

# 配电网网架规划与多模块智能终端配置联合优化方法

刘洪<sup>1</sup>, 滑雪娇<sup>1</sup>, 韩柳<sup>2</sup>, 周沫<sup>3</sup>, 梁荣<sup>4</sup>

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209;

3. 国网辽宁省电力有限公司 经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015;

4. 国网山东省电力有限公司 经济技术研究院, 山东 济南 250021)

**摘要:**针对现有配电网网架规划方法未能与二次设备充分协调及对二次设备类型考虑不全等问题,提出了一种网架规划与多模块智能终端配置联合优化方法。介绍多模块智能终端的组成模块,并分析保护与自动化配合的故障处理策略;基于该故障处理策略,定义含多模块智能终端的配电网故障处理时间与馈线分区逻辑;提出配电网网架规划与多模块智能终端配置协同规划框架,构建交替优化数学模型,并采用粒子群优化算法进行求解;通过IEEE RBTS BUS-2 配电系统和某60节点城市配电网2个实例,验证了所提方法的有效性和实用性。

**关键词:**配电网;网架规划;智能终端;协同规划;可靠性

**中图分类号:**TM 715

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202207022

## 0 引言

配电网处于电力系统的末端,直接与各个用电用户相连,对供电质量与可靠性有着至关重要的影响。一次网架结构是配电网的基础,合理的网架规划是配电网可靠运行的前提<sup>[1]</sup>;二次设备可用于配电网的测量、保护与控制,恰当的终端配置能够保障并进一步提高配电网的可靠性<sup>[2]</sup>。当前,两者的规划方法主要是先使一次网架达到最高可靠程度,在此基础上再考虑二次设备的配置。然而,若能同时开展一二次的规划,合理布局二次设备,可降低对网架结构要求的严苛程度,使配电网建设成本大幅下降,满足在可靠性约束下配电网运营效率的提升。其中,二次设备可进一步分为保护设备和自动化设备。当配电网出现故障或异常情况时,继电保护装置可以直接将故障部分隔离、切除,具有响应快速、不受通信影响等优点<sup>[3]</sup>;自动化终端可实现对配电网的监测、控制以及故障后的快速处理等<sup>[4-5]</sup>。因此,将二次设备类型进行细分,考虑保护和自动化在故障处理方面的功能互补,进一步考虑网架、自动化以及继电保护的协同规划将对配电网的可靠经济建设有重要意义。

本文考虑的继电保护模式为级差保护,其利用上下级之间电流和时间的不同来完成保护。①在网架规划与级差保护配置方面,文献[6]针对城市配电网供电半径短、继电保护配合困难的问题,提出了一

种基于限流级差配合的继电保护方案,以降低短路电流水平以及对设备的危害;文献[7]针对本地保护不正确动作的情况,根据断路器的配置情况划分保护区域,并结合阶段式过流保护提出配电网区域保护方案。②在网架规划与自动化终端配置方面,国内外提出的终端配置模型大多以配电网可靠性或经济性作为切入点,既有对已有网架中终端的安装位置和类型的研究<sup>[8-9]</sup>,也有对网架与终端的协同规划的研究<sup>[10-11]</sup>。文献[8]以经济性最优为目标,确定配电网中开关设备和配电自动化终端的安装位置和安装类型;文献[11]结合配电自动化终端类型与通信方式,提出了一种配电网网架结构与配电自动化终端协同规划方法。③在配电自动化与保护配合的研究方面,文献[12]归纳了配电网故障处理过程,对配电网继电保护、就地馈线自动化、智能接地配电系统等方法进行了深入研究;文献[13]指出继电保护的配合可以提高配电自动化的故障处理性能,主干线故障依靠集中智能配电自动化处理,分支故障可依靠继电保护形成多级配合,从而不影响主干线正常供电。

上述文献分别考虑了网架与保护、网架与自动化终端、自动化终端与保护的配合,并未在配电网的规划阶段考虑三者之间的相互作用关系。配电网一次网架结构微调会对保护设备和自动化终端配置产生巨大影响,2类二次设备之间也存在着配合的空间。因此,需要同时考虑网架、保护以及自动化终端在规划环节中的交互作用问题,从而提升规划方案的经济性与可行性。

基于上述分析,本文提出了配电网网架规划与多模块智能终端(multi-module intelligent terminal, MIT)配置联合优化方法。首先,介绍本文所考虑的

收稿日期:2021-11-17;修回日期:2022-04-13

在线出版日期:2022-07-26

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(5106-202056130A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5106-202056130A-0-0-00)

多模块智能终端的组成模块及其类型特点,并确定智能终端的自动化控制模式;其次,根据级差保护与自动化控制模式相配合的故障处理策略,定义配置多模块智能终端后的配电网馈线分区,以此作为可靠性评估的基础;然后,在网架规划的总体过程中嵌入多模块智能终端优化配置模块,建立配电网网架规划与多模块智能终端配置协同规划框架,并构建数学模型;最后,采用粒子群优化算法求解上下层模型,利用IEEE RBTS BUS-2和某60节点城市配电网作为实例,对不同方案下的系统可靠性及成本费用进行对比分析,验证了所提方法的有效性。

