DOI:10.12177/emca.2026.231 文章编号:1673-6540(2026)10-1039-14 中图分类号:TM 351 文献标志码:A

基于虚拟同步机的储能变流器并网预同步控制技术

王恒宜[1,2*]

[1. 阳光电源(上海)有限公司,上海 201107;
2. 上海大学 机电工程与自动化学院 电气工程系,上海 200444]

Grid-Forming Pre-Synchronization Control for Power Conversion System Based on Virtual Synchronous Generator

Wang Hengyi[1,2*]

[1. Sungrow (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201107, China;
2. Department of Electrical Engineering, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China]

Abstract: [Objective] To address the transition issue during the switching process of an power conversion system from off-grid mode to grid-connected mode, this paper studies a pre-synchronization strategy based on virtual synchronous generator (VSG) control. **[Methods]** Detailed dynamic mathematical models were established for the off-grid operation mode, the pre-synchronization control mode, and the grid-connected operation mode, respectively. Before the grid-connection transition, a pre-synchronization link was introduced to compensate for the voltage amplitude and phase deviations between the inverter output and the grid bus. After incorporating the pre-synchronization proportional-integral (PI) regulator into the original off-grid model, the overall order of the system's mathematical model was increased from the original second order to third order. The Routh stability criterion was applied to analyze the system stability, and feasible selection guidelines for the control parameters in the pre-synchronization control loop were provided. Furthermore, the root locus method was adopted to investigate the variation of the closed-loop system's root locus with key parameters after the addition of pre-synchronization control. The considered parameters included virtual inertia, damping coefficient, and the proportional and integral gains of the pre-synchronization control. By analyzing the intersection points of the root loci with the imaginary axis and the movement trends of the dominant pole pairs, the influences of each parameter on system stability and response speed were systematically summarized. **[Results]** The research results indicated that during the pre-synchronization control process, the inertia time constant of the VSG had a relatively limited impact on the response speed. In contrast, the damping coefficient, along with the proportional and integral gains of the pre-synchronization PI controller, constituted the key factors determining the quality of the system's dynamic response. The simulation scenarios systematically covered typical operating conditions under different combinations of virtual inertia, damping coefficients, and pre-synchronization PI parameters. The simulation results not only confirmed that the virtual inertia had a weak influence on response speed, but also quantitatively demonstrated the regulation effects of damping and PI parameters on response time, overshoot, and other performance metrics. **[Conclusion]** The theoretical models and analytical methods established in this paper provide a theoretical basis and practical guidance for the engineering parameter tuning of smooth grid-connection control strategies for microgrids.

Key words: virtual synchronous generator; pre-synchronization; virtual inertia; damping coefficient

摘 要:【目的】针对储能变流器由离网模式切换至并网模式过程中的过渡问题,本文研究了一种基于虚拟同步机(VSG)控制的预同步策略。**【方法】**对离网运行模式、预同步控制模式以及并网运行模式分别建立了详尽的动态数学模型。在并网切换前,需引入预同步环节,用以补偿逆变器输出与电网母线之间的电压幅值及相位偏差。

基金项目: 国家自然基金(52007111)
National Natural Science Foundation of China (52007111)

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

将预同步比例积分(PI)调节器引入原离网模型后,系统整体的数学模型阶次由原有的二阶上升为三阶。应用劳斯稳定判据对系统进行稳定性分析,并给出预同步控制环节中控制参数可行选取准则。进一步地,采用根轨迹法研究了加入预同步控制之后闭环系统根轨迹随关键参数变化的规律。所考虑的参数包括虚拟惯量、阻尼系数以及预同步控制的比例和积分增益等,通过分析根轨迹与虚轴的交点以及主导极点对的移动趋势,系统地归纳了各参数对系统稳定性、响应速度的影响。【结果】研究结果表明,在预同步控制过程中,VSG 的惯性时间常数对响应速度的影响相对有限;阻尼系数以及预同步 PI 控制器的比例增益与积分增益,则构成了决定系统动态响应品质的关键因素。仿真工况系统性地覆盖了不同虚拟惯量、阻尼系数及预同步 PI 参数组合下的典型运行场景。仿真结果不仅印证了虚拟惯量对响应速度的影响较弱,也定量展示了阻尼系数和 PI 参数对响应时间、超调量等调控效果。【结论】本文所建立的理论模型与分析方法可为微电网平滑并网控制策略的工程参数整定提供理论依据与实践指导。

关键词: 虚拟同步机;预同步;虚拟惯量; 阻尼系数

0 引言

双高电力系统中,传统同步发电机占比持续下降导致系统的惯量与短路容量水平显著降低,频率与电压支撑能力面临严峻挑战。为应对这一趋势,基于构网型控制的储能变流器(Power Conversion System,PCS)因其能够模拟同步发电机运行机理,主动为系统提供惯性与阻尼支撑,已成为保障新型电力系统安全稳定运行的关键设备[1-5]。在微电网这类场景中,构网设备需应对离网与并网模式之间的平滑转换,这直接关系到微电网的供电可靠性、电能质量以及系统运行的灵活性[6-8]。

特别地,构网型 PCS 储能变流器的离网转并网技术主要形成两种技术路线:一是控制模式切换法,在离网模式下采用 V/f 控制以建立稳定的电压和频率,在并网模式下切换为 P/Q 控制以实现功率输出[9-11];二是非控制模式切换法,以虚拟同步发电机控制和下垂控制为代表,在离网和并网两种模式下采用统一的控制结构,已成为当前研究的主流[12-17]。在构网型 PCS 的预同步技术领域,研究围绕如何消除变流器输出电压与电网电压之间的幅值、频率及相位偏差展开。由于获取电网电压的相位信息是实现平滑切换的前提,因此也有文献提出基于改进型锁相环(Phase-Locked Loop,PLL)的预同步控制方法[18-21]。然而预同步控制的性能不仅取决于相位检测的精度,还受到预同步调节器参数与虚拟同步机(Virtual Synchronous Generator,VSG)关键控制参数的显著影响。这类研究侧重于相位的锁定,对 VSG 关键控制参数影响预同步过程的机理关注不足。

文献[22-23]在不加入额外预同步环节的前提下,提出了基于 VSG 的自适应惯量/阻尼预同步控制策略。尽管该策略在理论上能够提升动态性能,但电网运行遵循可预测性和确定性的基本原则,调度机构更倾向于采用固定参数控制方案以确保系统行为的可预期性。固定参数控制方案因其行为确定、易于验证而长期占据工程主导地位[24-25]。文献[26-27]在离网转并网策略中引入额外的预同步控制单元,通过调整变流器输出电压的幅值、频率和相位,使其与电网电压保持一致。虽然文献[26]提供了详尽的仿真与试验验证,但其控制框图未对引入预同步环节后的高阶系统[26]、分段非线性系统[27]进行建模与分析。这导致预同步参数的影响评估仅限于仿真或试验波形层面,缺乏针对系统稳态及动态性能的定性理论解析,难以为控制参数整定提供系统性的设计依据。文献[28]提出了频率-相位双环预同步方案,其频率环采用比例积分(Proportional-Integral,PI)控制器,相位环采用纯积分控制器。然而,该方案的参数整定与稳定性分析仅基于相位环和频率环独立的传递函数,未能建立能够反映环间耦合及微电网整体动态的闭环系统模型。

针对上述问题,本文研究一种基于 VSG 转子相位差闭环的预同步控制策略:以虚拟转子与电网电压的相位差为反馈量,通过 PI 调节器输出角频率补偿量并叠加至 VSG 的频率给定值;幅值预同步采用简化处理,直接将虚拟内电势幅值切换至电网电压幅值。区别于现有文献侧重算法层面的描述,本文的核心贡献在于对该类预同步系统建立了涵盖离网、并网及预同步模式的小信号模型,推导了开环与闭环传递函数,并借助劳斯稳定判据和根轨迹法给出预同步系统稳定条件及控制参数设计准则,最后通过仿真验证了所提参数设计方法的有效性。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

1 整体系统介绍

如图 1 所示，整体系统包含三相储能系统、三相负载、电网侧、三相开关 Q_1（用于负载投切）和 Q_2（位于电网侧）。离网时储能系统只连接三相负载，即 Q_1 闭合、Q_2 断开；并网时 Q_2 闭合。

