

# 考虑皮尔逊相关系数和切比雪夫距离的 电压暂降类型计算方法

杜 培, 林 焱, 张伟骏, 林 芳, 方晓玲

(国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:**电压暂降类型是进行故障类型识别和治理设备选型的重要信息。首先,根据电压暂降的类型定义和其经变压器传播的类型变换特性,建立电压暂降类型模式库。定义和提取了三相电压的六维向量,以进行暂降类型计算。应用皮尔逊相关系数,建立待计算电压暂降与模式库各元素的相关系数矩阵,计算其相似程度。提出基于切比雪夫距离的待计算电压暂降与模式库中各矢量的距离矩阵。基于相关系数矩阵与距离矩阵,构建电压暂降类型相关度矩阵,考虑混合判据计算电压暂降类型。经仿真数据和实测数据验证,所提方法准确度较高,能克服传统方法对浅暂降和相位跳变敏感的缺点。建议在省级电能质量监测平台中应用所提算法,实现暂降类型的实时计算,为区域电压暂降的有效评估和治理提供参考依据。

**关键词:**电压暂降;暂降类型;相关度矩阵;皮尔逊相关系数;切比雪夫距离

**DOI:** 10.12067/ATEEE2006017

**文章编号:** 1003-3076(2021)03-0063-09

**中图分类号:** TM714.2

## 1 引言

随着高新技术快速发展,高端制造业大量采用可编程控制器、交流接触器等精密设备,对电压暂降非常敏感。精密设备因电压暂降发生故障、报错、跳停等现象,造成用户巨大经济损失,用户抱怨严重,治理电压暂降问题成为工业界和学术界关注的热点<sup>[1,2]</sup>。明确接入点的电压暂降类型是制定电网侧和用户侧治理决策的关键。

目前,工业界和学术界提出了多种电压暂降类型计算方法。但是,现有算法应用于相位跳变较大或幅值较高的暂降数据时,计算错误率较高。文献[3-6]中的方法均以三相电压矢量作为输入值。六相法(SPA)和对称分量法(SCA)<sup>[3]</sup>是最早提出且计算简便的算法,但是对浅暂降和较大相位跳变暂降的计算结果不理想。TP-TA法<sup>[4]</sup>和TPA法<sup>[5]</sup>对阈值敏感,且判据公式繁多。F-V法<sup>[6]</sup>流程简单,但对较大相位跳变比较敏感。RMS法<sup>[7]</sup>以三相电压有效值作为输入值,计算暂降类型(A-G类),SVA

法<sup>[8]</sup>以电压波形作为输入量,计算结果新增了H和I类暂升,分类更合理,但仍未解决大相位跳变影响的问题。为提升类型计算准确率,改善分类算法的适应性,应克服计算方法对暂降幅值和相位跳变的敏感性。

文章提出了一种考虑皮尔逊相关系数和切比雪夫距离的电压暂降类型计算方法。首先,根据电压暂降的类型定义和其经变压器传播的类型变换特性,建立电压暂降类型模式库。定义和提取了三相电压的六维向量,以进行暂降类型计算。采用皮尔逊相关系数,建立待计算电压暂降与模式库各元素的相关系数矩阵,计算其相似程度。提出基于切比雪夫距离的待计算电压暂降与模式库中各矢量的距离矩阵。基于相关系数矩阵与距离矩阵,构建电压暂降类型相关度矩阵,考虑混合判据计算电压暂降类型。经仿真数据和实测数据验证,所提方法准确度较高,能克服传统方法对浅暂降和相位跳变敏感的缺点。基于所构建的类型模式库,所提算法可实现毫秒级快速计算,适合应用于电压暂降监测系统

**收稿日期:** 2020-06-08

**基金项目:** 国网福建省电力有限公司科技项目(No. 52130419000Y)

**作者简介:** 杜 培(1988-),女,湖北籍,工程师,硕士,研究方向为电力系统分析及电力市场;  
林 焱(1974-),男,福建籍,教授级高工,硕士,研究方向为电能质量监测与治理。

或终端中,计算暂降类型实时信息,具有较大的应用价值。

## 2 电压暂降类型分析

### 2.1 电压暂降类型

电网故障是引起电压暂降的最主要原因。电力系统运行过程中,天气、树枝搭接线路等原因都可能引起电网故障。故障发生时,系统汲出一个大电流,根据线路分压原理,故障附近的电压会大幅下降,产生电压暂降;故障清除后,附近区域电压恢复正常。三相短路故障是最严重的短路故障,导致三相电压幅值跌落基本相同;相间短路故障会造成故障两相电压跌落,非故障相电压幅值基本不变;两相接地短路故障导致故障相电压下降,非故障相电压不变或升高,非故障相电压变化情况主要取决于系统接地方式;单相故障的故障相电压降低,非故障相电压变化情况与系统接地等因素有关。

学术界根据三相电压幅值和相位的变化,定义电压暂降类型。学者 Bollen 提出了 ABC 分类法,把电压暂降划分为 7 种类型<sup>[9]</sup>;文献[8]在此基础上,定义了暂降时伴随暂升的两种类型,被命名为 H 和 I 型。假设暂降前电源电动势标幺值为 1 pu,9 种类型的电压暂降/暂升如图 1 所示,其中虚线代表暂降前电压向量,实线代表暂降期间的电压向量。暂升是系统特定接地条件下,伴随暂降发生的现象,后文以 A-I 类型统一描述,不专门分析暂升类型。

