

双输入直流变换器的建模与闭环系统设计

1 引言

化石能源是不可再生能源，正在日益减少而终将枯竭，同时由于它的大量使用所导致的环境污染问题日益严重。为了人类的可持续发展，人们正在致力于寻找新的替代能源。可再生能源具有便宜、可靠、清洁无污染、可永续运用等优点受到广泛的关注，可再生能源发电作为其一种运用形式具有良好的发展前景。目前，应用较多的有光伏发电、风力发电、水力发电、地热发电等，但均存在电力供应不稳定、不连续、随气候条件变化等缺陷，因此需要采用多种能源联合供电系统^[1]。

在传统的新能源联合供电系统中，每种能源形式通常需要一个 DC-DC 变换器，将各种能源变成直流输出，并联在公共的直流母线上，结构较复杂，且成本较高^[2]。为了简化电路结构，减少系统成本，可以用一个多输入直流变换器(Multiple-Input Converter，MIC)来代替多个单输入直流变换器。MIC 是一种将多个输入源联合起来向单个负载供电的变换器。它允许多种能源输入，输入源的性质、幅值和特性可以相同，也可以不同；并且多种输入源可以同时向负载供电，也可以单独向负载供电，因此 MIC 存在多种工作模式。近年来，在 MIC 的电路拓扑和能量管理策略等方面已开展了大量研究工作^[3-10]。

由于存在多个输入源，MIC 的能量管理策略是需要保证输出电压的稳定和实现输入功率的分派，其控制系统将由多个闭环共同组成。并且，当多个输入源同时向负载供电时，它是一个典型的多输入-多输出的耦合系统，因此其闭环系统设计比较复杂。文献[11]基于双输入分时 Buck 变换器建立了系统的小信号数学模型，通过度析系统的闭环传递函数矩阵，给出了系统的稳定性判据。但是对于这样的一个耦合控制系统，文献中并没有提及闭环调节器是如何设计的。文献[12]介绍了一种带电流解耦控制的双输入双向变换器。其控制系统由两个输入电流内环和一个输出电压外环组成。为了实现两个电流内环的解耦，系统中增长了解耦矩阵，这样可以独立的设计两个电流内环调节器。但是文献中没有提及两个输入电流的分派策略以及输出电压外环调节器的设计方法。

本文将双输入 Buck 变换器为例，采用一个输入电流闭环和一个输出电压闭环组成控制

系统，针对电路的三种工作模式，分别建立了系统的小信号数学模型，在此基础上，将提出一种输入电流闭环和输出电压闭环调节器的设计方法，采用这种方法设计的闭环调节器可以使系统在三种工作模式下均有较好的稳定性和快速性。最后通过一个 400W 的原理样机验证了该闭环设计的有效性。

2 双输入 Buck 变换器的工作原理

2.1 工作原理

图 1 给出了双输入 Buck 直流变换器的电路图，它是由 Buck 三电平直流变换器推导而来^[13]，其中 V_{in1} 和 V_{in2} 分别是 1#、2# 输入源电压， Q_1 、 Q_2 为开关管， D_1 、 D_2 为续流二极管， L_f 是输出滤波电感， C_f 是输出滤波电容， R_{Ld} 是负载。该变换器的工作原理详见文献^[14]。

