# 多风电场接人的灵敏度场景静态无功/电压评估

明 杰,向红吉,戴朝华,陈维荣 (西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:风电出力对电力系统运行的影响存在复杂的非线性,现有处理风电随机性的风电场景模型难以保证风 电场景与电力系统优化运行保持一致,为此提出含多风电场的电力系统无功/电压灵敏度场景分析方法。首先 利用网损/电压灵敏度计算方法计算多风电场相关性出力样本的网损/电压灵敏度,再基于主成分分析构建联 合网损/电压灵敏度特征空间,并在此基础上进行场景聚类,得到多风电场网损/电压灵敏度场景。将某2个风 电场的实际数据接入 IEEE 30 节点系统中分别进行传统风电场景分析和所提灵敏度场景分析,验证了所提方 法的有效性和优越性。

关键词:风电场;无功/电压优化;聚类;风电场景;灵敏度场景 中图分类号:TM 614 文献标识码:A DO

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.014

## 0 引言

近年来,随着环境恶化和能源危机日益严重, 大规模风电接入电网。由于风电出力随机,线路开 断或无功缺失导致的无功/电压问题日益加剧。电 网的无功/电压水平直接影响了整个大电网的电压 水平,并且风电出力的随机性对电网的影响越来越 大,这更加加大了无功/电压控制的难度<sup>[1-2]</sup>。由此, 针对风电出力的随机性,合理提出有效的无功优化 方案,改善电网的电压质量显得更加重要。

对于含风电的无功/电压优化一般存在以下 2 个问题:针对风电场的规模,目前大部分文献处理 风电随机性问题均是建立在单风电场的问题上,对 于多风电场研究较少[3-4];处理风电随机性与波动 性问题,典型的处理方法是采用场景分析[5-7].但都 是基于风电本身进行场景划分,没有考虑系统运行 特性。文献[3]和文献[4]均是采用对单风电场进 行等距拉丁超立方采样得到场景模型,其次对场景 进行场景削减得到风电场景模型来解决风电随机 性问题,但是没有对多风电场随机性问题进行处理。 文献[5-11]对风电进行直接聚类[12]得到场景模型, 但是在场景划分时忽略了系统的运行特性。在实 际运行当中,由于风电几何空间与电力系统运行特 性空间存在复杂的非线性,同一风电场场景的不同 风电出力对系统的影响可能截然不同,但不同风电 场景的风电出力可能具有非常接近的系统特性。因 此,如果只是在风电空间上进行风电场景聚类,就 可能影响电力系统运行优化效果。

收稿日期:2017-03-16;修回日期:2017-09-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51307144);国网湖南省 电力公司项目(SGHNJY00JHQT1400066) 此外,也有文献采用灵敏度无功/电压控制策略 用于含风电电力系统,但没有考虑风电随机性<sup>[10,13-14]</sup>。 文献[10]基于二阶网损无功灵敏度矩阵确定无功 的补偿点,由此来降低系统网损,但是在处理风电 的过程中,由于风电出力的随机性和波动性,按照 此方法会导致无功补偿出现偏差。文献[13]基于网 损灵敏度进行无功/电压控制,但是在不确定问题 上只是考虑了负荷的随机波动和发电机停运,灵敏 度特征中也没有考虑随机性。文献[14]基于系统网 损灵敏度的二阶指标探讨电压的问题,但是同样没 有考虑系统随机性。

本文充分考虑风电以及风电接入电力系统后 的系统运行特性,引入了含大规模风电电力系统无 功/电压优化的灵敏度场景 SS(Sensitivity Scenario) 模型,利用灵敏度空间的场景聚类结果指导含大规 模风电电力系统的无功/电压运行优化,通过算例 验证本文所提模型的有效性。

# 1 灵敏度计算

#### 1.1 网损灵敏度

网损灵敏度指电力系统系统有功网损对节点 注入有功功率和无功功率的灵敏度<sup>[10,13-18]</sup>。设电力 系统的总节点数为 N,则网损如下:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^{N} U_i \sum_{j=1}^{N} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij})$$
(1)

