

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210748

暂态电能质量扰动引发电压变动对闪变检测的影响

汪清¹, 游奕弘¹, 赵誉洲¹, 朱明星², 焦亚东², 高敏²

(1. 南方电网公司新型智慧城市高品质供电联合实验室(深圳供电局有限公司), 广东 深圳 518020;

2. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 随着电能质量在线监测系统建设的深入, IEC 规定的标记已不能应对暂态电能质量扰动在传播过程中引发的电压变动对闪变检测的不利影响, 给闪变源定位方面的技术监督工作带来巨大挑战。针对该现状定义了暂态电压变动并给出刻画其电压均方根值形状的特征量, 而后基于 IEC 闪变仪分析各特征量变化对闪变检测结果的影响特性及程度, 实现考虑背景的暂态电压变动引起闪变水平的量化, 给出幅值差的限值建议, 并通过实例验证。最后面向不同场景在线监测数据, 总结长时闪变月趋势数据分布特征, 提出应用统计学准则的四分位数判别方法, 分析结果表明了该方法的有效性, 为暂态电压变动造成闪变超标的监测点快速筛查提供可选方法。

关键词: 暂态电能质量扰动; 暂态电压变动; 特征量; 闪变; 四分位数法

Influence of voltage variation caused by transient power quality disturbance on flicker detection

WANG Qing¹, YOU Yihong¹, ZHAO Yuzhou¹, ZHU Mingxing², JIAO Yadong², GAO Min²

(1. New Smart City High-Quality Power Supply Joint Laboratory of China Southern Power Grid (Shenzhen Power

Supply Co., Ltd.), Shenzhen 518020, China; 2. School of Electrical Engineering and

Automation, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: With the development of an online power quality monitoring system, the data flagged stipulated by IEC can no longer cope with the adverse impact of voltage variation caused by transient power quality disturbance on flicker detection. This brings great challenges to the technical supervision of flicker source location. Given this, this paper defines the transient voltage variation and gives the characteristic quantity to describe the shape of RMS voltage. Then, based on the IEC flicker meter, it analyzes the influence characteristics and degree of each characteristic quantity variation on flicker detection results, realizes the quantification of flicker level caused by transient voltage variation considering the background, and gives limit value suggestions of amplitude difference. This is verified by an example. Finally, the distribution characteristics of monthly trend data of P_{It} are summarized based on the data of online monitoring in different scenarios, and a quartile discrimination method using statistical criteria is proposed. The analysis results show the effectiveness of the method. It provides an optional method for rapid screening of monitoring points with flicker exceeding the standard caused by transient voltage variation.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited (No. 090000KK52190169/SZKJXM2019669).

Key words: transient power quality disturbance; transient voltage variation; characteristic quantity; flicker; quartile method

0 引言

电力系统中各种电能质量扰动可分为稳态和暂

态^[1-7], 后者具有发生随机性强、持续时间短和幅值突变剧烈的特性, 对依托自动化和电力电子技术的各种新型设备的影响最为突出^[8-9], 其中电压暂降和暂升作为重点研究对象, 在特征提取、检测、识别与溯源^[10-15], 敏感设备耐受力^[16-18], 传播规律与凹陷域^[19-20]等方面都取得较多的成果。

基金项目: 南方电网公司科技项目资助(090000KK52190169/SZKJXM2019669)

对于暂态电能质量扰动监测方面的研究不多,且集中在考虑成本、数据冗余及监测盲区的监测点优化配置方面^[21-22],鲜有涉及暂态电能质量扰动对其他稳态电能质量指标检测影响方面的研究。尽管标准 IEC 61000-4-30^[23]给出了数据“标记”的规定,来避免暂态电能质量扰动(电压暂降、暂升及中断)数据在稳态电能质量指标计算和统计过程中被重复使用,消除测量结果的不可靠性。但随着各省级电力公司电能质量在线监测系统投资建设范围的不断扩大,当电网中某处发生暂态电能质量扰动时,其沿着输电线路和变压器向外围不断衰减传播的过程将被多个不同位置的监测终端记录到,其中必然存在测量电压未达到阈值的监测点,导致“标记”功能的失效,而同时段内这些监测点闪变的测量也出现了异常偏大甚至超标的情况,说明两者之间存在某种关联性。实际上,该问题已在监测点分布密度较高的局部地区多次出现,这给闪变源的定位及责任划分带来困扰,应该引起足够的重视。

实际上,国外电能质量研究领域已经认识到该问题,在标准 IEC 61000-4-30 中定义快速电压变动(Rapid Voltage Change, RVC)指标来包含这一现象。文献[24-25]基于 IEC 闪变仪的原理,开展了 RVC 事件与闪变之间相关性研究,并结合一些电网实测数据进行论证,结果表明 RVC 对闪变具有显著影响。IEC 和 EN 的标准也初步开始限制 RVC 的数量和大小,用以控制电网系统的兼容性,进而减少其对闪变的影响^[26]。但该指标还未得到国内相关研究者的重视,仅有少数的标准解读^[27]。

面对国内相关指标及研究的缺失,本文首先定义暂态电压变动来表示暂态电能质量扰动的这种影响,并给出刻画其电压均方根值形状的特征量。而后基于 IEC 闪变仪分析各特征量变化对闪变检测结果的影响特性及程度,实现考虑背景的暂态电压变动引起闪变水平的量化,给出幅值差的限值建议,并通过实例验证。最后面向不同场景在线监测数据,总结长时闪变月趋势数据分布特征,提出应用统计学准则的四分位数判别方法,以实现因暂态电压变动造成闪变超标监测点的快速筛查,对弥补当前在线监测系统的缺陷,减小闪变源定位干扰具有重要意义。

