

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.07.012

特高压高补偿度串补线路潜供电弧特性研究

颌雅迪¹, 何柏娜¹, 孟涛², 李辉³, 宁家兴¹, 孔杰¹, 王乐森¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074;
3. 中国电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要: 高补偿度串补在远距离大容量特高压输电线路中有广阔的发展前景,但串补输电线路发生单相接地故障产生的潜供电流包含高幅值低频分量,不利于电弧快速熄弧。针对此问题,文中基于串补输电线路产生潜供电弧的机理,采用 ATP-EMTP 电磁暂态程序建立特高压串补系统仿真模型,并分别研究采用小电阻短接故障相串补以及联动旁路串补措施对潜供电流、恢复电压的抑制效果。结果表明,潜供电流的衰减速度与串补被短接或旁路的时刻有关,在断路器跳闸前将串补短接或旁路,可加快电弧熄弧速度。该研究结果对特高压大容量远距离高补偿度串补输电线路的工程设计具有参考价值。

关键词: 高补偿度串补; 潜供电流; 恢复电压; 短接电阻; 联动旁路

Research on Secondary Arc Characteristics of UHV Lines With High Compensation Degree Series Compensation

XIE Yadi¹, HE Baina¹, MENG Tao², LI Hui³, NING Jiaxing¹, KONG Jie¹, WANG Lemiao¹

(1. Shandong University of Technology, College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong Zibo 255049, China; 2. Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: The high compensation degree series compensation has broad prospects for development in UHV transmission lines with long distance and large capacity. However, there is a high amplitude low frequency component of the secondary arc current produced by the single phase grounding fault occurring in the series compensation transmission lines, which is not conducive to the arc rapidly extinguishing. To solve this problem, based on the secondary arc current mechanism of series compensated transmission lines, the simulation model of series compensated UHV transmission lines is established by using ATP-EMTP simulation program, and the suppression effects of series compensation of short-connection fault with small resistance and series compensation of linkage bypass on the secondary arc current and recovery voltage are studied respectively. The results show that the decay speed of the secondary arc current is related to the short circuit or bypass time of the series compensation. Shorting or bypassing the series compensation before the breaker trips can increase the arc extinguishing speed. The research results have reference value for the design of UHV and high capacity long distance high compensation degree series compensated transmission lines.

Key words: high compensation degree series compensation; secondary arc current; recovery voltage; short connection circuit resistance; linkage bypass

收稿日期:2018-11-01; 修回日期:2019-01-20

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2016EL17);山东省高等学校科技计划项目(J14LN27)。

Project Supported by Shandong Provincial Natural Science Fund Project(ZR2016EL17), Shandong Province Science and Technology Plan Projects(J14LN27).

0 引言

串联补偿装置可补偿线路电抗,增大线路输电能力,保证系统的暂态稳定性^[1-3]。远距离大容量特高压输电对串补装置的串补度有更高的需求^[4-8]。线路中加装串补装置时,将产生高幅值低频分量,使潜供电流过零点次数减少,电弧难以快速熄弧,影响断路器重合闸^[9-13]。目前一般采用线路保护联动旁路串补措施来抑制线路潜供电流,而文[14]中采用一定数值小电阻短接故障相串补电容的方法加快了潜供电弧的熄灭,但对于高补偿度时的抑制效果有待研究。

文中基于1 000 kV 长治—南阳—荆门特高压串联补偿系统,采用 ATP-EMTP,分析特高压线路加装串补装置后潜供电流及恢复电压的变化规律,研究提高串补度对潜供电流与恢复电压特性的影响,并分析采用小电阻短接故障相串补措施和串补联动旁路措施时短接与旁路时间差异对潜供电流和恢复电压的抑制效果。该研究结果对特高压大容量远距离高补偿度串补输电线路的工程设计具有参考价值。

1 特高压线路加装串补对潜供电流和恢复电压影响特性分析

1.1 输电线路加装串补对潜供电流的影响

串补输电线路发生单相接地故障,短路电流经串补装置产生过电压使电容器组储存能量,断路器跳闸后,电容器组储存的能量经输电线路、故障点及并联电抗、中性点小电抗组成 RLC 回路放电,故障处有电流产生^[15-18],见图1。非故障相通过相间电容的相互作用产生电容电流,此时潜供电流 i_x 由两部分组成,即

$$i_x = i_{x_1} + i_{x_2} \quad (1)$$

式(1)中: i_{x_1} 为健全相线路电压经相间耦合作用产生的电容电流; i_{x_2} 为 RLC 回路的放电电流。

图1中: L 表示高抗电感; L_n 表示中性点小电抗的电感; C_m 表示相间电容。串补装置原理图见图2。图2中: C 表示电容器组; MOV 表示金属氧化物限压器; D 表示阻尼装置; G 表示放电间隙; S 即旁路开关^[19-20]。

