

含智能外围的智能电网：能源互联网的一个架构

Felix F. Wu^{1,2*}, Pravin P. Varaiya¹, Ron S. Y. Hui²

摘要：未来的智能电网应能够实现能源互联网的愿景：数百万用户利用可再生能源，在家庭、办公室和工厂生产所需的能源，并实现共享；广泛使用电动车辆和本地储能系统；利用互联网技术将当前电网升级为实现能源共享的互联网络。为实现这个愿景，本文提出了含智能外围的智能电网的架构和概念，或称为智能 GRIP。GRIP 架构的构建模块被称为集群，配置能量管理系统 (EMS) 的输电网是一个在电网核心的集群，外围的配电网，微电网和智能楼宇及住宅均为 (外围的) 集群。这些集群全部采用分层结构。GRIP 的分层架构可让电网实现从当前电网功能到未来即插即用型电网的无缝过渡。所有的集群都包括三个基本功能，即调度、消除波动和故障缓解。为实现上述功能，本文提出了风险约束的调度方法；开发了一种名为“电力弹簧”的新型装置，用于消除外围集群的电力波动；另外还讨论了故障的缓解措施。

关键词：智能电网，未来电网，能源互联网，能量管理系统，可再生能源接入，电力系统运行，电力系统控制，配电自动化系统，需求侧管理

1 引言

中国在过去30年里成功实现了从一个落后国家到世界第二大经济体的转型，使数亿人摆脱了贫困，为本国

人民和世界其他国家的人民带来了繁荣。中国的崛起为其他国家树立了成功的榜样。21世纪全球将迎来从亚洲和南美洲到非洲的全面崛起。中国的发展道路在很大程度上遵循了西方的发展模式：经济增长由化石燃料能源驱动，这样的发展伴随着资源的消耗和环境的恶化。环境污染带来的破坏已在中国逐渐凸显，表现在对人民健康和经济发展造成的长期的毁灭性的破坏。中国是当前全球温室气体 (主要为二氧化碳) 排放的第一大国。温室气体排放导致了人为的全球气候变化，给人类文明的延续带来威胁。印度可能将在未来的20年内取代中国成为温室气体的最大排放国。传统的经济发展道路是一种不可持续的发展方式，应予以摒弃。预计在即将举行的2015年巴黎气候峰会上，世界各国领导人将宣布各国的排放配额，以减少温室气体排放。时间非常紧迫。这可能是人类将全球气温上升幅度控制在2°C (高于工业化前的水平) 的最后机会。科学界一致认为，若全球气温上升幅度超过这个值，会对地球造成不可逆转的灾难性破坏。联合国已决定制定2015年后的可持续发展目标，以期在不破坏环境 (零贫困/零碳排放) 的前提下实现全球经济的发展。

能源转化就是把各种资源转换为多种所需的形式，从而推动经济的发展。电网是能源转化链的核心。经济的可持续发展将严重依赖于一个可行的未来电网的支撑。因

¹Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, CA 94720, USA; ²Department of Electrical and Electronic Engineering,

The University of Hong Kong, Hong Kong, China

* Correspondence author. E-mail: ffwu@eee.hku.hk

Received 2 November 2015; received in revised form 23 November 2015; accepted 26 November 2015

© The Author(s) 2015. Published by Engineering Sciences Press. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

英文原文：Engineering 2015, 1(4): 436–446

引用本文：Felix F. Wu, Pravin P. Varaiya, Ron S. Y. Hui. Smart Grids with Intelligent Periphery: An Architecture for the Energy Internet. *Engineering*, DOI 10.15302/J-ENG-2015111

此,未来电网的变革将有助于实现以下功能:①能源去碳化;②提高转换过程和最终使用的效率;③清洁运输。

• 能源去碳化:未来能源的基础必须从化石燃料转变为可再生能源,如风能、太阳能、核能(可能),以减少对大气的碳排放。核能发电是一项成熟且争议不断的技术,它对电网的整合并不会改变电网的传统运行方式。未来电网的运行方式必须能大力促进具有间歇性和不确定性的可再生能源的开发和利用。

• 提高效率:电力有助于解开目前能源消耗与国内生产总值(GDP)和人口增长之间的同比率俱增的关系,有利于降低碳排放强度(单位GDP碳排放量)。通过利用先进的计算机、通信和互联网技术,未来智能电网将能够全面显著提升发电、输电和用电的效率。终端智能能量管理有助于提高能源利用率。

• 清洁运输:在美国等先进国家,交通运输占碳排放总量的四分之一,仅次于电力。电动车辆及去碳化的未来电网的广泛应用,将有助于实现清洁且可持续的交通运输模式。

本文的第2节主要讨论了未来电网或能源互联网所面临的挑战。为牢牢“把握住(grip)”未来的发展,我们提议建设一个带有智能外围的智能电网(智能GRIP)。第3节将提出智能GRIP的分层架构,以实现电网从现在到未来的无缝过渡。GRIP的构建模块被称为集群。所有集群,

无论规模大小,其基本功能都包括调度、消除波动以及故障缓解。本文第4节提出了一种风险约束的调度方法;第5节提出了一种名为电力弹簧的新型装置,用于消除未来电网中的功率和电压的波动;第6节主要研究故障缓解的措施;第7节总结全文。

2 未来电网:能源互联网

传统电网经过了20世纪中的不断发展。在这个时代,能源主要来源于大型化石燃料发电厂、大型水电站和核电站。此类能源的技术具有明显的规模经济性。以下是对传统电网的主要特征进行的简要总结,以便与即将到来的电网转型进行对比。

(1) 供应商,即电力公司,有责任去满足用户的随机性的负荷需求。换句话说,电力负荷是被动且不可控的。

(2) 在机械设备时代,对经济性和可靠性的均衡的考虑导致高压输电网和低压配电网在结构和运营方面出现差异。

(3) 由于缺乏经济上可行的蓄能技术(除地理状况允许的抽水蓄能外),系统运营管理必须担负起实现瞬时功率平衡的责任,并且围绕这个核心目标建立起一整套规

划和运行的功能。

(4) 20世纪70年代,能量管理系统(EMS)的出现将智能技术带入了输电网[1]。通过采用集中式架构,一个EMS的实时监测和控制能覆盖数百个发电厂和输变电站。EMS延伸了当时计算机和通信技术能力的极限。

(5) 电网的不确定性体现在负荷波动和设备故障两个方面。上述两个问题都可通过传统方式,利用确定的方法得到充分解决(即通过设置备用容量和进行N-1安全校核)。

近年来,风能和太阳能技术的效率和可靠性取得了长足的进步,使得可再生能源相对于传统电力能源具有更高的竞争力[2]。兆瓦级陆上风力发电机组已经成为一项成熟和标准的技术,在越来越多的地区,不算政府补贴,其发电厂总成本也比传统发电厂的低。海上风力发电技术也日趋成熟。太阳能光伏(PV)技术正处于快速发展期[3]。在材料科学研究方面取得的创新成果促进了新一代PV电池的诞生,如薄膜电池、多接面电池、有机电池和量子点电池,此类成果可保证未来能够以更低的成本和更高的效率转化更多的能源。嵌入式电力电子元件使得PV组件的发电效率更加优化,进一步改善了整体电力的输出,提高了系统效率。在过去六年里,PV组件的价格已降低到以前价格的五分之一,光伏系统的价格已降到以前价格的三分之一。

