

计及风速与线路故障率周期时变特性的 风电并网系统可靠性评估

严勤^{1,3}, 万小花², 李浩然³

(1. 贵阳职业技术学院, 贵州 贵阳 550081; 2. 国网甘肃省电力公司经济技术研究院, 甘肃 兰州 730050;
3. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 目前在风电并网系统长期可靠性评估中, 风速多采用威布尔概率分布模型, 输电线路故障率多采用年均值故障率, 其评估结果无法反映系统可靠性随时间的变化情况。提出了综合考虑风速和输电线路故障率周期时变特性对电网的影响进行可靠性评估。在风电场出力方面, 建立了风速的时间周期时变模型, 并根据风机输出功率与风速的函数关系进一步建立了风电场的出力模型; 在输电线路故障率方面, 通过统计气象引起的输电线路故障次数计算历史同期各月故障率, 用曲线拟合模拟其变化规律, 建立了输电线路故障率周期时变模型。基于上述两种模型, 用蒙特卡洛模拟法, 对风电并网系统的时变可靠性进行评估, 最后用算例进行了验证, 评估结果可为电网中长期调度、运维及检修决策等提供参考。

关键词: 风速模型; 曲线拟合; 线路故障率; 风电并网系统; 时变可靠性

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)05-0034-09

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.05.008

Reliability Evaluation of Wind Power Integrated Systems Considering Periodic Time-varying Characteristics of Wind Speed and Failure Rate of Lines

Yan Qin^{1,3}, Wan Xiaohua², Li Haoran³

(1. Guiyang Vocational and Technical College, Guiyang 550081, Guizhou, China;
2. Economic Research Institute of State Grid Gansu Electric Power Company,
Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment &
System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The Weibull distribution model of wind speed and the annual average value of failure rate of lines are currently used in reliability evaluation of wind power integrated system, but it cannot reflect the time-varying characteristics of system reliability. The influence of periodic time-varying characteristic of wind speed and failure rate of transmission lines on power system is comprehensively considered. In the aspect of wind farm output, the periodic time-varying model of wind speed is established, and according to the functional relationship between output power and wind speed, output power model of wind farm can be determined. In the aspect of failure rate of transmission lines, the historical monthly failure rate is calculated by statistic failure numbers of lines, and the periodic variation failure rate model of transmission lines is established through curve fitting method. Based on the proposed models and Monte Carlo simulation, the time-varying reliability evaluation of wind power integrated system can be achieved. The validity of the proposed method is verified by a case analysis. And the results of reliability evaluation can provide a reference for mid-long term dispatching and maintenance decision.

Key words: wind speed model; curve fitting; failure rate of transmission lines; wind power integrated system; time-varying reliability

0 引言

随着电力系统的不断发展, 其运行可靠性受气

象因素的影响也越来越大。在发电侧, 随着全球范围内的能源危机问题日益严峻, 新能源发电技术得到了迅速发展。风力发电以其清洁、可再生、建设周

期短、技术较为成熟等特点在新能源发电中占据了重要地位。由于风电具有明显的随机性、间歇性特点,大规模的风电接入电网势必会影响电网的运行可靠性;在输电侧,随着电压等级不断提高,架空输电线路的跨度也越来越大,且其长期暴露在大气环境中,极易受雷电、大风、沙尘、冰雪等气象灾害的影响导致故障停运,从而影响电网的运行可靠性。

气象领域的研究指出:气候系统的演变过程具有自记忆特性,在不同的时间标度上有相似的统计特性,即大气环境具有时间周期性^[1]。因此,在气象因素影响下的电网可靠性也应是随时间变化的,评估电网的时变可靠性对系统规划、中长期调度和月发电计划制定等具有重要意义。

在研究气象因素导致风力发电随机性对电网可靠性的影响时,因为风电机组出力与风速直接相关,所以目前许多文献对风速预测模型进行了研究。现有的风速模型主要有:机器学习模型、时间序列模型和概率分布模型^[2]。文献[3-6]采用了各种机器学习方法及智能算法对风速进行短期预测。机器学习方法能考虑多种变量对风速的影响,预测精度较高,但模型复杂,计算量大。风速的时间序列模型通常适用于风速的中短期预测,文献[7-9]在自回归动平均模型(autoregressive integrated moving average model, ARIMA)的基础上进行了改进,提高了风速预测精度,风速时间序列模型的阶数对预测精度影响较大,低阶模型建模比较容易但误差较大,高阶模型参数估计困难。风速的概率分布模型反映的是风速长期的统计规律,通常适用于长期风速预测。常用的风速概率分布模型主要有瑞利分布、威布尔分布、对数正态分布等,其中威布尔分布使用最为广泛^[10]。文献[11-12]用威布尔分布对实际风速数据进行模拟,取得了较好的效果。概率分布模型较为简单,使用方便,但是精度不高,且不能反映风速的时间变化特征。在风电接入对电网可靠性的影响方面,文献[13-16]从不同角度对风电出力随机性下的电网运行可靠性进行了评估。

在研究气象因素导致线路故障对电网可靠性的影响时,现有文献的研究重点主要关注气象因素对线路可靠性模型的影响。文献[17]对一些气候因素,如每年的极大风速和冰层厚度等对输电线路可靠性的影响进行了分析,研究结果显示气候变化会显著地影响输电线路的可靠性。文献[18]对极端

