

# 基于参考电动势动态预同步的跟/构网平滑切换控制

王婷, 张学广, 徐殿国

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

**摘要:**针对并网逆变器在跟网与构网模式切换过程中因控制结构差异及实际稳态电动势与额定值失配导致的暂态冲击问题,为降低切换过程中的功率与电流冲击,提出一种基于参考电动势动态预同步的跟/构网平滑切换策略。该策略依据积分器状态量差异引起冲击的机理分析,采用动态预同步控制,通过实时运行工况信息求解构网模式下的理论参考电动势,并在切换前对其动态跟踪与预同步控制,修正积分器状态,消除电动势失配。实验结果表明,所提方法在不同电网强度下均能实现平滑切换,切换时间缩短85%,功率冲击始终低于3%。在电网阻抗识别存在 $\pm 20\%$ 误差时,系统仍未出现振荡,切换过程稳定可靠,验证了该策略在复杂实际工况中的适应性与有效性。

**关键词:**并网逆变器;跟/构网平滑切换;暂态冲击;积分器预同步;参考电动势;动态预同步

**DOI:**10.15938/j.emc.2025.12.002

中图分类号:TM464

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)12-0013-11

## Seamless transition between grid-following and grid-forming modes based on dynamic feedforward of reference electromotive force

WANG Ting, ZHANG Xueguang, XU Dianguo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

**Abstract:** To address transient impacts caused by control structure differences and mismatches between actual steady-state electromotive force and rated values during grid-following and grid-forming mode switching in grid-connected inverters, a dynamic pre-synchronization strategy based on reference electromotive force was proposed to mitigate power and current impacts during switching. Based on an analysis of the impact mechanism caused by differences in integrator state quantities, and in this strategy a dynamic pre-synchronization control method was employed. The theoretical reference electromotive force was calculated in grid-forming mode using real-time operational condition information, dynamically tracks and pre-synchronizes it before switching, the integrator state was corrected, and electromotive force mismatch was eliminated. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves smooth mode switching under various grid strengths, reducing switching time by 85% while maintaining power impacts consistently below 3%. Even with  $\pm 20\%$  errors in grid impedance identification, the system exhibits no oscillations, ensuring stable and reliable switching. This validates applicability and effectiveness of the strategy under complex actual operating conditions.

**Keywords:** grid-connected inverter; grid-following/grid-forming smooth switching; transient impacts; integrator state pre-synchronization; reference electromotive force; dynamic pre-synchronization

收稿日期: 2025-08-14

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51977046)

作者简介: 王婷(2002—),女,硕士研究生,研究方向为并网逆变器控制、海上风电柔性直流送出并网;

张学广(1982—),男,博士,教授,研究方向为新能源发电技术、电力电子装置并网稳定分析、柔性直流输电技术等。

通信作者: 张学广

## 0 引言

全球能源结构正向低碳化与可再生化转型,这一趋势塑造了以“双高”为特征的新型电力系统<sup>[1]</sup>。该背景下,作为新能源并网核心接口的逆变器,其运行的灵活性与稳定性面临着更高的标准要求<sup>[2]</sup>。

并网逆变器有两种常见的控制模式:电流源型跟网模式(grid-following, GFL)与电压源型构网模式(grid-forming, GFM)<sup>[3]</sup>。两种控制模式各具特点:跟网模式以其快速的动态响应和精准的功率控制为优势,但缺乏对电网的主动支撑能力,弱电网适应性不足<sup>[4-5]</sup>;构网模式则能为系统提供惯性与阻尼,有效支撑弱网运行,但其动态响应较慢、控制复杂,且在强电网下存在稳定性挑战<sup>[6-7]</sup>。为适应复杂电网工况,提升高比例新能源系统的鲁棒性与适应性,实现逆变器在跟/构网模式间的无缝切换至关重要。

现有研究主要聚焦于微网并网与离网运行模式间的平滑切换<sup>[8-11]</sup>。文献[8]提出一种满足微网孤岛/并网切换的VSG技术,采用幅值和相位预同步,以降低模式切换过程中的冲击电流。文献[9]提出一种广义控制算法,切换瞬间无需改变控制层结构,解决了微网并网PQ控制与离网下垂控制切换的暂态振荡问题。文献[10]提出一种附加电流控制器和电压保持器的组合式平滑切换控制:并网时附加电流环与电感电流环共同调节并网电流;孤岛时电压控制器作外环与电感电流内环共同调节输出电压。文献[11]提出附加补偿器的切换控制,通过附加电容电流反馈、输出电流前馈回路和改进下垂机制,实现并网到孤岛的平稳过渡。在此类微网切换策略中,GFL与GFM控制模式通常被分别应用于并网与离网/孤岛运行状态。

切换控制的相关研究不止于微网场景,面对新能源高渗透率导致的电网强度弱化,并网跟/构网平滑切换成为提升弱网适应性与系统稳定运行的关键。文献[12]兼顾跟/构网型变流器优点,指出跟/构网切换控制可以提高单机及场站级多机系统的弱电网适应性。文献[13]选取运行短路比作为跟/构网切换指标,采取积分器跟随稳态点和GFM预同步做到平滑无扰切换。文献[14]基于非特征次谐波注入的电网阻抗辨识,提出一种基于积分器预同步的PQ/VSG自适应切换策略,电网强弱大幅度变化时,实现双模式柔性切换。为解决全功率风电变流器在跟/构网模式切换时直流母线电压的暂态冲击问题,文献[15]基于积分器切换方案,采用延迟切

换策略,通过平滑电流指令值的过渡,实现扰动最小化与直流母线电压的稳定。文献[16]提出一种Koopman算子理论与模型预测控制相结合的统一控制框架,解决切换瞬间随机非线性和固有动态的影响。文献[17]通过积分器预同步实现角度平滑过渡,通过功率前馈方法实现电流参考值的预同步。

现有针对跟/构网切换的研究多数基于积分器预同步方法,并引入上述附加控制:阻抗自适应切换<sup>[12]</sup>;延迟切换信号<sup>[15]</sup>;功率电流前馈<sup>[17]</sup>等。然而,此类方法的电动势预同步过程通常基于一个静态、理想化的预设工作点,本质上是将参考电动势 $E$ 视为恒定值,而未考虑实际工况的动态变化。事实上,系统稳态电动势 $E$ 是随系统功率、电网阻抗等实时变化的动态变量<sup>[18]</sup>。此静态预设值与动态实际值间的失配,正是切换瞬间产生冲击的根源。