未来电动汽车(EV)和插电式混合动力电动汽车(PHEV)能成功推广的关键因素是储能技术。考虑到可再生能源的间歇性和不确定性,并网储能技术也能够为电网实现瞬时供求平衡提供不可或缺的灵活性。当前技术的快速创新已经极大地改变了多项传统储能技术的性能,同时也引进了一系列新型的储能技术。电网级可充电电池(包括锂离子电池、液流电池以及其他类型的电池)正在稳步地突破传统电池小容量和高成本的缺陷。飞轮、压缩空气、热力(熔融盐)以及储氢系统方面的研究和发展也取得了极大的进展。除物理蓄能设备外,电网终端用户在储能开发方面也存在巨大的潜力。例如,热水器和空调的能源需求管理系统就是通过循环利用存储在水箱和建筑物中的热能,实现热能和电能的相互转换的。智能汽车充电和放电(或车辆-电网,V2G)技术则利用了存储在EV/PHEV电池内的电化学能,实现电网的储能需求。在未来电网中,若需对此类“虚拟储能系统”进行有效管理,可以双向提供大量具有成本效益的功率。

自2010年以来,全球范围内新增的太阳能光伏电池超过了前四十年的总和。由风能、水能和太阳能构成的世界可再生能源占据了世界新能源投资的主要部分。目前全世界范围内的风能和太阳能发电量分别约为400 GW

和200 GW。国际能源署 (IEA) 表示, 到2050年, 风能和太阳能在全球范围内的供电量有望分别达到30%和15%~20%[4]。IEA的这一发展蓝图呼吁各国政府鼓励到2050年时(此时电网主要通过可再生能源供电), 提升EV和PHEV的使用数量到全球车辆总数的一半。全世界必须全面释放创新能力。在能源技术不断创新的同时, 制度方面也需要不断创新, 以利于新兴技术的有效开发和利用。在电力系统的经济和政策层面还需要取得进一步的发展, 包括设计合理的市场机制、实现有效的定价和制定合适的监管框架。市场、定价和政府监管取决于电网的运营方式。在智能电网运营方面的创新是朝着确保未来智能电网能够以最高效率和利用率接收和分配电力(从可再生能源和V2G到终端用户)所迈出的第一步。信息和互联网技术的进步已经准备好为必要的电网创新作贡献。

未来电网的组成结构将完全不同于传统电网。光伏和蓄能电池的技术并不具有规模经济性。分散式光伏发电、住宅蓄能以及电动汽车技术的发展, 共同促进了自发电和用电的形成, 这些状况将在未来的10~20年内从根本上改变电网的结构。Rifkin[5]表示, 人类社会必将进入一个崭新的时代, 在这个时代里, 可再生能源和互联网技术相互融合形成一套强大的新型基础设施, Rifkin将其称为第三次工业革命。在这一愿景下, 数亿人能够利用可再生能源在家里、办公室和工厂内自行生产所需的绿色能源, 并通过“能源互联网”与其他人进行共享(正如我们现在在线生成和共享信息)。同时充分利用各种储能技术, 将能源局部存储在每栋大楼和整个基础设施内。此外, 交通运输车辆将全部改为电动汽车和燃料电池汽车。为实现这一愿景, 必须利用互联网技术使电网能源互联共享。当数以百万计的普通民众生产和共享能源时, 传统的金字塔形的社会结构将从上到下彻底地被从边到边的横向结构所取代。横向社会结构将信息共享的范围扩大至能源共享, 乃至利益和责任共享, 从而引领世界进入一个大协作的时代; 并且在新世纪里, 对如何协调人类的生活(经济、政治、社会)产生深刻的影响。

“能源互联网”的理念与我们未来电网的概念相契合。未来电网将具有与目前电网完全不同的特点。从电网运行的角度看, 存在如下四大本质区别:

(1) 电力负荷将变为可控: 终端用能量管理系统(包括住宅热水器、空调设备和智能家电的需求侧响应)和建筑楼宇能量管理系统共同实现电力负荷的可控化。电池和其他蓄能系统以及V2G系统进一步推动了主动可控负荷的实现。

(2) 发电和负荷需求均为随机: 风能和太阳能发电的输出量取决于风速和太阳辐射, 具有间歇性和高度可变的特点。终端能源管理、蓄能管理和V2G技术的存在将进一步扩大负荷需求的变化。

(3) 海量能源和智能设施将分布在智能电网中: 分散式能源(DER), 包括可再生能源和存储在住宅、楼宇和工厂内的能源的总量将非常庞大。智能电表和先进计量基础设施(AMI)将提高电网的智能。在“物联网”时代, 电网的一系列新元件(如智能电器、用户能量管理、EV和V2G)都将具备智能和通信的能力。

(4) 配电网微电网以及未来的智能建筑和智能住宅将类似于现在的输电网: DER将遍布配电网, 电力将不再从变电站向下单向流动, 而将按照DER决定的方向流动。在双向电力潮流下, 应采用与目前输电系统相同的方式来操作和管理配电网。这种方式同样适用于智能住宅和智能建筑, 这些建筑将拥有自己的现场发电和控制设施。

3 GRIP 的架构

伴随着电网内不断新增的各类元件(如分布式的可再生能源以及需求侧管理系统等), 现有的运营模式面临着日益凸显的挑战。目前运营商正在为分布式可再生能源发电的难以计量和需求侧响应的难以预测而忧虑不已。这种趋势才刚刚开始。传统的集中控制模式可处理数百甚至数千个监测点和控制点, 但却处理不了能源互联网的住宅、楼宇和工厂的数以百万计的监测点和控制点。根据现有的运营模式, 智能电网内新老元件之间的管理、信息和技术关联只能用“新兴结构性混乱”来形容[6]。中国有句成语叫“削足适履”, 恰当地形容了目前用于解决问题的方法。电网正在经历前所未有的变革, 只有彻底改变运营模式才能实现根本性的转变。

针对这些根本性的变化, 我们提出了一个带智能外围的智能电网的概念, 也称为智能GRIP, 以适应未来的电网需求[7]。GRIP的建立依赖于下列三个要素。

(1) 增强外围的能力: 发电和负荷需求中的不确定性是未来电网的运行面临的巨大挑战。大量分散型可再生能源的产生和用户终端EMS将极大增加电网外围设施(即配电网、微电网、工厂、大楼和住宅)供需的不确定性。我们认为, 解决这个问题的办法在于将不确定性管理设施布置在其源头附近, 也就是外围。在这个相互协作的时代, 未来电网外围的能力必须要增强, 以分担电网的运行负担。

(2) 提取共性: 未来的配电系统以及楼宇、工厂和住

宅都将类似于目前的输电系统 (或微电网), 具有本地发电和双向电力潮流的特点。核心电网 (配有实时EMS的输电电网) 和外围电网 (配电网、微电网、楼宇、工厂和住宅) 之间的差异正在消失。寻求核心电网和外围电网之间的共性是建立统一的未来运营模式的关键。

(3) 分层架构: 电网的转变并非一朝一夕就可实现。当前集中式核心电网将会快速发展, 并将持续演变为未来具有完善功能的智能外围电网。在对未来电网或能源互联网进行构架设计时, 必须考虑传统电网及其未来发展。传统电力系统还将继续存在一段时间。根据采用新技术的个别接受程度, 不同电网将以不同的速度升级。因此有必要建立起一种适用于无缝过渡和即插即用互操作性的分层架构[8]。