气候事件导致的连锁停运故障进行研究,用极端气候随机模型和连锁故障停运模拟相结合的方法对电网可靠性进行评估。文献[19]分析了气候变化对电力系统元件可靠性的影响,提出了极端天气下提高电力系统弹性的防御策略。文献[20-22]提出一种月时间尺度下的输电线路时变故障率模型来反映气象灾害影响下线路故障与时间相关的规律,并用IEEE-RTS79系统作为算例计算了系统时变的可靠性指标。

综上所述,气象因素对风力发电和输电线路运行均有较大影响,但目前同时考虑气象因素对二者影响条件下的风电并网系统可靠性评估还很缺乏。针对这一不足,综合考虑了风电出力和输电线路故障率周期时变特性对电网的影响,建立了风速和输电线路故障率的周期时变模型。在上述模型的基础上,用蒙特卡洛模拟法对风电并网系统的时变可靠性进行评估,最后用算例进行了验证。

1 基于风速周期时变特性的风电场出力模型

从中国气象数据网的中国地面气候资料日值数据集^[23]中选取了甘肃民勤气象站2011—2015年的风速数据,对不同时间尺度下的风速变化特征进行了分析。根据整理的风速数据,绘制出2011—2015年日平均风速的时序图,如图1所示。

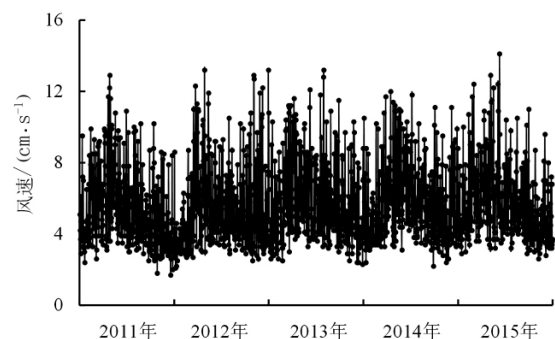


图1 民勤气象站2011—2015年日平均风速

将时间按年进行划分后可以看出,每一年风速的变化规律是相似的,即风速以年为时间尺度时表现出周期性。因此,可用累年均值分析风速在一年内的变化规律。以天为单位将累年日平均风速按时间顺序进行排列,将累年月平均风速用光滑曲线连接起来表示其变化趋势,二者绘制在一幅图上,如图2所示。

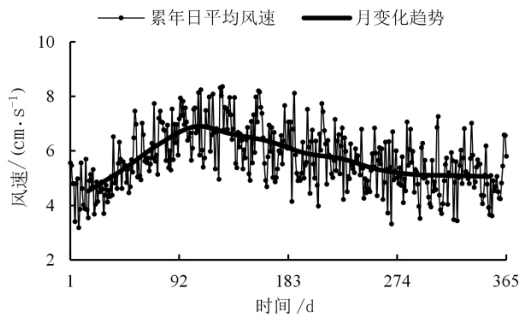


图2 2011—2015年累年日平均风速及月变化趋势

可见,风速以年为时间尺度时主要表现出周期特征,以月为时间尺度时表现出全年随时间的主要变化趋势,以日为时间尺度时在月变化趋势附近表现出波动特征。这里将风速的这种多时间尺度变化规律概括为风速的周期时变特性。

1.1 风速的周期时变特性建模

由上述分析可知,同一地区每一年风速的变化规律是相似的。因此,其周期特征可以通过累年均值来反映。以累年月平均数据为样本,用拟合函数 $f(t)$ 表示其变化趋势;用累年日平均风速和拟合函数值作差得到波动量,用服从某一概率分布的随机变量 $\varepsilon(v)$ 模拟其波动特征。最后将拟合函数与随机变量相叠加得到风速的周期时变模型 $F(t)$ 。

采用曲线拟合法根据具体的风速样本建立不同地区的风速周期时变模型。用拟合优度确定拟合函数形式及概率分布类型,用最小二乘法确定模型中的待定参数值。曲线拟合法是在建模过程中一种常用的数据处理方法。其思路是,用某种方法寻找一条光滑曲线使其尽量逼近样本数据。比较常用的曲线拟合方法是最小二乘法。

最小二乘法曲线拟合的原理是:对于一组已知的数据集 $\{(x_i, y_i)\} (i=0, 1, 2, \dots, n)$, 构建一个函数 $g(a, x)$, 其中 a 为待定的参数向量,通过使误差平方和 S_E 最小来确定函数 $g(a, x)$ 中的未知参数,计算误差平方和的公式如式(1)。

$$S_E = \sum (g(a, x_i) - y_i)^2 \quad (1)$$

式中函数 $g(a, x)$ 称为拟合函数或最小二乘解。使用 Matlab 软件中的曲线拟合工具箱来实现曲线拟合,计算拟合优度和确定拟合模型中的参数值。

下面以民勤气象站 2011—2015 年的风速样本为基础,详细介绍风速周期时变模型的建立过程。

1.1.1 风速月变化趋势拟合

首先对风速的月变化趋势进行曲线拟合,以累

年月平均风速作为纵坐标,以每月天数的中位数作为横坐标,得到图 3 中的散点。使用 Matlab 曲线拟合工具箱中的傅里叶函数和高斯函数进行拟合,拟合优度中 R^2 为可决系数,越接近于 1 拟合效果越好;RMSE 为均方根误差,越接近于 0 拟合效果越好。拟合优度如表 1 所示。

