

考虑电气元件多重故障的海上风场集电系统 可靠性与经济性评估

吕小凡¹, 刁晓伟², 王 靖², 蒋传文¹

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 上海绿色能源环保有限公司, 上海 200433)

The Research on Reliability and Economy Evaluation of Wind Power Collection System for Offshore Wind Farms Considering Multiple Failures of the Electrical Components

LYU Xiaofan¹, DIAO Xiaowei², WANG Jing², JIANG Chuanwen¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Green Environmental Protection Energy CO. LTD, Shanghai 200433, China)

摘 要: 随着海上风电场装机容量日益增加, 风电场集电系统拓扑结构将成为影响海上风电场可靠性与经济性的关键因素, 为此本文提出了风电场集电系统可靠性评估模型与经济性评估方法。考虑了集电系统内部电气元件的多重故障, 采用分块枚举法, 比较了风电场集电系统不同拓扑结构的可靠性, 计算得到年电量不足期望值和系统等效可用率等可靠性指标以及不同拓扑结构下风场运行容量概率模型。并计及系统可靠性对经济性的影响, 综合考虑一次投资成本和故障机会成本, 计算得到不同拓扑结构的经济性指标。通过算例分析得到, 单边环形拓扑结构的可靠性最高, 链形拓扑结构的经济性最优。与以往评估集电系统拓扑结构可靠性与经济性的研究相比, 本文考虑了电气元件的多重故障, 得到了不同拓扑结构风场运行容量概率模型, 评估结果准确合理, 研究更具广泛意义。

关键词: 海上风电场; 集电系统; 多重故障; 分块枚举法; 可靠性评估; 经济性评估

Abstract: With the growing installed capacity of offshore wind farm, the topology of wind power collection system for wind farms will become the key factor that affects the reliability and the economy of offshore wind farms, and the reliability and economy evaluation method of the wind power collection system for wind farms is proposed in this paper. Considering multiple failures of the electrical components in the wind power collection system, the reliability of different topological structures of the system is compared by using the block enumeration method, and such reliability indexes of the system as insufficient expected energy and equivalent availability of the system and the operation capacity probabilistic model of wind farm under different topologies are cal-

culated. Furthermore, considering the impact of system reliability on economy, the once capitalized cost and failure opportunity cost are comprehensively analyzed, and economic indexes of different topologies are calculated. It can be analyzed from case that the reliability of the unilateral ring topology is the highest, and the topology of the radial topology is the most economical. Compared with the previous studies on the reliability and economy of topologies of wind power collection systems, the multiple failures of electrical components are considered in this paper, and the probability model of wind operation capacity under different topological structures is obtained. The evaluation results are accurate and reasonable, and the research has broader significance.

Keywords: offshore wind farm; wind power collection system; multiple failures; block enumeration method; reliability evaluation; economic evaluation

0 引 言

在能源短缺、气候变化、环境污染等形势日趋严峻的背景下, 风能尤其是海上风电作为典型的清洁能源越来越受到重视。截至 2014 年底, 全球海上风电装机容量已经达到 8 770MW, 中国大陆累计海上风电装机容量达到 658MW^[1]。我国海上风能资源丰富, 具备大规模发展海上风电的条件。与陆上风电相比, 海上风电具有不占用土地资源、风速高且稳定、湍流强度小、视觉及噪声污染小等优点^[2]。与陆上风电场相比, 海上风电场受海洋环境影响, 电气设备的运行维护成本远远高于陆上风电场。因此确保海上风场可靠性, 提高风场输出功率, 减小电量供应不足所带来的经济损失变得十分

基金项目: 上海市科委计划任务书(16DZ1203504)

