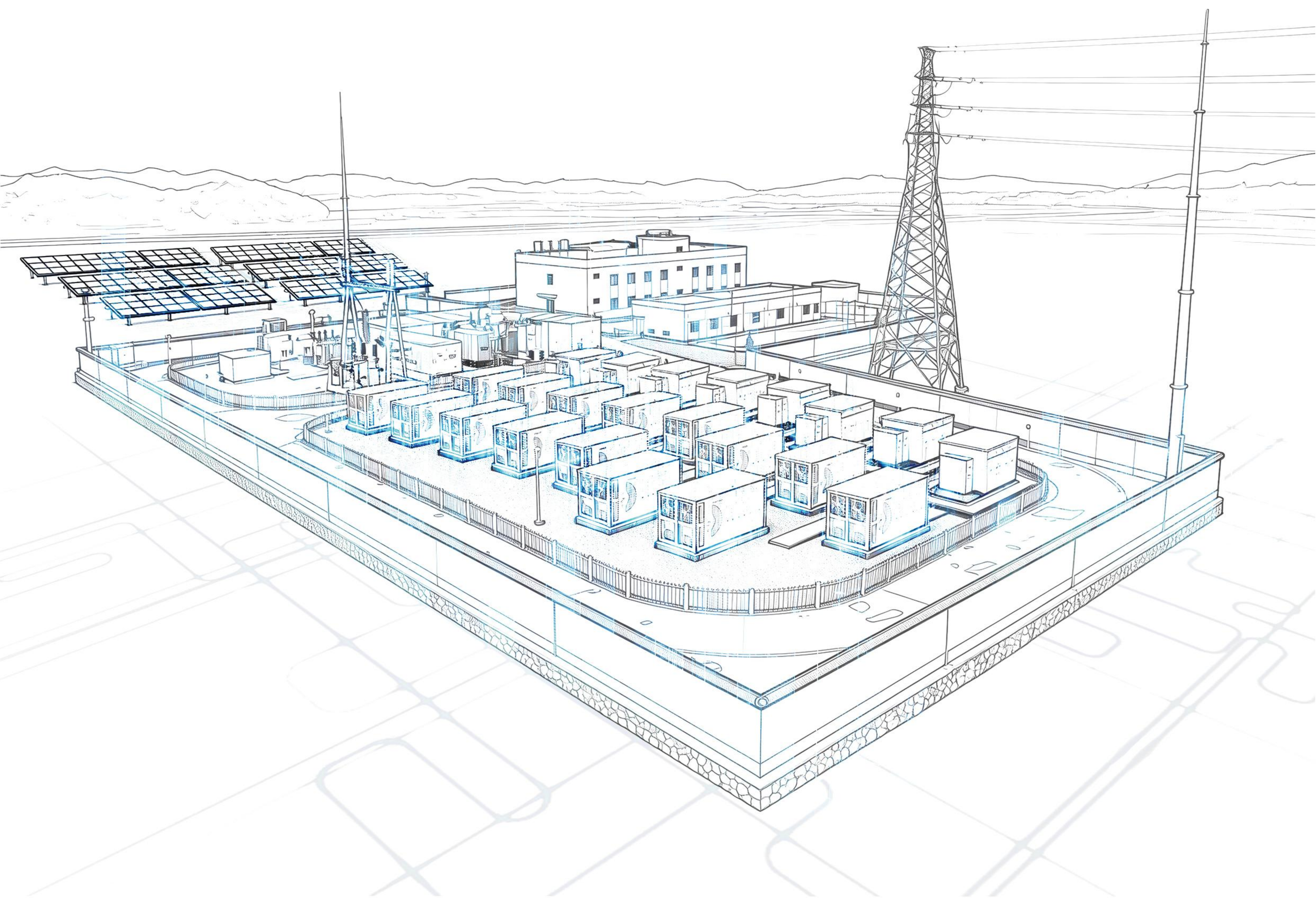


构网型储能系统 白皮书



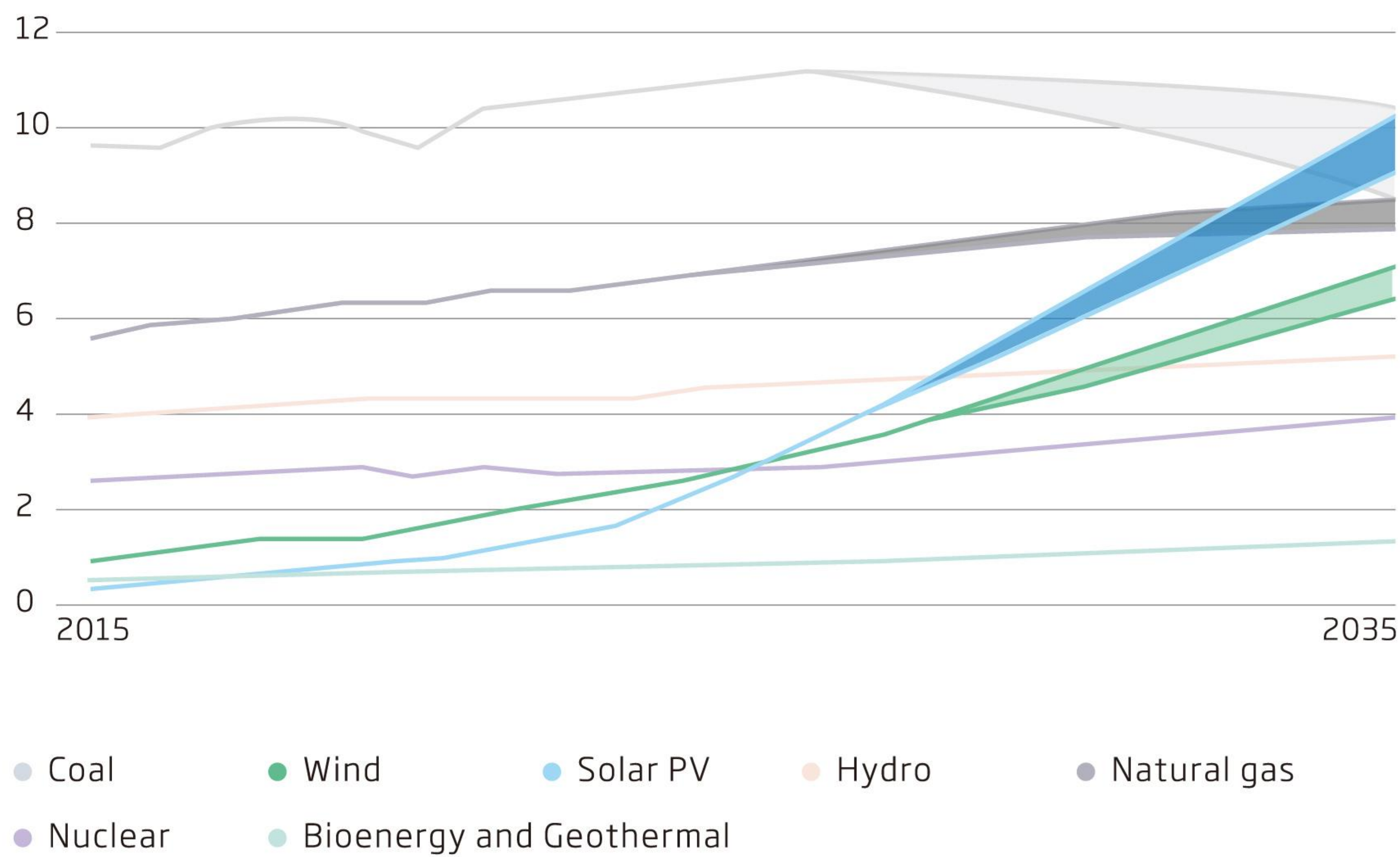


前言

全球能源转型的浪潮，正以前所未有的力度重塑电力工业的底层逻辑。“双碳”目标引领下，可再生能源正在从能源系统的“补充力量”转变为主力电源。根据IEA预测，在电力领域，可再生能源的渗透率将从2024年的32%升至2030年的43%，风光发电占比翻倍至28%，“双高”特征凸显。可再生能源的大规模并网，新能源的间歇性与波动性，以及电力电子设备“低惯量、弱支撑”的固有特性，正在深刻改变电力系统的运行机理。电网的稳定性面临着巨大挑战，亟需构网技术的支撑。

天合储能创新性提出针对构网场景的整体化解决方案，完整呈现EMS、PCS、直流舱在构网场景中的协同，实现从“设备级功能”到“系统级能力”的跃迁，为构建更强、更智能的新型电力系统贡献力量。

2015-2035年全球电力生产情况预测



目录

1.电网稳定概念与构网技术	01
1.1 电网强弱的衡量指标	01
1.2 影响电网稳定的关键因素	02
1.2.1 电网规模	02
1.2.2 电源类型	03
1.2.3 负载类型	03
1.3 电网波动类型	04
1.3.1 频率波动	04
1.3.2 电压波动	04
1.3.3 功角扰动	04
1.4 主流构网技术及差异分析	05
1.4.1 小型调相机	05
1.4.2 构网型静止无功补偿器 (SVG)	06
1.4.3 构网型静止调相机 (SSC)	07
1.4.4 构网型储能	07
2.构网型储能的概念与挑战	08
2.1 构网型储能的基础概念：电网的“智能锚点”	08
2.1.1 与跟网型储能的比较	08
2.1.2 电压源与频率源特性：主动建立电网的“节奏与张力”	09
2.1.3 虚拟惯量与阻尼模拟：为电网注入“物理记忆与镇定剂”	10
2.1.4 强大的过流与短路支撑能力：提供亟需的“电网强度”	11
2.1.5 黑启动能力：电网的“生命火种”	12



2.2 当前的技术挑战	12
2.2.1 多模式无缝切换与稳定	12
2.2.2 频率响应的多时间尺度耦合	13
2.2.3 电压支撑与无功管理的动态协调	13
2.2.4 黑启动场景下的技术瓶颈	14

3.天合构网型储能解决方案	15
3.1 构网根基：储能电池舱	15
3.2 电网扰动下零感知自适应控制技术	17
3.3 多尺度频率响应协同控制技术	20
3.4 全范围电压重构技术	24
3.5 全过程黑启动技术	27
3.6 保障：端到端的系统集成验证能力	28
3.6.1 天合垂直一体化系统集成布局	28
3.6.2 20MVA实证测试中心	29

4.构网项目案例	31
4.1 PGT 250MW/500MWh	31
4.2 Atlas 250MW/1000MWh	32

1. 电网稳定概念与构网技术

电网稳定是指电力系统在受到扰动后，仍能维持频率、电压、功角等关键参数在允许范围内并在一定时间内恢复平衡。如果电网不稳定，可能导致频率骤降、电压崩溃等，甚至大面积停电，给电力供应、工业生产和社会生活带来巨大风险。2021年法国因持续高温引发山火，导致跨国输电线路连锁故障，区域电网频率大幅下降，触发低频减载系统，大量负荷被切除，给当地工业生产和居民生活带来严重影响。



1.1 电网强弱的衡量指标

电网强弱是衡量电力系统抵抗扰动、支撑电压和保持同步能力的重要指标。强电网意味着系统惯量大、短路容量高，弱电网则相反。衡量电网强弱的指标主要包括以下内容。

短路比

短路比 (SCR)，是衡量电网强弱的“脉搏指标”，定义为系统中短路容量与所接入电源容量的比值。当短路比大于3时，电网如磐石般强劲。此时系统惯量充足，电压支撑稳固，面对扰动从容不迫、韧劲十足；当短路比低于2时，电网则如薄冰般脆弱。系统对外界扰动异常敏感，轻微波动都可能引发电压与频率的剧烈振荡，甚至导致系统失稳。

系统惯量

系统惯量,是电力系统所有同步发电机转动质量的综合体现。当系统惯量充裕时,频率如平静湖面,波动徐缓悠长,为调频响应留足了宝贵时间;而当惯量稀缺时,频率则如惊弓之鸟,瞬间飞掠,调频难度陡增,系统随时面临低频或高频的悬崖风险。

阻抗特性

系统阻抗比(X/R 比),决定了电网对电流变化的响应特性,直接影响着电压的稳定。当 X/R 比高时,电网如钢筋铁骨,对电压的支撑能力强劲,电压与功率变化各自独立、不易纠缠;当 X/R 比低时,电网则如软泥筑堤,电压可能快速坍塌,甚至引发振荡连锁,危及系统安全。

1.2 影响电网稳定的关键因素

稳定不仅仅是电网自身强弱,还受到电网规模、电源结构和负载类型的影响。

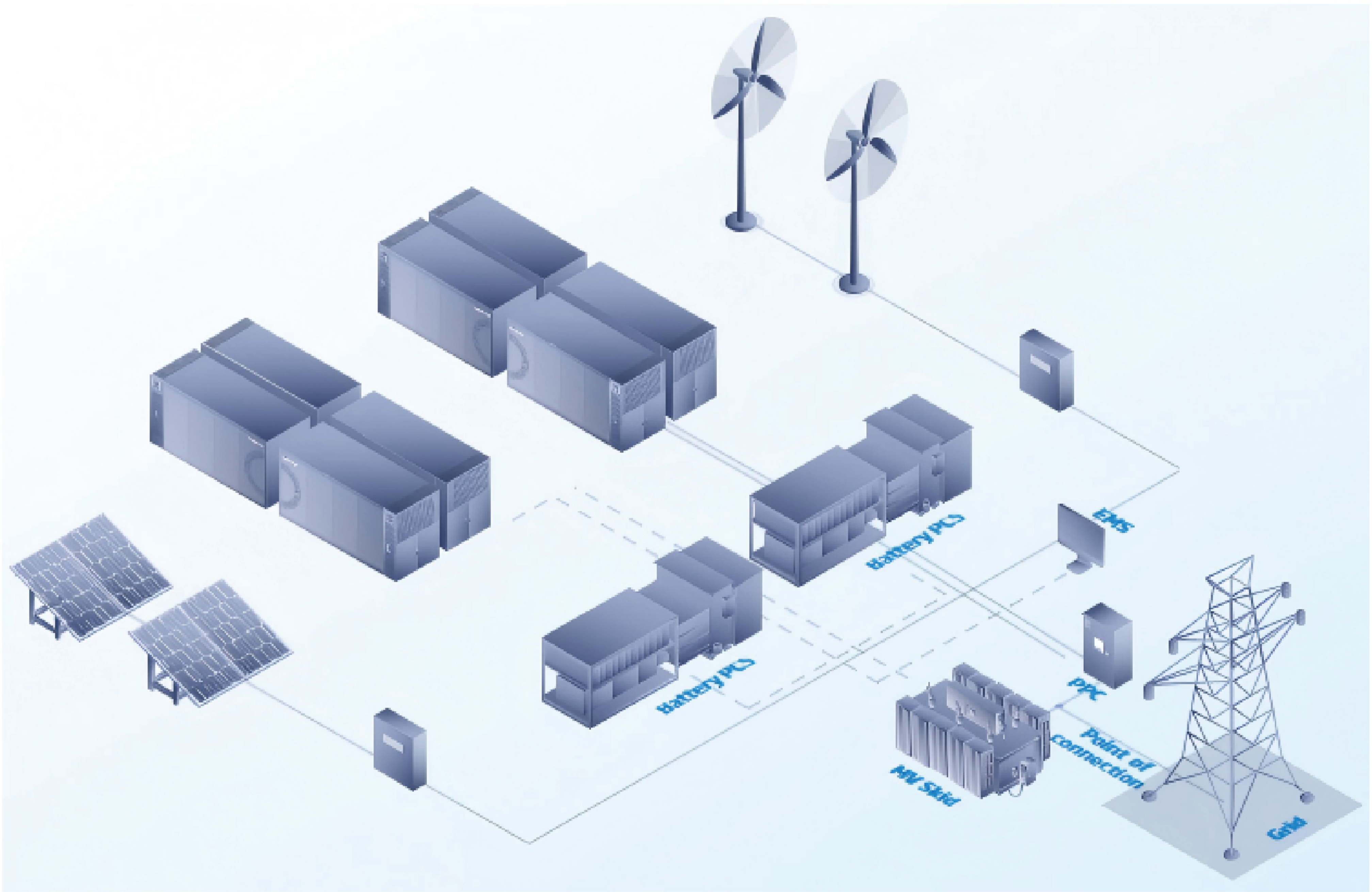
1.2.1 电网规模

电网规模可直接影响系统惯量与稳定性。大型电网的系统规模大,多发电单元分布,惯量高,扰动影响易被分散。而小型孤网则相反,调节资源有限,频率与电压波动幅度大,容易失稳。



1.2.2 电源类型

在电力系统中,不同类型的电源对电网稳定性的贡献存在本质差异。传统同步机组(如火电、水电)凭借物理转子提供的天然惯量和短路电流能力,自发支撑频率与电压,是传统电网稳定运行的基石。跟网型电源则依赖锁相环追踪电网相位,需外部提供电压和频率参考,在强电网中可正常运行,但在弱电网下稳定性显著下降,难以主动支撑系统。构网型电源突破了这一局限,它能够自主建立电压和频率,模拟同步发电机行为主动提供虚拟惯量,支撑功角稳定,尤其适用于弱电网、孤网运行及高比例新能源接入场景,成为新型电力系统稳定运行的关键支撑力量。



1.2.3 负载类型

固定大负载(如城市群、工业区)负荷总量大、密度高,如同蜘蛛网中心悬挂的重物,要求电网具备足够的强度与持续支撑能力;而冲击性负载(如电动汽车快充)则表现为负荷的不规则、突发性增减,持续考验电网的动态响应与瞬时调节能力。

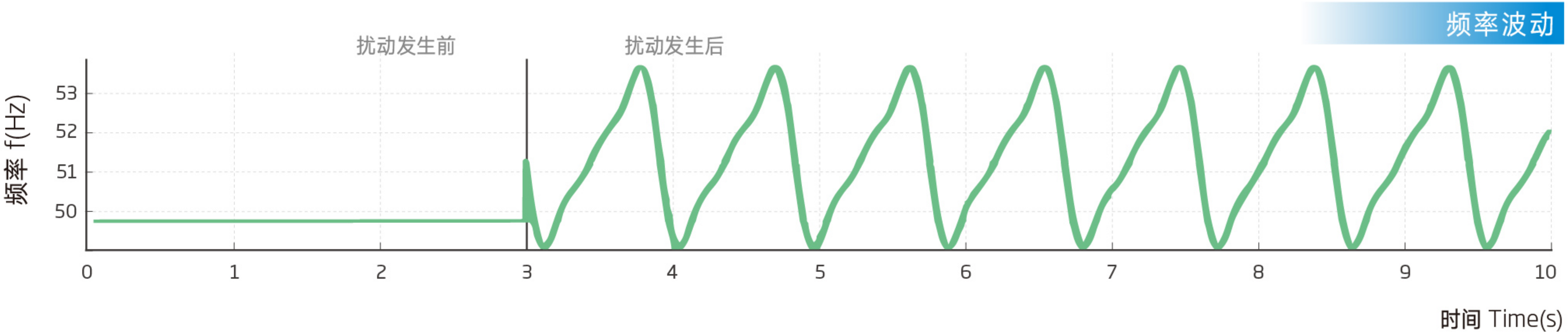
一个规模庞大但结构薄弱的电网,如同一个魁梧但骨骼疏松的巨人;一个结构坚强但规模不足的电网,则像一个骨架精悍但肌肉匮乏的武者。当前电网的发展,正同时面临结构性薄弱点凸显(高比例新能源并网)与系统性冲击增加(冲击性负载越来越多)的双重挑战,这使得电网稳定性问题变得前所未有的复杂和紧迫。

