

风力发电系统可靠性分析

李东东

(上海电力学院电力与自动化工程学院, 上海市平凉路 2103 号 200090)

摘 要: 风力发电的快速发展使其在电力系统中的比重逐渐增加, 并对系统带来了新的影响, 其中对电力系统可靠性的影响是一个重要方面。本文分析了风力发电系统的可靠性特点, 建立了风力发电机组的容量模型和配电网与系统联系的等效容量模型, 用发电系统可靠性的解析法研究了风力发电对电力系统可靠性带来的影响。结果表明风力发电机组的接入对提高电力系统可靠性具有一定的作用, 并分析了影响其效果的相关因素。

关键词: 风力发电; 电力系统; 可靠性

0 引言

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能源。由于风力发电具有与常规发电形式明显不同的特点, 它对电力系统有着新的、特殊的影响, 随着风力发电的快速增长使其在电力系统中的比重逐渐增大, 这些影响也愈发显著, 其中对电力系统可靠性的影响是一个受到广泛关注的重要问题^[1-4]。

尽管风能总体上是一种丰富的资源, 但它在时间和空间上的分布具有很大的不均匀性^[5]。风速经常处于变化之中, 随之造成风力发电机组出力的变化, 风速的变化不受人们的控制、甚至难以预测, 风力发电很难实现电力系统的完全调度, 这与火电、核电甚至水电相比都是有很大区别的, 因此, 一般认为风力发电对系统容量裕度的贡献较弱、对提高系统可靠性的作用较小, 本文将就这一问题进行具体分析研究。

风速的地域分布也具有明显的差异性, 风能资源经常位于人类活动比较少的边远地区, 因此也是电网的末端, 而风力发电单机容量较小、风电场的容量不大, 这些特点决定了大量的风力发电并入配电网运行, 使得风力发电对于局部配电网的影响更加显著, 本文的分析将针对这些特点进行。

1 可靠性概念和分析方法

电力系统可靠性研究的内容广泛, 可分为发电系统可靠性、输电系统可靠性、发输电系统可

靠性等方面, 并主要采用包含不确定性的概率研究方法。风力发电并网系统的可靠性有其特殊性, 主要是由于风速的变化, 使得风力发电机组的实际出力经常变化, 其有效容量与额定容量的关系受到风况、机组类型等因素的影响而比较复杂, 因此, 对风力发电系统可靠性的研究主要着眼于风力发电机组能够提供多大的功率来满足负荷需求, 属于发电系统可靠性的研究范围。

发电系统可靠性^[6,7]主要与其裕度有关。为了便于运用概率研究手段, 发电系统裕度表示为一个随机变量, 由某一时刻系统中总的发电机组运行容量和负荷功率之差决定:

$$X = \sum_i W_i - L_s \quad (1)$$

其中, X 为系统的裕度, W_i 为发电机组 i 的运行容量, L_s 为系统负荷。得到系统裕度表后, 可以构造和计算出各种可靠性指标, 电力不足概率和电量不足期望值是两个常用的指标, 它们都与系统裕度的累积概率有关。系统裕度的累积概率为

$$P_i^* = P(X \leq X_i) = \sum_{X_j \leq X_i} P_j \quad (2)$$

它表示系统裕度小于等于 X_i 的概率, 对应于每一个裕度 X_i , 就存在一个累积概率。在实际应用中, 裕度表中 X_i 取一个个等间距的离散值, 该间距称为步长, 为计算精度和计算方便考虑, 一般取系统中各发电机组容量和负荷功率适当大小的公约数。式 (2) 的最后一式表示, 累积概率可由系统裕度的确切概率 P_j 计算。系统的确切概率

$$P_i = \sum_{X_j + X_k = X_i} P_a(X_j) \cdot P_b(X_k) \quad (3)$$

该式称为卷积公式, 是计算元件 a 、 b 组成的组合系统裕度确切概率的基本公式, $P_a(X_j)$ 、 $P_b(X_k)$ 分别是元件 a 、 b 运行在 X_j 、 X_k 的确切概率, 卷积公式可以推广到含有多个元件的组合系统。根据式 (2) 计算出的系统容量裕度, 可以构造各种可靠性指标。

