

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.04.019

基于互近似熵的电压暂降波形匹配方法

李丹奇¹, 史明明², 袁晓冬², 郑建勇¹, 叶昱媛¹, 谈永伟³

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103; 3. 江苏南瑞泰事达电气有限公司, 江苏 泰州 225300)

摘要:随着越来越多电压暂降敏感设备接入电网, 因电压暂降干扰带来的直接及间接经济损失日趋严重, 这对供电质量提出了更高要求, 准确识别暂降源是治理电压暂降问题中必不可少的步骤。文中分析了各类短路故障引起的电压暂降类型及其经变压器传变后暂降波形的变化情况, 并根据理论分析建立各类暂降的标准样本波形。提出了一种基于互近似熵原理的电压暂降源辨识方法, 通过计算实测波形与样本波形之间的互近似熵, 直接进行相似度匹配, 实现故障暂降类别的准确识别, 并利用电网实测数据对该方法进行验证。结果表明该方法与实际工程相贴合, 具有很强的实用性。

关键词:电能质量; 短路故障; 电压暂降; 互近似熵; 波形匹配

中图分类号: TM714.2

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)04-0124-07

0 引言

随着现代工业不断发展, 调速驱动装置、过程控制设备和计算机等自动化、智能化设备广泛接入电网。这类设备对电压暂降问题非常敏感, 当电压有效值低于 90% 持续时间达到 1~2 周波以上时就会跳闸停运^[1-4]。大多数电压暂降都是由短路故障引起的, 不同类型短路故障引起的电压暂降波形也不同, 若能通过监测到的电压暂降波形判断出短路故障类型, 则可为治理电压暂降问题提供针对性理论指导^[5-6]。

国内外学者已经对电压暂降源辨识方法展开了大量研究, 并获得众多成果。文献[7-10]利用 S 变换法对提取各类暂降特征实现电压暂降源识别, 但这类方法分辨率的变化趋势单一, 无法满足在不同频段需要不同分辨率的要求。文献[11-14]采用改进的 S 变换法, 灵活调节时频窗口, 对电压暂降波形进行特征量提取, 用多分类器支持向量机对不同电压暂降类型分类, 但需要大量的样本训练以保证电压暂降源辨识的正确率。文献[15]通过基于云计算的电压暂降计算方法, 计算出电压有效值, 排序后用化简值整合并计算出电压暂降特征值, 但该方法仅考虑了三相电压幅值的变化, 没有考虑三相电压相位的变化, 结果不够准确。现有的一些电压暂降源识别方法大多通过对有效值处理并进行分类, 没有考虑相位变化问题。以上方法都

需要提取合适的特征量, 特征量选取不当会直接影响电压暂降源分类, 甚至产生完全不一样的结果, 而电压暂降实际波形易受外界因素影响, 这使得特征量提取的难度进一步增加。

文中对不同短路故障引起暂降的波形及其经变压器传变后的波形特征进行了分析, 并对各个类别建立了波形样本库。提出一种基于互近似熵的电压暂降识别方法, 通过计算电压暂降实测波形与各类型的电压暂降样本波形之间的互近似熵值, 比较熵值大小直接进行相似度匹配, 从而避免现有暂降辨识方法中特征量提取不准确的问题。仿真算例验证了该方法的可行性。

1 电压暂降扰动类型

大多数电压暂降都是由短路故障引起的, 不同类型的短路故障引起的电压暂降波形也不相同, 设备侧不同的负荷连接方式, 会改变电压暂降三相波形的幅值和相角^[16-18]。按照短路原因可将电压暂降分为 A、B、C、D、E、F 6 种类型(包括负荷的 Y 型、 Δ 型连接形式), 如表 1 所示。

经变压器传变后, 电压暂降波形的幅值和相位角可能发生改变, 且经过的变压器接线方式不同, 暂降波形也会受到不同的影响^[19]。总结出上述 6 种暂降类型经各种类型变压器传变后的暂降所属类型, 如表 2 所示。

值得注意, E 型、F 型暂降经过消去零序电压的变压器或交换线相电压的变压器传播后会产生一种新的向量模式^[20], 将其规定为 G 型, 以 a 相作为参考相, 故障引起的各种电压暂降类型的各相相电

