

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.014

基于特征选择与 TCED 的 UHVDC 输电线路故障判定方法

丁津津¹, 汤汉松², 高博¹, 张峰¹, 李远松¹, 孙辉¹

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230061;

2. 江苏凌创电气自动化股份有限公司, 江苏 镇江 212009)

摘要:针对多端特高压直流(UHVDC)输电线路存在的故障范围广、保护动作易误动等问题,提出基于特征选择与暂态电流能量差(TCED)的多端UHVDC输电线路故障区域判定方法。首先,采用离散小波变换对暂态故障电流进行特征分析,并基于皮尔逊矩相关系数的母小波选择进行故障匹配。然后,利用故障两侧TCED的特性判别故障方向,通过各换流站故障方向信息确定故障区域。最后,建立四端UHVDC输电线路的PSCAD/EMTDC仿真模型,从故障位置、电阻、距离等方面进行论证。仿真结果表明,文中所提方法能有效区分电力系统暂态扰动与直流故障,准确判定线路故障区域,极大提高检测效率及故障区域判定准确率。

关键词:母小波选择匹配;特征选择;暂态电流能量差(TCED);故障判别;多端特高压直流

中图分类号:TM89

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)03-0092-07

0 引言

近年来,中国在特高压直流输电(ultra high voltage direct current, UHVDC)领域发展迅猛,但仍存在大量技术难题亟待攻克^[1-4]。由于各种故障会对UHVDC系统造成极大危害,因此检测故障并及时实施保护动作尤为重要^[5]。传统的高压交流断路器利用电流过零的优点,使其能够安全跳闸,但直流系统不存在电流零点,因此该机制不再适用。

目前UHVDC输电线路的直流断路器在实际工程方面的应用仍待进一步完善,由于并联接入技术较为简单,因此多端混合直流输电大多使用具备自清除能力的模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)并联^[6-8]。直流线路阻容小、惯量小,更容易发生故障,若处理不及时,快速增加的直流电流会损坏设备。文献[9]提出了混合直流断路器,能在5 ms内隔离故障,这一关键技术将为多端UHVDC电网的建设提供可能,但对与之相关的保护算法就有了更高的要求。此外,随着UHVDC输电系统向多端规模发展,故障选线已成为保护系统的另一个重要方面^[10-11]。

近年来,直流故障检测方法在多端UHVDC输电线路中得到了广泛研究。行波法是传统交流电力系统中公认的故障点定位方法,其在多端UHVDC输电线路中同样适用^[12-13],但为了准确获得波前到达时间,该技术需要高采集率的数据采集。文献

[14]提出了基于直流电流测量的故障检测方法,直流电流变化率是故障判据的基础,该方法简单且计算效率高,但在系统高度网格化的环境下,难以独立确定故障区段。直流故障检测也可以通过模式识别进行,将测量电压与已知信号进行比较,通过皮尔逊相关系数测量相似度^[15-16],但该方法缺乏通用性。小波变换是处理非平稳故障信号的重要技术之一,该信号处理技术能够在时域和频域上对信号进行解释^[17]。小波变换的优势在于能够区分直流故障和非相关干扰(交流故障和负载变化),利用该技术可以在不需要通信信道的情况下,确定电网网络中的故障线路,从而大大缩短检测时间^[18-19]。

现有的多端UHVDC故障区域判定方法大多难以可靠识别具体的故障区域^[20-23],且终端间通信复杂且易受外界干扰。文中所提方法仅需每个终端本地化地采集直流电流信号及故障电流造成的暂态电流能量差(transient current energy difference, TCED),检测耗时少,进而较好地判别故障电阻和距离,实现故障区域判定,提高了故障判别准确率。

1 基于母小波选择匹配与 TCED 的多端 UHVDC 输电线路故障区域判定方法

1.1 多端 UHVDC 输电线路中的直流故障分析

直流故障可分为极间电容不平衡、极间对地(pole to ground, PG)故障和极间(pole to pole, PP)故障。直流架空线路由于直接暴露在空气中,容易发生PP和PG 2种故障,而PP故障可能对多端UHVDC系统造成极大的破坏,因此,其为所提方法中最为关键的直流故障。

收稿日期:2019-11-15;修回日期:2019-12-21

基金项目:国家电网有限公司科技项目“特高压直流控制保护系统及运维优化关键技术研究与应用”(5210EF180013)

