

非并网多能源协同智能电网系统研究

顾为东¹, 施建中^{1,2}

(1. 江苏省宏观经济研究院, 江苏 南京 210024; 2. 南京大学工程管理学院, 江苏 南京 210093)

摘要: 本文根据中国国情, 提出“智能负载”这一新的理念。通过物联网将智能负载和智能电网结合起来构成“非并网多能源协同智能电网系统”, 该系统的核心是将中国大量的高耗能产业通过必要的技术创新, 改造成能够适应风电等可再生能源和电网输出功率巨大波动的“智能负载”, 为中国政府提供一条适合国情、大幅度提高电网和发电装备利用效率, 并将风电等可再生能源高效、低成本全部利用的新路径。

关键词: 非并网; 多能源协同; 智能负载; 智能电网系统

0 引言

中国具有极丰富的风能资源, 可开发利用的风能储量远远超过化石能源(煤炭、石油、天然气)之和, 如果能够得到充分利用, 可有效缓解中国目前面临的能源短缺和环境问题。现已确定陆地 50 米高处风能可利用储量为 23.5 亿千瓦^[1], 而海上风电可利用量也接近 15 亿千瓦。2012 年, 中国新增风电装机容量 1296.0 万千瓦, 总量已达 7532.4 万千瓦, 分别占全球新增风电装机容量的 30% 和总容量的 26.8%, 保持全球领先地位^[2]。

中国是世界上最大的发展中国家, 目前又处于工业化和城市化进程的加速期。传统的化石能源支撑中国经济高速发展的同时, 也带来国内生态环境严重透支和恶化, 应对气候变化压力日益增大。2009 年, 中国二氧化碳排放量为 64 亿吨, 约占世界排放总量 313 亿吨的 1/5, 超过美国成为世界上最大的温室气体排放国^[3]。近年持续出现大范围雾霾天气和极端气候等就是自然界客观的反映。在可预见时期内, 中国 GDP 仍将保持 7-9% 的快速发展, 二氧化碳排放量仍将高位增长。不断增长的能源需求与应对气候变化、减缓二氧化碳排放之间的矛盾更加尖锐, 如果不能根本转变现行经济发展方式、实现风能等可再生能源高效、低成本、规模化使用, 将严重威胁人类生存环境。

因此, 中国政府迫切需要一条既能充分发挥风电资源优势, 又能大力发展绿色产业的新路, 来应对经济发展和国内日益恶化的生存环境, 以及来自国际温室气体排放的巨大压力。美国杰里米·里夫金

教授在其著作《第三次工业革命》中指出“历史上的工业革命均是通信技术与能源技术的结合, 进而引发重大的经济转型”, 而第三次工业革命的显著特点就是可再生能源与互联网的结合。中国解决目前面临的一系列环境问题, 就必须走出一条富有中国特色的第三次工业革命之路。

1 非并网风电理论

风电并网是世界上大规模风电场的唯一应用方式。风的高度不稳定性, 导致风电大幅度波动。在没有水电或燃气发电调峰的情况下, 风电对电网贡献率难以超过 10%。2011 年风电限电弃风问题突出, 全国约有 100 亿度左右风电电量由于被限发而损失, 2012 年上半年已超过 2011 年全年弃风量。

作者通过几十年的研究和中国国家“973”基础项目“大规模非并网风电系统的基础研究”的研究成果, 提出了“非并网风电”理论。2005 年时任世界风能协会主席 Preben Maegaard 先生在“构筑中国绿色能源之都”国际论坛上首次积极推荐与宣传非并网风电理论, 2011 年第十届世界风大会专设非并网风电分会场, Google 网也以非并网风电专有名词在全球发布。非并网风电是指大规模风电直接应用于一系列通过技术创新、能较好应用风电特性的产业^[4-5]。

大规模风电的终端负荷不再是电网, 其与蓄电池配套的小型独立运行供电系统也不同, 而是将风电直接输送到一些高载能的企业, 以期解决无法上网的风电的利用问题。非并网风电模式和离网型风电模式、并网型风电模式的区别如图 1 至图 3 所示。