用 U 表示非故障线路相电压,健全相通过相间电容产生的潜供电流包含一个工频分量和一个衰减的直流分量,其表达式为

$$i_{x_1} = \omega C_m U \cos(\omega t + \varphi) + A e^{-t/T_s} \quad (2)$$

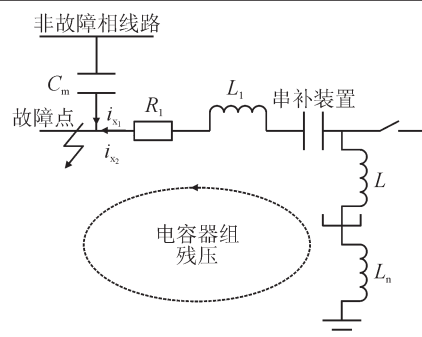


图1 串补输电线路发生单相接地故障时潜供电流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of secondary arc current when a single-phase grounding fault occurring in a series capacitor lines

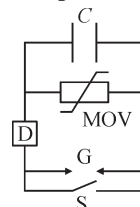


图2 串补装置原理图

Fig. 2 Schematic diagram of series compensator

式(2)中: ω 为工频角频率; φ 为相角; $T_s = L/R$, 为时间常数。

串联补偿电容器组放电产生的潜供电流 i_{x_2} 的简化电路见图3。

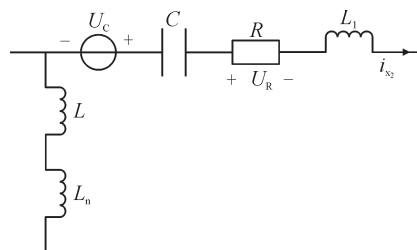


图3 串补电容器组产生潜供电流简化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of secondary arc current produced by series capacitor banks

由 KVL: $L'C \frac{d^2 U_c}{dt^2} + RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0$, 求解得

$$i_{x_2} = \frac{U_c}{\omega_c L} e^{-\delta t} \sin(\omega_c t) \quad (3)$$

式(3)中: L' 为输电线路、并联电抗及中性点小电抗电感之和; U_c 为电容器组残压; ω_c 为放电角频率 ($\omega_c^2 = \frac{1}{L'C} - \left(\frac{R}{2L'}\right)^2$); δ 为衰减系数 ($\delta = R/2L'$); R 为输电线路电阻、并联电抗及小电抗电阻及弧道电阻。

在式(2)、(3)中,因 R 比 L' 小得多,所以 $\omega_c^2 \approx \frac{1}{L'C} = \omega^2 \frac{X_c}{X'}$, 在串连补偿输电线路中, $X' > X_c$, 则 $f_c < f$, 即串补电容器组放电电流频率为低频。线路串补度越大,串补容抗就越大,电容器组残压

U_c 因短路电流的作用而升高, 放电频率 ω_c 增大, 由串补电容器组产生的潜供电流 $|i_{s2}|$ 增大, 总的潜供电流 i_s 幅值增大。

串补输电线路上发生单相接地故障时, 通过采用联动旁路措施或短接故障相串补措施将串补装置旁路或短接, 电容器组残压通过阻尼回路 D 放电, 消耗原来储存在电容器中的能量。串补被旁路或短接的速度越快则消耗能量越多, 对潜供电流的影响就越小, 可加速潜供电弧的熄弧速度。

1.2 输电线路加装串补对恢复电压的影响

串补线路发生单相接地故障时, 为了快速切除故障使断路器重合闸, 必须加快电弧熄弧速度。影响电弧熄弧速度的因素除了潜供电流、风速风向等, 恢复电压的影响也不能忽略^[21-23]。若恢复电压幅值较大, 电弧可能重燃使断路器重合闸不成功。基于戴维南等值简化电路见图4。分析发生单相接地故障串补不旁路时对恢复电压的影响。

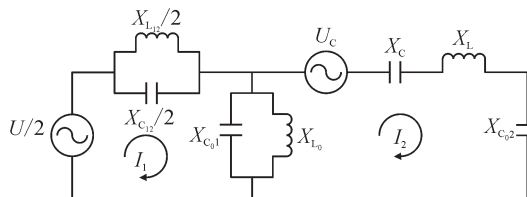


图4 串补未旁路时故障相恢复电压等值电路图

Fig. 4 Circuit diagram of fault phase recovery voltage equal value when the series compensation not bypass

图4中: U 表示非故障相等值电压源电动势; X_L 表示输电线路电抗、并联电抗及小电抗零序电抗; X_{C12} 表示相间容抗; X_{L12} 表示相间感抗; X_{C01} 、 X_{C02} 代表故障位置分别到输电线路两端的对地容抗; X_c 为串补电容器组容抗; U_c 为串联补偿电容器组残压。因 $R \ll L'$, 因此 R 可忽略不计, 根据图4列写回路方程为

$$\begin{cases} (a+b)I_1 - bI_2 = 2/U \\ -bI_1 + (b+X)I_2 = -U_c \\ X = X_c + X_1 + X_{C02} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中

$$\begin{cases} a = X_{L12} X_{C12} / 2(X_{L12} + X_{C12}) \\ b = X_{C01} X_{L0} / X_{C01} + X_{L0} \\ X_{L0} = X_L + 3X_n \\ X_{C12} = X_L^2 / (X_n + 3X_L) \\ X_{L12} = 3X_L X_{L0} / (X_{L0} - X_L) \end{cases} \quad (5)$$