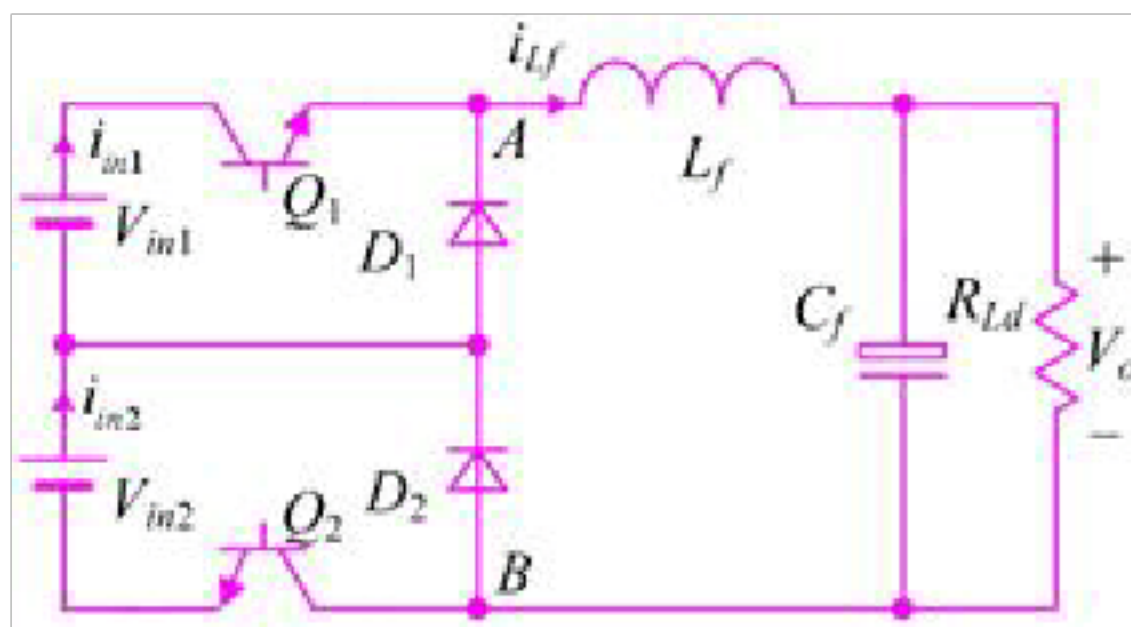


图 1 双输入 Buck 直流变换器

V_{in1} 单独向负载供电时， Q_2 始终截止， D_2 始终导通， V_{in1} 、 Q_1 、 D_1 、 L_f 、 C_f 和 R_{Ld} 相称于一个 Buck 变换器。 V_{in2} 单独向负载供电时， Q_1 始终截止， D_1 始终导通， V_{in2} 、 Q_2 、 D_2 、 L_f 、 C_f 和 R_{Ld} 也相称于一个 Buck 变换器。 Q_1 、 Q_2 同时导通时， V_{in1} 、 V_{in2} 串联向负载供电。

由上面的分析可知：该变换器的输入输出关系为

$$V_o = V_{in1} \cdot D_{y1} + V_{in2} \cdot D_{y2} \quad (1)$$

$$I_{in1} = D_{y1} \cdot I_o \quad (2)$$

$$I_{in2} = D_{y2} \cdot I_o \quad (3)$$

式中 D_{y1} 和 D_{y2} 分别为 Q_1 和 Q_2 的占空比， I_o 为输出电流。从式(1)至(3)可以看出：输出电

压和两个输入源的输入电流都是 D_{y1} 和 D_{y2} 的函数。

2.2 工作模式

在 MIC 中，由于存在多个输入源及相应的开关管，因此可以对多个占空比进行控制，换言之，即存在多个控制自由度，这就为多个输入源的能量管理提供了也许性。那么多输入直流变换器的控制策略需要实现两大功能：(1) 保证输出电压稳定；(2) 实现多个输入源的功率分派。

以双输入直流变换器为例，通过控制其中一路的输入电流就可以控制该输入源的输入功率。在氢-光互补供电系统中，需要优先运用太阳能电池的能量，因此可以将太阳能电池作为主供电设备（1#输入源），燃料电池为后备能源供电设备（2#输入源）。本文采用主从控制方式分派两路输入源的输入功率^[14]，负载所需功率尽也许由 1#输入源提供，剩余功率由 2#输入源提供。

图 2 给出了双输入 Buck 直流变换器的控制框图，它由 1#源输入电流闭环和输出电压闭环组成。该变换器存在以下三种工作模式。

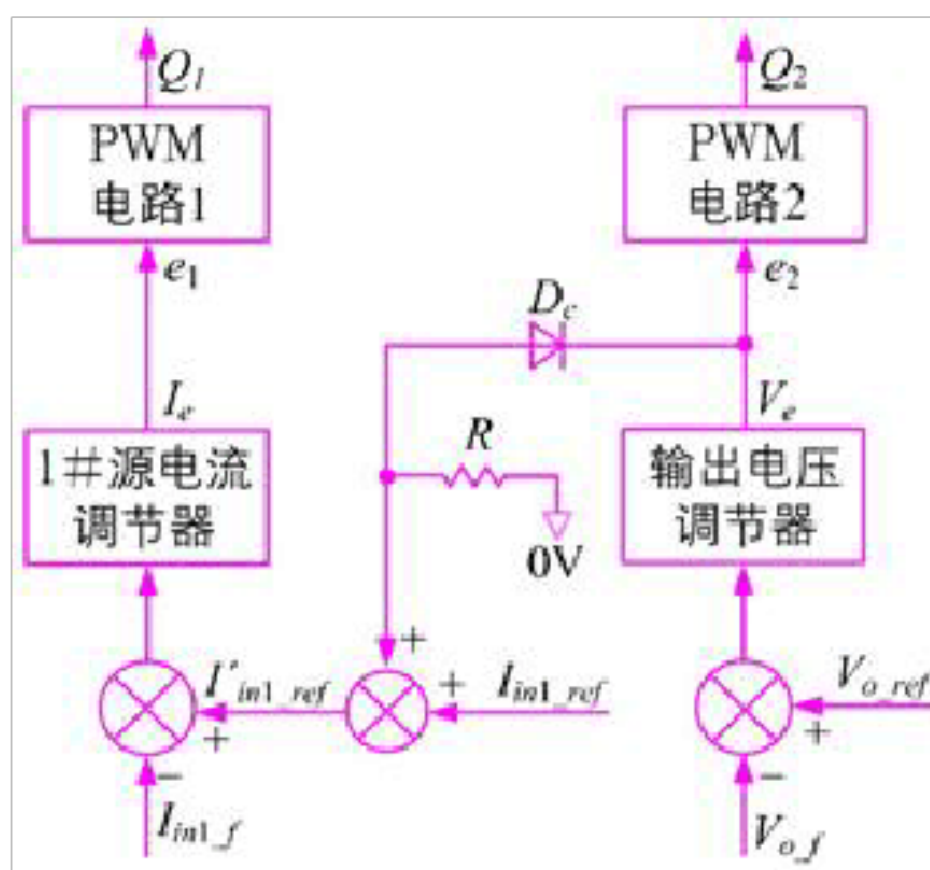


图 2 控制系统框图

工作模式 I：当负载所需功率大于 1#源所能提供的最大功率时，两路输入源同时向负载供电。此时电压调节器的输出 V_e 为正值，二极管 D_c 截止，电压调节器和电流调节器独立工

