



中国电机工程学会
CHINESE SOCIETY FOR ELECTRICAL ENGINEERING

电力系统 热点名词释义

中国电机工程学会电力系统专业委员会
2024年

前言

在碳达峰、碳中和“双碳”目标下，新型电力系统建设加速推进，传统电力系统在电源结构、运行特性、发展路径等方面面临前所未有的变化与挑战。此外，能源电力行业出现了诸多新业态、新模式、新概念，与国际相关学术组织、科研机构交流愈加密切，业界亟需统一思想，规范电力系统相关名词解释的使用，确保学术用词的规范性和严谨性，推动新型电力系统背景下相关科研工作高质量开展。

2023 年 12 月，中国电机工程学会电力系统专业委员会（以下简称“专委会”）名誉主任委员周孝信院士在专委会换届会议上提到，针对当前电力系统领域容易混淆使用的名词、定义含混不明确的名词，有必要开展名词释义工作，对前者要正本清源给出倡议、对后者要梳理明确技术内涵和边界，从专业委员会的角度给出参考意见。周院士的倡议得到了委员会全体委员的赞同。

2024 年 3 月，专委会组织成立了电力系统热点名词释义工作秘书处，形成了《电力系统热点名词释义》编写工作方案。2024 年 4 月秘书处以问卷的形式，向专委会委员和行业内专家征集意见，收集确定了待释义名词 37 个。2024 年 5 月，在专委会挂靠单位中国电力科学研究院电力系统研究所（以下简称“系统所”）的支持下成立了电力系统热点名词释义工作组，对征集意见中热度最高的 12 个名词开展名词释义的编写工作，并形成了初稿。通过会议研讨和书面反馈等形式，工作组收集了专委会委员和系统所的专家意见，并对初稿进行了多轮修改、补充、整理，于 2024 年 12 月形成了《电力系统热点名词释义》（讨论稿）。

由于时间和水平所限，《电力系统热点名词释义》（讨论稿）难

免存在疏漏与不足，恳请各位专家和同仁批评指正。未来，我们将持续推进该项工作，针对此前征集的其他名词以及新的热点名词，深入开展释义编写和完善工作，不断提升内容的科学性与准确性，力求为行业提供更具参考价值的成果。

中国电机工程学会电力系统专业委员会

2024 年 12 月 28 日

顾问组

组 长：周孝信 郭剑波

副组长：冯 凯 孙华东 刘映尚 吴 云 郭 强 鞠 平

成 员：丁 磊 马士聪 王成山 王 斌 王轶禹 文继锋

叶 林 刘一民 刘云峰 刘永奇 刘 强 许 涛

汤 奕 汤 涌 杜正春 李生虎 李明节 李庚银

李 勇 李 晖 余 锐 闵 勇 严 正 时伯年

张益国 肖先勇 范 越 庞 辉 周勤勇 项 丽

胡家兵 郭小江 郭 琦 徐 箭 黄志龙 黄 莹

符 杨 穆 钢 薛 峰

编写组

组 长：马士聪 周勤勇

副组长：韩家辉 李亚楼 赵 兵 马世英 李文锋 安 宁

成 员：王铁柱 李苏宁 王虹富 张国宾 杜 毅 毕经天

吴 萍 姜静雅 罗 魁 吴国旻 彭 丽 李再华

单熙雯 徐式蕴 侯玮琳 郭雅蓉 屠竞哲 宋瑞华

范士雄 荆逸然 朱艺颖 王姗姗 穆 清 田鹏飞

唐晓骏 贺海磊 徐浩田

目 录

弹性/韧性 (Resilience, Resiliency)	1
构网型控制技术 (Rrid Forming (GFM) Control Technology)	5
电力系统强度 (Power System Strength)	9
新能源极高占比电力系统 (Power System with Extremely High Proportion of New Energies)	13
非同步机电源渗透率 (System Non-Synchronous Penetration, SNSP)	15
非常规状态 (Power System Unconventional States)	18
宽频振荡 (Broadband Oscillation)	20
长周期储能技术 (Long Duration Energy Storage, LDES)	24
混合直流 (LCC-VSC Hybrid HVDC)	27
大电网全电磁暂态仿真 (Large Power Grid Full Electromagnetic Transients Simulation)	32
电力系统仿真模型节点数 (Number of Nodes in the Power System Simulation Model)	39
虚拟电厂 (Virtual Power Plant, VPP)	43

弹性/韧性（Resilience, Resiliency）

撰稿：张国宾、李苏宁、单熙雯

在电气工程领域，“韧性/弹性”均来源于英文 **resilience** 一词，指的是电力系统在遭受低概率、高影响事件时，能够最大程度保障电力系统运行安全及重要负荷供电安全的能力，涵盖事前准备、事中响应和事后恢复三个阶段，强调既要应对当前事件，也要考虑未来挑战。从中文词义的角度来看：两者同样面向小概率、高风险的极端事件，但弹性侧重于系统异常状态下的快速恢复能力，韧性侧重于系统面对扰动时的极限耐受能力，但随着理论和技术研究的不断发展，两者概念不断扩展融合，目前已同样可以涵盖系统完整响应过程。因此，本报告推荐将二者作为同义词使用。

弹性、韧性作为一个跨学科概念，起源于材料力学，最早引入到生态学和心理学，后逐渐扩展到社会学以及工业领域，后被引入生态学和社会学，又进入电力系统领域。

在物理学和机械学上，弹性理论是描述一个物体在外力的作用下如何运动或发生形变，韧性表示材料在塑性变形和破裂过程中吸收能量的能力。在材料力学中，弹性对应 **resilience**，韧性对应 **toughness**，前者主要用于描述材料发生弹性变形时存储弹性势能并恢复原状的能力，后者主要用于描述材料受到使其发生形变的力时对抗折断的抵抗能力。

在生态学和社会学中，弹性/韧性是指某一生态系统或社会系统在面对外部强烈变化时在维持单一平衡态下或保持多个平衡态之间相互转换的扰动承受能力。生态学和社会学中，弹性/韧性被进一步阐述为“适应性循环”理论，即通过利用、保存、释放和重组四个阶段，实现对外部冲击的逐步适应，推动系统的螺旋式发展。

在电力领域，弹性、韧性的英文翻译均为 resilience，即“恢复力”，对电力系统弹性和韧性的定义一定程度上融合了工程学和生态学中的概念。行业内各个机构也分别给出了具体解释。

国外方面，美国科学院 NAS 在《Enhancing the Resilience of the Nation's Electricity System》中提出，“a resilient system is one that acknowledges that such outages can occur, prepares to deal with them, minimizes their impact when they occur, is able to restore service quickly, and draws lessons from the experience to improve performance in the future.”

美国能源部 DoE 提出，“The (resilience) ability of a power system and its components to withstand and adapt to disruptions and rapidly recover from them.”

美国电科院 EPRI 在《Enhancing Energy System Reliability And Resiliency In A Net-Zero Economy 2022》中提出，“power system resiliency is...the ability to withstand extreme (high impact, low frequency) events with minimal interruption to the supply of electricity and enabling a quick recovery...Resiliency can encompass the following forms: Damage Prevention, Easier Repair, Isolation and Reconfiguration, Recovery, Community Sustainability.”

美国联邦能源管理委员会 FERC 提出“The ability to withstand and reduce the magnitude and/or duration of disruptive events, which includes the capability to anticipate, absorb, adapt to, and/or rapidly recover from such an event.”

国际大电网组织 CIGRE Working Group SC C4.47 提出，“Power system resilience is the ability to limit the extent, severity, and duration of system degradation following an extreme event.””

除此之外，美国西北太平洋国家实验室、美国桑迪亚国家实验室、

华盛顿大学、PJM 电力公司，英国国家基础设施委员会、牛津大学等机构也对包括电力系统在内的基础设施系统弹性/韧性做出过类似解释。

国内方面，以西安交通大学为代表，认为电力系统弹性(resilience, 常被译为“恢复力”)是“电力系统针对小概率-高损失极端事件的预防、抵御以及快速恢复负荷的能力”。除此之外，河海大学、浙江大学、南方电网等高校和企业对电力系统弹性也有类似解释。

以北京交通大学为代表，认为“所有的(电力系统)韧性(resilience, 亦可译为‘弹性’或‘恢复力’)定义内涵基本一致，都包括系统的两种核心特性，即应对大型扰动事件(如极端灾害等)的抵抗能力和恢复能力。”“韧性电网是能够全面、快速、准确感知电网运行态势，协同电网内外部资源，对各类扰动做出主动预判与积极预备，主动防御，快速恢复重要电力负荷，并能自我学习和持续提升的电网。”除此之外，清华大学、浙江大学、重庆大学、国网上海电力公司、国网浙江电力公司等高校或企业对电力系统韧性也有类似解释。

虽然目前国内外电力行业不同机构对电力系统弹性、韧性的具体定义存在差异，但整体上其核心理念基本一致，即弹性、韧性电力系统在面对极端事件时具有一定程度的抵御能力、适应能力以及恢复能力，抵御能力包含了“能够降低极端事件引发的系统故障概率及严重程度”，适应能力包含了“系统受到破坏后仍然能够保持部分电网稳定运行或重要用户基本供电需求”，恢复能力包含了“极端事件后系统在相对较短的时间内恢复到与事前接近的运行水平和运行状态”。理念上的一致性决定了弹性、韧性在研究方法上具有共通性。

从中文词义的角度来看:两者同样面向小概率、高风险的极端事件，但弹性侧重于系统异常状态下的快速恢复能力，韧性侧重于系统

面对扰动时的极限耐受能力。

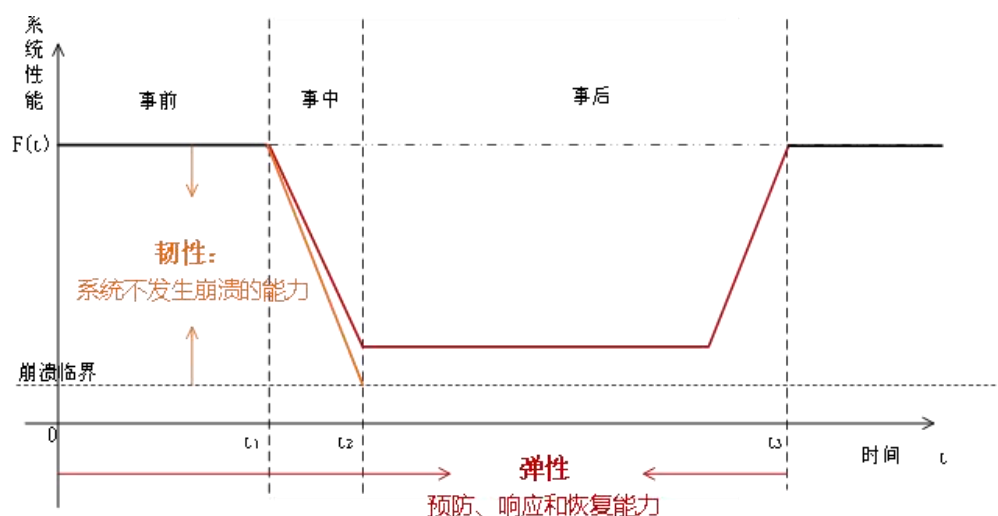


图 1 电力系统弹性与韧性的含义

随着理论和技术研究的不断发展，两者概念不断扩展融合，目前已同样可以涵盖系统完整响应过程。因此，本报告推荐将二者作为同义词使用。

参考文献:

- [1] EPRI.Enhancing Energy System Reliability And Resiliency In A Net-Zero Economy[R].2022.
- [2] NAS.Enhancing the Resilience of the Nation's Electricity System[R].2017.
- [3] GMLC.Enhancing Grid Modernization:Metrics Analysis[R].2018.
- [4] 别朝红, 林雁翎, 邱爱慈.弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J].电力系统自动化,2015(39):1-16
- [5] 鞠平,王冲.电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J].电力自动化设备,2019(39) 1-4
- [6] 阮前途,谢伟,许寅.韧性电网的概念与关键特征[J].中国电机工程学报,2020(40):66-77.

