

面向高比例可再生能源接入的电力系统稳定性分析与控制

韩玉光

北京移动系统集成有限公司 北京

【摘要】随着高比例可再生能源的接入，电力系统面临着频率波动、电压波动等稳定性问题。为应对这些挑战，需求响应和储能技术成为关键解决方案。需求响应通过灵活调节用户负荷，平衡电力供需差异；而储能技术则通过储存过剩电能，并在需求高峰时释放，平滑可再生能源的波动。智能电网技术的应用进一步提升了电力系统的调度能力和稳定性。综合这些技术手段，有助于提高电力系统的可靠性，为高比例可再生能源的接入提供支持，确保电网的安全与经济运行。

【关键词】电力系统稳定性；可再生能源；控制策略；频率波动；储能技术

【收稿日期】2025 年 2 月 20 日 **【出刊日期】**2025 年 3 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250077

Stability analysis and control of power systems for the access of a high proportion of renewable energy

Yuguang Han

Beijing Mobile System Integration Co., Ltd., Beijing

【Abstract】 With the access of a high proportion of renewable energy, power systems are faced with stability issues such as frequency fluctuations and voltage fluctuations. To address these challenges, demand response and energy storage technologies have become key solutions. Demand response balances the differences between power supply and demand by flexibly adjusting user loads. Energy storage technology, on the other hand, stores excess electrical energy and releases it during peak demand periods to smooth out the fluctuations of renewable energy. The application of smart grid technology further enhances the dispatching capability and stability of power systems. The comprehensive use of these technical means helps to improve the reliability of power systems, provides support for the access of a high proportion of renewable energy, and ensures the safe and economic operation of the power grid.

【Keywords】 Power system stability; Renewable energy; Control strategy; Frequency fluctuation; Energy storage technology

引言

在全球能源结构的转型，越来越多的国家和地区开始加大可再生能源的使用比例，以实现碳中和目标。高比例可再生能源的接入给电力系统的稳定性带来了新的挑战。由于风能和太阳能等可再生能源的波动性，传统的电力系统控制方法已无法满足这些新需求。如何在确保电力供应稳定的同时有效应对可再生能源引发的波动问题，成为了电力工程领域亟待解决的核心问题。本文将深入探讨高比例可再生能源接入后的电力系统稳定性问题，并提出相应的解决方案，旨在为电力系统的安全、可靠运行提供理论依据和实践指导。

1 高比例可再生能源接入对电力系统稳定性的

影响

随着高比例可再生能源逐步接入电力系统，电网的稳定性面临着前所未有的挑战。风能和太阳能等可再生能源的波动性和不确定性使得电力系统的负荷预测和功率调度变得更加复杂。与传统的火力和水力发电相比，可再生能源的输出具有较强的时变性和空间分布特征，尤其是在天气变化、季节性波动等条件下，其发电能力的不稳定性尤为明显^[1]。这种不稳定性导致电力系统的频率和电压波动加剧，严重时可能引发系统故障，甚至导致大规模停电事件的发生。高比例可再生能源的接入对电网调度和稳定运行构成了巨大压力。

在电力系统运行中，频率和电压是两个重要的

稳定性指标。频率波动通常由负荷波动和发电端的变化引起,而在高比例可再生能源的背景下,这些波动会变得更加剧烈。太阳能和风能的出力变化通常没有规律,尤其是在短时间内可能出现大幅度波动,从而直接影响到电力系统的频率控制和负荷平衡。电压波动也是高比例可再生能源接入后面临的另一个重要问题。风电和光伏的并网方式及其输出特性,使得电压调节和稳定变得更加困难,特别是在离散型发电点的分布较为广泛时,电网的电压控制难度进一步增加。

为了应对高比例可再生能源接入所带来的稳定性挑战,电力系统必须实施更加精细化的调度和控制策略。传统的电网控制方法可能无法有效应对快速变化的负荷和功率输出。新的技术手段,如智能电网、需求响应和储能系统,逐渐成为提升电力系统稳定性的重要手段。智能电网能够通过实时监测和调度调整可再生能源的出力,需求响应则通过调整用电负荷来平衡电力需求与供给的差异,而储能技术则在电力过剩时储存能量,在电力短缺时释放,以此来稳定电网。这些技术的应用,将有助于减少由于可再生能源波动带来的频率和电压不稳定现象,保障电力系统的安全可靠运行。

