

基于 FEEMD 与 TEO 的贯通式 AT 同相牵引供电系统牵引网单端功率方向保护^{*}

陈仕龙, 陈俊滢, 蔡 潇, 毕贵红, 赵四洪
(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 根据牵引网线路边界对高频暂态量的衰减作用, 提出一种基于快速总体平均经验模式分解 (FEEMD) 和 Teager 能量算子 (TEO) 的贯通式自耦变压器 (AT) 同相牵引供电系统牵引网单端功率方向保护方法。求采集到的电压电流信号故障发生时的瞬时功率, 并对暂态功率进行 Teager 变换求得 TEO 波形突变点的极性来作为方向判据, 判别是正向故障或反向故障; 若为正向故障 (区内或对侧区外), 再对故障暂态电流信号进行 FEEMD 分解, 提取故障信号的固有模式函数 1 (IMF1) 分量, 再对 IMF1 分量进行 TEO 变换, 求出高频暂态电流信号的 TEO 谱瞬时值, 然后求取其绝对值并求和, 进而判断故障位于区内还是对侧区外。最终通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建贯通式 AT 同相牵引供电系统模型, 在不同故障条件下进行大量仿真提取数据, 仿真结果证明本方案能够有效区分区内外故障, 保护牵引网线路全长。

关键词: 贯通式自耦变压器同相牵引供电系统; 牵引网边界; 快速总体平均经验模式分角; Teager 能量算子; 单端功率方向保护

中图分类号: TM773 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)08-0073-06

doi: 10.12177/emca.2022.065

Single-Ended Power Direction Protection for Traction Network of Through-Type AT In-Phase Traction Power Supply System Based on FEEMD and TEO^{*}

CHEN Shilong, CHEN Junhao, CAI Xiao, BI Guihong, ZHAO Sihong

(School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, China)

Abstract: According to the attenuation effect of the traction network line boundary on high-frequency transient, a single-ended power direction protection method for the traction network of the through-type auto transformer (AT) in-phase traction power supply system based on fast ensemble empirical mode decomposition (FEEMD) and Teager energy operator (TEO) is proposed. Obtain the instantaneous power of the collected voltage and current signals when the fault occurs, and perform Teager transformation on the transient power to obtain the polarity of the TEO waveform mutation point as the direction criterion to determine whether it is a forward fault or a reverse fault. If it is a forward fault (inside or outside the opposite side), the fault transient current signal is decomposed by FEEMD, the intrinsic mode function 1 (IMF1) component of the fault signal is extracted, and then TEO is performed on the IMF1 component to obtain the instantaneous value of the TEO spectrum of the high-frequency transient current signal. The absolute pair value is obtained and summed, so as to judge whether the fault is inside or outside the opposite.

收稿日期: 2022-05-29; 收到修改稿日期: 2022-06-20

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51767012)

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

陈俊滢 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制。

赵四洪 (1973—), 男, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制。(通信作者)

Finally, the through-type AT in-phase traction power supply system model is built through PSCAD/EMTDC simulation software, and a large number of simulation data are extracted under different fault conditions. The simulation results show that this scheme can effectively partition internal and external faults and protect the full length of the traction network line.

Key words: through-type auto transformer in-phase traction power supply system; traction network boundary; fast ensemble empirical mode decomposition (FEEMD); Teager energy operator (TEO); single-ended power direction protection

0 引言

如今以高速铁路为代表的电气化铁路快速发展,铁路采用的贯通式同相牵引供电系统无电分相,解决了牵引供电系统中的谐波、负序和三相功率不平衡等问题^[1]。但牵引网输电线路受到运行环境、气候、电力机车的冲击负荷和雷电流等条件的影响,故障率较高,且无备用接触网,故其对供电可靠性要求极高^[2]。目前国内的牵引网继电保护有三段距离保护、过电流保护、接触网发热保护等^[3-4],但继电保护动作的准确性和可靠性还有待改善。

