A Terminal Configuration Method for Distribution Network Automation Considering Power Failure Loss and Power Supply Reliability*

CAO Xuanwei*, QI Huihui, LI Ning
(Jiangsu Electric Power Information Technology Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210029, China)

Abstract: Automation terminals in distribution networks are key devices for mitigating the impacts of permanent faults. However, traditional configuration methods mostly take "minimizing power outage losses" as a single objective, which cannot meet the dual engineering requirements of "reducing losses" and "improving reliability". A dual-objective configuration method for distribution network automation terminals is proposed based on the epsilon constraint algorithm. Firstly, the power outage time expressions for manual control switches (MCS), fault indicators (FI), and remote control switches (RCS) is defined, and a system power outage loss model is constructed. Secondly, a dual-objective optimization model is established with the goals of "minimizing total power outage losses" and "maximizing average service availability index (ASAI)". Finally, the epsilon constraint algorithm is used to solve the aforementioned dual-objective optimization model. Case studies based on the IEEE RBTS-BUS4 system show that, compared with the NSGAII algorithm, the proposed method improves computational efficiency by 32%. Under the constraint of a 1.5 million yuan life-cycle cost, the power outage loss is reduced by 28.5%, and the power supply reliability (ASAI) is increased to 99.92%. This method can provide a quantitative decision-making basis for the scientific configuration of distribution network automation terminals, and help achieve the coordinated optimization of economy and reliability.

Key words: distribution network; automation terminal; multi-objective optimization; Epsilon constraint algorithm
EEACC: 8110B **doi**: 10.3969/j.issn.1005-9490.2026.04.027

考虑停电损失和供电可靠性的配电网自动化终端配置方法*

曹轩玮*, 齐会会, 李 宁
(江苏电力信息技术有限公司, 江苏 南京 210029)

摘 要: 配电网自动化终端是降低永久性故障影响的关键设备, 但传统配置方法多以“最小化停电损失”为单一目标, 难以满足工程中“降损失”与“提可靠性”的双重需求。提出一种基于 Epsilon 约束算法的配电网自动化终端双目标配置方法: 首先定义手动控制开关(MCS)、故障指示器(FI)、远程控制开关(RCS)的停电时间表达式, 构建系统停电损失模型; 其次以“最小化总停电损失”和“最大化平均供电可靠性(ASAI)”为目标, 建立双目标优化模型; 最终通过 Epsilon 约束算法求解该模型。基于 IEEE RBTS-BUS4 系统的算例表明: 与 NSGAII 算法相比, 所提方法计算效率提升 32%, 在全生命周期成本 150 万元约束下, 停电损失降低 28.5%, 供电可靠性(ASAI)提升至 99.92%。该方法可为配电网自动化终端的科学配置提供量化决策依据, 助力实现经济性与可靠性的协同优化。

关键词: 配电网; 自动化终端; 多目标优化; Epsilon 约束算法
中图分类号: TM73 **文献标识码**: A **文章编号**: 1005-9490(2026)04-0887-07

随着社会经济的不断演进, 用户对配电网的电力供应稳定性提出了更为苛刻的要求。为了进一步提高电网可靠性水平, 需要加强配电网的现代化改造与管理, 而配网自动化正是其中必不可少的环节之一[1-2]。通过引入多种类型的自动化终端设备, 可快速实现配电网的故障隔离和定位, 从而最大程度地减少永久性故障所带来的停电损失和停电时间, 进而提升配电网的可靠性。配电系统作为电力系统的基础部分, 其安全可靠与否直接关系到整个电力系统安全稳定运行以及广大用户的正常生活与工作, 因此配电网自动化成为保障供电质量及供电可靠的有效措施之一[3-4]。在配电网自动化建设中, 由于其结构复杂、运行方式多样且自动化终端种类繁多, 如何在有限的成本下最大限度地发挥配电

项目来源: 国网江苏省电力有限公司科技项目(SGJS0000YXXX2400773)
收稿日期: 2025-07-18 **修改日期**: 2025-10-16

网自动化的作用成为了最为紧迫的问题。因此,合理科学的配网自动化方案及相应技术的应用显得尤为重要。在过去的十年中,国内各大电网公司积极推进配电网自动化试点,同时城市配电网的规划建设步伐也得到了加速[5-6]。为了适应配电网发展需求,各地纷纷引进了大量的各种新型配电自动化设备。然而,在实际的电力配送网络建设中,仍缺乏系统化的指导,对于各种配电自动化设备的数量、位置和类型的配置研究仍处于起步阶段。

