

文章编号:1671-6833(2011)02-0117-04

风电拉平负荷下的发电系统可靠性评估

吴政球, 唐民富, 张旭乐, 王 韬

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 风能具有随机性、间歇性和波动性的特点, 风力发电并网对发电系统的可靠性有一定影响, 为了评估含风电场的发电系统可靠性, 提出了风电功率拉平负荷的概念. 基于风电功率与系统负荷为相互独立的随机变量的特点, 采用裕度表的方式推导出风电场输出功率跟负荷的联合概率分布, 建立了风电功率拉平负荷模型, 与常规发电机组停运容量模型结合计算发电系统的可靠性指标, 为含风电场的发电系统可靠性分析提供了新的思路和方法. 算例计算分析结果表明了该方法的合理性和有效性.

关键词: 风电功率; 联合概率分布; 容量停运模型; 发电系统可靠性

中图分类号: TM715

文献标志码: A

0 引言

风能是洁净的可再生能源, 风力发电是解决当前突出的能源和环境问题的有效手段, 因而得到了普遍重视和大规模开发利用, 是目前世界上增长速度最快的新能源. 随着风力发电技术的发展, 风电场并网已经成为主流趋势^[1].

但风能具有随机性、间歇性和波动性等明显区别于常规能源的特点, 风力发电并网后会对电力系统的可靠性带来一定的影响^[2]. 因此, 为全面评估风电场的价值, 需要充分考虑其接入系统后对系统供电可靠性的影响. 国内外许多学者对此进行了研究. 文献[3]考虑同一风带上的风电场完全相关和完全不相关两种极端情况并用仿真法计算出一个给定国家或地区的总的风电场等效容量. 文献[4]用实验的方法计算和比较了4个典型的风电场的容量可信度指标, 表明了不同的定义下, 计算结果会有差别. 文献[5-6]建立了基于蒙特卡洛仿真的风电场可靠性模型, 应用时序模型预测风速, 对发电机组进行概率抽样, 统计得到可靠性指标. 文献[7]推导出风电场输出功率的概率分布公式, 以解析法建立了风电场的可靠性模型. 以上研究在风电并网的发电系统可靠性评估方面做了有益的探索, 但在含有风电场的发电系统可靠性评估中, 目前的研究均把风电场等效为一台常规发电机组, 没有从风电场输出功率与系统负荷之间的关系进行考虑.

笔者根据现有研究状况, 基于风电场的输出功率与系统负荷是相互独立的随机变量的特点, 提出了风电功率拉平负荷的概念, 推导出风电功率与系统负荷的联合概率分布, 然后与常规发电系统的停运容量模型结合起来, 求出发电系统的可靠性指标, 实现了含有风电场的发电系统可靠性评估.

1 风电场模型

1.1 风速模型

风电场的风力发电机以风为原动力, 根据大量的统计数据表明, 风速具有服从威布尔分布的特点^[3]. 风速 v 的分布函数如下所示:

$$f(v) = \frac{B}{A^B} v^{B-1} \cdot e^{-(\frac{v}{A})^B} \quad (1)$$

$$F(v) = 1 - e^{-(\frac{v}{A})^B} \quad (2)$$

式中: A 为尺度参数(反映平均风速); B 为形状参数(反映风速在平均值附近的分布情况); v 为风速随机变量; $f(v)$ 为概率密度函数; $F(v)$ 为累积分布函数.

1.2 风机及风电场模型

在研究风力发电的有关问题时, 首先需要确定风力发电机组和风力发电场的输出功率. 风电机组的输出功率与风速之间的关系曲线有着不同的形状, 而其中线性特性与风电机组的实验数据

收稿日期: 2010-10-12; 修订日期: 2010-12-17

作者简介: 吴政球(1963-), 男, 湖南湘阴人, 湖南大学教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制及电力市场.

较为接近^[5],如图1所示.

