DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.190 **中图分类号**：TM711 **文献标志码**：A

并网变换器电流-内电势与端电压-电流激励-响应特性的等效机制及仿真分析

付天照，袁小明(中国电源学会高级会员)，龚 轩
(华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074)

摘要：系统动态过程中，当网侧电流变化时变换器电流控制将通过调节输出的电压来实现电流与指令的平衡，表现为电流激励下的电压响应。由于变换器交流电压通过控制幅值和频率产生且系统运行需要维持电压的幅值和频率水平，因此当发生功率不平衡时，电流控制应被描述为有功/无功电流激励下的内电势幅值和频率响应。与此同时，从变换器对所并入电网影响的角度看，端电压幅值和频率激励下的有功/无功电流响应也是认识并网变换器特性的另一视角。因此对于变换器电流控制，提出了服务于大系统动态分析的有功/无功电流-内电势特性以及从单机视角认识设备对电网影响的端电压-有功/无功电流特性。在此基础上，通过说明电流控制中电流和端电压间的冗余关系，解释了2种特性在本质上是等效的。最后，通过仿真验证了2种特性间的等效性，并初步探究了锁相控制参数对电流控制特性的影响。

关键词：并网变换器；电流控制；激励-响应特性；有功/无功电流；内电势；端电压；幅值和频率

Equivalent Mechanism and Simulation Analysis of Current-Internal Voltage and Terminal Voltage-Current Excitation-response Characteristics of Grid-connected Converter

FU Tianzhao, YUAN Xiaoming, *Senior Member*, *CPSS*, GONG Xuan
(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: During the dynamic process of a system, the current control of a converter realizes a balance between current and reference by adjusting the output voltage when the grid-side current changes, which is represented as voltage response under the current excitation. Since the AC voltage of the converter is generated by controlling the amplitude/frequency and the amplitude/frequency of voltage is required to be maintained during the system operation, the current control should be described as the internal voltage amplitude/frequency response under active/reactive current excitation when a power imbalance occurs. At the same time, from the perspective of a grid-connected converter's influence on the grid, the active/reactive current response under the terminal voltage amplitude/frequency excitation is another perspective for understanding the characteristics of the grid-connected converter. Therefore, for the current control of the converter, the active/reactive current-internal voltage characteristics used in the dynamic analysis of large systems and the terminal voltage-active/reactive current characteristics from the perspective of the influence of equipment (e.g., single machine) on the grid are presented. On this basis, it is determined that the two kinds of characteristics are essentially equivalent by explaining the redundant relationship between current and terminal voltage under the current control. Finally, the equivalence is verified by simulations, and the influence of phase-locked control parameters on current control characteristics is preliminarily explored.

收稿日期：2022-12-29；**修回日期**：2023-02-19；**录用日期**：2023-03-21；**网络首发日期**：2023-05-06
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2022YFB2402700)
This work is supported by National Key R&D Program of China under the grant 2022YFB2402700

Keywords: Grid-connected converter; current control; excitation-response characteristic; active/reactive current; internal voltage; terminal voltage; amplitude/frequency

随着新型电力系统的发展，变换器设备正逐步

取代同步机成为电力系统中的主要发电设备[1-2]。其中，变换器的电流控制作为控制内环，决定了变换器设备在系统动态初期阶段的行为[3]。因此，为服务于新型电力系统的分析与研究需求，亟需建立合适的激励响应模型来描述变换器的电流控制。

当系统发生扰动时，电流控制检测电流变化并与电流指令形成电流误差，再通过控制环节调节变换器输出的交流电压。实际上，变换器设备是通过控制幅值和频率来形成交流电压的[4]。当系统发生功率不平衡时，变换器电流控制会检测到对应的有功/无功电流的变化，从而调节所输出内电势的幅值和频率去改变系统中的功率分布直至功率恢复平衡。因为系统动态过程是上述有功/无功功率及内电势幅值和频率的连续调节过程[4]，所以为认识电流控制在系统动态过程中的角色，需要将其描述为有功/无功电流激励下的内电势幅值和频率响应，即有功/无功电流-内电势特性。而学术界既有的相关研究包括状态空间法[5-6]及阻抗法[7-8]在内，均未认识到系统动态过程中变换器电流控制在功率不平衡作用下调节内电势幅值和频率的本质，因此都不是研究电流控制在大系统动态过程中角色的合适思路。

与此同时，很多场合下研究中关心的是单机设备对所接入电网的影响，这就需要适合于在单机视角下描述变换器设备的激励-响应关系。因此为反映单机设备在网侧端电压幅值和频率波动时将如何调节输出至电网的功率，需要以端电压-有功/无功电流特性来描述电流控制。虽然在过去学术界针对单机并网场景也做了许多建模和分析工作，如文献[9]综述了变换器接入可能对电网带来的影响，文献[10]指出变换器设备接入会影响系统功率分布，但是这些工作均未形成从端电压幅值和频率及有功/无功电流去机理化认识电流控制特性的合适视角。

