

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.02.009

## 基于 PCS 功率越限判据的独立型微电网紧急控制策略

朱皓斌<sup>1</sup>, 徐光福<sup>1</sup>, 侯炜<sup>1</sup>, 李旭<sup>1</sup>, 陈俊<sup>1,2</sup>, 王政<sup>2</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 紧急控制作为微电网系统的最后一道防线, 在系统受到大扰动以后, 能够维持频率稳定, 对微电网的稳定运行具有重要意义。文中分析了频率紧急控制策略以及轮次减载策略在微电网中存在的定值整定难、无法精准减载的问题, 提出了一种基于储能变流器(PCS)输出功率越限判据的独立型微电网紧急控制策略: 在外部扰动导致 PCS 输出功率越限时, 通过计及电池荷电状态(SOC)的均衡控制策略计算 PCS 的越限功率, 采用负荷精准减载方案精确切除负荷, 并针对工程实施采用面向通用对象的变电站事件(GOOSE)通信技术、提出小步长趋势变化采样算法和防一点大数算法, 提高了控制系统的响应速度, 提升了大容量独立微电网运行的稳定性。通过新疆某独立型微电网项目工程案例验证了本方案的可行性和有效性。

**关键词:** 紧急控制; 独立型微电网; 储能变流器; GOOSE; SOC 均衡控制

**中图分类号:** TM46

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)02-0059-07

### 0 引言

微电网中含有大量低惯性和欠阻尼的电力电子设备, 导致系统易因源荷扰动而振荡<sup>[1-4]</sup>; 同时, 上述设备过载和耐压能力较差, 在电网受扰后易脱网, 进而导致系统崩溃。因此, 需要配置紧急控制策略, 维持系统稳定运行<sup>[5-8]</sup>。

关于微电网紧急控制, 主要采用基于频率电压的紧急控制判据以及采用轮切的减载方式<sup>[9-14]</sup>: 文献[9]通过神经网络来预测受扰动后系统的频率响应, 再通过调度来降低减载量, 该方法受系统的下垂参数变化影响, 难以准确计算减载功率; 文献[10]提出一种基于比例-积分-微分的算法, 采用粗调轮、细调轮和紧急启动轮的微电网低频减载策略, 无法满足微电网快速精准减载的需求; 文献[11-14]提出基于微电网内频率变化特性的紧急控制策略, 设置频率阈值实现紧急控制, 无法解决二次调频对控制的影响, 频率计算存在的数据窗延时导致控制响应迟缓。上述方案在微电网中应用存在如下 2 个问题: (1) 微电网投入二次调频后, 通过平移储能变流器(power conversion system, PCS)的下垂曲线, 实现频率的无差调节<sup>[15-19]</sup>; 然而, 平移下垂曲线导致 PCS 极限输出功率对应的频率 $f_{lim}$ 发生变化。然而, 频率控制定值需基于 $f_{lim}$ 整定, 因此, 二次调频投入后存在无法整定定值的问题。(2) 传

统的电压频率紧急控制采用多轮次动作的方式<sup>[20]</sup>, 通过事先整定出口矩阵确定各轮次的切除线路。无法根据系统的功率偏差实现快速精准减载。

因此基于频率的紧急控制策略在微电网中存在无法整定定值、无法精确减载的问题, 迫切需要引入一种新的紧急控制策略。文中提出了基于 PCS 功率越限判据的紧急控制策略, 通过控制限制 PCS 功率, 从而降低系统源荷功率不平衡度。并从工程可实施角度, 采用面向通用对象的变电站事件(generic object oriented substation event, GOOSE)通信策略, 提出了小步长趋势变化采样算法和防一点大数算法, 提高了控制系统的快速性、稳定性和工程可实施性。

### 1 PCS 功率越限对独立型微电网的影响

独立型微电网内的主电源(文中指用以维持系统电压频率的电源)一般有以电压源型储能变流器为接口的电池系统和柴油机, 其中, 以柴油机为主电源的微电网依赖柴油机的大惯性及强过流能力, 稳定性较高, 不在讨论范围内。文中主要研究以 PCS 为主电源的微电网的紧急控制策略。

PCS 作为微电网的平衡节点, 其输出功率取决于系统的源荷功率差额, 满足式(1):

$$P_{PCS} = P_{load} - P_{dg} \quad (1)$$

式中:  $P_{PCS}$  为 PCS 输出功率, 正表示放电, 负表示充电;  $P_{load}$  为负荷容量;  $P_{dg}$  为其他分布式电源的发电功率。

