

# 构网型储能在弱电网与孤岛运行中的稳定性作用机理分析

申永芳

新疆华电喀什热电有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i9.6573

**[摘要]** 本文旨在分析构网型储能在弱电网及孤岛运行中的稳定性作用机理。随着高比例可再生能源接入,电网惯性下降,稳定性问题凸显。构网型控制通过模拟同步发电机外特性,自主构建电压与频率支撑,为系统提供关键惯性和阻尼。文章阐释其与跟网型控制的区别,重点剖析在弱电网中增强强度、抑制振荡、提升稳定性的机理,论述在孤岛中作为主电源建立框架、平衡功率、保证质量的核心作用,并展望技术挑战与发展。构网型储能是构建高比例新能源电力系统稳定运行的关键技术。

**[关键词]** 构网型储能; 弱电网; 孤岛运行; 稳定性机理

中图分类号: V242.3+1 文献标识码: A

## Analysis of the stability mechanism of grid-connected energy storage in weak power grid and island operation

Yongfang Shen

Xinjiang Huadian Kashi Thermal Power Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper aims to analyze the stability mechanism of grid-connected energy storage in weak grids and islanded operations. With the access of a high proportion of renewable energy, the inertia of the grid decreases, and stability issues become prominent. Grid-connected control simulates the external characteristics of synchronous generators to independently build voltage and frequency support, providing key inertia and damping for the system. The article explains the difference between it and grid-following control, focusing on the mechanism of enhancing strength, suppressing oscillations, and improving stability in weak grids. It discusses its core role as the main power source in establishing a framework, balancing power, and ensuring quality in isolated islands, and looks forward to technical challenges and developments. Grid-connected energy storage is a key technology for building stable operation of power systems with a high proportion of new energy.

**[Key words]** grid-connected energy storage; weak power grid; island operation; stability mechanism

## 前言

全球能源转型进程不断加速,以风电、光伏为代表的逆变器接口可再生能源在电力系统中的渗透率持续提高。这些分布式电源通过电力电子变流器接入电网,其固有的低惯量、弱阻尼特性逐步取代传统同步发电机的旋转惯量,导致现代电力系统,尤其是网架结构薄弱的偏远地区电网,面临前所未有的稳定性挑战:频率抗扰能力下降、电压崩溃风险加剧、宽频振荡现象频发。在此背景下,储能系统——特别是具备主动支撑能力的构网型储能——正从单纯的“能量存储”单元跃升为系统“稳定支撑”的关键资产。其研究对于增强电网韧性、保障新能源高效消纳具有重大的理论价值与工程意义。当前,国内外学者围绕构网型控制策略、稳定性分析及工程应用已开展广泛研究,但在系统性地阐释其从弱电网到孤岛运行不同场景下的稳定性作用机理方面仍存在深入空间。本文旨在针对这一关键问题,开展综合性的机理分析与探讨。

## 1 构网型储能的基本原理与核心技术

构网型储能与跟网型控制在原理上存在本质区别,其核心在于从“追随者”到“构建者”的角色转变。跟网型控制本质上是一个电流源,其行为模式是被动的。它完全依赖于电网提供的稳定电压参考点,通过锁相环实时追踪电网的电压相位和频率,并按照指令向电网注入预设的有功和无功电流。这种模式在电网强度足够的传统系统中表现良好,但在以高阻抗、低短路容量为特征的弱电网中,锁相环与电网阻抗之间的负面交互作用极易引发同步失稳和宽频振荡问题。与之相反,构网型控制本质上是一个电压源,其行为模式是主动的。它摒弃了对电网电压相位追踪的绝对依赖,通过内部算法自主生成稳定的电压和频率参考信号,主动为电网建立一个坚固的电压和频率支撑点。它通过调节其输出电压的幅值和相位来直接控制和平衡系统的有功及无功功率,从而成为电网的稳定基石。

为实现其“电网构建”功能,构网型储能采用了多种先进的控制策略。虚拟同步机技术是其中的典范,它通过模拟同步发电机的核心物理特性——二阶摇摆方程,在电力电子变流器中成功地引入虚拟惯量和阻尼环节,使其对外呈现出与传统同步机无异的频率响应特性,即固有的有功-频率下垂特性,从而为缺乏旋转惯量的电力系统注入宝贵的惯性支撑。虚拟阻抗技术则是在控制环路中引入额外的阻抗环节,通过主动重塑变流器的输出阻抗特性,来改善并联运行时与其他单元之间的功率分配精度,增强系统对线路参数不平衡的鲁棒性,并有效抑制设备间的环流现象。而作为所有这些高级控制策略基础的下垂控制,则通过模拟传统发电机的有功-频率和无功-电压下垂特性,实现了多台构网型变流器在无需高速通信条件下的功率自主、均衡分配,保证了系统的即插即用和可扩展性。

