

引用格式:王巍,卢庆辉,吕帅,等.多端供电运行配电网单相接地选线方法研究[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):110-121.

Citation: WANG Wei, LU Qinghui, LYU Shuai, et al. Single-phase grounding line selection method for multi-terminal power supply distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 110-121.

多端供电运行配电网单相接地选线方法研究

王 巍¹, 卢庆辉², 吕 帅¹, 崔 瑞¹, 杨 鹏¹, 尹项根², 乔 健²

(1. 内蒙古电力(集团)有限责任公司鄂尔多斯供电分公司, 内蒙古自治区 鄂尔多斯 017010;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘 要:中压微电网的接入改变了传统配电网的辐射型结构,使配电网可以多端供电方式运行。单相接地故障是配电系统频发的故障类型,而多端供电运行使得配电网的接地故障特性复杂化,传统的单相接地选线方法不再适用。先分析中压微电网和中压配电网的网络结构,并建立了中压微电网接入的多层级多端供电配电网模型;然后,以两级母线节点为视角分析了小电流接地方式下多端供电配电系统的单相接地故障特征,进而基于故障特性的分析,提出适用于微电网接入的多端供电网络选线方法;最后,在装备布局、选线任务分配等方面进行了详细设计,构成了一套完备的自动化选线系统。所提选线方案以两级母线节点为依托,可以类比应用于多层级多端供电运行的配电网。研究结果表明,本文所提选线方案可有效应用于中压微电网接入的多端供电运行配电网。

关 键 词:中压微电网;多端供电;单相接地故障;故障选线

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.012 中图分类号: TM773 文章编号: 1673-9140(2025)02-0110-12

Single-phase grounding line selection method for multi-terminal power supply distribution network

WANG Wei¹, LU Qinghui², LYU Shuai¹, CUI Rui¹, YANG Peng¹, YIN Xianggen², QIAO Jian²

(1. Ordos Power Supply Branch, Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Ordos 017010, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The access of the medium-voltage (MV) microgrid changes the radial structure of the traditional distribution network, causing the distribution network to operate in a multi-terminal power supply mode. The single-phase grounding (SPG) fault is a frequent fault type in distribution system, and multi-terminal power supply operation complicates the grounding fault characteristics of the distribution network. Thus, the traditional SPG line selection method is no longer applicable. This paper analyzes the network structure of the MV microgrid and the MV distribution network and establishes a multi-level multi-terminal power supply distribution network model with MV microgrid access. Then, the SPG fault characteristics of the multi-terminal power supply distribution system under the small current grounding mode are analyzed from the perspective of two-level bus nodes. Furthermore, based on the analysis of fault characteristics, a line selection method suitable for multi-terminal power supply networks with microgrid access is proposed, and a detailed design is carried out in terms of equipment layout and line selection task allocation, forming a relatively complete automatic line selection system. At the same time, the proposed line selection scheme is based on the two-level bus nodes, which can be analogously applied to the multi-level multi-terminal power supply distribution network. The simulation results show that the proposed line selection scheme can be effectively applied to the multi-terminal power supply distribution network with MV microgrid access.

Key words: medium-voltage microgrid; multi-terminal power supply; single-phase grounding fault; fault line selection

微电网在提高配电网可靠性、支持可再生能源的高渗透率与提高发电效率等方面发挥着关键作

用^[1-4]。随着电力电子技术的发展与微电源控制技术的优化,较大容量的微电网逐渐发展为以 10、

收稿日期: 2023-11-24; 修回日期: 2024-05-29

基金项目: 国家自然科学基金(52007010)

通信作者: 卢庆辉(1999—),男,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护等方面的研究; E-mail: 908581621@qq.com

20 kV 等中电压等级接入配电网的形式^[5-6]。其与大电网互为配合,可为配电网内的所有负荷提供有效电力支持。

单相接地故障是配电系统频发的故障类型。一方面,在小电流接地系统中,当线路发生单相接地故障时,系统往往允许其继续运行一段时间,但为防止故障进一步恶化甚至危及人员及设备安全,及时检测出故障线路并对其进行隔离检修至关重要。与中压配电网相似,中压微电网也具有中性点不接地和中性点经消弧线圈接地两种小电流接地方式^[7],其接入配电网后也将形成两种小电流接地系统。另一方面,中国配电网通常采用“闭环设计,开环运行”的供电方式,其本质上为辐射型结构。中压微电网的接入改变了配电网的传统拓扑结构,导致其变为以多端供电方式运行的闭式网。闭式配电网可进一步提高系统的供电可靠性,但这也使其故障特性更复杂,进一步增加了故障线路检测的难度^[8-10]。

目前,配电网的单相接地故障选线研究大多数是建立在辐射型网络拓扑的基础上的,对微电网及微电网并入配电网后的多端供电网络进行单相接地故障选线的研究鲜见。在实际工程中,传统辐射型配电网的单相接地故障选线,通常采用群体比幅比相法(中性点不接地系统)和零序电流有功分量法(中性点经消弧线圈接地系统)^[11]。此外,还有行波法^[12-13]、注入法^[14]、信息融合法^[15]等多种选线方式。但这些方法均基于辐射型网络,难以适用于中压微电网接入配电网后所形成的多端供电网络。为满足日益提高的供电需求,新加坡与中国部分地区建立了花瓣型闭式配电网^[16-17]。但花瓣型配电网采用小电阻接地方式。在发生单相接地故障时,其通常利用差动保护瞬时切除故障线路^[18-21]。因此,闭环运行下的花瓣型配电网实际上无特定的接地故障选线问题。文献[22]设想将现有配电网进行合环运行改造,并提出了基于复杂配电网结构的单相接地综合选线方法,但是该方法只能适用于所提出的特定网架。

微电网中通常具有多个微电源,故其本身处于多端供电运行的状态,微电网接入配电网后甚至可能会形成多层次多端供电运行的系统结构。在微电网单相接地故障保护研究方面,文献[23]基于控保结合的思路,提出了一种单相接地故障下适配孤岛场景的具备高抗过渡电阻能力的距离保护方案;文献[24]提出了一种零序非工频分量注入式微电

网接地故障保护方案,该方案能同时适用于微电网的并网和孤岛两种运行方式。实际上,单相接地故障通常为瞬时性故障,这种快速跳闸方法并不利于提高微电网的运行可靠性,微电网应首选小电流接地方式。文献[25]发现具有中性点不接地环网型拓扑结构的孤岛微电网发生单相接地故障时具有虚拟终端点(零序电流为零)的现象,并提出了基于高频零序电压和零序电流偏度的故障选线方法,但该方法只适用于孤岛运行且具有环网拓扑结构的微电网,不适应多微网集群及并网条件下的微电网—配电网耦合系统。

本文针对中压微电网接入配电网后所形成的小电流接地方式下的多端供电运行网络,提出了一套完整的选线方案。首先,基于中压微电网和配电网的网架建立了中压微电网接入的多端供电运行配电网模型;其次,分别以故障发生在联络馈线及非联络馈线两种情况分析了多端供电运行配电网的单相接地故障特性,再次,在此基础上,设计了适应于中压微电网接入的多端供电运行配电网选线方案;最后,借助于 MATLAB/Simulink 平台,搭建了故障仿真模型,验证了本文所提方案的有效性。

