

# 高压直流线路单端暂态量保护研究

张保会, 张嵩, 尤敏, 曹瑞峰

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对国内已投运的高压直流线路主保护存在的问题, 提出了仅采用单端暂态电压信号的直流线路保护方案。通过对直流线路两端安装的平波电抗器和直流滤波器组的幅频特性分析, 构造了暂态量保护的主元件——边界元件的原理和算法, 并在此基础上形成了启动元件、雷电干扰识别元件和故障极判别元件的动作判据以及它们与主元件间的逻辑配合关系。大量 EMTDC 仿真表明, 该方案具有准确、快速、可靠地识别直流线路内外部故障, 耐受过渡电阻能力强等特点, 且保护整定一次性到位, 不需要随着线路长短的变化而改变。

**关键词:** 高压直流; 线路保护; 单端量; 暂态量保护; 故障极判别; 雷电干扰识别

## Research on transient-based protection for HVDC lines

ZHANG Bao-hui, ZHANG Song, YOU Min, CAO Rui-feng

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to overcome the shortcomings of current main protection for HVDC lines, a novel protection scheme based on non-unit transient voltage is proposed. Through analyzing the characteristics of smoothing reactors and DC filters located at both ends of the DC line, the working principle and algorithm of the main element——boundary unit, as well as the operation criteria of starting unit, lightning identification unit and fault-pole identification unit are established. Besides, the logic coordination of each element is also presented. Extensive EMTDC simulation experiments show that this protection scheme can accurately and reliably identify DC line faults, with excellent performance of tolerating transition resistances. Also, the relay threshold requires setting only once and needs no more modification as the length of line changes.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50977074).

**Key words:** HVDC; line protection; non-unit; transient-based protection; line fault identification; lightning disturbance identification

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0018-06

## 0 引言

目前国家电网公司和南方电网公司已投入运行的直流输电工程中, 其直流保护系统多为 ABB 和 SIEMENS 两家公司提供。综观两家的直流线路保护系统<sup>[1-4]</sup>, 其保护原理主要由以下判据构成: 变化率(或称行波)保护判据、低电压保护判据和差动保护判据。

### (1) 变化率保护判据

直流线路通过高阻接地短路时, 直流电压将以较慢的速度下降, 这时基于变化率判据的保护就可能发生拒动的情况。在文献[1]中指出, 2007年8月27日葛南直流线路发生高阻接地故障时(计算过

渡电阻为 295 ohm), 检测到的地波变化率和电压突变量都小于整定值, 从而导致行波保护和电压突变量保护拒动。最终由线路低电压保护延时切除故障。文献[3]也指出, 近几年天广直流工程实际运行中, 当直流线路经过高阻接地短路时, 行波保护的电压变化率元件没有启动, 导致行波保护拒动。

此外, 由于变化率受到故障地点、故障过渡电阻等因素的影响, 以变化率判据为基础的直流线路保护整定较为困难, 无法很好地适应网络参数的变化与调整。

### (2) 低电压保护判据

低电压保护判据依靠直流电压水平进行故障判断, 缺乏可靠性, 可能出现保护误动的情况。现场往往采用降低定值的方法来躲过交流系统故障和逆变器换相失败所造成的低电压(例如, 在天广直流

基金项目: 国家自然科学基金项目(50977074)

工程中, 其低电压判据的定值就设定为  $0.25 \text{ pu}$ ), 这就造成了保护灵敏度的降低, 在线路内部发生电阻接地故障时不能动作的情况。

### (3) 差动保护判据

直流线路的差动保护, 由于其需要对端的直流线路电流, 所以得依靠通讯通道; 通讯通道的不可靠性, 直接导致直流线路差动保护的可靠性降低。在天广直流工程的实际运行中, 就曾出现错误的广州站直流线路电流信号, 进而导致天生桥站三套直流差动保护动作的事故<sup>[4]</sup>。

故障暂态所产生的电压、电流暂态信号中蕴含了丰富的故障信息<sup>[5]</sup>, 对这些暂态信号进行分析, 提取相应的故障特征, 可实现仅使用单端信息而不依赖于通道的, 耐受过渡电阻能力强的, 快速可靠的保护原理。