构网型控制技术（Grid Forming（GFM）Control Technology）

撰稿：杜毅、姜静雅

构网型控制技术,使电力电子装备的并网变流器稳态与暂态工况下均呈现电压源外特性,并具备电网电压与频率支撑、自同步运行、孤立组网能力的一类控制技术,可应用于储能、柔性直流、风电和光伏等装备。

自 20 世纪 80 年代以来,微电网领域的学者已经提出了“grid forming”概念。该概念表示主从控制框架下构建系统电压与频率的主电源,其在孤岛模式下,通常采用 V/F 控制策略。

在 2000 年,卡塞尔大学太阳能供应技术研究所的学者首次提出了对等控制方案,即有功频率下垂控制,以解决多个电压源并联运行问题,并将采用该方案的分布式电源命名为“grid forming battery inverters”。

在 2012 年,奥尔堡大学的 Frede Blaabjerg 教授在《Control of Power Converters in AC Microgrids》中,从微电网的视角对众多控制策略进行了分类与定义,包括:(1) GFM 控制技术,其典型策略为 V/F 控制;(2) 馈网型(Grid Feeding, GFD)控制技术,其典型策略为恒功率控制、最大功率点跟踪控等;电网支撑型(Grid Supporting, GST)控制技术,其又分为电压源型控制与电流源型控制模式两个子类,其典型策略包含基于 PLL 的电流源型下垂控制与基于功率同步机制的电压源型下垂控制。

欧盟 H2020 项目群中的 MASSIVE INTEGRATION OF POWER ELECTRONIC DEVICES (简称 MIGRATE)研究项目(2016 年-2019 年)将 Grid Forming 技术这一学术名词的适用范围从微电网应用为主推广至存在大规模高比例新能源接入的电力系统。同时认为将 Grid

Forming 与现有新能源并网变流器控制技术（Grid Following）及其改进技术相结合，可以提升大规模高比例新能源接入的电力系统稳定性，进一步提高未来电力系统的新能源接入比例极限。

在 2020 年，奥尔堡大学王雄飞教授将基于检测电压实现并网同步的控制定义为跟网型控制技术，而将采用功率同步机制的电压源型控制定义为构网型控制技术。

在 2020 年，徐政教授团队引入了 GFM 概念到国内，并在《高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战》中将电压源类控制策略均定义为 GFM 技术，从而扩展了其适用范围。

在 2021 年，清华大学谢小荣团队在《电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势》一文中指出，构网型变流器采用与同步发电机类似的功率同步控制策略，不需要借助锁相环即可实现并网同步。

在 2022 年，中国电力科学研究院秦世耀团队在《电压源型构网风电机组研究现状及展望》一文中指出：类似于同步发电机，电压源型构网控制多具备功率同步或惯性同步的特性，不仅可以自发地与电网同步，无需额外的锁相环节，还可以主动地表现出对电网频率、电压的响应和支撑。此外，顾名思义，电压源型构网控制通常也具备建立电压和构建电网的能力，在能量供给充足时，可以独立地为负荷供电。

在 2022 年末，南瑞继保电气有限公司詹长江总工在《构网型变流器稳定性研究综述》一文中指出，通过借鉴同步发电机的物理机理，不同学者在不同时期，从不同角度提出了构网型(grid-forming)变流器的概念。尽管在不同文献中，构网型变流器控制架构的具体实现在细节上有所差别，但它们均遵循着相同的本质，即：

- 1)将变流器控制成电压源而非电流源。

2)通过控制变流器自身输出功率(或直流电压)而非仅采样外部交流电网电压来实现同步。

上述两条核心控制思想保证了构网型变流器可以在不依赖外界交流系统的情况下，自行构建交流侧输出电压。因此构网型变流器可以孤岛运行，也可以接入极弱电网运行。

随后，在后续 GFM 技术相关综述论文中均指出 GFM 装备不仅可以自发与电网同步，无需额外锁相环节，还能主动响应与支撑系统电压与频率，并通常具备独立构建电网的能力。根据同步机制的不同，当前的典型构网型控制技术如下图所示：

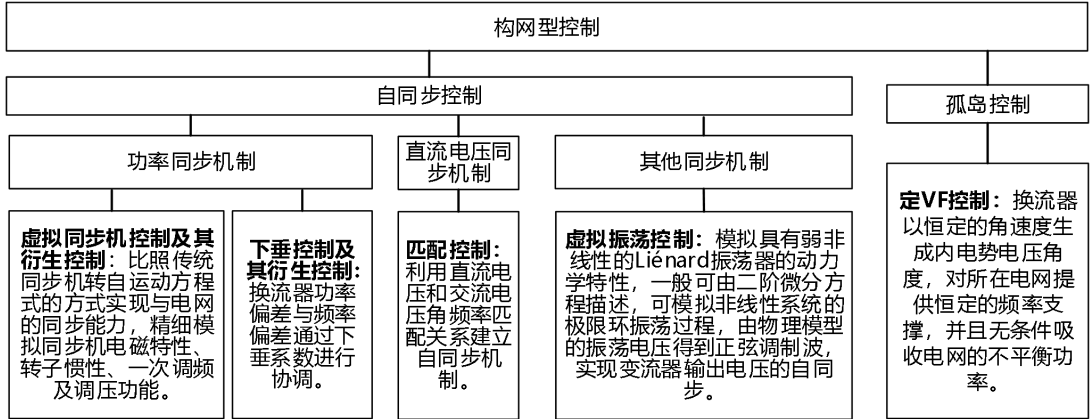


图 2 典型构网型控制技术

综上，不同学者在不同时期从多个角度对 GFM 概念进行了相关定义。在工业界，由于世界各国电力系统发展阶段与需求的多样性，GFM 控制技术的精确定义同样存在困难。因此，从电网实际安全稳定运行需求出发，将构网型定义为一类“使以变流器为接口的电力电子装备呈现电压源外特性，并具备系统强度支撑、自同步运行、孤立组网能力”的控制技术，同时包括“采用该技术的各类产品及解决方案”。

参考文献：

- [1] A. Engler. Control of parallel operating battery inverters. Photovoltaic Hybrid Power Systems Conference, Kassel, Germany, 2000.
- [2] A. Engler, C. Hardt, P. Strauss, et al. Parallel Operation of Generators for Stand-Alone Single-Phase Hybrid Systems-First Implementation of a new control Technology. In European photovoltaic solar energy conference, Kassel, Germany, 2002
- [3] A. Engler, C. Hardt, N. Bechtel, et al. Next generation of AC coupled hybrid systems - 3 phase parallel operation of grid forming battery inverters, s. In 2nd European PV-Hybrid and Mini-Grid, Kassel, Germany, 2003, 25-26
- [4] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, et al. Control of Power Converters in AC Microgrids. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 7(11): 4734-4749
- [5] Wang XF, M. G. Taul, Wu H. Grid-Synchronization Stability of Converter-Based Resources-An Overview. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020, (1): 115-134
- [6] 徐政. 高比例非同步机电源电网面临的三大技术挑战. 南方电网技术, 2020, 14(02): 1-9
- [7] 许诒翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势. 电网技术, 2022, 46(09): 3586-3595
- [8] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望. 中国电机工程学报, 2023, 43(04): 1314-1334.
- [9] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳定性研究综述. 中国电机工程学报, 2023, 43(06): 2339-2359.
- [10] 刘辉,于思奇,孙大卫,等.构网型变流器控制技术及原理综述[J/OL].中国电机工程学报:1-16[2024-05-17]

电力系统强度（Power System Strength）

撰稿：毕经天、徐式蕴

电力系统强度是指电力系统对接入源-网-荷等各层级设备的支撑能力，以及应对各类扰动时的调节能力。系统强度体现了设备接入系统的安全稳定运行能力，是电力系统构建和运行中的重要考量因素^[1]。

系统强度是高比例电力电子电力系统安全稳定运行的重要基础。当前，国内外学者针对系统强度的基本概念及分析方法已开展大量相关研究。早期，“系统强度”涵盖两方面特性：阻抗与惯性，若满足交流系统阻抗很大，或交流系统的机械惯性很小，则可以将一个交流系统看作是“弱”系统^[2-3]；文献[4]将系统强度和惯性视为两方面特性，系统强度仅用于指征系统的电压特性；文献[5]指出电力系统在稳态运行期间和遭受干扰后维持和控制电力系统中任何给定位置电压波形的能力；文献[6]认为系统强度(系统电压支撑强度)描述由电网和设备构成的闭环系统响应性能，“电网强度”描述不考虑设备动态的交流网络特性。而针对“电网强度”，文献[7]认为“电网强度”是描述实际电网某一母线电压幅值和频率受到所接入设备影响程度的指标，描述电压幅值受所接入设备影响而改变的电网强度指标是电压支撑强度，描述电压频率受所接入设备影响而改变的电网强度指标是频率支撑强度。上述研究存在“系统强度”、“电网强度”、“电压强度”、“支撑强度”^[8-9]等众多说法，“强度”的基本概念及定义尚不明确。

在高比例电力电子设备并网背景下，电力系统强度的分类体系如下图所示。

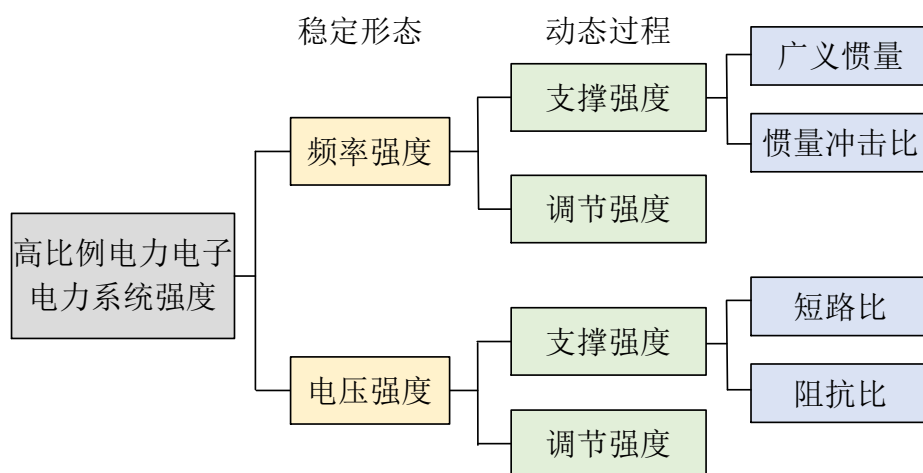


图3 电力系统强度分类体系

从稳定形态上讲，“系统强度”包含频率强度与电压强度两个维度。从动态过程上讲，根据系统中电压/频率控制措施是否处于有效工作状态，“系统强度”可分为电力系统自然响应下的支撑强度以及各元件、装置控制过程作用下的调节强度。