1 微电网接入的多端供电运行配电网架构

1.1 中压微电网拓扑结构

以 10 kV 及以上电压等级接入的微电网系统的容量多为兆瓦级。在发电单元接线形式上,与低压微电网中多种分布式电源互补直接并入电网方式不同,中压微电网电压及其容量较高,发电单元通常需要经升压变连接至微电网母线^[26]。常见分布式电源接线形式如图 1 所示。受逆变器容量限制,兆瓦级光伏电站通常将光伏组件设计成多个 0.5 MW 的发电单元,并将 2 个 0.5 MW 发电单元与 1 台 1 MVA 双分裂升压变压器组成 1 个 1 MW 的发电单元,并将其接入 10 kV 母线,如图 1(a)所示。兆瓦级风力发电机组通常采用单元接线形式,即 1 台风力发电机组配备 1 台变压器,风力发电机组经升压变连接 10 kV 母线,如图 1(b)所示。

微电网既能在并网模式,又能在孤岛模式中运行,并通过公共耦合点(point of common coupling, PCC)开关与大电网相连。此外,微电网中的分布式电源有风力发电机、光伏电池、柴油发电机以及

微型燃气轮机等多种形式,通常可分为逆变型微电源(invert-interfaced distributed generator, IIDG)和旋转电机型微电源(rotating machine distributed generator, RMDG)两种类型^[27-28]。根据美国电力可靠性技术解决方案协会(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS)提出的微电网结构与中国东澳岛中压微电网的实际接线形式^[29],绘制如图2所示的具有一般代表性的中压微电网典型拓扑结构。

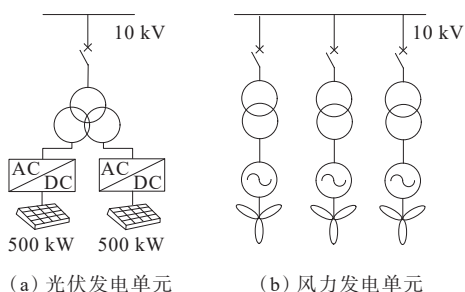


图1 常见分布式电源接线形式

Figure 1 Common distributed power supply wiring forms

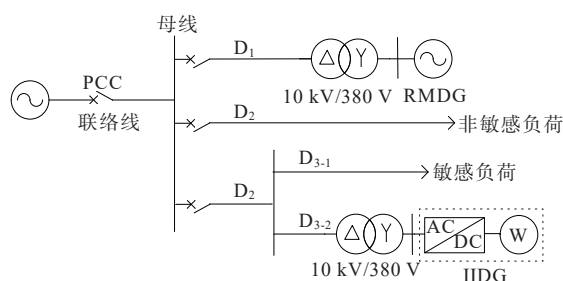


图2 中压微电网接线

Figure 2 Wiring diagram of MV microgrid

在图2中,PCC所在线路为微电网与配电网能量交互的联络线。微电网中主要含有3条馈线 $D_h, h=1, 2, 3$ 。其中,馈线 D_1 连接旋转电机型微电源,馈线 D_2 连接非敏感负荷,馈线 D_3 连接逆变型微电源并装有敏感型负荷。

1.2 中压配电网拓扑结构

根据中国《配电网规划设计技术导则》(DL/T 5729—2023)推荐的电网结构,中国中压架空线路多采用多分段多联络、多分段单联络以及多分段单辐射网架;中压电缆线路一般采用环网式结构,包括单环网和双环网网架。部分常见的中压配电网接线如图3所示。

实际上,虽然中压配电网采用了闭式设计,但正常运行时联络开关为断开状态,即配电网运行于开环模式下。因此,正常运行的中压配电网往往为单电源辐射型架构。

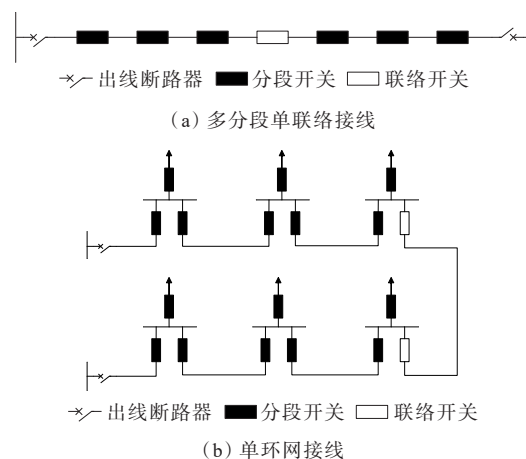


图3 部分常见中压配电网接线

Figure 3 Common MV distribution network wiring

1.3 含多分层级节点的多端供电运行配电网

基于文1所分析的中压微电网和中压配电网拓扑结构,建立如图4所示的微电网接入后的多端供电运行配电网。在图4中,共有9条馈出线 $L_k, k=1, 2, 3, \dots, 9$; P_1 和 P_2 为两个公共耦合点开关。该网络由原始开环运行配电网和2个接入的微电网组成。原始开环运行配电网的10 kV母线共有3条馈线。其中, L_1 和 L_2 为正常负荷馈线, L_3 为具有三分段二联络结构的联络馈线。 L_3 除了联络2个微电网外还承担一定的负荷。从图4中可以看出,微电网接入传统开环运行的配电网后,改变了原有配电网单电源辐射状的结构,即配电网变为多端电源供电的闭式网络。

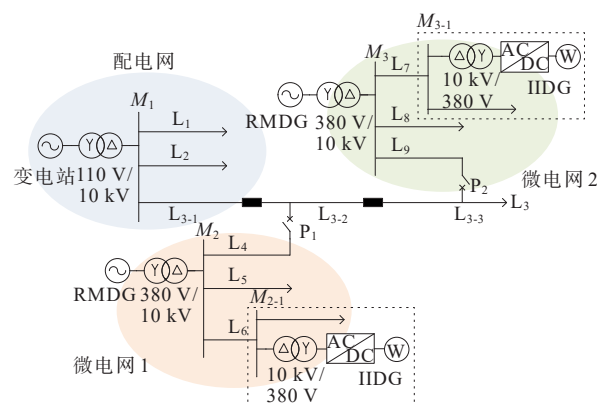


图4 中压微电网接入的多端供电运行配电网

Figure 4 Multi-terminal power supply distribution network with MV microgrid access

实际上,微电网本身具有多个电源供电。因此,其本身处于多端供电运行状态,而微电网接入配电网后的系统运行结构将更复杂。从图4中还可以看出,中压微电网接入配电网后,系统将具有多