## 1 直流输电线路暂态量保护方案

本文所提出的高压直流输电线路暂态量保护方案如图 1 所示。图 1 中,  $U_1$  为本极线路 (即保护安装线路) 的直流电压信号,  $U_2$  为另一极线路的直流电压信号。

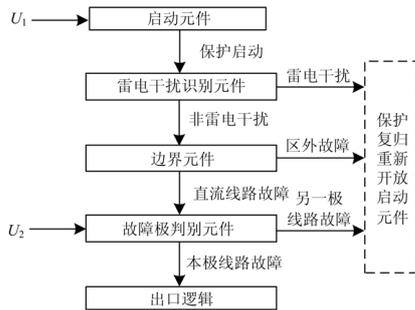


图 1 高压直流输电线路暂态量保护方案框图

Fig.1 Block diagram of the scheme of transient-based protection for HVDC transmission lines

整套暂态量保护方案由四个元件组成。保护的主元件为边界元件, 与之配套的辅助元件包括启动元件、雷电干扰识别元件和故障极判别元件。它们之间的配合逻辑叙述如下:

- 1) 启动元件根据测得的数据信息, 判断系统是否发生异常, 决定保护是否启动;
- 2) 保护启动后, 为了防止保护受雷影响, 需要进行雷电干扰的识别, 当判定系统的异常不是由雷电干扰导致时, 保护进入边界元件的判定;
- 3) 边界元件判断是否为直流线路故障。若确定为直流线路故障, 则进行故障极的判别, 否则保护复归, 重新开放启动元件;
- 4) 故障极判别元件进一步判断是否为本极线

路故障, 决定保护是否出口动作, 启动线路再起逻辑。

## 2 直流输电线路暂态量保护原理

### 2.1 直流输电线路边界特性

由于直流输电线路的两端均加装了平波电抗器及直流滤波器, 它们就构成了直流输电线路高频暂态量的固有“边界”<sup>[6]</sup>。以某  $\pm 500 \text{ kV}$  直流输电工程为例, 其直流输电线路两端加装的直流滤波器和平波电抗器如图 2 所示。其中  $u_i$  表示平波电抗器换流阀侧的电压信号,  $u_o$  表示平波电抗器线路侧的电压信号。每个直流滤波器由一个 12/24 型滤波器与一个 12/36 型滤波器并联构成。针对直流线路的 12、24、36 次特征谐波, 调谐频率为  $600 \text{ Hz}$ 、 $1200 \text{ Hz}$  和  $1800 \text{ Hz}$ 。

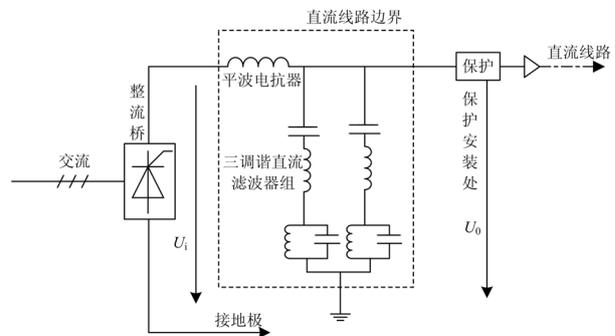


图 2 高压直流输电线路边界

Fig.2 Boundary of HVDC transmission lines

根据平波电抗器和直流滤波器的结构与参数, 得到直流线路边界的幅频特性, 如图 3 所示。从图 3 中可以看到, 当暂态信号频率大于  $10^4 \text{ Hz}$  时, 其经过线路边界后幅值衰减至  $-40 \text{ dB}$ , 由此可见, 直流输电线路边界对于故障暂态信号中的高频分量 ( $10 \text{ kHz}$  及以上) 具有明显的衰减作用。