综上所述,构网型储能技术的核心稳定性作用可概括为:为系统提供电压和频率的参考与支撑。这具体体现在三个核心方面:一是提供虚拟惯性,通过模拟同步机的转子动力学特性来减缓系统频率的变化速率,为一次调频争取宝贵时间;二是提供阻尼,消耗系统振荡能量,抑制功率和频率振荡,提升系统的动态稳定性;三是提供短路容量,增强电网局部的电压刚度,提高电压抗扰动能力和稳定性水平。这些主动支撑能力共同构成了构网型储能提升现代电力系统,尤其是弱电网与孤岛系统稳定性的根本机理。

## 2 构网型储能在弱电网中的稳定性作用机理

### 2.1 弱电网的特征与稳定性问题

弱电网通常指短路容量相对较小、等效电网阻抗较大的电力系统,常见于偏远地区或新能源集中接入的电网末端。其核心特征在于系统表现出“软”的特性,即电压波动幅度大、频率稳定性差,且极易引发宽频带振荡问题。当采用传统跟网型控制的变流器接入此类电网时,其依赖锁相环跟踪电网电压的特性会与电网大阻抗形成负交互作用,导致同步失稳、谐波谐振放大乃至次同步振荡等一系列稳定性问题,严重制约了新能源的并网容量和系统的安全运行。

### 2.2 增强电网强度与电压稳定性的机理

面对弱电网的固有缺陷,构网型储能通过其电压源特性发挥着增强电网强度与电压稳定性的关键作用。首先,它作为一个稳定的本地电压源,为公共连接点提供了一个低阻抗的电压参考点。这一特性能够有效补偿因长线路、大阻抗传输所造成的电压跌落,从本质上提升了接入点的电压稳定性,使局部电网的电压水平不再随远端主网电压或负荷波动而剧烈变化。其次,通过无功-电压下垂控制或自动电压调节功能,构网型储能能够动态感知电网电压偏差,并快速响应以注入或吸收相应的无功功率。这种毫秒级的无功支撑能力可以迅速抵消负荷突变或故障扰动带来的电压波动,有效防止电压失稳乃至崩溃事故的发生,将电网电压稳定在一个安全的运行区间内。

### 2.3 提供虚拟惯性与阻尼的频率稳定机理

在频率稳定方面,构网型储能提供的虚拟惯性与阻尼是其

在弱电网中的另一核心价值。通过虚拟同步机技术,储能变流器模拟了同步发电机的转子运动方程。当系统频率发生变化时,其内部的“虚拟转子”动能会立即响应,通过功率-频率的微分关系向系统释放或吸收动能,从而提供瞬时有功功率支撑。这种惯性响应极大地减缓了系统频率的变化速率,为常规机组的一次调频动作赢得了至关重要的反应时间。同时,VSG控制中精心设计的阻尼环节能够有效地消耗掉系统因扰动而产生的振荡能量,无论是负荷投切还是新能源功率的随机波动,其引发的机电振荡或同步振荡都能被显著抑制,从而大幅提升弱电网的动态稳定性与抗干扰能力。

### 2.4 抑制宽频振荡的机理

除了常规的电压和频率问题,弱电网中更复杂的宽频振荡问题同样需要构网型储能的介入。这类振荡往往源于电力电子设备阻抗与电网阻抗在特定频段上的不利交互。构网型变流器通过控制算法可以主动重塑其输出阻抗特性,使其在关键频段内呈现为阻性或感性阻抗。这种主动阻抗重塑能力改变了局部的系统阻抗网络结构,避免了与电网容性阻抗或其他跟网型变流器所呈现的负阻阻抗发生谐振,从而能从根源上抑制次同步振荡和超同步振荡等宽频振荡现象,净化电网环境,保障系统安全。

## 3 构网型储能在孤岛运行中的稳定性作用机理

### 3.1 孤岛运行模式的特征与挑战

孤岛运行模式是指局部电网或微网与主大电网完全解列,形成一个独立运行的电力孤岛。该模式的核心特征与挑战在于其失去了大电网在功率和电压上的强大支撑,系统规模显著减小,总惯性极低。在此环境下,任何微小的负荷投切或分布式电源出力的波动都会直接、迅速地转化为显著的频率和电压变化,稳定性问题被急剧放大,其严峻程度远高于并网状态。因此,孤岛系统的生存与稳定运行绝对依赖于一个或多个能够自主建立并维持电网电压和频率基准的电源,即“电网形成者”,而构网型储能正是承担这一角色的理想选择。

### 3.2 建立与维持电网框架的核心作用

构网型储能在孤岛中最根本的作用在于建立并维持整个系统的运行框架。首先是黑启动与电压建立能力。构网型储能可以作为系统的启动电源,在全黑状态下,无需外部电网支持,自主产生稳定、标准的三相平衡电压和额定频率,从而构建起孤岛系统的“骨架”,为其他跟网型微源(如光伏、风电)和负荷的逐步有序接入创造先决条件。其次,在由多台储能单元构成的系统中,构网型控制实现了灵活可靠的运行架构。可采用主从控制模式,指定一台储能作为主单元设定电压频率,其余单元作为从单元跟踪功率分配;更重要的是,其通过对等控制下的有功-频率和无功-电压下垂特性,能够实现多台构网型储能单元在无需高速通信线路的情况下,自主、精确地按容量比例分担系统总负荷,并协同维持系统频率和电压的稳定,极大地增强了系统的可靠性和可扩展性。