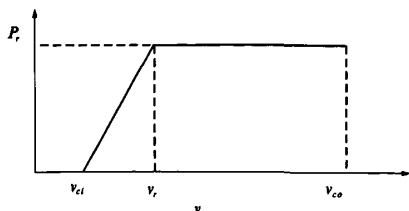


图1 风电机组输出功率曲线

Fig.1 The output curve of wind unit

风机输出功率与风速的关系表达式为

$$P(v) = \begin{cases} 0 & v \leq v_{ci} \text{ 或 } v \geq v_{co} \\ a + bv & (v_{ci} \leq v \leq v_r) \\ P_r & (v_r \leq v \leq v_{co}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: v 为风电机组所处的风电场的风速; v_{ci} 为切入风速; v_r 为额定风速; v_{co} 为切除风速; P_r 为风电机组额定输出功率.

由风速公式(2)和公式(3),既可求得风电功率的分布.对于同一个风电场,所有发电机组输出功率的总和就是风电场的输出功率,可由风电机组输出功率累加得到.有时候也需要考虑尾流效应,风电场运行经验表明,尾流效应造成损失的典型值是10%,所以可以将风电机组总的输出功率乘以典型系数值0.9来表示风电场的实际输出功率^[6].

2 并入风电场的发电系统可靠性评估

发电系统的可靠性评估首先假定电源与负荷之间的输电线路完全可靠.对于含风电场的发电系统可靠性评估,目前的研究主要有解析法和模拟法两种,解析法一般都是把风电场等效成一台常规发电机组,然后建立发电系统的停运容量模型,再与负荷模型结合起来计算发电系统的各个可靠性指标.模拟法则是按一定步骤在计算机上随机模拟出现的系统状态,用数值计算方法模拟一个实际过程,并从大量的模拟实验结果中统计出系统的可靠性指标^[8].

笔者提出的风电拉平负荷 L'_k 不是先求风电场的等效容量,而是把风电场的功率看成是一个随机变量,它与系统负荷是相互独立的,先求风电功率随机变量跟负荷的联合概率分布,建立风电拉平负荷模型,再与常规机组停运容量模型结合起来求得发电系统的可靠性指标.

风电拉平负荷的关系图如图2所示.

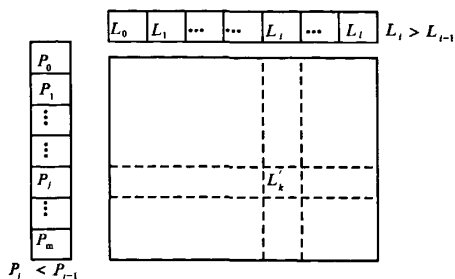


图2 风电功率拉平负荷

Fig.2 The wind power leveling load

首先由公式(4)定义一个随机变量

$$L' = L - P \quad (4)$$

式中: L 为负荷; P 为风电场输出的风电功率; L' 为风电功率拉平负荷,其概率分布可以通过图2的形式求得:

由于风电功率与负荷是相互独立的两个随机变量,因此 L'_k 的概率为

$$p_k = p_{L_k} \times p_{P_j} \quad (5)$$

式中: p_{L_k} 表示负荷处于 L_k 的概率; p_{P_j} 表示风电功率大小为 p_j 的概率.根据图2与式(5)就可以求出负荷减去风电场输出功率后得到的各种可能值的确切概率的大小,建立包含有风电场输出功率信息的风电功率拉平负荷模型.

风电拉平负荷 L'_k 考虑了风电功率的随机特性, L'_k 模型与发电系统中的常规容量停运模型结合起来就可以计算发电系统的可靠性指标.

3 算例分析

某原常规发电系统有4台同类型发电机,单机容量为50 MW,单机强迫停运率为0.04.负荷模型采用两级模型, $L_0 = 0$ MW,10%的天数尖峰负荷为100 MW,20%的天数尖峰负荷为120 MW,50%的天数尖峰负荷为140 MW,20%的天数尖峰负荷为150 MW,负荷模型中的尖峰负荷系数取为0.5.可靠性指标采用失负荷概率LOLP(Loss of Load Probability),它是在假定日尖峰负荷持续一整天的条件下,系统负荷超过可用发电容量的时间概率的总和,该发电系统的失负荷概率LOLP=0.008 23^[9].

