

# 电力系统电压薄弱节点识别研究综述

董治全 何雨洁\* 代绍铖 胡见平 张俊妍

云南国土资源职业学院

DOI:10.12238/hwr.v9i10.6606

**[摘要]** 电力系统电压稳定性问题一般是从电网中最薄弱的节点开始,逐渐蔓延到其他节点,进而影响区域电压稳定,最终导致重大电网事故。本文通过研究各文献对电压薄弱节点的定义,总结出电压薄弱节点含义,阐述了电压薄弱区间的内涵,进而对当前电压薄弱节点识别方法进行阐述,并对比了各识别方法的优缺点。

**[关键词]** 电力系统; 电压; 薄弱节点

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A

## A Review on the Identification of Weak Voltage Nodes in Power Systems

Zhiquan Dong Yujie He\* Shaocheng Dai Jianping Hu Junyan Zhang

Yunnan Land And Resources Vocational College

**[Abstract]** The issue of voltage stability in power systems generally starts from the weakest nodes in the grid, gradually spreads to other nodes, thereby affecting regional voltage stability, and ultimately leading to major grid accidents. This paper, through a study of various literature definitions of voltage weak nodes, summarizes the meaning of voltage weak nodes, explains the connotation of voltage weak intervals, then elaborates on the current methods for identifying voltage weak nodes, and compares the advantages and disadvantages of each identification method.

**[Key words]** Power system; voltage; weak nodes

### 引言

通过分析电压稳定性事故,电力系统电压崩溃一般是从电压薄弱节点开始,通过一系列链式反应,从而影响其他节点,最终发展成为电压崩溃事故。为了能够有效避免电压稳定破坏甚至电压崩溃事故的发生,及时采取合理控制措施,研究有效识别电力系统电压薄弱节点的指标来帮助电力系统运行人员了解各节点电压的变化情况显得尤为重要。

电力系统稳定性一般指广义的稳定,包括角度稳定、电压稳定和频率稳定,在进行稳定性指标的研究时不能用局部指标来代替整个电力系统的稳定性。电压薄弱节点的识别指标正常情况下只用于判断节点的电压稳定程度,将其扩大为一个区域系统或者整个系统的电压节点群时,可以用于衡量一个区域系统、乃至整个系统的电压稳定程度。因此,本章所介绍的电压薄弱节点识别指标、方法主要是当前较为典型、有效的方法,对于识别电压薄弱节点具有良好效果。

### 1 电压薄弱节点的定义

纵览诸多文献,对电压稳定及电压崩溃均有明确定义,但对于电压薄弱节点却无准确定义及解释,尤其是对电压薄弱节点的薄弱区间完全没有涉及。文献[1]给出了电压薄弱节点的简单

定义:“电网中最易失去电压稳定的节点”。认为电压薄弱节点最接近电压稳定运行的极限,是电网电压稳定的重要衡量标志。文献[2]认为,电压薄弱节点主要是电力系统中线路有功和无功负荷比较大、负荷增长较快、电压易出现最低值的节点。文献[3]也指出电压薄弱节点是电力网中电压最低的节点,负荷和潮流最重的节点。以上定义分别从电压稳定性、节点电压和负荷变化以及节点群中电压和负荷变化方面进行概括,较为笼统。

电压薄弱节点是一个相对的概念,其衡量标准不一,对其定义时,应根据不同的标准进行定义,本文主要从电压运行偏差限值方面进行阐述,将电压薄弱节点定义为运行于电压薄弱区间内的节点。处于电压薄弱区间内的节点,其电压稳定性较差,节点负荷裕度较小。

对于图1所示的电力线路模型,已知  $\dot{U}_2$ 、 $\dot{S}_2 = P_2 + jQ_2$ ,

$$\text{由 } \dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \left( \frac{\dot{S}_2'}{\dot{U}_2} \right)^* Z \text{ 可得:}$$

$$\dot{U}_1 = (U_2 + \Delta U) + j\delta U \quad (1)$$

$$\text{其中 } \Delta U = \frac{P'_2 R + Q'_2 X}{U_2}, \delta U = \frac{P'_2 X - Q'_2 R}{U_2},$$

