

DOI: 10.7667/PSPC170923

## 考虑风电接入与负荷不确定性的静态电压稳定性分析

段贵钟<sup>1</sup>, 秦文萍<sup>1</sup>, 逯瑞鹏<sup>1</sup>, 雷达<sup>2</sup>, 肖莹<sup>2</sup>, 许进<sup>1</sup>

(1. 电力系统运行与控制山西省重点实验室(太原理工大学), 山西 太原 030024;

2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

**摘要:** 随着风电渗透率不断提高, 其对系统电压稳定性的影响已经不容忽视。根据风电特性, 计及风电机组由于电压降低进入降功率运行的情况, 同时考虑充分利用风电场无功补偿剩余容量, 提出了一种考虑风电接入情况下的改进连续潮流算法。为了研究负荷不确定性对系统的影响, 使用概率潮流法进行电压稳定性分析。分析过程中, 以所提出的改进连续潮流法对含有风电系统的样本进行计算, 同时使用模糊 C 均值聚类算法进行负荷聚类, 建立基于负荷聚类的拉丁超立方抽样概率潮流模型。分别在 IEEE 14 节点系统和 IEEE 57 节点系统中加入风电进行算例分析。分析结果表明, 所提方法分析结果更符合实际情况, 而且提高了概率潮流算法的样本利用率。

**关键词:** 静态电压稳定性; 连续潮流; 风电; 无功补偿; 负荷聚类; 概率潮流

### Static voltage stability analysis considering the wind power and uncertainty of load

DUAN Guizhong<sup>1</sup>, QIN Wenping<sup>1</sup>, LU Ruipeng<sup>1</sup>, LEI Da<sup>2</sup>, XIAO Ying<sup>2</sup>, XU Jin<sup>1</sup>

(1. Shanxi Key Laboratory of Power System Operation & Control (Taiyuan University of Technology),

Taiyuan 030024, China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** As the wind power penetration is increasing ceaselessly, the influence of wind power for voltage stability should not be ignored. According to the characteristics of wind power, this paper proposes an improved continuation power flow method. This method considers the wind generators switching to power-reducing mode when the voltage declines. At the same time, this method considers using the wind farm's remaining capacity of reactive power compensation device to improve the condition of grid voltage. To study the influence of load uncertainty on system, the probabilistic load flow is used to make voltage stability analysis. The improved continuation power flow method is used to research the samples of probabilistic load flow. At the same time, the fuzzy C-mean clustering is used to find the load bus group. A Latin hypercube probabilistic load flow model based on load clustering is built. The validity of proposed method is tested on IEEE 14 and IEEE 57 bus system, which have wind farms. The simulation result shows that the method of this paper matches the practice better. Besides, this method can improve the sampling efficiency.

This work is supported by Key Research and Development Program of Shanxi Province (No. 201603D112001).

**Key words:** static voltage stability; continuous power flow; wind power; reactive power compensation; load clustering; probabilistic load flow

## 0 引言

随着风电等新能源大量接入电网、工农业生产生活负荷不确定性增强以及负荷中心远离能源基地, 系统电压稳定性问题越来越严重。

静态电压稳定性分析方法有很多<sup>[1-3]</sup>。其中, 连

续潮流法(Continuous Power Flow, CPF)从负荷初始状态逐渐增长负荷寻找系统崩溃点, 该方法可以在运算时克服潮流方程雅可比矩阵奇异的问题<sup>[4]</sup>, 再加上其简单有效, 许多学者在研究风电并网时都选择 CPF 进行电压稳定性分析。文献[5]使用 CPF 进行了双馈风电机组在不同控制方式下的电压稳定性分析。文献[6]提出了一种计及风电场低电压自切操作的改进连续潮流算法, 然而, 随着风电机组低电压穿越技术的普及, 该方法不再适用。由于 CPF 潮流计

基金项目: 山西省重点研发计划重点项目资助(201603D112001); 山西省电力公司科技项目资助(SGTYHT/14-JS-188)

算次数较多, 计算时间较长, 文献[7]采用改进二分搜索法加快了 CPF 的计算速度。文献[8]在连续潮流计算中考虑了发电机无功出力极限的限制, 对超出无功限制的节点进行了 PQ 节点转换, 该方法更符合实际情况。

