

引用格式:陈春,万金金,曹一家,等.极端条件下多源配电网主动孤岛研究综述与展望[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):1-11.

Citation: CHEN Chun, WAN Jinjin, CAO Yijia, et al. Review and outlook on active islanding of multi-source distribution networks under extreme conditions[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 1-11.

极端条件下多源配电网主动孤岛研究综述与展望

陈 春¹, 万金金¹, 曹一家¹, 孙充勃²

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410114;2.国网经济技术研究院有限公司,北京 102209)

摘 要:高比例分布式电源接入后的故障配电网,具备主动恢复与自治能力,有利于提升电力系统适应气候变化和灾害风险管理的水平,顺应配电网技术的发展方向。当前,配电网主动孤岛自恢复和稳定运行的研究受到广泛关注。首先,概述多源配电网主动孤岛的内涵,以及多源配电网孤岛与微电网孤岛的区别,分析归纳配电网主动孤岛在分布式电源高比例接入下稳定运行存在的关键问题。其次,从主动孤岛划分、孤岛自组网波动平抑控制以及组网完成后主动孤岛小干扰稳定控制 3 个方面阐述国内外研究现状,并进行总结。最后,基于电力物联网、高电力电子化下的小干扰抑制以及能源互联网背景下的主动孤岛方案,对多源配电网主动孤岛的发展前景进行展望和总结。

关 键 词:配电网主动孤岛;孤岛划分;孤岛自组网;孤岛稳定运行

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.001 **中图分类号:**TM732 **文章编号:**1673-9140(2024)05-0001-11

Review and outlook on active islanding of multi-source distribution networks under extreme conditions

CHEN Chun¹, WAN Jinjin¹, CAO Yijia¹, SUN Chongbo²

(1.School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

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

Abstract: The fault distribution network with a high proportion of distributed power supply access possesses active recovery and self-governance capabilities, which is conducive to enhancing the power system's adaptability to climate change and disaster risk management, aligning with the development direction of distribution network technology. Currently, research on active islanding self-recovery and stable operation of distribution networks has received widespread attention. This paper begins with an overview of the connotations of active islanding in multi-source distribution networks, as well as the distinctions between multi-source distribution network islands and microgrid islands. It then analyzes and summarizes the key issues that arise in the stable operation of active islands in distribution networks with a high proportion of distributed power supply integration. Subsequently, the paper elaborates on the current research status from three aspects: active islanding partitioning, fluctuation mitigation control for island self-networking, and small signal stability control for active islands after networking completion, followed by a summary. Finally, based on the internet of things for power, small signal suppression in the context of high power electronics, and active islanding solutions within the framework of the energy internet, the paper provides an outlook and summary on the development prospects of active islanding in multi-source distribution networks.

Key words: active islanding of distribution network; islanding partition; islanding self-organizing network; islanding stabilized operation

收稿日期:2024-01-01;修回日期:2024-03-01

基金项目:国家自然科学基金(52007009)

通信作者:陈 春(1987—),男,博士,副教授,主要从事智能配电网规划与自愈控制方面的研究;E-mail:chch3266@126.com

近年来,人们越来越关注由极端事件引发的大范围停电事件。在极端条件下,大电网的供电安全无法保障,即使诸如美国、英国这样的发达国家也不时遭遇城市电网大面积停电事故。例如,2019年7月13日美国曼哈顿发生了大面积停电,事故波及用户达7万户;同年8月9日英国的大断电事故几乎覆盖了大半个英国,受影响人数近百万。中国近些年也不时发生由极端天气影响供电的问题事件,如2021年的河南水灾,导致河南郑州、洛阳、许昌、焦作、南阳、平顶山等多地市电力设施受损,800多条城市配电线路、超过98万户用电受到影响;2023年甘肃地震导致青海、甘肃共有3条750千伏线路、5条330千伏线路、9条35千伏线路、29条10千伏线路跳闸,2座35千伏变电站停运,2座35千伏变电站各有1台主变停运,共接近6万户用户用电受到影响。这些极端条件造成的大停电事故给人们的生活带来了严重的不便,对国民经济造成了巨大损失。

中国配电网一般采用网格化分区供电,在严重自然灾害、蓄意攻击等极端条件下,可能造成两类极限场景:一是重要输电通道破坏,导致负荷无供电路径;二是上级电网遭受破坏,无法向配电网送电。这2种场景都可能引发配电网区域甚至全局停电。由于分布式电源的突出优势,多类型、高比例分布式电源已高渗透接入配电网,传统配电网的架构发生了巨大变化,配电系统由单一电源的配电角色转变为集电能收集、传输、储存和分配于一体的新型智能电力交换系统,增加了系统运行方式的多样性与灵活性^[1-2]。对于与输电网弱连接的配电网,通过分布式电源的协同控制,在输电网发生故障的极端条件下,实现配电网主动孤岛与自治运行,为配电网供电恢复提供了新路径^[3-6]。研究配电网主动恢复与自治技术,有利于提高极端条件下配电网的故障应变能力,顺应配电网技术的发展方向,且满足国家战略需求。

为此,本文首先概述分析配电网主动孤岛的内涵,讨论多源配电网与传统微电网的区别;其次,分析了当前分布式电源高渗透下多源配电网主动孤岛存在的关键问题;再次,基于描述的关键问题,归纳当前多源配电网主动孤岛运行的研究动态;最后,展望未来极端条件下配电网主动孤岛的发展方向。

1 多源配电网主动孤岛的内涵

配电网主动孤岛是指在配电网发生故障或者外部受到干扰时,部分区域能够自主运行并提供电力供应的自治系统,使分布式电源成为大电网的一个有力补充。配电网主动孤岛运行依托于分布式电源的可靠出力,依赖于分布式储能等可控资源的调节,才能实现对小扰动波动的平抑,达到长时间稳定供电的目的。