其中,*U<sub>i</sub>*、*U<sub>j</sub>*分别为节点*i*、*j*的电压值;*G<sub>ij</sub>*和*B<sub>ij</sub>*分别 为节点*i*、*j*之间的电导值和电纳值;*δ<sub>ij</sub>*为*U<sub>i</sub>*和*U<sub>j</sub>*之 间的相角差。

根据全微分公式可以推出如下公式:

$$\frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_i} = \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q} \frac{\partial U}{\partial Q_i} + \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_i} \frac{\partial \theta}{\partial Q_i}$$
(2)

故而可以写出其矩阵形式变换为:

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51307144) and Project of State Grid Hunan Electric Power Corporation(SGHNJY00JHQT1400066)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial U} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial U} \frac{\partial Q_i}{\partial U} \\ \frac{\partial P_i}{\partial \theta} \frac{\partial Q_i}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_i} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix}$$
(3)

其中, P<sub>i</sub>、Q<sub>i</sub>分别为节点 i处的有功功率和无功功 率; θ为节点电压相位。

根据数学矩阵的运算法则和牛顿潮流约束方 程以及雅可比矩阵的计算,可推出电力系统网损对 节点功率变化的灵敏度:

$$\boldsymbol{S}_{1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial P_{i}} \\ \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial Q_{i}} \end{bmatrix} = (\boldsymbol{J}^{\text{T}})^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial \theta_{i}} \\ U_{i} \frac{\partial P_{\text{loss}}}{\partial U_{i}} \end{bmatrix}$$
(4)

其中,J为雅可比矩阵。

1.2 电压灵敏度

电压灵敏度指各节点无功功率改变所引起节 点电压的变化。根据节点电压的牛顿拉夫逊的潮 流计算:

$$\begin{cases} \Delta P_i = \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} \Delta U_j \\ \Delta Q_i = \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} \Delta U_j \end{cases}$$
(5)

得到该矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ U^{-1} \Delta U \end{bmatrix}$$
(6)

 $\diamond \Delta P = 0$ 时,则电压灵敏度矩阵如下:

$$S_2 = \frac{\Delta U}{\Delta Q} = U(-JH^{-1}N + L)^{-1}$$
(7)

其中,H、L为J的约当块矩阵。

#### 2 灵敏度场景

传统风电场景 WPS(Wind Power Scenario)根据 风速特征或风电有功出力特征构建随机样本,通过 计算不同风速(电)特征样本间的距离,如闵可夫斯 基距离中的欧氏距离,进行聚类得到各个不同的场 景,再对得到的场景进行无功优化。结合 K-means 聚类方法,建立风电场景模型,具体过程见文献[5]。

但是传统的风电场景聚类没有考虑系统的运行特性,而只有风速或风电信息,当风电随机性较大时,可能难以得到较好的系统运行性能。而风电接入的电压/网损灵敏度则能反映风电对系统运行的影响,因此本文基于此建立包含系统特性的风电灵敏度场景,主要分析如下。

#### 2.1 主成分分析

主成分分析<sup>[19-20]</sup>是多元统计分析中常用的方法 之一。基本原理为:在有一定相依关系的 n 个参数 的 m 组样本值所构成的数据阵列的基础上,通过建 立较小数目的综合变量,使其更集中地反映原来 n 个 参数中所包含的变化信息。根据数据变化的方差 大小来确定变化方向的主次地位,按主次顺序得到 各主成分。主成分分析综合评价法是从原始数据 所给定的信息直接确定权重,进而进行评价的方法。 在进行主成分分析时,所取权重直接为对应主成分 的方差贡献率,某个主成分在综合评价时所能反映 的信息越多,相应的权重也就越大。

#### 2.2 联合网损电压灵敏度特征空间构造

将风电场每一个风电出力随机样本代入系统中,利用灵敏度计算方法得到网损灵敏度 $S_1$ 、电压灵敏度 $S_2$ ,假定风电接入系统中有N个节点,其中 PV 节点有M个,PQ 节点有N-M-1个,根据雅可比矩阵可以得到 $S_1$ ,维数为 $2(N-1)-M,S_2$ 维数为N-M-1,因此得到总的灵敏度矢量样本为 $[S_1,S_2]$ ,矢量维数为3N-2M-3。

