综合能源电力系统的在线分布互联建模研究

鞠 平,沈 赋,吴 峰
(河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要:为了充分利用可再生能源、充分发挥多种能源与电力系统的综合优势,探讨了综合能源电力系统的概念。针对综合能源电力系统仿真分析和运行控制的需要,构建综合能源电力系统建模的研究框架。分析了综合能源电力系统建模的难点,提出了在线分布互联的建模思路以及"即测-即辨-即插-即用"的建模策略,研究了模型路由的可行性。

关键词:综合能源电力系统;模型路由;模型接口;冷-热-电联供;可再生能源;建模
中图分类号:TM 71;TM 61 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2017.06.002

0 引言

近年来,以风电、光伏为代表的可再生能源发展非常迅速。目前,一方面,可再生能源比例较低,弃风、弃光的现象较为严重,2016 年全国弃风电量高达 4.97×10^{10} kW·h,经济损失约 248 亿元[1]。另一方面,化石燃料直接燃烧做功能量损失较大,微小型动力循环效率较低,从燃料的燃烧、做功到动力余热都没有实现有效的梯级利用。

为充分利用可再生能源,减少弃风、弃光的比例,提高可再生能源的利用率以及可再生能源发电、供电的可靠性[2-7],专家学者们提出了冷-热-电联供(CCHP)联产机组。CCHP 联产机组是分布式能源发展的主要方向和形式,也是世界第二代能源技术发展的重要方向之一。CCHP 联产机组是以能量梯级利用为基础的综合产、用能系统,分散在用户端附近,其利用一次能源驱动发电机供电,通过余热利用设备对余热进行回收利用,以实现更高的能源利用率[8]。文献[9]提出了将小型 CCHP 联产机组应用于微网,并就 CCHP 联产机组和微网的系统结构、控制方式、数学模型以及运行规律等展开了详细的研究,同时对燃气轮机的运行特性进行了仿真研究。文献[10]提出了当自然灾害或战争发生时,CCHP 联产机组具有较高的可靠性,并且在 4000 m² 的生活住宅区内建立了一个 CCHP 联产机组微型汽轮机循环系统。文献[11]提出了微型冷-热-电联供(mCCHP)系统。

随着风电、光伏等可再生能源以及 CCHP 联产机组接入电网[12],电力系统中涉及电、气、冷、热等多种能源。为了进行仿真分析和运行控制,就有必要研究这种系统的建模问题。

收稿日期:2017-03-09;**修回日期**:2017-04-24
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228204);江苏省 2016 年度普通高校研究生科研创新工程项目(2016B44314)
Project supported by the National Key Basic Research Program of China(973 Program)(2013CB228204) and the 2016 Ordinary University Graduate Student Scientific Research Innovation Project of Jiangsu Province(2016B44314)

1 综合能源电力系统的基本概念

美国学者 Alex Q. Huang 在 2010 年介绍了一种适用于分布式可再生能源和分布式能量存储设备的未来配电系统框架,基于快速、灵活的能源共享理念[13],提出了能源互联网(EI)的概念。另一美国学者 Jeremy Rifkin 在 2012 年也提出了能源互联网[14]的概念,指出了未来能源生产民主化、能源分配分享互联化。中国国家电网公司在 2014 年提出了全球能源互联网[15]的概念,从全球视角研究了世界能源可持续发展的重大战略问题和解决方案。文献[16]提出了综合能源系统(IES)的概念,通过对能源的产生、传输、分配、转换、存储、消费等环节进行协调和优化,实现能源产供销一体化。

自 2016 年 10 月在天津大学召开第 167 期双清论坛以来,人们开始探讨 IES 和综合能源电力系统(PS-IE)的概念。笔者认为,所谓 IES 是指包含多种能源互联互通的系统;所谓 PS-IE 是指包含多种能源的、以电力为主进行能量传输的系统。显然,PS-IE 在 IES 的范畴内,而 IES 是全球能源互联网的一部分。目前,PS-IE 规模不大,与微电网存在交互。上述概念之间的相互关系,如图 1 所示。本文立足于电力系统的需求,探讨 PS-IE 建模的问题。

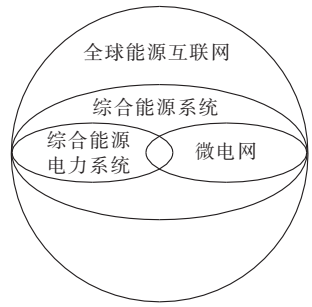

图 1 PS-IE 关系图
Fig.1 Relationship diagram of PS-IE

2 PS-IE 建模的难点

2.1 多时间尺度

PS-IE 中涉及电力、天然气、热力(供热和供冷)等能源形式,其动态过程具有显著差异,时间尺度相

差较大。电力系统的惯性最小,时间尺度最小,调节速度最快,波过程为微秒级,电磁暂态为毫秒级,机电暂态为秒级,中长期过程为分钟级[17];天然气系统的惯性和时间尺度均大于电力系统,调节速度慢,一般为秒级,与电力系统中的机电暂态过程对应;热力(供热和供冷)网的惯性和时间尺度均大于天然气系统,调节速度较慢,一般为分钟级,与电力系统中的中长期过程对应。由于电力、天然气、热力(供热和供冷)的时间尺度差异较大,给建模带来了很大的困难。

