

强台风环境下考虑微地形因素的输电通道结构安全概率评估方法

王泽斌¹,王松岩¹,陈莹²,陈宁³,陈彬⁴,于继来¹

1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 国网福建省电力公司厦门供电公司,福建 厦门 361000;
3. 中国电力科学研究院有限公司,江苏 南京 210003;
4. 福建省电力公司电力科学研究院,福建 福州 350023)

摘要:提出一种强台风环境下考虑微地形因素的输电通道结构安全概率评估方法。首先,基于地面自动气象站信息,提出了一种适用于输电塔结构安全分析的台风近地面风场模型;其次,针对真实台风环境中受破坏输电塔主要集中在峡谷地貌区域的灾损现象,分别提出了平地与峡谷地貌的2种输电塔失效计算方法;然后,对峡谷地貌进行了微地形建模,给出了峡谷吹出风速、漩涡气流风速与漩涡区范围经验计算公式以用于输电塔结构安全分析。指出峡谷区域气流的狭管效应在台风环境下对输电塔结构性破坏有重要作用,并建立了良态风环境与漩涡气流环境下的2种输电塔失效概率曲线。最后,综合评估台风环境下电网总体结构安全水平。基于2016年台风莫兰蒂对F省的输电通道结构安全进行分析评估,结果验证了所提方法的有效性和工程实用性,评估结果可为电网运维部门安全校核及物资调配提供重要依据。

关键词:输电网;台风;热带气旋;狭管效应;电网结构安全;模型

中图分类号:TM 71

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201911026

0 引言

台风登陆后会在短时间内释放出巨大的能量,对登陆点附近区域电网输电通道造成大范围结构性破坏^[1-2],目前极端气候出现频率提升,台风对沿海地区电网结构性破坏已不能简单归为传统意义上的小概率风险事件。因此在台风逐年多发的背景下,电网输电通道结构安全评估工作就显得尤为重要^[3]。

目前国外及我国沿海电网一般根据台风高空气象云图经折算后得到近地面风场^[4]。然而此做法存在2个问题:高空气象云图折算到地面风场后模型存在较大误差;经折算的风场为地面数百米以上的风场,而输电塔及建筑物高度却为数十米量级,因此模型适用度不佳。从沿海电网实际灾损情况来看,台风对电网的结构性破坏仅存在于半径约为20 km的极小范围内,远低于理论计算值,因此研究一种适用于电网输电通道结构性失效分析的台风近地面风场建模方法就显得极为重要^[5-9]。

在地面微气象视角下,由于输电通道杆塔所处

地形复杂多样,台风气流在微地形的作用下可能会加速并产生漩涡气流,从而对输电通道设备产生更为剧烈的破坏作用。目前在强台风环境下电网结构安全评估研究领域,文献[10]提出了以月为单位的时变故障率计算方法,用以预测未来时段的输电线路故障率;文献[11]对架空输电线路大风灾害预警方法进行了研究,利用气象和地理信息,提出了台风情况下杆塔故障及风偏事故的预警等级评估方法;文献[12]提出一种较全面地反映气象环境对电网故障率影响的时空预警框架,分析了断线、倒塔、风偏闪络等故障机理;文献[13]通过台风风场建模计算电网结构安全破坏状态组合,并建立概率潮流模型,给出系统风险调控策略;文献[14]利用高程数据修正输电塔高度风速并采用指数型输电塔失效概率曲线,提出一种短时输电通道结构失效概率评估方法。

以上研究成果对台风环境下电网防灾减灾工作具有重要价值。然而台风近地面风场复杂,对输电通道结构安全评估不准的情况始终存在,这也导致了电网结构安全评估结果在实际工程应用中或多或少地存在着保守或冒进的问题。为此,本文结合我国东南沿海F省超强台风莫兰蒂期间的实际灾损情况,提出了一种台风环境下考虑微地形的输电通道结构安全评估方法。通过大量的地面气象站量测风速数据,在台风登陆前辨识台风的近地面风眼半径;指出台风风场经过峡谷地区会产生“狭管效应”,在其作用下,峡谷内的气流加速效应及谷口的漩涡气流对输电塔结构安全具有极为显著的破坏作用;给

收稿日期:2019-01-14;修回日期:2019-12-19

基金项目:国家电网公司科技项目(台风环境下沿海风电多点汇集接入系统风险评估及协调运行技术研究)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC (Research on Risk Assessment and Coordination Operation Technology of Coastal Wind Power Multi-point Convergence Access System under Typhoon Environment)

出了谷口漩涡区的经验计算公式,以及良态风和峡谷漩涡气流 2 种不同类型风速作用下的输电塔失效概率曲线;根据串联系统可靠性理论,计算电网内各输电通道的失效概率;通过莫兰蒂台风实例验证了方法的合理性与有效性。

1 台风环境下输电通道结构破坏机理分析

1.1 台风对电网结构安全影响特点

台风对电网结构安全的影响应综合考虑地理和气象信息。附录 A 中的图 A1 展示了台风莫兰蒂的移动轨迹、影响区域及所有地面自动气象站位置。

由图 A1 可见,由于莫兰蒂着陆点 10 级风圈半径为 80 km,因此 F 省电网大部分受到台风影响。然而实际灾损结果显示,大部分受台风影响区域内输电通道仅发生风偏闪络等轻微事故,而真正发生输电塔结构性失效的地域仅出现在台风登陆点 XM 市内的极小范围(具体描述见第 4 节)。电网结构破坏集中体现在输电塔的倒塔事故,且在台风登陆 4 h 后再无输电塔结构性破坏事件发生。由此可见,台风对电网运行安全的影响具有电网受灾范围较大、结构破坏发生时间短、结构破坏区域集中的特点。

1.2 台风静态风场模型

近地面台风风场模型是评估输电塔结构安全的研究基础。台风静态模型可以描述为一个移动旋转风场,如图 1 所示。图中, R_{eye} 为风眼半径; V_C 为合成风速; V_R 为环流风速; V_T 为移行风速;输电塔 5—8 受到台风严重影响。

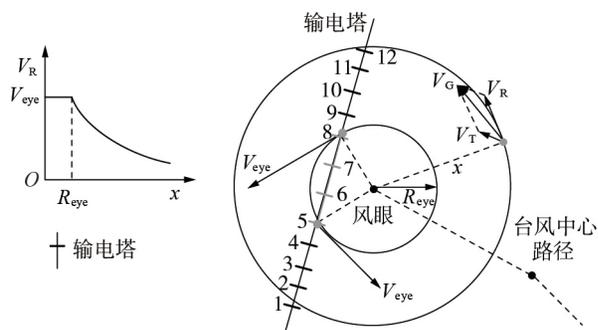


图 1 台风静态模型

Fig.1 Static typhoon model

由图 1 可见,北半球台风呈逆时针旋转。任意位置的风速 V_C 可以分解为环流风速 V_R 与移行风速 V_T 。由于 V_T 远小于 V_R ,因此 V_R 可视为对输电塔结构性破坏的主导因素。基于实际台风期间近地面风场量测发现,风眼壁内部(包含台风中心)存在强风及漩涡气流,从而对整个风眼覆盖区域电网造成巨大结构性破坏。考虑到风眼壁内部风场的复杂性,本文假设整个风眼壁内风速均等于 V_{eye} 。风眼壁外风速会随台风中心距离的增大而递减。

