

多能流能量管理研究:挑战与展望

孙宏斌^{1,2}, 潘昭光^{1,2}, 郭庆来^{1,2}

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100084;

2. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学, 北京市 100084)

摘要: 多能流耦合是能源互联网和综合能源系统区别于智能电网的关键特征之一。多能流能量管理面临三方面挑战:多能流耦合、多时间尺度和多管理主体。总结了国内外的研究现状,展望了多能流能量管理的研究趋势和重点:多能流实时建模与状态估计;多能流多时间尺度安全分析与安全控制;多能流混合时间尺度优化调度;多能流能量管理系统设计、开发和验证。

关键词: 能源互联网; 综合能源系统; 多能流; 能量管理系统

0 引言

在传统能源系统中,各类能源耦合不紧,不同能源系统相对独立,如电网、热力网、天然气网等属于不同公司管理和运营,导致能源使用效率总体不高。随着能源和环境问题的日益严峻,为了提高能源的总体效率和可再生能源的消纳能力,对多类能源互联集成和互补融合的需求日益迫切。现实中各种能源转换设备(如热电联产(CHP)/冷热电联产(CCHP)、热泵、电采暖、电制氢等)的发展也为多类能源互联提供了手段。

近年来,综合能源系统成为能源领域发展的重要趋势之一,学术界和工业界都有许多探索,在欧洲的发展尤其迅速^[1]。2005年,瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH)承担了“未来能源网络愿景”(Vision of Future Energy Networks)研究项目,认为未来能源网是电、热、冷、天然气等网络相互耦合。丹麦为了在2050年实现100%可再生能源的目标,十分强调电力、天然气、供暖的融合。2015年4月,创新英国(Innovate UK)成立“能源系统弹射器”(Energy Systems Catapult),支持英国的企业重点研究和开发综合能源系统。此外,荷兰代尔夫特理工大学(TU Delft)有“下一代基础设施”(Next Generation Infrastructures)研究项目,瑞典有“马尔默西港重建”(Western Harbour Front Redevelopment-

Malmo)项目,德国有“电制氢”(Power to Gas)、“柏林区域能源系统”(Berlin District Energy System)等项目。除了欧洲,美国国家可再生能源实验室(NREL)在2013年成立了“能源系统集成”(Energy Systems Integration)研究组,IBM有Smart City等项目,澳大利亚Wollongong大学有“智能设施”(SMART Infrastructure)研究等。近几年,国内也已经启动了若干个综合能源利用和多能协同方向的国家级项目和自然科学基金支持的研究,清华大学、天津大学、中国电力科学研究院等高校和科研院所也已经取得了不少成果,正向国际前沿靠拢。

另一个重要趋势是近年来国内外掀起的能源互联网研发热潮^[2-3]。2008年,美国和德国都启动了能源互联网的研究或示范,2011年,里夫金在《第三次工业革命》进一步推广了能源互联网概念。2012年以来,国内也有几次能源互联网的研讨会并启动了相关研究,如中国电力科学研究院“可再生能源互联网”前沿论坛;国家电网公司提出了全球能源互联网;2015年4月,作者作为牵头人组织召开了以能源互联网为主题的香山科学会议,清华大学成立了能源互联网创新研究院;2015年7月,《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》正式将“互联网+”智慧能源作为重点行动;2016年2月,《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》对能源互联网的发展提出了具体的指导意见;2016年3月,能源互联网进入中国的“十三五”规划。在不同的研究和表述中,多能协同和耦合互补都是能源互联网的核心特征之一。

通过实体抽象,无论是综合能源系统还是能源互联网,多能流是其区别于智能电网的关键特征,表

收稿日期: 2016-05-22; 修回日期: 2016-06-12。

上网日期: 2016-06-30。

国家重点基础研究发展计划资助项目(973计划)(2013CB228203);国家自然科学基金资助项目(51537006);国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51321005)。

示多类能量相互转换、耦合和作用。

在电力系统领域,自从1967年DyLiacco博士提出电网的能量管理系统(energy management system, EMS)框架,经过40余年发展,传统面向电网的EMS已较成熟,在保障电网安全和高效运行方面发挥了核心作用,被公认为电网运行的“神经中枢和大脑”。而多能流系统显然更为复杂,传统的电网EMS无法直接应用。为了保证多能流系统的安全高效运行,实现提高综合能效和可再生能源消纳的目标,亟需发展面向多能流的EMS。本文总结了多能流能量管理的技术挑战,综述了该领域国内外的研究现状,并展望了研究趋势。

1 技术挑战

与传统智能电网的能量管理相比,多能流能量管理面临新的技术挑战,主要体现在以下三个方面:多能流耦合、多时间尺度和多管理主体。

1.1 多能流耦合

多能流系统最基本的特点就是由多类异质能流系统组成,不同能流系统耦合在一起。如图1所示,电、热、冷、气等能流通过CHP/CCHP、电制氢、热泵等设备转化并耦合在一起。异质能流模型各异,特性差异大,各有不同的建模、分析和控制方法。异质能流之间相互转换和作用,从而耦合形成更加复杂的大系统。随着耦合的不断增强,耦合带来的系统特性变化越来越明显,也越来越复杂。传统单能流系统的建模、分析和控制方法已经无法直接应用。因此需要深入研究多能流耦合下的建模、分析、优化和控制方法,发挥多能流协同的作用,避免耦合带来的不利影响。

