

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.03.024

一种电容解耦三相功率因素校正器

陈 洁¹,王柏林²

(1.河海大学计算机及信息工程学院,江苏 南京 210098;2.河海大学电气工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 :提出了一种新型三相有源功率因素校正器,它由 3 个单相功率因素校正器模块组合而成,并用 6 个解耦电容去抑制 3 个单相功率因素校正器模块之间的相间耦合.从该三相功率因素校正器电路导出的一组解析公式表明:只要解耦电容的容量足够小相间耦合就足够小,只要每个单相功率因素校正器性能优越就能保证三相功率因素校正器性能优越. Matlab 仿真显示:该三相功率因素校正器具有单位功率因素和连续的正弦输入电流,这一结果验证了理论分析的正确性.

关键词 :功率因素校正 ;三相功率因素校正器 ;相间耦合 ;Cuk 变换器

中图分类号 :TM46 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)03-0356-04

有源功率因素校正器已经广泛用于 AC/DC 变换电路^[1-2],在有源功率因素校正器(power factor corrector , PFC)中,单相 PFC 技术最为成熟^[2],三相 PFC 技术则相对滞后^[2-3].由于相间耦合、控制复杂等原因,基于三相全桥的三相 PFC 技术尚未得到广泛应用^[4].能否将单相 PFC 的成熟技术用于三相 PFC,一直是业内关注的问题^[5-6].三相单开关 PFC 是单相 PFC 的推广^[7],但由于其相间耦合很强,性能一般不佳.文献[5]提出了用 3 个单相 Boost-PFC 模块组成 1 个三相 PFC 的方案,并提出了附加二极管和电感抑制相间耦合的措施^[6],显然,附加的二极管增大了功耗,同时,这种三相 PFC 近 700V 的输出电压也给应用增加了困难.另一个方案是用 2 个单相 Boost-PFC 组成 1 个三相 PFC^[6],虽然省了 1 个单相 PFC,但增加了 1 个笨重而低效的工频变压器.本文提出一种新的三相 PFC——电容解耦三相 PFC,它也是由 3 个单相 PFC 模块组合而成的,但其三相解耦是通过 6 只电容来实现的.

1 电路拓扑

图 1 为三相三线的电容解耦三相 PFC 原理图,显然,它很容易改成三相四线接法.不难发现,图中每个单相 PFC 是 Cuk 变换器的变形,实际上也可以用 Sepic 变换器的变形,变形的关键是将原来的 1 个电容分裂为 2 个电容——作为 2 个解耦电容.

图 1 中 $L_{1j} \sim L_{4j} (j = A, B, C)$ 是储能电感,电容 C_{1j} 和 $C_{2j} (j = A, B, C)$ 完成能量传送并实现相间解耦,PFC 控制电路控制 $Q_j (j = A, B, C)$ 的占空比,使电感电流波形跟踪电网电压波形并稳定输出直流电压 V_0 ,PFC 控制电路可以采用现成的单相 PFC

