

三相大功率因数整流器的发展与现状

徐德鸿 浙江大学电机系 (杭州 310027)

摘要: 本文对近几年三相大功率因数整流电路的发展和现状作了系统和全面的回顾和介绍,对几种典型拓扑结构的优缺点作了比较和分析。

叙词: 大功率因数 整流器 谐波

1 引言

近二十年来电力电子技术得到了飞速发展,广泛应用到电力、冶金、化工、煤炭、电力传动等许多工业领域。大多数电力电子电路都通过整流器与工业电网接口,经典的整流器是由二极管或晶闸管组成的一个非线性电路,存在如下缺点:

- (1) 输入电流谐波含量高;
- (2) 从电网吸取无功功率,输入功率因数低;
- (3) 因为整流器输入电流额定值大,使整流器效率降低;
- (4) 交流侧电网电压产生畸变。

电力电子装置已成为最主要的谐波源,传统整流器污染了电网,成为电网公害。我国国家技术监督局在 1994 年颁布了《电能质量公用电网谐波》标准(GB/T14549-93),国际电工学会也于 1988 年对谐波标准 IEC555-2 进行了修正,传统整流器已不再符合新的规定。因此,传统整流器将面临前所未有的挑战。

抑制电力电子装置产生的电流谐波的方法有两种:一是被动式的,即采用无源滤波或有源滤波电路来旁路或补偿谐波;另一种方法是主动式的方法,设计新一代高性能整流器(U PF),具有输入电流为正弦、谐波含量低、功率因数高等优点。由于后一种方法在中小功率范围具有成本低、效率高、性能好等优点,并且符合新的谐波管理规定,因此,功率因数校正电路(PFC)得到了很大的发展,成为电力电子学目前研究的一个重要方向。

单相功率因数校正电路目前在电路拓扑和控制方面已相当成熟,而适合中高功率等级的三相变换器比单相整流器对电网产生的污染更大。因此,三相大功率因数整流电路的研究近年来成为研究热点。下面将简单介绍近几年三相 PFC 的主要拓扑结构。

2 三相 PFC 的基本拓扑

2.1 单开关三相 PFC 拓扑

单开关三相 PFC 按输入类型可分为电感输入型、电容输入型、谐振输入型和 Buck-Boost 输入型。电感输入型三相 PFC 是用图 1(b) 中的网络 A1 代替图 1(a) 中的网络 A 而构成的,它的

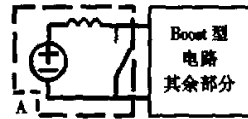


图 1(a) DC/DC Boost 型变换器

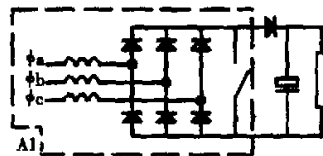


图 1(b) 电感输入型三相单开关 PFC

基本原理可认为是单相电流断续式(DCM)PFC 在三相的延伸^[1]。假设开关频率远高于电网频率,在开关开通期间,输入电压近似不变,电感电流线性上升,电流峰值和平均值正比于相电压,开关关断期间,电感能量释放到负载,在此阶段,电感电流平均值是输入相电压和输出直流电压的非线性函数,平均相电流可表示如下:

$$\begin{cases} \left(\frac{V_m}{R_{eff}} \right) \cdot \frac{\sin(\omega t)}{1 - 2\mu \sin(\omega t)}; & \left(0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} \right) \\ \left(\frac{V_m}{R_{eff}} \right) \cdot \frac{\sin(\omega t)}{1 - \mu \sin(\omega t)}; & \left(\frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi \right) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mu = \frac{3V_d}{2V_m}$, $R_{eff} = \frac{2L}{D^2 \cdot T_s}$, L 为输入电感, T_s 为开关周期, V_d 为输出直流电压, V_m 为相电压。从(1)式看出,输入电流平均值强烈依赖于 μ , 只有 $\mu \rightarrow 0$, 即 $V_d > V_m$ 时,输入电流才接近正弦,功率因数才为 1。因此,此电路有如下缺点:

- (1) 输入电流工作在 DCM 方式下,开关所受的电流应力大;
- (2) 输出电压与占空比之间存在严重的非线性关系,这就造成系统闭环困难;
- (3) 为了提高功率因数,需增大输出电压,导致开关电压应力增加;

(4)由于采用电流断续方式,EMI大。

尽管如此,由于此电路元件少,成本低,开关工作在零电流开通,开通损耗小等优点,在中小功率的三相 PFC 中仍有相当大的吸引力。

电容输入型三相 PFC^[2]是用图 2(b)中的网络 B1 代替图 2(a)中的网络 B,其工作原理可认为是电感输入型 PFC 的对偶,它适用于输出电压低于输入电压的场合。不同之处在于,输入电流的功率因数和谐波总量 THD 依赖于输出电流,输出电流越大,THD 越小,功率因数越高。但是,电容输入型 PFC 中开关工作在高电压、大电流方式,工作条件很差。