由以上分析可见,风眼(风眼壁到台风中心)是台风中最具破坏力的区域。且从东南沿海各省所发生的实际台风灾损来看,绝大多数倒塔事故也均发生在风眼覆盖区域,如莫兰蒂台风(2016年)与彩虹台风(2015年)等。由于输电塔高度均为地面以上数十米,因此台风的近地面风眼半径辨识就显得极为重要。

1.3 狭管效应对输电塔结构安全的影响

根据 F 省电网历史台风灾损数据,台风对 110 kV 及更高电压等级线路的破坏具有一些典型特征。2016 年莫兰蒂台风经过 F 省后输电塔结构失效统计结果见附录 A 中的表 A1。

总体而言,台风对 F 省 220 kV 及更高电压等级线路的破坏有以下现象:

- (1) 台风对电力系统电气元件的破坏主要体现为输电塔的倒塔等结构失效,输电线很少受到损坏;
- (2) 对于强台风及超强台风情况,处于开阔平坦地带的输电塔几乎没有出现倒塔等结构失效现象;
- (3) 倒塔集中出现在具有峡谷地貌区域。

现象(1)表明输电线的抗风能力要明显强于输电塔,这也与我国杆塔设计方式相符。现象(2)表明输电塔实际抗风能力要远高于理论设计值,即输电塔极限风速设计值具有较大的保守性。现象(3)为台风期间输电塔受到台风风场与峡谷地貌作用后产生的复杂微气象条件影响所致,其机理阐述如下^[15]。

台风过境期间,峡谷台风引发的强劲气流可能恰好流入峡谷地带。由于两侧山脊的挤压作用,气流开始在峡谷内加速,导致峡谷中的风速明显高于平地风速。一旦空气最终流出峡谷到达平地,谷口两侧的空气速度将显著降低。这样谷口中间与两侧的气流将产生较大的速度差,最终导致在谷口两侧产生漩涡气流。狭管效应示意图如附录 A 中的图 A2 所示。

由以上分析可见,狭管效应对输电塔结构安全存在 2 类破坏作用:一是峡谷内风速极高的单向流动风,输电塔所受风荷载可达平地的数倍;二是谷口处形成的漩涡气流。尽管漩涡气流的风速不高,但输电塔周围风速的方向会在极短时间内快速变化,极易导致输电塔结构疲劳并最终破坏输电塔。这也与实际台风灾损结果对应。附录 A 中的图 A3 展示了狭管效应对峡谷内输电塔(图 A2 中的点 A₁)及峡谷出口处输电塔(图 A2 中的点 B₁)的影响。

对莫兰蒂台风期间 XM 市石兜水库所在谷口地带漩涡气流的数值流体力学仿真结果如附录中的图 A4 所示。

图 A4 中,峡谷中心及迎风坡风速较大,点 A 处于峡谷中心,点 B 处于峡谷出口处。点 A 入流线条

密,点B则出现大量涡旋型入流线。这也意味着峡谷区域风速较大,而谷口处则会出现涡流区,进一步验证了狭管效应,而莫兰蒂台风期间A与B两处恰好是倒塔集中地域。

2 基于自动气象站的台风近地面风场建模

为解决传统气象模型由高空到地面的折算问题,本文提出一种利用近地面气象站量测数据来进行风眼辨识的方法。利用近地面气象站辨识风眼半径的原理图如图2所示。

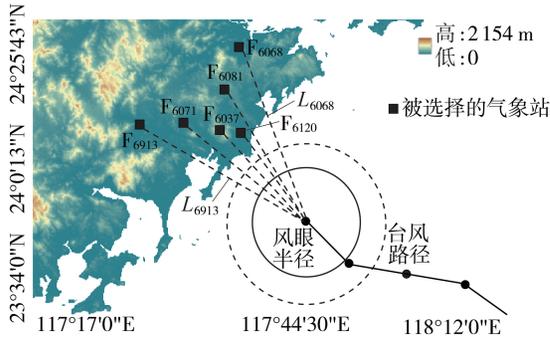


图2 利用近地面气象站辨识风眼半径原理

Fig.2 Principle of identifying radius of eye by using near ground meteorological station

由图2可知,在台风登陆前,靠近台风中心的气象站量测风速将明显高于其他气象站风速。根据Rankine模型^[5],气象站*i*的量测风速和风眼风速 V_{eye} 之间的关系可用式(1)表示。

$$V_i = \frac{V_{eye} R_{eye}}{L_i} \quad L_i \in (R_{eye}, \infty) \quad (1)$$

其中, V_i 为气象站*i*的量测风速; L_i 为气象站*i*与台风中心的距离。 V_{eye} 由气象部门向电网实时提供,因此 R_{eye} 是式(1)中唯一的未知量。为充分利用台风附近多个气象站的量测风速数据,将 R_{eye} 的辨识转化为优化问题:

$$\min \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i L_i - V_{eye} R_{eye})^2 \quad (2)$$

其中, n 为参与风眼辨识的气象站个数。

求解式(2)可得辨识出的风眼半径 $R_{eye}^{(iden)}$ 为:

$$R_{eye}^{(iden)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{V_i L_i}{V_{eye}} \quad (3)$$

对于某具体位置的输电塔*p*,其所受风速 V_p 可描述为:

$$V_p = \begin{cases} V_{eye} & L_p \in [0, R_{eye}] \\ \frac{V_{eye} R_{eye}^{(iden)}}{L_p} & L_p \in (R_{eye}, \infty) \end{cases} \quad (4)$$

由上文可见, $R_{eye}^{(iden)}$ 的辨识过程基于多个气象站数据,从统计角度可合理辨识风眼的近地面尺度特

征。由于风眼辨识过程是基于多个气象站量测信息而非单一数据源,这样即使有少数气象站数据存在一定误差,最终辨识结果仍可保证其合理性。此外, $R_{eye}^{(iden)}$ 完全由近地面量测数据计算获得,因此模型适用于近地面输电塔结构失效分析。