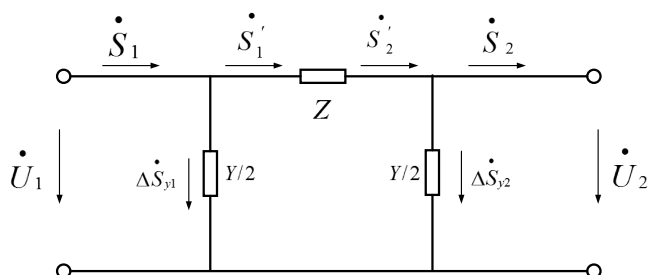


图1 电力线路模型

根据国家能源局发布的《电能质量评估技术导则——供电电压偏差》(DL/T 1208-2013), 35kV及以上供电电压偏差的限值: “正、负偏差绝对值之和不超过标称电压的10%”<sup>[4]</sup>。据此, 以电网标称电压为半径做出电网电压标准运行域, 再分别以 $U_2$ 、 $(1-5\%)U_2$ 、 $(1+5\%)U_2$ 为半径做圆, 得到受端节点电压运行域圆图, 如图2所示。

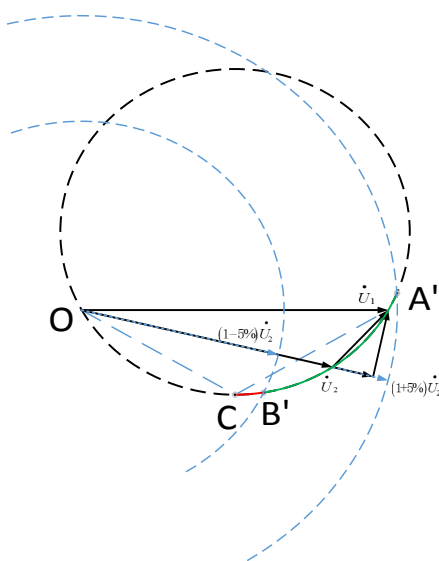


图2 受端节点电压运行域圆图

图2中,  $U_1$ 为系统送端电压,  $U_2$ 为受端电压。随着负荷的变化, 受端电压矢量 $U_2$ 会相应增加或减小, 但其必须运行在规定的范围内, 由此得到电压矢量 $U_2$ 的增、减范围圆弧, 与电压标准运行域分别相交于 $A'$ 、 $B'$ 点, 圆弧 $A'B'$ 即为受端节点电压正常运行域。

随着负荷的增加, 节点电压逐渐降低, 当节点电压降至图2所示的运行域圆图圆弧中部虚线所对应的位置时, 输出功率最大, 处于临界点C(即节点电压等于线路阻抗上的电压降)<sup>[5]</sup>。此时, 如果负荷继续增加, 节点电压将急剧下降, 重负荷线路将被继电保护装置跳开, 负荷将转移至其他线路, 此时, 可能产生级联跳闸; 若此时发电机励磁限制器动作, 有可能引发电压崩溃事

故。因此, 节点电压临界运行点C即为电压的不稳定点, 节点电压低限运行点 $B'$ 到临界运行点C的圆弧 $B'C$ 即为节点电压的一个薄弱区间, 处于此区间内的节点即为薄弱节点。

## 2 电压薄弱节点识别方法

### 2.1 灵敏度分析法

灵敏度分析法是基于潮流方程, 应用某些物理量的变化来研究电力系统稳定性<sup>[6]</sup>, 一般用微分方程和非线性代数方程表示其模型<sup>[6]</sup>:

$$\dot{X} = F(X, Y, P) \quad 0 = G(X, Y, P)$$

在某一稳定运行点 $(X(P_0), Y(P_0))$ , 将上式对参数 $P$ 求偏导, 有:

$$0 = \frac{\partial F}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial P} + \frac{\partial F}{\partial P} \quad 0 = \frac{\partial G}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P} + \frac{\partial G}{\partial Y} \frac{\partial Y}{\partial P} + \frac{\partial G}{\partial P}$$

