

# 网荷互动用户可中断负荷选择与恢复策略研究

仇晨光<sup>1</sup>, 程锦闽<sup>1</sup>, 李新家<sup>2</sup>, 熊政<sup>2</sup>, 李平<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**大规模源网荷友好互动系统通过对负荷资源的分类、分级、分区域管理,实现对用户可中断负荷的实时精准控制,避免对变电所或线路进行整体拉闸,将电网故障的社会影响降低到最低,提升大电网故障防御能力。文中提出了在电网不同运行状态和需求场景下,参与网荷互动的用户及其可中断负荷的选择、参与策略和恢复原则,从而起到一方面实现电网频率紧急控制中的负荷快速切除与恢复;另一方面,确保在紧急控制过程中重要负荷不受影响,保障电网在紧急状态下的安全运行。

**关键词:**网荷互动;可中断负荷;电网频率

**中图分类号:**TM732

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2018)04-0033-05

## 0 引言

为全面落实国家全球能源互联网发展战略,全力支持全球能源互联网落地江苏,国网江苏省电力有限公司自主创新,建设大受端省级泛在智能电网,其核心内容就是大规模源网荷互动体系的设计和系统建设。

大规模源网荷友好互动系统通过快速精准控制客户的可中断负荷,将大电网的事故应急处理时间从原先的分钟级提升至毫秒级,可显著增强大电网严重故障情况下的弹性承受能力和弹性恢复能力,大幅提升电网消纳可再生能源和充电负荷的弹性互动能力。这种可中断负荷是国网江苏省电力有限公司与用电客户协商,由客户自主选择后确定的一部分非核心、参与互动的用电负荷,如启停方便的生产线和空调用电、部分照明用电等。这部分负荷被切除后,客户关键的生产和安全保障用电不受任何影响,可最大程度地保障企业产能和电网设备安全。

本文着重讨论大规模源网荷友好互动系统中,在电网不同运行状态和需求场景下,如何选择大型工业企业内各类生产与辅助负荷分路荷,参与负荷进行互动,响应电网紧急状态。

## 1 网荷互动执行介绍

### 1.1 大电网安全稳定控制的各个阶段

大规模源网荷互动体系使用户负荷参与电网稳定控制的各个阶段,可避免直接拉限线路或变电站,加快恢复拉限线路供电,让电网回归到正常状

态中<sup>[1]</sup>。

(1) 电网三级主动防御过程,时限要求1 s以内。特高压直流故障时,稳控系统中心站接收到高压换流站的故障信号,立即根据预案分组通过快速通道向预定的用户侧网荷终端发出紧急切负荷指令,动作在1 s内完成。系统的毫秒级设计改变了以往负荷管理系统不能直接参与电网三级主动防御过程的现象。

(2) 电网频率稳定性控制,时限要求10~20 s。特高压直流故障引发大电网扰动,在电网安全稳定的三级自动切负荷等动作后,调度自动化系统已经完成了故障判别和系统参数测量,但系统频率还未恢复正常,调度机构发布事故限电指令。此时负荷控制指令通过省调D5000系统发送到负荷快速响应子系统实施一键式群控对用户负荷快速切除,可替代直接拉限线路。

(3) 电网潮流控制,时限要求1~10 min。特高压直流故障第一阶段结束后,可能造成相关输电通道潮流超过稳定限额,省调经计算分析后,确定特定地区或电网分区进行负荷控制。此时负荷控制指令通过省调D5000系统发送到负荷快速响应子系统实施快速用户负荷切除。对江苏电网,锦苏特高压直流双极闭锁时,近区500 kV线路潮流越限,需要在苏州4个分区进行负荷控制。

(4) 地区发用电重新平衡,时限要求10~30 min。特高压直流故障处理完成后,省级电网不能实现发用电平衡,区域联络线路负荷超计划。省调立即计算限电容量,按一定比例分配到各地区,此时负荷控制指令通过省调D5000系统发送到负荷快速响应子系统压限用户用电负荷。

(5) 恢复拉闸线路重新送电,时限要求 30~60 min。在地区发用平衡后,通过进一步压限用户负荷,逐步恢复被紧急拉闸线路,恢复旋转备用设备,让电网恢复到正常运行状态。

