

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.06.008

虚拟电厂关键技术及其建设实践

Key technologies and construction practices of virtual power plants

刘健¹, 刘雨鑫², 庄涵羽¹

LIU Jian¹, LIU Yuxin², ZHUANG Hanyu¹

(1. 华能浙江能源销售有限责任公司, 杭州 310014; 2. 华能浙江清洁能源分公司, 杭州 310014)

(1. Huaneng Zhejiang Power Supply Company Limited, Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Clean Energy Branch of Huaneng Power International Incorporated, Hangzhou, 310014, China)

摘要:在碳达峰、碳中和及构建以新能源为主体的新型电力系统的背景下,虚拟电厂因其对分布式能源的灵活有效管理成为智能电网和能源互联网中的重要组成形式,虚拟电厂通过先进的控制、计量、通信、优化等技术聚合分布式能源资源(可调节负荷、可中断负荷、储能等),实现源、网、荷、储的友好互动和优化运行,有利于资源的合理优化配置及利用。介绍了接入调度系统的虚拟电厂系统结构、网络拓扑、控制策略等关键技术,在虚拟电厂建设过程中的保护配置、信息通信、智能终端等方面存在的问题,提出改进措施,可供同类工程建设项目参考。

关键词:虚拟电厂;网络拓扑;服务器;安全区;控制策略;储能;智能终端;碳中和;新型电力系统;能源互联网

中图分类号:TK 01*9

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2023)06-0059-07

Abstract: In the context of pursuing dual carbon target and constructing a new power system with new energy as the main body, the virtual power plant has become an important component of smart grid and Energy Internet due to its flexibility and effectiveness in managing distributed energy resources. The virtual power plant integrates distributed energy resources (including adjustable load, interruptible load and energy storage) through controlling, metering, communication and optimization technologies, and realizes smooth interactions and optimized operation of source, network, load and storage, which is conducive to the rational and optimal allocation and utilization of resources. The structure, network topology, control strategy and key technologies of the virtual power plant accessed to the power dispatching system are introduced, and the problems in protection configuration, information communication and intelligent terminals are discussed. The improvement measures put forward provide a reference for similar projects.

Keywords: virtual power plant; network topology; server; security zone; control strategy; energy storage; intelligent terminal; carbon neutrality; new power system; Energy Internet

0 引言

在碳达峰、碳中和及构建以新能源为主体的新型电力系统的背景下,虚拟电厂作为源网荷储一体化的重要实施方式,是实现能源互联网的重要途径^[1],通过先进的信息通信技术和软件系统,实现常规电源与分布式电源、储能系统、可控负荷、电动汽车等资源的聚合和协调优化,虚拟电厂在电力负荷高峰时段可削减聚合资源功率,作为正电厂向系统供电调峰,在电力负荷低谷时段可增加聚合资源功率,作为负电厂加大负荷消纳配合系统填谷。也可作为一个特殊电厂参与电力市场和电网运行的协调管理系统^[2],推动电源结构和布局优化,加快能源互联网转型。在国内,虚拟电厂技术的研发应用还处于起步阶段,其应用场景只局限于如某一处楼宇

空调群、某一工业负荷群、某一充换电站群或某一非统调并网的分布式发电资源群等,其资源分散且控制方式单一,只能实现其所在地的单一功能应用,网络安全功能薄弱,不能实现虚拟电厂将各类资源的“聚合”与“解聚”,发挥虚拟电厂将分布式资源“聚沙成塔”的作用,不能实现与省电力调控中心自动化网络系统互联,接受调度指令,不能作为一个统调并网对象参与自动发电控制(Automatic Generation Control, AGC)实时控制等。随着新能源和分布式电源的大规模接入,作为接入调度系统的虚拟电厂,利用其关键技术聚合各类电力资源,参与电力市场辅助服务已成为能源互联网落地应用的重要场景之一,发展虚拟电厂意义重大,不仅可以促进新能源消纳,降低用户用能成本,而且可以节约电厂和电网投资,提高电网安全保障水平。