由以上两式可得 $Y$ 灵敏度表达式和 $X$ 灵敏度表达式:

$$\frac{\partial Y}{\partial P} = - \left[ \frac{\partial G}{\partial Y} \right]^{-1} \left[ \frac{\partial G}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial P} + \frac{\partial G}{\partial P} \right] \frac{\partial X}{\partial P} = A^{-1} \left[ \frac{\partial F}{\partial Y} \left[ \frac{\partial G}{\partial Y} \right]^{-1} \frac{\partial G}{\partial P} - \frac{\partial F}{\partial P} \right]$$

$$\text{其中, } A = \left[ \frac{\partial F}{\partial X} - \frac{\partial F}{\partial Y} \left[ \frac{\partial G}{\partial Y} \right]^{-1} \frac{\partial G}{\partial X} \right]$$

利用灵敏度寻找电压薄弱节点, 一般有排序法、综合法、变化率法。排序法是将节点的灵敏度指标按照一定规则进行排序, 排在最前面或最后面的即为薄弱节点。综合法采用灵敏度的综合判别指标来确定薄弱节点。变化率法即灵敏度值变化最快的节点就是薄弱节点<sup>[7-8]</sup>。

文献[9]定义了相对灵敏度 $\delta$ , 用相对灵敏度确定电网电压稳定薄弱节点。

$$\delta = \frac{\delta_1 - \delta_0}{\delta_0} \quad (2)$$

式中:  $\delta$ 为相对灵敏度;  $\delta_0$ 为负荷初始状态时的灵敏度;  $\delta_1$ 为不同负荷下的灵敏度。

广义Tellegen定理用于计算不同负荷情况下的灵敏度, 接着计算出所对应的相对灵敏度。随着节点负荷的增加, 每个节点的灵敏度增加, 但每个节点增加的速度不同, 增加较快表明当节点受到有功功率干扰时电压降低较大, 且灵敏度增速可以用相对灵敏度来衡量, 较大的相对灵敏度值意味着灵敏度增加较快, 表明该节点的稳定性较差, 即为薄弱节点。

### 2.2 最小奇异值灵敏度分析法

奇异值分析法是基于潮流方程收敛后的雅可比矩阵奇异值分解。设电力系统潮流方程的极坐标形式为<sup>[10-13]</sup>:

$$P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

式中:  $i, j$  为节点号,  $U_i$  和  $U_j$  为节点电压幅值;  $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$ ;  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  为节点  $i, j$  电压相角差。将以上两式线性化, 可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{p\theta} & J_{pv} \\ J_{q\theta} & J_{qv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} \quad (3)$$

对  $J$  进行奇异值分解:

$$J = U \Lambda V^T = \sum_{i=1}^n \sigma_i u_i v_i^T \quad (4)$$

令  $\sigma_{\min}$  为最小奇异值, 当  $\sigma_{\min} \neq 0$  时, 有:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U/U \end{bmatrix} = V \Lambda^{-1} U^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \sigma_i^{-1} v_i u_i^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式 (5) 可知, 电压稳定的相对临近程度可以直接用雅可比矩阵的最小奇异值来表征。

文献[10-11]基于最小奇异值分析给出了最小奇异值对负荷功率的灵敏度。使用最小奇异值灵敏度来分析电压薄弱节点并识别最弱节点。最小奇异值灵敏度分析法分析了状态变量、控制变量对电压稳定性的影响, 对电力系统运行与电网规划提供了重要信息。

### 2.3 复合指标分析法

复合指标分析法是将常规的电压薄弱节点识别指标通过一定的数学方法处理, 形成一个新的复合指标, 并将这一指标用于识别电压薄弱节点。该分析方法是目前识别电压薄弱节点的主流方法<sup>[14-15]</sup>。

#### 2.3.1 电压变化-无功功率裕度指标

文献[14]提出了一种识别电压薄弱节点的综合性指标。在  $P-V$ 、 $Q-V$  曲线的基础上, 求出电压变化和无功功率裕度指标; 在此基础上, 提出用理想点评价方法合成两种电压稳定性指标, 用于识别电压薄弱节点。

