

文章编号:1006-2467(2021)12-1619-12

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.279

# 考虑韧性提升的交直流配电网线路 加固和储能配置策略

周士超<sup>1</sup>, 刘晓林<sup>2</sup>, 熊展<sup>1</sup>, 王旭<sup>1</sup>, 蒋传文<sup>1</sup>, 张沈习<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;

2. 国网江苏省电力有限公司苏州供电公司, 江苏 苏州 215004)

**摘要:** 线路加固和储能配置是灾前规划性防御策略的重要组成部分, 可以有效提升交直流混合配电网防灾应急能力. 在极端事件频发的背景下提出了考虑线路加固和储能资源配置的交直流混合配电网韧性提升方法, 构建两阶段鲁棒优化模型. 模型本质上为 3 层混合整数非线性规划问题, 最外层为配电网主动行为, 确定线路加固和储能配置策略; 中间层为被动行为, 确定极端事件发生后的最严重故障集; 内层为配电网主动行为, 确定灾中配电网故障应对和调度运行策略. 基于嵌套列和约束生成算法(Nested Column and Constraint Generation, NC&CG)对 3 层混合整数线性规划模型进行求解. 最后, 以 9 节点直流配网和改进的 IEEE-33 节点含环交流配网耦合的交直流混合配电网为例进行仿真分析, 结果表明所提方法可以有效提升配电网韧性, 保障其在极端事件下安全可靠运行.

**关键词:** 韧性配电网; 交直流混合配电网; 两阶段鲁棒优化; 嵌套的列与约束生成法

中图分类号: TM 732

文献标志码: A

## Line Hardening and Energy Storage System Configuration Strategies for Resilience Enhancement of a Hybrid AC-DC Distribution System

ZHOU Shichao<sup>1</sup>, LIU Xiaolin<sup>2</sup>, XIONG Zhan<sup>1</sup>, WANG Xu<sup>1</sup>  
JIANG Chuanwen<sup>1</sup>, ZHANG Shenxi<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. State Grid Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, Jiangsu, China)

**Abstract:** Line hardening and energy storage configuration are important parts of the pre-disaster planning defense strategy, which can effectively improve the disaster prevention and emergency response capabilities of the hybrid AC-DC distribution system (HDS). Under the background of frequent extreme events, a method to improve the resilience of hybrid AC-DC distribution system considering line hardening and energy storage resource allocation is proposed, and a two-stage robust optimization model is constructed. Essentially, the model is a tri-level mixed integer nonlinear programming problem. The outer level evaluates the active behavior of HDS to determine the line hardening and energy storage system configuration strategies, the middle level determines the worst line failure set after the extreme event

收稿日期: 2021-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(51907120), 上海市青年科技英才扬帆计划(19YF1423600)

作者简介: 周士超(1992-), 男, 浙江省温州市人, 博士生, 从事韧性配电网及电力系统优化运行研究.

通信作者: 王旭, 男, 副教授, 电话(Tel.): 18801903426; E-mail: wangxu1989@sjtu.edu.cn.

occurs, which is the passive behavior of HDS, and the inner level evaluates the active behavior of HDS to determine the emergency response and the operation strategies. Based on the nested column and constraint generation algorithm (nested column and constraint generation, NC&CG), the 3-level mixed integer linear programming model is solved. Finally, a simulation analysis is conducted with a 9-node DC distribution network and an improved IEEE-33 node hybrid AC-DC distribution system coupled with a ring AC distribution network as an example. The results show that the proposed method can effectively improve the resilience of the distribution network and ensure its safe and reliable operation in extreme events.

**Key words:** resilient distribution system; hybrid AC-DC distribution system; two-stage robust optimization; nested column-and-constraint method

交直流混合配电网可提升对异构分布式电源、多元负荷以及储能设备的接纳能力<sup>[1]</sup>,降低因大量交直流变换造成的功率损耗。在广域潮流调度、功率灵活控制及高可靠性供电等方面相较于传统主动配电网也具有突出优势,将成为未来智能配电网的主要发展形态之一<sup>[2]</sup>。交直流混合配电网的落地工程建设也在逐步展开<sup>[3]</sup>。

然而,交直流混合配电网面临的内外部威胁更为复杂而严重<sup>[4]</sup>。外部威胁一方面体现在气候不稳定造成雷击、暴雨、台风等极端自然灾害频发<sup>[5]</sup>,另一方面体现在不法分子针对配电网信息物理耦合系统的漏洞进行的网络攻击<sup>[6]</sup>。而交直流混合配电网异构多源特性和较低的自动化水平导致其故障演化复杂、故障类型多样、故障恢复更加困难<sup>[7]</sup>,这也成为内部威胁的主要来源。面对极端事件日益严峻的考验和挑战,我国已将韧性概念全面纳入配电网研究领域,在韧性核心特征防御力、应变力、恢复力基础上,增加了感知力、协同力和学习力,使得其外延更加丰富<sup>[4]</sup>。部分地区更是提出建设韧性城市的目标<sup>[8]</sup>。

近年来,学界围绕韧性核心特征和韧性提升策略展开了大量研究。我国尚处交直流混合配电网建设初期,对规划阶段灾前防御策略的研究显得尤为重要。灾前防御策略主要包括线路加固<sup>[9-10]</sup>、植被管理<sup>[11]</sup>、杆塔升级<sup>[12]</sup>、分布式电源与储能资源规划配置<sup>[13-15]</sup>等。在决策主动防御行为时往往会兼顾灾后运行情况,这就必然会涉及到对灾难及其引发故障的建模。随机优化和鲁棒优化是两种应用最为广泛的故障不确定性处理方法。文献<sup>[16]</sup>综合了线路加固和分布式电源配置两种灾前防御策略,构建了 3 层鲁棒优化模型,并提出了飓风时空特性建模方法以及不确定性故障集合分区分阶段鲁棒处理方法。文献<sup>[17]</sup>在规划阶段统一决策线路加固、分布式电源配置、馈线开关配置策略,对飓风时空演变特性、

线路故障情况、线路修复时间等不确定因素进行抽样,构建了双层混合整数随机优化模型,并基于多阶段随机规划算法对模型进行求解。文献<sup>[18]</sup>将信息间隙决策理论(IGDT)引入面向韧性的配电网规划中,以解决鲁棒区间或不确定因素概率分布函数不易获取的问题,并创新性地提出了 IGDT 保守度确定方法。文献<sup>[19]</sup>利用了可移动储能设备(MES)的特点和优势,在规划阶段同时考虑 MES 正常运行状态和灾后运行状态,使得配置决策更加全面。但目前学界缺少对交直流混合配电网韧性提升策略的研究,部分原因在于交直流混合配电网运行特性方程高度非凸非线性,导致模型难以求解。学界往往认为配电网结构呈辐射状,潮流可以转化为 Distflow 的形式。但我国当前配电网环网率已达到 65%,城市环网率已超过 86%<sup>[7]</sup>,现有模型及求解算法无法适应配电网的长足发展。并且,已有研究在构建多层模型时,往往忽视了外层线路加固策略对中间层线路故障率的影响,对阶段之间关联约束建模不够具体。

针对已有研究的不足,本文侧重防御力,提出了交直流混合配电网韧性提升方法。考虑到规划建设应能保证配电网在最严重故障情况下不出现重要负荷减载,构建了两阶段鲁棒优化模型。其中第一阶段为灾前防御阶段,第二阶段为灾中应对阶段。模型本质上可以转化为主动-被动-主动 3 层混合整数非线性优化问题。最外层确定配电网线路加固和储能资源选址定容策略,中间层确定灾难发生后的最严重故障情况,内层反映灾中配电网基于应急资源的调度策略。构建关联性约束,分析最外层加固策略对线路故障率的影响。基于配网潮流线性化方法和电压源型换流站运行特性方程线性化方法将模型转化为 3 层混合整数线性规划问题,进而通过嵌套的列与约束生成法(Nested Column-and-Constraint Generation Algorithm, NC&CG)对模型进行求解。最后,本文构建了含 9 节点直流配网、改进 IEEE-33 节点

含环交流配网以及电压源型换流站(VSC)的交直流混合配电网算例系统,对本文提出的韧性提升方法进行了验证。

本文的创新性工作如下:

(1) 面向交直流混合配电网韧性提升,在规划期考虑最严重故障情况,提出了两阶段鲁棒优化模型,对线路加固和储能配置的最优投资策略进行决策分析。

(2) 引入配网潮流线性化方法和 VSC 运行特性方程线性化方法,消除模型中的非线性项,使得两阶段鲁棒优化模型最终转化为可解的 3 层混合整数线性规划模型。同时线性化方法引入了较少的二进制变量,降低了 3 层模型算法求解压力。

