

· 电网技术 ·

海上风电场集群输电网可靠性分析

郑明¹, 李保宏², 陆莹¹, 刘天琪²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州, 510663;
2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都, 610065)

摘要: 建立由多个海上风电场构成的海上风电集群输电网成为未来发展的必然趋势, 不同的拓扑方案直接影响集群输电网的投资成本和输出电能的可靠性。为分析这种新型电力系统的可靠性, 文中根据海上风电集群输电网的特点, 利用所选择的可靠性评估方法进行可靠性量化分析, 为海上风电场的集群设计建议合适的拓扑结构。基于图论的原理, 对海上风电集群输电网的最小路集进行分析, 对不同集群输电网拓扑结构下的故障概率、频次及时间等进行计算, 最终得出各种拓扑结构方案的可靠性指标, 从而利用相应指标筛选出满足可靠性的拓扑方案。

关键词: 海上风电; 集群组网; 可靠性分析; 电网容量受阻概率; 受阻电量期望值

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)02-0049-06

0 引言

随着海上风电场的兴建和海洋经济的兴起, 在海上构建连接海上风电场电源、海上油气平台、海岛等负荷并与大陆联网的高压输电网成为一种发展方向^[1-3]。根据规划, 我国近海风电场有多个容量超过百万千瓦的大型区块^[4], 如广东省阳江地区海域规划有南鹏岛海上风电场(700 MW)和沙扒海上风电场(2000 MW)。但目前国内海上风电研究仍大多局限在单个海上风电场项目层面, 缺乏区域性海上输电系统的整体研究。在当前形势下, 统筹各海上风电场的送出, 规划海底电缆共用路由通道, 建立陆上汇集点集中送出风能, 已经成为现实而迫切的任务。

建立陆上汇集点, 并构建由多个海上风电场构成的集群输电网, 其关键技术之一是输电网的可靠性评估。不同电网拓扑结构直接影响集群输电网的可靠性运行指标^[5-6], 因此, 不同汇集方式下的可靠性指标计算必然是海上输电集群输电网构建的重点。而海上输电集群输电网是由多个风电场互连接并最终汇集到一点(路径汇集点, 并不需要建设海上实际的汇集变电站), 再经共用路由通道集中送出, 因此呈现出与传统电网完全不同的特点, 其可靠性计算尚无直接参考资料。仅有的海上风电可靠性分析也多集中于海上风电的集电系统^[6-7], 陆上风电场可靠性分析的研究成果也无法

应用于集群输电网的可靠性计算^[8-9], 因此必须选择合适的方法对各备选集群输电方案进行可靠性评估^[10-11]。

电力系统中的可靠性评估常采用2种基本方法: 蒙特卡洛法和解析法。蒙特卡洛法与解析法各有优缺点, 其中蒙特卡洛法通过大量随机样本进行可靠性计算^[12-13]。解析法通过已有模型数据对可靠性进行详细分析, 可精确得到各种状态下的可靠性指标, 但其不适用于规模较大的系统^[14-16]。

由于海上输电网主要考虑的是主网不同拓扑结构的可靠性, 因此可靠性计算仅考虑各风电场升压站及以上部分的结构, 不考虑升压站以下的集电系统相关元件。而且海上风电集群输电网在未来一段时间内规模均不会太大^[17-19], 故不建议应用蒙特卡洛法分析海上风电场集群输电网可靠性。本文考虑通过分析元件状态或元件状态组合对系统的影响最小来进行可靠性评估, 即采用基于解析法的最小割集法来分析海上风电集群输电网的可靠性。

1 元件可靠性评估模型

文中可靠性计算针对海上输电网主网, 因此仅考虑各升压站的构成元件, 包含有变压器、断路器、隔离开关、母线、海底电缆等多种电气元件^[20-21]。

1.1 断路器

断路器可靠性由以下4种状态组成: 正常(N)、计划检修(M)、扩大故障(包含拒动等状态, S)、故障修复(R), 其概率分别为 P_N, P_M, P_S, P_R , 则:

$$P_N + P_M + P_S + P_R = 1 \quad (1)$$

在稳态情况下, 断路器的马尔可夫状态方程为:

