

支持高比例电气化，提高系统灵活性

相关法律政策概述及分析

王轩

睿博能源智库

背景和概述¹

电气化能带来多重益处。通过电能替代以及用电能满足新的能源需求，电气化可以增加能源利用效率，减少排放。特别是当电力系统中可再生能源比例不断提高时，电气化可以更好地利用这部分绿色电力，并扩大其环境和经济利益。电气化终端也可以为电力系统提供灵活性，推动能源转型。除此之外，电气化还有包括促进生产力、减少化石能源依存度和能源强度从而保障能源安全，提高生活品质等一系列社会价值。

现行与能源相关的法律除了《电力法》中提到的农村电力建设之外，并没有着重提及电气化。在新的双碳目标下，制定较为综合的电气化规定，促进工业、建筑、交通等领域电气化的发展，可以更好地适应高比例可再生能源为主导的新型电力系统。最近几年颁布的电气化政策，包括 2016 年八部门出台的《关于推进电能替代的指导意见》，2022 年十部门联合出台的《关于进一步推进电能替代的指导意见》以及 2022 年出台的“1+N”政策体系中的《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》为引导绿色能源消费的制度和体系确定了基本方向，对推动电气化和增强电网灵活性起到了积极的作用。

过去 10 年，通过在居民采暖、工农业生产制造、交通运输等诸多领域推进电能替代工作，中国电能占终端消费比重的增长速度加快。根据“十四五”规划目标，2025 年电能

¹ 感谢睿博能源智库 Max Dupuy, 高驰, 何泉对本文的贡献。

占终端能源消费比重需要从 2020 年 27% 增加到 30%；一些机构的研究结果表明，这一指标到 2050 年，2060 年预计能够达到 60%，70%²。在能源转型的大背景下，随着电力行业碳达峰碳中和，电气化将有效支撑工业、建筑、交通等终端用能部门碳减排。然而，中国和其他国家电气化还有很长的路要走，也遇到了新的挑战，特别是在现阶段如何把握电气化的发展速度和规模以充分地利用现有电力资源，避免新建传统电源和电网快速扩张。以及，在可再生能源渗透率较高时，如何利用电气化终端可控智能的特点来帮助消纳可再生能源。

国际上，没有一个国家设计出了完美的解决方案，很多国家都在循序渐进地改进电气化政策。事实上中国在电气化的很多方面（如交通领域）已经领先世界。电气化措施主要体现在分行业的政策，近年来，有一些国家和地区制定了较为综合的电气化策略，也在法律中增加了有关电气化的条款。本文结合了欧洲和美国电气化的经验，为中国完善能源相关法律，实现跨越式电气化发展提供了一些备选方案。具体而言，本文围绕着一个关键议题——如何确保高比例电气化能够同时满足成本有效和灵活性目标——我们的主要建议包括：1）继续改善分时零售电价，2）采用非电网替代方案，和 3）帮助虚拟电厂参与电力市场。

有关电气化的关键问题

电气化的优先顺序

衡量电气化是否能体现公共利益，产生正的环境、经济、社会效益，需要至少满足以下一个指标并不影响其他指标的实现：成本降低、环境质量提升、电网友好、社会公正转型。如果电气化措施未能体现这些目标，则有可能导致昂贵、污染和冗余的电力系统。一些电气化措施可以同时满足多个衡量指标，例如利用空气源热泵代替燃煤、燃气、燃油设备供暖和热水，以及利用电动汽车替代燃油乘用车和公共汽车，都能够达到多重目标³，这个时候可以考虑优先采用满足多个指标的电气化措施。随着新兴技术成本降低，电力系统清洁低碳化，以及可控负荷的增加，这些电气化措施在减少成本、降低环境影响和平衡电网等方面的价值也会逐步提升。另外，为保证这些利益能够造福社会各个群体，一些电气化政策也对低收入家庭和空气质量较差地区给予特殊的优惠，以鼓励公正转型，欧洲的《绿色协议》和美国的《通胀消减法》都非常重视这一点。

² 国网能源研究院. (2021). 中国能源电力发展展望2021. <https://power.in-en.com/html/power-2400568.shtml>

³ Farnsworth, D., Shipley, J., Lazar, J., & Seidman, N. (2018). *Beneficial Electrification: Ensuring Electrification in the Public Interest*. Regulatory Assistance Project (睿博能源智库). <https://www.raonline.org/knowledge-center/beneficial-electrification-ensuring-electrification-public-interest/>