3 强台风环境下的输电通道结构安全评估方法

3.1 峡谷微地形建模

基于地理高程信息^[16],峡谷微地形建模见图3。

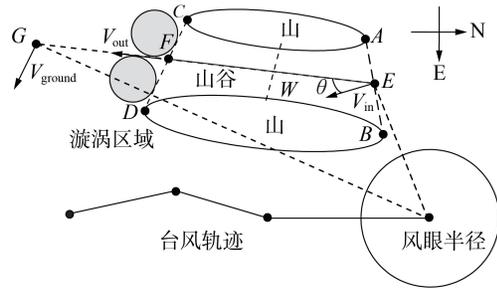


图3 峡谷微地形模型

Fig.3 Micro-meteorological model of valley

图3中,点A—D为山脚;点E和F分别为线段AB和CD的中点,E和F之间的距离为L;W为峡谷的宽度。通过2个山脊的平均高度最大值来计算峡谷深度H; V_{in} 和 V_{out} 分别为峡谷进、出风速; V_{ground} 为距峡谷较远的平地风速。峡谷入口处风速 V_{in} 可根据第2节中的近地面风场模型求得。

峡谷出口处风速可表示为^[17]:

$$V_{out} = V_{in} \left(1 + 0.8 \frac{HL}{W} - 0.26 \theta \right) \quad (5)$$

其中, θ 为 V_{in} 与线段EF的夹角。当近地面风场较为复杂并导致 θ 难以获取时,也可将 θ 设为0。

若台风气流经过峡谷并吹至谷口平地,则峡谷流出风速 V_{out} 会衰减至平地风速 V_{ground} 。衰减过程可表述为:

$$V_{ground} = V_{out} e^{-\alpha t_g} \quad (6)$$

其中, α 为衰减系数,本文中 α 整定为 8 h^{-1} ; t_g 为风速从 V_{out} 衰减至 V_{ground} 的时间。

假设涡流区为2个与线段CD和FG相切的圆,则涡流区直径可表示为:

$$D_{tu} = \int_0^{t_g} V_{gr,t} dt = (V_{out} - V_{ground}) / \alpha \quad (7)$$

涡流区的平均风速可近似表示为:

$$V_{tu} = D_{tu} / t_g \quad (8)$$

式(6)—(8)均为经验公式形式。本文中的 α 值整定过程如下:

(1)根据真实台风期间现场输电线路及植被破坏情况,确定涡流区直径 D_{tu} ;

(2)结合台风期间近地面自动气象站风速量测值并依据数值模拟仿真结果,确定真实台风环境下的 V_{out} 及 V_{ground} ;

(3)根据式(7)计算 α 值。

3.2 平地及峡谷区域输电塔失效概率计算

基于1.3节的分析,将不同位置输电塔所受风荷载的计算归结为以下3点:

(1)平地的输电塔所处位置风速由式(4)求得;

(2)对于峡谷中的输电塔,首先根据式(4)算得峡谷吹入风速 V_{in} ,再根据式(5)计算其所处位置风速;

(3)对于位于峡谷出口处漩涡区域的输电塔,由式(8)计算其所处位置风速。

考虑到1.3节中单向良态风和漩涡气流两者的差异性,将输电塔失效概率曲线分为2种:良态风条件下的输电塔(峡谷中及平地,即图4中塔1—3)失效概率曲线,以及漩涡风条件下的输电塔(图4中的塔4、5)失效概率曲线。

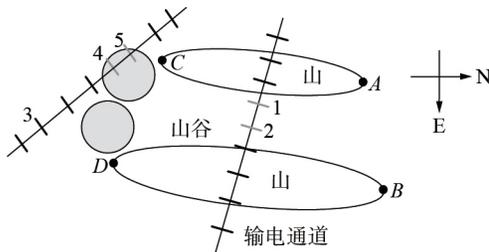


图4 不同地理位置的输电塔

Fig.4 Transmission towers in different locations

良态风环境下的输电塔 i 的失效率可表示为:

$$\lambda_i^{(dir)} = \begin{cases} 0 & V \in [0, V_{min}^{(dir)}) \\ e^{K(V - V_{ex}^{(dir)})} & V \in [V_{min}^{(dir)}, V_{ex}^{(dir)}) \\ 1 & V \in [V_{ex}^{(dir)}, \infty) \end{cases} \quad (9)$$

其中, $V_{min}^{(dir)}$ 和 $V_{ex}^{(dir)}$ 分别为输电塔的设计风速和极限风速。对于110 kV以上电压等级的输电塔, K 可设置为0.2, $V_{min}^{(dir)}$ 和 $V_{ex}^{(dir)}$ 分别设置为35 m/s和70 m/s。进一步地,输电塔失效概率 $P_{out,i}^{(dir)}$ 可表示为:

$$P_{out,i}^{(dir)} = 1 - \exp\left(-\frac{\lambda_i^{(dir)}}{1 - \lambda_i^{(dir)}}\right) \quad (10)$$

良态风环境下的输电塔失效概率曲线见图5。

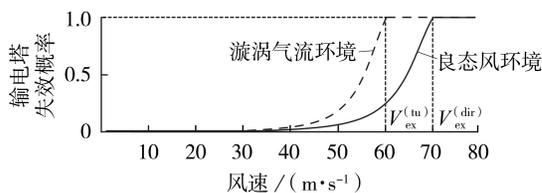


图5 良态风环境下的输电塔失效概率曲线

Fig.5 Failure probability curve of transmission tower in normal climate condition

图5中的失效概率曲线适用于F省设计风速为35 m/s的高压输电塔失效评估。根据台风灾后情况,不同塔高、塔型、导线排列等条件下220 kV输电塔与500 kV输电塔的抗台风能力相差不大,因此该失效概率曲线具有一定的普适性及实用性。

漩涡区域输电塔和良态风环境下输电塔的失效率 $\lambda_i^{(dir)}$ 及失效概率 $P_{out,i}^{(dir)}$ 的计算方法基本相同,但区别在于,受输电塔周围风速方向短时不断变化的影响,漩涡区域输电塔更易发生失效,因此其极限风速要明显小于受良态风荷载的输电塔情况。根据台风历史灾损结果,本文将漩涡区域输电塔设计风速和极限风速分别设为30 m/s和60 m/s。

以上不同风荷载条件下的失效概率曲线建模凸显了漩涡区域的输电塔更易被台风破坏这一物理特性。以图5为例,当风速为50 m/s时,受良态风荷载的输电塔失效概率很低,但漩涡区域的输电塔失效概率已达较高值。

3.3 输电通道失效概率计算

对于由 u 个输电塔串联组成的输电通道 k (含 $u-1$ 段档距),其输电通道失效概率表示为:

$$P_{out,k}^{(corr)} = 1 - \prod_{i=1}^u (1 - P_{out,i}^{(dir)}) \quad (11)$$

假设电网状态 p 所对应的失效输电塔集合为 F ,未失效输电塔集合为 T ,则状态 p 的概率为:

$$\pi_p = \prod_{i \in F} P_{out,i}^{(corr)} \prod_{j \in T} (1 - P_{out,j}^{(corr)}) \quad (12)$$

