



能源互联网关键技术分析

查亚兵^{①②}, 张涛^{①②*}, 黄卓^①, 张彦^①, 刘宝龙^①, 黄生俊^①

① 国防科技大学信息系统与管理学院, 长沙 410073

② 国防科技大学高性能计算国家重点实验室, 长沙 410073

* 通信作者. E-mail: zhangtao@nudt.edu.cn

收稿日期: 2014-01-20; 接受日期: 2014-03-31

摘要 能源互联网是解决未来可再生能源大规模有效利用的重要基础设施, 围绕着这一新型电力网络的设计、实现、运行和管理中所面临的新问题, 提出了实现能源互联网的六大关键技术: 先进储能技术、固态变压器技术、智能能量管理技术、智能故障管理技术、可靠安全通信技术和系统规划分析技术, 并对各项关键技术所涉及的科学问题进行了分析与探讨.

关键词 能源互联网 能源局域网 分布式发电 储能系统 固态变压器

1 引言

能源是现代社会赖以生存和发展的基础. 为了应对能源危机, 各国积极研究新能源技术, 特别是太阳能、风能、生物能等可再生能源. 可再生能源具有取之不竭, 清洁环保等特点, 受到世界各国的高度重视. 科学家指出, 太阳光线一个小时的照射所产生的能量足以支撑全球经济运行一整年^[1]. 欧洲光伏工业协会预测, 在所有适合的建筑物表面安装光伏系统就能够产生 1.5 万亿度电, 能满足欧盟所需电力总数的 40%. 2009 年在《科学》杂志称只要中国提高补贴和改善传输网络, 至 2030 年风力发电就可以满足中国所有的电力需求^[2], 可见可再生能源对于解决能源问题具有巨大的潜力.

可再生能源存在地理上分散、生产不连续、随机性、波动性和不可控等特点, 传统电力网络的集中统一的管理方式, 难于适应可再生能源大规模利用的要求. 对于可再生能源的有效利用方式是分布式的“就地收集, 就地存储, 就地使用”^[3~5].

但微电网和分布式发电并网并不能从根本上改变分布式发电在高渗透率情况下对上一级电网电能质量, 故障检测, 故障隔离的影响, 也难于实现可再生能源的最大化利用, 只有实现可再生能源发电信息的共享, 以信息流控制能量流, 实现可再生能源所发电能的高效传输与共享, 才能克服可再生能源不稳定的问题, 实现可再生能源的真正有效利用^[6,7].

信息技术与可再生能源相结合的产物——能源互联网为解决可再生能源的有效利用问题, 提供了可行的技术方案. 与目前开展的智能电网, 分布式发电, 微电网研究相比, 能源互联网在概念, 技术, 方法上都有一定的独特之处. 因此, 研究能源互联网的特征及内涵, 探讨实现能源互联网的各种关键技术, 对于推动能源互联网的发展, 并逐步使传统电网向能源互联网演化, 具有重要理论意义和实用价值.

