高压直流输电线路行波保护实用整定原则

任师铎,肖 浩,李银红

(华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:现阶段行波保护缺乏成熟整定原则,导致整定计算效率不足且隐藏误整定因素。基于此,提出高压直流输电线路行波保护的实用整定原则。考虑直流输电线路区内、区外不同故障类型,分析了直流线路端口电压变化率、电压变化量、电流变化量的故障响应特性;揭示了行波保护电压变化率、电压变化量、电流变化量动作判据的功能,分析了各动作判据的逻辑配合关系;考虑保护灵敏性和选择性要求,提出了各动作判据定值的实用整定原则。基于PSCAD/EMTDC仿真平台验证了所提整定原则的有效性。

0 引言

近年来我国高压直流输电技术发展迅速,众多 直流输电工程相继投入运行^[1]。由于直流输电线路 较长,工作环境复杂,故障发生概率较高,相关研究 表明我国直流输电系统各类故障中线路故障占比高 达50%以上^[2]。行波保护作为高压直流输电线路的 主保护,对保障直流输电系统的安全稳定运行具有 重要意义。高性能的行波保护应能快速可靠地识别 线路故障,从而提升瞬时故障的重启成功率。但现 阶段行波保护缺乏成熟的整定计算原则,实际工程 中采用的保护定值多由厂家给定,并在事故后根据 经验进行适当调整^[3],上述经验型思路使得整定计 算效率不足,且隐藏误整定因素,可能会导致发生交 流故障时行波保护误动^[4]以及发生直流线路高阻接 地故障时行波保护拒动^[5]。因此,有效的行波保护 整定原则是实现高性能保护的基本前提。

现有针对行波保护的研究工作聚焦于以下2个 方面。

(1)对西门子或 ABB 行波保护方案进行分析。 文献[6-7]通过对直流输电线路区内、区外故障下电 压、电流行波的理论分析,研究了行波保护的基本原 理;在此基础上,文献[8]对 ABB 行波保护方案的动 作判据进行了优化,提出采用地模波变化率区分本 极、对极故障,并通过极波变化率识别区内、区外故 障;文献[9]通过研究直流线路故障后的行波传播特 性,推导了考虑频变参数和直流控制的故障电气量 时域解析表达式。虽然上述研究有助于加深对行波 保护相关故障电气量特征的理解,但是没有提出保 护的成熟整定原则。

收稿日期:2019-03-14;修回日期:2019-08-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907067)

(2)研究行波保护新原理。文献[10]指出暂态 电压小波能量在区内、区外故障下有显著差异,可由 此构造区内、区外故障的识别判据;文献[11]基于故 障行波的传输特性,分析了区内、区外故障下行波波 形的时-频差异性和相关性,并提出了故障定位的新 方法;文献[12]通过分析采样步长与灵敏性的关系, 提出基于小步长采样的新型行波保护,并引入雷击 识别判据来防止噪声干扰引起保护误动作。上述新 原理为提升行波保护性能提供了有益的思路,但是 工程经验有限。

基于此,本文针对西门子公司的行波保护方案, 提出了高压直流输电线路行波保护的实用整定原则。通过分析直流输电线路在不同类型故障情况下 端口电压变化率、电压变化量、电流变化量的故障响 应特性的解析表达式,揭示了行波保护电压变化率、 电压变化量、电流变化量动作判据的功能,并由此探 究了各动作判据的逻辑配合关系;基于此,综合考虑 保护灵敏性和选择性要求,提出了各动作判据定值 的实用整定原则;最后,基于 PSCAD / EMTDC 软件 搭建了某直流输电工程仿真算例,验证了本文所提 整定原则的有效性。

1 行波保护相关电气量故障响应特性

行波保护是直流输电线路保护的主保护,保护 范围为本极输电线路的全长,识别线路故障后重启。 西门子公司行波保护方案的动作方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} dU_{d}/dt > (dU_{d}/dt)_{set} \\ \Delta U_{d} > (\Delta U_{d})_{set} \\ \Delta I_{d} > (\Delta I_{d})_{set} \end{cases}$$
(1)

其中, dU_d /dt为正极直流线路电压变化率; ΔU_d 为电 压变化量; ΔI_d 为电流变化量;下标 set 表示整定值。

高压直流输电系统发生各类型故障时,各特征 量的动态响应情况有所不同,研究各特征量在不同

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51907067)

故障条件下的动态响应特性规律是行波保护整定原则研究的基础。直流输电系统的常见故障如图1所示。图中, F_1 、 F_2 分别对应正、负极线路接地故障; F_3 、 F_4 分别对应整流侧、逆变侧平波电抗器阀侧故障; F_5 — F_8 、 F_9 — F_{12} 分别对应整流侧、逆变侧母线不同类型的短路故障。





