

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230741

新能源大规模并网环境下变电站防孤岛技术研究

耿新¹, 马文恒¹, 武琼², 王临宁¹, 翟君毅¹, 赵建军¹

(1. 国网河南省电力公司平顶山供电公司, 河南 平顶山 467000; 2. 河南平高通用电气有限公司, 河南 平顶山 467000)

摘要: 针对新能源规模化并网给变电站带来的孤岛运行风险, 研究基于电网拓扑和纵向通信的全站孤岛识别技术及相关切机策略。针对现有变电站新能源联切回路错综复杂的现状, 基于电网拓扑模型, 设计以联切矩阵为主的回路优化策略, 建立联切间隔与新能源间隔之间的映射关系, 大幅降低新能源间隔扩建时电网在运设备配合传动频率及后期运维难度。针对区域孤岛问题, 提出基于多站信息融合的孤岛广域判别技术。采集并分析开关量、功率突变等关键信息, 结合就地电气量变化得出可靠判别结果, 避免新能源出力与孤岛负荷大体平衡时因无法快速识别孤岛带来的自备投及重合闸误动风险。研究表明, 以联切矩阵为主的回路优化策略能大幅降低现场新能源联切回路数量, 基于多站信息融合的孤岛广域判别技术可解决新能源出力与孤岛负荷大体平衡时孤岛识别问题。结合电网侧过/欠压及过/欠频等判据, 形成完备的电网侧变电站反孤岛解决方案。

关键词: 新能源; 并网; 联切; 孤岛; 矩阵

Islanding prevention technology for substations in the context of large-scale grid connection of new energy

GENG Xin¹, MA Wenheng¹, WU Qiong², WANG Linning¹, ZHAI Junyi¹, ZHAO Jianjun¹

(1. Pingdingshan Power Supply Company, State Grid Henan Electric Power Company, Pingdingshan 467000, China;
2. Henan High General Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

Abstract: There is a risk of island operation of a substation brought about by large-scale grid connection of new energy. Thus the whole station island identification technology based on grid topology and vertical communication and the relevant strategy of generator tripping are studied. In view of the complexity of the existing new energy joint tripping of a substation, based on the power grid topology model, the circuit optimization strategy based on the joint tripping matrix is designed, and the mapping relationship between the joint tripping interval and the new energy interval is established. This greatly reduces both the transmission frequency and the difficulty of late operation and maintenance of the power grid on-running equipment during the expansion of the new energy interval. To solve the problem of regional islands, an island wide area discrimination technology based on multi-station information fusion is proposed. This collects and analyzes key information such as switch quantity and power mutation, and obtains reliable discrimination results combined with changes in local electricity consumption. This avoids the risk of standby self-input and re-closing misoperation when an island cannot be quickly identified, and when new energy output and island load are roughly balanced. The research shows that a loop optimization strategy based on the joint tangent matrix can greatly reduce the number of new energy joint tangent loops on site. The island wide area identification technology based on multi-station information fusion can solve the island identification problem when the new energy output and island load are generally balanced. Combined with grid-side over/under voltage and over/under frequency criteria, a complete anti-island solution for a grid-side substation is formed.

This work is supported by the National Key Research & Development Program of China (No. 2022YFE0205100).

Key words: new energy; grid connection; joint tripping; island; matrix

0 引言

随着双碳目标的持续推进, 新能源并网趋势愈

加明显, 大量新能源机组接入 110 kV 及以下电网, 形成高比例新能源接入电网的局面。在长期运行过程中, 规模化新能源并网增加了变电站孤岛运行的风险。为确保供电可靠性, 须及时识别新能源孤岛运行状态并采取应对措施。近年来, 国内外学者与

基金项目: 国家重点研发计划项目资助 (2022YFE0205100)

研究机构相继提出多种孤岛检测方法。

孤岛检测方法依据是否采用远程通信，可分为本地检测法和远程检测法。本地检测法又依据是否向电网注入干扰信号，分为被动式检测法和主动式检测法^[1-4]。

被动式检测法主要是通过通过分析孤岛产生前后观测点采集的电压、电流等电气量的幅值、相位、频率等，来诊断是否产生孤岛状况。被动式检测的优点是不需要额外增设检测设备，节省成本；缺点是当孤岛产生后，新能源出力与孤网范围内负荷总量大体相当时，电流、电压等电气量的特征不会产生明显变化，这时会产生检测盲区^[5-8]。

主动式检测方法借助控制逆变器，使其输出的电压电流的相位或频率产生微小偏移，通过分析检测点该电气量变化量是否超出阈值来判断是否出现孤岛。主动式检测方法的优点是检测盲区小，响应速度快，检测精度高；缺点是所加入的扰动量将增加电网的谐波分量，降低电能质量^[9-10]。

远程检测法是通过电力通信网络开展判据采集、逻辑分析、指令释放等任务，常见的远程检测方法有电力线载波通信法、连锁跳闸法、远动释放法等。

1 本地检测方法简介

1.1 被动式检测法

常见的被动式检测法有过/欠压检测法、过/欠频检测法、相位突变检测法、电压谐波检测法等。

1.1.1 过/欠压或过/欠频法

图 1 为并网发电系统逆变器的功率流图，包括电网、新能源场站、RLC 负载以及新能源场站侧断路器 S1 和电网侧断路器 S2。图 2 为并网逆变系统的等效图，图中 P 为并网逆变器输出的有功功率； Q 为并网逆变器输出的无功功率； ΔP 为电网提供的有功功率； ΔQ 为电网提供的无功功率； V_i 为检测点电压； f_i 为检测点频率； P_{load} 为本地负载消耗的有功功率； Q_{load} 为本地负载消耗的无功功率。

图中 ΔP 与 ΔQ 越大，检测点的电压和频率变化也越大，容易达到孤岛检测阈值；若 ΔP 与 ΔQ 较小，检测点相位和频率变化量低于孤岛检测阈值，将不足以启动过/欠压或过/欠频逻辑，但阈值也不可设置过低，防止电网正常波动引起误动作^[11-15]。

