

新能源并网对电力系统频率稳定的影响及对策

龙登新

三亚多益实业开发有限责任公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17184

[摘要] 随着“双碳”战略目标的深入推进,以风能、太阳能为代表的新能源在电力系统中的渗透率持续攀升。然而,新能源发电固有的随机性、波动性和间歇性,以及其通过电力电子变流器与电网连接的特性,对传统电力系统的频率稳定构成了严峻挑战。本文首先阐述了电力系统频率稳定的基本原理及传统同步发电机在其中扮演的关键角色;其次,深入剖析了高比例新能源并网对系统惯量、一次调频能力和频率动态响应特性带来的负面影响;在此基础上,系统性地梳理并评述了当前应对上述挑战的主要技术对策,包括新能源机组主动支撑能力提升、新型储能系统应用、需求侧响应资源协同以及先进控制策略优化等;最后,对构建适应高比例新能源接入的新型电力系统频率稳定体系进行了展望,并提出了相关建议。

[关键词] 新能源; 电力系统; 频率稳定; 系统惯量; 一次调频; 虚拟同步机

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A

Impact of Renewable Energy Integration on Power System Frequency Stability and Countermeasures

Dengxin Long

Sanya Duoyi Industrial Development Co., Ltd.

[Abstract] With the deepening advancement of the "dual carbon" strategic goals, the penetration rate of renewable energy, represented by wind and solar power, in the power system continues to rise. However, the inherent randomness, volatility, and intermittency of renewable energy generation, along with its integration into the grid via power electronic converters, pose significant challenges to the frequency stability of traditional power systems. This paper first elaborates on the fundamental principles of power system frequency stability and the critical role played by traditional synchronous generators. Next, it provides an in-depth analysis of the negative impacts of high-penetration renewable energy integration on system inertia, primary frequency regulation capability, and frequency dynamic response characteristics. On this basis, the paper systematically reviews and evaluates current technical countermeasures to address these challenges, including enhancing the active support capability of renewable energy units, applying new energy storage systems, coordinating demand-side response resources, and optimizing advanced control strategies. Finally, the paper offers insights into building a frequency stability framework for power systems adapted to high-penetration renewable energy integration and proposes relevant recommendations.

[Key words] Renewable Energy; Power System; Frequency Stability; System Inertia; Primary Frequency Regulation; Virtual Synchronous Generator

引言

能源是人类社会发展的基石,在全球气候变化与环境污染压力下,加快能源结构转型、发展可再生能源成全球共识。我国在“双碳”战略引领下,风电、光伏等新能源装机容量爆发式增长。截至2023年底,二者装机容量均突破4亿千瓦,合计占比近三成且持续上升。但新能源大规模并网带来新问题。传统电力系

统以大量同步发电机为核心,其转动惯量与天然调频能力是维持频率稳定的“压舱石”。而新能源发电单元本质是经全控型电力电子变流器与电网连接的“静止”设备,自身无物理转动惯量,传统控制策略对频率变化不敏感,呈“低/无惯量、弱调频”特性。新能源渗透率高时,传统同步机组被大量替代,系统整体惯量下降,一次调频备用容量不足。系统发生较大功率缺额,频率

会更快下降、稳态偏差更大,甚至触发安全装置,威胁电网安全。近年来,爱尔兰、澳大利亚等高比例可再生能源电网均出现此类问题。鉴于此,深入研究新能源并网对电力系统频率稳定的影响机理,探索应对策略,对保障我国新型电力系统安全、可靠、高效运行意义重大。本文将系统性分析该核心问题,为未来电网规划、运行和控制提供参考。

1 电力系统频率稳定基础理论

1.1 频率稳定的定义与重要性

电力系统频率是衡量电能质量的核心指标之一,也是系统有功功率供需平衡状态的直接反映。根据国际大电网会议(CIGRE)的定义,频率稳定是指电力系统在遭受有功功率扰动后,维持系统频率于允许范围内的能力^[1]。系统正常运行时,频率应保持在额定值(我国为50Hz)附近的一个极小范围内波动(如±0.2Hz)。频率的大幅偏移不仅会影响用户侧用电设备的正常工作(如电动机转速异常、精密仪器失准),更会危及发电侧设备的安全(如汽轮机叶片共振),极端情况下可能导致系统崩溃,造成大面积停电事故。

