

# 计及气候、含风力发电的配电系统 可靠性评估研究

李翔, 李华强

(四川大学电气信息学院, 四川成都 610065)

**摘要:** 分布式电源(distributed generation, DG)的接入使配电系统从辐射型的网络变为遍布中小电源和用户的互联网络, 将对传统配电系统产生巨大的影响。而风力发电机(wind turbine generation, WTG)凭借其无污染、建造费用低、发电灵活等优势越来越多地被作为分布式电源接入配电网。但由于其自身功率输出随机性强的特点,对传统的分布式电源接入配电网带来了一定的影响。在充分考虑了气候因素对WTG功率输出和配电网馈线故障率的影响的同时,结合WTG的多状态模型与配电网孤岛运行方式,对含有气候因素并以风力发电机作为分布式电源的配电系统的可靠性评估情况进行了阐述,希望电网规划人员在选择最优方案时能够考虑由上述因素带来的影响。

**关键词:** 分布式电源; 风力发电机; 恶劣气候; 孤岛; 可靠性; 配电网

**中图分类号:** TM72; N945.17

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1001-2184(2012)02-0217-04

分布式电源(distributed generation, DG)是指某些中小型发电装置能够靠近用户侧安装,它既可独立于公共电网,直接为少量用户提供电能,也可将其接入配电网,与公共电网一起共同为用户提供电能。现今,随着分布式发电技术的日趋成熟,分布式电源凭借其发电方式灵活、环境友好等优点而越来越多地被接入配电网,对配电系统的结构和运行产生了重大影响<sup>[1]</sup>。

在分布式电源的选择中,风力发电机由于其具有可以分散设置,接近负载端而可以降低输配电损失等特性而被广泛应用。但风力发电受气候尤其是风速的影响较大,随时都有切入或者切出的可能,从而导致在配电系统中加入风力发电机可能对系统的安全运行带来一些不安因素。目前,国内外学者对于以WTG作为分布式电源的配电网的可靠性评估进行了一定的研究。文献[2]量化分析了各种参数下WTG的数量和风电场对系统可靠性增益的影响。文献[3]建立了以风电场作为分布式电源的概率模型,能够计算系统可靠性的SAIDI指标,但在计算负荷点的可靠性方面仍有欠缺。文献[4]深入讨论了分布式电源在配电网中的接入位置和注入容量限制问题。文献[5]采用区间算法计算了分布式电源接入后的配电网可靠性指标。文献[6,7]提出了几种接入WTG后对配电系统可靠性评估的方法,但未

考虑风速对WTG输出的影响。而文献[8~11]则采用了蒙特卡罗法(Monte Carlo)模拟了天气因素对配电网可靠性的影响。

笔者通过比较各种分布式电源的特点及优劣,重点分析了WTG作为DG加入配电系统的情况,并对气候因素对配电系统可靠性指标的影响进行了说明,希望电网规划人员在选择最优方案时能够考虑由上述因素带来的影响。

## 1 配电网可靠性指标

文献[12]指出了配电系统最基本的可靠性指标有3个:负荷点平均故障率 $\lambda$ 、平均停电时间 $t_r$ 以及年平均停电时间 $t_u$ 。系统可靠性常规计算指标如系统平均停电频率(system average interruption frequency indices, SAIFI)、系统平均停电持续时间(system average interruption duration indices, SAIDI)、用户平均停电持续时间(customer average interruption duration indices, CAIDI)和平均供电可用率指标(average service availability indices, ASAI)可以由上述3种可靠性指标计算得到。可靠性成本/效益指标,如期望缺电量(expected energy not supply)、期望停电成本(expected interruption cost)和缺电损失评价率(interruption energy assessment rate)也可以从这3个指标计算得到。

## 2 分布式电源具有的特点及分类

分布式电源是区别于传统集中发电、远距离

传输和大互连网络的发电形式,它与传统电源相比,具有以下特点<sup>[13]</sup>:节能效果好;环保性能好;节省管网和输配电投资;能够满足用户的多样化需求;供电可靠性好等。就我国目前的情况而言,随着我国燃料结构的变化和高峰期电力负荷越来越大,有必要加快发展分布式电源、优化供电模式和保障供电安全。

DG按容量分类可以分为总容量为数十兆瓦的微型电厂和数千瓦至数兆瓦的分布式电源;按使用能源分类可以分为可再生能源、清洁的不可再生能源和氢气化学反应等;可再生能源包括太阳能、水力、风能、地热和生物质能等;清洁的不可再生能源如天然气、氢气化学反应如燃料电池等;按使用发电机类型分类可以分为同步发电机和异步发电机;按接入电网方式可以分为旋转型接入和通过逆变器接入;按是否反送功率可以分为经电网接入点向电网反送功率和不经电网接入点向电网反送功率。

