高压直流输电保护定值整定流程的研究

高本锋[1] 张学伟[1] 刘辛晔[1] 董沛毅[1] 张云晓[2] 马玉龙[2] 赵书强[1]

（1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室 北京 102206
2. 国网北京经济技术研究院 北京 102209）

摘要 由于高压直流输电的强非线性，其保护定值的整定难以通过解析计算进行，目前工程实际中多采用经验值结合仿真验证的方法。这种方法工作量大、整定效率低且容易遗漏某些故障情况。实际工程中已发生多次因保护定值设置不合理而导致的事故。针对这一现状，本文从保护定值整定的角度出发，系统梳理了现有高压直流输电保护的特点，将其按照保护原理分为：线路保护、差动类保护、过负荷类保护、开关类保护、其它类保护。针对线路保护与差动类保护用于检测特定故障的特点，提出基于故障特征量的整定流程。对于过负荷类、开关类和其它类保护，归纳总结了其整定流程。研发了高压直流输电保护定值整定系统，其具有定值自动整定、定值查询与对比等功能，提高了高压直流输电保护定值整定的自动化程度。

关键词：高压直流输电 保护定值 整定流程 PSCAD/EMTDC

中图分类号：TM315

Research of HVDC Protection Value Setting Process

Gao Benfeng[1] *Zhang Xuewei*[1] *Liu Xinye*[1] *Dong Peiyi*[1] *Zhang Yunxiao*[2] *Ma Yulong*[2] *Zhao Shuqiang*[1]

（1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources
North China Electric Power University Beijing 102206 China
2. State Power Economic Research Institute Beijing 102209 China）

Abstract HVDC protection value setting is difficult to be analytically calculated, because of its strong nonlinearity. So far, the combination of empirical value and simulational verification is the most available method used in actual project. However, the method may induce large workload, low setting efficiency, and possibility of neglecting some faults. And accidents caused by irrationally protection value setting have repeatedly taken place in actual projects. In view of the current situation, the characters of present protections are systematically summarized from the perspective of value setting. According to protection principles, all present protections are classified into line protection, differential protection, overload protection, switch protection and other protection. Aiming at the character of line protection and differential protection that detects certain fault, the setting process based on fault feature is proposed. The setting processes for other three categories are generalized. The system of HVDC protection value setting, which has the function of automatic value setting, value inquiry and value comparison, is developed to improve the automatic degree of HVDC protection value setting.

Keywords：HVDC, protection value, setting process, PSCAD/EMTDC

1 引言

高压直流输电因其输电距离远、输送容量大以及控制灵活等特点，已经成为我国电网中的重要组成部分。目前，我国在建与投运的高压直流输电线路共计 24 条，其中国家电网公司 16 条，南方电网公司 8 条。预计到 2020 年，我国将发展成为以特高压为骨干输电网架，西电东送容量超过 1.5 亿 kW 的巨型交直流电网。随着高压直流输电系统规模的快速增长，其发生故障的频率也逐渐增大，对整个

收稿日期 2014-09-10

电网带来的影响也越来越严重[1]。

高压直流输电控制保护系统是高压直流输电系统的重要组成部分，其可控性高，快速调整潮流分布能力强，对于提高系统暂态和动态稳定性有重要作用[2]。其中，保护定值的合理性是控制保护系统的关键。与交流继电保护定值整定不同，由于控制系统的作用，高压直流输电系统的故障响应特性复杂，高压直流输电保护定值整定中使用的故障极限值难以通过解析化的故障分析算法得到。实际工程中已多次出现因定值设置不合理导致的事故，如 2001 年天广工程直流线路行波保护误动[3]，2007 年高肇直流因接地极过压保护动作不当引起双极闭锁[4]，2007 年兴安工程接地极不平衡保护动作导致双极闭锁[5]等。

目前，高压直流输电保护定值整定主要以已有类似工程定值为基础，通过联调试验验证定值合理性并确定定值。现有文献对于高压直流输电保护的研究多集中于保护新方法[6]，保护拒动、误动分析[7,8]，保护软硬件配置[9]等，缺乏关于保护定值整定的研究。文献[10]以“整定预备量”为基础，提出了一种仅适用于部分保护的定值整定方法，没有形成针对所有保护的整定流程。