## 1 考虑多模块智能终端的馈线分区

### 1.1 多模块智能终端

继电保护中的级差保护在故障发生后,从保护装置启动到断路器动作跳开的时间在150 ms以内,但故障定位、隔离以及负荷转供均需要人工现场操作,故障处理时间长达数小时;自动化终端可辅助实现故障自动定位<sup>[14]</sup>,其中“三遥”终端可实现远程故障隔离与负荷转供,大幅缩短了故障处理时间,但其故障切除时间因控制模式的不同在秒级与分钟级不等。

多模块智能终端能够充分结合并发挥二者优势,主要包括故障检测模块、故障显示模块、继电保护模块、电动操作模块、信息收发模块等,如图1所示。“二遥”终端在故障发生后可以指示故障位置并实现故障信息的上报;“三遥”终端在“二遥”终端的基础上增加了电动操作模块,可远程遥控其对开关进行操作实现配电网重构。继电保护模块可以选择性地配置在上述2类终端中,在故障发生后根据继电保护模块设置的保护模式对开关进行操作。

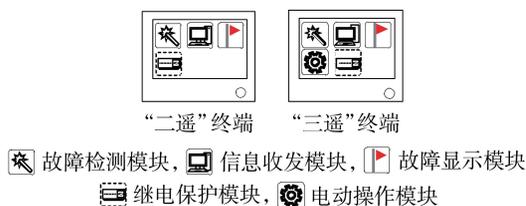


图1 多模块智能终端设备

Fig.1 Multi-module intelligent terminal equipment

### 1.2 考虑多模块智能终端的故障处理时间

考虑多模块智能终端后的故障处理时间 $T$ 包括故障定位时间 $t_1$ 、故障隔离时间 $t_2$ 、负荷转供时间 $t_3$ 以及故障修复时间 $t_4$ ,具体为:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (1)$$

1)故障定位时间 $t_1$ 包括“二遥”或“三遥”终端上传故障信息的时间以及主站确定故障区域的时间。

2)故障隔离时间 $t_2$ 包括远程隔离时间 $t_{2,r}$ 和现场隔离时间 $t_{2,s}$ 。远程隔离时间为工作人员遥控最邻近故障点的“三遥”终端的时间;现场隔离时间为检修人员到达现场操作开关恢复故障区上游负荷供电的时间。

3)负荷转供时间 $t_3$ 包括远程转供时间 $t_{3,r}$ 和现场转供时间 $t_{3,s}$ 。远程转供时间为工作人员遥控故障隔离区下游装有“三遥”终端的联络开关的时间;现场转供时间为检修人员操作故障点最邻近的下游开关打开,闭合联络开关的时间。

4)故障修复时间 $t_4$ 为检修人员现场修复故障的时间。

### 1.3 考虑智能终端设备配置的馈线分区

将具有共同入口开关的元件划分为一个馈线分区,内部不含开关装置的馈线分区称为最小隔离区<sup>[15]</sup>,同一最小隔离区的元件故障影响相同。根据故障发生时相对故障区的位置,可以将各最小隔离区进一步划分。以图2所示的配电网馈线分区为例,根据定义,其被划分为6个最小隔离区,当区域 $D_3$ 发生故障时,分析不同分区的类型。

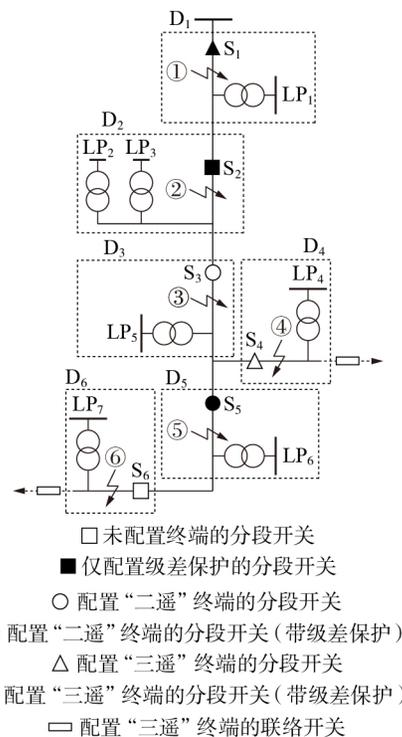


图2 配置多模块智能终端设备后的馈线分区

Fig.2 Feeder zoning after configuring MIT equipment

1)故障区(区域 $D_3$ )。将故障元件所属的最小隔离区定义为故障区,故障区域停电时间为 $T$ 。

2)正常区(区域 $D_1$ )。正常区指在故障区的上游区域中,通过级差保护与故障区快速隔离的最小隔离区,停电时间近似为0。

3)上游隔离区(区域 $D_2$ )。上游隔离区为从故障区入口开关所连接的另一最小隔离区到正常区之间的区域。停电时间因其入口开关和故障区入口开关

配置的多模块智能终端类型不同而不同。若上游隔离区和故障区的入口开关至少一处配置“二遥”终端或未配置终端,则其停电时间为故障隔离时间 $t_2$ (都需要人工现场操作开关分合);若上游隔离区入口开关和故障区入口开关均配置“三遥”终端,停电时间为远程故障隔离时间 $t_{2,r}$ 。