2.2 多能流耦合

电力、天然气、热力(供热和供冷)主要通过能量转换形成互联,在转换、互联和传送的过程中存在能量的耦合。比如电力与天然气之间的耦合,电力与热力之间的耦合,热力与天然气之间的耦合,甚至是电力、热力与天然气三者之间的相互耦合。由于能量耦合的情况复杂多样,给建模带来了很大的困难。

2.3 快与准之间的矛盾

为了实现 PS-IE 的有效运行,需要在线进行仿真计算和调度控制,这对其建模提出了快与准的要求[18]。一方面,由于 PS-IE 的网络拓扑和运行状态随时变化,导致模型缓慢时变,所以要求快速建模;另一方面,由于 PS-IE 的运行需要做到安全高效,所以要求模型准确。而快与准的要求之间往往相互矛盾,如何达到平衡给建模带来了很大的困难。

3 PS-IE 建模的思路

3.1 基本思路

为解决上述 PS-IE 建模中的困难,本文提出在线分布互联建模的基本思路。

在线是指在线建模并且在线使用。由于传统测量技术以及建模技术的限制,一般先进行测量,再根据数据离线进行参数辨识。随着测量、建模技术的发展,目前逐渐可以实现在线测量和在线辨识[12,18]。

分布是指“横向分区、纵向分层”[12]。以电网为例,在横向上,可基于时变电流注入方法进行分区域[19]建模,既可充分利用中小扰动数据,又可有效隔离区域之间模型误差的交互影响;在纵向上,按照电网分层[20]运行模式建立各自的模型,然后拼接为电力系统的整体模型[13]。

为了实现在线分布建模,需采取“即测-即辨”策略,进行数据的采集、模型的建立以及参数的辨识。通过 SCADA 采集拓扑数据和状态数据,进行静态建模及参数辨识;通过广域测量系统(WAMS)采集故障数据和动态数据,进行动态建模及参数辨识。

为了实现在线互联使用,需采取“即插-即用”策略,实现模型接入互联,满足在线仿真快速、准确的计算需求。

模型路由(MR)是实现分布建模、互联使用的关键,包括机理模型路由和非机理模型路由。下文对此展开进一步的探讨。

3.2 机理模型路由

3.2.1 研究思路

瑞士学者 Martin Geidl 等人在 2006 年率先提出了能源路由器的概念[21],研究了多能源传输系统的利用和分布式能源的转换和存储,可实现多种能源载体的输入、输出、转换和存储,并且提出了基于成本、排放量、能量效率、可用性、安全性等标准来找到多个能量源之间的最佳耦合和功率交换的建模方法。

本文所提的机理模型路由是从各子系统的机理出发,通过将各子模型接入机理模型路由,从机理上实现模型互联,解决由于时间尺度差异和多能耦合引起的建模困难的问题。

典型的机理模型路由结构框图如图 2 所示,由微型燃气轮机(MT)和模型接口(MI)组成。其可以实现天然气模型、光伏模型、风电模型等的接入,以及供气模型、供热模型、供冷模型、供电模型的输出。机理模型路由的通用性是研究追求的目标,不过通用也是相对的分类通用,需要根据不同的能源形式和能源转换器的类别,设定若干种相应的机理模型路由模式。

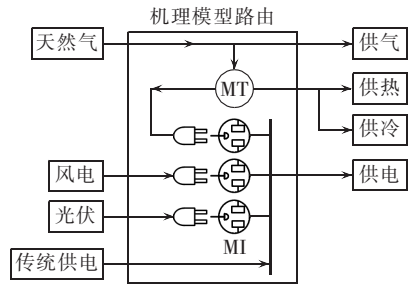

图 2 机理模型路由示意图

Fig.2 Schematic diagram of mechanism model routing

3.2.2 电网机理模型接口

电网机理模型接口如图 3 所示。模型接口根据分布式电网模型边界潮流的不平衡量设定模型接口中各元件的参数,实现潮流不平衡量的直接补偿,完成分布式电网模型的接入和潮流匹配。实际电网计算仿真结果表明[22-23],该模型接口在几乎不需要计算的前提下,可以准确、快速地实现电网模型的互联。

