

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200504

基于模糊化事故等级指标的调度风险评价方法

何晓峰¹, 林子钊¹, 徐希², 程韧俐¹, 马伟哲¹, 史军¹, 徐欣³

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518001; 2. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 211106;
3. 东南大学, 江苏 南京 210096)

摘要: 为整合不同的后果严重度的指标, 充分反映调度员在调度全过程中规避高等级电力事故的意图, 提出一种基于模糊化事故等级指标的调度全过程风险评价方法。首先给出了考虑调度全过程的事故后果严重度评价指标体系, 然后, 基于南方电网电力事故等级划分标准, 提出了电力事故等级指标的模糊化定级和量化方法。接着, 提出了设备和开关操作故障的模糊化概率建模策略。最后, 提出了考虑调度操作全过程的风险评估技术流程。深圳电网的实际算例表明, 所提风险评估方法可以有效量化电网运行和调度开关操作中的风险, 从而明确判断本次调度操作是否具有实际价值。

关键词: 事故等级; 电网运行; 开关操作; 风险; 模糊化

A dispatch risk assessment method based on fuzzification accident rating index

HE Xiaofeng¹, LIN Zizhao¹, XU Xi², CHENG Renli¹, MA Weizhe¹, SHI Jun¹, XU Xin³

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518001, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 3. Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In order to integrate different severity indicators of the consequences, and fully reflect the intention of the dispatcher to avoid high-level electrical accidents during the whole process of dispatching, this paper proposes a whole process risk assessment method based on fuzzy accident level indicators. First, an accident severity evaluation index system of the whole process of dispatching is considered. Then, based on the classification standard of power accident level of the China Southern Power Grid, a fuzzy grading and quantification method of electric power accident grade index and a fuzzy probabilistic modeling strategy of equipment and switch operation faults is proposed. Finally, a technical process of the risk assessment that considers the whole process of dispatching operations is proposed. The practical example of Shenzhen Power Grid shows that the risk assessment method proposed in this paper can effectively quantify the risk in grid operation and dispatching switch operation, so as to clearly determine the practical value of the dispatching operation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51707034) and the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. 090000KK52160048).

Key words: accident level; power grid operation; switch operation; risk; fuzzification

0 引言

调度操作属于电网常规工作, 在合理分配电能、维持安全稳定运行方面具有重要意义^[1-3]。调度操作全过程指调度方案开始执行直到调度目标达成这个过程, 其风险存在于开关操作和电网运行两个阶段, 开关操作风险指开关有概率出现爆炸、瓷瓶

断裂等事故^[4], 运行风险指目标电网存在的潮流风险和 $N-1$ 故障风险, 因此, 评价调度方案的优劣必须综合评价操作和运行过程中存在的综合风险^[5-8]。

风险评估需要综合考虑事件的后果和不确定性, 因此, 调度操作风险评估首先需要构建后果严重度指标体系, 文献[9-13]从调度决策角度对后果严重度指标的选取原则进行了研究, 文献[14-16]将电压越限、线路过载等指标引入到调度操作风险评价中。在不断丰富指标的同时, 业界也对故障来源及其概率分布开展了研究, 文献[17]考虑设备故障受

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51707034); 中国南方电网公司科技项目资助(090000KK52160048)

天气、老化等因素的影响,建立了风险评估的时变模型,文献[18-23]通过分析操作流程和故障概率分布来研究调度操作风险,文献[24-26]考虑人为因素对调度操作风险的影响。

现有研究存在三个不足:第一,将调度开关操作过程和目标电网运行当成两个独立问题来研究,调度员无法获取调度操作全过程的风险感知视图;第二,不同后果严重度指标的数值范围差异较大,量纲也不尽相同,如何综合评价事故风险难度较大;第三,严重事故的发生概率一般很小,后果严重值与发生概率相乘得到的风险数值过小,无法反映调度员倾向规避严重事故的意图。