重要。随着海上风电场装机容量日益增加,风场内部集电系统结构将成为影响海上风电场可靠性与经济性的关键因素。

目前,已有文献对风电场集电系统的可靠性和经济性进行了研究。文献[3]从接地保护和过电压保护方面,研究了大型海上风电场集电系统的不同拓扑结构的可靠性。文献[4]考虑了风机输出功率的波动性,运用等效可用系数法计算得到风电场集电系统放射形拓扑结构的可靠性指标。文献[5]考虑了电缆、开关、风机故障等因素,提出了集电系统在传统开关配置和完全开关配置下的可靠性评估算法,计算得到了集电系统的可靠性指标。文献[6]在考虑海上变电站数量和容量的基础上,建立了大型风电场建设成本最小的数学模型,采用遗传算法优化风场集电系统规划布局。文献[7]考虑了风电场电气系统的投资成本和故障机会成本,评估了风场电气系统不同布局的经济性。文献[8]从开关配置方案角度,研究了放射形拓扑结构的经济性,比较了传统开关配置、开关部分配置以及开关完全配置方案的经济性。

但是以往研究都较少考虑到电气系统元件设备的多重故障对集电系统的可靠性和经济性的影响,为此本文在研究海上风电场集电系统内部电气结构的基础上,考虑断路器和隔离开关的影响,计及电气设备或元件的多重故障,采用分块枚举法,计算并比较集电系统不同拓扑结构的可靠性指标以及风电场运行容量百分比。同时计算海上风电场集电系统的一次投资成本和故障机会成本,评估了不同拓扑结构的经济性。最后,基于可靠性与经济性的综合评估,对海上风电场集电系统的内部布局提出合理建议。

1 海上风电场集电系统拓扑结构

根据目前研究,集电系统有5种典型拓扑结构,如图1所示^[9]。

①放射形。放射形结构是最常使用的一种海上风电场集电系统电气连接方式,包括链形结构和树形结构,如图1中(a)和(b)所示。多台风机共同连接在同一条馈线上,多条馈线共同连接至汇流母线。放射形结构简单,工程造价低。但是结构可靠性不高,当某一电气元件故障后,处于该电气元件与馈电线路末端的风机将全部停运。

②单边环形。相比于放射形结构,单边环形结

构增加了一回馈电线路,从而大大提高了系统可靠性,如图1(c)所示。当馈线1某处电气元件发生故障,该元件前向风机可通过馈线1与汇流母线连接;该元件后向风机可通过馈线2与汇流母线连接。但新增馈电线路使得该拓扑结构的工程造价高于放射形结构。

③双边环形。双边环形结构是由放射形结构相邻两回馈线末端连接构成,如图1(d)所示。与单边环形结构类似,当馈线1某处电气元件发生故障时,该元件前向风机可通过馈线1与汇流母线连接;该元件后向风机仍可通过馈线2与汇流母线连接。相比于前两者,双边环形结构对馈线传输容量的要求更高,因此工程造价也将高于前两种拓扑结构。

④复合环形。复合环形结构是双边环形结构和单边环形结构的结合,如图1(e)所示。将相邻馈线末端的风电机组相连,再经一条冗余馈线,将各馈线末端连接至汇流母线。相比于单边环形结构,复合环形结构减少了冗余馈线;相比于双边环形结构,复合环形结构对馈线传输容量的要求较低。

⑤星形。星形结构如图1(f)所示,每条馈电线路路上只连接一台风机。因此星形结构在保证系统可靠性的同时,可以降低对馈电线路传输容量的要求。但是该结构中心处的风机开关配置复杂,使得该结构工程造价有所增加。星形结构常用于风源风向变化较大的地理区域。

