

DOI: 10.7667/PSPC171765

考虑负荷增长随机性的大电网电压稳定概率评估

陈刚¹, 包严², 赵晋泉², 黄冠标¹, 周艳², 林青²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对电压稳定负荷裕度计算中负荷增长随机性的影响, 提出一种大电网电压稳定概率评估方法。该方法根据历史负荷数据采用改进 K 均值聚类算法将负荷分类, 基于负荷预测和负荷分类结果定义负荷随机增长的期望, 在此基础上建立负荷增长方向概率模型, 并采用拉丁超立方采样技术获得负荷增长方向样本, 运用连续潮流对各样本进行确定性的负荷裕度计算。运用该方法对我国某实际电网进行电压稳定概率评估, 评估结果验证了该方法的有效性和实用性。

关键词: 电压稳定概率评估; 负荷裕度; 负荷增长随机性; 负荷分类; 拉丁超立方采样

Probabilistic voltage stability assessment of large power grid considering stochastic load growth

CHEN Gang¹, BAO Yan², ZHAO Jinquan², HUANG Guanbiao¹, ZHOU Yan², LIN Qing²

(1. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Considering the influence of stochastic load growth in voltage stability load margin computation, a probabilistic voltage stability assessment method of large power grid is proposed. The improved K-means clustering algorithm is used to classify the load types according to historical load data. Then the expectation value of stochastic load growth is defined based on load forecasting and load classification results. According to the probability distributions of load growth direction, the samples are generated by the Latin Hypercube Sampling method. The continuation power flow is utilized for computing load margin of each sample. The numerical results of probabilistic voltage stability assessment in a large power grid of China show that the proposed method is effective and practical.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577049) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company (No. KYKJXM00000001) "Research and Development of Advanced Function on Static Voltage Security Assessment for AC/DC Power Grids".

Key words: probabilistic voltage stability assessment; load margin; stochastic load growth; load classification; Latin Hypercube Sampling

0 引言

近 40 年来, 电压稳定研究取得了丰硕成果。在线电压稳定监视与控制已经成为 EMS 的重要功能, 而离线电压稳定分析与评估也已经成为实际电网规划和运行方式制定的重要工作^[1-4]。当前实际电网进行电压稳定评估的主要指标是负荷裕度。通常定义一个或多个负荷-发电增长方向, 然后采用重复潮

流、连续潮流或特殊最优潮流等工具得到电压稳定极限负荷点, 即 PV 曲线的鼻点。有功负荷裕度是指该鼻点与系统当前运行点之间的有功负荷差值。这样, 负荷裕度就是所定义的负荷-发电增长方向的函数。如果负荷-发电增长方向定义合理, 所得评估结果就有参考意义, 否则缺乏实际意义。在电压稳定研究中, 曾有大量工作考虑负荷-发电增长方向的任意性, 试图求取最小负荷裕度以及识别最恶劣的负荷-发电增长方向^[5-8], 但其评估结果的保守性是非常明显的。

电压稳定评估中负荷-发电增长方向的含义需要深入认识。它是由充分了解电网负荷-发电未来增

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577049); 南方电网公司科技项目资助(KYKJXM00000001)“交直流大电网静态电压安全评估高级功能研发”

长态势的运行人员给定的。在实时调度运行场景下,运行人员可根据当日或次日负荷预测的峰值与当前负荷水平的差值来定义负荷增长方向;在规划和方式制定的中长期场景下,运行人员可根据电网规划负荷峰值或者希望检讨的增量送电计划来定义负荷-发电增长方向。必须指出的是,虽然负荷裕度的计算是以计算到电压稳定临界点即 PV 曲线的鼻点为结束的,如图 1 所示,多数情况下运行到 PV 曲线的鼻点,不仅可能超过了电网安全运行要求的电压下限,而且也可能已经超过了电网中全部发电机出力的上限,或超过了部分线路、变压器和断面的热功率极限或暂态功角稳定限额,但该鼻点仍然具有电压稳定分析意义。因此,负荷-发电增长方向的定义需要兼顾以下几个方面的因素:

- (1) 电网运行人员的先验知识和评估意愿;
- (2) 不同类型负荷变化规律和负荷预测信息;
- (3) 在此基础上考虑负荷增长的随机性。

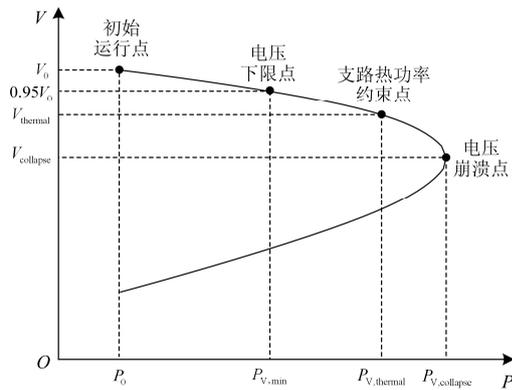


图 1 PV 曲线中不同极限点示意图

Fig. 1 Diagram of different limit points on PV curve

计及电源出力、网络变化和基态负荷随机性的电压稳定概率评估已得到充分研究^[9-12]。不同于状态类指标,只有采用负荷裕度等距离类指标时才需考虑负荷增长方向的随机性,所以研究负荷增长的随机性在电压稳定概率评估中具有特殊性。文献[13]考虑负荷增长的随机性,用概率分布来模拟负荷随机增长,且通过对负荷增长节点分类来考虑各类负荷增长态势的不同,但各负荷随机增长的期望取基态负荷值使得评估结果缺乏实际意义;文献[14-15]中负荷增长方向的定义是根据下一时间段负荷预测结果与当前负荷水平的差值,该定义给负荷随机增长期望值的给定提供了参考;文献[16]假设负荷增长满足一定的区间范围,采用概率超圆锥模型来描述,相较于负荷增长方向的任意性,该模型更合理,但其假设各个负荷增长范围均相同,与实际情况不符。

本文提出了一种考虑负荷增长随机性的大电网电压稳定概率评估方法。首先根据历史负荷数据,采用改进 K 均值聚类算法对负荷进行分类,然后基于负荷预测和负荷分类结果定义负荷随机增长的期望,再根据负荷增长方向的概率分布,利用拉丁超立方采样技术结合连续潮流来计算各采样样本的电压稳定负荷裕度,最后得到负荷裕度的统计特征。通过对我国某实际电网进行计算分析,结果表明本文所提概率评估方法对系统安全稳定运行具有重要工程实际意义。

1 考虑负荷增长随机的负荷裕度计算模型

电压稳定负荷裕度的计算通常转化为电压稳定临界点的计算,针对一个确定的负荷-发电增长方向计算得到一个确定的稳定临界点。本文以负荷裕度为目标函数,考虑负荷增长方向的随机性和系统安全约束,构成如式(1)的随机负荷裕度计算模型。

$$\begin{cases}
 \max & \tilde{\lambda} \\
 \text{s.t.} & P_{G,i,0}(1 + \lambda k_{G,i}) - P_{L,i,0}(1 + \lambda \tilde{k}_{P,i}) - \\
 & V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad i \in \Omega_N \\
 & Q_{G,i,0} - Q_{L,i,0}(1 + \lambda \tilde{k}_{Q,i}) - \\
 & V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad i \in \Omega_N \\
 & P_{G,i,\min} \leq P_{G,i,0}(1 + \lambda k_{G,i}) \leq P_{G,i,\max} \quad i \in \Omega_G \\
 & Q_{G,i,\min} \leq Q_{G,i,0} \leq Q_{G,i,\max} \quad i \in \Omega_G \\
 & \sum_{i \in \Omega_G} k_{G,i} P_{G,i,0} = \sum_{i \in \Omega_L} \tilde{k}_{P,i} P_{L,i,0}
 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\tilde{\lambda}$ 为负荷参数,标量,无单位,其中上标“~”表示随机变量,下同; $\tilde{k}_{P,i}$ 、 $\tilde{k}_{Q,i}$ 和 $k_{G,i}$ 分别为节点 i 的有功、无功负荷增长系数和发电机有功出力增长系数,各负荷增长系数和发电机出力增长系数共同构成了本文所述的负荷-发电增长方向; $P_{L,i,0}$ 、 $Q_{L,i,0}$ 和 $P_{G,i,0}$ 、 $Q_{G,i,0}$ 分别为节点 i 负荷的有功、无功功率和发电机的有功、无功出力; $P_{G,i,\max}$ 、 $P_{G,i,\min}$ 和 $Q_{G,i,\max}$ 、 $Q_{G,i,\min}$ 分别为节点 i 发电机有功出力上、下限和无功出力上、下限; V_i 和 V_j 分别为节点 i 与 j 的电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为导纳矩阵中第 i 行第 j 列元素的实部和虚部; θ_{ij} 为节点 i 与 j 之间的相角差; Ω_N 、 Ω_L 和 Ω_G 分别为总节点集合、负荷节点集合和发电机节点集合。

由于各节点的负荷增长系数 $k_{P,i}$ 、 $k_{Q,i}$ 为随机变

量, 即负荷增长方向为随机变量, 则计算得到的负荷裕度也是一个随机量, 其随机分布特征与 $k_{p,i}$ 、 $k_{Q,i}$ 的随机分布特征密切相关。需要说明的是, 已有大量研究对象考虑的是基态负荷随机性, 而不考虑负荷增长随机性, 对于系统运行人员的实际工作场景, 即静态电压稳定评估的实际应用场景更接近于后者, 即给定确定的系统运行方式数据, 计算具有随机性的负荷增长方向下的电压稳定裕度。需要指出的是, 两个问题在数学上具有一定的等价性。

$$\tilde{P}_{L,i}(\lambda) = P_{L,i,0} + \lambda \tilde{k}_{P,i} P_{L,i,0} = \tilde{P}_{L,i,0} + \lambda \Delta P_{L,i} \quad (2)$$