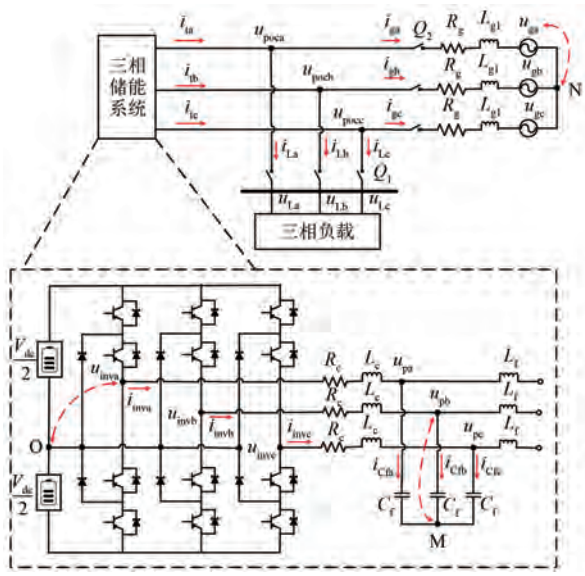


图 1 基于中点箝位 PCS 的并离网系统

Fig. 1 Grid-connected and off-grid system based on neutral-point-clamped PCS

图 1 中，C_f 为滤波电容；R_c、L_c 分别为逆变器侧电阻、电感；L_{gl}、R_g 分别为网侧电感、电阻；u_{invx}、i_{invx} 分别为三相储能逆变器输出电压、电流（x=a，b，c）；u_{px}、i_{Cfx} 分别为滤波电容电压、流经滤波电容的电流；u_{gx}、i_{gx} 分别为电网电压、电流；u_{Lx}、i_{Lx} 分别为负载电压、电流；i_{tx} 为三相储能系统的输出端口电流；u_{pccx} 为储能系统接入电网的接入点电压；L_f 为滤波电感。

令 $\boldsymbol{u}_{inv}^{dq}=[u_{invd}\quad u_{invq}]^T$，$\boldsymbol{u}_p^{dq}=[u_{pd}\quad u_{pq}]^T$，$\boldsymbol{i}_{inv}^{dq}=[i_{invd}\quad i_{invq}]^T$，$\boldsymbol{i}_t^{dq}=[i_{td}\quad i_{tq}]^T$。无论是在并网还是离网状态下，图 1 的储能系统在 dq 坐标系下的数学模型均满足：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{i}_{inv}^{dq}=\begin{bmatrix}-\dfrac{R_c}{L_c} & \omega\\ \omega & -\dfrac{R_c}{L_c}\end{bmatrix}\boldsymbol{i}_{inv}^{dq}+\frac{1}{L_c}(\boldsymbol{u}_{inv}^{dq}-\boldsymbol{u}_p^{dq}) \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{u}_p^{dq}=\begin{bmatrix}0 & \omega\\ \omega & 0\end{bmatrix}\boldsymbol{u}_p^{dq}+\frac{1}{C_f}(\boldsymbol{i}_{inv}^{dq}-\boldsymbol{i}_t^{dq}) \tag{2}$$

2 基于 VSG 的并网预同步控制策略

本文 PCS 在并网和离网状态都采用 VSG 控制策略。在收到预同步指令后，PCS 进入预同步阶段，此时变流器仍保持离网运行状态，Q_1 闭合，Q_2 断开。预同步控制的目的是主动调节变流器输出电压的幅值与频率，使其逼近电网电压参数。当变流器电压和电网电压的相位差和幅值差小于一定阈值，Q_2 闭合，预同步控制退出，变流器由离网转并网。

2.1 VSG 控制策略

图 2 展示了 VSG 的控制框图，包括功率外环控制以及电压电流内环控制。图 2（a）中，θ_p^* 为电压相角参考值；U_p^* 为电压幅值参考值。图 2（b）中，k_{pu}、k_{iu} 分别为电压环比例、积分系数；k_{pi}、k_{ii} 分别为电流环比例、积分系数。经过电压生成及坐标变换模块后，得到 dq 轴电压给定信号，对应于图 2（b）内环控制的电压参考值。内环控制采用双 PI 控制策略，在实际系统中，双 PI 控制策略通常需要引入虚拟阻抗（图中 L_v 和 R_v 为虚拟电感和电阻）。虚拟阻抗的引入能够带来多重益处，包括增强系统稳定性、调节电压与频率、提升故障穿越能力、改善电能质量以及降低功率耦合效应等[29]。

2.1.1 有功和无功外环控制

VSG 有功控制的数学模型为

$$\begin{cases}J\omega_N\dfrac{\mathrm{d}\omega_p}{\mathrm{d}t}=P_m-P_e-D\omega_N(\omega_p-\omega_{ref})\\ P_m=P_{ref}+k_\omega(\omega_{ref}-\omega_p)\\ \dfrac{\mathrm{d}\theta_p^*}{\mathrm{d}t}=\omega_p\end{cases} \tag{3}$$

式中：P_e、P_{ref} 分别为变流器实际有功、有功参考值；P_m 为经过频率下垂修正后的有功功率指令值；ω_N 为额定角频率；ω_p、ω_{ref} 分别为滤波电容处的角频率及其参考值；J、D 分别为转动惯量、阻尼系数；k_ω 为一次调频系数。

VSG 无功控制的模型为

$$\begin{cases}k_{iq}\dfrac{\mathrm{d}U_p^*}{\mathrm{d}t}=Q_m-Q_e\\ Q_m=Q_{ref}+k_u(U_{ref}-U_p^*)\end{cases} \tag{4}$$

式中：Q_e、Q_{ref} 分别为变流器实际无功、无功参考

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

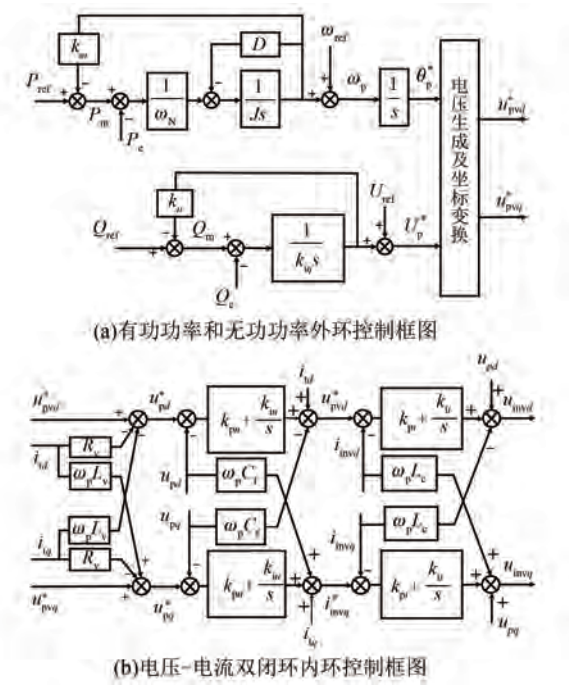


图 2 VSG 控制框图

Fig. 2 Block diagram of VSG control

值;Q_m 为经过电压下垂修正后的无功功率指令值;U_{ref} 为滤波电容处电压幅值参考值;k_{iq} 为无功-电压励磁系数;k_u 为一次调压系数。

2.1.2 电压-电流内环控制

内环控制旨在使变流器系统跟踪外环生成的电压参考值,其常见形式包括单电压环、电压-电流双闭环以及虚拟导纳-电流环[30]。由于单电压环控制中缺乏电流控制,极容易造成过流,因此后两种应用更为广泛。电压-电流双闭环凭借电压 PI 控制器可获得最优的电压跟踪性能;而虚拟导纳-电流环因缺少电压环,在离网带载工况下易出现电压偏差,需引入基于输入的复合控制等策略以提升稳态精度[31]。如图 2(b)所示,本研究采用电压-电流双闭环的内环控制方式。

2.2 预同步控制策略

在预同步过程中,需要对给定频率 ω_{ref} 和给定电压幅值 U_{ref} 进行修正,如图 3 所示。图中,θ_p^*、θ_g 分别为 VSG 和电网电压的相位,两者差值定义为功角 δ。该功角经过相位预同步 PI 控制器调节后,输出为 $\Delta\omega_{ps}$。

$$\begin{cases}\omega_{ref}=\omega_N-\Delta\omega_{ps}\\ \Delta\omega_{ps}=k_{p\theta}\delta+k_{i\theta}\int\delta dt\\ \delta=\theta_p^*-\theta_g\end{cases}\tag{5}$$

