

单级功率因数校正变换器拓扑结构的研究

韩丽艳

(北京石油化工学院, 北京 102617)

摘 要 为了减小 AC/DC 变流电路输入端谐波电流产生的谐波“污染”, 提高输入端功率因数, 对现有的单级功率因数校正变换器的拓扑进行了分析和比较。发现 Boost 型单级 PFC 变换器的两端模式和三端模式具有相似性, 且可以相互转换, 并利用仿真验证了该结论。根据不同需要提出或得到一些新型的拓扑结构。

关键词 功率因数校正; 变换器; 拓扑; 三端模式; 两端模式

中图分类号 TM643

为了减小 AC/DC 变流电路输入端谐波电流造成的噪声和对电网产生的谐波“污染”, 提高电网的可靠性及输入端功率因数, 达到节能的效果, 必须限制 AC/DC 电路的输入端谐波电流分量。因此, 对单级功率因数校正 (Power Factor Correction, 缩写为 PFC) 技术的需求越来越紧迫, 特别是小功率场合。单级 PFC 变换器是把 PFC 级和 DC/DC 级集成在一起, 共用开关管和控制电路, 同时实现输入电流的整形和对输出电压的调节。如图 1(a) 所示^[1]。

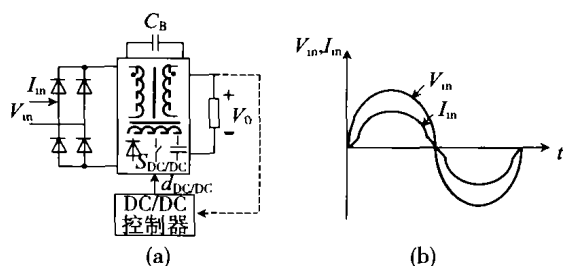


图 1 单级 PFC 变换器方框图及
输入交流电压和电流波形

由于控制电路只调节电压, 因此要求 PFC 级的输入电流能自动跟随输入电压, 如图 1(b) 所示。储能电容 C_B 用来平衡 PFC 级和 DC/DC 级之间瞬时不等的能量。

1 单级 PFC 变换器的拓扑

图 2 为 Boost 型单级 PFC 变换器的通用

结构。通过在 Boost 电感 L (A 点)、储能电容 C_B (B 点) 和开关管 SW (C 点) 之间加入二极管、电感、电容、变压器绕组来实现 PFC 功能。如果只在 A、B 或 A、C 之间插入器件则为两端模式; 如果在 A、B、C 三点间都插入器件则为三端模式。

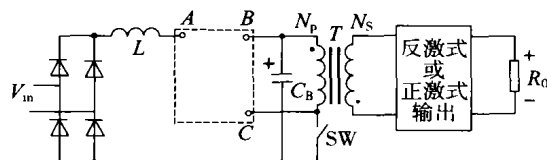


图 2 Boost 型单级 PFC 变换器的结构

1.1 三端模式

图 3(a) 是一个基本的三端拓扑, 它是在两极 PFC 变换器基础上, 直接把 PFC 级和 DC/DC 级的开关管合并为一个, 加入两个二极管 D_1 和 D_2 以防止电流反向, 同时去掉 PFC 的控制电路。其余的三端拓扑都是在此基础上改进的, 如图 3(b~f) 所示。

图 3(b) 是在 AC 支路上加入一个电感 L_r , 使 PFC 工作在连续导电模式 (Continuous Conduction Mode, 缩写为 CCM)^[2], 降低储能电容的电压, 提高变换器的效率。图 3(c) 的拓扑是在 AC 支路加入一个变压器绕组 N_1 实现负反馈, 从而抑制电容两端的电压。图 3(d) 是在图 3(c) 的基础上, 在 AB 支路上增加了一个绕组 N_2 , 在 SW 关断时, 加在电感 L_B 上的反向