利用主成分分析方法得到贡献率大于 98%的前 *s* 个主成分。*s* 个主成分即是网损和电压灵敏度的联合灵敏度特征空间。然后将得到的联合网损电压灵敏度进行聚类分析,产生与系统运行特性相关的各个关于灵敏度的场景,利用得到的场景再映射到风电聚类,得到风电灵敏度场景。该方法不仅考虑了风电的随机特性,同时将风电的场景划分建立在系统运行优化的基础上,从而更利于指导系统运行。

#### 2.3 灵敏度场景划分

灵敏度场景划分指的是,结合 K-means 聚类方法以及联合灵敏度信息建立灵敏度场景模型,其流程如图1所示,其中T为当前迭代次数,L为最大迭代次数。具体过程如下。

**a.**数据处理。对风电场数据预处理,剔除不良数据,补其缺失数据<sup>[12]</sup>。

**b.** 灵敏度计算。风电随机出力样本接入系统进行灵敏度计算,得到相应的灵敏度矢量样本。

**c.** 联合灵敏度特征空间构造。通过主成分分 析方法构造特征空间。

**d.**数据归一化。由于灵敏度变量不同维数据 的量和数量级不同,因此对控制变量各维进行归一 化处理<sup>[21]</sup>。

**e.** 联合灵敏度特征空间场景划分。采用聚类指标 *K*<sub>DBI</sub><sup>[22]</sup>得出灵敏度场景的最佳聚类数,然后采用 *K*-means 聚类方法得到 *K* 个联合灵敏度场景。

f. 无功优化。对各灵敏度场景进行无功优化, 得到每个场景唯一的共享控制变量形态。

g. 存储性能结果以及最优控制策略。根据各 个场景下的网损、电压以及无功情况,采用统计方 法得到各个场景下的数据特征以及分布曲线,对系 统运行状态进行概率分析。



图 1 灵敏度场景流程图 Fig.1 Flowchart of sensitivity scenario

# 3 算例分析

采用含风电场的 IEEE 30 节点系统进行仿真 测试,如图 2 所示。该系统包含:41 条支路,其中有 4 条装有可调变压器,21 个负荷节点,6 台发电机,2 个风电场,3 台并联电容器。

无功优化采用粒子群优化 PSO(Particle Swarm Optimization)算法,以有功网损、发电机无功偏差和 节点电压偏差加权和最小作为目标函数,以电网潮 流、发电机端电压可调变压器分接头、电容器投切 组数上下限为约束条件,求得风电样本最优无功控 制变量,各控制变量的详细信息如表1所示,机端 电压上、下限为标幺值,3台并联电容器中每台50个 档,每档调节无功补偿量(步长)为1 Mvar。算例中 PSO 算法参数参考文献[2]。

#### 3.1 联合灵敏度空间构造

利用本文中灵敏度求取方法以及主成分分析, 在节点 7 和节点 9 接入澳大利亚风电场数据,该风 电场数据为 2015 年澳大利亚月份数据,时间尺度为 15 min,30 节点系统中 PQ 节点有 24 个,PV 节点有 5 个,平衡节点有 1 个,可以得到[*S*<sub>1</sub>,*S*<sub>2</sub>],其中 *S*<sub>1</sub> 为 53 维,*S*<sub>2</sub> 为 24 维。



图 2 含 2 个风电场的 IEEE 30 节点系统 Fig.2 IEEE 30-bus system with two wind farms

#### 表 1 IEEE 30 节点系统控制变量信息表

Table1 Control variables of IEEE 30-

bus system

控制变量	所在位置 (节点/支路)	上限	下限	步长	档数	变量性质
机端电压	1,2,5,8,11,13	1.06	0.94	—	_	连续
变压器变比	6-9,6-10, 4-12,28-27	1.10	0.90	0.0125	16	离散
并联电容器	3,10,24	50.00	0	1.0000 Mvar	50	离散

