冰风暴灾害下电力断线倒塔的概率计算

徐文军1,杨洪明1,赵俊华2,董朝阳3,赖明勇4,薛禹胜5

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南省长沙市 410114; 2. 浙江大学电气工程学院,浙江省杭州市 310027;
3. 香港理工大学电机工程学系,香港; 4. 湖南大学物流信息与仿真技术重点实验室,湖南省长沙市 410079;
5. 国网电力科学研究院/南京南瑞集团公司,江苏省南京市 210003)

摘要:提出了基于广义帕累托分布(GPD)和 Copula 函数的冰风暴灾害下电力断线倒塔的概率计算方法。该方法基于冰风暴灾害下风速和冻雨量的 GPD,提出了电力线和铁塔的冰荷载和风荷载 的概率计算模型;然后考虑冰荷载与风荷载之间存在的概率相关性,基于 Copula 函数,提出了电力 线和铁塔冰荷载、风荷载的联合概率分布计算模型;在此基础上,实现了冰风暴灾害下电力断线倒 塔的概率计算。结合湖南郴州电网 220 kV 输电线路的历史数据,计算出该电网断线倒塔的概率, 并通过与实际数据的分析比较,表明该计算模型精确、有效。

关键词:广义帕累托分布;Copula 函数;联合概率分布;电力断线倒塔;冰风暴灾害

0 引言

自架空输电线路开始大规模建设以来,由冰风 暴灾害造成的灾害性破坏时有发生,对电力的安全 可靠供应造成严重威胁。2008年1月中国大部分 地区发生了严重的冰风暴电力灾害事故,给社会和 人民生命财产带来了巨大损失。因此,开展冰风暴 灾害下架空输电系统的安全可靠性研究具有十分重 要的现实意义。

针对电力冰风暴灾害,已开展了冰风暴气象条 件和架空输电线路受力特性的研究^[1-8]。上述研究 都未涉及冰风暴灾害下电力断线倒塔的概率计算。 并且,由于受相同气象条件的共同作用,电力线和铁 塔的冰荷载和风荷载存在一定的概率相关性,它们 并不是相互独立的概率事件。这种概率相关性对电 力断线倒塔概率的影响分析尚待研究。

为此,本文针对风速和冻雨量对覆冰的影响,基 于极值理论中的 POT(peak over threshold)模型, 提出冻雨量和风速的广义帕累托分布(GPD)。在 此基础上,计算电力线和铁塔的冰、风荷载的概率分 布函数,并通过 Copula 函数考虑冰荷载和风荷载的 概率相关性,从而提出了冰风暴灾害下电力断线倒 塔的概率计算模型。通过选择输电线路断线倒塔概 率值超出某一设定值时的事故为预想事故,构建出 电力系统综合防御体系的预想事故集,为冰风暴灾 害下电力系统的预防措施提供重要的理论依据。

1 风速和冻雨量的 GPD

冰风暴是指风速和冻雨量出现异常,超出某一 阈值,且发生于一定区域和时段上的气候极值事 件^[9]。冰风暴期间,极端风速和冻雨量是2个极不 稳定的随机气象变量,难以预测。但从概率意义上 讲,可通过推断寻求变量极值的分布模型,估计极端 风速和冻雨量可能出现的极值^[9]。本文假定在冰风 暴灾害下的一定时间内风速的概率分布近似具有时 不变特性,从而在计算覆冰厚度时可用风速的均值 进行分析。因此,本文采用 POT 模型对极端风速 和冻雨量进行概率分析。该模型把风速和冻雨量观 测值中所有达到或超过某一足够大阈值的各个超限 样本作为分析样本去拟合 GPD^[10]。

首先针对冻雨量 r 这一气象变量进行概率分析。假定冻雨量序列 $\{r_i\}$ 的样本个数为 N_r ,分布函数为F(r),定义 $F_u(\bar{r})$ 为条件超限分布,它是冻雨量 r 超过阈值 u_r 的条件分布函数,其数学表示如下:

 $F_{u_r}(\bar{r}) = \frac{F(u_r + \bar{r}) - F(u_r)}{1 - F(u_r)} = \frac{F(r) - F(u_r)}{1 - F(u_r)} \quad (1)$

