

级联功率因数校正变换器的级间耦合 非线性动力学行为分析*

邹建龙[†] 马西奎

(西安交通大学电气工程学院, 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

(2009 年 9 月 29 日收到; 2009 年 11 月 10 日收到修改稿)

级联功率因数校正(PFC)变换器是一个由 PFC 变换器和直流-直流(DC-DC)变换器级联而成的非线性系统. 建立了级联 PFC 变换器的非线性模型, 据此对系统的级间耦合非线性动力学行为进行了数值仿真, 并进行了实验验证和分析. 结果表明: PFC 级输出电容减小会使系统出现分岔, 引起 DC-DC 级输出电压的变化; DC-DC 级负载电阻变化会改变 PFC 级的非线性动力学行为; 当 DC-DC 级出现占空比饱和时, PFC 级与 DC-DC 级之间会出现复杂的相互耦合影响过程.

关键词: 级联, 功率因数校正, 耦合, 非线性

PACC: 0545

1. 引 言

目前, 人们已经对单个非线性系统的动力学行为进行了深入的研究, 对多个非线性系统级联后的耦合动力学行为研究则相对很少. 而在实际应用中, 有时必须将多个非线性系统进行级联才能达到期望的目标. 例如, 在电力电子领域中, 人们对电能质量的要求越来越高, 对于某些用途, 采用单个的开关功率变换器已不足以达到对电能质量的要求. 这时就需要将多个开关功率变换器级联起来, 通过多次功率变换才能实现期望的目标.

本文所研究的对象是一个级联功率因数校正(PFC)变换器, 其结构如图 1 所示. 由图 1 可见, 整个系统由一个 PFC 变换器和一个直流-直流(DC-DC)变换器级联而成. 由于前级 PFC 变换器的输出电压一般较高, 并且含有纹波, 所以在其后级联了一个 DC-DC 变换器, 用来将 PFC 变换器较高的输出电压变换为期望的低电压, 并且消除纹波. PFC 变换器和 DC-DC 变换器各自都由于开关的切换而成为分段光滑的非线性系统, 因此图 1 的级联 PFC 变换器是一个级联非线性系统.

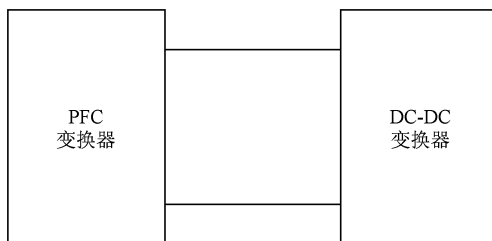


图 1 级联 PFC 变换器结构

对级联非线性系统的研究目前的主要着眼点是分析整个系统的稳定性^[1-5]. 本文侧重于研究级联非线性系统的级间耦合动力学行为, 这是级联非线性系统有别于单一非线性系统的最主要特征. 研究将参考已有的关于 PFC 变换器非线性动力学行为^[6-15]和 DC-DC 变换器非线性动力学行为^[16-26]的丰富研究成果, 重点分析 PFC 级对 DC-DC 级的影响、DC-DC 级对 PFC 级的影响以及两级之间相互耦合作用的过程.

本文将首先建立级联 PFC 变换器的非线性模型, 然后根据非线性模型进行数值仿真, 揭示两级之间的耦合非线性动力学行为, 最后给出实验结果及分析.

* 国家自然科学基金(批准号:50577047)资助的课题.

[†] E-mail: superzou@mail.xjtu.edu.cn

2. 级联 PFC 变换器的非线性建模

图 2 是级联 PFC 变换器的电路原理图,其中 PFC 级为升压变换器,DC-DC 级为反激变换器.两级分别有各自的控制电路,其中 PFC 级采用平均电

流控制,DC-DC 级采用峰值电流控制.

由于 PFC 级后面级联的是 DC-DC 级,因此级联 PFC 变换器非线性模型的推导就要考虑 DC-DC 级的工作状态.下面分别讨论 DC-DC 级工作于不连续导通模式 (DCM) 和连续导通模式 (CCM) 时级联 PFC 变换器的非线性模型.

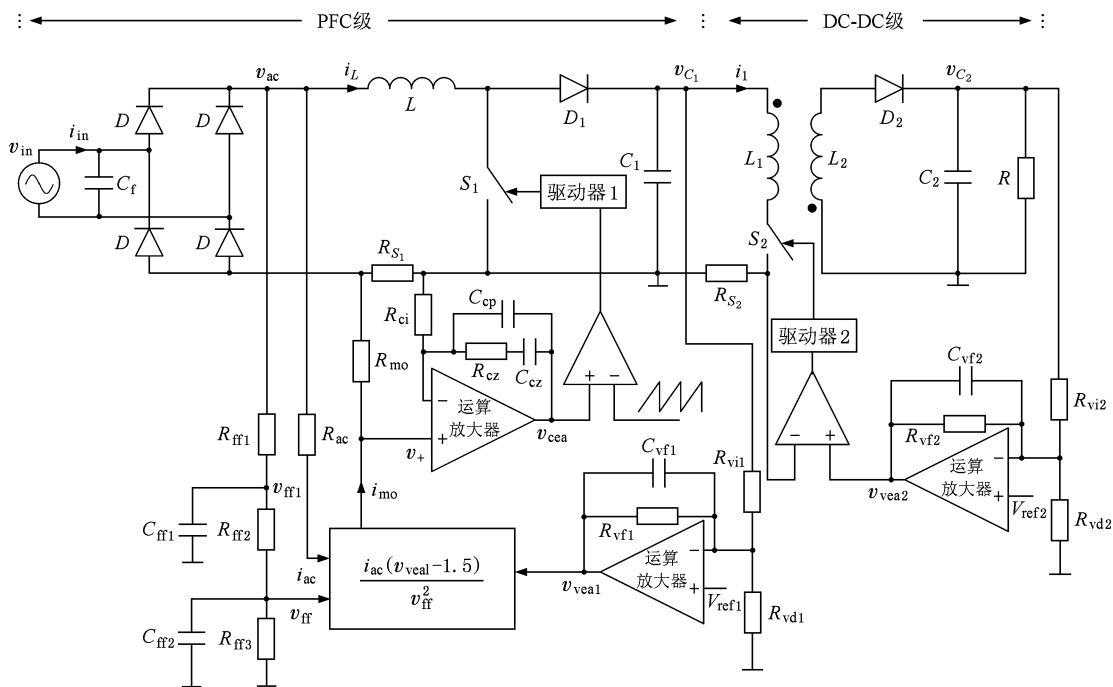


图 2 级联 PFC 变换器电路原理图

2.1. DC-DC 级工作于 DCM 时的非线性模型

DC-DC 级变换器工作于 DCM 的临界条件为^[27]

$$\frac{L_2}{RT_s} \leq \frac{(1-D)^2}{2}, \quad (1)$$

式中 D 为占空比, T_s 为开关周期, L_2 为变压器二次侧的电感值.

根据输入输出瞬时功率的平衡,可以得到图 2 中 DC-DC 级的功率平衡方程为

$$v_{c1} i_1 = \frac{v_{c2}^2}{R} + v_{c2} C_2 \frac{dv_{c2}}{dt}. \quad (2)$$

DC-DC 级工作于 DCM 时的输出电压与输入电压之比为^[27]

$$\frac{v_{c2}}{v_{c1}} = \frac{N_2}{N_1} \sqrt{\frac{D^2 T_s R}{2L_2}}, \quad (3)$$

式中 N_1 和 N_2 分别为变压器一次侧和二次侧线圈的匝数. DC-DC 级工作于 DCM 时输入电流 i_1 在一个开关周期内的平均值为

$$i_1 = \frac{v_{c1} D^2 T_s}{2L_1}. \quad (4)$$

将(3),(4)式代入(2)式,并根据 $\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$, 可得

$$\frac{dv_{c2}}{dt} = 0. \quad (5)$$

(5)式表明,DC-DC 级工作于 DCM 时不管输入电压如何变化,其输出电压都保持不变,这也意味着 DC-DC 级是 PFC 级的恒功率负载.由图 2 可见,当 DC-DC 级输出电压 v_{c2} 不变时,稳态时 DC-DC 级电压环误差放大器输出电压 v_{vea2} 也保持不变.

根据输入输出瞬时功率的平衡,可以得到图 2 中级联 PFC 变换器的功率平衡方程为

$$v_{in} i_{in} = v_{c1} C_1 \frac{dv_{c1}}{dt} + v_{c2} C_2 \frac{dv_{c2}}{dt} + \frac{v_{c2}^2}{R}. \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式,可得

$$\frac{dv_{c_1}}{dt} = \frac{v_{in} i_{in}}{v_{c_1} C_1} - \frac{v_{c_2}^2}{v_{c_1} C_1 R}. \quad (7)$$

由于级联 PFC 变换器的 PFC 级与单级 PFC 变换器的控制电路完全一样,因此其非线性模型的推导过程^[13]也一样.综合 DC-DC 级和 PFC 级非线性建模的结果,可得到 DC-DC 级工作于 DCM 时的级联 PFC 变换器非线性模型.

当 PFC 级电压环误差放大器输出电压 $v_{vea1} \geq 1.5$ V 时,级联 PFC 变换器各状态变量满足的微分方程为

$$\begin{aligned} \frac{dv_{c_1}}{dt} &= \frac{R_{m0} V_m^2}{R_{s1} R_{ac} v_{ff}^2 C_1 v_{c_1}} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \\ &\quad \times (v_{vea1} - 1.5) - \frac{v_{c_2}^2}{v_{c_1} C_1 R}, \\ \frac{dv_{vea1}}{dt} &= -\frac{v_{c_1}}{R_{v11} C_{v1}} - \frac{v_{vea1}}{R_{v1} C_{v1}} \\ &\quad + \left(\frac{1}{R_{v11} C_{v1}} + \frac{1}{R_{vd1} C_{v1}} + \frac{1}{R_{v1} C_{v1}} \right) V_{ref1}, \\ \frac{dv_{ff1}}{dt} &= \frac{v_{ff} - v_{ff1}}{R_{ff2} C_{ff1}} + \frac{V_m |\sin \omega t| - v_{ff1}}{R_{ff1} C_{ff1}}, \\ \frac{dv_{ff}}{dt} &= \frac{v_{ff1} - v_{ff}}{R_{ff2} C_{ff2}} - \frac{v_{ff}}{R_{ff3} C_{ff2}}, \\ \frac{dv_{c_2}}{dt} &= 0, \\ \frac{dv_{vea2}}{dt} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

当 $v_{vea1} < 1.5$ V 时,各状态变量满足的微分方程为

$$\frac{dv_{c_1}}{dt} = -\frac{v_{c_2}^2}{v_{c_1} C_1 R}, \quad (9)$$

关于 v_{vea1} , v_{ff1} , v_{ff} , v_{c_2} 和 v_{vea2} 的微分方程与(8)式相同.

