

基于可信度区间的静态电压稳定性评价

熊 宁¹, 程浩忠¹, 李曼丽², 薛迎成¹

(1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海市 200240; 2. 江西赣西供电公司, 江西省新余市 338025)

摘要: 在电网负荷注入水平和增长方式都不确定的情况下,给出了一种新的以区间形式表示的电压稳定评价模型。该模型不仅能处理变量的区间特性,还可以计及其概率分布,为不确定方式下的电压稳定性分析提供了一种新思路。然后采用线性规划法对模型进行求解,解决了双端不固定条件下的最短路径问题。最后在 IEEE 30 节点系统中验证了所提出的算法的快速有效性。

关键词: 静态电压稳定; 概率区间; 可信度; 线性规划; 电力系统

中图分类号: TM712

0 引言

负荷裕度是电压稳定性评价的常用指标。该指标的求解通常基于 2 类假设: 假定负荷增长方式完全确定^[1-4],用指定方向下的负荷裕度作为电压稳定水平的评价指标,由于负荷变化具有随机性,该方法所得指标偏于乐观; 假定负荷增长方式完全不确定^[5-9],用最危险方向下的负荷裕度来衡量系统的稳定水平,由于最小负荷裕度对应的负荷增长方式未必在实际系统运行中出现,所得指标过于保守。文献[10-11]对此进行了讨论,并提出了负荷增长方式在区间范围内可变的超圆锥或棱锥模型,相比于前 2 类假设,该指标更具有实用性。

由于预测、测量和估计误差的存在,实际电力系统不仅在负荷增长方式上存在不确定性,负荷本身也带有一定程度的不确定性。这就导致了由负荷注入功率决定的运行状态将不再是一个确定的点,而是一个可能的 n 维复空间(n 为节点数)。在这个空间中,存在着无穷多个可能的运行点。稳定裕度的求解就需要在此可能的空间中找一个最危险的运行点,在负荷增长方式可变区间范围内该点离电压崩溃曲面的负荷距离最短。为求解此双端都不固定的最短距离问题,文献[12]利用区间内最危险的负荷必定分布在其取值边界上的性质提出了一种求解最小负荷裕度的几何方法。但该方法无法考虑负荷增长方式变化的区间约束。更为重要的是,该方法不能根据负荷在取值区间上的可信度提供相应的裕度指标。如果负荷分布在区间边界上的概率很小,或

几乎不可能取到边界值时,那么将可信度取满整个区间,结果将过于保守。

本文提出一种基于可信度区间的电压稳定性评价方法。该方法首先根据负荷及其增长方向的不确定程度给出其在区间中的可信度,然后根据概率密度函数求出各变量的取值区间,最后以各节点负荷及其增长方式为控制变量,以最小传输功率极限为目标,采用线性规划法求解。本文提出的方法快速、有效,为负荷不确定方式下的电压稳定性评估提供了一种新方法。

1 负荷特性的概率分析

对于只有居民用户的电力系统,其用户的用电行为是大量微小的、相互独立的随机扰动,因此各节点负荷的概率函数属于正态分布 $N(x, \sigma)$,其中, x 为随机变量; σ 为分布参数。

对于某个节点负荷 y_i ,假设其样本空间 $(y_{s1}, y_{s2}, \dots, y_{sl})$ 已知,则可通过矩法估计其概率函数中的参数。其中, l 为样本数。

如果节点负荷 y_i 没有历史记录,可先估计其可能的取值上下限 (c_i, d_i) ,并将其区间均值作为期望 $E_{y,i}$:

$$E_{y,i} = \frac{c_i + d_i}{2} \quad (1)$$

标准差 σ 可采用 3 法则估计,即对于正态系统, $P(|x| > 3\sigma)$ 很小,在工程上认为它不会发生,可设 3σ 值等于其边界。 y_i 的标准差 $\sigma_{y,i}$ 为:

$$\sigma_{y,i} = \frac{d_i - E_{y,i}}{3} \quad (2)$$

各节点负荷与总负荷的期望、方差以及各变量在设定可信度下的取值区间计算详见附录 A。

收稿日期: 2008-07-10; 修回日期: 2009-02-06。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB219703)。