由于 CPF 只能对系统安全性进行确定性评估, 为了研究不确定负荷对电力系统的影响, 文献[9]在 CPF 的基础上进行模拟法概率潮流计算, 研究了负荷波动极限情况下的系统电压稳定性问题, 但在建立负荷模型时并没有考虑负荷之间的相关性。文献[10]同时考虑负荷增长方式随机性和负荷出现增长节点的不确定性, 却没有考虑风电接入的情况。

本文考虑风电机组由于电压下降而降功率运行的情况, 同时充分利用风电场的无功补偿装置剩余容量, 提出了考虑风电场接入情况下的改进连续潮流算法。使用模拟法概率潮流充分考虑负荷不确定性对系统的影响, 在概率潮流计算中, 对得到的含有风电系统的样本进行本文提出的改进连续潮流计算, 同时对负荷曲线进行模糊 C 均值聚类, 确定负荷节点群, 以节点群为单位进行随机负荷建模。为了验证本文所提方法的有效性, 分别在 IEEE14 节点系统和 IEEE57 节点系统中加入风电, 对上述含有风电场的算例系统进行计算分析。

## 1 计及风电接入的连续潮流法

### 1.1 低电压导致的风电机组降功率运行

风力发电机的低电压穿越技术是当电网发生故障导致电压突然跌落时, 风力发电机可以在一定时间内保持并网状态不解列<sup>[11]</sup>。除了电网故障会导致电压下降外, 在电压稳定性分析中同样会遇到电压下降的情况。文献[6]提出了在电压稳定性分析情况下考虑电网电压降低导致风力发电机自切后的连续潮流算法。但风电场低电压穿越是当电网故障引起电压突然跌落, 导致电流突然增大, 为了保护风电机组元件而采取的措施。而在静态电压稳定性研究过程中, 电压的跌落并非瞬时的, 不存在电流突然增大的过程, 因此本文不考虑风力发电机的自切。

但是当风力发电机检测到电压降低时, 为了保护风电机组, 需要控制变桨子系统动作降低出力。也就是说在电压稳定性分析中, 虽然可以不考虑风力发电机的自切, 但却需要考虑由于电压降低导致的降功率运行, 确保风电机组电流不会过大。

### 1.2 风电场无功补偿装置剩余容量

风电场的无功功率的调节范围和响应速度都要满足风电场所在节点的电压调节要求。风电场规划阶段都要按照《风电场接入电力系统技术规定》的

要求配置一定无功补偿装置<sup>[12]</sup>。

通常情况下, 风电场无功补偿装置只用来补偿风电场的无功需求。然而风电场出力不同时需要的无功补偿不同, 风电场出力越大, 风电场需要的无功功率越大<sup>[13]</sup>。也就是说该无功补偿装置并不是时刻处于满发状态, 在电压稳定性分析时, 若风电场所在节点电压下降时, 可以利用其无功剩余容量抬高节点电压。

无功剩余容量可以通过无功补偿容量减去风电场无功需求得到。图 1 为典型风电场接线拓扑图, 从图中可以看出, 风电场无功计算时需要考虑风力机箱式变压器、汇流升压站变压器、集电线路以及风力发电机的无功。

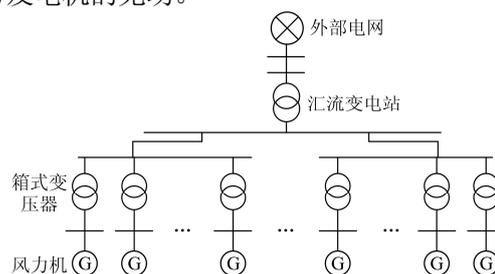


图 1 风电场拓扑图

Fig. 1 Topology of wind farm

风力机箱式变压器和汇流升压站变压器的无功功率计算公式为

$$X_T = \frac{U_c^2}{S_e} \times \frac{U_k \%}{100} \quad (1)$$

$$\Delta Q_T = \frac{P_T^2 + Q_T^2}{U_c^2} \cdot X_T + \frac{I_0 \% \times S_e}{100} \quad (2)$$

式中:  $X_T$  为变压器电抗;  $S_e$  为变压器额定容量;  $U_c$  为额定电压;  $\Delta Q_T$  为变压器吸收的无功;  $P_T$  和  $Q_T$  为变压器的有功和无功功率;  $I_0 \%$  为变压器空载电流百分值;  $U_k \%$  为变压器短路电压百分值。

