可再生能源互联网中的微电子技术

黄如*, 叶乐, 廖怀林

北京大学微电子学研究院, 北京 100871

* 通信作者. E-mail: ruhuang@pku.edu.cn

收稿日期: 2014-01-24; 接受日期: 2014-05-21

国家重点基础研究发展计划 (973)(批准号: 2011CBA00601) 资助项目

摘要 可再生能源互联网对电子系统提出了五大要求: 高效性、安全性、可靠性、便利性、宽泛性. 为了实现上述要求, 可再生能源互联网需要多学科、多方面、多层次的创新. 微电子技术将会渗透到可再生能源互联网的各个层级, 是可再生能源互联网的重要支撑性技术之一. 文章重点围绕固态变压器、分布式储能技术、信息采集芯片技术、通信芯片技术四个方面, 阐述了可再生能源互联网中的微电子技术所面临的特殊要求、技术挑战及未来可能的发展趋势.

关键词 可再生能源互联网 微电子 固态变压器 分布式储能 信息采集芯片 自供能

1 背景介绍

能源问题是未来人类面临的最为严峻的挑战之一. 当前人们对能源的需求呈指数形式的增长, 若对能源使用方式不加以改变, 预计 2050 年全球能源消耗将增长至 20 TW, 远超过 1 TW 的可容忍目标^[1]. 传统的以煤炭、石油等化石燃料为主的能源模式将带来一系列重大问题, 如环境污染、碳排放的急剧增加、化石能源储量下降等, 从而对可持续发展造成很大的障碍. 因此, 可再生能源是解决能源问题的重要途径. 规模化的可再生能源包括太阳能、风能、潮汐能等. 以太阳能为例, 如果我们将地球表面 1% 的面积利用起来, 以 5% 的效率将太阳能转化为电能, 那么一年的能源则可供全球使用 40 年以上^[2].

然而, 由于可再生能源的独特性导致其无法直接并入传统电网, 阻碍了可再生能源的发展. 利用可再生能源发电具备以下 4 个特征及挑战:

- 1) 波动性: 随着时间、气候、季节等变化, 可再生能源发电量波动且不受人为因素控制.
- 2) 间歇性: 可再生能源发电电压波动剧烈, 甚至某些时候无电能输出.
- 3) 采能用能间的不平衡性: 可再生能源发电高峰期与用电高峰期在时间尺度上不平衡, 如太阳能仅在白天发电, 而夜晚则是大多数家庭的用电高峰期.
- 4) 地域不平衡性: 可再生能源丰富的地区与用电量大的地区往往不一致, 如我国风能主要集中于内蒙等北方地区, 但是当地却无法消耗大量的风电装机容量.

另一方面, 传统电网所具备的星型网络拓扑, 也使其面临着一系列的问题:

- 1) 兼容性差: 可再生能源并网困难, 时空上剧烈波动的可再生能源将会导致传统电网的电压剧烈波动.

引用格式: 黄如, 叶乐, 廖怀林. 可再生能源互联网中的微电子技术. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 728–742, doi: 10.1360/N112014-00025

图 1 可再生能源互联网示意图

Figure 1 Schematic diagram of renewable energy network

2) 网络脆弱: 易受攻击, 如果将传统电网简单的与互联网相结合, 那么互联网的开放性特征将导致传统电网极易受到攻击。

3) 故障传导: 传统电网的某一部分发生故障, 会传导至更大范围从而导致大面积电网崩溃, 并对电网内电气和电子设备造成损伤。美国和加拿大 2003 年 8 月 14 日的大断电事故造成了约 300 亿美元的经济损失^[3]。

可再生能源的特征和传统电网的缺陷, 导致可再生能源无法直接并入电网, 因此, 我们有必要利用信息技术对传统电网加以改造, 使得可再生能源得以顺利进入电网中, 即通过信息技术与电力技术的深度融合, 实现电网的变革——可再生能源互联网。如图 1 所示, 分布式可再生电网与信息网络深度融合, 构成了可再生能源互联网, 从而实现可再生能源的高效配置和高效使用。

可再生能源互联网具有类似于互联网的扁平化拓扑结构, 由各种规模不同的分布式微电网组成, 微电网之间可以实现电能的双向共享和高效配置。大到一座工厂, 小到一幢居民房都可以作为一个微电网。如图 2 所示, 一个典型的微电网由分布式采能装置(可再生能源)、分布式储能装置、分布式用能装置(负载)三种类型的基本单元组成, 通过固态变压器(solid-state transformer, SST)实现与电力总线之间的电能双向流动。分布式采能装置负责产生电能, 它可以是太阳能、风能等新能源供给端, 然而由于可再生能源发电的波动性和间歇性导致发出的电能波动剧烈, 而分布式的微电网由于其规模较小, 会进一步加剧这一波动, 从而无法满足负载对高质量电源的需求。因此, 分布式储能装置就显得尤

图 2 可再生能源互联网中的微电网

Figure 2 Micro grid in renewable energy network

为重要, 它可以将微电网中暂时多余的电能储存起来, 当电能出现缺口时再释放出来, 起到稳定微电网的作用. 一个分布式微电网如果无法实现自给自足时, 仍然可以从外部电力总线获取电能; 如果电能有盈余, 则可以向外部输电. 本文认为, 分布式微电网应当最大限度的实现采能、储能、用能之间微平衡, 从而为可再生能源互联网电能高效配置奠定基础.

