

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201085

# 考虑直流系统双极闭锁故障的受端电网运行成本优化

廖长风, 李勇, 马俊杰

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 现有的电力系统运行优化大多没有考虑故障短期运行安全约束, 导致其优化结果没有为故障短期内快速控制保留充分有功备用, 尤其在含特高压直流输入的电力系统发生直流闭锁故障后将会出现大量有功缺额, 从而导致故障后系统大面积切负荷, 给电力系统带来了严重经济损失。提出了一种考虑故障短期运行安全约束的含特高压接入受端系统发输电运行优化模型。首先, 在含特高压接入受端系统中设置含直流双极闭锁在内的多个  $N-1$  故障。其次, 在传统  $N-1$  安全约束下最优潮流规划模型中加入故障短期安全约束。最后, 以发输电成本最小和切负荷成本最小为目标函数, 提出了含特高压接入的受端电网运行成本优化模型。该模型在修改后的 IEEE39 节点系统中得到验证。

**关键词:**  $N-1$  短期运行安全约束; 传统特高压直流输电; 直流闭锁; 最优潮流

## Operating cost optimization of the receiving side power system considering the bipolar blocking fault of the DC system

LIAO Changfeng, LI Yong, MA Junjie

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Existing power system planning does not consider short-term security constraints, and does not reserve sufficient active power for short-term control after a fault, especially in the case of a DC blocking fault in the power system with UHVDC connection. In this case there will be a large amount of active power deficiency, resulting in a large area of load shedding after the fault. This brings serious economic losses to the power system. Therefore, this paper proposes an OPF model of the receiving side of the power system considering short-term operation security constraints. First, several  $N-1$  faults including DC blocking are set in the system. Secondly, short-term security constraints are added to the optimal power flow planning model under the traditional  $N-1$  security constraints. Finally, taking the minimum generation and transmission cost and the minimum load shedding cost as the objective function, an OPF model for the receiving side of the power system with UHVDC connection is proposed. The model is verified in the modified IEEE39 node system.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52007057), the Innovative Construction Program of Hunan Province of China (No. 2019RS1016), and the Excellent Innovation Youth Program of Changsha of China (No. KQ2009037).

**Key words:**  $N-1$  short term operation security constraints; UHVDC transmission; DC blocking; optimal power flow

## 0 引言

特高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)作为一种长距离、高效能输电技术, 在消纳我国西部风电、优化我国电网网架格局中产生了重要作用<sup>[1-3]</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 HVDC 系统仍是我国 HVDC 的主要类型<sup>[4-5]</sup>。但是, LCC-HVDC 需要受端电网提供无功支撑<sup>[6]</sup>, 并且在连接弱交流电网时容易引起换相失败的问题<sup>[7]</sup>。尤其在连续换相失败情况下, 将会导致直流保护动作出口闭锁直流, 给受端电网造成严重不利影响<sup>[8]</sup>。

目前, 中国大规模交直流混联系统呈现“强直弱交”特征<sup>[9]</sup>, 交流系统网架结构较为薄弱, 直流系统配套电源建设不足。当发生特高压直流双极闭

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(52007057); 湖湘高层次人才聚集工程项目资助(2019RS1016); 长沙市杰出创新青年计划资助(KQ2009037)

锁故障时, 将发生大规模潮流转移, 给电力系统安全稳定运行带来巨大冲击。以我国湖南电网实际情况为例, 甘肃酒泉—湖南湘潭±800 kV 特高压直流线路(祁韶线)额定输电能力为 800 万 kW, 而目前, 湖南电网仅有 3 回跨省联络通道与湖北电网联络, 该断面调度运行控制极限功率远不够填补系统发生直流双极闭锁故障后产生的有功缺额。若祁韶线发生直流双极闭锁故障, 省间联络通道输电能力不足以满足潮流转移需求<sup>[10]</sup>, 需进行大面积切负荷, 有可能导致电网大规模停电。为保障电网安全, 迫切需要一种考虑直流双极闭锁故障下安全约束的交直流混联系统优化模型, 从而减小因直流双极闭锁给电网带来的危害。