集电线路吸收的无功功率计算公式为

$$\Delta Q_L = \frac{P_L^2 + Q_L^2}{U_L^2} \cdot X_L \quad (3)$$

式中:  $P_L$  和  $Q_L$  为线路传输的有功和无功功率;  $U_L$  为线路的电压;  $X_L$  为线路的电抗。

不同的风电机组在运行时无功特性是不同的, 常见风力发电机有双馈异步发电机、永磁直驱同步发电机以及笼式异步发电机。目前国内生产的双馈异步风电机组和永磁直驱同步风电机组的功率因数可以控制在  $-0.98 \sim 0.98$ , 即这两种风电机组的功率因数可以在一定范围内调节, 当风电场电压降低时, 风电机组可以发出一定的无功改善节点电压。而笼

式异步风电机组并没有这样的调节功能，其在发出有功的同时也需要吸收无功，而且随着发出有功功率的增加，吸收的无功功率也增加。

综上所述，可以计算风电场的无功补偿装置剩余容量。设风电场的无功补偿装置容量为  $Q_z$ ，风电机组吸收无功功率为  $Q_j$ ，则风电场的无功补偿装置剩余容量为

$$Q_s = Q_z - nQ_j - n\Delta Q_{T1} - \Delta Q_{T2} - \Delta Q_L \quad (4)$$

式中： $n$  为风力机台数； $\Delta Q_{T1}$  和  $\Delta Q_{T2}$  分别为风力机箱式变压器和升压站变压器吸收的无功。

当风电场所在节点电压降低到 0.9 p.u. 以下，可以考虑使用这部分无功补偿装置剩余容量对系统进行无功补偿。

### 1.3 计及风电接入的改进连续潮流法

连续潮流法可以分成四个步骤：预测、校正、参数化以及步长控制<sup>[14]</sup>，可以利用其绘制 PV 曲线。然而在绘制 PV 曲线的过程中，如果步长控制中步长过大，则收敛精度不好，计算的稳定极限可能与系统实际情况相差甚远。如果步长过小则会产生许多无效的中间解，导致计算时间过长。

为了解决这一问题，文献[7]使用改进二分搜索法，在离崩溃点较远时使用二项式搜索法将负荷以 2 的指数倍大幅度增加从而快速确定崩溃点所在区间，而后使用二分搜索法寻找到该区间内的崩溃点，在相同的收敛精度下，该方法耗时更少。

本文在改进二分搜索法的基础上同时考虑风电机组的降功率运行与风电场无功补偿装置剩余容量，提出改进连续潮流算法，算法步骤如下。

1) 输入系统数据，进行潮流计算，并记录风电场的出力  $P_1$  与所在节点电压  $U_0$ ，计算当前风电场出力情况风电场无功补偿装置无功出力  $Q_1$ 。

2) 根据当前电压，计算额定电流情况下的风电场最大出力  $P_{\max}$ ，若  $|P_1 - P_{\max}| > 0.01 \text{ MW}$ ，则将风电场出力设定为  $P_{\max}$  并返回 1) 重新计算。

3) 计算风电场无功补偿装置剩余容量  $Q_s$ 。若  $U_0 < 0.9 \text{ p.u.}$  且  $|Q_s - Q_1| > 0.01 \text{ MW}$ ，则令风电场无功出力  $Q_s$  并返回 1) 重新计算。

4) 判断是否找到崩溃点，如果找到结束计算，否则初始化参数，使用改进二分搜索法增加负荷并返回步骤 1) 重新计算。

## 2 基于负荷聚类的拉丁超立方概率潮流

### 2.1 模糊 C 均值聚类

由于受到用电习惯、气候、天气变化等因素的

影响，负荷之间存在一定的相关性，在建立负荷模型时也应该考虑负荷之间的相关性。负荷聚类通过聚类算法，根据负荷的历史数据将负荷特性相同的负荷进行聚类，同时找出不同类型节点的负荷特性。

负荷聚类方式很多，比较常用的有 K-mean 聚类、支持向量机、自组织特征映射神经网络、模糊 C 均值聚类等<sup>[15]</sup>。其中，由于模糊 C 均值聚类在聚类稳定性与聚类准确度方面效果很好，在负荷聚类中得到广泛应用。