收稿日期: 2017-11-09; 修回日期: 2017-12-29

基金项目: 四川省科技厅科技计划项目(2016GZ0143); 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司科技项目(2016F006)

$$\begin{cases} -(\lambda_R + \lambda_M + \lambda_S) P_N + \mu_R P_R + \mu_M P_M + \mu_S P_S = 0 \\ \lambda_S P_N - \mu_S P_S = 0 \\ \lambda_R P_N - \mu_R P_R = 0 \\ \lambda_M P_N - \mu_M P_M = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： λ 为故障率； μ 为修复率。

将式(1)、(2)联立得：

$$\begin{cases} P_N = 1/(\lambda_R/\mu_R + \lambda_S/\mu_S + \lambda_M/\mu_M + 1) \\ P_S = \lambda_S/\mu_S P_N \\ P_M = \lambda_M/\mu_M P_N \\ P_R = \lambda_R/\mu_R P_N \end{cases} \quad (3)$$

1.2 母线和变压器

母线和变压器可靠性由 N、M、S 3 种状态组成。

且有：

$$\begin{cases} P_N = 1/(\lambda_S/\mu_S + \lambda_M/\mu_M + 1) \\ P_M = \lambda_M/\mu_M P_N \\ P_S = \lambda_S/\mu_S P_N \end{cases} \quad (4)$$

1.3 海底电缆

海底电缆可靠性由 N、S 2 种状态组成。且有：

$$\begin{cases} P_N = 1/(\lambda_S/\mu_S + \lambda_M/\mu_M + 1) \\ P_S = \lambda_S/\mu_S P_N \end{cases} \quad (5)$$

1.4 隔离开关、电压互感器和电流互感器

为简化计算，隔离开关、电压互感器和电流互感器等元件故障按可靠性逻辑合并到其端部的母线或断路器中。

2 海上风电场集群输电可靠性评估指标

文章在结合元件和电力系统的可靠性指标的基础上^[22]，选用如下可靠性指标：正常工作状态概率 P_S 、故障概率 P_F 、故障频次 f_F 、故障累积时间 T_F 、输电网容量受阻概率 P_{LOSP} 、输电网受阻电量期望值 E_{EENS} 。

(1) 正常工作状态概率 P_S ，也称为可用率或供电可靠率，表示满足一定可靠性准则的输电网在长期运行中，处于可靠工作状态的时间占总运行时间的比例。

(2) 故障概率 P_F ，在进行概率及频率计算时，假设各类故障都是相互独立的，各故障组合的概率可以直接由有关元件各种故障概率相乘求得。例如仅元件 i, j 发生扩大型与非扩大型故障时的概率为：

$$P_F = P_{Si} P_{Rj} \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq i, j}}^n P_{Ni} \quad (6)$$

(3) 故障频次 f_F ，为系统在某种故障状态下、单位时间里向其他状态转移的转移率。仍以上述停运的出线为例，可得该出线停运的频率为：

$$f_F = \sum_{i=1}^{k_1} P_{C_i} M_i \quad (7)$$

式中： M_i 为故障状态向其他状态的转移率。

(4) 故障累积时间 T_F ，表示由于故障不满足可靠性准则而导致各出线每次故障的停运时间。在求出 P_F 和 f_F 后，即可求得平均故障时间 T_F 。

$$T_F = P_F / f_F \quad (8)$$

(5) 输电网容量受阻概率 P_{LOSP} 。

$$P_{LOSP} = \sum_{i < k_N} P_i \quad (9)$$

式中： P_i 为变电所主接线各种输出容量的概率。

(6) 输电网受阻电量期望值 E_{EENS} 。

$$E_{EENS} = 8760 \sum_i (C_{\Sigma} - i \Delta x) P_i \quad (10)$$

式中： Δx 为步长； C_{Σ} 为电气主接线的总容量。

3 海上风电场集群输电网最小割集的求法

海上风电场输电网可靠性计算与传统可靠性计算类似，主要基于可靠性参数以及网络拓扑。实际上，海上风电场输电网的电力通道是包含主接线的输电网络结构图中的最小路，并以风电机组为源点开始，以汇集点为终点结束^[14,22]。