在分布式微电网中, 电子系统起着至关重要的作用, 可再生能源互联网对电子系统提出了以下五大要求.

- 1) 高效性: 即实现分布式采能 (可再生能源)、储能、用能间的微平衡, 从而实现电能的高效配置与高效使用.
- 2) 安全性: 分布式微电网应当具有故障屏蔽功能, 即微电网或其内部发生故障时, 应当断开与外部电力总线的联系, 防止故障传导乃至大规模电网崩溃, 并且具有一定的故障排查与故障自愈能力.
- 3) 高质性: 应当提供高品质的电能, 即稳定的电压和纯净的频率, 避免由于谐波污染、电涌等造成的电力设备老化和故障.
- 4) 便利性: 一方面设备小型化、轻量化, 从而可实现小型化的分布式微电网; 另一方面, 设备即插即用, 即任何一个分布式采能装置 (可再生能源)、分布式储能装置、或分布式用能装置可以在无须停电的情况下便捷地接入微电网或从微电网中断开.
- 5) 宽泛性: 可提供多种多样的可再生能源互联网的应用, 并可为衍生性应用提供支持.

然而传统的电子系统难以满足上述要求, 为了实现上述要求, 可再生能源互联网中的电子系统需要多学科、多方面、多层次的创新, 尤其是需要微电子学科的技术创新, 包括微电子材料、工艺、器件和芯片等多层次的创新. 微电子技术将会渗透到可再生能源互联网的各个层级, 是可再生能源互联网的重要支撑性技术之一. 而可再生能源互联网的技术要求和特定应用环境对微电子技术提出了新的挑

战. 本文将重点围绕固态变压器、分布式储能技术、信息采集芯片技术和通信芯片技术 4 个方面, 阐述可再生能源互联网中的微电子技术所面临的特殊要求、技术挑战及未来可能的发展趋势等.

2 固态变压器

2.1 固态变压器的特征

固态变压器 (SST) 是能源互联网系统中实现能量转换的核心部件, 为了适应可再生能源互联网的特殊要求, 它具备了传统变压器所不具有的众多优点^[4,5]:

1) SST 不仅可以实现电压转换 (高压与低压之间的转换), 还能够实现传统变压器所不能实现的频率变换 (直流电与交流电之间的变换). SST 同时具有交流和直流环节, 可实现直流低压、直流高压、交流低压、交流高压四种状态之间的转换, 从而满足各种分布式电力设备灵活接入电力系统的需求.

2) 体积小、重量轻. 变压器中的铁芯尺寸直接决定了 SST 的尺寸. 由于变压器铁芯大小与工作频率大致成反比, SST 通过提高工作频率大大缩小了体积, 减轻重量, 从而可以广泛应用于分布式电力电子设备中, 适应可再生能源互联网海量装备的特点.

3) 双向输入输出, 兼有故障隔离功能. 由于 SST 频率变换和电压变换的灵活性, 它可以有效阻断变压器两端故障传递. 同时相比于传统变压器只适用于单一频率、单向电压传递, SST 几乎可以适用于各种情况下的电压双向传递. 例如 SST 可以将太阳能发电网络并入电网, 实现低压直流电向高压交流电的转化; 将风能发电网络并入电网, 实现低压交流电向高压交流电的转化; 为电动汽车充电, 实现低压交流电向低压直流电的转化; 将分布式储能装置与电力总线相连, 实现直流电与交流电的双向传导. 这适应了可再生能源互联网应用多样化和宽泛性的特点.

2.2 固态变压器原理及与传统变压器的区别

在电网系统中, 变压器的主要目的是电力变压: 由于输电线中焦耳损耗正比于电流的平方, 远距离输电时, 就需要用变压器升高电压以减小电流. 发电机的输出电压一般是 6~10 kV, 通常根据输电距离的远近, 用大型电力变压器将电压升高到 35, 110, 220 kV 等高压. 电流经高压线传送到企业用户时, 再用降压变压器把电压降到几百伏, 以保证用电的安全. 从发电、输配电一直到用电, 一般需要经过三到五次的变压过程, 由于其数目多, 容量大, 在电力系统 (包括发、供、用电) 运行中, 变压器的电能损失占发电量的 10% 左右. 传统变压器的主要作用是变压和隔离, 功能单一, 铁芯饱和时, 会产生谐波, 在投入电网时还会造成较大的励磁涌流; 此外还有过载时电压下降、非线性负载影响敏感等一系列问题^[6]. 因此, 传统变压器往往适用于传统电网的单向输变电应用, 无法应用于可再生能源互联网的微电网中, 与之相比, SST 就具备了与可再生能源互联网很好的相容性.

SST 的基本结构如图 3 所示. 原方开关 S1 和 S2 以高频交替导通, 这样低频交流或直流输入信号就被调制成为高频信号后再经过高频变压器耦合到副方, 副方开关 S3 和 S4 的开通和关断与 S1 和 S2 同步, 仅在相位上有差异. 通过控制相位差异就可以控制输出电压幅值^[7].

2.3 固态变压器的现状及发展方向

对 SST 的研究还处于起步阶段, 现在还存在着转换效率低、转换功率低、输入输出多样性低等问题, 还无法满足能源互联网对 SST 的要求. 2010 年由美国的 Cree, Powerex, GE 公司联合研发的 SiC

图 3 SST 的原理图

Figure 3 Elementary diagram of SST

图 4 SST 的发展要求

Figure 4 Development requirements of SST

图 5 SiC 与 Si 的参数对比

Figure 5 Comparison of the parameters of SiC and Si

MOSFET 的 1MVA SST 是少数高功率密度的 SST 之一 [8].

