

DOI: 10.7652/xjtuxb201608018

主动配电网多维度静态安全评估

王秀丽, 张择策, 侯雨伸
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了使主动配电网静态安全评估多维度和标准化,提出了一种主动配电网的多维度静态安全评估方法,利用信息熵原理分析指标间的差异程度,从风险性、可靠性和均匀性3个维度对主动配电网进行评估,从而确定各个指标应具有的客观权重。为应对主动配电网中包含的大量随机因素和不确定性,采用了一种结合蒙特卡罗模拟法高维不敏感性和拟蒙特卡罗模拟法抽样均匀性的混合蒙特卡罗(hybrid-Monte Carlo, HMC)模拟法来形成系统状态矩阵。通过算例进行指标计算验证了证方法的有效性,结果表明,随着主动配电网中各类随机因素的增加,各维度的风险性指标、可靠性指标、均匀性指标变化趋势各不相同,对均匀性的改善程度最大,对可靠性的改善次之,对风险性的改善相对较少,但需求侧响应对3个维度的指标都有明显的改善作用,负荷可调之后将使得综合安全性能指标变好。研究工作对推动可再生能源消纳技术有一定指导作用。

关键词: 主动配电网;静态安全评估;信息熵;混合蒙特卡罗

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)08-0110-07

Multidimensional Static Security Assessment for Active Distribution Network

WANG Xiuli, ZHANG Zece, HOU Yushen

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A multidimensional static security assessment plan is proposed, which gives a comprehensive assessment of active distribution network from the aspects of risk, reliability and homogeneity, thus the assessment becomes multidimensional and standardized. This plan uses the information entropy principle to analyze the difference among the indexes, so as to determine the objective weight of each index. To deal with the randomness and uncertainty in active distribution network, a hybrid-Monte Carlo method (HMC) which absorbs the high-dimension insensitivity of Monte Carlo method and the uniform sampling of quasi-Monte Carlo method is introduced and used to form the system state matrix. The feasibility of the plan is verified by calculating the indexes of an example. With the increasing of all kinds of random factors in active distribution network, the index variation trend for each dimension is different. These random factors improve homogeneity to a greater extent, reliability to a less extent and risk to the least extent. The demand response improves the index of each dimension significantly, and the comprehensive index becomes better in the case of adjustable load.

Keywords: active distribution network; static security assessment; information entropy; hybrid-Monte Carlo

收稿日期: 2015-12-22。 作者简介: 王秀丽(1961—),女,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277140)。

网络出版时间: 2016-05-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160517.1925.018.html>

主动配电网是具备组合控制各种分布式能源能力的配电网路^[1],旨在更好地兼容大规模可再生能源,提升绿色能源利用率^[2],优化一次能源结构^[3-4],积极消纳可再生能源并确保电网的安全稳定运行^[5-9]。对于其静态安全评估,仅关注配电网中的节点电压越限概率和支路功率过载概率显然不够全面^[10-11],探索多维度、深层次、标准化的新型静态安全评估方法势在必行。

主动配电网的电力可靠性显然是其静态安全评估的重要环节。文献[12]详细介绍了用蒙特卡罗模拟的方法评估发电、输电组合系统,文献[13]说明了电力系统均匀性、安全性、可靠性之间的区别与联系,文献[14]则提出了合理的均匀性指标和求解模型。

信息熵作为信息论的内容,在求解不同指标权重分布中的应用已经在各个领域越来越广泛,如分布式冷热电能源系统优化设计^[15]、火电机组综合评价^[16]、水电厂机组运行优劣度评价^[17]、水质评价^[18]等。文献[15]建立了分布式能源系统指标评价矩阵,利用信息熵原理求解了不同指标的权重分布。

为应对主动配电网中出现的大量不确定性因素和随机因素,采用模拟法求解静态安全评估问题,易于实现也便于统计结果。蒙特卡罗(MC)模拟法是应用最为广泛的抽样方法,然而计算量大是一个明显的缺点,于是重要抽样法^[19]、控制变量法^[20]、分层抽样法^[21]等提高 MC 法效率的研究曾火爆一时。近年来,在经济学领域中的证券交易^[22]、期权问题^[23]中较为常用的拟蒙特卡罗(QMC)模拟法逐渐被电力系统的研究人员所注意。文献[24]成功地将该法运用到电力系统的可靠性评估中,取得了理想的效果。

