

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.04.015

基于可控消能的直流系统故障下送端交流过电压抑制

黄永瑞^{1,2}, 韩坤^{1,2}, 胡秋玲^{1,2}, 张文博^{1,2}, 袁洪涛^{1,2}, 邵珠柯^{1,2}

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要:大规模新能源接入的常规特高压直流输电系统中,当受端出现换相失败或直流闭锁故障时,送端换流站的无功盈余会造成交流系统出现过电压。为了抑制送端过电压,基于可控消能的原理,文中提出过电压抑制方案。首先,分析直流系统故障下交流系统产生过电压机理,并提出可控消能装置的拓扑和工作原理;其次,通过仿真研究典型故障工况下,可控消能装置对交流系统过电压的抑制作用及其电气应力;然后,进行可控消能装置设计,重点分析避雷器的电位分布和触发开关在不同线圈匝数下电磁斥力机构的静、动态特性,并提出可控消能装置投入和退出控制策略;最后,对研制的可控消能装置样机进行试验验证,证明设计的正确性。研制的可控消能装置已成功应用于±800 kV 鲁固特高压直流输电工程,运行结果表明,可控消能装置能有效抑制交流过电压。

关键词:高压直流输电;交流过电压;可控消能装置;无功功率;避雷器;触发开关

中图分类号: TM72

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)04-0138-09

0 引言

构建以新能源为主体的新型电力系统是实现碳达峰、碳中和目标的关键环节。然而,随着新能源的大规模接入,交流电网的稳定性面临挑战,新能源的波动性和随机性特征对电力系统的功率平衡、抗冲击能力提出了新的要求^[1-5]。

此外,考虑到我国的能源分布与需求分布特点,特高压直流输电成为解决当前大量新能源无法就地消纳问题的关键技术^[6-9]。然而,对于大规模新能源接入的特高压直流送端系统而言,由于交流系统的稳定性减弱,当直流系统受端发生换相失败或直流故障闭锁(非正常停运)后,送端无功补偿设备通常无法及时投切,导致大量无功功率注入交流系统^[10-14]。若送端交流系统的强度不足,这部分多余的无功功率会造成交流系统出现过电压,可能引发大面积新能源脱网和设备损坏,威胁电网的安全稳定运行^[15-18]。

为降低过电压水平,通常采取的措施是限制直流系统的输送功率,但这不利于发挥大直流能源通道的作用,造成资源的极大浪费^[19-20]。

为抑制系统过电压,传统的方法是设置固定的避雷器,但其主要作用是限制持续时间为微秒级的操作过电压和雷电过电压,无法抑制上述弱交流系统可能出现的秒级过电压^[21-23](多次换相失败所致)。

为解决秒级过电压的抑制问题,还可以采用配

置调相机的方式来进行抑制送端系统暂态过电压,但调相机的静态投资及运行维护成本较高,经济性较差。文中基于可控消能的原理,提出在送端换流站交流母线配置交流可控消能装置(以下简称“消能装置”)的方案,可有效解决系统过电压问题,将过电压的幅值限制在 1.3 p.u. 以下。

文中分析了直流系统受端发生换相失败或直流故障闭锁(非正常停运)等故障后,送端交流过电压的产生机理,研究了消能装置的拓扑及工作原理,并开展了系统仿真分析。在此基础上,研究消能装置的详细设计和样机研制,同时进行了试验验证。研制的 440 kV/240 MJ 消能装置已成功应用于±800 kV 鲁固特高压直流输电工程的内蒙古扎鲁特换流站。

1 直流系统故障下弱交流系统过电压机理

在常规直流输电系统中,当晶闸管换流器正常运行时,需要吸收大量无功功率,因此换流站配置了多组无功补偿设备^[24-25]。当直流系统受端发生换相失败或直流故障闭锁后,由于送端滤波场站的无功补偿设备通常来不及投切,会向交流系统中注入大量无功功率^[26-28]。如果送端交流系统强度不足,这部分盈余无功会造成交流系统出现过电压。当受端发生换相失败时,过电压的持续时间可能达到秒级^[29-31]。

送端交流系统的等效电路如图 1 所示。其中 U 为交流系统电压源; L 为交流系统等电感; U_L 为换流器网侧交流电压; V 为晶闸管换流器。

系统短路比 S_{CR} 通常用来表征交流系统的稳定性强弱, S_{CR} 越小代表系统的稳定性越弱。交流系

收稿日期: 2024-08-09; 修回日期: 2024-10-28

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5500-202158108A-0-0-00)

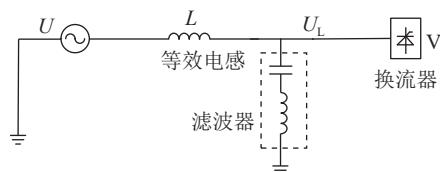


图1 送端交流系统等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of sending end AC system

