

# 面向高可靠性的钻石型配电网及其派生结构分析

张铭泽<sup>1</sup>, 华晟辉<sup>1</sup>, 李奥<sup>2</sup>, 吴志<sup>2</sup>, 陆于平<sup>2</sup>

(1. 国网上海市经济技术研究院, 上海 200000; 2. 东南大学电气工程学院, 南京 210000)

**摘要:**“双碳”背景下,新型配电系统将向着适应高比例可再生能源接入的方向发展。为满足新型配电系统高可靠性、高供电能力的要求,上海市根据自身配电网建设提出了钻石型配电网,然而当前针对该网架的研究较少。本文首先介绍了钻石型配电网的结构,并在此基础上提出了双工—钻石型配电网,之后根据钻石型配电网特殊结构生成故障隔离、恢复策略,建立了考虑高比例可再生能源接入的可靠性评估算法,建立了含分布式电源的配电系统分时段最大供电能力模型。最后通过具体算例,分析了大规模可再生能源接入的影响,比较了开关站单环网、钻石型配电网、双工型配电网在可靠性、供电能力上的差异,验证了钻石型配电网及本文提出的双工型配电网的优越性。

**关键词:**钻石型配电网; 可靠性; 最大供电能力; 可再生能源

## Analysis of Diamond Distribution Network and its Derived Structure with High-reliability

ZHANG Mingze<sup>1</sup>, HUA Shenghui<sup>1</sup>, LI Ao<sup>2</sup>, WU Zhi<sup>2</sup>, LU Yuping<sup>2</sup>

(1. State Grid Shanghai Economic and Technological Research Institute, Shanghai 200000, China;

2. Southeast University, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** Under the "dual carbon" context, new distribution networks will be developed in the direction of adapting to the high proportion of renewable energy sources (RES). For meeting the requirements of high reliability and total power supply capacity (TSC) of the new distribution system, the diamond-shaped distribution network (DDN) is proposed in Shanghai based on its own distribution network construction. However, there are limited studies on this network structure. In this paper, the structure of the DDN is introduced firstly and, on this basis, a duplex-diamond-shaped distribution network is proposed. Then, the fault isolation and recovery strategy is generated in accordance with the special structure of the DDN, the reliability assessment algorithm that considers the high proportion of RES is set up and a TSC model of the distribution system with RES on a time-of-day basis is proposed. Finally, the influence of access of large scale renewable energy is analyzed. The reliability and TSC differences among the switch station single-loop network, DDN, and duplex-diamond-shaped distribution network through specific examples is compared through specific calculation example. The superiority of the diamond distribution and the proposed duplex distribution network is verified.

**Keywords:** diamond distribution network; reliability; total power supply capacity; renewable generation

## 0 引言

电能供应关系经济发展、社会民生,配电系统作为电能供应的关键环节,其网架结构受技术发展、政策市场等多重因素的共同影响<sup>[1]</sup>。城市配电网往往负荷密度高,可靠性要求高,部分城市现已形成了独特的配电网网架形态。如新加坡采用

花瓣型接线方式<sup>[2]</sup>,正常状态闭环运行,但调整站间负荷需打破闭环运行<sup>[4-5]</sup>,东京采用多分段多联络接线方式,可靠性较高<sup>[5]</sup>,法国巴黎配电系统采用环网的接线方式,发生  $N-2$  故障后可快速恢复供电<sup>[6]</sup>。国内城市配电网结构一般为单环网、双环网、 $N$  供 1 备,部分城市配电网仍面临一些问题<sup>[7]</sup>,如故障影响范围大,供电恢复时间长,且灵活性难以满足分布

收稿日期:2023-05-15

基金项目:国网上海电力公司科技项目(52090R21N004)。

式能源的接入需求。近期上海市根据以高可靠性为目标,提出钻石型配电网的结构<sup>[8]</sup>。在建设新型电力系统的背景下,为支撑钻石型配电网的大规模应用,本文首先提出了钻石型配电网的派生结构,并从可靠性、供电能力两个方面对钻石型配电网的开展研究。

随着“双碳”目标的提出,大规模分布式电源的接入将成为配电系统的发展趋势<sup>[9-10]</sup>。然而分布式电源的随机性特点,会给配电系统的安全稳定运行带来挑战<sup>[11]</sup>,也将使配电系统可靠性评估更为复杂。目前关于配电系统可靠性评估主要分为两种研究路径,解析法<sup>[12-14]</sup>和模拟法<sup>[15-17]</sup>。解析法模型精度高,计算结果准确,但随着网络规模增大,计算效率下降,同时难以计算带有随机性元件的系统。模拟法通过抽样得到系统状态,进而计算可靠性指标,适用于大型系统和随机元件,但精度不及解析法。综上,在本文研究的高比例可再生能源接入的配电系统可靠性分析上,更适合采用基于模拟法的可靠性评估算法。

最大供电能力(total powersupply capability, TSC)是配电网的一个重要指标,反映了配电网在满足 $N-1$ 安全准则条件下所能供给最大负荷的能力。文献[18]类比输电网最早提出了配电网的TSC模型。文献[19]提出了TSC判定定理并证明完善了TSC的理论体系。文献[20]提出了考虑网络重构和不同用户类型的TSC评估模型,并通过线性规划的方法求解。文献[21]基于重复潮流法求取了日内不同时段最大供电能力。当前关于TSC的研究均考虑了 $N-1$ 安全准则,然而对于大规模新能源接入下配电网的短时供电能力研究较少。考虑到分布式电源出力的时变性,本文建立的TSC模型将时间细分至小时。

本文的主要内容如下,首先介绍了钻石型配电网的结构,并提出其派生结构“双工型配电网”;根据钻石型配电网特殊结构生成故障隔离、恢复策略,建立了可靠性评估算法;建立了含分布式电源的配电系统分时段TSC模型;最后结合具体算例,分析了大规模可再生能源接入的影响,分析了不同网架结构的差异,验证了本文提出的双工型配电网的优越性。

## 1 钻石型配电网及其派生结构

钻石型配电网是一种新型配电系统结构<sup>[7]</sup>,见图1。钻石型配电网是主次分层的配电网,包括主干网和次干网,其中K为开关站,P为环网站,S为

上级变电站,U为用户。

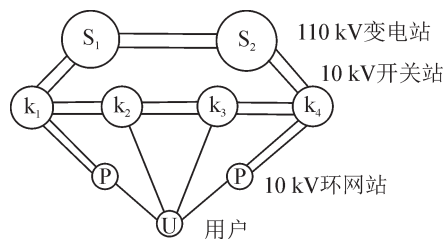


图1 钻石型配电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of diamond distribution network

### 1.1 钻石型配电网结构

钻石型配电网主干网串接开关站和两侧上级变电站,采用双环网连接,全部进出线配置断路器,配置自动化设备,闭环连接开环运行,根据不同的负荷情况,每条主干线路串接有4-6座开关站形成一组双环网。连接两侧变电站的方式可满足检修情况下的 $N-1$ 校验,降低计划检修时间,减少用户停电时间,提升可靠性。次干网串接环网站与开关站,以环网站为节点,可形成单环网或双环网连接,并配置有配电系统自动化装置,环网站进线可来自同一开关站的不同母线,或来自不同开关站的母线。对于不同等级的负荷,可选择直接接入开关站,或接入环网站。对于不同容量的分布式电源及储能,可接入环网站或开关站。

