

DOI: 10.7667/PSPC170196

台风天气下配电网可靠性的新型评估算法

尹超雄¹, 唐武勤², 温灵锋¹, 蓝建杰¹, 林杰欢¹, 李少逸¹, 李宁³

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516001; 2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510640;
3. 惠州电力勘察设计院有限公司, 广东 惠州 516001)

摘要: 基于台风的可预测性, 考虑到配电网元件电杆的强度随机变量, 提出基于风速的配电网元件电杆故障率计算模型。通过该模型可计算出不同风速下配电网元件的故障率, 并结合现有的馈线、负荷分块的思想, 采用序贯蒙特卡洛模拟法计算出配电系统在台风登陆过程中最高风速段的可靠性水平。模拟过程中考虑了元件的实时故障率以及运行—故障—运行—故障的动态交替特性。该计算结果为以后的配电网工程加固提供了理论基础, 对于配电网的差异化规划设计也具有一定的指导意义。最后以 IEEE RBTS BUS6 F4 馈线为算例, 在 Matlab 上进行了计算, 计算结果验证了该方法的正确性与有效性。

关键词: 配电网; 荷载; 可靠性; 蒙特卡洛模拟法; 台风

A new method for reliability evaluation of distribution network considering the influence of typhoon

YIN Chaoxiong¹, TANG Wuqin², WEN Lingfeng¹, LAN Jianjie¹, LIN Jiehuan¹, LI Shaoyi¹, LI Ning³

(1. Huizhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Supply Co., Ltd, Huizhou 516001, China;
2. Guangzhou Benliu Power Electrical Engineering Technology Co., Ltd, Guangzhou 510640, China;
3. Huizhou Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd, Huizhou 516001, China)

Abstract: Based on the typhoon forecasting and the strength random variables of distribution component pole, this paper proposes a wind speed based failure rate calculation model for distribution component pole. This model can calculate the failure rate of distribution network components under different wind speeds. The reliability level of the highest wind speed section during typhoon landing of distribution system is calculated by the sequential Monte Carlo simulation method combining existing feeder and load partition theory. In the simulation process, the real time failure rate of the components and the dynamic alternation characteristics of operation-fault-operation are considered. The calculation results provide theoretical basis for reinforcing the distribution network project and some guidance for the differential design and plan of power distribution network in the future. Finally, the IEEE RBTS BUS6 F4 feeder is taken as an example to be calculated using Matlab, and the results show the correctness and effectiveness of the method.

Key words: distribution network; load; reliability; Monte Carlo simulation; typhoon

0 引言

中国沿海地区是台风登陆最多的地区之一, 我国电网几乎每年都要接受台风的洗礼。强台风的概率虽小^[1], 一旦发生就会造成大面积的停电损失, 甚至可能演变成电力灾难^[2], 风险不容忽视。例如: 2013年台风“天兔”袭击广东惠州惠东县, 造成重大经济损失, 大范围停电。随着环境的恶化, 台风给我国电网所造成的危害也越来越大, 因此, 建立一个基于台风基础信息的配电网评估算法具有重大的意义。据统计, 台风天气下绝大部分故障是电杆

故障所造成的, 断线的概率很低^[3-5], 基本上可以忽略。本文只考虑电杆故障所导致的配电网可靠性。近3年风力12级以上的台风情况统计如图1所示。

文献[6]提出台风风速模型, 重点考虑风速与电杆之间的相互作用关系, 较少提及台风与配电网可靠性之间的相互作用; 文献[7]重点考虑配电网拓扑结构对配电网可靠性的影响, 该分析方法从一个区域电网的拓扑结构进行分析, 对于配电网元件与台风的相互作用机理较少涉及; 文献[8]根据某地区实际情况, 做出了风速与配电网元件故障率的拟合曲线, 该曲线是基于过去风速与元件故障率的事实统

