

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.2019.19059

泛在电力物联网实施策略研究

陈麒宇

(中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

Research on Implementation Strategy of Ubiquitous Power Internet of Things

CHEN Qiyu

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

摘要: 建设泛在电力物联网是实现能源转型目标的必要手段。从电力系统发展历程和面临的问题出发, 论述了泛在电力物联网的意义, 提出了实施策略和可能遇到的问题。为实现能源转型, 风电光电等可再生能源装机容量不断增加。这些能源的随机性给电力系统的功率平衡造成巨大压力, 有时不得不弃掉一部分风电光电。为了维持电力系统的稳定运行、提高风电光电的利用率, 必须对可控负荷和分散式发电进行控制。因此, 需要用互联网连接可控负荷和分散式发电, 形成泛在电力物联网。常规发电厂、大型风电场、光伏电站等已经和电力系统连接了, 调度可以直接控制。因此, 泛在电力物联网主要任务是连接负荷和分散式发电, 尤其是可控负荷。电动汽车是可控负荷中最容易实现可控的, 其次是热水器、电热锅炉和空调等。利用泛在电力物联网, 协同控制风电光电、可控负荷、分散式发电等, 可以提高风电光电利用率, 实现能源转型目标。

关键词: 泛在电力物联网(UPIoT); 电力系统; 物联网; 可控负荷; 电动汽车; 调峰; 能源转型

ABSTRACT: Building ubiquitous power internet of things (UPIoT) is a necessary means to achieve the goal of energy transformation. Starting from the development history and problems of power system, the significance of UPIoT was discussed, and the implementation strategies and possible problems were put forward. In order to realize the energy transformation, the installed capacity of renewable energy such as wind, photovoltaic (PV) and so on is increasing. The randomness of these sources of energy causes tremendous pressure on the power balance of power systems, sometimes having to abandon part of electricity from wind farms and PV. In order to maintain the stable operation of power system and improve the utilization rate of wind power and photoelectricity, it is necessary to control controllable load and decentralized generation. Therefore, it is necessary to connect controllable load and decentralized power generation with the internet to form a UPIoT. Conventional

power plants, large-scale wind farms, PV stations have been connected to dispatching center, and can be directly controlled. Therefore, the main task of UPIoT is to connect load and distributed generation, especially controllable load. Electric vehicles are the easiest controllable loads, followed by water heaters, electric boilers and air conditioners. Utilizing the UPIoT, coordinated control of wind power and PV, controllable load, decentralized power generation, etc., can improve the utilization rate of wind power and PV, and achieve the goal of energy transformation.

KEY WORDS: ubiquitous power internet of things (UPIoT); power system; internet of things; controllable load; electric vehicle; peak load shaving; energy transformation

0 引言

国家电网公司于 2019 年初提出了泛在电力物联网的概念。泛在物联是指任何时间、任何地点、任何人、任何物之间的信息连接和交互。泛在电力物联网是泛在物联在电力行业的具体应用, 是电力设备、电力企业、电力用户、科研机构等与电力系统相关的设备及人员之间的信息连接和交互; 它将发电企业及其设备、电力用户及设备、电网企业及设备、供应商及其设备、设计院、科研单位等人和物连接起来, 产生共享数据, 为发电、电网、用户、设备供应商、科研、设计单位和政府提供服务; 以电网为枢纽, 发挥平台和共享作用, 为电力行业 and 更多市场主体发展创造机遇, 提供价值服务。通过应用大数据、云计算、物联网、移动互联、人工智能、区块链、边缘计算等信息技术和智能技术, 汇集各方面资源, 为规划建设、生产运行、经营管理、综合服务、

新业务新模式发展、企业生态环境构建等各方面，提供充足有效的信息和数据支撑。建设泛在电力物联网是社会和科技发展的必然。泛在电力物联网的提出受到了业界的广泛关注，尤其是信息及其相关产业。该概念涉及的内容包括了发电、输电、配电、用电等方面的技术问题和经济问题。