### 3.3 维持功率平衡与电能质量的机理

在建立起电网框架之后,维持实时的功率平衡与高质量的电能供应是构网型储能保障孤岛长期稳定运行的核心机理。在一次调频层面,通过其固有的有功-频率下垂特性,构网型储能能够自动感知系统频率的微小偏差,并立即调整其有功功率输出,与变化的负荷需求实时匹配,从而维持发电与用电之间的瞬时平衡,将频率偏差控制在允许范围内。在二次调频层面,通过与上层能量管理系统的配合,或在检测到自身荷电状态越限时主动调整功率参考点,它能够实现频率的无差调节和能量的跨时间尺度管理,确保储能系统自身运行的可持续性,避免因电量耗尽而导致系统再次崩溃。此外,作为系统的电压源,构网型储能对非线性负荷产生的谐波电流具有天然的隔离作用,表现出比电流源型变流器更强的谐波免疫力;同时,还可通过附加的谐波抑制等高级控制算法,主动补偿谐波,净化电网波形,全面保障孤岛系统用户的电能质量。

#### 4 构网型储能应用面临的挑战与未来展望

##### 4.1 关键技术挑战

尽管构网型储能在提升系统稳定性方面展现出巨大潜力,但其从技术示范走向大规模工程应用仍面临诸多关键技术挑战。首要挑战在于其自身稳定性的保障与鲁棒性的提升。构网型变流器是一个复杂的非线性系统,其控制性能与电网阻抗、负荷特性等外部环境紧密耦合。控制参数的整定过程复杂,且一套固定的参数难以在所有运行工况下均保持最优性能,系统在遭遇大扰动或运行点剧烈变化时的鲁棒性仍有待提高。其次,故障穿越与保护配合是一大难题。在弱电网或孤岛发生短路故障时,构网型电源既需要提供足够的短路电流以确保保护设备能够可靠检测和隔离故障,又必须严格限制电流以保障自身电力电子设备的安全,这与基于传统同步机大短路电流设计的保护方案之间存在协调配合的困难。最后,多时间尺度协调控制是系统工程化的难点。如何将构网型储能毫秒至秒级的快速有功/无功支撑能力,与分钟级甚至小时级的电池荷电状态管理、经济调度和能量优化进行无缝协同,实现从暂态稳定到长期经济性的全局优化,是一个复杂的系统性问题。

##### 4.2 未来研究方向展望

面向未来,为克服上述挑战并推动构网型储能的广泛应用,几个研究方向值得重点关注。一是发展自适应与智能控制技术。

利用人工智能、机器学习等算法,使构网型控制系统能够在线实时感知电网状态变化,并自主调整控制参数和策略,从而显著提升其在复杂多变工况下的适应性和鲁棒性。二是加快标准化与测试验证体系建设。亟需推动包括并网测试规程、建模与仿真标准、设备规范及运维指南在内的全链条标准制定,并通过大型示范工程对技术的有效性和可靠性进行充分验证,为产业化铺平道路。三是深入研究混合构网系统的稳定理论。未来的电力系统将是构网型储能、构网型新能源发电和传统同步机等多种设备共存的形态,深入研究其间的动态交互机理、稳定性边界以及协调控制策略,是构建安全稳定新型电力系统的必然要求。

#### 5 结论

本文系统地分析了构网型储能在弱电网与孤岛运行模式下的稳定性作用机理,得出以下主要结论:构网型控制技术通过模拟同步发电机的运行特性,实现了变流器从被动“追随者”到主动“构建者”的根本性转变,其内在的电压源特性是提升电力系统稳定性的物理基础。在弱电网环境中,构网型储能通过自主提供稳定的电压参考点,有效增强了电网强度;通过提供虚拟惯性和阻尼支撑,显著平抑了频率波动,并成功抑制了宽频振荡现象,从根本上解决了高阻抗电网与跟网型变流器之间的交互失稳难题。在孤岛运行模式下,构网型储能作为系统的核心主电源,承担了建立并维护电压和频率稳定框架的关键职责,通过快速的功率调节和无功支撑,确保了发电与用电的实时平衡,保障了孤岛系统的电能质量和安全运行,是其不可或缺的稳定基石。

#### [参考文献]

- [1]王伟,周少泽,黄萌,等.构网型技术:演进历程、功能定位与应用展望[J].电力系统自动化,2025(01):1-13.
- [2]张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022(08):2806-2819.
- [3]周亮.微电网孤岛运行工况下DT模型自适应迁移方法[J].电气传动,2024,54(09):50-55.

#### 作者简介:

申永芳(1989--),男,汉族,山西潞城人,函授本科,职务:技术专工,工程师,研究方向:电力及新能源。