如图 1 所示的示例网络，其中 N1 为电源点，N4 为负荷点，用搜索法求取最小路集时首先从电源点 N1 开始搜索，具体过程如图 2 所示。

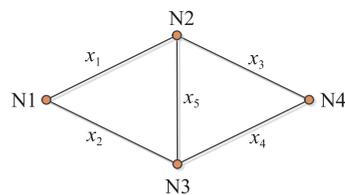


图 1 示例网络

Fig.1 Example network diagram

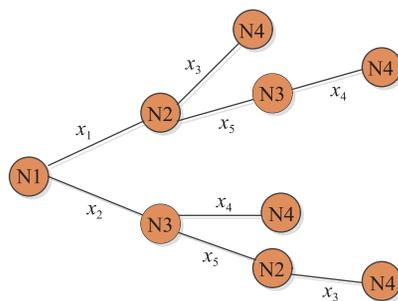


图 2 示例最小路

Fig.2 Example minimum path

则图1拓扑的最小路矩阵为:

$$\begin{bmatrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ L_1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ L_2 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ L_3 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ L_4 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵的行为每一条最小路 L , 列为每个支路, “1”表示该支路属于这条最小路, “0”表示不属于。

海上风电场集群输电网中的一阶割集对应一阶故障, 一阶故障指网络中有一个元件出现故障, 二阶故障类似。而网络的一阶最小割集为最小路矩阵中全为1的列元素。同理, 输电网中的二阶割集对应二阶故障, 且网络的二阶最小割集为最小路矩阵中两列相或之后全为1所对应的列元件。三阶最小割集类似。需要注意的是, 求解 n 阶最小割集时需要去掉 $n-1$ 阶最小割集^[23]。考虑到实际情况, 海上输电网发生三重及以上的故障概率极其微小, 故此不予考虑。

按照上面介绍的方法即可求出对应故障集合的最小割集, 如表1所示。求解最小割集的计算流程如图3所示。

表1 电气主接线元件故障组合

Tab.1 Fault combination of electrical main circuit components

| 重数 | 无S型故障 | 包括S型故障 |
|----|--------|------------|
| 一重 | R | S |
| 二重 | RR, MR | SS, MS, SR |

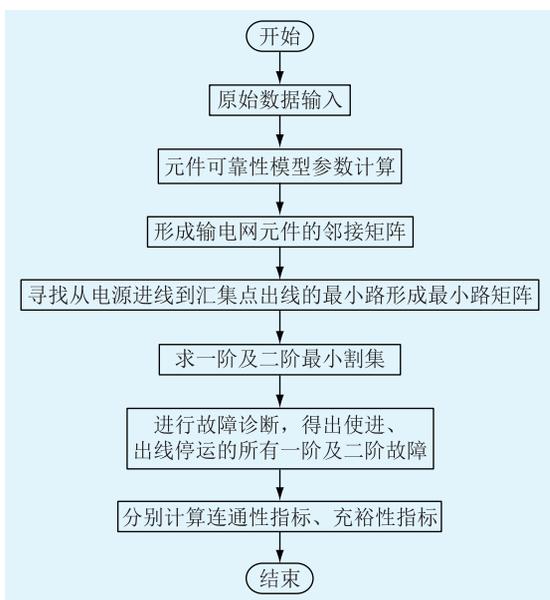


图3 基于邻接矩阵的最小割集算法流程

Fig.3 Flow chart of minimum cut set algorithm based on adjacency matrix

4 算例分析

图4为广东某海上风电场集群输电的备选方案之一, 通过一个汇集点对6个海上风电场升压站进行风能的汇合。根据前期经济性比较, 得出经济性排序较优的前10种不同汇集方案, 在表2中列出, 表2中编号1为汇集点, 其余为各风电场对应升压站。1→2表示升压站2直接连接到汇集点1, 1→5→7表示升压站7经升压站5分段母线再连接到汇集点1。本文将对这10种方案进行可靠性计算。

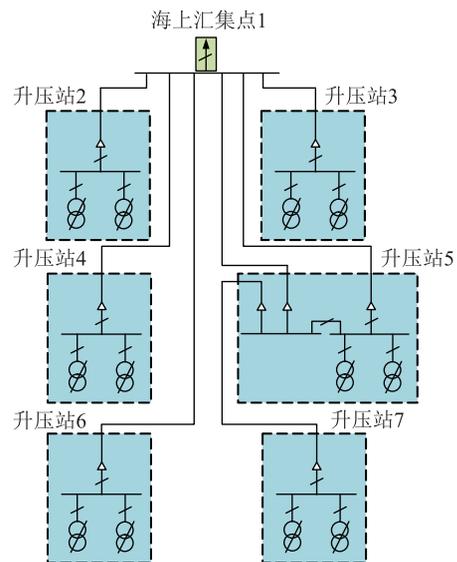


图4 海上风电场集群拓扑结构(方案2)

Fig.4 Offshore wind farm cluster topology(plan 2)

表2 10种集群输电网拓扑方案

Tab.2 Ten kinds of cluster transmission network topology

| 方案编号 | 方案拓扑 |
|------|----------------------------------|
| 方案一 | 1→2, 1→3, 1→4, 1→5, 1→6, 1→7 |
| 方案二 | 1→2, 1→3, 1→4, 1→5, 1→6, 1→5→7 |
| 方案三 | 1→2, 1→3, 1→4, 1→5, 1→4→6, 1→7 |
| 方案四 | 1→2, 1→3, 1→4, 1→5, 1→4→6, 1→5→7 |
| 方案五 | 1→2, 1→3, 1→4, 1→3→5, 1→6, 1→7 |
| 方案六 | 1→2, 1→3, 1→4, 1→5, 1→6, 1→3→7 |
| 方案七 | 1→2, 1→3, 1→4, 1→3→5, 1→4→6, 1→7 |
| 方案八 | 1→2, 1→3, 1→2→4, 1→5, 1→6, 1→7 |
| 方案九 | 1→2, 1→3, 1→2→4, 1→5, 1→6, 1→5→7 |
| 方案十 | 1→2, 1→3, 1→4, 1→5, 1→4→6, 1→3→7 |

图4的拓扑连接方式是表2中的方案二, 其各升压站初始内部元件按图5所示进行顺序编码: 1为变压器, 2为断路器, 3为母线, 4为断路器, 5为出线。对于新增分段母线的进出线间隔, 编码如下: 1为联络断路器, 2为断路器, 3为母线, 4为断路器, 5为出线。

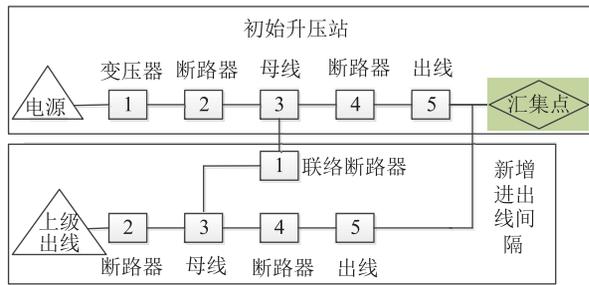


图5 升压站内部结构

Fig.5 Boost station internal structure

利用结构数组形成邻接矩阵,并按图3流程进行可靠性计算。图4中各风电场容量均为300 MW,对应的计算用设备可靠性指标如表3所示^[22]。

表3 相关设备可靠性指标

Tab.3 Reliability indexes of relative components

| 可靠性指标 | 风力机 | 断路器 | 变压器 |
|--|-------------|-------------|-------------|
| $\lambda_T / (\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$ | 1 | 0.080 | 0.344 |
| $t_T / (\text{h} \cdot \text{次}^{-1})$ | 146 | 60.75 | 480 |
| $\mu_T / (\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$ | 60 | 144.20 | 18.25 |
| P_N | 0.983 6 | 0.993 9 | 0.971 6 |
| P_R | 1.639 3E-02 | 5.445 8E-04 | — |
| P_S | — | 6.807 3E-06 | 1.831 3E-03 |
| P_M | — | 3.967 5E-03 | 2.661 8E-02 |

| 可靠性指标 | 母线 | 中压电缆 (1 km) | 高压电缆 (15 km) |
|--|-------------|-------------|--------------|
| $\lambda_T / (\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$ | 0.012 | 0.015 | 0.150 |
| $t_T / (\text{h} \cdot \text{次}^{-1})$ | 96 | 240 | 480 |
| $\mu_T / (\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$ | 91.25 | 36.50 | 18.25 |
| P_N | 0.995 1 | 0.999 6 | 0.991 8 |
| P_R | — | — | — |
| P_S | 1.308 6E-04 | 0.000 4 | 0.008 2 |
| P_M | 4.771 1E-03 | — | — |