LCC-HVDC 的直流双极闭锁是一个典型的  $N-1$  问题。目前针对  $N-1$  安全约束下最优潮流问题, 已有大量文献做了相关研究。文献[11]建立了风电与抽水蓄能电站联合调度优化模型, 然而该模型中仅考虑了传统  $N-1$  安全约束, 没有考虑故障后发电机有功出力调节爬坡约束。文献[12]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模式。文献[13]中采用区间数优化方法, 建立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[14]利用多场景技术对风电、负荷的不确定性进行建模, 建立了计及  $N-1$  安全网络约束的发输电双层随机规划模型。文献[15]建立了一种考虑  $N-1$  安全约束下以电能和备用购买费用最小为目标函数的能量备用规划模型。文献[16]将该优化问题分为经济调度问题和  $N-1$  校验问题, 通过迭代求解, 对输电网结构和机组出力进行优化。文献[13-16]中的静态安全稳定分析虽然考虑了故障发生后长期内持久性的紧急状态, 但均没有考虑短期内稳定性的紧急状态, 该状态下, 由于时间跨度太小, 大部分元器件无法及时地进行校正控制, 仅可以通过切负荷等紧急控制来维持系统稳定运行。文献[17]中首次提出, 故障发生后的这段短期平衡状态下, 对于状态变量的不等式约束可以短暂放松。本文中, 由于加入了直流双极闭锁这一  $N-1$  故障, 系统针对故障发生后的巨大有功缺额必将采取联络通道紧急调度有功及切负荷等紧急控制措施, 因此, 在优化模型中加入故障内短期安全约束是十分必要的。

文献[18-19]通过定义过载线路热量累积限值, 体现故障内多时间阶段的安全约束条件。虽然这种方法能够有效地在优化模型中考虑  $N-1$  故障下短期运行约束, 然而也严重加剧了安全约束下最优

潮流问题规模大、计算耗时长的问题<sup>[20]</sup>。此外, 上述文献大多是基于直流潮流算法解决  $N-1$  安全约束下最优潮流问题, 没有考虑系统无功潮流及电压约束。

针对上述文献分析, 本文建立了考虑故障短期内安全约束的含特高压接入受端电网运行成本优化规划模型。论文主要贡献包括:

1) 针对含特高压直流输入的受端系统中存在的直流双极闭锁这一故障建立了  $N-1$  安全约束优化模型。

2) 在保证本文提出模型为凸优化模型基础上, 考虑了无功潮流及电压。

3) 综合考虑了直流双极闭锁故障的优化模型有效性与计算效率问题, 在传统  $N-1$  安全约束基础上加入故障后短期(稳定性紧急状态)运行安全约束。

## 1 优化模型

### 1.1 系统控制方案

本文中, 电力系统运行主要分为三个状态, 正常运行状态、故障内短期运行状态和故障内长期运行状态<sup>[17]</sup>。其中, 故障内短期运行状态和长期运行状态分别对应静态安全稳定分析中的稳定性紧急状态和持久性紧急状态。

如图 1 所示, 正常运行状态下可以调节联络通道上的功率传输、调相机的无功出力及 PV 节点上发电机的有功出力、端电压幅值。当故障发生后短期内, 发电机由于爬坡约束及调节时间过于短暂, 无法调节有功出力, 仅可以通过紧急调度联络通道功率传输及切负荷来满足系统故障后短期运行有功功率平衡。特高压直流有功传输受端需消耗 40%~60% 的无功功率, 通常站内会安装相应容量无功补偿装置<sup>[21]</sup>。当直流双极闭锁故障发生后, 冗余无功将涌入受端交流系统, 造成过电压问题, 然而在故障短期内可以及时切除无功补偿装置<sup>[22]</sup>, 且调相机可以及时响应并通过进相运行调节电压<sup>[23]</sup>, 故本文短期运行约束中不考虑由直流双极闭锁故障所带来的无功问题。当系统短暂运行一段时间后, 进入故障内长期运行状态, 各发电机及联络通道均可以调节有功出力来进行故障后校正控制。

各状态下决策变量如式(1)~式(3)所示。

$$u_{bc} = \{P_{i, bc}^T, Q_{i, bc}^T, Q_{i, bc}^{SC}, P_{i, bc}^G, V_{i, bc}^{PV}\} \quad (1)$$

$$u_{fst} = \{P_{fst}^T, Q_{fst}^T, Q_{fst}^{SC}, V_{fst}^{PV}\} \quad (2)$$

$$u_{fth} = \{P_{fth}^T, Q_{fth}^T, Q_{fth}^{SC}, P_{fth}^G, V_{fth}^{PV}\} \quad (3)$$