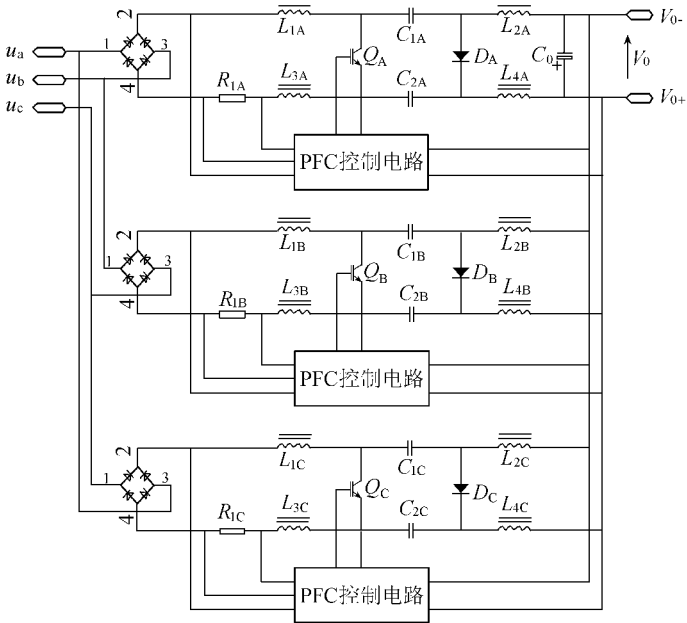


图 1 电容解耦三相三线 PFC 电路拓扑
Fig. 1 Circuit topology of three-phase three-line PFC decoupled by capacitors

控制芯片. 由于 3 个单相 PFC 用同样的电压反馈信号, 所以它们之间可以实现自动均流.

图 1 中 3 个单相 PFC 分别对应 3 个线电压 u_{ab} , u_{bc} 和 u_{ca} , 每个线电压不仅在对应的单相 PFC 中形成电流, 还会在不同的单相 PFC 之间形成电流, 即相间耦合电流或简称耦合电流. 三相 PFC 的相间耦合是一个非常复杂的问题, 耦合电流的流动路径和方向与 3 个线电压的瞬时大小和 3 个开关管的状态有关. 图 2 将 360° 电角度分成 6 个时段, 第一时段 $u_a > u_c > u_b$, 第二时段 $u_a > u_b > u_c$3 个开关管有 8 种状态: Q_A, Q_B, Q_C 均导通, Q_A, Q_B 导通 Q_C 关断.....6 个时段与 8 种状态可配成 48 种不同的耦合情况.

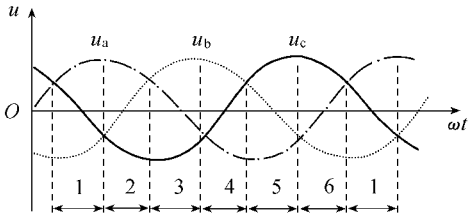


图 2 时段划分
Fig. 2 Division of time intervals

2 相间耦合分析

下面先讨论 $u_a > u_b > u_c$ 的耦合情况. 为了让解析公式不至于庞杂, 假设所有电感、电容、开关器件是理想的. 同时, 对于图 1 所示的三相 PFC 还规定:

$$L_{1A} = L_{3A} = L_{1B} = L_{3B} = L_{1C} = L_{3C} = L_1 \tag{1}$$

$$L_{2A} = L_{4A} = L_{2B} = L_{4B} = L_{2C} = L_{4C} = L_2 \tag{2}$$

$$C_{1A} = C_{2A} = C_{1B} = C_{2B} = C_{1C} = C_{2C} = C_1 \tag{3}$$

这意味着 3 个单相 PFC 的结构和参数是完全相同的, 每个单相 PFC 的上下 2 条支路是完全对称的, 这些特征对相间解耦和解耦分析是有益的.

先考虑 Q_A, Q_B, Q_C 均导通的情况(图 3), i_{1A} 是 u_{ab} 对电感 L_{1A} 和 L_{3A} 的充磁回路电流, i_{2A} 是电容 C_{1A} 和 C_{2A} 的放电回路电流, 其他两相类推. $i_{11}, i_{12}, \dots, i_{34}$ 为相间耦合电流, 箭头方向为假定正向. 列出该电路的一组电流平衡方程如下:

