

DOI: 10.7667/PSPC160210

# 一种多指标综合静态电压稳定薄弱母线辨识方法

罗庆跃<sup>1</sup>, 罗婷<sup>1</sup>, 孙柳青<sup>2</sup>, 刘白杨<sup>1</sup>

(1. 邵阳学院多电源地区电网运行与控制湖南省重点实验室, 湖南 邵阳 422000;

2. 国网湖南省电力公司邵阳分公司, 湖南 邵阳 422000)

**摘要:** 探讨了一种多指标综合电压稳定性辨识方法。该方法基于节点电压变化、电压有功灵敏度、母线参与因子三个电压指标, 以客观赋值与主观赋值组合方法对上述3个指标分别赋予不同权重求得综合指标以辨识系统各节点薄弱程度。最后以湘西南某实际电网为仿真对象进行分析, 以单一指标与综合指标分别辨识系统薄弱母线, 验证该综合辨识方法的全面性、有效性与科学性。

**关键词:** 电压稳定; 综合评判方法; 多指标; 薄弱母线辨识

## A multi-index integrated static voltage stability assessment method for weak buses identification

LUO Qingyue<sup>1</sup>, LUO Ting<sup>1</sup>, SUN Liuqing<sup>2</sup>, LIU Baiyang<sup>1</sup>

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Grids Operation and Control on Multi-Power Sources Area, Shaoyang University,

Shaoyang 422000, China; 2. Shaoyang Power Supply Branch, State Grid Hunan

Electric Power Company, Shaoyang 422000, China)

**Abstract:** This paper discusses a kind of static voltage multi-index comprehensive evaluation method. The method is based on node voltage changes, voltage active/reactive power margin three voltage sensitivity index, fully considers the different factors influencing voltage stability, and combines with the subjective assignment to the objective value assignment method of each index respectively and gives different weights to calculate comprehensive index. Finally, a real power grid of Hunan southwest is simulated and analyzed, of which single index and integrated index are used respectively to identify system weak buses, verifying the proposed identification method is comprehensive, effective and scientific.

This work is supported by Science and Technology Program of Hunan Province (No. 2016TP1023), Postgraduate Scientific Research Innovation Program of Hunan Province (No. CX2015B602), Mass Innovation Program of State Grid Hunan Province Electric Power Company (No. 5216E015000L), and Talents Cultivation Demonstration Base Construction Project of Hunan Enterprise and Universities Cooperation (No. [2015]274).

**Key words:** voltage stability; comprehensive evaluation method; multi-index; identification of weak bus

## 0 引言

电压稳定性是指在给定的初始运行状态下, 电力系统遭受扰动后系统中所有母线维持稳定电压的能力, 它依赖于负荷需求与系统向负荷供电之间保持/恢复平衡的能力<sup>[1]</sup>。历史上曾经发生的几次大停电事故也引起了各界对电压稳定性研究的广泛关

注, 专家学者对电压稳定性做了大量相关研究。文献[2]基于节点注入功率空间, 针对传统的失稳模式参与因子对极限诱导的缺陷, 提出一种电压稳定极限曲面法向量指标。文献[3]由 PMU 的局部量测信息快速获得一种新的基于支路电压方程可行解域的静态电压稳定指标。文献[4]提出一种基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定性分析方法。文献[5]提出一种 P-V 曲线与模态分析联合应用的方法分析电网静态电压稳定性。文献[6]提出一种考虑负荷波动的新的节点静态电压稳定指标。文献[7]介绍一种计算 N-1 故障情况下电压稳定极限及其裕度的新方法, 该方法能快速精确求解出故障情况下电压稳定

**基金项目:** 湖南省科技计划项目(2016TP1023); 湖南省研究生科研创新项目(CX2015B602); 国网湖南省电力公司群众性创新项目(5216E015000L); 湖南省电气类专业校企合作人才培养示范基地建设项目(湘教通[2015]274号)

点的精确解。文献[8]针对冬季覆冰情况研究了直流融冰技术, 保证了电网的安全可靠运行。文献[9]对显式重启动 Amodli 算法的重启动向量进行了改进, 可以快速计算降阶雅可比矩阵的模最小特征值和相应的特征向量, 从而求出静态电压稳定裕度。