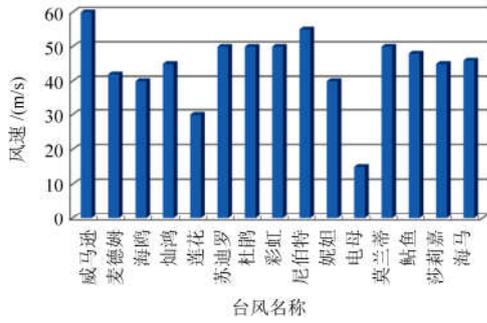


图1 近几年台风统计情况

Fig. 1 Statistics of typhoon in recent years

计; 文献[9]提出一种基于模糊聚类和相似度的电力系统原始参数预估方法, 以气候影响因素作为描述线路的模糊集, 提出一种能够预估新投产线路的可靠性原始参数, 该文中气候因素包含暴风、暴雨、高温等天气, 侧重对可靠性参数的预估, 并将大部分气候因素都纳入考虑范围。文献[10]以开关元件为界形成配电系统元件分区和负荷分区, 提出一种配电网可靠性快速评估算法, 该文中的分区思想解决了重复遍历网络拓扑的问题, 具有一定的参考意义。综上, 目前对于常态下的配电网可靠性研究已经较为成熟, 针对台风与配电网可靠性之间的关系, 尤其是能说明台风与配电网元件相互作用机理的研究, 还有待深入。

本文主要工作为根据台风风速和电杆故障率之间的关系, 建立基于风速的配电网可靠性评估算法。根据此算法, 求得台风特定条件下配电系统的各个可靠性指标, 该计算过程能够详细论述台风与配电网元件相互作用的机理以及该机理对配电网可靠性的影响。该研究对于配电网规划设计及网络加固有一定的指导意义和理论参考价值。

1 台风风速计算模型

国内外学者对于台风模型已经进行较多的探索与研究, 如 Chow^[11]、Gmoe 和 Vickery^[12], Batts^[13], Shapiro^[14], Yan Meng^[15]等提出并发展了基于概率的台风计算分析方法。本文选取 Batts 台风模型进行计算, 该模型曾经用于美国沿海建筑设计, 具有很高的准确性。

Batts 台风模型是将气旋的梯度风速和移动风速相叠加, 通过台风中心和研究点的位置关系确定该点的风速值。

其中, 最大梯度风速可以根据忽略摩擦的梯度风方程求得, 即

$$V_{gx} = K\sqrt{\Delta P} - \frac{R_{\max}}{2} f \quad (1)$$

式中: K 为常系数, 取 0.865; f 为地球自转科氏力参数; R_{\max} 为最大风速半径, 通常平均最大风速一般出现在台风最大风速半径处。

$$R_{\max} = \exp(-0.1239\Delta P^{0.6003} + 5.1034) \quad (2)$$

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 - 0.675(1 + \sin \beta)t \quad (3)$$

式中: $\Delta P(t)$ 为台风登陆后 t 时刻的中心气压差, 单位为 hpa; ΔP_0 为台风登陆前中心气压差, 单位为 hpa; β 为台风登陆海岸线时与台风运动方向的夹角; t 为登陆后的时间, 单位为 h。

最大风速半径 R_{\max} 处的最大平均风速 $V_{R_{\max}}$ 为

$$V_{R_{\max}} = 0.865V_{gx} + 0.5V_T \quad (4)$$

式中, V_T 为台风整体移动速度, 单位为 m/s。

台风风场中各点的风速大小按式(5)进行计算。

$$\begin{cases} V_{r内} = V_{R_{\max}} \frac{r}{R_{\max}}, & r \leq R_{\max} \\ V_{r外} = V_{R_{\max}} \left(\frac{R_{\max}}{r} \right)^x, & r > R_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $V_{r内}$ 、 $V_{r外}$ 分别为台风风场模拟圆内和圆外的各点平均风速; r 为配电线路距台风中心的距离; x 根据不同台风的情况在 0.5~0.7 之间变化。