1.2 传统系统频率响应过程

当系统发生有功功率扰动(ΔP_d)时,频率的动态变化过程可分为三个阶段:(1)初始惯量响应阶段:扰动发生的瞬间,由于机械功率与电磁功率的不平衡,同步发电机转子转速发生变化。系统储存的动能($E = 1/2 J \omega^2$,其中J为转动惯量, ω 为角速度)被释放或吸收,以暂时弥补功率缺额。此阶段决定了频率的初始变化速率($RoCoF = -\frac{\Delta P_d}{2HS_B}$,其中H为系统惯性时间常数, S_B 为系统基准容量)。惯量越大,RoCoF越小,为后续调频措施争取了宝贵时间。(2)一次调频阶段:在几秒内,各同步发电机组的调速器(Governor)感知到转速(频率)下降,自动开大导叶或汽门,增加原动机出力。这是一个有差调节过程,最终使频率稳定在一个新的、略低于额定值的稳态点。一次调频能力取决于机组的调差系数(R)和可用的一次调频备用容量。(3)二次调频/自动发电控制(AGC)阶段:在几十秒至几分钟的时间尺度上,调度中心通过AGC系统,协调各机组出力,消除一次调频留下的频率偏差和联络线功率偏差,将频率恢复至额定值。在整个过程中,系统惯量(H)和一次调频能力是决定频率能否安全越过最危险时刻(即频率最低点)的两大关键因素。

2 新能源并网对频率稳定的影响机理

高比例新能源接入主要通过以下三个方面对系统频率稳定产生不利影响:

2.1 系统惯量水平显著降低

这是最根本、最直接的影响。传统同步发电机的转子是一个巨大的飞轮,其物理转动惯量是系统惯量的主要来源。而新能源发电单元通过电力电子变流器并网,其直流侧电容或电池虽能存储少量能量,但与同步电机转子的巨大动能相比微乎其微,且

其动态响应特性完全不同。在传统控制模式下,新能源机组对系统频率变化“视而不见”,无法像同步机那样自然地提供惯量响应。随着新能源渗透率的提高,同步机开机数量减少,系统等效惯性时间常数H急剧下降。由RoCoF公式可知,在相同的功率扰动下,H的减小将导致频率初始变化速率(RoCoF)成倍增加。过高的RoCoF可能超出发电机组和保护装置的承受能力,导致连锁故障。

2.2 一次调频能力削弱

一方面,新能源机组本身不具备传统意义上的调速器,无法提供一次调频服务。另一方面,为了追求最大经济效益,新能源电站通常运行在MPPT模式,其有功出力完全由自然资源(风速、光照)决定,没有预留可用于调频的备用容量。即使部分新能源场站配置了AGC系统,其调节指令也多用于跟踪计划出力或参与市场交易,而非实时响应系统频率变化^[2]。此外,新能源出力的强波动性本身就会成为系统的一种“负向扰动源”。

2.3 频率动态响应特性恶化

综合惯量降低和调频能力削弱的影响,高比例新能源电网的频率动态响应特性表现出“快、深、缓”的特点:“快”:指频率下降速率(RoCoF)快。“深”:指在一次调频作用前,频率跌落的深度更深,更容易触及低频减载的启动阈值。“缓”:指由于缺乏足够的快速调频资源,频率恢复到正常水平的过程更为缓慢。这种恶化的动态特性极大地压缩了系统应对大扰动的安全裕度,使得原本在传统电网中可控的故障事件,在新型电力系统中可能演变为严重的稳定性事故。

3 提升新能源电力系统频率稳定性的对策

为应对上述挑战,学术界和工业界提出了多种技术路径,旨在从电源侧、电网侧和负荷侧协同发力,构建一个具备足够“虚拟惯量”和“快速调频”能力的新型频率稳定支撑体系。

3.1 提升新能源机组自身的主动支撑能力

这是最直接、最经济的解决方案,核心思想是通过改进新能源变流器的控制策略,使其能够模拟同步发电机的部分外特性。(1)虚拟惯量控制:通过在变流器控制环中引入与系统频率变化率(df/dt)成正比的附加功率指令,使新能源机组能在扰动初期快速增发或减发功率,模拟同步机的惯量响应。其输出功率增量可表示为 $\Delta P = -K_v * df/dt$,其中 K_v 为虚拟惯量系数。该方法能有效抑制RoCoF,但提供的能量有限,且在频率恢复阶段可能产生反向功率冲击。(2)一次调频控制:通过引入与系统频率偏差(Δf)成正比的附加功率指令,使新能源机组具备类似调速器的功能。其输出功率增量可表示为 $\Delta P = -K_p * \Delta f$,其中 K_p 为下垂系数。这要求新能源场站必须预留一部分有功备用容量(即放弃部分MPPT收益),以备调频之需^[3]。(3)虚拟同步机技术(VSG):这是一种更为先进的综合控制策略。VSG通过在控制算法中引入一个虚拟的转子运动方程,使变流器在外特性上完全“伪装”成一台同步发电机。它不仅能同时提供虚拟惯量和一次调频功能,还能自主建立电压和频率,具备更强的电网支撑能力和黑启动