式中:  $P_i^T$ 、 $Q_i^T$  分别表示节点  $i$  上联络通道注入有

功、无功功率;  $Q_i^{SC}$  表示节点  $i$  上调相机注入无功功率;  $P_i^G$  表示节点  $i$  上发电机注入有功功率;  $V_i^{PV}$  表示 PV 节点  $i$  上电压幅值。下标 bc、 $f_{st}$ 、 $f_{lt}$  分别表示系统正常运行状态、故障内短期运行状态和故障内长期运行状态。

## 1.2 目标函数

如图 1 所示, 目标函数主要由两部分组成, 静态稳定下正常运行发电及外网输电成本最低和故障后切负荷成本最低。

$$\sum_{i \in \Omega_i} (a_i (P_{i,bc}^G)^2 + b_i P_{i,bc}^G + c_i + d_i P_{i,bc}^T) + \sum_{i \in \Omega_i} \sum_{f \in \Omega_f} p_f \cdot e_i \Delta P_{i,f}^L \quad (4)$$

式中:  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分别为节点  $i$  上发电机发电成本二次项系数、一次项系数及常数项系数;  $d_i$  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  $\times$  影响权重;  $\Delta P_{i,f}^L$  为节点  $i$  上故障后切负荷量。

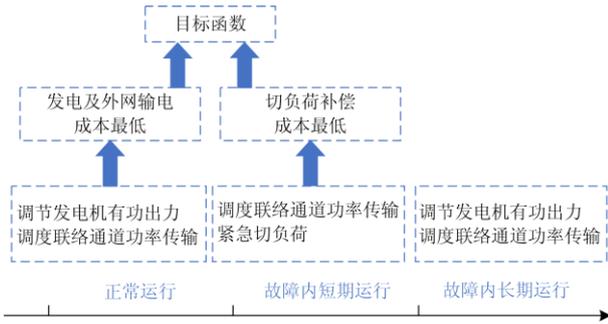


图 1 各状态下系统运行

Fig. 1 System operation in each state

## 1.3 等式约束

为搭建凸优化模型, 提高计算效率, 保证所求解有效性, 故本优化模型中采用文献[24]所提出线性潮流模型。该模型在直流潮流算法模型基础上计及无功潮流及电压变量, 能更好地反应含特高压直流接入的受端系统发生直流双极闭锁故障后的潮流转移过程及电压问题。等式约束包括

### 1) 节点潮流方程

$$\begin{cases} P_{i,s} = \sum_{j \in \Omega} B_{ij,s} \theta_{j,s} - G_{ij,s} V_{ij,s} \\ Q_{i,s} = \sum_{j \in \Omega} B_{ij,s} V_{ij,s} + G_{ij,s} \theta_{j,s} - b_{ii} V_{i,s} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{i,s}$ 、 $Q_{i,s}$  分别为节点  $i$  上状态  $s$  下节点有功、无功注入功率;  $G_{ij,s}$ 、 $B_{ij,s}$  分别为状态  $s$  下节点导纳矩阵对应元素;  $V_{i,s}$  为节点  $i$  上状态  $s$  下电压幅值;

$V_{ij,s}$ 、 $\theta_{ij,s}$  分别为状态  $s$  下节点  $i$  和节点  $j$  之间的电压差和相角差。其中,  $s = \{bc, f_{st}, f_{lt}\}$ 。

$$\begin{cases} P_{i,s} = P_{i,s}^T + P_{i,s}^G + P_{i,s}^{DC} - P_{i,s}^L \\ Q_{i,s} = Q_{i,s}^T + Q_{i,s}^G + Q_{i,s}^{SC} - Q_{i,s}^L \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_{i,s}^{DC}$  为节点  $i$  上状态  $s$  下特高压直流有功注入;  $Q_{i,s}^{SC}$  为节点  $i$  上状态  $s$  下调相机无功出力;  $P_{i,s}^L$ 、 $Q_{i,s}^L$  为节点  $i$  上状态  $s$  下有功、无功负荷。

### 2) 支路潮流方程

$$\begin{cases} P_{ij,s} = B_{ij,s} \theta_{j,s} - G_{ij,s} V_{ij,s} \\ Q_{ij,s} = B_{ij,s} V_{ij,s} + G_{ij,s} \theta_{j,s} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $P_{ij,s}$ 、 $Q_{ij,s}$  分别为状态  $s$  下支路  $i$  和  $j$  之间的有功、无功支路潮流。