4) 联络转供区(区域 $D_4—D_6$ )。联络转供区定义为发生故障后可以通过下游联络线路转供恢复供电的区域。联络转供区停电时间因其入口开关配置的多模块智能终端类型不同而不同。若联络转供区的入口开关配置“二遥”终端或未配置终端,则停电时间为负荷转供时间 $t_3$ (对应区域 $D_5、D_6$ );若联络转供区的入口开关配置了“三遥”终端,则停电时间为远程负荷转供时间 $t_{3,r}$ (对应区域 $D_4$ )。此外,若联络线无法将故障区下游负荷全部转供,则被削减的负荷停电时间为故障处理时间 $T$ 。

总之,进行上述网络结构的详细分析可以降低可靠性评估的复杂程度,减少分析的工作量。

## 2 配电网网架规划与多模块智能终端设备配置协同优化模型

### 2.1 协同优化框架

配电网网架规划与多模块智能终端设备配置的协同优化框架如图3所示,协同优化即在进行网架规划的同时,将多模块智能终端设备的规划纳入优化过程。实现方法是将多模块智能终端设备的部署费用加入网架规划的适应度函数中进行协同优化,最后得到整体的优化方案。

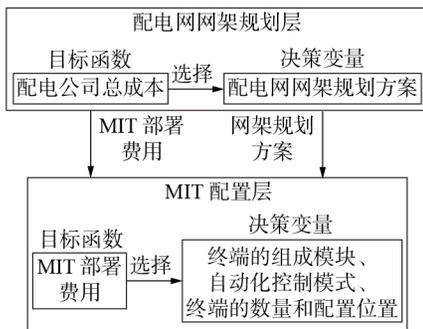


图3 网架规划与多模块智能终端配置协同优化框架

Fig.3 Grid planning and MIT configuration collaborative optimization framework

在下层规划中,通过对智能终端设备组成模块进行选择来确定终端的类型(“二遥”或“三遥”)以及是否配备继电保护模块;通过级差保护的配置位置来确定其保护动作时间;通过配电网可靠性约束的程度来确定自动化控制模式(集中式或智能分布式)以及终端的数量和位置。

## 2.2 数学模型

### 2.2.1 配电网网架规划层

#### 1) 目标函数。

网架规划层以网架建设和多模块智能终端设备部署的年综合费用 $F$ 最小为目标函数,具体表达式如下:

$$\min F = F_U + F_L \quad (2)$$

$$F_U = C_{\text{line,inv}} + C_{\text{line,main}} \quad (3)$$

$$C_{\text{line,inv}} = \frac{\gamma(1+\gamma)^m}{(1+\gamma)^m - 1} \sum_{i,j} x_{ij} L_{ij} c_{\text{line}} \quad (4)$$

$$C_{\text{line,main}} = \mu C_{\text{line,inv}} \quad (5)$$

式中: $F_U$ 为上层规划的年总费用; $F_L$ 为下层规划的年总费用; $C_{\text{line,inv}}$ 为网架建设的投资费用等年值,包括新建线路和联络线路; $C_{\text{line,main}}$ 为配电网的运维费用; $\gamma$ 为贴现率; $m$ 为线路的使用年限;下标 $i$ 和 $j$ 为配电网节点编号; $x_{ij}$ 为表示节点 $i$ 和节点 $j$ 间的线路是否投建的0-1变量, $x_{ij}=1$ 表示投建, $x_{ij}=0$ 表示不投建; $L_{ij}$ 为节点 $i$ 和节点 $j$ 间的线路的长度; $c_{\text{line}}$ 为单位长度线路的建设费用; $\mu$ 为线路运维费用占投资的比例。

#### 2) 约束条件。

##### (1) 潮流约束。

采用潮流计算来校验生成网架的节点电压和各条线路的负载率是否在规定范围内。

##### (2) 网络连通性与开环运行约束。

配电网必须对所有负荷点供电,避免出现孤岛和成环的现象。每条馈线均能通过唯一的联络线路与其他馈线进行站间联络。

### 2.2.2 多模块智能终端配置层

#### 1) 目标函数。

多模块智能终端配置的目标是在满足系统可靠性需求的前提下,使终端建设的总费用最低,包括智能终端设备的年综合费用 $F_{\text{MITD}}$ 以及在此终端配置方案下每年停电造成的损失费用 $F_{\text{fail}}$ ,目标函数具体表达式如下:

$$\min F_L = F_{\text{MITD}} + F_{\text{fail}} \quad (6)$$

相关费用的计算公式如下。

#### (1) 多模块智能终端设备年综合费用。

$$F_{\text{MITD}} = C_{\text{MITD,inv}} + C_{\text{MITD,main}} \quad (7)$$

$$C_{\text{MITD,inv}} = \frac{\sigma(1+\sigma)^p}{(1+\sigma)^p - 1} (n_r c_r + n_{s2} c_{s2} + n_{s3} c_{s3}) \quad (8)$$

$$C_{\text{MITD,main}} = \alpha C_{\text{MITD,inv}} \quad (9)$$

式中: $C_{\text{MITD,inv}}$ 为多模块智能终端设备的投资费用等年值; $C_{\text{MITD,main}}$ 为多模块智能终端设备的运行维修费用; $n_r$ 为配置继电保护模块终端的数量; $n_{s2}$ 和 $n_{s3}$ 分别为“二遥”和“三遥”终端的数量; $c_r$ 为保护模块的投资费用现值; $c_{s2}$ 和 $c_{s3}$ 分别为“二遥”和“三遥”终端的投资费用现值; $p$ 为设备的经济使用年限; $\sigma$ 为投资

回收率; $\alpha$ 为终端运维费用占投资的比例。

(2)每年停电造成的损失费用。

$$F_{\text{fail}} = \sum_{k=1}^{N_c} P_k T_{\text{OFF}k} R \quad (10)$$

式中: $N_c$ 为系统中负荷节点数量; $P_k$ 为系统负荷节点 $k$ 的平均负荷; $T_{\text{OFF}k}$ 为系统负荷节点 $k$ 的年平均停电时间; $R$ 为单位停电损失费用。

2)约束条件。

供电可靠性是配电系统规划、建设、运维、检修等环节技术的综合体现。系统平均供电可用率指标(average service availability index, ASAI)是配电系统可靠性的重要评估指标,计算公式如下:

$$\delta_{\text{ASAI}} = \left( 1 - \frac{\sum U_k N_k}{8760 \sum N_k} \right) \times 100\% \quad (11)$$

$$\delta_{\text{ASAI}} \geq \delta_{\text{ASAI0}} \quad (12)$$

式中: $\delta_{\text{ASAI}}$ 为某种多模块智能终端配置模式下的系统ASAI值; $U_k$ 为负荷节点 $k$ 的年平均停电时间; $N_k$ 为负荷节点 $k$ 所连的用户数; $\delta_{\text{ASAI0}}$ 为规划要求的可靠性水平。

### 3 模型求解方法

#### 3.1 配电网网架规划层求解步骤

本文的网架规划问题采用收敛速度快的粒子群优化算法求解,为了降低在寻优过程中不可行解的数量,提高寻优效率,借鉴图论中避圈法的思想初始生成的网架结构,从而保证每次产生的解是可行的。配电网网架规划层编码方式与主要求解思路见文献[16],本文不再赘述。

#### 3.2 多模块智能终端层求解步骤

本文下层模型采用整数粒子群优化算法进行求解,粒子每一维的取值范围有1—6这6个值,分别对应图2中的6类分段开关类型。每条建设线路的始端可以选择性地配置终端,每个粒子的维度等于配电网建设的线路数量。粒子的适应度函数值采用2.2.2节构建的终端建设总费用。

主要求解思路如下。

1)根据上层传递的线路建设方案进行广度优先遍历,生成辐射形逻辑关系矩阵。

2)判断线路首端和终端类型进行馈线分区。将分区看作一个节点,若分区内无线路则故障率为0,若分区内有线路则计算其作为节点的故障影响。

3)遍历划分的馈线分区,寻找含联络开关的分区,并确定与之相连的分区号与终端类型。

4)存储故障时各分区停电时间,计算可靠性和停电损失费用,判断是否满足可靠性约束条件,并更新粒子群。

上下2层模型交替迭代,直至满足上层粒子群

优化算法的收敛条件,制定出最优的配电网网架结构和多模块智能终端规划方案。

## 4 算例分析

### 4.1 配置不同类型终端的费用及可靠性对比

1)算例概况。

本文算例采用IEEE RBTS BUS-2配电系统,该系统共有4条出线,分别形成2组单环网,其中各个元件的具体参数、可靠性相关参数及网络数据见文献[17]。各类智能终端的参数如下:故障修复时间为4h;未配置终端时,故障查找与人工隔离故障时间之和为3h,继电保护装置的故障切除时间忽略不计,安装“二遥”终端后,自动故障查找与人工隔离故障时间为1h,安装“三遥”终端后,自动隔离故障和恢复供电时间为0.05h;仅配置继电保护模块智能终端0.7万元/组,“二遥”终端1万元/组,“三遥”终端5万元/组;多模块智能终端的运维费用按投资费用的3%计,单位停电损失费用为20元/(kW·h)。

2)算例结果与分析。

为了验证保护与自动化相互配合能够进一步提高配电网可靠性,设计了如下3种方案进行对比验证,可靠性指标约束为99.94%。方案1,对现有网架配置级差保护;方案2,对现有网架配置不安装继电保护模块的智能终端;方案3,对现有网架配置多模块智能终端。分别计算3种方案下满足可靠性约束、费用最低的终端配置方案。3种方案的配置结果分别见附录A图A1—A3,其成本及可靠性指标见表1。

表1 方案1—3费用和供电可靠性比较

Table 1 Comparison of cost and power supply reliability among Case 1, 2 and 3

指标	数值		
	方案1	方案2	方案3
$F_{\text{MTD}}$ / 万元	1.0744	5.4720	4.9761
$F_{\text{fail}}$ / 万元	21.5071	15.9013	13.4920
ASAI / %	99.9471	99.9692	99.9701
网络年综合费用 / 万元	22.5837	21.3733	18.4681