近年来,国内外学者围绕配电网自动化终端配置的优化目标与方法展开了更深入的探索,研究维度与技术路径持续拓展[7-8]。国内方面,文献[9]提出基于改进深度强化学习的故障指示器与远程控制开关协同配置方法,通过实时感知故障信息动态调整终端布局,虽提升了故障处理效率,但模型未纳入用户侧停电损失量化计算,且未考虑终端全生命周期内的维护成本[10];文献[11]构建了计及馈线拓扑复杂度的多目标配置模型,以"最小化投资成本"和"最大化供电可靠性"为目标,但采用的加权求和法易导致 Pareto 最优解丢失,难以平衡双目标的优先级。国外研究中,文献[12]在 IEEE RBTS-BUS6 系统上验证了混合整数线性规划(Mixed-Integer Linear Programming,MILP)在终端配置中的适用性,首次将终端老化损耗纳入成本模型,但该方法仅适用于辐射型配电网,对含环网结构的系统通用性不足;文献[13]提出基于自适应遗传算法的多终端配置方案,重点优化故障隔离时间,却未建立停电损失与供电可靠性的直接关联模型,难以反映工程实际中"经济损失-供电质量"的耦合关系[14]。

基于上述分析,本文提出了一种考虑停电损失和供电可靠性的配电网自动化终端配置方法。首先,定义了手动控制开关(Manual Control Switch,MCS)、故障指示器(Fault Indicator,FI)和远程控制开关(Remote Control Switch,RCS)的停电时间表达式,并在此基础上建立了系统的停电损失模型;其次,构建了一个基于双目标优化的配电网自动化终端配置模型,其目标函数为最大限度地减少停电损失和最大限度地提高平均供电可靠性;最后,利用 Epsilon 约束算法对上述的双目标优化模型进行了求解。算例分析证明:与传统的多目标算法非支配排序遗传算法(Non Dominated Sorting Genetic Algorithm,NSGAII)相比,本文提出的方法具有更高的计算效率和更好的计算性能,有利于实现更好优化配置。

1 配电网自动化终端配置模型

本文讨论的配电网自动化终端设备共分为三种类型:手动控制开关、故障指示器和远程控制开关。其中,手动控制开关目前已被广泛使用,而故障指示器具有自行检测故障电流特性的能力,同时其可以加快故障线路检查的速度,减少负载的停电时间。相比之下,远程控制开关不仅可以远程控制配电中心的开关,还可以检测故障电流,从而大大缩短停电时间。进一步地,本文分别使用 x、y、z 三个变量表示手动控制开关、故障指示器和远程控制开关,同时使用变量 $T_{i,j}(x,y,z)$ 表示由故障 i 引起的负载 j 的停电时间。

1.1 变量集、逻辑运算符及其两种实现

为了便于构建负载停电时间的函数,首先定义了一组变量:

$$\mathrm{VAR}=\{\mathrm{var}_i \mid i\in \Omega_{\mathrm{Index}}\} \tag{1}$$

式中:变量 var_i 是表示位置 i 处自动化终端设备配置的决策布尔变量,其值为 1 表示配置了终端设备,其值为 0 表示未配置终端设备;Ω_{index} 表示满足上述条件的下标索引的集合,VAR 是变量集合。

对变量集的运算符 And( ) 及 Or( ) 定义如下:

$$\begin{aligned}\mathrm{And}(\mathrm{VAR})&=\begin{cases}1 & \forall\, \mathrm{var}_i=1\\ 0 & \exists\, \mathrm{var}_i=0\end{cases}\\ \mathrm{Or}(\mathrm{VAR})&=\begin{cases}1 & \exists\, \mathrm{var}_i=1\\ 0 & \forall\, \mathrm{var}_i=0\end{cases}\end{aligned} \tag{2}$$

这两个运算符都是针对布尔变量,且其值只能是 0 或 1。运算符 And( ) 的赋值规则是变量集 VAR 中的所有变量都是 1,则它的值是 1;否则其值为 0。在运算符 Or( ) 中,只要变量集 VAR 中存在任何变量为 1,其值就为 1;如果所有变量都为 0,则其值为 0。

两个逻辑运算符可以进行线性化:

$$\frac{1+\sum_{\mathrm{var}_i\in \mathrm{VAR}}(\mathrm{var}_i-1)}{M}\leqslant \mathrm{And}(\mathrm{VAR})\leqslant 1+\frac{\sum_{\mathrm{var}_i\in \mathrm{VAR}}(\mathrm{var}_i-1)}{M} \tag{3}$$

$$\frac{\sum_{\mathrm{var}_i\in \mathrm{VAR}}\mathrm{var}_i}{M}\leqslant \mathrm{Or}(\mathrm{VAR})\leqslant \sum_{\mathrm{var}_i\in \mathrm{VAR}}\mathrm{var}_i \tag{4}$$

