

# 考虑直流线路和换流器故障的交直流配电网弹性分析

李 同

华北电力大学, 北京  
Email: 531875450@qq.com

收稿日期: 2021年3月6日; 录用日期: 2021年3月14日; 发布日期: 2021年4月1日

---

## 摘 要

随着用户对直流配电网需求的日益增加, 交直流混合配电网可能成为未来配电网发展的重要方向之一。为提升交直流配电网面对极端攻击事件的抵御、适应、恢复能力, 本文建立了考虑直流线路和换流器故障的防御-攻击-防御三层弹性规划模型。模型以加固元件和分布式能源预置为规划措施, 在考虑系统受到最严重攻击情况下, 实现了综合费用最小和失负荷最小的目标。本文以列与约束生成算法为求解方法, 构建22节点系统进行算例分析, 验证了本文方法的有效性。

## 关键词

交直流配电网, 弹性, 三层优化模型, 系统元件攻击

---

# Resilience Analysis of AC/DC Distribution Network considering DC Line and Converter Faults

Tong Li

North China Electric Power University, Beijing  
Email: 531875450@qq.com

Received: Mar. 6<sup>th</sup>, 2021; accepted: Mar. 14<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 1<sup>st</sup>, 2021

---

## Abstract

With the increasing demand for DC distribution network, AC-DC hybrid topology may become an

important direction of future distribution network development. In order to improve the ability of resisting, adapting and recovering in the face of extreme attack events, a tri-level resilience programming model, which takes the form of defense-attack-defense model, is established in this paper. Also, the fault of DC lines and converters are considered. The model takes the components hardening and distributed energy presetting as the planning measures. Considering the most serious attack on the distribution network, it finally achieves the goal of minimum comprehensive cost and minimum load loss. In this paper, the column and constraint generation algorithm is used as the solution method, and the effectiveness of this method is verified by the example analysis.

## Keywords

AC/DC Distribution Network, Resilience, Tri-Level Optimization Model, System Component Attack

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

弹性(resilience)指的是在外部扰动事件下整个系统准备、吸收、适应和恢复的能力[1]。近年来,自然灾害[2] [3]或人为恶意破坏[4]导致的大规模停电事故给社会发展和人民生活带来了较为巨大的影响。另一方面,在电力系统中,配电网是直接为用户提供服务的重要环节[5]。伴随着分布式电源(distributed generator, DG)等各类直流电源的大规模接入,交直流配电网具有良好的接纳 DG 能力,提升配网传输效率以及电能质量的特点[6],已经成为未来配电网发展的重要方向。因此,针对交直流配电网引入弹性概念来研究其在极端攻击事件下减小故障损失并尽快恢复正常供电的能力,对保障人们生产生活、抵御灾害事故、推动社会发展具有重要意义。

目前,国内外学者对于交直流混合配电网的经济性[7]、电压等级[8]、可靠性[9]等开展了初步研究。以上述研究为基础,在交直流配电网弹性分析方面,文献[10]讨论了配电系统中微网对弹性的提升作用,研究了信息通信技术对系统弹性的影响,提出混合交直流微网的分层控制策略。但其更偏重于极端事件下微网管理操作方式的探索。文献[11][12]将微网作为紧急调控资源,研究面对极端事件的配电网重构方法。但这类研究主要针对于分析极端事件后配网快速恢复能力。文献[13]提出了安全约束下最优潮流操作方法,考虑交直流线路、发电机和换流器故障,分别建立预防性模型和修正性模型,探索直流网络对系统安全供电和弹性提升的意义。但其仅考虑  $N - 1$  情况,恢复过程未计及 DG 存在的影响,没有提出具体的弹性提升措施。

为研究系统最严重攻击情况下弹性相关措施,降低交直流配电网受极端事件影响的系统损失,需要更好地模拟电网攻击扰动和最优防御操作。文献[14]提出了攻击 - 防御模型,分别以攻击破坏最大化和通过决策使破坏最小化为上、下层问题,对电网进行安全性分析。文献[15]进一步提出防御 - 攻击 - 防御(DAD)模型,构建三层优化 DAD 模型,并通过基于组合的方法迭代内、外层问题求解。文献[16]考虑加固线路和 DG 安置条件,建立三层两阶段鲁棒优化模型,并提出了多阶段、多区域方法来获取不确定性极端天气的时空特点。但是以上研究均集中于传统交流系统领域。

事实上,相较于传统交流系统,交直流配电网系统组成不同,在可能的故障元件、潮流计算、故障机理等方面均存在差异。在采用模型进行弹性分析时有必要计及系统特殊元件,统筹考虑规划、适应过

程。传统弹性分析故障元件集中于交流系统，一般为交流线路、母线或变电站等，本文依托交直流配电网组成结构，以交流线路、直流线路和换流器等重要组成元件为假设故障元件；传统交流输电系统潮流计算常采用直流最优潮流模型[15] [17]，只考虑有功功率和相角，忽略了无功功率和电压。配电网很大部分是树状辐射结构，DistFlow 公式是配电网计算复杂潮流和电压的常用方法[18] [19]。为方便模型求解并适用于交直流配电网，本文采用 DistFlow 公式的线性化形式[18] [19]并进行直流形式推导；交直流配电网包括交流系统、直流系统两部分，一侧故障可能会对另一侧产生影响。文献[20] [21]从连锁故障角度分析得出，换流站附近的交流线路发生故障会导致换相失败，严重时闭锁，中断功率传输，直流线路故障则会引起潮流转移，可能导致并联运行的交流线路过载。文献[22]则以配置保护为目标，分析了交流系统纵向故障、横向故障、换流站内系统故障的相应故障特性，并对保护改进措施进行了研究。