现有某风力发电场^[7]并入到上述发电系统,风电场含有10台风力发电机组,可选用的风电机组类型有6种:类型1是理想机组,故障停机率FOR=0,容量为2.5 MW;类型2与类型3、类型4机组的容量为2.5 MW,FOR分别为0.01,0.15,

0.20;类型 5 机组的容量为 2 MW, FOR 为 0.05; 类型 6 机组的容量为 1.5 MW, FOR 为 0.20.

将风电场输出功率^[7]代入到公式(4), 计算得到风电功率拉平负荷的值, 如图 3 中的虚线所示, 从图中可以看出, 经过风电功率拉平之后, 负荷 L' 的取值范围在 -25.00 ~ 150 MW 之间, 图中的实线为系统负荷原来的取值分布线. 再由公式(5)计算出各个取值的确切概率, 得到风电功率拉平负荷模型, 如表 1 所示.

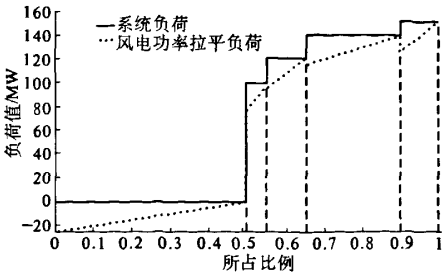


图 3 风电功率拉平负荷取值分布图
Fig.3 The value distribution of wind power leveling load

表 1 由 10 台故障停机率 FOR 为 0.2 的风电机组组合时的风电功率拉平负荷模型
Tab.1 The model of wind power leveling load for 10 wind units combined with the FOR of 0.20

L' /MW	确切概率	L' /MW	确切概率	L' /MW	确切概率	L' /MW	确切概率	L' /MW	确切概率
150.00	0.024 070 0	133.75	0.014 512 5	112.50	0.004 599 3	75.00	0.001 020 0	-12.50	0.023 509
148.75	0.000 071 2	132.50	0.017 864 3	111.25	0.004 589 2	0.00	0.120 350 0	-13.75	0.019 816
147.50	0.002 968 5	131.25	0.013 654 2	110.00	0.004 631 9	-1.25	0.000 356 0	-15.00	0.026 131
146.25	0.004 204 4	130.00	0.018 639 8	108.75	0.004 408 5	-2.50	0.014 843 0	-16.25	0.016 092
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
136.25	0.014 474 2	115.00	0.009 490 9	77.50	0.002 730 0	-10.00	0.023 160 0	-23.75	0.001 344
135.00	0.016 204 1	113.75	0.004 517 6	76.25	0.000 134 4	-11.25	0.022 043 0	-25.00	0.010 200

图 3 和表 1 为取 10 台 FOR = 0.2、总装机容量为 2.5 MW 的风电机组时的风电功率拉平负荷模型, 取其他类型机组时与此类似. 得到了以上的风电功率拉平负荷模型后, 就可以跟常规机组停运容量模型结合起来计算发电系统的失负荷概率 LOLP, 计算结果列于表 2 中, 表中的平均输出功率 AP 来源于文献[7], 0.20 × 10 表示 FOR 为 0.20 的风力发电机的台数为 10 台, 其余类似. 从表中的 LOLP 值可以看出, 在风电场并入后, 发电系统可靠性指标总体情况下明显低于之前的 0.008 23, 这说明风电场的并入提高了整个发电系统的发电可靠性. 其中风电机组 FOR = 0.00 时的 LOLP 值最小, 系统的可靠性最高, 其次为 FOR = 0.01 时, 这表明风电场中的风力发电机故障停机率 FOR 越低, 风电场并网后系统的 LOLP 越小, 系统的可靠性越好, 这是因为在相同条件下, 风电机组故障率越低, 风电场可发出的风电功率就越大, 对系统的可靠性贡献也就大. 对于表 2 第 4 行的情况, 虽然其总体的故障停机率比第 3 行的要小, 而 LOLP 值却反而要大一点, 这是由于其总装机容量要小很多, 风电场可发出的功率减小, 对发电系统的可靠性贡献也就减小.