2 数学模型的建立

假设负荷增长方式分量 b_i 是以 $E_{b,i}$ 为期望,在可信度 $k_{b,i}$ 确定区间 $b_{b,i}$ 范围内变化,且 $E_{b,i}$ 和 $b_{b,i}$ 都是该节点实际负荷 y_i 的函数;发电机有功出力方式 B 给定,并通过 1-范数规范化。那么,求解基于可信度区间的最小传输功率极限模型为:

$$\min F = \sum_{i=1}^{n-1} b_i = b_{pz} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } G \cdot y + (Bb_{pz} - b) - f(x) = \mathbf{0} \quad (4)$$

$$w^T f_x = \mathbf{0} \quad (5)$$

$$w^T w = 1 \quad (6)$$

$$\begin{cases} -p_z(k_{pz}) & y_{pz} - E_{pz} & p_z(k_{pz}) \\ -q_z(k_{qz}) & y_{qz} - E_{qz} & q_z(k_{qz}) \\ -y_{y,i}(k_{y,i}) & y_i - E_{y,i} & y_{y,i}(k_{y,i}) \\ -b_{b,i}(y_i, k_{b,i}) & b_i - E_{b,i}(y_i) & b_{b,i}(y_i, k_{b,i}) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $k_{b,i}$ 为当前运行点的负荷变化因子; $y, b \in \mathbf{R}^{n-1+m}$, 分别为当前运行点的负荷及其增长方式向量,前 $n-1$ 维为除去平衡节点以外的有功分量,后 m 维为 PQ 节点的无功分量; b_{pz} 为有功负荷增长分量之和; $G, B \in \mathbf{R}^{n-1+m}$, 分别为当前运行点的发电机功率注入及其有功出力方式向量; 函数 f 为潮流表达式; x 为电压崩溃点处的状态变量; f_x 为其雅可比矩阵; w 为 f_x 中零特征值对应的左特征向量;

$$y_{pz} = \sum_{i=1}^{n-1} y_i, \quad y_{qz} = \sum_{i=n}^{n-1+m} y_i$$

分别为有功和无功总负荷; E_{pz}, p_z, k_{pz} 和 E_{qz}, q_z, k_{qz} 分别为有功和无功总负荷的数学期望、取值区间与可信度; $E_{y,i}, y_{y,i}, k_{y,i}$ 分别为负荷分量 y_i 对应的数学期望、取值区间和可信度。

发电机无功出力限制在潮流方程求解中考虑,未列出其不等式约束。式(3)~式(8)建立了以总有功负荷裕度最小为目标的优化模型。其中:式(3)为目标函数;式(4)为潮流等式约束,由 $n-1$ 个有功和 m 个无功方程组成;式(5)和式(6)为功率传输极限的必要条件;式(7)为各节点负荷和总负荷的取值区间约束;式(8)为负荷增长方式的取值区间约束。

3 模型的求解

采用线性规划法求解。由于崩溃点处不同分岔类型对应的求解方程有所不同,本文中此处只对鞍结分岔的求解方法进行推导,极限诱导分岔的求解方法见附录 B。

确定一个初始负荷向量 y_0 及其增长方式 b_0 。

求解负荷 y_0 沿 b_0 方向下的电压崩溃点,可得该崩溃点处的状态变量 x_0 、负荷裕度 ρ_0 及其法向量 w_0 。将模型目标函数在此崩溃点处线性化,有

$$\min F = \sum_{i=1}^{n-1} b_{0,i} + \rho_0 \sum_{i=1}^{n-1} b_i = b_{pz0} + \rho_0 b_{pz} \quad (9)$$

将式(4)在崩溃点处线性化,有

$$y - (Bb_{pz0} - b_0) - \rho_0 (B b_{pz} - b) + f_x|_{x=x_0} x = \mathbf{0} \quad (10)$$

两端左乘 w_0^T ,整理后有:

$$= \frac{w_0^T y - \rho_0 w_0^T (B b_{pz} - b)}{w_0^T (B b_{pz0} - b_0)} \quad (11)$$

将式(11)代入式(9),消去 ρ_0 后目标函数为:

$$\min F = \frac{w_0^T y - \rho_0 w_0^T (B b_{pz} - b)}{w_0^T (B b_{pz0} - b_0)} b_{pz0} + \rho_0 b_{pz} \quad (12)$$

将不等式约束(7)线性化,有

$$\begin{cases} -p_z + E_{pz} - y_{pz0} & y_{pz} & p_z + E_{pz} - y_{pz0} \\ -q_z + E_{qz} - y_{qz0} & y_{qz} & q_z + E_{qz} - y_{qz0} \\ -y_{y,i} + E_{y,i} - y_{0,i} & y_i & y_{y,i} + E_{y,i} - y_{0,i} \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$$y_{pz0} = \sum_{i=1}^{n-1} y_{0,i}$$

$$y_{qz0} = \sum_{i=n}^{n-1+m} y_{0,i}$$

$$y_{pz0} = \sum_{i=1}^{n-1} y_{0,i}$$

$$y_{qz0} = \sum_{i=n}^{n-1+m} y_{0,i}$$

对于可信度 $k_{b,i}$ 确定的负荷增长方式 b_i , 取值区间 $b_{b,i}$ 是其期望 $E_{b,i}$ 的一次函数,可写为 $b_{b,i} = a_i E_{b,i}$ 。将式(8)线性化后为:

$$\begin{cases} b_i - (1 + a_i) \frac{\partial E_{b,i}}{\partial y_i} y_i & (1 + a_i) E_{b,i} - b_{0,i} \\ -b_i + (1 - a_i) \frac{\partial E_{b,i}}{\partial y_i} y_i & - (1 - a_i) E_{b,i} + b_{0,i} \end{cases} \quad (14)$$

