

# 针对特高压直流接入受端电网的 TCSC 装置定容选址规划

李湘旗<sup>1</sup>, 章 德<sup>1</sup>, 廖长风<sup>2</sup>, 李 勇<sup>2</sup>, 马俊杰<sup>2</sup>

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410007; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘 要:**目前中国特高压直流接入的受端电网大多呈现“强直弱交”的情况。特高压受端换流站发生直流闭锁故障时,系统将发生大规模潮流转移,并可能引发部分线路过载。在此背景下,提出在受端电网中加入晶闸管控制串联电容器(TCSC)装置改善含特高压直流接入受端电网安全稳定问题,并建立了计及  $N-1$  安全约束的 TCSC 装置定容选址双层规划模型。上层规划模型以加装 TCSC 装置投资成本最小为目标,下层规划模型以  $N-1$  约束下最优潮流为目标,下层通过最优潮流求解结果选取给系统造成严重影响的  $N-1$  故障返回上层,增加新的约束,上下层通过互相迭代求得最终解。提出规划模型在修改 IEEE 39 节点系统中得到验证。

**关 键 词:**特高压直流;TCSC;双层规划

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.010 中图分类号:TM715 文章编号:1673-9140(2022)01-0082-08

## Capacity and location planning of TCSC for UHVDC receiving end power grid

LI Xiangqi<sup>1</sup>, ZHANG De<sup>1</sup>, LIAO Changfeng<sup>2</sup>, LI Yong<sup>2</sup>, MA Junjie<sup>2</sup>

(1. State Grid Hunan Electric Power Company Limited Economic & Technical Research Institute, Changsha 410007, China;  
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In China, most of the receiving systems with the UHVDC access are in the situation of "strong DC and weak AC" in present. After the DC blocking fault occurs, the system will undergo the large-scale power flow transfer, which may cause overloads in some lines. Under the circumstance, a thyristor-controlled series capacitor (TCSC) device is added to the receiving system, and a bilevel planning model is established for fixed-capacity and site selection of TCSC devices which takes  $N-1$  security constraints into account. The upper-level planning model aims to minimize the investment cost of installing a TCSC device. The lower-level planning model aims to optimize the power flow under the constraint of  $N-1$ . Afterwards, the lower layer selects the  $N-1$  fault that has a serious impact on the system operation through the optimal power flow solution. The lower layer results are returned to the upper layer to add a new constraint and the final solution is given by iterating. The planning model proposed in this paper are verified in the modified IEEE 39-node system.

**Key words:** UHVDC; TCSC; bilevel planning model

收稿日期:2020-10-19;修回日期:2020-11-23

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A218000B)

通信作者:李 勇(1982-),男,博士,教授,主要从事电力系统优化运行与控制、电能质量分析与控制研究;E-mail:liyong1881@163.com

中国的新能源与负荷的分布在地域上存在着严重不匹配的情况,为满足西电东送的需求,中国正在大力发展大容量、远距离特高压直流输电技术<sup>[1]</sup>。受益于高输送容量和较低的建造成本,基于电网换相换流器(line-commutated converter, LCC)的高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)技术目前在中国应用最为广泛<sup>[2]</sup>。然而,LCC-HVDC 存在换相失败的问题,在发生连续换相失败情况下,将会导致直流保护动作出口闭锁<sup>[3]</sup>,给受端电网造成严重不利影响。目前,中国绝大多数大规模交直流混联系统都呈现着“强直弱交”特征,交流系统网架结构较为薄弱。以 2025 年湖南电网目标网架为例,在规划方案中,有一回±800 kV 特高压直流落点湘南地区。当系统发生直流闭锁故障后,将通过与外部电网联络通道紧急调度来填补有功缺额,而大规模的潮流转移可能会导致部分线路过载,造成系统输电阻塞问题,从而大面积切负荷,给系统带来严重经济损失。

针对输电阻塞问题,已有许多研究者提出了相应改善方案。文献[4-5]分别针对自由电力市场下和大规模风电接入下系统潮流变化造成的线路过载问题,提出了传输线路切换优化模型,通过切除部分传输线路来满足线路潮流安全约束。这种方式虽然可以在一定程度上改善潮流分布,但无法最大化利用系统线路传输容量,当系统发生大规模潮流转移时,仍可能导致部分线路过载,给电力系统稳定运行带来严重影响。新建变电站及输电线路虽可以有效地解决输电阻塞问题,然而新建变电站存在经济性差且选址困难的问题<sup>[6]</sup>。文献[7-8]基于晶闸管控制的串联电容器(thyristor controlled series capacitor, TCSC)提出了一种电力系统阻塞疏导方法,TCSC 可以通过连续地调节所补偿线路的电抗来控制线路潮流<sup>[9]</sup>,进而可以高效地缓解系统输电阻塞问题;文献[10]基于 TCSC 改善了风电并网对网络功率分布的影响。除此之外,还可以通过 TCSC 的快速响应能力提升系统的暂态稳定性<sup>[11]</sup>以及降低系统的短路电流水平<sup>[12]</sup>。因此,为满足含特高压接