为了避免人为确定聚类数目导致的误差，可以利用类间类内划分指标(Between Within Proportion, BWP)<sup>[16]</sup>确定聚类效果，选择最佳的聚类数目，BWP 计算公式为

$$\text{BWP}(j, i) = \frac{b(j, i) - w(j, i)}{b(j, i) + w(j, i)} \quad (5)$$

$$b(j, i) = \min_{1 \leq k \leq m, k \neq j} \left( \frac{1}{n_k} \sum_{p=1}^{n_k} \|x_p^k - x_i^j\|^2 \right) \quad (6)$$

$$w(j, i) = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{q=1, q \neq i}^{n_j} \|x_q^j - x_i^j\|^2 \quad (7)$$

式中： $b(j, i)$  表示第  $j$  类中第  $i$  个样本的最小类间距离； $w(j, i)$  表示第  $j$  类中第  $i$  个样本的类内距离； $m$  表示聚类数； $x_i^j$  表示第  $j$  类的第  $i$  个样本； $x_p^k$  和  $x_q^j$  的命名规则同上； $n_k$  和  $n_j$  表示第  $k$  类和第  $j$  类中的样本个数。

使用 BWP 指标可以实现自动选择聚类数目的功能，具体步骤如下所述。

1) 将所有负荷进行归一化处理并确定初始聚类数目为最小值 2。

2) 生成初始隶属矩阵，利用模糊 C 均值聚类算法进行聚类。

3) 计算聚类后的 BWP 指标并记录，将聚类数目加 1 后返回步骤 2) 重新进行聚类。

4) 当聚类数目等于负荷数目的 1/3 时停止聚类，并比较 BWP 值。最大的 BWP 值对应的聚类结果为最佳聚类结果。

本文利用聚类后的结果确定负荷节点群，同一节点群内的负荷变化趋势相同，以节点群为单位进行随机负荷建模。

### 2.2 概率潮流建模

模拟法概率潮流在建立概率模型时将系统不确定因素作为随机变量，抽取满足概率分布的样本，计算输出变量分布特性。在抽取样本时使用拉丁超立方采样法可以确保输入随机变量的样本能完全覆盖对应的随机分布区间，可以非常显著地减少样本

数量, 提高算法计算速度<sup>[17]</sup>。

基于负荷聚类的拉丁超立方概率潮流具体建模步骤如下所述。

1) 采用模糊 C 均值聚类算法对系统的  $M$  个节点进行聚类, 假设聚类结果有  $C$  个负荷节点群。

2) 以负荷节点群为单位, 依次对所有节点群进行单节点群负荷增长计算直至系统崩溃。记录各节点群的负荷增长系数组成增长系数矩阵  $\mathbf{K}_0$ 。

3) 所有负荷节点等比例增加负荷直至系统崩溃, 记录负荷增长系数  $K_M$ 。

4) 以负荷节点群增长系数  $[70\%, K_0]$  为负荷节点群波动区间, 将其平均分成  $N$  个子区间进行拉丁超立方抽样得到初始样本, 进行  $N$  次抽样, 得到负荷节点群增长矩阵  $\mathbf{K}_{N \times C}$ 。

5)  $K_i$  表示  $\mathbf{K}_{N \times C}$  矩阵的第  $i$  行。若  $\min(K_i / K_M) > 1$  说明这种负荷情况下系统必定不收敛, 将这种情况排除。经过筛选后的负荷节点群增长矩阵为  $\mathbf{K}_{N_1 \times C}$ 。对  $\mathbf{K}_{N_1 \times C}$  中每一行对应的负荷情况进行潮流计算, 排除不收敛的情况得到  $\mathbf{K}_{N_2 \times C}$ 。

6) 将  $\mathbf{K}_{N_2 \times C}$  每一行对应的样本都进行本文所提改进连续潮流法计算, 将所有负荷节点等比例增长直至系统崩溃。按照得到的全负荷增长系数更新  $\mathbf{K}_{N_2 \times C}$  得到  $\mathbf{K}_{N_3 \times C}$ 。更新后的负荷采样结果更逼近系统崩溃点。

7) 计算  $\mathbf{K}_{N_3 \times C}$  对应不同负荷样本情况下系统崩溃时的节点电压。

通常情况下, 在负荷增加到系统崩溃点的过程中, 节点电压越先越限的节点越薄弱<sup>[18]</sup>。通过观测崩溃电压的情况确定系统薄弱点。使用最低电压概率风险指标 (Minimum Voltage Probability risk indicator, MVP) 量化分析系统的薄弱节点, 其计算公式为

$$P_{mvw} = T_{mvw} / N_{all} \quad (8)$$

式中:  $P_{mvw}$  为在系统崩溃时节点  $w$  成为最低电压节点的概率;  $T_{mvw}$  为在系统崩溃时节点  $w$  为最低电压的统计次数;  $N_{all}$  为所有样本的个数。