本文根据保护原理对高压直流输电系统保护进行分类。针对不同类型保护的特点，分别提出相应的整定流程，并通过典型保护的整定过程详细说明不同整定流程的应用。依据整定流程，结合 PSCAD/EMTDC 仿真程序，本文开发了高压直流输电保护定值整定系统，实现定值自动整定、定值对比、工程参数查询等功能。

2　高压直流输电保护的分类方法

高压直流输电系统保护项目繁多且遍布系统的各个位置，单独讨论每个保护的整定方法工作量大且效率较低。将保护进行分类可以归纳出同类型保护的通用整定流程，提高整定效率，同时可以明确保护配合关系，便于进行定值的调整。因此，合理的保护分类方法是定值整定流程的基础。

现有对高压直流输电保护分类的方法为保护分区，即按照保护配置的位置进行划分。这种分类方法比较直观，但除了位置接近以外，同一保护分区内的保护共同点较少，进行定值整定时，无法形成通用的整定流程。而按照保护原理进行分类则可归纳出适用于各类保护的整定流程。

2.1　高压直流输电保护分区

高压直流输电保护分区的原则为：影响单 12 脉动换流器正常运行的故障退出故障换流器；影响单极正常运行的故障退出故障极；双极保护区的故障退出双极，但要采取措施尽量避免双极故障退出运行，保证运行的可靠性[11]。现有工程一般依照上述分区原则对高压直流输电保护进行分区，如图 1 所示。

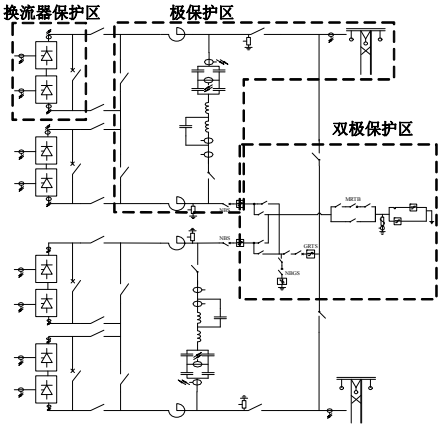


图 1 高压直流输电保护分区图

Fig.1　Protection zone of HVDC

由图 1 可知，保护分区简明，覆盖各个区域。但保护分区的方法仅仅是对保护项目的初步分类，每个保护区内仍然存在着保护原理各异、整定方法不同的情况，例如极保护区中，极母线差动保护、极过负荷保护和中性母线开关保护的整定方法有明显差异，无法形成统一的整定流程。为解决这一问题，本文提出根据保护原理分类的方法。

2.2　基于保护原理的分类方法

按照以保护原理进行分类的原则，在详细分析所有高压直流输电保护的保护原理的基础上，将高压直流输电保护分为五类：线路保护，差动类保护，过负荷类保护，开关类保护及其它类保护，如表 1 所示。

行波保护与微分欠压保护为直流输电线路的主保护。这两种保护的动作特性与原理相似，且明显区别于其它保护，因此将两者归为一类。差动类保护占高压直流输电保护总数的 30%，其速动段均为所在保护区域的主保护，并且各个差动保护的原理相同，因此将所有差动保护归为一类。过负荷保护的目的都是保护设备免受过负荷造成的损伤，保护原理相似，因此归为一类。高压直流输电系统中各个开关保护均与开关设备本身的特性相关，因此可归为一类。剩余的保护项目原理各异，且多为后备保护，动作可能性小，统一归为其它类保护。

表 1 保护分类表

Tab.1 The classification of protections

	线路保护	差动类保护	过负荷类保护	开关类保护	其他保护
换流器保护区		阀短路保护，换流器直流差动保护，换相失败保护	阀过流保护，电压应力保护，旁通对过负荷保护	旁通断路器保护	大触发角监视，晶闸管监视，换流变阀侧中性点偏移保护，阀触发异常保护，交流低电压保护
极保护区	行波保护，微分欠压保护	直流线路纵联差动保护，极母线差动保护，中性母线差动保护，换流器连接引线差动保护，极差动保护，直流滤波器差动保护	极过流保护，直流过电压保护，直流滤波器电容不平衡保护，直流滤波器电抗过负荷保护，接地极引线开路保护	中性母线开关保护	直流低电压保护，不平衡运行保护，直流谐波保护，交直流碰线监视
双极保护区		双极中性母线差动保护，金属回线横差保护，金属回线纵差保护	站内接地过流保护，后备站内接地过流保护，接地极引线过负荷保护	转换开关保护	金属回线接地保护，接地极引线不平衡保护

