

基于混合无功功率补偿的交直流混联线路潜供电弧抑制措施

刘洋¹, 何柏娜¹, 崔荣喜², 李辉³, 吴硕¹, 孟凡涛¹, 代维汉¹, 尉元龙¹, 王硕¹,
张东进¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 国网日照供电公司, 山东 日照 276826; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430000)

摘要: 随着电压等级提高、输送功率增大, 系统无功功率变化更加频繁, 不利于熄弧, 输电线路安全稳定运行受到严重威胁。基于交直流混合无功补偿线路研究了混合无功补偿装置(hybrid reactive power compensation, HRPC)补偿度对潜供电流与恢复电压影响, 分析分级可控高抗与小电抗联动控制的措施对潜供电弧抑制效果, 提出一种改进型旁路断路器时序控制策略。结果表明, 串补度 20%、补偿度 70% 及小电抗 700 mH 时, 潜供电流与恢复电压幅值最小, 抑制效果最佳。此外, 采用潜供电弧熄灭后旁路断路器断开的控制策略能够进一步加快熄弧速率, 提高单相重合闸成功率。研究成果为 HRPC 在远距离大容量混联线路中应用提供理论依据和技术支撑。

关键词: 混合无功补偿装置; 交直流混联输电线路; 潜供电弧; 旁路断路器时序控制策略

Suppression Measures for Submarine Arc in AC/DC Hybrid Transmission Lines Based on Hybrid Reactive Power Compensation

LIU Yang¹, HE Baina¹, CUI Rongxi², LI Hui³, WU Shuo¹, MENG Fantao¹, DAI Weihang¹,
WEI Yuanlong¹, WANG Shuo¹, ZHANG Dongjin¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;
2. State Grid Rizhao Power Supply Company, Rizhao, Shandong 276826, China; 3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: With the increase of voltage level and transmission power, the reactive power of the system changes more frequently, which is not conducive to arc extinguishing and seriously threatens the safe and stable operation of transmission lines. Based on the AC/DC hybrid reactive power compensation (HRPC) line, the influence of the compensation degree of the hybrid reactive power compensation (HRPC) device on the submarine current and recovery voltage is studied. The measures of hierarchical controllable high reactance and small reactance linkage control are analyzed to suppress the submarine arc, and an improved timing control strategy for bypass circuit breakers is proposed. The results show that when the series compensation degree is 20%, the compensation degree is 70%, and the small reactance is 700 mH, the amplitude of the submarine current and recovery voltage is the smallest, and the suppression effect is the best. In addition, the control strategy of using the bypass circuit breaker to disconnect after the extinguishing of the submarine arc can further accelerate the extinguishing rate and improve the success rate of single-phase reclosing. The research results provide theoretical basis and technical support for the application of HRPC in long-distance high-capacity hybrid transmission lines.

Key words: hybrid reactive power compensation device; AC/DC hybrid transmission line; submarine arc; timing control strategy for bypass circuit breakers

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2401104); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME057); 山东省研究生教育质量提升计划项目(SDYAL2022114)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFB2401104); the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2021ME057); Graduate Education Quality Improvement Plan Project of Shandong Province (SDYAL2022114).

0 引言

电力工业是关系国计民生的基础产业,为满足我国东部和中部地区发展的能源需求^[1-2],大容量、远距离的输电技术是优化资源配置和促进国民经济发展的必然选择^[3-6],建设交直流混联线路成为未来电网发展方向^[7-10]。

伴随特高压直流线路快速发展,电网运行特性发生深刻变化,“强直弱交”矛盾突出,电网安全面临新的挑战^[11-13]。相比非混联线路,交直流混联线路存在支撑能力不足与无功电压支撑能力弱的问题^[14],致使潜供电弧熄弧难度进一步增加^[15-17],降低了重合闸成功率,不利于系统稳定运行。目前,国内外学者对潜供电弧抑制措施进行了广泛研究,文献[18]提出了电阻短接故障相串联补偿装置的方法,加快潜供电弧熄弧速率,提高单相重合闸成功率。文献[19]通过拉普拉斯变换分析了线路安装低补偿度串联补偿装置的频域特性。文献[20]研究了提高串联补偿装置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。以上文献均针对串联补偿装置对潜供电弧抑制作用进行研究,串联补偿装置通过减小系统电抗的方式降低潜供电流幅值,加快熄弧速度,但在解决混联线路间容升效应引起的过电压及线路无功补偿变化频繁问题方面存在不足。

针对上述问题,本文基于交直流混联线路耦合作用机理提出一种安装 HRPC 混联线路潜供电弧抑制措施,调节线路输送功率增长和无功功率补偿的平衡,分析了混联线路安装 HRPC 后潜供电流及恢复电压的变化规律,研究了装置补偿度对潜供电流与恢复电压幅值的影响。结合串补装置特殊结构分析了运用分级可控高抗与中性点小电抗联动控制对潜供电弧的抑制效果,研究了通过旁路断路器与主断路器单相重合闸相配合的策略以进一步加快潜供电弧熄弧速率。研究结果对交直流大容量远距离输电线路建设具有参考价值。

1 HRPC 对潜供电弧特性的影响分析

1.1 HRPC 对潜供电流的影响

当交直流混联线路交流侧发生单相接地故障时,断路器跳闸后串补装置电容器组储存的能量经

故障点电阻、线路电抗及分级可控高抗组成 RLC 回路放电^[21],故障位置产生潜供电流,潜供电流示意图如图 1 所示。

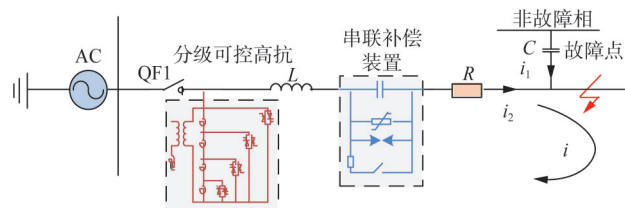


图 1 交直流混联线路故障时潜供电流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of submarine arc current during faults in AC/DC hybrid lines

图 1 中, L 为输电线路电感之和; C 为输电线路电容之和; R 为输电线路等效电阻之和。

由图 1 所示, HRPC 安装在线路两端,通过分级可控高抗与串联补偿装置产生的低频振荡减少潜供电流的过零点数量,加快熄弧速率。潜供电流 i 包含非故障相相间电容、电感产生的稳态分量 i_1 和 RLC 回路残压放电产生的暂态分量 i_2 , 即:

$$i = i_1 + i_2 \quad (1)$$

1.1.1 潜供电流稳态分量

交流输电线路发生单相接地故障,非故障与故障线路耦合模型如图 2 所示。

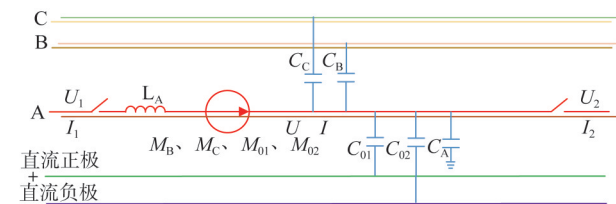


图 2 交直流混联线路耦合模型

Fig. 2 Coupling Model of AC/DC Hybrid Lines

图 2 中, A 为交流线路故障相, M_B 、 M_C 、 M_{01} 、 M_{02} 分别为非故障相与故障 A 相之间电感; C_B 、 C_C 、 C_{01} 、 C_{02} 分别为非故障相与故障 A 相之间电容; L_A 、 C_A 分别为故障 A 相单位长度的电感和对地电容(忽略损耗)。

设 x 为故障点距线路首端的距离, l 为输电线路的长度, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{-\partial I_f}{\partial x} = & j\omega C_B (U_f - U_B) + j\omega C_C (U_f - U_C) + \\ & j\omega C_{01} (U_f - U_1) + j\omega C_{02} (U_2 - U_f) + \\ & j\omega C U_f \end{aligned} \quad (2)$$

式中: ω 为角频率; U_B 、 U_C 为非故障相的沿线电

压; U_1 、 U_2 为故障相的沿线电压; U_f 、 I_f 分别为故障相电压、电流。

基于拉普拉斯变换与逆变换运算, 交流线路潜供电流为:

$$i_1 = \left[-j \frac{U_1}{Z_c} \sin(\gamma x) - j \frac{U_2}{Z_c C} \sin \gamma(l-x) \right] + \left[I_1 \cos(\gamma x) + I_2 \cos \gamma(l-x) \right] + j \frac{N}{\gamma^2 Z_c} U_A [\sin(\gamma x) + \sin \gamma(l-x)] + \frac{M}{L} I_A [\cos(\gamma x) + \cos \gamma(l-x) - 2] \quad (3)$$

式中: γ 为相位常数; Z_c 为波阻抗; N 、 M 分别为线路互感系数、互容系数; l 、 x 和 x_1 分别为输电线路长度、故障点距线路首端的距离、故障点位置。

由式(3)可知, 潜供电流包含容性耦合和感性耦合两个分量, 其中容性耦合分量大小与耦合段长度有关, 耦合段越长, 容性耦合分量越大; 感性耦合分量大小主要与故障位置有关, 故障位于耦合段中点时感性耦合分量达到最小值, 故障位于耦合段两端时感性耦合分量达到最大值。

1.1.2 潜供电流暂态分量

潜供电流暂态分量由 RLC 回路残压放电产生, 放电简化电路如图 3 所示。

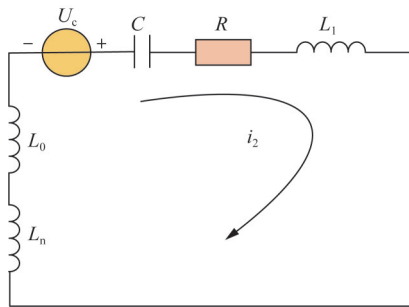


图 3 RLC 回路残压放电产生潜供电流示意图

Fig. 3 Schematic diagram of submarine arc current generated by residual voltage discharge in RLC circuit

