

双极闭锁故障下送端新能源高渗透系统暂态过电压抑制措施

李欣悦^{1,2}, 尹纯亚³, 李琳^{1,2}, 王思珏^{1,2}, 陈莹^{1,2}

(1. 思极智联(天津)信息通信科技有限公司, 天津 300000;

2. 天津市普迅电力信息技术有限公司, 天津 300000;

3. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要:针对直流双极闭锁故障导致的送端新能源高渗透地区暂态过电压问题,以送端系统中安全裕度最低的风电场暂态过电压抑制至目标值以下作为约束条件,提出一种换流母线无功配置容量优化方案。在此基础上,提出一种双极闭锁故障下抑制送端系统暂态过电压的切机方案,通过故障发生后优先切除不具备高压穿越能力的风电机组,实现送端系统两段式电压稳定控制。最后,基于 DIgSILENT 仿真平台搭建±800 kV 天中直流输电系统及其送端电网简化模型。仿真结果表明,提出的无功优化配置方案及切机方案可将目标节点的暂态过电压降低 0.12 p.u.,精确度可达 95.56%。所提方案在抑制直流闭锁引起的暂态过电压方面具有显著效果,可有效防止新能源大规模连锁脱网,提高系统的稳定性及可靠性。

关键词:直流闭锁;新能源高渗透;送端交流系统;无功优化配置;切机方案;高压穿越能力

中图分类号:TM721.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)04-0159-08

0 引言

在“双碳”背景下,高压直流外送通道成为解决我国大范围电力资源优化配置问题的主要途径^[1-4]。然而,随着交流系统中新能源装机占比的提升,“强直弱交”问题日益显著,当直流线路出现闭锁故障时,送端系统呈现以暂态过电压为主导的特征^[5-10]。新能源机组由于缺乏自身无功支撑能力^[11-15],电压大幅度升高,容易导致其大规模脱网^[16-17]。因此,研究防止新能源大规模连锁脱网的暂态过电压抑制措施对保障电力系统稳定性具有重要意义。

国内外学者针对交直流混联系统暂态过电压抑制方法开展了深入研究。目前,针对直流闭锁故障后暂态过电压的抑制措施主要为无功优化配置和切机两种方案。文献[18]提出三角形近似法求取大容量直流输电线路闭锁后的切机总量,改善了控制总量预估的保守性;文献[19]利用粒子群算法进行寻优得到分布式调相机优化配置方案,抑制了高比例新能源直流送端系统暂态过电压;文献[20]提出考虑直流闭锁过程的多直流功率支援和送端切机的紧急协同控制策略,以保障故障后系统的暂态稳定。直流闭锁故障后新能源机组脱网会进一步恶化暂态过电压程度,而上述切机方案均缺乏对直流近区域新能源机组高压穿越(high voltage ride-through, HVRT)能力的考量。

文中提出一种考虑风电 HVRT 的无功优化配

置方案,基于阻抗比精确揭示送端电网内部各个节点的暂态过电压分布情况;然后通过计算直流双极闭锁后的暂态过电压,在保障直流闭锁后送端系统安全裕度最低的风电场可靠不脱网的目标下,优化换流母线处无功配置容量,降低送端电网新能源脱网风险。在此基础上,提出一种抑制送端系统暂态过电压的切机方案,通过切除不具备 HVRT 能力的风电机组,进一步提高送端电网电压稳定性。基于 DIgSILENT/PowerFactory 电力系统电磁机电暂态混合仿真软件,搭建±800 kV 天中直流输电系统及其送端电网模型,通过仿真验证了文中提出的无功优化配置方案及切机方案的有效性。

1 直流闭锁故障对送端系统的影响分析

1.1 直流双极闭锁后送端系统暂态过电压分析

直流闭锁分为单极、双极闭锁。单极闭锁是指直流系统正、负两极中有一极换流阀关断处于闭锁状态,而另一健全极正常输送功率。双极闭锁则指直流系统正、负两极换流阀均关断,直流系统停止输送功率。

直流闭锁故障后功率传输受到限制,盈余的无功功率会造成换流母线处及送端电网各节点中出现电压抬升。根据文献[21-22],换流母线处暂态过电压 ΔU_L 为:

$$\Delta U_L = \left[-\sqrt{\left(\frac{S_C}{2Q_C} \right)^2 - \frac{S_C}{Q_C} - \frac{Q_{AC}}{Q_C} + \frac{S_C}{2Q_C} - 1} \right] U_{LN} \quad (1)$$