综上，本文以交直流配电网弹性分析问题为研究对象，考虑了交直流配电网与传统交流系统弹性分析的差异性，基于原有攻击 - 防御模型，建立了针对交直流配电网的 DAD (defense-attack-defense)三层弹性规划模型，在考虑元件加固和 DG 配置的前提下，得到交直流配电网在最严重线路和换流器故障情况下的最优弹性提升策略，并采用列与约束生成(column-and-constraint generation, C&CG)算法[18]对模型进行求解，对 22 节点交直流配电网进行分析，算例结果验证了模型的有效性。

## 2. 交直流配电网弹性规划模型

### 2.1. 交直流配电网弹性分析简介

目前，配电网中传统的交流配电仍占据主流地位。然而由于电力电子技术快速迅猛的发展趋势，与交流配电网比较而言，直流配电网在各个方面都有一定技术和经济上的优势[7] [9]。因此，交直流配电成为了未来配电网发展的又一方向。

对交直流配电网弹性进行分析，首先需要对弹性的概念进行定位。在 2009 年发布的《智能电网报告》一文中，美国能源部首先明确定义弹性应该是智能电网的显著特征之一[23]。结合电力系统的特点，对目前电力系统弹性定义的共同特点进行归纳总结可得，弹性是表征电力系统对于扰动做出相应反应的能力。也就是说，针对交直流配电网的弹性分析应着眼于提升系统准备预防能力、抵御吸收能力或快速恢复能力。

交直流配电网系统与传统交流配电系统组成不同。以交直流配电网为弹性分析对象时，必须考虑其与传统配电网的区别。

1) 在极端事件下考虑系统故障元件时必须包含换流器和直流线路的故障。

对交流系统进行弹性分析时，故障元件一般为交流系统内重要组成元件，即交流线路、母线或变电站等。交直流配电网引入直流部分和换流站等大量电力电子元件，主要由 3 个部分组成：交流配电网、直流配电网、电压源型换流器(voltage source converter, VSC)，其基本模型如图 1 所示。

其中，直流线路是电力系统直流部分维持正常运行的重要载体，换流器 VSC 站作为交流侧与直流侧的连接接口，是实现能量转换交流直流变换的元件，二者均为交直流配电网的重要组成部分。因此，本文在考虑攻击导致故障元件和规划预先加固元件时，均以交流线路、直流线路和换流器为假设目标。

2) 潮流计算由于直流系统的加入发生改变。

在直流配电系统中，运行控制都和交流线路有很大区别，因此，原有交流系统模型中的潮流计算方法可能无法适用，相应算法均要考虑直流系统特性进行一定的修改与扩展。配电网大部分是树状辐射结构，而 DistFlow 公式是计算复杂潮流与电压的常用方法之一。其公式如下所示：

$$\sum_{(n,h) \in L} P_{nh} = P_{mn} - r_{mn} \frac{P_{mn}^2 + Q_{mn}^2}{V_n^2} - P_n \quad (1)$$

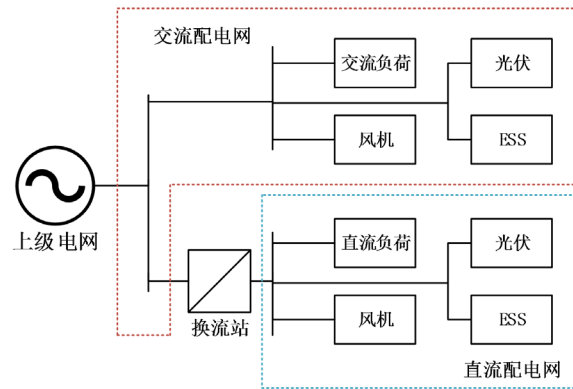


Figure 1. AC/DC hybrid distribution network model

图 1. 交直流配电网模型

$$\sum_{(n,h) \in L} q_{nh} = q_{mn} - r_{mn} \frac{p_{mn}^2 + q_{mn}^2}{V_n^2} - Q_n \quad (2)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2(r_{ij} p_{ij} + x_{ij} q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \left( \frac{p_{ij}^2 + q_{ij}^2}{V_i^2} \right) \quad (3)$$

式中， $m$  代表  $n$  的母节点， $h$  代表  $n$  的子节点。

该潮流公式的线性化形式已经在传统配电系统和微网等领域广泛应用[18] [19]。其形式如下：

$$\begin{cases} \sum_{(n,h) \in L} P_{nh} = P_{mn} - P_n \\ \sum_{(n,h) \in L} q_{nh} = q_{mn} - Q_n \\ V_j = V_i - \frac{r_{ij} P_{ij} + x_{ij} q_{ij}}{V_0} \end{cases} \quad (4)$$

针对交直流配电网，可推导直流系统公式和其线性化形式如下：

$$\sum_{(n,h) \in L} P_{nh} = P_{mn} - r_{mn} \frac{p_{mn}^2}{V_n^2} - P_n \quad (5)$$

$$V_j^2 = V_i^2 - 2r_{ij} p_{ij} + r_{ij}^2 \frac{p_{ij}^2}{V_i^2} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sum_{(n,h) \in L} P_{nh} = P_{mn} - P_n \\ V_j = V_i - \frac{r_{ij} p_{ij}}{V_0} \end{cases} \quad (7)$$