1 虚拟电厂关键技术

1.1 虚拟电厂系统结构

虚拟电厂系统主要分为3层结构^[3-4],分别为虚拟电厂站控层、过程层和资源层,如图1所示。

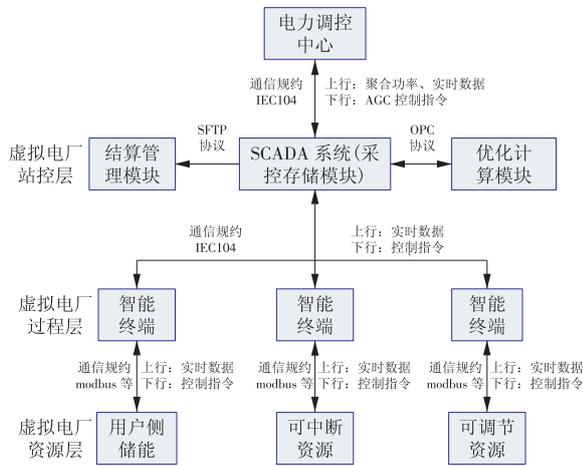


图1 虚拟电厂系统结构

Fig. 1 Structure of the virtual power plant system

虚拟电厂应用功能实现过程在纵向轴上分为上、下行2个方向。

上行应用过程:主要完成用户侧储能、可中断、可调节的分布式资源“聚合”过程,通过智能终端采集各用户资源的功率及状态变量等信息,并预测各用户资源的功率,进而评估各用户资源的可调节能力,所有资源可调节功率将通过优化计算被聚合成为一个总可调节容量,该容量及相关信息上报给电力调度。

下行应用过程:主要完成分布式资源的“解聚”过程,下发出力计划及实时调节功率需求给虚拟电厂站控层,虚拟电厂站控层执行优化计算及指令分解,并下发到各个分布式用户资源所连接的智能终端。各智能终端分别接收到分配的功率信息,并完成用户资源设备的控制。

虚拟电厂参与需求侧响应、调峰调频功率平衡等应用功能的实现需要各个逻辑层级在其应用功能上协调配合,各个逻辑层级实现的主要应用功能如下。

(1)虚拟电厂资源层。虚拟电厂用户资源为系统可接入的分布式发电、用户侧储能、各类可中断、可调负荷资源,最典型类型包括分布式燃机、分布式光伏、用户侧储能、充换电站、楼宇空调系统等,这些资源需要具备一定的灵活可控性,在不影响生产运行的情况下,根据其电力系统中的调节属性,可分为用于调频调峰的资源,如储能、燃机、充换电站,用于调峰的资源,如楼宇空调、压缩机和各类可

中断负荷。各用户资源在虚拟电厂系统内进行建模并参与优化调度计算及聚合解聚算法的执行,进而与电网进行互动,实现调频、调峰等目标。

(2)虚拟电厂过程层。主要由智能终端组成,包含协议转换接口、微型纵向加密及通信模块,安装在用户资源现场的数据采集、通信及控制设备柜内,主要功能是对资源的实时运行数据的采集和测量,并通过通信远程传送至虚拟电厂站控层进行优化调度计算。同时,智能终端接收虚拟电厂站控层下发的控制命令,实现对资源的本地调节控制。

(3)虚拟电厂站控层。上行与电力调控中心通信,接收调度下发的调频、调峰AGC指令,下行主要与智能终端的数据通信,获取接入用户资源的测量数据及用户资源模型建立及运行,基于所采集的数据实现对资源灵活性预测、聚合与解聚的优化计算,并下发优化运行结果自动功率控制(Automatic Power Control,APC)指令至智能终端设备。

1.2 虚拟电厂系统网络拓扑

虚拟电厂系统网络建设中严格按“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证、综合防护”进行建设^[5-7]。虚拟电厂业务系统网络整体上划分为生产控制大区与管理信息大区,2个大区之间部署的网络安全设备,无数据交互、物理隔离。生产控制大区进一步划分为控制区(安全区 I)和非控制区(安全区 II),并设立安全接入区(使用公用通信网络、无线通信网络以及处于非可控状态下的网络设备与终端等进行通信,其安全防护水平低于生产控制大区内其他系统时,应设立安全接入区),虚拟电厂系统位于生产控制大区的安全区 I,与安全接入区之间部署了正反向隔离装置进行逻辑隔离,虚拟电厂系统采用独立的网络设备组网,采用经过国家指定部门检测认证的纵向加密装置与调度机构进行通信。