式中: S_C 为交流系统短路容量; U_{LN} 为换流母线电压

基准值; Q_{AC} 为交直流系统间交换的无功功率; Q_C 为常规直流稳态运行时换流母线交流滤波器组与无功补偿装置提供的无功功率。

根据文献[23-24], 交流系统中任一节点 k 的变化量与换流母线处电压变化量的关系为:

$$\frac{\Delta U_k}{\Delta U_L} = \left| \frac{Z_{kL}}{Z_{LL}} \right| \quad (2)$$

式中: ΔU_k 为节点 k 电压压升值; Z_{kL} 为节点 k 到换流母线处的等值阻抗; Z_{LL} 为换流母线处等值阻抗。

$|Z_{kL}/Z_{LL}|$ 为阻抗比 $Z_k^{[21]}$, 则式(2)可表示为:

$$\Delta U_k^* = Z_k \Delta U_L^* \quad (3)$$

式中: ΔU_k^* 为节点 k 电压压升的标么值; ΔU_L^* 为换流母线处暂态过电压的标么值。阻抗比 Z_k 可精确揭示送端电网内部各个节点的暂态过电压分布情况, 进而有效评估新能源机组的高压脱网风险水平。

1.2 新能源机组 HVRT 标准分析

直流系统发生双极闭锁故障后, 新能源机组的 HVRT 能力是指当系统发生扰动或故障导致新能源公共连接点(point of common coupling, PCC)电压骤升时, 机组能够保持一段时间不脱网, 并在电压恢复后维持运行的能力。当 1.1 节所述的暂态过电压较为严重时, 容易导致新能源机组高电压穿越失败并引发连锁脱网, 严重威胁送端系统的安全稳定运行。

随着我国西部地区新能源资源的高度开发, 大规模风电场相继建成, 交流系统暂态过电压引起的新能源机组高压脱网现象逐渐得到重视。2022 年出台的《风电场接入电力系统技术规定》中制定了我国风电机组 HVRT 的相关技术标准^[25]。

文中基于表 1 中风电机组 HVRT 标准数据开展双极闭锁故障下暂态过电压抑制措施研究。

表 1 我国风电机组 HVRT 技术标准
Table 1 China's wind turbine HVRT technical standards

并网电压 $U/p.u.$	故障后运行情况
$U \leq 1.1$	不脱网
$1.1 < U \leq 1.2$	不脱网连续运行 10 s
$1.2 < U \leq 1.25$	不脱网连续运行 1 s
$1.25 < U \leq 1.3$	不脱网连续运行 500 ms
$U > 1.3$	脱网

2 抑制送端系统暂态过电压的无功优化配置方案

换流站运行时消耗的无功功率一般为传输有功功率的 30%, 无功容量配置越多引发的送端系统暂态过电压程度越高^[26-27]。直流双极闭锁故障下,

送端系统近区域 HVRT 能力不足的风电机组极易受到由延时切除无功补偿装置及滤波器引起的暂态过电压的影响, 从而引发连锁脱网。因此, 文中结合 1.2 节风电系统的 HVRT 能力对换流母线处的无功优化配置方案进行研究。

利用式(1)及式(3)计算出各 PCC 暂态过电压 $\Delta U_{\max}^*$, 同时结合各风电场 HVRT 标准 H_n 计算出各节点的安全裕度 S_n 为:

$$S_n = H_n - \Delta U_{\max}^* \quad (4)$$

找出安全裕度最低值 S_x , 结合最低安全裕度和节点阻抗比反推出换流母线处所需降低的电压值 ΔU_{Lx}^* 为:

$$\Delta U_{Lx}^* = \frac{S_x}{Z_x} \quad (5)$$

式中: Z_x 为安全裕度最低节点 x 的阻抗比。

考虑换流站配置调相机的无功调节能力 ΔQ_{HVDC} , 根据式(5)求出换流母线处无功功率待优化量 ΔQ_{need} 为:

$$\Delta Q_{\text{need}} = \Delta U_{Lx}^* S_C + \Delta Q_{HVDC} \quad (6)$$

考虑风电穿越能力的无功优化方案具体步骤如下。

步骤 1: 根据工程实际确定送端各个风电场的 HVRT 能力。将近区域风电场 1、风电场 2、...、风电场 n 的 HVRT 标准分别表示为 H_1 、 H_2 、...、 H_n 。

步骤 2: 根据交流系统网架结构计算近区域风电场 1、风电场 2、...、风电场 n 的 PCC 阻抗比, 分别表示为 Z_1 、 Z_2 、...、 Z_n 。

