

引用格式: 杜 谦, 张金龙, 陈武晖. 考虑集电系统元件故障的风电场可靠性评估[J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(4): 73-79.

DU Qian, ZHANG Jinlong, CHEN Wuhui. Reliability Evaluation of Wind Farm Considering Component Faults in Collecting System[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(4): 73-79.

考虑集电系统元件故障的风电场可靠性评估

杜 谦 张金龙 陈武晖

(太原理工大学电气与动力工程学院 太原 030024)

摘要 鉴于规划阶段对风电场运行可靠性评估的重要意义,以风电场的有功出力为研究对象,在分析风电场集电系统拓扑结构及元件可靠性模型的基础上,考虑了风速变化对系统可靠性指标的影响,设计了一种序贯蒙特卡洛法与深度优先路径搜索法相结合的风电场可靠性评估流程。通过算例分析比较了不同拓扑结构下风电场的可靠性指标,结果表明,相较于放射形拓扑,采用单边环形拓扑与双边环形拓扑结构的风电场等效停运率分别降低7.92%、7.79%,单边环形拓扑结构的可靠性最高,所建可靠性模型和评估方法有效可靠。

关键词 风电场; 集电系统; 多重故障; 序贯蒙特卡洛法; 可靠性评估

文献标志码 B

文章编号 :1008-6218(2024)04-0073-07

中图分类号 :TM712

doi:10.19929/j.cnki.nmgdljs.2024.0056

Reliability Evaluation of Wind Farm Considering Component Faults in Collecting System

DU Qian, ZHANG Jinlong, CHEN Wuhui

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract In view of the significance of the reliability evaluation of wind farm operation during the planning phase, taking the active power output of wind farms as the object study, based on the analysis of the topology structure and component reliability model of wind farm collection systems, considering the influence of wind speed changes on system reliability indicators, this paper designs a wind farm reliability evaluation process combining sequential Monte Carlo method and depth first path search method. Afterwards, the reliability indicators of wind farms under different topology structures are compared and analyzed through examples. The results show that comparing with the radial topology, the equivalent outage rates of wind farms using single-sided ring topology and double-sided ring topology are reduced by 7.92% and 7.79%, respectively. The reliability of single-sided ring topology is the highest, and the established reliability model and evaluation method are effective and reliable.

Key words wind farms; power collecting system; multiple failures; Sequential Monte Carlo method; reliability assessment

0 引言

自2020年我国在第七十五届联合国大会上提出“碳达峰 碳中和”概念以来,全国各行各业不断落实绿色发展任务,电力系统转型的步伐加速,构建以新能源为主体的新型电力系统是应对战略目标的重要举措。我国西部的沙漠、戈壁、荒漠地区

拥有优质的太阳能和风能资源,建设大型风电基地是对该区域新能源利用的一大趋势^[1]。与此同时,沙戈荒地区自然环境较为恶劣,风电系统运行的可靠性问题较为突出。

在风电场可靠性评估过程中,需要考虑诸多因素,如集电系统拓扑结构、风机停运状态、系统出力受风速变化过程和元件工作状态的耦合影响等。

其中,集电系统可靠性主要是针对不同拓扑结构及开关配置,评估元件故障对风电场有功输出的影响。文献[2]提出一种基于保护区和等值风机模型的集电系统可靠性评估方法,有效减少系统故障状态次数。文献[3]对采用环形拓扑结构的集电系统开关配置方案进行分析,设计出最优配置方案。文献[4]考虑了集电系统元件的多重故障并计及系统经济性,采用分块枚举法对不同拓扑结构可靠性进行评估,得到风电场运行容量概率模型。对于风电机组的可靠性评估,需要考虑出力模型和风机故障模型的共同作用。文献[5]综合多状态风机出力模型和通用生成函数方法评估风电场的有功输出,结果表明考虑集电系统故障,发电可用率显著降低。文献[6]对故障停运表和无故障风机出力分布进行卷积,得到风电场输出功率的概率和频率分布。