泛在电力物联网不仅是技术创新，更是管理创新。建设泛在电力物联网可以全面感知源网荷储设备运行状态和环境信息，用市场办法引导用户参与电力系统调峰调频，通过虚拟电厂和多功能互补提高分布式新能源友好并网水平和电网可调容量占比，缓解弃风弃光，促进清洁能源消纳。常规发电厂、大型风电场、光伏电站等已经和电力系统连接了，调度可以直接控制；泛在电力物联网的主要任务是连接负荷和分散式发电，尤其是可控负荷。利用泛在电力物联网，协同控制风电光电、可控负荷、分散式发电等，可以提高风电光电利用率，实现能源转型目标。电动汽车是可控负荷中最容易实现可控的，其次是热水器、电热锅炉和空调等。利用泛在电力物联网可以组织可控负荷参与电力系统调峰调频。

本文从电力系统发展历程和面临的问题出发，分析建设泛在电力物联网的意义及其实施策略，提出可能遇到的关键问题。

1 三代电力系统的发展历程

周孝信院士于 2012 年提出了三代电力系统的概念，得到国内外学者的认可^[1-3]。

1.1 第一代电力系统

第一代电力系统(the first generation power system, FGPS): 20 世纪前半期的电力系统，以小机组、低电压、小电网为特征，是电网发展的兴起阶段；此时电网称为一代电网。

第一代电力系统中，爱迪生 1882 年建立了第一个发电厂，因萨尔(Samuel Insull)建立了第一个电力系统，特斯拉发明了感应电机和三相交流电。1880 年爱迪生发明了第一台电动汽车，如图 1 所示，实物保存在东京电力博物馆。1898 年建成了第一个电池储能供电系统，如图 2 所示。



图 1 爱迪生发明的第一台电动汽车
Fig. 1 The first electric car invented by Thomas Alva Edison

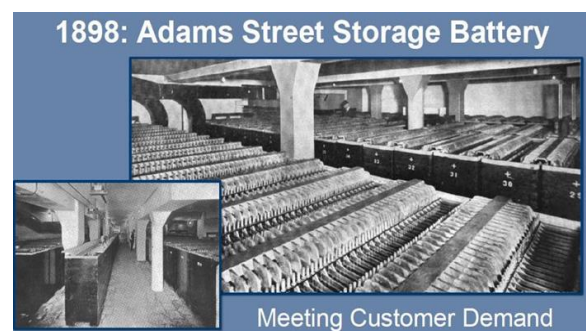


图 2 第一个电池储能电站
Fig. 2 The first battery storage power station

第一代电力系统的主要特点是交流输电占主导，输电电压达到 220kV 等级；电网规模小，属于城市电网、孤立电网和小型电网，发电单机容量不超过 10 万~20 万 kW。

1.2 第二代电力系统的发展及成就

第二代电力系统(the second generation power system, SGPS): 20 世纪后半期的电力系统，以大机组、超高电压、互联电网为特征，标志着电网进入规模化发展阶段。第二代电力系统的成就主要体现如下：

1) 大电网和远距离输电。

第二代电力系统从开始过渡到技术成熟的时间跨度大体上是从 20 世纪中期到 20 世纪末。在此期间，电网规模不断扩大，形成了大型互联电网；发电机组单机容量达到 30 万~100 万 kW；建立了 330kV 及以上电压等级的超高压交流、直流输电系统。第二代电力系统发展的里程碑如下：

(1) 1952 年，瑞典首先建成 380kV 超高压输电线路，全长 620km，输送功率 45 万 kW。

(2) 1959 年，苏联首次使用 500kV 输电，

距离 1000km。

(3) 1965 年, 加拿大首先建成 735kV 的输电线路。1984 年, 苏联建成了 750kV 输电线路。1969 年, 美国实现了 765kV 的超高压输电。

(4) 1985 年, 苏联建成了 1150 kV 特高压输电线路; 由于没有输电需求, 降压运行。日本于 1994 年建成特高压线路, 主要用于设备实验。

(5) 我国 1971 年建成 330 kV 线路, 1981 年建成 500kV 线路, 2005 年建成 750kV 线路, 2009 年建成 1000kV 特高压输电线路。