频率支撑强度是指系统惯量对扰动功率的抵御能力，具体体现在有功扰动下的频率变化速率。频率支撑强度包括扰动功率自动分配和惯量响应两个阶段：在扰动瞬间，具有电压源特性的机组根据同步功率系数自动分担扰动功率，使系统发电和负荷平衡；由于第一阶段中突变的机组电磁功率与不变的机械功率产生了不平衡力矩，致使运动状态发生改变，机组通过轴系旋转动能释放或吸收电磁功率的不平衡量。频率支撑强度可以通过广义惯量及惯量冲击比两个指标进行量化。其中，系统广义惯量是电力系统中能够反映系统惯性量值的统称，可以反映故障扰动后的频率变化率。惯量冲击比为系统广义惯量与有功扰动冲击的比值，表征系统在网内最大有功冲击下的最大频率偏差。

频率调节强度是指系统故障扰动后的暂态过程发生频率变化时，同步机、负荷及电力电子设备等各类元件控制作用下维持系统频率稳定的能力。频率调节强度取决于系统中各装置的频率调节能力以及扰动大小，主要影响暂态频率最大偏差与稳态频率偏差。其中，暂态频

率最大偏差主要由发电机一次调频、负荷频率响应及系统惯量决定，而稳态频率偏差受发电机一次调频与负荷频率调节影响，与系统惯量无关。

电压支撑强度是指系统在遭受扰动或故障后，维持电压波形不变的能力，主要与交流电网结构、并联电容等无功补偿装置、同步机等电压源型设备提供的长期无功支撑有关。系统中各装置在故障扰动下的无功自然响应输出可为系统提供电压支撑，决定了故障瞬间交流电网对电力电子设备的支撑能力。传统交直流系统的电压支撑强度可通过系统短路比进行量化，但对于高比例新能源电力系统而言，由于新能源经低压网络接入电网，当新能源场站覆盖范围较大时，各场站节点系统侧的戴维南等值阻抗比(记为 X/R)可能根据接入点的电压等级、无功分布等不同存在较大差异，对系统的最大传输功率与短路比造成影响。对于多新能源场站接入系统来说，通常将短路比作为主要指标，将 X/R 作为辅助指标，帮助评估交流系统的电压支撑强度。

电压调节强度是指系统中同步机的励磁电压控制、动态无功补偿装置及电力电子设备等各类元件在电压变化时，通过其动态电压响应特性对系统提供的短时无功，反映了各装置通过控制作用对系统电压进行调节和维持电压稳定的能力。对于高比例电力电子电力系统来说，故障发生后同步电源励磁控制、构网型电力电子设备控制等环节开始进行电压调节，在支撑强度的基础上进一步提供无功支撑以提高系统的稳定运行能力；随后跟网型电力电子设备可能进入故障穿越控制，数百毫秒后电力系统安全稳定控制系统动作，十秒左右自动电压控制等稳态电压控制措施开始发挥作用。若系统提供的无功支撑无法满足需求，电压将迅速下降，严重时发生电压崩溃。

参考文献

- [1]孙华东, 赵兵, 徐式蕴等. 高比例电力电子电力系统强度的定义、分类及分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2024
- [2]KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [3]徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之一——直流输电的输送能力[J]. 电网技术, 1997, (1): 12-16.
- [4]Australian Energy Market Operator. System strength requirements methodology system strength requirements & fault level shortfalls[R]. 2018.
- [5]Australian Energy Market Operator . System strength in the NEM explained[R]. 2020.
- [6]周瑾涵, 辛焕海, 鞠平. 基于广义短路比的多馈入系统强度量化原理与方法: 回顾、探讨与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3794-3811.
- [7]徐政. 新型电力系统背景下电网强度的合理定义及其计算方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3805-3819.
- [8]TAYLOR C W. Power system voltage stability [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [9]刘其泳, 于之虹, 张璐路, 等. 基于惯量比的电网频率支撑能力在线评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47(2): 493-502.

新能源极高占比电力系统（Power System with Extremely High Proportion of New Energies）

撰稿：吴萍

定义：从某一时刻最大出力角度看，新能源占比=新能源出力/所有电源发电电力，一般认为比例超过 50% 为新能源高占比电力系统，比例超过 70% 的场景定义为新能源极高占比电力系统。从电量角度看，新能源占比=新能源发电量/所有电源发电量，一般认为比例 30%~50% 为新能源高占比电力系统，比例为 50%~100% 为新能源极高占比电力系统。

当前，国内外对新能源的占比有不同衡量指标，对新能源占比水平的评价标准也不尽相同。

国外较关注可再生能源占比，2013 年，美国国家可再生能源实验室（NERL）讨论并定义了“高比例可再生能源情景”为可再生能源占比达到 80% 以上^[1]。2017 年，美国国家可再生能源实验室 KROPOSKI, B 教授将超高占比可再生能源（VRE, variable renewable energy）定义为：在同步电力系统中，VRE 的年渗透率超过 50%，并且瞬时渗透率（某一时刻）可高达 100%。年渗透率是指 VRE 产生的能量(发电量 Wh)除以全年所需的总能量(负荷 Wh)的平均值，瞬时渗透率是指任意时刻 VRE 的输出功率除以总功率需求^[2]。上述指标可供新能源极高占比定义参考。

2021 年清华大学谢小荣教授团队提出可再生能源渗透比例为风/光电源在电力系统总发电量中占比，并将中比例定义为 10%~30%、高比例定义为 30%~50%，极高比例定义为 50%~100%^[3]。

2022 年清华大学鲁宗相教授团队将极高比例可再生能源电力系统定义为风/光电源在系统总发电量中占比达到 50%及以上的电力系统。且从灵活性供需平衡技术体系的完整性角度考虑，其关注能量供需自平衡的系统，即不存在大规模电力输入或外送^[4]。

电网公司等生产单位从直流送端电网和受端电网的角度，提出新能源占比的定义，其中，送端新能源占比=新能源出力/所有电源发电电力，受端新能源占比=（新能源出力+直流受入电力）/（用电负荷+交直流送出电力），一般认为比例超过 50%为新能源高占比电力系统。

中国电科院开展新能源极高占比场景下电力系统构建理论与稳定分析控制方法研究，并将新能源电量与所有电源电量比例超过 70%的能源基地送出场景定义为新能源极高占比电力系统。

参考文献

- [1] Renewable Electricity Futures Study. Volume 1: Exploration of High-Penetration Renewable Electricity Futures. <https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52409-1.pdf>
- [2] KROPOSKI, B. Integrating high levels of variable renewable energy into electric power systems. J. Mod. Power Syst. Clean Energy 5, 831–837 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40565-017-0339-3>
- [3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(09):171-191.
- [4] 鲁宗相,林弋莎,乔颖,等.极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J].电力系统自动化,2022,46(16):3-16.

非同步机电源渗透率 (System Non-Synchronous Penetration, SNSP)

撰稿：王铁柱、侯玮琳、郭雅蓉

非同步机电源渗透率是对系统非同步机电源实时出力占比的衡量指标,通常定义为某个交流同步电网内非同步机电源实时出力与全部负荷功率的比值,其中非同步机电源实时出力为非同步发电机组实时出力与直流输电实时受入功率之和,全部负荷功率为本区域负荷实时功率与直流输电实时送出功率之和,具体如下式所示。

$$SNSP(\%) = \frac{\text{非同步发电机组实时出力} + \text{直流输电实时受入功率}}{\text{本区域负荷实时功率} + \text{直流输电实时送出功率}}$$

SNSP 指标最早由爱尔兰电网公司 EirGrid 的 Jonathan O’Sullivan 等人提出,最早公开于 2011 年发表的《Determining and implementing an approach to system frequency and inertial response in the Ireland and Northern Ireland power system》一文。

该指标首次应用于爱尔兰和北爱尔兰的联合电力系统,当时提出该指标是为了能够制定尽可能简单的运行规则,用于电网的实时调度。在该电力系统中,非同步发电机组主要为风力发电机组,且爱尔兰电网为一个孤岛系统,仅与英国电网通过两回高压直流输电线路相联。因此最早的 SNSP 指标计算公式为:

$$SNSP(\%) = \frac{\text{风电机组实时出力} + \text{直流输电实时受入功率}}{\text{负荷实时功率} + \text{直流输电实时送出功率}} \quad (1)$$

作为爱尔兰电网运营商, EirGrid 在大量不同风电出力渗透率、高压直流交换功率和负荷功率水平条件下的系统建模基础上, EirGrid 通过仿真分析明确了各种电网安全风险,并将 SNSP 指标与系统安全风险水平关联,通过对电网的 SNSP 指标设置运行限制来维护电力系统的安全。近十几年来, EirGrid 不断修正 SNSP 的计算定义和运行

上限。目前，其使用的计算公式为：

$$SNSP(\%) = \frac{\text{非同步发电机组实时出力} + \text{直流输电实时受入功率}}{\text{负荷实时功率} + \text{直流输电实时送出功率}} \quad (2)$$

且近十年来，EirGrid 通过应用多种措施，将系统运行中的 SNSP 上限从 50%逐步提高到目前的 75%，并计划于 2030 年将该指标的上限提升至 95%。

自从为爱尔兰和北爱尔兰电力系统制定 SNSP 指标以来，该指标也被推广应用于新能源发电渗透率不断升高的其他电力系统。澳大利亚全国电力市场（National Electricity Market, NEM）中最典型的例子是塔斯马尼亚的岛式电力系统。与爱尔兰一样，塔斯马尼亚州的新能源发电也在大幅增长，并且仅通过高压直流与相邻电网互联。从 2013 年起，塔斯马尼亚电网开始应用 SNSP 指标，高比例的高压直流输入，加上高比例的岛内风电和太阳能发电，使其 SNSP 处于较高水平，2021 年 1 月，塔斯马尼亚电网的 SNSP 曾录得 91.6%（考虑网损后则为 88%）的峰值，当时直流受入功率为 390MW、风电出力为 525MW、负荷功率为 997MW。

国内方面，当前电网在运行管理中尚未对非同步机电源渗透率做出限制，但学术界和工业界对该指标均有所探讨和应用需求。

浙江大学的徐政教授团队于 2020 年首次提出了非同步机电源渗透率的概念，并将其定义为非同步机电源的有功出力在系统总有功出力中的比例，计算公式为：

$$SNSP(\%) = \frac{\text{非同步机电源实时出力}}{\text{同步机电源实时出力} + \text{非同步机电源实时出力}} \quad (3)$$

华南理工大学和南网科研院在《南方电网新型电力系统规划建设

的量化评估与分析》一文中提出了系统非同机步电源功率置信渗透率（System Asynchronous Confidence Penetration，SACP）的概念。

$$SACP(t) = 1 - \frac{P_{sync}(t)}{P_{load}(t) + P_{out,dc}(t)} \quad (4)$$

式中， P_{sync} 为本区域同步电源发电功率， $P_{out,dc}$ 为本区域直流送出功率。式（4）与式（2）等价。

综上所述，非同步机电源渗透率指标都是通过衡量非同步机电源实时出力占比，来为电网运行管理提供指导，只在具体公式计算上有些微差别。考虑到非同步机电源渗透率指标在送端电网和受端电网的通用性，以及对既有直流受入功率又有直流送出功率的电网的适用性，将其定义为某个交流同步电网内非同步机电源实时出力与全部负荷功率的比值，其中非同步机电源实时出力为非同步发电机组实时出力与直流输电实时受入功率之和，全部负荷功率为本区域负荷实时功率与直流输电实时送出功率之和。

参考文献：

[1] J. Eggleston, A. Halley and P. Mancarella, "System non-synchronous penetration (SNSP) metric and potential alternatives in low-carbon grids," 11th Solar & Storage Power System Integration Workshop (SIW 2021), Hybrid Conference, Germany, 2021, pp. 30-34, doi: 10.1049/icp.2021.2480.

[2] 喻哲扬, 张君黎, 徐政. 非同步机电源渗透率对同步机之间功角稳定性影响的简化模型分析[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(09): 88-97.

非常规状态 (Power System Unconventional States)

撰稿：张国宾、屠竞哲

在电力系统中，非常规状态通常是指电力系统遭受非常规事件影响而导致的电力供需失衡、严重故障、大面积停电等事故的发展过程。此处的非常规事件是指超出现有电力系统安全防御体系，可能导致系统严重故障，停电后果巨大且难以准确评估的小概率、高风险事件。

非常规状态的概念广泛存在于各类学科中，其描述的对象几乎可以涵盖所有可以直接或者间接的借助一种或多种科学方法加以持续观测的事物。

“常规”一词在中华词典中的解释是：过去流传下来的规矩，日常必须遵守的规则。其对应的英文单词“convention”的英文释义为：A protocol; a preferred method of accomplishing a task. 很明显这是一个名词性词汇，不是非常适合用来解释常规状态这个复合词，我们需要它的形容词性解释。“conventional”对应英文释义：ordinary, commonplace. 就是惯例的、普通的、常见的意思。所谓常规状态就是指事物通常的、常见的存在形式，即事物在大部分时间内所处的状态。

因此，相对地来讲，非常规状态指事物由于自发的内因或者因某种外力作用导致其偏离常规状态，而暂时的、在短时间内所处的状态，或者说是一种相对常规状态而言的不稳定态。

在公共安全学中，非常规状态指系统在非常规事件影响下的发展过程。非常规事件在公共安全学科中具有如下定义：

- 1) 前兆不充分，具有明显的复杂性特征和潜在次生衍生危害，破坏性严重，采用常规管理方式难以应对处置的突发事件。
- 2) 无前例参照的或形态上、性质上、致因上、影响程度上异于、

甚于以往同类事件的，采用常规管理方式难以应对的重大突发事件。

在电力系统中，非常规事件是指超出现有电力系统安全防御体系，可能导致系统严重故障，停电后果巨大且难以准确评估的小概率、高风险事件。从事件类型来看，包括但不限于极端天气、严重自然灾害、物理攻击、网络攻击等。

宽频振荡 (Broadband Oscillation)

撰稿：姜静雅、宋瑞华

宽频振荡是电力系统的一种异常运行状态，在这种运行状态下，电力电子设备、常规电源、电力网络中会出现电气量的振荡现象。该振荡具有非线性的特征，振荡频率范围从几赫兹到几千赫兹以上。

2018 年，清华大学学者谢小荣团队在《电力系统新型振荡问题浅析》一文中在数学上将各种振荡等价于与电气振荡一致的电网络形态，并指出新型振荡事件的共性特征：

1) 机理上涉及多变流器、可再生能源机组和交直流电网间的动态相互作用，与旋转机组惯性和轴系动态主导的传统机电(低频)振荡有本质的区别；

2) 振荡频率范围宽，从几 Hz 到 kHz 以上，包含机械扭振和电气振荡频段，有激发谐振的风险；

3) 振荡的频率、阻尼或稳定性受变流器和电网诸多参数，乃至风、光等外部条件的影响，具有影响因素复杂、大范围时变的特征；

4) 变流器有复杂的非线性特征且过载能力有限，控制信号易被限幅，使得振荡往往始于小信号负阻尼发散，而终于非线性持续振荡。

2020 年，清华大学马宁宁团队在《高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述》一文中，从广义角度对电力系统宽频振荡进行定义，将“双高”电力系统因受自身或外部因素的影响，电力电子设备之间及其与电网之间相互作用引起的电气量(如电压、电流、功率等)随时间作周期性波动，且振荡频率在较宽范围内变化的动态过程称为电力系统宽频振荡。

2021 年，中国电力科学研究院孙华东团队在《高比例电力电子电力系统宽频带振荡研究综述》一文中提出电力系统宽频带振荡的定义与分类。宽频振荡是含可再生能源机组和高压直流输电等电力电子设备的电力系统的一种异常运行状态，在这种运行状态下，电力电子设备、常规电源、电力网络中会出现电气量的振荡现象。该振荡具有非线性的特征，振荡频率范围从几赫兹到几千赫兹以上。

2023 年，浙江大学徐政学者将新型电力系统的主要动态特性归结为五个方面，即五大动态特性。分别为广义同步稳定性、电压稳定性、频率稳定性、宽频谐振稳定性和短路电流新特性。指出“宽频振荡”至少包括了由广义同步稳定性、电压稳定性和宽频谐振稳定性 3 种稳定性破坏所造成的振荡现象。

根据宽频带振荡的产生机理(是否存在电感电容 LC 电路谐振)以及参与设备(电力电子设备控制器是否对振荡有明显影响作用)的不同，电力系统宽频带振荡问题有谐振(存在 LC 电路谐振)以及控制振荡(不存在 LC 电路谐振，控制器对振荡有显著影响作用)两种形式，如图 4 所示。

1) 谐振

谐振类振荡是由电感电容 LC 谐振电路引起。此类振荡包含传统次同步谐振(sub-synchronous resonance, SSR)、铁磁谐振、电力电子设备主导谐振 3 个子类。

2) 控制振荡

对于控制振荡，系统中不存在 LC 电气谐振回路，且电力电子设

备控制器对此类振荡有明显的影响作用。此类振荡包含次同步振荡(sub-synchronous oscillation, SSO)以及电力电子设备主导控制振荡两个子类。

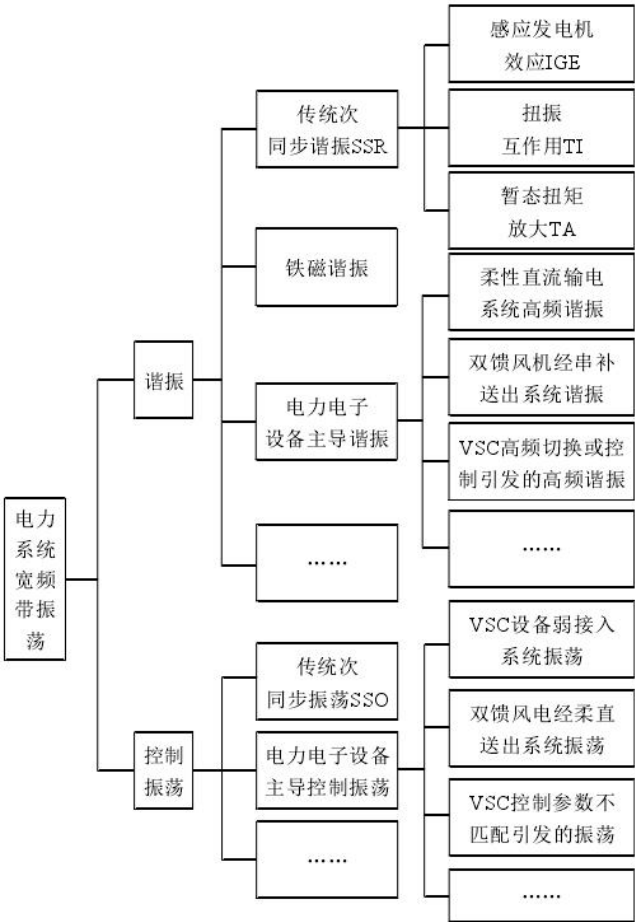


图 4 电力系统宽频振荡问题的分类

综上，不同学者在不同时期从多个角度对宽频振荡概念进行了相关阐释。目前，宽频振荡产生的物理机理仍不清楚，宽频振荡难以明确定义，宽频振荡泛指从次同步振荡、超同步振荡到高频段的振荡现象。因此，从电网实际安全稳定运行需求出发，将宽频振荡定义为电力系统的一种异常运行状态，在这种运行状态下，电力电子设备、常规电源、电力网络中会出现电气量的振荡现象。该振荡具有非线性特征，振荡频率范围从几赫兹到几千赫兹以上。

参考文献:

- [1] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等.电力系统新型振荡问题浅析[J].中国电机工程学报:2018, 38(10):2821-2828.
- [2] 马宁宁,谢小荣,贺静波,等.高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J].中国电机工程学报:2020, 40(15):4721-4731.
- [3] 陈露洁,徐式蕴,孙华东,等.高比例电力电子电力系统宽频带振荡研究综述[J].中国电机工程学报:2021,41(7):2297-2309.
- [4] 徐政.频域耦合阻抗模型的性质及其适用性分析[J].高电压技术:2023,10:4058-4068.