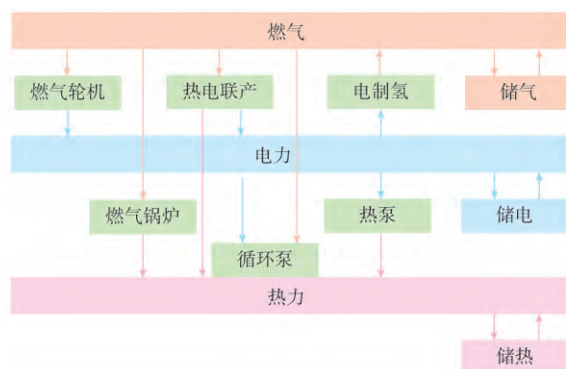


图1 多能流耦合示意图

Fig.1 Illustration of multi-energy flow coupling

1.2 多时间尺度

不同能流系统具有显著不同的动态过程,体现在不同的时间尺度上。如图2所示,电力系统的惯性最小,调节速度快;天然气系统次之;热力等系统

再次之。当不同动态的能流系统组成一个多能流系统,其特性也会表现出多时间尺度特点,这使得不同能流间的相互作用变得复杂,这是传统单能流系统中没有的特点。需要深入研究不同能流间相互作用的时间尺度关系,进而提出时间尺度配合最佳的能量管理方法,提高供能安全性评估的科学性,同时挖掘综合能量管理的效益潜力。

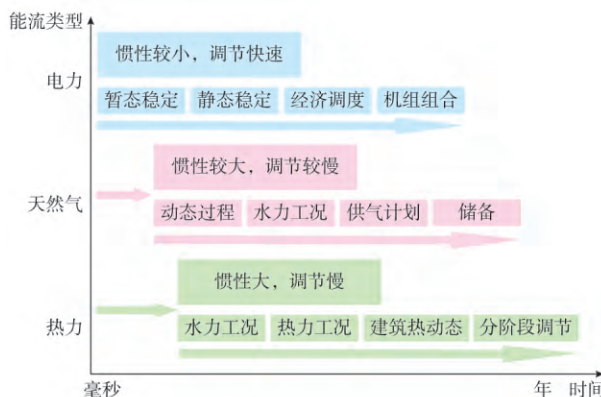


图2 多时间尺度示意图

Fig.2 Illustration of multi-time scale

1.3 多管理主体

传统的电、热、冷、气等分属不同公司和行业管理,存在行业壁垒。未来虽然可能出现同时管理几类能源的综合能源服务公司,但仍然会存在大量的公司分别管理不同层级、不同类型、不同环节的能源和设备,如图3所示,存在多个管理主体,从而存在信息隐私、操作权限和目标差异等问题。这给能量管理带来挑战,需要深入研究分布式能量管理方法,在信息分布的情况下,通过交换必要的边界信息,实现多能流的自律-协同控制,满足全局安全和高效的目标。

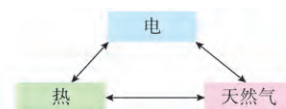


图3 多管理主体示意图

Fig.3 Illustration of multi-management body

2 国内外研究现状

虽然近几年国内外在多能流领域做了不少研究,但与电网能量管理问题不同,多能流能量管理问题尚未形成研究体系,尚未形成EMS的整个架构,也未覆盖EMS的各个核心功能。参照电网EMS的组成架构,以下从多能流建模和计算、状态估计、安全分析与安全控制、优化调度、EMS架构等五方面总结研究现状。

2.1 多能流建模和计算

在传统的电、热、冷、气等各自领域,各系统的建模方法相对成熟。电网主要由潮流模型表示,遵循电磁学定律,主要变量有各节点的电压幅值和相角、线路有功/无功潮流、各节点注入功率等,有一整套的网络分析方法^[4-5]。供热/冷网络遵循流体力学和热力学定律,包括水力和热力两大模型,主要变量有压力、流量、温度等^[6-7]。天然气网络遵循流体力学定律,主要变量有压力、流量等^[8-9]。

随着 CHP 和 CCHP 等技术的出现,针对单个设备的建模、仿真、优化运行研究较多^[10-11]。近几年伴随微电网的发展,多种能量形式的综合利用也在增加,从系统层次建立了相应的数学模型^[12-13],而且模型的精度也在不断增加。

