

## 特约主编寄语



鲁宗相，清华大学电机系副系主任，副教授，博士生导师，IET Fellow，IEEE Senior Member，中国电机工程学会高级会员。主要研究方向为风电/太阳能发电并网分析与控制、能源与电力宏观规划、电力系统可靠性、分布式电源及微电网。

在化石能源枯竭的预期和气候变化现实威胁的双重压力之下，传统能源发展方式难以为继，可再生能源大规模利用，互联网、新能源等技术蓬勃兴起，推动了高比例可再生能源并网未来电力系统的战略发展方向。然而，具有显著随机、波动特性的可再生能源电源大规模并网，引起了整个电力系统本征特性的深刻改变，未来电力系统形态结构和演化机理呈现极大的不确定性和复杂多样性，其分析和预测技术成为新的研究热点。

《全球能源互联网》针对这一热点问题策划了“高比例可再生能源未来电力系统”专题，本人荣幸受邀担任本期专题特约主编。此次专题征稿得到了相关领域专家学者的大力支持，共收到来稿15篇，本期收录了其中的9篇，内容涉及电力系统的资源、电源、电网、负荷等全环节，从高性能分析、协调规划、预测评估等多个角度深入讨论了高比例可再生能源未来电力系统的形态、特征分析和规划、预测方法。

希望本期专题能够为关心和从事高比例可再生能源电力系统的广大科技工作者提供借鉴，共同探索新一代电力系统的技术前沿，促进电力行业的不断发展和创新。

2018年12月27日于北京

文章编号: 2096-5125 (2019) 01-0001-07  
DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.01.001

中图分类号: TM 711

文献标志码: A

# 电网灵活性的高性能分析

黄振宇, 陈有素

(太平洋西北国家实验室, 里奇兰市, 华盛顿州 99352, 美国)

## High Performance Analytics for Grid Flexibility

HUANG Zhenyu, CHEN Yousu

(Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington 99352, USA)

**Abstract:** The power grid has evolved into a system that needs flexibility within and without to ensure its reliable, resilient, and economic operation. The world-wide smart grid development leads to higher interdependency between the grid and other systems. Together they form an energy ecosystem. This poses a fundamental challenge in the energy sector, but also offers a great opportunity for better flexibility by relaxing traditional rigid boundary conditions. This paper examines such an opportunity at all levels in this energy ecosystem. Significant potential of grid flexibility exists, but for this purpose, high-performance analytics is required for the holistic design and end-to-end assessment because of the increased size and complexity of the system. Several open-source software platforms and packages are introduced as examples of such high-performance

analytics, which enables large-scale analysis, optimization, and control of the energy ecosystem. An open-access environment ‘GridSandbox’ is also proposed for evaluating high-performance analytical methods and tools. Fully developing the required high-performance analytics for grid flexibility requires collaboration and concerted efforts by experts in mathematics, computing, data science, and applications domains. Significant white space is yet to be explored.

**Keywords:** power grid flexibility; high-performance analytics; open-source software; high-performance computing; co-simulation

**摘要:** 电网近年来的高速发展需要内外兼备的灵活性以保障其经济可靠的运行。世界各地智能电网的迅猛发展让电网

和其他系统之间的关系越来越紧密。电网和其他系统正逐渐融合成为一个能源有机体。这给能源领域带来了根本性的挑战，同时也为电网消除传统的严格边界条件进而提升其灵活性提供了难得的机遇。从能源有机体的各个层面探讨了提高电网灵活性的可能性。电网存在着巨大的灵活性潜力，但是挖掘这些潜力需要高性能的分析方法和工具以实现电网的整体设计和能源有机体的全方位评估，并适应系统规模的逐渐扩大和复杂度的不断提高。介绍了几个开源软件平台和软件包作为灵活性电网高性能分析的样例。它们已被应用于能源有机体的大规模分析、优化和控制。提出的“电网沙盘”（GridSandbox）概念可作为一个开放式的环境，用于评估各类高性能分析方法和工具的有效性。建设灵活性电网所需的高性能分析方法和工具的开发需要来自数学、计算、数据科学、电网以及其他能源领域等多个学科专家的通力合作。高性能分析研究领域仍有许多空白亟需填补，具备广阔的研究和应用前景。