为解决上述问题,本文提出了一种基于模糊化事故等级指标的调度全过程风险评价方法。首先给出了考虑调度操作全过程的事故后果严重度评价指标体系,然后,基于南方电网电力事故等级划分标准,提出了电力事故等级指标的模糊化定级和量化方法,接着,提出了 $N-1$ 故障和开关操作故障的概率模型及模糊化策略,最后,提出了考虑调度操作全过程的风险评估技术流程。深圳电网的实际算例表明,本文方法可以有效量化电网运行和调度开关操作中的风险,从而明确判断本次调度操作是否具有实际价值。

1 模糊化事故等级指标

本节首先提出考虑调度操作全过程的事故后果严重度评价指标体系,然后,基于南方电网电力事故等级划分标准,提出电力事故等级指标的模糊化定级和量化方法。

1.1 事故后果严重度指标体系

调度操作全过程的不同阶段调度员关注的电网指标不同:在电网稳定运行阶段,调度员主要关注当前断面和 $N-1$ 故障断面下的潮流越限、电压越限、设备重载和负荷损失等问题;在调度的开关操作阶段,调度员重点关注开关爆炸、瓷瓶断裂等操作故障引起的负荷损失和厂站全停等问题。因此,本文选取潮流越限、电压越限、设备重载、负荷损失和厂站全停共5个后果严重度指标评价调度操作全过程的风险^[27]。

1) 潮流过载指标 R_T

潮流过载指标能够反映电力系统运行断面的潮流越限状况,计算公式如式(1)、式(2)所示。

$$R_T = \sum_{i=1}^S K(P_i) \frac{P_i - P_{r,i}}{P_{r,i}} \quad (1)$$

$$K(P_i) = \begin{cases} 1 & P_i > P_{r,i} \\ 0 & P_i \leq P_{r,i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: S 为发生潮流越限的断面数量; P_i 为断面 i 的实际输送功率; $P_{r,i}$ 为断面 i 的输送功率控制值。

2) 线路重载指标 R_E

线路重载指标是对输电线路电流超过额定电流的度量。本文规定流过线路的实际电流大于其额定电流50%时,该线路属于重载线路,计算公式如式(3)所示。

$$R_E = \text{Max}_{i=1}^n \frac{I_l}{I_{l,n}} \quad (3)$$

式中: I_l 为第 l 条重载线路的实际电流; $I_{l,n}$ 为第 l 条重载线路的额定电流, n 为出现重载线路的数量。

3) 电压越限指标 R_V

电压越限指标反映系统的电压越限状态,计算公式如式(4)所示。

$$R_V = \text{Max}_{i=1}^n K_{ev}(U_i) \quad (4)$$

式中: n 为出现电压越限的节点数量; $K_{ev}(U_i)$ 代表母线 i 上的电压越限程度,计算公式如式(5)所示。

$$K_{ev}(U_i) = \begin{cases} U_i - 1, & U_i \geq 1 \\ 1 - U_i, & U_i \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_i 为节点 i 的电压值; $U_{u,i}$ 、 $U_{l,i}$ 为节点 i 电压的上限和下限。

4) 负荷损失指标 R_L

该指标反映负荷损失的程度,按式(6)计算。

$$R_L = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{L_0} \quad (6)$$

式中: L_i 为节点 i 损失的负荷量; L_0 为电网的原始负荷。

5) 厂站全停指标 R_S

开关操作故障引起的母线保护动作会造成严重的厂站全停事故,该指标描述了变电站全站对外停电的数目和等级,计算公式如式(7)所示。

$$R_S = \sum_{i=1}^n K(i)\eta_i \quad (7)$$

式中: η_i 为变电站 i 的重要程度,与变电站 i 的电压等级有关,本文定义110 kV变电站为1,220 kV变电站为5; $K(i)$ 为阶跃函数,当变电站全站失压时为1,其他为0。