式中:$k_{p\theta}$、$k_{i\theta}$ 分别为相位预同步 PI 控制的比例、积分系数。

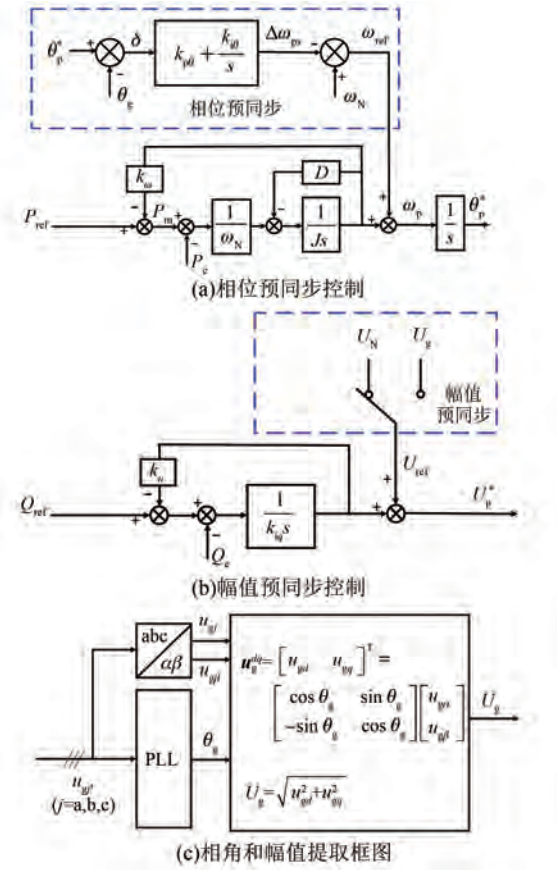


图 3 预同步控制框图

Fig. 3 Block diagram of pre-synchronization control

如图 3(b)所示,加入幅值预同步之后:

$$U_{ref}=\begin{cases}U_g,\ \text{预同步,并网}\\ U_N,\ \text{离网}\end{cases}\tag{6}$$

式中:U_g、U_N 分别为电网电压幅值、变流器额定电压幅值。

在实际 PCS 产品中,逆变器额定电压等级与所接入电网电压等级通常一致,静态幅值偏差较小。并网瞬间将幅值参考直接切换至电网电压,不会产生显著冲击暂态,故而在本文中未采用幅值 PI 控制。当 VSG 的频率和电压幅值与电网趋于一致,此时再闭合开关 Q_2,确保并网瞬间不产生显著冲击。

图 3(c)给出了电网电压相角 θ_g 和幅值 U_g 的提取策略:采用 PLL 提取相角;等幅值 Park 变换下,电网电压幅值等于 d、q 分量平方和的平方根。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

3 稳定性分析及关键参数影响分析

图 4 给出了预同步系统在小信号模型下的整体控制框图。预同步 PI 控制器在原有系统的积分环节处引入负反馈 PI 环节，该反馈环节只在预同步过程中有效。本文 PCS 的三个阶段：(1)离网阶段，未接收到预同步指令，预同步 PI 环节未切入系统；(2)预同步阶段，PCS 仍离网运行，但接收到了预同步指令，投入预同步 PI 环节；(3)并网阶段，预同步过程结束，预同步 PI 退出，储能系统工作在并网状态。

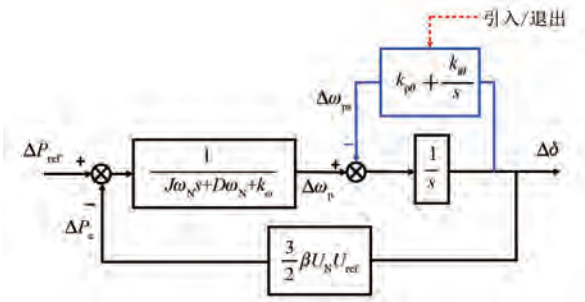


图 4 预同步整体控制框图

Fig. 4 Overall control block diagram of pre-synchronization

3.1 稳定性分析

在离网、预同步以及并网这 3 个阶段系统都应保持稳定。在离网和并网阶段，不含预同步 PI 环节的系统前向通道传递函数为

$$G(s)=\frac{1}{J\omega_N s+(D\omega_N+k_\omega)}\cdot\frac{1}{s} \tag{7}$$

反馈通道传递函数为

$$H(s)=\frac{3}{2}\beta U_{ref}U_N \tag{8}$$

在离网阶段 $\beta=\beta_{off}$，在并网阶段 $\beta=\beta_{on}$。其中，β_{on} 和 β_{off} 的表达式为

$$\begin{cases}\beta_{on}=\dfrac{\omega_N(L_f+L_{g1}+L_v)}{(R_{g1}+R_v)^2+\omega_N^2(L_f+L_{g1}+L_v)^2}\\ \beta_{off}=\dfrac{\omega_N(L_f+L_v)}{R_v^2+\omega_N^2(L_f+L_v)^2}\end{cases} \tag{9}$$

系统离网和并网状态下的闭环传递函数为

$$\frac{\Delta\delta(s)}{\Delta P_{ref}(s)}=\frac{1}{J\omega_N s^2+(D\omega_N+k_\omega)s+1.5\beta U_N U_{ref}} \tag{10}$$

由式(10)可知，只要 J,D,k_ω 大于 0，则离网系统和并网系统稳定，二者的区别在于并网和离网的 β 值不同。

在预同步阶段，变流器收到预同步指令，预同步 PI 环节被加入到系统中，前向通道传递函数为

$$G'(s)=\frac{1}{J\omega_N s+(D\omega_N+k_\omega)}\cdot\frac{s}{s^2+k_{p\theta}s+k_{i\theta}} \tag{11}$$

此时，闭环传递函数为

$$\Phi'(s)=\frac{\Delta\delta(s)}{\Delta P_{ref}(s)}=\frac{G'(s)}{1+G'(s)H(s)}=\frac{N(s)}{D(s)} \tag{12}$$

$$N(s)=s \tag{13}$$

$$D(s)=as^3+bs^2+cs+d \tag{14}$$

$$\begin{cases}a=J\omega_N\\ b=J\omega_N k_{p\theta}+D\omega_N+k_\omega\\ c=J\omega_N k_{i\theta}+(D\omega_N+k_\omega)k_{p\theta}+\dfrac{3}{2}\beta_{off}U_{ref}U_N\\ d=(D\omega_N+k_\omega)k_{i\theta}\end{cases} \tag{15}$$

相比未引入预同步 PI 时的二阶系统，引入预同步 PI 控制后的系统为三阶。根据劳斯稳定判据，若要使该三阶闭环系统稳定，式(15)的各系数 a,b,c,d 均大于 0，且还需要满足：

$$bc>ad \tag{16}$$

由于本文并未采用自适应参数控制方法，控制参数在离网、预同步期间以及并网工况下保持一致，因此所设计参数需保证式(10)和式(12)所示的闭环系统稳定。

3.2 关键参数影响分析

为分析关键参数对系统稳定性和动态性能的影响，进一步采用根轨迹法对预同步系统进行分析。系统参数如表 1 所示。

3.2.1 虚拟惯量的影响

图 5 所示为虚拟惯量 J 从 2 s 到 20 s 均匀变化引起的根轨迹以及零点变化图。图中，×为特征根，是根轨迹的起点；○为零点，且令零点始终在原点。

由图 5 可知，三个根均在左半平面。其中，最左边的根随 J 的增大向右移动，中间的特征根随 J 的增大略微向左移动，最右边的特征根和零点相近，可以对消。当 J 增大时，最左根仍离虚轴较

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

远,主导极点实为中间的特征根,其位置变化较小且不能与零点对消,因此可以预判 J 的变化对预同步的快速性影响甚微。

表 1　系统参数

Tab. 1　System parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
P_N/MW	1.575	U_N/V	514
V_{dc}/V	1 500	R_c/mΩ	73
L_c/uH	70	R_g/mΩ	8
L_f/uH	76	ω_N/(rad·s^{-1})	314
C_f/uF	600	J/s	17.2
D	1 472	R_v/mΩ	31.5
L_v/uH	50	k_w	10 027
k_u	32	k_{iq}	3 635
k_{pu}	0.8	k_{iu}	532
k_{ii}	690	k_{pi}	0.7
$k_{p\theta}$	1.5	$k_{i\theta}$	0.25

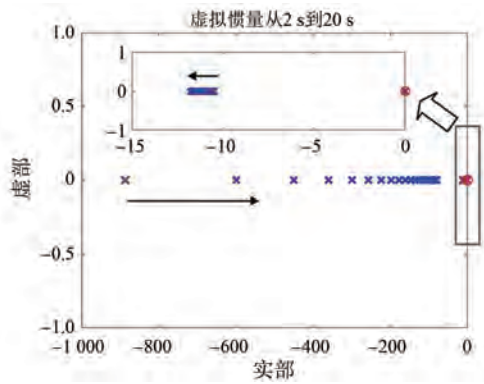


图 5　J 均匀变化时的根轨迹与零点

Fig. 5　Root locus and zeros with uniform variation of J

3.2.2　阻尼系数的影响

图 6 给出了阻尼系数 D 增大时的根轨迹和零点,其他参数如表 1 所示。由图 6 可知,最右边的特征根与零点十分接近,可以对消。随着 D 增大,系统的主导特征根会变成实根,其中一个实根往左,另一个往右,且随着 D 的增大,两个根距离越来越远。由于快速性由右移的实根决定,可预判随着阻尼系数 D 的增大,预同步速度将变慢。