多源配电网主动孤岛恢复有别于传统微电网孤岛运行模式,一方面,微电网孤岛运行方式固定(外部电网故障时,微电网按照设定好的运行方式由并网模式转为孤岛模式),而多源配电网主动孤岛恢复则是因故障位置不同而形成不同的方案;另一方面,微电网孤岛恢复的范围很小,往往只是一栋或者若干栋楼宇,而多源配电网主动孤岛模式恢复的是局部电网。多源配电网结构示意图如图1所示,多类型分布式电源以直接并网或接入微电网的形式并入配网^[7]。外部电网发生故障时,多源配电系统可通过主动解列实现主动孤岛的形式保障关键负荷(微电网等效为柔性负荷);整个配电网系统因故障全部失电时,多源配网系统可通过黑启动技术实现主动孤岛保障供电;多源配电网内部故障时,对于不能通过网络重构恢复的非故障失电区但存在可靠供电分布式电源的情况,也可利用主动孤岛实现保供电。

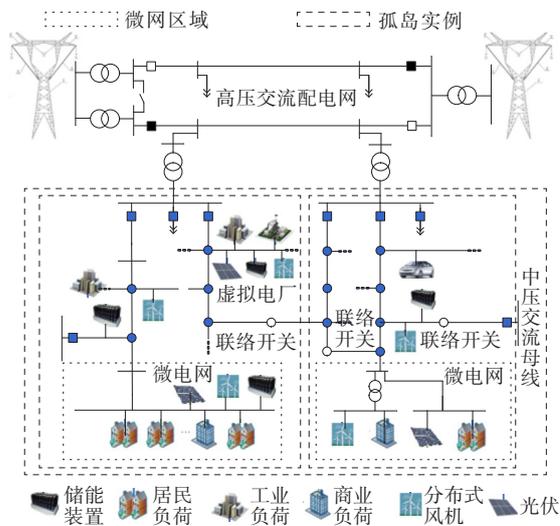


图1 多源配电网的结构示意

Figure 1 Schematic structure of a multi-source distribution network

2 多源配电网主动孤岛运行关键问题分析

在满足用户可持续电能供应的需求下,构建具有快速恢复电网故障的弹性配电系统成为配电网发展的必然趋势。弹性配电系统要求能适应各类故障情况,具备极端条件下的故障应变能力。

传统配电网的故障恢复通常依赖于相邻线路的重构。含分布式电源的配电网故障恢复策略可以分为孤岛划分策略和综合恢复策略两大类^[8],主动孤岛划分是配电网实现孤岛运行的重要手段,通常其描述为一个非线性组合优化问题。现有的研究中通常考虑将计划孤岛内负荷恢复供电多、开关动作次数少、网损少、分布式电源与负荷的功率不平衡度低作为主动孤岛划分目标函数^[9-12]。

另一方面,当系统发生故障,配电网内所有负荷全部失电时,作为系统后备电源的分布式电源可以采用黑启动技术对失电负荷进行逐步恢复。传统意义上的黑启动技术在输电网中应用较多,主要是利用大型发电机组对失电网络进行恢复。但在中国电力系统中分布式电源接入占比正逐渐上升的趋势下,利用这些分布式电源作为配电网的黑启动手段具有重要的研究意义。

而配电网的网络架构、负荷特性和潮流特性相较于输电网更加复杂。因此,在黑启动恢复过程中,负荷的波动以及分布式电源的不确定性将会导致电压和频率的波动^[13]。由于失去主电网的支撑,孤岛系统容易受到外界不稳定因素的影响,在主动孤岛实现组网后,在主网故障恢复之前实现稳定运行控制,可以提升其抵御外界小干扰的能力。

多源配电网主动孤岛关键问题及分析如图 2 所示。可知,多源配电网主动孤岛稳定运行主要可分为以下 3 个问题。

1) 主动孤岛的动态划分。主动孤岛的最优划分通常是一个非线性的组合优化问题,目前,关于配电网主动孤岛划分的研究已有不少,但是由于受到系统馈线自动化水平、分布式电源的可调控性等影响,主动孤岛的最优划分仍然难度较大。现有的方法通常将树背包模型作为静态孤岛划分的主要模型,功率约束作为主要约束,围绕这个模型进行各种求解算法的研究,但是模型关于分布式电源的不确定性,负荷的重要性描述不够全面等问题导致多源配电网的主动孤岛最优动态划分仍然具有较

大的研究空间。

2) 自组网波动平抑。当系统发生较严重故障,配电网全部失电时,需要具备后备电源的分布式电源利用黑启动技术完成自组网过程。但是实际中配电网线路短、出线多,负荷特性多样,在分布式电源启动后,电压升高过快将会导致变压器出现磁通饱和,容易造成过电压问题,同时在负荷不断恢复过程中,短时间内的负荷投入可能会导致系统的频率下降;另一方面,若将配网内的多个分布式电源看作多个小型微电源,在逐步组网过程中,多个分布式电源的并行恢复可能会出现电流过大而失败^[14]。因此,如何优化分布式电源的投入顺序,采用合适的控制策略抑制组网过程中的电压频率波动是一个关键问题。

3) 主动孤岛稳定运行的小干扰平抑。主动孤岛能否在组网后实现稳定运行及其抗干扰能力大小直接关系到组网过程的黑启动是否成功。小干扰稳定性是系统稳定性的一个重要方面,而虚拟惯量的分布方式对小干扰稳定性是不同的,光伏、储能等通过逆变器直接接入系统,而风机通过转子接入,其惯量与风力等也有较大关系,从而影响到系统的输出功率,整个系统呈现出低惯量的特性。因此,采用合适的控制策略提升主动孤岛抗干扰性能具有重要意义。

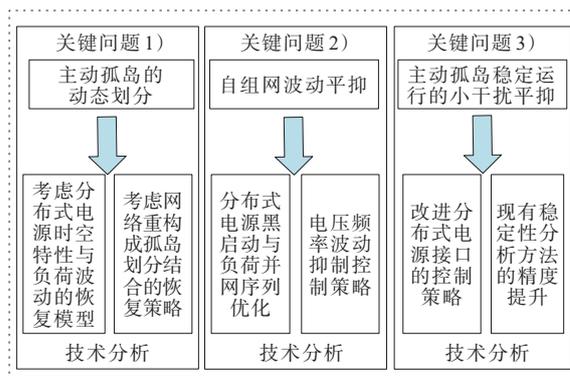


图 2 多源配电网主动孤岛关键问题及分析

Figure 2 Key issues and analysis of multi-source distribution network active islanding

