DOI:10.12177/emca.2026.225 文章编号:1673-6540(2026)10-1005-13 中图分类号:TM 715 文献标志码:A

储能变流器跟/构网切换控制策略研究

何志龙[1], 向 昆[1,2], 朱添安[2], 姚俊伟[2], 曹菁阳[1], 顾九州[1], 马 辉[1*]
[1.三峡大学 电气与新能源学院(智慧能源技术湖北省工程研究中心),湖北 宜昌 443002;
2.国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司,湖北 宜昌 443000]

Research on Grid-Following/Grid-Forming Switching Control Strategy for Power Conversion System

He Zhilong[1], Xiang Kun[1,2], Zhu Tian'an[2], Yao Junwei[2], Cao Jingyang[1], Gu Jiuzhou[1], Ma Hui[1*]
[1. School of Electricity and New Energy (Hubei Engineering Research Center for Intelligent Energy Technology), Three Gorges University, Yichang 443002;
2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Yichang Power Supply Company, Yichang 443000]

Abstract: **[Objective]** To address the problem that traditional single grid-following (GFL) or grid-forming (GFM) control is difficult to adapt to under alternating strong and weak grid conditions in doubly-high power systems, a grid impedance identification-based GFL/GFM switching control strategy is proposed. **[Methods]** Grid strength was monitored and the short-circuit ratio (SCR) was determined by using a grid impedance identification technique based on specific harmonic extraction. A hysteresis switching loop was set up: GFM control was adopted when SCR was less than 2, GFL control was adopted when SCR was greater than 3, and the original control mode was maintained within $2 \leqslant SCR \leqslant 3$ to avoid frequent switching in the critical interval. Transient impacts during mode switching were eliminated through a steady-state operating point pre-matching strategy, which compensated the power reference values and initial virtual excitation values. Finally, simulation verification was carried out using Matlab/Simulink. **[Results]** During the alternating variation of strong and weak grid conditions, the proposed strategy accomplished bidirectional switching between GFM and GFL control based on online identification results. At the switching instant, no significant step occurred in the point of common coupling voltage, and the current only exhibited short-term disturbance before rapidly recovering to steady state, with no sustained oscillation in active and reactive power. Comparison results with different switching methods further indicated that steady-state operating point pre-matching mitigated current impacts during the switching process and rendered the mode transition smoother. **[Conclusion]** This strategy integrates the technical advantages of GFL and GFM control. It can realize GFL/GFM switching control according to changes in grid strength, and reduces the voltage, current, and power impacts during mode switching through steady-state operating point pre-matching, thereby improving the operational adaptability and switching stability of the power conversion system under dynamically varying strong and weak grid conditions.

Key words: grid-following; grid-forming; switching control; power conversion system

摘 要:**【目的】**针对双高电力系统下电网强弱交替导致传统单一跟网型(GFL)或构网型(GFM)控制难以适配的问题,提出一种基于电网阻抗辨识的 GFL/GFM 切换控制策略。**【方法】**采用基于特定频次谐波提取的电网阻抗辨识技术监测电网强度并确定短路比(SCR);设置迟滞切换环节,当 SCR<2 时采用 GFM 控制,当 SCR>3 时采用 GFL 控制,当 $2 \leqslant SCR \leqslant 3$ 时保持原控制模式运行,避免临界区间频繁切换。通过稳态工作点预匹配策略补偿功率参考值与虚拟励磁初值,消除模式切换时的瞬态冲击,并通过 Matlab/Simulink 进行仿真验证。**【结果】**在强弱电网交替变化过程中,所提策略能够根据在线辨识结果完成 GFM 与 GFL 控制的双向切换,切换瞬间公共耦合点电压无明显阶跃,电流仅出现短时扰动并能快速恢复稳态,有功、

基金项目:国家自然科学基金(52377191);湖北省自然科学基金(2024AFB584)

National Natural Science Foundation of China (52377191); Natural Science Foundation of Hubei Province, China (2024AFB584)

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

无功功率无持续振荡。与不同切换方法的对比结果进一步表明,稳态工作点预匹配能够减小切换过程中的电流冲击,使模式过渡更加平滑。【结论】该策略融合了 GFL 与 GFM 控制的技术优势,其能够根据电网强度变化实现 GFL/GFM 切换控制,并通过稳态工作点预匹配降低模式切换过程中的电压、电流和功率冲击,提高储能变流器在强弱电网动态变化条件下的运行适应性和切换稳定性。
关键词:跟网型;构网型;切换控制;储能变流器

0 引言

为实现“双碳”战略目标,我国新能源装机规模持续稳步增长,电力系统正式进入以“高比例可再生能源、高比例电力电子设备”为特征的双高发展阶段[1]。双高电力系统惯性支撑不足,削弱了储能变流器的动态响应特性,严重影响系统稳定性[2]。电网短路比(Short Circuit Ratio,SCR)呈现大范围动态波动,强—弱电网交替已成为新常态。储能变流器作为储能系统与电网之间核心的能量交互接口,是平抑新能源功率波动、为电网提供惯量支撑的关键设备,其控制策略的适配性直接关系到储能系统的运行稳定性与电网的调节能力[3]。

当前储能变流器主流控制技术分为跟网型(Grid-Following, GFL)[4-6]与构网型(Grid-Forming,GFM)[7-9]两类。GFL 控制在强电网下具备高精度的充放电功率控制和快速响应能力,但在弱电网下易因锁相环失稳引发谐波谐振、无主动电压支撑能力[10-12];GFM 控制在弱电网与孤岛场景下具备优异的稳定性,能够为系统提供惯量支撑[13-16],但其在强电网下易出现同步失稳、功率控制精度不足[17]。两类控制的固有特性决定了单一控制模式无法适配储能变流器在强—弱电网交替场景下的全工况运行需求。

为实现两类控制的优势互补,国内外学者围绕 GFL/GFM 切换控制技术开展了相关研究。文献[18]归纳总结了 GFL 和 GFM 两种控制方式,并基于变流器暂态期间过流能力和电压支撑特性,对比讨论了两类控制策略优缺点及使用场景。文献[19]系统综述了高渗透率新能源并网变流器的稳定控制技术,涵盖单机双模式切换、融合控制及多机场站混合模式控制,并探讨了非线性控制在应对电网非线性变化中的应用,为复杂电网条件下变流器稳定性提升提供了技术方向。文献[20-21]通过电网阻抗辨识确定了并网变流器在两种运行模式间的切换边界,但并未涉及切换过程的无缝衔接问题;文献[22]进一步基于 D 分割法定量分析了 GFL/GFM 两种控制模式下的稳定域和切换边界,并结合基频电网阻抗辨识实现双模式控制。文献[23]提出适用于储能变流器的 GFL/GFM 无扰切换控制方法,通过功角观测、坐标系旋转等关键模块实现平滑切换,并基于阻抗分析验证了该方法在 SCR 动态变化下的稳定性与优异的动静态性能。文献[24]提出交叉型控制概念,融合电压角度与电流幅值形成特性,在对称及不对称故障期间既能快速限制故障电流,又能保障同步稳定性。文献[25]采用在线阻抗估计和普通最小二乘回归计算 SCR,并引入迟滞逻辑实现 GFL/GFM 自动切换。

本文提出一种基于电网阻抗辨识的 GFL/GFM 切换控制策略。首先,阐述电网阻抗辨识原理,以此判定电网强弱,明确电网强度与相应控制模式的匹配关系,进而切换到相应的控制模式。最后,基于 Matlab/Simulink 搭建储能变流器并网系统仿真模型。仿真结果表明,所提策略能显著提升储能变流器在复杂电网环境下的全工况适配能力:可根据电网强度变化切换至对应控制模式,并通过稳态工作点预匹配,降低模式切换过程中的电压、电流与功率冲击,提高其在强弱电网动态变化条件下的运行适应性与切换稳定性。

1 储能变流器并网系统建模

储能变流器主电路拓扑结构如图 1 所示,其中系统由电池组、双向 Buck-Boost 电路、逆变器、LC 滤波器、电网阻抗和电网组成。图 1 中,U_{bat} 为电池组端电压;L 为双向 Buck-Boost 电路的储能电感;C 为直流母线电容;U_{dc} 为直流母线电压;L_{f}、C_{f} 分别为交流侧滤波电感、滤波电容;i_{a}、i_{b}、i_{c} 为逆变器侧三相输出电流;i_{ga}、i_{gb}、i_{gc} 为三相并网电流;i_{Ca}、i_{Cb}、i_{Cc} 为三相滤波电容支路电流;u_{pcca}、u_{pccb}、u_{pccc} 分别为公共耦合点(Point of Common Coupling,PCC)处的三相相电压;Z_{g} 为 PCC 与电网之间的等效电网阻抗,其中 $Z_{\mathrm{g}}\angle\alpha=R_{\mathrm{g}}+\mathrm{j}\omega L_{\mathrm{g}}$,$L_{\mathrm{g}}$ 为电网电感,R_{g} 为电网电阻。

设 abc 坐标系的变量为 x_{a}、x_{b}、x_{c},设 dq 坐标系的变量为 x_d、x_q,经坐标变换后,得到 dq 坐标

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

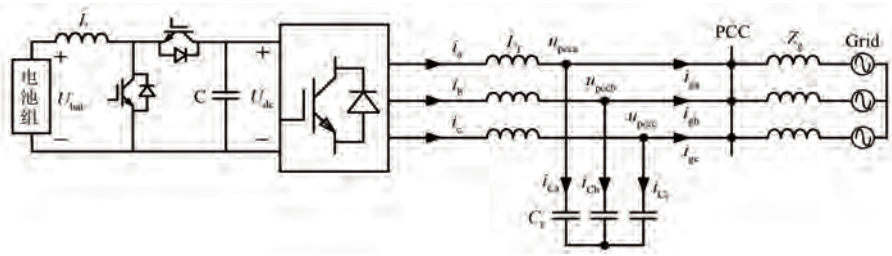


图 1　储能变流器主电路拓扑结构

Fig. 1　Main circuit topology of the power conversion system

系的变量为

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120°) & \cos(\theta+120°) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-120°) & -\sin(\theta+120°) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$\theta=\omega t$，ω 为基波角频率，取 $\omega=2\pi f$。

故 dq 坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} u_d - u_{pccd} = L_f\dfrac{di_d}{dt} - \omega L_f i_q \\ u_q - u_{pccq} = L_f\dfrac{di_q}{dt} + \omega L_f i_d \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} i_d - i_{gd} = C_f\dfrac{du_{pccd}}{dt} - \omega C_f u_{pccq} \\ i_q - i_{gq} = C_f\dfrac{du_{pccq}}{dt} + \omega C_f u_{pccd} \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} u_{pccd} - u_{gd} = R_g i_{gd} + L_g\dfrac{di_{gd}}{dt} - \omega L_g i_{gq} \\ u_{pccq} - u_{gq} = R_g i_{gq} + L_g\dfrac{di_{gq}}{dt} + \omega L_g i_{gd} \end{cases} \tag{4}$$

式中：u_d、u_q 分别为逆变器交流侧输出电压的 d、q 轴分量；u_{pccd}、u_{pccq} 分别为 PCC 处电压的 d、q 轴分量；i_d、i_q 分别为逆变器侧输出电流的 d、q 轴分量；i_{gd}、i_{gq} 分别为并网电流的 d、q 轴分量。

输出有功、无功功率表达式为

$$\begin{cases} P = \dfrac{3}{2}(u_{pccd}i_{gd} + u_{pccq}i_{gq}) \\ Q = \dfrac{3}{2}(-u_{pccd}i_{gq} + u_{pccq}i_{gd}) \end{cases} \tag{5}$$

将 δ 定义为功率角，即 PCC 电压矢量 $U_{pcc}\angle\delta$ 与电网电压矢量 $U_g\angle 0$ 之间的相位差。将 α 定义为电网阻抗角，电网阻抗 $Z_g\angle\alpha=R_g+jX_g$，则 $\alpha=\arctan(X_g/R_g)$。PCC 与电网的相位关系如图 2 所示。从 PCC 流向电网的有功功率 P_g 和无功功率 Q_g 可表示为

$$\begin{cases} P_g = 3\dfrac{U_{pcc}U_g\cos(\alpha-\delta) - U_g^2\cos\alpha}{Z_g} \\ Q_g = 3\dfrac{U_{pcc}U_g\sin(\alpha-\delta) - U_g^2\sin\alpha}{Z_g} \end{cases} \tag{6}$$

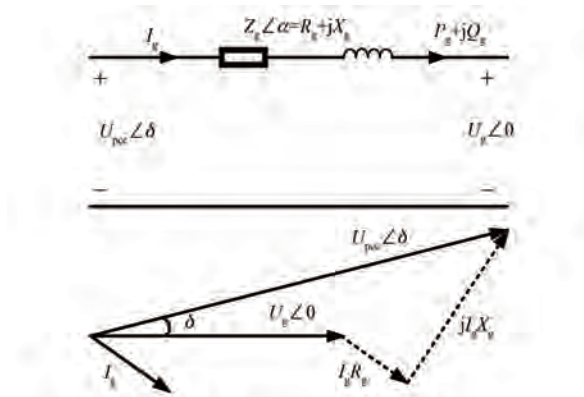


图 2　PCC 与电网之间的相位关系

Fig. 2　Phase relationship between PCC and grid

2　基于特定频次谐波提取的电网阻抗辨识

2.1　电网阻抗辨识原理

电网阻抗是衡量电网强度的核心指标，在高比例新能源并网的复杂电网环境中，受负载变化、新能源发电间歇性及电网故障等多种因素作用，其呈现出显著的时变特征。精确获取电网阻抗的变化，是实现两类控制模式平滑切换的前提与关键。针对此问题，本研究采用基于特定频次谐波提取的电网阻抗辨识方法，获取电网阻抗及短路比，其整体框图如图 3 所示，其中谐波电流指令生成框图如图 4 所示。

图 3 中，储能变流器、LCL 滤波器、电网阻

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

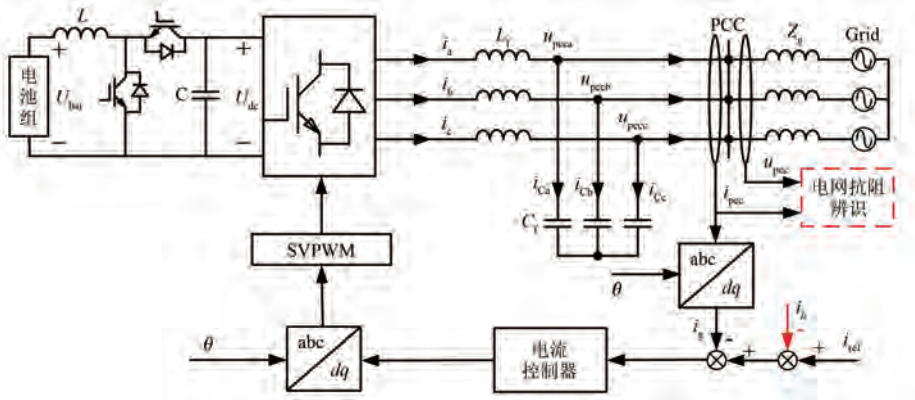


图 3 基于特定频次谐波提取电网阻抗测量框图

Fig. 3 Block diagram of grid impedance measurement based on specific frequency harmonic extractio

抗、电网、带谐波注入的电流环、空间矢量脉宽调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)环节与阻抗提取测量部分共同构成系统主体。通过将谐波电流注入并叠加于电流控制指令,从而实现对注入谐波电流的精确控制。

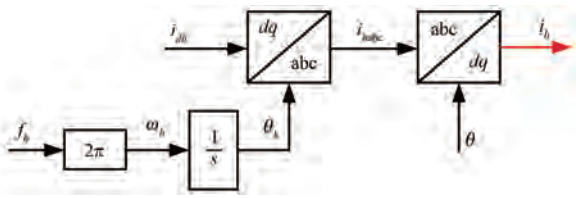


图 4 谐波电流指令生成框图

Fig. 4 Block diagram of harmonic current command generation

图 4 中,i_{dh} 为 d 轴输入的谐波电流幅值;ω_h 为谐波角频率;f_h 为谐波频率;θ_h 为谐波电流相位;i_{habc} 为三相扰动电流。

2.2 电网阻抗计算

为提取注入的特定频次谐波电流并将其用于电网阻抗计算,可根据式(7)计算电网等值阻抗:

$$\begin{cases} Z(h)=\dfrac{v_{pcc}(h)}{i_{pcc}(h)} \\ |Z(h)|=\dfrac{|v_{pcc}(h)|}{|i_{pcc}(h)|} \\ \angle Z(h)=\angle v_{pcc}(h)-\angle i_{pcc}(h) \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} R_g=|Z(h)|\cos\angle Z(h) \\ L_g=\dfrac{1}{\omega_h}|Z(h)|\sin\angle Z(h) \end{cases} \tag{8}$$

式中:$v_{pcc}(h)$、$i_{pcc}(h)$分别为 PCC 处提取的 h 次谐波电压、谐波电流;$|v_{pcc}(h)|$、$|i_{pcc}(h)|$分别为相应谐波电压、电流的幅值。

SCR 的计算式如式(9)所示:

$$SCR=\frac{S_{ac}}{S_N}=\frac{2U_g^2}{2\pi f\cdot P_N L_g} \tag{9}$$

式中:S_{ac} 为 PCC 处交流电网的短路容量;S_N 为储能变流器的额定容量;U_g 为电网额定电压;P_N 为储能变流器的额定功率。

为保证电网阻抗辨识结果的准确性,并降低扰动注入对电能质量的影响,扰动信号的选取遵循以下原则:注入频次的谐波应避开基波频率及 3 次、5 次及 7 次等主要的低次背景谐波频率,且需低于电流内环有效带宽,并避开滤波器谐振频率附近频段。

3 GFL/GFM 切换控制策略

所提策略的核心思路是:储能变流器在强网下采用 GFL 控制,弱网下采用 GFM 控制,通过动态切换实现优势互补。为此,提出一种基于电网阻抗辨识的 GFL/GFM 切换控制策略,其原理是利用辨识环节获取短路比 SCR,并以其大小为据控制切换开关,使变流器能主动感知电网阻抗变化并切换至对应控制模式。

为避免辨识结果瞬时波动导致控制模式切换频繁,设置迟滞切换环节:当 SCR<2 时采用 GFM 控制,SCR>3 时采用 GFL 控制,当 2≤SCR≤3 时保持原控制模式运行,避免临界区间频繁切换。由此形成"PCC 电压/电流采样,特定频次谐波提取,电网阻抗在线辨识,SCR 计算,迟滞判别,模式切换开关动作"的闭环控制链路。两类控制的核心差异主要体现在同步控制策略上,具体分析如下。

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

3.1 GFL 控制

GFL 控制由锁相环（Phase-Locked Loop，PLL）单元、电压环路和电流环路组成，利用 PLL 实现储能变流器与电网的同步。外部功率控制环路用于调节注入电网的有功和无功功率，其输出经处理生成电流环路的参考值 $i^*_{\mathrm{GFL}d}$ 和 $i^*_{\mathrm{GFL}q}$，如式(10)所示：

$$\begin{cases} i^*_{\mathrm{GFL}d} = \left(k_{\mathrm{p}PQ} + \dfrac{k_{\mathrm{i}PQ}}{s}\right)(P_{\mathrm{ref}} - P_{\mathrm{e}}) \\ i^*_{\mathrm{GFL}q} = -\left(k_{\mathrm{p}PQ} + \dfrac{k_{\mathrm{i}PQ}}{s}\right)(Q_{\mathrm{ref}} - Q_{\mathrm{e}}) \end{cases} \tag{10}$$

式中：$k_{\mathrm{p}PQ}$、$k_{\mathrm{i}PQ}$ 分别为功率控制器的比例系数、积分系数。

为实现对外部功率环路给定参考值的跟踪，采用内部电流环路对变流器电流进行调节，其输出如式(11)所示：

$$\begin{cases} u_d = \left(k_{\mathrm{p}i} + \dfrac{k_{\mathrm{i}i}}{s}\right)(i^*_{\mathrm{GFL}d} - i_d) - \omega_{\mathrm{g}} L_{\mathrm{f}} i_q + u_{\mathrm{pcc}d} \\ u_q = \left(k_{\mathrm{p}i} + \dfrac{k_{\mathrm{i}i}}{s}\right)(i^*_{\mathrm{GFL}q} - i_q) + \omega_{\mathrm{g}} L_{\mathrm{f}} i_d + u_{\mathrm{pcc}q} \end{cases} \tag{11}$$

式中：$k_{\mathrm{p}i}$、$k_{\mathrm{i}i}$ 分别为电流控制器的比例系数、积分系数；ω_{g} 为电网角频率。

3.2 GFM 控制

GFM 控制由虚拟同步机（Virtual Synchronous Generator，VSG）、虚拟励磁回路、电压回路和电流回路组成。与 GFL 控制不同，GFM 控制不需要 PLL 单元进行同步。相反，其模拟了传统同步发电机的功率同步特性，由摆动方程表示为

$$\begin{cases} J\dfrac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{VSG}}}{\mathrm{d}t} = \dfrac{P_{\mathrm{ref}} - P_{\mathrm{e}}}{\omega_{\mathrm{VSG}}} - D(\omega_{\mathrm{VSG}} - \omega_{\mathrm{g}}) \\ \dfrac{\mathrm{d}\theta_{\mathrm{VSG}}}{\mathrm{d}t} = \omega_{\mathrm{VSG}} \end{cases} \tag{12}$$

式中：J 为虚拟转动惯量；D 为阻尼系数；ω_{VSG} 为 VSG 控制的角频率。

在 GFM 控制策略下，电压幅值通过虚拟励磁回路在局部参考坐标系内进行估算，而非依赖 PLL 单元。该虚拟励磁回路采用带有积分环节的下降控制方式，可表示为

$$E_{\mathrm{m}} = E_0 + k_q \int [k_u(U_{\mathrm{N}} - U_{\mathrm{pcc}}) + Q_{\mathrm{ref}} - Q_{\mathrm{e}}]\,\mathrm{d}t \tag{13}$$