1.2 模糊化的事故等级指标

式(1)~式(7)表示的后果严重度指标的数值范围差异较大,量纲也不尽相同,现有研究大都将其处理成去除量纲的百分比形式再相加得到综合风险

值, 但这样的加法不具有明确的物理意义。考虑到调度员非常关心控制严重电力事故, 采用基于电力事故等级的模糊化策略来处理指标, 参考南方电网电力事故等级划分标准, 将电力事故按后果的严重程度分为三级, 具体见表 1^[28-29]。

表 1 操作失败后果严重程度的定级策略

Table 1 Rating strategy of electricity accidents

事故级别	R_T	R_E	R_V	R_L	R_S
一级	20%以上	120%以上	7%以上	12%以上	7以上
二级	10%~20%	100%~120%	5%~7%	5%~12%	3~7
三级	5%~10%	90%~100%	2%~5%	2%~5%	1~3

1) 一级电力事故: 当潮流越限指标 R_T 大于 20%、线路重载指标 R_E 大于 120%、电压越限指标 R_V 大于 7%、负荷损失指标 R_L 大于 12%、厂站全停指标 R_S 大于 7, 以上五种情况发生其中任意一种时, 即认为发生了电网一级事故。

2) 二级电力事故: 当潮流越限指标 R_T 处于 10%~20% 区间、线路重载指标 R_E 处于 100%~120% 区间、电压越限指标 R_V 处于 5%~7% 区间、负荷损失指标 R_L 处于 5%~12% 区间、厂站全停指标 R_S 处于 3~7 区间, 以上五种情况发生其中任意一种时, 即认为发生了电网二级事故。

3) 三级电力事故: 当潮流越限指标 R_T 处于 5%~10% 区间、线路重载指标 R_E 处于 90%~100% 区间、电压越限指标 R_V 处于 2%~5% 区间、负荷损失指标 R_L 处于 2%~5% 区间、厂站全停指标 R_S 处于 1~3 区间, 以上五种情况发生其中任意一种时, 即认为发生了电网三级事故。

需要说明的是, 如果一个故障场景下有多个指标达到了不同的电力事故等级, 取所有指标中最严重的事故等级作为该故障的模糊化事故等级指标, 举例来说, 如果负荷损失指标处于二级事故、其他指标都处于三级事故, 那么整个故障场景的电力事故等级指标定为二级。

综合风险评估需要对各个故障场景下的风险后果指标进行概率求和, 如果两个故障场景下电网处于不同的电力事故等级, 无法直接求和得到一个综合量化风险数值, 因此, 根据不同等级电力事故对应的后果严重度数值范围和调度员对不同风险的量化态度, 表 2 为每个风险等级制定了一个风险量化数值, 解决了不同故障下的风险等级指标无法直接相加的问题^[28-29]。

2 电力事故的概率建模

本文考虑的电力事故分为两大类, 第一类是电网运行过程中可能发生的 $N-1$ 安全事故, 第二类是

表 2 不同风险等级对应的风险量化值

Table 2 Quantized value corresponding to risk level

事故级别	一级	二级	三级
风险量化值	1	0.5	0.2

开关操作过程中开关有概率出现爆炸、瓷瓶断裂、拒动等事故。其中, 电网设备运行过程中发生 $N-1$ 故障的概率模型如式(8)所示。

$$P_s = \sigma \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (8)$$

式中: λ 为维修后再运行的故障率; μ 为修复率; σ 为故障概率修正因子, 和设备负载率有关。

调度工作开始后, 工作人员将按预先制定的单项令序列执行一系列开关操作, 直至调度目标达成或发生故障。只有前 i 步操作都成功执行, 才会执行第 $i+1$ 步操作, 且第 $i+1$ 步操作成功与否的概率与前序操作环节无关。因此, 调度的开关操作过程是一个发散序列, 可以采用图 1 所示的双层事故树描述这种非记忆性的状态序列, 将调度操作风险分析作为顶上事件, 将每一个开关操作可能发生的拒动和爆炸事故作为一个底事件, 底事件的发生概率可以通过统计数据得到。基于深圳电网的历史数据, 如表 3 所示, 开关刀闸操作的成功概率为 0.98, 失败概率为 0.02, 而在操作失败情况中, 机械拒动概率为 0.99, 开关爆炸或瓷瓶断裂的概率为 0.01。