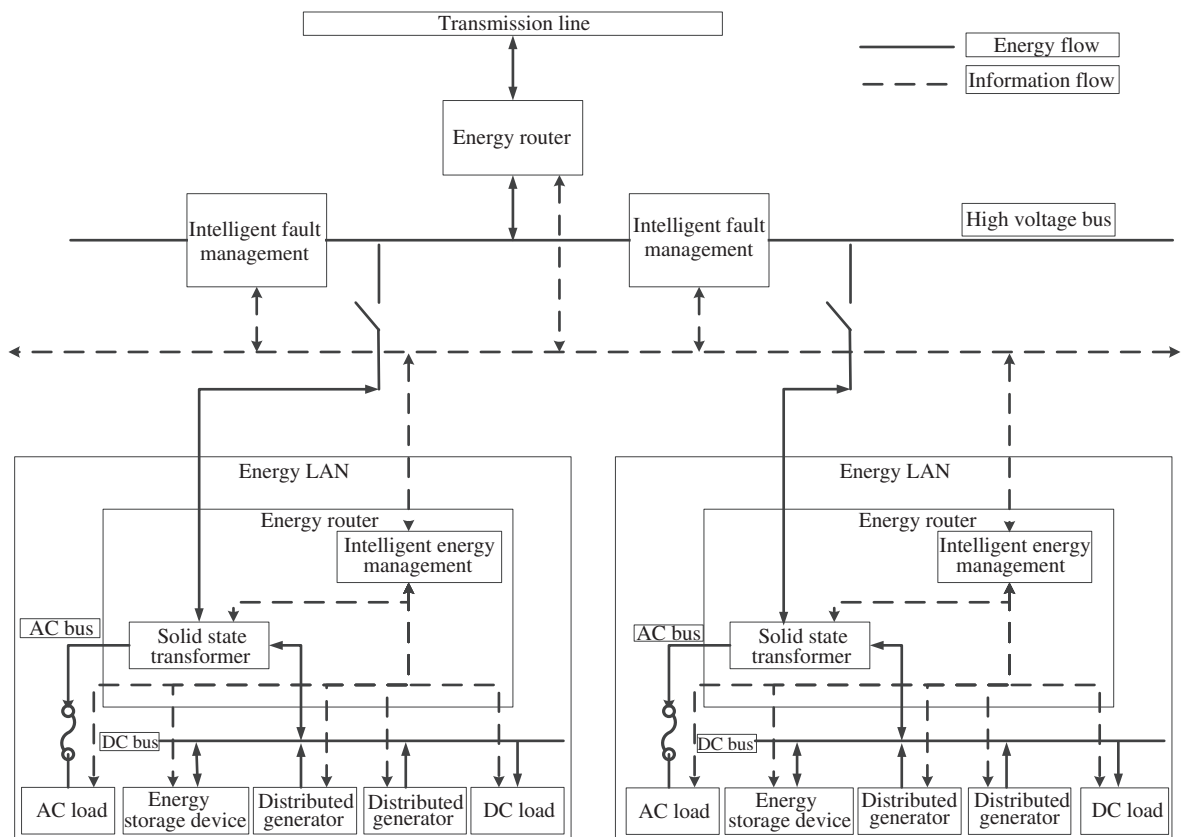


图 1 能源互联网结构示意图

Figure 1 Architecture of energy internet

2 能源互联网的特征及内涵

参考美国国家自然科学基金委支持的未来可再生电力能源转换与管理 (FREEDM) 项目对能源互联网的相关叙述^[8], 能源互联网可理解是综合运用先进的电力电子技术, 信息技术和智能管理技术, 将大量由分布式能量采集装置, 分布式能量储存装置和各种类型负载构成的新型电力网络节点互联起来, 以实现能量双向流动的能量对等交换与共享网络^[9], 典型结构如图 1 所示.

能源互联网由若干个能源局域网相互连接构成. 能源局域网由能量路由器、发电设备、储能设备、交直流负载组成, 可并网工作, 也可脱网独立运行. 能量路由器由固态变压器 (solid state transformer, SST) 和智能能量管理组成; 智能能量管理根据收集的能源局域网中发电设备, 储能设备和负载等信息做出能量控制决策, 然后将控制指令发送给固态变压器执行, 即智能能量管理控制信息流, 固态变压器控制能量流. 为保证能源互联网的可靠安全工作, 能源局域网的上一级母线具有智能故障管理功能, 提供能源互联网故障的实时检测, 快速隔离等功能. 能源互联网与其他形式的电力系统相比, 具有以下 4 个关键特征^[8,10~13].

- **可再生能源高渗透率** 能源互联网中将接入大量各类分布式可再生能源发电系统, 在可再生能源高渗透率的环境下, 能源互联网的控制管理与传统电网之间存在很大不同, 需要研究由此带来的一系列新的科学与技术问题.

- **非线性随机特性** 分布式可再生能源是未来能源互联网的主体, 但可再生能源具有很大的不确定性和不可控性, 同时考虑实时电价, 运行模式变化, 用户侧响应, 负载变化等因素的随机特性, 能源互联网将呈现复杂的随机特性, 其控制, 优化和调度将面临更大挑战.

- **多源大数据特性** 能源互联网工作在高度信息化的环境中, 随着分布式电源并网, 储能及需求侧响应的实施, 包括气象信息, 用户用电特征, 储能状态等多种来源的海量信息. 而且, 随着高级量测技术的普及和应用, 能源互联网中具有量测功能的智能终端的数量将会大大增加, 所产生的数据量也将急剧增大.

- **多尺度动态特性** 能源互联网是一个物质, 能量与信息深度耦合的系统, 是物理空间、能量空间、信息空间乃至社会空间耦合的多域, 多层次关联, 包含连续动态行为、离散动态行为和混沌有意识行为的复杂系统. 作为社会/信息/物理相互依存的超大规模复合网络, 与传统电网相比, 具有更广阔的开放性和更大的系统复杂性, 呈现出复杂的, 不同尺度的动态特性.

3 能源互联网关键技术分析

为了解决以上特性所带来的问题, 发展能源互联网需要解决 6 项关键技术: 先进储能技术、固态变压器技术、智能能量管理技术、智能故障管理技术、可靠安全通信技术和系统规划分析技术.

3.1 先进储能技术

与传统电网的用户侧节点不同, 能源互联网中的用户侧节点 (如家庭或小区等) 一般都具有发电能力, 因此需要配备一定规模的分布式储能系统. 另一方面能源互联网的电网侧或发电侧, 因为可再生能源的高渗透率, 所以为了维持系统的稳定运行, 必须配备较大规模的集中储能系统. 可以看出, 分布式和大规模同时并存是能源互联网储能的重要特点.

分布式储能主要面向用户, 经济效益非常关键, 对储能系统的存储效率、能量密度、使用寿命等提出了较高要求, 新型储能材料是提高这些性能的关键; 目前实现大规模存储的主要手段是电池成组技术, 电池成组后储能单元的科学管理是储能系统高效、长寿命运行的重要保证; 不论是分布式储能还是集中式储能的布局与建设, 都会对整个能源互联网产生较大影响, 因此进行科学合理的储能系统规划意义重大. 先进储能相关技术的逻辑关系如图 2 所示.

3.1.1 新型储能材料

目前, 能源互联网中应用最广泛的储能方式是电池储能, 为了满足能源互联网对储能的需求, 国内外学者对新型储能材料进行了深入研究, 以获取更高能量密度, 更大的存储容量, 更好的转换效率 and 更稳定的性能. 新型储能材料的研究主要集中在以下 3 个方面.

- (1) 高比容量合金负极材料. 传统的碳系材料虽然具有良好的层状结构, 电极位低, 制成电池电压较高, 但在反复充放电时, 可能会发生表面析出化合物现象和与电解液发生共嵌反应, 成为电池循环寿命提升的瓶颈, 未来的研究方向是硅合金与其他形式的合金材料.

- (2) 大功率, 低成本, 高容量和高安全性正极材料. 正极材料性能对储能电池安全性, 循环寿命, 成本等的影响极大, 目前的正极材料以固相法为主, 液相法有待发展^[14,15].

- (3) 燃料电池关键材料, 燃料电池堆, 固体氧化物燃料电池的电极材料.

