高压直流输电线路行波保护影响因素分析及改进

李爱民,蔡泽祥,李晓华,刘永浩 (华南理工大学电力学院,广东省广州市 510640)

摘要:分析了目前常用行波保护的影响因素,指出电压波形受平波电抗器和直流滤波器的影响使 差分计算的电压变化率减小进而导致电压变化率保护拒动,而采用方向行波可以减小影响;方向行 波变化率主要受过渡电阻影响,而电压变化量和地模波受线路损耗及色散现象影响较为严重,因 此,当远距离故障时,二者定值到达时间的滞后是导致行波保护拒动的重要原因。提出了基于极性 比较的不受过渡电阻影响的行波保护原理,基于该原理的行波保护能够在区内高阻接地故障时可 靠动作。基于 EMTDC 的仿真结果验证了所述工作的正确性和有效性。

关键词:高压直流;行波保护;高阻接地故障;方向行波

0 引言

目前,国内直流输电系统常用的行波保护在检 测高阻接地故障时存在困难^[1-3],常导致直流闭锁, 引起不必要的直流停运。因此,快速、准确检测直流 线路故障尤其是高阻接地故障,对保证直流系统安 全稳定运行意义重大。

国内外学者对交流线路行波保护及其影响因素 进行了广泛研究,相继提出了行波极性比较式保护、 行波差动保护、行波距离保护等原理^[4]。但是,由于 行波的色散特性^[5]、近端故障时高频振荡、受初始故 障相角影响较大等原因,使检测行波波头较为困难, 动作可靠性不高。近年来,基于小波奇异性检测原 理的研究工作为解决行波波头检测问题作出了巨大 贡献^[6-7],但是,小波变换方法处理电力系统信号需 要保证足够宽度的采样数据窗口,并且其积分变换 结果相对于输入信号会带来相位偏移和幅度衰减。 另外,积分变换数值计算复杂,耗时较多^[8]。目前, 在实际工程中应用较少。

相比于交流系统,直流线路故障产生的行波不 受故障初始角的影响;两端换流器波阻抗非常大,行 波几乎只在故障点和换流器之间折反射;直流线路 结构简单,不存在不对称现象。另外,直流定电流控 制在故障后快速将电流抑制在10%左右,难以依靠 电流来检测故障。因此,直流线路在全世界范围内 均以行波保护为主保护。

目前,国内直流系统常用直流电压变化率保护 和行波幅值比较式方向保护作为线路主保护^[9-10]。 实际运行经验表明,现有行波保护受故障位置和过 渡电阻影响较大,难以检测高阻接地故障。结合直

收稿日期: 2009-11-22; 修回日期: 2010-03-04。

流线路行波的特殊性,对上述保护的影响因素进行 详细深入研究并提出改进方法是有意义的。

本文分析了目前常用直流线路行波保护的影响 因素,指出电压波形受线路末端平波电抗器和直流 滤波器影响导致差分计算的电压变化率减小;方向 行波变化率主要受过渡电阻影响,电压变化量和地 模波受故障距离影响较严重。在此基础上提出了基 于极性比较的不受过渡电阻影响的行波保护原理。

1 常用直流线路行波保护判据分析

1.1 电压变化率保护判据

典型的电压变化率保护,如天广直流行波保护 判据为^[11]:

	$\int \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t} > \Delta_1$	上升沿展宽6 ms	
	$\Delta u > \Delta_1$		
\langle	$rac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} > \Delta_3$	整流侧	(1)
1	$rac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} < \Delta_4$	逆变侧	

式中:*Δi* 为各个条件的定值。

该保护同时检测电压变化率 du/dt 和电压变化 量 Δu,二者同时满足定值才能启动检测电流变化率 di/dt。

图1给出了天广行波保护电压判据^[3]的逻辑 图。其中,Dif 是微分环节;Max(6)表示取6个采样 值中的最大值;Delay(5)表示延时5个采样间隔; NCM为比较环节;Sub表示相减。保护采样率为 10kHz,差分计算电压变化率 du/dt 且取6个采样 点中的最大值点保存为行波波头的采样点。为保证 与 du/dt 在同一时间段内计算,取当前采样值与前 5个采样点的最大值保存为行波波头点,与之前第 5 个采样值的差作为 Δu。逆变侧电流变化率为负,因此其定值为负,这也是区别线路故障与逆变侧交流系统故障的主要依据。