许多研究建立了多能流的能量平衡模型,考虑不同能量之间的转换关系和能量供需的平衡,但不同能流相对分立,还没有形成多能流耦合的统一概念。

瑞士联邦理工学院提出了能源集线器(Energy Hub)和能源连接器(Energy Interconnect)的概念^[14]。其中 Energy Hub 模型可以表示多种能量之间的转换、耦合等,是对多种实际设备及其组合关系的抽象建模,并发展出扩展 Energy Hub,目前已应用于优化设计、最优潮流、优化调度等不同方面^[15-16]。但 Energy Hub 对实际系统进行了较大简化,难以考虑非线性、动态等特性。此外 Energy Hub 可以建模多能流网络中的一个节点(内部可以是一个小系统),无法描述节点间互联的网络关系。

为了进一步考虑多能流的网络关系,能量流、网络流等模型得到了应用,发展出了互联 Energy Hub 等概念,从而可以考虑网络约束。文献^[17-18]使用网络流模型对美国全国的煤、天然气和电力网络进行了分析;文献^[12]提出了一种基于母线模型的通用微电网多能流系统建模方法。这些模型也做了线性化处理,可以应用在规划、评估、初步优化等许多方面,尤其是在大规模系统和强不确定性中可以简化分析,但这些模型没有考虑不同网络的具体特性约束,前面所述的电磁学、流体力学、热力学约束没有体现,难以适用于精度要求高的在线能量管理中,比如需要求解多能流的安全分析。

近几年考虑多能流网络具体特性约束的联合建模和计算的研究开始出现。文献^[19]研究了电网与天然气耦合运行时的稳态多能流计算;文献^[20]研究了电网与供热网络的联合稳态多能流计算;文献^[21-22]研究了电、热、气联合稳态多能流计算;文献^[23]进一步考虑了时间尺度特性提出了准稳态的

多能流模型;而文献^[24]则研究了考虑风电不确定性的电、气的区间能流问题。由于各能流特性差异以及耦合增强,如何高效求解多能流仍然是一个挑战,目前还没有成熟的可以进行多能流联合求解和仿真的工具。此外还需要进一步考虑多时间尺度的动态特性。

综上所述,单能流系统和单设备的建模已经比较成熟,未考虑网络具体特性约束的模型已得到大量应用,多能流网络的联合建模取得初步成果,但在具体应用问题中有待改进,如多能流的高效求解与仿真。

2.2 多能流状态估计

电网状态估计是一个较成熟的研究领域。状态估计利用数据采集与监控(SCADA)提供的冗余实时量测数据,实现完整、可信的全局电网实时建模和一致的状态解,为后续的电网运行调度决策功能提供支持。

相比电网,热网状态估计的研究还比较初步。只考虑管道中的水的流动而不考虑温度分布,即普通水管网络的状态估计,目前已有研究。文献^[25]提出并实现了水管网络的状态估计,以及坏数据辨识和漏水检测;文献^[26]总结了水管网络状态估计的方法。但将水力工况和热力工况结合起来的的状态估计研究还比较少。文献^[27]提出了一种基于用户端量测的启发式状态估计方法,由于未考虑热网的网络约束,并不能算是严格意义上的热网状态估计;文献^[28]考虑热网和电网之间的耦合关系,研究了热电联合网络的状态估计。

综上所述,电网状态估计的研究已经比较成熟,而热网、天然气网络的状态估计研究还比较初步,多能流状态估计基本处于空白状态。

2.3 多能流安全分析与安全控制

在线安全分析和安全控制是 EMS 的核心功能之一,对于确保系统时刻运行在安全状态非常重要。电力系统的安全运行要求非常高,研究也非常丰富,众多学者在这个方面做出了卓有成效的贡献,并且在实际电网运行中得到了大量应用。

在传统的供热/冷网络和天然气网络中,规划和离线分析已有考虑 $N-1$ 安全问题。文献^[29]建立了用于电力系统可靠性分析的天然气管网模型,该模型考虑了天然气系统与电力系统的区别,采用高阶模型进行电力系统可靠性分析;文献^[30]研究了电力网络和天然气网络暂态过程的相互影响。但在运行阶段,面向多能流的 $N-1$ 在线安全分析的研究还非常少,无法适应多能流运行方式实时变化的需要。文献^[23]研究了考虑时间尺度特性的电、热

耦合网络在各种扰动情况下的相互影响机理和过程;文献[31]提出了多能流静态安全分析的基本概念和方法,但还未能充分考虑多能流动态的多时间尺度特性。

多能流的安全控制问题研究也还较少,主要在最优能流方面开展了若干研究。文献[32]提出了求解电、气耦合网络最优能流的方法;文献[15]研究了 Energy Hub 网络的最优能流问题;文献[33]进一步研究了分布式多能流的最优能流问题。

综上所述,在线安全分析和安全控制在电力系统领域比较成熟,而在供热/冷和天然气网络方面相对薄弱,已有研究关注不同系统间的相互影响和最优能流,但适用于在线运行的系统性的多能流安全分析和安全控制的概念和方法还比较初步,有待深入研究。