3 高压直流输电保护定值整定流程

根据不同类型保护的动作特性，分别制定相应的整定流程，共包括四种：基于故障特征量的整定流程，过负荷类保护整定流程，开关类保护整定流程和其它类保护整定流程。

3.1 基于故障特征量的整定流程

故障特征量指系统发生故障时，存在明显变化趋势，并且能够快速反映故障特征的电气量。在交流输电系统中，短路电流、短路电压、零序电流、差动电流等均属于故障特征量。交流保护就是以这些故障特征量为依据构成保护判据，并计算保护定值。这种交流保护整定方法主要适用于针对特定故障设立的保护，其突出特点是故障严重程度直接影响定值。

参考交流保护的整定方法，将故障特征量应用于高压直流输电保护整定中，提出基于故障特征量的整定流程。该整定流程适用于线路保护与差动类保护。

在高压直流输电系统中，典型的故障特征量包括直流电压幅值、直流电流、直流电压变化率和差动电流等。保护分类中，线路保护与差动类保护是针对特定故障设置的保护。线路保护用于检测直流输电线路上发生的接地故障，通过测量直流线路电压与直流线路电流构成判据；差动类保护用于检测所在区域的接地故障，通过测量差动电流构成判据。基于故障特征量的整定流程如图 2 所示。

基于故障特征量的整定流程中，影响因素分析与仿真条件制定是核心，主要研究方法为 PSCAD/EMTDC 时域仿真。影响因素分析包括两个方面，

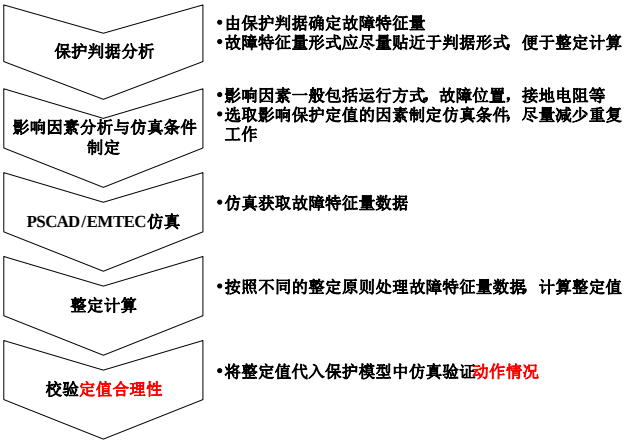


图 2 基于故障特征量整定流程图

Fig.2 Setting process diagram based on fault feature

分析故障特征量在同一类型故障期间的变化趋势与归纳故障特征量在不同类型故障下的变化规律。通过影响因素分析，找出影响保护定值的故障，确定这些故障的基本信息，如故障位置、接地电阻和系统运行方式等。依据故障对保护定值的影响程度制定仿真条件。一般严重故障对定值影响小，轻微故障对定值影响大，因此制定仿真条件时重点考虑轻微故障。由于直流系统非线性的特点，定值校验不宜采用灵敏度系数计算等方法，可采用定值代入仿真模型，验证动作情况的方法。保证区内故障正确动作，区外故障正确不动作即可。

根据影响因素分析确定的仿真条件具有通用性，即不同工程中同一种保护的整定可使用相同的仿真条件。因此，应用该整定流程对多个工程进行整定时，同一种保护的影响因素分析只需进行一次，减少了工作量，显著提高整定效率。