2.2. DC-DC 级工作于 CCM 时的非线性模型

DC-DC 级工作于 CCM 时输入电流 i_1 在一个开关周期内的平均值为

$$i_1 = D \left(\frac{v_{vea2}}{2R_{s2}} - \frac{v_{c_1}}{2L_1} DT_s \right). \quad (10)$$

占空比 D 可表示为

$$D = \frac{\frac{N_1}{N_2} v_{c_2}}{\frac{N_1}{N_2} v_{c_2} + v_{c_1}}. \quad (11)$$

将(10)式代入(2)式,可得

$$\frac{dv_{c_2}}{dt} = \frac{v_{c_1}}{C_2 v_{c_2}} D \left(\frac{v_{vea2}}{2R_{s2}} - \frac{v_{c_1}}{2L_1} DT_s \right) - \frac{v_{c_2}}{RC_2}. \quad (12)$$

(12)式表明,若 DC-DC 级工作于 CCM,当输入电压变化时,其输出电压也将发生变化,这也意味着 DC-DC 级不再是 PFC 级的恒功率负载.

将(12)式代入(6)式,可得

$$\frac{dv_{c_1}}{dt} = \frac{v_{in} i_{in}}{v_{c_1} C_1} - \frac{D}{C_1} \left(\frac{v_{vea2}}{2R_{s2}} - \frac{v_{c_1}}{2L_1} DT_s \right). \quad (13)$$

根据上述推导,可得 DC-DC 级工作于 CCM 时的级联 PFC 变换器非线性模型.

当 $v_{vea1} \geq 1.5$ V 时,各状态变量满足的微分方程为

$$\begin{aligned} \frac{dv_{c_1}}{dt} &= \frac{R_{m0} V_m^2}{R_{s1} R_{ac} v_{ff}^2 C_1 v_{c_1}} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} (v_{vea1} - 1.5) \\ &\quad - \frac{D}{C_1} \left(\frac{v_{vea2}}{2R_{s2}} - \frac{v_{c_1}}{2L_1} DT_s \right), \\ \frac{dv_{c_2}}{dt} &= \frac{v_{c_1} D}{C_2 v_{c_2}} \left(\frac{v_{vea2}}{2R_{s2}} - \frac{v_{c_1}}{2L_1} DT_s \right) - \frac{v_{c_2}}{RC_2}, \\ \frac{dv_{vea2}}{dt} &= -\frac{v_{c_2}}{R_{v12} C_{v12}} - \frac{v_{vea2}}{R_{v12} C_{v12}} \\ &\quad + \left(\frac{1}{R_{v12} C_{v12}} + \frac{1}{R_{vd12} C_{v12}} + \frac{1}{R_{v12} C_{v12}} \right) V_{ref2}, \end{aligned} \quad (14)$$

关于 v_{vea1} , v_{ff1} 和 v_{ff} 的微分方程与(8)式相同.

当 $v_{vea1} < 1.5$ V 时,各状态变量满足的微分方程为

$$\frac{dv_{c_1}}{dt} = -\frac{D}{C_1} \left(\frac{v_{vea2}}{2R_{s2}} - \frac{v_{c_1}}{2L_1} DT_s \right), \quad (15)$$

关于 v_{vea1} , v_{ff1} 和 v_{ff} 的微分方程与(8)式相同,关于 v_{c_2} 和 v_{vea2} 的微分方程与(14)式相同.

3. 级联 PFC 变换器中的耦合非线性动力学行为

根据推导的非线性模型可以对级联 PFC 变换器的动力学行为进行数值仿真.本文着重研究级间耦合非线性动力学行为,因此下面分别从 PFC 级对 DC-DC 级的影响以及 DC-DC 级对 PFC 级的影响两个方面研究级联 PFC 变换器中的级间耦合非线性动力学行为.数值仿真中所选用参数值如下: $R_{s1} = 0.51 \Omega$, $R_{v11} = 510 \text{ k}\Omega$, $R_{vd1} = 8.8 \text{ k}\Omega$, $V_{ref1} = 3 \text{ V}$, $R_{v1} = 180 \text{ k}\Omega$, $C_{v1} = 47 \text{ nF}$, $R_{ac} = 400 \text{ k}\Omega$, $R_{m0} = 3.9 \text{ k}\Omega$,