潜力。VSG(虚拟同步发电机)被认为是实现新能源友好并网的关键技术之一。

3.2 发挥新型储能系统的灵活调节优势

储能系统(ESS),特别是电化学储能(如锂电池),具有毫秒级的功率响应速度、双向调节能力和精准的功率控制精度,是解决频率稳定问题的理想“缓冲器”。(1)提供快速惯量响应:储能系统可以通过预设的控制策略,在检测到 df/dt 信号后立即释放或吸收功率,其响应速度远超任何传统机组,能最有效地抑制RoCoF。(2)提供大容量一次调频备用:储能可以作为独立的调频资源,或者与新能源电站联合运行(风光储一体化),利用其充放电能力提供持续、稳定的一次调频服务。相比于让新能源弃光弃风来预留备用,储能方案的经济性更高。(3)平抑新能源出力波动:通过“削峰填谷”,储能可以平滑新能源的出力曲线,从源头上减少其对系统造成的功率扰动,间接提升了系统的频率稳定性。目前,国内外已有大量储能电站被部署用于电网侧调频辅助服务市场,并取得了显著成效。

3.3 挖掘需求侧响应资源的潜力

传统的频率稳定主要依赖供给侧调节,而在智能电网背景下,海量的需求侧可调节负荷(如电动汽车、智能家居、工业可中断负荷、数据中心等)构成了一个巨大的、分布式的“虚拟电厂”。(1)负荷侧一次调频:通过先进的通信和控制技术(如5G、物联网),电网调度中心可以向符合条件的用户负荷发送频率响应信号,引导其在系统频率异常时自动调整用电功率。例如,在频率下降时,短时关闭部分非关键负荷或降低空调温度设定值^[4]。这种“以用促稳”的模式,成本低廉,且能有效分担发电侧的调频压力。(2)电动汽车(EV)作为移动储能:大规模EV的有序充放电(V2G, Vehicle-to-Grid)可以构成一个巨大的分布式储能网络,为系统提供宝贵的灵活性资源和调频能力。

4 新能源电力转型核心影响及关键应对对策

新能源电力转型的核心痛点,非常关键!核心结论是:新能源并网会通过降低系统惯量、加剧出力波动等削弱频率稳定性,需结合技术改造、机制优化和电网升级多维度应对。

4.1 核心影响

系统惯量大幅下降:新能源机组(风电、光伏)多通过电力电子器件并网,缺乏传统火电、水电的旋转惯量,频率响应速度变慢,抗扰动能力减弱。

出力波动性强:风能、太阳能受风速、光照变化影响,输出功率随机波动,易引发频率偏差甚至越限;

调频能力先天不足:多数新能源机组不具备传统机组的一次、二次调频功能,无法快速响应频率变化。

4.2 关键应对对策

提升系统惯量支撑:新能源电站配置虚拟惯量控制功能,模拟传统机组的惯量响应;合理保留部分常规电源作为“惯量备用”,避免大规模退役。

平抑出力波动:优化新能源功率预测技术(短期预测精度提升至95%以上),配置储能系统(锂电池、抽水蓄能)快速吸收/释放功率,与新能源机组协同运行。

完善调频体系:推动新能源参与调频,通过技术改造让风电、光伏具备AGC(自动发电控制)功能;建立市场化激励机制,明确调频服务补偿标准。

强化电网支撑能力:升级电网网架结构,提升区域电网互联水平,通过跨区域功率互济分担波动;优化调度策略,实现新能源与常规电源的动态平衡。

5 结语

本文系统分析了新能源并网导致系统惯量降低、一次调频能力削弱,进而恶化频率动态响应特性的内在机理。为应对这一挑战,需要采取“源-网-荷-储”多维协同的综合策略:一方面,通过虚拟惯量、一次调频和VSG等技术赋能新能源机组,使其从“被动跟随者”转变为“主动支撑者”;另一方面,充分发挥储能系统快速、灵活的调节优势,并积极挖掘海量需求侧资源的巨大潜力。同时,必须辅以系统层面的先进协同控制架构和市场机制创新。展望未来,随着电力电子技术、人工智能、大数据等前沿科技的深度融合,新型电力系统的频率稳定体系将朝着更加智能化、自治化和韧性化的方向发展。未来的电网将不再仅仅依赖少数大型同步机,而是由无数具备主动支撑能力的分布式智能单元(包括新能源、储能、柔性负荷等)共同构成一个有机的生命体,能够自适应、自组织、自愈合,从而在高比例可再生能源接入的背景下,依然保持坚强可靠的频率稳定屏障。这不仅是技术上的革新,更是电网发展理念的一次深刻变革。

[参考文献]

- [1]王学超,冀帅,董庆寰.新能源并网对电力系统频率响应的评估分析[J].水利水电技术(中英文),2021,52(10):191-198.
- [2]赵鹏飞.新能源发电并网对配电网运行的影响及应对措施[J].张江科技评论,2025,(06):45-47.
- [3]薛渊,奚春平,张新亮.新能源并网对电力系统稳定性的影响及应对措施[J].中国电力企业管理,2025,(18):72-73.
- [4]徐华俊,周宇.新能源并网对电力系统稳定性的综合影响及优化应对策略[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题.盐城三新供电服务有限公司东台分公司,2025:685-689.