2.4 多能流优化调度

国内外对于多能流优化调度方面已经有了较多研究,包括优化调度模型、算法和效益分析等。

文献[34]对冷热电联供系统中的设备进行了详细的数学建模,并对燃气轮机的运行特性进行了仿真研究;文献[35]利用粒子群算法优化 CCHP 机组的电出力;文献[36]基于太阳能发电和多能流系统,研究在多目标需求下的冷、热、电优化调度模型和策略;文献[37]主要研究了储能在多能流系统优化中起到的作用。在家庭和楼宇层面的多能优化,文献[38]研究了分时电价机制下家庭中电、热、冷、气的优化问题及其峰值负荷的变化;文献[39]在此基础上考虑电-热之间的不同时间尺度研究了优化周期的影响;文献[40]对楼宇型多能流系统进行了建模,并对以电定热、以热定电运行的策略及其组合对系统经济、能源和环境目标的影响方法进行了研究;文献[41]基于建筑仿真和模型化简评估了建筑参与需求响应的能力。以上属于多能流优化调度方面的重要研究,但大部分都未考虑多能流网络的约束,而且主要面向稳态问题。

考虑具体网络约束和动态特性的研究已有出现,但一般仍要进行简化出力。文献[42-43]利用热电联产机组参与电力系统调峰,使用了基于自回归滑动平均(ARMA)模型和频率响应模型的供热系统动态,做了较大简化。文献[44]在微网的热电联合优化运行中考虑了网络约束,文献[45]在电、气耦合系统中考虑了天然气网络的动态特性,文献[46]研究了考虑天然气流量瞬态特性安全约束的电、气协调调度。

此外,由于多能流潜在的灵活性在可再生能源消纳方面的作用,许多文献已经考虑可再生能源的

优化调度问题。文献[47-48]研究了微网的冷、热、电、气联合优化及其在消纳可再生能源方面的作用;文献[49-50]从更大范围的区域角度利用热力系统和储热消纳风电。但上述研究尚未考虑热网具体模型和动态过程;文献[51-52]考虑了热网时延的影响;文献[53]研究了含新能源的热网动态模型及其优化调度;文献[54-55]在经济调度和机组组合中利用城市热网的储热特性消纳风电;文献[56]利用鲁棒方法应对多能流系统中风电的不确定性,考虑了网络特性。这些研究考虑了网络约束,部分利用了不同能流的动态差异,但主要只研究其中两种能量耦合并使用了一致的优化周期,优化方法和传统方法较为一致,多能流多时间尺度和多管理主体的特性没有充分体现。

综上所述,多能流优化调度的研究相对比较丰富,部分研究考虑了不同能流系统的网络约束和动态过程,但还比较初步,尚未充分考虑多时间尺度特性和多管理主体对优化调度方法的影响。

2.5 多能流 EMS 架构

集中式的电网 EMS 发展成熟,实现了众多的高级分析决策功能^[57],得到了广泛应用,基本满足了复杂电力系统的安全经济运行需求。相对而言,供热/冷系统和供气系统的 EMS 功能还不够完善。近年来,由于微电网的发展,部分微电网实现了冷热电联供,具备了初步的 EMS 功能^[58],但大部分还不够完善,主要实现了监测和基础优化调度功能,还没有实现多能流网络的高级分析决策,无法适用于更多层次的多能流系统。

作者提出了智能电网 EMS 家族的概念,认为未来的 EMS 将采用分布自治、集中协同架构^[59]。在多能流系统中,由于多主体管理的特点,各种分布式 EMS 也必将广泛存在于多主体之中,甚至在家庭、园区、城市、省份、区域、国家、跨国等不同层面都需要存在 EMS,从而形成多能流意义下的 EMS 家族。不同的 EMS 家族成员将通过双向通信形成互联,实现多能量流的协同优化管理。

综上所述,电网的集中式 EMS 已经很成熟,分布式 EMS 正在发展中,而供热/冷系统和天然气系统的 EMS 还不够完善,缺乏适应多能流特点的 EMS 功能架构设计,尚无成熟的多能流 EMS 问世。

2.6 小结

总体而言,国外尤其是欧洲在多能流领域的基础研究和示范较为领先,但目前国际上在多能流能量管理方面的研究还处于起步阶段,尚缺乏系统性的基础理论和成熟的系统应用。电网 EMS 的一些基本概念和方法,在多能流系统中尚处于空白,研究空间很大。因此,一方面要将电网 EMS 的概念

和经验,类比到多能流的 EMS 中,另一方面需要考虑多能流相比电网的核心特点,提出面向多能流的能量管理理论和方法体系,研制出可以在线运行的多能流 EMS。

3 研究展望

针对多能流能量管理的“多能流耦合、多时间尺度和多管理主体”三方面挑战,需要将传统电网能量管理问题拓展到包含电力、天然气和冷热等多能流系统的综合能量管理问题,构建含实时建模与状态估计、安全分析与安全控制、优化调度等多能流能量管理的理论体系,突破多能流能量管理的关键技术,开发多能流 EMS,保障多能流系统运行的安全和高效。