1 暂态电压变动的定义与特征

暂态电压变动指由电压暂降、暂升及中断等暂态电能质量扰动在传播过程中引起的电力系统中某点的半波刷新电压均方根值处于 0.9~1.1 p.u. 内的现象,彼此关系如图 1 所示。暂态电压变动一般由电

网短路故障和负荷冲击(如电动机启动、电容器组投切及变压器空载合闸等)造成^[28]。

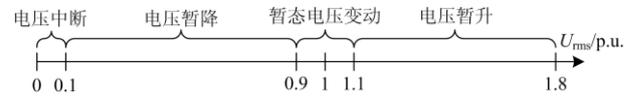


图 1 暂态电压变动定义

Fig. 1 Definition of transient voltage variation

在工频为 f_0 、相电压为 U_m 的交流系统中,发生单次暂态电压变动的典型数学模型可用式(1)表示。

$$u(t) = \sqrt{2}U_m [1 + g(t)] \cos(2\pi f_0 t + \varphi) \quad (1)$$

其中,

$$g(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_s \\ R(t - t_s), & t_s < t \leq t_e \\ \Delta U, & t > t_e \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_s 为暂态电压变动发生时间; t_e 为暂态电压变动结束时间; ΔU 为幅值差,指暂态电压变动结束后相对发生前稳态电压均方根值差,用与标称电压比值的百分数表示; R 为电压幅值的变化率, $R = \Delta U / (t_e - t_s)$ 。以典型的电网短路故障为例,其在发生和结束过程中分别引发 1 次暂态电压变动,且具有方向性(发生时向下变动,结束时向上变动),过程如图 2 所示,2 次相邻的暂态电压变动间的时间 ΔT 称为间隔时间。当 $\Delta T = 0$ 时,通过控制 R_1 、 R_2 、 ΔU_1 及 ΔU_2 即可模拟电机或空载变压器启动引起的暂态电压变动。

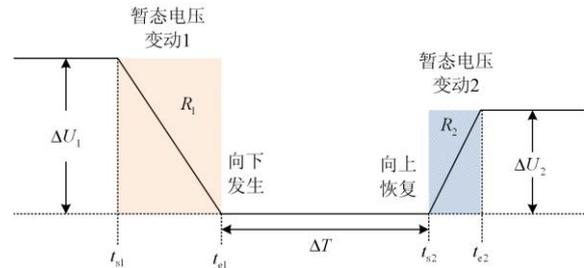


图 2 电网短路故障引起的暂态电压变动示意图

Fig. 2 Transient voltage variation caused by short circuit fault in power grid

综上所述,暂态电能质量扰动引发的暂态电压变动可以通过控制电压幅值差、变化率、间隔时间、变动方向来刻画其电压均方根值的形状。

2 暂态电压变动对闪变检测的影响

2.1 IEC 闪变检测方法

闪变是衡量特定频率、幅值的电网电压波动引起的灯光变化对人视感产生影响的参数,为量化该

指标, IEC 61000-4-15 标准^[29]建立了以白炽灯为参考的灯-眼-脑模型, 进而确定了闪变仪的组成功能模块及各模块设计规范, 如图 3 所示^[30-33]。

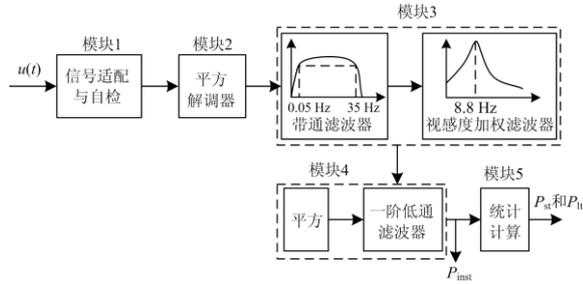


图 3 IEC 闪变仪结构

Fig. 3 Structure of IEC flicker meter

模块 1 基于半波有效值来适配调整(缩放)输入电压。模块 2、3、4 组成灯-眼-脑环节的模拟部分, 其中模块 2 采用平方检测法, 测出调制工频的电压波动, 模拟白炽灯的行为。模块 3 由提取引起闪变频率成分的 0.05~35 Hz 带通滤波器和模拟人眼对灯光变化反应的视感度加权滤波器组成。模块 4 模拟了人脑中视觉神经对眼睛看到的反映和记忆效应, 其中平方是为了模拟人脑的非线性反映过程, 一阶低通滤波器是为了模拟人脑对视觉感知的记忆效应, 最终输出瞬时闪变值 P_{inst} , 其单位值对应于人类闪变可感知度阈值, 即有 50% 的人会感知到这种闪变水平, 但在时间角度, 这不代表不可容忍。

IEC 给出两个不同的观察时段(10 min 和 2 h)内累积的 P_{inst} , 来反映短时闪变严重程度(短时闪变, P_{st})和长时闪变严重程度(长时闪变, P_{lt}), 在模块 5 中实现。首先对 10 min 内的 P_{inst} 做分级统计(不小于 64 级), 获得各级 P_{inst} 的概率分布直方图, 通过累加计算得到累积概率函数(CPF)曲线, 然后按照表 1 取 CPF 曲线上不同时间百分位数处经平滑处理的瞬时闪变值 P_n 及其对应的加权系数 k_n , 按式(3)计算 P_{st} 。

表 1 加权系数及对应时间百分位数处瞬时闪变值

Table 1 Weighting coefficient and instantaneous flicker value at corresponding time percentile