本文着眼于深化主动配电网静态安全评估的内涵,从风险性、可靠性、均匀性 3 个维度同时对主动配电网进行评估,采用混合蒙特卡罗(HMC)法来抽取系统状态矩阵,采用熵权法评价其综合静态安全性能的指标。本文提出的多维度综合静态安全性能评估是对更全面地评价电网安全性能的积极探索,所选取的 HMC 抽样方法是解决模拟法计算效率问题的有益尝试。本文的研究工作对推动可再生能源消纳技术有一定指导作用。

1 主动配电网中的随机因素

1.1 可再生能源的考虑

由于负荷波动、可再生能源发电出力波动,故障的多样性等特征,主动配电网运行环境复杂多变。

为了更好地对其进行随机潮流分析、可靠性分析和均匀性分析,应选取合适的模型描述造成其不确定性的随机因素。

在大量历史数据的支撑下,对风速进行统计学上的分布模拟以及等效出整个风电场的总出力已变得不再遥不可及。同时,中小型光伏发电系统也是主动配电网中重要的出力来源。风电机组群和光伏电站的出力建模研究已较为成熟,在此不再赘述,详细推导参见文献[11]。

生物质发电技术由于燃料的松散性、高挥发性和低热值性^[25],收集和贮藏都较为困难,难以大规模集中利用,但却有着弱时空特性的优点。在主动配电网的环境下,可将其作为系统出力的补充。本文以中型生物质循环流化床气化发电为例,给出额定出力、气化效率和发电效率的范围,出力公式为

$$P=f_{\text{c}}f_{\text{b}}P_{\text{r}} \tag{1}$$

式中: P_{r} 为气化发电系统额定出力; f_{c} 和 f_{b} 分别为考虑不确定性后的气化效率和发电效率。

1.2 负荷与需求侧响应的考虑

在主动配电网中,负荷具有较强的随机性和不确定性。根据文献[26],本文采用综合考虑负荷点变化相关性和预测不确定性的改进 K 均值聚类算法建立负荷概率模型。用 Sturges 公式决定年负荷阶次的个数 $K=1+\lg 8\ 760/\lg 2\approx 14$

以 IEEE RTS79 系统^[26]为例,将其年负荷原始数据采用改进 K 均值聚类算法进行聚类,得到的负荷概率模型如表 1 所示。表中各级负荷水平用峰值百分数表示。

表 1 基于改进 K 均值聚类算法的负荷概率模型

负荷阶次	负荷水平/%	概率	负荷阶次	负荷水平/%	概率
1	96.42	0.002 6	8	70.16	0.095 1
2	92.45	0.007 6	9	65.73	0.126 4
3	88.52	0.022 0	10	61.02	0.099 8
4	84.86	0.036 3	11	54.92	0.114 3
5	81.93	0.046 1	12	49.71	0.134 0
6	78.62	0.072 4	13	42.70	0.122 0
7	74.63	0.071 0	14	35.54	0.050 3

需求侧响应是主动配电网中一个显著的特点。本文考虑的需求侧响应包括可中断负荷、实时电价和电动汽车。

在本文的主动配电网模型中,对于可中断负荷节点,若其负荷水平 L_i 较高,则用较低的设定值 L^* 代替。为反映实时电价的影响,用模拟出的电价曲

线按人为规定的方式对负荷进行修正。

对于主动配电网中的每一辆充电汽车,先抽取其状态参数,包括行驶状态、位于哪个充电站、充电还是放电状态、充放电电量为多少。确定了充电汽车的状态,再将其转换为对负荷的调整。

2 HMC 方法

模拟法求解问题的基本思路是:建立一个概率模拟或者随机过程,使其参数等于问题的解,然后通过模型或者过程的抽样来观察和计算所求参数的统计特征,最后给出所求问题的近似解^[27]。

蒙特卡罗法是最经典的模拟法,易于实现,对维数不敏感,适合考虑复杂因素,在电力系统工程分析中应用十分广泛。但是,其缺点是计算量大,从误差阶的角度看,MC 法的积分误差以 $O(N^{-1/2})$ 为阶,意味着误差每提高一位精度,需要增加约 100 倍的抽样次数。