输电网的升级和智能化（智能电力基础设施）

配电网规划

电气化意味着负荷的增加，这对于电力系统运行既是机遇也是挑战。一方面，如果用电出现在系统峰值和拥堵的时间和地点，可能会增加可靠运行配电网的难度，相应地增加了对配电网和其他基础设施升级的需要。例如，电动汽车大规模的发展，对局部配电网的运行可能产生较大的影响。另一方面，如果电气化终端用户能够积极响应系统需要，则为电网提供了灵活调峰的资源，可以优化电网运行。配电网规划可以有预见性地做出反应，在每个地区负荷预测的基础上，加强对分布式能源资源（包括能效、需求响应、储能、分布式发电）的预测，通过比较现有资源和为支持负荷增长和分布式资源并网所需的配电网资源，来确定配电网升级的需要，不断优化投资策略，找到最合适解决方案⁴。

配电网规划的一个挑战是需要增加分布式资源的可见度，需要考察不同电气化措施、分布式发电在不同时间地点对负荷的影响，也就是要在准确预测“净负荷”的基础上，开展配电网规划。这可能增加智能电表等基础设备对负荷和分布式能源开展实时监测和评估。数字化技术可以很大程度上帮助用户和系统运行商集合分布式资源，增加其可见度和可控性。

输电网层面

充分考虑分布式资源也可以帮助输电运行商做出实时调度决策，提高运行效率和增强系统可靠性。从长期来看，对电气化和分布式资源的预测，也应该被考虑到输电规划中。在欧洲，输电系统运行商组织（ENTSO-E）负责在情景预测的基础上，预估未来十年电网的需要，并开展成本效益分析来比较不同的方案，确定未来要新建的能源基础设施项目也称为公共利益项目（PCI）。对分布式发电的管理和用户减少能耗导致的能源强度降低，以及需求侧技术和多个能源消费部门耦合的考虑是情景预测的重要组成部分⁵。

实施非电网替代方案

在电气化深度发展的阶段，如果需求侧能够充分响应电网需求，也可以减少输配电网的投资，这被称为非电网替代方案（NWA）。在输配电网的某个特定的地点（如变电站、回路），当预测的尖峰负荷会超过电网的承载能力时，可以采用有时空特性、更为成本有效的包括需求响应在内的分布式能源资源组合，延迟或者替代传统的电网升级和扩建。同样地，在评估电力充足性和进行综合资源规划时，也需要充分考虑需求侧资源，减

⁴ The Mid-Atlantic Distributed Resources Initiative (MADRI). (2019). *Integrated Distribution Planning for Electric Utilities: Guidance for Public Utility Commissions*. https://www.madrionline.org/wp-content/uploads/2019/10/MADRI_IDP_Final.pdf

⁵ The European Parliament and of the Council. (2022). *EU Regulation 2022/869 on guidelines for trans-European energy infrastructure*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2022/869/oj#d1e2360-45-1> 以及ENTSO_E. (2023) *TYNDP 2022 high level report*. <https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/tyndp-documents/TYNDP2022/public/high-level-report.pdf>

少对顶峰发电和调峰电源的投资。（详情见电力规划文章）

分时零售电价以及动态调整

由于电网的运行情况和供需两侧发生的变化，在一天之内的不同时间，电力系统运行包括发电、输配电的边际成本也在发生改变。分时电价是一种根据发用电的规律制定电价的方法，它有助于激励用户削峰填谷，减少成本高昂的顶峰发电和调峰资源的使用，促进可再生能源并网。静态分时电价通常把一天分为峰、平、谷、尖峰等时段，制定不同销售电价并且随着季节和节假日等有所改变。这是目前国内普遍采用的电价形式。自2021年以来，分时电价的设计和实施的范围都在不断完善，由此也推动了电气化设备的有序使用，以及分布式发电和储能的发展。目前的挑战是如何进一步发挥需求侧的潜力，在不同的时间尺度上满足系统的需要。

一个方法是科学地定期动态调整分时电价⁶。特别是，在电气化和可再生能源快速发展的当下，需要在对净负荷以及天气等因素预测的基础上，开展对分时电价的常规评估和动态调整。国际上，将分时电价和现货市场相衔接也是一个解决办法，这可以让需求侧更多感受到现货市场价格信号的变化，从而改变用电行为，支持系统的多重目标。在美国和欧洲的一些零售市场，已经对更灵活的动态分时电价⁷做出了一些尝试，例如，动态尖峰电价和实时电价，能够根据系统情况在更短的时间内形成终端电价，激励消费者增加电网可靠性，减少用电成本，帮助消纳可再生能源。对于中国而言，无论是否存在零售市场，用户都可以通过采用智能化电气终端或者通过第三方管理负荷，响应更灵活的价格信号，以提高效率，避免市场风险，促进源网荷储一体化。

需求侧非歧视地参与各个细分市场，发挥第三方集成商作用

电气化、数字化措施在建筑、交通和工业部门大规模发展，使得需求侧资源——包括需求响应，储能、能效，分布式发电等——以集合的形式替代传统的发电厂成为可能。这些经过整合的需求侧资源通常被称为“虚拟电厂”，它们可以为电力系统提供容量、电能量和辅助服务。电力市场应该允许所有资源(包括虚拟电厂)公平参与和充分竞争，以带来经济、环境和社会等多重效益。中国电力市场以化石能源为主要参与方，虽然一些地方的市场规则开始考虑电动汽车、储能这些新型主体，但是总体而言，并没有为需求侧资源