表 1 风速月变化趋势拟合函数拟合优度

傅里叶函数	R^2	RMSE	高斯函数	R^2	RMSE
一阶	0.857 3	0.321 5	一阶	0.633 6	0.485 7
二阶	0.981 1	0.135 0	二阶	0.985 1	0.120 0
三阶	0.996 3	0.072 7	三阶	0.987 9	0.152 7

从表 1 可以看出,二阶傅里叶函数与三阶傅里叶函数的拟合优度接近,但三阶傅里叶函数表达式更为复杂,待定参数更多,因此为了降低复杂度,这里选择二阶傅里叶函数作为拟合函数,其函数表达式为

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) \quad (2)$$

用最小二乘法可计算出拟合函数中的待定参数值,如表 2 所示。

表 2 风速月变化趋势拟合函数中待定参数的拟合值

待定参数	拟合值	待定参数	拟合值
a_0	4.767	a_2	-0.218
a_1	-0.618	b_2	0.753
b_1	1.632	ω	0.011

确定参数值后可绘制出拟合曲线,将其与累年月平均风速比较,如图 3 所示,从图中可以看出采用二阶傅里叶拟合函数能较好地反映风速的月变化趋势。

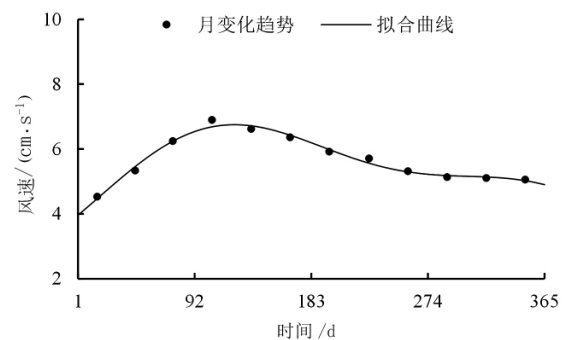


图 3 风速月平均风速及拟合曲线

1.1.2 风速波动分量拟合

风速的波动分量是累年日平均风速与拟合函数值的差值,表达式为

$$\Delta v(t) = v_0(t) - f(t) \quad (3)$$

式中: $\Delta v(t)$ 是第 t 天风速的波动分量; $v_0(t)$ 是风速在第 t 天的累年日均值; $f(t)$ 是第 t 天的拟合函数值。

根据上述的风速样本及拟合函数值计算出的 $\Delta v(t)$ 在零值附近来回波动,具有随机性,可看作是服从某一概率分布的随机变量 $\varepsilon(v)$,与时间无关。绘制 $\Delta v(t)$ 的频率直方图,此直方图的矩形顶边接近一光滑曲线,该曲线就是随机变量 $\varepsilon(v)$ 服从的概率密度函数曲线。同样地,运用曲线拟合的方法可确定风速波动分量的概率分布模型及其参数。随机变量 $\varepsilon(v)$ 有正有负,因此应选取横坐标能取到负值的概率密度函数。下面分别选取了正态分布、三参数伽马分布及三参数威布尔分布对其进行拟合,拟合优度如表3所示。

表3 风速波动分量概率分布拟合优度

概率分布模型	R ²	RMSE
正态分布	0.801 0	0.045 85
三参数威布尔分布	0.804 4	0.045 57
三参数伽马分布	0.803 5	0.046 19

拟合优度的结果显示三参数威布尔的拟合效果较好,因此选择三参数威布尔分布作为风速波动分量的概率分布模型,其概率密度函数为

$$\varepsilon(v) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{v-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{v-\gamma}{\alpha}\right)^\beta} \quad (4)$$

式中: α 为尺度参数; β 为形状参数; γ 为位置参数。用最小二乘法确定参数值,如表4所示。

表4 风速波动分量概率分布拟合中待定参数的拟合值

待定参数	拟合值
α	3.61
β	2.73
γ	-3.17

确定参数值后可求解出对应的三参数威布尔分布概率密度函数,风速波动分量的频率直方图及概率密度函数拟合曲线如图4所示。可以看出三参数威布尔分布较好地体现了风速波动分量的概率分布特征。

1.1.3 风速的周期时变模型

所举例中风速的月变化趋势用二阶傅里叶拟合函数 $f(t)$ 来表示,波动分量用服从三参数威布尔分布的随机变量 $\varepsilon(v)$ 来表示,风速的周期时变模型为二者的叠加,表达式为