### 3 算例分析

算例分析中使用的负荷模型为恒功率负荷模型。在潮流计算中考虑有功和无功电源的出力约束, 当发电机的有功出力达到上限, 由其他发电机平衡有功功率; 当 PV 节点无功功率出力达到上限时, 将其转变为 PQ 节点。算例中使用的风电机组

为双馈异步风力发电机。

#### 3.1 IEEE 14 节点系统

将装机容量为 99 MW 的风电场接入 IEEE 14 节点系统的节点 14 进行算例分析, 系统参数见文献 [19]。算例中接入的风电场无功补偿装置容量为 30 Mvar, 将 66 台双馈异步风电机组分成 6 组, 每组 11 台。每台风电机组通过 0.69/35 kV 箱式变压器将电压升到 35 kV, 风电机组之间距离为 500 m, 升压站变压器容量为 100 MVA, 其将电压升到 110 kV 接入电网。

##### 3.1.1 考虑风力机降功率运行电压稳定性分析

进行考虑风力机降功率运行的改进二分搜索法计算, 与常规的改进二分搜索法计算相比较。图 2 为风电场满发情况下节点 14 的 PV 曲线。

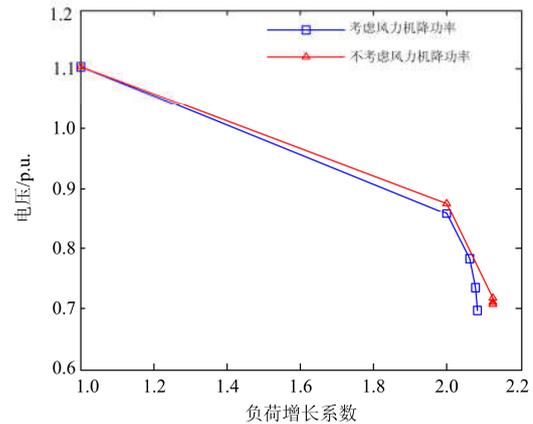


图 2 考虑风力机降功率运行节点 14 的 PV 曲线

Fig. 2 14-node PV curve considering the wind turbine power-reducing mode

从图 2 中可以看出, 考虑风力发电机降功率运行时系统更早到达崩溃点。这是因为在负荷增加的过程中, 节点 14 的电压降低, 风力发电机由于电压降低而进入降功率运行状况, 该节点的有功缺额需要从其他节点输送过来, 从而导致系统提前崩溃, 此时风电场的实际出力为 68.99 MW。

表 1 为风电场不同出力情况下系统崩溃时节点 14 的电压  $V_m$  与系统负荷增长系数  $K_m$ 。

表 1 节点 14 电压与负荷增长系数

Table 1 Voltage of 14 collapse node and load growth factor

风电场出力/%		20	40	60	80	100
不考虑风力	$V_m$	0.633 2	0.649 9	0.668 8	0.688 8	0.708 3
机降功率	$K_m$	1.919 6	2.001 0	2.061 6	2.103 2	2.125 8
考虑风力机	$V_m$	0.633 5	0.649 9	0.668 8	0.699 8	0.699 0
降功率	$K_m$	1.919 6	2.001 0	2.061 6	2.082 0	2.082 1

实验证明, 当风电场出力大于 77.3% 时, 若不考虑风电机组在低电压状况下降功率运行的情况,

系统负荷增长系数偏大, 分析结果偏乐观。当风电机组出力小于 77.3% 时, 由于电压降低引起的电流增加并不会超过额定电流, 所以不需要降功率运行。

### 3.1.2 计入剩余无功补偿的电压稳定性分析

在考虑风电机组降功率运行情况下, 同时考虑计及风电场无功补偿装置的剩余容量。当风电场按照 80% 出力设置时, 风电场由于低电压降功率运行的真实出力为 76.32 MW, 此时的无功补偿装置剩余容量为 21.61 Mvar, 节点 14 的 PV 曲线如图 3 所示。

