

基于 Matlab 设计的软开关型 APFC 电路

任开春,严志强,王永民

(重庆通信学院 电力工程系,重庆 400035)

摘要: 将一种改进型软开关电路与 Boost 电路相结合,组成一种软开关型有源功率因数校正(APFC)电路。软开关型 APFC 电路的主电路是将输入端的交流变换为直流,并在软开关条件下实现功率因数校正。基于 Boost 型功率因数校正电路,利用改进型 ZVT(Zero Voltage Transition)实现软开关。电路由基本 Boost 电路和辅助谐振网络 2 部分组成。电路中的主开关管是零电压开通和零电压关断的,辅助开关管是零电流开通和零电压关断的。在软开关型 APFC 电路中,选用平均电流控制方式。给出了电路中主要元器件参数(升压电感、滤波电容、辅助电感、辅助电容、采样电阻及输出负载)的选取方式,仿真结果表明,功率因数可达 0.9976。

关键词: 有源功率因数校正; 零电压开关; Matlab 仿真

中图分类号: TM 933.3; TM 714 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-6047(2007)08-0095-04

有源功率因数校正(APFC)电路通过引入有源开关器件,较大幅度地减小了交流侧的谐波电流,提高了功率因数。但随着有源开关器件的引入,开关器件的通断损耗增大,电压、电流应力加大,因此,为克服这些问题,引入了软开关技术。现将一种改进型 ZVT(Zero Voltage Transition)软开关应用于 APFC 电路中^[1-5],通过仿真分析验证了电路设计的合理性,通过构建电路模型,进一步验证了其可行性。

1 软开关 APFC 电路设计^[5-12]

1.1 主电路设计

主电路的作用是将输入端的交流变换为直流,并在软开关条件下实现功率因数校正。其中,功率因数校正借助于 Boost 型电路,而软开关则是利用改进型 ZVT 技术实现的,如图 1 所示。

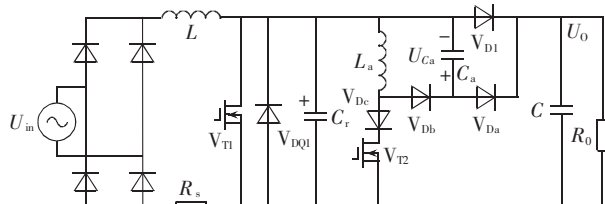


图 1 典型的软开关 APFC 电路

Fig.1 Typical soft-switching APFC circuit

电路由基本 Boost 电路和辅助谐振网络 2 部分组成。辅助谐振网络由辅助开关管 V_{T2} , 谐振电感 L_a , 谐振电容 C_a 和 C_r , 辅助二极管 V_{Da} 、 V_{Db} 、 V_{Dc} 组成。

辅助谐振网络为主开关管 V_{T1} 提供零电压开通条件,其工作过程可分为以下 6 个步骤^[1]:

a. 假定主开关管 V_{T1} 处于关断状态,此时二极管 V_{D1} 导通,电感 L 给电容 C 充电;

b. 当需要开通主开关管 V_{T1} 时,提前开通辅助开关管 V_{T2} ,此时谐振电感 L_a 的电流由零开始线性增加,当 L_a 的电流等于 L 的电流时, V_{D1} 关断;

c. V_{D1} 关断后,谐振电感 L_a 和谐振电容 C_r 构成谐振电路, C_r 电压逐渐降低,当等于零时,主开关管 V_{T1} 的体内二极管 V_{DQ1} 导通,谐振电路停止谐振, V_{T1} 两端的电压维持为零;

d. 开通 V_{T1} ,实现零电压开通;

e. V_{T1} 开通后,关断 V_{T2} ,此时 L_a 和 C_a 构成谐振电路,但由于 C_a 的起始值是零,因此, V_{T2} 是在零电压条件下关断的,当 C_a 的电压等于输出电压时,二极管 V_{Da} 导通, L_a 的电流线性减小,当减小到零时, V_{Da} 和 V_{Db} 关断;

f. 关断主开关管 V_{T1} ,此时电感 L 的电流分别给电容 C_a 和 C_r 充电,由于电容 C_r 的起始电压是零,因此, V_{T1} 是零电压关断的,当 C_r 的电压升高到与输出电压相等时, C_a 的电压已经减小到零,二极管 V_{Da} 截止,二极管 V_{D1} 导通。

以后重复前面的过程。

因此,从上述的分析可知,主开关管 V_{T1} 是零电压开通和零电压关断的,因而是真正的 ZVT 模式;辅助开关管是零电流开通和零电压关断的,是 ZCT (Zero Current Transition)和 ZVT 的结合。