加权系数	时间百分位数处瞬时闪变值(平滑)
$k_1 = 0.0314$	$P_1 = P_{0.1}$
$k_2 = 0.0525$	$P_2 = P_{15} = (P_{0.7} + P_1 + P_{15})/3$
$k_3 = 0.0657$	$P_3 = P_{35} = (P_{2.2} + P_3 + P_4)/3$
$k_4 = 0.28$	$P_4 = P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5$
$k_5 = 0.08$	$P_5 = P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3$

$$P_{st} = \sqrt{\sum_{n=1}^5 k_n P_n} \quad (3)$$

对于平稳的电压波动, 可认为任意时间百分位数处的瞬时闪变值相等, 即 $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P_m$, P_m 为观察时段内的 P_{inst} 平均值, 则

$$P_{st} = \sqrt{\sum_{n=1}^5 k_n P_n} = \sqrt{0.5096 P_m} = 0.714 \sqrt{P_m} \quad (4)$$

利用 10 min 的短时闪变 P_{st} , 按式(5)计算 2 h 的长时闪变 P_{lt} , $N = 12$ 。

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{st,i}^3} \quad (5)$$

2.2 暂态电压变动对瞬时闪变检测的影响特性分析

在 Matlab/Simulink 中按图 3 建立闪变检测仿真模型, 进行不同电压幅值差、变化方向、变化率及间隔时间的暂态电压变动对闪变检测影响的定性分析, 因暂态电压变动的短时突然性, 故采用 P_{inst} 指标的变化情况来描述其影响特性, 结果如图 4 所示。

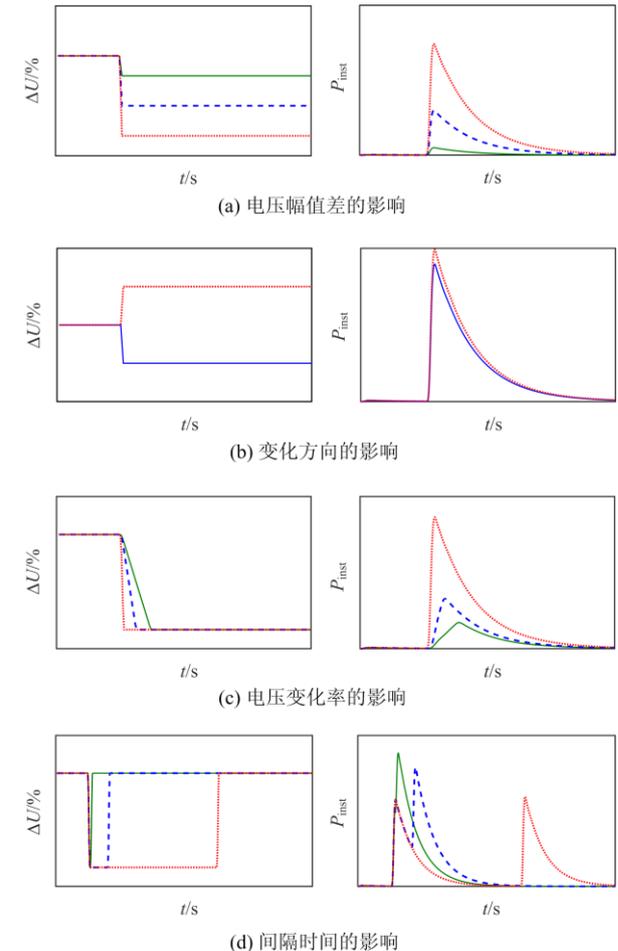


图 4 暂态电压变动对瞬时闪变的影响特性

Fig. 4 Influence of transient voltage variation on transient flicker

由图 4 可以看出:

1) 暂态电压变动幅值差的大小影响着 P_{inst} , 幅值差越大对应的 P_{inst} 曲线最大值越大。需要注意, 尽管 P_{inst} 曲线上升最大值取决于电压幅值差的变化, 但其下降则由灯-眼-脑模型函数的记忆效应决定, 因此, P_{inst} 曲线始终具有相同的下降趋势。

2) 在相同初始电压和幅值差的情况下, 电压向上变动时对应的 P_{inst} 最大值大于向下变动。

3) 暂态电压变动的变化率也是影响 P_{inst} 的重要因素, 在相同的电压幅值差情况下, 电压变化率越大, 对应 P_{inst} 曲线最大值越大, 同时达到最大值的时间也越短。

4) 两个连续的暂态电压变动(先向下后向上)在不同间隔时间下影响情况不同。当两个暂态电压变动之间时间足够长, 即间隔时间大于等于临界时间, 则对 P_{inst} 的影响将分离; 当两个暂态电压变动之间时间足够接近, 即间隔时间小于临界时间, 则对 P_{inst} 的影响将叠加。而临界时间由人脑的记忆效应决定, IEC 标准以时间常数为 0.3 s 的一阶低通滤波器来模拟该过程, 故临界时间约为 4 倍的时间常数, 即 1.2 s。相同幅值差条件下, 间隔时间越短, P_{inst} 曲线最大值越大。

不难发现, 刻画暂态电压变动的特征量的变化从数量大小和时间长短维度对 P_{inst} 产生不同规律的综合影响。而以 P_{inst} 为基础, 通过不同时间累积而来以反映闪变严重程度的 P_{st} 和 P_{lt} 也必然受到不可忽视的影响。