⁶ 高驰. (2022) 基于常规评估的分时电价动态调整思路. Regulatory Assistance Project. <https://www.raponline.org/blog/dynamic-adjustment-of-time-of-use-electricity-tariff/>

⁷ 动态分时电价是指能够反应短时间价格波动的电价，在欧洲动态电价被定义为价格根据现货市场（日前和实时市场）结算的间隔波动的电价。而固定电价是根据系统情况提前制定的，相对稳定的电价，包括，固定分时电价。

创造良好的条件。从国际经验来看，许多国家采取了一些措施鼓励需求侧平等地参与市场，包括：降低需求侧资源参与批发市场的门槛，制定符合需求侧资源的市场参与模式，为消费者（或产销者）赋能以主动参与能源转型，以及培育第三方集成商等市场主体。如何让需求侧资源在电力市场发挥更大的价值，并取得合理的回报，是一个复杂的话题。一些讨论集中在利用智能平台管理电气化终端，以同时满足批发和零售市场的需要，服务于电力系统和用户侧的多个目标，从而叠加不同分市场的价值⁸。另外一些讨论则围绕在建立新的灵活性市场/平台，来更好地协调输电和配电系统运行商，利用需求侧资源实现包括替代投资，执行针对特定资源的规划决定，管理电网阻塞，应对紧急状况等多个应用场景⁹。

欧美国家推动电气化的法律和政策

很多国家对于电气化和灵活性的重视程度在近十年有所提高，法律和相关政策也在不断更新，增加了一些与电气化相关的条款。虽然，欧盟各国以及美国各州对于如何改善和实行这些法律还有争议，不过这些法律和政策依然有十分重要的借鉴意义。

欧盟

欧盟电力法令 Electricity Directive (EU)2019/944¹⁰

欧盟试图通过这部法令为成功开展电气化开创条件。这部法令为欧盟电力系统的发电、输电、配电、供电制定了通用的法则，通过为消费者赋能和保护消费者，希望建立统一竞争、以消费者为中心、灵活、公平透明的电力市场。它要求成员国需要确保其国家法律促进跨境电力交易，不会阻碍消费者参与包括需求响应，对灵活的发电、储能和互联电网设备的投资，确保电价反映真实的需求和供给。与消费者权利相关的，各成员国需要建立法律框架以促使供应商为消费者提供动态电价套餐，并为积极的消费者（包括拥有分布式发电和/或储能的消费者）直接或者聚合的方式参与市场，提供灵活性等系统服务打下基础。此部法令也对输电和配电系统运行商的职责，特别是对数据管理和为灵活性提供激励等方面做了详细的规定。

欧洲绿色协议 The European Green Deal

2019年12月，欧洲委员会发布了《欧洲绿色协议》，它包涵一系列各行各业的政策措施，以期完成绿色转型，达到2030年在1990年基础上减少温室气体排放55%和2050年达到碳中和的目标。

- **Fit for 55 package**

⁸ 见FERC Order 2222的讨论。

⁹ 欧洲内部电力市场法令2019/944，以及相关讨论 Jarry, G. & Servant, L. (Nov 2021) *Understanding European flexibility markets*. Accenture. <https://www.accenture.com/us-en/insights/utilities/understanding-european-flexibility-markets>

¹⁰ 欧洲内部电力市场法令2019/944，以及相关讨论 Jarry, G. & Servant, L. (Nov 2021) *Understanding European flexibility markets*. Accenture. <https://www.accenture.com/us-en/insights/utilities/understanding-european-flexibility-markets>

2021年7月，欧盟委员会公布了“减碳55”的一揽子气候计划，它包括修改已有的气候、能源、交通领域的法律，并制定新的法律从而更好地与欧盟的气候目标相一致。其中，与电气化相关的一些立法包括：

