

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.004

# 考虑风电接入的电网静态电压安全域计算

周刚<sup>1</sup>, 肖斐<sup>2</sup>, 艾芊<sup>2</sup>, 谢善益<sup>1</sup>, 张宇帆<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080;

2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:**实现快速、有效的系统安全裕度评估,能够为系统运行控制提供决策指导。为掌握电网的安全运行态势,提出一种考虑风电接入的电网静态电压安全域计算方法。首先,利用连续潮流模型并结合电压安全约束,构建系统电压安全裕度指标,用于衡量运行点的安全状态。其次,融合灵敏度方程和启发式算法求得电压安全裕度,实现负荷裕度量化评估。然后,通过引入考虑相关性的风速预测方法,为态势预测奠定基础。最后,通过IEEE 118节点测试系统验证所提方法的有效性和可行性。通过算例仿真可知,当风电渗透率较高时,风电场出力之间的相关性越大,电压安全裕度的波动范围也越大。

**关键词:**风电;电压安全裕度指标;静态电压安全裕度;灵敏度方程;启发式算法

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)03-0023-07

## 0 引言

电网态势感知是指在广域时空范围内,通过对电网中各类因素的采集、理解与预测,进而准确地掌握电网的安全态势。随着电网规模日渐扩大以及运行复杂性的不断提升,如何快速准确地判断电网的运行发展趋势是调度人员关注的重点,而基于精确系统元件模型的安全状态感知方法并不适用于当前大规模互联电网<sup>[1-2]</sup>。同时,受限于监测装置的数据传输频率和实时故障分析工具的运算速度,调度人员难以及时采取预防措施或紧急控制。安全域方法通过分析运行点在安全域空间中的相对位置进行安全状态评估,在实时监测和系统整体感知方面的优势使其有望运用于新一代智能控制中心的态势感知领域。

安全域的概念最早是在二十世纪七十年代由F.D.Galiana等人提出<sup>[3]</sup>。随后,安全域被定义为满足系统安全约束的注入功率、电压、相角等状态变量集合<sup>[4]</sup>。域方法的提出有效克服了逐点法计算量大、不利于实时监控的缺陷。近些年,该方法已经被广泛应用线路热稳定、电压稳定、小干扰稳定及暂态稳定等方面<sup>[5-9]</sup>。文献[5]利用超平面近似描述了决策空间中热稳定安全域边界,计算速度和精度方面满足在线监测的工程需求。文献[7]提出一种基于安全域的含风电电力系统小扰动分析方

法,可代替传统的特征值分析方法。文献[8]基于正态分布函数的快速衰减特性,提出动态安全域的小范围搜索方法,为电力系统概率不安全指标计算和安全评估提供了新途径。文献[9]提出一种适用于各类稳定约束条件的安全域框架模型,利用同步相角测量单元采集数据,实现广域电网的实时感知和在线监测。

与此同时,以风力发电为代表的分布式能源大规模并网,高渗透率下的风电随机性、不可控性对电网安全状态感知带来怎样的影响,并网风电的容量大小和风速之间的相关性强弱是否引起系统安全稳定裕度的改变等问题有待探讨。

针对上述问题,开展了以下研究。首先,提出了基于连续潮流模型和电压安全约束的安全裕度指标,用于实时评估电力系统安全状态。其次,利用自回归滑动平均模型(auto regression moving average, ARMA)和时移技术(time-shifting technique, TST)模拟预测含相关性的风速时间序列。然后,提出了一种基于启发式算法的运行点转移迭代逼近方法,并通过构建安全域模型库,以满足电压安全裕度评估的需求。最后,通过测试系统证明了所提方法的正确性和可行性。

## 1 电压安全裕度指标

在静态电压稳定性分析中,极限诱导分岔可描述为如下情形: $P_{0i}$ 为节点 $i$ 的基准负荷容量; $Q_{Gi}$ 为发电机 $i$ 注入无功功率。当发电机处于无功极限状态下, $Q_{Gi} = Q_{Gi,lim}$ 。随着负荷增加,系统电压水平逐渐下降,直至逼近节点电压安全约束极限,此时

收稿日期:2019-12-02;修回日期:2020-01-16

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM-20162540);国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2015AA050404)

节点  $i$  的临界运行点  $P_{i,Smax}$  为无功/电压约束转换点,如图 1 所示<sup>[10]</sup>。此后,这些发电机不能维持机端电压恒定,而当系统中某台发电机达到无功极限,系统会突然发生电压崩溃,即  $P_{i,Smax}$  位于有功功率-电压幅值( $P$ - $V$ )曲线的下半部,系统发生极限诱导分岔。