式中: r 为超限样本。

超限样本序列 $\{\bar{r}_t\}$ 通过取出 $\{r_i\}$ 中大于 u_r 的样本,根据 $\bar{r}_i = r_i - u_r$ 来构建,样本个数记为 N_{u_r} ;利用 超限样本个数,计算 $r_i < u_r$ 的分布函数 $F(u_r) = 1 - N_{u_r}/N_r$ 。当 u_r 足够大时,条件超限分布函数 $F_{u_r}(\bar{r})$ 存在如下式所示的 GPD:

收稿日期: 2010-05-21; 修回日期: 2010-08-05。

国家自然科学基金资助项目(70601003);教育部新世纪优秀 人才支持计划资助项目(NCET-08-0676);国家杰出青年科 学基金资助项目(70925006);湖南省科技重大专项资助项目 (2008FJ1006);香港理工大学基金资助项目(ZV3E)。

$$F_{u_r}(\overline{r}|\xi_r,\sigma_r) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \xi_r \frac{\overline{r}}{\sigma_r}\right)^{-\frac{1}{\xi_r}} & \xi_r \neq 0\\ 1 - \exp\left(-\frac{\overline{r}}{\sigma_r}\right) & \xi_r = 0 \end{cases}$$
(2)

式中: *ξ*, 为形状参数; *σ*, 为规模参数; 1/*ξ*, 为尾部指数。

GPD 具有厚尾特征,即当 *ξ*,(由负值到正值)由 小变大时,GPD 尾部逐渐增厚。

POT 模型中确定阈值 u_r 是形成 \bar{r} 和准确估计 参数 ξ_r 和 σ_r 的前提。这里,采用平均超限函数 (mean excess function,MEF)法来估计阈值^[11]。

令 $r_1 < r_2 < \cdots < r_N$, MEF 定义为:

$$e(u_r) = \frac{1}{N_r - k + 1} \sum_{t=k}^{N_r} (r_t - u_r)$$
(3)

式中: $k = \min\{t \mid r_t > u_r\}$ 。

MEF 图为点 $(u_r, e(u_r))$ 构成的曲线,选取充分 大的阈值 u_r ,使得当 $r \ge u_r$ 时, $e(u_r)$ 为近似线性函数。

针对超限样本序列 $\{r_r\}$,通过极大似然法,获得 GPD 参数的极大似然估计值 $\hat{\xi}_r, \hat{\sigma}_r$ 。于是,冻雨量 r的概率密度函数为:

$$f(r) = \begin{cases} \frac{N_{u_r}}{\sigma_r N_r} \left(1 + \xi_r \frac{r - u_r}{\sigma_r} \right)^{\frac{-1}{\xi_r} - 1} & \xi_r \neq 0 \\ -\frac{N_{u_r}}{\sigma_r N_r} \exp\left(\frac{-r + u_r}{\sigma_r}\right) & \xi_r = 0 \end{cases}$$
(4)

针对另一气象变量风速 v,展开类似冻雨量的 概率分析,得到其概率密度函数为:

$$f(v) = \begin{cases} \frac{N_{u_v}}{\sigma_v N_v} \left(1 + \boldsymbol{\xi}_v \frac{v - u_v}{\sigma_v}\right)^{\frac{-1}{\xi_v} - 1} & \boldsymbol{\xi}_v \neq 0\\ -\frac{N_{u_v}}{\sigma_v N_v} \exp\left(\frac{-v + u_v}{\sigma_v}\right) & \boldsymbol{\xi}_v = 0 \end{cases}$$
(5)

式中: N_{u_v} 为风速超限样本个数; σ_v 为规模参数; N_v 为风速序列 $\{v_i\}$ 样本个数; ξ_v 为形状参数; u_v 为位置参数(阈值); $1/\xi_v$ 为尾部指数。

2 电力线和铁塔的冰、风荷载的概率分布

2.1 电力覆冰厚度模型

冰风暴灾害下,考虑电力线和铁塔所在位置的 海拔高度等因素的影响,结合覆冰厚度预测模型^[12],计算电力覆冰厚度,其数学模型为:

$$R_{H} = \frac{N}{\rho_{i} \pi} \sqrt{(r\rho_{w})^{2} + (3.6vW)^{2}} \left(\frac{H}{H_{0}}\right)^{b}$$
(6)