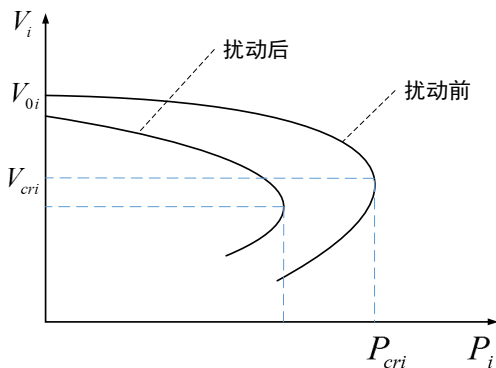


图3 不同运行条件下的节点P-V曲线

(1) 基于P-V曲线的电压变化指标。图3给出了不同运行条件下系统节点的P-V曲线。由图可知, 随着有功功率的增加, 扰动前

和扰动后的节点电压均下降。当通过节点的有功功率达到极限值  $P_{cri}$  时, 节点将处于电压稳定的临界状态, 此时若有功率继续增加, 节点电压将急剧波动, 产生失稳现象。

从图3可以得出如下指标:

①电压变化指标:  $(V_{0i} - V_{cri})/V_{0i}$ 。该指标数值越大, 节点越薄弱。

②节点负荷裕度指标:  $(P_{cri} - P_{0i})/P_{0i}$ 。该指标可用于计算负荷节点的电压稳定裕度。

③电压-负荷灵敏度指标:  $\Delta V_i / \Delta P_i$ 。该指标可反映负荷变化对节点电压的影响。

(2) 基于Q-V曲线的无功功率裕度指标。图4给出了不同运行条件下的节点Q-V曲线。如图所示, 曲线底部  $dQ/dV=0$  的点即为节点电压运行的临界点, 处于临界点右侧,  $dQ/dV>0$ , 节点电压是稳定的; 处于临界点左侧,  $dQ/dV<0$ , 节点电压是不稳定的。

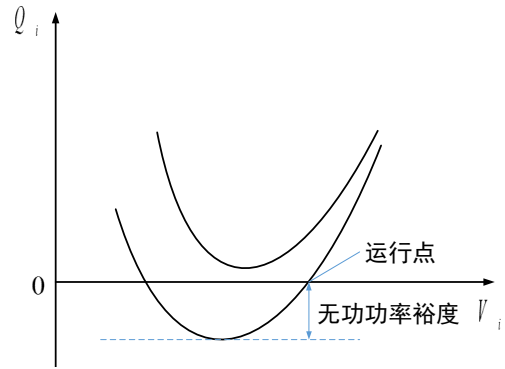


图4 不同运行条件下的节点Q-V曲线

从图4中可以得到以下指标:

①无功功率与电压灵敏度指标:  $dQ_i/dV_i$ , 即运行点斜率。

②无功功率裕度指标:  $\Delta Q_i$ , 即临界点与正常运行点之间的距离, 其值越小, 节点越薄弱。

#### 2.3.2 发电机节点无功变化量-负荷节点电压变化量指标

电力系统在实际运行过程中, 其状态总是变化的, 因此, 各节点电压的薄弱程度也是变化的。文献[16]通过分析电压薄弱节点的临界状态灵敏度 ( $dQ_L/dQ_g, dU_L/dQ_g$ ) 指标, 得出优于临界状态灵敏度的电压薄弱节点识别指标——发电机节点无功功率变化量和负荷节点电压变化量指标。定义指标<sup>[16-17]</sup>

$$V_{index} = \frac{\sum_{j \in \Omega_G} \Delta Q_{gj}}{\Delta V_i} \quad i \in \Omega_L \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 通过测得无功功率变化量  $\Delta Q_G$  和电压变化量  $\Delta V$ , 即可判别出电压薄弱节点。