调度数据网在专用通道上使用独立的网络设备组网,在物理层面上实现与其他数据网及外部公共信息网的安全隔离。虚拟电厂系统与电力调控中心通过电力调度数据网、光通信传输设备双点接入,虚拟电厂核心交换机与远动装置或服务器、电力专用纵向加密认证装置,通过路由器实现与电力调度的通信,通信网络、设备专网专用、双冗余配置,安全可靠性高。电力调度数据网络拓扑如图2所示(图中SDH为同步数字体系)。

在综合防护层面,生产控制大区内部署 II 型网络安全装置、入侵检测系统(Intrusion Detection System,IDS)、日志审计、防恶意代码服务器和运维堡垒机,并在安全接入区也部署 II 型网络安全装置、

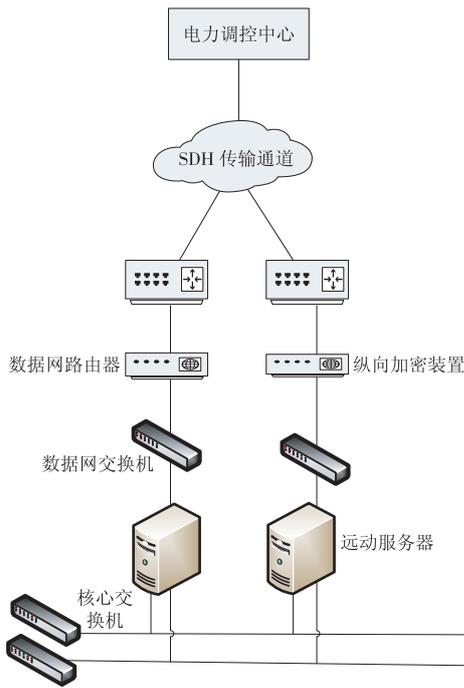


图2 电力调度数据网络拓扑

Fig.2 Topology of the power dispatching data network

防恶意代码服务器,纵向加密装置签发网关,用于对虚拟电厂分布资源安全设备的监视、审核和签发,严格限制业务网络边界,配置有效防护策略,提高综合防护能力。

1.3 虚拟电厂数据流

虚拟电厂生产控制大区安全区I即站控层的设备由前置服务器、数据库服务器、数据采集与监视控制系统(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA)服务器、接口服务器、高级应用服务器及监控工作站等组成,用户侧资源通过智能终端将上行数据通过安全接入区的通信服务器,经电力反向隔离装置接入到虚拟电厂生产控制大区的前置服务器,前置服务器解析处理后将遥信、遥测数据送给SCADA服务器,同时发送给接口服务器并存入历史数据到数据库服务器。调度来的AGC指令通过远动服务器与接口服务器、高级应用服务器通信,在高级应用服务器内对所有数据进行边界条件判断及逻辑优化计算,将优化后的功率指令下行至SCADA服务器与前置服务器通信,前置服务器经电力专用正向隔离装置,安全接入区的通信服务器下发至智能终端与就地控制系统通信,控制目标执行并反馈。虚拟电厂数据流向如图3所示。

生产控制大区安全区I前置服务器与安全接入区通信服务器的下行报文,通过正向隔离装置后进行规约处理,并写入对应通道的报文缓冲区中,下发至采集终端。上行报文通过反向隔离装置并通过专用传输软件进行文件搬运,对上行报文进行规

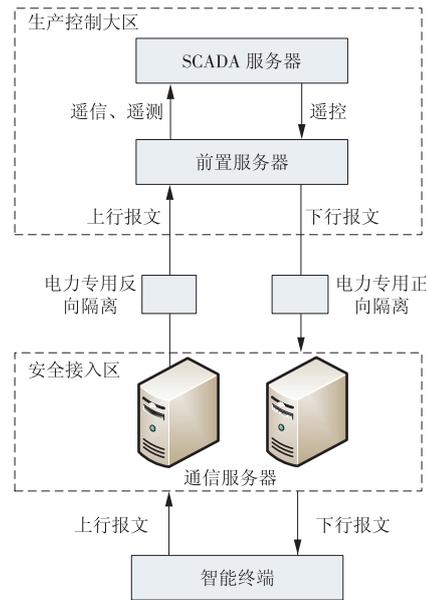


图3 虚拟电厂数据流向

Fig.3 Date flow of the virtual power plant

约处理,安全接入区的通信进程收到报文后正常写入报文缓冲区中,生成文本文件,将上行报文缓冲区中的数据写入临时的文本文件中。反向隔离装置自动将文本文件传到生产控制大区安全区I指定的路径下。生产控制大区安全区I前置服务器增加文件解析进程,解析上行报文并将报文信息存放到指定的报文缓冲区中。