作。其中 I_{in1_ref} 作为 1#源可以提供的最大功率相应的 1#源输入电流的参考值，使 1#源输出最大功率；电压调节器用于调节输出电压，2#源提供剩余功率。

工作模式 II：当负载较轻时，由 1#输入源单独向负载供电。假如保持 I_{in1_ref} 不变，则 1#源以最大功率输出，大于负载功率，导致输出电压升高。这时电压调节器的输出将为负值，使 Q_2 关断，同时使 D_1 导通，电压调节器的输出 V_c 作为调整信号使 I_{in1_ref} 减小，即减小输入电流。此时电压调节器与电流调节器组成双闭环，电流环为内环，电压环为外环，此时调节 Q_1 的占空比使输出电压稳定。

工作模式 III：由于特殊因素，1#源不输出功率，直接关断开关管 Q_1 ，由 2#源单独向负载供电，此时电压调节器控制 Q_2 占空比保证输出电压恒定。

3 小信号电路模型

电力电子系统一般由电力电子变换器、PWM调制器、驱动电路、反馈控制单元组成。在进行闭环系统设计前，一方面要建立被控对象的小信号模型。

在工作模式 I 下，两路输入源同时工作，共同向负载提供能量；在工作模式 II 和 III 下，单个输入源向负载供电，变换器等效为单输入 Buck 变换器。下面建立这三种工作模式下的变换器小信号模型。

3.1 双输入 Buck 变换器的小信号电路模型

图 1 给出了双输入 Buck 变换器的电路图，采用状态平均法^[15]，可直接建立双输入 Buck 变换器的小信号电路模型，如图 3 所示。

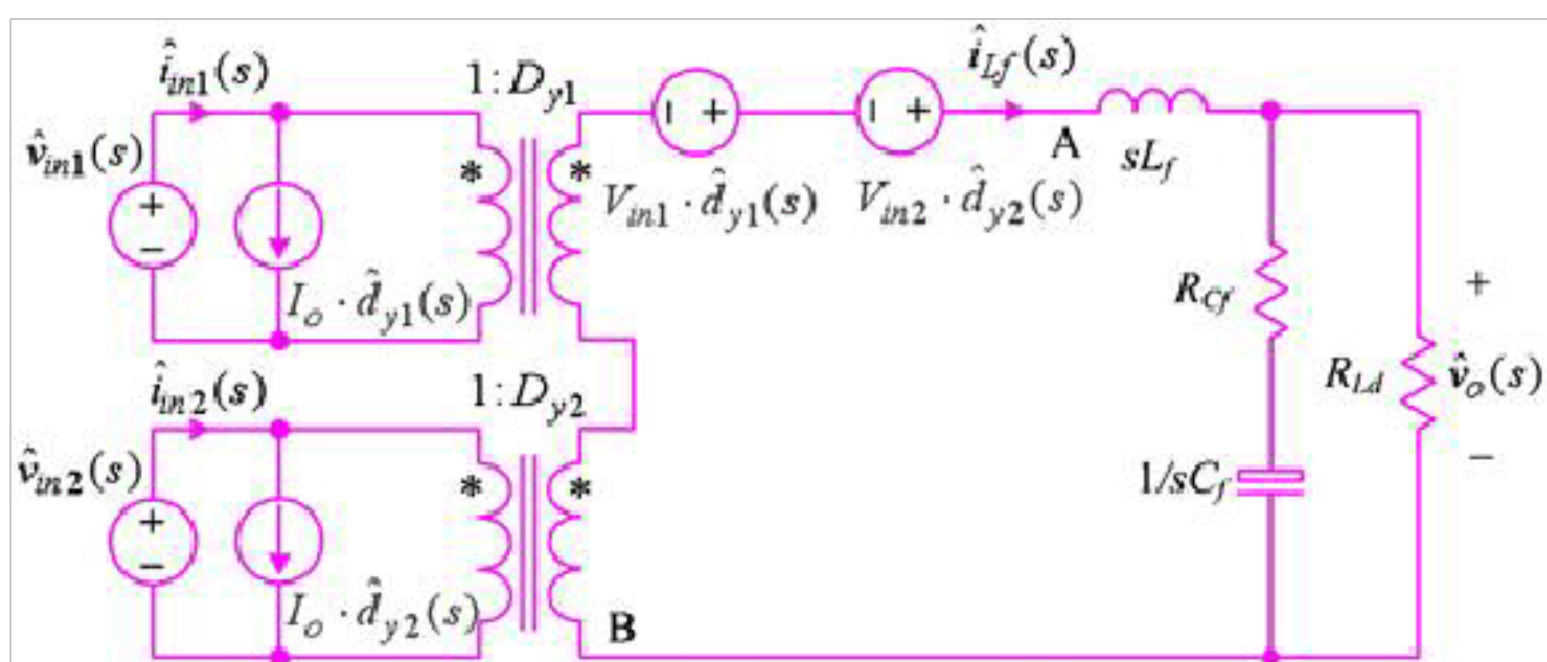


图 3 工作模式 I 下双输入 Buck 变换器的小信号电路模型

根据图 3 可以得到 AB 点间电压、输出电压、输入电流和电感电流的表达式分别为：

$$\hat{v}_{AB}(s) = \hat{d}_{y1}(s) \cdot V_{in1} + \hat{d}_{y2}(s) \cdot V_{in2} + D_{y1} \cdot \hat{v}_{in1}(s) + D_{y2} \cdot \hat{v}_{in2}(s) \quad (4)$$