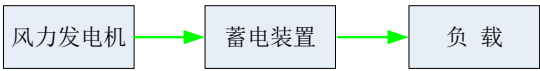


图 1 离网型风电模式



图 2 并网型风电模式

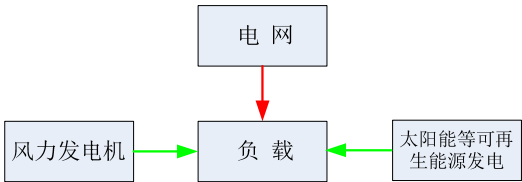


图 3 非并网型风电模式

离网型风电模式风电经蓄电后为负载供电，利用效率降低 30% 左右，投资却增加约一倍。并网型风电模式风机结构复杂，风电对电网污染严重。在没有燃气发电、水电等调峰时，风电在电网中贡献率一般难以超过 10%。而非并网型风电模式利用风/网协同供电，风电、网电相互独立、互不干扰，协同为负载供电。风机结构优化，成本降低，实现风电高效、低成本全部利用。

风电的这种非并网模式，将发电与负载直接耦合为一个“新系统”，其优势体现在：

(1) 采用直流电，回避风电上网电压差、相位差、频率差难以控制的问题，绕开电网这一限制风电大规模应用的瓶颈，也避免了风电并网对电网系统的影响；

(2) 突破终端负荷使用风电的局限，使大规模风电在非并网风电系统中 100% 利用；

(3) 由于没有了上网条件的束缚，风力机可以采用一些低成本、高效能的设备，也可以简化甚至省去成本高、结构复杂的设备。

非并网风/网协同供电的特性关系如式(1)和(2)所示。

$$\begin{cases} I = U_2 / R, 0 \leq U_1 < U_2 \\ I = U_1 / R, U_1 \geq U_2 + 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_1 = \alpha U_1 - I_0 - A e^{-\frac{U_1}{t}} \\ I_2 = I_0 + A e^{-\frac{U_1}{t}} \\ I = I_1 + I_2 \end{cases} \quad (2)$$
$$(U_2 \leq U_1 < U_2 + 0.5)$$

式中： I 为供电总电流， I_1 为风电电流， I_2 为网电电流， U_1 为风电电压， U_2 为网电电压。 I_0, A, t, α 等参数随网电电压的变化而调整的。

目前，非并网风电可以直接应用的高耗能领域主要有：以电解铝为重点的有色冶金工业、盐化工氯碱产业、大规模海水淡化、规模化制氢和以非金属为原料的精深加工产业链等。

2 智能负载的提出

目前世界各主要风电国家，均在积极探索电网接纳更多的风电等可再生能源，重点均放在积极发展智能电网和规模化蓄电调峰装置。但智能电网本身既不发电，也不消耗电能，只是电能的“搬运工”，而发电端则是通过电网无条件的服从用电端的需求。因此，欧美一些国家根据石油、天然气和水能的优势，在迅速发展风电的同时，大力配套发展具有深度调峰能力的燃油/燃气机组、联合循环机组，来适应风电调峰需求。如欧洲的西班牙，近十年来大力发展风电，装机容量突破 2000 万 kW，但配套发展具有深度调峰能力的机组就达 3500 万 kW，调峰机组装机总量远大于风电装机总量，满足了风电调峰需求。

由于中国的能源以煤炭为主，发电端难以大幅度瞬间变换输出功率来满足用电端的变化需求，国际上先进的智能电网理念并不能解决中国大规模风电全部利用的问题。相对于水电和燃气等机组来说，火电机组锅炉燃烧系统具有滞后（反应慢）、迟延和不宜深度调峰等特性。如用于深度调峰，将使煤耗上升、发电机组效率下降和增加机组故障概率。表 1 显示某超超临界火电机组在不同的出力条件下，出力每下降 200MW 煤耗的上升值。

表 1 不同出力范围下的超超临界机组煤耗上升值

机组出力范围/MW	煤耗上升值/(g/kWh)
1000-800	6
800-600	14
600-500	24

风电充足时，参与调峰的火电机组输出功率下降，每度电耗煤迅速上升；当输出功率下降到额定功率的 80% 时，度电耗煤增加 6g；下降到 50% 时，度电耗煤增加 24g，煤电厂处于亏损状态；下降到 30% 时，度电耗煤将增加约 36g，煤电厂严重亏损。

中国的国情是“富煤、少油、缺气”，决定了中国将在较长时间保持以煤电为主的电源结构，这一

特性也就决定了中国电网在现有技术条件下不具备大规模深度调峰能力，国外传统并网模式并不符合中国国情。因此，中国必须依靠科技创新，走出一条适合中国国情的大规模风电高效、低成本全部利用的特色之路。

