

考虑新能源发电不确定性的静态电压稳定故障筛选与排序方法

鲍海波¹, 郭小璇²

(1. 广西电网 南宁供电局, 广西 南宁 530031; 2. 广西电网 电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

摘要:为了有效地分析电力系统设备故障和新能源发电不确定性对系统静态电压稳定的影响,提出了一种考虑新能源发电不确定性的静态电压稳定故障筛选与排序方法。假设各新能源发电出力为均值,建立 $N-1$ 故障场景下确定性的电压稳定临界点模型,根据所得的故障后负荷裕度筛选得到严重故障集。考虑风电和光伏发电的随机分布,建立故障场景下的电压稳定概率评估模型,采用随机响应面法求解获得故障场景的负荷裕度累积概率分布。根据负荷裕度累积概率分布,设计了2种故障后系统电压稳定性的排序指标,确定严重故障集的排序。IEEE 118节点标准系统的计算结果表明,所提故障筛选与排序方法是有效的,可以甄别和排序各故障场景下系统的概率静态电压稳定性;根据故障排序结果构建的电力系统概率电压稳定域有助于对概率稳定边界的分析和研究。

关键词:新能源发电;静态电压稳定;负荷裕度;故障筛选与排序;随机响应面法;不确定性

中图分类号:TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.009

0 引言

风电和光伏等新能源发电并网,不仅有利于调整电力系统的一次能源结构,也可以降低系统的碳排放水平,实现发电侧的清洁可持续化。而且随着新能源发电成本的降低,其相较于传统化石能源发电的经济竞争力逐渐增强^[1-2],使得风电和光伏发电的高比例渗透成为未来电力系统的重要特征。但是由于受自然条件的影响,新能源发电出力具有较强的随机性和不确定性,其高比例并网必将增加系统稳定运行和调节控制的难度。

为了准确且合理地刻画新能源出力的随机特征,有效地评估电力系统的静态电压稳定性,文献[3-13]基于经典概率论,将风速、光照强度以及负荷增加方向等不确定量描述为随机变量,建立了电压稳定概率评估模型,并且采用蒙特卡罗法及其改进方法、点估计法、无迹变换、随机响应面法SRSM(Stochastic Response Surface Method)等概率分析手段进行求解,从而获得静态电压稳定临界功率、负荷裕度或L指标的概率分布,用以判断系统在任意负荷水平下发生电压失稳的概率。其中文献[13]研究了不确定信息不完全可知时系统发生电压失稳的概率区间(即最大概率和最小概率)。

考虑到电力系统线路、变压器等设备发生故障的规律也具有随机性,而且一旦发生设备故障,对系统的静态电压稳定性影响很大。针对电力系统静态电压稳定概率评估模型没有考虑设备故障的问题,文献[14]将设备发生故障的特性定义为服从0-1分

布的随机变量,可以统一处理设备故障和注入功率的随机性。然而,根据历史统计数据可知,设备发生故障的概率通常较小,而新能源发电或负荷方向随机波动的概率较大,将二者的随机性统一考虑到静态电压稳定概率分析问题中,容易出现设备故障的随机性被淹没的问题,且难以准确甄别和量化每个设备故障对系统电压稳定性的影响。文献[15-16]虽然基于概率潮流研究了考虑新能源的静态安全分析,但并没有拓展到静态电压稳定领域。

因此,本文借鉴传统确定性静态电压稳定分析的故障筛选与排序机制^[17-18],提出了一种考虑新能源发电不确定性的静态电压稳定故障筛选与排序方法。首先,通过假设各新能源发电出力为均值,建立故障场景下确定性的电压稳定临界点模型,采用内点法进行求解,获得故障场景的负荷裕度值,据此筛选得到严重故障集。然后,考虑风电和光伏发电的随机分布,建立故障场景下电压稳定概率评估模型,采用随机响应面法结合内点法进行求解,获得各故障场景的负荷裕度累积概率分布。最后,根据负荷裕度累积概率分布,设计了2种故障后系统电压稳定性的排序指标——概率排序指标和裕度排序指标,最终确定严重故障集的排序。

通过对IEEE 118节点标准系统进行仿真,计算结果表明,本文所提故障筛选与排序方法行之有效,可以有效甄别和排序各故障场景下的概率静态电压稳定性。同时,根据故障排序结果构建了电力系统概率静态电压稳定域,对分析和研究系统的概率稳定边界有一定的参考价值 and 意义。

1 考虑新能源的静态电压稳定分析

1.1 静态电压稳定分析模型

本文将衡量电力系统静态电压稳定性的常用指

收稿日期:2019-03-25;修回日期:2019-05-09

基金项目:南方电网公司重点科技项目(GXKJXM20170522)

Project supported by the Key Science and Technology Program of China Southern Power Grid Company(GXKJXM20170522)