PCS 功率越限与电源负荷功率关系如图 1 所

收稿日期: 2019-10-09; 修回日期: 2019-11-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2018YFB0904800, 2018YFB0904802)

示,PCS 功率越上限意味着系统负荷过大,越下限意味着系统电源过大。

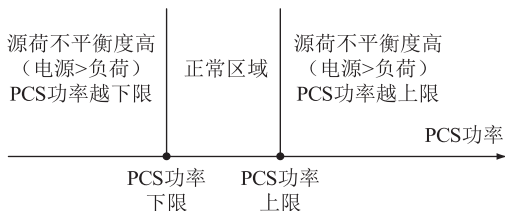


图1 PCS 功率超限示意

Fig.1 PCS power over limit diagram

微电网内电压频率主要由 PCS 控制器通过控制逻辑触发绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 通断形成,该控制逻辑包含电流控制环、电压控制环、逻辑控制环等<sup>[21]</sup>;若系统负荷/电源投退则会导致 PCS 出力越限,进而引发上述各控制环饱和,电压、频率闭环控制失效,导致 PCS 失去控压、控频能力;微电网系统因平衡节点丢失以及低惯性特性,导致电压频率快速失控,图 2 为某工程现场的运行数据,当 PCS 充电功率超过额定值后,系统频率快速增加,直至系统崩溃。

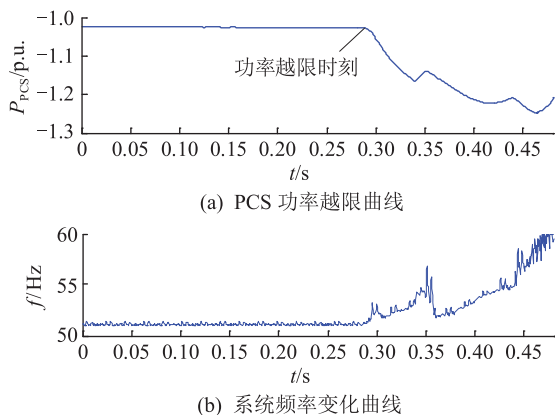


图2 PCS 功率超限引起频率变化

Fig.2 Frequency change caused by PCS power saturation

大容量微电网中配有多个 PCS,在单个 PCS 功率超限跳闸时,其他 PCS 输出功率增大,进而引发其他 PCS 功率超限跳闸,以此连锁反应,直至系统崩溃。通过上述分析可知,为了维持系统稳定,需要采用快速有效的紧急控制策略,根据 PCS 的出力超限情况快速控制负荷和其他电源。

## 2 考虑 PCS 功率超限微电网紧急控制策略

文中采用以 PCS 输出功率是否超限作为判据的紧急控制策略,控制策略如图 3 所示。

整个控制流程由计及电池荷电状态 (state of charge, SOC) 均衡的控制和负荷精准减载/切电源 2

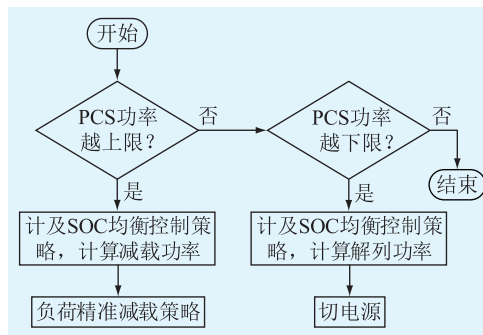


图3 控制逻辑流程

Fig.3 Control logic flowchart

个环节组成:若 PCS 功率越上限,则触发计及 SOC 均衡控制策略,并计算需要减载的功率,再通过负荷精准减载策略实现精准减载;若 PCS 功率越下限,则触发计及 SOC 均衡控制策略,并计算需要解列的功率,再切除对应功率的电源。文中主要讨论计及 SOC 均衡的控制策略和负荷精准减载方案。

### 2.1 计及 SOC 均衡的控制方案

大容量微电网存在多个 PCS,各 PCS 功率之和反应了系统的源、荷功率平衡关系;考虑到系统运行 PCS 数目不固定导致总超限功率不固定,从方便定值整定角度考虑,本控制采用 PCS 平均功率作为超限判据。

然而,为了确保系统中各 SOC 一致,往往配置 SOC 均衡策略来均衡各电池 SOC,常见的方案是通过平移 PCS 下垂曲线改变各 PCS 的功率分配<sup>[22-25]</sup>,SOC 均衡控制导致各 PCS 输出功率不一致,更易导致单个 PCS 功率超限。

