



中国石油大学
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

经济管理学院
碳中和与能源创新发展研究院

迈向“双碳” 研究系列报告

(C系列-2021C05)

《双碳目标下新型电力系统灵活性提升》





双碳目标下新型电力系统灵活性提升 (摘要性报告)

核心结论

- 燃煤发电机组为可再生能源发电优先调度而进行的灵活性发电调峰，具有经济可行性以及显著的环境效益。
- 通过电力系统与热力系统耦合，可以使部分地区（比如，北京）满足本地将近 100%的可再生能源供电和供热需求。
- 为促进可再生能源发电与电动汽车充电协同发展，峰谷分时电价区间应该保持在 0.7 元-0.97 元/kWh 范围内。
- 可再生能源发电与制氢产业具有明显的相互促进的协同发展效益。

1. 研究背景与目的

为应对气候变化带来的严峻而紧迫的挑战，碳达峰、碳中和目标在各个国家和地区被相继提出并引起广泛关注。中国也在 2020 年 9 月提出“3060”的双碳目标（2030 年碳达峰，2060 年碳中和）。促进可再生能源等清洁低碳能源对传统化石能源的替代是实现双碳目标的重要保障。然而，可再生能源的快速发展对原有以化石能源为主导的电力系统运行模式提出了重大挑战；为此，2021 年 3 月，习近平主席提出要“构建以新能源为主体的新型电力系统”。

灵活性是新型电力系统的核心要素。为提升电力系统的灵活性，本报告主要研究了以下三个问题：1) 提高燃煤发电机组灵活性出力的经济性和环境影响分析。2) 如何通过热、电耦合方式，促进电力系统灵活性的提升。3) 如何促进可再生能源发电与灵活性电源产业的协同发展。

2. 主要研究思路与方法

(1) 提高燃煤发电机组灵活性出力的经济性和环境影响分析的研究方法

本报告构建了风电企业和传统化石能源发电企业在发电出力决策方面的博弈模型，以及同时考虑能源强度和弃风率的优化调度目标基础上的机组组合模型，

基于京津唐电网燃煤发电、燃气发电以及风电等 160 个发电企业、总装机容量 63824 MW 的实际数据进行了分析。研究中还基于 Manson-Coffin 低周疲劳损耗模型，分析了燃煤机组为可再生能源发电出力进行调峰时（灵活运行）所产生的煤耗率下降和燃煤机组启停调峰产生的机组损耗成本，并同时考虑了燃煤机组灵活性运行情况下的燃油增加、厂用电增加和耗水增加等方面的影响，分析了燃煤发电机组为可再生能源优先调度进行灵活性出力调峰的经济和环境效应。

（2）通过热、电耦合方式，促进电力系统灵活性的提升的研究方法

首先，根据地区经济增长、能源消费、资源禀赋、技术进步等情况分析可再生能源利用与煤炭利用、油气利用之间的替代关系与互补关系；其次，重新设计高比例可再生能源系统，分析脱碳化供热技术对传统化石能源供热技术的替代如何影响可再生电力消纳，例如，空气源热泵、地源热泵的大规模使用，可再生电力与传统热电厂的协同发展等，重点探究可再生电力逐渐增加的过程中可以使能源系统稳定运行的具有经济效益的解决方案。其次，分析与可再生能源相关的技术，并在此基础上评价各种技术在未来能源系统中的发展前景，明确各种技术替代模式下可再生能源发展对煤炭行业和油气行业的替代与互补关系。最后，基于 EnergyPLAN 模型进行考虑可再生能源发电的电力需求和热力需求等能源协同利用的仿真模拟计算，确定多能互补的灵活性电力系统实现路径。即根据研究地区的能源供需特征，例如，电力热力需求、电力热力供给结构等，利用 EnergyPLAN 模型（图 1）还原区域能源系统现状，确定所研究地区未来的能源替代关系并进行未来供热系统以脱碳化转型为目标的灵活性电力系统发展路径的设计，设计中需要考虑电力供热的发展模式、可再生电力与热电厂的协同发展模式等因素。

