第 4 章

MMC柔性直流输电系统的控制和保护策略

4.1 柔性直流输电系统控制策略简介

控制系统对柔性直流输电系统功能的实现至关重要。早期的电压源换流器（VSC）采用间接电流控制策略，即根据 *abc* 坐标系下 VSC 的数学模型和当前的有功、无功功率指令值，计算需要 VSC 输出的交流电压的幅值和相位[1-3]。间接电流控制策略通过控制 VSC 输出交流电压的幅值和相位，间接控制交流电流。其优点在于控制简单，无需电流反馈控制[4]。但是，其缺点是电流动态响应慢，受系统参数影响大，容易造成 VSC 阀的过电流[1,4]。

针对间接电流控制存在的问题，现代电力电子技术采用以快速电流反馈为特征的直接电流控制策略（在电机控制领域称为矢量控制），能够获得高品质的电流响应，目前来看这种控制策略已成为主流[1,4]。直接电流控制可以在 3 种不同的坐标系及相应的控制算法下实现[5]，分别为同步旋转坐标系（*dq* 坐标系）与比例-积分（PI）控制算法，$\alpha\beta$ 坐标系与比例谐振（PR）控制算法，*abc* 坐标系与无差拍（Dead Beat）控制算法或滞环（Hysteresis）控制算法。本书关于 VSC 的控制方法，将主要基于同步旋转坐标系（*dq* 坐标系）及相应的比例-积分（PI）控制算法。该方法在同步旋转坐标系下建立 VSC 的数学模型，将 *abc* 坐标系下的三相交流量变换为 *dq* 坐标系下的两轴直流量，简化了换流器的数学模型，使控制器的设计变得简单，且控制效果良好，因而在柔性直流输电系统控制中得到了广泛的应用。

当 VSC 所连接的交流系统短路比较小时（如小于 1.3），采用常规的直接电流控制将很难使系统在额定功率下稳定运行[6,7]。主要原因有两个，一是在弱交流系统条件下，直接电流控制的 d 轴和 q 轴解耦特性被破坏，使 VSC 的稳态特性和暂态特性恶化；二是在弱交流系统条件下，常规锁相环（PLL）的性能也严重恶化，不能满足与电网电压保持同步的要求。为了解决直接电流控制在弱交流系统下所遇到的困难，提出了“功率同步控制（Power Synchronization Control，PSC）”方法[8]。功率同步控制方法的核心思想是，使 VSC 模拟同步发电机的外特性，即 VSC 自主控制三相调制电压的频率和相位，不再依赖锁相环去被动跟踪外部交流电网的频率和相位。采用功率同步控制方法的 VSC 具有类似于同步电机转子运动方程的惯量特性，对所连接的交流系统的短路容量没有要求，因此非常适合用于连接弱交流系统和无源系统。功率同步控制方法可以看作是间接电流控制方法和直接电流控制方法的结合，且具有故障电流限制能力。但当 VSC 连于强交流系统时，采用功率同步控制可能出