入受端系统发生直流闭锁故障后的大规模潮流转移需求,亟需要一种针对该系统的 TCSC 装置定容选址规划方法。

本文将 LCC-HVDC 直流闭锁故障作为安全约束加入到规划模型中。目前针对安全约束下规划问题,已有大量文献做了相关研究。文献[13]采用模糊聚类法将风电场和负荷出力的数据聚类成多个确定性的运行场景,提出了计及  $N-1$  安全约束的含风电场输电网扩展规划模型;文献[14]基于安全距离模型,配电网  $N-1$  安全评估方法和指标,提出一种考虑  $N-1$  安全的多目标 DG 选址定容规划模型;文献[15]为了在改变系统网架结构的同时保证系统安全性,建立考虑  $N-1$  安全网络约束的输电网结构优化模型;文献[16]分析了考虑节点电压限制和  $N-1$  潮流约束的 DG 出力上限求解方法,提出了一种考虑  $N-1$  安全约束的 DG 出力控制可视化方法;文献[17]建立了考虑风电和负荷波动及系统  $N-1$  故障多场景的备用容量优化模型。文献[13-17]中提出的  $N-1$  规划方案,虽能有效地保证系统安全性,但也导致了  $N-1$  安全约束下最优潮流问题规模大,计算耗时长的问题<sup>[18]</sup>。文献[19]提出了将机组组合与电网线路  $N-1$  安全校核直接闭环的发电计划优化模型。然而其  $N-1$  故障校核中,没有设置切负荷等紧急控制方案。文献[20]提出在含可再生能源接入的电力系统输电网络结构优化模型,将该优化问题分为经济调度问题和  $N-1$  校验问题,2 个问题交替求解。对输电网结构和机组出力进行优化,文献[21]利用多场景技术对风电、负荷的不确定性进行建模,在此基础上建立了计及  $N-1$  安全网络约束的发电双层随机规划模型。文献[19-21]中下层  $N-1$  校验均选取造成系统切负荷的  $N-1$  故障返回上层,然而造成系统切负荷的故障不均是对系统整体造成影响最大的故障,且当针对特高压直接入的受端系统发生直流闭锁故障时,可能无法避免采取切负荷紧急控制。故本文选取新的指标判断下层  $N-1$  故障是否通过校验,返回上层规划。

针对上述文献分析,本文建立了针对特高压直

流接入受端电网的 TCSC 装置定容选址规划模型。所提模型主要创新点包括:

1) 针对特高压直流入受端系统发生直流闭锁故障后所造成大规模潮流转移问题,通过加装 TCSC 装置进行改善;

2) 综合考虑 TCSC 投资建设成本及系统运行成本,构建双层规划模型,降低了  $N-1$  约束下优化规划的求解难度;

3) 下层  $N-1$  故障校验中,通过各机组有功出力与最优出力的偏移量选取对系统造成严重影响的故障返回上层,进行规划优化。

## 1 规划模型

### 1.1 TCSC 工作原理

TCSC 工作原理如图 1 所示,  $X_{ij}$  为原线路电抗;  $X_{TCSC}$  为晶闸管控制串联电容器,为可运行在容性状态或感性状态。运行在容性状态下时,线路电抗减小,有功潮流增加;运行在感性状态下时,线路电抗增加,有功潮流减小。

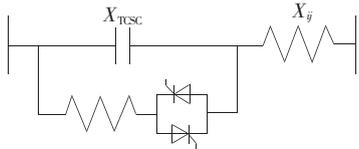


图 1 TCSC 等效电路模型

Figure 1 Equivalent circuit of TCSC

通过加装 TCSC,节点  $i$  与节点  $j$  之间线路电抗将被调节为

$$X_L = X_{ij} + X_{TCSC} \quad (1)$$

将 TCSC 的控制作用等效为系统线路传输功率,不需要对系统原导纳矩阵做任何修改<sup>[22]</sup>。支路有功潮流可计算为

$$P_{ij} = B_{ij}\theta_{ij} + P_{ij}^{TCSC}(X_{ij}, X_{TCSC}, \theta_{ij}) \quad (2)$$