$R_{fi1} = 910 \text{ k}\Omega$, $R_{fi2} = 91 \text{ k}\Omega$, $R_{fi3} = 22 \text{ k}\Omega$, $C_{fi1} = 0.1 \text{ }\mu\text{F}$, $C_{fi2} = 0.47 \text{ }\mu\text{F}$, 变压器一次侧电感 $L_1 = 850 \text{ }\mu\text{H}$, 匝数比 $N_1/N_2 = 4$, $R_{s2} = 0.1 \text{ }\Omega$, $R_{vi2} = 85 \text{ k}\Omega$, $R_{vd2} = 10.5 \text{ k}\Omega$, $V_{ref2} = 2.5 \text{ V}$, $R_{vi2} = 150 \text{ k}\Omega$, $C_{vi2} = 100 \text{ pF}$, $C_2 = 4700 \text{ }\mu\text{F}$, 输入电压 v_{in} 是有效值为 100 V 的正弦电压, 其频率为 50 Hz , 开关频率为 100 kHz . PFC 级输出电容 C_1 和 DC-DC 级负载电阻 R 为可变参数.

3.1. PFC 级对 DC-DC 级的影响

PFC 级参数尤其是输出电容 C_1 会直接影响级联 PFC 变换器的动力学行为. 将 DC-DC 级负载电阻 R 固定为 $10 \text{ }\Omega$, 图 3 给出了以 C_1 为分岔参数的 v_{veals} 分岔图. v_{veals} 是 PFC 电压环误差放大器输出电压 v_{veal} 的采样值, 采样周期为 10 ms . 由图 3 可见, 系统由周期 1 过渡到周期 2 以及由周期 2 过渡到周期 1 都是突变, 有别于传统分岔的光滑过渡, 这是由于饱和非线性导致的边界碰撞所致^[13].

图 4(a) 和 (b) 分别给出了 $C_1 = 470 \text{ }\mu\text{F}$ 和 $C_1 =$

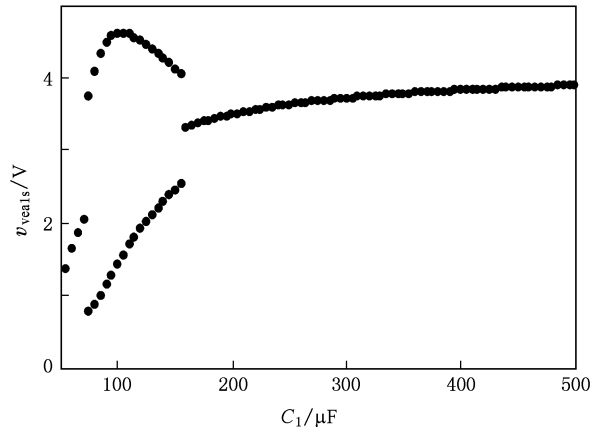
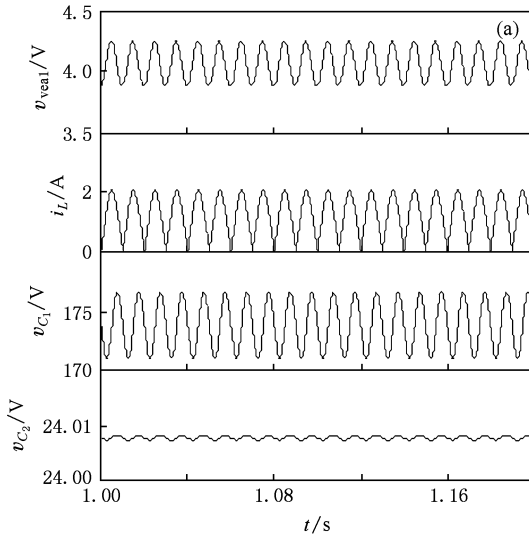


图 3 以 C_1 为分岔参数的 v_{veals} 分岔图

$100 \text{ }\mu\text{F}$ 时 v_{veal} , i_L , v_{C1} 和 v_{C2} 的波形. 由图 4 可见, 随着 C_1 的减小, 级联 PFC 变换器由周期 1 变为周期 2, 发生了分岔, 导致 DC-DC 级输出电压 v_{C2} 的纹波也随之增大.