图 3 中, U_c 为 RLC 回路放电残压, 放电角频率

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}, \text{ 衰减系数 } \delta = R/2L。$$

由图 3 潜供电流放电简化电路可列写 KVL 方程, 即:

$$LC \frac{d^2 U_c}{dt^2} + RC \frac{dU_c}{dt} + U_c = 0 \quad (4)$$

$$i_2 = C \frac{dU_c}{dt} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得:

$$i_2 = \frac{U_c}{\omega_c L} e^{-\delta t} \sin(\omega_c t) \quad (6)$$

串联补偿装置的串补度与分级可控高抗的补偿度分别用 β 和 λ 表示, 则有:

$$\beta = \frac{X_{C_c}}{X_L} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{X_{L_R}}{X_C} \quad (8)$$

式中: C_c 为串联补偿电容, X_{C_c} 为 C_c 的感抗值; L_R 为并联补偿电抗, X_{L_R} 为 L_R 的感抗值。

由于 $R \ll L$, 因此放电角频率可近似表示为:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L_R C_c}} = \sqrt{\frac{\beta \omega^4 LC}{\lambda}} \quad (9)$$

由于串补工频容抗值低于线路电抗、高抗及其小电抗的工频感抗之和, 放电电流频率为低频, 故潜供电流幅值取决于电容器残压放电产生的暂态分量, 即 $|i_2| > |i_1|$ 。分级可控高抗补偿度一定时串联补偿度越高则放电频率 ω_c 越大, 潜供电流 i_x 幅值也越高; 当串联补偿度一定时分级可控高抗补偿度越高则放电频率 ω_c 越小, 潜供电流 i 幅值也越低。

1.2 HRPC 对恢复电压影响

交直流混联线路发生单相接地故障, 为快速切除故障, 进一步加快电弧熄弧速度, 恢复电压的影响不能忽略^[22-23]。基于戴维南定理, 分析 HRPC 对恢复电压影响, 线路故障简化电路如图 4 所示。

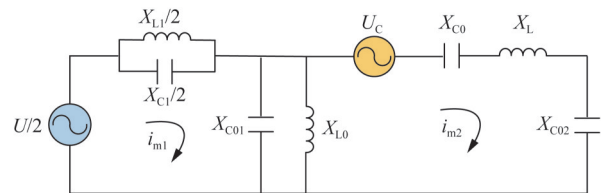


图 4 故障简化电路

Fig. 4 Fault simplified circuit

图 4 中, U 为非故障相等值电压源电动势; X_L 为输电线路电抗、并联电抗及小电抗零序电抗之和; X_{C1} 为相间容抗; X_{L1} 为相间感抗; X_{C01} 、 X_{C02} 分别为故障位置分别到线路首末两端的对地容抗; X_{L0} 为分级可控高抗电抗; X_{C0} 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 列写回路方程如式(10)所示。

$$\begin{cases} (a+b)i_{m1} - bi_{m2} = U/2 \\ -bi_{m1} + (b+X)i_{m2} = -U_C \\ a = X_{L1}X_{C1}/(X_{L1} + X_{C1}) \\ b = X_{L0}X_{C01}/X_{L0} + X_{C01} \\ X = X_{C0} + X_{C02} \end{cases} \quad (10)$$

解得:

$$\begin{cases} i_{m1} = \frac{(b^2 + bX)U - (\alpha + 2b^2)U_C}{\alpha b} \\ i_{m2} = \frac{bU - 2(a+b)U_C}{\alpha} \\ \alpha = ab + aX + bX \end{cases} \quad (11)$$

令 $b=X_{L0}$, $X_{C02}=X_{C0}$, 代入式(9)解得故障点处的恢复电压为:

$$U_x = I_2 X_{C0} = \frac{bX_{C0}}{\alpha} U - \frac{2(a+b)X_{C0}}{\alpha} U_C \quad (12)$$

由于电容器组容抗远大于分级可控高抗电抗, 线路相间容抗远大于相间感抗, 即 $X_{C0} \gg X_{L0}$, $X_{C1} \gg X_{L1}$, 故混联线路安装 HRPC 后恢复电压幅值主要取决于串补装置的补偿度变化。随着串补度增加电容器残压 U_C 增加, 故障处恢复电压幅值降低。

1.3 HRPC 对潜供电弧低频振荡机理影响

交直流混联线路交流侧发生单相接地故障, 线路电抗、对地电容及 HRPC 等储能元件可能形成不同振荡回路^[24], 线路开断后振荡频率发生变化, 影响潜供电弧幅频特性^[25-27]。故障切除后的暂态等效电路如图 5 所示。

