Vol.36 No.4 Apr. 2016

a

# ±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

周 浩,李济沅,王东举,邱玉婷,李 莎,韩雨川 (浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

**摘要**:将特高压直流输电线路单极接地故障过电压分成第一次跃升和第二次跃升2个过程,并基于极线间 的电磁耦合作用和波过程阐述了2次电压跃升的产生机理;分析了直流滤波器主电容、直流滤波器型式、直 流控制系统、杆塔接地电阻、线路中点杆塔是否装设避雷器、输电线路参数和输送功率等多种因素对该过电 压的影响。仿真结果表明,直流滤波器主电容参数是限制单极接地故障过电压的关键因素,其他因素对 该过电压影响不大,为控制过电压幅值不超过额定电压的1.7倍,建议±800 kV 特高压线路的直流滤波器 主电容参数取值范围为1~2μF。

关键词:特高压输电;直流输电;单极接地故障;过电压;机理分析;故障分析;影响因素;波过程 中图分类号:TM 86 文献标识码:A DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.001

#### 0 引言

电力需求持续快速增长,能源资源分布不均,电网 发展相对滞后,这对发展特高压输电提出了客观要 求<sup>[1-3]</sup>。而特高压直流(UHVDC)输电在提高输送容 量、减少输电损耗、节约走廊土地资源等方面具有不 可替代的优势<sup>[47]</sup>。

研究表明,单极接地故障是特高压直流输电线路 发生概率较高的故障之一,其通过极线间的电磁耦 合作用,在健全极线路上产生较为严重的过电压, 是直流线路过电压的研究重点<sup>[8-11]</sup>。文献[12-13] 对±800 kV 直流线路故障过程中电磁耦合特性进 行研究分析;文献[14]对单极线路接地在健全极线 路产生的缓波前过电压的沿线分布进行研究并给出 绝缘配合方案;文献[15]研究了特高压直流线路距整 流站不同距离发生对地闪络故障时过电压的沿线分 布及水平,并对部分过电压影响因素进行计算分析。

本文采用电磁暂态计算软件 EMTDC 以及行波 理论将单极接地故障过电压分成第一次跃升和第二 次跃升 2 个阶段,并对 2 次电压跃升作用的形成机 理进行分析;同时,分析直流滤波器主电容参数、直 流滤波器型式、直流控制系统、杆塔接地电阻、线路 中点杆塔是否装设避雷器、输电线路参数以及输送 功率等因素对该过电压的影响;最后,讨论了限制该 过电压的主要措施,并指出控制直流滤波器主电容 是限制单极接地故障过电压的关键因素,并给出直 流滤波器主电容推荐取值范围。

#### 1 直流线路单极故障过电压仿真

#### 1.1 仿真计算参数

本文依据 ±800 kV 向家坝—上海直流输电工程 参数,通过仿真计算对直流输电线路过电压产生机 理、影响因素以及防护措施进行分析。该工程输电 线路导线参数如表1所示。

表 1 ±800 kV 直流输电线路导线参数 Table 1 Conductor parameters of ±800 kV

UHVDC transmission lines

导线参数	架空地线	导线
型号	LBGJ-180-20AC	6×ACSR-720/50 钢芯铝绞线
外径/mm	17.5	36.2
直流电阻/(Ω·km <sup>-1</sup> )	0.4696	0.0398
水平距离/m	27.8	22
塔上悬挂高度/m	63	48
弧垂/m	13	18
分裂间距/mm	—	450
地线是否分段接地	是	—

复龙换流站及奉贤换流站的直流极线与中性线 间各配置一组直流 2/12/39 三调谐直流滤波器,具 体电路及参数如图 1 和表 2 所示。



图 1 向家坝 — 上海直流滤波器电路图

Fig.1 Circuit of DC filter for Xiangjiaba-Shanghai DC transmission project

> 表 2 向家坝—上海直流滤波器参数 Table 2 Parameters of DC filter for

Xiangjiaba-Shanghai DC transmission project

$C_1 \angle \mu F$	$L_1/\mathrm{mH}$	$C_2/\mu F$	$L_2/\mathrm{mH}$	$C_3/\mu F$	$L_3/\mathrm{mH}$	$R_1/\Omega$	
1.05	9.847	3.286	582.95	5.105	11.745	3 0 9 5	-

收稿日期:2015-11-16;修回日期:2016-03-04

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目 (2011CB209405)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2011CB209405)

#### 1.2 仿真计算结果

0

正极性线路沿线从 0~100% 发生单极接地故障,相应的健全极负极性线路沿线(0~100%)过电压 分布的计算结果如图 2 所示。另外,正极性线路距 离线路中点±30 km 范围内发生单极接地故障时,相 应的健全极负极性线路距离线路中点±30 km 范围 内过电压分布的计算结果如图 3 所示。



Fig.3 Overvoltage distribution along healthy line when grounding fault occurs within ±30 km from midpoint of faulty line

由图 2、图 3 可以看出,单极接地故障位置对单 极接地故障过电压有较大影响,直流系统在完整双 极运行方式下,线路中点发生单极接地故障时过电 压最大;故障点距离线路中点较远时,健全极上沿线 过电压一般在相应的接地故障处达到最大值;而当 故障点距离线路中点较近时,健全极上沿线过电压 一般在相应的接地故障处关于线路中点的对称位置 (即两端换流站直流滤波器放电电流波在线路上相 遇的位置)达到最大值。

通过对向家坝—上海直流输电工程的仿真计算,得到故障极(正极)线路中点接地时健全极(负极)线路中点过电压波形曲线如图4所示,电压跃升过程用A、B、C、D、E5个点来表征。

由图 4 可以看出,健全极线路中点电压在正常 工作电压下经过 2 次电压跃升后达到峰值。开始时 系统处于稳定运行状态,健全极线路中点电压约 为 – 783 kV,如曲线 *AB* 段所示;在 6 s 时刻,故障极 线路中点发生单极接地故障,健全极线路中点电压 瞬间由 – 783 kV 直接跃升至 – 981 kV,如曲线 *BC* 段



Fig.4 Overvoltage waveform of healthy line midpoint when grounding fault occurs at midpoint of faulty line

所示;在曲线 CD 段,健全极线路中点电压由 -981 kV 逐渐上升至 -1055 kV,该过程持续大约 6.5 ms(恰 好为故障电流波从故障点传播至换流站端部再返回 至故障点所需要的时间);故障电流波返回至故障点 瞬间,健全极线路中点电压发生第二次跃升,电压上 升至 -1254 kV,如曲线 DE 段所示。

#### 2 过电压机理分析

直流线路发生单极接地故障时,故障极上主要 会发生2个过程:首先,接地瞬间一个与故障极电压 幅值相同、极性相反的电压波由故障点向两侧换流站 传播,使得故障极线路上的电压下降至零,并产生相 应的电流波;接着,当电压波传到换流站两侧,故障 极线路的直流滤波器主电容会对故障点开始回传放 电的波过程,并在故障极沿线产生一个较大的脉冲 放电电流。

假设故障极为正极,稳态运行时全线对地电容 充电至  $U_0$ =+800 kV,此时若在线路中点发生金属性 单极接地故障,故障极线路接地故障点电压瞬间由  $U_0$ =+800 kV下降为零。这就相当于有一个幅值为  $-U_0$ 的电压行波,沿着故障极线路由故障点向两侧 换流站同时开始传播,该行波在故障极线路的传播过 程如图 5 所示。