针对上述情况,提出了一种计及 SOC 均衡的紧急控制方案,包含 PCS 平均功率超限时的切机切负荷、PCS 最大功率超限时的闭锁 SOC 均衡和开放 SOC 均衡 3 部分,具体如下。

实时采集各 PCS 的输出功率  $P_i$ ,已知 PCS 额定出力为  $P_{norm}$ ,设置各 PCS 最大出力限值范围为  $[-P_{lim}, P_{lim}]$  (负值表示充电,正值表示放电),设置开放 SOC 均衡的 PCS 出力范围为  $[-P_{op}, P_{op}]$ ,满足式(2):

$$-P_{norm} < -P_{lim} < -P_{op} < P_{op} < P_{lim} < P_{norm} \quad (2)$$

其中,  $P_{lim}$  需小于  $P_{norm}$ ,由于 PCS 任一相输出功率超限均会引起 PCS 饱和失控,考虑到实际运行系统三相负荷不完全对称导致 PCS 三相输出功率不一致,  $P_{lim}$  相对  $P_{norm}$  需要留一定的功率裕度。其中,  $P_{lim}$  和  $P_{op}$  是本控制系统的定值,可在项目调试初期固化,不受系统运行状态的影响。

计算在线 PCS 的运行数目  $n$ , 平均出力  $P_{\text{avg}}$ , 最大出力  $P_{\text{max}}$  和最小出力  $P_{\text{min}}$ 。

(1) 当  $P_{\text{avg}} > P_{\text{lim}}$  时, 快速切除负荷功率  $P_{\text{shed}}$  (如式(3)所示), 并且闭锁 SOC 均衡功能(如图 4 所示), 最终各 PCS 出力趋于一致, 并且满足  $P_i < P_{\text{lim}}$ 。

$$P_{\text{shed}} = (P_{\text{avg}} - P_{\text{lim}})n \quad (3)$$

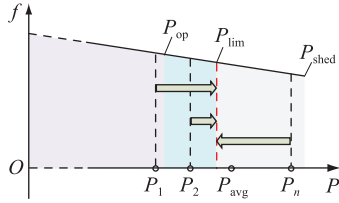


图 4 平均功率越限

Fig.4 Average power over range

当  $P_{\text{avg}} < -P_{\text{lim}}$  时, 快速切除电源功率  $P_{\text{shed}}$  (如式(4)所示), 并且闭锁 SOC 均衡功能, 原理同上, 不再赘述。

$$P_{\text{shed}} = -(P_{\text{avg}} + P_{\text{lim}})n \quad (4)$$

(2) 当  $P_{\text{avg}} < P_{\text{lim}}$  且  $P_{\text{max}} > P_{\text{lim}}$  时, 闭锁 SOC 均衡功能, 如图 5 所示, 最终各 PCS 出力趋于一致, 均满足  $P_i < P_{\text{lim}}$ 。

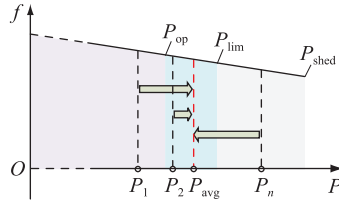


图 5 最大功率越限

Fig.5 Maximum power over range

当  $P_{\text{avg}} > -P_{\text{lim}}$  且  $P_{\text{min}} < -P_{\text{lim}}$  时, 闭锁 SOC 均衡功能, 原理同上, 不再赘述。

(3) 当  $-P_{\text{op}} < P_{\text{avg}} < P_{\text{op}}$  且 SOC 均衡功能被闭锁时, 开放 SOC 均衡功能, 如图 6 所示。

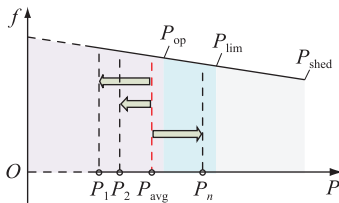


图 6 开放 SOC 均衡控制

Fig.6 Enable SOC equalization control

本方案相比传统的频率紧急控制具有如下优点: (1) 不受系统二次调频影响; (2) 控制定值整定较方便。

## 2.2 负荷精准减载方案

大容量微电网存在多条负荷支路, 当控制系统

下达切除指定功率负荷时, 需要根据负荷重要等级快速准确切除负荷。文中提出了一种精准匹配的负荷控制方案, 具体策略如下:

采集各负荷支路线路功率, 并根据事先整定的负荷级别以及各等级负荷从大到小排序形成负荷控制矩阵  $C$ , 如式(5)所示。其中 1 级负荷等级较低, 2 级负荷其次, 3 级负荷等级较高。

$$C = \begin{bmatrix} P_{1\text{tot}} & P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{2\text{tot}} & P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ P_{3\text{tot}} & P_{31} & P_{32} & \cdots & P_{3n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $P_{1\text{tot}}$ ,  $P_{2\text{tot}}$ ,  $P_{3\text{tot}}$  分别为 1 级、2 级、3 级负荷当前的总功率;  $P_{1i}$ ,  $P_{2i}$ ,  $P_{3i}$  分别为 1 级、2 级、3 级负荷, 满足式(6)。

$$P_{k(i-1)} > P_{ki} > P_{k(i+1)} \quad (6)$$

其中,  $k = 1, 2, 3$ 。当切除功率  $P_{\text{cut}}$  大于 1~ $k$  级负荷之和时, 1~ $k$  级负荷全切。切除  $k+1$  级负荷功率  $P_{\text{cut}(k+1)}$  见式(7):

$$P_{\text{cut}(k+1)} = P_{\text{cut}} - \sum_{n=1}^k P_{\text{ntot}} \quad (7)$$

对于某级非全切负荷, 其切除功率为  $P'_{\text{cut}}$ , 将  $P'_{\text{cut}}$  与该级负荷矩阵中的负荷功率进行比较; 若满足式(8), 则将  $P_{k(i+1)}$  至  $P_{kn}$  的数据进行任意组合加法运算, 记录所有大于  $P'_{\text{cut}}$  的组合及其和值  $s_j$ , 并将  $P_{ki}$  与所有  $s_j$  排序, 选择其中最小值对应的组合进行切负荷操作。

$$P_{ki} > P'_{\text{cut}} > P_{k(i+1)} \quad (8)$$

本方案相比传统多轮次紧急控制, 具备快速、精准的优势。

## 3 工程优化配置

为了提高本控制策略的工程可实施性, 采用基于 GOOSE 的通信方式提高控制系统的通信速度, 通信架构如图 7 所示, 微网控制器 (micro-grid control center, MGCC)、各 PCS 具备 GOOSE 通信接口, 对于大型微电网要求负荷线路综保和风光集电线路综保具备 GOOSE 通信接口。GOOSE 报文在事件发生时以较短的间隔连续传输 (1 ms, 2 ms, 4 ms), 总的传输时间小于 3 ms<sup>[26]</sup>, 缩短了从 PCS 到 MGCC 和从 MGCC 到各综保装置的传输延时。同时, 为了提高数据采集的准确性和快速性, 采用如下方案。

### 3.1 采样数据防误

本控制系统采集的数据全部通过网络传输获得, 网络传输的丢帧、异常等对控制系统影响较大。

采用对采集的数据进行防一点大数处理: 控制

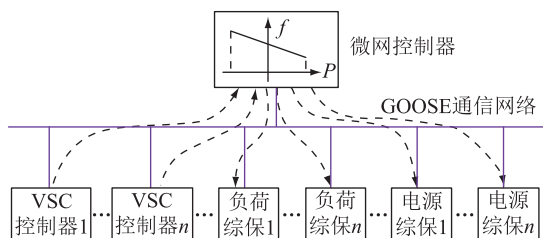


图7 通信架构

Fig.7 Communication architecture

系统依次采集到连续3个时刻数据  $D_{k-2}$ ,  $D_{k-1}$ ,  $D_k$ 。若满足式(9),则认为  $D_{k-1}$  为大数据,重构该时刻数据如式(10),控制系统按照上一个采样时刻的值(可能为重构值)进行逻辑判断。

$$\begin{cases} D_{k-1} - D_k > D_{set} \\ D_{k-1} - D_{k-2} > D_{set} \end{cases} \quad (9)$$

$$D'_{k-1} = (D_k + D_{k-2})/2 \quad (10)$$

式中:  $D_{set}$  为设定的功率突变限值。

### 3.2 快速采样算法

为了确保上送功率不包含非直流分量,PCS 将其计算功率经过平滑滤波后上送 MGCC,故存在一个功率变化的过程;为了提高控制响应速度,并且确保功率采集的正确性,采用小步长趋势变化的采样算法,如图8所示。