利用主成分分析方法可以得到主成分分析 的结果如表 2 所示,可以看到第一个主成分贡献率达 到 74.69%,前 5 个主成分累积贡献率达到 98.45%。 可认为前 5 个主成分为电压网损灵敏度的联合灵 敏度成分。最后得到的[*s*<sub>1</sub>,*s*<sub>2</sub>,*s*<sub>3</sub>,*s*<sub>4</sub>,*s*<sub>5</sub>]即为联合 网损电压灵敏度矩阵,为下一步进行聚类分析构造 了灵敏度场景聚类空间。

表 2 主成分分析结果 Table 2 Results of principal

component analysis							
特征值	差值	贡献率/%	累计贡献率/%				
57.51	44.78	74.69	74.69				
12.73	9.76	16.53	91.23				
2.97	1.28	3.85	95.08				
1.69	0.77	2.18	97.27				
0.91	0.24	1.18	98.45				

#### 3.2 场景数选取

David-Bouldin 指数  $K_{DBI}$  是一种评估度量聚类 算法有效性的指标<sup>[22-24]</sup>,为了得出合理的场景数 K, 利用澳大利亚某地区相邻风电场(分别用 WF<sub>1</sub>和 WF<sub>2</sub>表示)的实测数据为基础,按文献[22]得到的  $K_{DBI}$ 指标如图 3 所示。

由图 3 可知,对于风电场景,聚类数 K=6 时 K<sub>DBI</sub> 取得极小值;在增大聚类数时 K<sub>DBI</sub> 值呈整体上升 趋势,因此风电场景聚类数选为 6。对于灵敏度场 景,聚类数 K=7 时 K<sub>DBI</sub> 取得极小值,因此灵敏度场 景聚类数选为 7。



Fig.3 Relationship between  $K_{\text{DBI}}$  and number of clustering

#### 3.3 对比分析

根据第3节分别得到风电场景和灵敏度场景, 2类场景下的聚类中心以及所占比例如表3所示。 风电场景总共6类,风电场出力越大,所占比例越小,符合风电出力的规律。灵敏度场景共7类,其 中场景7占总类数的71.15%,其余所占比例较小, 灵敏度场景将风电数据大部分集中在一定区域范 围以内,不同于风电场景是将风由小到大进行排列, 而忽略了风电对于系统的影响。

表 3 风电场景与灵敏度场景聚类场景表

Table 3 Clustering scenarios by wind power scenario and sensitivity scenario

七星	灵敏度	汤景	风电场景			
切尽	中心/MW	概率/%	中心/MW	概率/%		
1	(2.72,6.44)	14.54	(0.52,0.91)	36.89		
2	(2.73,6.41)	2.94	(2.23,4.53)	22.73		
3	(3.20,7.22)	1.00	(4.26, 8.86)	15.93		
4	(3.27,7.30)	1.92	(6.43,14.58)	12.12		
5	(3.43,7.79)	0.96	(9.80,22.02)	7.73		
6	(3.67,8.15)	7.49	(15.54, 31.09)	4.59		
7	(3.67, 7.94)	71.15				

为了验证所提出的灵敏度场景分析方法的有效性和优越性,分别对每个风电场景和灵敏度场景进行 30 次独立无功优化计算,给出无功优化目标函数值、网损和电压的最大值、最小值、均值、方差和 T 检验结果。T 检验是一种评价随机样本平均数的差异是否显著的概率统计理论。T 检验时,假设样本数据 A = B 的均值相等,则返回值 h = 0,反之则  $h \neq 0$ ;若在均值相等的情况下判断置信区间  $T_{cl}$ ,若 A = B 比较  $T_{cl} < 0$ ,则 A 优于 B;反之亦然<sup>[21]</sup>。本文中 T 检验显著水平均取 0.05。

图 4 和图 5 分别给出了风电场景与灵敏度场 景的聚类散点图,可以明显看出风电场景的散点图 只是按照风电的大小依次分类,然而灵敏度场景则 打乱了风电出力的有序性,灵敏度场景散点图几乎



