

基于经验模态分解的直流输电线路故障识别方法

直流输电线路两端的平波电抗器和直流滤波器构成了直流输电线路的物理边界，该物理边界对高频分量具有很强的衰减作用。直流输电线路外部故障时，电压信号经过物理边界的衰减作用，电压波形极为平缓，经验模态分解后计算提取的特征幅频量较小；直流输电线路内部故障时，由于电压信号没有经过物理边界，电压波形起始陡峭，经EMD分解提取的特征幅频量大。据此，形成以经验模态分解为基础的直流输电线路故障识别算法。大量PSCAD仿真试验表明，所提方法可靠有效。

安娜 束洪春/昆明理工大学电力工程学院
臧永刚/华能澜沧江水电股份有限公司

0 引言

现已投运的直流输电系统有葛南直流输电系统、天广直流输电系统、银东—山东直流输电系统、云广直流输电系统和向家坝—上海直流输电系统等，其中云广和向家坝—上海直流输电系统均为 ± 800 kV，是电压等级最高的直流输电系统^[1]。直流输电系统的输送距离一般比较长，使得输电线路保护显得尤为重要。目前，我国已投运的直流输电线路保护主要是以变化率和变化量为基础的所谓行波保护、微分欠电压保护、纵联差动保护和低电压保护等。其中行波保护和微分欠电压保护为主保护，动作保护速度快，但易受干扰且耐受过渡电阻的能力比较差。以电压变化率 du/dt 为核心判据的高压直流输电线路行波保护往往不能检测出远端高阻故障，根本原因是随着过渡电阻的增大和故障距离的

增加，使得 du/dt 减小，无法有效区分出线路内部高阻接地故障与线路外部故障^[1-4]。而纵联差动保护和低电压保护作为后备保护，动作时限较长^[4-8]。作为高阻故障检测的纵联差动保护是依靠延时来躲过交流系统故障期间暂态响应以保障其不误动。同时，为避免功率调整期间不误动，SIMENS差动保护设计中又增加了闭锁逻辑，故此纵联差动保护出口延时太长。一方面，致使纵差常常起不到后备保护的作用；另一方面，致使直流控制系统保护先动作，引起不必要的直流闭锁事故^[9-16]。为了保证高压直流输电系统安全运行的可靠性，对高压直流输电线路内、外部极线电压故障特征进行深入分析，探索新的故障甄别方法具有极其重要的现实意义。

经验模态分解算法是把信号分解成一组称为固有模态函数的单分量信号的算法，其能使信号分解具有唯一性又能在时域和频域同时具有良好的局部化性质^[17]。本文提出一种基于经验模态分解的故障识别算法，该方法利用线路区内外信号的明显差异，采用信号的幅频量来表征这种差异。此方法时间窗较短，避开了控制系统的影响，能够快速识别故障且对高阻故障有一定的甄别能力。

1 基于经验模态分解的时域特征提取法

经验模态分解将信号中不同尺度的趋势和波动逐级分解，产生一系列具有不同特征尺度的数据序列，即把复杂信



安娜/硕士研究生

关键词/Keywords

直流输电线路 ·
物理边界 ·
高频分量 ·
经验模态分解 ·
幅频量 ·

国家自然科学基金项目 (51267009)。

号分解成一组称为固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 的单分量信号的算法——经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 算法^[17-20]。经验模态分解的思想是用振幅和频率都随时间变化的一种模态函数来表示信号的非平稳性, 可以用式 (1) 来表示, 即

$$x(t) = \sum_{i=1}^m a_i(t) \cos \varphi_i(t) \quad (1)$$

式 (1) 可简写成

$$x(t) = \sum_{i=1}^m x_i(t) \quad (2)$$

用 $x_i(t)$ 同时表征振幅和频率的变化。其中, $x(t)$ 为非平稳信号; $a_i(t)$ 为瞬时幅值; $\varphi_i(t)$ 为瞬时相位。

根据信号的自身特征, 经验模态分解将信号分解为一组基本模式分量, 从瞬态尺度到粗糙尺度, 或称为从高频模态到低频模态^[19]。信号经 EMD 分解后第一个 IMF 含有最高瞬时频率成分, 第 $i+1$ 个 IMF 瞬时频率几乎是第 i 个 IMF 瞬时频率的 $1/2$ ^[18-20]。