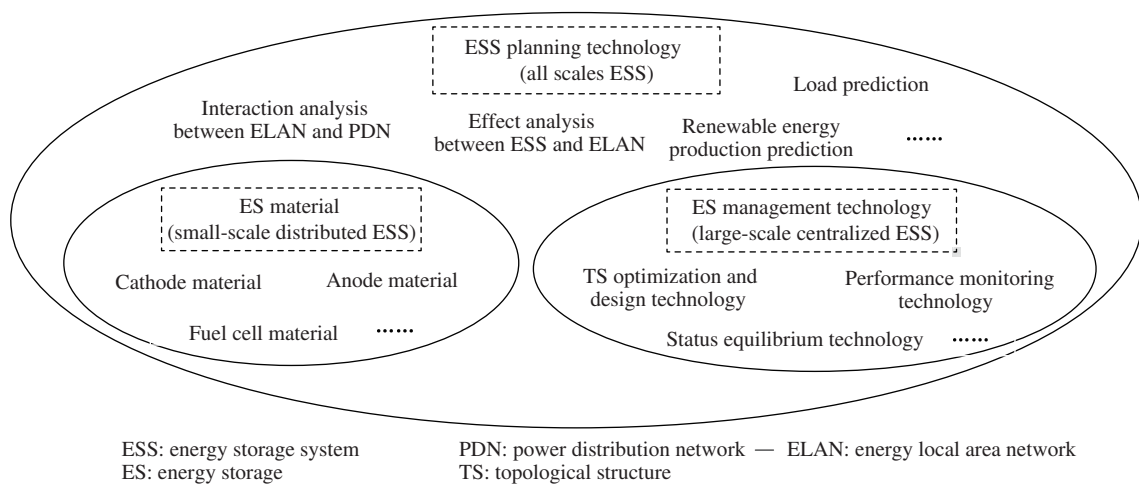


图 2 先进储能技术逻辑关系图

Figure 2 Advanced storage technology logic relationship

3.1.2 储能管理技术

储能单元大规模成组后, 由于储能单元的差异性大, 数量较多, 连接复杂, 如果管理混乱, 将严重影响系统的寿命和性能^[16], 因此国内外学者对储能单元的成组管理开展了大量研究工作, 主要集中于以下 3 个方面.

(1) 拓扑结构优化与设计技术. 能源互联网的非线性随机特性给储能系统带来较大冲击, 为了提高储能系统灵活应对和处理随机波动的能力, 科学合理的拓扑结构是基础. 目前, 动态化, 网络化拓扑结构是研究的主要方向.

(2) 性能监控技术. 对储能系统性能的精确监控是保证对其合理调度使用的基础, 然而目前储能单元的性能监控技术仍不够成熟, 大规模成组之后储能系统的性能监控更难以实现. 目前, 监控的主要参数为温度、电压、电流、内阻、荷电状态 (SOC)、健康状态 (SOH) 等, 其中 SOC 和 SOH 不可直接测量, 其精确估算模型是研究的重点.

(3) 状态均衡技术. 储能单元成组之前, 因为生产工艺等原因, 不可避免地存在差异性; 成组之后, 差异性随着循环次数增加将越来越大. 为减小差异性, 目前已开发了几种常用的储能系统状态均衡技术, 分别基于电阻、电容、电感和二极管等耗能和储能元件, 但均衡效果仍不够理想, 均衡电路与均衡元件的有效搭配是状态均衡的热点.

3.1.3 储能系统规划技术

储能系统的接入对提高电网的稳压调频能力, 拉低电网功率峰谷差, 改善用户在电网事务中的参与度具有重要意义, 但储能系统的单位投入成本较高, 有必要开展储能系统规划研究, 目的是以最小的成本实现寿命长, 安全可靠, 经济效益高的储能系统. 储能系统规划研究过程中面临的主要问题有: (1) 不同的储能技术在成本、额定功率、充放电速率有所不同; (2) 发电侧、传输线侧、变电站侧、用户侧对储能系统的功能要求不同; (3) 同一储能系统具有多种使用策略; (4) 可再生能源发电和负载需求具有随机性、波动性和间歇性. 因此, 为了更好的开展储能系统规划技术研究, 需要从以下 3 个方面进行突破.

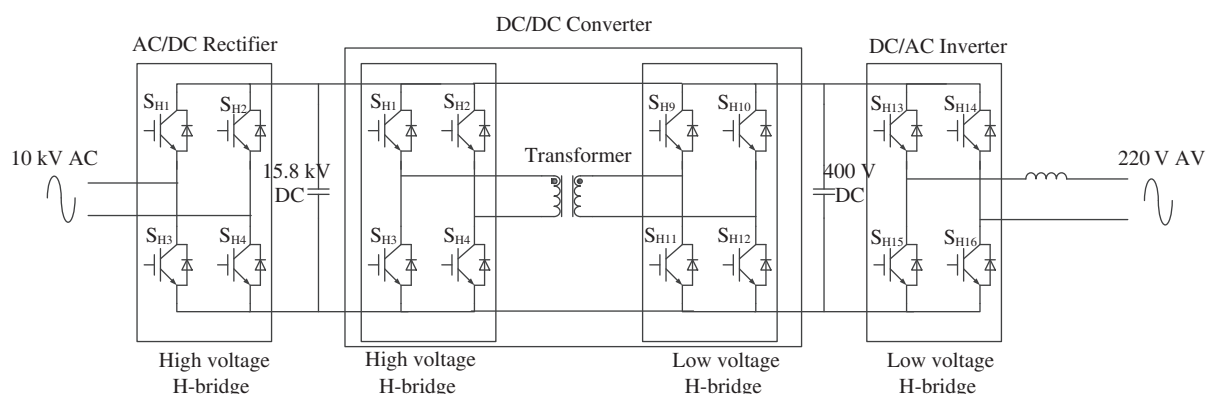


图 3 固态变压器电路拓扑

Figure 3 Topology of solid state transformer

(1) 各种待选储能技术评价分析. 全面分析各种储能技术的各项性能指标, 如额定功率、使用寿命、初始投资成本、年平均维护成本、功率密度、比能量等, 经过指标初选, 指标筛选建立对储能技术评价的指标体系, 为开展不同储能技术筛选提供理论依据.