### 3 电压薄弱节点识别方法比较

灵敏度分析法最早应用于电压稳定性分析, 其计算原理和实现过程相对简单, 计算速度快, 便于识别电压节点的薄弱程度, 但该指标涉及的运行约束问题较少, 指标线性为非线性, 因此, 具有一定的局限性, 识别准确性差, 一般适用于设计规划领域<sup>[18]</sup>。

最小奇异值灵敏度分析法从系统的角度来对电压薄弱节点进行分析,但其线性为非线性,在临界点处,会出现快速下降过程,同时计算量比较大,对计算机存储服务要求较高,识别准确性差。

复合指标分析法考虑了系统约束条件,可明确工作点与临界点的距离,指标线性为准线性,因此,识别电压薄弱节点更准确,但计算复杂,耗时较长,适用于离线分析。

#### 4 总结与展望

本文首先对电压薄弱节点进行定义,并解释了电压薄弱区间的内涵,接着介绍了当前较为有效的电压薄弱节点识别方法,阐述了各电压薄弱节点识别方法的基本思路与识别指标,最后对各电压薄弱节点识别方法进行对比分析,总结归纳其在计算速度、指标线性及识别准确性等方面的优缺点。后续电力系统电压薄弱节点识别研究将考虑更多的系统不确定性,结合人工智能科技,挖掘更多数据,更加全面、准确的评估电压薄弱节点。

#### [基金项目]

项目名称: 基于态势感知技术的电压薄弱节点识别; 项目编号: 2024YJ01。

#### [参考文献]

[1]张尧,宋文南.节点电压稳定临界状态和弱节点的确定[J].中国电机工程学报,1993(06):42-47.

[2]陈斌斌.主动配电网的电能质量评估及薄弱点识别方法研究[D].华侨大学,2018.

[3]安天瑜,周苏荃.一种电压薄弱负荷节点群的戴维南等值参数跟踪方法研究[J].继电器,2007(24):21-25.

[4]许月琳.具有谐波监测功能的电压监测仪的设计与实现[J].仪表技术,2010(12):59-61+67.

[5]张书瑀.电力系统电压稳定性分析指标的研究与应用[D].中国电力科学研究院,2017.

[6]胡立强.基于PSS/E的新疆电网电压稳定性分析[D].新疆大学,2008.

[7]李鹏.电压稳定灵敏度方法及其在广西电网中的应用[D].广西大学,2007.

[8]闫征.大规模并网风电场选址及装机容量优化研究[D].青岛大学,2018.

[9]吴静,马毅,鲁宝春.基于相对灵敏度确定电网电压稳定薄弱节点的研究[J].辽宁工学院学报,2006(03):148-150+154.

[10]陈敏,张步涵,段献忠,等.基于最小奇异值灵敏度的电压稳定薄弱节点研究[J].电网技术,2006(24):36-39+55.

[11]赵瑞峰.最小奇异值灵敏度分析法的研究[J].湖南工业大学学报,2010,24(03):70-72.

[12]刘文平.电网无功优化补偿技术的研究与应用[D].吉林大学,2010.

[13]吴昊,卫志农,王成亮,等.基于最小奇异值遗传退火算法的电压稳定性研究[J].电气自动化,2011,33(04):35-38.

[14]高鹏,石立宝,姚良忠,等.辨识电网薄弱节点的多准则综合电压稳定指标[J].电网技术,2009,33(19):26-31.

[15]张涵之.考虑电压稳定的区域电网PMU配置方法及仿真研究[D].华北电力大学,2013.

[16]万秋兰,丁涛,王莹,等.薄弱电压节点的在线辨识[J].电网技术,2012,36(03):156-161.

[17]王清,柳焯.基于戴维南等值的系统参数跟踪估计[J].电网技术,2000(11):28-30.

[18]成柯.基于WAMS的在线电压稳定指标及其评估方法研究[D].华北电力大学(北京),2009.

#### 作者简介:

董治全(1988--),男,汉族,云南曲靖人,助理工程师,硕士,研究方向: 电力系统运行与控制。

#### \*通讯作者:

何雨洁(1995--),女,汉族,云南曲靖人,讲师,硕士,研究方向: 控制系统分析与控制工程。