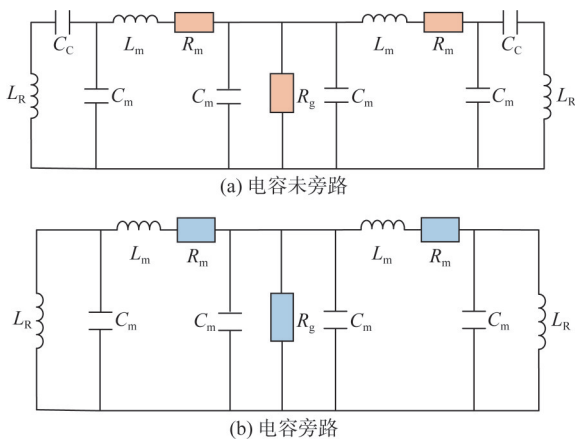


图 5 混合无功补偿单相接地故障等值电路

Fig. 5 Equivalent circuit of hybrid reactive power compensation for single phase ground fault

图 5 中, L_R 为可控高抗等效电抗, C_C 为串补的等效电容, L_m 、 C_m 、 R_m 分别为线路对地电感、电容及电阻, R_g 为弧道电阻。

基于拉普拉斯变换, 混联线路故障处的等效阻抗表达式如式(13)所示。

$$Z_g = \frac{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}{b_5 s^5 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s} \quad (13)$$

式中: $a_1=C_m R_m+C_C R_m$; $a_2=L_R C_C+L_m C_m+L_m C_C$;

$a_3=L_R C_C C_m R_m$; $a_4=L_R L_m C_C C_m$; $b_1=4C_m+2C_C$; $b_2=2C_m^2 R_m+2C_C C_m R_m$; $b_3=4L_R C_C C_m+2L_m C_C^2+2L_m C_R C_m$; $b_4=2L_R C_C C_m^2 R_m$; $b_5=2L_R L_m C_C C_m^2$ 。

由式(13)可知自由振荡频率由高阶方程式决定, 即:

$$b_5 s^5 + b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s = 0 \quad (14)$$

$$f = \sum_{n=2}^5 \sqrt{\frac{b_n s^{n-1}}{b_1 + b_{n-1} s^{n-2}}} \quad (15)$$

式中: f 为自由振荡频率; s 为衰减系数。

由式(14)——(15)可求得混联线路潜供电弧自由振荡频率及对应衰减系数如表 1 所示。

表 1 自然振荡频率及对应衰减系数

Tab. 1 Natural oscillation frequencies and corresponding attenuation coefficient

情况	s 的解	自由振荡频率/Hz	衰减系数
线路无补偿装置 未安装 HRPC	$s_1=s_2=\pm j82$	13.1	0
安装 HRPC 串 20%, 并 70%	$s_1=s_2=93\pm j19$ $s_3=-48$	30.3	45

由表 1 可知, 对比未安装 HRPC 前后的情况, 混联线路安装 HRPC 后电感和电容相互作用加剧故障电流振荡, 使低频振荡频率上升, 衰减速度更快, 利于电弧熄灭。

2 HRPC 补偿度对潜供电弧特性影响仿真分析

由理论分析可知, 潜供电弧暂态特性与线路耦合段长度、故障位置有关。混联线路安装 HRPC 后固定补偿方式时不同耦合段长度、故障位置对潜供电流特性影响如图 6 所示。

由图 6 可知, 故障位于耦合段中点、耦合段长度为 400 km 时潜供电流幅值达到最小; 故障位于耦合段两端、耦合段长度为 5 km 时潜供电流幅值达到最大。在潜供电流最小的情况下研究线路安装 HRPC 后潜供电弧特性, 分析 HRPC 补偿度对潜供

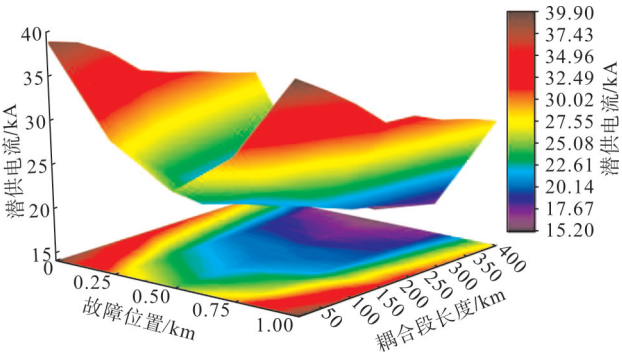


图 6 潜供电流影响特性

Fig. 6 Impact characteristics of submarine current

电流和恢复电压的影响。

2.1 串补装置串补度对潜供电弧影响

线路安装 HRPC 后, 保持分级可控高抗补偿度不变研究串联补偿度对潜供电弧特性影响, 不同串补度下潜供电流特性如图 7 所示。

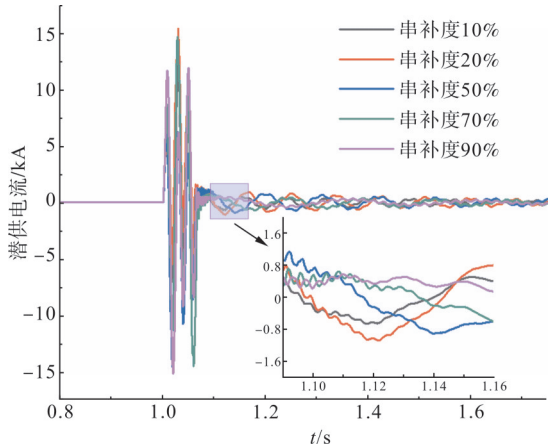


图 7 不同串补度潜供电流特性

Fig. 7 Characteristics of submarine currents with different series compensation degrees