1.4 虚拟电厂资源层

虚拟电厂资源层通信连接,以储能接入虚拟电厂为例。虚拟电厂站控层平台通过智能终端与储能用户接口通信,储能电站能源管理系统(Energy Management System, EMS)装置与现场的表计、保护装置及储能集装箱通信连接,网络通信连接如图4所示。

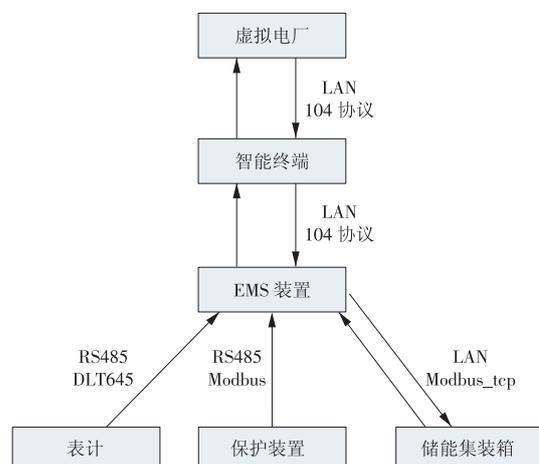


图4 虚拟电厂储能通信连接

Fig.4 Communication connections of the virtual power plant

虚拟电厂站控层平台与智能终端、智能终端与 EMS 装置采用 IEC 104 进行数据交互,智能采控终端起到承上启下的作用,并可监控 EMS 装置执行的正确性,对上行及下行报文进行分析。EMS 装置,一是作为协议转换装置,将电能表计、保护装置及储能集装箱内储能变流器(Power Conversion System, PCS)、电池管理系统(Battery Management System, BMS)等不同接入方式及通信规约统一转换为 IEC 104 通信协议与虚拟电厂通信交互,二是作为储能电站数据采控、存储、逻辑及策略执行单元。在计划模式下,储能电站调峰时,虚拟电厂在调峰前一日下发 96 点曲线至智能终端,并判断其遥调标志识别位是否为最新,如有更新,智能终端下发 96 点曲线至 EMS 装置存储,调峰当日,EMS 装置下发曲线至储能电站执行,调度 AGC 模式下,跟随调度指令执行。EMS 与储能电站关口电能表、储能上网表通过 DLT 645 规约通信、与储能电站保护装置、储能集装箱内 PCS、BMS 通过 Modbus 规约通信。

2 控制策略

虚拟电厂以总体运行成本最小为目标,采用点对点电能共享的运行模式^[8],因此在虚拟电厂平台上,通过调节负载减少电能消耗(储能为减少充电功率,或增加放电功率)或者调节分布式发电资源增加出力,将增加虚拟电厂的聚合实时出力,方向为正。反之调节负载增加电能消耗(储能减少放电功率,或增加充电功率)或者调节分布式发电资源减出力,将降低虚拟电厂的聚合实时出力,方向为负。虚拟电厂日前计划和日内运行方案是其在内、外部随机性上,实现经济或技术效益的有力保证,建立不同尺度化模型并通过“多级调度、逐级细化”的思想达到优化^[9]。

储能是虚拟电厂的优质可调节资源,储能充放电时应考虑其充放电速率、用户在低谷、尖峰、高峰时的满充满放和充放电时电池的荷电状态(SOC)情况,其中储能放电为正功率,储能充电为负功率,储能用户以自身用电成本最小为目标,根据其用电电价合理安排储能充放时间,同时根据需要将储能等分布式资源接入虚拟电厂参与电网调度辅助服务而获得收益^[10]。

2.1 逆功率保护

高峰时间段,储能系统在配电段低负荷运行且以最大功率放电时,会发生向变压器倒送电的运行方式,这时需要在策略里配置逆功率保护^[11],可防止储能系统向系统倒送电,并同时具备低频、低压解列储能系统的功能,提高系统运行的安全性。

