

面向跟/构网平滑切换的VSG预同步控制策略

张国跃¹, 邹阳², 王海燕¹, 蒋成博¹, 徐子炎¹, 张云²

(1. 河南平高电气股份有限公司, 河南 平顶山 467000;

2. 天津大学 智能配用电装备与系统全国重点实验室, 天津 300072)

摘要:针对并网变流器跟/构网模式切换过程中的暂态功率冲击问题,结合暂态功率冲击产生机理,提出一种面向跟/构网平滑切换的虚拟同步发电机(VSG)预同步控制策略。首先,对预同步过程相位差跳变问题进行校正,并基于相位差区间自适应调整追踪方向,优化相位追踪过程所需的相位调节量。其次,基于积分器输出一致平滑切换电流参考值,避免因直接切换引起的电流冲击,结合电压幅值预同步,有效抑制模式切换过程的暂态功率冲击。最后搭建了并网变流器实验平台并进行实验,实验结果验证了所提控制方法对抑制跟/构网切换瞬间暂态功率冲击的有效性。

关键词:并网变流器;跟/构网平滑切换;虚拟同步发电机;预同步控制

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed27333

VSG Pre-synchronization Control Strategy for Smooth Switching Between Grid-following and Grid-forming Modes

ZHANG Guoyue¹, ZOU Yang², WANG Haiyan¹, JIANG Chengbo¹, XU Ziyang¹, ZHANG Yun²

(1. Henan Pinggao Electric Co., Ltd., Pingdingshan 467000, Henan, China;

2. State Key Laboratory of Smart Distribution and Power Utilization Equipment and Systems, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To address the transient power impact of grid-connected converters during the switching between grid-following and grid-forming modes, and based on the generation mechanism of this transient power impact, a virtual synchronous generator (VSG) pre-synchronization control strategy for smooth switching was proposed. First, the phase difference jump problem during pre-synchronization was corrected, and the tracking direction was adaptively adjusted according to the phase difference interval, optimizing the phase adjustment amount required for phase tracking. Second, the reference current value was smoothly switched based on the consistency of integrator output to avoid current impact caused by direct switching, and combined with voltage amplitude pre-synchronization, the transient power impact during the mode switching process was effectively suppressed. Finally, an experimental platform of the grid-connected converter was built and experiments were carried out. The experimental results verify the effectiveness of the proposed control method in suppressing the transient power impact during the switching between grid-following and grid-forming modes.

Key words: grid-connected converter; smooth switching between grid-following and grid-forming modes; virtual synchronous generator (VSG); pre-synchronization control

随着全球能源转型战略的深入推进,以光伏和风电为代表的新能源发电在电力系统中的占比持续攀升,新型电力系统呈现出高比例可再生能源与高比例电力电子设备的“双高”特征^[1-3]。在此背景下,电网的动态特性发生深刻变化,系统等效惯量与阻尼水平显著下降,频率稳定问题

凸显,尤其在弱电网条件下,电压支撑能力不足成为制约新能源消纳的关键瓶颈^[4]。作为新能源并网的核心接口装置,并网变流器的控制策略从根本上决定了系统的稳定运行能力^[5]。传统并网变流器以跟网运行模式为主,能够进行精确功率追踪,具有快速动态响应能力,但无法对电网频

作者简介:张国跃(1979—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为新型配电设备研发与产品制造技术,

Email: zhangguoyue@pg.cee-group.cn

率和电压形成主动支撑,在弱电网下易出现小扰动同步失稳^[6]。与跟网型变流器不同,构网型变流器具有电压源特性,不依赖锁相环实现并网,能够为电网提供惯量与阻尼,主动支撑电网频率和电压,提升高比例新能源下弱电网的稳定性^[7-8]。以虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)为代表的构网控制方法得到了广泛的研究,但其在强电网场景下存在小干扰失稳问题^[9]。为适应不同电网强度的复杂电网工况,实现变流器在跟网模式与构网模式之间的平滑切换已成为保障电力系统稳定运行的关键环节。

现有研究多集中于变流器在并网运行模式和离网运行模式之间的切换控制。文献[10]通过PI反馈补偿VSG与电网的电压幅值与频率差,实现VSG离网模式和并网模式的无缝切换;文献[11]提出一种基于VSG惯量系数优化的微电网预同步控制策略,依据同步发电机功角-频率振荡特性曲线对转动惯量系数进行自适应调整,提升微电网在模式切换瞬间的动态响应性能。上述控制方法重点关注并离网切换前后构网单模式运行的预同步控制。文献[12]提出一种基于附加电流环与电压保持器的组合式平滑切换策略,并网运行时附加电流环与电感电流环共同作用调控并网电流,孤岛运行时电压控制器作为电压外环控制输出电压。文献[13]提出一种基于模型预测的微电网模式切换控制方法,依据代价函数分别对孤岛模式电压和并网模式电流进行控制,并基于锁相环实现模式间的平滑过渡,避免切换产生瞬间电压尖峰和冲击电流。上述方法虽然取得了较好的控制效果,但仅针对并网与孤岛两种运行工况分别采用跟网型与构网型控制,未涉及并网工况下两种控制模式的平滑切换问题,无法适配电网强度宽范围波动的运行场景。

