台风对电力系统连锁故障的影响分析

张晶晶, 尉静慧, 李小燕

(合肥工业大学 安徽省新能源利用与节能实验室,安徽 合肥 230009)

摘要:在分析连锁故障现有模型的基础上,在多时间尺度连锁故障预测模型中考虑台风对线路故障概率的动态影响,建立台风变化过程与连锁故障事故链的配合关系。考虑台风影响下的线路故障概率,构造初始故障集;结合天气因素、线路负载率和潮流波动率等因素构造关联性指标,利用聚类方法选取关联性指标高的线路作为下一级故障线路,模拟重载等因素引起的线路随机开断;将基于潮流追踪的切机切负荷与发电机调整相结合,用于线路一般过载的控制,并计算事故链的概率和风险;最后以IEEE 39节点系统为例,说明台风对系统关键线路和事故链的影响、基于潮流追踪的切机切负荷控制的作用和提高线路设计风速的可能性,并验证了所提模型和算法的合理性。

关键词:电力系统;连锁故障;台风;多时间尺度;事故链;潮流追踪 中图分类号:TM 712
文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201909040

0 引言

目前,随着全球气候的变化,极端灾害天气的发 生愈加频繁,给电力系统带来的经济损失不容小觑。 2005年的台风"达维"造成了海南电网主网的崩溃, 台风期间,海南电网全网20条220kV线路共发生故 障跳闸16次,6条线路发生永久性故障;99条110kV 线路共发生故障跳闸63次,24条线路发生永久性故 障,直接经济损失为116亿元^[1]。台风给人们生活 带来不便的同时造成了巨大的经济损失,其对系统 连锁故障停运的影响引起广泛重视。

输电线路停运的主要因素为外部环境(如台风)、服役时间、线路潮流等,这些因素会增加输电线路的故障率,其中短时间内的恶劣天气会引起输电线路故障率和故障概率明显增加。在台风模型方面,文献[2-5]通过模糊推理、指数函数模型等获得台风天气下的线路动态故障率;在台风对系统影响方面,文献[6]认为双状态天气模型不够准确,将模糊推理与区域天气模型结合,应用最小割集法计算台风时期系统的可靠性指标;文献[7]针对电力系统线路和杆塔元件构建受台风实时影响的脆弱性模型,评估系统弹性;文献[8]结合线路故障概率和临界系数选择初始故障,通过元件热稳裕度指数预测事故链下级故障环节;文献[9]通过线路故障概率选择初始故障,计算线路的临界系数,形成临界线路集,计算线路的长程连接系数,对系数较高的线路进

收稿日期:2018-10-24;修回日期:2019-08-09

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(PA-2019GDPK0085);安徽省自然科学基金资助项目(1808085-ME142)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (PA2019GDPK0085) and the Natural Science Foundation of Anhui Province (1808085ME142) 行预警;文献[10]选取故障概率较高的线路作为初 始故障,结合电气介数和线路静态安全能量函数构 建下级故障环节预测指标。上述文献对恶劣天气的 影响进行了一定的研究,主要使用复杂网络理论,未 能详细地模拟电力系统连锁故障的演化过程;针对 基于多时间尺度的连锁故障事故链模型中如何考虑 恶劣天气因素,鲜有详细的研究分析其对系统连锁 故障的影响。另外,常用的切机切负荷控制措施基 于灵敏度方法,如何采用更经济合理的控制措施,对 连锁故障的预防和控制具有重要意义。

本文将台风的影响考虑在多时间尺度的连锁故 障建模中,研究台风在连锁故障演化过程中的影响, 并给出了基于潮流追踪的切机切负荷和发电机调整 的过载协调控制方案。

1 初始故障选取

台风持续期间,受影响的线路及其故障概率随时间推移发生变化,台风对线路故障概率的影响是 一个动态过程,可以综合线路自身故障概率和台风 影响下的故障概率选取线路初始故障集。

台风与线路的位置关系如图1所示。



风速 V 指距离地面高度为 10 m、持续时间为 10 min 的风行进的平均速度。t 时刻线路承担的有效风速^[11]为:

$$V(t) = \left\{ A_1 \exp\left[-\frac{(x - \mu_x(t))^2 + (y - \mu_y(t))^2}{2\sigma_1^2}\right] - A_2 \exp\left[-\frac{(x - \mu_x(t))^2 + (y - \mu_y(t))^2}{2\sigma_2^2}\right] \right\} \sin \alpha(t) (1)$$