大电网提高了供电可靠性, 用户停电成为小概率事件。供电经济性提高, 电能成为生活中的必需品, 大电网运行、分析和控制技术得到发展。

2) 风电光电等可再生能源得到利用。

我国风电和光电累计装机容量统计分别如图 3、4 所示。风电和光电装机容量分别占总装机容量的 10.6% 和 7.3%; 其发电量分别是 3057 亿 kW·h 和 1182 亿 kW·h, 占总发电量的 4.8% 和 1.8%。

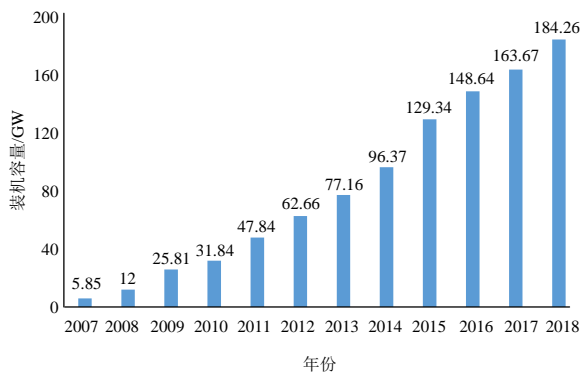


图 3 风电累计装机容量

Fig. 3 Cumulative installed capacity of wind power

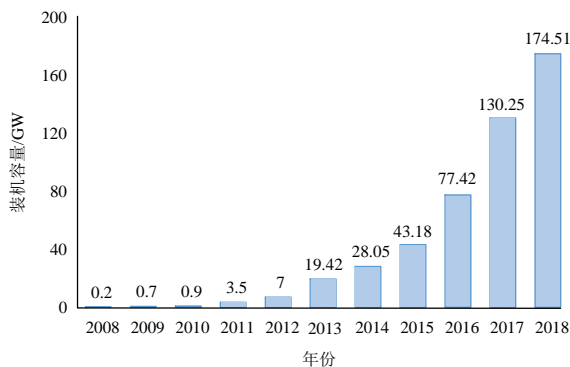


图 4 光电累计装机容量

Fig. 4 Cumulative installed capacity of photovoltaic

3) 物联网技术初见端倪。

一个成功的物联网雏形示例: 1995 年德国胡苏姆风电场全自动运行, 无人值班, 风电机组故障信息通过 BP 机直接发送到生产厂家和业主, 接到信息后厂家直接维修。目前, 风电机组的运行信息都可以传到调度和生产厂家, 风电机组也可以被控制, 易于实现泛在物联。

1.3 第二代电力系统面临的挑战

1) 能源转型必须发展风电和光电。

大量使用化石燃料严重威胁人类的生存环境, 并且化石燃料在不断减少; 同时, 人均用电量在不断增加。为了保护环境 and 实现可持续发展, 必须进行能源转型。《巴黎协定》签署之后, 我国向国际社会郑重承诺到 2030 年前后单位 GDP 二氧化碳排放较 2005 年下降 60%~65%, 碳排放于 2025 年前后达到峰值并力争尽早实现。而发展新能源是我国能源转型的基本措施, 能源转型中, 我国一次能源消费结构演化趋势如图 5^[2]所示, 能源消费结构如图 6^[2]所示。