式中, $\Delta P_{L,i}$ 为节点 i 的有功负荷变化量。

2 问题的求解方法

2.1 负荷-发电增长模式的定义

在进行电压稳定评估之前, 系统运行人员需要根据评估意愿指定负荷和发电增长的范围, 如按区域(area)或分区(zone)增长, 并得到各节点的相关参数信息, 如历史负荷数据、负荷预测值和发电机出力上、下限等等。系统规划和运行人员具有电网运行特征的先验知识, 如规划人员了解未来一段时间哪些区域或分区规划有新的电源点, 其发电会增长, 哪些有新的负荷点, 其负荷会增长; 而调度人员了解短期内哪些区域或分区发电有增加的裕度, 哪些区域或分区负荷会增长。

本文所研究的负荷增长不确定性是在这种负荷-发电增长模式确定的基础之上, 离开了这种确定性所定义的任意范围内负荷随机增长仅有数学分析意义, 而没有工程应用意义和物理基础。

2.2 负荷分类和负荷增长方向的定义

2.2.1 基于改进 K 均值聚类算法的负荷分类

对于系统运行人员指定负荷增长范围内的负荷, 其增长方向也与其负荷类型紧密相关的。因此, 在定义负荷增长方向中考虑其分类, 显然使得最终负荷裕度计算结果更加具有实际意义。通常同一类型负荷变化相似, 不同类型负荷变化不同。本文基于历史负荷数据采用改进 K 均值聚类算法将有功负荷变化相似的节点归到同一类, 得到各负荷节点群。

改进 K 均值聚类算法解决了传统 K 均值聚类算法需要人为选取初始均值向量的问题。实现负荷分类的改进 K 均值聚类算法的具体步骤如下^[17-19]。

步骤 1: 已知 N 个负荷节点 1 天 24 个整点时刻的历史有功负荷数据, 得到各负荷数据样本 $\mathbf{P}_{L,i} = [P_{L,i,1}, P_{L,i,2}, \dots, P_{L,i,24}]$, ($i=1, 2, \dots, N$); 指定负荷聚类数目 K 。

步骤 2: 先对各负荷数据样本进行一次层次聚

类, 根据层次聚类结果得到各类负荷的初始均值向量 $\mathbf{u}_j = [u_{j,1}, u_{j,2}, \dots, u_{j,24}]$, ($j=1, 2, \dots, K$)。

步骤 3: 计算各负荷样本 $\mathbf{P}_{L,i}$ 与各均值向量 \mathbf{u}_j 的欧氏距离 $\text{dist}(\mathbf{P}_{L,i}, \mathbf{u}_j)$ 。

$$\text{dist}(\mathbf{P}_{L,i}, \mathbf{u}_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^{24} |P_{L,i,k} - u_{j,k}|^2} \quad (3)$$

将距离某个均值向量最小的样本划入该均值向量所在的类, 对所有样本划分后得到 K 个负荷节点群 $C_j = \{\mathbf{P}_{L,j,1}, \mathbf{P}_{L,j,2}, \dots, \mathbf{P}_{L,j,n_j}\}$, 其中 n_j 为第 j 个节点群的负荷个数。

步骤 4: 根据步骤 3 的聚类结果更新各节点群均值向量 \mathbf{u}_j 。

$$\mathbf{u}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{k=1}^{n_j} \mathbf{P}_{L,j,k} \quad (4)$$

步骤 5: 重复步骤 3 和步骤 4, 直到聚类结果不再变化时停止计算, 得到负荷分类结果。

2.2.2 定义负荷增长方向

定义负荷增长方向时, 根据负荷预测和负荷分类结果, 设第 j 类节点群的有功负荷增长系数为 γ_j , 其大小为 η_{j,t_0} , η_{j,t_0} 的物理意义是第 j 类节点群当前 t_0 时刻的有功负荷增长率, 其定义为

$$\eta_{j,t_0} = \frac{\sum_{k=1}^{n_j} P_{j,k,t_{\max}} - \sum_{k=1}^{n_j} P_{j,k,t_0}}{\sum_{k=1}^{n_j} P_{j,k,t_0}} \quad (5)$$

式中: $P_{j,k,t_{\max}}$ 为第 j 类节点群中的第 k 个负荷节点有功负荷预测最大值, 即日尖峰 t_{\max} 时刻的负荷预测值; P_{j,k,t_0} 为第 j 类节点群中的第 k 个负荷节点当前 t_0 时刻的实际有功负荷值。

