

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司
支持

高敬业,杨鸿雁,蔡 潇,毕贵红,杨 毅,
陈仕龙.
基于形态学的贯通式同相AT牵引供电
系统牵引网单端电流方向暂态保护.
电机与控制应用,2021,48(8):98.



SEARI
上电科

NCMS
上科电机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



科技改变未来
智慧创造价值

· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号

手机: 18918357509

电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904

邮箱: wangcj@seari.com.cn

基于形态学的贯通式同相 AT 牵引供电系统 牵引网单端电流方向暂态保护^{*}

高敬业^{1,2}, 杨鸿雁¹, 蔡 潇¹, 毕贵红¹, 杨 毅¹, 陈仕龙¹

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘 要: 针对贯通式同相自耦变压器(AT)牵引供电系统牵引网边界对高频暂态量有较强的衰减作用, 提出一种基于形态学的贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网单端电流方向暂态保护方法。采用多分辨形态梯度处理保护安装处检测到的故障暂态电流, 得到其线模分量波形突变点的极性, 由此构成方向起动元件。若极性为负, 判定为本侧区外故障, 保护不动作。若极性为正, 则需进一步对故障电流线模分量进行形态谱运算, 并将归一化后的形态谱变换到频域, 比较频域下形态谱值与阈值的大小判断是区内或对侧区外故障。利用 PSCAD 仿真平台对贯通式同相 AT 牵引供电系统进行建模, 针对不同故障条件进行大量仿真, 仿真结果验证了保护方法的有效性。

关键词: 贯通式同相 AT 牵引供电; 多分辨形态梯度; 牵引网边界; 单端电流方向暂态保护; 形态谱

中图分类号: TM 771 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)08-0098-08

doi: 10.12177/emca.2021.071

Single-Ended Current Direction Transient Protection of Traction Network in the Through-Type Co-Phase AT Traction Power Supply System Based on Morphology^{*}

GAO Jingye^{1,2}, YANG Hongyan¹, CAI Xiao¹, BI Guihong¹, YANG Yi¹, CHEN Shilong¹

(1. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650500, China;

2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: Aiming at the fact that the traction network boundary of the through-type co-phase auto-transformer (AT) traction power supply system has a strong attenuation effect on high-frequency transients, a single-ended current direction transient protection method of traction network based on morphology is proposed. The multi-resolution morphological gradient is used to process the fault transient current detected at the protection installation, and the polarity of the mutation point of the line mode component is obtained, which constitutes the directional start element. If the polarity is negative, the fault occurs outside the local area, and the protection does not operate. If the polarity is positive, it is necessary to further calculate the morphological spectrum of the fault current line mode component, and convert the normalized morphological spectrum to the frequency domain. By comparing the size of the morphological spectrum value and the threshold in the frequency domain, the fault is judged to be an internal fault or an external fault on the opposite side. The through-type co-phase AT traction power supply system is built on PSCAD,

收稿日期: 2021-04-02; 收到修改稿日期: 2021-07-12

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51767012)

作者简介: 高敬业(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

陈仕龙(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制。(通信作者)

and plenty of fault simulations are conducted for different situations. The simulation results show the availability of the protection method.

Key words: through-type co-phase AT traction power supply; multi-resolution morphological gradient; traction network boundary; single-ended current direction transient protection; morphological spectrum

0 引言

基于全线贯通技术和同相补偿技术的新型贯通式同相牵引供电系统,彻底解决了牵引供电系统中最为严重的过分相问题和负序问题,并大幅度提高了牵引供电系统的效率^[1-3]。牵引供电系统的运行状态受内外诸多因素的影响,事故发生率高^[4]。故障暂态电流信号中含有的故障信息比故障暂态电压信号更丰富,因此进一步研究由故障电流信号构成的牵引网暂态保护具有重要意义。由于自耦变压器(AT)供电方式具有通信防护效果好、牵引网供电距离长及牵引网损耗低等优点,目前高速重载铁路大部分选择该供电方式为机车供电,故本文选取贯通式同相 AT 牵引供电系统作为对象展开研究^[5]。

数学形态学是一种处理非线性问题的方法,该方法不仅有速度快、时延小等优点,而且通过形态学处理故障暂态信号不会出现幅度衰减及相位移的问题。形态谱运算由开运算和闭运算组成,可提取故障暂态信号的形态谱,进而得到形态谱值。多分辨形态梯度(MMG)能可靠判断故障暂态电流信号波形突变点的极性,由此可以构成方向起动元件的判据^[6]。