实际上，有功/无功电流-内电势特性和端电压-有功/无功电流特性二者在本质上是等价的。虽然除了交流电流以外，经锁相环检测的端电压也参与了变换器内电势的形成，但是在系统动态过程中端电压和电流同时变化且相互冗余，当其一的变化规律确定后，另一者的变化规律也被唯一确定。由于端电压和电流都可以完整、独立地反映外部扰动对于设备的激励作用，因此以电流或端电压作为激励本质上是等价的。

综上所示，本文的主要贡献是提出了适用于系统动态分析的有功/无功电流-内电势特性及适用于从局部单机视角认识设备对电网影响的端电压-有功/无功电流特性，并说明和验证了这 2 种特性间的等价性。与此同时，本文还初步探究了锁相参数对电流控制特性的影响，为后续进一步研究电流控制特性及特定场景下的系统稳定性提供了基础。

1　变换器电流控制的基本结构和工作原理

1.1　变换器电流控制的基本结构

并网变换器的电路拓扑与控制结构如图 1 所示，不考虑电流控制中的端电压前馈和交叉解耦环节。根据控制器响应速度的快慢，可以将变换器的双闭环控制划分为电压外环控制与电流内环控制。本文考虑电流环的快尺度动态而不考虑电压环的慢尺度动态。虽然锁相环在不同控制参数下表现出不同的响应速度，但是由于经锁相环检测的端电压也一同参与了变换器内电势的形成，因此在分析时应和电流控制器一同考虑，在电流控制快时间尺度下，变换器所考虑的拓扑范围如图 1 所示。动态时电流控制将网侧电流变换为锁相坐标系下的电流分量 i_{dq}^{p} 和 i_{qq}^{p}，期望其跟踪指令值 i_{dr}^{p} 和 i_{qr}^{p}。其中，指令值 i_{dr}^{p} 和 i_{qr}^{p} 由电压控制外环形成，因为本文不考虑电压外环的慢尺度动态，所以锁相电流指令取恒定值。

1.2　变换器电流控制的基本工作原理

当系统发生扰动时，锁相坐标下的电流分量 i_{dq}^{p}、i_{qq}^{p} 和指令 i_{dr}^{p}、i_{qr}^{p} 之间不再平衡，电流控制器将通过 PI 环节调节锁相坐标下的内电势分量 E_d 和 E_q，再经过 PWM 形成脉冲指令作用于开关管进而形成变换器交流内电势。因此，当变换器网侧电流

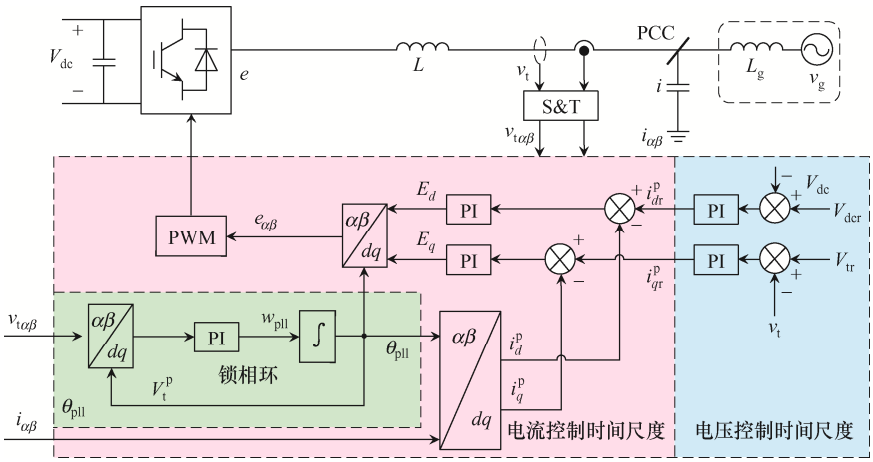


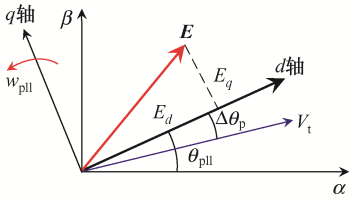
图 1 并网变换器电路拓扑和控制结构

Fig. 1 Circuit topology and control structure of grid-connected converter

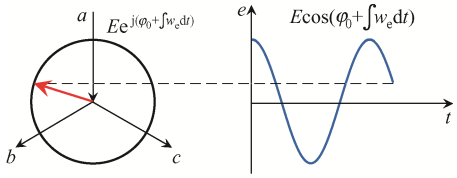
变化时，电流控制将以连续调节输出的交流内电势为手段，实现反馈电流与指令的平衡。

实际上，变换器输出的交流内电势是通过控制其幅值和频率产生的。如图 2(a)所示，内电势在锁相位置下的分量 E_d 和 E_q 共同形成了内电势的幅值 E，而 E_d、E_q 和锁相速度 w_{pll} 共同形成了内电势的频率 w_{e}，其数学关系分别为

$$\begin{cases} E=\sqrt{E_d^2+E_q^2} \\ w_{\text{e}}=w_{\text{pll}}+\dfrac{\text{d}}{\text{d}t}\arctan\dfrac{E_q}{E_d} \end{cases} \tag{1}$$



