

PWM 整流器控制技术研究

随着工业生产和电力电子技术的飞速发展,在钢铁、冶金、石油、化工等工业领域,电气设备、电力电子变换装置的应用日益普及。在电力变换装置中,AC/DC 变换即整流的应用较为广泛。如变频器、逆变电源、高频开关电源等,这些变换器大部分都需要整流环节,以获得直流电压。二极管整流滤波装置的接入,给电网中注入了大量的电力谐波。电力谐波干扰导致电气设备异常和事故有逐年增长的趋势,电力系统谐波已成为威胁电力系统和其它用电负荷安全运行的“电力公害”。

目前解决电网污染的途径主要有两种:

(1)对电网来说,采用在电力系统中加入补偿器来补偿电网中的谐波。可以采用有源滤波器(APF),但是其成本比较高,控制过程复杂。近年来,静止无功补偿(SVC)已应用于负载无功补偿,但在补偿无功的同时,却不能抑制谐波,甚至因晶闸管相控工作方式而成为新的谐波源。

(2)设计输入电流和电压同相、谐波含量低、功率因数高的整流器。

前者是产生谐波后进行补偿,而后者是消除了谐波源,是解决谐波问题的根本措施。把逆变电路中的 PWM 技术应用于由 MOSFET、IGBT 等全控器件组成的整流电路,工作时可以使网侧电流正弦化,获得单位功率因数,甚至能量可以双向流动,真正实现绿色电能转换,这种整流器称为 PWM 整流器,又称为单位功率因数变流器。

1、PWM 整流器拓扑

就 PWM 整流器拓扑结构而言,按直流储能形式可分为电压型和电流型;按电网相数可分为单相电路、三相电路和多相电路;PWM 开关调制可分为硬开关调制和软开关调制;按桥路结构可分为半桥电路和全桥电路;按调制电平可分为二电平电路、三电平电路和多电平电路;但是最基本的是按直流储能形式分为电流型和电压型两大类。电压型 PWM 整流器(VSR)的显着拓扑特性就是直流侧采用电容进行直流储能,从而使 VSR 直流侧呈低阻抗的电压源特性,拓扑结构主要有以下几种:单相半桥、全桥 VSR 拓扑结构;三相半桥、全桥 VSR 拓扑结构;三电平 VSR 拓扑结构;基于软开关调制的 VSR 拓扑结构。电流型 PWM 整流器(CSR)拓扑结构的显着特性就是直流侧采用电感进行直流储能,从而使 CSR 直流侧呈高阻抗的电流源特性,常采用的 CSR 拓扑结构有单相、三相两种。而对于不同功率等级以及不同的用途,可以研究各种不同的 PWM 整流器拓扑结构。在小功率应用场合,PWM 整流器拓扑结构的研究主要集中在减小功率开关和改进直流输出性能上。在大功率应用场合,其拓扑结构的研究主要集中在多电平拓扑结构、变流器组合以及软开关技术上。

2、PWM 整流器控制技术

控制技术是决定 PWM 整流器发展的关键因素, PWM 整流控制对象是输入电流和输出电压, 其中输入电流控制是整流器控制的关键。这是由于应用 PWM 整流器的目的是使输入电流正弦化, 在单位功率因数下运行。对输入电流有效控制实质就是对电力电子变换器的能量流动进行控制, 进而控制输出电压; 相反, 控制变换器有功功率和无功功率流动, 可以控制输出直流电压和输入电流, 使系统处于单位功率因数运行状态。目前电压型 PWM 整流器网侧电流控制策略主要分成两类: 一类是“间接电流控制”策略; 另一类就是目前占主导地位的“直接电流控制”策略。“间接电流控制”实际上就是所谓的“幅相”电流控制, 即通过控制电压型 PWM 整流器的交流侧电压基波幅值和相位, 进而间接控制其网侧电流。由于“间接电流控制”其网侧电流的动态响应慢, 并且对系统参数变化灵敏, 因此这种控制策略已逐步被“直接电流控制”策略所取代。直接电流控制的主要特点在于引入了电流环, 使系统动态性能明显改善。电压外环输出作为电流指令, 电流内环则控制输入电流, 使之快速跟踪电流指令, 其动态响应速度快、限流容易、控制精度高。目前已研究出各种不同的方案, 主要有以下几种:

(1) 空间电压矢量控制

空间电压矢量脉宽调制(SVPWM)是目前广泛应用的数字化高频调制方式, 其优点是容易采用微处理器实现, 易于实现交流侧输入电流正弦化, 功率因数为 1; 直流侧输出电压纹波小; 直流电压利用率高。在同样交流侧电流 THD 要求下, 比其它控制模式的开关频率低得多, 但其缺点是计算量庞大, 先要做复杂的坐标变换, 进行矢量选择, 然后需要分别计算各矢量的持续时间, 再将分区段的时间相加变成三相脉宽调制时间, 导致三相 PWM 整流器的实时控制需要双单片机、DSP 等高速处理器。另外, 过多运算环节容易引起控制误差甚至错误。从本质上讲, 空间电压矢量调制是基于规则采样的正弦脉宽调制算法, 最终目的是优化开关函数。

(2) SPWM 调制控制

移相采样 SPWM 是 PWM 技术中应用于 PWM 整流器控制比较早的技术, 包括规则采样和自然采样, 其开关频率固定, 有明显载波, 用模拟和数字电路容易实现, 但是无法克服其直流电源利用率低的缺点。使用模拟电路实现时, 脉冲开关时间很短, 几乎瞬间完成, 但是硬件投资较多, 不够灵活, 参数的改变和系统的调试都比较复杂。使用数字电路实现时, 以软件为基础, 其投资少, 灵活性好, 缺点是计算脉冲宽度时需要一定的延时和响应时间。但是随着高速、高精度微处理器的发展, 采用数字化 SPWM 技术已经占领了主导地位, 而且 SPWM 输出电压谐波主要是开关频率及其倍数的谐波, 容易滤除。

(3) 开关逻辑表控制

这种控制方式主要是使用优化开关逻辑表来达到控制目标, 是基于直接功率控制和电流控制所提出的。其过程主要依赖于瞬时有功及无功功率控制环, 不需要电流内环和 PWM 调制模块, 通过预估有功功率和无功功率值与给定值之间的瞬时误差来选择开关逻辑, 与电流滞环控制有点相似, 不同之处在于电流滞环开关输出直接与误差有关, 而开关逻辑输出不仅与功率滞环带和误差有关, 而且与电

压矢量所处扇区有关。相对于电压定向的控制方式而言,不需要坐标变换,不需要计算开关作用时间,实时性要求不高,其缺点是开关频率不固定,需要高速处理器。

(4) 电流滞环控制

这种控制方式开关逻辑输出是由滞环带宽和电流误差所决定的,其优点是结构简单、工作可靠、响应速度快、谐波相对较小,过程容易实现。其最大缺点是在固定带宽内,给定参考电流在一个周期内 PWM 脉冲频率差别很大,开关频率不固定。在频率低的一段,电流的跟踪性差于频率高的一段,而且参考电流变化率接近零时,功率开关管的工作频率增高,加剧开关损耗,甚至超过功率器件的安全工作区。输入电流频谱随机分布,给交流侧滤波器设计带来困难。

3、PWM 整流器控制技术展望

近年来有关 PWM 整流器控制的研究紧紧围绕以下几个方面:

- (1) 减小 AC 侧输入电流谐波畸变率,降低其对电网的负面效应。
- (2) 提高功率因数,减小整流器的非线性,使之对电网而言相当于纯阻性负载。
- (3) 提高系统动态响应能力,减小系统动态响应时间。
- (4) 降低开关损耗,提高整个装置的效率。
- (5) 减小直流侧纹波系数,缩小直流侧滤波器体积,减轻重量。
- (6) 提高直流侧电压电流利用率,扩大调制波的控制范围。

根据上述控制要求,随着 PWM 整流器控制策略研究的不断深入,其控制技术主要向以下几个方面发展:

(1) 电网不平衡条件下 PWM 整流器的控制技术研究

目前关于电网处于不平衡状态时, PWM 整流器的研究主要围绕整流器网侧的电感及直流侧电容的设计准则,或者是通过控制系统本身去改善和抑制整流器输入侧的不平衡因素。为了使 PWM 整流器在电网处于不平衡状态下仍能正常运行,必须提出相应的控制策略。

(2) 将非线性控制理论应用到 PWM 整流器控制技术中

为提高 PWM 整流器的性能,研究人员开始将非线性状态反馈控制, Lyapunov 非线性大信号方法以及无源性控制理论应用到 PWM 整流器控制中。待研究的主要问题是最佳能量函数和反馈控制率的确定方法。

(3) 智能控制技术研究

针对PWM整流器的双闭环控制系统中的PI调节器的参数难以确定,以及系统参数具有非线性和时变性的问题,为进一步提高PWM整流器的性能,将模糊控制和神经网络控制结合起来,利用模糊逻辑的智能推理机制和神经网络的自学习能力,将组成更好的控制方案。

4、结束语

本文主要论述了PWM整流器控制技术,分析了几种控制策略,最后对PWM整流器控制技术的发展进行了展望。随着电力电子技术的不断发展,PWM整流器技术将会不断地发展和深入,从而促进PWM整流器广泛应用在更广阔的领域。

OFweek 电子工程网