

## 能源互联网中需求侧资源参与电网控制的边云协同技术研究

潘明明<sup>1</sup>, 田世明<sup>1</sup>, 刘宗杰<sup>2</sup>, 袁金斗<sup>1</sup>, 陈宋宋<sup>1</sup>

(中国电力科学研究院有限公司 需求侧多能互补优化与供需互动技术北京市重点实验室, 北京 100192;

2. 国网山东省电力公司济宁供电公司, 山东 济宁 272000)

**摘要:** 能源互联网技术能够实现需求侧可调节电力负荷资源与输配电资源、发电资源的信息融通, 发挥需求侧可调节电力负荷在电网供需平衡调节中的价值效益。通过整合需求侧资源参与电网不同控制模式的优缺点, 提出了一种以电网侧云平台为主导、聚合商内部分散协同加用户侧边缘控制主动响应的能源互联网供需资源协调控制框架及方法, 能够有效提高可调负荷资源响应电网调度的灵活性与快速性。

**关键词:** 能源互联网; 可调负荷; 电网调度; 负荷聚合; 边缘计算

中图分类号: TN915

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201475

中文引用格式: 潘明明, 田世明, 刘宗杰, 等. 能源互联网中需求侧资源参与电网控制的边云协同技术研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(4): 24-29.

英文引用格式: Pan Mingming, Tian Shiming, Liu Zongjie, et al. Research on cloud edge coordination technology of demand side resources participating in system control within Energy Internet[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(4): 24-29.

## Research on cloud edge coordination technology of demand side resources participating in system control within Energy Internet

Pan Mingming<sup>1</sup>, Tian Shiming<sup>1</sup>, Liu Zongjie<sup>2</sup>, Yuan Jindou<sup>1</sup>, Chen Songsong<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Demand Side Multi-Energy Carriers Optimization and Interaction Technique,

China Electric Power Research Institute, Beijing 10092, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jining 272000, China)

**Abstract:** Energy Internet technology can realize the information fusion of demand side adjustable power load resources, transmission and distribution resources, power generation resources, and play the value benefits of demand side adjustable power load in peak load and frequency regulation of power grid. In this paper, by integrating the advantages and disadvantages of different control modes for demand side resources, a framework and method of decentralized collaborative control within demand side resource cluster and regional grid coordinated control is proposed, which can effectively improve the flexibility and rapidity of adjustable resource response grid frequency regulation.

**Key words:** Energy Internet; adjustable load; grid regulation; load aggregation; edge computing

### 0 引言

伴随碳达峰、碳中和不断推进, 大量清洁能源接入电网, 终端电气化水平不断提升, 仅从发电侧已经无力支撑能源互联网安全运行的调节需求, 亟需发掘需求侧资源参与系统调度。当前调度系统还缺乏针对需求侧资源的常态化调控通道, 并且由于异质多元的需求侧资源具有空间分散性和运营主体多元化等特征, 如何将其纳入到能源互联网的调度框架之中并实现快速响应是一大难题。目前需求侧资源的快速响应大多采用集中控制<sup>[1]</sup>, 也有部分研究采用分散控制的控制方式。集中控制具有可靠性高的优点, 但存在投资费用高和通信延迟的问题。分散控制响应速度快, 但响应随机性较高。此

外, 电网公司大多将需求侧资源作为一种日前资源进行调度<sup>[2]</sup>, 实施过程主要是由调度部门或聚合商对需求侧资源通过优化调度制定控制策略<sup>[3]</sup>, 在具体设计控制策略时还需进行多目标的权衡。

本文从研究建立包含可调负荷的能源互联网区域频率响应模型和电压控制模型入手, 分析可调负荷参与电力系统调频调压的机理, 并提出一种能够适应可调负荷接入的能源互联网调度控制系统中 AGC 和 AVC 应用架构; 进而研究基于负荷聚合商的分层分散可调负荷控制架构和具备边缘计算功能的多元负荷主动响应单元, 最后对系统性能进行了试验验证, 为能源互联网中需求侧资源参与系统调节提供了技术支撑和理论依据。

## 1 可调负荷控制机理与响应模型

### 1.1 包含可调负荷的省级能源互联网频率响应模型

能源互联网的频率取决于发电侧资源与需求侧资源的有功功率平衡。当发电有功出力高于负荷有功出力时,频率上升,反之下降。传统电网主要针对供给侧资源调节来维持频率稳定,只有当出现较大的频率偏差并且无法使其恢复时,才有可能触发低频减载或高频切机<sup>[4]</sup>,而低频减载需要切除一部分负荷支路,这种方式会引起停电造成用户投诉甚至带来安全、经济损失,而采用负荷调节的方式来实现精细化的系统调频控制是能源互联网发展的必然趋势。