1.1.2 相位突变检测法

相位突变检测法通过检测公共点电压和并网逆变器输出电流之间的相位差是否发生突变，来判断新能源系统是否处于孤岛状态。

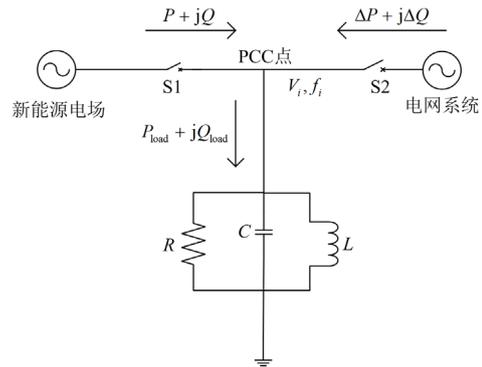


图 1 并网发电系统逆变器的功率流图

Fig. 1 Power flow diagram of inverter in grid-connected power generation system

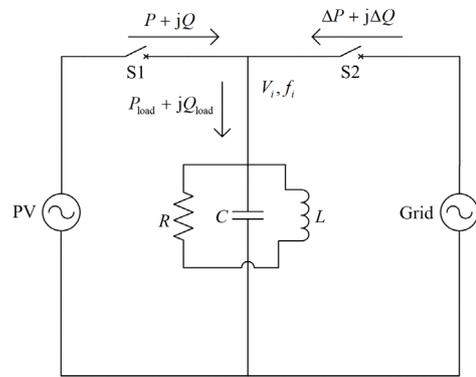


图 2 并网逆变系统的等效图

Fig. 2 Equivalent diagram of grid-connected inverter system

在电网正常运行时，并网逆变器输出电流和公共耦合点的电压相位差为 0，孤岛发生后，公共耦合点电压受本地负荷和逆变器输出电流共同决定。逆变器输出受锁相环控制，因此输出电流和检测点电压会在电压过零点同步，如图 3 所示，孤岛形成时，将导致检测点电压相角突变，因此可以通过检测电压与电流之间的相角差是否突变且超出阈值，来达到孤岛检测的目的^[16-18]。

相位突变法的优点是不需要增加额外硬件，经济性及实用性强，不会影响电能质量；缺点是盲区大，当本地负载阻抗角较小时，将会导致电压及电流相位差值很小，容易造成检测失败^[19]。

1.1.3 电压谐波检测法

谐波检测法是通过分析检测点电压总谐波畸变大小来判断系统是否处于孤岛状态。当分布式新能源向电网输送功率时，电流中的谐波分量也会被注入电网。由于电网等效阻抗小，电流谐波引起的电压谐波畸变率也小，一般难以达到电压谐波畸变率阈值。

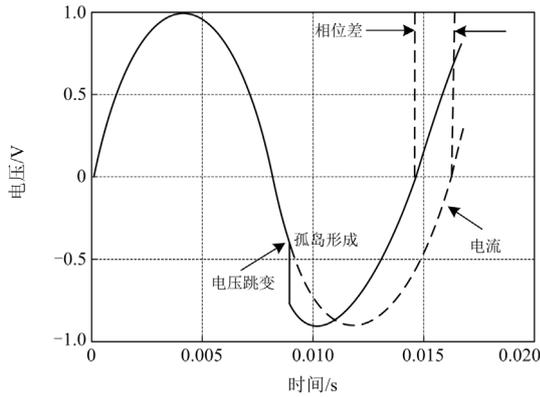


图3 电压相位突变检测法原理

Fig. 3 Principle of voltage phase mutation detection method

孤岛发生后, 由于新能源侧网络脱离主电网, 等效阻抗变大, 谐波电流产生的谐波电压将增大。因此可以通过判断检测点谐波电压是否超过阈值来判断系统是否处于孤岛状态。

电压谐波检测法的优点是不用添加硬件, 操作简单; 缺点是易受外部非线性负载影响, 造成总谐波失真度增大, 引起误判, 且谐波阈值不易选择^[20-23]。

1.2 主动式孤岛检测法

主动式孤岛检测法通常是在逆变器控制中施加相角、功率、频率等扰动信号, 当分布式电源正常并网工作时, 逆变器输出的波形将与主网同步, 并网点不会被检测到扰动信号。当孤岛形成后, 由于失去主电网电压钳制, 逆变器输出的扰动信号将快速累积, 逐渐超出阈值, 成功检测出孤岛。这类方法可以避免在孤岛状态下, 新能源出力与负载匹配度较高时, 检测点电气量变化不明显导致的检测时间增加等问题。下面重点介绍主动频率偏移法(active frequency drift, AFD)及滑模频率偏移法(slip-mode frequency shift, SMS)两种主动式检测方法。

1.2.1 主动频率偏移法(AFD)

AFD 的基本思路是在逆变器输出电流过零点时, 控制其频率周期性地产生畸变, 如图4所示, 检测其是否累计并超出指定阈值, 进而判断是否存在孤岛。当正常运行时, 电网电压到达过零点时, 逆变器电流也会同时复位, 即使逆变器输出电流频率产生微小的偏差 Δf , 在锁相环作用下逆变器侧电流频率也会与电网电压频率保持一致; 若孤岛状态下, 不再受电网电压频率钳制, 电流频率将周期性地递增或递减, 若累计量超出阈值, 则判断为孤岛运行状态。

在 AFD 算法作用下, RLC 负载断网后新稳态满足式(1)。

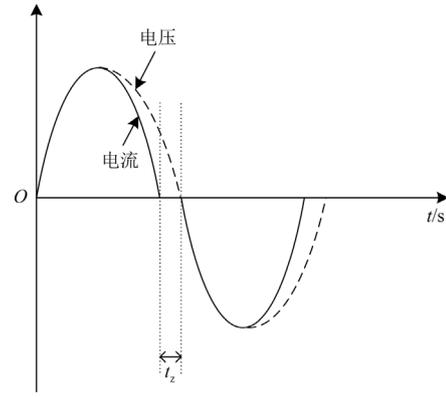


图4 AFD 电流波形

Fig. 4 AFD current waveform

$$\arctan[R(\omega C - (\omega L)^{-1})] = \theta_{AFD} \quad (1)$$

式中: ω 为电网角频率; θ_{AFD} 为 AFD 算法的相位偏移, θ_{AFD} 一般选择最坏情况, 即 $\theta_{AFD} = \frac{\omega t_z}{2}$ 的情况,

t_z 为电流超前(或滞后)监测点电压过零处的时间。

由于该方法属于主动式检测法, 所引入扰动信号会对电能质量造成一定影响, 且在特殊负载条件下会存在检测盲区。当负载呈阻性时, 孤岛效应无盲区, 容易被检测; 当负载呈容性时, 频率递减会加速孤岛检测, 频率递增会降低检测效果, 甚至出现检测失败的情况; 当负载呈感性时, 频率递增可以加速孤岛检测, 频率递减会降低检测效果, 甚至出现检测失败的情况^[19-21]。