3) 在弹性分析过程中需要判断故障范围，换流站和直流线路等新故障元件的出现可能会对故障机理产生影响。

交直流配电网中，交流侧和直流侧是相互联接的，故障影响可能从一侧传递至另一侧，使其范围扩大。如果换流站附近的交流线路或直流线路发生故障，有可能会换相失败，严重时甚至会闭锁。因此，本文假设和换流站相连的交直流线路被攻击发生故障，则该换流站也会闭锁故障。

为综合考虑交直流配电网面对极端事件的准备、适应、恢复过程，从破坏和抵御两个角度模拟相应决策，本文建立了考虑直流线路和换流器故障的防御 - 攻击 - 防御(defense-attack-defense, DAD)三层弹性

规划模型。

## 2.2. 交直流配电网弹性规划模型结构

防御-攻击-防御三层模型是配电网弹性规划问题经常采用的模型[17] [24]。该模型以“攻击者”破坏系统重要元件来模拟极端事件扰动，以“防御者”采取措施减少负荷损失来模拟实际规划运行人员行为。

相较传统交流网络，交直流配电网组成元件包括交流架空线路、直流电缆和换流器等。针对交直流配电网 DAD 模型，首先，“防御者”进行交直流配电网设计规划，确定架空线路、电缆和换流站等组成元件的加固策略和 DG 预置最优决策，决策方案将传递至下层。其次，“攻击者”作为配电网敌对方，在有限攻击资源限制下，期望通过破坏系统组成元件使系统受到最严重攻击，即使系统失负荷最大。最后，配电网运行人员作为“防御者”，在给定弹性提升策略和攻击决策下，通过调整潮流，尽量减小系统损失。

根据各层“防御者”或“攻击者”立场目的、决策手段的不同，本文构建交直流配电网弹性分析问题的 DAD 三层模型结构如图 2 所示。

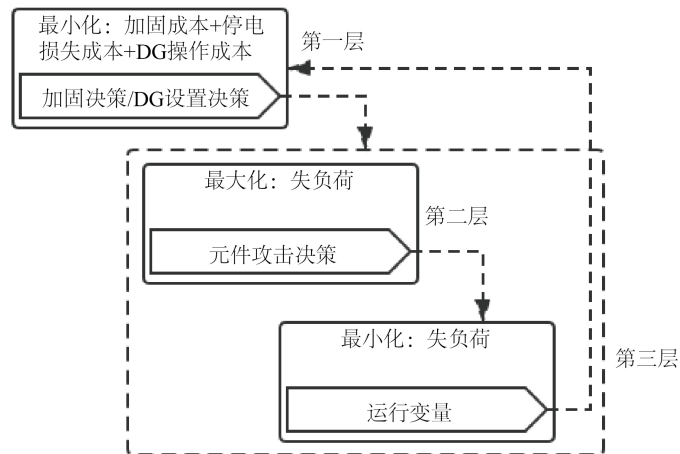


Figure 2. Framework of AC/DC distribution network resilience planning model

图 2. 交直流配电网弹性规划模型模型结构

## 2.3. 网络规划决策

本部分负责确定“防御者”网络弹性规划决策。

在有限预算前提之下，规划人员可以通过制定相应的合理规划措施提升交直流配电网弹性。本文主要考虑加固系统元件和 DG 资源预先配置两种措施。加固策略是恐袭、自然灾害等扰动下提高电力系统弹性的良好方法之一[25]。相比传统交流网络以线路作为加固目标，交直流配电网加固元件需扩充为交流架空线路、直流电缆和换流器。同时，DG 能显著提升电网可靠性、减少电力系统负荷损失[25]，特殊情况下可作为备用电源。为方便后续问题分析，假设直流配电网部分均为电缆线路，且经加固后交直流系统元件在合理时间范围内不会因极端事件攻击失效退出运行。另一方面，本文中 DG 在系统受到攻击后能为其安置节点和未破坏子节点供电。

综上，本层目标函数为最小化综合费用，包括加固系统元件成本、停电损失成本和操作 DG 成本。数学模型如下：

$$\begin{aligned} \min_{\theta_1} & \sum_{l \in \Omega_{l1}} X_l^{L1} c_l^{L1} + \sum_{l \in \Omega_{l2}} X_l^{L2} c_l^{L2} + \sum_{l \in \Omega_C} X_l^C c_l^C \\ & + \sum_{i \in \Omega_D} X_i^D c_i^D + \sum_{t=1}^T \Delta t \sum_{i \in \Omega_B} P_{i,t}^{LL} c_i^{LL} + \sum_{t=1}^T \Delta t \sum_{i \in \Omega_D} P_{i,t}^O c_i^O \end{aligned} \quad (8)$$