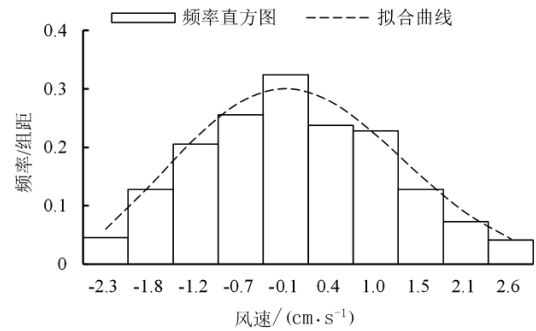


图4 风速波动分量频率直方图及概率密度拟合曲线

$$F(t) = f(t) + \varepsilon(v) \quad (5)$$

式中: $F(t)$ 为风速周期时变模型在第 t 天的模拟值。

实际风速值与模型模拟值的比较如图5所示,可以看出二者能较好地吻合。

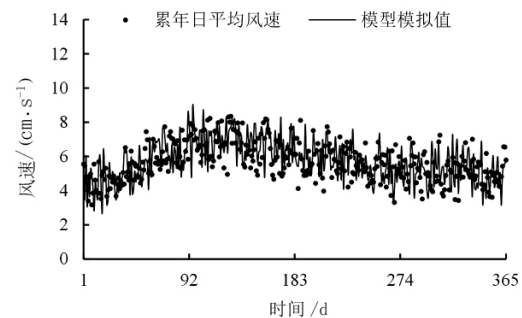


图5 累年日平均风速与模型模拟值

1.2 计及风速周期时变特性的风电场出力模型

气象站的标准观测高度距地面 10 m,因此在计算风机出力时需将风速换算到风机轮毂高度。根据 GB/T 18710-2002《风电场风能资源评估方法》^[24],对不同高度的风速进行换算,公式为

$$v_2 = v_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^a \quad (6)$$

式中: a 为风切变指数; v_2 为高度 z_2 的风速; v_1 为高度 z_1 的风速。风切变指数可用式(7)计算:

$$a = \frac{\lg(v_2/v_1)}{\lg(z_2/z_1)} \quad (7)$$

式中: v_1 、 v_2 分别为高度 z_1 、 z_2 下风速的实测值。若没有不同高度的实测风速数据,风切变指数 a 可取 0.143 作为近似值。

通过风机出力与风速之间的函数关系^[25],可得到风电场的出力模型,其函数表达式如下:

$$P_t = \begin{cases} 0 & 0 \leq V_t \leq V_{ci} \\ (A + B \times V_t + C \times V_t^2) P_r & V_{ci} < V_t \leq V_r \\ P_r & V_r < V_t \leq V_{co} \\ 0 & V_t > V_r \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_t 为第 t 天的风电场出力, P_r 为风电场装机容量, MW; V_t 为第 t 天的风速; V_{ci} 、 V_r 、 V_{co} 分别表示风机的切入风速、额定风速和切除风速, m/s; 中间变量 A 、 B 和 C 可由以下公式表达:

$$A = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left[V_{ci}(V_{ci} + V_r) - 4(V_{ci} \times V_r) \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \quad (9)$$

$$B = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left[4(V_{ci} + V_r) \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 - (3V_{ci} + V_r) \right] \quad (10)$$

$$C = \frac{1}{(V_{ci} - V_r)^2} \left[2 - 4 \left(\frac{V_{ci} + V_r}{2V_r} \right)^3 \right] \quad (11)$$

将由风速的周期时变模型 $F(t)$ 模拟生成的时变风速作为变量 V_t 代入式(8)中, 可得风电场出力的周期时变模型 P_t 。

2 输电线路故障率的周期时变模型

随着电压等级不断提高, 架空输电线路的跨度也越来越大, 且其长期暴露在大气环境中, 极易受雷电、大风、沙尘、冰雪等气象灾害的影响。文献[26-27]指出气象灾害是造成架空输电线路故障停运的主要原因。目前电力系统可靠性评估中线路故障率常采用多年统计得到的年均值进行计算, 而实际上由于气象灾害具有明显的时空分布特征, 因此受其影响, 输电线路的故障率也是随时间、空间变化的。下面借鉴文献[20]的研究思路和研究方法, 建立了输电线路周期时变模型。

2.1 历史同期故障率统计

与风速类似, 从年时间尺度来看气象灾害也具有周期性, 例如中国每年的1—2月易发生冰雪灾害, 每年的7—8月雷电灾害频发, 由气象导致的线路故障频率也随之变化。因此, 基于多年的气象灾害导致线路故障的记录, 按月进行统计, 可计算得到线路各月的历史同期故障率。

单条输电线路历史同期月故障率可以表示为

$$\lambda_k(m) = \frac{\sum_y n_{kym}}{YT_m L_k} \times 100 \quad m = 1, 2, \dots, 12 \quad (12)$$

式中: $\lambda_k(m)$ 表示线路 k 在历史同期的第 m 月的故障率, 次/(100 km·月); n_{kym} 为线路 k 在第 y 年的 m 月的故障次数; T_m 表示第 m 月的时间; Y 为统计的总年数; L_k 表示线路 k 的长度, km。

式(12)可推广到计算相似气象条件下某一地区多条线路的历史同期各月故障率, 公式为

$$\lambda(m) = \frac{\sum_k (\lambda_k(m) \times L_k)}{\sum_k L_k} \quad (13)$$

式中 $\lambda(m)$ 表示同一电压等级线路在历史同期的第 m 月的故障率, 次/(100 km·月)。

根据甘肃电网2014—2016年330 kV输电线路故障记录进行统计, 用式(12)、式(13)计算出甘肃地区输电线路的历史同期各月故障率, 并与年均值故障率进行比较, 如图6所示。

