

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.01.015

海上风电场环形结构集电系统可用率等值计算方法

魏书荣^{1,2}, 樊 潇³, 黄苏融¹, 卢永魁³, 符 杨²

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 上海电力学院 电气工程学院, 上海 200090;
3. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 为了在规划阶段做好海上风电场集电系统的可靠性评估, 避免可及性差导致的维护困难, 提出将概率性方法与确定性方法结合的可用率等值计算方法。首先根据大规模海上集电系统的特点将其划分为变电站层、风机层、电缆层, 通过故障树算法对环形集电系统的可用率进行分层描述; 然后根据环形结构可能出现的运行状态, 分别计算单串环网的可用率; 最后以某规划中的海上风电场为例对其集电系统的可靠性与经济性这对矛盾指标进行对比分析, 实现集电系统不同拓扑方案的优劣比较, 为海上风电场集电系统的拓扑规划提供量化的参考指标。

关键词: 海上风电场; 集电系统; 环形拓扑; 可用率计算; 定量分析

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2016)01-0089-06

Method for calculating equivalent availability of ring collector system for an offshore wind farm

WEI Shurong^{1,2}, FAN Xiao³, HUANG Surong¹, LU Yongkui³, FU Yang²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
3. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd, Jinan 250013, China)

Abstract: In order to evaluate the reliability of a collector system of an offshore wind farm in the planning stage and to avoid maintenance difficulties caused by the poor accessibility, a method for calculating equivalent availability is proposed combining the probabilistic and deterministic methods. First, according to the characteristics of the large-scale offshore collector system, it can be divided into a substation layer, turbine layer, and cable layer, and the availability of each layer of the ring collector system is described using the fault tree algorithm. Second, according to the possible operation state of the ring structure, the availability of a single-string ring network is calculated. Finally, using a planning offshore wind farm as an example, the reliability and economy of the collector system are compared and analyzed, and different topological schemes of the collector system are also compared, providing quantitative reference indices for topological planning of the collector system of an offshore wind farm.

Key words: offshore wind farm; collector system; ring topology; availability calculation; quantitative analysis

随着海上风电场规模的逐渐增大, 接入的主网对其可靠性要求也逐渐提高。大型海上风电场的集电系统主要有有备用和无备用两大类连接方式。无备用的放射形连接方式^[1]已在丹麦 Horn Rev 海上风电场^[2]以及东海大桥海上风电场等许多海上风电场中得到广泛的应用。文献[2]中还提到了星形、链形等连接方式, 都可归类为无备用的放射形连接。有备用的环形网络由于经济成本较高, 在之前的海上风电场集电系统规划中较少使用, 但是对于离岸距离远、容量大的大型海上风电场, 由于其可进入性差, 导致维护困难, 高可

收稿日期: 2015-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(51177098); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目(13DZ2251900); 上海市科委科技创新项目(14DZ1200905)

作者简介: 魏书荣(1980—), 女, 湖北钟祥人, 副教授, 主要从事大型海上风电场规划设计及运行维护研究。E-mail: wsrmail@163.com

靠性的环形连接方式是很有必要的。环形拓扑结构现已得到广泛应用,例如伦敦奥运会前并网的英国 London array 大型海上风电场,离岸距离 20 km,一期装机容量 630 MW,其集电系统即采用环形网络连接结构。

放射形连接方式经济性更优,但可靠性相对较弱,环形连接方式具有更高的可靠性,但必然需要付出更大的经济成本代价。但是目前缺乏对 2 类不同方案的定量分析。在规划阶段对大型海上风电场集电系统进行可靠性评估,可以比较各种不同规划方案的优劣,在满足一定经济性要求的前提下进行可靠性检验,这就需要对集电系统的可用率进行定量评估,以实现不同方案的优劣比较,最终得到更加合理、可靠性高的规划设计方案。