3.1 多能流实时建模与状态估计

实时建模与状态估计是能量管理的重要基础,为后续的在线分析和优化调度提供可靠和一致的多能流实时状态解。

对于多能流系统,需要建立多能流耦合的综合量测方程和多能流耦合的综合状态估计模型,提出多能流耦合的可观测性分析方法,研究由于不同网络量测数值差异大导致的联合状态估计求解的数值问题及解决方法。由于坏数据的存在,以及不同能流系统量测精度的差异,需要提出多能流耦合的坏数据辨识方法和综合抗差状态估计方法,提高多能流实时建模的可靠性和准确性。此外,为了适应供热网络和天然气网络的动态特性,需要提出多能流动态状态估计方法。

由于多主体管理不同能流和不同供能区域的实际需求,需要研究分布式状态估计算法,包括分布式多能流状态估计模型、分布式可观性和坏数据辨识的分析方法、分布式多能流状态估计最小的信息交互和快速收敛方法。

3.2 多能流多时间尺度安全分析与安全控制

安全分析和安全控制是能量管理的核心功能之一,可以在线发现多能流系统实时运行中的薄弱环节;通过安全控制,保障多能流系统运行的安全性。

在安全分析中,首先需要研究多能流预想事故集的定义和建模方法;然后研究各种预想事故情况下不同能流之间的耦合及其相互作用机理,而这需要研究多能流的联合计算方法,统一求解电网潮流、热网水力/热力工况及天然气网水力工况;在此基础上需要研究不同能流安全性指标随时间变化的规律,进而提出考虑不同能流的供能品质差异和多能流多时间尺度特性的安全分析定义及其事故严重性评估指标;最后形成多能流安全分析框架。

为了满足安全分析的在线需求,需要研究多能流多时间尺度安全分析的高效求解算法。可以使用稀疏技术和修正技术提高求解速度;适应不同网络动态特性和实际问题需求,简化多能流计算模型和方法,如基于稳态模型的多能流多时间尺度安全分析方法;研究多能流预想事故的快速过滤方法和近似求解方法,减少计算量。

根据多能流安全分析结果,研究多能流安全控制方法,使多能流系统运行在安全范围内。根据不同需求,研究多能流的预防控制、校正控制、紧急控制和恢复控制方法;研究不同能流网络相互支撑的作用机理,利用网络的相互作用增加控制手段,提高综合供能的安全性和可靠性;建立最优能流模型,研究多能异质网络的求解方法,进而可以分析多能流综合灵敏度模型,简化分析。

为了满足多管理主体分布式分析和控制的需要,建立多能流分布式模型,研究多能流的分布式高效求解技术;提出基于分布式的安全分析框架及其安全评估指标;研究分布式多能流安全控制方法。

3.3 多能流混合时间尺度优化调度

优化调度是能量管理的核心功能之一,用于实现多能流系统在安全约束下的高效运行。

考虑到多能流动态的多时间尺度特性,需要研究不同能流响应特性在时间尺度上的差异性,在此基础上研究多能流系统动态过程的相互影响,分析多能流系统的多动态变化过程、特征及其对调度指令的响应行为,研究不同能流的互补性和灵活性,及其消纳可再生能源的潜力;研究不同优化周期对多能流系统优化调度的影响,进而提出多能流调度中不同能流的差异化优化周期的确定方法;在此基础上建立基于混合时间尺度的多能流优化调度模型,充分挖掘效益潜力并降低求解规模;针对混合时间尺度和强时段耦合的特点提出有效的求解方法。

针对多管理主体的特点,需要提出分布式多能流优化调度框架,研究分布式多能流优化调度的交互机制和交互信息,适应多种管理模型;需要研究面向多主体的分布式多能流优化调度模型和高效求解方法,提高其收敛性。

3.4 多能流 EMS 设计、开发和验证

高效的多能流 EMS 离不开合理的架构,不同功能、不同管理主体的 EMS 之间都需要交互信息,实现自律和协同。

在功能架构上,多能流 EMS 需要包括实时建模与状态估计、安全分析与安全控制、优化调度等核心模块,不同模块之间的关系见图 4。因此需要研究不同模块的实现技术与系统集成方案,以及不同功能之间的相互关系和信息交互。

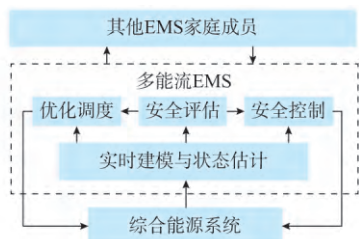


图4 多能流 EMS 功能架构
Fig.4 Functional architecture of EMS for multi-energy flow

在分布式架构上,形成多能流 EMS 家族,适应多主体管理的需求,如图 5 所示,包括火电厂 EMS (T-EMS)、风电场 EMS (W-EMS)、光伏 EMS (P-EMS)、变电站 EMS (S-EMS)、天然气发电 EMS (G-EMS)、热电联产 EMS (CHP-EMS)、储能 EMS (ST-EMS)、工厂 EMS (F-EMS)、建筑 EMS (B-EMS)、家庭 EMS (H-EMS)、园区 EMS (D-EMS)、微电网 EMS (μ -EMS)、城市 EMS (C-EMS) 和国家 EMS (N-EMS) 等不同对象、不同层面。需要研究电力、天然气和冷热等多能流 EMS 分布式信息交互的实现技术与集成方案,实现 EMS 之间的双向信息交互,调控能量的双向流动,达到不同层级、不同区域的能量优化配置。