对采样信号进行 EMD 分解, 得到矩阵 $c[m, n]$, m 为分解得到的 IMF 分量 $\text{IMF}_i(i)$, $i=1, 2, \dots, m$, n 为采样信号序列长度, IMF 分量为时域空间的瞬时振幅, IMF 反映了信号内部固有的波动性, 在任何时刻只有单一的频率成分, 对其进行 Hilbert 变换后得到瞬时频率^[17-20], 用 f_i 表示。将 $\text{IMF}_i(i)$ 的瞬时幅值 $|\text{IMF}_i(i)|$ 乘以其对应的瞬时频率 f_i 并除以一个常数, 取这个常数为采样频率 f_s , 得到 $k_i(i)$, 称 $k_i(i)$ 为瞬时幅频量, 即

$$k_i(i) = \frac{|\text{IMF}_i(i)| f_i(i)}{f_s} \quad (3)$$

式中, $i=1, 2, \dots, m$; f_s 为采样频率, 即 10^5 Hz。

对不同频率下的瞬时幅频量 $k_i(i)$ 进行求和, 得到随时间变化的幅频量 k_i 并取时域内的最大值为 k , 即得到能表现信号特征的幅频量 k

$$k_i = \sum_{i=1}^m k_i(i) \quad (4)$$

$$k = \max(k_i) \quad (5)$$

2 直流输电线路区内外特性差异

直流输电线路两端均装有平波电抗器和直流滤波器, 其构成了直流输电线路的物理边界^[12-16]。文献[12-16]均已详细阐述物理边界的滤波特性, 本文不再重复。由于直流输电线路物理实体边界的存在, 使得输电线路外部故障信息的高频部分衰减严重, 电压波形表现平缓, 起始幅值小, 特征频率较低; 而输电线路内部故障时, 故障信息没有经过平波电抗器和直流滤波器的滤波作用, 高频分量衰减不大, 电压较线路外部故障时起始变化陡峭, 幅值大, 特征频率较高。因此, 高压直流输电线路内部与外部分别故障时, 其线模电压幅值、频率在时域内的表现形式差别明显。

3 基于经验模态分解的区内外故障识别

3.1 线路内部故障的 EMD 分析

以云广 ± 800 kV 直流输电工程为例, 其系统结构图如图 1 所示。设 M 为输电线路保护测量点, f_1 为输电线路内部故障, f_2 为整流侧正极故障。直流滤波器为 12/24/36 三调谐滤波器; 直流输电线路为六分裂导线, 线路全长为 1 500 km, 采用 J. R. Marti 依频率线路模型^[21-24]。

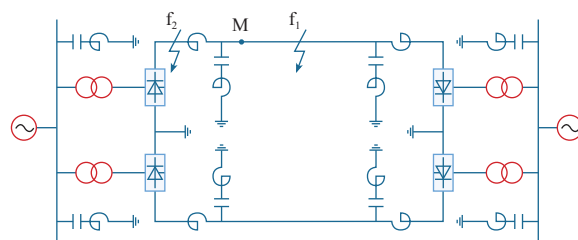


图1 高压直流输电系统结构图

现假设正极线路 f_1 处发生线路内部接地故障, 设故障距离为 200 km, 采样频率为 100 kHz, 故障后线模电压波形图如图 2 所示, 由于故障电压没有经过平波电抗器和直流滤波器的滤波作用, 高频信号明显, 起始电压变化陡峭, 幅值大, 特征频率较高。

取故障后 1 ms 时间内的采样信号, 并对其进行 EMD 分解, 采样序列长度为 100 点, 经 EMD 分解得到矩阵 $c[m, n]$, $n=100$, 分解后的 IMF 分量如