2.3 暂态电压变动特征量影响敏感度分析

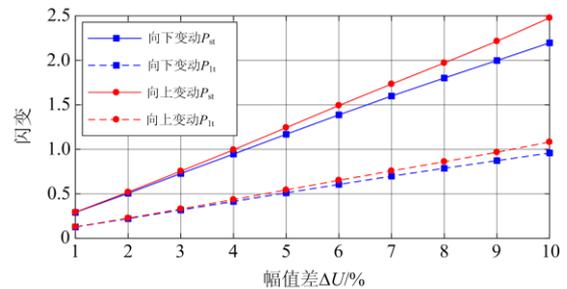
考虑到闪变的大小与电压变化相对值有关, 故以 230 V、50 Hz 电压为例, 在 10 min 内通过控制单一暂态电压变动特征量的方式进行敏感度仿真。间隔时间可参照电压暂降持续时间范围来确定, 不超过 60 s, 具体的仿真取值见表 2。当对某项特征量进行仿真时, 其他变量按默认值设置。特别注意在计算 P_{lt} 时, 非暂态电压变动发生时段的 P_{st} 取 0。

表 2 暂态电压变动特征量仿真取值

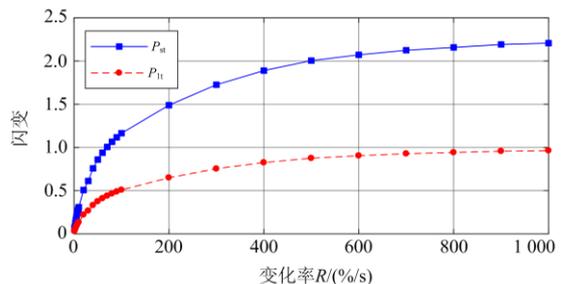
Table 2 Simulation value of transient voltage variation characteristic quantity

特征量	默认值	仿真范围	仿真步长
变动方向	向下	向下/向上	—
幅值差 $\Delta U/\%$	10	$0 < \Delta U \leq 10$	1
		$0 \leq R \leq 10$	1
变化率 $R/(%/s)$	10.00	$10 < R \leq 100$	10
		$100 < R \leq 1000$	100
		$0 \leq \Delta T \leq 1$	0.1
间隔时间 $\Delta T/s$	0.3	$1 < \Delta T \leq 10$	1
		$10 < \Delta T \leq 60$	5

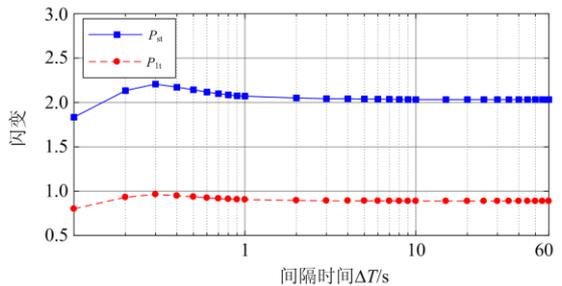
图 5(a)表明, 短时闪变 P_{st} 和长时闪变 P_{lt} (简称闪变值)随着暂态电压变动的幅值差增大而线性增大, 同时向上变动大于向下变动的结果。图 5(b)显示暂态电压变动的变化率增大, 闪变值跟随增大, 但不同变化率区间对闪变值的影响程度各异, 变化率小于 200%/s 时影响最为显著, 闪变值快速增大, 变化率在 200%/s~500%/s 区间的影响次之, 当变化率大于 500%/s 后影响影响较小, 闪变值增大缓慢, 详情见表 3。



(a) 幅值差敏感度分析



(b) 变化率敏感度分析



(c) 间隔时间敏感度分析

图 5 暂态电压变动对闪变影响敏感度

Fig. 5 Sensitivity of transient voltage variation to flicker

表 3 不同变化率区间对应的闪变值增加情况

Table 3 Flicker increase corresponding to different change rate intervals

变化率区间	ΔP_{st}		ΔP_{lt}	
	增量	增率/%	增量	增率/%
小于 200%/s	1.419	0.710	0.620	0.310
200%/s~500%/s	0.515	0.172	0.225	0.075
大于 500%/s	0.202	0.040	0.088	0.018

间隔时间对闪变值的影响是非线性的, 见图 5(c), 随着间隔时间的增大, 闪变值先增大后减小, 该结果与图 4(d)中的叠加特性相关, 仿真条件下, 最大值出现在 0.3 s 处, 临界时间(1.2 s)后两个暂态电压变动的影响分离, 结果趋于稳定。最大值和稳定值间 ΔP_{fl} 不超过 0.076(相对量为 8.56%), 相对幅值差和变化率的影响程度较小。

3 考虑背景的暂态电压变动引起的闪变水平及限值建议

3.1 暂态电压变动引起闪变水平量化分析

为保证供电末端电压偏差满足标准要求, 并减小电压暂降的影响, 实际电网电压运行水平通常高于标称值。在此背景下, 暂态电压变动的最严重情况是由 1.1 p.u. 跌落至 0.9 p.u., 因此幅值差上限为系统标称电压的 20%。同时根据变化率的定义, 在半波刷新均方根(工频 50 Hz 系统半周波为 0.01 s)计算方式下, 幅值差决定了变化率的范围, 彼此关系满足 $R \leq \Delta U \times 100$, 即幅值差确定的情况下, 变化率最大值也确定。综合暂态电压变动在间隔时间 $\Delta T = 0.3$ s 处闪变值最大及幅值差与变化率越大对闪变检测影响越大的结果, 仿真考虑不同背景闪变水平下, 不同幅值差的暂态电压变动引起的闪变最严重情况, 来量化其引起闪变水平。仿真时, 设置背景闪变值在任意时刻均相等, 则根据式(4)、式(5)推算此背景水平下的 P_{inst} , 再与暂态电压变动引起的 P_{inst} 按时间顺序进行算术叠加, 仿真结果如图 6 所示。