## 1.2 网荷互动执行过程

在智能电网环境下,用户负荷参与电网互动,可分为 3 类场景:(1) 应对电网异常时的紧急负荷响应;(2) 应对电网供电能力不足时的有序用电;(3) 调节电网峰谷差的需求响应。负荷响应系统的过程如图 1。

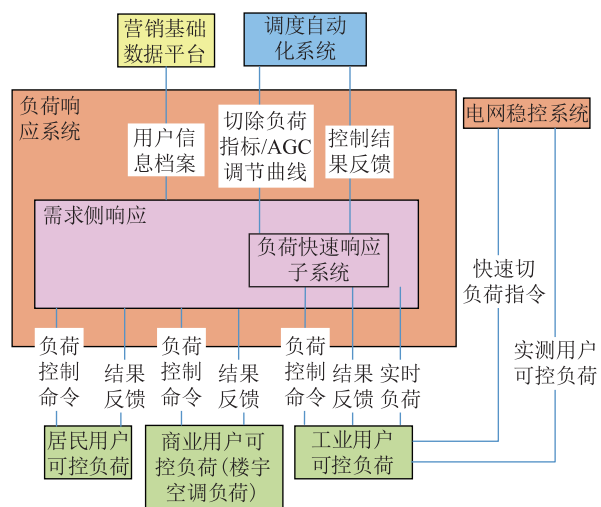


图 1 负荷响应系统架构

Fig.1 Diagram of load response system architecture

负荷响应系统可接收调度自动化系统下达的负荷调节指令,根据从营销基础数据平台获取的用户档案信息和用电行为,结合实时负荷数据,对指令进行快速分解,并通过用电信息采集(负控)系统和楼宇需求响应系统等其他控制系统,向各目的区域内、特定工业、商业、居民的可控负荷下发响应需求信号,完成负荷配合调度运行的全过程。

### 1.2.1 方案决策

快速负荷响应系统根据调度系统下达的不同指令,快速编制各种调节方案。

在快速故障处理阶段,针对调度下发的全网快速控频率、特定区域控潮流、分区比例分摊控联络线口子功率等指令,优先筛选相应地区内可切除容量大、具备迅速切除条件的用户,基于用户影响程度最小,制定一键式精准削峰方案,确定执行用户及切负荷容量要求。

在旋转备用补充及恢复阶段,选择负荷调节经济性好、运行特性稳定的用户,将不同调控容量、不同调控特性的用户负荷组成多个“调峰机组”,制定经济性调峰方案,确定执行用户组合和负荷调节要求。

### 1.2.2 方案执行

一键式精准削峰面向方案确定的用户,将切负荷指令快速下发给负控终端以及楼宇需求响应终端,对用户的快速响应型可中断负荷进行控制。典型手段包括非应急照明、非生产性电机、空调系统部分新风机组、可中断电加热锅炉、热水器等用电设备的快速控制。主要满足电网调度运行及时控频率、控潮流和控联络线电量的需求。

经济性灵活调峰面向方案组合中的用户,将负荷调节曲线下发给负控终端以及楼宇需求响应终端,对用户的可调节负荷进行跟踪调节,如图 2 所示。常用手段既可以采用切除工业用户非生产性负荷、关闭商业楼宇空调主机、水泵、新风系统、热水器等刚性控制方式,也可以采用调节空调回水温度、调节风量和全局温度等柔性控制方式。主要在满足电网旋转备用补偿及恢复的基础上,达到电网稳定的经济性要求。

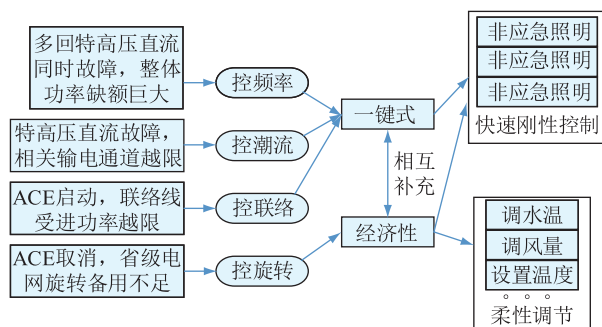


图 2 负荷快速响应自行方案执行图

Fig.2 Diagram of load the rapid response to the implementation of their own plans

