formula for medium and low voltage feeders[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 105-109.
- [16] 周卓敏,李湘华,何禹清,等. 架空和电缆混合馈线的电压损耗快速估算[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(17):169-173.
- ZHOU Zhuomin, LI Xianghua, HE Yuqing, et al. Fast estimation of voltage loss in feeders consisting of overhead line and power cable[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 169-173.
- [17] 白牧可,唐巍,张璐,等. 基于BP神经网络群的中压配电网电压降落估算[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(2):132-138.
- BAI Muke, TANG Wei, ZHANG Lu, et al. Voltage estimation of low-voltage distribution network based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 132-138.
- [18] 郑佩祥,宣菊琴,王凯,等. 基于归一负荷矩的配电网台区低电压治理研究[J]. 电力科学与技术学报,2015,30(2):80-86.
- ZHENG Peixiang, XUAN Juqin, WANG Kai, et al. Government of low volt-age area based on normalized load moment for distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(2): 80-86.
- [19] 胡斌,王绪利,叶斌,等. 一种基于改进负荷矩的台区电压快速估算方法[J]. 电测与仪表,2020,57(2):46-51.
- HU Bin, WANG Xuli, YE Bin, et al. A fast estimation method of station voltage based on improved load moment [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 46-51.