标——负荷裕度作为优化目标,以包含负荷裕度参数的扩展潮流方程为等式约束,以设备和系统安全运行限制为不等式约束,考虑风电、光伏发电等新能源出力的不确定性,建立电压稳定概率评估模型如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min(-\lambda) \\ \text{s.t.} \quad U_i \sum_{j \in i} Y_{ij} U_j \cos \delta_{ij} + P_{Li} + \lambda b_{Pi} - \\ \quad P_{Gi} - P_{Wi} - P_{Si} = 0 \quad i, j \in S_B \\ U_i \sum_{j \in i} Y_{ij} U_j \sin \delta_{ij} + Q_{Li} + \lambda b_{Qi} - \\ \quad Q_{Ri} - Q_{Wi} - Q_{Si} = 0 \quad i, j \in S_B \\ P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad i \in S_G \\ Q_{Ri}^{\min} \leq Q_{Ri} \leq Q_{Ri}^{\max} \quad i \in S_R \\ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad i \in S_B \end{array} \right. \quad (1)$$

其中, λ 为负荷裕度; S_B 为系统全部节点的集合; S_G 和 S_R 分别为常规发电机和无功电源节点集合; P_{Gi} 为节点 i 处常规发电机的有功出力; Q_{Ri} 为节点 i 处无功电源的无功出力; P_{Wi} 和 Q_{Wi} 分别为节点 i 处风电场的有功和无功注入功率; P_{Si} 和 Q_{Si} 分别为节点 i 处光伏发电的有功和无功注入功率; P_{Li} 和 Q_{Li} 分别为节点 i 处的有功和无功负荷; b_{Pi} 和 b_{Qi} 为节点 i 处负荷的增加方向; U_i 为节点 i 的电压幅值; Y_{ij} 为节点导纳矩阵中的第 i 行第 j 列元素; $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}$, δ_i 为节点 i 的电压相角, α_{ij} 为节点导纳矩阵中第 i 行第 j 列元素的相角, 是描述电力系统网架特性(容性或感性)的参数; $P_{Gi}^{\max}$ 和 $P_{Gi}^{\min}$ 分别为节点 i 处常规发电机有功出力的上、下限; $Q_{Ri}^{\max}$ 和 $Q_{Ri}^{\min}$ 分别为节点 i 处无功电源无功出力的上、下限; $U_i^{\max}$ 和 $U_i^{\min}$ 分别为节点 i 电压幅值的上、下限安全边界。

由于风电场的出力 P_{Wi} 和 Q_{Wi} 、光伏发电的出力 P_{Si} 和 Q_{Si} 均是随机变量,这使得式(1)是一个随机分析问题,其待求解的是负荷裕度 λ 的概率分布特征,即概率密度分布或累积概率分布。

1.2 新能源发电不确定建模

通常风电机组可以采用恒电压和恒功率因数 2 种运行模式,风电机组在系统对应接入节点可分别归类为 PV 节点和 PQ 节点,2 种运行模式都直接适用于式(1)所示的电压稳定概率分析模型。

本文假设风电机组以恒功率因数模式运行,且风电场内各台机组的功率因数相同、风速相同,从而建立如下风电的随机模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Wi} = N_{Wi} P_{Wgi} \\ Q_{Wi} = P_{Wi} \tan \theta_{Wi} \end{array} \right. \quad (2)$$

$$P_{Wgi} = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & v_i \leq v_{in}, v_i > v_{out} \\ a + bv_i & v_{in} < v_i < v_r \\ P_r & v_r \leq v_i \leq v_{out} \end{array} \right. \quad (3)$$

其中, N_{Wi} 为节点 i 处风电场内风电机组的数量; θ_{Wi} 为节点 i 处风电机组的功率因数角; P_{Wgi} 为节点 i 处风电机组的实际输出功率; $a = P_r v_{in} / (v_{in} - v_r)$ 和 $b = P_r / (v_r - v_{in})$ 为常数; v_{in} 、 v_{out} 和 v_r 分别为风机的切入风速、切出风速和额定风速; P_r 为额定有功出力; v_i 为节点 i 处风电场的实际风速。风电机组和风电场的发电功率随着风速的波动而变化,由于风速具备较强的随机性和不确定性,造成风电机组和风电场的输出有功也具有较大的随机性和不确定性。现有研究通常认为风速近似服从 Weibull 分布,其概率密度函数为:

$$f(v_i) = \frac{K}{C} \left(\frac{v_i}{C} \right)^{K-1} \exp \left[- \left(\frac{v_i}{C} \right)^K \right] \quad (4)$$

其中, K 、 C 分别为 Weibull 分布的形状参数、尺度参数。

光伏发电系统的发电功率与光照强度的关系可以表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Si} = r_i A \eta \\ Q_{Si} = P_{Si} \tan \theta_{Si} \end{array} \right. \quad (5)$$