### 2.2 变压器对电压暂降类型的影响

变压器有多种联结方式,电压从高压侧向低压侧传播,不同连接方式可能会导致暂降类型发生改变。根据暂降类型改变的效果,可将变压器分为三类:I 类(YNyn),II 类(Yy, Dd, Dz)和 III 类(Yd, Dy, Yz)。用传递矩阵描述变压器联结方式导致的暂降类型变化特性,如式(1)~式(3)所示<sup>[10,11]</sup>。

(1)I 类:此类变压器不改变相电压和线电压的传递,传递矩阵为单位矩阵  $E$ ,如下:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2)II 类:此类变压器不传递零序电压,传递矩阵如下:

$$T_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

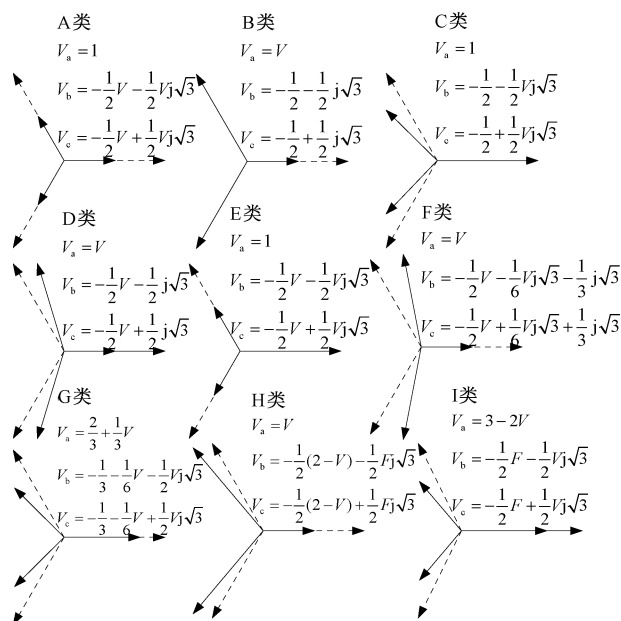


图 1 电压暂降/暂升的 9 种类型

Fig.1 9 types of voltage sags/swells

(3)III 类:等同于相电压向线电压的转换,转换后电压不含零序分量,且会发生相位变化,传递矩阵如下:

$$T_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

不同类型的电压暂降,经不同类型变压器传播,其暂降类型的变化规律如图 2 和表 1 所示<sup>[12]</sup>。

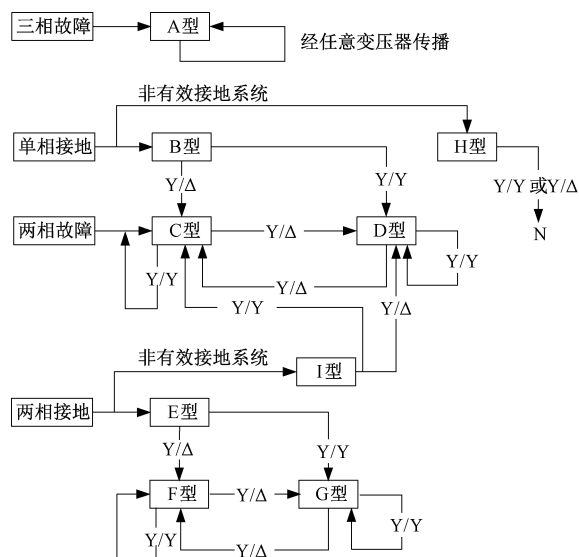


图 2 经变压器的电压暂降类型变换规律

Fig.2 Transformation law of voltage sag type through transformer

表 1 电压暂降类型传播规律

Tab.1 Propagation law of voltage sag types

| 变压器<br>联结方式 | 暂降类型 |   |   |   |   |
|-------------|------|---|---|---|---|
|             | A    | B | C | D | E |
| I 类         | A    | B | C | D | E |
| II 类        | A    | D | C | D | G |
| III 类       | A    | C | D | C | F |

| 变压器<br>联结方式 | 暂降类型 |   |   |   |
|-------------|------|---|---|---|
|             | F    | G | H | I |
| I 类         | F    | G | H | I |
| II 类        | F    | G | H | C |
| III 类       | G    | F | H | D |

### 3 基于混合判据的电压暂降类型计算方法

如图 1 所示,电压暂降类型由特征电压  $V$  和各相相位跳变值<sup>[13]</sup> 共同决定,基于各类型基本定义,构建 13 万组特征电压全覆盖的电压暂降数据库。提取三相电压的实部、虚部,构成六维向量模式库。针对监测数据求取其电压暂降类型时,应用皮尔逊相关系数及切比雪夫距离,分别度量待匹配电压与模式库每条特征电压之间的相似度;定义相关度指标,根据最大相关度计算出暂降类型。主要算法流程如图 3 所示。