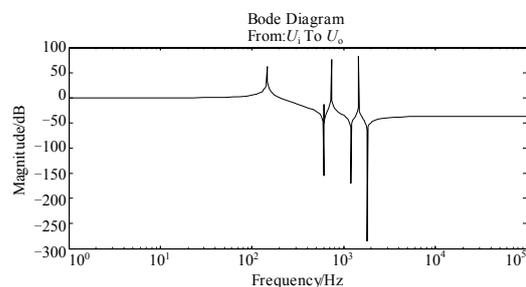


图 3 边界幅频特性

Fig.3 Amplitude-frequency characteristic of the boundary

当线路外部故障时, 高频分量由于以上元件的阻隔作用, 在保护安装处测得的值较小; 而内部故障时, 故障产生的高频分量无阻隔地传至保护安装

处，其值较大。从而，单端比较保护安装处暂态电压高频分量在不同故障位置时的数值特征，就可以区分直流输电线路的内外部故障。

### 2.2 边界元件

一般地，故障暂态信号可以用式(1)表达<sup>[7]</sup>：

$$u(t) = u_0 e^{-t/\tau} + \sum_{n=1}^M u_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

式中： $u_0$ 为衰减直流分量的初始值； $\tau$ 为衰减时间常数； $u_n$ 和 $\varphi_n$ 分别为 $n$ 次谐波的幅值和初相角； $\omega$ 为基频分量的角频率； $M$ 为谐波的最高次数。

借用文献[7]中提出的算法思想，可得到各次谐波的幅值及初相角的计算公式，如式(2)所示。其中： $a_n, b_n$ 为传统傅氏算法计算出的系数减去一个修正项后得到的修正系数<sup>[7]</sup>。

$$\begin{cases} u_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \\ \varphi_n = \arctan(a_n / b_n) \end{cases} \quad (2)$$

和文献[7]不同的是，本文提出的算法采样率为100 kHz，数据窗长为1.6 ms，基频 $f_0=625$  Hz。为了避免与改进全波傅氏算法引起混淆，暂且将以上算法称之为“高频傅氏算法”。

由2.1节分析可知，直流线路边界对10 kHz以上的高频信号具有明显的衰减作用，故使用本文提出的高频傅氏算法提取信号中的高频分量(10~50 kHz)能量来构成保护判据。为了提高保护判据的抗干扰性和可靠性，引入“平均能量和”的概念，其数学定义如式(3)所示。

$$E_{h\_aver} = \sqrt{E_L^2 + E_M^2 + E_H^2} \quad (3)$$

式(3)中： $E_{h\_aver}$ 为暂态信号高频分量的平均能量和； $E_L$ 对应频率为12.5 kHz的谱线能量； $E_M$ 对应频率为25 kHz的谱线能量； $E_H$ 对应频率为37.5 kHz的谱线能量。大量的仿真数据说明<sup>[8]</sup>，和小波变换相比，采用这种“谱线和”能量提取方法的判据具有更大的“区分度”(区内故障时能量的最小值与区外故障时能量的最大值之比)，同时也兼顾了一定的抗干扰性和可靠性，具有更加优良的动作性能。

于是，边界元件中所使用的故障暂态信号高频分量用其对应的平均能量和 $E_{h\_aver}$ 来表征，进而得到边界元件判据：

$$E_{h\_aver} > \Delta_b \quad (4)$$

满足判据时，则确定为直流线路故障，进入故障极判别程序。

随着直流滤波器组在直流线路上配置的标准<sup>[9]</sup>(多采用双调谐滤波器和三调谐滤波器)，以及

考虑到实际直流工程中平波电抗器的电感量变化范围不大(我国在2000年后新建的直流输电工程均采用了油浸铁心式平波电抗器，电感量基本维持在0.2~0.4 H<sup>[10]</sup>)，因此使得直流线路边界特性对信号高频分量呈现出基本相同的衰减规律。表1表明了平波电抗值对线路边界高频段衰减特性的影响情况。

表1 平波电抗值对边界高频衰减特性的影响( $f_c > 10$  kHz)

Tab.1 Influence of smoothing reactor on high-frequency attenuation characteristics of the boundary

电感量/mH	200	300	400
衰减/dB	>25	>30	>35

由表1可知，在常用的平波电抗器取值范围内，线路边界对高频段信号(>10 kHz)的衰减能维持在25~35 dB以上，也就是说，频率大于10 kHz的信号能量在穿越边界后衰减了大约3个数量级。另外，研究表明不同地点故障时高频能量存在较小的数量级差异，这便为边界判据确定一个统一的定值提供了可能性。通过在线路边界元件参数可能的取值范围内的大量仿真，最终确定保护动作门槛值 $\Delta_b$ 为1.5e-7，仿真结果表明该值适合于不同的直流线路长度，避免了重复整定，为现场人员提供了便利(见表2)。