其中, θ_{Si} 为节点 i 处光伏发电系统的功率因数角; r_i 为太阳光辐射强度; A 为太阳能电池方阵的总面积; η 为总体光电转换效率。由于光照强度受天气影响具有较强的间歇性和随机性,使得 P_{Si} 和 Q_{Si} 也具有随机性。通常认为光照强度满足 Beta 分布,其概率密度函数为:

$$f(s_i) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha) \Gamma(\beta)} S_i^{\alpha-1} (1 - S_i)^{\beta-1} \quad (6)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; $S_i = r_i / r_{\max}$, $r_{\max}$ 为太阳光的最大辐射强度; α 、 β 分别为 Beta 分布的形状参数、尺度参数。

2 静态电压稳定性排序指标

2.1 求解电压稳定概率评估的随机响应面法

为了提高求解效率,采用随机响应面法^[19]结合原始对偶内点算法求解电压稳定概率评估问题。静态电压稳定概率评估模型(式(1)~(6))可以抽象为如下随机性分析问题的标准形式:

$$y = f(x) \quad (7)$$

其中, y 为待求随机变量,即负荷裕度 λ ; x 为输入随机变量,即风电场风速 v_i 和太阳光辐射强度 r_i 。

采用随机响应面法求解式(7)的原理是:将待求随机变量 y 表示为以标准随机变量为自变量、包含待定参数的混沌多项式,明确输出随机变量 y 与标准随机变量的映射,从而建立待求随机变量与输入随机变量的混沌关系。根据少量样本点的对应输入变量 x 和待求变量 y 取值,构建线性方程组并求解混沌多项式中的待定系数,以确定待求随机变量

与输入随机变量的映射,用以分析待求量的随机分布。

(1) 构建待求随机变量的混沌多项式。

随机响应面法通常选择标准正态分布随机变量 ξ 作为标准随机变量,建立待求变量的 Hermite 混沌多项式为:

$$y = a_0 + \sum_{i_1=1}^n a_{i_1} H_1(\xi_{i_1}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=2}^{i_1} a_{i_1 i_2} H_2(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=2}^{i_1} \sum_{i_3=3}^{i_2} a_{i_1 i_2 i_3} H_3(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \xi_{i_3}) + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=2}^{i_1} \sum_{i_3=3}^{i_2} \sum_{i_4=4}^{i_3} a_{i_1 i_2 i_3 i_4} H_4(\xi_{i_1}, \xi_{i_2}, \xi_{i_3}, \xi_{i_4}) + \dots \quad (8)$$

其中, n 为输入随机变量的个数; $a_0, a_{i_1}, a_{i_1 i_2}, \dots$ 为混沌多项式的待定参数,为常数项; $H_m(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m)$ 为 ξ 的 m 阶 Hermite 多项式。式(8)选择的阶数 m 越大,则计算精度越高,但需确定的待定参数也越多,所需的样本点数量和计算量也会大幅增加。为了平衡精度和效率,选择 2 阶混沌多项式更具实用性^[5],则所建立的多项式为:

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \xi_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} (\xi_i^2 - 1) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n a_{ij} \xi_i \xi_j \quad (9)$$

(2) 明确输入随机变量与标准随机变量的映射关系。

电压稳定概率评估模型的输入随机变量是风速 v_i 和太阳光辐射强度 r_i , 分别满足 Weibull 分布和 Beta 分布,可以根据二者的累积概率分布函数 Ψ 经过如下转换获得:

$$x = \Psi^{-1}(\Phi(\xi)) \quad (10)$$

其中, Ψ^{-1} 为 x 的累积概率分布函数的反函数; Φ 为标准正态分布函数。

(3) 确定待定参数。

按照概率配点规则选择风速 v_i 和太阳光辐射强度 r_i 的适当采样点,采用原始对偶内点算法计算模型式(1)~(6)获得各样本点对应的输出变量取值,将其代入式(9)建立线性方程组,计算确定混沌多项式的待定参数。

2.2 故障排序指标

采用随机响应面法求解电压稳定概率评估模型式(1)~(6),可以获得系统负荷裕度的累积概率分布函数 $F(\lambda)$ 。 $F(\lambda)$ 是一个单调递增的函数,根据 $F(\lambda)$ 可以确定任意负荷裕度下系统发生电压失稳的概率,根据其反函数 $F^{-1}(\lambda)$ 则可以确定任意电压失稳概率对应的负荷裕度。

由于电力系统发生设备故障而退出运行,改变了系统的网架结构,使得不同故障后负荷裕度累积概率分布曲线存在差异。因此,本文设计了如下 2 种评价故障后电压稳定性的评价指标。

(1) 概率排序指标。给定负荷裕度 λ_a , 确定故障后电力系统发生静态电压失稳的概率,可表达为式(11)所示。

$$p_{Pr}(\lambda \leq \lambda_a) = F(\lambda_a) \quad 0 \leq \lambda_a \leq +\infty \quad (11)$$