级母线节点。若配电网母线节点 M_1 为一级节点,则其馈出线 L_3 连接的两个微电网母线节点 M_2 和 M_3 均为二级节点。显然, M_{2-1} 和 M_{3-1} 分别为 M_2 和 M_3 的下一级节点,更复杂的结构以此类推。由于不同母线节点间具有嵌套关系,故仅需以两级母线节点为视角分析多端供电运行网络的故障问题。如可将 M_{2-1} 和 M_{3-1} 分别视为一条负荷馈线以分析配电网和两个微电网之间联合运行的故障特征。为简化分析,文中将不计电源绕组(变压器绕组)与10 kV母线连接线对地电容的影响。因此,图4所示的多端供电运行系统中总共有9条馈出线。其中, L_3 、 L_4 和 L_9 为联络馈线。在正常运行情况下,PCC开关闭合,系统处于联合运行状态。本文将称图4所示的中压微电网接入配电网后的系统为多端供电运行配电网。

2 多端供电运行配电网的单相接地故障特性

2.1 中性点不接地系统

中性点不接地是配电网常用的小电流接地方式。为适应于所接入配电网的接地方式,中压微电网也采用中性点不接地方式,从而形成了一个中性点不接地多端供电运行网络。在实际中,每条出线所使用的各相导线的生产型号均相同且其工作环境也基本一致。因此,三相导线对地有相同的电容 $C_k, k=1, 2, 3, \dots, 9$ 。在正常运行情况下,每一相都有对地电容电流产生,且其相位超前于相电压的相位。同时,因为三相电压和线路参数对称,所以三相电容电流之和为0 A,即没有零序电流。规定零序电流由母线流向线路方向为正。本文分别以故障发生在非联络馈线(L_2 故障为例)、故障发生在联络馈线(L_3 故障为例)两种情况分析中性点不接地多端供电运行配电网的单相接地故障特点。

1) 当故障发生在非联络馈线时的情况(以 L_2 故障为例)。

当 L_2 发生故障时,系统各线路的零序电流分布如图5所示。其中,所有非故障非联络馈线(L_1 、 L_5 、 L_6 、 L_7 、 L_8)的零序电流均为线路本身对地电容电流,其方向为由母线流向线路,即

$$\dot{I}_{0,k} = 3\dot{U}_0 j\omega C_k, k = 1, 5, 6, 7, 8 \quad (1)$$

式中, $\dot{I}_{0,k}$ 为第 k 条线路首端零序电流; $\dot{U}_0$ 为系统零序电压; ω 为系统工频电压角频率; C_k 为第 k 条线的对地分布电容。

对于联络馈线,若其与故障线路不属于同母线

(L_4 、 L_9),则其零序电流大小为所在同母线节点非联络馈线电流之和,其方向为由线路流向母线,即

$$\begin{aligned} \dot{I}_{0,4} &= -3\dot{U}_0 j\omega (C_5 + C_6) = -(\dot{I}_{0,5} + \dot{I}_{0,6}) \\ \dot{I}_{0,9} &= -3\dot{U}_0 j\omega (C_7 + C_8) = -(\dot{I}_{0,7} + \dot{I}_{0,8}) \end{aligned} \quad (2)$$

若其与故障线路属于同母线(L_3),则其零序电流大小为本段线路零序电流和下游线路零序电流之和,其方向为由母线流向线路,即

$$\begin{aligned} \dot{I}_{0,3} &= \\ 3\dot{U}_0 j\omega (C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7 + C_8 + C_9) \end{aligned} \quad (3)$$

故障线路 L_2 的零序电流为系统所有非故障线路零序电流之和,其方向由线路流向母线。

$$\dot{I}_{0,2} = -3\dot{U}_0 j\omega \sum_{k \neq 2}^9 C_k \quad (4)$$

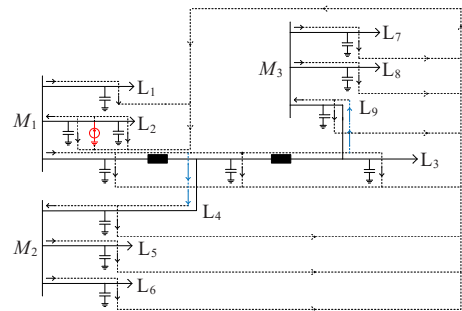


图5 多端供电运行配电网在 L_2 故障时的零序电流分布

Figure 5 Zero-sequence current distribution diagram of multi-terminal power supply distribution network under L_2 fault

由上述分析可知,当非联络馈线 L_2 发生故障时,故障线路 L_2 的零序电流最大,其方向与同母线节点 M_1 的其他馈线零序电流方向相反,故可以利用传统比幅比相法在该节点馈线中选出故障线路。但对于其他母线节点(M_2 、 M_3)的联络馈线 L_4 和 L_9 ,其电流方向和故障线路零序电流方向相同,且其电流幅值较大。若仍采用传统比幅比相法,其会被误判为故障线路。

2) 当故障发生在联络馈线时的情况(以 L_3 故障为例)

当 L_3 发生故障时,系统各线路的零序电流分布如图6所示。此时,所有非故障非联络馈线(L_1 、 L_2 、 L_5 、 L_6 、 L_7 、 L_8)的零序电流仍为线路本身对地电容电流,方向为由母线流向线路。对于非故障联络馈线(L_4 、 L_9),其零序电流大小仍为所在同母线非联络馈线电流之和,方向为由线路流向母线。但故障联络馈线 L_3 零序电流大小变为所在母线非联络馈线零序电流之和,方向由线路流向母线,即

$$\dot{I}_{0,3} = -3\dot{U}_0 j\omega (C_1 + C_2) = -(\dot{I}_{0,1} + \dot{I}_{0,2}) \quad (5)$$

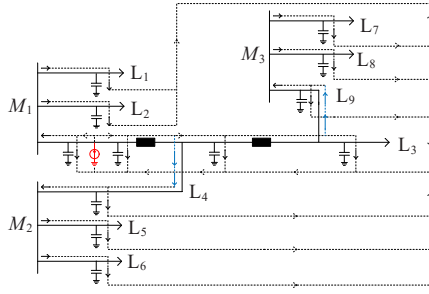


图6 多端供电运行配电网在 L_3 故障时的零序电流分布

Figure 6 Zero-sequence current distribution diagram of multi-terminal power supply distribution network under L_3 fault

因此,当故障发生在联络馈线时,其故障情况和各母线节点互不相连,以独立辐射状运行且故障同时发生在联络馈线(L_3 、 L_4 、 L_9)时的故障情况相同。此时,利用传统比幅比相法会将所有联络馈线误认为是故障馈线。该仿真结果如图7(a)所示。从图7(a)中可以看出,此时健康的联络线 L_4 、 L_9 和故障馈线 L_2 的零序电流方向相同,其均会被误判为故障线路。在图7中, $i_{0,k}$ 为第 k ($k=1,2,3,\dots,9$)条线路的零序电流瞬时值,联络线 L_3 、 L_4 、 L_9 分别用虚线表示。此种情况的仿真结果如图7(b)所示。从图7(b)中可以看出,健康联络线 L_4 、 L_9 电流方向与故障线路 L_3 相同,造成选线误判。