统等效电感 L 可由短路比表示如下:

$$L = \frac{U_N^2}{\omega S_N S_{CR}} \quad (1)$$

式中: U_N 为送端交流系统标称电压; ω 为交流系统的工频角频率; S_N 为送端换流站额定容量。

当直流系统受端发生换相失败或直流故障闭锁后, 送端交流系统网侧交流电压 U_L 为:

$$U_L = \frac{US_N S_{CR}}{S_N S_{CR} - P \tan \varphi} \quad (2)$$

式中: P 为送端换流站稳态运行有功功率; φ 为送端换流站功率因数角。

式(2)表明, 送端交流系统短路比减小, 即交流系统稳定性越弱, 或者系统稳态运行有功功率越大, 直流系统故障下送端交流系统的过电压幅值就越大。

2 消能装置拓扑及工作原理

为了解决秒级系统过电压问题, 基于可控消能的原理, 提出在送端换流站交流母线配置消能装置, 以抑制交流过电压幅值。消能装置在系统中的安装位置及单相拓扑如图2所示, 虚线框内为消能装置拓扑, 消能装置原理如图3所示。

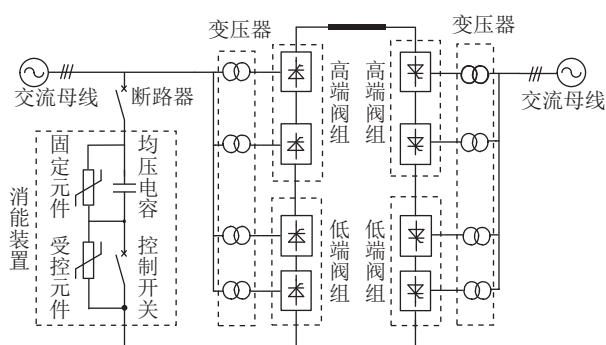


图2 可控消能装置安装位置及单相拓扑

Fig.2 Installation location and topology of controllable energy dissipation device

消能装置主要包括避雷器本体(固定元件和受控元件)、控制开关(触发开关和旁路开关)、均压电容、测量系统及控保系统等。均压电容并联连接在固定元件两端, 用于补偿控制开关和测量电压互感器的电容。触发开关和旁路开关的作用在正常运行时处于分闸状态, 故障工况时收到合闸指令后

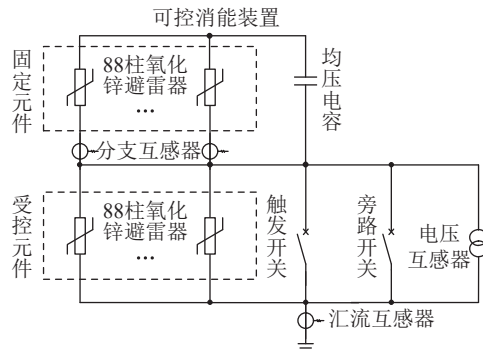


图3 可控消能装置原理

Fig.3 Schematic diagram of controllable energy dissipation device

快速合闸, 从而使受控元件旁路。触发开关采用快速机械开关, 合闸时间不超过 5 ms; 旁路开关采用常规断路器, 合闸时间不超过 40 ms。触发开关的特点是合闸速度快, 但通电流能力弱; 旁路开关的特点是合闸速度相对慢, 但通电流能力强。因此, 消能装置投入时, 千安级电流最终大部分都流过旁路开关。

消能装置工作原理为当电网系统正常运行时, 消能装置中的触发开关和旁路开关处于分闸状态, 避雷器固定元件和受控元件呈现高阻状态, 仅流过泄漏电流。当电网系统出现如单极闭锁、双极闭锁、换相失败等故障工况, 控保系统检测到系统参数满足消能装置投入条件时, 立刻给触发开关和旁路开关同时下达合闸指令。接收到合闸指令后, 触发开关可在 5 ms 时间内导通, 旁路开关则在 40 ms 内导通(触发开关主回路电阻小于 $500 \mu\Omega$, 旁路开关主回路电阻小于 $30 \mu\Omega$, 由于旁路开关的阻抗远小于触发开关, 因此大部分电流最终转移到旁路开关), 将避雷器受控元件短接, 仅固定元件投入运行, 利用避雷器的非线性阻抗特性, 动态调节了避雷器本体的保护水平, 最终将交流母线过电压水平限制到 1.3 p.u. 以下, 如图4所示。

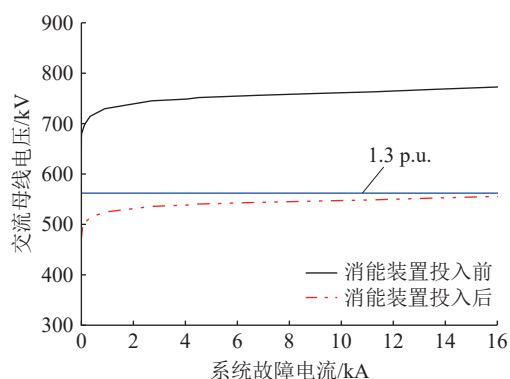


图4 消能装置投入前后效果对比

Fig.4 Effect comparison of energy dissipation device before and after operation

当系统故障消失,控保系统检测到系统参数恢复到正常运行范围后,即给触发开关和旁路开关下达分闸指令,避雷器固定元件和受控元件重新恢复到高阻运行状态。

3 系统仿真

为研究消能装置的功能及电气应力,基于PSCAD搭建±800 kV 直流输电系统仿真模型,仿真消能装置在双极闭锁、单极闭锁、5次换相失败故障工况下对交流系统过电压的抑制作用及装置的电气应力。