其中, $p_{Pr}(\cdot)$ 为事件发生的概率, $p_{Pr}(\lambda \leq \lambda_a)$ 表示事件 $\lambda \leq \lambda_a$ 发生的概率。不同故障的负荷裕度累积概率分布存在差异,导致系统电压失稳的概率有所不同。电压失稳概率越小,说明故障对系统静态电压稳定性的影响越小;电压失稳概率越大,说明故障对系统静态电压稳定性的影响越大。

(2) 裕度排序指标。给定电压失稳概率 p_a , 确定不同故障场景下的负荷裕度,可表达为:

$$\lambda_a = F^{-1}(p_a) \quad 0 \leq p_a \leq 1 \quad (12)$$

不同故障的负荷裕度累积概率分布存在差异,导致同一失稳概率对应的负荷裕度不同。负荷裕度越高,说明故障对系统静态电压稳定性的影响越小;负荷裕度越低,说明故障对系统静态电压稳定性的影响越大。

3 电压稳定故障筛选与排序方法

3.1 基本思路

大规模电力系统的实际故障集很庞大,若逐个分析每种故障场景下的电压稳定随机特性,需要耗费大量的计算时间。本文提出一种两阶段法进行故障筛选和排序。

阶段 1: 考虑到均值是随机变量概率特征参数,本文将新能源发电出力建模为随机变量,基于其出力均值筛选故障集更具合理性。若基于概率密度的最高值来筛选严重故障场景,同样具有可行性,但由于过度关注高采样区域,难以真实全面地考虑新能源的概率特征。因此,假设新能源发电出力为均值,即风电场的风速 $v_i = \bar{v}_i$ ($\bar{v}_i$ 为风速的平均值)、太阳光辐射强度 $r_i = \bar{r}_i$ ($\bar{r}_i$ 为太阳光辐射强度的平均值)。对于风电场风速和光伏发电太阳光辐射强度的平均值,可分别根据地区风速和光照强度的历史统计数据,计算统计样本的期望值而获得。建立确定性电压稳定临界点模型,采用原始对偶内点算法逐个分析各种 $N-1$ 故障场景,筛选得到对系统稳定裕度影响较大的故障集,即严重故障集。

阶段 2: 考虑新能源发电的随机分布,建立电压稳定概率分析模型(式(1)~(6)),根据其结果进行严重故障集排序。

阶段 2 故障排序的实施方法为: ① 选择严重故障集的各故障场景,修正电力系统的网络结构,建立各故障场景下的电压稳定概率评估模型; ② 求解各电压稳定概率评估问题,获得故障后负荷裕度累积概率分布曲线; ③ 根据负荷裕度累积概率分布,计算各故障场景下静态电压稳定性的概率指标或裕度指

标,并按指标值进行排序。

3.2 实现流程

本文所提电压稳定故障筛选与排序方法的实现步骤如下:

(1) 选择需要分析的 M 种 $N-1$ 故障场景,构建原始故障集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$;

(2) 假设风电场的风速和光伏系统的太阳光辐射强度为对应的平均值,即 $v_i = \bar{v}_i$ 、 $r_i = \bar{r}_i$,选取任意故障场景 s_i ,修正网络结构,建立故障场景 s_i 下的电压稳定临界点模型;

(3) 采用内点算法求解电压稳定临界点问题,获得各故障场景的负荷裕度,筛选得到严重故障集 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_i\}$;

(4) 选取严重故障集内任一故障场景 h_i ,修正网络结构,并考虑风电、光伏等新能源发电的不确定性,建立故障场景 h_i 下的电压稳定概率评估模型式(1)~(6);

(5) 采用随机响应面法将电压稳定概率评估问题转化为一系列确定性的电压稳定临界点计算问题;

(6) 采用原始对偶内点算法求解各电压稳定临界点问题,根据结果构造负荷裕度的累积概率分布函数 $F_i(\lambda)$;

(7) 根据式(11)或式(12)计算故障场景 h_i 下的概率排序指标或裕度排序指标;

(8) 重复步骤(4)~(7),直至完成严重故障集 H 内所有故障场景的分析;

(9) 根据概率排序指标或裕度排序指标对故障集内的各故障场景进行排序。

4 计算结果分析

4.1 系统概况

使用 MATLABR2016b 编写程序实现本文所提模型与方法,计算平台 CPU 主频为 3.2 GHz×2,内存为 8 GB。各风电场和光伏发电的主要参数及在 IEEE 118 节点系统中的接入位置分别如表 1、2 所示。所研究的负荷方向为以恒功率因数、4 个节点负荷同时等比例增加。

4.2 电压稳定故障筛选与排序

为了验证随机响应面法的求解精度和效率,本文

表 1 风电场参数

Table 1 Parameters of wind farms

风电场	接入节点	机组数/台	额定容量/MW	切入风速/(m·s ⁻¹)	切出风速/(m·s ⁻¹)	额定风速/(m·s ⁻¹)	K	$C/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1	23	80	1.0	4.5	27	15	1.6	7.0
2	27	40	1.2	4.0	30	15	1.8	6.0
3	39	50	1.5	3.5	25	14	1.6	7.0
4	114	20	2.0	4.0	30	15	1.7	6.5

