

# 提高配电系统韧性的遥控开关与传统开关的优化配置方法

孙诺陵, 赖素丹, 陈浩

国网福建省电力有限公司经济技术研究院多灾害地区配电网规划与运行控制技术实验室, 福建省福州市晋安区茶园路 68 号, 350011

## The Optimal Configuration Method of Remote Control Switch and Manual Switch to Improve the Resilience of Power Distribution System

Sun Nuoling, Lai Sudan, Chen Hao

Multi-disaster Area Distribution Network Planning and Operation Control Technology Laboratory, Power Economic Research Institute, Fujian Electric Power Company Limited, Fujian, China

**摘要:** 为快速恢复负荷供电, 增强配电系统的韧性, 通常考虑网络重构技术。传统开关 (Manual Switch, MSs) 的关闭状态无法快速改变, 系统故障发生后不久的恢复阶段, 其状态由防御阶段的状态决定, 而配备遥控开关 (Remote-Controlled-Switch, RCSs) 的配电系统, 其网络能够快速重新配置。考虑到这些因素, 本文提出提高配电系统韧性的遥控开关与传统开关的优化配置方法。为实现传统开关和遥控开关的有效分配, 本文综合考虑了通过 RCS 和 MS 进行防御阶段网络配置和基于 RCSs 的恢复阶段快速网络配置。将该方法应用于 IEEE 33 节点母线系统, 并验证了其有效性。

**关键词:** 韧性; 配电系统; 网络重构; 遥控开关; 传统开关

**ABSTRACT:** Network reconfiguration is often considered for fast load restoration to enhance distribution system resilience. For distribution systems equipped with remote-controlled switches (RCSs), the network could be reconfigured more fast. Nevertheless, when there is a manual switch (MS), its closed or open state cannot be changed quickly, and its state in the restoration stage shortly after faults is determined by state in the prevention stage. Given these facts, the coordinated allocation of RCSs and MSs for is considered for resilience enhancement in this paper. To make the allocation of RCSs and MSs more effective, the network configuration of the prevent stage through RCSs and MSs and the fast network configuration of the restoration stage based on RCSs are comprehensively considered. The proposed method is applied on the IEEE 33-bus system and its effectiveness is verified.

**KEY WORD:** resilience, distribution system, network reconfiguration, remote-controlled switch, manual switch

## 0 术语

指数和符号

$i$  母线

$l$  配电线路

$c$  故障场景

$\Omega^{\text{bus}}$  母线组

$\Omega^{\text{line}}$  配电线路组

$\Omega^{\text{snr}}$  故障场景集

$\Omega_l^{\text{bus}}$  线路  $l$  两端的总线组

$\Omega_l^{\text{line}}$  连接到总线  $i$  的线路组

参数和变量

$f_{l,c}$  二进制变量, 表示在情景  $c$  下线路  $l$  是否发生故障

$r_l / x_l$  阻力/反应

$p_c$  情景概率

$\omega_i$	载荷重量
$M$	大量
$N^{\text{bus}}$	母线数量
$N^{\text{RCS}} / N^{\text{MS}}$	最大遥控开关(RCS)/手动开关(MS)数量
$P_i^{\text{load}} / Q_i^{\text{load}}$	主动/被动负载
$P_i^{\text{fmax}} / Q_i^{\text{fmax}}$	主动/被动容量限制
$P_i^{\text{dmax}} / Q_i^{\text{dmax}}$	DG 的最大有功/无功功率输出
$U_i^{\text{max}} / U_i^{\text{min}}$	最大/最小电压幅值
$U^{\text{ref}}$	参考电压幅值
$s_{i,l}^{\text{RCS}} / s_{i,l}^{\text{MS}}$	表示线路 1 的 i 端是否安装了 RCS/MS 的二进制变量
$z_{i,l}^{\text{end}} / z_{i,l,c}^{\text{end}}$	二进制变量, 表示线路 1 的 i 端在防御/恢复阶段被关闭
$z_l^{\text{line}} / z_{l,c}^{\text{line}}$	表示在防御/恢复阶段是否关闭线路 1 的二进制变量
$z_{l,c}^{\text{temp}}$	二元变量和辅助变量
$o_{i,l}^{\text{end}}$	表示线路 1 的 i 端是否关闭的二进制变量
$\mu_{i,c}$	表示母线 i 在恢复阶段是否属于故障区的二进制变量
$\gamma_i / \gamma_{i,c}$	二进制变量, 表示母线 i 是否是防御/恢复阶段的根总线
$F_l / F_{l,c}$	在防御/恢复阶段流经线路 1 的虚拟电能
$P_i^{\text{dg}} / P_{i,c}^{\text{dg}}$	防御/恢复阶段的有功 DG 功率输出
$P_l^{\text{flow}} / P_{l,c}^{\text{flow}}$	防御/恢复阶段的有功功率流
$Q_i^{\text{dg}} / Q_{i,c}^{\text{dg}}$	防御/恢复阶段的无功 DG 功率输出
$Q_l^{\text{flow}} / Q_{l,c}^{\text{flow}}$	防御/恢复阶段的无功功率流