3.2.3　比例系数的影响

当预同步 PI 控制的比例系数 $k_{p\theta}$ 在[-10,10]范围内均匀变化时,根轨迹和零点如图 7 所示。由图 7 可知,最左边的特征根远离虚轴且对

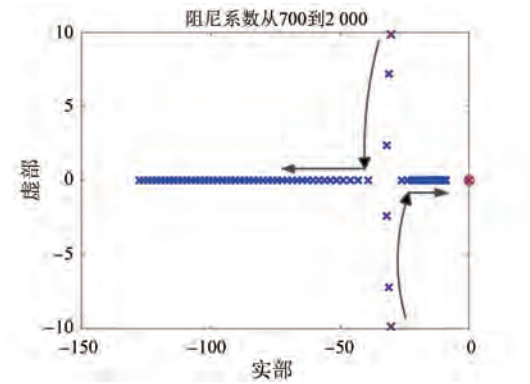


图 6　D 均匀变化时的根轨迹与零点

Fig. 6　Root locus and zeros with uniform variation of D

$k_{p\theta}$ 的变化不敏感。而当 $k_{p\theta}$ 在该区间内变化时,右面两个极点经历了一对正实根→共轭正根→共轭负根→一对负实根的变化过程。这两个负实根一个向左移动,一个向右移动。当比例系数 $k_{p\theta}$ 越大,最右边的极点和零点越接近,近似对消,动态性能由中间的极点主导。随着比例系数增大,中间极点左移,可预判在系统稳定的前提下,预同步速度将略有提升。

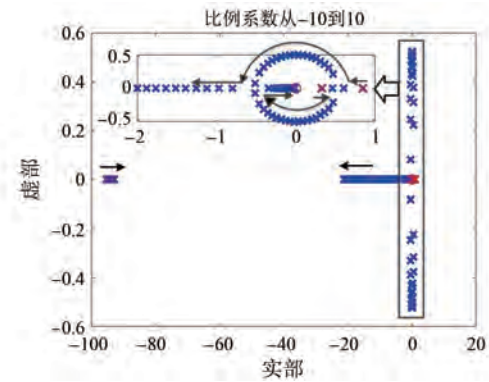


图 7　$k_{p\theta}$ 变化时的根轨迹和零点

Fig. 7　Root locus and zeros with variation of $k_{p\theta}$

3.2.4　积分系数的影响

当 $k_{i\theta}$ 在[-10,40]范围内均匀变化时,根轨迹和零点如图 8 所示。如图 8 所示,当 $k_{i\theta}$ 在该范围内变化时,最左边的根远离虚轴且几乎保持不变。离虚轴近的两根在 $k_{i\theta}$ 变大时先相互靠拢,随后分裂为共轭复根。由局部放大图可知当 $k_{i\theta}$ 为负数时,存在位于右半平面的极点,系统失稳,这与式(15)的理论分析一致。这表明,在系统稳定的前提下,预同步速度随 $k_{i\theta}$ 增大而加快;当 $k_{i\theta}$ 达到一定值后,预同步速度几乎不变。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

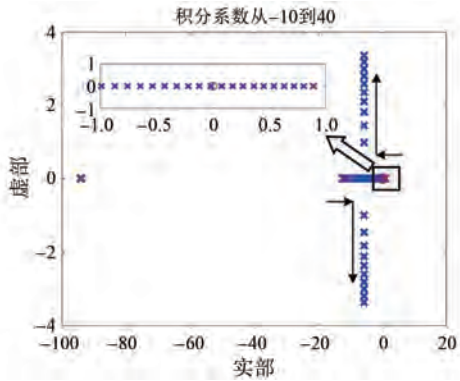


图 8　$k_{i\theta}$ 均匀变化时的根轨迹与零点

Fig. 8　Root locus and zeros with uniform variation of $k_{i\theta}$

4　仿真分析

为验证所提理论，基于 Matlab/Simulink 搭建了基于中点箱位的离网/并网切换仿真模型。本文设置了以下对照仿真：(1) J 取 17.2 s 和 4 s；(2) D 取 1 472 和 700；(3) $k_{p\theta}$ 取 1.5、0.02，从 −10→1.5 阶跃变化；(4) $k_{i\theta}$ 取 0.25、15，从 −10→10 阶跃变化。系统初始 $t=0$ s 时处于离网状态，$t=1$ s 时下发预同步指令以投入预同步控制。当检测到功角小于 10°，变流器进入并网状态，预同步 PI 控制器退出。阈值 10°源于工程经验，旨在有效平衡并网冲击电流与预同步调节时间，在桂林某电站已得到应用。变流器离网和并网时有功和无功功率设定值分别为 $P_{ref}=0.5P_N$ 及 $Q_{ref}=0$。

4.1　虚拟惯量的影响

当 $J=17.2$ s 时，仿真波形如图 9～11 所示。图 9 给出了整个时域内变流器频率和功角 δ 的波形。由图 9 可知，在 $t<1$ s 时为离网状态，此阶段功角 δ 取滤波电容和负载电压的相角差，其数值较小；$t=1$ s 开始进入预同步控制，由于相位预同步的控制作用，变流器频率比 50 Hz 稍大，功角 δ 渐渐变小，此时 PCS 仍未并网；在 $t=1.58$ s 时，功角 δ 为 10°，满足合闸要求，预同步控制退出，并网开关 Q_2 关闭，储能系统处于并网状态。一旦进入并网状态，功角 δ 接近为 0。图 9～11 表明预同步控制持续了 0.58 s。图 10 的波形显示，在整个过程中，负载电流为 0.5 pu，储能系统的功率输出能够准确跟踪其给定值。

由图 11 可知，Q_2 关闭前 θ_p 和 θ_g 仍有一定的相角差，Q_2 合闸后 θ_p 和 θ_g 相角差几乎消失，表示并网成功。

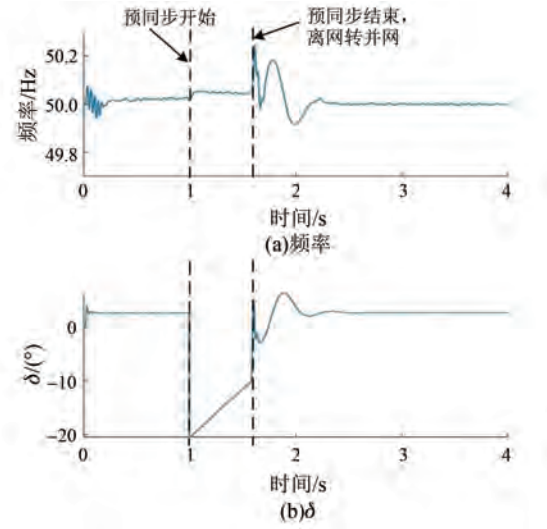


图 9　$J=17.2$ s 时的频率和功角波形

Fig. 9　Frequency and power angle waveforms with $J=17.2$ s

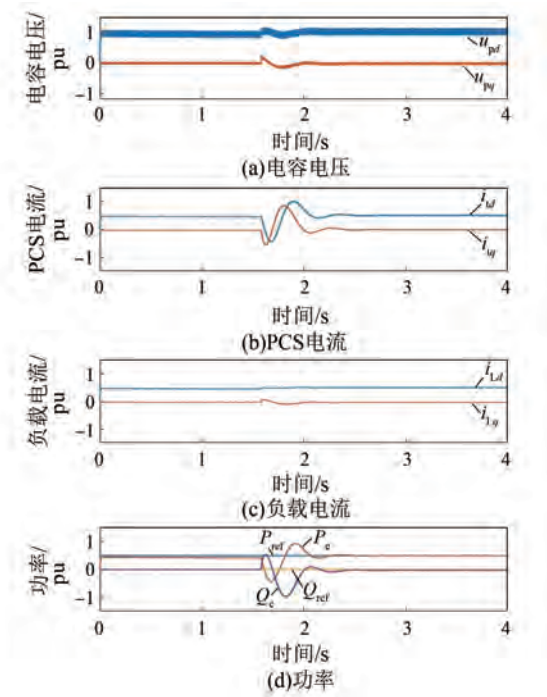


图 10　$J=17.2$ s 的仿真波形

Fig. 10　Simulation waveforms with $J=17.2$ s

当 $J=4$ s 时的仿真波形如图 12～14 所示。图 12 中的功角波形也分为三个阶段：$t=0$～1 s 时储能系统离网，此时 δ 为滤波电容电压和负载电压之间的相角差，其数值较小；$t=1$～1.58 s 为预同步过程，此时功角 δ 为滤波电容和电网电压相角差，其值渐渐减小；当功角 δ 小于阈值时，预同