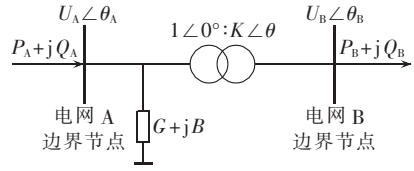

图 3 电网机理模型接口

Fig.3 Mechanism model interfacing of power grid

3.2.3　气电热机理模型接口

微型燃气轮机实现了天然气到电和热的转换,是典型的能源转换器。典型的微型燃气轮机结构如图 4 所示,由燃烧室、回热器、换热器、燃气涡轮、压缩机、动力涡轮、制冷器组成[24]。通过微型燃气轮机,可以实现天然气模型与供电模型、供气模型、供热模型、供冷模型之间的互联。

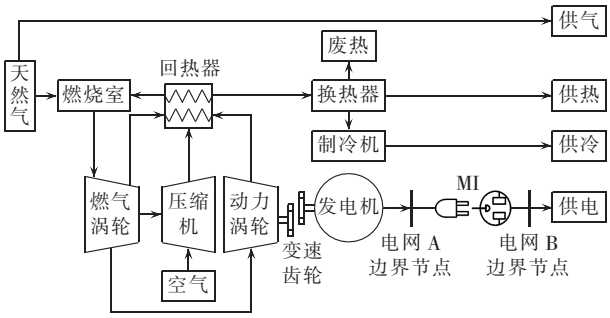

图 4　典型微型燃气轮机结构框图

Fig.4　Structure of typical micro-turbine

3.3　非机理模型路由

为了便于其他形式的能源也可通过合适的模型接口接入系统,进行交互仿真,在此提出了可适用于系统模型机理不完全清楚、但存在互联关系的非机理模型路由。

非机理模型路由示意图如图 5 所示,由各模型的边界条件 B_1、B_2、B_3、B_4 组成。非机理模型路由同样可实现模型互联。

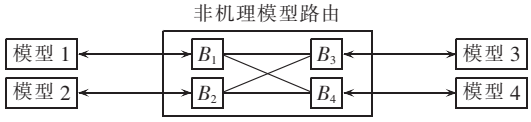

图 5　非机理模型路由示意图

Fig.5　Schematic diagram of non-mechanism model routing

在系统机理不完全清楚的情况下,可通过非机理模型路由实现模型的互联建模,但由于 PS-IE 具有多时间尺度与多能流耦合的特点,常规代数微分方程的惯性时间常数不一样,其很难用传统的代数微分方程描述。

针对耦合性强、特性相近的系统模型进行分类,再接入非机理模型路由。在系统模型外部可合理设置边界条件,在边界上可通过缓冲技术解决边界的耦合问题;在系统模型内部可通过内部方程的自适应调整,自动取舍方程的部分参数,解决时间尺度不一致的问题。避免因时间尺度差异和多能耦合引起的建模困难的问题,重点研究各系统之间的交互影响,保证模型接入非机理模型路由后的动态仿真精度,来满足兼顾精度和速度的 PS-IE 分布互联建模的需求。

4　结语

本文探讨了 PS-IE 与综合能源系统、全球能源互联网、微电网之间的关系,指出 PS-IE 建模的困难在于多时间尺度、多能流耦合和快与准之间的矛盾,为此提出了在线分布互联的建模思路,相应地提出了“即测–即辨–即插–即用”的建模策略,分析了机理模型路由和非机理模型路由的可行性。

参考文献:

[1] 国家能源局. 2016 年风电并网运行情况[EB/OL]. (2017–01–26)[2017–04–22]. http://www.nea.gov.cn/2017-01/26/c_136014615.htm.

[2] 于慎航,孙莹,牛晓娜,等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):104-108.
YU Shenhang,SUN Ying,NIU Xiaona,et al. Energy internet system based on distributed renewable energy generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):104-108.

[3] 张国荣,陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备,2017,37(1):1-7.
ZHANG Guorong,CHEN Xiaran. Future development of energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(1):1-7.

[4] 付学谦,孙宏斌,郭庆来,等. 能源互联网供能质量综合评估[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):1-7.
FU Xueqian,SUN Hongbin,GUO Qinglai,et al. Comprehensive evaluation of energy quality for energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):1-7.

[5] 肖定垚,王承民,曾平良,等. 考虑可再生能源电源功率不确定性的电源灵活性评价[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):120-125.
XIAO Dingyao,WANG Chengmin,ZENG Pingliang,et al. Power source flexibility evaluation considering renewable energy generation uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):120-125.

[6] 孙盛鹏,刘凤良,薛松. 需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度综合评价体系[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):77-83.
SUN Shengpeng,LIU Fengliang,XUE Song. Comprehensive evaluation system for contribution degree of demand-side resources to renewable energy source integration[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):77-83.

[7] 周辛南,柯德平,孙元章. 基于配电网静态电压质量机会性约束的可再生能源分布式发电容量规划[J]. 电力自动化设备,2015,35(9):143-149.
ZHOU Xinnan,KE Deping,SUN Yuanzhang. DG planning based on chance constraint of distribution network static voltage quality for renewable energies[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(9):143-149.