由于负荷分类是根据各节点有功负荷变化的相似程度, 定义有功负荷增长方向时, 假定不同节点群之间增长相互独立, 同一节点群内各负荷同调增长, 即各负荷节点有功增长系数与该节点群增长系数相等, 且各节点无功负荷按原功率因数比例增长。负荷增长带来的网损增量可由全网的松弛节点或指定机组承担。因此, 第 j 个节点群内的第 i 个负荷节点的增长系数为

$$k_{p,i,j} = k_{Q,i,j} = \gamma_j \quad (6)$$

式中: $k_{p,i,j}$ 和 $k_{Q,i,j}$ 分别为第 j 个节点群内的第 i 个节点的有功和无功增长系数。

由于各节点负荷增长系数与该节点所在节点群负荷增长系数相等, 所以指定负荷增长范围内各节

点群负荷增长方向共同构成了该范围的负荷增长方向, 则有功负荷增长方向 \mathbf{D}_p 的定义为

$$\mathbf{D}_p = [\underbrace{\gamma_1, \dots, \gamma_1}_{n_1 \uparrow}, \underbrace{\gamma_2, \dots, \gamma_2}_{n_2 \uparrow}, \dots, \underbrace{\gamma_K, \dots, \gamma_K}_{n_K \uparrow}] = [\mathbf{D}_{p,1} \quad \mathbf{D}_{p,2} \quad \dots \quad \mathbf{D}_{p,K}] \quad (7)$$

式中, $\mathbf{D}_{p,j} = [\gamma_j, \dots, \gamma_j]$ 为第 j 个负荷节点群有功负荷增长方向。

2.3 发电出力增长方式的定义

为实现负荷增量和发电增量之间的平衡, 需要定义发电出力增长方式。一般而言, 负荷裕度计算中定义各发电机出力增长方式有以下三种。

(1) 各发电机按基态有功出力比例分摊有功增长功率。

(2) 各发电机平均分摊有功增长功率。

(3) 各发电机按有功备用容量比例分摊有功增长功率, 其中有功备用容量 $P_{res,i}$ 定义为

$$P_{res,i} = P_{G,i,max} - P_{G,i,0} \quad (8)$$

这种增长方式下发电机有功出力增长系数为

$$k_{G,i} = \frac{P_{res,i} \sum_{i \in \Omega_k} k_{p,i} P_{L,i,0}}{P_{G,i,0} \sum_{i \in \Omega_k} P_{res,i}} \quad (9)$$

前两种增长方式下各发电机出力不会同时达到上限, 当某台发电机出力先达到上限时, 令该发电机有功出力增长系数为 0, 然后重新计算剩余发电机的出力分配比例, 再继续检查剩余发电机是否存在有功达到上限的问题, 如此反复迭代。而第三种增长方式各发电机出力同时达到上限, 此时发电增长范围内无可用的有功储备, 这时为计算至电压稳定临界点, 功率缺额由指定发电增长范围外的发电机以某种方式承担。考虑到离线电压稳定研究方便, 本文采用第三种发电出力增长方式。

2.4 负荷增长方向随机样本集的生成

2.4.1 负荷增长概率分布模型

随机变量的波动常用概率分布来描述, 概率分布模型中随机变量的维度决定了计算的难易程度。在电压稳定概率评估中, 模拟节点数目众多的大电网负荷随机增长时, 若将各负荷节点的有功和无功增长系数都列为随机变量, 随机变量维度过大, 计算繁琐。为避免维数灾难, 本文根据负荷分类数目来选取负荷增长概率分布模型中的随机变量个数, 一般约为 4~8 个, 计算相对简单。

对于分类后的各负荷节点群, 将各节点群有功负荷增长系数 γ_j 列为随机变量, 负荷增长波动满足正态分布, 即 $\gamma_j \sim N(\mu_j, \sigma_j)$ 。正态分布的期望

$\mu_j = \eta_{j,t_0}$, 标准差为 σ_j , 则 γ_j 的概率密度函数为

$$f(\gamma_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left[-\frac{(\gamma_j - \eta_{j,t_0})^2}{2\sigma_j^2}\right] \quad (10)$$

2.4.2 负荷增长方向样本集的生成

概率分析方法通常有蒙特卡洛模拟法(Monte Carlo Simulation, MCS)、解析法和近似法三种^[20]。解析法和近似法需要结合相应级数展开求解, 虽然计算量小, 但精度不高。MCS 通过生成满足随机变量概率分布的样本集, 将不确定性问题转化成若干确定性问题来解决, 其计算精度依赖于采样规模, 采样规模越大, 计算精度越高。在本文考虑负荷随机增长的电压稳定概率评估的实际工程应用中, 系统运行人员不仅关注所求负荷裕度的数字特征和概率分布, 而且关心某个特定负荷增长方向下的负荷裕度, 如最恶劣增长方向下的最小负荷裕度。所以, 为实现采样规模与计算精度的折中, 本文采用基于拉丁超立方采样(Latin Hypercube Sampling, LHS)的 MCS 得到各节点群负荷增长系数样本, 然后计算各样本的负荷裕度值。