因此,为保证并网逆变器跟/构网模式在复杂工况下切换的鲁棒性与平滑性,本文基于积分器预同步方法提出基于参考电动势动态预同步的切换策略,该策略考虑系统实际运行工况,实时计算系统实际的理论电动势参考值,并在切换前对该电动势进行动态预测与跟踪调节,保障逆变器在不同电网运行条件下均能实现双模式间的平滑切换。所提切换策略的核心创新在于突破传统静态电动势预同步的固有局限,解决“静态预设理想电动势”与“实际动态参考电动势”之间的失配问题,从根本上有效消除因电动势失配所引起的切换瞬间的电流与功率冲击。首先对比分析跟/构网控制结构中各积分器输出状态量的差异,量化分析模式切换瞬间暂态冲击产生机理;随后阐述积分器预同步切换方法基本原理,并指出其存在的固有局限性;在此基础上,提出一种参考电动势动态预同步切换策略以实现跟/构网模式的平滑切换;最后,通过实验验证所提控制策略的有效性与适用性。

## 1 切换瞬间暂态冲击产生机理

本节首先通过对比分析跟网模式(锁相环同步与功率-电流双环控制)与构网模式(虚拟同步发电机与电压-电流双环控制)控制结构的差异及各积分器输出状态量的变化,旨在分析两种控制模式切换过程中暂态冲击产生的机理。

### 1.1 电流源型跟网模式(GFL)

跟网控制模式以电网电压为同步基准,通过锁相环(phase-locked loop, PLL)实时跟踪电网相位,其核心控制结构如图1所示,分为三层控制。

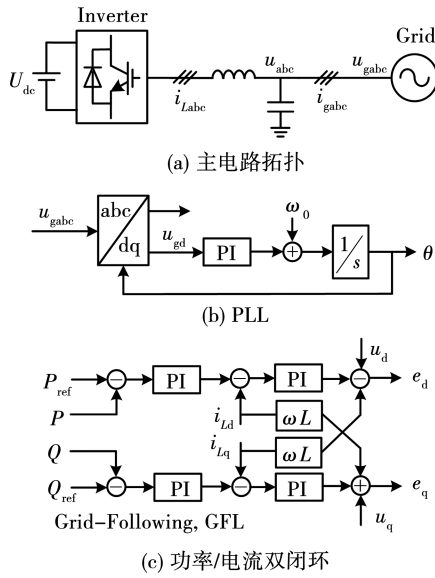


图 1 跟网模式控制拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of GFL mode control

1) 锁相环同步单元: 实时跟踪电网电压相位, 有:

$$\left. \begin{aligned} \omega_{pll} &= \omega_0 + (k_{ppll} + \frac{k_{ipll}}{s})(u_q - 0); \\ \theta_{pll} &= \frac{1}{s}\omega_{pll} \circ \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $u_q$  表示并网点电压 q 轴分量;  $\theta_{pll}$ 、 $\omega_{pll}$  表示锁相环单元产生的相角及角频率;  $\omega_0$  表示额定角频率,  $\omega_0 = 100\pi$ ;  $k_{ppll}$ 、 $k_{ipll}$  表示锁相环的比例系数及积分系数。

2) 功率外环: 采用功率控制生成电流参考值。功率指令经 PI 调节器输出 dq 轴电流参考值:

$$\left. \begin{aligned} i_{dref} &= (k_{pp} + \frac{k_{ip}}{s})(P_{ref} - P); \\ i_{qref} &= - (k_{pp} + \frac{k_{ip}}{s})(Q_{ref} - Q) \circ \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $P_{ref}$ 、 $Q_{ref}$  表示并网功率参考值,  $P$ 、 $Q$  表示逆变器实际输出功率值;  $i_{dref}$ 、 $i_{qref}$  表示 dq 轴电感电流的参考值;  $k_{pp}$ 、 $k_{ip}$  表示功率外环的比例系数及积分系数。

3) 电流内环: 作为电感电流的快速跟踪层, 实现对功率指令的精准、快速跟踪, 有:

$$\left. \begin{aligned} e_d &= (k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{dref} - i_{Ld}) - \omega_0 L_f i_{Lq} + u_d; \\ e_q &= (k_{pi} + \frac{k_{ii}}{s})(i_{qref} - i_{Lq}) + \omega_0 L_f i_{Ld} + u_q \circ \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$  表示实际并网点电压的 dq 轴分量;  $i_{Ld}$ 、 $i_{Lq}$  表示实际电感电流的 dq 轴分量;  $L_f$  表示逆变器的滤波电感;  $k_{pi}$ 、 $k_{ii}$  表示电流内环的比例及积分系数;  $e_d$ 、 $e_q$  表示逆变器的输出调制电压。

GFL 控制模式下等效电路表现为受控电流源, 其等效电路如图 2 所示。该特性决定了其输出相位完全由 PLL 锁定, 其动态特性强耦合于电网强度, 从而在弱电网下存在显著的失稳风险。

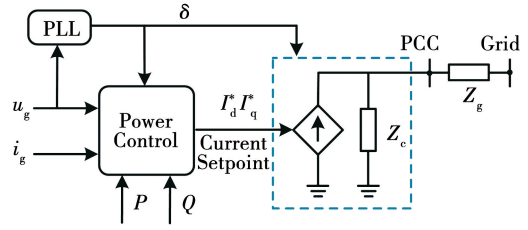


图 2 跟网控制等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of GFL control

## 1.2 电压源型构网模式 (GFM)

本文研究的构网控制采用虚拟同步 (virtual synchronous generators, VSG) 控制, 通过模拟同步发电机运行特性, 在不借助锁相环下实现电网角度实时跟踪。VSG 控制系统如图 3 所示。

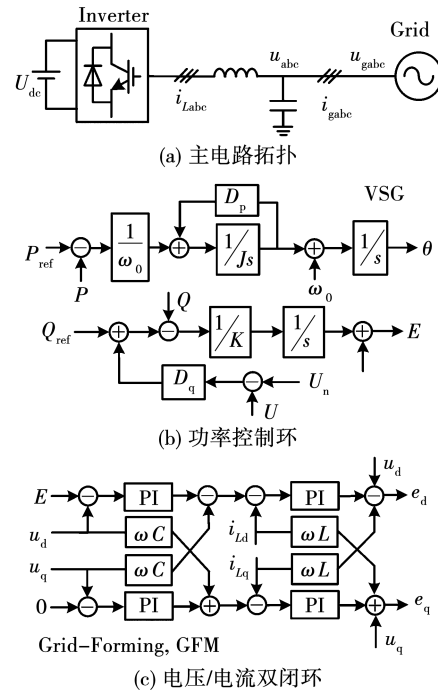


图 3 构网模式控制拓扑图

Fig. 3 Topology diagram of GFM mode control

1) 功率外环: 其有功-频率环通过调节虚拟转子转速来响应功率波动, 从而为系统提供惯量支撑; 其无功-电压环则模拟调压器特性, 通过引入调压系数  $K$  动态调整内电势幅值, 以维持端口电压稳定, 即:

$$\left. \begin{aligned} J \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{\omega_n} (P_{\text{ref}} - P) - D_p (\omega - \omega_0); \\ E &= U_n + \frac{1}{K} \int [Q_{\text{ref}} - Q + D_q (U_n - U)] dt \end{aligned} \right\} (4)$$