解得

$$\begin{cases} I_1 = \frac{(b^2 + bX)U - (g + 2b^2)U_c}{gb} \\ I_2 = \frac{bU - 2(a+b)U_c}{g} \\ g = ab + aX + bX \end{cases} \quad (6)$$

假设线路故障发生在高抗附近, 此时 X_{C01} 趋于无穷大, $b = X_{L0}$, $X_{C02} = X_{C0}$, 代入式(7)解得故障点处的恢复电压为

$$U_X = I_2 X_{C0} = \frac{bX_{C0}}{g}U - \frac{2(a+b)X_{C0}}{g}U_c \quad (7)$$

由式(7)可知, 恢复电压包括两部分, 一部分与非故障相等值电压源 U 有关, 另一部分与电容器组残压 U_c 有关。因 $X_{C0} \gg X_{L0}$, $X_{C12} \gg X_{L12}$, 所以

$$U_X = \frac{bU - 2(a+b)U_c}{g}X_{C0} < bUX_{C0}/g, \text{ 表明 } U_c \text{ 的存在}$$

使恢复电压和无串补的情况相比有所减小, 串补度 K 越大, 串补电容器组容抗 X_c 和经过串补电容器组短路电流随之增大, U_c 越大, 反而使故障处恢复电压的幅值降低。

串补线路发生单相接地故障且采用短接故障相串补措施时, 电容器组残压通过阻尼回路放电, $|U_c|$ 持续减小, 若 U_c 减小为0, 串补装置等同于被小电阻短接, 故障相恢复电压简化电路见图5。在该条件下, 列写回路电流方程为

$$\begin{cases} (a+b)I_1 - bI_2 = 2/U \\ -bI_1 + (b+X')I_2 = 0 \\ X' = R + X_1 + X_{C02} \end{cases} \quad (8)$$

解得

$$\begin{cases} I_1 = (b+X')U/(2g') \\ I_2 = bU/(2g') \\ g' = ab + aX' + bX' \end{cases} \quad (9)$$

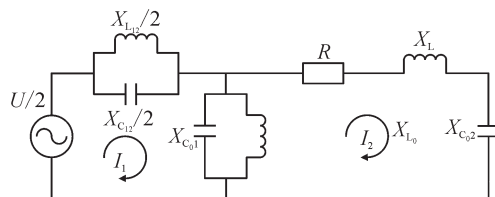


图5 短接小电阻时的故障相恢复电压等值电路图

Fig. 5 Circuit diagram of fault phase recovery voltage equal value when short connection small resistance

假设线路故障在高抗附近, 则 X_{C01} 趋于无穷大, $b = X_{L0}$, $X_{C02} = X_{C0}$, 这时故障点恢复电压 U_X' 为

$$U_X' = I_2 X_{C0} = \frac{bX_{C0}}{2g'}U \quad (10)$$

由式(10)可知, 电容器组残压对恢复电压的幅

值没有影响,此时恢复电压的大小只与健全相电源 U 的大小有关。

同理,当特高压串补输电线路发生单相接地故障且采用联动旁路串补措施时, U_c 对恢复电压也无影响。

2 提高串补度对潜供电流及恢复电压的仿真分析

假设 X 为补偿前线路电抗, X_c 为串联补偿等效容抗,则线路补偿度为 $K=X_c/X$,其中 $0\leq K<1$ 。输电线路串补度一般取25%~70%,现有超、特高压串补度一般为40%左右^[24-25],而远距离大容量输电有加装更高补偿度串补的需求,文中考虑串补度为40%、50%、60%、70%的情况。

2.1 特高压串联补偿输电模型搭建

基于1 000 kV长治—南阳—荆门特高压串联补偿输电系统,在南阳—荆门两站串补输电线路发生单相接地故障时,对潜供电流、恢复电压仿真分析,特高压串补系统接线见图6。在整个仿真过程中,分析无串补及串补度分别为40%、50%、60%、70%时的情况,故障假设在线路的中间位置。线路在0.025 s时出现故障;0.075 s时断路器跳闸;0.350 s时故障切除。输电线路模型参数见表1。

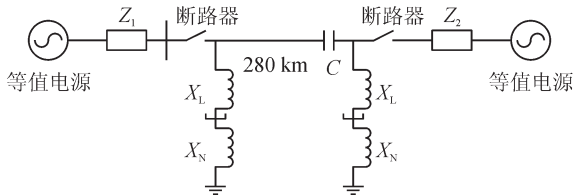


图6 1 000 kV 特高压系统接线图

Fig. 6 Simulation model of 1 000 kV UHV system

表1 输电线路模型参数

Table 1 Transmission line model parameters			
正序参数	数值	负序参数	数值
$R_l/(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	0.008 27	$R_l/(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	0.275 3
$X_l/(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	0.269 80	$X_l/(\Omega\cdot\text{km}^{-1})$	0.739 0
$C_l/(\mu\text{F}\cdot\text{km}^{-1})$	0.014 00	$C_l/(\mu\text{F}\cdot\text{km}^{-1})$	0.009 5