$$\hat{v}_o(s) = \hat{v}_{AB}(s) \cdot \frac{\frac{R_{Ld} \cdot [R_C + 1/(C_f \cdot s)]}{R_{Ld} + R_C + 1/(C_f \cdot s)}}{L_f \cdot s + \frac{R_{Ld} \cdot [R_C + 1/(C_f \cdot s)]}{R_{Ld} + R_C + 1/(C_f \cdot s)}} \quad (5)$$

$$\hat{i}_{in1}(s) = I_o \cdot \hat{d}_{y1}(s) + \hat{i}_{Lf}(s) \cdot D_{y1} \quad (6)$$

$$\hat{i}_{Lf}(s) = \hat{v}_o(s) \cdot \frac{R_C + 1/(C_f \cdot s) + R_{Ld}}{[R_C + 1/(C_f \cdot s)] \cdot R_{Ld}} \quad (7)$$

在工作模式 I 下，对于双输入 Buck 变换器而言，控制变量为两路占空比，输出变量为 1# 源输入电流和输出电压。控制到输出的传递函数表达式为：

$$Y(s) = \begin{bmatrix} \hat{i}_{in1}(s) \\ \hat{v}_o(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{d}_{y1}(s) \\ \hat{d}_{y2}(s) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 $\hat{i}_{in1}(s)$ 、 $\hat{v}_o(s)$ 、 $\hat{d}_{y1}(s)$ 、 $\hat{d}_{y2}(s)$ 分别为 1# 源输入电流 I_{in1} 、

输出电压 V_o 、占空比 D_{y1} 和 D_{y2} 的小信号扰动。

由式(9)~式(12)可以得到控制-输出的传递函数：

$$G_{11}(s) = \left. \frac{\hat{i}_{in1}(s)}{\hat{d}_{y1}(s)} \right|_{\hat{d}_{y2}(s)=0}$$

$$= I_o + \frac{D_{y1} \cdot V_{in1} \cdot [(R_C + R_{Ld}) \cdot C_f \cdot s + 1]}{L_f \cdot C_f \cdot (R_{Ld} + R_C) \cdot s^2 + (L_f + R_{Ld} \cdot R_C \cdot C_f) \cdot s + R_{Ld}}$$

(9)

$$G_{12}(s) = \left. \frac{\hat{i}_{in1}(s)}{\hat{d}_{y2}(s)} \right|_{\hat{d}_{y1}(s)=0}$$

$$= \frac{D_{y1} \cdot V_{in2} \cdot [(R_C + R_{Ld}) \cdot C_f \cdot s + 1]}{L_f \cdot C_f \cdot (R_{Ld} + R_C) \cdot s^2 + (L_f + R_{Ld} \cdot R_C \cdot C_f) \cdot s + R_{Ld}}$$

(10)

$$G_{21}(s) = \left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}_{y1}(s)} \right|_{\hat{d}_{y2}(s)=0}$$

$$= \frac{V_{in1} \cdot (R_C \cdot C_f \cdot s + 1)}{L_f \cdot C_f \cdot (R_{Ld} + R_C) / R_{Ld} \cdot s^2 + (L_f / R_{Ld} + R_C \cdot C_f) \cdot s + 1}$$

(11)

$$G_{22}(s) = \left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}_{y2}(s)} \right|_{\hat{d}_{y1}(s)=0}$$

$$= \frac{V_{in2} \cdot (R_C \cdot C_f \cdot s + 1)}{L_f \cdot C_f \cdot (R_{Ld} + R_C) / R_{Ld} \cdot s^2 + (L_f / R_{Ld} + R_C \cdot C_f) \cdot s + 1}$$

(12)

3.2 单输入 Buck 变换器的小信号电路模型

在工作模式 II 下， $D_{y2}=0$ ，2#输入源不输出能量。双输入 Buck 变换器等效于一个单输入 Buck 变换器，工作在电压电流双闭环模式，电压环为外环，电流环为内环。令图 4.2 中

