

多态用能与电网间安全稳定的协调控制框架设计

秦晓辉¹, 张彦涛^{1,2}, 葛磊蛟², 王虹富¹, 王莹³

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;
3. 国网天津市电力公司, 天津 300010)

摘要:随着新能源发电、电动汽车、微电网、冷热电三联供、大型电热锅炉、地源热泵等大规模接入电力系统, 电力系统变成了含冷/热/电等多种用能形态的能源互联网系统, 也使电力系统安全稳定运行的同时面临电网侧与用户侧的双重影响, 为此提出一种能源互联网背景下多态用能与电网间安全稳定的协调控制框架。首先, 简介了电力系统的多态用能, 并分析了其特征; 其次, 从正常态和故障态两个角度构建了多态用能与电网间安全稳定的控制目标; 最后, 设计了多态用能与电网间安全稳定的协调控制框架, 以期高渗透率新能源消纳提供可行思路。

关键词:多态用能; 安全稳定; 协调控制; 精准切负荷

中图分类号: TM74

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2017)05-0008-07

0 引言

近年来随着智能电网建设的推进, 新能源发电、电动汽车、微电网、冷热电三联供、大型电热锅炉、地源热泵等大规模接入电力系统, 使电力系统逐步转变为以供电服务为中心, 兼顾冷/热/电多种能源的能源互联网系统。尤其是高比例新能源的接入, 也使电网的安全稳定运行面临电压、频率等诸多问题。

为此, 近年来国内外的学者对能源互联网从基本概念^[1]、系统架构^[2]、功能设计^[3,4]、发展模式^[5-8]、技术架构^[9-14]、组织形态^[15-17]等多方面进行了探讨。另外, 文献[18]从曲线平移类、曲线整形类和综合类等方面对高比例可再生能源并网的电力系统灵活控制和平衡机理进行了论述。以上的研究对能源互联网背景下多态用能与电网间安全稳定控制提供了基础和借鉴, 可以解决一些以电力为中心的能源供应问题, 但缺乏针对多态用能的具体措施, 有待深入研究。

能源互联网集成了水/电/气/热等多种能源的综合利用, 多种能源的交换和转化利用^[19-24], 尤其是能源互联网多态用能, 这些能源之间的实时互动, 以及多态用能与电网间的能源、信息等互联互通, 将面临各自不同种类能源运行和控制、不同时间常数、不同尺度的集中控制和稳定控制, 是一个超越方程的优化问题, 有必要从网-荷互动的角度

收稿日期: 2017-04-17; 修回日期: 2017-05-23

基金项目: 国家电网公司科技项目(全球能源互联网技术体系研究); 广东省绿色能源技术重点实验室项目(2008A06-0301002)

设计能源互联网多态用能与电网间的安全稳定协调控制框架, 满足高渗透率新能源的就地消纳, 确保能源互联网的稳态安全运行。

1 多态用能

多态最早是面向对象程序设计的一个重要特性, 主要是指程序设计过程中选用一个接口可实现多种功能, 泛指同一种事物表现出的多种形态。将此种概念套用于电力系统和能源互联网^[25-31], 特指电能与其他热能、冷能等互相之间灵活、快速转换的电能替代技术, 以满足人民的生产生活需求。

近年来, 新能源和新技术的快速发展, 国内智能电网示范区、发达城市核心区、大负荷工业园区、高新技术园区等政策与技术资源集中区域对水/电/气/热等多种能源需求量日益增加, 而能源与环境的矛盾日益突出, 传统以燃煤、燃油等主要形式的能源消费方式给环境造成了较大的影响, 因此, 最大限度保障能源安全、优质与可靠供应是这些区域经济发展的基本要求, 而且为了实现节能减排和高效利用, 出现了综合集成能源服务、整合能源供应链等尝试, 并逐渐形成以提供电能服务为中心, 以能源高效利用和满足用户用能需求为核心的多态用能系统。