尽管现有切换控制研究已覆盖变流器并网与孤岛运行模式间的无缝过渡,但面对新能源高比例接入导致电网强度逐步弱化,并网变流器跟网模式至构网模式的平滑切换,成为制约弱电网下系统安全稳定运行的关键问题。文献[14]研究了并网变流器在短路比大幅波动下的稳定性问题,基于电网阻抗辨识推导出并网变流器模式控制切换的边界。文献[15]采用谐波注入的电网阻抗辨识算法感知电网强度,提出一种能够自适应电网阻抗变化的PQ/VSG双模式切换方法,解决了单一模式变流器对电网适应性差的问题。文

献[16]提出一种VSG的PQ控制模式,通过参数匹配实现VSG恒定稳态有功功率控制与频率下垂控制之间的平滑切换。文献[17]针对跟/构网切换的稳定性问题,选取运行时短路比作为模式切换依据。上述方法聚焦于控制模式切换条件的判断,实际跟/构网模式切换瞬间暂态冲击是由电压相位、幅值以及控制环输出参考电流不一致引起的。

本文提出了一种面向跟/构网平滑切换的VSG预同步控制策略,该策略校正了相位追踪过程相位差跳变的问题,依据实际相位差对相位预同步过程追踪方向进行自适应优化调整。通过分析切换过程暂态功率冲击产生机理,结合电压相位、幅值预同步与基于积分器输出一致的参考电流预同步,降低了跟/构网模式切换时的暂态功率冲击,实现了跟网模式与构网模式之间的平滑切换。

1 VSG控制及模式切换暂态功率冲击产生机理

1.1 VSG控制基本原理

传统同步发电机(synchronous generator, SG)通过转子储能提供固有的惯性响应与阻尼特性,能够自发抑制频率波动,同时为电网提供稳定的电压支撑。VSG控制在下垂控制基础上增加虚拟转动惯量和阻尼系数,通过模拟同步机组的惯量、阻尼、调频、调压等外特性,使并网变流器具备类似同步机的电网支撑能力,提升了并网系统的安全性和稳定性。

VSG控制系统主功率电路拓扑以及传统VSG控制框图如图1所示。

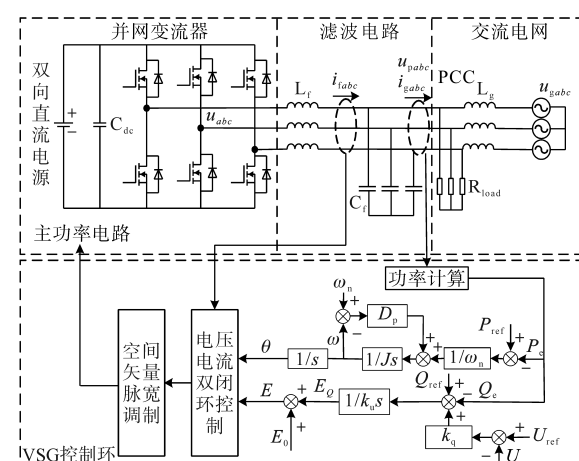


图1 主功率电路以及传统VSG控制框图

Fig.1 Main power circuit and traditional VSG control diagram

图1中, C_{dc} 为直流侧滤波电容; L_f, C_f 分别为滤波电路的电感和电容; R_{load} 为网侧负载电阻; u_{abc}, i_{iabc} 分别为并网变流器输出的三相电压和三相电流; u_{pabc} 为公共耦合点三相电压, i_{gabc} 为输入交流电网的三相电流, u_{gabc} 为交流电网电压。图中关键电流正方向均按变流器向交流电网侧输出功率时的电流流向规定, 其中 i_{iabc} 的正方向为变流器交流端经滤波电感指向公共耦合点, i_{gabc} 的正方向为公共耦合点指向交流电网; 后文以变流器向电网馈入功率方向为功率正方向。

VSG 核心控制环节包括有功-频率环与无功-电压环。在有功-频率控制环节中, VSG 通过引入转子运动方程模拟同步发电机的机械惯性, 其转子运动方程如下:

$$\begin{cases} T_m - T_e = \frac{P_m}{\omega_n} - \frac{P_e}{\omega_n} = J \frac{d\omega}{dt} + D_p(\omega - \omega_n) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_m, T_e 分别为 VSG 的机械转矩和电磁转矩; P_m, P_e 分别为 VSG 的机械功率和电磁功率; J 为虚拟转动惯量; D_p 为阻尼系数; ω, ω_n 分别为 VSG 输出角频率与电网额定角频率; θ 为 VSG 控制环电压参考相位。