$$i_{11} + i_{14} = i_{12} + i_{13} \tag{4}$$

$$i_{21} + i_{24} = i_{22} + i_{23} \tag{5}$$

$$i_{31} + i_{34} = i_{32} + i_{33} \tag{6}$$

$$i_{12} + i_{22} + i_{32} = i_{14} + i_{24} + i_{34} \tag{7}$$

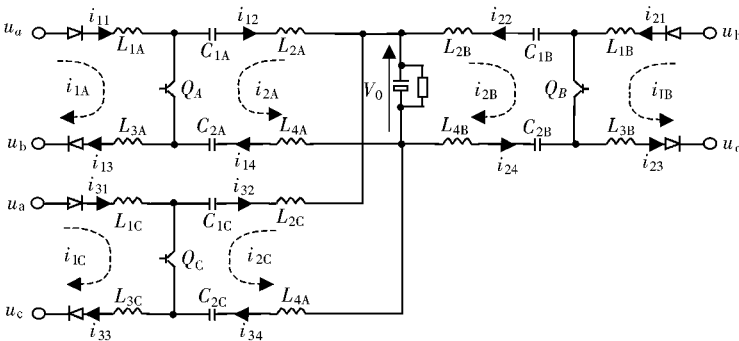


图 3 Q_A, Q_B, Q_C 均导通的耦合情况
Fig. 3 Coupling cases with conducted Q_A, Q_B, Q_C

在列写电压平衡方程前, 先研究一下电容上的电压, 以电容 C_{1B} 和 C_{2B} 为例. 电容 C_{1B} 和 C_{2B} 上的电压是从 $t = 0$ 开始经过很多个充放电周期积累起来的. 根据 Cuk 变换器的工作原理^[5-6], 当 Q_B 关断时 u_{bc} 经 Q_B 向 C_{1B} 和 C_{2B} 充电, 当 Q_B 导通时 C_{1B} 和 C_{2B} 经 Q_B 和 V_0 向 L_{2B} 和 L_{4B} 放电. C_{1B} 的充电电流为 $(i'_{1B} + i'_{21})$, 放电电流为 $(i_{2B} + i_{22})$, C_{2B} 的充电电流为 $(i'_{1B} + i'_{23})$, 放电电流为 $(i_{2B} + i_{24})$, 其中有上标'的变量是 Q_B 关断情况下的, 无上标'的变量是 Q_B 导通情况下的. 如果规定电容电压的正方向与其放电电流方向一致, 则 Q_B 导通时电容 C_{1B} 和 C_{2B} 的当前电压为

$$u_{C_{1B}} = \bar{u}_{C_{1B}} - \frac{1}{C_{1B}} \int i_{22} dt \tag{8}$$

$$u_{C_{2B}} = \bar{u}_{C_{2B}} - \frac{1}{C_{2B}} \int i_{24} dt \tag{9}$$

其中

$$\bar{u}_{C_{1B}} = \frac{1}{C_{1B}} \int (i_{2B} - i'_{1B} - i'_{21}) dt \quad \bar{u}_{C_{2B}} = \frac{1}{C_{2B}} \int (i_{2B} - i'_{1B} - i'_{23}) dt$$

由于图 1 电路的对称性,当三相电压平衡时,肯定有 $\int_T i'_{21} dt = \int_T i'_{23} dt$,其中 T 表示电网电压的一个周期,这样 $\bar{u}_{C_{1B}}$ 与 $\bar{u}_{C_{2B}}$ 的差别就是 i'_{21} 和 i'_{23} 在当前不足一个周期 T 内的积分之差,所以在 i'_{21} 和 i'_{23} 都很小时, $\bar{u}_{C_{1B}} \approx \bar{u}_{C_{2B}}$.当 Q_B 关断时,电容 C_{1B} 和 C_{2B} 的当前电压为

$$u_{C_{1B}} = \bar{u}'_{C_{1B}} - \frac{1}{C_{1B}} \int i'_{21} dt \tag{10}$$

$$u_{C_{2B}} = \bar{u}'_{C_{2B}} - \frac{1}{C_{2B}} \int i'_{23} dt \tag{11}$$

其中

$$\bar{u}'_{C_{1B}} = \frac{1}{C_{1B}} \int (i_{2B} - i'_{1B} - i_{22}) dt \quad \bar{u}'_{C_{2B}} = \frac{1}{C_{2B}} \int (i_{2B} - i'_{1B} - i_{24}) dt$$

同样,当三相电压平衡且 i_{22} 和 i_{24} 都很小时, $\bar{u}'_{C_{1B}} \approx \bar{u}'_{C_{2B}}$.其他两相也有类似的结论.