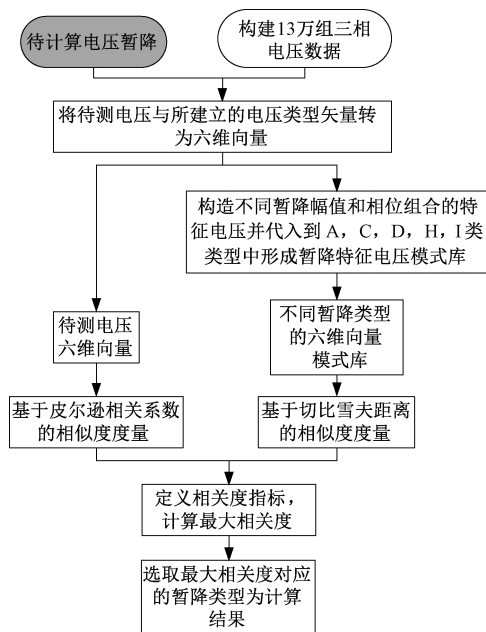


图 3 所提方法流程图

Fig.3 Flow chart of proposed method

#### 3.1 电压暂降类型模式库

为了准确识别电压暂降类型,分别计算其三相幅值和相位跳变值,构成 6 维向量。其中,F、G 类型是

C、D 类的畸变形式;用户大多采用三角形联结方式接入电网,所以 B、E 类暂降一般不会传播到用户侧。因此,A、C、D、H、I 类型为本文进行类型计算的目标。

##### 3.1.1 特征电压 $V$

特征电压  $V$  是 IEEE 1564—2014 提出的电压暂降单次特征,用以描述电压跌落的程度和类型。不同于残余电压的定义,以六相电压的最低值来表示特征电压  $V$ 。六相电压包括了三相降电压和三相线电压。 $V_0(t)$  为零序电压随时间变化的曲线,如下:

$$V_0(t) = \frac{1}{3} [V_a(t) + V_b(t) + V_c(t)] \quad (4)$$

式中, $V_a(t)$ 、 $V_b(t)$ 、 $V_c(t)$  为三相相电压随时间变化曲线。定义降电压为相电压减去零序电压,如下:

$$\begin{cases} V_a'(t) = V_a(t) - V_0(t) \\ V_b'(t) = V_b(t) - V_0(t) \\ V_c'(t) = V_c(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (5)$$

为使三相线电压的数量级与三相降电压保持一致,令三相线电压为:

$$\begin{cases} V_{ab}(t) = [V_a'(t) - V_b'(t)] / \sqrt{3} \\ V_{bc}(t) = [V_b'(t) - V_c'(t)] / \sqrt{3} \\ V_{ca}(t) = [V_c'(t) - V_a'(t)] / \sqrt{3} \end{cases} \quad (6)$$

在式(5)和式(6)中,共六相电压,其中最低的一相电压即为特征电压  $V(t)$ ,以向量的形式表示该事件的特征电压  $V$ 。文献[3]定义正负序因子  $F$ ,  $V$  和  $F$  可刻画电压暂降类型。以图 1 中 C 类型暂降为例,其电压表达式为:

$$\begin{cases} V_a = 1 \\ V_b = -\frac{1}{2}F - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \\ V_c = -\frac{1}{2}F + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{cases} \quad (7)$$

在各种短路情况下,正负序因子  $F$  几乎都接近于 1;电机起动造成的暂降,可能导致  $F$  低至 0.7。文中研究不同短路故障造成的暂降类型计算问题,因此,设置所有类型表达式中  $F$  的值均为 1<sup>[9]</sup>。

为全面描述所有可能发生的电压暂降,构建特征电压  $V$ 。暂降幅值范围从 0.01 到 1,等间隔设置 100 个不同的幅值。相位跳变范围不必考虑  $-180^\circ$  至  $+180^\circ$  的全范围<sup>[13]</sup>。根据文献[10],当系统  $X/R$  阻抗比为 10,馈线阻抗比  $X/R$  为 0.5 时,此时阻抗角有最大负值,大约为  $-60^\circ$ 。如果系统与馈线的  $X/R$  几乎相等时,此时阻抗角有最小正值,大约为  $10^\circ$ 。因此,

在大多数情况下,实际阻抗角在 $-60^\circ$ 至 $+10^\circ$ 之间。基于上述原因,设置 100 个不同的相位,考虑  $20^\circ$  的相位裕度,范围从 $-80^\circ$ 至 $+30^\circ$ 之间,步长间隔为  $110^\circ/100$ ,将幅值和相位一一组合,得到  $100 \times 100$  个不同幅值和相位的特征电压,  $V$  构成模型为:

$$V_{ij} = |V_i| \angle \varphi_j \quad (8)$$

$$|V_i| = i \times \frac{1}{100} \quad i = 1, 2, 3, \dots, 100 \quad (9)$$

$$\varphi_j = -80 + (j - 1)(110/99) \quad j = 1, 2, \dots, 100 \quad (10)$$

式中,  $i, j$  为各组的编号。式(9)和式(10)表示特征电压的幅值和相位。

### 3.1.2 类型模式库

文章生成 A、C、D、H、I 类型电压暂降数据,以构建类型模式库。其中 A 类暂降为三相暂降;后四类为不对称暂降,每一类暂降可分别以 a、b、c 相为特征相,生成数据。基于 3.1.1 节所构建的特征电压,将特征电压代入 2.1 节所述的 A、C、D、H、I 类型电压暂降表达式,生成电压暂降数据,构建类型模式库。其中, A 类型为三类暂降, C、D、H、I 可分别以 a、b、c 三相为特征相构造 12 类暂降,如  $D_a, D_b, D_c$  表示以不同相作为特征相的 D 类型暂降,形成  $13 \times 10000$  组电压暂降数据。如式(11),提取每条暂降数据的实部和虚部,构成一组 6 维向量。

$$\begin{cases} V_a = V_{s1} + jV_{s2} \\ V_b = V_{s3} + jV_{s4} \\ V_c = V_{s5} + jV_{s6} \end{cases} \Rightarrow V = (V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}, V_{s4}, V_{s5}, V_{s6}) \quad (11)$$