其中,(x,y)为某段线路的实际坐标;($\mu_x(t),\mu_y(t)$) 为t时刻台风中心的实际坐标; $A_1 \pi A_2$ 为2个最大的 风速系数, 且 $A_1 > A_2, \sigma_1 \pi \sigma_2$ 分别为对应的衰减系 数, 且 $\sigma_1 > \sigma_2$; $\alpha(t)$ 为该输电线路与台风环绕方向的 夹角。

台风移动过程中风速与线路故障率的关系^[5]为:

$$\lambda_{k}(t) = \sum_{i=1}^{K} \lambda_{k,i}(t) l_{k,i} / 50 = \sum_{i=1}^{K} \exp\left(a \frac{V_{k,i}(t)}{V_{d,k}(t)} + b\right) l_{k,i} / 50$$
(2)

其中, $\lambda_{k,i}(t)$ 、 $V_{k,i}(t)$ 、 $V_{d,k}(t)$ 分别为t时刻线路 L_k 第i段的故障率(以每小时每50 km线路的故障次数表 征)、有效风速和设计风速; $l_{k,i}$ 为线路 L_k 第i段的长 度(单位为km);a、b的值通过历史统计数据得到;K为线路的总分段数; $\lambda_k(t)$ 的单位为h⁻¹。

台风影响下, $[t_0, t_1]$ 时间段的线路 L_k 的故障概 率为:

$$P_{\mathrm{L}_{k},1} = 1 - \exp\left(-\int_{t_0}^{t_1} \lambda_k(t) \,\mathrm{d}t\right) \tag{3}$$

正常天气下线路L_k的自身故障概率^[12]为:

$$P_{\mathrm{L}_{k},0} = l_{k} / \left(\sum_{\mathrm{L}_{j} \in \Omega} l_{j} \right)$$
(4)

其中, l_k 为线路 L_k 的长度; Ω 为电网中所有线路 集合。

$$[t_0, t_1] 时间段的线路 L_k 的初始故障概率为:P_{k,0} = P_{L_k,0} + P_{L_k,1} - P_{L_k,0} P_{L_k,1}$$
(5)

2 系统整体建模

文献[13]在总结连锁故障引发大停电事故的一般过程的基础上,根据连锁故障过程中不同物理现象和控制对策的时间特性,将连锁故障划分为3种时间尺度过程。系统暂态失稳、线路严重过载、发电机越限和与之对应的紧急切机切负荷、线路/发电机保护划入短时间尺度;线路一般过载、线路重载触树和与之相对应的过负荷控制划入长时间尺度;负荷波动和对应的运行方式调节划入极长时间尺度。

考虑台风对线路故障概率的影响,在台风持续 期间,台风移动中同一地区处于不同时间的线路的故 障概率不同,需要对P_{L,}进行更新。表1为更新时间 不同时,前后两时间段内的线路故障概率差值。

表 1	不同更新时间	间的故障植	既率差值
-----	--------	-------	------

Table 1 Failure probability difference for

different update times

更新时间	故障概率差值数量级	更新时间	故障概率差值数量级
1 s	10-5	10 min	$10^{-2} \sim 10^{-1}$
1 min	10 ⁻⁴	30 min	10-1

由表1可知,在不同时间尺度下的线路故障概率随台风变化的程度是不同的,以1s、1min为尺度时线路故障概率变化微小,以10、30min为时间尺度时可以明显看出线路故障概率的变化。为考虑台风的动态影响,建立如附录中图A1所示的台风变化和连锁故障时间尺度的配合关系,选择合理的时间尺度7,计算受影响区域内的线路故障概率指标,构造关联性指标对下级故障支路进行预测。

2.1 关联性指标计算

从连锁故障引发的停电事故中可以看出,连锁 故障的特点是具有明显的前后关联性,推动故障扩 大的原因除线路重载触树、潮流转移和保护隐性故 障,还包括台风引起的线路故障概率增加,这4种因 素可作为预测连锁故障发展下级支路开断的依据。

(1)线路负载率指标*D*_{L_i}。

$$D_{L_k} = \frac{F_{L_k,j} + F_{L_k,j-1}}{F_{L_k,\max}}$$
(6)

(2)耦合指标S_{L_i}。

$$S_{L_{k}} = \left| \frac{F_{L_{k},j} - F_{L_{k},j-1}}{F_{L_{i},j-1}} \right|$$
(7)

