

DOI: 10.7652/xjtuxb201706007

用于风电机组容量评估的容量可信度快速算法

刘洁冰, 白婕, 翟桥柱

(西安交通大学智能网络与网络安全教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对以往在利用风电机组容量可信度这一指标来评价风电机组容量时, 准确度与计算速度不能兼顾的问题, 提出了一种基于负载-失负荷概率曲线来快速准确计算风电机组容量可信度的最大公因子步长算法(GCDS)。该方法首先将风速分布信息和风电机组特性曲线离散化, 把风电机组出力建模为多状态, 然后应用负载-失负荷概率的递推关系式和以各个机组装机容量最大公约数为步长进行遍历的算法, 快速得出加入风电机组前后系统的负载-失负荷概率曲线, 最终得出风电机组的容量可信度。仿真和实验结果表明: 把 1 个风电机组加入到 41 个常规机组的系统中, 使用 GCDS 算法对风电机组容量可信度进行计算, 在准确度可以保证的前提下, 计算时间仅为 0.015 6 s, 与穷举法相比, 计算效率有了极大提升。

关键词: 风电机组容量; 容量可信度; 快速算法; 负载-失负荷概率曲线

中图分类号: TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)06-0041-06

A Fast Algorithm of Capacity Credit for Measuring Capacity of Wind Turbines

LIU Jiebing, BAI Jie, ZHAI Qiaozhu

(Ministry of Education Key Lab for Intelligent Networks and Network Security, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A fast step algorithm GCDS based on greatest common divisor and the curve of the lost of load probability is proposed to solve the problem that the accuracy and calculation speed cannot be taken into consideration at the same time when evaluating the capacity of wind turbines by using wind turbine capacity credit. Firstly, both the wind speed distribution and the curve of wind turbine characteristic are discretized, and the output of a wind turbine is modeled with multi-state. Then, the recurrence relation between the load and the lost of load probability is used, and the maximum common divisor of each unit's installed capacity is taken as the step length to traverse the curve of the lost of load probability in order to quickly obtain the curves before and after the wind turbine is added. The capacity credit of a wind turbine is finally obtained. Numerical testing results show that when a wind turbine is added into a system with 41 conventional generators, the GCDS only uses 0.015 6 second to complete the calculation on the premise of guaranteed accuracy. It's obviously a great increase in computing speed compared to the exhaustive method.

Keywords: capacity of wind turbines; capacity credit; fast algorithm; lost of load probability curve

由于风电出力的不确定性和间歇性,同样装机容量风电机组与常规火电或水电机组载荷能力并不相同。随着风电的大规模接入,如何准确评价风电机组容量,维持电力系统发电和负荷平衡成为了一个重要的问题。

Garver 在 1966 年最早提出用容量可信度来衡量具有不同停运率机组在可靠性意义上的载荷能力^[1](常用的可靠性指标是系统的失负荷概率,即系统发电量小于负荷的概率),但 Garver 当时提出这个概念是针对两状态(正常状态和故障停机状态)常规机组,并没有考虑将其应用到风电当中。相比于常规机组的两状态,风电机组的出力分布是一个连续的区间,这使得对于风电机组容量可信度的计算要困难得多。

目前比较常用的风电容量可信度的定义有 4 种^[2-4],其中等效载荷能力(equivalent load-carrying capability, ELCC)^[5]的定义比较直观且通用性较好。因此,本文采用等效载荷能力这种定义方式,即从需求侧出发,定义风电机组接入前后,系统在同一可靠性水平下能够保证供电安全的负荷增量即为风电机组容量可信度。