按照时间尺度,可以将频率调节分为一次调频、二次调频和三次调频<sup>[5]</sup>。频率的一次调整是由发电机原动机自发地根据频率变化进行的调节,相关参数固定;二次调整是电网调度中心通过 AGC 程序对发电机和负荷的有功功率进行控制;三次调节也称为经济调度,是通过优化方法对发电厂的功率进行经济分配。因此,本文重点关注可调负荷在二次调频中的价值创造。AGC 要实现的主要目标是维持系统频率与额定值的偏差在允许的范围之内和维持对外联络线净交换功率与计划值的偏差在允许的范围之内。根据 AGC 控制基本目标变量的不同,分为三种控制模式,即 FFC、TBC 和 FTC,不同控制模式下控制目标不同。本文基于 FFC 模式展开研究。FFC 模式被称为恒定频率控制模式,这种控制模式下 AGC 控制区的目标是维持系统频率恒定,即  $\Delta f=0$ ,对联络线上的交换功率则不加控制。此控制下的区域控制偏差 ACE 如式(1)所示:

$$ACE=10 \times B \times \Delta f \quad (1)$$

其中  $B$  为区域频率偏差系数,取正值。

可调节负荷对频率的控制效果依赖于所实施的控制策略,控制策略一般都是基于频率偏差信号  $\Delta f$  来设计的。例如,当检测到系统当前区域的频率偏差信号  $\Delta f$  低于某一阈值时,使一部分可调负荷终端关闭。构建考虑可调负荷的能源互联网区域频率响应模型,如图 1 所示。

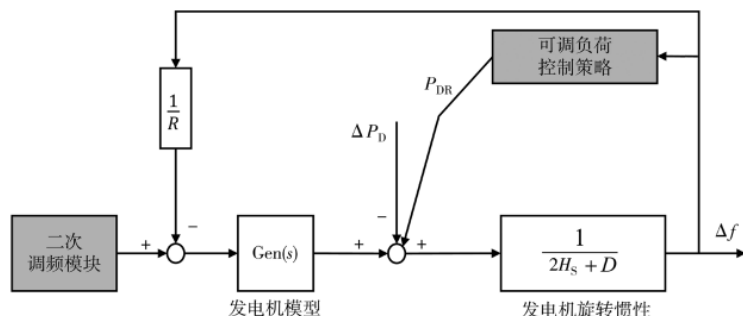


图1 能源互联网区域频率调节模型

其中  $Gen(s)$  为发电机模型的传递函数,与发电机的类型是传统发电还是新能源发电相关。可调负荷的调频作用等同于在图 1 所示的能源互联网区域频率响应模

型中额外增加了一条虚拟闭环控制回路,制定可调负荷的控制策略  $P_{DR}$  的依据为影响系统频率发生变化的负荷变化量  $\Delta P_d$ ,  $P_{DR}$  与  $\Delta P_d$  的符号相反<sup>[5]</sup>。需要注意的是,可调负荷控制策略即需求响应策略应是由负荷聚合商协调各种需求响应终端共同作用的结果,反映的将是众多负荷控制装置的整体响应特性,在实际执行时,需要将计算出的  $P_{DR}$  分解至每一个具体用户以及每一个用电设备。

### 1.2 包含可调负荷的省级能源互联网电压调节模型

能源互联网中大量用户侧分布式电源接入,使区域电网由原来的单电源辐射线路变为多电源供电结构,电网潮流发生改变,传统的线路电压下降分布也发生了改变<sup>[6]</sup>。

研究分析可调负荷对节点电压的影响机理,首先构建能源互联网区域电压调节模型如图 2 所示,假设每个节点上都具有一定数量的用户侧分布式电源,同时也具有一定数量的可调负荷,能够对分布式电源并网引起的电压变化进行就地调节。