式中  $B_{ij}$  为系统导纳矩阵中对应元素;  $\theta_{ij}$  为相角差;  $P_{ij}^{TCSC}$  为 TCSC 控制作用下等效线路传输功率,可通过  $X_{ij}$ 、 $X_{TCSC}$ 、 $\theta_{ij}$  非线性表达,本文仅对其定容选址进行规划,不考虑其控制过程。

### 1.2 上层规划模型

1) 目标函数。考虑 TCSC 装置建设的经济性,

TCSC 定容选址规划模型中,上层模型以加装 TCSC 装置投资成本最小为目标,上层目标函数设定为

$$o_{bj} = \min \sum_{\Omega_1} n_{ij}^{TCSC} \quad (3)$$

式中  $o_{bj}$  为目标函数值;  $n_{ij}^{TCSC}$  为线路上安装 TCSC 装置数量;  $\Omega_1$  为线路集合。若  $n_{ij}^{TCSC}$  为 0,则表示线路  $i-j$  上没有加装 TCSC 装置。

2) 等式约束。节点潮流方程为

$$\begin{cases} P_{i,s} = \sum_{\Omega_i} P_{ij,s} \\ P_{i,s} = P_{i,s}^G + P_{i,s}^T + P_{i,s}^{DC} - P_{i,s}^L \end{cases} \quad (4)$$

式中  $s$  为状态维度,包括正常运行状态和故障状态,  $s = \{bc, f_k\}$ ;  $P_{i,s}$  为节点注入功率;  $\Omega_i$  为节点集合;  $P_{i,s}^G$  为发电机有功出力;  $P_{i,s}^L$  为节点负荷;  $P_{i,s}^T$  为联络通道有功传输功率。

支路潮流方程为

$$P_{ij,s} = l_{ij,s} B_{ij} \theta_{ij,s} + l_{ij,s} P_{ij,s}^{TCSC} \quad (5)$$

式中  $l_{ij,s}$  为线路状态。若线路正常运行,则值为 1,若线路因故障而断开,则值为 0。

3) 不等式约束。支路潮流约束为

$$P_{ij,\min} \leq P_{ij,s} \leq P_{ij,\max} \quad (6)$$

式中  $P_{ij,\min}$ 、 $P_{ij,\max}$  分别为支路传输功率上、下限。

发电机出力及调节约束为

$$\begin{cases} P_{i,\min}^G \leq P_{i,s}^G \leq P_{i,\max}^G \\ P_{i,lo}^G \leq P_{i,s}^G \leq P_{i,up}^G \\ \Delta P_{i,\min}^G \leq P_{i,f_k}^G - P_{i,bc}^G \leq \Delta P_{i,\max}^G \end{cases} \quad (7)$$

式中  $P_{i,\max}^G$ 、 $P_{i,\min}^G$  分别为发电机有功出力上下限;  $P_{i,up}^G$ 、 $P_{i,lo}^G$  分别为下层给出发电机有功出力约束区间的上下限;  $\Delta P_{i,\max}^G$ 、 $\Delta P_{i,\min}^G$  分别为故障后发电机有功出力调节上下限。

联络通道功率传输约束为

$$P_{i,\min}^T \leq P_{i,s}^T \leq P_{i,\max}^T \quad (8)$$

式中  $P_{i,\max}^T$ 、 $P_{i,\min}^T$  分别为联络通道有功传输上、下限值。

切负荷约束为

$$P_{i,bc}^L - P_{i,f}^L \leq \Delta P_{i,\max}^L \quad (9)$$

式中  $\Delta P_{i,\max}^L$  为节点  $i$  在故障后最大切负荷量。

TCSC 调节约束为

$$-n_{ij}^{\text{TCSC}} P_r^{\text{TCSC}} \leq P_{ij,s}^{\text{TCSC}} \leq n_{ij}^{\text{TCSC}} P_r^{\text{TCSC}} \quad (10)$$

式中  $P_r^{\text{TCSC}}$  为 TCSC 装置额定容量。

最低运行成本约束为

$$\sum_{i \in \Omega_i} (a_i (P_{i,bc}^G)^2 + b_i P_{i,bc}^G + c_i + d_i P_{i,bc}^T) + \sum_{i \in \Omega_i} \sum_{f \in \Omega_f} p_f e_i \Delta P_{i,f}^L \leq C_{\min} \quad (11)$$