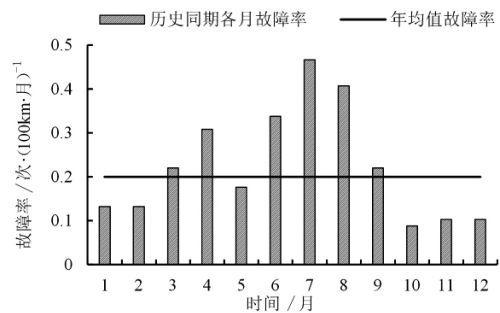


图6 甘肃地区线路历史同期各月故障率与年均值故障率

2.2 输电线路周期时变故障率模拟

基于上面得到的历史同期故障率, 可进一步用曲线拟合的方法模拟其变化规律, 用拟合函数 $H(t)$ 来建立输电线路故障率的周期时变模型。

以图6中甘肃地区线路的历史同期各月故障率为样本, 用不同阶数的傅里叶函数和高斯函数对其进行曲线拟合, 其拟合优度如表5所示。

表5 甘肃地区线路历史同期各月故障率拟合优度

傅里叶函数	R ²		RMSE	
	傅里叶函数	R ²	高斯函数	RMSE
一阶	0.707 10	0.081 08	一阶	0.664 3 0.081 84
二阶	0.883 2	0.059 13	二阶	0.828 2 0.071 70
三阶	0.967 0	0.038 52	三阶	0.905 1 0.075 37

从表5中可以看出, 用三阶傅里叶函数对两地区的故障率进行拟合均能取得较好的拟合效果, 因此选用三阶傅里叶函数作为拟合函数, 其函数表达式为

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + a_3 \cos(3\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) \quad (14)$$

用最小二乘法计算出拟合函数中的待定参数, 如表6所示。

确定参数值后可绘制出对应的拟合曲线, 历史

同期故障率及拟合曲线如图7所示。

表6 线路故障率拟合函数中待定参数的拟合值

待定参数	拟合值	待定参数	拟合值
a_0	0.240 8	b_2	0.019 7
a_1	-0.101 3	a_3	0.045 0
b_1	-0.096 9	b_3	0.026 4
a_2	-0.077 8	ω	0.598 9

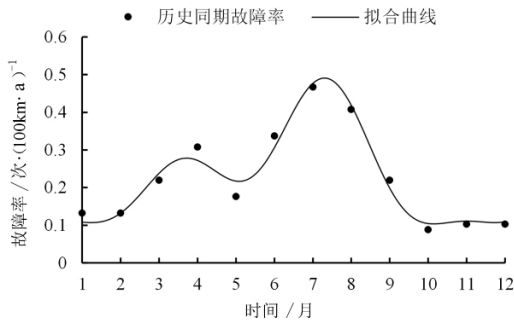


图7 甘肃地区线路历史同期各月故障率及拟合曲线

从图7中可以看出拟合曲线与历史同期故障率是基本吻合的,且根据表5可知三阶傅里叶函数的拟合精度较高,说明该拟合函数能较好地反映故障率的时变特征。

3 风电并网系统可靠性评估方法

将前面建立的风速和输电线路故障率的周期时变模型运用到传统的电力系统可靠性评估中,得到了综合考虑气象因素对风电出力及输电线路故障率影响下的风电并网系统时变可靠性评估方法。

3.1 评估指标

根据所建立的风速周期时变模型,可在发电侧模拟风电场出力的随机性、季节性等特征;根据所建立的输电线路故障率的周期时变模型,可在输电侧模拟气象灾害影响下的线路故障率的时变特征。将二者结合起来,运用蒙特卡洛模拟法,可计算风电并网系统的时变可靠性,将系统各月的失负荷概率(loss of load probability, LOLP)和电力不足期望(expected demand not supplied, EDNS)作为可靠性指标对风电并网系统的时变可靠性进行评估。

