

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181321

适应多直流馈入受端电网的柔性直流配置方法

唐晓骏^{1,2}, 张正卫^{1,2}, 韩民晓¹, 谢岩², 赵娟³, 霍启迪²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 电网安全与节能国家重点实验室
(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192; 3. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450008)

摘要: 远方清洁能源经直流大容量远距离送入负荷中心是电网的发展趋势。加强交流网架等传统措施已不能满足多直流馈入受端电网安全稳定运行需求, 迫切需要研究柔性输电新技术的应用可行性。首先分析了多直流馈入受端电网安全稳定运行面临的风险与挑战。结合柔性直流输电技术优势, 针对潮流分布不均导致的交流断面输电能力受限问题, 提出了支撑断面输电能力最大化的柔性直流布局方法, 并量化了柔性直流并网后断面输电能力提升效果。针对交流故障诱发多回直流同时换相失败问题, 提出了降低两回直流同时换相失败风险的柔性直流配置方法, 并量化了诱发两回直流同时换相失败的交流系统故障区域降低效果。以河南电网实际数据为例验证了所提方法的有效性。在关键输电断面配置柔性直流可充分挖掘现有输电设备潜力、提升断面输电能力, 显著缩小引起两回直流同时换相失败的交流故障区域范围, 提升电网安全稳定运行水平。

关键词: 多直流馈入; 断面输电能力; 换相失败; 柔性直流配置方法

VSC-HVDC configuration method suitable for multi-DC feeding receiving power grid

TANG Xiaojun¹, ZHANG Zhengwei^{1,2}, HAN Minxiao¹, XIE Yan², ZHAO Juan³, HUO Qidi²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. State Key Laboratory of Grid Security and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute Co., Ltd.),
Beijing 100192, China; 3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450008, China)

Abstract: Long-distance transmission of large-capacity clean energy to load center via DC is the development trend of power grid. Traditional measures for example strengthening the AC grid can no longer meet the requirements of safe and stable operation of multi-DC feeding receiving power grids. It is urgent to study the application feasibility of new flexible transmission technologies. This paper first analyzes the risks and challenges faced by the safe and stable operation of multi-DC feeding receiving power grids. Combined with the advantages of VSC-HVDC and aiming at the problem of limited transmission capacity of AC section caused by uneven power flow distribution, a VSC-HVDC layout method to maximize the transmission capacity is proposed and the effect of improving the transmission capacity of the VSC-HVDC grid-connected section is quantified. Aiming at the problem of multi DC simultaneous commutation failure caused by AC fault, a VSC-HVDC configuration method for reducing the risk of two DC simultaneous commutation failures is proposed and the reduction effect is quantified. The effectiveness of the proposed method is verified by taking the actual data of Henan Power Grid as an example. The configuration of VSC-HVDC in the key transmission section can fully exploit the potential of existing transmission equipment and improve the transmission capacity of the section, significantly reduce the range of AC fault areas that cause the two DC commutation failures, and improve the safe and stable operation level of the grid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777196) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. XTB11201703025).

Key words: multi-infeed HVDC; section transmission capacity; commutation failure; VSC-HVDC configuration method

0 引言

我国能源资源与负荷中心呈逆向分布, 能源资

源主要分布在西部、北部地区, 负荷则主要分布在中东部地区。为优化资源配置, 迫切需要利用特高压直流输电技术将西部的能源优势转化为电能送往中东部负荷中心^[1-2]。随着特高压直流工程的建成投运, 华东、华中等负荷中心逐步演变为多直流/交直流馈入受端电网^[3], 外受电力比重不断增大, 电网

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777196); 国家电网公司科技项目(XTB11201703025)

安全稳定特性发生显著变化。具体表现在：(1) 交流系统故障可能导致多回直流同时/相继换相失败，特别是故障清除时间较长的交流线路保护或开关拒动故障，可能造成多回直流持续换相失败，甚至导致直流闭锁，严重影响送受端电网频率稳定特性^[4-5]，同时可能诱发薄弱送端电网失去稳定^[6]；(2) 直流换相失败或闭锁后，大量功率转移冲击交流系统薄弱环节，可能诱发交流系统失去静稳、热稳、暂稳、电压稳定等问题^[7-8]，进一步扩大事故范围和影响；(3) 直流换相失败过程中需要从交流系统吸收大量无功功率，可能引起受端电网电压失稳^[9]，严重情况下诱发大停电。

随着国民经济稳步发展，河南电网负荷水平持续快速增长，受潮流分布不均衡等问题影响，重要输电断面往往受制于热稳极限约束，不能充分发挥其输电能力^[10]。为满足河南电力增长需求，已开工建设青海—河南±800 kV 特高压直流将青海风光清洁能源送往河南，河南电网将形成两回特高压直流馈入受端电网格局，两回特高压直流之间、特高压直流与特高压交流长南线及省内 500 kV 断面之间耦合关系复杂^[11]，电网安全稳定运行压力凸显。