牵引变电所出口处电容和区外一段接触线共同构成贯通式同相牵引供电系统牵引网的天然边界,且该边界对高频分量具有较强的衰减作用^[7]。通过结合牵引网边界对高频分量较强的衰减作用和数学形态学处理故障暂态信号的优点,提出了基于形态学的贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网单端电流方向暂态保护方法。通过 MMG 判断故障电流线模分量波形突变点极性的正负,若极性为负,则判别为本侧区外故障。若极性为正,则通过形态谱运算得到故障电流线模分量的形态谱,对该形态谱进行归一化并将其变换到频域,并将频域中形态谱值与阈值的大小进行比较,来判断区内故障、对侧区外故障。通过大量仿真,验证了该保护方法的可靠性和可行性。

1 贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网单端电流方向保护原理

1.1 贯通式同相 AT 牵引供电系统

贯通式同相 AT 牵引供电系统结构如图 1 所示。公共电网侧输入三相交流电流,通过三相 PWM 整流与单相 PWM 逆变将三相交流电变换为单相交流电,再通过单相升压变压器升压后进入牵引网,为电力机车的运行提供电能。

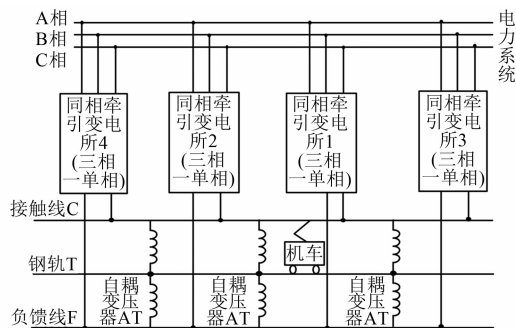


图 1 贯通式同相 AT 牵引供电系统示意图

根据牵引网各导线的参数,由 Carson 理论可计算出牵引网阻抗 $Z_{\text{相}}$ 的相量矩阵、电感 L 的相量矩阵 $L_{\text{相}}$ 、电容 C 的相量矩阵 $C_{\text{相}}$,如下^[8]:

$$Z_{\text{相}} = \begin{bmatrix} 0.1117 + j0.3544 & 0.0361 + j0.1167 \\ 0.0361 + j0.1167 & 0.2002 + j0.5169 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$C_{\text{相}} = \begin{bmatrix} 1.2304 \times 10^{-8} & -1.7417 \times 10^{-9} \\ -1.7417 \times 10^{-9} & 7.8435 \times 10^{-9} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$L_{\text{相}} = \begin{bmatrix} 1.1282 \times 10^{-3} & 3.7147 \times 10^{-4} \\ 3.7147 \times 10^{-4} & 1.6454 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $Z_{\text{相}}$ 、 $L_{\text{相}}$ 、 $C_{\text{相}}$ 的单位分别为 Ω/km 、 H/km 、 F/km 。

将贯通式同相 AT 牵引供电系统的牵引网简化为由 C 相和 F 相构成的两相不换位线路^[9]。由于 C 相是由接触线与承力索 2 条相异的导线共同构成的一相二分裂导线, F 相为负馈线、钢轨和

回流线等效合并而成, C 相和 F 相的线路参数不同, 故牵引网是不对称线路。牵引网的不对称性导致线路的传播模量也是不平衡的, 因此需要不同的变换矩阵对电压、电流波动方程进行对角化。电流、电压的相模变换矩阵为^[8]

$$\begin{aligned} T_i &= \begin{bmatrix} 0.889 & 9 & -0.677 & 6 \\ 0.456 & 2 & 0.735 & 4 \end{bmatrix} \\ T_u &= \begin{bmatrix} 0.763 & 2 & -0.473 & 5 \\ 0.703 & 2 & 0.923 & 5 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

设有:

$$T_i = (T_u^T)^{-1} \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_{\text{相}} = T_u U_{\text{模}} \\ I_{\text{相}} = T_i I_{\text{模}} \end{cases} \quad (6)$$

经计算可得

$$\begin{cases} R_m = T_u^{-1} R_{\text{相}} T_i \\ L_m = T_u^{-1} L_{\text{相}} T_i \\ C_m = T_i^{-1} C_{\text{相}} T_u \end{cases} \quad (7)$$