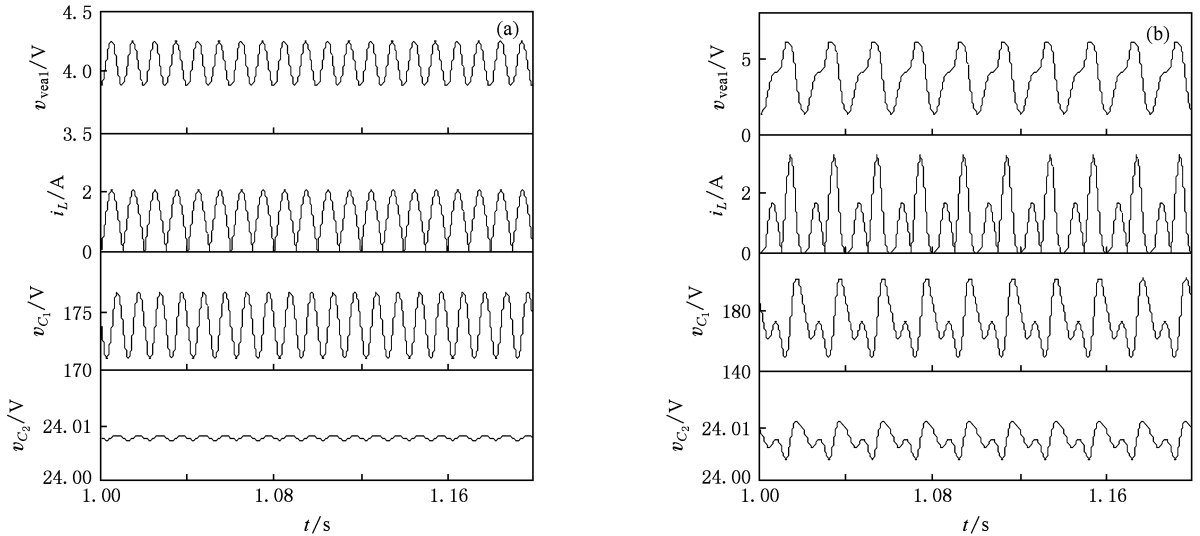


图 4 $R = 10 \text{ }\Omega$ 时 v_{veal} , i_L , v_{C1} 和 v_{C2} 的波形 (a) $C_1 = 470 \text{ }\mu\text{F}$, (b) $C_1 = 100 \text{ }\mu\text{F}$

3.2. DC-DC 级对 PFC 级的影响

DC-DC 级负载电阻 R 会直接影响 PFC 级的非线性动力学行为. PFC 级输出电容 C_1 固定为 $100 \text{ }\mu\text{F}$, 图 5 给出了以 R 为分岔参数的 v_{veals} 分岔图.

图 6 给出了负载电阻 $R = 40 \text{ }\Omega$, $C_1 = 100 \text{ }\mu\text{F}$ 时 v_{veal} , i_L , v_{C1} 和 v_{C2} 的波形. 对比图 6 和图 4(b) 可见, 随着 DC-DC 级负载电阻 R 的增大, PFC 级由周期 2 变为混沌. 当负载 $R = 40 \text{ }\Omega$ 时, 根据 (1) 式可判断

DC-DC 级工作于 DCM, 所以虽然 PFC 级输出电压 v_{C1} 有较大的纹波, 但 DC-DC 级输出电压 v_{C2} 却没有纹波, 如图 6 所示. 当负载 $R = 10 \text{ }\Omega$ 时, 根据 (1) 式可判断 DC-DC 级工作于 CCM, 所以 PFC 级输出电压 v_{C1} 的纹波会导致 DC-DC 级输出电压 v_{C2} 也出现纹波, 如图 4(b) 所示. 由此可见, 一方面 DC-DC 级负载电阻 R 的变化会影响 PFC 级的非线性动力学行为, 另一方面 PFC 级的非线性动力学行为对 DC-DC 级的影响取决于 DC-DC 级的工作模式. 若工

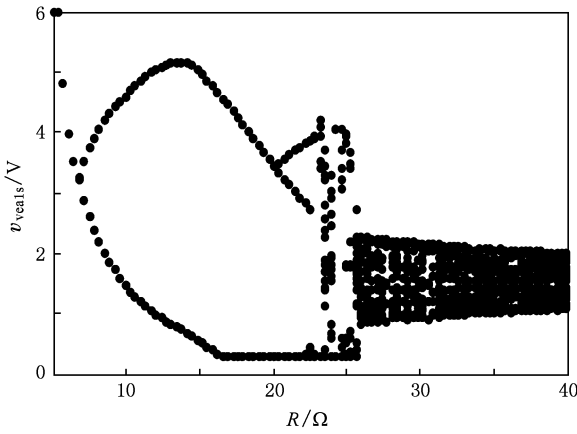


图5 以 R 为分岔参数的 v_{veal_1} 分岔图

作于 DCM, DC-DC 级输出电压不受 PFC 级影响, 没有纹波; 若工作于 CCM, DC-DC 级输出电压受 PFC 级影响, 会出现纹波。

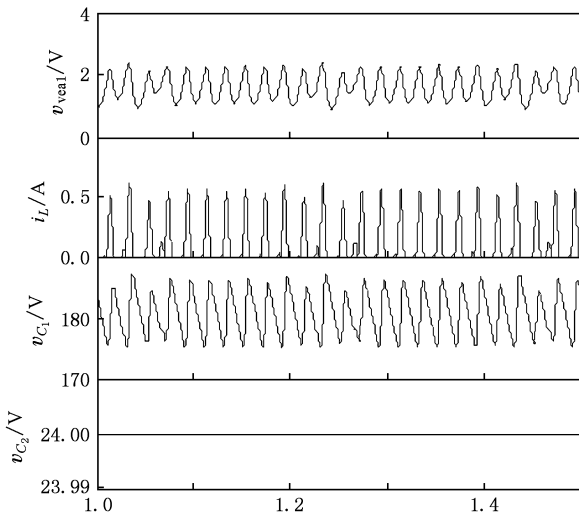


图6 $R = 40 \Omega$, $C_1 = 100 \mu\text{F}$ 时 v_{veal_1} , i_L , v_{c_1} 和 v_{c_2} 的波形

4. 实验结果及分析

级联 PFC 变换器实验电路如图 7 所示, 实验电路参数与数值仿真所用参数相同. 图 7 中控制芯片 UC3854A 的作用是实现 PFC 级的控制和驱动功能, 控制芯片 UC3845B 的作用是实现 DC-DC 级的控制和驱动功能. 输入电压 v_{in} 是有效值为 100 V 的 50 Hz 交流电压, 开关频率为 100 kHz. PFC 级输出电容 C_1 和 DC-DC 级负载电阻 R 为可变参数.