#### 图 5 正极线路中点发生单极接地故障时 故障极线路电压行波传播过程



考虑电压波 – U<sub>0</sub> 由故障点向左侧传播的过程。 通常电流行波、电压行波均以向右为正方向,故从故 障点处向左侧换流站传播的电压波 – U<sub>0</sub> 是一个电压 反行波,此时线路上产生的相应电流反行波为:

$$i_0 = -(-U_0) / Z \tag{1}$$

其中,Z为波阻抗;i<sub>0</sub>为电压反行波在故障极线路上 产生的电流反行波。

仿真计算得到的故障极线路中点电流波形如图 6 所示。从图 6 中可以看出,开始时系统处于稳定运 行状态.线路运行电流为额定电流 4 kA. 如曲线  $A_1B_1$ 段所示;随后,故障极线路中点电流发生2次跃升, 在故障发生瞬间,由额定工作电流4 kA 跃升至 6.38 kA, 如曲线 B<sub>1</sub>C<sub>1</sub> 段所示; 故障发生约 6.5 ms 后, 故障极电流再次由 6.03 kA 跃升至 6.50 kA, 如曲线  $D_1E_1$ 段所示。实际上,第一次电流跃升是由向换流 站传播的电压反行波 - U<sub>0</sub> 造成的,由文献[14]中的 方法可估算向家坝—上海工程直流线路的波阻抗 约为 380 Ω.代入式(1)可估算出故障极线路电流第 一次跃升作用使线路电流上升至 6.13 kA. 与仿真计 算得到的 6.38 kA 接近,验证了故障瞬间确实是电压 波-U。从故障点向两端换流站传播的过程;而第二 次电流跃升是由故障极线路的直流滤波器主电容向 故障点回传放电造成的,它的数值与主电容的大小 直接相关。



图 6 故障极线路中点电流波形 Fig.6 Current waveform of faulty line midpoint

在故障点左侧附近,故障极线路与健全极线路 电流对应关系如图 7 所示。由图 7 可以看出,由于 极线间的电磁耦合作用,与故障极线路电流的 2 次 跃升(在额定电流 +4 kA 的基础上正突变)相对应, 健全极线路电流也会发生 2 次反向跃升(在额定电 流 -4 kA 的基础上负突变)。





直流系统在双极运行方式下,当一极发生接地故障时,故障极线路故障点处会产生同时向两端换流站传播的故障电压波(与故障极电压幅值相同、极性相反),并产生相应的故障电流波,由于极线间电磁耦合作用,该故障电流波电流突变处(B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>段)会在健全极线路感应产生相应的反向突变脉冲电流

(B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>段),并对故障点附近的健全极线路对地电容 充电,从而造成健全极线路电压的第一次跃升:接 着,待电压波传到两侧换流站,故障极线路的直流 滤波器主电容会对故障点放电并产生较大的突变脉 冲故障电流(D<sub>2</sub>E<sub>2</sub>段),同样由于极线间的电磁耦合 作用,该突变故障电流也会在健全极线路上感应出 反向突变脉冲电流波(D<sub>3</sub>E<sub>3</sub>段)(它的大小主要由故 障极线路直流滤波器主电容放电脉冲电流和极线间 互感耦合系数共同决定),该反向脉冲电流波又会对 故障点附近的健全极线路对地电容充电,导致健全 极线路电压的第二次跃升。上述2次电压跃升叠加 在健全极对地正常工作电压上,从而在健全极线路 形成较为严重的过电压。另外,若单极接地故障发 生在故障极线路中点,则由两端直流滤波器主电容 放电所产生的第二次电压跃升会在健全极中点处产 生叠加,产生最严重的单极接地故障过电压:若单极 接地故障发生在故障极线路其他位置(非中点),则 第二次电压跃升将不会在健全极线路发生叠加,此 时产生的单极接地故障过电压没有前者严重。因 此,故障极线路中点发生单极接地故障时,健全极 线路上的过电压最严重。

由图 7 可以看出,在健全极线路上,故障点左侧 会产生 2 次负的电流脉冲跃升(负突变),会对健全 极线路(负极)对地电容反向充电,充电过程如图 8

所示,造成了健全极线路 电压在额定电压(-800 kV) 基础上的2次跃升,其电流 与电压的对应关系如图9 所示。类似地,在故障点 右侧,健全极线路上会产 生2次正的电流脉冲跃升 (正突变),也会对健全极线 路(负极)对地电容反向充电, 同样造成了健全极线路电 压在额定电压(-800 kV) 基础上的2次跃升。