则

$$R_m = \begin{bmatrix} 0.088 & 5 & -0.011 & 2 \\ -0.011 & 2 & 0.1 & \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$L_m =$$

$$\begin{bmatrix} 1.537 & 5 \times 10^{-3} & -1.260 & 6 \times 10^{-19} \\ -1.888 & 7 \times 10^{-19} & 1.037 & 7 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C_m = \begin{bmatrix} 9.176 & 6 \times 10^{-9} & 2.061 & 0 \times 10^{-24} \\ 1.224 & 6 \times 10^{-24} & 1.097 & 1 \times 10^{-8} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: R_m 、 L_m 、 C_m 分别表示牵引网电阻 R 、电感 L 、电容 C 的模量矩阵, 单位分别是 Ω/km 、 H/km 、 F/km 。

由于牵引网电能质量易受交-直-交变换器所生成高次谐波的影响, 可通过装设电容电感滤波装置来降低高次谐波干扰, 该电容并联在牵引网上, 其在牵引网中的连接方式如图 2 所示^[10]。

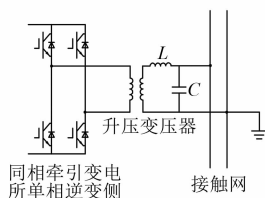


图2 电容与牵引网并联示意图

文献[11]分析表明, 3 m 长接触线与牵引变电所出口处电容构成的牵引网边界可以用于判别区内和区外故障。牵引变电所出口处电容与区外 3 m 长接触线共同构成的牵引网边界的等效电路如图 3 所示。

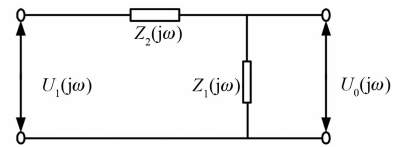


图3 牵引网边界等效电路

图 3 中, $Z_1(j\omega)$ 为牵引变电所出口处电容的等效阻抗, $Z_2(j\omega)$ 为 3 m 长接触线的等效阻抗。由图 3 推导出牵引网边界的传递函数 $G(j\omega)$ 为

$$\begin{aligned} G(j\omega) &= \frac{U_0(j\omega)}{U_1(j\omega)} = \frac{Z_1(j\omega)}{Z_1(j\omega) + Z_2(j\omega)} = \\ &= \frac{1}{(j\omega)^2 LC + (j\omega) RC + 1} = \\ &= \frac{1}{-9.0625 \times 10^{-3} \times f^2 + j3.5758 \times 10^{-4} \times f + 1} \end{aligned} \quad (11)$$

传递函数的幅频特性如图 4 所示。

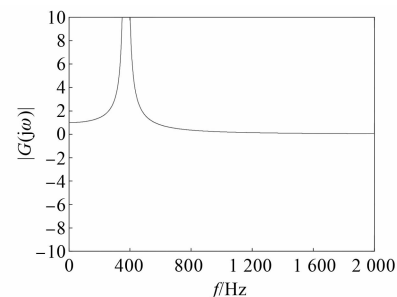


图4 牵引网边界传递函数的幅频特性

由图 4 可知, 低频部分传递函数的幅值接近于 1; 当频率 $f > 1 \text{ kHz}$ 时, 传递函数的幅值远小于 1, 即贯通式同相 AT 牵引供电系统的边界元件对故障信号的高频分量有较强的衰减作用。

1.2 牵引网单端电流方向保护原理

牵引网线路及边界对故障电流高频分量的衰减作用不同。当牵引网的距离较短时, 边界对高频分量的衰减作用将大于牵引网对高频分量的衰减作用。当牵引网的长度超过某个临界值时, 牵引网对故障电流高频分量的衰减作用可能会大于

边界对故障电流高频分量的衰减作用,这样会导致牵引网区内故障时保护安装处检测到的高频分量小于本侧区外故障时保护安装处检测到的高频分量,引发保护拒动^[12]。

保护安装处区内故障和本侧区外故障时,可以根据保护安装处检测到的故障电流波形突变点极性判定是否为本侧区外发生故障^[6]。利用归一化后形态谱值的大小来表示保护装置检测到的故障电流线模信号中高频分量的大小,通过比较阈值与形态谱值的大小来判定区内故障或对侧区外故障。由上述原理提出基于形态学的贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网单端电流方向保护方法,结合图 5 进行说明,步骤如下:

(1) 提取保护安装处检测到的故障暂态电流进行相模变换。因线模信号中含有的故障高频分量比零模信号多,故选取线模信号作为研究对象。通过 MMG 变换分析故障电流线模分量波形突变点的极性来判断是本侧区外故障(极性为负,故障 f_1),还是区内故障或对侧区外故障(极性为正,区内故障 $f_2 f_3 f_4$ 或对侧区外故障 f_5)。

(2) 若方向元件判断出故障不是本侧区外故障(即故障不是发生在 f_1 处),则需进行形态谱运算得到其形态谱,为消除不同尺度的影响,需要将得到的形态谱归一化后变换到频域。再分别对不同尺度下的形态谱求和,得到不同尺度下的形态谱值,并将得到的形态谱值进行归一化。

(3) 最终通过比较归一化后的形态谱值 Q_1 与阈值 Q 的大小来判定区内故障或对侧区外故障。当故障电流线模分量的形态谱值 Q_1 大于阈值 $Q(Q=1)$ 时,为区内故障(故障 $f_2 f_3 f_4$);当故障电流线模分量的形态谱值 Q_1 小于阈值 Q 且大于零时,为对侧区外故障(故障 f_5)。

贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网单端电流方向暂态保护的布置如图 5 所示,保护检测点在牵引变电所 2 的区内出口处。规定牵引变电所 1、2 之间的牵引网为保护区内,本侧区外为牵引变电所 2 的左侧,对侧区外为牵引变电所 1 的右侧。

2 电流方向起动元件

2.1 构造方向起动元件

设定母线流向线路为电流正方向。在图 5

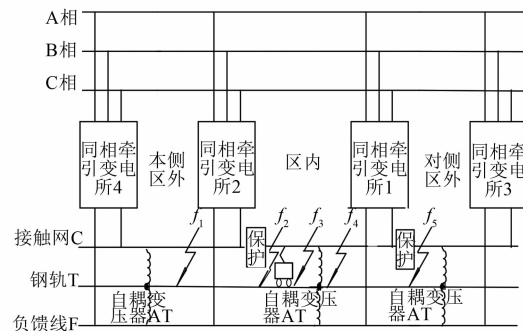


图 5 牵引网单端电流方向暂态保护布置图

中,当故障发生在本侧区外 f_1 处,电流方向与正方向相同,电流的突变方向为反方向即在波形突变处极性为负;当区内 $f_2 f_3 f_4$ 处或者对侧区外 f_5 处发生故障时,电流方向与正方向相反,电流突变方向为正方向即在波形突变处极性为正^[13]。由此可知,可以通过判定保护装置处检测到的故障电流波形突变点的极性构造方向起动元件。若故障电流波形突变处极性为负,则本侧区外发生故障,保护应可靠不动作;若故障电流波形突变处极性为正,则是区内故障或对侧区外故障,需进一步判断故障位置。

2.2 基于 MMG 技术的电流极性判断

本文采用 MMG 技术对保护安装处检测到的故障电流线模分量进行信号处理,可以通过提取电流信号的上升沿、下降沿来分析电流信号的极性^[14-15]。

设 $G_g^{\alpha+}(n) > 0$ 、 $G_g^{\alpha-}(n) < 0$ 分别为暂态波形的上升沿、下降沿; $\oplus$ 为膨胀运算, Θ 为腐蚀运算。通过 MMG 变换进行信号处理的数学表述如下:

$$G_g^{\alpha+}(n) = (f^{\alpha-1} \oplus g^+)(n) + (f^{\alpha-1} \Theta g^+)(n) \quad (12)$$

$$G_g^{\alpha-}(n) = (f^{\alpha-1} \Theta g^-)(n) + (f^{\alpha-1} \oplus g^-)(n) \quad (13)$$

$$f_g^{\alpha}(n) = G_g^{\alpha+}(n) - G_g^{\alpha-}(n) \quad (14)$$

$$g^+ = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l\} \quad (15)$$

$$g^- = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l\}$$

式中: g^+ 、 g^- 为结构元素; g 为原点所在位置; $f_g^{\alpha}(n)$ 用于反映信号极性的变化,当 $\alpha=1$ 时, $f^0=f$ 为初始信号;当 $\alpha=2,3,\dots$ 时, $f^{\alpha-1}=f_g^{\alpha}(n)$ 。