2 电杆故障率计算模型

2.1 电杆荷载效应计算

荷载是指使结构或构建产生内力和变形的外力及其他因素, 或者是在工程结构上使得工程结构或者构建产生效应的各种直接作用。台风天气下影响电杆的主要外力由三部分构成, 第一部分为导线所受的风荷载 w_x ; 第二部分为杆塔所受的风荷载 w_s ; 第三部分为绝缘子所受的风荷载 w_z 。三部分的计算公式为

$$w_x = \alpha \mu_z \mu_{sc} d l_H \sin^2 \varphi \frac{v^2}{1600} \quad (6)$$

$$w_s = \beta \mu_z \mu_s A \frac{v^2}{1600} \quad (7)$$

$$w_z = n_1 n_2 \mu_z A_p \frac{v^2}{1600} \quad (8)$$

式中: w_x 为电线水平档距为 l_H 的风荷载, 单位为 kN; α 为电线风压不均匀系数; μ_z 为风压高度变化系数; μ_{sc} 为电线的体型系数; d 为电线外径, 单位为 m; l_H 为水平档距, 单位为 m; φ 为风向与导线之间的夹角; v 为线路规定基准高 h_s 处的设计风

速, 单位为 m/s; β 为风振系数; μ_s 为风荷载体型系数; A 为杆塔结构构件迎风面的投影面积, 单位为 m^2 ; n_1 为一相导线所用的绝缘子串数; n_2 为每串绝缘子的片数, 其他金具零件按加一片绝缘子的受风面积计算; A_p 为每片绝缘子的受风面积。上述参数数值可根据相关设计规范查得。

电杆杆身任意截面的 $x-x$ 处的弯矩 M_x 按照式(9)计算。

$$M_x = (w_{xz} h_1 + 2w_{xz} h_2 + w_{sv} h_1 \bar{h}) \cdot (1 + m_x) \quad (9)$$

$$w_{sv} = \beta \mu_z \mu_s F \frac{v^2}{1600} \quad (10)$$

$$w_{xz} = w_x + w_z \quad (11)$$

$$\bar{h} = \frac{h_1}{3} \cdot \frac{2D_0 + D_x}{D_0 + D_x} \quad (12)$$

式中: F 为杆身投影面积, 单位为 m^2 ; w_{xz} 为导线风荷载和绝缘子的风荷载合计, 单位为 kN ; \bar{h} 为 $x-x$ 截面至杆身风压合力作用点的高度, 单位为 m ; h_1 为 $x-x$ 截面至杆顶距离, 单位为 m ; D_0 为电杆稍径, 单位为 m ; D_x 为电杆 $x-x$ 直径, 单位为 m ; m_x 为由扰度产生的附加弯矩系数。

2.2 电杆故障率模型

配电系统中常采用的混凝土电杆由于制造误差、工艺等方面的不确定性, 其抗弯强度存在一定的分散性。一般情况下, 混凝土电杆抗弯强度的均值略大于其承载能力校验弯矩, 抗弯强度负荷正态分布。据此, 电杆抗弯强度的概率密度函数表示为^[16]

$$f_R(M_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_p} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{M_p - \mu_p}{\delta_p}\right)^2} \quad (13)$$

式中: $\mu_p = \beta M_u$, μ_p 为混凝土电杆抗弯强度的均值, β 值可通过实际运行经验或破坏性试验得到, M_u 为混凝土电杆的承载能力校验弯矩; $\delta_p = v M_u$ 为混凝土电杆抗弯强度的标准差, v 为变差系数, 具体数值根据实际运行经验或破坏性试验得到。

由上述可求得电杆的强度变量及荷载效应。因此, 可以建立以上述元件状态为基本变量的功能函数, 该功能函数为

$$Z = R - S \quad (14)$$

式中: R 为元件的强度, 通常为服从一定分布的随机变量; S 为风力荷载引起的元件内部效应, 即应力, 与风速、风向有关。由式(14)可知, R 服从正态分布, 则该功能函数也服从正态分布。由此, 可以得到以下判据。