表2 线路长度变化时边界元件的保护定值整定

Tab.2 Protection setting calculation of boundary unit for different line lengths

线路长度/km	线路区内故障时		保护定值
	高频能量最小值	高频能量最大值	
500	2.6937e-006	2.7040e-008	1.5e-007
1 043	2.5722e-006	1.1111e-008	1.5e-007
2 000	1.0240e-006	1.3708e-008	1.5e-007

### 2.3 故障极判别元件<sup>[11]</sup>

假设忽略了线路的损耗，因而导线中波的运动可以近似看成是平面电磁波的传播。则对于同杆并架的双极直流线路来说，彼此间的耦合关系就能用式(5)来表示<sup>[12]</sup>。

$$\begin{cases} \Delta u_1 = z_s \Delta i_1 + z_m \Delta i_2 \\ \Delta u_2 = z_m \Delta i_1 + z_s \Delta i_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中： $\Delta u_1, \Delta u_2$ 是线路上任意点的故障电压分量； $\Delta i_1, \Delta i_2$ 是线路上任意点的故障电流分量； $z_s, z_m$ 是线路的自波阻抗和互波阻抗。

假设正极线路发生接地故障，故障暂态行波将由故障点沿正极线路向两端传播，由于负极线路上电流的变化量 $\Delta i_2 \ll \Delta i_1$ ，故

$$\Delta u_2 = \frac{z_m}{z_s} \Delta u_1 = k_{c12} \Delta u_1 \quad (6)$$

式(6)中,  $k_{c12}$ 称为正极线路对负极线路的耦合系数。显然,  $k_{c12}$ 是频率相关函数。根据直流工程具体的参数,在 Matlab 下绘出耦合系数随频率变化的关系,如图4所示。

图4表明,同杆并架的双极直流线路间的耦合系数在频带 $[10^{-1}, 10^5]$  Hz 范围内先增大后减小,但总体上满足  $k_{c12} < 0.5 < 1$ 。即健全极线路上检测到的暂态信号强度始终要弱于故障极上信号的强度。尤其在信号低频带时,这种差异就更明显。由此,通过比较线路两极的故障信息能够识别故障极。

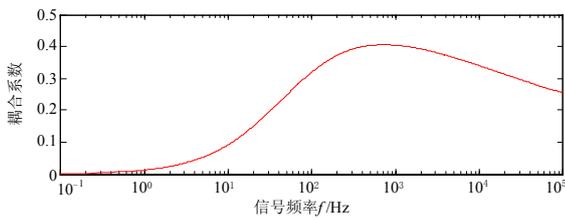


图4 同杆并架的双极直流线路间的耦合系数

Fig.4 Coupling coefficient of the parallel bipolar lines on the same tower

对于两极线路整流侧各检测到的故障电压信号,利用前文提及的“高频傅氏算法”,分别提取并计算其电压故障分量的低频段谱能量。如果  $E_{L\_N}$  和  $E_{L\_P}$  分别表示本极线路(负极)和另一极线路(正极)故障信号低频段的谱能量,仿照式(3)分别做出  $E_{L\_N}$  和  $E_{L\_P}$  的表达式:

$$E_{L\_N} = \sqrt{E_{N1}^2 + E_{N2}^2 + E_{N3}^2} \quad (7)$$

$$E_{L\_P} = \sqrt{E_{P1}^2 + E_{P2}^2 + E_{P3}^2} \quad (8)$$

$E_{N1}, E_{N2}, E_{N3}$  和  $E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}$  分别代表本级线路与另一极线路上保护所采集到的信号中对应频率为 625 Hz, 1 250 Hz, 1 875 Hz 的谱能量。