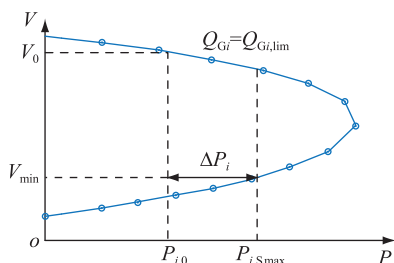


图 1 负荷节点 PV 曲线

Fig.1 PV curves for load bus

文中将有功率作为计算电压安全裕度指标的主要参数。负荷节点和发电机节点电压安全裕度由式(1)和式(2)计算。

$$\Delta P_i = P_{i,Smax} - P_{i,0} \quad (1)$$

$$V_s = \min_i \Delta P_i \quad (2)$$

式中:  $\Delta P_i$  为节点  $i$  的电压安全裕度;  $P_{i,Smax}$ ,  $P_{i,0}$  分别为节点  $i$  的临界运行和初始运行状态下的负荷容量;  $V_s$  为定义的电压安全裕度。图 1 展示了在特定的负荷和发电机功率增长方式下,节点电压随负荷容量的变化情况。

## 2 含风电场的静态电压安全域

基于文献[11]引入注入功率空间下的静态电压安全域(static voltage security region, SVSR)模型,定义如下:

$$\Omega_V = \{ (P_G, P_L, Q_L) \mid f(x) = y, V \in R_V, Q_G \in R_{QG}, I_1 \in R_{I1} \} \quad (3)$$

式中:  $f(x) = y$  为潮流方程;  $x$  为节点的电压幅值和相角;  $y$  为节点的注入有功功率和无功功率;  $V$  为节点电压幅值向量;  $P_G, Q_G$  分别为发电机节点的有功功率和无功功率向量;  $P_L, Q_L$  分别为负荷节点的有功功率和无功功率向量;  $I_1$  为线路电流幅值向量;  $R_V, R_{QG}, R_{I1}$  分别为节点电压幅值约束、发电机无功功率约束和线路电流约束集合。

在式(3)描述的高维注入功率空间中,仅由式(1)和式(2)难以准确反映全系统的电压安全裕度和运行态势。在静态电压安全域模型的基础上,将电压安全裕度计算扩展到多维域空间。式(4)定义了注入功率空间中运行点  $P_0$  到静态电压安全域边界的最小 L1 范数距离,式(5)定义了多维域空间中

的电压安全裕度。

$$\lambda = \min_{P' \in \omega_i} \| P' - P_0 \|_1 \quad \omega_i \in \partial \Omega_V \quad (4)$$

$$V_s = \frac{\lambda}{\| P_0 \|_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $P'$  为静态电压安全域边界上的运行点;  $\omega_i$  为第  $i$  个安全域边界超平面;  $\partial \Omega_V$  为安全域边界集合。

### 2.1 风电场出力预测模型及其相关性分析

在安全域模型中,可将风机视作潮流计算中的 PQ 节点,认为其有功功率就是风力机的机械功率,只与风速有关,不考虑滑差的影响。

实际风速具有一定的随机性和规律性,风速时间序列  $S_{k,W}(t)$  可以由式(6)计算<sup>[12]</sup>。

$$S_{k,W}(t) = \mu_k(t) + \sigma_k(t)s_k(t) \quad (6)$$

式中:  $\mu_k(t)$ ,  $\sigma_k(t)$  分别为时段  $t$  内第  $k$  个风电场的平均风速和风速标准差;  $s_k(t)$  为风速尺度函数时间序列。(  $n, m$  ) 阶尺度函数时间序列的 ARMA 模型如下:

$$s_k(t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i s_k(t-i) + a(t) - \sum_{j=1}^m \theta_j a(t-j) \quad (7)$$

式中:  $\varphi_i, \theta_j$  分别为自回归 (AR) 模型和移动平均 (MA) 模型的参数;  $a(t)$  为高斯白噪声序列;

鉴于地理位置相近的风电场其风速序列之间具有较强的相关性,式(8)给出了风电场  $k1$  和  $k2$  的风速序列相关性系数计算方法。

$$\rho = \frac{E(S_{k1,W} S_{k2,W}) - E(S_{k1,W}) E(S_{k2,W})}{\sqrt{\text{var}(S_{k1,W})} \sqrt{\text{var}(S_{k2,W})}} \quad (8)$$