2 风力发电系统可靠性建模

2.1 风力发电机组可靠性模型

风力发电机组是将风能转化为电能的设备，其出力主要取决于机组安装地点风能资源状况、即风速的大小，图 1 是典型的风力发电机组功率-风速曲线。在风速由 0 逐渐增大的过程中，当风速大于切入风速 V_{in} 时，机组开始发电、其出力随风速增大而增加，达到额定风速 V_r 时机组出力也达到额定值，在其后风速增大的过程中机组出力基本维持额定值不变，当风速过大、超过切除风速 V_{out} 时，机组保护停机。

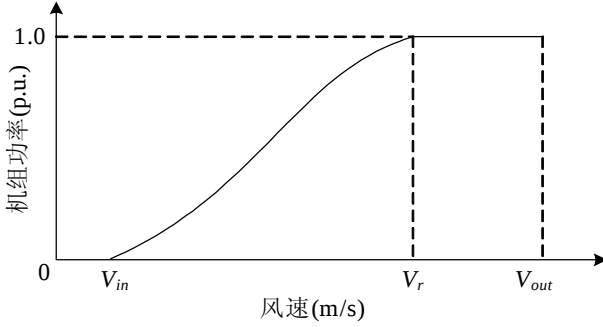


图 1 典型的风力发电机组功率-风速曲线

一般风力发电机组的 V_r 值在 13~14m/s 左右，而实际上，大多数风电场风机高度的平均风速为 7~9m/s，所以风力发电机组大多数时间无法达到额定出力。运行经验表明，风力发电机组的年最大负荷利用小时数在 2000 小时左右，少数风电场能够达到 3000 小时，风速是风力发电对提高系统可靠性作用较小的最主要原因。因此，在风力发电对电力系统可靠性的研究中可以做如下两个简化假设：

(1) 风力发电机组的出力完全取决于风速大小，即不考虑设备自身故障、检修等因素对机组出力的影响；

(2) 不考虑配电网网络故障对可靠性造成的影响，即可以用发电系统可靠性的研究方法对问题进行研究。

第二个假设特别适用于在比较强健的配电网中，在中国东南沿海经济发达地区，其自然条件适宜于发展风力发电，而经济、社会的发展使得配电网比较完善，与风力发电机组的间歇式运行相比，网络的故障可以忽略不计，可以不考虑网络的可靠性模型而采用发电系统可靠性的分析方法进行研究。这种方法也特别适合用于比较强健的配电网中接入所谓“分布式发电”系统的可靠性分析。

对两状态发电机组容量模型而言，其可用容

量的数值是离散的，而对于风力发电机组来说，由图 1 可知，其可用容量是风速的连续函数、其容量模型具有无穷多个状态，所以需要风力发电机组的容量状态进行离散化。

设风力发电机组额定功率为 P_{WGN} ，裕度表步长为 ΔS ，则风力发电机组的容量状态数为

$$N_{WG} = P_{WGN} / \Delta S + 1 \quad (4)$$

设第 i 个状态下风力发电机组的可用容量为 $P_{WG(i)}$ ，并令

$$P_{WG(i)} = P_{WGN} - i \cdot \Delta S + \Delta S \quad (5)$$

则状态 $i(2 \leq i \leq N_{WG})$ 的确切概率可近似为

$$p_i = p(P_{WG(i)} \leq P_{WG} < P_{WG(i-1)}) \quad (6)$$

由图 1 可知，每一个 $P_{WG(i)}$ 都对应着一个风速 V_i ，则

$$p_i = \begin{cases} \int_{V_i}^{\infty} p(V_w) dV, i = 1 \\ \int_{V_i}^{V_{i-1}} p(V_w) dV, 2 \leq i \leq N_{WG} \\ \int_0^{V_{i-1}} p(V_w) dV, i = N_{WG} \end{cases} \quad (7)$$