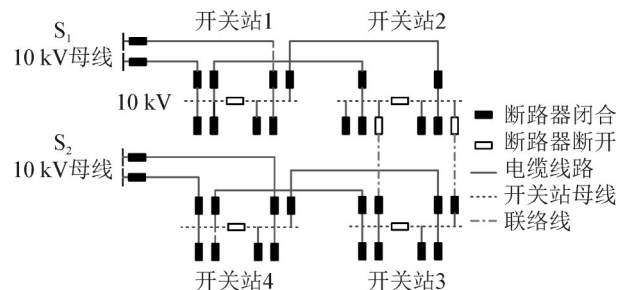


图2 钻石型配电网主干网接线图

Fig. 2 Wiring diagram of the main network of diamond distribution network

钻石型配电网主干网具体接线见图2。开关站包括两段母线,通过联络开关相连。图中开关站1-4分别对应图1中的 $K_1-K_4$ ,1号变电站和2号变电站分别对应图1中的 $S_1$ 与 $S_2$ 。

### 1.2 钻石型配电网的特点

作为一种新提出的配电网网架结构,钻石型配电网特点如下:

1) 钻石型配电网是主次分层的配电网,主干网以开关站为核心,次干网以环网站为核心,不同层级接线模式不同,设备选型不同;

2) 钻石型配电网主干网开关站进出线均配置

断路器,故障发生后可迅速隔离故障区域,降低故障对其他区域的影响;

3) 钻石型配电网采用双侧电源供电,可通过改变串接开关站数量平衡变电站间负荷,在不同变电站间转移负荷;

4) 钻石型配电网相比单环网、双环网等接线模式,钻石型配电网可靠性较高。

### 1.3 钻石型配电网的派生结构

本节提出一种钻石型配电网的改进结构,双工—钻石型配电网,后文简称为双工型配电网。该网架在钻石型配电网的基础上,在两条主干线路之间增加两段联络线,组成两个“工”字结构。提出该网架的原因是考虑到变压器  $N-1$  故障时,为满足 100% 转供要求,钻石型配电网馈线负载率不能超过 50%,其 TSC 仍有提升空间。

钻石型与双工型网架对比图见图 3,上方为钻石型配电网主干网,对应图 1 中钻石型配电网的上半部分。两座 110 kV 变电站之间串接 4 个开关站,开关站 2、3 及开关站 6、7 之间为联络线。如图 3 下半部分所示为双工型配电网,在钻石型配电网的基础上,增加开关站 1、5 及开关站 4、8 之间的联络线,增强两条钻石型配电网线路之间的联络。

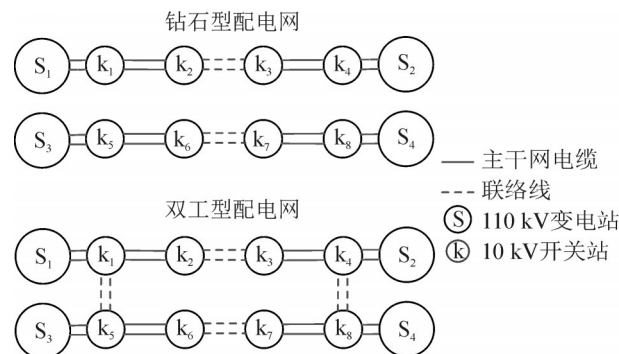


图3 钻石型与双工型网架对比图  
Fig. 3 Comparison diagram of diamond and duplex distribution network

双工型配电网中发生  $N-1$  故障时,由于增加了联络线,负荷转移能力进一步提升。 $S_1$  发生  $N-1$  故障时, $K_1$  和  $K_2$  的负荷仅能通过联络线转移至  $S_2$ 。采用双工型接线后, $K_1$  的负荷可通过联络线转移至  $S_3$ , $K_2$  的负荷可通过联络线转移至  $S_2$ ,降低联络线的传输功率,增强转供能力。

## 2 可靠性分析方法

大规模可再生能源的接入将使配电系统源荷界限模糊,使可靠性评估更加复杂<sup>[22-29]</sup>。可靠性分析除了考虑网络重构,还需要考虑到故障时分布式

电源的出力情况。本文研究的钻石型配电网是针对城市配电网提出的,而城市中较难配置大规模风力发电,故本文考虑的可再生能源为光伏,同时为平滑输出功率,配置有一定的储能。

本节基于序贯蒙特卡洛模拟建立钻石型配电网可靠性评估方法。首先,根据钻石型配电网的特殊网架结构,生成故障恢复隔离恢复策略。之后模拟元件及系统运行状态,分析故障的后果影响,计算系统可靠性指标。

### 2.1 故障定位隔离恢复策略

钻石型配电网主干网开关站全部进出线均配置断路器,故障发生后可有效隔离故障。钻石型配电网故障隔离见图 4。

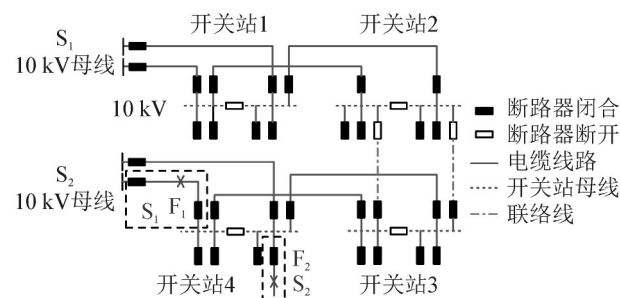


图4 钻石型配电网故障隔离示意图  
Fig. 4 Fault isolation schematic diagram of diamond distribution network

若  $F_1$  处发生故障,两端断路器动作隔离故障线路,开关站 4 左侧母线可通过转供恢复供电,故障区域被限制在  $S_1$  虚线框内。若次干网  $S_2$  发生故障,开关站出线断路器动作,故障区域被限制在  $S_2$  虚线框内,故障区等待元件修复后可恢复供电,不影响开关站 4 及其他区域正常供电。故障影响区的用户在恢复供电期间,故障区将孤岛运行维持部分用电需求。

为得到故障对系统运行状态的影响,考虑  $K$  型站母线,输电线路、配电变压器元件的故障状态,根据每个元件发生故障后对负荷点的影响生成故障后果分析矩阵如式(1)所示,其中  $m$  为元件数, $n$  为负荷点数, $a_{ij}$  表示第  $i$  个元件故障后对第  $j$  个负荷点的影响,若  $a_{ij}=0$  表示无影响,若  $a_{ij}=1$  表示有影响且为永久性故障不可转供,需等待至元件修复恢复供电,若  $a_{ij}=2$  表示有影响但可转供。

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (1)$$

### 2.2 故障影响区孤岛运行过程

受影响的负荷点可根据上述故障后果分析矩

阵得到,无论是负荷转供或者修复故障均需要一定的时间。此期间内负荷点将充分利用分布式资源,孤岛运行维持供电,直至恢复正常运行。具体孤岛运行过程如下:

1)初始化,令孤岛运行时间  $t_s = 0$ ,得到上级电网故障发生时刻  $k$  由上级电网故障修复时间得到孤岛运行最大时间  $t_{s,max}$ 。