**关键词：**电网灵活性；高性能分析；开源软件；高性能计算；协同仿真

## 0 引言

电力系统正逐渐从相对封闭的系统演变为具有更广泛依赖性的系统，这种依赖性不仅仅表现为对电网内部多样化元素的依赖，还体现在对其他外部系统不同程度的依赖。由于全球智能电网的发展，过去行为可预测的被动负载设备如今大规模地主动参与到电网的运行控制中来<sup>[1]</sup>，风力发电、光伏发电、储能、智能负载和电动汽车等新技术开始重塑电力系统的行为和特征，这些新技术使整个电力系统从上到下更多地相互作用、相互影响。在中国，发电、输电、配电和用电的综合分析、设计和运行一直是确保经济、清洁和可靠电网的重点<sup>[2]</sup>，这种相互作用不仅仅表现在电网的内部演变中，还体现在其他系统的演变过程中，例如通信、楼宇、天然气管道、水利、气象和交通等系统也变得更加依赖于电网，或者被电网所依赖。

这些正在快速进行的演变创造了一个新的能源有机体，如图1所示，因此不能像以往那样，忽视各种能源子系统之间的相互作用和相互依赖性，这也对管理这样一个复杂的系统提出了一个根本性的挑战。与此同时，它也提供了一个很好的机会通过调节系统边界条件来发挥更大的灵活性，进而取代目前的子系统之间假定的严格边界条件。

美国能源部的电网现代化计划（Grid Modernization Initiative）将灵活性定义为未来现代化电网的属性之一<sup>[3]</sup>：“现代化电网必须具有……优越的灵活性，

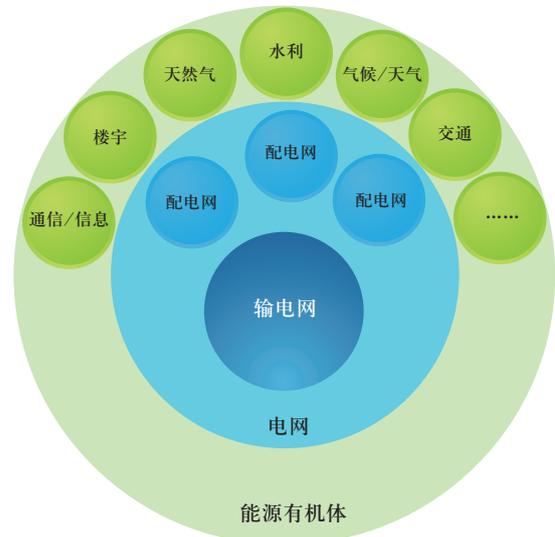


图1 电网和其他能源系统共同组成能源有机体

Fig. 1 The power grid and other energy systems form an energy ecosystem

以应对不同时间尺度下的单个或多个条件的变化和不确定性，这包括了一定范围内的未来能源形态。”这里的灵活性实际上意味着在能源有机体的各个层面都需要灵活的边界条件。传统上，输电与配电系统具有严格的边界，其特征在于发电量始终满足固定的配网电力需求。然而，需求响应技术正在打破这个严格的边界条件，进而从电网的整体利益出发提升系统灵活性。不止电力系统，天然气管道系统的燃料供应也可以拥有类似的灵活性，数据通信系统也可以通过重新配置来满足电网接收数据和发送指令信号的需要，交通系统也可以通过优化调度以减轻电网的压力。其他很多子系统的边界也都可以被重新审视和定义，以获得更好的电网灵活性。这就给推进电网新功能的发展提供了一个绝佳机会。

当然，这样绝佳的机会需要新的技术发展来支持，例如在数学、数据和计算应用领域中研发大量新的高性能分析来增强现有的电力系统功能，以及设计和实现新的功能来确保未来电力系统的安全可靠运行。本文探讨了如何在前述能源有机体的不同层面抓住这一机会，并通过几个实例展示提高系统灵活性的可能性。这些实例中包括了几个开源的高性能分析平台和分析软件包。

## 1 输电系统的灵活性

由于安全事故的可能性以及可再生能源发电的日益普及，输电系统面临越来越多的不确定性。目前有

限的静态安全分析（通常仅为“N-1”）仅能研究系统运行的部分情况。这样可导致电网有可能运行在未经研究的危险情况，这也是过去许多大停电的原因之一<sup>[4-5]</sup>。2018年上半年，中国新增风电装机为750万 kW，新增光伏装机2430万 kW<sup>[6]</sup>；2017年，风能和太阳能总发电量已占全美发电量的7.6%<sup>[7]</sup>；欧盟的可再生能源管理组织设定了到2020年可再生能源的发电量占总发电量20%的目标<sup>[8]</sup>。这就要求系统具有更大的灵活性来最大限度地利用可再生能源，同时减轻其不确定性对系统的影响。这也要求更快的决策能力来防止大规模电力系统的连锁故障乃至大停电事故，或者最大限度地减轻其影响和损失。再加上可再生能源的不确定性，使用高性能分析来预测电网行为并为未来事件做好准备就变得尤为重要<sup>[9]</sup>。