步骤 3: 根据式(1)计算换流母线压升标么值 ΔU_L^* ; 根据式(3)计算近区域风电场 1、风电场 2、...、风电场 n 的 PCC 暂态电压压升值, 分别表示为 ΔU_1^* 、 ΔU_2^* 、...、 ΔU_n^* 。

步骤 4: 根据式(4)计算近区域风电场 1、风电场 2、...、风电场 n 的安全裕度, 分别表示为 S_1 、 S_2 、...、 S_n ; 确定安全裕度值最低(负值)的风电场。

步骤 5: 确定实际配置调相机的无功调节能力 ΔQ_{HVDC} ; 根据式(6)计算无功功率待优化量 ΔQ_{need} , 完成无功优化配置。

无功优化配置方案流程如图 1 所示。

3 抑制送端系统暂态过电压的切机方案

直流闭锁故障后, 新能源脱网将导致送端系统电源缺失, 致使抵御暂态冲击的能力降低, 进一步抬升暂态过电压, 引发连锁脱网事故^[28-30]。因此, 为抑制直流闭锁引发的暂态过电压, 文中提出在极控系统切除交流滤波器前, 主动切除近区域无 HVRT

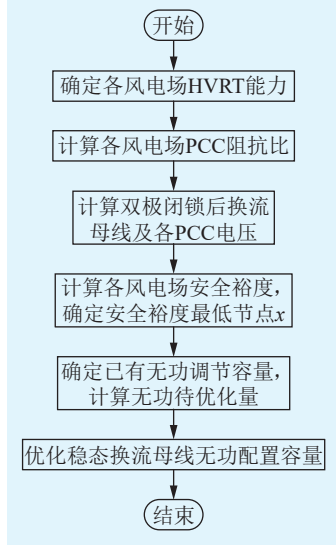


图1 抑制送端系统暂态过电压的无功优化配置方案流程

Fig.1 Flow chart of optimized reactive power allocation scheme for suppressing transient overvoltage at the sending end

能力的风电机组。

首先, 确定不具备 HVRT 能力的风电场切机对换流母线处电压的影响:

$$\Delta U_{kL}^* = \frac{\Delta U_{kc}^*}{Z_k} \quad (7)$$

式中: ΔU_{kL}^* 为切机后换流母线处电压变化量; ΔU_{kc}^* 为任一不具备 HVRT 能力的风电场切除全部风电机组后 PCC 电压变化量。

根据式(5), 计算无功优化后换流母线处暂态电压临界值 U_{limit}^* 为:

$$U_{\text{limit}}^* = U_L^* - \Delta U_{Lx}^* \quad (8)$$

式中: U_L^* 为双极闭锁故障下不考虑任何措施的换流母线暂态电压值。

将安全裕度最低的节点 x 设置为目标节点, 根据实际需求设定目标节点 x 发生直流双极闭锁故障后的电压期望值为 $U_{\text{tar},x}^*$, 进而确定换流母线处电压期望值 U_{tar}^* 以及需要降低的电压值 ΔU_{need}^* 。

$$U_{\text{tar}}^* = \frac{U_{\text{tar},x}^*}{Z_x} \quad (9)$$

$$\Delta U_{\text{need}}^* = U_{\text{limit}}^* - U_{\text{tar}}^* \quad (10)$$

分配不具备 HVRT 能力的风电场权重系数为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, 要求始终满足:

$$\omega_1 \Delta U_{1L}^* + \omega_2 \Delta U_{2L}^* + \dots + \omega_n \Delta U_{nL}^* \geq \Delta U_{\text{need}}^* \quad (11)$$

$$\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1 \quad (12)$$

抑制送端系统暂态过电压的切机方案具体步骤如下。

步骤 1: 确定近区域风电场 1、风电场 2、 $\dots$ 、风电场 n 内不具备 HVRT 能力的风机容量, 分别表

示为 $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ 。

步骤 2: 检测不具备 HVRT 能力的风电场节点电压 $U_1^*, U_2^*, \dots, U_n^*$; 检测不具备 HVRT 能力的风电场切除全部风电机组后 PCC 电压变化量 $\Delta U_{1c}^*, \Delta U_{2c}^*, \dots, \Delta U_{nc}^*$ 。

步骤 3: 计算换流母线处暂态过电压波动值 $\Delta U_{1L}^*, \Delta U_{2L}^*, \dots, \Delta U_{nL}^*$, 如式(7)所示。