$U_i / U_{i,c}$	母线 i 在防御/恢复阶段 的电压幅值
$P_{i,c}^{\text{shed}} / Q_{i,c}^{\text{shed}}$	在防御/恢复阶段主动/反作用削减负荷
$R$	复原力等级

## 1 引言

近年来, 全球多地接连遭遇极端天气出现停电事故。例如, 2021 年美国德克萨斯州寒潮导致大面积停电, 2023 年极端高温引发越南电荒, 这些恶劣天气对电力系统造成严重损害。因此, 增强电力系统韧性至关重要<sup>[1]</sup>。

在提高配电系统韧性的优化配置多采用配电系统网络重构方法。在文献[2]中, 考虑采用事件前后网络重构增强配电系统的韧性; 文献[3]和[4]为了增强系统韧性, 将分布式电源小岛配置成分布式网络; 在这些研究中, DG 岛和微电网通过网络重新配置得到了优化配置, 其中关键负载得以恢复。

配电系统网络重构方法通常采用两种分断开关: 遥控开关 (RCS) 和传统开关 (MS), 前者可远程操作<sup>[5]</sup>, 后者只能手动操作, 同时 RCS 的网络重构速度高于 MS。因此, 在配电系统中安装 RCS 可以增强系统韧性, 缩短负荷恢复时间。然而, 考虑到经济性, 无法在所有的配电系统中安装 RCS。因此, 如何最优分配 RCS 成为研究热点<sup>[6]-[9]</sup>。

上述传统方法主要关注配电系统的事后网络重构问题, 在预防阶段的网络重构通常被忽略。若配电路径只配备 MS, 当遭遇极端事件时, 配电路径的闭合状态不能立即改变, 系统恢复阶段的状态取决于预防阶段状态。

因此, 预防阶段和恢复阶段的网络重新配置都会在很大程度上影响极端事件后的恢复效果。基于此, 文献[10]提出了基于配电系统预防阶段和恢复阶段网络重构的 RCS 分配方法。然而, 在 [10]中提及, 对于所有未配备 RCS 的配电路径上都安装 MS 是不切实际的, 应该考虑如何实现 MS 的优化分配。

为解决这一问题, 本文考虑了如何协调分配

RCS 和 MS 以增强配电系统的韧性。在预防阶段，网络拓扑结构将通过 RCS 和 MS 进行重新配置使得 RCS 和 MS 的分配更加有效，以应对即将发生的极端事件；在恢复阶段，网络拓扑结构将通过 RCS 进行重新配置，以隔离故障并恢复负荷。

本文安排如下，第 2 节阐述了模型设计；第 3 节进行案例研究分析，验证上述方法的有效性；第 4 节是结论部分。

## 2 模型设计

### 2.1 模型框架

如图 1 所示，是 RCS 与 MS 协调分配模型的框架。提出的模型包括 4 个部分，即资源分配约束、防御阶段约束、恢复阶段约束和目标。详情分别见 2.1-2.5 节。