图 4 风电场景的聚类散点图





图 5 灵敏度场景的聚类散点图

Fig.5 Scatter diagram of clustering by sensitivity scenario

重合,而对应的场景分类却不同。这是因为风电接 入系统中进行联合灵敏度计算后,不同风电接入系 统联合灵敏度的大小可能一样,而相同风电接入系 统灵敏度可能会不同,该场景突出了对无功/电压影 响的特征,说明灵敏度场景更多反映了系统的特性。

表4给出了网损的最大值、最小值、均值、方差 和T检验结果。灵敏度场景的最大值、均值和方差 均优于风电场景,其中均值为17.52 MW,比风电场 景少了2.82%,最大值比风电场景少了3.77%,最 小值比风电场景大13.51%,方差低于风电场景;T检 验 h=1,置信区间小于0,说明从统计意义上灵敏 度场景分析方法优于风电场景分析方法。灵敏度 场景一定程度上反映了系统特性,相同风电出力可 能有不同的系统性能,而不同的风电出力可能有相 同的系统特性,风电接入系统特性后,一定程度上 削弱了风电的波动性,在风电信息相对稳定的情况

表 4 风电场景与灵敏度场景网损对比

Table 4 Comparison of power losses between wind power scenario and sensitivity scenario

场景	最大值/ MW	最小值/ MW	均值/ MW	方差	h	$T_{ m CI}$
风电场景	27.09	8.73	18.03	6.81	_	_
灵敏度场景	26.07	9.91	17.52	5.12	1	[-0.586, -0.435]

下,网损会相应减小。

106

表5给出了电压最大值、最小值、偏差期望(以 上为标幺值)和T检验结果.风电场景的最大值小于 灵敏度场景,最小值大于灵敏度场景,但是相差不 大,说明在一定程度上都有一定的越限。从偏差期望 来看,灵敏度场景优于风电场景。根据 T 检验结果可 以看到 T<sub>q</sub><0.因此从统计效果而言灵敏度场景优于 风电场景。同时,图6给出了30个节点的电压最大 值(标幺值),由图可知灵敏度场景节点11存在越上 限,但是风电场景在无功优化的情况下还是存在节 点9越上限。图7给出了30个节点的电压最小值(标 幺值),由图可知灵敏度场景节点5、7、18、19、30存 在越下限,风电场景在无功优化的情况下节点10-15、18、19、30 越下限,可明显看出风电场景越下限 的节点数为9个,而灵敏度场景越下限的个数仅为 5个。选取风电场景和灵敏度场景均越限的节点18、 19、30进行概率统计分析。图 8 和图 9 给出了各越 限节点电压幅值的概率密度曲线(图中电压为标幺 值),灵敏度场景节点18、19电压多数集中在1 p.u. 附近,但是风电场景节点18、19电压大部分集中在 0.95~0.98 p.u., 由此可知风电场景电压越限情况方差 大的原因。而节点 30 在 2 个场景下的电压期望都在 0.95 p.u. 附近,但只是风电场景大都集中在 0.95 p.u., 而灵敏度场景有一部分集中在1p.u. 附近,因此风 电场景越下限的可能性大幅提高。图 10 和图 11 分 别给出了风电场景和灵敏度场景越限节点的分布情 况,风电场景节点18、19越限情况多于灵敏度场景, 节点 30 电压越限情况不相上下。

表 6 给出了无功越限的最大值、最小值、均值、 方差和 T 检验结果。灵敏度场景的最大值、均值优 于风电场景,其中均值为 0.0572 Mvar,比风电场景 少了 72.42%,最大值比风电场景少了 3.67%,最小

表 5 风电场景与灵敏度场景电压对比



图 6 节点电压最大值图

Fig.6 Schematic diagram of maximum node voltage

值和均值略微优于风电场景,最小值比风电场景小 39.61%,方差高于风电场景;T检验*h*=1,置信区间 小于0,说明从统计意义上灵敏度场景分析方法优于 风电场景分析方法。整体而言,灵敏度场景在无功 偏差上优于风电场景。



图 7 节点电压最小值图





图 8 灵敏度场景典型节点电压幅值概率密度图 Fin 8 Park billing duration of anthrono complication of







(c) 节点 30
图 11 风电场场景典型节点电压越限值

Fig.11 Voltage limit violation value of typical node in wind power scenario

表 6 风电场景与灵敏度场景无功对比						
Table 6 Comparison of reactive powers between						
wind power scenario and sensitivity scenario						