拟蒙特卡罗法是近年来发展起来的方法,通过改进误差阶提高 MC 法求解问题的计算效率,与 MC 法一样,都是通过对系统状态的大规模抽样,用抽样的平均值作为近似值来进行估计。QMC 法与 MC 法最大的区别在于,MC 法抽取的是伪随机数列,致力于抽样的随机性,而 QMC 法抽取的是确定性低偏差点列,致力于抽样的均匀性。文献[28]证明了 QMC 法的积分误差渐进以 $O(N^{-1})$ 为阶,即误差每提高一位精度,只需增加约 10 倍的抽样次数。文献[29]详细论述了 QMC 法的具体原理及其低偏差点列的构造办法。

为了同时利用 MC 法的抽样随机性和 QMC 法的抽样均匀性,本文提出将两者结合起来的混合蒙特卡罗 (Hybrid Monte Carlo, HMC) 模拟法,即分层抽取系统的随机状态。在主动配电网中,对于那些由于各类约束和限制,随机性并不太大的不确定性因素,如风电场风速切入角度、生物质发电系统的气化效率等,采用 QMC 法抽取的低偏差点列来形成随机状态矩阵 S' ,而其他因素则由 MC 法抽取的伪随机数列来形成随机状态矩阵 S'' ,最后再处理成统一的系统随机状态矩阵 $S=[S'; S'']$ 。在该矩阵的基础上进行确定性分析,并在大规模抽样后得到所求参数的统计特征,从而估计出问题的解。

3 多维度静态安全评估

3.1 风险性评估

电力系统运行的风险主要表现为支路功率过载

和节点电压越限,它们容易导致系统电压崩溃和出现连锁故障。

文献[30]认为,对系统风险的评估需要同时考虑出现风险的概率和风险的严重程度。设配电网中有 m 条支路和 n 个节点,采用上节所述的 HMC 法进行随机潮流计算,容易统计出各节点的支路功率过载概率和节点电压越限概率,分别为 p_{OL_m} 和 p_{OV_n} 。根据文献[30],定义支路功率过载严重程度如下

$$S_{ev}(L_m) = e^{a\omega(L_m)} - 1 \quad (2)$$

$$\omega(L_m) = \begin{cases} L_m - L_0, & L_m \geq L_0 \\ 0, & L_m < L_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S_{ev}(L_m)$ 为支路 m 的支路功率过载严重程度; $\omega(L_m)$ 为越限量; a 为正数; L_m 为支路 m 的实际输送功率与功率限额之比; L_0 为设定的阈值。

定义支路功率过载风险为

$$R_{OL_m} = bS_{ev}(L_m)p_{OL_m} \quad (4)$$

式中: b 为正数。

设向量 $R=[R_{OL_1}, R_{OL_2}, \dots, R_{OL_M}]^T$ 为配电网中支路功率过载风险向量,定义系统支路功率过载风险指标为

$$R_{OL} = \alpha \frac{1}{N} \|R\|_1 + \beta \|R\|_\infty \quad (5)$$

式中: α 和 β 为权重系数,一般都取 0.5,分别表征风险平均值和风险最大值的影响程度,两者之和为 1; $\|R\|_1$ 与 $\|R\|_\infty$ 分别是向量 R 的 1 范数和 ∞ 范数。同理可定义出系统节点电压越限后果严重程度和节点电压越限风险指标 R_{OV} 。

3.2 可靠性评估

主动配电网中的分布式电源产生的电能除了就地消纳,还要输送出去参与配电网的调度,这是主动配电网与微电网的一个重大区别。

将主动配电网中的所有发电机节点的注入功率看成是多状态的,具体模型需参考分布式电源的种类,负荷节点仍采用聚类算法进行分级。输电线路按不同故障后果处理为不同的故障模式,为简化计算,将主动配电网中所有元件的故障看成是相互独立的。采用 HMC 法抽取元件状态,形成系统状态矩阵,对该状态下的系统进行可靠性计算,在大规模抽样直至满足精度要求后,统计可靠性指标。由于主动配电网的可靠性评估将影响可调负荷的控制,本文主要考虑的指标是切负荷概率

$$p_{PLC} = \sum_{i=1}^{N_L} \left(\sum_{j \in S_i} \frac{n_j}{N_i} \right) \frac{T_i}{T} \quad (6)$$

式中: N_L 为负荷分级数; S_i 是第 i 个负荷状态下有

切负荷的系统状态集合; n_j 为抽样中系统状态 j 的发生次数; N_i 和 T_i 分别是第 i 个负荷状态下的抽样总数和持续时间; T 为负荷的总持续时间。

3.3 均匀性评估

在电力系统的规划和运行中,由于电力设备运行参数的差异、网架结构的多样以及随机因素的影响,电力系统在时空上都会表现出不均匀的特征。

由于实际运行条件的限制,人为规定的安全约束边界和系统的实际安全约束边界是不同的^[14],对于某一运行时刻,系统状态在各个可能转移的方向上离实际安全约束边界的距离也是不同的。如系统中各个线路的负载率都没有超过设定的阈值,但某区域内有大量线路的负载率都接近阈值,处于重载状态,一旦一条线路发生故障,则容易引发大规模潮流转移,造成大规模连锁性故障。这种情况是需要极力避免的,因此设定指标评估系统的均匀性具有积极意义。

根据文献[13],用表示电力设备实际输送容量与其最大输送能力之比的负载率作为衡量系统均匀度的指标较为合理。负载率的表达式如下

$$L_i = \frac{c_i}{c_{imax}} \quad (7)$$

式中: c_i 、 c_{imax} 分别为电力设备实际输送容量、最大输送容量; 设向量 $\mathbf{L} = [L_1, L_2, \dots, L_M]^T$ 为配电网中某时刻所有支路的负载率向量, $\bar{L}$ 为 $L_1 \sim L_M$ 的平均值。定义系统不均匀度如下

$$H = \lambda H_1 + \mu H_2 \quad (8)$$

$$H_1 = \left(\sum_{i=1}^M (\bar{L} - L_i)^2 / (M - 1) \right)^{1/2} \quad (9)$$

$$H_2 = \max\{L_i\} - \min\{L_i\} \quad (10)$$

式中: H_1 为系统负载率方差; H_2 为系统负载率极差; λ 和 μ 是权重系数,分别表征负载率平均分布情况和最极端偏差值的影响程度,两者之和为 1。

3.4 主动配电网综合静态安全性能指标

为将风险性、可靠性和均匀性指标综合成一个指标,可利用信息熵原理分析指标间的差异程度,从而确定各个指标应具有的主观权重。

设有 m 个参与评价的场景,记为 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]$, 设有 n 个评价指标,记为 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]$; 场景 y_i 对应的第 j 个指标用 a_{ij} 表示 ($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$), 可得到 m 个场景的 $m \times n$ 个评价指标构成的矩阵 $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{m \times n}$, 即

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

对于值越大越优的指标,采用下式进行标准化

$$b_{ij} = \frac{x_i - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (12)$$

对于值越小越优的指标,采用下式进行标准化

$$b_{ij} = \frac{\max x_i - x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (13)$$

至此,指标矩阵 $\mathbf{A}$ 被标准化为 $\mathbf{B}$ 。容易计算第 i 个场景下的第 j 个指标的值所占比重 P_{ij} , 矩阵 $\mathbf{P}$ 即为归一化矩阵。

$$P_{ij} = b_{ij} / \sum_{j=1}^m b_{ij} \quad (14)$$

下面,利用熵权法来确定指标在综合评价过程中权重的大小。信息熵是信息无序度的度量,信息熵越大,信息的无序度越高,其信息的贡献越小,其权重应越小;反之,信息熵越小,信息的无序度越低,信息的贡献越大,其权重应越大。根据文献[15],第 j 个指标的信息熵为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (15)$$

其中 $k = 1/\ln m$, 且当 $P_{ij} = 0$ 时,令 $P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ 。

第 j 个指标的熵权为

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (16)$$

若考虑偏好,第 j 个指标的熵权 ξ_{ij} 为

$$\xi_{ij} = \frac{\alpha_j \omega_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j \omega_j} \quad (17)$$