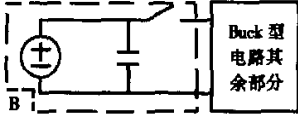


图 2(a) DC/DC Buck 型变换器

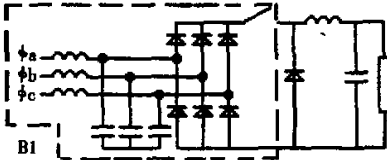


图 2(b) 电容输入型单开关三相 PFC 拓扑

谐振输入型 PFC 与上两种类似,以零电流开关谐振式(ZCS)Buck 型 PFC 为例,以图 3(b)中的三相谐振单元 C1 代替谐振型 DC/DC 变换器中的谐振单元 C 构成,它的优点是开关工作在 ZCS 状态,改善了开关的工作条件,缺点与 DC/DC 谐振型变换器一样,输出电压是负载的非线性函数,谐振频率与开关的寄生参数有关,系统闭环困难等。

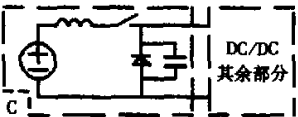


图 3(a) ZCS DC/DC Buck 型直流谐振型变换器

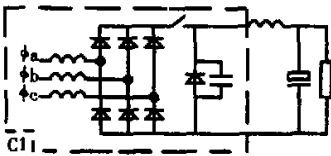


图 3(b) 三相谐振式 ZCS Buck 型单开关变换器

输入平均电流为纯正弦,功率因数为 1。缺点与单相反激式 PFC 相同,适合应用在小功率范围。

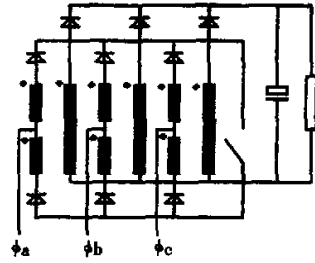


图 4 Buck-Boost 型单开关三相 PFC

2.2 多开关三相 PFC 拓扑

图 5 是六开关的整流器和逆变器,多用作电压源逆变器。由于它本身可完成功率反向传输,因此,它可作为三相 PFC,优点是输入电流可以连续,输入电流谐波含量小,功率因数高,可实现功率的反向传输。缺点是:

- (1)控制复杂,成本高;
- (2)三相 PWM 变换器/整流器有直通短路危险,可靠性差。

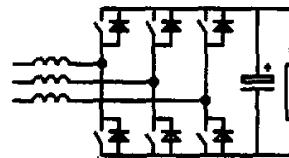


图 5 六开关整流器/逆变器

因此,采用六开关桥式整流器/逆变器来完成 PFC,需作一定的简化和改进,如采用滞环控制的六开关整流器,在很多文献都有记载。

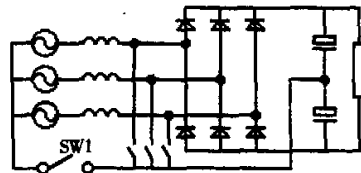


图 6 文献[4]中所提的三双向开关 PFC

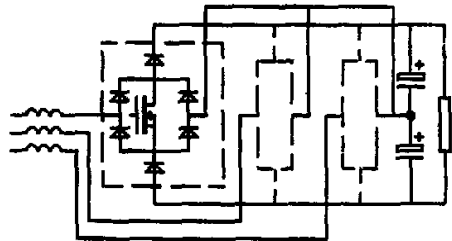


图 7 J.W.Kolar 所提的三开关三电平三相 PFC

奥地利的 J.W.Kolar 教授等将 Buck-Boost 电路应用到三相 PFC 中,即产生 Buck-Boost 输入型 PFC^[3]。见图 4,这种电路可以认为是反激式单相 PFC 在三相中的延伸,此电路的基本原理是开关开通,电感电流线性上升,峰值和平均值正比于相电压,开关关断,电感电能通过变压器副边向负载释放。电路优点是

图6是用三个双向开关的滞环控制的三相 PFC^[4],其电路的基本原理是将输入电感电流和给定电流经过滞环控制,使输入电流跟随电流给定,从而实现功率因数校正。由于 $i_a + i_b + i_c = 0$,所以,将图6中开关 SW1 断开,并用图7虚线框内的双向开关代替图6中的双向开关,则构成了三开关三电平三相 PFC^[5]。这种电路的优点是开关电压额定值仅为输出电压的一半,因此,可采用开关速度快的功率 MOSFET,欧洲某公司受此电路启发,已作成了模块。此电路缺点是开关损耗较大。