式中  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为节点  $i$  上发电机发电成本系数； $d_i$  为节点  $i$  上联络通道有功功率调度成本系数； $e_i$  为切负荷补偿成本系数； $p_f$  为故障影响因子，定义为故障发生几率与影响权重的乘积； $\Delta P_{i,f}^L$  为节点  $i$  上故障后切负荷量； $C_{\min}$  为最低运行成本。

### 1.3 下层优化模型

下层优化模型以运行成本最小为目标，考虑了节点潮流方程等等式约束和发电机出力及调节等不等式约束。在上层规划给出 TCSC 配置方案基础上进行最优潮流计算。通过计算结果分析给出对系统造成影响较大的  $N-1$  故障及其最低运行成本，各发电机及联络通道有功出力区间，并返回上层。

$$\begin{cases} P_{i,s} = \sum_{\Omega_i} P_{ij,s} \\ P_{i,s} = P_{i,s}^G + P_{i,s}^T + P_{i,s}^{\text{DC}} - P_{i,s}^L \\ P_{ij,s} = l_{ij,s} B_{ij} \theta_{ij,s} + l_{ij,s} P_{ij,s}^{\text{TCSC}} \\ p_{ij,\min} \leq P_{ij,s} \leq p_{ij,\max} \\ \text{s. t. } \begin{cases} P_{i,\min}^G \leq P_{i,s}^G \leq P_{i,\max}^G \\ \Delta P_{i,\min}^G \leq P_{i,f,k}^G - P_{i,bc}^G \leq \Delta P_{i,\max}^G \\ P_{i,\min}^T \leq P_{i,s}^T \leq P_{i,\max}^T \\ P_{i,bc}^L - P_{i,f}^L \leq \Delta P_{i,\max}^L \\ -n_{ij}^{\text{TCSC}} P_r^{\text{TCSC}} \leq P_{ij,s}^{\text{TCSC}} \leq n_{ij}^{\text{TCSC}} P_r^{\text{TCSC}} \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

## 2 模型求解

为改善由于加入多个  $N-1$  安全约束所造成的优化模型规模增加的问题，并同时考虑 TCSC 装置加装成本及系统运行成本，本文将规划模型分为上层 TCSC 定容选址规划和下层最优潮流。通过下层最优潮流优化结果分析选取对系统造成严重影响的  $N-1$  故障作为约束返回上层，上层针对这些故障进行 TCSC 定容选址规划，并将规划结果再次传递

给下层，通过上下层相互迭代得到最终规划结果。

其中，下层最优潮流主要包含以下 3 个部分。

1) 不考虑  $N-1$  安全约束下的最优潮流模型。通过不含  $N-1$  故障安全约束的最优潮流结果，分别设置各发电力及联络通道有功出力区间、发电机及联络通道有功出力区间边界值与最优值之差绝对值为  $P_{\Delta}^G$  和  $P_{\Delta}^T$ 。

2) 考虑各单独  $N-1$  安全约束下最优潮流模型。判断各故障下发电机及联络通道在最优潮流下，有功出力是否在有功出力区间内，如若不在，则说明系统需要对此  $N-1$  故障进行较强的预防控制，将对系统造成影响较大的  $N-1$  故障返回上层。

3) 考虑全部  $N-1$  安全约束下最优潮流模型。本文在上层规划中还加入了最低运行成本约束，通过求解含全部  $N-1$  故障下的最优潮流得出每个故障下的最低运行成本。