式中: R_H 为海拔高度 H 位置的覆冰厚度; N 为冻 雨小时数; ρ_i 为冰密度; ρ_w 为冻雨密度; W 为空气中 液态水含量, $W = 0.067 r^{0.846}$; H_0 为观测点的海拔高 度; b 为覆冰厚度修正系数。

2.2 电力线冰、风荷载的概率分布函数

冰风暴期间,分析冰荷载对电力线的影响,进而 计算电力线的冰荷载及其概率分布。根据电力线的 冰荷载 *T*_{Li}模型^[3],得到 *T*_{Li}的分布函数为:

$$F(t_{\rm Li}) = \int_0^{+\infty} \int_0^{\zeta} f(v) f(r) \,\mathrm{d}v \,\mathrm{d}r \tag{7}$$

式中:

$$\zeta = \frac{\sqrt{\left[\left(\sqrt{\frac{576t_{\text{Li}}}{\rho_{\text{i}}\pi L} + D^2} - D\right)\frac{\rho_{\text{i}}\pi H_0^b}{2NH^b}\right]^2 - r^2\rho_{\text{w}}^2}}{0.241\ 2r^{0.846}}$$

L为电力线长度;D为电力线直径。

基于电力线的风荷载 *T*_{Lv}模型^[13],得到 *T*_{Lv}的分布函数为:

$$F(t_{\rm Lv}) = \int_0^{+\infty} \int_0^q f(v) f(r) \,\mathrm{d}v \mathrm{d}r \tag{8}$$

式中:

$$q = \sqrt{\frac{1\ 600t_{\rm Lv}}{\alpha \lambda S\beta_{\rm C}(D+2R_{\rm H})L\sin^2\vartheta}}$$

α 为风压不均匀系数; t 为风压高度变化系数; S 为
 电力线体型系数; β_c 为风荷载调整系数; θ 为风向与
 电力线之间的夹角。

2.3 铁塔冰、风荷载的概率分布函数

同一冰风暴条件下,不同类型构件的铁塔覆冰 厚度不同,其中,圆截面构件铁塔覆冰厚度与电力线 覆冰厚度可以使用相同的模型^[14]。

圆截面构件铁塔的冰荷载模型^[14]为:

 $T_{\text{Ti}} = \pi R_{H\alpha_h\alpha_d} (d + R_{H\alpha_h\alpha_d}) \gamma l_{\text{T}} \times 10^{-6}$ (9) 式中: α_h 为覆冰厚度递增系数; α_d 为与构件直径有 关的覆冰厚度修正系数;d 为铁塔构件圆截面直径; γ 为覆冰厚度; l_{T} 为铁塔构件总长度。

非圆截面构件铁塔的冰荷载模型[14]为:

$$T_{\rm Ti} = 0.6 a_h \gamma A 10^{-3} R_{\rm T}$$
 (10)

式中:A为铁塔构件总表面积;R_T为非圆截面构件 铁塔覆冰厚度。

为简化问题,突出倒塔概率计算方法,本文主要 针对圆截面构件铁塔进行分析,铁塔冰荷载 *T*_{Ti}的 分布函数为:

$$F(t_{\rm Ti}) = \int_0^{+\infty} \int_0^{\delta} f(v) f(r) \,\mathrm{d}v \,\mathrm{d}r \qquad (11)$$

式中:

$$\delta = \frac{1}{0.482 \ 4r^{0.846} \alpha_h \alpha_d N H^b} \cdot \sqrt{\left[\rho_{\rm i} \pi H_0^b \left(\sqrt{d^2 + \frac{4 \times 10^6 t_{\rm Ti}}{\pi \gamma l_{\rm T}}} - d\right)\right]^2 - (2\alpha_h \alpha_d N H^b r \rho_{\rm w})^2}$$

根据铁塔的风荷载 T_{Tv} 模型^[15],计算 T_{Tv} 的分 布函数为:

— 14 —

$$F(t_{\mathrm{Tv}}) = \int_{0}^{\varepsilon} \frac{N_{u_{v}}}{\sigma N_{v}} \Big(1 + \xi_{v} \frac{v - u_{v}}{\sigma_{v}}\Big)^{\frac{-1}{\xi_{v}} - 1} \mathrm{d}v \qquad (12)$$