已知并网点关口电表功率 P_1 , 储能负荷功率 P' , 逆功率保护设定值 P_i , K 为逆功率保护比率系数。

(1) 当 $P_1 > P_i$, 即并网点关口表功率大于逆功率保护限制值, 储能所在配电母线段不会发生逆功率现象, 继续执行储能调控现有策略。

(2) 当 $P_1 < P_i$, 即并网点关口表功率小于逆功率保护限制值, 此时, 储能所在配电母线段容易发生逆功率现象, 向系统供电造成保护动作, 因此将储能系统功率降低, 储能执行下设功率 P_i 为 $K(P' - P_i)$ 。

(3) K 取值为 0.8~0.9 时, 确保储能负荷功率值低于并网点关口电表功率, 不发生逆功率。

2.2 需量控制

低谷时间段, 储能系统在配电段高负荷运行且以最大功率充电时, 会发生配电变压器过负荷, 对于按需量支付电费的企业要对储能进行需量控制, 需量取并网点关口表最大有功需量值, 需量控制策略可防止储能系统用电超过限制, 防止变压器过载, 提高储能系统运行的安全可靠性和经济性。

已知关口表有功功率需量控制限制值 P_d , K_1 为有功功率需量控制比率系数。

(1) 当 $P_1 < 0.98P_d$, 即并网点关口表功率小于有功功率需量限制设定值, 说明此时不会发生关口表有功功率需量越限现象, 继续执行原有设定的策略。

(2) 当 $P_1 > 0.98P_d$, 即并网点关口表功率大于有功功率需量控制限制值, 说明此时容易发生需量越限现象造成保护动作, 则向储能系统下设的功率 P_i 为 $K_1(P' - P_d)$ 。

(3) K_1 取值为 0.8~0.9 时, 确保储能系统所在配电段功率值低于并网点关口有功功率需量, 不发生用户超有功功率需量用电而支付额外电费。

2.3 协调控制

当虚拟电厂正常运行时, 处于调峰时段, 执行辅助调峰的下设计划曲线值, 处于调频时段, 则执行调频功率值, 否则仍执行调峰曲线。以储能接入资源为例, 当储能放电时满足逆功率保护或需量控制判断条件时, 优先运行逆功率保护、需量控制策略计算出的功率值。同时, 实时判断储能 SOC、最大可放电功率、最大可充电功率等边界条件, 对下设的功率指令进行实时优化。

虚拟电厂主站与储能控制策略的协调, 在储能侧增加远方、就地投退软压板; 虚拟电厂增加 APC 投入、退出遥控, 当储能侧投入远方模式且虚拟电厂 APC 投入时, 执行虚拟电厂控制指令, 其他情况仍然执行资源侧本地策略, 控制方式灵活, 既能保

障储能原有的两充两放,又能根据用户用电情况,投切至远方接受虚拟电厂控制,参与电力市场获取额外收益。

3 建设与运营过程分析及改进措施

3.1 保护配置

虚拟电厂接入的储能、空调、充换电站等资源,以用户侧储能经升压变压器接 10 kV 电网为例,在运行过程中,经常发现储能侧开关、低压框架断路器及相关附属设备故障引起其上级开关跳闸故障,分析其原因是储能接入的开关、变压器保护装置未及时整定或整定错误,这将可能导致储能设备损坏或引起开关越级跳闸,扩大故障范围。为此,对虚拟电厂接入资源的电气主设备按电网相关规程及标准进行保护配置和整定,储能系统开关、升压变压器等一般应配置速断、短延时的过流保护等,并与开关的上下级保护配合,满足电网对继电保护的要求。可采用以下整定原则,以确保继电保护装置的快速性、可靠性、灵敏性和选择性^[12-13]。

3.1.1 速断保护

(1)按躲过变压器低压侧出口三相短路时流过保护的最大短路电流整定

$$I_{op} = K_{re} \times I_{k(3),max} / N_a = 1.3 I_{k(3),max} / N_a, \quad (1)$$

式中: I_{op} 为保护整定电流; k 为短路点, $I_{k(3),max}$ 为变压器低压侧出口最大三相短路电流; N_a 为电流互感器变比; K_{re} 为可靠系数,建议取值 1.3。