考虑到图 3 电路是三相对称的,为叙述方便,称下列方程为“ A 相电压平衡方程”:

$$L_{1A} \frac{d(i_{11} + i_{1A})}{dt} + L_{3A} \frac{d(i_{13} + i_{1A})}{dt} = u_{ab} \tag{12}$$

$$L_{2A} \frac{d(i_{2A} - i_{12})}{dt} + \bar{u}_{C_{1A}} - \frac{1}{C_{1A}} \int i_{12} dt + \bar{u}_{C_{2A}} - \frac{1}{C_{2A}} \int i_{14} dt + L_{4A} \frac{d(i_{2A} - i_{14})}{dt} = -V_0 \tag{13}$$

$$L_{1A} \frac{d(i_{11} + i_{1A})}{dt} - \bar{u}_{C_{1A}} + \frac{1}{C_{1A}} \int i_{12} dt + L_{2A} \frac{d(i_{12} - i_{2A})}{dt} + L_{2B} \frac{d(i_{2B} - i_{22})}{dt} + \bar{u}_{C_{1B}} - \frac{1}{C_{1B}} \int i_{22} dt + L_{3B} \frac{d(i_{23} + i_{1B})}{dt} = u_{ac} \tag{14}$$

B 相电压平衡方程和 C 相电压平衡方程照此类推,限于篇幅,此处从略.

因为 $\bar{u}_{C_{1A}} \approx \bar{u}_{C_{2A}}$, $\bar{u}_{C_{1B}} \approx \bar{u}_{C_{2B}}$, $\bar{u}_{C_{1C}} \approx \bar{u}_{C_{2C}}$,从式(1)~(14)可以得

$$u_{ac} \approx L_1 \frac{d\tilde{i}_{ac}}{dt} + \frac{1}{C_1} \int \tilde{i}_{ac} dt + L_2 \frac{d\tilde{i}_{ac}}{dt} \tag{15}$$

其中

$$\tilde{i}_{ac} = i_{23} - i_{21} - i_{13} + i_{11}$$

同理,从 B 相电压平衡方程和 C 相电压平衡方程也可得到相应的关系.实际上在其他 47 种耦合情况下,耦合电流也满足方程(15),限于篇幅,推导过程略.

上述结果表明:只要电网电压是正弦的,耦合电流基本上也是正弦的,只要 $\frac{1}{\omega C_1}$ 或 $\omega(L_1 + L_2)$ 足够大(ω

是电网电压角频率),相间耦合电流就足够小.因为 $\frac{1}{\omega C_1}$ 足够大更容易实现,所以这种三相 PFC 就命名为电容解耦三相 PFC.

3 仿真研究

对电容解耦三相 PFC 进行 Matlab 仿真. $u_{ab} = u_{bc} = u_{ca} = 380\text{ V}$, $V_0 = 385\text{ V}$,负载电流 10 A ,开关频率 100 kHz ,取 $R_1 = 0.1\Omega$, $L_1 = 0.5\text{ mH}$, $L_2 = 0.25\text{ mH}$, $C_1 = 1\mu\text{F}$, $C_0 = 1000\mu\text{F}$,PFC 控制电路按 UC3854 芯片原理仿真.图 4(a)是仿真波形,自上而下依次为: A 相电压, A、B、C 相电流,输出电压.横轴为时间.用 FFT 方法计算出相电流的畸变率为 0.45% ,功率因数为 0.999 .

为了对比,对图 1 中的单相 PFC 也进行 Matlab 仿真,结果如图 4(b),自上而下依次为:相电压,相电流,输出电压.相电流的畸变率为 0.44% ,功率因数为 0.999 .可见,电容解耦是十分有效的.