以上文献对风电场可靠性模型与评估方法进行了研究,但仍存在以下几方面问题。首先,考虑集电系统拓扑结构的情况下,集电系统元件间串并联关系复杂,若拓扑存在环形结构,采用增量频率的传统方法难以直接应用,需进行一些简化、近似处理;其次,模拟法中,基于非序贯蒙特卡洛模拟法的风电场可靠性评估模型,不能给出与时间相关的评价指标;最后,现有研究大多集中在评估风电场对输、配电系统运行可靠性的影响,侧重于为负荷提供电力的能力,对风电场自身可靠性的针对性研究较少。

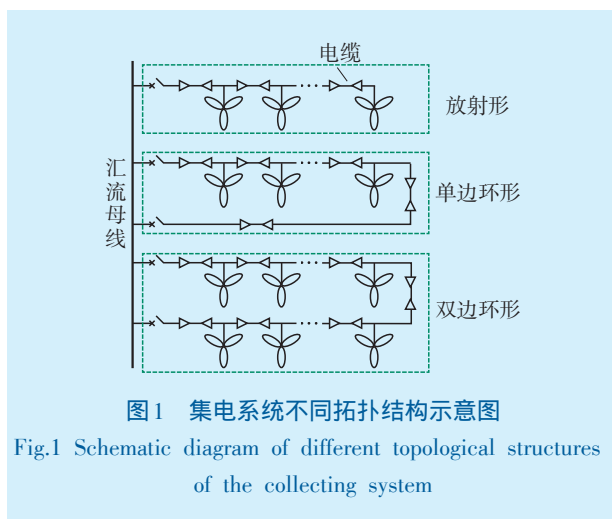
本文在分析风电场集电系统拓扑结构的基础上,综合考虑了风速随机性及集电系统元件故障对风电场建模的影响,提出了风电场可靠性评估模型与方法,并参考现有风电场运行数据,以某风电场为算例对所提方法的有效性进行了验证。

1 风电场集电系统

风电场主要由风电机组、集电系统及升压站组成。集电系统是指风电机组与升压站之间的电气连接部分,用于将风电机组电能汇集并输送至升压站。集电系统作为风电汇集与传输的关键环节,需在风电场规划期间对集电系统不同拓扑结构及开关配置进行可靠性评估。

1.1 拓扑结构

集电系统元件主要包括断路器、集电电缆、汇流母线等。常见的集电系统拓扑结构有放射形、单边环形、双边环形等接线形式^[7],如图1所示。



(1) 放射形结构是最常用的一种风电场集电系统电气连接方式,多台风机共同连接在同一条集电电缆上,多条集电电缆共同连接至汇流母线。放射形结构简单,建造成本低,但可靠性不高,当某一电气元件故障后,处于该电气元件与集电电缆末端的风机将全部停运。综合考虑到建造与运行维护成本,放射形结构被广泛使用。

(2) 单边环形结构增加了一回输电线路,当单个环形结构内存在电气元件故障时,可以将开关切换到正常电缆端,继续向汇流母线输送电能。单边环形的可靠性略高于放射形,但是建造成本也略高于放射形。

(3) 双边环形结构是在单边环形的备用电缆上安装了相同数量的风电机组。当一条集电电缆发生故障时,将开关切换到正常电缆端,使得拓扑继续向汇流母线输送电能。双边环形结构可以安装更多的风电机组,对集电电缆传输容量的要求更高。

1.2 开关配置

集电系统中断路器可以在风电机组发生故障或异常情况时进行故障隔离,降低风电场停运损失,常见的集电系统开关配置策略可分为传统配置和完全配置^[8]。以双边环形拓扑结构为例,其开关配置方案如图2所示。

在开关传统配置方案中,只在汇流母线处及部分风电机组配置了开关保护,其余风电机组只通过集电电缆进行连接;在开关完全配置方案中,每台风电机组均配置两个开关。当集电电缆发生故障,保护开关将切除故障电缆,保证在单个电缆故障情况下系统电力输送不受影响,提高整个拓扑结构的可靠性。