3.1 集群

正如第2节所指出的, 未来的智能住宅将会配备具有能够控制屋顶光伏发电、就地蓄电池储能、需求侧和V2G管理系统以及智能家电的智能电表, 其功能与EMS运行电网的功能类似。同样地, 外围的配电网和微电网都将配有智能和可控的发电设施和负荷。它们都是GRIP架构的基本单元, 我们称其为“集群”。每个集群中都有①发电和/或负荷, 以及②控制和通信的智能设施。集群是对电力系统运行基本要素的一种抽象概括; 本文第3.3节将对此概念进行阐述。外围的智能住宅、楼宇、

工厂、微电网以及配电网都是集群。核心输电网的任何一个“控制区”也是一个集群。集群相互连接, 并形成分层结构 (见第3.2节)。核心输电网集群内包含多个配电网集群, 每个配电网集群又由微电网、工厂和住宅集群组成。一个微电网集群可包含多个智能住宅集群。一个集群的内部功能被隐藏在定义良好的接口背后, 本文第3.3节将阐述这一概念。

第三次工业革命使得能源互联网内可再生能源具有了分布式的特点, 因此, 必须采取协作模式而非集中式或分级的指挥和控制机制对能源进行控制。这种协同运行的模式有利于效益的共享和分配。各集群将共同努力去确保可再生能源的最充分和最有效的利用。通力合作, 追求共同利益是实现经济可持续发展的最佳途径。通过调度和保持个体净功率平衡, 各集群必须按要求分担维持系统瞬时功率平衡的运行任务 (见第3.3节)。

3.2 架构

图1展示了GRIP架构的基本结构。集群采用分层结构布置。核心输电网集群包含多个变电站、微电网以及工厂。这些变电站、微电网以及工厂自身也是集群。由

一个变电站和配套配电网组成的集群位于一个大型的核心理群内, 同时包含多个由微电网、楼宇和住宅组成的小集群。位于变电站集群内部的微电网集群可能包含多个由智能住宅和楼宇组成的集群。各集群具有从智能电网 (信息) 中收集实时数据的能力, 以分析集群的状态和采取必要的措施 (计算), 并采取运行决策 (控制)。

所有集群都具有相同的基本功能, 且均借助于“应用设备”来实现其功能。本文建议从一个基本的三层架构起步。底层为设备层, 是网络系统和物理系统间连接设备的一种抽象概念。智能传感器和执行器都属于这一层。底层之上为服务层, 主要功能是利用各种设备来执行特定服务。例如, 通信服务会发送从传感器收集到的数据, 一个计算服务会按照收集到的数据提取信息, 另一个计算服务会执行分析任务, 以帮助决策。顶部为应用层, 主要功能是利用第二层提供的服务来实现集群要求的功能。这些功能包括发电调度和负荷管理, 这将在下一节中进行详细说明。为了实现即插即用的互操作性, 必须为每层及各层间的连接进一步制定相应的协议和标准, GRIP的各项协议和标准应与国际和行业的现行协议和标准一致, 如智能电网结构模型、IEC和IEEE标准等。

由于组成和要求不同, 不同类型集群应用的复杂程度各不相同。即使对于相同类型的集群, 如智能住宅来说, 要根据主人对家庭管理的不同需求, 采用不同的应用设备, 只要用户遵循相关协议和标准即可。

3.3 功能

集群的基本功能是根据电力系统互联运行的基本要素进行抽象概括得出的。在20世纪中叶前, 互联电力系统快速扩张。在此期间, 电力系统工程技术得到了许多突破性的成果, 创造了各种“运行协议”, 这些协议一直到现在还被用在电力系统的运行模式中。随着互联“标准”的出现, “控制区”的概念逐步形成[9]。控制区必须

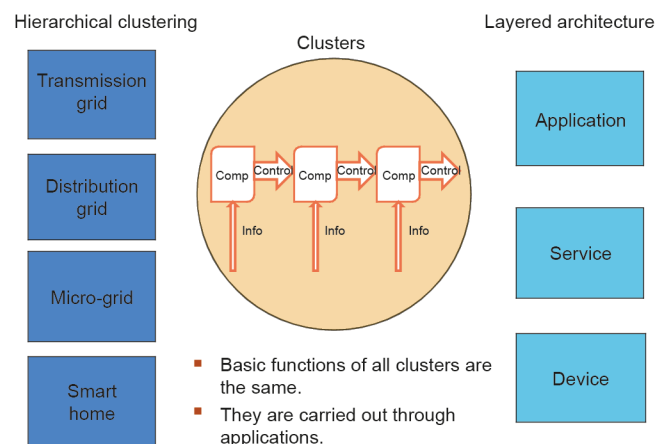


图 1. GRIP 架构。

维护其外部交换的安排,即便在控制区内出现巨大扰动,仍然要履行上述责任。控制区如何去完成它的任务是各控制区自己的事情。用现代术语来说,控制区必须满足互联接口的定义,并隐藏其内部功能。控制区是互联电力系统的基本单元,必须保持其瞬时净功率平衡(包括交换计划)。一般通过下列三个步骤实现:①安排和调度发电来维持净功率平衡;②在同步发电机内利用调速器实现频率控制,利用励磁机来实现电压控制,以消除由不平衡引起的有功和无功波动;③在出现发电不足的紧急情况时下切负荷。

GRIP内集群的定义和电力系统的相似,要求能够智能地管理其自身发电和负荷。外围集群必须发挥类似于电力系统的功能,并能对整个系统的运行作出贡献。这些集群必须在维持整个系统的瞬时电力平衡方面履行其各自的职责。集群必须能按要求安排、保证和维持它们与外部系统的能量交换。这意味着一个集群会自行安排电力购买和销售,并将该计划告知其上级集群。在运行过程中,集群必须对其自身的发电量和用电量进行内部管理,以维持其净功率(包括外部功率交换)的平衡。例如,一个智能住宅集群确定了一天当中不同时段的用电量并进一步制定相应的电力交换计划。该住宅集群必须提前告知其上级配电网集群其用电安排,并严格执行该计划。电力交换可通过电力市场来安排,顺序调度(如更新的调整)也可能出现。

与控制区的基本功能类似,一个集群的基本功能包括以下三个方面:

- (1) 调度发电和负荷,维持净功率平衡;
- (2) 局部反馈控制,用于消除波动;
- (3) 通过切机、切负荷来缓解故障。

我们将在接下来的三节中对这三个基本功能进行详细说明。虽然本文重点关注的是正在发生变革的外围集群,但由于核心输电网同样也是一个集群,同样的方法对其也必须适用。在三个功能中,核心输电网是受调度原则变化影响最大的部分。传统系统必须适应此类变化,并能够无缝过渡到新的模式。我们在设计风险约束的调度方法时已考虑到上述演变(第4节)。我们研发出一种局部反馈控制装置,即“电力弹簧”,用于消除外围集群的波动(第5节)。第6节简要分析了缓解故障的方法。

4 风险约束的调度方法

本文所指的风险约束的调度方法(RLD)[10, 11]是建立在随机性方法基础之上的,与传统调度方法相比有以下三个方面的区别。

4.1 风险

当发电量和负荷量均为随机变量时,始终存在二者不平衡的概率,因此必须考虑风险的概念,即未能维持某个集群净功率平衡的风险。运行的目标是使风险最小化。风险的评估和管理已成为现代银行业和金融业的核心技术,各种精巧的风险测度和方法层出不穷[12]。这里用一个简单的风险测度来说明集群的目标。