1.2.2 滑模频率偏移法(SMS)

SMS 的原理为: 控制并网逆变器的输出电压与电流之间的相位差为频率的函数, 在孤岛状态下, 频率快速偏离正常值并超过阈值, 从而触发孤岛保护。

通常逆变电源工作在单位功率因数下, 检测点电压和逆变器输出电流之间的相位差被控制为接近零。在此方法中, 逆变电源输出电流和检测点电压之间的相位差 θ_{SMS} 如式(2)所示。

$$\theta_{SMS} = \theta_m \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{f - f_g}{f_m - f_g}\right) \quad (2)$$

式中: θ_m 为算法的最大相位偏移; f 为检测点电压频率; f_g 为电网频率; f_m 为最大相位偏移 θ_m 发生时的频率。

正常情况下, 电网提供固定的频率和相角基准, 工作点被稳定在工频状态, $\theta_{SMS} = 0$; 孤岛形成后, 当出现小扰动导致频率变化时, 如频率增加, 则相位差也将增加, 电压下次过零时间将缩短, 逆变器输出电压频率将进一步增加, 形成正反馈。若电压

频率快速变化并超过阈值,则判定为孤岛状态^[22-26]。

SMS 中电压与电流间的相位差 θ_{SMS} 与检测点电压频率呈函数关系,如图 5 中曲线所示;负荷侧相角差与频率的响应曲线 $\phi(f)$ 如图 5 中直线所示。

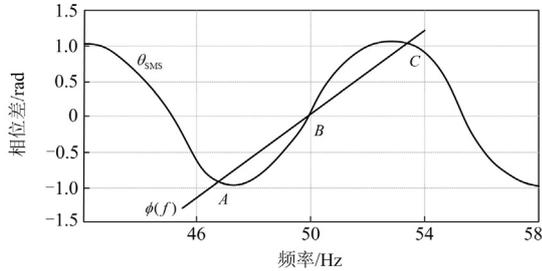


图 5 负载和相位差的频率响应曲线

Fig. 5 Frequency response curves of load and phase difference

SMS 孤岛检测方法是通过对移相实现移频目的,当频率偏移超出阈值时,可判断孤岛发生。如图 5 所示,以光伏逆变器为例,未发生孤岛情况时,受系统电压钳制,逆变器输出的电流与检测点电压之间相角差为零,工作于 B 点;当发生孤岛情况时,由于 B 点为不稳定工作点,因此频率在微小扰动作用下移向稳定工作点 A 或点 C,若此时系统频率超过阈值,则孤岛检测成功。SMS 孤岛检测算法会使孤岛发生后检测点频率持续单向变化,使得频率持续单向升高(或降低),最后超出阈值,满足孤岛检测条件。

与其他主动式方法相比, SMS 检测盲区相对较小,孤岛检测效果显著,且当连接多台并网逆变器时不会产生稀释效应;缺点是此方法不断对逆变器输出电流进行相位修正,对电能质量影响较大^[25-26]。

2 远程检测法

2.1 电力线载波通信法

电力线载波通信法是借助原有的电力线路为载波媒介,通过装设在变电站侧的信号发射器持续发送射频电波,并由安装在新能源场站的信号检测器接收并解析载波信号,以射频信号的有无来判别孤岛是否发生;其缺点是每个分布式新能源电场均需要加装一台信号检测器,极大地增加了成本,此外,通信信道被挤占或信号频段丢失,都可能造成检测失败。

2.2 连锁跳闸法

连锁跳闸法的思想是通过检测所有可能导致孤岛产生的断路器及其自动重合闸状态,判断是否有孤岛发生。当检测出非计划孤岛,将由中央处理单元向分布式新能源场站发送联切信号,终止孤岛状

态,其原理如图 6 所示。

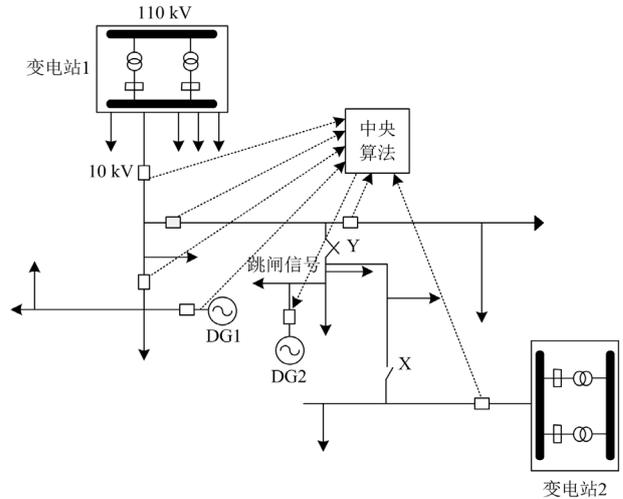


图 6 连锁跳闸方案的原理图

Fig. 6 Schematic diagram of interlocking trip scheme

此方法虽然原理简单,但实际实施的过程中会存在部分问题:该方法需要借助通信平台实现其功能,若新能源处于偏远地区,会产生高昂的成本,且由于电网的拓扑结构可能存在变化,中央处理单元的算法也需要不断更新。对于拓扑结构稳定的分布式发电系统,该方法效果显著。

2.3 运动释放法

运动释放法是靠中央处理器实时监测电网各个支路断路器状态检测孤岛,并对孤岛状态下相关状态组合制定相应策略。如图 7 所示,运动释放法通过安装在电网侧的采集控制系统监测各断路器的状态,开展孤岛检测,并制定联切策略。