收稿日期: 2019-01-22; 修回日期: 2019-03-29

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目“基于全网谐波监测数据的干扰源分析技术研究与应用”

表 1 各类故障源对应的电压暂降类型
Table 1 Types of voltage sags corresponding to various fault sources

故障源类型	负荷连接形式	电压暂降类型
三相短路	Y、 Δ	A
单相接地	Y	B
	Δ	C
两相相间短路	Y	C
	Δ	D
两相接地	Y	E
	Δ	F

表 2 到较低电压等级暂降类型的转换
Table 2 Conversion to sag type at lower voltage level

变压器 连接方式	一次侧的暂降						
	A	B	C	D	E	F	G
YNyn	A	B	C	D	E	F	G
Yy, Dd, Dz	A	D	C	D	G	E	G
Yd, Dy, Yz	A	C	D	C	F	G	F

压幅值示例计算结果如图 1 所示。

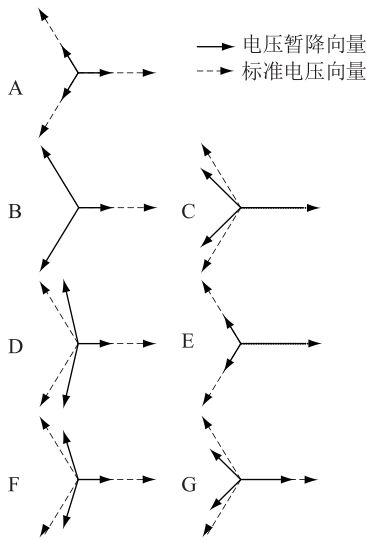


图 1 各电压暂降类型向量

Fig.1 Vector graph of various voltage sag types

2 互近似熵算法

为了实现实测波形与样本波形之间的匹配,引入互近似熵概念^[21]。针对传统的熵存在需要大量采样数据、对噪声敏感和不易收敛等问题,Steven M. Pincus 从衡量时间序列复杂性的角度,于 20 世纪 90 年代提出了近似熵。互近似熵是近似熵^[22-23]概念的拓展,可用于评价 2 条时间序列的相似性。

通过规定 2 个长度相等的短窗口,分别从实测序列与样本序列的起始时刻逐点移动至结束时刻,计算每次移动后窗口内波形的距离。互近似熵法

只需要非常短的窗口即可得到稳定的熵值,通过移动窗口可得到 2 条波形在时间轴上的相似度变化,从而实现电压暂降波形相似度的动态观察。

引入相似容限的概念,统计窗口内波形距离小于该相似容限的概率。此外,该措施可过滤小于相似容限的波形细节信息^[24-26],只保留幅值大于相似容限的波形细节信息,有利于抑制幅值低于相似容限的噪声,说明互近似熵具有一定的抗干扰能力。

增大窗口长度,再次统计在增大后窗口中波形距离小于相似容限的概率,计算窗口改变长度前后 2 个概率的比值,得到 2 条波形的互近似熵值。该数值反映了 2 条时间序列随着时间发展所呈现出来的差异或变化情况。

文中通过计算实测波形与样本波形之间的互近似熵(互近似熵值越小说明相似度越高)从而匹配实测波形所属暂降类型,具体算法如下。

(1) 对于实测波形时间序列 $i(t)$ 和样本波形时间序列, $j(t)$ 规定一个长度为 m 的窗口,如图 2 所示。分别对 $i(t)$ 和 $j(t)$ 构造 $N-m+1$ 个 m 维矢量 X_p 和 X_q ,其中:

$$X_p = [i(p), \dots, i(p+m-1)] \quad p = 1, 2, \dots, N-m+1 \quad (1)$$

$$X_q = [j(q), \dots, j(q+m-1)] \quad q = 1, 2, \dots, N-m+1 \quad (2)$$

式中: p, q 分别为实测波形序列与样本波形序列的序号。

(2) 使用矢量的 ∞ -范数描述 X_p 与 X_q 之间的距离 $d(X_p, X_q) = \|X_p - X_q\|_{\infty}$ 。

(3) 给定相似容限 r ,对每一个 p 值统计 X_p 和所有 $X_q (q = 1, 2, \dots, N-m+1)$ 的矢量距离小于 r 的个数 $N_{p,m,r}$,并计算 $N_{p,m,r}$ 与总的矢量个数 $(N-m+1)$ 的比值 $c_{p,m,r}$:

$$c_{p,m,r} = \frac{d(X_p, X_q) < r \text{ 的数目}}{N-m+1} \quad (3)$$

结合图 2 给出原理解释。假设 $m=2$, 向量 $X_p = [i(p), i(p+1)]$ 即为图 2(a) 中相邻两点数据连城的线段。当 $p=8$ 时,以 $X_p(8)$ 为例,规定相似容限 r ,规定 $X_p(8) \pm r$ 为蓝色区域, $X_p(9) \pm r$ 为紫色区域,如果 X_q 的任意收尾两点对应地落在蓝色区域与紫色区域中,表示他们在相似容限 r 的意义下与 $X_p(8)$ 相似,则改线段成为入选模式(如图 2(b) 中的 $X_q(8), X_q(15), X_q(19), X_q(20)$)。

(4) 先对 $c_{p,m,r}$ 取对数,再求其对所有 p 的平均值,从而获得 2 条曲线之间的互相关程度:

$$\Phi_{m,r} = \frac{1}{N-m+1} \sum_{p=1}^{N-m+1} \ln c_{p,m,r} \quad (4)$$

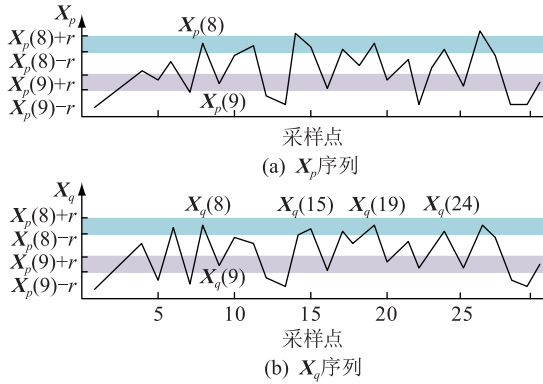


图2 互近似熵原理说明

Fig.2 Cross approximate entropy schematic diagram

(5) 增加窗口长度至 $m+1$, 重复上述步骤 (1)~(4) 的运算过程, 得到 $\Phi_{m+1,r}$ 。

(6) 计算得到与 m, r 相关的互近似熵值:

$$C(m, r) = \Phi_{m,r} - \Phi_{m+1,r} \quad (5)$$

3 基于互近似熵的电压暂降波形匹配方法

按照第 1 节 7 种不同电压暂降类型生成样本波形库, 将监测到的实际电压暂降波形与波形库中的每一组样本波形进行互近似熵计算, 通过比较熵值大小选取与待匹配波形相似度最高的样本波形, 实现电压暂降波形匹配, 具体步骤如下。

(1) 按照 7 种电压暂降波形生成样本数据, 设定样本数据中每种电压暂降波形的数据三相长度均为 $L (L > l)$, 将每组样本波形数据储存为 $3 \times L$ 的矩阵。

(2) 由于 B—G 型这 6 种电压暂降的波形为不对称故障, 将每个样本波形矩阵的行按顺序依次替换, 重构成 3 个不同矩阵, 形成 B—G 型共 18 个矩阵。由于 A 型暂降波形为三相对称, 不做改变。现波形库含 A—G 型共 19 个矩阵。

(3) 采集暂降发生时间内的实际波形数据, 设定时间序列长度为 l , 将待匹配的实际波形数据储存为 $3 \times l$ 的矩阵。

(4) 由于 $L > l$, 在样本矩阵中截取 $3 \times l$ 的矩阵, 统一时间序列长度, 将 $3 \times l$ 的样本矩阵转化为 $1 \times 3l$ 的样本波形序列, 将 $3 \times l$ 的实际波形矩阵转化为 $1 \times 3l$ 的实际波形序列。