式中: $\varepsilon = \sqrt{2t_{Tv}/(\rho C_d(\alpha)A_f)}; \rho$ 为空气密度; $C_d(\alpha)$ 为风速以 α 角度作用铁塔的拖动系数; A_f 为铁塔构件承受风压的有效面积。

3 电力线和铁塔冰、风荷载的联合概率分布

同一冰风暴灾害下,电力线和铁塔的冰荷载和 风荷载受相同气象条件的影响,它们的冰荷载和风 荷载相互不独立。Copula 函数可将冰荷载和风荷 载的联合分布用其一维边际分布连接起来^[16],从而 有效刻画冰荷载与风荷载之间的相关性。令电力线 冰荷载 T_{Li} 和风荷载 T_{Lv} 的联合分布函数为 $J(t_{\text{Li}}, t_{\text{Lv}})$,边际分布函数分别为 $F(t_{\text{Li}})$ 和 $F(t_{\text{Lv}})$,则存在 一个 Copula 函数 $C(\cdot)$ 对所有的 $T_{\text{Li}} \in \mathbf{R}, T_{\text{Lv}} \in \mathbf{R}$ 具有:

 $J(t_{Li}, t_{Lv}) = C(F(t_{Li}), F(t_{Lv}))$ (13) 式中:C为被限定在 ran $F(t_{Li}) \times ran F(t_{Lv})$ 上的函数;ran(•)表示函数的值域。

由于电力线冰、风荷载概率分布呈现下厚尾特性,因此,借助 Clayton-Copula 构建电力线冰荷载和风荷载的联合分布函数^[12],其数学表示为: $J(t_{1i}, t_{1x}) =$

 $\max[(F^{-\theta_{l}}(t_{Li}) + F^{-\theta_{l}}(t_{Lv}) - 1)^{-\frac{1}{\theta_{l}}}, 0]$ (14) 式中: θ_{l} 为联合分布的连接参数,可通过极大似然法 求取估计值 $\hat{\theta}_{l}$,从而计算出电力线冰、风荷载的联合 密度函数如下,

$$f(t_{\rm Li}, t_{\rm Lv}) = c(F(t_{\rm Li}), F(t_{\rm Lv})) \frac{\partial F(t_{\rm Li})}{\partial t_{\rm Li}} \frac{\partial F(t_{\rm Lv})}{\partial t_{\rm Lv}}$$
(15)

式中:c(•)为概率密度函数。

类似于电力线冰、风荷载联合概率分布计算,得 到铁塔冰、风荷载的联合分布函数 $J(t_{Ti}, t_{Tv})$ 为: $J(t_{Ti}, t_{Tv}) = \max[(F^{-\theta_{t}}(t_{Ti}) + F^{-\theta_{t}}(t_{Tv}) - 1)^{-\frac{1}{\theta_{t}}}, 0]$ (16)

式中: θ_t 为联合分布的连接参数。

铁塔冰、风荷载的联合密度函数
$$f(t_{\text{Ti}}, t_{\text{Tv}})$$
为:

$$f(t_{\text{Ti}}, t_{\text{Tv}}) = c(F(t_{\text{Ti}}), F(t_{\text{Tv}})) \frac{\partial F(t_{\text{Ti}})}{\partial t_{\text{Ti}}} \frac{\partial F(t_{\text{Tv}})}{\partial t_{\text{Tv}}}$$
(17)

4 电力断线倒塔的概率计算模型

4.1 电力断线的概率计算

基于冰、风荷载及其联合概率分布,提出冰风暴 灾害下电力断线的概率计算模型,其表达式为:

$$P_{\rm L} = \int_{F_{\rm Lmax}}^{M_{\rm L}} f(t_{\rm Li}, t_{\rm Lv}) dt_{\rm Li} dt_{\rm Lv}$$
(18)

式中:*P*_L 为断线概率;*F*_{Lmax} 为电力线所能承受最大 荷载;*M*_L 为电力线作用荷载,其计算公式为:

$$M_{\rm L} = T_{\rm Li} + T_{\rm Lv} + \frac{1}{4}\pi D^2 L \rho_1 g \qquad (19)$$