采用系统状态快速排序技术筛选出高概率系统状态^[18],最终最优系统状态集合为:

$$S_0 = \{S_1, S_2, \dots, S_p, \dots, S_N \mid \forall p, \pi_p \geq \pi_{th}\} \quad (13)$$

其中, π_{th} 为阈值概率。集合 S_0 中包含了电网可能出现的高概率结构安全状态。

4 算例分析

4.1 基于多自动气象站的台风风眼辨识示例

本文以莫兰蒂台风为例展示所提方法的有效性。莫兰蒂于01:00接近XM市,10级风圈半径为80 km。XM市周边存在87个省级地面自动气象站。台风于03:00着陆后,这些气象站的量测风速快速增大。莫兰蒂经过XM市后,8个500 kV输电塔和16个220 kV输电塔被破坏,导致XM区域的2条500 kV输电通道(L_{11-16}, L_{13-14})及5条220 kV输电通道($L_{17-23-I}, L_{17-23-II}, L_{18-24}, L_{23-24}, L_{22-27-I}$)失效,并诱发大面积停电。附录B中的图B1展示了F省网XM市地区输电塔失效情况,图B2为受损输电塔所处区域的立体视图,图B3为F省电网电气接线图。由图B1及B2可见,莫兰蒂经过XM市电网后,倒塔集中在峡谷附近的一小片区域内,充分表明微地形对输电塔结构性失效具有重要作用。莫兰蒂台风气象信息见附

录B中表B1。

莫兰蒂过境期间,4个代表性气象站(F_{2269} , F_{2171} , F_{2186} 和 F_{5617})各时段的实际量测极大风速如图6所示。4个气象站的地理位置见图B1。

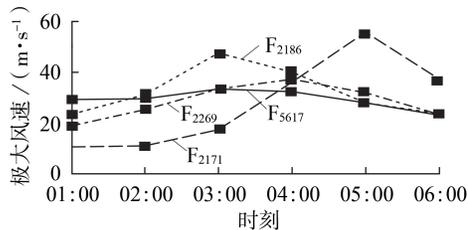


图6 气象站各时刻的实际量测极大风速

Fig.6 Maximum measured wind speed at each time of meteorological station

由图B1与图6可见,随着莫兰蒂台风中心接近陆地,气象站量测风速增大。当台风中心于02:00到达位置②时, F_{2186} 与台风中心的距离大于风眼半径,因此 F_{2186} 的量测风速仍在不断增大。当台风中心于03:00到达位置③时,由于风眼此时覆盖气象站 F_{2186} ,因此 F_{2186} 量测风速达到最大值。相比之下, F_{5617} 量测风速变化幅度很小,这是因为 F_{5617} 距离风眼较远。从04:00开始,台风中心逐渐远离 F_{2186} 和 F_{5617} ,2个气象站的量测风速均开始下降。而 F_{2269} 的量测风速在04:00时却达到最大值,这是因为03:00时 F_{2269} 离台风中心仍有一段距离,而04:00时 F_{2269} 离台风中心最近,导致其量测风速出现最大值。

由以上分析可见,近地面气象站的量测风速可较好地描述台风近地面风场模型。利用台风路径周围多个省级自动气象站量测数据对风眼进行辨识所得结果见表1,并将文献[19]方法与本文方法进行比较。

表1 本文方法所辨识的各时刻台风风眼半径
Table 1 Identification of typhoon eye radius at each time

时刻	R_{eye}/km	时刻	R_{eye}/km
01:00	27.9	04:00	27.2
02:00	24.4	05:00	27.1
03:00	22.9	06:00	31.1

利用文献[19]方法计算台风风眼,所得计算结果为42 km。由表1与图B1可看出,采用本文方法所辨识的风眼半径明显小于文献[19]的结果,在03:00时本文方法所辨识的风眼半径几乎仅为文献[19]结果的1/2。如果按照文献[19]的计算结果,则 F_{2186} 将在多个时段持续被风眼覆盖并达到最大风速,这显然与实际量测结果不符。而本文所提方法则较好地还原了台风近地面风场。需要注意的是,随着台风过境时间的推移,由于风眼风速因台风登

陆后能量衰减而持续减小,表1中辨识的风眼半径在05:00后增大,但由于此时 V_{eye} 明显减小且台风中心已远离电网所在地域,风眼对输电通道已不具破坏力。

4.2 微地形建模及狭管效应分析

由图B1可见,气象站 F_{2171} 处于峡谷地貌中。为有效说明 F_{2171} 所在峡谷地区出现狭管效应,本节结合微地形建模进行实例分析。

基于地理高程数据, F_{2171} 所处峡谷的宽度 $W=1.7$ km,峡谷深度 $H=0.7$ km。峡谷为西北-东南走向。由于莫兰蒂台风逆时针旋转,在01:00—03:00时,受两侧山峰屏蔽, F_{2171} 的量测风速甚至出现远低于远离台风中心的 F_{5617} 量测值的情况(见图6)。由图B1可知, F_{2171} 在04:00及05:00时均靠近台风中心且距离几乎相同,但在04:00时,由于峡谷走向与台风气流流向相错,峡谷阻碍了台风气流。因此尽管此时量测风速迅速增长,但仍未达到最高值,根据3.1节的分析结果,计算得此时峡谷的进、出风速分别为41.67 m/s、55.40 m/s,这也意味着在谷口已经存在漩涡区。两漩涡区计算直径为6.18 km,漩涡区平均风速为48.21 m/s,谷口地带已可能出现倒断塔的现象。在05:00时,台风气流流向与峡谷走向接近,台风气流从西北方向高速流入峡谷。尽管此时因台风能量衰减 V_{eye} 已经开始降低,但受峡谷挤压后气流加速影响, F_{2171} 的量测风速达到最大值,并且该值明显高于其他自动气象站在整个台风期间出现的最大值。此时峡谷吹入风速为45 m/s,高于04:00时的吹入风速,计算得到峡谷流出气流风速为59.82 m/s,漩涡区直径为6.66 km,风速均速为52.06 m/s,因此05:00时的狭管效应要强于04:00时的狭管效应,谷口极可能出现大范围倒断塔。06:00之后,台风中心远离峡谷,气象站 F_{2171} 量测风速降低,狭管效应减弱,谷口漩涡区逐渐消失。