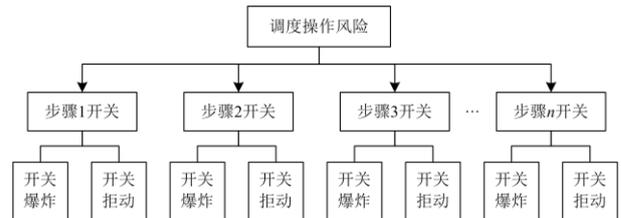


图 1 调度操作事故树

Fig. 1 Accident tree of power network dispatching

表 3 开关操作失败概率

Table 3 Failure probability of switching operation

操作元件	操作状态	操作概率
开关	机械拒动	0.99
	开关爆炸	0.01
刀闸	机械拒动	0.99
	瓷瓶断裂	0.01

电网 $N-1$ 故障和调度开关操作失败的概率都很低, 但一旦发生故障的话, 危害程度可能非常高, 如果将后果和非常小的概率直接相乘, 往往难以体现小概率事件可能造成的严重后果, 因此, 采用对数方式模糊化处理概率, 将原来相差 10 倍的概率大小差异通过对数转换为数值上相差 0.2 的线性数值

差异, 具体计算公式如式(9)所示。

$$P'_k = \begin{cases} (5 + \lg P_k) / 5 & P_k > 0.00001 \\ 0 & P_k < 0.00001 \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_k 为原始的事件概率; P'_k 为模糊化处理之后的概率。当 P_k 小于 0.00001 时, P'_k 直接取 0, 表示不考虑概率小于十万分之一的事件。

3 调度操作全过程的风险评估流程

图 2 给出了调度操作全过程的风险评估流程, 对其说明如下:

1) 电网运行风险分析

对调度操作前后的电网进行拓扑和潮流分析, 计算得到潮流越限、线路重载、电压越限和负荷损失 4 个后果严重度指标, 采用表 1 的分级策略得到电力事故等级。

对调度操作前后的电网进行 $N-1$ 故障分析, 每个 $N-1$ 故障都计算电力事故等级和发生概率。

采用表 2 量化风险等级, 采用式(9)处理故障发生概率, 将正常运行和 $N-1$ 故障的风险值进行概率求和得到电网运行总风险值。

2) 开关操作风险分析

将调度操作的综合令分解为开关操作单项令序列, 分析得到每一步开关操作失败引起的关联母线故障、故障概率、故障电网拓扑和故障潮流, 计算负荷损失和厂站全停 2 个后果严重度指标, 采用表 1 的分级策略得到电力事故等级。

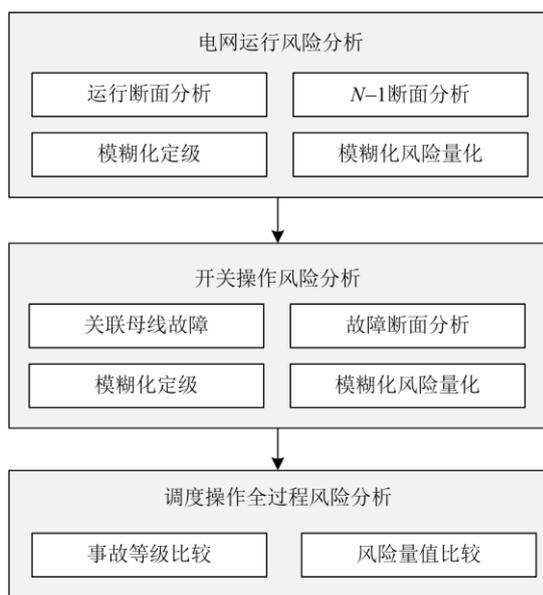


图 2 调度操作全过程风险评估技术框架

Fig. 2 Technical framework of risk assessment for power network dispatching

采用表 2 量化风险等级, 采用式(9)处理开关操作失败概率, 对每一种操作失败进行概率求和得到开关操作过程的总风险值。

3) 调度操作全过程风险分析

综合电网运行风险和开关操作风险进行调度操作全过程风险分析, 重点关注两个方面: 第一, 比较本次调度操作的运行风险减少值和开关操作风险, 如果运行风险值减少明显大于开关操作风险值, 则本次调度操作存在价值; 第二, 关注本次调度操作是否能够规避高等级的电力事故, 如果能够规避, 则本次调度操作存在价值。