## 1.4 不等式约束

不等式约束通常为表示系统中各元器件的物理极限。在传统  $N-1$  安全约束基础上, 本文对系统故障短期运行内各元器件的安全运行约束做了进一步描述。本模型中, 不等式约束包括如下几个约束。

### 1) 电压约束及支路潮流约束

当故障发生后系统潮流分布将发生改变, 尤其考虑直流双极闭锁故障发生后系统将发生大规模潮流转移, 由此可能会引发节点电压越限及支路潮流过载等问题, 故本文针对状态变量所提出的不等式约束主要为电压约束及支路潮流约束。

$$V_{i,\min} \leq V_{i,s} \leq V_{i,\max} \quad (8)$$

式中,  $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$  分别为电压上下限值。

$$(P_{ij,s})^2 + (Q_{ij,s})^2 \leq (\beta_s S_{ij,\max})^2 \quad (9)$$

式中:  $S_{ij,\max}$  为支路潮流上限;  $\beta_s$  定义为状态  $s$  下潮流约束相对于永久潮流约束可以放松的极限值。通常,  $\beta_{bc} = \beta_{f_{lt}} = 1, \beta_{f_{st}} > 1$ 。

$\beta_s$  在文献[18-19]中体现为过载线路热量累积极限值。文献[18]通过计算故障发生后到系统完全消除线路过载时间段内多个短暂间隔时间节点的线路过载潮流, 约束其累积量不超过过载线路热量累积极限值来保证系统故障内短期安全稳定运行。而文献[19]通过限制其故障内长期校正控制响应时刻线路温度来体现故障后短期运行安全约束。上述两种方法均能有效地在规划中体现故障后短期运行约束, 但同时也严重增加了  $N-1$  约束下最优潮流问题的规模。通过分析, 上述两种方法均采用线路过载潮流来表达线路热累积量, 在故障发生后, 潮流实现瞬时转移, 切负荷等快速控制均在故障发生时刻进行瞬时响应。故在整个故障内短期运行时间段内,

潮流变化很小。故本文直接通过短期过载极限来体现系统故障内短期运行安全约束，在保证约束有效性的同时，降低了优化模型的计算规模。

2) 发电机出力及调节约束

常规发电机组有功出力调节速率约为 5%/min<sup>[18]</sup>，在故障内短期运行状态下，由于调节时间过于短暂，调节量过小，故将发电机在该状态下调节量近似等效为零。

$$\begin{cases} P_{i,\min}^G \leq P_{i,s}^G \leq P_{i,\max}^G \\ Q_{i,\min}^G \leq Q_{i,s}^G \leq Q_{i,\max}^G \end{cases} \quad (10)$$

式中： $P_{i,\max}^G$ 、 $P_{i,\min}^G$  分别为发电机有功出力上下限值； $Q_{i,\max}^G$ 、 $Q_{i,\min}^G$  分别为发电机无功出力上下限值。

$$\begin{cases} P_{i,fst}^G = P_{i,bc}^G \\ \Delta P_{i,\min}^G \leq P_{i,fh}^G - P_{i,bc}^G \leq \Delta P_{i,\max}^G \end{cases} \quad (11)$$

式中， $\Delta P_{i,\max}^G$ 、 $\Delta P_{i,\min}^G$  分别为系统进入故障内长期运行状态下发电机可调节量的上下限值。

3) 联络通道功率传输约束

本文假设联络通道所连外部大电网皆有充足的可快速调节的有功备用，在故障后可以紧急调度，调度功率大小仅受联络通道容量约束。

$$\begin{cases} P_{i,\min}^T \leq P_{i,s}^T \leq P_{i,\max}^T \\ Q_{i,\min}^T \leq Q_{i,s}^T \leq Q_{i,\max}^T \end{cases} \quad (12)$$

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； $Q_{i,\max}^T$ 、 $Q_{i,\min}^T$  分别为联络通道无功传输上下限值。

4) 调相机无功出力约束

为解决传统特高压直流输电面临的无功储备减少、电压调节特性变差、受端站换相失败风险升高等问题，特高压直流接入点通常会部署新型大容量调相机<sup>[23]</sup>。其无功出力约束为

$$Q_{i,\min}^{SC} \leq Q_{i,s}^{SC} \leq Q_{i,\max}^{SC} \quad (13)$$

式中， $Q_{i,\max}^{SC}$ 、 $Q_{i,\min}^{SC}$  分别为调相机无功出力上下限值。

5) 紧急切负荷约束

当系统在故障发生后短期内，快速有功调节无法满足有功平衡约束及潮流约束时，需要进行紧急切负荷，约束如下：

$$P_{i,bc}^L - P_{i,f}^L \leq \Delta P_{i,\max}^L \quad (14)$$

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

1.5 规划模型求解方法

本文中数学模型通过专业软件 GAMS 中 cplex 求解器实现。在 cplex 求解器中采用障碍算法(内点法)进行求解。算法求解过程如下：

$$\min f(x) \text{ s.t. } g_i(x) \geq 0$$

a)  $r > 0, \varepsilon > 0$ ，障碍因子缩小系数  $d, 0 < d < 1$ ；

b) 定义障碍函数， $G(x, r) = f(x) + rB(x)$ ， $B(x)$  为连续函数，当  $x$  趋近可行域边界时， $B(x)$  趋近无穷大；

c) 求解无约束优化问题  $G(x, r)$ ，设其无约束极小点为  $X$ ；

d) 若  $0 < rB(x) < \varepsilon$ ，输出  $X$ ，否则， $r = dr$ ，返回步骤 b)。

算法流程图如图 2 所示。

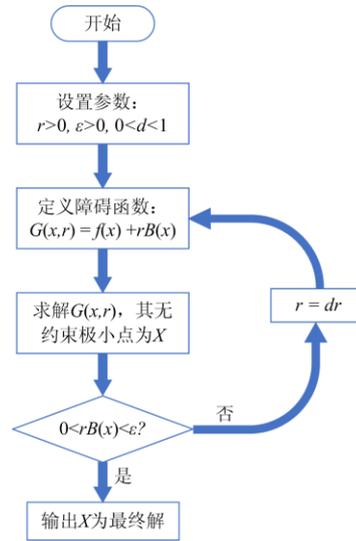


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart

2 算例分析

在修改后的 IEEE39 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 IEEE39 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，节点上调相机容量设置为 300 Mvar。故障分别设置为线路 4-14( $f_1$ )、线路 15-16( $f_2$ )、线路 21-22( $f_3$ )、线路 3-18( $f_4$ )断开及直流双极闭锁( $f_5$ )。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的 50%。故障后长期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 30%， $(\beta_{fst} \cdot S_{ij,\max} = 7.2)$  设置为 1.2， $p_f$  均设置为 0.05。线路潮流约束设置为 600 MVA，系统基准容量设置为 100 MVA，系统中各成本参数如表 1 所示。其中，发电成本系数参考文献[25]，切负荷成本系数基于文献[18]进行设置。本文所提出的规划优化模型在 GAMS 中采用 cplex 求解器进行求解。

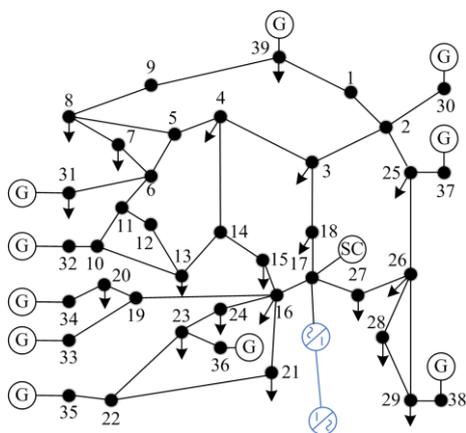


图3 算例拓扑

Fig. 3 Topology of test system

表1 系统成本系数

Table 1 System cost coefficient

	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$	$e_i$
各发电机发电成本	0.01	0.3	0.2	—	—
联络通道输电成本	—	—	—	8	—
切负荷补偿成本	—	—	—	—	100

### 3 仿真结果分析

本文提出模型在不同状态下各决策变量情况如表2所示, 在故障发生后短期内, 发电机有功出力无法进行快速调节, 仅可以通过紧急调度联络通道有功传输功率和紧急切负荷来达到系统有功平衡, 其中, 当系统发生普通  $N-1$  故障即线路断开故障( $f_1-f_4$ )时, 仅需要调节联络通道功率传输, 调节