式中:  $E(\cdot)$  为数学期望函数;  $\text{var}(\cdot)$  为方差函数。对于给定的风速相关系数,通过时移技术可由原始风速序列模拟求得互相关风速序列。由式(9)可计算出时移量为  $t = K + t_0$  的风速序列:

$$y_{K+t} = (1 - t_0)x_t + t_0 x_{t+1} \quad (9)$$

式中:  $K, t_0$  分别为时移整数和小数部分<sup>[12]</sup>;  $x_t$  为原始风速序列;  $y_t$  为时移后的风速序列。

利用风电场的有功出力-风速模型获取风电场实际出力,如式(10)所示。

$$P_W(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ k_1 v^3 + k_2 & v_{ci} < v < v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $k_1 = P_r / (v_r^3 - v_{ci}^3)$ ;  $k_2 = -k_1 v_{ci}^3$ ;  $P_r$  为风电场额定功率;  $v_{ci}, v_r, v_{co}$  分别为风机的切入风速、额定风速和切出风速。

### 2.2 静态电压安全域边界推导

风电场并入电力网络后,需在原始雅各比矩阵

$J$ 中引入风电功率对机端电压和相角的偏导数,如式(11)所示。

$$J_s = \begin{bmatrix} J \\ \frac{\partial \Delta P_W}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P_W}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q_W}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q_W}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $J_s$ 为扩展后的雅各比矩阵; $\Delta P_W, \Delta Q_W$ 分别为风电场有功和无功功率变化向量; $V, \theta$ 分别为节点电压和相角向量。

基于电压准稳态(quasi steady state, QSS)方程和 $J_s$ 的逆矩阵,求得电压变化量近似表达式如下:

$$\Delta V_d = \sum_{i \in LUW} H_{i,d} \Delta P_{Li} + \sum_{i \in LUW} S_{i,d} \Delta Q_{Li} + \sum_{i \in G} R_{i,d} \Delta P_{Gi} \quad d \in L \cup W \cup G \quad (12)$$

式中: $H_{i,d}, R_{i,d}$ 为节点 $d$ 的电压变化量关于节点 $i$ 有功功率的灵敏度值; $S_{i,d}$ 为节点 $d$ 的电压变化量关于节点 $i$ 无功功率的灵敏度值; $L, W, G$ 分别为负荷、风电场、发电机节点集合。系统内节点电压幅值变化量在场景 $s$ 中满足下式:

$$V_{d,\min} \leq V_{d,s} + \sum_{i \in LUW} H_{i,d,s} (P_{Li} - P_{Li,s}) + \sum_{i \in LUW} S_{i,d,s} (Q_{Li} - Q_{Li,s}) + \sum_{i \in G} R_{i,d,s} (P_{Gi} - P_{Gi,s}) \leq V_{d,\max} \quad d \in L \cup W \cup G \quad (13)$$

式中: $V_{d,s}$ 为场景 $s$ 中节点 $d$ 的电压幅值; $P_{Li,s}, Q_{Li,s}$ 分别为场景 $s$ 中负荷与风电场节点 $i$ 注入有功功率和无功功率; $P_{Gi,s}$ 为场景 $s$ 中发电机节点 $i$ 注入有功功率。将式(13)变换为式(14),分别表征节点 $d$ 电压幅值下限约束和上限约束。

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{d,\min} \leq V_{d,s} - \left( \sum_{i \in LUW} H_{i,d,s} P_{Li,s} + \sum_{i \in LUW} S_{i,d,s} Q_{Li,s} + \sum_{i \in G} R_{i,d,s} P_{Gi,s} \right) + \sum_{i \in LUW} H_{i,d,s} P_{Li} + \sum_{i \in LUW} S_{i,d,s} Q_{Li} + \sum_{i \in G} R_{i,d,s} P_{Gi} \\ V_{d,\max} \geq V_{d,s} - \left( \sum_{i \in LUW} H_{i,d,s} P_{Li,s} + \sum_{i \in LUW} S_{i,d,s} Q_{Li,s} + \sum_{i \in G} R_{i,d,s} P_{Gi,s} \right) + \sum_{i \in LUW} H_{i,d,s} P_{Li} + \sum_{i \in LUW} S_{i,d,s} Q_{Li} + \sum_{i \in G} R_{i,d,s} P_{Gi} \end{array} \right. \quad (14)$$

若考察由节点 $d$ 电压幅值下限约束确定的安全域空间,将满足 $V_{d,s} = V_{d,\min}, P_{Li,s} = P_{Li,cr}, Q_{Li,s} = Q_{Li,cr}, P_{Gi,s} = P_{Gi,cr}$ 约束条件的临界运行点,代入式