目前研究风电容量可信度的文献较多^[1-11], Amelin 等在系统地总结了之前学者们的成果之后,在两状态常规机组模型下,给出了系统失负荷概率的表达式,并推导出了风电机组容量可信度的计算方法^[2],但该方法中未充分考虑风电分布信息,也没有解决计算过程中随着机组数目上升而导致的时间复杂度问题。为了解决计算时长的问题,研究者们提出了很多简化方法^[7-8],其中比较有代表性的是一些解析方法,例如 Z-Method 方法。该方法是对风电的出力分布或系统的容量盈余(系统有效容量减去系统负荷)等进行数学处理,可以在解析表达式中直观看出影响容量可信度的一些因素,而且计算极其简便。然而,这些解析方法在数学处理中会不可避免地引入误差,也没有有效控制误差的方法。还有一些方法也被用于风电容量可信度的计算,如文献[9]的智能计算方法利用智能算法简单高效的优势,快速提取高质量的系统状态;文献[10]采用优化模型,基于系统失负荷期望指标,对系统加入风电前后的可靠性水平进行比较,将某个风电机组等效为一定容量的常规机组;文献[11]通过分析历史电力数据,来分析容量可信度。

本文针对目前在风电容量可信度中主要存在的 2 个问题,即风电出力分布如何处理以及计算时间

随机机组数目指数增长的问题,给出了一种新的解决办法:根据求解常规机组容量可信度的方法,推导出利用负载-失负荷概率曲线求解风电机组容量可信度的方法,调整离散化过程中的分段数来控制准确度,并通过以各个机组装机容量最大公约数为步长进行负载-失负荷概率曲线的遍历的方法来减少计算时间。

1 常规机组容量可信度模型

1.1 利用递推公式得到负载-失负荷概率曲线

本文采用文献[2]的方法来对常规机组的容量可信度模型进行分析。

失负荷概率(lost of load probability, LOLP)定义为系统发电量小于负荷的概率,可表示如下

$$P_{\text{LOL}, I} = P(D > \sum_{i=1}^I G_i - \sum_{i=1}^I O_i) \quad (1)$$

式中: $P_{\text{LOL}, I}$ 表示系统有 I 个机组时的失负荷概率; i 为机组编号; G_i 表示机组 i 的装机容量; O_i 表示机组 i 的停运容量; D 表示系统负载。将常规机组建模为两状态,如果第 $I+1$ 个机组也为常规机组,则式(1)可写成下面形式

$$P_{\text{LOL}, I+1} = P(D > \sum_{i=1}^{I+1} z_i G_i) = p_{I+1} P(D > \sum_{i=1}^I z_i G_i + G_{I+1}) + q_{I+1} P(D > \sum_{i=1}^I z_i G_i) \quad (2)$$

式中: z_i 为 0-1 随机变量,机组 i 未发生停运时 $z_i = 1$,停运时 $z_i = 0$; p_i 为机组 i 的非停运率; $q_i = 1 - p_i$ 。

设 $F_{I+1}(x) = P(x > \sum_{i=1}^{I+1} z_i G_i)$, 其中 x 表示系统负载,该式反映了 $I+1$ 个机组的负载-失负荷概率关系。式(2)可改写为

$$F_{I+1}(x) = p_{I+1} F_I(x - G_{I+1}) + q_{I+1} F_I(x) \quad (3)$$

将式(3)推到第 1 项,即为

$$F_2(x) = p_2 F_1(x - G_2) + q_2 F_1(x) \quad (4)$$

式中: $F_1(x)$ 的函数曲线是 3 条分段直线

$$\left. \begin{aligned} F_1(x) &= 0, & x &\leq 0 \\ F_1(x) &= 1 - p_1, & 0 < x \leq G_1 \\ F_1(x) &= 1, & x > G_1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

本文系统共有 41 台常规机组,参照文献[2]中的机组数据,本文使用的常规机组数据如表 1 所示。

利用表 1 数据以及递推公式(3),得到系统有 15 台机组时的负载-失负荷概率曲线如图 1 所示。

表 1 系统机组情况

机组数	容量/MW	非停运概率
4	100	0.90
2	80	0.92
5	50	0.94
6	25	0.96
6	24	0.96
6	23	0.96
6	22	0.96
6	21	0.96