为解决电网规划和运行中遇到的各种问题，在现有骨干网架难以大幅调整的前提下，迫切需要研究适应电网实际需求的输电新技术。柔性直流与传统直流相比，具有有功/无功独立调节、自换相、潮流反转电压极性不变、无需无功补偿设备等技术优势^[12]；与常规交流系统相比，采用柔性直流实现电网适度分区或弱化电气联系强度，一方面有利于降低现有电网短路电流水平、解决短路电流越限问题，另一方面能够隔离交流系统故障，降低其对远端其他元件特别是常规直流的影响，阻断连锁故障的发生。目前对柔性直流的规划和运行控制研究，主要针对可再生资源并网、弱受端电网、城市分区互联、直流分区等场景^[13-16]，文献[13]设计了我国西部地区大规模新能源发电集群多层次直流汇集与输送系统方案，为未来西部新能源开发提供参考；文献[14]研究了大扰动冲击下 VSC-HVDC 与弱交流混联系统失稳机理及稳定控制策略；文献[15]提出了城市电网分区柔性互联的概念，并介绍了国内外首个城市电网分区柔性互联工程的可研论证；文献[16]运用灵敏度法提出了基于多馈入交互作用因子的直流分区原则和方法，能够提升多直流馈入受端系统的运行性能。总体看来，目前针对省级电网研究柔性直流的合理规划和运行控制技术鲜有报道。

本文首先分析了多直流/交直流混联馈入受端电网运行面临的挑战和风险。针对关键断面输电能

力受限问题，研究了支撑断面输电能力最大化的柔性直流布局方法，量化了输电能力提升效果；针对交流故障诱发多直流同时换相失败问题，研究了降低两回直流同时换相失败风险的柔性直流配置方法，量化了引起该问题的交流系统故障区域范围降低效果。以河南电网实际数据为研究对象，验证了所提方法的有效性和应用效果，为新形式下河南电网充分挖掘现有输变电资源潜力和电网合理规划提供技术支撑。

1 特高压交直流混联背景下河南电网面临的挑战

1.1 目标网架

预计 2020 年青海—河南特高压直流投运，接入驻信地区 500 kV 电网，额定输送功率 8 000 MW。河南电网形成两回特高压直流(天中直流、青海直流)、一回特高压交流(长南线)的多直流/交直流馈入格局。特高压长南线承担了华北、华中电网水火南北互济职责，丰水期华中水电北送华北电网，枯水华北火电南送华中电网。河南电网主网架如图 1 所示。

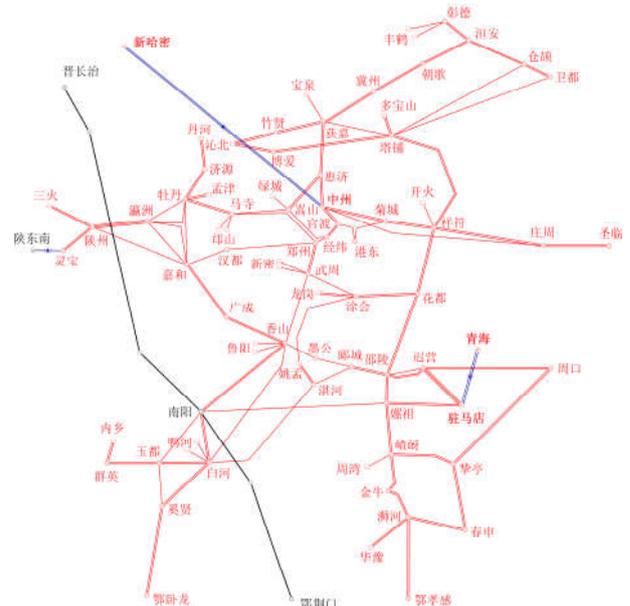


图 1 河南电网主网架结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the main grid structure of Henan power grid

1.2 河南电网运行面临的挑战

依据特高压交直流及河南电网发展规划，河南电网面临的安全稳定问题如下所述。

(1) 省内主要输电断面(豫北—豫中、豫西外送、豫中—豫南)均受限于热稳极限，无法充分发挥交流

通道输电能力, 导致豫中、豫南负荷集中地区供电受限, 而豫西、豫北地区窝电, 大量常规机组和新能源机组电力无法全额送出。

(2) 网架结构密集, 500/220 kV 电网短路电流超标问题突出。常规的拉线、出串等网架临时调整措施, 在抑制短路电流水平的同时削弱了网架结构强度, 影响电网安全稳定供电。