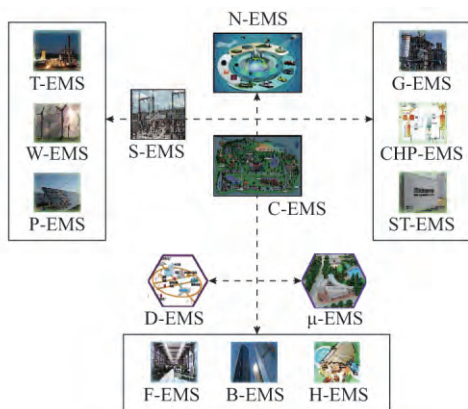


图5 多能流 EMS 家族
Fig.5 EMS family of multi-energy flow

在研究基础上,需要开发多能流 EMS 家族,实现不同 EMS 之间的互联和分布式架构,满足多能流系统自律协同的需求。此外,可以充分利用大数据、云计算、物联网和移动互联网等互联网新技术,拓展多能流 EMS 的应用场景,充分提升多能流系统各层面各环节运行的高效、安全、可靠水平。

为了对多能流 EMS 进行验证,应当搭建包含电力、天然气和冷热等多能流系统的计算机数字仿真平台,对 EMS 功能和性能进行仿真验证。最后,需要利用运行的实际多能流系统,对 EMS 功能和

性能进行现场验证,让多能流 EMS 在实际中发挥作用。

4 结语

多能流是能源互联网和综合能源系统区别于智能电网的关键特征之一,是能源领域的重要发展方向。多能流系统的安全高效运行离不开多能流能量管理的研究和系统开发应用,但目前国内外在该方面的研究还处于起步阶段,尚缺乏系统性的研究和成熟系统的应用,研究空间大。和传统电网能量管理相比,多能流能量管理主要面临“多能流耦合、多时间尺度和多管理主体”三方面挑战。因此,需要攻克多能流能量管理的四项关键技术:①多能流实时建模与状态估计;②多能流多时间尺度安全分析与安全控制;③多能流混合时间尺度优化调度;④多能流 EMS 设计、开发和验证。

通过构建多能流能量管理的理论和方法体系,研制多能流 EMS,进而在数字仿真平台和实际多能流系统中获得验证和应用,有利于促进可再生能源利用和综合能效提高,也有利于综合供能安全,促进能源行业升级,为中国能源生产和消费革命提供一条新的技术途径。

参考文献

- [1] 吴建中. 欧洲综合能源系统发展的驱动与现状[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20150512001.
WU Jianzhong. Drivers and state-of-the-art of integrated energy systems in Europe[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20150512001.
- [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. DOI: 10.7500/AEPS20150701007.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20150701007.
- [3] 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.
- [4] WOOD A J, WOLLENBERG B F, SHEBLÉ B. Power generation, operation and control[M]. Hoboken: Wiley, 2013.
- [5] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [6] 田玉卓, 闫全英, 赵秉文. 供热工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [7] 石兆玉. 供热系统运行调节与控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
- [8] 张勇. 燃气管网的稳态分析与模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.