(2) 储能系统使用环境及作用机理分析. 主要进行微电网与大电网相互作用机理分析, 储能系统对微电网稳定运行作用机理分析, 负荷特性分析, 可再生能源发电功率预测分析, 为快速准确的进行储能系统规划提供保障.

(3) 储能系统规划权衡分析. 确定储能系统的优化使用目标与约束条件, 运用线性规划, 非线性规划, 动态规划, 智能优化等方法选出最适合的储能系统组成, 最佳的配置位置, 最优化的使用策略.

3.2 固态变压器技术

随着高渗透率下可再生能源发电设备及储能设备接入, 传统变压器的供电质量等方面难以满足能源互联网建设和发展的需求, 而固态变压器作为一种利用电力电子器件进行高频的能量和功率控制的变换器, 被认为是能源互联网的核心技术, 其原理如图 3 所示, 该固态变压器由 3 部分组成, 分别是: AC/DC 整流器、DC/DC 变换器和 DC/AC 逆变器. 固态变压器可实现可再生能源发电设备和储能设备和负载的有效管理, 固态变压器具有双向能量流动能力, 可以控制有功功率和无功功率, 具有更大的控制带宽提供即插即用功能.

固态变压器是将固态技术整合到变压器中, 通过电力电子控制和中间直流总线能量存储功能, 这种变压器具有很多新的功能^[17].

(1) 电压下陷补偿. 当电网输入电压短期下降时, 固态变压器可以补偿功率差额维持输出电压稳定, 这种直流总线的能量存储功能可以作为满足用户的特定需求.

(2) 断电补偿. 和电压下陷补偿原理类似, 在外电网断电时, 固态变压器可以通过内置储能设备提供全电压补偿.

(3) 瞬时电压调整. 当电力系统或者负载出现波动时, 固态变压器因为具有的能量缓冲功能可以维持输出电压恒定.

(4) 故障隔离. 固态变压器能起到电网和负载故障相互隔离的作用.

(5) 单位功率因数校正 (无功功率补偿). 固态变压器能在一定功率范围内保持单位功率因数运行, 也可以根据系统需要产生或吸收一定的无功功率.

表 1 固态变压器与传统变压器比较^{a)}

Table 1 Comparisons of solid state transformer and traditional

Evaluation indicator	Conventional transformer	SST
Eliminating oil	×	✓
Reducing weight and size	×	✓
Reactive power compensation	×	✓
Voltage sag compensation	×	✓
Voltage regulation	Limited, slow	✓
Outage compensation	×	✓
Harmonic isolation	×	✓
DC output	×	✓
Energy storage option	×	✓
Fault isolation	×	✓
Bidirectional power flow	×	✓

a) 表注: ✓ 有此优点; × 无此优点

(6) 谐波隔离. 非线性负载产生的畸变电流会积累到变压器的主边, 而固态变压器能维持输入电流不畸变, 能运行在单位功率因数下.

(7) 直流输出. 固态变压器具有 400 V 直流输出, 使得分布式能源的接入更方便.

(8) 分布式信息量自动测量. 固态变压器能自动测量包括瞬时电压、电流、功率因数、谐波量、功率、故障电流和故障电压等.

(9) 环境效益. 传统变压器需要绝缘油等液体, 而固态变压器不需要绝缘油, 对环境友好, 且因为中间采用变压器的高工作频率, 变压器体积大幅度减小.

固态变压器和传统变压器的具体性能比较如表 1 所示.

固态变压器作为能源互联网关键设备之一, 其研究领域主要有: (1) 基于 SiC 的新型宽禁带材料的研制, 固态变压器要工作在高温、高压、高频的环境下, 并且小型化也要求固态变压器具有高的功率密度, 而 SiC 材料在高压、高温、高频环境下将表现出比 Si 材料更优异的性能: 3 倍于 Si 的禁带宽度, 更大幅度的工作温度, 比 Si 高一个数量级的击穿电场, 有很高的功率密度. 比 Si 高 3 倍的热导率, 能在更高温度下长时间稳定工作^[17,18], 所以 SiC 材料将逐渐取代 Si 材料, 成为固态变压器中功率半导体的主要材料; (2) 基于 SiC 的固态功率器件和固态变压器设计与实现, 文献 [19] 中利用 10 KV SiC 功率设备成功研制出 270 KVA 的固态变压器, 文献 [20] 中利用 SiC MOSFET 研制出 FREEDM 研究中心的第 2 代固态变压器, 实现 AC-DC 的变换, 效率达 97%, 体积仅为第 1 代的 1/5, 为未来能源互联网的大规模应用奠定了重要基础; (3) 固态变压器的鲁棒性控制, 传统的 PID 控制方法只具有小信号稳定性, 不能保证固态变压器在元器件参数摄动、负载突变、可再生能源功率波动、电网波动等不确定性, 大信号干扰下具有很好的稳定性, 很多先进的控制方法如滑模控制、自适应控制、鲁棒控制、反演控制等非线性控制方法表现出了很好的大信号稳定性, 另外也可以应用模糊控制、神经网络等智能控制方法提高固态变压器的鲁棒性.