为了实现 SST 并实现更高的性能, 微电子方面面临的挑战主要有三方面, 如图 4 所示. 第一是半导体材料的发展. 第二是功率器件结构的发展. 第三是 SST 模组的发展. 主要发展方向包括功率更大、成本更低、体积和重量更小.

- 半导体材料的发展. 由图 3 的 SST 原理图结构可以看出, 开关在其中扮演着重要角色. 好的开关要求开态电阻低、击穿电压高、响应速度快、功率密度高、损耗功率小等. 综合来看, SiC 材料是制备开关的一种较为理想的材料 [9]. 如图 5 所示, 与 Si 相比, SiC 的禁带宽度 3 倍于 Si, 击穿电压 10 倍于 Si. 这表明 SiC 可以承受很高的击穿电压. 不过现阶段制备 SiC 材料还存在着位错密度较高导致可靠性较差, 以及成本有待降低等问题.

- 功率器件结构的发展. SiC 材料的功率器件包括 3 种主要结构 [10], 如 10~15 kV 的金属—氧化物—半导体场效应晶体管 (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) [10~12] 和传统的门级可关断晶闸管 (gate-turn-off thyristor, GTO), 如图 6 所示. 其中, MOSFET 适用于 2 kHz 以上的高频电路, 尺寸可以做得很小, 且损耗低、效率高, 缺点是电流不能过大, 适用于可再生能源互联网中底层 SST. IGBT 结构也适用于高频, 且击穿电压高, 但缺点是体积较大, 主要用于高频 SST [13]. GTO 则具有更高的电流和电压特性, 但

图 6 SST 功率器件结构

Figure 6 The structure of the SST power device

图 7 SST 模组原理图 [15]

Figure 7 Elementary diagram of SST module

是损耗高、效率低, 适用于可再生能源互联网中有大功率、高电压要求的上层 SST. 考虑到 SST 小体积要求, 当电压小于 10 kV 时 MOSFET 是适于能源互联网的最佳选择. 如果要求的电流更高 (>1000 A), SiC GTO (可关断晶闸管) 则是最好的选择^[14]. 未来对于功率材料和器件的探索需要着力于对于宽禁带和高压高频应用的研究. 此外为了提高开关功率密度, 适用于大电流的材料和器件需要进一步研究; 由于相比传统变压器没有了绝缘油, 还要求材料和器件适应高温的条件.

• SST 模组的发展. 在 SST 系统结构方面, 基本结构即图 7 所示的第一种原理结构、可以称之为交流/交流 (AC/AC) 结构, 它具有结构简单, 效率高的优点, 但是没有隔离措施, 输入和输出只能采用交流电压. 为了能够做到输入输出电压的多样化和隔离, 可以进一步从 AC/AC 结构改为交流/直流/直流/交流 (AC/DC/DC/AC) 结构^[15~18]. 但是这样的改动导致了结构的复杂化和传输效率的降低. 如何兼顾简单的结构和输入输出的多样性是未来需要探索的重点之一.

3 分布式储能技术

3.1 分布式储能技术的特征

为了适应新能源革命的需要,可再生能源必定会成为能源互联网的重要元素,可再生能源的间歇

图 8 分布式储能技术的作用与要求

Figure 8 The usage and requirements of distributed energy storage technology

性和分散性使得电网的稳定运行离不开分布式储能系统. 分布式储能技术能缓解电能供需不平衡问题并增强系统稳定性, 吸收可再生能源电量. 分布式储能为可再生能源通过微电网接入大电网提供可靠的稳定支撑^[19]. 分布式储能技术主要包括分布式储能器、电池智能管理和信息采集两大部分. 电池智能管理和信息采集系统通过准确实时测量电池的信息, 动态智能地管理电池, 合理调用能量以保证分布式储能器的安全. 配合使用的储能器需要拥有较高的比能量和比功率及长循环寿命才能进入实际产业应用. 分布式储能在微电网中的主要作用如图 8 所示, 主要包括以下几点:

1) 提高电网运行的稳定性. 能量存储使得分布式发电机即使在负荷波动较大的情况下也能够输出稳定而高质量的电压. 可靠的分布式发电装置与分布式储能装置结合是解决电压脉冲、涌流、电压跌落和瞬时供电中断的有效途径之一.

2) 解决分布式电网发电的波动性间歇性问题. 例如太阳能发电在夜间难以产生足够的电量, 风力发电的产能随风的强度波动较大等. 这样的非持续的、不稳定的电能供给需要系统中的储能管理系统来调节输出, 利用储能器中的电量使输出电压稳定.

3) 实现采能、储能、用能间最大限度的微平衡. 实时控制算法, 决定何时打开和关闭分布式储能器, 能量何时流出和流入多少能量到缓冲区^[20]. 当采集能量少于负载用电时, 分布式储能器进行适当放电; 当采集能量大于负载用电时, 分布式储能器进行适当充电; 从而实现微电网电压的平稳.

3.2 分布式储能器

传统电力储能技术主要有抽水储能、压缩空气储能、蓄电池储能、飞轮储能等. 其中, 蓄电池储能由于技术相对成熟, 尤其是铅酸蓄电池已在各个行业得到了广泛应用, 是其他储能技术没有重大突破前的主要手段. 随着可再生能源的推广应用, 传统电力储能技术很难走进家庭和用户单元, 高效、小型的储能器和储能管理系统是分布式储能技术的进一步需求. 锂离子电池具有工作电压高、能量密度大、无记忆效应、循环寿命长等优点, 已成为各类电子产品的主要电源, 也成为了新能源汽车的主流技术路线. 然而锂离子电池在分布式储能器中的应用上还存在很多问题, 如循环寿命是否达到要求、电池安全性如何保证、电池电解液存在爆炸风险等.

图 9 超级电路电池原理示意图

Figure 9 The schematic diagram of working principle of the super circuit battery

图 10 信息采集芯片在能源互联网中的支撑作用

Figure 10 The role of information collecting chip in energy network

分布式储能器需要在能量密度、小型化、环保化、使用寿命、安全性等方面进行突破. 超级电容电池似乎更适于分布式微电网的应用. 超级电容电池安全性高、成本低、比能量与比功率高、循环寿命长; 与锂离子电池、镍氢电池相比寿命更长, 且电容量受温度影响很小, 有望成为代替传统储能方式的分布式储能器. 超级电容是将两个无反应活性的多孔电极板悬浮于电解质中, 在极板上加电后, 正/负极板将分别吸引负/正离子, 从而形成等效的超高密度双层电容器. 如图 9 所示, 超级电容电池是将双层电容器与铅酸电池融合, 在保持高功率、长寿命优点的同时, 又能简化电路、提高比能量, 并降低总费用. 超级电容电池的一项关键技术是碳材料, 如何在有限尺寸下增加极板的有效表面积, 对增加电池容量至关重要; 另一方面, 为解决负极板上的“硫酸盐化”现象, 可通过增加负极板中碳的含量来抑制 PbSO_4 在负极板上的积累^[21], 从而延长电池寿命. 超级电容电池的小型化技术也在不断进步, 微米级的超级电容电池^[22] 研究将推动其超小型化的应用. 然而, 面对实际应用, 超级电容电池还有很

多难题需要解决, 如成本问题, 每年每度电 85 美金的价格还不能被用户接受; 此外, 技术成熟度有待进一步提高. 另一方面, 单一的储能技术难以同时满足能量密度、功率密度、储能效率、使用寿命、环境特性以及成本等性能指标, 因此将两种或两种以上性能互补性强的储能技术相结合, 组成复合储能, 有望取得良好的技术与经济性能折衷.

3.3 电池智能管理与信息采集

电池管理是分布式储能技术的关键技术之一. 电池管理系统不仅可以准确估计电池电量等信息, 还可以控制电池工作状态、延长电池寿命、确保电池安全等. 电池管理系统关键功能之一是确保电池安全, 防止电池工作在危险状态, 同时实现电池串中所有单元电池的均衡管理. 危险的状况主要是由电池化学特性所引起的, 电池电量低于一定程度却仍然继续深度放电, 或者在电池充满电后却仍然继续充电, 或者电池充放电速率高于安全值等, 可导致电池发生危险状况. 此外, 电池工作温度对于电池安全同样非常重要, 电池管理系统可以设置工作温度限制, 防止电池工作温度超出安全范围. 例如, 锂电池的充电温度范围在 $0\sim 60^{\circ}\text{C}$, 放电和存储温度范围在 $20\sim 60^{\circ}\text{C}$ ^[23]. 电池信息采集对防止电池过充过放、保护电池安全、优化电池管理、准确估计电池电量等具有重要意义. 电池电量等状态会受到电池电流、电压、温度、湿度、压力、PH 值等因素影响; 此外, 电池由数目众多的电池单元组成, 对电池单元的信息采集可为电池管理提供全面多样的信息, 有利于提高电池管理效能. 因此, 基于微电子技术的集成传感芯片可以集成进电池单元, 为电池管理提供重要的支撑. 电池管理与信息采集可提供精准实时的数据, 如用户实时用电量、用电方式与用电时段等, 可再生能源发电等信息, 结合智能仿真和先进计算技术从而监测故障, 优化用电和用户储能行为. 此外, 分布式储能器对每一个电池单元的动态智能管理可以实现分布式管理的效益最大化, 而电池单元数量很大, 因此对电池智能管理与信息采集芯片的需求是海量的. 另一方面, 面对分布式微电网的电池管理芯片还有很多挑战, 如抗干扰能力、电池信息采集的精度、系统设计复杂度的降低、低功耗的数据传输、高集成度等.

3.4 分布式储能技术的现状和发展方向

国外储能技术的起步较早, 发展较快. 2009 年 1 月美国白宫发布《复苏计划尺度报告》, 计划在美国铺设或更新 3000 英里输电线, 并安装 4000 万只家用智能电表. 美国 AEP 公司成功研发 50 kWh 三相流 480 V、直流 480 V 的碳铅储能系统, 并用于办公大楼等. 储能技术不仅应用于办公大楼, 在机动车方面应用更加广泛. CSIRO 澳大利亚联邦科学与工业研究组织与日本古河电池公司合作, 将该铅炭超级电池应用于本田 Insight 系列混合动力车上, 通过了 16 万公里的寿命测试^[24]. 我国的储能技术起步较晚, 但是发展迅速. 2013 年 9 月, 南车株洲电力机车有限公司生产出初级超级电容轻轨列车, 我国自主研发的大功率超级电容单体成功实现了批量生产. 尽管分布式发电具有投资低、绿色环保、灵活性高等优点, 但是分布式发电会对电网的电能质量和可靠性产生不利影响, 例如瞬间的能量不平衡会导致电网电压不稳定; 因此电能可否大量、实时地分布式存储对电网的稳定运行至关重要. 超级电容电池、新兴纳米材料、电池智能管理与信息采集等技术的发展与突破, 将进一步推进分布式储能器乃至可再生能源互联网的发展.