式中：E_{m} 为励磁电压；k_q 为积分增益；k_u 为电压下降系数；E_0 为变流器的空载电动势；U_{N} 为额定电网电压的峰值。

电压回路会调节 PCC 电压，使其与虚拟励磁回路设定的参考值保持一致，如式(14)所示：

$$\begin{cases} i_{d\mathrm{ref}} = \left(k_{\mathrm{p}u} + \dfrac{k_{\mathrm{i}u}}{s}\right)(u_{\mathrm{pcref}} - u_{\mathrm{pcc}d}) - \omega_{\mathrm{g}} C_{\mathrm{f}} u_{\mathrm{pcc}q} \\ i_{q\mathrm{ref}} = \left(k_{\mathrm{p}u} + \dfrac{k_{\mathrm{i}u}}{s}\right)(0 - u_{\mathrm{pcc}q}) + \omega_{\mathrm{g}} C_{\mathrm{f}} u_{\mathrm{pcc}d} \end{cases} \tag{14}$$

式中：$k_{\mathrm{p}u}$、$k_{\mathrm{i}u}$ 分别为电压控制器的比例系数、积分系数。

GFM 与 GFL 控制的电流回路几乎相同。唯一区别在于参考值的生成方式：GFM 中由电压控制环节确定，而 GFL 中由外部功率控制环节确定。在 GFM 控制下，电流回路的参考值定义为 $i^*_{\mathrm{GFM}d}$ 和 $i^*_{\mathrm{GFM}q}$。

3.3 切换控制策略

分别采用 *PQ* 控制和 VSG 控制作为 GFL 和 GFM 的控制策略。具体的切换逻辑为：当处于强电网环境时，采用 GFL 控制，以提升新能源的利用效率；在弱电网环境下则切换至 GFM 控制，增强弱电网运行的稳定性，同时为电网提供一定的支撑作用。具体控制方案如下。

控制系统由电网同步环、功率环、虚拟励磁环、电压环和电流环组成。电网同步环路由 PLL 和 VSG 两部分组成。

电网同步控制环节如图 5 所示，其核心功能是生成相位同步角 θ：在 GFL 控制下，开关切换到位置“1”，通过 PLL 跟踪电网电压相位实现同步；在 GFM 控制下，开关切换到位置“2”，通过模拟同步发电机的转子运动特性实现电网同步。随后通过坐标变换将三相静止 abc 坐标系下的变量转换至 *dq* 旋转坐标系。

如图 6 所示，通过式(5)计算所得功率经低通滤波器消除高频分量，得到 P_{e} 和 Q_{e}，旨在避免高频波动对后续控制造成干扰，从而提高系统稳定性。

从 GFM 控制切换到 GFL 控制时，为了保证切换前后稳态工作点一致，GFL 控制的功率参考值 P_{ref} 和 Q_{ref} 应分别等于 GFM 控制稳态工况下的有功功率 $P_{\mathrm{e}0}$ 和无功功率 $Q_{\mathrm{e}0}$。由于变流器与

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

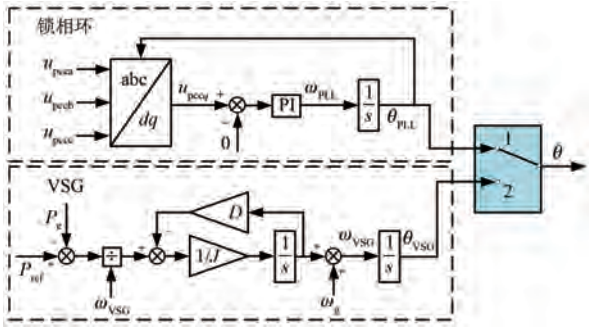


图 5 电网同步控制框图

Fig. 5 Block diagram of grid synchronization control

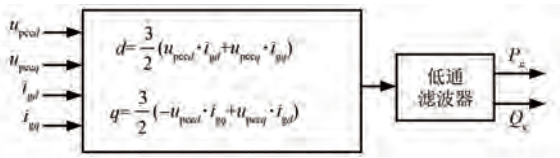


图 6 功率计算

Fig. 6 Power calculation

电网相连,其频率等于电网频率 ω_g,因此可直接令 $P_{ref}=P_{e0}$。而对于 Q_e,由虚拟励磁环路调节可知,稳态运行时 PCC 电压与无功功率呈下垂关系,可表示为

$$k_u(U_N - U_{pcc}) + Q_{ref} - Q_e = 0 \qquad (15)$$

由式(15)可知,当 PCC 电压 U_{pcc} 偏离额定电压 U_N 时,在 GFM 控制下的 Q_e 将不会跟踪 Q_{ref},这可能导致转换前后的稳态工作点存在差异。为解决该问题,需要计算 GFM 控制的稳态值 Q_{e0},并将其设置为 GFL 控制的 Q_{ref}。结合式(2)~(6)及(15),可计算出 Q_{e0} 的稳态值。

功率环路控制如图 7 所示,从 GFM 控制切换到 GFL 控制时,功率环路的开关先位于位置"3",以确保切换前后的工作点相同。当变流器能够有效的跟踪 P_{ref} 和 Q_{ref} 时,功率环路的开关切换到位置"4",接入设定的无功功率参考值 Q_{ref},这样既实现了无缝切换,又恢复了 GFL 控制模式下按

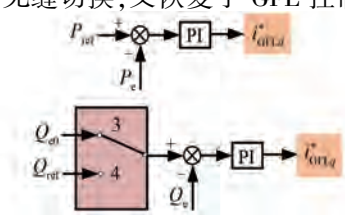


图 7 功率环路控制

Fig. 7 Power loop control

指令调节无功功率的功能。

同样,从 GFL 控制切换到 GFM 控制时,为了确保切换前后的工作点相同,GFM 控制的 $u_{pccdref}$ 和 $u_{pccqref}$ 应与 GFL 控制稳态运行时的 u_{pccd0} 和 u_{pccq0} 相同。鉴于稳态运行时 $u_{pccqref}$ 和 u_{pccq0} 等于 0,仅需考虑 $u_{pccdref}$ 和 u_{pccd0}。结合式(2)~(6),并假设 $P_e=P_{ref}$,$Q_e=Q_{ref}$,则可计算出 u_{pccd0}。因此,切换瞬间虚拟励磁环路开关先置于位置"5"以匹配工作点,待进入稳态后再切至位置"6",从而模拟同步发电机的励磁特性。

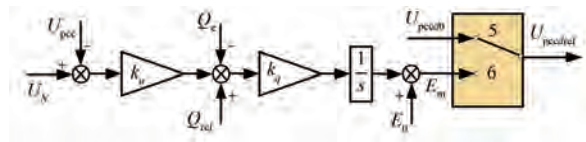


图 8 虚拟励磁控制

Fig. 8 Virtual excitation control

GFM 控制中的电压外环控制框图如图 9 所示,具体设定方式如式(14)所示。

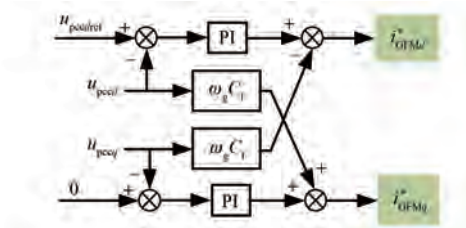


图 9 电压外环

Fig. 9 Voltage loop

电流内环控制框图如图 10 所示,在切换到 GFL 控制时,开关位于位置"1";在切换到 GFM 控制时,开关位于位置"2"。此处开关动作与图 5 电网同步控制中的开关动作一致。