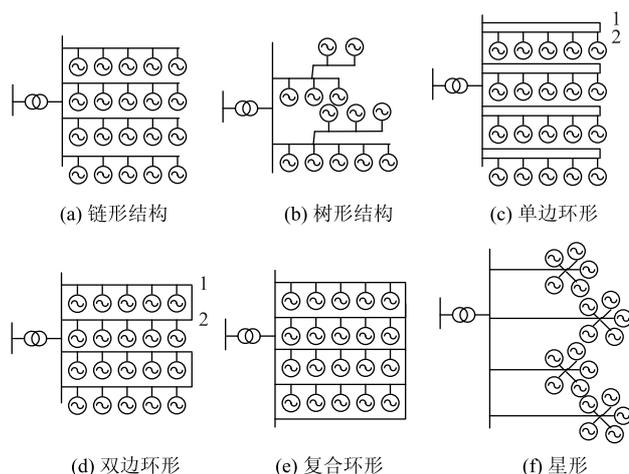


图1 集电系统典型拓扑结构

2 海上风电场集电系统可靠性评估

2.1 集电系统可靠性模型

风电场集电系统包含的电气元件主要有风机、

集电变压器、馈电线路、断路器、隔离开关及汇流母线等^[10-11]。为了简化分析过程，可以将集电系统中的元件等效为图 2 和图 3 所示的模型。计算时将风机、塔架电缆和集电变压器等效为等值风机模型。

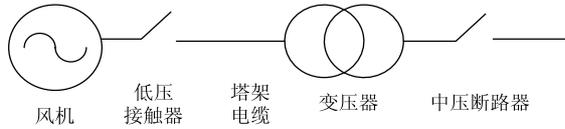


图 2 等值风机模型



图 3 馈电线路等效模型

2.2 考虑电气设备多重故障的可靠性模型

研究中将考虑电气元件或设备的多重故障，根据各个元件在集电系统中的作用，建立相应的 Markov 可靠性模型。由于虑及断路器和隔离开关的影响，所以根据故障后元件是否需要隔离切换，将元件可靠性模型分为不同的状态，如图 4 所示。其中， μ 为修复率， λ_1 为隔离率， λ_2 为切换率， λ_3 为故障率。

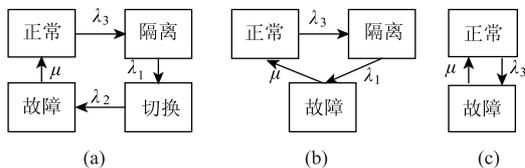


图 4 集电系统不同元件状态空间图

根据集电系统电气元件或设备故障后是否需要隔离切换，可以将其状态空间图分为以下几种。如图 4 中(a)所示，电气元件或设备具有 4 种状态，分别为正常、故障、隔离、切换。如馈电线路故障后，将依次经历隔离故障、切换线路和修复故障等过程。如图 4 中(b)所示，电气元件或设备具有 3 种状态，分别为正常、故障、隔离。如风机与馈电线路相连的断路器故障后，则将依次经历隔离故障和修复故障等过程。如图 4(c)中所示，风电机组具有两种状态，正常和故障状态。

2.3 集电系统可靠性评估算法

2.3.1 分块枚举算法

在进行集电系统可靠性评估前，先做如下假定：集电系统中所有元件相互独立；元件的故障率

和修复率在研究期间内为常数。本文采用分块枚举法评估风场集电系统可靠性。块是去掉汇流母线后，不与其他任何电气元件或电气设备相连的最小单元。风电场集电系统可以分为若干块，块之间相互独立。分块枚举算法具体如下：输入海上风电场的拓扑结构，断开汇流母线侧开关，并且合上内部所有联络线开关，遍历集电系统所有元件，最后输出集电系统分块数。

2.3.2 风场运行容量概率模型算法

根据元件的故障、隔离、切换等状态的概率，可以得到单个分块内运行机组台数的概率模型，进而得到整个风场运行容量概率模型。记单个分块内正常运行机组台数为 $N_k (k = 1, 2, 3)$ ，分别代表隔离、切换、故障状态下正常运行机组台数，其相应概率记为 P_k 。其中 F 为故障元件集合， W 为正常工作元件集合。 P_{ki} 为元件 i 处于 $k (k = 1, 2, 3)$ 状态的概率， P_{wj} 为元件 j 正常工作的概率。那么在不同的系统状态下，单个分块内正常运行机组台数的概率为

$$P_k(N_k) = \prod_{i \in F} p_{ki} \prod_{j \in W} p_{wj} \quad (k = 1, 2, 3) \quad (1)$$