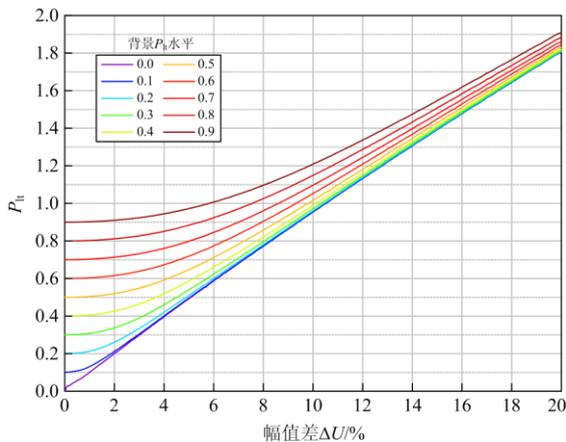


图 6 考虑背景的暂态电压变动引起闪变水平

Fig. 6 Flicker level caused by transient voltage variation considering background

考虑背景闪变影响下, 单次典型暂降过程, 所引起的暂态电压变动最大可造成 1.81~1.91 内的 P_{fl} 。根据标准《GB/T 12326-2008 电能质量 电压波动和

闪变》的规定: ≤ 110 kV 系统, P_{fl} 限值为 1; > 110 kV 系统, P_{fl} 限值为 0.8, 说明暂态电压变动可以引起超过限值的闪变。若 2 h 内暂态电压变动产生多次, 则 P_{fl} 可达到更高水平, 但暂态电压变动属于暂态事件, 根据调研可知单个监测点处每天发生概率不高于 4%^[10], 其短时间内多次发生概率将更低。假设 2 h 内有 3 个 10 min 时段发生了暂态电压变动事件, 其发生概率最高为 0.0064%, 更高的发生次数可认为是小概率事件, 则此时仿真得到的长时闪变值甚至可达 2.60~2.69。

3.2 限值建议

可通过闪变限值来管理暂态电压变动, 通过限制幅值差来控制其影响, 故在暂态电压变动引起闪变水平量化仿真条件下, 取出不同条件下引起闪变达到限值处所对应的幅值差, 结果如表 4 所示。

表 4 闪变限值对应暂态电压变动幅值差

Table 4 Amplitude difference of transient voltage variation corresponding to flicker limit

背景 P_{fl}	幅值差 $\Delta U/\%$					
	≤ 110 kV ($P_{fl}=1$)			> 110 kV ($P_{fl}=0.8$)		
	$N=1$	$N=2$	$N=3$	$N=1$	$N=2$	$N=3$
0.0	10.5	8.2	7.1	8.3	6.5	5.6
0.1	10.5	8.2	7.1	8.2	6.4	5.6
0.2	10.4	8.1	7	8.2	6.4	5.5
0.3	10.3	8	6.9	8.0	6.2	5.4
0.4	10.1	7.8	6.7	7.7	5.9	5.1
0.5	9.7	7.5	6.5	7.2	5.5	4.7
0.6	9.3	7.1	6.1	6.4	4.8	4.1
0.7	8.6	6.5	5.5	5.0	3.7	3.1
0.8	7.5	5.7	4.8	—	—	—
0.9	5.8	4.3	3.6	—	—	—

注: N 为 2 h 内发生暂态电压变动的 10 min 时段个数。

不难发现, 随着背景闪变水平的提升(不超过限值)及长时闪变观察时段内发生暂态电压变动的 10 min 时段个数增加, 引起闪变超标的暂态电压变动幅值差越小。当背景 $P_{fl} \leq 0.4$ 时, 引起闪变超标的幅值差变化范围小; 当背景 $P_{fl} > 0.4$ 时, 引起闪变超标的幅值差变化范围大。为合理最大化限值的适用范围并简化其应用条件, 故以背景 $P_{fl}=0.4$ 为界限, 将 ≤ 110 kV 系统的背景 P_{fl} 划分为 [0,0.4] 和 (0.4,0.9) 区间, 将 > 110 kV 系统的背景 P_{fl} 划分为 [0,0.4] 和 (0.4,0.7) 区间, 对不同区间给出不同限值建议。具体地, 根据表 4 取小于上述背景 P_{fl} 划分区间上限值且 $N=3$ 所对应的幅值差, 并在此值基础上降低 0.1% 的绝对量作为最终限值, 该绝对量为管理裕量, 以进一步降低闪变超标风险, 结果见表 5, 超过该限值的暂态电压变动需进行“标记”。

表 5 不同电压等级系统暂态电压变动幅值差限值

Table 5 Limit value of amplitude difference of transient voltage variation in different voltage level systems

系统背景闪变水平	≤110 kV	>110 kV
$P_{fl} \leq 0.4$	6.6%	5%
$P_{fl} > 0.4$	3.5%	3%

3.3 实测验证

图 7 为某光伏电站 35 kV 并网母线监测的长时闪变结果, 16 时处 P_{fl} 达到 1.08 左右, 超过限值。为查明原因, 遍历闪变超标时段的时域电压波形, 发现其发生了暂态电压变动, 如图 8 所示。