(3) 本文构建的面向韧性提升的交直流混合配电网线路加固和储能配置模型本质上是 3 层混合整数线性规划模型,通过 NC&CG 算法对模型进行求解,实现内外层 C&CG 算法收敛。

## 1 面向韧性提升的两阶段鲁棒优化模型

面向韧性提升提出两阶段鲁棒优化模型,以确定交直流混合配电网规划阶段灾前防御策略,同时兼顾灾中应对阶段的运行状态。

两阶段模型示意图如图 1 所示。

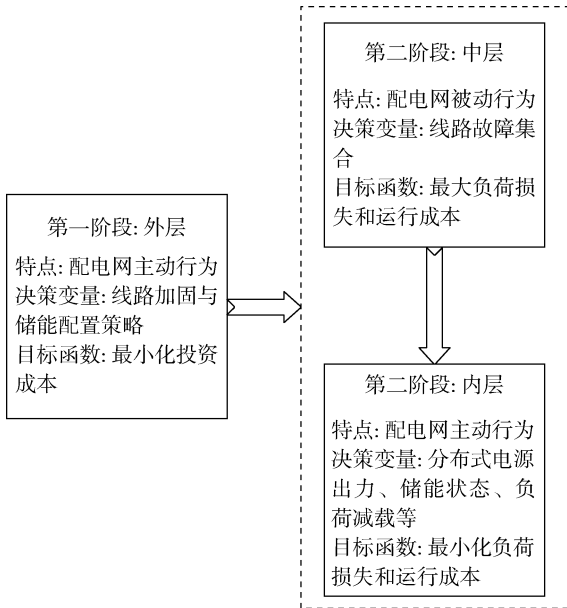


图 1 两阶段优化模型示意图

Fig. 1 Illustration of two-stage optimization model

### 1.1 目标函数

两阶段鲁棒优化模型目标函数可以表示为

$$\min_{y \in Y} C^{\text{INV}} + \rho_{\text{pre}} \tau \max_{u \in U} \min_{x \in F(y, u)} (C^{\text{OPE}} + C^{\text{LS}}) \quad (1)$$

式中:  $x, y, u$  分别表示内层、外层、中层决策变量;  $C^{\text{INV}}$  表示投资成本;  $C^{\text{OPE}}$  和  $C^{\text{LS}}$  分别表示灾后运行成本和负荷减载(Load Shedding, LS)损失; 考虑到投资并非仅仅用于提升韧性, 引入韧性偏好系数  $\rho_{\text{pre}}$  反映规划期的韧性倾向;  $\tau$  表示规划期内极端事件发生的次数。

投资成本包括线路加固成本和储能配置成本两部分, 由于线路和储能系统的规划年限不同, 投资成本均转化为一年期成本。

$$C^{\text{INV}} = C_{\text{L}}^{\text{INV}} + C_{\text{ES}}^{\text{INV}} \quad (2)$$

$$C_{\text{L}}^{\text{INV}} = \beta_{\text{L}} \sum_{(i, j) \in \Omega_{\text{L}}} c_{ij}^{\text{L}} s_{ij} y_{ij} \quad (3)$$

式中:  $C_{\text{L}}^{\text{INV}}$  表示线路加固投资成本;  $C_{\text{ES}}^{\text{INV}}$  表示储能资源配置投资成本;  $\beta_{\text{L}}$  为按规划年限将线路投资总成本折算至一年期的系数;  $i, j$  表示节点;  $\Omega_{\text{L}}$  表示交直流配电网线路集;  $c_{ij}^{\text{L}}$  表示该线路单位加固投资成本;  $s_{ij}$  表示线路长度;  $y_{ij}$  为线路加固的二进制决策变量, 值为 1 时表示线路加固, 为 0 时表示未加固。需要特别指出的是, VSC 联络线不作为线路加固考虑的因素。储能配置成本与储能系统总容量及额定功率呈线性关系:

$$C_{\text{ES}}^{\text{INV}} = \beta_{\text{ES}} \left( \sum_{i \in \Omega_{\text{B}}} c^{\text{E}} E_i^{\text{R}} + c^{\text{P}} P_i^{\text{R}} \right) \quad (4)$$

式中:  $\beta_{\text{ES}}$  表示按规划年限将储能系统投资总成本折算至一年期的系数;  $\Omega_{\text{B}}$  表示交直流配网节点集合;  $c^{\text{E}}, c^{\text{P}}$  分别表示储能系统容量成本系数、储能系统功率成本系数;  $E_i^{\text{R}}$  和  $P_i^{\text{R}}$  分别表示配置在节点  $i$  的储能系统容量和额定功率。

灾后运行成本  $C^{\text{OPE}}$  包括分布式电源出力成本和储能充放电成本, 可表示为

$$C^{\text{OPE}} = \sum_{t \in T} \left[ \sum_{g \in \Omega_{\text{G}}} c_g^{\text{G}} p_{g,t}^{\text{G}} + \sum_{i \in \Omega_{\text{B}}} (c_i^{\text{dis}} p_{i,t}^{\text{dis}} + c_i^{\text{ch}} p_{i,t}^{\text{ch}}) \right] \quad (5)$$

式中:  $T$  表示极端事件持续影响时间;  $\Omega_{\text{G}}$  表示分布式电源集合;  $c_g^{\text{G}}, c_i^{\text{ch}}$  和  $c_i^{\text{dis}}$  分别表示分布式电源出力、储能系统充放电单位成本系数;  $p_{g,t}^{\text{G}}$  表示  $t$  时刻分布式电源  $g$  的出力;  $p_{i,t}^{\text{dis}}$  和  $p_{i,t}^{\text{ch}}$  分别表示  $t$  时刻储能系统  $i$  的放电功率、充电功率。

$$C^{\text{LS}} = \sum_{i \in \Omega_{\text{B}}, t \in T} c_i^{\text{LS}} \rho_{i,t} p_{i,t}^{\text{D}} \quad (6)$$

式中:  $c_i^{\text{LS}}$  表示考虑负荷权重后的单位切负荷成本;  $\rho_{i,t}$  表示  $t$  时刻节点  $i$  切负荷比率;  $p_{i,t}^{\text{D}}$  为对应时刻和节点的负荷。

### 1.2 约束条件

1.2.1 外层约束  $\mathbf{Y} = [y_{ij} \ \sigma_i \ E_i^{\text{R}} \ P_i^{\text{R}}]$  为外层决

策变量 ( $y_{ij}$  表示线路  $ij$  的加固情况,  $\sigma_i$  表示储能配置的二进制决策变量). 考虑到投资成本是优化目标函数项, 因此在约束中不直接限制投资成本, 而对线路加固和储能配置数量进行限制, 增强投资可行性.

(1) 储能系统配置数量约束.

$$\sum_{i \in \Omega_B} \sigma_i \leq N_{ES}^{INV} \quad (7)$$

式中:  $\sigma_i$  为 1 时表示节点  $i$  配置储能系统, 反之则未配置;  $N_{ES}^{INV}$  表示储能系统最大允许配置数量.

(2) 线路加固数量约束.

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_L} y_{ij} \leq N_L^{INV} \quad (8)$$

式中:  $N_L^{INV}$  表示线路最大加固数量.

(3) 储能额定功率和容量配置约束.

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq P_i^R &\leq \sigma_i P_i^{R, \max}, \quad \forall i \in \Omega_B \\ 0 \leq E_i^R &\leq \sigma_i E_i^{R, \max}, \quad \forall i \in \Omega_B \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:  $P_i^{R, \max}$  和  $E_i^{R, \max}$  分别表示储能系统可配置的额定功率和容量上限.

**1.2.2 中层约束** 中层确定最严重的故障集合, 但由于交直流混合配电网设备众多, 需要对故障线路数量进行限制. 借鉴香农信息理论<sup>[9, 17]</sup>, 对配网故障不确定熵值进行限制.

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_L} (-\log p_{ij}^{\text{dam}}) z_{ij,0} \leq W_{\max} \quad (10)$$

式中:  $p_{ij}^{\text{dam}}$  表示线路故障率;  $z_{ij,0}$  为二进制变量, 表征线路是否发生故障, 发生故障时值为 1, 反之为 0;  $W_{\max}$  表示配网线路故障不确定熵值上限.