3.3 智能能量管理技术

能源互联网中具有多种能量产生设备, 能量传输设备, 能量消耗设备, 拓扑结构动态变化, 具有典

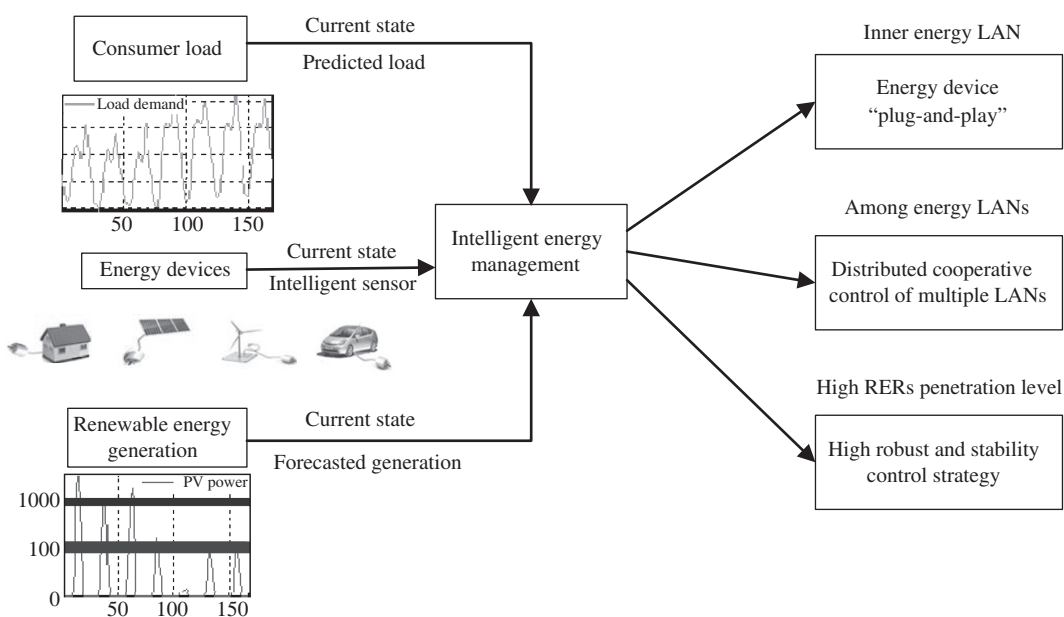


图 4 智能能量管理技术的系统架构

Figure 4 System architecture of the intelligent energy management technology

型的非线性随机特征与多尺度动态特征,如图 4 所示,为了实现对能源局域网内能量设备的“即插即用”管理,多能源局域网之间的分布式协同控制,以及针对可再生能源高渗透率下的控制策略高鲁棒性,需要在能源互联网的各层引入智能能量管理技术。

3.3.1 能量设备“即插即用”管理技术

随着太阳能电池模块,小型风力发电机组与分布式发电设备成本的持续下降,繁琐的设备安装,互连等非硬件成本占到分布式电源总成本的比例越来越大,固定的拓扑结构也降低了系统的安全性与灵活性。为了降低分布式发电设备的非硬件成本,提高能源互联网的动态拓扑性,灵活性和安全性,要求能源互联网中能量设备满足“即插即用”的特性。能量设备的“即插即用”管理技术应具备:(1)类似于计算机的“USB”接口协议,能够快速感知与描述负载、储能、发电等设备;(2)具有开放的硬件平台,能与现有电网很好连接;(3)能量设备接入或脱离时能自动快速进行能量与信息的接入与断开。

为了实现能量设备的“即插即用”,应突破以下 3 个方面的技术:(1)各种能量设备的自动识别技术;(2)能量设备“即插即用”标准与协议的制定;(3)能量设备集成管理技术。

3.3.2 分布式能量管理与协同控制技术

多能源局域网之间的能量管理与协同控制主要有主从控制与对等控制两类。主从控制的拓扑结构较为僵化,且主控中心计算量巨大,一旦崩溃会波及整个能源互联网系统;分布式对等控制没有控制中心,能量控制主要采用多能源局域网间的协同与配合,采用的是动态拓扑结构,具有能源网与信息网叠加的特点。为了最大化的利用可再生能源,提高能源互联网的可靠性与安全性,要求能源互联网运用多层交叉,集中与分布结合的分布式能量管理与协同控制技术。由于对等控制结构比较复杂,接口较多,响应速度相对集中控制稍慢,需要探索能够快速、高效和不以牺牲单个能源局部利益全局最优分布式能量管理与协同控制技术。

分布式能量管理与协同控制技术实现中主要有以下几个方面的困难: (1) 节点异质和通信时延等情况; (2) 适应“即插即用”的动态网络拓扑结构; (3) 保证系统整体的一致性. 可以从以下几个方面进行技术突破: (1) 设计物理结构简单, 逻辑快速的控制网络拓扑结构; (2) 采用动态性, 适应性较强的分布式人工智能控制技术, 对能源互联网中的多个微电网节点进行并行地, 相互协作地控制; (3) 借助 agent 技术的突出优势, 构建基于 agent 的分布式多层交叉能量控制架构.

3.3.3 基于可再生能源预测的控制策略优化技术

为了提高能源互联网中各种设备合理配置与优化调度能力, 需要提高控制策略鲁棒性与适应性, 而可再生能源发电功率作为最大的不确定因素, 对储能系统的配置, 充电使用策略和网内电压的稳定有重大影响, 因此, 有必要开展基于可再生能源预测的控制策略优化研究. 目前, 由于可再生能源发电高度的随机性和间歇, 传统的预测方法难以实现精确预测, 更难以研究出一套与之相适应的控制优化算法.