系统内部网络潮流分布, 就可以系统满足故障后短期内安全运行约束, 而当系统发生直流闭锁故障( $f_5$ )后, 除通过联络通道从外部大电网紧急调度增加有功输入 7.779 p.u.外, 节点3和节点7还分别需紧急切除负荷 1.342 p.u和 0.799 p.u., 才可以使系统恢复有功平衡, 使潮流分布满足各支路的热稳定极限。一段时间后, 系统进入故障内长期运行状态, 各发电机均可以调节有功出力, 通过调节各发电机及联络通道有功出力来满足故障内长期运行支路潮流约束。

在表3中, 将本文提出规划模型与传统  $N-1$  安全约束下规划模型的优化结果进行了对比。对比结果求解过程如图4所示, 在不考虑短期运行安全约束下, 求得系统正常运行状态下各发电机及联络通道有功出力最优解, 并将所求解中所有决策变量作为约束条件代入提出规划模型中进行优化求解, 目标函数为故障后切负荷成本最小, 若无解, 则适当放松支路潮流约束, 若存在最优解, 得到对比结果。通过对比分析, 在不考虑短期运行安全约束下, 调度方案中不需要为故障后短期运行保留充分可快速调度有功备用, 各发电机及联络通道可取到更优解, 系统发电成本降低了 1 534.081 \$/h, 然而在实际运行中故障发生后短期运行状态下, 由于没有为系统紧急调度保留充分有功备用, 只能通过大规模紧急切负荷维持系统有功平衡, 频率稳定, 导致切负荷补偿成本增加了 3 229.045 \$/h, 从而使系统总成本增加, 给系统经济性造成严重损失。

表2 提出优化模型下系统控制方案

Table 2 System control scheme of the planning model proposed in this paper

节点号	控制变量/p.u.	$bc$	$f_{1st}$	$f_{1ht}$	$f_{2st}$	$f_{2ht}$	$f_{3st}$	$f_{3ht}$	$f_{4st}$	$f_{4ht}$	$f_{5st}$	$f_{5ht}$
3		—	0		0		0		0		0.502	
4		—	0		0		0		0		0.553	
7	切负荷	—	0		0		0		0		0.320	
8		—	0		0		0		0		0.496	
18		—	0		0		0		0		0.350	
31	联络通道	0	2.330	5.078	7.281	5.462	2.064	5.250	2.266	5.167	7.292	5.778
39	有功输入	10.513	8.183	10.754	3.232	10.784	8.449	10.759	8.247	10.741	11.000	10.926
30		6.000	6.000	5.135	6.000	5.206	6.000	5.136	6.000	4.983	6.000	5.779
32		5.995	5.995	4.597	5.995	5.299	5.995	5.050	5.995	4.954	5.995	5.654
33		4.752	4.752	4.124	4.752	3.797	4.752	4.511	4.752	4.198	4.752	5.229
34	发电机	4.752	4.752	4.596	4.752	4.478	4.752	4.752	4.752	4.600	4.752	5.002
35	有功出力	4.752	4.752	4.356	4.752	3.989	4.752	3.493	4.752	4.409	4.752	5.521
36		4.752	4.752	4.479	4.752	4.190	4.752	4.075	4.752	4.500	4.752	5.591
37		5.640	5.640	4.822	5.640	4.833	5.640	4.842	5.640	4.680	5.640	5.503
38		5.386	5.386	4.600	5.386	4.505	5.386	4.673	5.386	4.311	5.386	5.339

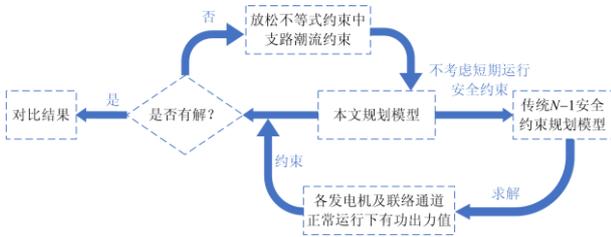


图4 对比结果求解过程

Fig. 4 Comparison planning model generation process

表3 目标函数值仿真结果对比

Table 3 Comparison of simulation results of

objective function value

	本文规划模型 仿真结果	传统规划模型 仿真结果
系统发电成本/(\$/h)	31 981.570	30 447.489
切负荷补偿成本/(\$/h)	1 110.304	4 329.150
总成本/(\$/h)	33 091.874	34 776.639

在图5和图6中分别展示了本文规划模型与传统规划模型中各故障内短期运行的潮流分布,如图5所示,本文提出规划模型在不同故障后短期运行状态下各支路潮流均满足约束值( $\beta_{f_{sa}} \cdot S_{ij,max} = 7.2$ ),在传统规划模型中,在直流闭锁故障( $f_5$ )发生后短