4.1. PFC 级对 DC-DC 级的影响

当负载电阻 $R = 10 \Omega$ 时, 图 8 给出了 PFC 级电压环输出电压 v_{veal_1} 、采样电感电流 $R_{s_1} i_L$ 、输出电压 v_{c_1} 和 DC-DC 级输出电压 v_{c_2} 的实验波形. 由图 8(a) 可见, C_1 较大时级联 PFC 变换器工作于周期 1, 采样电感电流为正弦全波, v_{c_1} 纹波分量很小, 峰-峰值仅为 3.2 V, 此时 DC-DC 级输出电压 v_{c_2} 的纹波也很小, 在示波器上都无法显示其数值. 由图 8(b) 可见, C_1 较小时级联 PFC 变换器工作于周期 2, 发生了分岔, 此时采样电感电流不再是正弦全波, v_{c_1} 纹波分量很大, 峰-峰值达到了 47.7 V, 由于 DC-DC 级工作于 CCM, DC-DC 级输出电压受 PFC 级输出电压大幅度波动的影响, 出现了 5.4 mV 的纹波分量.

4.2. DC-DC 级对 PFC 级的影响

保持 PFC 级输出电容 $C_1 = 100 \mu\text{F}$ 不变, 当增大 DC-DC 级负载电阻 R 时, 图 9 给出了 $R = 40 \Omega$ 时级联 PFC 变换器的实验波形. 由图 9 可见, 级联 PFC 变换器工作于混沌状态. 与图 8(b) 比较可知, DC-DC 级负载电阻的增大导致 PFC 级由周期 2 变为混沌. 此时, 虽然 PFC 级输出电压含有 16.1 V 的纹波分量, 但由于 DC-DC 级工作于 DCM, 因此理论上 DC-DC 级输出电压为一恒值, 不包含纹波分量. 由图 9 还可见到, DC-DC 级输出电压出现了非常微小的纹波, 这是由于实际电路所用器件不是理想器件所致.

4.3. DC-DC 级和 PFC 级的相互耦合影响

为了安全起见, 图 7 实验电路中的 DC-DC 级控制芯片 UC3845B 的最大占空比限定为 50%. 而级联 PFC 变换器在发生分岔时, PFC 级输出电压波动幅度有时会非常大, 有可能导致 DC-DC 级出现占空比饱和, 此时会出现 DC-DC 级和 PFC 级的相互耦合影响. 图 10 给出了 $R = 10 \Omega$, $C_1 = 10 \mu\text{F}$ 时级联 PFC 变换器的实验波形.

由图 10 可见, 变换器工作于周期 2, 发生了分岔. PFC 级输出电压 v_{c_1} 纹波分量的峰-峰值很大, 达到了 186 V, 这会导致 DC-DC 级的占空比在部分时间内达到其上限 50%, 从而导致 DC-DC 级输出电压 v_{c_2} 也出现了较大的纹波, 其峰-峰值达到了 1.39 V. DC-DC 级和 PFC 级相互耦合影响的过程可以分析如下: PFC 级输出电容减小 \rightarrow PFC 级发生分岔 \rightarrow