2)读取时刻  $k$  光伏输出功率  $P_{pv}^k$ ,负荷需求  $P_L^k$ ,储能剩余电量  $SOC^k$ 。

3)判断若  $P_{pv}^k > P_L^k$ ,此时储能的充电功率为  $P_{charge} = P_{pv}^k - P_L^k$ ,储能剩余电量为  $SOC^{k+1} = SOC^k + P_{charge} t$ 。若  $P_{pv}^k < P_L^k$ ,计算此时微电网最大出力  $P_m^k = P_{pv}^k + P_{discharge}$ ,若  $P_m^k > P_L^k$ ,  $P_{loss} = 0$ ;若  $P_m^k < P_L^k$ ,负荷点损失功率  $P_{loss} = P_L^k - P_m^k$ 。

4)计算负荷点切除的用户数  $N_d^i = (P_{loss}/P_L^k) \cdot N_i$ ,其中  $N_i$  为负荷点  $i$  的用户数,用户被切除后本次孤岛运行用户将不再接入电网,计算负荷点用户平均停电时间  $t_e = t_e + N_d^i t$ 。

5)  $k = k + 1$ ,  $t_s = t_s + 1$ 。

6)若  $t_s \geq t_{s,max}$ ,退出孤岛运行,统计负荷点用户平均停电时间  $t_e$ ,负荷点平均停电次数  $n_e = N_{d,max}^i / N^i$ ,  $N_i$  为负荷点  $i$  的用户数,  $N_{d,max}^i$  为最大切除用户数,否则返回第二步继续模拟计算。

### 2.3 钻石型配电网可靠性分析方法

考虑到钻石型配电网网架结构灵活多变,分布式光储出力具有随机性,为实时模拟系统运行状态以及分布式光储出力带来的影响,本节基于序贯蒙特卡洛模拟提出可靠性评估算法,同时运用故障后果分析矩阵,在保持一定的精度下加快计算。在此假设系统中所有元件都是可修复的;元件故障后,负荷点恢复供电可通过转供或修复故障元件;同时不考虑保护设备的误动拒动。元件无故障运行时间为  $TTF$ ,元件修复时间  $TTR$  抽样公式为

$$TTF = -\frac{1}{\lambda} \ln(R_1) \quad (2)$$

$$TTR = -\frac{1}{\mu} \ln(R_2) \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为元件的故障率;  $\mu$  为元件的修复率;  $R_1$  与  $R_2$  为 0 与 1 之间的随机数。

对配电网中每个元件的  $TTF$  和  $TTR$  分别交替抽样,可得到元件状态循环过程,进而获得整个系统状态随时间的变化。可靠性评估算法流程图见图 5。

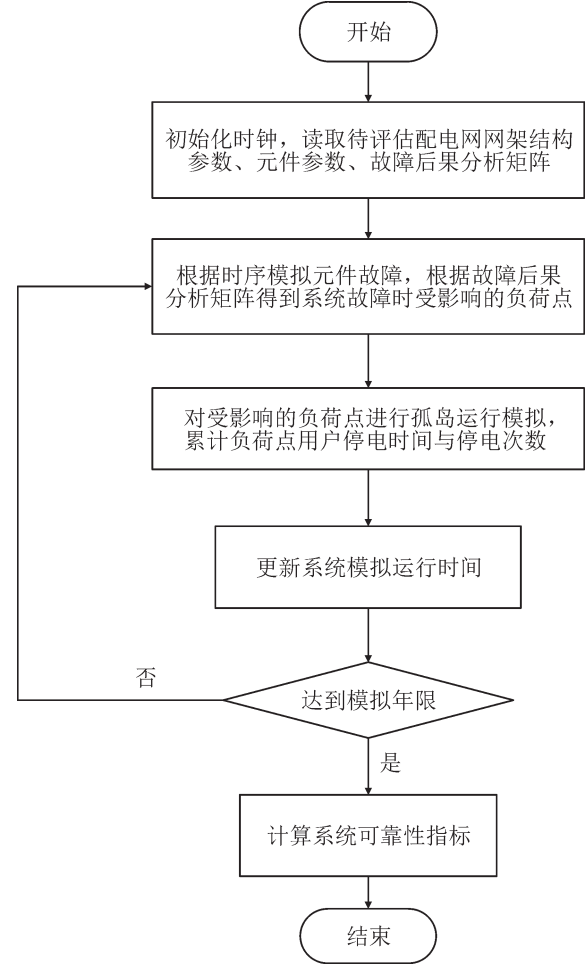


图5 可靠性评估流程图  
Fig. 5 Flow chart of reliability assessment

## 3 最大供电能力分析

考虑到分布式电源出力的时变性和配电网安全运行的要求,本文的 TSC 定义为考虑变压器及馈线的  $N-1$ ,在不同时段区域配电网通过调用灵活性资源、网络重构所能够承载的最大负荷。本节建立的 TSC 模型基于最优潮流模型,以每小时区域内供电能力最大为目标,考虑节点功率平衡约束、线路压降约束、支路功率平衡约束、线路二阶锥约束等约束。

### 3.1 目标函数

TSC 计算模型的目标函数如式(4)所示,表示时段  $t$  第  $f$  次  $N-1$  校验时网络能够承载的最大负荷。

$$\max E_{\max,f,t} = \sum_{i \in N_i} \alpha_i P_{\max,i,f,t} \quad (4)$$

式中:  $E_{\max,f,t}$  为该区域内时段  $t$  的最大供电能力;  $P_{\max,i,f,t}$  为节点  $i$  进行第  $f$  次  $N-1$  校验时段  $t$  的最大供电能力;  $\alpha_i$  为该时段的负荷放大倍数;  $N_i$  为负荷

点集合,  $N_f$  为  $N-1$  场景的集合。式(5)表示区域的最大供电能力为所有  $N-1$  场景下节点区域最大供电能力的最小值。

$$E_{\max,t} = \min_{f \in N_f} E_{\max,f,t} \quad (5)$$

在大规模可再生能源接入的情况下,最大供电能力计算模型需考虑分布式光伏储能的出力变化情况。当系统发生  $N-1$  故障时,分布式电源可在短时间内提供部分功率,可提升因线路传输容量限制的区域最大供电能力。

### 3.2 约束条件

节点功率平衡约束为式(6)–(7)

$$\begin{cases} \sum_{k \in \psi(i)} P_{ik}^f - \sum_{j \in \phi(i)} (P_{ji}^f - \hat{I}_{ji}^f R_{ji}) = P_{\text{In},i}^f \\ \sum_{k \in \psi(i)} Q_{ik}^f - \sum_{j \in \phi(i)} (Q_{ji}^f - \hat{I}_{ji}^f X_{ji}) = Q_{\text{In},i}^f \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} P_{\text{In},i}^f = P_{\text{DG},i}^f + P_{\text{Sub},i}^f + P_{\text{es},i}^f + (-P_{\text{L},i}) \\ Q_{\text{In},i}^f = Q_{\text{DG},i}^f + Q_{\text{Sub},i}^f - Q_{\text{L},i} \end{cases} \quad (7)$$