多态用能系统是指在规划、建设和运行等过程中, 以电能为中心, 通过对能源的产生、传输与分配(能源供应网络)、转换、存储、消费等环节进行有机协调与优化后, 形成的能源产-供-消一体化多态用能系统, 也是电、气、热(冷)等两种或多种能源系统耦合形成的有机整体, 但随着区域多态用能系统的推广应用, 其发展过程中所面临的持续建设时间

长、基础设施薄弱、协调运行控制等关键技术缺乏,规划、运行和建设等诸多短板也逐渐显现,主要表现出以下特征:

(1) 目前的多态用能系统的规划技术,一般对于电力、冷热和燃气等管网结构、控制策略等各自规划,没有总体的目标分解和协调策略,即使存在一定的协调规划,基本上也是根据用户需求而被动变化,特别是电力、冷热和燃气等能源调度的时间尺度不一致,如果在规划设计阶段未提前进行优化布局建设,将给未来构建同步协调机制增加难度,非常不利于源-荷互动的实施。

(2) 能源的使用自始至终受资源环境约束,全世界的能源总量处于长期短缺状态,如何在满足正常的用能需求前提下,有效利用好太阳能、风能等这些具有强随机性、间歇性的优质可再生资源,做好多态用能与电网间的互动,在保证多态用能系统经济、高效、安全和可靠的前提下,尽可能多地消纳这些优质可再生资源,至关重要。

(3) 智能化能源站、电能替代技术、分布式储能与用户联供设备等用户侧多态用能的基础设施,目前还相对比较薄弱,并且转换效率、动态响应速度不高,精准网-荷互动协调控制所需的一些关键技术和重要设备装置还处在研究和探索阶段,亟需进一步深入研究。

(4) 电力能源作为以电能作为动力的二次清洁能源,随着智能电网与配用电一体化的建设,其资源调度能力和协调控制能力,相比燃气、冷热等其他能源具有较高优势,但如何发挥电力能源在多态用能系统中的主导性作用,在确保能源安全、电网安全的前提下,充分利用网-荷互动技术,实时调度管理好能源互联网,满足用户的多态用能需求,且保障经济、高效用能,有待进一步深入研究。

总而言之,多态用能技术正处在快速发展中,其规模化推广应用在关键技术、核心装备、系统集成等多方面还有较多的研究需要深入,一些观点、概念和技术都在逐步的发展和完善中,但是多态用能系统运行的首要目标是多态用能与电网间的安全稳定,这是毋庸置疑和非常明确的。

2 多态用能与电网间的安全稳定控制目标

多态用能与电网间的安全稳定协调控制其实质是为了在电网安全稳定的前提条件下充分利用好强随机性、间歇性的可再生能源发电,整体上可分为系统的正常态和局部故障态两种情况,但依据不同的出发点具有不同的控制目标,也可分为从用

户用能角度出发的多态用能安全稳定协调控制目标、从电网安全角度的电网安全稳定控制目标和从整体协调控制角度的多态用能与电网间的安全稳定协调控制目标三部分,且每一个部分内容均分为正常态和局部故障态两个方面,如图1所示。由于多态用能的核心目标是整体的协调控制,为此重点阐述整体协调控制目标。

