

# 可控型混合无功功率补偿线路 TRV 抑制措施

孟凡涛<sup>1</sup>, 何柏娜<sup>1</sup>, 李辉<sup>2</sup>, 吴硕<sup>1</sup>, 刘洋<sup>1</sup>, 代维汉<sup>1</sup>, 王硕<sup>1</sup>, 董彦辰<sup>3</sup>

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430000; 3. 国网山东淄博供电公司, 山东 淄博 255000)

**摘要:** 可控型混合无功补偿对输电线路暂态特性的影响亟待研究。与常规输电线路相比, 安装可控型混合无功补偿的特高压交流输电线路断路器实际开断条件更加苛刻, 对系统绝缘造成极大威胁。以特高压可控型混合无功补偿线路瞬态恢复电压最严重超标状况为研究对象, 建立了特高压混合无功补偿线路单相接地故障等效模型, 分析了瞬态恢复电压的影响因素, 提出了可控型混合无功补偿线路瞬态恢复电压(transient recovery voltage, TRV)的抑制措施; 采用等值参数集中电路理论分析与 PSCAD/EMTDC 仿真结合, 探讨了快速联动旁路串补、断路器加装分闸电阻以及安装快速接地开关等方法对瞬态恢复电压的抑制效果以及可行性, 并得到了可控型混合无功补偿线路瞬态恢复电压最佳抑制措施, 研究成果可以为特高压工程建设提供实际参考。

**关键词:** 特高压; 可控型混合无功补偿; 单相接地故障; 瞬态恢复电压; 抑制措施

## TRV Suppression Measures of Controllable Hybrid Reactive Power Compensation Lines

MENG Fantao<sup>1</sup>, HE Baina<sup>1</sup>, LI Hui<sup>2</sup>, WU Shuo<sup>1</sup>, LIU Yang<sup>1</sup>, DAI Weihang<sup>1</sup>, WANG Shuo<sup>1</sup>,  
DONG Yanchen<sup>3</sup>

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China; 2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 3. State Grid Shandong Zibo Power Supply Company, Zibo, Shandong 255000, China)

**Abstract:** The influence of controllable hybrid reactive power compensation on the transient characteristics of transmission lines needs to be studied urgently. Compared with conventional transmission lines, the actual breaking conditions of ultra high voltage (UHV) transmission line circuit breakers with controllable hybrid reactive power compensation are more stringent, which pose a great threat to system insulation. The most serious over-standard condition of transient recovery voltage of UHV controllable hybrid reactive power compensation line is taken as the research object. An equivalent model for single-phase grounding faults in UHV hybrid reactive power compensation lines is established, and the influencing factors of transient recovery voltage are analyzed. The transient recovery voltage (TRV) suppression measure of controllable hybrid reactive power compensation line is proposed. By combining the theoretical analysis of equivalent parameter lumped circuit with PSCAD/EMTDC simulation, the suppression effects and feasibility of fast linkage bypass series compensation, circuit breaker with opening resistance, and fast grounding switch on transient recovery voltage are discussed, and the best suppression measure of transient recovery voltage is obtained, which provides a practical reference for UHV engineering construction.

**Key words:** UHV; controllable hybrid reactive power compensation; single-phase grounding fault; transient recovery voltage; suppression measures

**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); the Graduate Education Quality Improvement Plan Project of Shandong Province (SDYAL2022114).

## 0 引言

特高压交流输电具有传输容量高、线路损耗小等优势<sup>[1-3]</sup>。随着我国电力系统电压等级的提升与输送功率的增长,无功功率变化更为频繁,电力系统稳定运行迎来新的挑战<sup>[4-6]</sup>。采用可控型混合无功补偿(hybrid reactive power compensation, HRPC)既可以提高线路功率极限,又能限制系统电压升高与操作过电压水平,可大幅提高系统稳定性<sup>[7-9]</sup>。

根据文献[10-12]可知,安装 HRPC 后特高压输电线路面临一些亟待解决的问题。断路器开断线路短路故障时,由于无法旁路 HRPC 中的串联补偿电容,短路电流产生高幅值低频振荡,导致断路器开断故障更加困难,使瞬态恢复电压(transient recovery voltage, TRV)变化更加复杂,严重损害断路器绝缘寿命<sup>[13-14]</sup>。近年来,国内外学者针对 TRV 抑制措施开展了研究。文献[15]研究了分闸电阻对超高压线路 TRV 的影响。文献[16]针对 500 kV 超高压线路分析了高耦合分裂电抗器对 TRV 峰值和上升率抑制效果。文献[17]以超高压线路为背景,设计混合串联补偿配置方案以保证断路器可靠开断。由于现有常规超/特高压输电线路断路器开断特性分析方法已无法应用于安装 HRPC 线路,虽然上述研究针对不同超/特高压线路对 TRV 抑制效果进行了分析,但未考虑传统抑制措施下安装 HRPC 的特高压输电线路断路器能否正常开断。因此,本文比较了不同抑制措施对 HRPC 线路 TRV 的抑制效果,并采用组合措施得到最佳抑制方案,为我国研究可控型 HRPC 线路 TRV 抑制措施奠定了基础。

本文首先构建了安装可控型 HRPC 的特高压输电线路模型,仿真分析了可控型 HRPC 线路 TRV 最严重超标状况;其次,采用快速联动旁路串补、断路器加装分闸电阻、安装快速接地开关以及多种措施组合优化的方案对 TRV 进行抑制研究;最后,针对多种抑制措施的数学模型进行仿真分析,比较其对可控型 HRPC 线路 TRV 抑制效果,得到 TRV 最佳抑制方案,为可控型 HRPC 推广提供实际参考。

## 1 特高压可控型 HRPC 输电系统

可控型 HRPC 由可控串联补偿(thyristor

controlled series compensation, TCSC)和晶闸管控制变压器式可控并联电抗器(thyristor controlled transformer, TCT)共同组成<sup>[18-20]</sup>。

其中,TCSC 由固定电容器  $C_c$  与晶闸管控制电抗器并联组成的主电路以及由旁路断路器、金属氧化物避雷器(metal-oxide surge arresters, MOA)保护电路构成。通过触发脉冲信号控制晶闸管触发角改变 TCSC 等效阻抗,实现控制系统有功潮流与无功功率的目的。TCSC 结构如图 1 所示。

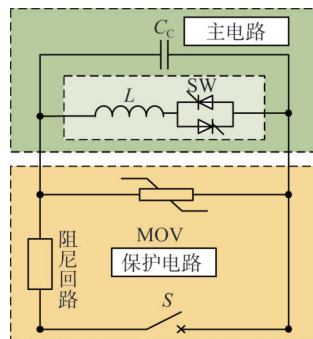


图 1 TCSC 补偿装置

Fig. 1 TCSC compensation device

TCT 由三绕组高阻抗变压器、晶闸管控制电抗器以及滤波模块组成,通过控制晶闸管触发角改变绕组电流平均值,进而改变变压器绕组电抗。通过变压器阻抗变换特性改变 TCT 电抗值与系统无功功率, TCT 结构如图 2 所示。

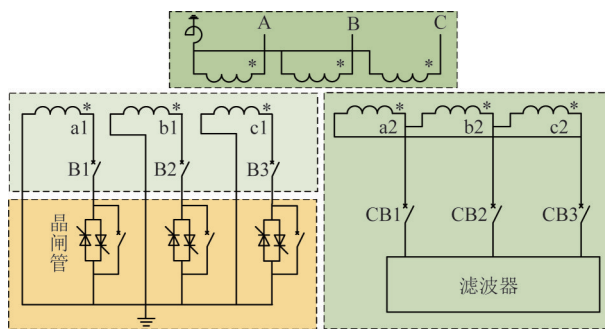


图 2 TCT 补偿装置

Fig. 2 TCT compensation device

以晋东南-南阳-荆门特高压示范线路为研究对象,其中,晋东南-南阳段线路长度为 362 km,南阳-荆门段线路长度为 283 km,额定工作电压为 1 000 kV,均采用分布参数模型,其特高压线路等效模型如图 3 所示,输电线路参数如表 1 所示。