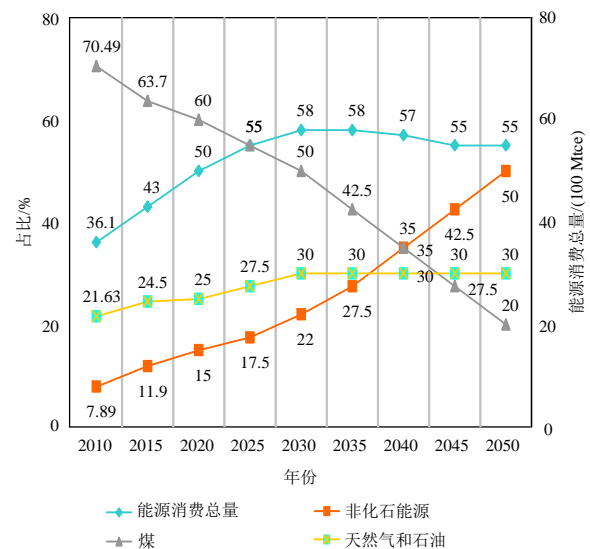


图 5 我国一次能源消费趋势

Fig. 5 Primary energy consumption trend in China

预计到 2030 年风电和光电装机容量分别达到 4.78 亿 kW 和 5.73 亿 kW, 分别占总装机容量的 17% 和 20%。

2) 弃风和弃光。

随着风电和光电的迅猛增长, 由于这些可再生能源的随机性和反调峰特性, 导致电网峰谷差

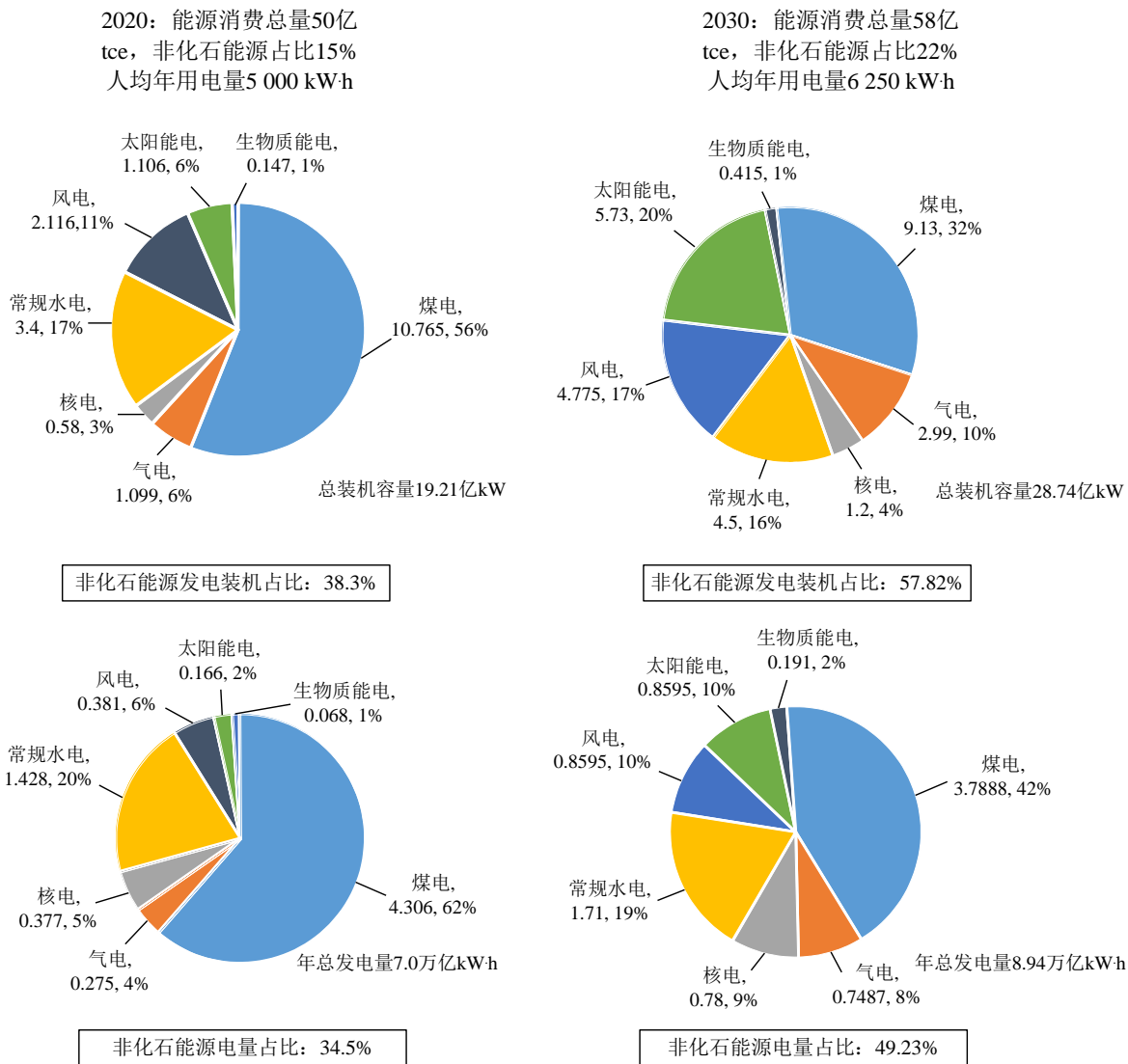


图 6 2020—2030 我国能源消费结构

Fig. 6 Energy consumption structure of China in 2020-2030

不断加大, 电网调峰压力越来越大, 因此, 出现了弃风弃光。弃风、弃光情况分别如图 7、8 所示,

可以看出, 2017 年弃风损失电量 419 亿 kWh, 弃光电量 73 亿 kWh。

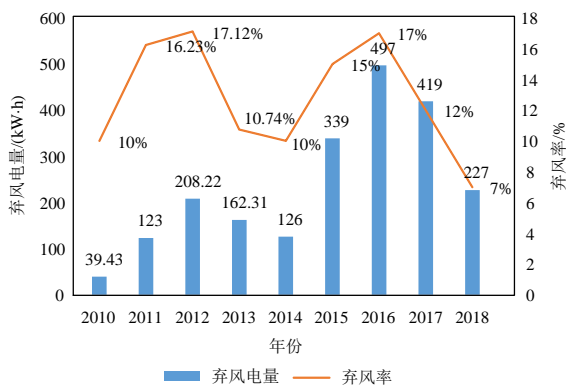


图 7 弃风电量和弃风率

Fig. 7 Rate of curtailed wind power

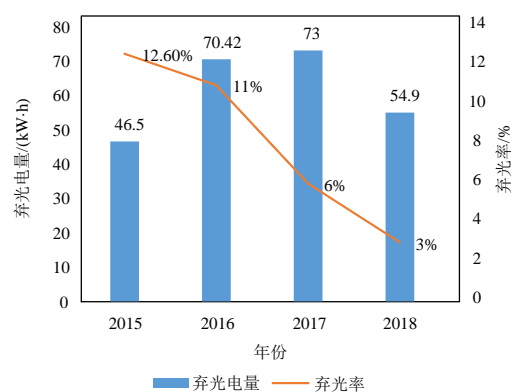


图 8 弃光电量和弃光率