(3) 两回特高压直流间地理位置仅 200 余公里, 电气距离较近, 导致两回直流同时换相失败的交流系统故障区域范围大, 几乎涵盖河南电网主要核心区。两回直流同时换相失败, 大量功率转移冲击特高压长南线, 可能诱发长南线失去静稳而解列, 华北、华中电网失去同步, 事故影响范围急剧扩大; 同时大量功率在河南 500 kV 电网内部转移冲击, 可能诱发豫南地区电压失稳; 再次, 由于两回直流送端均在西北电网, 而西北电网承受多直流多次换相失败的能力较差, 可能诱发西北电网失稳。因此, 河南电网交流系统任一故障都可能产生全局性的影响, 必须采取措施降低两回直流同时换相失败的风险。

2 支撑断面输电能力最大化的柔性直流布局方法

2.1 传统交流断面输电能力评估

河南省网可分为豫北、豫中、豫南和豫西四个地区电网, 断面构成如图 2 所示, 其中豫北—豫中断面由获嘉—惠济和塔铺—祥符共四回线路组成, 豫中—豫南断面由嘉和—广成、武周一香山、武周一

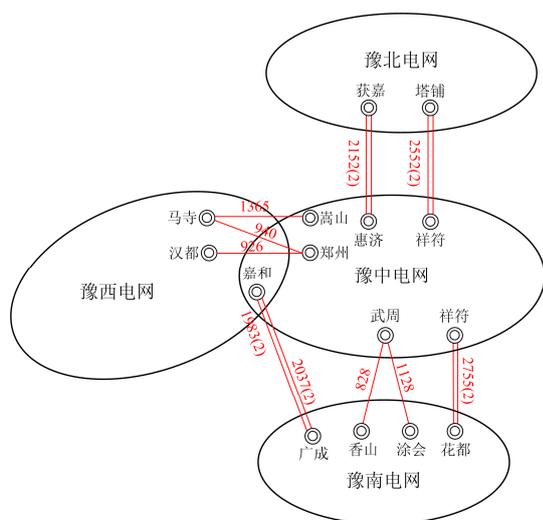


图 2 河南电网省内输电断面构成示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the internal section in Henan power grid

涂会、祥符—花都共六回线路组成, 豫西外送断面由马寺—嵩山、马寺—郑州、汉都—郑州、嘉和—广成共五回线路构成。火电装机和新增风光新能源机组主要分布在豫北和豫西地区, 豫中地区是河南电网的负荷中心, 豫南地区负荷增长迅速, 通常情况下的电力流为豫北、豫西地区往豫中地区送电, 豫中地区往豫南地区送电。

省内主要断面输电能力主要受 $N-1$ 故障后另一回线路功率达到热稳极限约束, 具体情况如表 1 所示。其中豫北—豫中断面潮流较偏重于塔铺—祥符双回线, 断面输电能力受限于塔祥线 $N-1$ 故障后另一回线的热稳限额; 豫中—豫南断面潮流偏重于祥符—花都双回线, 断面输电能力受限于花样线 $N-1$ 故障后另一回线的热稳限额; 嘉和—广成(同塔双回线路) $N-2$ 故障后潮流大比例转移到马寺—嵩山单回线, 该线路热稳极限较低, 成为豫西外送断面输电能力的短板。

表 1 交流断面输电能力及约束条件

Table 1 Transmission capacity and constraint conditions of AC section

输电断面	输电能力/MW	约束条件
豫北—豫中	4 704	塔祥线 $N-1$ 后另一回线达到额定功率 1 920 MW
豫中—豫南	6 748	花样线 $N-1$ 后另一回线达到额定功率 2 200 MW
豫西外送	5 214	嘉广 $N-2$ 后马嵩线达到额定功率 1 920 MW

2.2 含柔性直流的断面输电能力评估

输电功率在传统交流断面上按照线路阻抗情况自然分布, 由于构成断面的各条输电线路阻抗不尽相同, 加之断面两侧发电机、负荷分布情况不均, 从而导致潮流在断面各条输电电路上分布不均衡。特别是断面上重载输电线路由双回线构成时, $N-1$ 故障后大部分功率将经由剩余一回线路输送, 易达到线路热稳极限, 从而导致整个断面受热稳极限约束, 此时断面上其他线路承担的功率可能很轻, 断面整体输电能力未能充分发挥。提高断面输电能力的方法其基本原理为减小线路阻抗, 缩短送受端电气距离, 可采用的方法包括串补、可控串补、UPFC、柔性直流等^[17-18]。串补简单、便宜, 但只能减小其所在线路的阻抗参数, 可控串补可分阶段调节所在线路的阻抗参数, 较串补灵活, 但整个断面功率仍按照线路阻抗自然分布, 无法灵活调节; UPFC、柔性直流可平滑精准调节所在线路功率水平, 从而实现对整个断面功率的灵活控制。考虑到河南电网短路电流水平较高、且存在两回直流同时换相失败风