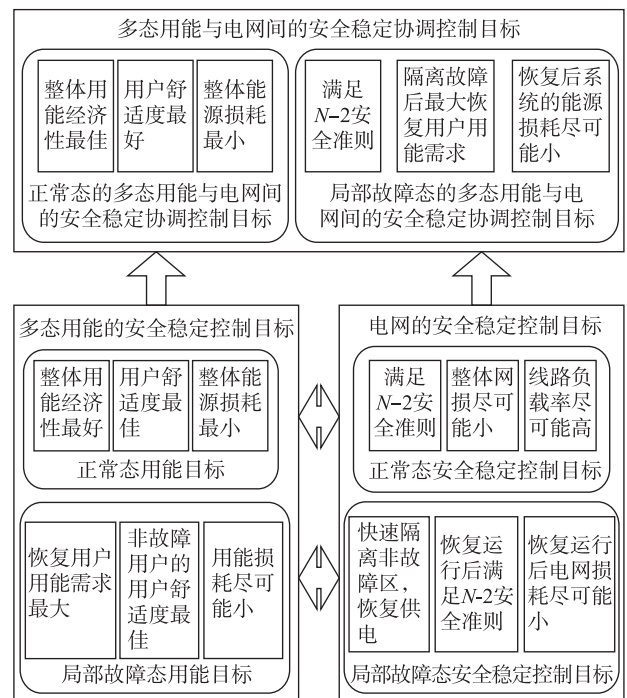


图1 多态用能与电网间的安全稳定协调控制目标

Fig.1 Coordinated control target of power system security and stability with polymorphic energy

2.1 正常态的多态用能与电网间安全稳定控制目标

正常态是指电力系统处于安全裕度运转状态,多态用能与电网间的安全稳定控制目标主要是为了在保障电网稳定运行的安全裕度条件下,尽可能为用户提供高品质的供电服务,主要控制目标包括整体用能经济性最佳、用户舒适度最好和整体能源损耗最小为主。

2.1.1 整体用能经济性最佳

在能源互联网背景下充分考虑影响用电系统与能源系统互动的因素,根据科学性、全面性和客观性的原则分析系统运行效益,达成整体用能的经济性最佳。

$$P = \sum_{i=1}^N a_i - \sum_{j=1}^M b_j \quad (1)$$

式中: P 为系统总的利润; N 为系统效益种类合计; M 为系统成本费用种类合计; a_i 为系统第*i*类效益值; b_j 为系统第*j*类成本费用值。在全球能源互联网

背景下系统的成本费用值基本都是固定值,效益值主要包括售电效益(a_1)、政府补贴效益(a_2)、节能效益(a_3)、降低损耗效益(a_4)、碳贸易效益(a_5)、可靠性效益(a_6)和减缓电网投资效益(a_7)等。

2.1.2 用户舒适度最好

一般而言,用户舒适度是一个与人生活质量相关的主观指标^[32],是气温、气压、相对湿度、风速等4个气象要素对人体感觉影响的综合体现,常用该4项要素构建一个非线性方程,如下式所示。

$$SSD = (1.818t + 18.18)(0.88 + 0.002f) + \frac{t - 32}{45 - t} - 3.2v + 18.2p \quad (2)$$

式中: SSD 为人体舒适度指数; t 为平均气温; f 为相对湿度; v 为风速; p 为气压。

2.1.3 整体能源损耗最小

整体能源损耗最小是指区域范围内所有的用户能源损耗总和最小,是整体用户用能及电网的损耗之和,主要包括电网的能源损耗、用户的能源损耗和用户接入可再生能源后所产生的损耗等三方面^[33],如下式所示。

$$Q = \sum_{i=1}^n N_i + \sum_{j=1}^m U_j + \sum_{k=1}^s E_k \quad (3)$$

式中: Q 为整体能源损耗; N_i 为第*i*个节点的能源损耗; n 为电网的总节点数; U_j 为第*j*个用户的能源损耗,主要包括耗电量、节电量、节电率三方面; m 为用户总数; E_k 为第*k*个用户接入的可再生能源后所产生的损耗,主要指为尽可能多消纳强随机性、间歇性可再生能源接入的电网协调调度损耗; s 为新能源的节点总数。

2.2 局部故障态多态用能与电网间安全稳定控制目标

局部故障态是指系统的局部出现故障而整个系统未崩溃的状态,此时系统为确保安全,需要进行快速、准确的保护动作,因此多态用能与电网间的安全稳定控制目标主要包括电网满足 $N-2$ 安全准则、隔离故障点后最大恢复用户用能需求和恢复后系统的能源损耗尽可能小。