式中,  $V_{s1}, V_{s3}, V_{s5}$  为实部;  $V_{s2}, V_{s4}, V_{s6}$  为虚部。针对每类暂降,可形成  $100 \times 100$  组 6 维向量。以类型  $D_a$  为例,式(12)中每个元素代表一条暂降数据的 6 维向量,如  $V_{Da-1-2}$ , 就是幅值为 0.01 pu, 相位为  $-78.89^\circ$  时构成的特征电压  $V$  代入图 1 的  $D_a$  类暂降公式,得到的三相电压的各相电压实部和虚部构成的 6 维向量。

$$V_{Da} = \begin{bmatrix} V_{Da-1-1} & V_{Da-1-2} & V_{Da-1-3} & \dots & V_{Da-1-100} \\ V_{Da-2-1} & V_{Da-2-2} & V_{Da-2-3} & \dots & V_{Da-2-100} \\ V_{Da-3-1} & V_{Da-3-2} & V_{Da-3-3} & \dots & V_{Da-3-100} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{Da-100-1} & V_{Da-100-2} & V_{Da-100-3} & \dots & V_{Da-100-100} \end{bmatrix} \quad (12)$$

13 种类型的电压暂降数据,共形成 13 万组 6 维向量,构成电压暂降类型模式库。

### 3.2 基于混合判据的电压暂降类型计算方法

识别某条电压暂降数据的类型,可以提取其 6 维特征,构成如式(11)的 6 维向量,比较该条数据 6 维向量与模式库中各向量的相似程度,判断其类型。文章提出基于皮尔逊相关系数和切比雪夫距离的双重判据,度量待识别的电压暂降数据与模式库中的各条暂降数据的相似度,定义最大相关度指标,计算电压暂降类型。

#### 3.2.1 基于皮尔逊相关系数的相似度量

皮尔逊相关系数,用于度量两个变量之间的相关程度,相关系数越大,两变量的相关性越强,反之相关性越弱<sup>[14]</sup>。

假设两个变量  $X$  和  $Y$  为  $n$  维向量,表现形式为:  $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]$ ,  $Y = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]$ , 则两变量间的相关系数为:

$$\rho_{(X,Y)} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (13)$$

式中,  $\bar{X}$  和  $\bar{Y}$  分别为变量  $X, Y$  的均值。

电压暂降类型模式库的某一元素可表示为:

$$V_s = (V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}, V_{s4}, V_{s5}, V_{s6}) \quad (14)$$

式中,  $V_{s1}, V_{s3}, V_{s5}$  为模式库中任一暂降数据  $s$  的三相电压实部;  $V_{s2}, V_{s4}, V_{s6}$  为三相电压虚部。设  $V_m$  为某一实测电压暂降向量:

$$V_m = (V_{m1}, V_{m2}, V_{m3}, V_{m4}, V_{m5}, V_{m6}) \quad (15)$$

式中,  $V_{m1}, V_{m3}, V_{m5}$  为某一实测电压暂降数据  $m$  的三相电压实部;  $V_{m2}, V_{m4}, V_{m6}$  表示三相电压虚部,则此向量与模式库中任一向量之间的相关系数为:

$$\rho_{(V_s, V_m)} = \frac{\sum_{i=1}^6 (V_{si} - \bar{V}_s)(V_{mi} - \bar{V}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^6 (V_{si} - \bar{V}_s)^2 \sum_{i=1}^6 (V_{mi} - \bar{V}_m)^2}} \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (16)$$

式中,  $\bar{V}_s$  和  $\bar{V}_m$  分别为两组向量的平均值,计算得到待测电压与模式库的相关系数矩阵为:

$$\rho_Z = \begin{bmatrix} \rho_{Z-1-1} & \rho_{Z-1-2} & \rho_{Z-1-3} & \dots & \rho_{Z-1-100} \\ \rho_{Z-2-1} & \rho_{Z-2-2} & \rho_{Z-2-3} & \dots & \rho_{Z-2-100} \\ \rho_{Z-3-1} & \rho_{Z-3-2} & \rho_{Z-3-3} & \dots & \rho_{Z-3-100} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{Z-100-1} & \rho_{Z-100-2} & \rho_{Z-100-3} & \dots & \rho_{Z-100-100} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中,相关系数矩阵下标  $Z$  代表不同暂降类型,即  $A, C_a, C_b, C_c, D_a, D_b, D_c, H_a, H_b, H_c, I_a, I_b, I_c$  类型。各相关系数代表待计算的电压暂降与模式库中各条暂降数据的相关性。相关系数越大,表示相关性越强,待计算电压向量与模式库中某向量的相似度越大。

### 3.2.2 基于切比雪夫距离的相似度量

切比雪夫距离用以度量两个样本的相似程度,度量结果越大,说明两个样本越不相似;距离越小,则反之<sup>[15]</sup>。电压模式库的某向量  $V_s$  和实测电压  $V_m$  的切比雪夫距离的定义如下:

$$m(V_s, V_m) = \lim_{k \rightarrow \infty} \left( \sum_{i=1}^6 |V_{si} - V_{mi}|^k \right)^{1/k} \quad (18)$$

以暂降类型  $Z$  为例,得到待计算电压暂降与模式库的各矢量的切比雪夫距离矩阵为:

$$M_Z = \begin{bmatrix} m_{Z-1-1} & m_{Z-1-2} & m_{Z-1-3} & \cdots & m_{Z-1-100} \\ m_{Z-2-1} & m_{Z-2-2} & m_{Z-2-3} & \cdots & m_{Z-2-100} \\ m_{Z-3-1} & m_{Z-3-2} & m_{Z-3-3} & \cdots & m_{Z-3-100} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{Z-100-1} & m_{Z-100-2} & m_{Z-100-3} & \cdots & m_{Z-100-100} \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中,  $m_{Z-100-3}$  表示待计算的电压暂降与  $Z$  类型模式库中幅值为 1、相位为  $-78^\circ$  的电压暂降的切比雪夫距离。