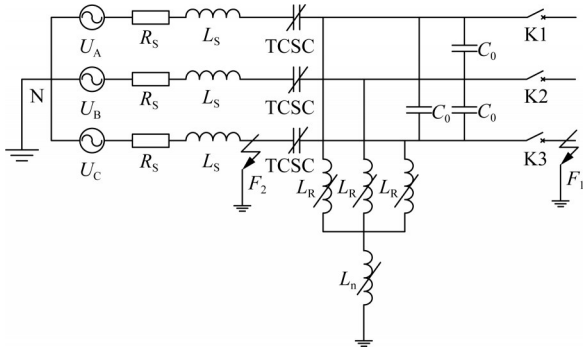


图 3 双重单相接地故障等效模型图

Fig. 3 Equivalent model diagram of double single-phase ground fault

表 1 特高压示范线路参数

Tab. 1 Parameters of UHV demonstration line  $\Omega \cdot \text{km}$

| 参数    | 晋东南-南阳线路  | 南阳-荆门线路   |
|-------|-----------|-----------|
| $R_1$ | 0.007 580 | 0.008 010 |
| $X_1$ | 0.263 650 | 0.263 100 |
| $C_1$ | 0.013 970 | 0.013 830 |
| $R_0$ | 0.154 210 | 0.156 300 |
| $X_0$ | 0.830 600 | 0.782 100 |
| $C_0$ | 0.009 296 | 0.008 955 |

图 3 中,  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  为系统等效电源,  $R_s$ 、 $L_s$  分别为电源等效电阻和电感,  $C_0$  为线路相间感应电容,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为断路器, TCSC 为串联补偿,  $L_R$  为并联补偿。表 1 中,  $R_1$ 、 $X_1$ 、 $C_1$  分别为正序电阻、电抗、电容,  $R_0$ 、 $X_0$  分别为零序电阻、电抗。

当输电线路发生短路故障时, 断路器分闸开断短路电流, 受 HRPC 中串联补偿装置电容器的影响, 短路电流产生低频率、高幅值振荡, 断路器触头分离后触头间产生电弧, 电弧电流过零瞬间电弧熄灭, 断路器两端产生 TRV, 导致断路器开断困难, 影响系统正常稳定运行。因此, 为研究可控型 HRPC 线路 TRV 抑制措施, 本文以安装可控型 HRPC 的晋东南-南阳-荆门特高压示范线路为研究对象, 采用 PSCAD 建立可控型 HRPC 线路分布参数仿真模型, 基于可控型 HRPC 补偿度为 70 % 时最严重的 TRV 开断工况, 仿真分析快速联动旁路串补、断路器加装分闸电阻、安装快速接地开关以及多种措施优化组合等方法对 TRV 的抑制效果, 装设可控型 HRPC 的特高压输电线路拓扑如图 4 所示。

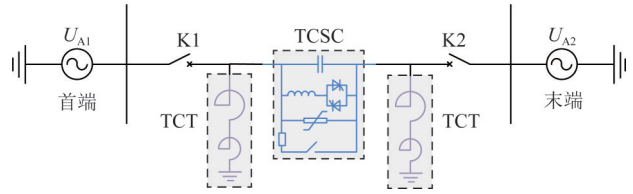


图 4 装设可控型 HRPC 的特高压输电线路

Fig. 4 UHV transmission line equipped with controllable HRPC

## 2 HRPC 线路 TRV 最严重超标工况

以晋东南-南阳-荆门特高压示范线路为研究对象, 设 HRPC 装设于南阳站, 补偿度为 70 %, HRPC 端部后侧 1.0 s 发生单相接地故障, 根据断路器分闸标准, 1.035 s 时刻首端断路器开断, 1.050 s 时刻末端断路器开断, 未采用抑制措施时 TRV 波形如图 5 所示。

如图 5 所示, 当特高压 HRPC 线路未采用抑制措施时, TRV 峰值高达 2 772 kV, 远高于国家标准规定<sup>[21]</sup>, 且 TRV 波形存在严重高频振荡, 必须采取相应抑制措施进行抑制。本文分别采用不同抑制措施比较分析其对 TRV 抑制效果, 使其满足国家标准规定<sup>[21]</sup>。

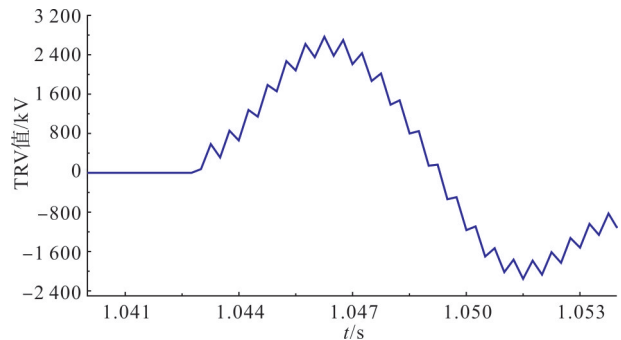


图 5 南阳站端部故障 TRV 波形图 (未采用抑制措施)

Fig. 5 TRV waveform diagram of Nanyang station end fault (without suppression measures)

## 3 可控型 HRPC 线路 TRV 抑制措施

### 3.1 快速联动旁路串补

由于可控型 HRPC 中串联补偿残压对 TRV 影响极大, 而并联补偿 TCT 对 TRV 影响较小, 且在国家标准规定断路器有效动作范围内。因此, 本文采用快速联动旁路串补的抑制措施, 该措施的实现可采用类似由 ABB 所研发的新型快速联动旁路串联补偿装置或西门子的晶闸管保护串联补偿技术。其

动作速度快、启动电压低,能够使 TCSC 旁路断路器早于输电线路主断路器动作,降低 HRPC 串联补偿残压对 TRV 的影响,TCSC 旁路断路器配合动作时序如图 6 所示。

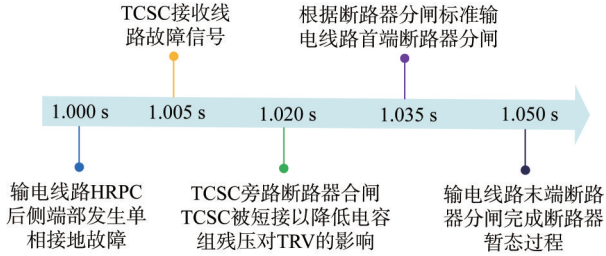


图 6 TCSC 旁路断路器配合动作时序

Fig. 6 Coordination action timing of TCSC bypass circuit breaker

当 1.0 s 时刻输电线路 HRPC 后侧端部发生故障时,可控型 HRPC 串联补偿装置在 5 ms 后收到线路故障信号,使得 TCSC 旁路断路器在收到联动信号 20 ms 内将 TCSC 电容器旁路,早于输电线路断路器开断 10~25 ms,能够在断路器端口 TRV 产生前旁路 TCSC 装置,降低可控型 HRPC 串联补偿装置残压,进而对断路器两端 TRV 起到更好的抑制效果。

### 3.2 断路器加装分闸电阻

为降低可控型 HRPC 对 TRV 的影响,规划建设输电线路可采用 HRPC 分散布置或适当减少补偿度等方法,建设完成已投运的输电线路可利用 HRPC 保护装置对串联补偿采取快速旁路的措施,而断路器自身可加装分闸电阻以抑制其两端 TRV,其原理如图 7 所示。

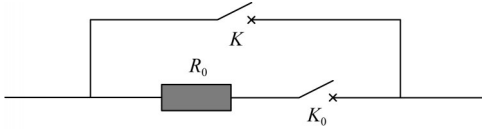


图 7 断路器加装分闸电阻原理图

Fig. 7 Schematic diagram of circuit breaker opening resistance

图 7 中,  $K$  为断路器主断口,  $K_0$  为辅助断口,  $R_0$  为分闸电阻,  $R_0$  的取值范围一般为 400~800  $\Omega$ 。在断路器进行分闸操作过程中,首先开断主断口  $K$ ,然后接入辅助断口  $K_0$  支路分闸电阻  $R_0$ ,最后开断辅助断口  $K_0$  完成分闸操作。分闸电阻可降低断路器分闸过程的过电压幅值及其电磁暂态振荡过程以减少 TRV 超标状况。

本文以 1 000 kV 晋东南-南阳-荆门特高压示范线路为研究背景,减少计算模型的复杂度,基于系统等效拓扑结构,采用集中参数电路代替分布参数模型的方法,建立了加装分闸电阻的输电线路单相等效模型,如图 8 所示,对分闸电阻对 TRV 的抑制效果进行分析。

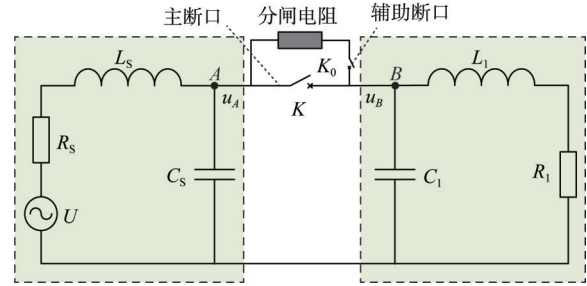


图 8 加装分闸电阻的输电线路单相等效模型

Fig. 8 Single-phase equivalent model of transmission line with opening resistance

图 8 中,  $U$  为系统等效电源,  $R_s$ 、 $L_s$  与  $C_s$  分别为电源侧等效电阻、电感与电容,  $R_1$ 、 $L_1$  与  $C_1$  分别为线路侧等效电阻、电感与电容,  $K$  为断路器主断口,  $K_0$  为辅助断口。其原理为:当输电线路发生短路故障,断路器主断口开断故障,分闸电阻投入后电源侧、线路侧通过分闸电阻建立电气连接,当弧隙间电弧尚未完全熄灭时短路电流未被断路器完全开断,而是从断路器主断口转移至辅助断口,并利用阻尼作用降低断路器主断口 TRV 峰值,但其可能导致辅助断口产生一定幅值的 TRV,个别 TRV 工况甚至出现超标状况,需予以注意。

设  $t_1$  时刻发生单相接地故障,  $t_2$  时刻断路器断口电弧熄灭,以断路器主断口  $K$  电弧电流熄灭时刻作为时间坐标 0 点,则电源侧回路电压方程为:

$$R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + u_A = U_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

式中:  $U_m$  为电源电压峰值;  $t$  为时刻;  $\theta$  为电源电压电流相位角;  $i_s$  为电源侧电流;  $u_A$  为断路器旁 A 点处电压;  $\omega$  为电源角频率。

由于断路器两端 TRV 暂态过程极短,输电系统工频电压变化趋近于 0,  $u_A$  可计算为:

$$u_A = U_m \cos 100\pi t + (U_m - U_{Am}) \cos \omega' t \quad (2)$$

式中:  $\omega' = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}$ ;  $U_{Am}$  为 A 点处电压峰值。

当断路器主断口开断输电线路短路故障后辅助

断口支路分闸电阻接入,与电源侧及线路侧建立电气连接,短路电流转移至辅助断口,吸收TRV能量,抑制主断口TRV峰值,其输电线路回路方程为:

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} = u_B \quad (3)$$

式中:  $i_1$  为线路侧电流;  $u_B$  为断路器旁B点处电压。

求解瞬态恢复电压  $u_{TRV}$  为:

$$u_{TRV} = (U_m - U_{Am}) \cos \omega' t U_m + \cos 100\pi t - R_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (4)$$

如式(4)所示,断路器主断口两端TRV为电源侧与线路侧节点电压矢量差,随着线路短路故障点距离增大,线路侧电压  $u_B$  衰减速度逐渐增大。初始TRV暂态特性决定了断路器正常开断能力,影响系统电压正常恢复水平。当分闸电阻接入输电线路后部分短路电流由断路器主断口转移至辅助断口,使其承受部分TRV,并利用阻尼作用降低断路器主断口TRV峰值,满足断路器国家标准,保证输电线路稳定运行。

### 3.3 快速接地开关

本文提出采用输电线路安装快速接地开关(high speed grounding switch, HSGS)的方法对TRV进行抑制。当输电线路发生短路故障时短路电流快速增大,断路器迅速开断清除故障,进入大电流阶段。为降低断路器开断电流与TRV暂态特性,在断路器出线侧安装HSGS,在断路器分闸后闭合HSGS分流线路短路电流,降低线路侧与HRPC侧电流峰值,从而降低线路侧与补偿侧对TRV的影响,HSGS配合动作时序如图9所示。

由图9可知,设1.0 s在HRPC端部后侧发生单相接地故障(动作时序1),短路电流迅速增大,1.035 s时刻断路器迅速开断清除故障(动作时序2),断路器开断短路电流后闭合HSGS,降低线路侧与补偿侧短路电流峰值,抑制TRV对断路器的影响(动作时序3)。当线路故障清除后,断开HSGS,故障相断路器重合闸,线路恢复正常运行(动作时序4)。

本文以1 000 kV特高压输电线路为研究背景,便于分析计算,基于系统等效拓扑结构,采用等值集中参数电路的方法,建立了装设HSGS的可控型

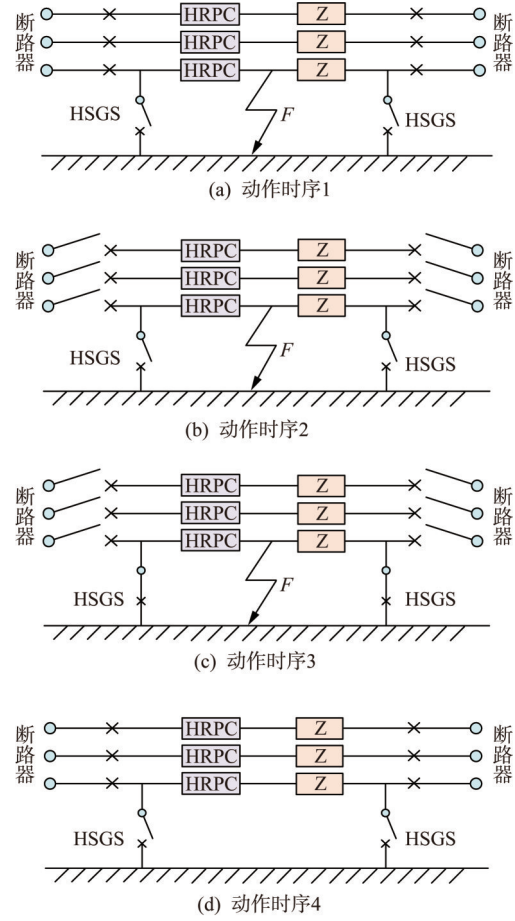


图9 HSGS配合动作时序图

Fig. 9 Sequence diagrams of HSGS action

HRPC线路单相等效模型,如图10所示,分析了HSGS对可控型HRPC线路TRV的抑制效果。

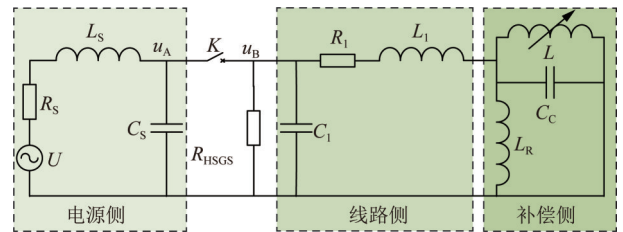


图10 加装HSGS的HRPC线路单相等效模型

Fig. 10 Single-phase equivalent model of HRPC line with HSGS

如图10所示,  $R_{HSGS}$  为断路器出线侧装设的HSGS内阻,为分析HSGS合闸时间对TRV的抑制效果,1.0 s时刻在HRPC端部后侧发生故障,1.035 s时刻断路器开断后,闭合HSGS分流短路电流,降低线路侧与补偿侧电流峰值,进而减轻TRV对断路器的影响。