4.3 输电通道失效概率计算

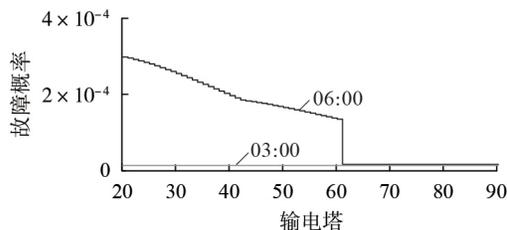
根据4.2节的分析,各时段输电通道失效概率如附录C中的表C1所示。

由表C1可见,在02:00时,由于台风中心远离XM市,输电塔受台风影响较小,因此所有输电通道的故障概率为0。03:00时,部分220 kV线路进入风眼范围内,这些线路的故障概率仅增长至0.0013,基本可以忽略,由此可见平地的输电塔抗风能力较强。04:00时,台风中心靠近峡谷区域,峡谷周围线路失效概率显著上升,线路已有较大概率会发生故障。05:00时,台风气流穿过峡谷,此时狭管效应最为明显,峡谷地区风速达到最大值,输电塔最易发生结构性破坏,多条输电通道失效概率达0.8以上,已接近于确定性事件。在06:00台风远离后,输电通道失效

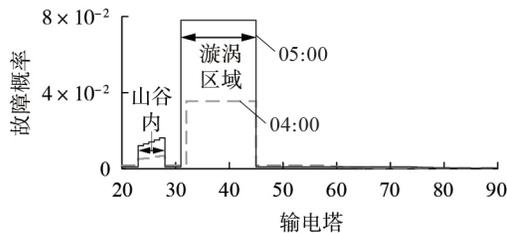
概率归零,这也意味着此时输电通道结构性失效问题不再发生。而F省网灾损报告也表明输电通道集中在04:00—05:00之间发生故障,这进一步说明本文提出的评估方法可较好地应用于实际台风情况。

为了进一步说明莫兰蒂对输电通道的影响,图7中描绘了 L_{13-14} (XM至HC输电通道)中各输电塔在03:00—06:00的理论失效概率。图8中标出了 L_{13-14} 的输电塔序号。

从图7和图8可见,03:00之前,由于台风中心离 L_{13-14} 输电通道很远,因此所有输电塔故障概率接近0。在04:00时,出现了2个连续失效概率峰值,分别位于塔22—28及塔32—46处。塔22—28位于峡谷内部,由于峡谷内狭管效应对气流的加速,这些塔所受风荷载将大于处于平地处的输电塔,因此输电通道失效概率曲线出现第一峰;塔32—46位于漩涡区域,且漩涡区均速比峡谷流入风速还要高,因此失效概率曲线出现第二峰。这2个失效概率峰值的出现极大增加了输电通道的整体失效概率。在05:00



(a) 03:00 和 06:00 时各输电塔的故障概率



(b) 04:00 和 05:00 时各输电塔的故障概率

图7 输电通道 L_{13-14} 在03:00—06:00时段内各输电塔的故障概率

Fig.7 Fault probability of each tower in transmission channel L_{13-14} from 03:00 to 06:00

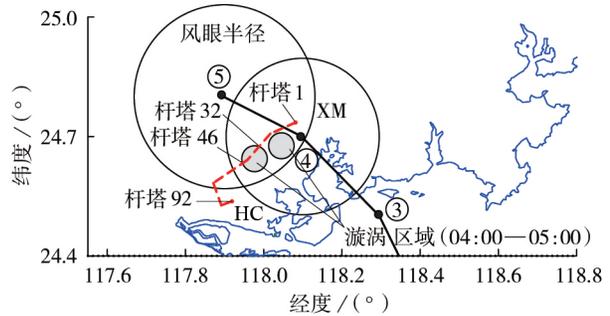


图8 L_{13-14} 输电通道输电塔序号

Fig.8 Number of L_{13-14} transmission channel tower

时,根据4.2节的分析,台风气流流向与峡谷走向接近,狭管效应更强,因此05:00时2个失效概率峰值要大于04:00时的峰值,如图7所示。在06:00之后,台风中心已经远离 L_{13-14} ,此时输电塔失效概率明显下降(小于 3×10^{-4}),输电通道已基本不存在结构性失效风险。

基于以上算得的输电塔故障概率,根据3.3节分析,表2列出了02:00—06:00时段的系统状态。

由表2可知,理论上系统状态共有32768种组合。但表2中故障概率大于0.012的系统状态仅有10种。区别于传统的风险分析方法,本文方法得到的强台风环境下的输电通道失效概率较高,这是因为本文方法充分突出了狭管效应对输电塔失效的影响。同时,经计算得到所有输电通道不失效的概率仅为 2.11×10^{-6} 。该计算结果也意味着,电网调度与检修部门有充分的理由相信在莫兰蒂过境期间,F省电网在XM市地区时“一定”会发生输电通道失效事件,其所面对的只是输电通道失效概率高低及最终通道失效数量多少的问题。同时,表2中故障概率最高的状态1与真实灾损情况高度吻合,进一步说明本文方法可以较好地评估输电通道失效情况。

5 结论

本文针对沿海地区电网常被台风侵袭的情况,提出了一种强台风环境下考虑微地形环境的输电通

表2 系统状态(故障概率>0.012)

Table 2 System state(failure probability is larger than 0.012)

排序	系统状态(失效输电通道组合)	故障概率
1	{ $L_{17-23-I}, L_{17-23-III}, L_{23-24}, L_{17-23-II}, L_{13-14}, L_{19-25}, L_{11-16}, L_{13-15}$ }	0.04690
2	{ $L_{17-23-I}, L_{17-23-III}, L_{23-24}, L_{17-23-II}, L_{13-14}, L_{19-25}, L_{11-16}$ }	0.02650
3	{ $L_{17-23-I}, L_{17-23-III}, L_{23-24}, L_{17-23-II}, L_{13-14}, L_{19-25}, L_{13-15}$ }	0.02528
4	{ $L_{17-23-I}, L_{17-23-III}, L_{23-24}, L_{17-23-II}, L_{13-14}, L_{11-16}, L_{13-15}$ }	0.02129
5	{ $L_{17-23-I}, L_{17-23-III}, L_{23-24}, L_{17-23-II}, L_{13-14}, L_{19-25}, L_{11-16}, L_{13-15}, L_{20-31}$ }	0.01994
6	{ $L_{17-23-I}, L_{17-23-III}, L_{23-24}, L_{17-23-II}, L_{13-14}, L_{19-25}, L_{11-16}, L_{13-15}, L_{23-28}$ }	0.01905
7	{ $L_{17-23-I}, L_{17-23-III}, L_{23-24}, L_{17-23-II}, L_{19-25}, L_{11-16}, L_{13-15}$ }	0.01843
8	{ $L_{17-23-I}, L_{17-23-III}, L_{23-24}, L_{13-14}, L_{19-25}, L_{11-16}, L_{13-15}$ }	0.01429
9	{ $L_{17-23-I}, L_{17-23-III}, L_{17-23-II}, L_{13-14}, L_{19-25}, L_{11-16}, L_{13-15}$ }	0.01417
10	{ $L_{17-23-I}, L_{23-24}, L_{17-23-II}, L_{13-14}, L_{19-25}, L_{11-16}, L_{13-15}$ }	0.01203