文献[5]提出利用一段接触线和牵引变电所右侧出口处电容构成牵引网“边界”,经验证,在一定范围内,高频暂态信号通过该边界会受到强烈衰减,且衰减程度大于通过牵引网线路。文献[6]基于高压直流输电线路边界对高频信号的衰减作用,提出了一种根据暂态功率构造高低频能量比值判据的单端暂态量保护方法。文献[7]将局部均值分解(LMD)算法和 Teager 能量算子(TEO)结合,实现了柔性直流输电(VSC-HVDC)线路全线快速保护。文献[8]中采用基于 TEO 的纵联保护方法,利用 TEO 提取出故障分量的瞬时能量信号,根据不同区域故障时瞬时能量信号的差异进行区域判别,而准确进行区内外故障识别及故障选极。文献[9]提出由平波电抗器、直流滤波器和 PLC 滤波器构成的特高压直流输电线路的边界,分别对边界和线路进行频率特性分析,认为在一定线路长度情况下边界对故障信号高频分量的衰减作用强于线路。文献[10]以直流电抗器等元件组成直流输电线路边界,该边界对高频分量具有强衰减作用,当故障发生在不同区域时高频分量差异明显,因此构成故障区域判据,并提出了一种直流线路单端暂态量保护方法。上述文献在高压直流输电中暂态量保护的研究颇深,

但是在牵引供电系统中的研究还远远不足。因此研究利用故障信号暂态高频分量的贯通式同相牵引供电系统牵引网线路保护具有重要意义。

本文首先分析了牵引网边界对故障信号高频量的衰减作用,提出基于 TEO 变换的功率方向元件,判断故障为正向时利用快速总体平均经验模式分解(FEEMD)和 TEO 求得 TEO 谱值并进行区内外判别,最终提出了一种单端暂态量保护方案,并利用仿真软件 PSCAD/EMTDC 和 MATLAB 进行大量仿真来验证本文提出的暂态保护方案。

1 贯通式 AT 同相牵引供电系统及其基本原理

1.1 贯通式 AT 同相牵引供电系统

基于交-直-交变换的贯通式同相牵引供电系统可以解决牵引网中的电分相、负序和谐波等问题^[11],同时在大负荷电流运行工程中采用自耦变压器(AT)供电方式可以减小接触线损耗和受电弓滑板^[12]。基于交-直-交变换的贯通式 AT 同相牵引供电系统如图 1 所示^[13]。

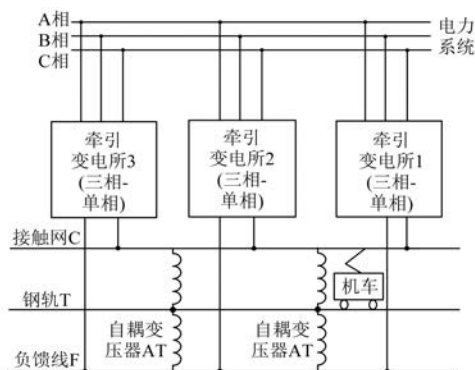


图 1 基于交-直-交变换的贯通式 AT 同相牵引供电系统结构图

1.2 牵引网输电线路边界及其频率特性

牵引网边界由牵引变电所出口处电容 C 和一段接触线构成,牵引网边界连接方式如图 2 所示。

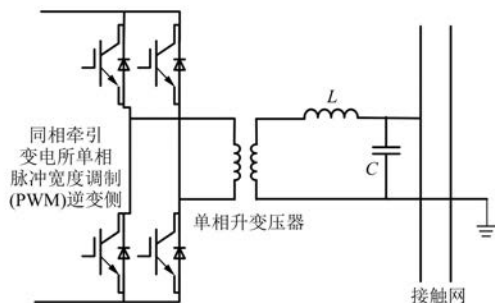


图2 牵引网边界连接示意图

牵引变电所出口处电容 C 为 $130 \mu\text{F}$, 其等效阻抗如下:

$$Z_1(j\omega) = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{2\pi f \times 130 \times 10^{-6}j} \quad (1)$$

式中: f 为频率; ω 为角频率。

文献[5]推导出牵引网边界的传递函数为

$$G(j\omega) = \frac{1}{-9.0625 \times 10^{-3} \times f^2 + j3.5758 \times 10^{-4} \times f + 1} \quad (2)$$

牵引网边界传递函数 $G(j\omega)$ 幅频特性如图3所示。由图3可知, 传递函数 $G(j\omega)$ 在频率 f 为 390 Hz 左右时幅值达到最大值, 当频率 $f > 1 \text{ kHz}$ 时, 其幅值趋近于0。由此可知故障信号通过牵引网边界时其高频分量将强烈衰减。