4 信息采集芯片技术

4.1 信息采集芯片技术的特征

信息技术的深度融合是可再生能源互联网区别于传统电网的关键特征之一, 同时也是可再生能源

互联网实现能源共享与高效运行的必要保证. 基于微电子技术的新型信息采集芯片是可再生能源互联网的重要支撑, 是信息技术在可再生能源互联网中深度融合的集中体现. 图 10 展示了信息采集芯片在能源互联网中的支撑作用.

可再生能源互联网实现电力网络信息化的基础在于低成本多功能的信息采集芯片的发展, 这主要是由可再生能源互联网的信息特征所决定的.

- 海量数据. 可再生能源互联网中信息的来源空间分布广、数据量庞大. 这些数据的来源既包括每一个微电网中的分布式产能装置、分布式储能装置及分布式用电装置, 也包括遍及各地的输电网络及其设备. 信息采集芯片需要海量装备到能源互联网中, 实现对电力网络状态的实时、广泛监测与控制, 提高可再生能源互联网的可靠性. 因此信息的获取必须采用低成本技术方案, 只有成本足够低, 才有可能实现海量的装备. 在过去的半个多世纪中, 硅基 CMOS 技术的发展一直遵循着摩尔定律, 每隔 18 个月芯片尺寸减小一倍、集成度提高一倍、而成本则降低到一半. 在今天, 硅基 CMOS 技术为可再生能源互联网的低成本信息采集技术提供了最大技术可能性.

- 多样信息. 能源互联网中信息的种类多, 需要完成多样化多功能的信息采集. 首先是电学相关信息, 主要包括电压、电流、实功率、虚功率及谐波信息等. 这方面数据不仅是实现电能监测、保证电能质量的必需参数, 关于能量消费的实时数据更是实现用户需求侧响应、建立能量在线交易、实现能源共享乃至进一步潜在商业应用开发的前提. 其次, 是非电学量相关信息, 包括温度、湿度、风速、压力、PH 值等传感数据. 这方面数据直接反映了电力网络相关设备的状态信息, 特别是与可再生能源的有效利用息息相关. 在可再生能源大量接入网络的情况下, 保证可再生能源互联网稳定性的基础在于及时获取分布式发电装置及分布式储能装置的状态信息, 实现实时有效监测和调度. 近些年微电子微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 技术的飞速发展提供了各种各样的低成本、可集成传感方案, 可以实现对能源互联网相关设备的状态信息的有效监测.

可以预见未来可再生能源互联网的这样一个情景: 基于 CMOS 技术的信息采集芯片遍布整个网络, 收集、处理和传送各种电力网络状态数据; 包含传感、数据收发等功能的每一个信息采集芯片构成一个传感节点, 通过有线传感网络或无线传感网络 (wireless sensor networks) 形式构建一张信息网络, 从而实现对电力网络的全方位监测和实时有效控制 [25,26].

4.2 信息采集芯片技术的挑战及发展方向

适应能源互联网的需求, 基于 CMOS 技术的新型信息采集芯片面临的技术挑战主要有四方面, 主要包括芯片自供能技术、低功耗技术、工况多样性及高集成度.

- 自供能. 能源互联网追求的是高可靠性、低日常维护需求的现代化、信息化电力网络, 其重要的优势之一就是故障自动检测、定位乃至自愈. 这就要求在网络发生故障及断电的情况下电网的故障信息能够及时传送到控制中心. 为满足这一要求, 信息采集芯片必须在断电的情况下仍能正常工作或工作一段时间. 通过集成能量采集模块, 实现芯片的自供能, 是一个非常有前景的技术方案 [27,28]. 实现自供能技术的信息采集芯片具有日常维护需求低、持续工作时间长、成本低等特点. 可以利用的能量来源包括电磁能量、光能、热能、振动能等 [27~30].

- 低功耗. 信息采集芯片的低功耗设计体现在集成电路技术和半导体器件两个层面. 在低功耗的集成电路技术中, 近阈值技术 [31] 是速度与功耗的最佳折中, 具有很好的应用前景 [32,33]. 近阈值电路的速度比亚阈值电路有极大的提高, 而功耗比过阈值电路有显著降低, 能量效率可以提升 5~10 倍. 其他重要的低功耗集成电路技术包括采用低工作电压、对非工作模块实行休眠的栅控功耗技术、动态