在发生 PP 故障且故障电流超过阈值时,闭锁换流阀,进入不控整流,直流电容放电时 MMC 直流侧的等效电路如图 1(a) 所示。其中, I_{cv} 为注入直流侧的总电流; I_{cap} 为电容电流; I_{dc} 为等效总电流; V_{dc} 为直流侧电压; C_e 为等效电容; L_{dc} , R_{dc} 分别为等效电感、电阻; R_f 为故障电阻。当故障电流在二极管内自由振荡时,绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 被阻塞,直流侧等效电路如图 1(b) 所示。其中, I'_{dc} 为电容振荡电流; I_{D1} , I_{D2} , I_{D3} 分别为第 1, 2, 3 组二极管的电流。

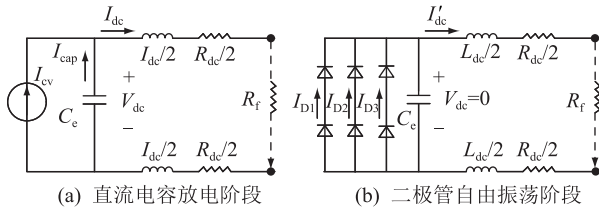


图 1 直流故障时 MMC 直流侧的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of MMC DC side in case of DC fault

图 1(b) 满足:

$$\frac{d^2 I'_{dc}}{dt^2} + \frac{R_e}{L_e} \frac{dI'_{dc}}{dt} + \frac{1}{L_e C_e} I'_{dc} = 0 \quad (1)$$

式中: $R_e = 2(R_{dc}/2) + R_f$; $L_e = 2(L_{dc}/2)$ 。

故障分析可以分为 3 个阶段:直流电容放电阶段、二极管自由振荡阶段和交流输入阶段。故障初期,电容器放电瞬间影响故障电流,当直流电压降至 0 时,交流侧将继续向故障点提供电流。由于相应的 IGBT 关断,线路电感不允许电流突变,因此该阶段的初始电流满足 $I_{dc}(t_1) = I'_{dc}(t_1) = I'_0$,故障电流满足:

$$\begin{cases} L_{dc} \frac{dI'_{dc}}{dt} + R_{dc} I'_{dc} = 0 \\ I'_{dc} = I'_0 e^{-(R_{dc}/L_{dc})t} \end{cases} \quad (2)$$

I'_{dc} 平均分布在三相二极管中,满足:

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{D3} = I'_{dc}/3 \quad (3)$$

1.2 基于母小波选择匹配的故障特征分析

采用小波变换 (wavelet transform, WT) 进行故障检测,根据信号的动态变化自动改变窗口大小,捕捉故障检测所需的高频突变。小波变换将信号分解为原始 (或母) 小波的移位和缩放版本,允许同时进行时间和频率分析。连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 为信号在所有时间内的总和乘以小波函数缩放和移位的形式,表示为:

$$C(p, q) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) |p|^{-1/2} \lambda \left(\frac{t-q}{p} \right) dt \quad (4)$$

式中: $\lambda(t)$ 为母小波; p, q 分别为标度和移位参数,

$p, q \in \mathbf{R}$, $p \neq 0$ 。

离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT) 表示为:

$$D(m, n) = p_0^{-m/2} \sum_i \left[x(i) \lambda^* \left(\frac{k - nq_0 p_0^{-m/2}}{p_0^m} \right) \right] \quad (5)$$

式中: m, n 分别为电流的标度和移位参数; p_0 满足 $p = p_0^{-m/2}$; q_0 满足 $q = n p_0^{-m/2} q_0$; $k, m, n \in \mathbf{Z}$; λ^* 为 λ 的复共轭; $x(i)$ 为电流的离散时间信号。

应用多分辨率信号分解 (multiresolution signal decomposition, MSD) 技术分解给定信号。MSD 技术以小波系数的形式将信号分解为时域视图系数 $P_l(i)$ 和频域视图系数 $Q_l(i)$, l 为尺度数。使用 4 尺度分解,原始信号可表示为:

$$x(i) = P_4(i) + Q_4(i) + Q_3(i) + Q_2(i) + Q_1(i) \quad (6)$$

小波系数是原始信号与母小波的互相关,小波系数越高,信号与所选母小波的匹配越紧密。因此,需要选择合适的小波,使其与故障信号的模式最接近^[24]。利用皮尔逊积矩相关系数进行母小波 β 选择如下:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (7)$$