Fig. 8 Rate of curtailed PV power

当风电和光电占到一定比例时,弃风和弃光将不可避免。风电和光电发电量占系统电量的比例与装机容量的关系如图9所示。其中: $C_w5\%$ 、 $C_w10\%$ 、 $C_w15\%$ 、 $C_w20\%$ 分别代表风电光电发电量占比5%、10%、15%、20%; L_a 是某省电网的平均负荷, L_{max} 、 L_{min} 是该省电网的最大负荷和最小负荷的标么值,基值是 L_a ; P_{wn} 是风电光电总的装机容量; H_w 是风电光电等效利用小时数。当 $H_w=1750\text{h}$, $C_w=20\%$ 时, $P_{wn}=L_a$; 此时,风电光电装机容量已经等于平均负荷,经常会出现风电光电功率大于负荷的情况,弃风弃光不可避免。

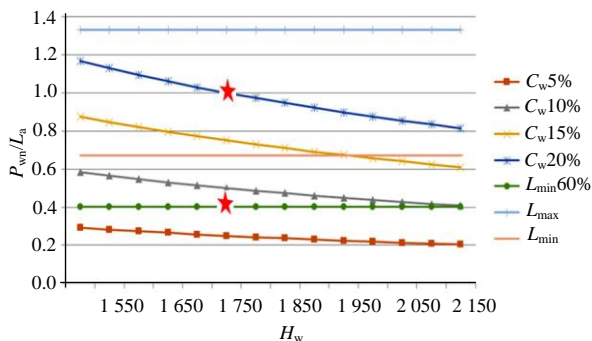


图9 风电光电发电量占比与装机容量

Fig. 9 Wind & PV power generation and installed capacity

3) 小型随机电源的分散接入。

随着光伏和风电成本的降低,分散式发电逐步兴起。分散式发电通常由电力用户建设,接入配电网。配电网将由原来的无源网络变成有源网络,线路的潮流方向可能随着电源出力发生变化,供电计划方法也将发生变化,能够适应这种变化的配电网叫主动配电网。