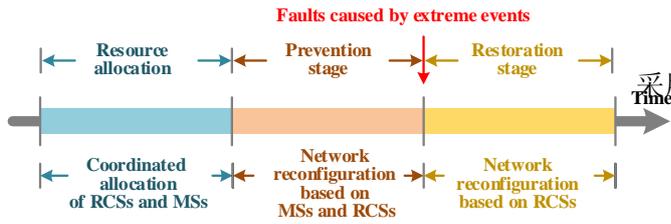


图 1 模型框架说明

### 2.2 资源分配限制

RCS 和 MS 的候选分配位置位于分配线的两端。由于投资限制，RCS 和 MS 的总数有限，分别描述为(1)和(2)。

$$\sum_{\forall i \in \Omega_{i,l}^{bus}, l \in \Omega_l^{line}} s_{i,l}^{rcs} \leq N^{rcs} \quad (1)$$

$$\sum_{\forall i \in \Omega_{i,l}^{bus}, l \in \Omega_l^{line}} s_{i,l}^{ms} \leq N^{ms} \quad (2)$$

### 2.3 预防阶段的制约因素

在这一阶段，将重新配置网络拓扑结构，使配电系统为即将发生的极端事件做好准备。

#### (1) 拓扑限制

在防御阶段，RCS 和 MS 均可用于网络重构。相应的约束条件如(3)和(4)所示。

$$z_{i,l}^{end} \geq o_{i,l}^{end} - s_{i,l}^{rcs} - s_{i,l}^{ms}, \forall i \in \Omega_l^{bus}, l \in \Omega^{line} \quad (3)$$

$$z_{i,l}^{end} \leq o_{i,l}^{end} + s_{i,l}^{rcs} + s_{i,l}^{ms}, \forall i \in \Omega_l^{bus}, l \in \Omega^{line} \quad (4)$$

其中，(3)和(4)表示只有安装了 RCS 和 MS 的配电线路才能处于正常运行状态。

配电线路得封闭还是开放取决于其两端的的状态，如 (5) 所示。

$$z_l^{line} = z_{i,l}^{end} z_{j,l}^{end}, \forall i, j \in \Omega_l^{bus}, \forall l \in \Omega^{line} \quad (5)$$

约束条件 (5) 可以线性化，如 (6)-(8) 所示。

$$z_l^{line} \leq z_{i,l}^{end}, \forall i, j \in \Omega_l^{bus}, \forall l \in \Omega^{line} \quad (6)$$

$$z_l^{line} \leq z_{j,l}^{end}, \forall i, j \in \Omega_l^{bus}, \forall l \in \Omega^{line} \quad (7)$$

$$z_l^{line} \geq z_{i,l}^{end} + z_{j,l}^{end} - 1, \forall i, j \in \Omega_l^{bus}, \forall l \in \Omega^{line} \quad (8)$$

采用 (9)-(11) 约束条件使网络拓扑呈放射状。

$$1 - M\gamma_i \leq \sum_{l \in \Omega_l^{line}} F_l \leq 1 + M\gamma_i, \forall i \in \Omega^{bus} \quad (9)$$

$$-Mz_l^{line} \leq F_l \leq Mz_l^{line}, l \in \Omega^{line} \quad (10)$$

$$\sum_{l \in \Omega^{line}} z_l^{line} = N^{bus} - \sum_{i \in \Omega^{bus}} \gamma_i \quad (11)$$

#### (2) 功率流和系统安全限制

相应的约束条件为 (12)-(20)。

$$P_i^{load} - P_i^{dg} = \sum_{l \in \Omega_l^{line}} P_l^{flow}, \forall i \in \Omega^{bus} \quad (12)$$

$$Q_i^{load} - Q_i^{dg} = \sum_{l \in \Omega_l^{line}} Q_l^{flow}, \forall i \in \Omega^{bus} \quad (13)$$

$$U_i - U_j - (r_l P_l^{flow} + x_l Q_l^{flow}) / U^{ref} \geq -M(1 - z_l^{line}), \quad \forall i, j \in \Omega_l^{bus}, l \in \Omega^{line} \quad (14)$$

$$U_i - U_j - (r_l P_l^{flow} + x_l Q_l^{flow}) / U^{ref} \leq M(1 - z_l^{line}), \quad \forall i, j \in \Omega_l^{bus}, l \in \Omega^{line} \quad (15)$$