在此基础上,以正极直流输电线路整流侧为例, 对不同故障条件下各特征量的响应情况进行了分析。当直流输电线系统发生故障时,整个交直流系 统的等值电路可看作是正常负荷分量网络和故障分 量网络的叠加,本节的分析是基于故障等值网络进 行的。

1.1 电压变化率故障特性分析

1.1.1 正极直流输电线路区内故障分析

为了简化分析,对正极直流输电线路金属性接 地故障进行分析,考虑到在直流输电线路发生接地 故障后的初始行波阶段,直流两侧换流站的控制系 统来不及充分响应,因此换流站等值电压源可以认 为近似维持不变,相应的线路故障等值网络图如图 2所示。



Fig.2 Schematic diagram of grounding fault

图 2 中, L_a为平波电抗器电感; L_i和 L_i分别为整 流侧和逆变侧等值换流电感; Z_f(s)为直流滤波器运 算阻抗; R_f为接地故障过渡电阻; u₀为故障前正极线 路正常运行电压; u₁⁽¹⁾和 u₂⁽¹⁾分别为故障点向整流侧 传播的第一次正向和反向电压行波; u₁⁽¹⁾和 u₂⁽¹⁾分别 为故障点向逆变侧传播的第一次正向和反向电压 行波。

当由故障点反射的第二次电压反向行波到达整 流侧量测点之前,整流侧直流输电线路出口故障电 压 Δu_{m} 如式(2)所示。

$$\Delta u_{\rm rp} = u_{\rm r2}^{(1)} {\rm e}^{-\alpha x} + u_{\rm r2}^{(1)} {\rm e}^{-\alpha x} n_{\rm r}$$
(2)

$$u_{r2}^{(1)} = \frac{Z_{c}/2}{Z_{c}/2 + R_{f}} (-u_{0}) = \frac{Z_{c}}{Z_{c} + 2R_{f}} (-u_{0})$$
(3)

其中,α为直流输电线路衰减系数;x为线路接地故 障位置与整流侧的距离;n_r为直流输电线路整流侧 出口边界元件的反射系数;Z_c为直流输电线路波 阻抗。

当采用复频域分析时,式(2)可以表示为:

$$U_r(s) = U_{r2}^{(1)} e^{-\alpha x} [1 + N_r(s)] =$$

 $U_{r2}^{(1)} e^{-\alpha x} \frac{2[Z_f(s) // (sL_d + sL_r)]}{Z_f(s) // (sL_d + sL_r) + Z_c} =$
 $U_{r2}^{(1)} e^{-\alpha x} \frac{2Z_f(s)[s(L_d + L_r)]}{[s(L_d + L_r)][Z_f(s) + Z_c] + Z_f(s)Z_c}$
(4)

其中,N_r(s)为整流侧线路末端的反射系数。

1.1.2 整流侧故障分析

整流侧故障类型包括 F₃、F₅—F₈,其对整流侧保 护的影响主要是使直流侧出口电压下降。由于整流 侧交流母线上的故障电压分量传播至平波电抗器阀 侧时,其幅度会受到换流变压器换流电感的抑制作 用,所以发生故障 F₃时的直流侧出口电压下降幅度 会比发生故障 F₅—F₈时更大,所以此处的分析对象 是故障 F₃。对应的故障等值网络图如图 3 所示。



图 3 整流侧 F_3 故障等值网络图 Fig.3 Schematic diagram of F_3 fault

at rectifier side

此时,整流侧直流输电线路出口故障电压如式 (5)所示。

$$U_{r}(s) = -u_{0} K_{r}(s) = -u_{0} \frac{Z_{f}(s) / Z_{c}}{Z_{f}(s) / Z_{c} + sL_{d}} = -u_{0} \frac{Z_{f}(s) Z_{c}}{sL_{d} (Z_{f}(s) + Z_{c}) + Z_{f}(s) Z_{c}}$$
(5)

其中,K_r(s)为整流侧线路末端的反射系数。 1.1.3 逆变侧故障分析

逆变侧故障类型包括F4、F9-F12,与整流侧故障

分析类似,此处的分析对象是故障F₄。对应的故障附加分量网络等值计算图如图4所示。



图4 逆变侧 F_4 故障等值网络图

Fig.4 Diagram of F_4 fault at inverter side

此时,整流侧直流输电线路出口故障电压为如 式(6)所示。

$$U_{r}(s) = -u_{0} e^{-\alpha l} [1 + N_{r}(s)] K_{i}(s) = -u_{0} e^{-\alpha l} \frac{2 [Z_{f}(s) / / (sL_{d} + sL_{r})]}{Z_{f}(s) / / (sL_{d} + sL_{r}) + Z_{c}} \frac{Z_{f}(s) / / Z_{c}}{Z_{f}(s) / / Z_{c} + sL_{d}}$$
(6)