因此, 开展基于可再生能源预测的控制策略优化研究主要从以下两个方面进行突破: (1) 小偏差的短期, 超短期可再生能源输出功率预测方法. 探索运用气象预报数值结合神经网络或模糊自适应等大规模数据处理优化模型对可再生能源的输出功率进行预测. (2) 高鲁棒性和动态性的控制优化方法. 以可再生能源利用率、经济性、电网能量满足充裕度等为目标, 以负载能耗需求、成本约束、光照与风力条件等为约束, 采用混合动态规划算法、遗传算法、粒子群算法等实现高鲁棒性和动态性的基于可再生能源预测的控制策略优化.

3.4 智能故障管理技术

智能故障管理技术在能源互联网中, 固态变压器提供分布式能源和负载的有效管理, 因其具有强烈的限流作用, 能大幅度改善短路电流波形, 提高电网的稳定性, 与传统电网相比, 能源互联网故障电流很小, 最多只能提供两倍额定电流的故障电流, 传统的通过检测电流大小的故障检测设备和方法将失效, 需要设计新型故障识别和定位方法. 这就需要设计一种新的电路断路器, 保证当系统发生故障时, 断路器可以快速的隔离故障单元, 使得固态变压器能快速的恢复系统电压. 而传统的机械式断路器会使系统在发生故障时, 功率流动出现短暂的中断, 会很大程度上干扰系统中的关键负载运行. 而用固态电力半导体器件代替机械式断路器而研制的固态断路器可以满足能源互联网的需求^[21]. 固态断路器利用 IGBT 等电力半导体器件作为无触点开关, 大幅度提高相应速度. 同时起到重合器和分段器的双重作用^[22].

在能源互联网中主要采用环路供电策略, 提高了系统的柔性操作能力和供电可靠性, 能源互联网提出识别和定位技术, 提出区域化系统保护方案, 如图 5 所示, 利用 Kirchhoff 电流定律, 根据线路两侧判别量的特定关系作为判断依据, 即区域两侧均将判别量借助通道传送到对策, 然后两侧分别按照对侧与本侧判别量之间的关系来判别区域故障或区域外故障. 利用纵连差动的思想, 将能源互联网分割成若干个区域, 每个区域两端都接有固态断路器, 负责清除故障, 由固态变压器提供后备保护, 每个区域连接若干个固态变压器拓扑分支, 每个分支上都有电流流入或流出, 显然不能仅仅必先区域两侧的判别量, 可以将在差动保护基础上, 由 Kirchhoff 定律去判断, 若图中闭合线圈内支路电流之和为零, 则区域内无故障; 若电流之和不为零, 则区域内有故障. 由于电流传感器的励磁特性不可能完全一致, 且在采用通信传输电流采样值时, 也不能完全保证实时性和同步性, 使得电流累加结果不为零, 因此设定一个阈值, 当累加电流大于此阈值时, 判定区域内有故障, 相关区域的固态断路器断开, 反之则判

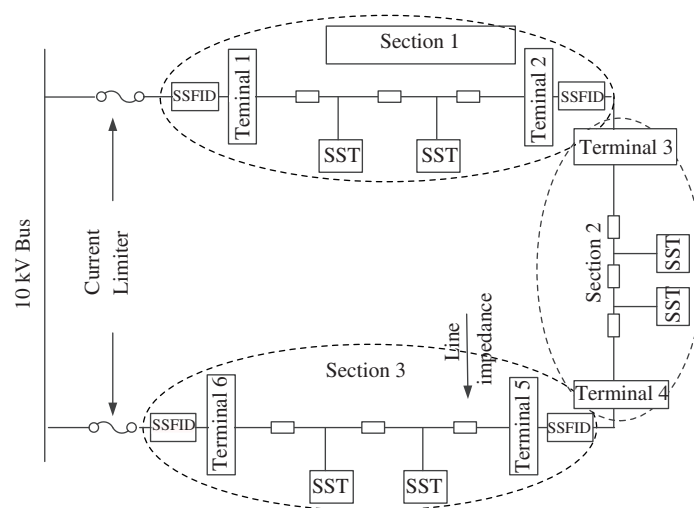


图 5 区域化系统保护方案

Figure 5 Zone system protection scheme

定无故障, 固态断路器无动作 [23].

3.5 可靠安全通信技术

安全可靠的通信骨干网是能源互联网正常工作的重要保证. 由于能源局域网内能量设备具有易接触性与高动态拓扑变化性, 能源互联网的多尺度动态性, 如图 6 (修改自文献 [24]) 所示, 使得能源互联网中的通信结构复杂, 数据处理量大; 为了保证能源互联网的稳定运行, 要求通信网络满足网络时延小、数据传输优先级分类、可靠传输、时间同步以及支持多点传输等多种功能.

实现正常, 高效的能源互联网通信网络, 需要处理好以下几个方面的问题: (1) 通信的设备繁多 (IEM、IFM、发电设备、各种智能负载); (2) 通信层级各异 (广域网、区域网、家域网); (3) 通信时延要求较高 ($< 20 \text{ ms}$) [24]. 因此, 主要可从以下几个方面进行突破.

(1) 可靠安全通信网络架构分析. 主要从地理上与控制关系上将通信网络进行合理的层次划分, 对影响各层通信时延, 可靠性和网络安全的影响因素进行分析, 包括可靠安全通信网络软硬件结构设计、通信优先级设计、通信安全措施分类、通信性能要求确定、通信媒介选择与确定等.

(2) 协议改进与标准分析. 主要通过对传统电网通信网络的通信协议分析, 根据能源互联网的体系结构改进或重新设计通信协议, 分析 IEC61970 与 IEC61968 协议选择能量管理与分布式管理系统协议, 分析 IEC60870-6、DNP3、IEC60870-5-101、IEC60870-5-104、IEC 62445-2 等协议标准控制中心间通信协议, 分析 IEC62445-1、IEC61850 等协议变电站间通信协议, 最后根据分析结果、构建能源互联网可靠安全通信的物理层、数据链路层、伪传输层和应用层协议标准.