$$-z_l^{line} P_l^{fmax} \leq P_l^{flow} \leq z_l^{line} P_l^{fmax}, l \in \Omega^{line} \quad (16)$$

$$-z_l^{\text{line}} Q_l^{\text{fmax}} \leq Q_l^{\text{flow}} \leq z_l^{\text{line}} Q_l^{\text{fmax}}, l \in \Omega^{\text{line}} \quad (17)$$

$$U_i^{\text{min}} \leq U_i \leq U_i^{\text{max}}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (18)$$

$$0 \leq P_i^{\text{dg}} \leq P_i^{\text{dmax}}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (19)$$

$$0 \leq Q_i^{\text{dg}} \leq Q_i^{\text{dmax}}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (20)$$

其中, (12)和(13)为功率平衡。约束条件(14)和(15)是 DistFlow 方程 **错误!未找到引用源。**。约束条件(16)和(17)表明, 如果配电线路封闭, 则容量应该受到限制。约束条件(18)是电压约束条件。约束条件(19)和(20)限制了 DG 的有功和无功输出。

## 2.4 修复阶段的制约因素

在此阶段, 对于每种故障情况 (即  $\forall c \in \Omega^n$ ), 都要满足相应的约束条件 (即 (21)~(43))。

### (1) 拓扑限制

如 (21) 所示, 极端事件发生后, 只有 RCS 可以立即进行网络重组切换。

$$z_{i,l}^{\text{end}} - s_{i,l}^{\text{rcs}} \leq z_{i,l,c}^{\text{end}} \leq z_{i,l}^{\text{end}} + s_{i,l}^{\text{rcs}}, \forall i \in \Omega_l^{\text{bus}}, l \in \Omega^{\text{line}} \quad (21)$$

在事件后阶段, 配电线路是闭合还是断开, 不仅取决于其两端的闭合或断开状态, 还取决于是否发生故障, 如 (22) 所示。同样, (22) 也可以线性化为 (23) - (26)。

$$z_{l,c}^{\text{line}} = z_{i,l,c}^{\text{end}} z_{j,l,c}^{\text{end}} (1 - f_{l,c}), \forall i, j \in \Omega_l^{\text{bus}}, \forall l \in \Omega^{\text{line}} \quad (22)$$

$$z_{l,c}^{\text{temp}} \leq z_{i,l,c}^{\text{end}}, \forall i, j \in \Omega_l^{\text{bus}}, \forall l \in \Omega^{\text{line}} \quad (23)$$

$$z_{l,c}^{\text{temp}} \leq z_{j,l,c}^{\text{end}}, \forall i, j \in \Omega_l^{\text{bus}}, \forall l \in \Omega^{\text{line}} \quad (24)$$

$$z_{l,c}^{\text{temp}} \geq z_{i,l,c}^{\text{end}} + z_{j,l,c}^{\text{end}} - 1, \forall i, j \in \Omega_l^{\text{bus}}, \forall l \in \Omega^{\text{line}} \quad (25)$$

$$z_{l,c}^{\text{line}} = z_{l,c}^{\text{temp}} (1 - f_{l,c}), \forall l \in \Omega^{\text{line}} \quad (26)$$

为保证网络拓扑结构仍呈放射状, 应满足

(27)-(29)项。

$$1 - M \gamma_{i,c} \leq \sum_{l \in \Omega_l^{\text{line}}} F_{l,c} \leq 1 + M \gamma_{i,c}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (27)$$

$$-M z_{l,c}^{\text{line}} \leq F_{l,c} \leq M z_{l,c}^{\text{line}}, l \in \Omega^{\text{line}} \quad (28)$$

$$\sum_{l \in \Omega^{\text{line}}} z_{l,c}^{\text{line}} = N^{\text{bus}} - \sum_{i \in \Omega^{\text{bus}}} \gamma_{i,c} \quad (29)$$