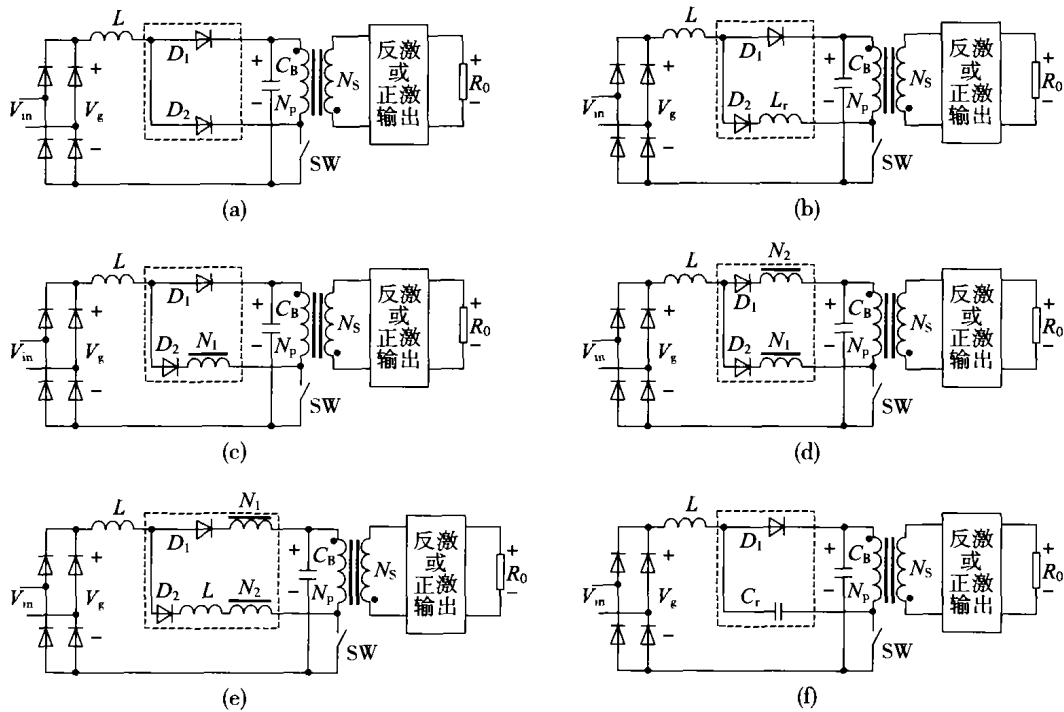


图 3 Boost 型单级三端模式 PFC 变换器的结构

电压和 N_2 上的电压之和减去输入电压, 加大了电感 L_B 在关断时的电流下降率, 减少了输入功率, 进一步降低了电容两端的电压, 并提高了功率因数。图 3(e) 是在图 3(d) 的基础上在 AC 支路增加了电感 L_r , 使输入电流工作在 CCM 模式, L_r 可以利用变压器的漏感, 也可以另加一个电感。图 3(f) 是在 AC 支路只加一个电容 C_r 实现 CCM 电压模式功率因数校正。

1.2 两端模式

Boost 型 PFC 变换器的另一种结构是两端模式拓扑, 如图 4 所示。在这种模式中, 输入电流整形 (Input Current Shaping, 缩写为 ICS) 单元 (如图中虚线框) 连接在全桥整流和储能电容之间。图 4(a) 中的 ICS 单元由电感 L_B 和它的充电、放电支路组成, 且这两条支路并联连接。当开关管导通时, 变压器前端绕组 N_1 两端的电压极性与储能电容两端的电压极性相反, 只有当整流后的电压加上 N_1 两端的电压大于电容两端的电压时, L_B 上才有电流流过, 实际上相当于在输入电压上叠加了一个直流电压分量, 增加了导通角; 在开关管关断时, N_1 两端的电压与电容两端的电压同向, 加在 L_B 上的电压为负, 加速了输入电流的下降。

图 4(b) 是在 D_2 支路串联了另一个变压器绕组 N_2 , $N_1 > N_2$, 在开关管开通时, 电感 L_B

通过 N_1 充电, 在开关管关断时, 电感 L_B 通过 N_2 充电。如果 $N_1 = N_2$, 则得到图 4(c)。图 4(d) 是在图 3(b) 的 AC 支路加一个电感来实现 CCM 电流模式的拓扑。如果去掉 D_1 , 用电容 C_r 和绕组 N_1 串联成一个支路, 便组成单负反馈绕组 CCM 电压源模式, 如图 4(e) 所示。电感 L_B 的充电支路和放电支路分开, 并且 L_B 工作在 CCM 模式。图 4(f) 是采用饱和电感实现 PFC。

2 两端模式和三端模式的通用结构^[3]