设置采样频率为 40 kHz,采样点个数为 200,选取 MMG 变换系数 α 为 2 的一层进行分析,得

到故障电流线模分量的波形如图 6 所示。

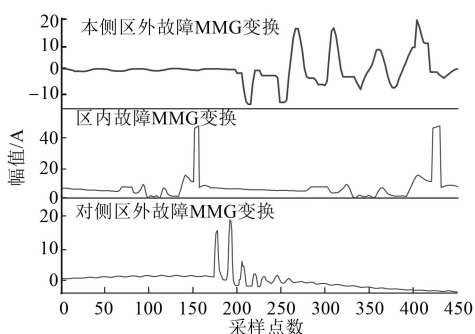


图 6 经 MMG 变换后的故障电流线模分量波形图

从图 6 中可以明显看出第 1 层(本侧区外故障)故障电流线模分量波形突变点处极性为负;第 2 层(区内故障)和第 3 层(对侧区外故障)故障电流线模分量波形突变点处极性为正。因此通过分析故障电流线模分量波形突变点处的极性可以构造方向起动元件。

3 区内故障与对侧区外故障的判据

当贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网发生故障后,若方向起动元件判断出不是本侧区外故障,则需进行形态谱运算并比较形态谱值与阈值的大小,进而判定区内故障或对侧区外故障。

3.1 形态谱原理

牵引网区内故障或对侧区外故障时,本文采用形态谱值的大小来表示保护装置检测到的高频分量的大小。当故障发生在对侧区外时,故障电流线模分量要经过牵引网及边界的共同衰减作用才能到达保护安装处,区内故障时电流线模分量仅经过牵引网的衰减作用便到达保护安装处,故区内故障时线模电流高频分量必然大于对侧区外故障时线模电流高频分量。设原始信号为 $f(x)$, 则其形态学的开运算、闭运算为^[6]

$$(f \circ rg) = (f \ominus rg) \oplus rg, r > 0 \quad (16)$$

$$(f \cdot rg) = (f \oplus rg) \ominus rg, r > 0 \quad (17)$$

式中: $\circ$ 表示开运算; $\cdot$ 表示闭运算; r 为结构元素的半径; $g(x)$ 为一凸结构函数。设定义域 R^m 内的面积为 A , 则形态谱表达式如下:

$$PS_f(+r, g) = -\frac{dA(f \circ rg)}{dr}, r \geq 0 \quad (18)$$

$$PS_f(-r, g) = \frac{dA(f \cdot rg)}{dr}, r > 0 \quad (19)$$

形态谱结构元素类型丰富,本文选取扁平形结构元素,因为不需考虑结构元素的高度且随着宽度的变化而变化,通过频率的不断改变对信号进行逐频率分解^[16]。

结构元素宽度的选取需要注意:结构元素的宽度必须大于故障信号的干扰宽度,否则不能有效过滤噪声,但宽度选择过大会干扰波形的局部及细节特征。当结构元素形状和结构元素宽度选定时,信号采样点数对形态学的频率响应特性并无影响,只会改变频率分辨率^[17-18]。对贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网的区内和对侧区外进行故障仿真,故障电流通过形态谱运算后其线模分量形态谱如图 7、图 8 所示。

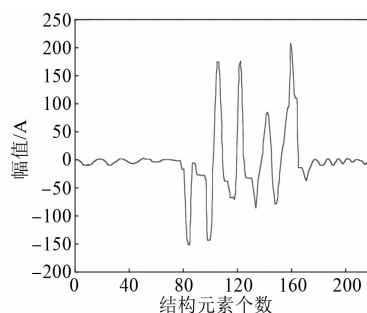


图 7 区内故障时电流线模分量的形态谱

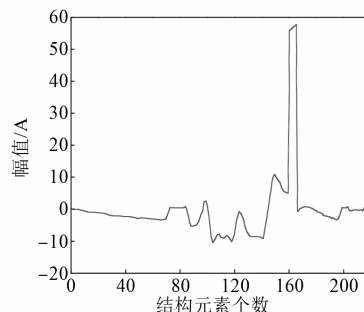


图 8 对侧区外故障时电流线模分量的形态谱

由图 7 和图 8 可知,当结构元素的宽度接近 180 时,无论故障发生在区内还是对侧区外,故障电流线模分量波形的形态谱值均接近 0。结构元素的个数大于 180 时,区内故障及对侧区外故障的谱线值均为 0,将会对波形的局部特征及细节特征造成影响,故本文选取结构元素的宽度为