非并网风电理论的关键是将高耗能产业通过必要的技术创新和改造后，能够适应风电和电网波动，成为理想的、具有深度调峰能力的“智能负载”。根据目前对高耗能产业内在耦合机理和运行规律研究，可改造成智能负载的高耗能产业主要有：电解铝工业、规模化电解水制氢、大规模海水淡化、氯碱工业和风煤多能源系统等^[6]。

所谓“智能负载”就是指该上述案例中负载能够根据供电量的大小，智能工作在相应的负荷下，其生产效率不发生改变，也就是说该智能负载能够适应风电和网电供电负荷的波动。这种适应性为风电等不稳定电源直接对负载进行供电提供了理论支撑，提高了电网的利用率，同时也是“智能负载”对电网起到了理想的调峰作用。

高耗能产业通过必要的技术创新与集成，能够适应风电(太阳能等)和电网输出功率大幅度波动，

使大规模、超大规模风电(太阳能等)不经过常规电网，就能够高效、低成本、低故障率全部利用。所以“智能负载”是“非并网风电”理论的核心，通过智能负载，发电量与用电量通过电网达到了“均衡化”，对电网也起到非常好的调峰作用，这是“非并网风电”理论的内涵。在中国，电解铝、海水淡化、盐化工氯碱、油田抽油、电解水制氢等都属于高耗能产业。以电解铝为例，生产 1 吨电解铝直流耗电为 13200kWh，效率只有 45%，50%以上的电能以热能的形式损耗，总用电占中国总用电量 6.1%。这些高耗能产业都可以通过相关的技术改造和创新，成为能够适应风电等新能源和电网波动的智能负载。

3 基于物联网的智能电网系统

智能电网为供电方和用电方提供了一条输电线路，承担了电能的输送，从广义上来说，既不生产也不消耗能源。“智能电网”就是把现代先进的计算机-通讯-网络-传感-控制技术最大限度地应用于电力系统以达到最大限度地提高设备效率，提高安全可靠，节能减排，提高用户的供电质量，提高可再生能源的利用效率。

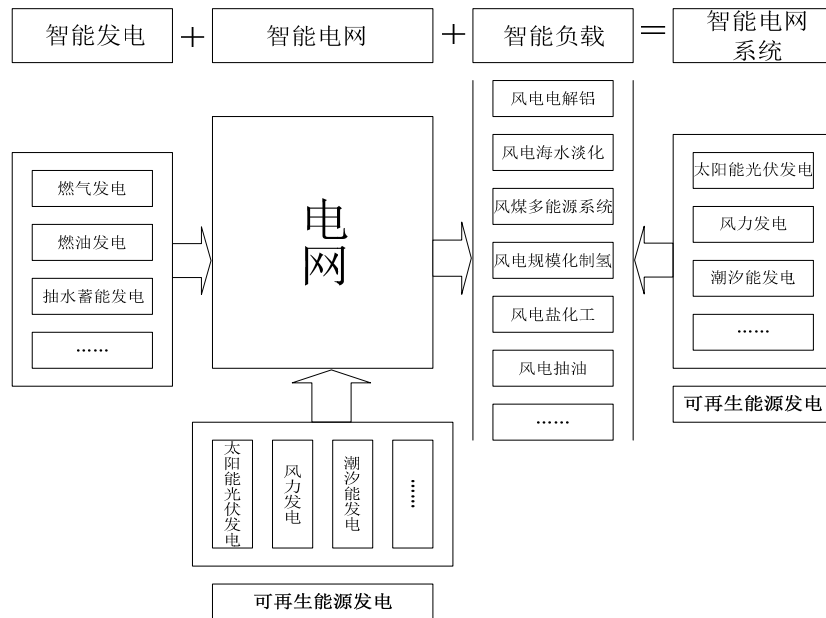


图4 智能电网系统示意图

目前，全球对于智能发电和智能电网的研究十分重视，这些研究是以供电侧无条件满足用电侧对电能的刚性需求（即电网需要以稳频、稳压、稳相位等电能输出满足负载需求）为前提来进行。用电

负荷峰谷差导致电网波动、电网设备利用系数低、供电质量差，这些都需要专门电站进行调峰或规模化储能装置进行储能。在此电网运行模式下，波动性、间歇性新能源（如风电）的大规模接入会严重