其中,K_i(s)为逆变侧线路末端的折射系数。 1.1.4 区内、区外故障对比分析

(1)故障 F_1 , F_3 对比分析。

当正极直流输电线路末端和整流侧平波电抗器 阀侧分别发生金属性接地故障时,令整流侧直流线 路出口故障电压分量比值为*K*₁(*s*),由式(4)和式(5) 可得*K*₁(*s*)的表达式如式(7)所示。

$$K_{1}(s) = \frac{\frac{Z_{c}}{Z_{c} + 2R_{f}} (-u_{0}) e^{-\alpha x} [1 + N_{r}(s)]}{-u_{0} K_{r}(s)} = \frac{Z_{c}}{Z_{c} + 2R_{f}} e^{-\alpha x} \frac{2[s(L_{d} + L_{r})]}{Z_{c}} = \frac{sL_{d}[Z_{f}(s) + Z_{c}] + Z_{f}(s) Z_{c}}{[s(L_{d} + L_{r})][Z_{f}(s) + Z_{c}] + Z_{f}(s) Z_{c}}$$
(7)

在工程实际中, $L_r \ll L_d$,对于典型的直流输电工 程参数, Z_e =300 Ω , L_d =0.3 H, α =6.7×10^{-8[13]},所以式 (7)可以简化为式(8)。

$$\left| K_{1}(j\omega) \right| \approx \frac{2 \times 2\pi fn \times 0.3}{300} = 0.63n \tag{8}$$

其中,f为基波频率;n为谐波次数。

当直流系统发生故障时,整流侧电压行波中谐 波占主要成分,由式(8)可知,对于各次谐波频率响 应 $|K_1(j\omega)|>1$ 。即与发生故障 F_3 的情况相比,线路 末端发生故障 F_1 时 dU_d/dt 总体响应幅度更大。

(2)故障 F_3 、 F_4 对比分析。

当逆变侧和整流侧平波电抗器阀侧分别发生金属性接地故障 F_4 和 F_3 时,令整流侧直流线路出口故障电压分量比值为 $K_2(s)$,由式(4)和(6)可得 $K_2(s)$ 的表达式如式(9)所示。

$$K_{2}(s) = \frac{-u_{0} \mathrm{e}^{-\alpha x} [1 + N_{r}(s)] K_{i}(s)}{-u_{0} K_{r}(s)} \approx 1 + N_{r}(s) \quad (9)$$

在实际直流工程中行波采样率最高一般为 10 kHz^[14],因而行波保护能够捕捉到的最高行波频 率为5 kHz,将某实际常规直流输电工程的边界元件 具体参数代入式(9)可得,在200~5000 Hz频段内, $K_2(j\omega)$ 的幅频响应值几乎均小于1,即在故障 F_4 下 dU_d/dt 的总体响应幅度小于故障 F_{30} 。

由上述基本电路分析可知,考虑整流侧 dU_d/dt 幅度,故障 F_1 下最大,故障 F_3 下次之,故障 F_4 下最小。由于故障发生瞬间电压变化量的波形近似为一个阶跃波,因此可以通过对比电压变化量的大小来近似估计电压变化率的大小,故可以认为故障 F_1 下的电压变化率最大, F_3 次之, F_4 最小。此外已有研究表明^[15]:当负极直流输电线路发生故障 F_2 时, dU_d/dt 取值与正极直流输电线路相同故障位置时的取值大小接近。因此,电压变化率可以将线路故障与非线路故障区分开来,但不能区分正负极故障。

1.2 电压变化量故障特性分析

由图 2—4可知,当正极直流输电线路区内、整流侧和逆变侧平波电抗器阀侧发生故障(F_1 、 F_3 和 F_4)时,整流侧直流输电线路故障电压 u_r 均为故障前正极输电线路正常运行电压 u_0 。假设忽略线路损耗,当负极直流输电线路发生故障 F_2 时,对于同杆并架的双极直流输电线路而言,负极线路对正极线路的耦合作用如式(10)所示。

$$\begin{cases} \Delta u_{\rm rp} = z_{\rm s} \Delta i_{\rm rp} + z_{\rm m} \Delta i_{\rm m} \\ \Delta u_{\rm rm} = z_{\rm m} \Delta i_{\rm rp} + z_{\rm s} \Delta i_{\rm m} \end{cases}$$
(10)

其中, Δu_{m} 和 Δi_{m} 分别为整流侧负极直流输电线路故障电压和故障电流; z_{s} 和 z_{m} 分别为直流输电线路的自波阻抗和互波阻抗。

由于正极直流输电线路上 Δi_{n} 取值远小于负极 线路上 Δi_{n} 取值,所以式(10)可以进一步简化,如式 (11)所示。

$$\Delta u_{\rm m} = \frac{z_{\rm m}}{z_{\rm s}} \Delta u_{\rm m} = k_{\rm c} \Delta u_{\rm m} \tag{11}$$