(14)第一式求得:

$$\sum_{i \in LUW} H_{i,d,cr} P_{Li,cr} + \sum_{i \in LUW} S_{i,d,cr} Q_{Li,cr} + \sum_{i \in G} R_{i,d,cr} P_{Gi,cr} \leq \sum_{i \in LUW} H_{i,d,cr} P_{Li} + \sum_{i \in LUW} S_{i,d,cr} Q_{Li} + \sum_{i \in G} R_{i,d,cr} P_{Gi} \quad (15)$$

若临界运行点已知,则上式中临界运行状态下的灵敏度值 $H_{i,d,cr}, S_{i,d,cr}, R_{i,d,cr}$ 为常数。归一化处理后,求得由电压幅值下限计算的安全域范围近似表达如式(16)所示,且该式取等号可作为安全域边界。同理,由式(14)和临界运行点可求得由电压幅值上限计算的安全域范围近似表达式。

$$\sum_{i \in LUW} a_i P_{Li} + \sum_{i \in LUW} b_i Q_{Li} + \sum_{i \in G} c_i P_{Gi} \geq 1 \quad (16)$$

式中: $a_i, b_i, c_i$ 为近似超平面系数。

### 2.3 基于启发式算法的运行点转移迭代计算

文中提出一种由启发式算法逼近安全域边界点的方法。该方法中发电和负荷增长量朝着使节点电压下降最快的方向变化,逐步迭代逼近静态安全域边界,无需确定运行点转移方向向量。求得的静态电压安全域相对保守,安全裕度更可靠。

步骤1:系统安全运行点初始化,确定系统拓扑结构和安全约束条件。设定迭代步数 $S_p = 1$ 。

步骤2:对式(11)雅各比矩阵求逆运算,获取迭代至 $S_p$ 步的电压灵敏度矩阵 $X_{S_p}$ ,如式(17)所示。此时,发电机节点数目为 $m$ ,负荷节点数目为 $n$ 。

$$X_{S_p} = [R_d, H_d, S_d] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta u_d}{\partial P_{G1}}, \dots, \frac{\partial \Delta u_d}{\partial P_{Gm}}, \\ \frac{\partial \Delta u_d}{\partial P_{L1}}, \dots, \frac{\partial \Delta u_d}{\partial P_{Ln}}, \frac{\partial \Delta u_d}{\partial Q_{L1}}, \dots, \frac{\partial \Delta u_d}{\partial Q_{Ln}} \end{bmatrix} \quad (17)$$

步骤3:通过式(18)可以确定使 $u_d$ 下降最快的发电功率增长节点 $X_{g,S_p}$ 和负荷功率增长节点 $X_{l,S_p}$ 。运行点转移方向向量为 $k_{G,S_p}, k_{L,S_p}$ ,其中 $k_{G,S_p}$ 的第 $g$ 个元素为1,其余为0,即 $k_{G,S_p} = [0, 0, \dots, 1, \dots, 0]$ ;  $k_{L,S_p}$ 的第 $l$ 个元素为1,其余为0,即 $k_{L,S_p} = [0, 0, \dots, 1, \dots, 0]$ 。灵敏度大小关系仅在当前运行点附近成立,增长的步长不能太大。设步长为 $h$ ,则下一步迭代后的注入功率向量如式(19)所示。鉴于实际系统的负荷和发电机节点功率约束,若下降最快的发电节点 $X_{g,S_p}$ 或负荷节点 $X_{l,S_p}$ 处于功率极限状态,则将式(17)中的该节点灵敏度参数删除,由式(18)重新确定发电功率和负荷功率增长节点。

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{g,S_p} = \min_i \left( \frac{\partial \Delta u_d}{\partial P_{Gi}} \right) \\ X_{l,S_p} = \min_i \left( \frac{\partial \Delta u_d}{\partial P_{Li}}, \frac{\partial \Delta u_d}{\partial Q_{Li}} \right) \end{array} \right. \quad (18)$$

$$\begin{cases} P_{G,S_p} = P_{G,S_p-1} + k_{G,S_p} h \\ P_{L,S_p} = P_{L,S_p-1} + k_{L,S_p} h \\ Q_{L,S_p} = Q_{L,S_p-1} + k_{L,S_p} h \eta \end{cases} \quad (19)$$

式中： $\eta$  为负荷节点无功功率与有功功率的比值。

步骤 4: 若迭代后的运行点位于安全域边界, 则转移迭代终止, 否则令  $S_p = S_p + 1$ , 并返回步骤 2。需要说明的是, 迭代过程中满足下列任一条件, 则认为运行点位于安全域边界。