	-					
场景	最大值/ Mvar	最小值/ Mvar	均值/ Mvar	方差	h	$T_{ m CI}$
风电 场景	57.7577	-8.3804	0.2074	5636.0		_
灵敏度 场暑	55.8780	-13.8780	0.0572	6031.4	1	[-9.3028,-8.9818]

表 7 给出了无功优化目标函数(网损、电压越限以及无功越限的加权和)的最大值、最小值、均值、方差以及 T 检验结果。从表 7 明显可知,灵敏度场景的最大值、均值和方差均优于风电场景,其中风电场景均值为 18.2103,比灵敏度场景多了 2.95%。从 T 检验来看, h=1 且置信区间位于大于 0 的一侧,说明从统计意义上,灵敏度场景优于风电场景。同时,灵敏度场景每个场景目标函数都比较接近,而风电场景的目标函数波动幅度比较大,不仅没有平抑风电给系统带来的劣根性,反而给运行人员带来诸多不利。

表 7 风电场景与灵敏度场景目标函数对比

Table 7 Comparison of objective functions between wind power scenario and sensitivity scenario

场景	最大值	最小值	均值	方差	h	$T_{ m CI}$
风电 场景	27.8216	8.8929	18.2103	7.3294	_	_
灵敏度 场景	26.3532	10.0783	17.6880	5.1370	1	[-0.5993,-0.4453]

## 4 结论

针对风电场景的不足,本文提出了含大规模风 电的电力系统灵敏度场景概率模型,并进行了无功 优化评估。通过仿真分析,得到结论如下:

a. 从模型本身,灵敏度场景除了反映风电特性 外,还能有效反映风电对系统运行特性的影响,能 合理刻画风电针对无功/电压优化的场景分析;

**b.** 从系统网损、节点电压以及总目标结果可以得到,与风电场景相比,灵敏度场景的网损均值减少2.82%,电压偏差减小6.11%,系统总目标函数 值降低2.95%。

因此,灵敏度场景在实际应用当中不仅能体现 风电本身的随机性,而且能反映其对电力系统运行 的影响,在此场景下无功电压调控性能更具优越性, 对电网运行更具有实际价值与参考意义。

#### 参考文献:

- [1] 汪文达,崔雪,马兴,等. 考虑多个风电机组接入配电网的多目标 无功优化[J]. 电网技术,2015,39(7):1860-1865.
   WANG Wenda,CUI Xue,MA Xing,et al. Multi-objective optimal reactive power flow of distribution network with multiple wind turbines[J]. Power System Technology,2015,39(7):1860-1865.
- [2] 杨硕, 王伟胜, 刘纯, 等. 计及风电功率波动影响的风电场集群无

功电压协调控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4761-4769.

YANG Shuo, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Coordinative strategy for reactive power and voltage control of wind farms cluster considering wind power fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28); 4761-4769.

- [3] MA X Y,SUN Y Z,FANG H L. Scenario generation of wind power based on statistical uncertainty and variability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013,4(4):894-904.
- [4] MA X Y,SUN Y Z,FANG H L,et al. Scenario-based multiobjective decision-making of optimal access point for wind power transmission corridor in the load centers [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(1):229-239.
- [5] 熊强,陈维荣,张雪霞,等.考虑多风电场相关性的场景概率潮流 计算[J]. 电网技术,2015,39(8):2154-2159.

XIONG Qiang, CHEN Weirong, ZHANG Xuexia, et al. Scenario probabilistic load flow calculation considering correlation between wind farms [J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2154-2159.