(5) 实测数据与样本数据幅值各不相同且相差较大, 将待匹配实际波形序列与波形库中样本波形序列分别进行标准化^[27], 标准化公式如下:

$$X_k^*(i) = [X_k(i) - \bar{X}_k] / \sigma(X_k) \quad (6)$$

$$X_j^*(i) = [X_j(i) - \bar{X}_j] / \sigma(X_j) \quad (7)$$

式中: \bar{X} 为数列平均值; σ 为数列标准差。

(6) 计算标准化后的实测波形序列与波形库中每个样本波形序列的互近似熵。

(7) 暂定实测电压暂降波形与互近似熵最小的样本波形属于同一类电压暂降, 进行阈值判断, 最终实现电压暂降波形匹配。根据仿真结果选择阈值为 0.4。

4 仿真

本算例按照图 3 所示基于互近似熵的电压暂降波形匹配方法流程图进行验证。为了验证互近似熵方法匹配电压暂降波形的可行性, 使用 Matlab 根据图 1 中的暂降向量建立不同暂降类型的样本波形数据, 如图 4 所示。文献[21—24]均证明取窗口初始长度 $m = 2$ 时得到的熵值具有较为合理的统计特性, 因此下文的算例中取 $m = 2$ 。

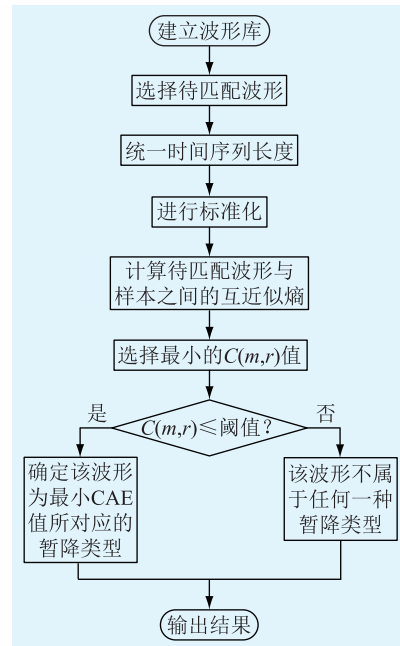


图3 基于互近似熵的电压暂降波形匹配方法流程

Fig.3 Flow chart of voltage sag waveform matching method based on mutual approximate entropy

值得注意的是, 相似容限 r 值不同时, 互近似熵计算结果也有所改变, 甚至可能出现结果完全不一致的情况。为求取合理的相似容限, 文中首先选取样本库中的 A 样本波形作为待匹配波形, 计算在不同相似容限下的互近似熵值, 由于 r 较小时 $C(2, r)$ 受其影响较大, 变换较快, 因此采用半对数坐标进行画图, 结果如图 5 所示。可以看出, 对于 A 型波形, $r \in [0.1, 0.4]$ 时区分度最为明显。按照该方法依次求取 B—G 型样本波形的合理 r 值, 最终取所有结果的并集, 文中算例取相似容限 $r = 0.3$ 。

以宿迁市五月的一次三相短路电压暂降为例:

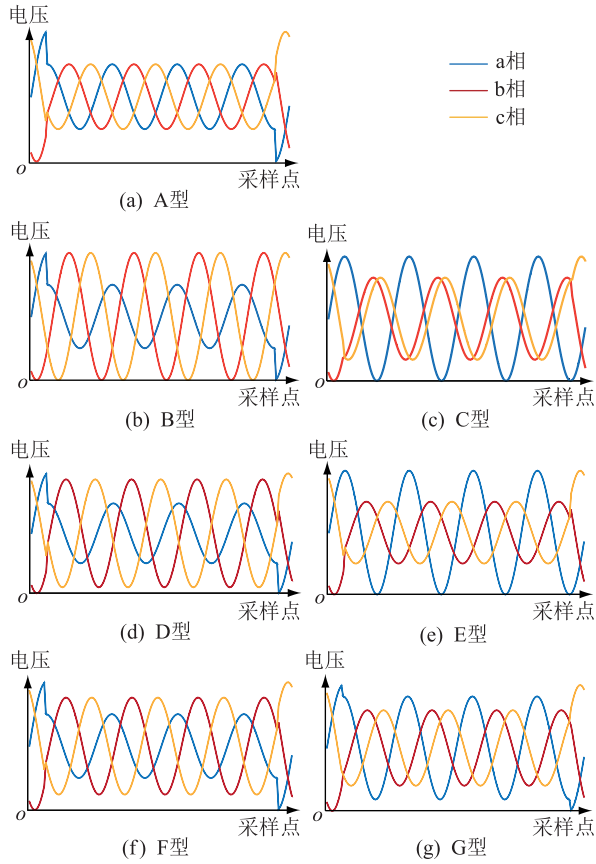


图 4 不同电压暂降类型的波形

Fig.4 Waveforms of different voltage sags

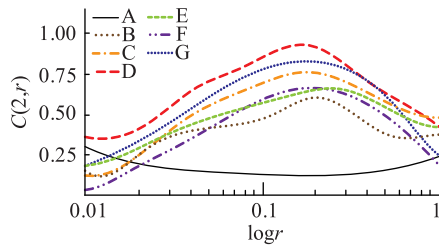


图 5 不同 r 值对应的互近似熵值

Fig.5 $C(2,r)$ corresponding to different r values

三相短路引起的电压暂降为 A 类型电压暂降,实际电压波形如图 6 所示,按照算法流程进行波形匹配,结果如表 3 所示。

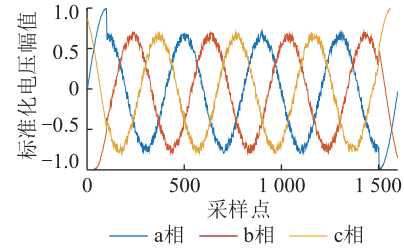


图 6 实际波形

Fig.6 Actual waveform

表 3 与 7 类样本之间的互近似熵计算结果

Table 3 Calculation results of cross approximate entropy between 7 types of samples

类别	$\Phi_{2,0.3}$	$\Phi_{3,0.3}$	$C(2,0.3)$
A	-1.527 7	-1.915 9	0.388 3
B	-1.776 3	-2.634 0	0.857 7
C	-1.761 1	-2.579 5	0.807 6
D	-1.835 3	-2.685 6	0.850 3
E	-1.746 1	-2.611 0	0.865 0
F	-1.782 7	-2.579 5	0.796 8
G	-1.697 9	-2.488 2	0.790 3

由表 3 可知,三相短路引起的电压暂降实际波形与 A 类样本的互近似熵为 0.388 3,是 7 个结果里数值最小的,其余样本的互近似熵均在 0.7 以上。根据第 3 节所述,该波形与 A 型电压暂降波形相似度最高,判断其属于 A 型电压暂降,实验结果与事实相符。

为了验证该方法的普适性,抽取 350 组实际电压暂降波形数据,分别计算实际波形与 7 类样本波形之间的互近似熵,平均互近似熵实际暂降波形如表 4 所示。

由表 4 可知,实际波形与其所属暂降类型的样本波形的互近似熵最小,平均值为 0.3 左右;实际波形与其他暂降类型的样本波形的互近似熵较大,平均值在 0.6 至 1 之间。该方法匹配波形时易于分类,具有良好的区分度。

表 4 实际暂降波形与样本波形的平均互近似熵

Table 4 Average cross entropy of actual sag waveform and sample waveform

实际波形所属暂降类型	样本波形所属暂降类型						
	A	B	C	D	E	F	G
A	0.298 2	0.815 8	0.874 1	0.877 4	0.840 8	0.879 4	0.866 1
B	0.898 3	0.297 3	0.787 0	0.849 8	0.885 3	0.908 6	0.872 9
C	0.911 9	0.910 2	0.319 2	0.913 2	0.852 4	0.864 3	0.633 0
D	0.900 1	0.900 6	0.840 8	0.322 6	0.846 1	0.629 4	0.802 6
E	0.835 4	0.904 8	0.872 2	0.762 9	0.300 6	0.753 7	0.792 5
F	0.860 9	0.910 1	0.910 7	0.612 4	0.790 9	0.297 9	0.838 7
G	0.754 1	0.801 6	0.626 3	0.780 2	0.853 2	0.777 8	0.312 3

根据计算结果进行暂降类型匹配,匹配结果与正确率如表 5 所示。

表 5 电压暂降波形匹配结果
Table 5 Voltage sag waveform matching results

电压暂降类型	待匹配总数	匹配正确数量	正确率/%
A	50	50	100
B	50	50	100
C	50	49	98
D	50	47	94
E	50	50	100
F	50	48	96
G	50	49	98

由表 5 可得到各暂降类型的匹配正确率,7 类暂降匹配正确率均在 94% 以上,其中 A 型暂降、B 型暂降与 E 型暂降的匹配正确率可达到 100%。该方法具有良好的准确性和有效性。