需要说明的是, 极端事件及故障集的时空演变过程是一项庞大的课题, 已有研究大多针对某一类型极端事件(如飓风), 将配电网划分成若干子区域, 进而将极端事件演变阶段与子区域对应. 相较于单一故障阶段单区域模型, 复杂性和仿真程度均有所提升, 但本质方法并无明显区别<sup>[16, 20]</sup>. 且本文研究规划策略, 在规划期便对极端事件类型和演变进行预测难以实现, 因此本文不考虑极端事件时空演变特性.  $t_0$  时刻故障发生,  $t_0 + T$  时刻故障线路修复, 上级电源恢复供电. 故障持续时间内线路状态不变, 即有

$$u_{ij,t} = z_{ij,0}, \quad \forall (i,j) \in \Omega_L, \quad \forall t \in T \quad (11)$$

式中:  $u_{ij,t}$  表示  $t$  时刻线路故障状态, 值为 1 表示线路处于故障状态, 反之则无故障. 同样地, 灾后恢复策略也不在本文研究范围之内. 中层决策变量  $\mathbf{u} = [z_{ij,0} \ u_{ij,t}]$ .

线路故障率与第一阶段的加固策略相关联, 导致两阶段决策变量相互制约, 因此需要补充阶段关联约束.

线路加固会显著降低故障率, 但通常并不会降低到 0. 假定线路加固前故障率为  $p_{ij}^0$ , 加固后故障率为  $p_{ij}^1$ , 那么有

$$\log p_{ij}^{\text{dam}} = \left( \log \frac{p_{ij}^1}{p_{ij}^0} \right) y_{ij} + \log p_{ij}^0 \quad (12)$$

**1.2.3 内层约束** 内层确定故障持续时间内, 交直流配电网脱离主网的调度运行和灾中应对策略, 其决策变量  $\mathbf{x} = [p_{i,t}^G \ q_{i,t}^G \ p_{i,t}^{\text{dis}} \ p_{i,t}^{\text{ch}} \ v_{i,t} \ p_{s,t} \ p_{d,t} \ q_{s,t} \ M_t \ \delta_t \ \rho_{i,t}]$  ( $p_{i,t}^G, q_{i,t}^G$  分别表示机组  $i$  在  $t$  时刻的有功和无功功率出力;  $v_{i,t}$  表示  $t$  时刻节点  $i$  的电压幅值;  $p_{s,t}, q_{s,t}$  分别表示 VSC 交流侧传输的有功功率、无功功率;  $p_{d,t}$  表示 VSC 直流侧传输的有功功率;  $M_t$  为脉冲宽度调制 (PWM) 信号的调制比;  $\delta_t$  表示 VSC 换流桥输出相位;  $\rho_{i,t}$  为  $t$  时刻节点  $i$  的负荷减载比例), 约束包括:

(1) 配网节点功率平衡约束.

$$p_{i,t}^G + p_{i,t}^{\text{dis}} - p_{i,t}^{\text{ch}} = \sum_{(i,j) \in \Omega_L^{\text{AC}}} p_{ij,t} + (1 - \rho_{i,t}) p_{i,t}^{\text{D}} + \left( \sum_{(i,j) \in \Omega_L^{\text{AC}}} G_{ij} \right) v_{i,t}^2 \quad (13)$$

$$\forall i \in \Omega_B^{\text{AC}}, \quad \forall t \in T$$

$$q_{i,t}^G = \sum_{(i,j) \in \Omega_L^{\text{AC}}} q_{ij,t} + (1 - \rho_{i,t}) q_{i,t}^{\text{D}} - \left( \sum_{(i,j) \in \Omega_L^{\text{AC}}} B_{ij} \right) v_{i,t}^2 \quad (14)$$

$$\forall i \in \Omega_B^{\text{AC}}, \quad \forall t \in T$$

$$p_{i,t}^G + p_{i,t}^{\text{dis}} - p_{i,t}^{\text{ch}} = \sum_{(i,j) \in \Omega_L^{\text{DC}}} p_{ij,t} + (1 - \rho_{i,t}) p_{i,t}^{\text{D}} \quad (15)$$

$$\forall i \in \Omega_B^{\text{DC}}, \quad \forall t \in T$$

式中:  $p_{ij,t}, q_{ij,t}$  分别表示  $t$  时刻线路  $ij$  传输的有功功率、无功功率;  $\Omega_L^{\text{AC}}, \Omega_L^{\text{DC}}$  分别表示交流配网线、直流配网线路集合;  $p_{i,t}^{\text{D}}, q_{i,t}^{\text{D}}$  分别表示  $t$  时刻接入节点  $i$  的有功负荷、无功负荷;  $G_{ij}, B_{ij}$  表示交流配网节点导纳;  $\Omega_B^{\text{AC}}$  和  $\Omega_B^{\text{DC}}$  分别表示交流配网线路集合和直流配网线路集合.

(2) 线路载荷约束.

$$p_{ij,t}^2 + q_{ij,t}^2 \leq (1 - u_{ij,t}) (S_{ij}^{\max})^2 \quad (16)$$

$$\forall (i,j) \in \Omega_L, \quad \forall t \in T$$

式中:  $S_{ij}^{\max}$  为线路传输视在功率上限.

(3) 线路潮流等式约束.

$$-M_1 u_{ij,t} \leq p_{ij,t} + G_{ij} V_{i,t}^2 - V_{i,t} V_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \leq M_1 u_{ij,t} \quad (17)$$

$$\forall (i,j) \in \Omega_L^{\text{AC}}, \quad \forall t \in T$$

$$-M_2 u_{ij,t} \leq q_{ij,t} - B_{ij} V_{i,t}^2 - V_{i,t} V_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) \leq M_2 u_{ij,t} \quad (18)$$

$$\forall (i,j) \in \Omega_L^{\text{AC}}, \quad \forall t \in T$$

$$-M_3 u_{ij,t} \leq p_{ij,t} - \frac{1}{r_{ij}} (V_{i,t}^2 -$$

$$V_{i,t} V_{j,t} \leq M_3 u_{ij,t} \quad (19)$$

$$\forall (i, j) \in \Omega_{\text{L}}^{\text{DC}}, \quad \forall t \in T$$

式中:  $\theta_{ij,t}$  表示  $t$  时刻节点  $i$  和节点  $j$  的电压相角差;  $v$  和  $\theta$  分别表示节点电压幅值和相角;  $r_{ij}$  表示直流配电网线路电阻值;  $M_1, M_2, M_3$  为足够大的正值常数, 其取值只需比对应潮流项绝对值上界稍大即可。

(4) 机组出力约束。

$$P_g^{\text{G}, \min} \leq p_{g,t}^{\text{G}} \leq P_g^{\text{G}, \max} \quad (20)$$

$$\forall g \in \Omega_G, \quad \forall t \in T$$

$$Q_g^{\text{G}, \min} \leq q_{g,t}^{\text{G}} \leq Q_g^{\text{G}, \max} \quad (21)$$

$$\forall g \in \Omega_G^{\text{AC}}, \quad \forall t \in T$$

式中:  $P_g^{\text{G}, \max}, P_g^{\text{G}, \min}$  分别表示机组有功功率出力上下限;  $p_{g,t}^{\text{G}}$  表示  $t$  时刻机组有功功率出力;  $P_g^{\text{G}, \max}, P_g^{\text{G}, \min}$  分别表示机组有功功率出力的上限、下限;  $\Omega_G$  表示所有机组集合;  $\Omega_G^{\text{AC}}$  表示交流配网中的机组集合。

(5) 节点电压约束。

$$V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq V_i^{\max}, \quad \forall i \in \Omega_B, \quad \forall t \in T \quad (22)$$