表 2 光伏发电参数

Table 2 Parameters of photovoltaic power generation

光伏系统	接入节点	总面积/m ²	转换效率/%	最大辐射强度/(W·m ⁻²)	α	β
1	23	40 000	15	707.1	0.95	0.95
2	45	35 000	14	695.5	0.90	0.90

以 10 000 次蒙特卡罗模拟作为对比依据,分别采用蒙特卡罗法、随机响应面法、点估计法计算电力系统正常状态下的稳定裕度均值和标准差,3 种方法的求解效果对比如表 3 所示,从而验证了随机响应面法在计算效率和精度上的优势。

表 3 3 种方法的计算效率对比

Table 3 Comparison of calculation efficiency among three methods

方法	负荷裕度均值	均值误差/%	负荷裕度标准差	标准差误差/%	计算时间/s
蒙特卡罗法	1.692 2	0	0.010 7	0	420.54
点估计法	1.695 0	0.17	0.011 3	5.61	3.78
随机响应面法	1.692 8	0.04	0.010 9	1.87	3.92

采用随机响应面法求解电力系统正常状态和 $N-1$ 故障状态下的负荷裕度,可以构造得到负荷裕度的 Hermite 多项式如下:

$$\lambda = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \xi_i + \sum_{i=1}^4 a_{ii} (\xi_i^2 - 1) + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i+1}^4 a_{ij} \xi_i \xi_j \quad (13)$$

由于故障场景不同,所确定的待定参数 a_0 、 a_i 、 a_{ii} 、 a_{ij} 也会各不相同。

表 4 为阶段 1 筛选得到的严重故障集合。以支路 76-118 因故障而退运为例,所得的故障后负荷裕度累积概率分布如图 1 所示。根据图 1 可以判断当负荷裕度 λ_a 为 1.660、1.665、1.670 和 1.675 时,系统发生静态电压失稳的概率分别为 0.114、0.585、0.941 和 1.000,即可确定该故障场景的概率指标。

表 4 IEEE 118 节点系统的严重故障集

Table 4 Serious fault set of IEEE 118-bus system

系统	严重故障集
IEEE 118 节点	8-9, 12-117, 110-112, 75-118, 76-118, 89-90, 89-92, 69-75, 69-70, 38-65, 42-49, 26-30, 25-27, 11-13

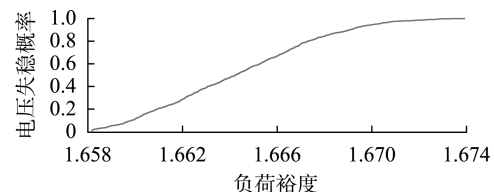


图 1 支路 76-118 发生故障后的负荷裕度累积概率分布

Fig.1 Cumulative density distribution of load margin after fault of branch 76-118

由此逐个确定各故障场景下的概率指标如表 5 所示,相应的故障排序如表 6 所示。从表 6 可以看

出,由于不同故障场景对系统电压稳定性影响的严重程度不同,故障场景的累积概率分布相差很大,难以选择恰当的负荷裕度 λ_a 作为统一判断标准。而且如果选择的负荷裕度不恰当,很容易出现表6中支路8-9、12-17、110-112、75-118等多个故障排序相同的情况。

表5 各故障场景下的概率指标

Table 5 Probability index under each fault scenario

断线支路	电压失稳概率			
	$\lambda_a = 1.660$	$\lambda_a = 1.665$	$\lambda_a = 1.670$	$\lambda_a = 1.675$
8-9	1.000	1.000	1.000	1.000
12-17	1.000	1.000	1.000	1.000
110-112	1.000	1.000	1.000	1.000
75-118	1.000	1.000	1.000	1.000
76-118	0.114	0.585	0.941	1.000
89-90	0	0	0.100	0.267
89-92	0	0	0.112	0.293
69-75	0.920	0.979	0.995	1.000
69-70	0	0	0.091	0.269
38-65	0.765	0.859	0.923	0.957
42-49	0.025	0.126	0.286	0.480
26-30	0	0.046	0.172	0.365
25-27	0	0	0.040	0.184
11-13	0	0.863	1.000	1.000

表6 故障排序结果

Table 6 Ranking results of faults

断线支路	故障顺序			
	$\lambda_a = 1.660$	$\lambda_a = 1.665$	$\lambda_a = 1.670$	$\lambda_a = 1.675$
8-9	1	1	1	1
12-17	1	1	1	1
110-112	1	1	1	1
75-118	1	1	1	1
76-118	7	8	7	1
89-90	9	11	12	13
89-92	9	11	11	11
69-75	5	5	6	1
69-70	9	11	13	12
38-65	6	7	8	8
42-49	8	9	9	9
26-30	9	10	10	10
25-27	9	11	14	14
11-13	9	6	1	1