运动释放法不会向电网注入谐波电流,不影响系统电能质量,效果显著,但是该方法监视控制系统算法复杂,现场实施成本高昂,难以推广应用。

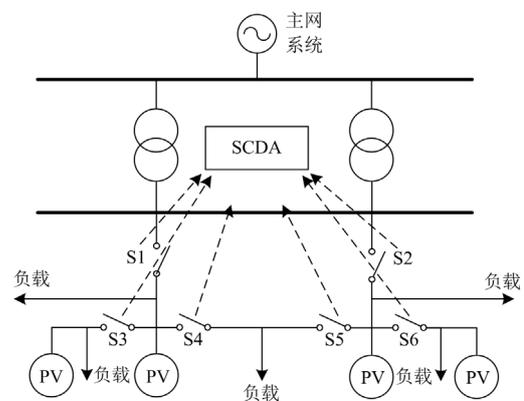


图 7 运动释放法方案

Fig. 7 Telecontrol release method scheme

3 方法对比与电网侧实例分析

3.1 方法对比

综合以上几种方法,在本地检测法中过/欠压或过/欠频法简单易行, ΔP 与 ΔQ 较大时检测效果显著,适用于新能源场站及电网侧变电站等场所,是一种常用的孤岛检测方法。

相位突变检测法、电压谐波检测法、AFD、SMS 涉及对逆变器的检测及控制,适用于新能源场站的孤岛检测,不适用于电网侧变电站。电力线载波通信法成本高且信号频段的缺失与通信信道的挤占都会造成检测失败的风险。

连锁跳闸法简单可靠,缺点是算法需要随电网拓扑变化而调整。本文根据此方法进行改进,采用可整定的联跳矩阵定值代替传统算法,联跳矩阵定值由专人整定,操作简单。

远动释放法无谐波电流注入,对系统电能质量的影响较小,孤岛检测效率高,但由于数据采集与监视控制系统算法复杂,制造成本高,不易推广。本文基于此方法,提出基于 Petri 网模型的孤岛判别逻辑,算法简单,无须随电网拓扑变化进行不断调整。

3.2 电网侧防孤岛实例分析

目前变电站联切新能源并网线的方式是通过站内关键断路器跳闸时向被联切新能源装置发联切令。随着新能源支路越来越多,变电站内联切回路也越来越多,给施工及后期维护带来很多困难。单台断路器跳闸,可能需要联切多条新能源支路;单条新能源支路也可能需要被多台断路器联切。这种 1→多或者多→1 敷设联切电缆的模式,会导致站内出现大量联切电缆及联切压板,增加现场施工成本及后期维护风险。

如图 8 所示,某 110 kV 甲变电站含两条 110 kV 电源进线及两台主变; 35 kV 侧及 10 kV 侧均各有两条新能源并网线。甲站联切新能源并网线的策略是: 两条 110 kV 电源线、主变高压侧断路器(111 断路器或 112 断路器)、主变中压侧断路器(351 断路器或 352 断路器)跳闸联切本段母线所带 35 kV 新能源支路, 101 或 102 断路器跳闸联切本段母线所带 10 kV 新能源支路。联切回路及联切压板如图 9 所示,共有联切回路 24 组,联切压板 24 个。若新增新能源间隔,则联切压板及回路对应增加。

复杂的新能源联切回路会给施工及维护带来如下风险:

1) 每次扩建新能源并网线,都要新增若干联切回路,与之关联的设备均需要轮流停电传动,增加施工成本,延长工期。

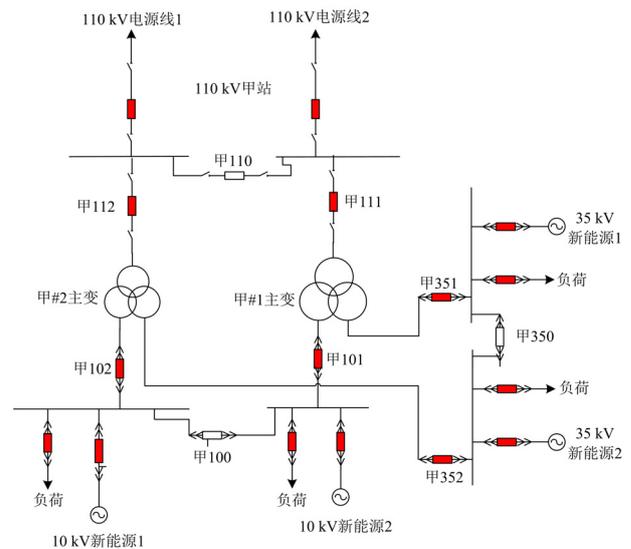


Fig. 8 Primary wiring diagram of a 110 kV station

2) 联切回路复杂度高,不同变电站之间联切回路规律不尽相同,给后期维护带来作业风险。

3) 每组新能源联切回路都需要联切令发送侧装置提供一组跳闸接点,随着新能源间隔越来越多,联切装置内部的跳闸接点将不够用,施工现场若加装重动继电器扩展接点,则会降低可靠性,增加运维风险。

3.3 基于矩阵方法简化变电站新能源联切回路

以 110 kV 甲站为例,有 110 kV 电源线 1 断路器、110 kV 电源线 2 断路器、351 断路器、352 断路器、101 断路器、102 断路器跳闸时需要联切新能源支路,有 4 条新能源支路需要被联切,如图 9 所示,联切回路复杂程度随着新能源并网线数量增加而增加。

为解决以上联切回路复杂问题,提出以下思路:制作一个由 CPU、液晶面板及开入、开出插件组成的装置。开入插件采集各联切支路跳闸接点闭合信息作为开入量,每个开入量在 CPU 内部生成一位二进制代码,无开入信息时二进制代码为 0,有开入信息时二进制代码为 1,将所有开入量按顺序生成一组二进制代码。开出插件的每个开出接点引至一个新能源支路,用于联跳该新能源支路,开出回路中设置出口压板供运维人员使用。开入二进制代码序列与开出跳闸指令集之间形成矩阵映射关系,将此矩阵设计为可整定形式(矩阵定值由专人计算,运维人员负责执行)。