式中:  $V_i^{\max}, V_i^{\min}$  分别表示节点电压幅值上下限。

(6) VSC 运行特性约束。

VSC 由换流桥、交流滤波器和换流电抗器等组成, 其等效单相稳态运行模型如图 2 所示。在图 2 中, VSC 连接交流配网与直流配网, 交流侧传递有功和无功功率为  $p_s$  和  $q_s$ ; 直流侧传递有功功率为  $p_d$ ;  $V_s, V_d$  分别表示 VSC 交流侧和直流侧节点电压, 为交直流配网运行决策变量;  $V_c$  表示换流桥虚拟节点线电压;  $x_{c, \text{VSC}}$  表示交流滤波器对地阻抗;  $r_{\text{VSC}}, x_{\text{L}, \text{VSC}}$  分别表示 VSC 联络线等效电阻和电抗;  $\delta_c$  表示换流桥虚拟节点相位。满足以下等式约束,

$$p_{s,t} = \frac{\mu M_t}{\sqrt{2}} V_{s,t} V_{d,t} Y \sin(\delta_t - \alpha) + V_{s,t}^2 Y \sin \alpha \quad (23)$$

$$\forall t \in T$$

$$q_{s,t} = -\frac{\mu M_t}{\sqrt{2}} V_{s,t} V_{d,t} Y \cos(\delta_t - \alpha) +$$

$$V_{s,t}^2 Y \cos \alpha + \frac{V_{s,t}^2}{x_{c, \text{VSC}}}, \quad \forall t \in T \quad (24)$$

$$p_{s,t} = \frac{\mu M_t}{\sqrt{2}} V_{s,t} V_{d,t} Y \sin(\delta_t + \alpha) - \frac{\mu^2 M_t^2}{2} V_{d,t}^2 Y \sin \alpha \quad (25)$$

$$V_{c,t} = \frac{\mu}{\sqrt{2}} M_t V_{d,t}, \quad \forall t \in T \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} Y &= \frac{1}{\sqrt{r_{\text{VSC}}^2 + x_{\text{L}, \text{VSC}}^2}} \\ \alpha &= \arctan \frac{r_{\text{VSC}}}{x_{\text{L}, \text{VSC}}} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式中:  $\mu$  表示直流电压利用率, 与脉冲宽度调制 (PWA) 调制策略相关;  $V_{s,t}, V_{d,t}$  分别表示  $t$  时刻 VSC 交流侧和直流侧的节点电压;  $\delta_t$  表示 VSC 换流桥输出相位, 数值上等于交流侧母线电压与换流桥输出线电压相位差<sup>[21]</sup>;  $Y$  和  $\alpha$  反映 VSC 等效阻抗信息。VSC 稳态运行时,  $\mu, Y, \alpha$  均为常量;  $r_{\text{VSC}}$  和  $x_{\text{L}, \text{VSC}}$  分别表示 VSC 等效电阻和电抗。

VSC 交直流两侧联络线受到一定的载荷限制, 可以表示为

$$P_s^{\min} \leq p_{s,t} \leq P_s^{\max}, \quad Q_s^{\min} \leq q_{s,t} \leq Q_s^{\max} \quad (28)$$

$$\forall t \in T$$

$$P_d^{\min} \leq p_{d,t} \leq P_d^{\max}, \quad \forall t \in T \quad (29)$$

式中:  $P_s^{\max}, P_s^{\min}$  分别表示 VSC 交流侧传输的有功功率上限、下限;  $Q_s^{\max}, Q_s^{\min}$  表示 VSC 交流侧传输的无功功率上限、下限;  $P_d^{\max}, P_d^{\min}$  表示 VSC 直流侧传输的有功功率的上限、下限。

此外, VSC 控制变量还需满足以下约束,

$$0 \leq M_t \leq 1, \quad \forall t \in T \quad (30)$$

$$\delta_{\min} \leq \delta_t \leq \delta_{\max}, \quad \forall t \in T \quad (31)$$

式中:  $\delta_{\max}, \delta_{\min}$  分别表示 VSC 换流桥输出相位上限、下限。

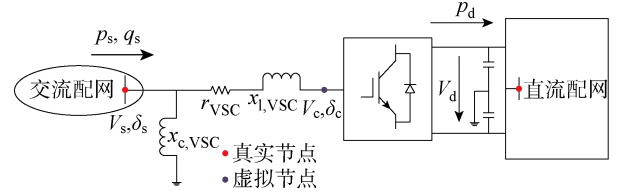


图 2 VSC 单相等效稳态运行模型

Fig. 2 Equivalent single-phase steady state operation model of VSC

(7) 储能系统运行约束。

$$S_i(t) = S_i(t-1) + p_i^{\text{ch}}(t) \eta_{\text{ch}} \Delta t - \frac{p_i^{\text{dis}}(t) \Delta t}{\eta_{\text{dis}}} \quad (32)$$

$$\forall i \in \Omega_B, \quad \forall t \in T$$

$$\text{SOC}_{i, \min} \leq \frac{S_i(t)}{E_i^{\text{R}}} \leq \text{SOC}_{i, \max} \quad (33)$$

$$\forall i \in \Omega_B, \quad \forall t \in T$$

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq p_i^{\text{ch}}(t) \leq P_i^{\text{R}}, \quad \forall i \in \Omega_B, \quad \forall t \in T \\ 0 \leq p_i^{\text{dis}}(t) \leq P_i^{\text{R}}, \quad \forall i \in \Omega_B, \quad \forall t \in T \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$p_i^{\text{ch}}(t) p_i^{\text{dis}}(t) = 0, \quad \forall i \in \Omega_B, \quad \forall t \in T \quad (35)$$

式中:  $S_i(t)$  表示储能系统  $i$  在时刻  $t$  剩余电量;  $p_i^{\text{ch}}, p_i^{\text{dis}}$  分别表示储能系统  $i$  的充电、放电功率;  $\text{SOC}_{i, \max}, \text{SOC}_{i, \min}$  分别表示储能系统  $i$  电量的上限、下限;  $\eta_{\text{ch}}, \eta_{\text{dis}}$  分别表示储能系统充放电效率。式(32)表示储能系统电量平衡等式约束。式(33)表示储能

系统荷电状态(State of Charge, SOC)约束,式(34)表示储能系统充放电功率约束,式(35)表示储能系统在某一时刻只能处于充电或者放电一种状态中。

(8) 负荷减载约束。

$$0 \leq \rho_{i,t} \leq 1, \quad \forall i \in \Omega_B, \quad \forall t \in T \quad (36)$$

## 2 模型线性化方法

模型中非线性项主要体现在以下几个约束中:

- (1) 交流配网潮流约束,式(17)~(18);
- (2) 直流配网潮流约束,式(19);
- (3) VSC 运行特性方程,式(23)~(26);
- (4) 线路载荷约束,式(16);
- (5) 阶段关联约束,式(10)、(12);
- (6) 储能系统充放电状态约束,式(35);

### 2.1 交/直流配网潮流线性化方法

交直流混合配电网潮流方程线性化思想可以总结为以下几点<sup>[22]</sup>:

(1) 非线性项如正弦项及电压乘积项( $V_i V_j$  形式),在运行点一阶泰勒展开,运行点通过迭代方法逐次逼近最优值。

(2) 三元连续变量乘积项( $V_i V_j \theta_{ij}$  形式),将  $V_i V_j$  视作一个独立变量,将  $V_i V_j \theta_{ij}$  项在运行点二元泰勒展开。

(3) 电压幅值平方项视作独立变量。

式(17)~(19)线性化约束表达式可写为

$$-M_1 u_{ij,t} \leq p_{ij,t} - (a_1 V_{i,t}^2 + a_2 V_{j,t}^2 + a_3 \theta_{ij} + a_4) \leq M_1 u_{ij,t}, \quad \forall (i,j) \in \Omega_L^{AC}, \quad \forall t \in T \quad (37)$$

$$-M_2 u_{ij,t} \leq q_{ij,t} - (a_5 V_{i,t}^2 + a_6 V_{j,t}^2 + a_7 \theta_{ij} + a_8) \leq M_2 u_{ij,t}, \quad \forall (i,j) \in \Omega_L^{AC}, \quad \forall t \in T \quad (38)$$

$$-M_3 u_{ij,t} \leq p_{ij,t} - (a_9 V_{i,t}^2 + a_{10} V_{j,t}^2 + a_{11}) \leq M_3 u_{ij,t}, \quad \forall (i,j) \in \Omega_L^{DC}, \quad \forall t \in T \quad (39)$$

式中: $a_1 \sim a_{11}$  为与运行点相关的系数。由于电压幅值平方项视作独立变量,相应地,式(22)也需转化成平方形式,由于各项均为正值,因此转化过程成立。

### 2.2 VSC 运行特性方程线性化方法

VSC 运行特性方程线性化方法总结为以下几点<sup>[21]</sup>:

(1) 正弦表达式在运行点一阶泰勒展开,并忽略二阶及以上高阶项。

(2) 三元连续变量乘积项( $V_i V_j \delta$  形式),将  $V_i V_j$  视作一个独立变量,进而对  $V_i V_j \delta$  项在运行点二元泰勒展开。