系统边界条件为:假定故障发生前,直流系统在额定工况下运行,直流电压为±800 kV;直流电流为6 250 A;输送功率为10 000 MW。

假定故障发生前,送端交流系统为弱系统,短路容量为30 000 MV·A;短路比 S_{CR} 为2;交流额定电压为530 kV。

设定消能装置的控制目标为:交流母线单相电压峰值不超过1.3 p.u.,即不大于562 kV。

消能装置电气应力仿真结果如表1所示。

表 1 消能装置电气应力仿真结果
Table 1 Electrical stress simulation results of energy dissipation device

故障工况	避雷器电压/kV	避雷器电流/kA	避雷器能量/MJ	最大过电压倍数
双极闭锁	529.7	8.48	80.8	1.23
单极闭锁	525.7	5.23	64.7	1.22
5次换相失败	532.5	11.13	139.8	1.23

由表1可以看出,故障工况下交流母线最大暂态电压为532.5 kV,小于限制值562 kV(1.3 p.u.);避雷器固定部分最大电流为11.13 kA;避雷器固定部分最大能量为139.8 MJ。因此,消能装置能够有效地将交流母线过电压峰值限制到1.3 p.u.以下。

4 消能装置设计及控制策略

4.1 消能装置设计原则

考虑一定工程裕度,文中提出了适用于±800 kV 直流输电工程的消能装置,主要技术参数如表2所示。

消能装置具体设计原则如下:

- (1) 消能装置容量应大于5次换相失败避雷器吸收能量的1.4倍,并考虑20%的设计裕度;
- (2) 消能装置保护水平为交流母线电压不超过1.3 p.u.;
- (3) 消能装置具备不小于1 s的连续投入能力。

表 2 消能装置主要技术参数
Table 2 Main technical parameters of energy dissipation device

参数	数值
额定电压/kV	440
避雷器固定元件残压/kV	562
避雷器吸收能量/MJ	≥240
触发导通时间/ms	≤5

4.2 消能装置设计

消能装置各主要部件的技术参数如表3—表6所示。

表 3 避雷器固定元件参数
Table 3 Parameters of arrester fixed element

参数	数值
持续运行电压 V_{rms}/kV	动作前 229 动作后 318
泄漏电流/mA	动作前 270 动作后 5
避雷器通过15 kA放电电流时,其端子间的最大电压峰值/kV	562
避雷器吸收能量/MJ	≥240
在直流参考电流1 mA下,避雷器直流参考电压/kV	≥443
电阻片能量容许值/(J·cm ⁻³)	200

表 4 避雷器受控元件参数
Table 4 Parameters of arrester controlled element

参数	数值
持续运行电压 V_{rms}/kV	89
在直流参考电流1 mA下,避雷器直流参考电压/kV	≥174
电阻片能量容许值/(J·cm ⁻³)	200

表 5 触发开关参数
Table 5 Parameters of trigger switch

参数	数值
导通时间/ms	≤5
额定电压/kV	89
关合电流/kA	15
关合电压/kV	215

(1) 避雷器设计。

常规交流避雷器的能量通常不超过10 MJ。消能装置中,为了抑制秒级过电压,消耗能量较大,避雷器的设计能量为240 MJ,电阻片为88柱并联,远远超过常规避雷器的单柱并联。其中,单柱由121个电阻片串联组成,固定元件由87个电阻片串联组成,受控元件由34个电阻片串联组成,可控比为28%。为了解决大容量多柱并联避雷器的电阻片电

表 6 旁路开关参数
Table 6 Parameters of bypass switch

参数	数值
开断时间/ms	≤40
转移电流/kA	≥15
额定短时耐受电流/kA	63
耐受时间/s	3

位均匀分布问题,降低杂散电容的影响,采用了避雷器双列布置、双层屏蔽环设计方案。为验证避雷器设计的有效性,利用 COMSOL 软件,基于仿真模型与实物结构尺寸一致,材料属性相同的建模原则,进行避雷器电阻片电位分布仿真研究。避雷器仿真模型如图 5 所示。

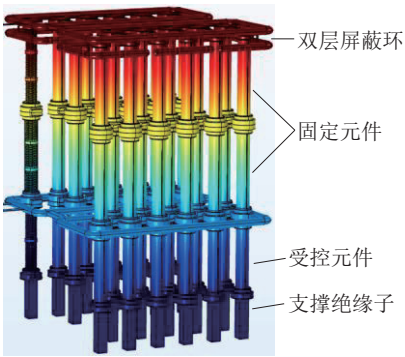


图 5 避雷器仿真模型
Fig.5 Simulation model of arrester

仿真表明,影响电阻片电位分布的关键因素为避雷器电阻片的本体电容、双层屏蔽环对避雷器本体的杂散电容、避雷器本体对地的杂散电容。电阻片不均压系数结果如图 6 所示,针对单个电阻片,电压分布不均压系数=(单个电阻片所承受电压/整体避雷器电阻片平均承受电压-1)×100%。