2.2.1 电网满足 $N-2$ 安全准则

能源互联网以电能供应为中心,局部故障态时优先保证电网的安全是其首要控制目标,为此要求电网具有 $N-2$ 安全准则^[34-36]。

$N-2$ 安全准则是指正常运行方式下系统中任意2个元件(如线路、发电机、变压器等)无故障或因故障断开后,系统应能保证稳定运行和正常供电,其他元件不过负荷,电压和频率均在允许范围

内。其主要包含两层含义:(1)保证电网的稳定;(2)保证用户得到符合质量要求的连续供电。

2.2.2 隔离故障点后最大恢复用户用能需求

当局部故障发生后,系统快速、精准切除了区域内区分片的故障用户用能需求,快速进行故障原因分析,精准确定故障点;在电力供应方面,通过负荷转供、网络重构、动态组网等技术手段,协调调度可再生能源发电出力,尽可能多恢复区域内没有故障的用户供电需求;在能源供应方面,基于供热、供冷等能源供应响应时间周期长的特点,进行冷热电三联供(CCHP)系统的模式切换、冰蓄冷/水蓄冷机组的协调控制,满足用户的热/冷用能需求。

2.2.3 恢复后系统的能源损耗尽可能小

系统局部发生故障后,将故障用户精准、快速隔离后,系统恢复稳定运行,此时为确保系统稳定,考虑可再生能源的强随机性、间歇性,一般不进行可再生能源的协调调度管理,因此系统恢复后的损耗主要包括电网侧的网损和用户侧的损耗两方面;系统稳定运行后,以能源损耗尽可能最小为目标。

$$Q = \sum_{i=1}^n N_i + \sum_{j=1}^m U_j \quad (4)$$

式中: Q 为能源损耗。

3 多态用能与电网间安全稳定的协调控制框架

多态用能与电网间的安全稳定协调控制是一个在系统网-荷互动协调调度下实时动态稳定问题,需要从网、荷两方面协调控制,如图2所示。其中电网侧的控制是现在较为成熟的大电网安全稳定调度管理^[37-42],下面重点从精准切负荷和多能协调互动两个方面介绍负荷侧的协调控制。

3.1 精准切负荷技术

用户侧的精准切负荷技术是多态用能与电网间安全稳定的重要技术之一,主要包括暂态控制和稳态控制两个方面,下面进行详细阐述。

3.1.1 精准负荷暂态控制

精准负荷暂态控制是为保证多态用能与电网间的安全稳定运行而进行精准切负荷控制的第一步,综合利用电网的故障信息、运行方式和关键断面潮流等数据,结合故障时负荷的实时状态,通过广域范围内的多个/多组负荷开关快速动作,按一定的控制原则、设定的控制目标和策略快速采取切负荷措施,从而达成系统的稳定。

精准负荷暂态控制的关键是正常运行时大规模、广域范围内负荷的精准实时监视与分类排序,

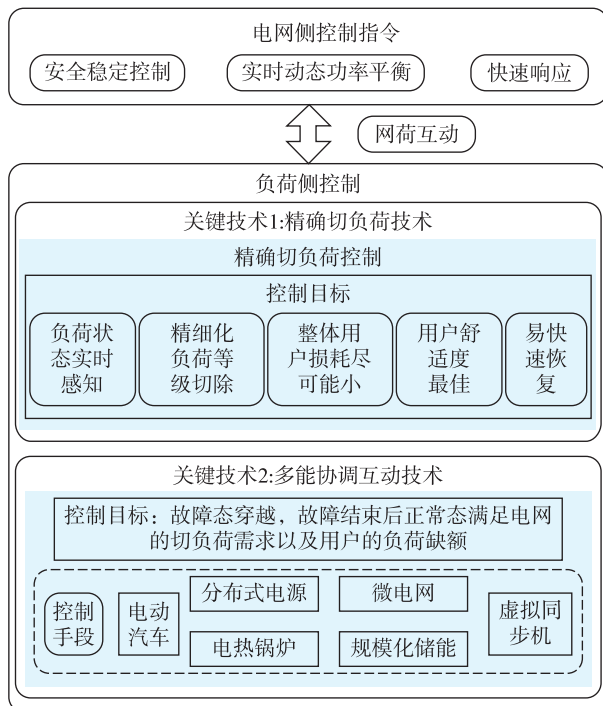


图2 能源互联网多态用能与电网间的安全稳定协调控制框架

Fig.2 Coordinated control framework of power system security and stability with polymorphic energy