$$\text{s.t. } \theta_1 = \{X_l^{L1}, X_l^{L2}, X_l^C, X_i^D\} \quad (9)$$

其中,  $c_l^{L1}$  表示加固交流部分架空线路成本,  $c_l^{L2}$  表示加固直流部分电缆成本,  $c_i^D$  表示设置备用 DG 成本,  $c_l^C$  表示加固换流站成本。  $X_l^{L1}, X_l^{L2}, X_l^C, X_i^D$  均为 0~1 变量, 分别表示是否加固交流部分架空线路, 是否加固直流部分电缆, 是否设置备用 DG, 是否加固换流站, 取 1 为加固, 取 0 为不加固。  $\Delta t$  表示时间间隔。  $c_i^{LL}$  表示负荷损失成本系数,  $P_{i,t}^{LL}$  表示  $t$  时刻节点  $i$  的失负荷。  $c_i^O$  表示操作 DG 的成本,  $P_{i,t}^O$  表示 DG 在  $t$  时间的有功功率输出。  $\Omega_{l1}$ 、 $\Omega_{l2}$  分别表示架空线路、电缆集合,  $\Omega_D$  表示可设置备用 DG 节点集合,  $\Omega_C$  表示换流站集合,  $\Omega_B$  表示配电网节点集合。

可见本层模型属于整数规划(integer programming, IP)问题。

## 2.4. 网络攻击策略

本部分模拟“攻击者”的攻击策略。

对于电力系统而言, 恐袭可能会导致各种严重后果。为方便研究, 通常以线路、变电站、母线等系统组成元件故障为攻击结果[14] [15]。本文假设在交直流配电网中, “攻击者”的破坏目标为架空线路、电缆和换流站。“攻击者”将在可调取攻击资源有限的前提下, 攻击重要网络元件, 造成配电网部分停运, 从而导致系统失负荷。

综上, 本层目标函数为最大化系统失负荷。数学模型如下:

$$\max_{\theta_2} \sum_{t=1}^T \Delta t \sum_{i \in \Omega_B} P_{i,t}^{LL} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \theta_2 = \{X_l^{A1}, X_l^{A2}, X_l^A\} \quad (11)$$

$$\sum_{l \in \Omega_{l1}} X_l^{A1} f_l^{A1} + \sum_{l \in \Omega_{l2}} X_l^{A2} e_l^{A2} + \sum_{l \in \Omega_C} X_l^A g_l^A \leq M^A \quad (12)$$

其中,  $X_l^{A1}, X_l^{A2}, X_l^A$  为 0~1 变量, 分别表示架空线路、电缆和换流站是否会受到攻击。取 1 为受到攻击, 取 0 为未受到攻击。  $M^A$  为常量, 表示最大攻击预算。  $f_l^{A1}$ ,  $e_l^{A2}$ ,  $g_l^A$  分别代表攻击架空线路、电缆和换流站的成本。约束(12)表示攻击网络元件的总成本不能超过最大攻击预算。

本层模型属于 IP 问题。

## 2.5. 网络运行决策

本部分负责研究“防御者”, 即配电网运行人员的操作措施。

交直流配电网潮流模型将用于确定给定规划和攻击情况下最优运行策略, 以减轻相应攻击后果。运行结果将反馈至上层进行下一步循环。

本层模型以系统失负荷最小为目标函数。数学模型如下:

$$\max_{\theta_3} \sum_{t=1}^T \Delta t \sum_{i \in \Omega_B} P_{i,t}^{LL} \quad (13)$$

本层约束主要包括节点功率约束、DG 容量约束、换流器约束和支路潮流约束等。

### ① 节点功率平衡约束

$$\sum_{b \in \Omega_i^D} P_{b,t}^O - \sum_{l \in \Omega_i^{L1}} P_{l,t}^L + \sum_{l \in \Omega_i^{L2}} P_{l,t}^L - \sum_{k \in \Omega_i^C} P_{k,t}^{C1} + P_{i,t}^{LL} = P_{i,t}, \forall i \in \Omega_{bl} \quad (14)$$



$$\sum_{b \in \Omega_i^D} Q_{b,t}^o - \sum_{l \in \Omega_i^{L1}} Q_{l,t}^L + \sum_{l \in \Omega_i^{L2}} Q_{l,t}^L - \sum_{k \in \Omega_i^C} Q_{k,t}^{C1} = Q_{i,t}, \forall i \in \Omega_{b1} \quad (15)$$

$$\sum_{b \in \Omega_i^D} P_{b,t}^o - \sum_{l \in \Omega_i^{L1}} P_{l,t}^L + \sum_{l \in \Omega_i^{L2}} P_{l,t}^L + \sum_{k \in \Omega_i^C} P_{k,t}^{C2} + P_{i,t}^{LL} = P_{i,t}, \forall i \in \Omega_{b2} \quad (16)$$

式中,  $P_{b,t}^o$ ,  $Q_{b,t}^o$  分别表示节点  $b$ ,  $t$  时间 DG 发出的有功出力 and 无功输出;  $P_{l,t}^L$  表示  $t$  时刻线路  $l$  输送的功率;  $P_{k,t}^{C1}$ ,  $Q_{k,t}^{C1}$  分别表示 VSC 换流器输出的功率;  $P_{i,t}^{LL}$  表示  $t$  时刻节点  $i$  的失负荷;  $P_{i,t}$ ,  $Q_{i,t}$  表示  $t$  时刻节点  $i$  的负荷;  $\Omega_i^D$  表示节点  $i$  处的 DG 集合;  $\Omega_i^C$  表示节点  $i$  处的换流器集合;  $\Omega_i^{L1}$ 、 $\Omega_i^{L2}$  分别表示以节点  $i$  为送、受端的线路集合。

### ② DG 容量约束

$$0 \leq P_{b,t}^o \leq X_b^D P_b^{o,\max}, \forall b \in \Omega_{d1} \quad (17)$$

$$X_b^D Q_b^{o,\min} \leq Q_{b,t}^o \leq X_b^D Q_b^{o,\max}, \forall b \in \Omega_{d1} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{b,t}^o \leq X_b^D P_b^{o,\max}, \forall b \in \Omega_{d2} \quad (19)$$

式中,  $P_b^{o,\max}$  和  $Q_b^{o,\max}$  分别代表 DG 的有功和无功功率极限。

### ③ 支路潮流约束

$$V_{j|l,t} = V_{i|l,t} - \frac{r_{ij} P_{l,t}^L + x_{ij} Q_{l,t}^L}{V_0}, l \in \Omega_{l1} \quad (20)$$

$$V_{j|l,t} = V_{i|l,t} - \frac{r_{ij} P_{l,t}^L}{V_0}, l \in \Omega_{l2} \quad (21)$$

$$0 \leq P_{l,t}^L \leq M^1 (1 - X_l^{A1} + X_l^{L1}) \quad (22)$$

$$0 \leq Q_{l,t}^L \leq M^2 (1 - X_l^{A1} + X_l^{L1}) \quad (23)$$

式中,  $V_{i|l,t}$ ,  $V_{j|l,t}$  分别表示线路 1 的起、止电压;  $M^1$ ,  $M^2$  为大  $M$  值。约束(22) (23)保证线路功率在线路未加固且被攻击情况下值为 0。而线路一旦被加固或未受到攻击, 则  $1 - X_l^{A1} + X_l^{L1} \geq 1$ , 0 上限约束被松弛。

### ④ 电压约束

$$V_{i,\min}^{AC} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max}^{AC}, \forall i \in \Omega_{b1} \quad (24)$$

$$V_{i,\min}^{DC} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max}^{DC}, \forall i \in \Omega_{b1} \quad (25)$$

式中,  $V_{i,\min}^{AC}$ ,  $V_{i,\max}^{AC}$ ,  $V_{i,\min}^{DC}$ ,  $V_{i,\max}^{DC}$  分别代表交流节点和直流节点电压上下限约束。

### ⑤ 换流器约束

$$P_{k,t}^{C1} = P_{k,t}^{C2} \quad (26)$$

$$|P_{k,t}^{C1}| \leq u_{k,t}^C P_k^{\max} \quad (27)$$

$$|Q_{k,t}^{C1}| \leq u_{k,t}^C Q_k^{\max} \quad (28)$$

式中,  $u_{k,t}^C$  为换流器状态变量, 由加固状况和攻击情况决定, 即  $u_{k,t}^C = \text{sgn}(1 - X_l^A + X_l^L)$ 。

### ⑥ 失负荷约束

$$0 \leq P_{l,t}^{LL} \leq P_{i,t}^{AC}, \forall i \in \Omega_{b1} \quad (29)$$

$$0 \leq P_{l,t}^{LL} \leq P_{i,t}^{DC}, \forall i \in \Omega_{b2} \quad (30)$$

### 3. 交直流配电网弹性规划模型求解方法

列与约束生成算法(C&CG)是两阶段鲁棒优化问题常用分解算法,与传统 Benders-dual 求解算法相比,其求解同量级问题速度更快,计算时间和迭代次数明显减少,在求解大规模问题时优势明显。C&CG 算法通过求解子问题,能精确定重要场景,提高收敛效率,同时,该算法以混合整数问题为主问题,保证了标称模型的网络结构,以便计算时完整利用[26]。因此,本文采用 C&CG 算法对 DAD 三层弹性规划模型进行求解。

#### 3.1. CCG 子问题

子问题将第二层和第三层问题合并为单层问题,目的为确定最严重攻击策略。该层在给定系统弹性规划决策的情况下,由袭击者攻击问题和系统运行问题的对偶问题组成。根据第 1 节模型公式归纳,总问题如下:

$$\min_{x \in H} \max_{u \in U} \min_{z \in F(x,u)} M \quad (31)$$

其中,  $H$  表示系统加固决策和 DG 预置决策的可行集合;  $U$  表示网络规划之后的攻击策略集合,该攻击将造成系统失负荷最大化;最后,配电网对系统破坏做出响应,通过  $F(x,u)$  最小化失负荷。 $M$  为(1)中目标函数。

则子问题如下:

$$\max_{u \in U, \phi \in \Phi(\hat{x}, u)} \sum_{t=1}^T \Delta t \sum_{i \in \Omega_B} P_{i,t}^{LL} \quad (32)$$

其中,  $\phi$  表示原问题约束对应的对偶变量,  $\Phi(\hat{x}, u)$  表示对偶问题约束和强队偶约束;  $\hat{x}$  表示给定的配电网弹性规划决策。上述问题可通过大  $M$  法等相应方法进行线性化处理为 MILP 问题从而求解。

#### 3.2. CCG 主问题

在 CCG 子问题构建完成后,主问题可表示为:

$$\min_{x, z^{(v)}, \beta} Cx + \beta \quad (33)$$

$$\text{s.t. } x \in H \quad (34)$$

$$\beta \geq f(z^{(v)}); \forall v \leq k \quad (35)$$

$$z^{(v)} \in F(x, u^{(v)}); \forall v \leq k \quad (36)$$

其中,  $v$  代表循环变量,  $k$  代表当前循环次数;  $x$  则表示弹性规划决策变量;  $z$  表示运行变量;  $\beta$  是定义于约束(35)的辅助变量;  $f(z^{(v)})$  表示目标函数(1)中与运行变量相关的部分。

CCG 主问题包括了第一层和第三层问题,即弹性规划决策问题和系统运行问题。同时,运行变量均与迭代次数  $v$  有关。攻击变量在该问题中为常数,由子问题求解得出。

#### 3.3. 算法求解流程

CCG 算法求解流程如下所示:

初始化问题,并设置上下界限分别为正无穷大和负无穷大,  $LB \leftarrow -\infty$ ,  $UB \leftarrow +\infty$ , 迭代次数  $v = 0$ 。

在给定弹性规划决策  $\hat{x}$  条件下求解 CCG 子问题,获取目标函数值。更新上界为

$UB = \min(UB, Cx + f(z^{(v)}))$ 。并获取第二层攻击变量,传递至主问题。

在给定攻击变量条件下求解 CCG 主问题。更新下界为  $LB = Cx^{(v)} + \beta^{(v)}$ 。若  $(UB - LB)$  满足终止条件,



则停止循环；否则，获取变量  $x^{(v)}$ ， $\beta^{(v)}$  传递至子问题。

绘制求解流程图如图 3 所示：

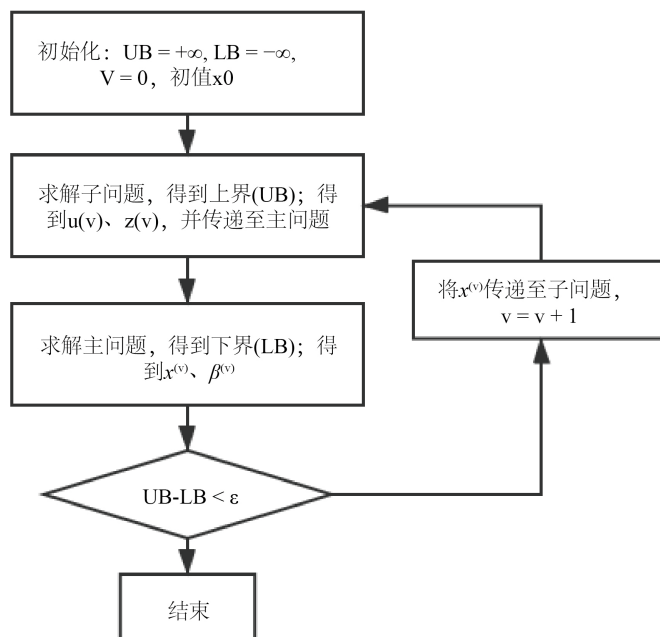


Figure 3. Flowchart illustrating the iteration process

图 3. 求解算法流程图

## 4. 算例分析

### 4.1. 算例数据

本文基于 MATLAB R2018a 平台(四核 1.6 GHz CPU, 8 G 内存)对上述算法程序进行开发, 操作系统为 win 10 64 bit, 并调用 GUROBI 工具包进行求解。针对本文构建的交直流配电网系统进行算例分析, 得到相应弹性提升策略, 以验证本文所建模型的有效性。

本文构建了由 14 节点交流系统, 8 节点直流系统和 2 台 VSC 换流器构成的交直流配电网系统, 如图 4 所示。为突出主要问题, 方便研究, 假设系统所有的负荷节点采用相同的负荷曲线; 算例系统中线路参数详见附录的表 A1, 表 A2; 安装的 2 个 VSC 换流器配置参数相同; 假设备用 DG 可调度; 直流配电网电压等级为  $\pm 10$  KV; 交直流混合配电网中节点电压的安全范围为  $[0.95, 1.05]$  (标么值); 交流线路每相的最大载流量为 2 MVA; 直流线路的最大载流量为 1 MW。

### 4.2. 算例结果分析

利用本文算法, 首先仅采用加固元件措施作为弹性提升策略研究相应规划结果。设置架空线路、电缆和换流站攻击成本分别为 1, 2, 3; 总攻击预算为 3。交流架空线路加固成本为  $0.5 \times 10^3$  \$/km, 直流电缆加固成本为  $1 \times 10^3$  \$/km。失负荷惩罚费用为 20,000 \$/MWh。与系统无加固策略结果做对比, 结果如下所示。

由表 1 可得, 在攻击预算为 3 的条件下, 交流架空线路 13~14 和直流电缆 1~2 作为系统的薄弱环节, 会成为“攻击者”的袭击目标, 攻击将造成失负荷后果。采取弹性提升措施中的加固元件策略, 可以有效减少失负荷, 缓解恐怖袭击造成的严重后果, 尽可能维护系统安全运行。同时, 对比综合费用可知, 虽然加固元件需要额外支出加固费用, 但在该情况下, 失负荷惩罚费用大于加固费用, 综合费用呈降低趋势。