高性能计算已经应用在电力系统状态估计中来获知系统的实时状态。图2显示了在2011年9月8日美国太平洋西南地区大停电中的连锁故障分析中，0.5 s高性能状态估计应用的潜在好处<sup>[10]</sup>。传统的状态估计因计算缓慢而错过大部分连锁故障之间的系统实时状态。当连锁故障之间的间隔小于状态估计的计算时间时，连锁故障的影响就无法被监测从而导致系统不可观。这就像驾驶汽车看后视镜却忽略行车前方一样，危险性可想而知。这就意味着如果没有足够的实时信息来快速做出反应，受最初干扰影响的区域就会不断扩大，这正是在这次美国太平洋西南地区大停电事件

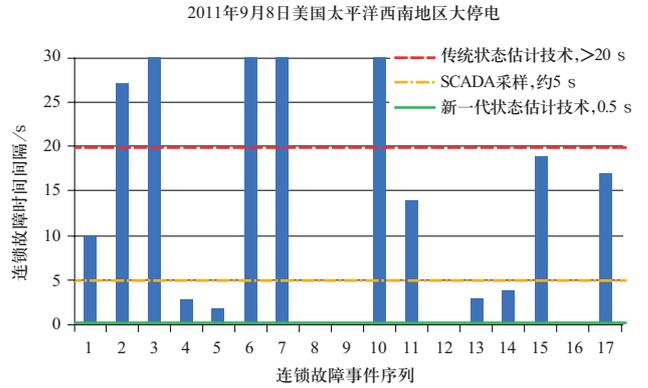
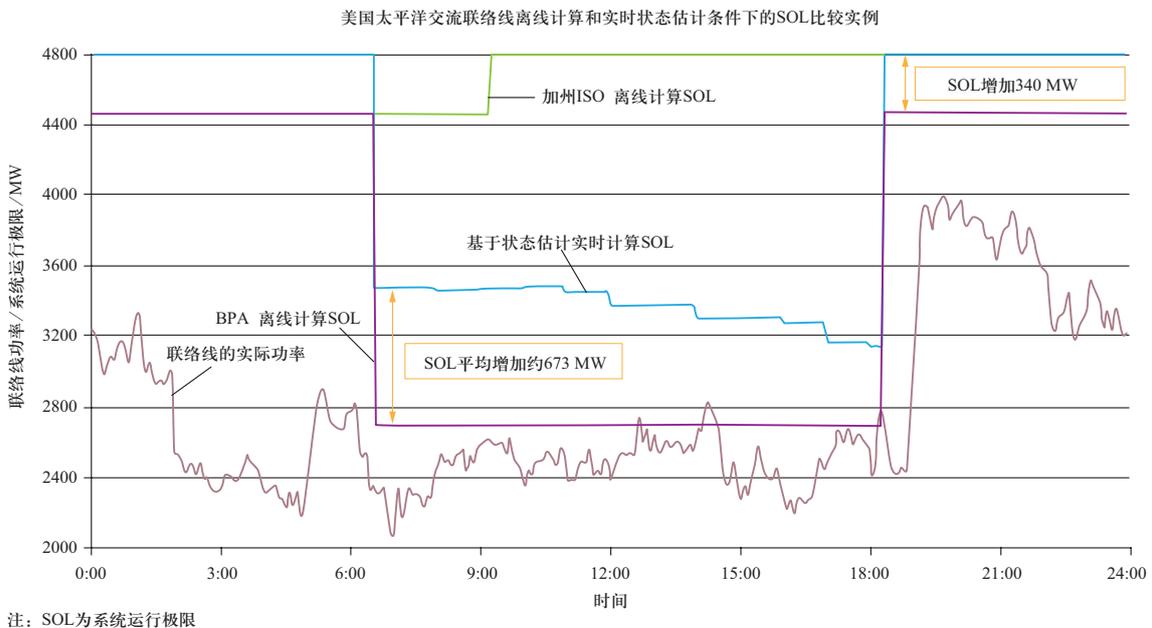