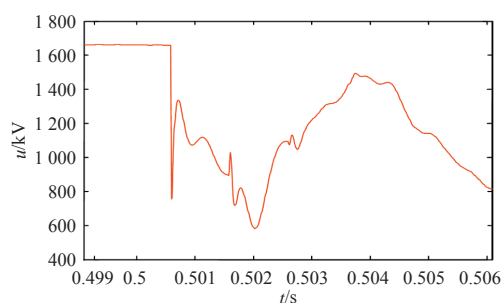


图2 输电线路内部故障电压

图3所示。IMF分量为时域空间的瞬时振幅, IMF反映了信号内部固有的波动性, 在任何时刻只有单一的频率成分。对其进行Hilbert变换后得到瞬时频率 f_i , 如图4所示。

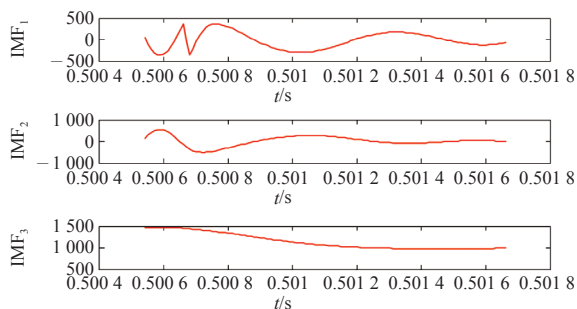


图3 区内故障IMF分量

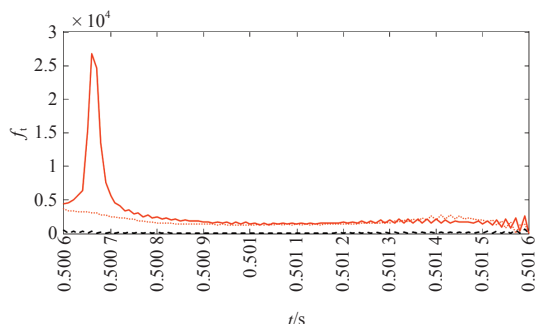


图4 区内故障IMF的瞬时频率

对分解提取的特征信号IMF和其对应的瞬时频率 f_i 应用式(3)、式(4)求取幅频量 k_i , 其为随时间变化的值, 如图5所示。将 k_i 代入式(5)求得能表现信号特征的幅频量 $k=106$ 。

对不同故障距离、不同过渡电阻计算特征幅频量 k , 如图6所示, 由图6可知, 在直流输电线路内部故障时, 特征幅频量明显较大, k 均大于20。由于线路内部故障时, 信号没有经过物理边界的滤波作用, 衰减不大, 所以其特征幅频量较大。

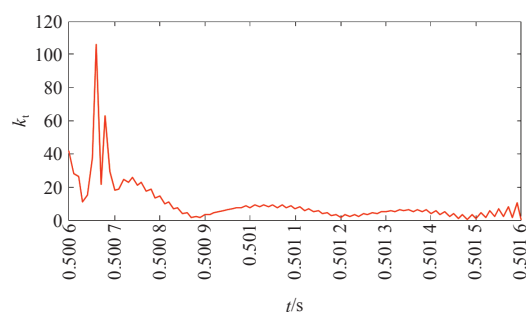


图5 区内故障 k_i

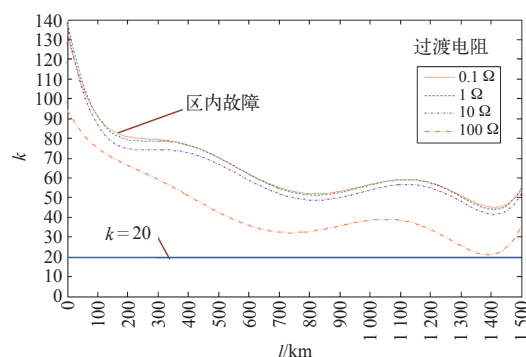


图6 幅频量 k 沿线分布图

3.2 线路外部故障的EMD分析

仍以上述直流输电工程为例, 现假设在 f_2 处发生直流输电线路外部故障, 采样频率为100 kHz, 故障后线模电压波形图如图7所示, 由于直流输电线路物理实体边界的存在, 使得输电线路外部故障信息的高频部分衰减严重, 电压波形表现平缓, 起始幅值小, 特征频率较低。