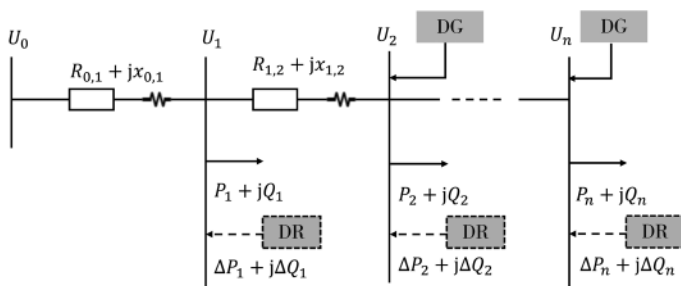


图2 能源互联网区域电压调节模型

设线路首端节点电压为  $U_1$ ,由于首端节点在配电线路中属于电源点,因此假设首节点电压恒定。设节点  $n-1$  和节点  $n$  的电压分别为  $U_{n-1}$ 、 $U_n$ ,节点之间的线路阻抗为  $R_{n-1,n}+jX_{n-1,n}$ ,则节点  $n$  和节点  $n-1$  间的电压差可由式(2)表达。

$$U_{n-1} = \frac{\sum_{i=n}^N (P_i + P_i^{DG} + P_i^{DR}) R_{n-1,n} + \sum_{i=n}^N (Q_i + Q_i^{DG} + Q_i^{DR}) X_{n-1,n}}{U_{n-1} - U_n} \quad (2)$$

式中,  $P_i$ 、 $Q_i$  为第  $i$  节点的有功功率与无功功率;  $P_i^{DG}$ 、 $P_i^{DR}$  为第  $i$  节点的分布式电源与可调负荷的功率,  $n$  为线路节点总数。

从图 2 可以看出,通过对可调负荷的合理操作,可以有效调节区域电网各节点的电压,从而可以减少分布式电源出力波动对电网电压的影响,既可以实现清洁能源的就近本地消纳,也能够保障能源互联网区域平衡自愈。

## 2 适应需求侧资源接入的能源互联网控制系统设计

### 2.1 适应需求侧资源接入的电网 AGC 控制

随着能源互联网的建设发展和新能源的大规模接

入,电网结构和形态发生了新的变化,不再是传统的源随荷动,而是源网荷储协调运行。因此,作为能源互联网调度控制系统的核心应用,传统 AGC 应用程序需要做出能够与需求响应技术体系相融的必要增强。

本文提出一种适应用户侧分布式电源和可调负荷等异质多元需求侧资源接入的能源互联网控制系统中 AGC 应用架构,如图 3 所示。在决策层,实现空间、时间和目标维度的协调控制。在执行层,基于决策层给出的控制目标,是在通过对常规发电、新能源发电和可调负荷聚合商资源的优化分配调用后,经安全无误处理后形成控制指令<sup>[9]</sup>。

升级后的 AGC 主要工作流程为:首先,AGC 从 SCADA 和用户处获取电网实时量测数据,其中负荷相关信息通过需求响应终端上传至负荷聚合商平台,再由聚合商平台接入 SCADA,之后,AGC 根据实时量测数据和当时的交换计划、发电计划,在考虑各项约束的同时计算出对包括可调负荷在内的各类资源的控制命令。最后,由 SCADA 将控制命令送到各电厂、新能源及可调负荷的就地控制器,由就地控制器调节机组的有功输出功率。

在新能源和可调负荷大规模接入后,将新能源机组和可调负荷聚合商平台纳入区域电网的有功调度与控制框架,应采取基于新能源和负荷功率预测的“发电计划跟踪”为主,新能源机组和负荷聚合商平台“直接参与调频”为辅(称为辅助调频)的控制原则。适应新能源和可调负荷接入的电网调峰/调频有功调度框架如图 4 所示。