### (2) 断裂带限制因素

基于故障状态传播模型 **错误!未找到引用源。** 故障区约束条件为 (30)-(32)

$$\mu_{i,c} \geq f_{l,c} z_{i,l,c}^{\text{end}}, \forall i, j \in \Omega_l^{\text{bus}}, \forall l \in \Omega^{\text{line}} \quad (30)$$

$$\mu_{i,c} + z_{l,c}^{\text{line}} - 1 \leq \mu_{j,c}, \forall i, j \in \Omega_l^{\text{bus}}, \forall l \in \Omega^{\text{line}} \quad (31)$$

$$\mu_{j,c} + z_{l,c}^{\text{line}} - 1 \leq \mu_{i,c}, \forall i, j \in \Omega_l^{\text{bus}}, \forall l \in \Omega^{\text{line}} \quad (32)$$

其中, (30)式为如果一条配电线路关闭并发生故障, 则整条配电线路都将属于故障区。约束条件(31)和(32)表明, 如果一条线路关闭, 那么它的两条母线将同时属于或不属于故障区。

### (3) 功率流和系统安全限制

恢复阶段的功率流和系统安全约束条件为 (33)-(43) 式。

$$P_i^{\text{load}} - P_{i,c}^{\text{dg}} - P_{i,c}^{\text{shed}} = \sum_{l \in \Omega_l^{\text{line}}} P_{l,c}^{\text{flow}}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (33)$$

$$Q_i^{\text{load}} - Q_{i,c}^{\text{dg}} - Q_{i,c}^{\text{shed}} = \sum_{l \in \Omega_l^{\text{line}}} Q_{l,c}^{\text{flow}}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (34)$$

$$U_{i,c} - U_{j,c} - (r_l P_{l,c}^{\text{flow}} + x_l Q_{l,c}^{\text{flow}}) / U^{\text{ref}} \geq -M (1 - z_{l,c}^{\text{line}}), \quad \forall i, j \in \Omega_l^{\text{bus}}, l \in \Omega^{\text{line}} \quad (35)$$

$$U_{i,c} - U_{j,c} - (r_l P_{l,c}^{\text{flow}} + x_l Q_{l,c}^{\text{flow}}) / U^{\text{ref}} \leq M (1 - z_{l,c}^{\text{line}}), \quad \forall i, j \in \Omega_l^{\text{bus}}, l \in \Omega^{\text{line}} \quad (36)$$

$$-z_{l,c}^{\text{line}} P_l^{\text{fmax}} \leq P_{l,c}^{\text{flow}} \leq z_{l,c}^{\text{line}} P_l^{\text{fmax}}, l \in \Omega^{\text{line}} \quad (37)$$

$$-z_{l,c}^{\text{line}} Q_l^{\text{fmax}} \leq Q_{l,c}^{\text{flow}} \leq z_{l,c}^{\text{line}} Q_l^{\text{fmax}}, l \in \Omega^{\text{line}} \quad (38)$$

$$U_i^{\text{min}} \leq U_{i,c} \leq U_i^{\text{max}}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (39)$$

$$0 \leq P_{i,c}^{\text{dg}} \leq (1 - \mu_{i,c}) P_i^{\text{dmax}}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (40)$$

$$0 \leq Q_{i,c}^{\text{dg}} \leq (1 - \mu_{i,c}) Q_i^{\text{dmax}}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (41)$$

$$\mu_{i,c} P_i^{\text{load}} \leq P_{i,c}^{\text{shed}} \leq P_i^{\text{load}}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (42)$$

$$\mu_{i,c} Q_i^{\text{load}} \leq Q_{i,c}^{\text{shed}} \leq Q_i^{\text{load}}, \forall i \in \Omega^{\text{bus}} \quad (43)$$

其中, (33)和(34)表示电力平衡限制。与(12)和(13)不同的是,在事件后阶段考虑了削减负荷。限制条件(35)~(39)与(14)~(18)类似。约束条件(40)和(41)意味着,如果某个发电机组位于故障区,它将被切断。约束条件(42)和(43)表明故障区将停电。

## 2.5 目标

为了恢复更多的负载,我们采用了以下目标。

$$\min \sum_{c \in \Omega^{\text{sc}}} (p_c \sum_{i \in \Omega^{\text{bus}}} \omega_i P_{i,c}^{\text{shed}}) \quad (44)$$