式中: α_j 为偏好系数,所有 α_j ($j=1, 2, \dots, n$) 之和为 1。至此,可计算第 i 个场景的综合指标为

$$D_i = \sum_{j=1}^n \xi_{ij} P_{ij} \quad (18)$$

4 算例分析

图 1 是一个在 IEEE30 节点系统网架结构和参数的基础上改造的 35 kV/10 kV 主动配电网系统^[5-7,31]。

在该系统中,节点 1 连接主网,节点 2 连接生物质发电系统,节点 5 和 13 连接光伏发电系统,节点 8 和 11 连接风电场,节点 4、21 和 27 处有电动汽车充电站,节点 23 和 25 是可中断负荷。取 10 kV 为基准电压,10 MV · A 为基准容量,使用 IEEE RTS79 系统的负荷曲线,将峰值取为 300 MW。节点 2 接入额定容量为 2 MW 的中型生物质循环流化床气化系统,平均气化效率为 0.75,发电效率设

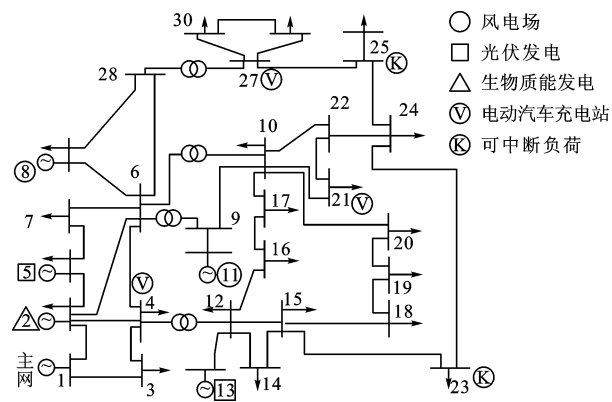


图 1 主动配电网测试系统

定在 15%~18%。风电场数据和光伏发电系统数据见附录 A。

以支路过载风险 R_{OL} 为风险性指标,记为 R ;以切负荷概率 PLC 为可靠性指标,记为 K ;以不均匀度 H 为均匀性指标,记为 J ;综合静态安全指标记为 D_{RKJ} 。容易看出,所选取的指标和综合指标都是越小越优,采用式(13)进行标准化。

下面,考虑以下几种场景:

- (1)场景 1 主动配电网中不含任何分布式能源,也不含可调负荷;
- (2)场景 2 在场景 1 的基础上,主动配电网中加入光伏发电系统;
- (3)场景 3 在场景 2 的基础上,主动配电网中加入风电场;
- (4)场景 4 在场景 3 的基础上,主动配电网中加入生物质发电系统;
- (5)场景 5 在场景 4 的基础上,主动配电网中考虑需求侧响应;
- (6)场景 6 以场景 5 的基础,将 R 、 K 、 J 的偏好系数分别设为 0.6、0.2 和 0.2;
- (7)场景 7 以场景 5 的基础,将 R 、 K 、 J 的偏好系数分别设为 0.2、0.6 和 0.2;
- (8)场景 8 以场景 5 的基础,将 R 、 K 、 J 的偏好系数分别设为 0.2、0.2 和 0.6。

对以上 8 种场景,用 HMC 法抽样 100 000 次(精度已达 0.01),计算出的综合静态安全性能指标如表 2 所示。

对表中数据做如下分析:①从场景 1 到场景 4,在配电网中各处逐渐接入更多的分布式能源,可以看到风险性指标 R 变差了,显然注入功率的随机性使系统越限风险增大,但随着在场景 5 中考虑需求侧响应、负荷可调的特性后,风险性指标 R 减小;

表 2 不同场景下的综合静态安全性能指标

场景	R	K	J	D_{RKJ}
场景 1	2.05	0.027	0.18	0.127 6
场景 2	3.36	0.021	0.29	0.132 2
场景 3	3.73	0.015	0.35	0.124 1
场景 4	4.12	0.011	0.39	0.146 2
场景 5	1.62	0.004	0.08	0.043 9
场景 6	1.62	0.004	0.08	0.055 1
场景 7	1.62	0.004	0.08	0.033 2
场景 8	1.62	0.004	0.08	0.025 7