在日前调度计划和实时调度计划环节,以考虑清洁能源优先消纳为目标的统一优化调度技术已经成熟,并

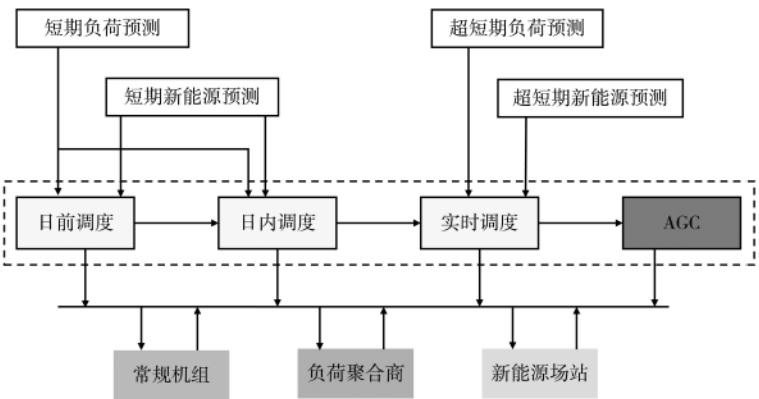


图 4 适应新能源和可调负荷接入的调峰/调频有功调度框架

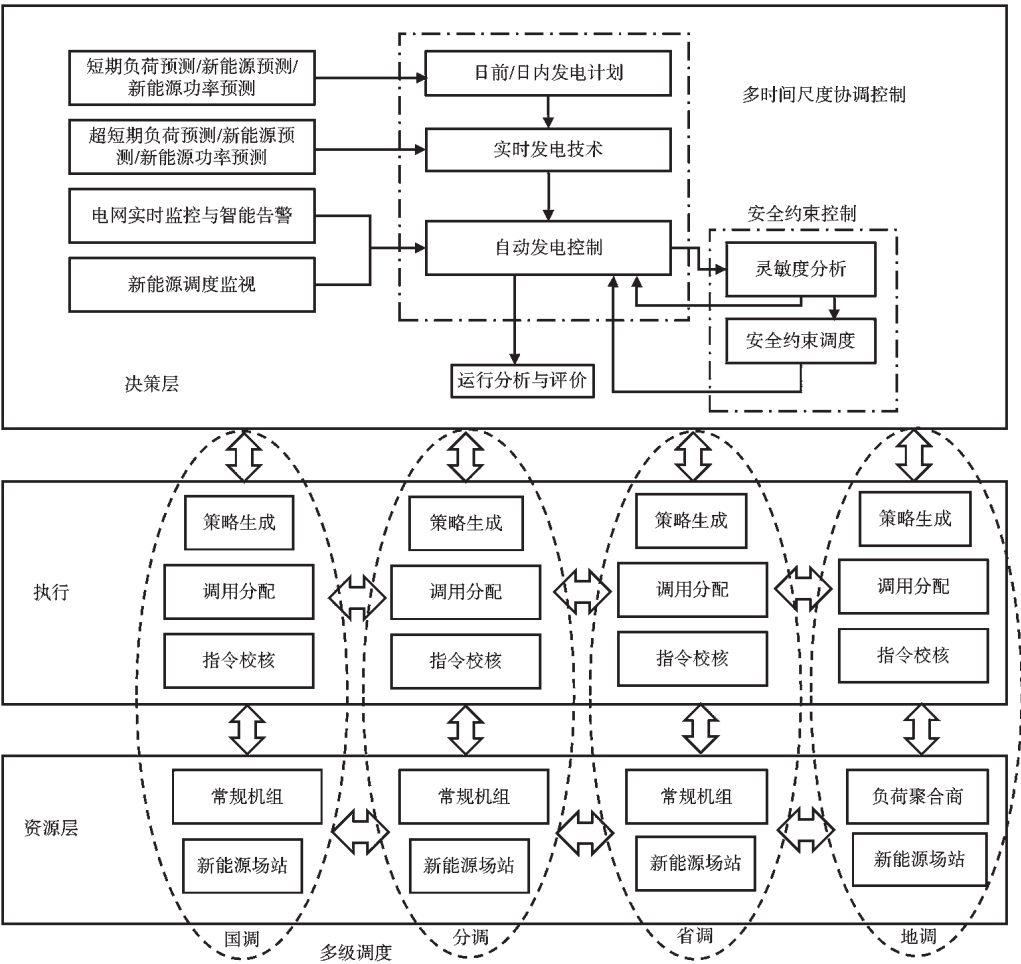


图 3 能源互联网控制系统中 AGC 应用架构



得到实际应用,而考虑可调负荷经济效益为目标的相关技术还是空白,需要在实时调度与 AGC 衔接环节以及 AGC 自身控制环节中加以完善提升。

## 2.2 适应需求侧资源接入的电网 AVC 控制

电网电压与无功功率关系密切,对电力系统的电压控制主要通过控制无功功率的产生、流动和消耗来实现<sup>[10]</sup>。与以 AGC 为代表的有功控制相比,无功电压的控制相对更为困难,这是由电网电压的节点特性不同造成的。而能源互联网无功电压控制在常规分散调节的方式之上,对增加无功资源容量、提升电压控制能力及控制系统智能化升级更是提出了全新的要求<sup>[11]</sup>。传统电网的无功电压控制采用分层分级的总体框架,具体特点为:一是控制中心内横向协调,二是控制中心间纵向协调。为了提高电压控制的可行性和鲁棒性,必须能够对能源互联网进行合理的控制区域划分,且需要摆脱对通信通道的依赖性,不同控制区间相对独立<sup>[12]</sup>。传统电网的电压控制通常基于当地 PMU 量测量进行在线电压失稳预测<sup>[13]</sup>,而面向可调负荷接入的电压控制需要对量测方式进行进一步的本地化细分,因此,有必要在用户侧引入边缘计算技术,对以通信功能为主的常规需求响应终端进行技术升级,提升能源互联网的分层分区电压控制能力。

## 3 能源互联网需求侧资源调度控制云边协同控制架构

### 3.1 负荷聚合商的可调负荷控制

需求侧资源包括柔性负荷(空调、电热水器、冰箱等)、冷(热)负荷(蓄冷空调)、电池储能、分布式能源(风电、光伏、电热气综合能源系统)等<sup>[14]</sup>。这些需求侧资源所属运营主体多元化、行为特征差异大、控制方式及调节能力各异,是一种典型的复杂主体。通过前两节分析,需求侧资源实现频率控制一般通过调节需求侧资源有功功率实现<sup>[15]</sup>。如控制温控设备的开断和设定温度等,电压控制不仅可以通过调节有功,也可以通过调节无功来实现。在能源互联网区域调度层面,需要能够给出参与调度的传统发电、新能源以及可调负荷的调度计划<sup>[16]</sup>;而要分解到每一个负荷上,还需要负荷聚合商的参与。负荷聚合商能够对大量中小型负荷进行资源整合,进行统一调度与控制,以充分挖掘负荷侧资源并实现最大化经济效益。

可调负荷在参与聚合商需求响应的过程中,要根据接收的控制信号做出一系列的响应,根据控制信号的决策位置,可以将可调负荷需求响应的控制模式分为集中控制和分散控制两类<sup>[17]</sup>。其中集中控制是对所辖可调负荷统一建立聚合模型,并针对系统负荷平衡、输电线路上的潮流波动等需求进行优化调度,并制订相应的控制策略,其特点是可靠性高,可预测性强,缺点是双向通信架构的投资成本高、有时延的问题<sup>[18]</sup>。另一种模式是分散控制,由安装于用户侧的智能终端实时监测系统电压、频率等因素变化并对负荷发布相应控制信号。由于分散

控制可以根据监测结果并结合自身情况迅速做出响应,因此可以适应调度系统对电压调节的分区要求,并且系统灵敏性较高,但由于没有统一的控制中心,响应随机性较高,可能存在响应不足或过量响应的问题<sup>[19]</sup>。

本文兼顾集中控制的整体协调能力和分散控制的自治灵活性,提出一种以电网调控云平台为主导、负荷聚合商协调本地边缘控制进行辅助的分层分散式可调负荷边云协同控制技术架构,在边侧增加智能计算能力,使得智能终端可自主感知电网频率、电压实时变化,自动跟踪电网状态变化和系统控制命令而调节负荷。

### 3.2 控制系统技术架构

能源互联网需求侧资源边云协同控制系统由三部分组成:部署在省级电网侧的调控云平台、部署在聚合商侧的多元负荷资源预测控制系统平台、部署在用户侧的多元负荷主动响应单元,此外,还包括分散在各地的异质多元需求侧资源。调控云平台负责收集各方信息并根据供需状况对需求侧资源协调控制软件下达调控指令,需求侧资源协调控制软件进一步分解指令并下达至主动响应单元执行,主动响应单元除了执行上述指令外还可根据监测的电网频率及电压情况进行实时的功率调节。基于负荷聚合商的分层分散可调负荷控制架构如图 5 所示。

在图 5 中,电网调度部门可以由多个负荷聚合商提供资源与服务,并与其架构通信线路,当系统出现频率或电压偏差时,调度部门将系统需求信息下达给各个负荷聚合商后,负荷聚合商可以根据 AGC 或 AVC 控制目标对所辖负荷下达需求响应策略指令,根据图 1 所示模型进行频率/电压恢复。基于负荷聚合商的控制模式,虽然能在一定程度上减少调度部门信号产生及其与负荷之间频繁通信的压力,但负荷聚合商与可调负荷之间需要进行信息传递和交换,仍然存在着集中控制<sup>[20]</sup>。而具备用户侧源网荷储泛在感知与快速响应边缘计算功能的多元负荷主动响应单元,能够基于电价、激励等多种信号输入对多元负荷进行主动快速调节,帮助聚合商按时按量完成 AGC 和 AVC 控制目标,有效提升需求侧资源参与电网调节的经济性和灵活性。