- (1) 系统潮流计算不收敛;
- (2) 节点电压低于电网安全电压下限;
- (3) 线路电流大于热稳定极限。

若计算发电机节点的 SVSR 临界点, 则运行点逼近极限诱导分岔过程中, 需保证发电机节点无功出力  $Q_{Gi} = Q_{Gi, \max}$ , 且节点电压必须大于设定的安全电压限值<sup>[13]</sup>, 于是提出条件(1)和条件(2), 同时考虑了系统出现鞍结分岔的情况。鉴于文中采用启发式算法求解临界运行点, 若迭代过程中某条支路潮流越限, 如条件(3)所示, 可终止迭代并取当前运行点作为临界点。所需数据可从采集与监视控制系统获取, 基于安全域模型的态势感知过程如图 2 所示, 包括安全域计算和安全裕度评估。安全域计算阶段的输入数据包括: 初始运行点、拓扑结构和相关参数及安全约束。由 2.2 节可知, 静态电压安全域边界由系统准稳态方程确定。因此在安全裕度评估阶段, 需利用当前运行点、拓扑结构和安全约束信息选择安全域模型。若不存在与当前状态匹配的安全域模型需重新计算。在此基础上, 利用预测的负荷容量和风电场出力, 实现系统未来的安全运行状态预估。

### 3 算例分析

以 IEEE 118 节点作为测试系统, 计算系统的静态电压安全域边界, 其中边界超平面表达式包含的注入功率变量共 181 个, 监测节点安全域超平面 117 个。表 1 仅展示了节点 95 边界超平面中系数幅值较大的功率变量。

#### 3.1 电压薄弱节点监测

电力系统中容易引发电压崩溃等安全稳定事故的节点即为电压薄弱节点。因此, 电压薄弱节点在线监视与预防治理是保证电力系统安全稳定运行的重要任务。图 3 展示了系统稳态运行点至静态电压安全域边界最近的 L1 范数距离。

由图 3 可知, 系统运行点至节点 21 和节点 53 确定的电压安全边界的空间距离最短, 说明以上 2 处节点在当前运行状态下比较容易发生电压安全事

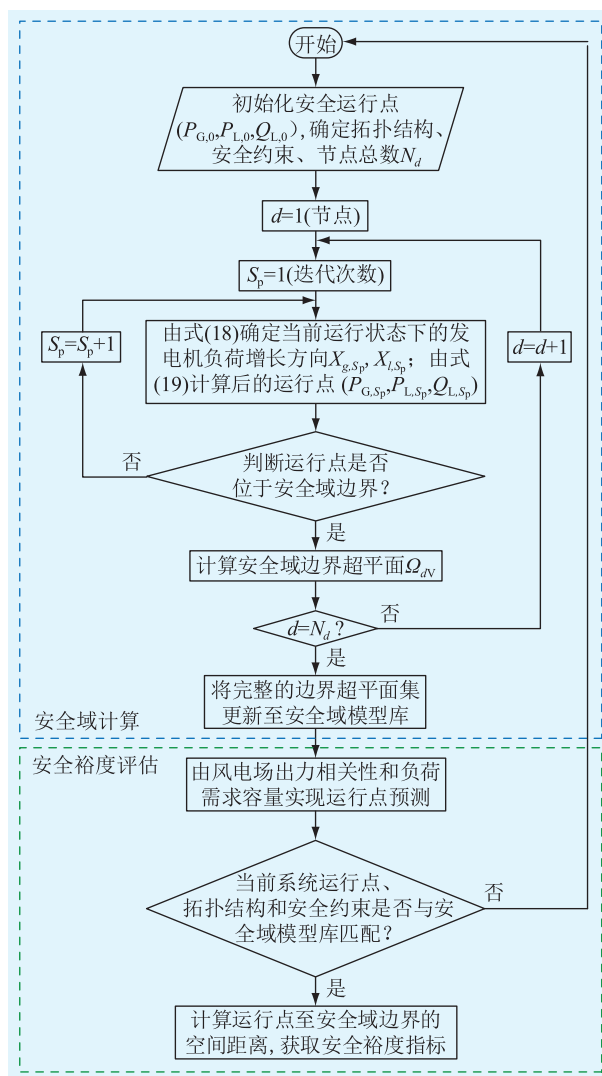


图 2 基于安全域模型的系统运行状态感知  
Fig. 2 Operation state awareness based on security region model

表 1 节点 95 的静态电压安全域超平面部分系数  
Table 1 Hyperplane coefficients of Bus95 SVSR boundary

变量	系数	变量	系数
$P_{82}$	-0.027	$P_{95}$	-0.143
$Q_{82}$	-0.084	$Q_{95}$	0.381
$P_{83}$	-0.059	$P_{96}$	-0.054
$Q_{93}$	-0.087	$Q_{96}$	-0.171
$P_{94}$	-0.052	$P_{97}$	-0.024
$Q_{94}$	-0.162	$Q_{97}$	-0.086