以方案一为例,根据如表3所示的相关设备可靠性指标,按照上述流程,计算出风电场集群方案一的输电可靠性指标,包括故障概率,如表4所示;故障频次,如表5所示;故障持续时间,如表6所示;输电网容量受阻概率 P_{LOSP} 为6.18%受阻电量期望值 E_{EENS} 为192 092.37 MW·h。

同理,计算出10种集群方案的可靠性指标值,如表7所示。

目前海上风电场汇集送出尚无研究成果,需要满足的最低可靠性指标国内没有参考数值。考虑到实际运行的单个风电场已经有较为成熟的运行经验,项目考虑在以上原始可靠性参数的基础上,计算单个风电场的可靠性指标,并以此作为标准。对于有 N 个风电场的集中送出情况,其相应可靠性指标需不低于单个风电场可靠性指标的 N 倍。

表4 方案一的故障概率

Tab.4 Failure probability of plan 1

| 故障类型 | 故障概率/ $(\% \cdot \text{a}^{-1})$ | | |
|------|----------------------------------|--------|--------|
| | 1条出线故障 | 2条出线故障 | 3条出线故障 |
| R型 | 0.48 | 0.00 | 0.00 |
| S型 | 4.53 | 0.00 | 0.00 |
| RR型 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| RS型 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| SS型 | 0.00 | 0.12 | 0.00 |
| RM型 | 0.00 | 0.91 | 0.00 |
| MS型 | 0.00 | 0.10 | 0.00 |
| 分项合计 | 5.01 | 1.15 | 0.00 |
| 总计 | 6.16 | | |

表5 方案一的故障频次

Tab.5 Failure frequency of plan 1

| 故障类型 | 故障频次/ $(\text{次} \cdot \text{a}^{-1})$ | | |
|------|--|--------|--------|
| | 1条出线故障 | 2条出线故障 | 3条出线故障 |
| R型 | 0.18 | 0.00 | 0.00 |
| S型 | 1.40 | 0.00 | 0.00 |
| RR型 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| RS型 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| SS型 | 0.00 | 0.07 | 0.00 |
| RM型 | 0.00 | 0.71 | 0.00 |
| MS型 | 0.00 | 0.08 | 0.00 |
| 分项合计 | 1.57 | 0.88 | 0.00 |
| 总计 | 2.46 | | |

表6 方案一的故障累计时间

Tab.6 Failure accumulated time of plan 1

| 故障类型 | 故障累计时间/ $(\text{h} \cdot \text{a}^{-1})$ | | |
|------|--|--------|--------|
| | 1条出线故障 | 2条出线故障 | 3条出线故障 |
| R型 | 42.41 | 0.00 | 0.00 |
| S型 | 396.60 | 0.00 | 0.00 |
| RR型 | 0.00 | 0.12 | 0.00 |
| RS型 | 0.00 | 2.17 | 0.00 |
| SS型 | 0.00 | 10.16 | 0.00 |
| RM型 | 0.00 | 79.68 | 0.00 |
| MS型 | 0.00 | 8.52 | 0.00 |
| 分项合计 | 439.00 | 100.65 | 0.00 |
| 总计 | 539.66 | | |

年受阻电能 E_{EENS} 指标与风电场容量大小有关,项目考虑以电网输出容量受阻概率 P_{LOSP} 指标对可靠性进行分析。对于单个风电场,计算出电网输出容量受阻概率 $P_{\text{LOSP}} = 1.03\%$ 。本项目有6个风电场,因此其 P_{LOSP} 指标不能低于 $6 \times 1.03\% = 6.18\%$,所以表7方案均能满足可靠性指标。按照经济排序可得出方案1为优选方案。

表7 10种集群方案指标计算结果
Tab.7 Ten kinds of cluster program index calculation results

| 方案编号 | $E_{EENS} / \text{MW} \cdot \text{h}$ | $P_{LOSP} / \%$ |
|------|---------------------------------------|-----------------|
| 方案一 | 192 092.37 | 6.18 |
| 方案二 | 165 264.90 | 5.408 |
| 方案三 | 165 264.90 | 5.408 |
| 方案四 | 141 664.38 | 4.724 7 |
| 方案五 | 165 264.90 | 5.408 |
| 方案六 | 165 264.90 | 5.408 |
| 方案七 | 141 664.38 | 4.724 7 |
| 方案八 | 165 264.90 | 5.408 |
| 方案九 | 141 664.38 | 4.724 7 |
| 方案十 | 141 664.38 | 4.724 7 |