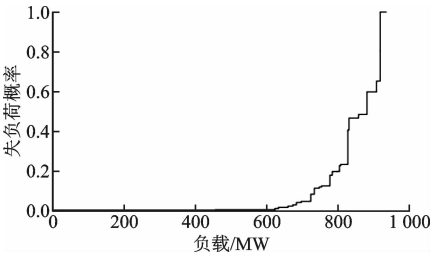


图 1 系统的负载-失负荷概率曲线

从图 1 可以看出,常规两状态机组的负载-失负荷概率曲线是随着负荷值增加而逐渐上升的阶梯型曲线。从理论分析上,也可以得出同样的结论。由于常规机组存在停运和非停运 2 个状态,那么 n 个机组共有 2^n 种组合方式,每一种组合结果对应着系统中一个发电侧总可用容量的值及其发生的概率,所以当给出一个系统负荷的值,遍历所有情况,找出所有总可用容量小于该负荷值的情况,将对应概率加起来,就是该负荷下的失负荷概率。由于组合结果只能构成离散的点,而系统负荷值是一个连续变量,负荷值在某一区间内会有相同的失负荷概率,负荷值大于这一区间会对应更高的失负荷概率,因此负载-失负荷概率曲线是一条随负荷值增加而逐渐上升的阶梯曲线。

本文将每一小段阶梯直线段的 2 个端点称为该段的跳跃点。

1.2 利用负载-失负荷概率曲线计算容量可信度

当系统中的机组较多时,每段阶梯曲线会变得较短,整个曲线会变得越来越平滑。在原始系统中加入一个停运概率不为 1 的常规机组,系统的可靠性会变得更好。也就是说,对于同样大小的负荷,新的系统会有更小的失负荷概率。根据等效载荷能力的定义,对某个负荷 D_0 ,先计算出原系统的失负荷概率,然后保持此可靠性水平不变,求出新系统在此失负荷概率下对应的负荷值 D_1 ,则新增机组的容量可信度 $C=D_1-D_0$ 。

系统加入一个机组前后的负载-失负荷概率曲线如图 2 所示。

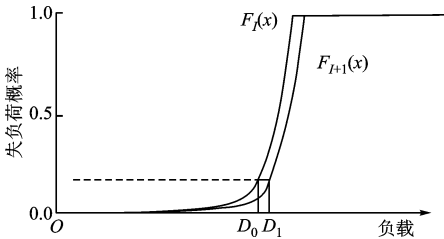
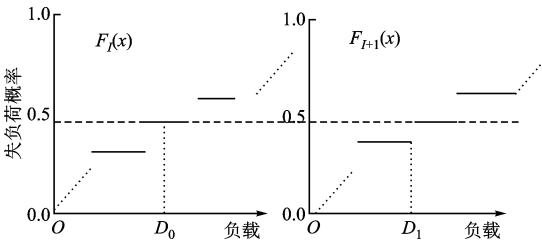
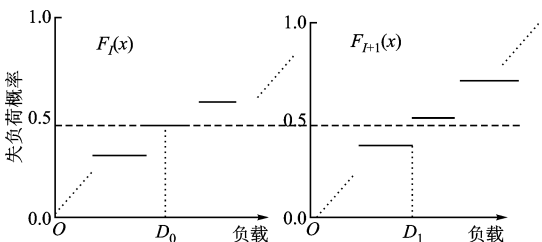


图 2 加入机组前后的负载-失负荷概率曲线

由 D_0 确定 D_1 时,会出现 2 种情况。图 3 为系统加入新机组前后阶梯曲线的 2 种情况。在图 3a 中的 $F_{I+1}(x)$ 曲线上可以找到有相等失负荷概率值的分段,新系统在该可靠性水平下能够保证供电安全的最大负荷值为该分段区间的右端点,所以 D_1 对应该右端点。在图 3b 中的 $F_{I+1}(x)$ 线上找不到有相等失负荷概率值的分段,这种情况发生的概率较大,这时应找到最邻近的稍小于该失负荷概率值的分段,由于有了一定的裕度,所以 D_1 对应该分段区间的右端点。