3.2 评估流程

基于风速和输电线路故障率周期时变模型的风电并网系统时变可靠性评估的流程如图8所示。

用蒙特卡洛模拟法对风速周期时变模型进

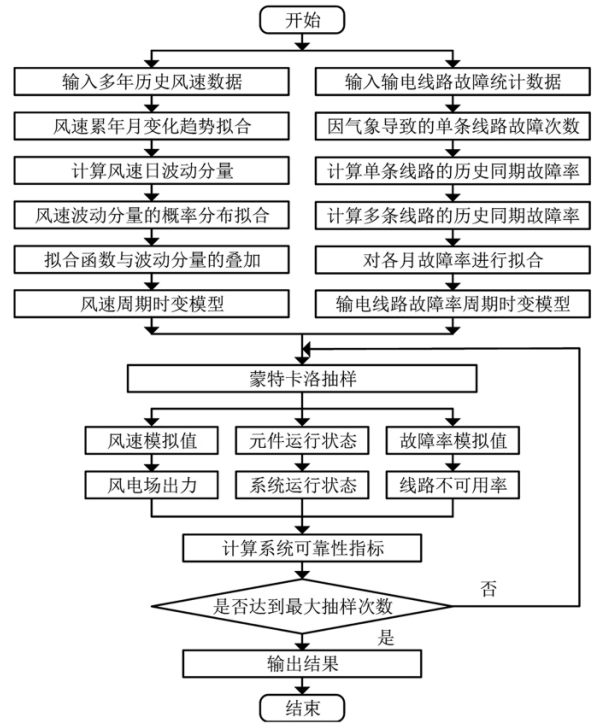


图8 基于风速和线路故障率周期时变模型的风电并网系统可靠性评估流程

行抽样时,由于模型中有一部分是随机变量 $\varepsilon(v)$,因此每次抽样首先需要生成服从拟合得到的概率分布的随机数,再与 $f(t)$ 叠加得到第 i 次抽样的风速模拟值 $F_i(t)$ 。然后根据考察的时间区间产生 $[t_1, t_2]$ 之间均匀分布的随机正整数 t_i ,其中 t_1, t_2 分别为抽取时间区间的上、下限。例如在计算系统一月份的可靠性指标时 $t_i \in [1, 31]$,抽取的风速表达式为

$$v_i = F_i(t_i) \quad t_i \in [t_1, t_2] \quad (15)$$

式中: v_i 为第 i 次抽取的风速值; $F_i(t_i)$ 为第 i 次抽样的风速周期时变模型生成的第 t_i 天的风速模拟值。进一步由式(8)可计算出风电场的出力。各月 t_i 所对应的抽样时间区间如表7所示。

表7 各月 t_i 对应的抽样区间

月份	抽样时间区间 $[t_1, t_2]$	月份	抽样时间区间 $[t_1, t_2]$
1月	[1, 31]	7月	[182, 212]
2月	[32, 59]	8月	[213, 243]
3月	[60, 90]	9月	[244, 273]
4月	[91, 120]	10月	[274, 304]
5月	[121, 151]	11月	[305, 334]
6月	[152, 181]	12月	[335, 365]

输电线路采用两状态模型,即正常运行状态和故障停运状态,其不可用率的表达式为

$$U = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (16)$$

式中: U 为线路的不可用率; λ 为故障率; μ 修复率。在所提出的风电并网系统可靠性评估中, 关注的是月时间尺度的可靠性指标, 因此 λ 采用所提出的输电线路故障率周期时变模型, 而 μ 基本上与时间无关, 因此可取多年统计值进行计算。

用蒙特卡洛模拟法对系统中各元件的运行状态进行抽样时, 用产生随机数的方法来模拟各个元件的状态, 通常是产生 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数 R_j , 每个元件的状态由式(17)确定:

$$s_j = \begin{cases} 0 & R_j > U_j \\ 1 & 0 \leq R_j \leq U_j \end{cases} \quad (17)$$

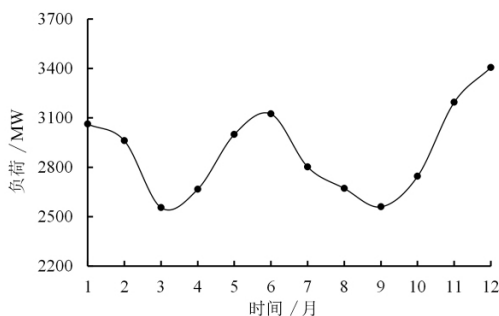
式中: 0 表示正常工作状态; 1 表示故障停运状态; U_j 是第 j 个元件的不可用率。

按上述方法多次对某月的风电场出力、线路故障率和系统中各元件状态进行抽取, 可模拟系统各种运行状态, 进而计算得到系统在该月的失负荷概率 (LOLP) 和各月的电力不足期望 (EDNS)。

4 算例分析

按照前述方法建立了甘肃瓜州、马鬃山、玉门、民勤、环县等 5 个风电集中地区的风速周期时变模型和甘肃地区的输电线路故障率周期时变模型。根据图 8 所示的可靠性评估流程, 用 Matlab 软件进行编程, 以改造的 IEEE - RTS79 系统为算例, 对其时变可靠性进行了评估。

原 IEEE - RTS79 系统中不含风电机组, 现分别将节点 22、15、13、1 和 7 处的 1 台 50 MW、12 MW、197 MW、20 MW 和 100 MW 的发电机组替换为等装机容量的风电场, 系统的结构及各元件参数见文献 [28]。算例中的负荷采用系统各月的峰值负荷, 如图 9 所示。