式中: X, Y 分别为故障信号和小波的数据集; \bar{X}, \bar{Y} 分别为 X, Y 对应的平均值。

故障信号与变阶 Daubechies 母小波 (db3—db10) 之间的相关系数如图 3 所示。从图中可发现,对于给定的故障模式,db4 为最佳匹配。

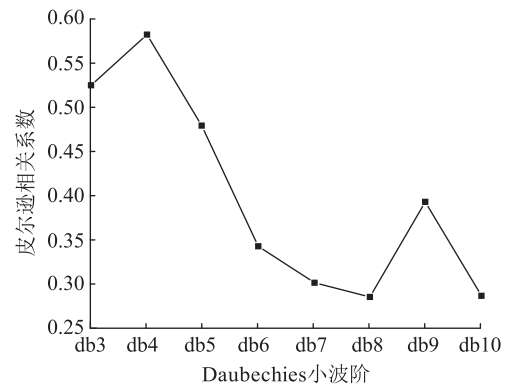


图 2 故障信号与 Daubechies 小波的相关系数

Fig.2 Correlation coefficient between fault signal and Daubechies wavelet

1.3 基于 TCED 的故障判别方法

经过故障区的电流能量会出现大幅度的减弱,

凭这一特性可以判定故障发生的方向。在限定的数据窗内,对故障区两侧的暂态电流作小波变换处理,故障区左侧的第 J 层小波能量 $E_{L,J}$ 与故障区右侧的第 J 层小波能量 $E_{R,J}$ 为:

$$E_{j,J} = \sum_i f_j^2(i) \quad j = L, R \quad (8)$$

式中: f_j 为线模电流变化量小波变换后第 J 层的细节系数; i 为电流变化量。

则标准 TCED 为:

$$\Delta E_J = \frac{E_{L,J} - E_{R,J}}{\max(E_{L,J}, E_{R,J})} \quad (9)$$

式中: $\max(E_{L,J}, E_{R,J})$ 为两侧能量的最大值。

则直流输电线路的故障识别判据为:

$$\begin{cases} |\Delta E_J| > \Delta_{\text{th}}, \Delta E_J > 0 & \text{故障发生在检测区左侧} \\ |\Delta E_J| > \Delta_{\text{th}}, \Delta E_J < 0 & \text{故障发生在检测区右侧} \\ |\Delta E_J| < \Delta_{\text{th}} & \text{故障发生在检测区内} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta E_{\min} < \Delta_{\text{th}} < \Delta E_{\max}$; ΔE_{\max} 为故障时标准能量差的最大值; ΔE_{\min} 为故障时标准能量差的最小值。文中将 Δ_{th} 设为 $0.5(\Delta E_{\max} + \Delta E_{\min})$ 。

首先,采用离散小波变换对暂态故障电流进行特征分析,利用 4 阶母小波的输出波形判断故障类型。电阻、距离和其他干扰因素的不同,使得波形存在差异,基于此可实现故障类型匹配。然后,在明确故障类型的基础上,利用故障两侧 TCED 的特性判别故障方向,并且通过各换流站故障方向信息确定故障区域。所提方法的具体处理流程如图 3 所示。

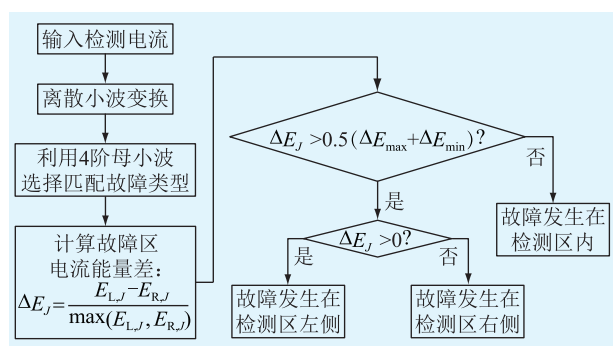


图 3 所提方法的判别流程

Fig.3 Diagnosis process of proposed method

通过母小波选择匹配、TCED 对故障信号进行处理,以判断故障类型以及故障区域。利用小波变换分析电流信号判断故障类型,验证电阻、距离等因素对直流故障判别的影响。同时,利用 TCED 变化判定故障区域,缩短检测故障时间,及时高效消除故障。