式中:M 为一较大常数,通过上述分析可将原先的分段函数进行线性化处理。

1.2 不同条件下的停电时间

巡线人员可在到达安装现场后对手动控制开关

进行操作，以确保负载与故障之间的物理隔离，从而最大限度地确保非故障区域的正常运行。图 1 为仅有两个负载接入点和手动控制开关的简单馈线示意图。鉴于线路追踪速度因区段不同而异，将故障空间进一步细分为中压和低压两个故障区域。当发生中压故障时，该系统通过对电流互感器二次电压进行测量来判断是否有短路故障出现。对于连接负载 $j_{(1,1)}$，由于缺乏与故障位置隔离的装置，只有在巡线人员发现故障并进行修复后，才能恢复其供电。

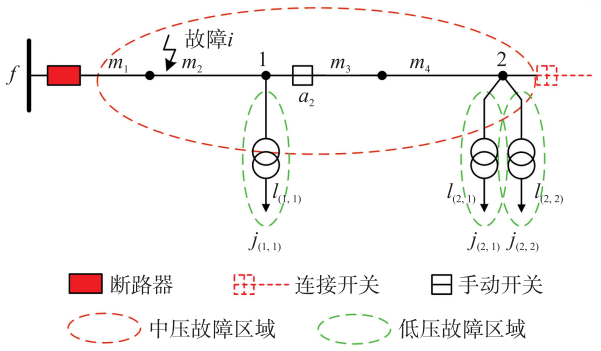

图 1　手动控制开关的故障停电分析

建立了基于分段线性模型的负荷电流预测数学模型，利用该模型可以实现对负荷电流进行短期预测。对应的电力中断时间的数学表达式为：

$$T_{2,(1,1)}(x)=t^{\text{search}}+t^{\text{rep}} \tag{5}$$

式中：t^{search} 是馈线的故障跟踪常数，其与馈线中压段和低压段的总长度有关，t^{rep} 是故障修复时间常数。

然而，对于连接负载 $j_{(2,1)}$ 和 $j_{(2,2)}$，存在三个可供选择的自动化终端安装位置，它们位于实际故障位置之间。只要在任何一个位置安装了自动化终端，巡线员一旦发现故障，就会立即采取隔离措施，以快速恢复电力供应。因此，所示情况的停电时间可以表示：

$$T_{2,(2,1)}(x)=T_{2,(2,2)}(x)=t^{\text{search}}+t^{\text{mcs}} \tag{6}$$

一般情况下停电时间的表达式更类似于分段表达式，这种表达方式更加直观：

$$T_{i,j}(x)=\begin{cases}t^{\text{search}}+t^{\text{mcs}} & \exists\, x_i=1, x_i\in X_{i,j}\\ t^{\text{search}}+t^{\text{rep}} & \forall\, x_1=0, x_i\in X_{i,j}\end{cases} \tag{7}$$

式中：$X_{i,j}$ 是表示馈线 f 上故障 i 和负载 j 间的变量集。

由于该表达式为分段表达式，其数学建模存在一定难度，因此引入了先前已构建的逻辑算子，并在此基础上构建了判定算子 $\text{If}_{i,j}^{\text{mcs}}(\,)$，用于判定手动隔离开关的动作时间：

$$\text{If}_{i,j}^{\text{mcs}}(x)=\text{Or}(X_{i,j}) \tag{8}$$

若此判定算子值为 1，则负荷 i 需经过一段时间的手动隔离开关操作。

构建一个判定算子 $\text{If}_{i,j}^{\text{rep}}(\,)$ 用于判断维修时间：

$$\text{If}_{i,j}^{\text{rep}}(x)=1-\text{Or}(X_{i,j}) \tag{9}$$

若此判定算子值为 1，则负荷 i 需经历故障的维修时间，因此可以推断出上述两个算子不可能同时为 0 或同时为 1，这意味着只能隔离或维修恢复供电。

在考虑停电时间通项表达式时，仅限于手动隔离开关 x 的情况：

$$T_{i,j}(x)=t^{\text{search}}+\text{If}_{i,j}^{\text{mcs}}(x)t^{\text{mcs}}+\text{If}_{i,j}^{\text{rep}}(x)t^{\text{rep}} \tag{10}$$

在配电网中，故障指示器是一种常见的自动化终端设备，它能够检测到故障电流的存在。由于不同类型配电设备具有不同的运行状态和特点，导致故障指示器在使用中存在一定差异。在发生永久性故障的情况下，可以根据故障电流的具体特性，采取措施最大限度地缩小故障范围，以确保配电网的正常运行。在配电网络正常运行中，由于负荷和开关操作等因素导致的短路事故时有发生，而故障指示器能够及时准确地显示出电网出现的各种情况。因此，在进行故障线路检查时，恰当地安装故障指示器可以显著提高检查速度，从而缩短负载停电时间并减少检查时间。

图 2 和图 3 分别呈现了故障指示器的可选安装位置和中压故障的位置。

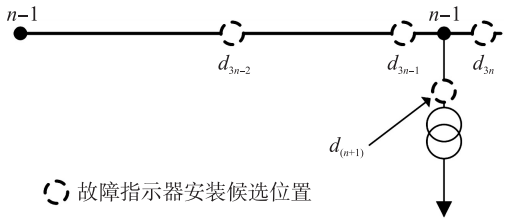

图 2　故障指示器的候选安装位置示意图

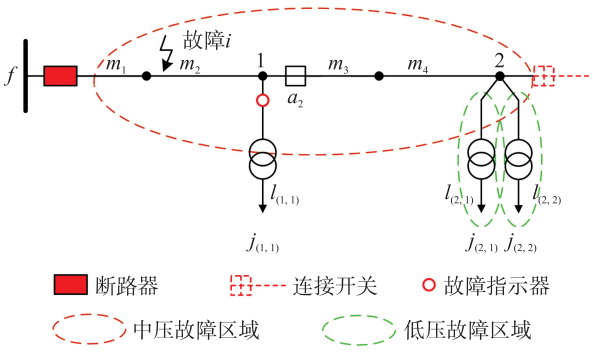

图 3　故障指示器的故障停电分析

为了便于分析，本文只讨论其中一个故障指示器的选择问题。通常将负载接入点 n 左右两侧视为故障指示器的潜在安装位置，分别标记为 d_{3n-1} 和 d_{3n}。对于低压区段首段的高压侧或者是末端的线

路,则需要对其分段后再编号作为安装候选位置。将位于负荷接入点 $n-1$ 和负荷接入点 n 之间的中压区段作为潜在的安装位置,并使用 MFI 编号 d_{3n-2} 来表示这三个安装在中压区段的故障指示器。当发生单相接地故障时,由于故障指示器是由一个或几个具有不同特性的元件组成,所以其对应的安装地点也各不相同。在低压区段的负荷接入点 n 处,存在一个故障指示器,其安装候选位置编号为 $d_{(n,1)}$,并使用 LFI 来表示该故障指示器的安装位置。

与上述建模方法类似,所建立的故障指示器的停电时间表达式为:

$$T_{i,j}(x,y)=T_{i,j}^{\text{search}}(y)\times \text{If}_{i,j}^{\text{invalid}}(x,y)+\text{If}_{i,j}^{\text{mcs}}(x)\times t^{\text{mcs}}+\text{If}_{i,j}^{\text{rep}}(x)\times t^{\text{rep}} \quad (11)$$

式中:$T_{i,j}^{\text{search}}(y)$ 表示巡线时间函数,$\text{If}_{i,j}^{\text{invalid}}(x,y)$ 表示用于判定负荷 j 是否需要经历巡线时间的判定算子。

同时考虑到手动控制开关 x、故障指示器 y 和远程控制开关 z,配电负载的停电时间的通用表达式为:

$$T_{i,j}(x,y,z)=T_{i,j}^{\text{search}}(y,z)\times \text{If}_{i,j}^{\text{invalid}}(x,y,z)+\text{If}_{i,j}^{\text{mcs}}(x,z)\times t^{\text{mcs}}+\text{If}_{i,j}^{\text{rcs}}(z)\times t^{\text{rcs}}+\text{If}_{i,j}^{\text{rep}}(x,z)\times t^{\text{rep}} \quad (12)$$

式中:t^{rcs} 是远程控制开关的动作时间,t^{mcs} 是手动控制开关的动作时间。

1.3 经济性指标

①一次性投资成本

在整个配电网中,馈线上所有自动化终端的一次性投资成本总和即为一次性投资成本:

$$\text{INV}(x,y,z)=\sum_{f\in\Omega_f}\left(\text{inv}^{\text{MCS}}\sum_{a\in\Omega_{f,a}}x_a+\text{inv}^{\text{FI}}\sum_{d\in\Omega_{f,d}}y_d+\text{inv}^{\text{RCS}}\sum_{a\in\Omega_{f,a}}z_a\right) \quad (13)$$