极端事件发生后,预期供应的有功负荷百分比可以用来表示配电系统的恢复能力,如(45)所示。

$$R = \left[ 1 - \frac{\sum_{c \in \Omega^{\text{sc}}} (p_c \sum_{i \in \Omega^{\text{bus}}} \omega_i P_{i,c}^{\text{shed}})}{\sum_{i \in \Omega^{\text{bus}}} \omega_i P_i^{\text{load}}} \right] \times 100\% \quad (45)$$

所提出的模型是一个混合整数线性规划(MILP)模型。商用求解器(如Gurobi、Cplex和Mosek)可轻松求解MILP模型。

## 3 案例研究

本节将展示基于IEEE 33总线系统的案例研究。如图2所示。共有37条配电线路。配电线路的容量限制均为5 MVA。相对应有74个RCS和MS分配的候选位置。在一条连接线(即L33-L37)上至少有一个RCS或MS。系

统中安装了5台发电机组,每台发电机组的功率为0.5MVA。3号、5号、11号、15号、19号、21号、26号、28号和29号母线的权重设为3,其他母线的权重设为1。RCS和MS的总数分别为8和16。

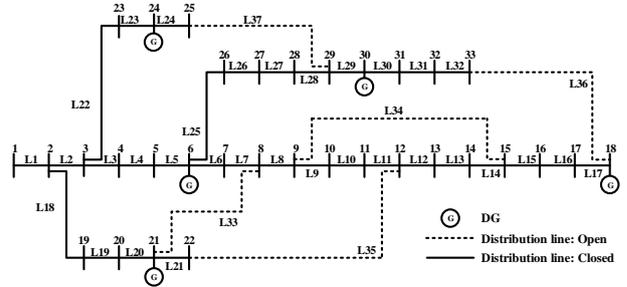


图2 IEEE 33 母线系统

如表1所列,随机生成10种故障情况。每种情况的概率为0.1。

表1 10种不同的故障情况

故障场景编号	故障线路
第1号	L4、L5、L23、L31
第2号	L2、L11、L25、L26
第3号	L10、L18、L19、L24
第4号	L6、L21、L23、L28
第5号	L18、L24、L30、L32
第6号	L15、L24、L26、L30
第7号	L5、L11、L19、L24
第8号	L6、L11、L17、L19
第9号	L1、L16、L25、L29
第10号	L12、L15、L27、L32

防御阶段的最佳RCS和MS分配结果以及网络拓扑结构如图3所示。在极端事件发生前形成3个部分,以应对极端天气。计算时间为6430秒,R值为73.09%。

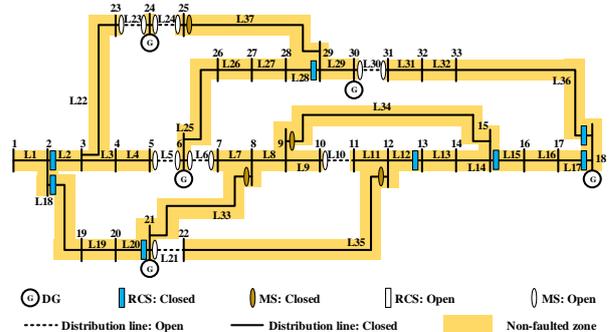


图3 区域通信中心和MS的分配以及活动前的网络拓扑结构

以方案 8 为例,恢复阶段的网络拓扑结构如图 4 所示。在情景 8 中,配电线路 L6、L11、L17 和 L19 发生故障。为隔离故障,配电线路 L12、L15、L17、L18 和 L20 上的可控硅被打开,这有利于服务恢复。方案 8 的供电负荷率为 77.79%。

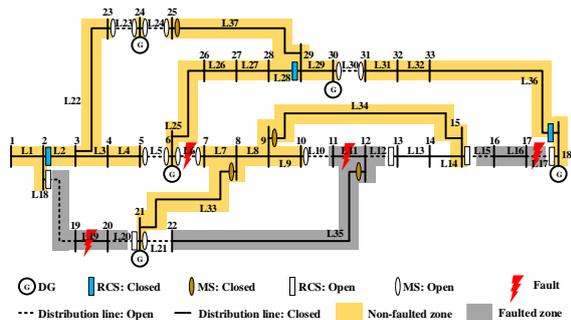


图 4 区域通信中心和 MS 的分配以及活动前的网络拓扑结构

上述结果说明了拟议方法的详细过程,并验证了其有效性。为了进一步说明所提方法的优越性,我们设计了案例 A 和案例 B 并进行了比较。

情况 A:考虑到预防阶段和恢复阶段的网络重新配置,分配 RCS 和 MS;