(a)分段相等的情形



(b)分段不等的情形

图 3 系统加入新机组前后阶梯曲线的 2 种情况

在计算容量可信度的过程中可以看出,某个常规机组的容量可信度与 3 个因素有关:①该机组的装机容量和非停运概率;②原始系统的机组情况;③所考虑的负荷水平。

2 风电机组容量可信度模型

2.1 风电机组的功率输出模型

目前对风电机组出力模型的研究很多^[12-14],大

多是根据实测数据或风电机组本身的物理特性进行建模。本文采用文献[12]中的风力发电机组的发电功率模型,其表达式如下

$$P = \begin{cases} 0, & V \leq V_{ci}; V \geq V_{co} \\ W_r \frac{V - V_{ci}}{V_r - V_{ci}}, & V_{ci} \leq V \leq V_r \\ W_r, & V_r \leq V \leq V_{co} \end{cases} \quad (6)$$

式中: V 表示风机轮毂高度处风速; V_{ci} 表示切入风速; V_{co} 表示切出风速; V_r 表示额定风速; W_r 表示风电机组装机容量。由式(6)可知:当风速大于切出风速或小于切入风速时机组出力为 0;在切入风速和额定风速之间时,机组出力与风速是线性关系;在额定风速和切出风速之间时出力保持额定出力不变。

风电机组发电功率与风速的关系如图 4 所示,如果已知风速概率分布,则可得出风电机组出力的概率分布。

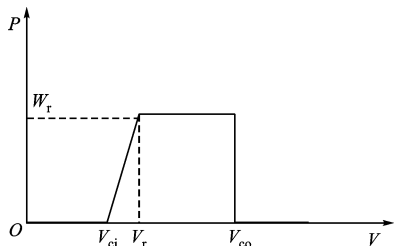


图 4 风电机组发电功率与风速关系图

2.2 风速模型

对风速数据的分析表明,风速近似服从两参数威布尔分布^[12],其概率密度为

$$f(V) = \frac{\beta}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^\beta\right), \quad V \geq 0 \quad (7)$$

式中: β 和 c 为待定参数。根据式(7),可以求出各个风速区间的概率。

2.3 风电机组容量可信度模型

由风电机组的功率模型和风速模型,可以对风电机组出力的概率分布进行离散化处理,步骤如下:

(1)把新加入的风电机组作为第 $I+1$ 个机组,把 $V \leq V_{ci}$ 或 $V \geq V_{co}$ 对应的概率设为 $P_{1,I+1}$,此时风电机组出力 $w_{1,I+1} = 0$;

(2)在 $V_{ci} \leq V \leq V_r$ 时由于出力功率曲线是一段线性增加的曲线,如果将该曲线分为 m 段,每段的概率由分布函数可得,分别设为 $P_{2,I+1}, P_{3,I+1}, \dots, P_{m+1,I+1}$,此时把每一小段风电机组出力值近似为该区间中点值;

(3)在 $V_r \leq V \leq V_{co}$ 时,对应的概率为 $P_{m+2,I+1}$,出力为 $w_{m+2,I+1} = W_r$ 。这样就把风电机组出力建

立成了一个 $m+2$ 状态模型。

对比于式(3),加入一个风电机组之后系统的负载-失负荷概率关系表示如下

$$F_{I+1}(x) = P_{1,I+1} F_I(x - w_{1,I+1}) + P_{2,I+1} F_I(x - w_{2,I+1}) + \dots + P_{m+2,I+1} F_I(x - w_{m+2,I+1}) \quad (8)$$