险, UPFC 无助于解决上述问题, 故本文重点研究柔性直流在河南电网实际应用的可能性和效果。

针对由多回交流线路构成的输电断面, 提出利用柔性直流提高断面输电能力方法和流程如图3所示。

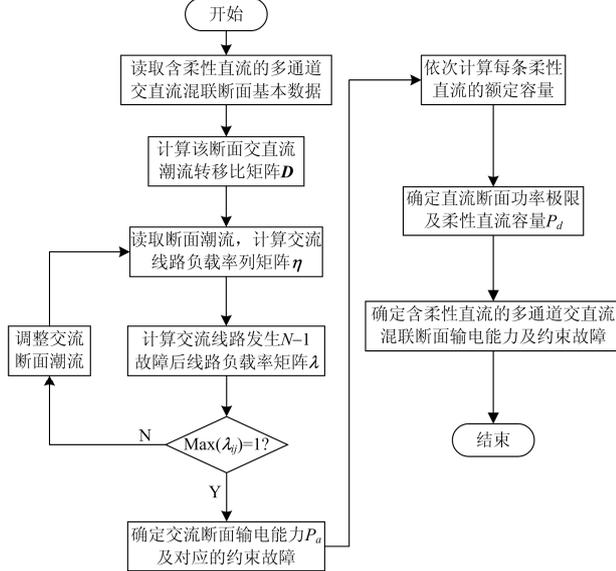


图3 交直流混联断面输电能力计算流程图

Fig. 3 Calculation flow chart of AC and DC hybrid section transmission capacity

(1) 计算所述交直流混联断面的交直流潮流转移比矩阵 D 为

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 \\ D_3 & D_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: D_1 表示交流线路间的转移因子矩阵; D_2 表示柔性直流线路对交流线路的转移因子矩阵; D_3 表示交流线路对柔性直流线路的转移因子矩阵; D_4 表示柔性直流线路间的转移因子矩阵。

(2) 计算所述交直流混联断面中交流线路的负载率列矩阵 η 为

$$\eta_i = P_i / P_{iN} \quad (2)$$

式中: P_i 表示交直流混联断面中第 i 条线路 l_i 输送的有功功率; P_{iN} 表示线路 l_i 的额定功率。

(3) 根据交直流潮流转移比矩阵 D 和交流线路负载率列矩阵 η 和各交流线路的额定功率计算交流线路发生 $N-1$ 故障后线路负载率矩阵 λ , λ 中第 i 行第 j 列的元素 λ_{ij} 为

$$\lambda_{ij} = \eta_i + D_{ij} \times \frac{P_{iN}}{P_{iN}} \times \eta_j \quad (3)$$

(4) 判断线路负载率矩阵 λ 中的最大元素是否为 1, 若判断为是, 则转入步骤(6), 否则, 转入步骤(5)。

(5) 调整所述交直流混联断面中交流断面的潮

流, 若负载率矩阵 λ 中最大元素值大于 1, 则降低所述交流断面的潮流; 若负载率矩阵 λ 最大元素值小于 1, 则增加所述交流断面的潮流。并转入步骤(2)。

(6) 计算出所述交流断面的输电能力 P_a 及其约束条件

$$P_a = \sum_{i=1}^n P_i' \quad (4)$$

式中, P_i' 为负载率矩阵 λ 最大元素值等于 1 时线路 l_i 的有功功率。

若负载率矩阵 λ 中最大元素值等于 1 的元素为 λ_{ij} , 则交流断面的约束条件为交流线路 l_j 发生 $N-1$ 故障后线路 l_i 达到额定功率。

(7) 依次计算所述交直流混联断面中每条柔性直流线路的额定容量及其约束条件。

先计算所述交直流混联断面中柔性直流线路 l_p 断开后交流线路的负载率列矩阵 λ_p , 若负载率列矩阵 λ_p 中的最大元素值位于第 q 行, 则柔性直流线路 l_p 的额定容量 P_p 为

$$P_p = \min\left(\frac{P_{qN} - P_q'}{D_{qp}}, P_{pN}\right) \quad (5)$$

式中: P_q' 为交流线路负载率列矩阵 λ_p 最大元素值等于 1 时线路 l_q 的有功功率; P_{qN} 表示线路 l_q 的额定功率; D_{qp} 为交直流潮流转移比矩阵 D 中第 q 行第 p 列的元素; P_{pN} 表示柔性直流线路 l_p 的额定功率。

当柔性直流线路 l_p 的额定容量 P_p 为 $\frac{P_{qN} - P_q'}{D_{qp}}$

时, 则柔性直流线路 l_p 的约束条件为: 柔性直流线路 l_p 发生 $N-1$ 故障后, 交流线路 l_p 输送功率达到其额定值。

当柔性直流线路 l_p 的额定容量 P_p 为 P_{pN} , 则柔性直流线路 l_p 的约束条件为: 柔性直流线路 l_p 的额定功率受制于所装设交流线路的额定功率。