故, 需要电网工作人员重点监测。

因文中在边界计算中采用启发式算法, 使运行点至安全域边界的距离不仅能反映节点的安全裕度, 还能体现运行点朝着电压稳定极限状态过渡的变化速度。依据模态分析方法计算 IEEE 118 节点系统电压稳定薄弱节点<sup>[14]</sup>, 系统临界稳定情形下, 4 类最不稳定模态的薄弱节点参与系数  $P_{ki}$  见表 2。



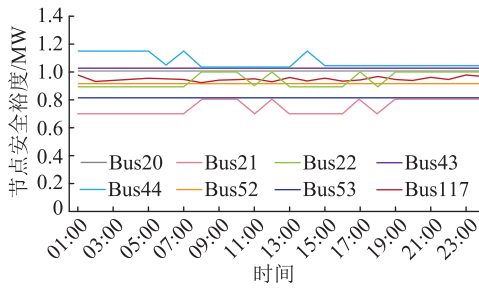


图3 运行点到 SVSR 边界的 L1 范数距离

Fig.3 L1 norm distance from operating point to SVSR boundaries

表2 不同模式下的节点参与系数

Table 2 Bus participations under different modes

模态 1 $\lambda = 0.17$		模态 2 $\lambda = 0.31$		模态 3 $\lambda = 0.83$		模态 4 $\lambda = 1.14$	
Bus	$P_{ki}$	Bus	$P_{ki}$	Bus	$P_{ki}$	Bus	$P_{ki}$
20	0.22	43	0.32	51	0.24	117	1.00
21	0.43	44	0.50	52	0.41		
22	0.34	45	0.18	53	0.22		
23	0.01			58	0.13		

注:表中  $\lambda$  为灵敏度矩阵的特征值倒数。

由表 2 可知,图 3 中最易发生电压安全事故的节点与模态分析薄弱节点基本相似,差异来源为:模态分析研究的薄弱节点主要与拓扑结构有关,而安全域模型还考虑了运行点功率变化对薄弱节点安全裕度的影响。对于系统调度人员,依据安全域模型可量化计算系统可行裕度。

### 3.2 含风电场的安全裕度指标计算

IEEE 118 节点系统中,在节点 26,59,73,77,92 分别接入以异步风力发电机为主的风电场<sup>[15-16]</sup>。为验证文中风速模拟方法的有效性,选取美国可再生能源实验室公布的 24 h 风速实测数据。选取临近风电场间风速相关系数为 0.2,0.5,0.7,0.9 的实测数据为样本。表 3 展示了文中方法与离散隐马尔科夫预测方法 (discrete hidden markov model, DHMM)、灰色预测方法 (gray model, GM) 结果的对比<sup>[17-20]</sup>。由表 3 可知,随着临近风电场风速相关系数提高,文中方法求得的模拟风速与实际风速值越接近。在相关系数较低时,文中方法模拟准确度与 DHMM 方法接近且略高于 GM 方法,这是由于 ARMA 和 DHMM 方法均具有较强的非平稳序列拟合能力,适用于风速模拟<sup>[17]</sup>。

为验证文中方法在对风电接入系统安全裕度评估的有效性,分别设置 4 个场景考虑风电场接入容量和风速间的相关性对系统安全裕度的影响,具体参数如表 4 和表 5 所示。73 和 77 临近节点处的风速序列之间存在一定的相关性,利用式(6)一式

(9) 预测模拟具有不同相关系数的风速序列。

表3 不同相关系数下风电场风速模拟准确度

Table 3 Simulation accuracy of wind speed in wind farm with different correlation coefficients

相关系数	风速模拟准确度		
	ARMA+TST	DHMM	GM
0.6	0.773	0.782	0.512
0.7	0.802	0.789	0.531
0.8	0.823	0.790	0.480
0.9	0.861	0.776	0.616

表4 不同场景下风电场风速相关系数

Table 4 Correlation coefficients of wind power in different cases

场景	风电场接入容量/MW				
	Bus26	Bus59	Bus73	Bus77	Bus92
一	200	150	75	100	120
二	200	150	75	100	120
三	200	150	75	100	120
四	200	150	30	50	120

表5 不同场景下风电场风速时移量

Table 5 Shifting time of wind power in different cases

场景	Bus73 与 Bus77 风速序列参数	
	相关系数	时移/h
一	0.2	13
二	0.5	4.5
三	0.9	0.5
四	0.9	0.5

将具有相关性的风速序列代入式(10),求得风电场出力,并结合基准负荷容量和含风电机组潮流计算模型<sup>[16]</sup>,由式(4)、式(5)分场景计算出 01:00 至 24:00 的电压安全裕度指标,如图 4 所示。