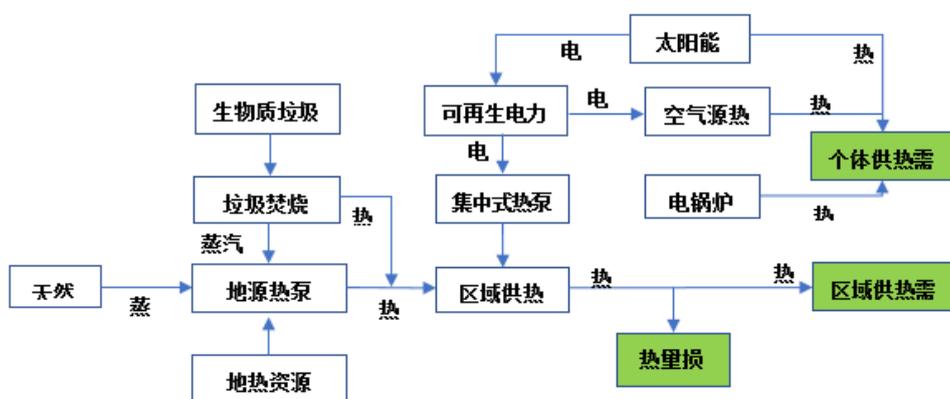


图 1. 未来实现碳中和目标的高比例可再生能源电力系统与热力系统耦合模型



(3) 促进可再生能源发电与灵活性电源产业协同发展的研究思路和方法

本报告主要分析了可再生能源发电与电动车充电以及制氢产业的协同发展问题。在可再生能源发电与电动汽车充电协同方面，本报告首先以北京市为例，基于光伏出力预测模型，估算了北京市屋顶光伏可利用面积及光伏出力潜力；然后通过蒙特卡洛模拟，综合考虑电动汽车规模，不同充电策略（不同价差的分时电价策略和智能充电策略），进行不同情境下电动汽车充电负荷模拟；最后结合分布式光伏出力与不同策略下电动汽车充电负荷，寻找最优充电策略。其次，考虑到充电补贴政策会对电动汽车用户的充电行为产生影响，进而引起电动汽车充电负荷的变化；同时，因不同类型电动汽车用户的充电行为不同，比如，网约车用户和私家车用户，在行驶路线、行驶里程以及充电时间、充电价格敏感性方面均有很大区别，为使电动汽车负荷与可再生能源发电更好匹配的激励政策更有针对性，需要理清不同类型用户在充电优惠补贴下充电行为的差异。本报告基于2020年国网运营的部分充电站的充电数据，基于双重差分（DID）方法，从每日充电量，每小时充电量等方面实证分析充电补贴政策对网约车用户和非网约车用户充电行为的影响。

在可再生能源发电与制氢产业发展的协同方面，构建了一个用于估计风力发电增加对并网电解水制氢成本的影响的方法，它主要分为三个部分：估计风力发电对电力市场中电力价格的影响的计量经济学模型；确定电解水制氢设备在全年利用小时数的调度模型；估计电解水制氢设备成本的生命周期模型。

在第一部分，由于风力发电的边际成本几乎为零，其发电量往往在电力市场中最先被成交。这一效应使得风力发电的增长会导致电力市场中的电力价格下降，许多研究将其称为最优顺序价格效应。我们参考了以往的研究，构建时间序列学模型来估计估计风力发电对电价的影响。在第二部分，本报告基于电解槽的物理特性，对电解水制氢在一年中的调度进行建模，估计其产量及成本。在第三部分，本报告运用全生命周期评价方法，综合考虑用电成本、投资成本及维护成本等多种因素，估计电解水制氢的平准化成本，并结合多个氢气技术进步情景假设。

3. 主要研究结论与政策建议

(1) 以可再生能源发电优先调度为目标构建的灵活性电力系统具有经济可行性

及显著的环境价值

研究发现，燃煤发电机组为风电的优先调度进行调峰可以显著降低电力系统的污染物排放强度。当风力发电从 5% 增加到 40% 时，系统的排放强度从 323.11g sce/kWh 降低到 265.37g sce/kWh；从能源节约成本角度可降低电力系统成本 17.87%。此外，增加风电还会降低污染物的排放。研究表明，风力发电 1kWh 比燃煤发电 1kWh，可减少 SO₂、NO_x、CO₂ 和 PM_{2.5} 的排放分别为 0.756g/kWh、0.721 g/kWh、791.92g/kWh 和 0.4591g/kWh。最后，研究还发现在考虑环境外部性的情况下，风力发电的总成本与燃煤发电非常接近，风电和燃煤发电成本分别为 0.527 元/kWh 和 0.515 元/kWh，这表明风力发电优先调度具有经济可行性，即使在考虑燃煤发电为可再生能源发电进行深度调峰而使得电力系统成本增加的情况下，上面的结论依然成立。