(3) 式(26)中二元连续变量乘积项  $MV_{d,t}$  可以通过二进制扩展法将  $M$  可行解离散化,进而将该项线性化。

(4) 电压幅值平方项视作独立变量。

式(23)~(25)线性化约束表达式可写为

$$p_{s,t} = b_1 V_{s,t}^2 + b_2 V_{c,t}^2 + b_3 \delta_t + b_4, \quad \forall t \in T \quad (40)$$

$$q_{s,t} = b_5 V_{s,t}^2 + b_6 V_{c,t}^2 + b_7 \delta_t + b_8, \quad \forall t \in T \quad (41)$$

$$p_{d,t} = b_9 V_{s,t}^2 + b_{10} V_{c,t}^2 + b_{11} \delta_t + b_{12}, \quad \forall t \in T \quad (42)$$

式中: $b_1 \sim b_{12}$  为与运行点相关的常系数,其表达式可见于文献[21]。交直流配网潮流方程及 VSC 运行特性线性化方法精确度和收敛性在文献[21]中已有验证,本文不再赘述。

式(16)线路载荷约束为凸约束,不需线性化可直接通过一般商用求解器求解,或通过割圆法将其线性化也是一种高效的处理方式。

### 2.3 阶段关联约束线性化方法

将(12)式代入(10)式,可以得到

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_L} \left[ - \left( \ln \frac{p_{ij}^1}{p_{ij}^0} \right) y_{ij} z_{ij,0} - \ln p_{ij}^0 z_{ij,0} \right] \leq W_{\max} \quad (43)$$

引入二进制变量  $t_{ij}$ , 令其满足

$$t_{ij} = y_{ij} z_{ij,0} \quad (44)$$

式(44)与下式等价,此关系通过列写真值表即可得到验证。

$$\left. \begin{aligned} t_{ij} &\leq y_{ij} \\ t_{ij} &\leq z_{ij,0} \\ t_{ij} &\geq y_{ij} + z_{ij,0} - 1 \end{aligned} \right\} \quad (45)$$

### 2.4 储能系统充放电状态约束线性化方法

通常,对式(35)线性化可以通过大  $M$  法则实现,但会引入二进制变量,对 3 层模型求解造成额外压力。且本文储能模型未参与市场或其他设备存在过多耦合关系,目标函数中充放电运行成本项便可以约束充放电功率不同时取正,这一点在文献[21,23]中均有所说明。

## 3 基于 NC&CG 的模型求解方法

### 3.1 基于 NC&CG 的模型转化过程

本文构建两阶段鲁棒优化模型转化为矩阵形式可表述为

$$\min_y c_1 y + \rho_{\text{pre}} \tau \max_u \min_{(x,z) \in F(y,u)} c_2 x \quad (46)$$

$$\text{st. } A_1 y \leq b_1 \quad (47)$$

$$A_2 y + A_3 u \leq b_2 \quad (48)$$

$$A_3 y + A_4 u + A_5 x + A_6 z \leq b_3 \quad (49)$$

$$A_7 x + A_8 z \leq b_4 \quad (50)$$

式中: $A_1 \sim A_8$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$ 、 $c_1$ 、 $c_2$  分别为与之对应的常系数矩阵。内层决策将连续变量和二进制变量分开,分别以  $x$  和  $z$  表示。模型本质上为 3 层混合整数线性规划问题,通过 NC&CG 算法对其求解是可

行而高效的<sup>[24]</sup>. 根据关联阶段变量的不同,将约束分写为式(47)~(50),以便于 NC&CG 算法中子问题原切平面向主问题的添加.

首先依据 C&CG 算法,将 3 层模型转化为主问题和子问题(图 3,  $n_i$ 、 $m_i$  为内层上、下界;  $n_o$ 、 $m_o$  为外层上、下界.),主问题(MP)表示可见下式

MP:  $\min_{y, \eta, x, z} c_1 y + \rho_{\text{pre}} \tau \eta$

st.  $A_1 y \leq b_1$

$A_2 y + A_3 u_l^* \leq b_2$

$\eta \geq c_2 x^l$

$A_3 y + A_5 x^l + A_6 z^l \leq b_3 - A_4 u_l^*$

$A_7 x^l + A_8 z^l \leq b_4$

$\forall 1 \leq l \leq k_o$

}

(51)

式中:  $\eta$  为新增主问题决策变量;  $u_l^*$  为第  $l$  次迭代中子问题求解并传递的最严重故障集合,在主问题求解时为常量;  $x^l$  和  $z^l$  为第  $l$  次迭代子问题新增决策变量;  $k_o$  为外层 C&CG 迭代次数. 主问题用于求解当不确定故障集合给定时基于储能配置和线路加固的灾前防御规划策略.

子问题(SP)可表示为

SP:  $Q(y^*) = \max_u \min_{(x, z) \in F(y, u)} c_2 x$

st.  $A_4 u + A_5 x + A_6 z \leq b_3 - A_3 y^*$

$A_7 x + A_8 z \leq b_4$

}

(52)

式中:  $y^*$  表示主问题求解并传递的第一阶段决策结果,在子问题求解时为常量. 子问题求解一阶段决策确定时的二阶段决策结果.

子问题为双层混合整数线性规划模型,无法通过商用求解器直接求解. 参照文献[25],借鉴 C&CG 算法将式(52)模型转化为新的主问题  $MP_{\text{sub}}$  和子问题  $SP_{\text{sub}}$ .

$MP_{\text{sub}}: Q(y^*) = \max_u \varphi$

st.  $A_4 u + A_5 x^r + A_6 z^r + A_3 y^* \leq b_3$

$A_7 x^r + A_8 z^r \leq b_4$

$\varphi \leq c_2 x^r$

$c_2^T + A_5^T \mu^r + A_7^T \lambda^r = 0$

$\mu^r (A_4 u + A_5 x^r + A_6 z^r + A_3 y^* - b_3) = 0$

$\lambda^r (A_7 x^r + A_8 z^r - b_4) = 0$

$\mu^r \geq 0 \quad \lambda^r \geq 0$

$\forall 1 \leq r \leq k_i$

}

(54)

式中:  $\varphi$  为新增辅助决策变量;  $\mu^r$  和  $\lambda^r$  分别对应问题内层约束的拉格朗日乘子;  $x^r$  为第  $r$  次迭代中  $SP_{\text{sub}}$  问题新增决策变量;  $k_i$  为内层 C&CG 迭代次数.

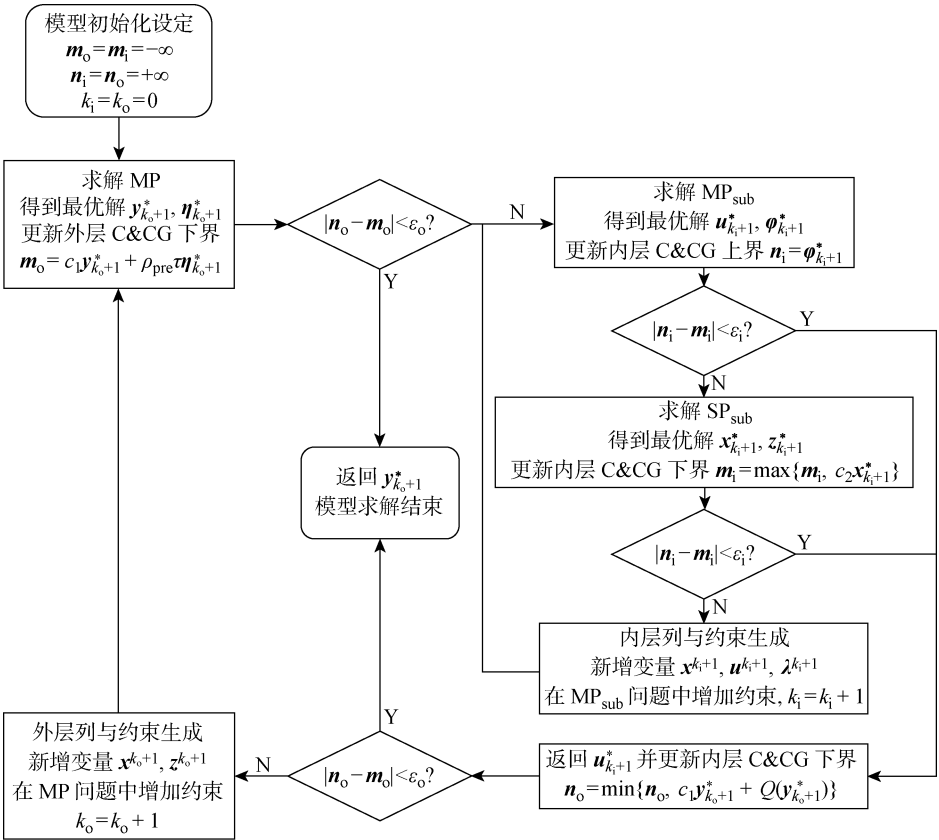


图 3 NC&CG 算法求解流程

Fig. 3 Illustration of solving process of NC&CG algorithm



当整数变量  $z$  取值确定时,原 SP 问题便转化为双层线性规划(LP)问题,通过将其下层目标转化为等效 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件便可以将双层问题降为单层. 式(54)反映的是 SP 问题内层等效 KKT 条件,  $\mu$  和  $\lambda$  分别对应 SP 问题内层约束的拉格朗日乘子. 式(54)中后两项表示互补松弛条件,对其线性化可通过大 M 法则实现<sup>[17]</sup>.