图2 快速状态估计获知实时状态以提高系统灵活性

Fig. 2 Fast computation helps real-time visibility of the grid, enabling flexibility

中发生的状况。只有当状态估计足够快以获得各个连锁反应间的系统状态时，才能进行有效的后续分析、评估和操作，以识别和利用系统中的灵活性来应对这种连锁故障。

另一个高性能分析的例子是提高输电系统传输极限以开发未被使用的系统传输容量，这利于系统的紧急运行，并提高电力市场效率<sup>[11]</sup>。增加数百兆瓦传输容量，可以显著提高电网的灵活性，避免限制发电或限制负荷，每年可能带来数亿美元新增收益。如图3中美国太平洋西北地区的实际电网事件所示<sup>[12]</sup>，基于状态估计实时计算运行极限，西北地区到加州地区的输电容量可增加673 MW，从而可以避免在7:00至19:00之间强制减负荷。



注：SOL为系统运行极限

图3 高性能计算帮助实时提高输电系统传输容量

Fig. 3 Increase path rating in real time through high-performance computing

## 2 利用配电网提高系统灵活性

配电系统也正在经历重大变化,不再是只是被动的需求。分布式发电、储能以及智能负载、电动汽车(EV)使配电网成为活跃的资源并能够积极参与电网服务。光伏发电(PV)和电动汽车近年来在中国飞速发展,拥有的数量位列世界前茅<sup>[13]</sup>。分布式能源资源(DER)在美国电力系统中将实现“爆炸性增长”<sup>[14]</sup>。这些变化使得配电系统成为提高系统灵活性的积极参与者,而不仅仅局限于刚性需求。通过配网提升系统灵活性的研究已有很多。世界各地的许多电力系统纷纷实施了需求响应项目,并有国际论坛致力于相应的交流和合作<sup>[15]</sup>。最近,交易式控制(Transactive Control)<sup>[16]</sup>已成为对分布式能源进行更精细和更自主管理的一种方式。美国太平洋西北地区智能电网示范项目表明,交易式控制可以减少15%的负载峰值进而减少电网的压力<sup>[17]</sup>。美国能源部的电网现代化计划中的弹性配电网研究工作继续探索提高配电网灵活性的办法<sup>[18]</sup>,其中高性能分析为此类工作打下扎实的基础。

## 3 利用与其他系统互动提高电力系统灵活性

电力系统不仅为其他系统提供动力,其运行控制也依赖于其他系统,比如通信系统。电网依赖于数据通信,例如用于测量、监视和控制电网行为的监控和数据采集(SCADA)系统。在过去的20年中,通过诸如北美同步相量发展计划(NASPI)<sup>[19]</sup>和中国电网调度部门技术管理<sup>[20]</sup>等努力,同步相量测量装置(PMU)的数量从无到有,现在已经比较普及。PMU可提供每秒30个或更多的同步采样用于电网监测和控制。一个PMU应用的例子是中国南方电网(CSG)的广域振荡控制<sup>[21]</sup>。在配网系统中,仅在美国太平洋西北地区智能电网示范项目中就在居民楼宇中安装了6万块智能电表<sup>[17]</sup>,智能电表安装量在北美电网中已迅速增长到数百万。由此产生的风险是电网性能对数据通信系统的严重依赖性。电网要求即使发生故障,通信系统仍可灵活调整以继续支持电网运行。为了评估这种灵活性,Bose等为PMU应用构建了GridSim<sup>[22]</sup>。美国的电网现代化计划支持开发了通用的高性能协同仿真平台(HELICS),其目的之一就是研究通信问题对电网行为的影响<sup>[23]</sup>。

如图1所示,在能源有机体中,电网与许多其他

系统具有很强的相互依赖性,包括天然气管道、楼宇和交通运输系统。许多发电厂依靠天然气作为燃料,供应的短缺或中断会对电网可靠性和灵活性产生重大影响。美国ISO New England对燃料安全性进行了研究,并得出结论:“ISO New England地区很容易受到该区域内任何一个主要能源供应季节性短缺的影响”<sup>[24]</sup>。根据美国能源情报署(EIA)的数据,2017年住宅和商业建筑消耗的能源占美国总能耗39%<sup>[25]</sup>,其中大部分为电力形式的能耗,占美国总用电量的75%以上。因此,楼宇到电网的集成技术一直是利用灵活的能源消费提供电网灵活性服务的重点研究方向之一<sup>[26]</sup>。交通电气化程度越来越高,例如中国高速铁路网发展令人瞩目,随着中国、美国和其他地区电动汽车的普及推广,未来数以百万计电动汽车的电池可以在必要时将电能回送电网。