重复以上步骤，可以得到整个风场运行容量概率模型，生成流程如图 5 所示。

由于风场输出功率受风速和海面环境影响，因此在计算风场运行容量时，假定单台风电机组输出额定功率，即只研究风场正常运行容量与集电系统的拓扑结构的关系。计算得到单个分块内正常运行机组台数的概率后，将每个分块的机组台数相加，对应的概率相乘即可得到整个风场正常运行机组台数概率模型。再对应乘以单台风机额定功率，即可得到风场运行容量百分比概率模型。

2.4 集电系统可靠性指标

电力系统可靠性评价通过分析电网设备的故障情况来反映系统整体可靠性水平。可靠性指标可以分为发输电系统指标和配电系统指标。由于风场集电系统属于发输电系统，因此研究时采用电量不足期望值 E_{EENS} 、年停运小时数 H_{AOH} 和系统可用率 S_a 来评估海上风场可靠性。

电量不足期望值是指在研究期间内由于设备故障或检修等原因导致设备停运致使功率收集处电量不足的期望值。对于某一停运状态 i ，单位时间内电量不足期望值为停运损失的发电容量乘以系统处于该停运状态的概率。对于整个系统而言，单位时间

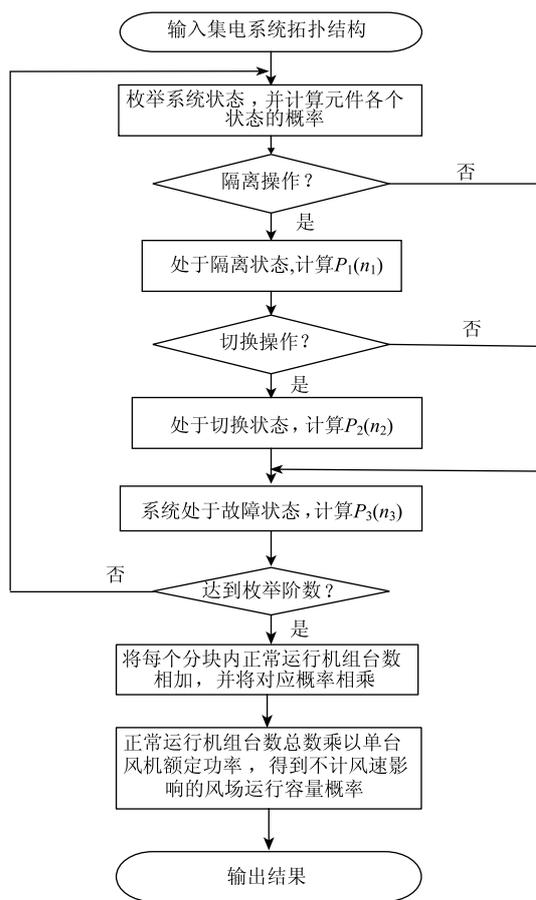


图5 风场运行容量概率模型生成流程

内电量不足期望值为所有停运状态下的 $E_{EENS,i}$ 之和。

$$E_{EENS} = \sum_{i=1}^n E_{EENS,i} \times p_i \times 8760 \quad (2)$$

式中： P_i 为系统处于停运状态 i 的概率，研究时间为 1 a。得到系统的电量不足期望值 E_{EENS} 后，可以定义年停运小时数 H_{AOH} 和系统可用率 S_a ，如式(3)和式(4)所示。

$$H_{AOH} = \frac{E_{EENS}}{P_s} \quad (3)$$

$$S_a = \left(1 - \frac{E_{EENS}/P_s}{8760}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中： P_s 为系统容量。

3 集电系统经济性评估

根据世界上现有海上风电场的建设经验，海上风电场的主要成本集中在风机投资和海底基础设施建设两方面^[12]。研究得到海底基础设施建设，集电系统的中压海底电缆以及输电通道，成为影响海上风电场建设经济性的关键因素。因此有必要研究集电系统内部的拓扑结构，在保障可靠性的前提

下，减少冗余线路，提高风场建设经济性。

3.1 一次投资成本

经研究表明^[7]，影响风电场集电系统建设成本的因素主要是中压海底电缆的长度、截面积以及开关设备的数量。因此，集电系统一次投资成本为式(5)所示。 C_L 为海底电缆成本， C_S 为开关设备成本。

$$CI = C_L + C_S \quad (5)$$

其中海底电缆成本包括电缆本身成本和敷设成本，如式(6)所示。其中 C_{LA} 为单位长度海底电缆的成本； C_{LB} 为单位长度海底电缆的敷设成本； L_{line} 为海底电缆总长度； N_{line} 为海底电缆总数。开关设备成本如式(7)所示。其中 C_{SA} 为单个开关的成本； N_S 为开关设备数量。

$$C_L = (C_{LA} + C_{LB}) \times L_{line} \times N_{line} \quad (6)$$

$$C_S = C_{SA} \times N_S \quad (7)$$

3.2 故障机会成本

在经济学上，机会成本是指把一定的资源用于生产某种商品而放弃生产其他商品可获得的最大收益。对于风电场集电系统而言，不同拓扑结构的可靠性不同。当集电系统内部电气元件故障导致风机停运，从而造成风场输出功率减少，带来的经济损失就是故障机会成本。

$$C_{lost} = \lambda \cdot E_{EENS} \quad (8)$$

式中： C_{lost} 为故障机会成本； λ 为上网电价； E_{EENS} 为年电量不足期望值。

综上所述，可以用一次投资成本和故障机会成本之和作为评价风电场经济性的指标。

4 算例分析

4.1 可靠性评估

设某风场的总装机容量为 240MW，由 80 台 3MW 的风机组组成。风电机组被分为 10 串，每串有 8 台机组，相邻机组间距 800m，行间距 1000m。风场布局如图 1 所示，算例中计算了链形、单边环形、双边环形以及星形拓扑结构的可靠性指标和经济性指标，供风电场规划者参考。

本研究借鉴瑞典、芬兰、德国等欧洲主要国家的海上风电场运行经验，得到海上风场运行统计数据^[13]。截至目前，欧洲海上风电场平均水深 27.2m，平均离岸距离 43.3km。仿真计算时采用了文献 [5] 中的元件可靠性参数。得到风场主要元件的可靠性参数如表 1 和表 2 所示^[14-15]。

计及电气设备或元件多重故障，计算得到不同

拓扑结构的可靠性指标，如表 3 所示。

表 1 风力发电机组各部件的可靠性参数

部件名称	年故障率/次	平均修复时间/h
风机	1.500 0	490
低压接触器	0.066 7	240
中压断路器	0.025 0	72
中压隔离开关	0.025 0	240
箱式变压器	0.013 1	240

表 2 海上风电场电缆的可靠性参数

类型	年故障率/次	平均修复时间/h
海底电缆	0.015	1 440
风机间电缆	0.015	1 440
塔架电缆	0.015	240

表 3 不同拓扑结构的可靠性指标

可靠性指标	链形	单边环形	双边环形	星形
$E_{EENS}/(MWh/a)$	65 174.4	62 441.2	62 573.4	67 276.8
H_{AOH}/h	271.56	258.42	260.172	306.6
$Sa/\%$	96.9	97.05	97.03	96.5

从表 3 中，可以看出单边环形的年电量不足期望值最小，可靠性最高。双边环形次之，链形和星形的可靠性较低。这是由于单边环形和双边环形增加了冗余线路，提高了风场的等效可利用率。

采用分块枚举算法，可以计算得到不同拓扑结构下风场不同运行容量的概率，如图 6 所示。从图中可以看出，风场运行容量 90%~95% 以上的概率最高。

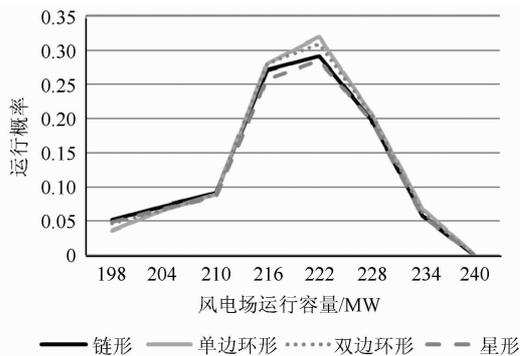


图 6 不同拓扑结构下风场运行容量概率

计算得到了考虑元件多重故障后不同拓扑结构的年电量不足期望值，并与不考虑元件多重故障计算得到的指标进行了比较，如图 7 所示。从图中可以看出，不考虑元件多重故障会造成可靠性偏高，因此无法准确合理地反映集电系统的可靠性水平，同时验证了本文所提方法的正确性与必要性。

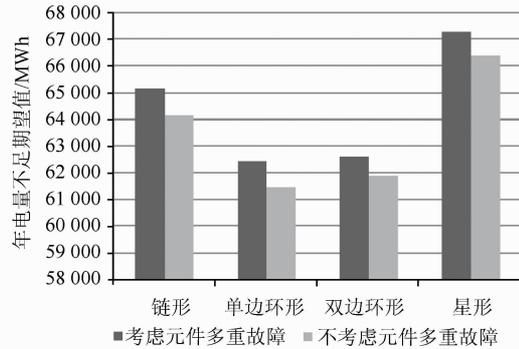


图 7 考虑和不考虑元件多重故障下的不同拓扑结构的可靠性指标

4.2 经济性评估

根据 ABB 提供的数据^[16]，风场集电系统主要设备造价为：海底电缆 0.5 万元/(mm²·km)，海底电缆敷设成本 100 万元/km，中压断路器 10 万元/台，可以计算得到不同拓扑方案的一次投资成本。假设风电上网电价为 0.6 元/kWh，计算得到不同拓扑方案的故障机会成本。将一次投资成本和故障机会成本相加，可以得到集电系统不同拓扑结构的总成本，如表 4 所示。从表中可以看出，由于星形拓扑结构的可靠性较低，所以故障机会成本较高，但由于其一次投资成本不高，所以总体经济性较好。双边环形结构总成本最高，约为单边环形结构的二倍，在增加冗余线路提高可靠性的同时，降低了经济性。在几种不同的拓扑结构中，链形拓扑结构的经济性最好，总成本最低。

表 4 不同拓扑结构的经济性指标

拓扑结构	电缆规格/mm ²	电缆长度/km	开关设备数量/个	一次投资成本/亿元	故障机会成本/亿元	总成本/亿元
链形	185	64	10	119.002 0	0.391 0	119.393 0
单边环形	185	128	90	238.074 0	0.374 6	238.448 6
双边环形	800	69	75	554.835 0	0.375 4	555.210 4
星形	185	72	90	133.956 0	0.403 7	134.359 7

5 结 论

本文考虑了风场集电系统电气元件的多重故障，基于分块枚举算法，计算得到不同拓扑结构的可靠性指标以及不同拓扑结构下风场运行容量概率模型。计及可靠性指标对经济性的影响，将风场总成本分为一次投资成本和故障机会成本，评估了不