5 结语

文章针对未来极有可能出现的由多个风电场互相连接并最终汇集到一点的海上输电集群输电电网,进行可靠性分析计算。集群输电电网呈现出与传统电网不同的特点,采用基于邻接矩阵的最小割集法对其可靠性进行了计算,求得电网故障状态集合,最后利用这些元件的可靠性参数计算集群输电电网的可靠性指标。计算结果表明该方法可对不同拓扑的集群方案的可靠性进行有效评估。该研究为多个海上风电场构成的集群输电电网的评价提供了方法。

参考文献:

- [1] 王锡凡,卫晓辉,宁联辉,等.海上风电并网与输送方案比较[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5459-5466.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [2] 王秀丽,张小亮,宁联辉,等.分频输电在海上风电并网应用中的前景和挑战[J].电力工程技术,2017,36(1):15-19.
WANG Xiuli, ZHANG Xiaoliang, NING Lianhui, et al. Application prospects and challenges of fractional frequency transmission system in offshore wind power integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 15-19.
- [3] 刘林,葛旭波,张义斌,等.我国海上风电发展现状及分析[J].能源技术经济,2012,24(3):66-72.
LIU Lin, GE Xubo, ZHANG Yibing, et al. Analysis on status of China's offshore wind power development[J]. Energy Technology and Economics, 2012, 24(3): 66-72.
- [4] 广东省海上风电场工程规划[R].中国能建广东院,2012.
Guangdong offshore wind farm project planning[R]. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., 2012.
- [5] 陈楠.海上风电场升压站电气设计及其可靠性评估[D].

广州:华南理工大学,2011.

CHEN Nan. Electric design and reliability assessment of offshore wind farm substation[D]. Guangzhou: Institutes of Technology of South China, 2011.

- [6] 王薪苹,李群,刘建坤,等.计及UPFC的220kV分区电网运行可靠性研究[J].电力工程技术,2017,36(1):39-42.
WANG Xinping, LI Qun, LIU Jiankun, et al. Operating reliability research of 220 kV divisional power grid considering UPFC[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1): 39-42.
- [7] 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.
- [8] 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.
TAN Renshen, YANG Ping, HE Peng, et al. Analysis on reliability and sensitivity of collection system of offshore wind farms considering electrical faults and switchgear configurations[J]. Power System Technology, 2013, 37(8): 2264-2270.
- [9] 张硕,李庚银,周明.含风电场的发输电系统可靠性评估[J].中国电机工程学报,2010,30(7):8-14.
ZHANG Shuo, LI Gengyin, ZHOU Ming. Reliability assessment of generation and transmission systems integrated with wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 8-14.
- [10] 王碧阳,王锡凡,王秀丽,等.考虑集电系统的风电场可靠性评估[J].中国电机工程学报,2015,35(9):2105-2111.
WANG Biyang, WANG Xifan, WANG Xiuli, et al. Reliability evaluation of wind plant considering collector grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2105-2111.
- [11] 石文辉,别朝红,王锡凡.大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法[J].中国电机工程学报,2008,28(4):9-15.
SHI Wenhui, BIE Zhaohong, WANG Xifan. Applications of Markov chain Monte Carlo in large-scale system reliability evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 9-15.
- [12] 别朝红,王锡凡.蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J].电力系统自动化,1997,21(6):68-75.
BIE Zhaohong, WANG Xifan. The application of Monte Carlo method to reliability evaluation of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(6): 68-75.
- [13] 张小军.基于蒙特卡洛方法的大规模风电并网可靠性评估[D].芜湖:安徽工程大学,2016.
ZHANG Xiaojun. Reliability evaluation of large scale wind power grid connection based on Monte Carlo method[D]. Wuhu: Anhui Engineering University, 2016.
- [14] 秦波.发电厂电气主接线可靠性研究与实践[D].南宁:广西大学,2002.
QIN Bo. Research and practice on reliability evaluation of