(a) 内电势幅值和频率形成过程



(b) 幅值和频率形成交流信号过程

图 2 内电势幅值和频率及交流信号形成过程

Fig. 2 Formation processes of internal voltage amplitude/frequency and AC signal

内电势的幅值 E 与频率 w_{e} 共同形成了三相交流电压信号，如图 2(b)所示。由于电力系统稳定运行要求维持电压的幅值和频率水平，因此电流控制通过调节内电势的幅值和频率将直流侧功率传输到电网。当发生功率不平衡时，电流控制将检测到对应有功/无功电流的变化，从而不断调节所输出内电势的幅值和频率，直至功率恢复平衡，与其对应的有功/无功电流也恢复到期望水平。上述过程反映了动态时有功/无功电流及内电势幅值和频率连续调节的客观事实，这也是以有功/无功电流-内电势特性来描述电流控制在动态过程中角色的原因。

2 电流控制的有功/无功电流-内电势特性

2.1 端电压坐标下的有功/无功电流-内电势特性

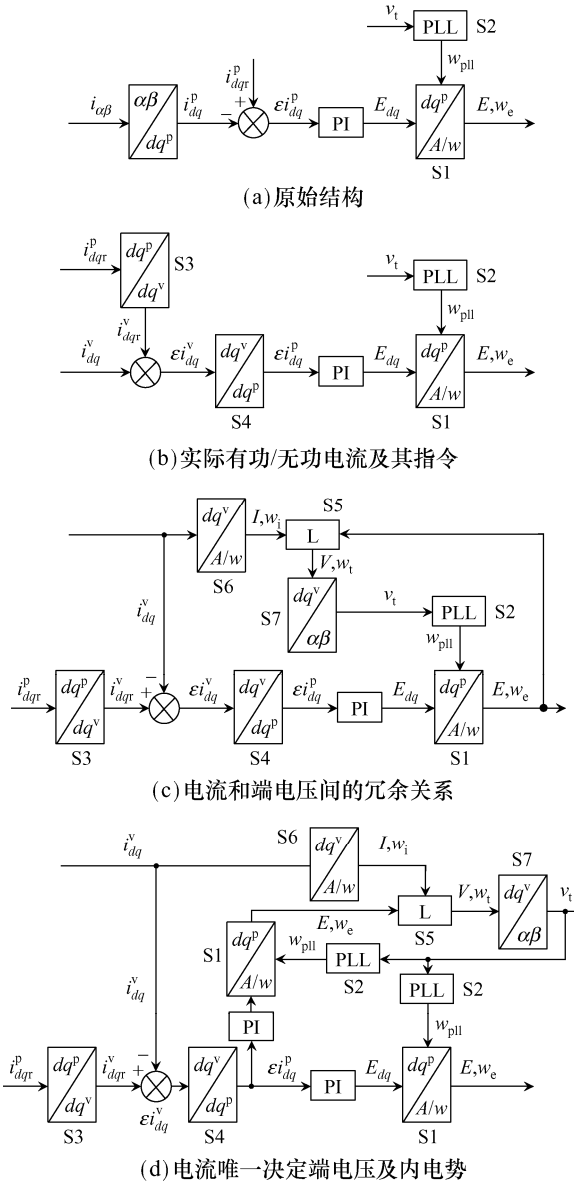
在上文假设前提下，变换器在电流控制时间尺度的原始结构如图 3(a)所示。其中，环节 S1 表示锁相位置下的内电势分量 E_d、E_q 及锁相速度 w_{pll} 共同形成内电势幅值 E 与频率 w_{e} 的过程，关系如式(1)所示。环节 S2 为锁相环，其采用经典的二阶控制结构，如图 1 所示。锁相环中坐标变换环节的数学关系及 PI 控制环节的关系分别为

$$V_{tq}=-v_{t\alpha}\sin\theta_{\text{p}} \tag{2}$$

$$w_{\text{pll}}=k_{\text{pp}}V_{tq}+\int k_{\text{ip}}V_{tq}\text{d}t \tag{3}$$

2.1.1 实际有功/无功电流及其指令值

在系统动态过程中，由于锁相环存在动态误差，故锁相位置 θ_{pll} 与实际端电压位置并不相等，



(a)原始结构

(b)实际有功/无功电流及其指令

(c)电流和端电压间的冗余关系

(d)电流唯一决定端电压及内电势

图 3　端电压坐标下的有功/无功电流-内电势特性

Fig. 3 Active/reactive current-internal voltage characteristics in terminal voltage coordinate