同拓扑结构的经济性。

根据算例结果,可知单边环形的可靠性高于双边环形,两者均高于链形和星形。其中链形的可靠性又高于星形。考虑元件多重故障和不考虑元件多重故障两种情形下,计算得到不考虑元件多重故障的可靠性偏高,因此本文所提方法可以准确合理地评估不同拓扑结构的可靠性水平。综合考虑一次投资成本和故障机会成本,计算得到不同拓扑结构的经济性指标。其中双边环形结构总成本最高,约为单边环形结构的二倍,在增加冗余线路提高可靠性的同时,降低了经济性。在几种不同的拓扑结构中,链形拓扑结构的经济性最好,总成本最低。综上所述,建议风场规划时选用单边环形结构或是链形结构。

参 考 文 献

- [1] 许莉,李锋,彭洪兵. 中国海上风电发展与环境问题研究 [J]. 中国人口资源与环境, 2015, 25(5): 135-138.
- [2] 王锡凡,卫晓辉,宁联辉,王秀丽. 海上风电并网与输电方案比较 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [3] Franken B, Breder H, Dahlgren M, Nielsen E K. Collection Grid Topologies for Off-Shore Wind Parks. 18th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution CIRED 2005, Turin, 6 - 9 June 2005.
- [4] Huang Lingling and Fu Yang, Reliability Evaluation of the Offshore Wind Farm, presented at the Int. Conf. APPEEC, Chengdu, China, Mar. 28 - 31, 2010.
- [5] 谭任深,杨苹,贺鹏等. 考虑电气故障和开关配置方案的海上风电场集电系统可靠性及灵敏度研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(8): 2264-2270.
- [6] 郑小霞,张秦墉,符杨等. 面向海上风电机组运行维护的 Petri 网模型 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(6): 10-13.
- [7] 王建东,李国杰. 海上风电场内部电气系统布局经济性对比 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 99-103.
- [8] 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.
- [9] 靳静,艾芊,奚玲玲等. 海上风电场内部接线系统的研究 [J]. 华东电力, 2007, 35(10): 20-23.
- [10] Sannino A H, Breder E, Nielsen E K. Reliability of collection grids for large offshore wind parks [C]. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. KTH, Stockholm, Sweden. 2006: 1-6.
- [11] Liu Xu, Islam S. Reliability issues of offshore wind farm topology [C]. The 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems. Rincon: University of Puerto Rico-Mayagüez, 2008: 1-5.
- [12] Lemming J K, Morthorst P E, Clausen N E. Offshore wind power experiences, potential and key issues for deployment. IEA Workshop on Offshore Wind Power, Experiences, Potentials & Key Issues for Deployment, December 3, 2007, Berlin, Germany.
- [13] Ribrant 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.
- [14] Ubeda J R, Rodriguez G M. Reliability and production assessment of wind energy production connected to the electric network supply [J]. IEEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, 1999, 146(2): 17-19.
- [15] Rajesh K, Hu P. Wind power simulation model for reliability evaluation [C]. IEEE CCECE/CCGEI, Saakatoon, 2005.
- [16] AULT G W, GAIR S, MCDONALD J R. Electrical system designs for the proposed one Gigawatt offshore windfarm. Proceedings of 5th International Workshop on Largescale Integration of Wind Power and Transmission Networks for Offshore Wind Farms, April 7-8, 2005, Glasgow, UK.

收稿日期: 2016-12-08

作者简介:

吕小凡(1992—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行和电力系统可靠性评估, E-mail: lx921117@sjtu.edu.cn;

刁晓伟(1975—),男,工程师,主要研究方向为深远海风电场接入系统关键技术研究, E-mail: dxw_dlsy@163.com;

王靖(1975—),男,工程师,主要研究方向为深远海风电场接入系统关键技术研究, E-mail: 13817637285@139.com;

蒋传文(1967—),男,教授,博士生导师,通信作者,主要研究电力市场、配电网自动化、电力系统优化运行、水电优化调度等, E-mail: jiangcw@sjtu.edu.cn.

(责任编辑:林海文)