具体求解过程如图 2 所示。

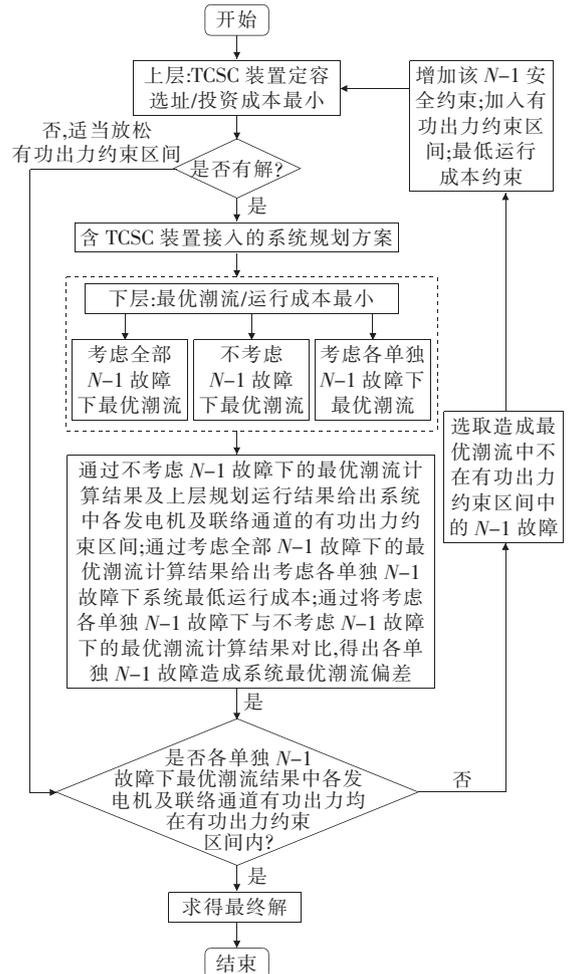


图 2 算法流程

Figure 2 Algorithm flowchart

### 3 算例分析

#### 3.1 仿真算例

在修改后的 IEEE 39 节点中,对本文提出优化模型进行验证。系统拓扑结构如图 3 所示,原 IEEE 39 节点系统中,31 节点与 39 节点上发电机替换为外部大电网联络通道,17 节点上接入一条特高压直流输电线路,输送有功功率为 1 000 MW,各故障设置如表 1 所示。可中断负荷节点设置为 3、4、7、8、18,可中断负荷量设置为节点负荷总量 50%。故障后运行状态下,发电机有功可调节量设置为系统最大有功出力的 10%, $p_f$  均设置为 0.05。系统中各成本参数如表 2 所示。系统连接发电机,联络通道及特高压直流线路潮流约束设置为 600 MV·A,其余线路潮流约束  $P_{ij,max}$  如表 3 所示,系统基准容量

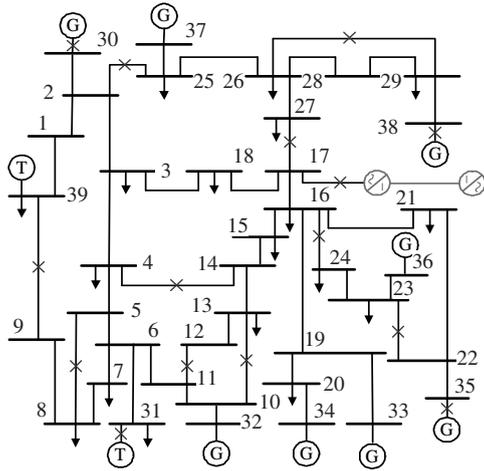


图 3 算例拓扑

Figure 3 Topology of test system

表 1 故障设置

Table 1 Fault settings

故障类型	故障支路或节点				
	$f_1$ /支路	$f_2$ /支路	$f_3$ /支路	$f_4$ /支路	$f_5$ /支路
线路	2-25	4-14	5-8	9-39	10-13
	$f_6$ /支路	$f_7$ /支路	$f_8$ /支路	$f_9$ /支路	$f_{10}$ /支路
	11-12	16-24	17-27	22-23	26-29
发电机/联络通道/直流闭锁	$f_{11}$ /节点	$f_{12}$ /节点	$f_{13}$ /节点	$f_{14}$ /节点	$f_{15}$ /节点
	30	35	38	31	17

表 2 系统成本系数

Table 2 System cost coefficient \$/MW·h

成本系数	节点	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$	$e_i$
各发电机发电	—	0.01	0.3	0.2	—	—
联络通道输电	31	—	—	—	8.5	—
	39	—	—	—	9	—
切负荷补偿	—	—	—	—	—	100

表 3 线路潮流约束参数

Table 3 Branch power flow constraints parameter

参数	线路
载流量 600/ (MV·A)	(1-2),(1-39),(2-30),(6-31),(8-9),(9-39) (10-32),(12-11),(16-17),(16,19),(17-18) (17-27),(19-20),(19-33),(20-34), (22-35),(23-36),(25-37),(29-38)
	(2-3),(2-25),(3-4),(3-18),(4-5),(4-14) (5-6),(5-8),(6-7),(6,11),(7-8),(10-11)
	$p_{ij,max}$ (10-13),(12-13),(13-14),(14-15),(15-16) (16-21),(16-24),(21-22),(22-23),(23-24) (25-26),(26-27),(26-28),(26-29),(28-29)

设置为 100 MV·A。每条线路上安装 TCSC 装置单位上限为 5 组,每组额定容量为 20 MV·A<sup>[12]</sup>。本文所提出的上下层规划优化模型在 GAMS 中采用 SBB 求解器进行求解,算法流程通过 MATLAB 实现。