1~180。不同的谱尺度对应不同的小波分解层数及不同的频段,对应关系如表1所示。

表1 频域内多尺度小波分解层数与形态谱尺度之间的对应关系

谱尺度	频段/Hz	小波尺度
1~8	2 500~40 000	d1~d3
8~16	1 250~2 500	d4
16~32	625~1 250	d5
32~64	312~625	d6
64~128	156~312	d7
128~256	78~156	d8

3.2 区内故障和对侧区外故障的判别

通过形态谱运算得到形态谱,并对其进行归一化处理,消除尺度变换对形态谱的影响;对不同尺度下的形态谱分别求和,得到不同尺度下的形态谱值并进行归一化,最终得到归一化处理后的形态谱值 $Q_i (i=1,2,3,4,5)$ 。由于形态谱尺度128~256对应的频段很低,不宜用于牵引网单端电流方向暂态保护,故将其舍弃。因此 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 对应的尺度分别为1~8、8~16、16~32、32~64、64~128。

通过大量仿真结果可知,高频段的形态谱值 Q_1 在区内故障时分布在 $10^0 \sim 10^1$,故障发生在对侧区外时,经过牵引网及边界共同的衰减作用后形态谱的谱值 Q_1 均分布在 10^{-1} 数量级,比区内故障时大约降低一个数量级。低频段形态谱值 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 ,在区内故障时较均匀地分布在 10^{-1} 数量级附近,对侧区外故障与区内故障时的形态谱值相比,变化并不大,这是由于牵引网边界自身通低频阻高频的特性造成的,边界对低频分量的衰减作用并不明显,而对高频分量有较强的衰减作用。因此,本文选取了对区内故障、对侧区外故障反应较灵敏的高频段形态谱值 Q_1 作为研究对象,且将 Q_1 放大了 10^2 倍以方便后续工作的开展。设定阈值 Q 为1,将最终得到的归一化后的高频段形态谱值 Q_1 与阈值 Q 进行比较,从而构成故障判据:当 Q_1 大于 Q 时,故障发生在区内;当 Q_1 小于 Q 且大于0时,故障发生在对侧区外。

4 仿真验证

本文参照图1,利用PSCAD平台搭建贯通式同相AT牵引供电系统仿真模型,模型参数如下:电压取220 kV/27.5 kV;频率为50 Hz;通过三相PWM整流与单相PWM逆变的变换方式来构成三相-单相变换,并利用SPWM调制技术输出以基波为主的单相交流电,同时抑制高次谐波的产生^[19];电力机车模型选取总牵引功率为4 800 kW的CHR2型交-直-交电动机车。

本文针对不同的故障初始角、故障位置及不同的过渡电阻等多种情况进行大量故障仿真。采样频率设置为40 kHz,扁平结构元素的宽度为1~180,根据滤波窗宽度(=结构元素宽度/采样频率)的计算公式可得滤波窗为4.5 ms。故障初始角为 10° 时,不同故障位置及不同过渡电阻条件下的仿真结果如表2所示。

分析表2可知,在故障初始角一定的情况下改变故障位置及过渡电阻:本侧区外故障时,故障电流线模分量波形突变点的极性为负;区内故障时,故障电流线模分量波形突变点的极性为正,且故障电流线模分量的形态谱值 Q_1 均大于阈值 $Q (Q=1)$;当对侧区外发生故障时,故障电流线模分量波形突变点的极性为正,且故障电流线模分量的形态谱值 Q_1 均小于阈值 Q 并大于0。通过仿真结果还可以看出,故障位置距离保护检测点越远,形态谱值越小;随着过渡电阻的增大,形态谱值减小。

过渡电阻设置为0.1 Ω 时,不同故障初始角及不同故障位置条件下的仿真结果如表3所示。

通过分析表3可知,在过渡电阻一定的情况下改变故障位置及故障初始角:故障发生在本侧区外时,故障电流线模分量的波形突变点极性为负;区内故障及对侧区外故障时故障电流线模分量的波形突变点极性为正;发生区内故障时,故障电流线模分量的形态谱值 Q_1 均大于阈值 $Q (Q=1)$;当发生对侧区外故障时,故障电流线模分量的形态谱值 Q_1 均小于阈值 Q 且大于0。且故障位置越接近保护安装处、故障初始角越大,则形态谱值越大。