于是故障极判别判据可以表示成:

$$\lambda = E_{L\_N} / E_{L\_P} > 1 \quad (9)$$

式(9)成立时,判断为本极直流线路故障,保护出口动作,启动线路再起逻辑。

## 2.4 快速启动元件

基于数字图像处理中的梯度算法,对于电压量的变化,可以采用改进的梯度算法<sup>[13]</sup>进行检测,即使用当前点的后三个数据之和减去当前点的前三个数据之和,对于当前采样点  $u_s$ , 计算电压梯度为:

$$\nabla_s = (u_{s+3} + u_{s+2} + u_{s+1}) - (u_{s-1} + u_{s-2} + u_{s-3}) \quad (10)$$

这种改进的梯度算法不仅计算简单方便,充分利用了暂态量保护高速的采样数据,自然实现了对

采样率的四分频,而且具有一定的平滑消噪作用,适合于超高速暂态量保护启动的需要,特别是对于高阻接地故障具有较高的灵敏度<sup>[13]</sup>。

## 2.5 雷电干扰识别元件

雷电干扰识别就是利用雷击线路未造成短路故障时特有的行波暂态特征,将其与雷击故障和短路故障区分开来,从而达到排除线路异常干扰、准确判断线路故障的目的。由于高压直流输电线路的雷击过程和识别问题较复杂,这里暂不作阐述,将另文研究。

## 3 仿真验证

### 3.1 仿真系统介绍

直流输电系统<sup>[14]</sup>如图5所示,在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件下建立某±500 kV 直流系统仿真模型。系统送电容量为 3 000 MW;整流侧和逆变侧均装有无功补偿装置和交流滤波器;无功补偿容量整流侧为 1 440 Mvar,逆变侧为 1 800 Mvar;两极直流线路送电距离可调整为 500 km、1 043 km 和 2 000 km 三种情况,四分裂导线,采用频率相关模型;线路两侧各装设 290 mH 的平波电抗器;直流滤波器由 12/24 型与 12/36 型两个滤波器并联组成;12 脉动换流桥单元是由相位差 30° 的两个 6 脉动换流器串联组成,其中 30° 的相位差专门由接线方式不同的两台换流变压器提供;整流侧由定电流控制和最小触发角  $\alpha_{min}$  限制两部分组成,逆变侧配有定电流控制和定关断角控制。此外,两侧都配有低压限电流控制,逆变侧还配有电流偏差控制。同时,为了更好地研究保护的防雷性能,在模型中还较为全面地考虑了雷电流源模型、避雷器模型、绝缘子串的伏秒特性、杆塔模型以及导线和地线模型。

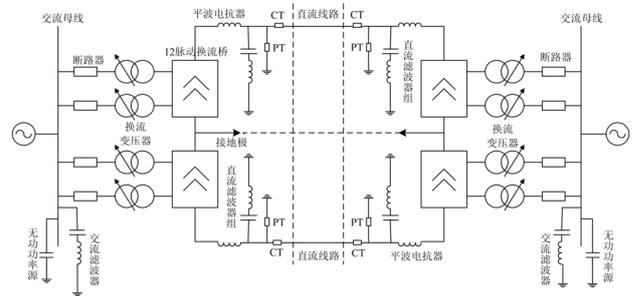


图5 直流输电系统示意图

Fig.5 Schematic diagram of HVDC system

### 3.2 线路区内外故障仿真

为验证本文提出的单端暂态量保护的性,仿真中考虑了不同故障位置、故障类型、过渡电阻的

故障情形<sup>[13]</sup>，并与基于电压变化率判据的直流保护性能作出了对比。直流线路故障设置在线路的始末端 5 km 以及线路上每间隔 100 km 处，过渡电阻包括 0 ohm、100 ohm 和 500 ohm；直流线路区外的故障考虑了①换流器直流侧出口短路；②换流器交流侧相间短路；③换流器交流侧相对地短路；④换流器直流侧对地短路；⑤换流变压器交流侧故障(Ag、BC、BCg、ABCg 及过渡电阻 50 ohm、100 ohm、150 ohm)。

限于篇幅，表 3 只列出了若干组仿真测试数据。结果显示，线路区内故障时故障电压信号高频能量值要比线路区外故障的情形大 2~3 个数量级，故保护定值的选取较为简单 ( $1.5e-7$ )。而另一方面，基于电压变化率判据的直流保护随着过渡电阻的增大， $du/dt$  不断减小，无法有效区分出区内经高过渡