假设一个集群的运行目标是在时间点 t 平衡系统的供给 $s(t)$ 和需求 $d(t)$,即实现 $s(t) = d(t)$ 。当需求 $d(t)$ 为随机且概率分布为 P 时, $P\{s(t) \neq d(t)\} = 1$ 。但在实际系统中,发电侧总能随时地削减发电量 ε ,因此未能维持净供需平衡的事件可表达为 $\{d(t) > s(t)\}$ 或 $\{d(t) < s(t) - \varepsilon\}$ 。一个简单的风险测度可表达为事故概率 $P\{d(t) > s(t)\}$ 和 $P\{d(t) < s(t) - \varepsilon\}$ 。系统运行的目标是将该风险降至可接受的水平,可表达为

$$P\{d(t) > s(t)\} < \alpha \text{ and } P\{d(t) < s(t) - \varepsilon\} < \beta \quad (1)$$

其中 α 和 β 为任意小数,如由用户指定的0.1%或0.01%。

4.2 供需

传统调度的原则是“根据负荷量确定发电量”。这种原则基于两个事实:①发电具有高度的确定性和可控性;②负荷可变,但不可控。随着发电越来越随机,负荷越来越可控,发电量和负荷量之间的区别也日益模糊。在新模式下,我们将发电量 $G(t)$ 和负荷量 $L(t)$ 的确定部分和随机部分按以下方式进行区别:

$$\begin{aligned} G(t) &= GD(t) + GS(t) \\ L(t) &= LD(t) + LS(t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中,随机项 $GS(t)$ 包括可再生能源发电,如风电或太阳能发电;确定项 $LD(t)$ 包括可控负荷,如需求侧管理。于是,发电和负荷的净平衡 $G(t) = L(t)$ 可表达为下式:

$$GD(t) - LD(t) = LS(t) - GS(t) \quad (3)$$

我们将等号左侧,即发电/负荷的确定部分称为净供给 $s(t)$;将等号右侧,即随机部分称为净需求 $d(t)$ 。净供给量是确定的,且部分可控,而净需求量是随机的。RLD通过调整净供给中的可控部分来平衡净需求中的随机部分。

4.3 决策过程

未来智能电网将安装大量的传感器和通信设施,从而保证其能持续、及时地提供系统的信息。这种能力是管理未来智能电网中不确定性的关键。发电和负荷的不确定性一般都是随着时间趋近实际运行点而逐渐降低的,

且呈指数式衰减。例如，一项日前风电预测的误差达30%，而提前几分钟作出的预测的误差几乎为零。换句话说，随着智能电网信息不断地更新，净需求在集群内的概率分布变得越来越清晰准确。因此，我们将多阶段随机决策的框架用于RLD (图2)。各阶段都对应于电力市场结构下的调度决策点，如一系列的日前市场、时前市场和分前实时市场。

在给出RLD的数学公式前，先建立一套符号体系。设净需求 $d(t)$ 为随机变量，其在各阶段的概率分布根据智能电网提供的信息 Y_i 进行更新，计为 $P_i\{d|Y_i\}$ ，其中 i 表示阶段。调度目标 J 可定义为预期总成本的最小化。一般情况下，目标函数 J 为各阶段净供给量 $s(k_1, \dots, k_i)$ (其中 $i = 1, 2, \dots, m$)的调度决策函数。

图2中，用 π 表示的RLD可被描述成下列的优化问题：

- 选择可控的净发电量， $s(k_1, \dots, k_i), i = 1, 2, \dots, m$ ，即 $s(k_1), s(k_1, k_2), s(k_1, k_2, k_3), \dots$
- 优化目标函数 J ，
- 满足风险约束条件：如 $P_m\{d(t) > s(t)|Y_m\} < \alpha$ 且 $P_m\{d(t) < s(t) - \varepsilon|Y_m\} < \beta$ 。

RLD与传统的不确定性方法不同，传统的方法假定的是未来场景中一种最坏的情况。而在多阶段的RLD模型中，基于可能的更新信息，未来选择校正策略的灵活度被纳入到当前阶段的最优决策的选择中。

上述RLD模型可完全实现集群的基本调度功能。其他的实际运行约束可作为约束条件加入这个模型。这有两种类型的约束：空间型和时间型约束。如须考虑网络的影响，如线路传输容量约束或功率损耗，可在每一阶段内考虑节点功率平衡(称为潮流方程)，因此净需求和净供给变成向量值。时间型的约束主要包括可控净供给的爬升约束和能量约束(如储能系统)。集群在分层架构上的位置越高，就可能需要包含更多的约束条件。例如，配电网集群的RLD必须考虑网络约束，但在楼宇或住宅集群内则可忽略不计。添加约束条件会增加模型的复杂度，加大计算负担。当前进行的研究正逐渐扩展RLD的模型，将网络约束包含其中[13, 14]。随机优化的实用计算方法，如蒙特卡罗模拟、基于场景的随机优化和鲁棒优化，可能会被当成求解更加普遍的RLD问题的方法来

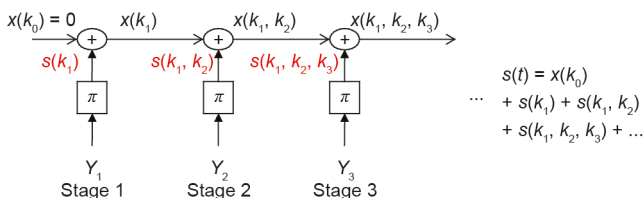


图 2. RLD 多阶段随机决策过程。

进行卓有成效的探索。

4.4 最优解

针对上述RLD模型，参考文献[11]中已推导出最优调度策略，可用于净需求的任意概率分布。该策略有一个极为简单的闭型解，但其复杂性在于求解一组复杂的方程组。为说明问题，我们通过具体案例去简化表达式。假设电力市场由一个日前市场、一个时前市场和两个辅助服务市场组成。两个辅助服务市场分别用来实现负荷跟随和频率控制(图3)。根据第4.3节中RLD的模型记号取 $m = 4$ 。进一步假设每个市场的持续时间分别为 $T_1 = 1 \text{ h}$, $T_2 = 30 \text{ min}$, $T_3 = 5 \text{ min}$ ，以及 $T_4 = 10 \text{ s}$ 。对于这四个阶段的RLD，在如下时段内

$$t \in [k_1 T_1 + k_2 T_2 + k_3 T_3 + k_4 T_4, k_1 T_1 + k_2 T_2 + k_3 T_3 + (k_4 + 1) T_4]$$