式中:  $J$ 、 $K$  表示惯量与调压系数;  $D_p$ 、 $D_q$  表示有功、无功下垂系数;  $U_n$ 、 $U$  表示并网点电压额定值与实际测量值;  $E$  表示 VSG 生成的参考电动势。

2) 电压电流内环: 内环利用电压电流双 PI 调节器对输出电压和电感电流进行控制, 输出得到参考调制电压, 电流环控制同式(3), 即:

$$\left. \begin{aligned} i_{d\text{ref}} &= (k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s})(E - u_d) - u_q \omega_0 C; \\ i_{q\text{ref}} &= (k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s})(0 - u_q) + u_d \omega_0 C. \end{aligned} \right\} (5)$$

式中:  $C$  表示逆变器的滤波电容;  $k_{pv}$ 、 $k_{iv}$  表示交流电压外环比例及积分系数。

GFM 控制模式下等效电路表现为受控电压源 (如图4), 具备惯性与阻尼能力, 为电网提供频率和电压支撑, 显著增强系统弱网条件下的稳定性。

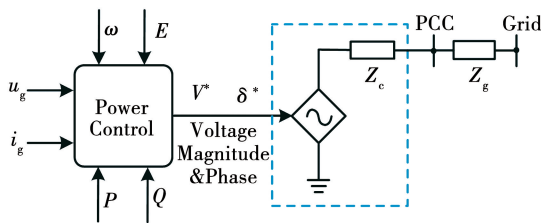


图4 构网控制等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of GFM control

图5表示VSG系统与电网的功率交互。假设理想电网幅值为  $U_g$  (假设保持恒定),  $\delta$  表示功角, 即VSG并网点电压与电网电压间的相角差,  $R_g$  与  $X_g$  分别表示线路电阻与感抗,  $U_{\text{vsg}}$  是VSG输出的参考电动势值, 即  $E$ 。

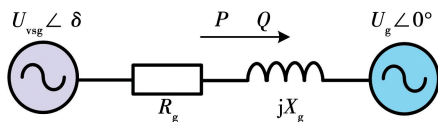


图5 VSG与电网的交互

Fig. 5 Interaction between VSG and the power grid

根据图5可计算出VSG型变流器并网功率:

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{3}{2} \cdot \frac{(U_{\text{vsg}}^2 - U_{\text{vsg}} U_g \cos\delta) R_g + X_g U_{\text{vsg}} U_g \sin\delta}{R_g^2 + X_g^2}; \\ Q &= \frac{3}{2} \cdot \frac{(U_{\text{vsg}}^2 - U_{\text{vsg}} U_g \cos\delta) X_g - R_g U_{\text{vsg}} U_g \sin\delta}{R_g^2 + X_g^2}. \end{aligned} \right\} (6)$$

考虑到实际并网运行时功角  $\delta$  通常较小, 因此可应用小信号线性化原理, 近似取  $\sin\delta \approx \delta$ ,  $\cos\delta \approx 1$ ; 同时忽略线路电阻 ( $R_g \ll X_g$ ), 从而将完整功率模型简化为下式所示的线性形式, 该简化模型建立了  $\Delta P$  与  $\Delta\delta$ 、 $\Delta Q$  与  $\Delta U_{\text{vsg}}$  之间的显性数学关系, 便于后续定量分析切换瞬间冲击的产生机理, 即:

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{\text{vsg}} U_g \delta}{X_g}; \\ Q &= \frac{3}{2} \cdot \frac{(U_{\text{vsg}}^2 - U_{\text{vsg}} U_g)}{X_g}. \end{aligned} \right\} (7)$$

### 1.3 模式切换瞬间暂态冲击产生机理分析

并网逆变器从跟网切换至构网模式时, 其输出特性从受控电流源变为受控电压源, 系统控制结构发生变化, 切换瞬间的暂态冲击主要源于控制角度 ( $\Delta\theta$ ) 及调制电压 ( $\Delta e$ ) 的跳变。然而, 其具体体现为控制系统内部积分器输出状态量—相位、参考电动势及电流参考值的跳变, 其中参考电动势 ( $\Delta E$ ) 及电流参考值 ( $\Delta i_{\text{ref}}$ ) 通过影响调制电压而间接对切换过程造成影响, 如图6所示。

1) 相位跳变 ( $\Delta\theta$ ): GFL 控制系统相角  $\theta_{\text{PLL}}$  由锁相环产生的  $\omega_{\text{PLL}}$  经积分器产生; GFM 控制系统相角  $\theta_{\text{VSG}}$  由VSG功率外环产生的  $\omega_{\text{VSG}}$  经积分器产生; 由于切换前两积分器独立运行, 其累积状态量存在偏差, 导致切换瞬间相位角存在跳变, 进而引起有功功率的暂态冲击  $\Delta P$  为

$$\Delta P = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_{\text{vsg}} U_g}{X_g} \Delta\theta. \quad (8)$$

2) 参考电动势跳变 ( $\Delta E$ ): GFL 模式下, 电动势幅值处于非主动调节状态; GFM 模式下, 参考电动势幅值由无功偏差经积分环节产生; 模式切换前, 由于GFM控制积分器持续累积误差, 其输出状态量与VSG模式的稳态值存在失配。切换瞬间, 该状态量跳变引发参考电动势幅值阶跃, 进而导致无功功率的暂态冲击  $\Delta Q$  为

$$\Delta Q = \frac{3}{2} \cdot \frac{(2U_{\text{vsg}} - U_g)}{X_g} \Delta E. \quad (9)$$