模型(12)~(14)已转换成线性规划法的规范形式,用单纯形法进行求解。

4 算例仿真

4.1 数据处理

用修改后的 IEEE 30 节点系统验证所提出的方法的有效性。数据处理方式为:

1) 将有功负荷大于 0 且无功负荷不小于 0 的节

点作为有效节点,其余节点的负荷取值区间及其对应的增长方式分量均为0。

2) 所有有效节点的负荷变量均属于正态分布,其期望为标准算例中数值;负荷取值区间为其期望值的 $\pm 20\%$ 。

3) 所有有效节点的有功负荷增长方式变量均属于正态分布,其期望为实际节点负荷的大小;无功负荷增长方式为按功率因数等比例增长;取值区间为其期望值的 $\pm 20\%$,即 $E_{b,i}(y_i) = y_i$, $b_{q,i} = i b_{p,i}$, $0.8 y_i$ $b_{p,i}$ $1.2 y_i$ 。其中, $b_{q,i}$ 和 $b_{p,i}$ 分别为节点 i 的无功和有功增长分量, i 为标准算例下的功率因数。

4) 在期望值 $\pm 20\%$ 以外的区域,事件发生的概率近似为0;通过3法则确定得各变量的标准差。

5) 可控发电机的出力方式为按有功备用大小分摊有功负荷增长方式的1-范数。为保证系统有足够的有功以平衡负荷的增长,各发电机有功出力上限增大2倍。

6) 为更好地模拟实际运行条件,总负荷、节点负荷和各节点负荷增长分量可选取不同的可信度。此处为描述方便,采用统一值,即 $k_{y,i} = k_{qz} = k_{pz} = k_{b,i} = k$ 。

4.2 数值仿真

以各变量的期望作为迭代初值,根据本文所提出的方法计算不同可信度 k 下的负荷裕度指标。

取不同的可信度 k ,对应的最小可传输极限也随之不同。图1显示了 k 按步长0.1从0变化到1时的最小传输功率极限值。

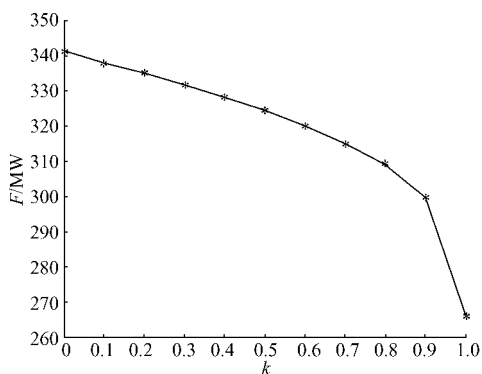


图1 IEEE 30节点不同可信度下的传输极限
Fig. 1 Transfer power limit under varied confidence factor on IEEE 30-bus system

由图1可知,随着可信度的增加,最小传输功率极限单调减小。尤其在可信度为1时,取值空间的大幅放大使可传输的功率极限急剧下降,达到266.03 MW。

附录C给出了 $k = 0.5$ 时各节点的负荷分布及其最危险的增长方式。为精确求解系统的可传输极限,可信度 k 的取值较为关键。当负荷较明确时,可信度 k 可取较小的值;当节点负荷值较为模糊,则需选取较大的可信度,以保证负荷的真实值落在所取的区间内,但可信度的增加是以允许可传输功率极限的减小为代价。