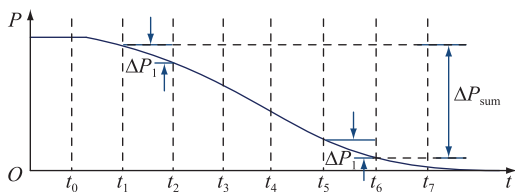


图8 小步长趋势变化采样算法原理

Fig.8 Small step trend change sampling algorithm schematic

$$\begin{cases} \Delta P_{n+1} > \Delta P_{th} \\ \Delta P_n < \Delta P_{th} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{n+1} < -\Delta P_{th} \\ \Delta P_n > -\Delta P_{th} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{m+1} < \Delta P_{th} \\ \Delta P_m > \Delta P_{th} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \Delta P_{m+1} > -\Delta P_{th} \\ \Delta P_m < -\Delta P_{th} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $\Delta P_n$  为  $n$  时刻相比  $n-1$  时刻的突变量;  $\Delta P_{n+1}$  为  $n+1$  时刻相比  $n$  时刻的突变量;  $\Delta P_m$  为  $m$  时刻相比  $m-1$  时刻的突变量;  $\Delta P_{m+1}$  为  $m+1$  时刻相比  $m$  时刻的突变量;  $\Delta P_{th}$  为相邻采样间隔的突变量门槛。

若满足式(11)或式(12),表明存在功率突变,

记录  $n$  时刻功率  $P_n$ 。

若满足式(13)或式(14),表明功率突变结束,记录  $m$  时刻功率  $P_m$ 。

得到功率突变量  $\Delta P_{sum}$ ,如式(15)所示:

$$\Delta P_{sum} = P_m - P_n \quad (15)$$

上述计算存在的最大误差  $\Delta P_{err}$  如式(16)所示:

$$\Delta P_{err} = 2\Delta P_{th} \quad (16)$$

为了减少误差对控制系统的影响,并且按照适当过切、不能欠切的原则,需要加上  $\Delta P_{err}$  的补偿功率,故最终获得的功率突变量  $\Delta P_{calc}$  如式(17)所示:

$$\begin{cases} \Delta P_{calc} = \Delta P_{sum} + 2\Delta P_{th} & \Delta P_{sum} > 0 \\ \Delta P_{calc} = \Delta P_{sum} - 2\Delta P_{th} & \Delta P_{sum} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

本采样算法计算功率变化过程所需时间  $T_{calc}$  满足式(18):

$$T_{calc} = T_{PCS} + T_{err} \quad (18)$$

式中:  $T_{PCS}$  为 PCS 功率变化的时间;  $T_{err}$  为控制算法引起的延时。从图8分析可知,  $T_{err}$  最大值为2倍的采样周期,本系统采用 0.833 ms 的采样周期,故本采样算法产生的最大延时为 1.666 ms。

## 4 工程案例

以新疆某独立型微电网项目为例,该项目包含 8 MW 储能(16 台 PCS 采用下垂控制并列运行)、10 MW 光伏、3 MW 风电及 3 个负荷站。正常运行时,由风光储并列运行,主电源为各 PCS。

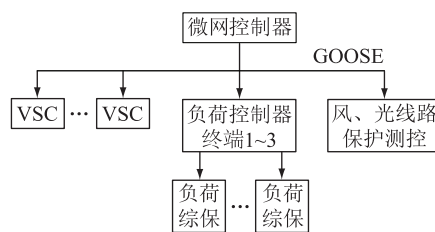


图9 某独立型微电网控制通信架构

Fig.9 Communication architecture of off-grid micro-grid

各负荷支路配置 3 台负荷控制终端(remote terminal unit, RTU)统一管理,采用全 GOOSE 通信方案,其控制组网如图9所示。RTU 上送各类负荷总功率,并根据负荷重要等级快速准确切除负荷;MGCC 采集各 PCS 出力,根据各 RTU 和风光线路保护测控提供的各类负荷功率情况向各 RTU 发送切负荷功率指令、向风光线路保护测控发送切电源指令。

本控制系统 PCS 额定功率  $P_{norm}$  为 500 kW,考虑到三相负荷不对称,设置 PCS 功率限值  $P_{lim}$  为 450 kW;考虑到 SOC 均衡产生的最大功率偏移量,