式中:上标  $f$  表示  $N-1$  场景;  $\phi(i)$  表示以节点  $i$  为末端节点的线路的首端节点的集合;  $\psi(i)$  表示以节点  $i$  为首端节点的线路的末端节点的集合;  $P_{ji}^f$ 、 $Q_{ji}^f$  表示线路  $ij$  上的流过的功率;  $P_{\text{In},i}^f$ 、 $Q_{\text{In},i}^f$  表示节点  $i$  的注入功率;  $P_{\text{DG},i}^f$ 、 $P_{\text{Sub},i}^f$  ( $Q_{\text{DG},i}^f$ 、 $Q_{\text{Sub},i}^f$ ) 表示分布式电源、变压器的注入功率;  $P_{\text{L},i}$ 、 $Q_{\text{L},i}$  表示节点  $i$  负荷。

线路压降约束公式为

$$\hat{U}_i^f - \hat{U}_j^f = 2 (P_{ij}^f R_{ij} + Q_{ij}^f X_{ij}) - \hat{I}_{ij}^f (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) \quad (8)$$

式中:  $R_{ji}$  和  $X_{ji}$  分别表示线路的电阻和电抗;  $\hat{U}_i^f$  表示节点  $i$  电压大小的平方,  $\hat{I}_{ij}^f$  表示线路  $ij$  电流大小的平方。

支路功率平衡约束公式为

$$\hat{U}_i^f \hat{I}_{ij}^f = (P_{ij}^f)^2 + (Q_{ij}^f)^2 \quad (9)$$

式中:  $\hat{U}_i^f$  表示节点电压的平方;  $\hat{I}_{ij}^f$  表示线路电流的平方。

线路上的传输功率与其首端电压和线路电流之间的关系如式(10)所示,这是一种非线性的约束条件,为非凸优化模型。用  $\hat{U}$  和  $\hat{I}$  替换非线性项  $U^2$  和  $I^2$ ,如式(11)所示,对该约束松弛将式(10)中的等号变为不等号,其可行域变为凸可行域。

$$P^2 + Q^2 = U^2 I^2 \quad (10)$$

$$\hat{U}_i^f \hat{I}_{ij}^f \geq (P_{ij}^f)^2 + (Q_{ij}^f)^2 \quad (11)$$

式(11)的二阶锥形式如式(12)所示,经松弛后该问题便于求解。

$$\hat{U}_i^f + \hat{I}_{ij}^f \geq \left\| \begin{bmatrix} 2P_{ij}^f \\ 2Q_{ij}^f \\ \hat{I}_{ij}^f - \hat{U}_i^f \end{bmatrix} \right\|_2 \quad (12)$$

储能最大充放电约束如式(13)所示。

$$-P_{\text{discharge},i} \leq P_{\text{es},i}^f \leq P_{\text{charge},i} \quad (13)$$

式中:  $P_{\text{es},i}^f$  为节点安装的储能充放电功率,充电时为负放电时为正,  $P_{\text{discharge},i}$  为储能最大放电功率,  $P_{\text{charge},i}$  为储能最大充电功率。

储能初始电量及电量平衡约束如式(14)–(15)所示。

$$E_{i,u,t,s,h}^B = C p_{\text{ESS},n} / 2, \quad h = 1, 24 \quad (14)$$

$$E_{i,u,t,s,h+1}^B = E_{i,u,t,s,h}^B + \eta^{\text{ch}} P_{i,u,t,s,h}^{\text{ESSch}} - \frac{P_{i,u,t,s,h}^{\text{ESSdis}}}{\eta^{\text{dis}}}, \quad h = 1 \sim 23 \quad (15)$$

式中,  $E_{i,u,t,s,h}^B$  为储能在时段  $h$  的容量,储能每小时的剩余电量情况根据正常运行场景得到,  $N-1$  校验时假设该时刻电量与正常运行时状态相同。

系统中电气设备的上下限约束如式(16)–(20)所示。

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (16)$$

$$0 \leq I_{ij} \leq I_{ij,\max} \quad (17)$$

$$0 \leq S_{\text{DG}}^{\text{t}} \leq S_{\text{DGmax}} \quad (18)$$

$$-P_{\text{linemax}} \leq P_{\text{line}} \leq P_{\text{linemax}} \quad (19)$$

$$-Q_{\text{linemax}} \leq Q_{\text{line}} \leq Q_{\text{linemax}} \quad (20)$$

式中:  $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$  为节点电压最大值最小值;  $I_{ij,\max}$  为线路电流最大值;  $S_{\text{DGmax}}$  为分布式电源最大输出功率;  $P_{\text{linemax}}$ 、 $Q_{\text{linemax}}$  为线路最大传输的有功功率和无功功率。

## 4 算例分析

本节结合某具体供电区域,分析大规模分布式光伏储能接入对双环网、钻石型配电网及其派生结构双工型配电网的影响。根据网格化供电,假设该供电区域为正方形,边长 1.2 km,包含 16 个供电网格,每一个供电网格边长 300 m。上级变电站分布在供电区域的四角,每个供电网格建有一座开关站,每座开关站下接 5 个环网站,开关站最大负载 5 MW,环网站最大负载 1 MW。则该供电区域内总最大负荷 80 MW,负荷密度最大 55.56 MW/km<sup>2</sup>,根据开关站位置将该区域划分为 16 个供电网格,每一个供电网格边长 300 米。

如图 6 所示为该区域采用开关站单环网,每两座开关站构成一个单环网连接双侧变电站。钻石型配电网示意图见图 7,双工型配电网示意图见图 8。具体网架参数见表 1-3,负荷参数见图 9。

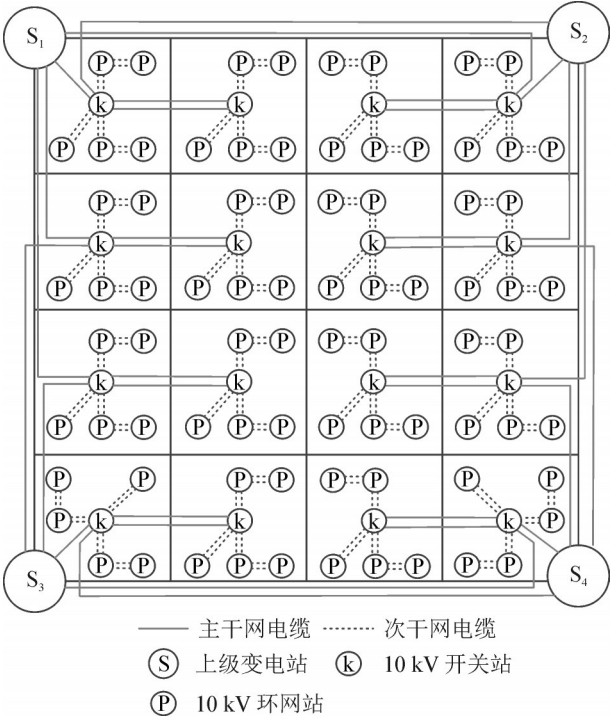


图 6 开关站单环网示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of single loop network of switching station