[6]何禹清,彭建春,文明,等. 含风电的配电网重构场景模型及算法
[J]. 中国电机工程学报,2010,30(28):12-18.
HE Yuqing,PENG Jianchun,WEN Ming,et al. Scenario model and algorithm for the reconfiguration of distribution network with

wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30 (28):12-18.
[7] 黎静华,文劲宇,程时杰,等.考虑多风电场出力 Copula 相关关系的场景生成方法[J] 中国电机工程学报 2013 33(16):30-36

- 系的场景生成方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):30-36. LI Jinghua, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. A scene generation method considering Copula correlation relationship of multi-wind farm power[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(16):30-36.
- [8] 朱乾龙,韩平平,丁明,等. 基于聚类-判别分析的风电场概率等 值建模研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(28):4770-4780.
   ZHU Qianlong,HAN Pingping,DING Ming,et al. Probabilistic equivalent model for wind farms based on clustering-discriminant analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(28):4770-4780.
- [9] 张晓辉,闫柯柯,卢志刚,等. 基于场景概率的含风电系统多目标 低碳经济调度[J]. 电网技术,2014,38(7):1835-1841. ZHANG Xiaohui,YAN Keke,LU Zhigang, et al. Scenario probability based multi-objective optimized low-carbon economic dispatching [J]. Power System Technology,2014,38(7):1835-1841.
- [10] 王景亮,张焰,王承民,等. 基于灵敏度分析与最优潮流的电网 无功/电压考核方法[J]. 电网技术,2005,29(10):65-69.
  WANG Jingliang,ZHANG Yan,WANG Chengmin, et al. Power system reactive power/voltage assessment based on sensitivity analysis and optimal power flow[J]. Power System Technology, 2005,29(10):65-69.
- [11] 曾山. 模糊聚类算法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
   ZENG Shan. Research on fuzzy clustering algorithm[D].
   Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2012.
- [12] 陈树勇,王聪,申洪,等. 基于聚类算法的风电场动态等值[J]. 中国电机工程学报,2012,32(4):11-19,24.
  CHEN Shuyong,WANG Cong,SHEN Hong,et al. Dynamic equivalence for wind farms based on clustering algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(4):11-19,24.
- [13] 吴杰康,胡文霞,秦砺寒,等. 计及 TCSC 的电压稳定性灵敏度 指标计算[J]. 电网技术,2008,32(17):12-16,34.
  WU Jiekang,HU Wenxia,QIN Lihan,et al. Calculation of sensitivity index for voltage stability of power system with thyristor controlled series compensator[J]. Power System Technology,2008,32(17):12-16,34.
- [14] 崔杨,徐蒙福,唐耀华,等. 基于集电系统无功灵敏度的双馈风 电场无功控制策略[J]. 电网技术,2015,39(9):2418-2422.

CUI Yang,XU Mengfu,TANG Yaohua,et al. Reactive control strategy of DFIG wind farm based on reactive sensitivity of collection system[J]. Power System Technology,2015,39 (9): 2418-2422.

- [15] 李勇,张勇军,刘巍,等. 电压稳定极限点的快速判定及其灵敏 度算法[J]. 电网技术,2008,32(18):47-51,61.
  LI Yong,ZHANG Yongjun,LIU Wei,et al. Fast determination of voltage stability critical point and its sensitivity algorithm [J]. Power System Technology,2008,32(18):47-51,61.
- [16] 黄弘扬,杨汾艳,徐政,等. 基于改进轨迹灵敏度指标的动态无 功优化配置方法[J]. 电网技术,2012,36(2):88-94.
  HUANG Hongyang,YANG Fenyan,XU Zheng,et al. A dynamic VAR configuration method based on improved trajectory sensitivity index[J]. Power System Technology,2012,36(2):88-94.
- [17] 彭昱,周玮,孙辉,等. 基于网损灵敏度二阶指标的电压稳定概率评估[J]. 继电器,2006,30(18):22-26.
  PENG Yu,ZHOU Wei,SUN Hui,et al. Probabilistic assessment based on second order loss sensitivity for voltage stability[J]. Relay,2006,30(18):22-26.
- [18] 姜勇,周双喜,朱凌志. 基于系统网损灵敏度的二阶指标研究
   [J]. 电力系统自动化,2000,34(20):16-18.
   JIANG Yong,ZHOU Shuangxi,ZHU Lingzhi. Second order index based on system loss sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems,2000,34(20):16-18.
- [19] 安军,穆钢,徐炜彬. 基于主成分分析法的电力系统同调机群识 别[J]. 电网技术,2009,33(29):25-28.
  AN Jun,MU Gang,XU Weibin. Recognition of power system coherent generators based on principal component analysis[J].
  Power System Technology,2009,33(29):25-28.
- [20] 贾嵘,蔡振华,刘晶,等. 基于主成分分析和最小二乘支持向量机的电力系统状态估计[J]. 电网技术,2006,30(21):75-77,98.
  JIA Rong,CAI Zhenhua,LIU Jing,et al. Power system state estimation based on principal component analysis and least square support vector machines[J]. Power System Technology, 2006,30(21):75-77,98.
- [21] DAI C, CHEN W, ZHU Y, et al. Seeker optimization algorithm for optimal reactive power dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3):1218-1231.
- [22] 明杰,向红吉,戴朝华,等. 大规模风电接入的运行场景无功优 化评估[J]. 电网技术,2016,40(9):2737-2742.
  MING Jie,XIANG Hongji,DAI Chaohua,et al. Operation scenario reactive power optimization assessment with large-scale wind farm integration[J]. Power System Technology,2016,40(9): 2737-2742.
- [23] CALINSKI T, HARABASZ J. A dendrite method for cluster analysis[J]. Communications in Statistics, 1974, 3(1):1-27.
- [24] RODRIGUEZ A,LAIO A. Machine learning. Clustering by fast search and find of density peaks[J]. Science,2014,344(6191): 1492.