LHS 是一种分层采样方法, 通过改变输入随机变量的样本生成过程, 实现了较小采样规模达到较高计算精度的优点。在概率问题计算中, LHS “百”数量级的采样次数一般能达到随机采样 “万”数量级采样次数的计算精度。LHS 包括采样和排序两个步骤, 过程如下所述^[21]。

假设系统有 N 个随机变量, 采样规模为 M , 其中某个随机变量的累积概率分布函数为 $Y_k = F_k(x_k)$ ($k=1, 2, \dots, N$), 值域为 $[0, 1]$ 。采样时将值域分为 M 个等间距不重叠的子区间, 选取各子区间的中点作为采样值, 则随机变量 x_k 的第 i ($i=1, 2, \dots, M$) 个采样值为

$$x_k = F_k^{-1}\left(\frac{i-0.5}{M}\right) \quad (11)$$

式中, $F_k^{-1}(\bullet)$ 是 $F_k(\bullet)$ 的反函数。

经过采样得到初始采样矩阵 $\mathbf{X}_{N \times M}$, 由于采样矩阵每一行元素按照顺序抽样排列, 相关性较强, 而输入随机变量采样值间的相关性会影响计算结果的精度, 所以 LHS 通过排序改变采样值的排列顺序来降低相关性。文献[21]证明了 Cholesky 分解法相比较于其他排序方法原理简单, 计算速度快, 本文采用该方法对采样矩阵进行排序。

2.5 单个样本的电压稳定负荷裕度计算

通过 LHS 得到负荷增长方向样本集后, 对于每个样本, 采用连续潮流(Continuation Power Flow, CPF)求解负荷裕度。CPF 的基本方程为

$$f(\mathbf{x}, \lambda) = \mathbf{F}(\mathbf{x}) + \lambda \mathbf{D} = \mathbf{0} \quad (12)$$

式中: \mathbf{x} 为系统状态向量, 即节点电压幅值和相角; $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 为常规潮流方程; \mathbf{D} 为负荷-发电增长方向。

连续潮流法通过相应参数化策略来构造一维扩展潮流方程, 该方程的引入使得常规潮流方程在电压稳定临界点附近的雅克比矩阵不再奇异。CPF 从系统初始运行点出发, 沿某一负荷-发电增长方向不断对下一运行点进行预测、校正, 直至计算到电压稳定临界点。CPF 的具体算法可参考文献[22]。

2.6 负荷裕度统计特征的求取

对各样本分别进行 CPF 计算得到各负荷裕度值后, 设 LM 表示负荷裕度, P_{area} 表示某区域基态负荷大小, 本文考虑的负荷裕度统计特征如下所述。

(1) 区域相对负荷裕度^[23]

$$K_p = \frac{LM_{\text{area}}}{P_{\text{area}}} \times 100\% \quad (13)$$

(2) 负荷裕度的期望 E 和标准差 S 。

(3) 负荷裕度的最大值 LM_{max} 与最小值 LM_{min} 和各自对应的有功负荷增长方向 $\mathbf{D}_{p,\text{max}}$ 和 $\mathbf{D}_{p,\text{min}}$ 。

(4) 负荷裕度概率密度分布图。

3 计算步骤

本文提出的考虑负荷增长随机性的电压稳定概率评估方法的流程图如图 2 所示。

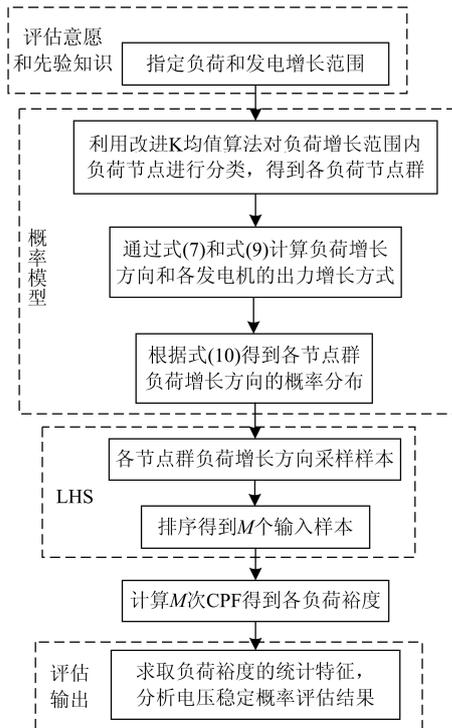


图 2 本文计算方法流程

Fig. 2 Flow chart of the proposed method

4 算例分析

本文提出的电压稳定概率评估方法由 C++ 语言实现, 在 Visual Studio 2010 环境下编译。运用所提方法对我国某大型实际电网 2017 年夏大运行方式数据进行电压稳定离线计算分析。表 1 给出了该电网的计算规模。