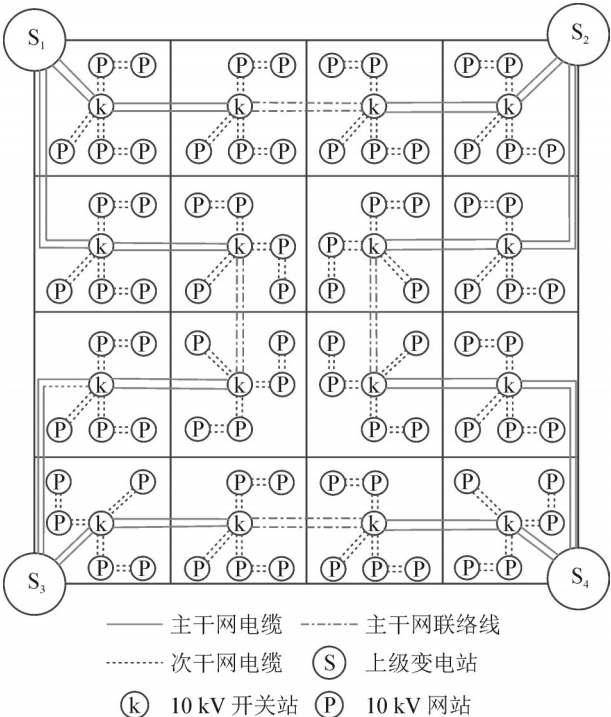


图 7 区域钻石型配电网示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of regional diamond distribution network

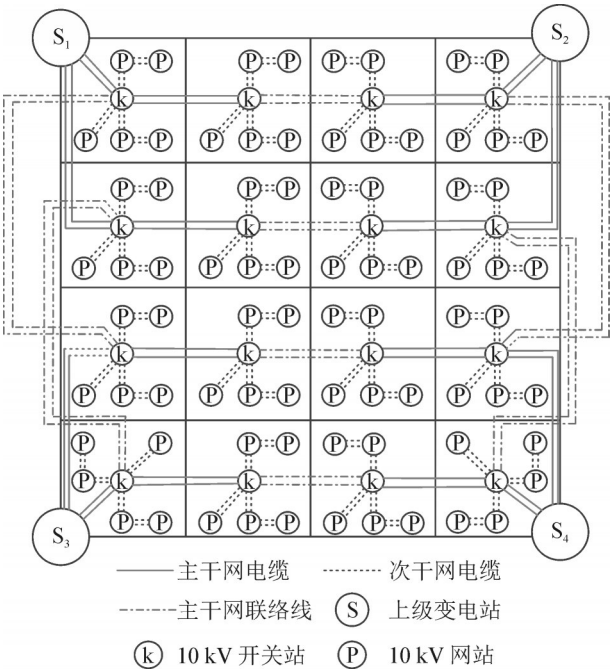


图 8 区域双工型配电网示意图  
Fig. 8 Schematic diagram of regional duplex distribution network

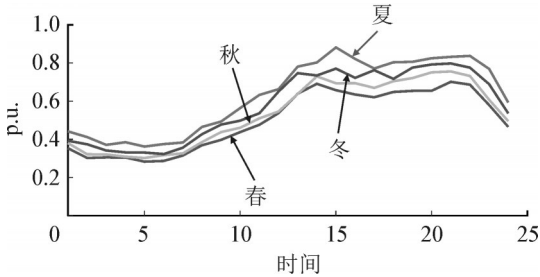


图 9 区域配电网典型日负荷曲线  
Fig. 9 Typical day load curve of regional distribution network

上述区域配电系统的线路选取 YJV-300 电缆,线路单位长度电阻、电抗分别为  $0.055\ \Omega/\text{km}$ 、 $0.086\ \Omega/\text{km}$ ,直埋土壤载流量 600 A,理论传输容量约为 10 000 kVA。

每个负荷点都根据负荷水平接入相应容量的光伏储能,区域内光伏的典型日输出功率如图 10 所示,TSC 分析中将可再生能源渗透率设置为 50%,可靠性分析中设置了不同比例的可再生能源接入。同时为保证光伏的稳定运行,设置光伏与储能的比例为 5:1。

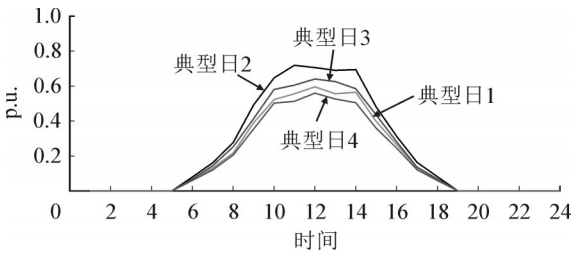


图 10 光伏典型日输出功率  
Fig. 10 Typical daily output power of PV

表 1  钻石型配电网参数  
Table 1  Parameters of diamond distribution network

| 线路编号 | 始端节点 | 末端节点 | 线路长度/km | 线路编号 | 始端节点 | 末端节点 | 线路长度/km |
|------|------|------|---------|------|------|------|---------|
| 1    | 1    | 2    | 0.2     | 17   | 19   | 20   | 0.2     |
| 2    | 2    | 3    | 0.3     | 18   | 20   | 21   | 0.3     |
| 3    | 1    | 4    | 0.2     | 19   | 19   | 22   | 0.2     |
| 4    | 4    | 5    | 0.3     | 20   | 22   | 23   | 0.3     |
| 5    | 1    | 6    | 0.6     | 21   | 19   | 24   | 0.6     |
| 6    | 6    | 7    | 0.3     | 22   | 24   | 25   | 0.3     |
| 7    | 1    | 8    | 0.6     | 23   | 19   | 26   | 0.6     |
| 8    | 8    | 9    | 0.3     | 24   | 26   | 27   | 0.3     |
| 9    | 10   | 11   | 0.2     | 25   | 28   | 29   | 0.2     |
| 10   | 11   | 12   | 0.3     | 26   | 29   | 30   | 0.3     |
| 11   | 10   | 13   | 0.2     | 27   | 28   | 31   | 0.2     |
| 12   | 13   | 14   | 0.3     | 28   | 31   | 32   | 0.3     |
| 13   | 10   | 15   | 0.6     | 29   | 28   | 33   | 0.6     |
| 14   | 15   | 16   | 0.3     | 30   | 33   | 34   | 0.3     |
| 15   | 10   | 17   | 0.6     | 31   | 28   | 35   | 0.6     |
| 16   | 17   | 18   | 0.3     | 32   | 35   | 36   | 0.3     |

表 2  开关站单环网参数  
Table 2  Parameters of switchyard single ring network

| 线路编号 | 始端节点 | 末端节点 | 线路长度/km | 线路编号 | 始端节点 | 末端节点 | 线路长度/km |
|------|------|------|---------|------|------|------|---------|
| 1    | 10   | 2    | 1       | 17   | 1    | 11   | 1.0     |
| 2    | 2    | 3    | 0.3     | 18   | 11   | 12   | 0.3     |
| 3    | 1    | 4    | 0.2     | 19   | 10   | 13   | 0.2     |
| 4    | 4    | 5    | 0.3     | 20   | 13   | 14   | 0.3     |
| 5    | 1    | 6    | 0.6     | 21   | 10   | 15   | 0.6     |
| 6    | 6    | 7    | 0.3     | 22   | 15   | 16   | 0.3     |
| 7    | 19   | 8    | 0.8     | 23   | 28   | 17   | 0.8     |
| 8    | 8    | 9    | 0.3     | 24   | 17   | 18   | 0.3     |
| 9    | 1    | 20   | 0.8     | 25   | 10   | 29   | 0.8     |
| 10   | 20   | 21   | 0.3     | 26   | 29   | 30   | 0.3     |
| 11   | 19   | 22   | 0.6     | 27   | 28   | 31   | 0.6     |
| 12   | 22   | 23   | 0.3     | 28   | 31   | 32   | 0.3     |
| 13   | 19   | 24   | 0.2     | 29   | 28   | 33   | 0.2     |
| 14   | 24   | 25   | 0.3     | 30   | 33   | 34   | 0.3     |
| 15   | 10   | 17   | 0.6     | 31   | 28   | 35   | 0.6     |
| 16   | 17   | 18   | 0.3     | 32   | 35   | 36   | 0.3     |