1) 元件处于正常状态:

$$Z = R - S > 0$$

2) 元件处于故障状态:

$$Z = R - S < 0$$

由此可知电杆正常的概率 P 为

$$P = P\{(R - S) > 0\} = \int_0^{+\infty} f(r) dr \quad (15)$$

$P_f = 1 - P$ 就是电杆的故障率。先假定 S 为固定值, 则 R 的概率分布如图 2 所示。

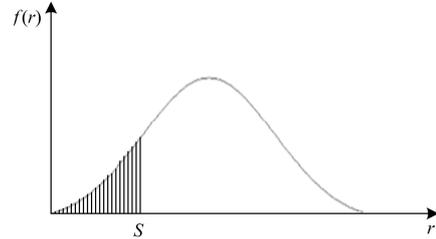


图 2 电杆强度与荷载效应示意图

Fig. 2 Diagram of strength of the pole and load effect

图 2 阴影部分所示为配电网电杆的故障率, 则电杆的故障率为

$$P_f = \int_0^S \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_p} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{M - \mu_p}{\delta_p}\right)^2} dM \quad (16)$$

根据此模型, 可计算得到风速与电杆故障的关系如图 3。

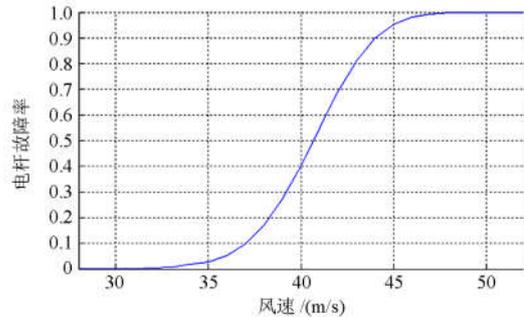


图 3 风速与电杆故障率曲线

Fig. 3 Curve of wind speed and pole failure rate

由图 3 可以得出, 在固定电杆型号及强度的情况下, 当风速在 33 m/s 以下时, 电杆故障率都很低, 几乎可以忽略。但是此后, 随着风速增长, 故障率迅速增长, 在到达 51 m/s 时, 故障率增长至 1, 即在此风速下, 电杆一定会发生故障。

3 评估算法

3.1 台风条件下配电网可靠性评估指标

1) 受台风影响的系统平均停电频率指标

$$SAIFI_T = \frac{\sum_i \lambda_{Ti} N_i}{\sum_i N_i} \quad (17)$$

式中: λ_{Ti} 为受台风影响的区间内负荷节点 i 的故障率; N_i 为负荷节点 i 的用户数。

2) 受台风影响的系统平均停电持续时间指标

$$SAIDI_T = \frac{\sum_i U_{Ti} N_i}{\sum_i N_i} \quad (18)$$

式中, U_{Ti} 为因受台风影响的故障导致的负荷点停运时间。

3) 受台风影响的系统缺供电量指标为

$$ENS_T = \sum_i P_{ai} U_{Ti} \quad (19)$$

式中, ENS_T 为各负荷点 i 的平均负荷, 单位为 kW。

3.2 馈线、负荷分块等值思想

综合考虑, 我国目前多数配电网一般只在变电站出线端配置断路器开关。对于含有复杂分支线路的配电系统, 在特殊、重要的负荷的子馈线上安装有开关(断路器及隔离开关)。根据现在继电保护系统配置, 配电系统某个元件故障会立即引起断路器动作。若瞬时故障, 则断路器会重合闸; 若是永久性故障, 则重合不成功, 此时需要打开故障所在地点的上一级负荷开关或者分段开关将故障线路隔离。由此, 在保护正常工作的前提下, 元件故障后总会有上一级操作元件切断或者隔离故障, 以图 4 例进行分析。

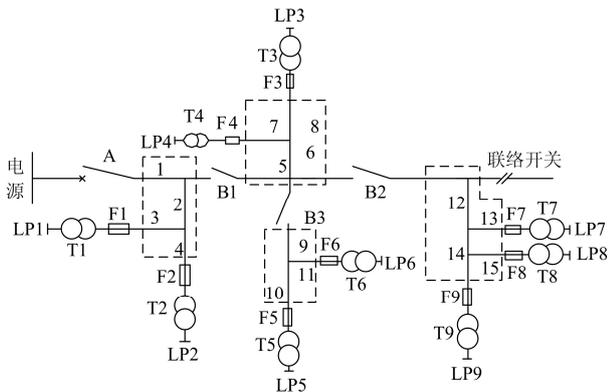


图 4 配电网实例

Fig. 4 Example of distribution network

图 4 中 A 代表断路器, B1、B2、B3 代表隔离开关, F1—F9 代表熔断器, T1—T9 代表变压器, LP1—LP9 代表负荷点, 1—16 代表线路。假如元件 5 故障, 会引起断路器 A 跳闸, 待 B1、B2 隔离开关拉开后, 断路器 A 合闸送电, LP1、LP2 恢复供