由式(8)可以得出加入风电机组后系统的负载-失负荷概率曲线。应用 1.2 节的结论可以求解出风电机组的容量可信度。

2.4 风电场容量可信度模型

对于一个风电场,根据历史数据,可以得出风电场总出力的分布曲线,再由该分布曲线,可以得出该风电场在某一出力下的概率,这样整个风电场就相当于一个多状态风电机组,可以求解其容量可信度。除此方法外,有文献采用分机组方式^[15]来计算整个风电场的容量可信度。

3 负载-失负荷概率曲线快速算法

从第 1 部分可知,如果负载-失负荷概率曲线可以得到,就可以准确计算出容量可信度的值。

之前的方法(简称穷举法)是穷举所有机组组合情况来计算阶梯曲线,但这种方法的计算量是极其大的。当有 n 个机组,理论上要计算 2^n 次,时间复杂度为 $T(n) = \Theta(2^n)$,与机组数量呈指数关系。如果采用此类穷举法,在 Intel(R)Core(TM)i7-4790 CPU 8 GB 内存计算机上,得出 15 个机组的负载-失负荷概率曲线需要 0.733 2 s,得出 21 个机组的负载-失负荷概率曲线就需要 68.858 8 s,如果要得出全部 41 个机组的负载-失负荷概率曲线理论上大约需要 2^{41} s,显然这个计算时长是不能接受的。所以,很有必要找出一个算法来快速得出全部机组的负载-失负荷概率曲线。

考虑到准确曲线是一个阶梯型曲线,且 $F_I(x)$ 和 $F_{I+1}(x)$ 之间满足式(3)或式(8)的递推关系,所以本文给出下面定理。

定理 1 在通过式(3)迭代的过程中, $F_I(x)$ 曲线跳跃点的横坐标除 0 以外,全部在 $G_1, G_2, \dots, G_I$ 的最大公约数的倍数中选取。

在实际系统中,火电或风电机组的装机容量可能是非整数的,解决方式有以下 2 种:

(1)把各自装机容量和系统负荷值同时乘以一个适当的倍数转化成整数;

(2)选取一个基准单位来代替最大公约数,使得各个机组的装机容量为这个基准单位的倍数。

证明 采用归纳法对定理 1 证明如下:

(1)当 $I=1$ 时,根据式(5),跳跃点为 0 和 G_1 ,显然满足定理 1;

(2)假设当 $I=k$ 时成立,即 $F_k(x)$ 跳跃点的横坐标除 0 以外,全部在 $G_1, G_2, \dots, G_k$ 的最大公约数的倍数中选取;

(3)当 $I=k+1$ 时,由式(3),有

$$F_{k+1}(x) = p_{k+1}F_k(x - G_{k+1}) + q_{k+1}F_k(x) \quad (9)$$
 $F_{k+1}(x)$ 的跳跃点分为 2 部分。 $F_k(x - G_{k+1})$ 把 $F_k(x)$ 的跳跃点向右移动了 G_{k+1} 个单位,使 $F_{k+1}(x)$ 多出这一部分跳跃点。设 $[G_1, G_2, \dots, G_k]$ 表示 $G_1, G_2, \dots, G_k$ 的最大公约数,则 $F_{k+1}(x)$ 多余跳跃点可以表示为 $\lambda[G_1, G_2, \dots, G_k] + G_{k+1}$,其中 λ 为整数。显然 $\lambda[G_1, G_2, \dots, G_k]$ 和 G_{k+1} 均为 $G_1, G_2, \dots, G_{k+1}$ 的最大公约数的倍数,所以当系统中只有常规机组时,所证结论成立。