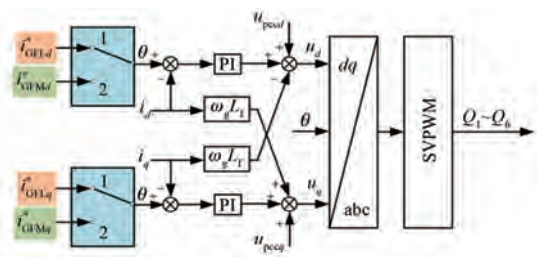


图 10 电流内环

Fig. 10 Current loop

3.4 充放电工况下预匹配策略的适用性分析

GFL/GFM 切换控制策略需兼顾储能充放电双工况,不宜仅针对放电工况设计。在 dq 坐标系下,GFL 控制的有功功率主要由 d 轴电流分量调节;当

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

储能由放电转为充电时，有功功率指令及 d 轴电流指令符号反转，在电流内环未饱和、限幅对称等条件下，充放电切换暂态具有一定镜像关系。然而，当功率流向反转且变流器接近电流限幅边界时，GFL 与 GFM 控制的饱和特性存在差异，暂态并非严格对称。

GFM 模式下 VSG 与虚拟励磁控制通过调节功角、频率及电压幅值主动支撑交流侧；功率流向反转时稳态有功及功角偏差符号变化，但预匹配核心目标仍是保证切换前后 PCC 电压、频率、有功及无功功率的连续性。因此，GFL 切换至 GFM 时可将切换前实际运行点作为 GFM 参考初值，反之将切换前实际功率作为 GFL 参考初值，该过程依赖稳态工作点一致性而非有功固定方向。在工程实际中，受荷电状态约束、直流侧波动等影响，充放电方向可能存在不同限值，预匹配框架仍可沿用，但需结合限幅边界修正参数。本文聚焦电网强度变化下的自适应切换机理，非对称限幅下的充电暂态将在后续工作中展开。

4 仿真分析

为验证所提 GFL/GFM 切换控制策略的有效性，基于 Matlab/Simulink 平台构建系统仿真模型，其拓扑结构如图 1 所示，关键参数如表 1 所示。

表 1 系统关键参数

Tab. 1 Key system parameters

参数名称	参数值
电网电压u_g/V	380
电网频率f_g/Hz	50
电网角频率ω_g/(rad·s^{-1})	314
电网电感L_g/mH	2.2
电网电阻R_g/Ω	0.2
滤波电感L_f/mH	3.5
滤波电容C_f/μF	47
有功功率参考值P_{ref}/kW	10
无功功率参考值Q_{ref}/var	0
空载电动势E_0/V	313
电网额定电压的峰值U_N/V	313
阻尼系数 D	48
虚拟转动惯量 J	7.14
电压下降系数k_u	30
积分增益系数k_q	0.05

为评估特定频次谐波注入对系统的影响，对未注入谐波与注入谐波后的输出电流分别进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform，FFT)分析，结果如图 11、12 所示。

由图 11 可知，未注入谐波时，输出电流基波幅值为 25.58，总谐波失真(Total Harmonic Distortion，THD)为 1.38%，且在 300 Hz 处的谐波背景分量极低，表明该频次原有背景干扰较小。因此，选择 300 Hz 作为特定注入频次，有利于将注入的响应信号与背景谐波有效区分。

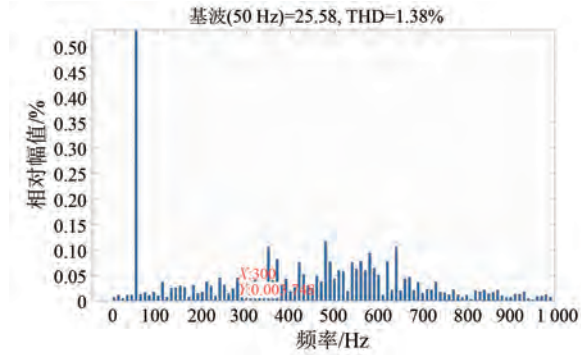


图 11 未注入谐波时的输出电流频谱

Fig. 11 Output current spectrum without harmonic injection

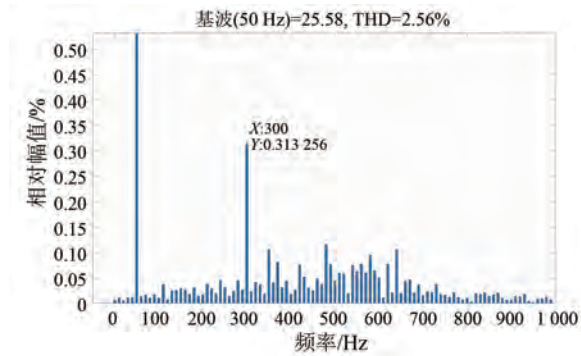


图 12 注入谐波电流后输出电流频谱

Fig. 12 Output current spectrum with harmonic injection

由图 12 可知，加入 300 Hz 的扰动谐波后，输出电流基波幅值仍为 25.58，而在 300 Hz 处的背景分量显著增加，说明注入 300 Hz 的谐波能够在目标频次形成明显响应，为电网阻抗辨识提供有效激励。同时，输出电流的 THD 由 1.38% 增加到 2.56%。该结果表明，注入谐波扰动会对电能质量产生一定的影响，但在所选小信号扰动幅值下，输出电流的 THD 值仍然较低，未出现明显的电流畸变，说明该谐波注入方式对系统正常运行的影响较小。

定义以下四种运行工况：Case I：强电网下采用 GFM 控制；Case II：弱电网下采用 GFM 控制；

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

Case III:强电网下采用 GFL 控制;Case IV:弱电网下采用 GFL 控制。为验证切换逻辑,即在强电网下采用 GFL 控制,在弱电网下采用 GFM 控制,基于 Matlab/Simulink 平台进行仿真验证,结果如图 13 所示。