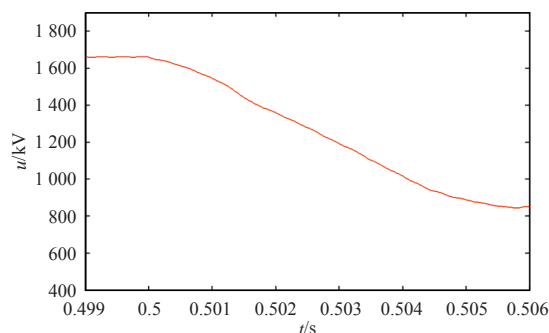


图7 输电线路外部故障电压

同样取故障后1 ms时间内的采样信号, 并对其进行EMD分解, 分解后的IMF分量如图8所示。由于信号比较平缓, 分解得到的特征信号就是其本身。对其进行Hilbert变换后得到瞬时频率 f_i , 如图9所示。

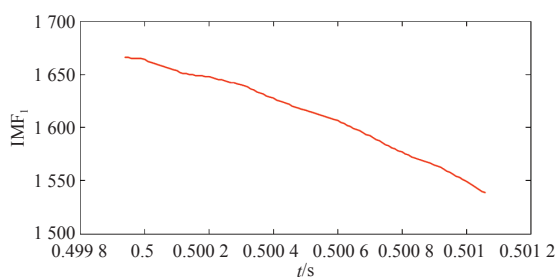


图8 f_2 故障IMF分量

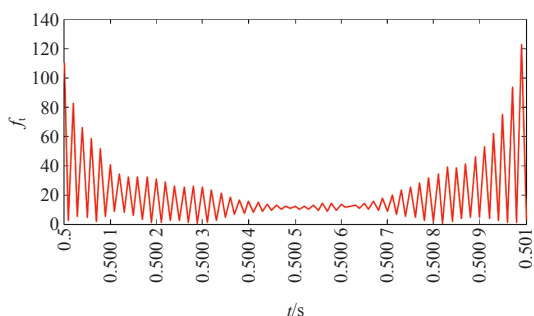


图9 f_2 故障时IMF的瞬时频率

对分解提取的特征信号IMF和其对应的瞬时频率 f_i 应用式(3)、式(4)求取幅频量 k_i , 其为随时间变化的值, 如图10所示。将 k_i 代入式(5)求得能表现信号特征的幅频量 $k=1.89$ 。

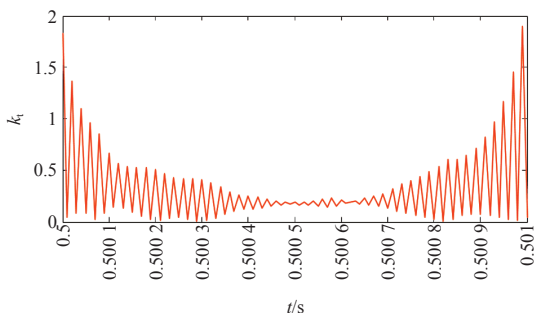


图10 f_2 故障时 k_1

若直流输电工程的交流侧发生两相接地故障, 取故障后的采样信号进行EMD分解, 并进行Hilbert变换后得到瞬时频率, 应用式(3)、式(4)求取幅频量 k_i , 分别得到图11~图13。将 k_i 代入式(5)求得能表现信号特征的幅频量 $k=3.89$ 。

由图11~图13可知, 当直流输电工程的输电线路外部故障或称区外故障时, 信号即使含有少量的高频成分, 但其幅值很小, 对应得到的幅频量也很小, 而且 k 明显小于10。