供电/频率技术、非关键晶体管采用长沟器件等^[34]。低功耗器件的开发与优化是低功耗芯片的核心与基础,在器件层面,应着重包括晶体管与非易失性存储器在内的器件低功耗特性优化。随着特征尺寸的降低,进入纳米尺度后,晶体管的漏电日趋严重。通过多栅结构,如鳍式场效应晶体管(fin field-effect transistor, FinFET)、围栅纳米线器件等,能够显著降低功耗。另外,基于新工作机理的隧穿场效应晶体管(tunneling field-effect transistor, TFET)提供了新的研究发展方向。对于非易失性存储器,在浮栅闪存和电荷陷阱型存储器外,基于新工作机理的自旋转移力矩磁阻存储器(spin-transfer-torque magnetic random access memory, STT-MRAM)和阻变存储器(resistive random access memory, RRAM)是具有良好应用前景的器件。工况多样,这源自电力网络的广泛性及遍布性。能源互联网中的信息采集芯片面临的工作变化多样,需要面对宽温区变化、高压、强电磁干扰等复杂工作环境。满足能源互联网信息采集需求的CMOS传感器设计是实现信息采集的关键,包括片上集成温度传感器、压力传感器、湿度传感器等。就温度传感器而言,如何在宽温度范围内保证精度仍是一个挑战。目前温度传感器的设计可以基于不同的原理和结构,包括热敏电阻、双极晶体管、亚阈值区MOS管等^[35~38]。高集成度。从系统层面来说,信息采集芯片需要更高地提高集成度。以目前国内快速发展的电能计量芯片为例,数据显示,2012年国内智能电表芯片出货量近6千万片,同比增长56.6%^[39];然而装备于现阶段智能电表的电能计量芯片自身集成度并不高,更谈不上融合集成更多传感测量功能的芯片,即使在国外也是如此。一个典型的智能电表芯片通常需要包括电能计量电路、处理器芯片、数据通信芯片、高精度实时时钟、液晶显示驱动芯片、温度传感器、数据安全芯片及非易失存储器等模块电路。高集成度、高灵活配置的SOC(system on chip)和SIP(system in package)方案是目前的发展方向。更进一步,仅仅提高电能计量芯片自身的集成度是远远无法满足未来能源互联网的技术需求的。需要融合更多的传感器,以更好地发挥在能源互联网中类似家庭网关的能源网关的发展趋势,实现整个微电网各组成部分的数据采集与控制。

5 通信芯片技术

可再生能源互联网是由可再生电网与信息网络高度融合而成,安全可靠的通信是可再生能源互联网高效运行的保障。现有的互联网通信技术,包括有线通信和无线通信,可胜任可再生能源互联网的正常运行,然而互联网非物理隔离、高度开放、易受攻击,因此将电力网络完全暴露在开放的互联网之下,是不安全、不可靠的。因此,在某些对安全性要求高的特殊应用中,需要建立另一套与互联网物理隔离的通信体系,保障信息传输的安全可靠。电力线通信(power line communication, PLC)则是一个较好的选择。电力线路和电力网络本身相对封闭,与互联网物理隔离、不易受攻击、安全可靠,因此可以以电力线为载体,通过PLC实现对可再生能源互联网的控制。

然而,PLC芯片也面临着一系列挑战:1)耐高压:电力线同时传输电能和通信信号,电能电压高达几百、上千、乃至更高伏特,对PLC芯片提出了很高的耐高压要求;2)抗强干扰:电力线中传输的高压电能信号和其他强电信号对微弱的通信信号而言,是很强的干扰,对PLC芯片提出了很高的抗强干扰要求;3)断电时有限时间内工作:当微电网出现故障时,有必要在断电时将微电网数据传输出去。为实现上述要求,需要通过对微电子的材料、工艺、器件、及电路等多层次的创新。

另一方面,可再生能源互联网规模庞大,信息采集点数目众多,仅依赖于PLC无法完全覆盖所有的通信需求。无线传感网络不依赖于电力线作为通信载体,可作为PLC的有力补充。低成本、海量的信息采集应当配以低成本、海量的无线传感通信芯片,一部分无线传感通信芯片可以从电力线中获取电能,然而相当一部分无线传感通信芯片不具备从电力线中获取电能的条件,因此其面临的主要挑战

图 11 自供能无线传感网示意图

Figure 11 Elementary diagram of the self-powered wireless sensor network

图 12 自供能 RFID 标签芯片平台

Figure 12 The structure of the self-powered RFID tag

就是如何解决低功耗和自供能的问题. 一种可行的方案是, 低功耗芯片技术结合微型超级电池, 以期支持芯片工作数年或更长的时间. 另一种更加前瞻性的技术方案是射频充电自供能体制.

图 11 展示了一种基于射频充电的自供能无线传感网络. 无线充电节点可布置于电力线上, 从电力线中获取电能并向周围发射射频信号, 向外发射 1 W, 900 MHz 的射频信号可以使距离 10 m 范围内的末端芯片平台获得大约 $10 \mu\text{W}$ 的能量, 这一微弱能量已经可以支持诸如超高频射频识别标签、温度传感器等电路的工作. 进一步, 如图 12 所示, 末端芯片平台可以通过超高频 RFID 标签芯片平台来实现, 该芯片平台通过射频充电接收能量, 并可将能量储存起来, 从而可以支持功耗要求更高的传感器芯片和无线通信芯片间断性工作, 解决了无供电情况下的通信问题.