高性能分析方法可以快速评估能源有机体内其他系统提高电网可靠性和灵活性的调节潜力(这种调节反过来可以使电网为这些系统提供更经济的不间断电力供应),这是研究和实现上述互动的关键。

## 4 高性能分析和软件技术以实现灵活性的整体评估

如上所述,电网内部和外部的各种元素存在着巨大的调节潜力。要实现这些潜力,需要使用电力系统分析方法和工具来评估系统的整体行为,并设计具体而完善的方法来获得更好的电网灵活性。由于系统的大小和复杂性的增加,这些方法和工具必须满足高性能的要求。如图4所示,北美输电电网约有1万个节点,配电系统可以增加数百万个节点,美国有数亿家庭用户,这些家庭很容易增加数十亿台用电设备。如何处理这种多尺度大型系统是一个必须面对的根本挑战。类比电网,通信系统、天然气管道系统和交通运输系统同样在地理上分布广泛,这就给这个根本挑战进一步增加了可观的或更高的复杂度。

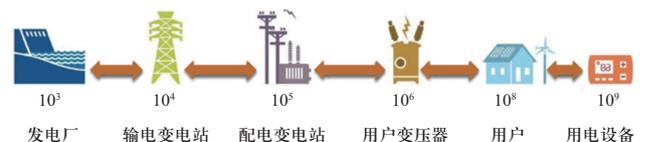


图4 多尺度大型系统计算节点数量

Fig. 4 The number of nodes of the multi-scale system in North American

为此，在世界各地已经有众多的工作致力于开发高性能的分析方法和工具。以下介绍3个开源的高性能仿真软件库和平台：

1) GridPACK<sup>TM</sup> [27]：GridPACK是一个模块化的电力系统高性能计算软件平台和软件库。它的目的是简化高性能计算在电网分析计算中的应用，并开发适合在高性能计算机上运行的相应软件代码。GridPACK已经过多种电力系统应用测试，包括状态估计、静态和暂态安全分析以及暂态仿真<sup>[28]</sup>。图2显示了15000母线美国西部输电系统的状态估计性能，而图5则显示了采用并行计算后，该系统暂态仿真的加速情况，30 s的暂态仿真可以在9 s内完成。和单线程相比，并行仿真可以实现26倍的加速来实现超实时的仿真能力<sup>[29]</sup>。图3中的实时传输容量计算就是利用了GridPACK中的快速暂态仿真功能。

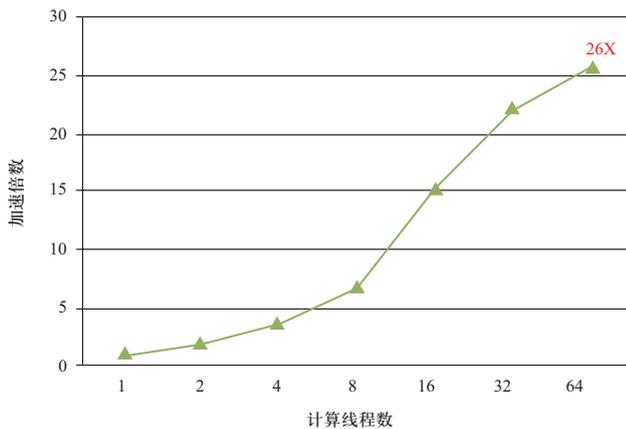
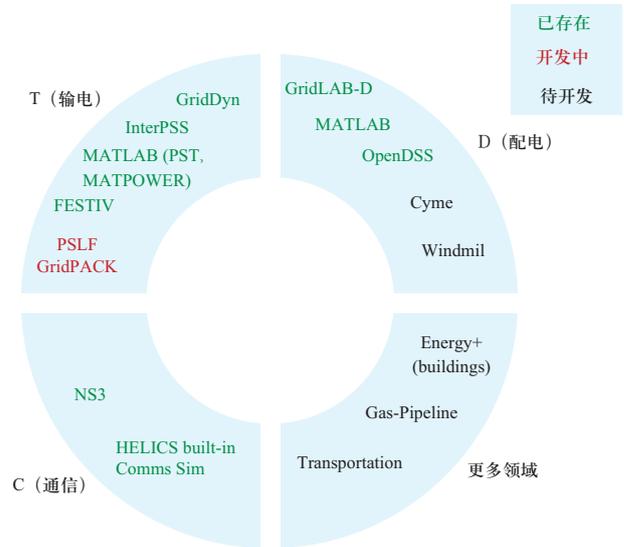