- power station bus systems arrangement [D]. Nanning: Guangxi University, 2002.
- [15] 黎红梅, 苑 舜. 变电所电气主接线可靠性分析方法的研
究[J]. 东北电力技术, 2008, 29(1): 15-17.
- LI Hongmei, YUAN Shun. A study on analyzing method of
main electrical wiring reliability [J]. Northeast Electric Power
Technology, 2008, 29(1): 15-17.
- [16] 别朝红, 王锡凡. 抽水蓄能电站主接线的可靠性综合评估
[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 9-14.
- BIE Zhaohong, WANG Xifan. Integrated reliability evaluation
of bus system arrangement for the pumped storage power
stations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30
(9): 9-14.
- [17] 姜 文, 严 正, 杨建林. 基于解析法的风电场可靠性模型
[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 79-83.
- JIANG Wen, YAN Zheng, YANG Jianlin. Wind farm reliabi-
lity model based on analytical method [J]. Electric Power Au-
tomation Equipment, 2010, 30(10): 79-83.
- [18] 吴 昊, 张 焰, 刘 波. 考虑风电场影响的发输电系统可
靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 36-42.
- WU Hao, ZHANG Yan, LIU Bo. Reliability assessment of
generation and transmission systems considering wind farm
effects [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39
(4): 36-42.
- [19] 张 硕, 李庚银, 周 明. 含风电场的发输电系统可靠性评
估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 8-14.
- ZHANG Shuo, LI Gengyin, ZHOU Ming. Reliability assess-
ment of generation and transmission systems integrated with
wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 8
-14.
- [20] 王巍麟. 计及风电场相关性的电力系统可靠性评估[D]. 北
京: 华北电力大学, 2014.
- WANG Weiling. Reliability assessment of power system con-
sidering wind farm correlation [D]. Beijing: North China
Electric Power University, 2014.
- [21] 黎红梅. 变电所电气主接线可靠性评估[D]. 沈阳: 沈阳工
业大学, 2008.
- LI Hongmei. Reliability assessment of main electrical connec-
tion for substation [D]. Shenyang: Shenyang University of
Technology, 2008.
- [22] 郭永基. 电力系统及电力设备的可靠性[J]. 电力系统自动
化, 2001, 25(17): 53-56.
- GUO Yongji. Reliability assessment of power systems and
power equipment [J]. Automation of Electric Power Systems,
2001, 25(17): 53-56.
- [23] 丁宣文. 变电站电气主接线的可靠性与经济性评估[D].
成都: 西南交通大学, 2011.
- DING Xuanwen. Reliability and economic evaluation of main
electrical connection of substation [D]. Chengdu: South West
Jiao Tong University, 2011.

作者简介:



郑 明

郑 明(1982—), 男, 硕士, 高级工程师,
从事火电厂、核电厂和新能源的电气一次设计
工作(E-mail: zhengming@gedi.com.cn);

李保宏(1986—), 男, 博士研究生, 研究
方向为新能源并网、高压直流输电、电力系统
稳定与控制(E-mail: scu_lbh@163.com);

陆 莹(1981—), 女, 硕士, 高级工程师,
从事火电厂、核电厂和新能源的电气一次设计
工作(E-mail: luying@gedi.com.cn)。

Reliability Analysis of Offshore Wind Farm Transmission Network Cluster

ZHENG Ming¹, LI Baohong², LU Ying¹, LIU Tianqi²

(1. Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Energy Engineering Group, Guangzhou 510663, China;

2. School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The establishment of offshore wind power transmission network composed by a number of offshore wind farms becomes an inevitable trend in future. Different topologies of the schemes would directly affect the investment cost of network and the reliability of the system's output power. In order to assess this new power system's reliability, the paper analyzes the reliability of offshore wind power transmission network quantitatively based on the selected reliability assessment method according to the characteristics of such new form power network. Different topologies' failure frequency and failure time are calculated based on Graph Theory, which is achieved through analysis of the network's minimal path sets. The reliability indexes of different topologies are calculated at the end and the qualified scheme are selected.

Key words: offshore wind power; cluster networking; reliability analysis; probability of loss of system power; expected energy not supplied

(编辑 江 林)