如图 10 所示,8 个联切设备的跳闸接点(每个设备仅取一个跳闸接点)逐一接入该装置的开入插

件接线端子；该装置 4 个联跳新能源支路的出口接点分别引至 4 个新能源间隔断路器操作箱永跳回路。

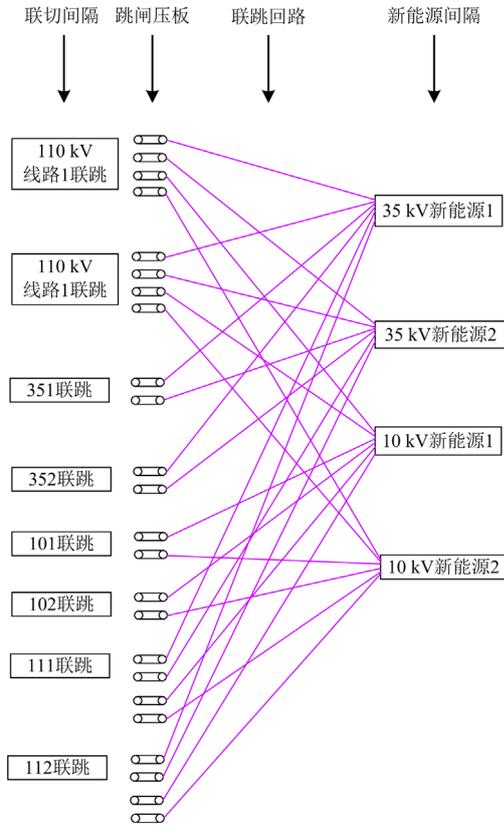


图 9 某 110 kV 甲站联切回路图

Fig. 9 Circuit diagram of a 110 kV station A

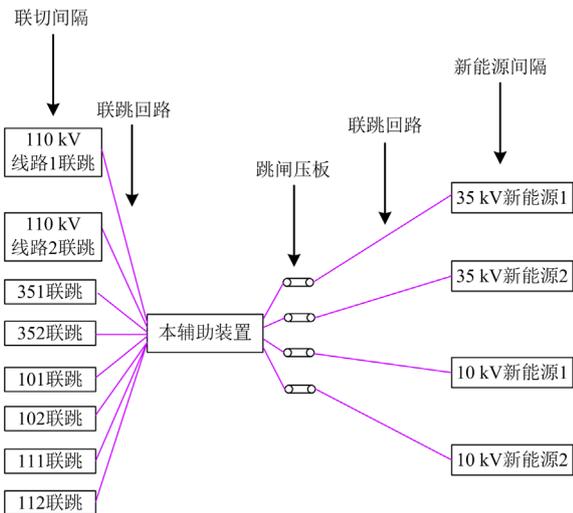


图 10 采用本辅助装置后的联切回路图

Fig. 10 Cutting circuit diagram with this auxiliary device

如表 1 所示，开入 1 至开入 16 分别代表 16 个二进制代码。本站只用到前 8 路开入，分别接 110 kV 进线 1 跳闸接点、110 kV 进线 2 跳闸接点、111 跳

闸接点、112 跳闸接点、351 跳闸接点、352 跳闸接点、101 跳闸接点、102 跳闸接点。

表 1 矩阵整定关系表

Table 1 Matrix tuning relation table

	跳 35 kV 新能源 1	跳 35 kV 新能源 2	跳 10 kV 新能源 1	跳 10 kV 新能源 2
矩阵定值	00CFH	00CFH	00F3H	00F3H
开入 1(110 kV 进线 1 跳闸接点)	1	1	1	1
开入 2(110 kV 进线 2 跳闸接点)	1	1	1	1
开入 3(351 跳闸接点)	1	1	0	0
开入 4(352 跳闸接点)	1	1	0	0
开入 5(101 跳闸接点)	0	0	1	1
开入 6(102 跳闸接点)	0	0	1	1
开入 7(111 跳闸接点)	1	1	1	1
开入 8(112 跳闸接点)	1	1	1	1
开入 9	0	0	0	0
开入 10	0	0	0	0
开入 11	0	0	0	0
开入 12	0	0	0	0
开入 13	0	0	0	0
开入 14	0	0	0	0
开入 15	0	0	0	0
开入 16	0	0	0	0

联跳新能源支路的出口接点 1 至出口接点 4 分别对应跳 35 kV 新能源 1、跳 35 kV 新能源 2、跳 10 kV 新能源 1、跳 10 kV 新能源 2。

若 35 kV 各新能源需要被 110 kV 进线断路器及 111 断路器、112 断路器、351 断路器、352 断路器联切，则跳 35 kV 新能源 1、跳 35 kV 新能源 2 的跳闸矩阵定值均为 00CFH。

若 10 kV 各新能源需要被 110 kV 进线断路器及 111 断路器、112 断路器、101 断路器、102 断路器联切，则跳 10 kV 新能源 1、跳 10 kV 新能源 2 的跳闸矩阵定值均为 00F3H。

计算思路为：装置 CPU 实时读取 16 位开入量，每位开入量取高电平为 1，取低电平为 0，构成一组十六位的二进制数据集，此二进制数据与十六位二进制矩阵定值做按位取与逻辑运算，逻辑运算结果若大于 0，则联切该新能源支路^[1]。

装置的正面设计如图 11 所示，液晶面板可整定每条新能源的跳闸矩阵、出口软压板等。

电网在日常运行中可能存在多种运行方式，导致变电站的拓扑结构也会随之变化，上文所述矩阵定值也会随之变化，运维人员须同步调整矩阵定值，给运维带来不便。因此装置设置多个定值区，每个

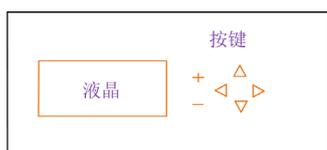


图 11 装置正面图

Fig. 11 Front view of the device

定值矩阵定值对应一种电网运行方式, 装置通过采集站内关键开关位置识别电网运行方式, 当电网运行方式改变时, 自动切换到对应定值区。

增加联切装置后大幅减少了联切回路和压板的数量, 但也增加了设备的可靠性风险。本联切装置故障将导致所有联切回路失效, 因此考虑将装置双重化, 即配置两套完全一样的装置。在双重化配置的情况下, 为不使联切回路数量加倍, 由各个联切设备处引用的回路仍为 1 组, 在第一套装置内部增加部分扩展插件及回路(采用独立电源, 增加可靠性), 通过重动继电器将一组联切回路扩展为两组联切回路, 供双套装置分别使用。双套装置跳闸出口接点并联引至被联切新能源支路的开关操作箱。