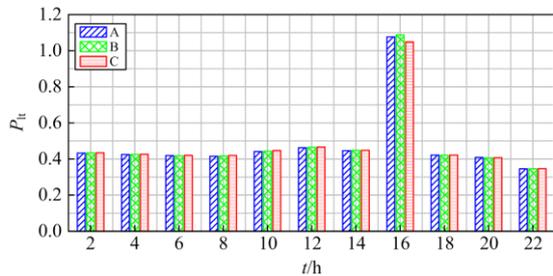


图 7 闪变实测结果

Fig. 7 Flicker measurement results

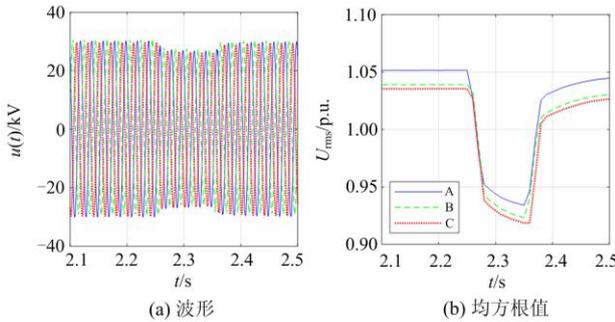


图 8 暂态电压变动实测情况

Fig. 8 Measured transient voltage variation

图 8(b)中的实测暂态电压变动特征量计算结果如表 6 所示。

表 6 实测暂态电压变动特征量

Table 6 Measured transient voltage variation characteristics

相别	向下变动		向上变动	
	幅值差 $\Delta U/\%$	变化率 $R/(%/s)$	幅值差 $\Delta U/\%$	变化率 $R/(%/s)$
A	11.61	105.55	9.21	307.00
B	11.59	115.90	9.19	229.75
C	11.80	118.00	9.70	242.50

根据表 4 的分析结果, 向下变动幅值差最大值达到 11% 以上, 在背景 P_{fl} 超过 0.4 的情况下, 该实

测暂态电压变动极易造成闪变的超标, 实测数据既证明了仿真分析的正确性, 也表明实际电网中已经存在该问题, 需要得到重视。

4 面向在线监测的暂态电压变动引起闪变异常值判别方法

电能质量在线监测系统建设是电网公司一项重要工作, 随着投资建设范围的不断扩大, 监测点密度的提升将进一步凸显暂态电压变动对闪变检测的不利影响, 造成某些无波动负荷的监测点出现闪变超标问题, 给闪变源定位方面的技术监督工作带来干扰, 甚至造成后续物力和人力的无效投入与浪费, 需要一种可快速高效判别出因暂态电压变动造成闪变超标的方法。

图 9 为存在波动负荷和暂态电压变动的 2 个 35 kV 母线监测点一个月以内的 P_{fl} 实测趋势情况。相对于图 9(a)中 P_{fl} 超标情况, 图 9(b)中的 P_{fl} 趋势具有正常运行时段水平低, 但在某时刻会“突然”孤立地出现超过限值的极大值的特征。考虑以月为单位的每相长时闪变测试数据量(数据量=每月天数×每天小时数/2, 每月 28 天、29 天、30 天及 31 天分别对应的数据量为 336、348、360、372)及实际电网运行状态的不确定性, 长时闪变的测试数据服从的分布形式不明确, 而四分位数法在应用过程中无需事先假定数据服从某种特定的分布形式^[34], 具有更广的适用范围。故本文基于长时闪变月趋势的数据分布特征提出应用四分位数的判别方法, 通过统计学准则来实现异常数据的初步快速筛查, 具体实现过程如下。

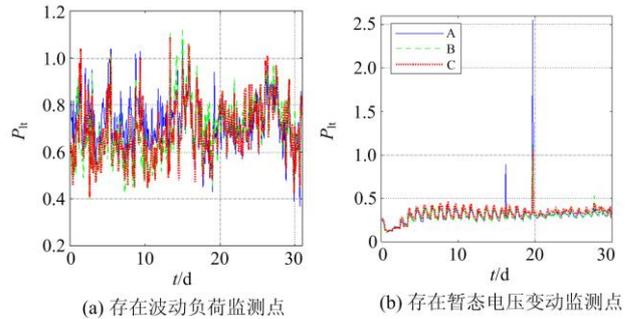


图 9 以月为单位的不同类型长时闪变趋势

Fig. 9 P_{fl} trend of different types in months

步骤 1: 取每月各相 P_{fl} 数据, 按相分别进行从大到小的降序排列;

步骤 2: 从每相排列完成的 P_{fl} 数据中取得上四分位数 Q_1 和下四分位数 Q_2 ;

步骤 3: 计算每相上下四分位数间距 $S=Q_1-Q_2$;

步骤 4: 求取每相最大偏离值 $K=Q_1+1.5 \times S$;

步骤 5: 判断每相 $P_{\text{limit}} > K$ 成立情况, P_{limit} 为长时闪变限值。若三相都成立, 则判断闪变超标由暂态电压变动造成; 如任意一相不成立, 则无法判断闪变超标原因, 需要补充数据进一步分析。

应用四分位数的闪变异常数据判别方法对图 9 中监测点的数据进行处理, 结果如图 10 所示。图 10(a)中由波动负荷引起的闪变超标其三相最大偏离值 K 都超过限值, 相对的图 10(b)最大偏离值 K 都远小于限值, 证明了应用四分位数的判别法可以有效反映出暂态电压变动引起的闪变超标的特征, 实现监测点的快速有效的筛查, 为相关技术管理人员提供了一种应对途径。

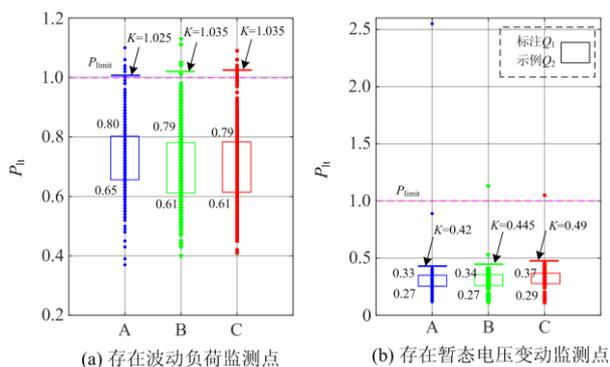


图 10 四分位数判别结果

Fig. 10 Quartile discrimination results

5 结语

面对暂态电能质量扰动所引起的未触发“标记”阈值的暂态电压变动对闪变检测的影响, 本文给出刻画暂态电压变动的特征量, 并分析其对闪变检测的影响特性及程度, 进而实现考虑背景的暂态电压变动引起闪变水平的量化, 并给出限值建议, 最后基于长时闪变月趋势数据分布特征提出应用四分位数的判别方法, 得到以下结论:

1) 暂态电压变动是指电压均方根值处于 0.9~1.1 p.u. 内的现象, 其形状可以通过控制幅值差、变化率、间隔时间及变动方向来刻画。

2) 暂态电压变动特征量的变化会对 P_{inst} 的数量大小和时间长短维度产生不同规律的综合影响, 进而影响短时闪变 P_{st} 和长时闪变 P_{lt} 检测结果, 其中幅值差和变化率越大, 暂态电压变动引起的闪变值越大且影响显著, 而间隔时间对闪变影响较小。

3) 以闪变限值为依据给出暂态电压变动幅值差限值建议: 对于 ≤ 110 kV 系统, 背景闪变 > 0.4 的监测点, 幅值差不超过 3.5%, 背景闪变 ≤ 0.4 的监测点, 幅值差不超过 6.6%; 对于 > 110 kV 系统,

背景闪变 > 0.4 的监测点, 幅值差不超过 3%, 背景闪变 ≤ 0.4 的监测点, 幅值差不超过 5%, 超过该值的暂态电压变动需进行“标记”。针对该建议限值的适用性还需更多的电网运行数据的支撑和验证。

4) 根据长时闪变月趋势数据分布特征, 可应用基于统计学准则的四分位数判别方法, 实现因暂态电压变动造成闪变超标监测点的快速高效的筛查。但运用统计学准则实现异常数据剔除方法不具有唯一性, 其他合适方法也可选择应用。

参考文献

- [1] 薛文婷. 暂态电能质量扰动检测分析与评估的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
XUE Wenting. Research on transient power quality disturbance detection analysis and evaluation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [2] 杨楠, 崔伟, 王智伟, 等. 含风电特高压直流系统单极接地故障暂态特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 142-149, 157.
YANG Nan, CUI Wei, WANG Zhiwei, et al. Research on transient characteristics of monopolar grounding fault for wind power integrated UHVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 142-149, 157.
- [3] 任冲, 柯贤波, 樊国伟, 等. 大规模风电直流送出系统过电压抑制措施及控制方案优化研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 163-174.
REN Chong, KE Xianbo, FAN Guowei, et al. Transient voltage stabilization and control optimization for large-scale wind power UHV DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 163-174.
- [4] 汪颖, 陈春林, 肖先勇, 等. 电压暂降敏感设备耐受能力自动测试方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 127-135.
WANG Ying, CHEN Chunlin, XIAO Xianyong, et al. Automatic test method for tolerance capability of voltage sag sensitive equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 127-135.
- [5] 李佳曼, 万文军, 苏伟, 等. 储能调频系统并网测试研究与分析[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 84-90.
LI Jiaman, WAN Wenjun, SU Wei, et al. Research and analysis on grid-connected test for energy storage frequency modulation system[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 84-90.
- [6] 钟庆, 姚蔚琳, 许中, 等. 基于平均点线距的电压暂降系统级评估方法[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 9-14.
ZHONG Qing, YAO Weilin, XU Zhong, et al. A system assessment method for voltage sag severity based on average point-to-line distance index[J]. Electric Power,