因此，在锁相坐标系下的电流分量 i_{dd}^{p}、i_{qq}^{p} 并不是在实际端电压位置上的有功/无功电流，因而不能反映设备的功率水平。故应以实际端电压位置的有功电流 i_{dd}^{v} 和无功电流 i_{qq}^{v} 作为电流控制的激励。同时，由于电压控制器输出的指令值 i_{dr}^{p}、i_{qr}^{p} 是锁相位置电流的期望值，并非实际有功/无功电流所对应的指令，因此需要将其变换为实际有功/无功电流所对应的指令值 i_{dr}^{v} 和 i_{qr}^{v}，其变换关系满足

$$i_{dr}^{v}+\mathrm{j}i_{qr}^{v}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}\Delta\theta_{p}}(i_{dr}^{p}+\mathrm{j}i_{qr}^{p}) \tag{4}$$

相应地，将图 3(a)变换为图 3(b)所示的形式，其中环节 S3 的关系如式(4)所示。为了保证变换等价性，在图 3(b)中增加反坐标变换环节 S4，并将其与 PI 控制器串联，环节 S4 的数学关系为

$$\varepsilon i_{d}^{p}+\mathrm{j}\varepsilon i_{q}^{p}=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\Delta\theta_{p}}(\varepsilon i_{d}^{v}+\mathrm{j}\varepsilon i_{q}^{v}) \tag{5}$$

PI 控制器的数学关系为

$$E_{dq}=k_{p}\varepsilon i_{dq}^{p}+k_{i}\int\varepsilon i_{dq}^{p}\mathrm{d}t \tag{6}$$

式中，k_p 和 k_i 为 PI 控制器的比例参数与积分参数。

2.1.2　有功/无功电流和端电压间的冗余关系

同步机在机械功率和输出电磁功率不平衡时，将独立调整所输出内电势的频率；当无功功率波动时，会在励磁系统的作用下调节内电势的幅值。因此，当有功/无功功率波动时，同步机可以独立地在端口功率激励的作用下形成一定幅值和频率的交流内电势。然而与同步机不同，理解变换器设备在端口功率激励作用下独立形成内电势存在根本困难。如图 3(b)所示，框图的输入量除了变换器网侧有功电流 i_{dd}^{v} 和无功电流 i_{qq}^{v} 以外，还包含锁相环所检测的端电压 v_t。由于变换器端口处电压并不能由该设备独立决定，而是电网中各电源共同作用的结果，因此变换器内电势的形成必然会受到系统中其他设备的影响，无法像同步机一样在自身端口功率的激励作用下独立形成内电势。这是锁相环检测对认识并网变换器所带来的根本障碍，也是以有功/无功电流激励下的内电势响应描述电流控制的困难所在。

实际上，网侧电流 i 和端电压 v_t 二者之间并不独立，当其中一者的变化规律确定后，另一者的变化规律也被唯一确定，而不能随意变化。这是因为，网侧电流 i、端电压 v_t 和内电势 e 之间会受到 2 个关系的约束。第一个约束是变换器的控制关系，如图 3(b)所示，有功/无功电流 i_{dd}^{v} / i_{qq}^{v} 和端电压 v_t 共同作为框图的输入，一起形成变换器内电势的幅值 E 及频率 w_e；实际上，网侧电流、端电压和内电势间还会受到变换器电路拓扑的约束，即变换器调整内电势幅值和频率后通过电路约束更新电感上的

电流，对应着电感 L 上的电气量间满足约束关系

$$LI\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_{\mathrm{i}}+\mathrm{j}\int w_{\mathrm{i}}\mathrm{d}t}=\int[E\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\varphi_{\mathrm{e}}+\int w_{\mathrm{e}}\mathrm{d}t)}-V\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\varphi_{\mathrm{t}}+\int w_{\mathrm{t}}\mathrm{d}t)}]\mathrm{d}t \tag{7}$$

式中：L 为电感；I、w_{i} 和 φ_{i} 分别为电流的幅度、频率和初相位；E、w_{e} 和 φ_{e} 分别为内电势的幅度、频率和初相位；V、w_{t} 和 φ_{t} 分别为端电压的幅度、频率和初相位。

在 2 个约束的共同作用下，当确定了有功/无功电流的变化规律后，端电压 v_{t} 和内电势 e 的变化规律也将被唯一确定，即端电压和电流之间存在冗余关系。根据电感的约束关系，将端电压用有功/无功电流及内电势替换，可得到在控制约束及电路约束共同作用下的电流控制激励-响应关系，如图 3(c)所示。其中，环节 S5 表示电感的约束关系，如式(7)所示，环节 S6 表示有功/无功电流及电流幅值和频率之间的关系，即

$$\begin{cases} I=\sqrt{(i_d^{\mathrm{p}})^2+(i_q^{\mathrm{p}})^2} \\ w_{\mathrm{i}}=w_{\mathrm{pll}}+\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\arctan\dfrac{i_q^{\mathrm{p}}}{i_d^{\mathrm{p}}} \end{cases} \tag{8}$$

环节 S7 表示端电压幅值和频率及端电压瞬时值之间的关系，即

$$v_{\mathrm{t}}=V\cos\left[\int_{0-}^{t}\omega_{\mathrm{t}}(\tau)\mathrm{d}\tau+\varphi_{\mathrm{t}}\right] \tag{9}$$