- 修订《能效法令》将欧盟2030年的能效目标从之前规定的比2007年水平降低33%，提高到分别降低一次能源和终端能源消费39%和36%。这意味着从2020年起需要降低一次能耗9%，比之前的目标大概翻了一番。具体的措施主要集中在建筑、交通和工业部门，并对公共领域提出了具体要求¹¹。
 - 修订《可再生能源法令》，除了将欧盟的2030年可再生能源占总的能源消费的比例从32%提高到40%，这次修订还为建筑、交通、工业，供热和制冷等分领域设定了可再生能源的发展目标，并提出了加速可再生能源项目许可和促进可再生能源并网等措施¹²。
 - 建筑消耗了欧盟40%的终端能源，并贡献了大约36%的碳排放。修订的《建筑能源绩效法令》规定所有新建建筑在2030年前达到零碳排放，现有建筑要在2050年前实现零碳。同时，此修订也提出在公用和居民建筑上采用光伏，以及为电动汽车提供充电设施等配套措施¹³。
 - 2022年10月，欧盟理事会和议会达成共识对新的乘用车和轻型商用车设置更紧的碳排放标准。到2035年，新的乘用车和轻型商用车将实现零排放，也就是说不再会有传统的内燃机汽车在市场上销售。欧盟希望通过这项规定减少碳排放和污染物排放，降低消费者成本，并促进交通领域的技术创新和竞争力¹⁴。
 - 通过改革能源税收、加强对污染能源征税，以及建立针对建筑和交通领域的碳排放交易系统，为清洁能源转型和电气化提供经济刺激。
- **RePowerEU**

为应对能源危机，摆脱对化石能源的依赖并加速减排日程，欧洲委员会于2022年5月推出了RePowerEU计划，除了多元化能源进口，以及对能源市场的临时干预，欧盟希望大力推进可再生能源，能效和电气化¹⁵。这主要体现在：

- 进一步提高能效和可再生能源目标。欧盟委员会议案提出，到2030年，将可再生能源占总的能源消费的比例进一步提高到45%，在节能方面，新的目标希望比2020年基准至少减少一次能源消费13%，高于“Fit 55”中9%的目标。

¹¹ Council of the European Union. (2022). *Infographic - Fit for 55: how the EU will become more energy-efficient* <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-how-the-eu-will-become-more-energy-efficient/>

¹² Council of the European Union. (2022). *Infographic - Fit for 55: how the EU plans to boost renewable energy* <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-how-the-eu-plans-to-boost-renewable-energy/>

¹³ Council of the European Union. (2022). *Infographic - Fit for 55: making buildings in the EU greener* <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-making-buildings-in-the-eu-greener/>

¹⁴ Council of the European Union. (2022). *Infographic - Fit for 55: why the EU is toughening CO2 emission standards for cars and vans* <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/fit-for-55-emissions-cars-and-vans/>

¹⁵ European Commission. (2022). *Communication REPowerEU Plan*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN&qid=1653033742483>

- 在电力领域，欧盟委员会肯定了电力市场所带来的利益，提出任何短期干预措施不应该动摇内部市场的核心功能，并要求加速有效实施《电力条例》，特别是有关需求响应的条款。在此之上，欧盟也确定了未来电力市场改革的一些工作重点：在坚持实施动态分时电价的基础上，更多发挥长期合同在保护消费者抵御价格风险的作用；确保对清洁和可靠的资源的投资；增加灵活性资源，包括需求响应、储能、智能电网以替代传统电源和基础设施并降低价格；增加跨边境的电力基础设施以确保电力在成员国之间的自由交易；改善区位定价（locational pricing）降低成本；增加市场监管和透明度¹⁶。
- 在建筑领域，推出欧洲屋顶光伏倡议（European Solar Rooftop Initiative），要求所有大型公共、商业建筑，以及新建居民建筑将在 2030 年前准备好安装光伏组件，同时也鼓励建筑的维护翻新，以及热泵和储能的使用，并加强光伏和用能终端的协调运行。
- 在工业领域，鼓励氢能和电气化替代天然气，支持清洁技术制造（例如，燃料电池，可再生能源组件，储能和热泵）以及对创新解决方案的试点。
- 在交通领域，考虑对公共，私营车辆和货物运输等立法促进绿色交通，以提高效率和转向零排放车辆。

2023年3月，欧洲委员会发布了新的电力市场改革提案¹⁷，很好地呼应了现有法律。在促进灵活性方面，欧盟委员会提出要评估电力灵活性需求，并引入灵活性支持机制（flexibility support schemes）激励储能、需求响应等低碳的灵活性资源。在消费者保护和赋权方面，确保消费者能够选择供应商，签订固定电价（包括分时电价）合同，并允许产销者共享能源，建立保护消费者的兜底供应商和市场风险防范措施。

美国

能源安全和自主法案 The Energy Independence and Security Act of 2007

早在1978年，为了鼓励电力公司节能，提高运行和资源配置效率，为消费者制定公平的电价，PURPA就开始为用户侧电价的制定和设计给出通用的标准，包括基于成本的电价，阶梯电价，分时电价，季节电价和可中断电价。1992年和2005年的能源法案对电价设计标准进行了扩充。2007年的能源安全和自主法案增加了另外两个新的标准：1）综合资源规划（在区域、州和电力公司的资源规划中同时评估供应侧和需求侧资源），引入脱钩（decoupling）等电价改革以促进能效；2）考虑智能电网，以激励消费者积极参与，帮助需求侧资源并网，促进电网运行效率，提高可靠性和韧性。然而，由于各州的监管委员会仍然拥有监管本州电力公司和制定零售电价的权力，因此各州并不是强制执行这些标准，而是在电力规划和零售电价上有一定自由度，导致实施情况有很大差异¹⁸。