2.2 不同串补度下潜供电流与恢复电压的变化规律分析

南阳—荆门两站之间加装不同补偿度的串联补偿装置时,其潜供电流、恢复电压仿真结果见图7、8,表2。

由图7、图8和表2可知,串补线路发生单相接地故障,电容器组残压放电产生高幅值的低频震荡电流,与无串补时相比 i_k 明显增大, K 越大, U_c 就越

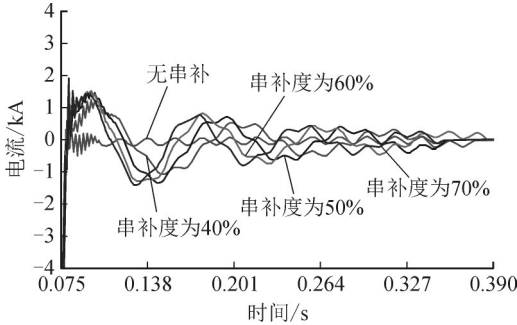


图7 无串补、串补度分别为40%、50%、60%、70%时的潜供电流仿真波形

Fig. 7 No series compensation, the series compensation was 40%, 50%, 60% and 70% respectively Simulation waveform of secondary arc current

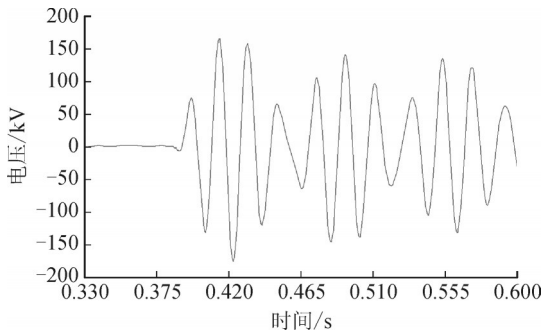


图8 串补度为70%时的恢复电压仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform of recovery voltage when the series compensation degree is 70%

表2 不同串补度下的恢复电压和断路器跳闸后0.3 s时的潜供电流

Table 2 Under different series compensator degree that recovery voltage and secondary arc current at 0.3 s after circuit breaker trip

参数	数值				
串补度/%	0	40	50	60	70
恢复电压最大值/kV	187	180	172	159	155
潜供电流/A	33	84	95	104	124

大,潜供电流过零点速度加快,产生的潜供电流幅值 i_k 也增大。若线路无串补装置, i_k 在断路器跳闸后0.15 s内就可达到稳定工频电流,线路装设串补装置后, i_k 随低频分量的衰减而缓慢减小。电弧熄弧后,出现恢复电压,输电线路加装串补时恢复电压的幅值与无串补时相比有所减小, K 越高, U_c 的幅值越小。由文[26]中特高压潜供电流熄弧时间试验数据可知,在恢复电压梯度为20 kV/m、全补偿的情况下, i_k 为40 A时电弧熄灭需0.7 s。文中线路加装串补度为40%以上的串补装置时, $|U_c|$ 为155~180 kV,断路器跳闸0.3 s后仍为84~124 A,不符合1 s单相重合

闸的要求,需采取相应抑制措施。

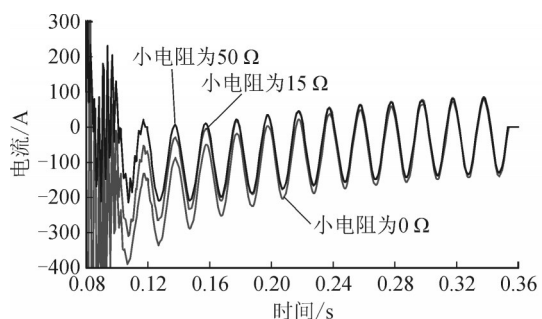
3 高补偿度串补线路潜供电流抑制措施研究

3.1 小电阻短接故障相串联补偿时潜供电流恢复电压的影响

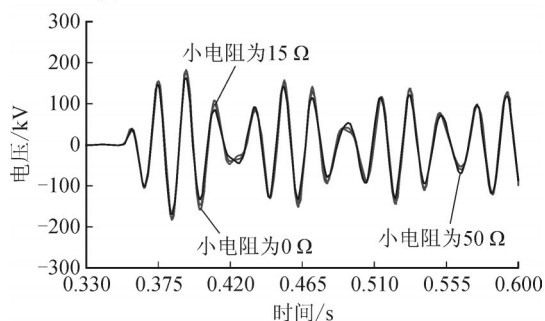
线路发生单相接地故障,因串补电容器的作用,潜供电弧中存在低频分量,采取短接小电阻或联动旁路措施,可近似认为串补电容器组残压经阻尼回路放电,最终衰减为零。该过程中,电流不会发生突变,转换过程中产生一定直流分量,而直流分量的衰减快慢与短接时刻和短接小电阻值有关。

3.1.1 断路器跳闸前将串补短接

以串补度70%为例,提前于故障相将串补装置短接小电阻分别取0、15、50 Ω ,分析在不同串补度下不同小电阻对潜供电流、恢复电压的影响,其结果见图9、表3。



(a) 小电阻分别取0、15、50 Ω 时的潜供电流



(b) 小电阻分别取0、15、50 Ω 时的恢复电压

图9 串补度为70%小电阻分别取0、15、50 Ω 时的潜供电流和恢复电压仿真图

Fig. 9 Series complement degree of 70%, resistance were taken 0、15、50 Ω secondary arc current and recovery voltage of simulation diagram