1.3 电网波动类型

电网波动主要分为三类：频率波动、电压波动、功角扰动。这三类波动分别反映系统不同方面的稳定性。

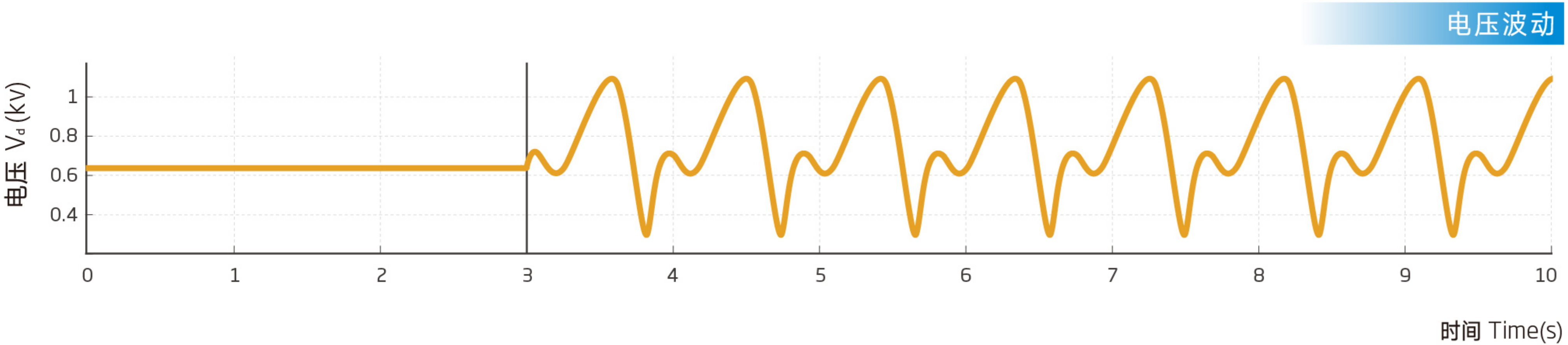
1.3.1 频率波动

频率直接映射着全网有功的实时平衡。传统电网以同步机组为基石，惯量充足，频率波动平缓，调频裕度大。但在新能源高占比时代，系统惯量被大幅削弱，频率变化速率激增，导致调频压力急剧攀升，对电网安全构成了严峻考验。



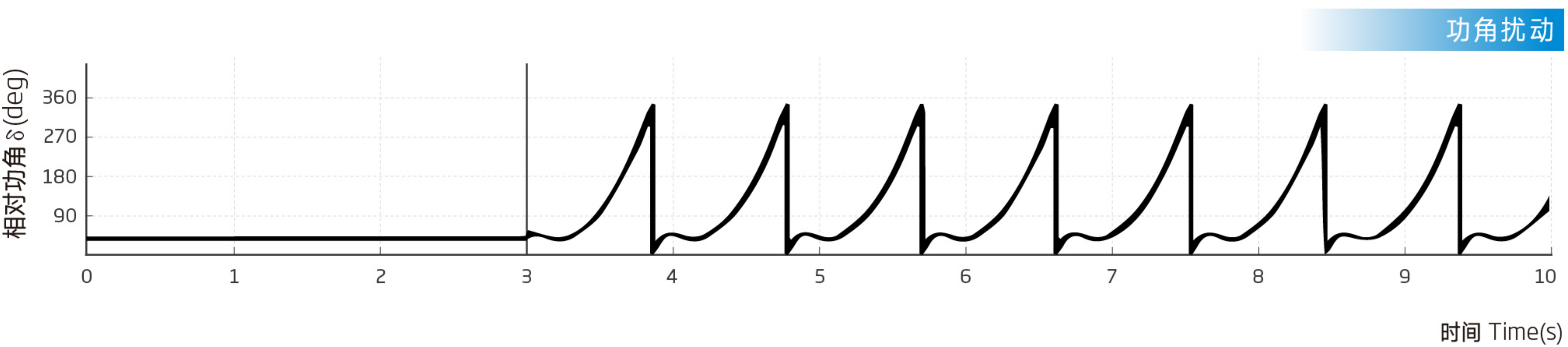
1.3.2 电压波动

电压水平主要由系统的无功功率平衡决定。当无功功率供应不足时，电压支撑便会显得“力不从心”，导致电压跌落。尤其是在远距离输电的末端、大型电机启动瞬间，或是光伏高渗透率接入点，这种电压下降现象更为显著。在弱电网架构下，系统电压的“刚性”不足，微小的扰动都可能引发显著的电压波动，若不及时干预，极易诱发电压崩溃事故。



1.3.3 功角扰动

功角是发电机转子间的相对电角度。当扰动发生时，功角摆动。若摆动持续增长，将导致系统失步。同步机自然提供功角稳定，但新能源系统中，缺少惯量与同步支撑，容易引发低频摆动，进而导致系统失步。



综上所述，当前电网正在经历一场系统的“基因改造”：稳定基石（同步电源）被大量替换为高效但依赖性强的新组件（电力电子电源）。这并非简单的“零件替换”，而是一场深刻的系统性变革。其结果不是“不稳定”，而是电网稳定的范式发生了转移——原本内化于电源物理特性的、“免费”的稳定服务（惯性、电压支撑、短路能力）正在消失，形成巨大的“稳定赤字”。弥补这一赤字，无法通过让新能源“变回”同步机实现，而必须依靠新的技术，通过改造新能源使其具备主动支撑能力，即构网技术。

1.4 主流构网技术及差异分析

为解决弱电网问题，目前行业常见的构网支撑方式主要包括小型调相机、构网型静止无功补偿器（SVG）、构网型静止调相机（SSC）与构网型储能（PCS构网控制）。

1.4.1 小型调相机

本质是一台不带机械负载运行的同步电机，其稳定能力源于物理特性而非控制算法。通过真实旋转质量提供物理惯量、短路电流支撑、无功支撑及功角同步能力，扰动瞬间无需控制即可立即参与支撑，效果自然可靠；故障期间可提供较大短路电流，有利于继电保护动作和电压恢复。作为历经百年验证的成熟技术，其系统行为可预期性强。但其局限性也较为明显，设备体积大，投资与运维成本高；无法参与有功调节，响应速度受机械限制，且不具备灵活部署能力，难以适应分布式场景。



1.4.2 构网型静止无功补偿器 (SVG)

本质是一种基于电力电子控制的快速无功补偿器，通过毫秒级调节无功电流实现电压支撑。其优势在于响应速度快、结构紧凑、成本低于调相机，适合场站部署。但局限性也较为明显，不提供真实物理惯量，无法减缓频率变化率；短路电流能力有限，在严重故障时支撑能力不足；且仅能解决电压问题，无法从系统层面参与频率与功角稳定调节。



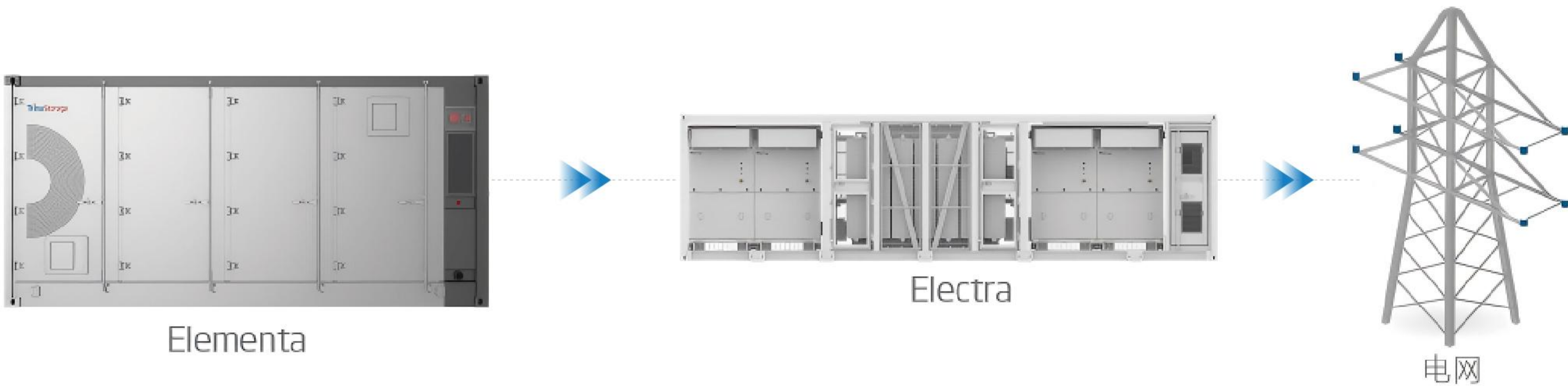
1.4.3 构网型静止调相机 (SSC)

SSC通过控制算法模拟同步机特性, 可以主动建立电压、提供虚拟惯量、具备下垂控制能力, 但其能量来源受限, 惯量支撑能力有限。



1.4.4 构网型储能

构网型储能并不是简单“储能+变流器”。其本质是通过PCS控制系统, 让储能系统成为电网的“电压源”, 而不是依赖电网的“电流源”。具备频率稳定能力、电压稳定能力以及功角稳定能力。

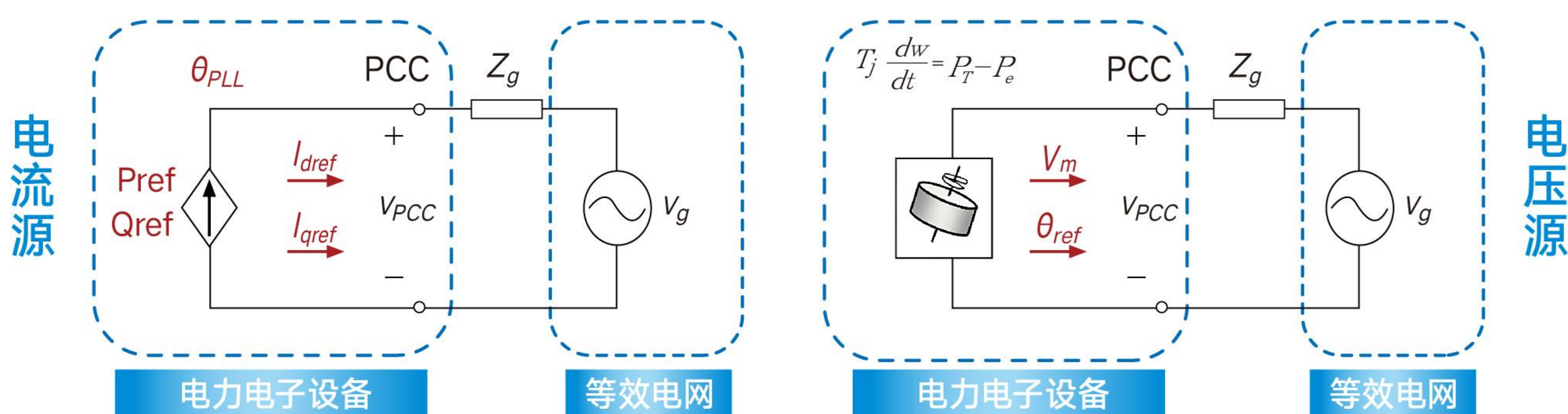


2. 构网型储能的概念与挑战

2.1 构网型储能的基础概念：电网的“智能锚点”

在现代电网中，构网型储能不仅是一种储能设备，更是一种主动参与电网稳定与调节的新型电力支撑单元。它通过高性能电力电子变流器，以及精密的实时监控和控制算法，能够自行建立稳定的电压与频率参考，就像在复杂、动态且可能不稳定的电网环境中设置一个“智能锚点”，为周围系统提供基准与稳定支持。甚至在完全失电的情况下可作为电网的“第一火种”启动整个系统。

2.1.1 与跟网型储能的比较



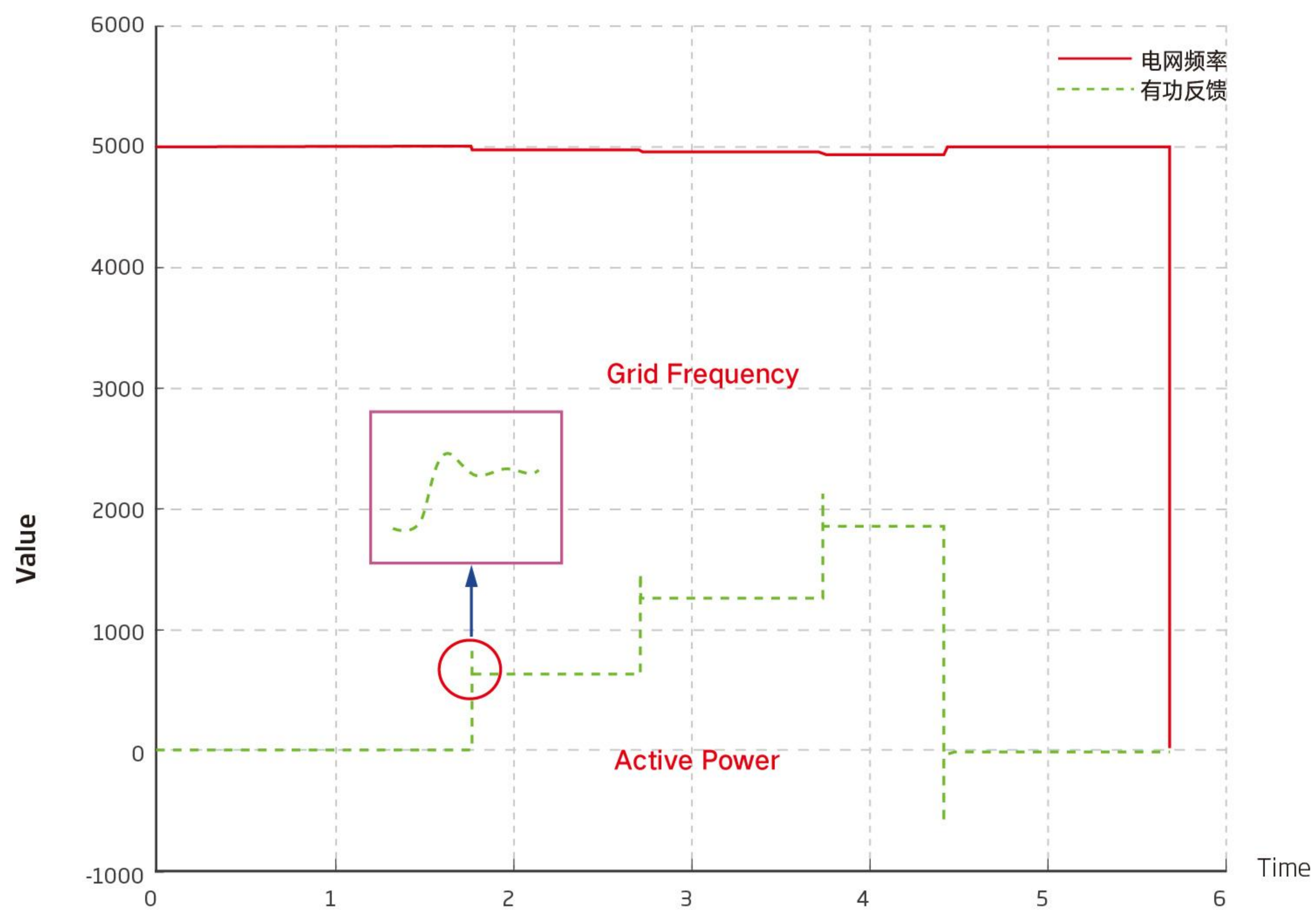
构网型与跟网型储能系统之间的区别，本质上体现为输出控制模式及其与电网的交互逻辑不同。传统的跟网型储能设备工作于电流源模式，依赖外部电网提供电压与频率信号，通过锁相环 (PLL) 实现同步，再根据设定的有功与无功功率指令，向系统注入控制电流。其控制目标集中在稳定功率输出与良好的并网适应性上。这类设备通常在电网结构稳健、电压频率信号清晰的条件下运行效果良好，是当前大多数并网型新能源和储能系统采用的主流技术。

与之不同，构网型储能采用电压源模式，它不依赖外部电网的电压参考，而是通过内部控制算法直接建立局部电压与频率基准。其控制路径模拟同步发电机的功率动态关系，实现基于功率平衡的自同步运行。成为电网稳定的主动力量。构网型储能的推广，将使电网在极端运行条件下具备更高的稳定性，并显著增强对新能源大规模接入的适应能力。

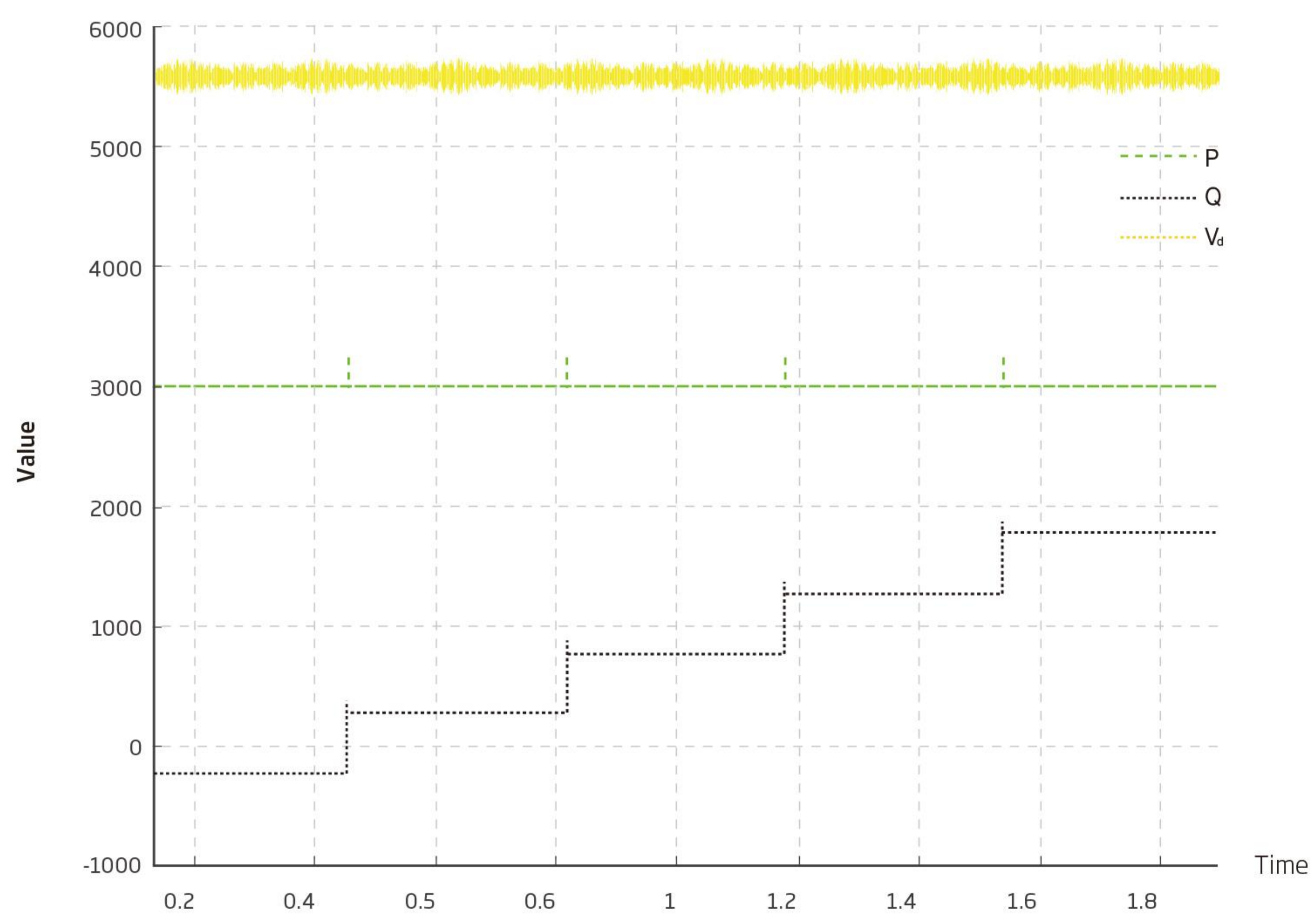
2.1.2 电压源与频率源特性：主动建立电网的“节奏与张力”

构网型储能能够直接输出稳定的电压波形，可在并网点自主输出一个稳态电压，无论外部波动如何，它都通过精密无功功率控制稳定并支撑局部电网电压，使局部系统“不必等待”外部电网恢复。频率则通过有功功率控制，设定并维持一个稳定的系统频率，并自动引导周围分布式电源和负载与其同步，避免频率混乱。

如同在恶劣环境中，蜘蛛主动持续拉紧局部蛛网，并稳定输出微弱而恒定的振动信号，让整张网在风雨中依然能保持稳定的组织结构。构网型储能就是在电网的动荡中维持稳定节奏的“蜘蛛”。



频率变化 (50Hz-49.8Hz-49.6Hz-49.4Hz-50Hz)