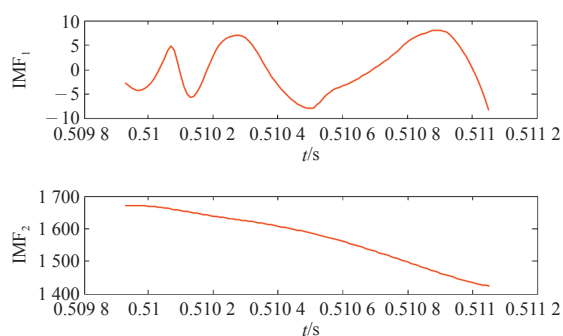


图11 交流侧两相接地故障时IMF分量

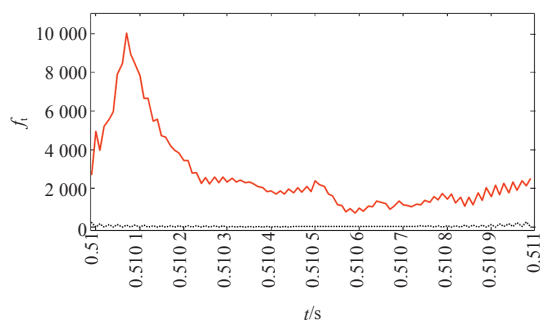


图12 交流侧两相接地故障时IMF的瞬时频率

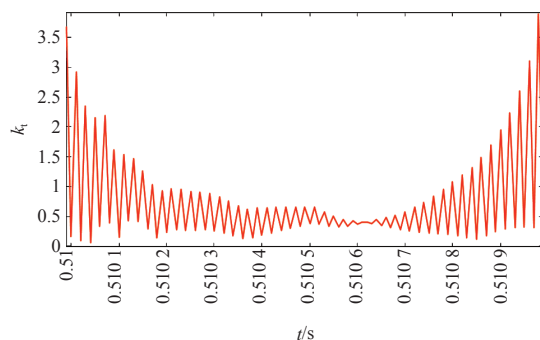


图13 交流侧两相接地故障时 k_1

3.3 线路故障识别的算法

通过对直流输电线路内部故障和外部故障的线模电压EMD分解并提取能表征信号特征的幅频量, 发现线路内外部故障时提取的特征幅频量大小差别明显。线路内部故障时, 由于没有经过平波电抗器和直流滤波器的滤波作用, 起始电压变化陡峭, 提取的特征幅频量 k 较大; 线路外部故障时, 由于平波电抗器和直流滤波器的滤波作用, 起始电压变化缓慢, 提取的特征幅频量较小。直流输电线路内部故障和外部故障时的特征幅频量差别显著, 利用此特征幅频量对故障时电压时域波形进行定量描述、分析和估计, 形成线路故障

的识别判据。

为了保证特征幅频量作为故障判据具有更大裕度,对保护判据进行整定,其整定值必须大于线路外部故障时的特征幅频量的最大值,线路外部故障时,特征幅频量 $k_{\max} < 10$,所以 $k_{\text{set}} > 10$,引入可靠系数 $K_{\text{rel}} = 1.2 \sim 1.3$,考虑各种实际因素和测量误差,并留有一定的裕度等,因此特征幅频量的整定值为

$$k_{\text{set}} = K_{\text{rel}} k_{\max} = 12 \quad (6)$$

通过上述分析可知,线路内部故障时,短时窗内电压高频明显,特征幅频量较大, $k > 20$,明显大于整定值12;线路外部故障时,短时窗内电压平缓,特征幅频量 $k < 10$,明显小于整定值12。两种情况存在显著差异,因此可提出甄别判据为

$$\begin{cases} k \geq 12, & \text{则为输电线路内部故障} \\ k < 12, & \text{则为输电线路外部故障} \end{cases} \quad (7)$$

直流输电线路内外部故障时电压的特征幅频量差别明显,并形成如上所述甄别判据,具体算法步骤如下。

- 1) 满足突变量条件后,采集故障前后两极电压数据并进行相模变换,得到相模电压 $u_1(t)$ 。
- 2) 对电压 $u_1(t)$ 进行EMD分解,得到IMF分量。
- 3) 分别对IMF分量进行Hilbert变换,得到对应的瞬时频率 f_i 。
- 4) 应用式(3)和式(4)计算得到随时间变化的幅频量。
- 5) 利用式(5)求得故障电压的特征幅频量 k 。
- 6) 根据故障判据阈值 k_{set} 判断故障类型,若 $k \geq k_{\text{set}}$ 则为线路内部故障,若 $k < k_{\text{set}}$ 则为线路外部故障。

4 仿真实验

应用PSCAD软件对直流输电系统进行仿真试验,以验证所提出的判据。本文对直流输电线路内外部故障进行了大量的仿真试验,线路内部故障主要考虑正极故障,过渡电阻考虑1 Ω 、10 Ω 和100 Ω ,外部故障主要考虑整流侧换流器出口故障、逆变侧换流器交流侧故障等。经仿真验证可