由图9和表3仿真结果可知,在串补度相同的前提下,短接小电阻值越大,潜供电流衰减速度越快。当短接小电阻值相同, K 不同时,串补度越大,潜供电流的衰减速度越慢。潜供电弧熄弧后,出现恢复电压,小电阻在断路器跳闸前将串补短接时,恢复电压会略微降低,与无串补时相比,无论串补度和短接小电阻值多大,其恢复电压幅值都不会超

表3 不同串补度不同短接小电阻的情况下潜供电流从断路器断开到衰减到过零点所需时间和恢复电压的大小

Table 3 In the case of different series compensation degree and connection resistance, disconnect from the circuit breaker to the time required to decay to the 0 points and the size of the recovery voltage

序号	串补度/%	短接小电阻/ Ω	从断路器断开至衰减到过零点所需时间/ms	恢复电压最大值/kV
1	40	0	102	175
		15	49	174
		50	39	173
2	50	0	105	172
		15	55	170
		50	41	171
3	60	0	110	169
		15	64	167
		50	42	168
4	70	0	120	167
		15	100	166
		50	45	165

过无串补时的187 kV,因此在断路器跳闸前短接串补可加速电弧熄弧速度。

3.1.2 断路器跳闸后将串补短接

若小电阻在断路器断开后将串补短接,此时串补电容器组储存的能量在潜供电流产生后放电,放电电流对潜供电流、恢复电压有影响,其影响特性与串补短接时刻紧密联系。以串补度70%为例,断路器跳闸后串补被短接,分析小电阻取各个值时在不同短接时刻对潜供电流及恢复电压的作用规律,串补短接时间分别取断路器跳闸后0.005、0.010、0.015 s,仿真结果见图10、表4。

由图10、表4的仿真结果知,小电阻在断路器跳闸后将串补电容器短接时,短接时间越长,直流分量衰减越缓慢,潜供电流恢复至工频出现稳定过零点需要时间越长。短接不同小电阻时,小电阻值越大,直流分量减小的速度越快。恢复电压出现时,小电阻在断路器跳闸前短接串补, $|U_x|$ 在165~175 kV之间;在断路器跳闸后短接串补, $|U_x|$ 在160~178 kV之间,故短接时刻的差异对恢复电压几乎无影响。

3.2 故障相串补被旁路时的潜供电流、恢复电压

3.2.1 断路器跳闸前将串补旁路

以串补度70%为例, $t=0.07$ s时将串补旁路,分析无串补、串补不旁路、提前旁路时潜供电流与恢复电压变化规律,其仿真结果见图11、表5。

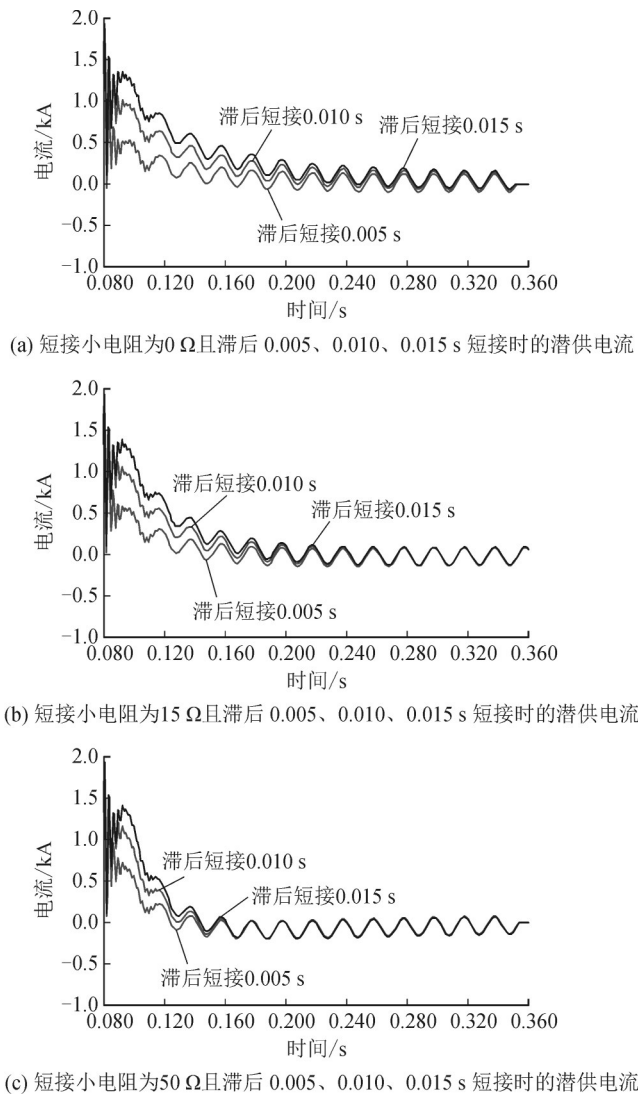


图 10 串补度为 70%、短接小电阻分别为 0、15、50 Ω 且滞后 0.005、0.010、0.015 s 短接时的潜供电流仿真图

Fig. 10 Series complement degree is 70%, short connect small resistance is 0、15、50 Ω and lagging 0.005, 0.010, 0.015 s short circuit connection of secondary arc current