### 3.3 多元负荷主动响应单元

多元负荷主动响应单元具有自我感知电网、快速调节控制、提高电能质量和优化经济运行的能力,通过装置的控制功能和通信功能,实现用户侧短时的有功、无功和电能质量调节,并具备边缘计算能力,可基于峰谷电价和经济激励等多种信号输入,就地调节用户侧多元负荷,提升需求侧资源参与电网调节的经济性和灵活性。

多元负荷主动响应单元采集用户用电支路的电参量和状态,接入新能源变流器及可调负荷信息,实现信息汇总发送给主站系统。并运用内部可编程逻辑算法,通过调节可调节负荷、分布式电源或者其他电能质量装置,快速及时保障区域电网内电源、负荷的稳定经济运行。

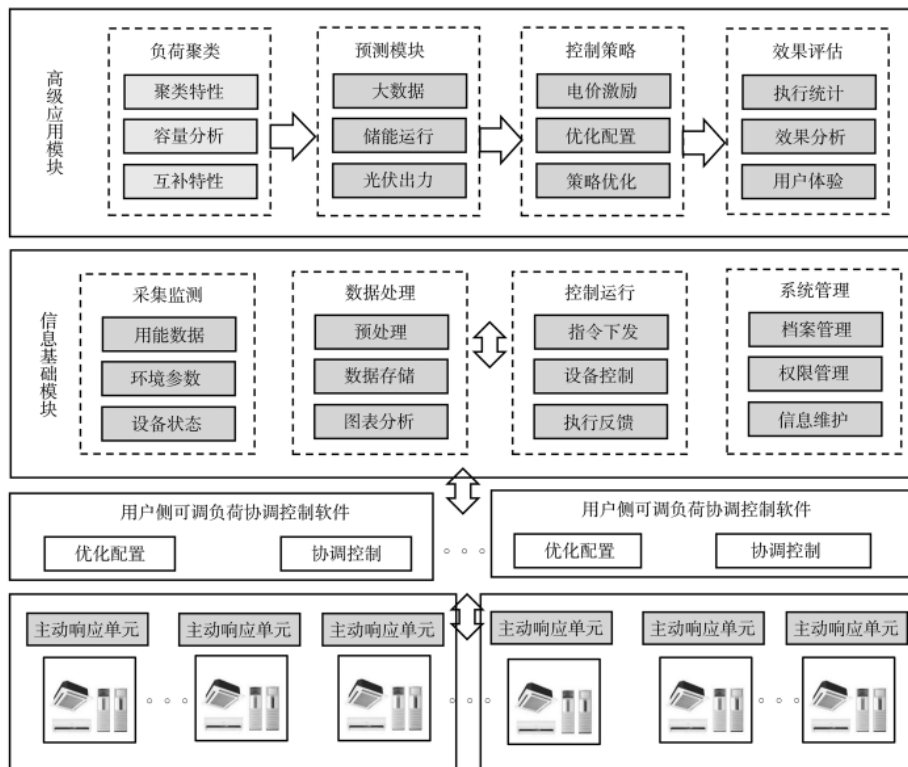


图5 基于负荷聚合商的分层分散可调负荷控制架构

## 4 试验分析

在实验室内搭建由磷酸铁锂储能系统、超级电容储能系统、直流电源+储能变流器、可编程RLC负载构成的能源局域网动模试验环境,对多元负荷主动响应单元参与电网调度控制的性能进行验证,其中磷酸铁锂储能系统和超级电容储能系统互为备用。采用DEWETRON 3020精度数据测试仪测试功率调节精度及动态响应时间,检测多元负荷主动响应单元控制可调负荷来调节电压的能力。

### 4.1 负荷调节响应时间测试

通过上位机向多元负荷主动响应单元下发磷酸铁锂储能系统的有功功率调节指令,功率指令分别为2.1 kW、1.1 kW、0.5 kW、0 kW,其功率的波形图如图6所示。