当 HRPC 线路发生单相接地故障时, 瞬态恢复电压  $U_{TRV1}$  为:

$$u_{TRV1} = u_{A1} - u_{B1} = U_0 + (U_{Am1} - U_0)\cos\omega_1 t - U_{C_{c1}}(\cos\omega t + k\sin a \sec\phi\sin[k(\omega t - a) - \phi]) - u_{C_{c1}}\sqrt{R_1^2 + \omega L_1^2}/Z_{HRPC} \quad (5)$$

式中:  $u_{A1}$ 、 $u_{B1}$  为加装 HSGS 后断路器旁 A、B 点处电压;  $U_{Am1}$  为加装 HSGS 后断路器旁 A 点处电压峰值;  $U_0$  为电压初始值;  $u_{C_{c1}}$ 、 $U_{C_{c1}}$  分别补偿侧电容电压及其峰值;  $\phi$  为补偿侧电压电流相位角;  $a$  为晶闸管导通角;  $Z_{HRPC}$  为混合无功补偿总阻抗;  $k = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$ ,  $X_C$  为补偿侧电容电抗,  $X_L$  为补偿侧电感电抗。

输电线路短路故障后经时间  $\Delta t$  HSGS 进行合闸操作。由于在换路瞬间电容电压不发生跃变, 则在 HSGS 合闸 0 时刻 A 点处电压  $u_{A2}(0)$  为:

$$u_{A2}(0) = u_{A1}(\Delta t) = U_0 + (U_{Am1} - U_0)\cos\omega_1 \Delta t \quad (6)$$

线路进行 HSGS 合闸操作后 A 点电压  $u_{A2}$  为:

$$u_{A2} = U_0 + (u_{A2}(0) - U_0)\cos\omega_1 t \quad (7)$$

由于输电线路进行 HSGS 合闸操作, 忽略对地支路电流与接地电阻, 则快速接地开关内阻电流  $I_{p2}$  为:

$$I_{p2} = \frac{U_b}{\sqrt{(R_s + R_{HSGS})^2 + (\omega L_s)^2}} \quad (8)$$

式中:  $U_b$  为电源电压有效值;  $R_{HSGS}$  为混合无功补偿总电阻。

设 TCSC 电流为  $i_{TCSC2} = \sqrt{2}(I_{p1} - I_{p2})\sin\omega t$ ,  $I_{p1}$  为断路器开断电流, 基于电容电压特性, TCSC 电压初始值  $U_{C_{c2}}(0)$  为:

$$U_{C_{c2}}(0) = u_{C_{c1}}(\omega\Delta t) \quad (9)$$

根据电容电压与 TCR 支路电流动态方程求解 TCSC 电压  $u_{C_{c2}}$  为:

$$u_{C_{c2}} = U_{C_{c2}}(\cos\omega t + k\sin a \sec\mu\sin[k(\omega t - a) - \mu]) \quad (10)$$

式中:  $U_{C_{c2}} = \sqrt{2}\delta X_L(I_{p1} - I_{p2})$ ;

$$\mu = \arctan \frac{\delta X_L(I_{p1} - I_{p2})\cos a - u_{C_{c1}}(\omega\Delta t)}{k\delta X_L(I_{p1} - I_{p2})\sin a},$$

$$\delta = \frac{k^2}{k^2 - 1}^\circ$$

根据 TCSC 电压  $u_{C_{c2}}$  与 HRPC 总阻抗  $Z_{HRPC}$  可得输电线路电压  $u_L$  为:

$$u_L = \frac{u_{C_{c2}}}{Z_{HRPC}} \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \quad (11)$$

根据式(10)~(11)可得合闸操作后 B 点处电压  $u_{B2}$  为:

$$u_{B2} = u_L + u_{C_{c2}} \quad (12)$$

当 HSGS 进行合闸操作后, 根据电压  $u_{A2}$  和  $u_{B2}$  可得瞬态恢复电压  $U_{TRV2}$  为:

$$U_{TRV2} = u_{A2} - u_{B2} = U_0 + (u_{A2}(0) - U_0)\cos\omega_1 t - U_{C_{c2}}(\cos\omega t + k\sin a \sec\mu\sin[k(\omega t - a) - \mu]) - u_{C_{c2}}/Z_{HRPC} \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \quad (13)$$

如式(13)所示, HSGS 的投入对 HRPC 线路 TRV 的容性分量与感性分量均有抑制作用。对于 TRV 容性分量, 当线路发生单相接地故障, 故障相两侧断路器开断后 HSGS 进行合闸操作, 容性分量由 TCSC 串联电容与相间电容通过故障点接地产生, 导致 HSGS 与输电线路故障接地点形成 3 条并联支路, HSGS 支路分流输电线路短路电流, 以减小故障点容性分量。

对于 TRV 感性分量, 当 HSGS 闭合后, 由电磁感应产生的感性分量不再经由故障点与故障相对地电容形成回路, 而是通过 HSGS 与故障接地点两侧线路形成两个回路, 两输电回路中互感分量相互抵消, 减小流经故障点的感性分量, 对 TRV 进行抑制。

### 3.4 组合优化措施

为选择可控型 HRPC 线路 TRV 最佳抑制方案, 本节基于 3 种抑制措施实际特点, 研究提出了组合优化抑制措施的方法。根据 3 种抑制措施仿真分析可知, 当可控型 HRPC 线路 1.0 s 在 HRPC 后侧端部发生单相接地故障时, 分别采用快速联动旁路串补与分闸电阻、快速联动旁路串补与快速接地开关以及快速接地开关与分闸电阻 3 种组合优化方案, 结合可控型 HRPC 线路 TRV 最严重工况分析组合优化措施对断路器两端 TRV 的抑制效果。

## 4 仿真分析

### 4.1 快速联动旁路串补

基于 HRPC 线路最严重 TRV 工况, 设 1.0 s 在

HRPC 后侧端部发生单相接地故障, 为降低 HRPC 线路 TRV 对断路器的影响, 本文采用快速联动旁路串补措施, 并根据《1 100 kV 高压交流断路器》国家标准规定, 1. 010—1. 025 s 对 TCSC 旁路断路器进行合闸操作, 降低串联残压对 TRV 的影响, 采用快速联动旁路电阻抑制措施后 TRV 仿真结果如表 2 所示。

表 2 快速联动旁路对 HRPC 线路 TRV 的影响

| Tab. 2 Effect of fast linkage bypass on TRV of HRPC line |           |                                    |         |
|----------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------|---------|
| 旁路断路器<br>合闸时间/s                                          | TRV 峰值/kV | 上升率RRRV/<br>(kV·μs <sup>-1</sup> ) | 短路电流/kA |
| 未合闸                                                      | 2772      | 1. 35                              | 15. 43  |
| 1. 010                                                   | 886       | 0. 35                              | 15. 48  |
| 1. 012                                                   | 911       | 0. 37                              | 15. 42  |
| 1. 014                                                   | 935       | 0. 40                              | 15. 45  |
| 1. 016                                                   | 925       | 0. 42                              | 15. 49  |
| 1. 018                                                   | 945       | 0. 39                              | 15. 36  |
| 1. 020                                                   | 961       | 0. 45                              | 15. 52  |
| 1. 022                                                   | 992       | 0. 50                              | 15. 45  |
| 1. 024                                                   | 1005      | 0. 56                              | 15. 65  |