(8) 根据每条柔性直流的额定容量确定柔性直流断面的输电能力 P_d 。

(9) 根据交流断面的输电能力 P_a 和柔性直流断面的输电能力 P_d 确定所述交直流混联断面的输电能力及其约束条件。

采用该方法计算河南省内断面配置柔性直流后输电能力如表 2 所示。

柔性直流可实现类似强制潮流的控制效果, 实现断面输电能力的最大化, 当断面上某一线路故障退出运行引起断面构成变化时, 可灵活调节柔性直流功率水平, 实现新拓扑结构下断面功率的 maximization, 充分挖掘现有交流输电设备潜力。

表 2 交直流混联断面输电能力及约束条件

Table 2 Transmission capacity and constraint conditions of AC/DC hybrid section

输电断面	原输电能力	柔性直流安装位置	交流断面输电极限	柔性直流输电极限	输电能力	输电能力提高
豫北—豫中	4 704	塔铺—祥符	1 920	1 920×2	5 760	1 056
豫中—豫南	6 748	祥符—花都	3 300	2 200×2	7 700	952
豫西外送	5 214	马寺—嵩山	4 415	1 920	6 335	1 121

3 柔性直流抑制两回直流同时换相失败

3.1 抑制两回直流同时换相失败的柔性直流配置方法

换相失败是传统高压直流输电系统常见故障之一。多直流换相失败的根本原因在于各逆变站之间电气距离较近, 交流系统故障引起的母线电压跌落或其他不平衡故障冲击同时影响多个逆变站的正常运行。从直流设备自身的角度通常采用增加换相失败预测环节^[19]、控制保护参数优化及换流器拓扑改造^[20]等手段提高直流系统抗扰动冲击能力。从系统的角度, 合理适度拉大各逆变站间电气距离, 是降低故障扰动冲击的必然选择, 同时可一定程度缓解受端电网短路电流超标问题。增大各逆变站间电气距离的手段包括开断联络线、增加串抗、柔性直流等。开断联络线在增大送受端电气距离的同时, 降低了两侧电网功率交换能力, 增加串抗会一定程度降低断面输电能力并增大系统损耗, 对承担大量功率输送任务的断面来说上述措施均不可取。柔性直流在增大电气距离、隔离送受端故障蔓延的情况下, 还可以实现送受端功率的灵活调节, 是解决问题的较好选择。

本文基于柔性直流增大受端换流母线间电气距离原理, 提出抑制两回直流同时换相失败的柔性直流配置方法和流程如图 4 所示。

(1) 根据系统典型运行方式进行 500 kV 线路 N-1 故障扫描, 统计导致两回直流同时换相失败的第一交流故障区域 A。

(2) 根据电网的分区以及分区间的输电断面确定两个换流站间的柔性直流配置候选线路集 I 。

(3) 依次将柔性直流安装于候选线路集 I 中的各条线路, 计算柔性直流安装于不同线路下的两回直流受端逆变站高压母线间的电气距离 $Z_{B_1 B_2, equ}$ 。

(4) 按照 $Z_{B_1 B_2, equ}$ 大小对 I 中线路进行重新排序, 得到柔性直流的线路配置顺序集 I' , 并选取所述线路配置顺序集中的第一个线路作为当前线路。

(5) 将当前线路的额定功率 P_{LN} 作为柔性直流的额定容量 P_{dcN} , 将柔性直流安装于当前线路, 对系统进行 500 kV 线路 N-1 故障扫描, 统计导致两回直流同时换相失败的第二交流故障区域 B。

(6) 计算换相失败抑制效果指数 δ , 并将其与预设指数阈值 δ_c 进行比较, 若 $\delta \geq \delta_c$, 则可确定柔性直流配置方案, 否则选取 I' 中的下一个线路作为当前线路, 并返回步骤(5)。