表 3  双工型配电网参数  
Table 3  Parameters of duplex distribution network

| 线路编号 | 始端节点 | 末端节点 | 线路长度/km | 线路编号 | 始端节点 | 末端节点 | 线路长度/km |
|------|------|------|---------|------|------|------|---------|
| 1    | 1    | 2    | 0.2     | 17   | 19   | 20   | 0.2     |
| 2    | 2    | 3    | 0.3     | 18   | 20   | 21   | 0.3     |
| 3    | 1    | 4    | 0.2     | 19   | 19   | 22   | 0.2     |
| 4    | 4    | 5    | 0.3     | 20   | 22   | 23   | 0.3     |
| 5    | 1    | 6    | 0.6     | 21   | 19   | 24   | 0.6     |
| 6    | 6    | 7    | 0.3     | 22   | 24   | 25   | 0.3     |
| 7    | 1    | 8    | 0.6     | 23   | 19   | 26   | 0.6     |
| 8    | 8    | 9    | 0.3     | 24   | 26   | 27   | 0.3     |
| 9    | 10   | 11   | 0.2     | 25   | 28   | 29   | 0.2     |
| 10   | 11   | 12   | 0.3     | 26   | 29   | 30   | 0.3     |
| 11   | 10   | 13   | 0.2     | 27   | 28   | 31   | 0.2     |
| 12   | 13   | 14   | 0.3     | 28   | 31   | 32   | 0.3     |
| 13   | 10   | 15   | 0.6     | 29   | 28   | 33   | 0.6     |
| 14   | 15   | 16   | 0.3     | 30   | 33   | 34   | 0.3     |
| 15   | 10   | 17   | 0.6     | 31   | 28   | 35   | 0.6     |
| 16   | 17   | 18   | 0.3     | 32   | 35   | 36   | 0.3     |

4.1 可靠性分析

可靠性计算基于序贯蒙特卡洛模拟法,模拟时间 100 000 年,考虑了故障发生后网络重构、负荷点孤岛运行。计算时假定配电自动化水平为配置二遥终端,即故障定位隔离时间为 1 h。系统内元件故障参数见表 4。

表 4 元件故障参数  
Table 4 Fault parameters of element

| 参数             | 数值       |
|----------------|----------|
| 电缆故障率/(次/百 km) | 0.84     |
| 电缆修复时间/h       | 8        |
| 配变故障率/(次/年·台)  | 0.001 35 |
| 配变修复时间/h       | 10       |
| 母线故障率/(次/年)    | 0.000 5  |
| 母线修复时间/h       | 36       |

表 5 不同可再生能源渗透率水平下可靠性计算结果  
Table 5 Reliability calculation results at different renewable energy penetration levels

| 渗透率/% | 钻石(双工)型配电网 |        | 开关站单环网     |        |
|-------|------------|--------|------------|--------|
|       | ASAI/%     | 停电时间/s | ASAI/%     | 停电时间/s |
| 0     | 99.999 568 | 136.3  | 99.999 521 | 150.9  |
| 10    | 99.999 587 | 130.4  | 99.999 534 | 146.8  |
| 20    | 99.999 591 | 128.9  | 99.999 544 | 143.7  |
| 30    | 99.999 608 | 123.7  | 99.999 562 | 138.3  |
| 40    | 99.999 614 | 121.6  | 99.999 572 | 135.1  |
| 50    | 99.999 629 | 116.9  | 99.999 586 | 130.7  |
| 60    | 99.999 639 | 113.9  | 99.999 597 | 127.1  |
| 70    | 99.999 643 | 112.7  | 99.999 607 | 124.1  |
| 80    | 99.999 654 | 109.1  | 99.999 620 | 119.9  |
| 90    | 99.999 662 | 106.5  | 99.999 627 | 117.7  |
| 100   | 99.999 679 | 101.3  | 99.999 651 | 110.2  |

证上述模型的有效性,并对比分析上述不同网架。不同网架结构的 TSC 分析设置了 2 种场景,每种场景包括分布式电源接入前后的两种情况。

场景 1:区域中上级变电站发生 N-1 事故,四座变电站中的一座停运,停运变电站的带载负荷将通过网络重构,转移至区域内其他两座变电站。

场景 2:区域中馈线发生 N-1 事故,选取其中最严重的馈线首段故障进行分析,馈线带载的负荷将通过网络重构,转移至其他馈线。

基于上述 TSC 模型,场景 1 考虑上级变电站 N-1 的 3 种网架的结果分析如下。

如图 11 所示为 3 种网架无新能源接入情况下的最大供电能力,钻石型配电网与开关站单环网最大供电能力十分接近,而双工型配电网最大供电能力有明显提升。如图 12 所示 3 种网架有新能源接入情况下的最大供电能力,接入大规模光储后,3 种网架最大供电能力均有提升,日间光伏输出功率较大时更为显著,同时钻石型配电网与开关站单环网

双工型配电网与钻石型配电网相比次干网无变化,主干网虽改变了线路连接,增加了联络线,但对可靠性基本无影响,可靠性计算结果差异很小。如表 5 所示为上述供电区域在不同可再生能源渗透率下的平均供电可靠性计算结果。

从计算结果可得钻石型配电网可靠性优于开关站单环网,且随着可再生能源渗透率的提升,可靠性不断提升,平均停电时间不断下降。钻石型配电网供电可靠性提升 0.000 111%,平均停电时间下降 35 s。开关站单环网可靠性提升 0.000 13%,平均停电时间下降 40.7 s。

4.2 最大供电能力分析

本节运用上述 TSC 计算模型,在 Matlab2021a 中编写相关程序,调用 gurobi 9.5.1 版本求解,以验

最大供电能力仍然十分接近,双工型配电网最大供电能力有明显提升。

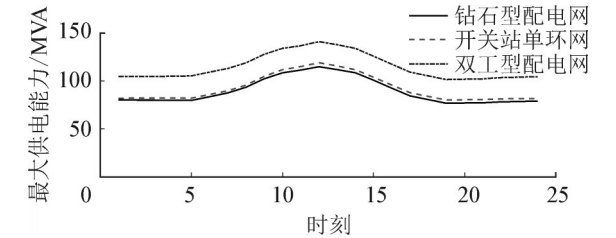


图 11 场景 1 无新能源接入最大供电能力对比  
Fig. 11 Maximum power supply ability comparison without access of renewable energy at scenario 1