是 p_i 的一种合理的近似解。式中， $p(V_w)$ 是风速随机分布的概率密度函数，它由风速的长期统计规律得到。常用的长期风速分布概率密度函数为 Weibull 型或 Rayleigh 型分布^[5]。根据图 1 所示的风力发电机组功率曲线和风速分布的概率密度函数，就可以求出风力发电机组的上述可靠性模型。

2.2 配电网可靠性模型

配电网的主要电源一般是外部供电线路，也有的配电网中接入了热发电机组等电源，这类电源可以用一般的发电机组容量模型表示，本节主要考虑外部供电线路的可靠性模型，

根据上节假设，对于通过外部线路供电的配电网，其可靠性由线路供电容量和线路运行状态决定。与提供电源的输电网相比，配电网容量小得多，因此可以认为输电网总是能够提供所需容量，而配电网能否获得这部分容量取决于各线路功率极限及其强迫停运率，即将配电网原有供电线路表示为两状态发电机组容量模型。

对于未接入风力发电的原始配电网，在给定可靠性指标、各线路极限功率和各线路强迫停运率之间关系时，可用二分迭代法^[1]求出各线路的强迫停运率，从而获得配电网原有电源的等效发

电机组可靠性模型。

3 算例研究

为说明上述可靠性分析方法和风力发电对配电网可靠性影响的效果,本节对一个实例系统进行分析。现有一配电网,其峰荷为 20MW,有 3 条极限容量为 8MW 的线路为其提供电源,3 条线路的强迫停运率相同,已知可靠性指标电力不足概率 $LOLP=0.004372$,电力不足期望值 $LOLE=1.6d/a$,电量不足期望值 $EENS=94.26$ MWh。该地区年平均风速为 7m/s,服从 Rayleigh 分布。

首先,用上节提出的二分迭代法求出每条线路的强迫停运率为 0.01328,得到配电网原有电源的等效发电机组可靠性模型。

当电网中加入风力发电机组后,先要建立其可靠性模型。在同一地区,各机组之间的风速相差不大,可以认为它们具有相同的容量状态模型,所有的机组可以用一台相同总容量的机组代替。在获得风力发电机组的可靠性模型后,加入原系统对可靠性指标重新计算。得到的结果如图 2 所示。

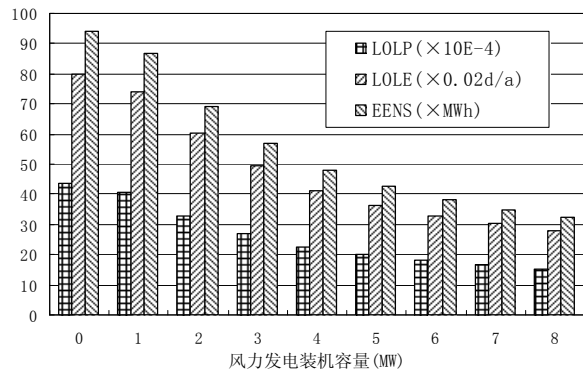


图2 风力发电装机容量对配电网可靠性的影响

由图 2 结果及其对比可知,随着配电网中风力发电装机容量从无到有和逐渐增加,系统各项可靠性指标都有所改善,说明风力发电的接入有利于系统可靠性的提高。而这种改善的效果随着风力发电容量增大的变化可以用可靠性指标变化对风力发电装机容量增加的比值来表示。定义

$$LEWGR=(LOLE-LOLE_0)/(P_{WGN}-0) \quad (8)$$

$$EEWGR=(EENS-EENS_0)/(P_{WGN}-0) \quad (9)$$

其中, P_{WGN} 表示系统中的风力发电装机容量, $LOLE_0$ 、 $EENS_0$ 分别为接入风力发电前系统的可靠性指标, $LOLE$ 、 $EENS$ 分别为接入容量为 P_{WGN} 的风力发电后系统的可靠性指标。上述指标的变化如图 3 曲线所示。