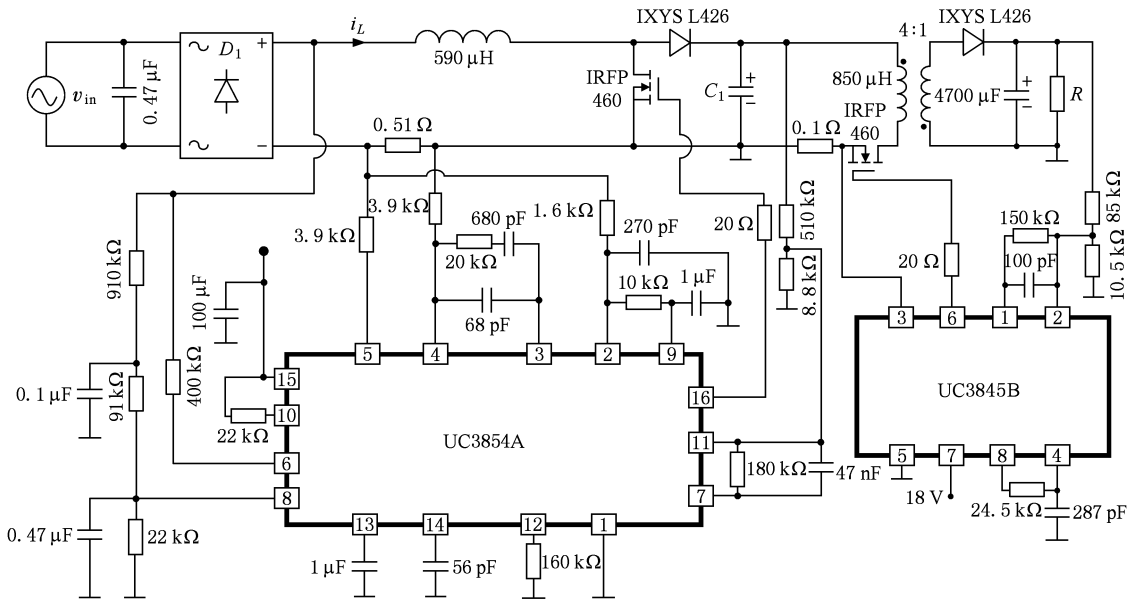


图 7 级联 PFC 变换器实验电路

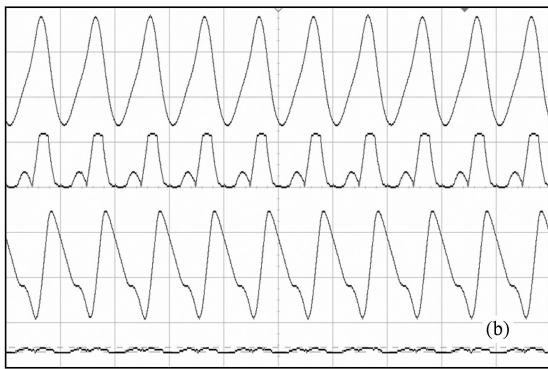
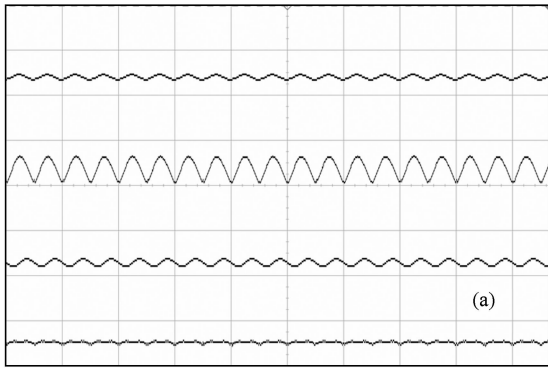


图 8 $R = 10 \Omega$ 时 PFC 级 C_1 取不同值时的实验波形 从上到下依次为 v_{veal} , $R_{S1} i_L$, v_{C1} 和 v_{C2} 的波形. (a) $C_1 = 470 \mu F$, (b) $C_1 = 100 \mu F$



图 9 $R = 40 \Omega$, $C_1 = 100 \mu F$ 时的实验波形 从上到下依次为 v_{veal} , $R_{S1} i_L$, v_{C1} 和 v_{C2} 的波形

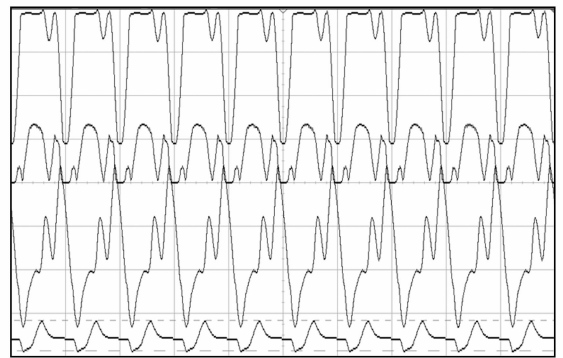


图 10 $R = 10 \Omega$, $C_1 = 10 \mu F$ 时的实验波形 从上到下依次为 v_{veal} , $R_{S1} i_L$, v_{C1} 和 v_{C2} 的波形

PFC 级输出电压纹波增大 → DC-DC 级占空比饱和 → PFC 级输入功率迅速减小 → DC-DC 级输出电压

迅速减小→DC-DC 级输出功率迅速减小→PFC 级输入的电感电流迅速减小→PFC 级输出电压波动幅度增大→DC-DC 级输出电压波动幅度增大. 上述过程循环进行, 最终导致 PFC 级输出电压和 DC-DC 级输出电压都出现了较大的纹波. 这一过程表明, 对于 PFC 级和 DC-DC 级两者级联的系统, 其相互耦合影响的过程可能十分复杂.

5. 结 论

本文建立了一个级联 PFC 变换器的非线性模型, 仿真揭示了系统中的级间耦合非线性动力学行为, 仿真结果得到了实验的验证. 研究结果表明: PFC 级变化会对 DC-DC 级产生影响——减小 PFC

级输出电容会导致系统出现分岔, 使 PFC 输出电压出现较大纹波, 若 DC-DC 级工作于 CCM, 其输出电压也会出现纹波, 若 DC-DC 级工作于 DCM, 其输出电压则会保持恒值. DC-DC 级变化会对 PFC 级产生影响——改变 DC-DC 级的负载电阻会使 PFC 级的非线性动力学行为发生定性的变化; 当 DC-DC 级出现占空比饱和时, PFC 级和 DC-DC 级之间的耦合作用过程十分复杂, PFC 级输出电容过小会导致 DC-DC 级占空比饱和, 使 DC-DC 级输出电压出现较大纹波, DC-DC 级占空比饱和且输出电压纹波较大反过来又会使 PFC 级输出电压纹波进一步增大. 本文的研究对象级联 PFC 变换器是由两个非线性系统级联而成的系统, 研究结果有助于人们更好地理解级联非线性系统中的级间耦合动力学行为.