如表 2 所示, 采用快速联动旁路抑制措施时 HRPC 线路 TRV 峰值与 RRRV 明显降低, 且满足国家标准<sup>[21]</sup>所规定的 TRV 耐受峰值。对于清除单相接地故障下 TRV 超标工况, 当 HRPC 线路未采用抑制措施时, 输电线路 1. 0 s 发生单相接地故障, 断路器开断后 5 ms 内断路器两端 TRV 达到 2 772 kV 的最大峰值, 对应断路器开断电流为 15. 43 kA, 约为断路器额定短路开断电流 63 kA 的 25 %, 考虑断路器开断试验电流允许偏差, 可按照国家标准规定的 OP1-OP2 所对应的 2 245 kV 进行衡量, 其 TRV 工况超标; 当输电线路采用快速联动旁路抑制措施时 TRV 峰值降至 1 005 kV, 满足国家标准, 且适当加快旁路断路器合闸时间可降低 TRV 峰值与上升率 RRRV。

如图 11 所示, 当可控型 HRPC 补偿度为 70 % 时, 在不采取联动措施与采用快速联动旁路措施两种 TRV 工况条件下断路器 TRV 最大峰值分别为 2 772 kV 与 1 005 kV, TRV 峰值出现时间分别为断路器开断电流过 0 点后 4. 2 ms 和 21. 3 ms, 输电线路采取快速联动旁路措施导致 TRV 最大峰值相较于未采取抑制措施时延迟 17. 1 ms, 降低断路器开断难度, 保证输电线路稳定运行。

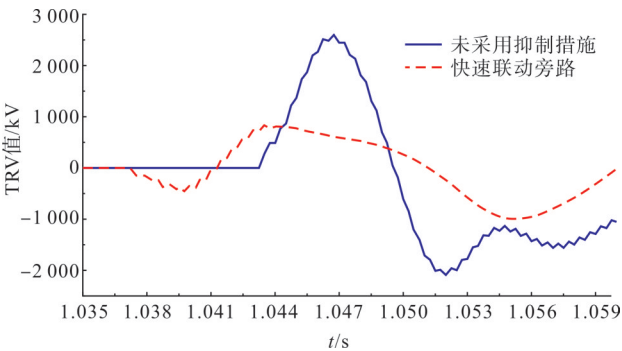


图 11 快速联动旁路对断路器 TRV 的影响

Fig. 11 Influence of fast linkage bypass on TRV of circuit breaker

4. 2 断路器加装分闸电阻

本文在首端断路器装设分闸电阻, 分析分闸电阻对可控型 HRPC 线路断路器两端 TRV 的抑制效果。根据 GB/T 24838-2018《1 100 kV 高压交流断路器》<sup>[21]</sup>, 断路器加装分闸电阻, 分闸电阻阻值一般取为 400~700 Ω, 辅助断口支路分闸电阻接入时间 ≥20 ms。本文依照该要求进行研究。

由表 3 可知, 当首端断路器装设 400~600 Ω 分闸电阻, 输电线路在 HRPC 端部后侧发生单相接地故障时断路器开断清除故障, 与未装设分闸电阻相比, 其断口两端 TRV 峰值显著降低。其中, 断路器主断口与辅助断口 TRV 峰值均随分闸电阻阻值增大呈升高趋势。当断路器开断 HRPC 输电线路短路故障时, 其主断口 TRV 峰值为 1 366 kV~1 685 kV, 显著低于无抑制措施时 TRV 峰值 2 772 kV, 且辅助断口最大 TRV 峰值为 1 242 kV~1 468 kV, 均低于国家标准规定的 2 245 kV, 如图 12 所示。

表 3 断路器所装设分闸电阻的阻值对 HRPC 线路 TRV 的影响

| Tab. 3 Influence of resistance values of the opening resistor installed in circuit breaker on TRV of HRPC line |      |           |                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------|--------------------------------|
| 分闸电阻/Ω                                                                                                         |      | TRV 峰值/kV | 上升率RRRV/(kV·μs <sup>-1</sup> ) |
| 无抑制                                                                                                            |      | 2 772     | 1. 35                          |
| 400                                                                                                            | 主断口  | 1 366     | 0. 36                          |
|                                                                                                                | 辅助断口 | 1 242     | 0. 40                          |
| 500                                                                                                            | 主断口  | 1 495     | 0. 48                          |
|                                                                                                                | 辅助断口 | 1 387     | 0. 50                          |
| 600                                                                                                            | 主断口  | 1 598     | 0. 42                          |
|                                                                                                                | 辅助断口 | 1 398     | 0. 47                          |
| 700                                                                                                            | 主断口  | 1 685     | 0. 52                          |
|                                                                                                                | 辅助断口 | 1 468     | 0. 56                          |

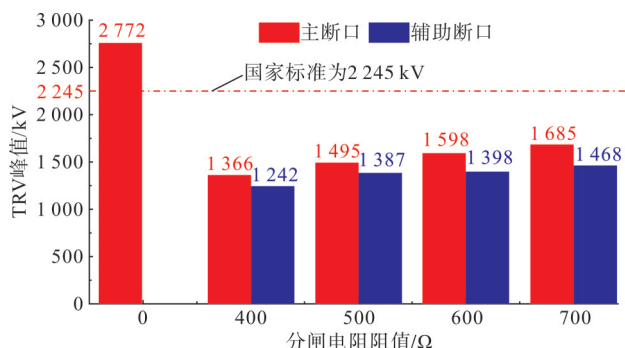


图 12 分闸电阻阻值对 HRPC 线路 TRV 抑制效果

Fig. 12 TRV suppression effect of the resistance values of the opening resistor on HRPC line

分闸电阻要求热容量大且造价高,使断路器结构更加复杂,不仅降低了断路器动作可靠性,更加重了维护检查工作负担。因此,采用断路器是否分闸电阻抑制 TRV 需要具体问题具体分析。

如表 3 所示,当断路器装设 400~600 Ω 分闸电阻时,对 TRV 起始波形 RRRV 具有一定抑制作用。见图 12,当断路器装设 400 Ω 分闸电阻后,TRV 峰值降低 1 406 kV,TRV 初始峰值上升速度变缓,RRRV 由 1.35 kV/μs 降低至 0.4 kV/μs。当断路器开断 HRPC 线路短路故障时,其主断口 RRRV 为 0.36~0.5 kV/μs,辅助断口 RRRV 为 0.42~0.56 kV/μs,均低于不采取抑制措施时 RRRV,满足国家标准要求。

如图 13 所示,断路器主断口与辅助断口 TRV 波形对比可知,当 HRPC 端部后侧 1.0 s 时刻发生单相接地故障时 1.035 s 主断口触头分离,断路器进行大电流阶段,短路电流的增加严重影响断路器电压变化。当断路器主断口触头分离后 TRV 迅速攀升,此时,辅助断口支路分闸电阻接入,电源侧与线路侧建立电气连接,短路电流由断路器主断口转移至辅助断口,利用分闸电阻吸收开断 TRV 产生的能量,从而对 HRPC 线路断路器两端 TRV 进行抑制。

根据图 14(a)—(b) TRV 波形可知,当断路器装设 400~600 Ω 分闸电阻,TRV 峰值与上升率 RRRV 显著降低,满足断路器国家标准,为我国特高压 HRPC 线路设计提供参考。但分闸电阻要求热容量大且造价高,使断路器结构更加复杂,不仅降低了断路器动作可靠性,更加重了维护检查工作负担。因此,采用断路器是否分闸电阻抑制 TRV 需要具