#### 3.2 算例结果分析

本文提出模型在不同支路潮流约束设置下的迭代求解结果如图 4 所示。系统在加装 TCSC 装置后,能有效地降低系统的运行成本。对比不同支路潮流约束下系统 TCSC 装置优化规划结果可知,随着系统支路潮流约束的增强,即系统网架结构越薄弱,通过加装 TCSC 降低的系统运行成本越大。当支路传输功率上限  $P_{ij,max} = 4.5$  时,通过加装 TCSC 装置可降低运行成本 1 811.5 \$/h;而当  $P_{ij,max} = 5.5$  时,降低运行成本则仅为 5.3 \$/h。同时,在加装相同数量 TCSC 装置时,网架较为薄弱的系统能够取得更好的效果,当  $P_{ij,max} = 4.5$ ,  $n_{ij}^{TCSC} = 7$  时,系统减少运行成本为 354.2 \$/h;而当  $P_{ij,max} = 5$ ,  $n_{ij}^{TCSC} = 5$  时,系统减少运行成本则为 247.4 \$/h。因此,受端交流系统网架越薄弱,其故障下潮流转移时,输电阻塞问题越为严重,TCSC 对此问题的改善

效果越加显著。本文所提模型在面对受端系统“强直弱交”问题时,能够取得良好的改善效果。

此外,对加装 TCSC 装置前后系统,在直流闭锁故障后,对各元器件状态进行分析比较,研究 TCSC 装置在系统发生直流闭锁故障后所起到的具体作用。选取支路传输功率上限  $P_{ij,max} = 5$ ,系统发生直流闭锁故障后最优潮流分布如图 5 所示,各元器件状态如表 4、5 所示。当系统发生直流闭锁故障后,主要通过联络通道紧急调度来填补系统出现的大量有功缺额,进而系统无法避免的出现大规模潮流转移。然而线路 3(2-3)已经达到支路潮流约束上线,无法继续增加有功传输量,从而导致节点 3 切除负荷 0.709 p. u.,当系统加装 TCSC 装置后,可通过线路 40(25-26)上 TCSC 装置增加向节点 26 上功率传输,进而通过线路 42(26-27)、31(17-27)、30(17-18)、7(3-18)增加对节点 3 的有功功率传输。从而有效地改善了系统由于大规模潮流转移所导致输电阻塞而造成的切负荷。因此,本文提出 TCSC 装置规划模型能够有效地改善含特高压直流接入受端系统直流闭锁故障下的切负荷问题。

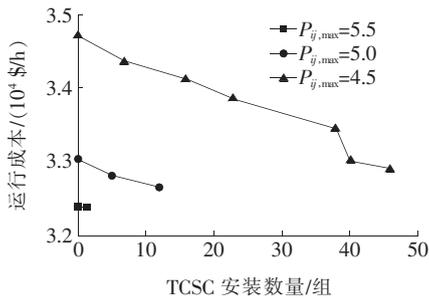


图 4 安装不同数目 TCSC 装置下的最优解

Figure 4 Optimal solution with different TCSC numbers

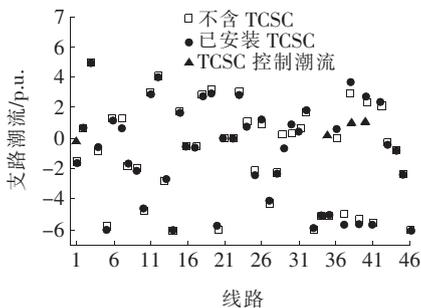


图 5 直流闭锁故障后系统最优潮流 ( $P_{ij,max} = 5$ )

Figure 5 Optimal power flow after DC blocking fault

表 4 直流闭锁故障后发电机出力结果对比

Table 4 Generator output after DC blocking fault

发电方案	不同调度方案优化结果	
	不含 TCSC	加装 TCSC
$P_{30,bc}^G / P_{30,f15}^G$	4.69/5.73	4.96/6.00
$P_{32,bc}^G / P_{32,f15}^G$	5.28/6.00	5.00/5.72
$P_{33,bc}^G / P_{33,f15}^G$	5.35/6.00	5.24/5.89
$P_{34,bc}^G / P_{34,f15}^G$	4.57/5.08	4.57/5.08
$P_{35,bc}^G / P_{35,f15}^G$	4.36/5.05	4.92/5.60
$P_{36,bc}^G / P_{36,f15}^G$	4.74/5.32	4.98/5.56
$P_{37,bc}^G / P_{37,f15}^G$	5.00/5.56	5.03/6.00
$P_{38,bc}^G / P_{38,f15}^G$	5.14/6.00	5.14/6.00
$P_{31,bc}^T / P_{31,f15}^T$	6.09/6.09	6.09/6.09
$P_{39,bc}^T / P_{39,f15}^T$	7.33/11.00	6.62/11.00
发电电成本/( \$ / h)	32 167.960	32 189.858