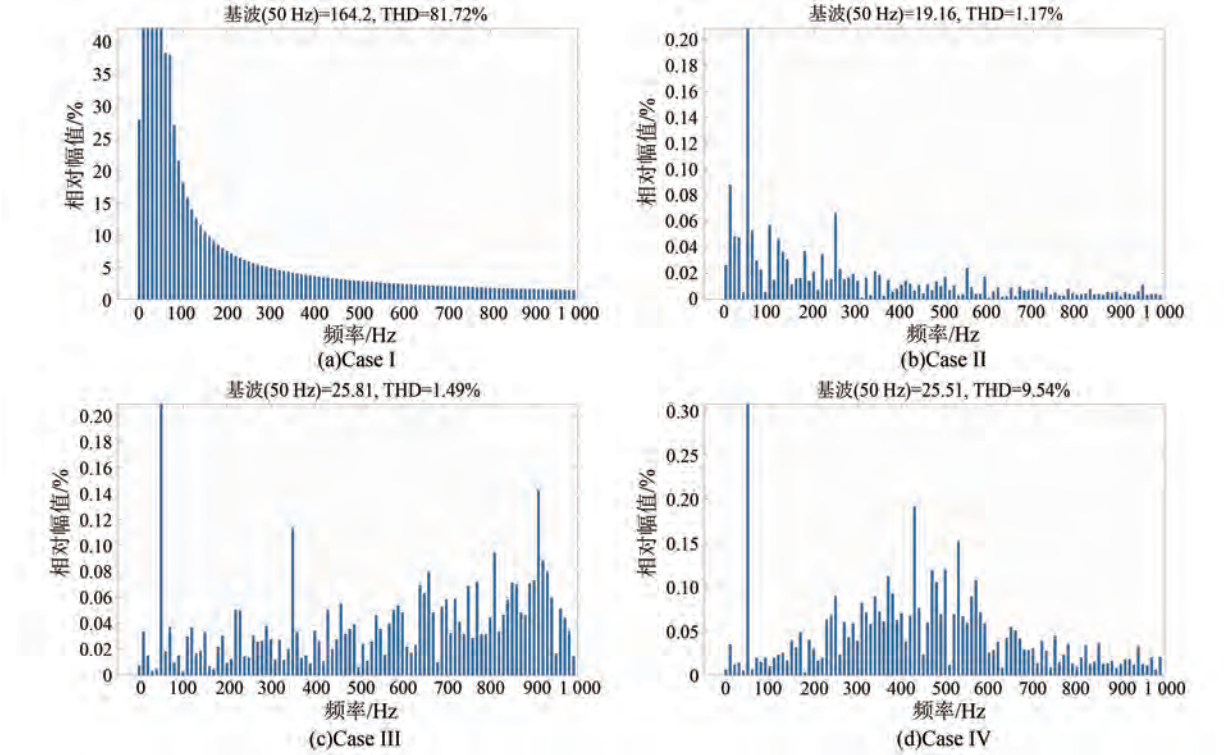


图 13 四种不同工况下的并网仿真电流频谱

Fig. 13 Current spectrum under four different operating conditions

因此,为了验证所提 GFL/GFM 切换控制策略的可行性,在仿真电网侧并入一个阻抗,SCR 变化曲线如图 14 所示,GFL/GFM 模式切换信号如图 15 所示。

图 14、15 中,在 0~0.8 s 内,经在线阻抗辨识后计算得出 SCR≈1.6<2,采用 GFM 控制;0.8~1.6 s 内,SCR 升至≈9.6,转为强电网,切换至 GFL

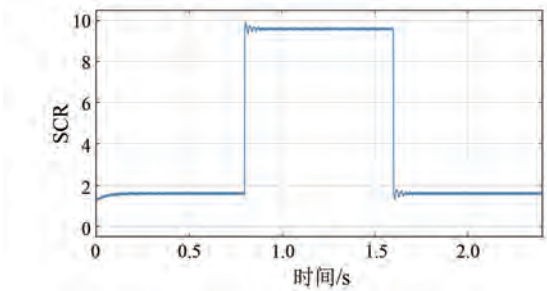


图 14 SCR 变化曲线

Fig. 14 Curve of SCR variation

由图 13 可知,Case Ⅰ下系统失稳,Case Ⅳ下系统 THD 值较大,均不满足要求;而 Case II 与 Case III 下系统稳定且 THD 较小,满足要求。这表明 GFL 控制适用于强电网场景,GFM 控制更适配弱电网场景。

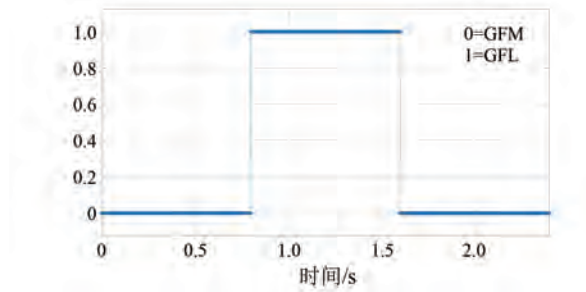


图 15 GFL/GFM 模式切换信号

Fig. 15 GFL/GFM mode switching signal

控制;1.6 s 后,SCR 回落至≈1.6,控制模式切回 GFM。在 0.8 s 时,控制模式从 GFM 切换至 GFL,如图 5 所示,电网同步控制部分从 VSG 控制单元切换至 PLL 控制单元,即开关从位置‘2’切换至位置‘1’。在 t=1.6 s 时,断开并入的阻抗使电网恢复到弱电网的场景,控制模式由 GFL 切回 GFM。如图 5 所示,电网同步控制部分从 PLL 单

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

元切换到 VSG 单元，即开关从位置‘1’切换至位置‘2’。

储能变流器 PCC 端口有功与无功功率波形如图 16、17 所示。图 16、17 中，所提 GFL/GFM 切换控制策略在强弱电网交替变化时仍可稳定运行。在 GFM 与 GFL 双向切换过程中，有功与无功功率无持续振荡与失稳现象，实现了两类控制模式的无扰平滑过渡。

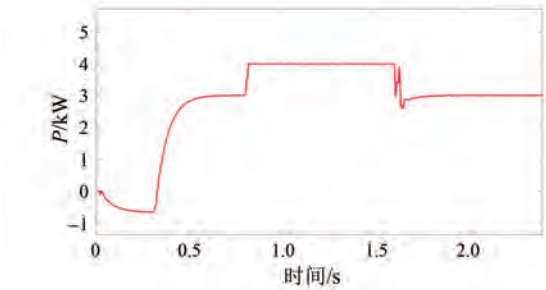


图 16　PCC 端口有功功率

Fig. 16　Active power at the PCC

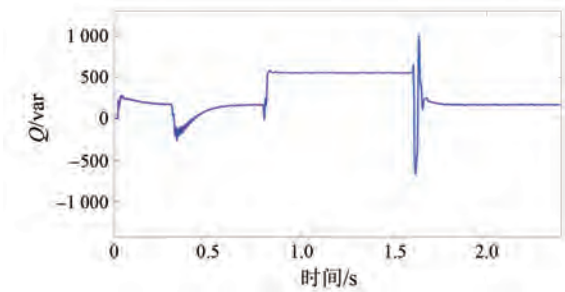


图 17　PCC 端口无功功率

Fig. 17　Reactive power at the PCC

在 $t=0.3$ s 时，储能变流器从充电状态切换到放电状态，在转换过程中 PCC 电压与电流仿真波形如图 18、19 所示。由图 18、19 可知，切换过程中，PCC 电压幅值无明显跌落或波动，波形无畸变，0.3 s 时无暂态冲击与振荡，全程维持稳定幅值输出；电流幅值稳定且波形对称，切换时实现平稳过渡抬升，仅经历极短暂幅值自适应调整便快速收敛至对称正弦稳态，无持续振荡现象。

在 $t=0.8$ s 时，控制方式由 GFM 控制切换到 GFL 控制，所提策略的 PCC 电压与电流的仿真波形分别如图 20、21 所示。由图 20 可知，切换过程中，PCC 电压幅值无明显跌落与畸变，仅在切换时刻产生轻微的波动，无大幅度的电压冲击，可快速恢复到稳定状态。由图 21 可知，切换时电流波形仅存在短暂的扰动，无尖峰冲击与波形畸变，切

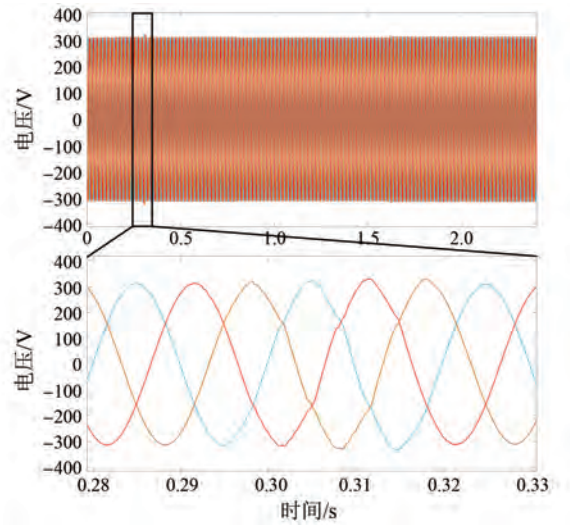


图 18　充电转换至放电状态的 PCC 电压仿真波形

Fig. 18　Simulated PCC voltage waveforms during transition from charging to discharging state