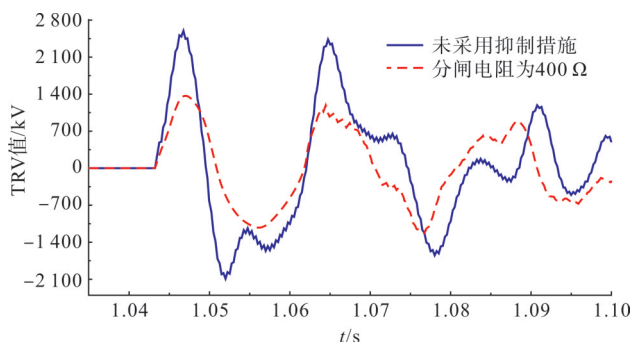
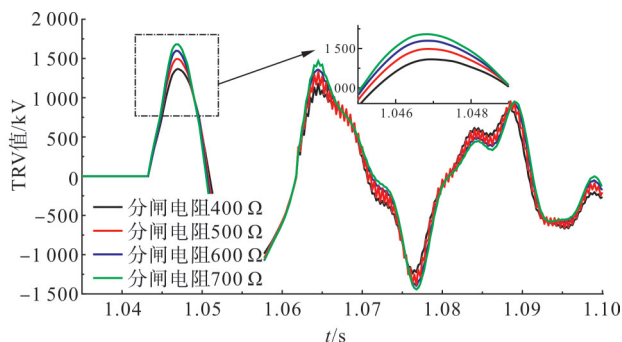
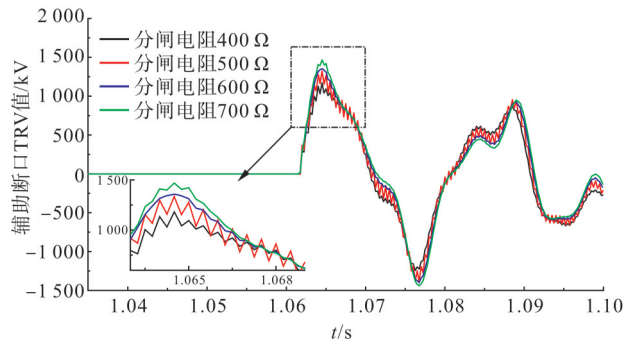


图 13 TRV 波形对比图

Fig. 13 TRV waveform comparison diagram



(a) 主断口 TRV 波形



(b) 辅助断口 TRV 波形图

图 14 断路器主断口与辅助断口 TRV 对比图

Fig. 14 Comparison of TRV between main fracture and auxiliary fracture of circuit breaker

体问题具体分析。

#### 4.3 快速接地开关

本文提出采用 HSGS 对 HRPC 线路 TRV 进行抑制。结合工程实际与 HSGS 对潜供电弧的影响,HSGS 安装在断路器出线侧,接地电阻为 0.5 Ω;1.0 s 在 HRPC 后侧发生单相接地故障,1.035 s 首端断路器开断,1.050 s 末端断路器开断。根据 HSGS 的不同合闸时间,分析 HSGS 对 HRPC 线路 TRV 的抑制效果,如图 15—16 所示。

如图 15 所示,1.0 s 在 HRPC 后侧端部发生单

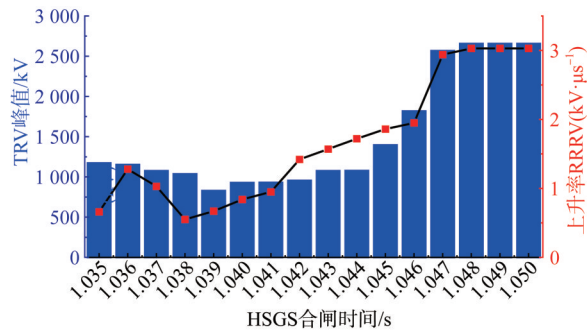


图 15 不同 HSGS 合闸时间对 TRV 的影响

Fig. 15 Effects of different HSGS closing time on TRV

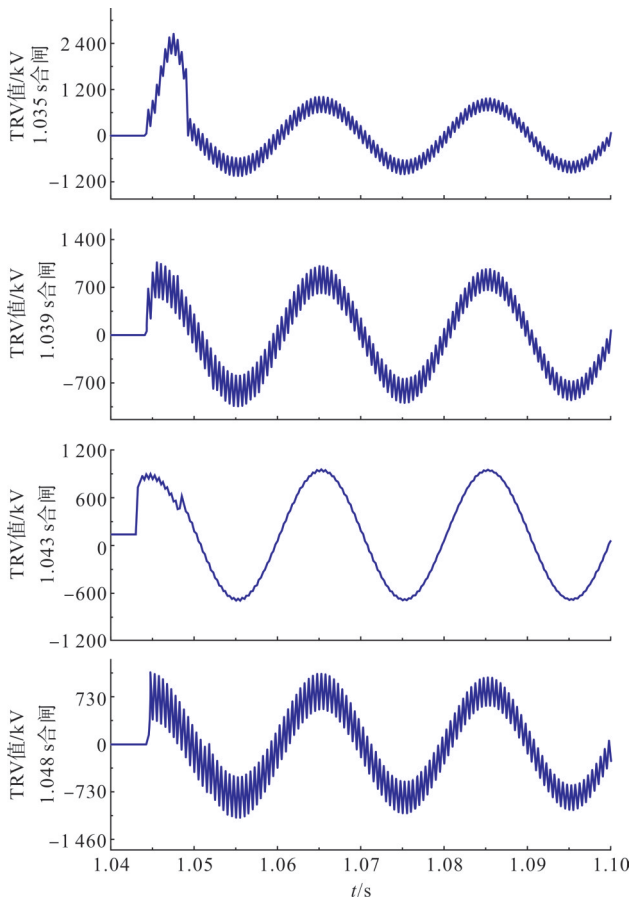


图 16 HSGS 不同时间合闸 TRV 波形对比图

Fig. 16 HSGS different time closing TRV diagrams

相接地故障, 基于断路器分闸时间标准, 1.035 s 首端断路器分闸, 随着 HSGS 合闸时间不断增大, TRV 峰值和上升率 RRRV 整体呈先降低后升高趋势, TRV 峰值与上升率 RRRV 分别在 828~2 655 kV、0.66~3.03 kV/ $\mu$ s 范围内波动。当 HSGS 在 1.047 s 合闸时, TRV 峰值高达 2 567 kV, 高于 1 100 kV 断路器耐压标准, 影响断路器的正常开断。当 HSGS 在 1.035~1.046 s 合闸时, TRV 峰值与上

升率 RRRV 低于断路器国际标准, TRV 成功抑制, 断路器能够正常开断。见图 16, 当 HSGS 在 1.039 s 合闸时, 电压恢复更快, 且大幅削弱由于弧后电导和 HRPC 引起的 TRV 增幅振荡, 提高了断路器绝缘性能。

如表 4 所示, 当输电线路发生短路故障时断路器开断电流快速增大, 断路器进入大电流阶段, 断路器性能显著影响线路电流变化。随着 HSGS 合闸时间不断增大, 断路器开断电流  $I_p$  在 9.20 kV~15.98 kV 范围内波动, 且电流峰值呈衰减趋势。当二次故障于 1.039~1.050 s 发生时, 断路器开断电流  $I_p$  降低 6.78 kA, 满足断路器开断标准, 提高了断路器绝缘性能, 保证了输电线路稳定运行, 如图 17 所示。

表 4 HSGS 合闸时间对合闸电流与断路器开断电流的影响

Tab. 4 Influences of HSGS closing time on closing currents

and breaker breaking currents

| 合闸时间/s | 合闸电流 $I_{HSGS}$ /kA | 断路器开断电流 $I_p$ /kA |
|--------|---------------------|-------------------|
| 1.035  | 11.89               | 15.98             |
| 1.037  | 8.43                | 11.67             |
| 1.039  | 8.11                | 9.20              |
| 1.041  | 7.06                | 9.20              |
| 1.043  | 7.88                | 9.20              |
| 1.045  | 7.48                | 9.20              |
| 1.047  | 7.87                | 9.20              |
| 1.049  | 8.19                | 9.20              |
| 1.050  | 9.24                | 9.20              |

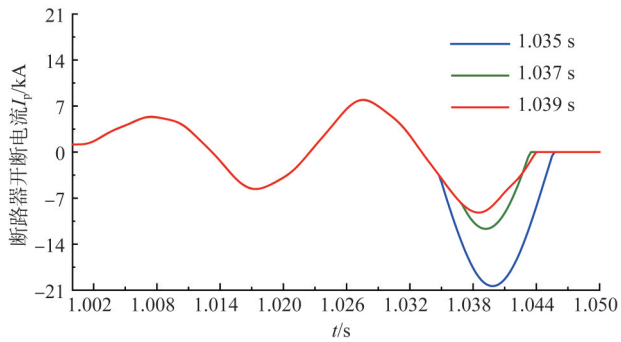


图 17 断路器开断电流随二次故障时间变化波形

Fig. 17 Waveforms of breaking currents of circuit breakers changing with secondary fault times