由图 11、表 5 可知,串联补偿线路出现单相接地故障后,随着串补度 K 增大潜供电流幅值呈上升趋势,而恢复电压幅值 $|U_x|$ 缓慢下降。提前旁路与串补不旁路、无串补相比,潜供电流幅值降低,在断路器跳闸 0.18 s 后,潜供电流幅值为 74 A,与串补不旁路时的 415 A 相比小得多,却高于无串补时的 46 A。电弧熄灭后,出现恢复电压,提前旁路时恢复电压峰值为 141 V,大于串补不旁路时的 131 kV 却小于无串补时的 187 kV。所以在断路器跳闸前将串补旁路,可降低串补电容器残压对潜供电流和恢复电压的影响,有利于电弧快速灭弧。

3.2.2 断路器跳闸后旁路串补

以串补度 70% 为例,分别在断路器跳闸后 0.005、0.010、0.015 s 时将串补旁路,其仿真结果见

表 4 不同串补度下短接小电阻分别为 0、15、50 Ω 且滞后 0.01 s 短接时的恢复电压

Table 4 In the case of different series complement degree the recovery voltage that the short connection resistance are respectively 0、15、50 Ω and Lag 0.01 s short connection

序号	串补度/%	短接小电阻/Ω	恢复电压最大值/kV
1	40	0	178
		15	171
		50	173
2	50	0	177
		15	168
		50	170
3	60	0	176
		15	164
		50	167
4	70	0	172
		15	160
		50	165

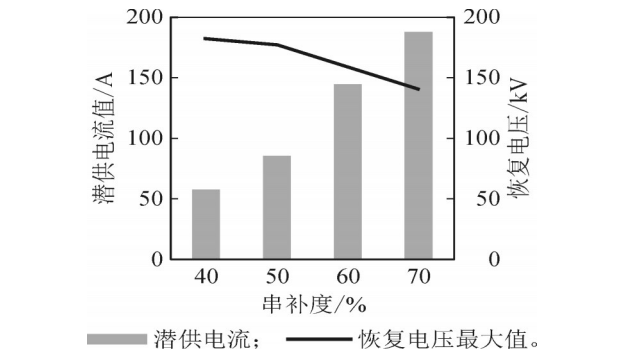


图 11 提前旁路时潜供电流与恢复电压随串补度变化曲线图

Fig. 11 Under the precondition of advance bypass, curve diagram of the variation of secondary arc current and recovery voltage with series complement degree

表 5 串补度为 70% 的情况下提前旁路、串补不旁路和无串补时的恢复电压及断路器跳闸 0.18 s 后的潜供电流

Table 5 The recovery voltage that advance bypass, no bypass and no series complement in case of series compensation degree of 70% and the secondary arc current of the circuit breaker after the trip of 0.18 s

名称	提前旁路	串补不旁路	无串补
潜供电流/A	74	415	46
恢复电压最大值/kV	141	131	185

图 12、表 6。

由图 12、表 6 可知,串补输电线路出现单相接地故障,旁路时间越长,直流分量衰减越慢,潜供电流恢复至工频出现稳定过零点需要的时间就越长。当潜供电弧灭弧后,出现恢复电压,在不同的串补

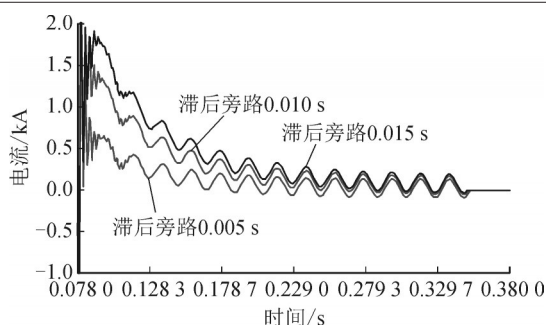


图12 串补度为70%的情况下滞后旁路0.005、0.010、0.015 s时的潜供电流

Fig. 12 Lag bypass 0.005、0.010、0.015 s of Secondary arc current in the case series compensation degree of 70%

表6 不同串补度下分别滞后旁路0.005、0.010、0.015 s时的潜供电流和恢复电压

Table 6 Under different series compensator degree, lagging behind the bypass respectively for 0.005 s, 0.01 s, 0.015 s secondary arc current and recovery voltage

串补 度/%	滞后旁 路时间/ ms	潜供电流最大值/A			恢复电 压值/ kV
		断路器跳闸后时间			
		10 ms	100 ms	260 ms	
40	5	220	115	51	180
	10	705	231	74	178
	15	716	377	81	173
50	5	335	141	59	180
	10	745	256	84	176
	15	857	363	93	173
70	5	316	173	63	180
	10	848	350	82	177
	15	967	453	93	172

度下,滞后旁路时间对恢复电压影响较小。

4 结论

1)特高压串补线路发生单相接地故障,在不采取抑制措施的情况下,潜供电流幅值与无串补时相比明显增大,串补度越高,潜供电流的幅值越大,而恢复电压的幅值随串补度的增大逐渐降低,但降低的幅度明显低于潜供电流升高的幅度。