2 仿真结果与分析

基于 PSCAD/EMTDC 的 4 个 MMC 组成的 UHVDC 输电线路模型如图 4 所示。其中 4 个交流系统通过环形和单极直流网络连接,由正负极组成的直流线在图中为单线,MMC 采用详细等效模型 (detailed equivalent modeling, DEM), MMC1 为固定直流电压控制,其余为固定有功功率控制。

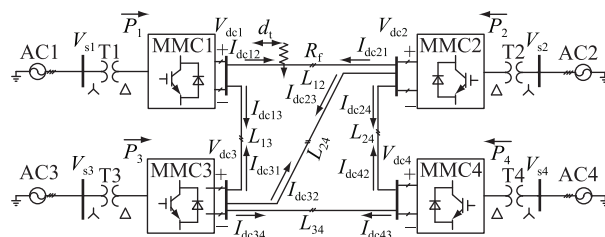


图 4 四端 UHVDC 输电线路模型

Fig.4 Four terminal UHVDC transmission line model

图 4 中,交流电源电压 V_s 为 230 kV;交流电源容量为 600 MV·A; P 为变压器输出功率;变压器 (Y/Δ) 变比为 230/180 kV; d_l 为故障距离; R_f 为故障电阻。仿真实验参数设置保护采样率为 10 kHz,判据计算数据窗长度为 2 ms,模拟故障为 PP 故障,采用的母小波为 db4。

2.1 直流故障定位

在多端 UHVDC 输电线路中,从模拟的直流线路 PP 故障中获得的小波系数如图 5 所示。PP 故障是通过故障电阻使正极和负极直流线路短路而引发的。因此,只给出了正极直流电流的小波系数。

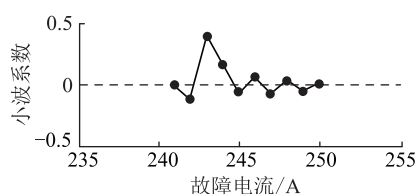


图 5 L_{23} 故障时直流线路电流小波系数

Fig.5 Wavelet coefficient of DC line current at L_{23} fault

从图 5 中可看出,小波系数在稳态期间保持较低,近似为 0。当故障线路的直流电流突然产生一个高小波系数时,就可以检测出直流线路故障。此外,由于电流的小波系数始终保持较低,因此小波变换允许健康终端识别故障在其保护区之外。

在线路 L_{23} 中点正极设置单极接地金属性故障,选择 2 ms 作为冗余数据窗,计算出故障区两侧故障电流暂态能量如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,故障发生于线路 L_{23} 时,两侧区域的小波能量均存在一定程度的削弱,但同侧

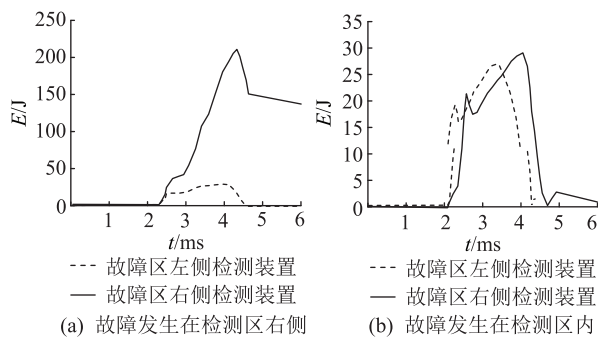


图6 故障区两侧暂态电流能量
Fig.6 Transient current energy on both sides of the fault zone

的暂态电流能量差别更为明显,由此可清晰地辨识故障发生的方位。故障出现在 L_{23} 检测区内时,两侧的暂态电流能量几乎一致。因此,利用 TCED 可以判别出故障方向。

2.2 直流故障距离

检测终端安装在 MMC 处,如果直流故障发生在靠近终端的地方,该终端的 DC 电流将经历更大的频率变化和更高的幅度。PP 故障位置 d_i 沿 L_{12} 从距 MMC1 为 27 km 逐步调整到 76 km。相应的近端和远端故障电流 I_{dc12} 变化如图 7(a) 所示,图中的黑色区域表示故障电流变化范围。相应的小波系数变化如图 7(b) 所示。