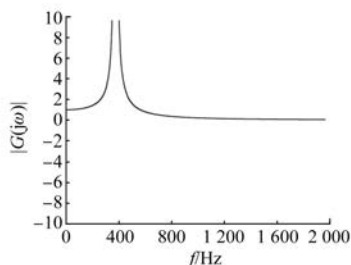


图3 牵引网边界传递函数幅频特性

2 FEEMD 和 TEO 算法

2.1 FEEMD 算法

由经验模态分解(EMD)和总体经验模态分解(EEMD)算法改进而来的 FEEMD 核心在于加入幅值为 ψ 的白噪声, 通过削减取样过程中的筛选次数来提升计算效率^[14-15]。因此, 采用 FEEMD 算法分解故障暂态电流信号, 不仅可以改善 EMD 算法中的模态混叠问题, 而且能够较好地解决非线性和非

平稳性信号问题, 使分解更加充分。

2.2 TEO 算法

TEO 算法能够快速反应原始信号变化并准确提取能量瞬时值^[8,16]。由于原始信号的特征差异, 其运算过程分为非线性信号和离散信号的运算。对于非线性信号 $x(t)$, TEO 可以定义为^[8,16-17]:

$$\Psi[x(t)] = [x'(t)]^2 - x(t)x''(t) \quad (3)$$

式中: $x'(t)$ 为 $x(t)$ 的一阶导数; $x''(t)$ 为 $x(t)$ 的二阶导数。

对于离散信号 $x(i)$, TEO 可以定义为

$$\Psi[x(i)] = [x(i)]^2 - x(i-1)x(i+1) \quad (4)$$

3 基于 FEEMD 和 TEO 的单端保护

3.1 单端方向保护基本原理

贯通式 AT 同相牵引供电系统单端暂态量保护方案的基本原理是: 利用安装在牵引变电所出口处右侧的保护装置检测故障信号方向, 若故障信号来自正向, 则进一步判断故障是发生在区内还是对侧区外。

图4所示, 保护装置安装在牵引变电所2的下方, 当 F_1 处发生故障时, 由于故障信号为反向, 保护不动作; 当 F_2 、 F_3 和 F_4 处发生故障时, 故障暂态电流信号中的高频分量经过一段小于 40 km 接触线的衰减即可达到保护安装处; 当 F_5 处(即图4中牵引变电所1的下方)发生故障时, 故障暂态电流信号中的高频分量经过一段大于 40 km 接触线和边界的双重衰减才达到保护安装处^[17-18]。因此, 提取来自正向的故障暂态电流信号的高频分量与预先设置的阈值作比较, 即可区分出区内故障和对侧区外故障。

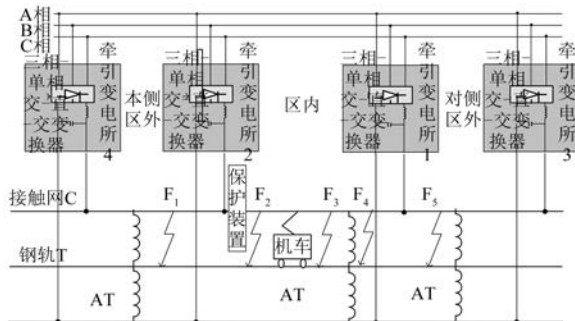


图4 AT 供电系统牵引网保护配置图

3.2 功率方向起动元件

为保护线路全长, 本文利用故障暂态功率线

模分量波形突变点的极性构造方向判据,通过方向起动元件来判断故障发生在反向还是正向。

3.2.1 构造方向起动判据

当牵引网发生故障时,保护安装处检测到故障电压 Δu 和故障电流 Δi ,就可以利用故障暂态功率信号 TEO 波形突变点的极性来作为方向起动判据。

当系统的故障发生在故障点 F_1 (反向)时,故障暂态功率信号 TEO 应反向突变(负极性);当故障发生在故障点 F_2 、 F_3 、 F_4 (正向区内)或是故障点 F_5 (正向区外)时,故障暂态功率信号 TEO 波形应正向突变(正极性)。

3.2.2 基于 TEO 变换的功率极性判断

考虑瞬时功率 p 时,则有:

$$p(t) = \Delta u \cdot \Delta i \quad (5)$$

式中: t 为故障发生的时刻。

采集的待处理信号和经过计算机处理过的信号均是离散的,故根据式(4)计算 TEO,使故障信号更加容易检测与判定。

设置采样频率和时间窗分别为 40 kHz 和 5 ms,进行故障仿真。对故障功率信号进行 TEO 变换,故障暂态功率信号 TEO 波形如图 5 所示。从图 5(a)中可以明显看出本侧区外故障暂态功率信号 TEO 波形突变点为负极性;区内故障和对侧区外故障功率暂态功率信号 TEO 波形突变点为正极性。

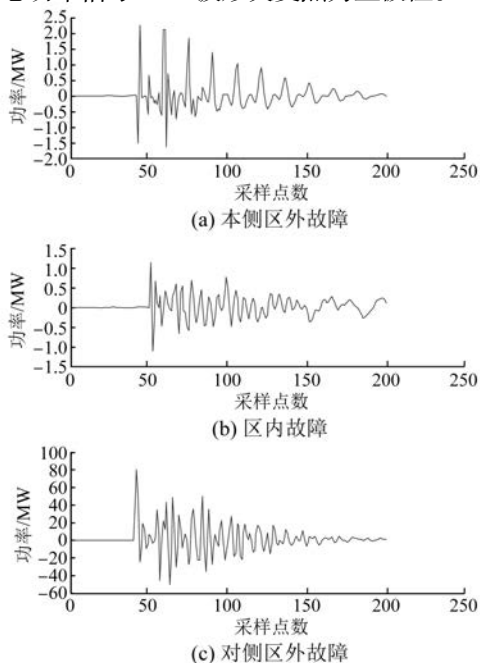


图5 故障功率线模分量经 TEO 变换后的波形图

通过大量仿真后得到的结果与前文分析一致,证明了前文所提的功率方向判别和起动的正确性。故可以得出结论:利用故障功率信号 TEO 波形突变点的极性构造方向起动判据,若突变点为负极性,则判定为反向故障,保护应可靠不动作;若突变点为正极性,则判定为正向故障,需进一步判断故障发生在区内还是对侧区外。

3.3 电流故障保护判据

当方向起动元件判断出故障为正向故障后,需进一步对电流故障信号进行 FEEMD 和 TEO 运算,求得 TEO 谱瞬时值,求其绝对值并求和,与阈值进行比较。分别对贯通式 AT 同相牵引供电系统进行区内故障和对侧区外故障仿真,保护安装处采集到的经 TEO 运算后的故障暂态电流信号高频分量 TEO 谱瞬时值如图 6 和图 7 所示。

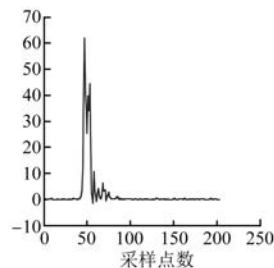


图6 区内末端故障时电流线模分量 TEO

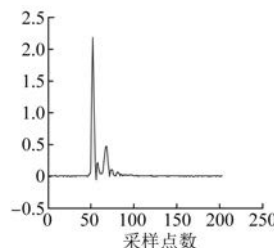


图7 对侧区外首端故障时电流线模分量 TEO

将 TEO 谱中的各个元素 $\Psi[x(i)]$ 求绝对值并求和,得到一个固有模态函数 1 (IMF1) 分量的 T_i 值:

$$T_i = \sum_{i=1}^n |\Psi[x(i)]| \quad (6)$$

经过大量仿真后可得:区内故障时高频段 T_i 值分布在 $10^2 \sim 10^3$ 级;对侧区外故障时,由于牵引网边界对高频分量的强烈衰减, T_i 值均分布在 $10^0 \sim 10^2$ 级,比区内故障时低 1~3 个数量级。由此可得发生区内故障时的故障暂态电流高频分量

瞬时 T_i 值较大,发生对侧区外故障时的故障暂态电流高频分量瞬时 T_i 值较小,为判定区内外故障,构造如下判别式:

$$T_i \geq T_p \tag{7}$$

T_p 为判别正向区内外故障的整定值,并以区内高阻接地故障躲过区外金属性接地故障为整定原则。通过大量仿真可得,当发生区内和对侧区外故障时, T_i 值相差较大,为了保证保护方案的可靠性和有效性,并计及一定裕度,设整定 T_p 值为 100。此时若 T_i 值满足式(7),则判定为区内故障,保护动作;反之,则判定为对侧区外故障,保护不动作并复归。

4 仿真实验

4.1 仿真模型介绍

本文利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建贯通式 AT 同相牵引供电系统,系统额定电压为 220 kV/27.5 kV,设置频率为 50 Hz,选取总功率为 4 800 kW 的 CHR2 型电力机车^[19]。系统接线图如图 8 所示。