根据我国国情,“小机组”、“小火电”和“小热电”也可以属于分布式电源的范畴,但与现代分布式发电技术不在同一层面上,由于其技术经济性能与环境性能不好将逐渐被淘汰,取而代之的是在新能源领域相对成熟、经济指标逐渐接近清洁煤发电的风力发电技术。

### 3 风力发电机的可靠性模型

随着风力发电技术的不断发展,发电成本大幅降低,风力发电已经成为水电和火电的有力补充,已成为目前新能源开发中最成熟、最具规模化商业开发前景的发电方式之一。

在标准空气密度条件下,风电机组的输出功率与风速的关系曲线称为风机的标准功率特性曲线,而在实际安装后,风电机组的输出功率与风速的关系曲线被称为风电机组的实际输出功率特性曲线<sup>[14]</sup>,如图1所示。

由图1可以看出,在切入风速(约介于2.5~4 m/s)以下时,风力发电机保持在停机状态,一旦开始运行,输出功率在达到额定值前与风速近似成一次函数关系直到额定风速(约介于12~15 m/s)。超过额定风速后,基于空气动力学设计的风轮被设定成能够限制从风中析取的机械功率,从而降低传动轴系的机械负载;最后,在非常高的风速下,风力发电机停机,该风速即为切出风速

(约介于20~25 m/s)。

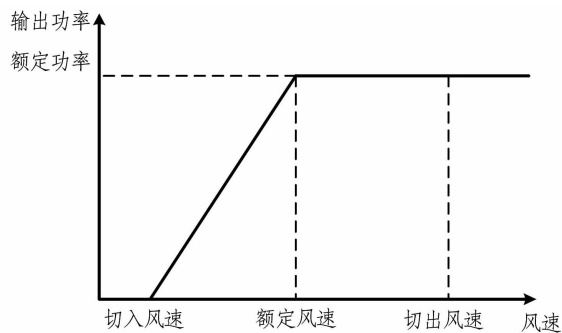


图1 风电机组标准功率特性曲线图

风电机组的实际输出功率特性曲线关系可由式(1)近似表示<sup>[15]</sup>:

$$P_t = \begin{cases} 0 & 0 \leq v_t \leq v_{ci} \\ (A + B \times v_t + C \times v_t^2) P_r & v_{ci} < v_t \leq v_r \\ P_r & v_r < v_t \leq v_{co} \\ 0 & v_t > v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $P_t$  为  $t$  时刻机组出力;  $v_t$  为  $t$  时刻风速;  $v_{ci}$ 、 $v_r$ 、 $v_{co}$  分别表示风电机组的切入风速、额定风速和切出风速;  $P_r$  为风电机组额定功率;  $A$ 、 $B$  和  $C$  为参数,其值可由式(2)表达:

$$A = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left\{ v_{ci}(v_{ci} + v_r) - 4v_{ci}v_r \left[ \frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right]^3 \right\}$$

$$B = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left\{ 4(v_{ci} + v_r) \left[ \frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right]^3 - (3v_{ci} + v_r) \right\}$$

$$C = \frac{1}{(v_{ci} - v_r)^2} \left\{ 2 - 4 \left[ \frac{v_{ci} + v_r}{2v_r} \right]^3 \right\} \quad (2)$$

### 4 含有 DG 的配电网孤岛划分算法

DG的接入改变了配电网辐射状的结构,同时也改变了配电网的潮流,它使得传统的单电源辐射状配电网变成了一个遍布电源和负荷的多电源系统。当包含DG的配电网与主配电网分离后,仍可继续向其所在的独立配电网供电,就成为孤岛。

配电网故障后的孤岛划分方案是根据故障点的位置和故障前配电网的实际运行情况动态生成的。根据负荷重要程度的不同,我们对负荷赋予不同的权重系数,并根据负荷的不同重要性确定各负荷的权重系数  $\omega(i)$ 。由此可以定义等值有效负荷为负荷大小与负荷权重系数的乘积。在形成孤岛后,需要孤岛划分的目标是使岛内所包含

负荷点的有效负荷之和最大,并可以用式(3)表示其数学模型:

$$\max L_E = \max_{i \in D} \sum \omega(i) L_a(i) \quad (3)$$

边界条件为:

$$\begin{cases} \sum_{i \in D} L_a(i) \leq P_{DC} \\ i \in D \\ \text{区域 } D \text{ 连通} \\ i \in D \end{cases} \quad (4)$$