同样以支路76-118因故障而退运为例,给定电压失稳概率 p_a 为0.6、0.7、0.8和0.9时,系统的负荷水平分别为1.665 2、1.666 2、1.667 4和1.669 0,即可确定该故障场景的裕度指标。逐个确定各故障场景的概率指标如附录中的表A1所示,相应的故障排序如附录中的表A2所示。与概率排序指标相比,裕度排序指标更为灵活,给定电压失稳概率 p_a 的选择更为容易,不会出现多个故障排序相同的问题,尤其适用于不同故障结果差异较大的大规模电力系统。

所提方法得到的0.6、0.7、0.8、0.9电压稳定概率,是基于系统发生故障场景得到的,实际系统正常状态下的电压稳定概率接近于1.0。掌握故障场景

的故障场景下电压失稳概率,可以有助于绘制系统静态电压稳定的概率稳定域和概率不稳定域,从而指导系统调整运行于最优区域。

4.3 概率电压稳定域

依据附录中表A1的裕度排序指标,本文构建了基于故障集的概率静态电压稳定域如图2所示,稳定域边界放大后如图3所示。图中曲线左侧为概率静态电压稳定域,右侧为概率静态电压不稳定域。

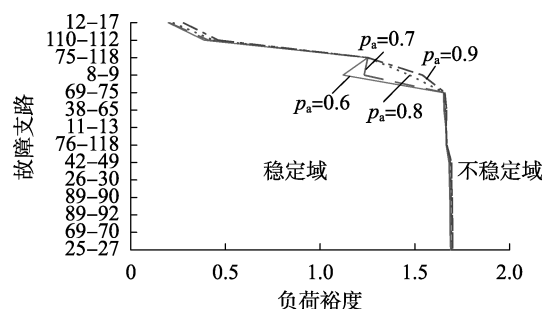


图2 基于故障集的概率静态电压稳定域

Fig.2 Probability voltage stability domain based on fault set

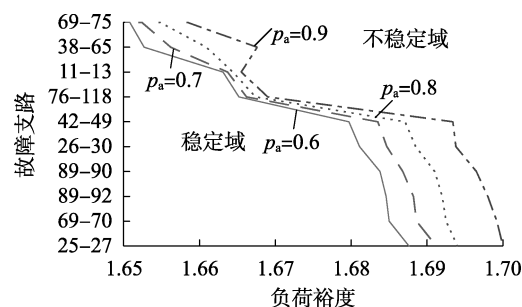


图3 稳定域边界放大图

Fig.3 Enlarged view of stability domain boundary

当电力系统运行于概率电压稳定域边界内时,系统发生静态电压失稳的最大概率为给定值。以 $p_a = 0.6$ 为例,当系统负荷水平和网络结构运行于 $p_a = 0.6$ 曲线的左侧时,系统发生电压失稳的最大概率为0.6,系统保持电压稳定的最小概率为0.4。而当系统负荷水平和网络结构运行于 $p_a = 0.8$ 曲线的左侧时,发生电压失稳的最大概率为0.8,保持电压稳定的最小概率为0.2。