¹⁶ European Commission. (2022). *Short-Term Energy Market Interventions and Long Term Improvements to the Electricity Market Design*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A236%3AFIN&qid=1653032581730>

¹⁷ European Commission. (2023). *Proposal for amending Regulations (EU) 2019/943 and (EU) 2019/942 as well as Directives (EU) 2018/2001 and (EU) 2019/944 to improve the Union's electricity market design*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52023SC0058&qid=1678967237509>

¹⁸ Rose, K. and Murphy, M. (2008). *Reference Manual and Procedures for Implementation of the "PURPA Standards" in the Energy Independence and Security Act of 2007*. U.S. Office of Electricity. <https://www.energy.gov/oe/articles/reference-manual-and-procedures-implementation-purpa-standards-eisa-2007>

美国联邦能源监管委员会第745号和第2222号令

FERC Order 745 Demand Response Compensation in Organized Wholesale Energy Markets; FERC Order 2222 Participation of Distributed Energy Resource Aggregations in Markets

美国联邦能源委员会早在2011年就颁布了第745号令，要求扫除需求响应参与电力批发市场的阻碍，并以与供应侧相同的价格对需求响应提供的服务进行补偿。虽然一度受到质疑，2016年，美国最高法院宣判FERC拥有权限在需求侧资源方面做出相应规定。2020年，FERC出台第2222号令，进一步要求区域电力市场修改市场规则，为需求侧资源（包括分布式发电、储能、智能电气化终端）制定参与模式，使得需求侧资源能够在多个场景下提供包括可靠性，灵活性等服务。在具体的实施层面，第2222号令也遇到了一些难题，特别是面对多种技术且小而分散的资源，如何制定具有操作性的规则（例如，参与规模，计量和评估），协调输电、配电系统运行和聚合商以最大程度发挥分布式资源作用，并适度对其补偿等，各区域市场还在逐步推出适合本地的解决方案¹⁹。

基础建设和就业法案Infrastructure and Jobs Act

美国国会于2021年批准了基础建设和就业法案，旨在完善涵盖交通、建筑、能源、供水等多个公共领域的基础设施。与电气化相关的，这部法案通过支持交通电气化，新建电动汽车充电网络，加强电网的可靠性和韧性，增加对智能电网的投资，改进输配电规划以充分考虑电气化，刺激清洁能源产业链（例如，大型电池的制造和回收），提高建筑能效等措施，以帮助实现2050年的减排目标²⁰。

通胀缩减法案Inflation Reduction Act

通胀缩减法案被认为美国历史上最重要的气候行动，研究机构的模拟显示IRA能够在2030年前将美国的温室气体排放在2003年基准上减少41%，很大程度上支持巴黎协定中的目标²¹。通过税收减免、资金和项目支持，通胀缩减法案会很大程度降低清洁能源的成本，并促进在交通、建筑和工业领域的电气化，为消费者节约成本，刺激经济和就业。然而也有评论显示，美国需要付出更多的努力以消纳大规模的波动性可再生能源和支持高比例的电气化，因此IRA需要配合联邦和州的政策措施以促进电网灵活运行，例如，更好地实施分时电价、虚拟电厂，升级输配电，增加配套储能和清洁可调资源的使用²²。

¹⁹ Shrestha, S., Haider, R., and Annaswamy, A. (2021). FERC Order 2222 – What Does it Mean for DERs? IEEE Smart Grid. <https://smartgrid.ieee.org/bulletins/october-2021/ferc-order-2222-what-does-it-mean-for-ders>

²⁰ Armstrong, C., Hettinger, L., Coulter, H., Elliott, N., Goldsmith, R., Barkovic, L., Pollner, L., Nicholas, K. and Colligan, M. (August 2021). *Infrastructure Investment and Jobs Act: Summary of Bipartisan Infrastructure Legislation*. Holland & Knight. <https://www.hklaw.com/en/insights/publications/2021/08/infrastructure-investment-and-jobs-act-summary>

²¹ Energy Innovation. (2022). *The Inflation Reduction Act Is The Most Important Climate Action In U.S. History*. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/energyinnovation/2022/08/02/the-inflation-reduction-act-is-the-most-important-climate-action-in-us-history/?sh=5c4ebbf1434d>

²² POWER. (2022). *Inflation Reduction Act: Increased Electrification and Resulting Utility Implications* <https://www.powermag.com/inflation-reduction-act-increased-electrification-and-resulting-utility-implications/>