#### 4.4 组合优化措施

为研究可控型 HRPC 线路 TRV 的最佳抑制方案, 本文采用 3 种抑制措施相互组合形成组合优化

措施, 结合 TRV 最严重超标工况研究了 3 种组合优化措施的抑制效果。设快速联动旁路串补的旁路断路器合闸时间为 1.020 s, 分闸电阻阻值为 400  $\Omega$ , HSGS 合闸时间为 1.043 s。分析了快速旁路串补与分闸电阻、快速旁路串补与 HSGS 以及 HSGS 与分闸电阻组合优化措施 TRV 抑制效果, 结果如表 5 所示。

表 5 不同措施下 TRV 抑制效果

Tab. 5 TRV inhibition effects under different measures

| 抑制措施        | TRV 峰值/kV | 上升率 RRRV/(kV $\cdot\mu$ s $^{-1}$ ) |
|-------------|-----------|-------------------------------------|
| 无措施         | 2 772     | 3.35                                |
| 快速旁路串补      | 886       | 0.35                                |
| 分闸电阻        | 1 366     | 0.36                                |
| HSGS        | 904       | 0.66                                |
| 快速旁路串补+分闸电阻 | 830       | 0.33                                |
| 快速旁路串补+HSGS | 900       | 0.35                                |
| 分闸电阻+HSGS   | 828       | 0.31                                |

由表 5 可知, 当可控型 HRPC 后侧端部发生单相接地故障且线路未采取抑制措施时, TRV 峰值与上升率 RRRV 超过国家标准规定值, 严重威胁断路器绝缘寿命, 因此必须进行抑制。相比线路采用单一抑制措施, 当线路采用组合优化措施时 TRV 峰值明显降低, 当线路采用分闸电阻与 HSGS 组合优化措施时 TRV 峰值降低至 828 kV, 相较于分闸电阻措施降低 523 kV, 抑制效果更加显著。3 种组合优化措施对上升率 RRRV 抑制效果不明显。由表 5 可知, 线路采用组合优化措施时, 当线路采用快速旁路串补与 HSGS 组合优化时 TRV 峰值降低至 900 kV, 而采用快速旁路串补与 HSGS 组合优化或分闸电阻与 HSGS 组合优化措施时 TRV 峰值降低至 828 kV, TRV 峰值降低更明显, 输电线路过电压程度更低, 以保证系统的正常稳定运行。由于特高压输电系统线路过长或系统以最小运行方式运行时可能无法旁路 HRPC 中串联补偿电容, 导致快速旁路串补措施无法对 TRV 进行抑制, 因此本文通过技术指标方案对比, 选取分闸电阻与 HSGS 组合优化方案对可控型 HRPC 线路 TRV 进行抑制, 保证输电系统稳定运行, 为我国建设特高压输电工程奠定坚实的理论基础与参考。

## 5 结论

本文针对特高压可控型 HRPC 线路 TRV 的最严重超标状况, 建立了可控型 HRPC 线路的等效模型, 分析了快速联动旁路串补、断路器加装分闸电阻与快速接地开关以及组合措施优化 4 种抑制方案对可控型 HRPC 线路 TRV 的抑制效果, 仿真表明:

1) 当线路采用快速联动旁路措施时 TRV 峰值降低至 1 005 kV, 且 TRV 波形延迟 17.1 ms 达到峰值; 当断路器装设 400~600  $\Omega$  分闸电阻时, 随着分闸电阻阻值降低, TRV 峰值与 RRRV 明显降低。

2) 提出了 HSGS 抑制措施, 在考虑合闸时间等影响因素下, HSGS 明显降低 TRV 峰值、减少 RRRV 超标工况, 低于断路器国际标准, TRV 得到成功抑制, 断路器能够正常开断, 保证系统稳定运行。

3) 通过比较 3 种单一措施与组合优化措施可知, 当采用分闸电阻与 HSGS 组合优化措施时, TRV 峰值降低至 828 kV, RRRV 为 0.31 kV/ $\mu$ s, 抑制效果最为显著。因此, 本文通过技术指标方案对比, 选择分闸电阻与 HSGS 组合优化方案对可控型 HRPC 线路 TRV 进行抑制, 极大程度降低了系统过电压水平, 保证线路稳定运行。

## 参考文献

- [1] 胡泰山, 蔡汉生, 刘刚, 等. 500 kV 限流电抗器接入 90 kA 短路电流系统时瞬态恢复电压抑制分析[J]. 南方电网技术, 2019, 13(12): 53-59.  
HU Taishan, CAI Hansheng, LIU Gang, et al. Analysis of transient recovery voltage restrictive measures when 500 kV current limiting reactor connected to 90 kA short circuit current system [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(12): 53-59.
- [2] 黄剑湘, 韩建伟, 杨涛, 等. 特高压混合直流输电系统中串联换流器的电压分配策略[J]. 南方电网技术, 2021, 15(8): 71-79.  
HUANG Jianxiang, HAN Jianwei, YANG Tao, et al. Voltage distribution strategy of series converters in hybrid uhvdc power transmission system [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(8): 71-79.
- [3] THIRUMALA K, PAL S, JAIN T, et al. A classification method for multiple power quality disturbances using EWT based adaptive filtering and multiclass SVM [J]. Euro Computing, 2019(334): 265-274.
- [4] 司马文霞, 王荣, 杨庆, 等.  $\pm 1100$  kV 特高压直流换流阀能量泄放过程及相关影响因素[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 25-32.  
SIMA Wenxia, WANG Rong, YANG Qing, et al. Energy

- release process in  $\pm 1$  100 kV UHVDC converter valve and related influencing factors[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 25–32.
- [5] 王平, 韩彬, 张媛媛, 等. 特高压半波长交流输电系统断路器瞬态恢复电压特性研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 22–28.
- WANG Ping, HAN Bin, ZHANG Yuanyuan, et al. Characteristics of transient recovery voltage of circuit breakers in UHV AC half-wavelength transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 22–28.
- [6] 董彦辰, 何柏娜, 贺兴民, 等. 分闸电阻对单相重合闸瞬态恢复电压影响研究[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 170–177.
- DONG Yanchen, HE Baina, HE Xingmin, et al. Study on influence of opening resistance on transient recovery voltage of single-phase reclosing operation [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 170–177.
- [7] SOUSA D W T B, KOTTONAU D, KARRARI S, et al. Deployment of a resistive superconducting fault current limiter for improvement of voltage quality and transient recovery voltage [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(1): 1–9.
- [8] EJIRI H, KUMADA A. Transient recovery voltage in direct current circuit breaker with active current injection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 3278–3281.
- [9] ZHENG B, XIANG Z, BAN L, et al. Study on circuit breaker TRV issues of UHV high series compensation lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 32(16): 867–871.
- [10] 张婧, 杨小霞, 杜巍. 混合无功补偿对特高压输电线路的影响机制研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(5): 92–98.
- ZHANG Jing, YANG Xiaoxia, DU Wei. Influence mechanism of hybrid reactive compensation on UHV transmission lines [J]. Smart Power, 2020, 48(5): 92–98.
- [11] 杨婧婧, 刘洪顺, 何东欣, 等. 特高压混合无功补偿对单相接地故障开断特性的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 39(23): 7083–7090.
- YANG Jingjing, LIU Hongshun, HE Dongxin, et al. The influence of uhv hybrid reactive power compensation on interrupting characteristics in the single phase-ground fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 7083–7092.
- [12] SUN Q, XIAO Z, LIU H, et al. A study on the transient of secondary arc current of UHV transmission lines [J]. IEEE Access, 2018(6): 38616–38626.
- [13] 祝佳佩, 赵文彬. 考虑线路潮流波动对母线电压影响的特高压交流电网电压控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 76–82.
- ZHU Jiapei, ZHAO Wenbin. Voltage control strategy of a UHV AC power grid considering the influence of line power flow fluctuation on bus voltage [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 76–82.
- [14] LIU Zhaoxi, WANG Lingfeng. Defense strategy against load redistribution attacks on power systems considering insider threats [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1529–1540.
- [15] 谢惠藩, 彭光强, 姚传涛, 等. 昆柳龙特高压混合多端直流阀触发生异常分析及优化措施[J]. 南方电网技术, 2024, 18(3): 104–110, 128.
- XIE Huifan, PENG Guangqiang, YAO Chuantao, et al. Analysis and optimization measures of anomaly valve-controlled trigger in kunliulong hybrid multi-terminal UHVDC project [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(3): 104–110, 128.
- [16] 孟凡涛, 何柏娜, 吴硕, 等. 可控型混合无功补偿对瞬态恢复电压影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 126–134.
- MENG Fantao, HE Baina, WU Shuo, et al. The influence of controllable hybrid reactive power compensation on transient recovery voltage [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 126–134.
- [17] 孙义, 刘景晖, 郑昕雷, 等. 特高压GIL接入对断路器瞬态恢复电压的影响[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 240–245.
- SUN Yi, LIU Jinghui, ZHENG Xinlei, et al. Influence of UHV GIL access on transient recovery voltage of circuit breaker [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 240–245.
- [18] 张磊, 余朋军, 卢天林, 等. 特高压变压器中压侧无功补偿运行电压特性分析[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 100–107, 115.
- ZHANG Lei, YU Pengjun, LU Tianlin, et al. Operating voltage characteristics analysis of medium voltage side reactive power compensation for UHV transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 100–107, 115.
- [19] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119–127.
- CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119–127.
- [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 secondary arc characteristics of UHV lines with high compensation degree series compensation [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 78–86.
- [21] 国家电网公司, 中国电力科学研究院有限公司. 1 100 kV 高压交流断路器: GB/T 24838–2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