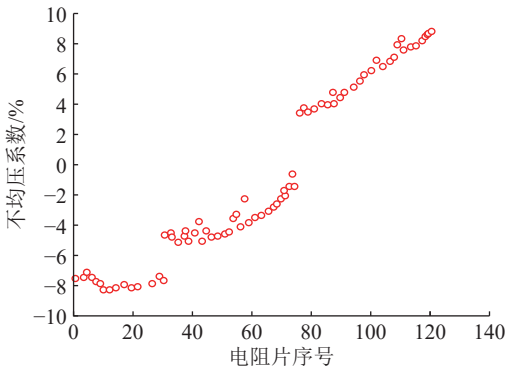


图 6 电阻片不均压系数
Fig.6 Uneven voltage coefficient of resistor

根据仿真结果可以看出,电阻片的最大电压分布不均压系数为 8.99%,小于国家标准要求的 15% 限值,且有充足的裕度,证明了设计的正确性。

(2) 触发开关设计。

为了实现快速抑制系统过电压的目的,消能装置中触发开关采用的是快速机械开关,额定电压为 89 kV,合闸时间≤5 ms(远小于常规机械开关 40 ms 的合闸时间)。为实现快速合闸,触发开关配置了电磁斥力机构(目前动作时间最短的开关操动机构),其平均合闸速度达 4~5 m/s,峰值速度接近 10 m/s,是一般开关的 5~10 倍。灭弧室由 2 个真空单元模块串联组成,每个真空单元模块主要包括真空灭弧室、均压装置和操作机构等。触发开关真空灭弧室采用户外固封极柱形式,其断口并联均压电容。触发开关示意如图 7 所示。

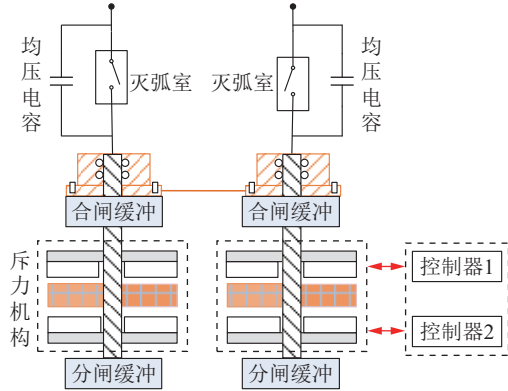


图 7 触发开关示意
Fig.7 Schematic diagram of trigger switch

研究触发开关电磁斥力机构的不同分合闸斥力线圈匝数对斥力机构电磁斥力、合闸位移及合闸运动速度的影响,并进行仿真分析,得到了满足快速触发开关技术要求的斥力机构最优参数。触发开关在不同分合闸斥力线圈匝数下的合闸动态特性如图 8—图 10 所示。

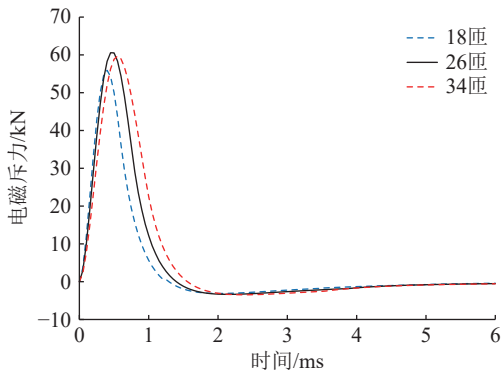


图 8 不同线圈匝数下的斥力机构合闸运动电磁斥力
Fig.8 Electromagnetic repulsion force during the closing motion of a repulsion mechanism with different coil turns

电磁斥力机构分合闸保持装置可以保证触发开关保持在分闸或合闸位置,采用的分合闸保持装置可提供 3 500 N 的保持力。

为了避免合闸速度过快造成触发开关触头因高速冲击造成损坏,设计了高速合闸缓冲装置,该

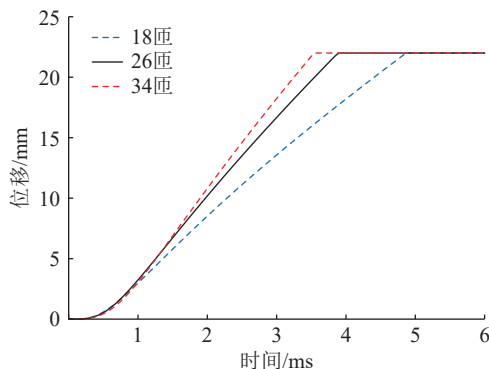


图9 不同线圈匝数下的斥力机构合闸位移

Fig.9 The closing motion displacement of a repulsion mechanism with different coil turns