### 1.2.3 实时反馈

负荷快速响应系统根据终端设备反馈的控制结果以及控制前后实时负荷对比,对调控的效果进行评估,将评估结果实时返回给调度自动化系统,以便调度自动化系统进行进一步的优化控制。

## 2 用户可中断负荷的分类与选择

可中断负荷是指在电网高峰时段或紧急状况下,用户负荷中可以中断的部分。电力公司与用户签订相关合同,在系统峰值时和紧急状态下,用户按照合同规定中断和削减负荷<sup>[2]</sup>。

从网荷互动场景分类,参与电网缺口调节和峰谷调节的可中断负荷,是有计划预案和提前预知的负荷中断,而参与电网应急响应时频率潮流控制的可中断负荷其响应时效性在分钟级以内,属于秒级可中断负荷<sup>[3]</sup>,对用户而言不可预测也无提前通知,也就是常年预备。在大电网事故情况下,为了

提升特高压应急处置速度同时减小影响面,需对用户秒级可中断负荷实现精确控制。

## 2.1 用户可中断负荷的分类

不同行业、不同类别、不同性质的电力用户用电设备、负荷特性、用电习惯均存在较大差别。参与网荷互动的用户,以及用户内部的各路分路负荷是否适宜参与,具体参与哪一个等级的负荷响应,根据日常用电管理的经验以及网荷互动对可中断负荷特性的要求,各用户负荷及设备特点<sup>[4-9]</sup>概括如下。

(1) 钢铁、水泥等高耗能企业。此类行业用电负荷大,生产性质一般为三班制连续作业,且不受时段、季节、气候影响。可中断负荷包括可快速停用用炉、废钢处理线、水泥磨机、生料磨机等高耗电用电设备负荷,可中断负荷快速调控能力较强。

(2) 化工等连续性生产企业。此类行业用电负荷较大,生产性质大多为三班制连续作业,且不受时段、季节、气候影响。在不危及安全生产的前提下可中断设备仅仅包括办公用电设备、物料泵等辅助生产设备,而主要的生产设备具有连续性和重要(高危)性,不适宜参与快速调控。

(3) 机械等非连续性生产企业。此类行业用户大多属于三级负荷性质的普通工业用户,多数企业采用白班制、非连续性生产,不受时段、季节、气候影响。可中断负荷包括办公照明、电脑、空调等非生产性负荷及电锯、切割机、机床等生产设备,相应设备均可快速切除。

(4) 宾馆、商场、写字楼等电力用户。此类行业用户负荷运行主要集中在早峰、腰峰、晚峰阶段,运行时间较为固定,涉及用电设备多,人员密集。因此对于可靠供电的依赖性较大。该行业用户负荷基本为重要(高危)用电负荷,可中断负荷基本为空调负荷<sup>[10-17]</sup>。

## 2.2 用户可应急中断分路负荷接入原则

各地区用户负荷主要分为以下几类:一是中断后会引发人身安全事故的安全保障负荷;二是中断后可能造成一定损失的生产负荷;三是中断后影响较低的辅助负荷和非生产负荷。在用户现场改造时,可按照以下原则接入用户分路负荷。

(1) 用户负荷回路接入选择顺序按总进线、中断后影响较低的辅助负荷和非生产负荷、中断后可能造成一定损失的生产负荷逐级选择,终端屏柜内端子接线按各路可控负荷重要性逐级提高,最后接总进的顺序接入;

(2) 终端接线完成后,通过参数配置设置跳闸

轮次与负荷回路对应的关系,每个轮次可任意对应多个负荷开关,建议同一轮次不可配置不同影响程度的负荷开关。按照国网企业标准“376.1.通信协议”一个终端的功控轮次上最多8轮。原则上1—2轮对应中断后影响较低的辅助负荷和非生产负荷,3—6轮对应中断后可能造成一定损失的生产负荷,7—8轮对应用户主、备总开关;

(3) 用户1—6轮开关接入的可监控负荷不得低于用户正常用电负荷的50%,不得高于用户正常生产负荷的70%。

## 3 可中断负荷控制与恢复策略

### 3.1 负荷控制策略

为有效降低事故影响面,在负荷调控时优先考虑影响用户数的多少,以影响用户最少为优先目标,主要对用户1—6路负荷进行控制,用户的安全保障用电予以保留。主要考虑以下几条控制策略<sup>[4]</sup>:

(1) 高耗能优先策略。各地区参与网荷互动改造的用户中,高耗能用户优先参与特高压应急处置,因此高耗能用户群组单列,在任何时段的特高压事故均按需优先投入控制。

(2) 分时段选择策略。根据用户时段负荷特性,将除高耗能用户外用户分为A、B、C、D、E 5种类型,其中A、B、C、D 4种类型分别为早峰型、腰峰型、晚峰型及倒挂型,即分别在各自类型所属时段控制能力较其他时段更强,在其所属时段优先控制。E类型无明显特征,仅参加循环补备控制。混合类型例如AB型用户,在A时段视为A型,B时段视为B型用户。

(3) 可中断容量优先策略。高耗能及5种类型用户中,在各自所属类型范围内按可中断容量进行优先级排序,可中断负荷动态计算,中断能力强用户优先控制,各分组用户执行时按需投入控制。

(4) 各时段循环补备策略。在各时段发生的特高压应急处置事故,如果本时段对应类型用户处置能力不足的情况下,考虑公平性,需按照图3所示顺序进行循环补备。在4个类型补备后仍无法满足要求的情况,补备E类型用户。本地区网荷互动用户全部参与仍无法满足缺口要求的情况下,启动调度群控拉路序位。

### 3.2 执行流程

用户参与特高压应急处置执行过程中,首先由调度部门确认地区缺口指标并分解下达至负荷快速响应子系统,再分解地区指标至用户并执行控

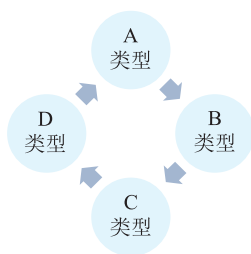


图3 各类型用户循环补备顺序

Fig.3 The order of each type of user cycle

制,高耗能用户按需优先投入控制,如图4所示。若满足地区缺口需求,则进行动态监测并将控制效果反馈至调度部门;如果不能满足缺口需求,则采取分时段选择策略,各时段用户按需投入,这时判断是否满足缺口,若满足则将动态监测控制效果反馈至调度部门;若不满足,则采取各时段循环补备策略,此时确认缺口是否已满足,如果满足,则控制结束;若所采取策略不能满足地区缺口,则通知调度部门启动分组群控拉路。

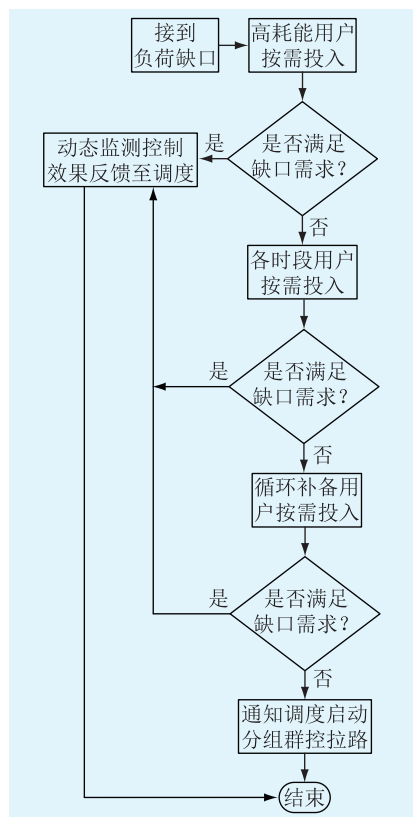


图4 用户参与特高压应急处置执行过程

Fig.4 The process of user participating extra-high voltage emergency disposal

### 3.3 恢复原则

在特高压事故执行秒级控制后,在调度部门通知营销可以释放部分容量后,各地区营销按以下原则进行中断用户恢复。

(1) 较小容量优先恢复原则。在已实施可中断负荷秒级控制的用户中,按照实际中断负荷大小进行排序。根据调度部门恢复供电负荷执行计划,中断用户按中断负荷由小到大的次序进行恢复。一方面尽可能减小事故影响面,另一方面为后续执行有序用电进一步压限大用户留有余地。

(2) 实时互动原则。在事故恢复过程中,在当期恢复用户确定后,由营销负控通过手机APP、手机短信、终端短信及声光告警方式向用户下发允许合闸指令。用户接到指令后,在确保设备及人身安全的前提下,自行恢复被中断负荷。

(3) 营销补备负荷置换原则。在特高压故障持续时间较长,需要通过有序用电进行较长时间控制负荷的情况下,由省调向省营销下达负荷控制需求,营销部通过各地市公司启动空调高级调控、投入有序用电方案分组等措施实施负荷控制。负荷控制到位后,省营销将已实施秒级控制,但未纳入本次有序用电执行序位用户下发允许合闸通知,对其已中断回路恢复供电,实现有序用电控制负荷与秒级中断控制负荷的负荷置换。

## 4 结语

本文以研究用户负荷分类为切入点,提出用户可应急中断分路负荷接入原则、可中断负荷控制与恢复策略,实现了对用户侧负荷的精准化、实时化的精益管理,保证了用户用电质量和电网有序恢复。未来将针对用户的不同设备负荷特性,研究其具体的恢复方式(如立即恢复、约时恢复、提醒恢复等)。

本文得到国网江苏省电力有限科技公司项目“特高压直流故障处置后期负荷恢复策略研究”资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 罗建裕,李海峰,江叶峰,等.基于稳控技术的源网荷友好互动精准负荷控制系统[J].电力工程技术,2017,36(1):25-29.  
LUO Jianyu, LI Haifeng, JIANG Yefeng, et al. Source network load friendly interactive and precise load control system based on stability control technology[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(1): 25-29.
- [2] 张涛,宋家骅,程晓磊,等.可中断负荷研究综述[J].东北电力技术,2007(6):46-48.  
ZHANG Tao, SONG Jiahua, CHENG Xiaolei, et al. Summary of intermittent load research[J]. Northeast Electric Power Technology, 2007(6): 46-48.
- [3] 都亮,刘俊勇,田立峰,等.电力市场环境下的秒级可中断负荷研究[J].中国电机工程学报,2008,28(6):90-95.



- DU Liang, LIU Junyong, TIAN Lifeng, et al. Reserach on the second-class intermittent load in the electrical market[J]. Proceedings of the Case, 2008, 28(6): 90-95.
- [4] 朱亮, 黄怡, 江全元, 等. 多智能体开发系统 SWARM 在电力系统中的应用[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 550-554.
- ZHU Liang, HUANG Yi, JIANG Quanyuan, et al. Principle and applications of multi-agent developing system swarm in power system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 550-554.
- [5] 朱鑫要, 汪惟源, 汪成根, 等. 江苏特高压交直流输电交互影响研究[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(2): 39-42.
- ZHU Xinyao, WANG Weiyuan, WANG Chenggen, et al. Analysis of interaction between UHVAC and UHVDC for Jiangsu power grid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(2): 39-42.
- [6] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 华东大受端电网直流接入能力评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 147-152.
- YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid "source-grid-load" interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 147-152.
- [7] 朱建全, 段翩, 刘明波, 等. 计及风险与源-网-荷双层协调的电力实时平衡调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3239-3247.
- ZHU Jianquan, DUAN Pian, LIU Mingbo, et al. Electric real-time balance dispatch via bi-level coordination of source-grid-load of power system with risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3239-3247.
- [8] 刘娅琳, 杜红卫, 赵浚婧, 等. 基于源网荷互动模式的智能配电网调度业务优化[J]. 华东电力, 2014, 42(7): 1290-1293.
- LIU Yalin, DU Hongwei, ZHAO Junjing, et al. Smart distribution grid scheduling business optimization based on source network load interaction mode[J]. East China Electric Power, 2014, 42(7): 1290-1293.
- [9] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 1-6, 12.
- YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid "source-grid-load" interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6, 12.
- [10] 王锡凡, 肖云鹏, 王秀丽, 等. 新形势下电力系统供需互动问题研究及分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5018-5028.
- WANG Xifan, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli, et al. Study and analysis on supply-demand interaction of power systems under new circumstances[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5018-5028.
- [11] 李轶鹏. 智能电网中的需求侧响应机制[J]. 江西电力, 2012, 36(6): 55-58.
- LI Yipeng. Mechanism of demand side response in smart grid[J]. Jiangxi Electric Power, 2012, 36(6): 55-58.
- [12] 何彦英, 曾鸣. 考虑需求侧响应的配电网运行效应评估研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(11): 1-7, 14.
- HE Yanying, ZENG Ming. Effect evaluation of demand response on distribution network operation[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(11): 1-7, 14.
- [13] 崔传建, 李博, 李思维, 等. 面向电力用户的一种通用互动服务平台设计[J]. 电力系统通信, 2012, 33(9): 30-33.
- CUI Chuanjian, LI Bo, LI Siwei, et al. Design of general interactive service platform for power users[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(9): 30-33.
- [14] 窦健, 董俐君, 朱新山, 等. 结构化用电客户互动需求信息的比对库设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(6): 80-85.
- DOU Jian, DONG Lijun, ZHUXinshan, et al. Design of the comparative database for structured interactive demand information of electricity customers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(6): 80-85.
- [15] 王军, 武文广, 李逸驰, 等. 支撑互动用电的用电信息采集系统基本构成与关键技术[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 1-5.
- WANG Jun, WUWenguang, LI Yichi, et al. Basic structure and key technology of power utilization information acquisition system for securitying interactive service[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 1-5.
- [16] 凌卫家, 孙维真, 叶琳, 等. 浙江交直流混联电网特性分析及运行控制[J]. 浙江电力, 2016, 35(9): 8-14.
- LING Weijia, SUN Weizhen, YE Ling, et al. Characteristics analysis and operation control of Zhejiang hybrid AC/DC power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(9): 8-14.
- [17] 方超, 陈楚, 熊政, 等. 基于用户可中断负荷的实时负荷控制决策技术应用[J]. 电力工程技术, 2017, 36(4): 20-23.
- FANG Chao, CHEN Chu, XIONG Zheng, et al. Application of real-time load control decion based on user intermittent load[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2017, 36(4): 20-23.