2)采用小电阻短接故障相串补措施时加快了直流分量的衰减,其抑制效果与短接小电阻的阻值及短接时刻有关,当小电阻较大时,潜供电流可在很短的时间内衰减为稳定的工频电流,能加快电弧灭弧速度,提高重合闸可靠性。

3)采用串补联动旁路措施时,其抑制效果与串补被旁路的时刻有关。断路器跳闸前将串补旁路,串补装置对潜供电流消极作用大大减小。断路器

跳闸后将串补旁路,旁路时间越短,潜供电流幅值越低,对电弧熄弧越有利。

参考文献:

- [1] 童涛,顾丹珍,崔勇,等.交流1 000 kV与500 kV/200 kV同塔四回线路的潜供电流问题研究[J].高压电器,2017,53(11):191-196.
TONG Tao, GU Danzhen, CUI Yong, et al. Study on secondary arc current of four-circuit on the same tower lines of AC 1 000 kV and 500 kV/200 kV[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 191-196.
- [2] 胡延涛.串补站用旁路隔离开关研究设计[J].高压电器,2015,51(11):182-186.
HU Yantao. Design of bypass disconnector for series compensation station[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 182-186.
- [3] 周启文,潘勇斌,王德昌,等.500 kV串补系统中火花间隙系统研究[J].高压电器,2012,48(8):40-44.
ZHOU Qiwen, PAN Yongbin, WANG Dechang, et al. Improvement of spark gap system for 500 kV series compensation system[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 40-44.
- [4] 赵媛,徐党国,彭珑,等.500 kV上承III线带串补工程人工单相瞬时接地故障试验分析[J].高压电器,2015,51(5):59-62.
ZHAO Yuan, XU Dangguo, PENG Long, et al. Analysis on artificial transient single-phase grounding test for 500 kV Shang-Cheng Line III with fixed series compensator[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 59-62.
- [5] 冯南战,张金凤,郭洁.配电网串联补偿装置稳态和暂态特性研究[J].高压电器,2017,53(11):51-56.
FENG Nanzhan, ZHANG Jinfeng, GUO Jie. Research on steady and transient characteristic of series compensation device in distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 51-56.
- [6] MA Q Y, ZHENG B, BAN L G, et al. EHV/UHV transmission line with controllable unbalanced shunt reactor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1458-1466.
- [7] 孙秋芹,汪汛,刘洋,等.特高压输电线路潜供电流的暂态特性研究[J].电工技术学报,2016,31(3):97-103.
SUN Qiuqin, WANG Feng, LIU Yang, et al. Research on transient characteristic of secondary arc current of ultra high voltage transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 97-103.
- [8] 郭鹏飞,张玲,唐荣年,等.特高压同塔多回混压输电线路潜供电流的影响因素仿真分析[J].电瓷避雷器,2017,(1):41-46.
GUO Pengfei, ZHANG Ling, TANG Rongnian, et al. Simulation and analysis of the influence factors on