3.2　过负荷类保护整定流程

过负荷类保护属于设备保护的一种，主要保护换流器、接地极和直流滤波器等一次设备免受过电流或过电压造成的损伤。过负荷类保护整定流程如图 3 所示。

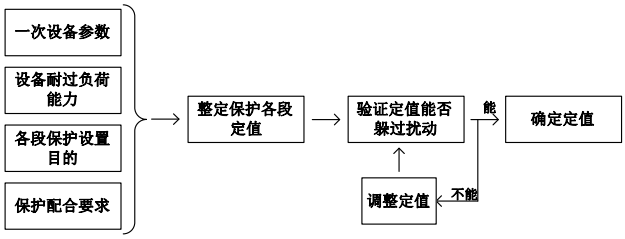


图 3 过负荷类保护整定流程图

Fig.3　Setting process diagram of overload protection

过负荷类保护的定值由一次设备参数与设备耐受过负荷能力决定。因此，收集厂家提供的一次设备参数与设备耐过负荷能力对于过负荷类保护的整定尤为关键。过负荷类保护一般设置多段，以满足各种保护配合要求，包括各过负荷保护间的配合与作为后备保护时，与对应主保护之间的配合。根据设备不同时间耐过负荷能力，按照反时限特性与各段保护设置目的分别整定各段定值。过负荷类保护的定值应能够躲过高压直流输电系统运行中可能产生的扰动。特别是避免在交流系统扰动引发换相失败时，保护误动导致直流闭锁[12]。

由于过负荷类保护并不是用来检测特定故障，因此校验定值时不采用设置区内故障验证保护能否正确动作的方法，而是验证能否躲过区外故障造成的扰动。若无法躲过扰动，则根据故障录波适当调整定值与延时设置。校验无误动后即可确定定值。

3.3　开关类保护整定流程

高压直流输电系统中的直流开关设备主要用于直流输电系统运行方式的转换、故障的清除，以及检修隔离等目的[13]。发出跳闸指令后，保护通过检测流过开关设备的电流判断开关是否跳闸失败，电流大于定值且满足延时要求时认定为跳闸失败。在确认跳闸失败后向开关设备发送重合闸指令以保护开关设备免受损伤。不同厂家生产的开关设备的特性不同，其定值整定也应灵活应对。

开关类保护整定过程中，定值整定主要以开关设备特性为依据，延时设置则以保护配合要求与开关操作时间为依据。收集开关设备参数是开关类保护整定的基础，主要包括：开关开断能力、开关承受开断失败能力、开关操作时间。由于开关设备具有转换系统运行方式的特殊作用，还应考虑系统运行方式转换时的开关动作顺序，避免因定值与延时设置不合理导致的开关频繁动作。开关类保护整定流程归纳如下：

（1）收集开关设备参数；

（2）依据开关开断能力与承受开断失败能力整定定值；

（3）依据开关操作时间与保护配合要求整定保护延时；

（4）根据开关动作顺序调整定值。

3.4　其它类保护整定流程

其它类保护中，保护的目的与原理不同，且保护所处位置相对独立，联系不密切，因此在整定过程中不仅要考虑共同点，还要考虑保护自身的特点。

这类保护多作为系统的后备保护，其共同点包括配合关系复杂、延时设置长和受控制系统影响等。保护配合关系与控制系统影响是决定其它类保护定值与延时设置的关键因素。在其他类保护中，部分保护需要与多个保护进行配合，整定过程不应遗漏，如直流低电压保护需与行波保护、微分欠压保护、线路差动保护等保护配合；部分保护只在特殊运行方式下投运，整定过程中考虑相应运行方式的影响即可，如换流变阀侧中性点偏移保护仅在换流器闭锁时投入。同时，保护还应能够躲过各类区外故障造成的扰动，避免双极闭锁等严重事故的发生。其它类保护整定流程归纳如下：

（1）明确保护目的与保护原理；

（2）根据配合关系与投运情况整定定值；

（3）验证保护能否躲过系统运行中的扰动。

4　高压直流输电保护定值整定流程的应用

本节以向上工程保护配置为基础，选取典型保护项目，分别说明各类保护整定流程的应用。向上工程的主要参数为，额定电压±800kV，额定电流 4kA，每级采用双 12 脉动换流器组。文中涉及的 PSCAD/EMTDC 模型均严格参照向上工程实际参数搭建。