情况 B: RCS 和 MS 的分配只考虑预防阶段的网络重新配置。

为了确保公平性,根据本文提出的防御阶段和恢复阶段网络重构过程,比较了两种情况下获得的分配方案的弹性水平。表 II 显示的结果可以看出,综合考虑预防阶段通过 RCS 和 MS 的网络配置,以及恢复阶段基于 RCS 的快速网络配置,可以提高配电系统的弹性。换句话说,基于所提出的方法,RCS 和 MS 的配置对提高系统韧性更为有效。

表 2 案例 A 和案例 B 的结果

案例	复原力等级 ( $R$ )
案例 A	73.09%
案例 B	54.80%

## 4 结论

本文提出并验证了 RCS 和 MS 的协调分配方法。结果表明,与传统方法相比,本文所提出的 RCS 和 MS 的分配对增强系统韧性更有效。

也就是说,通过综合考虑基于 RCS 和 MS 的预防阶段的网络配置和基于 RCS 的恢复阶段快速网络配置,可以提高配电系统的恢复能力。

## 参 考 文 献

- [1] Z. Bie, Y. Lin, G. Li, and F. Li, "Battling the extreme: A study on the power system resilience," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp.
- [2] Z. Wang and J. Wang, "Self-healing resilient distribution systems based on sectionalization into microgrids," *IEEE Trans. 电力系统*, 第 30 卷, 第 6 期, 第 3139-3149 页, 2015 年 11 月。
- [3] Y. Lin and Z. Bie, "Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding," *Appl. Energy*, vol. 210, pp.
- [4] C. Chen, J. Wang, F. Qiu, and D. Zhao, "Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters," *IEEE Trans. 智能电网*, 第 7 卷 第 2 期, 第 958-966 页, 2016 年 3 月。
- [5] P. M. S. Carvalho, L. A. F. M. Ferreira, and A. J. C. da Silva, "A decomposition approach to optimal remote controlled switch allocation in distribution systems," *IEEE Trans.* 20, no. 2, pp.
- [6] S. Lei, J. Wang, and Y. Hou, "Remote-controlled switch allocation enabling prompt restoration of distribution systems," *IEEE Trans.* 33, no. 3, 第 3129-3142 页, 2018 年 5 月。
- [7] M. Izadi and A. Safdarian, "Financial risk constrained remote controlled switch deployment in distribution networks", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 7, pp.
- [8] M. Farajollahi, M. Fotuhi-Firuzabad, and A. Safdarian, "Simultaneous placement of fault indicator and sectionalizing switch in distribution networks," *IEEE Tran. 智能电网*, 第 10 卷, 第 2 期, 第 2278-2287 页, 2019 年 3 月。
- [9] M. Zare-Bahramabadi, A. Abbaspour, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Moeini-Aghtaie, "Resilience-based framework for switch placement problem in power distribution systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 5, pp.
- [10] J. Liu, Y. Yu, and C. Qin, "Unified two-stage reconfiguration method for resilience enhancement of distribution systems," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 9, pp.
- [11] T. Ding, Y. Lin, G. Li, and Z. Bie, "A new model for resilient distribution systems by microgrids formation," *IEEE Trans.* 32, no. 5, pp.
- [12] J. Liu, C. Qin, and Y. Yu, "Enhancing distribution system resilience with proactive islanding and RCS-based fast fault isolation and service restoration," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 3, pp.
- [13] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Trans.* 4, no. 2, pp.



**作者简介:**

孙锴稜 (1997), 女, 福建福州, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研究领域为配电网防灾规划。

赖素丹 (1997), 女, 福建龙岩, 硕士研究生, 助理工程师, 主要研

究领域为配电网规划与运行。

陈浩 (1993), 男, 福建福州, 硕士研究生, 工程师, 主要研究领域为配电网防灾规划。