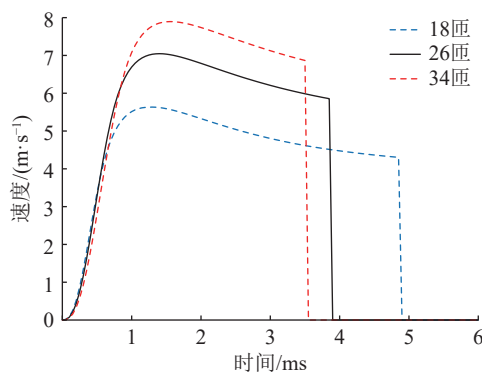


图10 不同线圈匝数下的斥力机构合闸运动速度

Fig.10 The closing motion speed of a repulsion mechanism with different coil turns

缓冲装置由弹簧缓冲和液压缓冲等组成的多级缓冲构成,可在较短行程内快速、平滑地将触发开关的高速运动部分速度降至可接受范围内。

4.3 消能装置控制策略

当直流系统出现故障时,直流电流或直流电压的变化会早于且快于交流过电压的发展速度。为了最大限度地限制过电压的幅值,并确保消能装置尽快投入,消能装置控制逻辑采用基于检测直流量变化的方式来实现,详细控制策略如下:

(1) 消能装置投入策略。

消能装置投入信号产生逻辑为直流电压变化大于阈值或直流电流变化大于阈值,这2个条件中任意1个满足即发出消能装置投入信号。

直流电压变化阈值为:

$$\Delta U = \min \{ (U_D - U_{60}), 10(U_D - U_4) \} \quad (3)$$

式中: U_D 为直流电压实际值; U_{60} 为 60 个周期之前的电压实际值; U_4 为 4 个周期之前的电压实际值。

当 $\Delta U < -0.3$ p.u. 时,延迟 0.2 ms 消能装置触发投入;当 $\Delta U < -0.6$ p.u. 时,消能装置直接触发投入。

直流电流变化阈值为:

$$\Delta I = \max \{ 5(I_D - I_2), 10(I_D - I_1) \} \quad (4)$$

式中: I_D 为直流电流实际值; I_2 为 2 个周期之前的电流实际值; I_1 为 1 个周期之前的电流实际值。

当 $\Delta I > 0.2$ p.u. 时,延迟 0.2 ms 消能装置触发投入;当 $\Delta I > 0.5$ p.u. 时,消能装置直接触发投入。