表 5 直流闭锁故障后切负荷结果对比

Table 5 Load shedding after DC blocking fault

切负荷方案	不同调度方案优化结果	
	不含 TCSC	加装 TCSC
$P_{3,bc}^L / P_{3,f15}^L$	3.22/2.51	3.22/3.22
$P_{4,bc}^L / P_{4,f15}^L$	5.00/5.00	5.00/5.00
$P_{7,bc}^L / P_{7,f15}^L$	2.34/2.34	2.34/2.34
$P_{8,bc}^L / P_{8,f15}^L$	5.20/5.22	5.22/5.22
$P_{18,bc}^L / P_{18,f15}^L$	1.58/1.58	1.58/1.58
切负荷成本/( \$ / h)	354.500	0

## 4 结语

本文提出了一种针对含特高压直流接入的受端系统 TCSC 装置定容选址双层规划模型,同时考虑了 TCSC 装置加装成本与系统运行成本。下层规划选取对系统最优潮流造成影响较大的故障返回上层,通过迭代得到数组有效优化解。

通过不同支路潮流约束下的优化结果对比可知,受端交流系统网架越薄弱,故障下潮流转移时输电阻塞问题越为严重,TCSC 对此问题的改善效果越加显著。因此,针对中国特高压直流接入下受端系统网架大多存在“强直弱交”问题,本文所提方法模型能够取得良好改善效果。直流闭锁故障后各元器件的状态对比结果表明,通过 TCSC 装置控制潮流可以有效地解决系统发生直流闭锁故障后发生大规模潮流转移导致的线路过载所造成切负荷问题。

综上,本文所提出 TCSC 装置定容选址双层规划模型可同时提高含特高压接入受端系统的经济性和稳定性。

### 参考文献:

- [1] 李智琦,罗日成,李稳,等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电线路带电作业电位转移特性分析[J]. 高压电器, 2020, 56(3):164-168+175.  
LI Zhiqi, LUO Richeng, LI Wen, et al. Analysis of potential shift characteristics of live working on  $\pm 800$  kV UHVDC transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3):164-168+175.
- [2] 陈龙龙,徐飞,魏晓光,等. 大容量可控关断的直流输电用电流源型换流器研究综述[J]. 中国电力, 2021, 54(1):25-36.  
CHEN Longlong, XU Fei, WEI Xiaoguang, et al. A review on large capacity controllable switching current source converter research[J]. Electric Power, 2021, 54(1):25-36.
- [3] 朱金涛,辛业春. 柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(3):1-11.  
ZHU Jintao, XIN Yechun. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system[J]. Smart Power, 2021, 49(3):1-11.
- [4] 沈政委,汤涌,易俊,等. 用于电网拓扑优化的输电线路开关控制研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(2):475-483.  
SHEN Zhengwei, TANG Yong, YI Jun, et al. Review of research on transmission switching control for network topology optimization[J]. Power System Technology, 2020, 44(2):475-483.
- [5] 王智冬,娄素华,范臻,等. 基于机会约束规划的含大规模风电电力系统阻塞调度优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23):147-154.  
WANG Zhidong, LOU Suhua, FAN Zhen, et al. Chance-constrained programming based congestion dispatching optimization of power system with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric power systems, 2019, 43(23):147-154.
- [6] 王泽宇,张仰飞,陈光宇,等. 基于最优传输切换阻塞管理方法研究[J]. 电工技术, 2019(16):71-74.  
WANG Zeyu, ZHANG Yangfei, CHEN Guangyu, et al. Research on congestion management based on optimal transmission switch[J]. Electric Engineering, 2019(16):71-74.
- [7] 周前,方万良. 基于 TCSC 技术和粒子群优化算法的电力系统阻塞疏导方法[J]. 电网技术, 2008, 32(8):47-52.  
ZHOU Qian, FANG Wangliang. Studies on congestion management of power systems based on TCSC and PSO[J]. Power System Technology, 2008, 32(8):47-52.
- [8] RASHED G I, SUN Y, SHAHEEN H I. Optimal location of thyristor controlled series compensation in a power system based on differential evolution algorithm considering transmission loss reduction[C]// 2011 9th World Congress on Intelligent Control and Automation, Taipei, China, 2011.
- [9] 和萍,陈婕,耿斯涵,等. FACTS 装置对含风电互联系统低频振荡特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8):86-95.  
HE Ping, CHEN Jie, GENG Sihan, et al. Analysis of FACTS device on low-frequency oscillation characteristics of a power system with wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8):86-95.
- [10] 李娟,孙欣. 计及风电不确定性和 TCSC 功率调节作用的最优潮流研究[J]. 电气自动化, 2019, 41(6):21-24.  
LI Juan, SUN Xin. Research on optimal power flow considering wind power uncertainty and TCSC power regulation[J]. Electrical Automation, 2019, 41(6):21-24.
- [11] 睦仁杰,薛峰,周野,等. 提高电力系统暂态稳定性的 TCSC 控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9):64-69.  
SUI Renjie, XUE Feng, ZHOU Ye, et al. TCSC control strategy for enhancing the transient stability of power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9):64-69.
- [12] HASHEMI S M, HAGH M T, Seyedi H. High-speed relaying scheme for protection of transmission lines in the presence of thyristor-controlled series capacitor[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 12(8):2083-2091.
- [13] 杨芸瑾. 计及 N-1 安全约束的含风电场电力系统扩展规划[J]. 电工技术, 2018(22):100-103.  
YANG Yunjin. Expansion planning of power system containing wind farm with considering N-1 security criterion[J]. Electric Engineering, 2018(22):100-103.