$$\hat{v}_{in2}(s)、\hat{i}_{in2}(s)、\hat{d}_{y2}(s)$$

和 D_{y2} 均为零，可以得到工作模式 II 下的双输入

Buck 变换器小信号电路模型，如图 4 所示。

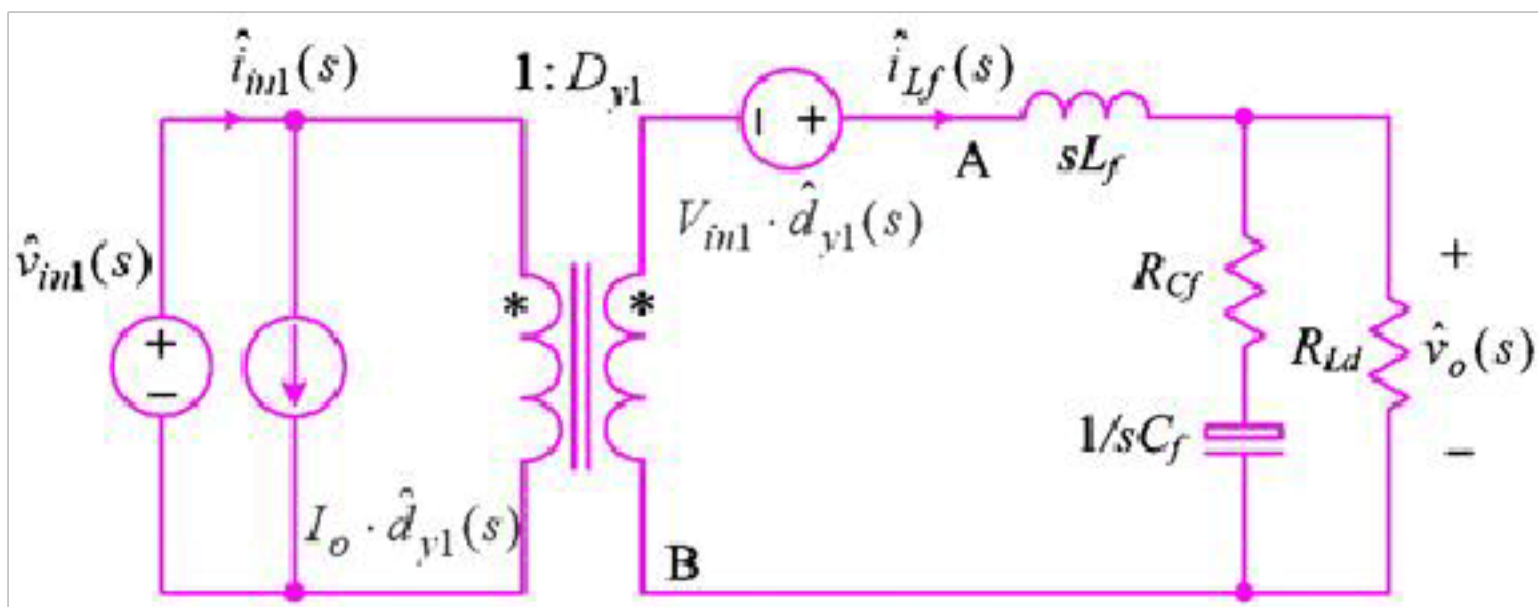


图 4 工作模式 II 下双输入 Buck 变换器的小信号电路模型

在工作模式 III 下， $D_{y1}=0$ 。此时双输入 Buck 变换器同样等效于一个单输入 Buck 变换器，

工作在单电压环模式。令图 4.2 中 $\hat{v}_{in1}(s)、\hat{i}_{in1}(s)、\hat{d}_{y1}(s)$ 和 D_{y1} 均为零，可以得到工作模式 III 下的双输入 Buck 变换器小信号电路模型，如图 5 所示。