#### 作者简介:



明 杰(1992—),男,四川自贡人,硕士 研究生,研究方向为大规模风电电力系统运 行优化(**E-mail**:banxim@163.com);

向红吉(1992—),男,重庆人,硕士研究 生,研究方向为含风电电力系统优化运行;

戴朝华(1973—),男,湖南新化人,副教 授,博士,通信作者,研究方向为电力系统规 划与运行优化、新能源技术等。

(下转第 115 页 continued on page 115)

108

# Optimized charging strategy of community electric vehicle charging station based on improved NSGA-II

WANG Yufei, CAI Chuangao, XUE Hua

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** An optimized charging strategy for community electric vehicle charging station based on improved NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II) is proposed. Firstly, the multi-objective charging model of electric vehicle charging station is established to minimize the charging cost of per unit electric energy and the load variance of grid side, with the capacity limitation of electric vehicle charging and distribution transformers as constraints. Then, aiming at the shortcomings of traditional NSGA-II, such as difficulties for generating the initial populations satisfying the constraints, uneven distribution of Pareto solution sets and low performance of optimal solution sets, an improved NSGA-II, combining improved initial population generation method with comparison operator of crowding distance, is proposed to solve the model. The optimal compromise charging scheme is selected from the final Pareto solution sets by TOPSIS(Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution) based on information entropy. Finally, simulative results of examples verify the effectiveness of the proposed algorithm and show that the improved NSGA-II can improve the grid-side load level and charging cost performance of customers in large extent.

Key words: electric vehicles; community charging station; NSGA-II; multi-objective optimization; charging strategy; Pareto optimality

(上接第 108 页 continued from page 108)

# Static reactive power/voltage assessment of sensitivity scenarios with multiple wind farms

MING Jie, XIANG Hongji, DAI Chaohua, CHEN Weirong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract**: There exists complex nonlinear impact of wind power on power system operation, and the traditional wind power scenario model for dealing with the randomness of wind power cannot ensure the consistency of optimal operation of power system and wind power scenario, for which, an analytical method of reactive power/voltage sensitivity scenario for power system with multiple wind farms is proposed. The power loss/voltage sensitivity calculation methods are adopted to calculate the power loss/voltage sensitivities for the correlated output samples of multiple wind farms, the principle component analysis is used to build the combined power loss/voltage sensitivity feature space, on this basis, the power loss/voltage sensitivity scenarios of multiple wind farms are obtained by scenario clustering. The practical data of two wind farms are connected into IEEE 30-bus system for the traditional wind power scenario analysis and the proposed sensitivity scenario analysis, the simulative results verify the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: wind farms; reactive power/voltage optimization; clustering; wind power scenario; sensitivity scenario