结合图 1 可以分析出 C 型暂降、D 型暂降、F 型暂降与 G 型暂降正确率不及其他类型的原因。根据向量图,C 型与 G 型三相幅值与相位差都较为接近,而 D 型与 F 型三相幅值与相位差较为接近,波形相似度相对较高,区分度降低。因此在计算互近似熵时结果值更小,增加了匹配错误的可能性。根据表 4 做出每种类型间的平均互近似熵三维图如图 7 所示。由图 7 与表 4 看出 C、G 类型和 D、F 类型间的互近似熵明显比其他情况下要小。

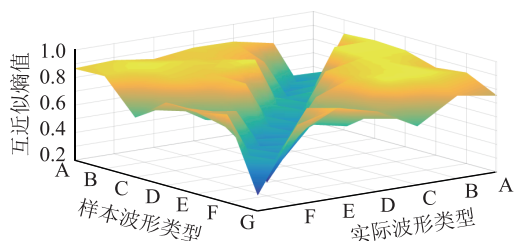


图 7 互近似熵三维图

Fig.7 Mutual approximate entropy three dimensional graph

为了验证互近似熵方法匹配电压暂降波形的优越性,将该方法与 SVM 法、BP 神经网络法进行对比,得到电压暂降波形匹配准确率如表 6 所示。

根据表 6 对比可知,基于互近似熵原理的电压暂降波形匹配方法判别正确率高达 98%,相较于 BP 神经网络法与 SVM 法的 55.43%, 80.29%,更具有优越性。

根据第 2 节中的分析,发生电压暂降时不只三相电压幅值会发生变化,三相电压相位差也将改变。现有的一些电压暂降源识别方法大多通过对有效值处理并进行分类,没有考虑相位变化问题。不同于

表 6 不同方法匹配准确率对比

Table 6 Comparison of matching accuracy of different methods

电压暂降类型	准确率/%		
	BP 神经网络	SVM	互近似熵
A	66	78	100
B	82	80	100
C	46	76	98
D	78	78	94
E	74	88	100
F	66	82	96
G	42	80	98

这些方法,基于互近似熵的波形匹配方法直接采用电压瞬时值进行匹配,综合电压暂降幅值与三相电压相位差变化情况,以此作为依据进行匹配,所考虑因素更为全面。

5 结语

文中对不同短路故障引起暂降的波形及其经变压器传变后的波形特征进行了分析,对由不同短路故障引起的电压暂降波形按照各个类别建立了波形样本库,提出了一种基于互近似熵原理的电压暂降波形匹配方法。

互近似熵法所需采样窗口短、抗噪能力强,算法简单易于实现。目前电压暂降源识别方法主要通过提取暂降波形的特征量进行分类,特征量选取的好坏直接影响分类结果的准确率,且实际情况中,暂降波形受很多随机因素的影响,波形不规整,这使得提取特征量时易造成误差。互近似熵法不用考虑如何提取合适的电压暂降特征量,也不需要大量的训练样本,有效避免了采用支持向量机算法和采用神经网络算法的不易收敛、算法过于复杂等问题。

通过仿真算例与结果分析证明了该方法能够对由各种短路故障引起的电压暂降波形进行匹配,单类正确率可达 94%,在一定程度上帮助工程人员正确判断电压暂降源类型及产生原因,为治理电压暂降问题提供针对性的理论指导。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2018011)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
XIAO Xiangning. Power quality analysis and control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [2] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析[J]. 电网技术, 2001, 25(3):66-69.
XIAO Xiangning, XU Yonghai. Analysis of power quality problem-