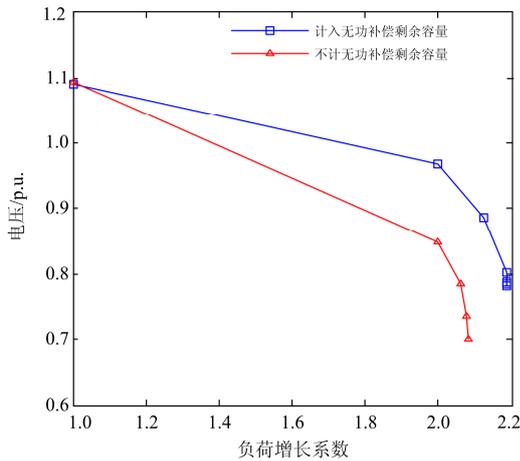


图 3 计入无功剩余容量节点 14 的 PV 曲线  
Fig. 3 14-node PV curve considering reactive power compensation device remaining capacity

从图 3 中可以看出, 在计入风电场无功装置的剩余容量后, 抬高了节点 14 的电压, 同时, 系统负荷增长系数也增加了。

### 3.2 IEEE57 节点系统

分别在 IEEE57 节点系统的节点 14 和节点 57 处接入 99 MW 的风电场, 系统参数见文献[19]。使用山西某地 42 个负荷节点的典型日负荷数据, 结合 IEEE57 节点系统的网架结构进行算例分析。在本节对含有风电的样本进行连续潮流计算时, 使用本文所提改进连续潮流法。

因为某些节点负荷特性非常独特, 与其他负荷节点之间的相关性都不大, 计算所有两两负荷节点之间相关性, 将与其他负荷节点相关性都很小的负荷提取出来组成单独一类, 提取结果如图 4 所示。

第一类节点群包括节点 1、3、5、8、12、20、27、41、42、44、47、50、54。这一类负荷节点中的每一个节点都单独成群, 也就是说这些节点负荷变化不受其他节点负荷变化的影响, 在取随机负荷时, 每一个节点都当成一个节点群处理。

本文通过模糊 C 均值聚类对剩下的负荷节点进

行聚类, 聚类结果如图 5 和表 2 所示。

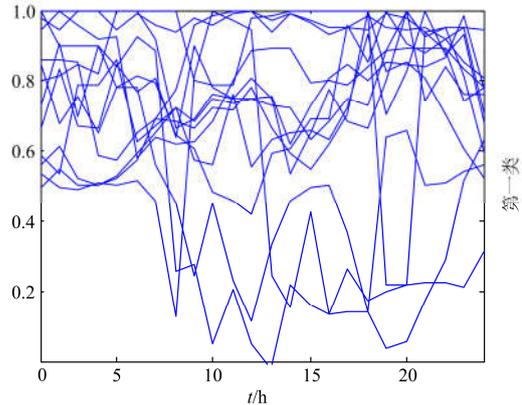


图 4 第一类节点群负荷  
Fig. 4 The first kind load node group

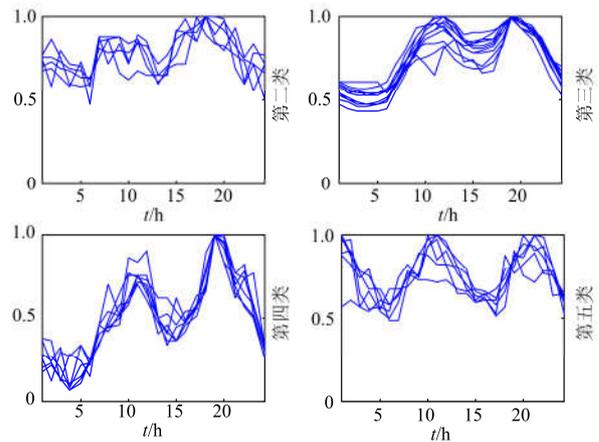


图 5 剩余节点聚类结果  
Fig. 5 Remaining load node group

表 2 剩余节点聚类结果

类别	节点
第二类	16、19、30、32、33
第三类	2、6、9、10、13、14、15、25、38、51、57
第四类	17、18、23、31、35、43、55
第五类	28、29、49、52、53、56

可以看出, 剩余节点分成四类, 按照聚类结果建立 2.2 节概率潮流模型, 计算所有节点的 MVP 指标, 找到 MVP 值最大的几个节点如表 3 所示。

表 3 最低电压概率风险指标

排序	不考虑负荷聚类		考虑负荷聚类	
	节点	MVP	节点	MVP
1	31	0.893 1	31	0.874 8
2	33	0.055 0	33	0.070 2
3	53	0.050 9	53	0.051 8
4	42	0.001 0	42	0.002 5