(3)潮流波动指标B_{1k}。

$$B_{L_k} = \left| \frac{F_{L_k, j} - F_{L_k, j-1}}{F_{L_k, j-1}} \right|$$
(8)

其中, $F_{L_k,j}$ 为连锁故障第j阶段线路 L_k 的潮流值; $F_{L_k,j-1}$ 、 $F_{L_i,j-1}$ 分别为第j-1阶段线路 L_k 、 L_i 的潮流值; $F_{L_k,\max}$ 为线路 L_k 的潮流极限值。定义一个综合指标 C_{L_k} ,综合考虑支路负载率和耦合关系及潮流波动的 影响。

$$C_{\mathrm{L}_{k}} = D_{\mathrm{L}_{k}} S_{\mathrm{L}_{k}} B_{\mathrm{L}_{k}} \tag{9}$$

$$P_{L_{k},2} = C_{L_{k}} / \sum_{L_{i} \in \Omega} C_{L_{i}}$$
(10)

其中, $P_{L_k,2}$ 为 C_{L_k} 的归一化值。

(4)天气指标P_{L₁,1}。

由于天气指标与综合指标相互独立,所以随机 故障过程中,下级开断线路的关联性指标PL₄及其归 一化值P₄分别如式(11)和式(12)所示。

$$P_{L_k} = P_{L_{k,1}} + P_{L_{k,2}} - P_{L_{k,1}} P_{L_{k,2}}$$
(11)

$$P_{k} = P_{\mathrm{L}_{k}} / \sum_{\mathrm{L}_{i} \in \Omega} P_{\mathrm{L}_{i}}$$
(12)

本文在极长时间尺度内更新天气指标,并结合 负荷波动的特点,将更新时间设置为0.5 h,采用加 权模糊C均值聚类算法^[12]对关联性指标进行聚类, 在每次数据更新后对关联性指标进行分类,选择关 联性指标高的一类支路作为下级开断环节。

2.2 线路过载控制措施

严重过载线路^[13]在短时间尺度内引起保护装置 动作,长时间尺度的一般过载线路通常采用发电机 调度和基于灵敏度方法的切机切负荷控制消除过 载。本文综合采用发电机调整和基于潮流追踪的切 机切负荷控制。

根据文献[14-15],含有n个节点 n_b 条支路的系 统相关度矩阵 $C(\lambda)$ 为 n_b ×n阶实数矩阵:

$$\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\lambda}) = \boldsymbol{Y}_{\mathrm{B}} \boldsymbol{A}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Y}_{\mathrm{N}}^{-1}$$
(13)

其中, Y_B和 Y_N分别为支路导纳矩阵和节点导纳矩阵; A 为节点关联矩阵。

线路L_k上的电流可由各节点的注入电流表示:

$$I_{k,\mathrm{B}} = \sum \lambda_{k,i} I_{i,\mathrm{N}} \tag{14}$$

其中, $I_{k,B}$ 和 $I_{i,N}$ 分别为线路 L_k 的电流和节点i的注入 电流; $\lambda_{k,i}$ 为 $I_{k,B}$ 和 $I_{i,N}$ 的相关度系数。

实际进行紧急控制时,系统需确定能有效消除 线路过载的控制节点及其功率调整量。线路L_k的 有功功率与节点p的注入有功功率的灵敏度为:

 $\beta_{k,p} = \lambda_{k,p} (\cos \phi_{k,B} \cos \phi_{p,N} + \sin \phi_{k,B} \sin \phi_{p,N})$ (15) 其中, $\phi_{k,B} \pi \phi_{p,N}$ 分别为线路L_k首端的电压相角和节 点 p 的电压相角; $\beta_{k,p} > 0 \pi \beta_{k,p} < 0$ 分别表示节点 p 注 入功率增加会导致线路L_k的功率增加和减少。