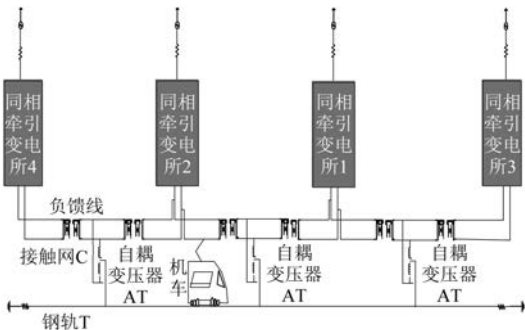


图 8 贯通式 AT 同相牵引供电接线图

4.2 故障仿真

利用图 8 所示的系统模型进行故障仿真,采样频率为 40 kHz,时间窗为 5 ms,过渡电阻为 0.1 ~ 300 Ω ,设置不同的故障距离和故障初始角进行故障仿真验证。限于篇幅,表 1 和表 2 仅计算了有代表性的区内外故障的保护仿真结果。

4.2.1 不同过渡电阻对保护结果的影响

选定故障初始角为 60°,过渡电阻分别设置为 0.1~300 Ω ,故障位置从牵引网首端开始每隔 20 km 设置,仿真结果如表 1 所示。分析表 1 可知,当发生反向区外故障时,TEO 波形突变点为

负极性;发生区内故障时,TEO 波形突变点为正极性,且 TEO 谱 T_i 值均大于或等于 T_p ($T_p = 100$);当发生对侧区外故障时,TEO 波形突变点为正极性,且 TEO 谱 T_i 值均小于 T_p 。由表 1 还可知 TEO 谱 T_i 值随着故障发生位置距离的增大而减小。

表 1 故障初始角为 60°时的仿真结果

故障位置	过渡电阻/ Ω	突变点极性	T_i 值	判断结果
本侧区外	0.1	负	-	反向区外
	10	负	-	反向区外
	50	负	-	反向区外
	100	负	-	反向区外
	200	负	-	反向区外
	300	负	-	反向区外
保护安装处	0.1	正	$5.858\ 4 \times 10^3$	区内
	10	正	$4.406\ 9 \times 10^3$	区内
	50	正	$2.279\ 9 \times 10^3$	区内
	100	正	$1.359\ 3 \times 10^3$	区内
	200	正	672.286 1	区内
	300	正	395.820 3	区内
距牵引变电所 2 20 km	0.1	正	$1.888\ 4 \times 10^3$	区内
	10	正	$1.217\ 3 \times 10^3$	区内
	50	正	508.732 0	区内
	100	正	322.655 9	区内
	200	正	176.199 3	区内
	300	正	111.779 8	区内
距牵引变电所 2 40 km	0.1	正	$1.160\ 8 \times 10^3$	区内
	10	正	935.339 5	区内
	50	正	581.687 2	区内
	100	正	400.359 9	区内
	200	正	230.190 2	区内
	300	正	152.681 0	区内
距牵引变电所 1 0.003 km	0.1	正	77.414 7	区外
	10	正	54.726 6	区外
	50	正	25.413 5	对侧区外
	100	正	17.222 8	对侧区外
	200	正	11.803 6	对侧区外
	300	正	9.709 8	对侧区外
距牵引变电所 1 20 km	0.1	正	51.852 9	对侧区外
	10	正	37.488 9	对侧区外
	50	正	20.080 2	对侧区外
	100	正	14.776 9	对侧区外
	200	正	11.847 1	对侧区外
	300	正	10.714 2	对侧区外
距牵引变电所 1 40 km	0.1	正	24.625 2	对侧区外
	10	正	20.585 0	对侧区外
	50	正	14.520 4	对侧区外
	100	正	12.919 3	对侧区外
	200	正	11.657 5	对侧区外
	300	正	11.0385	对侧区外