以如图 12 所示的某支路的扩展为例, 其中 01 及 02 回路为从原联切支路保护装置所引的 1 组联切线, TJ 为原联切支路保护装置的联切接点。01、02 回路引至第一套装置扩展插件后, 接入图 12 所示对应位置。当 TJ 接点闭合时, 重动继电器 CDJ1、CDJ2 启动, 其对应的若干接点同时闭合。CDJ1 继电器扩展出的接点供第一套联切装置采用, CDJ2 继电器扩展出的接点供第二套联切装置采用, 这样以来, 原本 TJ 一个联切接点被扩展为 CDJ1、CDJ2 两个继电器的若干个联切接点, 供双重化的设备采用。为确保扩展插件的可靠性, 装置设置电源监视回路, 当第一组电源+KM1、-KM1 失电时, DYJS 继电器失电, 常闭接点 DYJS1 闭合, 点亮告警灯 BJD、启动音响并上传监控系统。当 DYJS 继电器失电时, 常开接点 DYJS2、DYJS3 打开, DYJS4、DYJS5 闭

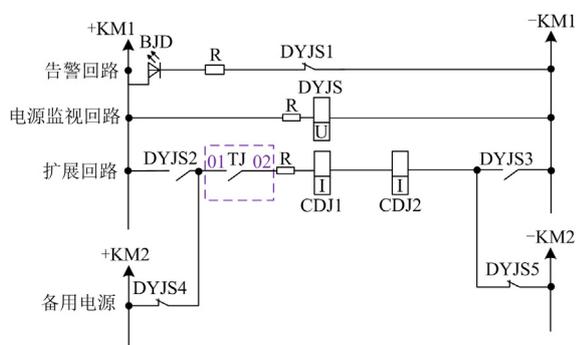


图 12 扩展回路原理图

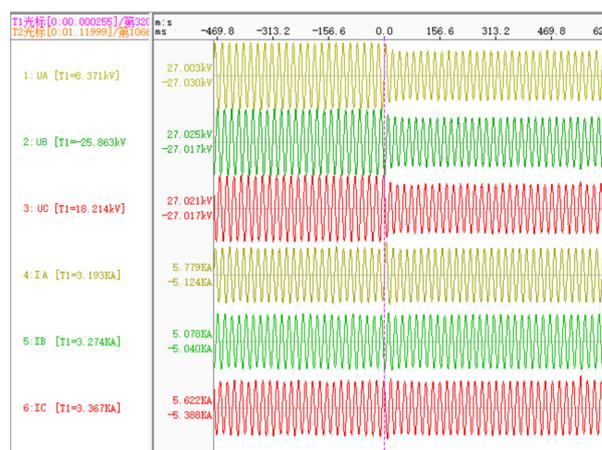
Fig. 12 Extended loop schematic

合, 装置由备用电源+KM2、-KM2 供电。

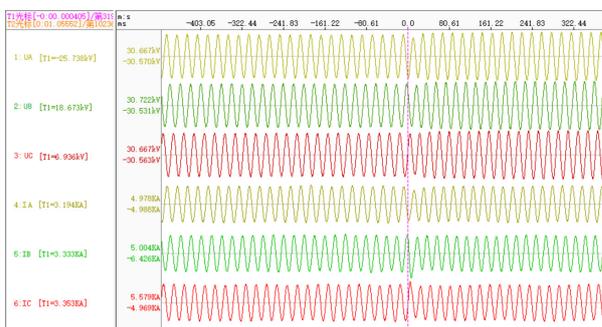
基于电网拓扑的联切矩阵, 极大地简化了联切回路, 使联切回路样板化、规律化, 降低了施工及运维的难度, 同时兼顾了传统联切思路的快速性、可靠性。该方法具有出口速度快、准确率高、联跳策略灵活易调整、投资成本小等优点, 但是该方法对于上级电网动作导致的本侧全站孤岛状态无法识别。

3.4 基于 Petri 网模型的孤岛判别逻辑

在极端状况下, 出现多站新能源带负荷孤岛网运行, 且新能源出力与所带负荷大体相当时, 孤岛前后电压频率变化不大, 极大地增加了孤岛检测难度。如图 13(a)所示, 某次孤岛状态下新能源出力与负荷相差较大时, 电压等电气量在 40 ms 即产生明显变化; 如图 13(b)所示, 某次孤岛状态下新能源出力与负荷大体相当时, 电压等电气量变化不明显, 这种极端状况下依靠传统的过/欠压、过/欠频检测法无法有效识别孤岛状态, 因此提出基于 Petri 网模型的孤岛判别逻辑。



(a) 新能源出力与负荷相差较大



(b) 新能源出力与负荷大体相当

图 13 孤岛瞬间电压电流波形

Fig. 13 Island instantaneous voltage and current waveform

该方法通过通信网络获取区域电网内的断路器位置及采样等信息, 基于网络拓扑结构构建 Petri

的就地判据可以取甲乙1电流与10 kV 新能源1电流是否持续小于某固定门槛, 如果持续小于, 则就地判据满足, 本装置带固定延时发新能源联切命令。

此外还在装置内部为各新能源支路设置独立的功能软压板, 当新能源支路须计划性孤岛运行时, 通过投退软压板实现其 Petri 判别逻辑的投退。

此方法为基于多站信息融合的孤岛广域判别技术, 可以有效进行区域电网内大范围非计划孤岛状态识别; 缺点是需要采集区域电网内相关间隔的断路器状态, 对于智能站来说只需要从站内过程层中心交换机上取数据即可, 但对于传统站来说, 需要构建一个数据采集平台, 投资较大。

4 工程应用实例

2023年, 某市110 kV 张庄变电站针对站内新能源联切回路开展技术改造, 应用基于上述原理的新能源联切设备。如图16所示, 110 kV 张庄变电站含有两条110 kV 电源进线(龚张线、尊张线)、两台110 kV 主变, 两条35 kV 新能源支路(盛张线、环张线)。正常运行时, 由龚张线带全站负荷, 当龚张线停电检修时, 可改为尊张线带全站负荷。