1.2 控制电路的选择

Boost 功率因数校正的控制电路有多种,其中平均电流控制方式,由于其总谐波失真度 THD (Total Harmonic Distortion)和电磁干扰 EMI (Electro Magnetic Interference)小,对噪声不敏感,开关频率固定,电感电流峰值和平均值之间的误差小,适用于大中功率场合,是目前 APFC 中应用最多的一种控制方式。因此,在软开关 APFC 电路中,选用平均电流控制方式。

为了保证主开关管在零电压状态下开通,保证辅助开关管在 C_r 上的谐振电压降至零这段时间内

始终保持导通,可以加上一段固定的延迟时间,该时间的大小等于输入电压下限、满负载状态下的零电压过渡时间 $t_{ZVT} = \frac{I_{INP} L_a}{U_0} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_a C_r}$ [13],这也是辅助开关管较之主开关管的提前导通时间。

2 软开关 APFC 电路参数选取

2.1 设计规格

- 输入交流电压 176~264 V[220×(1±0.2) V];
- 交流电压频率 50 Hz(±1 Hz);
- 输出直流电压 400 V(±10 V);
- 输出最大功率 1 kW;
- 开关频率 100 kHz;
- 功率因数 $\lambda > 0.99$ 。

2.2 主要元器件参数的选取

关于升压电感和输出电容的选取原则和选取方式,在很多文献中都有阐述,升压电感取值为 1.0 mH,电容值取 450 μ F。

2.2.1 电流采样电阻的选取

电流采样电阻,如果选取过大,则造成不必要的电路损耗,降低效率;如果选取过小,则电流检测信号过小,造成检测电路不敏感,因此电流采样电阻应合理选取。通常采样电阻两端的检测电压 $\Delta u_{Rs} = R_s I_{L, \text{linepk}} \leq 1$ (V),即 $R_s \leq 1 / I_{L, \text{linepk}} = 0.1$ (Ω),在这个范围之内,按照经验进一步选取,经验公式为

$$R_s = 48 / P_0 = 48 / 1000 = 0.048 \text{ } (\Omega) \quad (1)$$

因此,电流采样电阻选择 0.048 Ω 。

2.2.2 C_a 的设计

选择 C_a 时,主要考虑 V_{T1} 的关断情况,这是因为辅助开关管的额定电流比主开关管小,虽然它关断时的电流比主开关管大,但其关断损耗要比主开关管小。为了减小 V_{T1} 的关断损耗,可以使 C_a 在放电时其速度不要太快。一般可选择在最大负载时, u_{Ca} 从 U_0 下降到 0 的时间为 $(2 \sim 3)t_f$, t_f 为 V_{T1} 的关断时间。则 C_a 可由下式选择 [14]:

$$C_a = \frac{I_{i, \max}}{U_0} \times (2 \sim 3)t_f \quad (2)$$

2.2.3 C_r 的设计

从软开关电路一个周期的分析过程中可以看出, C_a 起到 2 个作用:当 V_{T2} 关断时, C_a 充电,给 V_{T2} 的关断起缓冲作用;当 V_{T1} 关断时, C_a 放电,给 V_{T1} 的关断起缓冲作用。因此, V_{T1} 的缓冲电容 C_r 可以很小,只利用其结电容就足够了,可以不再另加缓冲电容。

2.2.4 L_a 的设计

根据电路分析过程, L_a 的选取如公式(3)所示:

$$\frac{L_a I_{i, \max}}{U_0} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_a C_r} \leq \frac{T_s}{10} \quad (3)$$

式中 T_s 为周期。

由于 C_r 很小,可忽略,对式(3)进一步推导,得:

$$L_a \leq \frac{T_s}{10} \frac{U_0}{I_{i, \max}} \quad (4)$$

$$L_a \text{ 的最大峰值电流为 } I_{La, \text{pk}, \max} = I_{i, \max} + \frac{U_0}{\sqrt{L_a / C_r}},$$

在计算 L_a 的有效值电流时,由于其充电时间很短,可以忽略。 L_a 的最大有效值电流为 [1]

$$I_{La, \max} = \sqrt{\frac{1}{T_s} \left[\frac{L_a}{3U_0} (I_{i, \max}^3 + A^3) + B + C + D \right]} \quad (5)$$

$$A = I_{i, \max} + U_0 / Z_a, \quad B = I_{i, \max}^2 \pi / (2 \omega)$$

$$C = 2 U_0 I_{i, \max} / (\omega L_a), \quad D = U_0^2 \pi / (4 L_a Z_a)$$

因此,软开关 APFC 电路主要元器件参数如表 1 所示。表中升压电感 L ,滤波电容 C ,辅助电感 L_a ,辅助电容 C_a ,采样电阻 R_s ,输出负载 R_o 。