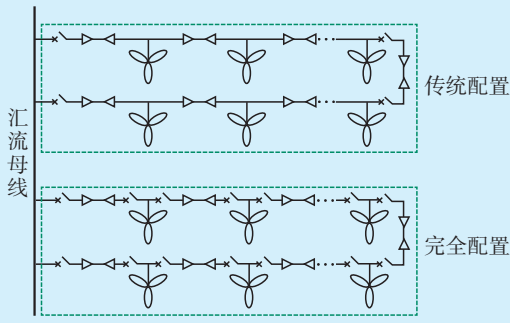


图2 双边环形拓扑的开关配置方案

Fig.2 Switch configuration scheme of two-sided ring topology

2 风电场可靠性模型

风电场的有功出力主要受集电系统和风电机组运行状态的双重影响。集电系统可靠性可以根据不同拓扑结构及元件故障状态进行评估,风电机组可靠性则需要考虑风资源和风机故障模型的共同作用进行评估。

2.1 风速模型

时序风速模型用来描述风速的时序动态变化过程,是风电场可靠性评估的重要基础。对于某个特定风电场,风速的时间序列可用自回归移动平均模型(Auto-Regressive Moving Average Model, AR-MA)表示^[9],如式(1)所示。

$$y_t = \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \cdots + \phi_n y_{t-n} + \alpha_t - \theta_1 \alpha_{t-1} - \theta_2 \alpha_{t-2} - \cdots - \theta_m \alpha_{t-m}, \quad (1)$$

式中: y_t 为 t 时刻风速时间序列值; $\phi_i (i=1,2,3,\cdots,n)$ 和 $\theta_i (i=1,2,3,\cdots,m)$ 分别为模型的自回归和移动值参数,其中 m 和 n 分别表示 ARMA 模型中的自回归 (AR) 部分和滑动平均 (MA) 部分的阶数; α_t 为服从 $N(0, \sigma^2)$ 分布的白噪声, σ^2 为风速测量值的标准差。

2.2 风电机组出力模型

风电机组输出功率与风速的关系曲线称为风电机组功率特性曲线,一种典型的风电机组功率特性曲线见图3。特性曲线采用分段函数来表示:

$$P_i = \begin{cases} 0 & 0 \leq v < V_{ci} \text{ 或 } V_{co} \leq v \\ (A + Bv + Cv^2)P_r & V_{ci} \leq v < V_r \\ P_r & V_r \leq v < V_{co} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: P_i 为风电机组在风速 v 时的输出功率; V_{ci} 、 V_r 、 V_{co} 分别为风电机组的切入风速、额定风速、切出

风速; P_r 为风电机组的额定功率; A 、 B 、 C 为风电机组输出功率的计算系数。

系数 A 、 B 、 C 由式(3)计算:

$$\begin{cases} A = \frac{1}{(V_r - V_{ci})^2} \left[V_{ci}(V_r + V_{ci}) - 4(V_r \times V_{ci}) \left(\frac{V_r + V_{ci}}{2V_r} \right)^3 \right] \\ B = \frac{1}{(V_r - V_{ci})^2} \left[4(V_r + V_{ci}) \left(\frac{V_r + V_{ci}}{2V_r} \right)^3 - (3V_{ci} + V_r) \right] \\ C = \frac{1}{(V_r - V_{ci})^2} \left[2 - 4 \left(\frac{V_r + V_{ci}}{2V_r} \right)^3 \right] \end{cases} \quad (3)$$

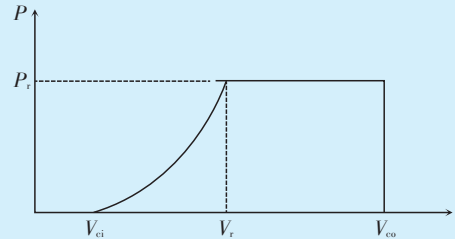
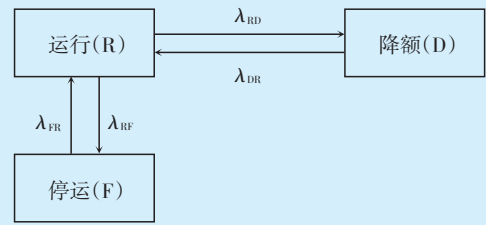


图3 风电机组输出功率特性曲线

Fig.3 Output power characteristic curve of wind turbine

2.3 风电机组可靠性模型

包含运行、降额和停运状态的风电机组三状态模型如图4所示。



图中: λ —状态之间的转移率,次/年,下标表示状态转移方向。

图4 风电机组三状态模型

Fig.4 Three-state model of wind turbine unit

通常情况下,认为风电机组的运行、停运和降额状态是随机事件,根据马尔科夫过程理论,采用状态空间法可得风电机组各状态概率为:

$$\begin{cases} P_R = 1 / (1 + \lambda_{RD} / \lambda_{DR} + \lambda_{RF} / \lambda_{FR}) \\ P_F = \lambda_{RF} P_R / \lambda_{FR} \\ P_D = \lambda_{RD} P_R / \lambda_{DR} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: P_R 、 P_D 和 P_F 分别表示运行、降额和停运状态出现的概率。

在区间 $[0, 1]$ 内抽取均匀分布的随机数 U , 由大数定律得风电机组在每次抽样时的工作状态 S , 如式(5)所示:

$$S = \begin{cases} 0(\text{运行}) & P_D + P_F < U \leq 1 \\ 1(\text{停运}) & P_D < U \leq P_D + P_F \\ 2(\text{降额}) & 0 \leq U \leq P_D \end{cases} \quad (5)$$

风电机组停留在每个状态的平均持续时间是离开该状态转移率总和的倒数^[10],各状态平均持续时间为:

$$\begin{cases} T_R = 1/(\lambda_{DR} + \lambda_{RF}) \\ T_D = 1/\lambda_{DR} \\ T_F = 1/\lambda_{FR} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: T_R 、 T_D 和 T_F 分别表示运行、降额和停运状态的持续时间。

3 风电场可靠性评估

3.1 可靠性评估指标

与传统电力系统侧重于为负荷提供电力的可靠性评估相比,风电系统并网分析中并未有明确意义的负荷,可靠性分析更侧重于研究为主网提供电力的能力^[11]。为定量分析风电场出力情况,使用以下指标进行评价。

3.1.1 EENS

电量不足期望值(Expected Energy Not Supplied, EENS)是计算风电场电量损失的一个重要指标(公式中记作 E_{EENS}),指在规定时间内风电场因元件故障而引起的电量损失的期望值,即装机容量对应的电量除去输送电量。一年内的 E_{EENS} 计算公式为:

$$E_{EENS} = \sum_{i \in S} P_i C_i T, \quad (7)$$

式中: S 为所有发生电量损失的系统状态集合; P_i 为系统状态 i 的概率; C_i 为系统状态 i 下损失的电量; T 为考虑的时间长度, $T=8760$ h。

3.1.2 等效停运率 Q_n 与等效停运时间 T_{EO}

一座由 n 台风电机组构成的风电场,可以将 n 台风电机组看作一台等效容量为 nP_N 的机组^[8]。当风电机组或集电系统故障导致风电场出力不完全时,可认为等效容量为 nP_N 的机组处于部分停运状态。根据期望受阻电力不变的原则,求得等效停运率 Q_n 与等效停运时间 T_{EO} 分别为:

$$Q_n = 1 - \frac{E_x}{nP_N}, \quad (8)$$

$$T_{EO} = 8760 \times Q_n, \quad (9)$$

式中: E_x 为风电机组的等效输出功率。

3.2 可靠性评估方法

3.2.1 序贯蒙特卡洛模拟法

序贯蒙特卡洛模拟法是指假定在一个抽样周期内系统状态不变,按照时序建立系统状态转移循环过程,进而获得一个具有时间序列的系统状态^[12]。由于风电场元件故障的随机性和风速随时间连续变化的特点,本文采用序贯蒙特卡洛模拟法对风电机组和集电系统元件的运行状态进行抽样,模拟风电场实际运行中的状态。

在抽样过程中,对于风电机组等多状态模型,首先根据模型处于不同状态的概率抽取元件状态,然后根据当前状态的平均持续时间抽取实际运行时间;对于集电电缆、断路器等两状态元件则假定元件初始为正常运行状态,只需对元件处于当前状态持续时间进行抽样。若元件状态持续时间服从指数分布,则状态持续时间抽样值 D_i 为:

$$D_i = -\frac{1}{\sum \lambda_{ij}} \ln R_i, \quad (10)$$

式中: λ_{ij} 为从状态 i 至状态 j 的转移率; R_i 是 $[0,1]$ 区间内均匀分布的随机数。

3.2.2 深度优先路径搜索算法

风电场可靠性评估的一个重要环节是:根据判别准则,鉴别在不同设备和元件故障情况下,风电机组与汇流母线之间是否存在电气通路^[13-14]。对于规模较大的风电场,集电系统故障状态次数多,结构复杂,需采用高效的路径搜索算法。

深度优先搜索是一种基于图论的搜索算法,可以判断一个图是否连通^[15]。该算法是从起始节点开始,沿着路径一直向下搜索直到无法继续为止,然后回溯到上一个节点,继续探索未搜索的路径,直到找到目标节点或遍历完整个图。这里使用深度优先搜索算法确定设备故障范围,实现有效供电路径的搜索。

3.2.3 风电场可靠性评估流程

考虑集电系统元件故障的风电场可靠性评估流程图如图5所示,评估的基本步骤如下。

(1) 步骤1:输入风电场原始数据,主要包括集电系统拓扑结构及主要元件可靠性参数、风电机组各状态转移率、风速分布的参数、最大仿真时间等。

(2) 步骤2:在仿真时间内,基于 ARMA 模型生成风速的时间序列,运用序贯蒙特卡洛抽样方法得到集电系统各元件和风电机组的状态转移时间序列。

(3) 步骤3:读取 t 时刻集电系统各元件和风电机组的状态,运用基于深度优先遍历的路径搜索算法对风电场进行连通性分析,得到汇流母线的所有供电路径。

(4) 步骤4:根据 t 时刻风速值及风电场连通性分析结果,结合风电机功率特性曲线计算出当前风电场的有功出力。

(5) 步骤5:检查仿真时间,若达到设定值,则计算可靠性评估指标,结束仿真;若未达到设定值,则转入步骤3。

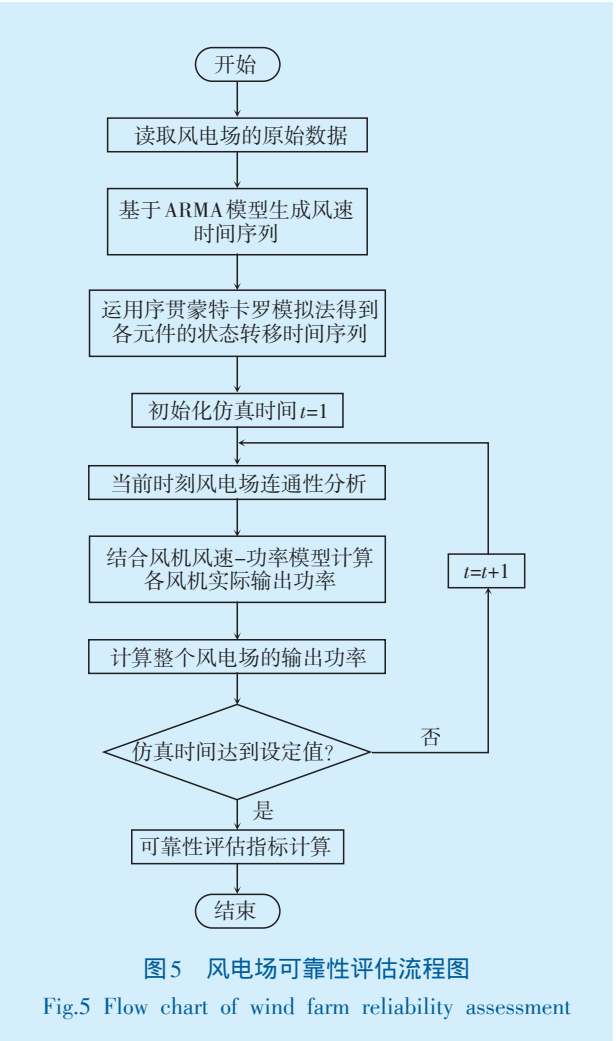


图5 风电场可靠性评估流程图

Fig.5 Flow chart of wind farm reliability assessment

4 算例分析

本文以某个规则风电场为例对其进行可靠性评估,风电场风电机组布局如图6所示。该风电场共有48台5 MW风机,其切入风速、额定风速和切出风速分别为3 m/s、12 m/s、25 m/s,风机降额系数为0.8。风电场主要元件的可靠性参数分别如表1、表2所示。

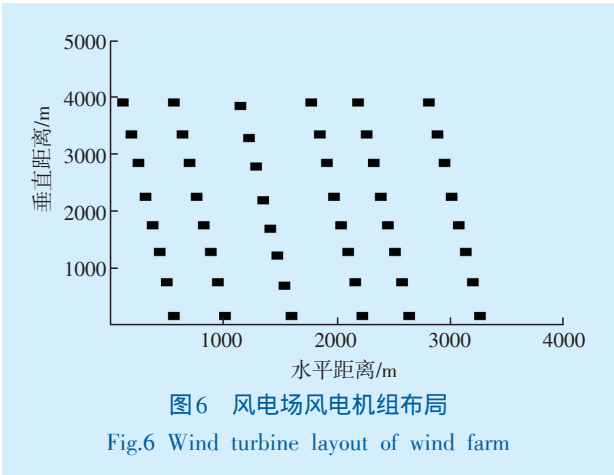


图6 风电场风电机组布局

Fig.6 Wind turbine layout of wind farm

表1 风电机组各状态之间的转移率

Tab.1 Transfer rate between various states of wind turbines

工作状态	转移状态		
	运行	故障	降额
运行	0	7.96	5.84
故障	58.40	0	0
降额	43.80	0	0

表2 元件可靠性参数

Tab.2 Component reliability parameters

元件名称	故障率/(次·年 ⁻¹)	故障修复时间/h
断路器	0.032	80
集电电缆	0.010	130
汇流母线	0.598	80

4.1 不同拓扑结构下风电场可靠性分析

风机出力大小受风资源和风机可靠性两个主要因素的影响。当风资源可用且风机无故障时,风机才能正常运行。在只考虑风速随机性及风电机组故障的情形下,对风电机组状态抽样80 000次,处于正常运行状态的风电机组台数概率分布如图7所示。

从图7可以看出,同一时刻下,算例中的风电场处于正常运行状态的风电机组台数集中在46—48台,概率为81.43%。其中,正常运行状态的风电机组台数为47台,概率最大,为34.75%。因风资源不可用,风机处于锁止状态所导致的风电机组全部停运的极端停运事件概率为1.20%,这是影响风电场可靠性的重要因素。

根据集电系统拓扑结构从以下四种情形分析对比可靠性指标,各情形具体情况如下。

(1) 情形1:不考虑集电系统故障,只考虑风速随机性及风电机组故障;

(2) 情形2:采用放射形拓扑结构,每列8台风

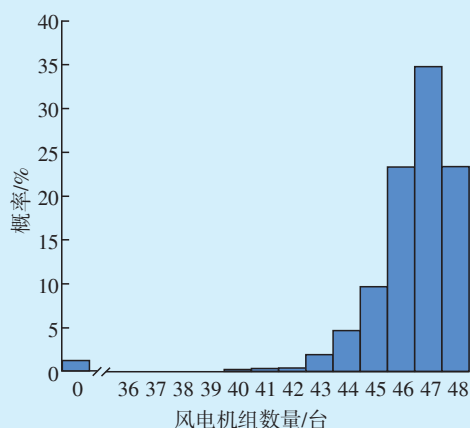


图7 正常运行风电机组台数概率分布

Fig.7 Probability distribution of the number of wind turbines in normal operation

机为一组,共分为6组;

(3) 情形3:采用单边环形拓扑结构,每列8台风机为一组,共分为6组;

(4) 情形4:采用双边环形拓扑结构,每两列16台风机为一组,共分为3组。

4.2 可靠性分析结果

四种情形的可靠性指标计算结果如表3所示。

表3 可靠性指标计算结果¹⁾

Tab.3 Reliability index calculation results

情形	馈线故障率/(次·年 ⁻¹)	等效停运率 Q_n	等效停运时间 T_{EoS}/h	出力期望值 E_{out}/MW	电量不足期望值 E_{EENS}/MWh
1	0.01	0.144 3	1 264.31	205.36	302 602.29
	0.2	0.138 1	1 209.94	206.85	289 589.62
2	0.01	0.149 7	1 311.30	204.07	313 850.48
	0.2	0.151 5	1 327.24	203.63	317 665.23
3	0.01	0.149 3	1 308.65	204.15	313 215.08
	0.2	0.139 5	1 221.86	206.52	292 441.95
4	0.01	0.149 3	1 308.65	204.15	313 215.08
	0.2	0.139 7	1 223.73	206.47	292 890.75

注:1) 除馈线以外的其他元件参数不变。

根据表3数据分析,可以得出以下结论。

(1) 在馈线低故障率条件下,由情形2至情形4对比可知,三种拓扑结构中,采用放射形拓扑结构的等效停运率最高,为14.97%。相较于放射形拓扑结构,采用单边环形拓扑与双边环形拓扑结构可靠性指标评价结果无明显差异,等效停运率均为14.93%,优于放射形拓扑结构。在馈线低故障率条件下,单边环形结构的可靠性未必优于双边环形结构,且投资成本较高。

(2) 在馈线高故障率条件下,由情形2至情形4对比可知,相较于放射形拓扑结构,采用单边环形

拓扑与双边环形拓扑结构的风电场等效停运率分别降低7.92%、7.79%,单边环形拓扑结构的可靠性最高。这是由于单边环形和双边环形增加了冗余线路,提高了风电场的等效可利用率。随着馈线故障率的升高,单边环形拓扑结构在可靠性方面的优势逐渐显现。

(3) 在馈线高故障率条件下,由情形1至情形4对比可知,采用放射形、单边环形、双边环形拓扑结构的风电场出力期望值分别为不考虑集电系统元件故障的风电场出力期望值的98.44%、99.84%、99.81%。可以看出,在考虑集电系统拓扑结构及元件故障的情况下,风电场出力变小,可靠性下降。这是由于集电系统发生故障时,部分风电机组与汇流母线之间不存在电气通路,风电机组产生的电能无法外送所致。

(4) 相较于海上风电场,陆地风电场设备故障率低,维修时间短,在拓扑结构方案选择过程中,可以计及可靠性指标对经济性的影响,综合考虑一次性投资成本和故障成本,进行风电场集电系统拓扑结构设计。

5 结语

本文提出了一种考虑集电系统元件故障的风电场可靠性模型与评估方法,能够对不同集电系统拓扑结构的风电场进行评估,进而得到可靠性指标。首先通过序贯蒙特卡洛法抽取风电场各元件的状态及持续时间,之后通过深度优先路径搜索算法对抽样后的元件进行连通性分析,实现有效供电路径的搜索。所提评估方法同时考虑了风速变化对系统可靠性指标的影响,指标计算结果更贴近实际。以某风电场为例进行算例分析,比较了不同拓扑结构下风电场的可靠性指标,认为单边环形拓扑与双边环形拓扑结构的可靠性较高,馈线的可靠性参数对不同拓扑结构可靠性影响较大。

参考文献:

- [1] 胡杰,许刚,齐立忠,等.基于沙戈荒新能源送出特性的特高压工程知识图谱构建技术研究[J].电网与清洁能源,2023,39(11):1-8,19.
- HU Jie, XU Gang, QI Lizhong, et al. Research on UHV Engineering Knowledge Graph Construction Technology Based on New Energy Transmission Characteristics from Desert Areas [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2023, 39(11): 1-8, 19.