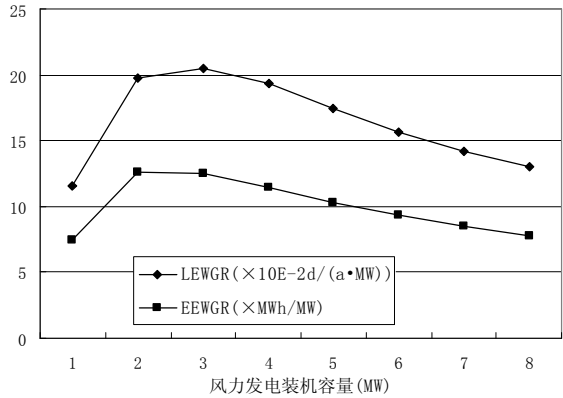


图3 配电网可靠性改善程度随风力发电容量的变化

由图 3 知,随着风力发电机组容量的增加,它对系统可靠性的改善效果出现了一个先强后弱的过程,最初接入的风力发电机组容量对提高系统可靠性的作用比较明显,随着风电的增加,这种作用逐渐变弱。

显然,风力发电对配电网可靠性改善的效果还受到平均风速的影响。表 1 给出了在平均风速为 8m/s 和 9m/s 时系统可靠性指标随风力发电容量变化的对比,可见,表 1 中列出的各项可靠性绝对指标都随着平均风速的增加而更大程度地改善。

表 1. 不同风速条件下系统可靠性指标的变化

风力发电 装机容量 (MW)	电力不足期望值 LOLE (d/a)		电量不足期望值 EENS (MWh)	
	8m/s	9m/s	8m/s	9m/s
2	1.136	1.075	64.79	60.97
5	0.6395	0.5665	37.51	33.29
8	0.4770	0.4111	27.49	23.66

在维持同样的可靠性水平下,风力发电的加入能够在一定程度上提高系统的最大承载负荷。当维持系统 $LOLE=1.6d/a$ 时,风力发电装机容量与系统最大承载负荷变化的关系如表 2 所示(平均风速为 7m/s)。

表 2. 风力发电装机容量与系统最大承载负荷的关系

风力发电装机容量 (MW)	0	4	5	6
系统最大承载负荷 (MW)	20	20.45	20.85	21.15

4 结论

随着风力发电在电力系统中比重的增加,其影响受到人们的关注。本文研究了风力发电接入

对配电网可靠性带来的影响,针对风力发电机组运行的规律和配电网的特点,建立的它们的可靠性模型,用发电系统可靠性分析的解析方法对组合系统的可靠性进行了分析研究。

分析结果表明,风力发电的接入能够提高原有系统的可靠性水平,而在一定的可靠性水平下,风力发电的接入也可以提高系统的最大负荷。风力发电提高系统可靠性的效果与多种因素有关,如平均风速、负荷特性、原系统外部电源状况以及风力发电在系统中的比重等。

致谢

本文研究得到上海市教委发展基金项目资助(05LZ03)和上海市重点学科建设项目资助(P1301)

参考文献

- [1] R. Billinton, H. Chen, "Assessment of risk-based capacity benefit factors associated with wind energy conversion systems". IEEE Transactions on Power System, vol.13, no.3, pp.1191-1196, 1998.
- [2] 陈树勇, 戴慧珠等. "风电场的发电可靠性模型及其应用". 中国电机工程学报, vol.20, no.3, pp.26-28, 2000.
- [3] 王海超, 鲁宗相等. "风电场发电容量可信度研究". 中国电机工程学报, vol.25, no.10, pp.103-106, 2005.
- [4] 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". 电力自动化设备, vol.24, no.12, pp.70-73, 2004.
- [5] J.F. Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers. Wind energy explained – theory, design and application. John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [6] 王锡凡. 电力系统规划基础. 水利电力出版社, 1994.10.
- [7] R. Billinton, R. N. Allan. 周家启, 任震译. 电力系统可靠性评估. 科学技术文献出版社重庆分社, 1986.6

作者简介:

李东东(1976-), 男, 安徽临泉人, 汉族, 博士, 主要研究方向为电力系统规划与运行, 风力发电技术等。
Email: powerlidd@163.com。