功率的调节值为2.1 kW、1.1 kW、0.5 kW、-0.05 kW,

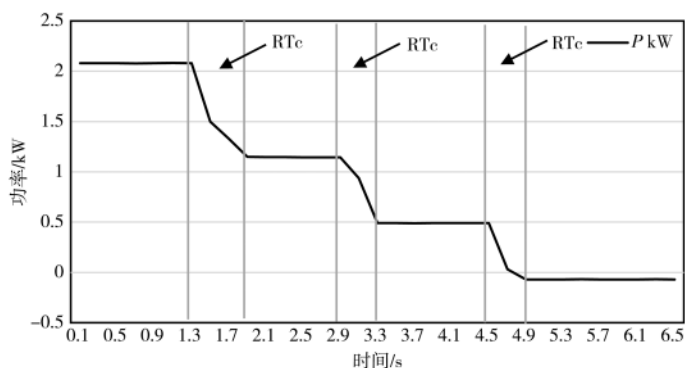


图6 远程控制负荷削减响应时间测试

远程控制响应时间分别是0.6 s、0.4 s和0.4 s。

设定可编程RLC负载投入使母线电压变化10%,观察主动响应单元是否控制可编程RLC负载有功变化,直至电压恢复到正常水平。

### 4.2 电压越上限试验

将多元负荷主动响应单元的线电压有效值的额定值设置为310 V,测试线电压超出额定值10%时主动响应单元通过调节负荷有功的电压恢复能力,AB、BC、CA线电压有效值和负荷有功功率的波形图如图7所示。主动响应单元在线电压有效值抬升超过额定值10%,即达到350 V时,开始调节负荷有功功率,通过抬升负荷有功功率消耗,将系统电压调节恢复到额定值。

### 4.3 电压越下限试验

将多元负荷主动响应单元的线电压有效值的额定值设置为350 V,测试线电压降低超出额定值10%时主动响应单元通过调节负荷有功的调节能力,AB、BC、CA线电压有效值和负荷有功无功功率的波形图如图8所示。其中负荷的有功功率由可编程RLC负载提供,试验中主要调节储能的无功输出。主动响应单元在线电压有效值降低超过额定值10%,即达到310 V时,开始调节储能无功功率,通过储能提供容性无功功率,将系统电压调节恢复到额定值。

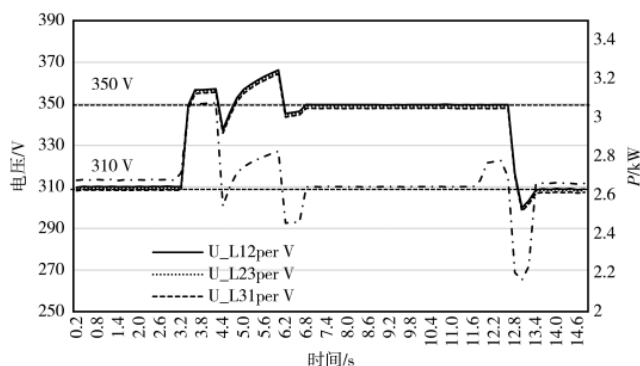


图7 电压越上限调节负荷有功

### 4.4 试验结论

多元负荷主动响应单元可分别进行远程和本地控制负荷功率,本地控制时间和远程控制时间满足标准要求;具备电压调节能力,在母线电压变化时,能够控制负荷有功和无功变化,使电压恢复到正常水平。

## 5 结论

本文针对能源互联网发展背景,研究能源互联网中

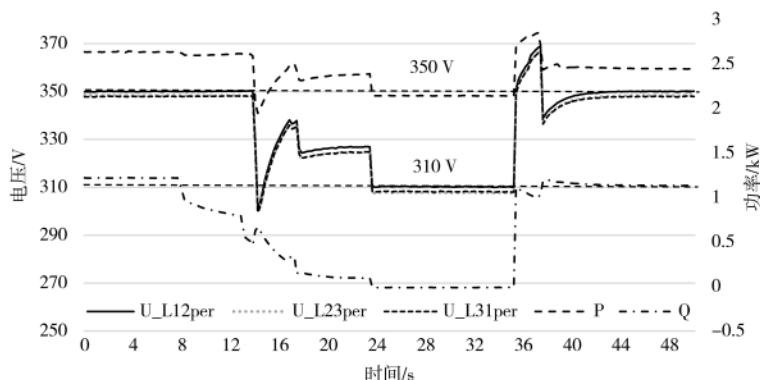


图8 电压越下限调节负荷无功

适应需求侧资源接入的新型系统控制技术,研究了低压可调负荷参与电网调频调节的机理和包含可调负荷的电力系统频率响应及电压调节模型,设计了用户侧负荷控制边缘计算单元并进行了性能试验,在此基础上研究了需求侧资源参与能源互联网控制的边云协同技术,可以有效降低对异质多元可调负荷实施统一管控的理论带宽需求和时延<sup>[21]</sup>,实现快速响应,满足能源互联网对频率电压进行分层分区的控制目标。