线路 L_k 的有功功率 $P_{k,B}$ 与节点p的有功功率 $P_{p,N}$ 的关系如式(16)所示。

$$P_{k,\mathrm{B}} = \sum \beta_{k,p} P_{p,\mathrm{N}} \tag{16}$$

基于潮流追踪的切机切负荷,首先根据灵敏度 切机切负荷^[16]的方案,找到切除的位置包括发电机 (负荷)节点及其切除量 $\Delta P_{c}=[\Delta P_{c_1},\Delta P_{c_2},\cdots,\Delta P_{c_s}]^{T}$ 和 $\Delta P_{Li}=[\Delta P_{Lil},\Delta P_{Li2},\cdots,\Delta P_{Lig}]^{T},其中<math>m_{\times g}$ 分别为 发电机和负荷数量。根据切负荷的节点,找到供应 该负荷节点的发电机,排除切机的发电机,剩余的发 电机为可增发机组记为 G_{*} 。在增加发电机出力的同 时,不能造成新的线路过载,增发机组供给负荷的路 径中若有1条线路达到潮流极限,则该发电机停止 增发。发电机G₆的增发量为:

$$\Delta P_{G_i} = \min \left\{ K_{G_i, \max} P_{G_i}, P_{G_i, \sup}, P_{G_i, \min} \right\}$$
(17)

其中, P_{G_i}为发电机 G_i的实际有功功率; K_{G_i, max}为发电机 G_i的最大增发率^[14]; P_{G_i, up}为发电机 G_i的有功出力 上限; P_{G_i, time}为发电机 G_i在过负荷控制允许时间内增 发的有功功率。

设PGLI 为发电机GI对负荷La的有功功率供给

量,则增发机组的增发量可转带的负荷有功功率 ΔP_{Ldi},见式(18)。

$$\Delta P_{\mathrm{Ld}j^{+}} = \sum_{G_i \in G_*} \Delta P_{G_i} \frac{P_{G_i, \mathrm{Ld}j}}{P_{G_i}}$$
(18)

经过增发机组调整后,在保证满足系统约束下, 负荷 L_{i} 的有功切除量 $\Delta P'_{Li}$ 为:

$$\Delta P'_{Ldj} = \Delta P_{Ldj} - \Delta P_{Ldj+}$$
(19)
2.3 系统仿直模型

考虑台风天气的连锁故障仿真流程如图2所示。短时间尺度过程为暂态仿真,包括系统暂态稳 定、线路严重过载和发电机电压越限的判定以及相 应的控制措施。





一般过负荷控制和下级支路随机开断属于长时 间尺度过程,其中下级支路开断体现了台风、线路负 载率和潮流波动率等因素对线路的影响,过负荷控 制包括发电机调度和切机切负荷,若发电机调度时 间小于过负荷控制时间,则可以采用发电机调度措 施;若大于过负荷控制时间,则采用切机切负荷方 案,切机切负荷控制采用基于潮流追踪的切机切负 荷控制方案,综合了潮流追踪方法和基于灵敏度的 切机切负荷方案。 负荷波动和线路故障概率随台风移动的更新属 于极长时间尺度过程。随机选取连锁故障的起始时 刻并将此时的负荷水平和线路故障概率作为初始值。

图 2 中的结束条件为:系统失去总负荷的 30% 以上;系统解列为3个孤岛。满足其中1个条件则结 束仿真。

3 算例分析

本文以 IEEE 39 节点系统为例进行恶劣天气条 件下连锁故障演化过程的研究。受台风影响线路的 分布图和预测的各线路的概率曲线图分别如图 3 和 图 4 所示。初始时刻,台风中心位于(100,0) km 并 以 20 km/h 的速度向 y 轴正方向移动。其他参数设 置分别为: A_1 =50 m/s, A_2 =20 m/s, 台风半径 R_{wind} = 150 km, σ_1 =0.4 R_{wind} , σ_2 =0.05 R_{wind} , V_d =28 m/s, a = 11,b=-18。





图4 线路故障概率分布



设台风在凌晨00:00登陆,选取登陆后第12小时的故障概率求取初始故障线路集合如表2所示。

3.1 连锁故障演化过程分析

0

本文以L₂₀作为初始故障线路,详细阐述其在台 风天气和正常天气下的演化过程,如附录中的表A1 所示。

表2 初始故障集合

Table 2 Initial fault set of line

排序	线路	概率	排序	线路	概率
1	L_4	0.422	6	L_{27}	0.023
2	L_3	0.379	7	L ₂₃	0.022
3	L ₂₉	0.058	8	L_8	0.021
4	L ₂₂	0.032	9	L_{20}	0.016
5	L ₃₁	0.024	10	L ₁₂	0.014