图 8 故障点左侧健全极 线路负的电流脉冲向线路 中点对地电容充电 Fig.8 Negative current pulse of healthy line left to fault point charges line-to-ground capacitor at midpoint

实际上,第一次电压跃升是由第一个过程---



图 9 健全极线路电流和电压波形



故障极线路接地瞬间向两端换流站传播的-800 kV 故障电压波产生的,一般无法进行控制;而第二次电压 跃升是由第二个过程——故障极线路直流滤波器主 电容对故障点放电的波过程造成的,可以通过直流滤 波器主电容加以控制。

仿真计算表明,直流滤波器主电容增大将直接 导致单极接地故障过电压第二次跃升作用明显增 加。在直流滤波器主电容值取为1μF、2μF、3μF 和4μF这4种情况下,故障极线路电流与健全极线 路电流分别如图10和图11所示。从图中可以看 出,随着直流滤波器主电容增大,在故障极线路上 产生的放电电流增大,因此通过极线间电磁耦合作 用在健全极线路上产生的感应电流增大,从而导致 过电压上升,进一步验证了直流滤波器主电容值是 单极接地故障过电压的关键影响因素。



图 10 故障极线路电流与主电容关系 Fig.10 Relationship between faulty line current and main capacitor





#### 3 影响因素分析

直流线路发生单极接地故障时的健全极线路过 电压可能受多种因素影响,根据影响程度主要可分 为关键影响因素和一般影响因素 2 类。

#### 3.1 关键影响因素

3.1.1 直流滤波器主电容

对于图 1 所示直流滤波器电路,当直流滤波器 主电容分别为 1 μF、2 μF、3 μF 和 4 μF,故障极线路 中点发生单极接地故障时(最严酷情况),相应的健 全极线路中点过电压仿真计算结果如表 3 所示。

表 3	不同直流滤波器主电容值对单极接地故障
	过电压的影响

Table 3 Influence of main DC filter capacitor on single-pole grounding fault overvoltage

主电容/μF	过电压/kV	主电容/μF	过电压/kV
1	1 243(1.55 p.u.)	3	1 400(1.75 p.u.)
2	1 357(1.70 p.u.)	4	1 422(1.78 p.u.)

由表 3 可以看出,直流滤波器主电容参数是影 响单极接地故障过电压的关键因素,主电容越大,过 电压幅值越大;当主电容取 2 μF 时,过电压幅值为 1357 kV,已达到额定电压的 1.7 倍。

3.1.2 直流滤波器型式

在特高压直流输电工程中,向家坝—上海直流输 电工程采用每站每极一组直流 2/12/39 三调谐直 流滤波器,具体电路和参数如图 1 和表 2 所示;锦 屏—苏南直流输电工程采用每站每极一组 2/39 双 调谐滤波器和一组 12/24 双调谐滤波器并联的直 流滤波器,具体电路和参数如图 12 和表 4 所示;云 南—广东直流输电工程采用每站每极一组 12/24/ 45 三调谐直流滤波器,具体电路和参数如图 13 和 表 5 所示。

本节将向家坝—上海特高压直流输电工程的



图 12 锦屏—苏南直流滤波器电路图 Fig.12 Circuit of DC filter for Jinping-

South Jiangsu DC transmission project

表 4 锦屏—苏南直流滤波器参数表

Table 4 Parameters of DC filter for Jinping-South Jiangsu DC transmission project

组名	刑式	组数/	$C_1/$	$L_1/$	$C_2/$	$L_2/$	$R_1/$
-11-11	±Μ	极	μF	mH	μF	mH	Ω
1	2/39	1	0.80	11.99	1.825	964.0	5 700
2	12/24	. 1	0.35	89.35	0.810	48.86	10 000