道结构安全评估方法。基于地面气象站信息,构建了台风近地面风场模型,回避了高空气象云图折算至地面台风风场模型存在偏差的技术问题,可有效用于地面输电塔失效分析计算;引出微地形对台风气流的影响,分析了峡谷地貌发生狭管效应时2种输电塔结构失效的机理并进行微地形建模,提出峡谷对台风气流的加速效应及峡谷谷口处漩涡气流对输电塔具有决定性结构破坏作用;建立了良态风环境与漩涡气流环境2种情况下的输电塔失效概率曲线。最后根据串联系统可靠性公式评估台风环境下电力系统状态。以莫兰蒂台风为实例验证了本文所提方法的有效性。依据本文方法得到的输电通道失效概率评估结果,既可以用于电网调度部门在台风到来前的6 h时间窗口内用于电网“N-k”安全校核,也可为运检部门提前配置应灾物资用于灾后抢修提供参考。

从我国东南沿海发生的多个台风灾损结果来看,台风暴雨联合作用环境下输电塔似乎更易发生结构性失效问题,这也意味着输电塔故障概率曲线可能需要考虑风雨综合作用效果,需要更进一步的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] LIN L E. The anatomy of a disaster, an overview of Hurricane Katrina and New Orleans[J]. Ocean Engineering, 2010, 37:4-12.
- [2] 张良栋, 石辉, 张勇军. 电网事故原因分类浅析及其预防策略[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4):130-133, 150.
ZHANG Liangdong, SHI Hui, ZHANG Yongjun. Analysis of causes and prevention methods for power network accidents[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4):130-133, 150.
- [3] 巫伟南, 杨军, 胡文平, 等. 考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6):129-134.
WU Weinan, YANG Jun, HU Wenping, et al. Power grid risk assessment system considering characteristics of transmission line failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):129-134.
- [4] 端义宏, 陈联寿, 许映龙, 等. 我国台风监测预报预警体系的现状及建议[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9):4-9.
DUAN Yihong, CHEN Lianshou, XU Yinglong, et al. The status and suggestions of the improvement in the typhoon observation, forecasting and warning systems in China[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(9):4-9.
- [5] 陈孔沫. 一种新的台风风场分布模式[J]. 海洋科学, 1990(3):1-5.
CHEN Kongmo. A new model of typhoon wind field distribution[J]. Marine Sciences, 1990(3):1-5.
- [6] JELESNIANSKI C P. A numerical computation of storm tides by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. Monthly Weather Review, 1965, 93(6):643-658.
- [7] 谢敏, 尹一江, 杜余昕, 等. 考虑复杂天气风险源的电力系统可用输电能力评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4):16-22.
XIE Min, YIN Yijiang, DU Yuxin, et al. Assessment on available transfer capability considering complex weather risk sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4):16-22.
- [8] WANG Yuqing. On the bogussing of tropical cyclones in numerical models: the influence of vertical structure[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1989, 46:975-990.
- [9] MILLER B I. Characteristics of hurricanes[J]. Science, 1967, 157:1389-1399.
- [10] 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, 123.
WANG Jian, XIONG Xiaofu, LI Zhe, et al. Time distribution of weather-related transmission line failure and its fitting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):109-114, 123.
- [11] 翁世杰. 架空输电线路大风灾害预警方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
WENG Shijie. Research of wind disaster early warning method for overhead transmission lines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [12] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2):20-29.
WU Yongjun, XUE Yuheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2):20-29.
- [13] JAVANBAKHT P, MOHAGHEGHI S. A risk-averse security-constrained optimal power flow for a power grid subject to hurricanes[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116:408-418.
- [14] 陈莹, 王松岩, 陈彬, 等. 台风环境下考虑地理高程信息的输电通道结构失效故障概率评估方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7):2295-2302.
CHEN Ying, WANG Songyan, CHEN Bin, et al. Evaluation of the failure probability of power transmission corridors during typhoons using digital elevation information[J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2295-2302.
- [15] 陈文兴. 2016年福建电网输电线路“莫兰蒂”台风受损情况及原因分析[J]. 能源与环境, 2017(1):106-109.
CHEN Wenxing. Damage situation and cause analysis of “Meranti” typhoon in Fujian Power Grid in 2016[J]. Energy and Environment, 2017(1):106-109.
- [16] 中国科学院计算机网络信息中心. 地理空间数据云平台[EB/OL]. [2019-12-23]. <http://www.gscloud.cn>.
- [17] 陈启新. 风速的“狭管效应”增速初探[J]. 山西水利科技, 2002(2):62-64.
CHEN Qixin. Venturi effect on increasing of wind velocity[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2002(2):62-64.
- [18] 刘海涛, 孙元章, 程林, 等. 计及多状态元件模型的系统状态快速排序技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1):16-21.
LIU Haitao, SUN Yuanzhang, CHENG Lin, et al. Fast sorting technique considering multi-state component models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1):16-21.
- [19] 姚恺丰. 热带气旋引发电网群发性故障的动态事故集生成方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
YAO Kaifeng. Generation method of power grid dynamic mass faults set caused by tropical cyclone[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

作者简介:

王泽斌(1995—),男,内蒙古包头人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统风险评估与调控(E-mail: hiteewangzb@163.com);

王松岩(1982—),男,讲师,博士,主要从事电力系统



王泽斌

暂态稳定分析及含可再生能源电网运行调控方面的研究(E-mail: wangsongyan@163.com);

陈莹(1993—),女,福建龙岩人,硕士,主要研究方向为电力系统风险评估与保护控制(E-mail: hiteechen@163.com);

陈宁(1983—),男,江苏南京人,研究员级高级工程师,主要研究方向为新能源

发电并网建模、仿真分析与运行控制(E-mail: chen_ning@epri.sgcc.com.cn);

陈彬(1982—),男,福建福州人,博士研究生,主要研究方向为新能源电力系统控制(E-mail: cb_fz@163.com);

于继来(1965—),男,江苏扬州人,教授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系统分析与控制方面的研究(E-mail: yupwrs@hit.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Safety probability assessment method considering micro-topography for transmission grid under strong typhoon environment

WANG Zebin¹, WANG Songyan¹, CHEN Ying², CHEN Ning³, CHEN Bin⁴, YU Jilai¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Xiamen Power Supply Company of State Grid Fujian Electric Power Company, Xiamen 361000, China;

3. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China;