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

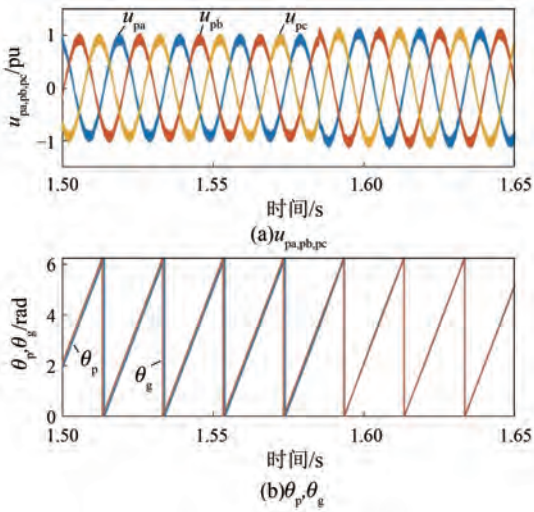


图 11　J=17.2 s 时合闸附近的仿真波形

Fig. 11　Simulation waveforms near the grid-connection moment with J=17.2 s

步结束,系统由离网转并网。

图 12 给出了 J=4 s 和 J=17.2 s 时的预同步波形,其持续时间均为 0.58 s,这与上述根轨迹分析结果高度一致。图 13 中,在 t=1.58 s 前后,有稳定的负载电流。储能系统的输出功率在整个过程中能够精准跟踪给定其给定值。图 14 给出了离网转并网附近的波形,表明尽管并网点电压在切换瞬间存在波动,但能迅速趋于平稳。相角 θ_p 以及网侧电压相角 θ_g 表明在储能系统成功并网后两者之差几乎收敛至 0。

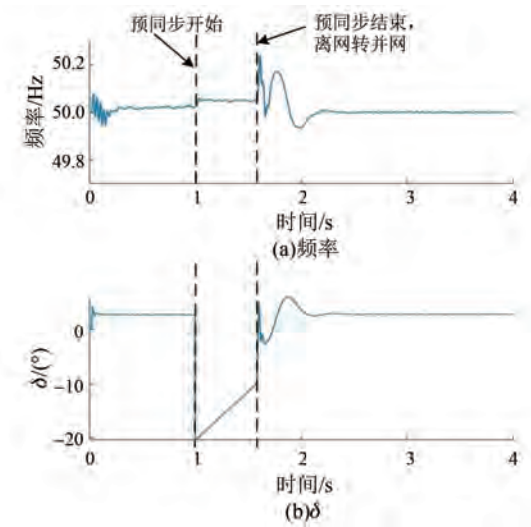


图 12　J=4 s 时的频率和功角波形

Fig. 12　Frequency and power angle waveforms with J=4 s

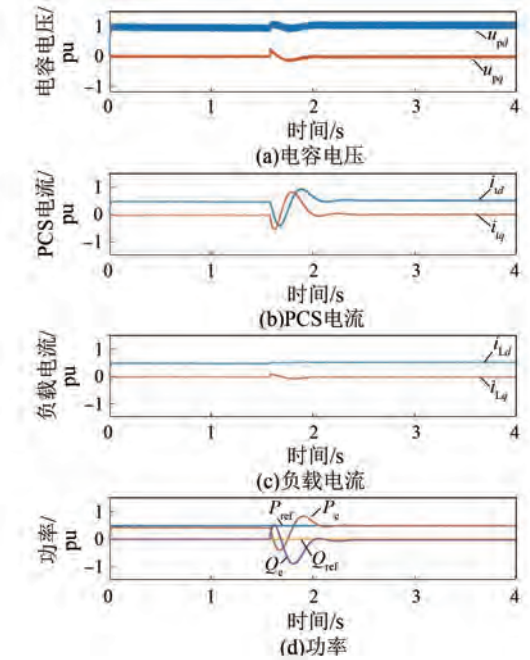


图 13　J=4 s 时的仿真波形

Fig. 13　Simulation waveforms with J=4 s

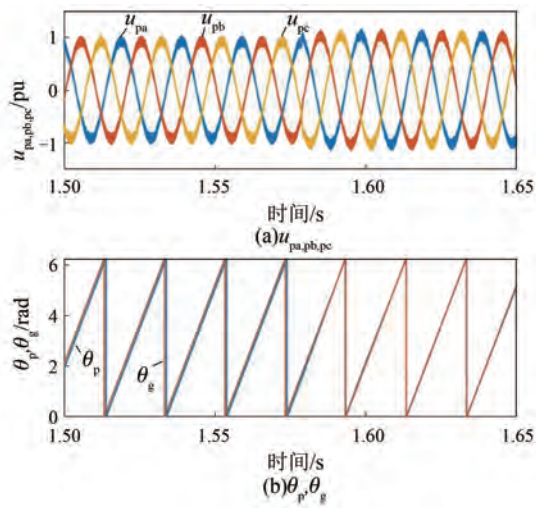


图 14　J=4 s 时合闸附近的仿真波形

Fig. 14　Simulation waveforms near the grid-connection with J=4 s

4.2　阻尼系数的影响

当 D=700 时,仿真波形如图 15~17 所示。图 15 中,在 t<1 s 时变流器处于离网状态;在 t=1 s 时开始进入预同步控制,在 t=1.08 s 时,满足并网要求,历时 0.08 s。和 D=1 472 时的仿真结果相比,D=700 时的预同步时间更少。根据 3.2 节的根轨迹分析,显示 D=700 主导极点更靠左,响应更快,理论与仿真一致。图 16 中,在并网/离

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

网前后，负载电流为 0.5 pu；储能系统的输出功率在整个过程中能跟踪给定值。图 17 给出了离网转并网附近的波形，表明在切换瞬间并网点处的电压有波动，但迅速趋于平稳。并网点处的相角 θ_p 和网侧电压相角 θ_g 在离网时有一定相角差，在储能系统并网后，两者之差几乎几乎收敛至 0。

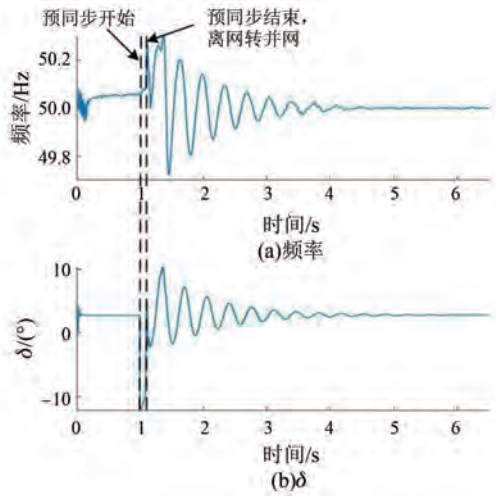


图 15　D=700 时的频率和功角波形

Fig. 15　Frequency and power angle waveforms with D=700

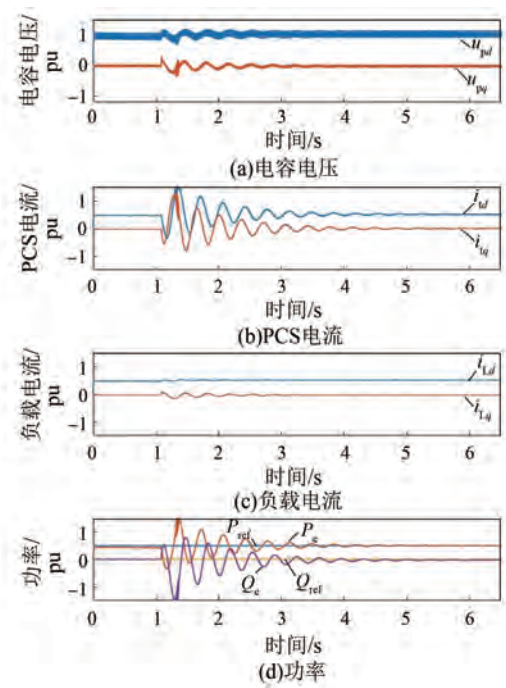


图 16　D=700 时的仿真波形

Fig. 16　Simulation waveforms with D=700

4.3　比例系数的影响

为了观察比例系数 $k_{p\theta}$ 对预同步过程的影响，在其他参数不变的条件下将其设为 0.02，仿真结果如图 18～20 所示。由图 18～20 可知，在 t=1.74 s 完成预同步，预同步过程持续 0.74 s。由图 19 可知，在离网和预同步阶段各变量 dq 值保持不变；预同步结束、切入并网状态时，各变量出现短暂波动，但迅速恢复稳定；在整个过程中，储能系统输出电流与负载电流均稳定在 0.5 pu，且有功和无功功率均能精准跟踪其给定值。图 20 给出了离转并网附近的电压 u_{px}、相角 θ_p 和网侧电压相角 θ_g，在并网后两者之差几乎收敛至 0。滤波电容处电压除了在离网转并网的瞬间有波动，其他时刻保持 1 pu。在系统保持稳定的前提下，预同步时间随着比例系数 $k_{p\theta}$ 的增大而减少，仿真和根轨迹的理论分析结果一致。