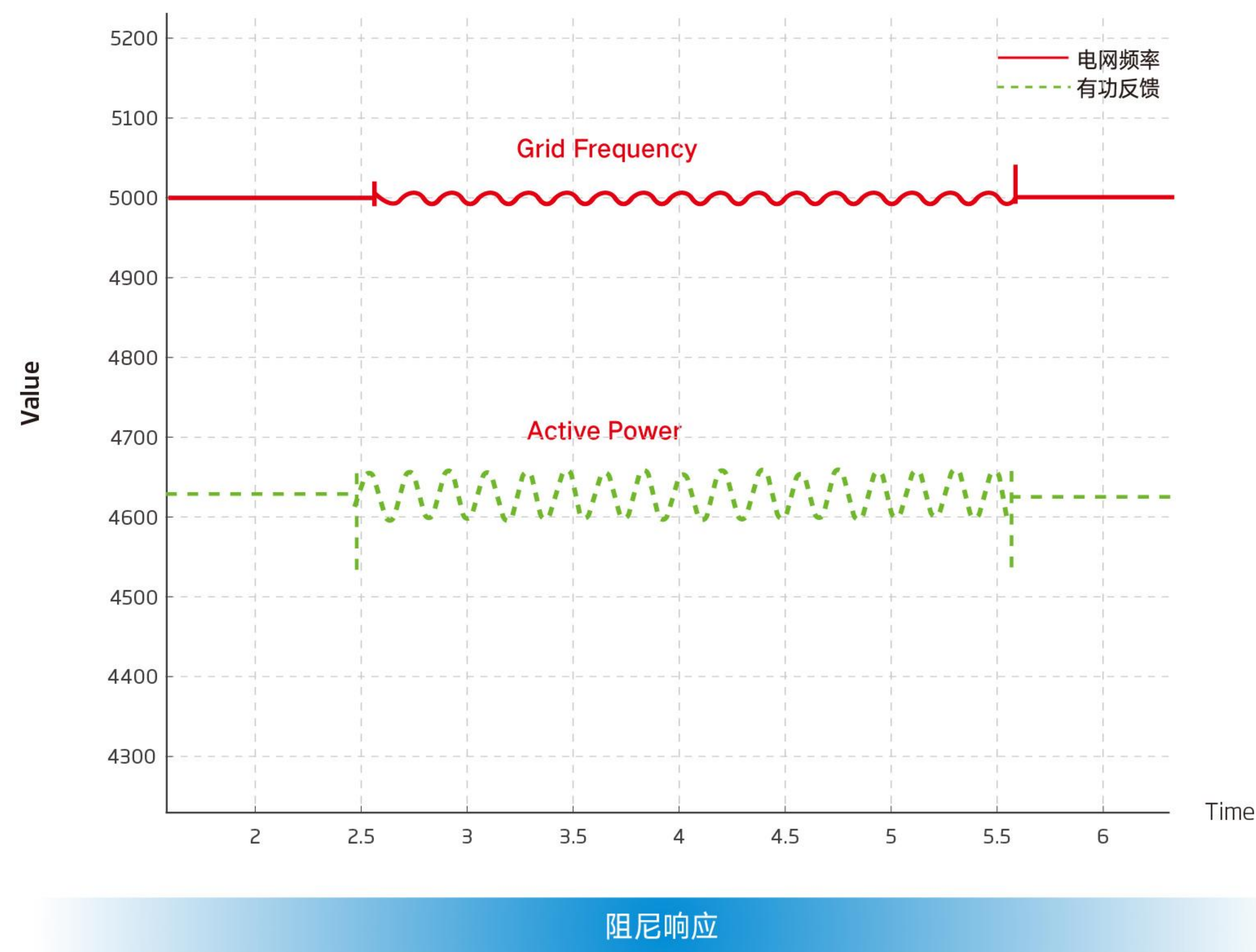
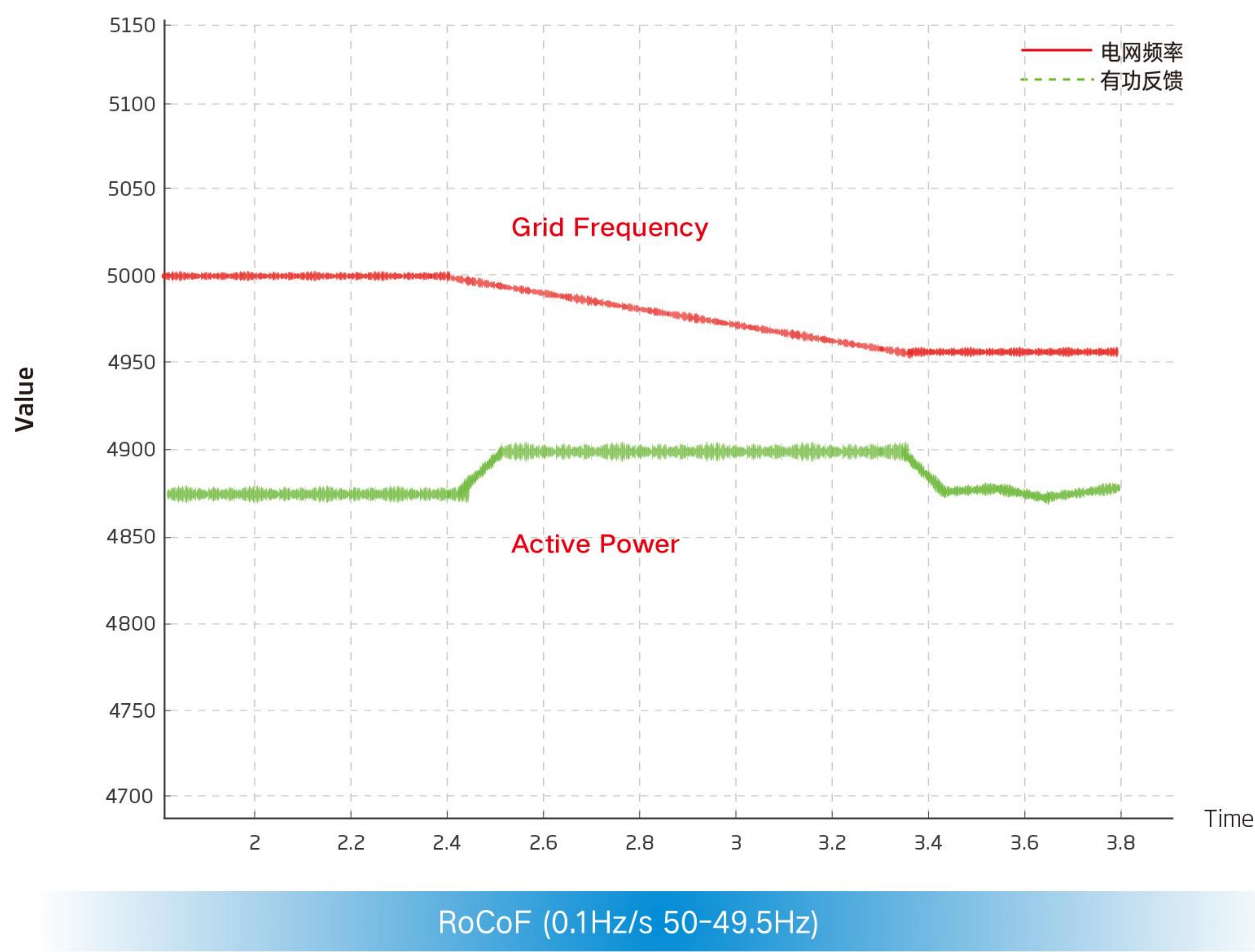
低压突变 (1.0p.u.-0.98p.u.-0.96p.u.-0.94p.u.-0.92p.u.)

2.1.3 虚拟惯量与阻尼模拟：为电网注入“物理记忆与镇定剂”

同步发电机的转动部件天然具有“惯性”，可以在频率波动时提供缓冲，减少波动幅度。而构网型储能的输出功率会由内电势与电网电势的

相角差自然驱动, 快速自发响应, 阻碍频率变化。这种机制完美复现了同步发电机转子的物理惯性, 赋予电网动荡时的自我缓冲能力。

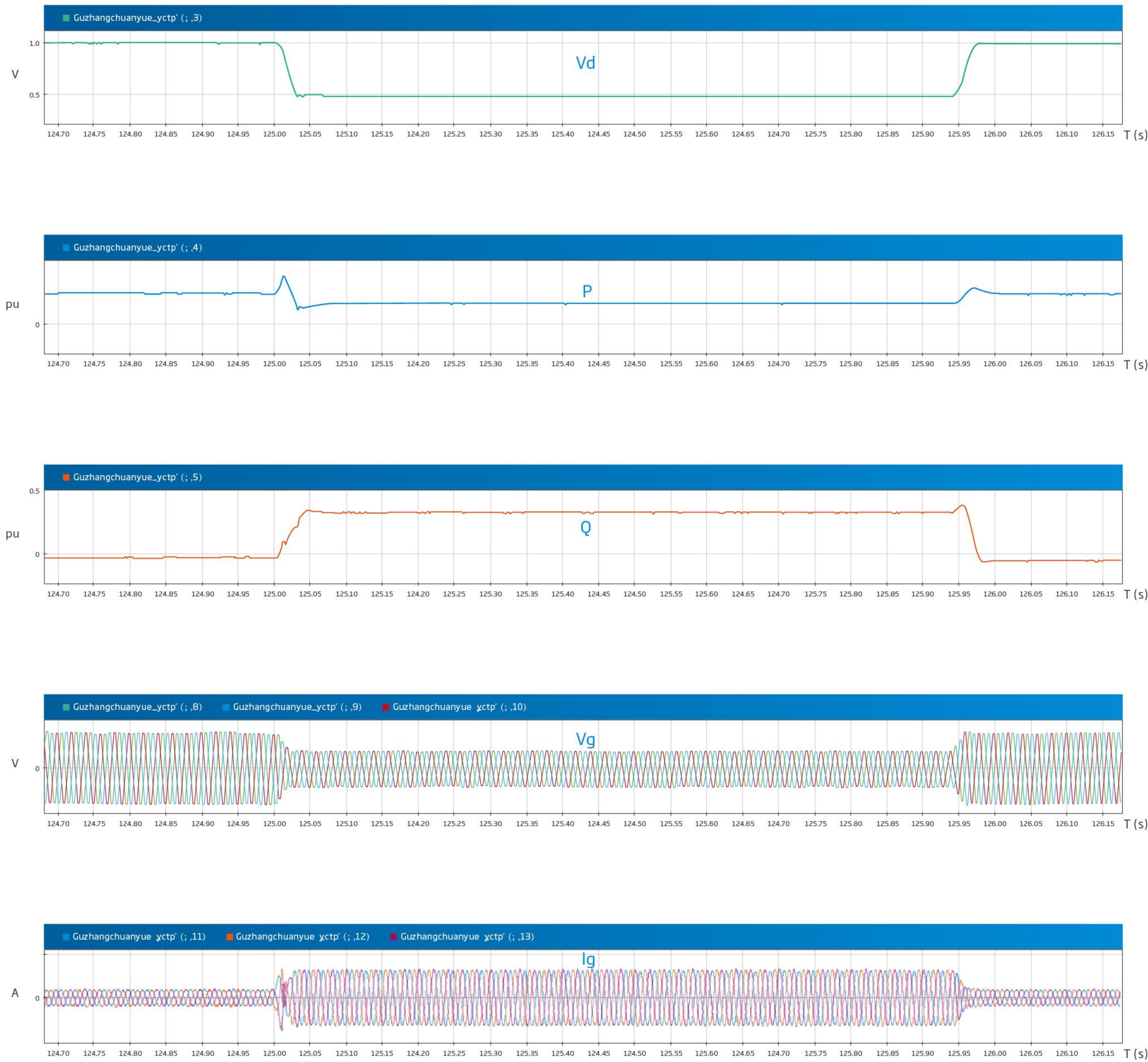
如同蛛网在潮湿环境下弹性下降、惯性减弱, 蜘蛛会在关键位置涂抹疏水物质, 使网丝恢复应有的韧性。同样, 构网型储能在系统惯性不足时为其“加固”, 使其稳健抵抗外界的扰动。



2.1.4 强大的过流与短路支撑能力：提供亟需的“电网强度”

在弱电网场景中, 短路容量不足是保护装置失灵、系统频繁崩溃的重要原因。构网型储能通过提升可控过流能力, 可以在关键时刻“撑住”电网。不同于传统电力电子设备的过流保护逻辑, 构网型储能可在有限时间内输出数倍额定电流, 并保持可控性, 从而实现故障穿越和电压支撑的任务。

如同大昆虫试图挣脱蛛网时, 蜘蛛能瞬间拉紧经线, 爆发正常数倍的拉力, 让整个结构不被撕毁。

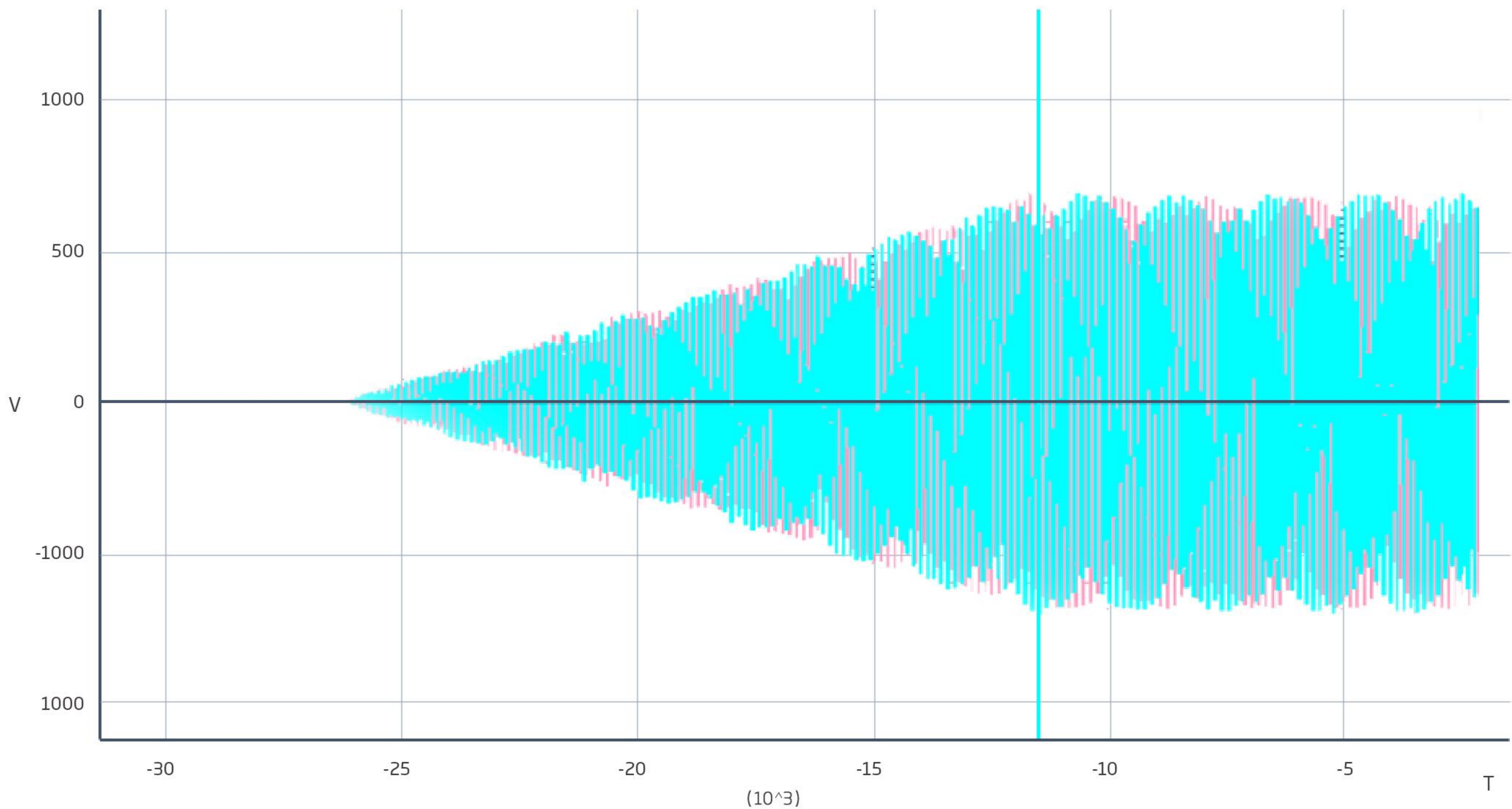


电网电压跌落故障

2.1.5 黑启动能力: 电网的“生命火种”

黑启动是指在电网全停电情况下, 用一台无需外部电源的设备去启动并恢复电网。构网型储能完全在完全失电的情况下, 完全不依赖外部电源, 直接建立电压源和频率基准。按照重要负载优先的策略逐步接入发电机、变电站、关键设施, 防止瞬时冲击和再次崩溃。迅速建立一个电压与频率稳定的小型电网, 并逐步扩展。

如同在一片破损且静止的网面上, 蜘蛛先织出一小块稳定、有节奏振动的新网, 以此为基础不断扩展, 直到恢复整个系统。



黑启动期间的电网电压

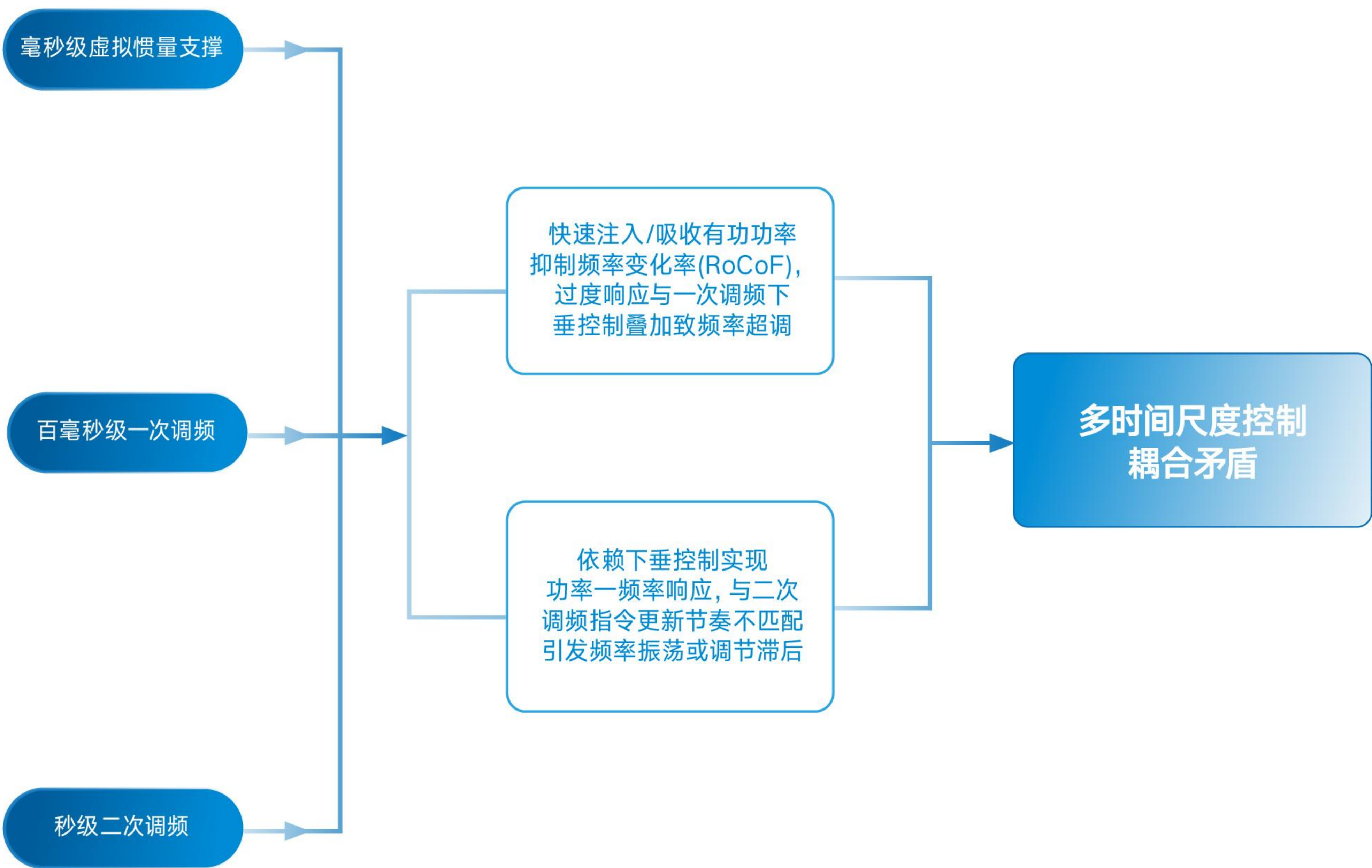
2.2 当前的技术挑战

2.2.1 多模式无缝切换与稳定

在多模式无缝切换与稳定运行方面, 面临的核心技术挑战在于并离网两种模式之间的平滑过渡。两种模式的控制目标、参考基准和动态响应特性存在本质差异, 如何确保切换过程无冲击、不引发系统振荡, 成为控制算法设计的核心难点。此时若相位、幅值的同步精度不足, 极易产生冲击电流, 导致设备损坏甚至系统失稳。此外, 电网强度并非恒定不变, 短路比 (SCR) 可能从极强网 (如SCR=100) 瞬间跌落至极弱网 (SCR=1.0), 电网阻抗的剧烈变化进一步加剧了切换过程的复杂性。电网拓扑改变或故障还可能导致电压相位瞬间跳变, 传统依赖锁相环的控制架构在此类扰动下极易失步脱网。如何在电网强度宽范围波动、阻抗突变、相角跳变等多重复杂工况下, 实现PCS控制模式的平稳切换与稳定运行, 是构网型储能技术必须突破的关键瓶颈。

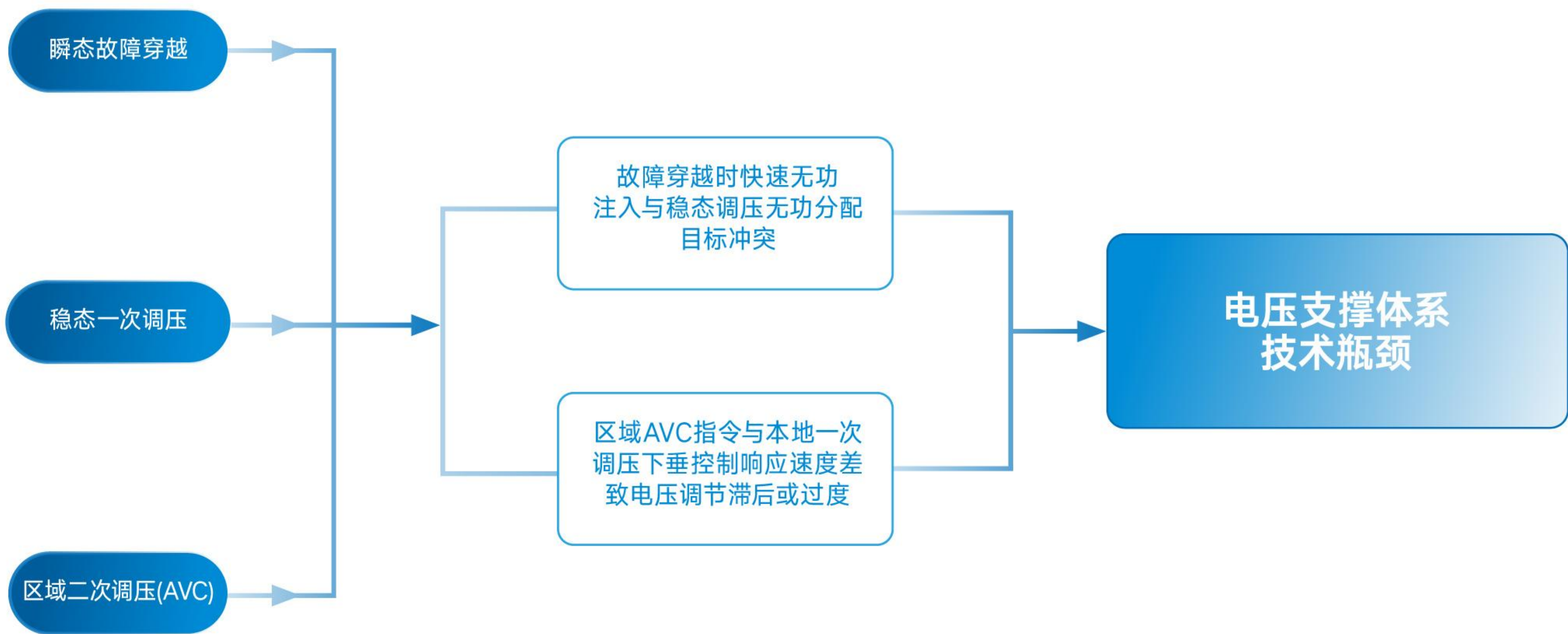
2.2.2 频率响应的多时间尺度耦合

在频率响应体系中, 虚拟惯量支撑、一次调频与二次调频三大核心功能覆盖了从毫秒级到秒级的调控需求, 各时间尺度控制目标存在天然耦合与潜在冲突。毫秒级虚拟惯量支撑是通过快速注入/吸收有功功率抑制频率变化率 (RoCoF), 但过度响应可能与百毫秒级一次调频的下垂控制产生叠加效应, 导致频率超调。同时, 百毫秒级一次调频依赖下垂控制实现功率-频率响应, 若与秒级二次调频 (AGC) 的指令更新节奏不匹配, 易引发频率振荡或调节滞后。传统方案难以兼顾不同扰动场景下的最优响应, 使多时间尺度控制的耦合矛盾进一步凸显。如何让三个时间尺度的控制在动态过程中平滑过渡, 是构网型储能频率响应体系必须突破的技术瓶颈。



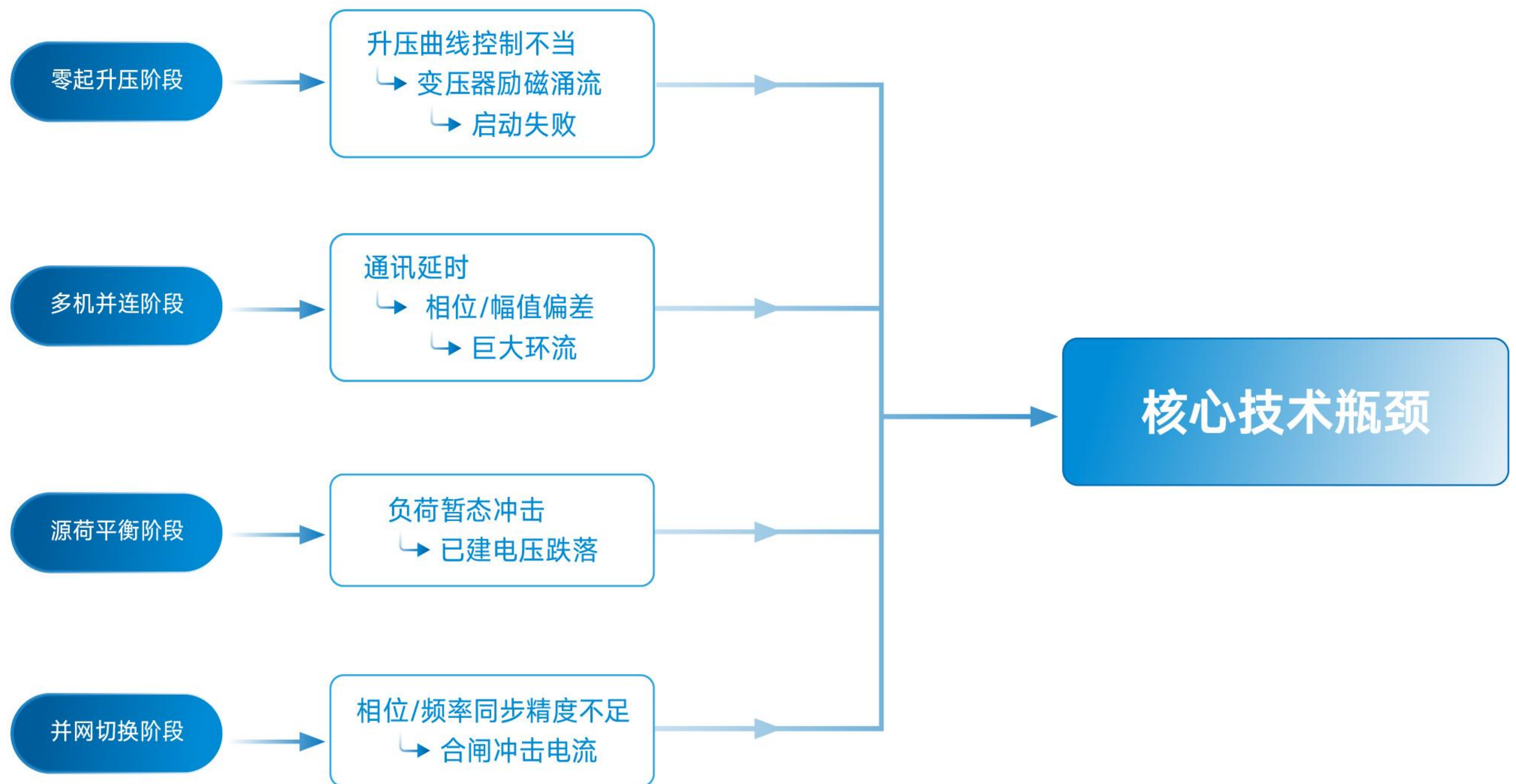
2.2.3 电压支撑与无功管理的动态协调

瞬态故障穿越、稳态一次调压与区域二次调压 (AVC) 之间的协同同样面临挑战, 故障穿越时的快速无功注入需优先保障系统电压稳定, 但可能与稳态调压的无功分配目标冲突。区域AVC指令与本地一次调压下垂控制的响应速度差异, 易导致电压调节滞后或过度调节。如何让三个时间尺度的控制在物理机理上自然分层、在动态过程中平滑过渡、在目标冲突时智能取舍, 是构网型储能电压支撑体系必须突破的技术瓶颈。



2.2.4 黑启动场景下的技术瓶颈

在黑启动与并网场景中, 储能系统面临从零起升压、多机并联、源荷平衡到并网切换的全过程技术挑战。零起升压阶段, 若升压曲线控制不当, 变压器因突加电压易产生励磁涌流, 导致启动失败; 多机并联阶段, PCS需同步建立电压源, 传统依赖顶层通讯的方案因通讯延时易导致启动时刻不一致, 相位、幅值差异引发巨大环流; 源荷平衡阶段, 负荷投入的暂态冲击若不能有效平抑, 将导致已建电压再次跌落; 并网切换阶段, 从孤岛构网向大电网过渡时, 若相位、频率同步精度不足, 直接合闸将产生巨大冲击电流。如何实现从零压建压到并网切换的全过程高精度控制, 确保黑启动一次成功、并网零冲击过渡, 是构网型储能必须突破的核心技术瓶颈。



3.天合构网型储能解决方案

天合构网型储能系统并非单一设备的突破，而是从电芯到系统、从硬件到软件的全栈技术重构。在构网场景中，三大核心单元各司其职、深度协同。

3.1 构网根基：储能电池舱

储能电池舱作为储能系统的核心储能单元，既是保障能量持续供给的“能量仓库”，更是支撑系统稳定运行、高效响应的“力量源泉”。从电芯到电池系统，天合储能实现了全维度的构网适配，以量化的技术指标和精准的设计优化，构建起满足电网调度需求、保障系统稳定运行的坚实基础。

“天合芯”：长寿命高一致性电芯以材料创新与品控升级为核心，打造适配构网场景的高可靠电芯。通过精选高稳定性电芯主材并搭配长寿命技术，从化学原理层面降低循环过程中的锂损耗率，显著延缓容量衰减，从源头保障构网场景下的长周期可靠性。同时，依托全自动化生产工厂实现电芯极片涂布、卷绕、封装等关键工序的高精度控制，搭配全流程数字化品控体系对电芯容量、电压、内阻等核心参数进行100%检测，确保同批次电芯高度一致性，为系统长期稳定、并网友好运行奠定化学与制造根基。

天合储能 587Ah 大电芯

容量、能量密度及RTE三大核心性能指标全面突破

容量	314Ah	587Ah	
能量密度	391Wh/L	417Wh/L	6.6%+
RTE	95%	96%	1%+



能量密度提升设计

正极颗粒级配设计

渐变极片结构

高速浸润电解液

低缺陷负极

能效提升设计

正极结构化功能设计

高活性表面设计

低阻抗SEI设计

高电导率新型锂盐

吞吐量提升设计

1减 材料微观调控技术

2减 正极过渡金属低溶出技术

3减 正负极适配组合技术

1制造 多场耦合化成

“天合舱”：构网增强型电池系统聚焦构网场景下的高功率响应、能量高效利用与安全可靠需求，通过针对性设计实现电池系统与电网调度的深度适配。在能量储备方面，电池舱通过PACK与舱体的紧凑型设计实现元器件高度集成化布局，体积能量密度达到行业顶尖水平，为电网故障期间的持续功率输出和长时间调频等关键应用提供坚实的物理保障。

Pack Pro 设计

通过IEC/UL/GBT标准运输测试

紧凑型设计, 能量密度提升12.3%



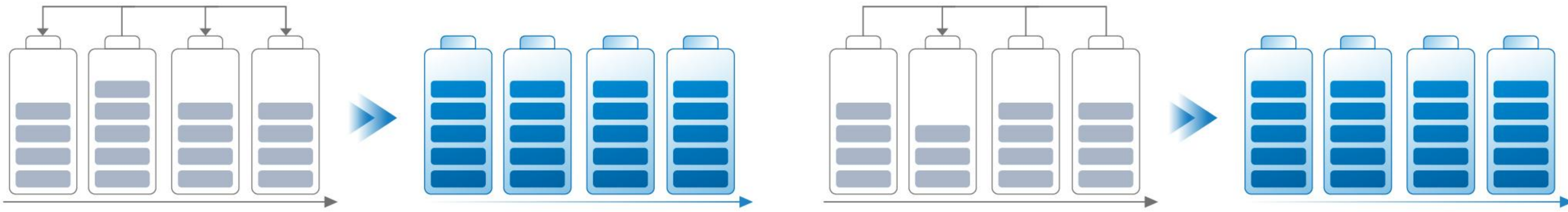
模组

容量	串并方式	防护等级
195.354kWh	26@4*module	IP67

在智能管理方面，BMS作为电池舱的“大脑”，采用高精度电芯状态监测算法精准识别电芯电压、SOC等核心参数，实时向PCS和EMS上传电池系统允许最大充放电功率；通过动态投切技术让性能最优的电池簇参与能量输出，及时隔离故障簇保障黑启动场景下的系统连续性；

集成芯片级主动均衡模块，均衡效率高达96%，通过动态分配均衡电流快速弥补电芯间容量偏差，使系统可用容量较传统方案提升约3%；配合内置的多维度保护策略，在电网过载、波动等极端工况下快速触发保护机制，确保电池系统安全可靠，全面满足构网运行的高可靠性要求。

芯片级主动均衡



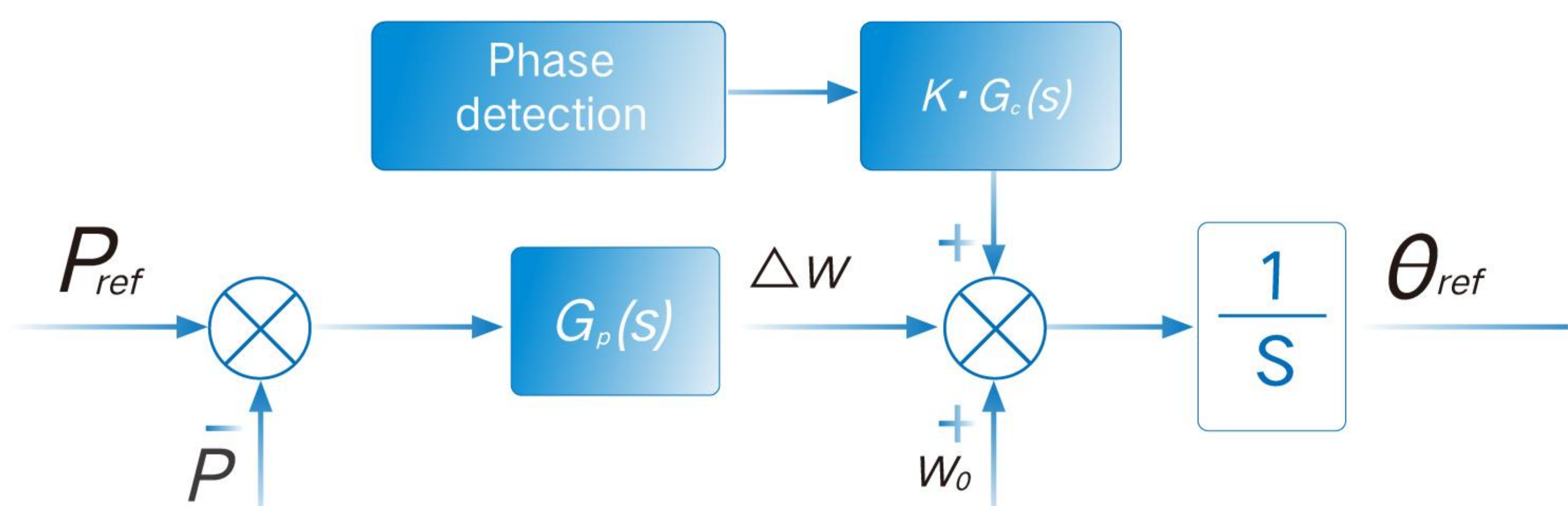
系统可用容量提升3%

3.2 电网扰动下零感知自适应控制技术

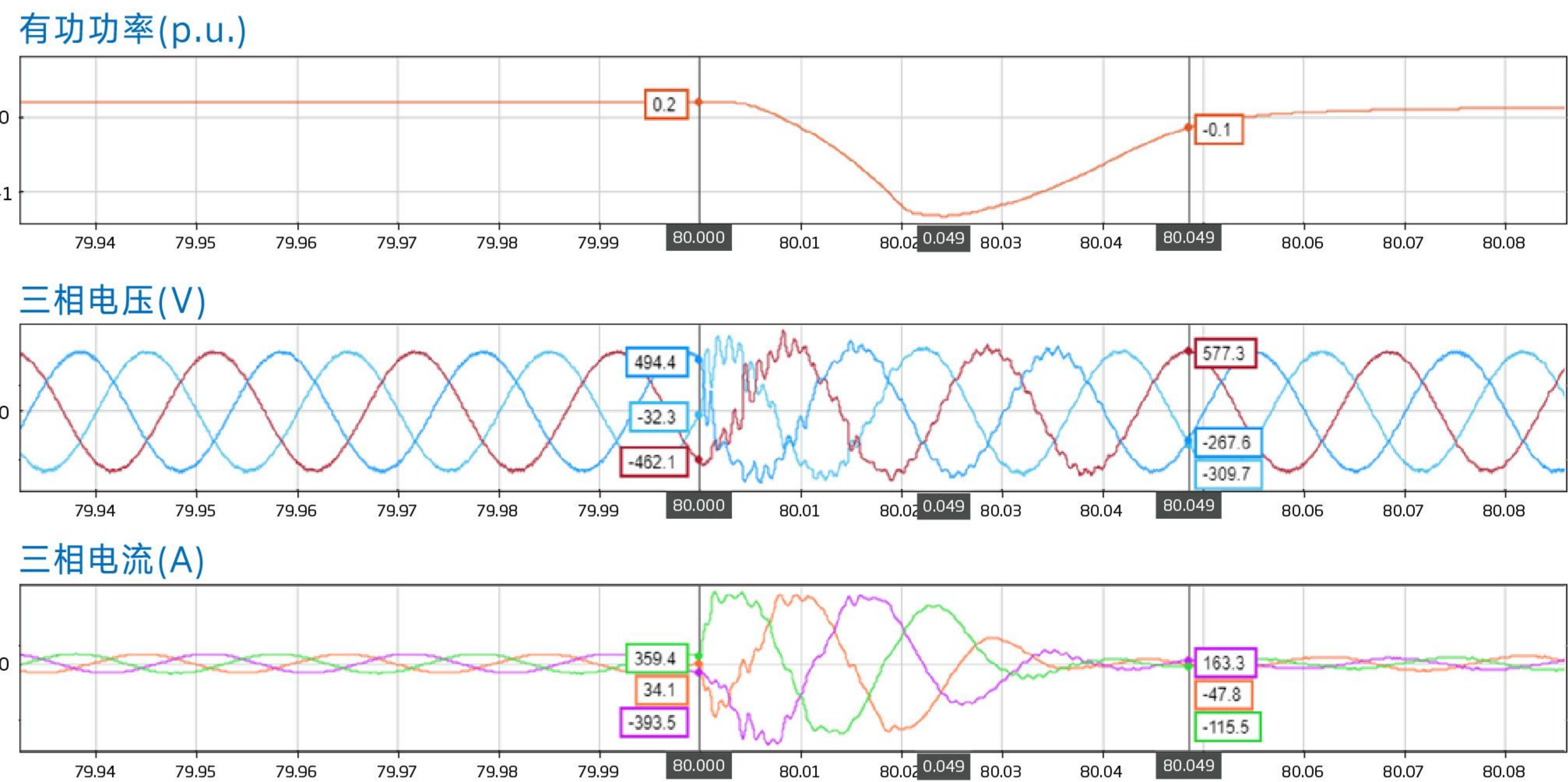
在EMS状态感知方面，ElecOS基于全维度实时采集的数据，在线实时计算并判断电网短路比（SCR）、电网强弱等级及电网扰动类型，同步动态调整电站运行模式。实时采集电网侧频率、电压、功率等全维度数据，实现秒级百万点位的数据采集能力。结合多类智能诊断模型，对电网、PCS及电池舱的潜在风险进行提前预警。精准支撑电网安全稳定运行。

在控制架构层面，天合PCS摒弃了传统依赖锁相环的控制方式，采用功率同步控制架构，在并离网切换场景，可提升运行灵活性，零延迟模式切换，实现无缝过渡。同时PCS直接依据功率平衡方程构建内电势，控制底层架构统一，从根本上消除了模式切换带来的控制基准突变问题。当电网发生±60°的剧烈相角跳变时，PCS能瞬时输出有功电流进行相位补偿，而非跟随错误相位跳闸，50ms内即可重新锁定同步，确保并网期间的精准同期。

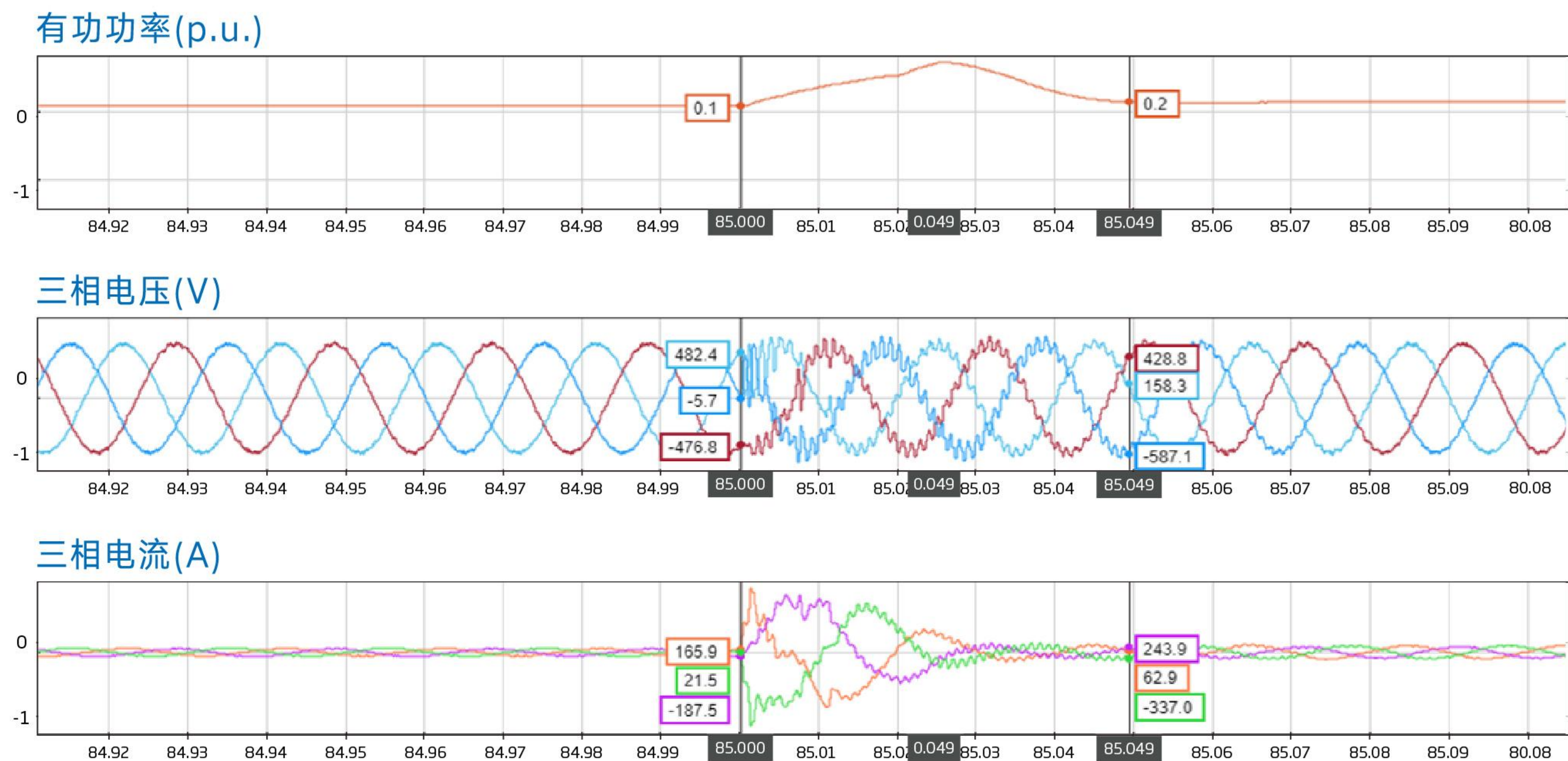
相角跳变控制框图



相角突变60°记录

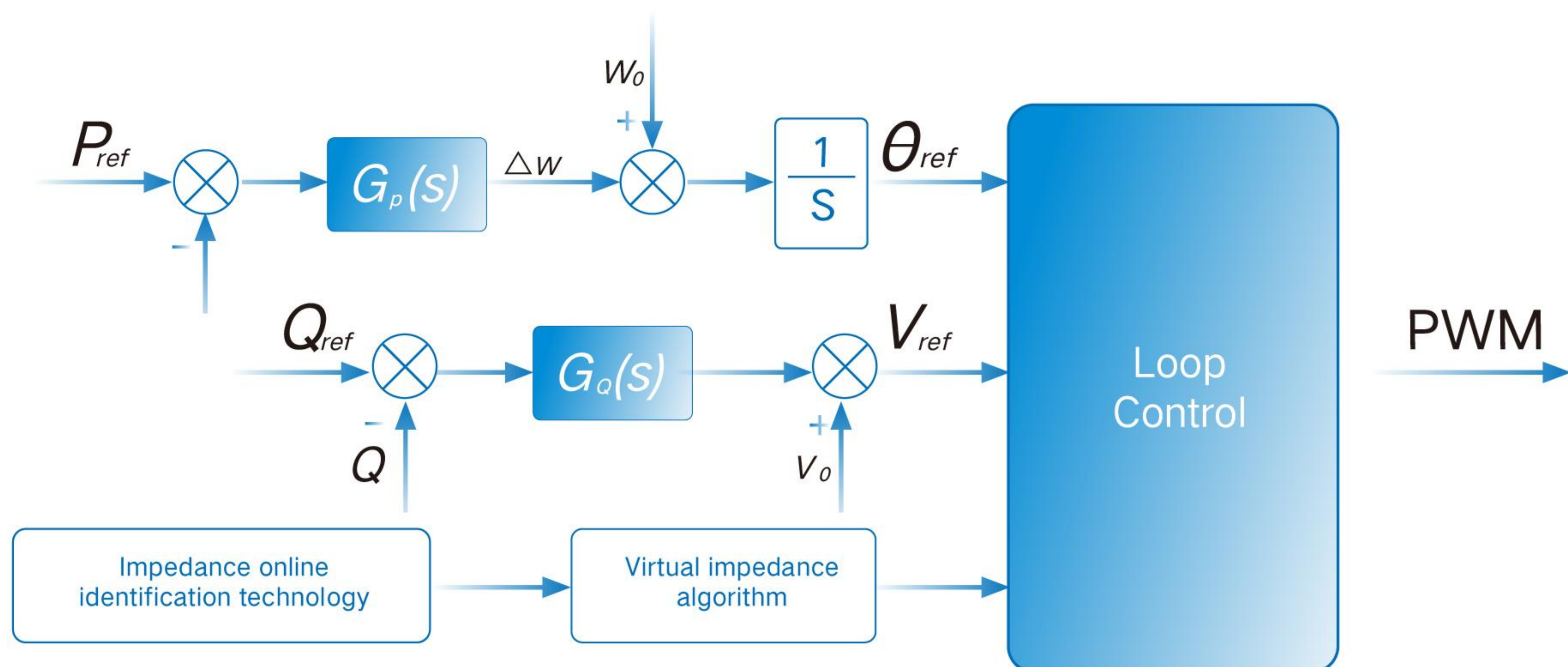


相角突变-60°记录



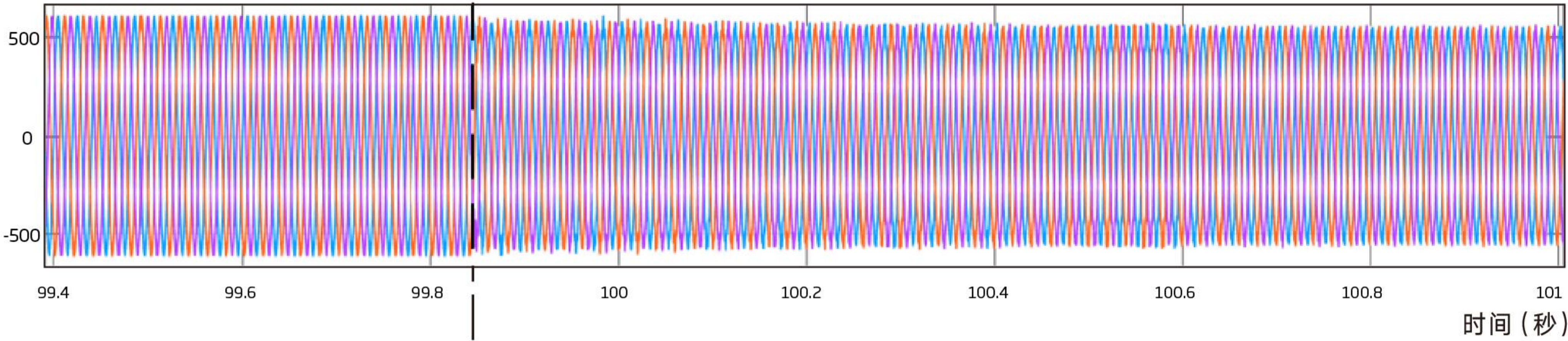
在电网适应层面，针对电网强度从极强网（SCR=100）到极限弱网（SCR=1.0）的宽范围波动，天合PCS摒弃了传统“一套参数走天下”的局限，采用虚拟阻抗实时重构算法。通过阻抗在线识别，PCS可实时感知PCC点阻抗特性，动态调整输出阻抗的幅频特性，使其主动适配电网环境，从根本上消除了谐振风险。当短路比从50瞬间跌落至1时，算法在10ms内识别阻抗突变，控制参数毫秒级无缝切换，全过程电压波形无发散震荡，有功功率在1秒内恢复额定值，实现了从极强网到极限弱网的无缝穿越。

阻抗重塑技术控制框图

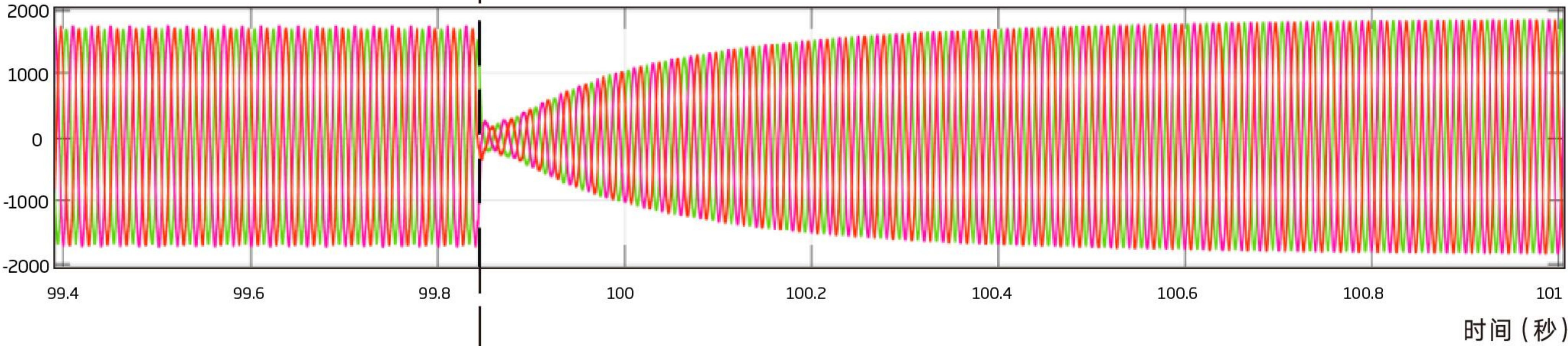


电网短路比SCR从50跳变到1时的PCS波形

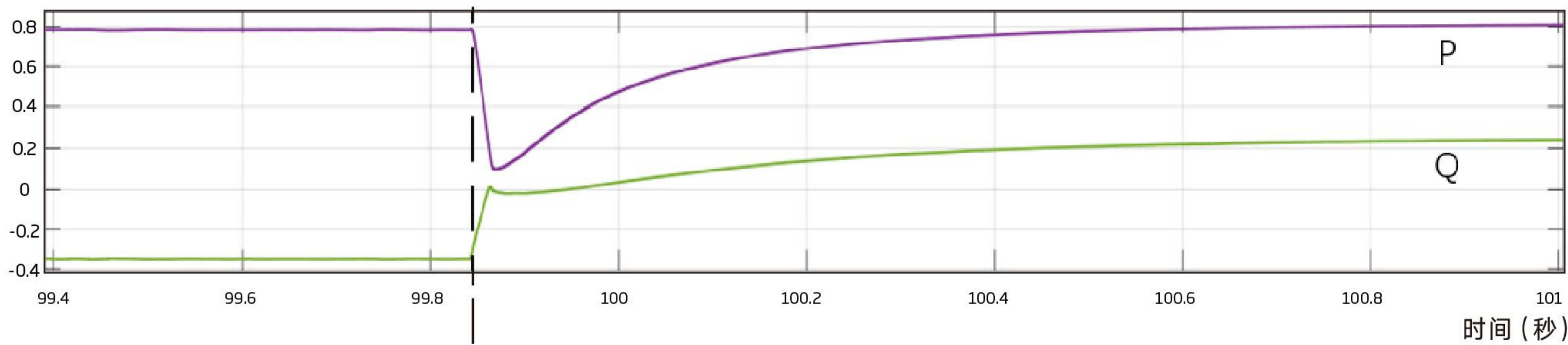
三相电压(V)



三相电流(A)



有功无功功率(p.u.)



SCR跳变时刻

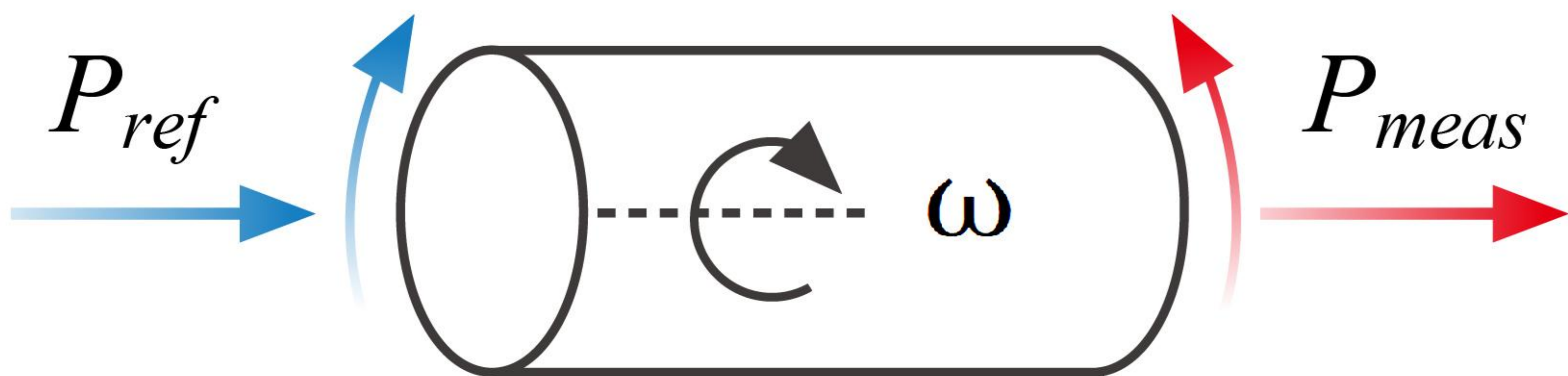
在稳定性保障层面，针对不同电网强度下的差异化风险，天合方案实现了精准应对，在强网 $SCR > 20$ 甚至达到100情况下，算法自动调整电流环带宽并引入有源阻尼，彻底消除高频谐振纹波；在极限弱网（ $SCR = 1.0$ ）情况下，采用的功率同步控制架构配合虚拟电阻注入算法，强力增加系统阻尼，如同给极不稳定的系统安装“电子减震器”，确保PCS不降额、不脱网稳定运行。

3.3 多尺度频率响应协同控制技术

针对频率响应体系的多时间尺度耦合挑战，天合提出了物理模型驱动的分层解耦解决方案。

在毫秒级虚拟惯量支撑层面，天合PCS内置高频RoCoF观测器，实现了惯量的动态自适应。可提供刚性支撑，当检测到频率急剧变化（RoCoF高）时，算法毫秒级自动增大虚拟惯量系数，提供如同物理大转子般的惯性，死死“拽住”频率。同时，也具备“柔”性恢复能力，当频率进入恢复区（RoCoF低），算法自动减小惯量并引入强阻尼，快速平抑功率振荡，缩短调节时间。天合自适应算法将有功响应时间缩短至100ms级，相较于传统策略缩短了一倍的响应时间，自适应惯量算法既保证了对频率变化期间响应的快速性，同时也兼顾了频率恢复稳定阶段的平稳性。

通用物理模型



$$J \cdot \omega_0 \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_{ref} - P_{meas} - D \cdot (\omega - \omega_0)$$

变量说明

J : 虚拟转动惯量。模拟同步发电机转子的物理质量，决定了PCS对抗频率变化的“惯性强度”。

D : 阻尼系数。模拟发电机的阻尼绕组特性，用于抑制功率振荡。

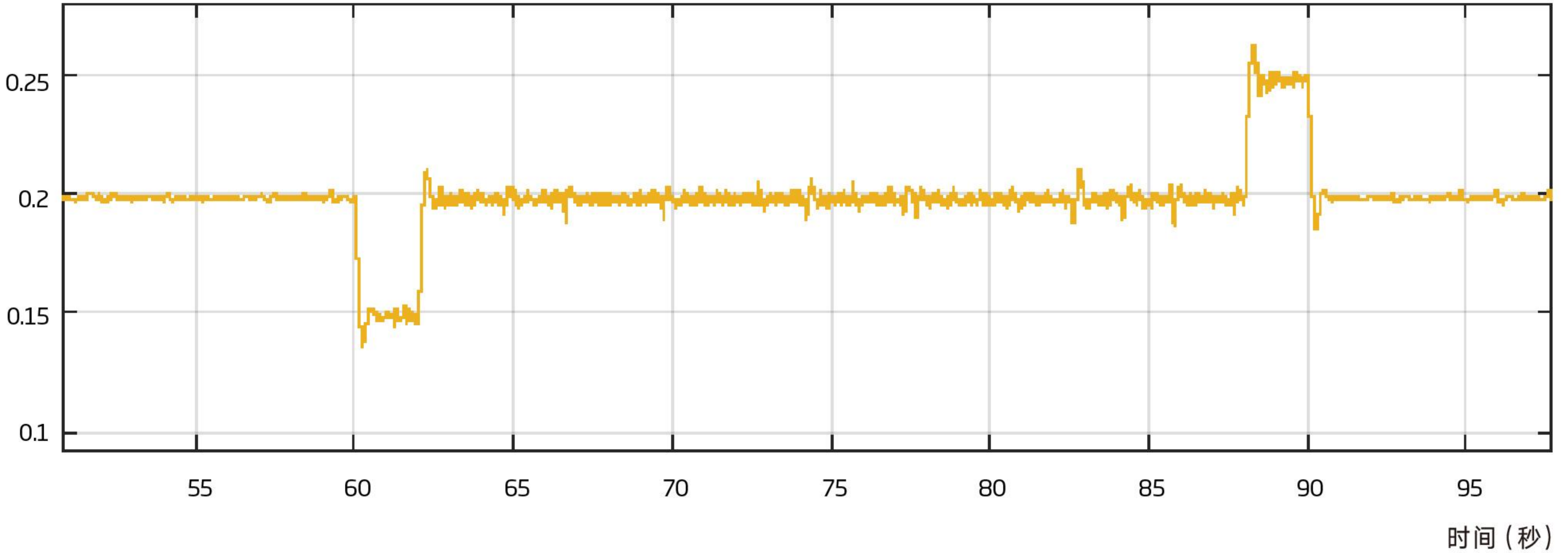
ω, ω_0 : 实时角频率与基准角频率。

$\frac{d\omega}{dt}$: 角频率变化率。表征电网频率波动的快慢。

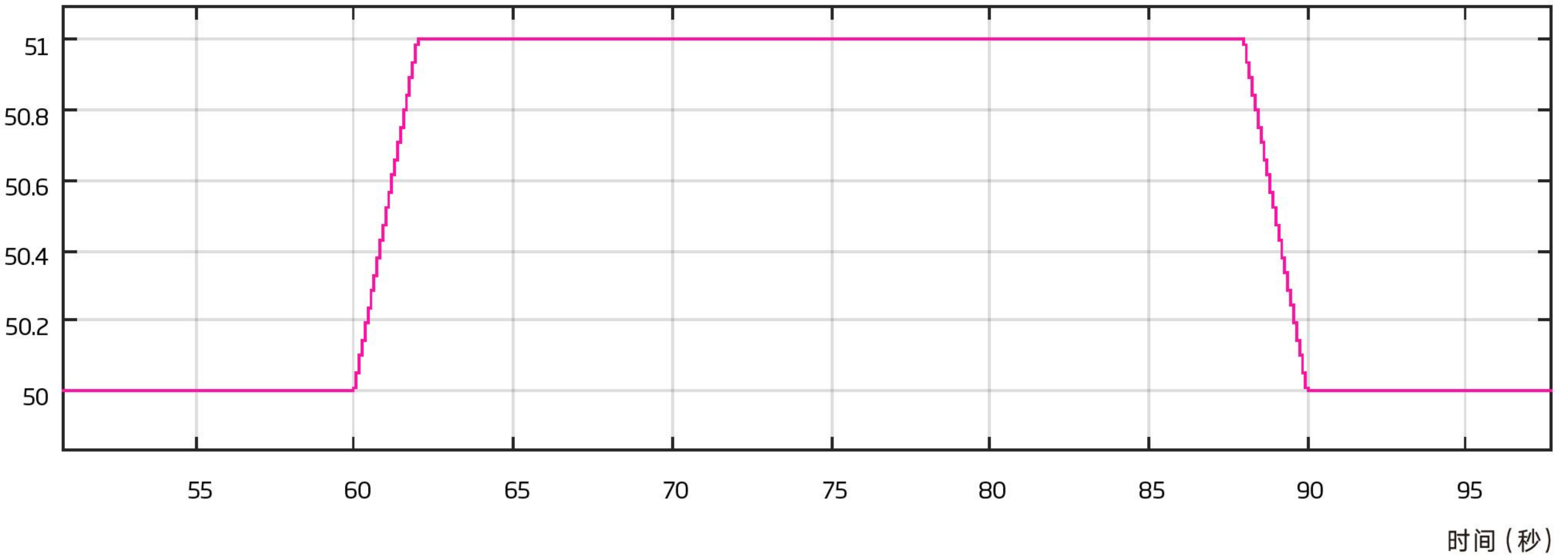
P_{ref}, P_{meas} : 实测有功功率与有功功率参考值。

通过引入虚拟转动惯量 J ，PCS 在故障瞬间模拟物理转子的动能释放过程，限制 $\frac{d\omega}{dt}$ 的幅值，防止频率崩溃；阻尼系数 D 则用于抑制随后的功率振荡。

有功功率(p.u.)



频率(Hz)



在百毫秒级一次调频层面，天合PCS遵循经典下垂控制 $f - f_0 = -K_p \cdot (P - P_0)$ ，复现物理发电机“负载越重，转速越慢”的机械外特性。当电网负载增加导致频率跌落时，PCS依据该物理模型自动增加有功输出，阻碍频率进一步下降。尤为关键的是，具备自主同步特性，无需通信互联，各台PCS仅凭端口频率变化即可按容量比例分担负荷，为多机并联场景下的稳定运行提供了物理基础。

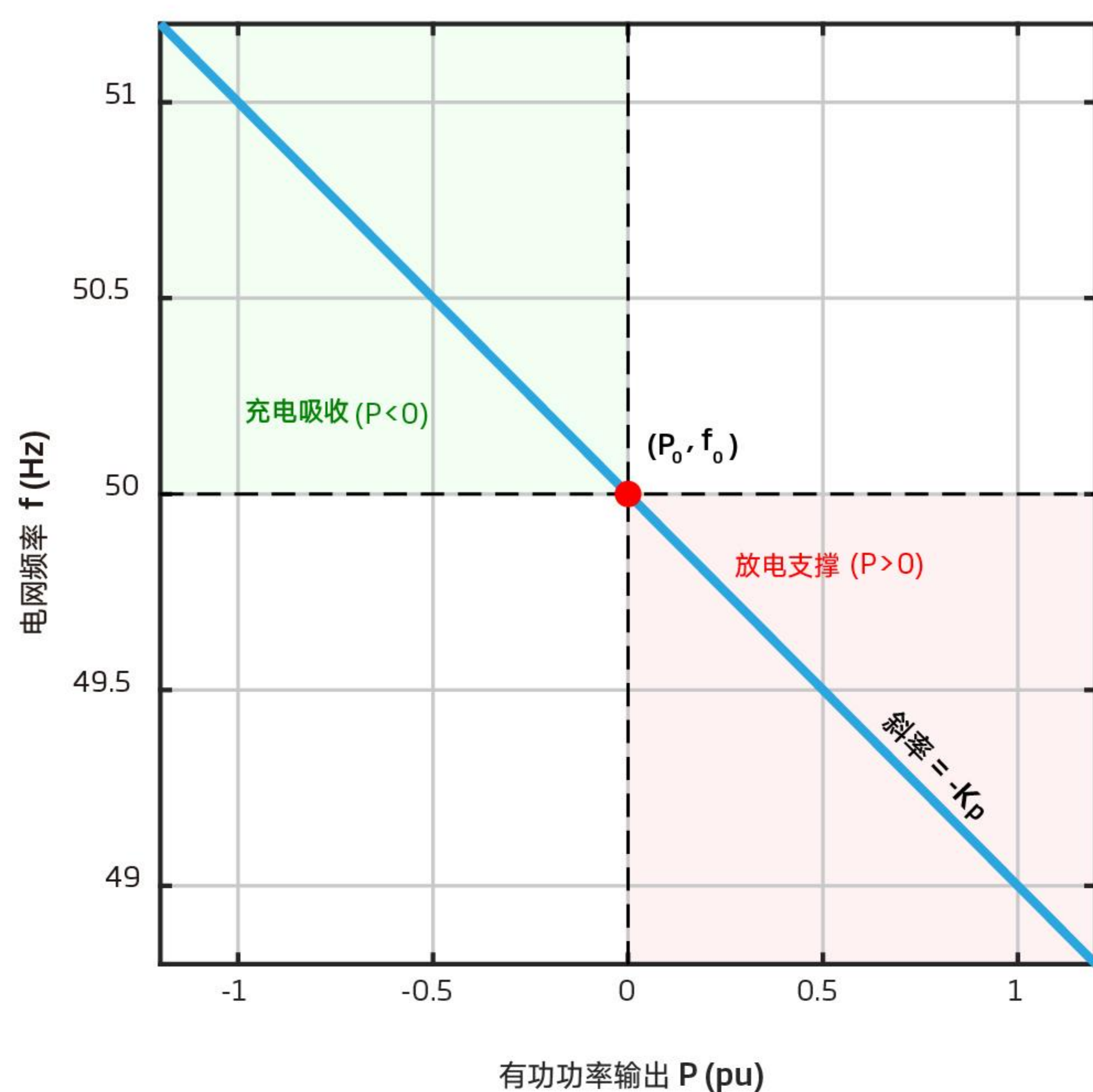
变量说明

f, f_0 ：实时频率与额定频率。

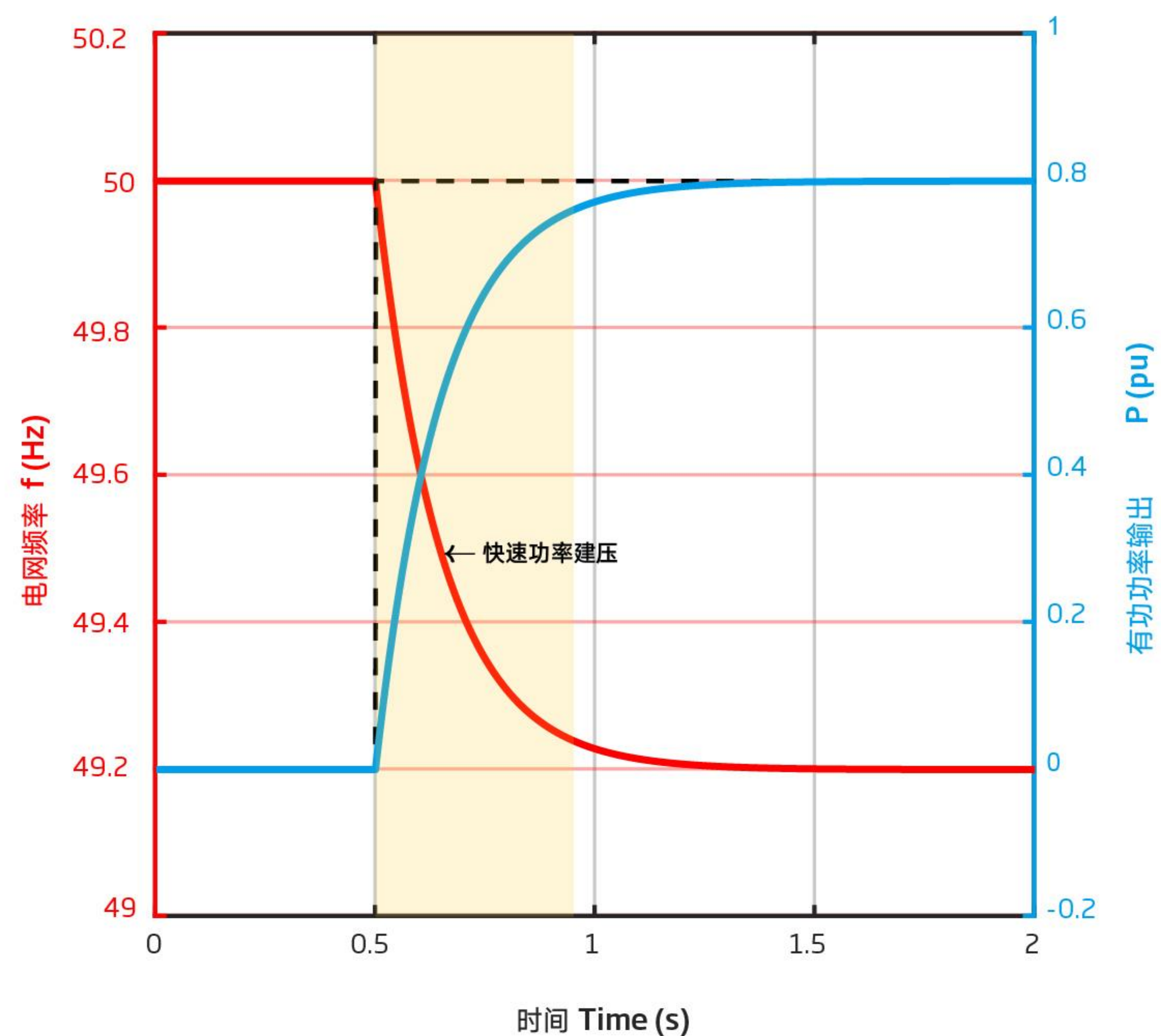
P, P_0 ：实时输出有功与额定有功参考值。

K_p ：有功下垂系数。物理意义等同于发电机的“调差率”，决定了系统频率变化的灵敏度。

稳态 P-f下垂控制特性



百毫秒级一次调频动态响应



在秒级二次调频层面，ElecOS依托高精度测量算法，实时监测并网点的频率与幅值，并根据天合电芯充放电特性与PCS运行状态，对有功功率指令进行动态优化分配，实现功率输出与SOC均衡的最佳平衡；尤其针对PCS额定功率不一致、电池舱额定容量不一致、电池舱老化程度不一致等复杂场景，均可实现良好适配与稳定运行。

PCS响应EMS下发的AGC指令，通过积分方程 $P_{ref}(t) = P_{set} - K_{if} \cdot \int (f - f_0) dt$ 实现无差调节。利用积分环节对频率偏差的累积效应，PCS自动调整有功功率基准点，补偿一次调频后的残余偏差。从控制本质上看，AGC是将P-f下垂特性曲线进行上下平移，在维持原有下垂斜率（系统稳定性）不变的前提下，将运行点重新拉回额定频率，确保一次调频的快速响应与二次调频的精确调节互不干扰、协同有序。

变量说明

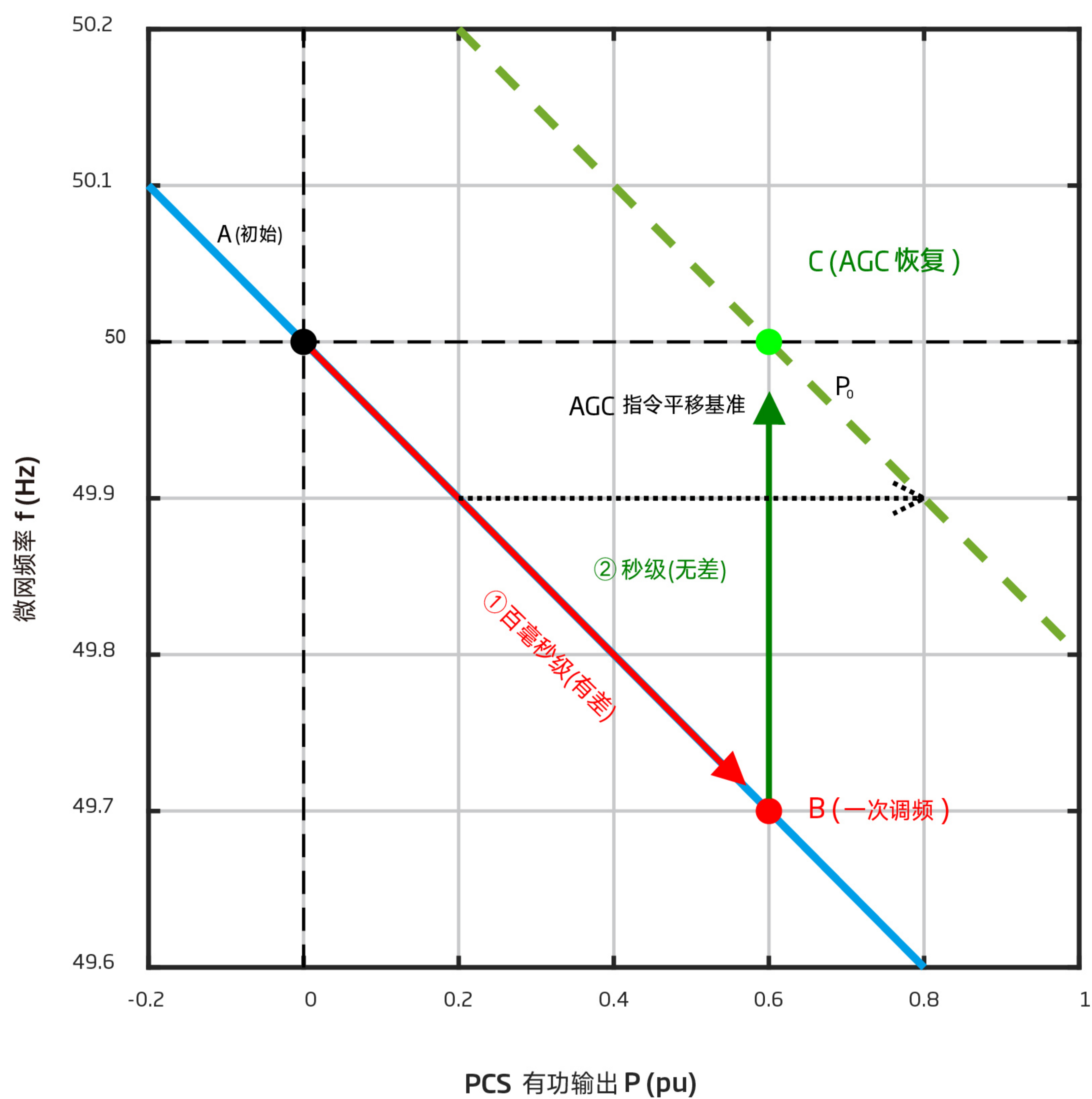
$P_{ref}(t)$ ：动态有功功率参考值。PCS 内部控制环路最终执行的有功指令。

P_{set} ：基础调度功率。EMS 下发的初始功率设定点。

K_{if} ：频率积分增益系数。决定了二次调频消除频率偏差的速度（通常较慢，以分钟计）。

$\int (f - f_0) dt$ ：频率偏差的积分项。只要频率 f 不等于额定值 f_0 ，该项就会持续累积，推动 P_{ref} 变化，直到偏差归零。

稳态曲线平移(改变功率基准)



三个控制方程在物理机理上的天然分层, 摇摆方程主导毫秒级惯量响应, 下垂方程主导百毫秒级一次调频, 积分方程主导秒级二次调频。各层级参数独立优化, 通过RoCoF实时反馈实现惯量的动态退出与阻尼的平滑介入, 从根本上规避了多时间尺度控制的耦合冲突。

3.4 全范围电压重构技术

针对电压支撑体系中毫秒级故障穿越、百毫秒级一次调压与秒级二次调压的多尺度协同难题, 天合提出了物理模型驱动、分层解耦的电压支撑解决方案, 实现从暂态故障到稳态调节的全维度无缝协同。

在毫秒级故障穿越层面, 当监测到并网点电压发生骤降或骤升时, PCS毫秒级切换控制策略, 由电压源模式转为动态电流注入模式, 严格遵循物理模型 $I_q = I_{q0} + K \cdot (U_0 - U)$, 根据电压跌落深度输出高达额定值数倍的无功电流。这一“极速刚性支撑”机制确保在故障瞬间强力抬升PCC点电压, 防止电压崩溃, 同时维持足够的短路电流水平, 保障电网侧继电保护装置能准确、快速动作切除故障。

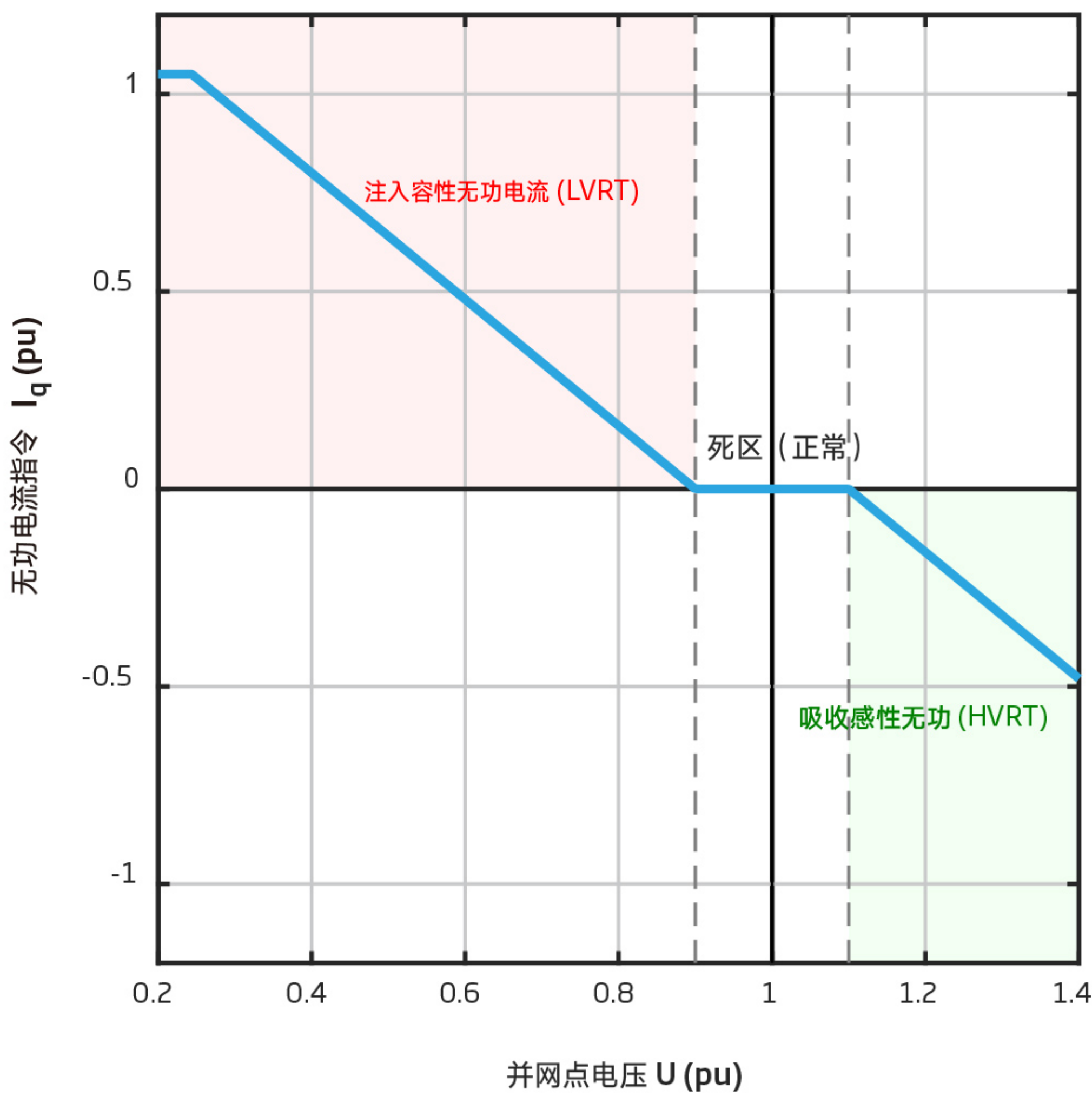
变量说明

I_q, I_{q0} : 故障期间输出的无功电流与故障前瞬间的无功电流。

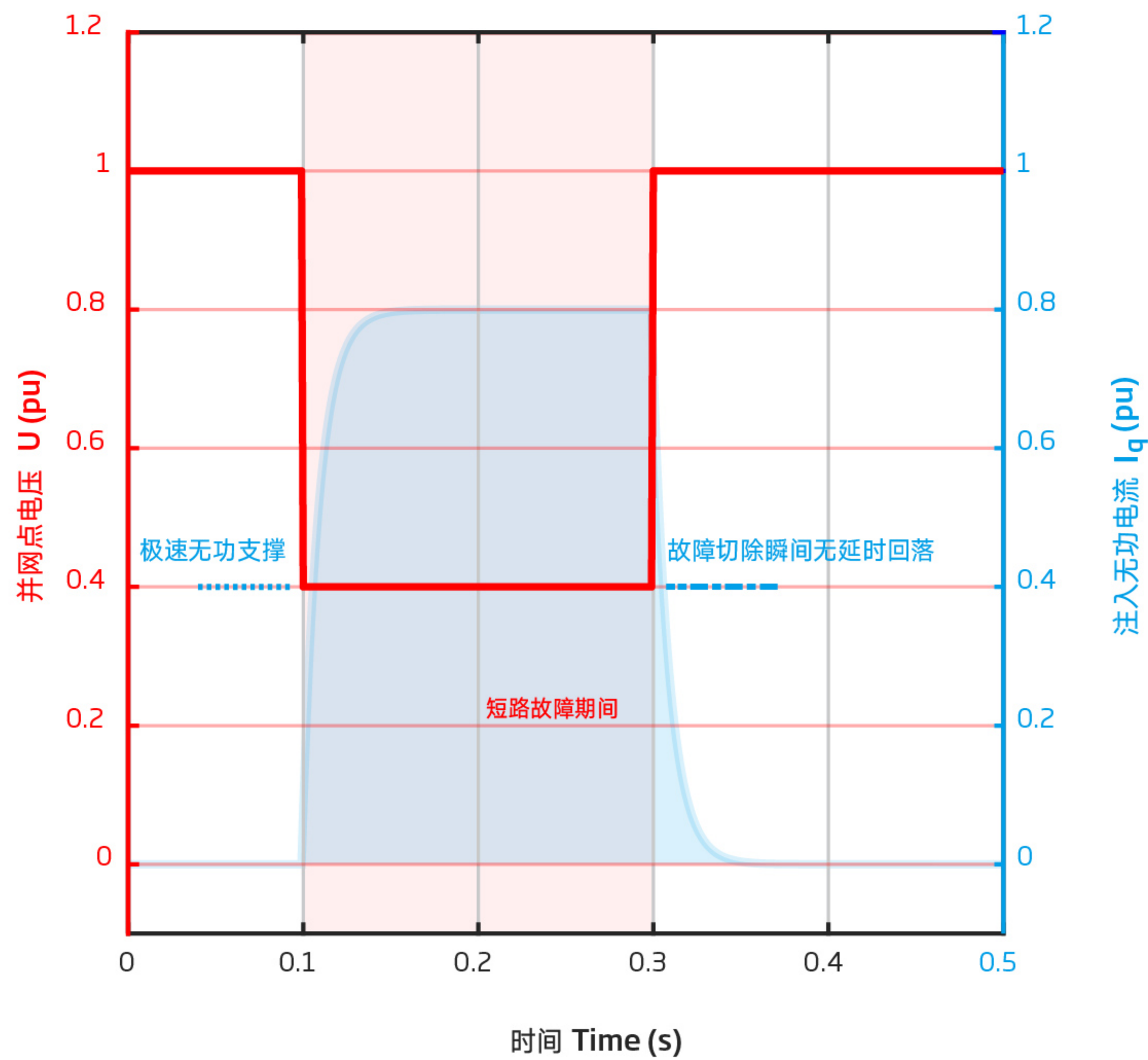
U, U_0 : 并网点实时电压与额定电压。

K : 动态无功电流比例系数。决定了 PCS 对电压波动的支撑强度 (通常取值 1.5 ~ 3.0) 。

稳态 U-I_q 动态无功支撑特性



极速动态无功电流响应



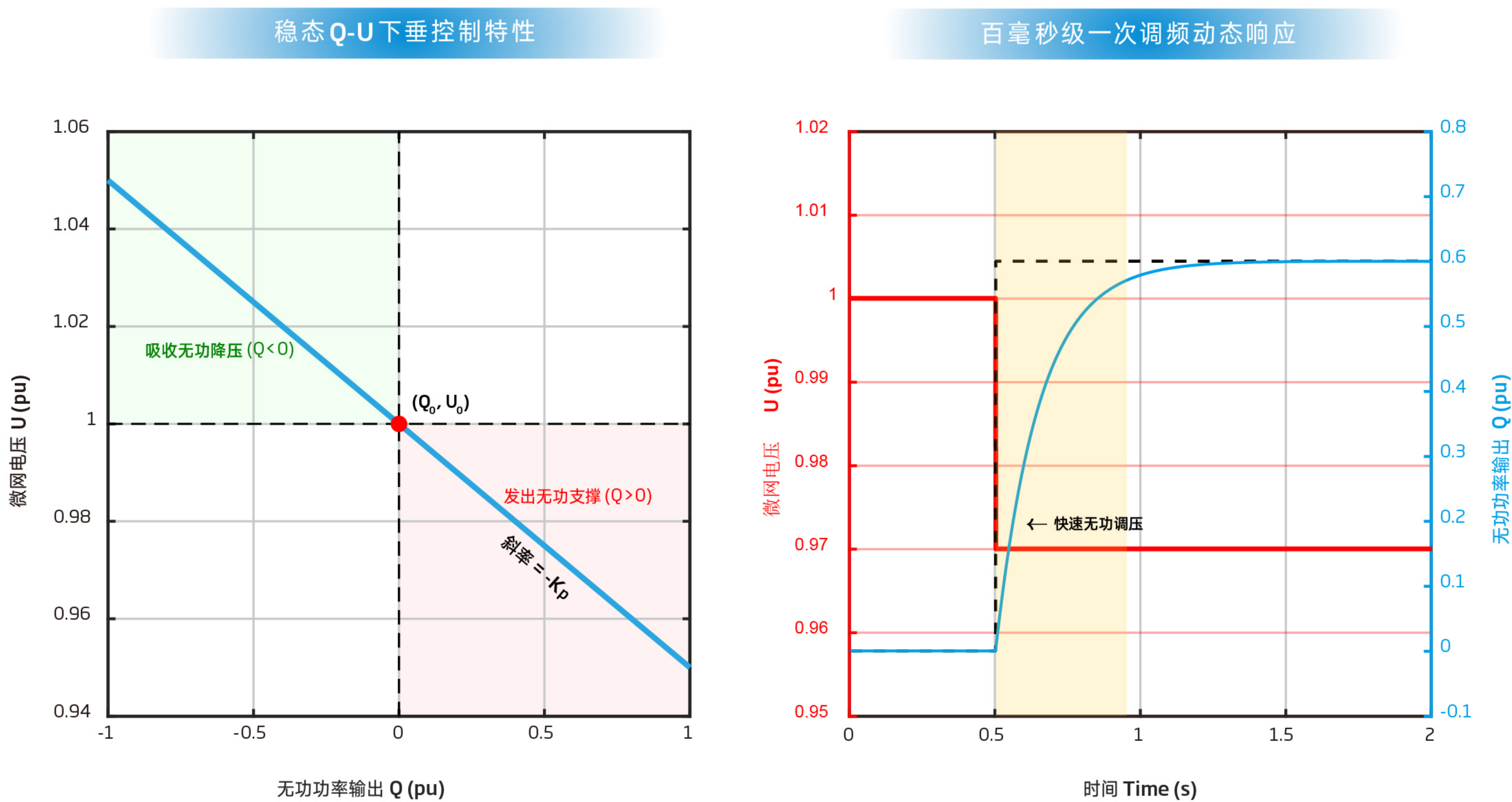
在百毫秒级一次调压层面，天合PCS采用经典无功-电压下垂控制 $U - U_0 = -K_q \cdot (Q - Q_0)$ ，精确模拟同步发电机励磁系统的调节规律。当感性负载启动导致母线电压下降时，PCS依据该物理模型自动增加容性无功输出，补偿电网电压压降。尤为关键的是，下垂机制赋予系统“自主均分”能力，无需通信互联，多台PCS即可根据自身容量比例自动分担系统的无功需求，从根本上避免并联系统中的无功环流问题，为多机并联场景下的稳定运行奠定基础。

变量说明

U, U_0 ：实时电压与额定电压参考值。

Q, Q_0 ：实时无功输出与额定无功参考值。

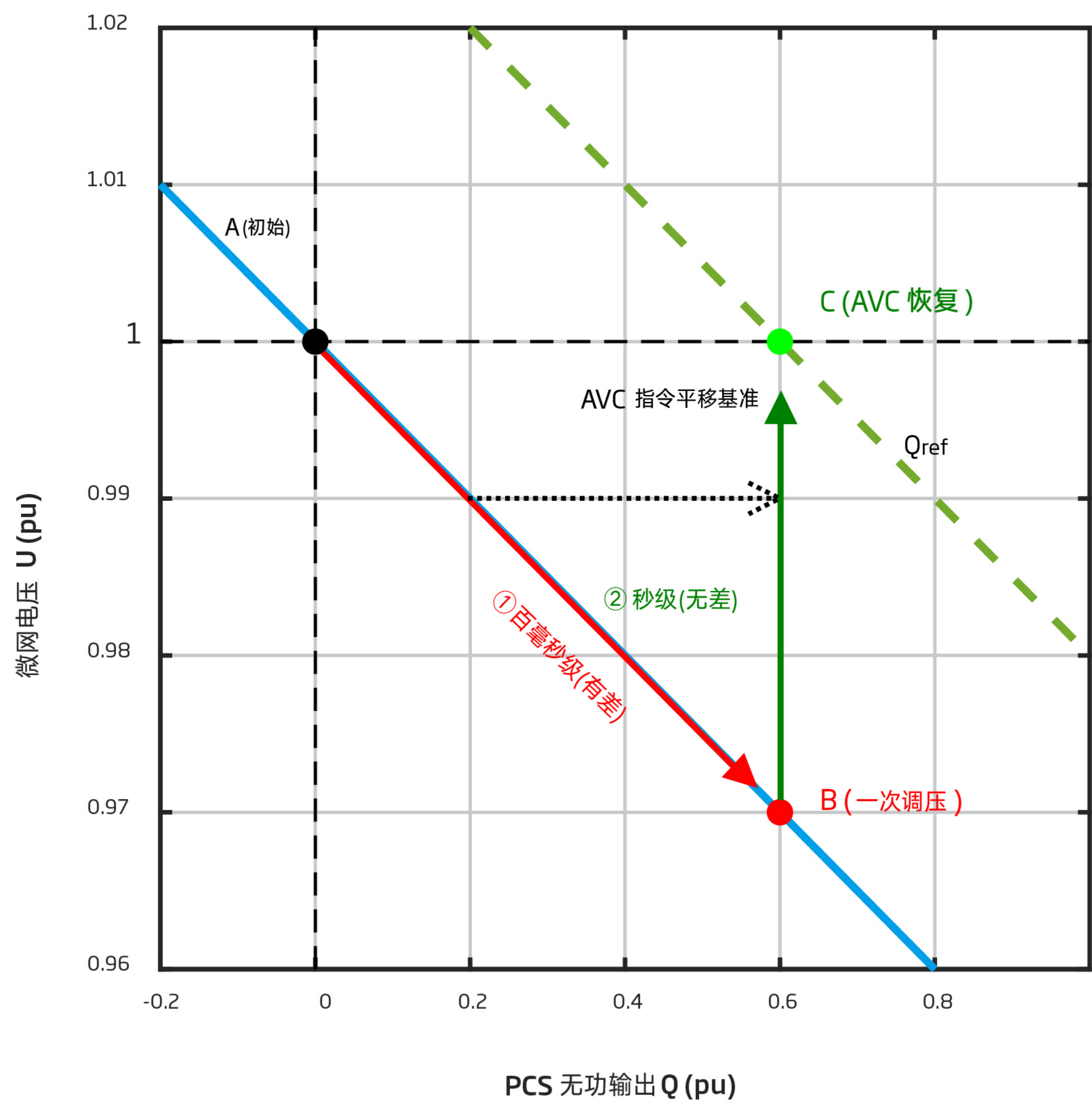
K_q ：无功下垂系数。物理意义等同于励磁系统的调差系数，决定了电压偏差与无功输出的线性关系。



在秒级二次调压层面，ElecOS检测到电压稳态偏差，通过下发二次调压指令（AVC）将电压缓慢、精准地恢复至额定值。PCS响应EMS下发的AVC指令，通过积分方 $Q_{ref}(t) = Q_{set} - K_{iU} \cdot \int (U - U_0) dt$ ，执行区域级电压校正。利用积分环节对电压偏差的累积效应，平滑调整PCS的无功基准点，将关键母线电压无差拉回至目标值，彻底消除一次调压固有的稳态偏差。EMS基于全站无功优化算法，计算最优无功分配方案，协同多台PCS优化站内潮流分布，降低线路损耗，并为下一次电压波动预留充足调节裕度。

变量说明

- $Q_{ref}(t)$ ：动态无功功率参考值。PCS 内部控制环路最终执行的无功指令。
- Q_{set} ：基础调度功率。EMS 下发的初始无功设定点（通常由全站无功优化算法计算得出）。
- K_{iU} ：电压积分增益系数。决定了二次调压消除电压偏差的速度。
- $\int (U - U_0)dt$ ：电压偏差的积分累积项。只要母线电压 U 偏离目标值 U_0 ，该项就会持续累积，推动 Q_{ref} 变化，直到偏差归零。

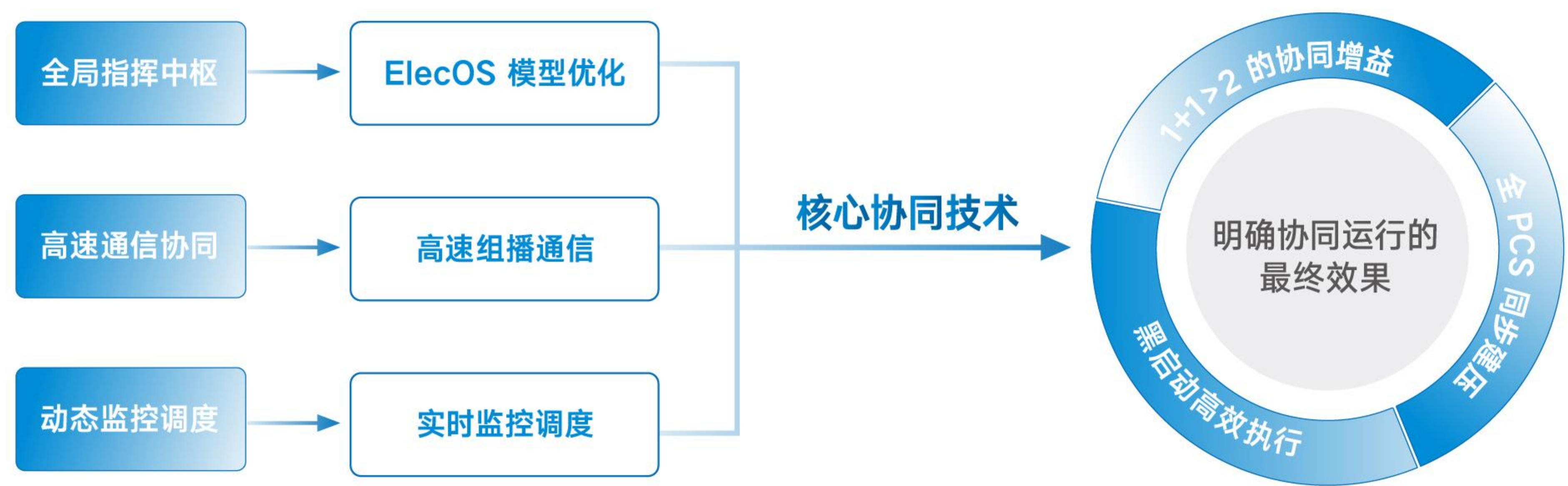


通过上述分层协同的控制架构，天合系统性地解决了故障穿越强制注入与稳态调压目标的冲突、下垂与区域AVC的节奏匹配、多机并联的无功均分等核心难题，为构网型储能提供了全维度、高可靠的电压支撑能力。

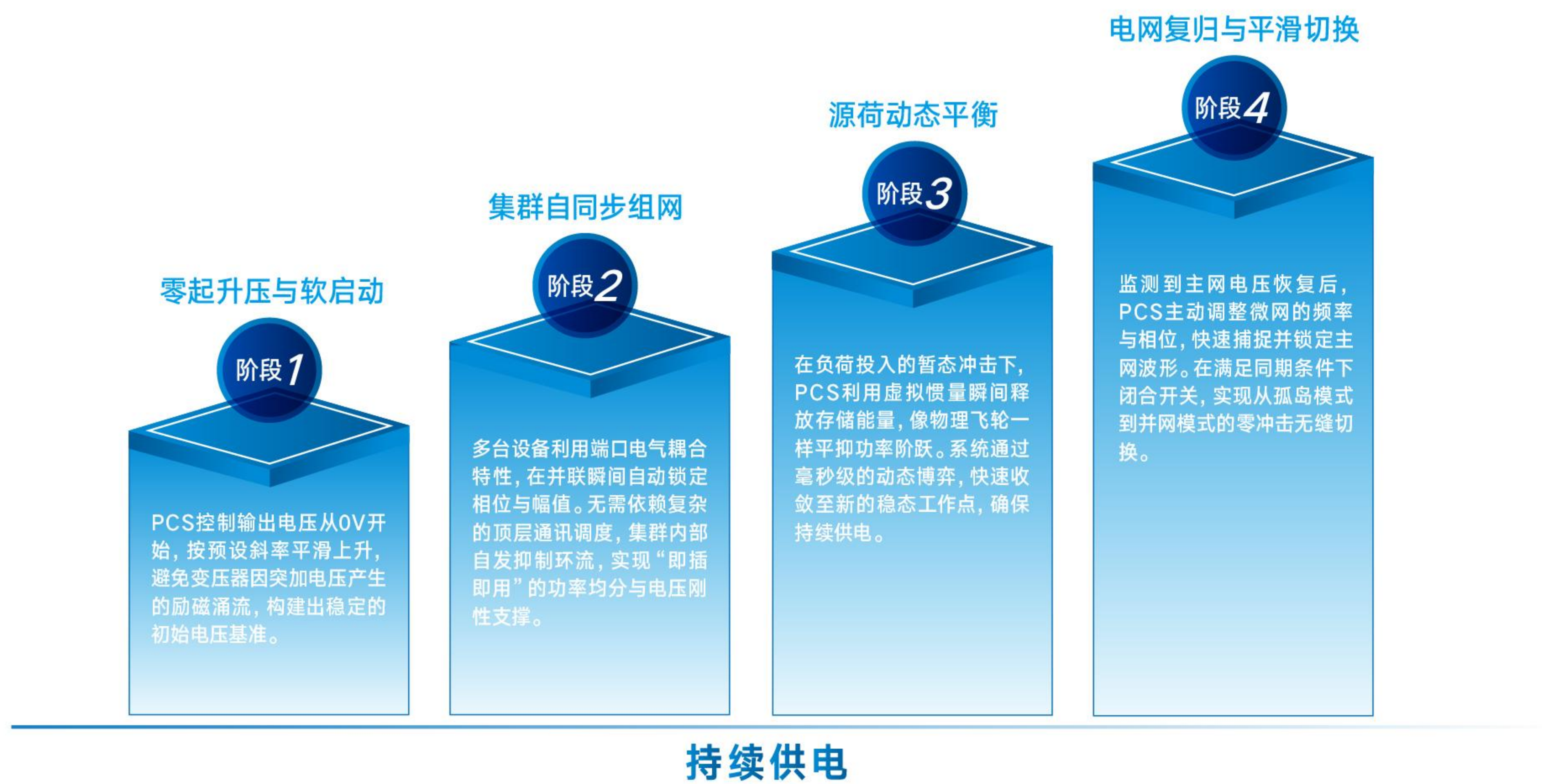
3.5 全过程黑启动技术

针对黑启动与并网同步的全过程技术挑战，天合依托“EMS+PCS一体化”的深度耦合优势，构建了“同步预判、协同动作”的零冲击黑启动技术体系。

EMS方面，作为黑启动的全局指挥中枢，承担着策略优化、指令下发与状态监控等核心职责。ElecOS基于大量仿真与现场实测数据持续优化控制模型与参数，同时结合PCS特性，优化通信与控制策略，实现系统“1+1>2”的协同运行效果。ElecOS与PCS基于实时内核技术，采用高速组播通信方案，可实现 PCS 同步指令接收时延<1ms，有力保障 PCS 相位同步的高可靠性。在下发统一指令后，所有PCS同步同时建立电压源、相位、幅值、频率。同时ElecOS动态检测电网、新能源储能与负荷需求，实时指挥 PCS 调整构网容量，实现“边启动、边带载、边充电”。



PCS方面，摒弃了直接合闸模式，通过特定的励磁涌流抑制算法，从物理层面抵御涌流产生。在电网全停工况下，构网型PCS基于自励磁机理，通过四个维度的系统级演进，实现从无序到有序的重构。基于自研系统的高精度授时协议（PTP），全站PCS实现微秒级时钟同步。



在黑启动期间, 变压器需优选高导磁材料, 具备耐受暂态过流能力、宽频耐受能力、抗电压扰动能力与精准电压调节能力, 保障黑启动过程中电压连续无台阶爬升, 提升并网合格率。同时要求环网柜开关选型具备极强的关合和耐受能力。互感器需具备高宽带特性与绝缘抗干扰能力, 适配黑启动时电压从零爬升过程中电流的瞬时变化, 保障在复杂工况下稳定运行。

通过上述EMS全局指挥与PCS本地执行的协同架构, 天合系统性地解决了励磁涌流抑制、多机同步建压、负荷冲击平抑、并网零冲击切换等黑启动核心难题, 真正实现了从零压建压到并网切换的全过程高精度控制, 确保黑启动一次成功、并网零冲击过渡。

3.6 保障：端到端的系统集成验证能力

3.6.1 天合垂直一体化系统集成布局

目前储能行业技术跨度过大, 需贯通多学科知识, 精准匹配系统容量/功率并验证。同时项目定制化程度高, 需要根据项目特点, 明确技术参数、功能需求和性能指标, 选择匹配的设备等。天合进而建立了先进的储能集成中心, 以专业集成优化系统协同, 实现全生命周期管控, 保障储能系统更安全、更稳定、更长效运行, 破解行业痛点。在集成中心建设的基础上, 我们进一步组建了系统研究院, 重点聚焦构网型系统技术的深度研究, 涵盖仿真技术研究、构网型实证验证等领域。当前, 多数电力电子企业将构网型技术局限于单一的电力电子设备, 而我们认为, 构网系统的本质在于多层次设备间的协同与联动。

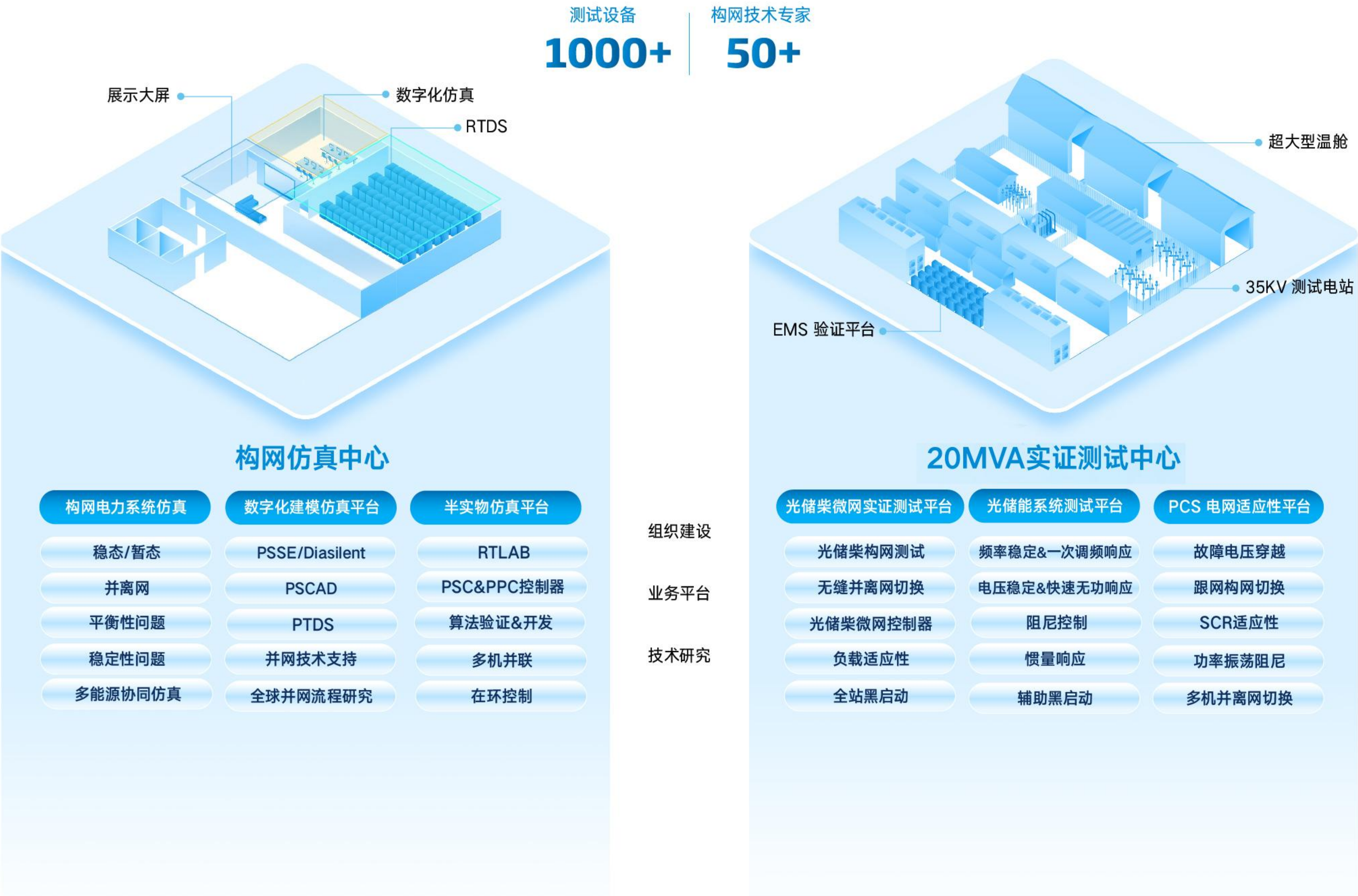


研发人员	专利授权	专利申请	标准制定	测试设备	测试通道	高精度进口检测仪器
600+	600+	1600+	20+	1000+	12000+	100+

系统研究院下设构网仿真中心与20MVA实证测试中心。其中，构网仿真中心主要承担系统级技术可行性分析、稳定性与合规性校验、控制策略开发与优化等核心职能，保障储能项目的可实施性、安全性与合规性，全面支撑电网前期规划工作，包括系统级潮流计算、电站级系统稳定分析、高低电压穿越校验，并构建电网全数字仿真平台，支持稳态分析、电能质量与控制原理仿真，同时开展复杂工况下的系统优化测试，涵盖构网应用场景验证及算法迭代开发。

实证测试中心在满足构网型PCS产品与构网储能系统整体验证需求的基础上，进一步拓展光储柴微电网的实证能力，面向多样化应用场景，为客户提供覆盖全场景的构网型系统解决方案

系统研究院-全场景构网平台



3.6.2 20MVA实证测试中心

天合规划建设构网型 20MVA 对拖验证平台，作为核心构网型储能集成平台，全面补齐现有测试能力短板，打造业内稀缺的中高压大容量储能系统集成验证能力。平台覆盖 22kV (±10%)、35kV 双电压等级，核心容量达 20MVA，依托 25 年一期改造项目已有基础完成升级建设，布局上优化高压线路径、合理预留设备位置。可完成Block级构网/黑启动测试、系统联调，10/12.5/13.8MVA大容量中压一体机的构网试验、样机验证、型式试验，以及 22kV (±10%) 中压侧项目联调等全场景测试，既是储能系统协同与能量管理的专属实验平台，也是国内外项目 FAT 测试与客户见证的核心载体，为构网型储能整体解决方案落地提供全链路技术验证保障。

同时天合系统集成验证平台依托四大研发实验室打造，涵盖业内首个自建35kV中压电站、478m³超大型环境测试舱、AC侧系统联调试验场及1:1半实物仿真EMS验证实验室。平台内所有测试均遵循四级验证框架，匹配客制化储能解决方案，严苛模拟系统能效与稳定性实验闭环，针对极端工况、通讯一致性、并网指标等，实施Block级联调预测试，将并网风险前置，缩短交付周期。



业内率先自建35kV兆瓦级电站，突破了选用第三方站点的环境资源限制。在35kV中压电网环境下，通过模拟场站布局实施Block级联调预测试，验证其高压并网性能等关键指标，加速项目现场并网验收进度。支持7×24小时灵活测试安排、全链路深度验证等优势，为储能系统产品的顺利交付提供了有力保障。

在西侧试验场内建立的两座行业领先的超大型环境舱拥有单舱478m³超大空间，可容纳包含直流舱及中压一体舱在内的40ft的子系统，在-50℃至+90℃极端温度与25%~98%RH湿度之间进行全环境模拟测试。天合在业内首次提出满载条件下环境舱的温度规范，确保产品在环境舱内满功率运行时，舱内温差始终控制在±4℃内。



4. 构网项目案例

4.1 PGT 250MW/500MWh

澳洲电网属于典型的“长串线”结构，一处故障可能像多米诺骨牌一样引发连锁反应，故澳洲的项目需要储能设备具备构网能力。PGT作为南澳州规模最大的独立储能项目，采用全构网模型，于2024年Q4已成功获得AEMO（澳大利亚能源市场运营商）GPS5.3.4标准认证函，并于2025年12月已完成R1设计冻结。本地化专业服务团队主导R1模型构建与验证，主动识别影响R1模型准确性的风险，提出系统解决方案，顺利通过AEMO技术合规性审核，主导按期完成所有BESS（直流舱/PCS/PPC）相关的技术问答。

南澳最大构网型项目PGT250MW/500MWh

PGT南澳州规模最大的独立储能项目，采用全构网模型
2024年Q4已成功获得AEMO（澳大利亚能源市场运营商）GPS5.3.4标准认证函，2025年12月R1设计输入冻结

本地化专业服务团队 主导构网GPS全流程



本地化专业服务团队主导R1模型构建与验证，主动识别影响R1模型准确性的风险，提出系统解决方案，顺利通过AEMO技术合规性审核

主导按期完成所有BESS（直流舱/PCS/PPC）相关的技术问答



提供 R1 模型所需
所有 BESS 控制曲线



提供实际设备的
控制逻辑说明

精通AEMO对新发电和储能项目接入电网的R1流程，能高效提交技术设计和建模文件，主导咨询方GSMT、BOP GGC和供应商三方的收资工作

精准控制项目计划

推动缩短审核周期

无缝对接项目交付

产品通过澳大利亚专用AS3000/AS5139认证



Level 12
171 Collins Street
Melbourne VIC 3000

Postal address
GPO Box 2008
Melbourne VIC 3001

11300 658 724
11323 565 5070
E info@aemo.com.au

19 December 2024

Lucas Millmore
Customer Connections Manager
ElectraNet
52-55 East Terrace Rymil Park
Adelaide 5000

By Email: millmore.lucas@electranet.com.au

Dear Lucas,

Limestone Coast North Energy Park BESS – Response to Proposed Access Standards

AEMO has completed its assessment of the proposed access standards under clause 5.3.4A(d) of the National Electricity Rules (NER) for the proposed Limestone Coast North Energy Park BESS (the Project) with the following particulars:

Project	Limestone Coast North Energy Park BESS
Connection Applicant	Pacific Green Limestone Coast North Energy Park Pty Ltd
Type of Generation	BESS
Maximum Capacity at the Connection Point (or Dispatched Location)	250 MW
Connection Point	The Palm on the surge arrester on the facility side of the 275 kV disconnector A80459 at South East 275kV substation
Connection Point Voltage	275 kV

1. Purpose

This letter documents AEMO's advice to the connection Network Service Provider under clause 5.3.4A(d) of the NER and is not to be used or relied on for any other purpose. In particular, AEMO's advice:

- Does not indicate that the Project is committed or likely to proceed to completion;
- Provides no assurance that the Project will be capable of meeting its applicable access standards on construction; and
- Should not be used or relied on to support any investment decision for the Project.

aemo.com.au

New South Wales | Queensland | South Australia | Victoria | Australian Capital Territory | Tasmania
| Western Australia
Australian Energy Market Operator 185 185 11 672 010 227



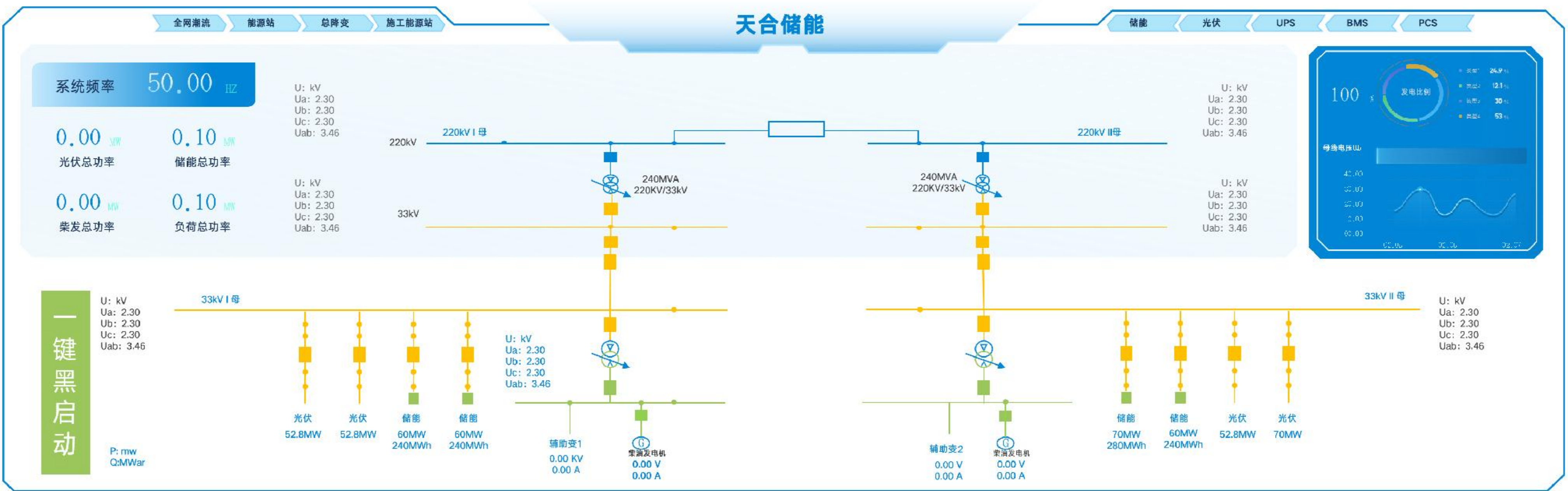
4.2 Atlas 250MW/1000MWh

天合携手全球领先的可再生能源开发商Atlas Renewable Energy在智利联合开发构网型储能项目。该项目紧随Atlas Renewable Energy近期4.75亿美元融资完成之后, 将用于建设这一大型光伏+储能综合体, 旨在为智利矿业提供清洁能源, 同时增强智利国家电网的韧性。

随着拉美地区高比例可再生能源并网加速, 电力系统惯量下降、电压频率稳定性恶化等问题日益突出, 传统跟网型 (Grid-Following) 储能难以满足弱电网或高波动场景下的稳定运行需求。天合储能与Atlas Renewable Energy在智利联合开发的储能项目, 采用先进的构网型 (Grid-Forming) 控制策略, 使储能系统具备电压源特性, 可在无外部电网支撑条件下自主建立电压与频率, 实现黑启动、虚拟惯量支撑、阻尼振荡抑制、RoCoF主动响应测试等功能。该系统可显著增强电网抗扰动能力, 抑制宽频振荡, 并在电网故障或停电期间维持关键负荷稳定运行, 有效提升该区域电网的可靠性。在停电或电压波动情况下, 系统可维持运行参数稳定, 有效避免故障蔓延, 为智利的国家电网提供可靠支撑。

拉美最大光储构网型储能项目Atlas250MW/1000MWh

智利电网(SEN)是超长距离弱惯量电网, 可再生占比高、弱网区域多, 因此对储能的频率支撑、虚拟惯量和短路容量补偿需求极为迫切



- 全站构网黑启**
主动成网, 超80台PCS自同步, 实现整站同步黑启指标: 同步黑启≤180s
- 稳源毫秒**
毫秒级构建稳定电压源, 为全站提供高质量电能
指标: 响应时间≤300ms
- 带载启动**
虚拟惯量支撑大扰动可接启大负载与变压器
指标: 承受≥80%冲击负载
- 离并网自动切换**
离网运行后自主完成对相并网, 确保高压侧无忧接入
指标: 同步偏差≤1°
- 弱网强撑**
在极弱电网稳定运行, 提供短路容量与稳相支撑能力。
指标: 最低稳定SCR≥1.1
- 构网/跟网无扰切换**
构网/跟网模式可无忧切换实现柔性友好并网。

总结与展望

从“双高”电网的时代挑战出发，天合系统阐述了构网型技术的完整实践，实现了从“设备级功能”到“系统级能力”的根本跃迁，使储能系统真正地从电网的“跟随者”成长为“支撑者”。

展望未来，构网型技术正从“可选附件”走向“标准配置”。随着新能源渗透率的持续攀升，构网能力将成为高比例可再生能源系统的刚性需求。天合将持续深化自适应控制算法的迭代升级，推动风光储深度融合，在更大范围内释放构网能力的系统价值，做能源转型长跑中坚定的支撑力量。





江苏天合储能有限公司

常州市新北区天合光伏产业园天合路2号
邮箱: trinastoragecn@trinasolar.com

www.trinasolar.com