4.1　基于故障特征量的整定流程的应用

根据 3.1 所述，基于故障特征量的整定流程适用于针对特定故障的保护，即线路保护与差动类保护。下面以行波保护为例说明基于故障特征量的整定流程的应用。

4.1.1 保护判据分析

行波保护是高压直流输电线路的主保护，主要用于检测直流线路上的接地故障，通过测量直流线

路电压与直流线路电流实现故障判断。典型行波保护判据如式（1）所示。

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} > k_1 \\ \Delta G_{\mathrm{wav}} > k_2 \end{cases} \tag{1}$$

式中，k_1，k_2 为保护定值。P 为极波，G_{wav} 为地模波，二者由所测直流电压与直流电流经变换得到，其表达式分别如式（2）与式（3）所示。

$$P = Z_{\alpha} I_{\mathrm{dL}} - U_{\mathrm{dL}} \tag{2}$$

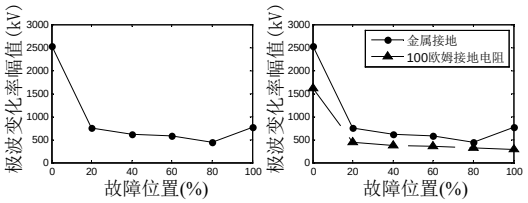
$$G_{\mathrm{wav}} = (Z_0 (I_{\mathrm{EL}} + I_{\mathrm{CN1}} + I_{\mathrm{CN2}}) - (U_{\mathrm{dL1}} + U_{\mathrm{dL2}}))/2 \tag{3}$$

式中，Z_{α} 为极波波阻抗，Z_0 为地模波波阻抗，分别由输电线路材料性质与大地导体性质决定。I_{EL} 为流入接地极电流，I_{CN1}、I_{CN2} 分别为极 1、极 2 中性母线接地电容冲击电流，U_{dL1}、U_{dL2} 分别为极 1、极 2 线路直流电压。

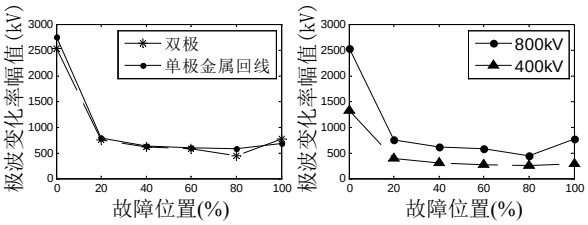
行波保护判据中，极波变化率的作用是判断直流线路上是否发生接地故障，正常运行时极波变化率几乎为零，当线路故障时极波变化率会迅速升高；地模波变化量的作用是区分故障所在极，排除对极故障对本极保护造成的扰动。极波变化率与地模波变化量同时大于整定值则行波保护动作[14]。根据行波保护判据形式与动作原理，选择极波变化率作为行波保护整定过程中的故障特征量，继续采用本流程对其进行整定。地模波变化量作为故障选极判据，根据经验值整定，并验证其能否区分故障极即可。

4.1.2 影响因素分析与仿真条件制定

根据行波传播特性与高压直流输电系统自身特点可知，影响极波变化率的主要因素包括：故障位置，接地电阻，系统运行方式[15]。其中，故障位置指故障点距保护测量点的距离。极波变化率主要用于检测各种区内故障，因此分析其在区内故障下的影响因素。实际保护装置采样频率为 10kHz，在计算变化率时以差分代替微分。保护测点设在直流线路首端。故障初始阶段极波变化率将迅速升高，通过分析极波变化率幅值的变化趋势，可得到极波变化率的影响因素，如图 4 所示。图中故障位置指故障点距保护测点距离占直流线路总长的百分比。



(a) 故障位置对比 (b) 接地电阻对比



(c) 运行方式对比 (d) 电压等级对比

图 4 故障特征量对比图

Fig.4 Comparison of fault feature

由图 4（a）可知，随着故障点距保护测点的距离增大，极波变化率幅值总体呈下降趋势。在故障点距离逆变侧较近时，受逆变侧直流滤波器放电的影响，极波变化率幅值有小幅度上升。由图 4（b）可知，故障点有接地电阻存在时，极波变化率幅值明显降低。由图 4（c）与图 4（d）可知，运行方式对极波变化率幅值的影响主要体现为，运行电压越高，极波变化率幅值越大。

制定仿真条件时，应能够包含区内最轻微故障情况，即极波变化率幅值最低的情况，以保证行波保护的灵敏度要求。根据上述影响因素分析，制定仿真条件如下：故障点设置在线路后 50%范围内，按距离平均设置 10 个故障点；故障点接地电阻 100 欧姆；运行方式选择双极 800kV，单极大地回线，单极金属回线，双极 400kV，本级 400kV 对极 800kV。

4.1.3 PSCAD/EMTDC 仿真

在参照向上工程参数搭建的 PSCAD/EMTDC 模型中，搭建行波保护模型，根据 4.1.2 所述仿真条件设置故障点。行波保护属于超高速动作的保护，保存故障时刻起 20ms 内故障特征量数据即可。仿真过程中，应用 PSCAD/EMTDC 的 snapshot 及 multiple run 功能，排除无效数据，减少工作量，实现仿真过程自动化。

4.1.4 整定计算

行波保护整定原则为保护线路全长，并且能够检测到各种区内故障，特别是能够检测到区内最轻微故障。从 PSCAD/EMTDC 中提取极波变化率仿真数据，经过数据处理环节得到极波变化率幅值。筛选出各种故障条件下的极波变化率幅值中的最小值，除以可靠系数（一般取 1.1～1.3），得到最终整定值。由于运行电压变化会对极波变化率幅值产生较大影响，因此对于电压等级不同的工况应分开整定，保证各种工况下的保护灵敏度与可靠性。以上计算过程均可在本文第 5 部分开发的高压直流输电

保护定值整定系统中实现。

4.1.5 校验定值合理性

在行波保护仿真模型中采用本文 4.1.4 中计算得到的整定值，验证其在故障时的动作情况。整定过程采取保护线路全长的原则，并以区内最轻微故障作为定值计算依据，因此校验过程重点在于检验区外故障是否发生误动。设置如下区外故障：整流侧平波电抗器阀侧金属接地，逆变侧平波电抗器阀侧金属接地，整流侧交流母线三相短路，逆变侧交流母线三相短路和对极线路金属接地。

4.2　过负荷类保护整定流程的应用

以阀组过流保护为例说明过负荷类保护整定流程的应用。阀组过流保护用于保护换流器设备免受过电流造成的损伤。根据过负荷类保护整定流程，首先应收集换流器设备参数及其耐过流能力。参照向上工程阀组过流保护的设置情况，保护设快速段和慢速段，判据形式如式（4）所示。

$$\max(I_{VY}, I_{VD}, I_{LV}) > I_{set} \tag{4}$$

式中，I_{VY} 为 Y 桥换流器交流侧三相电流，I_{VD} 为 D 桥换流器交流侧三相电流，I_{LV} 为换流器直流出口低压侧电流，I_{set} 为保护定值。

保护快速段整定时，以换流器能承受的极限电流为依据，设置高定值、低延时；保护慢速段整定时，以系统额定电流为依据，结合安全裕度与工程经验，设置低定值、高延时。保护位于逆变侧时，还应考虑躲过换相失败造成的瞬间扰动，在原延时基础上增设延时时间。本例中，快速段定值设为 11kA，延时 4ms；慢速段定值设为 7kA，延时 50ms。

设置区外故障验证定值与延时设置能否躲过扰动。对于阀组过流保护，其区外故障包括：交流母线单相金属接地，交流母线三相短路，本极直流线路出口金属接地和对极直流线路出口金属接地。在 PSCAD/EMTDC 模型中设置故障进行验证，若保护能够躲过区外故障造成的扰动，则可确定定值。

4.3　开关类保护整定流程的应用

以转换开关保护为例说明开关类保护整定流程的应用。转换开关包括大地回线转换开关和金属回线转换开关，主要用于单极大地回线与单极金属回线这两种运行方式之间的转换。根据开关类保护整定流程，首先应收集转换开关设备参数，并明确保护判据。大地回线转换开关保护与金属回线转换开关保护判据分别如式（5）与式（6）所示。

$$\left|I_{DEL}\right| > I_{set} \tag{5}$$

$$\left|I_{DME}\right| > I_{set} \tag{6}$$

式中，I_{DEL} 为接地极电流，I_{DME} 为金属回线电流，I_{set} 为保护定值。

以开关设备承受能力以及躲过电流互感器最大误差为主要整定原则，保护定值在留有安全裕度的基础上尽可能取较小值。参考转换开关设备参数，在开关操作时间的基础上设置动作延时。在运行方式转换过程中，转换开关会出现同时闭合的情况，据此调整定值。对于大地回线转换开关保护，定值应小于转换开关同时闭合时流过大地回路的最小电流；对于金属回线转换开关保护，定值应小于转换开关同时闭合时流过金属回路的最小电流。本例中，转换开关保护定值为 75A，动作延时 140ms。

4.3　其它类保护整定流程的应用

以接地极引线不平衡保护为例说明其它类保护整定流程的应用。接地极引线不平衡保护通过测量两接地极引线间的电流差，判断接地极引线的接地故障或开路故障。保护判据如式（7）所示。

$$\left|I_{DEL1} - I_{DEL2}\right| > I_{set} \tag{7}$$

式中，I_{DEL1} 为接地极引线 1 电流，I_{DEL2} 为接地极引线 2 电流，I_{set} 为保护定值。

高压直流输电系统在双极对称运行时，流过接地极引线的电流非常小，此时接地极引线不平衡保护不起作用。因此，整定过程主要考虑双极不平衡运行与单极大地运行两种工况的影响。保护定值由接地极引线耐过流能力得出，动作延时设定由运行方式决定。双极不平衡运行时，动作延时应大于调节双极电流平衡时间；单极大地运行时，动作延时应大于直流线路重启时间[16]。本例中，保护定值 100A，动作延时 1s。

5　高压直流输电保护定值整定系统

在对高压直流输电保护定值整定流程研究的基础上，本文研发了高压直流输电保护定值整定系统。该系统采用 C#语言开发，通过 windows 系统的 ini 文件存储运行参数，参数修改与数据录入方便快捷。高压直流输电保护定值整定系统结构如图 5 所示。

该系统需要输入的数据包括：PSCAD/EMTDC 仿真模型主参数，仿真数据，保护整定所需一次设备参数。各类数据按照统一格式存储到相应目录下，该

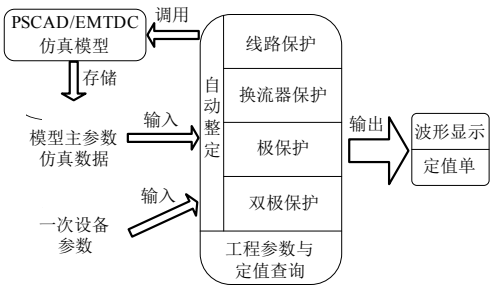
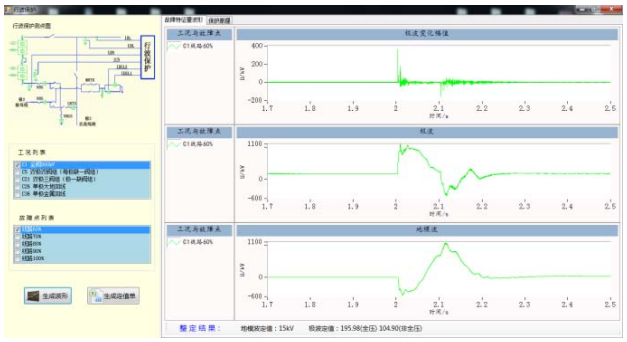


图 5 高压直流输电定值整定系统结构图

Fig.5 Structure of HVDC value setting system

系统即可读取数据，实现自动整定。其中，PSCAD/EMTDC 仿真模型也应按照要求设定测点与通道名称。输入仿真模型存储路径后，即可实现该系统对模型的直接调用。为贴近工程实际，方便运行人员使用，该系统仍采用保护分区的形式显示整定结果。定值整定系统部分界面如图 6 所示。

(a) 主界面



(b) 行波保护界面

(c) 定值查询与对比

图 6 高压直流输电保护定值整定系统界面

Fig.6 Interface of HVDC value setting system

除自动整定功能外，该系统还加入了波形显示、定值对比、定值单生成等功能。考虑到运行与设计人员的需要，该系统还嵌入了实际工程参数与保护定值数据库，实现了实际工程参数与保护定值的查询对比功能。

