案例 8　组网逆变器——天下兴亡，匹夫有责

【所属课程】 电力电子技术。

【教学内容】 具有电网支撑功能的并网逆变器。

【案例意义】 近年来，我国大规模推广可再生能源发电（renewable energy generation，REG）技术，甚至推进 100%可再生能源供电。在 REG 高渗透率电网中，负载变化和新能源间歇式供电易造成瞬时功率过冲和振荡，导致较大的频率偏差和较高的频率变化率；系统频率稳定性差，影响安全运行。基于此，本案例提出系统惯性特征的自适应配置方法。将系统设计为 Grid-Forming 逆变器（GFM），并考虑利用有功功率状态量的反馈来修正惯性，在功率控制模块进行系统惯性的配置，达到惯性自适应配置和保证电能质量的目的。

【教学过程】

1. 问题导入

随着电网中 REG 渗透率的提高，Grid-Following 逆变器（GFL）会放大频率波动问题，而 GFM 却可以通过引入惯性和阻尼，有效抑制频率波动和频率变化率；在强电网的电网故障情况下，由于电网阻抗较小，电网跟随模式逆变器需要输出极大的电流才能支持电压恢复，相当于已经失去电压支持能力，而 GFM 在这种情况下仍然能够发挥电网电压支撑作用。可见，在频率稳定和故障下的电压支撑方面，GFM 具有明显的优势。

2. 讲授正文

（1）GFM 的功率控制。GFM 逆变器的功率控制可以分为有通信机制控制和无通信的即插即用控制。其中，无通信功率控制因为具有即插即用和可靠性高等特点，引起了国内外学者的广泛研究。无通信的功率控制，实质上是通过功率控制实现电网频率同步，按照其控制原理，又分为“基本下垂控制”“功率同步控制”“带有 LPF 的下垂控制”“虚拟同步机控制”四类方法。

①基本下垂控制：根据电压源在纯感性等效输出阻抗、输出电压相位与电网电压相位角度差很小的条件下，所呈现的输出有功功率正比于角度差、输出无功功率正比于电压源电压幅值的特性，而构造出的频率有功、幅值无功下垂控制方法。

②功率同步控制：其实质是通过控制相位角和电压幅值控制有功功率和无功功率，与通过锁相环实现功率控制的电流控制方式相比对，这种控制被称为功率同步控制方法。

③带有 LPF 的下垂控制：在基本下垂控制中引入 LPF，最初是为了消除由负载不平衡而引起的瞬时功率二次纹波分量。但研究人员发现，LPF 的使用相当于在采用电压控制的逆变器中引入了一种虚拟惯性。

④虚拟同步机控制：通过模拟同步发电机模型来构造功率控制环，通过有功功率偏差调节频率，以呈现惯性特征，是现阶段组网逆变器的主要功率控制方法。

（2）GFM 逆变器结构。GFM 逆变器一般控制为受控电压源，非常类似于并网同步发电机。具有下垂特性的电压源逆变器可直接控制电压和频率。在极端情况下，采用下垂控制的 GFM 逆变器将立即降低其输出功率，以平衡负载并保持本地电压和频率的稳定。典型 GFM 逆变器框图如图 17-6 所示。该基于下垂控制的 GFM 逆变器相比于 GFL 逆变

器来说，调节系统功率和频率的速度更快，输出功率的变化与输出频率的变化之间没有明显的延迟。

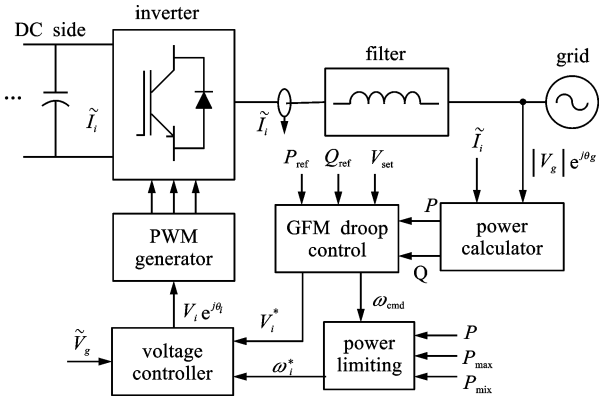

图 17-6　典型 GFM 逆变器框图

(3)相关挑战。在未来的低惯性电网中大规模应用 GFM 所遇到的关键挑战和需要解决的问题主要为以下两个方面。

1)器件级的主要挑战：①消除测量引入的误差、延迟和噪声等；②合适的 DC 侧电源的选择以及与可再生能源(储能电池、光伏和风力发电机)的兼容性；③限制逆变器的浪涌电流。

2)系统级的主要挑战：①GFM 并网系统的稳定性与同步性；②与同步发电机的兼容；③GFM 对功率传输系统拓扑变化的反应和支持能力；④GFM 大小/分配和规划的优化能力。

3. 分析总结

从基于同步电机的常规发电到与电力电子转换器接口的可再生能源。可再生能源渗透率的提高，使得传统只跟随电网电压的并网逆变器成为影响电网稳定的不可忽略的部分，必须使并网逆变器肩负起保持电网稳定的责任，才有可能使大电网达到良好的稳定性和运行性能。随着我们高等教育面的不大扩大，大学生比例在增加，每一名大学生都应该要肩负起国家稳定和经济繁荣的责任，只有这样，我们的中国梦，我们每个人的梦想，才能实现。