换相失败抑制效果指数 δ 计算如式(6)。

$$\delta = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \quad (6)$$

式中: δ 为换相失败抑制效果指数; N_1 、 N_2 分别为交流故障区域 A 和 B 中的节点数。

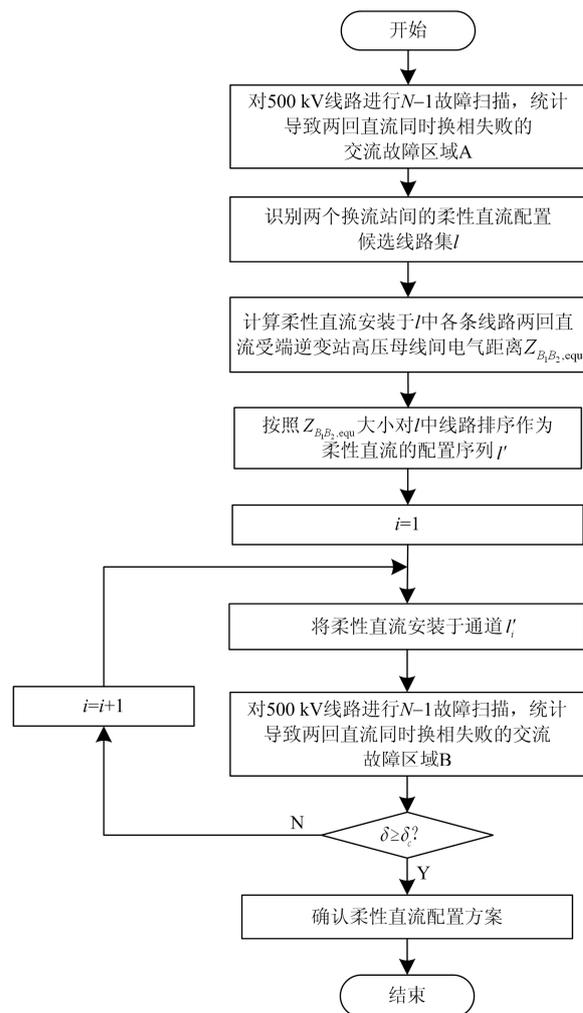


图 4 抑制两回直流同时换相失败的柔性直流配置方法
Fig. 4 VSC-HVDC configuration method for suppressing two DC simultaneous commutation failure

3.2 河南电网两回直流换相失败仿真分析

2020 年天中直流、青海—河南直流集中馈入河

南电网，额定输送功率均为 8 000 MW，受端换流站分别为 500 kV 中州换流站和驻马店换流站。

对河南电网典型运行方式进行 500 kV 线路三永 N-1 故障扫描，依据换相失败判断标准对导致两回直流换相失败情况进行统计，引起天中直流换相失败的交流故障如图 5 中黄色区域所示，引起青海—河南直流换相失败的交流故障如图 5 中蓝色区域所示，两者重叠区为引起两回直流同时换相失败的交流故障区域 A，基本覆盖郑开、许漯周平、洛三济等地区。

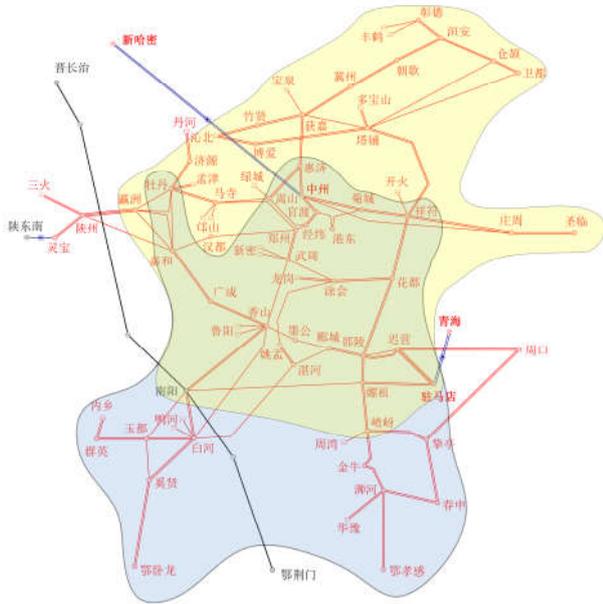


图 5 导致两回直流换相失败交流故障区域示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the AC fault area resulting in two DC commutation failure

中州换流站和驻马店换流站分别位于豫中、豫南地区，能够将其所在电网分割成两个独立系统的分区间输电断面为豫中—豫南断面，因此基于上述换流站实际所在分区和分区间联络线，确定柔性直流配置候选线路集 $l\{l_1, l_2, l_3, l_4\}$ 。

依次将柔性直流安装于候选线路集 l 中各个通道 $l_i (i=1, 2, 3, 4)$ ，采用网络等值的方法，计算两回直流受端逆变站高压母线间的电气距离 $Z_{B_1 B_2, equ}$ ，结果如表 3 所示。

按照表 3 的电气距离计算结果由大到小顺序对 l 中线路进行重新排序，得到柔性直流配置顺序集 $l'\{l'_1, l'_2, l'_3, l'_4\}$ ，其中 l'_1 为祥符—花都双回线， l'_2 为武周一香山单回线， l'_3 为武周一涂会单回线， l'_4 为嘉和一广成双回线。

表 3 柔性直流安装于各个通道高压母线间电气距离对比
Table 3 Comparison of electrical distance between high voltage busbars with VSC-HVDC installed in each channel

柔性直流安装位置	电气距离(阻抗模值)	增大比例/%
无	0.525 207	—
l_1 (嘉和一广成)	0.530 303	0.97
l_2 (武周一香山)	0.556 734	6.00
l_3 (武周一涂会)	0.554 01	5.48
l_4 (祥符—花都)	2.300 227	337.97

首先将柔性直流安装于 l'_1 ，确定柔性直流额定容量为 $P_{dcN} = P_{LN} = 2\ 200$ MW，对系统进行 500 kV 交流线路三永 N-1 故障扫描，统计导致两回直流换相失败的交流故障区域如图 6 所示，标定导致两回直流同时换相失败的交流故障区域 B。