表 1 软开关 APFC 电路元器件参数值

Tab.1 Parameters of main components

L/mH	$C/\mu\text{F}$	$L_a/\mu\text{H}$	C_a/nF	R_s/Ω	R_o/Ω
1.0	450	6	3.6	0.048	160

3 仿真分析及实验波形

3.1 电路仿真及波形分析

3.1.1 功率因数

对软开关 APFC 电路进行仿真,求得功率因数 $\lambda = 0.9976$ 。整个仿真时间段内的功率因数如图 2 所示。

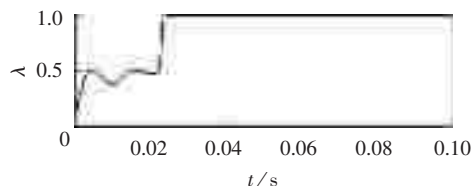


图 2 功率因数

Fig.2 The power factor curve

从波形图 2 可以看出,当仿真时间达到 0.024 s 之后,电路趋于稳定,功率因数也基本稳定,能够得到接近 1 的高功率因数,稳定后的功率因数尽管有波动,但是波动幅度很小。

3.1.2 输入电压、电流波形

图 3 给出了输入电压和输入电流的仿真图形,为了在同一个坐标轴内更清晰地反映输入电压和输入电流之间的关系,因此,将输入电压缩小了 20 倍。从图 3 中可以看出,经过一个工频周期之后,输入电压和输入电流进入稳态,输入电压和输入电流相位几乎一致,而输入电流也几乎是正弦波。

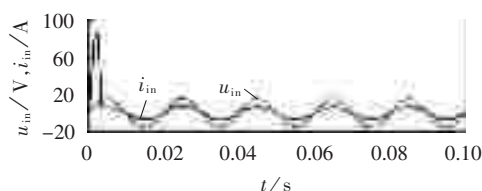


图 3 输入电压和输入电流的波形

Fig.3 Waveforms of input voltage and input current

3.1.3 输出电压波形

对软开关 APFC 电路进行仿真,求得总输出电

压 $U_0=395\text{ V}$,符合电路设计要求 $U_0=400\text{ V}(\pm 10\text{ V})$,整个仿真时间段内的输出电压波形如图 4 所示。

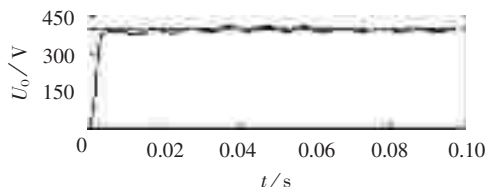


图 4 输出电压波形

Fig.4 Waveform of output voltage

从图 4 可看出,输出电压随着仿真时间的进行,逐渐趋于稳定状态,输出电压集中在 400 V 上下波动,之所以比电路设计中规定的 400 V 小,主要原因是电路的元器件非理想元器件,在电路运行过程中,负担了一部分电压,不过,电路的输出电压还是在设计要求范围内的。

3.1.4 谐波电流值与标准值的比较

图 5 给出了软开关 APFC 电路的输入谐波电流值与 IEC61000-3-2A 类标准值的比较结果,从图中可以看出,输入电流的 2、3、...、19 次谐波电流值均远远小于 IEC61000-3-2A 类标准值。

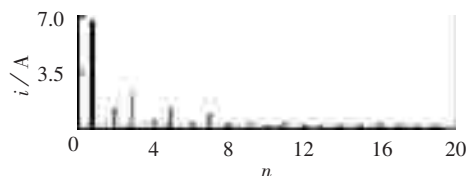


图 5 电路输入谐波电流值与标准值的比较

Fig.5 Comparison between input harmonic currents and standard values

3.2 电路板搭建及实验波形

为进一步验证该变换器工作原理和性能,在实验室完成了一个功率为 1 kW 、工作频率为 100 kHz 的软开关 APFC 电路。电路的设计规格及主要元器件参数选取与仿真电路相同,控制器以 UC3855 为核心,辅以必要的外围电路,可使电路获得近似正弦波的输入电流,并且 THD 很小,只有 4.7% ,功率因数 λ 达到了 0.996 。图 6 给出了满载运行时输入电压和输入电流波形,从图形可看出,输入电流跟踪输入电压,波形成正弦趋势;图 7 给出了主开关管和辅助开关管的驱动脉冲,其中 1、2 分别为主开关管、辅助开关管驱动脉冲,从图形上可以看出,辅助开关管只是在主开关管导通前的很小一段时间内导通,因此导通损耗很小;图 8 给出了满载条件下主开关管两端电压及流过电流的波形,其中 1、2 分别为电压波形和电流波形,从波形图可以看出,主开关在导通和关断过程中,电压均已降为 0,实现了零电压通断 ZVS(Zero Voltage Switching);图 9 给出了辅助开关管两端电压及流过电流的波形,其中 1、2 分别为电压、电流波形,从图中可以看出,辅助开关管实现了零电流 ZCS(Zero Current Switching)导通和零电压(ZVS)关断,实验波形与仿真结果一致。