- ms [J]. Power Grid Technology, 2001, 25 (3): 66-69.
- [3] 杨进, 肖湘宁. 电能质量监测技术发展新趋势—网络化、信息化、标准化[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 82-87.
YANG Jin, XIAO Xiangning. New trend of power quality monitoring technology—networking, informatization and standardization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (11): 82-87.
- [4] 陶顺, 肖湘宁. 电力系统电能质量评估体系架构[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 171-175.
TAO Shun, XIAO Xiangning. Power system power quality assessment system architecture [J]. Journal of Electrical Technology, 2010, 25 (4): 171-175.
- [5] 何建, 熊超, 李大成, 等. 电能质量综合优化装置(MEC)在三相不平衡配电网中的应用[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(4): 47-49.
HE Jian, XIONG Chao, LI Dacheng, et al. Application of power quality integrated optimization device (MEC) in three-phase unbalanced distribution network [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19 (4): 47-49.
- [6] 吴凯, 施康明. 基于SVD和PNN的电能质量扰动分析方法[J]. 浙江电力, 2018, 37(4): 63-67.
WU Kai, SHI Kangming. Analysis method of power quality disturbance based on SVD and PNN [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(4): 63-67.
- [7] 黄勇东, 陈冬洋, 肖建华, 等. 基于小波包分解和改进差分算法的神经网络短期风速预测方法[J]. 浙江电力, 2017, 36(6): 1-7.
HUANG Yondong, CHEN Dongfeng, XIAO Jianhua, et al. Short-term Wind Speed Forecast Method Based on WPD-IDE-NN [J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36(6): 1-7.
- [8] 吕千云, 方奇品, 蔡秀珊. 基于多分类支持向量机的电压暂降源识别[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 152-155.
LYU Ganyun, FANG Qipin, CAI Xiushan. Voltage sag source identification based on multi-class support vector machine [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 152-155.
- [9] 仲飞, 邵如平. 基于S变换的三相短路故障电压暂降检测研究[J]. 煤炭工程, 2014, 46(3): 109-111.
ZHONG Fei, SHAO Ruping. Research on voltage sag detection of three-phase short-circuit fault based on S-transform [J]. Coal Engineering, 2014, 46 (3): 109-111.
- [10] 张伟. 基于S变换和RBF神经网络的电气化铁路电压暂降识别研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2016.
ZHANG Wei. Research on voltage sag identification of electrified railway based on S-transform and RBF neural network [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway University, 2016.
- [11] 陈丽, 王硕, 孔维功. 基于改进S变换的复合电压暂降源识别特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014(4): 27-33.
CHEN Li, WANG Shuo, KONG Weigong. Recognition feature analysis of composite voltage sag sources based on improved S-transform [J]. Power System Protection and Control, 2014 (4): 27-33.
- [12] 张乾业, 张科, 王战胜, 等. 基于改进S变换和DSVM的电能质量扰动识别[J]. 军民两用技术与产品, 2016(22): 182.
ZHANG Qianye, ZHANG Ke, WANG Zhansheng, et al. Power quality disturbance identification based on improved S-transform and DSVM [J]. Dual-use Technology and Products, 2016 (22): 182.
- [13] 秦伟, 冯延晖, 黄凯, 等. 基于NCAV和电路等效替换的PWM整流器容错控制系统[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6): 84-89, 131.
QIN Wei, FENG Yanhui, HUANG Kai, et al. Fault tolerant control system of PWM rectifier based on NCAV and circuit equivalent replacement [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 84-89, 131.
- [14] 袁露, 雷万钧, 刘博, 等. 基于改进S变换的电压暂降检测方法[J]. 北京交通大学学报: 自然科学版, 2016, 40(3): 32-37.
YUAN Lu, LEI Wanjun, LIU Bo, et al. Voltage sag detection method based on improved S-transform [J]. Journal of Beijing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2016, 40 (3): 32-37.
- [15] 齐林海, 艾明浩. 一种基于云计算的电压暂降并行计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5493-5499.
QI Linhai, AI Minghao. A parallel calculation method of voltage sag based on cloud computing [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (31): 5493-5499.
- [16] 杜雄, 周维维, 许可夫. 基于双dq变换的引起电压暂降的短路故障分类[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 86-90.
DU Xiong, ZHOU Liwei, XU Kefu. Classification of short circuit faults causing voltage sag based on double DQ transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (5): 86-90.
- [17] 郎福龙, 田立军, 王滕藤. 基于电压暂降监测点优化配置的同轴松弛凹陷域分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 96-101.
LANG Fulong, TIAN Lijun, WANG Tengting. Concentric relaxation sag region analysis based on optimal configuration of voltage sag monitoring points [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (18): 96-101.
- [18] 王玲, 高倩倩, 陶顺, 等. 基于暂降类型判断的短路故障类型识别研究[J]. 电测与仪表, 2013(6): 8-13.
WANG Ling, GAO Qianqian, TAO Shun, et al. Study on short-circuit fault type identification based on transient type judgment [J]. Electrical Measurement and Instrument, 2013 (6): 8-13.
- [19] 肖湘宁, 陶顺. 中性点不同接地方式下的电压暂降类型及其在变压器间的传递(一)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 143-147.
XIAO Xiangning, TAO Shun. Types of voltage sags and their transmission between transformers under different grounding modes of neutral points: (1) [J]. Journal of Electrical Technology, 2007, 22 (9): 143-147.
- [20] BOLLEN M H J. 理解电能质量问题: 电压暂降与短时中断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
BOLLEN M H J. Understanding power quality problems: voltage