②从场景 1 到场景 4,可靠性指标 K 一直越来越好,这是由于随着分布式能源的接入,虽然系统的不确定性大大增加,但总的发电量也增加,抵消了随机性的负面影响,场景 5 中负荷可调,可靠性进一步变好;③从场景 1 到场景 4,注入功率的不确定性增大,导致支路功率的随机性变大,从而增大了负载率的极差,不均匀性指标 J 都逐渐变差,而场景 5 中负荷可调后,负载率变得可以人为控制,所以均匀性变好;④总的来看,场景 5~8 的综合静态安全指标 D_{RKJ} 比场景 1~4 要好很多,可见需求侧响应对于增大主动配电网综合安全性有着重要作用;⑤从场景 6 到场景 8,分别人为赋予 R 、 K 、 J 更大的权重,对比场景 6~8 的 D_{RKJ} ,场景 6、场景 5、场景 7、场景 8 逐渐减小,可以看出主动配电网中各类不确定性因素的综合作用对均匀性的改善程度最大,对可靠性的改善次之,对风险性的改善相对较少。

5 结 论

主动配电网中含有大量的不确定性因素,为了使其静态安全评估多维度 and 标准化,本文从风险性、可靠性和均匀性 3 个维度对主动配电网进行评估,采用 HMC 法来抽取系统状态矩阵,采用熵权法来评价其综合静态安全性能的指标。随着主动配电网中各类随机因素的增加,各维度的指标 R 、 K 、 J 变化趋势各不相同,但需求侧响应对 3 个维度的指标都有明显的改善作用,负荷可调之后将使得综合安全性能指标 D_{RKJ} 变好。主动配电网中各类不确定性因素的综合作用对各个维度性态的改善程度也略有不同,对均匀性的改善程度最大,对可靠性的改善次之,对风险性的改善相对较少。

本文仅从 3 个维度上各选取了一个指标,考虑更多的维度(如系统灵活性)以及在同一维度中考虑多类指标的综合静态安全评估将会是下一步的研究工作。

参考文献:

- [1] 尤毅, 刘东, 于文鹏, 等. 主动配电网技术及其进展 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.
YOU Yi, LIU Dong, YU Wenpeng, et al. Technology and its trends of active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 10-16.
- [2] DJAPIC P, RAMSAY C, PUDJIAN TO D, et al. Taking an active approach [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4): 68-77.
- [3] WALLING R, SAINT R, DUGAN R C, et al. Summary of distributed resources impact on power delivery [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(3): 1663-1644.
- [4] 范明天, 张祖平, 苏傲雪, 等. 主动配电系统可行技术的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 36(22): 12-18.
FAN Mingtian, ZHANG Zuping, SU Aoxue, et al. Enabling technologies for active distribution systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 36(22): 12-18.
- [5] 钟清, 孙闻, 余南华, 等. 主动配电网规划中的负荷预测与发电预测 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3050-3056.
ZHONG Qing, SUN Wen, YU Nanhua, et al. Load and power forecasting in active distribution network planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3050-3056.
- [6] 于汀, 刘广一, 蒲天骄, 等. 计及柔性负荷的主动配电网多源协调优化控制 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 95-100.
YU Ding, LIU Guangyi, PU Tianjiao, et al. Multiple coordinated optimization control of active distribution network considering flexible load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 95-100.
- [7] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [8] 梁才浩, 段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响 [J]. 电力系统自动化, 2001(12): 53-56.
LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its influence on power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001(12): 53-56.
- [9] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
XIAO Shijie. Thinking of building Chinese smart grid technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 1-4.
- [10] 吴际舜. 电力系统静态安全分析 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985: 48-50.
- [11] 康重庆, 夏清, 徐玮. 电力系统不确定性分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 33-36.
- [12] 丁明, 张瑞华. 发输电组合系统可靠性评估的蒙特卡罗模拟 [J]. 电网技术, 2000, 24(3): 9-12.
DING Ming, ZHANG Ruihua. Monte-Carlo simulation of reliability evaluation for composite generation and transmission system [J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 9-12.
- [13] 孙伟卿, 王承民, 张焰, 等. 电力系统运行均匀性分析与评估 [J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 173-180.
SUN Weiqing, WANG Chenmin, ZHANG Yan, et al. Analysis and evaluation on power system operation homogeneity [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 173-180.
- [14] 孙伟卿, 王承民, 曾平良, 等. 电力系统均匀性评价方法与指标综述 [J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1205-1212.
SUN Weiqing, WANG Chenmin, ZENG Pingliang, et al. Review on evaluation method an index of power system homogeneity [J]. Power System Technology, 2015, 39(5): 1205-1212.
- [15] 张涛, 朱彤, 高乃平, 等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3706-3713.
ZHANG Tao, ZHU Tong, GAO Naiping, et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3706-3713.
- [16] 齐敏芳, 付忠广, 景源, 等. 基于信息熵与主成分分析的火电机组综合评价方法 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(2): 58-64.
QI Minfang, FU Zhongguang, JING Yuan, et al. A comprehensive evaluation method of power plant units based on information entropy and principal component analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(2): 58-64.
- [17] 符向前, 刘光临, 蒋劲, 等. 基于信息熵的机组运行劣化度综合指标 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 75-78.
FU Xiangqian, LIU Guanglin, JIANG Jin, et al. An evaluation index of the hydroelectric generating sets overall performance [J]. Automation of Electric Power