总调度的净供给等于

$$s(t) = s(k_1) + s(k_1, k_2) + s(k_1, k_2, k_3) + s(k_1, k_2, k_3, k_4)$$

各市场的调度决策包括购买(生产)或销售(减少)。市场 i 中的购买用 $s_+(k_1, \dots, k_i)$ 表示，销售用 $s_-(k_1, \dots, k_i)$ 表示。该市场中的购买和销售电价(成本)分别用 $c^+(k_1, \dots, k_i)$ 和 $c^-(k_1, \dots, k_i)$ 表示。上述调度的目标是最小化总的期望成本，可表达为

$$J(\pi) = E \left\{ T_1 \sum_{k_1=1}^{24} [c^+(k_1) s_+(k_1) + c^-(k_1) s_-(k_1)] \right. \\ + T_2 \sum_{k_1=1}^{24} \sum_{k_2=1}^2 [c^+(k_1, k_2) s_+(k_1, k_2) + c^-(k_1, k_2) s_-(k_1, k_2)] \\ + T_3 \sum_{k_1=1}^{24} \sum_{k_2=1}^2 \sum_{k_3=1}^6 [c^+(k_1, k_2, k_3) s_+(k_1, k_2, k_3) \\ + c^-(k_1, k_2, k_3) s_-(k_1, k_2, k_3)] \\ \left. + T_4 \sum_{k_1=1}^{24} \sum_{k_2=1}^2 \sum_{k_3=1}^6 \sum_{k_4=1}^{30} [c^+(k_1, k_2, k_3, k_4) s_+(k_1, k_2, k_3, k_4) \right. \\ \left. + c^-(k_1, k_2, k_3, k_4) s_-(k_1, k_2, k_3, k_4)] \right\} \quad (4)$$

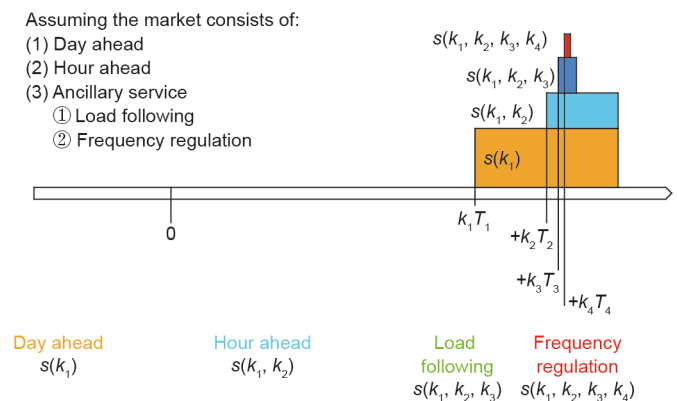


图 3. 净供给累积决策示意图。

以上问题可采用逆向递归公式导出最优解。其中 j 从4开始, 然后逐步逆向递归至1。在第 j 阶段, RLD先求解下列方程式, 得到两个临界值 φ_j^+ 和 φ_j^- 。

$$f_j(x) = T_j c^+(k_1, \dots, k_j) \quad (5)$$

其中 $f_j(x)$ 为一个函数, 详见文献[11]。

$$f_j(x) = -E \left\{ \sum_{k_{j+1}}^4 \nabla J^*(x, k_1, \dots, k_{j+1}) \middle| Y_j \right\} \quad (6)$$

令 $x(k_0) = 0$, 且 $x(k_1, \dots, k_j) = x(k_1, \dots, k_{j-1}) + s(k_1, \dots, k_j)$ 。在第 j 阶段, 根据图4描述的简单规则实现RLD调度。

$$s(k_1, \dots, k_j) = \begin{cases} s_-(k_1, \dots, k_j) = -[x(k_1, \dots, k_{j-1}) - \varphi_j^-] & \text{if } x(k_1, \dots, k_{j-1}) > \varphi_j^- \\ 0 & \text{if } \varphi_j^+ \leq x(k_1, \dots, k_{j-1}) \leq \varphi_j^- \\ s_+(k_1, \dots, k_j) = [\varphi_j^+ - x(k_1, \dots, k_{j-1})] & \text{if } x(k_1, \dots, k_{j-1}) \leq \varphi_j^+ \end{cases} \quad (7)$$

在推导过程中, 根据前一天得到的信息, 对未来的不确定性进行估计, 得到的概率分布为 $P_i\{d|Y_i\}$, $i = 1, 2, 3, 4$; 将这个概率分布计入RLD模型中。该模型可解出 $(\varphi_j^+, \varphi_j^-)$ 以及日前市场的最优调度 $s(k_1)$ 。利用三阶段RLD及其最新(时前)的概率分布 $P_i\{d|Y_i\}$, $i = 2, 3, 4$, 可推导出时前市场的最优调度决策 $s(k_2)$, 以此类推。

5 内嵌电力弹簧的智能负荷

在任意一个调度阶段内, 一个集群内由发电或负荷中的波动所引起的偏差(与计划净功率平衡相比)必须要被消除。本文中所述的功率包括交流系统中的有功功率和无功功率。有功功率是生产或消耗的平均功率。无功功率与电压相关: 充足的无功功率是维持系统电压稳定的必要条件。在传统电力系统中, 确保瞬时功率平衡的责任由连接到输电网的发电机担负, 通过对同步发电机内的调速器(对应有功功率)和励磁系统(对应无功功率)进行局部反馈控制来实现此功能。总之, 上述功能是根据负荷需求的波动情况来调节发电输出量的。外围的集

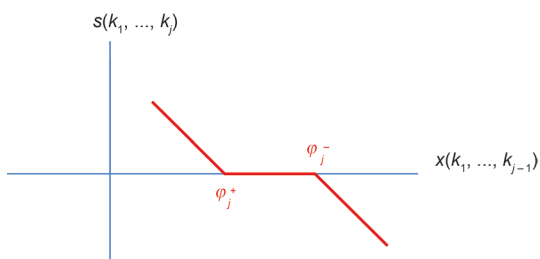


图4. 本例的最优解。

群——配电网、微电网和智能建筑及住宅——则缺乏同步发电机来完成这项工作。我们因此提出了利用遍布于外围的负荷来平抑系统的波动。

5.1 智能负荷

某些负荷我们称之为关键, 因为构成这些负荷的设备或电器的正常动作严格要求供电功率和电压的水平必须控制在很窄的范围内。其他非关键性负荷对于终端的供电质量则不敏感。电阻负荷的敏感性一般较低。非关键性负荷包括: ①住宅和大型建筑的热水器、大型冰蓄冷系统、某些非必要照明、空调设备; ②配电网或微电网路灯照明。关键性负荷是指那些终端用户最为关注的负荷。此类负荷包括家庭和办公用电脑、建筑物内的电梯(使用时), 以及某些制造用机械设备。集群优先考虑的是确保输入到关键负荷的功率和关键负荷上的终端电压能保持在使其正常运行的严格的范围内。因此, 终端电压和有功功率的波动需要被消除。

众所周知, 机械弹簧可用于消除机械振动。因为弹簧在受压后会回弹、拉伸后会回缩。电力弹簧(ES)这种装置应能在功率过低时提升功率, 并在功率过高时降低功率。ES对有功和无功功率都能实现上述功能。对于无功功率来说, ES必须有能力在电压偏离理想值的时候使其恢复原值。基于上述思想, 我们研发了几种基于电力电子装置的ES [15–20], 提出使用一种“ES嵌入式智能负荷” [15,16]来消除集群内, 特别是外围集群内的发电和负荷的失衡。目前, 已研发出三种类型的ES。

- (1) 无有功电源的ES[15, 16];
- (2) 含有功电源的ES[17, 18];
- (3) 含储能装置, 基于联网双向AC-DC逆变器的ES [19, 20]。

ES使用时, 首先将ES串联或嵌入到非关键负荷上, 形成一个“智能负荷”; 然后, 将该组合与关键负荷并联, 如图5所示。智能负荷可自适应地减小有功功率的不平衡, 同时保持关键负荷的电压水平[15, 16]。