图8是一种用串联双 Boost 构成的三相 PFC^[6]。电路基本原理是在 360° 范围内选择一 60° 区域,如在 $V_a > V_b > V_c$ 期间,令开关 S_b 开通,则图8所示的电路可等效为两个单相 Boost PFC 的串联,利用单相 PFC 的技术,可使 A、C 相相电流正比于相电压。同时,由于三相电流之和在任何时候皆为零,因此, B 相电流也必然是正弦,且正比于 B 相电压。依此类推,可推广到整个 360° 范围。

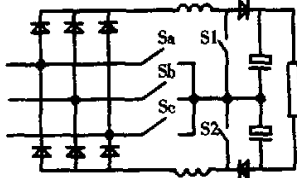


图8 串联双 Boost 解码式三相 PFC

上述电路的优点是通过三个双向开关,将三相高功率因数整流变换为两个 Boost 电路的串联,这样就可应用目前已成熟的单相 PFC 电路的技术。缺点是:

- (1) 需要一个三相解码电路来选择工作区;
- (2) 根据 Boost 电路原理,电容输出电压必须大于最大的输入电压,所以它适合于输出电压较大的场合;
- (3) 开关数相对较多。

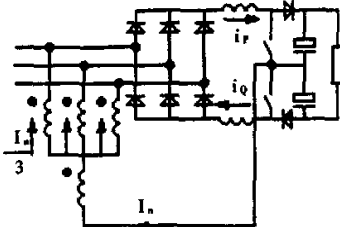


图9 含 IFT 的解码式三相 PFC

文献[7]提出了一种含三相隔离变压器接口(JFT)的三相 PFC,电路如图9,基本思想是引入了一个 IFT,其输出端电流为人端电流 I_o 的三分之一,在此条件下,输入相电流 i_a, i_b, i_c 和整流桥输出电流 i_p 和 i_q 存在一一映射关系;整流桥之后是两个单相 Boost PFC 电路的串联,因此,可采用单 PFC 的技术,使 i_p 和 i_q 跟随电流给定 i_p^* 和 i_q^* ,根据映射关系,输入电流也将跟随给定电流 i_a^*, i_b^*, i_c^* ,从而可实现功率因数为 1。这种电路的优点是开关少,控制简单,可采用任何单相 PFC 的技术。缺点是

需要一个容量相当大的 IFT(约大于输入总功率的 20%),由于 IFT 工作在低频,这必然增加变换器的成本和体积。

3 软开关三相 PFC

软开关技术近来发展迅速,它可减少开关损耗、提高开关频率等,从而可以减少输入输出滤波器的大小,增加功率密度和减小 EMI 等。目前,提出的软开关有许多种,其中,比较热门的是增加一个辅助网络(即辅助电流源),其根本原理是在开关开通或关断瞬间,即在能量由一个状态转移到另一个状态期间,把本来消耗在开关上的能量转移到辅助网络,再由辅助网络释放给输出,这样可大幅度减少开关损耗。如美国 VPEC 的 F.C.Lee 等提出的 ZVT、ZCT、并 MOSFET 技术以及其它很多并辅助网络软开关,都基于此思想。目前,软开关在三相单开关、多开关 PFC 中的应用很多,在 1994 年以后的 PESC、APEC 等都有大量文献。

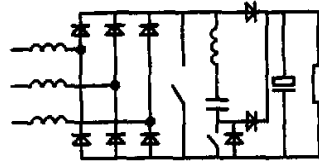


图10 ZCT 单开关 DCM Boost 三相 PFC

图10是含 ZCT 的三相单开关 DCM Boost PFC 电路拓扑。但是软开关只能减少开关损耗,对 PFC 拓扑本身所固有的缺点(如单开关 Boost DCM PFC 中功率因数与输出电压之间的非线性关系等)是无法克服的。因此,三相 PFC 电路的发展还须依赖于本身拓扑结构的进展。

4 三相 S²IP²

为了符合 IEC 555-2 的标准,常常在 DC/DC 变换器前增加一个 PFC,这种电路的输出电压性能是好的,但是增加了成本。文献[8]提出了单相单级隔离式功率因数校正的电源(S²IP²),它的思想是将 PFC 和 DC/DC 经过适当的组合,只采用一个开关,在完成输出电压调节的同时,自动完成输入功率因数的校正。此电路的优点是开关少,动态性能好,所以,近来发展很快。将这种思想应用到三相 PFC,即产生三相 S²IP²,目前,此电路还在发展中。

5 结束语

三相高功率因数整流器的研究将引起整流器技术的一场革命,目前,它还处在发展之中。三相高功率因数整流器的进一步发展一方面依赖于新的拓扑结构,另一方面,新的控制策略往往可以改善电路的性能,因此,这两个方面的研究将是近几年的主要研究方向。