此时，框图的输入不再包含端电压，而仅由有功/无功电流作为独立的激励。

2.1.3 有功/无功电流独立决定变换器内电势的激励-响应关系

动态过程中，变换器的内电势幅值 E 和频率 w_{e} 变化后，该变换器和电网中的其他设备一同更新了网络各位置的电压及电流，故有功无功电流 i_{dd}^{v} 及 i_{qq}^{v} 和端电压 v_{t} 在这个过程中被同时确定，二者并非独立关系。即对于图 3(c)中的电感约束，当内电势幅值 E 和频率 w_{e} 变化时，若给定了有功/无功电流 i_{dd}^{v} 及 i_{qq}^{v} 的变化规律，则端电压 v_{t} 的变化规律也将与电流一同被唯一确定。随后，端电压和电流一同在设备控制约束的作用下继续更新内电势的幅值和频率。由于端电压和电流间是冗余的，因此可以以电流作为独立激励，将电流控制描述为有功/无功电流激励下的内电势幅值和频率响应。需要说明的是，根据上述认识，以端电压作为电流控制的独立激励当然也是可行的，这也正是本文第 3 节所做工作的前提。

虽然在图 3(c)中，框图的唯一外部输入为有功/无功电流，但由于作为输出的内电势幅值和频率又反馈回框图内部表现为设备内部的闭环，因此仍难以直观认识变换器内电势的形成过程。根据对有功/无功电流和端电压间冗余性的认识，对图 3(c)进行等效变换可以得到图 3(d)，该框图反映了电流激励唯一确定端电压，二者再共同形成变换器内电势的过程。可以看出，以有功/无功电流作为激励时，变换器的端电压和内电势将被唯一确定。

2.2 内电势坐标下的有功/无功电流-内电势特性

为反映系统动态过程中电流控制在功率不平衡作用下调节内电势幅值和频率的本质，应以内电势位置上的有功/无功电流 i_{dd}^{e} 及 i_{qq}^{e} 作为激励，来得到用于大系统动态分析的有功/无功电流-内电势特性。第 2.1 节中是以端电压坐标下的有功/无功电流为激励，因此需要通过坐标变换，将端电压位置上的有功/无功电流 i_{dd}^{v} 及 i_{qq}^{v} 转换为设备内电势位置上的有功/无功电流 i_{dd}^{e} 及 i_{qq}^{e}，它们之间的数学约束为

$$i_d^{\mathrm{v}}+\mathrm{j}i_q^{\mathrm{v}}=\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\theta_{\mathrm{e}}-\theta_{\mathrm{v}})}(i_d^{\mathrm{e}}+\mathrm{j}i_q^{\mathrm{e}}) \tag{10}$$

式中，θ_{v} 和 θ_{e} 分别为端电压 v_{t} 和内电势 e 的相位。

对图 3(d)进行变换，可以得到图 4 所示的框图，其中环节 S8 的关系如式(10)所示。可以看出，此

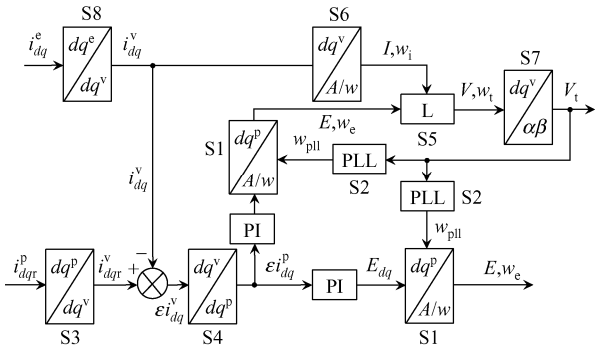


图 4 内电势坐标下的有功/无功电流-内电势特性

Fig. 4 Active/reactive current-internal voltage characteristics in internal voltage coordinate

时框图的激励已转换为内电势坐标下的有功/无功电流 i_{dd}^{e} 及 i_{qq}^{e}，输出为内电势的幅值和频率，所得关系即为内电势坐标下的有功/无功电流-内电势特性。

3　电流控制的端电压-有功/无功电流特性

3.1　电流控制 2 种特性描述的等价性

上述有功/无功电流-内电势特性是认识变换器设备参与大系统动态所必需的视角，但在很多场合，研究中关心的是单机设备对电网的影响，即在电网端电压幅值和频率波动时将如何调节输出至电网的功率，因此应以端电压幅值和频率激励-有功/无功电流响应来描述变换器电流控制。该视角不能反映系统动态时变换器设备的有功/无功功率及内电势幅值和频率间的连续调节过程，因而不能用于大系统分析，但却可以从单机并网视角分析变换器设备对所并入电网的影响。