同理,当系统加入风电机组,通过式(8)进行迭代时, $F_I(x)$ 跳跃点的横坐标全部在常规机组装机容量以及风电机组各状态出力值的最大公约数的倍数中选取。

定理 1 证毕。

所以,在已知系统全部 M 个机组(包括常规机组和风电机组)的情况下,可由下面算法快速得出系统的负载-失负荷概率曲线。

步骤 1 计算出只有 1 台机组时的负载-失负荷概率曲线 $F_1(x)$,置 $j=1$ 。

步骤 2 将新加入的机组作为第 $j+1$ 个机组,选取 $[G_1, G_2, \dots, G_{j+1}]$ 作为步长,在曲线 $F_j(x)$ 上,沿横轴从 0 开始,以该步长一直到等于此 j 个机组的总装机容量为止,找出所有相应的点,对应点的横坐标设为 $d_0, d_1, \dots, d_l, \dots, d_L$ 其中 $d_0=0$; d_L 代表已选出来的任意一点的横坐标, $0 \leq l \leq L$ 。

步骤 3 当新机组为常规机组或风电机组时,分别以式(3)或式(8)进行迭代。以常规机组为例,其负载-失负荷概率关系为

$$F_{j+1}(d_l) = p_{j+1}F_j(d_l - G_{j+1}) + q_{j+1}F_j(d_l) \quad (10)$$

当 d_l 较小时,有 $d_l - G_{j+1} < 0$ 的情况,这时 $F_j(d_l - G_{j+1})$ 代入 0。

步骤 4 得到系统负载-失负荷概率曲线上的一些离散点,将其用左开右闭的阶梯曲线连接,即为当前 $j+1$ 个机组的负载-失负荷概率曲线。置 $j=j+1$,如果 $j < M$ 返回步骤 2;如果 $j=M$,输出结果。

在步骤 1 中,这一台机组可以随意选取,不会对结果造成影响;在步骤 2 中,机组的加入顺序对结果

也没有影响,但每个机组只能加入一次。另外,由于步长与风电机组各状态出力值有关,所以步长受到离散化过程中的分段数影响,下面算例中,为了使得步长在不同分段数 m 下相同,选取的步长为所有 m 下风电机组各状态出力值与常规机组装机容量的最大公约数。

4 测试与分析

4.1 算例数据

本节讨论在一个有 41 台常规机组的系统中加入风电机组的情况(常规机组数据如表 1 所示)。由于多个独立的风电机组均可用式(8)依次进行迭代,为了方便表述,此处假设系统只加入一个风电机组,该风电机组轮毂高度处风速分布符合 $c=8, \beta=2$ 的 Weibull 模型^[12]。这台风电机组的功率曲线如图 5 所示。

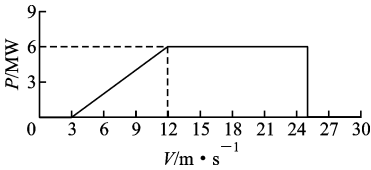


图 5 风电机组功率模型

4.2 风电机组容量可信度模型的求解

由式(8),风电机组被建立成一个多状态模型。本例中首先选取步长为 0.5 MW,分段数分别选为 $m=2, 3, 6$,把表 1 中 41 台机组的负载-失负荷概率曲线作为 $F_I(x)$,把系统加入该风电机组后的负载-失负荷概率曲线作为 $F_{I+1}(x)$,应用本文第 3 章中的快速算法,得出系统加入风电机组前后系统的负载-失负荷概率表,截取部分数据如表 2 所示。

表 2 加入风电机组前后系统的失负荷概率

负荷/ MW	失负荷概率			
	不加 风电	加风电 ($m=2$)	加风电 ($m=3$)	加风电 ($m=6$)
1 499.0	0.880 237	0.880 237	0.880 237	0.880 237
1 499.5	0.880 237	0.880 237	0.880 237	0.880 237
1 500.0	0.880 237	0.880 237	0.880 237	0.880 237
1 500.5	1.000 000	0.895 955	0.895 955	0.895 955
1 501.0	1.000 000	0.895 955	0.895 955	0.912 728
1 501.5	1.000 000	0.895 955	0.931 768	0.912 728
1 502.0	1.000 000	0.950 277	0.931 768	0.931 768
1 502.5	1.000 000	0.950 277	0.931 768	0.931 768