### 3.2.3 基于混合判据的模式匹配

利用 3.2.2 节所得相关系数矩阵  $\rho_Z$  和切比雪夫距离矩阵  $M_Z$ , 相关度指标可定义为相关系数除以对应的切比雪夫距离,其优势在于降低单个判据所带来的不确定性,提高计算准确率。

定义暂降类型相关度矩阵  $K_Z$ ,  $K_Z$  中各元素等于  $\rho_Z$  中各元素与  $M_Z$  中对应元素相除所得到的值。

以暂降类型  $Z$  为例,根据上述方法计算得到相关度矩阵  $K_Z$ 。

$$k_{Z-i-j} = \frac{\rho_{Z-i-j}}{m_{Z-i-j}} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, 100 \quad (20)$$

$$K_Z = \begin{bmatrix} k_{Z-1-1} & k_{Z-1-2} & k_{Z-1-3} & \cdots & k_{Z-1-100} \\ k_{Z-2-1} & k_{Z-2-2} & k_{Z-2-3} & \cdots & k_{Z-2-100} \\ k_{Z-3-1} & k_{Z-3-2} & k_{Z-3-3} & \cdots & k_{Z-3-100} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{Z-100-1} & k_{Z-100-2} & k_{Z-100-3} & \cdots & k_{Z-100-100} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中,  $k_{Z-100-3}$  表示待计算暂降与  $Z$  类型模式库中幅值为 1、相位跳变为  $-78^\circ$  的电压暂降的相关度。相关系数  $\rho$  越大,切比雪夫距离  $m$  越小,相关度越大,表示待计算暂降与某向量的匹配度越高。

依次进行上述操作,求取得待计算暂降与  $K_Z$  矩阵中各元素的最大相关度:

$$k_{Z-\max} = \max(K_Z) \quad (22)$$

应用到其余各个暂降类型,将每个暂降类型得到的  $k_{Z-\max}$  记为  $k_A, k_{Ca}, \dots, k_{Ic}$  共 13 个,提取出这 13 个相关度之中的最大值。

$$k_{\max} = \max(k_A, k_{Ba}, k_{Bb}, \dots, k_{Ic}) \quad (23)$$

根据 13 个相关度之中的最大值,匹配相关暂降类型,匹配结果如表 2 所示。

表 2 电压暂降类型匹配结果

Tab.2 Matching results of voltage sag types

| $k_{\max}$ | 暂降类型  | $k_{\max}$ | 暂降类型  | $k_{\max}$ | 暂降类型  |
|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| $k_A$      | A     | $k_{Db}$   | $D_b$ | $k_{Ia}$   | $I_a$ |
| $k_{Ca}$   | $C_a$ | $k_{Dc}$   | $D_c$ | $k_{Ib}$   | $I_b$ |
| $k_{Cb}$   | $C_b$ | $k_{Ha}$   | $H_a$ | $k_{Ic}$   | $I_c$ |
| $k_{Cc}$   | $C_c$ | $k_{Hb}$   | $H_b$ |            |       |
| $k_{Da}$   | $D_a$ | $k_{Hc}$   | $H_c$ |            |       |

## 4 算例验证

### 4.1 仿真数据验证

#### (1) 仿真数据 1

根据已知类型的电压暂降进行仿真,构造多个暂降数据,为避免仿真数据与模式库数据重复,对特征电压的幅值和相位调整为  $[0.1, 0.9]$  和  $[-40, 10]$ ,样本数为  $50 \times 50$ ,形成 2 500 组仿真数据,同时考虑标准电压的变化,分别取  $F=1$ 、 $F=0.9$  与  $F=0.8$  的情况进行验证。结果表明,所提算法具有较高的准确率。

为验证所提混合判据的效果,在仅考虑皮尔逊相关系数、仅考虑切比雪夫距离的单一判据下,进行电压暂降类型计算。对于前者,在相关系数矩阵中,受测电压暂降数据与某暂降类型相关系数最大,该次电压暂降即为相应类型。对于后者,在切比雪夫距离矩阵中,受测电压暂降数据与某暂降类型的切比雪夫距离最小,该次电压暂降即为相应类型。

计算结果如表 3 所示,考虑  $F=1$  和 0.9 的情况下,仅以皮尔逊相关系数或切比雪夫距离作为判据,电压暂降类型计算结果的准确率约为 75% 或 80%,远低于混合判据的计算效果。

表3 仿真数据1电压暂降类型计算正确率

Tab.3 Calculated results of voltage sag types for simulated data 1

| 方法        | $F$ | 仿真数据类型正确率(%) |       |       |       |       |
|-----------|-----|--------------|-------|-------|-------|-------|
|           |     | A            | $C_a$ | $D_a$ | $H_a$ | $I_a$ |
| 所提方法      | 1   | 100          | 100   | 100   | 100   | 100   |
|           | 0.9 | 100          | 100   | 99.6  | 100   | 100   |
|           | 0.8 | 100          | 95.12 | 94.84 | 95.04 | 100   |
| 仅考虑皮尔逊判据  | 1   | 76.43        | 74.98 | 73.97 | 74.88 | 77.66 |
|           | 0.9 | 74.58        | 75.07 | 73.82 | 75.32 | 74.97 |
| 仅考虑切比雪夫判据 | 1   | 81.86        | 80.65 | 82.65 | 81.62 | 80.54 |
|           | 0.9 | 79.78        | 78.47 | 78.21 | 79.45 | 80.1  |