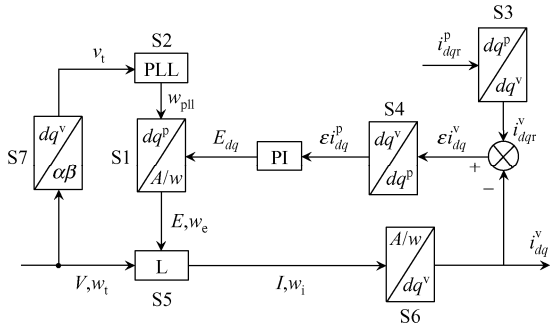
如前文所分析，网侧电流和端电压二者间是冗余的，因此选择端电压或电流作为设备激励本质上是等价的，因为二者均可以完整且独立地反映设备外部的扰动对该设备自身的激励作用。当选择电流作为激励时，端电压和内电势被唯一确定；当选择端电压作为激励时，电流和内电势也可以被唯一确定。因此，有功/无功电流-内电势特性与端电压-有功/无功电流特性在本质上是等价的，只是服务于不同的分析目标选择了不同的电气量作为设备的激励。

3.2　端电压独立决定有功/无功电流的激励-响应关系

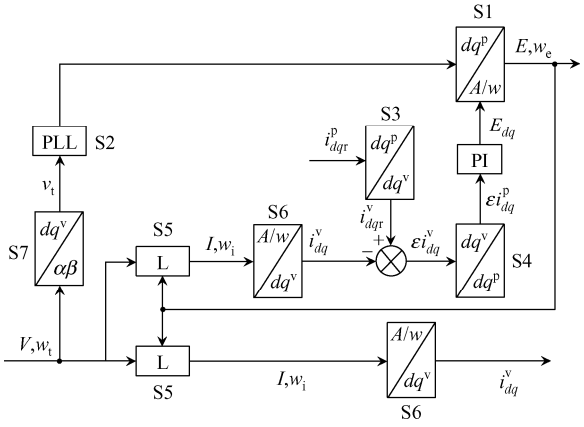
该视角是以端电压作为接口分析变换器外特性，因此输出应选择端电压坐标下的有功/无功电流。根据图 3，已经得到了端电压坐标下的有功/无功电流-内电势特性。在图 3(b)所示的设备控制约束的基础之上，增加电感 L 所反映的电路约束，即内电势幅值和频率与端电压幅值和频率在电感关系下形成电流幅值和频率的关系，可表示为

$$LI\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi_{\mathrm{i}}+\mathrm{j}\int w_{\mathrm{i}}\mathrm{d}t}=\int[E\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\varphi_{\mathrm{e}}+\int w_{\mathrm{e}}\mathrm{d}t)}-V\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\varphi_{\mathrm{t}}+\int w_{\mathrm{t}}\mathrm{d}t)}]\mathrm{d}t \quad (11)$$

综上可得到同时包含变换器控制约束及变换器电路拓扑约束的框图，如图 5(a)所示，其中电感约束表示为环节 S5。由于锁相电流的参考值取恒定值，所以框图的唯一输入为端电压的幅值和频率，输出为端电压位置上的有功/无功电流。



(a)端电压激励-电流响应框图



(b)端电压唯一决定内电势及电流的关系

图 5　电流控制的端电压-有功/无功电流特性

Fig. 5 Terminal voltage-active/reactive current characteristics under current control

图 5(a)中，作为输出的有功/无功电流又反馈回框图内部，所引入的闭环使得有功/无功电流唯一取决于端电压幅值和频率的机制并不直观。对图 5(a)进行等效变换，所得的图 5(b)中在变换器控制约束和电路拓扑约束的共同作用下，当端电压幅值和频率激励给定后，变换器输出的内电势幅值和频率及交流侧有功/无功电流同时被确定。内电势坐标下的有功/无功电流-内电势特性，以及端电压坐标下的端电压-有功/无功电流特性都是在端电压坐标下的有功/无功电流-内电势特性的基础上

等效得到的。对应于框图，即图4和图5(b)都是在图3(b)基础上通过框图等效变换得到，且均由相同环节S1~S7构成，因此从框图的形成方式和环节构成上，也可以认识到2种特性的等效性。

4 仿真分析

4.1 电流控制2种特性间等效性的仿真验证

本节使用MATLAB/Simulink软件搭建仿真，以单台并网变换器设备并入无穷大电网为例，来辅助说明电流控制2种特性之间的等效性。仿真电路结构如图6所示，用于模拟简单的单机系统场景。其中，变换器设备VSC通过滤波电感L_f及电容C_f接入无穷大电网。所仿真的单机系统中，容量基准值S_{base}=100 kVA，电压基准值V_{base}=35 kV，频率基准值f_{base}=50 Hz；电流控制器dq轴参数对称，其比例参数k_p=1.8，积分参数k_i=45，锁相环比例参数k_{pp}=45，积分参数k_{ip}=1 200；滤波电感L_f=0.2 p.u.，滤波电容C_f=0.06 p.u.，线路电感L_g=0.3 p.u.，线路电阻R_g=0.1 p.u.。