- 2020, 53(11): 9-14.
- [7] 张文海, 肖先勇, 汪颖. 人工智能算法在电能质量领域的应用[J]. 供用电, 2020, 37(9): 1-8, 16.
ZHANG Wenhai, XIAO Xianyong, WANG Ying. The application of artificial intelligence in power quality[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(9): 1-8, 16.
- [8] 吕伟, 田立军. 基于凹陷域分析的电压暂降监测点优化配置[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 49-54.
LÜ Wei, TIAN Lijun. Optimal allocation of voltage sag monitoring based on exposed area analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 49-54.
- [9] 杨洪耕, 肖先勇, 刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(三)—电力系统的电压凹陷[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 1-4.
YANG Honggeng, XIAO Xianyong, LIU Junyong. Issues and technology assessment on power quality part 3: voltage sags in power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 1-4.
- [10] 徐永海, 兰巧倩, 孔祥雨, 等. 电压暂降特征值统计分析及暂降传播特性[J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 165-175.
XU Yonghai, LAN Qiaoqian, KONG Xiangyu, et al. Statistical analysis of voltage sag characteristics and research on sag propagation property[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(11): 165-175.
- [11] 周贤姣. 配电网电压暂降检测与扰动源识别方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
ZHOU Xianjiao. Study on detection and recognition of voltage sags in distribution system[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015.
- [12] 周军, 类腾辉, 何振梁, 等. 基于延迟小角度法和自适应复合形态滤波器的电压暂降检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 148-155.
ZHOU Jun, LEI Tenghui, HE Zhenliang, et al. Voltage sag detection method based on the delayed small angle method and an adaptive composite morphological filter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 148-155.
- [13] 汪颖, 陈春林, 肖先勇. 电压暂降源异质堆叠集成学习识别法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 1-8.
WANG Ying, CHEN Chunlin, XIAO Xianyong. Heterogeneous stacking integrated learning identification method for voltage sag sources[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 1-8.
- [14] 汪颖, 王欢, 李琼林, 等. 基于距离判别分析的电压暂降源识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 9-16.
WANG Ying, WANG Huan, LI Qionglin, et al. Identification method of voltage sag source based on distance discriminant analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 9-16.
- [15] RAHUL, KAPOOR R, TRIPATHI M M. Detection and classification of multiple power signal patterns with Volterra series and interval type-2 fuzzy logic system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 92-101.
- [16] 徐永海, 洪旺松, 兰巧倩. 电压暂降起始点与相位跳变对交流接触器影响的分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 92-97, 135.
XU Yonghai, HONG Wangsong, LAN Qiaoqian. Analysis on the impact of the starting point and phase jump on the ac contactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 92-97, 135.
- [17] DIKIC S Z, MILANOVIC J V, KIRSCHEN D S. Sensitivity of AC coil contactors to voltage sags, short interruptions, and undervoltage transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(3): 1299-1307.
- [18] 栾乐, 马智远, 莫文雄, 等. 考虑不同敏感设备耐受特性的用户侧电压暂降严重程度区间评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 140-148.
LUAN Le, MA Zhiyuan, MO Wenxiong, et al. Voltage sag severity interval assessment method for user side considering tolerance characteristics of equipment of differing sensitivity[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 140-148.
- [19] 罗珊珊, 杜晓彤, 张军, 等. 电压暂降通过多级变压器的传播规律研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(5): 170-175.
LUO Shanshan, DU Xiaotong, ZHANG Jun, et al. Study on propagation law of voltage sags through multiple grade transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(5): 170-175.
- [20] 程志友, 王焱. 基于FPP改进的FAHP方法和健康指数理论的电压凹陷严重程度评估[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 35-40.
CHENG Zhiyou, WANG Miao. Severity evaluation of voltage sag based on multi-attribute decision-making using FPP extended FAHP and healthy index theory[J]. Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 35-40.
- [21] 郎福龙. 电压暂降监测点优化配置及暂降数据压缩研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
LANG Fulong. Research on optimal allocation of voltage sag monitoring point and voltage sag data compression[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [22] 代晓倩, 杨洪耕, 蔡维. 一种考虑电压暂降分布域的电能质量监测仪的优化配置方法[J]. 电力科学与工程,

- 2011, 27(2): 6-12, 17.
- DAI Xiaoqian, YANG Honggeng, CAI Wei. One optimum allocation method of power quality monitors by considering exposed area[J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(2): 6-12, 17.
- [23] IEC 61000-4-30: electromagnetic compatibility (EMC) - part 4: testing and measurement techniques - section 30: power quality measurement methods, 3rd edition[S]. IEC, 2015.
- [24] APRAIZ M, BARROS J, DIEGO R I, et al. Detection and analysis of rapid voltage changes in power system networks[C] // 2014 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems Proceedings (AMPS), September 24-26, 2014, Aachen, Germany: 1-6.
- [25] BARROS J, GUTIERREZ J J, APRAIZ M, et al. Rapid voltage changes in power system networks and their effect on flicker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 262-270.
- [26] BARROS J, APRAIZ M, DIEGO R I, et al. Minimum requirements for rapid voltage changes regulation based on their effect on flicker[C] // 2017 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), September 20-22, 2017, Liverpool, UK: 1-5.
- [27] 陈聪, 陶顺, 陈鹏伟, 等. IEC 标准的快速电压变动测量方法解读与对比[J]. 电测与仪表, 2016, 53(18): 35-40.
- CHEN Cong, TAO Shun, CHEN Pengwei, et al. Rapid voltage changes detection and analysis methods based on IEC standard[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(18): 35-40.
- [28] 王纯. 电压暂降典型特征量分析和传播特性研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- WANG Chun. Typical characteristic quantity analysis and propagation characteristics study of voltage sag[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [29] IEC-61000-4-15: electromagnetic compatibility (EMC) part 4: testing and measurement techniques—section 15: flickermeter functional and design specifications, 2nd edition[S]. IEC, 2010.
- [30] 王建勋, 刘会金. 间谐波闪变效应计算及闪变源识别方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 57-63, 80.
- WANG Jianxun, LIU Huijin. A calculation method for interharmonics-caused flicker and flicker source identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 57-63, 80.
- [31] 季宇, 孙云莲, 王黎, 等. 基于半周期峰值采样的间谐波闪变算法[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 66-70.
- JI Yu, SUN Yunlian, WANG Li, et al. Research of voltage flicker caused by interharmonics based on half-cycle peak sequence[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 66-70.
- [32] 叶新坤. 电压的闪变检测算法的研究与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- YE Xinkun. Research and implementation of voltage flicker detection algorithm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [33] 魏晓璞, 徐永海, 肖湘宁. 电压波动与闪变检测方法综述[J]. 电测与仪表, 2009, 46(4): 1-5.
- WEI Xiaopu, XU Yonghai, XIAO Xiangning. Survey on methods for measurement of voltage fluctuations and flicker[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2009, 46(4): 1-5.
- [34] 武佳卉, 邵振国, 杨少华, 等. 数据清洗在新能源功率预测中的研究综述和展望[J]. 电气技术, 2020(11): 7-12.
- WU Jiahui, SHAO Zhenguo, YANG Shaohua, et al. Review and prospect of data cleaning in renewable energy power prediction[J]. Electrical Engineering, 2020(11): 7-12.

收稿日期: 2021-06-24; 修回日期: 2021-10-08

作者简介:

汪清(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量监测与治理技术;

游奕弘(1995—), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为电能质量监测与治理技术;

焦亚东(1990—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电能质量分析与控制。E-mail: jiao12345ya@163.com

(编辑 葛艳娜)