5.2 平滑波动

如图6所示, ES通过调整其有功和/或无功功率的消耗来维持关键负荷的总功率输入。如图6(a)所示, 在无ES的正常运行状态下, 对非关键负荷 p_{NC} 和关键负荷 p_C 的总输入功率 p_{in} 为

$$p_{in} = p_{NC} + p_C \quad (8)$$

假设关键负荷认为输入功率 p_C 是可以接受的。若输入功率波动时形成的值用 p'_{in} 表示, 且 $p'_{in} = p'_{NC} + p'_C$, p'_{in}

$< p_{in}, p'_c < p_c$, 此时 p'_c 过低, 关键负荷无法接受。然而, 对于ES嵌入式智能负荷, 可将关键负荷的输入功率提升至理想值 p_c , 如图6(b)所示。

$$p'_{in} = (p_{ES} + p''_{NC}) + p_c \quad (9)$$

通过要求

$$p_{ES} = (p'_{NC} - p''_{NC}) - (p_c - p'_c) \quad (10)$$

式(10)中, p_{ES} 为ES消耗的功率, ES生产(供给)的功率是其消耗的负数, 即

$$p_{ES}^G = (p_c - p'_c) - (p'_{NC} - p''_{NC}) \quad (11)$$

根据关键负荷和非关键负荷的特性, ES的嵌入能调节非关键负荷来促成对关键负荷供电的要求。由以上分析可得, 若 $p''_{NC} < p'_{NC}$, ES嵌入式智能负荷能够从减少的非关键性负荷的功率消耗量 $(p'_{NC} - p''_{NC})$ 中“借”得一定功率, 加入到关键负荷中, 以补偿差额 $(p_c - p'_c)$ 。ES从非关键负荷中获取功率的这种特殊功能完全不同于传统的方法。传统方法通常利用蓄能设备和电压控制装置来消除波动。ES以一种“罗宾汉式”精神在发挥作用, 即从非关键负荷上“抢夺”功率, 供给关键负荷使用。ES的使用可能会对非关键性负荷(有较大的变容)产生不利影响, 却可以稳定具有较高优先级的关键性负荷。本文第5.3节将通过例子进一步说明此观点。

上述分析对有功和无功功率都适用。如果关键负荷为阻抗型负荷, 其阻抗值为 $Z_C \angle \theta_C$, 则 $q_C = |V_C|^2 (\sin \theta_C) / Z_C$, 其中 $|V_C|$ 为关键负荷的终端电压幅值; 如将终端电压保持在理想值 $|V_C|$, 则无功功率必须为 q_C 。式(11)适用于这里分析的无功功率。然而, 对于较为复杂的负荷, 电压幅值和无功功率之间的关系甚至可能难以用解析式表达; 但是由于ES是一种反馈控制装置, 可以产生必需的无功功率来维持关键性负荷的电压, 所以电压幅值和无功功率之间的关系不需要解析式表达。例如, 若必需的无功功率并非之前的 q_C , 而是 q''_C , 则应修改式(11), 如图6(c)所示, ES必须提供的无功功

率是

$$q_{ES}^G = (q''_C - q'_C) - (q'_{NC} - q''_{NC}) \quad (12)$$

我们用一个简单的例子来说明要求ES提供的无功功率。假设关键负荷和非关键负荷均为阻抗负荷, 分别用 $Z_C \angle \theta_C$ 和 $Z_{NC} \angle \theta_{NC}$ 来表示。若无ES时, 假定功率输入的波动会导致电压过低。如图7的相量图所示, 可通过加入ES来提升电压。ES产生电压 V_{ES} , 使 V_C 幅值升高。从图7中可以看出, 相量 V_{ES} 和 I_{NC} 相互垂直, 表明ES为被动装置, 且 $p_{ES} = 0$ 。因此, ES是以一种电压支持(即电容性)的模式发挥作用。ES产生的必需的无功功率为

$$q_{ES}^G = -|V_{ES}| |I_{NC}| \sin(-90^\circ) = |V_{ES}| |I_{NC}| \quad (13)$$

5.3 示例

图8所示的系统是由一个配电网提供的供电接口加上一个输出功率波动的风电机, 连接着一组负荷。图9(来源于文献[16])展示了该系统的测试结果。由此可见, 通过接入一个ES, 输送至关键负荷的电压和输入功率可被稳定在恒定水平, 但其代价是非关键负荷上的电压和功率消耗的波动增大。

5.4 应用

本文描述的ES可以被很容易地装入热水器、空调机、家用电器或路灯内。就像在床垫中安装许多机械弹簧一样, 我们可将大量的ES分布安装在包括住宅、楼宇和微电网的配电网中。ES可以有效地消除由各种原因造成的波动, 如由具有间歇性和不确定性的可再生能源造成的波动, 以及由各种形式的不可预测的需求侧和EV管理计划造成的波动。

若非关键负荷(式(11))中功率消耗的减少量不足以产生平抑波动的必要功率 p_{ES}^G , 则可在ES之外另外加入蓄能装置(如电池)来达到上述目的。在这种情况下, ES可同时使用电池的电量, 以及降低非关键负荷的功率, 以保证对关键负荷输送恒定功率[17, 18]。显然, 在这种情况下, 对比只使用一个电池去平抑波动, 采用较小容量的电池就

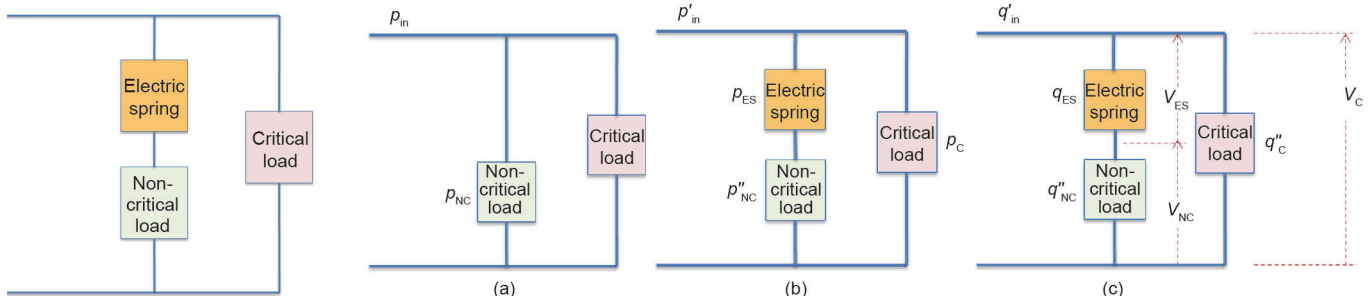


图5. 内嵌ES的智能负荷。

图6. (a) 无ES的正常运行情况; (b) 利用ES消除关键负荷上的波动; (c) 用于无功功率/电压。

可以达到同样的目的。非关键负荷的比例越大, ES的效果就越好。若电网中非关键负荷的比例相当大, 则ES就能有效地利用非关键负荷去大幅度降低功率供需间的不平衡。研究表明, 嵌入式ES智能负荷能够有效地在电网中维持瞬时功率平衡所需的储能容量[21]。