(3) 通信实验平台设计与实验评估. 主要是通过建立实验平台评估网络通信的功能是否满足要求, 需要完成软件系统设计、系统实验与评估、系统改进等工作.

3.6 系统规划分析技术

能源互联网是一个物质, 能量与信息深度耦合的系统, 是物理空间、能量空间、信息空间乃至社会

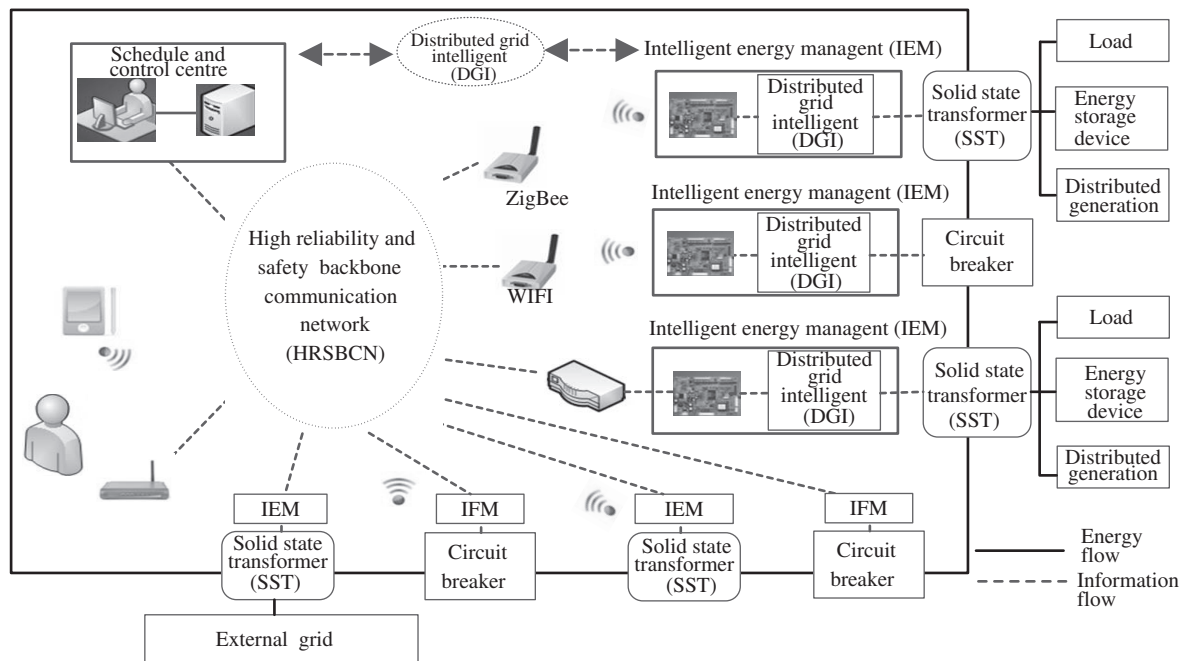


图 6 能源互联网通信架构

Figure 6 Communication architecture of the energy internet

空间耦合的多域、多层次关联, 包含连续动态行为、离散动态行为和混沌有意识行为的复杂系统. 作为社会/信息/物理相互依存的超大规模复合网络, 与传统电网相比, 具有更广阔的开放性和更大的系统复杂性. 能源互联网系统在协同控制过程中各个节点间存在着博弈过程和较强的社会性, 能量的流动与网络拓扑的变化受市场电价和政府政策的影响, 结构与单元异质, 行为复杂, 能量与信息深度融合, 能量供需不确定等特征, 表现出混杂多尺度动态与复杂网络特性. 因此, 开展能源互联网系统规划分析技术研究, 分析并揭示能源互联网的控制, 运行和演化机理, 研究能源互联网系统中的体系结构设计, 能源互联网系统规划等方面的基础理论和关键技术具有重要的意义.

能源互联网系统规划技术以构建双向互动, 自治高效和安全可信的能源互联网系统为目标, 考虑能源互联网行为复杂, 能量与信息深度融合, 能量供需不确定等特征, 主要从以下几个方面开展研究: (1) 能源互联网系统中的体系结构设计; (2) 能源互联网系统可靠性、安全性和抗毁性分析与评估; (3) 政策对能源互联网的影响分析等问题.

4 结论

能源互联网是互联网信息技术与可再生能源相结合的产物, 涉及的学科领域非常广泛, 如材料科学、生物科学、控制科学、信息科学、管理科学、经济学等, 是典型的交叉学科问题. 能源互联网为解决可再生能源的有效利用问题, 提供了可行的思路与技术方案. 本文分析了能源互联网的六大关键技术: 先进储能技术、固态变压器技术、智能能量管理技术、智能故障管理技术、可靠安全通信技术、系统规划分析技术, 初步讨论了每项关键技术需要解决的科学问题, 目的在于引起学术界对能源互联网研究的关注, 共同推动能源互联网的发展, 为解决中国乃至世界能源问题做出贡献.