分析表1中数据可知,虽然仅配置继电保护的多模块智能终端设备年综合费用 $F_{\text{MTD}}$ 最低,但是每年停电造成的损失费用 $F_{\text{fail}}$ 最高。加入自动化终端后,尽管方案2和方案3的多模块智能终端设备年综合费用较方案1有所增加,但随着二次设备功能多样性的提升,人工现场操作次数减少,每年停电造成的损失费用因停电时间的缩短而下降,因而年综合费用明显降低。与方案2相比,方案3中继电保护与自动化终端相结合,可以进一步缩短故障隔离时间,面对同样的可靠性约束,减少高成本终端的数量,可以找到年综合费用更低的方案。

进一步分析 3 种方案下的终端布局结果。与方案 1 相比,方案 2 和方案 3 下终端的数量更少。为满足可靠性约束,方案 1 下分段开关几乎均配置继电保护,由于各馈线上最小隔离区内线路总长度相差不多,级差保护较为均匀地配置在分段开关上,未配置保护的线路 24 处于馈线末端,其保护的配置与否对系统整体可靠性影响不大,因此难以通过配置继电保护进一步提高方案 1 的可靠性。受光纤布置成本影响,方案 2 靠近电源的分段开关均配置“三遥”终端,远离电源的位置根据经济性与可靠性需求选择性地配置“二遥”终端。方案 3 由于各馈线出口的断路器已配置带级差保护的“三遥”终端且可靠性约束较易满足,故其下一处“三遥”终端未配置级差保护而将级差保护配置在线路的中间位置。与方案 2 相比,方案 3 下线段 14 上带级差保护的“二遥”终端替代了“三遥”终端。故障发生后,“二遥”终端与继电保护结合使其所处的最小隔离区开关可以依级差保护原则断开,但不可被遥控参与故障隔离,因此可配置在馈线较短且上游故障次数较低的区域后。线段 34 上仅配置级差保护的终端替代了“二遥”终端,这是因为线段 34 处于馈线末端且馈线较短,其发生故障后的快速隔离可以降低整条馈线的停电时间。

#### 4.2 一二次顺序规划与协同规划对比

为验证本文所提配电网网架规划与多模块智能终端配置协同优化方法的有效性,对协同规划与顺序规划在同一算例下的规划结果进行对比。将某地区实际配电网作为算例系统,配电网的结构及各负荷点类型、线路及节点信息见文献[18],线路建设成本为 15 万元/km、馈线故障率为 0.065 次/(a·km),网架的运维费用按投资费用的 4% 计。智能终端设备参数与 4.1 节相同。待规划配电网结构图见附录 A 图 A4。可靠性约束为 99.94%,单位停电损失费用为 20 元/(kW·h)时设置如下 2 种方案:第一种方案采用顺序规划,即先进行网架规划,再在规划得到经济性最优网架的基础上,进行级差保护与自动化终端的配置;第二种方案采用协同规划,即采用本文所提方法,一次网架与二次设备共同规划。分别计算 2 种方案在满足可靠性约束下总费用最低的规划结果,顺序规划和协同规划的规划结果分别如图 4(a)、(b)所示。需要说明的是,图中所有断路器已配置带级差保护“三遥”终端,联络开关已配置“三遥”终端。

顺序规划和协同规划的费用与供电可靠性比较如表 2 所示。通过对比表中的结果可知,顺序规划先以网架规划费用最小为目标建设线路,故网架投资年费低于协同规划。然而网架总长度最短,线路的布局不一定最合理,需要增加智能终端投资费用以满足可靠性约束,故多模块智能终端设备年综合

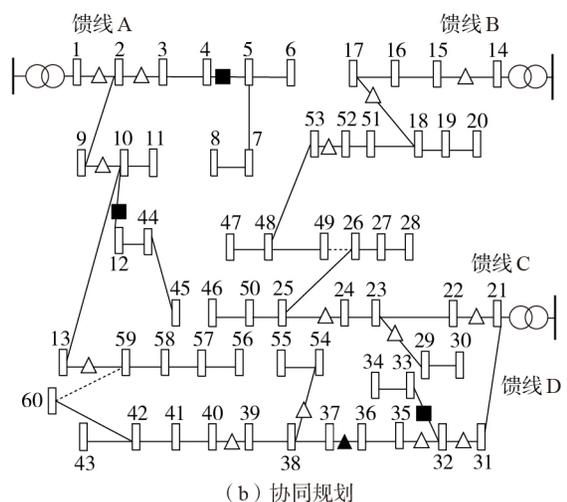
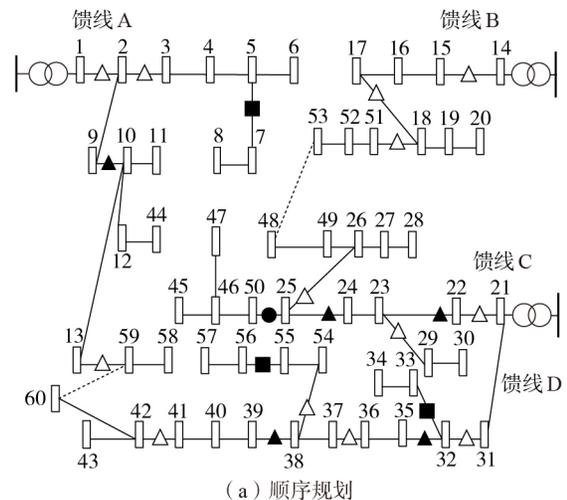