• 40 • 图9 IEEE - RTS79 系统各月峰值负荷

算例对 Case 1 和 Case 2 两种情形下系统各月的失负荷概率和电力不足期望指标进行了计算。两种情形下所采用的风速模型和线路故障率模型如表 8 所示。

表 8 Case 1 和 Case 2 的计算条件说明

计算条件	风速模型	线路故障率模型
Case 1	威布尔模型	年均值模型
Case 2	周期时变模型	周期时变模型

计算所得结果如图 10 和图 11 所示。

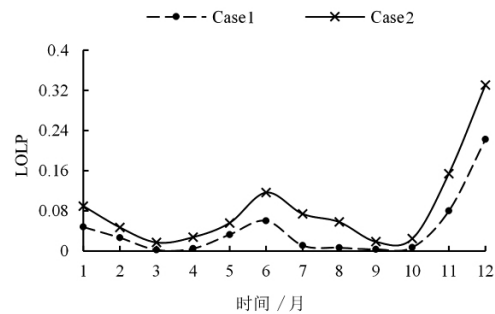


图 10 Case 1 和 Case 2 情形下系统各月的 LOLP

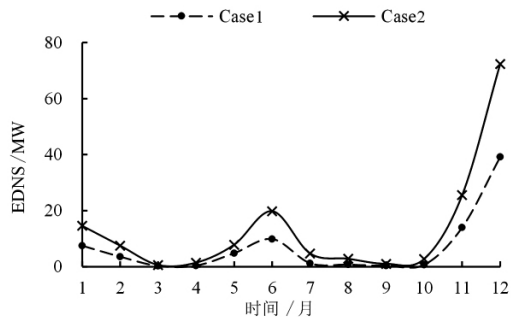


图 11 Case 1 和 Case 2 情形下系统各月的 EDNS

系统可靠性指标中失负荷概率 LOLP 和电力不足期望 EDNS 越大, 说明系统可靠性越低; 反之, 系统可靠性越高。目前风电并网系统可靠性评估多采用 Case 1 的计算条件, 即风速模型采用威布尔分布, 线路故障率模型采用年均值故障率。但威布尔分布本质上是一种概率分布模型, 不具备时间属性, 并且年均值故障率也无法反映其各月的差异, 因此采用上述条件计算得到的系统各月可靠性指标并不能真实反映系统可靠性随时间的变化情况。从图 10 和图 11 中可以看出, Case 1 所得结果比 Case 2 偏低, 即采用传统方法评估风电并网系统各月可靠性时, 可能会造成对可靠性的低估。这是因为, 相比于 Case 1, Case 2 的计算条件充分考虑了气象因素导致的风电出力和线路故障率周期时变特性对电网

的影响,更加接近实际。

利用所提方法能真实反映系统可靠性随时间的变化情况,使系统运行人员提前对系统各月的可靠性水平有所把握,事先制定好相应的降风险措施。例如,在运行方面,加强气象灾害多发时段相关线路的巡检工作;检修方面,事先制定好高风险时段的应急措施并准备好事故抢险物资;调度方面,在制定月发电计划时,可在系统可靠性较低月份限制部分风电场的出力,以减小风电出力随机性对电网的影响,同时加大部分火电机组的出力以保证供电。

5 结 语

针对现有风电并网系统可靠性评估方法不能反映系统可靠性随时间变化的问题,提出了风速和输电线路故障率的周期时变模型,并结合蒙特卡洛模拟法计算得到了风电并网系统各月的可靠性指标,通过研究得出以下结论:

1) 风速具有周期时变特性,可将其描述成月变化趋势与日波动分量的叠加。其中月变化趋势用拟合函数表示,日波动分量用服从特定概率分布的随机变量表示。通过对多年风速样本的曲线拟合来建立适应该地区风速变化规律的周期时变模型。

2) 输电线路故障大多是由气象灾害导致的,而气象灾害也具有周期时变特性。通过统计气象灾害引起的输电线路故障次数,计算得到线路的历史同期各月故障率,并用曲线拟合方法建立了输电线路故障率的周期时变模型,充分反映了气象灾害影响下输电线路故障率随时间的变化情况。

3) 将风速和输电线路故障率的周期时变模型与蒙特卡洛模拟法相结合,实现了对风电并网系统时变可靠性的评估。相比传统方法,所提方法得到的结果更能反映系统可靠性随时间变化的实际情况,评估结果可为电力系统中长期调度、运维及检修决策等提供参考。

参考文献

[1] 封国林,侯威,支蓉,等. 极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究[M]. 北京:科学出版社,2012.
[2] 余慎思,李征,蔡旭,等. 用于风力发电仿真的多时间尺度风速建模方法[J]. 电网技术,2013,37(9): 2559-2565.

[3] Wang Shouxiang, Na Zhang, Lei Wu, et al. Wind Speed Forecasting Based on the Hybrid Ensemble Empirical Mode Decomposition and GA-BP Neural Network Method[J]. Renewable Energy, 2016, 94: 629-636.
[4] Chang G-w, Lu H-j, Chang Y-r, et al. An Improved Neural Network-based Approach for Short-term Wind Speed and Power Forecast[J]. Renewable Energy, 2017, 105: 301-311.
[5] Ren Y, Suganthan P N, Srikanth. A Novel Empirical Mode Decomposition with Support Vector Regression for Wind Speed Forecasting[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(8): 1793-1798.
[6] Ma Xuejiao, Yu Jin, Dong Qingli. A Generalized Dynamic Fuzzy Neural Network Based on Singular Spectrum Analysis Optimized by Brain Storm Optimization for Short-term Wind Speed Forecasting[J]. Applied Soft Computing, 2017, 54: 296-312.
[7] Yunus K, Thiringer T, Chen P. ARIMA-based Frequency-decomposed Modeling of Wind Speed Time Series[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2546-2556.
[8] 修春波,任晓,李艳晴,等. 基于卡尔曼滤波的风速序列短期预测方法[J]. 电工技术学报,2014,29(2): 253-259.
[9] Shukur O B, Lee M H. Daily Wind Speed Forecasting through Hybrid KF-ANN Model Based on ARIMA[J]. Renewable Energy, 2015, 76: 637-647.
[10] Ozay C, Celiktas M S. Statistical Analysis of Wind Speed Using Two-parameter Weibull Distribution in Alacati Region[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 121: 49-54.
[11] Ouarda T J, Charron C, Chebana F. Review of Criteria for the Selection of Probability Distributions for Wind Speed Data and Introduction of the Moment and L-moment Ratio Diagram Methods, with A Case Study[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 124: 247-265.
[12] Wais P. A Review of Weibull Functions in Wind Sector[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 70: 1099-1107.
[13] Lannoye E, Flynn D, O'malley M. Evaluation of Power System Flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 922-931.
[14] Wan C, Xu Z, Pinson P, et al. Optimal Prediction Intervals of Wind Power Generation[J]. IEEE Transac-

tions on Power Systems ,2014 ,29(3) : 1166 - 1174.