4 结 论

电容解耦三相 PFC 由 3 个单相 PFC 组合而成,每个单相 PFC 有 2 个解耦电容,理论分析表明,解耦电容

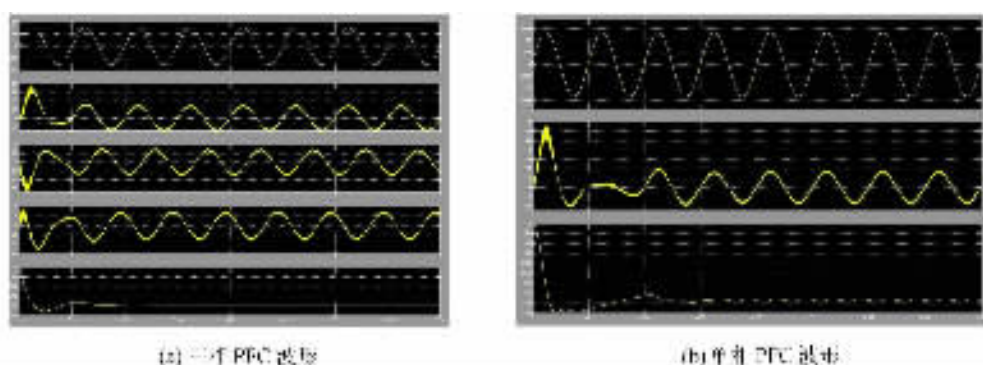


图4 Matlab 仿真结果

Fig. 4 Simulated results of Matlab

容量越小相间耦合电流也越小,只要设计好单相PFC就能保证三相PFC性能优越. Matlab 仿真显示,这种三相PFC三相电流连续、波形非常接近正弦,3个单相PFC之间几乎完全解耦,功率因素达0.99以上.

参考文献:

- [1] 陈坚. 电力电子学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [2] 周志敏, 周纪海, 纪爱华. 开关电源功率因素校正电路设计与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [3] KALKAR S, HENZE C P. High performance three phase unity power factor rectifier use interleaved buck derived topology for high power battery charging applications[C]//Proc of IEEE PESC. New York: IEEE, 2001: 1013-1018.
- [4] MAO H, LEE F C, BOROEYEVICH D, et al. Review of high performance three-phase power factor correction circuit[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1997, 44(4): 437-446.
- [5] JANG Y, JOVANOVIĆ M M. A comparative study of single-switch three-phase high-power-factor rectifiers[J]. IEEE Trans Ind Appl, 1998, 34(1): 1327-1334.
- [6] SPIAZZI G, LEE F C. Implementation of single-phase boost power-factor-correction circuits in three-phase applications[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1997, 44(3): 365-369.
- [7] HAHN J, ENJETI P N, PITEL I J. A new three-phase power-factor correction(PFC) scheme using two single-phase PFC modules[J]. IEEE Ind Appl, 2001, 38(1): 813-819.
- [8] BRKOVIC M, CUK S. Input current shaper using Cuk converter[C]//Proc IEEE INTELEC '92. Portugal [s. n.], 1992: 532-539.
- [9] LIN B T, LEE Y S. Power-factor correction using Cuk converter in discontinuous-capacitor-voltage mode operation[J]. IEEE Trans Ind Electron, 1997, 44(5): 648-653.

A three-phase power factor corrector decoupled by capacitors

CHEN Jie¹, WANG Bo-lin²

(1. College of Computer and Information Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A novel three-phase active power factor corrector (APFC) was proposed. The three-phase power factor corrector (PFC) consisted of three single-phase PFC modules and employed six decoupling capacitors to limit the phase coupling among the three single-phase PFC modules. The analytical expressions deduced from the three-phase PFC circuit indicate that the phase coupling is small if the magnitude of the decoupling capacitor is small. The performance of the three-phase PFC is excellent if the performance of every single-phase PFC module is excellent. Results simulated with Matlab show that the three-phase PFC has a unity power factor and continuous sinusoidal input currents. Therefore, the validity of the theoretical analysis is proven.

Key words: power factor correction; three-phase PFC; phase coupling; Cuk convertor