消能装置投入控制流程如图 11 所示。

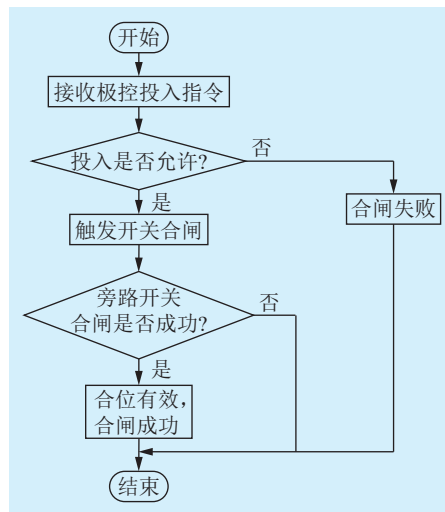


图11 消能装置投入控制流程

Fig.11 Control flow chart of energy dissipation device input

(2) 消能装置退出策略。

直流电压变化退出条件。当直流电压实际值恢复至 0.9 p.u., 延迟 100 ms 消能装置退出运行。

直流电流变化退出条件。当直流电流实际值与工程正常电流参考值比较,偏差小于 5%, 延迟 100 ms 消能装置退出运行。

消能装置退出控制流程如图 12 所示。

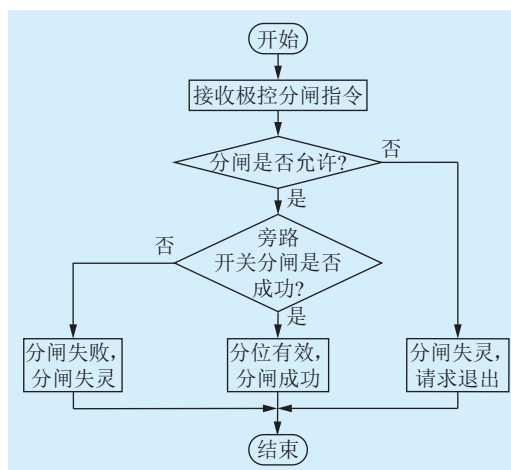


图12 消能装置退出控制流程

Fig.12 Control flow chart of energy dissipation device exit

5 样机试验

根据第 4 章的设计,研制额定电压为 440 kV 的

消能装置样机, 如图 13 所示。

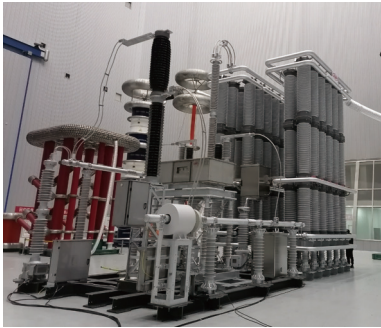


图 13 消能装置样机

Fig.13 Prototype of energy dissipation device

对消能装置进行型式试验, 主要包括绝缘试验和运行试验。型式试验项目及试验内容如表 7 和表 8 所示。

表 7 绝缘试验项目及内容

Table 7 Insulation test items and contents

试验位置	试验项目	试验内容
固定元件端间	交流电压耐受试验	交流电压有效值425 kV, 时间1 min
		交流电压有效值274.8 kV, 时间30 min
	操作冲击试验	操作冲击电压925 kV
	雷电冲击试验	雷电冲击电压1 280 kV
受控元件端间	交流电压耐受试验	交流电压有效值165 kV, 时间1 min
		交流电压有效值106.8 kV, 时间30 min
	操作冲击试验	操作冲击电压250 kV
	雷电冲击试验	雷电冲击电压270 kV

表 8 运行试验项目及内容

Table 8 Operational test items and contents

试验项目	试验内容
电流转移试验	试验总电流15 kA, 试验时间60 ms, 测试触发开关和旁路开关支路电流, 试验次数共3次
模拟触发开关合闸失灵, 进行通流试验	试验总电流15 kA, 试验时间60 ms, 测试旁路开关支路电流, 试验次数共3次

绝缘试验过程中, 消能装置无闪络、击穿放电现象, 无元器件损坏。操作试验波形如图 14 所示。

运行试验过程中, 消能装置各部件及本体保护正常动作, 从消能装置接到合闸指令到触发开关通流时间为 4.4 ms; 到旁路开关合闸通流时间为 38 ms; 试验电流为 15.5 kA; 试验电流时间为 60.5 ms。试验结果满足要求, 电流转移(此处是指消能装置接到合闸指令后, 电流从触发开关通流转移旁路开关

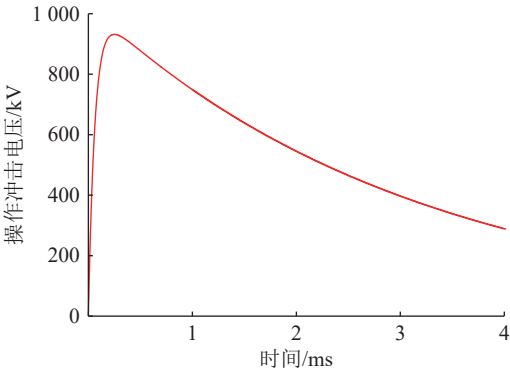


图 14 操作冲击试验波形

Fig.14 Waveform of switching impulse test

通流)试验波形如图 15 所示。

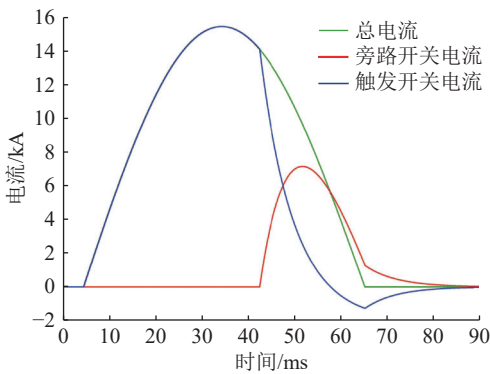


图 15 电流转移试验波形

Fig.15 Waveforms of current transfer test

试验后部件未发生损坏, 且触发开关和旁路开关能够正常分合闸。试验过程中, 测试了触发开关和旁路开关支路电流, 验证了触发开关的通流、最大电流转换能力以及控制开关整体控制保护单元设计的正确性。试验结果证明了消能装置设计的正确性。

6 结论

文中基于可控消能原理, 提出在送端换流站交流母线配置交流可控消能装置方案, 可有效解决系统过电压问题, 将过电压的幅值限制在 1.3 p.u. 以下。具体如下:

- (1) 分析直流系统故障下弱交流系统产生过电压的机理, 为抑制过电压水平, 提出可控消能装置的拓扑。
- (2) 搭建系统仿真模型, 分别研究直流输电系统在双极闭锁、单极闭锁、换相失败故障工况下消能装置的电气应力, 并提出消能装置的核心技术参数。
- (3) 完成消能装置设计和关键组件技术研究, 并提出相应的控制策略。

(4) 研制额定电压为 440 kV 的消能装置样机, 并进行试验验证, 试验结果证明了设计的正确性。

文中研制的消能装置已应用于 ± 800 kV 鲁固特高压直流输电工程, 运行结果表明, 可控消能装置可有效抑制交流过电压。

参考文献:

- [1] 邓楠, 郝亮亮, 和敬涵, 等. 受端混联型多端直流输电系统逆变器交流故障特性分析及协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 54-64.
DENG Nan, HAO Liangliang, HE Jinghan, et al. AC fault characteristics analysis and coordinated control strategy on the inverter side of a receiving-end hybrid multi-terminal HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 54-64.
- [2] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(1): 1.
- [3] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [4] 郝文斌, 孟志高, 张勇, 等. 新型电力系统下多分布式电源接入配电网承载力评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 23-33.
HAO Wenbin, MENG Zhigao, ZHANG Yong, et al. Carrying capacity evaluation of multiple distributed power supply access to the distribution network with the background of a new power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 23-33.
- [5] 谈竹奎, 文贤馥, 杨涛, 等. 面向新型电力系统的双馈风力发电机并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 181-187.
TAN Zhukui, WEN Xiankui, YANG Tao, et al. A grid-connected control strategy for doubly-fed wind turbines for new power systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 181-187.
- [6] 柳飞扬, 曾平, 李征. 电网故障下全功率风电场内部机组的暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 43-54.
LIU Feiyang, ZENG Ping, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with a full-scale converter under grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 43-54.
- [7] NADOUR M, ESSADKI A, NASSER T. Improving low-voltage ride-through capability of a multimewatt DFIG based wind turbine under grid faults[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(4): 1-13.
- [8] 丁坤, 陈博洋, 秦建茹, 等. 大规模新能源集群接入弱电网的消纳能力评估方法[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 86-94.
DING Kun, CHEN Boyang, QIN Jianru, et al. Evaluation method of consumption ability of new large scale energy clusters connected to weak grids[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 86-94.
- [9] 马会萌, 李相俊, 吴荣宇, 等. 兼顾新能源消纳和主动支撑电网能力提升的多类型储能容量优化配置[J]. 电力建设, 2024, 45(6): 111-119.
MA Huimeng, LI Xiangjun, WU Rongyu, et al. Optimal capacity configuration method for multi-type energy storage systems enhancing new energy consumption and actively supporting the grid[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 111-119.
- [10] ZHANG T, YAO J, SUN P, et al. Improved continuous fault ride through control strategy of DFIG-based wind turbine during commutation failure in the LCC-HVDC transmission system[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(1): 459-473.
- [11] 肖超, 韩伟, 李琼林, 等. 基于虚拟电阻的高压直流换相失败期间送端电网暂态过电压抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 122-129.
XIAO Chao, HAN Wei, LI Qionglin, et al. A suppression method for overvoltage of a sending end grid caused by commutation failure based on virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 122-129.
- [12] 王秋楠, 晋宏杨, 刘东, 等. LCC-HVDC 换流站无功电压控制问题综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2): 10-17.
WANG Qiunan, JIN Hongyang, LIU Dong, et al. Review on reactive voltage control of LCC-HVDC converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 10-17.
- [13] 黎立丰, 刘春晓, 朱浩骏, 等. 考虑网络安全约束的可再生能源消纳能力评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(4): 162-168.
LI Lifeng, LIU Chunxiao, ZHU Haojun, et al. Absorptive capability evaluation method of renewable energy considering security constraints of power grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(4): 162-168.
- [14] 韩璐, 尹纯亚, 戴晨, 等. 高比例新能源送端系统暂态电压运行风险分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 23-34.
HAN Lu, YIN Chunya, DAI Chen, et al. Transient voltage operational risk of a high-proportion new energy sending system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 23-34.