## (2) 仿真数据2

在PSCAD/EMTDC平台上搭建IEEE 14节点网络,如图4所示,设置三种不同类型的电压暂降,在4号母线和9号母线之间设置两相故障和三相故障,故障1是在线路4-9之间发生的A、B两相接地短路故障,故障开始时刻为1 s,故障清除时刻为4 s;故障2是在线路4-9之间发生的三相接地短路故障,开始时刻为5.6 s,故障清除时刻为6.8 s;故障3是在线路4-9之间发生的A、C两相接地故障,开始时间为8.6 s,结束时刻为10 s。各次电压暂降有效值曲线如图5所示。

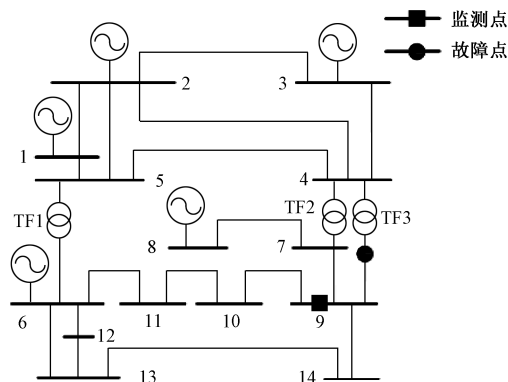


图4 IEEE 14节点测试系统

Fig.4 IEEE 14-bus test system

三次暂降波形有效值如下:

已知具体的故障类型,可推断所监测到的暂降类型分别为  $C_c$  类、A类和  $I_b$  类。其三相幅值和相位如图6所示。

应用所提方法对图5的监测数据进行分类,计算其最大相关度,结果列于表4中。由计算结果可知,与暂降1、暂降2和暂降3最相关的暂降类型分别为  $C_c$  类、A类、 $I_b$  类。计算结果与实际结果一致,证明了所提方法的有效性。

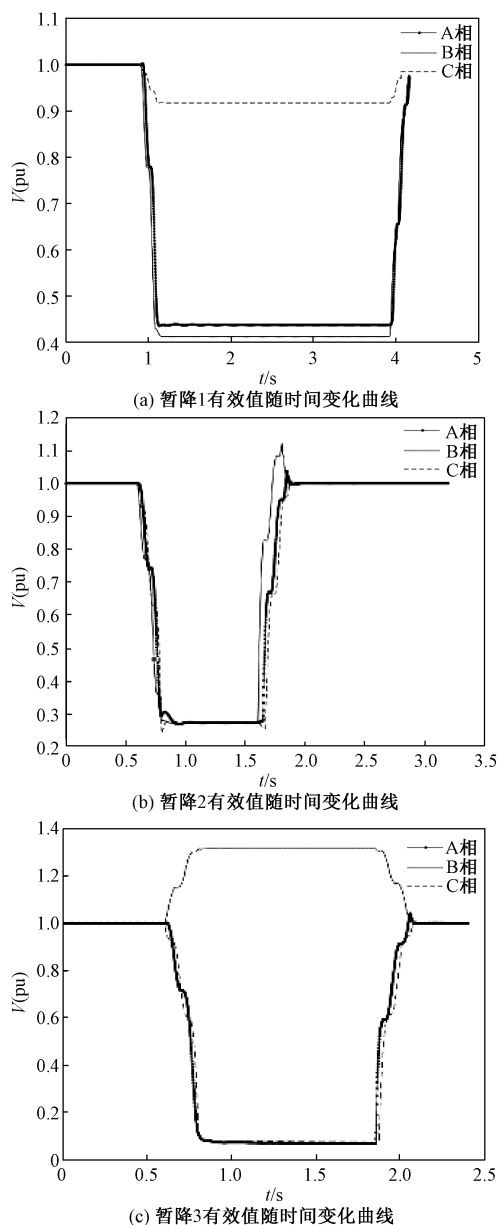


图5 仿真电压暂降有效值

Fig.5 Rms voltage of simulated voltage sag waveforms

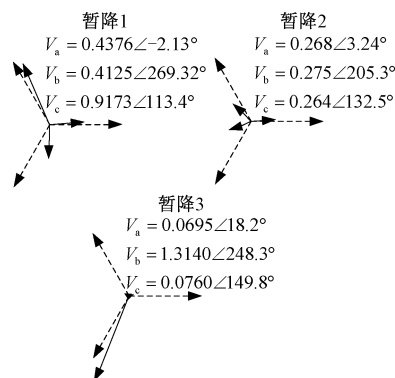


图6 仿真数据电压向量示意图

Fig.6 Vectors of the simulated voltage sags

表 4 仿真数据最大相关度计算结果

Tab.4 Calculated maximum correlation of simulated voltage sags

|          | 暂降 1  | 暂降 2   | 暂降 3  |
|----------|-------|--------|-------|
| $k_A$    | 3.291 | 10.766 | 1.303 |
| $k_{Ca}$ | 1.666 | 1.330  | 0.813 |
| $k_{Cb}$ | 1.894 | 1.247  | 1.370 |
| $k_{Cc}$ | 4.496 | 1.382  | 1.020 |
| $k_{Da}$ | 3.211 | 1.297  | 1.604 |
| $k_{Db}$ | 2.739 | 1.622  | 0.853 |
| $k_{Dc}$ | 1.710 | 1.782  | 1.585 |
| $k_{Ha}$ | 1.763 | 1.319  | 1.174 |
| $k_{Hb}$ | 1.685 | 1.354  | 0.796 |
| $k_{Hc}$ | 1.716 | 1.246  | 0.926 |
| $k_{Ia}$ | 1.636 | 1.256  | 0.820 |
| $k_{Ib}$ | 1.745 | 1.305  | 1.632 |
| $k_{Ic}$ | 2.433 | 1.310  | 0.852 |