长周期储能技术 (Long Duration Energy Storage, LDES)

撰稿：罗魁、范士雄、荆逸然

定义：长周期储能是指能量存储与功率转换相互解耦，能够实现跨天、跨周、跨月甚至跨季节能量循环的储能方式，具备存储大量电能时边际成本低（储能时长越长，功率单元单位投资成本越低的规模化效应）特点，一般来讲，长周期储能应具备不低于 4 小时的额定功率持续充/放电时长。

在储能时长方面，目前国内外对于长周期储能定义暂未达成共识。2021 年美国桑迪亚国家实验室发布《长周期储能简报》，把长周期储能定义为持续放电时间不低于 4 小时的储能技术。同年，美国能源部将其定义为额定功率下至少持续运行（放电）10 小时的储能系统。美国加州公共事业委员会(CPUC)将时长为 8-12 小时的储能定义为长周期储能，短时储能为 4 小时及以下；加州能源委员会将长周期储能时长定义为 10 小时及以上；长时储能理事会（Long Duration Energy Storage Council）将长周期储能按储能时长分为两种类型，一种是 8-24 小时，另外一种为 24 小时及以上。为了区分大规模建设的 2 小时储能系统，我国一般把长周期储能定义为 4 小时以上的储能技术。储能时长受诸多因素影响，如储能规模布局、系统需求、政策支持力度等。

在应用场景方面，长周期储能的目的是为了提高电力系统的可靠性和灵活性，适应风能、太阳能等可再生能源的波动性和不确定性，实现跨日、跨月甚至跨季节的电能储存和释放，主要以长周期的平衡需求为主，对于短时动态响应性能，如响应速度等并无要求，同时具

备长周期大规模储能的边际效应，如以动态支撑性能为主的锂电池在长周期储能方面不具备经济性。

在储能形式方面，以电-储-电，或者电-储 X（热、冷、氢等）为能量吞吐形式，功率和容量可以相对独立扩展。

在储能类型方面，以压缩空气、全钒液流电池、氢储能、熔盐储能等为代表的机械储能、化学储能、电化学储能、热储能等多种形式均处于发展阶段，并无固定的技术路线。

美国能源部于 2021 年公布了“长周期储能攻关”计划，目标在 10 年内将时长超过 10 小时的储能系统成本降低 90%以上，丹麦、德国等欧洲国家在跨季节储热领域也开展了长期布局。我国国家发展改革委、国家能源局 2022 年 3 月印发的《“十四五”新型储能发展实施方案》也提出要推动多时间尺度新型储能技术试点示范，重点试点示范压缩空气、液流电池、高效储热等长周期储能技术。国家科技部发布的《“十四五”国家的重点研发计划》提出支持长周期储能多种储能技术的研发，重点包括超长时间尺度储能技术 3 项：100MW 级先进压缩空气储能技术、新一代液流电池储能技术、宽液体温域高温熔盐储热技术。

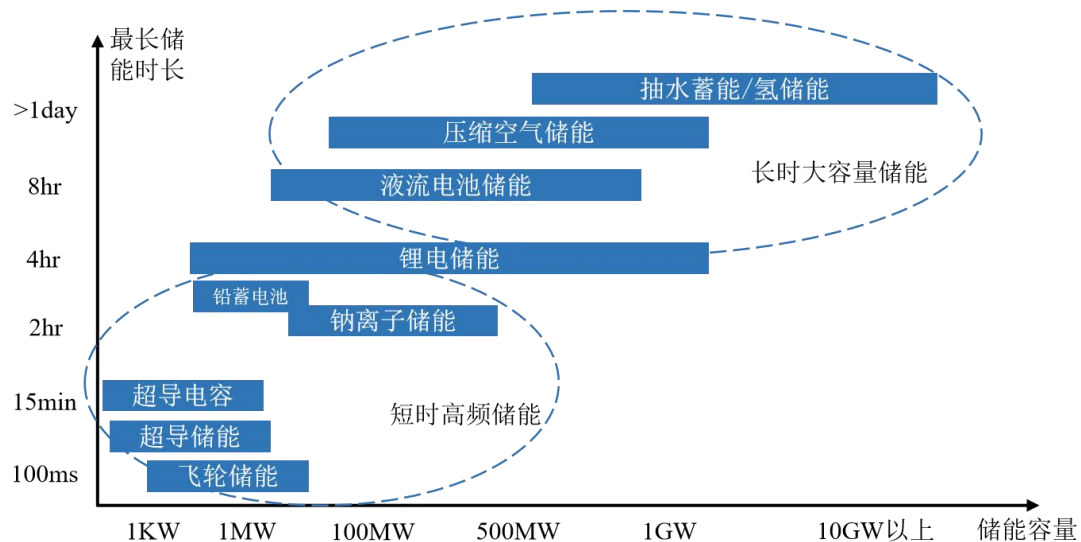


图 5 储能的分类

参考文献:

- [1]Jeremy Twitchell , Kyle DeSomber .Defining long duration energy storage. April, 2023.
- [2]NREL.The Challenge of Defining Long-Duration Energy Storage
- [3]Sandia National Laboratories. ISSUE BRIEF Long-Duration Energy Storage. January 2021.
- [4]Mckinsey Company. Net-zero power Long duration energy storage for a renewable grid[R]. November 2021.

混合直流 (LCC-VSC Hybrid HVDC)

撰稿：吴国旻、朱艺颖、王姗姗

在电力系统中，通常是指两种及以上不同工作原理换流器，通过不同的接线方式和拓扑结构进行结合，形成兼具各自优点、具备更为复杂控制响应特性的直流输电系统。上述换流器包含 LCC(line-commuted converter) 换流器、VSC (voltage source converter) 换流器、可关断电流源型直流 (Controlled-LCC, CLCC) 与特高压直流多源自适应换相换流器(self-adaption statcom and line commutation converter, SLCC)等。

直流输电 (high voltage direct current, HVDC) 技术包括常规直流输电技术、柔性直流输电技术和混合直流输电技术。常规直流输电技术具有输送容量大、输送距离远、造价成本低等优点，但存在逆变站易发生换相失败以及无法向弱交流电网供电等问题。常规直流输电技术发展已经非常成熟，电压等级已达到 1100kV，电流最大可达到 6250A。

柔性直流输电技术目前正处在快速发展阶段，具有良好的动态无功支撑能力、优良的功率调节特性和灵活的组网结构等特点；同时也存在通流能力相对较弱、换流器损耗较大、系统造价昂贵，以及无法有效解决直流故障后的隔离和恢复问题等缺点，制约了其在长距离、大功率输电场合的运用。

两种直流输电技术存在各自的技术或经济性优势与缺陷，适用于不同的应用场合。为了更好地结合两种不同类型直流输电技术各自的技术优势，有效扩展直流输电系统的适用范围，高压大容量混合型

直流输电技术成为国内外研究的热点方向。

国外方面, Z. Zhao 和 M. R. Iravani 最早于 1994 年提出了混合直流输电的概念, 称为混合高压直流 (hybrid-HVDC) 输电系统。这种混合直流拓扑送端由 LCC 换流器构成, 受端由采用门极可关断器件 (Gate Turn Off, GTO) 的 VSC 换流器构成, 解决了由于受端交流系统较弱导致的易发生换相失败的问题^[1]。

2005 年, Qahraman B, Gole A 等提出了新的混合直流输电系统概念, 即由 LCC 与 VSC 换流器相串联组成逆变侧, 通过控制串联的 VSC 提高逆变侧所连交流电网的电压支撑能力, 从而提高 LCC 换相失败的抵御能力。该混合直流系统因 LCC 的单向导电特性, 具有较强的交直流故障穿越能力, 但拓扑结构控制复杂, 单个换流器故障会导致整个直流输电系统停运, 可靠性较差^[2,3]。

2007 年, Petter T, Raffel H, Orlik B 等提出了并联混合直流输电系统的概念, 即将 LCC 和 VSC 并联, 组成混合直流输电系统的一端。由于 VSC 能够产生无功功率增强换流站母线电压稳定性, 改善系统动态性能, 使 LCC 能够应用于弱交流系统。同时, 这种方式还可以利用 VSC 的有源滤波作用, 大大减小 LCC 对系统造成的谐波影响。但并联换流器型混合直流输电系统并不能完全避免 LCC 的换相失败风险^[4]。

2015 年, ABB 正式交付了 Skagerrak 4 HVDC Light 工程。该工程在挪威和丹麦之间原有的三极 Skagerrak LCC-HVDC 的基础上, 建立采用 VSC-HVDC 的第四极, 是世界首个投运的混合直流工程。

Skagerrak 4 的 VSC 与 Skagerrak 3 的 LCC 逆变站连接在共同的交流母线上, 利用 VSC 的无功-电压调节能力, 增强 Skagerrak 3 逆变侧电网强度, 从而减小 LCC-HVDC 极换相失败的概率^{[5]-[7]}。

国内方面, 徐政团队 2012 年提出了一种混合型直流输电系统结构, 送端采用 LCC, 受端采用半桥子模块 MMC, 在逆变侧的直流出口处装设大功率二极管阀组以清除直流侧故障^[8]。2014 年, 为了解决交流故障下的功率续传和直流故障下的自清除能力, 进一步提出了逆变站采用半桥和全桥子模块混合的混杂式 MMC^[9]。2016 年, 提出了两侧均采用 12 脉动 LCC 和半桥子模块 MMC 串联的混合型直流输电系统结构, 其中, LCC 为高端换流器, MMC 为低端换流器, 在保持串联换流器型优点的同时, 提高了系统的可靠性^[10]。

赵成勇团队于 2012 年提出了 LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 组成的并联混合双馈入支路输电系统, 可有效改善交流母线电压, 同时降低 LCC-HVDC 子系统的暂态过电压, 减少换相失败风险^[11]。2014 年又提出了 LCC-MMC 混合直流系统, 送端站为 LCC, 受端站采用足够比例全桥子模块 MMC, 在保证直流故障处理能力的同时降低了成本^[12]。2015 年, 进一步提出了逆变站采用 LCC-MMC 串联的混合直流概念^[13]。

2021 年, 国家电网有限公司辛保安指出, 混合直流输电技术是结合常规直流输电技术与柔性直流输电技术的新型输电技术, 具备两种直流输电技术特点, 技术方案多样。从串并联结构角度, 可将混合直流输电技术划分为并联混合型直流输电、串联混合型直流输电两种

技术方案。从换流器技术路线角度，可将混合直流输电技术划分为 LCC 整流型混合直流输电、VSC 整流型混合直流输电两种技术方案 [14]。

2021 年，昆柳龙混合直流输电工程投运，直流电压等级达到 $\pm 800\text{kV}$ ，输送总容量达到 8000MW。该工程采用并联混合、LCC 整流型技术方案，送端站为 LCC，两个受端站为 VSC，受端站容量分别为 3000 MW 与 5000 MW^[15]。

2022 年，白鹤滩—江苏混合直流输电工程投运，直流电压等级达到 $\pm 800\text{k}$ ，输送总容量达到 8000 MW，世界上首次采用常规直流和柔性直流混合级联技术。该工程采用串联混合、LCC 整流型技术方案，送端站为 LCC，受端站为高压侧 LCC 串联低压侧 VSC，受端站 LCC 总容量为 4000 MW，VSC 总容量为 4000 MW，其中每一极 VSC 又由 3 个换流器并联组成^[16]。

综上，不同学者在不同时期从多个角度对混合直流概念进行了相关定义。因此，从电网实际安全稳定运行需求出发，将混合直流定义为“两种及以上不同工作原理换流器，通过不同的接线方式和拓扑结构进行结合，形成兼具各自优点、具备更为复杂控制响应特性的直流输电系统。”上述换流器包含 LCC(line-commuted converter)换流器、VSC (voltage source converter) 换流器、可关断电流源型直流 (Controlled-LCC, CLCC) 与特高压直流多源自适应换相换流器 (self-adaption statcom and line commutation converter, SLCC)等。