- [2] 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.
- [3] 陈献慧,王冰,邓红峰,等.海上风电场环形拓扑结构集电系统开关配置分析[J].可再生能源,2019,37(2):205-211.
CHEN Xianhui, WANG Bing, DENG Hongfeng, et al. Analysis of the switchgear configuration for the ring collection grids of offshore wind farms[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(2): 205-211.
- [4] 吕小凡,刁晓伟,王靖,等.考虑电气元件多重故障的海上风电场集电系统可靠性与经济性评估[J].现代电力,2017,34(6):59-64.
LYU Xiaofan, DIAO Xiaowei, WANG Jing, et al. The Research on Reliability and Economy Evaluation of Wind Power Collection System for Offshore Wind Farms Considering Multiple Failures of the Electrical Components[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(6): 59-64.
- [5] Abeynayake G, Van Acker T, Van Hertem D, et al. Analytical model for availability assessment of large-scale offshore wind farms including their collector system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 1974-1983.
- [6] Sulaeman S, Benidris M, Mitra J, et al. A wind farm reliability model considering both wind variability and turbine forced outages[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 8(2): 629-637.
- [7] 杨之俊.基于粒子群算法的风电场集电系统优化设计[J].电测与仪表,2016,53(19):113-118.
YANG Zhijun. Optimal design of power collection system for wind farm based on PSO algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(19): 113-118.
- [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] 王昕伟,张建华,蒋程,等.基于序贯蒙特卡罗方法的风电场有功出力可靠性评估[J].太阳能学报,2014,35(1):106-112.
WANG Xinwei, ZHANG Jianhua, JIANG Cheng, et al. Reliability Assessment Of Wind Farm Active Power Based On Sequential Monte-Carlo Method[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2014, 35(1): 106-112.
- [10] 刘文霞,蒋程,张建华,等.一种用于序贯蒙特卡罗仿真的风电机组多状态可靠性模型[J].电力系统保护与控制,2013,41(8):73-80.
LIU Wenxia, JIANG Cheng, ZHANG Jianhua, et al. A multistage reliability model of wind turbines for sequential Monte Carlo simulation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 73-80.
- [11] 罗魁,郭剑波,马士聪,等.海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述[J].电网技术,2022,46(10):3691-3703.
LUO Kui, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of Key Technologies of Reliability Analysis and Improvement for Offshore Wind Power Grid Integration[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3691-3703.
- [12] 徐政,陈凡.序贯蒙特卡罗方法计算速度的影响因素分析[J].电力学报,2018,33(1):1-8.
XU Zheng, CHEN Fan. The Influencing Factor Analysis on Computation Speed of Sequential Monte Carlo Method[J]. Journal of Electric Power, 2018, 33(1): 1-8.
- [13] 李化.蒙特卡洛模拟法在计算风场超越概率发电量中的应用[J/OL].南方能源建设,1-9[2024-08-14].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1715.TK.20240606.0831.004.html>.
- [14] 徐权,陈如玉.某山地风电场建设前后发电量损失研究[J].东北电力技术,2023,44(11):52-55,62.
XU Quan, CHEN Ruyu. Research on Power Generation Loss Before and After Construction of Wind Farm in Terrain[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(11): 52-55, 62.
- [15] 王亦晨,刘雪梅.基于冲突搜索增强深度强化学习的多AGV路径规划方法[J/OL].机电工程技术,1-7[2024-08-14].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1522.TH.20240715.1114.002.html>.

编辑 王秀清

[收稿日期] 2024-03-22

[作者简介] 杜 谦(1997),男,山西人,博士,研究方向为含新能源的电力系统规划和稳定性分析等。E-mail:dluqian142226@163.com
张金龙(2000),男,山东人,硕士,研究方向为含风电场的电力系统规划和风电并网等。E-mail:1461315601@qq.com
陈武晖(1974),男,黑龙江人,博士,教授,研究方向为电力系统稳定和控制等。E-mail:chenwuhui@tyut.edu.cn