其中,*k*。为负极故障线路对正极健全线路的耦合系数。已有研究表明,*k*。的取值远小于1^[16]。由此可知,当发生故障*F*2时,整流侧正极直流输电线路故障电压取值远小于负极直流输电线路故障电压,且小于发生故障*F*1时的取值。

综上所述, ΔU_{d} 的取值能够将负极直流输电线路故障 F_{2} 与其余故障(F_{1} 、 F_{3} — F_{12})有效地区分开来, 但是不能够有效区分正极直流输电线路故障 F_{1} 和非 线路故障 F_{3} — F_{12} 。

1.3 电流变化量故障特性分析

由图3可知,当正极整流侧平波电抗器阀侧故 障F₃发生时,会产生一个反向电流行波^[17],因此整 流侧正极直流输电线路故障电流Δ*i*_m取值为负。而 由图2和图4可知,当正极直流输电线路区内发生故 障 F_1 以及正极逆变侧平波电抗器阀侧发生故障 F_4 时, Δi_n 取值为正。同时相关研究表明^[18]:在特定直流输送功率水平下, Δi_n 取值在故障 F_2 下的取值为正 且远小于故障 F_1 下的取值。因此,对于整流侧正极 直流输电线路故障电流,故障 F_1 、 F_2 和 F_4 发生时取值 为正,且故障 F_1 和 F_4 下的取值远大于故障 F_2 下的取 值,而故障 F_3 发生时取值为负。

综上所述, ΔI_{a} 的取值能够将行波保护反方向故 障与正方向故障有效地区分开来。以整流侧为例, 电流变化量将整流侧故障(F_{3} 、 F_{5} — F_{8})与其余故障 (F_{1} — F_{2} 、 F_{4} 、 F_{9} — F_{12})有效地区分开来,但是不能够 有效区分正极直流输电线路故障 F_{1} 和保护正方向其 余故障(F_{2} 、 F_{4} 、 F_{9} — F_{12})。

2 行波保护动作判据功能及逻辑配合

根据前文分析,西门子公司的行波保护方案的 实现步骤如下。

(1)计算整流侧或逆变侧正极直流线路电压变 化率 dU_d/dt 、电压变化量 ΔU_d 和电流变化量 ΔI_d 。

(2)判断 ΔI_{d} 取值是否大于整定值(ΔI_{d})_{set}。如果 $\Delta I_{d} > (\Delta I_{d})_{set}$,则方向元件启动,同时执行步骤(3);否则行波保护复归。

(3)判断 dU_d / dt 是否大于整定值 $(dU_d / dt)_{set}$ 。 如果 $dU_d / dt > (dU_d / dt)_{set}$,则边界元件启动,同时执 行步骤(4);否则行波保护复归。

(4)判断 ΔU_{d} 的取值是否大于整定值(ΔU_{d})_{set}。 如果 ΔU_{d} >(ΔU_{d})_{set},则选极元件启动,同时执行步骤 (5);否则行波保护复归。

(5)行波保护动作出口。

3 行波保护实用整定原则

在明确行波保护各判据功能及相互配合逻辑的 基础上,综合考虑行波保护的灵敏性和选择性,本文 提出了行波保护的实用整定原则,包括电流变化量 判据定值(ΔI_d)_{set}、电压变化率判据定值(dU_d / dt)_{set}和 电压变化量判据定值(ΔU_d)_{set}的整定原则。

3.1 电流变化量判据定值整定原则

电流变化量判据作为行波保护的方向元件,其 定值(ΔI_d)_{set}应当能够可靠识别保护正方向故障。以 整流侧行波保护为例,(ΔI_d)_{set}应能识别故障 $F_1 - F_2$ 、 F_4 、 $F_9 - F_{12}$ 。考虑到保护反方向整流侧故障(F_3 、 $F_5 - F_8$)时, ΔI_d 的取值符号与发生保护正方向故障时相 反,当(ΔI_d)_{set}取值符号与发生保护正方向故障时相 同即可确保方向元件的选择性。此外,(ΔI_d)_{set}的取 值应当确保方向元件在故障 F_1 下具有较好的灵敏 性。因此,(ΔI_d)_{set}可按照式(12)所示的"保灵敏性" 的方式进行整定计算。

$$(\Delta I_{\rm d})_{\rm set} = \frac{(\Delta I_{\rm d})_{\rm min}}{K_{\rm sen}}$$
(12)