（2）减少燃煤机组的启停调峰成本和投油调峰成本是提高电力系统灵活性中成本节约的关键

燃煤发电机组为可再生能源进行灵活性调峰出力时，启停成本上升比例最大，其次是投油成本，再次是机组磨损成本（图 2）。因此，提高燃煤发电机组灵活性的技术发展方向首先应该是扩大燃煤发电机组的最低出力下限，尽可能减少燃煤发电机组的启停次数；其次，应注重研发燃煤发电机组投油调峰时燃油的使用量，降低燃煤发电机组灵活性调峰时的燃油成本消耗。

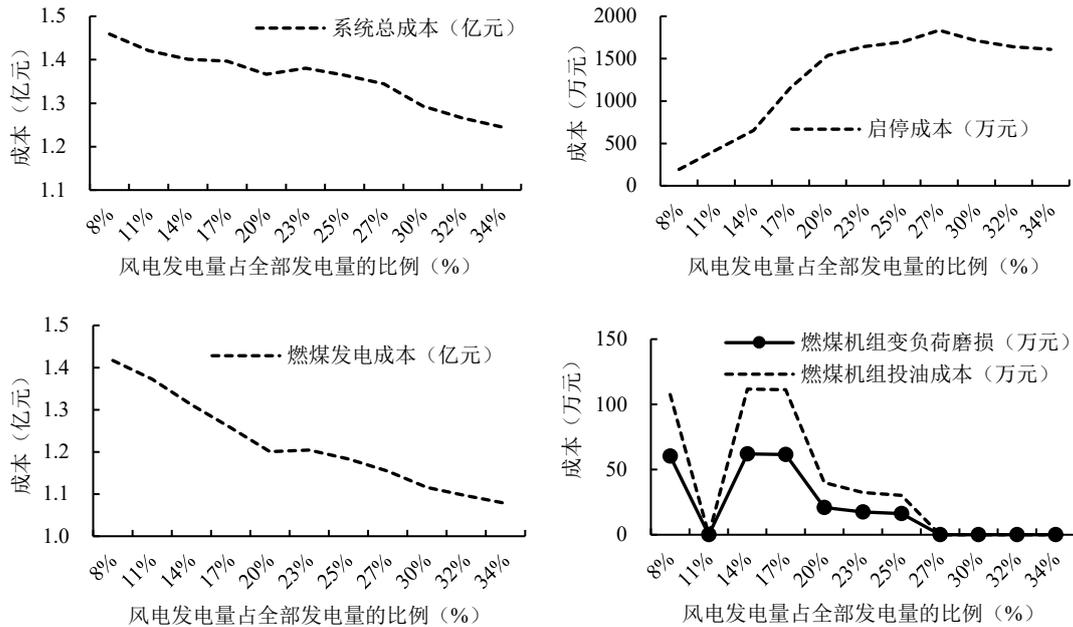


图 2. 冬季大负荷下随着风电发电量增加电力系统经济成本的变化情况

资料来源：基于京津唐区域电网机组参数仿真模拟计算得到。

(3) 通过电、热耦合方式，北京地区可以实现本地将近 100%的可再生能源供热和供电需求

本报告基于 EnergyPLAN 模型设计的含可再生能源的电力系统和热力系统耦合模型，研究发现可再生电力与热电厂的协同发展模式可以解决未来可再生能源大规模发展中可再生能源发电出力与电力负荷的不匹配问题，未来北京地区可以实现高比例（接近 80%）可再生能源满足供热和供电的能源需求（图 3）。从技术角度分析，可再生能源的大规模发展虽然可能会产生电力系统稳定性的问题，但是可以寻找到相应的解决方案。从经济角度分析，电力、热力耦合发展模式，由于需要在系统中部署大量的系统不稳定解决方案，因此，在重新部署未来能源系统时，投资成本会显著增加，并且未来电价和天然气价格会显著影响系统的可变运行成本，因此，未来技术进步、能源价格会主要影响未来电力供热的发展前景。而可再生电力与热电厂的协同发展模式需要在热电厂中加入蓄热装置，这会影响系统的前期投资成本，但是在运行时是由可再生电力代替化石燃料的燃烧，会使系统的可变运行成本显著减少。仅从供热部门脱碳化转型的角度出发以及现有的技术进步和能源价格情况，可再生电力与热电厂协同发展的模式具有经济效益。

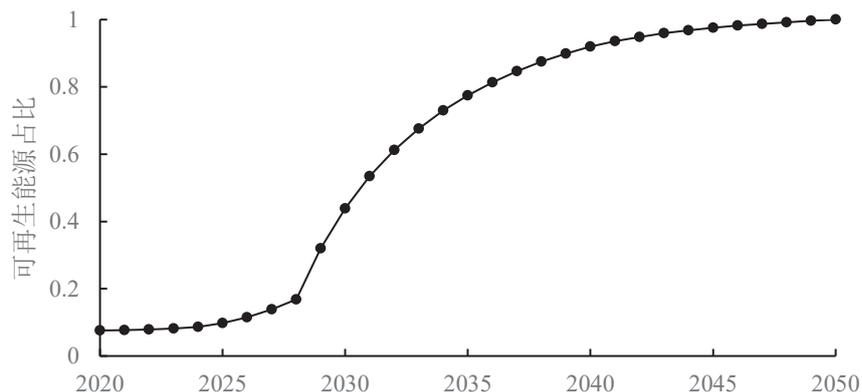


图 3. 北京地区本地电力和热力供应中可再生能源比例

注：上图中的结果不考虑北京从其他地区输入电量的可再生能源比例问题

(4) 促进可再生能源发电与电动汽车充电协同的峰谷分时电价差，应该保持在合理范围内

本报告发现，考虑分布式光伏出力后，随着分时电价差的增大，电动汽车充电负荷与光伏出力更匹配，可以促进分布式光伏发电的消纳；但价差不能过大，否则会对充电进行“过度优化”，不利于分布式光伏的发展。图 4 显示，10 点至 15 点间为电价峰值时段，在高电价响应度下（如 100% 电价响应度），该时段电动汽车充电行为被调整到其他时段，导致该时段负荷降低；而此时段正是光伏出力高峰期，因此不利于光伏发电的消纳。而低电价响应度下（如 25% 电价响应度），“削峰填谷”的效果较差。

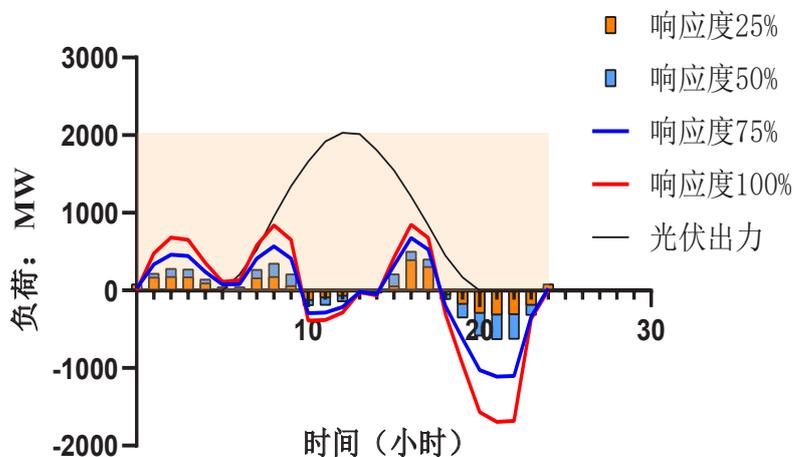


图 4. 不同电价响应度下优化后与优化前的电动汽车充电负荷差值



综上，高电价响应度可以得到更好“削峰填谷”的效果，但消纳光伏发电能力降低，此时对应的分时电价政策会对充电行为进行“过度优化”，导致光伏出力高峰期时，充电行为较少，无法及时消纳光伏发电，对分布式光伏发展的促进效果较小；低电价响应度的“削峰填谷”效果不足。因此，应采取合适的电价响应度，如电价响应度在 50%—75%之间。进一步结合电价响应度与电价差关系的研究结果，可计算得到促进光伏发电与电动汽车充电协同发展的合适的电价差约为 0.7 元-0.97 元/kWh。