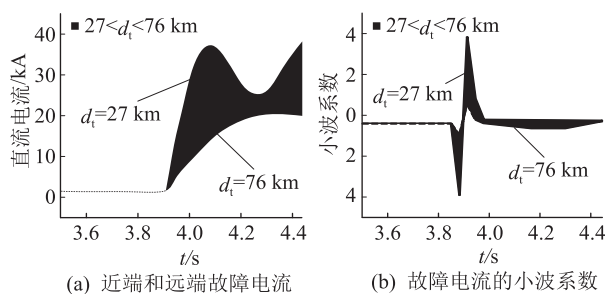


图7 故障线路电流及其小波系数变化
Fig.7 Fault line current and its wavelet coefficient change

从图 7 中可以看出,随着故障距离的增加,电流幅值减小,暂态过程减弱,但靠近故障终端的电流产生的小波系数比远离终端的小波系数高。小波变换在小波系数大大超过阈值的情况下成功地检测出了直流故障,尽管灵敏度降低,但可以在评估的所有距离内成功检测到故障。

2.3 直流故障电阻的影响

当 L_{12} 上故障电阻从 0.01Ω 增加到 500Ω 时,直流电流的小波系数变化趋势如图 8 所示。当故障电阻在 $0.01 \sim 7 \Omega$ 的范围内变化时,小波系数一直很高,但由于较大故障电阻抑制了故障引起的暂态

过程,随着故障电阻值增大,小波系数幅值开始呈现下降趋势。

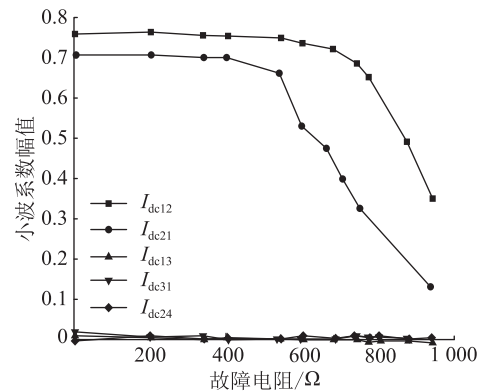


图8 PP 故障电阻对各直流线电流小波系数的影响
Fig.8 The influence of PP fault resistance on the wavelet coefficients of each DC line current

从图 8 中可看出,小波系数随故障电阻的增大而减小,但即使故障电阻较高时,其故障电流的小波系数也远远高于正常直流电流的小波系数,因此不会影响检测的准确性。由此论证小波变换在检测直流故障中的有效性,也进一步说明了所提方法对多端直流输电线路高阻故障判别的鲁棒性。

2.4 与其他类型电力系统扰动的区分

电力系统负荷变化导致电流增大,可能误认为是直流故障。为了模拟电力系统负荷的变化,接收端的电阻负载突然降低,从而产生与故障引起的暂态电流相同峰值的暂态。实验结果的小波变换如图 9 所示。

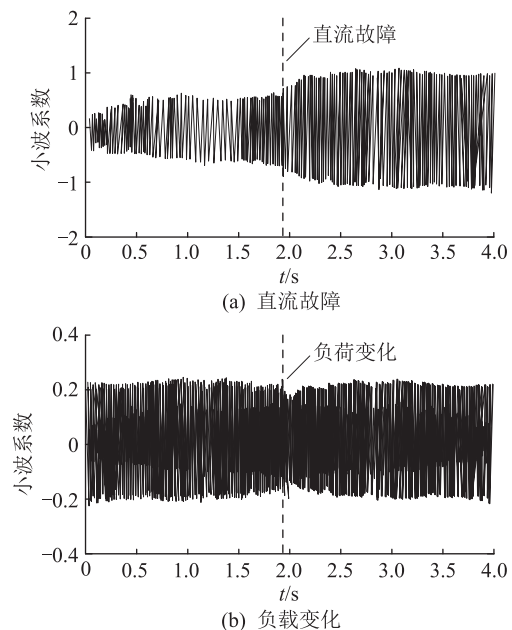


图9 直流故障和负载变化情况下的小波分析
Fig.9 Wavelet analysis under DC fault and load change

从图 9 中可看出,直流故障中的故障电流会产生较高的小波系数。虽然负载变化会引起直流电流的暂态,但其小波系数并没有太大的增加,并且几乎没有超过设定的阈值。因此,所提的输电线路故障区域判定方法能够区分直流故障和负载变化,具有可行性。