$$\text{SP}_{\text{sub}}: \min_{z, x \in F(y^*, u^*)} c_2 x \tag{55}$$

$$\text{s.t. } A_4 u^* + A_5 x + A_6 z + A_3 y^* \leq b_3 \tag{56}$$

$$A_7 x + A_8 z \leq b_4 \tag{57}$$

式中:  $u^*$  为  $\text{MP}_{\text{sub}}$  问题求解并传递的最严重故障集合,在  $\text{SP}_{\text{sub}}$  问题求解时为常量.

3.2 模型求解算法

求解 3 层混合整数线性规划问题的 NC&CG 算法流程包含以下几步:

**步骤 1** (模型初始化) 设定下界  $m_o = m_i = -\infty$ , 上界  $n_i = n_o = +\infty$ , 迭代批次  $k_i = k_o = 0$ .

**步骤 2** (求解 MP) 求解式(51)所示 MP 问题, 得到最优解  $y_{k_o+1}^*$ ,  $\eta_{k_o+1}^*$ ,  $x_1^*$ ,  $\cdots, x_{k_o}^*$ ,  $z_1^*$ ,  $\cdots, z_{k_o}^*$ , 更新外层 CCG 下界

$$m_o = c_1 y_{k_o+1}^* + \rho_{\text{pre}} \tau \eta_{k_o+1}^* \tag{58}$$

如果此时外层收敛判据满足, 则返回  $y_{k_o+1}^*$  并停止全部求解流程, 收敛判据为

$$|n_o - m_o| < \epsilon_o \tag{59}$$

式中:  $\epsilon_o$  为外层收敛参数.

**步骤 3** (求解  $\text{MP}_{\text{sub}}$ ) 求解式(53)、(54)所示  $\text{MP}_{\text{sub}}$  问题, 得到最优解  $u_{k_i+1}^*$ ,  $\varphi_{k_i+1}^*$ ,  $x_1^*$ ,  $\cdots, x_{k_i}^*$ , 更新内层 CCG 上界

$$n_i = \varphi_{k_i+1}^* \tag{60}$$

如果此时内层收敛判据满足, 则返回  $u_{k_i+1}^*$  并进入步骤 6, 收敛判据为

$$|n_i - m_i| < \epsilon_i \tag{61}$$

**步骤 4** (求解  $\text{SP}_{\text{sub}}$ ) 求解式(55)~(57)所示  $\text{SP}_{\text{sub}}$  问题, 得到最优解  $x_{k_i+1}^*$ ,  $z_{k_i+1}^*$ , 更新内层 CCG 下界

$$m_i = \max \{m_i, c_2 x_{k_i+1}^*\} \tag{62}$$

如果此时内层收敛判据满足, 则返回  $u_{k_i+1}^*$  并进入步骤 6.

**步骤 5** (内层列与约束生成) 新增变量  $x^{k_i+1}$ ,  $u^{k_i+1}$ ,  $\lambda^{k_i+1}$ , 并在  $\text{MP}_{\text{sub}}$  问题中新增式(54)所示对应  $k_i + 1$  批次约束, 令  $k_i = k_i + 1$ , 回到步骤 3.

**步骤 6** (外层列与约束生成) 更新外层 CCG 上界,

$$n_o = \min [n_o, c_1 y_{k_o+1}^* + Q(y_{k_o+1}^*)] \tag{63}$$

如果此时外层收敛判据满足, 返回  $y_{k_o+1}^*$  并停止全部求解流程. 如果不满足, 新增变量  $x^{k_o+1}$ ,  $z^{k_o+1}$ , 并在 MP 问题中新增式(51)所示对应  $k_o + 1$  批次约束, 令  $k_o = k_o + 1$ , 回到步骤 2.

4 算例分析

4.1 算例设置

本文采用 9 节点直流配网改进的 IEEE-33 节点交流配网和 VSC 组成的交直流混合配电网系统对所提韧性提升策略进行算例分析. 交直流混合配电网(HDS)拓扑示意图如图 4 所示, 图中 DG 为分布式电源. 其中交流配网电压等级为 12.66 kV, 在辐射状配网基础上新增了 4 条线路, 增加其环状冗余度. 交流配网接入的分布式电源均为可调度的燃气轮机, 新能源机组仅接入直流配网. 负荷出力曲线如图 5 所示. 线路载荷容量上限和 VSC 联络线潮流视在功率允许通过上限均设为 2 MV · A. VSC 电阻和电抗分别取 0.2 Ω 和 0.6 Ω. 设置线路加固最大条数为 3, 单线加固费用为 1 000 元/m, 所有线路长度均为 1 km. 储能系统技术参数如表 1 所示, 成本均已折算至一年期, 假定极端事件发生前, 配电网运营方已收到故障预警信息, 提前采取应对措施, 因此设置储能初始 SOC 为 0.85.

故障发生后, 交直流混合配电网解列, 与上级电源联络线断开, 故障持续 5 h 后线路修复, 上级电源供电恢复. 负荷减载成本如表 2 所示, 考虑到大用户及重要负荷更多接入交流配网, 因此设置交流配网负荷权重高于直流配网.

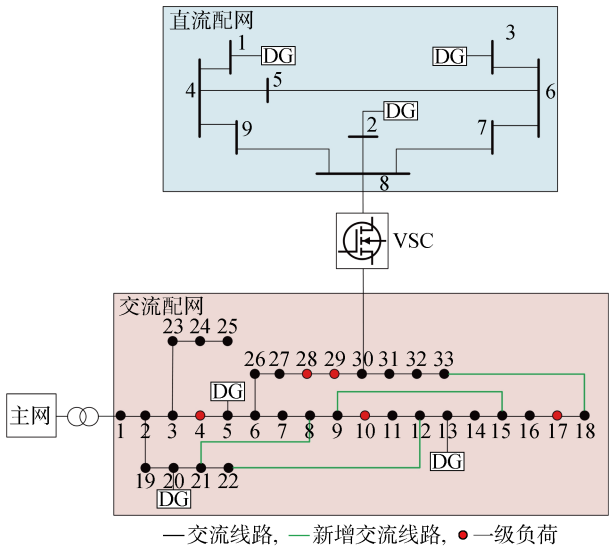


图 4 交直流混合配电网算例拓扑

Fig. 4 Topology of HDS in case studies



考虑一年期内极端事件发生 5 次,线路加固前故障率为 0.9,加固后故障率为 0.1.