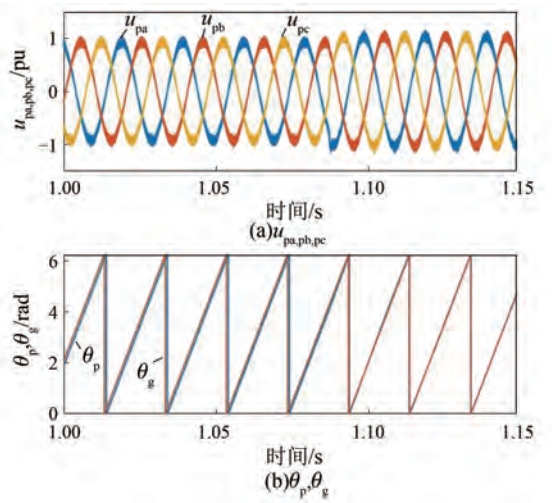


图 17　D=700 时并网附近的仿真波形

Fig. 17　Simulation waveforms near the grid-connection with D=700

为进一步说明 $k_{p\theta}$ 对系统稳定性的影响，$k_{p\theta}$ 先取−10，后取 1.5，结果如图 21～22 所示。如图 21 所示，在 t<1 s 时 PCS 处于离网状态，在 t=1 s 时开始进入预同步。$k_{p\theta}$=−10 时，根据理论和根轨迹分析，此时闭环系统存在右半平面极点，系统失稳，表现为频率持续跌落、功角 δ 不断增大。在 t=1.5 s、$k_{p\theta}$=1.5 时，系统稳定，频率回升，功角开始减小。当功角 δ<10°，进入并网状态。图 22 中，在 1～1.5 s 时 θ_p 和 θ_g 相角差持续变大，在 1.5 s 之后相角差变小直至并网，此时 θ_p 和 θ_g 相角差几乎为 0。

4.4　积分系数的影响

积分系数 $k_{i\theta}$=15.0 时的仿真结果如图 23～25 所示。由图 23 可知，在 t=1.13 s 时系统完成预同

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

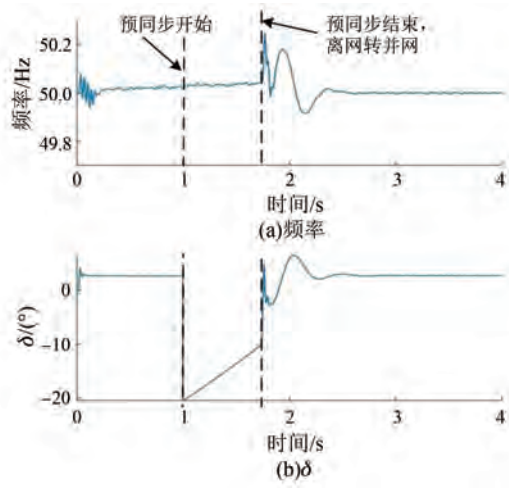


图 18 $k_{p\theta}=0.02$ 时的频率和功角波形

Fig. 18 Frequency and power angle waveforms with $k_{p\theta}=0.02$

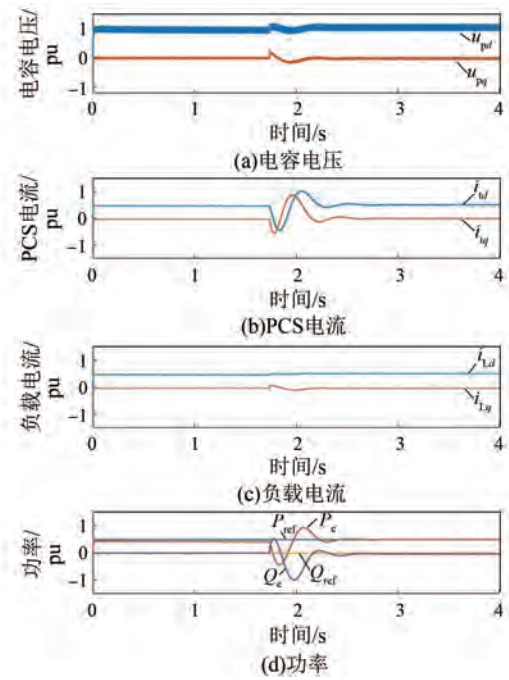


图 19 $k_{p\theta}=0.02$ 时的仿真波形

Fig. 19 Simulation waveforms with $k_{p\theta}=0.02$

步,过程持续大概 0.13 s。实际的仿真图如图 24 所示,图中三相电压 u_{px} 除了在离网转并网的瞬间有波动,其他时刻保持 1 pu,储能系统的电流为 0.5 pu,功率能够精准跟踪给定值。图 25 放大图显示,并网后相角 θ_p 和网侧电压相角 θ_g 之差几乎收敛至零,表明相位预同步成功,储能系统已平滑并入电网。

根据 3.2 节的根轨迹分析,相比 $k_{i\theta}=0.25$ 时,

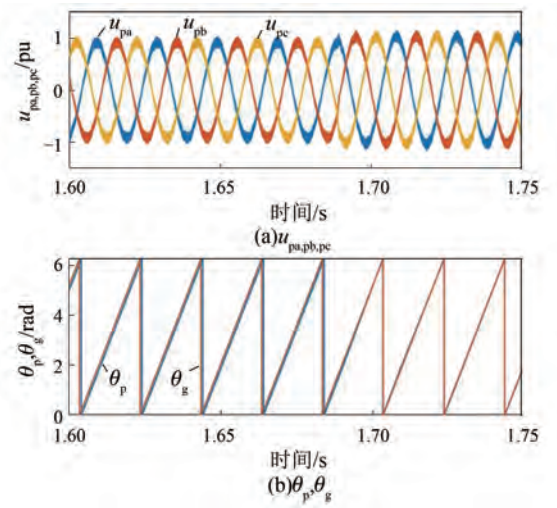


图 20 $k_{p\theta}=0.02$ 时合闸附近的仿真波形

Fig. 20 Simulation waveforms near the grid-connection with $k_{p\theta}=0.02$

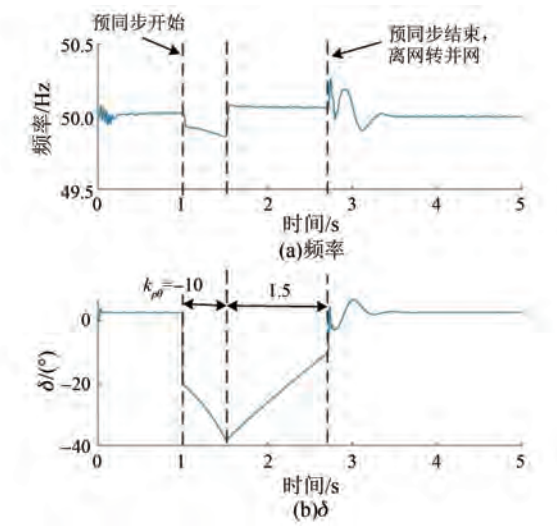


图 21 $k_{p\theta}$ 变化时的频率和功角波形

Fig. 21 Frequency and power angle waveforms with $k_{p\theta}$ varies

$k_{i\theta}=15.0$ 时主导极点向左偏移,即预同步时间减少,仿真结果和根轨迹理论分析一致。为了进一步说明积分系数对系统稳定性的影响,$k_{i\theta}$ 从-10 阶跃至 10,仿真波形如图 26~27 所示。图 26 中,在 $t<1$ s 时系统处于离网状态;在 $t=1$ s 时开始进入预同步,$k_{i\theta}=-10$,由式(15)及根轨迹分析可知此时系统发散,频率持续降低,功角持续增大。在 $t=1.5$ s 时,$k_{i\theta}=10$,系统稳定,频率回升,功角开始减小。当功角绝对值小于 10°时,系统进入并网状态。图 27 波形表明,相角差 $\theta_p-\theta_g$ 在 $t=1$~