式中  $j$  为 DG 所在馈线的编号;  $D$  为孤岛内所有负荷点  $L_a(i)$  组成的区域;  $P_{DC}$  为 DG 的额定容量;  $L_a(i)$  为负荷点  $i$  处负荷的大小;  $\omega(i)$  为负荷的重要程度系数,一类、二类和三类负荷的重要程度系数分别为 0.5、0.3 和 0.2。

对于模型的求解,文献[16]提出了功率圆的概念。功率圆的定义为:以 DG 所在馈线的负荷点为圆心,沿着网络拓扑方向,以 DG 的额定容量为半径搜索负荷,该圆内包含的负荷点集称为功率圆。因此,只要负荷点沿着网络拓扑线路到圆心的负荷值之和小于 DG 的额定容量,则该负荷点必在功率圆内。笔者在文中采取文献[16]中采用的广度优先搜索法来确定功率圆的范围。从 DG 所在馈线的负荷点  $L_a(i)$  出发,首先访问与负荷点  $L_a(i)$  相连的所有支路,然后访问下层支路,在满足边界条件的范围内,遍历功率圆图,这样可以快速进行复杂配电网的功率圆确定。确定功率圆之后,在满足孤岛对区域  $D$  连通性的要求的前提下,首先从 DG 所在馈线的负荷点  $L_a(i)$  出发,访问此顶点,然后依次从  $L_a(i)$  的未被访问的邻接点出发,在满足边界条件的范围内,遍历功率圆图,直至目标函数达到最大值。

## 5 气候模型的建立

配电线路长期在户外运行,而风电机也处于露天环境中工作,因此,气候变化对于暴露于户外的元件故障率影响非常大。按 IEEE346 标准<sup>[17]</sup>,将天气分为三类:正常天气(normal)、恶劣天气(adverse)、大灾害天气(major storm disaster)。由于大灾害天气出现的机会极小,而且系统的建模、数据收集、数据处理等困难,我们可以将三类情况合并为正常和恶劣两种情况,并用随机的持续时间期望进行描述。令  $\lambda$  和  $\lambda'$  分别为元件在正常天气和恶劣天气时的故障率;  $N$  为正常天气的期

望持续时间;  $S$  为恶劣天气的期望持续时间;  $\lambda_{av}$  为考虑了气候因素的平均故障率[18]。因此,元件的故障率可以表示为:

$$\lambda_{av} = \left( \frac{N}{N+S} \right) \lambda + \left( \frac{S}{N+S} \right) \lambda' \quad (5)$$

设:恶劣天气下发生故障的几率  $0 \leq F \leq 1$ ,则由式(5)可知:

$$\lambda' = \lambda_{av} \left( \frac{N+S}{S} \right) F \quad \lambda = \lambda_{av} \left( \frac{N+S}{S} \right) (1-F) \quad (6)$$

考虑到维修工作人员的安全,假设恶劣天气条件下不进行维修,则折算后的系统等效故障率  $\lambda_p$  和等效停运时间  $r_p$  公式如下:

$$A' = \frac{N}{N+S} \left[ \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2) + \frac{S}{N} (\lambda'_1 \lambda_2 r_1 + \lambda_1 \lambda'_2 r_2) \right]$$

$$B' = \frac{S}{N+S} \left[ 2\lambda'_1 \lambda'_2 S + \lambda_1 \lambda'_2 S + \lambda_1 \lambda'_2 r_1 + \lambda'_1 \lambda_2 r_2 \right]$$

$$\lambda_p = A' + B'$$

$$r_p = \frac{A'}{A' + B'} \times \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} + \frac{B'}{A' + B'} \left( \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} + S \right)$$

式中  $A'$ 、 $B'$  分别为正常与恶劣天气下孤岛内第  $k$  段主馈线的故障率;  $\lambda_1$ 、 $r_1$  分别为 DG 的故障率和平均停电持续时间;  $\lambda_2$ 、 $r_2$  分别为第  $k$  段主馈线的故障率与平均停电持续时间。

## 6 结语

随着常规能源的衰竭、环境污染的加剧和全球气候的变暖,人们越来越多的认识到清洁能源的重要性。风力发电凭借其无污染、发电灵活等优势迅速崭露头角。然而,如何安全、可靠地接入分布式电源亦是电网发展面临的一大挑战。在考虑气候因素的情况下,为配电系统接入 WTG 作为分布式电源不仅需要考虑风机性能特性、DG 接入后的孤岛作用,还需要计算气候因素对配电系统元件故障率的影响。

笔者在文中只是简单地将气候类型分为正常和恶劣两种,但气候的形式多种多样,许多都能导致配电系统元件故障率增大,综合考虑各种气候因素的相互作用将使问题变得十分复杂。事实上,在线路参数受气候条件影响的同时,风机的输入输出也遭遇到气候变化的影响,两者的可靠性模型应当是以气候条件为共同变量的复杂模型。因此,对以风力发电机作为分布式电源的配电系统的可靠性评估研究可以在这个方向上做进一步