综上，采用元件加固策略是合理的提升系统弹性，维护配网正常运行措施。相应加固策略如图 5 所示。

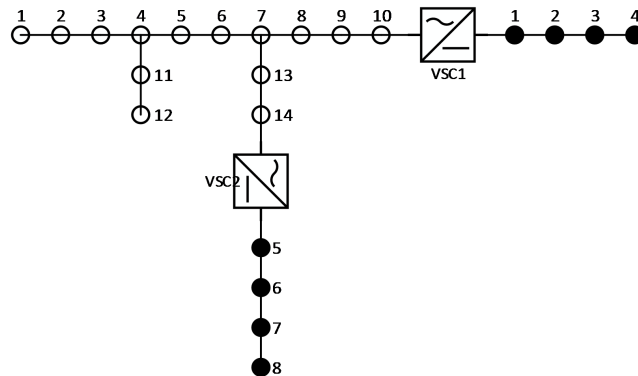


Figure 4. 22-node test system  
图 4. 22 节点算例系统

Table 1. Results comparison of different component -reinforcement cases  
表 1. 有无加固策略结果对比

弹性提升策略	无	元件加固
攻击元件	AC13-14, DC1-2	AC9-10, DC3-4
交流线路加固	—	13-14
直流线路加固	—	1-2
换流器加固	—	—
备用 DG 设置	—	—
综合费用/10 <sup>4</sup> \$	10	7.15
失负荷/ MW	5	1

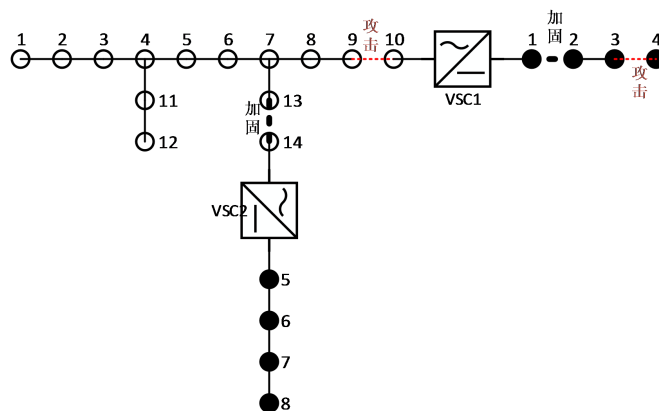


Figure 5. 22-node test system schematic diagram of reinforcement strategy  
图 5. 22 元件加固策略示意图

为了分析不同攻击预算下“攻击者”攻击目标变化和加固元件费用对综合费用的影响，本文改变了攻击预算值，并观察相应结果变化，如表 2 所示。

**Table 2.** Results comparison of different attacking strategy  
**表 2.** 不同攻击预算下优化结果对比

攻击预算	1	3	5
攻击元件	AC9-10	AC9-10, DC3-4	AC11-12,13-14, DC1-2
交流线路加固	13-14	13-14	9-10
直流线路加固	-	1-2	-
换流器加固	-	-	2
备用 DG 设置	-	-	-
综合费用/104\$	5.15	7.15	10
失负荷/MW	1	1	4

由表 2 可得, 由于攻击预算的加大, “攻击者”针对交直流系统攻击的薄弱范围逐渐增大, 相应攻击目标也会发生变化。同时, 加固策略具有针对性, 随攻击预算和攻击元件的变化而变化, 表现为系统问题和解决策略一一对应。另一方面, 综合费用由于加固各类元件成本不同以及交直流线路长度差异, 呈现基于相应加固策略的上下波动形式。可以发现, 单纯采用加固策略作为弹性提升措施难以完全解决攻击造成的失负荷问题。

为进一步探究设置备用 DG 对交直流配电网弹性提升的影响, 本文在给定可设置备用 DG 节点的前提下, 对比了设置备用 DG 和仅加固元件对系统优化结果的影响, 如表 3 所示。

**Table 3.** Results comparison of different back-up DG cases  
**表 3.** 有无设置备用 DG 策略结果对比

弹性提升策略	元件加固	元件加固 + 备用 DG	元件加固 + 2 备用 DG
攻击元件	AC9-10, DC3-4	AC9-10, DC3-4	AC9-10, DC3-4
交流线路加固	13-14	13-14	—
直流线路加固	1-2	1-2	1-2
换流器加固	—	-	-
备用 DG 设置	—	节点 4	节点 4, 7
综合费用/10 <sup>4</sup> \$	7.15	8.25	9.2
失负荷/MW	1	0	0

分析比较设置备用 DG 和仅考虑元件加固两种提升措施下系统优化结果可知, 增设备用 DG 可以在故障发生时, 为负荷提供备用功率支持, 从而减少失负荷, 维持系统正常运行, 提升系统弹性。同时, 由于预置备用 DG 费用和 DG 运行费用的存在, 系统综合费用会呈上升趋势。对比增设 2 组备用 DG 的情况可知, 设置多组备用 DG 可能减少所需加固元件数量, 但其装置和运行费用会导致总体费用增加, 应合理对比成本, 不宜增设过多。

## 5. 结论

本文针对交直流配电网弹性规划问题, 考虑直流配电系统接入带来的影响, 以交流架空线路、直流电缆、换流器为故障元件, 构建 DAD 三层模型, 研究了系统元件受到攻击情况下交直流配电网系统运行状况, 并提出相应弹性提升决策。通过本文算例分析可得, 在费用限制下, 综合采用元件加固和预先设