直流  

$$H$$
  
 $K$   
 $K$   
 $K$   
 $L$   
 $L$   
 $C_2$   
 $C_3$   
中性  
母线  
母线

#### 图 13 云南—广东直流滤波器电路图

Fig.13 Circuit of DC filter for Yunnan-Guangdong DC transmission project

表 5 云南—广东直流滤波器参数表 Table 5 Parameters of DC filter for Yunnan-Guangdong DC transmission project

$C_1/\mu F$	$L_1/\mathrm{mH}$	$C_2/\mu F$	$L_2/\mathrm{mH}$	$C_3/\mu F$	$L_3$ /mH
1.2	9.345	2.824	15.919	2.647	4.656

直流滤波器型式分别替换成锦屏—苏南和云南— 广东2种直流滤波器型式,对健全极线路中点过电 压进行仿真计算,3种情况下的过电压计算结果 如表6所示。

#### 表 6 不同直流滤波器型式对单极 接地故障过电压的影响 Table 6 Influence of DC filter type on

single-pole grounding fault overvoltage

直流滤波器型式	主电容/μF	过电压/kV
向家坝—上海工程型式	1.05	1 254
锦屏—苏南工程型式	1.15	1 263
云南—广东工程型式	1.20	1 258

由表 6 可以看出,3 种直流滤波器型式对过电 压幅值几乎没有影响;另外,考察 3 种不同型式的直 流滤波器还可以发现一个特点,其总的主电容参数 分别为 1.05 μF、1.15 μF、1.2 μF,三者很接近。因 此,在直流滤波器主电容参数值接近的情况下,即 使采用不同直流滤波器型式,一般也不会对过电压 整体水平产生太大影响,直流滤波器主电容值才是 影响单极接地故障过电压的最关键性因素。

#### 3.2 一般影响因素

#### 3.2.1 直流控制系统

考虑到线路发生故障后,需要经过故障电流波 在故障极线路的传播时间以及保护装置的延时作用 后,直流保护装置方能发出保护指令,而该时间一般 都会比单极接地故障过电压达到最大值的时间长, 两侧控制系统无法及时对该故障作出反应。因此, 直流控制系统通常不会对该过电压幅值产生影响。

3.2.2 杆塔接地电阻

杆塔接地电阻可以降低线路对地闪络时的暂态 分量,从而使得健全极线路上的过电压幅值有所降 低,但其对该过电压的整体波形及其幅值出现时间 基本没有影响。不同杆塔接地电阻情况下的健全极 线路中点过电压仿真结果如表7所示。

#### 表 7 不同杆塔接地电阻对单极接地故障过电压的影响 Table 7 Influence of tower grounding resistance on single-pole grounding fault overvoltage

杆塔接地电阻/Ω	过电压/kV	杆塔接地电阻/Ω	过电压/kV
0	1 2 5 4	10	1 2 2 7
1	1 2 5 1	15	1214
5	1 2 4 0		

由表7可以看出,随着杆塔接地电阻阻值增大, 健全极线路中点过电压幅值稍有下降,但影响较小。 3.2.3 线路中点杆塔装设避雷器

在杆塔接地电阻取 0 Ω 且直流滤波器主电 容分别取为 1 μF、2 μF、3 μF 和 4 μF 4 种情况下, 分析在线路中点杆塔上装设避雷器(与换流站极线 处特性相同)对该过电压的影响。当故障极线路中 点发生单极接地故障时,该避雷器对健全极线路中 点过电压幅值的影响如表8所示。

表 8 线路中点杆塔装设避雷器对过电压的影响 Table 8 Influence of arrester installed on tower at line midpoint on overvoltage

线路中点杆塔装设		线路过电压	E幅值/kV	
避雷器情况	$C_1 = 1 \ \mu F$	$C_1 = 2 \mu F$	$C_1 = 3 \mu F$	$C_1 = 4 \mu F$
不装设避雷器	1 2 4 3	1 357	1 400	1 4 2 2
装设避雷器	1211	1 312	1 3 3 1	1 340