以看出,直流输电线路内部故障时电压的特征幅频量均大于12,输电线路外部故障时电压的特征幅频量均小于12,满足判据。部分仿真结果如下表所示。

表 部分仿真结果

故障条件		k	判断结果
故障位置	过渡电阻/ Ω		
距M端100 km处	1	76.8	线路内部故障
距M端400 km处	100	33.6	线路内部故障
距M端700 km处	10	56.8	线路内部故障
距M端1 000 km处	10	34.7	线路内部故障
距M端1 200 km处	1	60.6	线路内部故障
距M端1 200 km处	100	38.4	线路内部故障
距M端1 400 km处	10	34.2	线路内部故障
整流侧出口故障	1	1.6	线路外部故障
逆变侧交流系统A相接地故障	1	1.8	线路外部故障

5 结束语

经验模态分解能将信号分解成一组称为固有模态函数的单分量信号,其能使信号分解具有唯一性,又能在时域和频域同时具有良好的局部化性质。根据瞬时幅值与瞬时频率得到随时间变化的幅频量,并可以提取时域内的最大幅频量来描述信号的特征。用线模电压提取的特征幅频量来刻画直流输电线路内部故障和外部故障。直流输电线路内部故障时电压变化陡峭,特征幅频量大;直流输电线路外部故障时,由于平波电抗器和直流滤波器的滤波作用,电压变化较平缓,特征幅频量小。

参考文献

- [1] 邢鲁华. 高压直流输电线路保护与故障测距原理研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [2] 束洪春, 田鑫萃, 张广斌, 等. ± 800 kV直流输电线路的极波暂态量保护[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 96-104.
- [3] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 18-23.
- [4] 张保会, 郝治国, Bo Zhiqian. 智能电网继电保护

- 研究的进展(一)——故障甄别新原理[J]. 电力自动化设备, 2007, 31(8): 1-5.
- [5] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. ± 800 kV云广直流输电线路保护的仿真及分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 179-188.
- [6] Long W, Nilsson S. HVDC transmission: yesterday and today [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(2): 22-31.
- [7] 艾琳, 陈为化. 高压直流输电线路行波保护判据的研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 41-44.
- [8] 董鑫. 高压直流输电线路行波保护的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2008.
- [9] Zhao J, Smith C D, Varlow B R. Substation monitoring by acoustic emission techniques [J]. IEE Proceedings-Science Measurement and Technology, 2001, 148(1): 28-34.
- [10] 艾琳. 高压直流输电线路行波保护的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2002.
- [11] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华. 直流线路行波传播特性的解析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 94-100.
- [12] 束洪春, 安娜, 董俊. 高压直流输电线路故障识别的分形算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(12): 49-54.
- [13] 王钢, 罗健斌, 李海峰, 等. 特高压直流输电线路暂态能量保护[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 28-31.
- [14] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.
- [15] You Min, Zhang Baohui, Cao Ruifeng, et al. Study of non-unit transient-based protection for HVDC transmission lines [C]. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009, 27: 1-5.
- [16] 束洪春, 刘可真, 朱盛强, 等. ± 800 kV特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报, 2011, 30(31): 108-117.
- [17] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] 刘洋, 曹云东, 侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4086-4093.
- [19] 王雷, 刘尚合, 魏明, 等. 基于经验模式分解的电晕放电辐射信号阈值降噪处理方法[J]. 高压技术, 2012, 38(9): 2280-2285.
- [20] 穆钢, 史坤鹏, 安军, 等. 结合经验模态分解的信号能量法及其在低频振荡研究中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 36-41.
- [21] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [22] 罗隆福, 周金萍, 李勇, 等. HVDC换相失败典型暂态响应特性及其抑制措施[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(4): 5-9.
- [23] 李爱民, 蔡泽祥, 任达勇, 等. 高压直流输电控制与保护对线路故障的动态响应特性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 72-75.
- [24] 段建东, 张保会, 任晋峰, 等. 超高压输电线路单端暂态量保护元件的频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 37-48.

(收稿日期: 2016-01-27) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告