的深入。

#### 参考文献:

- [1] 钱科军,袁越. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 74-78.
- [2] Peng Wang, Roy Billinton. Reliability benefit analysis of adding WTG to a distribution system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(2): 134-139.
- [3] Yasser M A, Ehab F E. Reliability evaluation for distribution system with renewable distributed generation during islanded mode of operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(2): 572-581.
- [4] 王志群,朱守真. 分布式发电接入位置和注入容量限制的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(1): 53-58.
- [5] 郑彦芹,娄北,张鸿雁,杨丽徒. 基于区间数和价值理论的配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 19-23.
- [6] Ehsani A, Fotuhi M, Abbaspour A, et al. An analytical method for the reliability evaluation of wind energy systems[C]. IEEE TENCON 2005. Melbourne, Australia; IEEE, 2005.
- [7] Suchitra G, Jangamshetti S H. Reliability evaluation of wind power in north Karnataka, India - a case study[C]. International Conference on Sustainable Energy Technologies. Singapore; IA/PELS Joint Chapter, IEEE Singapore Section, 2008.
- [8] Charles W R, Richard D C, Vito J L, distribution system reliability assessment due to lightning storms[J], IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2153-2159.
- [9] R. Billinton and J. R. Acharya, Weather-based distribution system reliability evaluation[J], IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(5): 499-506.
- [10] P. Wang and R. Billinton, Reliability cost/worth assessment

(上接第213页)

#### 4 结语

对于电厂编码系统的设计, KKS 编码自身具有很多优点, 灵活性也较强, 便于后续添加和维护, 是一种很好的编码方式。KKS 编码规范可以在标准规范的基础上制定切合实际的标准, 但必须设计一套统一的编码标准。KKS 编码工作是一项庞大而复杂的过程, 在实施过程中, 需要设计单位、电厂、第三方通力合作才能完成。KKS 编码系统在电厂信息化建设方面极为方便, 随着时间的推移, 将会有越来越多的电厂应用 KKS 编码系统。

#### 参考文献:

- of distribution systems incorporating time-varying weather conditions and restoration resources[J], IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(1): 260-265.
- [11] Y. J. Zhou, A. Pahwa, S. S. Yang, Modeling Weather-related failures of overhead distribution lines[J], IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(4): 1683-1690.
- [12] Allen R N, Billinton R. Sjarief I, et al A reliability test system for educational proposes basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions On Power System, 1991, 6(2): 813-820.
- [13] 杨素萍, 赵永亮, 奕风奎, 等. 分布式发电技术及其在国外的的发展状况[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(2): 57-60.
- [14] 王承煦. 风力发电实用技术[M]. 北京: 金盾出版社, 1999.
- [15] Givelberg M, Lysenko F, Zelichonok R. Zero sequence directional earth-fault protection with improved characteristics for compensated distribution networks[J]. Electric Power Systems Research, 1999, 51(3): 217-222.
- [16] 刘传铨, 张焱. 计及分布式电源的配电网供电可靠性[J]. 电力系统自动化. 2007, 31(22): 46-49.
- [17] IEEE Std 346-1973 Terms for reporting and analyzing outages of electrical transmission and distribution facilities and interruptions to customer service. 1973.
- [18] 朱金花. 含风力发电的配电系统可靠性评估研究[D]. 浙江大学电气工程学院, 2006. 35-37.

#### 作者简介:

李翔(1987-), 男, 四川成都人, 在读硕士研究生, 研究方向: 配电系统可靠性评估;  
李华强(1965-), 男, 北京市人, 教授, 博士, 从事电压稳定及无功优化问题研究。  
(责任编辑: 李燕辉)

- [1] 劳丽, 展锦程. 电厂标识系统 KKS 编码工程实施[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 电厂标识系统编码标准, GB/T 50549-2010[S].
- [3] 方涛, 董军, 全玲玲. 发电厂标识系统的应用[J]. 热力发电, 2009, 38(5): 104-107.
- [4] 任振伟. KKS 电厂标识系统的应用[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2004, 7(3): 22-24.
- [5] 胡向岚. KKS 编码在水电厂点检管理中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2007, 3(2): 75-77.

#### 作者简介:

焦学林(1987-), 男, 四川广元人, 助理工程师, 学士, 研究方向: 水电厂自动化;  
玄利鹏(1979-), 男, 黑龙江佳木斯人, 工程师, 工程硕士, 研究方向: 水电厂自动化。  
(责任编辑: 李燕辉)