3 多源配电网主动孤岛运行的实现方法

基于文 2 中主动孤岛稳定运行的问题描述和关键问题,本节将对主要问题的实现方法研究现状进行分析。图 3 为主动孤岛稳定运行关键问题的研究动态框图。

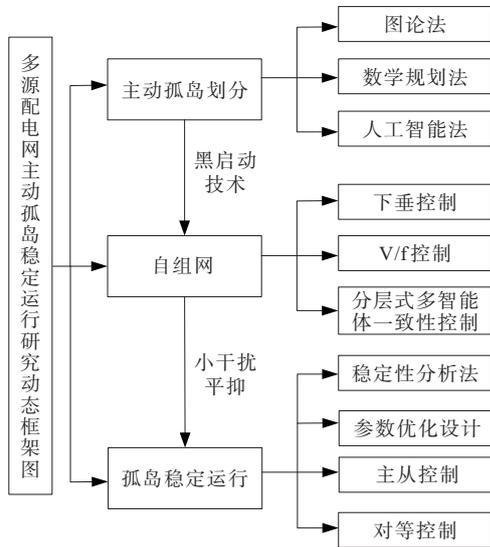


图3 多源配电网主动孤岛稳定运行研究动态框架

Figure 3 Dynamic framework for stable operation of multi-source distribution network active islanding

3.1 主动孤岛划分求解方法研究动态

关于配电网主动孤岛划分的求解方法已有不少,主要包括人工智能算法、图论法以及数学规划等方法。

1) 人工智能算法。

人工智能方法是解决最优化问题的有效途径之一。通常其包括遗传算法、粒子群算法等方法。文献[15]基于区间分析、相对距离度量(relative distance measure, RDM)区间算法,利用混合整数线性规划和风险管理工具,实现区间内不同组合依赖关系的算术运算,依据最小风险准则,降低由于新能源出力与负载波动造成最小化孤岛操作失败风险,但这种方法区间组合数量,依赖程度的不同会导致计算复杂程度增加。文献[16]采用遗传算法来求解孤岛划分问题,并引入了基因组的概念。通过基因组,研究者实现了染色体间的交叉和变异,以解决染色体可能不在可行解空间的问题。然而,遗传算法作为一种全局搜索算法,在处理存在多个局部最优解的问题时,可能会陷入局部最优解而无法找到全局最优解,且其搜索速度相对较慢。文献[17]将Levy飞行策略、柯西变异和反向学习策略引入粒子群算法,以增强算法的全局搜索能力,提高搜索效率、收敛速度和鲁棒性。文献[18]在孤岛划分的基本原则进行了改进,提出了恢复圈和供电系数的概念,以增强启发式规则的可靠性。

这些方法在一定程度上能够大大提高收敛速

度,但是对复杂的大规模系统具有较强的自适应能力,容易陷入局部最优。

2) 图论法。

将考虑负荷权重的孤岛划分问题表示为树背包模型(tree knapsack problem, TKP),如下所示:

$$\begin{cases} \max \sum_{i=0}^n x_i d_i P_{i,L} \geq 0 \\ \sum_{i=0}^n x_i (P_{i,DG} - P_{i,L}) \geq 0 \\ x_0 = 1, x_i = \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n, x_{a(i)} \geq x_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, i 为节点编号;1或者0为节点 i 是否在孤岛内; d_i 为负荷权重; $P_{i,L}$ 、 $P_{i,DG}$ 分别为节点 i 处的负荷和分布式电源的有功功率。

传统上通常将TKP问题转化为求解最优生成树的问题,常用的方法包括Kruskal^[19]算法、Sollin算法^[20]、Prim^[21]算法、图分割方法^[22]、有根树分层搜索^[23]等方法。

文献[22]在TKP问题的基础上提出了一种新的图分割问题,即含连通图约束的背包问题。这种方法在满足目标函数的基本要求的同时,保持了各个子图之间的连通性,从而限制了解空间,使问题的解空间变得更为可控,提高了孤岛最优划分方案的准确性。然而,这种基于TKP的图论方法并未考虑动态划分过程,且这种方法依赖于准确的数学模型构建,数学求解的复杂度较高。

3) 数学规划方法。

传统的数学规划方法通常包括混合整数规划算法和分支定界法。文献[24]将孤岛划分分为2个阶段的任务。先利用包含多个TKP问题的孤岛建立和孤岛合并得到初始的孤岛划分方案;然后,通过调整初始孤岛方案,推导出分支定界的前推和回溯过程。这种方法虽然在一定程度上能够提高收敛速度,但对于复杂的大规模系统具有较强的自适应能力,容易陷入局部最优。文献[25]基于分布式电源的功率极限出发,通过双线性模型线性化含电压功率乘积项的基尔霍夫电流方程,分离约束模型解决孤岛网络拓扑变化和负荷切除的问题。但这种方法需要涉及大量的决策变量和约束条件,导致模型的复杂性较高。

对于复杂的电力系统,采用数学规划方法求解最优问题时,存在计算复杂、求解时间长的问题。因此,数学规划不适用于复杂庞大的电力系统。未

来的研究需要进一步探索如何克服这些挑战,以实现更优的孤岛划分策略。

综上所述,将孤岛划分常用的几种方法进行总结对比,如表 1 所示。

表 1 几种孤岛划分方法对比

Table 1 Comparison of several island partition methods

方法	性能		
	求解速度	模型复杂度	自适应性
人工智能	高	中	高
图论	低	低	低
数学规划	中	高	中

3.2 主动孤岛自组网波动平抑方法研究动态

随着分布式电源的高比例接入,在配电网故障情况下,如何利用分布式电源的黑启动保障关键负荷供电是研究热点,但关于自组网的波动平抑的研究并不多。

在有关孤岛内 DG 黑启动保障关键负荷的研究中,下垂控制和 V/f 控制是自组网过程控制中通常采用的方法^[26-28],上述 2 种方法能够保证稳态条件下功率的分配和频率的稳定,但是对于瞬时的功率变换不够灵敏且这种控制属于有差调节。