2 面向稳定性的控制方法与技术

为确保高比例可再生能源接入后的电力系统稳定性,必须采用一系列先进的控制方法和技术。这些方法不仅需要在短时间内响应系统的变化,还要具备较强的适应性,以应对不同规模的波动和不确定性。智能电网技术作为一种重要的手段,通过在电网中安装先进的传感器、控制设备和通信网络,实现对电网状态的实时监测与调度。智能电网能够动态调整可再生能源的输出和负荷分配,借助数据分析和人工智能技术对发电端和负荷端进行精准的预测和控制,从而有效提高电网的调度效率和稳定性。

需求响应是另一项关键的控制技术,它通过引导和调节消费者的用电行为,以应对电力供应的短期波动。在高比例可再生能源接入的电力系统中,由于可再生能源的波动性和不可预测性,负荷需求的快速调整显得尤为重要。通过激励用户在电力紧张时段降低电力需求或在电力过剩时段增加用电,需求响应可以在系统中发挥缓冲作用,从而平衡发电与负荷之间的关系^[2-6]。现代化的需求响应系统结

合了实时通信和智能设备,使得用户可以根据电力市场的实时价格变化或电网的稳定需求进行灵活调整,从而减少系统频率波动,提升电网的稳定性。

储能技术也是面向电力系统稳定性的重要控制手段,尤其是在面对可再生能源的出力波动时,储能系统可以有效地平滑这些波动。电池储能、抽水蓄能和压缩空气储能等多种技术已经在不同场景下得到应用,通过将过剩电能储存起来,并在电力短缺时释放,可以有效缓解电网的压力。储能技术不仅有助于平衡电网中的瞬时负荷波动,还能为系统提供备用容量,增强电网的抗扰能力。在未来的电力系统中,储能技术将成为调节可再生能源波动性、提高电力系统鲁棒性的重要支柱。将这些控制方法和技术综合应用,可以为电力系统的稳定运行提供强有力的保障。

3 需求响应与储能技术在电力系统稳定性中的应用

需求响应和储能技术在提高电力系统稳定性方面发挥着至关重要的作用,特别是在高比例可再生能源接入的背景下。这两种技术的应用可以有效地平衡供需波动,确保电网的可靠性和经济性。在电力系统中,需求响应通过调节用户的用电模式来应对电力供应的波动。对于可再生能源的波动,需求响应系统通过与用户终端设备的连接,使用户在电力供应过剩时增加用电,在电力短缺时减少用电,从而有效缓解电力系统的频率波动^[7]。现代电力系统通常结合电力市场价格信号和实时负荷信息,以更精确地引导需求响应,确保电力供需之间的平衡。借助智能电网和物联网技术,需求响应可以在全网范围内灵活调度,实现对大规模用户群体的协调管理,使得电力系统的负荷调节更加高效,减少对传统调度手段的依赖。

储能技术在平衡电力系统波动、提升系统稳定性方面的作用也日益显著。可再生能源的输出通常受气候变化的影响,风能和太阳能等能源的间歇性和不确定性可能导致电力供应的不稳定。储能系统通过将多余的电能储存于电池、抽水蓄能或压缩空气储能系统中,能够在电力供给不足时及时释放能量,确保电网的供电稳定性。电池储能系统可以在短时间内快速响应电力需求的变化,提供快速调节的能力。抽水蓄能作为一种成熟的储能技术,通过水泵将多余的电能转换为势能储存,并在需求高峰