4 算例分析

4.1 算例说明

以深圳电网 220 kV 清中甲线(#2369 线路)开关跳闸事件为例进行算例分析, 事故发生时的电网断面如图 3 所示, 220 kV 清中甲线两侧开关跳闸, 重合不成功, 220 kV 中航站全站由 220 kV 清中乙线(#2372 线路)单供。

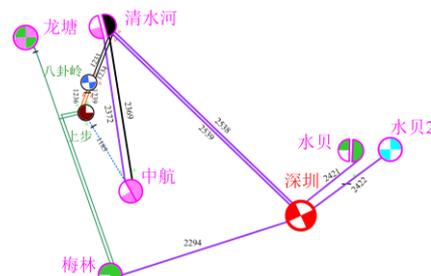


图 3 220 kV 清中甲线两侧开关跳闸事件

Fig. 3 Grid profile of 220 kV Qingzhong Line one emergency shutdown event

此时的电网风险主要有两个: 第一, 由于中航站由清中乙线单独供电, 清中乙线重载, 电网运行风险增大; 第二, 如果清中乙线跳闸, 中航站以及由中航站供电的 110 kV 赛格站、华强站、田面站、岗厦站均会失电, 发生二级电力事故。

为此, 深圳供电局提出如下事故处理方案: 首先, 通过中航站 110 kV 1M 由 110 kV 上中线(#1185 线路)供赛格站全站及 110 kV 华强站#2、#3 主变; 110 kV 田面站#1、#2 主变, 110 kV 岗厦站#1、#3 主变转滨河网供; 将中航站 110 kV 母线转分列运行。事故处理后的网络断面如图 4 所示, 经过调度操作后, 如果清中乙线出现跳闸情况, 失压变电站仅有 220 kV 中航站一个站点, 为三级事故, 成功降低了事故风险, 同时增强了断面的网架结构。

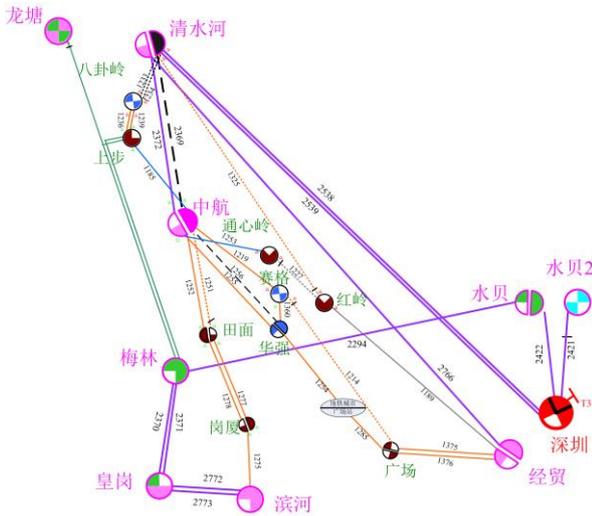


图4 调度操作完成后的电网断面

Fig. 4 Grid profile after dispatching operation

4.2 电网运行风险分析

电网稳定运行关注潮流越限、线路重载、电压越限和负荷损失4个指标，分别对调度操作前后的电网进行潮流分析，对应的后果严重度指标计算结果见表4，对比表1可知，调度操作前，电网潮流越限指标 R_T 、线路重载指标 R_E 都处于三级电力事故指标区间，因此整体处于三级电力事故状态，调度操作后，所有指标正常。