发电系统的可靠性指标 LOLP 跟风电场平均输出功率有一定的关系, 如图 4 所示. 图 4 反应了不同的风电场平均输出功率下系统可靠性指标的

表 2 风电场各种组合下的发电系统可靠性指标
Tab.2 The reliability indices under various combinations of wind units

风电机组故障 停机率 FOR × 台数	总装机 容量/ MW	平均输出 功率 AP ^[7] / MW	系统可靠 性指标 LOLP
0.00 × 10	25.00	12.211	0.007 664 2
0.01 × 10	25.00	12.093	0.007 688 0
0.20 × 10	25.00	9.843	0.007 929 8
0.2 × 3, 0.05 × 5, 0.15 × 2	19.50	8.368	0.007 974 3

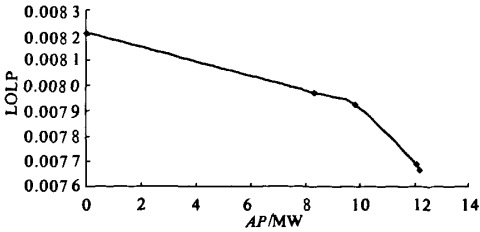


图 4 风电场不同平均输出功率下的可靠性指标
Fig.4 Reliability indices under different wind farm's average output power

变化趋势, 平均输出功率较大时, LOLP 值较低, 系统的可靠性较好. 这是因为, 平均输出功率大, 说明风电场发出的能量多, 满足负荷的能力加大, 发电系统的可靠性得到提高.

4 结论

基于风力发电随机性强的特点,考虑了风电功率与系统负荷相互独立等因素,先求风电场发电功率与负荷的联合概率分布,建立起包含风电功率的风电功率拉平负荷模型,在此基础上跟常规机组的停运容量模型结合起来,计算发电系统的可靠性指标.算例计算分析结果表明了该方法的合理性和有效性.

参考文献:

- [1] 陈树勇,戴慧珠,白晓民,等.风电场的发电可靠性模型及其应用[J].中国电机工程学报,2002,20(30):26-29.
- [2] 徐钟济.蒙特卡罗方法[M].上海:上海科技出版社,1985.
- [3] VALLEE F, LOBRY J, DEBLEKER O. System reliability assessment method for wind power integration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3):1288-1296.
- [4] 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.
- [5] 吴义纯,丁明.基于蒙特卡罗仿真的风力发电系统可靠性评价[J].电力自动化设备,2004,24(12):70-72.
- [6] 吴义纯,丁明.风电场可靠性评估[J].中国电力,2004,37(5):81-84.
- [7] 朱树云,别朝红,王锡凡.大型风电场接入电力系统的可靠性评估[C]//中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术论文集:下册.北京:中国电机工程学会,1998:2712-2717.
- [8] 李朝顺.电力系统可靠性评估方法的分析[J].电网设计,2009(5):53-57.
- [9] 郭永基.电力系统可靠性原理和应用[M].北京:清华大学出版社,1986.

Power System Reliability Evaluation in Wind Power Leveling Load

WU Zheng-qiu, TANG Min-fu, ZHANG Xu-le, WANG Tao

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Abstract: The wind energy always affects the reliability of power system for its randomness, intermittent and Fluctuation. A concept that Wind Power leveling Load(WPLL) is proposed to evaluate the reliability of power system when wind farms are grid-connected. Based on the fact that the wind power and loads are independent random variables, a combined probability distribution function of wind power and loads is deduced by the margin table method. And hence WPLL model is established. This established model is combined with the conventional generator outage capacity model to calculate the reliability indexes, which provides a novel method for the wind power system reliability assessment. Finally, the validity of the proposed model and algorithm is proved by an analysis of the selected sample system. Finally, analysis of the selected sample system illustrates the validity of proposed model and algorithm.

Key words: wind power; combined probability distribution; outage capacity model; power system reliability