- sags and short-term interruptions [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [21] PINCUS S, SINGER B H. Randomness and degrees of irregularity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1996, 93(5):2083-2088.
- [22] PINCUS S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1991, 88(6):2297-2301.
- [23] 杨福生, 廖旺才. 近似熵:一种适用于短数据的复杂性度量[J]. 中国医疗器械杂志, 1997(5):283-286.
YANG Fusheng, LIAO Wangcai. Approximate entropy: a complexity measure for short data [J]. Chinese Journal of Medical Devices, 1997 (5): 283-286.
- [24] 洪波, 唐庆玉, 杨福生, 等. 近似熵、互近似熵的性质、快速算法及其在脑电与认知研究中的初步应用[J]. 信号处理, 1999(2):100-108.
HONG Bo, TANG Qingyu, YANG Fusheng, et al. Properties of approximate entropy, mutual approximate entropy, fast algorithm and its preliminary application in EEG and cognitive research [J]. Signal Processing, 1999 (2): 100-108.
- [25] 黄南天, 李富青, 王文婷, 等. 输电线路故障层次化变步长 Tsallis 小波奇异熵诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017,45(18):38-44.
HUANG Nantian, LI Fuqing, WANG Wenting, et al. Tsallis wavelet singular entropy diagnosis method with hierarchical variable step size for transmission line faults [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (18): 38-44.
- [26] 王如伟, 孔剑虹, 吴港, 等. 一种基于相对熵组合赋权法的区间联络线选取方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(0):65-72.
WANG Ruwei, KONG Jianhong, WU Gang, et al. A method of selecting the interval tie-line based on relative entropy combination weighting [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46 (2): 65-72.
- [27] 沈冰, 肖远兴, 翁利国. 基于互近似熵的微电网并网同步检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16):99-104.
SHEN Bing, XIAO Yuanxing, WENG Ligu. Synchronization detection method for microgrid interconnection based on mutual approximation entropy[J]. Power System Protection and Control, 2017,45(16): 99-104.

作者简介:



李丹奇

李丹奇(1996),女,硕士在读,研究方向为电力系统及其自动化(E-mail:495715426@qq.com);

史明明(1986),男,博士,高级工程师,从事电能质量工作(E-mail:419489941@qq.com);

袁晓冬(1979),男,硕士,研究员级高级工程师,从事新能源并网工作。

Voltage sag waveform matching method based on cross approximate entropy

LI Danqi¹, SHI Mingming², YUAN Xiaodong², ZHENG Jianyong¹, YE Yuyuan¹, TAN Yongwei³

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

3. Jiangsu NANRUI Taishida Electric Co., Ltd., Taizhou 225300, China)

Abstract: As more and more devices sensitive to voltage sag are widely connected to the power grid, the direct and indirect economic losses caused by voltage sag interference become more and more serious, which puts forward higher requirements for power supply quality. Accurate identification of sag sources is an essential step in the treatment of voltage sag. It analyzes the types of voltage sags caused by various short-circuit faults and the changes of voltage sags waveforms after transformer transmission, and establishes the standard sample waveforms of voltage sags according to theoretical analysis. A voltage sag waveform matching method based on mutual approximation entropy principle is proposed. The measured waveforms are compared with the sample waveforms and the similarity matching is carried out directly. Finally, the effect of identifying voltage sag disturbance source is achieved. The simulation results show that the method has high accuracy in identifying the measured voltage sag waveforms in power grid, and the feasibility and effectiveness of the method are verified.

Keywords: power quality; short circuit fault; voltage sag; mutual approximate entropy; waveform matching

(编辑 钱悦)