2.5 与现有方法的比较

当 L_{12} 上发生极间故障时,将所提方法与现有的几种方法在故障判别时间和准确率这两方面进行比较,结果如图 10 所示。

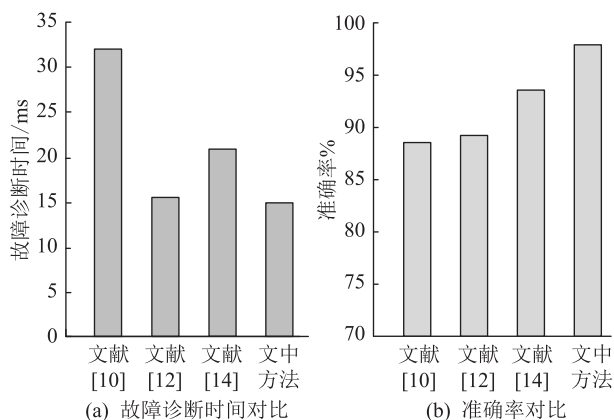


图 10 文中方法与其他方法性能对比

Fig.10 Performance comparison between the proposed method and other methods

从图 10 中可看出,文献[10]采用高频率设备,但缺乏相应的保护算法作支撑,耗时 32 ms 判别故障类型及区域,准确率仅为 88%,耗时长且准确率不高。文献[12]采用经典的行波法,判别速度较快,耗时 15 ms,但其要求高采集率,因此该方法准确率不理想。文献[14]采用人工神经网络算法对故障信息进行分析处理,能保证较好的准确率,但其算法复杂,因此故障判别耗时较长。相比之下,文中所提方法具有较高的准确率(98%)以及较短的故障判别时间(13 ms),可有效应用于多端 UHV-DC 输电线路的故障判别。

3 结论

利用 PSCAD/EMTDC 仿真模型分析和验证了小波变换和 TCED 在多端 UHVDC 输电线路故障区域判定中的应用。其中小波分析采用 db4, 能实现最小的时滞检测故障。仿真结果表明,在四端直流输电线路模型中,所提方法以各端直流线路 TCED 作为判据,能够在短时间内检测出故障线路。同时所提方法对故障电阻和距离的影响也具有较好的鲁棒性,对负载变化引起的暂态不敏感,可以将直流故障区分于其他类型的扰动。与其他故障判别

方法相比,所提方法准确率更高,且耗时最短,在直流故障判别中具有可行性。

所提方法暂未考虑噪音对故障判别精度的影响,后期将针对去噪影响作进一步研究,如设计合适的策略减小检测误差,以提高故障判定精度等。

本文得到国网安徽省电力有限公司科技项目(521205180020)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术,2012,36(4):1-9.
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Current status and development prospects of HVDC technology[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.

[2] 瞿合祚,黄彦浩,李晓明,等. 机电暂态仿真中直流输电系统恢复特性曲线修正方法[J]. 电力信息与通信技术,2018,16(6):43-51.
QU Hezuo, HUANG Yanhao, LI Xiaoming, et al. Correction method for recovery characteristic curve of HVDC transmission system in electro-mechanical transient simulation[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(6): 43-51.

[3] 陈志磊,沈珮,李臻,等. 全球能源互联网标准化及其评价方法研究[J]. 供用电,2019,36(2):1-6.
CHEN Zhilei, SHEN Pei, LI Zhen, et al. Research on standardization of global energy interconnection and its evaluation methods[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(2): 1-6.

[4] 段玉飞,王伟. 基于物联网的输电线路智能监测系统研究与应用[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(7):21-28.
DUAN Yufei, WANG Wei. Research and application of intelligent monitoring system for transmission line based on internet of things[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(7): 21-28.

[5] 李世龙,滕予非,李小鹏,等. 基于注入法的改进特高压直流接地极引线保护方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(16):155-163.
LI Shilong, TENG Yufei, LI Xiaopeng, et al. Improved UHVDC grounding electrode lead protection method based on injection method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 155-163.

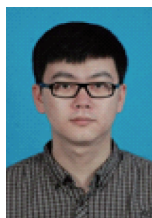
[6] SOLAS E, ABAD G, BARRENA J A, et al. Modulation of modular multilevel converter for HVDC application[C]//Power Electronics and Motion Control Conference. IEEE, 2010: 84-89.