- 23-34.
- [15] 林圣, 雷雨晴, 刘健, 等. HVDC 送端系统故障引发受端换相失败分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1669-1680.
LIN Sheng, LEI Yuqing, LIU Jian, et al. Analysis of receiving-side commutation failure mechanism caused by HVDC sending-side system fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1669-1680.
- [16] 孙家豪, 王笑雪, 李光辉, 等. 换相失败引起送端电网过电压的定量计算及影响因素[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(12): 62-68.
SUN Jiahao, WANG Xiaoxue, LI Guanghui, et al. Quantitative calculation and influencing factors of overvoltage of sending-side system caused by commutation failure[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(12): 62-68.
- [17] 尹纯亚, 李凤婷, 王丹东, 等. 风电高渗透率交直流外送系统直流闭锁稳控方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 95-102.
YIN Chunya, LI Fengting, WANG Dandong, et al. Research on stability control scheme for AC/DC hybrid transmission system with wind power high permeability under DC blocking[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 95-102.
- [18] 李帛洋, 晁璞璞, 徐式蕴, 等. 风电经特高压直流送出系统的暂态过电压问题研究综述[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 26-35.
LI Boyang, CHAO Pupu, XU Shiyun, et al. Review on transient overvoltage issues of wind power transmission system via UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 26-35.
- [19] 牛宇昆, 文俊, 马立民, 等. 换相失败引起的送端电网暂态过电压抑制措施研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(11): 59-65, 96.
NIU Yukun, WEN Jun, MA Limin, et al. Transient overvoltage suppression measures for sending-end power grid caused by commutation failure[J]. Smart Power, 2021, 49(11): 59-65, 96.
- [20] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [21] HE Y J, XIANG W, NI B Y, et al. Impact of strength and proximity of receiving AC systems on cascaded LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 880-892.
- [22] WEI J, CAO Y J, WU Q W, et al. Coordinated droop control and adaptive model predictive control for enhancing HVRT and post-event recovery of large-scale wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(3): 1549-1560.
- [23] 刘东洋, 徐捷, 孙宁, 等. 用于稳定控制的 HVDC 换相失败识别判据研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 108-114.
LIU Dongyang, XU Jie, SUN Ning, et al. Identification criteria of HVDC commutation failure for stability control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 108-114.
- [24] 刘晓琳, 曹泽宇, 高丙团, 等. HVDC 送端交流系统故障暂态过电压评估指标[J]. 电力建设, 2023, 44(1): 64-72.
LIU Xiaolin, CAO Zeyu, GAO Bingtuan, et al. Evaluation index of transient overvoltage during fault at HVDC sending-end AC system[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1): 64-72.
- [25] 马星, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 整流侧换流母线电压恢复导致逆变器换相失败的机理分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 83-88.
MA Xing, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Mechanism analysis of inverter commutation failure caused by voltage recovery of commutation bus at rectifier side[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 83-88.
- [26] 孟沛戡, 向往, 潘尔生, 等. 分址建设直流输电系统拓扑方案与运行特性研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(19): 4808-4822.
MENG Peiyu, XIANG Wang, PAN Ersheng, et al. Research on topology and operation characteristics of HVDC transmission system based on site-division construction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4808-4822.
- [27] 刘泽洪, 马为民, 王绍武, 等. 混合级联特高压直流输电系统方案设计及动模试验验证[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1214-1222.
LIU Zehong, MA Weimin, WANG Shaowu, et al. Schematic design of hybrid cascaded ultra HVDC and its modification in dynamic model experiment[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1214-1222.
- [28] 万帅, 许衡, 曹伟, 等. 220 kV 交流无间隙金属氧化物避雷器电位分布及改善措施研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(4): 50-55.
WAN Shuai, XU Heng, CAO Wei, et al. Study on potential distribution and improvement measures of MOA for 220 kV AC system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(4): 50-55.
- [29] 严伟, 郑毅, 张广泰, 等. 特高压换流站可控消能装置均压环优化设计[J]. 电瓷避雷器, 2023(4): 205-212.
YAN Wei, ZHENG Yi, ZHANG Guangtai, et al. Optimization for grading rings of UHVDC controllable energy absorption device[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(4): 205-212.
- [30] 蔡斌, 袁康, 梁茂祺, 等. 基于 Simulink 的串联间隙避雷器雷

击能量过负荷问题分析[J]. 电瓷避雷器, 2024(3): 96-104,113.

CAI Bin, YUAN Kang, LIANG Maoqi, et al. Lightning strike energy overload problem of series gap arrester based on Simulink[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 96-104,113.

[31] 冯亮. 出线侧避雷器对雷电侵入过电压影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(2): 113-118,126.

FENG Liang. Influence of outlet side arrester on lightning intrusion overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(2): 113-118,126.

作者简介:



黄永瑞

黄永瑞(1982), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 从事常规直流输电换流阀、柔性直流输电换流阀研发和工程应用工作(E-mail: 163hyr@163.com);

韩坤(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 从事常规直流输电换流阀、柔性直流输电换流阀研发和工程应用工作;

胡秋玲(1988), 女, 硕士, 工程师, 从事常规直流输电换流阀、柔性直流输电换流阀研发和工程应用工作。

Suppression of AC overvoltage at sending end under DC transmission system fault based on controllable energy dissipation

HUANG Yongrui^{1,2}, HAN Kun^{1,2}, HU Qiuling^{1,2}, ZHANG Wenbo^{1,2}, YUAN Hongtao^{1,2}, SHAO Zhuke^{1,2}

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: In the conventional high voltage direct current transmission system with large-scale new energy access, when commutation failure or DC blocking occurs at the receiving end, the reactive power surplus at the sending converter station may cause overvoltage in the AC system. In order to suppress the overvoltage at the sending end, an overvoltage suppression device is proposed based on the principle of controllable energy dissipation. Firstly, the overvoltage mechanism in weak AC system under the fault of DC system is analyzed, and the topology and working principle of the controllable energy dissipation device are proposed. Secondly, the suppression effect and electrical stress of the controllable dissipation device on AC system overvoltage under typical fault conditions is simulated and studied. Then, the design of the controllable dissipation device is carried out, focusing on the potential distribution of the arrester and the static and dynamic characteristics of electromagnetic repulsion of the trigger switch under different coil turns, the entry and exit control strategy of the dissipation device is proposed. Finally, the experimental verification of the energy dissipation device prototype is carried out, proving the correctness of the design. The energy dissipation device developed is successfully applied to the ± 800 kV Lu-Gu high voltage direct current transmission project, and the operation results show that the controllable energy dissipation device can effectively suppress of AC overvoltage.

Keywords: high voltage direct current transmission; AC overvoltage; controllable energy dissipation device; reactive power; arrester; trigger switch

(编辑 吴昊)