- [9] 段常贵.燃气输配[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [10] 赖中练.热电冷联产系统准稳态模拟[D].北京:清华大学,2009.
- [11] LIU P, GEROGIORGIS D, PISTIKOPOULOS I. Modeling and optimization of polygeneration energy systems [J]. Catalysis Today, 2007, 127: 347-359.
- [12] 王成山,洪博文,郭力,等.冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J].中国电机工程学报,2013,33(31):26-33.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of combined cooling, heating and power microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 26-33.
- [13] 王锐,顾伟,吴志.含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J].电力系统自动化,2011,35(8):22-27.
WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-27.
- [14] GEIDL M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems[D]. ETH Zurich, 2007.
- [15] GEIDL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [16] KIENZLE F, AHCIN P, ANDERSSON G. Valuing investments in multi-energy conversion, storage, and demand-side management systems under uncertainty[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2011, 2(2): 194-202.
- [17] QUELHAS A, GIL E, MCCALLEY J D, et al. A multiperiod generalized network flow model of the U.S. integrated energy system: Part I model description[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 829-836.
- [18] QUELHAS A, MCCALLEY J D. A multiperiod generalized network flow model of the u.s. integrated energy system: Part II simulation results[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(2): 837-844.
- [19] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [20] LIU Xuezhi. Combined analysis of electricity and heat networks [D]. Cardiff University, 2013.
- [21] LIU Xuezhi, MANCARELLA P. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems [J]. Applied Energy, 2016, 167: 336-352.
- [22] 徐宪东,贾宏杰,靳小龙,等.区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(14):3634-3642.
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [23] PAN Zhaoguang, GUO Qinglai, SUN Hongbin. Interactions of district electricity and heating systems considering time-scale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow[J]. Applied Energy, 2016, 167: 230-243.
- [24] QIAO Zheng, HUANG Shangyuan, LI Rui, et al. Power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks considering the uncertainty of wind power [C]// Applied Energy Symposium and Forum, REM 2016: Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid, April 19-21, 2016, Maldives: 6p.
- [25] BARGIELA A. On-line monitoring of water distribution networks[D]. Durham: Durham University, 1984.
- [26] PREIS A, WHITTLE A J, OSTFELD A, et al. Efficient hydraulic state estimation technique using reduced models of urban water networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 137(4): 343-351.
- [27] FANG Tingting, LAHDELMA R. State estimation of district heating network based on customer measurements[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 1211-1221.
- [28] 董今妮,孙宏斌,郭庆来,等.热电联合网络状态估计[J].电网技术,2016,40(6):1635-1641.
DONG Jinni, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. State estimation for combined electricity and heat networks [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1635-1641.
- [29] MUNOZ J, JIMENEZ-REDONDO N, PEREZ-RUIZ J, et al. Natural gas network modeling for power systems reliability studies [C]// 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, June 23-26, 2003, Bologna, Italy: 8p.
- [30] XU X, JIA Hongjie, CHIANG H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 30(3): 1212-1221.
- [31] 潘昭光,孙宏斌,郭庆来.面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J].电网技术,2016,40(6):1627-1634.
PAN Zhaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Static security analysis method of multi-energy flow for Energy Internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1627-1634.
- [32] AN S, LI Q, GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow [C]// 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-11, 2003: 138-143.
- [33] MOEINI-AGHTAIE M, ABBASPOUR A, FOTUHI-FIRUZABAD M, et al. A decomposed solution to multiple-energy carriers optimal power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2014, 29(2): 707-716.
- [34] 马力.CCHP 及其所构成微网的运行特性研究[D].天津:天津大学,2008.
- [35] FU Xuqian, HUANG Shangyuan, LI Rui, et al. Electric power output optimization for CCHP using PSO theory[C] // Applied Energy Symposium and Forum, REM2016: Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid, April 19-21, 2016, Maldives.
- [36] WANG Man, WANG Jiangfeng, ZHAO Pan, et al. Multi-objective optimization of a combined cooling, heating and power system driven by solar energy[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 289-297.
- [37] LI Jinxia, ZHU Shouzheng, ZHENG Jinghong, et al. Combined economic operation research of CCHP system and energy storage[C]// 2014 International Conference on Information

- Science, Electronics and Electrical Engineering (ISEEE), April 26-28, 2014, Sapporo, Japan: 574-578.
- [38] PAN Zhaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. TOU-based optimal energy management for smart home[C]// 2013 4th IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), October 6-9, 2013, Lyngby, Denmark: 5p.
- [39] PAN Zhaoguang, GUO Qinglai, SUN Hongbin. Impacts of optimization interval on home energy scheduling for thermostatically controlled appliances[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(2): 90-100.
- [40] 许东. 微型燃气轮机冷电联供系统能量优化与管理[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [41] YANG Fan, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Demand response capability assessment for buildings based on simulation and model simplification[C]// 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), November 15-18, 2015, Brisbane, QLD: 6p.
- [42] 付林. 热电(冷)联产系统电力调峰运行研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
- [43] 唐家裕. 基于管网热动态特性的供热机组电力调峰运行研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [44] AWAD B, WU Jianzhong, EKANAYAKE J, et al. Integrated operation of an energy microgrid with islanded electricity network [C]// CIRED 2011: The 21st International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, June 6-9, 2011, Frankfurt, Germany.
- [45] CHAUDRY M, JENKINS N, STRBAC G. Multi-time period combined gas and electricity network optimisation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1265-1279.
- [46] LIU Cong, SHAHIDEHPOUR M, WANG Jianhui. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow[J]. Chaos, 2011, 21(21): 599-606.
- [47] WU Fan, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Research on the optimization of combined heat and power microgrids with renewable energy[C]// 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), December 7-10, 2014, Hong Kong: 5p.
- [48] WU Fan, HUANG Shangyuan, LI Rui, et al. Research on the collaborative optimization of multi-energy flow microgrids [C] // Applied Energy Symposium and Forum, REM2016: Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid, April 19-21, 2016, Maldives.
- [49] 陈新宇. 促进风电消纳的电热能集成系统模型与方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2014.
- [50] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5063-5072.
- XU Fei, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Combined electricity-heat operation system containing large capacity thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [51] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596-3604.
- GU Zepeng, KANG Zhongqing, CHEN Xinyu, et al. Operation optimization of integrated power and heat energy systems and the benefit on wind power accommodation considering heating network constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [52] 李鹏, 杨玉龙, 黄越辉, 等. 综合热电负荷控制下的省级电网风电并网研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(2): 69-73.
- LI Peng, YANG Yulong, HUANG Yuehui, et al. Wind power integration in provincial power grid under electricity and heating load control[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 69-73.
- [53] JIANG X S, JING Z X, LI Y Z, et al. Modelling and operation optimization of an integrated energy based direct district water-heating system[J]. Energy, 2014, 64: 375-388.
- [54] LI Zhigang, WU Wenchuan, SHAHIDEHPOUR M, et al. Combined heat and power dispatch considering pipeline energy storage of district heating network [J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2015, 1(7): 12-22.
- [55] LI Zhigang, WU Wenchuan, WANG Jianhui, et al. Transmission-constrained unit commitment considering combined electricity and district heating networks[J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2015, 2(7): 480-492.
- [56] MARTINEZ-MARES A, FUERTE-ESQUIVEL C R. A robust optimization approach for the interdependency analysis of integrated energy systems considering wind power uncertainty[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2013, 28(4): 3964-3976.
- [57] BOSE Anjan. Smart transmission grid applications and their supporting infrastructure[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2010, 1(1): 11-19.
- [58] OLIVARES D E, CANIZARES C A, KAZERANI M. A centralized optimal energy management system for microgrids [C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, San Diego, USA.
- [59] 孙宏斌, 张伯明, 吴文传, 等. 自律协同的智能电网能量管理系统家族: 概念、体系架构和示例[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 1-5. DOI: 10.7500/AEPS20140424002.
- SUN Hongbin, ZHANG Boming, WU Wenchuan, et al. Autonomous-synergetic energy management system family for smart grids: concept, architecture and cases[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 1-5. DOI: 10.7500/AEPS20140424002.
- 孙宏斌(1969—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, IET Fellow, 教育部长江学者, 国家级教学名师, 国家杰出青年科学基金获得者, 主要研究方向: 能源互联网、智能电网、自动电压控制、电力系统信息论。E-mail: shb@tsinghua.edu.cn
- 潘昭光(1991—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 多能流能量管理、需求侧响应。E-mail: panzg09@163.com
- 郭庆来(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 能量管理技术、电压稳定与电压控制、信息物理系统(CPS)、电动汽车。E-mail: guoqinglai@tsinghua.edu.cn