表 2 故障初始角为 10°时的仿真结果

故障位置	过渡电阻/ Ω	Q_1	突变点极性	判断结果
本侧区外	0.1	—	负	本侧区外故障
	10	—	负	本侧区外故障
	50	—	负	本侧区外故障
	100	—	负	本侧区外故障
	200	—	负	本侧区外故障
	300	—	负	本侧区外故障
保护 安装处	0.1	26.962 4	正	区内故障
	10	22.841 4	正	区内故障
	50	19.253 6	正	区内故障
	100	12.226 0	正	区内故障
	200	7.365 2	正	区内故障
	300	5.783 0	正	区内故障
距牵引 变电所 2 为 20 km	0.1	13.956 7	正	区内故障
	10	11.546 7	正	区内故障
	50	8.651 8	正	区内故障
	100	5.771 3	正	区内故障
	200	3.989 2	正	区内故障
	300	2.958 7	正	区内故障
距牵引 变电所 2 为 40 km	0.1	5.795 7	正	区内故障
	10	5.566 6	正	区内故障
	50	4.043 9	正	区内故障
	100	2.419 1	正	区内故障
	200	1.858 5	正	区内故障
	300	1.796 6	正	区内故障
距牵引 变电所 1 为 0.01 km	0.1	0.902 5	正	对侧区外故障
	10	0.842 3	正	对侧区外故障
	50	0.839 4	正	对侧区外故障
	100	0.775 8	正	对侧区外故障
	200	0.655 6	正	对侧区外故障
	300	0.544 0	正	对侧区外故障
距牵引 变电所 1 为 20 km	0.1	0.710 1	正	对侧区外故障
	10	0.609 0	正	对侧区外故障
	50	0.608 3	正	对侧区外故障
	100	0.546 3	正	对侧区外故障
	200	0.532 5	正	对侧区外故障
	300	0.354 5	正	对侧区外故障
距牵引 变电所 1 为 40 km	0.1	0.526 8	正	对侧区外故障
	10	0.386 6	正	对侧区外故障
	50	0.254 7	正	对侧区外故障
	100	0.214 0	正	对侧区外故障
	200	0.184 6	正	对侧区外故障
	300	0.106 9	正	对侧区外故障

表 3 过渡电阻为 0.1 Ω 时的仿真结果

故障位置	故障初 始角/(°)	Q_1	突变 点极性	判断结果
本侧区外	10	—	负	本侧区外故障
	30	—	负	本侧区外故障
	45	—	负	本侧区外故障
	60	—	负	本侧区外故障
	90	—	负	本侧区外故障
保护安装处	10	2.058 5	正	区内故障
	30	3.947 1	正	区内故障
	45	3.529 8	正	区内故障
	60	4.364 9	正	区内故障
	90	5.8975	正	区内故障
距牵引 变电所 2 为 20 km	10	1.802 6	正	区内故障
	30	2.7466	正	区内故障
	45	2.900 3	正	区内故障
	60	3.427 5	正	区内故障
	90	4.453 3	正	区内故障
距牵引 变电所 2 为 40 km	10	1.526 5	正	区内故障
	30	1.627 0	正	区内故障
	45	2.154 9	正	区内故障
	60	2.308 4	正	区内故障
	90	3.365 2	正	区内故障
距牵引 变电所 1 为 0.003 km	10	0.354 5	正	对侧区外故障
	30	0.592 7	正	对侧区外故障
	45	0.684 1	正	对侧区外故障
	60	0.812 1	正	对侧区外故障
	90	0.918 1	正	对侧区外故障
距牵引 变电所 1 为 20 km	10	0.309 0	正	对侧区外故障
	30	0.477 6	正	对侧区外故障
	45	0.577 3	正	对侧区外故障
	60	0.754 5	正	对侧区外故障
	90	0.863 3	正	对侧区外故障
距牵引 变电所 1 为 40 km	10	0.197 6	正	对侧区外故障
	30	0.208 6	正	对侧区外故障
	45	0.309 2	正	对侧区外故障
	60	0.511 1	正	对侧区外故障
	90	0.613 5	正	对侧区外故障