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

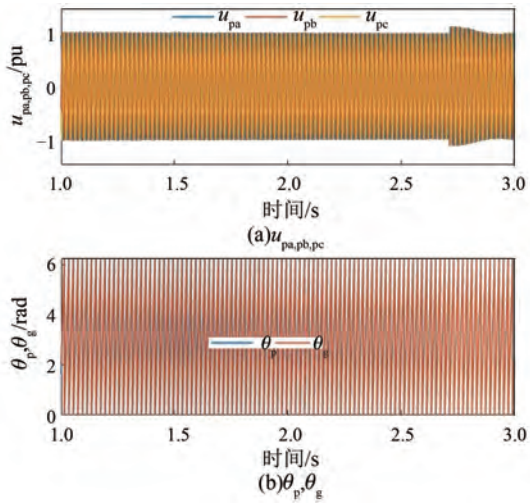


图 22 $k_{p\theta}$ 变化时的仿真波形

Fig. 22 Simulated waveforms with $k_{p\theta}$ varies

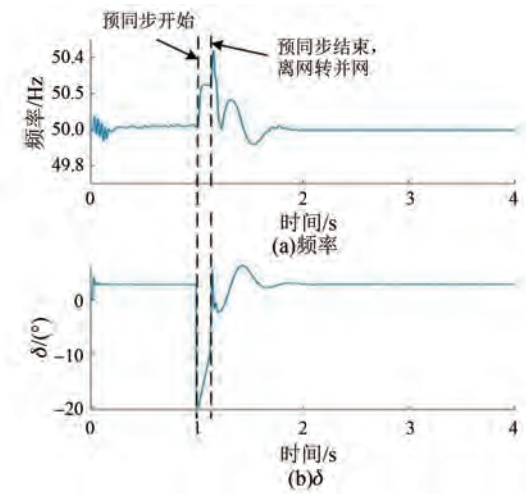


图 23 $k_{i\theta}=15$ 时的频率和功角波形

Fig. 23 Frequency and power angle waveforms with $k_{i\theta}=15$

1.5 s 先越来越大，1.5 s 之后逐渐减小直至并网，相角差几乎消除，θ_p 和 θ_g 几乎重合。

5 结语

本文针对 PCS 由离网模式切换至并网模式过程中的平滑过渡问题，研究了基于 VSG 控制的 PCS 预同步控制策略。首先，对基于 VSG 控制的 PCS 预同步控制系统进行了详细的数学建模，并完成了控制参数的系统化设计，分析发现由于预同步 PI 环节的引入，控制系统的阶数由原来的二阶上升为三阶。为了深入分析该三阶系统的性能，本文采用劳斯稳定判据和根轨迹法对系统的

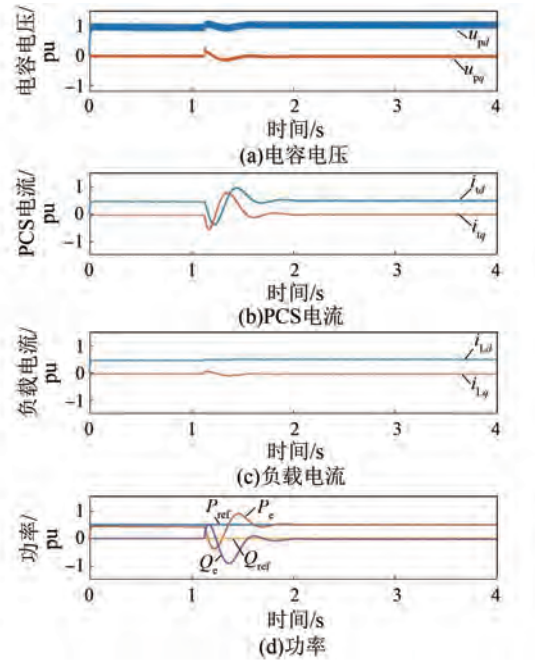


图 24 $k_{i\theta}=15$ 时的仿真波形

Fig. 24 Simulation waveforms with $k_{i\theta}=15$

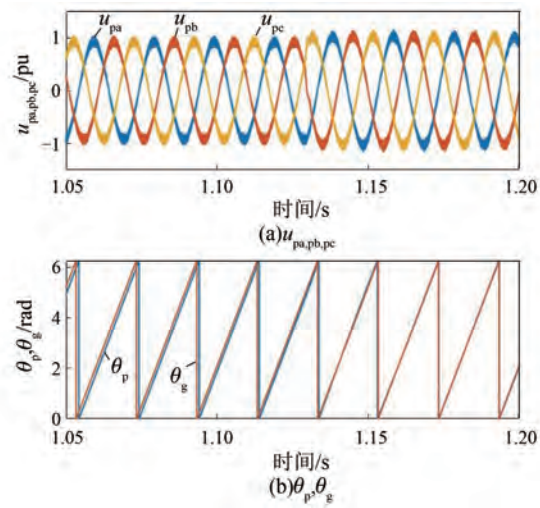


图 25 $k_{i\theta}=15.0$ 时合闸附近的仿真波形

Fig. 25 Simulation waveforms near the grid-connection with $k_{i\theta}=15.0$

稳定性和动态特性进行了理论分析，揭示了系统极点随参数变化的轨迹规律。研究结果表明，VSG 的虚拟惯量对预同步速度的影响并不显著，而阻尼系数、预同步控制环节中的比例和积分系数则是决定预同步动态性能的关键因素，其基本趋势是在保证系统稳定性的前提下，阻尼系数越小、比例系数和积分系数取值越大，预同步的动态响应速度越快。理论预测与仿真观测结果高度吻

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

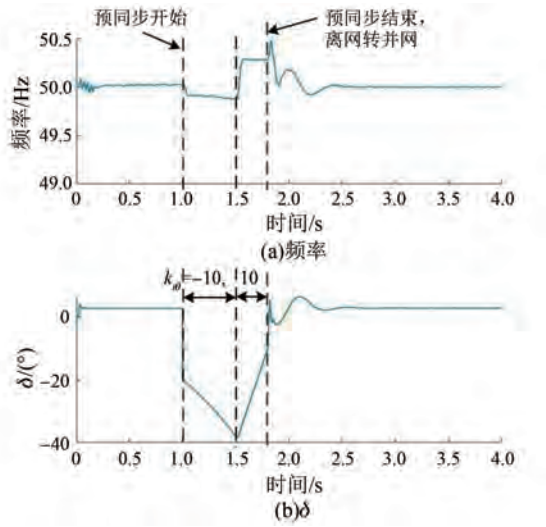


图 26 $k_{i\theta}$ 变化时的频率和功角波形

Fig. 26 Frequency and power angle waveforms with $k_{i\theta}$ varies

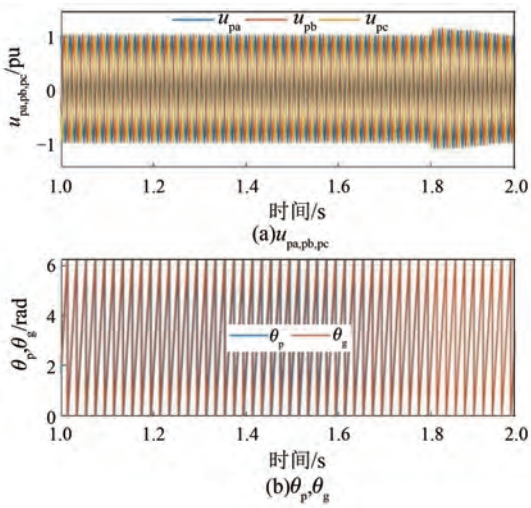


图 27 $k_{i\theta}$ 变化时的仿真波形

Fig. 27 Simulated waveforms with $k_{i\theta}$ varies

合。本文所建立的理论模型和分析方法,可为微电网平滑并网控制策略的工程参数整定提供理论依据与实践指导。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

王恒宜进行了方案设计、仿真研究、内容总结与论文撰写,阅读并同意了最终稿件的提交。

Wang Hengyi was responsible for scheme design, simulation research, content summarization, and manuscript writing. She reads and approves the final version of the paper for submission.

参 考 文 献

[1] Ji X T, Wen J Y, Huang Y H. Modeling and stability analysis of multi grid-forming converters with connected to low-impedance grid [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 40(5): 2479-2492.

[2] Wang H Y. Modeling, control, and impedance analysis of grid-forming BESS with NPC topology [J]. Energies, 2026, 19(7): 1781.

[3] 陈磊, 郑燊聪, 郭瑶, 等. 基于惯量-阻尼动态调整的跟网-构网变流器并联系统暂态稳定控制方法[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(9): 924-934.
Chen L, Zheng S C, Guo Y, et al. Transient stability control method for parallel system of grid-following and grid-forming converters based on dynamic adjustment of inertia-damping [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(9): 924-934.

[4] 赵艺琳, 柳伟, 袁晓冬, 等. 基于状态矩阵的构网型多变流器系统高精度建模方法[J]. 电机与控制应用, 2026, 53(1): 12-23.
Zhao Y L, Liu W, Yuan X D, et al. High-precision modeling method for grid-forming multi-converter systems based on state matrix [J]. Electric Machines & Control Application, 2026, 53(1): 12-23.