3) 电流参考值突变 ( $\Delta i_{ref}$ ): GFL 模式电流参考值由功率外环产生; GFM 模式电流参考值由交流电压外环产生, 切换前后两个积分器输出状态量不一致, 导致电流参考值阶跃, 进而引起变流器输出电流 ( $\Delta i_d, \Delta i_q$ ) 与调制电压 ( $\Delta e_d, \Delta e_q$ ) 突变, 进一步导致切换瞬间产生功率 ( $\Delta P, \Delta Q$ ) 的暂态冲击为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= I_{d0} \Delta e_d + I_{q0} \Delta e_q + E_{d0} \Delta i_d + E_{q0} \Delta i_q; \\ \Delta Q &= I_{d0} \Delta e_q - I_{q0} \Delta e_d + E_{q0} \Delta i_d - E_{d0} \Delta i_q. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中:  $I_{d0}, I_{q0}$  表示逆变器输出电流的稳态值;  $E_{d0}, E_{q0}$  表示逆变器输出电压的稳态值。

针对模式切换瞬间暂态冲击产生的机理, 可借助如图 6 所示的简化矢量图进行分析。图中:  $e$  表示未加任何切换控制系统产生的电压矢量;  $e_1$  表示与  $e$  幅值相同的电压矢量;  $e_2$  为加入静态电动势预同步控制后的电压矢量;  $e_3$  为切换后的理想稳态电压矢量, 也为加入动态电动势预同步控制后的电压矢量。由图可知, 相角突变 ( $\Delta\theta$ ) 及调制电压突变 ( $\Delta e_2 + \Delta e$ ) 导致系统实际电压矢量  $e$  与理想电压矢量  $e_3$  之间存在偏差  $\Delta e_3$ , 进而在切换瞬间产生冲击, 而调制电压的突变由电动势突变 ( $\Delta E$ ) 与电流参考值突变 ( $\Delta i_{ref}$ ) 导致。综上所述: 系统内部积分器输出状态量—相角 ( $\Delta\theta$ )、参考电动势 ( $\Delta E$ ) 及电流参考值 ( $\Delta i_{ref}$ ) 共同影响着系统切换瞬间的冲击。

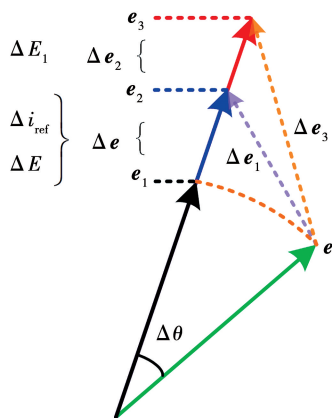


图 6 模式切换瞬间的简化电压矢量图

Fig. 6 Simplified voltage vector diagram at mode switching instants

## 2 参考电动势动态预同步切换

本节针对并网模式跟/构网切换, 首先阐明基于积分器预同步的切换控制机理, 指出其虽能减小切

换瞬间积分器输出状态量的突变, 但存在固有局限; 进而提出一种基于参考电动势动态预同步的切换策略, 彻底消除了切换瞬间的冲击。

### 2.1 基于积分器预同步的切换控制

本节基于积分器预同步进行跟/构网模式间的切换: 模式切换前, 通过协同调节跟/构网控制环路的积分器输出状态量, 实现控制角度、参考电动势等变量的预同步, 确保切换瞬间系统积分器输出状态量的连续性。结合 1.3 节模式切换暂态冲击产生机理分析, 跟/构网平滑切换的预同步环节包含:

1) 相角  $\theta$  预同步: GFL 模式下, 控制系统的相角由锁相环得到,  $K_2$  开关拨至 1; GFM 模式下, 逆变器模拟同步发电机的转子特性, 角度由有功功率外环产生,  $K_2$  开关拨至 2。为避免跟/构网切换过程中角度的非连续变化, GFL 运行状态下,  $K_0$  断开,  $K_1$  闭合, 保证此时 VSG 有功环积分器输出的角度与 PLL 输出角度保持一致。

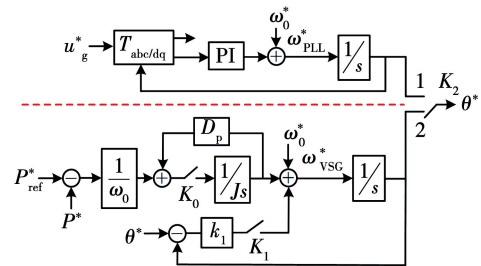


图 7 相角预同步

Fig. 7 Phase angle pre-synchronization

2) 参考电动势  $E$  预同步: GFL 模式下, 并网点电动势无控制; GFM 模式下, 电动势由无功环节产生 ( $K_3$  拨至 2), 并通过电压外环进行实时跟踪。为防止 GFM 无功环积分器在 GFL 模式下一直累积, 导致切换前后积分器输出量突变, GFL 控制下,  $K_3$  开关拨至 1, 保证积分器输出保持为  $U_n^*$ 。

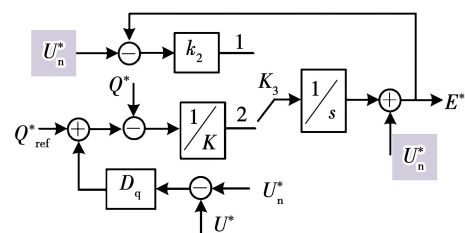


图 8 参考电动势预同步

Fig. 8 Reference electromotive pre-synchronization

3) 电流给定值  $i_{\text{ref}}^*$  预同步: 以  $i_{\text{dref}}^*$  的预同步为例进行分析, 如图 9 所示。GFL 模式下,  $K_4$ 、 $K_6$  拨至 1,  $i_{\text{dref}}^*$  由功率外环产生, 保证跟网运行下恒功率输出, 同时  $K_5$  拨至 1, 保证 GFM 电压外环积分器的输出与实际的  $i_{\text{d}}^*$  保持一致; GFM 模式下,  $K_5$ 、 $K_6$  拨至 2,  $i_{\text{dref}}^*$  由交流电压外环产生, 控制并网点电压值, 同时  $K_4$  拨至 2, 保证 GFL 功率外环积分器的输出与实际的  $i_{\text{dref}}^*$  保持一致, 保证 d 轴参考电流切换前后的平滑性。