解决上述问题,步入第三代电力系统。

1.4 第三代电力系统

第三代电力系统(the third generation power system, TGPS): 从21世纪初开始建设并设想到2050年在世界范围内实现的电力系统,以非化石能源发电占较大份额和智能化为主要特征,是可持续发展的电力系统。此时电网称为三代电网。智能电网(smart grid)和泛在电力物联网属于三代电网。第三代电力系统的使命将发生重大变化^[2]:

1) 大规模新能源电力的输送网络,具有接纳大规模可再生能源电力的能力。

2) 灵活、高效的能源配置和供应系统,建立用户需求响应机制,分布式电源和储能将改变终端用电模式,电能将在电网和用户之间双向流动,大幅度提高终端能源利用效率。

3) 安全、可靠的智能能源网络,具有极高的供电可靠性,基本排除大面积停电的风险。

4) 覆盖城乡的能源、电力、信息的物联网和综合服务体系,实现“多网合一”,成为能源、信息的双重载体。

1.5 智能电网

智能电网以物理电网为基础(中国的智能电网是以特高压电网为骨干网架,各电压等级电网协调发展的坚强电网为基础),将现代先进的传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成的新型电网。它以充分满足用户对电力的需求和优化资源配置,确保电力供应的安全性、可靠性和经济性,满足环保约束,保证电能质量,适应电力市场化发展等为目的,实现对用户可靠、经济、清洁、互动的电力供应和增值服务。智能电网贯穿发、输、配、用全过程,建设智能电网,需要电力系统各领域的积极合作^[4]。

智能电网主要具有坚强、自愈、兼容、经济、集成、优化等特性。智能电网主要体现在:1) 科学经济的配网规划;2) 自适应的故障处理能力;3) 迅速的故障反应;4) 可靠的电力供给;5) 更高的电能质量;6) 可靠经济的设备管理;7) 支持分布式能源和储能元件;8) 与用户的更多交互;9) 允许用户向电网提供多余的电力;10) 根据用户的信用控制电力的供给。

2 泛在电力物联网的使命

智能电网和泛在电力物联网相辅相成、融合发展,形成强大的价值创造平台,共同构成能源流、业务流、数据流“三流合一”的能源互联网。从三代电力系统发展历程可见,能源转型是必须的。发展风电和光电是实现能源转型目标的必要手段。风电光电比例增加导致了弃风弃光,为了实现能源转型目标,必须减少弃风弃光。泛在电力物联网要解决的主要问题就是如何减少弃风弃

光，提高新能源利用率，实现能源转型目标。风电场、光伏电站、火电厂、水电厂和大型用户等已经和调度连接了，泛在电力物联网主要是连接用户和分散发电，尤其是可控负荷用户。把可控负荷和分散发电有效控制起来，以实现源网荷协同，减少弃风弃光。

下面重点介绍减少弃风弃光的方法：1) 常规发电厂与新能源电厂的协同运行；2) 可控负荷的有效控制。

3 常规发电厂与新能源发电厂协同运行

3.1 风电火电打捆输送

风电火电打捆输送对减少弃风、实现新能源远距离输送具有重要意义。我国风能开发主要集中在风能资源丰富的三北地区，这些地区受电力负荷水平低、系统规模小、风电就地消纳能力不足的限制，大规模风电必须送到区域电网内甚至其他区域电网消纳。风电年利用小时数低，单独远距离传输经济性差，同时传输线路上的功率频繁波动不利于系统的安全稳定运行，采取风电火电打捆外送并对风电火电的有功功率进行协调控制，能有效地减小线路功率的波动，有利于系统的安全稳定运行。风火打捆外送已经在西北获得应用^[5-7]。