电阻接地故障与区外故障，并且随着故障距离的增加，这种情况变得更加严重。

### 3.3 故障极判别仿真

当本极（负极）线路以及另一极（正极）线路上发生接地短路故障时，暂态量保护的故障极判别能量比值见图 6。结果表明，当本极线路发生接地故障时，能量比值都大于 1；而当另一极线路发生接地故障时，能量比值都小于 1。由故障极判别判据可知，当发生直流线路故障时，暂态量保护能够准确地识别故障极。

### 3.4 保护定值适用性仿真

为了考察暂态量保护定值的适用性，将线路长度由 1 043 km 调整为 500 km 和 2 000 km。表 2 的结果说明了边界元件在面对新的线路长度时不需要重新整定。

表 3 故障电压高频能量值与变化率的比较

Tab.3 Comparison of high frequency energy value and change rate of voltage fault components

区内故障	高频能量值	du/dt	区外故障	高频能量值	du/dt(p.u./ms)	
逆变侧平波电抗器线路侧接地(500 ohm)	2.5722e-006	0.033	逆变侧平波电抗器换流阀侧接地(0 ohm)	8.2820e-009	0.347	
线路中点	0 ohm	1.0552e-004	1.230	逆变侧换流器直流侧出口短路	2.1314e-009	0.023
	100 ohm	3.8186e-005	0.467	逆变侧换流器交流侧相间短路	8.4461e-010	0.033
	500 ohm	3.1753e-006	0.067	逆变侧换流器交流侧相对地短路	8.2743e-009	0.333
	0 ohm	1.5756e-003	5.210	逆变侧交流母线 Ag50 ohm 故障	9.7603e-010	0.040
线路距整流侧 5 km	100 ohm	4.9530e-004	1.933	整流侧换流器直流侧出口短路	1.0350e-008	0.587
	500 ohm	6.7288e-005	0.467	整流侧换流器交流侧相间短路	1.0400e-008	0.473

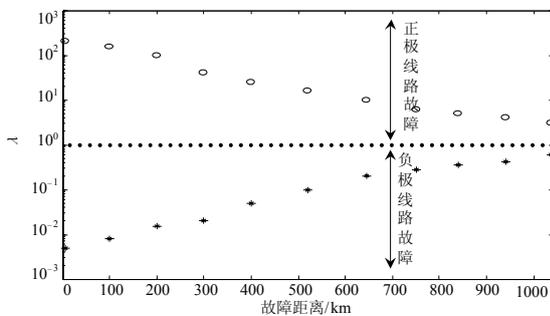


图 6 故障极判别元件的仿真结果

Fig.6 Simulation results of line fault identification unit

## 4 结论

基于直流线路两端安装的平波电抗器和直流滤波器的幅频特性，提出了直流线路边界的概念。该边界对于故障暂态信号的高频分量具有较大的衰减作用，据此暂态量保护能够可靠地识别直流线路区内外故障。该保护方案仅需单端信息，耐受过渡电阻能力强；且定值整定一次性到位，不需要随着线路长短的变化而改变，具有较强的适应性。

## 参考文献

- [1] 田庆, 原敏宏, 王志平. 葛南直流线路高阻接地故障保护分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(6): 60-63.  
TIAN Qing, YUAN Min-hong, WANG Zhi-ping. Analysis of Ge-Nan HVDC line protection against high-impedance ground fault[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(6): 60-63.
- [2] 胡宇洋, 黄道春. 葛南直流输电线路故障及保护动作分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 102-107.  
HU Yu-yang, HUANG Dao-chun. Faults and protection analysis of Gezhouba-Nanqiao DC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 102-107.
- [3] 邓本飞. 天广高压直流输电线路保护系统综述[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(19): 71-74.  
DENG Ben-fei. HVDC line protection summary of Tian-Guang project[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(19): 71-74.
- [4] 高锡民, 张鹏, 贺智. 直流输电线路保护行为分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 96-99.  
GAO Xi-min, ZHANG Peng, HE Zhi. Analysis on the operation of DC transmission line protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14):