[15] Chen Z , Wu L , Shahidehpour M. Effective Load Carrying Capability Evaluation of Renewable Energy via Stochastic Long - term Hourly Based SCUC [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy ,2015 ,6(1) : 188 - 197.

[16] 黄海煜 , 于文娟. 考虑风电出力概率分布的电力系统可靠性评估 [J]. 电网技术 ,2013 ,37(9) : 2585 - 2591.

[17] Rezaei S N , Chouinard L , Langlois S , et al. Analysis of the Effect of Climate Change on the Reliability of Overhead Transmission Lines [J]. Sustainable Cities and Society ,2016 ,27: 137 - 144.

[18] Frangesco C , Gian L A , Eerjco Z. A Modeling and Simulation Framework for the Reliability/Availability Assessment of A Power Transmission Grid Subject to Cascading Failures under Extreme Weather Conditions [J]. Applied Energy ,2017 ,185: 267 - 279.

[19] Panteli M , Mancarella P. Influence of Extreme Weather and Climate Change on the Resilience of Power Systems: Impacts and Possible Mitigation Strategies [J]. Electric Power Systems Research ,2015 ,127: 259 - 270.

[20] Wang J , Xiong X , Zhou N , et al. Time - varying Failure Rate Simulation Model of Transmission Lines and Its Application in Power System Risk Assessment Considering Seasonal Alternating Meteorological Disasters [J]. IET Generation , Transmission Distribution , 2016 , 10 (7) : 1582 - 1588.

[21] 王建 , 熊小伏 , 梁允 , 等. 地理气象相关的输电线路风险差异评价方法及指标 [J]. 中国电机工程学报 , 2016 ,36(5) : 1252 - 1259.

[22] 王建 , 熊小伏 , 李哲 , 等. 气象环境相关的输电线路故障时间分布特征及模拟 [J]. 电力自动化设备 , 2016 ,36(3) : 109 - 114.

[23] 中国气象数据网. 中国地面国际交换站气候资料日值数据集 [DB]. http://data.cma.cn/data/detail/data-Code/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY.

[24] 风电场风能资源评估方法: GB/T 18710 - 2002 [S] , 2002.

[25] Wangdee W , Billinton R. Considering Load - carrying Capability and Wind Speed Correlation of WECS in Generation Adequacy Assessment [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion ,2006 ,21(3) : 734 - 741.

[26] 陈丽娟 , 胡小正. 2010 年全国输变电设施可靠性分析 [J]. 中国电力 ,2011 ,44(6) : 71 - 77.

[27] 陈丽娟 , 李霞. 2011 年全国输变电设施可靠性分析 [J]. 中国电力 ,2012 ,45(7) : 89 - 93.

[28] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. IEEE Reliability Test System [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems ,1979 ,98(6) : 2047 - 2054.

作者简介:
 严 勤(1966) 本科、高级工程师、访问学者,研究方向为电力系统保护自动化及新能源接入技术;
 万小花(1982) ,工程硕士、工程师,主要从事新能源发电等相关研究;
 李浩然(1992) 硕士,研究方向为气象相关的电力系统可靠性评估。

(收稿日期: 2018 - 07 - 18)

=====

(上接第 28 页)

[4] 杨博麟. 高压电缆接头热老化机制的研究及其温度监测系统的设计 [D]. 长沙: 湖南大学 ,2011.

[5] 任明 , 彭华东 , 陈晓清 , 等. 采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电 [J]. 高电压技术 ,2010 ,36(10) : 2460 - 2466.

[6] 徐焰. 开关柜局部放电暂态对地电压检测技术 [J]. 供用电 ,2011 ,28(1) : 62 - 64.

[7] 孙志明. 10 kV 电缆振荡波局部放电检测技术研究及应用 [D]. 北京: 华北电力大学 ,2012.

作者简介:
 解 磊(1985) ,工程师,从事电气试验、电缆运检工作;
 张增智(1979) ,助理工程师,从事配电线路运检工作、电缆运检工作;
 张 禹(1985) ,工程师,从事配电网运维检修管理工作;
 唐 朝(1984) ,工程师,从事配电运检分析管理、配电网自动化管理等工作;
 曾 娜(1987) ,工程师,从事配电网生产技改大修项目管理等工作;
 李卓雯(1986) ,硕士、工程师,从事配电网运检计划管理工作。

(收稿日期: 2018 - 06 - 20)

韩启贺(1992) ,助理工程师,从事输配电电力电缆运维检修工作;