步骤 4: 计算无功优化后送端系统换流母线处暂态电压临界值 U_{limit}^* , 如式(8)所示。

步骤 5: 根据实际需求设定目标节点 x 的电压期望值, 计算需要降低的暂态过电压值 ΔU_{need}^* , 如式(10)所示。

步骤 6: 分配各个不具备 HVRT 能力的风电场权重系数为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$, 始终满足式(11)、式(12)。

步骤 7: 根据分配的权重系数, 切除各个不具备 HVRT 能力的风电场风电机组, 容量分别为 $\omega_1 Q_1, \omega_2 Q_2, \dots, \omega_n Q_n$ 。

抑制送端系统暂态过电压的切机方案流程如图 2 所示。

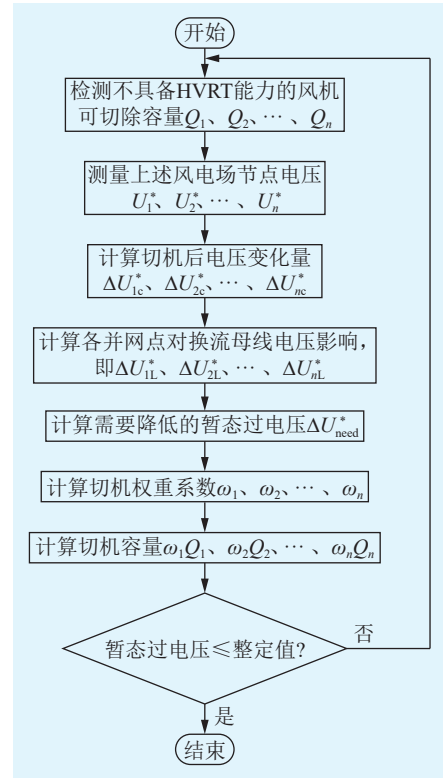


图2 抑制送端系统暂态过电压的切机方案流程

Fig.2 Flow chart of the cutter scheme for suppressing transient overvoltage at the sending end

4 仿真实验

4.1 测试系统

为结合工程实际, 文中重点围绕哈密风电基地

The diagram illustrates the Xinjiang power grid with the following components:

- Power Sources:**
 - Wind power: 3 948.5 MW (in the northwest), 791 MW (near Dunhuang), 4 100 MW (central), and 396 MW (southwest).
 - Solar power: 900 MWp (near Guangchi) and 393 MWp (central).
 - Thermal power: 6 660 MW (southwest, labeled as '配套火电').
- Substations and Key Nodes:**
 - 750 kV Substations: Represented by concentric circles, including 望洋台东, 望洋台西, 望洋台, 三塘湖, 吐鲁番, 哈密, 山北, 淖毛湖南, 淖毛湖, 三道岭, 石城子, 景峡北, 景峡东, 景峡西, 景峡南, 烟墩北, 烟墩西, 烟墩南, 苦水东, 苦水西, 思甜北, 思甜东, 沙州, 敦煌, 天山换流站, 国电哈密, 国电南湖, 神华花园, 雅满苏, 回庄子, 华电庙尔沟, and 华电庙尔沟.
 - 220 kV Substations: Represented by blue dots, including 望洋台西, 望洋台, 三塘湖, 吐鲁番, 哈密, 山北, 淖毛湖南, 淖毛湖, 三道岭, 石城子, 景峡北, 景峡东, 景峡西, 景峡南, 烟墩北, 烟墩西, 烟墩南, 苦水东, 苦水西, 思甜北, 思甜东, 沙州, 天山换流站, 国电哈密, 国电南湖, 神华花园, 雅满苏, 回庄子, 华电庙尔沟, and 华电庙尔沟.
- Transmission Lines:**
 - 220 kV Lines: Represented by blue lines.
 - 750 kV Lines: Represented by thick black lines.
 - 500 kV Lines: Represented by green lines.
- Legend:**
 - 220 kV变电站
 - ⊞ 特高压直流
 - ◎ 750 kV变电站
 - 220 kV线路
 - 750 kV线路
 - 500 kV线路

为简化计算, 设各新能源场站 HVRT 标准均为 1.3 p.u., 根据式(7)找出暂态过电压最高的 PCC 为 苦水东 110 kV 母线, $\Delta U_{\max}^*$ 为 0.371 p.u., 安全裕度

为 -0.071 p.u. , ΔQ_{need} 为 $2\,800\text{ Mvar}$ 。仿真前在模型原始参数下, 将稳态换流母线处无功配置容量修改为 $2\,000\text{ Mvar}$ (滤波器组 $1\,400\text{ Mvar}$ 、调相机 600 Mvar), 仍在 0.05 s 时设置整流侧换流器故障, 0.06 s 时切除滤波器组共 $1\,400\text{ Mvar}$ 。无功优化配置方案下各 PCC 电压曲线及其前后暂态电压压升结果对比如图 6 及表 2 所示。