设置开放 SOC 均衡功率定值  $P_{op}$  为 420 kW。

晚上负荷较大,储能处于大功率放电状态。某台风力发电机突然离网,导致储能放电功率越限,微电网紧急控制动作,实现了系统的稳定运行。

图 10(a)为各 PCS 输出功率曲线,在 0.2 s 时刻 1 400 kW 风电脱网,在 0.2~0.25 s PCS 平均功率从 440 kW 变化至 477 kW(该功率变化过程时间长短取决于 PCS 的功率滤波系数),同时,MGCC 采集到各 RTU 上送的一类负荷功率分别为 336 kW,585 kW,738 kW。MGCC 通过逻辑计算,在 0.25 s 闭锁 SOC 均衡控制,并依次向各 RTU 下达 175 kW,305 kW,384 kW 切负荷功率指令。在 SOC 均衡功能闭锁后,各 PCS 功率在 0.3 s 时趋于一致;各 RTU 收到指令后切负荷,在 0.315 s 开始陆续有负荷被切除(本系统所用断路器的分闸时间在 60 ms 左右),图 10(b)为各 RTU 输出功率曲线,通过比对切除前后的功率可知,各 RTU 切除负荷功率分别为 176 kW,312 kW,393 kW。图 10(c)为系统的频率曲线,系统频率在风机脱网后出现短暂降落,经过 150 ms 频率恢复。

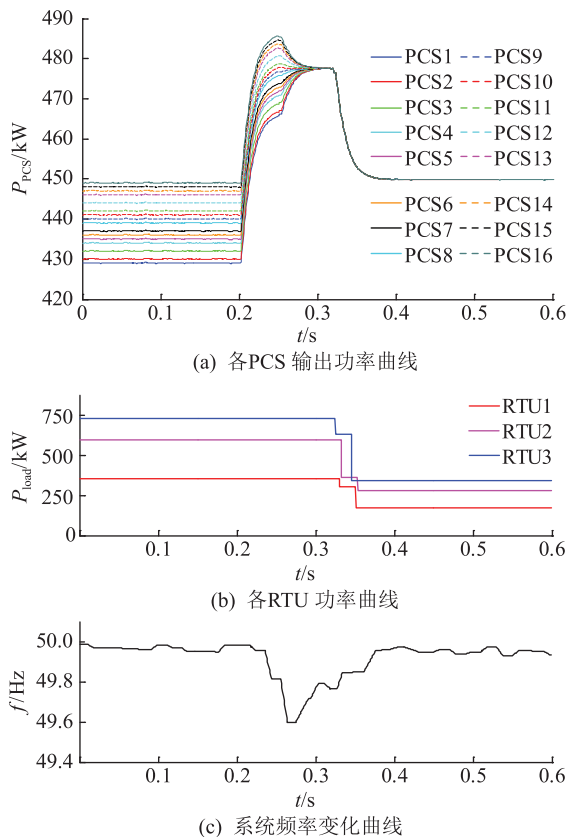


图 10 某独立型微电网紧急控制动作过程  
Fig.10 Emergency control action process of off-grid micro-grid

由上述动作过程可知,从风电脱网到负荷切除总时间在 120 ms 以内,这部分延时由 GOOSE 通信

延时(10 ms)、PCS 功率采集并滤波延时(30 ms)、微网控制器控制延时(20 ms)和断路器分闸延时(60 ms)组成,可以通过 PCS 厂家缩短滤波延时和采用固态断路器缩短分闸延时,来降低整个控制系统的响应延时。

## 5 结语

针对源荷不平衡导致独立型微电网崩溃的情况,提出了一种考虑 PCS 输出功率越限的独立型微电网紧急控制方法,具有控制精准、响应速度快、定值易整定、工程可实施性高的特点。

本控制系统适应大容量独立型微电网多 PCS、多负荷支路的应用场景,能够解决因源荷不平衡导致的稳定问题;然而,本控制方案要求控制系统与 PCS 通信延时在几十毫秒级,故仅适用于控制系统与 PCS 之间采用 GOOSE 通信的场合;为了提高兼容性,还需要进一步分析和研究含多类型电压源的离网型微电网稳定控制策略。

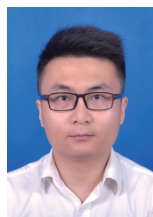
### 参考文献:

- [1] 于苗. 微网控制策略的研究及频率稳定性分析[D]. 天津:天津理工大学,2016.  
YU Miao. The research of control strategy and frequency stability on micro-grid[D]. Tianjin:Tianjin University of Technology,2016.
- [2] 田盈,郭宝甫,王卫星,等. 一种提高微电网储能电站电池使用经济性的混合储能容量配置方法[J]. 供用电,2019,36(1):81-86.  
TIAN Ying, GUO Baofu, WANG Weixing, et al. A capacity configuration method of hybrid energy storage for improving the battery economy of microgrid energy storage power station[J]. Distribution & Utilization,2019,36(1):81-86.
- [3] 李碧君,李兆伟,吴雪莲,等. 基于能量变化的暂态频率安全紧急控制决策方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(20):150-157.  
LI Bijun, LI Zhaowei, WU Xuelian, et al. Research on the decision method of frequency security emergency control based on energy change[J]. Power System Protection and Control,2018,46(20):150-157.
- [4] 张健铭,毕天姝,刘辉,等. 孤网运行与频率稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(11):149-154.  
ZHANG Jianming, BI Tianshu, LIU Hui, et al. Review of frequency stability for islanded power system[J]. Power System Protection and Control,2011,39(11):149-154.
- [5] 张玮亚,李永丽,孙广宇,等. 微电网安全防御体系下电压分层分区控制[J]. 电力系统自动化,2015,39(13):1-7,15.  
ZHANG Weiya, LI Yongli, SUN Guangyu, et al. Hierarchical-partitioned voltage control under security safeguard system of micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(13):1-7,15.

- [6] 洪灏灏,顾伟,潘静,等. 具有延时开关特性的多VSG微电网频率恢复控制策略[J]. 供用电,2019,36(4):18-23.  
HONG Haohao, GU Wei, PAN Jing, et al. Frequency recovery control strategies with delayed switching characteristics for microgrid with multiple VSG units[J]. Distribution & Utilization, 2019,36(4):18-23.
- [7] 张继元,舒杰,宁佳,等. 考虑SOC自均衡的光储独立微电网协调控制[J]. 电工技术学报,2018,33(S2):527-537.  
Zhang Jiyuan, SHU Jie, NING Jia, et al. Coordinated control for PV/storage hybrid islanded micro-grid considering SOC balancing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2):527-537.
- [8] 吉露露. 微电网频率稳定及其控制方法研究[D]. 南京:东南大学,2014.  
JI Lulu. Research on frequency stability and control strategy of micro-grid[D]. Nanjing:Southeast University,2014.
- [9] PADRON S, HERNANDEZ M, FALCON A. Reducing under-frequency load shedding in isolated power systems using neural networks. Gran canaria; a case study[J]. IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society, 2016,31(1):63-71.
- [10] 林湘宁,李正天,薄志谦,等. 适用于微网孤岛运行的低频减载方法[J]. 电网技术,2010,34(3):16-20.  
LIN Xiangning, LI Zhengtian, BO Zhiqian, et al. An under-frequency load shedding method adaptive to the islanding operation of micro-grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(3):16-20.
- [11] 李顺,唐飞,廖清芬,等. 计及需求响应的智能化微网频率紧急控制策略[J]. 中国电机工程学报,2018,38(1):51-60.  
LI Shun, TANG Fei, LIAO Qingfen, et al. Intelligent frequency emergency control strategy considering demand response in the micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1):51-60.
- [12] 熊小伏,周永忠,周家启. 计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(19):48-51.  
XIONG Xiaofu, ZHOU Yongzhong, ZHOU Jiaqi. Study of under frequency load shedding scheme based on load frequency characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19):48-51.
- [13] 沈臣,顾伟,吴志. 孤岛模式下的微电网低频减载策略分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):47-52.  
SHEN Chen, GU Wei, WU Zhi. An underfrequency load shedding strategy for islanded micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9):47-52.
- [14] 张执超. 电力系统紧急状态下切负荷控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.  
ZHANG Zhichao. Study on load shedding strategy for power system under emergency situations [D]. Beijing:North China Electric Power University, 2014.
- [15] 涂春鸣,杨义,兰征,等. 含多虚拟同步发电机的微电网二次调频策略[J]. 电工技术学报,2018,33(10):2186-2195.  
TU Chunming, YANG Yi, LAN Zheng, et al. Secondary frequency regulation strategy in micro-grid based on VSG [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(10):2186-2195.
- [16] 田盈,黄利军,郭宝甫,等. 多能互补微电网群能量管理系统设计方案研究及工程应用[J]. 供用电,2018,35(2):63-68.  
TIAN Ying, HUANG Lijun, GUO Baofu, et al. Research and engineering application on energy management system design scheme of microgrid clusters with multiple energy sources [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(2):63-68.
- [17] 孙景钉,杨建华,李琦,等. 智能用电系统与海岛微电网系统交互运行研究[J]. 浙江电力,2019,38(2):22-26.  
SUN Jingdiao, YANG Jianhua, LI Qi, et al. Research on interactive operation of intelligent electricity consumption system and island microgrid [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(2):22-26.
- [18] 肖少华,朱庆龙,杨家豪. 基于时序模拟的孤岛微电网频率及电压质量评估[J]. 浙江电力,2018,37(4):42-46.  
XIAO Shaohua, ZHU Qinglong, YANG Jiahao. Evaluation of frequency and voltage quality for islanded microgrids based on time series simulation [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(4):42-46.
- [19] 梁英,盛万兴,钟庆昌,等. 基于同步逆变器的微电网二次调频策略及特性分析[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):391-402.  
LIANG Ying, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Secondary frequency regulation strategies and characteristic analysis of synchronverter-based micro-grids [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):391-402.
- [20] 李祝昆,宣筱青,叶振风,等. 智能变电站架构下的低频低压减载装置技术思路[J]. 电力系统自动化,2013,37(10):19-22.  
LI Zhukun, XUAN Xiaqing, YE Zhenfeng, et al. Technical ideas of low frequency and low voltage load shedding devices in smart substation architecture [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10):19-22.
- [21] 曾正,邵伟华,宋春伟,等. 电压源逆变器典型控制方法的电路本质分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(18):4980-4989.  
ZENG Zheng, SHAO Weihua, SONG Chunwei, et al. Circuit-based analysis of typical control schemes of voltage-source inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18):4980-4989.
- [22] 韦佐霖,陈民铀,李杰,等. 孤岛微网中分布式储能SOC和效率均衡控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):169-177.  
WEI Zuolin, CHEN Minyou, LI Jie, et al. Balancing control strategy of SOC and efficiency for distributed energy storage in islanded micro-grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4):169-177.
- [23] 胡超,张兴,石荣亮,等. 独立微网中基于荷电状态均衡的改进型下垂控制策略[J]. 电源学报,2018,16(3):70-76.  
HU Chao, ZHANG Xing, SHI Rongliang, et al. Improved droop