图 1 电压判据逻辑 Fig. 1 Logic diagram of VDCL and transient current control

1.2 行波幅值比较式方向保护判据

典型的行波保护如三广直流行波保护判据为:

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}P_{i}}{\mathrm{d}t} > \Delta_{1} \\ \Delta P_{i} > \Delta_{2} \\ G_{\mathrm{wav}} > \Delta_{3} \end{cases}$$
(2)

式中: P_i 为第*i*极的极波, $P_i = Z_a i_{dLi} - u_{dLi}$; G_{wav} 为地 模波,用来选相,双极运行时可作为区分逆变侧交流 故障和区内故障的判据, $G_{wav} = Z_0 (i_{EL} + i_{N1} + i_{N2}) - (u_{dL1} + u_{dL2})$; Z_a , Z_0 分别为线模波阻抗和地模波阻 抗; i_{EL} 为接地极线路电流; u_{dLi} , i_{dLi} , i_{Ni} 分别为第*i*极 线路电压、电流和接地极母线吸收电容的电流。

dP/dt由差分法计算,差分步长 100 μ s,当满足 定值后,将前一个点保存为波前点,并与之后的第 2,5,7 个点进行比较以计算变化量 ΔP_i 。

2 行波保护判据影响因素分析

2.1 直流滤波器的影响

单极直流线路故障分量如图 2 所示。



 G_M, G_N 为线路两侧的无源网络; u_F 为故障前电压; R_f 为过渡电阻; $u_{t2}^{(1)}, u_{t1}^{(1)}$ 为整流侧在第1次反向电压行波和正向电压行波; $u_{t2}^{(2)}$ 为 整流侧经故障端口反射后形成的第2次反向行波; $u_{i2}^{(1)}, u_{i1}^{(1)}, u_{i1}^{(2)}$ 为 逆变侧相应的行波

图 2 直流线路故障分量 Fig. 2 Fault component of the HVDC line faults

假设为无畸变线路, M 侧第 2 次反向行波到达 之前的行波为:

$$\begin{cases} u_{M} = (u_{r2}^{(1)} e^{-al} + u_{r2}^{(1)} e^{-al} n(t)) \varepsilon(t - \tau) \\ i_{M} = \frac{1}{Z_{c}} (-u_{r2}^{(1)} e^{-al} + u_{r2}^{(1)} e^{-al} n(t)) \varepsilon(t - \tau) \end{cases}$$
(3)

式中:α为线路衰减系数;Z_c为线路波阻抗,无畸变 线路时为纯电阻;l为故障点距 M 侧距离;τ为行波 从故障点到 M 侧的时间;n(t)为由线路末端平波电 抗器和直流滤波器决定的反射系数。

行波初值为:

$$u_{r2}^{(1)} = \frac{Z_{\rm C}}{Z_{\rm C} + 2R_f} (-u_F) \tag{4}$$

当 τ≪t≪3τ 时,M 侧电压波形是阶跃波与由末 端反射波的叠加,阶跃波的幅值取决于故障位置和 过渡电阻大小,反射波波形则由 n(t)决定。

图 3 给出了不同线路末端时的电压波形 U_{d} 、保护采样后的电压 U_{s} 、电压变化率 du/dt 以及电压变化量 Δu_{s}



Fig. 3 Fault component of voltage at different terminals

可见,直流滤波器的存在使电压波形产生波动, 而目前行波保护的采样率为10kHz,造成5kHz以 上的高频分量丢失,致使电压变化率和变化量失真, 因此电压变化率保护受直流滤波器参数影响较大。

由式(3)可得 M 侧的极波为:

 $P = Z_{\rm C} i_M - u_M = -2u_{\rm r2}{}^{(1)} {\rm e}^{-\alpha l} \varepsilon \left(t - \tau\right) \quad (5)$

当 τ≪t <3τ, M 侧观测到的极波为阶跃波,且 极波特性与 M 侧接线方式无关^[4],即直流滤波器对 行波方向保护判据没有影响。在这个意义上,行波 方向保护要优于电压变化率保护。

2.2 过渡电阻的影响

图 4 给出了不同过渡电阻对于行波保护判据的 影响,P_s,dP/dt,ΔP 为保护采样得到的极波、极波 变化率和变化量。可见,由式(4),初始行波幅值随 过渡电阻增大而减小。又由于实际保护以差分计算 电压变化率和变化量,因此二者随过渡电阻增大而 减小。过渡电阻使电压变化率和变化量下降是目前 行波保护难以检测线路高阻接地故障的主要原因。

— 77 —



图 4 不同过渡电阻对行波保护的影响 Fig. 4 Influence of fault impedance on traveling wave protection

对比U_s和P_s可知,极波仍为近似的阶跃波, 其变化率计算不受直流滤波器的影响,只与过渡电 阻有关。

2.3 故障位置的影响

第2次反向行波到达后以及以后在故障点与换 流站之间折反射,行波进入暂态阶段,其振荡频率主 要取决于故障位置与波速,故障点与保护安装处距 离越小,振荡频率越高。图5给出了不同故障位置 对行波保护的影响。



可见,由于近端(离继电保护较近)故障产生的

高频振荡使保护判据均发生振荡,但由于2类保护 均采用保存波前点或波头点的算法,近端故障对保 护动作特性影响不大。由式(3)、式(5)可知,远端故 障时,主要是由于线路损耗使入射波幅值减小,而行 波保护以差分代替微分计算变化率,因此,各个判据 都会随着故障距离的增大而减小。

从上述分析可知,直流滤波器主要影响行波波 头的形状,进而使电压变化率减小,行波保护拒动。 由于极波与线路末端无关,因此,采用极波可以减小 直流滤波器的影响。然而,过渡电阻和线路损耗使 入射波幅值减小,进而使行波保护拒动。因此,现行 行波保护难以检测远端高阻接地故障是目前直流线 路行波保护存在的主要问题。

3 行波保护的改进原理

实际直流系统多为双极运行方式,可用相模变 换技术将其分解成线模和地模分别计算。线模和地 模的反向行波为:

$$\begin{cases} S_1 = u_{M1} - Z_1 i_{M1} = 2K_1 e^{-\alpha_1 l} (-u_F) \varepsilon(t - \tau_1) \\ S_0 = u_{M0} - Z_0 i_{M0} = 2K_0 e^{-\alpha_0 l} (-u_F) \varepsilon(t - \tau_0) \end{cases}$$
(6)

式中: S_1 , S_0 分别为线模、地模反向行波; u_{M1} , i_{M1} 分 别为M侧线模电压和电流; u_{M0} , i_{M0} 分别为地模电压 和电流; τ_1 , τ_0 分别为线模和地模从故障点到M侧 的时间; Z_1 , Z_0 分别为线模和地模波阻抗; α_1 , α_0 分 别为线模和地模的衰减系数; K_1 , K_0 分别为线模和 地模的初始行波幅值系数,

$$\begin{cases} K_{1} = \frac{\sqrt{2}Z_{1}}{Z_{0} + Z_{1} + 4R_{f}} \\ K_{0} = \frac{\sqrt{2}Z_{0}}{Z_{0} + Z_{1} + 4R_{f}} \end{cases}$$
(7)

假设两极分别为极 a 和极 b,且极 a 发生故障,两极上的反向行波 S_a , S_b 为:

$$\begin{cases} S_{a} = \frac{S_{0} + S_{1}}{\sqrt{2}} \\ S_{b} = \frac{S_{0} - S_{1}}{\sqrt{2}} \end{cases}$$
(8)