对于大规模复杂电力系统,可靠性评估分为确定性方法和概率性方法。对于确定性方法,需要在确定运行方式或有限枚举故障模式下检查系统的安全性能;而概率性方法则需根据元件故障和修复的统计值,通过对系统运行方式和元件故障模式的概率模拟,计算各节点运行参数变化区间和风险指标,得到概率风险指标和概率经济指标。概率性方法又分为 2 类,一类为解析法,将元件和系统的寿命过程加以合理的理想化,并用数学模型来描述这一过程,如网络法、状态空间法、故障树分析法等;另一类在计算机上模拟出寿命过程的实际重现,并通过对此模拟过程若干时间的观察,估计所要求的可靠性指标,如蒙特卡洛法。

对于大型海上风电场,单一的评估方法已不能满足复杂系统的要求^[3-4]。采用蒙特卡洛算法进行可靠性评估已被广泛采用^[5-7],但是其主要是计算服从某个概率分布的状态持续时间随机变量的抽样值,评估结果受概率的影响,因而具有一定不确定性,且其求取时间长,每次都要做一个 8 760 h 或更长时间的循环,对于大型海上风电场来说,程序运行时间过长。文献[8]即采用综合蒙特卡洛算法对环形集电系统进行可靠性评估,由于受随机概率分布影响,每次评估结果皆不同。

综合以上因素,本文考虑将概率性方法与确定性方法结合,计算大型海上风电场环形集电系统的可用率,结合经济性分析,实现不同集电系统方案的定量对比分析。

1 海上风电场集电系统的可用率评估方法

大型海上风电场的可用率受多方因素的影响,对于不同拓扑结构的集电系统,海上变电站、海上气象信息等对集电系统可用率的影响相同,故在此忽略海上变电站、风能特性的影响,只取风机、电缆、开关设备为计算可用率的研究对象。