式中:$\text{INV}(x,y,z)$ 表示自动化终端一次性投资成本,Ω_f 是配电网中的馈线组,$\Omega_{f,a}$ 和 $\Omega_{f,d}$ 分别表示隔离开关(包括手动控制开关和远程控制开关)和故障指示器的候选安装位置集合,inv^{MCS}、inv^{FI} 和 inv^{RCS} 分别是手动控制开关、故障指示器和远程控制开关的一次投资成本。

②后期维护成本

后期维护成本是指自动化终端在整个使用寿命内维护成本总和,其数学表达式为:

$$\text{MAI}(x,y,z)=\sum_{t\in\Omega_t}\frac{1}{(1+\text{DR})^t}\text{INV}(x,y,z) \quad (14)$$

式中:$\text{MAI}(x,y,z)$ 表示自动化终端的后期维护成本,Ω_t 为自动化终端的预计使用寿命,DR 是维护费的折扣率。

③全生命周期成本

全生命周期成本是指一次性投资成本和后期维护成本的总和,其数学表达式为:

$$\text{LCC}(x,y,z)=\text{INV}(x,y,z)+\text{MAI}(x,y,z) \quad (15)$$

式中:$\text{LCC}(x,y,z)$ 是自动终端全生命周期成本。

④网侧停电损失成本

售电公司将在配电网停电后失去所有售电费用,这是由于系统故障所致。在不考虑停电成本和用户购电费用的情况下,系统停电损失可以由供电企业直接计算得到,但该方法并不能反映出用户停电损失的实际大小。在本文中,我们将其视为电网侧的电力中断所带来的经济损失,其数学公式为:

$$\text{GCIC}(x,y,z)=\sum_{t\in\Omega_t}\sum_{f\in\Omega_f}\lambda_i P_{t,k}T_{i,j}(x,y,z)R_k \quad (16)$$

式中:$\text{GCIC}(x,y,z)$ 表示自动化终端的网侧停电损失成本,Ω_f 为馈线 f 的故障集合,λ_i 表示位置 i 发生故障的预期概率,$P_{t,k}$ 表示第 k 类荷载在第 t 年的荷载量,R_k 是第 k 种类型负载的单价。

⑤用户侧停电损失成本

对于终端用户而言,遭受网侧停电所带来的经济损失是不可避免的。为了减少这种经济损失,需要对停电进行预测以降低损失程度。即便负载相同,不同的用户类型也会对停电造成不同的影响,这种影响可以用不同的表述方式来描述:

$$\text{LCIC}(x,y,z)=\sum_{t\in\Omega_t}\sum_{f\in\Omega_f}\lambda_i P_{t,k}\text{CDF}_k(T_{i,j}(x,y,z)) \quad (17)$$

式中:$\text{LCIC}(x,y,z)$ 表示自动化终端的用户侧停电损失,CDF_k 是停电损失函数,它是一个分段阶跃函数。

⑥总停电损失

总停电损失是指自动化终端的网侧停电损失成本和用户侧停电损失成本的总和,其数学表达式为:

$$\text{CIC}(x,y,z)=\text{GCIC}(x,y,z)+\text{LCIC}(x,y,z) \quad (18)$$

式中:$\text{CIC}(x,y,z)$ 表示自动化终端总停电损失。

1.4 可靠性指标

本文所采用的可靠性评估指标为平均供电可靠性率,该指标基于用户实际总供电时间与用户预期总供电时间的比例,即:

$$\text{ASAI}(x,y,z)=\left[1-\frac{\sum_{f\in\Omega_f}\sum_{i\in\Omega_{f,i}}\sum_{j\in\Omega_{f,j}}\lambda_i N_j T_{i,j}(x,y,z)}{31\ 536\ 000\times\sum_{f\in\Omega_f}\sum_{j\in\Omega_{f,j}}N_j}\right]\times 100\% \quad (19)$$

式中:$\text{ASAI}(x,y,z)$ 表示自动化终端的可靠性指标。

1.5 双目标最优配置模型

由于配电网是一个复杂系统,它与用户之间存

在着错综复杂的联系，同时受自然因素和人为因素影响较大，因而使配网的运行方式、设备结构等也各不相同。因此，在规划配电网的投资时，通常期望配电网能够在最小化停电损失的同时，实现最大程度的供电可靠性，因此需要建立相应的优化模型：

$$\text{s.t.}\begin{cases}\begin{cases}\min\ \mathrm{CIC}(x,y,z)\\ \max\ \mathrm{ASAI}(x,y,z)\end{cases}\\ \begin{cases}\mathrm{LCC}(x,y,z)\leqslant \mathrm{LCC}^{\lim}\\ x_a+z_a\leqslant 1\\ \forall f\in\Omega_f, a\in\Omega_{f,a}\end{cases}\end{cases}\tag{20}$$