根据前面的分析知道, 虽然 ICS 单元的结构不同, 但大部分三端结构的 Boost 型单级 PFC 变换器有一些共同的特点。即每个 ICS 单元包括一个电感 L_B 和支路, 如图 5 所示。一个支路为电感 L_B 的充电支路 (AC 支路), 另一个为电感 L_B 的放电支路 (AB 支路)。

同样可以归纳出两端模式的通用结构, 如图 6 所示。同三端模式一样, 每个 ICS 单元包括一个电感 L_B 和两个支路, 一个支路为电感 L_B 的充电支路, 另一个为电感 L_B 的放电支路。

3 仿真结果

为了更清楚地了解上述两种变换器的电路

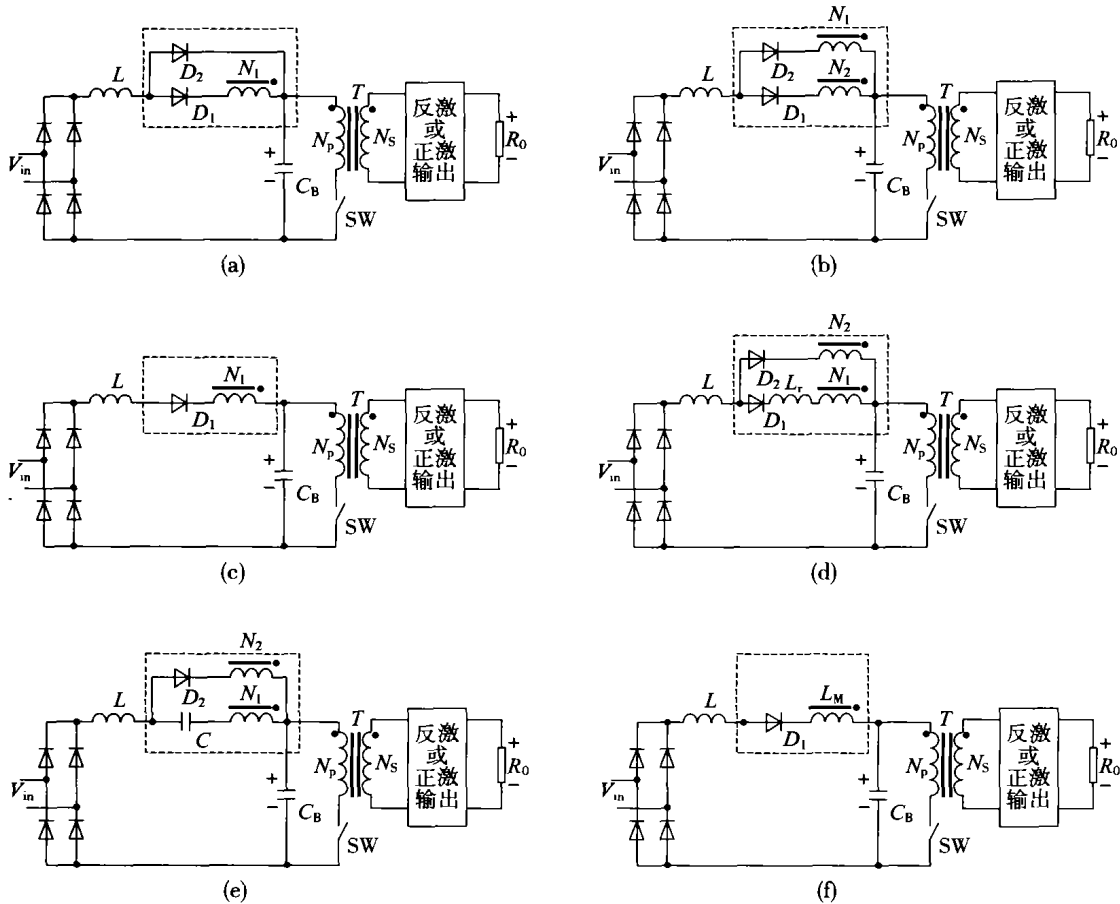


图 4 Boost 型单级两端模式 PFC 变换器的结构

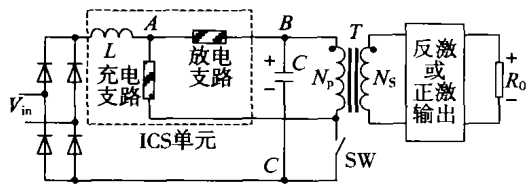


图 5 Boost 型单级 PFC 变换器三端模式的通用结构

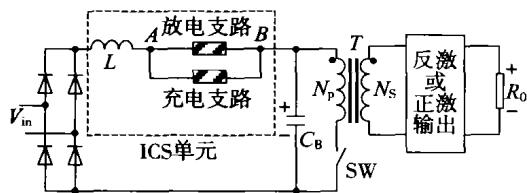


图 6 Boost 型单级 PFC 变换器两端模式的通用结构

性能以及它们之间联系与差别,对其进行了仿真分析。仿真条件是:

输入电压:180 V~265 VAC;输出电压:48 V。