表 1 某大型电网计算规模

类型	规模	类型	规模
区域	9	电源	1 703
断面	12	负荷	2 668
节点	12 911	支路	15 695

系统运行人员希望检讨的负荷-发电增长模式通常有两种: 区域(分区)内负荷-发电增长和区域间联络线功率增长。本文按这两种增长模式在不同负荷增长方向下进行电压稳定概率评估。

将指定负荷增长范围内的负荷分为四类, 基于各节点群的负荷预测峰值定义负荷增长方向随机变化的期望。为表明所提算法的有效性, 对两种运行场景进行计算。

场景 1: 确定性评估。负荷增长范围内所有负荷确定性增长, 各节点群负荷增长系数取期望值。

场景 2: 本文提出的概率性评估方法。正态分布的标准差取期望值的 10%, 拉丁超立方采样的采样次数取 200。

分别计算如下负荷-发电增长模式下的两种运行场景得到负荷裕度统计特征信息, 其中负荷裕度和基础功率的单位均为 MW, 由于篇幅限制, 表中有功负荷增长方向用各节点群增长系数代替。

(1) 区域(分区)内负荷-发电增长

(2) 区域间联络线功率增长

从表 2、表 3 的计算结果以及图 3—图 6 的概率密度分布图可知: 与场景 1 的确定性评估方法相比, 场景 2 考虑负荷增长随机的电压稳定概率评估的一个特例, 且场景 2 可以给出各负荷增长方向下的不同负荷裕度以及负荷裕度的整体概率分布信息, 便于调度员找到最关心的负荷增长模式。同时, 从各负荷增长方向对应的各负荷裕度结果可以看出, 负荷裕度对第一类负荷增长变化较为敏感, 所以在系统实际运行中当第一类负荷增长变化较大时, 系统运行人员应提高警示, 采取相应控制措施降低电压失稳风险。通过对该实际电网的计算分析, 结果表明各个增长模式下的区域相对负荷裕度均满足《电力系统电压稳定评价导则》^[23]中正常运行方式下大于 8% 的要求, 说明该电网在正常运行方式下电压

失稳风险较低。综合看来，考虑负荷增长不确定性的电压稳定概率评估能给系统的安全稳定运行提供有价值的参考。

表 2 区域(分区)内负荷-发电增长模式的统计特征

Table 2 Statistical characteristics of area (zone) load-generation growth modes

统计特征		区域 1 内负荷-发电增长	分区 1 内负荷-发电增长
增长期望		[1.0 0.7 0.5 0.3]	[1.2 0.9 0.6 0.4]
基础功率		19 930	4 435
场景 1	$LM(K_p)$	2 481.36 (12.45%)	1 362.72 (30.73%)
	$E(K_p)$	2 468.00 (12.38%)	1 359.62 (30.66%)
	S	254.78	23.02
场景 2	$LM_{min}(K_p)$	1 916.34 (9.62%)	1 283.83 (28.94%)
	$D_{p,min}$	[1.24 0.54 0.48 0.42]	[1.62 0.38 0.41 0.23]
	$LM_{max}(K_p)$	3 216.13 (16.14%)	1 359.62 (30.66%)
	$D_{p,max}$	[0.83 0.79 0.62 0.52]	[0.62 0.39 0.53 0.55]

表 3 区域间联络线功率增长模式的统计特征

Table 3 Statistical characteristics of area to area load-generation growth modes

统计特征		区域 2 送区域 3	区域 4 送区域 5
增长期望		[1.1 0.8 0.6 0.5]	[1.0 0.7 0.5 0.3]
基础功率		6 200	3 500
场景 1	$LM(K_p)$	2 662.49 (42.94%)	1 014.40 (28.98%)
	$E(K_p)$	2 595.16 (41.86%)	1 016.45 (29.04%)
	S	168.06	21.79
场景 2	$LM_{min}(K_p)$	2 051.60 (33.09%)	958.91 (27.40%)
	$D_{p,min}$	[1.47 0.53 0.29 0.61]	[1.36 0.62 0.24 0.14]
	$LM_{max}(K_p)$	2 978.57 (48.04%)	1 079.87 (30.85%)
	$D_{p,max}$	[0.60 0.71 0.81 0.33]	[0.54 0.83 0.61 0.23]