由于可调负荷可能存在于不同级别的台区中,也可能存在于同一台区中,又由于季节对居民用户参与响应的负荷对象有较大影响,并且用户的响应行为存在一定的不确定性,难以配合调度系统实现精准控制。因此,如何在边缘计算单元中结合负荷预测 AI 算法<sup>[21]</sup>,明确快速响应负荷调节潜力的可信容量,是下一步需要重点考虑的问题。

#### 参考文献

- [1] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等.能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J].电网技术,2016,40(1): 114-124.
- [2] 包宇庆.需求响应参与电力系统调频机理及控制研究[D].南京:东南大学,2015.
- [3] 王蓓蓓,刘小聪,李扬.面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J].中国电机工程学报,2013(22):35-44.
- [4] 滕贤亮,高宗和,朱斌,等.智能电网调度控制系统 AGC 需求分析及关键技术[J].电力系统自动化,2015,39(1): 81-87.
- [5] 周磊.空调负荷的动态需求响应理论及其应用研究[D].南京:东南大学,2017.
- [6] 潘明明,田世明,于建成.基于可控负荷的主动配电网电压优化调节方法[J].供用电,2019,36(5):48-52,92.
- [7] 周滢露,颜伟,王官洁.基于负荷预测的变电站无功控制[J].重庆大学学报,2003,26(9):89-92.
- [8] 刘萌,褚晓东,张文,等.负荷分布式控制的云计算平台构架设计[J].电网技术,2012,36(8):140-144.
- [9] KARTHIKEYAN N, PILLAI J, BAK-JENSEN B, et al.

Predictive control of flexible resources for demand response in active distribution network[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2957-2969.

- [10] 曾鸣,舒彤,史慧,等.兼顾分布式发电商利益的有源配电网规划[J].电网技术,2015,39(5): 1379-1383.
- [11] POURMOUSAVI S A, NEHRIR M H. Introducing dynamic demand response in the LFC model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1562-1572.
- [12] KIM Y J, NORFORD L K, KIRTLEY J L. Modeling and analysis of a variable speed heat pump for frequency regulation through direct load control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(1): 397-408.
- [13] 高赐威,李倩玉,李扬.基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(10): 1546-1555.
- [14] 刘东,陈云辉,黄玉辉,等.主动配电网的分层能量管理与协调控制[J].中国电机工程学报,2014,34(31): 5500-5506.
- [15] 曾鸣,杨雍琦,向红伟,等.计及需求侧响应的电力系统鲁棒优化规划模型[J].电力系统自动化,2016,40(17): 137-145.
- [16] 陆婷婷.空调负荷的储能建模和控制策略研究[D].南京:东南大学,2015.
- [17] 卫文婷,王丹,贾宏杰,等.一种基于模型预测的城市园区分层分布式温控负荷需求响应控制策略[J].中国电机工程学报,2016,36(8): 2049-2056.
- [18] 杨鑫,时晓厚,沈云,等.5G 工业互联网的边缘计算技术架构与应用[J].电子技术应用,2019,45(12): 25-28,33.
- [19] 王腾飞,张瑞权,李建宏,等.基于边缘计算的计算即服务模式[J].电子技术应用,2019,45(5): 74-77.
- [20] 辛耀中,郭建成,杨胜春,等.智能电网调度控制系统应用技术[M].北京:中国电力出版社,2016.
- [21] 韩青,高昆仑,赵婷,等.边云协同智能技术在电力领域的应用分析[J/OL].物联网学报.https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1491.TP.20210304.1519.008.html.

(收稿日期:2021-03-08)

#### 作者简介:

潘明明(1985-),女,博士,高级工程师,主要研究方向:需求响应、智能用电。

田世明(1965-),男,硕士,教授级高级工程师,主要研究方向:需求响应、智能用电。

刘宗杰(1983-),男,本科,高级工程师,主要研究方向:智能电网。



## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所