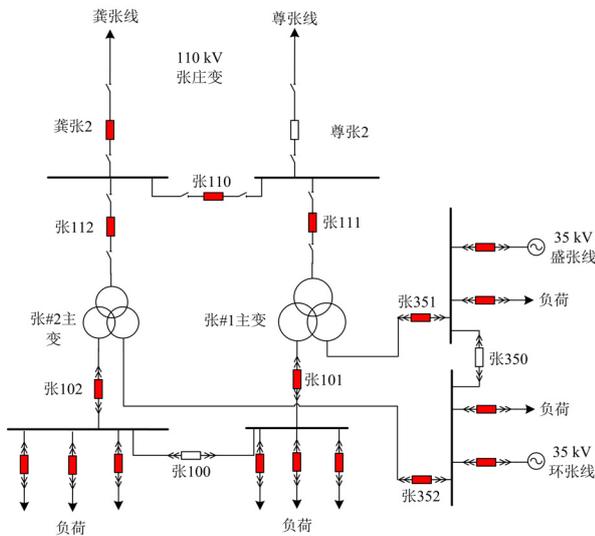


图 16 110 kV 张庄变一次接线图

Fig. 16 Primary wiring diagram of 110 kV Zhangzhuang transformer

张庄变改造前, 110 kV 龚张线、尊张线等间隔的保护装置均联切新能源支路, 全站共有联切回路34组, 联切压板34个, 如表2所示。

由表2可以看出, 当前110 kV 张庄变拥有两条新能源并网线, 但有34条联切回路及34个联切压板。随着新能源并网线增加, 若最终规模是 n 条新能源并网线, 则联切回路的最终数量是 $17n$ 条, 联

切压板是 $17n$ 个。

表 2 110 kV 张庄变联跳压板及联跳回路明细表
Table 2 Detailed list of 110 kV Zhangzhuang variable link jump plate and link jump circuit

发联跳命令装置	联跳 35 kV 盛张线		联跳 35 kV 环张线		回路数量	压板数量
	回路数	压板数	回路数	压板数		
龚张 2 保护	1	1	1	1	2	2
尊张 2 保护	1	1	1	1	2	2
张 110 备自投	2	2	2	2	4	4
张 110 kV 母差	2	2	2	2	4	4
张 35 kV 母差 I	1	1	1	1	2	2
张#1 变差动	1	1	1	1	2	2
张#1 变非电量	1	1	1	1	2	2
张#1 变高后备	1	1	1	1	2	2
张#1 变中后备	1	1	1	1	2	2
张#1 变低后备	1	1	1	1	2	2
张#2 变差动	1	1	1	1	2	2
张#2 变非电量	1	1	1	1	2	2
张#2 变高后备	1	1	1	1	2	2
张#2 变中后备	1	1	1	1	2	2
张#2 变低后备	1	1	1	1	2	2
合计	17	17	17	17	34	34

2023年, 110 kV 张庄变电站针对新能源联切回路开展改造, 安装本项目所述的新能源联切装置后, 联切压板降低为19个。若最终规模接入 n 条新能源并网线, 则联切回路的最终数量是 $17+n$ 条, 联切压板是 $17+n$ 个。图17为新能源支路新增引起联切压板及回路增加趋势图。

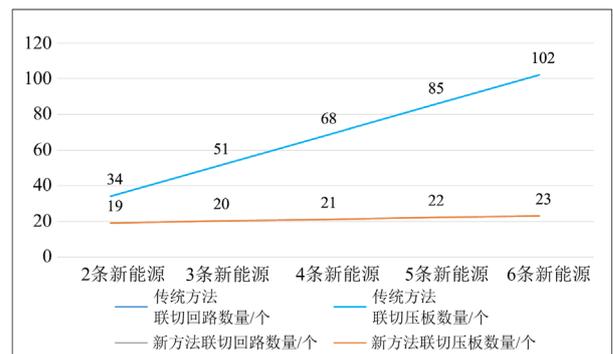


图 17 新能源支路新增引起联切压板及回路增加趋势图

Fig. 17 Trend diagram of the increase of cutting platen and circuit caused by the addition of new energy branches

与原有联切方法相比, 联切回路及联切压板数量大大降低, 并且回路集中敷设至本联切装置, 规律性强, 极大地降低了施工难度及后期运维风险。

该装置自投运以来, 110 kV 龚张线曾发生故障

跳闸一次,引起 35 kV 盛张线及 35 kV 环张线带全站负荷孤岛运行风险。龚张 2 间隔线路保护因线路故障,动作跳龚张 2 断路器的同时,本孤岛联切装置同时检测到龚张 2 的联切入量置 1,经过矩阵计算,该装置瞬时发新能源联切令,准确地将 35 kV 盛张线及 35 kV 环张线断路器跳开,有效避免了该变电站孤岛运行的风险。