对比分析表A1可得:同样的初始故障线路在不同天气下的连锁故障的演化过程是有区别的。正常 天气下的事故链为L29-L28-L6-L19-L5-L1,台风天气 的事故链为L29-L4-L6-L5-L3-L30-L210 L4由于天气因 素引起的线路关联性指标较高,代替L28改变了事故 链的走向。L5、L6因天气因素使得关联性指标较高, 容易筛选出来作为下级开断支路,是2条事故链共 同的环节。台风天气下事故链走向会因台风的影响 而发生改变。

表3所示的正常天气条件下连锁故障的演化过 程中,L₁₉开断后引起L₃₁一般过载,计算得到过负荷 控制时间为29.09 s,采用切机切负荷方案消除线路 过载。根据基于灵敏度的切机切负荷方案得到的切 机位置和切负荷位置分别为G₈、G₉和节点15、18,G₈ 和G。均切除80 MW,节点15和18分别切除120 MW 和40 MW;根据潮流追踪理论分析得到的供电路径 如图5所示。负荷18仅由G₈和G₉通过L₃₁、L₂₆和L₂₅ 这条路径供电,而负荷15除了可以通过G₈和G₆获取 电能外,还可以通过G₄和G₆获取电能(G₅的电能全 部供给负荷20),G,和G,(可增发的机组)在过负荷 控制时间内分别增发31.6 MW 和33.3 MW,最终节 点15和18分别切除106.89 MW和40 MW的负荷, 因此可以通过基于潮流追踪的切机切负荷控制减少 节点15的切负荷量,增发机组的增发量使得该节点 的切负荷量减少了13.11 MW,避免了部分负荷 停电。

3.2 事故链风险计算

根据文献[13]中连锁故障后果及风险指标的计 算方法,将3.1节中的2条事故链和线路L₃、L₄共因故 障(杆塔倒塌)的事故链的概率及风险值列于表3。

分析表3可得:L₃和L₄作为关键线路影响连锁 故障的发展,L₃和L₄因台风的影响故障概率升高,被 筛选出来作为初始故障线路,若发生倒塔事件,L₃和

表3 事故链风险

Table 3	Fault	chain	risk

编号	事故链	概率	风险值
1	$L_{29}-L_4-L_6-L_5-L_3-L_{30}-L_{21}$	4.20×10^{-4}	151.23
2	$L_{29} - L_{28} - L_6 - L_{19} - L_5 - L_1$	2.96×10^{-4}	47.23
3	$(L_3, L_4) - L_6 - L_5 - L_7 - L_{18} - L_{12}$	6.90×10^{-4}	380.50
4	$(L_3, L_4) - L_{26} - L_{30}$	9.61×10^{-3}	136.11



Fig.5 Power supply path for Load 18 and 15

L₄同时停运,则事故链3的风险会很高;事故链4的 故障环节少,事故链概率大,风险比正常天气下的事 故链2大。比较事故链1和2可得,台风影响了事故 链的走向,如果系统中的关键线路受台风影响,则会 造成更为严重的后果,增加系统的风险,因此在事故 发展过程中要采取更为合理的控制措施。

事故链控制过程及代价如表4所示,表中,V_{G1}、 V_{G2}和V_L分别为切机量、发电机调整量和切负荷量。 事故链2中线路L₁₉跳闸后机组来不及调整,采用基 于潮流追踪的切机切负荷方案的控制代价比基于灵 敏度的紧急切机切负荷控制方案减少约8144元 (15×(600.46-669.35)+700×(160-146.89)),降低了 该事故链的后果和风险。

表4 事故链控制过程及代价

Table 4	Control	process	and	cost	of	fault	chain
---------	---------	---------	-----	------	----	-------	-------

故障	基于灵敏度的切机 切负荷方案 / MW			基于潮流追踪的切机 切负荷方案 / MW		
21.12	$V_{\rm G1}$	V_{G2}	$V_{\rm L}$	$V_{\rm G1}$	V_{G2}	$V_{\rm L}$
L ₂₉	—	85.00	—	—	85.00	_
L_{28}	28.49	159.42	_	28.49	159.42	_
L_6	—	86.01	—	—	86.01	—
L ₁₉	160.00	—	160.00	160.00	64.90	146.89
L_5	45.00	—	_	45.00	_	_
L_1	_	270.03	_	_	274.02	_
总计	233.49	600.46	160.00	233.49	669.35	146.89