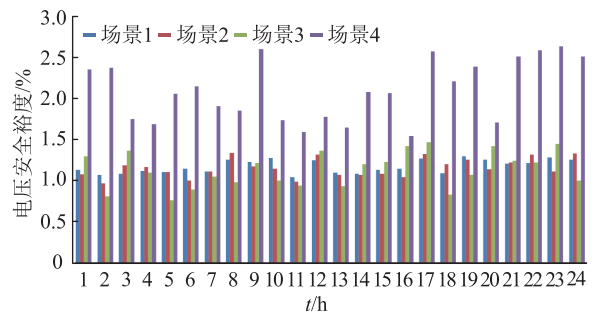


图4 IEEE 118 节点系统电压安全裕度

Fig.4 VSM of IEEE 118-bus

4 个场景的安全裕度指标分布区间依次为:  $[1.04\%, 1.29\%]$ ,  $[0.97\%, 1.34\%]$ ,  $[0.76\%, 1.47\%]$ ,  $[1.55\%, 2.63\%]$ 。比较场景一、二、三可知,风电场出力之间的相关度越大,电压安全裕度

的波动范围也越大;比较场景三、四可知,随着风电场接入容量减少,电压安全裕度增大。由机理分析可知,当系统风电渗透率较高时,风力发电机组吸收的无功功率会随风速变化而出现波动,伴随而来的无功功率转移容易使系统出现电压失稳。风电本身的随机性和不可控性造成电网潮流分布的不确定性增大,使安全状态感知准确度降低<sup>[21-23]</sup>。

#### 4 结论

为掌握电网的安全运行态势,提出了一种基于静态电压安全域的态势感知方法。首先,基于连续潮流模型和极限诱导分岔条件提出电压安全裕度指标,用于实时评估电力系统安全状态。其次,利用自回归滑动平均模型和时移技术模拟预测含相关性的风速时间序列。然后,通过融合准稳态方程和启发式算法求得安全域边界超平面。最后,通过计算运行点至电压安全域边界的距离实现系统安全裕度评估。

含风电场的 IEEE 118 节点系统上的测试结果表明,当风电渗透率较高时,风电场出力之间的相关度越大,电压安全裕度的波动范围也越大,并且当风电场接入容量减小时,电压安全裕度有所增大。此外,文中方法适用于薄弱节点监测和安全裕度评估。在实际工程应用中,分布式能源控制策略以及无功补偿装置将对系统静态电压安全域产生影响,这也是后续需进一步研究的重点。

#### 参考文献:

[1] DIAO R, VITTAL V, LOGIC N. Design of a Real-time security assessment tool for situational awareness enhancement in modern power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2):957-965.

[2] 刘俊勇,沈晓东,田立峰,等. 智能电网下可视化技术的展望[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1):7-13.

LIU Junyong, SHEN Xiaodong, TIAN Lifeng, et al. Prospects of visualization under smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1):7-13.

[3] GALIANA F D. Analytic properties of the load flow problem [C]//IEEE International Symposium on Circuits, 1977.

[4] KANG C Q, XIA Q, CHEN Q X, et al. Steady-state security assessment method based on distance to security region boundaries[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(3):288-297.

[5] 郭聪,余贻鑫. 决策空间上的电力系统热稳定安全域边界[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18):42-47.

GUO Cong, YU Yixin. Boundary of thermal security region in decision making space of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(18):42-47.

[6] 杨明,程凤璐,韩学山. 电力系统实时调度的有效静态安全

域法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6):1-5.

YANG Ming, CHENG Fenglu, HAN Xueshan. Real-time dispatch based on effective steady-state security regions of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6):1-5.

[7] 秦超,余贻鑫. 基于安全域的含风电电力系统概率小扰动稳定分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10):43-48.

QIN Chao, YU Yixin. Security region based probabilistic small signal stability analysis for power systems with wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10):43-48.

[8] 刘怀东,张江红,刘沛龙,等. 基于改进解析法的小范围动态安全域搜索方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2):29-33.

LIU Huaidong, ZHANG Jianghong, LIU Peilong, et al. Small-range search of DSR based on improved analytical method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2):29-33.

[9] MAKAROV Y V, DU P, LU S, et al. PMU-based wide-area security assessment: concept, method, and implementation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3):1325-1332.

[10] 董晓明,梁军,韩学山,等. 连续潮流参数选择及步长控制的分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(13):49-54.