参考文献:

- [1] ZHAO Z, IRAVANI M R. Application of GTO voltage source inverter in a hybrid HVDC link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994,9(1):369-377.
- [2] B. Qahraman, A.M. Gole. A VSC based series hybrid converter for HVDC transmission[C]. 2005 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, May 14,2005,458-461.
- [3] 李程昊. 混合直流输电系统拓扑结构及关键技术研究[D]. 华中科技大学博士论文, 2015,5.
- [4] Petter T, Raffel H, Orlik B. Parallel operation of thyristor- and IGBT-based HVDC. 2007 European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2007), vol.7
- [5] 许冬. 混合多端直流输电运行特性研究[D]. 华北电力大学博士论文, 2017,6.
- [6] 杨睿璋. 适用于大容量功率馈入的混合级联换流阀拓扑及控制研究[D]. 华中科技大学硕士论文,2020.6.
- [7] Åsa M Halvorsdatter Kjørholt. HVDC Transmission Using a Bipolar Configuration Composed of an LCC and MMC[D]. Norwegian University of Science and Technology, 2014.
- [8] LCC-MMC 混合高压直流输电系统. 唐庚,徐政,薛英林等, 电工技术学报,2013,10 (28) ,301-310.
- [9] 许烽, 徐政. 基于 LCC 和 FHMMC 的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术, 2014,8(40), 2520-2530.
- [10] 徐政, 王世佳, 李宁璨,等. 适用于远距离大容量架空线路的 LCC-MMC 串联混合型直流输电系统. 电网技术. 2016, 1(40):55-63.
- [11] 郭春义, 赵成勇, Allan Montanari, Aniruddha M.Gole, 肖湘宁. 混合双极高压直流输电系统的特性研究. 中国电机工程学报. 2012,4(32),98-104.
- [12] 赵成勇,郭春义,刘文静. 混合直流输电[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [13] 郭春义,赵成勇,彭茂兰,刘炜. 一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统. 中国电机工程学报,2015,9(35):4345-4352.
- [14] 辛保安, 郭铭群, 王绍武, 厉璇. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践. 2021, 11(45):1-8.
- [15] 束洪春, 赵红芳, 张 旭. 昆柳龙混合直流工程送端换流站电气主接线可靠性分析. 电力系统自动化, 2021, 11(45):115-123.
- [16] 雷霄, 杨立敏, 朱艺颖, 等. 白鹤滩—江苏特高压混合级联直流工程数模仿真平台构建及特性研究. 电网技术, 2024,1(48): 434-442.

大电网全电磁暂态仿真 (Large Power Grid Full Electromagnetic Transients Simulation)

撰稿：彭丽、穆清

大电网全电磁暂态仿真是对大电网及接入的电力设备全部采用考虑电磁暂态时间尺度动态特性的数学模型,利用数值计算方法对各种运行条件和扰动下从微秒至数秒之间的电磁暂态动态进行模拟的仿真技术,以考察分析系统的稳定性、可靠性和安全性。

电磁暂态仿真技术起源于对电力系统中电磁暂态过程的模拟需求,特别是为了分析由故障和开关操作等引起的电压和电流的瞬态变化。最早的电磁暂态仿真工具(BPA-EMTP)由 H. W. Dommel 在 1966 年于美国能源部下属的 Bonneville Power Administration(BPA)完成。这项技术的发展与计算机模拟技术的进步紧密相关,随着系统运行电压的提高,对电磁暂态分析的需求也日益增长。

在 20 世纪 20 年代,所有的瞬态分析和预测都是基于理论手工计算。到了 1970 年代,随着数字计算机的普及,大量的工程研究开始进行,其中包括对不同瞬态仿真方法的研究,如在法国电力公司(EDF)、魁北克水电研究所(IREQ)和日本电力中心研究所(CRIEPI)的瞬态网络分析器(TNAs)。这些研究表明,电磁暂态仿真程序(EMTP)是最强大和有用的工具。

电磁暂态仿真技术的发展也与电力系统瞬态现象的研究密切相关。例如,1854 年 Lord Kelvin 为了研究计划中的跨大西洋电话电缆上的信号失真问题,推导出了“Kelvin arrival curve”,这是与电力系

统瞬态相关的第一个工作。1926 年，由于雷击导致的变压器故障，促使了将瞬态分析应用于高压电力系统。

英国工程技术学会(IET)2003 年出版的专著《Power Systems Electromagnetic Transients Simulation》指出“真正为电力系统电磁暂态计算机仿真建立永久性基础框架的是 H. W. Dommel 博士所撰写的 IEEE 经典论文《Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks》(1969)”。电力系统运行涉及系统中各种元件之间连续的机电、电磁能量转移和分配。在系统正常运行状态下，在阻抗恒定和系统拓扑结构不变的条件下，这种能量交换不需要特别明确地进行，系统行为可仅由频域的电压和电流相量来表征。但是，操作事件和系统故障后的能量交换将引起电流或电压的大范围波动，回路中的设备将承受更大的冲击或影响。因此，对电流或电压暂态行为的准确预测成为电力系统暂态仿真的主要目的。

图 6 给出了电力系统暂态过程的典型时间范围。图中偏左侧的部分主要涉及系统中电感磁场和电容电场之间的相互作用，它们被称为电磁暂态；图中偏右侧的部分主要受存储在旋转电机中的机械能量和存储在网络中的电能量之间相互作用的影响，它们被称为机电暂态。中间部分属于灰色地带，也就是暂态稳定区域，同时受到上述两种作用的影响，系统分析时要依据具体情况进行合理和充分的表述。

一般来说雷击故障会产生最高的电压冲击，这决定了设备的绝缘水平。但是，当运行在 400kV 及以上电压等级时，系统内部过电压（例如空载输电线路合闸过电压）也常常成为影响设备绝缘配合的决

定因素。

从系统分析的角度看，电磁暂态问题涉及求解一组满足基尔霍夫定律的一阶微分方程组，它描述了 RLC 电路受到特定激励之后的动态行为。

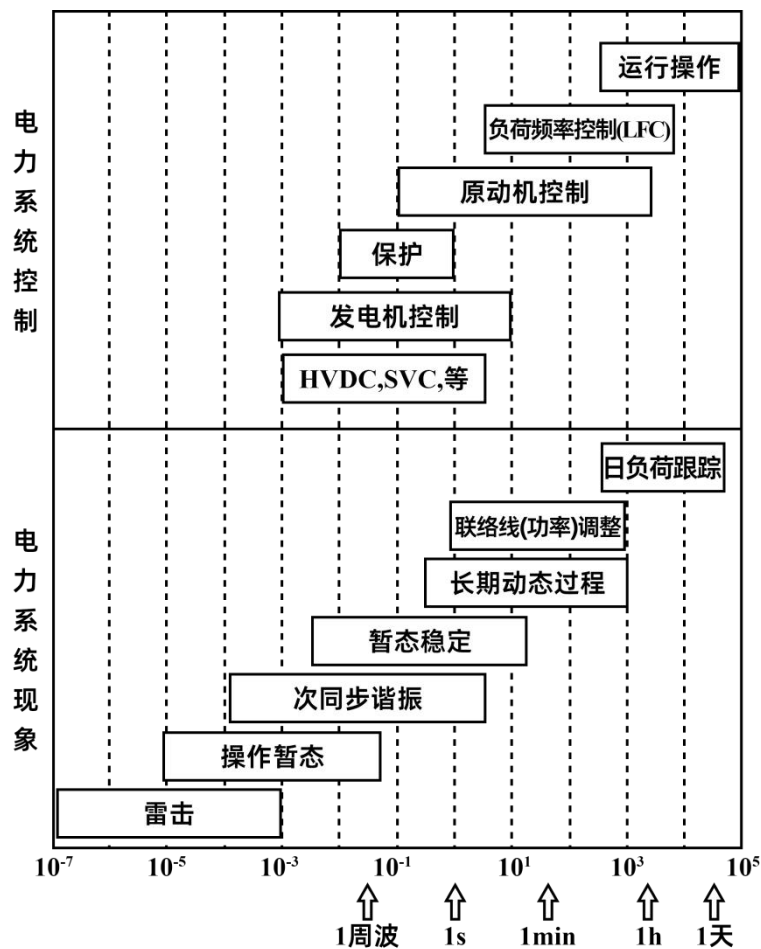


图 6 各种暂态现象的时间范围

H. W. Dommel 教授 1986 年著的《EMTP theory book》的译序指出：电力系统的规划、设计、运行，电机、电器设备的研制都必须对电力网络进行研究。电网研究的内容通常有：短路分析，潮流分析，稳定分析，电磁暂态分析。其中电磁暂态分析是最新的也是最为复杂的课题。研究电磁暂态问题可用物理模型和数字程序。电磁暂态分析程序 EMTP 便是目前国际通用的一种数字程序，它规模大，功能强，

最初由加拿大不列颠哥伦比亚大学（UBC）的 H. W. Dommel 教授创立，又经过很多专家的共同努力而日臻完美。美国邦纳维尔电力局（BPA）对程序的开发作出了很大的贡献。近年来成立的包括美国、加拿大、日本及欧洲一些国家在内的 EMTP 联合发展中心（DCG）和在欧洲成立的另一个 EMTP 用户协会（LEC），都还在为该程序的改进提高和推广普及进行着大量工作。”

2014 年周孝信院士等著的《电力系统并行计算与数字仿真》指出“电磁暂态过程主要指各元件涉及的电场和磁场以及相应的电压和电流变化的过程。电磁暂态过程仿真的主要目的在于分析和计算故障或操作后可能出现的暂态过电压和过电流，以便对电力设备进行合理设计，确定已有设备能否安全运行，并研究相应的限制和保护措施。此外，对于研究新型快速继电保护装置的動作原理，故障点探测原理以及电磁干扰等问题，也常需进行电磁暂态过程分析。由于电磁暂态过程变化很快，一般只需分析和计算持续时间在毫秒级以内的电压、电流时值变化情况，因此，分析中需要考虑元件的电磁耦合、计及输电线路分布参数所引起的波过程，有时还要考虑线路三相结构的不对称、线路参数的频率特性以及电晕等因素的影响。这类电力系统现象变化快，持续时间短，而急剧变化过程中振荡频率往往高达几千赫兹。在电磁暂态仿真中通常采用时域瞬时值分析计算。”

2022 年汤涌和刘文焯著的《电力系统全电磁暂态仿真》中，指出“电磁暂态仿真是用数值计算方法对电力系统中从微秒至数秒之间的电磁暂态过程进行仿真模拟。电磁暂态仿真一般应考虑输电线路参

数的分布特性和频率相关特性、发电机的电磁和机电暂态过程以及一系列元件(避雷器、变压器、电抗器等)的非线性特性。因此,电磁暂态仿真的数学模型必须建立这些元件和系统的代数或微分、偏微分方程,工程上一般采用的数值积分方法为隐式积分法。