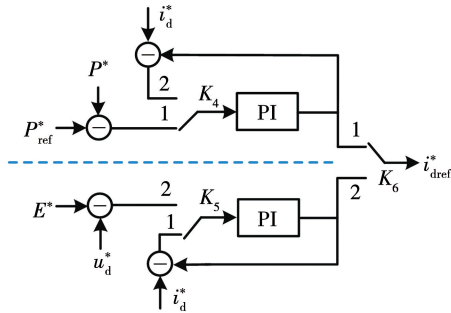


图 9 d 轴电流参考值预同步

Fig. 9 d-axis current reference pre-synchronization

## 2.2 参考电动势动态预同步的必要性

传统预同步切换策略基于理想状态下稳态的额定电动势  $U_n^* = 1$  pu 预同步, 认为  $E^*$  始终恒定不变, 未考虑实际运行工况的影响, 其本质是静态工作点匹配。但实际系统中, 电动势值  $E$  会随着不同的运行工况而改变, 受系统输出功率 ( $P_{\text{ref}}$ 、 $Q_{\text{ref}}$ )、并网点电压 ( $U_g$ )、线路阻抗 ( $X_g$ ) 影响。因此上述参考电动势的静态预同步存在固有局限性。

借助图 6 对比分析静态与动态电动势预同步切换控制的区别: 前者将电压矢量  $e$  修正为  $e_2$ , 消除了切换中的部分电压矢量跳变  $\Delta e_1$ ; 后者在此基础上, 考虑由于实际运行工况导致的  $\Delta e_2$ , 最终将电压矢量  $e$  修正为  $e_3$ , 彻底消除了电压矢量跳变  $\Delta e_3 = \Delta e_1 + \Delta e_2$ , 从而实现系统的平滑过渡。

为进一步研究  $\Delta E_1$  受实际运行工况的影响, 在忽略线路电阻的条件下, 联立式 (6) 及功率平衡方程  $P = P_{\text{ref}}$   $Q = Q_{\text{ref}}$ , 求解出不同运行工况下的实际电动势值  $U_{\text{vsg}}$  为

$$U_{\text{vsg}} = \sqrt{\frac{4Q_{\text{ref}}^2 X_g^2 + 3U_g^2 X_g + 3\sqrt{U_g^4 X_g^2 + 8Q_{\text{ref}}^2 U_g^2 X_g^3 / 3} - 16P_{\text{ref}}^2 X_g^4 / 9}{6X_g}} \quad (11)$$

式 (11) 表明,  $U_{\text{vsg}} = f(U_g, P_{\text{ref}}, Q_{\text{ref}}, X_g)$ , 其值随运行工况动态变化。在  $Q_{\text{ref}} = 0$  且电网阻抗辨识准确时, 可得简化表达式为

$$U_{\text{vsg}} = \sqrt{\frac{U_g^2}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{U_g^4 - \frac{16}{9} P_{\text{ref}}^2 X_g^2}} \quad (12)$$

基于式 (11), 图 10 进一步给出了不同有功功率 ( $P$ ) 与短路比 (SCR) 条件下稳态电动势  $U_{\text{vsg}}$  的变化曲线, 结合式 (12) 进一步分析表明, 参考电动势随实际运行工况呈非线性变化: 输出功率越大, 短路比越小, 电网越弱, 则稳态电动势与额定电动势偏差值越大, 即图 6 中的变化量  $\Delta E_1$  越大。

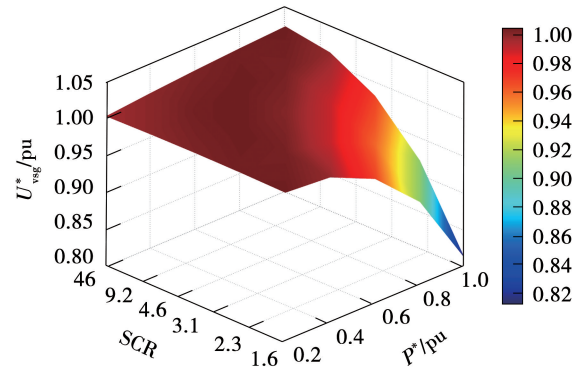


图 10 不同功率与短路比下电动势稳态值

Fig. 10  $U_{\text{vsg}}^*$  under different  $P^*$  and SCR

本文所提的基于参考电动势动态预同步的切换控制依赖于电网阻抗辨识, 为探究电网阻抗参数识别不准确时该改进控制策略的适用性。图 10 给出阻抗参数识别存在一定的误差时 (10%), 不同运行功率下理论计算电动势  $U_{\text{vsg}}^*$  与额定电动势  $U_n^* = 1$  pu 的偏差量。

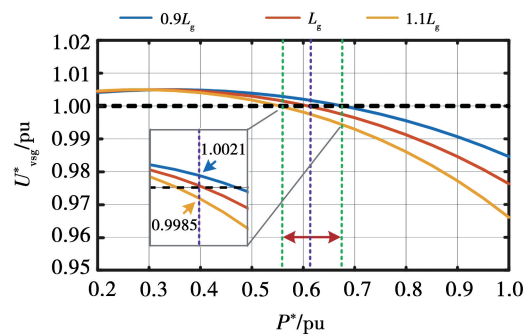


图 11 阻抗识别不精准下理论电动势稳态值

Fig. 11  $U_{\text{vsg}}^*$  under inaccurate impedance identification

分析可知, 阻抗辨识误差 10% 范围内, 该改进

切换控制策略在较窄的功率运行范围内存在一定的偏差,最大偏差量为 0.25%,在误差允许范围内,表明其对参数误差具备良好适应性。后续实验将进一步量化分析阻抗参数辨识的偏差对模式切换瞬间的电流、功率冲击的影响。

### 2.3 参考电动势动态预同步策略

区别于静态电动势预同步方法,本节构建了一种基于参考电动势动态预同步的平滑切换控制策略,具体实现如图 12 所示。

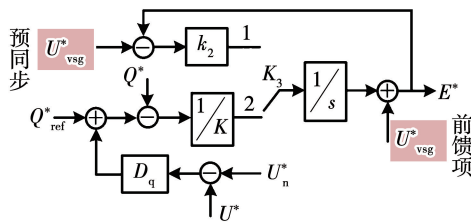


图 12 参考电动势动态预同步

Fig. 12 Dynamic pre-synchronization of electromotive

1) 实时数据采集与工况感知。采集并网点关键运行参数:三相电压、电流瞬时值( $u_g, i_g$ );逆变器输出功率( $P, Q$ );功率指令( $P_{ref}, Q_{ref}$ ) (由上级能量管理系统或本地控制设定);基于扰动注入法和扰动信号提取法对电网阻抗参数进行辨识<sup>[19]</sup>,实时估计电网电阻  $R_g$  和感抗  $X_g$ 。

2) 动态电动势实时计算。基于步骤 1 采集的实时运行参数( $U_g, P_{ref}, Q_{ref}, X_g$ ),结合式(11)所示的 VSG 电动势解析模型,实时求解构网模式下维持稳态运行所需的电动势幅值  $U_{vsg}$ 。

3) 动态预同步与切换。GFL 模式期间,计算  $U_{vsg}$  替代额定值  $U_n$  进行预同步,使得 GFM 无功环积分器输出在切换前就被调整到与当前运行工况所要求的理论稳态值相匹配;同时将  $U_{vsg}$  作为电压前馈信号,进一步提升预同步精度。该方法消除了因电动势失配导致的暂态冲击,结合相位角和电流参考值预同步,确保切换过程的平滑性。

所提动态预同步策略的核心优势在于,其突破了积分器预同步控制中参考电动势恒定的理想化假设,充分计及了实际运行工况的动态影响。无论电网阻抗变化(强/弱电网切换),或系统功率指令调整,所提方法均能实时求解出匹配当前工况的电动势参考值,从根源上解决了电动势失配问题,显著提升了切换过程的平滑性与适用性。

## 3 实验证明

本节在并网逆变器实验平台针对积分器预同步控制及参考电动势动态预同步切换控制下跟/构网模式切换进行分析与实验验证。图 13 为实验平台实物照片。表 1、表 2 分别为实验平台参数及跟/构网型并网逆变器的控制参数。

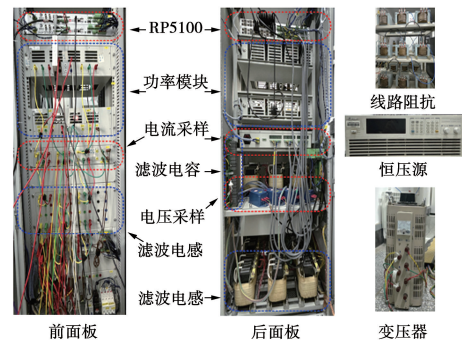


图 13 并网逆变器实验平台

Fig. 13 Grid-connected inverter test platform

表 1 实验平台参数

Table 1 Experimental platform parameters

变量	数值
直流母线电压 $U_{dc}/V$	200
交流线电压 $U_{ac}/V$	95
滤波电感 $L_f/mL$	7
滤波电容 $C_f/\mu F$	6.6
采样频率 $f_s/kHz$	3.2
额定容量 $S_n/kVA$	1

表 2 跟/构网控制参数

Table 2 Control parameters for GFL/GFM

变量	数值
锁相环比例/积分系数 $k_{pll}/k_{ipll}$	0.000 25/0.006 4
电流环比例/积分系数 $k_{pi}/k_{ii}$	4/32
功率环比例/积分系数 $k_{pp}/k_{ip}$	0.02/0.8
电压环比例/积分系数 $k_{pv}/k_{iv}$	0.15/3.2
惯量系数 $J$	0.03
电压调节系数 $K$	50
有功下垂系数 $D_p$	20
无功下垂系数 $D_q$	30

为验证所提策略的有效性,首先对比了相同工况下( $P_{ref}=0.5$  pu (SCR=3.6),  $Q_{ref}=0$ )静态与动态电动势预同步的控制效果,实验结果如图 14 所示。

基于积分器预同步的切换控制时(图 14(a)),

系统出现明显有功(0.12 pu)与无功(0.5 pu)冲击;而采用动态电动势预同步控制后(图14(b)),功率与电流冲击均被抑制在3%以内。

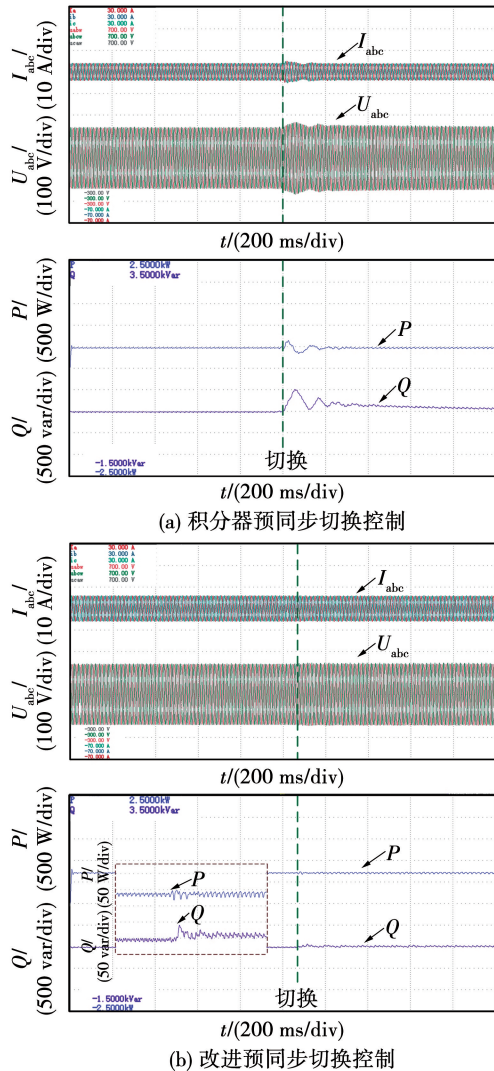


图14 预同步改进前后实验结果(SCR = 3.6)

Fig. 14 Experimental results before and after pre-synchronization improvement(SCR = 3.6)

对比分析上述实验结果,可得以下结论:所提方法将切换瞬间功率冲击从0.12 pu降至0.03 pu以下,降幅达75%;切换时间从300 ms缩短至30 ms以内,实现双模式的平滑切换,实验初步验证了动态电动势预同步切换方法的有效性。