2　双目标优化模型求解过程

本文所建立的模型在数学上属于多目标混合整数二次规划（Multi-Objective Mixed-Integer Quadratic Programming，MOMIQP）模型，该模型是一种求解大型复杂优化问题的有效工具，可用来研究具有多个约束条件的组合最优化问题和非线性规划问题。鉴于目前多目标算法的局限性，引入了约束算法以解决 GUROBI 问题，并对其特点进行了深入分析。

为了更加便捷地阐述 Epsilon 约束算法，我们采用以下简单的双重目标模型进行解释，

$$\text{s.t. } g(x)\leqslant 0\begin{cases}\max f_1(x)\\ \max f_2(x)\end{cases}\tag{21}$$

首先，定义以下三种类型特殊点：①理想点：设置 $f^I=(f_1{}^I,f_2{}^I)$，其中满足 $f_1{}^I=\max f_1(x)$ 且 $f_2{}^I=\max f_2(x)$；②纳迪尔点：设置 $f^N=(f_1{}^N,f_2{}^N)$，其中所设置的条件满足 $f_1{}^N=\min f_1(x):f_2(x)=f_2{}^I, f_2{}^N=\min f_2(x):f_1(x)=f_1{}^I$；③极限点：通过设置 $f_1{}^E=(f_1{}^I,f_2{}^N)$ 和 $f_2{}^E=(f_1{}^N,f_2{}^I)$，根据定义可知这两点是 Pareto 边界的一部分。

Epsilon 约束算法的独特之处在于首先定位点 f_N，矩形空间则由这两个特征点唯一决定。此外，Pareto 边界上的所有点必须位于该空间内，而矩形空间的另外两个顶点即为 Pareto 边界的两个边界点。该算法选取其中一个边界点为起点，在满足特定约束条件的前提下，向着对应搜索方向搜寻 Pareto 边界，直至找到另一个边界点。

3　案例分析

本文采用 IEEE RBTS-BUS4 配电网系统作为测试配电网系统，如图 4 所示。

表 1 给出了 IEEE RBTS-BUS4 系统生命周期成本约束参数设置。

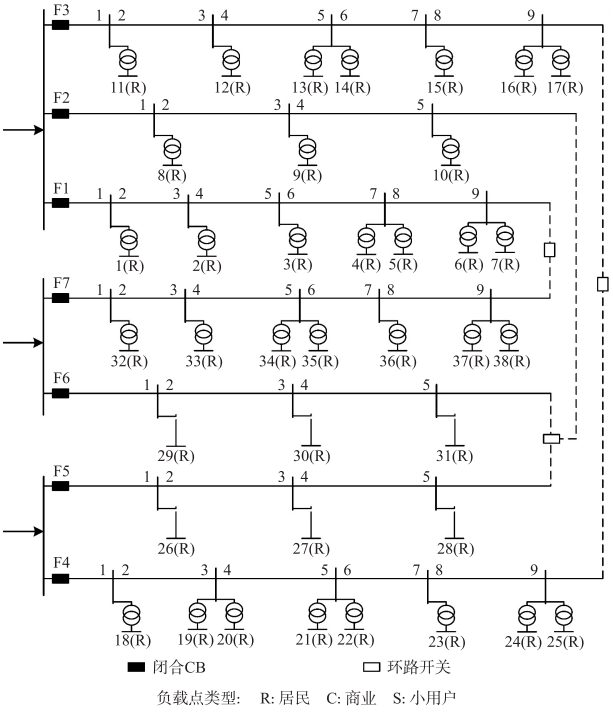

图 4　IEEE RBTS-BUS4 配电网系统

表 1　IEEE RBTS-BUS4 系统成本约束参数表

类别	参数	取值
一次性投资成本	MCS 单位成本	1.2 万元/台
	FI 单位成本	0.35 万元/台
	RCS 单位成本	5.8 万元/台
全生命周期维护成本	MCS 年维护成本占比	2.5%
	FI 年维护成本占比	2.5%
	RCS 年维护成本占比	2.5%
折扣率	维护费折扣率	8%
设备寿命	预计使用寿命	20 年

3.1　确定生命周期成本时的测试分析

在配电网中，由于负载和用户分布的不均匀性以及生命周期成本的限制较小，导致相应的自动化终端数量减少，因此可能会出现各种类型的自动化，而优化配置策略则会在这种情况下提供更多的解决方案。如图 5 所示，在配电网系统停电造成的损失

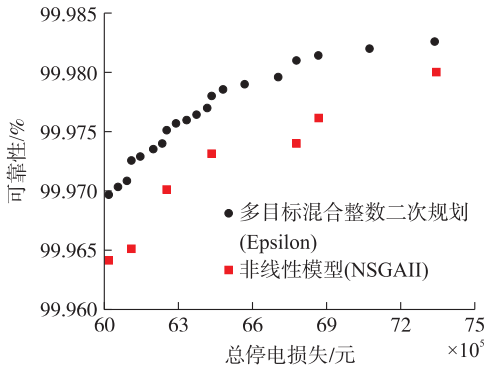

图 5　两种算法的 Pareto 边界计算结果比较

较小的情况下,供电的可靠性也会受到最大的影响;反之则最佳。当电力供应的可靠性达到最佳状态时,相应的停电损失也将达到顶峰。

根据图 5 所示,NSGAII 算法所探测到的边界点数量较 Epsilon 约束算法为少,且解的质量明显较低。因此,相较于加权法、层次字典法和 NSGAII 算法,Epsilon 约束算法能够直接获取所有 Pareto 边界,并在理论上保证解的质量,这一点毋庸置疑。同时,该算法也能够有效减少计算时间。因此,在配电网自动化终端配置方面,该算法提供了一种更加直观的方式来分析两个目标之间的相互关系,从而有助于实现自动化终端配置的不同目标。

3.2 未确定生命周期成本时的测试分析

本文对生命周期成本限制进行了逐步拓展,对本章所提出的 MOMIQP 模型进行了求解,并深入探讨了 Epsilon 约束算法的优越性,其结果呈现于图 6 和图 7 之中。

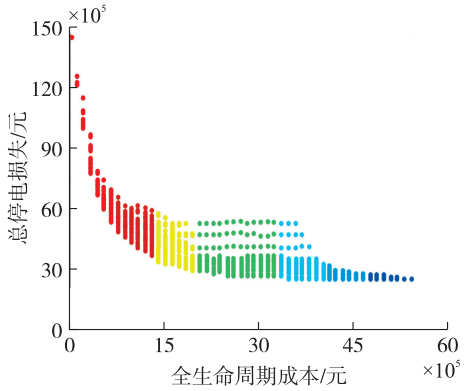

图 6 总停电损失与全生命周期成本的关系

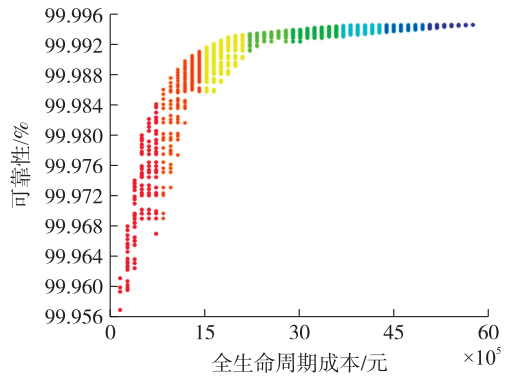

图 7 配电可靠性与全生命周期成本的关系

结合上图可以发现,此时 Pareto 边界从平面空间扩展到三维空间,通过观察可以得到以下特征:

①在生命周期成本低于 150 万元的情况下,通过少量的生命周期成本投资,可以显著降低停电损失,并大幅提升供电的可靠性。然而,在生命周期成本超过 150 万元且不超过 450 万元的情况下,停电损失和供电可靠性的改善程度逐渐减弱并逼近饱和状态。生命周期成本超过 450 万元后,附加生命周期成本投资并不会显着增加停电损失或者供电可靠性,这时投资就会大大浪费。

②在未配置任何自动化终端且其生命周期成本为零的情况下,配电网的停电损失和供电可靠性是确定的,因此它们在空间中独立存在。在考虑到不同方案间的优劣比较之后,可以得出最优方案,该方案将对配网规划产生最大影响。随着生命周期成本的不断攀升,自动化终端的种类、数量和位置或许会呈现出多种不同的组合形式。在考虑到每个方案的投资费用之后,我们得到了最优的配电自动化系统布局。因此,多个解决方案的 Pareto 边界图对应着相同的生命周期成本,这是一种普遍适用的成本分配方式。同时,在配电网络规划阶段考虑自动化终端配置问题也可以有效地降低全系统的总停电损失。然而,随着寿命周期成本的不断攀升,整个配电网的自动化终端已经接近饱和,自动化终端的不断增加逐渐降低了停电损失,从而提高了供电的可靠性。当所有配电网的位置都配备了相应类型的自动化终端时,停电损失和供电可靠性再次呈现出独立的空间节点。