- 96-99.
- [5] 吕延洁, 张保会, 哈恒旭, 等. 基于暂态量超高速线路保护的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 56-61.  
Lü Yan-jie, ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu, et al. Development and prospect of ultra-high speed protection for EHV transmission systems based on fault-generated transients[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5): 56-61.
- [6] YOU Min, ZHANG Bao-hui, CAO Rui-feng, et al. Study of non-unit transient-based protection for HVDC transmission lines[C]. //Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 2009.
- [7] 齐先军, 丁明, 温阳东. 一种完全滤除衰减直流分量的短数据窗改进全波傅氏算法[J]. 继电器, 2005, 33(17): 14-16.  
QI Xian-jun, DING Ming, WEN Yang-dong. An improved short data window full-wave Fourier algorithm for completely filtering decaying DC component[J]. Relay, 2005, 33(17): 14-16.
- [8] 曹瑞峰. 高压直流输电线路单端暂态量保护研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.  
CAO Rui-feng. Study of non-unit transient-based protection for HVDC transmission lines[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009.
- [9] 罗隆福, 俞华, 刘福生, 等. 高压直流输电系统中双调谐滤波器参加研究及仿真[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 25-27.  
LUO Long-fu, YU Hua, LIU Fu-sheng, et al. Study on parameters of double tuned filter in HVDC transmission system and its simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 25-27.
- [10] 张劲松. 特高压直流平波电抗器的选择[J]. 广东电力, 2006, 19(5): 36-38, 45.  
ZHANG Jin-song. Selection of ultra-high voltage direct current smoothing reactors[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(5): 36-38, 45.
- [11] 王钢, 李志铿, 李海锋.  $\pm 800$  kV 特高压直流线路暂态保护[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 40-43.  
WANG Gang, LI Zhi-keng, LI Hai-feng. Transient based protection for  $\pm 800$  kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 40-43.
- [12] 施围, 邱毓昌, 张乔根. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [13] 魏军, 罗四倍. 基于信号奇异性检测的行波启动元件算法的探讨[J]. 继电器, 2007, 35(21): 1-6.  
WEI Jun, LUO Si-bei. Traveling-wave starting algorithm based on signal singularity detection[J]. Relay, 2007, 35(21): 1-6.
- [14] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

收稿日期: 2010-03-09; 修回日期: 2010-05-19

作者简介:

张保会(1953-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、安全稳定控制和通信等领域; E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn

张嵩(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电线路单端暂态量保护; E-mail: zs19860415@gmail.com

尤敏(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电线路单端暂态量保护。

(上接第 17 页 continued from page 17)

- [5] 卞松江, 吕晓美, 相会杰. 交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究[J]. 中国电机工程学报 2005, 25(16): 57-62.  
BIAN Song-jiang, Lú Xiao-mei, XIANG Hui-jie. Modeling and simulation of AC-excited VSCF in wind-power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 57-62.
- [6] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.  
LIU Qi-hui, HE Yi-kang, BIAN Song-jiang. Study on the no load cutting in control of the variable speed constant frequency (VSCF) wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11.
- [7] 侯勇, 童建东. 变速恒频双馈风力发电机并网积分型变结构控制[J]. 电机与控制学, 2008, 12(3): 260-265.  
HOU Yong, TONG Jian-dong. Cutting-in control of variable-speed constant-frequency double-fed wind power generator with integral variable structure control[J]. Electric Machines and Control, 2008, 12(3): 260-265.
- [8] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [9] Pena R, Clare J C, Asher G M. Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation[J]. IEE Proc on Power Appl, 1996, 143(3): 231-241.
- [10] Tang Y, Xu L. A flexible active and reactive power control strategy for a variable speed constant frequency generating system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 10(4): 472-478.

收稿日期: 2009-09-10; 修回日期: 2010-05-13

作者简介:

赵宇(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为非线性控制技术在风力发电系统中的应用; E-mail: zhaoyu\_u@163.com

郭清滔(1983-), 男, 硕士, 研究方向为发电机及高压相关新技术;

王奔(1960-), 男, 教授, 研究方向为电力系统非线性与变结构控制。