为进一步验证改进切换策略在弱电网的有效性,在 $P_{ref} = 1$  pu(SCR = 1.8)的工况下开展了双模式切换实验。实验结果如图15所示。

基于积分器预同步的切换控制时(图15(a)),系统出现明显有功(0.2 pu)与无功(0.6 pu)冲击;而采用动态电动势预同步控制后(图15(b)),功率

与电流冲击均被抑制在1%以内。

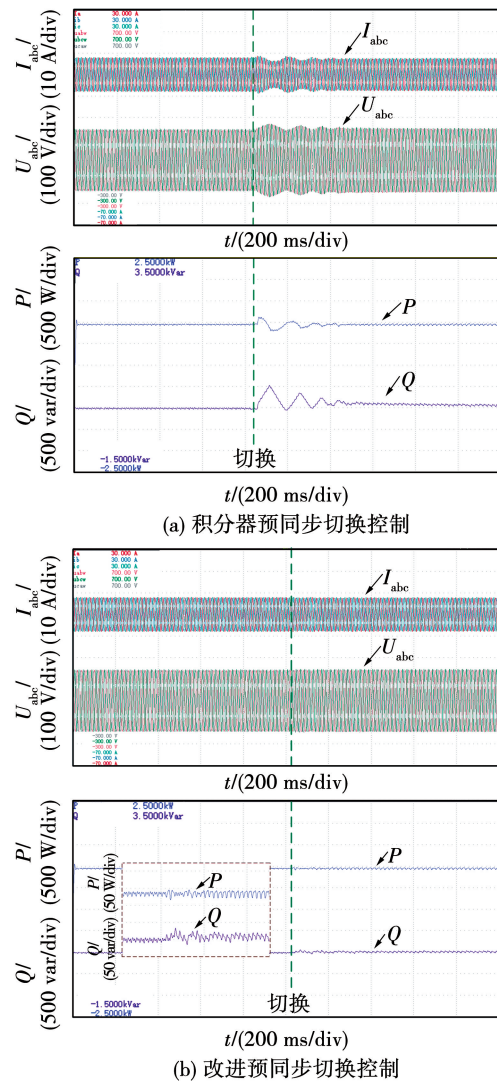


图15 预同步改进前后实验结果(SCR = 1.8)

Fig. 15 Experimental results before and after pre-synchronization improvement(SCR = 1.8)

对比分析上述实验结果,可得以下结论:所提方法将切换冲击从0.2 pu降至0.01 pu以下,降幅达95%;切换时间从400 ms缩短至50 ms以内,电流平滑过渡,实验结果进一步验证了所提参考电动势动态预同步方法在弱电网实验工况的适用性。

进一步探究线路阻抗参数辨识误差对改进控制的影响,实验于两种实际工况:1)  $P_{ref} = 0.7$  pu(SCR = 2.6);2)  $P_{ref} = 0.6$  pu(SCR = 3),实验结果如图16、图17所示,图(a)、图(b)分别为参考电动势静态、动态预同步控制的系统输出功率;图(c)、图(d)和图(e)、图(f)分别为线路阻抗识别误差为 $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ 时电动势动态预同步控制的系统输出功率。

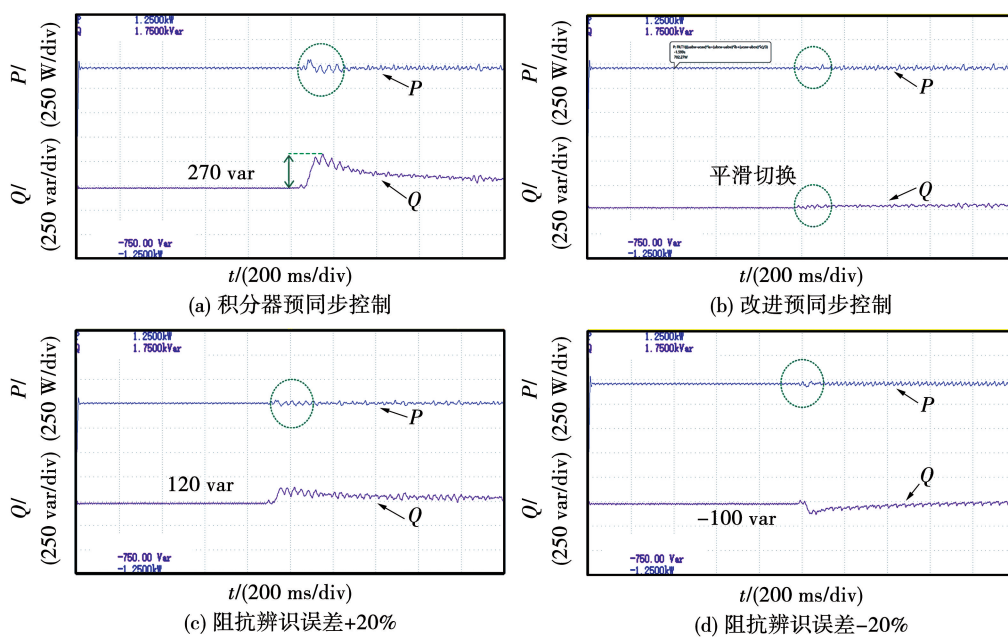


图 16 阻抗辨识精度的影响 ( $P_{ref} = 0.7 \text{ kW}, SCR = 2.6$ )

Fig. 16 Impact of impedance identification accuracy ( $P_{ref} = 0.7 \text{ kW}, SCR = 2.6$ )

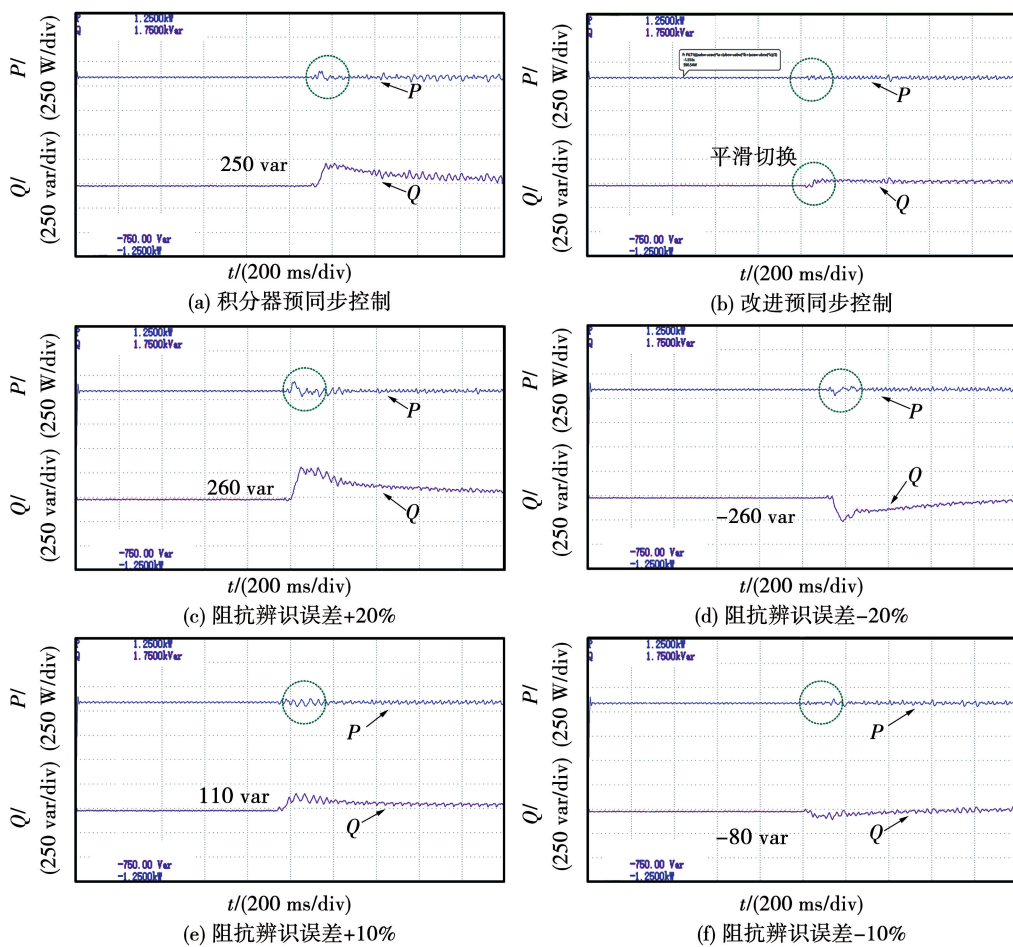


图 17 阻抗辨识精度的影响 ( $P_{ref} = 0.6 \text{ kW}, SCR = 3$ )