表4 调度操作前后电网运行的严重度指标

Table 4 Consequence indicators before and after dispatching operation

指标	R_T	R_E	R_V	R_L	事故级别
操作前	7.9%	92%	0.3%	0	三级
操作后	2.2%	62%	0.2%	0	无

基于深圳电网的历史数据，设线路 $N-1$ 故障的概率为 0.000 2，系统发生三级及以上电力事故的概率分布如表5所示。可以看出：调度操作前， $N-1$ 故障可能引起二级电力事故，概率为 0.000 2，三级事故概率为 0.000 4；调度操作后，系统只存在概率为 0.000 6 的三级事故风险。

表5 调度操作前后 $N-1$ 故障后果的概率

Table 5 Probability consequences of $N-1$ fault before and after dispatching operation

指标	一级事故	二级事故	三级事故
操作前	0	0.000 2	0.000 4
操作后	0	0	0.000 6

通过表2所示的量化风险等级指标和式(9)得到的事故发生概率，将正常运行和 $N-1$ 故障的风险进

行概率求和，可以得出调度操作前后的系统风险数值分别为 $S_{y1}=0.394$ 和 $S_{y2}=0.071$ ，本次调度操作将系统的风险数值降低了 $\Delta S_y=0.323$ 。

4.3 开关操作风险分析

本次调度的综合令可以分解成表6所示的单项令序列，由于属于紧急故障处理，所有开关操作采用断路器操作。

表6 单项令序列

Table 6 Single order sequence

操作步骤	操作内容
1	闭会上步站上中线 1185 开关
2	闭合岗厦站滨厦线 1275 开关
3	断开田面站中田线 1251 开关
4	断开中航站 110 kV 母联开关 1012

开关操作过程关注关联母线事故引起的负荷损失和厂站全停指标。表6操作的每一步都存在开关拒动和开关爆炸的概率，对其分析如下：步骤1中，#1185 开关拒动则步骤2不再进行，系统停留在调度前状态；如果#1185 开关爆炸，则引发母线保护动作，上步站全站失压，该事故属于3级电力安全事故。类似的，其他步骤的风险分析结果见表7。

表7 开关操作对应的风险等级

Table 7 Risk levels corresponding to switch operation

操作步骤	一级事故	二级事故	三级事故
1	0	0	0.000 2
2	0	0	0.000 2
3	0	0	0
4	0	0	0.000 2

根据表7，整个操作过程中三级事故的发生概率为 0.000 6，模糊化之后的概率为 $P'_k=0.356$ ，对应的风险数值 $\Delta S_y=0.071$ 。

4.4 综合风险分析

综上所述，本次调度操作达到的效果如下：

- 1) 将电网的运行风险值从 0.394 降低到 0.071，同时消除了发生二级事故的可能性。
- 2) 开关操作过程增加了一定发生三级事故的可能性，对应的风险值为 0.071。
- 3) 从调度操作全过程来看，以操作风险提高了 0.071 的代价换取了 0.323 的运行风险值降低，同时避免了二级事故发生的可能性，本次操作具有重要意义。

5 结论

本文从事事故后果严重度评价指标体系、电力事故等级指标的模糊化定级和量化方法、设备和开关

操作故障的模糊化概率模型等方面入手, 提出了基于模糊化事故等级指标的调度全过程风险评价方法, 该方法具有如下特点: 便于整合不同量纲和数量级的后果严重度指标; 充分反映调度员规避高等级电力安全事故的意图; 从减少风险值和规避高等级电力安全事故两个方面, 直观评价本次调度操作的价值。