DONG Xiaoming, LIANG Jun, HAN Xueshan, et al. Analysis and improvement on parameter selection strategy and step size controlling in continuation power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(13):49-54.

[11] 余贻鑫,冯飞. 电力系统有功静态安全域[J]. 中国科学(A辑), 1990, 33(6):664-672.

YU Yixin, FENG Fei. Active power steady-state security region of power system [J]. Science in China (Series A), 1990, 33(6):664-672.

[12] XIE K, BILLINTON R. Considering wind speed correlation of WECS in reliability evaluation using the time-shifting technique [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(4):687-693.

[13] WEI W, LIU F, MEI S. Dispatchable region of the variable wind generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(5):2755-2765.

[14] GAO B, MORISON G K, KUNDUR P. Voltage stability evaluation using modal analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(4):1529-1542.

[15] 许国东,吴跨宇,杨靖,等. 风电机组惯性能量支撑过程量化分析[J]. 浙江电力, 2019, 38(2):44-49.

XU Guodong, WU Kuayu, YANG Jing, et al. Quantitative analysis of inertial energy support process of wind turbine units [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(2):44-49.

[16] 王魁. 含大规模风电电力系统多时空尺度协调的若干问题研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.

WANG Kui. Research on some problems of multiple time and space scale coordination of wind power integrated system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science Technology, 2013.

[17] 肖斐,艾芊. 考虑天气因素的区域配网扰动事件预估[J]. 电网技术, 2018, 42(4):1132-1139.

XIAO Fei, AI Qian. Prediction of regional distribution network

- disturbance events considering weather factor[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1132-1139.
- [18] 钱政, 裴岩, 曹利宵, 等. 风电功率预测方法综述[J]. 高压技术, 2016, 42(4): 1047-1060.  
QIAN Zheng, PEI Yan, CAO Lixiao, et al. Review of wind power forecasting methods[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1047-1060.
- [19] 胡列翔, 戚宣威, 裘愉涛, 等. 电网全频域暂态信息记录及分析系统[J]. 浙江电力, 2018, 37(7): 31-35.  
HU Liexiang, QI Xuanwei, QIU Yutao, et al. Recording and analysis system for full frequency domain transient information in power system[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(7): 31-35.
- [20] 房亚囡, 杨柳, 龚仁敏, 等. 一种基于网格分形理论的电力系统故障选相方法[J]. 浙江电力, 2018, 37(8): 28-34.  
FANG Yanan, YANG Liu, GONG Renmin, et al. A fault phase selection method for power system based on mesh fractal theory[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(8): 28-34.
- [21] 李明节, 于钊, 许涛, 等. 新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1035-1042.  
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [22] 王伟胜, 张冲, 何国庆, 等. 大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1050-1060.  
WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillation in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060.
- [23] 刘文颖, 徐鹏, 赵子兰, 等. 基于区间估计的风电出力多场景下静态电压安全域研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 172-178.  
LIU Wenyong, XU Peng, ZHAO Zilan, et al. A research of static voltage stability region in wind power scenario based on interval estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 172-178.

作者简介:



周刚

周刚(1977),男,硕士,高级工程师,从事电力生产运维与管理工作;

肖斐(1991),男,博士在读,研究方向为电力系统态势感知、大数据在电力系统的应用;

艾芊(1969),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电能质量、人工智能、大数据及在电力系统中的应用、电力系统建模、分布式发电与微电网等。

## Calculation of power grid static voltage security region considering wind power integration

ZHOU Gang<sup>1</sup>, XIAO Fei<sup>2</sup>, AI Qian<sup>2</sup>, XIE Shanyi<sup>1</sup>, ZHANG Yufan<sup>2</sup>

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd. Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Fast and effective assessment of power systems security region can provide decision-making guidance for system operation. In order to identify operational state of power system, a method of static voltage security region (SVSR) considering wind power integrated is presented. Firstly, index of voltage security margin is presented by combining continuous power flow model and condition of limit induced bifurcation, which could quantify the level of voltage security. Then, hyper-planes of SVSR boundary by blending quasi steady state equation and heuristic algorithm are calculated. The hyper-planes assist in online assessment of security state and load margin. Further, the method of wind power forecasting considering correlation is introduced, which establishes foundation for situation prediction. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed method are demonstrated by cases studied in the IEEE 118-bus system. The simulation results show that when the permeability of wind power is high, correlation between wind power output and fluctuation range of voltage safety margin are greater.

**Keywords:** wind power; index of voltage security margin; static voltage security region; quasi steady state equation; heuristic algorithm

(编辑 钱悦)