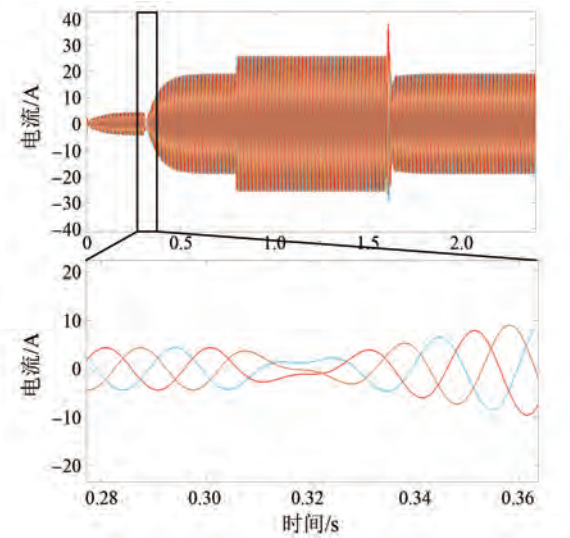


图 19　充电转换至放电状态的 PCC 电流仿真波形

Fig. 19　Simulated PCC current waveforms during transition from charging to discharging state

换完成后迅速恢复到稳定状态，无持续振荡现象，验证了所提稳态工作点预匹配策略可实现 GFM 向 GFL 的平滑切换。

在 $t=1.6$ s 时，控制方式由 GFL 控制切换到 GFM 控制，所提策略的 PCC 电压与电流的仿真波形如图 22、23 所示。由图 22 可知，电压波形仍无明显跌落与畸变，且切换时刻的扰动比前者更小；由图 23 可知，电流波形的扰动较大，但切换完成后依旧可以快速恢复到稳定状态，验证了所提稳态工作点预匹配策略可实现 GFL 向 GFM 的平滑

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

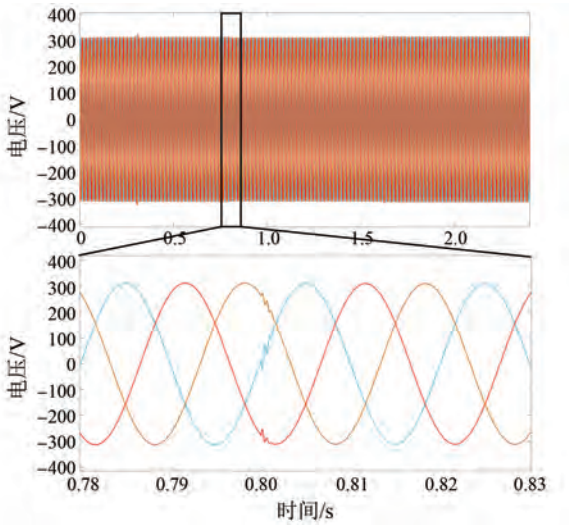


图 20 GFM 切换至 GFL 控制时 PCC 电压仿真波形

Fig. 20 Simulation waveforms of PCC voltage during the transition from GFM to GFL control

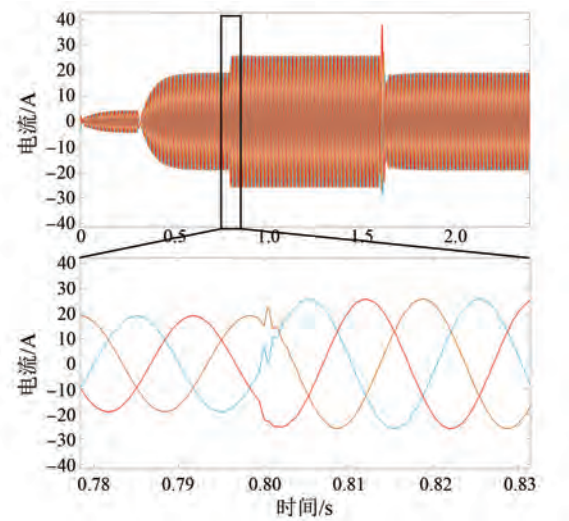


图 21 GFM 切换至 GFL 控制时 PCC 电流仿真波形

Fig. 21 Simulation waveforms of PCC current during the transition from GFM to GFL control

切换。

结果表明,本文所提切换控制策略有效保障了系统的安全运行,以及 GFM 与 GFL 控制模式间的快速切换。

为进一步验证所提稳态工作点预匹配策略的有效性,在相同主电路拓扑、控制参数、SCR 变化过程及切换时刻的条件下,设置三种切换方法进行对比分析:直接切换方法、无扰切换方法以及本文所提稳态预匹配切换方法。

直接切换法仅依据 SCR 阈值直接切换控制

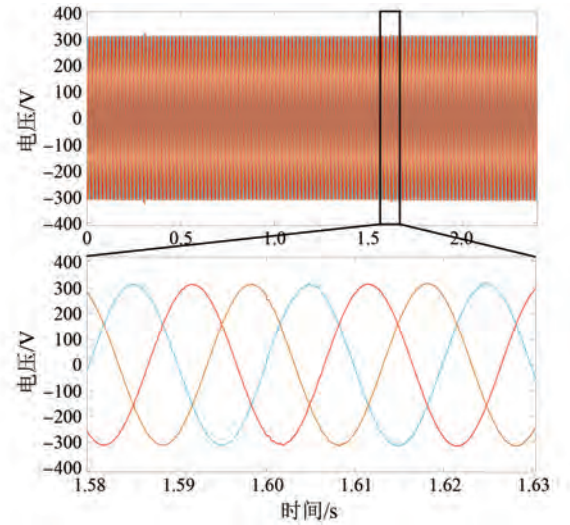


图 22 GFL 切换至 GFM 控制时 PCC 电压仿真波形

Fig. 22 Simulation waveforms of PCC voltage during the transition from GFL to GFM control

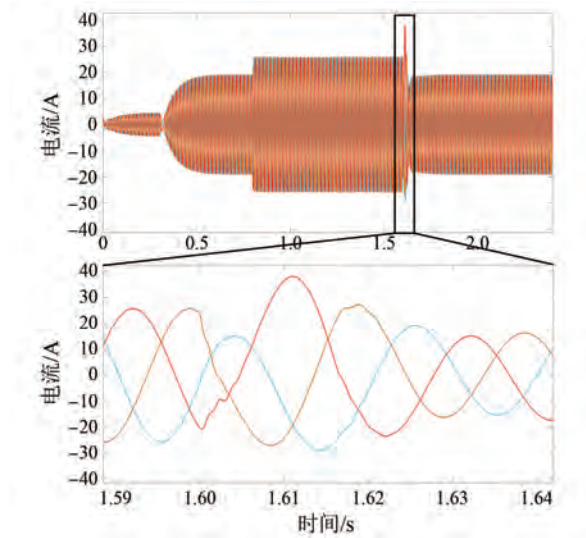


图 23 GFL 切换至 GFM 控制时 PCC 电流仿真波形

Fig. 23 Simulation waveforms of PCC current during the transition from GFL to GFM control

通道,不进行任何状态初始化或工作点匹配;无扰切换方法通过功角观测、坐标系旋转及 PI 调节器初始化来保持内部变量的连续;本文所提 GFL/GFM 切换策略则基于电网阻抗辨识,在切换前后对功率参考值和虚拟励磁初值进行预匹配,使控制参考值与系统运行状态相协调。