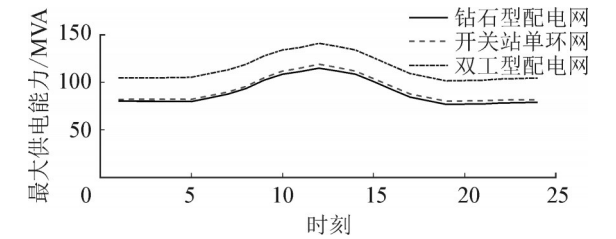


图 12 场景 1 有新能源接入最大供电能力对比  
Fig. 12 Maximum power supply ability comparison with access of renewable energy at scenario 1

产生上述结果的原因是,双工型增加的线路间联络发挥了作用,可更灵活的转供负荷,将发生 $N-1$ 故障的上级变电站带载负荷转移至其余的变电站。故障线路的最大供电能力达到正常运行的75%。而钻石型配电网与开关站单环网仅能转移至其余两座变电站,最大供电能力仅为正常运行的50%。

基于上述TSC模型,场景2考虑馈线首段 $N-1$ 的3种网架的结果分析见图13-14。

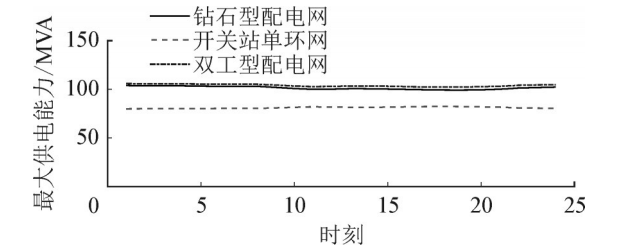


图13 场景2无新能源接入最大供电能力对比  
Fig. 13 Maximum power supply ability comparison without access of renewable energy at scenario 2

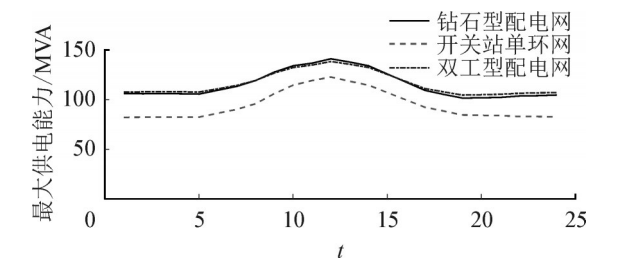


图14 场景2新能源接入最大供电能力对比  
Fig. 14 Maximum power supply ability comparison with access of renewable energy at scenario 2

如图13所示为3种网架无新能源接入情况下的TSC,钻石型配电网与双工型配电网TSC十分接近,而开关站单环网明显较低。如图14所示3种网架有新能源接入情况下的TSC,接入大规模光储后TSC均有提升,日间光伏输出功率较大时更明显,同时钻石型配电网与双工型配电网TSC仍然十分接近,双工型配电网略高,开关站单环网低于其余两种网架。

4.3 建设成本分析

建设成本具体计算参数如表6所示。钻石型配电网共16座开关站,主干网线路12 km,次干网线路16 km,管廊14 km,80个环网站;双工型配电网共16个开关站,主干网线路16.8 km,次干网线路16 km,管廊16.4 km;开关站单环网共16个开关站,主干网14.4 km,次干网线路16 km,管廊15.2 km,80个环网站。

通过上述参数计算结果如表7所示。表中以钻石型配电网投资成本为基准,可以看出,3种网架中钻石型配电网投资成本最低,双工型投资成本最高,但投资差异均不超过5%。

| 表6 建设成本计算参数<br>Table 6 Construction cost calculation parameters |      |
|-----------------------------------------------------------------|------|
| 项目                                                              | 投资成本 |
| 线路建设/(万元/千米)                                                    | 100  |
| 开关站建设/(万元/站)                                                    | 665  |
| 环网站建设/(万元/站)                                                    | 350  |
| 通道建设/(万元/千米)                                                    | 35   |
| 光缆通信/(万元/站)                                                     | 40   |
| 保护及配电系统自动化/(万元/站)                                               | 50   |
| 变电站间隔投资/(万元/站)                                                  | 80   |

| 表7 投资计算结果<br>Table 7 Results of investment calculations |          |        |
|---------------------------------------------------------|----------|--------|
| 网架结构                                                    | 投资总成本/万元 | 投资差异/% |
| 钻石型配电网                                                  | 43 690   | 0      |
| 双工型配电网                                                  | 45 214   | +3.49  |
| 开关站单环网                                                  | 13 972   | +0.65  |

4.4 综合分析

3种网架结构均包含了开关站,适用于全线电缆的城市配电区域。可靠性方面3种网架均达到99.999%,且钻石型与双工型优于开关站单环网;供电能力方面, $N-1$ 的情况下双工型表现较好,钻石型次之,单环网较差;经济性方面三者相差不大,这与算例假设的供电区域较为简单有关,实际网架建设将更为复杂。

实际网架建设中,钻石型配电网是上海市针对城市核心区域高供电可靠性的要求提出的。考虑到 $N-1$ 状态下的极端情况,本文提出了双工型配电网。根据算例分析结果,钻石型配电网的经济性较好,双工型配电网最大供电能力更好。对于钻石型配电网,未来可在可靠性要求高的城市核心区域通过对原有网络的改造升级,增加开关站以及联络线,逐渐推广应用,提升正常运行状态下的可靠性水平。若还需提升极端场景下的区域供电能力,则可在钻石型配电网的基础上,增加开关站间联络,将网架向双工型配电网改造。

5 结语

针对城市配电网负荷密度大,可靠性要求高的特点,本文提出了钻石型配电网的派生形态双工型配电网,针对钻石型配电网的结构特点,生成故障恢复策略,最后结合算例对比分析了大规模新能源接入下,不同网架结构的可靠性及最大供电能力。

算例分析结果表明:大规模分布式光伏储能接入,提升了区域配电系统的可靠性及TSC;双工型配电网提升了区域电网的TSC,提升了区域配电网

的可靠性。

上述分析验证了所提出的可靠性和最大供电能力分析的有效性,验证了钻石型配电网及其派生结构双工型配电网的优势。相比于城市供电区域的常规双环网,双工型配电网虽增加了一定的投资,但同时提升了可靠性和最大供电能力,适用于对可靠性要求高、负荷密度大的城市供电区域。