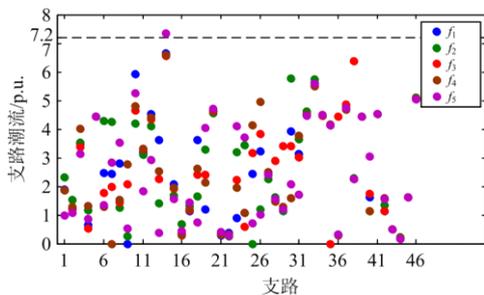


图5 提出优化模型故障后短期运行潮流

Fig. 5 Short-term operation power flow distribution after the failure of the planning model proposed in this paper

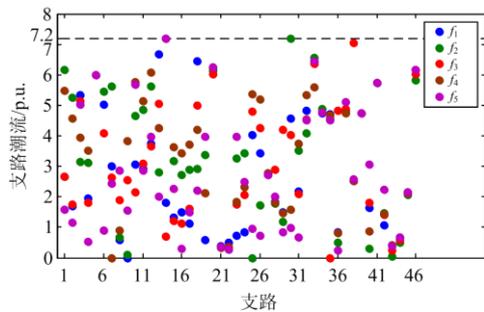


图6 对比结果故障后短期运行潮流

Fig. 6 Comparison result of short-term operation power flow distribution after the failure

期内,由于没有为系统保留充分可快速调度有功备用,为满足系统有功平衡,只能通过节点31上联络通道增加有功输入,造成线路14(节点6—节点31)潮流超出过载极限,达到7.3236 p.u.,给系统稳定性带来了不利影响。

#### 4 结语

本文针对含特高压直流接入的受端系统提出了发输电优化模型。在模型中,考虑了包含直流双极闭锁故障在内的多个N-1故障安全约束,并在传统N-1安全约束最优潮流问题中加入了故障内短期运行安全约束。此外,为保证规划模型所求解为全局最优解,本文提出规划模型为凸优化模型。

本文将提出规划模型与传统规划模型运行结果进行比较,结果表明,本文提出规划模型将针对故障内短期运行约束保留一定可快速调度的有功备用,虽然发电成本有所增加,但可以大幅降低切负荷补偿成本,使系统总成本有所降低。另一方面,传统规划模型在故障后短期运行状态下,部分线路会出现过载情况,给系统稳定性造成不利影响。综上,本文所提出考虑故障短期安全约束的电网运行成本优化,可同时提高含特高压接入的受端系统的经济性与稳定性。

#### 参考文献

- [1] 戴志辉,张程,刘宁宁,等.特高压直流线路保护原理及动作策略分析[J].电力系统自动化,2019,43(21):1-11.  
DAI Zhihui, ZHANG Cheng, LIU Ningning, et al. Analysis of UHVDC line protection principle and operation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 1-11.
- [2] 王钢,罗健斌,李海锋,等.特高压直流输电线路暂态能量保护[J].电力系统自动化,2010,34(1):28-31.  
WANG Gang, LUO Jianbin, LI Haifeng, et al. Transient energy protection for  $\pm 800$  kV UHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 28-31.
- [3] 郭宏光,吴彦维,陈大鹏,等.分层接入方式下锡泰特高压直流输电系统阀组电压平衡控制[J].电力系统自动化,2019,43(2):176-183.  
GUO Hongguang, WU Yanwei, CHEN Dapeng, et al. Voltage balance control of values in hierarchical connection mode for Ximeng-Taizhou UHVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 176-183.
- [4] 严胜,罗湘,贺之渊.直流电网核心装备及关键技术展望[J].电力系统自动化,2019,43(3):205-216.

