

第五章 离网模式下 PCS 电压源输出的系统控制

对于 PCS 而言，其直流侧可以通过储能介质以及 DC/DC 提供稳定的直流电压，从而使得 VSC 可以对外输出有功功率。当 PCS 安装在用户侧，比如医院、军事设施等场合，在电网因故障停电的情况下，要求 PCS 能够对负载提供可靠供电。此外，当微电网工作于离网模式下，此时 PCS 通常在系统中扮演电压源的角色。

因此，这就要求 PCS 具有离网运行的功能，为本地负荷提供不间断的优质供电，此时变流器的控制与并网状态具有明显的不同。由前述分析可知，当变流器工作在并网模式时，无论是电网电压平衡抑或存在不平衡以及畸变条件下，均是通过控制注入电网的电流，从而实现并网有功与无功功率的调节，此时 PCS 对电网而言等效为一个可控电流源，因此对控制系统而言，并网电流质量成为关注的重点。而在离网模式下，变流器负责向负荷提供稳定的（恒定的频率与幅值、三相平衡、低 THD）电压，而输出电流是由负载决定的。由于负载的类型各式各样，比如有三相平衡负荷、三相不平衡负荷以及单相负荷，还有整流非线性负荷等等，因此电流的波形与频谱可能非常复杂。而无论何种负荷的接入，要求变流器均能够提供三相稳定的电压，此时 PCS 对负载而言等效为一个可控电压源，因此变流器输出电压质量是控制系统关注的重点。需要特别指出的是，变流器输出电压源控制也是 UPS、独立式分布式发电、微电网以及岸电电源等领域的核心关键技术，因此电压源输出系统控制的研究具有重要的理论与应用价值。

由于 VSC 的出口是一个脉宽调制电压，对于大功率变流器一般采用 LC 滤波器，以滤除输出电压的高频分量，而 LC 滤波器的设计要满足截止频率（滤波能力）、空载无功电流以及满载电压降落（直流母线输出能力）的要求。LC 滤波器存在固有串联谐振点，而 VSC 出口脉宽调制电压具有非常丰富的频率分量，因此电压谐波分量容易引起 LC 滤波器谐振，导致变流器过流并恶化输出电压质量，因此需要小心设计控制系统以避免这个问题。总体而言，电压源输出变流器的控制可以分为三大类，即单电压闭环控制、电压外环+电流内环以及电压外环+虚拟电阻，三种控制各具特色且均有实际应用。其中单电压闭环又分为输出电压有效值闭环与电压瞬时值闭环两类，输出电压有效值闭环的优势在于控制简单，并且系统稳定性不受负载阻抗影响，因此系统鲁棒性很强，不足之处在于系统响应速度慢，在负载投入瞬间存在较大的冲击电流；并且由于控制器不能为 LC 滤波器提供阻尼，一般需要在电容支路串联电阻以抑制谐振并提高稳定性，而这又将带来额外的损耗以及滤波能力下降的问题；此外当变流器带不平衡负荷时，三相不平衡电流将在滤波器上产生不平衡压降，将导致负荷端电压不平衡，而电压有效值闭环控制方式不具备不平衡电压的补偿能力，更加恶劣的情况是变流器带非线性负荷（如二极管整流负载），此时负荷电流含有大量的谐波分量并在变流器输出滤波器上产生谐波压降，并进一步引起负荷端电压的畸变，而电压有效值闭环控制同样也不具备谐波电