5 结 语

基于牵引网边界对高频分量有较强的衰减作

用,提出一种基于形态学的贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网单端电流方向暂态保护方法,通过大量故障仿真验证了所提保护方法的可行性,主要结论如下:

(1) 通过对故障电流线模分量进行 MMG 变换,可以得到故障电流线模分量波形突变点的极性:若极性为负,判定为本侧区外故障;若极性为正,判定为区内故障或对侧区外故障。

(2) 当判定为区内故障或对侧区外故障时,通过形态谱运算对故障电流线模分量进行处理,并变换归一化后的形态谱到频域。通过比较频域下的形态谱值 Q_1 与阈值 Q 的大小,判断故障发生位置:当形态谱值 Q_1 大于阈值 Q 时,为区内故障;当形态谱值 Q_1 小于阈值 Q 且大于 0 时,为对侧区外故障。

【参考文献】

- [1] 陈民武,宋雅琳,刘琛,等. 同相供电系统潮流控制器可靠性建模与冗余分析[J]. 电网技术,2017,41(12): 4022.
- [2] SHU Z L, XIE X F, JING Y Z. Advanced co-phase traction power supply simulation based on multilevel converter [C] // Proceedings of the 2011 2nd International Congress on Computer Applications and Computational Science Advances in Intelligent and Soft Computing, 2012.
- [3] 何晓琼,彭旭,周瑛英,等. 一种新型同相牵引供电系统均流性能研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(4): 53.
- [4] 程宏波,李新原,王勋,等. 高铁牵引供电系统故障的 Logistic 关联分析[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(10): 2065.
- [5] 张秀峰,高仕斌,钱清泉,等. 基于阻抗匹配平衡变压器和 AT 供电方式的新型同相牵引供电系统[J]. 铁道学报,2006,28(4): 32.
- [6] 陈仕龙,曹蕊蕊,毕贵红,等. 基于形态学的特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电力自

- 动化设备,2016,36(1): 67.
- [7] 宋国兵,冉孟兵,褚旭,等. 利用高低频电流幅值比的 VSC-HVDC 输电线路全线速动保护新原理[J]. 电网技术,2014,38(5): 1402.
- [8] 李建平. 贯通式同相牵引供电系统牵引网行波传播特性及保护初探[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [9] 赵四洪,刘浩,陈仕龙,等. 贯通式同相牵引直接供电系统牵引网边界频率特性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(3): 758.
- [10] 胡景瑜. 贯通同相供电系统潮流控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [11] 陈仕龙,杨鸿雁,毕贵红,等. 贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备,2021,41(6): 192.
- [12] 常非,赵丽平,冯金博. 五电平交直交变换器在贯通同相供电中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报,2015,27(1): 26.
- [13] 陈仕龙,束洪春,谢静,等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(11): 134.
- [14] 束洪春,王超,张杰,等. 基于形态学的 HVDC 线路故障识别与定位方法研究[J]. 电力自动化设备, 2007,27(4): 6.
- [15] 吴青华,张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化,2003,27(7): 45.
- [16] 杨庆,王荆,陈林,等. 计及冲击电晕的输电线路雷电绕击和反击智能识别方法[J]. 高电压技术, 2011,37(5): 1149.
- [17] 胡爱军,孙敬敬,向玲. 振动信号处理中数学形态滤波器频率响应特性研究[J]. 机械工程学报, 2012,48(1): 98.
- [18] 顾红伟,马季,孙振权,等. 数学形态滤波在局部放电信号分析中的应用研究[J]. 高压电器,2011,47(9): 57.
- [19] 郭文杰,林飞,郑琼林. 三相电压型 PWM 整流器的级联式非线性 PI 控制[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(2): 138.

(上接第 97 页)

- [16] 全国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技术委员会. GB/T 2423.37—2006. 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 L: 沙尘试验[S]. 2006.
- [17] 全国电工电子产品环境条件与环境试验标准化技

术委员会. GB/T 2423.16—2008. 电工电子产品环境试验 第 2 部分: 试验方法 试验 J 和导则: 长霉[S]. 2008.

- [18] 中华人民共和国工业和信息化部. GB/T 37079—2018. 设备可靠性 可靠性评估方法[S]. 2018.