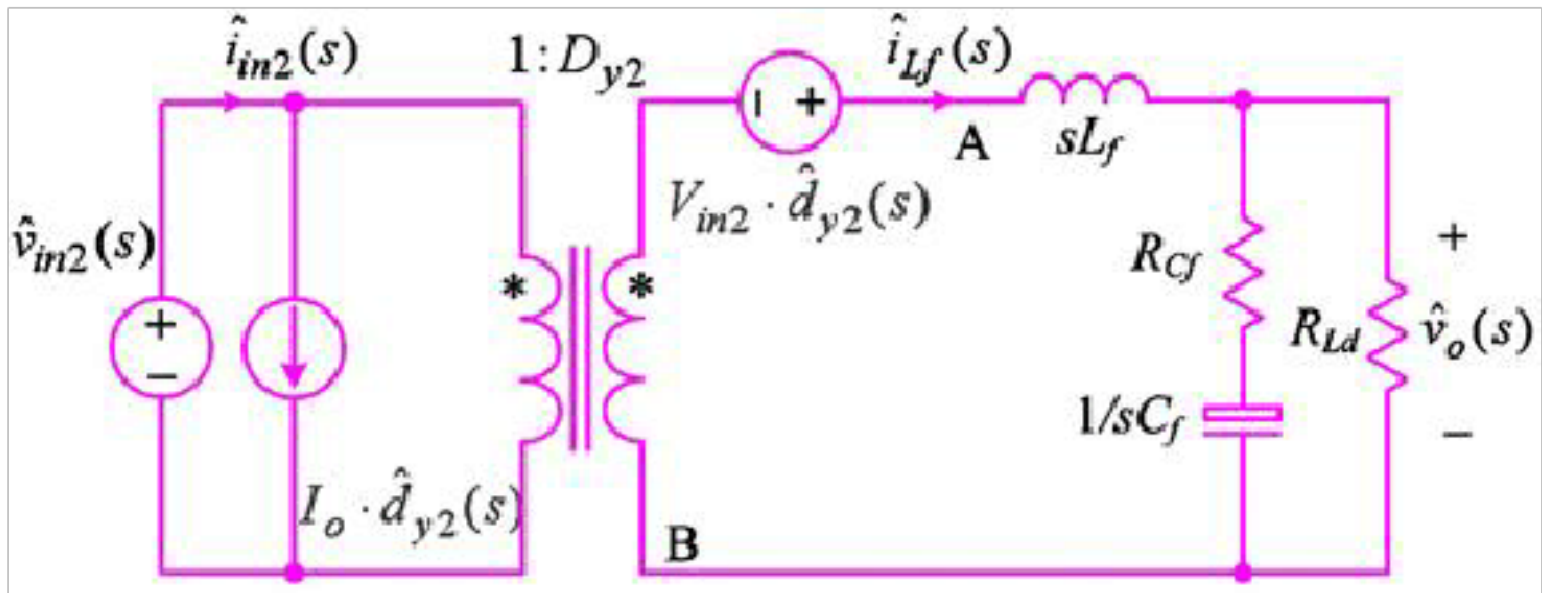


图5 工作模式 III 下双输入 Buck 变换器的小信号电路模型

4 系统的小信号数学模型

由图 2 所示的控制框图，可以得到三种工作模式下系统的小信号数学模型，如图 6 所示，其中 $G_{cr}(s)$ 、 $G_{vr}(s)$ 分别为 1#源输入电流闭环调节器和输出电压闭环调节器的传递函数， $G_{PWM}(s)$ 是 PWM 调制器的传递函数， $G_{PWM}(s)=1/V_m$ 。1#源输入电流是开关电流，需要进行滤波，因此 1#源输入电流反馈环节的传递函数为： $G_{cf}(s)=1/(R_1C_1s+1)$ ；电压反馈环节的传递函数为： $G_{vf}(s)=K$ 。

从图 6 可以看出：

(1) 图 6(a) 给出了两路输入源同时工作时系统的小信号数学模型，由于 $G_{12}(s)$ 和 $G_{21}(s)$ 的

存在， $\hat{d}_{y1}(s)$ 或 $\hat{d}_{y2}(s)$ 的变化会同时影响两个输出量 $\hat{i}_{in1}(s)$ 和 $\hat{v}_o(s)$ 。简言之，

两路闭环通过被控对象耦合在一起，这使控制系统设计比较困难。

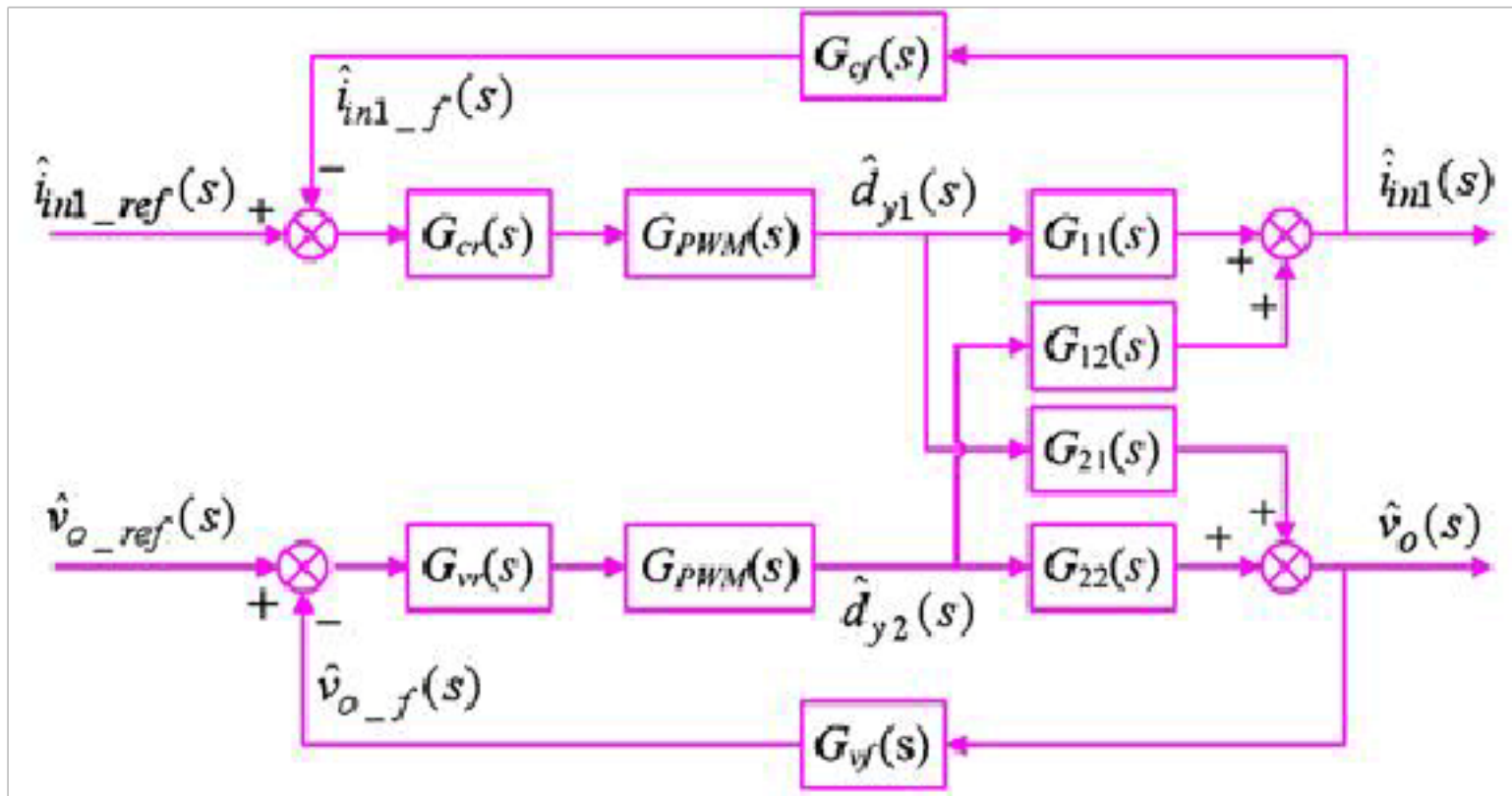
(2) 图 6(b) 给出了 1#输入源单独工作时系统的小信号数学模型， $G_{vr}(s)$ 的输出作为 $G_{cr}(s)$ 的参考信号，电路工作在电压电流双闭环模式，电压环为外环，电流环为内环。