令极 a 和极 b 的保护判据分别为 D_a , D_b , 且

$$\begin{cases} D_a = \frac{S_b}{S_a} \\ D_b = \frac{S_a}{S_b} \end{cases}$$
(9)

将式(6)、式(7)代入式(9)可得:

$$D_{a} = \frac{m \mathrm{e}^{-(a_{0}-a_{1})l} \varepsilon \left(t-\tau_{0}\right) - \varepsilon \left(t-\tau_{1}\right)}{m \mathrm{e}^{-(a_{0}-a_{1})l} \varepsilon \left(t-\tau_{0}\right) + \varepsilon \left(t-\tau_{1}\right)}$$
(10)

式中:
$$m = Z_0 / Z_1$$
。
当 $\tau_1 < t < \tau_0$ 时, $D_a = -1$;当 $\tau_0 < t < 3\tau_1$ 时,

78 —

 $D_a \in (-1,0)$ 。此时 $D_b \in (-\infty, -1)$ 。当区外交流 系统故障时,两极对称,这时不存在地模分量,因此 $D_a = -1$ 。由式(10)可知,该判据可避免过渡电阻 的影响,减小线路损耗的影响。

值得注意的是,上述研究均针对于故障分量,而 正常运行时,S_a,S_b均为0,为避免判据(式(9))的分 母为0,同时也为了简化保护逻辑,本文采取的保护 判据为:

$$D_{a} = \frac{u_{Mb} - i_{Mb}Z_{av} - \zeta}{u_{Ma} - i_{Ma}Z_{av} + \zeta}$$
(11)

式中: u_{Ma} , u_{Mb} , i_{Ma} , i_{Mb} 分别为M侧两极测得的线路 电压和电流; $Z_{av} = (Z_1 + Z_0)/2; \zeta$ 为偏移量。

进一步,式(11)可写成:

$$D_{a} = \frac{S_{0} - S_{1} - \zeta + \frac{1}{2}(i_{M1} - i_{M0})(Z_{0} - Z_{1})}{S_{0} + S_{1} + \zeta - \frac{1}{2}(i_{M1} - i_{M0})(Z_{0} - Z_{1})}$$
(12)

为保证分母不为 0,必须在整个线路故障过程 中保证 $\zeta > (i_{M1} - i_{M0})(Z_0 - Z_1)/2$ 。结合式(7)~ 式(10),式(12)又可近似化简为:

$$D_{a} = \frac{S_{0} - S_{1} - \zeta}{S_{0} + S_{1} + \zeta} = -1 + \frac{2m}{(1+m)(1+\zeta) + \frac{4\zeta R_{f}}{Z_{1}}}$$
(13)

可见,偏差 ζ 越大,过渡电阻 R_f 越大, D_a 越趋 近于一1 而拒动;同时, ζ 越大,保护对于过渡电阻的 灵敏度越低。大量仿真分析表明:当 ζ 在 6~10 范 围内变化时,行波保护都能可靠动作且具有较高的 灵敏度。

4 仿真结果及分析

结合南方电网某实际直流系统,直流线路采用 相域频变参数模型,全长为 960 km,采用双调谐滤 波器, L_d 为平波电抗器, U_{aL} 为测量电压,整流侧为 定电流控制方式,逆变侧为定电流和定熄弧角方式, 直流电压为±500 kV。 $F_{1,1}$, $F_{1,2}$, $F_{1,3}$, $F_{1,4}$ 分别对 应极 1 距 M 侧(整流侧)1 km,240 km,720 km 和 960 km 的线路故障, $F_{2,1}$ 对应极 2 距 M 侧 480 km 的线路故障, $F_{R,3}$, $F_{R,1}$ 为整流侧交流系统三相和单 相接地故障, $F_{1,3}$, $F_{1,1}$ 为逆变侧三相和单相接地故 障,如图 6 所示。取 200 Hz^[12-13]时线路波阻抗为: $Z_1=253 \Omega$, $Z_0=424 \Omega$, $Z_{av}=338 \Omega$ 。为了比较行波 保护的动作特性,同时建立了电压变化率保护和行 波幅值比较式方向保护模型,保护采样率为 10 kHz,仿真步长 5 μ s。图 7 给出了不同保护判据 在不同过渡电阻的 F_{1_4} 故障时的曲线。其中, D_1 , D_2 分别是本文提出的极 1、极 2 的保护判据。