4.2.2 不同故障初始角对保护结果的影响

选定过渡电阻为 10 Ω ,故障初始角分别设为

5°、10°、60°,故障位置从牵引网首端开始每间隔 20 km 设置,仿真结果如表 2 所示。

表 2 过渡电阻为 10 Ω 时的仿真结果

故障位置	故障初始角/(°)	突变点极性	绝对值	判断结果
本侧区外	5	负	-	反向区外
	10	负	-	反向区外
	60	负	-	反向区外
保护安装处	5	正	$4.406\ 9 \times 10^3$	区内
	10	正	$2.044\ 7 \times 10^3$	区内
	60	正	$3.762\ 7 \times 10^3$	区内
距牵引 变电所 2 20 km	5	正	$1.217\ 3 \times 10^3$	区内
	10	正	286.688 6	区内
	60	正	501.913 4	区内
距牵引 变电所 2 40 km	5	正	935.339 5	区内
	10	正	430.471 6	区内
	60	正	728.384 3	区内
距牵引 变电所 1 0.003 km	5	正	54.726 6	区外
	10	正	10.321 3	对侧区外
	60	正	22.756 3	对侧区外
距牵引 变电所 1 20 km	5	正	37.488 9	对侧区外
	10	正	2.803 0	对侧区外
	60	正	4.496 7	对侧区外
距牵引 变电所 1 40 km	5	正	20.585 0	对侧区外
	10	正	3.080 4	对侧区外
	60	正	3.055 7	对侧区外

分析表 2 可知,过渡电阻不变时改变故障位置及初始角进行仿真,当发生反向区外故障时,TEO 波形突变点为负极性;当发生区内故障时,TEO 波形突变点为正极性,且 TEO 谱 T_i 值均大于或等于 T_p ;当发生对侧区外故障时,TEO 波形突变点为正极性,且 TEO 谱 T_i 值均小于 T_p 。

综合表 1 和表 2 可知,当发生故障时利用本文提出的贯通式 AT 同相牵引供电系统牵引网单端功率方向保护策略可以有效识别故障,判定故障位置,保护线路全长。

5 结 语

本文提出了一个基于 FEEMD 与 TEO 的牵引网单端功率方向保护方案,具体结论如下:

(1) 将暂态功率进行 TEO 变换,得到 TEO 波形突变点极性,若极性为负,则为反向区外故障,若极性为正,则为正向故障。

(2) 当判断 TEO 波形突变点为正极性后,对故障暂态电流信号线模分量进行 FEEMD 分解并对其高频分量进行 TEO 谱运算。最终通过比较 TEO 谱值与阈值的大小来判断故障发生位置:若

TEO 谱 T_i 值均大于或等于阈值 T_p ,则判定为区内故障;若 TEO 谱 T_i 值均小于阈值 T_p ,则判定为对侧区外故障。

(3) 利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建贯通式 AT 同相牵引供电系统仿真模型,并设置不同故障位置、不同过渡电阻和不同故障初始角等情况进行大量仿真,得到表 1 和表 2 的仿真结果,证明了本文提出的贯通式 AT 同相牵引供电系统牵引网单端功率方向保护是有效可靠的。

【参 考 文 献】

- [1] 何洋阳,黄康,王涛,等. 轨道交通牵引供电系统综述[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(2): 352.
- [2] 王轶欧. 电气化铁路牵引供电用光伏发电系统的接入拓扑及其电流控制策略[J]. 电机与控制应用,2020,47(11): 91.
- [3] 王贞,林圣,冯玓,等. 考虑天气状态的接触网可靠性评估方法研究[J]. 铁道学报,2018,40(10): 49.
- [4] 刘大岗. 同相供电继电保护方案研究[D]. 成都: 西南交通大学,2012.
- [5] 杨鸿雁. 贯通式同相 AT 牵引供电系统牵引网频率特性及边界保护研究[D]. 昆明: 昆明理工大学,2020.
- [6] 侯俊杰,宋国兵,常仲学,等. 基于暂态功率的高压直流线路单端量保护[J]. 电力系统自动化,2019,43(21): 203.
- [7] 郝勇奇,王倩,周士琼,等. 基于 LMD 与 Teager 能量算子的 VSC-HVDC 输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(1): 81.
- [8] 高淑萍,高悦,宋国兵,等. 利用 Teager 能量算子瞬时能量的模块化多电平换流器多端柔性直流电网保护方法[J]. 西安交通大学学报,2020,54(9): 40.
- [9] 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.
- [10] 李岩,龚雁峰. 考虑高阻故障的多端直流电网快速保护方案[J]. 南方电网技术,2018,12(6): 16.
- [11] 童宁,范理想,林湘宁,等. 不依赖边界元件及同步对时的多端柔直电网波形匹配式差动保护原理[J]. 中国电机工程学报,2019,39(13): 3820.
- [12] 张权,胡海涛,陶海东,等. 基于电容器投切法的牵引供电系统谐波阻抗测试分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(11): 145. (下转第 86 页)