为此,将一致性协同控制引入采用分层控制是较为常用的控制方式。分层控制是指系统除了本地控制外,还需要一个中央处理器。本地控制通常采用下垂控制,上层控制能够实现有功与无功的输出控制,同时能够实现多个微电源之间的协调,对系统的电压和频率进行控制,但是这种方式对通信的要求较高。文献[29]研究了在光储荷组成的孤岛系统中的控制策略,提出一种新型的中央处理器的方法,基于对等控制中下垂控制是有差调节,且会使系统到达其他不可预期的稳态,主从控制中对主控电源的容量要求较高等问题,提出一种加入新型中央控制器的方法,以采用 V/f 控制的储能装置为主控元件,根据系统功率分布,协调各部分组件的功率以及投切状态。

将下垂控制设为初级控制,采用一致性控制作为消差的二级控制。下垂控制功率特性为

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_{set} - m_i P_i \\ V_i = V_{set} - n_i Q_i \end{cases} \quad (2)$$

式中, ω_i 、 V_i 分别为第 i 台 DG 输出的角频率、电压幅值; ω_{set} 、 V_{set} 分别为二次控制器确定的基准角频率、电压设定值; P_i 、 Q_i 分别为第 i 台 DG 的输出有功功

率、无功功率; m_i 、 n_i 分别为第 i 台 DG 频率—有功下垂控制和电压—无功下垂控制的下垂系数, $m_i > 0, n_i > 0$ 。

多智能体间的通信拓扑如图 4 所示。

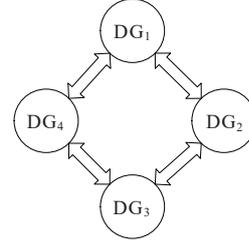


图 4 含 4 个智能体的通信拓扑

Figure 4 Communication topology with 4 agents

每个智能体的变化取决于它自身的当前状态和与它相邻智能体当前的状态。其一阶动态特性可以表示为

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t) \quad (3)$$

式中, $\dot{x}_i(t)$ 为状态变量,表示不同智能体的状态; $u_i(t)$ 为控制变量,其具体表示为

$$u_i(t) = -\beta \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_j(t) - x_i(t)) \quad (4)$$

但由于一致性控制,各个智能体之间存在通信。通信延时对系统的稳定性存在影响。

图 5 给出了计及时滞的一致性系统总体控制框。文献[30]针对通信时滞问题,利用盖尔圆盘定理和奈奎斯特稳定判据分析了延时对频率二次协同控制策略稳定性造成的影响,提出了能够控制延时界限的计算方法,提高了系统的稳定性,但是由低等级代理向高等级代理逐层进行信息传递的过程会降低通信效率,增加通信时间。

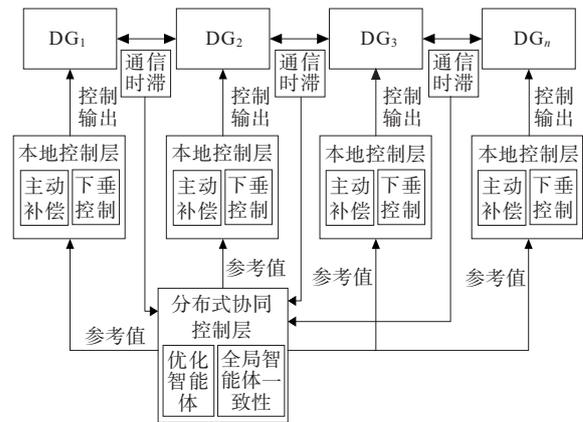


图 5 计及时滞的多智能体一致性控制系统总体框

Figure 5 Overall block diagram of multi-agent consensus control system with time delay

将这些方法加以归纳,如表2所示。

表2 几种自组网波动平抑方法对比

Table 2 Comparison of several fluctuation smoothing methods for self-organizing network

方法	性能		
	是否有差控制	速度	复杂度
下垂控制	是	高	低
V/f控制	是	中	中
分层多智能体 一致性控制	否	低	高

3.3 主动孤岛小干扰平抑方法研究动态

由于分布式电源的大规模接入,光伏、储能等通过逆变器接入,没有转子和惯性,不存在功角稳定,系统呈现出低惯量特性。而风电机组由于受到风速的影响,风速的不可控影响转子的变化,其输出功率也会受到惯量的影响。研究主动孤岛的小干扰的平抑从以下几个方面加以总结,如图6所示^[31]。

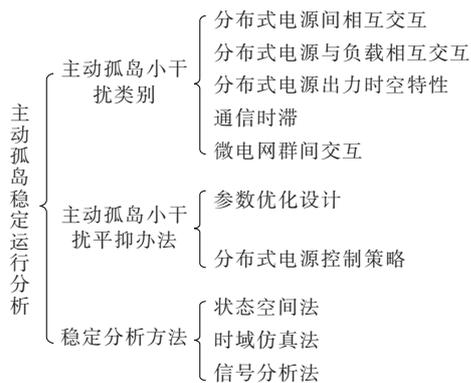


图6 主动孤岛运行小干扰平抑研究框架

Figure 6 Research framework for active islanding operation and small interference suppression

目前,在孤岛运行中,通常将系统的小干扰稳定问题归于系统阻尼不足,采用全局参数优化设计或者改进分布式电源的控制策略来进行主动孤岛条件下的小干扰稳定控制。

就参数优化设计而言,分布式电源接入后,系统中增加了许多电力电子器件,同时控制器中的参数整定增加了分布式电源之间的耦合程度。因此,通过相应的优化算法将电压电流控制环、功率控制环、LCL滤波参数等与系统稳定性相关的参数通过优化算法作为目标整定,在一定程度上能够提高系统的稳定性。文献[32]针对多台逆变器虚拟同步机(virtual synchronous generators, VSG)并联由于

系统参数不均而产生的功率环流问题,提出了自适应虚拟阻抗控制策略,通过自适应算法对引入虚拟阻抗进行调节,同时对系统进行小参数整定,最终系统对功率环流的抑制有明显作用,同时系统功率能够实现合理分配。

就分布式电源控制策略方面来说,目前在配电网孤岛运行方面的研究较少,但是控制策略与孤岛微电网有着互通性。因此,鉴于在孤岛微电网中常采用的分布式电源之间的控制方式包括主从控制和对等控制,分布式电源个体通常采用P/Q控制、下垂控制、V/f控制^[33-34],下面就这几个方面进行归纳总结。

由于主从控制需要选择一个主电源,对主电源的容量要求较高,文献[35]提出一种改进的主从控制策略即通过通信网络,在主控制器瞬时补充系统缺额时按照各自的容量比例承担主电源的输出功率,在一定程度上能够分担主电源的承担压力。但是这种主从控制的方法在一定程度上对通信网络的要求严格,若是通信出现中断,那么“跟从”的分布式电源都将失去控制。

对等控制中每个分布式电源的地位都是相同的,不分主从,这种方式不需要各个分布式电源之间的相互通信,能够彼此独立,具有“即插即用”、功率共享的功能。其中,较为常用的方法是下垂控制。文献[36]基于传统的下垂控制,采用零电平和主控制器结合实现系统的稳定性。文献[37]中采用鲁棒负虚的方法对控制器进行设计,实现不同负载和故障条件下的单相和三相孤岛微电网电压控制。一些学者通过加入虚拟量下垂,减少反馈回路,降低频率波动^[38],另一种是通过基于改变发电机输出电压的角度和大小,从而减小频率偏差和提高电能质量,但是这种方法角度下垂的功率共享较差^[39]。文献[40]在配电网主动孤岛采用有功一相角下垂控制的基础上,将同步相量测量单元(phasor measurement unit, PMU)引入系统,提出了一种基于 μ PMU的有功补偿控制方法,同时建立了系统小信号模型,结合 μ PMU测得的配电网孤岛公共母线上相角信息最终能够使系统功率进行合理分配,采用粒子群算法整定出了能够满足系统动态性能的最优参数,提高了系统的稳定性。

除此之外,稳定性分析方法是研究稳定性问题的一个重要方面。目前,状态空间建模、时域仿真以及信号分析是稳定性分析的主要方法。

状态空间法通过建立电力系统的状态空间模型,利用特征分析解决多输入、多输出、多变量的线性或非线性系统的动态稳定问题。文献[41]对逆变器、网络、动态负荷进行了较为详细的描述。但是状态空间法在描述系统动态行为时需要考虑多个状态变量,因此在系统比较复杂或者非线性时,状态空间法的建模和分析会变得复杂,同时由于系统的低惯性,较小的扰动也可能对系统参数造成较大的影响,从而使得状态空间法的参数具有不确定性。

时域仿真分析法通过仿真工具对系统进行建模和仿真分析,能够准确描述系统的变化动态,但是对于较为复杂的电力系统,仿真耗时过长且不能量化分析^[42]。

信号分析法可以将系统响应转化到频域分析,可以揭示系统在不同频率下的稳定性,应用广泛,但在某些情况下,频域分析可能难以处理非线性系统或者时变系统^[43]。

将这几种稳定分析方法进行归纳,如表 3 所示。

表 3 几种稳定分析方法对比

Table 3 Comparison of several stability analysis methods

方法	性能	
	准确性	复杂性
状态空间法	中	中
时域仿真法	高	高
信号分析法	低	低

4 展望

配电网主动孤岛化有助于提高配电网的可靠性,减少停电时间,保障关键负载的供电,同时能够更好地利用分布式能源和储能系统等微电网资源,提高电能利用率,降低能源浪费。随着智能设备和通信技术的不断发展,未来的配电网主动孤岛化将更加智能化和自动化。智能电力电子设备将更加灵活,能够对配电网的故障和停电状态做出更快速的响应,实现自主分离和平稳过渡,更加注重系统的鲁棒性和安全性,包括对供电质量和频率稳定性的更好控制,以及对孤岛内部电网安全运行的更好的保障,同时可以实现多能互补和综合利用,包括对不同类型的分布式能源和储能系统之间以及电力系统与其他系统之间的协调调度,以求最大化供电可靠性和经济性。因此,在已有基础上,还需要对以下 4 个方面进行深入研究探讨。

1) 电力物联网下的配电网主动孤岛运行展望。近些年,人工智能、5G、北斗等新技术与传感监测等传统技术的融合,海量数据上传到云端,配电网面临数字化转型^[44]。一方面,海量的数据上传到云端,且数据类型庞杂,占用大量的通信宽带,给数据的处理的准确性和时效性带来了挑战。因此,在电力物联网的背景下,融合边缘计算和人工智能的云一边协同控制技术有助于配电网在极端条件下的快速决策。另一方面,随着配电网数字化转型的不断深入,实现配电网的智能规划需要融合图一模一数一算多个方面的交互协调。因此,提出合适有效的图模数融合驱动算法是实现新型配电网数字化故障恢复的重点与难点。

2) 高电力电子化下的主动孤岛稳定运行控制展望。在不采用通信控制的分散式分布式电源间,由于多类型分布式电源电压及频率特性、低惯性及低阻尼、时空分布特性等因素的影响,多台逆变器并列运行时,系统低频动态特性对功率下垂的系数敏感,严重时主动孤岛在低频模式下可能发生振荡失稳的现象,影响系统的稳定运行,有效的低频振荡抑制策略对配电网主动孤岛稳定运行具有重要的意义。