VSG 的无功-电压控制环节模拟同步发电机的励磁调节特性, 通过 $Q-E$ 下垂控制建立无功功率与机端电压幅值之间的耦合关系, 根据系统无功负荷的变化动态调节虚拟内电势幅值, 从而维持并网点电压的稳定并提供无功支撑, 其控制方程如下式所示:

$$k_u \frac{d(E - E_0)}{dt} = Q_{ref} - Q + k_q(U_{ref} - U) \quad (2)$$

式中: E 为 VSG 无功-电压控制环输出电压幅值; E_0 为 VSG 空载电势; U_{ref}, U 分别为 VSG 输出电压参考值和实际输出电压值; Q_{ref}, Q 分别为无功功率参考值和实际输出值; k_q, k_u 分别为下垂系数和积分系数。

1.2 模式切换暂态功率冲击产生机理分析

VSG 与电网间的功率交互模型可等效为 VSG 输出电压经过电网等效阻抗与电网电压串联, 如图2所示。其中, E 为 VSG 输出电压幅值, U_g 为电网电压幅值, 假设电网电压相位为基准相位, 则功角 δ 为 E 和 U_g 之间的相位差, X_g, R_g 分别为 VSG 并网点与电网之间的等效电感和等效电阻。

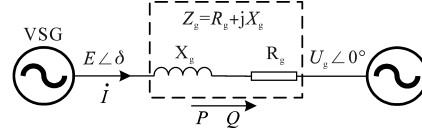


图2 VSG与电网间的功率传输模型

Fig.2 Power transfer model between VSG and the grid

根据图2可求流经线路电流为

$$\dot{I} = \frac{E\angle\delta - \dot{U}_g}{R_g + jX_g} \quad (3)$$

进一步求得变流器馈入电网功率为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} \frac{(E^2 - EU_g \cos\delta)R_g + EU_g X_g \sin\delta}{R_g^2 + X_g^2} \\ Q = \frac{3}{2} \frac{(E^2 - EU_g \cos\delta)X_g - EU_g R_g \sin\delta}{R_g^2 + X_g^2} \end{cases} \quad (4)$$

实际并网运行时变流器输出电压与电网电压间等效阻抗近似于纯感性, 等效电阻 R_g 忽略不计, 功角 δ 通常较小, 可将三角函数值近似等效为 $\sin\delta \approx \delta, \cos\delta \approx 1$, 式(4)可简化为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2} \frac{EU_g \delta}{X_g} \\ Q = \frac{3}{2} \frac{E(E - U_g)}{X_g} \end{cases} \quad (5)$$

跟网模式运行时, 并网变流器输出特性表现为受控电流源, 控制结构为功率-电流环, 电压相位依赖锁相环跟随电网电压相位, 控制结构如图3所示。

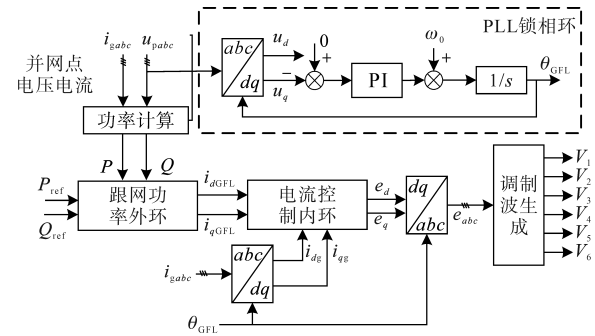


图3 跟网型变流器控制结构框图

Fig.3 Grid-following converter control block diagram

构网模式运行时, 并网变流器输出特性表现为受控电压源, 有功功率和无功功率分别调控输出电压的相位和幅值, 控制结构为功率外环-电压电流内环, 与跟网控制结构存在差异。在跟/构网模式切换瞬间, 由于控制结构以及控制外特性的突变, 切换瞬间 VSG 电压相位与幅值无法实时跟踪电网电压, 相比于切换前的并网点电压, VSG 输出电压存在相位变化量 $\Delta\delta$ 和幅值变化量 ΔE ,

并通过功率耦合进一步产生输出有功功率变化量 ΔP 和无功功率变化量 ΔQ ,如下式所示:

$$\begin{cases} \Delta P = \frac{3}{2} \frac{EU_g}{X_g} \Delta \delta + \frac{3}{2} \frac{U_g \delta}{X_g} \Delta E \\ \Delta Q = \frac{3}{2} \frac{2E - U_g}{X_g} \Delta E \end{cases} \quad (6)$$

此外,跟网模式和构网模式下电流参考值分别由跟网功率外环和构网交流电压外环产生,由于两者在切换前输出状态不一致,电流环参考值前后不匹配将进一步加剧功率暂态振荡过程。综上所述,模式切换瞬间的输出电压相角、电压幅值以及参考电流值不一致都将引起暂态功率冲击。

2 面向跟/构网平滑切换的预同步控制策略

2.1 基于相位差区间自适应追踪策略

由上节分析,并网变流器跟网模式和构网模式切换瞬间的暂态功率冲击主要来源于电压相位、电压幅值以及参考电流的突变。本文首先对电压相位预同步过程进行研究,结合电压幅值预同步与参考电流平滑切换,实现模式间的平滑切换。