图6为根据式(3)绘制的台风登陆后第12小时 线路L₃和L₄在不同设计风速下的故障概率曲线。由 图6可知,线路故障概率随着设计风速增加而减小, 提高线路的设计风速可有效降低台风时的线路故障 概率,从而降低潜在事故链的概率和风险。若仅考 虑设计风速与故障概率的关系,则设计风速越大越 好,但是还需考虑重现期风速、工程造价等因素,选 择一个折中值。实际工程中的设计风速取值应综合 分析、多方论证,保证线路工程的可靠性和经济性。



图 6 设计风速与L₃、L₄故障概率的关系曲线 Fig.6 Curve of design wind speed and failure probability of L₃ and L₄

4 结论

本文研究了台风对连锁故障的演化发展的影响,台风会引起线路的偶然失效,增加线路的故障概率。考虑台风对连锁故障事故链的影响主要表现为 其对初始故障集的选取和下级故障支路预测两方面 的影响。采用IEEE 39节点系统进行算例分析,选 取线路L₂₀作为初始故障得到2种天气条件下的事故 链,表明事故链在台风的影响下路径发生了变化;若 关键线路在恶劣天气影响范围内,则会造成更严重 的后果;采用基于潮流追踪的切机切负荷方案与基 于灵敏度的切机切负荷方案相比,降低了事故链的 后果和风险;可通过提高线路设计风速来降低系统 发生连锁故障的风险。算例验证了本文所建台风天 气下的连锁故障的事故链模型和方法的有效性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 唐斯庆,张弥,李建设,等. 海南电网"9·26"大面积停电事故的 分析与总结[J]. 电力系统自动化,2006,30(1):1-7.
 TANG Siqing,ZHANG Mi,LI Jianshe, et al. Review of blackout in Hainan on September 26th-causes and recommendations[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(1): 1-7.
- [2] 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 Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J].
 Automation of Electric Power Systems,2016,40(2):20-29.
- [3] 孙荣富,程林,孙元章. 基于恶劣气候条件的停运率建模及电 网充裕度评估[J]. 电力系统自动化,2009,33(13):7-12.
 SUN Rongfu, CHENG Lin, SUN Yuanzhang. An outage rate model and system adequacy assessment based on adverse weather conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(13):7-12.
- [4] 靳军.考虑气候灾害的架空线路停运模型研究[D].北京:华 北电力大学,2014.

JIN Jun. Research on climate disasters considered outage models of overhead line[D]. Beijing:North China Electric Power

University, 2014.

162

[5] 宋晓喆.基于风险的电力系统暂态稳定评估与协调控制问题研究[D].杭州:浙江大学,2013.
 SONG Xiaozhe. Risk-based research on power system tran-

sient stability assessment and coordination control[D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2013.

- [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] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5):3747-3757.
- [8] 刘文颖,杨楠,张建立,等. 计及恶劣天气因素的复杂电网连锁 故障事故链模型[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):53-60.
 LIU Wenying, YANG Nan, ZHANG Jianli, et al. Complex grid failure propagating chain model in consideration of adverse weather[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(7):53-60.
- [9] 王佳明,刘文颖,张建立.恶劣天气下的复杂电网连锁故障在 线预警[J].电网技术,2012,36(5):239-244.
 WANG Jiaming,LIU Wenying,ZHANG Jianli. Online early warning model for cascading failure in complex power grid under sever weather[J]. Power System Technology,2012,36(5): 239-244.
- [10] 潘一飞,李华强,许海青,等.考虑气象因子条件下的电网连锁 故障预测[J].华北电力大学学报(自然科学版),2014,41(1): 53-59.

PAN Yifei,LI Huaqiang,XU Haiqing,et al. Cascading failures forecasting to power grid in consideration of weather factor [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition),2014,41(1):53-59.

- [11] BROSTRÖM E, SÖDER L. Modelling of ice storms for power transmission reliability calculations [C] // The 15th Power Systems Computation Conference. Liege, Belgium: University of Liege, 2005:1-7.
- [12] 丁明,肖遥,张晶晶,等. 基于事故链及动态故障树的电网连锁 故障风险评估模型[J]. 中国电机工程学报,2015,35(4):

821-829.

DING Ming, XIAO Yao, ZHANG Jingjing, et al. Risk assessment model of power grid cascading failures based on fault chain and dynamic fault tree [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4):821-829.

[13] 丁明,钱宇骋,张晶晶.考虑多时间尺度的连锁故障演化和风险评估模型[J].中国电机工程学报,2017,37(20):5902-5912.

DING Ming, QIAN Yucheng, ZHANG Jingjing. Multi-timescale cascading failure evolution and risk assessment model [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20):5902-5912.