电, LP3—LP6 停电, LP7—LP9 由于有转供恢复供电。元件 5、6、7、8 中任何一个发生故障, 都会导致四个元件同时停电, 这四个元件还具有同时送电的特征。根据此特性, 将配电网进行分块, 图 3 中虚线框包含的元件为一块, 每一块所对应的负荷点具有同时停电的特性。等值模块的故障率和停电时间的关系为

$$\lambda_{ip} = \sum_{k=1}^m n_k \lambda_k \quad (20)$$

$$t_{ip} = \sum_{k=1}^m n_k \lambda_k t_{rk} \quad (21)$$

式中: m 为模块中的元件数目; λ_k 、 t_{rk} 分别为第 k 个元件的故障率和故障修复时间。对于相同材质的元件, 故障修复时间相同, 只需要将各个元件的故障率相加就可以得到模块的故障率, 故障平均修复时间不变, 大大简化了计算过程。

3.3 可靠性评估算法流程

配电网元件在停电 1 次后, 需要等修复或者转供之后才能再次发生故障, 即元件在其有效期内的运行—故障—运行—故障的交替过程存在一个最小的时间间隔, 该最小间隔为元件故障修复时间或者转供时间。本文采用基于分块思想的序贯蒙特卡罗模拟法来对配电网可靠性进行计算, 该方法能够准确描述这个动态过程, 计算步骤如下。

Step1 获取台风相关基础信息, 根据 Batts 台风模型对台风风速进行计算。假定台风在 1 h 内风速、风向不变。

Step2 根据 Step1 中计算所得的风速, 代入电杆故障率模型当中, 计算该小时段的电杆故障率。

Step3 根据配电网结构进行分块, 对块和元件进行编号, 计算每个模块的故障率, 并设置仿真次数。

Step4 初始化设置, 对于每个元件产生一个(0,1)上均匀分布的随机数, 并根据故障率参数, 计算出随机每个元件的故障时间矩阵 TTF 。

Step5 寻找矩阵 TTF 中最小的元素 $\min(TTF_i)$, 则该元素对应的元件为最先故障的元件 i 。

Step6 寻找元件 i 所处的配电网模块, 若 i 属于馈线模块, 对应该馈线模块的负荷点停电一次, 计算故障持续时间; 若 i 属于分支线模块, 分支线 i 所对应的负荷点停电一次, 计算故障持续时间; 在故障发生至故障持续时间内, 该部分元件不参与下一次 Step5, 直到 TTF_i 大于故障持续时间。

Step7 判断仿真是否达到规定时间, 台风假定 1 h 内参数不变, 本文以 1 h 为仿真时间。未达到仿

真时间, 则回到 Step5。

Step8 判断抽样次数是否完成, 未完成转入 Step4。

Step9 计算台风最大风速 1 h 内平均故障率、平均修复时间和平均负荷损失。

Step10 计算各个配电网可靠性评估指标。

3.4 算例分析

本文以 IEEE RBTS BUS6 F4 馈线为算例, 如图 5 所示, 该系统为典型的供电系统。共有 23 个负荷点, 1330 个用户, 用电类型较为全面。假定断路器等开关元件 100%可靠, 配电线路普遍采用强度等级为 K 级的 12 m 混凝土电杆; 导线型号为 LGJ-240/30 进行计算; 转供时间为 1 h; 隔离故障操作时间为 1 h。该系统详细参数详见文献[17-18]。

