

光伏快速频率响应在电力系统稳定控制中的应用

张开远

五凌电力有限公司宁夏事业部 宁夏 银川 750004

摘要：随着光伏电站在全球能源结构中的占比逐渐增大，其稳定运行对电网的频率稳定具有重要影响。然而，传统的光伏电站在设计阶段往往未考虑快速频率响应功能。因此，本文旨在探讨光伏电站快速频率响应技术的原理及两种改造方案，提升光伏电站对电网频率波动的应对能力，确保电网的稳定运行。

关键词：光伏发电；快速频率响应；电力系统；稳定控制

引言

光伏电站作为清洁能源的重要组成部分，其运行稳定性对于电网的安全至关重要。然而，由于光伏电站的出力受光照条件影响，其功率输出存在较大的波动性。这种波动性可能导致电网频率的不稳定，进而影响电力设备的正常运行。因此，研究光伏电站的快速频率响应技术具有重要意义。

1 光伏电站快速频率响应技术原理

光伏电站快速频率响应技术的核心在于实现有功下垂控制（图1），即根据电网频率按照下垂特性曲线调整有功功率输出。通过采集光伏电站并网点的系统频率，并判断其是否超出设定的死区范围。一旦频率超出死区，快速频率响应系统会立即启动，根据当前电网频率和预设的下垂特性曲线，计算出需要调整的有功功率目标值。然后通过优化指令传输方案，将有功指令快速、准确地传送给光伏电站自动发电控制（AGC）系统，再由AGC系统将指令分配给各个逆变器，从而实现光伏电站的有功功率调整，使电网频率快速恢复到正常范围。

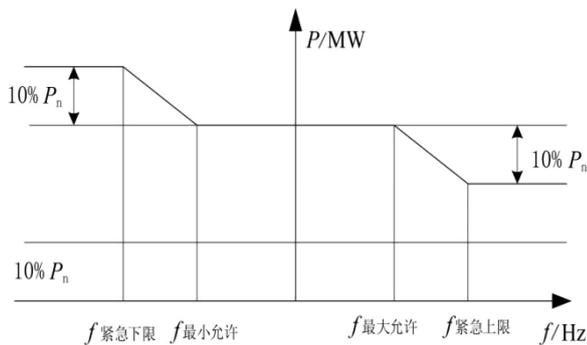


图1 光伏电站频率下垂特性曲线示意图

新能源场站按照有功-频率特性曲线函数，实现快速频率响应功能，公式如下：

$$P = P_0 - P_n \frac{f_0 - f_d}{f_n} \frac{1}{\delta\%}$$

式中： f_d 为快速频率响应死区，Hz； f_n 为系统额定频率，Hz； f_0 为系统实时频率，Hz； P_n 为额定功率，MW； $\delta\%$ 为新能源快速频率响应调差率，光伏电站设置为3%； P_0 为有功功率初值，MW。

2 光伏快速频率响应技术的实现方式

2.1 实时监测电网频率

实时监测电网频率是光伏快速频率响应技术的基础。为实现高精度的频率测量，需采用专用的频率测量设备，这些设备通常基于高精度的时钟源和信号处理技术。电网频率的实时监测主要依赖于对电网电压信号的采样和分析。采样过程中，设备会按照设定的采样率对电网电压进行连续采样，然后通过数字信号处理技术对采样数据进行分析。常用的频率测量算法包括过零检测法、傅里叶变换法等。以过零检测法为例，该方法通过检测电压信号的过零点来计算电网频率。设电网电压信号为 $u(t)$ ，则电网频率 f 可表示为： $f = 1/T$ 。其中， T 为电压信号相邻两个过零点之间的时间间隔。通过高精度计时器测量这个时间间隔，即可得到电网的实时频率。为提高频率测量的精度和稳定性，还需对采样数据进行滤波处理，以消除噪声和干扰信号的影响。常用的滤波方法包括低通滤波、滑动平均滤波等^[1]。

2.2 功率控制系统

在光伏快速频率响应技术中，功率控制系统是核心环节。这一系统的高效运作，主要依赖于逆变器的控制策略调整以及储能系统的协同工作。逆变器作为光伏发电系统中的关键设备，其控制策略的调整是实现快速频率响应的重要手段。通常，逆变器采用最大功率点跟踪（MPPT）控制策略来最大化光伏电池板的输出功率。然而，在需要快速响应电网频率变化时，逆变器的控制策略需要从MPPT模式切换到频率响应模式。在频率响应模式下，逆变器的输出功率不再仅仅由光伏电池板的最大功率点决定，而是根据电网频率的实时测量结果进行动