(5) 电动汽车充电补贴政策的差异化更有利于提高电力系统灵活性

在电动汽车充电补贴政策对不同用户充电行为影响的实证分析上，研究结果显示，在每度电 0.4 元补贴下，电动汽车充电补贴政策会整体平均日充电量增长 17.13%。其中，网约车用户对补贴激励较为敏感，该类型用户的平均日充电量将增加 81.32%，且增长主要分布在一天中的 23 时至次日 5 时；而非网约车用户对电价激励的反应门槛相对较高，在每度电 0.4 元补贴下，平均日充电量并未有显著变化，仅在部分时段（5 时至 8 时）有一定程度的提高。因此，通过在不同时间段实施有差别的充电补贴政策，不仅更有利于提高补贴政策的实施效果，还可以有效调度不同类型用户的充电行为，进而更有效地提高电力系统的灵活性。

(6) 可再生能源发电与制氢产业协同发展会带来“1+1>2”的经济环境价值

在可再生能源发电与制氢产业的协同发展方面，我们选择美国的 PJM、ERCOT、ISNE、MISO 和 SPP 电力市场，以及欧洲的希腊、瑞典、西班牙、波兰及法国作为案例进行了定量分析。研究发现，随着风力发电增加，电解水制氢成本将明显下降。即使制氢设备成本不变，美国多个地区的电解水制氢成本也将在风力发电占比上升至 40% 时与蓝氢（带有碳捕集的天然气的蒸汽重整制氢，2.1\$/kg）相当。而在制氢设备成本下降情景下，当风力发电占比上升至 40%，电解水制氢成本将足以与灰氢（不带有碳捕集的天然气的蒸汽重整制氢，1.6\$/kg）相竞争。而在被选为案例的几个欧洲国家中，法国的电解水制氢成本随风力发电增加而下降得最快。在制氢设备成本下降情景下，当风力发电占比上升至 40%，法国的电解水制氢成本将足以与蓝氢（带有碳捕集的天然气的蒸汽重整制氢，2.1\$/kg）相竞争。这些研究结果显示可再生能源发电与制氢产业具有明显的相互促进的协

同发展效应，同时，由于制氢产业具有用电灵活性和储能作用，如果将制氢产业对电力系统灵活性运行所贡献的价值考虑进来，可再生能源发电与制氢产业的协同发展所创造的经济、环境价值将更加显著。

上述结论带来的政策启示是：第一，在其他灵活性调峰电源数量还比较有限的情况下，应适当保留小规模燃煤发电机组，以提高燃煤发电机组的启停调峰能力。第二，应打破能源运行和管理的条块分割问题，在考虑电、热、交通、制氢等部门协同运行基础上促进新型电力系统灵活性能力的提高。第三，在制定峰谷分时电价、充电补贴电价等激励可再生能源发电与电动汽车充电协同的政策时，应从系统性角度并区分不同用户类型进行考虑，这样会有效提升政策的实施效果。



关于作者

系列报告总协调人：王建良

本报告主笔人：



赵晓丽（1970.10-），女，中国石油大学（北京）经济管理学院副院长，低碳经济与政策研究中心主任，教授，博导。从事能源经济与政策、环境管制与可持续发展等研究。主持国家自科重点、美国能源基金等项目，在国内外知名期刊发表文章 50 余篇，著作 6 部。

本报告校对：王建良、朱金宏

报告引用：赵晓丽. 双碳目标下新型电力系统灵活性提升[R]. 中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院, 2021C05, 2021 年 11 月 20 日.



中国石油大学
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM

经济管理学院

碳中和与能源创新发展研究院

Institute of Carbon Neutrality and Innovative Energy Development, China University
of Petroleum, Beijing (ICED-CUPB)

联系电话: 18910556924 邮箱: iced-cupb@cup.edu.cn

微信公众号: ICED-CUPB

地址: 北京市昌平区府学路18号

Add: No. 18, Fuxue Rd., Changping District, Beijing, 102249, China