表 5 实测数据最大相关度计算结果

Tab.5 Calculated maximum correlation of measured voltage sags

|          | 数据 1  | 数据 2  | 数据 3  | 数据 4  |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| $k_A$    | 0.937 | 1.535 | 2.032 | 9.788 |
| $k_{Ca}$ | 0.910 | 1.928 | 9.107 | 3.628 |
| $k_{Cb}$ | 1.192 | 1.805 | 1.355 | 6.639 |
| $k_{Cc}$ | 0.916 | 1.086 | 1.538 | 4.283 |
| $k_{Da}$ | 1.142 | 1.203 | 1.238 | 6.176 |
| $k_{Db}$ | 0.886 | 1.267 | 2.952 | 3.546 |
| $k_{Dc}$ | 1.006 | 2.868 | 2.234 | 4.589 |
| $k_{Ha}$ | 0.933 | 1.115 | 1.230 | 3.292 |
| $k_{Hb}$ | 0.982 | 1.119 | 1.299 | 3.178 |
| $k_{Hc}$ | 1.463 | 1.585 | 1.281 | 3.229 |
| $k_{Ia}$ | 1.025 | 1.214 | 1.434 | 3.178 |
| $k_{Ib}$ | 1.129 | 1.228 | 1.486 | 3.191 |
| $k_{Ic}$ | 0.879 | 1.100 | 1.341 | 3.268 |

## 4.2 实测数据验证

选取福州市电能质量监测系统中 2019 年的 4 次暂降事件进行分析,验证所提方法。在 MATLAB/Simulink 平台进行计算,每次计算时长不超过 1 s。计算 4 次暂降的各相幅值和相位跳变值,其向量图如图 7 所示。

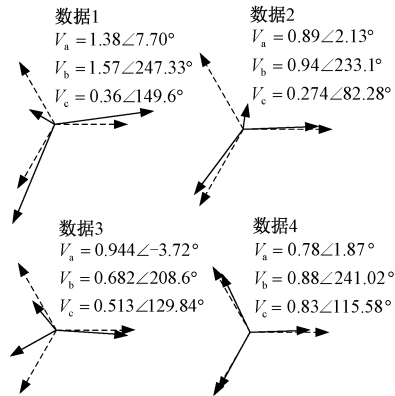


图 7 实测数据电压向量示意图

Fig.7 Vectors of measured voltage sags

应用所提方法,计算 4 组实测电压暂降数据与模式库的各类暂降的相似度,结果如表 5 所示。

根据计算结果,找出每一列的最大相关度,对应的暂降类型即为计算结果。

对于实测数据,目前并无标准算法在监测系列中进行计算,只能靠目测判断,估计其实际类型,并与计算结果进行对比。以数据 2 为例,b 相未跌到标准规定的暂降阈值以下,a 相几乎等于阈值,可以认为 a,b 相未跌落,c 相明显跌落至 0.274 pu,目测

判定波形 2 为典型的 D<sub>c</sub> 类电压暂降,本文方法计算结果正确。对数据 3 也可进行类似判断,a 相几乎无跌落,b、c 相分别跌至 0.682 pu 和 0.513 pu,b 相发生较大相位跳变,目测判断其为 C<sub>a</sub> 类暂降,计算结果符合目测判断。

为验证所提方法的先进性,将所提方法的计算结果,与国际上几种主流分类算法的计算结果进行对比。应用引言中介绍的 SCA 法、SPA 法、SVA 法以及 TP-TA 法,计算数据 1~数据 4 的暂降类型,对比结果如表 6 所示。

表 6 实测数据电压暂降类型

Tab.6 Voltage sag types of measured data

| 暂降类型    | 数据 1            | 数据 2           | 数据 3           | 数据 4 |
|---------|-----------------|----------------|----------------|------|
| 目测结果    | H <sub>c</sub>  | D <sub>c</sub> | C <sub>a</sub> | A    |
| 本文方法    | H <sub>c</sub>  | D <sub>c</sub> | C <sub>a</sub> | A    |
| SCA 法   | -               | D <sub>c</sub> | C <sub>a</sub> | -    |
| SPA 法   | -               | C <sub>b</sub> | D <sub>c</sub> | -    |
| SVA 法   | I <sub>ac</sub> | C <sub>b</sub> | D <sub>c</sub> | A    |
| TP-TA 法 | -               | D <sub>c</sub> | C <sub>c</sub> | -    |

由于 SCA 法、SPA 法和 TP-TA 法没有将电压暂升和对称型暂降考虑在内,而数据 1 和 4 的实际类型分别为 H<sub>c</sub> 型暂升和 A 型对称暂降,因此应用这三种方法无法计算数据 1 和 4 的暂降类型。应用 SPA 法和 SVA 法计算数据 2 的暂降类型,结果均为 C<sub>b</sub> 型,明显错误;计算数据 3 的暂降类型,仅 SCA 法结果正确。数据 2 和数据 3 的相位跳变是导致现有方法错误的主要原因。由对比可知,文章所提方法能够有效地克服相位跳变导致的误判,具有良好的应用前景。

## 5 结 论

(1)提出了基于皮尔逊相关系数和切比雪夫距离的电压暂降类型计算方法。将包含幅值和相位信息的三相电压转化为易于计算的六维向量,建立 6 维向量模式库,通过计算向量最大相关度,识别电压暂降类型。