参考文献

- 1 Rifkin J. Third Industrial Revolution (in Chinese). Zhang T W, Sun Y L, translation. Beijing: CITIC Press, 2012 [杰里米·里夫金. 第三次工业革命. 张体伟, 孙毅宁, 译. 北京: 中信出版社, 2012]
- 2 Michael B M, Xi L, Chris P N, et al. Potential for wind-generated electricity in china. *Science*, 2009, 325: 1378–1380
- 3 Saima A, Yogesh S, Viktor K P. Energy management systems: state of the art and emerging trends. *IEEE Commun Mag*, 2013, 51: 114–119
- 4 Wang C S, Wang S X. Study on some key problems related to distributed generation systems. *Automat Electric Power Syst*, 2008, 32: 1–8 [王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究. *电力系统自动化*, 2008, 32: 1–8]
- 5 Mei S W, Zhu J Q. Mathematical and control scientific issues of smart grid and its prospects. *Acta Automat Sin*, 2013, 39: 119–131 [梅生伟, 朱建全. 智能电网中的若干数学与控制科学问题及其展望. *自动化学报*, 2013, 39: 119–131]
- 6 Lasseter R H. Microgrids. In: *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Michigan, 2002. 305–308
- 7 Ackermann T, Andersson G, Söder L. Distributed generation: a definition. *Electr Pow Syst Res*, 2001, 57: 195–204
- 8 Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet. *P IEEE*, 2011, 99: 133–148
- 9 Zha Y B, Zhang T, Tan S R, et al. Understanding and thinking of the energy internet. *Nat Defense Sci Technol*, 2012, 33: 1–6 [查亚兵, 张涛, 谭树人, 等. 关于能源互联网的认识与思考. *国防科技*, 2012, 33: 1–6]
- 10 Massoud A S, Wollenberg B F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power Energy M*, 2005, 3: 34–41
- 11 Chen S, Song S, Li L, et al. Survey on smart grid technology. *Power Syst Technol*, 2009, 33: 1–7
- 12 Akella R, Meng F, Ditch D, et al. Distributed power balancing for the FREEDM system. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, Gaithersburg, 2010. 7–12
- 13 Huang A. FREEDM system-a vision for the future grid. In: *Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Minneapolis, 2010. 1–4
- 14 Yang Z, Zhang J, Kintner-Meyer M C W, et al. Electrochemical energy storage for green grid. *Chem Rev*, 2011, 111: 3577–3613
- 15 Xiao L G, Ding R, Wei H L. Study of the new phase change composite materials. *J Jilin Inst Archit Civil*, 2008, 25: 7–14 [肖力光, 丁锐, 魏宏亮. 新型相变储能材料的研究. *吉林建筑工程学院学报*, 2008, 25: 7–14]
- 16 Chen Y J. Research on modeling and SOC algorithm of LiFePO₄ battery. Dissertation for the Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 [陈勇军. 磷酸铁锂电池建模及 SOC 算法研究. 哈尔滨, 哈尔滨工业大学, 2011]
- 17 Zhao T F. Design and Control of a Cascaded H-Bridge Converter based Solid State Transformer (SST). North Carolina State: North Carolina State University, 2010. 20–21
- 18 Li Y Z. A review of 4H-SiC power electronic devices. *Res Prog Solid State Electron*, 2011, 31: 213–218 [李宇柱. SiC 电力电子技术综述. *固体电子学进展与研究*, 2011, 31: 213–218]
- 19 Tie F Z, Li Y Y, Jun W, et al. 270 kVA solid state transformer based on 10 kV SiC power devices. In: *Proceedings of IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, Arlington, 2007. 145–149
- 20 Wang G Y, She X, Wang F, et al. Comparisons of different control strategies for 20 kVA solid state transformer. In: *Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Phoenix, 2011. 3173–3178
- 21 Watterson J, White L, Bhattacharya S, et al. Operation and design considerations of FID at distribution voltages. In: *Proceedings of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Long Beach, 2013. 2206–2211
- 22 Zhang M R, Liu J H, Jin X. Research on the FREEDM micro-grid and its relay protection. *Power Syst Protect Control*, 2011, 39: 95–100 [张明锐, 刘金辉, 金鑫. FREEDM 微型电网及其继电保护研究. *电力系统保护与控制*, 2011, 39: 95–100]
- 23 Tatcho P, Jiang Y, Li H. A novel line section protection for the FREEDM system based on the solid state transformer. In: *Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, 2011. 1–8
- 24 Xiang L, Wen Y W, Jian F M. An empirical study of communication infrastructures towards the smart grid: design, implementation, and evaluation. *IEEE Trans Smart Grid*, 2013, 4: 170–183

Analysis of energy internet key technologies

ZHA YaBing^{1,2}, ZHANG Tao^{1,2*}, HUANG Zhuo¹, ZHANG Yan¹, LIU BaoLong¹ & HUANG ShengJun¹

1 College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2 State Key Laboratory of High Performance Computing, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

*E-mail: zhangtao@nudt.edu.cn

Abstract Energy internet is an important infrastructure to solve high-permeability of renewable energy generation in the future grid. A series of major issues about design, production, operation and management of this new grid. Six key technologies are proposed to realize the energy internet: advanced energy storage technology, solid state transformer technology, intelligent energy management technology, intelligent fault management technology, reliable and secure communications technology and system planning and analysis technology. Then the science problems of these technical issues are analyzed and discussed in this study.

Keywords energy internet, energy LAN, distributed generation, energy storage, solid state transformer



ZHA YaBing received his Ph.D. degree in system simulation from National University of Defense Technology (NUDT) in 1995. Now he is the dean of College of Information System and Management, NUDT. His research interests include conceptual modeling, system simulation and integration, simulation Verification, Validation and Accreditation (VV&A).



ZHANG Tao received his Ph.D. degree in management science and engineering from NUDT in 2004. Now he is the deputy director of the department of system engineering, College of Information System and Management, NUDT. His research interests include complex system modeling and optimization, battery management technology, energy internet technology.



HUANG Zhuo received his Ph.D. degree in management science and engineering from NUDT in 2007. His research interests include energy systems engineering and management, and system reliability analysis.