[5] 黄晓芸, 李杰生, 蒋仁战, 等. 考虑阻感比变化的构网型变流器功率解耦控制方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(12): 26-38.
Huang X Y, Li J S, Jiang R Z, et al. Power decoupling control method for grid-forming converters considering changes in resistance-inductance ratio [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(12): 26-38.

[6] 钱佳钰, 赵虎府, 刘文泉, 等. 直流微电网并离网协调控制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 11-23.
Qian J Y, Zhao H F, Liu W Q, et al. Coordinated control strategy for DC microgrid grid-connected and off-grid [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 11-23.

[7] 吴伟亮, 侯凯, 王小红, 等. 两级式储能逆变器并

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

离网控制技术[J]. 电机与控制应用，2021，48(5)：72-78.
Wu W L，Hou K，Wang X H，et al. On-grid/off-grid control technology of two-stage energy storage inverter [J]. Electric Machines & Control Application，2021，48(5)：72-78.

[8] 董家伟，陈昊晓，姜志筠，等. 微电网运行控制技术与标准综述[J]. 电力需求侧管理，2025，27(5)：105-111.
Dong J W，Chen W X，Jiang Z Y，et al. Brief introduction of microgrid operational control and standard [J]. Power Demand Side Management，2025，27(5)：105-111.

[9] 李海波，刘广林，许国泽，等. 并/离网控制策略研究综述[J]. 东北电力技术，2025，46(12)：1-5.
Li H B，Liu G L，Xu G Z，et al. Research on review of grid-connected/off-grid systems control strategies [J]. Northeast Electric Power Technology，2025，46(12)：1-5.

[10] Ganjian-Aboukheili M，Shahabi M，Shafiee Q，et al. Seamless transition of microgrids operation from grid-connected to islanded mode [J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2020，11(3)：2106-2114.

[11] 张文煜，李明，任巍曦，等. 基于光储控制的微电网改进预同步控制及离并网切换策略研究[J]. 电子测量技术，2022，45(16)：8-14.
Zhang W Y，Li M，Ren W X，et al. Research on improved pre synchronization control and off-grid/on-grid switching strategy of microgrid based on optical storage control [J]. Electronic Measurement Technology，2022，45(16)：8-14.

[12] 杨轩，李瑞，曹晓庆，等. 基于参数优化 VSG 的预同步控制策略[J]. 电气传动，2025，55(11)：13-18.
Yang X，Li R，Cao X Q，et al. Pre-synchronization control strategy for parameter-optimized virtual synchronous generator [J]. Electric Drive，2025，55(11)：13-18.

[13] 张译文，张笑，张航，等. 一种面向离并网平滑切换的虚拟同步发电机模式切换阻尼控制策略[J/OL]. 电源学报，2026-04-02. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20260401.1437.012.
Zhang Y W，Zhang X，Zhang H，et al. A mode-adaptive damping control strategy for virtual synchronous generators towards smooth grid-connected/islanding transition [J/OL]. Journal of Power Supply，2026-04-02. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20260401.1437.012.

[14] 郑强仁，胡丽娟，李宝聚，等. 基于无锁相环预同步的光储集群并离网控制策略[J]. 湖南电力，2025，45(3)：112-121.
Zheng Q R，Hu L J，Li B J，et al. Grid-connected and off-grid control strategy for optical storage clusters based on phase-locked-loop-free pre-synchronisation [J]. Hunan Electric Power，2025，45(3)：112-121.

[15] Liu T，Wang X F，Liu F C，et al. Transient stability analysis for grid-forming inverters transitioning from islanded to grid-connected mode [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics，2022，3：419-432.

[16] D'silva S，Shadmand M，Bayhan S，et al. Towards grid of microgrids：Seamless transition between grid-connected and islanded modes of operation [J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society，2020，1：66-81.

[17] Souza M E T，Carvalho H T D M，Rodrigues D B，et al. Unified control strategy for islanded，seamless transition，and grid-connected operations of inverter-based distributed generation and microgrids [J]. IEEE Access，2025，13：202253-202274.

[18] 曹刚，宋佳宸，郑雪梅. 微网逆变器无缝切换控制策略研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版)，2021，39(1)：56-60.
Cao G，Song J C，Zheng X M. Research on seamless switching control strategy without PLL for microgrid inverter [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)，2021，39(1)：56-60.

[19] 瞿祎，欧阳曾恺，朱虹，等. 基于改进高斯滤波器的含锁相环 PV-BES 微电网的孤岛检测和无缝切换控制[J]. 电网与清洁能源，2022，38(7)：38-46.
Qu Y，Ouyang Z K，Zhu H，et al. Island detection and seamless switching control of PV-BES microgrid with phase-locked loop based on improved Gaussian filter [J]. Power System and Clean Energy，2022，38(7)：38-46.

[20] 张宇辰，张丽霞，马文忠. 基于虚拟同步发电机的无锁相环预同步并网控制策略[J]. 电机与控制应用，2020，47(11)：82-90+103.
Zhang Y C，Zhang L X，Ma W Z. Pre-synchronization grid-connected control strategy

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

without PLL based on virtual synchronous generator [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(11): 82-90+103.

[21] Lu Y, Lei W, Zhang Z, et al. A non-PLL pre-synchronization method for VSG-based inverter considering the effects of grid voltage imbalance and harmonics //[C] 2025 IEEE International Conference on Electrical Energy Conversion Systems and Control, Chongqing, China, 2025: 623-630.

[22] 吴洁月. 面向电网故障的虚拟同步发电机自适应控制策略[J]. 发电设备, 2026, 40(2): 133-141.
Wu J Y. Adaptive control strategy of virtual synchronous generator for power grid faults [J]. Power Equipment, 2026, 40(2): 133-141.

[23] 李新, 刘国梁, 杨苒晨, 等. 具有暂态阻尼特性的虚拟同步发电机控制策略及无缝切换方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2081-2088.
Li X, Liu G L, Yang R C, et al. VSG control strategy with transient damping term and seamless switching control method [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2081-2088.

[24] Murzakhanov I, Gupta S, Chatzivasileiadis S, et al. Optimal design of volt/var control rules for inverter-interfaced distributed energy resources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(1): 312-323.

[25] 张义, 马军, 王运, 等. 复杂电网条件下的集中式新能源发电主动控制探讨[J]. 浙江电力, 2021, 40(9): 10-15.
Zhang Y, Ma J, Wang Y, et al. Exploration of active control of centralized renewable energy on condition of complicated power grid [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(9): 10-15.

[26] 崔高鹏, 杨宝峰, 王宇鹏, 等. 基于 VSG 的相位补偿预同步控制策略研究与实现[J/OL]. 电源学报, 2026-03-19. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20260319.0932.004.
Cui G P, Yang B F, Wang Y P, et al. Research and implementation of a phase compensation pre-synchronization control strategy based on virtual synchronous generator [J/OL]. Journal of Power Supply, 2026-03-19. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20260319.0932.004.

[27] 邓鑫隆, 邱存勇, 杨轶航, 等. 基于自适应 PI 的构网型变流器预同步控制策略[J]. 电力自动化设备, 2026, 46(2): 120-127.
Deng X L, Qiu C Y, Yang Y H, et al. Pre-synchronization control strategy of grid-forming converter based on adaptive PI [J]. Electric Power Automation Equipment, 2026, 46(2): 120-127.

[28] Patel T, Chauhan P. Presynchronization of weak source in microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(10): 12101-12106.

[29] Zhang Q C. IEEE Std 2988 - 2024 and the recommended practice for use and functions of virtual synchronous machines [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2025, 12(3): 78-83.

[30] 吴超, 王尽颢, 王勇, 等. 考虑功率约束和电流保护的构网变流器统一化控制框架推演[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(23): 9376-9392.
Wu C, Wang J H, Wang Y, et al. Deduction of a unified control framework for grid-forming converters considering power constraint and current protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23): 9376-9392.

[31] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 第 7 版. 北京: 科学出版社, 2019.
Hu S S. Principles of automatic control [M]. 7th ed. Beijing: Science Press, 2019.

收稿日期:2026-04-30
收到修改稿日期:2026-07-31

作者简介:

王恒宜(1986—),女,博士,高级工程师,研究方向为电力电子、电力系统、优化理论与控制理论的交叉应用,wanghycg@163.com;

*通信作者:王恒宜(1986—),女,博士,高级工程师,研究方向为电力电子、电力系统、优化理论与控制理论的交叉应用,wanghycg@163.com。

© Editorial Office of Electric Machines & Control Application. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.