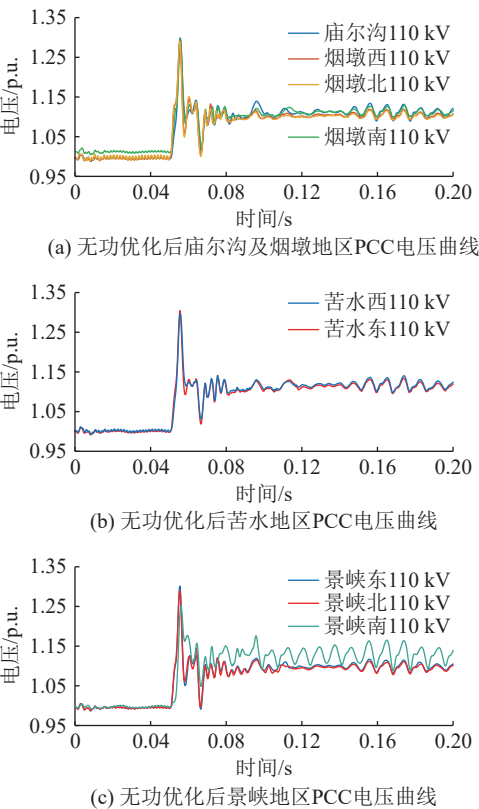


图 6 无功优化后各风电场 PCC 电压
Fig.6 Voltage at PCC of each wind farm after reactive power optimization

表 2 无功优化前后各风电场 PCC 暂态电压压升结果
Table 2 Results of transient voltage rise at PCC of each wind farm before and after reactive power optimization

母线	优化前 压升值/p.u.	优化后 压升值/p.u.
庙尔沟110 kV	0.363	0.297
烟墩西110 kV	0.355	0.291
烟墩北110 kV	0.351	0.288
烟墩南110 kV	0.361	0.295
苦水西110 kV	0.362	0.296
苦水东110 kV	0.371	0.304
景峡东110 kV	0.369	0.301
景峡北110 kV	0.366	0.290
景峡南110 kV	0.340	0.275

由图 6 和表 2 分析可知, 通过无功优化配置将直流双极闭锁故障后送端系统中安全裕度最低的目标节点——苦水东 110 kV 母线的暂态电压压升

降低至 0.304 p.u. , 与预期结果的偏差仅为 0.004 p.u. 。其他 110 kV 母线暂态过电压均低于 1.3 p.u. , 根据风电机组 HVRT 标准, 理论上机组没有直接脱网风险。文中所提出的抑制送端系统暂态过电压的无功优化配置方案对直流双极闭锁后送端系统各节点暂态过电压有明显的抑制效果。

4.4 抑制送端系统暂态过电压的切机方案验证

由 4.3 节已知, 安全裕度最低的 PCC 为苦水东 110 kV 母线。根据风电机组 HVRT 标准, PCC 电压在 $1.2\text{ p.u.}<U\leq 1.25\text{ p.u.}$ 之间可保持机组 1 s 不脱网, 因此将目标节点的暂态过电压降低至 1.25 p.u. , 根据切机方案计算出 ΔU_{need}^* 为 0.09 p.u. , 共需要切除送端无 HVRT 能力的风电机组 500 MW 。在 0.05 s 时设置整流侧换流器故障, 在 0.055 s 时主动切除不具备 HVRT 能力的风电机组共 500 MW , 0.06 s 时切除全部滤波器组。切机方案下各 PCC 电压曲线及其前后暂态电压压升结果对比如图 7 及表 3 所示。

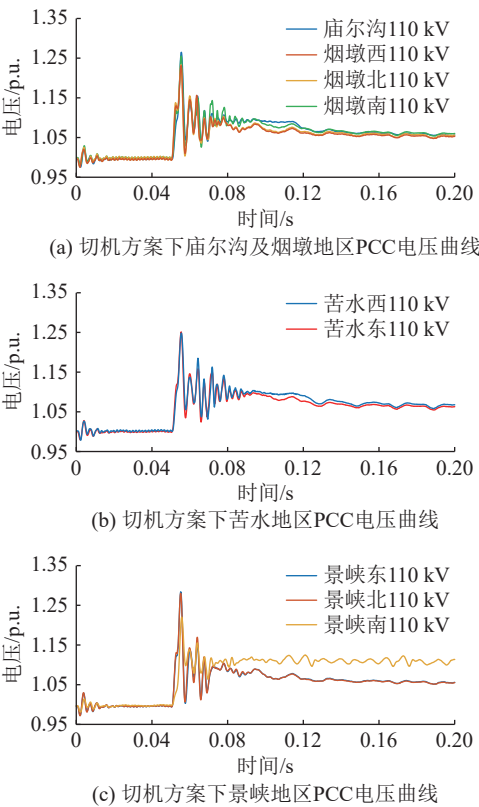


图 7 切机方案下各风电场 PCC 电压
Fig.7 Voltage at PCC of each wind farm under the cutting scheme