对于输出电压相位预同步,电压相位变化范围为 $[0, 2\pi]$,每个电网电压周期结束后电压相位都存在 2π 到0的跳变。当VSG控制环电压参考相位与电网电压相位不一致时,二者发生相位跳变的时刻不同,如图4示例所示。在预同步期间,电网电压相位超前VSG控制环电压参考相位 θ_e : $0 \sim t_1$ 时段相位差 $\theta_{ek} = \theta_g - \theta_{vsg}$ 为正; t_1 时刻 θ_g 达到最大值 2π 后跳变至0,相位差 θ_{ek} 随之变为负值;在 $t_1 \sim t_2$ 时段,该相位差实际表示电网电压相位滞后VSG电压相位 $2\pi - \theta_e$ 。此时,若仍直接采用该相位差参与预同步调节,将使相位调节方向与期望追踪方向相反,进而延长相位预同步时间并增加预同步失败风险。

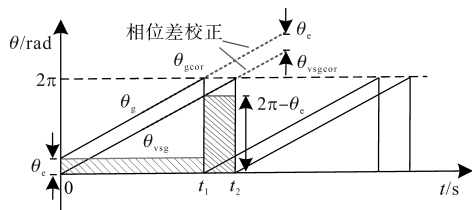


图4 电压相位差跳变机理

Fig.4 Mechanism of voltage phase-angle difference jump

为解决相位差跳变问题,本文增加了相位差跳变校正环节,校正原理如下式所示:

$$\begin{cases} \theta_{cor}(t) = \theta(t) + 2n(t)\pi & \theta(t) < \theta(t-1) \\ n(t) = n(t-1) + 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\theta(t)$ 为当前时刻输入相角; $\theta(t-1)$ 为上一时刻输入相角; $n(t)$ 为当前时刻相角校正计数量; $n(t-1)$ 为上一时刻相角校正计数量; $\theta_{cor}(t)$ 为校正相角。

电压相位每过一个周期发生一次跳变,相位由 2π 跌落至0,当前时刻相角 $\theta(t)$ 小于上一时刻相角 $\theta(t-1)$,校正计数加一,校正相角 $\theta_{cor}(t)$ 增加 2π ,消除因电压相位跳变引起的实际电压相位失真。

对电压相位进行跳变校正后,分别获得电网电压相位 θ_{gcor} 和VSG电压相位 θ_{vsgcor} 。电压相位差取值范围为 $(0, 2\pi]$,传统相位预同步过程通过补偿VSG输出角频率 ω_{vsg} 将相位差减小至0,实现对电网电压相位的追踪。然而,对于交流电压而言,相位差为 2π 与相位差为0时具有等效电气相位关系。因此,本文进一步提出一种基于相位差区间的自适应追踪策略,如图5所示。

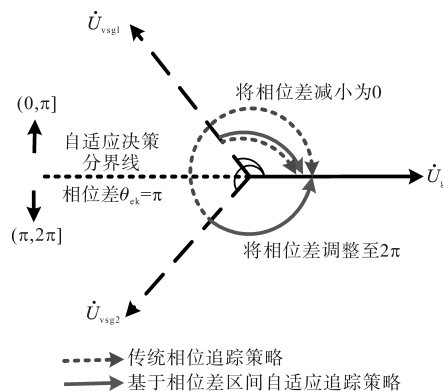


图5 基于相位差区间自适应追踪策略

Fig.5 Phase difference interval-based adaptive tracking strategy

当电压相位差范围为 $(0, \pi]$ 时,与传统相位追踪策略一致, ω_{vsg} 增大,VSG电压相位呈追赶状态,相位差逐渐缩小为0;当电压相位差范围为 $(\pi, 2\pi]$ 时,与传统相位追踪方向相反, ω_{vsg} 减小,相位差增大,直至 2π 停止,其等效电气相位差同步收敛至0,如下式所示:

$$\begin{cases} \Delta \omega_{comp} = (k_{p\theta} + \frac{k_{i\theta}}{s})(\theta_{gcor} - \theta_{vsgcor}) & 0 < \theta_{gcor} - \theta_{vsgcor} \leq \pi \\ \Delta \omega_{comp} = -(k_{p\theta} + \frac{k_{i\theta}}{s})[2\pi - (\theta_{gcor} - \theta_{vsgcor})] & \pi < \theta_{gcor} - \theta_{vsgcor} \leq 2\pi \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\Delta \omega_{comp}$ 为预同步过程角频率补偿量; $k_{p\theta}$ 、 $k_{i\theta}$ 分

别为相位预同步的比例系数和积分系数。

相比于传统相位追踪策略,该方法在电压相位差范围为 $(\pi, 2\pi]$ 时对相位调整量更小,优化了相位调节过程。

结合相位差跳变校正与基于相位差区间自适应追踪策略,相位预同步整体控制策略如图6所示:首先对输入电网电压与VSG电压相位进行校正;随后基于电压相位差区间自适应选择相位追踪方向,得到预同步角频率补偿量,最终消除相位差,完成相位预同步过程。