(3) 图 6(c) 给出了 2#输入源单独工作时系统小信号数学模型，只存在输出电压闭环。

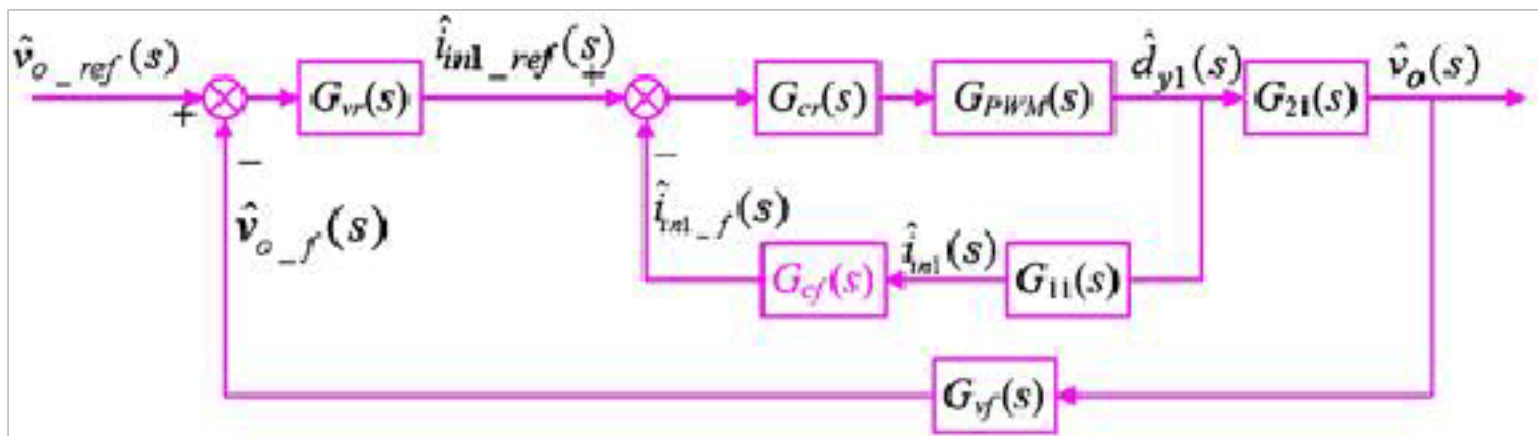
综上所述，电流调节器在工作模式 I 和 II 下参与工作，电压调节器在三种工作模式下均参与工作，因此闭环控制系统的参数必须使系统在三种工作模式下均满足稳定性规定。

在一般的闭环控制系统中，从误差信号到反馈信号之间环路中各环节传递函数之乘积称为环路增益函数。由于环路增益函数中包含了所有闭环极点的信息，可以通过度析它的特性

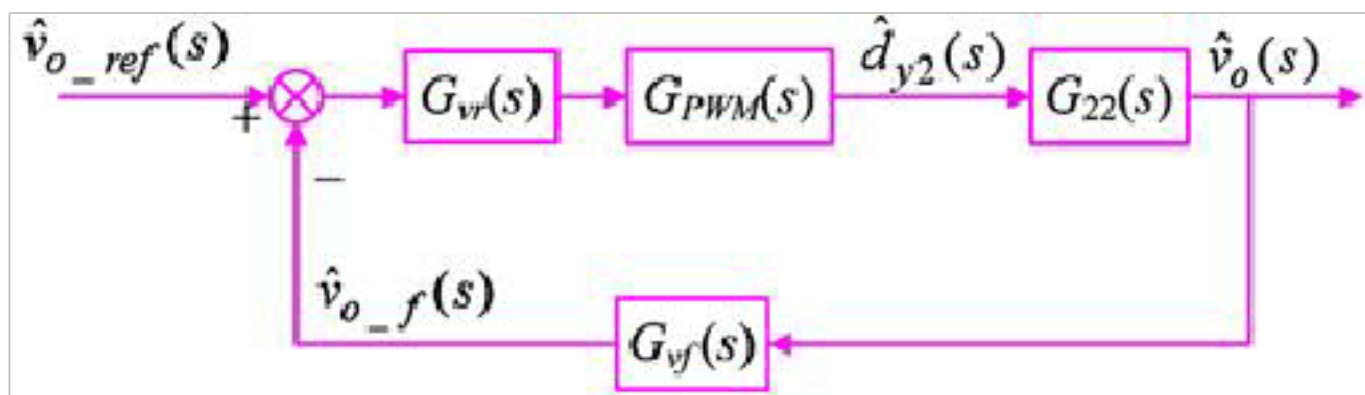
全面把握系统的稳定性。下面分别推导三种工作模式下的电压闭环和电流闭环的环路增益函数。



(a) 两路输入源同时工作(工作模式 I)



(b) 1# 输入源单独工作(工作模式 II)



(c) 2# 输入源单独工作(工作模式 III)