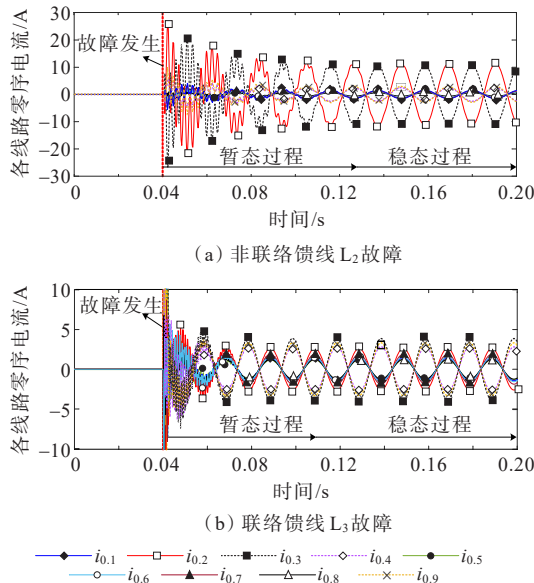


图7 不同线路故障时各馈线零序电流幅值相位关系

Figure 7 Relationship between the zero-sequence current amplitude and phase of each feeder under different line faults

2.2 中性点经消弧线圈接地系统

当配电系统的接地电流过大,电弧不能自行熄灭时,往往采用中性点并装消弧线圈的方法对电网电容电流进行补偿以大大降低接地点电流^[30]。中

国 110 kV/10 kV 或 220 kV/10 kV 变压器一般采用 $Y_N d11$ 接线。因此,10 kV 线路没有接地中性点,一般采用 Z 型接法的接地变压器形成人工中性点,进而通过消弧装置形成经消弧线圈接地系统。中压微电网的容量较大,线路也较长,其对地电容电流较大。为适应所接入配电网的接地方式,中压微电网也采用经消弧线圈接地方式,从而形成了一个中性点经消弧线圈接地多端供电的运行网络。传统消弧线圈接地系统通常采用零序有功分量法选线。因此,本节讨论该系统在多端供电运行时的零序有功电流分布情况。同样地,分别以故障发生在非联络馈线(L_2 故障为例)和故障发生在联络馈线(L_3 故障为例)两种情况,分析中性点经消弧线圈接地多端供电运行配电网的单相接地故障特点。

1) 当故障发生在非联络馈线时的情况(以 L_2 故障为例)。

零序有功电流分布如图8所示。流入故障点的零序有功电流由3部分组成,分别为经母线节点 M_1 、 M_2 和 M_3 所连消弧线圈形成的零序有功电流。

$$I_{0p,2} = \operatorname{Re} \left[\frac{U_0}{Z_1} \right] + \operatorname{Re} \left[\frac{U_0}{Z_2} \right] + \operatorname{Re} \left[\frac{U_0}{Z_3} \right] \quad (6)$$

式中, $I_{0p,k}$ 为流过第 k ($k=1,2,3,\dots,9$)条线路的零序有功电流; Z_h 为第 h ($h=1,2,3$)个消弧线圈的阻抗。

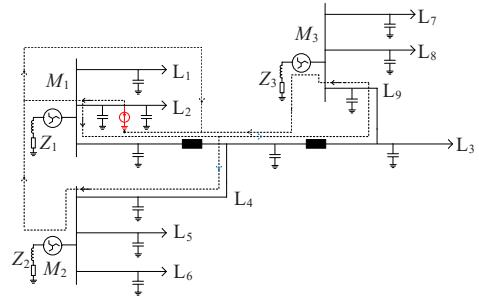


图8 多端供电配电网在 L_2 故障时的零序有功电流分布

Figure 8 Zero-sequence active current distribution diagram of multi-terminal power supply distribution network under L_2 fault

由于系统经联络线连接联合运行,联络馈线也会出现零序有功电流。若联络馈线和故障线路不属于同母线,即 L_4 和 L_9 ,其零序有功电流为本母线节点经消弧线圈对地有功电流,即

$$\begin{cases} I_{0p,4} = \operatorname{Re} \left[\frac{U_0}{Z_2} \right] \\ I_{0p,9} = \operatorname{Re} \left[\frac{U_0}{Z_3} \right] \end{cases} \quad (7)$$

若联络馈线和故障线路属于同一母线节点 M_3 ,其零序有功电流为下游线路零序有功电流之和,即

$$I_{0p,3} = \operatorname{Re} \left[\frac{U_0}{Z_2} \right] + \operatorname{Re} \left[\frac{U_0}{Z_3} \right] = I_{0p,4} + I_{0p,9} \quad (8)$$

综合上述分析,当非联络馈线出现单相接地故障时,除故障线路外,联络馈线上也将出现零序有功电流,且所在母线节点的联络馈线零序有功电流为下游线路的零序有功电流之和。

2) 当故障发生在联络馈线时,以 L_3 故障为例。

此时,零序有功电流分布如图9所示,不同线路故障时各馈线零序有功电流关系如图10所示。故障线路的零序有功电流为本母线零序电压经消弧线圈对地所产生的有功电流。由于系统经联络线连接,此时,其他联络馈线上也将产生零序有功电流,且电流大小为所在母线零序电压经消弧线圈对地产生的有功电流。从图10中可看出, L_2 的故障除故障馈线外,3条联络馈线上也将出现零序

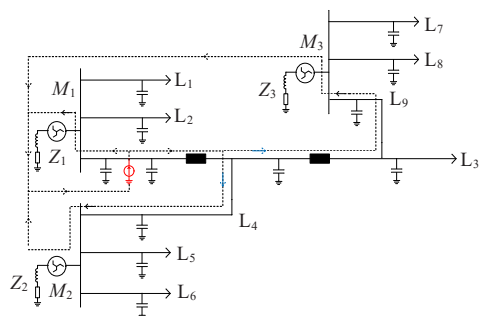


图9 多端供电配电网在 L_3 故障时的零序有功电流分布

Figure 9 Zero-sequence active current distribution diagram of multi-terminal power supply distribution network under L_3 fault

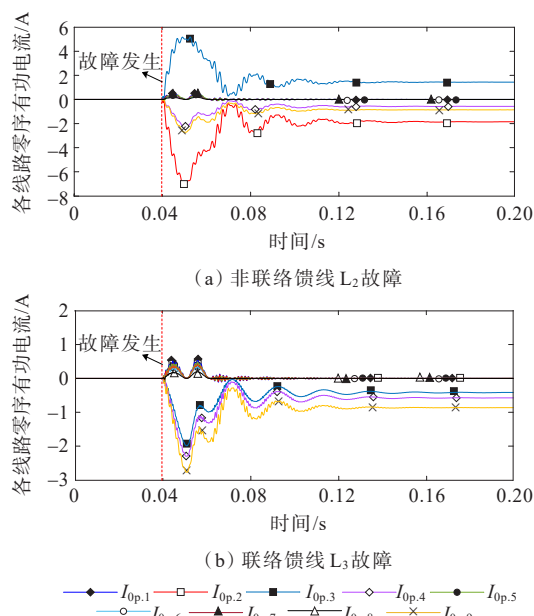


图10 不同线路故障时各馈线零序有功电流关系

Figure 10 Relationship diagram of zero-sequence active current of each feeder under different line faults

有功分量,且两条非故障母线节点的联络馈线(L_4 、 L_9)产生的零序有功分量值较大,其会被所在节点误判为故障线路。此时,所有联络馈线上都出现零序有功电流分量,且其幅值较大,可触发各节点零序有功分量法选线装置,按照零序有功分量幅值最大的原则,所有联络线都将被判断为故障线路。因此,无法通过零序有功分量法选线。

3 多端供电运行配电网单相接地选线方法

在前面的分析中,各种应用于传统配电网的选线方案在多端供电运行的系统中应用时均不能展现出良好的适应性。因此,基于文2的分析,本节针对2种小电流接地方式下的多端供电运行配电网分别提出相应的可靠选线方案。

3.1 中性点不接地系统选线方案

由于采用传统的群体比幅比相法会使联络线发生误判,故提出利用联络线两端的零序电流方向对各母线节点进行故障位置初步判断,以锁定故障区域。本文提出的单相接地选线方案测量装置布局如图11所示。在图11中,深色块代表安装在线路上的配电自动化馈线终端单元(feed terminal unit, FTU),由其进行故障发生判断和零序电压、零序电流的测量。每条馈线首端($F_k, k=1, 2, 3, \dots, 9$)与微电网馈出联络线两端(F_a, F_b, F_c, F_d)也都装有FTU装置。规定馈线零序电流从母线流出方向为正,联络线上的零序电流从母线或馈线流向联络线方向为正。下面分析各线路单相接地故障时,微电网馈出联络线两端FTU所测量零序稳态电流的方向。

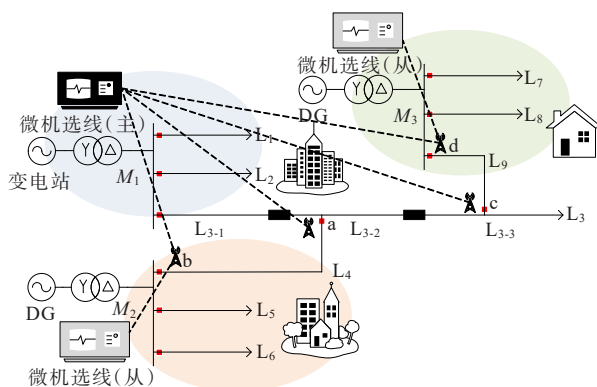


图11 单相接地选线方案测量装置布局

Figure 11 Measuring device layout for SPG line selection scheme

不同线路发生故障时联络线两端零序稳态电流方向见表1。由表1可知,若联络线b端的零序电流方向为正,则一定是 M_2 节点的馈线发生了单相接地故障。若联络线d端的零序电流方向为正,则一定是 M_3 节点的馈线发生了单相接地故障。只有当联络线a端和c端的零序电流方向同时为正时,才可判断是节点 M_1 的馈线发生了单相接地故障。当联络线a端和b端的零序电流同时为负时,一定是联络线 L_4 发生了单相接地故障。同理,当联络线c端和d端的零序电流同时为负时,一定是联络线 L_9 发生了单相接地故障。这些结论也构成了初步确定故障位置的逻辑判断依据。

表1 不同线路发生故障时联络线两端零序稳态电流方向
Table 1 Zero-sequence steady-state current direction table at both ends of the tie line when faults occur on different lines

隶属节点	故障线路	F_a	F_b	F_c	F_d
M_1	L_1	+	-	+	-
	L_2	+	-	+	-
	L_3	+	-	+	-
M_2	L_4	-	-	+	-
	L_5	-	+	+	-
	L_6	-	+	+	-
M_3	L_7	+	-	-	+
	L_8	+	-	-	+
	L_9	+	-	-	-

具体选线方案如下:

1) 对于每个母线节点设置一台微机选线装置,设置一个主站(M_1),2个从站(M_2 、 M_3)。各微机选线装置进行选线工作时独立运行。从站只对本节点馈出线进行选线,主站除了负责本节点馈出线外,还要对联络线进行选线。各个节点的馈线首端与馈出联络线两端装设FTU装置。

2) 设置各节点FTU设备的采样频率和零序电压整定值 U_{set} ,该整定值应大于正常情况下的不平衡电压值。为防止误判,可连续进行2次判断,当这2次 U_0 采样值都大于整定值时,方可确定线路发生故障,并把故障数据传送给相应微机选线装置。

3) 各节点馈线的FTU测量数据直接传给本节点微机选线装置,并由其判断出各馈线的零序电流方向。各联络线两端的FTU测量数据传送给相应的微机选线装置,并由微机选线装置判断联络线各端零序电流方向。从机只接收本节点相连接络线首端FTU发出的信号,主机则接收所有联络线两端点FTU发出的信号。

4) 故障区域判断。各节点微机选线装置根据

表1总结逻辑判断信息判别故障是否发生在本节点,也可由主站直接判断故障发生在哪条联络线。

5) 具体线路判定。若已经确定故障发生在某一节点上,则进一步利用比幅比相法选出故障馈线或节点母线。

3.2 中性点经消弧线圈接地系统选线方案

由于受到消弧线圈补偿的影响,故障线路电流的方向和正常线路方向可能会变得一样,其幅值根据补偿度的变化而确定。此外,考虑到零序有功分量在多端供电运行配电网中的误判问题,零序有功分量提取的复杂性,故提出基于消弧线圈调谐的零序电流差值法选线方案。其测量装置及信号采集布置和图11的布置一致。

当故障发生时,系统处于消弧线圈初始补偿状态,设置过补偿度为10%。表2是各线路发生单相接地故障后,调节主站节点 M_1 的消弧线圈调谐度后(过补偿到15%),联络线两端零序稳态电流的变化情况。为降低误差的影响,规定各线路零序电流变化量只要大于所属母线节点中性点对地故障零序电流的5%,就可认为是零序电流发生了显著变化,即

$$\frac{\Delta I_{0,k}}{I_{N,h}} \times 100\% \geq 5\% \quad (9)$$

式中, $\Delta I_{0,k}$ 为第 k 条馈线或联络线某端零序电流幅值的变化量; $I_{N,h}$ 为第 h 个母线节点初始额定补偿度(110%)下中性点对地故障零序电流幅值。

表2 不同线路发生故障时联络线两端零序稳态电流变化
Table 2 Zero-sequence steady-state current changes at both ends of the tie line when faults occur on different lines

隶属节点	故障线路	F_a	F_b	F_c	F_d
M_1	L_1	保持	保持	保持	保持
	L_2	保持	保持	保持	保持
	L_3	保持	保持	保持	保持
M_2	L_4	变化	保持	保持	保持
	L_5	变化	变化	保持	保持
	L_6	变化	变化	保持	保持
M_3	L_7	保持	保持	变化	变化
	L_8	保持	保持	变化	变化
	L_9	保持	保持	变化	保持