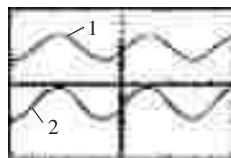


图 6 满载时输入电压和输入电流的波形

Fig.6 Waveforms of input voltage and input current with full load



图 7 主开关管和辅助开关管的驱动脉冲

Fig.7 Driving pulses of main and assistant on-off components

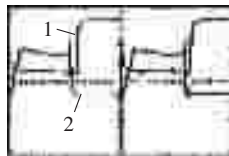


图 8 主开关管两端电压及流过电流波形

Fig.8 Voltage and current of the main on-off component



图 9 辅助开关管两端电压及流过电流波形

Fig.9 Voltage and current of the assistant on-off component

4 结语

文中讨论了软开关 APFC 的主电路及控制电路的设计方法,给出了主要元器件参数的选取方法,实现了基于 Matlab 的软开关型 APFC 设计方法。利用仿真分析验证了这些设计方法的正确性,最后,通过电路实验进一步验证了电路设计的合理性。

参考文献:

- [1] 张建荣,汤秀娟. 直流开关电源的软开关技术[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [2] 何茂军,李晓帆. 一种新型 ZVT-PWM 软开关 BOOST 变换器的设计[J]. 通信电源技术,2001(2):17-20,24.
HE Mao-jun, LI Xiao-fan. A kind of new ZVT-PWM soft switching BOOST converter[J]. Telecom Power Technologies, 2001(2):17-20,24.
- [3] 姚为正,秦祖泽,刘国繁,等. 零电压过渡有源功率因数校正电路的设计[J]. 电气应用,2000(5):10-12.
YAO Wei-zheng, QIN Zu-ze, LIU Guo-fan, et al. Design of zero-voltage-transition active power factor correction circuit[J]. Electrotechnical Application, 2000(5):10-12.
- [4] 程丽. 单相软开关有源功率因数校正装置的研究[D]. 南宁:广西大学,2004.
CHENG Li. The research of single-phase soft-switch active power factor correction[D]. Nanning:Guangxi University, 2004.
- [5] MAO Heng-chun, LEE F C, JIANG Yi-min. Review of power factor correction techniques[C]//International Power Electronics and Motoring Conference. Hangzhou, China: [s.n.], 1997:9-27.
- [6] 李先祥. 开关电源功率因数校正系统设计技术[J]. 佛山科学技术学院学报:自然科学版,2000,18(2):1-5.
LI Xian-xiang. Designing the power factor correction system for the switch power and the techniques involved[J]. Journal of Foshan University: Natural Science Edition, 2000, 18(2):1-5.
- [7] 冯波. 软开关功率因数校正技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,2004.
FENG Bo. The study on soft switching PFC techniques[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [8] 王纪周. 单级功率因数校正技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.
WANG Ji-zhou. Investigation on single stage power factor correction techniques[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [9] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

- [10] 张占松,蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- [11] 周志敏,周纪海. 开关电源实用技术设计与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [12] 李爱文. 现代通信基础开关电源的原理和设计[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [13] 倪海东,蒋玉萍. 高频开关电源集成控制器[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [14] 周志敏,周纪海,纪爱华. 开关电源功率因数校正电路设计与应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2004.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

任开春(1970-),男,重庆人,副教授,博士,从事电力电子方面的工作(E-mail:ren65551210@126.com);

严志强(1973-),男,重庆人,讲师,硕士,从事自动控制方面的工作;

王永民(1979-),男,山东临朐人,硕士研究生,从事电力电子方面的工作。

Soft-switching APFC circuit based on Matlab

REN Kai-chun, YAN Zhi-qiang, WANG Yong-min

(Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

Abstract: A soft-switching type APFC(Active Power Factor Correction) circuit is designed by combining improved soft-switching circuit with Boost circuit. Its main circuit converts input AC into DC and corrects the power factor under soft-switching condition. The Boost-based APFC circuit implements the soft-switching using improved ZVT(Zero Voltage Transition) circuit. The circuit is composed of the basic Boost circuit and the resonant network. The main on-off component implements real ZVT mode while the assistant on-off component implements zero current turn-on and zero voltage turn-off. The average current control mode is adopted. The method of selecting main component parameters is provided, such as the voltage-rising inductor, the filtering capacitor, the assistant inductor, the assistant capacitor, the sampling resistor and the output load. Simulation results show that the power factor is 0.9976.

Key words: APFC; ZVT; Matlab simulation

+++++