[8] 周任军,康信文,李绍金,等. 冷热电联供系统能量流函数及运行策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):1-5.
ZHOU Renjun,KANG Xinwen,LI Shaojin,et al. Energy flow function and operational strategy of CCHP system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):1-5.

[9] 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.
MA Li. The research on the operation characteristic of CCHP and

micro-grid composed of CCHP[D]. Tianjin:Tianjin University, 2008.

[10] EBRAHIMI M,KESHAVARZ A,JAMALI A. Energy and exergy analyses of a micro-steam CCHP cycle for a residential building[J]. Energy & Buildings,2012,45(1):202-210.

[11] MAGO P J,CHAMRA L M,RAMSAY J. Micro-combined cooling,heating and power systems hybrid electric-thermal load following operation[J]. Applied Thermal Engineering,2010,30(8-9):800-806.

[12] 鞠平,沈赋,陈谦. 新背景下电力系统的建模思路[J]. 南方电网技术,2016,10(3):32-34.
JU Ping,SHEN Fu,CHEN Qian. The idea of model building for power systems under new background[J]. Southern Power System Technology,2016,10(3):32-34.

[13] HUANG A Q,CROW M L,HEYDT G T,et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management(FREEDM) system:the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE,2011,99(1):133-148.

[14] RIFKIN J. The third industrial revolution[J]. Engineering & Technology,2013,6(1):8-11.

[15] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京:中国电力出版社,2015:8-11.

[16] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):198-207.
JIA Hongjie,WANG Dan,XU Xiandong,et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(7):198-207.

[17] 鞠平. 现代电力系统控制与辨识[M]. 北京:清华大学出版社,2015:3-25.

[18] 鞠平,谢会玲,陈谦. 电力负荷建模研究的发展趋势[J]. 电力系统自动化,2007,31(2):1-4.
JU Ping,XIE Huiling,CHEN Qian. Research tendencies of electric load modeling[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(2):1-4.

[19] 鞠平,秦川,黄桦,等. 面向智能电网的建模研究展望[J]. 电力系统自动化,2012,36(11):1-6.
JU Ping,QIN Chuan,HUANG Hua,et al. Research trends of power system modeling geared to smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(11):1-6.

[20] 鞠平,戴琦,黄永皓,等. 我国电力负荷建模工作的若干建议[J]. 电力系统自动化,2004,28(16):8-12.
JU Ping,DAI Qi,HUANG Yonghao,et al. Some suggestions of electric load modeling in China[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(16):8-12.

[21] GEIDL M,FAVRE-PERROD P,KLÖCKL B,et al. A green field approach for future power systems[C]//41st International Conference on Large High Voltage Electric Systems 2006,CIGRE 2006. Paris,France:[s.n.],2006:306-307.

[22] 王舒琴,黄永伟,汪晶,等. 电力系统地区电网模型拼接中的灵敏度潮流调整[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(18):83-88.
WANG Shuqin,HUANG Yongwei,WANG Jing,et al. Sensitivity flow adjusting in the integration of regional power grid models[J]. Power System Protection and Control,2013,41(18):83-88.

[23] QIN C,JU P,WU F,et al. An efficient multi-area networks-merging model for power system online dynamic modeling[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems,2015,1(4):37-43.

[24] 郭力,王成山,王守相,等. 两类双模式微型燃气轮机并网技术方案比较[J]. 电力系统自动化,2009,33(8):84-88.
GUO Li,WANG Chengshan,WANG Shouxiang,et al. The grid connection schemes comparison of two types of microturbines with dual mode operation[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(8):84-88.

作者简介:

鞠　平

鞠　平(1962—),男,江苏靖江人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统建模与控制(**E-mail**:pju@hhu.edu.cn);

沈　赋(1988—),男,云南昆明人,博士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统建模(**E-mail**:shenfu@hhu.edu.cn);

吴　峰(1977—),男,江苏如皋人,教授,博士,主要研究方向为可再生能源的建模与控制(**E-mail**:wufeng@hhu.edu.cn)。

Research on distributed and interconnected online modeling of PS-IE

JU Ping,SHEN Fu,WU Feng

(College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China)

Abstract: The concept of PS-IE(Power System with Integrated Energy) is explored to fully develop the comprehensive advantages of various energy sources and power system as well as make the best of renewable energies. A research framework of PS-IE modeling is constructed for its simulative analysis, operation and control. The difficult points of PS-IE modeling are analyzed,an idea of distributed and interconnected online modeling and a modeling strategy of "measure-identify-plug-play" are proposed,and the feasibility of model routing is studied.

Key words: PS-IE; model routing; model interfacing; CCHP; renewable energy resources; modeling