3) 主动孤岛配电网的长时间尺度的稳定运行展望。在长时间尺度下,孤岛配电网的稳定运行需要考虑负荷需求、分布式电源出力波动、储能系统的调节以及运行调度和控制策略等因素的影响。在长时间尺度下,考虑使用储能系统来平衡不同时间段的能源供应和需求是较为有效的方式。一方面,构建根据配电网的实际负荷和可再生能源的波动情况,建立孤岛配电网系统内电力平衡模型,利用实时数据对储能系统进行合理配置模型;另一方面,如何构建综合考虑储能设备的成本、能量密度、效率等因素实现成本和性能的双重优化模型,提出快速高效的求解算法,这对主动孤岛配电网的长时间尺度的稳定运行具有重要意义。

4) 能源互联网背景下的主动孤岛运行策略展望。随着互联网理念的不断深化,融合了电力、供热、燃气等能源系统以及通信、交通、供水等非能源系统的一种新型的能源体系架构——“能源互联网”的构想被提出。可再生能源作为主要能量供应源,通过互联网技术实现各种能源的合理分配与共享^[45-46]。在能源互联网的背景下,配电网的主动孤岛运行需要考虑对关键负荷的供电恢复以及与电力、交通和供水等多个方面的协同耦合。举例来

说,极端事件使得交通系统和电力系统瘫痪时,仅仅恢复电力并不能保证生活物资的运输;另外,在医院等人群聚集场所,恢复电力之外也需要考虑供水和供热的恢复。这就意味着在进行配电网主动孤岛划分或黑启动的过程中需要考虑大量的控制变量,同时目标函数和约束条件的复杂度也大大提

高。因此,在能源互联网的背景下,构建准确的多能耦合模型并提出高效的能源互联网主动孤岛最优划分以及黑启动的最优组网顺序,提出有效的能源互联网背景下主动孤岛稳定运行控制策略是有待解决的难点问题。图7为多源配电网主动孤岛稳定运行的总结与展望。

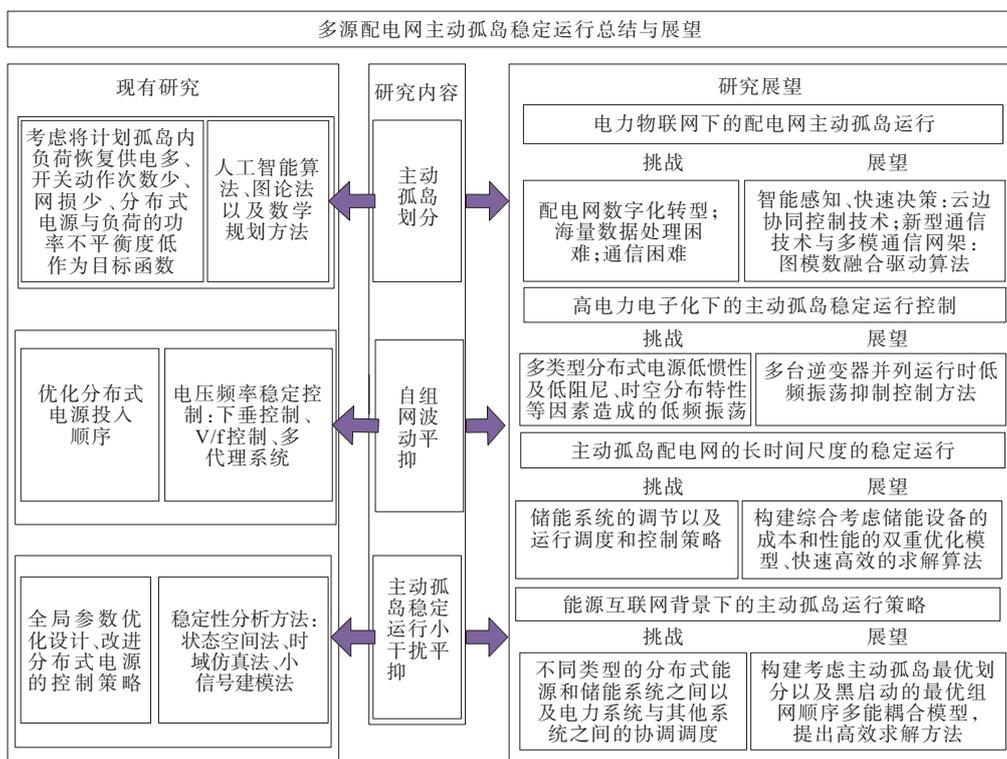


图7 多源配电网主动孤岛稳定运行总结与展望

Figure 7 Summary and outlook on stable operation of multi-source distribution network in active islanding mode

5 结语

极端事件引发的大停电事故日益频发使得配电网的恢复研究成为热点问题。本文介绍多源配电网主动孤岛的内涵,总结了配电网主动孤岛恢复与微电网孤岛恢复的区别,就新能源接入背景下的配电网主动孤岛稳定运行研究进行了综述。首先,阐述了配电网主动孤岛在孤岛划分、自组网以及小干扰运行下的3点关键问题;其次,从这3个方面综述了现有的实现方法;最后,就配电网主动孤岛稳定运行进行了展望,并提出了相关的亟待解决的核心难点问题等,以为后续研究提供参考。

参考文献:

[1] 张博,马梓耀,王辰,等.含光储充一体化电站的城市交直流混合配电网韧性提升策略[J].电力系统自动化,2023,47(12):28-37.

ZHANG Bo, MA Ziyao, WANG Chen, et al. Resilience improvement strategy for urban AC/DC hybrid distribution network with photovoltaic-storage-charging integrated station[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(12):28-37.

[2] 蔡田田,姚浩,杨英杰,等.基于云一边协同的配电网快速供电恢复智能决策方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(19):94-103.

CAI Tiantian, YAO Hao, YANG Yingjie, et al. Cloud-edge collaboration-based supply restoration intelligent decision-making method[J]. Power System Protection and Control, 2023,51(19):94-103.

[3] 傅守强,陈翔宇,张立斌,等.面向韧性提升的交直流混合配电网协同恢复方法[J].中国电力,2023,56(7):95-106.

FU Shouqiang, CHEN Xiangyu, ZHANG Libin, et al. Coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution networks for resilience enhancement[J]. Electric Power,2023,56(7):95-106.