图5 GridPACK实现快速超实时的暂态仿真能力

Fig. 5 GridPACK-enabled high-performance transient simulation of interconnection-scale power systems

2) HELICS<sup>[23]</sup>：HELICS (Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation) 是一种分层的高性能协同仿真框架，可提供高性能计算、输电网和配电网之间协同仿真、电网和通信系统的协同仿真等多个先进功能。这些功能也可扩展到其他系统的协同仿真。HELICS本身不是一个仿真工具，而是一个协调不同系统领域仿真工具之间数据交换和同步的平台。HELICS已经有了许多应用，包括大规模太阳能发电对输电网的影响，考虑通信问题的广域控制以及聚合负载模型评估。HELICS可以同时协调多至10万个不同系统的仿真。目前，HELICS已经建立了与主要电网及通信仿真工具的接口，并具备扩展到电力系统之外的其他领域的的能力（图6）。



注：未列出所有仿真软件

图6 HELICS已实现与其他主要仿真工具的接口

Fig. 6 HELICS interfaces to major simulators

3) GOSS<sup>[30]</sup>：GOSS (GridOPTICS<sup>TM</sup> Software System) 是一个集成多数数据源电网应用、并可方便实现数据流计算和可视化的高性能中间件框架。它不仅集成不同的电力系统计算功能和相应的输入/输出数据，还可以实现电力系统软件中各程序模块（如数据、计算和可视化模块）之间的数据交换。GOSS可以通过应用程序接口（API）将Windows和Linux等不同操作系统的功能模块跨平台结合在一起，从而使数据交换更灵活。在针对可再生能源发电和智能负载不确定性的前瞻性静态安全分析应用中，GOSS的功能和性能已经得到验证<sup>[9]</sup>。

使用开源方式使得软件代码很容易获得，促使不同领域研究人员和用户群体能够更好地应用、改进与创新这些软件。剩下的障碍是如何得到真实和客观的数据和模型、高性能计算硬件、以及分析专业知识。为此，笔者提出了电网沙盘“GridSandbox”作为一个开放式应用和测试环境（图7）。这个环境可提供超出用户自身研究和应用环境的数据、模型、软件和硬件，从而使用户可以更加简洁、高效地测试和评估高性能分析方法和工具，并将之融入自己的电网灵活性研究与分析中。

GridSandbox中的一些要素已经开发完成。例如DR POWER，是一个包含电网数据、模型和运行方式的存储库，通过直观的基于网页的用户界面来建立、管理和开发可开放获取的电网模型和场景<sup>[31]</sup>；Bettergrids是一个类似的存储库<sup>[32]</sup>；电力系统优化方

法 (GO) 竞赛<sup>[33]</sup>利用这些电网存储库并结合软件和硬件资源, 通过web门户网站支持竞赛参与者开发最优潮流 (OPF) 算法以实现更有灵活性和安全性的电力系统。



图7 电网沙盘 (GridSandbox) 示意图

Fig. 7 GridSandbox combining realistic data, high-performance software, and hardware to provide an open-access environment to users

## 5 结语与展望

作为能源有机体中的电力系统, 已经进化成为一个超复杂系统, 需要应用高性能分析技术对其进行整体评估和设计。本文介绍了几个开源软件平台和软件包, 包括GridPACK、HELICS和GOSS。它们作为高性能分析的示例展现了在能源有机体的大规模分析、优化和控制中的用途。这些平台和软件包涵盖高性能计算、大规模协同仿真以及数据密集型计算和分析, 其性能已在电力系统应用中得到了验证。基于这些开源软件, 作者提出开放式应用与测试环境“GridSandbox”。这个方便高效的测试环境可用于托管实际系统模型与数据、集成高性能硬件和软件, 并进行各种高性能分析方法和工具的测试和管理。