由表 8 可以看出,在线路中点处装设的避雷器 对该过电压有一定的限制作用,但效果不太明显。 在主电容取值为 4 μF 的情况下,线路中点杆塔处装 设避雷器可使过电压从 1 422 kV 下降至 1 340 kV, 过电压水平仅降低 5.8%。因此,通常情况下不建议 采用在杆塔中点处加装线路避雷器的方式来限制该 过电压。

3.2.4 输电线路长度

±800 kV 向家坝—上海直流输电工程线路长度为 1907 km,在不同的线路长度下,故障极线路中点发生接地故障,健全极线路中点过电压与线路长度的关系如表 9 所示。

表 9 不同线路长度对单极接地故障过电压的影响 Table 9 Influence of line length on single-pole grounding fault overvoltage

线	路长度/km	过电压/kV	线路长度/km	过电压/kV
	1 500	1 249	2 100	1 255
	1 700	1 254	2 300	1 279
	1 900	1 253		

由表9可以看出,随着直流输电线路长度逐渐 增加,过电压水平略有升降,但变化规律不明显。这 主要是因为线路长度变化并不会对互感耦合系数产 生太大影响,故特高压直流线路长度变化对该过电 压幅值的影响通常不大。

3.2.5 输送功率

直流系统双极平衡运行方式下,几种典型输送 功率运行工况对单极接地故障过电压的影响情况如 表 10 所示,其中输送功率为标幺值。

表 10 不同输送功率对单极接地故障过电压的影响 Table 10 Influence of transferring power on single-pole grounding fault overvoltage

输送功率	过电压/kV	输送功率	过电压/kV
0.10	1 264	0.75	1 245
0.25	1 256	1.00	1 2 3 9
0.50	1 252	1.05	1 2 2 9

由表 10 可以看出,随着输送功率增加,过电压 水平呈下降趋势。当输送功率从 0.10 p.u. 增大到 1.05 p.u.,过电压水平仅下降 2.8%,可见输送功率对 单极接地故障过电压影响较小。

#### 4 结论

6

a. 故障极线路发生单极接地故障时,会在沿线 产生2次电流跃升,由于极线间的电磁耦合作用,在 健全极线路上也会产生2次反向电流跃升,2次电 流脉冲会对健全极线路对地电容反向充电,从而造 成健全极线路电压在额定电压的基础上发生2次跃 升,从而导致过电压。

b. 直流滤波器主电容是影响单极接地故障过电 压的最关键因素,适当控制主电容数值,就可以有效 地控制单极接地故障过电压幅值;另外,在总的主电 容相接近的情况下,直流滤波器型式(双调谐或三调 谐等)对单极接地故障过电压影响不大。研究表明, 为了使单极接地故障过电压水平不超过 1.7 p.u., ± 800 kV 特高压线路直流滤波器主电容参数宜控制 在 1~2 μF。

c. 直流输电线路结构及其参数主要包括极导线 对地高度、极间距离、极导线分裂间距、极导线分裂 数、子导线横截面积等因素,它们会对单极接地故障 过电压产生一定影响,但影响幅度通常不大,考虑到 直流线路电磁环境的限制,直流输电线路结构及其参 数通常变化不大,故实际上直流输电线路结构及其 参数通常对单极接地故障过电压影响不大。杆塔接 地电阻一般对单极接地故障过电压影响也很小,当 杆塔接地电阻由 0 Ω 增大到 15 Ω,过电压仅下降 3.2%。另外,直流控制系统对该过电压无影响,输电 线路长度以及输送功率对该过电压影响不大。

d. 在线路中点杆塔装设线路避雷器可以适当降低该过电压,但效果不明显;在过电压幅值为1.78 p.u. 情况下,若在线路杆塔中点装设一只与换流站极线 处特性相同的避雷器,过电压仅下降5.8%。因此, 通常不建议采取在线路中点装设线路避雷器的方 式来限制单极接地故障过电压。

#### 参考文献:

- [1] 周浩. 特高压交直流输电技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2014: 13-20.
- [2] 郑晓冬,邰能灵,杨光亮,等.特高压直流输电系统的建模与仿真
   [J].电力自动化设备,2012,32(7):10-14,61.
   ZHENG Xiaodong,TAI Nengling,YANG Guangliang, et al. Modeling

and simulation of UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7):10-14, 61.