置备用 DG 是系统最优弹性提升策略, 将最大化降低外部扰动影响, 减少负荷损失。本文研究对减小交直流配电网极端事件下故障损失具有重要意义, 为未来建设更具弹性的交直流配电网提供了参考。但需要指出, 本文极端事件以系统元件攻击模拟, 与实际情况存在差异, 可建立细化模型研究。同时模型为方便构建, 存在多处简化。对于合理设置备用 DG 的数量、位置, 有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] 高海翔, 陈颖, 黄少伟, 等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化, 2015(23): 1-8.
- [2] Wang, Y., Chen, C., Wang, J., *et al.* (2015) Research on Resilience of Power Systems under Natural Disasters—A Review. *IEEE Transactions on Power Systems*, **31**, 1-10. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2429656>
- [3] Michel, B., Massignan, J.A.D., Fanucchi, R.Z., *et al.* (2018) Probabilistic Assessment of Power Distribution Systems Resilience under Extreme Weather. *IEEE Systems Journal*, **13**, 1747-1756.
- [4] Wang, Y. and Baldick, R. (2014) Interdiction Analysis of Electric Grids Combining Cascading Outage and Medium-Term Impacts. *IEEE Transactions on Power Systems*, **29**, 2160-2168. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2300695>
- [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, 201, 38(2): 505-513.
- [6] 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.
- [7] 郑欢, 江道灼, 杜翼. 交流配电网与直流配电网的经济性比较[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3368-3374.
- [8] 王丹, 柳依然, 梁翔, 等. 直流配电网电压等级序列研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 19-25, 47.
- [9] 曾嘉思, 徐习东, 赵宇明. 交直流配电网可靠性对比[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2582-2589.
- [10] Li, Z., Shahidehpour, M., Aminifar, F., *et al.* (2017) Networked Microgrids for Enhancing the Power System Resilience. *Proceedings of the IEEE*, **105**, 1289-1310.
- [11] Khederzadeh, M. and Zandi, S. (2019) Enhancement of Distribution System Restoration Capability in Single/Multiple Faults by Using Microgrids as a Resiliency Resource. *IEEE Systems Journal*, **13**, 1796-1803. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2890898>
- [12] Wang, Z., Shen, C., Xu, Y., *et al.* (2018) Risk-Limiting Load Restoration for Resilience Enhancement with Intermittent Energy Resources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 2507-2522.
- [13] Pinto, R.T., Aragüés-Peñalba, M., Gomis-Bellmunt, O., *et al.* (2016) Optimal Operation of DC Networks to Support Power System Outage Management. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **7**, 2953-2961. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2586024>
- [14] Salmeron, J., Wood, K. and Baldick, R. (2004) Analysis of Electric Grid Security under Terrorist Threat. *IEEE Transactions on Power Systems*, **19**, 905-912. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.825888>
- [15] Salmeron, J., Wood, K. and Baldick, R. (2009) Worst-Case Interdiction Analysis of Large-Scale Electric Power Grids. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, 96-104. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2004825>
- [16] Yuan, W., Wang, J., Qiu, F., *et al.* (2016) Robust Optimization-Based Resilient Distribution Network Planning against Natural Disasters. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **7**, 2817-2826. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2513048>
- [17] Yuan, W., Zhao, L. and Zeng, B. (2014) Optimal Power Grid Protection through a Defender-Attacker-Defender Model. *Reliability Engineering & System Safety*, **121**, 83-89. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.08.003>
- [18] Baran, M.E. and Wu, F.F. (1989) Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **4**, 1401-1407. <https://doi.org/10.1109/61.25627>
- [19] Wang, Z., Chen, B., Wang, J., Kim, J. and Begovic, M.M. (2014) Robust Optimization Based Optimal DG Placement in Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **5**, 2173-2182. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2321748>
- [20] 赵建伟, 厉天康, 严正, 等. 交直流电网连锁故障研究现状与展望[J]. 华东电力, 2013(4): 720-724.
- [21] 刘宇石. 交直流电网连锁故障传播机理及薄弱环节辨识方法[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [22] 成敬周. 高压交直流互联系统故障分析及相关保护的研究[D]: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [23] 别朝红, 林雁翔, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1-9.
- [24] Yao, Y., Edmunds, T., Papageorgiou, D. and Alvarez, R. (2007) Trilevel Optimization in Power Network Defense. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C*, **37**, 712-718.

<https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.897487>

- [25] Ma, S., Li, S., Wang, Z., *et al.* (2019) Resilience-Oriented Design of Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, **34**, 2880-2891. <https://doi.org/10.1016/j.orl.2013.05.003>
- [26] Zeng, B. and Zhao, L. (2013) Solving Two-Stage Robust Optimization Problems Using a Column-and-Constraint Generation Method. *Operations Research Letters*, **41**, 457-461.

## 附录

**Table A1.** AC line parameters

**表 A1.** AC 参数

起始节点	终止节点	R	X
1	2	0.3375	1.0478
2	3	0.3465	1.0179
3	4	0.1535	0.3849
4	5	0.2066	0.4591
4	11	1.3294	1.3271
5	6	1.3292	1.3435
6	7	0.3192	0.0328
7	8	0.7526	1.1814
7	13	1.3238	1.3569
8	9	0.3414	1.0348
9	10	0.7436	1.2112
11	12	1.3425	0.5124
13	14	0.7475	1.1983

**Table A2.** DC line parameters

**表 A2.** DC 参数

起始节点	终止节点	R
1	2	0.52
2	3	0.52
3	4	0.52
5	6	0.52
6	7	0.52
7	8	0.52