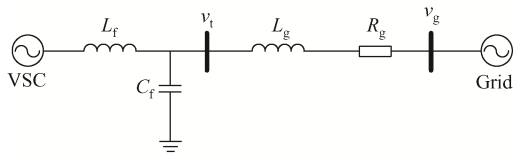


图6 仿真系统的电路结构

Fig. 6 Circuit structure of simulation system

通过本文建模所得到的端电压-有功/无功电流特性如图5(b)所示，简称其为特性1；与其等效的有功/无功电流-内电势特性如图4所示，简称其为特性2。

等效性验证思路为，首先说明特性1的有效性，即变换器端电压幅值和频率波动时，实际系统有功/无功电流的变化规律应符合特性1在相应端电压幅值和频率激励下的有功/无功电流响应的变化规律。随后验证2种特性的等效性，特性2由特性1等效得到，因此实际系统中有功/无功电流及内电势幅值和频率间的关系应满足特性2的约束。在t=10 s时，电网电压v_g上发生5°的相位扰动，在仿真中提取变换器设备端电压的幅值和频率，如图7(a)和(b)所示，将其作为特性1的输入，将得到的端电压位置有功/无功电流输出和仿真结果对比，如图7(c)和(d)所示。可以看出，实际系统与特性1所反映的有功/无功电流变化规律一致，故所得到的端电压-有功/无功电流特性可有效反映实际动态过程。

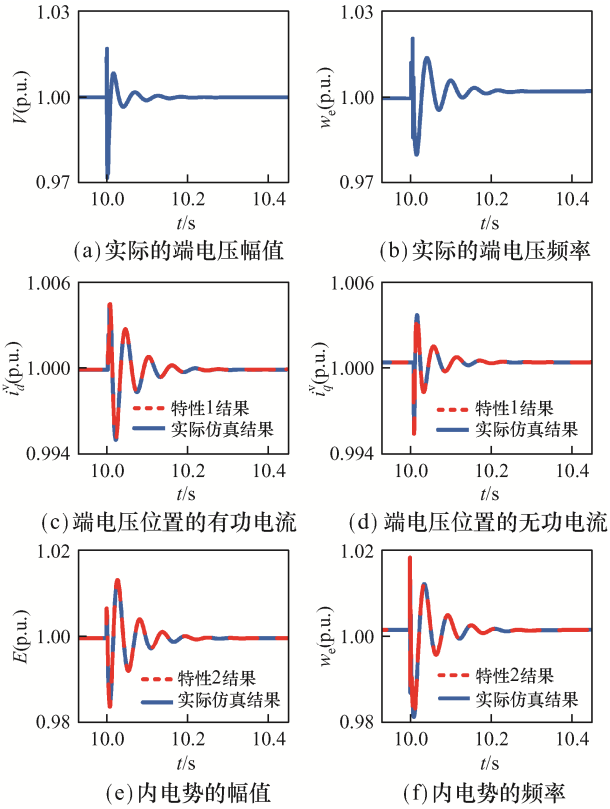


图7 仿真电路及2种特性的动态响应结果

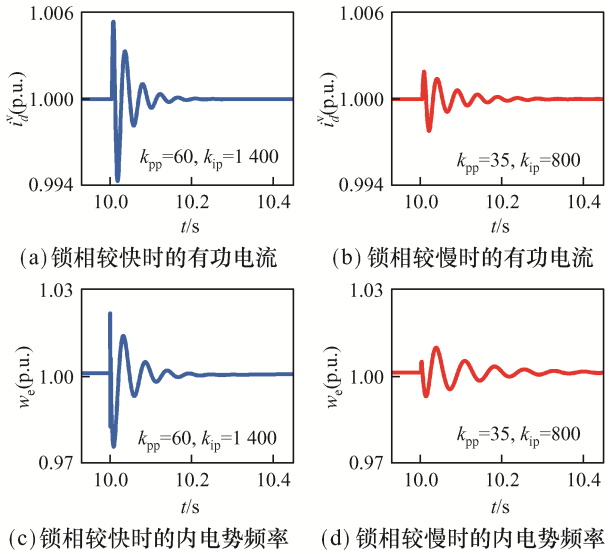
Fig. 7 Dynamic response results of simulation circuit and two kinds of characteristics

从仿真实例中提取内电势位置的有功/无功电流作为特性2的输入，所得到的内电势幅值和频率变化如图7(e)和(f)所示。实际系统在该动态过程中的变换器内电势幅值和频率变化规律也在图7(e)和(f)中给出，可以看出，实际系统中的有功/无功电流-内电势关系符合特性2所描述的约束，因此2种特性是等效的，均与实际系统的响应结果相一致。

4.2 锁相环参数对电流控制特性的影响

首先分析锁相参数对端电压-有功/无功电流

特性的影响，取图7(a)和(b)中端电压幅值和频率波形作为端电压-有功/无功电流特性的激励，图 8(a)和(b)反映了锁相控制器取不同 PI 参数时的有功电流响应。对比可知，在同样的端电压幅值和频率激励下，当锁相环控制带宽较大时，有功电流将以更快速度响应于端电压幅值和频率的变化；而当锁相控制带宽较小时，有功电流以较慢的速度响应。在端电压幅值和频率激励下的无功电流响应也具有相似的响应规律，不再赘述。