5 结论

本文提出了概率排序和裕度排序2种故障排序指标,设计了一种考虑新能源发电不确定性的静态电压稳定故障的两阶段排序方法。通过IEEE 118节点标准系统的计算结果表明,本文所提方法可以有效甄别和排序随机因素影响下故障场景的静态电压稳定性。同时,基于故障排序结果,构建了基于故障集的电力系统概率电压稳定域,用于判断系统给定失稳概率的最佳运行区域。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家信息中心经济预测部. 新能源发电成本下降原因及发展趋势[EB/OL]. (2016-09-30) [2019-03-25]. <http://www.sic.gov.cn/News/466/6940.htm>.
- [2] 康忠健,辛士郎,仲崇山,等. 双馈风电场穿透功率增加对电力系统稳定影响综述[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):94-99.
KANG Zhongjian, XIN Shilang, ZHONG Chongshan, et al. Impact of ride-through power increase of DFIG-based wind farm on power system stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11):94-99.
- [3] 杨悦,李国庆,王振浩. 基于可信性理论的含风电电力系统电压稳定概率评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):6-12.
YANG Yue, LI Guoqing, WANG Zhenhao. Probabilistic voltage stability assessment based on credibility theory for power system with wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12):6-12.
- [4] HAESSEN E, BASTIAENSEN C, DRIESEN J, et al. A probabilistic formulation of load margins in power systems with stochastic generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2):951-958.
- [5] 鲍海波,韦化. 考虑风电的电压稳定概率评估的随机响应面法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):77-85,194.
BAO Haiibo, WEI Hua. A stochastic response surface method for probabilistic evaluation of the voltage stability considering wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13):77-85, 194.
- [6] 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.
- [7] BAO H B, WEI H, GUO X X. Solutions to probabilistic analysis of voltage stability in power systems with wind farms using advanced unscented transformation[C]//2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Beijing, China: IEEE, 2016:1-7.
- [8] 谢应昭,卢继平. 基于多项式正态变换和最大熵估计的含风电系统电压稳定概率分析[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):66-73.
XIE Yingzhao, LU Jiping. Probabilistic voltage stability analysis based on polynomial normal transformation and maximum entropy estimation for power system containing wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10):66-73.
- [9] RODRIGUES A B, PRADA R B, DA GUIA DA SILVA M. Voltage stability probabilistic assessment in composite systems: modeling unsolvability and controllability loss[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3):1575-1588.
- [10] 鲍海波,韦化,郭小璇. 考虑双馈异步风电机组无功极限的静态电压稳定概率评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(11):87-93.
BAO Haiibo, WEI Hua, GUO Xiaoxuan. Static voltage stability probabilistic evaluation considering reactive power limit of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11):87-93.
- [11] 陈磊,闵勇,侯凯元. 考虑风电随机性的静态电压稳定概率评估[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):674-680.
CHEN Lei, MIN Yong, HOU Kaiyuan. Probabilistic steady-state voltage stability assessment considering stochastic wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3):674-680.
- [12] 张谦,唐飞,刘涤尘,等. 计及电动汽车充电和负荷波动极限的电力系统静态电压稳定性评估方案[J]. 电网技术,2017,41(6):1888-1895.
ZHANG Qian, TANG Fei, LIU Dichen, et al. A static voltage stability assessment scheme of electric power systems considering charging state of plug-in electric vehicles and load fluctuation limits[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):1888-1895.
- [13] 鲍海波,郭小璇,韦化. 结合证据理论和双层规划的电压稳定不确定分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(5):120-126,146.
BAO Haiibo, GUO Xiaoxuan, WEI Hua. Uncertainty analysis of voltage stability based on evidence theory and bilevel programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5):120-126, 146.
- [14] 吴蓓,张焰,陈闽江. 点估计法在电压稳定性分析中的应用[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):38-43.
WU Bei, ZHANG Yan, CHEN Minjiang. Application of point estimate method to voltage stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25):38-43.
- [15] 蒋平,杨绍进,霍雨舫. 考虑风电场出力随机性的电网静态安全分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(22):35-40.
JIANG Ping, YANG Shaojin, HUO Yuchong. Static security analysis of power systems considering randomness of wind farm output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(22):35-40.
- [16] 董雷,程卫东,杨以涵. 考虑支路随机断线的概率潮流方法及应用[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(20):79-84.
DONG Lei, CHENG Weidong, YANG Yihan. Probabilistic load flow method with consideration of random branch outages and its application[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20):79-84.
- [17] 陈得治,张伯明,吴文传,等. 静态电压稳定分析的故障筛选和排序方法[J]. 电力系统自动化,2008,32(14):16-20,39.
CHEN Dezhi, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. A contingency screening and ranking method for voltage stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14):16-20, 39.
- [18] 马平,蔡兴国. 电压稳定分析中支路型故障筛选及排序算法研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(1):44-48.
MA Ping, CAI Xingguo. A new method of screening and ranking branch outage contingencies for voltage stability assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1):44-48.
- [19] ISUKAPALLI S S, ROY A, GEORGOPOULOS P G. Stochastic Response Surface Methods (SRSMs) for uncertainty propagation: application to environmental and biological systems[J]. Risk Analysis, 1998, 18(3):351-363.

作者简介:



鲍海波

鲍海波(1988—),男,安徽合肥人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统最优运行与规划(E-mail: baohaiiboP50514007@163.com);

郭小璇(1986—),女,辽宁大连人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统运行与分析(E-mail: guo_xiaoxuan@163.com)。

Fault screening and ranking method of static voltage stability considering uncertainty of renewable energy power generation

BAO Haibo¹, GUO Xiaoxuan²

(1. Nanning Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530031, China;

2. Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530023, China)

Abstract: In order to effectively analyze the influence of power system equipment failures and uncertainty of renewable energy power generation on static voltage stability, a fault screening and ranking method of static voltage stability considering uncertainty of renewable energy power generation is proposed. Assuming the average output of each renewable energy power generation, the deterministic voltage stability critical point model under $N-1$ fault scenario is established, and the critical fault set is screened based on the obtained load margin after fault. The voltage stability probability evaluation model under fault scenario is established considering the random distribution of wind power and photovoltaic power generation, and the cumulative probability distribution of load margin under fault scenario is solved by the stochastic response surface method, based on which, two voltage stability ranking indexes are designed to determine the ranking of critical fault sets. Calculative results of the standard IEEE 118-bus system show that, the proposed fault screening and ranking method is effective, and the static voltage stability probability under each fault scenario can be screened and sorted. The probabilistic voltage stability domain of power system, which is established on the basis of the fault ranking result, is conducive to the analysis and study of probability stable boundary.