图 4 不同方案的规划结果  
 ■ 仅配置级差保护的分段开关  
 ● 配置“二遥”终端的分段开关(带级差保护)  
 △ 配置“三遥”终端的分段开关  
 ▲ 配置“三遥”终端的分段开关(带级差保护)  
 □ 负荷节点, ..... 联络线路, — 馈线段

图 4 不同方案的规划结果

Fig.4 Planning results of different cases

表 2 顺序规划和协同规划费用与供电可靠性比较  
 Table 2 Comparison of cost and power supply reliability between sequential planning and collaborative planning

指标	数值	
	顺序规划	协同规划
$F_U$ / 万元	67.3689	95.4917
$F_{MTD}$ / 万元	18.8983	14.1211
$F_{int}$ / 万元	166.7626	95.2576
ASAI / %	99.9515	99.9730
网络年综合费用 / 万元	253.0390	204.8704

费用较高。协同规划以年综合费用最小为目标,不拘于线路总长度,网架结构与终端之间相互影响,在满足可靠性约束的同时尽量降低了综合费用。

进一步分析规划结果。顺序规划中馈线 C、D 总长度较长,导致一条线段故障后影响范围大,这是降低可靠性的主要原因,进行终端规划时需要将较多

配置高的智能终端配置在馈线C、D上,而协同规划中待建线路较为均匀地分配给各条馈线。此外,2种方案在主干线的分支处多配置“三遥”终端隔离故障,并在联络开关的容量范围内配置“三遥”终端与联络开关相配合。对于较长的馈线段,其前后均应该配置“三遥”终端隔离故障。由馈线的级差保护布局可以看出,靠近电源的分支要求在故障发生后及时与主干断开,减小其故障影响范围,若该分支较短、所带负荷重要性较低,可以不配置“三遥”终端而用继电保护代替。此外,一条馈线上的继电保护模块不宜配置过多,避免出口断路器上的保护动作时间较长。

## 5 结论

本文研究了考虑保护与自动化相配合的二次设备对配电网可靠性和网架规划的影响,提出了一种配电网网架规划与多模块智能终端配置联合优化方法,通过算例分析进行验证,得出如下结论。

1)对于给定的网架结构,可靠性主要受二次设备配置情况的影响。在二次设备规划中,不同方案之间可以找到兼顾可靠性和经济性的配置结果。具有继电保护功能的“二遥”终端在一定程度上减少了“三遥”终端的配置数量,因此在实际工程中应当充分考虑保护与自动化在故障处理过程中的配合,这样能够有效降低设备配置成本,提高供电可靠性。

2)对于可靠性要求较高的规划区域,基于规划导则和标准在网架规划的同时加入对多模块智能终端的配置,考虑线路负荷水平和可靠性需求进行两者的协同优化,这样能够在保证可靠性要求的同时降低网架规划费用和终端配置费用,并使配电网管理智能化。

本文在计算可靠性时主要考虑了网络拓扑和终端配置对配电网可靠性的影响,后续将考虑终端设备故障以及通信链路失效下的配电网可靠性,并进行配电网规划。此外,研究分布式电源接入后三者的规划问题也是后续的工作重点。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 柴雁欣,向月,刘俊勇.面向可靠性提升的关联规则驱动下配电网投资规划优选模型与方法[J].电力自动化设备,2020,40(3):85-92.  
CHAI Yanxin, XIANG Yue, LIU Junyong. Optimization model and method of distribution network investment planning driven by correlation rules for reliability improvement [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 85-92.
- [2] 王宝平,常新平,官建涛.配电线路故障的快速切除与隔离[J].电力自动化设备,2005,25(11):56-59.  
WANG Baoping, CHANG Xinping, GUAN Jiantao. Fast fault clearing and isolation of power distribution lines [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 56-59.
- [3] 刘健,刘超,张小庆,等.基于供电可靠性的配电网继电保护规划[J].电网技术,2016,40(7):2186-2191.  
LIU Jian, LIU Chao, ZHANG Xiaoqing, et al. Planning of protective relay coordination for power distribution systems based on service reliability [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2186-2191.
- [4] 武奕彤.智能配电网分布式拓扑识别与应用方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(16):136-142.  
WU Yitong. Distributed topology identification and application method of smart distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(16): 136-142.
- [5] 邓良辰,刘艳丽,余贻鑫,等.考虑故障处理全过程的配电网信息物理系统可靠性评估[J].电力自动化设备,2017,37(12):22-29.  
DENG Liangchen, LIU Yanli, YU Yixin, et al. Reliability assessment of distribution network CPS considering whole fault processing [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 22-29.
- [6] 刘健,张志华,芮骏,等.基于限流级差配合的城市配电网高选择性继电保护方案[J].电力系统自动化,2019,43(5):101-106.  
LIU Jian, ZHANG Zhihua, RUI Jun, et al. Highly selective relay protection scheme for urban distribution network based on current limiting grade difference coordination [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 101-106.
- [7] 马静,张涌新,项晓强,等.基于保护动作信号的配电网区域保护方案[J].电力自动化设备,2018,38(3):34-41.  
MA Jing, ZHANG Yongxin, XIANG Xiaoliang, et al. Regional protection scheme of distribution network based on operating signal of protection [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 34-41.
- [8] 李子韵,成乐祥,王自桢,等.配电自动化终端布局规划方法[J].电网技术,2016,40(4):1271-1276.  
LI Ziyun, CHENG Lexiang, WANG Zizhen, et al. A method of layout planning for distribution automation terminal [J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1271-1276.
- [9] 刘坤,王克文,祁小鹏.基于元件故障率曲线的配电网可靠性评估和配电终端优化配置[J].电力系统保护与控制,2017,45(13):49-56.  
LIU Kun, WANG Kewen, QI Xiaopeng. Reliability evaluation and distribution terminal optimal configuration of power distribution system based on bathtub curve of component failure rate [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 49-56.
- [10] 吕小东,高红均,叶圣永,等.考虑事故-经济重构共同影响的配电网智能终端规划[J].中国电机工程学报,2022,42(2):589-603.  
LÜ Xiaodong, GAO Hongjun, YE Shengyong, et al. Intelligent terminal planning strategy considering reliability and economy reconfiguration for distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 589-603.
- [11] 钟士元,熊宁,张成昊,等.配电网网架结构与配电自动化终端协同规划方法[J].电力建设,2020,41(3):23-30.  
ZHONG Shiyuan, XIONG Ning, ZHANG Chenghao, et al. A collaborative planning method for grid structure of distribution network structure and distribution automation terminal [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(3): 23-30.
- [12] 刘健,张志华,张小庆.配电网故障处理若干问题探讨[J].电力系统保护与控制,2017,45(20):1-6.  
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Investigation on fault processing for electric power distribution networks [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-6.