(编辑 郑颖)

(下转第 16 页 continued on page 16)

优潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 11-17. DOI: 10.7500/AEPS20150611006.

SUN Guoqiang, CHEN Shuang, WEI Zhinong, et al. Probabilistic optimal power flow of combined natural gas and electric system considering correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 11-17. DOI: 10.7500/AEPS20150611006.

- [27] MUNOZ J, JIMENEZ-REDONDO N, PEREZ-RUIZ J, et al. Natural gas network modeling for power systems reliability studies[C]// IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23-26, 2003, Bologna, Italy: 20-27.

- [28] MARIA H. World energy outlook 2014[M]. Paris, France;

International Energy Agency, 2014.

王志农(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化。E-mail: wzn_nj@263.net

张思德(1992—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:综合能源网优化。E-mail: Ade_hhu@163.com

孙国强(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力系统分析与运行控制。E-mail: hhusunguoqiang@163.com

(编辑 万志超)

Carbon Trading Based Low-carbon Economic Operation for Integrated Electricity and Natural Gas Energy System

WEI Zhinong¹, ZHANG Side¹, SUN Guoqiang¹, XU Xiaohui², CHEN Sheng¹, CHEN Shuang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Some power generation technologies such as gas-fired generator provide an effective way for low-carbon electricity. Meanwhile, Energy Internet enables a deep interconnection between the natural gas network and the electric power network. This paper proposes a joint economic operation model for integrated electricity and natural gas energy system. Minimizing the sum of integrated energy system generation energy costs and carbon trading costs becomes the objective function of the model with the consideration of the carbon trading mechanism. The security constraints of the natural gas and electricity networks are considered simultaneously. The test case consists of the modified IEEE 30-bus electric network, the Belgian 20-bus gas network and the couplings of gas-fired generators. The effectiveness of the proposed model has been verified by analyzing and comparing the operation conditions of integrated electricity and natural gas energy system and power system with all coal-fired generators based low-carbon economic model. Finally, the effect of carbon trading price, the price of natural gas and natural gas network constraints on operation conditions has been further analyzed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277052).

Key words: Energy Internet; integrated energy system; natural gas network; low-carbon; carbon trading mechanism; economic operation

(上接第 8 页 continued from page 8)

Energy Management for Multi-energy Flow: Challenges and Prospects

SUN Hongbin^{1,2}, PAN Zhaoguang^{1,2}, GUO Qinglai^{1,2}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Multi-energy flow coupling is one of the key features of the Energy Internet and integrated energy system distinguishing them from the smart grid. Energy management for multi-energy flow is faced with three main challenges, multiple-energy flow coupling, multi-time scale and multi-management body. This paper summarizes the research status and prospects of the research trends and focal points, namely, multi-energy flow real-time modeling and state estimation; multi-energy flow multi-time scale security analysis and security control; multi-energy flow hybrid-time scale optimization and scheduling; design, development and validation of energy management system (EMS) for multi-energy flow.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program)(No. 2013CB228203) and National Natural Science Foundation of China (No. 51537006, No. 51321005).

Key words: Energy Internet; integrated energy system; multi-energy flow; energy management system (EMS)