电路参数: $L_B = 100 \mu\text{H}$, T: ERL35, 其中 $N_p = 49$ 匝, $N_s = 24$ 匝, SW: IRF150, D_1, D_2, D_3, D_4 : DIN4148, $f_s = 100 \text{ kHz}$, 三端模式中 $N_1 = 25$ 匝, 三端模式中 $N_1 = 24$ 匝, $C_B: 0.22 \mu\text{F}$ 。

图 7 为三端模式和两端模式 PFC AC/DC 变换器输入电压和电流波形。

图 8 为三端模式和两端模式 PFC AC/DC 变换器的各种参数对比图。图中 2-T 代表两端模式, 3-T 代表三端模式。其中图 8(a) 为输入电压为 265 V 时电压 V_B 随负载电流的变化曲线; 图 8(b) 为满载时效率 η 随输入电压 V_{in} 的变化曲线; 图 8(c) 为输入电压为 230 V、满载时输入电流的各次谐波含量同 IEC1000-8 Class D 标准的对比。

从图 8 可以看出两端模式和三端模式的输入电流和输入电压波形很相似, 这很好的验证了它们的相似性。从图 8(a) 仿真结果得到两端模式 V_B 的最高值为 408 V, 三端模式 V_B 的最高值为 410 V, 但两者相差不足 0.5%, 很相近。从图 8(b) 仿真结果得到两端模式效率最大值为 83%, 三端模式效率最大值为 83.3%, 略高于两端模式, 但它们之间最大相差接近 3%。从图 8(c) 的仿真结果得到两端模式和三端模式的输入电流谐波都满足 IEC 1000-8 Class D 标准, 且各次谐波很相近。总之, 仿真