式中:pi为电力线密度;g为重力常数。

4.2 电力倒塔的概率计算

在冰风暴灾害下,除分析铁塔自身所受的冰荷 载和风荷载之外,还必须着重考虑铁塔两侧所连接 电力线对其产生的不平衡张力,从而准确分析铁塔 的荷载水平,评估冰风暴灾害下电力倒塔的概率。 冰风暴灾害下电力倒塔的概率计算模型为:

$$P_{\rm T} = \int_{F_{\rm Tmax}}^{M_{\rm T}} f(t_{\rm Ti}, t_{\rm Tv}) dt_{\rm Ti} dt_{\rm Tv}$$
(20)

式中: P_{T} 为倒塔概率; F_{Tmax} 为铁塔所能承受极限荷载; M_{T} 为铁塔的荷载,计算公式为,

$$M_{\mathrm{T}} = T_{\mathrm{Ti}} + T_{\mathrm{Tv}} + \Delta F$$

 $\Delta F_{\rm L}$ 为铁塔所连两档电力线产生的合成侧力,

 $\Delta F_{L} = \sqrt{(F_{L1})^{2} + (F_{L2})^{2} - 2F_{L1}F_{L2}\cos(\varphi_{1} + \varphi_{2})}$ φ_{1} 和 φ_{2} 为铁塔两侧电力线弧垂张力与铁塔垂直方 向的夹角; $F_{L1} = M_{L1}/2\cos\varphi_{1}$ 和 $F_{L2} = M_{L2}/2\cos\varphi_{2}$ 为铁塔两侧电力线的张力。

针对输电线路断线倒塔的概率计算,可以根据 实时的气象数据,利用本文提出的模型首先求取冰、 风荷载的联合概率分布,再进一步求取断线倒塔的 概率。当断线倒塔概率值超出某一设定概率λ时, 即可以设定该线路故障为预想事故。由此建立电力 系统综合防御体系的预想事故集^[17],从而为冰风暴 灾害下电力系统的快速预警提供可靠的理论依据。

5 算例分析

本文以 2008 年覆冰受灾严重的湖南郴州地区 为例,针对郴州地区 220 kV 输电线路,开展电力断 线倒塔的概率计算。收集郴州 1990 年至 2008 年的 280 个风速气象数据和 300 个冻雨量气象数据进行 GPD 拟合。计算风速和冻雨量的超限期望,如图 1 所示。

由图 1 可知,选取合适的阈值,即 u_v =1.5, u_r = 6.4。风速和冻雨量超过阈值的样本个数均为49, 分别占总样本个数的17.5%和16.3%。基于超限 样本r,通过极大似然法估计出风速和冻雨量 GPD 的参数: ξ_v =0.9025, ξ_r =1.9547; σ_v =1.4616, σ_r = 0.6132。于是,风速和冻雨量 GPD 为:

 $F(v) = 1 - 0.175[1 + 0.62(v - 1.5)]^{-1.11}$ $F(r) = 1 - 0.163[1 + 3.2(r - 6.4)]^{-0.513}$



基于冻雨量和风速 GPD,计算电力线和铁塔冰 荷载概率分布和风荷载概率分布。在此基础上,考 虑冰、风荷载的概率相关性,计算电力线和铁塔荷载 的联合分布函数 Clayton-Copula。通过极大似然法 估计出冰、风荷载联合概率分布的连接参数 θ_1 和 θ_t ,它们分别为 1.76 和 2.53。结合电力线和铁塔 冰、风荷载的联合概率分布,计算冰风暴灾害下电力 断线倒塔的概率值(风速为 2.3 m/s),如表 1 和表 2 所示。

表 1 城烟线各档电力线断线概率 Tab. 1 Probability of broken lines of Chengyan line

| 档号 | 档距/ | 断线概率 | | | | | |
|-------|-----|----------|------------|------------|------------|--|--|
| | m | r=30 mm | r = 40 mm | r = 55 mm | r = 75 mm | | |
| 74-75 | 513 | 0.126 7 | 0.255 1 | 0.381 4 | 0.612 9 | | |
| 75-76 | 472 | 0.124 5 | 0.229 3 | 0.368 9 | 0.689 4 | | |
| 76-77 | 384 | 0.122 9 | 0.203 6 | 0.342 5 | 0.625 2 | | |
| 77-78 | 651 | 0.135 6 | 0.315 4 | 0.475 2 | 0.722 8 | | |
| 78-79 | 416 | 0.137 2 | 0.334 0 | 0.481 3 | 0.751 9 | | |
| 79-80 | 527 | 0.120 4 | 0.193 0 | 0.316 3 | 0.567 3 | | |