由于模型中假设风速在 v_{ci} 和 v_r 之间时,风电机组

组出力是线性的,并在离散化时将其分成了 m 段,这使得风电机组各个状态的出力值和概率都受到分段数 m 的影响,失负荷概率值随之也受到 m 的影响。理论上,分段数 m 越大,步长越小,计算结果就越接近准确值。表 3 是取步长为 0.05 MW、分段数 m 从 3 增大到 30 时计算出的风电机组容量可信度的值。

表 3 不同 m 下风电机组容量可信度的值

负荷/ MW	风电机组容量可信度				
	$m=3$	$m=6$	$m=10$	$m=20$	$m=30$
250	2	1.5	1.8	1.7	1.7
500	1	1.5	1.5	1.4	1.4
750	2	2.5	2.4	2.4	2.4
1 000	2	2.5	2.4	2.4	2.4
1 250	1	1.5	1.5	1.4	1.4
1 500	0	0	0.3	0.3	0.2

从表 3 可以看出:随着分段数 m 的增加,得到的风电机组容量可信度的值趋于稳定;当 m 大于等于 10 时,风电机组容量可信度的变化已经很小,其值已经足够准确。

利用本文的快速算法,不同分段数 m 对计算时间影响极小,求解出风电机组容量可信度的时间仅为 0.015 6 s,而穷举法在此算例中的计算时间约为 2^{27} s,为 10^8 数量级,显然本文算法极大地减少了计算时间。

5 结 论

针对之前在用风电机组容量可信度这一指标评价风电机组容量时,存在的准确度和计算速度不能兼顾的问题,本文提出了一种基于负载-失负荷概率曲线来快速准确计算风电机组容量可信度的方法。首先,根据风速模型和风电机组出力模型将风电机组出力离散成为了一个多状态模型,为了保证准确度,选择足够的分段数 m ;然后,借助递推公式,并以风电机组各状态出力值与常规机组装机容量的最大公约数作为步长来快速得出负载-失负荷概率曲线并计算风电机组容量可信度的值。与穷举法相比,在保证准确度的同时,本文算法的计算速度有了显著提升。

参考文献:

[1] GARVER L L. Effective load carrying capability of generating units [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1966, 8(8): 910-919.

[2] AMELIN M. Comparison of capacity credit calculation methods for conventional power plants and wind power [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24 (2): 685-691.

[3] 张宁,康重庆,肖晋宇,等. 风电容量可信度研究综述与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 82-94.

ZHANG Ning, KANG Chongqing, XIAO Jinyu, et al. Review and prospect of wind power capacity credit [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(1): 82-94.

[4] AMELIN M, SODER L. Taking credit [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2010, 8(5): 47-52.

[5] KAHN E P. Effective load carrying capability of wind generation: initial results with public data [J]. The Electricity Journal, 2004, 17(10): 85-95.

[6] HASLETT J, DIESENDORF M. The capacity credit of wind power: a theoretical analysis [J]. Solar Energy, 1981, 26(5): 391-401.

[7] DENT C J, KEANE A, BIALEK J W. Simplified methods for renewable generation capacity credit calculation: a critical review [C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 1-8.

[8] DRAGOON K, DVORTSOV V. Z-method for power system resource adequacy applications [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 982-988.

[9] WANG L, SINGH C. Population-based intelligent search in reliability evaluation of generation systems with wind power penetration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1336-1345.

[10] ZHU S, ZHANG Y, CHOWDHURY A A. Capacity credit of wind generation based on minimum resource adequacy procurement [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 730-735.

[11] GILOTTE L. Wind capacity credit: accounting for years of extreme risk [C]// 2011 IEEE PES Trondheim PowerTech: The Power of Technology for a Sustainable Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-4.

[12] 吴林伟,张建华,刘若溪. 考虑风电机组故障的风电场可靠性模型及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 31-35.

WU Linwei, ZHANG Jianhua, LIU Ruoxi. A wind farm reliability model considering wind turbine faults and its application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 31-35.

(下转第 53 页)