其中, $(\Delta I_d)_{\min}$ 为故障 F_1 下 ΔI_d 的最小值; K_{sen} 为灵敏 系数。

3.2 电压变化率判据整定原则

电压变化率判据作为行波保护的边界元件,其 定值 $(dU_d/dt)_{set}$ 应能够可靠识别保护正方向的线路 故障。以整流侧行波保护为例, $(dU_d/dt)_{set}$ 应能识别 故障 F_1 、 F_2 。为确保边界元件的选择性, $(dU_d/dt)_{set}$ 的 取值应该按照式(13)所示的"保选择性"方式进行整 定计算;同时,采用式(14)校验边界元件的灵敏性。

$$\left(\,\mathrm{d}U_{\mathrm{d}}/\mathrm{d}t \,\right)_{\mathrm{set}} = K_{\mathrm{rel}}\left(\,\mathrm{d}U_{\mathrm{d}}/\mathrm{d}t \,\right)_{\mathrm{max}} \tag{13}$$

$$K_{\rm sen} = \frac{\left(\,\mathrm{d}U_{\rm d}/\mathrm{d}t \,\right)_{\rm min}}{\left(\,\mathrm{d}U_{\rm d}/\mathrm{d}t \,\right)_{\rm set}} \tag{14}$$

其中, $(dU_d / dt)_{max}$ 为故障 F_4 下 dU_d / dt 的最大值; $(dU_d / dt)_{min}$ 为故障 F_1 下 dU_d / dt 的最小值; K_{rel} 为可 靠系数。

3.3 电压变化量判据整定原则

电压变化量判据作为行波保护的选极元件,其 定值(ΔU_d)_{set}应当能够可靠识别故障极线路故障。 为了确保选极元件的选择性,(ΔU_d)_{set}的取值应该按 照式(15)所示的"保选择性"方式进行整定计算;同 时,采用式(16)来校验选极元件的灵敏性。

$$(\Delta U_{\rm d})_{\rm set} = K_{\rm rel} (\Delta U_{\rm d})_{\rm max}$$
(15)

$$K_{\rm sen} = \frac{(\Delta U_{\rm d})_{\rm min}}{(\Delta U_{\rm d})_{\rm set}}$$
(16)

其中, $(\Delta U_d)_{max}$ 为故障 F_2 下 ΔU_d 的最大值; $(\Delta U_d)_{min}$ 为故障 F_1 下 ΔU_d 的最小值。

4 算例分析

4.1 仿真模型

以某实际常规直流输电工程为例,在PSCAD/ EMTDC平台上搭建了仿真模型,直流系统的额定 电压为±800 kV,额定电流为3.125 kA,额定功率 为5000 MW。系统运行的额定运行工况为采用双 极平衡运行方式,整流侧、逆变侧为大方式运行,功 率水平为额定功率。

通过调整故障位置、接线方式、运行方式、功率 水平等因素,得到了行波保护整定计算所需电气特 征量的取值。考虑故障位置影响时,设置故障位置 与整流侧距离占线路全长的比例*L*,从0至1等间距 变化,间距为0.1;考虑接线方式影响时,分别设置双 极平衡运行方式、单极大地运行方式、单极金属运行 方式;考虑运行方式影响时,分别设置两站为大方 式、小方式、孤岛方式;考虑功率水平影响时,设置功率 水平从0.1 p.u.到1.2 p.u.等间距变化,间距为0.1 p.u.。 根据仿真结果得到了实用整定计算所需的相关特征 量的参数值,如表1所示。表中,各参数值均为标 幺值。

表1 相关特征量取值	Ī
------------	---

Table 1 Values of related features

	故障	特征量	参数值
	F_1	$(\Delta I_{\rm d})_{ m min}$	0.581
	F_4	$\left(\mathrm{d}U_{\mathrm{d}}/\mathrm{d}t \right)_{\mathrm{max}}$	0.117
	F_1	$\left(\mathrm{d}U_{\mathrm{d}}/\mathrm{d}t\right)_{\mathrm{min}}$	0.131
	F_2	$\left(\Delta U_{\mathrm{d}} ight)_{\mathrm{max}}$	0.227
_	F_1	$\left(\Delta U_{\mathrm{d}} ight)_{\mathrm{min}}$	0.445

将表1中的相关参数分别代入式(12)、(13)以及式(15)中,令 ΔI_d 判据的灵敏系数 K_{sen} 以及d U_d /dt 判据和 ΔU_d 判据的可靠系数 K_{rel} 的取值皆为1.1,可以得到动作判据(ΔI_d)_{set}、(d U_d /dt)_{set}以及(ΔU_d)_{set}的整 定值取值分别为0.528 p.u.、0.129 p.u.以及0.250 p.u.。

4.2 整定原则有效性验证

在得到各特征量的整定值后,对不同运行工况 以及不同的故障类型进行仿真分析,观察正极输电 线路整流侧各特征量的动态响应情况。

(1)系统运行在额定工况下,分别设置整流侧、 逆变侧平波电抗器阀侧以及两极线路中点处发生金 属性接地故障,故障起始时刻为2.1 s,持续时间为 1 s。各特征量的动态响应情况如图5所示。图中, 纵轴均为标幺值。





Fig.5 Dynamic responses of different characteristic parameters under different faults

由图5可以看出,当发生故障 F_3 时, ΔI_d 为负值, 可有效发挥识别正方向故障的作用;当发生故障 F_4 时, dU_d/dt 低于整定值,可有效发挥识别线路故障的作用;当发生故障 F_2 时, ΔU_d 低于整定值,可有效 发挥识别故障极的作用,且电流变化量的大小低于 故障 F_1 时,与预期结果保持一致。

(2)系统运行在额定工况下,设置线路末端发生 经0、15、30、60Ω过渡电阻接地故障,故障起始时刻 为2.1 s,持续时间为1 s。不同接地电阻情况下各特 征量的动态响应波形图见附录中的图A1。

由附录中的图A1可以看出,对于经0、15、30 Ω过 渡电阻接地故障而言,在故障发生后的瞬间,各特征 量均超过了整定值,此时行波保护应能够正确动作 切除故障,与仿真结果一致;当线路末端发生经60 Ω过渡电阻接地故障时, dU_d / dt 没有超过整定值, 行波保护不会动作。将 $(dU_d / dt)_{min}$ 和 $(dU_d / dt)_{set}$ 的 具体数值代入式(16)进行灵敏度校验, K_{sen} = 0.131/0.129 = 1.016 < 1.3, dU_d / dt 判据灵敏度不足, 在高阻接地情况下会导致行波保护的拒动,与仿真 结果一致。

(3)相比于系统额定运行工况,改变系统运行功 率,考虑不同功率水平下线路末端发生经60Ω过渡 电阻接地故障时各特征量的动态响应情况,功率水 平分别设置为1.2、1.0、0.6、0.1 p.u.,故障起始时刻仍 为2.1 s,持续时间为1 s。不同功率水平下各特征量 的动态响应波形图见附录中的图A2。

由图A2可以看出,当功率水平为1.2、0.1 p.u.时, 在发生经60 Ω过渡电阻接地故障的瞬间,各特征量 均超过了整定值,此时行波保护应能够正确动作切 除故障,与仿真结果一致;当功率水平为1.0、0.6 p.u. 时,dU_d/dt均没有超过整定值,此时行波保护将不 会动作。因此,功率水平会影响行波保护的动作响 应情况,在进行整定计算时,需要计及功率水平的 影响。

(4)相比于系统额定运行工况,改变整流站运行 方式,考虑不同运行方式下线路末端发生经30、40Ω 过渡电阻接地故障时各特征量的动态响应,故障起 始时刻仍为2.1 s,持续时间为1 s。不同运行方式下 各特征量的动态响应波形图见附录中的图A3。

由图A3可以看出,大方式运行线路末端发生经 40 Ω 过渡电阻接地故障时 dU_d / dt 没有超过整定 值,此时行波保护将不会动作;其余情况下各特征量 均超过了整定值,此时行波保护应能够正确动作切 除故障,与仿真结果一致。因此,不同的运行工况下 行波保护的动作响应情况有所不同,在进行整定计 算时,同样需要计及运行方式的影响。

(5)系统在额定工况下运行时,考虑雷电非故障 性绕击线路以及投切电容器组带来的非故障扰动。 采用普遍认可的1.2 / 50 μs的负极性雷电流模拟雷 电绕击正极线路,雷电流幅值为15 kA^[19-20]。非故障 扰动下各特征量的动态响应波形图见附录中的图A4。

由图 A4 可以看出,当线路发生非故障绕击时, 雷击极和非雷击极都会检测到 dU_a/dt 的变化较大, 但其他特征量的变化幅度很小,行波保护不会误动 作;当系统连续投切多组投电容器时, ΔU_a 将出现较 大的变化,但 dU_a/dt 的变化幅度很小,行波保护同 样不会误动作。采用本文所提的实用整定原则,可 有效应对雷电非故障性绕击线路以及投切电容器组 带来的非故障性扰动。

4.3 实际定值后评价

由前文分析可知,对于某一特定运行工况,当过 渡电阻处于一定的范围内时,应用本文所提出的整 定原则计算得到的整定值可以确保行波保护的可靠 动作,但此整定值与实际应用值略有不同,如表2所 示,表中数据均为标幺值。下面进行简要对比 分析。

表2 整定值与应用值

Table 2 Setting v	value	and	application	value
-------------------	-------	-----	-------------	-------

判据定值	整定值	应用值
$\left(\Delta I_{\mathrm{d}} ight)_{\mathrm{set}}$	0.528	0.500
$\left(\mathrm{d}U_{\mathrm{d}}/\mathrm{d}t \right)_{\mathrm{set}}$	0.129	0.140
$\left(\Delta U_{ m d} ight)_{ m set}$	0.250	0.250

4.3.1 电流变化量判据定值后评价

整流侧(ΔI_d)_{set}应用值 0.500 p.u. 比整定值 0.528 p.u. 略小,使得电流变化量判据灵敏度更高,耐过渡 电阻能力更强;此外,根据 ΔI_d 判据的功能,(ΔI_d)_{set}应 用值的减少可能会影响整流侧判据的选择性。