表 1 储能系统技术参数

Tab. 1 Technical parameters of energy storage system	
参数	取值
可配置的额定功率上限 $P^{\text{R,max}}/\text{kW}$	400
可配置的容量上限 $E^{\text{R,max}}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	800
单位功率配置成本 $c^{\text{P}}/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	1 050 <sup>[13]</sup>
单位容量配置成本 $c^{\text{e}}/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	3 000 <sup>[13]</sup>
充电效率 $\eta^{\text{ch}}$	0.9
放电效率 $\eta^{\text{dis}}$	0.9
单位充电成本 $c^{\text{ch}}/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.2
单位放电成本 $c^{\text{ch}}/[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$	0.2
储能最大配置数量	5
初始 SOC	0.85
SOC 上限	0.9
SOC 下限	0.1

表 2 负荷减载成本

Tab. 2 Cost of load shedding	
负荷类型	切负荷成本/ $[\text{元}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}]$
一级负荷	2 500
交流配网其他负荷	100
直流配网负荷	20

表 3 不同场景下韧性提升策略效果对比

Tab. 3 Comparison of resilience enhancement effects in different scenarios				
场景	故障集合	线路加固策略	储能配置节点	目标函数值/万元
1	19-20, 4-5, 6-26, 29-30, 30-31, 2-19	—	—	1 965.7
2	19-20, 3-4, 17-18, 16-17, 9-10, 10-11	4-5, 29-30, 28-29	—	1 765.3
3	19-20, 3-4, 30-31, 15-16, 5-6, 12-13	—	4, 10, 17, 28, 29	1 098.7
4	19-20, 3-4, 30-31, 15-16, 5-6, 27-28	4-5, 29-30, 28-29	10, 17	804.0

表 4 不同场景下负荷减载情况

Tab. 4 Load shedding in different scenarios			
场景	一级负荷 减载量/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$	交流配网其他 负荷减载量/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$	直流配网 负荷减载量/ $(\text{kW}\cdot\text{h})$
1	1 137.6	10 791.6	828.7
2	858.2	7 323.3	3 372.1
3	0	15 719.8	919.7
4	0	13 156.9	1 705.3

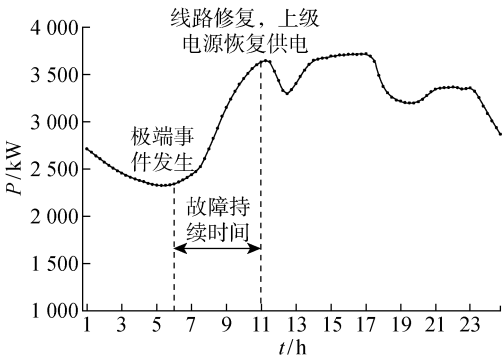


图 5 算例负荷曲线

Fig. 5 Load curve in the case

4.2 结果分析

算例将设计 4 个不同场景对交直流混合配电网灾前韧性提升策略进行分析.

场景 1 不采取灾前韧性提升策略.

场景 2 仅采取线路加固策略.

场景 3 仅采取储能配置策略.

场景 4 采取线路加固与储能配置相结合的灾前防御策略.

4.2.1 最优韧性提升投资策略分析 表 3 对比了 4 个场景韧性提升策略效果及目标函数值. 表 4 对比了 4 个场景下负荷减载情况,表 5、6 分别为场景 3、场景 4 的储能配制策略. 由于直流配网负荷权重较低,故加固策略及故障更多针对交流配网,下文图表中线路或节点等如不加说明则均指代交流配网.

表 5 场景 3 储能配置策略

Tab. 5 Energy storage system configuration strategy in the third scenario			
储能配置节点	$P^{\text{R}}/\text{kW}$	$E^{\text{R}}(\text{kW}\cdot\text{h})$	配置成本/万元
4	88.5	588.7	185.9
10	90.7	613.2	193.5
17	83.5	561.9	177.3
28	83.1	545.9	172.5
29	98.2	660.1	208.3

表 6 场景 4 储能配置策略

Tab. 6 Energy storage system configuration strategy in the fourth scenario

储能配置节点	$P^R/\text{kW}$	$E^R/(\text{kW}\cdot\text{h})$	配置成本/万元
10	90.8	614.1	193.8
17	83.5	561.9	177.3

对以上数据进行分析可以看出,若不采取任何灾前防御策略,极端事件直接导致交直流混合配电网约 57% 的一级负荷减载,进而造成了巨大的经济损失.虽然这衡量的是最差情况,但却具有十分重要的现实意义.极端事件类型不仅包括自然灾害,人为攻击也占有很高比例.自然灾害具有偶然性,而恶意攻击则往往具备较强的指向性,因此分析最严重故障情况下的灾前防御策略,也是偶然中寻求必然的结果.

场景 2 采取线路加固策略,目标函数较场景 1 降低了 10.7%,此时仍有 43% 的一级负荷减载,韧性提升效果有限.这是因为 HDS 在脱网运行时,本就处于功率缺额状态,仅通过线路加固无法弥补功率不足.另外若重要负荷节点同分布式电源拓扑相距较远,保障重要负荷供电便需要将沿线全部加固,显然不具备可行性.将线路加固最大条数设置为 3 是因为即使设置为 4,最优加固策略依然不变.

场景 3 采取储能配置策略,目标函数较场景 1 降低了 44.1%,此时储能接入点与一级负荷位置重合,一级负荷无减载.但该策略仍具备较大的提升空间,这是因为单纯依靠配置储能系统保障重要负荷供给需要点对点实现,改变了 HDS 原有的供电方式.如果能尽可能引导 HDS 已配置的分布式电源对重要负荷进行供电,则可以进一步降低投资成本.此外,一级负荷保障供电的代价是其他交流配网负荷出现大规模减载,这主要是 HDS 环状冗余度不足导致的,如果可以对馈线开关进行调度,在灾中应对时进行配网最优拓扑重构,则可以进一步避免大规模负荷减载.但对馈线开关的调度会引入大量二进制变量,而 NC&CG 算法效率受到二进制变量影响较大,因此该内容不在本文探讨范围内.

场景 4 采取线路加固与储能配置相结合的灾前防御策略,目标函数较场景 1 降低了 59.1%,储能分布如图 6 所示.对场景 1~3 投资结果进行分析可以得到,若分布式电源拓扑位置距一级负荷较近或一级负荷之间距离较近,则线路加固策略更加适合;反之则应该倾向于储能系统配置策略.从图 4 不难看出,节点 4 与 DG1 相邻,在节点 4 配置储能成本

高于对线路 4-5 进行加固.同理直流配网功率可以通过 VSC 返送到节点 30,进而保障节点 28、29 处一级负荷供应,因此该处线路加固策略同样优于储能配置.而节点 10、17 与 DG 距离较远,线路加固成本高,在该节点处进行储能系统配置则更为适宜.因此储能配置与线路加固相结合的防御策略可以在保证韧性提升效果的同时降低投资规划成本.

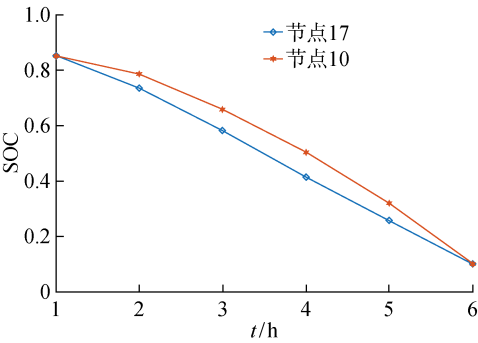


图 6 场景 4 储能分布

Fig. 6 Energy storage distribution in the fourth scenario

4.2.2 故障状态下 HDS 运行状态分析 从表 4 可以看出,交直流混合配电网在应对极端事件方面具备结构性优势.正常运行时,直流配网分布式电源不足以供应负荷,因此交流配网潮流通过 VSC 上送.故障发生后,由于直流配网负荷权重低于交流配网负荷,直流配网会主动切除区内负荷使得潮流返送.场景 2 和 4 中直流配网负荷减载量较场景 1 明显增长,这并非由于直流配网内故障增加,而是 HDS 主动行为,以保证交流配网 28、29 节点以及周边节点负荷供应.现实中交流配网与直流配网保持着一定的空间距离,当交流配网出现大规模故障时,直流配网可以对其进行功率支援.当故障演变至直流配网,交流配网可能已实现故障清除,这样交直流配网之间通过 VSC 潮流的双向流动保障双方重要负荷供给.若直流配网与多个交流配网通过 VSC 相接,交直流混合配电网在广域潮流调度及大规模故障应对方面的优势则会体现的更加明显.

以场景 4 为例,分析极端事件发生储能系统的充放电过程.从图 6 中可以看出,配置的两台储能故障期间一直处于放电模式,且释放的电能量全部仅用于一级负荷供给.最终 SOC 达到下限 0.1,调度结果与最优投资策略相对应.

结合灾前主动防御策略和灾后 HDS 脱网调度运行策略可以看出,HDS 面对极端事件的运营方式包括 3 点:

(1) 通过线路加固使得灾后分布式电源尽可能

处在满发状态;

(2) 通过储能资源配置实现重要负荷的就地供给;

(3) 通过灾后调度、切除非重要负荷以保证重要负荷的供给.

**4.2.3 算法收敛性分析** NC&CG 算法收敛性在文献[25]中已有说明,且内层 C&CG 收敛次数和计算效率受到约束中二进制变量个数影响程度较大.本文提出的两阶段鲁棒优化模型内层约束中,仅在对(26)式通过二进制扩展法进行线性化时引入了少许二进制变量,因此模型求解效率和收敛性较好.以场景 4 为例,外层 C&CG 通过 5 次迭代达到收敛状态,内层分别进行了 11、4、5、7 次迭代达到收敛状态.收敛曲线如图 7 所示.