表 2 城烟线各基电力铁塔倒塔概率 Tab. 2 Probability of collapsed towers of Chengyan line

| 塔号 | 高度差/ | 倒塔概率 | | | | |
|----|------|----------|------------|------------|------------|--|
| | m | r=30 mm | r = 40 mm | r = 55 mm | r = 75 mm | |
| 75 | 35.2 | 0.119 6 | 0.218 3 | 0.341 2 | 0.597 3 | |
| 76 | 23.9 | 0.115 6 | 0.195 6 | 0.323 6 | 0.560 2 | |
| 77 | 56.4 | 0.122 5 | 0.231 9 | 0.354 2 | 0.616 1 | |
| 78 | 52.8 | 0.118 4 | 0.201 5 | 0.331 6 | 0.589 3 | |
| 79 | 71.2 | 0.126 9 | 0.306 8 | 0.527 2 | 0.814 6 | |
| 80 | 10.3 | 0.116 4 | 0.1637 | 0.289 5 | 0.513 6 | |

由表1和表2可知,最大断线概率发生在78-79 档电力线,最大倒塔概率发生在79基电力铁塔,最 小电力断线倒塔概率分别发生在74-75档电力线和 75基电力铁塔处。通过断线倒塔概率值的对比分 析,发现与220 kV 城烟线实际断线倒塔的情况一 致。 针对郴州地区另外 4 条 220 kV 线路:城蓉线、 东朝线、蓉桐线、东塘线,计算每条输电线路断线倒 塔的概率,比较理论计算的断线倒塔概率值与实际 断线档数、倒塔基数在每条输电线路中所占比例,如 表 3 所示。

表 3 郴州 220 kV 输电线路断线倒塔概率 Tab. 3 Probability of broken lines and collapsed towers of Chenzhou 220 kV transmission lines

| 线路 | 断线 | 倒塔 概率 | 实际断线 | | 实际倒塔 | |
|-----|---------|----------|------|---------|------|---------|
| | 概率 | | 档数 | 占总档数比 | 基数 | 占总塔数比 |
| 城蓉线 | 0.216 9 | 0.5538 | 14 | 0.225 6 | 37 | 0.534 6 |
| 东朝线 | 0.1598 | 0.419 6 | 9 | 0.150 8 | 24 | 0.410 3 |
| 蓉桐线 | 0.126 4 | 0.435 2 | 7 | 0.132 1 | 22 | 0.425 9 |
| 东塘线 | 0.126 7 | 0.279 6 | 5 | 0.120 6 | 13 | 0.261 8 |

由表 3 可知,实际断线档数和倒塔基数占该线 路总档数和塔数的比例与借助本文所提出的概率模 型计算出的断线倒塔概率基本一致。例如:城蓉线 断线倒塔的概率计算值为 21.69%和 55.38%,而实 际断线 14 档,占总档数比例为 22.56%,倒塔 37 基,占总电力铁塔比例为 53.46%。分析结果表明 基于 GPD 和 Copula 函数的冰风暴灾害下电力断线 倒塔的概率计算模型正确、有效。

6 结语

本文提出的基于 GPD 和 Copula 函数的冰风暴 灾害下电力断线倒塔的概率计算模型,成功应用于 湖南郴州地区 220 kV 输电线路断线倒塔的概率计 算。其模型具有如下特性:

1)GPD 可准确刻画气象变量风速和冻雨量的 极值分布。

2)通过 Copula 函数在一定程度上能较好地刻 画风荷载与冰荷载之间非对称的概率相关性,有效 计算出冰、风荷载对电力线和铁塔的共同影响。

基于 GPD 和 Copula 函数的电力断线倒塔概率 计算模型为快速启动冰风暴灾害下电力预防措施提 供了重要的理论依据。

参考文献

- [1] BROSTROM E, AHLBERG J, SODER L. Modeling of ice storms and their impact applied to a part of the Swedish transmission network[C]// Proceedings of 2007 IEEE Power Tech, July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland: 1593-1598.
- [2] MASOUD F, KONSTANTIN S. Statistical analysis of field data for precipitation icing accretion on overhead power lines[J].
 IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1080-1087.
- [3] KRISHNASAMY S G. Assessment of weather induce transmission line loads on a probabilistic basis[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(9): 2510-2516.
- [4] KAMINSKI J, Jr, RIERA J D, de MENEZES R, et al. Model uncertainty in the assessment of transmission line towers

— 16 —

subjected to cable rupture[J]. Engineering Structures, 2008, 30(10): 2935-2944.