(2)按躲过变压器励磁涌流整定,取(7~12) I_e, I_e 为变压器额定电流。

(3)速断保护定值取上述(1),(2)整定计算最大值。

(4)灵敏度校验,按最小运行方式下,变压器高压侧出口二相金属性短路电流 $I_{k(2),max}$ 校核,灵敏系数要求不小于 1.5。

(5)动作时限:变压器采用断路器时,动作时间取 0.1 s,当采用高压熔断器、接触器时,取经验值 0.3 s。

3.1.2 过流保护

(1)按躲过厂用变压器所带负荷需要自启动的电动机最大启动电流之和整定

$$I_{op} = K_{re} \times K_{zp} \times I_e, \quad (2)$$

式中: K_{re} 为可靠系数,取 1.15~1.25; K_{zp} 为自启动电流倍数。

(2)按躲过低压侧一个分支负荷自启动电流和其余分支正常负荷电流整定,即

$$I_{op} = K_{re} \times (\sum I_{qd} + \sum I_n) / N_a, \quad (3)$$

式中: $\sum I_{qd}$ 为低压侧一个分支自启动电流折算到高压侧的一次电流; $\sum I_n$ 为低压侧其余分支正常负荷总电流折算到高压侧的一次电流。

(3)按低压侧分支过流保护的動作电流配合整定,即

$$I_{op} = K_{co} \times (K_{iopl} + \sum I_n) / N_a, \quad (4)$$

式中: K_{co} 为配合系数,取 1.15~1.25; K_{iopl} 为低压侧一个分支过流保护的最大動作电流折算到高压侧的一次电流; $\sum I_n$ 为低压侧其余分支正常负荷总电流折算到高压侧的一次电流。

(4)过流保护定值取上述(1),(2),(3)整定计算最大值。

(5)灵敏度校验,按最小运行方式下,变压器低压侧母线两相金属性折算到高压侧的一次电流校核,灵敏系数要求不小于 1.3。

(6)動作时间与下一级过流保护的最大動作进间配合整定,考虑时间级差取为 0.3 s。

3.2 通信延时

虚拟电厂站控层对资源进行调控时,从指令下发到数据返回测试时间在 10 s 左右,通信时间较长,系统反应慢,虚拟电厂与资源通信交互,其通信延时^[14]主要为虚拟电厂高级应用优化计算时间,虚拟电厂监控平台整体通信时间,安全接入区正向、反向隔离装置通信时间、5G 无线通信路由时间,资源本地执行与数据采集时间,为此将虚拟电厂整个通信环节,以全球定位系统(GPS)统一时钟为归节点,分段抓取虚拟电厂前置服务器、通信服务器、智能终端及储能 EMS 通信报文,通信测试结果见表 1。

表 1 虚拟电厂自动化设备通信延时

Table 1 Communication delay of the automation equipment in the virtual power plant

报文序号	监控平台延时	优化计算延时	5G 通信延时	正向隔离延时	反向隔离延时	储能动作延时
1	0.101	2.192	0.255	0.216	0.395	4.878
2	0.105	1.945	0.264	0.190	0.773	6.331
3	0.122	1.808	0.217	0.212	0.307	5.957
4	0.123	0.921	0.265	0.104	0.579	7.447
5	0.121	2.204	0.209	0.229	0.760	5.085
6	0.155	0.691	0.216	0.071	0.676	5.481

由表 1 可知,储能 PCS 从接收指令到返送至 EMS 数据采集时间在 8 s 以内,虚拟电厂优化计算时间 2 s 左右,正反向隔离装置通信时间 1 s 以内,5G 通信与虚拟电厂监控平台整体响应在 0.3 s 左右。由上述测试时间,可知本地储能的动作反应时间最长,分析主要原因为虚拟电厂平台经智能终端、EMS 装置下发功率指令给储能集装箱内控制装置,储能响应后,将功率返送值通过 EMS 装置、智能终端、运营商 5G 专线,传输到虚拟电厂主站的通信服务器,中间环节较多,解决的方法是将储能响应后的功率直接接入智能终端进行返送,减少中间环节,经改造并再次测试后,储能 PCS 动作时间在 4 s 以内,响应时间缩短 50%,从而使虚拟电厂从指令下发到数据返回响应时间由原来的 10 s 减少到 6 s 左右,可见虚拟电厂的调频性能将有所提高。

同时,在 5G 通信延时上,虚拟电厂资源数据原先通过运营商机房通信设备再与虚拟电厂设备进行通信和转换,通信时间较长,为此在虚拟电厂部署一套基于边缘用户面功能(User Plane Function, UPF)设备,采用 5G 专网,独享 UPF 模式,用于 5G 核心网虚拟电厂资源用户数据包的路由和转发相关功能,采用低时延不大于 20 ms、大带宽不小于 2 Mb/s 的边缘计算和网络切片技术,实现负荷控制的毫秒级控制、支持多业务平台,确保业务传输的安全与保密,为虚拟电厂资源接入提供采集、控制、视频监控的通信支撑服务。

3.3 智能终端

虚拟电厂用户资源由于地域分布广,常规的资源接入只能通过运营商的专用网络来实现通信,采用一种基于边缘计算的智能终端,内部配置有线安全通信模块、接入路由器通过光纤接入运营商信息箱,运行商提供虚拟专用网络(Virtual Private Network, VPN)通道^[15-16]及光纤专线与虚拟电厂对接。由于接入虚拟电厂的资源是海量的分布式资源,每个资源需配置 1 台通信终端设备(Customer Premise Equipment, CPE)、1 台微型纵向加密装置、1 台远程终端单元(Remote Terminal Unit, RTU)。单个资源接入硬件涉及 3 个厂家,调试管理费用较高,且以上接入设备需不同厂家调试人员到现场进行调试、适配规约、相互联调等,需要较长时间才能将用户资源接入虚拟电厂。

为此,开发了一款智能终端:一是将虚拟电厂用户资源侧 EMS 终端、微型纵向加密装置、通信 CPE 多个硬件融合,降低设备成本,节约建设资金;

二是一体化智能终端能即插即用,支持 Modbus, DLT 645, IEC 101, IEC 104, CAN, IEC 61850 等多种标准规约智能识别及端口转换;三是满足调度对分布式资源安全接入的要求,智能终端的研发投用实现了虚拟电厂资源快速接入,降低了项目建设和运维调试成本,为虚拟电厂技术成果应用和推广提供实践和应用场景,提高了虚拟电厂的核心竞争力。

4 结束语

虚拟电厂聚合多样化的分布式能源资源进行协调控制及调度,在现阶段电力市场环境下,虚拟电厂对分布式能源的约束力来源于事先协议,分布式能源被动接受调度指令。而未来随着能源互联网的发展,分布式能源将更加的高度自由,在该情况下,虚拟电厂既要满足海量的分布式能源实时参与电力市场获取收益,又要有效控制分布式能源的运行以保障电力系统安全可靠,使得协调控制技术从机制设计到技术实现均具有较大难度。云计算、大数据、物联网、移动互联、人工智能、区块链技术的飞速发展及其在经济、金融和社会系统中的成功应用为解决虚拟电厂上述问题提供了新的研究思路。

参考文献:

- [1]孙惠,翟海保,吴鑫.源网荷储多元协调控制系统[J].电工技术学报,2021,36(15):3264-3271.
SUN Hui, ZHAI Haihao, WU Xin. Research and application of multi-energy coordinated control generation, network, load and storage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3264-3271.
- [2]杨晓已,陶新磊,韩立.虚拟电厂技术现状及展望[J].华电技术,2020,42(5):73-78.
YANG Xiaosi, TAO Xinlei, HAN Li. Status prospect of virtual power plant technology [J]. Huadian Technology, 2020, 42(5): 73-78.
- [3]吴晓刚,唐家俊,吴新华,等.“双碳”目标下虚拟电厂关键技术建设与现状[J].浙江电力,2022,41(10):64-71.
WU Xiaogan, TANG Jiajun, WU Xinhua, et al. Key technologies and present situation of virtual power plant under “dual-carbon” goals [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(10): 64-71.
- [4]钟永洁,纪陵,李靖霞,等.虚拟电厂基础特征内涵与发展现状概述[J].综合智慧能源,2022,44(6):60-72.
ZHONG Yongjie, JI Ling, LI Jingxia, et al. Overview on the characteristics, connotation and development status of virtual power plant in China [J]. Integrated Intelligent