图 6 三种工作模式的系统小信号数学模型

两路输入源同时向负载供电

(1) 1#源输入电流闭环的环路增益函数

需要指出的是：在求解输入电流闭环环路增益函数时，除自身的输入参考信号

$\hat{i}_{in1_ref}(s)$ 之外的其它输入信号均看作扰动信号。因此，令图 6(a) 中的输出电压参考值

$\hat{v}_o_ref(s) = 0$ ，其等效的小信号数学模型如图 7 所示。

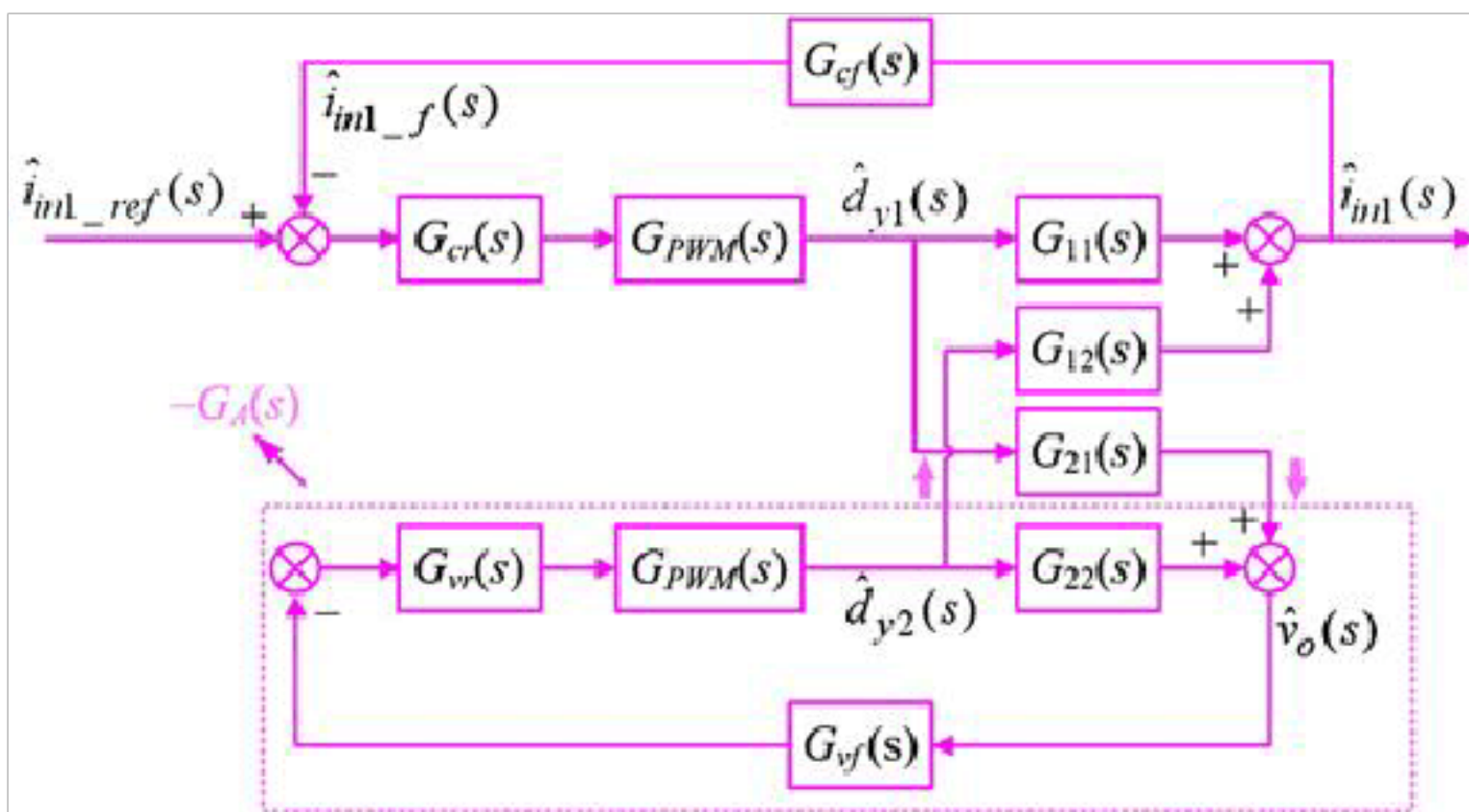


图 7 1#源输入电流闭环等效小信号数学模型

由图 7 可以得到电流闭环环路增益函数为：

$$T_{i_1}(s) = G_{cr}(s) \cdot G_{PWM}(s) \cdot G_{cf}(s) \cdot [G_{11}(s) - G_{12}(s) \cdot G_A(s) \cdot G_{21}(s)] \quad (13)$$

式中

$$G_A(s) = \frac{G_{vr}(s) \cdot G_{PWM}(s) \cdot G_{vf}(s)}{1 + G_{vr}(s) \cdot G_{PWM}(s) \cdot G_{vf}(s) \cdot G_{22}(s)} \quad (14)$$

从式(13)可以看出，与输入电流控制型单输入 Buck 变换器的环路增益函数相比， $T_{i_1}(s)$ 中增长了 $-G_{12}(s) G_A(s) G_{21}(s)$ 项，其中包含了电压调节器 $G_{vr}(s)$ 。因此，补偿前电流环环路

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/206000044133011010>