由图 7 和表 3 分析可知, 在无功优化配置基础上进行切机很大程度上抑制了直流双极闭锁后的暂态过电压, 将各节点暂态过电压严格控制在 1.3 p.u. 之内, 目标节点——苦水东 110 kV 母线的暂态过电压降低 0.12 p.u. , 精确度可达 95.56% 。根据我国风电机组 HVRT 技术标准, 暂态电压在

表3 切机方案前后各风电场PCC暂态电压压升结果
Table 3 Transient voltage rise results at PCC of each wind farm before and after the turbine cutting scheme

母线	未采取措施前 压升值/p.u.	无功优化后 压升值/p.u.	切机方案后 压升值/p.u.
庙尔沟110 kV	0.363	0.297	0.265
烟墩西110 kV	0.355	0.291	0.232
烟墩北110 kV	0.351	0.288	0.233
烟墩南110 kV	0.361	0.295	0.255
苦水西110 kV	0.362	0.296	0.249
苦水东110 kV	0.371	0.304	0.251
景峡东110 kV	0.369	0.301	0.284
景峡北110 kV	0.366	0.290	0.280
景峡南110 kV	0.340	0.275	0.220

1.25 p.u. $<U\leq 1.3$ p.u.之间维持时间超过 500 ms 才会引起风电机组脱网。在采取切机方案后,最高的景峡东 110 kV 母线暂态过电压为 1.284 p.u.,且仅在 1.25 p.u. $<U\leq 1.3$ p.u.之间维持了 1 ms,理论上该风电场风电机组高压脱网风险较低。综上,文中提出的无功优化配置方案和切机方案对直流双极闭锁后的暂态过电压抑制效果明显,大幅降低了送端交流系统中风电机组连锁脱网的风险。

5 结论

为降低直流双极闭锁故障后送端系统风电机组大规模连锁脱网的风险,提出了一种抑制送端系统暂态过电压的无功优化配置方案。该方案须基于暂态过电压计算方法,找出系统中安全裕度最低的目标节点,通过对换流母线处的无功配置容量进行优化将目标节点暂态过电压降低至期望值;在无功优化配置基础上提出了一种切机方案,可进一步降低目标节点的暂态过电压。基于 DIgSILENT/PowerFactory 搭建了 ± 800 kV 天中直流输电系统及其送端系统模型,仿真结果表明,文中所提方法将目标节点暂态过电压降低 0.12 p.u.,精确度可达 95.56%,有效降低了直流双极闭锁故障后送端新能源脱网风险。

工程数据表明,吉泉直流发生直流闭锁也会导致天中直流送端附近哈密地区新能源场站的电压波动。因此,对于多直流馈出、新能源高占比的弱送端系统,直流间存在着复杂的电气量耦合关系,文中仍缺乏对多直流间交互耦合影响的相关研究,后续将针对该问题进一步展开研究。

参考文献:

[1] 李晖,刘栋,姚丹阳.面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统

发展研判[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.

LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.

[2] 任大伟,肖晋宇,侯金鸣,等.双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J].电网技术,2022,46(10):3831-3839.

REN Dawei, XIAO Jinyu, HOU Jinming, et al. Construction and evolution of China's new power system under dual carbon goal[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3831-3839.

[3] XIA C Y, ZHANG J, ZHAO J, et al. Exploring potential of urban land-use management on carbon emissions: a case of Hangzhou, China[J]. Ecological Indicators, 2023, 146: 109902.

[4] 刘泽洪,周原冰,金晨.支撑新能源基地电力外送的电源组合优化配置策略研究[J].全球能源互联网,2023,6(2):101-112.

LIU Zehong, ZHOU Yuanbing, JIN Chen. Optimization strategy study on installation mix of renewable energy power base for supporting outbound delivery[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 101-112.

[5] 王骅,李相俊,李文启,等.分布式储能系统对特高压直流闭锁后的紧急功率支撑方法研究[J].供用电,2021,38(6):14-20.