4.3.2 电压变化率判据定值后评价

整流侧 $(dU_d/dt)_{set}$ 应用值 0.140 p.u. 比整定值 0.129 p.u. 大,使得 dU_d/dt 判据具有更好的选择性, 但是也会使得灵敏性降低,导致行波保护耐受过渡 电阻能力减弱。

4.3.3 电压变化量判据定值后评价

整流侧(ΔU_{d})_{set}应用值 0.250 p.u. 与整定值 0.250 p.u. 相同,在确保 ΔU_{d} 判据选择性的同时具有一定的 灵敏度。

由上述分析可知,应用此实用整定原则得到的 整定计算值与实际应用值略有区别,但考虑到采样 精度问题以及选择性与灵敏性的取舍,此差异是可 以接受的,因此本文所提出的实用整定原则具有可 行性,可为实际整定计算工作提供技术支撑。

5 结论

现阶段行波保护缺乏成熟整定原则,导致整定 计算效率不足且隐藏误整定因素,本文针对此问题, 开展了以下工作。

(1)通过对直流线路端口电压变化率、电压变化

量、电流变化量的故障响应特性的解析,揭示了行波 保护电压变化率、电压变化量、电流变化量动作判据 的功能: ΔI_a 判据的功能是作为方向元件识别正方向 故障, dU_d /dt判据的功能是作为边界元件识别线路 故障, ΔU_a 判据的功能是作为选极元件识别故障极。 由此明确了各判据的逻辑配合关系以及行波保护动 作的实现方案。

(2)根据各判据的功能,综合考虑保护灵敏性和 选择性要求,提出了各动作判据定值的实用整定原 则。基于 PSCAD / EMTDC 软件搭建了某直流输电 工程仿真算例,通过研究各运行工况下直流输电系 统发生各类故障时以及非故障扰动下行波保护的动 作特性,验证了所提整定原则的有效性。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]周浩,钟一俊.特高压交、直流输电的适用场合及其技术比较
 [J].电力自动化设备,2007,27(5):6-12.
 ZHOU Hao,ZHONG Yijun. Applicable occasions of UHVAC / UHVDC transmission and their technology comparisons in China[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(5): 6-12.
- [2]郑伟,武霁阳,李海锋,等.特高压直流线路自适应行波保护
 [J].电网技术,2015,39(7):1995-2001.
 ZHENG WEI,WU Jiyang,LI Haifeng,et al. Research on adaptive travelling wave based protection for UHVDC transmission line[J]. Power System Technology,2015,39(7):1995-2001.
- [3]韩昆仑,蔡泽祥,徐敏,等.高压直流输电线路微分欠压保护特 征量动态分析与整定[J].电力自动化设备,2014,34(2):114-119.
 HAN Kunlun, CAI Zexiang, XU Min, et al. Dynamic characteristic analysis and setting of characteristic parameters of differential under-voltage protection for HVDC transmission line
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):114-119.
- [4]余江,周红阳,黄佳胤,等.交流系统故障导致直流线路保护动作的分析[J].南方电网技术,2009,3(3):20-23.
 YU Jiang,ZHOU Hongyang,HUANG Jiayin, et al. Analysis on HVDC line protection action due to AC system fault[J].
 Southern Power System Technology,2009,3(3):20-23.
- [5]朱韬析,彭武.天广直流输电系统线路高阻接地故障研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(23):137-140.
 ZHU Taoxi, PENG Wu. Research on high impedance earth fault of Tian-Guang HVDC transmission project [J]. Power System Protection and Control,2009,37(23):137-140.
- [6] 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.
 AI Lin, CHEN Weihua. Research on traveling wave protection criterion on HVDC transmission line[J]. Relay,2003,31 (10):41-44.
- [7] 叶猛,曹海艳,马国鹏. 高压直流输电线路保护分析[J]. 南方 电网技术,2008,2(6):43-46.
 YE Meng, CAO Haiyan, MA Guopeng. Analysis of the line protection for HVDC power transmission systems[J]. Southern Power System Technology,2008,2(6):43-46.
- [8]郑伟,张楠,杨光源.西门子及ABB直流线路行波保护对比和 改进研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(24):149-154.
 ZHENG Wei, ZHANG Nan, YANG Guangyuan. Power system protection and control[J]. Power System Protection and Control,2015,43(24):149-154.

 [9] 徐敏,蔡泽祥,李晓华,等.考虑频变参数和直流控制的直流输 电系统线路故障解析[J].电力系统自动化,2015,39(11): 37-44.

XU Min, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analysis of line faults on HVDC transmission system considering frequency-dependent parameters and HVDC control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 37-44.

[10] 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,2010,30(31): 108-117.

SHU Hongchun, LIU Kezhen, ZHU Shengqiang, et al. ±800 kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31):108-117.