参考文献

- [1] KUMAR D S, SAVIER J S, BIJU S S. Micro-synchrophasor based special protection scheme for distribution system automation in a smart city[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(1): 97-110. DOI: 10.1186/s41601-020-0153-1.
- [2] 占勇, 程浩忠, 熊虎岗. 电力网络连锁故障研究综述[J]. *电力自动化设备*, 2005, 25(9): 93-98.
ZHAN Yong, CHENG Haozhong, XIONG Hugang. Review of cascading failures in electric power network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2005, 25(9): 93-98.
- [3] 陈思宇, 柴庆宣, 李延松, 等. 综合能源系统潮流及最优潮流计算模型与方法综述[J]. *热力发电*, 2020, 49(7): 1-12.
CHEN Siyu, CHAI Qingxuan, LI Yansong, et al. Models and methods of power flow and optimal power flow calculation for integrated energy system: a review[J]. *Thermal Power Generation*, 2020, 49(7): 1-12.
- [4] 李一泉, 焦邵麟, 曾耿晖, 等. 基于贝叶斯网络的电网复杂故障推演新方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(4): 57-63.
LI Yiquan, JIAO Shaolin, ZENG Genghui, et al. A new method to deduce complex fault of power grid based on Bayesian network[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(4): 57-63.
- [5] 彭磊, 孟敬伟, 宁云华. 调度操作安全预控技术探讨[J]. *电工技术*, 2011(3): 33-34.
PENG Lei, MENG Jingwei, NING Yunhua. Discussion on safety control technology of dispatching operation[J]. *Electric Engineering*, 2011(3): 33-34.
- [6] 侯国莲, 弓林娟. 基于量子蜂群聚类的T-S模糊建模在智能发电运行控制中应用[J]. *热力发电*, 2019, 48(9): 108-114.
HOU Guolian, GONG Linjuan. Application of T-S fuzzy modeling based on quantum bee colony clustering in smart power generation operation control[J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(9): 108-114.
- [7] 胡杰, 唐静, 谢仕义. 基于实时动态基线的运行设备多元状态估计方法[J]. *热力发电*, 2021, 50(2): 125-131.
HU Jie, TANG Jing, XIE Shiyi. Multivariate state estimation technique for equipment running condition using real-time dynamic baseline[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(2): 125-131.
- [8] 屈子程, 高亮, 康保林, 等. 基于多源数据的电力系统故障全信息诊断模型[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(22): 59-66.
QU Zicheng, GAO Liang, KANG Baolin, et al. A power system fault full information diagnosis model based on multi-source data[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(22): 59-66.
- [9] 陈东, 潮铸, 呼士召, 等. 电网调度操作安全风险实时评估方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2015, 27(8): 31-36.
CHEN Dong, CHAO Zhu, HU Shizhao, et al. Real-time risk assessment method for dispatching operation security[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2015, 27(8): 31-36.
- [10] 王申华, 何湘威, 方小方, 等. 基于泛在电力物联网多源信息的电网动态风险评估系统[J]. *中国电力*, 2019, 52(12): 10-19.
WANG Shenhua, HE Xiangwei, FANG Xiaofang, et al. Dynamic risk assessment system for power system based on multi-source information of the ubiquitous power internet of things[J]. *Electric Power*, 2019, 52(12): 10-19.
- [11] WAN H, MCCALLEY J D, VITTAL V. Risk based voltage security assessment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(4): 1247-1254.
- [12] NI M, MCCALLEY J D, VITTAL V, et al. Online risk-based security assessment[J]. *IEEE Power Engineering Review*, 2007, 22(11): 50-59.
- [13] 陆波, 唐国庆. 基于风险的安全评估方法在电力系统中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2000, 24(22): 61-64.
LU Bo, TANG Guoqing. Application of risk-based security assessment in power systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2000, 24(22): 61-64.
- [14] 邱威, 张建华, 刘念, 等. 计及运行风险的多目标发电优化调度[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(22): 64-72.
QIU Wei, ZHANG Jianhua, LIU Nian, et al. Multi-objective optimal generation dispatch with consideration of operation risk[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(22): 64-72.
- [15] 林洁瑶. 计及电网变化过程的地区电网运行风险评估分析[J]. *中国信息化*, 2013(14).
LIN Jieyao. Regional power grid operation risk assessment and analysis of the change process[J]. *Zhongguo Xinxihua*, 2013(14).
- [16] 吴子美, 刘东, 周韩. 基于风险的电力系统安全预警的预防性控制决策分析[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(9): 105-109.