WANG Hua, LI Xiangjun, LI Wenqi, et al. Research on emergency power support method of distributed energy storage system after UHVDC blockage[J]. Distribution & Utilization, 2021, 38(6): 14-20.

[6] 欧阳金鑫,陶睿,潘馨钰,等.基于不平衡无功与触发角误差补偿的直流输电系统送端交流暂态过电压控制方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(24):53-63.

OUYANG Jinxin, TAO Rui, PAN Xinyu, et al. A suppression method for sending-end transient overvoltage of LCC-HVDC based on the compensation of unbalanced reactive power and firing angle error[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 53-63.

[7] 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.

[8] 陈星,黄天啸,吴翔宇,等.考虑系统故障响应轨迹的交直流混联电力系统暂态能量计算方法[J].电力自动化设备,2020,40(9):102-111.

CHEN Xing, HUANG Tianxiao, WU Xiangyu, et al. Transient energy calculation method of AC-DC hybrid power system considering post-fault trajectory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(9): 102-111.

[9] 张冬清,张国华,徐玲玲,等.调相机在电力系统中的应用与动态特性[J].南方能源建设,2024,11(4):31-41.

ZHANG Dongqing, ZHANG Guohua, XU Lingling, et al. Development application and dynamic characteristics of synchronous condenser in electric power system[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(4): 31-41.

[10] 范鹏,刘飞,王建,等.大规模新能源接入系统暂态过电压研

- 究综述[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 94-102.
- FAN Peng, LIU Fei, WANG Jian, et al. Review on of research of transient overvoltage of large-scale new energy access to power system[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 94-102.
- [11] 毕平平, 许晓艳, 梅文明, 等. 风电基地连锁脱网风险评估方法及送出能力研究[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 903-910.
- BI Pingping, XU Xiaoyan, MEI Wenming, et al. Study on cascaded tripping-off risk assessment method and delivery capacity of wind power base[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 903-910.
- [12] 李文竹, 寇汉鹏. 考虑暂态过电压抑制的新能源送出型电网无功优化方法[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 117-125.
- LI Wenzhu, KOU Hanpeng. Reactive power optimization method of new energy outgoing grid considering transient overvoltage suppression[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 117-125.
- [13] 任冲, 柯贤波, 程林, 等. 基于可控变压器的新能源暂态过电压抑制方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(3): 123-129.
- REN Chong, KE Xianbo, CHENG Lin, et al. Transient overvoltage suppression method of new energy based on controllable transformer[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(3): 123-129.
- [14] 裴林, 王彤, 赵伟, 等. 换相失败场景下虚拟惯性控制对风火打捆送端系统暂态过电压的影响分析[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4589-4597.
- PEI Lin, WANG Tong, ZHAO Wei, et al. Analysis of the influence of virtual inertial control on the transient overvoltage of the wind-thermal-bundled sending system in the scenario of commutation failure[J]. Power System Technology, 2024, 48(11): 4589-4597.
- [15] 史映萍, 尹纯亚, 李凤婷, 等. 送端系统故障下考虑有功无功交互影响的暂态过电压机理及控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21): 117-128.
- SHI Yingping, YIN Chunya, LI Fengting, et al. Transient overvoltage mechanism and control strategy considering active and reactive interaction when there is a fault in the sending end AC system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 117-128.
- [16] 屠竞哲, 潘艳, 訾鹏, 等. 功角失稳与暂态过电压并存型锡盟交直流弱送端系统特性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1496-1506.
- TU Jingzhe, PAN Yan, ZI Peng, et al. Ximeng AC/DC weak sending-side system characteristics with angle instability and transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1496-1506.
- [17] 任冲, 柯贤波, 樊国伟, 等. 大规模风电直流送出系统过电压抑制措施及控制方案优化研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 163-174.
- REN Chong, KE Xianbo, FAN Guowei, et al. Transient voltage stabilization and control optimization for large-scale wind power UHV DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 163-174.
- [18] 索之闻, 李晖, 张锋, 等. 高比例新能源直流送端系统分布式调相机优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 133-141.
- SUO Zhiwen, LI Hui, ZHANG Feng, et al. Optimal configuration of a distributed synchronous condenser for an HVDC sending-end system with a high-proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 133-141.
- [19] 相禹维, 王彤, 李聪聪, 等. 面向大容量直流闭锁的暂态稳定紧急切机控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 84-92.
- XIANG Yuwei, WANG Tong, LI Congcong, et al. Strategy of emergency generator tripping control for transient stability after a large capacity HVDC blocking fault[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 84-92.
- [20] 胡加伟, 王彤, 王增平. 直流闭锁后系统暂态稳定紧急协同控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 43-52.
- HU Jiawei, WANG Tong, WANG Zengping. Collaborative emergency control strategy of system transient stability after DC blocking[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 43-52.
- [21] 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.
- [22] 辛超山, 尹纯亚, 李凤婷, 等. 特高压直流完全闭锁后的暂态压升计算方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 184-190.
- XIN Chaoshan, YIN Chunya, LI Fengting, et al. Calculation method of transient voltage rise after UHVDC complete blocking[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 184-190.
- [23] 邵瑶, 汤涌. 采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 108-114, 11.
- SHAO Yao, TANG Yong. A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 108-114, 11.
- [24] 夏成军, 王真, 杜兆斌. 考虑直流系统控制方式的多馈入交互作用因子实用计算方法[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3532-3540.
- XIA Chengjun, WANG Zhen, DU Zhaobin. Practical calculation method for multi-infeed interaction factor considering HVDC system control modes[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3532-3540.
- [25] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for connecting wind farm to power system: part 1: on shore wind power: GB/T 19963.1-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [26] 尹纯亚, 李凤婷, 周识远, 等. 基于无功功率短路比的直流闭锁暂态过电压计算方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(10): 150-154, 161.
- YIN Chunya, LI Fengting, ZHOU Shiyuan, et al. Calculation method of transient overvoltage due to DC blocking based on short circuit ratio of reactive power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 150-154, 161.
- [27] 廖圣文, 甘德强, 摆世彬, 等. 多直流送端电网闭锁动态过电压分析与计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4181-4193.
- LIAO Shengwen, GAN Deqiang, BAI Shibin, et al. Analysis and calculation methods of dynamic DC blocking overvoltage in multi-send HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4181-4193.
- [28] 刘杉, 谭开东, 姜喆, 等. 基于可控自恢复消能装置的直流送端暂态过电压抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(9): 142-150.
- LIU Shan, TAN Kaidong, JIANG Zhe, et al. Suppression method for transient overvoltage at DC sending end based on controllable self-recovery energy consumption device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 142-150.
- [29] 曹昊, 严欢, 王雷, 等. 直流故障引发直流外送系统新能源脱网问题研究[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(1): 71-79.
- CAO Hao, YAN Huan, WANG Lei, et al. Research on renewable energy off-grid of DC transmission system caused by DC fault[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 71-79.
- [30] 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.