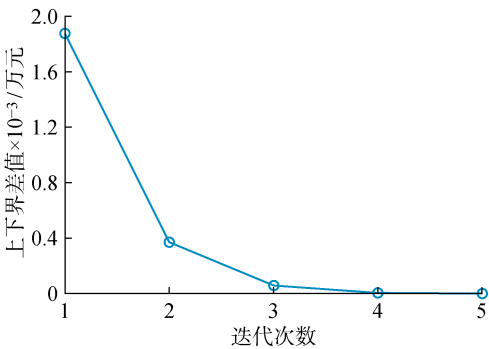


图 7 NC&CG 算法收敛曲线

Fig. 7 Convergence curve of NC&CG algorithm

5 结论

本文提出了考虑线路加固和储能资源配置的交直流混合配电网韧性提升方法,构建两阶段鲁棒优化模型.通过潮流线性化方法和 VSC 运行特性方程线性化方法消除交直流混合配电网调度约束中高度非凸非线性项对求解的影响.基于 NC&CG 算法对 3 层混合整数线性规划模型进行求解.最后通过交直流混合配电网算例对本文提出的韧性提升策略进行了验证,主要结论有:

(1) 线路加固和储能配置策略均可提升交直流混合配电网韧性.采取线路加固与储能配置相结合的策略可以在保障系统韧性水平的同时尽可能降低投资成本.

(2) VSC 双向潮流特性为交流配网与直流配网在大规模故障状态下的功率支援提供了必要条件,因此交直流混合配电网在应对极端事件和大规模故障方面具有独特的优势.

(3) NC&CG 可有效应用于面向韧性提升的两

阶段鲁棒优化模型的求解.文中提出的韧性提升策略可协助规划部门做出理性而有效的投资决策.

参考文献:

[1] 马鑫,郭瑞鹏,王蕾,等.基于二阶锥规划的交直流主动配电网日前调度模型[J].电力系统自动化,2018,42(22):144-150.  
MA Xin, GUO Ruipeng, WANG Lei, *et al.* Day-ahead scheduling model for AC/DC active distribution network based on second-order cone programming [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42 (22): 144-150.

[2] 黄仁乐,蒲天骄,刘克文,等.城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J].电力系统自动化,2015,39(9):26-33.  
HUANG Renle, PU Tianjiao, LIU Kewen, *et al.* Design of hierarchy and functions of regional energy Internet and its demonstration applications[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 26-33.

[3] 赵彪,赵宇明,王一振,等.基于柔性中压直流配电的能源互联网系统[J].中国电机工程学报,2015,35(19):4843-4851.  
ZHAO Biao, ZHAO Yuming, WANG Yizhen, *et al.* Energy internet based on flexible medium-voltage DC distribution[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35 (19): 4843-4851.

[4] 阮前途,谢伟,许寅,等.韧性电网的概念与关键特征[J].中国电机工程学报,2020,40(21):6773-6784.  
RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, *et al.* Concept and key features of resilient power grids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(21): 6773-6784.

[5] 周晓敏,葛少云,李腾,等.极端天气条件下的配电网韧性分析及提升措施研究[J].中国电机工程学报,2018,38(2):505-513.  
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, *et al.* Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(2): 505-513.

[6] 童晓阳,王晓茹.乌克兰停电事件引起的网络攻击与电网信息安全防范思考[J].电力系统自动化,2016,40(7):144-148.  
TONG Xiaoyang, WANG Xiaoru. Inference and countermeasure presupposition of network attack in incident on Ukrainian power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(7): 144-148.

[7] 和敬涵,李猛,罗国敏,等.面向韧性提升的异构多源交直流配电网保护与故障恢复方法研究综述[J].供用电,2019,36(7):2-7.  
HE Jinghan, LI Meng, LUO Guomin, *et al.* Review

- of protection and restoration methods for heterogeneous multi-source AC/DC distribution network facing resilience improvement[J]. **Distribution & Utilization**, 2019, 36(7): 2-7.
- [8] 上海市人民政府. 上海市城市安全发展的工作措施[R]. 上海: 上海市人民政府, 2019.  
Shanghai Municipality People's Government. The working measures of urban safety development in Shanghai [R]. Shanghai: Shanghai Municipality People's Government, 2019.
- [9] TAN Y S, DAS A K, ARABSHAHI P, *et al.* Distribution systems hardening against natural disasters[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2018, 33(6): 6849-6860.
- [10] MA S S, CHEN B K, WANG Z Y. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2018, 9(2): 1442-1451.
- [11] KUNTZ P A, CHRISTIE R D, VENKATA S S. Optimal vegetation maintenance scheduling of overhead electric power distribution systems[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2002, 17(4): 1164-1169.
- [12] SALMAN A M, LI Y, STEWART M G. Evaluating system reliability and targeted hardening strategies of power distribution systems subjected to hurricanes[J]. **Reliability Engineering & System Safety**, 2015, 144: 319-333.
- [13] NAZEMI M, MOEINI-AGHTAIE M, FOTUHI-FIRUZABAD M, *et al.* Energy storage planning for enhanced resilience of power distribution networks against earthquakes[J]. **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, 2020, 11(2): 795-806.
- [14] LIN Y L, BIE Z H. Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding[J]. **Applied Energy**, 2018, 210: 1266-1279.
- [15] HE C, DAI C X, WU L, *et al.* Robust network hardening strategy for enhancing resilience of integrated electricity and natural gas distribution systems against natural disasters[J]. **2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)**, 2019: 1.
- [16] YUAN W, WANG J H, QIU F, *et al.* Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2016, 7(6): 2817-2826.
- [17] MA S S, SU L, WANG Z Y, *et al.* Resilience enhancement of distribution grids against extreme weather events[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2018, 33(5): 4842-4853.
- [18] SALIMI M, NASR M A, HOSSEINIAN S H, *et al.* Information gap decision theory-based active distribution system planning for resilience enhancement[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2020, 11(5): 4390-4402.
- [19] KIM J, DVORKIN Y. Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2019, 10(5): 4996-5006.
- [20] 张海波, 马仲铜, 程鑫, 等. 保证重要负荷不间断供电的配电网储能规划方法[J]. **电网技术**, 2021, 45(1): 259-268.  
ZHANG Haibo, MA Shentong, CHENG Xin, *et al.* Distribution network energy storage planning ensuring uninterrupted power supply for critical loads[J]. **Power System Technology**, 2021, 45(1): 259-268.
- [21] XU B L, WANG Y S, DVORKIN Y, *et al.* Scalable planning for energy storage in energy and reserve markets[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2017, 32(6): 4515-4527.
- [22] 杨修宇, 穆钢, 柴国峰, 等. 考虑灵活性供需平衡的源-储-网一体化规划方法[J]. **电网技术**, 2020, 44(9): 3238-3246.  
YANG Xiuyu, MU Gang, CHAI Guofeng, *et al.* Source-storage-grid integrated planning considering flexible supply-demand balance [J]. **Power System Technology**, 2020, 44(9): 3238-3246.
- [23] 刘晓林, 王旭, 蒋传文, 等. 计及 VSC 运行约束的交直流混合配电网分布式优化调度方法[J]. **电网技术**, 2021, 45(3): 1089-1101.  
LIU Xiaolin, WANG Xu, JIANG Chuanwen, *et al.* Distributed optimal scheduling of hybrid AC-DC distribution grid considering VSC operation constraints [J]. **Power System Technology**, 2021, 45(3): 1089-1101.
- [24] 伍俊, 鲁宗相, 乔颖, 等. 考虑储能动态充放电效率特性的风储电站运行优化[J]. **电力系统自动化**, 2018, 42(11): 41-47.  
WU Jun, LU Zongxiang, QIAO Ying, *et al.* Optimal operation of wind farm with hybrid storage devices considering efficiency characteristics of dynamic charging and discharging[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2018, 42(11): 41-47.
- [25] ZHAO L, ZENG B. An exact algorithm for two-stage robust optimization with mixed integer recourse problems[DB/OL]. (2012-09-30) [2021-06-30]. [http://www.optimization-online.org/DB\\_FILE/2012/01/3310.pdf](http://www.optimization-online.org/DB_FILE/2012/01/3310.pdf).

(本文编辑:陈晓燕)