时将水释放,转化为电能输出,起到稳定电网的作用。储能技术不仅能平滑由可再生能源波动引起的频率和电压波动,还能为电网提供备用容量,增强系统的抗干扰能力。

在实际应用中,需求响应和储能技术的联合使用能够达到互补效应,进一步增强电力系统的稳定性。储能系统能够在需求响应无法及时调节负荷时提供备用支持,特别是在突发负荷波动或可再生能源供应急剧变化的情况下,储能系统能够发挥调节作用,减少对电网的冲击。需求响应在短期内能够灵活调节负荷,而储能则在长时间尺度上为电力系统提供稳定的支撑。随着电力市场和技术的发展,需求响应和储能系统的深度融合将成为未来电力系统调度和控制的关键手段。通过这两项技术的优化组合,可以大大提高电力系统的运行效率,提升对高比例可再生能源接入后的稳定性保障。

4 实际案例分析与控制策略验证

随着可再生能源比例的增加,电力系统稳定性面临巨大挑战。甘肃省作为国内重要的可再生能源基地,尤其在风能和太阳能的利用上面临较大压力。风电和太阳能的波动性直接影响电网的稳定性。为应对这一问题,甘肃省采取了包括需求响应和储能技术在内的多项控制策略。通过需求响应调度,能够在风电和太阳能输出不稳定时,快速调整用户负荷,平衡电力供需,减轻电网调度压力。储能系统在电力过剩时储存能量,需求高峰时释放,缓解了电力供需不平衡对电网的影响,显著提升了电力系统的稳定性与可靠性。

在浙江省,随着大量光伏电站的建设,该地区也面临类似的电力稳定性问题。浙江省通过实施智能电网技术和大规模储能项目来解决这些挑战。通过智能电网,浙江省实现了对电网状态的实时监控和优化调度,能够在光伏发电出力不稳定时,迅速调整其他能源的发电调度^[8]。浙江省还大力推动抽水蓄能项目的建设,通过调节水库的水位来实现电能的存储与释放,从而平滑可再生能源带来的波动。通过这一系列控制策略的综合应用,浙江省在保障电力供应的有效提升了电网的稳定性和可靠性。

在山东省,随着风电和光伏装机容量的逐年增加,该地区也逐步实现了需求响应与储能技术的深度融合。山东省通过建立以大数据为基础的电力调

度平台,实时采集各类电力信息,进行精准调度。针对风电和光伏的波动,平台根据实时电网需求和可再生能源发电情况,快速调整用户的用电需求,实施需求响应。山东省还加强了储能技术的投资,通过电池储能系统和抽水蓄能电站,将多余的电能储存起来,并在需求高峰时段释放出来。通过这一系统,山东省成功减少了电力波动带来的系统负荷,提高了电网的可靠性,为其他地区提供了可借鉴的经验。

5 结语

随着高比例可再生能源的接入,电力系统的稳定性面临新的挑战,但通过需求响应与储能技术的有效应用,电力系统的稳定性得到显著提升。国内各省份在智能电网、储能系统与需求响应方面的探索,已经取得了一定的成效,证明了这些技术在应对电力波动、提升电网可靠性方面的巨大潜力。未来,随着技术的进一步发展和优化,需求响应与储能技术将在保障电力系统安全运行、促进可再生能源的更广泛应用方面发挥更重要的作用。

参考文献

- [1] 刘子悦.面向高比例分布式电源接入的输配协同运行风险优化调度[D].东北电力大学,2024.
- [2] 杨志成.高比例新能源接入电力系统的数字孪生优化调度研究[D].北方工业大学,2024.
- [3] 王坤.计及碳交易的可再生能源参与电力现货市场机制设计与实现方法[D].浙江大学,2024.
- [4] 刘康祥,周家辉,徐钢,等.面向高比例可再生能源消纳的光储氢醇一体化系统规划与调度[J].动力工程学报,2023, 43(11): 1477-1486.
- [5] 杨炯君.高比例可再生能源电力系统的灵活性市场机制设计研究[D].华北电力大学(北京),2023.
- [6] 张策.面向高比例可再生能源消纳的综合能源系统多元储能协同配置研究[D].华北电力大学,2023.
- [7] 王冉.高比例可再生能源电力系统均衡特性与多市场联合优化[D].东南大学,2023.
- [8] 成润婷,张勇军,李立涅,等.面向高比例可再生能源消纳的电力市场建设及研究进展[J].中国工程科学,2023, 25(02): 89-99.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS