

案例 12 并网变流器的韧性——砥砺前行

【所属课程】 电力电子技术。

【教学内容】 并网变流器的韧性——坚韧不拔，砥砺前行。

【案例意义】 由于并网变流器中含有对电流处理能力较弱的半导体开关，并且变流器装置控制环节及交直流混合系统中故障都具有多样性，因而并网变流器对电网故障的响应与传统电机大不相同，故障类型、电网结构，或者故障位置的不同都会使其产生不同的响应行为。为此，我国学者将在外界故障扰动冲击下并网变换器的耐受能力称为变换器的韧性。本案例的探讨，可以让学生思考是什么让我们接受并战胜挑战。如何战胜挑战，是我们必不可少的人生智慧。

【教学过程】

1. 问题导入

随着新能源发电系统与能源互联网系统的开发、高压直流输电技术日益成熟，以及柔性交流输电技术的发展，由以铜、铁等材料为主的电磁装备构成的传统电力系统，正逐渐向以半导体材料为主的电力电子装置构成的电力系统转变。在这个发展过程中，器件、系统拓扑结构以及电力电子装置的应用都发生了极大的变化。电力电子装置的失效机理与传统的铜、铁等铁磁材料存在很大差异，在这种电力系统运行需要大规模依赖电力电子技术应用的情形下，并网大功率电力电子变流器的安全可靠运行已成为电力系统安全可靠运行的重要保证。电力电子变流器在电网所规定的边界条件下的运行状态较为复杂，同时有遭受扰动冲击的可能，其能否耐受得住电网安全条件下的扰动冲击主要受并网电力电子变流器运行韧性的影响。

2. 讲授正文

(1) 并网原理。一般来说，耐受能力根据变换器交直流侧、变换器在并网点运行行为等相关标准(或约束)来体现，包括直流侧电压波动、交流测谐波含量等。各方面的耐受能力为约束条件，可构成并网变换器运行的韧性区间，即并网变换器系统在电网安全规定运行的边界条件。在各项指标均达标的前提下，通过在韧性区间寻找最优，并网变换器可表现出更优良的运行特性。本案例以电网不平衡工况下，改善传统并网控制策略导致的并网变换器有功功率输出受限的现状、提升并网系统的韧性为主要研究内容。事实上，国内外并网标准都对并网交直流侧功率波动、并网谐波含量等有相关要求：允许功率在一定范围内波动、特定次谐波在一定含量以内等，且要求并网变换器具备低电压穿越、注入有功的能力以保证变换设备稳定运行。

(2) 并网变换器韧性的评估。在实际工程应用中，电网侧故障通常会很大程度上影响并网变换器的稳定运行，因而电网对接口变流器的运行要求极为严格。世界各国对并网变流器接入电网制定了相应的并网导则，但是，这些并网导则并没有对并网变流器可以承受冲击的能力给出任何指标要求。现有文献中对变流器的研究多为在理想电网下对并网变换器的稳态进行研究，以及在故障下对系统控制方法加以改进，因而很少有研究关注电网故障冲击下并网变换器的运行行为。有文献立足于小扰动对变流器小信号稳定性进行分析，也有文献对三

相并网变换器系统进行大信号分析，以及研究并网变换器的非线性分岔现象等，但均未着重关注并网电力电子装置在电网故障期间的运行行为，也未能从设计角度提出有效的准则对并网变流器承受电网故障冲击的能力进行评估与设计。

(3) 韧性设计方法与步骤。电网故障下对并网变流器韧性指标进行评估，包括如下步骤：

① 建立电力系统预想事故集，判断故障类型，设计出满足性能指标要求的变流器模型；

② 分析电网故障下变流器的响应，分别计算出电流环的传输曲线及电压环稳定性判据；

③ 计算出电网扰动下变流器关于关键参数的韧性边界条件，判断此变流器是否耐受该故障类型，并对变流器韧性进行评估；

④ 在变流器对故障不具耐受能力时，可返回初始设计对变流器参数进行反复修改，终可得到满足耐受电网故障的设计方案。

3. 分析总结

并网变流器的韧性评估与设计，能够使其在电网故障情况下满足其耐受冲击能力的要求。以上案例表明，处于电网中的变流器，与处于集体中的每个人一样，我们不仅要独善其身，而且要能承受挑战、承担责任，并最终完成自己的使命。