以及系统局部故障情况下毫秒级准确决策与海量负荷的准确措施执行。精准负荷的暂态控制在控制时间上要求与现有的集中负荷暂态控制相同,均需在毫秒级的时间内完成对负荷的控制,以满足对电网的暂态稳定、频率稳定的要求。其协调控制的方法主要采用分层分区控制方法,分别由控制主站、子站和执行站来执行组成相应协调指令;其中,控制主站负责系统整体策略的判断和指令下发;控制子站负责本区域的负荷信息汇集与上传,并接收主站命令分配下发至下属执行站;控制执行站负责负荷信息的采集与上送,接收子站命令并执行切负荷控制。

3.1.2 精准负荷稳态控制

精准负荷稳态控制是系统进行切负荷动作完成后,为尽可能多消纳可再生能源,并保证系统的稳定运行而进行的优化协调控制,由特高压电网故障感知、电网运行调整优化策略在线生成以及省调、地调和营销的自动协调控制等三方面组成,其协调控制流程如下。

(1) 特高压故障感知:通过网省协调以及主子站协同两种不同模式的特高压直流故障在线诊断技术,实现直流故障模式的在线识别、运行信息综合集成展示以及省地间联合控制的实时交互,解决目前特高压故障人工分析判断、告警信息繁杂以及

省地间信息交互能力薄弱的问题,提升应对特高压电网的故障感知能力。

(2) 电网运行调整优化决策在线生成:针对特高压直流闭锁情况下控制手段精细化不足的问题,从直流闭锁预决策以及实际闭锁后的校正控制两方面开展研究,综合考虑机组、负荷等资源的调节能力以及调节成本,结合可调度管理的可再生能源,在满足断面输送能力、系统备用水平等约束下,建立控制成本最小化的电网运行调整优化模型,实现电网运行调整优化策略的在线计算,给出应对直流闭锁的预决策及校正控制辅助决策,提升应对特高压直流闭锁的精细化控制水平。

(3) 省调、地调和营销的自动协调控制:在优化决策基础上,将优化决策计算出的控制策略通过智能电网调控系统与营销负荷快速控制系统一体化集成,由调度员直接在调控系统对营销策略终端用户实现负荷控制,实现分钟级负荷控制,解决电网控制断面越限、控制联络线超用以及控制预留旋转备用等稳态问题,实现在电网安全稳定运行条件下,尽可能多消纳可再生能源发电。

3.2 多能协调互动技术

多能协调互动技术是以负荷侧与电网侧的PCC接入点交换功率为设定目标,调动用户侧的电动汽车、分布式电源、微电网、电热锅炉、规模化储能和虚拟同步机等,结合不同能源间的不同时间、不同响应时长等特性,达成满足系统稳定的目标,完成可再生能源发电的消纳,主要有以下几个方面的关键技术。

(1) 在构建的系统模型基础上,充分考虑各类分布式能源、储能和负荷之间的相应速度和响应特性差异,结合各单元设备运行特性数学模型和改进型的运行模型量化分析集成多态用能系统在多个时空尺度上的运行特性和相互作用与影响。通过分析分散和聚合形式下元件运行规律,定量计算能源互联网中能量实时可调裕度和周期可调度范围。

(2) 考虑到间歇性可再生能源电源、电动汽车、储能等单元在共存运行过程中存在互补增效性,针对多态用能不同运行模式形成兼顾重要负荷支撑和经济优化运行的多时空尺度上的“调峰调蓄”协同控制与调度机制。

(3) 考虑到针对网-荷均具有随机性的特点,互动协同运行的运行机会约束模型构建技术,通过需求响应与分布式能源、用户间的互动协调来消纳高渗透率的间歇性可再生分布式能源的出力不确定性。采用孤岛划分和复杂网络节点划分思想,提

出一种基于智能搜索算法的互济协同运行的协同互济调度方法。

(4) 在根据前述系统模型的模块化构建方法所形成的含有两种或两种以上间歇性可再生电源(光伏、风力)、电动汽车、储能单元以及主动负荷的多态用能混合集成系统模型基础上,采用分层分区控制思想实现设备单元级、微网级和系统级上的协同控制技术,各层采用不同时间尺度以保证功率平衡并维持电压、频率在允许范围内,实现系统的安全稳定运行。

4 结语

能源互联网的推广应用,用户侧的冷/热/电等多种能源需求,以及多种能源协调互动和可再生能源的高效利用是一个趋势,但是多态用能与电网间的安全稳定是这些问题的首要和重点核心之一,本文从源-荷互动的角度,构建了一种多态用能与电网间安全稳定的协调控制框架,重点从精准切负荷和多能协调互动技术两方面,提出了多态用能的安全稳定控制技术路线,以期为高渗透率新能源的高效、经济运行提供借鉴。

参考文献:

- [1] 董朝阳, 赵俊华, 文福栓, 等. 从智能电网到能源互联网基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [2] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8.
- [3] 黄仁乐, 蒲天骄, 黄克文, 等. 城市能源互联网功能体系及应用方案设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 26-33, 40.
HUANG Renle, PU Tianjiao, HUANG Kewen, et al. Design of hierarchy and functions of regional energy internet and its demonstration applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 26-33, 40.
- [4] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光, 等. 能源互联网: 驱动力、评述与展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3005-3013.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy internet: driving force, review and outlook[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3005-3013.
- [5] 邓建玲. 能源互联网的概念及发展模式[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 1-5.
DENG Jianling. Concept of energy internet and its development modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 1-5.
- [6] TARANTO G N, ASSIS T M L, FALCAO D M, et al. Highlighting the importance of chronology on voltage protection and control in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 361-369.
- [7] DOOSTIZADEH M, AMINIFAR F, LESANI H. Coordinated multi-area energy and regulation joint dispatch under wind power uncertainty [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2017, 9: 1-18.
- [8] 葛磊蛟, 王守相, 瞿海妮. 智能配用电大数据存储架构设计[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 194-202.
GE Leijiao, WANG Shouxiang, QU Haini. Design of storage framework for big data of SPDU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 194-202.
- [9] LI Wei, SANOS L, DELICATO F C, et al. System modelling and performance evaluation of a three-tier cloud of things [J]. Future Generation Computer Systems, 2017, 70: 104-125.
- [10] REZAEI F, ESMAEILI S. Decentralized reactive power control of distributed PV and wind power generation units using an optimized fuzzy-based method [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2017, 87: 27-42.
- [11] ARBOLEYA P, GARCIA P, MOHAMED B, et al. Distributed resources coordination inside nearly-zero energy buildings providing grid voltage support from a symmetrical component perspective [J]. Electrical Power Systems Research, 2017, 144: 208-214.
- [12] ABIKARRAM J B, MCCONKY K. Real time machine coordination for instantaneous load smoothing and photovoltaic intermittency mitigation [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 1406-1416.
- [13] 姚建国, 高志远, 杨胜春. 能源互联网的认识和展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 9-14.
YAO Jianguo, GAO Zhiyuan, YANG Shengchun. Understanding and prospects of energy internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 9-14.
- [14] 周海明, 刘广一, 刘超群. 能源互联网技术框架研究[J]. 中国电力, 2014, 47(11): 140-144.
ZHOU Haiming, LIU Guangyi, LIU Chaoqun. Study on energy internet technology framework [J]. Electric Power, 2014, 47(11): 140-144.
- [15] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [16] 赵海, 蔡巍, 王进法, 等. 能源互联网架构设计与拓扑模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 30-36.
ZHAO Hai, CAI Wei, WANG Jinfa, et al. An architecture design and topological model of intergrid [J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2015, 30(11): 30-36.
- [17] RO J H, KWON B N, LEE S, et al. Adaptive encoding scheme providing optimal performance for internet of things industry in the backscatter system [J]. International of

- Distributed Sensor Networks, 2017, 13(2):1-5.
- [18] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9-19.
LU Zongxiang, LI HaiBo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-19.
- [19] 严太山, 程浩忠, 曾平良, 等. 能源互联网体系架构及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 105-113.
YAN Taishan, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. System architecture and key technologies of energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 105-113.
- [20] 曹军威, 王继业, 明阳阳, 等. 软件定义的能源互联网信息通信技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3649-3655.
CAO Junwei, WANG Jiye, MING Yangyang, et al. Soft-ware-defined information and communication technology for energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3649-3655.
- [21] 孙秋野, 王冰玉, 黄博南, 等. 狭义能源互联网优化控制框架及实现[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4571-4580.
SUN Qiuye, WANG Bingyu, HUANG Bonan, et al. The optimization control and implementation for the special energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4571-4580.
- [22] 王继业, 孟坤, 曹军威, 等. 能源互联网信息技术研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2015, 52(5): 1109-1126.
WANG Jiye, MENG Kun, CAO Junwei, et al. Information technology for energy internet: a survey[J]. Journal of Computer Research and Development, 2015, 52(5): 1109-1126.
- [23] 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.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunnan, et al. Generation-grid-load-storage coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124.
- [24] 杨方, 白翠粉, 张义斌. 能源互联网的价值与实现架构研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3495-3502.
YANG Fang, BAI Cuifen, ZHANG Yibin. Research on the value and implementation framework of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3495-3502.
- [25] SAGHEZCHI F B, RADWAN A, RODRIGUEZ J. Energy aware relay selection in cooperative wireless networks: An assignment game approach[J]. Ad Hoc Networks, 2017, 56: 96-108.
- [26] SHENG Min, ZHAI Daosen, WANG Xijun, et al. Intelligent energy and traffic coordination for green cellular networks with hybrid energy supply[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2): 1631-1646.
- [27] SALEM M M, ELKALASHY N I, ATIA Y, et al. Modified inverter control of distributed generation for enhanced relaying coordination in distribution networks[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2017, 32(1): 78-87.
- [28] 孙秋野, 滕菲, 张化光, 等. 能源互联网动态协调优化控制体系构建[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3667-3677.
SUN Qieye, TENG Fei, ZHANG Huaguang, et al. Construction of dynamic coordinated optimization control system for energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3667-3677.
- [29] 蒲天骄, 刘克文, 陈乃仕, 等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3511-3521.
PU Tianjiao, LIU Kewen, CHEN Naishi, et al. Design of AND based urban energy internet architecture and its technological issues[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3511-3521.
- [30] 祝恩国, 刘宣, 葛磊蛟. 用电信息采集系统非结构化数据管理设计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(10): 123-128.
ZHU Enguo, LIU Xuan, GE Leijiao. Management design of unstructured data in electrical information acquisition system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(10): 123-128.
- [31] 葛磊蛟, 王守相, 张明, 等. 智能用电条件下用户用能管理与服务平台[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 152-156.
GE Leijiao, WANG Shouxiang, ZHANG Ming, et al. Power usage management & service platform in smart electricity utilization condition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 152-156.
- [32] 孙毅, 叶涵, 李彬, 等. 计及用户舒适度与用电成本的空调负荷优化控制方法[J]. 现代电力, 2016, 35(5): 30-36.
SUN Yi, YE Han, LI Bin, et al. An optimal control method for air conditioning load by considering comfort and electricity expense of consumers[J]. Modern Electric Power, 2016, 35(5): 30-36.
- [33] 肖峻, 谷文卓, 郭晓丹, 等. 配电系统供电能力模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(24): 47-52.
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GUO Xiaodan, et al. Power supply capability model of distribution system[J]. Automation of Power Systems, 2011, 35(24): 47-52.
- [34] 汤涌. 基于响应的电力系统广域安全稳定控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5041-5050.
TANG Yong. Response-based wide area control for power system security and stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5041-5050.
- [35] 舒印彪, 汤涌, 孙华东. 电力系统安全稳定标准研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 1-9.
SHU Yinbiao, TANG Yong, SUN Huadong. Research on power system security and stability standards[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 1-9.
- [36] 李柏青, 刘道伟, 秦晓辉, 等. 信息驱动的大电网全景安全

- 防御概念及理论框架[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5796-5805.
- LI Baiqing, LIU Daowei, QIN Xiaohui, et al. Concept and theory framework of panoramic security defense for bulk power system driven by information[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5796-5805.
- [37] 陆玉军, 李澄, 陈颖, 等. 紧急切负荷网荷互动终端设计与实现[J]. 2017, 36(3): 112-118.
- LU Yujun, LI Cheng, CHEN Hao, et al. Design and implementation of user terminal unit for emergency load shedding[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 112-118.
- [38] YOU Changsheng, HUANG Kaibin, Hyukjin Chae, et al. Energy efficient resource allocation for mobile edge computation offloading [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1397-1411.
- [39] OH S, LEE J, PARK S. Energy efficient and accurate monitoring of large scale diffusive objects in internet of things [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(3): 612-615.
- [40] BLANCO-NOVOA O, FERNÁNDEZ-CARMÉS, FRAGALAMS P, et al. An electricity price aware open source smart socket for the internet of energy [J]. Sensors, 2017, 17(643): 1-34.
- [41] 孙璐, 徐青山, 李国栋, 等. 能源互联网背景下热电联供系统的优化调度[J]. 电器与能效管理技术, 2017(8): 61-67.
- SUN Lu, XU Qingshan, LI Guodong, et al. Optimal schedule of CHP under the background of energy inter-connection [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(8): 61-67.
- [42] 马洲俊, 王勇, 朱红, 等. 源-网-荷不对称的配电网全三相仿真方法[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(6): 50-55.
- MA Zhoujun, WANG Yong, ZHU Hong, et al. Three-phase operation simulation method of intelligent distribution network with source-grid-load asymmetry [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(6): 50-55.

作者简介:



秦晓辉

秦晓辉(1979—),男,山西晋城人,教授级高级工程师,从事电力系统规划运行分析和新技术应用工作;

张彦涛(1980—),男,河北保定人,教授级高级工程师,从事电力系统规划研究工作;

葛磊蛟(1984—),男,湖北咸宁人,讲师,研究方向为智能配用电、云计算和大数据(E-mail: legendgj@163.com);

王虹富(1984—),男,河北保定人,工程师,从事电力系统潮流计算和短路电流计算工作;

王莹(1979—),女,辽宁锦州人,高级工程师,从事电网调度运行与计划、电网规划计划管理工作。

A Framework Design of Coordinated Control for Multi-energy's Utilization and Grid's Security and Stability

QIN Xiaohui¹, ZHANG Yantao^{1,2}, GE Leijiao², WANG Hongfu¹, WANG Ying³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: With the integration of large-scale new energy resources, EVs, microgrids, CCHPs, large electric heating boilers and ground-source heat pump in to power system, it has been converted to be a meshed multi-energy system with the setup for cooling, heating, and electricity. Since power system's stability can be affected by grid and user sides, a frame work design of coordinated control for multi-energy's utilization and grid's stability and security under the scope of energy internet is proposed in this paper. Firstly, this paper introduces multit-energy utilization in the power system, and investigates its characteristics. Secondly, the control objects for multi-energy's utilization and grid's security and reliability were constructed from the aspects of normal and contingency conditions. Lastly, a framework is designed for multi-energy's utilization and grid's stability and security, and provides a viable scheme for the utilization of high-penetration new energy.

Key words: polymorphic energy; security and stability; coordinated control; accurate load shedding

(编辑 刘晓燕)