中国能源相关法律推动电气化的备选方案

通过经济、环境、电网灵活性、社会公正指标来评价电气化措施，制定比较综合的电气化方案。欧美国家产生了越来越多的共识，统筹考虑各个行业的技术、经济发展的电气化政策十分重要，需要在能效提升、成本减少、降低二氧化碳和其他污染物排放，增加系统灵活性、帮助可再生能源并网、为消费者（特别是脆弱群体）带来社会效益等方面比较各个电气化措施，从而确定电气化的路线图，促进各行各业向低碳的方向发展。中国的1+N政策体系，目前已经出台了能源转型，工业、交通、城乡建设等多个政策文件，下一步有必要根据各个地区和行业的特征，因地制宜制定细节方案，并从一开始就重视电气化过程对电力系统的影响，使其对电网平衡、提高灵活性稳定性做出贡献。

鼓励电网公司选择最成本有效的方案升级或者辅助输配电基础设施，以适应交通、建筑和工业电气化。在综合资源规划和输配电规划中充分考虑电气化影响，利用需求侧资源减少或者替代对输配电的投资。电气化措施如果在正确的时间和地点用电，可以减少高峰需求，更多利用本地清洁资源和现有输配电网，降低输电阻塞，反之亦然。从电力规划的角度来说，既要考虑到大规模电气终端无序使用可能导致的对发电、输电的需要，也要考虑到需求侧在市场和电价的激励下，采用智能技术，主动响应减少化石能源使用，降低输配电投资，驱动能源转型的作用。欧洲输电系统运行商组织（ENTSO-E）的规划实践表明，将能效放在第一位，考虑非电网替代方案，即所有可能替代传统输配电的措施，是确保电力规划成本有效的前提。

销售电价能够为用户削峰填谷提供良好的激励。中国可以在现行分时电价政策²³的基础上，对分时电价进一步完善，在保护消费者的前提下，促进批发和零售市场的良性竞争。基于国际经验，这可能包括：

- 动态调整电价设计（例如，时间段，峰谷比例）以充分反映电力系统成本——包括边际发电、输配电成本和排放成本²⁴从而指导终端用户在可再生能源多发时段用电，避免在系统紧张或者需要高排放机组顶峰发电的时段用电；
- 增加动态电价选择，在工商业用户具备动态响应软硬件的条件下，可以根据动态尖峰电价或者实时电价做出反应，在短时间内改变电力负荷，减少电力支出，并满足系统调峰调频等需要。
- 扩大分时电价的实施范围，在完善工商业用户充分实施分时电价的基础上，逐渐将范围扩大到有智能电表的居民用户。

²³ 国家发改委.(2021). 关于进一步完善分时电价机制的通知. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-07/29/content_5628297.htm

²⁴ 高驰.(2022). 基于常规评估的分时电价动态调整思路. Regulatory Assistance Project. <https://www.raponline.org/blog/dynamic-adjustment-of-time-of-use-electricity-tariff/>

鼓励和支持灵活性电力负荷，如电动汽车、热泵供暖和新增工业负荷参与电力市场，为每种资源制定市场参与模式。国际经验表明，在保护消费者和尊重其选择的前提下，明确供电商、第三方集合商的责任和义务，有助于虚拟电厂参与电力市场或者通过签订合同等方式逐步实现和电网的互动。虽然，近几年来，各个国家对于需求响应等分布式资源参与市场做出了前所未有的努力，然而，总体而言，这些新兴资源还未能平等、充分地与传统资源竞争，提供系统所需要的服务。无论是在批发市场，还是在零售市场，都需要各个市场成员（包括输配电网运行商，负荷集成商、供电商）互相协作，创新商业模式，以最大化发挥可调节负荷和其他分布式资源的作用。

附录(相关法律的原文摘录)

需求响应和分布式资源参与市场

Electricity Directive (EU) 2019/944

第 17 条通过聚合进行需求响应 1. 成员国应允许并促进通过聚合参与需求响应。成员国应允许最终用户，包括那些通过聚合提供需求响应的最终用户，以非歧视的方式与发电商一起参与所有电力市场..... 5. 成员国应确保监管机构或在其国家法律体系要求的情况下，输电系统运营商和配电系统运营商与市场参与者和最终用户密切合作，根据这些市场的技术特征和需求响应能力，制定电力需求响应参与所有市场的技术要求。此类要求应涵盖涉及聚合负荷的参与。

美国联邦能源监督委员会第 745 号令 批发电力市场中的需求响应补偿

FERC Order 745 第48条 FERC认为，在满足以下两个条件时²⁵，要求对参与区域电力批发市场的需求响应资源提供的服务以节点边际电价（LMP）（即现货市场价格）进行补偿是适当的。

FERC 第 2222 号令 聚合分布式能源资源参与市场

FERC Order 2222 第27条 FERC认为最终规则采用的允许分布式能源资源参与市场的改革是及时的，因为近年来分布式能源技术和分布式能源的部署取得了重大进展。这一发展引发了关于此类资源（包括更小、以较低电压互连且地理上分散的分布式能源资源）通过参与 RTO/ISO 市场提供电网服务的讨论。通过部署和改进计量、遥测和通信技

²⁵ 这两个条件是：第一，需求响应资源具有提供服务的能力，即需求响应资源必须能够替代发电资源在平衡供需方面服务于 RTO / ISO。第二，为需求响应资源提供服务而支付的LMP 必须具有成本效益，正如测试所确定的那样产生正的净收益。

术，可以更广泛地使用分布式资源。聚合新的和现有的分布式能源资源可以提供具有成本效益的能源和电网服务，并作为新的市场参与者加强批发市场的竞争。

第29条. 这些改革将提高 RTO/ISO 市场的竞争力，进而提高效率，从而有助于确保批发电力市场的价格公正合理（不会产生过度歧视或优惠的价格）。此外，最终规则的要求将有助于 RTO/ISO 考虑分布式能源资源对装机容量要求和日前市场能源需求的影响，从而减少负荷预测的不确定性以及过度采购资源的风险和相关成本，并提供许多其他益处。

输配电系统考虑灵活性

欧盟电力法令 Electricity Directive (EU) 2019/944

第 32 条 在配电网中使用灵活性的激励措施 1. 成员国应提供必要的监管框架，以允许并激励配电系统运营商采购灵活性服务，包括其所在地区的拥塞管理，以提高运营效率和配电系统的发展。特别是，当此类服务可经济有效地缓解升级或替换电力容量的需求并支持配电系统的高效和安全运行时，监管框架应确保配电系统运营商能够从分布式发电、需求响应或储能供应商处采购此类服务，并促进采用能效措施。 2. 配电系统运营商经监管机构批准，或监管机构本身应在透明的，包括所有系统用户和输电系统运营商在内的相关方广泛参与的过程中，制定所采购的灵活性服务的规范，并且，至少在国家层面为此类服务提供适当的标准化产品。规范应确保所有市场参与者有效和非歧视参与，包括提供可再生能源、需求响应的市场参与者、储能设施的运营商和负荷聚合商。配电系统运营商应交换所有必要的信息，并应与输电系统运营商协调，以保证资源的最佳利用，确保系统的安全和高效运行，并促进市场发展。 3. 配电系统的发展应基于透明的配电规划，配电系统运营商应至少每两年公布一次，并提交给监管机构。配电发展规划应提供所需的中长期灵活性服务的透明度，并列出未来五到十年的规划投资，特别强调所需的主要配电基础设施以满足新的发电并网和负荷增长，包括电动汽车的充电点。配电规划还应包括需求响应、能源效率、储能设施或其他配电系统运营商作为电网扩张替代方案的资源的使用。

能源安全和自主法案 The Energy Independence and Security Act of 2007

Sec. 1301. 电网智能化的政策论述

美国的政策是支持国家输配电系统的现代化，以维持可靠和安全的电力基础设施，以满足未来的需求增长，并实现以下各项特征，这些特征共同构成了智能电网：

1) 增加数字信息和控制技术的使用，以提高电网的可靠性、安全性和效率。

- 2) 电网运行和资源的动态优化，具有充分的网络安全性。
- 3) 分布式发电和资源的并网和应用，包括可再生资源的并网和应用。
- 4) 需求响应、需求侧资源和能效资源的开发和整合。
- 5) 应用“智能”技术（实时、自动化、交互式技术以优化电器和消费者设备的物理运行），用于计量、有关电网运行和状态的通信以及配电自动化。
- 6) “智能”电器和消费者设备的整合。
- 7) 应用和整合先进的电力存储和调峰技术，包括插电式和混合动力电动汽车以及蓄热空调。
- 8) 向消费者提供及时的信息和控制选项。
- 9) 制定连接到电网的电器和设备的通信和交互操作性标准，包括为电网服务的基础设施。
- 10) 识别并降低采用智能电网技术、实践和服务的不合理或不必要的障碍。

基础建设和就业法案 Infrastructure and Jobs Act

SEC. 40107. 采用技术加强电网灵活性

基础建设和就业法案修改了2007年的能源安全和自主法案，增加了9-15条有资格申请联邦政府基金智能电网投资。

- 9) 使用数据分析和软件的能力，通过提高电网运营商对电力系统的可见性来提供灵活性，从而帮助通过自主控制快速重新平衡电力系统。
- 10) 促进聚合或整合分布式能源资源作为电网资产。
- 11) 提供储能以满足波动的电力需求，提供电压支持，以及帮助间歇性发电资源并网，包括车辆到电网技术。
- 12) 适用于现有传输设施的硬件、软件及相关协议以增加输电网络的运行传输能力。
- 13) 预测和减轻极端天气或自然灾害对电网韧性的影响。
- 14) 促进可再生能源并网、电动汽车充电基础设施和车辆到电网技术。
- 15) 能够可靠地满足日益增长的需求，包括电动汽车、电器和其他部门的电气化。