- control strategy based on state of charge balance in islanded micro-grid[J]. Journal of power supply, 2018, 16(3):70-76.
- [24] 原亚宁,李琳,赵浩然. 基于主从博弈模型的交直流混合微电网源网协调优化运行方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(3):30-37.
- YUAN Yaning, LI Lin, ZHAO Haoran. Optimization operation method for AC/DC hybrid microgrid considering source network coordination based on master-slave game [J]. Smart Power, 2019, 47(3):30-37.
- [25] 郑能,胡瑞馨,丁晓群,等. 考虑多种类型的分布式电源和网络重构的配电网无功优化[J]. 智慧电力, 2019, 47(3):90-96.
- ZHENG Neng, HU Ruixin, DING Xiaoqun, et al. Reactive power optimization of distribution network considering multiple types of distributed generations and network reconfiguration [J]. Smart Power, 2019, 47(3):90-96.
- [26] 刘静. GOOSE 通信技术应用研究[J]. 办公自动化, 2018(10):60-62.
- LIU Jing. GOOSE communication technology application research[J]. Office Automation, 2018(10):60-62.

作者简介:



朱皓斌

朱皓斌(1987),男,硕士,工程师,从事微电网控制与保护技术相关工作(E-mail: zhuhaobin@nrec.com);

徐光福(1982),男,硕士,高级工程师,从事电力系统分布式发电微电网、配网控制保护相关工作;

侯炜(1979),男,硕士,高级工程师,从事电力系统自动化相关工作。

## Emergency control strategy of independent micro-grid based on PCS power limit criterion

ZHU Haobin<sup>1</sup>, XU Guangfu<sup>1</sup>, HOU Wei<sup>1</sup>, LI Xu<sup>1</sup>, CHEN Jun<sup>1,2</sup>, WANG Zheng<sup>2</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** As the last line of defense of the micro-grid system, emergency control can maintain the frequency stability after the system is greatly disturbed, which is of great significance to the stable operation of the micro-grid. This paper analyzes the problem that frequency emergency control strategy and round load shedding strategy are difficult to set and cannot accurately load down in micro-grid, and an independent micro-grid emergency control strategy based on the PCS output power limit criterion is proposed. When the external disturbance causes the PCS output power to exceed the limit, the PCS's over-limit power is calculated by taking into account the SOC equalization control strategy, the load is accurately cut off by the load accurate load shedding scheme, and adopting GOOSE communication technology for engineering implementation, proposing small step trend variation sampling algorithm and anti-point large number strategy to improve the response speed of control system, improving the stability of large-capacity independent micro-grid operation. The feasibility and effectiveness of this scheme are verified by an independent micro-grid project in Xinjiang.

**Keywords:** emergency control; independent micro-grid; power conversion system (PCS); generic object oriented substation event (GOOSE); state of charge (SOC) equalization control

(编辑 钱悦)