收稿日期: 2023-07-24; 网络首发日期: 2024-05-20

作者简介:

孟凡涛(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为混合无功补偿与断路器开断特性分析, Mengft0409@163.com;

何柏娜(1977), 女, 通信作者, 副教授, 博士, 从事电力系统暂态特性分析及高电压绝缘技术方面的教学与科研工作, hbn770425@163.com;

李辉(1982), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为输变电设备故障监测与诊断, lihui00312@163.com。

## 征稿启事

《南方电网技术》是由中国南方电网公司主管、南方电网科学研究院有限责任公司主办的电力技术类科技期刊,向国内外公开发行人。刊登电力系统的科研、规划、设计、工程、生产运行、设备和系统维护等方面的成果、经验和动态,尤其是科研创新方面的论文。设有特约专稿、高压直流输电、高电压与绝缘、系统分析与运行、控制与保护、调度与通信、输变电技术、电力技术经济、智能电网、分布式电源与微电网、低碳电力等栏目。热烈欢迎国内外的电力研究人员、工程技术人员、大专院校师生踊跃投稿。

### 1 文稿要求

1)文稿应未在其他刊物上发表过,译文稿件须附上原作者的书面许可证明。内容要有科学性、创新性和实用性;论点明确、数据可靠、说理严谨、数学推导简明;语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。

2)学术论文请按GB 7713—1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写,篇幅以版面不超过9 000字(包括图表所占篇幅)为宜。同时请写明如下a,b,c,d,e五项:

a)作者署名(不宜超过7位)、作者单位、地址、电话、email信箱和邮政编码;

b)论文题目和作者单位英译文,作者姓名的汉语拼音;

c)作者的简历,包括姓名、出生年、性别、籍贯、职称、学位、当前从事的研究或工作等项;

d)350字左右的中文摘要,3~8个关键词,以及摘要和关键词相应的英文文本。摘要采用第三人称写法,内容包括论文的目的、方法、结果和结论;

e)若为国家基金资助项目或部、省级重大科研攻关项目,请提供项目名称及编号。

### 2 书写格式

1)要求文稿正文字号为5号,汉字字体为宋体,英数字体为Times New Roman,希腊字体为Symbol。文稿须采用可编辑的电子文档形式。

2)计量单位采用国家法定计量单位和符号,不能用“大气压”、“kgf/cm<sup>2</sup>”、“卡”、“ppm”等已废除的计量单位。

3)文中和公式中容易混淆的字符请注明文种(希文、英文、罗马字等)、大小写、上下标及上下标字母含义,表示矢量及矩阵的字符用黑斜体表示或特别注明。

4)文稿标题中不宜用缩略词(化学符号和公知公用者除外);摘要和正文中的缩略词在第一次出现时必须写出全称,后加括号附缩略词。

### 3 表格、插图及参考文献

1)表格尽量采用“三线表”。表格的上方写表序和表名。表名应有自明性且中文、英文表名并列。表注放在表底,缩入1个汉字以“注:”起头排版。

2)插图的下放应有图序和图名。图名应有自明性且中英文图名并列。工程图、电气图和函数图采用AutoCAD、

Adobe Illustrator或Corel DRAW软件绘制,工程图和电气图要符合国家标准规定,函数图要标明曲线序号及其注释,坐标轴上要有标值、标目,注明物理量和单位;数码照片图具备200万总像素以上。

3)图片和表格中的文字、变量、单位和数字要齐全、清晰。

4)参考文献应选用公开发表的资料,按引用的先后次序列表于文后,以[1]、[2]…标识序号,且与正文中的指示序号一致。按《信息与文献 参考文献著录规则,GB/T 7714—2015》和《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范,CAJ-CD B/T 1—2006 修订版试行稿》的要求著录文后参考文献。中文参考文献后要并列其英文译文(如示例[6]所示)。

文献类型及其标识为:普通图书[M];会议论文[C];报纸文章[N];期刊文章[J];学位论文[D];报告[R];标准[S];专利[P];汇编[G];档案[B];古籍[O];参考工具[K];其他未说明的文献类型,例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册[Z]。网上期刊[J/OL];网上电子公告[EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

### 4 投稿

1)请登录《南方电网技术》编辑部网站<https://nfdwjs.csg.cn>,选择“作者登录”,登录或注册登录后选择投稿并按提示操作,登录方面出现问题请致电020-36625646咨询。

2)投稿时务必附上联系电话(手机为佳)。

3)编辑部不保证留存稿件,请作者自留底稿。稿件评审进程和结论可在《南方电网技术》编辑部网站上即时查询。作者也可致电020-36625642、36625643或发送电子邮件到nfdwjs@csg.cn向编辑部了解审稿情况。

4)文章一经发表,编辑部便取得作者的自动授权,可将文章收录入本刊网站,及与本刊有合作关系的数据库。

#### 参考文献著录格式示例:

- [1] 刘国钧,陈绍业,王凤翥. 图书馆目录[M]. 北京:高等教育出版社,1957:15-18.
- [2] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用——中国运筹学会第五届大会论文集. 西安:西安电子科技大学出版社,1996:468-471.
- [3] 冯西桥. 核反应堆压力管道与压力容器的LBB分析[R]. 北京:清华大学核能技术设计研究院,1997.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 信息与文献 参考文献著录规则:GB/T 7714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 邓一刚. 全智能节电器:200610171314.3[P]. 2006-12-13.
- [6] 陈祥. 无线技术在现代电网管理中的应用与展望[J]. 南方电网技术,2009,3(6):85-89.  
CHEN Xiang. Development of wireless technology in modern power grid management and its perspective [J]. Southern Power System Technology, 2009,3(6):85-89.
- [7] 王明亮. 关于中国学术期刊标准化数据库系统工程的进展[EB/OL]. (1998-08-16) [1998-10-04]. <http://www.cajcd.edu.cn/pub/wml.txt/980810-2.html>.

《南方电网技术》编辑部