从表 3 可以看出, 系统最薄弱节点为 31 节点。

使用计算所得的系统崩溃状态绘制系统崩溃时电压分布曲面, 选取 500 次计算结果作图分析。图 6 为不考虑负荷聚类的分析结果, 图 7 为计及负荷聚类的概率潮流方法分析结果。

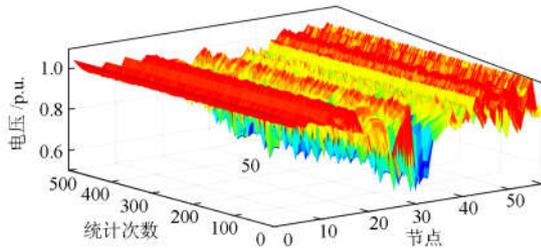


图 6 不考虑负荷聚类时崩溃电压分布曲面

Fig. 6 Voltage distribution surface not considering the load clustering

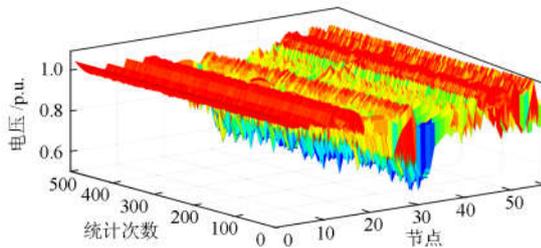


图 7 考虑负荷聚类时崩溃电压分布曲面

Fig. 7 Voltage distribution surface considering the load clustering

图 6、图 7 显示了在系统崩溃状态下所有节点的电压大小。图中节点 31 附近区域颜色越深, 说明其对应节点的电压越低。两种方法的计算结果都显示节点 30、31、32、33 处的电压最低, 原因在于这些节点距离发电机节点较远, 无功功率缺乏。

两种方法找出的系统最薄弱区域都在节点 31 附近。但是, 在考虑负荷聚类后, 节点 31 附近的颜色更深。这说明在考虑聚类后, 当系统处于崩溃点时, 节点 31 附近的电压更加恶化了。原因在于节点 30、32、33 这几个较薄弱节点聚到了一类, 它们之间相关性很强, 在负荷增加时, 这些较薄弱节点的负荷同时增加, 导致系统崩溃时这一区域的电压更低了。

上述两种方法都从 150 000 个初始样本中筛选可用样本, 筛选结果见表 4。

表 4 初始样本筛选结果

Table 4 Initial sample filtering result

	初始样本个数	可用样本	样本利用率/%
考虑负荷聚类	150 000	8 463	5.642
不考虑负荷聚类	150 000	528	0.352

从表 4 可知, 在初始样本个数都选择 150 000 个的情况下, 考虑负荷聚类之后, 样本利用率有了明显提高。原因在于在算法筛选可用样本时, 只会留下计算收敛的样本结果, 而在考虑负荷聚类后, 负荷整体水平减小了。例如第二类节点群中, 节点 16 的单节点最大负荷增长系数为 11.71, 而在进行负荷聚类后, 节点 16 所在的节点群的最大负荷增长系数为 4.14, 节点 16 的负荷增长系数也被限定在 4.14 以下, 无形中降低了系统的总体负荷, 潮流计算更容易收敛, 从而提高了算法的样本利用率。

## 4 结论

本文计及风电机组低电压降功率运行, 同时考虑风电场无功补偿装置剩余容量, 建立了考虑风电场接入情况下的改进连续潮流算法。概率潮流分析过程中, 以本文所提改进连续潮流法对含有风电系统的样本进行计算, 同时使用模糊 C 均值聚类算法进行负荷聚类, 建立基于负荷聚类的拉丁超立方抽样概率潮流模型。