- [13] 刘健,张小庆,张志华. 继电保护配合提高配电自动化故障处理性能[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(22):10-16.  
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua. Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids[J]. Power System Protection and Control,2015,43(22):10-16.
- [14] 曾广璇,余涛,林丹,等. 基于分布式馈线自动化的配电信息物理系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):57-68.  
ZENG Guangxuan, YU Tao, LIN Dan, et al. Reliability assessment of cyber physical distribution system based on distributed feeder automation[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(12):57-68.
- [15] 葛少云,王浩鸣,王源山,等. 含分布式风光蓄的配电系统可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2012,36(5):16-23.  
GE Shaoyun, WANG Haoming, WANG Yuanshan, et al. Reliability evaluation of distribution system including distributed wind turbines, photovoltaic arrays and batteries[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(5):16-23.
- [16] 刘洪,郑楠,葛少云,等. 内嵌需求响应与优化运行策略的主动配电系统源网协同规划[J]. 电力系统自动化,2020,44(3):89-97.  
LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al. Coordinated planning of source and network in active distribution system with demand response and optimized operation strategy[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(3):89-97.
- [17] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991,6(2):813-820.
- [18] 葛少云,张有为,刘洪,等. 考虑网架动态重构的主动配电网双层扩展规划[J]. 电网技术,2018,42(5):1526-1536.  
GE Shaoyun, ZHANG Youwei, LIU Hong, et al. Bi-layer expansion programming method for active distribution network considering dynamic grid reconfiguration[J]. Power System Technology,2018,42(5):1526-1536.

#### 作者简介:



刘 洪

刘 洪(1979—),男,教授,博士,主要研究方向为智能配用电及综合能源系统仿真分析与规划运行(E-mail: liuhong@tju.edu.cn);

滑雪娇(1998—),女,硕士研究生,主要研究方向为配电网规划和电力系统可靠性分析(E-mail: hhuaxj@tju.edu.cn)。

(编辑 李玮)

## Joint optimization method of distribution network grid planning and multi-module intelligent terminal configuration

LIU Hong<sup>1</sup>, HUA Xuejiao<sup>1</sup>, HAN Liu<sup>2</sup>, ZHOU Mo<sup>3</sup>, LIANG Rong<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

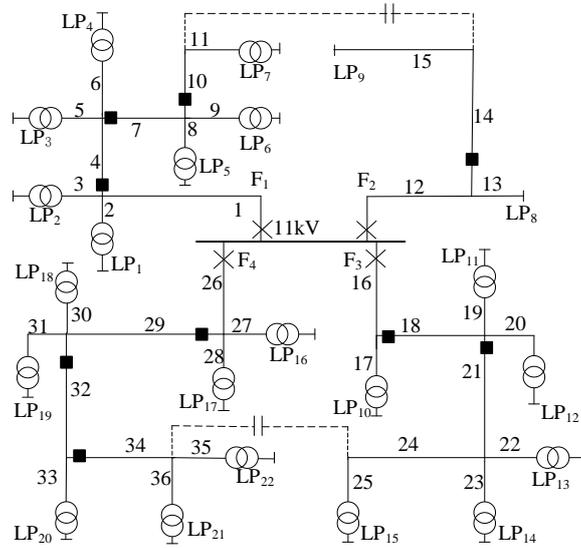
3. Economic and Technological Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110015, China;