6 结论

微电子技术在可再生能源互联网中发挥着重要的支撑性作用, 其涉及可再生能源互联网的各个部

分. 为了满足可再生能源互联网对电子系统的五大要求: 高效性、安全性、可靠性、便利性、宽范性, 微电子技术需要多个层面的理论创新和技术创新, 包括微电子材料、工艺、器件和电路. 可再生能源互联网也给微电子技术发展带来了新的创新需求与发展空间, 国际也尚处于刚刚起步阶段, 如果我国能够抓住这一历史机遇, 推进相关微电子技术的研究与发展, 从而可以为我国在可再生能源互联网领域占据前沿制高点奠定坚实的基础. 未来我们应当重点在一下几个方面给予关注: 1) 面向可再生能源互联网的功率半导体材料、器件、固态变压器组件等领域的研究与产业化; 2) 超级电池和电池管理芯片相关研究与产业化; 3) 面向可再生能源互联网应用的、与 CMOS 工艺兼容的低成本、低功耗的信息采集芯片技术研究与产业化; 4) 中国自主的电力线通信协议、相关支撑芯片、以及面向可再生能源互联网的无线传感网 WSN 等.

致谢 本文撰写得到了王茂俊、郑永安、杨丽杰、王润华、王施、周莉莉等人的帮助, 特此致谢.

参考文献

- 1 Dan E A. Meeting the renewable energy challenge: what will it take to reach solar PV's ultimate potential. In: Proceedings of IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Hawaii, 2006. 5-15
- 2 Zhang L X. Status and prospects of renewable power generation. J Electric Power, 2008, 23: 30-32 [张丽香. 可再生能源发电的发展现状及前景. 电力学报, 2008, 23: 30-32]
- 3 Cha Y B, Zhang T, Tan S R, et al. Understanding and thinking of the energy Internet. National Defense Sci Technol, 2008, 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]
- 4 Bifaretti S, Zanchetta P, Watson A, et al. Advanced power electronic conversion and control system for universal and flexible power management. IEEE Trans Smart Grid, 2011, 2: 231-243
- 5 Zhao T F, Yang L Y, Wang J, et al. 270 kVA solid state transformer based on 10 kV SiC power devices. In: Proceedings of IEEE Symposium on Electric Ship Technology, Virginia, 2007. 145-149
- 6 Ronan E R, Sudhoff S D, Glover S F, et al. A power electronic-based distribution transformer. IEEE Trans Power Deliv, 2002, 17: 537-543
- 7 Senior Editors of Books of Transformers Manufacturing Process Technique. Transformer Winding Manufacturing Process Technology. Beijing: China Machine Press, 1998. 265-269 [变压器制造技术丛书编审委员会. 变压器绕组制造工艺. 北京: 机械工业出版社, 1998. 265-269]
- 8 Das M K, Capell C, Grider D E, et al. 10 kV, 120 A SiC half H-bridge power MOSFET modules suitable for high frequency, medium voltage applications. In: Proceedings of 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Arizona, 2011. 2689-2692
- 9 McMurray W. U.S. patent, 3 517 300, 1970-06-23
- 10 Kaminski N. State of the art and the future of wide band-gap devices. In: Proceedings of 13th European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, 2009. 1-9
- 11 Zhang Q C, Callanan R, Das M K, et al. SiC power devices for microgrids. IEEE Trans Power Electron, 2011, 25: 2889-2896
- 12 Wang J, Wang G Y, Bhattacharya S, et al. Comparison of 10 kV SiC power devices in solid state transformer. In: Proceedings of IEEE Conference on Energy Conversion Congress and Exposition, Georgia, 2010. 3284-3289
- 13 Palmour J W, Zhang J Q, Das M K, et al. SiC power devices for Smart Grid systems. In: Proceedings of Power Electronics Institute Conference, Sapporo, 2010. 1006-1012
- 14 Wang G Y, Huang X, Wang J. Comparison of 6.5 kV, 25 A IGBT and 10 kV SiC MOSFET in solid-state transformer application. In: Proceedings of IEEE Conference on Energy Conversion Congress and Exposition, Georgia, 2010. 100-104
- 15 She X, Burgos R, Wang G Y, et al. Review of solid state transformer in the distribution system: from components to field application. In: Proceedings of IEEE Conference on Energy Conversion Congress and Exposition, North Carolina, 2010. 100-104