在生命周期成本约为 150 万左右的情况下,投资于自动化终端的配置较少,可以显著提高停电损失和供电可靠性,从而达到最经济的效果。由于极少数自动化终端拥有多种配置模式,因此在相同的生命周期成本下,它们可能会面临更高的停电损失和电源可靠性组合的风险。

在求解上述的双目标模型时,若采用加权方法或字典排序方法,由于无法直接获取 Pareto 边界,因此观察上述特征变得困难,而使用 NAGAII 算法则无法确保求解的质量。此外,在规划期内,如果配电系统中存在多个变电站且每个站都有相同的运行时间和容量要求,则会产生大量冗余设备,降低整个电网的经济性和安全性。因此,在不同的需求条件下,优化配电网自动化终端的配置是一项极具挑战性的任务。然而,Epsilon 约束算法以其直接求解 Pareto 边界的方式,成功地解决了停电损失与供电可靠性之间复杂关系的问题。

4 结论

配电网自动化终端是缓解永久性故障影响的核心设备,传统单目标配置方法难以满足“经济性-可靠性”协同需求。本文提出基于 Epsilon 约束算法的双目标配置方法,通过定义手动控制开关(MCS)、

故障指示器(FI)、远程控制开关(RCS)的停电时间表达式构建停电损失模型,以“最小化总停电损失”“最大化平均供电可靠性(ASAI)”建立双目标模型并求解,经 IEEE RBTS-BUS4 系统验证效果显著。算例显示,与 NSGAII 算法相比,本文方法计算效率提升 32%,Pareto 最优解数量增加 45%;全生命周期成本 150 万元约束下,总停电损失从 86.2 万元降至 61.7 万元(降幅 28.5%),ASAI 从 99.75%提升至 99.92%;成本超 450 万元时,附加投资仅使停电损失再降 7.2%、ASAI 再升 0.05%。该方法可为终端配置提供量化支撑,助力配电网自动化建设高效化。

参考文献:

[1] 张明泽,栾文鹏,艾欣,等. 基于低压量测的小电流系统单相接地故障检测方法[J]. 电网技术,2023,47(8):3457-3466.

[2] 刘伯文,张旭,王怡,等. 计及馈线自动化故障处理全过程的配电终端优化布置方法[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(9):97-107.

[3] 杜志华,徐驰,秦至臻,等. 基于智能融合终端的中压配电线路断线故障检测方案[J]. 电网与清洁能源,2022,38(12):79-85,94.

[4] 陈锐智. 配电网自动化终端最优配置策略[D]. 北京:华北电力大学(北京),2020.

[5] 刘洪,滑雪娇,韩柳,等. 配电网网架规划与多模块智能终端配置联合优化方法[J]. 电力自动化设备,2023,43(1):41-47.

[6] 于海平,吴雪琼,杜天硕. 不平衡数据集下海量配电网量测终端故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2023,35(4):32-40.

[7] 薛斌,马晓伟,任景,等. 基于双向长短时记忆网络和设备未来态的停电优化模型[J]. 电子器件,2022,45(3):732-738.

[8] 吴争荣,包新晔,尹立彬,等. 基于 BGA 的配电网可靠性自恢复方法[J]. 沈阳工业大学学报,2023,45(3):253-258.

[9] 王勇,金飞宇,张子信,等. 考虑差异化负荷特性的基于改进遗传算法的供电可靠性分析[J]. 沈阳工业大学学报,2023,45(5):491-496.

[10] 赵勇,卢建刚,王飞,等. 考虑差异化负荷特性的基于改进遗传算法的供电可靠性分析[J]. 电子器件,2025,48(2):401-406.

[11] Farajollahi M, Fotuhi-Firuzabad M, Safdarian A. Deployment of Fault Indicator in Distribution Networks: A MIP-Based Approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(3):2259-2267.

[12] Farajollahi M, Fotuhi-Firuzabad M, Safdarian A. Simultaneous Placement of Fault Indicator and Sectionalizing Switch in Distribution Networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019,10(2):2278-2287.

[13] 潘凯岩,赵瑞锋,刘海信,等. 基于图论和遗传优化算法的自愈型配电网馈线重构[J]. 电子器件,2025,48(2):414-419.

[14] 陈恒,王鹏玮,徐丙垠,等. 配电线路自适应相序识别方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(6):53-64.

曹轩玮(1994—),男,江苏泰州人,本科,主要从事电力营销业务产品设计,dongzi361@ sina.com。