首先,采用故障树法对集电系统进行整体评估。集电系统故障树结构如图 1 所示。

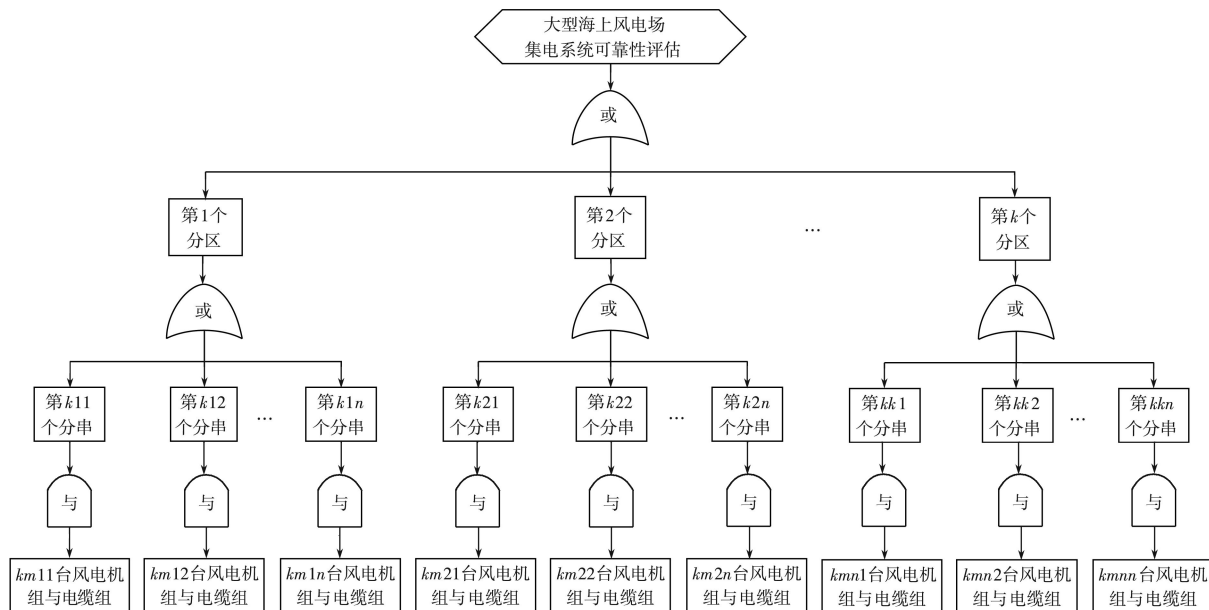


图1 集电系统故障树结构

Fig. 1 Fault tree structure of electrical collection system

假定该大型海上风电场共有 k 个变电站,即有 k 个分区;每个分区皆有若干分串,分别用 $k1n, k2n, \dots$,

kkn 表示。每个分区内的串数并不一定相同,即 $k1n, k2n, \dots, kkn$ 的数值不一定相等。每个分串内又有若干台风机连接,每台风机都是由风电机组和电缆组元件连接构成,每个分串内连接风机的台数用 $km11, km12, \dots, kmnn$ 表示。同理,风格分串内连接风机的台数亦不一定相等。由于集电系统在不同拓扑结构下分区和分串皆不同,且每个分串内的风机连接方式亦可能存在不同,因此,故障树算法还不足以描述集电系统的可用率,需要和其他能描述拓扑连接的方法相结合。

其次,根据串联系统的概念,将除海上变电站外的电气部分分为两个等效元件:风力发电机组元件和电缆组元件。不管是风力发电机组元件或电缆组元件都是可修复元件,模型中需要有元件故障率和以年为单位的故障恢复时间 2 个参数表征^[9-10]。风电机组和电缆组的连接方式分别如图 2、图 3 所示。

最后,采用状态枚举法罗列环形网络的风力发电机组元件和电缆组元件所有可能的运行状态,并计算其等效停运率。文献[11]详细分析了放射形集电系统的可靠性,本文主要评估环形集电系统的可靠性。环形集电系统在连接方式上属于有备用接线方式,其可靠性远高于放射形的无备用接线方式,评估方法也相应地不同。

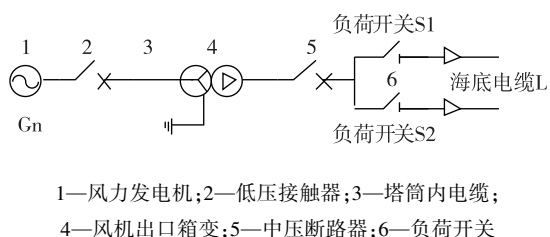
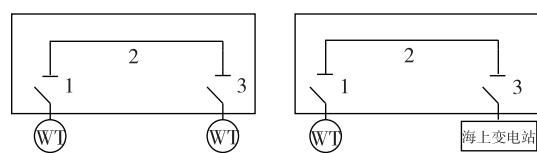


图 2 单台风力发电机组接线示意图

Fig. 2 Connection of single wind turbine generator system



1—负荷开关;2—海底电缆;3—负荷开关

图 3 海底电缆组元件电气连接示意图

Fig. 3 Electrical connection of submarine cable elements

2 分串环网可用率计算模型

目前已经有比较成熟的计算方法^[12-13]评估传统水电厂和火电厂的电气主接线可靠性,将每一组连接成“串”的风力发电机组在维持相同可靠性标准的情况下等效成一个常规发电机组,则可以按照传统的模型和方法评估该海上风电场集电系统的可靠性^[14],最后再根据故障树逻辑得到整个风电场的可用率。

对于图 4 中的环网拓扑结构来说,不可能出现分叉,因此,中压断路器和负荷开关对可靠性的影响主要可以分为以下 2 种情况^[11]:

a. 负荷开关数量为 1,即风机位于串的末端,通过海底电缆 L 与其他风机相连,此时元件 5、6 或海底电缆 L 的停运将造成整个风电机组停运,即图 2 中只有负荷开关 $S1$ 、无负荷开关 $S2$ 的情况。可以将其视为元件组停运模式,其停运率为

$$Q_1 = 1 - (1 - q_L) \prod_{i=1}^6 (1 - q_i) \quad (1)$$

式中: Q_1 ——风电机组的等效停运率; q_L ——海底电缆 L 的停运率; $q_1 \sim q_6$ ——图 2 中元件 1~6 的停运概率。

b. 负荷开关数量为 2,如图 2 所示同时有负荷开关 $S1$ 、 $S2$ 的情况,若 $S1$ 、 $S2$ 两端各有 1 台风机, q_{WTG} 为风机的等效停运率, q_L 为海底电缆 L 的等效停运率,则此系统的运行状态列表如表 1 所示。