2012. 4077–4084
- 16 Hatua K, Dutta S, Tripathi A, et al. Transformerless intelligent power substation design with 15 kV SiC IGBT for grid interconnection. In: Proceedings of IEEE Conference on Energy Conversion Congress and Exposition, Arizona, 2011. 4225–4232
 - 17 Fan H F, Li H. High frequency transformer isolated bidirectional. IEEE Trans Power Electron. 2011, 26: 3599–3608
 - 18 Fan H F, Li H. DC-DC converter modules with high efficiency over wide load range for 20 kVA solid state transformer. IEEE Trans Power Electron, 2011, 26: 3599–3608
 - 19 Liu J G. Present situation and development of distributed energy storage technology in Smart Grid. Electric Age, 2011, 9: 30–32 [刘建戈. 智能电网中分布式储能技术的发展与现状. 电气时代, 2011, 9: 30–32]
 - 20 Molderink A, Bakker V, et al. Management and control of domestic Smart Grid technology. IEEE Trans Smart Grid, 2010, 1: 109–119
 - 21 Shiomi M, Funato T, Nakamura K, et al. Effects of carbon in negative plates on cycle- life performance of valve-regulated lead/acid batteries. J Power Sources, 1997, 64: 147–152
 - 22 Pech D, Brunet M, Durou H, et al. Ultrahigh-power micrometre-sized supercapacitors based on onion-like carbon. Nature Nanotechnol, 2010, 5: 651–654
 - 23 Rahimi-Eichi H, Ojha U, Baronti F, et al. Battery management system: an overview of its application in the Smart Grid electric vehicles. IEEE Ind Electron Mag, 2013, 2: 1–16
 - 24 Liu Y G, Tian X C, Yang C P, et al. The research progress in environmental friendly Pb-C ultrabattery. Battery Bimonthly, 2011, 41: 112–114
 - 25 Gungor V C, Lu B. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in Smart Grid. IEEE Trans Ind Electron, 2010, 57: 3557–3564
 - 26 Moghe R, Frank C, Divan L D. Smart “stick-on” sensors for the Smart Grid. IEEE Trans Smart Grid, 2012, 3: 241–252
 - 27 Moghe R, Yi Y. A scoping study of electric and magnetic field energy harvesting for wireless sensor networks in power system applications. In: Proceedings of IEEE Conference on Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, 2009. 3550–3557
 - 28 Moghe R, Yi Y. Design of a low cost self powered “stick-on” current and temperature wireless sensor for utility assets. In: Proceedings of IEEE Conference on Energy Conversion Congress and Exposition, Georgia, 2010. 4453–3557
 - 29 Paradiso J, Starner T. Energy scavenging for mobile and wireless electronics. IEEE Pervasive Comput, 2005, 4: 18–27
 - 30 Gilbert J M, Balouchi F. Comparison of energy harvesting systems for wireless sensor networks. Int J Autom Comput, 2008, 5: 334–347
 - 31 Kaul H, Anders M, Hsu S, et al. Near-threshold voltage (NTV) design — opportunities and challenges. In: Proceedings of the 49th ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conference, San Francisco, 2012. 1149–1154
 - 32 Markovic D, Wang C C, Alarcon L P. Ultralow-power design in near-threshold region. Proc IEEE, 2010, 98: 237–252
 - 33 Dreslinski R G, Wiecekowsi M, Blaauw D, et al. Near-threshold computing: reclaiming moore’s law through energy efficient integrated circuits. Proc IEEE, 2010, 98: 253–266
 - 34 Wang Y Y. Green Micro/Nano Electronics. Beijing: Science Press, 2010. 321–400 [王阳元. 绿色微纳电子学. 北京: 科学出版社, 2010. 321–400]
 - 35 Amin E M, Karmakar N. Development of a chipless RFID temperature sensor using cascaded spiral resonators. IEEE Sensors, 2011, 554–557
 - 36 Pertijs M A P, Makinwa K A A, Huijsing J H. A CMOS smart temperature sensor with a 3σ inaccuracy of $\pm 0.1^\circ\text{C}$ from -55°C to 125°C . IEEE J Solid-State Circuit, 2005, 40: 2805–2815
 - 37 Makinwa K A A, Snoei M F. A CMOS Temperature-to-frequency converter with an inaccuracy of less than $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (3σ) from -40°C to 105°C . IEEE J Solid-State Circuit, 2006, 41: 2992–2997
 - 38 He D D, Nausieda I A, Ryu K K, et al. An integrated organic circuit array for flexible large-area temperature sensing. In: Proceeding of IEEE International Solid-State Circuits Conference. Piscataway: IEEE, 2010. 142
 - 39 Zero Power Intelligence. Analysis report of development prospect and investment forecasting of China smart meter industry in 2013–2017. 695357. 2012 [中研普华公司. 2013–2017 年中国智能电表行业发展前景与投资预测分析报告. 695357. 2012]

Microelectronics technologies in renewable energy internet

HUANG Ru*, YE Le & LIAO HuaiLin

Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China

*E-mail: ruhuang@pku.edu.cn

Abstract Renewable energy internet proposes five requirements for electronic system: efficiency, safety, reliability, convenience, extensiveness. In order to achieve the above requirements, renewable energy internet demands a multi-disciplinary, multi-faceted, multi-level innovation. Microelectronics technology will permeate all levels of renewable energy internet, performing as one of the important supporting technologies of renewable energy internet. This paper will focus on solid state transformers, distributed energy storage technology, information acquisition chip technology, communications chip technology, describing the special requirements, technical challenges, trend of development of microelectronics in renewable energy internet.

Keywords renewable energy internet, microelectronics, solid state transformer, distributed energy storage, information collecting chips, self-powered

HUANG Ru is currently a Professor and the Director of the Institute of Microelectronics, Peking University. Her research interests include nanoscale CMOS devices, nonvolatile memory devices, and new devices for RF and harsh environment applications.

YE Le was born in Jiangsu, China, in 1983. He received the B.S. degree (with honors) in physics from the Department of Physics in Nanjing University, Nanjing in 2005, and the Ph.D. degree in microelectronics from the Institute of Microelectronics in Peking University, Beijing in 2010. From July 2010, he joined the Institute of Microelectronics of Peking University, where he is currently an Associate Professor.

LIAO HuaiLin received the B.S. and M.S. degrees from Beijing Normal University, Beijing, in 1995 and 1998, respectively, and the Ph.D. degree from the Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing, in 2001. He worked in the Institute of Microelectronics, Singapore, from 2001 to 2004, as a Senior Researching Engineer. In 2004, he joined Peking University, where he is currently a Professor. His research interests include RF integrated circuits design and nanoscale CMOS device modeling. He is the author or coauthor of more than 50 papers.