6 结论

本文在深入研究高压直流输电系统各个保护的基础上，按照保护原理对保护项目进行分类，针对不同保护类型的特点提出相应的整定流程。结论如下：

1）按照保护原理将高压直流输电所有保护分为五类：线路保护，差动类保护，过负荷类保护，开关类保护和其它类保护。

2）根据线路保护与差动类保护针对特定故障设置的特点，提出基于故障特征量的整定流程；根据设备过负荷能力决定过负荷类保护定值的特点，提出过负荷类保护整定流程；根据开关特性决定开关类保护定值的特点，提出开关类保护整定流程；根据其他类保护作为后备保护的共同点，提出其他类保护整定流程。以典型保护为例说明了各个整定流程的应用。

3）以整定流程为基础，研发了高压直流输电保护定值整定系统，实现了定值整定的自动化、定值查询与对比等功能，目前该系统已成功应用于工程实际。

参考文献

[1] 韩昆仑. 高压直流输电系统换流器与线路保护动态特性分析与整定研究[D]. 华南理工大学, 2013.

[2] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.
Li Xing-yuan, Zhao Rui, Liu Tian-qi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.

[3] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 173-175.
Ren Dayong. Analysis of bipole block events over the year of Tian-Guang HVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 173-176.

[4] 郭琦, 韩伟强, 周红阳, 等. 高压直流接地极过压

保护反事故措施的仿真研究[J]. 南方电网技术, 2009, 3(3): 35-38.
Guo Qi, Han Wei-qiang, Zhou Hong-yang, et al. RTDS based study on the anti-fault strategies of HVDC electrode over-voltage protection[J]. Southern Power System Technology, 2009, 3(3): 35-38.

[5] 朱韬析, 何方, 何烨勇, 等. 南方电网直流输电系统接地极线路不平衡保护动作后果探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 112-116.
Zhu Tao-xi, He Fang, He Ye-yong, et al. Discussion on operation results of electrode current unbalanced protection used in HVDC transmission system in CSG[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 112-116.

[6] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. ±800kV直流输电线路边界保护的模型匹配时域算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 320-327.
Shu Hong-chun, Tian Xin-cui, Dong Jun, et al. ±800kV DC transmission line boundary protection using model matching algorithms in time-domain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 320-327.

[7] 田庆. 天广工程直流线路突变量保护误动作分析[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 33-38.
Tian Qing. Analysis on the fault trip of bipole DC line protection in Tianguang HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 33-38.

[8] 罗德彬, 汪峰, 徐叶玲. 国家电网公司直流输电系统典型故障分析[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 35-39.
Luo Debin, Wang Feng, Xu Yeling. Analysis on typical faults in SGCC's HVDC projects[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 35-39.

[9] 王海军. 云广特高压直流输电工程直流保护功能分析及典型故障研究[D]. 华南理工大学, 2012.

[10] 刘登峰, 李银红, 石东源, 等. 高压直流输电系统直流保护整定预备量分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 47-51.
Liu Deng-feng, Li Yin-hong, Shi Dong-yuan, et al. Study on setting preparative parameter of HVDC system protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 47-51.

[11] 石岩, 韩伟, 张民, 等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 11-15.
Shi Yan, Han Wei, Zhang Min, et al. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 11-15.

[12] 李国栋, 严宇, 皮俊波, 等. 高岭背靠背直流系统过流保护动作案例分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 126-129.
Li Guodong, Yan Yu, Pi Junbo, et al. Case study of Gaoling back-to-back DC system over-current protection action[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 126-129.

[13] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[14] 艾琳. 高压直流输电线路行波保护的研究[D]. 华北电力大学（北京）, 2003.

[15] 韩昆仑, 蔡泽祥, 贺智, 等. 高压直流输电线路故障行波传播特性及其对行波保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013,41(21): 20-25.
Han Kun-lun, Cai Ze-xiang, He Zhi, et al. Propagation charactertistic of fault traveling wave on HVDC line and its influence on HVDC line traveling wave protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 20-25.

[16] DL/T 277-2012, 高压直流输电系统控制保护整定技术规程[S].

作者简介

高本锋　男，1981 年生，博士，研究方向为高压直流输电和电力系统稳定性分析。

张学伟　男，1991 年生，硕士研究生，研究方向为高压直流输电。