- YAN Sheng, LUO Xiang, HE Zhiyuan. Prospect of core equipment and key technology for DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 205-216.
- [5] 李钊. 基于 S 变换的特高压直流输电线路快速保护研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- LI Zhao. S-transform based fast protection research for UHVDC transmission lines[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [6] 孙巍峰, 崔晨, 周晓风, 等. 调相机与特高压直流换流站交流滤波器的协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(7): 182-187.
- SUN Weifeng, CUI Chen, ZHOU Xiaofeng, et al. Coordinated control strategy for synchronous condenser and AC filter in UHVDC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 182-187.
- [7] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
- ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [8] 蒋智宇. 一起换相失败导致直流闭锁故障分析及其阀控策略优化研究[J]. 电气技术, 2016(7): 96-100.
- JIANG Zhiyu. The HVDC faults caused by end of current failure analysis and its valve control strategy optimization research[J]. Electrical Engineering, 2016(7): 96-100.
- [9] 舒展, 张伟晨, 王光, 等. 特高压直流接入江西电网后的故障影响分析及其应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 163-170.
- SHU Zhan, ZHANG Weichen, WANG Guang, et al. Fault analysis and its countermeasures of Jiangxi Provincial Grid after UHVDC line connection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 163-170.
- [10] LI Guodong, LI Gengyin, ZHOU Ming. Model and application of renewable energy accommodation capacity calculation considering utilization level of inter provincial tie-line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-12. DOI: 10.1186/s41601-019-0115-7.
- [11] 张翔宇, 李丹, 张予燮, 等. 考虑  $N-1$  安全约束的风—火—蓄联合优化调度模型及仿真[J]. 水电能源科学, 2019, 37(8): 202-206.
- ZHANG Xiangyu, LI Dan, ZHANG Yuxie, et al. Wind-thermal-storage joint optimization scheduling model considering  $N-1$  safety constraints[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2019, 37(8): 202-206.
- [12] 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.
- [13] 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 Energetica Solaris Sinica, 2014, 35(1): 64-73.
- [14] 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.
- [15] 王延纬, 刘凡, 丁涛, 等. 含多分区电力系统能量备用实时优化调度的动态积极集求解算法[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(4): 45-52.
- WANG Yanwei, LIU Fan, DING Tao, et al. Dynamic active set algorithm for real-time energy-reserve optimal dispatch in multi-zonal power system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(4): 45-52.
- [16] 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结构鲁棒优化[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.
- [17] CAPITANESCU F, WEHENKEL L. Improving the statement of the corrective security-constrained optimal power-flow problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 887-889.
- [18] 毛思杰, 贾燕冰, 张琪. 计及过载线路发热严重程度的紧急控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 34-42.
- MAO Sijie, JIA Yanbing, ZHANG Qi. Research on emergency control method considering severity of

- overheating of overload line[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 34-42.
- [19] 楼贤嗣, 王槽裕, 郭创新, 等. 考虑输电线路动态增容的增强型安全约束最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 26-36.  
LOU Xiansi, WANG Luyu, GUO Chuangxin, et al. Enhanced security-constrained optimal power flow considering dynamic thermal rating of transmission lines[J]. Automation of Electric power systems, 2019, 43(18): 26-36.
- [20] 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.
- [21] 殷威扬, 杨志栋. 特高压直流工程无功平衡和补偿策略[J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 50-54.  
YIN Weiyang, YANG Zhidong. Study on reactive power balance and compensation strategy for UHVDC project[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(9): 50-54.
- [22] 刘旭斐, 吴琛, 黄伟.  $\pm 800$  kV 直流双极闭锁分析[J]. 云南电力技术, 2016, 44(2): 84-86.  
LIU Xufei, WU Chen, HUANG Wei.  $\pm 800$  kV Analysis and countermeasures of the double pole DC blocking[J]. Yunnan Electric Power, 2016, 44(2): 84-86.
- [23] 张志猛, 贾伯岩, 张建忠, 等. 新型大容量调相机在特高压直流输电中的应用研究[J]. 河北电力技术, 2019, 38(4): 1-4, 19.  
ZHANG Zhimeng, JIA Boyan, ZHANG Jianzhong, et al. Research of new large-capacity synchronous condenser in UHVDC transmission application[J]. Hebei Electric Power, 2019, 38(4): 1-4, 19.
- [24] YANG J, ZHANG N, KANG C, et al. A state-independent linear power flow model with accurate estimation of voltage magnitude[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3607-3617.
- [25] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J, et al. MATPOWER: steady-state operations, planning and analysis tools for power systems research and education[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 12-19.

收稿日期: 2020-09-05; 修回日期: 2020-12-24

作者简介:

廖长风(1994—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统规划; E-mail: 1182288292@qq.com

李勇(1982—), 男, 通信作者, 教授, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制、电能质量分析与控制; E-mail: liyong1881@163.com

马俊杰(1989—), 男, 博士后/助理研究员, 主要研究方向为新能源发电, 电力系统稳定性分析与控制, 电力系统规划。E-mail: majunjie1989@hnu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)