鼓励电气化和需求侧灵活性的零售电价

RePOWER EU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy²⁶

²⁶ EU Commission. (August 2022) *Communication From The Commission To The European Parliament, The European Council, The Council, The European Economic and Social Committee and Committee of the Regions REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy.* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A108%3AFIN>

1.1. 降低零售价格并支持严重暴露在市场风险下的公司

欧盟委员会认为建立有助于保护消费者和经济的价格监管和交易机制是可能的。电力市场的法律框架，特别是电力指令第(5)条，允许成员国在当前的特殊情况下为家庭和微型企业设定零售价格。

委员会提供了详细的指导，以帮助成员国制定管制价格。这可以伴随着对能效和节能的激励措施，以减少能源费用。制定受监管的零售价格的主要考虑因素：

- 赋予消费者权力的措施：

- 实现自我消费和生产的措施；
- 减少能源需求、提高能源效率并减少消费者受到价格波动影响的能效措施；
- 挖掘需求侧灵活性的潜力，以应对供需波动，特别是确保用户可以通过聚合参与需求响应措施。

- 确保所有供应商以审慎方式运营，保护消费者利益的措施。

- 确保供应商能够在市场上提供满足消费者需求的措施

- 供应商能够在平等的基础上获得长期合同；
- 支持新供应商有效进入批发市场的措施；

最大限度地减少管制价格的潜在不利影响还意味着确保对供应商的非歧视性待遇。这需要包括以下内容：

- 供应商应自由进行其他报价，而不是基于管制价格。
- 动态价格合同不应受到影响，消费者应继续能够选择动态电价。

受管制的价格应反映成本，处于可以发生有效价格竞争的水平。

能源安全和自主法案 The Energy Independence and Security Act of 2007

SEC. 532. 电力公司能效项目

16) 综合资源规划—各电力公司应

- (A) 将能效资源纳入电力公司，州和区域规划；
- (B) 采取政策，将具有成本效益的能效资源确定为优先资源。

17) 修改电费设计以促进能效投资。

- (A) 一般——任何电力公司允许收取的电费应
 - (i) 使电力公司的激励与提供具有成本效益的能效保持一致；
 - (ii) 促进能效投资。

(B) 政策选择——在遵守(A)项规定时，每个州监管机构和每个不受监管的电力公司应考虑：

(i) 消除电力公司“扩大售电量”的动力 (throughput incentives) 和其他抑制能效的监管和管理因素；

(ii) 为电力公司提供激励措施以成功管理能效项目；

(iii) 将采用能效的影响作为零售电价设计的目标之一，认识到能源效率必须与其他目标相平衡；

- (iv) 采用鼓励每个客户类型实施能效的电费设计;
- (v) 允许及时回收与能源效率相关的成本;以及
- (vi) 提供家庭能源审计, 开展需求响应项目, 宣传与提升家庭能效相关的经济和环境效益, 并对所有现有的联邦和州激励措施进行推广教育, 包括使能效更优惠的低成本贷款。

基础建设和就业法案 **Infrastructure and Jobs Act**

TITLE I—电网基础设施和韧性

SEC. 40104. 电力公司需求响应 (A) 总则.—每个电力公司都应该促进商业、居民和工业用户采用需求响应和需求侧灵活性, 以减少电能消耗, 特别是在需求通常较高的时段。**(B) 成本回收**

(i) 各州监管机构应考虑建立价格机制, 对于州监管机构有权制定电费的电力公司, 允许其及时回收促进需求响应和需求灵活性的成本。

(ii) 不受监管的电力公司 – 不受监管的电力公司可以建立电费机制, 以便及时回收促进需求响应和需求灵活性的成本。

SEC. 40431. 促进高比例的交通电气化. 每个州应考虑采取措施, 促进交通部门更高比例的电气化, 包括制定以下电费机制:

(A) 为住宅、商业和公共电动汽车充电基础设施提供负担得起和公平的电动汽车充电价格选择;

(B) 改善与电动汽车充电相关的客户体验, 包括减少轻型、中型和重型车辆的充电时间;

(C) 加快轻型、中型、重型车辆电动汽车充电第三方投资;

(D) 适当回收向电动汽车供电和充电基础设施的边际成本。



RAP[®]

Energy Solutions for a Changing World

Regulatory Assistance Project (RAP)[®]

Belgium · China · Germany · India · United States

CITIC Building, Room 2504

No. 19 Jianguomenwai Dajie
Beijing, 100004

中国北京市建国门外大街 19 号

国际大厦 2504 室

邮编: 100004

raponline.org

© Regulatory Assistance Project (RAP)[®]. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial License (CC BY-NC 4.0).