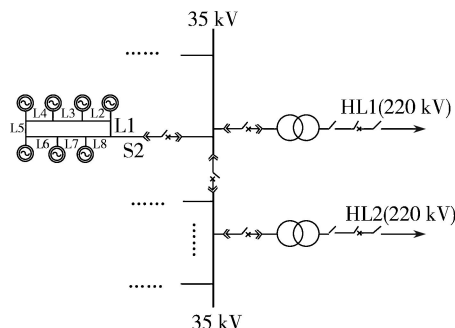


图 4 单串环网拓扑结构示意图

Fig. 4 Topological structure of single-string ring network

表 1 负荷开关数量为 2 时系统运行状态表

Table 1 Operation states when number of load switches is 2

系统运行状态 (S1, S2)	概率	输出功率/ kW
(1, 0)	$1 - (1 - q_5) q_6 (1 - q_L) (1 - q_{WTG})$	P_N
(0, 1)	$1 - (1 - q_5) q_6 (1 - q_L) (1 - q_{WTG})$	P_N
(1, 1)	$1 - (1 - q_5) (1 - q_6)^2 (1 - q_L) (1 - q_{WTG})$	$2 P_N$

根据风电机组“串”的可靠性逻辑与其运行状态列表,在保持期望故障受阻电力不变的前提可以等效为一个容量为 $(n+1)P_N$ 的发电机组。其中, Q_n 为图2所示的 n 台风力发电机组串联结构的等效停运率; Q_{n+1} 为 $n+1$ 台风力发电机组串联结构的等效停运率,由 Q_n 迭代计算得到,当 $n=1$ 时 Q_1 可以由式(1)计算得到。由此可得到负荷开关数量为2时,容量为 $(n+1)P_N$ 的发电机组的等效停运率为

$$Q_{n+1} = 1 - \frac{[(n+1) - nQ_n - q_{\text{WTG}}]}{n+1} (1 - q_5)(1 - q_6)^2(1 - q_L) \quad (2)$$

以图4中给出的环网拓扑中S2开关所在串的7台风机为例进行说明,整个海上风电场有若干个类似的风机串构成。L1~L8为电缆支路,每段电缆的接线如图3所示。

每串风机串上各段电缆的编码用1、0、X表示。其中1为正常,0为停运,X为两者皆可。由于环网结构的特殊性,环网若要能正常运行,则首尾支路至少有一条支路能够正常运行即可。若L2~L7段电缆任意一条支路停运,则仍然可以输出所有机组全都正常运行的功率,则整串支路只有在L1、L8段电缆支路同时停运的情况下才可能停运,因此,只需分别计算出L1和L8段电缆支路的停运率 q_1 、 q_8 ,整串支路的总停运率为

$$Q_e = q_1 q_8 \quad (3)$$

先求 q_1 ,根据状态枚举法,在L1支路停运的条件下,其他各条支路可能出现的状态如表2所示。

风电机组“串”在保持期望故障受阻电力不变的前提下可以等效为一个容量为 nP_N 的发电机组,根据期望受阻电力不变的原则,取表中各运行状态的可靠性概率与输出功率的乘积之和,将其除以“等值容量”可以得到等效停运率,即

$$q_1 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n-1} iP_N(1 - Q_i)q_{n+1-i} + (1 - Q_7)nP_N}{nP_N} \quad (4)$$

同理,可以得到L8段电缆支路停运的总等效停运率为

$$q_8 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n-1} iP_N(1 - Q'_i)q_{n+1-i} + (1 - Q'_7)nP_N}{nP_N} \quad (5)$$

式中: Q'_i ——采用公式(2)计算出的L8支路停运时 n 台风力发电机组串联结构的等效停运率。

按照公式(3)即可求出整串环网的等效停运率。对整个风电场而言,可用率由上述计算的各串网络共同构成,假定2串网络各自看成一个整体,其等效停运率分为 Q_{e1} 、 Q_{e2} ,每串对应的额定容量分别为 P_1 、 P_2 ,这里对各分串采用故障树逻辑时,由于每串网络所连风机数目基本相同,可以认为每个分串对整体应用的概率基本相同。根据故障树的逻辑关系,则其可能出现的运行状态如表3所示。

2串集电系统的等效停运率为

$$q = 1 - \frac{(1 - Q_{e1})Q_{e2}P_1 + (1 - Q_{e2})Q_{e1}P_2 + (1 - Q_{e1})(1 - Q_{e2})(P_1 + P_2)}{P_1 + P_2} \quad (6)$$

依此类推到多串网络,若是风电场有多个分区,以每个分区为1个计算单元,每个分区下有多串网络,即可计算出整个风电场的等效停运率。

3 环网与放射形网络的对比分析

首先分析单串环形结构及放射形结构的可用率,将图4中的L5电缆断开即可得到放射形网络结构。再以规划中的某海上风电场为例对其集电网络在环网与放射形网络2种典型连接拓扑结构的可靠性进行对比

表2 各段电缆的运行状态

Table 2 Operation state of each segment of cable

状态编码	状态	概率	输出功率/kW
01111111	全部正常	$1 - Q_7$	$7P_N$
00111111	L2 停运	$(1 - Q_6)q_2$	$6P_N$
0X011111	L3 停运	$(1 - Q_5)q_3$	$5P_N$
0XX01111	L4 停运	$(1 - Q_4)q_4$	$4P_N$
0XXX0111	L5 停运	$(1 - Q_3)q_5$	$3P_N$
0XXXX011	L6 停运	$(1 - Q_2)q_6$	$2P_N$
0XXXXX01	L7 停运	$(1 - Q_1)q_7$	P_N

表3 风电场2串集电系统运行状态

Table 3 Operation state of two-string collector system of wind farm

状态编码	状态	概率	输出功率/kW
10	S2 停运	$(1 - Q_{e1})Q_{e2}$	P_1
01	S1 停运	$(1 - Q_{e2})Q_{e1}$	P_2
11	全部正常	$(1 - Q_{e1})(1 - Q_{e2})$	$P_1 + P_2$
00	全部停运	$Q_{e1}Q_{e2}$	0

分析。

为了使 2 种不同结构网络的可靠性更具有可比性,将 2 种结构下的分串处理得相同,主要是为了环形和放射形 2 种情况下的可靠性对比。首先分析风电场集电系统单串网络在环形和放射形 2 种结构下的对比结果。这里环网每段电缆截面分别为最大运行方式下对电缆截面进行选型的结果,如表 4 所示。

电缆不同截面的价格相差很大,例如:截面 95 mm^2 的电缆成本为 92 万元/km,而截面 300 mm^2 的电缆成本为 175 万元/km。结合电缆不同截面的价格及各段所有电缆长度,可得到环网与放射形网络的经济性及各项可靠性指标,如表 5 所示。整个风电场由多串网络构成,2 种不同结构下的串数及每串的分组可能皆有差异,进行经济性优化^[8]后 2 种接线方式下的拓扑结构图如图 5 所示。

表 4 单串集电系统不同结构下电缆截面选型的结果

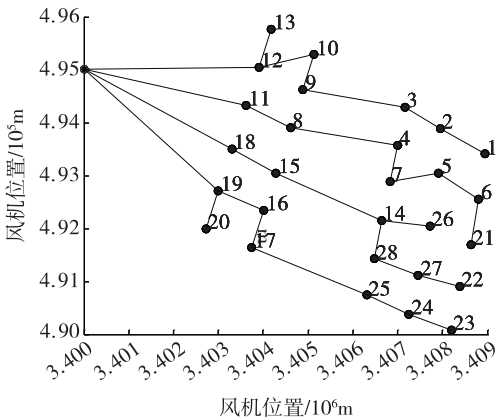
Table 4 Results of cable section selection with different structures of single-string collector system

电缆编号	电缆截面/ mm^2		本段电缆长度/ km
	环网	放射形网络	
L1	300	240	3.6859
L2	240	150	1.0724
L3	150	70	1.1007
L4	120	50	0.8671
L5	95		1.0000
L6	120	50	1.0116
L7	240	95	0.7051
L8	300	240	2.4062

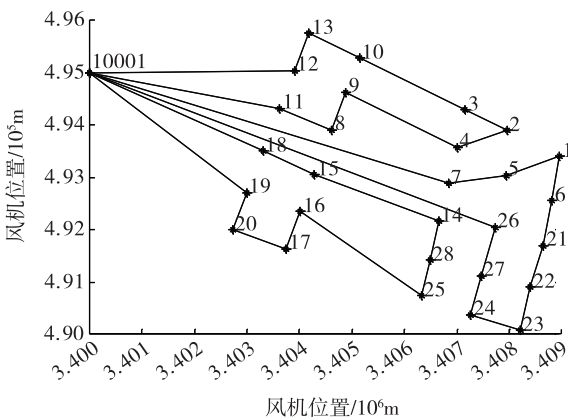
表 5 集电系统两种结构的经济性 & 可用率指标对比

Table 5 Comparison of economy and reliability indices between two structures of collector system

集电系统 结构形式	单串网络 故障停运率	风电场 故障停运率	计及风能影响 的风电场可用率	年利用 小时数/h	风电场集电 系统成本/万元
环网	0.0076	0.0322	0.2872	2516	6051.4726
放射形网络	0.0899	0.0970	0.2680	2347	5280.6070



(a)放射形网络(总投资 5 280.607 万元)



(b)环形网络(总投资 6 051.472 6 万元)

图 5 风电场网络拓扑结构

Fig. 5 Topological structure of wind farm with different structures of collector system

在可用率计算中,年利用小时数除受故障停运、维护检修等影响外,还受风能的影响,这里以国内首座海上风电场(东海大桥海上风电场)设计的年利用小时数 2 600 h 为基准进行计算。其中,年利用小时数=计及风能影响的风电场可用率 $\times$ 8 760。

表 5 结果表明,环网比放射形网络的可靠性高,但是经济性不如放射形网络。东海大桥海上风电场集电系统采用放射形网络连接,采用本文方法计算的年利用小时数与此海上风电场实际运行的年利用小时数一致,验证了本方法的有效性。若采用环网网络,具有更高的可靠性,可得到更高的年利用小时数,但是由于环网结构每段电缆在最大运行方式下所带风机多、截面大,需要以一定的经济成本作为代价。正是由于这个原因,很多海上风电场集电系统都直接选用了放射形连接方式。

采用序贯蒙特卡洛模拟法对本文海上风电场案例的可用率进行计算,首先根据元件的可靠性参数,生成风电机组的随机故障时序和电缆组的随机故障时序,仿真组合整个风电场 0~8 760 h 的状态时序。由于受随机概率的影响,每次 8 760 h 循环仿真的结果不同。经过多次仿真取平均值以得到尽量可靠的结果,可以得到

环网和放射形网络2种方式下海上风电场的等效容量分别为:97.57 MW、89.97 MW,风电场由28台3.6 MW的风机构成,则海上风电场的故障停运率分别为0.03204、0.1074。该结果与表5中采用等效停运率计算出的风电场故障停运率结果基本一致。