态调整。具体来说,当电网频率下降时,逆变器会增加输出功率以提供额外的功率支持;反之,当电网频率上升时,逆变器会适当减少输出功率。此外,储能系统在光伏快速频率响应中也发挥着重要作用。储能系统能够在短时间内吸收或释放大能量,从而快速平衡电网中的功率波动。当电网频率下降时,储能系统可以迅速放电,增加电网中的功率供给;当电网频率上升时,储能系统则可以充电,吸收多余的功率。为了实现精确的功率控制,可以采用以下计算公式来确定逆变器输出功率的调整量: $\Delta P = K_p (f_{ref} - f_{meas})$ 。其中, ΔP 是输出功率的调整量, K_p 是比例系数, f_{ref} 是电网的额定频率(通常为50Hz或60Hz), f_{meas} 是实时监测到的电网频率。通过调整比例系数 K_p , 可以控制功率调整的灵敏度和幅度。

2.3 与电网调度中心的协同

光伏电站与电网调度中心的协同是实现快速频率响应不可或缺的环节。首先,数据共享是实现协同控制的基础。光伏电站需要实时向电网调度中心传输关键运行数据,包括当前的光照条件、光伏电池板的工作状态、逆变器的输出功率以及储能系统的充放电状态等。同时,电网调度中心也会向光伏电站提供电网的实时运行数据,如电网频率、负荷情况、其他电源的运行状态等。这些数据不仅有助于光伏电站了解当前电网的运行状况,还能为其快速响应提供决策依据。其次,协同控制要求光伏电站能够根据电网调度中心的指令,迅速调整其输出功

率。在电网频率出现异常时,电网调度中心会根据电力系统的整体运行情况,向光伏电站发出调整指令。光伏电站接收到指令后,需要立即通过功率控制系统调整逆变器的输出功率,以提供必要的功率支持或减少功率输出,从而帮助电网恢复稳定。此外,光伏电站与电网调度中心之间的通信系统的稳定性和可靠性至关重要^[2]。为了确保数据的实时传输和指令的准确执行,双方需要建立高效的通信链路,并采用可靠的通信协议。

3 两种快速频率改造方案及优缺点

3.1 AGC改造方式

AGC(自动发电控制)改造方式(图2)是一种实现光伏电站快速频率响应的技术手段。该方案主要通过增加高精度测频模块,并修改光伏电站的有功控制策略,以达到有功下垂控制的目的。以下是关于AGC改造方式的详细分析:

3.1.1 实现原理

(1) 增加高精度测频模块:为了能够更精确地检测电网的频率变化,需要在光伏电站中增加高精度测频模块。这些模块能够实时监测电网频率,并将数据反馈给AGC系统。

(2) 修改有功控制策略:在接收到频率数据后,AGC系统会根据预设的控制策略,自动调整光伏电站的输出功率。这通常涉及到有功下垂控制,即当电网频率下降时,自动增加光伏电站的输出功率,反之则减少输出功率。

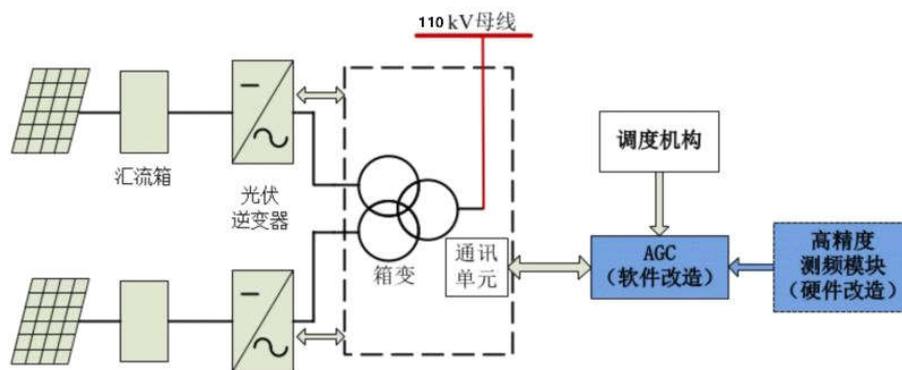


图2 AGC改造方式

3.1.2 优缺点分析

(1) 优点:能够实现光伏电站对电网频率的快速响应,有助于提高电力系统的稳定性。通过自动调整输出功率,可以减少人工干预的需要,提高运行效率。(2) 缺点:该方案需要对现有光伏电站的通讯网络和AGC控制策略进行较大改动。这不仅包括硬件设备的更换和升级,还包括软件系统的重新配置和调试。由于改动范围大,涉及的系统和设备多,因此改造周期相对较长。这

可能导致光伏电站在改造期间无法正常运行或发电效率受到影响。任何大规模的改动都伴随着风险。在改造过程中,可能会出现各种预料之外的问题,如设备兼容性问题、系统故障等。这些问题可能会导致光伏电站的运行中断或性能下降。