- secondary arc current of UHV mixed voltage multi-circuit transmission line[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2017 (1): 41-46.
- [9] 关永刚, 郭佩琪, 项祖涛, 等. 特高压串补线路短路电流的延时过零特性[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(11): 2879-2886.
- GUAN Yonggang, GUO Peiqi, XIANG Zutao, et al. Characteristics of the delayed current-zero crossing of short-circuit current occurred in the UHV series compensated transmission line[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35 (11): 2879-2886.
- [10] 郑彬, 毕天姝, 项祖涛, 等. 特高压串补线路断路器短路电流过零延迟特性及对策[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 323-333.
- ZHENG Bin, BI Tianshu, XIANG Zutao, et al. Zero-crossing delay characteristics of short circuit current passing through circuit breakers of UHV series compensated lines and countermeasures[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 323-333.
- [11] 李振强, 刘昊昕, 娄颖. 高抗过补偿对500 kV输电线路电磁暂态的影响研究[J]. *高压电器*, 2015, 51(5): 53-58.
- LI Zhengqiang, LIU Haoxin, LOU Ying. Influence of high voltage shunt reactor overcompensation on the electromagnetic transient of 500 kV transmission line[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(5): 53-58.
- [12] 阎对丰, 王培人, 王安, 等. 高压断路器近区故障试验人工链路分析研究[J]. *高压电器*, 2017, 53(8): 17-21.
- YAN Duifeng, WANG Peiren, WANG An, et al. Analysis of artificial line in high-voltage breaker short-line fault test [J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(8): 17-21.
- [13] SOHN S H, CHO G J, PARK J K, et al. Analysis of secondary arc extinction effects according to the application of shunt reactor and high speed grounding switches in transmission systems[J]. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 2014, 4(4): 324-329.
- [14] 胡玉生, 商立群, 刘培. 特高压串补输电线路熄灭潜供电弧的方法[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2014, 26 (8): 29-33.
- HU Yusheng, SHANG Liqun, LIU Pei. Secondary arc extinction in UHV transmission line with series capacitor compensation[J]. *Proceeding of the CUS-EPSA*, 2014, 26 (8): 29-33.
- [15] 栗向鑫, 曹斌, 张鹏, 等. 基于PSCAD的500 kV武一察同塔双回输电工程内过电压仿真分析[J]. *高压电器*, 2015, 51(4):84-92.
- LI Xiangxin, CAO Bin, ZHANG Peng, et al. Internal overvoltage simulation for 500 kV Wu-Cha double circuit transmission line on same tower in power transmission and transformation project based on PSCAD[J]. *High Voltage Apparatus*, 2015, 51(4):84-92.
- [16] 娄宝磊, 舒胜文, 刘畅. 真空断路器弧后仿真模型及参数优化方法研究[J]. *高压电器*, 2017, 53(5):103-108.
- LOU Baolei, SHU Shengwen, LIU Chang. Research on post-arc simulation model and parameter optimizing method of vacuum circuit breaker[J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(5):103-108.
- [17] ZANDI Z, SHESHYEKANI K, AFJEI E. On the selection of bypassing schemes affecting the secondary arc current and TRV in series compensated lines[J]. *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2012, 13(5): 1-20.
- [18] 崔博源, 李志兵, 王承玉, 等. 提高特高压串补用旁路隔离开关转换电流开合能力的方法[J]. *高压电器*, 2014, 50(8): 26-31.
- CUI Boyuan, LI Zhibing, WANG Chengyu, et al. Method to improve transfer current switching capacity for bypass disconnectors used in UHV series compensation[J]. *High Voltage Apparatus*, 2014, 50(8): 26-31.
- [19] 刘平, 刘朴, 姚远, 等. 特高压串补用火花间隙试验研究[J]. *高压电器*, 2018, 54(1):51.
- LIU Ping, LIU Pu, YAO Yuan, et al. Research on test method of spark gap for UHV series compensation device [J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(1):51.
- [20] 罗虎, 曲欣, 李慧娜, 等. 可控串补装置主动过电压保护分析与研究[J]. *高压电器*, 2011, 47(10):31.
- LUO Hu, QU Xin, LI Huina, et al. Study on the initiative overvoltage protection of thyristor controlled series compensation[J]. *High Voltage Apparatus*, 2011, 47(10): 31.
- [21] 何柏娜, 赵云伟, 刘连鑫, 等. 感应电压对断路器瞬态恢复电压特性影响的研究[J]. *高压电器*, 2016, 52(10): 8-12.
- HE Baina, ZHAO Yunwei, LIU Lianxin, et al. Research on effect of induction voltage on transient recovery voltage characteristic of circuit breaker[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(10): 8-12.
- [22] 毕天姝, 郑彬, 马其燕, 等. 特高压高补偿度串补线路潜供电流问题[J]. *电网技术*, 2017, 41(3): 863-871.
- BI Tianshu, ZHENG Bin, MA Qiyan, et al. Secondary arc current issues of uhv lines with high compensation degree series capacitors[J]. *Power System Technology*, 2017, 41 (3): 863-871.
- [23] 高山. 特高压输电线路潜供电流及其对重合闸的影响研究[D]. 保定:华北电力大学, 2009.
- GAO Shan. Study of secondary arc current in UHV transmission line and the influence to the auto reclosing[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- [24] NAGPAL M, MANUEL S H, BELL B E, et al. Field verification of secondary arc extinction logic[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(4): 1864-1872.
- [25] 曹斌, 吴志敏, 张鹏, 等. 基于PSCAD的500 kV输电线路潜供电流和恢复电压的仿真分析[J]. *高压电器*,

- 2014, 50(12):71-78.
- CAO Bin, WU Zhimin, ZHANG Peng, et al. Simulation of secondary arc current and recovery voltage for 500 kV transmission line based on PSCAD[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12):71-78.
- [26] 和彦森, 宋 杲, 曹荣江, 等. 1 000 kV 特高压输电线路潜供电弧试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 138-143.
- HE Yanmiao, SONG Gao, CAO Rongjiang, et al. Test research of secondary arc in 1 000 kV UHV double-circuit transmission lines[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(16): 138-143.
- 颀雅迪(1995—),女,硕士研究生,从事电力系统暂态特性分析。
- 何柏娜(1977—),女,博士,副教授,从事电力系统暂态特性仿真及高电压绝缘技术方面的教学与科研工作(通讯作者)。

(上接第 77 页)

- [21] LI N, ZHOU J, WANG Y, et al. Suppression of UHF partial discharge signals buried in white-noise interference based on block thresholding spatial correlation combinative de - noising method[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(5): 353-362.
- [22] 马 强, 唐 阳. 基于 PSCAD 的电力电缆局部放电信号检测仿真研究[J]. 电工技术, 2018(16): 60-61.
- MA Qinag, TANG Yang. Simulation research on PD signal detection of power cable based on PSCAD[J]. Electrical Technical Periodicals, 2018(16): 60-61.
- [23] TANG J, LIU F, ZHANG X, et al. Partial discharge recognition based on SF₆ decomposition products and support vector machine[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2012, 6(4):198.
- 秦金飞(1989—),男,硕士,工程师,主要从事电力设备高压试验、状态检测等领域的研究。