- [5] 薛禹胜,费圣英,卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思:
 (一)新的挑战与反思[J]. 电力系统自动化,2008,32(9):1-6.
 XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part I new challenges and reflection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 1-6.
- [6] 薛禹胜,费圣英,卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思:
 (二)任务与展望[J]. 电力系统自动化,2008,32(10):1-5.
 XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters: Part II tasks and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 1-5.
- [7] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
 XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 8-16.
- [8] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(三)各道防线内部的优化 和不同防线之间的协调[J]. 电力系统自动化,2006,30(3):1-10.

XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part III optimization and coordination of defense-lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10.

[9] 丁裕国. 探讨灾害规律的理论基础——极端气候事件概率[J]. 气象与减灾研究,2006,29(1):44-50.

DING Yuguo. Theoretical basis for discussing disaster disciplinarian—the probability of extreme climate event [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2006, 29(1): 44-50.

[10] HOLMES J, MORIARY W. Application of the generalized Pareto distribution to extreme value analysis in wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1/2/3): 1-10.

- [11] DIERCKX G, BEIRLANT J, WAAL D. A new estimation method for Weibull-type tails based on the mean excess function [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2009, 139(6): 1905-1920.
- [12] KATHLEEN F. A simple model for freezing rain ice loads[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1/2): 87-97.
- [13] 王杨.风荷载下输电塔体系动力可靠性分析[D].大连:大连理 工大学,2008.
- [14] GBJ 135—90 高耸结构设计规范[M].北京:中国建筑工业出版社,1991.
- [15] BATTISTA R C, RODRIGUES R S, PFEIL M S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(8): 1051-1067.
- [16] YU Lining, EBERHARD O V. Construction of bivariate Sdistributions with copulas[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2006, 51(3): 1822-1839.
- [17] 邵振国,林智敏,林韩,等. 在线安全预警中的预想事故生成
 [J]. 电力系统自动化,2008,32(7):15-18.
 SHAO Zhenguo, LIN Zhimin, LIN Han, et al. Online determination of predictive contingency in security forewarning analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 15-18.

徐文军(1984—),男,硕士研究生,主要研究方向:市场 运营环境下电力系统的分析与控制。E-mail: xwj--163@ 163. com

杨洪明(1972—),女,通信作者,博士,教授,主要研究方向:市场运营环境下电力系统的分析与控制。E-mail: yhm5218@163.com

赵俊华(1980—),男,在博士后流动站从事研究工作,主 要研究方向:电力系统的分析与控制、电力经济。

Probability Calculation of Broken Transmission Lines and Collapsed Towers Under Ice Storms

XU Wenjun¹, YANG Hongming¹, ZHAO Junhua², DONG Zhaoyang³, LAI Mingyong⁴, XUE Yusheng⁵ (1. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China;

4. Hunan University, Changsha 410079, China; 5. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: A probability calculation method of broken lines and collapsed towers under ice storms based on generalized Pareto distributions (GPD) and Copula function is presented. Based on GPD of meteorological variables, such as wind speed and freezing precipitation, the probability calculation model of ice loads and wind loads on transmission lines and towers are proposed. Then a joint probability distribution model for ice and wind loads of power line and tower is put forward, in considering the dependence of ice loads and wind loads and based on Copula function. Furthermore, a probability calculation of broken lines and collapsed towers under ice storms is completed for historical data of 220 kV transmission system in Chenzhou power grid, Hunan. Comparing the calculation results with practice, it shows that the accuracy and validity of this model are quite perfect.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 70601003), Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-08-0676), National Natural Science Funds for Distinguished Young Scholars (No. 70925006), Key Scientific and Technological Project of Hunan Province (No. 2008FJ1006) and the Hong Kong Polytechnic University (No. ZV3E).

Key words: generalized pareto distributions (GPD); Copula function; joint probability distribution; broken lines and collapsed towers; ice storm