- [4] 周淦,解慧力,郑柏林,等.基于混合算法的配电网故障重构与孤岛运行配合[J].电网技术,2015,39(1):136-142. ZHOU Quan, XIE Huili, ZHENG Bolin, et al. Hybrid algorithm based coordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation[J]. Power System Technology, 2015, 39(1):136-142.
- [5] 张振强,王宏波,赵阳,等.考虑灵活性的交直流混联配电网分布鲁棒优化运行[J].电力科学与技术学报,2024, 39(2):64-73. ZHANG Zhenqiang, WANG Hongbo, ZHAO Yang, et al. Distributionally robust optimal operation of AC/DC hybrid distribution network considering flexibility evaluation index[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2):64-73.
- [6] 徐思佳.柔性负荷平衡装置对孤岛电网调频过程的影响研究[J].电力工程技术,2022,41(1):126-133. XU Sijia. The frequency modulation model considering the coordinated output of the load end and the generator end[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1):126-133.
- [7] 朱险峰,刘子伟,申冉,等.基于HSA-FNSA混合算法的配电网群故障恢复多目标优化决策[J].智慧电力,2023, 51(5):23-29. ZHU Xianfeng, LIU Ziwei, SHEN Ran, et al. Multi-objective optimization for fault recovery decision of distribution network cluster based on HSA-FNSA hybrid algorithms[J]. Smart Power, 2023, 51(5):23-29.
- [8] 牛耕,孔力,周龙,等.含分布式电源的配电网的供电恢复技术研究综述[J].电工电能新技术,2017,36(9):51-62. NIU Geng, KONG Li, ZHOU Long, et al. Review of power service restoration of distribution network with distributed generation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(9):51-62.
- [9] 徐丙垠,徐化博,杨帆,等.配电网防孤岛保护技术与发展[J].供用电,2023,40(4):2-8+22. XU Bingyin, XU Huabo, YANG Fan, et al. Anti-islanding protection technology and development of distribution systems[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(4):2-8+22.
- [10] 戴志辉,王旭,陈冰研.主动配电网供电恢复过程中的孤岛划分及并网方法[J].电力系统及其自动化学报,2018, 30(9):1-7. DAI Zhihui, WANG Xu, CHEN Bingyan. Islanding division and grid connection method during service restoration of active distribution networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9):1-7.
- [11] 詹红霞,肖竣文,邓小勇,等.计及柔性负荷的高比例风光渗透下配电网孤岛划分策略[J].电力工程技术,2022, 41(4):108-116. ZHAN Hongxia, XIAO Junwen, DENG Xiaoyong, et al. Islanding strategy for distribution network with high proportion of wind/photovoltaic penetration considering flexible load[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4):108-116.
- [12] 陈厚合,丛前,姜涛,等.多能协同的配电网供电恢复策略[J].电工技术学报,2022,37(3):610-622+685. CHEN Houhe, CONG Qian, JIANG Tao, et al. Distribution systems restoration with multi-energy synergy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3):610-622+685.
- [13] 陈春,高靖,曹一家,等.多源配网主动孤岛恢复过程电压频率波动的平抑方法[J].上海交通大学学报,2022,56(5):543-553. CHEN Chun, GAO Jing, CAO Yijia, et al. Voltage and frequency suppression of intentional islanding restoration process for distribution system with multi-generations[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(5):543-553.
- [14] 王敏,李想,潘永春,等.微电网黑启动研究综述[J].电力自动化设备,2016,36(3):41-45+59. WANG Min, LI Xiang, PAN Yongchun, et al. Overview of research on microgrid black-start[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):41-45+59.
- [15] POPOVIC Z N, KNEZEVIC S D, BRBAKLIC B S. A risk management procedure for island partitioning of automated radial distribution networks with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5):3895-3905.
- [16] 李振坤,刘俊,杨帆,等.有源配电网的综合供电恢复及改进遗传算法[J].电力系统保护与控制,2014,42(17):24-30. LI Zhenkun, LIU Jun, YANG Fan, et al. Restoration of distribution network containing DG and a refined genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17):24-30.
- [17] 王以琳,谢华北,闫杨舒,等.基于改进粒子群算法的配电网故障恢复研究[J].陕西科技大学学报,2023,41(5):174-181. WANG Yilin, XIE Huabei, YAN Yangshu, et al. Study on fault recovery of distribution network based on improved particle swarm algorithm[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2023, 41(5):174-181.
- [18] 端木浚程,袁越.配电网孤岛划分的启发式方法[J].电测与仪表,2023,60(3):26-32. DUANMU Juncheng, YUAN Yue. A heuristic method for island partition of distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(3):26-32.
- [19] 刘宗歧,鲍巧敏,孙春山,等.基于改进Kruskal算法的含分布式发电的配网孤岛划分算法[J].电工技术学报, 2013, 28(9):164-171. LIU Zongqi, BAO Qiaomin, SUN Chunshan, et al. Islanding algorithm of distribution system with