- [1] Imula J I, Sugie T, Yoshikawa T 1994 *IEEE Trans. Autom. Control* **39** 1084
- [2] Panteley E, Loria A 2001 *Automatica* **37** 453
- [3] Sepulchre R, Arcak M, Teel A R 2002 *IEEE Trans. Autom. Control* **47** 521
- [4] Li S H, Tian Y P 2007 *Int. J. Control* **80** 646
- [5] Ding S H, Li S H, Li Q 2008 *Acta Autom. Sin.* **34** 1268 (in Chinese) [丁世宏、李世华、李 奇 2008 自动化学报 **34** 1268]
- [6] Orabi M, Ninomiya T 2003 *IEEE Trans. Ind. Electron.* **50** 1116
- [7] Dranga O, Tse C K, Iu H H C 2003 *Int. J. Bifur. Chaos* **13** 3107
- [8] Zhang H, Ma X K, Xue B L, Liu W Z 2005 *Chaos Solitons Fract.* **23** 431
- [9] Ma X K, Liu W Z, Zhang H 2005 *Proc. Chin. Soc. Electr. Eng.* **25** 61 (in Chinese) [马西奎、刘伟增、张 浩 2005 中国电机工程学报 **25** 61]
- [10] Wong S, Tse C K, Orabi M, Ninomiya T 2006 *IEEE Trans. Circ. Syst. I* **53** 454
- [11] Zou J L, Ma X K, Tse C K, Dai D 2006 *Int. J. Circ. Theory Appl.* **34** 251
- [12] Ren H P 2006 *Acta Electron. Sin.* **34** 784 (in Chinese) [任海鹏 2006 电子学报 **34** 784]
- [13] Zou J L, Ma X K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 720 (in Chinese) [邹建龙、马西奎 2008 物理学报 **57** 720]
- [14] Dai D, Li S N, Ma X K, Tse C K 2007 *IEEE Trans. Circ. Syst. I* **54** 1724
- [15] Zou J L, Ma X K, Du C Q 2009 *IEEE Trans. Circ. Syst. II* **56** 230
- [16] Hamill D C, Jefferies D J 1988 *IEEE Trans. Circ. Syst. I* **35** 1059
- [17] Tse C K 1994 *IEEE Trans. Circ. Syst. II* **42** 16
- [18] Banerjee S, Chakrabarty K 1998 *IEEE Trans. Power Electron.* **13** 252
- [19] Zhang B, Qu Y 2003 *Proc. Chin. Soc. Electr. Eng.* **23** 99 (in Chinese) [张 波、曲 颖 2003 中国电机工程学报 **23** 99]
- [20] Luo X S, Wang B H, Chen G R, Quan H J, Fang J Q, Zou Y L, Jiang P Q 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 12 (in Chinese) [罗晓曙、汪秉宏、陈关荣、全宏俊、方锦清、邹艳丽、蒋品群 2003 物理学报 **52** 12]
- [21] Zhou Y F, Tse C K, Qiu S S, Chen J N 2005 *Chin. Phys.* **14** 61
- [22] Li M, Ma X K, Dai D, Zhang H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1084 (in Chinese) [李 明、马西奎、戴 栋、张 浩 2005 物理学报 **54** 1084]
- [23] Yang R, Zhang B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5667 (in Chinese) [杨 汝、张 波 2006 物理学报 **55** 5667]
- [24] Lu W G, Zhou L W, Luo Q M, Du X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6275 (in Chinese) [卢伟国、周维维、罗全明、杜 雄 2007 物理学报 **56** 6275]
- [25] Wang S B, Zhou Y F, Chen J N, Jiang X D 2008 *Proc. Chin. Soc. Electr. Eng.* **28** 26 (in Chinese) [王诗兵、周宇飞、陈军宁、姜学东 2008 中国电机工程学报 **28** 26]
- [26] Wang X M, Zhang B, Qiu D Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2728 (in Chinese) [王学梅、张 波、丘东元 2008 物理学报 **57** 2728]
- [27] Yang X 2004 *Switching Power Supply Technology* (Beijing: China Machine Press) p96 (in Chinese) [杨 旭 2004 开关电源技术 (北京: 机械工业出版社) 第 96 页]

Analysis of coupling nonlinear dynamical behaviors between two stages in a cascade power-factor-correction converter^{*}

Zou Jian-Long[†] Ma Xi-Kui

(*State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering,
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

(Received 29 September 2009; revised manuscript received 10 November 2009)

Abstract

A cascade power-factor-correction (PFC) converter is a nonlinear system cascaded by a PFC converter and a direct current-direct current (DC-DC) converter. According to the nonlinear model of the cascade PFC converter derived, we simulate the interstage coupling nonlinear dynamical behaviors of the system, and the simulation results are verified experimentally. The results shows that with the decrease of the PFC output capacitance the bifurcation may appear, which results in the change of the DC-DC output voltage. Likewise, the dynamical behavior of the PFC stage may change with DC-DC load resistance. When the duty ratio of the DC-DC stage becomes saturated, the coupling process between the PFC stage and the DC-DC stage is very complicated.

Keywords: cascade, power-factor-correction, coupling, nonlinear

PACC: 0545

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 50577047).

[†] E-mail: superzou@mail.xjtu.edu.cn