5 结语

本文提出一种基于可信度区间的静态电压稳定性评价模型,该模型不仅能考虑负荷及其增长方式的区间特性,还能计及各分量在区间中的可信度水平,对实际电网,特别是规划电网的电压稳定性评估有一定的指导意义。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 程浩忠. 一种计算静态电压崩溃裕度的简化实用方法. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 5-9.
CHENG Haozhong. A simplified and practical method for calculating static voltage collapse margins. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(11): 5-9.
- [2] 胡泽春, 王锡凡. 基于最优乘子潮流确定静态电压稳定临界点. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 6-11.
HU Zechun, WANG Xifan. Determination of static voltage collapse critical point based on load flow method with optimal multiplier. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 6-11.
- [3] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压分析的改进连续潮流法. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 13-16.
GUO Ruipeng, HAN Zhenxiang. An improved continuation power flow method for voltage stability analysis. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 13-16.
- [4] 江伟, 王成山. 电力系统输电能力研究中 PV 曲线的求取. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 9-12.
JIANG Wei, WANG Chengshan. PV curve tracing in power system transfer capability analysis. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 9-12.
- [5] ALVANADO F, DOBSON I, HU Yi. Computation of closest bifurcations in power system. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 918-924.
- [6] 周双喜, 周远, 冯治鸿. 电力系统最临近静态电压失稳点的确定. 清华大学学报: 自然科学版, 1997, 37(S1): 88-90.
ZHOU Shuangxi, ZHOU Yuan, FENG Zhihong. Determination of closest bifurcations for voltage stability analysis in power systems. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 1997, 37(S1): 88-90.
- [7] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 计算最近电压崩溃点的实用算法. 电网技术, 2006, 30(3): 13-17.
GUO Ruipeng, HAN Zhenxiang. A practical algorithm for

- calculating closest point collapse. Power System Technology, 2006, 30(3): 13-17.
- [8] 何宇,彭志炜,张靖. 电力系统最近电压崩溃点的确定. 贵州工业大学学报:自然科学版,2004,33(6):26-29.
HE Yu, PENG Zhiwei, ZHANG Jing. Computation of closest voltage collapse point in power system. Journal of Guizhou University of Technology: Nature Science Edition, 2004, 33(6): 26-29.
- [9] 常乃超,何光宇,梅生伟,等. 注入空间中电压安全域最短半径的估计. 电力系统自动化,2008,32(3):1-3.
CHANG Naichao, HE Guangyu, MEI Shengwei, et al. Estimation of the shortest radius of power system voltage security region in node injection space. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 1-3.
- [10] KATAOKA Y. A probabilistic nodal loading model and worst case solutions for electric power system voltage stability assessment. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1507-1514.
- [11] 胡泽春,王锡凡,程浩忠. 最近电压稳定临界点的两层规划模型和信赖域算法. 中国电机工程学报,2008,28(1):6-11.
- HU Zechun, WANG Xifan, CHENG Haozhong. A bilevel programming formulation and trust region approach for closest critical point of voltage stability. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 6-11.
- [12] 熊宁,程浩忠,马则良,等. 负荷不确定性电网的电压稳定性评价方法. 电力系统自动化,2008,32(8):24-27.
XIONG Ning, CHENG Haozhong, MA Zeliang, et al. Voltage stability assessment method for power system with load uncertainty. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 24-27.

熊宁(1975—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:输电网电压稳定与配网优化。E-mail:civilaviation@hotmail.com

程浩忠(1962—),男,博士,博士生导师,主要研究方向:电压稳定、电网规划、电能质量、电力市场。

李曼丽(1982—),女,硕士,主要研究方向:电力系统信息化和配网优化。

A Static Voltage Stability Evaluation Method Based on Confidence Intervals

XIONG Ning¹, CHENG Haozhong¹, LI Manli², XUE Yingcheng¹

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Ganxi Power Supply Company of Jiangxi Province, Xinyu 338025, China)

Abstract: Under the condition that load and its increasing pattern is uncertain, a novel voltage stability evaluation model with interval expression is given. This model can tackle the interval characteristics of the variables and can consider the probability distribution of these variables. The proposed approach provides a new light for static voltage stability evaluation under uncertain conditions. Linear programming is employed to solve this shortest path problem with two terminals being not fixed. At last, the speed and efficiency of the proposed method are tested on IEEE 30-bus power system.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2009CB219703).

Key words: static voltage stability; probability interval; confidence factor; linear programming; power system

(上接第 15 页 continued from page 15)

Monitoring of Static Characteristics and Diagnosis of Hidden Failures in Protection System Based on WAMS

XIONG Xiaofu, LIU Xiaofang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Hidden failures in protection system are great threats to the operation of power grids, while there are almost no on-line diagnostic methods for hidden failures so far. To solve this problem, this paper proposes a new method for exploring the hidden failures in protection system. By comparing the calculated values from measurements of wide-area measurement system (WAMS) and from relay protection, this method realizes the real-time monitoring of static characteristics and diagnosis of hidden failures in protection system. The criterion for failure diagnosis is also developed. As an example, for an optical-fiber longitudinal differential protection of transmission lines, the setting method for hidden failure criterion's threshold is analyzed.

This work is jointly supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217908) and National Natural Science Foundation of China (No. 50777068).

Key words: static characteristic; hidden failure; WAMS; status monitoring; protection system