尽管全世界有很多研究人员致力于高性能分析的研究, 但是从为未来电网提供更好的分析方法和应用的角度来说, 该领域仍存在许多空白亟需填补。为此需要开发针对更多不同数据源和不同领域仿真工具的接口; 同时应进一步探索提高计算效率和跨平台代码移植性的新方法; 更重要的是, 如何引导电力系统软件供应商参与开源软件的开发, 从而将开源软件进一步转换为实际的产品。高性能分析研究领域需要来自数学、计算、数据科学、电网以及其他能源领域等多个学科专家的通力合作, 具备广阔的研究和应用前景。

## 致谢

本文特别感谢美国太平洋西北国家实验室的范晓原博士和杜威博士提供了诸多的背景知识和建议。清

华大学的鲁宗相教授和《全球能源互联网》的白恺主编提供了宝贵的修改意见, 一并致谢。

## 参考文献

- [1] D. J. Hammerstrom, S. E. Widergren, C. Irwin. Evaluating transactive systems: historical and current U.S. DOE research and development activities [J]. IEEE Electrification Magazine, 2016, 4(4): 30-36. doi: 10.1109/MELE.2016.2614182.
- [2] H. Sun et al. Integrated energy management system: concept, design, and demonstration in China [J]. IEEE Electrification Magazine, 2018, 6(2): 42-50. doi: 10.1109/MELE.2018.2816842.
- [3] The United States Department of Energy. Grid modernization multi-year program plan [R/OL]. (Nov. 2015). <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/01/f28/Grid%20Modernization%20Multi-Year%20Program%20Plan.pdf>.
- [4] North American Electric Reliability Council. Review of selected 1996 electric system disturbances in north America [R/OL]. (2002). <https://www.nerc.com/pa/rrm/ea/System%20Disturbance%20Reports%20DL/1996SystemDisturbance.pdf>.
- [5] US-Canada Blackout Task Force. Blackout in the United States and Canada: causes and recommendations [R/OL]. (August 14, 2003). <https://www.energy.gov/sites/prod/files/oeprod/DocumentsandMedia/BlackoutFinal-Web.pdf>.
- [6] 国家能源局. 中国可再生能源发展[EB/OL]. (2018-07-30). [http://www.nea.gov.cn/2018-07/30/c\\_137356631.htm](http://www.nea.gov.cn/2018-07/30/c_137356631.htm).
- [7] The United States Energy Information Administration. The U.S. electricity generation by energy source [EB/OL]. (2017).[2018-12-05]. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=427&t=3>.
- [8] European Commission. Europe 2020 renewable energy targets [EB/OL]. (2017)[2018-12-05]. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy>.
- [9] Chen Yousu, Fitzhenry Erin B, Jin Shuangshuang, et al. An integrated software package to enable predictive simulation capabilities[C]. Proceedings of the 19th Power Systems Computation Conference (PSCC 2016), Genoa, Italy, June 20-24, 2016.
- [10] Federal Energy Regulatory Commission (FERC). 2011 US southwest blackout report [R/OL]. (2012). <https://www.ferc.gov/legal/staff-reports/04-27-2012-ferc-nerc-report.pdf>.
- [11] Ruisheng Diao, Zhenyu Huang, Chunlian Jin, et al. Towards more transmission asset utilization through real-time path rating [C]. Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm 2013), Vancouver, Canada, October 21-24, 2013.
- [12] Diao R. S., Huang Z. Y., Makarov Y. V., et al. An HPC based real-time path rating calculation tool for congestion management with high penetration of renewable energy [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 431-439.