- Energy, 2022, 44(6):60-72.
- [5] 郑子淮, 裘雨音, 陈球草, 等. 电力监控系统二次安防的防护策略[J]. 自动化应用, 2017(8):121-123.
ZHENG Zihuai, QIU Yuyin, CHEN Lucao, et al. Second security protection strategy of electric monitoring system[J]. Automation Application, 2017(8):121-123.
- [6] 王永平. 电力监控系统安全防护管理与技术研究[J]. 科技创新与应用, 2019(31):68-69.
WANG Yongping. Research on security protection management and technology of electric power monitoring system [J]. Technology Innovation and Application, 2019 (31):68-69.
- [7] 吴程楠, 田茜, 李曼. 基于网络安全管理平台的电力监控系统网络安全应用实践[J]. 电力与能源, 2021, 42(3):287-290.
WU Chengnan, TIAN Qian, LI Man. Network security research of power monitoring system based on network security management platform[J]. Power & Energy, 2021, 42 (3):287-290.
- [8] 兰威, 陈飞雄. 计及阻塞管理的虚拟电厂与配电网协同运行策略[J]. 电气技术, 2022, 23(6):30-41.
LAN Wei, CHEN Feixiong. Cooperative operation strategy distribution network and virtual power plants considering congestion management[J]. Electrical Engineering, 2022, 23 (6):30-41.
- [9] 李翔宇, 赵冬梅. 基于模糊-概率策略实时反馈的虚拟电厂多时间尺度优化调度[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7):1446-1455.
LI Xiangyu, ZHAO Dongmei. Research on multi-time scale optimal scheduling of virtual power plant based on real-time feedback of fuzzy-probability strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7):1446-1455.
- [10] 张迪, 苗世洪, 周宁, 等. 分布式发电市场化环境下各交易主体响应行为模型[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15):3327-3340.
ZHANG Di, MIAO Shihong, ZHOU Ning, et al. Research on response behavior model of trading entities considering the marketization environment of distributed generation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (15):3327-3340.
- [11] 严干贵, 刘莹, 段双明, 等. 电池储能单元群参与电力系统二次调频的功率分配策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14):26-34.
YAN Gangui, LIU Ying, DUAN Shuangming, et al. Power distribution strategy for battery energy storage unit group participating in secondary frequency regulation of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (14):26-34.
- [12] 厂用电继电保护整定计算导则:DL/T 1502—2016[S].
- [13] 孔琳琳. 低压厂用电系统整定计算方法研究[J]. 电力系统装备, 2020(20):32-33.
KONG Linlin. Research on the setting calculation method of low voltage auxiliary power system [J]. Electric Power Equipment, 2020(20):32-33.
- [14] 张凯杰, 丁国锋, 闻铭, 等. 虚拟电厂的优化调度技术与市场机制设计综述[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6):60-72.
ZHANG Kaijie, DING Guofeng, WEN Ming. Review of optimal dispatching technology and market mechanism design for virtual power plant [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6):60-72.
- [15] 任宝军, 高志勇. 基于容器技术实现边缘计算的智能配用电一体化终端[J]. 综合智慧能源, 2021, 43(3):25-30.
REN Baojun, GAO Zhiyong. An intelligent distribution and consumption terminal capable of making edge computing based on container technology [J]. Integrated Intelligent Energy, 2021, 43(3):25-30.
- [16] 任宝军, 高志勇. 一种基于边缘计算的分散式站所终端方案的设计与实现[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6):59-69.
REN Baojun, GAO Zhiyong. Design and implementation of a terminal configuration scheme in a decentralize distribution station base on edge computing [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6):59-69.

(本文责编:齐琳)

收稿日期:2022-12-07;修回日期:2023-02-21
上网日期:2023-06-25;附录网址:www.ienergy.cn

作者简介:

刘健(1975),男,高级工程师,从事电气工程及其自动化方面的研究, hnhzlj@163.com;

刘雨鑫(2000),男,助理工程师,从事发电厂及电力系统方面的研究, 172242982@qq.com;

庄涵羽(1997),女,助理工程师,从事电子商务方面的研究, 026901709@qq.com。