风火打捆适用于风电场和火电厂距离不太远，可以使用同一线路输送的场合。

3.2 风电水电协同运行

风力发电等随机性可再生能源的接纳是当前电力系统面临的基本问题。风电的随机性导致部分时间系统内功率过剩，风电场被迫关机或降低出力；而在其他时间系统有功功率不足，频率降低或需要增加备用容量。风电场具有能量输出，水电厂具有容量保证，风电和水电具有互补性。在保证系统安全运行条件下，考虑水电厂的水能储备和风电场功率预测，根据风电场实时输出功率，发挥水电机组的快速调节作用，目标是保证协同运行的水电厂和风电场向电力系统提供的有功功率之和按计划输出。从而将随机电源转化成能够保证输出功率的按计划发电的电源，降低了含随机电源的电力系统调度和运行的难度，减少

了弃风。这种运行方式叫做风电和水电的协同运行(coordinated hydro and wind power generation, CHWG)。风电水电协同运行机理及控制方法的理论研究，对揭示电力系统中随机电源的独立控制规律具有重要意义，为解决大规模风电并网运行提供了新的思路^[8-10]。

协同运行原理如图 10 所示，以较少的水电能量协同较大的风电能量。协同运行原理同样适用于可以深度调节的火电机组和风电场。

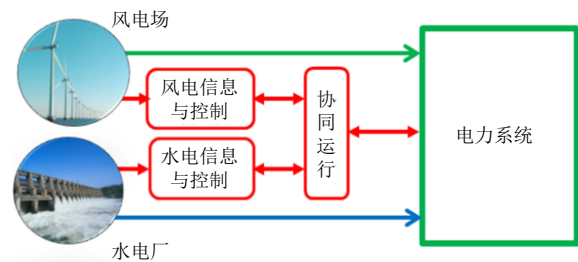


图 10 风电水电协同运行原理图

Fig. 10 CHWG schematic diagram

3.3 热电厂的弃风蓄热

东北西北等地区冬季风资源较好，此时需要供热，热电机组“以热定电”必须发出一定的电功率，造成弃风。为了调峰需要，允许供热电厂建设电蓄热装置，弃风加热、存储热能，增加电网负荷谷值，从而为风电上网留出更大空间，提升风电消纳率，降低热电机组热负荷峰值，且能为整个电热联合系统带来经济收益。热电厂蓄热储能原理如图 11 所示。其特点是风电场减少了弃风，部分收益分配给热电厂，热电厂用弃风电能是获得收益的；而对社会的回馈是减少了煤炭的使用，为保护环境做出了贡献^[11-12]。

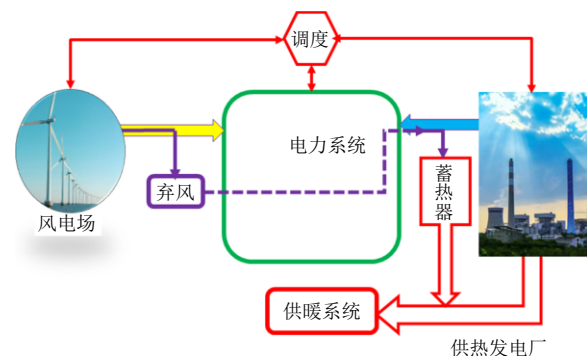


图 11 热电厂蓄热储能原理图

Fig. 11 Heat storage in the thermal power plant

4 可控负荷的有效控制

4.1 可控负荷

电动汽车是可控负荷中最容易实现可控的,其次是热水器、电热锅炉和空调等。利用泛在电力物联网可以组织可控负荷参与电力系统调峰调频。当然,可控负荷的控制应该和被控用户有协议,并且用户可以获得被控收益,实现控制与被控制的双赢。

4.2 电动汽车的充放电控制

电动汽车(EV)是一种非常特殊的负荷,因为电动汽车不仅可以作为负载,还可以作为发电机,对应充电(G2V)和放电(V2G)模式。适用条件如下:

1) 电动汽车属于可控负荷,对其充电进行控制可以达到在时间上移动负荷,调整负荷曲线和响应新能源发电的目的。对于允许充电控制的汽车,给予电价优惠。

2) 使用上达不到最佳充放电周期的电动汽车或者长时间闲置不用时,也会减少电池的使用寿命,适当的V2G有助于维护电池的寿命,同时车主可以获得收益。但是频繁的V2G模式会降低电池寿命,技术和经济上都是不可行的。