4. Fujian Electric Power Research Institute, Fuzhou 350023, China)

Abstract: A method considering micro-topography for evaluating the safety probability of the transmission grid under strong typhoon environment is proposed. According to the data from surface automatic meteorological stations, a typhoon near-surface wind field model for structural security assessment of transmission towers is proposed. Considering that the damaged power transmission towers are mainly concentrated on the valley area, the calculation methods of damage mechanism respectively for transmission towers in flat and valley areas are proposed. By modeling the micro-topography of valley, the empirical formulas of wind speed in the exit of the valley, the turbulence wind speed and the radius of the turbulent area are obtained to analyze the structural safety of the power transmission towers. It is pointed out that funneling effect of the valley is of key importance to the structural damage of the power transmission channels during typhoon. Thus failure probability curves respectively in the normal climate condition and the turbulence condition are computed. The level of power system's structural safety under typhoon environment is evaluated. The structural safety of power transmission channels in F province under the influence of Typhoon Meranti in 2016 is evaluated, the results verify that the proposed method is effective and can be used pragmatically in an actual system operation. The evaluation results can provide an important basis for the safety check and material allocation of the grid operation and maintenance department.

Key words: power transmission network; typhoon; tropical cyclone; funneling effect; power system structural security; models

附录 A

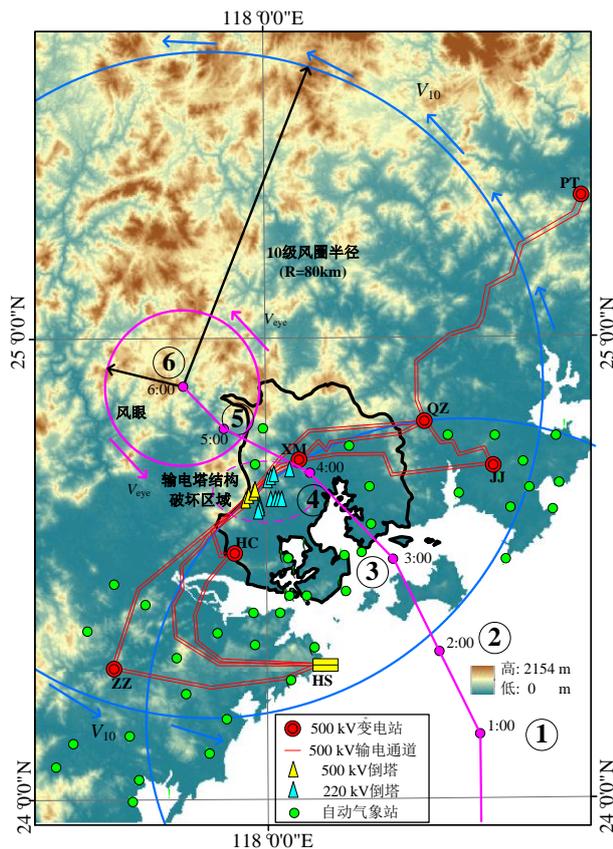


图 A1 莫兰蒂台风通过 F 省时受影响区域

Fig.A1 Affected area of typhoon Meranti which passes through F province

表 A1 台风莫兰蒂期间输电塔结构失效统计

Table A1 Tower structure failure statistics of Meranti

电压等级 /kV	倒塔	断塔	塔头破坏	其他
500	5	0	0	2
220	10	0	5	0

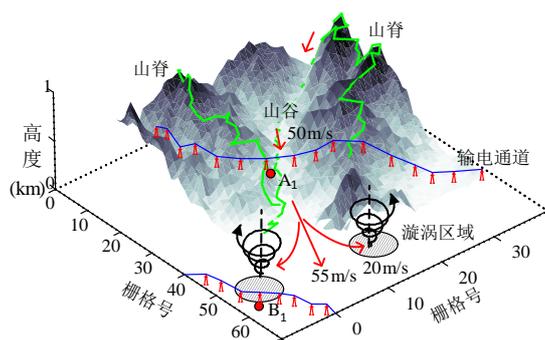
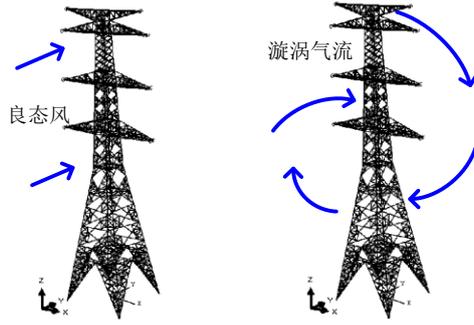


图 A2 狭管效应示意图

Fig.A2 Schematic diagram of funnelling effect



(a)峡谷内输电塔处风速 (b)峡谷谷口输电塔处风速

图 A3 狭管效应对峡谷地带输电塔结构安全影响

Fig.A3 Effect of funneling effect on structure safety of transmission tower in valley