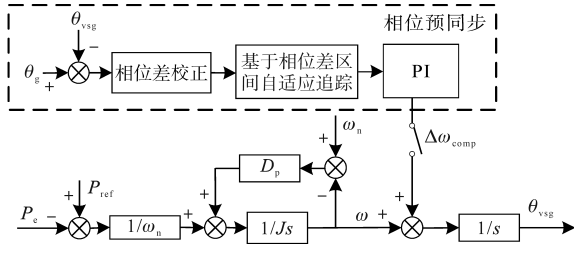


图6 电压相位预同步

Fig.6 Voltage phase pre-synchronization

2.2 电压幅值与参考电流预同步控制

电压幅值预同步过程如图7所示。跟网模式下,并网变流器输出电压跟随电网,输出电压幅值与并网点电压幅值一致;构网模式下,并网变流器输出电压幅值由无功环控制。

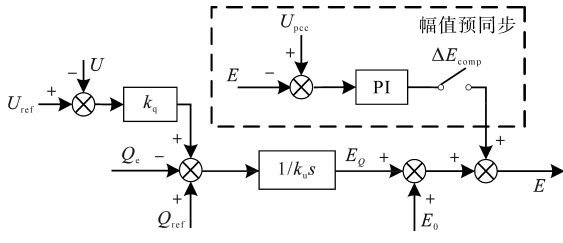


图7 电压幅值预同步

Fig.7 Voltage amplitude pre-synchronization

在模式切换前,为避免电压幅值在切换瞬间突变而引起的暂态功率冲击,依据并网点电压幅值对无功环输出电压幅值进行补偿调整,从而实现电压幅值的平滑切换,如下式所示:

$$\Delta E_{\text{comp}} = (k_{pE} + \frac{k_{iE}}{s})(U_{\text{pcc}} - E) \quad (9)$$

式中: ΔE_{comp} 为预同步过程电压幅值补偿量; U_{pcc} 为并网点电压幅值; k_{pE} , k_{iE} 为电压幅值补偿的比例系数和积分系数。

电流参考值预同步过程,以 d 轴参考电流为例,如图8所示。跟网模式下,参考电流 i_{dGFL} 由功率外环获得;构网模式下,参考电流 i_{dvsg} 由电压外环获得。通过控制模式切换前后变流器输出功率参考值一致,可以实现对参考电流稳态值一致

的控制。然而在切换瞬间,由于控制环的更改,直接切换参考电流将引起电流冲击进而导致暂态功率冲击,因此本文基于积分器输出一致对参考电流进行平滑切换控制。

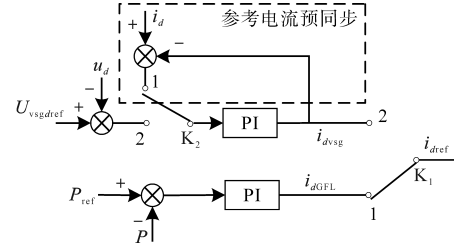


图8 参考电流预同步

Fig.8 Reference current pre-synchronization

跟网模式运行时,开关 K_1 闭合至1,参考电流由功率外环产生,系统保持恒功率运行;开关 K_2 闭合至1,保持构网控制模式下电压外环积分器输出与电流实际值相同。跟/构网模式切换时,开关 K_1 和 K_2 闭合至2,控制构网电压外环积分器输出的参考电流预同步如下式所示:

$$\begin{cases} x_{i_{ud}} = i_d/k_{i_{ud}} \\ x_{i_{uq}} = i_q/k_{i_{uq}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x_{i_{ud}}$, $x_{i_{uq}}$ 分别为 d 轴、 q 轴电压外环PI控制器的积分状态量; $k_{i_{ud}}$, $k_{i_{uq}}$ 为 d 轴、 q 轴电压外环积分系数; i_d , i_q 分别为 d 轴、 q 轴变流器电流输出实际值。

综上所述,本文提出的面向跟/构网平滑切换的VSG预同步整体控制框图如图9所示。

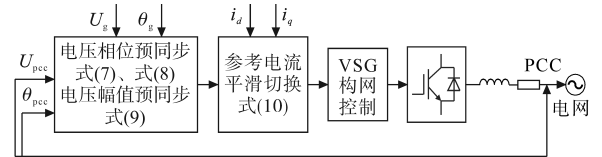


图9 VSG预同步控制策略结构框图

Fig.9 Block diagram of VSG pre-synchronization control strategy

3 实验结果与分析

本节基于并网变流器实验平台,对本文所提方法抑制模式切换瞬间暂态功率冲击的有效性进行实验验证,实验在并网变流器输出有功功率400 W、单位功率因数工况下开展,实验平台如图10所示,实验参数如表1所示。

表1 实验参数

Tab.1 Experimental parameters

参数	数值	参数	数值
三相交流电压 U_{gabc}	70.7 V	电网等效电感 L_g	3 mH
直流母线电压 U_{dc}	200 V	负载电阻 R_{Load}	20 Ω
交流侧滤波电感 L_f	10 mH	采样频率 f_s	10 kHz
交流侧滤波电容 C_f	5 μ F		