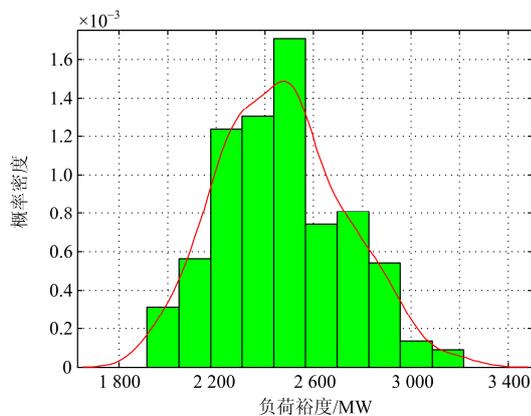


图 3 区域 1 负荷-发电增长模式下负荷裕度概率密度分布
Fig. 3 Load margin probability density distribution of the Area 1 load-generation growth mode

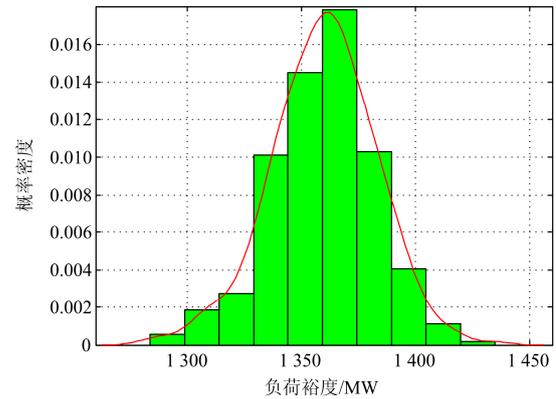


图 4 分区 1 负荷-发电增长模式下负荷裕度概率密度分布
Fig. 4 Load margin probability density distribution of the Zone 1 load-generation growth mode

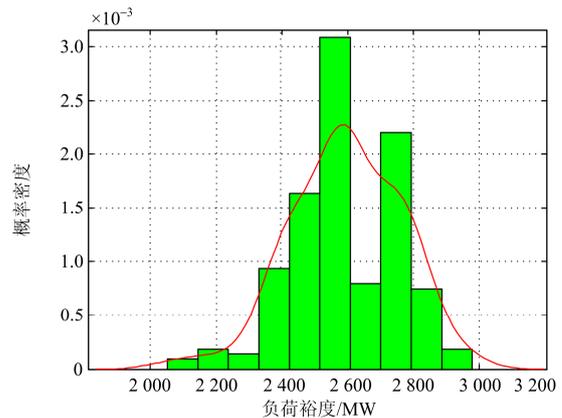


图 5 区域 2 送区域 3 增长模式下负荷裕度概率密度分布
Fig. 5 Load margin probability density distribution of the Area 2 to Area 3 growth mode

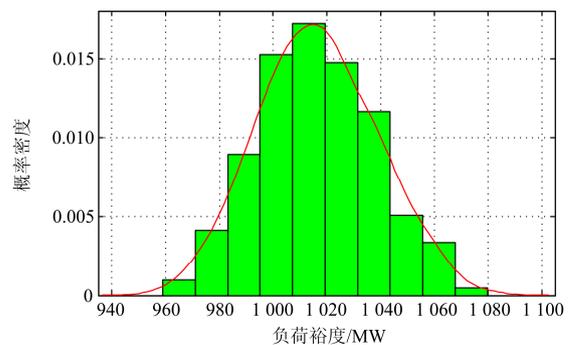


图 6 区域 4 送区域 5 增长模式下负荷裕度概率密度分布
Fig. 6 Load margin probability density distribution of the Area 4 to Area 5 growth mode

5 结论

针对电压稳定负荷裕度计算中的负荷增长方向随机问题，提出了一种电压稳定概率评估方法。通过对负荷进行分类，将各节点群的有功负荷增长系数列为随机变量，降低了随机变量的维度；基于负

荷预测和负荷分类结果定义负荷随机增长的期望,相较于其他方法更能真实反映电力系统实际负荷增长情况,能较好地估计电网未来运行态势;概率评估结果对负荷裕度的描述不再是一个确定值,而是有一定区间范围内的统计分布,有助于系统运行人员全面了解负荷裕度的整体情况;通过对我国某大型实际电网的算例进行计算分析,结果表明该方法对电网运行方式的制定和电力系统调度具有指导意义。