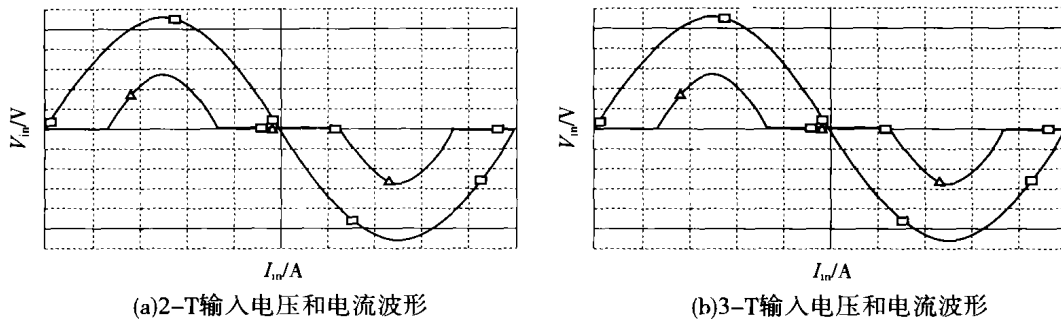


图 7 三端模式和两端模式输入电压和电流波形

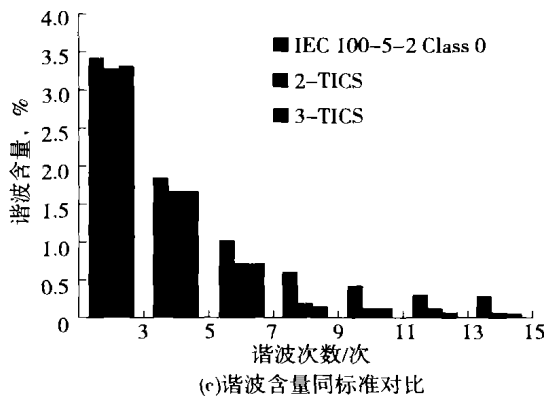
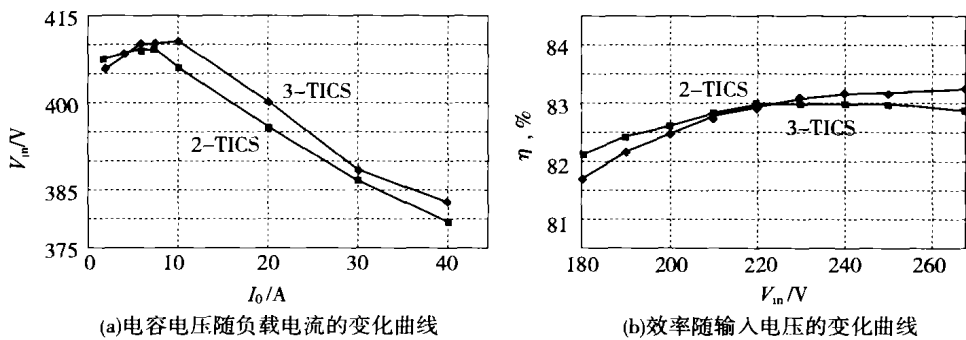


图 8 两端模式和三端模式各种参数的对比

结果显示单级 Boost 型单绕组三端模式和两端模式 PFC AC/DC 变换器具有相似性, 它们之间可以相互转换。

4 三端模式和两端模式之间相互转换

通过归纳和仿真结果分析, 发现 Boost 三端模式和两端模式拓扑都具有一定的规律性, 并且它们在功能上是等价的, 性能相似, 可以相互转换。

三端结构的 ICS 单元可以不改变充电支路和放电支路的结构, 通过在 AC 支路增加一个辅助绕组, 把 C 点从开关管的漏极断开, 和 B 点合并, 得到 AB 支路的两端结构 ICS 单元, 如图 9 所示。

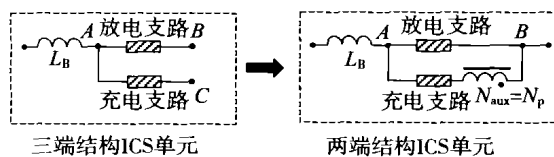


图 9 三端结构转换为两端结构的转换

同理, 两端结构 ICS 单元也可以转换成三端结构的 ICS 单元。如图 10 所示。AB 支路两端模式 ICS 单元把充电支路从 B 点断开, 接到开关管的漏极, 并在充电支路增加一个辅助绕组 N_{aux} 可转换成具有相同充电支路和放电支路的三端结构的 ICS 单元。

5 结论

根据前面分析得知, 三端模式和两端模式

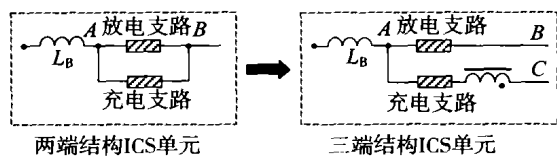


图 10 两端结构转换为三端结构的转换

的单级 PFC 变换器之间存在着相互转换规律, 发现已有的一些三端结构和两端结构具有相互对应的关系。如图 3(a) 中三端结构拓扑可以转换成图 4(a) 中两端结构拓扑。这两个拓扑虽然是不同作者提出的, 但它们在电气上是等效的。因此可以利用这个结论, 根据不同的需

要, 提出或者得到新的拓扑结构。

参考文献

- 1 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理和设计 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1998
- 2 严百平. 不连续导电模式高功率因数开关电源 [M]. 北京: 科学出版社, 2000
- 3 许化民等. 单级功率因数校正 AC/DC 变换器综述 [J]. 电力电子技术, 2001(1): 56~60

Topological Study on Single-stage Power Factor Correction Converters

Han Liyan

(Beijing Institute of Petro-chemical Technology, Beijing 102617)

Abstract A topological study on representative single-stage PFC converters are presented in this paper. Single-stage PFC converter can be classified into 2-terminal ICS cell and 3-terminal ICS cell. The analysis and simulation show that these two types of converter have similar performance, and can be transformed into each other. Therefore, some new PFC topologies can be derived from the existing ones.

Key words power-factor-correction; converter; topology; 3-terminal ICS cell; 2-terminal ICS cell