5 总结

本文从电网侧运维需求出发,对传统孤岛检测方法进行改进,提出基于电网拓扑和纵向通信的全站孤岛识别技术,采用联切矩阵大幅降低了联切回路的复杂程度。

针对区域电网的孤岛现象,提出基于多站信息融合的孤岛广域判别技术,参照电网拓扑构建 Petri 网模型,依托通信网络完成信息采集与判断,有效识别区域电网孤岛状态。

上述两种方法是对现有电网侧防孤岛技术的改进与提升,该方案在实际工程应用中动作可靠、快速,显著降低了现场运维难度,具有较高的实用价值。

参考文献

- [1] 钟诚,井天军,杨明皓.基于周期性无功电流扰动的孤岛检测新方法[J].电工技术学报,2014,29(3):270-276.
ZHONG Cheng, JING Tianjun, YANG Minghao. A new islanding detection method with periodic reactive current disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 270-276.
- [2] 杨京渝,严文交,罗隆福,等.风储联合发电系统三站合一智能监控系统设计与实现[J].电力系统保护与控制,2022,50(17):168-171.
YANG Jingyu, YAN Wenjiao, LUO Longfu, et al. Design and implementation of an intelligent monitoring system for three-station integrated wind-storage power plants[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 168-171.
- [3] 邵美阳,张子墨,王露缙,等.一种无功功率扰动的孤岛检测新方法[J].电网与清洁能源,2023,39(6):98-107,114.
SHAO Meiyang, ZHANG Zimo, WANG Lujin, et al. A new islanding detection method for reactive power disturbance[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 98-107, 114.
- [4] 侯立健,朱长青,安巧静,等.Sandia频移法在电子负载孤岛检测中的应用研究及参数优化[J].电子测量技术,2016,39(4):13-17.
HOU Lijian, ZHU Changqing, AN Qiaojing, et al. Research and parameter optimization on Sandia frequency shift method in the islanding detection of electronic load[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(4): 13-17.
- [5] 盛四清,俞可,张文朝,等.大规模风电并网对送端系统功角稳定的影响研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(6):84-87.
SHENG Siqing, YU Ke, ZHANG Wenchao, et al. Influence of large-scale wind power grid connection on the power angle stability of the sending end system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6): 84-87.
- [6] 桑宝旭,帕孜来·马合木提.基于小波包能量熵和BP神经网络的孤岛检测方法[J].电测与仪表,2022,59(2):63-67.
SANG Baoxu, PAZILAI·Mahemuti. Island detection method based on wavelet packet energy entropy and BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 63-67.
- [7] 袁精,丁浩,杨秋霞.改进SMS孤岛检测方法研究[J].电工电能新技术,2017,36(7):51-56.
YUAN Jing, DING Hao, YANG Qiuxia. Research on improved SMS islanding detection method[J]. Electric Power Technology, 2017, 36(7): 51-56.
- [8] 张军,张新慧,黄超艺,等.基于逆变器定频率控制的多分布式电源孤岛检测方法[J].电力系统自动化,2022,46(4):123-131.
ZHANG Jun, ZHANG Xinhui, HUANG Chaoyi, et al. Islanding detection method for multiple distributed generators based on fixed frequency control of inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 123-131.
- [9] 丁彦,谷廷坤,宋亚琴,等.基于功率检测的光伏并网发电系统混合型孤岛检测方法[J].电器与能效管理技术,2018(16):48-54.
DING Yan, GU Tingkun, SONG Yaqin, et al. Hybrid islanding detection method for photovoltaic grid-connected power generation system based on power detection[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2018(16): 48-54.
- [10] ELTAWIL M A, ZHAO Z. Grid-connected photovoltaic power systems: technical and potential problems—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1): 112-129.
- [11] 孙玥,程新功,王鲁浩,等.双有源桥钳位变换器的简单PWM移相控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(16):106-112.
SUN Yue, CHENG Xingong, WANG Luhao, et al. Simple PWM phase shift control strategy for a dual active bridge

- clamp converter[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 106-112.
- [12] MANIKONDA S K G, GAONKAR D N. Comprehensive review of IDMs in DG systems[J]. IET Smart Grid, 2019, 2(1): 11-24.
- [13] 张学广, 王瑞, 刘鑫龙, 等. 改进的主动频率偏移孤岛检测算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 200-204. ZHANG Xueguang, WANG Rui, LIU Xinlong, et al. Improved active frequency drift anti-islanding algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 200-204.
- [14] 李正明, 张振杰. 基于改进功率-频率正反馈孤岛检测研究[J]. 电子设计工程, 2018, 18(3): 124-134. LI Zhengming, ZHANG Zhenjie. Islanding detection method based on improved power-frequency positive feedback[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 18(3): 124-134.
- [15] 孙振奥, 杨子龙, 王一波, 等. 适用于分布式多逆变器系统的混合孤岛检测法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3590-3597. SUN Zhen'ao, YANG Zilong, WANG Yibo, et al. A hybrid islanding detection method for distributed multi-inverter systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3590-3597.
- [16] 吕干云, 吴启宇, 吴晨媛, 等. 基于双向谐波电压变动的光伏并网孤岛检测[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 194-199. LÜ Ganyun, WU Qiyu, WU Chenyuan, et al. Islanding detection of grid-connected PV system based on bi-direction voltage harmonic variation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 194-199.
- [17] 周林, 谢星宇, 郝高锋, 等. 一种新型的无功功率扰动孤岛检测方法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 275-283. ZHOU Lin, XIE Xingyu, HAO Gaofeng, et al. A novel reactive power disturbance islanding detection method[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(2): 275-283.
- [18] 唐忠廷, 粟梅, 刘尧, 等. 带负载阻抗角反馈的主动频率孤岛检测技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 199-207. TANG Zhongting, SU Mei, LIU Yao, et al. Active frequency drift islanding detection technology with feedback of load impedance angle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 199-207.
- [19] 邹培源, 黄纯. 基于模糊控制的改进滑模频率偏移孤岛检测方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 574-580. ZOU Peiyuan, HUANG Chun. An improved slip mode frequency shift islanding detection method based on fuzzy control[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 574-580.
- [20] 张俊蔚. 光伏并网逆变器的孤岛检测研究[J]. 青海电力, 2015, 30(2): 14-23. ZHANG Junwei. Research on islanding detection of PV grid inverters[J]. Qinghai Electric Power, 2015, 30(2): 14-23.
- [21] 王晓寰, 沈虹. 基于间歇性无功扰动的孤岛检测方法研究[J]. 电力电子技术, 2016, 50(5): 58-61. WANG Xiaohuan, SHEN Hong. Islanding detection method based on intermittent reactive power disturbance[J]. Power Electronics Technology, 2016, 50(5): 58-61.
- [22] 王书征, 李先允, 赵小海. 适用于多台逆变器并联运行的孤岛检测方法[J]. 电力科学与工程, 2018, 25(3): 77-81. WANG Shuzheng, LI Xianyun, ZHAO Xiaohai. An island detection method for parallel operation of multiple inverters[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 25(3): 77-81.
- [23] 张玉, 孟丽囡. 光伏并网系统孤岛检测技术的研究[J]. 电子世界, 2018, 41(2): 11-14.
- [24] 杨彦会. 分布式发电反孤岛保护检测方法[J]. 电气传动自动化, 2017, 37(4): 197-205. YANG Yanhui. Detection method for distributed generation anti-island protection[J]. Electric Drive Automation, 2017, 37(4): 197-205.
- [25] 邹培源, 黄纯, 白振宇, 等. 低谐波畸变的快速主动移频式孤岛检测方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 21(3): 52-57. ZOU Peiyuan, HUANG Chun, BAI Zhenyu, et al. Fast active frequency drift islanding detection method with lower total harmonic distortion[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 21(3): 52-57.
- [26] 张瑞叶, 张少如, 刘晓博, 等. 新型低畸变扰动式孤岛检测法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 35(6): 157-168. ZHANG Ruiye, ZHANG Shaoru, LIU Xiaobo, et al. A new active island detection method based on small distortion disturbance way[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 35(6): 157-168.

收稿日期: 2023-06-17; 修回日期: 2023-11-19

作者简介:

耿新(1983—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为继电保护; E-mail: 15037534461@163.com

马文恒(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为继电保护。E-mail: 877346033@qq.com

(编辑 周金梅)