电磁暂态仿真程序主要针对: ①由系统外部引起的暂态过程,如雷电过电压等; ②由故障及操作引起的暂态过程,如操作过电压、工频过电压等; ③谐振暂态过程,如次同步谐振、铁磁谐振等; ④控制系统暂态过程,如一次与二次系统的相互作用等; ⑤电力电子装置(包括风力发电机组、太阳能光伏发电机组、直流输电、柔性交流输电系统(FACTS)相关装置等)中的开关快速动作和非正弦量的暂态过程等进行数字仿真。

由于电磁暂态仿真不仅要求对电力系统的动态元件采用详细的非线性模型,还要计及输变电网络的暂态过程,需采用微分方程描述,电磁暂态仿真程序的仿真规模受到了限制。一般对大规模电力系统进行电磁暂态仿真时,都要对电力系统进行等值化简。”

电磁暂态仿真目前普遍采用的是电磁暂态程序(electromagnetic transients program, EMTP),其特点是能够计算具有集中参数元件与分布参数元件的任意网络中的暂态过程。程序中采用的模型及计算方法对计算机的适应性强,求解速度快,精确度能满足工程计算的要求。1987年以来,EMTP的版本更新工作在多国合作的基础上继续发展,如 ATP-EMTP、EMTP-RV、EPTPE(中国电力科学研究院继续完善版本)。具有与 EMTP 相似功能的程序还有加拿大马尼托巴直流研究中

心的 PSCAD/EMTDC、加拿大哥伦比亚大学(UBC)的 MicroTran 和德国西门子的 NETOMAC 等。

中国电力科学研究院进一步完善和改进了电磁暂态仿真算法，重新开发了 ADPSS 和 PSModel 全电磁暂态仿真软件，具备分网并行、自动建模和初始化能力并且具有很强的电力电子仿真和大规模电力系统仿真能力。

清华大学、清华四川能源互联网研究院、清鸾科技有限公司组成的“产-学-研”联合研发团队共同研发了 CloudPSS (Cloud-based Power System Simulator) 云仿真平台，聚焦于利用云计算和异构并行计算技术对复杂电力系统的电磁暂态行为进行高精度、实时仿真。

全电磁暂态仿真在大电网应用中已初步攻克了电力电子设备精细化建模、分网并行、自动建模和初始化等难题，并成功扩展到大规模电力系统的高效模拟，广泛应用于电网规划和运行优化，为系统的稳定性、可靠性和安全性分析提供了关键支持。然而，当前大电网全电磁暂态仿真仍面临计算规模和效率的瓶颈、数据接口和模型兼容性问题，以及仿真软件普及的限制。未来的发展趋势包括通过云计算、GPU 和 FPGA 等技术提升仿真效率，实现高速实时仿真；结合 AI 技术智能化建模与优化；推动多场景联合仿真以支撑综合决策，并加快开源工具与标准化接口的开发，提升仿真的灵活性与适应性等。

参考文献:

[1] Ametani, A. (2021), Electromagnetic Transients Program: History and Future. IEEJ Trans Elec Electron Eng, 16: 1150-1158. <https://doi.org/10.1002/tee.23192>.

- [2] Watson N, Arrillaga J, Arrillaga J. Power systems electromagnetic transients simulation[M]. Iet, 2003.
- [3] H. W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388-399, April 1969, doi: 10.1109/TPAS.1969.292459.
- [4] H. W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program (EMTP) Theory Book", Bonneville Power Administration, Portland, OR (1981 or 1986 or 1994 or ?).
- [5] H. W. Dommel, 李永庄.电力系统电磁暂态计算理论[M].水利电力出版社,1991.
- [6] 周孝信 -.电力系统并行计算与数字仿真[M].清华大学出版社,2014.
- [7] 汤涌 -.电力系统全电磁暂态仿真[M].科学出版社,2022.

电力系统仿真模型节点数 (Number of Nodes in the Power System Simulation Model)

撰稿：彭丽、田鹏飞

电力系统仿真模型节点数是指电力系统仿真模型中电路网络节点的总数。电路网络节点指电路中电流的汇集点或支路的汇集点。

中华人民共和国国家标准 GB/T 2900.1-2008《电工术语 基本术语》第 3.2.48 节中，对节点的英文表述为“node; vertex(US)”，定义为“连接于或不连接于一个或多个其他支路的支路端点。”

现行企业标准 DL/T 1640-2016《继电保护定值在线校核及预警技术规范》中，定义节点为在电网计算分析等值图中电流的汇集点或支路的汇集点。节点一般对应于运行电网的母线等。

IEEE 14 节点测试案例（https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm）代表了 1962 年 2 月美国电力系统（位于美国中西部）的一部分，是一个简化的模型，用于教育和研究目的。AEP 的 Iraj Dabbagchi 慷慨提供了一份多次复印的纸质数据版本，并由华盛顿大学的 Rich Christie 于 1993 年 8 月输入为 IEEE 通用数据格式。14 节点测试案例没有线路限制。与 90 年代的电力系统相比，它具有较低的基础电压和过多的电压控制能力。

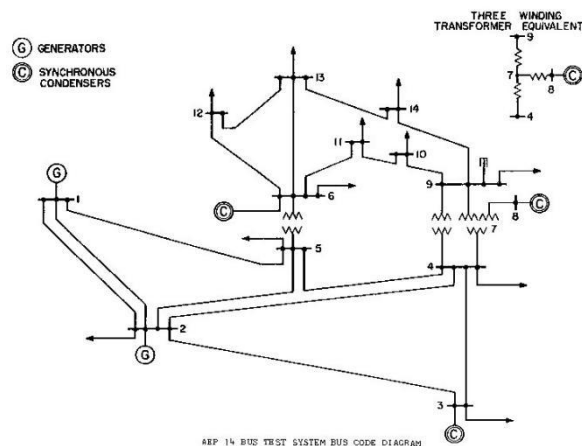


图 7 IEEE 14 节点测试案例

水电部华北电力设计院王明俊在 1965 年电机工程学报发表的《结点阻抗矩阵及其在电力系统计算中的应用》中，指出“电力系统中的许多计算问题（如短路、潮流、稳定等），以往大都是利用结点电压迭代法来求解的。”

江缉光、刘秀成在 1996 年出版的《电路原理》第 1.6 章节介绍基尔霍夫定律时，给出了节点的定义为“三个或三个以上的支路的联接点称为节点”。

邱关源在 1978 年首次出版的《电路》第 1.8 章介绍基尔霍夫定律时，提出“为了简化说明，在本节中把组成电路的每一个二端元件称为一条支路，把支路的连接点称为结点。”

王锡凡在 2003 年出版的《现代电力系统分析》第 1 章“电力网络的数学模型及求解方法”中，指出“电力网络通常是由相应的节点导纳矩阵或节点阻抗矩阵来描述的。在现代电力系统分析中，我们需要面对成千上万个节点及电力网络所连接的电力系统。对电力网络的描述和处理往往成为解决有关问题的关键。电力网络的导纳矩阵具有良好的稀疏特性，可以用来高效处理电力网络方程，是现代电力系统分析

中广泛应用的数学模型。”

李庚银在 2013 年出版的《电力系统分析基础》第 4.1.4 章节中介绍潮流计算的基本方程与节点分类时，指出“按各个节点所已知变量的不同，可以把节点分为以下三种类型：分别是 PQ 节点、PV 节点和平衡节点。

但在第 4.1 章节介绍潮流计算的数学模型时，指出“目前，运用计算机进行电力系统的潮流分布计算时，引用节点电压方程比较普遍，因此，这里限于篇幅，也仅讨论节点电压方程及其有关问题，并进而推出潮流计算的基本方程。”并在后面第 4.1.1 章节中介绍节点电压方程时，指出“在电工原理课程中，已导出了运用节点导纳矩阵的节点电压方程。”可见，在电力系统的潮流分布计算中，采用的潮流计算的基本方程，为电工原理课程中的节点电压方程。

在潮流分析和机电暂态仿真分析中，采用序网络分析。一个三相电气节点对应潮流和机电暂态仿真中的网络节点。而电磁暂态仿真采用分相求解的电路解算方法，根据节点是待求解的节点电压方程中方程维数的定义，电磁暂态仿真的节点数量不能沿用三相电气节点概念。而应该和电磁暂态网络方程中的节点数目一致。考虑现有 EMTP 类仿真软件设计，电磁暂态仿真的节点数应该是网络中的所有单相电气节点数目总和。考虑到新能源和直流内部的电气节点，同样规模电网下电磁暂态仿真的节点数量应该是机电暂态仿真的 3 倍以上。

参考文献:

- [1] GB/T 2900.1-2008. 电工术语 基本术语[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [2] DL/T 1640-2016. 继电保护定值在线校核及预警技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [3] "IEEE 14 Node Test Case". University of Washington Power Systems Test Case Archive, [Online]. Available: https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm. [Accessed: 1993].
- [4] 王明俊. 结点阻抗矩阵及其在电力系统计算中的应用[J]. 电机工程学报, 1965(01):3-22+68. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.1965.01.001.
- [5] 江缉光, 刘秀成. 电路原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [6] 邱关源. 电路 (第 5 版) [M]. 高等教育出版社, 2006.
- [7] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] 李庚银. 电力系统分析基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [9] L. W. Coombe and D. G. Lewis, "Digital Calculation of Short-Circuit Currents in Large Complex-Impedance Networks [includes discussion]," in Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 75, no. 3, pp. 1394-1397, Jan. 1956, doi: 10.1109/AIEEPAS.1956.4499452.