(a) 锁相较快时的有功电流　(b) 锁相较慢时的有功电流

(c) 锁相较快时的内电势频率　(d) 锁相较慢时的内电势频率

图 8　不同锁相控制参数下 2 种特性的响应结果

Fig. 8 Response results of two kinds of characteristics under different phase-locked control parameters

同样可以分析锁相参数对有功/无功电流-内电势特性的影响，将图 7(c)和(d)中端电压位置的有功/无功电流变换为内电势位置的有功/无功电流，作为有功/无功电流-内电势特性的激励，图 8(c)和(d)反映了在锁相控制器取不同 PI 参数时对应的内电势频率响应。对比可知，在相同的有功/无功电流激励下，当锁相环控制带宽较大时，内电势频率将以更快的速度响应于有功/无功电流的变化；而当锁相控制带宽较小时，内电势频率响应于有功/无功电流的速度较为平缓。

此外，由于本文所得到的 2 种电流控制特性分别表征了变换器电流控制参与大系统动态以及在单机并网场景下的设备角色，因此后续工作可以基于对这 2 个激励-响应关系的认识去进一步归纳电流控制特性的特征及影响因素。在此基础上，亦有助于分析电流控制特性在特定运行场景下对系统稳定性的影响。

5　结论

针对变换器电流控制，本文提出了适用于大系统动态分析的有功/无功电流-内电势特性，以及适用于从单机视角认识设备对电网影响的端电压-有功/无功电流特性，在此基础上说明并验证了 2 种特性的等效性，通过仿真初步探究了锁相参数对电流控制特性的影响。

首先，服务于不同分析目标，本文提出了变换器电流控制的 2 种描述方法。明确了服务于大系统动态分析，必须以有功/无功电流-内电势特性描述变换器电流控制，以反映其在系统动态过程中的角色；同时，明确了服务于分析单机设备对电网的影响，应以端电压-有功/无功电流特性描述变换器电流控制。

其次，本文说明并验证了 2 种特性间的等效性。指出了电流控制中有功/无功电流和端电压之间的冗余关系，二者均可完整且独立地反映外部扰动对于变换器设备的激励作用，从而解释了以有功/无功电流或端电压作为激励在本质上是等效的，并进一步通过仿真对2 种特性间的等效性进行了验证。

最后，本文初步分析了锁相参数对电流控制特性的影响，表现为锁相环控制带宽较大时，内电势频率更快速地响应有功/无功电流激励的变化，同时有功电流更快速地响应端电压幅值和频率激励的变化；而锁相环控制带宽较小时则反之。此外，在本文所得到的电流控制特性的基础上，后续工作可以进一步归纳电流控制特性的特征及其影响因素，并分析电流控制特性在特定运行场景下对系统稳定性的影响。

参考文献：

[1]　袁小明，程时杰，胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度

电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
Yuan Xiaoming, Cheng Shijie, Hu Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154, 5395. (in Chinese)

[2] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274-1289.
Li Zixin, Gao Fanqiang, Zhao Cong, et al. Summary of research on power electronic transformer technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289. (in Chinese)

[3] 周国华, 冷敏瑞, 李媛, 等. 开关变换器及其控制环路的建模综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 183-199, 386.
Zhou Guohua, Leng Minrui, Li Yuan, et al. A review on modeling of switching converters and their control loops [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 183-199, 386. (in Chinese)

[4] 袁小明, 何维. 动态过程的幅频调制统一本质与系统稳定问题分类及新能源发电构网能力创新[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 1-9.
Yuan Xiaoming, He Wei. Amplitude/frequency as prerequisites of operation and thus classification of stability problems and capability opportunities for new generations [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 1-9. (in Chinese)

[5] Middlebrook R D, Ćuk S. A general unified approach to modelling switching-converter power stages [J]. International Journal of Electronics, 1977, 42(6): 521-550.

[6] Wang Caisheng. Modeling and control of hybrid wind/photovoltaic/fuel cell distributed generation systems [D]. Bozeman: Montana State University, 2006.

[7] Wen Bo, Boroyevich D, Burgos R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.

[8] Cespedes M, Sun Jian. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.

[9] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
Zhang Liying, Ye Tinglu, Xin Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9. (in Chinese)

[10] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华, 等. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 10-14.
Chi Yongning, Wang Weisheng, Liu Yanhua, et al. Impact of large scale wind farm integration on power system transient stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 10-14. (in Chinese)



付天照

作者简介：

付天照(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：电力电子化电力系统运行与控制。E-mail：17853141908@163.com。

袁小明(1966—)，男，中国电源学会高级会员，通信作者，博士，教授。研究方向：可再生能源发电设备及其控制，直流输电系统及其控制，电力电子化电力系统安全稳定行分析及其控制。E-mail：yuanxm@hust.edu.cn。

龚轩(1995—)，男，博士研究生。研究方向：电力电子化电力系统运行与控制。E-mail：gong_xuan@hust.edu.cn。

(责任编辑：耿越)