加深对电网的负面影响。抽水蓄能电站是目前最常用、有效的一类调峰电站,可以大容量有效调节电网的峰谷差,但抽水蓄能电站的建设对于水土、植被等生态环境的影响较大,现在各国对于大型水电站的建设都十分谨慎,同时抽水蓄能电站投资强度高于常规电站,也导致 25-30% 的电能损耗。蓄电装置是储能的常见形式,有较好的调峰功能,但因价格和技术效率等原因,在可预期的将来还难以规模化应用。

本文提出的智能电网系统就是在常规智能电网基础上,增加适合中国国情的“智能负载”,组成非并网多能源与高耗能负载协同智能化运行系统。其内涵为多能源协同供电,核心是高耗能负载能够适应风电等新能源和电网输入电流的大幅度波动,运行规律是通过智能负载的调节,使发电侧的供电量和用电侧的用电量实现“均衡化”。通过智能电网系统,使大规模、超大规模风电(太阳能等)不经过常规电网,就能够高效、低成本、低故障率全部利用。

智能负载可以主动根据供电侧供电能力的变化,主动调节用电侧负载变化,使用用电侧的用电量与供电侧的供电量实现动态平衡,达到均衡化,起到理想、高效的调峰功能。将中国一系列高耗能产业改造成智能负载,在调峰的同时,自身也成为绿色高耗能产业。与智能电网相结合,通过物联网信息感知交互中心,组成一个完整、高效、安全、稳定的符合中国国情的智能电网系统,如图 4 所示。

4 结论

本文突破了传统智能电网的构架,根据中国“富煤、少油、缺气”的国情,在多能源协同供电与智能电网耦合关系研究基础上,提出了基于物联网的“智

能负载”与智能电网相结合的智能电网系统新理念,为实现风电等可再生能源的规模化高效利用和提高电网效率的实施路径提供了理论支撑。智能电网系统覆盖了电源侧,输电、配电侧和用电侧的主要方面,构建了一个完整的新型高效的电力系统。

智能电网系统的提出,将对中国能源结构,能源布局和经济性产生重大影响,对中国高耗能产业布局、乃至对全球经济结构都会产生重要影响。

中国的二氧化碳排放占全球总排放量 25% 以上,解决了中国的温室气体排放问题,就是极大改善全人类的生存环境。因此,通过本文提出的智能电网系统能够有效扼制和缓解全球日益严重的环境恶化问题,为全人类的发展做出重要贡献。

参考文献:

- [1] M. B. McElroy, X. Lu, C. P. Nielsen, Y. Wang, Potential for wind-generated electricity in China. *Science*, 2009, 325, 1378-1380.
- [2] Chinese Wind Energy Association, Installed capacity of wind power in 2012(CWEA)
- [3] Netherlands Environmental Assessment Agency, No growth in total global CO₂ emissions in 2009 (PBL, Bilthoven, 2010; [http://www.pbl.nl/en/publications/2010/No-growth-in-total-global-CO₂-emissions-in-2009.html](http://www.pbl.nl/en/publications/2010/No-growth-in-total-global-CO2-emissions-in-2009.html))
- [4] W. D. Gu, Recognition for coastal wind resources in China. *Wind Energy*, 1985, 4.
- [5] W. D. Gu, Utilization of wind resource to develop sea beach along north Jiangsu province. *Journal of Jiangsu Institute of Technology*, 1986, 7, 82-87
- [6] 顾为东. 大规模非并网风电系统开发与应用. *电力系统自动化*, 2008,32(19):1-4.

Research on non-grid-connected multi-energy complementary smart grid system

GU Wei Dong¹, SHI Jian Zhong^{1,2}

1. Jiangsu Academy of Macroeconomic Research, Nanjing 210024

2. School of Management and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract: This paper brings forward a new concept of an “smart load” in accordance with China’s national conditions. It is the internet of things that combines the smart load with smart grid to constitute the “non-grid-connected multi-energy complementary smart grid system”. The core of the system is to transform a large number of energy-intensive industries in China into the “smart loads” that can be adapted to wind power and other renewable energy and huge fluctuations in grid output power through necessary technological innovation, thus providing Chinese government with a new path that can significantly improve the utilization efficiency of power grid and power generation equipment as well as take full advantage of high-efficient and low-cost renewable energy such as wind power pursuant to China’s national conditions.

Key Words: Non-grid-connected, Multi-energy collaborative, Smart load, Smart grid system