[3] 张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究[J]. 中国电机 工程学报,2007,27(22):1-7.

ZHANG Wenliang,YU Yongqing,LI Guangfan,et al. Researches on UHVDC technology[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(22): 1-7.

[4] 莫丽琼. ±800 kV 特高压直流输电系统谐波不稳定研究[J]. 电 力自动化设备,2012,32(5):118-122,146. MO Liqiong. Study of harmonic instability for ±800 kV UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):118-122,146.

- [5] MELVOLD D J, ODAM P C, VITHAYATHIL J J. Transient overvoltages on an HVDC bipolar line during monopolar line faults[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977,96(2):591-601.
- [6] 饶宏,张东辉,赵晓斌,等. 特高压直流输电的实践和分析[J]. 高 电压技术,2015,41(8):2481-2488.
   RAO Hong,ZHANG Donghui,ZHAO Xiaobin,et al. Practice and analyses of UHVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2481-2488.
- [7] 邓旭,王东举,沈扬,等. ±1100 kV 准东—四川特高压直流输电 工程主回路参数设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):133-140.
   DENG Xu,WANG Dongju,SHEN Yang,et al. Design of main circuit parameters for ±1100 kV UHVDC power transmission project from Zhundong to Sichuan[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(4):133-140.
- [8] 王德林,吕鹏飞,阮思烨,等. 特高压直流双极输电线路互感影响 及对策研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(17):4353-4360.
  WANG Delin,LÜ Pengfei,RUAN Siye, et al. Effect of mutual inductance between bipolar transmission lines of UHVDC and proposal of countermeasure[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35 (17):4353-4360.
- [9]张万荣,黄莹,荷锐锋,等.±800 kV 特高压直流工程直流滤波器 设计关键问题研究[J].南方电网技术,2009,3(6):35-39.
  ZHANG Wanrong,HUANG Ying,GOU Ruifeng, et al. Study on the key issues of DC filter design for ±800 kV UHVDC transmission projects[J]. Southern Power System Technology,2009,3(6): 35-39.
- [10] 张文亮,陆家榆,鞠勇,等. ±800 kV 直流输电线路的导线选型研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(27):1-6.
  ZHANG Wenliang,LU Jiayu,JU Yong, et al. Design consideration of conductor bundles of ±800 kV DC transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(27):1-6.
  [11] 朱艺颖,刘翀,王薇薇,等. 同塔双回特高压直流线路过电压研
- [11] 未乙類, 刘翀, 主微微, 等. 问塔双回径简压直流线路过电压研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8):2225-2229.
   ZHU Yiying, LIU Chong, WANG Weiwei, et al. Study on overvoltage in UHVDC double-circuit transmission lines on same tower[J]. Power System Technology, 2013, 37(8):2225-2229.
- [12] 吴驰,张龙伟,朱军,等. 共走廊同塔交直流输电线路电磁耦合 分量的计算分析[J]. 中国电力,2013,46(4):43-47.
  WU Chi,ZHANG Longwei,ZHU Jun,et al. Calculation and analysis on electromagnetic coupling component of AC/DC transmission lines on the same tower built in same corridor[J]. Electric Power,2013,46(4):43-47.
- [13] 周全,別睿,涂莉,等. ±800 kV 直流线路故障过程中电磁耦合特 性与保护研究[J]. 电网技术,2014,38(8):2133-2140.
  ZHOU Quan,BIE Rui,TU Li,et al. Research on electromagnetic coupling characteristics during fault process in ±800 kV UHVDC transmission line and its protection strategy[J]. Power System Technology,2014,38(8):2133-2140.
- [14] 周沛洪,吕金壮,戴敏,等. ±800 kV 特高压直流线路缓波前过 电压和绝缘配合[J].高电压技术,2009,35(7):1509-1517.

(下转第13页 continued on page 13)

106-111.