3) 在紧急情况下,电动汽车可以作为分布式储能,保证就近的1级负荷供电,车主可以获得应急支援的高额补偿。

因此,对电动汽车进行聚类分析,分类适当使用,将给电力系统和车主带来双赢。汽车的无线通信和网络功能已经成熟并得到广泛应用,基本具备控制条件^[13-15]。

4.3 空调等可控负荷的控制

热水器、电热锅炉和空调等可控负荷的控制比较复杂,首先要解决通信和网络连接问题。因此,必须发展泛在电力物联网,把这些可控负荷有效组织和控制起来,参与电力系统调峰调频。

5 风险防范

1) 泛在电力物联网必须保证电力系统的安全稳定运行和对用户的安全可靠供电,尤其是网络安全风险的防范。泛在电力物联网是信息物理系统(CPS),但其职能是在实现能源转型目标的过程中

提供安全可靠的电能。泛在电力物联网的同时必须考虑安全防范措施,做到安全措施与泛在电力物联网同时设计、同时施工、同时投入运行。

2) 提高效率和使用方便是泛在电力物联网获得社会认可和积极使用的基础。泛在电力物联网应该为用户带来便利。不是根据实际需要的大规模建设和不成熟技术的广泛推广,都可能造成巨大的浪费。

6 结论

1) 建设泛在电力物联网是实现能源转型目标的必要手段,发展风电和光电是实现能源转型的基础,减少弃风弃光是泛在电力物联网的一项主要任务。

2) 常规发电厂与新能源发电厂的协同运行可以减少弃风弃光,提高新能源利用率。

3) 可控负荷的有效控制潜力巨大。用互联网连接可控负荷和分散式发电,形成泛在电力物联网。利用泛在电力物联网组织可控负荷参与电力系统调峰调频。电动汽车是可控负荷中最容易实现可控的,其次是热水器、电热锅炉和空调等。

4) 泛在物联网的安全性、实用性、有效性是应用的关键。

参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904, 2205.
- [2] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相. 电网和电网技术发展的回顾与展望——试论三代电网[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 1-11, 22.
- [3] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [4] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
- [5] 白建华, 辛颂旭, 贾德香, 等. 中国风电开发消纳及输送相关重大问题研究[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(1): 14-17.
- [6] 陈树勇, 陈会, 唐晓骏, 等. 风火打捆外送系统暂态稳定切机控制[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 514-519.

- [7] 毛峰, 桂前进, 王磊, 等. 风火打捆交直流外送系统区域间输电能力评估[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 69-75.
- [8] Chen Q Y, Yang X Y, He G Q, et al. Optimal scheduling system for wind farm and hydro power plant coordinating operation[J]. Energy Procedia, 2018, 145: 277-282.
- [9] 杨秀媛, 陈麒宇, 王蒙, 等. 考虑网络约束的风电水电协同果蝇优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5286-5293, 5527.
- [10] 陈麒宇, 张芳, 章锐. 风水协同运行控制信息的传输[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 53-57.
- [11] 葛维春, 李家珏, 李军徽, 等. 提高风电消纳的大容量储热系统优化控制策略[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 380-386.
- [12] 葛维春. 大规模弃风储热供暖协调计算方法[J]. 发电技术, 2018, 39(4): 291-295.
- [13] 张祖平, 陈麒宇. 大容量直流充电桩集群的调峰研究[J]. 发电技术, 2019, 40(1): 11-16.
- [14] Wang S, Dong Z Y, Luo F J, et al. Stochastic collaborative planning of electric vehicle charging stations and power distribution system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(1): 321-331.
- [15] Karfopoulos E L, Hatziaargyriou N D. Distributed coordination of electric vehicles providing V2G services[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 329-338.

收稿日期: 2019-04-01。

作者简介:



陈麒宇

陈麒宇(1986), 男, 博士后, 主要研究方向为新能源及电力系统分析与规划, chenqiyu@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 车德竞)