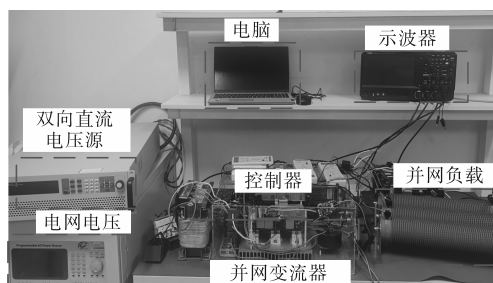
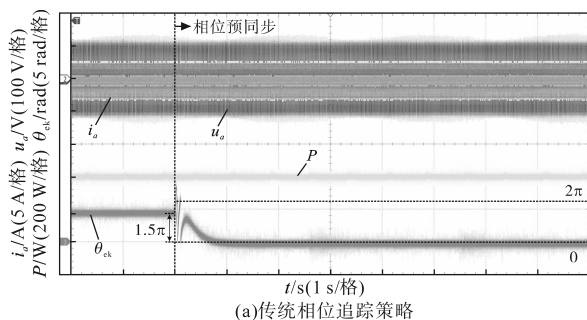


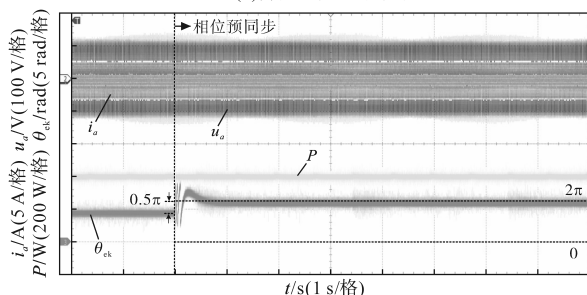
图10 VSG预同步实验平台

Fig.10 VSG pre-synchronization experimental platform

首先,对基于相位差区间的自适应追踪策略进行验证。对于 $\theta_{ek} \in (0, \pi]$,所提策略与传统追踪策略的相位调整方向一致;对于 $\theta_{ek} \in (\pi, 2\pi]$,传统策略需将相位差由 θ_{ek} 调节至0,而所提策略将相位差调节至等效同步点 2π ,所需相位调整量由 θ_{ek} 降低为 $2\pi - \theta_{ek}$ 。以 θ_{ek} 分别取 1.25π 、 1.5π 和 1.75π rad为例,相较于传统相位追踪策略,本文所提策略相位调整幅度理论上分别降低40.0%、66.7%和85.7%。因此,本文选取 1.5π rad作为 $(\pi, 2\pi]$ 区间的典型中间工况进行实验验证,能够反映所提自适应追踪策略在该区间缩短相位调节路径的代表性效果,实验结果如图11所示。



(a)传统相位追踪策略



(b)基于相位差区间自适应追踪策略

 图11 相位差为 1.5π rad时预同步波形

 Fig.11 Pre-synchronization waveforms at a phase difference of 1.5π rad

由图11a、图11b对比可知,传统相位追踪通过PI反馈将相位差由 1.5π rad缩减至0,相位变化幅度为 1.5π rad;基于相位差区间对电压相位追踪方向进行调整后,相位差由 1.5π rad变化至 2π rad随后稳定,相位变化幅度为 0.5π rad,预同

步过程电压相位追踪所需的相位幅度减小66.7%。

为进一步验证基于参考电流平滑切换VSG预同步控制方法的有效性,对实验进行跟/构网模式控制切换,如图12所示。由图12可知,电压相位和幅值预同步能够有效解决模式切换时构网型变流器输出电压与电网电压不一致引发的数倍额定电流冲击问题,变流器保持安全并网,但变流器输出功率仍存在一定波动。

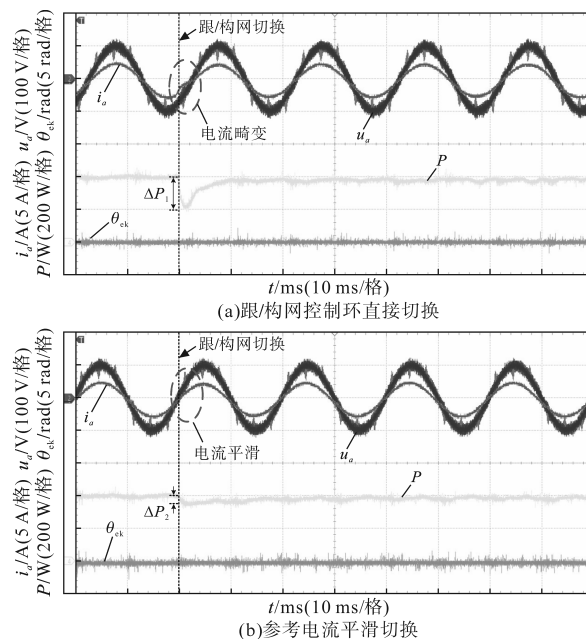


图12 跟/构网模式切换实验波形

Fig.12 Experimental waveforms of grid-following/grid-forming mode switching

图12a为跟/构网模式参考电流控制环直接切换实验波形,在控制环切换时刻,功率波动较大,波动幅度约为200 W,且在切换时刻伴随一定并网电流畸变;图12b为参考电流平滑切换实验波形,相比于直接切换,功率波动幅度降低70%,最大波动量从200 W降至60 W以内,电流切换平滑无冲击。由此可见,本文提出的面向跟/构网平滑切换VSG预同步控制方法能够在模式切换时通过电压相位、幅值以及参考电流预同步,抑制切换瞬间的状态突变,保持变流器安全并网,有效减小切换时的功率波动,实现模式间的平滑切换。