图 6 直流仿真系统 Fig. 6 HVDC system simulation



图 7 3 种行波保护的比较 Fig. 7 Comparison of the three traveling wave protections

从电压变化率 du/dt 与极波 dP/dt 变化率来 看,过渡电阻增大主要影响其最大值,不影响其到达 的时间。这是因为变化率的最大值一般在波头的第 1个采样点就已经达到,此时波头中只含有线模波, 受线路损耗及色散影响很小,因此,其最大值主要受 初始行波幅值系数 K_1 的影响;电压变化量 Δu 和地 模波Gwav在地模波到达时才达到最大值,由于地模 波的受线路损耗和色散现象影响较为严重,因此,其 到达定值的时间就会滞后,这也是目前行波保护拒 动的重要原因。区外故障时,由于线路末端平波电 抗器及滤波器的作用,使进入线路的初始波头已经 不再是阶跃波,而是含有高频分量的振荡波,因此, 波头的第1个采样点已经不能作为变化率的最大 值,从图中看就是变化率急剧下降。可见,电压变化 率保护和行波幅值比较式方向保护受过渡电阻和线 路损耗以及色散影响很大。

本文提出的行波保护新判据本质上是极性比较 式的,受过渡电阻、色散现象影响较小,能够准确地 判断故障。其他仿真结果如表1所示。

表 1 其他仿真结果

	Table 1	Other simulation results		
故障点	过渡电阻/Ω	R1	R2	R 3
F_{1_1}	10	正确动作	正确动作	正确动作
F_{1_2}	10	正确动作	正确动作	正确动作
F	10	正确动作	正确动作	正确动作
1.1_3	200	拒动	正确动作	正确动作
	10	正确动作	正确动作	正确动作
	100	拒动	正确动作	正确动作
F_{1_4}	300	拒动	拒动	正确动作
	400	拒动	拒动	正确动作
	1 000	拒动	拒动	正确动作
F_{2_1}	10	正确动作	正确动作	正确动作
$F_{\mathrm{R}_{-3}}$	0	正确不动作	正确不动作	正确不动作
$F_{\rm R_{-}1}$	0	正确不动作	正确不动作	正确不动作
F_{I_3}	0	正确不动作	正确不动作	正确不动作
$F_{\mathrm{I_1}}$	0	正确不动作	正确不动作	正确不动作

注:R1,R2,R3分别表示电压变化率保护、行波幅值比较式方向保护及本文提出的保护。

可见,本文提出的保护在区内高阻接地故障时 仍能可靠动作,而电压变化率保护受过渡电阻的影 响最大。

5 结论

目前,国内直流输电系统主要以电压变化率保 护和行波幅值比较式方向保护为线路主保护。本文 分析了这2种保护的主要影响因素,并在此基础上 提出了不受过渡电阻影响的行波保护原理,得出以 下结论:

1)电压波形主要受线路末端直流滤波器和平波 电抗器的影响,差分计算的电压变化率减小而使电 压变化率保护拒动。采用方向行波可以避免线路末 端的影响。

2)极波变化率主要受过渡电阻的影响,而电压 变化量及地模波由于线路损耗和色散现象受故障位 置的影响很大,其到达定值滞后是导致行波保护拒 动的重要原因。

3)本文提出的基于极性比较式的行波保护原理 上不受过渡电阻的影响,能够在区内高阻接地故障 时可靠正确动作。

参考文献

[1] 任达勇. 天广直流工程历年双极闭锁事故分析. 高电压技术, 2006,32(9):173-176.

REN Dayong. Analysis of bipole block events over the years of Tianguang HVDC Project. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 173-176.