3.2 加装快速频率响应装置改造方式

该方案的核心是在光伏电站中增加专门的快速频率响应装置,装置内置高精度测频模块,能够独立实现有

功下垂控制,从而无需对光伏电站原有的有功控制系统架构进行改动。这种改造方式的实现原理是快速频率响应装置会实时监测电网的频率变化。一旦检测到频率异常,装置会立即根据预设的下垂控制策略,自动调整光伏电站的输出功率。由于这种装置是独立于原有控制系统之外的,因此它能够在不干扰光伏电站正常运行的情况下,快速、准确地响应电网频率的变化。这种改造方式的优点首先表现在对现有电站和新建站均具有较好的兼容性。由于无需改动原有的有功控制系统架构,因此无论是已经运行的光伏电站还是新建电站,都可以方便地加装这种快速频率响应装置。其次,改造周期相对较短。加装装置的过程相对简单,不需要对整个系统进行大规模的改动和调试,从而大大缩短了改造所需的时间。^[3]

4 光伏快速频率响应技术对电力系统稳定性的影响

4.1 提高电网频率稳定性

光伏快速频率响应技术对电力系统稳定性的影响主要体现在提高电网频率稳定性方面。通过实时监测和快速响应机制,光伏电站能够在电网频率出现波动时,迅速而准确地调整其输出功率,这一调整过程对于平抑频率波动、提升电网稳定性具有显著效果。实时监测是快速频率响应技术的基础。只有准确地捕捉到电网频率的微小变化,光伏电站才能做出相应的功率调整。这种监测需要高精度的测量设备和快速的数据处理能力,以确保在任何时刻都能获得准确的频率信息。通过迅速调整输出功率,光伏电站可以有效地对电网进行有功支持,从而帮助稳定电网频率。这种快速响应不仅可以减少频率波动的幅度,还可以缩短频率恢复到正常范围所需的时间。光伏电站的快速频率响应技术对于提高整个电力系统的稳定性具有积极作用^[4]。

4.2 增强电网抗干扰能力

光伏快速频率响应技术的应用对电网的抗干扰能力有着显著的提升作用。主要体现在:(1)快速恢复稳定状态:当电网遭受外部扰动,如短路、断线或大容量负荷的突然投切等,会引起电网频率的波动。光伏快速频率响应技术通过实时监测电网频率,一旦发现异常,能够立即调整光伏电站的输出功率,以最快的速度帮助电网恢复到稳定状态。(2)减少连锁故障风险:在电力系统中,一个小的故障如果不能及时得到处理,可能会引发连锁反应,导致更大范围的故障。光伏快速频率响应技术的迅速介入,可以有效遏制这种连锁故障的发生,降低电网大面积停电的风险。(3)提高供电质量:电网频率的稳定直接关系到供电质量。光伏快速频率响应技术能够迅速平抑频率波动,从而确保用户侧用电设备的

正常运行,提高供电的可靠性和质量。(4)增强电网韧性:面对日益复杂多变的电网运行环境,光伏快速频率响应技术的应用无疑增强了电网的韧性。

4.3 优化电力资源配置

光伏电站的快速响应特性对于优化电力资源配置具有显著作用,主要包括:(1)实时供需平衡:光伏电站通过快速响应系统,能够根据实际用电需求迅速调整发电量。在用电高峰时段,光伏电站可以增加输出功率,满足电网的即时需求;而在用电低谷时段,则可以减少输出,避免电力资源的浪费。(2)减少能源损耗:传统的电力系统中,由于供需不匹配,往往会造成电力在传输和分配过程中的损耗。而光伏电站的快速响应能力可以减少这种损耗,因为它能更精确地匹配供需,降低无效传输和分配的比例。(3)提升电网运行效率:光伏电站的快速响应还能帮助电网运营者更精确地预测和管理电力需求。通过实时数据分析和响应调整,电网可以更加高效地运行,减少因供需失衡而导致的运营效率下降。(4)促进可再生能源的利用:随着可再生能源在电力系统中的比例不断增加,光伏电站的快速响应能力将有助于更好地整合这些资源。通过快速调整输出,光伏电站可以与其他可再生能源发电站(如风电场)协同工作,从而提高整个电力系统的效率和可靠性。

结语

光伏电站快速频率响应技术对于维护电网的稳定运行具有重要意义。本文通过对两种改造方案的对比分析,认为加装快速频率响应装置的方式具有更好的适用性和实施效果。未来,随着智能电网技术的发展和光伏电站规模的扩大,快速频率响应技术将发挥更加重要的作用。因此,应进一步研究优化快速频率响应技术的算法和硬件装置,提高光伏电站对电网频率波动的应对能力,确保电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1]张军,王瑾然,章叶青.新能源快速频率响应在新能源场站的应用方案研究及工程实践[J].湖北电力,2021,45(04):86-93.
- [2]华光辉,胡汝伟,焦龙,等.光伏电站快速频率响应技术研究及应用[J].电网与清洁能源,2019,35(05):64-69+76.
- [3]孙钢虎,王思南,贺婷,等.基于自适应下垂控制的光伏频率快速响应方案[J].热力发电,2019,48(08):94-100.
- [4]官成,王卫,赵正奎,等.基于改进锁频器频率偏差检测的光伏逆变器快速频率响应控制[J].电工电能新技术,2021,40(09):10-17.