## 作者简介:



仇晨光

仇晨光(1977—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统运行和控制相关工作(E-mail: cgqiu@hotmail.com);

程锦闽(1984—),男,硕士,工程师,从事电力系统运行和控制相关工作(E-mail: cjm-03@163.com);

李新家(1967—),男,本科,研究员级高级工程师,从事信息系统自动化与有序用电相关工作。

## A Clustering Algorithm Based on CUDA Technology for Massive Electric Power Load Curves

WU Shuang<sup>1</sup>, JI Cong<sup>2</sup>, SUN Guoqiang<sup>3</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Nanjing 210008, China;

2. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China ; 3. Research Center for  
Renewable Energy Generation Engineering, Ministry of Education (Hohai University), Nanjing 210098, China)

**Abstract:** With the explosive growth of user load data in power consumption information collection and load control systems, traditional computing frameworks and methods are faced with tremendous computational pressure when dealing with massive user load clustering and carrying out load characteristic analysis. In this paper, with a view to increasing accuracy and computational power of graphic process unit (GPU), the fast parallel  $K$ -means clustering algorithm for load curves is proposed based on Nvidia compute uniform device architecture (CUDA). This algorithm uses parallel acceleration strategies, such as parallelization of distance computing and curves counting, and rational allocation of thread blocks, which greatly improve the clustering speed of user load curves. A number of test examples show that the proposed clustering algorithm in this paper has a high acceleration ratio and strong adaptability, which is a good way to solve the problem of massive load curve clustering.

**Key words:** GPU; CUDA; parallel computing; mass data;  $K$ -means clustering; power load curve

(编辑 钱悦)

(上接第 37 页)

## Intermittent Load Selection and Recovery Strategy for Network Load Interactive User

QIU Chenguang<sup>1</sup>, CHENG Jinmin<sup>1</sup>, LI Xinjia<sup>2</sup>, XIONG Zhen<sup>2</sup>, LI Ping<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** It proposes the participating network load interaction users and their interruptible load selection, participation strategy and recovery principle in different running state and demand scene of power grid. So as to achieve fast load removal and recovery in power grid frequency emergency control, on the other hand, ensure that the important load in emergency control process is not affected, and ensure the safe operation of power grid under emergency condition.

**Key words:** network load interaction; interruptible load power ; grid frequency

(编辑 钱悦)