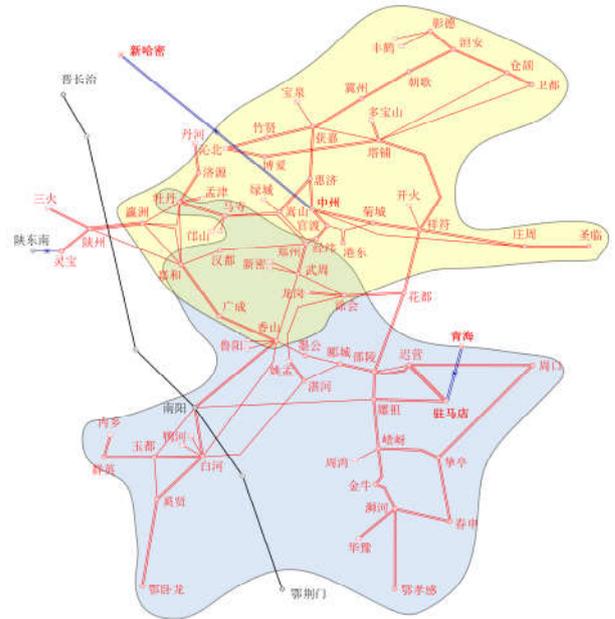


图 6 配置柔性直流后导致两回直流换相失败交流故障区域示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the AC fault area resulting in two DC commutation failure after configuration of VSC-HVDC

区域 A 中包含节点数 $N_1=28$ ，区域 B 中包含节点数 $N_2=10$ ，换相失败抑制效果指数 $\delta=64\%$ ，预设指数阈值 $\delta_c=50\%$ ，满足 $\delta \geq \delta_c$ ，换相失败抑制效果达到目标要求，确定柔性直流配置方案。

结果表明导致两回直流同时换相失败的交流故障区域明显减小，验证了本文方法的有效性。为进一步压缩引起两回直流同时换相失败的交流故障区域，可以依据表 3 按照引起电气距离增大效果顺序在豫中—豫南断面逐步增加柔性直流装置，理想情

况下豫中-豫南电网将仅通过柔性直流互联, 彻底消除两回直流同时换相失败风险。但该方案投资较大, 应衡量投资成本和抑制两回直流同时换相失败效果, 合理选择柔性直流配置方案。

对于多直流馈入受端电网, 可将常规直流两两分组, 逐一参照本文方法采用柔性直流逐步隔离各常规直流, 常规直流负责大规模远距离输电, 柔性直流负责各分区间功率交互支援和抑制多回直流同时换相失败、改善受端电网安全稳定水平, 同时可有效降低受端电网短路电流水平。但需要注意各柔性直流间的匹配和协调问题。

4 结论

省内电源和负荷发展不均衡造成河南电网重要输电断面潮流分布不均衡、断面输电能力未充分发挥; 网架结构密集导致短路电流水平偏高; 青海—河南直流投运后, 交流故障易诱发两回直流同时换相失败, 影响华北—华中互联电网、河南电网甚至送端西北电网安全稳定运行, 迫切需要采取输电新技术解决上述问题。

针对潮流分布不均导致的交流断面输电能力受限问题, 基于控制断面关键线路功率的思路, 提出了支撑断面输电能力最大化的柔性直流布局方法, 并量化了柔性直流并网后断面输电能力的提升效果。针对交流故障诱发多回直流同时换相失败问题, 基于控制各逆变站间电气距离的思路, 提出了降低两回直流同时换相失败风险的柔性直流配置方法, 并量化了降低两回直流同时换相失败的效果。

以河南电网为研究对象对柔性直流配置方法进行了实证, 结果表明在关键输电断面配置柔性直流可充分挖掘现有输电设备潜力, 显著提升断面输电能力; 在两个逆变站间合理布局柔性直流可有效增大逆变站间电气距离, 显著缩小引起两回直流同时换相失败的交流故障区域范围, 提升河南电网安全稳定运行水平, 并同时达到降低短路电流水平的效果。

受限于电力电子器件发展水平, 柔性直流相对交流输电造价昂贵且损耗较大, 其电压等级和输电容量还有待进一步提升。随着技术进步及核心装备研制成功, 柔性直流将从目前常用的新能源并网、弱系统联接等低电压场景逐步扩展到主网架互联、甚至跨区柔性直流电网互联等更高电压等级应用场景, 更好地服务于未来大范围、高比例清洁能源多能互补的技术需求。