由表2可知,若联络线b端的零序电流发生显著变化,则一定是节点 M_2 的馈线发生了单相接地故障。若联络线d端的零序电流发生显著变化,则一定是节点 M_3 的馈线发生了单相接地故障。只有当联络线a端和c端的零序电流同时不发生变化时,才可判断是节点

收相应 FTU 数据的稳态瞬时波形。在图 13 中,虚线代表缩小后的零序电压 u_0 瞬时波形,以便于对各零序电流进行方向分析,规定零序电流超前零序电压方向为正,滞后零序电压方向为负。

各节点的微机选线装置进行单相接地选线时独立工作,主站 M_1 的波形中 F_a 方向为负、 F_c 方向为正。若发现这两者不同时为正,则判断节点 M_1 没有故障,进一步对联络线是否故障进行判断。若发现 F_a 、 F_b 方向同时为负,则判断联络线 L_4 发生单相接地故障。若从站 M_2 , F_b 的方向为负,则判断节点 M_2 没有故障。若从站 M_3 , F_d 的方向为负,则判断节点 M_3 没有故障。经过这些判断,微机装置得到联络线 L_4 发生单相接地故障,选线正确。

进一步考虑不同故障角和接地电阻时的故障选线情况,并在不同线路设置单相接地故障点。结果见表 3。在表 3 中,正、负符号代表不同方向, $I_{F,i}$ 为 F_i 处的稳态电流, $i \in \{a, b, c, d\}$; $I_{F,j}$ 为 F_j 处的电流, $j=1, 2, \dots, 8$ 。由表 3 可知,设置的故障线路和选线结果均一致,在各种工况情况下,基于联络线零序电流方向辨识的改进比幅比相法均能正确地选出故障线路。

表 3 中性点不接地系统多种工况下的单相接地选线结果

Table 3 SPG line selection results under various working conditions of ungrounded neutral point system

故障角/ (°)	接地电 阻/Ω	故障 线路	$I_{F,a}/A$	$I_{F,b}/A$	$I_{F,c}/A$	$I_{F,d}/A$	$I_{F,1}/A$	$I_{F,2}/A$	$I_{F,3}/A$	$I_{F,5}/A$	$I_{F,6}/A$	$I_{F,7}/A$	$I_{F,8}/A$	选线 结果
45	0	L_2	+4.42	-2.49	+4.94	-2.88	+0.62	-11.29	+10.67	+1.43	+1.06	+1.31	+1.56	L_2
		$L_4(L_{ab})$	-8.06	-2.47	+4.90	-2.86	+0.62	+1.24	-1.85	+1.42	+1.05	+1.30	+1.55	$L_4(L_{ab})$
	500	L_3	+3.53	-1.99	+3.94	-2.30	+0.50	+0.99	-1.49	+1.14	+0.85	+1.05	+1.25	L_3
		$L_4(L_{ab})$	-6.48	-1.99	+3.94	-2.30	+0.50	+0.99	-1.49	+1.14	+0.84	+1.05	+1.25	$L_4(L_{ab})$
90	1 000	L_5	-4.44	+5.49	+2.70	-1.57	+0.34	+0.68	-1.02	-6.06	+0.58	+0.72	+0.85	L_5
		$L_9(L_{cd})$	+2.44	-1.38	-4.19	-1.58	+0.34	+0.69	-1.03	+0.79	+0.58	+0.72	+0.86	$L_9(L_{cd})$

4.2 中性点经消弧线圈接地系统选线方案验证

中性点经消弧线圈接地系统故障仿真模型中,消弧线圈参数按照补偿本节点所有馈线的电容电流设置。如果要满足完全补偿的条件,则有 $\omega L_h = 1/(3\omega C_{\Sigma h})$, ($h=1, 2, 3$)。 L_h 为第 h 母线节点消弧线圈的电感, $C_{\Sigma h}$ 为第 h 条母线节点所有馈线的三相对地电容。同时,考虑到正常情况下 10% 的过补偿度,则有

$$L_h = \frac{1}{3\omega^2 C_{\Sigma h} \times 110\%} \quad (10)$$

发生单相接地故障时,由主站节点 M_1 的消弧线圈进行调谐,将过补偿度提高到整个多端供电运行系统的 15%。此时,主站的消弧线圈电感值 $\tilde{L}_1$ 应为

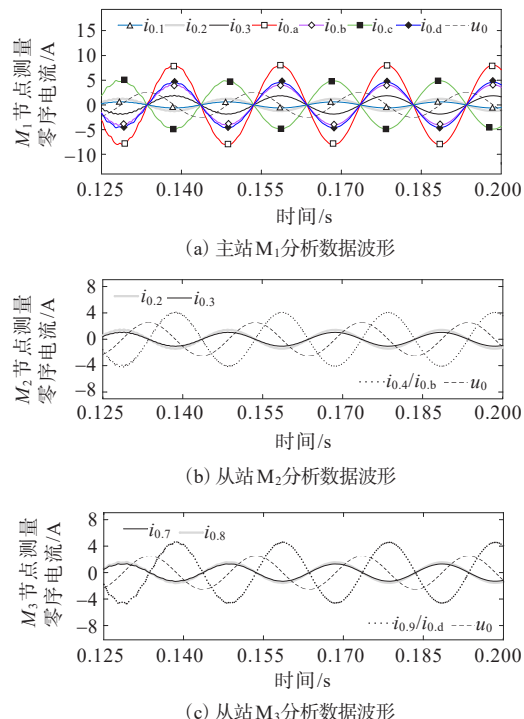


图 13 各微机选线装置的波形分析

Figure 13 Waveform analysis of each microcomputer line selection device

$$\tilde{L}_1 = \frac{1}{3\omega^2 C_{\Sigma 1} \times 115\% + 3\omega^2 (C_{\Sigma 2} + C_{\Sigma 3}) \times 5\%} \quad (11)$$

此外,消弧线圈中的串联电阻值 R_{Lh} 取为应取为感抗的 10%,即

$$R_{Lh} = \omega L_h \times 10\% \quad (12)$$

图 14 为馈线 L_5 发生单相接地故障时按照文 3.2 所提选线策略得到的各条线路的零序电流变化情况。当系统检测到单相接地故障时,主站消弧线圈过补偿度调整至系统的 15%。

主站 M_1 对主站馈线和联络线的故障情况进行判定。如图 14(b) 所示,所有联络线两端 FTU 测得零序电流中, F_a 电流发生显著变化, F_c 零序电流

无变化。因此,判断节点 M_1 没有故障。进一步对联络线是否故障进行判断: F_a 零序电流显著变化的同时, F_b 零序电流也显著变化,判断联络线 L_{ab} 无故障; F_c 端和 F_d 端零序电流均不显著变化,判断联络线 L_{cd} 无故障。由于从站 M_2 , F_b 零序电流显著变化,故判断锁定节点 M_2 发生了接地故障。进一步根据 M_2 节点的馈线中, L_5 零序电流发生了显著变化,如图14(d)所示,故判断线路 L_5 发生了单相接地故障。从站 M_3 , F_c 零序电流无变化,故判断节点