Fig. 17 Impact of impedance identification accuracy ( $P_{ref} = 0.6 \text{ kW}, SCR = 3$ )

对比分析实验结果可知,基于参考电动势动态预同步的切换策略在一定的参数误差范围内都能保持较好的适应性。工况一:阻抗辨识误差 20% 时系统切换效果仍好于静态预同步控制;工况二:阻抗辨识误差 10% 时系统切换效果好于静态预同步控制,阻抗辨识的误差为 20% 时系统切换的效果与静态预同步控制效果接近。综上所述,阻抗参数存在一定范围的辨识误差时,系统仍能保持较高的精度与稳定性,控制效果未见显著退化。

## 4 结论

本文针对新能源电力系统中并网逆变器的跟/构网模式切换,提出了一种基于参考电动势动态预同步的平滑切换控制策略。通过理论分析与实验验证,得出以下结论:

1) 模式切换瞬间暂态冲击主要源于控制角度及调制电压的跳变,具体体现为系统内部积分器输出状态量—相位、电动势及电流参考值在切换瞬间的突变,其中电动势及电流参考值通过影响调制电压而间接影响系统的动态切换过程。

2) 本文所提的参考电动势动态预同步切换策略,通过结合实际运行信息,动态求解构网模式下的理论参考电动势值,并以该值进行预同步与电压前馈。实验结果表明:所提策略解决了切换瞬间的电动势失配问题,克服了静态电动势预同步的局限性,实现了跟/构网型变流器的平滑切换。

3) 所提控制策略在一定的参数误差范围内保持较好的适应性。实验结果表明:在参数误差允许范围内,系统仍能保持较好的切换性能,体现了该策略在实际工程应用中的可行性与有效性。

### 参考文献:

[1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461.  
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of re-newables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461.

[2] 刘欣,邓昊,贾焦心,等. 含构网型与跟网型逆变器的多变流器系统小干扰稳定性分析方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(15): 4722.  
LIU Xin, DENG Hao, JIA Jiaoxin, et al. Small-signal stability analysis method for multi-converter system with grid-forming and grid-following inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical

Society, 2025, 40(15): 4722.

[3] WANG Xiongfei, TAUL M G, WU Heng, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—an overview[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020(1): 115.

[4] 李雨果,易皓,姜鑫,等. 极弱电网下新能源跟网逆变器低频振荡的机理探究与暂态无功过补稳定性提升策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 482.  
LI Yuguo, YI Hao, JIANG Xin, et al. Mechanism researching on low-frequency resonance of renewable-energy grid-following inverters under very weak grid and the stability-improving strategy based on dynamic reactive power over compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 482.

[5] 刘昊,方天治,张惠丽,等. 弱电网下应对复杂稳定性问题的并网逆变器改进电压前馈通路研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 4955.  
LIU Hao, FANG Tianzhi, ZHANG Huili, et al. Research on an improved voltage feedforward path of grid-connected inverter coping with complex stability issues in weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 4955.

[6] 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.  
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.

[7] 詹长江,吴恒,王雄飞,等. 构网型变流器稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339.  
ZHAN Changjiang, WU Heng, WANG Xiongfei, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339.

[8] 石荣亮,张兴,徐海珍,等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16.  
SHI Rongliang, ZHANG Xing, XU Haizhen, et al. Seamless switching control strategy for microgrid operation modes based on virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 16.

[9] 郑峰,叶韬,李世春,等. 基于储能广义控制算法的微网并/离网平滑切换控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2840.  
ZHENG Feng, YE Tao, LI Shichun, et al. Research on grid-connected/islanded smooth transition of microgrid based on generalized control algorithm of energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2840.

[10] 张纯江,徐青远,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.  
ZHANG Chunjiang, XU Qingyuan, 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.
- [11] 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.
- [12] 张兴, 战祥对, 吴孟泽, 等. 高渗透率新能源发电并网逆变器跟网/构网混合模式控制综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 1.  
ZHANG Xing, ZHAN Xiangdui, WU Mengze, et al. Review on grid-following/grid-forming hybrid mode control for grid-connected converter in high penetration rate of renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(21): 1.
- [13] 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.  
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.
- [14] 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.  
SHENG Jie, GUO Tiantian, JIA Kaili, et al. Dual-mode adaptive flexible switching control strategy for grid-connected converter[J]. Electric Drive, 2025, 55(8): 45.
- [15] 代鹏程, 张兴, 谢震. 构网型全功率风电逆变器的平滑模式切换策略[J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1589.  
DAI Pengcheng, ZHANG Xing, XIE Zhen. Smooth mode switching strategy for grid-forming full-power wind turbine converters[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1589.
- [16] DEBNATH R, KUMAR D, GUPTA G S, et al. A unified novel Koopman-based model predictive control scheme to achieve seamless stabilization of nonlinear dynamic transitions in inverter-based stochastic microgrid clusters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(6): 5441.
- [17] ZHANG Zhe, YANG Yongheng. Control flexibility of power converters for seamless transition between grid-following and grid-forming modes [C]//2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), November 10 - 13, 2023, Guangzhou, China. 2023: 1015 - 1020.
- [18] TIAN Yanjun, XU Xiaoqi, WANG Yi, et al. Full-state feedback power decoupling control for grid forming converter with improved stability and inertia response[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(2): 2930.
- [19] 陈巧地, 张兴, 李明, 等. 基于阻抗辨识的下垂控制并网逆变器孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 123.  
CHEN Qiaodi, ZHANG Xing, LI Ming, et al. Impedance identification based islanding detection method for grid-connected inverter with droop control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 123.

(编辑:刘素菊)