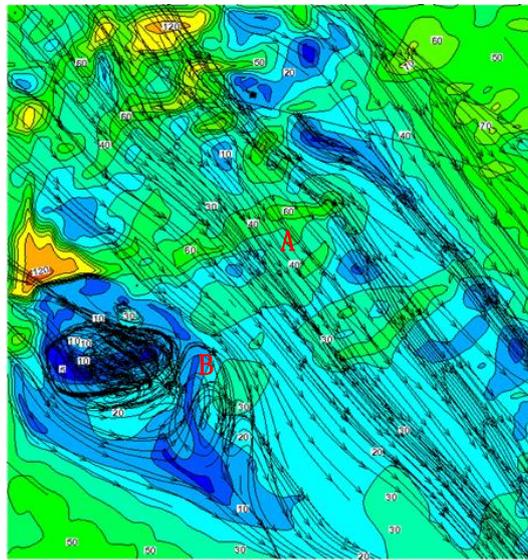


图 A4 石兜水库所在谷口地带流体力学仿真结果

Fig.A4 Simulative results of fluid mechanics in area of Shidou reservoir

附录 B

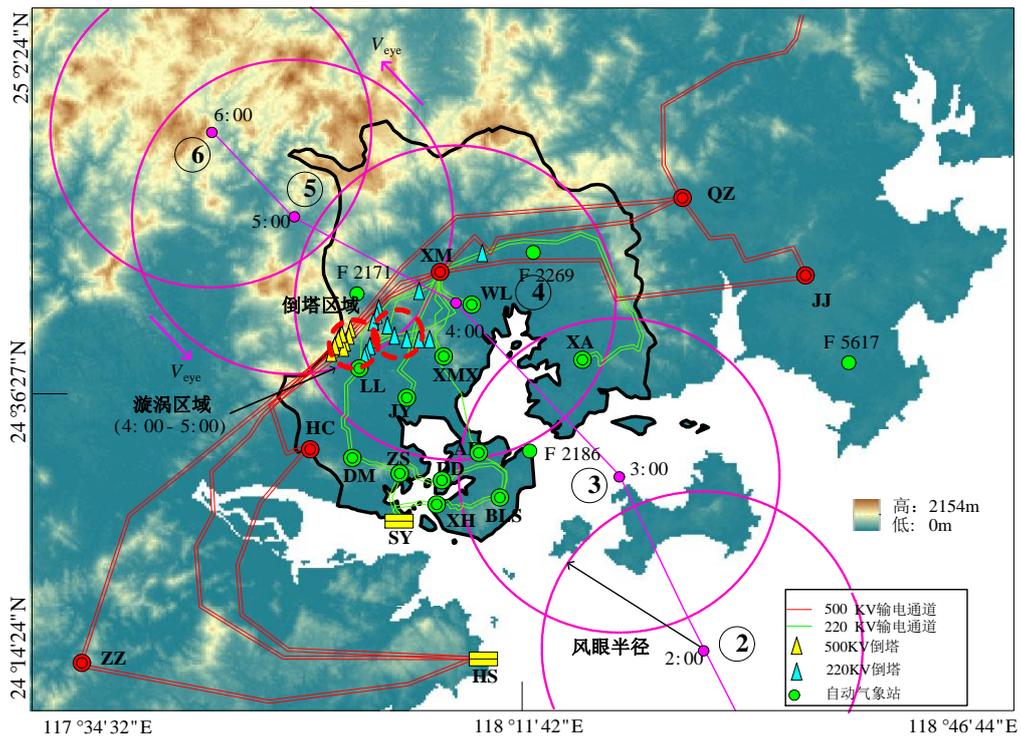


图 B1 XM 市输电塔失效情况

Fig.B1 Failure of transmission towers in XM

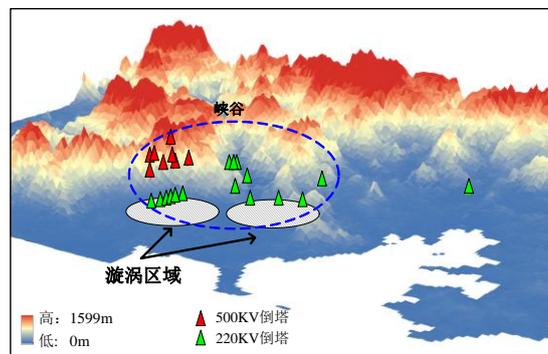


图 B2 受损输电塔区域的立体视图

Fig.B2 3D view of damaged tower area

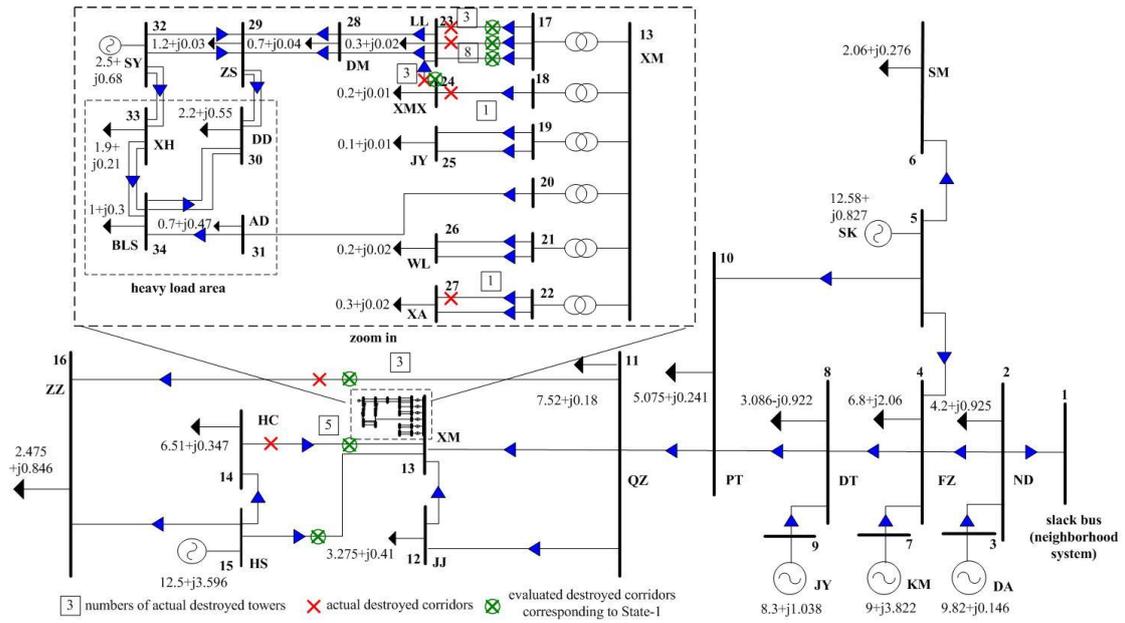


图 B3 F 省电网电气接线图
Fig.B3 Electric diagram of F province

表 B1 台风莫兰蒂气象信息

Table B2 Meteorological information of typhoon Meranti

时间	风眼风速/ (m · s-1)	经纬度/ (°)	7 级风圈半径/km	10 级风圈半径/km
01:00	50	(118.5, 24.1)	200	80
02:00	50	(118.4, 24.3)	200	80
03:00	50	(118.3, 24.5)	200	80
04:00	48	(118.1, 24.7)	200	80
05:00	45	(117.9, 24.8)	200	80
06:00	42	(117.8, 24.9)	200	80

附录 C

表 C1 各时刻输电通道失效概率

Table C1 Failure probability of transmission channel in each time

时间	输电通道	失效概率
02:00	所有	0
03:00	L ₃₁₋₃₄	0.0013
	L ₃₀₋₃₄	0.0013
	L ₃₃₋₃₄	0.0013
	L ₂₂₋₂₇	0.0007
	L ₂₀₋₃₁	0.0003
	其他	0
04:00	L _{17-23-III}	0.6250
	L _{17-23-I}	0.6053
	L ₂₃₋₂₄	0.5402
	L ₁₃₋₁₄	0.4390
	L _{17-23-II}	0.4355
	L ₁₉₋₂₅	0.4263
	L ₁₁₋₁₆	0.4177
	L ₁₃₋₁₅	0.3527
	L _{22-27-I}	0.1520
	L _{17-23-I}	0.8985
	L _{17-23-III}	0.8910
	L ₂₃₋₂₄	0.8343
05:00	L _{17-23-II}	0.7679
	L ₁₃₋₁₄	0.7179
	L ₁₉₋₂₅	0.6878
	L ₁₁₋₁₆	0.6497
	L ₁₃₋₁₅	0.6389
	L ₂₀₋₃₁	0.2983
	06:00	所有