[7] DEBNATH S, QIN J, BAHRANI B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.

[8] 黄勇,姚志,王容,等. 基于结温预估的模块化多电平换流器损耗计算方法[J]. 电网技术,2019,43(11):4115-4124.
HUANG Yong, YAO Zhi, WANG Rong, et al. Modular multilevel converter loss calculation method based on junction temperature prediction[J]. Power System Technology, 2019, 43(11):

- 4115-4124.
- [9] 蓝童琨,李银红,段献忠. 基于晶闸管的电压钳位型混合直流断路器[J]. 中国电机工程学报,2019,39(20):6159-6168.
LAN Tongkun, LI Yinhong, DUAN Xianzhong. Thyristor based voltage clamp type hybrid DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 6159-6168.
- [10] DAWEI D, HAIWEN Y, YONG C, et al. Energy management of WSN-based charge measurement system of ultra high-voltage direct-current transmission line[J]. Wireless Networks, 2016, 24(1): 1-15.
- [11] YUAN H W, YANG Q H, LIU Y Q, et al. Development and application of high-frequency sensor for corona current measurement under ultra high-voltage direct-current environment[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61(4): 1064-1071.
- [12] 崔本丽,兰生. 基于行波法的 HVDC 输电线路故障测距综述[J]. 电气技术,2017(10):1-4.
CUI Benli, LAN Sheng. A review of HVDC transmission line fault location based on traveling wave method[J]. Electrical Technology, 2017(10): 1-4.
- [13] LIAO K, HE Z Y, LI X P. A fault location method based on traveling wave natural frequency used on ± 800 kV UHVDC transmission lines[C]//International Conference on Electrical and Control Engineering. ICECE, 2011: 5652-5655.
- [14] 李振华,胡廷和,李春燕,等. 应用于智能电网的高压直流电流及谐波测量方法研究[J]. 中国科学:技术科学,2019, 49(11):1361-1371.
LI Zhenhua, HU Tinghe, LI Chunyan, et al. Research on high voltage DC current and harmonic measurement for smart grid [J]. Chinese Science: Technical Science, 2019, 49(11): 1361-1371.
- [15] 杨赛昭,向往,张峻樛,等. 基于人工神经网络的架空柔性直流电网故障检测方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(15):4416-4430.
YANG Saizhao, XIANG Wang, ZHANG Junjie, et al. Fault detection method for overhead flexible DC grid based on artificial neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4416-4430.
- [16] KONG F, HAO Z, ZHANG B. Improved differential current protection scheme for CSC-HVDC transmission lines[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(4): 978-986.
- [17] 张晗博,殷奕,殷奎喜. 基于小波变换的非平稳信号分析与处理[J]. 南京师范大学学报(工程技术版),2014(1): 69-75.
ZHANG Hanbo, YIN Yi, YIN Kuixi. Analysis and processing of nonstationary signal based on wavelet transform[J]. Journal of Nanjing Normal University(Engineering Technology Edition), 2014(1): 69-75.
- [18] 李军,俞建定,徐铁峰. 基于小波变换的故障诊断信号非平稳性分析[J]. 系统工程与电子技术,2006(7):172-174.
LI Jun, YU Jianding, XU Tiefeng. Nonstationary analysis of fault diagnosis signal based on wavelet transform[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2006(7): 172-174.
- [19] 陈争光,周泽昕,王兴国,等. 基于双树复小波变换的混合直流输电线路行波保护方法[J]. 电网技术,2019,43(10): 3832-3840.
CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Traveling wave protection method for hybrid DC transmission lines based on dual-tree complex wavelet transform[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3832-3840.
- [20] 瞿鹏,赵铮,陈兴雷,等. LCC-VSC 混合直流电网机电暂态建模方法研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24): 6265-6274.
ZI Peng, ZHAO Zheng, CHEN Xinglei, et al. Study on electromechanical transient modeling method of LCC-VSC hybrid DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6265-6274.
- [21] 罗澍忻,董新洲. 基于 LCC 的高压直流输电线路保护分析及展望[J]. 广东电力,2019,32(12):121-129.
LUO Shuxin, DONG Xinzhou. Analysis and prospects of HVDC transmission line protection based on LCC[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(12): 121-129.
- [22] 王振,杨育丰,刘坤,等. 兴安直流输电工程继电器绝缘失效机理及整治措施[J]. 广东电力,2019,32(8):126-132.
WANG Zhen, YANG Yufeng, LIU Kun, et al. Relay insulation failure mechanism of Xing'an HVDC project and regulation measures [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(8): 126-132.
- [23] 蔡明,陈涛,张松光,等. 多端柔性直流输电系统的功率协调控制策略[J]. 广东电力,2019,32(6):101-107.
CAI Ming, CHEN Tao, ZHANG Songguang, et al. Power coordinated control strategy for multi-terminal VSC-HVDC transmission system[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(6): 101-107.
- [24] 周华良,饶丹,宋斌,等. 输电线路分布式故障诊断系统的信息安全防护设计及应用[J]. 电力系统自动化,2019,43(15):193-199.
ZHOU Hualiang, RAO Dan, SONG Bin, et al. Design and application of information security protection for distributed fault diagnosis system of transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 193-199.

作者简介:



丁津津

丁津津(1985),男,硕士,高级工程师,从事智能电网、继电保护和新能源相关工作(E-mail:djinjin123@126.com);

汤汉松(1974),男,学士,工程师,从事智能电网技术研究和电子式互感器相关工作;

高博(1981),男,硕士,高级工程师,从事智能电网、继电保护和新能源相关工作。

Fault diagnosis method of UHVDC transmission line based on feature selection and TCED

DING Jinjin¹, TANG Hansong², GAO Bo¹, ZHANG Feng¹, LI Yuansong¹, SUN Hui¹

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hefei 230061, China;

2. Jiangsu Lingchuang Electric Automation Co., Ltd., Zhenjiang 212009, China)

Abstract: In view of problems existing in multi-terminal ultra-high voltage direct current (UHVDC) transmission line, such as wide fault range and easy malfunction of protection actions, a fault diagnosis method based on wavelet transform and transient current energy difference (TCED) is proposed. Firstly, the wavelet transform is used to analyze fault current, and a mother wavelet selection method based on Pearson product-moment correlation coefficient is proposed. Then, the fault direction is determined by characteristics of TCED between two sides of the fault. The fault area is determined by fault direction information of each converter station. Finally, PSCAD / EMTDC simulation model of four terminal UHVDC transmission line is established, and performance of the proposed method is demonstrated in terms of fault location, resistance and distance. The simulation results show that the proposed method can effectively distinguish the power system transient disturbance and DC fault, accurately determine the fault area of the line, sharply improve accuracy of determination and shorten detection time.

Keywords: wavelet transform; feature selection; transient current energy difference (TCED); fault diagnosis; multi-terminal ultra-high voltage direct current transmission

(编辑 吴楠)

(上接第 77 页)

Modeling and simulation analysis of UHVDC transmission system based on PSCAD

XU Duo¹, WU Feng¹, SHI Linjun¹, PENG Yan², HUANG Hongyang²

(1. School of Energy and Electrical, HOHAI University, Nanjing 211100, China; 2. State Grid

Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: When studying the interaction between the ultra high-voltage direct current (UHVDC) system and the AC system, the accurate electrical quantity changes of DC fault are important. In order to accurately simulate and analyze the characteristics of fault changes in UHVDC transmission systems, on the PSCAD/EMTDC simulation platform, taking Binkin DC transmission system as an example, a 800 kV, 8 000 MW bipolar UHVDC transmission system model is built. This model mainly details the reactive power compensation equipment, filtering device, DC line and DC control system in the DC transmission system. For the transmission and reception AC systems, the Thevenin equivalents of the actual AC systems on both sides are made at the converter bus, and a practical system transmission model with a DC system as the main and a simplified AC system is built. The commutation failure of typical faults in the DC system is simulated and analyzed. The main electrical changes in UHVDC system before and after the failure of commutation failure are analyzed. The feasibility of the model is verified by comparing with the waveform of the actual fault recorder. The changes of active power and reactive power flowing into the receiving AC system on the inverter-side converter bus are emphasized. The research conclusion provides technical support for analyzing the impact of UHVDC commutation failure faults on the actual AC system.

Keywords: commutation failure; ultra high-voltage direct current (UHVDC) transmission system model; DC control system; Thevenin equivalent; PSCAD/EMTDC

(编辑 方晶)