参考文献

- [1] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10, 25.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of National Power Grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10, 25.
- [2] 饶宏, 张东辉, 赵晓斌, 等. 特高压直流输电的实践和分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2481-2488.
RAO Hong, ZHANG Donghui, ZHAO Xiaobin, et al. Practice and analyses of UHVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2481-2488.
- [3] 覃琴, 郭强, 周勤勇, 等. 国网“十三五”规划电网面临的安全稳定问题及对策[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 25-32.
QIN Qin, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, et al. The security and stability of power grids in 13th five-year planning and countermeasures[J]. Electric Power, 2015, 48(1): 25-32.
- [4] 邓晖, 楼伯良, 华文, 等. 基于直流闭锁事故的华东电网频率特性及控制措施[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 76-81.
DENG Hui, LOU Boliang, HUA Wen, et al. Frequency characteristic of East China Power Grid based on DC block accidents and control measures[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 76-81.
- [5] 陈刚, 丁理杰, 李旻, 等. 异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 76-82.
CHEN Gang, DING Lijie, LI Min, et al. Stability characteristics of southwest China power grid after asynchronous interconnection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 76-82.
- [6] 贾俊川, 张健, 仲悟之, 等. 应对多回并列直流换相失败的送端系统安全稳定控制措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21): 6320-6327.
JIA Junchuan, ZHANG Jian, ZHONG Wuzhi, et al. Research on the security and stability control measures of the sending side system coping with multiple parallel-operation HVDCs simultaneous commutation failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(21): 6320-6327.
- [7] 胡晓飞, 陈得治, 张垠, 等. 多直流换相失败对弱交流断面的冲击特性及应对措施[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 26-32, 51.
HU Xiaofei, CHEN Dezhi, ZHANG Yin, et al. Impact of multi-HVDC commutation failure on weak AC section and its countermeasures[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 26-32, 51.

- [8] 郝梦竹, 王青, 李文启, 等. 不同直流闭锁故障对弱交流联络线功率波动影响机制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 88-94.
HAO Mengzhu, WANG Qing, LI Wenqi, et al. Power fluctuation influence mechanism of weak AC tie-line caused by different DC block[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 88-94.
- [9] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.
- [10] 罗红梅, 张正卫, 高雯曼, 等. 河南特高压及 500 千伏主网架结构优化研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2018.
- [11] 安军, 柴旭峥, 王骅. 采用柔性直流输电优化河南电网运行的前瞻性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 86-91.
AN Jun, CHAI Xuzheng, WANG Hua. Prospective study of Henan Power Grid optimized operation with VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 86-91.
- [12] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [13] 姚良忠, 刘艳章, 杨波, 等. 大规模新能源发电集群直流汇集及输送方案研究[J]. 中国电力, 2018, 51(1): 36-43.
YAO Liangzhong, LIU Yanzhang, YANG Bo, et al. Research on DC collection and transmission for large scale renewable energy generation clusters[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 36-43.
- [14] 郑超, 张鑫, 吕盼, 等. VSC-HVDC 与弱交流电网混联系统大扰动行为机理及稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 629-641, 943.
ZHENG Chao, ZHANG Xin, LÜ Pan, et al. Study on the large disturbance behavior mechanism and stability control strategy for VSC-HVDC and weak AC hybrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 629-641, 943.
- [15] 肖峻, 伊丽达, 郭伟, 等. 城市电网分区柔性互联的概念与示范工程论证[J]. 供用电, 2016, 33(8): 2-6, 56.
XIAO Jun, YI Lida, GUO Wei, et al. The concept and demonstration project of flexible interconnection of urban power grid partition[J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(8): 2-6, 56.
- [16] 徐蔚, 程斌杰, 林勇, 等. 基于多馈入交互作用因子的直流分区原则和方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 108-116.
XU Wei, CHENG Binjie, LIN Yong, et al. DC-segmentation planning based on multi-infeed interaction factor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 108-116.
- [17] 艾芊, 杨曦, 贺兴. 提高电网输电能力技术概述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 34-40, 7.
AI Qian, YANG Xi, HE Xing. Research on technologies for improving power grid transmission capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 34-40, 7.
- [18] 徐雨田, 刘涤尘, 黄涌, 等. 用于提高输电均衡性的 DPFC 优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 94-102.
XU Yutian, LIU Dichen, HUANG Yong, et al. DPFC optimization configuration strategy for increasing transmission equilibrium[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 94-102.
- [19] 李新年, 陈树勇, 庞广恒, 等. 华东多直流馈入系统换相失败预防和自动恢复能力的优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(6): 134-140.
LI Xinnian, CHEN Shuyong, PANG Guangheng, et al. Optimization of commutation failure prevention and automatic recovery for East China multi-infeed high-voltage direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(6): 134-140.
- [20] 郭春义, 赵剑, 刘炜, 等. 抑制高压直流输电系统换相失败方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 1-10.
GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A review of methods to mitigate the commutation failure for LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 1-10.

收稿日期: 2018-10-24; 修回日期: 2019-03-25

作者简介:

唐晓骏(1979—), 男, 教授级高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统分析、稳定和控制等; E-mail: tangxj@epri.sgcc.com.cn

张正卫(1991—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流规划与控制、电力系统安全稳定分析与控制等; E-mail: zhang-zhengwei@qq.com

韩民晓(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为直流输电、电力电子技术在电力系统中的应用。E-mail: hanminxiao@ncepu.edu.cn

(编辑 张爱琴)