## 参考文献

- [1] 王成山,王瑞,于浩,等. 配电网形态演变下的协调规划问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2385-2395.  
WANG Chengshan, WANG Rui, YU Hao, et al. Challenges on coordinated planning of smart distribution networks driven by source-network-load evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2385-2395.
- [2] 黄河,田浩,解进军,等. 新加坡电网高可靠性供电方案分析[J]. 电力建设, 2015, 36(11): 91-97.  
HUANG He, TIAN Hao, XIE Jinjun, et al. High-reliability power supply scheme analysis for Singapore power grid[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(11): 91-97.
- [3] 华煌圣,刘育权,张君泉,等. 基于配电管理系统的“花瓣”型配电网供电恢复控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 102-107.  
HUA Huangsheng, LIU Yuquan, ZHANG Junquan, et al. Recovery control scheme for petal-shape distribution network based on distribution management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 102-107.
- [4] 李正红,丁晓兵,冯宝成,等. 基于HSR环网的“花瓣”型配电网区域自备投系统研究及应用[J]. 中, 2019, 52(8): 64-70.  
LI Zhenghong, DING Xiaobing, FENG Baocheng, et al. Research and application of regional power grid auto transfer system for the Petal-Shape distribution networks based on HSR network[J]. Electric Power, 2019, 52(8): 64-70.
- [5] 李亮玉,林俐,杨楠. 国外大城市电网分区运行现状[J]. 广东电力, 2014, 27(10): 6-10.  
LI Liangyu, LIN Li, YANG Nan. Partition running status quo of foreign large urban power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(10): 6-10.
- [6] 唐文左,梁文举,李媛媛,等. 大型城市电网结构分析及其对重庆电网的启示[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 72-75.  
TANG Wenzuo, LIANG Wenju, LI Yuanyuan, et al. Analysis on power network structure of large-scale urban areas and its inspiration to Chongqing power network[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2014, 26(3): 72-75.
- [7] 迟福建,刘聪,张媛,等. 国内外城市配电网组网模式及变电站配置综述[J]. 发电技术, 2018, 39(6): 499-504.  
CHI Fujian, LIU Cong, ZHANG Yuan, et al. Summary of urban distribution network structure mode and substation configuration at home and abroad[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(6): 499-504.
- [8] 阮前途,谢伟,张征,等. 钻石型配电网升级改造研究与实践[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 1-7.  
RUAN Qiantu, XIE Wei, ZHANG Zheng, et al. Research and practice on the upgrading for diamond distribution network[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 1-7.
- [9] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.  
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of Carbon emission peak and Carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258.
- [10] 贾巍,雷才嘉,葛磊蛟,等. 城市配电网的国内外发展综述及技术展望[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 158-168.  
JIA Wei, LEI Caijia, GE Leijiao, et al. Overview on domestic and international development of urban distribution network and technical prospect[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 158-168.
- [11] 刘东,张弘,王建春. 主动配电网技术研究现状综述[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 2-7.  
LIU Dong, ZHANG Hong, WANG Jianchun. Review on the state of the art of active distribution network technology research[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4): 2-7.
- [12] LIU Yi, LI Haibo, YU Zhanqing, et al. Reliability evaluation method for AC/DC hybrid distribution power network considering cascaded multiport power electronic transformer[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2019, 13(23): 5357-5364.
- [13] XIANG Yue, SU Yunche, WANG Yang, et al. An explicit formula based estimation method for distribution network reliability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 2109-2112.
- [14] TABARES A, MUÑOZ-DELGADO G, FRANCO J F, et al. An enhanced algebraic approach for the analytical reliability assessment of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2870-2879.
- [15] 黄伟,陈伯达,羿应棋,等. 考虑光储可持续带载能力的配电网可靠性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1510-1517.  
HUANG Wei, CHEN Baida, YI Yingqi, et al. Distribution system reliability analysis considering sustainable on-load capacity of hybrid photovoltaic/energy-storage system[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1510-1517.
- [16] M WADI, M BAYSAL, A SHOBOL, et al. Reliability eval-

- uation in smart grids via modified monte carlo simulation method[C]//2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications ICRERA, 2018: 841-845.
- [17] LIU W, Gong, HAN Q H, et al. Reliability modeling and evaluation of active cyber physical distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7096-7108.
- [18] 肖峻, 谷文卓, 郭晓丹, 等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 47-52.  
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GUO Xiaodan, et al. A supply capability model for distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(24): 47-52.
- [19] 肖峻, 蔡仲伟. 配电网  $N-1$  最大供电能力的判定定理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9481-9495.  
XIAO Jun, CAI Zhongwei. Judgment theorem of  $N-1$  total supply capability for distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9481-9495.
- [20] CHEN Kening, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A method to evaluate total supply capability of distribution systems considering network reconfiguration and daily load curves[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(3): 2096-2104.
- [21] 国宗, 韦钢, 李明, 等. 含分布式电源的配电网供电能力评估方法[J]. 现代电力, 2015, 32(4): 56-61.  
GUO Zong, WEI Gang, LI Ming, et al. Assessment of power supply capability for disibution network with distributed generations[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(4): 56-61.
- [22] 洪飒, 杨俊友, 高柳, 等. 考虑电转气和负荷惯性的综合能源系统优化调度[J]. 东北电力技术, 2021, 42(8): 1-7.  
HONG Feng, YANG Junyou, GAO Liu, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering power-to-gas and load inertia[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(8): 1-7.
- [23] 陈金猛, 汪贝, 孙萌, 等. 配电变压器供应商绿色发展能力评估方法的研究[J]. 变压器, 2022, 59(11): 42-46.  
CHEN Jinmeng, WANG Bei, SUN Meng, et al. Study on evaluation method for green development capability of distribution transformer suppliers[J]. Transformer, 2022, 59(11): 42-46.
- [24] 栗世玮, 张谦, 熊炜, 等. 含高渗透可再生能源的动态网络重构与无功电压调整协同优化[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1): 100-110.  
SU Shiwei, ZHANG Qian, XIONG Wei, et al. Coordination optimization of dynamic network reconfiguration and reactive power voltage regulation with high penetration renewable energy generation[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 100-110.
- [25] 熊焰, 李强泽, 于玮, 等. 促进可再生能源消纳的有序充电能量管理[J]. 电器与能效管理技术, 2020(11): 111-115.  
XIONG Yan, LI Qiangze, YU Wei, et al. Orderly charge energy management to promote the consumption of renewable energy [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(11): 111-115.
- [26] 王华昕, 刘美娜, 褚启迪. 计及长线路参数扰动的新能源黑启动工程分析[J]. 高压电器, 2023, 59(3): 99-107.  
WANG Huaxin, LIU Meina, CHU Qidi. Analysis of new energy black start-up engineering considering parameter perturbation of long line [J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3): 99-107.
- [27] 金璐, 何伟, 闫华光, 等. 考虑多评价指标的可再生微能源网双层优化配置[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 112-119.  
JIN Lu, HE Wei, YAN Huaguang, et al. Double-layer optimal allocation of renewable micro-energy network considering multiple evaluation indices[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 112-119.
- [28] 杨安全, 赵清松, 岳颖, 等. 电—气—热综合能源系统多目标优化调度策略[J]. 东北电力技术, 2023, 44(12): 1-8.  
YANG Anquan, ZHAO Qingsong, YUE Ying, et al. Research on multi-objective optimization scheduling of electricity-gas-thermal integrated energy systems basedon wind/photovoltaic power accommodation[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(12): 1-8.
- [29] 傅美平, 毛建容, 宋锐, 等. 大型新能源富集地区储能电站电压无功控制策略[J]. 电器与能效管理技术, 2022(2): 88-94.  
FU Meiping, MAO Jianrong, SONG Rui, et al. Voltage and reactive power control strategy of energy storage power stations in large new energy enriched areas[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(2): 88-94.

#### 作者简介:

张铭泽(1985—),男,高级工程师,从事城市配电网规划与运行相关工作。E-mail:15651880535@163.com。

华晟辉(1995—),男,高级工程师,从事配电网数据分析相关工作。

李奥(1998—),男,硕士在读,研究方向为配电网规划。

吴志(1987—),男,副教授,研究方向为配电网运行与规划,综合能源系统。

陆于平(1962—),男,教授,研究方向为电力系统微机保护、分布式发电和新能源系统保护等。