M_3 无故障。经过这些判断,微机装置得到联络线 L_5 发生单相接地故障,选线正确。

进一步考虑该方案在不同故障角和接地电阻时的选线情况,并在不同线路设置单相接地故障点。结果见表4。在表4中,若幅值变化小于0.3 A,则视其为无显著变化,正负符号代表变化量的增减情况。由表4可知,所设置的故障线路和选线结果均一致,在各种工况情况下,所提出的基于消弧线调谐的零序电流差值法均能正确地选出故障线路。

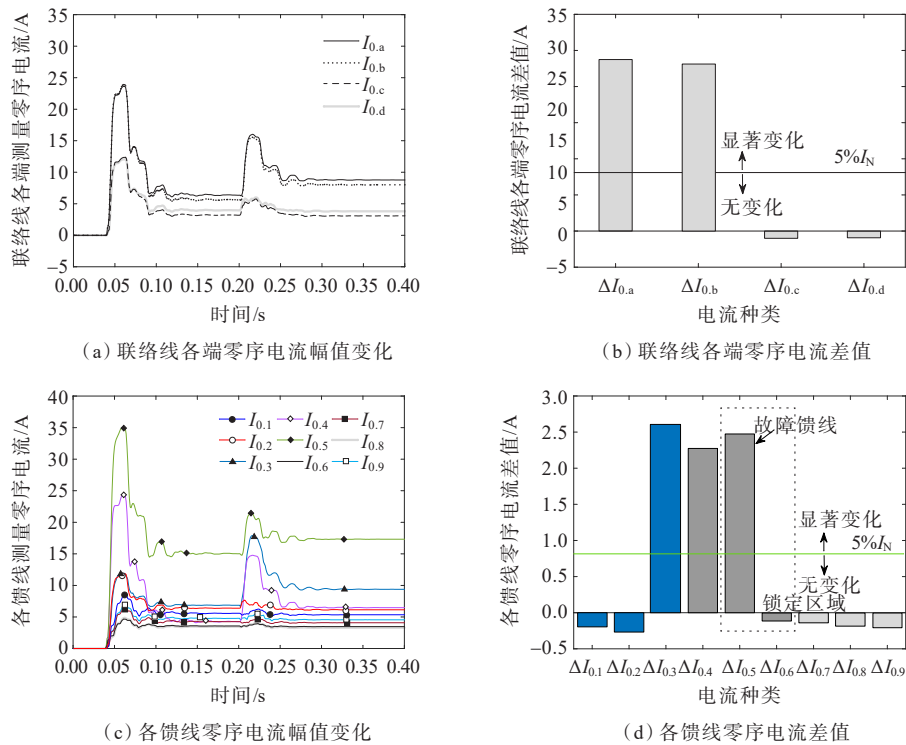


图14 L_5 接地故障时各线路零序电流变化

Figure 14 Zero-sequence current of each line changes when grounding fault occurs in L_5

表4 消弧线圈接地系统多种工况下的单相接地选线结果

Table 4 SPG line selection results under various working conditions for grounding system via arc suppression coil

故障角/ (°)	接地电 阻/Ω	故障 线路	$I_{F,a}/A$	$I_{F,b}/A$	$I_{F,c}/A$	$I_{F,d}/A$	$I_{F,1}/A$	$I_{F,2}/A$	$I_{F,3}/A$	$I_{F,5}/A$	$I_{F,6}/A$	$I_{F,7}/A$	$I_{F,8}/A$	选线 结果
45	0	L_2	-0.02	-0.03	-0.04	-0.04	-0.06	+3.47	-0.10	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	L_2
		$L_4(L_{ab})$	+3.25	-0.01	-0.00	-0.00	-0.05	-0.07	+3.75	+0.00	+0.00	-0.00	-0.00	$L_4(L_{ab})$
	500	L_3	-0.08	-0.09	-0.09	-0.11	-0.21	-0.25	+2.20	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	L_3
		$L_4(L_{ab})$	+1.93	-0.09	-0.09	-0.11	-0.22	-0.20	+2.16	+0.00	+0.00	-0.00	-0.00	$L_4(L_{ab})$
90	1 000	L_5	+1.02	+0.95	-0.12	-0.14	-0.28	-0.38	+1.04	+0.45	-0.26	-0.21	-0.20	L_5
		$L_9(L_{cd})$	-0.11	-0.13	+1.19	-0.14	-0.25	-0.40	+1.21	-0.00	-0.00	-0.00	-0.00	$L_9(L_{cd})$

5 结语

本文分析了中压微电网接入中压配电网后所形成多端供电运行网络的单相接地故障特性,并针

对性地提出了该种网络结构下的单相接地选线方案,得到以下结论:

1) 多端供电运行配电网的单相接地故障特性较以往辐射型网络有很大变化,群体比幅比相法

(中性点不接地)和零序有功分量法(中性点经线圈接地)所代表的传统接地选线方法在多端供电运行网络中应用时存在选线误判问题。

2) 基于多端供电运行网络的故障特性分析,针对中性点不接地系统提出了基于联络线零序电流方向辨识的改进比幅比相选线法;针对中性点经消弧线圈接地系统提出了基于消弧线圈调谐的零序电流差值选线法。仿真结果表明,所提选线方法可以有效应用于中压微电网接入的多端供电运行网络,且在多种不同工况下均能正确地选出故障线路。

3) 结合所提选线方法,本文在装备布局、选线任务分配等方面均进行了详细设计,构成了一套完备的自动化选线系统;同时,所提选线方案以两级母线节点为依托,可以类比应用于多层级多端供电运行的配电网。

参考文献:

- [1] CORTES C A, CONTRERAS S F, SHAHIDEHPOUR M. Microgrid topology planning for enhancing the reliability of active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6369-6377.
- [2] 余雪莹, 李华强, 杨龙杰, 等. 兼顾企业综合成本与用户用电体验的微电网双层优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 38-45.
YU Xueying, LI Huaqiang, YANG Longjie, et al. Bi-level programming method for optimal sizing of grid-connected DC microgrid system based on economic efficiency of enterprises and customer electricity experience[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 38-45.
- [3] 裴润生, 赖绮瑄, 梁活航. 计量设备故障下交流微电网缺失电量智能追补[J]. 供用电, 2023, 40(5): 92-99.
PEI Runsheng, LAI Qixuan, LIANG Huohang. Smart catch-up for missing power in AC microgrid under metering equipment failure[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(5): 92-99.
- [4] 尹昕, 赖锦木, 尹项根, 等. 微电网混合型联网变压器及其故障阻隔协调控制[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(10): 145-151+207.
YIN Xin, LAI Jinmu, YIN Xianggen, et al. Hybrid interlinking transformer and its fault blocking coordination control for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 145-151+207.
- [5] QUAN H, UTKARSH K, SRINIVASAN D. A distributed dual-optimization framework for ancillary-service coordination between MV microgrids and LV distribution networks[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(1): 212-223.
- [6] 李鸿毅. 中压孤岛微电网中性点接地方式及故障定位技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
LI Hongyi. Research on neutral grounding mode and fault location technology of medium voltage island microgrid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [7] MOHAMMADI J, BADRKHANI AJAEI F, STEVENS G. Grounding the AC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 98-105.
- [8] ZHANG Z H, XU B Y, CROSSLEY P, et al. Positive-sequence-fault-component-based blocking pilot protection for closed-loop distribution network with underground cable[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 94: 57-66.
- [9] 夏伟, 蔡文婷, 刘阳. 基于图数据库的中压配电网网格搜索引擎系统[J]. 电测与仪表, 2024, 61(11): 182-188.
XIA Wei, CAI Wenting, LIU Yang. Grid search engine system of medium voltage distribution network based on graph database[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(11): 182-188.
- [10] 甘国晓, 王主丁, 周昱甬, 等. 基于可靠性及经济性的中压配电网闭环运行方式[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 144-150.
GAN Guoxiao, WANG Zhuding, ZHOU Yuyong, et al. Reliability and economy based closed-loop operation modes for medium voltage distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 144-150.
- [11] 申玮, 蒋鑫. 配电网故障选线与定位发展现状[J]. 电子测试, 2022(3): 129-131.
SHEN Wei, JIANG Xin. Development status of fault line selection and location in distribution network[J]. Electronic Test, 2022(3): 129-131.
- [12] 李志勇, 周鹏鹏, 陈朋, 等. 电化学储能电站协调控制器动模试验关键技术研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 165-173.
LI Zhiyong, ZHOU Pengpeng, CHEN Peng, et al. Key technologies research and application of a dynamic test for coordination controller of an electrochemical energy storage power station[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 165-173.
- [13] 李志勇, 王伟, 庄良文, 等. 基于RTDS小步长仿真的配电网行波选线装置动模试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 108-114.
LI Zhiyong, WANG Wei, ZHUANG Liangwen, et al. Dynamic test of traveling wave line selecting device based on RTDS small time-step simulation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 108-114.
- [14] 张颖, 张宇雄, 容展鹏, 等. 基于中性点零序电流注入的高阻接地辨识方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(3): 123-129.

- ZHANG Ying,ZHANG Yuxiong,RONG Zhanpeng,et al. High resistance grounding fault identification method with zero sequence current injection at neutral point[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2016,31(3):123-129.
- [15] WEI X X,YANG D C,WANG X W,et al. Faulty feeder detection based on fundamental component shift and multiple-transient-feature fusion in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(2):1699-1711.
- [16] 刘洪波,刘坤诚,盖雪扬,等. 高比例新能源接入的主动配电网规划综述[J]. 发电技术,2024,45(1):151-161.
LIU Hongbo, LIU Shencheng, GAI Xueyang, et al. Overview of active distribution network planning with high proportion of new energy access[J]. Power Generation Technology,2024,45(1):151-161.
- [17] 石方迪,侯四维,唐琪,等. 世界一流城市配电网典型接线模式的评估及选型方法[J]. 电网技术,2022,46(6):2249-2259.
SHI Fangdi,HOU Siwei,TANG Qi,et al. Evaluation and selection of typical connection modes for world-class urban distribution network[J]. Power System Technology,2022,46(6):2249-2259.
- [18] 黄昱翰,蔡泽祥,潘天亮,等. 面向闭环运行配电网的广域保护控制方案[J]. 电力科学与技术学报,2019,34(2):47-52.
HUANG Yuhan, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Research on wide area protection and control scheme for closed-loop distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(2):47-52.
- [19] 章姝俊,陆海清,赵扉. 新能源接入下配电网电能损耗控制方法研究[J]. 电网与清洁能源,2024,40(10):115-121+131.
ZHANG Shujun,LU Haiqing,ZHAO Fei. Research on the power loss control method of distribution networks under new energy access[J]. Power System and Clean Energy,2024,40(10):115-121+131.
- [20] PAPASPILIOTOPOULOS V A, KORRES G N, KLEFTAKIS V A,et al. Hardware-In-the-loop design and optimal setting of adaptive protection schemes for distribution systems with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2017,32(1):393-400.
- [21] 陈晓龙,袁姝,李永丽,等. 含逆变型分布式电源花瓣式配电网单相接地故障特性分析[J]. 电力自动化设备,2022,42(4):129-137.
CHEN Xiaolong,YUAN Shu,LI Yongli,et al. Analysis of single-phase grounding fault characteristics in petal-shaped distribution network with inverter-interfaced distributed generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(4):129-137.
- [22] 刘学超. 复杂配电网单相接地故障选线方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2019.
LIU Xuechao. Research on line selection method for single-phase grounding fault in complex distribution network[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2019.
- [23] 黎钊,吴宇奇,郑宇超,等. 基于控保结合的适配孤岛场景单相接地故障的新型距离保护方案[J]. 中国电机工程学报,2023,43(24):9509-9523.
LI Zhao, WU Yuqi, ZHENG Yuchao, et al. A novel distance protection scheme for island grid based on control combined with protection under single-phase ground fault[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(24):9509-9523.
- [24] 赵怀健,牟龙华,方重凯. 零序非工频分量注入式微电网接地故障保护方案[J]. 电力自动化设备,2022,42(11):25-31.
ZHAO Huajian, MU Longhua, FANG Chongkai. Grounding fault protection scheme based on zero-sequence off-nominal frequency component injection for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2022,42(11):25-31.
- [25] HE L L, LI Y, CHU X, et al. Single-phase to ground fault line identification for medium voltage islanded microgrids with neutral ineffectively grounded modes[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2022,13(6):4312-4326.
- [26] 贾泽宾. 微电网接地方法及保护配置研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.
JIA Zebin. Research on micro-grid's grounding method and protection configuration[D]. Beijing: North China Electric Power University,2016.
- [27] 林林馨妍,朱俊澎,袁越. 体系架构下的多微电网分布式韧性增强策略[J]. 中国电力,2023,56(12):87-99.
LIN Linxinyan, ZHU Junpeng, YUAN Yue. A distributed resilience enhancement strategy for multi-microgrids based on system of systems architecture[J]. Electric Power,2023,56(12):87-99.
- [28] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):57-70.
- [29] 赵卓立,杨苹,蔡泽祥,等. 含风电孤立中压微电网暂态电压稳定协同控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):1-9.
ZHAO Zhuoli, YANG Ping, CAI Zexiang, et al. Cooperative control of transient voltage stability for islanded medium-voltage microgrid with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):1-9.
- [30] 曾超,喻锟,曾祥君,等. 并阻尼谐振接地系统对地参数测量与高阻故障选线新方法[J]. 电力系统保护与控制,2024,52(4):67-76.
ZENG Chao, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al. A new method for measuring ground parameters and selecting high resistance fault lines in parallel damping resonant grounding systems[J]. Power System Protection and Control,2024,52(4):67-76.