Systems, 2005, 29(7): 75-78.

[18] 孙维夫. 基于信息熵的区域科技竞争力的综合评价[J]. 烟台职业学院学报, 2009, 15(4): 87-92.

SUN Weifu. Overall evaluation for regional scientific competitive power based on information entropy [J]. Journal of Yantai Vocational College, 2009, 15(4): 87-92.

[19] 宋晓通, 谭震宇. 改进的重要抽样法在电力系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 56-59.

SONG Xiaotong, TAN Zhenyu. Application of improved importance sampling method in power system reliability evaluation [J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 56-59.

[20] OLVEIRA G C, PEREIRA M V F, CUNHA S H F. A technique for reducing computational effort in Monte-Carlo based composite reliability evaluation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(4): 1309-1315.

[21] MELO A C G, OLVEIRA G C, MOROZOWSKI F M, et al. A hybrid algorithm for Monte Carlo/enumeration based composite reliability evaluation [C]// Proceedings of 3rd International Conference on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1991: 70-74.

[22] BOYLE P, BROADIE M, GLASSERMAN P. Monte Carlo methods for security pricing [J]. Journal of Economic Dynamics and Control, 1997, 21(8): 1267-1321.

[23] 董成. 拟蒙特卡罗方法在亚式期权敏感性参数估计中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2011: 25-26.

[24] 侯雨伸, 王秀丽, 刘杰, 等. 基于拟蒙特卡罗方法的电力系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 744-750.

HOU Yushen, WANG Xiuli, LIU Jie, et al. A quasi-Monte Carlo method based power system reliability evaluation [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 744-750.

[25] 吴金卓, 马琳, 林文树. 生物质发电技术和经济性研究综述[J]. 森林工程, 2012(5): 102-106.

WU Jinzhuo, MA Lin, LIN Wenshu. Literature review on biomass power generation technology and economic feasibility [J]. Forest Engineering, 2012(5): 102-106.

[26] 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(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(22): 128-133.

[27] 朱星阳, 刘文霞, 张建华, 等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2013, 10: 257-270.

ZHU Xingyang, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Reviews on power system stochastic load flow and its applications in safety evaluation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 10: 257-270.

[28] NIEDERREITER H. Random number generation and quasi-Monte Carlo methods [M]. Philadelphia, USA: SIAM, 1992: 56-60.

[29] SOBOL' I M. On the distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals (English translation) [J]. USSR Comp Math Math Phys, 1967, 7(4): 86-112.

[30] 朱星阳, 黄宇峰, 张建华, 等. 基于随机潮流的含风电电力系统静态安全评估[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(20): 46-53, 60.

ZHU Xingyang, HUANG Yufeng, ZHANG Jianhua, et al. Static security assessment based on probabilistic load flow for wind power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 46-53, 60.

[31] 广东电网公司电力科学研究院组. 主动配电网知识读本[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 144-147.

附录 A

表 A1 风电场数据

参数	节点 8	节点 11
风速期望/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	5	4
风速标准差/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	8	9
切入风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3	4
切出风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	25	28
额定风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	13	15
额定出力/MW	1.5	2
总台数	50	30

表 A2 光伏发电系统数据

参数	节点 5	节点 13
经度/ $^{\circ}$	东经 104.4	东经 104.4
纬度/ $^{\circ}$	北纬 30.4	北纬 30.4
损耗系数	0.85	0.75
温度系数	-0.004 5	-0.005 5
白昼平均气温/ $^{\circ}\text{C}$	24	24
额定出力/MW	3	4
总台数	40	30

(编辑 杜秀杰)