电压失稳与系统电压、有功、无功、负荷特性等均有关系<sup>[10]</sup>, 所以在以静态电压稳定指标进行电压稳定分析时, 需全面考虑不同因素的影响。基于此, 本文探讨了一种综合多种静态电压稳定指标, 以模糊综合评判法<sup>[11]</sup>与层次分析法<sup>[12]</sup>集成方法以及熵权法<sup>[13]</sup>对 3 种电压稳定指标分配相应的权重系数所构造的一种新的综合指标评判方法。综合考虑多个对电压稳定的不同影响因素, 通过湘西南某实际电网为仿真对象, 验证了该综合指标评判方法在辨识系统薄弱节点时较单一指标评判相比, 克服了其片面性与差异性, 所得分析结果更加科学合理。

### 1 静态电压稳定指标

现有的电压稳定指标主要包括各类灵敏度指标、阻抗模指标、特征/奇异值指标以及裕度指标等<sup>[14]</sup>。每一种指标与系统某种特定运行状态密切相关, 如负荷特性、有功功率、无功功率等。在分析过程中, 即使是相同的电力系统运行情况, 因为每一个不同的指标都是从不同的某个方面去考虑, 所以有其局限性, 如无功裕度指标主要考虑电压崩溃之前的无功功率裕度, 且还需要克服雅可比矩阵在临界点处的奇异。本文所提出的综合多指标评判方法总共包括 3 个指标。

1) 节点电压随有功负荷波动而变化的灵敏度指标  $L_p$  可由 P-V 曲线算得, 且表现为该曲线的斜率,  $L_p$  越大, 则其绝对值  $L'_p$  就越小, 表明等微增量的有功负荷变化会导致较小的母线电压的变化, 该母线节点电压稳定性越强。

2) 系统的有功负荷增大而引起的电压变化的节点电压变化指标为  $L_v$ ,  $L_v$  越大, 母线的电压稳定性越薄弱。

3) 母线参与因子指标  $L_r$ , 它基于模态分析法求得, 主要探讨电压与无功之间的关系,  $L_r$  越大, 电压稳定性越薄弱。

这 3 个指标以综合评判法分别赋予不同权重得到综合指标  $L$ 。

$$L = \lambda_1 L'_p + \lambda_2 L_v + \lambda_3 L_r \quad (1)$$

其中,  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 。该综合指标涉及电压、有功功率、无功 3 个方面的电压稳定性的影响因素, 能克服单一指标评判的片面性与差异性, 所辨识出的关键节点更加科学合理。

### 2 权重系数分配

本文总共选用 3 个评价指标, 关于多指标权重系数的分配一般分为主观赋值法与客观赋值法。主观赋值法解释性较好, 但客观性较差; 客观赋值法大多情况下确定的权重系数精确度较高, 但有时会与实际情况不符, 对所得结果难以给出明确合理的解释。基于此, 本文提出一种结合客观赋值与主观赋值的“综合评判法”, 它能够结合二者的优点, 弥补缺点, 它的基本思想是采用熵权法对评价指标客观赋值, 再采用层次分析法与模糊评判法的集成方法对指标主观赋值, 最后综合出总的评价结果。

#### 2.1 主观赋值法

以模糊综合评判法与层次分析法的结合, 将评价指标体系分成递阶层次结构, 运用层次分析法确定各指标的权重, 然后分层次进行模糊综合评判, 最后综合结果。综合评估指标体系如图 1。

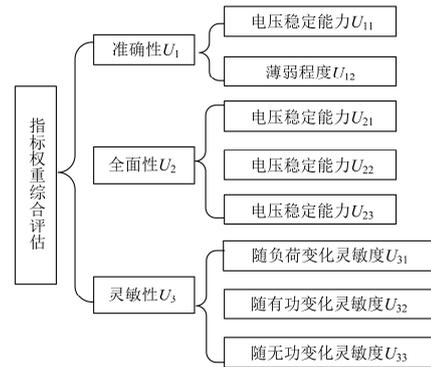


Fig. 1 Comprehensive evaluation index system

选取 3 个静态电压指标特性构建评估因素集  $U = \{U_i\}$  作为主准则层, 再将特征因素集按属性细分为  $m$  个子评估因素集  $U_i = \{U_{ij}\}$ ,  $m=3; i=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, t, t$  变动。

定义本评估模型的评语集

$$V = \{V_1, V_2, V_3\} \quad (2)$$

邀请  $x$  个专家以层次分析法要求给出指标间两两比较的相对重要性, 构建评判矩阵, 求出矩阵的最大特征值及其对应的特征向量, 以此向量计算出相应指标的权重, 并进行加总求平均, 确定各项评估指标的最终权重  $A_i$ 。

$$A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ij}) \quad (3)$$

把准则层因素集  $U_i$  到评语集  $V$  看成是一个模糊映射, 确定模糊评估矩阵

$$R_i = \{r_{ijk}\} \quad (4)$$

根据模糊评判理论, 运用模糊矩阵的合成运算,

得到  $U_i$  的综合评判向量

$$\mathbf{B}_i = A_i \circ R_i = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}) \quad (5)$$

将每个子因素集  $U_i$  看为一个因素, 用  $\mathbf{B}_i$  作为它的单因素评判, 既得评估因素  $U$  到评语集  $V$  是一个模糊映射

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_s\} \quad (6)$$

将每个  $U_i$  作为  $U$  的一部分, 可以按它们的重要性给出权数分配

$$\mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_s) \quad (7)$$

得二级综合评判为

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \circ \mathbf{R} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (8)$$

对评判结果归一化, 按最大隶属度原则得

$$\mathbf{B}_k = \max(b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (9)$$

则得出模糊综合评判所确定的指标  $j$  的主观权重为

$$V_j = V_k \quad (10)$$

## 2.2 客观赋值法

本文采用熵权法对各指标赋予客观权重, 现研究对象的电力系统有  $m$  条母线待评价,  $n=3$  个指标, 形成原始数据矩阵  $\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & \dots & r_{23} \\ \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & r_{m3} \end{pmatrix}_{m \times n} \quad (11)$$

式中,  $r_{ij}$  为第  $j$  个指标下第  $i$  条母线的评价值。

第  $j$  个指标下第  $i$  条母线的指标值的比重  $p_{ij}$  为

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (12)$$

第  $j$  个指标的熵值  $e_j$  为

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \quad (13)$$

第  $j$  个指标的熵权  $w_j$  为

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (14)$$

## 2.3 综合权重

以熵权法赋予客观权重之后, 再以上述主观赋值法求得的主观权重对其进行修正, 得到指标  $j$  的综合权重为

$$z_j = \frac{v_j w_j}{\sum_{j=1}^n v_j w_j} \quad (15)$$

在评判过程中, 每个指标所表现出的性质是不同的, 主观赋值法主要是以专家经验判断以及参考系统实际运行条件, 将灵敏性高、准确性强、能全面反映电压稳定状态的指标赋予更高的权重, 对已赋予客观权重的指标进行适应性地修正, 在以熵权法确定指标客观权重的计算过程中, 指标值的大小是其直接影响因素。在不同的运行情况下, 各指标的权重是不一样的, 这对薄弱母线识别结果的影响很大, 针对不同运行情况, 综合评判结果与各个单一指标评判结果的接近程度也有所区别, 若某一指标权重值处于较高水平, 在综合评判中也将占主导地位, 所以, 在综合评判过程中, 既能克服单一指标评判的片面性, 又能根据实际情况有所侧重, 使评判结果更为科学合理。在综合评判时, 应选取涵盖影响电压稳定性的多个方面的因素, 本文选取的 3 个电压稳定性指标, 涵盖了能体现电压波动、有功负荷变化、无功变化而引起电压稳定性变化的影响因素, 且针对 3 种指标的不同指标值以及在不同运行情况下所表现出的灵敏性、准确性、全面性的不同分别赋予不同的权重, 使得综合评判结果更为准确。

## 3 实例分析

本文以湘西南某实际电网为仿真对象, 该电网共有机组 1 261 台, 容量 891.865 MW, 110 kV 电压等级以上的变电站共 61 座, 110 kV 电压等级以上线路 109 条。本文以 220 kV 电压等级节点作为节点电压相对稳定性的评估对象, 负荷模型采用 35% 恒阻抗+65% 恒功率的静态负荷模型, 不考虑负荷的频率特性<sup>[15]</sup>。负荷增长方式<sup>[16]</sup>为: 全系统各负荷保持当前状态时的功率因素和比例不变, 同步增长至电压稳定极限点; 发电机出力按照当前状态的比例不变, 同步增长; 在迭代过程中, 若发电机无功出力越界, 则将 PV 节点转化为 PQ 节点。以单一指标与综合指标分别辨识丰水期大方式与小方式下各节点的电压稳定程度。我们可以得出各个节点的 P-V 曲线并计算各指标值, 所得结果如表 1、表 2 所示。

从表 1、表 2 中可以得出如下结论。

1) 由上述分析结果, 一方面可以看出在相同的运行状况下, 以不同的指标辨识系统的薄弱母线, 所得的结果均存在一定的差异, 如  $L'_p$  指标表明系统扶夷、柳山、青山、赧水等电压稳定性较弱, 而  $L_v$  指标表明儒林、青山、扶夷、檀江等电压稳定性较弱, 二者的结果存在一定差异,  $L'_p$  指标关注的是母线电压对有功功率波动的灵敏性,  $L_v$  指标关注的是系统的有功负荷增大而引起的电压变化, 指标的侧



表 1 丰水期大方式各指标评判结果

Table 1 Index values of peak load operating mode during high flow season

母线名称	$L'_p$	母线名称	$L_v$	母线名称	$L_r$	综合识别
扶夷	0.165	儒林	0.0781	扶夷	0.3884	扶夷
柳山	0.159	青山	0.0729	青山	0.3062	青山
青山	0.149	扶夷	0.0605	柳山	0.2609	建设
建设	0.108	檀江	0.0566	宝庆	0.2356	柳山
宝庆	0.095	柳山	0.0545	赧水	0.1959	赧水
赧水	0.035	宝庆	0.0520	檀江	0.1757	宝庆
隆回	0.018	建设	0.0514	建设	0.1697	檀江
儒林	0.015	赧水	0.0501	隆回	0.1065	儒林
平溪	0.013	平溪	0.0201	儒林	0.1063	隆回
檀江	0.012	隆回	0.0085	平溪	0.1043	平溪

表 2 丰水期小方式各指标评判结果

Table 2 Index values of low load operating mode during high flow season

母线名称	$L'_p$	母线名称	$L_v$	母线名称	$L_r$	综合识别
扶夷	0.596 96	儒林	0.0828	儒林	0.5625	儒林
建设	0.382 41	青山	0.0811	赧水	0.2542	赧水
赧水	0.179 26	扶夷	0.0675	扶夷	0.2481	扶夷
宝庆	0.163 28	檀江	0.0617	青山	0.1639	建设
檀江	0.159 51	柳山	0.0608	柳山	0.1391	青山
青山	0.159 46	宝庆	0.0591	宝庆	0.1294	柳山
柳山	0.158 94	建设	0.0573	檀江	0.1039	宝庆
儒林	0.158 87	赧水	0.0553	建设	0.0946	檀江
隆回	0.158 27	平溪	0.0228	平溪	0.0741	平溪
平溪	0.147 89	隆回	0.0109	隆回	0.0704	隆回

重点不同, 所得出的结果必然存在差异, 这论证了结合多种电压稳定指标进行综合评估的必要性, 而以综合指标所辨识出的薄弱母线基本包括了单一指标评判方法辨识出的薄弱程度比较靠前的母线, 充分考虑了各因素对电压稳定性的影响, 表明综合指标评判方法能克服单一指标评判的片面性与差异性。

2) 另一方面, 由分析结果可以看出, 在不同的运行方式下, 综合指标所辨识的薄弱母线排序与各单一指标分析结果的接近程度也不一样, 如丰水期小方式下, 综合指标分析结果与  $L_v$  分析结果比较接近, 而小方式下, 则差异相对而言较大。这是因为在不同运行方式下, 指标准确性、灵敏性等有所变化。所以, 以综合评判法根据不同运行情况分别对指标赋予不同权重, 使薄弱母线辨识结果更加贴合实际。

3) 该地区工业用电相对较少, 负荷大多是居民生活用电, 且西部地区富含小水电、风电。扶夷、青山、建设为该地区的主要负荷集中地, 在夏季用电高峰时期, 本地电厂不多, 不能就地缓解用电压力, 使得稳定性相对而言最低。在小方式下, 儒林、赧水地区小水电、风电大量并网, 向系统送入大量

感性无功, 而负荷需求不大, 使得无功不能就地平衡, 电压偏高, 电压稳定性降低。该地区电压稳定性定性分析结果与综合指标评判结果基本吻合, 这进一步验证了综合评判方法的正确性与科学性。

#### 4 结语

本文所探讨的综合评判方法囊括了 3 种静态电压稳定指标, 能充分考虑影响系统电压稳定的不同因素, 且在综合评判过程中, 以主观赋值与客观赋值组合的方式对各指标分配不同的权重, 充分考虑了不同运行方式下, 影响系统电压稳定的因素有所不同, 在克服单一指标评判的片面性的同时又有所侧重, 所辨识出的薄弱节点更加科学可靠, 为电网运行调度、无功补偿等提供了更为科学可靠的数据。

#### 参考文献

- [1] 孙华东, 汤勇, 马世英. 电力系统稳定的定义和分类评述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 31-35.  
SUN Huadong, TANG Yong, MA Shiyong. A commentary on definition and classification of power system stability[J].

- Power System Technology, 2006, 30(17): 31-35.
- [2] 邓大上, 房鑫炎. 电压稳定极限曲面法向量在分布式电源选址中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 57-62.  
DENG Dashang, FANG Xinyan. Application of normal vector of voltage stability limit surface in distributed generation allocation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 57-62.
- [3] 董雷, 张昭, 蒲天骄, 等. 基于 PMU 量测信息的电压稳定在线评估指标[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 1-6.  
DONG Lei, ZHANG Zhao, PU Tianjiao, et al. An online voltage stability index based on measuring information of phasor measurement unit[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 1-6.
- [4] 周玮, 姜汀, 胡姝博, 等. 基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 8-13.  
ZHOU Wei, JIANG Ting, HU Shubo, et al. Probabilistic assessment on voltage stability of AC/DC hybrid systems based on two-point estimate method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 8-13.
- [5] 姜一涛, 毛玉清, 杨明玉. P-V 曲线与模态法联合应用分析电网静态电压稳定性[J]. 陕西电力, 2014, 42(12): 48-51.  
JIANG Yitao, MAO Yuqing, YANG Mingyu. Static voltage stability analysis of power system using combination of P-V curve and modal analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(12): 48-51.
- [6] 傅旭, 王锡凡. 一种新的节点静态电压稳定指标及切负荷算法[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 8-12.  
FU Xu, WANG Xifan. A new index of nodal static voltage stability and load shedding method[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 8-12.
- [7] 吴政球, 李日波, 钟浩, 等. 电力系统静态电压稳定极限及裕度计算综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(1): 126-131.  
WU Zhengqiu, LI Ribao, ZHONG Hao, et al. Summary of power systems static voltage stability limitation and load margin calculation[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2010, 22(1): 126-131.
- [8] 姚致清, 刘涛, 张爱玲, 等. 直流融冰技术的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 57-62.  
YAO Zhiqing, LIU Tao, ZHANG Ailing, et al. Research & application on DC de-icing technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 57-62.
- [9] 孙建生, 候志俭, 王承民. Arnodli 算法在电力系统静态电压稳定分析中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 79-82.  
SUN Jiansheng, HOU Zhijian, WANG Chengmin. Application of Arnodli algorithm to the steady-state voltage stability analysis of power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2005, 17(5): 79-82.
- [10] PAL M K. Voltage stability conditions considering load characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 243-249.
- [11] 聂宏展, 吕盼, 乔怡, 等. 基于熵权法的输电网规划方案模糊综合评价[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 60-64.  
NIE Hongzhan, LÜ Pan, QIAO Yi, et al. Comprehensive fuzzy evaluation for transmission network planning scheme based on entropy weight method[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 60-64.
- [12] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [13] 常建娥, 蒋太立. 层次分析法确定权重的研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2007, 29(1): 153-155.  
CHANG Jiane, JIANG Taili. Research on the weight of coefficient through analytic hierarchy process[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2007, 29(1): 153-155.
- [14] 傅旭, 王锡凡, 杜正春. 电力系统电压稳定性研究现状及展望[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 1-9.  
FU Xu, WANG Xifan, DU Zhengchun. Survey of power system voltage stability study[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 1-9.
- [15] 张建华, 张国华, 杨京燕. 基于 PSASP 的廊坊电网静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 65-69.  
ZHANG Jianhua, ZHANG Guohua, YANG Jingyan. An analysis of static voltage stability for Langfang power system based on PSASP[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 65-69.
- [16] 方仁挺, 田位平. 基于 PSASP 的西藏林芝电网电压稳定研究[J]. 中国电力, 2014, 47(4): 70-74.  
FANG Renting, TIAN Weiping. An analysis of static voltage stability for Linzhi city of Tibet power system based on PSASP[J]. Electric Power, 2014, 47(4): 70-74.

收稿日期: 2016-02-23; 修回日期: 2016-04-26

作者简介:

罗庆跃(1961-), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: luo610718@163.com

罗婷(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电压稳定性;

孙柳青(1963-), 男, 高级工程师, 专业为电气工程及其自动化。

(编辑 葛艳娜)