虚拟电厂 (Virtual Power Plant, VPP)

撰稿：李再华、唐晓骏

是一种智能的能源管理系统，通过先进的信息处理、计量、通信、控制等技术和软件系统，实现分布式发电、储能系统、可控负荷、电动汽车等分布式能源资源 (DER) 的智能聚合和协调优化，使这些 DER 作为一个出力和需求高度可控的特殊电厂，灵活参与电力市场和电网集中调度运行，达成电源侧多能互补、电网侧安全稳定、负荷侧灵活高效的目的。

“虚拟电厂”这一术语源于 1997 年美国经济学家西蒙·阿韦布赫 Shimon Awerbuch 博士在其著作《The Virtual Utility: Accounting, Technology & Competitive Aspects of the Emerging Industry》中对虚拟公共设施的定义：一种由独立的、市场驱动的实体组成的灵活聚合体，可以高效为消费者提供能源服务，而不必建设相应的实体设施^[1]。Pudjianto, D 和 Kieny, C 等人支持并拓展了这个概念^[2,3]。

虚拟电厂和能效电厂

有些文献提出了“能效电厂”的概念。能效电厂侧重于需求侧的有效节电，而虚拟电厂包括有效分配和管理 DG 发电、储能充放电，和需求侧的可控负荷^[4]。

虚拟电厂和微网

虚拟电厂和微网都是为解决 DG 及其他元件整合并网而形成的技术路线。微网强调“自治”，而虚拟电厂强调“参与”，即吸引并聚合各种 DER 参与电网调度和电力市场交易，优化 DER 组合以满足电力系统或市场要求为主要控制目标。微网相对于外部大电网表现为单一

的受控单元，既可运行于并网模式，又可运行于孤岛模式；而虚拟电厂始终与公网相连，即只运行于并网模式，与系统相互作用的要求比微网更为严格，可用常规电厂的统计数据 and 运行特性来评价虚拟电厂，如：有功/无功负载能力、出力计划、爬坡速度、备用容量、响应特性和运行成本特性等^[5]。

虚拟电厂的主要技术

虚拟电厂的主要技术主要包括负荷预测、电力市场、智能计量、信息通信、人工智能以及协调控制技术，最具吸引力的功能在于能够聚合 DER 参与电力市场和辅助服务市场运行，为配电网和输电网提供高效的管理和辅助服务。关键技术主要是“聚合”“控制”，提供“能源云”服务（energy cloud service）^[6-12]。虚拟电厂依托的是高度智能化的控制系统，理论响应速度与调节能力也远超传统调峰手段，尤其适合用于以风光为主的电网，发挥其削峰填谷、相互备用的天然优势^[13,14]。

虚拟电厂的发展

目前，虚拟电厂的研究和实施主要集中于欧洲、亚太和北美。根据产品类型，虚拟发电厂主要分为 OC 模型和 FM 模型。FM 模型是最大的细分市场，占有率超过 50%。基于虚拟发电厂（VPP）应用，虚拟发电厂市场应用分为几个主要部分，如商业、工业和住宅。然而，欧洲与美国虚拟电厂的应用形式有着显著的不同，欧洲各国的虚拟电厂亦各具特色。欧洲现已实施的虚拟电厂项目，如欧盟虚拟燃料电池电厂(virtual fuel cell power plant, VF CPP)项目、荷兰基于功率匹配器

的虚拟电厂项目、欧盟 FENIX(flexible electricity network to integrate expected)项目以及德国专业型虚拟电厂(professional VPP, ProViPP)试点项目,主要针对实现 DG 可靠并网和电力市场运营的目标而来, DG 占据 DER 的主要成分。而美国的虚拟电厂主要基于需求响应计划发展而来,兼顾考虑可再生能源的利用,因此可控负荷占据主要成分。

虚拟电厂最显著的特征是兼具“源—荷”特性,既可以作为“正电厂”向系统供电调峰,又可作为“负电厂”加大负荷消纳,配合系统填谷;可快速响应指令,配合保障电网稳定并获得经济补偿,也可直接像传统电厂一样,参与到电力市场交易、电力辅助服务交易等。

从虚拟电厂的功能角度,可以分为商业型虚拟电厂(commercial VPP, CVPP)和技术型虚拟电厂(technical VPP, TVPP)。这种分类也称为运营控制(OC)模式和功能管理(FM)模式。商业型虚拟电厂是从商业收益角度考虑的虚拟电厂,是 DER 投资组合的一种灵活表述。其基本功能是基于用户需求、负荷预测和发电潜力预测,制定最优发电计划,并参与市场竞标。商业型虚拟电厂不考虑虚拟电厂对配电网的影响,并以与传统发电厂相同的方式将 DER 加入电力市场。技术型虚拟电厂是从系统管理角度考虑的虚拟电厂,考虑 DER 聚合对本地网络的实时影响,并代表投资组合的成本和运行特性。技术型虚拟电厂提供的服务和功能包括为 DSO 提供系统管理、为 TSO 提供系统平衡和辅助服务。

商业型虚拟电厂在国外有两种相对成熟的范例可供参考。其一

是欧洲模式，侧重于分布式发电单位，通过参与电力交易来获取收益；另一种是美国模式，侧重于用户端的电力资源，通过提供辅助服务来获取收益。

欧洲模式下，虚拟电厂主要通过提供技术支持，优化发电成本，降低不必要损失，从而收取佣金；或是辅助发电单位接入电网，完成电力交易，获取服务费及溢价部分分成。代表性企业为德国虚拟电厂公司 **Next Kraftwerke**，该公司也是欧洲最大的虚拟电厂运营商。**Next Kraftwerke** 盈利模式大致分为三种，一是向可再生能源发电企业提供服务，协助发电商监测发电情况，节省不必要的成本；二是向电网侧提供短期柔性储能服务，提供来自发电侧的调峰、调频服务赚取收益；三是通过控制需求侧，服务电网侧，以赚取相应费用。截至 2022 年二季度，**Next Kraftwerke** 已管理 14414 个分布式发电设备，包括生物质发电装置、热电联产、水电、风光等多样化设备，总管理规模达到 10836MW。2015 年，美国的特斯拉就推出了家用储能设备电力墙（**PowerWall**）。**PowerWall** 内置 18650 锂电池，有 7 千瓦时和 10 千瓦时两种配置，通过太阳能发电进行储能。在加利福尼亚，**PowerWall** 用户每向电网输送 1 度电，就可以获得 2 美元奖励。

美国模式中，能源零售商开展虚拟电厂计划，通过提供低价储能电池或现金，换取家庭一部分电力的控制权，必要时给零售商提供电力，零售商的虚拟电厂聚合这些储能并在用电高峰期提供给需要的用户，从而获取辅助服务收益。

根据 QYResearch（恒州博智）公司公布的数据，2023 年，全球

虚拟电厂容量约 3 千万千瓦，市场销售额达到了 59 亿元，核心厂商包括施耐德电气 (AutoGrid)、西门子 (Siemens)、通用电气 (Enbala)、通用电气数字能源 (GE Digital Energy) 和 ABB。排名前五的公司持有约 85% 的市场份额。欧洲是最大的市场，份额超过 50%，其次是亚太和北美，份额分别约为 25% 和 20%。预计亚太将成为发展最快的区域^[15]。

2015 年 8 月，国网江苏公司发布首个需求响应细则，推动了中国虚拟电厂发展^[16]。

国网冀北电力公司 2019 年投运的虚拟电厂示范工程为例是我国第一个市场化运营的虚拟电厂工程^[17]。该电厂聚合了张家口、秦皇岛、承德、廊坊地区的可调节工商业、蓄热式电锅炉、智慧楼宇、储能等资源，主要参与华北调峰辅助服务市场的运营。一方面，在凌晨 4 时至 6 时风力大发期间，虚拟电厂控制蓄热式电锅炉、储能、电动汽车等分布式资源储存电力，到了晚上 7 时至 8 时用电高峰期，再将储存起来的这部分电力提供给电网；另一方面，虚拟电厂还可将商业楼宇空调等柔性负荷降下来，减少负荷需求。

2022 年 8 月 26 日，我国首家虚拟电厂管理中心在深圳揭牌，它接入分布式储能、数据中心、充电站、地铁等类型负荷聚合商 14 家，接入容量达 87 万千瓦，接近一座大型煤电厂的装机容量。该虚拟电厂可在电力供应紧张时段，直接调度分散的充电桩、空调、储能等用电资源^[18]。

2023 年，厦门“虚拟电厂”平台已聚合 600 多家参与主体约 42 万

千瓦可调资源，相当于 8 万户居民的用电容量。厦门“虚拟电厂”负荷类型包括空调、储能、电动汽车充电桩、生产设备、自备发电机、5G 基站等。运行统计显示，可实时调节负荷量位居前三位的分别是电动汽车充电桩、自备发电机和空调。

根据相关研究预测，我国虚拟电厂市场规模将在未来几年内持续扩大。到 2025 年，我国虚拟电厂市场规模有望达到百亿元级别。其中，分布式能源资源整合、智能调度系统、电力市场交易等环节将成为市场规模扩大的主要驱动力。许继电气、国电南瑞、国网信通、国电南自等厂商均有一定的技术储备。

我国虚拟电厂仍处于早期阶段，主要由政府部门牵头，各个聚合商参与，共同完成整个流程。但现下的虚拟电厂总体还处于试点示范阶段，缺乏统一的标准和更细化的政策。

虚拟电厂向上接入电网听令调度，向下连接资源分配指令，存在三个难度。难度一，虚拟电厂中设施、设备的空间分布和网状链接，与现实运行中的电网层级调度不相容；难度二，大电网安全运行是保障经济运行的命脉，需万无一失，虚拟电厂必须经过一系列严格的安防措施才能和电网对接。难度三，接入资源设备通信系规约不一致，如果不做整改则无法统一管控，而涉及的改造成本颇高。

参考文献

- [1] Awerbuch S , Preston A .The Virtual Utility: Accounting, Technology & Competitive Aspects of the Emerging Industry[M]. 1997.
- [2] Pudjianto, D.; Ramsay, C.; Strbac, G.; Virtual power plant and system integration

of distributed energy resources Renewable Power Generation, IET. Volume 1, Issue 1, March 2007:10 -16.

[3] Kieny, C.; Berseneff, B.; Hadjsaid, N.; Besanger, Y.; Maire, J.; On the concept and the interest of Virtual Power. plant: some results from the European project FENIX[C]. Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE26-30 July 2009:1 – 6.

[4] 高绘彦,范宏.能效电厂的发展及应用研究综述[J].智能电网,2015,3(12):1202-1208.

[5] 卫志农,余爽,孙国强,等.虚拟电厂的概念与发展[J].电力系统自动化,2013,37(13):1-9.

[6] 牛东晓,赵东来,杨尚东,等.考虑不确定性和储能系统的虚拟电厂与能效电厂联合调度优化模型及仿真应用[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(07):1736-1743.

[7] 艾芊. 虚拟电厂----能源互联网的终极组态 [M].北京: 科学出版社, 2019.

[8] 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(07):1893-1904+2205.

[9] 郭剑波,王铁柱,罗魁,等.新型电力系统面临的挑战及应对思考[J].新型电力系统,2023,1(01):32-43.

[10] 田立亭,程林,郭剑波,等.虚拟电厂对分布式能源的管理和互动机制研究综述[J].电网技术,2020,44(06): 2097-2108.

[11] 方燕琼,艾芊,范松丽. 虚拟电厂研究综述[J].供用电,2016,33(04):8-13.

[12] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等.新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(18):3-14.

[13] 陈闯雷(果壳硬科技). 虚拟电厂: 既不虚拟,也不发电,更不建厂[EB/OL]. <https://news.pedaily.cn/202209/500889.shtml>. 2022-09-20.

[14] 钟永洁,纪陵,李靖霞,等. 虚拟电厂基础特征内涵与发展现状概述[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6):12.

[15] QYResearch(恒州博智).2023 年全球虚拟电厂行业总体规模、主要企业国内外市场占有率及排名[EB/OL]. <https://weibo.com/u/6268665176>. 2023-12-25.

[16] 江苏省经济和信息化委员会电力能源处.江苏省电力需求响应实施细则(试行) [S]. 2015.

[17] 王宣元,刘蓁.虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践[J].电力系统自动化,2022,46(18):158-168.

[18] 新华网.虚拟电厂管理中心在深圳成立,特来电成为负荷聚合商[EB/OL]. <http://www.xinhuanet.com/auto/20220829/db342a6e7247487c8a176cd5b53ded19/c.html>. 2022-08-29.