对于配有有功电源的ES, 可增加背靠背的换流器来代替电池。该方案不需要电池, 并可扩大有功和无功功率的控制范围。在高层建筑内的大型供热负荷中安装一个三相ES, 不但能减少高峰负荷和降低供需间的功率不平衡, 还能降低高层建筑内部的功率不平衡[22]。这一改进方案促进了对自适应建筑物能源建模的新一轮研究[23]。将ES的概念融入已有的联网的双向AC-DC逆变器中, 使ES的研究有了新的进展。这种逆变器在许多配有蓄能装置的分布式PV系统都有广泛的应用。传统的方式是将间歇性的有功功率以统一的功率因数(该因数可能会造成系统的不稳定)注入到电网中, 与传统的方式不同, PV系统通过对控制回路进行微小的调整, 融入ES的概念, 实现有功功率和无功功率补偿, 从而降低电网中的电压和频率波动[20]。

从供电方的角度来看(如配电网集群), 可采用大容量的ES将主供电电路拆分为两个可供用户使用的电路: 一个为“稳流主电路”, 用于供应优质电力; 另一个为“自适应主电路”, 用于提供可接受扰动的电力(如较大幅度的电压波动)。接入稳流主电路的用电设备是我们配置方案中的关键负荷, 而接入自适应主电路的用电设备则是非关键负荷。采用这种方案可以克服在电力交易中实现“产品差异化”的技术障碍, 允许用电设备根据其实际需求确定差异性价格。

6 缓解故障

突发和未预见事件(如严重扰动或故障)的发生将严重影响集群维持计划净功率平衡的能力。此时集群必须能够针对紧急情况制订缓解策略。虽然此类事件发生的概率极低, 但一旦发生, 集群必须具有足够的智能来感知紧急状况, 并能制订缓解措施, 确保不平衡的程度不会进一步扩大和影响到其他集群及电网的其他部分。在扰动过后, 必须立即通过系统恢复措施, 迅速恢复负荷。

当集群发生故障时, 输电网核心集群内系统频率会出现瞬间和大幅度下降, 目前, 将这种频率下降看成电力严重失衡的一个指标。触发低频继电器启动减载, 继电器的减载量是根据电网负荷频率的响应特征预先设定好的。近年来, 人们开始逐渐认识到有必要采用更为先进的运行策略, 以减轻输电系统中的系统故障损失,

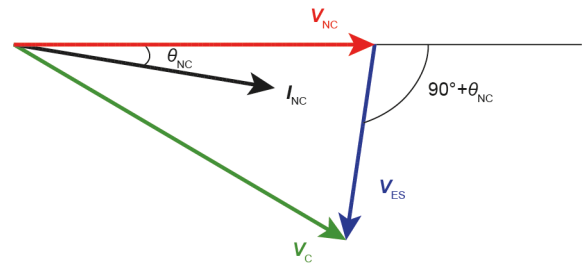


图7. 相量图展示了非关键负荷、关键负荷和ES之间电压的关系。

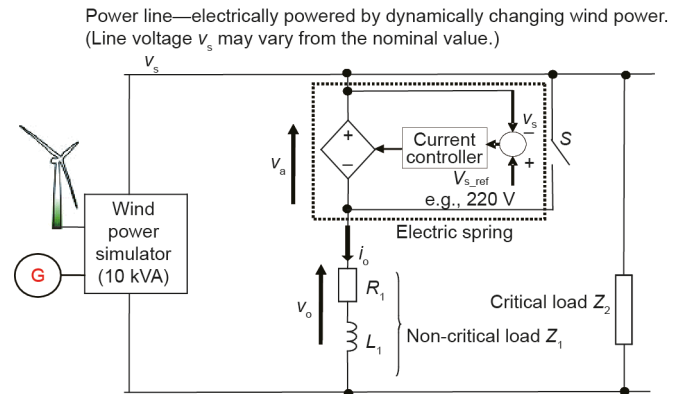


图8. 测试案例系统。

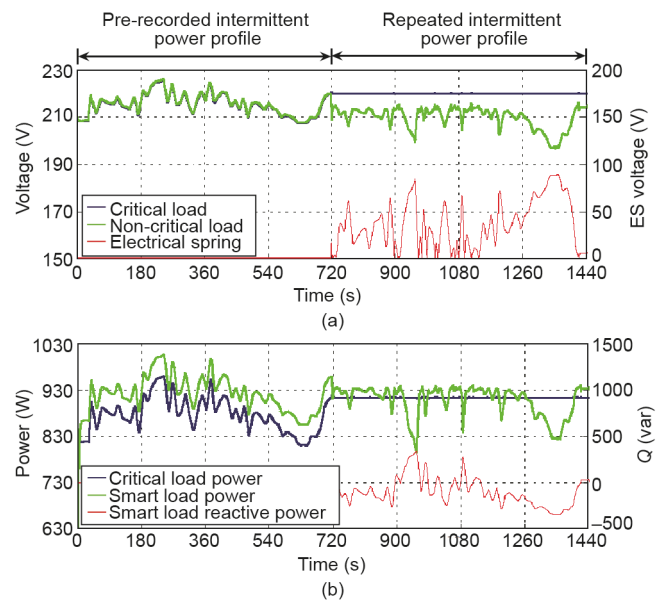


图9. 图8测试案例系统的测试结果。(a) 电压; (b) 功率所示系统的测试结果[16]。

从而避免连锁故障的发生; 目前, 电力系统弹性的概念吸引了广泛的关注和研究[24]。对于系统扰动, 弹性电力系统能够对其进行预测、吸收、适应和恢复。近年来, 电力系统恢复方法和工具逐渐成熟起来[25]。长期以来, 构建电力系统恢复策略的传统方法只针对若干预设的场景, 最新的研究正努力使电网具有在线的自愈功能[26]。

缓解外围集群故障的方法主要包括三个方面。

(1) 故障检测: 检测到集群正在进入应急状态, 且将

无法维持计划净功率平衡。

(2) 缓解措施：为避免对系统中的其他部分造成影响，根据需要，确定集群中需要进行切机或者切负荷的量和位置，然后采取必要的措施。

(3) 恢复策略：在严重电力中断后，需制定高效的恢复策略，即最小化故障的影响。事故风险主要包括故障的概率和影响两个方面的风险。停电的负荷越少，此故障的风险就越低。高效供电恢复措施可从根本上降低上述风险。

对外围集群，我们需要充分利用智能电网内可用的智能控制手段和设备，制定故障检测的方法、发电量算法/减载措施，以及恢复故障的策略。即便是核心的输电网，这也是一个处于研究初级阶段的领域。我们需要充分认识到此项研究对外围集群的重要性，并尽快开展相关研究。此项研究的进展在很大程度上取决于现有技术和系统本身的细节，值得期待。

7 结论

未来的智能电网应能实现能源互联网的愿景：数百万用户利用可再生能源，在家庭、办公室和工厂生产所需的能源，并实现能源共享；电动车辆和本地储能系统将被广泛使用；利用互联网技术将当前电网升级为能源共享的互联网络。本文提出了构建含智能外围的智能电网，即智能GRIP，作为能源互联网的架构。将GRIP的构建模块称为集群。配置能量管理系统 (EMS) 的输电网是一个集群，可将其称为核心集群；将配电网、微电网和智能楼宇及住宅称为外围集群。各个集群都采用分层结构。GRIP的分层控制架构保证了从当前到未来系统升级的无缝衔接和即插即用的相互操作性。对于不同的集群，用于实现集群功能的措施的复杂程度是不同的。任意一个集群都具有以下基本功能：①智能调度，②平抑波动，③缓解故障。另外，本文还提出了一种风险约束的调度方法，并开发了一种名为“电力弹簧”的新型装置，用于平抑外围集群的电力波动。