- [13] Sustainable Enterprises Media. China PV development [EB/OL]. (2018)[2018-12-05]. <https://cleantechnica.com/2018/08/30/the-growth-challenges-of-distributed-solar-pv-in-china/>.
- [14] Greentech Media. DER explosive growth in U.S. [EB/OL]. (2018)[2018-12-05]. <https://www.greentechmedia.com/articles/read/distributed-energy-poised-for-explosive-growth-on-the-us-grid#gs.SZxUjso>.
- [15] Demand Response Forum [EB/OL]. (2018)[2018-12-05]. <http://www.drworldforum.com/index.htm>.
- [16] Lian J., Marinovici L., Zhang W., et al. Transactive system part i: Theoretical underpinnings of payoff functions control decisions information privacy and solution concepts [R/OL]. (2018-01-17). doi:10.2172/1422302.
- [17] Hammerstrom D.J. et al. 2007. Pacific northwest gridWise testbed demonstration projects; part II. grid friendly appliance project [R]. PNNL-17079. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory.
- [18] The United States Department of Energy. Resilient distribution systems [EB/OL]. (Sep.2017)[2018-12-05]. <https://www.energy.gov/grid-modernization-initiative-0/resilient-distribution-systems-lab-call-awards>.
- [19] NASPI(North American SynchroPhasor Initiative) [EB/OL]. (2018)[2018-12-05]. <http://www.naspi.org>.
- [20] 全国电力系统管理及其信息交换标准化技术委员会. 电力系统同步相量测量装置通用技术条件: DL/T 280-2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [21] Lu, C., Wu, X., Wu, J., et al. Implementations and experiences of wide-area HVDC damping control in China Southern Power Grid [C]. Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 2012. doi: 10.1109/PESGM.2012.6345363.
- [22] Anderson D., Zhao C., Hauser C., et al. Intelligent design real-time simulation for smart grid control and communications design[J]. IEEE Power Energy Mag. 2012(10): 49-57.
- [23] HELICS(Hierarchical Engine for Large-scale Infrastructure Co-Simulation) [EB/OL]. (2018)[2018-12-05]. <https://www.helics.org>.
- [24] ISO NE. Operational fuel-security analysis [R/OL]. (Jan. 2018). [https://www.iso-ne.com/static-assets/documents/2018/01/20180117\\_operational\\_fuel-security\\_analysis.pdf](https://www.iso-ne.com/static-assets/documents/2018/01/20180117_operational_fuel-security_analysis.pdf).
- [25] The United States Energy Information Administration. How much energy is consumed in U.S. residential and commercial buildings? [EB/OL]. (May 2018)[2018-12-05]. <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=86&t=1>.
- [26] Woohyun Kim, Srinivas Katipamula. Development and validation of an intelligent load control algorithm[J]. Energy and Buildings, 2017, 135: 62-73.
- [27] GridPACK(Grid: Parallel Advanced Computing Kernels) [EB/OL]. (2018)[2018-12-05]. <https://www.gridpack.org>.
- [28] Bruce Palmer, William Perkins, Yousu Chen, et al. A framework for developing power grid simulations on high performance computing platforms [J]. High Performance Computing, 2015, 30(2): 223-240.
- [29] Jin Shuangshuang, Huang Zhenyu, Diao Ruisheng, et al. Comparative implementation of high performance computing for power system dynamic simulations [J]. IEEE Trans. on Smart Grid, 2017, 8(3): 1387-1395.
- [30] GitHub. GridOPTICS™ software system [CP/OL]. (2018)[2018-12-05]. <https://github.com/GridOPTICS/GOSS>.
- [31] DR POWER. Data repository for power system open models with evolving resources [EB/OL]. (2018)[2018-12-05]. <https://egriddata.org>.
- [32] BetterGrids Foundation [EB/OL]. (2018)[2018-12-05]. <http://bettergrids.org>.
- [33] Grid Optimization (GO) Competition [EB/OL]. (2018)[2018-12-05]. <https://gocompetition.energy.gov>.

收稿日期: 2018-12-17; 修回日期: 2019-01-01。

#### 作者简介:



黄振宇

黄振宇, 1994年毕业于华中科技大学, 1999年获清华大学博士学位。1998至2003年, 分别在香港大学、加拿大麦吉尔大学和阿尔伯塔大学从事研究工作。现任美国太平洋西北国家实验室首席科学家与技术组组长。研究领域主要包括高性能计算、数据分析、电力系统及其他相关设备的优化与控制, 已发表学术论文140余篇。现为IEEE Fellow, 活跃于IEEE电力与能源协会(PES)多个技术委员会。获得2008年PNNL Ronald L. Brodzinski早期职业生涯杰出成就奖与2009年IEEE PES杰出青年工程师奖, 带领Richland分会获得2007年IEEE PES杰出分会奖。现为美国华盛顿州注册专业工程师, E-mail: zhenyu.huang@pnnl.gov。



陈有素

陈有素, 2006年起任职于美国太平洋西北国家实验室, 现为资深研究员。主要研究方向为电网高性能计算应用、电力系统运行与决策支持、电力系统建模与仿真, 已发表学术论文90余篇。现为美国华盛顿州注册专业工程师, IEEE高级会员, IEEE Transactions on Smart Grid与IEEE PES Letter编辑。获得2016年IEEE会员与地理活动领导奖, IEEE PES杰出讲座人(Distinguished Lecturer), E-mail: yousu.chen@pnnl.gov。

(责任编辑 白恺)