WU Zimei, LIU Dong, ZHOU Han. Preventive control decision making based on risk analysis for power system security warning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 105-109.

[17] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明. 电力系统运行风险评估中元件时变停运模型分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 7-12.

NING Liaoyi, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Analysis of a time-varying power component outage model for operation risk assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 7-12.

[18] 林少华, 刘嘉宁, 陈东, 等. 基于故障树理论的电网调度操作实时风险评估[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 121-125.

LIN Shaohua, LIU Jianing, CHEN Dong, et al. Real-time risk assessment based on fault tree theory for power dispatch[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(5): 121-125.

[19] 魏炜, 王恩, 刘哲. 时变概率模型下的电网调度操作过程风险评估[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3509-3514.

WEI Wei, WANG En, LIU Zhe. Real-time probabilistic model based risk assessment of dispatching operations process[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3509-3514.

[20] 刘嘉宁, 潮铸, 钟华赞, 等. 基于广义断面的电网调度操作风险评估[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 155-163.

LIU Jianing, CHAO Zhu, ZHONG Huazan, et al. The risk assessment method for the dispatching operation based on generalized sections[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 155-163.

[21] 吴琼, 余文铖, 洪海生, 等. 基于 XGBoost 算法的配网台区低压跳闸概率预测[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 105-113.

WU Qiong, YU Wencheng, HONG Haisheng, et al. Probability prediction of low-voltage tripping failures in distribution transformer station areas based on XGBoost algorithm[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 105-113.

[22] 侯恺, 曾沅, 贾宏杰, 等. 基于马尔可夫链的调度操作流程风险评估及优选方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 142-148.

HOU Kai, ZENG Yuan, JIA Hongjie, et al. Risk assessment and optimization method for Markov Chain-based scheduling operations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 142-148.

[23] 陈兴华, 李峰, 陈睿, 等. 计及安全稳定二、三道防线的电网运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 159-166.

CHEN Xinghua, LI Feng, CHEN Rui, et al. Risk assessment of power grid operation considering second and third defense line of security and stability[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 159-166.

[24] WANG A, LUO Y, TU G, et al. Quantitative evaluation of human-reliability based on fuzzy-clonal selection[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(3): 517-527.

[25] 陈涛威, 朱凌, 魏可慰. 考虑人因可靠性的调度操作风险评估及应用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(1): 240-245.

CHEN Taowei, ZHU Ling, WEI Kewei. Risk assessment and application for dispatching operation considering human reliability[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(1): 240-245.

[26] 邹清林, 唐健, 刘裕昆, 等. 一种满足风险完备性的调度操作风险量化评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 32-40.

ZOU Qingling, TANG Jian, LIU Yukun, et al. A risk quantitative evaluation method of the dispatching operation considering the complete risk[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 32-40.

[27] 呼士召, 潮铸, 钟华赞, 等. 电网调度操作的风险后果值建模及应用[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 54-60.

HU Shizhao, CHAO Zhu, ZHONG Huazan, et al. Modeling and application of power grid dispatching operation risk consequences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 54-60.

[28] 王英英, 罗毅, 涂光瑜, 等. 基于事故链的电力系统连锁故障风险模糊综合评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(增刊 1): 25-30.

WANG Yingying, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Risk assessment of cascading failures in power system based on fault chain and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(S1): 25-30.

[29] 王一枫, 汤伟, 刘路登, 等. 电网运行风险评估与定级体系的构建及应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 141-148.

WANG Yifeng, TANG Wei, LIU Ludeng, et al. Construction and application of power grid operation risk assessment and rating system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 141-148.

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-08-13

作者简介:

何晓峰(1979—), 男, 工学博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行; E-mail: hxf303@163.com

林子钊(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网调度运行与分析; E-mail: 736622472@qq.com

徐希(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网调度自动化。E-mail: hedy_xuxi@126.com

(编辑 张爱琴)