- distributed generations based on improved kruskal algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(9):164-171.
- [20] 王振浩,李秉书,任强,等.含分布式电源的智能配电网孤岛划分策略[J].电测与仪表,2015,52(14):39-43.
WANG Zhenhao, LI Bingshu, REN Qiang, et al. Island division strategies for the smart distribution network with distributed power supply[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2015,52(14):39-43.
- [21] 曾令诚,吕林,曾澜钰.基于sollin算法的含分布式电源的孤岛划分方法[J].电力自动化设备,2013,33(4):95-100.
ZENG Lingcheng, LYU Lin, ZENG Lanyu. Islanding method based on sollin algorithm for grid with distributed generations[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):95-100.
- [22] 林济铿,王旭东,李胜文,等.基于含连通图约束的背包问题的图分割方法[J].中国电机工程学报,2012,32(10):19+134-141.
LIN Jikeng, WANG Xudong, LI Shengwen, et al. Graph partitioning method based on connected graph constrained knapsack problem[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(10):19+134-141.
- [23] 丁磊,潘贞存,丛伟.基于有根树的分布式发电孤岛搜索[J].中国电机工程学报,2008,28(25):62-67.
DING Lei, PAN Zhencun, CONG Wei. Searching for intentional islanding strategies of distributed generation based on rooted tree[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(25):62-67.
- [24] 王旭东,林济铿.基于分支定界的含分布式发电配电网孤岛划分[J].中国电机工程学报,2011,31(7):16-20.
WANG Xudong, LIN Jikeng. Island partition of the distribution system with distributed generation based on branch and bound algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(7):16-20.
- [25] 汪隆君,郭俊宏,王钢,等.主动配电网孤岛划分的混合整数规划模型[J].电工技术学报,2016,31(15):136-146.
WANG Longjun, GUO Junhong, WANG Gang, et al. A mixed integer programming model for islanding partition of active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(15):136-146.
- [26] MORSTYN T, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Control strategies for microgrids with distributed energy storage systems: An overview[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(4):3652-3666.
- [27] 汪亮,彭勇刚,吴韬,等.光储交流微电网孤岛模式下的改进型主从控制[J].高电压技术,2020,46(10):3530-3541.
WANG Liang, PENG Yonggang, WU Tao, et al. Improved master-slave control for islanded AC microgrid with PV and energy storage systems[J]. High Voltage Engineering, 2020,46(10):3530-3541.
- [28] MORSTYN T, HREDZAK B, AGELIDIS V G. Distributed cooperative control of microgrid storage[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(5):2780-2789.
- [29] 邱首东,李辉.光储微电网孤岛运行控制策略研究[J].电工技术,2017(3):142-144.
QIU Shoudong, LI Hui. Research on islanding operation control strategy of optical storage microgrid[J]. Electric Engineering,2017(3):142-144.
- [30] 范培潇,杨军,肖金星,等.基于深度Q学习的含电动汽车孤岛微电网负荷频率控制策略[J].电力建设,2022,43(4):91-99.
FAN Peixiao, YANG Jun, XIAO Jinxing, et al. Load frequency control strategy based on deep Q learning for island microgrid with electric vehicles[J]. Electric Power Construction,2022,43(4):91-99.
- [31] 赵卓立.微电网动态特性分析及稳定控制[D].广州:华南理工大学,2017.
ZHAO Zhuoli. Dynamic characteristics analysis and stability control of microgrid[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2017.
- [32] 孙佳航,王小华,黄景光,等.基于MPC-VSG的孤岛微电网频率和电压动态稳定控制策略[J].中国电力,2023,56(6):51-60+81.
SUN Jiahang, WANG Xiaohua, HUANG Jingguang, et al. MPC-VSG based control strategy for dynamic stability of frequency and voltage in islanded microgrid[J]. Electric Power,2023,56(6):51-60+81.
- [33] 万千,夏成军,管霖,等.含高渗透率分布式电源的独立微网的稳定性研究综述[J].电网技术,2019,43(2):598-612.
WAN Qian, XIA Chengjun, GUAN Lin, et al. Review on stability of isolated microgrid with highly penetrated distributed generations[J]. Power System Technology, 2019,43(2):598-612.
- [34] 苏译, Jiashen TEH, 柏智, 等. 考虑不确定性扰动的含海量资源配电网弹性研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16):17-30.
SU Yi, TEH J, BAI Zhi, et al. Review of research on resilience of distribution network with massive resources considering uncertainty disturbance[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(16):17-30.
- [35] 陈涛,李哲,赖向平,等.改进的孤岛微电网主从控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(11):45-52.
CHEN Tao, LI Zhe, LAI Xiangping, et al. Improved master-slave control strategy for islanded micro-grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2019,31(11):45-52.
- [36] WANG X S, ZHANG J C, ZHENG M L, et al. A

- distributed reactive power sharing approach in microgrids with improved droop control[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(6): 1238-1246.
- [37] SARKAR S K, RONI M H K, DATTA D, et al. Improved design of high-performance controller for voltage control of islanded microgrid[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(2): 1786-1795.
- [38] 瞿祎, 欧阳曾恺, 朱虹, 等. 基于改进高斯滤波器的含锁相环 PV-BES 微电网的孤岛检测和无缝切换控制[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 38-46.
- QU Yi, OUYANG Zengkai, ZHU Hong, et al. Island detection and seamless switching control of PV-BES microgrid with phase-locked loop based on improved Gaussian filter[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 38-46.
- [39] MOUSSA H, SHAHIN A, MARTIN J P, et al. Optimal angle droop for power sharing enhancement with stability improvement in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5014-5026.
- [40] 许寅, 王思家, 吴翔宇, 等. 基于同步相量测量的配电网孤岛多源协同控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 872-880.
- XU Yin, WANG Sijia, WU Xiangyu, et al. Multi-source coordinated control method based on PMU for islanded distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 872-880.
- [41] 赵雨童, 高飞, 张博深. 基于交流电流下垂特性控制的 VSC 建模和稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 50-55.
- ZHAO Yutong, GAO Fei, ZHANG Boshen. Modeling and stability analysis of VSC with droop characteristic based on AC current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 50-55.
- [42] 付强, 杜文娟, 王海风. 交直流混联电力系统小干扰稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2829-2840+3134.
- FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Small signal stability analysis of AC/DC hybrid power system: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2829-2840+3134.
- [43] 杨洁, 刘开培, 余俞, 等. 交流电网互联的双端柔性直流输电系统小信号建模[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2177-2184.
- YANG Jie, LIU Kaipei, YU Yu, et al. Small signal modeling for VSC-HVDC used in AC grid interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2177-2184.
- [44] 全杰, 齐子豪, 蒲天骄, 等. 电力物联网边缘智能: 概念、架构、技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5473-5496.
- TONG Jie, QI Zihao, PU Tianjiao, et al. Edge intelligence to power Internet of Things: concept, architecture, technology and application[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5473-5496.
- [45] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3014-3022.
- MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy Internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022.
- [46] 许寅, 和敬涵, 王颖, 等. 韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3416-3429.
- XU Yin, HE Jinghan, WANG Ying, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.