(2)当正负序因子  $F$  为标准电压时,对于所有仿真数据,所提方法正确率为 100%。当正负序因子  $F$  不为标准电压时,仍然具有较高识别准确率,准确率高于 95%。

(3)对于实测数据,算法能精确计算出暂降类型,为分析暂降事件对敏感设备的影响提供依据。

(4)大电机启动和变压器激磁导致的电压暂降是缓慢恢复型暂降,暂降过程中电压幅值一直在发生变化,难以以 ABC 分类法对其进行定义。本文所提算法仅适用于因电网故障导致的矩形暂降。

(5)本文构建了类型模式库,能够批量、实时、在线计算监测数据的暂降类型,一般计算时长不超过 1 s。建议将该算法嵌入省级电能质量监测平台,为评估、治理区域电压暂降提供有效信息。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 付华, 于田 (Fu Hua, Yu Tian). 电压暂降源自适应 S 变换辨识模型 (Identification model of voltage sag derived from adaptive S-transform) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (11): 17-23.
- [ 2 ] 罗超, 陶顺, 肖湘宁 (Luo Chao, Tao Shun, Xiao Xiangning). dq 变换用于电压暂降瞬时检测的合理性分析 (Rationality analysis of dq transform used in voltage sag instantaneous detection) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (3): 66-70.
- [ 3 ] Bollen M H J. Algorithms for characterizing measured three-phase unbalanced voltage dips [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18 (3): 937-944.
- [ 4 ] Madrigal M, Rocha B H. A contribution for characterizing measured three-phase unbalanced voltage sags algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22 (3): 1885-1890.
- [ 5 ] Thakur P, Singh A K. Unbalance voltage sag fault-type characterization algorithm for recorded waveform [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (2): 1007-1014.
- [ 6 ] Ma Z Y, Zhou K, Wang H J. A new method for calculating the voltage dip type in three-phase systems [A]. 2018 China International Conference on Electricity Distribution [C]. China, 2018. 17-19.
- [ 7 ] Bollen M H J, Goossens P, Robert A. Assessment of voltage dips in HV-network; deduction of complex voltages from the measured rms voltages [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (2): 783-790.
- [ 8 ] Ignatova V, Granjon P, Bacha S. Space vector method for voltage dips and swells analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24 (4): 2054-2061.
- [ 9 ] Bollen M H J, Zhang L D. Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults [J]. Electric Power Systems Research, 2003, 66 (1): 59-69.
- [ 10 ] Bollen M H J. 理解电能质量问题: 电压暂降与短时中断 (Understanding power quality problems: Voltage sags and interruptions) [M]. 肖先勇, 汪颖, 译 (Xiao Xianyong, Wang Ying). 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2016. 163-167.
- [ 11 ] 肖湘宁, 陶顺 (Xiao Xiangning, Tao Shun). 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) (Types of voltage sag and its transfer between transformers under different neutral grounding modes (1)) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2007, 22 (9): 143-148.
- [ 12 ] 陶顺, 肖湘宁 (Tao Shun, Xiao Xiangning). 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 (二) (Types of voltage sag at neutral point under different grounding modes and its transfer between transformers (2)) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2007, 22 (10): 156-159.
- [ 13 ] Wang Y, Bollen M H J, Xiao X Y. Calculation of the phase-angle-jump for voltage dips in three-phase systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30 (1): 480-487.
- [ 14 ] 张世强, 吕杰能, 蒋峥, 等 (Zhang Shiqiang, Lv Jieneng, Jiang Zheng, et al.). 关于相关系数的探讨 (Study of the correlation coefficients in mathematical statistics) [J]. 数学的实践与认识 (Mathematics in Practice and Theory), 2009, 39 (19): 102-107.
- [ 15 ] 杨威, 龙华, 邵玉斌, 等 (Yang Wei, Long Hua, Shao Yubin, et al.). 基于切比雪夫距离的密度计算与 K-means 的聚类方法研究 (Density calculation based on Chebyshev distance and K-means clustering method) [J]. 通信技术 (Communication Technology), 2019, 52 (4): 833-838.

## Voltage sag type calculation algorithm considering Pearson correlation coefficient and Chebyshev distance

DU Pei, LIN Yan, ZHANG Wei-jun, LIN Fang, FANG Xiao-ling  
(Electric Power Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd.,  
Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** It is the important information of voltage sag type for fault type identification and mitigation equipment selection. Firstly, this paper establishes the voltage sag type pattern library based on the type definition of voltage sag and the voltage sag type propagation characteristics through transformer. The six-dimensional vector of three-phase voltage is defined and extracted to calculate the type of voltage sag. The Pearson correlation coefficient is used to establish the correlation coefficient matrix between the voltage sag to be calculated and the elements of the pattern library, and the similarity degree is calculated. The distance matrix between the measured voltage sag and the voltage sag vectors in the pattern library is proposed and calculated based on Chebyshev distance. Then the correlation matrix of voltage sag types is constructed based on the correlation coefficient matrix and the distance matrix and the voltage sag type considering the mixed criterion is calculated. The simulation data and measured data verify that the proposed method has high accuracy and can overcome the shortcomings of traditional methods that are sensitive to shallow sags and phase jumps. It is recommended to apply the proposed method in the provincial power quality monitoring platform to realize the real-time calculation of the type of sag and to provide a reference for the effective evaluation and mitigation of voltage sag in a certain region.

**Key words:** voltage sag; sag type; correlation matrix; Pearson correlation coefficient; Chebyshev distance