以海上风电场整体集电系统为研究对象时,风机串的数量以及每串的台数亦发生相应变化。放射形的接成4串,每串7台风机。环形连接由于其每段电缆截面增大,充分利用此优点,每串所带风机数量增多,环形最优方式为接成3串、每串9台风机,因此集电系统的成本比放射形的增加14.6%,但是风电场年利用小时提高7.2%。所以在离岸距离远、容量大的大型海上风电场,环形连接方式应作为主要备选方案在规划设计中予以考虑。本文对于集电系统放射形及环网拓扑结构的可靠性评估方法具有一般性,可推广到任意海上风电场。

4 结 语

放射形网络结构在大型海上风电场集电系统规划中得到了广泛应用,但是对于离岸距离远、容量大的大型海上风电场,由于其可进入性差,高可靠性的环形拓扑结构是很有必要的。本文首先分析海上风电场环形集电系统的可用率计算方法,然后以某规划中的海上风电场为例,分别计算单串集电系统和整个海上风电场的等值可用率,用国内唯一并网的大型海上风电场的实际运行数据验证了本方法的可行性。最后,结合经济性指标,对集电系统不同方案的优劣进行对比分析,为海上风电场集电系统的拓扑规划提供较好的数据依据,可广泛应用于海上风电场建设与规划中,对加快我国海上风电场建设意义深远。

参考文献:

- [1] GONZALEZ-LONGATT F M, WALL P, REGULSKI P, et al. Optimal electric network design for a large offshore wind farm based on a modified genetic algorithm approach[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 164-172.
- [2] ACKERMANN T. Transmission systems for offshore wind farms[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(12): 1-2.
- [3] RIBBANT J, BERTLING L M. Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997—2005[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 167-173.
- [4] 王建东, 李国杰. 考虑电缆故障时海上风电场电气系统开关配置方案的经济性比较与分析[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 125-128. (WANG Jiandong, LI Guojie. Economic study on switchgear configuration in electrical system of offshore wind farms with cable outage[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 125-128. (in Chinese))
- [5] PARK J, Wu Liang, CHOI J, et al. A probabilistic reliability evaluation of a power system including solar/photovoltaic cell generator [C]//JOHN PASERBA. IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-6.
- [6] 葛少云, 王浩鸣, 王源山, 等. 含分布式风光蓄的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(5): 16-23. (GE Shaoyun, WANG Haoming, Wang Yuanshan, et al. Reliability evaluation of distributed system including distributed wind turbines, photovoltaic arrays and batteries[J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(5): 16-23. (in Chinese))
- [7] BILLINTON R. Reliability consideration in the utilization of wind energy, solar energy and energy storage in electric power systems [C]//JOHN PASERBA. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Stockholm, Sweden: IEEE, 2006: 11-15.
- [8] 符杨, 吴靖, 魏书荣. 大型海上风电场集电系统拓扑结构优化与规划[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2553-2558. (FU Yang, WU Jing, WEI Shurong. Topology optimal and planning of power collection system for large-scale offshore wind farm [J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2553-2558. (in Chinese))
- [9] 黄玲玲, 符杨, 胡荣, 等. 基于运行维护的海上风电机组可用性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 13-17. (HUANG Lingling, FU Yang, HU Rong, et al. Availability evaluation of offshore wind turbine considering operation and maintenance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 13-17. (in Chinese))
- [10] 蒋泽甫, 谢开贵, 胡博, 等. 风力发电系统可靠性评估解析模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 52-57. (JIANG Zefu, XIE Kaigui, HU Bo, et al. Wind power generation analytical model for the reliability evaluation of power systems [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 52-57. (in Chinese))
- [11] 黄玲玲, 符杨, 郭晓明. 海上风电场集电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 169-174. (HUANG Lingling, FU Yang, GUO Xiaoming. Reliability evaluation of wind Power collection system for offshore wind farm [J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 169-174. (in Chinese))
- [12] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 40-50.
- [13] IEEE Power Engineering Society. IEEE 762—2006 IEEE standard definitions for use in reporting electric generating unit reliability, availability and productivity[S]. New York: 3 Park Avenue, 2007.
- [14] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.