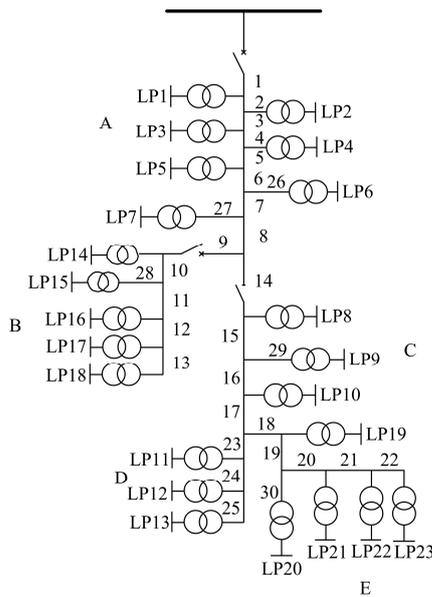


图 5 IEEE RBTS BUS6 F4 接线图

Fig. 5 Wiring diagram of IEEE RBTS BUS6 F4

针对该系统, 计算工况为各个台风最大风速 1 h 以内的配电网可靠性指标, 计算结果如表 1 所示。

表 1 配电系统最大风速时可靠性指标

Table 1 Reliability index of distribution system in maximum wind speed

| 风速/(m/s) | SAIFI _T /(次/h) | SAIDI _T /(min/h) | ENS _T /MW |
|----------|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 25 | 2.0e-04 | 5.4e-03 | 6.04e-04 |
| 27 | 3.92e-03 | 0.12 | 0.013 |
| 30 | 0.031 | 0.93 | 0.103 |
| 34 | 0.575 | 18.73 | 2.445 |
| 35 | 0.749 | 25.79 | 3.658 |
| 38 | 0.990 | 45.16 | 6.992 |
| 40 | 0.998 | 49.15 | 7.412 |
| 45 | 0.999 | 52.23 | 7.599 |

根据表 1 中内容可以看出, 当风速达到 34 m/s 的时候, SAIFI_T 及 SAIDI_T 的值都较大, 此时配电网处于紧急的状态, 需要进行加固, 提高整个配电网可靠性。为进一步论证上述所提方法的有效性, 本文考虑采取加固措施之后的情况(采用拉线或者撑杆加固), 配电网可靠性指标如表 2 所示。

表 2 加固后最大风速时可靠性指标

Table 2 Reliability index of distribution system in maximum wind speed after reinforcement

| 风速/(m/s) | SAIFI _T /(次/h) | SAIDI _T /(min/h) | ENS _T /MW |
|----------|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 25 | / | / | / |
| 27 | / | / | / |
| 30 | / | / | / |
| 34 | / | / | / |
| 35 | 1.3e-05 | 6.9e-06 | 4.4e-05 |
| 38 | 2.1e-05 | 5.2e-06 | 3.5e-05 |
| 40 | 2.9e-05 | 1.6e-05 | 1.1e-04 |
| 45 | 1.0e-04 | 4.9e-04 | 3.4e-04 |

表 2 中“/”表示该数值非常小, 可以忽略不计。对比两表数值, 可以看出, 经过加固后可靠性指标大幅度变好, SAIFI_T、SAIDI_T 和 ENS_T 的数值都非常小, 几乎可以忽略其影响, 在台风风速大的情况下, 配电网具有很高的可靠性。

4 总结

本文基于台风预测模型、电杆风速荷载效应模型及含分块思想的序贯蒙特卡洛算法, 提出一种根据台风条件(风向、登陆路径等)计算配电网可靠性的方法, 并用 IEEE RBTS BUS6 F4 系统作为算例进行了验算, 计算结果表明配电网可靠性指标与台风风速具有直接相关性。明确此种相关性具有重要的意义。一方面, 配电网规划设计人员可以以此为基础, 指导配电网的差异化规划与设计, 提升配电网设计的精确性与科学性; 另一方面, 电网运行人员可以根据台风的预测信息运用此模型对配电网的可靠程度进行预评估, 并基于预评估结果采取相应的措施对配电网进行加固, 进而提高整体配电网的可靠性, 降低恶劣天气所带来的损失。