Key words: renewable energy power generation; static voltage stability; load margin; fault screening and ranking; stochastic response surface method; uncertainties

(上接第56页 continued from page 56)

- mation Equipment, 2014, 34(4): 95-100, 119.
- [17] YANG Hao, ZHANG Baohui, MA Shiyang, et al. A novel self-adaptive underfrequency load shedding method based on local measurements [C] // 2013 IEEE Region 10 Conference. Xi'an, China: IEEE, 2013: 1-4.
- [18] 李顺, 廖清芬, 唐飞, 等. 高风电渗透率下的自适应低频减载策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1084-1090.
LI Shun, LIAO Qingfen, TANG Fei, et al. Adaptive underfrequency load shedding strategy considering high wind power penetration[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1084-1090.
- [19] 李常刚, 刘玉田, 邱夕兆. 基于暂态频率偏移安全性的低频减载方案优化[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(4): 51-56, 61.
LI Changgang, LIU Yutian, QIU Xizhao. Optimization of under-frequency load shedding schemes based on transient frequency deviation security[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(4): 51-56, 61.
- [20] FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu. Integrated wind turbine con-

troller with virtual inertia and primary frequency responses for grid dynamic frequency support[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(8): 1129-1137.

作者简介:



王怀远

王怀远(1987—),男,福建南安人,博士,从事电力系统安全稳定控制方面的研究工作(E-mail: 79749544@qq.com);

何培灿(1994—),男,福建龙岩人,硕士研究生,研究方向为电力系统安全稳定控制(E-mail: 845015625@qq.com);

江岳文(1977—),女,湖南岳阳人,教授,从事风电并网优化运行方面的研究工作(E-mail: jiangyuewen2008@163.com)。

Under-frequency load shedding scheme based on estimated inertia

WANG Huaiyuan, HE Peican, JIANG Yuewen, WEN Buying

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: Different control methods for new energy power generation access to systems will bring different influences to the inertia of system. The real-time calculation method to calculate power shortage based on estimated inertia is proposed. Firstly, the shortcomings of the existing under-frequency load shedding equipment for calculating power shortage are analyzed. In view of these shortcomings, the influence of voltage deviation on active power balance is studied, and the quantization algorithm is proposed. According to the response information of load after disturbance, a real-time method to recognize system inertia is proposed. Then, the real-time calculation method to calculate power shortage based on estimated inertia is proposed. The simulative results of islanding system in IEEE 39-bus system verify the influence of the voltage offset on the calculation of power shortage, and the veracity and validity of recognizing system inertia and calculating power shortage in real-time. Compared with the traditional round-by-round load shedding schemes, the proposed scheme has relatively small amount of load shedding and dynamic frequency offset and stronger ability of frequency recovery.

Key words: under-frequency load shedding; inertia calculation; frequency stability; real-time calculation; power shortage

附录

表 A1 IEEE 118 节点系统故障场景的裕度指标
Table A1 Margin index of fault scenarios for IEEE 118-bus system

断线支路	负荷裕度			
	$p_a=0.6$	$p_a=0.7$	$p_a=0.8$	$p_a=0.9$
8-9	1.1206	1.2320	1.4722	1.5403
12-17	0.1977	0.2025	0.2224	0.2768
110-112	0.3886	0.4105	0.4365	0.4622
75-118	1.2513	1.2514	1.2516	1.2517
76-118	1.6652	1.6662	1.6674	1.6690
89-90	1.6838	1.6868	1.6910	1.6965
89-92	1.6846	1.6882	1.6920	1.6980
69-75	1.6508	1.6524	1.6548	1.6584
69-70	1.6850	1.6886	1.6925	1.6992
38-65	1.6527	1.6562	1.6609	1.6676
42-49	1.6797	1.6835	1.6871	1.6934
26-30	1.6811	1.6847	1.6885	1.6938
25-27	1.6876	1.6912	1.6940	1.7000
11-13	1.6631	1.6637	1.6644	1.6655

表 A2 基于裕度指标的 IEEE 118 节点系统的故障排序结果
Table A2 Fault ranking results of IEEE 118-bus system based on margin index

断线支路	故障顺序			
	$p_a=0.6$	$p_a=0.7$	$p_a=0.8$	$p_a=0.9$
8-9	3	3	4	4
12-17	1	1	1	1
110-112	2	2	2	2
75-118	4	4	3	3
76-118	8	8	8	8
89-90	11	12	11	11
89-92	12	13	12	12
69-75	5	5	5	5
69-70	13	13	13	13
38-65	6	6	6	7
42-49	9	9	9	9
26-30	10	11	10	10
25-27	14	14	14	14
11-13	7	7	7	6