4 结论

针对并网变流器跟/构网模式切换过程中的暂态功率冲击问题,本文分析了模式切换过程暂态功率冲击的产生机理,提出了一种面向跟/构网

模式平滑切换的VSG预同步控制方法。该控制方法能够自适应调整相位追踪方向,消除电压相位差,基于积分器输出一致平滑切换参考电流。结合电压幅值预同步,该控制方法能够有效减小模式切换时的暂态功率冲击,实现模式之间的平滑切换。

参考文献

- [1] 李萌,姚增慧,包博,等. “双高”电力系统暂态电压稳定新问题综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2026, 46(2): 462–477.
Li Meng, Yao Zenghui, Bao Bo, et al. Review and prospect of new transient voltage stability issues in power systems with high proportion of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(2): 462–477.
- [2] 郭威,郑文伟,文云峰,等. 考虑非线性环节的双高电力系统频率安全快速评估方法[J]. 电力自动化设备, 2026, 46(3): 168–177.
Guo Wei, Zheng Wenwei, Wen Yunfeng, et al. Fast frequency security calculation method for double-high power system considering nonlinear elements[J]. Electric Power Automation Equipment, 2026, 46(3): 168–177.
- [3] 刘辉,于思奇,孙大卫,等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 277–297.
Liu Hui, Yu Siqi, Sun Dawei, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277–297.
- [4] 李明,常永康,毛永涛,等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网型稳定控制技术综述与展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4773–4788.
Li Ming, Chang Yongkang, Mao Yongtao, et al. Review and prospect of stability control techniques for grid-following/grid-forming converters in high-penetration renewable energy generation[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4773–4788.
- [5] 于彦雪,马慧敏,陈晓光,等. 弱电网下基于准静态模型的混合控制微电网逆变器同步稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1): 152–164.
Yu Yanxue, Ma Huimin, Chen Xiaoguang, et al. Synchronous stability research of inverters in hybrid microgrid based on the quasi-static models under weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 152–164.
- [6] 李红,梁军杨,王振民,等. 跟网型变换器的小扰动同步稳定机理分析与致稳控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3802–3815.
Li Hong, Liang Junyang, Wang Zhenmin, et al. Small signal synchronization stability analysis and improved control strategy for grid following converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3802–3815.
- [7] 盛李龙,许津铭,李威,等. 弱电网下跟/构网型变流器并联系统的阻抗频率耦合及稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 27–37.
Sheng Lilong, Xu Jinming, Li Wei, et al. Impedance frequency coupling and stability analysis of parallel system of grid-following and grid-forming converters in weak grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 27–37.
- [8] 赵冬梅,裴建楠,白俊辉,等. 弱、极弱电网场景下构网型变流器调频能力提升技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(S1): 215–226.
Zhao Dongmei, Pei Jiannan, Bai Junhui, et al. Research on improving frequency modulation capability of grid-forming converter under weak and extremely weak grid conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 215–226.
- [9] 马俊鹏,李磊,迟程宾,等. 宽短路比工况下构网型逆变器功率自同步控制的稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 165–173.
Ma Junpeng, Li Lei, Chi Chengbin, et al. Stability analysis of power self-synchronization control of grid-forming converters in wide range of short-circuit ratio conditions[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 165–173.
- [10] 魏亚龙,张辉,孙凯,等. 基于虚拟功率的虚拟同步发电机预同步方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 124–129, 178.
Wei Yalong, Zhang Hui, Sun Kai, et al. Pre-synchronization method of virtual synchronous generator using virtual power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 124–129, 178.
- [11] 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 Xuan, Li Rui, Cao Xiaoqing, et al. Pre-synchronization control strategy for parameter-optimized virtual synchronous generator[J]. Electric Drive, 2025, 55(11): 13–18.
- [12] 张纯江,徐菁远,庆宏阳,等. 主从结构微电网逆变器离网全过程平滑切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 125–133.
Zhang Chunjiang, Xu Jingyuan, Qing Hongyang, et al. Seamless transferring control strategy for master-slave microgrid inverter in whole off-grid process[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 125–133.
- [13] Sharma A, Chilipi R, Kumar K V P. Model predictive control of MMC-based medium voltage microgrid for grid connected and islanded operation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2025, 61(4): 5751–5766.
- [14] Li M, Zhang X, Guo Z, et al. Impedance adaptive dual-mode control of grid-connected inverters with large fluctuation of SCR and its stability analysis based on D-partition method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14420–14435.
- [15] 绳洁,郭田田,贾凯莉,等. 并网变流器双模式自适应柔性切换控制策略[J]. 电气传动, 2025, 55(8): 45–50, 79.
Sheng Jie, Guo Tian Tian, Jia Kaili, et al. Dual-mode adaptive flexible switching control strategy for grid-connected converter[J]. Electric Drive, 2025, 55(8): 45–50, 79.