- [14] 钟浩,郝亚群,刘海涛,等. 考虑风电消纳的风-蓄联合系统  $N-1$  安全校正方法[J]. 电网与清洁能源,2019,35(2):78-86.  
ZHONG Hao,HAO Yaqun,LIU Haitao,et al.  $N-1$  security rescheduling method for wind-storage combined system considering wind power consumption[J]. Power System and Clean Energy,2019,35(2):78-86.
- [15] 杨德州,任彦辉,葛磊蛟,等. 基于  $N-1$  安全约束的主动配电网拓扑优化控制方案[J]. 电测与仪表,2020,57(1):49-54.  
YANG Dezho,REN Yanhui,GE Leijiao,et al. A topology optimization control scheme of active distribution network based on  $N-1$  security constraints[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2020,57(1):49-54.
- [16] 刘佳,程浩忠,李思韬,等. 考虑  $N-1$  安全约束的分布式电源出力控制可视化方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):24-30.  
LIU Jia,CHENG Haozhong,LI Sitao et al. Visualization method of output power control of distributed generators considering  $N-1$  security constraints[J]. Automation of Electric power systems,2016,40(11):24-30.
- [17] 张粒子,李丰,叶红豆,等. 考虑风电和负荷波动及  $N-1$  故障的发电备用优化方法研究[J]. 太阳能学报,2014,35(1):64-73.  
ZHANG Lizi,LI Feng,YE Hongdou,et al. Optimal reserve dispatch approach considering wind power and load fluctuations and  $N-1$  fault[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2014,35(1):64-73.
- [18] 阳育德,陶琢,刘辉,等. 电力系统静态安全最优潮流并行计算方法[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):99-105.  
YANG Yude,TAO Zhuo,LIU Hui,et al. Parallel computation methods for static security-constrained optimal power flow of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):99-105.
- [19] 汪洋,夏清,康重庆. 考虑电网  $N-1$  闭环安全校核的最优安全发电计划[J]. 中国电机工程学报,2011,31(10):39-45.  
WANG Yang,XIA Qing,KANG Chongqing. Optimal security constrained generation scheduling considering closed-loop  $N-1$  security correction[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(10):39-45.
- [20] 赵博石,胡泽春,宋永华. 考虑  $N-1$  安全约束的含可再生能源输电网络鲁棒优化[J]. 电力系统自动化,2019,43(4):16-26.  
ZHAO Boshi,HU Zechun,SONG Yonghua. Robust optimization of transmission topology with renewable energy sources considering  $N-1$  security constraints [J]. Automation of Electric power systems,2019,43(4):16-26.
- [21] 张衡,程浩忠,张建平,等. 高比例风电背景下计及  $N-1$  安全网络约束的发输电优化规划[J]. 中国电机工程学报,2018,38(20):5929-5936.  
ZHANG Heng,CHENG Haozhong,ZHANG Jianping,et al. Generation and transmission expansion planning considering  $N-1$  security constraints with high penetration of wind power[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(20):5929-5936.
- [22] 李娟,许欣,李壮,等. SVC 与 TCSC 优化配置在电力系统静态电压稳定中的应用[J]. 广东电力,2016,29(4):67-72+78.  
LI Juan,XU Xin,LI Zhuang,et al. application of SVC and TCSC optimal configuration in static voltage stability of power system[J]. Guangdong Electric power,2016,29(4):67-72+78.