作者简介:



李欣悦

李欣悦(1994), 女, 硕士, 工程师, 从事交直流系统稳定控制、新型电力系统数字化转型应用工作(E-mail: 541520566@qq.com);

尹纯亚(1994), 男, 博士, 副教授, 通信作者, 研究方向为交直流混联系统、电力市场;

李琳(1993), 女, 硕士, 工程师, 从事新型电力系统及数字化转型应用工作。

Transient overvoltage suppression measures for new energy high penetration system at the sending end under bipolar blocking fault

LI Xinyue^{1,2}, YIN Chunya³, LI Lin^{1,2}, WANG Sijue^{1,2}, CHEN Ying^{1,2}

- (1. Siji Zhilian (Tian Jin) Information and Communication Technology Co., Ltd., Tianjin 300000, China;
2. Tianjin Richsoft Electric Power Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300000, China;
3. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, China)

Abstract: Aiming at the transient overvoltage problem in the new energy high-penetration area of the feeder due to DC bipolar blocking fault, a converter bus reactive power allocation capacity optimization scheme is proposed with the constraint that the transient overvoltage of the wind farm with the lowest safety margin in the feeder system is suppressed to below the target value. On this basis, a cutting scheme for suppressing transient overvoltage in the feeder system under bipolar blocking faults is proposed, which realizes the two-stage voltage stabilization control of the feeder system by prioritizing the cutover of wind turbine generators without high-voltage ride-through capability after the occurrence of faults. Finally, a simplified model of ± 800 kV Tianzhong DC transmission system and its feeder grid is constructed based on the DIGSILENT simulation platform. The simulation results show that the proposed reactive power optimization allocation scheme and machine-cutting scheme can reduce the transient overvoltage of the target node by 0.12 p.u., and the accuracy can reach 95.56%. The proposed scheme has significant effect in suppressing the transient overvoltage caused by DC blocking, which can effectively prevent the new energy from large-scale chain off-grid and improve the stability and reliability of the system.

Keywords: DC blocking; high penetration of new energy; AC system at the sending end; reactive power optimization configuration; switching scheme; high voltage ride-through capability

(编辑 陆海霞)