参考文献

- [1] 赵晋泉, 黄文英, 方朝雄, 等. 福建电网在线电压稳定监视和控制系统[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 102-106.
ZHAO Jinquan, HUANG Wenying, FANG Zhaoxiong, et al. Fujian on-line voltage stability monitoring and control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 102-106.
- [2] 凌卫家, 孙维真, 叶琳, 等. 浙江交直流混联受端电网静态稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 164-170.
LING Weijia, SUN Weizhen, YE Lin, et al. Static stability analysis of Zhejiang hybrid ultra-high voltage AC/DC receiving power grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 164-170.
- [3] 傅旭, 王宏, 杨欣, 等. 考虑 N-1 静态电压稳定约束的电力系统负荷裕度新算法[J]. 陕西电力, 2016, 44(3): 15-19.
FU Xu, WANG Hong, YANG Xin, et al. New approach to calculate load margin considering N-1 static voltage stability constraints of power system[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(3): 15-19.
- [4] 李娟, 许欣, 李壮, 等. SVC 与 TCSC 优化配置在电力系统静态电压稳定中的应用[J]. 广东电力, 2016, 29(4): 67-72.
LI Juan, XU Xin, LI Zhuang, et al. Application of SVC and TCSC optimal configuration in static voltage stability of power system[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(4): 67-72.
- [5] DOBSON I, LU L. New methods for computing a closest saddle node bifurcation and worst case load power margin for voltage collapse[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 905-913.
- [6] ALVARADO F, DOBSON I, HU Y. Computation of closest bifurcations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 918-928.
- [7] 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[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(增刊 1): 88-90.
ZHOU Shuangxi, ZHOU Yuan, FENG Zhihong. Determination of closest bifurcations for voltage stability analysis in power systems[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 1997, 37(S1): 88-90.
- [8] 戴伟华, 熊宁, 李曼丽. 负荷增长方式不确定条件下有功出力方式优化[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 136-140.
DAI Weihua, XIONG Ning, LI Manli. Generation rescheduling under uncertain load growth pattern[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 136-140.
- [9] 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[J]. 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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 24-27.
- [10] WAN H, MCCALLEY J D, VITTAL V. Risk based voltage security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1247-1254.
- [11] 何迪, 章禹, 郭创新, 等. 一种面向风险评估的输电线路故障概率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 69-76.
HE Di, ZHANG Yu, GUO Chuangxin, et al. Failure probability model of transmission lines for risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 69-76.
- [12] 王敏, 丁明. 考虑分布式电源的静态电压稳定概率评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 17-22.
WANG Min, DING Ming. Probabilistic evaluation of static voltage stability taking account of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 17-22.
- [13] 白杨, 王鹏, 韩肖清, 等. 基于负荷不确定性建模的静态电压稳定性风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3470-3478.
BAI Yang, WANG Peng, HAN Xiaoqing, et al. Risk assessment of static voltage stability based on load uncertainty modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3470-3478.
- [14] 随慧斌, 赵建国, 李可军, 等. 考虑不均衡区域负荷增长的在线电压稳定评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 57-61.
SUI Huibin, ZHAO Jianguo, LI Kejun, et al. On-line voltage stability assessment considering uneven growth of regional load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 57-61.
- [15] 伍利, 南海鹏, 姚李孝. 实际负荷变化模式下的静态电压稳定分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014,

- 26(5): 50-54.
WU Li, NAN Haipeng, YAO Lixiao. Static voltage stability analysis with realistic load variation mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(5): 50-54.
- [16] KATAOKA Y. A probabilistic nodal loading model and worst case solutions for electric power system voltage stability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1507-1514.
- [17] 陈凡, 刘海涛, 黄正, 等. 基于改进 k-均值聚类的负荷概率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 128-133.
CHEN Fan, LIU Haitao, HUANG Zheng, et al. Probabilistic load model based on improved k-means clustering algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 128-133.
- [18] 邱宜彬, 欧阳誉波, 李奇, 等. 考虑多风电场相关性的场景概率潮流计算及无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 61-68.
QIU Yibin, OUYANG Yubo, LI Qi, et al. Scenario probabilistic load flow calculation and reactive power optimization considering wind farms correlation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 61-68.
- [19] 秦绪华, 王秋平, 陈志强. 基于改进 k-means 算法的电站最优外部运行工况划分[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 28-33.
QIN Xuhua, WANG Qiuping, CHEN Zhiqiang. Application of improved k-means algorithm in optimal operation of power plant[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6): 28-33.
- [20] 刘宇, 高山, 杨胜春, 等. 电力系统概率潮流算法综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 127-135.
LIU Yu, GAO Shan, YANG Shengchun, et al. Review on algorithms for probabilistic load flow in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 127-135.
- [21] YU H, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Probabilistic load flow evaluation with hybrid Latin hypercube sampling and Cholesky decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 661-667.
- [22] AJJARAPU V, CHRISTY C. The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(1): 416-423.
- [23] 国家能源局. 电力系统电压稳定评价导则: DLT 1172—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

收稿日期: 2017-12-05; 修回日期: 2018-02-01

作者简介:

陈刚(1964—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统计算分析和运行控制技术; E-mail: chengang1@csg.cn

包严(1993—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定分析与控制; E-mail: baoyanhhu@163.com

赵晋泉(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统优化运行、电压稳定分析与控制和电力市场等方面。E-mail: jqzhao2@tom.com

(编辑 姜新丽)