GRIP架构要求所有集群提前计划其自身的净功率平衡，包括与其他集群之间的外部功率交换，并有效地保证按照计划运行。与未来能源互联网的协作行为一致，集群要共同分担维持电网瞬时功率平衡的运行任务。因此，外围集群需要提前计划安排其自身资源，并进行实时的调度和控制。这一模式与当前的被动用电和/或发电的模式完全不同。在当前模式下，终端用电设备对系统不承担任何责任。需要责任分担的这项提议可能是接受GRIP要面临的巨大挑战。但我们认为，减少环境污染和

全球气候变化是全世界共同关注的话题，全人类必须努力避免环境污染和全球气候变化对我们的社会和地球造成的破坏。在能源互联网相互协作的时代，我们应通力合作，实现更为广泛的利益。本文提出的强化GRIP架构中外围集群的能力能够让我们更有效地利用可再生能源。为实现可持续发展，接受这一共同责任对所有电力用户都是一个崇高的目标。

一直以来，由于人们对能源互联网一词的技术内涵的理解各不相同，人们在使用能源互联网一词时并不是很严谨。近年来，有些研究人员将能源互联网的范围从电力扩大到热能、天然气以及其他形式的能源，形成了多能源输送系统[27, 28]。期望通过整体能源管理的创新进一步提高能源利用的整体效率。GRIP的基本概念，即目标抽象、概括、协作及各自和共同的责任，可被延伸至含多种形式能源的系统。然而，集群的基本功能还需要进一步扩展，从而实现对多种形式的能源的整体运行进行管理。本文提出的GRIP架构可作为最终扩展至能源互联网的一个最佳起点。

致谢

本文全体作者在此特别鸣谢Ram Rajagopal、Janusz Bialek、Yunhe Hou、Steven Low、Kameshwar Poola、C. K. Lee、S. C. Tan和Chaoyi Peng。上述人员为本文提供了宝贵的意见和建议；特别感谢Yixin Yu，本文正是在其鼓励下才得以完成。本研究由以下单位赞助：向Wu提供赞助的中国国家重点基础研究发展计划（“973”计划）(2012CB215102)；向Varaiya提供赞助的美国国家科学基金会奖(1135872)，以及向Hui提供赞助的香港RGC主题研究项目(T23-701/14-N)。

Compliance with ethics guidelines

Felix F. Wu, Pravin P. Varaiya, and Ron S. Y. Hui declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

1. F. F. Wu, K. Moslehi, A. Bose. Power system control centers: Past, present, and future. *Proc. IEEE*, 2005, 93(11): 1890–1908
2. International Energy Agency. Energy technology perspectives 2015. [2015-11-24]. <http://www.iea.org/etp/>
3. International Energy Agency. Technology roadmaps. [2015-11-24]. <https://www.iea.org/roadmaps/>
4. International Energy Agency. World energy outlook 2014. [2015-11-24]. <http://www.iea.org/weo/>

- www.iea.org/Textbase/npsum/WEO2014SUM.pdf
5. J. Rifkin. *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. New York: Palgrave Macmillan, 2011
 6. J. Taft, P. De Martini. Ultra large-scale power system control architecture: A strategic framework for integrating advanced grid functionality. San Jose: Cisco Connected Energy Business Unit. 2012
 7. D. Bakken, et al. GRIP—Grids with Intelligent periphery: Control architectures for Grid2050⁵. In: *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*. Brussels, Belgium, 2011: 7–12
 8. J. Walrand, P. Varaiya. *High-Performance Communication Networks*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1996
 9. N. Cohn. *Control of Generation and Power Flow on Interconnected Systems*. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 1966
 10. P. P. Varaiya, F. F. Wu, J. W. Bialek. Smart operation of smart grid: Risk-limiting dispatch. *Proc. IEEE*, 2011, 99(1): 40–57
 11. R. Rajagopal, E. Bitar, P. Varaiya, F. Wu. Risk-limiting dispatch for integrating renewable power. *Int. J. Elec. Power*, 2013, 44(1): 615–628
 12. K. Dowd. *Measuring Market Risk*. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2002
 13. B. Zhang, R. Rajagopal, D. Tse. Network risk limiting dispatch: Optimal control and price uncertainty. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 2014, 59(9): 2442–2456
 14. C. Peng, Y. Hou. Risk-limiting dispatch with operating constraints. In: *IEEE PES General Meeting*. Washington D.C., USA, 2014
 15. S. Y. R. Hui, C. K. Lee, F. F. Wu. Power control circuit and method for stabilizing a power supply: PCT, 61/389,489. 2012-04-05
 16. S. Y. R. Hui, C. K. Lee, F. F. Wu. Electric springs—A new smart grid technology. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2012, 3(3): 1552–1561
 17. S. C. Tan, C. K. Lee, S. Y. R. Hui. General steady-state analysis and control principle of electric springs with active and reactive power compensations. *IEEE Trans. Power Electr.*, 2013, 28(8): 3958–3969
 18. X. Chen, Y. Hou, S. C. Tan, C. K. Lee, S. Y. R. Hui. Mitigating voltage and frequency fluctuation in microgrids using electric springs. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2015, 6(2): 508–515
 19. C. K. Lee, S. Y. R. Hui. Input AC voltage control bi-directional power converters: US, 13/907,350. 2013-12-05
 20. K. T. Mok, T. Yang, S. C. Tan, C. K. Lee, S. Y. R. Hui. Distributed grid voltage and utility frequency stabilization via shunt-type electric springs. In: *2015 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition*. Montreal, Canada, 2015: 3774–3779
 21. C. K. Lee, S. Y. R. Hui. Reduction of energy storage requirements in future smart grid using electric springs. *IEEE Trans. Smart Grid*, 2013, 4(3): 1282–1288
 22. S. Yan, S. C. Tan, C. K. Lee, B. Chaudhuri, S. Y. R. Hui. Electric springs for reducing power imbalance in three-phase power systems. *IEEE Trans. Power Electr.*, 2015, 30(7): 3601–3609
 23. J. Soni, K. R. Krishnanand, S. K. Panda. Load-side demand management in buildings using controlled electric springs. In: *Proceedings of IECON 2014—40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Dallas, TX, USA, 2014: 5376–5381
 24. North American Electric Reliability Corporation. Severe impact resilience: Considerations and recommendations. 2012[2015-11-24]. http://www.nerc.com/docs/oc/sirtf/SIRTF_Final_May_9_2012-Board_Accepted.pdf
 25. M. M. Adibi. *Power System Restoration: Methodologies & Implementation Strategies*. New York: Wiley-IEEE Press, 2000
 26. S. Liu, Y. Hou, C. Liu, R. Podmore. The healing touch: Tools and challenges for smart grid restoration. *IEEE Power Energy M.*, 2014, 12(1): 54–63
 27. T. Krause, G. Andersson, K. Frohlich, A. Vaccaro. Multiple-energy carriers: Modeling of production, delivery, and consumption. *Proc. IEEE*, 2011, 99(1): 15–27
 28. M. Qadrdan, J. Wu, N. Jenkins, J. Ekanayake. Operating strategies for a GB integrated gas and electricity network considering the uncertainty in wind power forecasts. *IEEE Trans. Sustain. Energ.*, 2014, 5(1): 128–138