ZHOU Chunxia,YU Yue,ZHAO Han,et al. Influence of zerosequence current compensation coefficient setting on earth-fault distance protection for double circuit UHVAC transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology,2012, 36(12):106-111.

[20] 焦彦军,侯仰栋,章政杰,等. 基于分布参数的特高压交流双回 长线路距离保护[J]. 电网技术,2008,32(2):119-123.

JIAO Yanjun, HOU Yangdong, ZHANG Zhengjie, et al. Distance protection of UHV AC double-circuit long transmission line based on distributed parameters [J]. Power System Technology,

#### 2008, 32(2):119-123.

作者简介:



王 艳(1981—),女,黑龙江富裕人, 讲师,博士,从事电力系统继电保护方面的 研究:

郝良霞(1990 — ), 女, 河北保定人, 硕 士研究生, 从事电力系统继电保护方面的研 究(E-mail: 8957979900@qq.com)。

王艳

### Fault location algorithm for double-circuit UHV transmission lines on same tower WANG Yan, HAO Liangxia, XU Yuqin

(School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract**: A fault location method based on the amplitude characteristics of hyperbolic cosine function is presented for the double-circuit UHV transmission lines on same tower. The half-wave Fourier narrow-band filtering algorithm is applied to extract the electrical fundamental components of both ends and the sixsequence component method is then applied to decouple them. A hyperbolic cosine fault locating function is constructed based on the homotopic positive-sequence fundamental components and the reference point producing the maximum amplitude of fault locating function is taken as the fault location. Theoretical analysis and simulative test prove that, immune to the system impedance, fault point transition resistance, line distributed capacitive current and other factors, the method has high fault locating accuracy and quick calculating speed, meeting the requirements of site applications.

Key words: UHV power transmission; AC power transmission; double-circuit transmission lines on same tower; electric fault location; narrow-band filtering; fault locating function

(- way o se communed from page o)

ZHOU Peihong,LÜ Jinzhuang,DAI Min,et al. Slow front overvoltage and insulation coordination of  $\pm 800 \text{ kV}$  UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7):1509-1517.

[15] 吴娅妮,蒋卫平,朱艺颖,等. 特高压直流输电线路故障过电压的研究[J]. 电网技术,2009,33(4):6-10,27.

WU Yani, JIANG Weiping, ZHU Yiying, et al. Research on inner overvoltage in UHVDC transmission line caused by flashover to ground fault[J]. Power System Technology, 2009, 33(4):6-10, 27. 作者简介:



周 浩(1963—),男,浙江绍兴人,教 授,博士研究生导师,博士,主要从事电力系 统过电压、直流输电等方面的研究工作; 李济沅(1992—),男,黑龙江佳木斯 人,硕士研究生,研究方向为电力系统过电压 (E-mail:lijiyuan\_ee@zju.edu.cn)。

## Overvoltage generation mechanism during single-pole grounding fault of ± 800 kV UHVDC transmission lines and its influencing factors

ZHOU Hao, LI Jiyuan, WANG Dongju, QIU Yuting, LI Sha, HAN Yuchuan (College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The overvoltage process of single-pole grounding fault of UHVDC transmission line is divided into two parts:the first voltage jump and the second voltage jump. The generation mechanism of two voltage jumps is studied based on the electromagnetic coupling between two poles and the wave process. The influences of different factors on the overvoltage are analyzed, such as main DC filter capacitor, DC filter type, DC control system, grounding resistance of line tower, arrester installed on tower at line midpoint, transmission line parameters, transferring power, etc. Simulative results show that, the main capacitor of DC filter is a critical factor to limit the overvoltage while the others have little effect on the overvoltage. Recommended capacitance of the main capacitor of DC filter for  $\pm 800 \, \text{kV}$  UHVDC lines is from 1  $\mu$ F to 2  $\mu$ F for limiting the overvoltage within 1.7 times of rated voltage.

**Key words**: UHV power transmission; DC power transmission; single-pole grounding fault; overvoltage; mechanism analysis; failure analysis; influencing factors; wave process