1) 在电压稳定性分析过程中, 当风电场所在节点电压降低且风电机组出力大时, 风电机组会进入降功率运行状态, 导致系统负荷可能的增长系数略有减小。

2) 在风电场所在节点电压降低时, 充分利用风电场无功补偿装置剩余容量, 改善了节点电压状况, 增大了系统负荷可能的增长系数。

3) 实验证明, 在考虑负荷聚类后进行概率潮流计算, 当较薄弱节点负荷特性相同时, 会导致在系统处于崩溃点附近时, 薄弱区域电压更加恶化。

4) 负荷聚类后的概率潮流算法样本利用率有了明显的提高, 加快了算法计算效率。

## 参考文献

- [1] KE C, HUSSEIN A, BRADLEY M E, et al. A performance-index guided continuation method for fast computation of saddle-bus bifurcation in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 753-760.
- [2] HSIAO-DONG C, JEAN-JUMEAU R. Toward a practical performance index for predicting voltage collapse in electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(2): 584-592.
- [3] MA Zhaoxing, CHEN Hao, CHAI Yanli. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 211-219. DOI: 10.1186/s41601-017-0051-3.
- [4] 吴昊, 卫志农, 王成亮, 等. 基于连续潮流综合算法的

- 电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 99-104.
- WU Hao, WEI Zhinong, WANG Chengliang, et al. Voltage stability study based on synthesis method of continuous power flow[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 99-104.
- [5] 丁明, 李宾宾, 韩平平. 双馈风电机组运行方式对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 26-31.
- DING Ming, LI Binbin, HAN Pingping. Impacts of operation models of doubly-fed wind turbine generator on system voltage stability[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 26-31.
- [6] 熊传平, 张晓华, 孟远景, 等. 考虑大规模风电接入的系统静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 132-137.
- XIONG Chuanping, ZHANG Xiaohua, MENG Yuanjing, et al. Analysis on static voltage stability of system with large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 132-137.
- [7] 秦文萍. 基于电压稳定的电力系统可靠性评估[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [8] 伍利, 古婷婷, 姚孝孝. 基于改进连续潮流法的静态电压稳定分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 99-103.
- WU Li, GU Tingting, YAO Lixiao. Static voltage stability analysis based on improved continuation power flow[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 99-103.
- [9] 秦文萍, 任琛, 韩肖清, 等. 考虑负荷波动极限的电力系统电压稳定性风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4102-4111.
- QIN Wenping, REN Chen, HAN Xiaoqing, et al. Power system voltage stability risk assessment considering the limit of load fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4102-4111.
- [10] 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, 3366.
- 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, 3366.
- [11] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩, 等. 具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62.
- QI Shangmin, LI Fengting, HE Shien, et al. Research on fault characteristics of grid-connected large scale wind farms with LVRT capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 55-62.
- [12] 周红婷, 宋玮. 计及动态无功控制影响的大规模风电汇集地区电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 13-18.
- ZHOU Hongting, SONG Wei. Analysis on voltage stability in large-scale wind farms integration area considering impact of dynamic reactive power control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 13-18.
- [13] 张永武, 孙爱民, 张源超, 等. 风电场无功补偿容量配置及优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 150-156.
- ZHANG Yongwu, SUN Aimin, ZHANG Yuanchao, et al. Reactive power compensation capacity configuration and optimal operation in wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(6): 150-156.
- [14] 文学鸿, 袁越, 鞠平. 静态电压稳定负荷裕度分析方法比较[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(5): 59-62.
- WEN Xuehong, YUAN Yue, JU Ping. The comparison of static voltage stability analysis methods[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5): 59-62.
- [15] 高洁, 李群湛, 汪佳, 等. 基于模糊聚类的 NExT-ERA 低频振荡类噪声辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 40-49.
- GAO Jie, LI Qunzhan, WANG Jia, et al. Modal parameter identification of low frequency oscillation through NExT-ERA based on fuzzy clustering[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 40-49.
- [16] 周世兵, 徐振源, 唐旭清. K-means 算法最佳聚类数确定方法[J]. 计算机应用, 2010, 30(8): 1995-1998.
- ZHOU Shibing, XU Zhenyuan, TONG Xuqing. Method for determining optimal number of clusters in K-means clustering algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2010, 30(8): 1995-1998.
- [17] 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.
- [18] CHEN Y L, CHANG C W, LIU C C. Efficient methods for identifying weak nodes in electrical power networks[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1995, 142(3): 317-322.
- [19] Power systems test case archive[EB/OL]. [2014-06-12]. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca>.

收稿日期: 2017-06-20; 修回日期: 2017-08-31

作者简介:

段贵钟(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电压稳定性分析; E-mail: 578223121@qq.com

秦文萍(1972—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统可靠性分析、微电网运行与控制技术、微机保护等。E-mail: qinwenping@tyut.edu.cn

(编辑 姜新丽)