 [11] 邓丰,李欣然,曾祥君,等.基于波形唯一和时-频特征匹配的 单端行波保护和故障定位方法[J].中国电机工程学报,2018, 38(5):1475-1487.
 DENC Find II. View ZENC Viewing et al. Parameters

DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in the time and frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1475-1487.

- [12] 李爱民,徐敏,蔡泽祥,等.小步长采样的新型直流输电线路行 波保护[J].电网技术,2015,39(1):90-96.
 LI Aimin, XU Min, CAI Zexiang, et al. A small sampling interval based new traveling wave protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 90-96.
- [13] 李爱民,徐敏,蔡泽祥,等.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.
 LI Aimin,XU Min,CAI Zexiang, et al. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(25):94-100.
- [14] 東洪春,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.
 SHU Hongchun,TIAN Xincui,DONG Jun, et al. Simulation and analyses for Yun-Guang ±800 kV HVDC transmission line protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31 (31):179-188.
- [15] 韩昆仑,蔡泽祥,徐敏,等. 直流线路行波保护特征量动态特性 与整定研究[J]. 电网技术,2013,37(1):255-260.
 HAN Kunlun, CAI Zexiang, XU Min, et al. Dynamic characte-

ristics of characteristic parameters of traveling wave protec-

tion for HVDC transmission line and their setting[J]. Power System Technology, 2013, 37(1):255-260.

[16] 周浩,李济沅,王东举,等. ±800 kV特高压直流输电线路单极接地故障过电压产生机理及影响因素[J]. 电力自动化设备,2016,36(4):1-6.
 ZHOU Hao,LI Jiyuan,WANG Dongju,et al. Fault location algorithm for double-circuit UHV transmission lines on same

gorithm for double-circuit UHV transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 1-6.

- [17] 张海凤,朱韬析. 整流侧交流系统故障对高压直流输电系统的 影响[J]. 继电器,2007,35(15);24-27.
 ZHANG Haifeng, ZHU Taoxi. Influence of rectifier AC fault on HVDC transmission system[J]. Relay,2007,35(15);24-27.
- [18] 東洪春,田鑫萃.基于PCA聚类方法的±800 kV 直流输电线路 全线速动保护[J].电力自动化设备,2016,36(1):51-59.
 SHU Hongchun, TIAN Xincui. Entire-line instant protection based on PCA clustering for ±800 kV HVDC transmission line
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(1):51-59.
- [19] 顾垚彬,宋国兵,郭安祥,等. 针对直流线路行波保护的雷击识 别方法研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(13):3837-3845.
 GU Yaobin,SONG Guobin,GUO Anxiang, et al. A lightning recognition method for DC line travling-wave protection of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(13):3837-3845.
- [20] 李书勇,郭琦,崔柳,等.特高压直流输电线路雷击暂态过程与 行波保护响应特性分析[J].电网技术,2015,39(10):2830-2835.

LI Shuyong, GUO Qi, CUI Liu, et al. Thunderstruck transient process of UHVDC transmission line and response characteristic of traveling wave protection[J]. Power System Technology, 2015,39(10):2830-2835.

作者简介:



任师铎(1996—),男,山东梁山人,硕 士研究生,主要研究方向为高压直流输电 线路保护(E-mail:renshiduo@hust.edu.cn); 肖 浩(1989—),男,湖南岳阳人,助 理研究员,博士,主要研究方向为交直流系 统动态交互作用机理及继电保护(E-mail: xiaohao@hust.edu.cn);

李银红(1976—),女,湖北荆门人,副教 授,博士,主要方向为交直流系统故障特性

分析及保护整定(E-mail:liyinhong@hust.edu.cn)。

Practical setting principle of traveling wave protection for HVDC power transmission line

REN Shiduo, XIAO Hao, LI Yinhong

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The existing traveling wave protection is still with the problems of incorrect setting and inefficiency of setting calculation, since the lack of empirical unified setting principle. On this basis, the practical setting principle of traveling wave protection for HVDC power transmission line is proposed. Considering the different types of internal and external faults in HVDC power transmission lines, the dynamic response characteristics of voltage change ratio dU_d / dt , voltage variation ΔU_d and current variation ΔI_d are analyzed and the function of the traveling wave protection criterions based on dU_d / dt , ΔU_d , ΔI_d are revealed. Considering the requirements of traveling wave protection for sensitivity and selectivity, a practical setting principle of traveling wave protection is proposed. The validity of the proposed criterion is verified by PSCAD / EMTDC simulation platform.

Key words: HVDC power transmission line; relay protection; traveling wave protection; fault response characteristic; action criterion; protection setting principle







Fig. A2 Dynamic responses of different characteristic parameters under different power levels

附录





Fig.A3 Dynamic responses of different characteristic parameters under different operation modes



Fig.A4 Dynamic responses of different characteristic parameters under non-fault disturbance