 [2] 高锡明,张鹏,贺智.直流输电线路保护行为分析.电力系统自动 化,2005,29(14):96-99.
 GAO Ximing, ZHANG Peng, HE Zhi. Analysis on the

operation of DC transmission line protection. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(14): 96-99.

- [3] 周翔胜,林容.高压直流输电线路保护动作分析及校验方法.高电压技术,2006,32(9):33-49.
 ZHOU Xiangsheng, LIN Rui. Analysis of relay protection action for HVDC line and testing method. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 33-49.
- [4] 葛耀中. 新型继电保护及故障测距原理与技术. 2 版. 西安: 西安 交通大学出版社, 2007.
- [5] 覃剑,陈祥训,郑健超. 行波在输电线上传播的色散研究. 中国电机工程学报,1999,19(9):27-30.
 QIN Jian, CHEN Xiangxun, ZHENG Jianchao. Study on dispersion of traveling wave in transmission line. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(9): 27-30.
- [6] 董杏丽,董新洲,张言苍,等. 基于小波变换的行波极性比较式方向保护原理研究.电力系统自动化,2000,24(14):11-15. DONG Xingli, DONG Xinzhou, ZHANG Yancang, et al. Directional protective relaying based on polarity comparison of traveling wave by using wavelet transform. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(14): 11-15.
- [7] 全玉生,李学鹏,马彦伟,等. 基于小波变换的 HVDC 线路行波 距离保护.电力系统自动化,2005,29(18):52-56.
 QUAN Yusheng, LI Xuepeng, MA Yanwei, et al. Distance protection scheme with traveling wave for HVDC line based on wavelet transform. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18): 52-56.
- [8] 吴青华,张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用. 电力 系统自动化,2003,27(7):45-49.
 WU Qinghua, ZHANG Dongjiang. Morphological filtering techniques and applications in protection relaying. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 45-49.
- [9] 艾琳,陈化为. 高压输电线路行波保护判据的研究. 继电器, 2003,31(10):41-44.
 AI Lin, CHEN Huawei. Research on traveling wave protection criterion on HVDC transmission line. Relay, 2003, 31(10): 41-44.
- [10] 艾琳. 高压直流输电行波保护的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2003.
- [11] LI Aimin, CAI Zexiang. Study on the dynamic performance characteristics of HVDC control and protections for the HVDC line fault// Proceedings of IEEE Power & Energy Society 2009 General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, Canada.
- [12] KIMBARK E W. Transient overvoltage on a bipolar HVDC overhead line caused by DC line faults. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 59(4): 592-610.
- [13] HINGORANI N G. Transient overvoltages caused by monopolar ground fault on bipolar DC line: theory and simulation. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1970, 59(4): 584-592.

(下转第96页 continued on page 96)

— 80 —

(上接第 80 页 continued from page 80)

蔡泽祥(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究

李爱民(1981—),男,通信作者,博士研究生,主要研究 方向:电力系统继电保护、控制与自动化。E-mail: liaimin4u @126.com 方向:电力系统继电保护与控制、电力系统稳定分析与控制。 李晓华(1975—),女,博士,副教授,主要研究方向:电力 系统继电保护与控制。

Analysis of Influence Factors and Improvement of Traveling Wave Protections for HVDC Line

LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua, LIU Yonghao

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: An analysis of influence factors on traveling wave protections is depicted and it is found that voltage waveform depends on the smoothing reactor and the DC filter so that the voltage change rate decreases and can cause miss-trip. To avoid this, the directional traveling wave can be adopted whose change rate is mostly influenced of the fault impedance. The absolute voltage step and the earth module wave are seriously affected by the line attenuation and dispersion of the traveling wave. Therefore, the important reason of miss-trip is delay of reach time of both set values while far distant fault happens. A new principle of traveling wave protection based on polarity comparison, independent from fault impedance is also presented which can reliably detect the high impedance fault. Simulation results with EMTDC show the conclusions and the new principle proposed are correct and effective.

Key words: HVDC transmission; traveling wave protection; high impedance earth fault; directional traveling wave