- [14] 张晶晶,杨洋,丁明,等.考虑Prim分区和机组调整的连锁过载控制策略[J].高电压技术,2017,43(11):3675-3682.
 ZHANG Jingjing, YANG Yang, DING Ming, et al. Control strategy for cascading overload considering Prim partition and generation adjustment[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43 (11):3675-3682.
- [15] 张伯明,陈寿孙,严正.高等电力网络分析[M].2版.北京:清 华大学出版社,2007:194-207.
- [16] 丁明,钱字骋,张晶晶,等.考虑有限理性的电力系统连锁故障 多阶段动态博弈防御模型[J].电力自动化设备,2017,37(2): 69-74.
 DING Ming, QIAN Yucheng, ZHAGN Jingjing, et al. Defence

model based on multistage dynamic game with consideration bounded rationality against power system cascading failure [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):69-74.

作者简介:



张晶晶(1977—),女,安徽寿县人,副教 授,博士,主要研究方向为电力系统规划及可 靠性、电力系统继电保护(E-mail:dragonzjj@ 126.com);

尉静慧(1994—),女,山西晋城人,硕士 研究生,主要研究方向为电力系统连锁故障的 建模和控制(E-mail:persist_wjh@qq.com)。

Impact analysis of typhoon on cascading failure for electric power system

ZHANG Jingjing, WEI Jinghui, LI Xiaoyan

(Anhui New Energy Utilization Saving Laboratory, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Based on the analysis of the existing model of cascading failure, the dynamic influence of typhoon on the line failure probability in the multi-time scale cascading failure model is considered and the cooperation relationship between typhoon change process and cascading failure fault chain is established. Considering the failure probability of line under the influence of typhoon, the initial fault set is constructed. Combining the factors of weather, line load rate, tidal fluctuation rate and so on, the correlation indicator is constructed. The lines with higher correlation index that selected by clustering method are taken as next outage lines to simulate the random line outage caused by heavy load and other factors. The load(generation) shedding based on power flow tracking and generation adjustment are combined to control the general overload lines and calculate the probability and risk value of all fault chains. Finally, with the IEEE 39-bus system taken as an example, the influence of typhoon on critical lines and fault chains, the effect of load(generation) shedding control based on power flow tracking and the possibility of improving design wind speed are demonstrated by case study, and the rationality of the model and algorithm are verified.

Key words: electric power systems; cascading failure; typhoon; multi-time scale; fault chain; power flow tracking





Fig.A1 The relationship between typhoon change and cascading failure

表 A1	连锁故障演化过程

	Table A1Process of cascading failure				
故障	台风天气	正常天气			
	L ₂₉	L ₂₉			
	暂态稳定, L ₂₇ 的负载率	暂态稳定,L ₂₇ 的负载率为			
初始	106%, L ₂₃ 的负载率为 113%,	106%, L ₂₃ 的负载率为 113%,			
故暗	允许调整时间为 312s,发电	允许调整时间为 312s,发电			
IXI+	机调整	机调整			
	L_4	L ₂₈			
	暂态稳定 更新负荷水平	暂态稳定, 解列为2个区域,			
	自恐怖走, 更新英尚尔平	区域功率平衡,更新负荷水平			
	L ₆	L ₆			
	暂态稳定,更新负荷水平	暂态稳定,更新负荷水平			
	哲念稳定,更新负何水平,	哲念稳定,更新负 何 水平,			
	L ₂₃ 的负载率为 104%, L ₂₇ 的	L ₃₁ 的负载率为 127.8%, 过负			
	负载率为 103%,允许调整时	荷控制时间为 29.09s, 采用基			
	间为 9765s,发电机调整控制	于潮流追踪的切机切负荷控			
后续	过载	制方案			
故障	L ₃	L ₅			
	暂态稳定,更新负荷水平,节	功角失稳, G ₂ 切除 4.78%, 系			
	点 3 为孤立的负荷节点	统恢复稳定,更新负荷水平			
		L_1			
	暂态稳定, 解列为2个区域,				
	更新负荷水平,L ₁₈ 的负载率	暂态稳定, 解列为3个区域,			
	为 103%,允许调整时间为	进行区域功率平衡,搜索结束			
	23148s,发电机调整				
	L ₂₁				
	暂态稳定,解列为3个区域,	_			
	区域功率平衡,搜索结束				