4. Economic and Technological Research Institute, State Grid Shandong Electric Power Co., Ltd., Jinan 250021, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that the existing grid planning method of distribution network fails to fully coordinate with the secondary equipment and the incomplete consideration of the types of secondary equipment, a joint optimization method of grid planning and multi-module intelligent terminal configuration is proposed. The component module of the multi-module intelligent terminal is introduced and the fault handling strategy for protection and automation is analyzed. Based on the fault handling strategy, the fault handling time and feeder zoning logic of the distribution network with the multi-module intelligent terminal is defined. Then, the collaborative planning framework of distribution network grid planning and multi-module intelligent terminal configuration is proposed. Besides, the alternate optimization mathematical model is constructed, and the particle swarm optimization algorithm is adopted to solve the model. The effectiveness and practicability of the proposed method is verified through two examples of IEEE RBTS BUS-2 distribution system and a 60-bus urban distribution network.

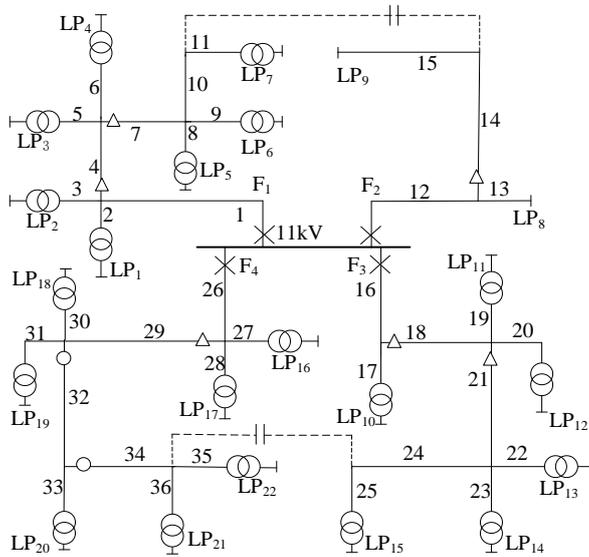
**Key words:** distribution network; grid planning; intelligent terminal; collaborative planning; reliability

# 附录 A



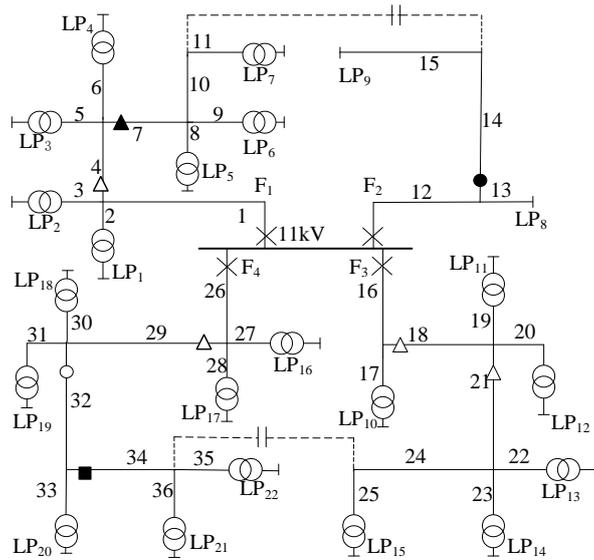
■ 仅配置级差保护的分段开关  
注：所有断路器均已配置继电保护

图 A1 方案 1 终端布局结果  
Fig.A1 Terminal layout result of Case 1



○ 配置“二遥”终端的分段开关  
△ 配置“三遥”终端的分段开关  
注：所有断路器和联络开关均已配置“三遥”终端

图 A2 方案 2 终端布局结果  
Fig.A2 Terminal layout result of Case 2



- 仅配置级差保护的分段开关
  - 配置“二遥”终端的分段开关
  - 配置“二遥”终端的分段开关（带级差保护）
  - △ 配置“三遥”终端的分段开关
  - ▲ 配置“三遥”终端的分段开关（带极差保护）
- 注：所有断路器已配置带极差保护“三遥”终端，联络开关已配置“三遥”终端

图 A3 方案 3 终端布局结果  
Fig.A3 Terminal layout result of Case 3

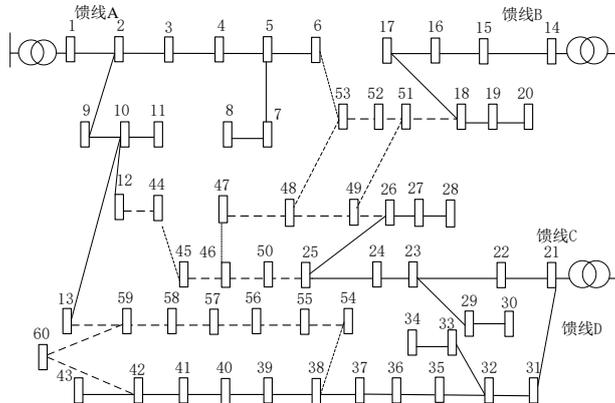


图 A4 待规划配电网结构图  
Fig.A4 Diagram of distribution network structure to be planned