由图 7 可知, 随着串联补偿度的增加潜供电流幅值不断增大, 整体呈线性增长的趋势, 串补度越高则潜供电流越难熄灭。串补装置电容器组残压经故障点、电阻及分级可控高抗形成低频振荡电流, 使故障点潜供电流暂态峰值升高。因此, 随着串联补偿度增加, 电容器组残压越高则潜供电流幅值越大。同时, 串联补偿度变化对恢复电压及燃弧时间影响如表 2 所示。

由表 2 可知, 随着串补装置串补度的增加, 恢复电压幅值不断减小, 整体呈线性降低的趋势, 潜供电弧燃弧时间呈阶梯状增加趋势。

综合分析潜供电流、恢复电压幅值和潜供电弧

表 2 不同串联补偿度对潜供电弧特性影响

Tab. 2 Effect of different series compensation degrees on the characteristics of submarine arc

特性	串补装置补偿度/%				
	10	20	50	70	90
恢复电压/kV	3.27	2.96	2.84	2.73	2.61
燃弧时间/s	0.10	0.09	0.33	0.61	1.02

燃弧时间随串补度变化的趋势。串联补偿度为 90% 时, 潜供电弧熄弧时间达到 1.02 s, 超过国标规定的自动重合闸时间(1 s 内)。因此, 应考虑潜供电弧熄灭对单相重合闸的影响。

2.2 分级可控高抗补偿度对潜供电弧影响

为研究分级可控高抗补偿度对潜供电弧特性影响, 保持串补度不变, 不同分级可控高抗补偿度下潜供电弧特性如表 3 所示。

表 3 不同分级可控高抗补偿度对潜供电弧特性影响

Tab. 3 Effect of different grades of controllable high impedance compensation on submarine arc characteristics

特性	分级可控高抗补偿度/%				
	20	30	50	70	90
潜供电流/kA	0.103	0.097	0.086	0.026	0.035
恢复电压/kV	3.105	3.082	3.061	2.915	2.956
燃弧时间/s	0.95	0.75	0.55	0.18	0.43

由表 3 可知, 随着分级可控高抗补偿度增加, 潜供电流先减小后增大, 恢复电压幅值整体变化不明显。分级可控高抗通过补偿线路分布电容, 限制潜供电流暂态分量, 使潜供电流幅值降低, 加快熄弧速率, 缩短燃弧时间。补偿度为 70% 时潜供电流幅值最小, 燃弧时间最短, 利于熄弧; 补偿度为 90% 时线路高抗饱和, 系统等效电抗降低, 潜供电流幅值最大, 燃弧时间最长, 灭弧困难。相比串补度变化的情况, 分级可控高抗补偿度对潜供电弧影响更大。

2.3 HRPC 补偿度对潜供电弧影响

根据不同串补度及分级可控高抗补偿度对潜供电弧影响, 研究 HRPC 不同补偿度下潜供电流特性, 结果如图 8 所示。

由图 8 可知, 串联补偿度 20%、分级可控高抗补偿度 70% 时潜供电流达到最小, 与其他补偿方式对比, 线路采用混合无功补偿对潜供电流抑制效果最佳。此外, HRPC 对恢复电压影响如表 4 所示。

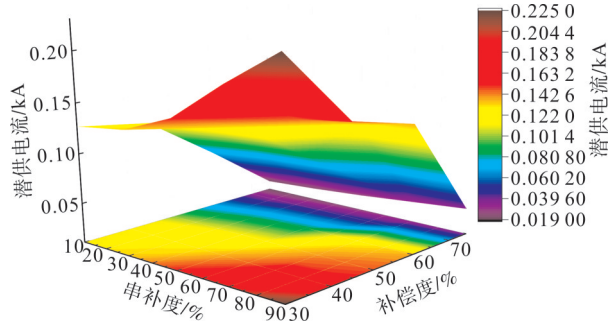


图8 潜供电流特性

Fig. 8 Submarine current characteristics

表4 HRPC对恢复电压影响

Tab. 4 Impact of HRPC on recovery voltage

分级可控高 抗补偿度/%	串补装置串补度/%				
	10	20	50	70	90
20	3.21	3.11	3.07	2.92	2.87
50	3.15	3.01	2.98	2.86	2.73
70	2.90	2.72	2.69	2.61	2.56
90	3.09	2.89	2.78	2.71	2.69

由表4可知,随着串补度与分级可控高抗补偿度不同,恢复电压整体变化比较平缓,HRPC补偿度对恢复电压影响较小。为进一步加快熄弧速率,限制潜供电流与恢复电压幅值,研究交直流混合无功补偿线路潜供电弧抑制措施十分必要。

3 混合无功补偿线路潜供电弧抑制措施

3.1 分级可控高抗安装小电抗

本文采用HRPC分级可控高抗中性点安装小电抗加快潜供电弧熄弧速率,提高系统稳定性。按照线路相间电容补偿原则^[28],小电抗 X_N 为:

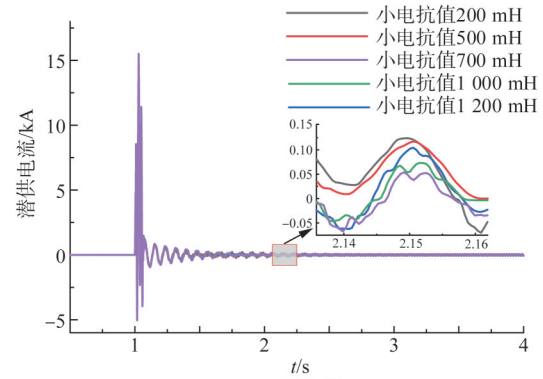
$$X_N = \frac{X_{L_n}^2}{X_{C_m} - 3X_{L_n}} = \frac{1}{\omega_c \lambda \left(\lambda \frac{C}{C_m} - 3 \right)} \quad (16)$$

式中: γ 为分级可控高抗补偿度; L_R 为并联电抗。

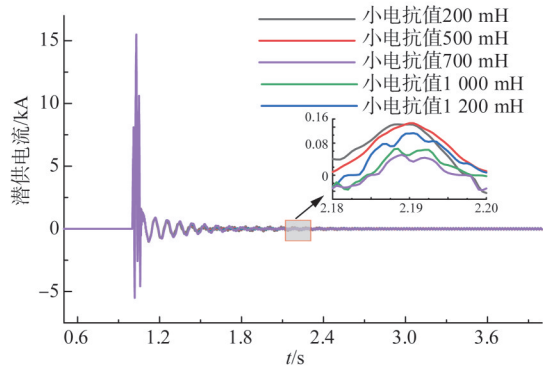
由式(16)可知,小电抗取值与分级可控高抗补偿度、线路参数有关。根据线路参数和补偿度变化范围,可得中性点小电抗取值范围为300~1100 mH。

为研究分级可控高抗安装小电抗对潜供电弧的抑制效果,固定HRPC补偿度,不同补偿方案下小电抗对潜供电流特性影响如图9所示。

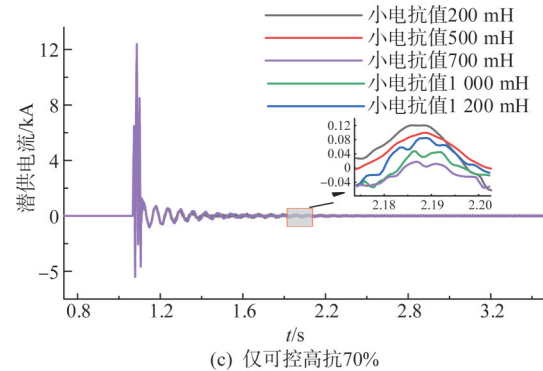
对比4种不同补偿方案,潜供电流均在小电抗为700 mH(约为分级可控高抗电感的1/3)时,达到



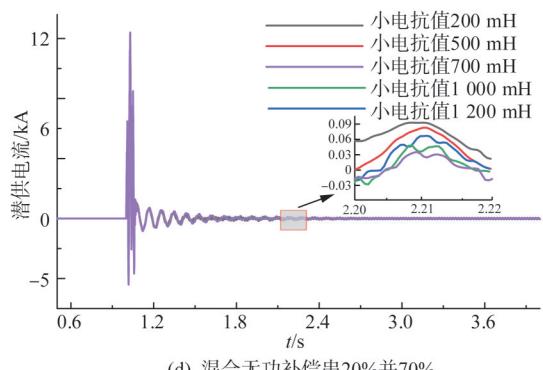
(a) 无补偿



(b) 仅串补20%



(c) 仅可控高抗70%



(d) 混合无功补偿串20%并70%

图9 小电抗变化对潜供电流特性影响

Fig. 9 Effect of small reactance changes on the characteristics of submarine current

最小。小电抗器与分级可控高抗配合, 补偿相间电容, 抑制潜供电流, 提高线路单相自动重合闸成功率。小电抗超过 700 mH 线路高抗饱和, 系统等效电抗降低, 潜供电流幅值增大, 不利于熄弧。因此, HRPC 串补度为 20%、分级可控高抗补偿度为 70% 及小电抗为 700 mH 时, 对潜供电弧抑制效果最佳。

3.2 基于 HRPC 的旁路断路器时序控制策略

串补装置中旁路断路器能够控制电容器组投入时间, 对潜供电弧顺利熄灭至关重要。基于 HRPC 补偿方式, 旁路断路器时序控制策略对潜供电弧特性影响如表 5 所示。

表 5 旁路断路器时序控制策略对潜供电弧特性影响

Tab. 5 Impact of bypass circuit breaker timing control strategy on submarine arc characteristics

旁路断路器时序控制策略	潜供电流/kA	燃弧时间/s
旁路断路器与主断路器同时断开	0.026	0.128
潜供电弧熄灭后旁路断路器断开	0.002	0.068

由表 5 可知, 采用旁路断路器与主断路器同时断开的控制策略, 潜供电流幅值 0.026 kA, 燃弧时间 0.128 s, 由于故障后串补旁路断路器立即闭合, 串联补偿中阻尼装置在旁路开关打开时被切除, 无法限制放电回路电流, 潜供电流衰减速度下降, 不利于熄弧; 采用潜供电弧熄灭后旁路断路器断开的策略, 潜供电流幅值降为 0.002 kA, 燃弧时间前后缩短 53%, 降为 0.068 s, 故障后阻尼装置能够有效限制短路电流, 衰减速度更快, 利于熄弧, 对潜供电弧抑制效果明显。基于潜供电弧熄灭后旁路断路器断开的控制策略, HRPC 旁路断路器与单相重合闸配合时序如图 10 所示。

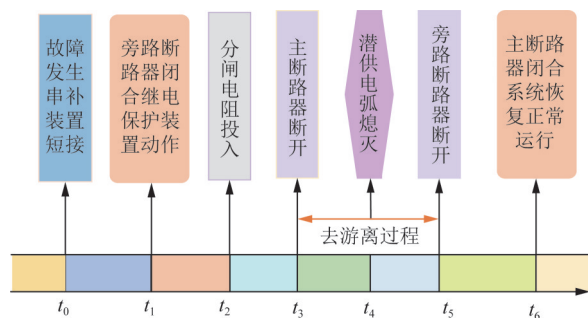


图 10 HRPC 旁路断路器与单相重合闸配合时序

Fig. 10 Timing of HRPC bypass circuit breaker and single-phase reclosing coordination

图 10 中, t_0 阶段线路发生单相接地故障, 火花间隙动作使串补电容器短接。 t_1 阶段线路联动串补保护发出控制信号, 旁路断路器闭合, 继电保护装置动作。 t_2 阶段分闸电阻投入, 故障隔离。 t_3-t_5 阶段为系统去游离过程, 主断路器断开, 系统与故障电阻完全隔离, 潜供电弧自熄。潜供电弧熄灭后, 放电间隙去游离, 弧道绝缘特性恢复至正常状态, 监控系统发出信号, 旁路断路器断开, 串补电容重新投入运行, 故障点电弧去游离过程结束。 t_6 阶段主断路器合闸, 系统恢复正常运行。

因此, HRPC 在交直流混联线路实际应用中, 潜供电弧熄灭后旁路断路器的中断利于重合闸的成功。此外, 当串补装置串补度较高时, 时序控制策略中 t_3-t_5 阶段系统去游离过程的参考时间应适当增加, 降低因潜供电弧未完全熄灭导致重合闸失败的概率, 进一步缩短单相自动重合闸整定时间。

4 结论

本文基于交直流混合无功补偿线路研究了潜供电弧故障发生机理, 采用了分级可控高抗与小电抗联动控制的抑制措施, 提出了一种改进型旁路断路器时序控制策略, 得到如下结论。

1) 当交直流混联线路发生单相接地故障且串补度为 20%、分级可控高抗补偿度为 70% 及小电抗为 700 mH 时可有效抑制潜供电弧, 缩短燃弧时间, 避免高补偿度串补线路出现次同步谐振问题。

2) 相比旁路断路器与主断路器同时断开的控制策略, 采用旁路断路器在潜供电弧熄灭后断开的时序控制策略, 潜供电流幅值降低 7.69%, 燃弧时间缩短 53%, 衰减速度更快, 利于熄弧。此外, 线路串补度较高时延迟旁路断路器开断可保证潜供电弧充足的去游离时间, 降低因潜供电弧未完全熄灭导致重合闸失败的概率, 提高重合闸成功率。

参考文献

- [1] 熊浩, 葛亚明, 黄曲黎, 等. 考虑风电机组调控潜力的交直流有功功率协调控制策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 37-47.
XIONG Hao, GE Yaming, HUANG Qucan, et al. Active power coordination control strategy of AC/DC system considering wind turbine regulation potential [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 37-47.
- [2] MOTAMEDINEJAD M B, RADMEHR M, RADMEHR M, et al. Modified solid-state fault current limiter based on AC/DC

- reactor[J]. International Journal of Electronics, 2022, 109(7): 200–209.
- [3] 韩璟琳, 赵辉, 胡平, 等. 交直流微电网互联统一控制虚假数据检测策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 35(9): 1–9.
- HAN Jinglin, ZHAO Hui, HU Ping, et al. False data detection strategy for unified control of hybrid microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 35(9): 1–9.
- [4] HAN Joon, LEE Chulmoon, KIM Chulhwan. Adaptive single-pole auto-reclosing scheme based on submarine arc voltage harmonic signatures[J]. Energies, 2021, 14(5): 1–10.
- [5] 宋长青, 罗新, 谢剑翔, 等. 广东背靠背柔性直流工程最后断路器过电压特性与优化[J]. 南方电网技术, 2023, 17(12): 10–17.
- SONG Changqing, LUO Xin, XIE Jianxiang, et al. Overvoltage characteristics and optimization of last breaker in guangdong back-to-back VSC-HVDC project[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 10–17.
- [6] 吕金壮, 陈兵, 张长虹, 等. 特高压直流高速开关研发关键技术研究[J]. 南方电网技术, 2023, 17(5): 9–18.
- LÜ Jinzhuang, CHEN Bin, ZHANG Changhong, et al. Research on key technology of ultra high voltage DC high speed switch[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(5): 9–18.
- [7] OZENIR D, MARIA C T, FABIANO M. New mitigation method and analysis of the submarine arc current in half-wavelength transmission lines[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 182(10): 100–110.
- [8] LI Jinsong, YU Hua, JIANG Min, et al. Numerical modeling of space-time characteristics of plasma initialization in a submarine arc[J]. Energies, 2019, 12(11): 21–28.
- [9] 汤未, 于溯, 郑涛, 等. 基于交直流保护协同配合的交直流碰线保护新方案[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 41–50.
- TANG Wei, YU Su, ZHENG Tao, et al. A novel protection scheme of AC and DC line-touching based on coordination of AC and DC protection[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 41–50.
- [10] 赖逸洋, 王增平, 王彤. 电流差动保护在柔直接入的交流电网中适应性分析及改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 145–154.
- LAI Yiyang, WANG Zengping, WANG Tong. Adaptability analysis of current differential protection in an AC power grid with an MMC-HVDC and improvement measures[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 145–154.
- [11] 黄宗超, 王帆, 刘一民, 等. 基于串补线性化模型的含串补线路距离保护整定方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 133–138.
- HUANG Zongchao, WANG Fan, LIU Yimin, et al. Distance protection setting method of series-compensated line based on series compensation linearized model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 133–138.
- [12] 贺杨焯, 郑晓冬, 邵能灵, 等. 交直流混联电网LCC-HVDC换流器建模方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3119–3130.
- HE Yangyang, ZHENG Xiaodong, TAI Nengling, et al. A review of modeling methods for LCC-HVDC converter in AC/DC hybrid power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3119–3130.
- [13] WEN Caiquan, ZHANG Zhiyuan, CHEN Taiyu, et al. Investigation of GIS enclosure circulating current in UHV substation with hybrid reactive power compensation[J]. Electric Power Systems Research, 2022 (203): 107666.1–107666.10.
- [14] YANG Jingjing, LIU Hongshun, SUN Ying, et al. Influence of UHV hybrid reactive power compensation on interrupting characteristics of circuit breakers in the event of phase-to-phase faults[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2021(124): 106354.1–106354.9.
- [15] 李鹏, 刘玢岩, 习伟, 等. 基于模型参数辨识的串联补偿输电线路纵联保护原理[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 20–28.
- LI Peng, LIU Fenyan, XI Wei, et al. Pilot protection principle based on model parameter identification for a series compensated transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 20–28.
- [16] 邵文权, 刘朋跃, 王斌, 等. 基于等值阻抗相位特征的带并补电抗线路单相自适应重合闸故障识别方法[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1796–1805.
- SHAO Wenquan, LIU Pengyue, WANG Bin, et al. Single-phase adaptive reclosure fault identification for transmission lines with shunt reactors based on equivalent impedance phase property[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1796–1805.
- [17] 夏海涛, 周小平, 刘一锋, 等. 含串补及STATCOM的交直流系统稳定性分析及改善方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 151–162.
- XIA Haitao, ZHOU Xiaoping, LIU Yifeng, et al. Stability analysis and improvement method for AC/DC system with series compensation and STATCOMs[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 151–162.
- [18] 郑彬, 项祖涛, 班连庚, 等. 特高压交流输电线路加装串联补偿装置后断路器开断暂态恢复电压特性分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 605–611.
- ZHENG Bin, XIANG Zutao, BAN Liangeng, et al. Analysis on circuit breaker transient recovery voltage UHV AC transmission lines fixed with series capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 605–611.
- [19] 关永刚, 郭珮琪, 项祖涛, 等. 特高压串补线路开断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.
- [20] 颜雅迪, 何柏娜, 孟涛, 等. 特高压高补偿度串补线路潜供电弧特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 78–86.
- XIE Yadi, HE Baina, MENG Tao, et al. Research on submarine arc characteristics of UHV lines with high compensation degree series compensation[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 78–86.
- [21] 赵盛, 李博通, 李斌, 等. 单相跳闸对换相过程的影响机理及连续换相失败抑制方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 17–24, 55.
- ZHAO Sheng, LI Botong, LI Bin, et al. Influence mechanism of single-phase tripping on commutation process and suppression strategy of continuous commutation failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 17–24, 55.

(下转第41页 Continued on Page 41)