(下转第31页)

- [7] 张勋,王广柱,王婷. 双向全桥 DC-DC 变换器基于电感电流应力的双重移相优化控制[J]. 电工技术学报,2016,31(22): 100-106.
Zhang Xun, Wang Guangzhu, Wang Ting. Optimized control based on current-stress of bi-directional full-bridge DC-DC converters with dual-phase-shifting control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 100-106.
- [8] 王攀攀,徐泽涵,王莉,等. 基于三重移相的双有源桥 DC-DC 变换器效率与动态性能混合优化控制策略[J]. 电工技术学报,2022,37(18):4720-4731.
Wang Panpan, Xu Zehan, Wang Li, et al. A hybrid optimization control strategy of efficiency and dynamic performance of dual-active-bridge DC-DC converter based on triple-phase-shift[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18):4720-4731.
- [9] Luo C, Huang S. Novel voltage balancing control strategy for dual-active-bridge input-series-output-parallel DC-DC converters[J]. IEEE Access, 2020, 8: 103114-103123.
- [10] 蔡逢煌,林俊腾,江加辉,等. 结合电流应力优化的 ISOP-DAB 变换器电压均衡控制[J]. 太阳能学报,2023,44(10): 90-96.
Cai Fenghuang, Lin Junteng, Jiang Jiahui, et al. Voltage balance control of ISOP-DAB converters with current stress optimization[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(10): 90-96.
- [11] Fu Y, Jing Z, Ren H P. Model predictive control for DAB under extended-phase-shift considering components uncertainty[J]. IET Power Electronics, 2023, 16(12): 1984-1995.
- [12] 张航,李耀华,李子欣,等. 基于扩张状态观测器的直流变压器模型预测控制策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(7): 104-110.
Zhang Hang, Li Yaohua, Li Zixin, et al. Model predictive control strategy of DC transformer based on extended state observer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 104-110.
- [13] 蔡逢煌,石安邦,江加辉,等. 结合电流应力优化与虚拟电压补偿的双有源桥 DC-DC 变换器三重移相优化控制[J]. 电工技术学报,2022,37(10):2559-2571.
Cai Fenghuang, Shi Anbang, Jiang Jiahui, et al. Triple-phase-shift optimal control of dual-active-bridge DC-DC converter with current stress optimization and virtual voltage compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(10):2559-2571.
- [14] Shi H, Wen H, Chen J, et al. Minimum-reactive-power scheme of dual-active-bridge DC-DC converter with three-level modulated phase-shift control[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(6):5573-5586.
- [15] 曾进辉,梁博文,余雪萍,等. 考虑电流应力优化的 ISOP-DAB 变换器扰动均压控制策略[J]. 电网技术,2023,47(11): 4448-4457.
Zeng Jinhui, Liang Bowen, Yu Xueping, et al. Disturbance voltage sharing control of ISOP-DAB converter considering current stress optimization[J]. Power System Technology, 2023, 47(11):4448-4457.
- [16] 游志强,高宁,李闻达,等. 混合双有源桥变换器扩展移相控制方法研究[J]. 电力电子技术,2023,57(9): 108-111.
You Zhiqiang, Gao Ning, Li Wenda, et al. Research on extended phase-shift control scheme for hybrid dual active bridge converter[J]. Power Electronics, 2023, 57(9): 108-111.

收稿日期:2025-07-10

修改稿日期:2025-10-24

(上接第22页)

- [16] 颜湘武,贾焦心,王德胜,等. 虚拟同步发电机的并网功率控制及模式平滑切换[J]. 电力系统自动化,2018,42(9): 91-99.
Yan Xiangwu, Jia Jiaoxin, Wang Desheng, et al. Power control and smooth mode switchover for grid-connected virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9):91-99.
- [17] 周于清,姚伟,宗启航,等. 基于运行短路比的新能源场站中跟/构网可切换单元的最优配置方法[J]. 电网技术,2024,48(3):1091-1104.
Zhou Yuqing, Yao Wei, Zong Qihang, et al. Optimal configuration of grid-following/grid-forming switchable units in new energy stations based on operating short-circuit ratio[J]. Power System Technology, 2024, 48(3):1091-1104.
- [18] 陈艳霞,李菁,李鑫明,等. 构网型与跟网型 VSC 的功率精确分配控制策略[J]. 电力电子技术,2023,57(2): 117-120.
Chen Yanxia, Li Jing, Li Xinming, et al. Power accurate distribution control strategy of grid-forming and grid-following VSC[J]. Power Electronics, 2023, 57(2): 117-120.

收稿日期:2026-04-09

修改稿日期:2026-06-16