参考文献

- [1] 严明良, 王猛, 于波, 等. 基于模糊聚类分型的数值产品暴雨预报释用方法[J]. 气象科学, 2008, 28(5): 581-585.
- YAN Mingliang, WANG Meng, YU Bo, et al. A heavy rainfall forecast method based on fuzzy cluster typing by using application and interpretation of NWP[J]. Meteorological Science and Technology, 2008, 28(5):

- 581-585.
- [2] 潘翀, 袁霞, 唐伦. 大型城市高压配电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 131-138.
PAN Chong, YUAN Xia, TANG Lun. Reliability analysis for high voltage distribution network in big cities[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 131-138.
- [3] 赵洪山, 赵航宇. 考虑元件故障率变化的配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 56-62.
ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu. Distribution system reliability analysis considering the elements failure rate changes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 56-62.
- [4] ATWAY M, EI-SAADANYE F, GUISEA C. Supply adequacy assessment of distribution system including wind-based DG during different modes of operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 78-86.
- [5] CASSOLA F, BURLANDO M. Wind speed and wind energy forecast through Kalman filtering of numerical weather prediction model output[J]. Applied Energy, 2012, 99(2): 154-166.
- [6] LIU Y, SINGH C. A methodology for evaluation of hurricane impact on composite power system reliability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 145-152.
- [7] BROSTROM E, AHLBERG J, SODER L. Modelling of ice storms and their impact applied to a part of the Swedish transmission network[C] // Power Tech, 2007 IEEE Lausanne: IEEE, 2007: 1593-1598.
- [8] BILLINTON R, SINGH G. Application of adverse and extreme adverse weather: modeling in transmission and distribution system reliability evaluation[C] // Transmission and Distribution, IEE Proceedings. IET, 2006, Generation: 115-120.
- [9] 张勇军, 陈超, 许亮. 基于模糊聚类和相似度的电力系统可靠性原始参数预估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 1-5.
ZHANG Yongjun, CHEN Chao, XU Liang. Prediction of original reliability parameters of power system based on fuzzy clustering and similarity[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 1-5.
- [10] 胡美玉, 胡志坚, 邓奥攀, 等. 基于元件层级和电源可达性的配电网可靠性评估混合算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 22-29.
HU Meiyu, HU Zhijian, DENG Aopan, et al. Hybrid algorithm for reliability evaluation of distribution network based on element hierarchy and power accessibility[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 22-29.
- [11] WANG P, BILLINTON R. Reliability benefit analysis of adding WTG to a distribution system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(2): 134-139.
- [12] GOMES L, VICKERY B J. On the Prediction of tropical cyclone gust speeds along the Northern coast[J]. Inst Eng Aust C E Trans CE18, 1976, 2(1): 40-49.
- [13] PELIKAN E, EBEN K, RESLER J, et al. Wind power forecasting by an empirical model using NWP outputs[C] // International Conference on Environment and Electrical Engineering, Prague, 2010, Czech Republic: 45-48.
- [14] 冷华, 童莹, 李欣然, 等. 配电网运行状态综合评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 53-59.
LENG Hua, TONG Ying, LI Xinran, et al. Comprehensive evaluation method research of the operation state in distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 53-59.
- [15] YANG M, MASAHIRO M, KAZUKI H. An analytical model for simulation of the wind field in typhoon boundary layer[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 56: 291-310.
- [16] 王艳松, 孙桂龙, 曹明志. 基于动态规划法的配电网联络线优化规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 30-36.
WANG Yansong, SUN Guilong, CAO Mingzhi. Research on the optimization of the tie lines based on dynamic programming for distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 30-36.
- [17] RAHMAN M H, XU L, YAO L Z. Protection of large partitioned MTDC Networks Using DC-DC converters and circuit breakers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [18] GRIGG C, WONG P, ALBRECHT P, et al. The IEEE reliability test system-1996[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1017.

收稿日期: 2017-02-16; 修回日期: 2017-05-18

作者简介:

尹超雄(1968—), 男, 本科, 高级工程师, 长期从事配电网运行、规划工作; E-mail: 1024923959@qq.com

唐武勤(1989—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向为电力系统运行分析与控制。E-mail: 511092918@qq.com

(编辑 周金梅)