GFM 切换至 GFL、GFL 切换至 GFM 过程中三种方法的并网电流对比波形分别如图 24、25 所示。

由图 24、25 可知,直接切换方法因缺少过渡处理,切换瞬间电流扰动最大,引发明显畸变与振

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

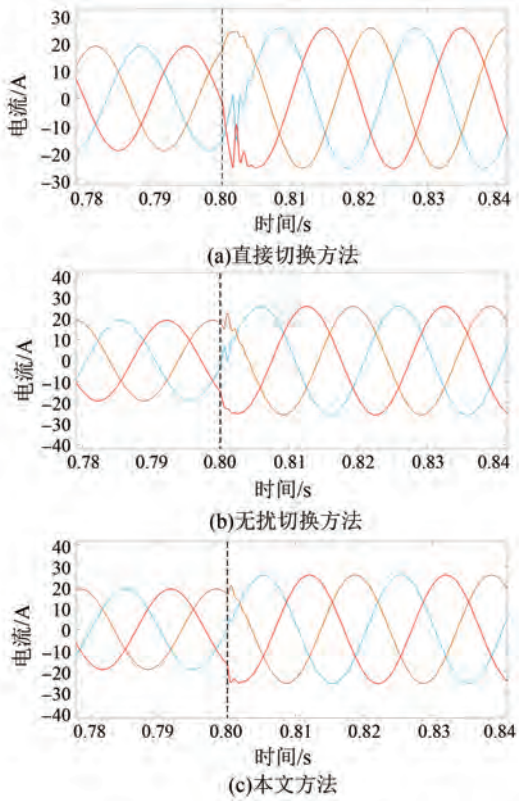


图 24　三种方法下 GFM 切换至 GFL 的电流波形

Fig. 24　GFM-to-GFL current waveforms under three methods

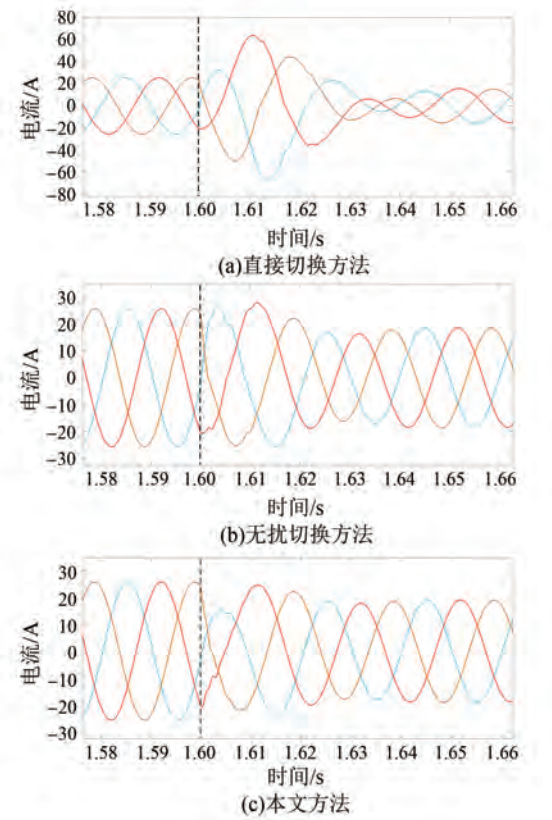


图 25　三种方法下 GFL 切换至 GFM 的电流波形

Fig. 25　GFL-to-GFM current waveforms under three methods

荡；无扰切换方法通过引入功角观测、坐标系旋转及 PI 调节器初始化，有效减小了电流扰动，切换过程相对平滑；本文所提稳态预匹配 GFL/GFM 切换策略则通过稳态工作点预匹配，从根源上协调了切换前后的运行点，仅产生微小波动并迅速恢复稳定。仿真对比验证了所提策略能显著提高模式切换的平滑性。

5　结语

针对“双高”电力系统强弱电网交替运行的复杂场景及单一控制模式适配性不足的问题，提出一种基于特定频次谐波提取电网阻抗辨识的 GFL/GFM 切换控制策略，并通过仿真验证了其在复杂场景下的可行性。研究表明：GFL/GFM 控制分别适配于强、弱电网工况；所提策略融合了电网阻抗辨识、SCR 迟滞判据与双向稳态工作点预匹配，构建了完整的控制框架，有效抑制了临界电网强度下的模式频繁切换，并消除了切换暂态冲击，实现了模式间的平滑过渡；该策略能够根据 SCR 变化自适应切换控制模式，显著提升了储能变流器在动态电网环境下的运行适应性与切换稳定性。

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

何志龙进行了方案设计、内容总结与论文撰写，向昆、朱添安、姚俊伟、曹菁阳和顾九州进行了试验研究，马辉参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

He Zhilong conducted the scheme design, content summarization, and manuscript writing. Xiang Kun, Zhu Tianan, Yao Junwei, Cao Jingyang, and Gu Jiuzhou performed the experimental research. Ma Hui participated in the review and revision of the manuscript. All authors

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

have read and approved the final version of the paper for submission.

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): 461-474.
Xie X R, He J B, Mao H Y, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.

[2] 史兴华, 张雪垠, 甘纯, 等. 基于主动电压抬升的光伏全直流汇集与送出系统网侧故障穿越策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(4): 20-28.
Shi X H, Zhang X Y, Gan C, et al. Fault ride-through strategy for PV full DC collection and transmission system based on active voltage rising method [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(4): 20-28.

[3] 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): 2339-2358.
Zhan C J, Wu H, Wang X F, et al. An overview of stability studies of grid-forming voltage source converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2339-2358.

[4] Zarei S F, Mokhtari H, Ghasemi M A, et al. Control of grid-following inverters under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 184-192.

[5] Li Y T, Gu Y J, Green T C. Revisiting grid-forming and grid-following inverters: A duality theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4541-4554.

[6] Mohammed N, Udawatte H, Zhou W H, et al. Grid-forming inverters: A comparative study of different control strategies in frequency and time domains [J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2024, 5: 185-214.

[7] Fu X K, Sun J J, Huang M, et al. Large-signal stability of grid-forming and grid-following controls in voltage source converter: A comparative study [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7832-7840.

[8] Rathnayake D B, Akeami M, Phurailatpam C, et al. Grid forming inverter modeling, control, and applications [J]. IEEE Access, 2021, 9: 114781-114807.

[9] 李智, 刘辉, 刘明波, 等. 虚拟同步发电机并网稳定性与控制技术研究综述[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 1-10.
Li Z, Liu H, Liu M B, et al. Research overview of grid-connected virtual synchronous generator stability and control technologies [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 1-10.

[10] 陈永平, 陈俊儒, 刘牧阳. 弱电网下虚拟同步补偿器对新能源暂态同步稳定性的影响机理[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1347-1357.
Chen Y P, Chen J R, Liu M Y. Study on the influence mechanism of virtual synchronous compensator on the transient synchronous stability of new energy in weak power grids [J]. Power System Technology, 2025, 49(4): 1347-1357.

[11] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
Shu Y B, Zhang Z G, Guo J B, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.

[12] 李智, 李长喜, 陈创庭, 等. 电流控制型储能变流器控制稳定性分析与谐波谐振抑制技术研究[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 21-28.
Li Z, Li C X, Chen C T, et al. Control stability analysis and research on harmonic resonance suppression technology of current-control type energy storage converter [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 21-28.

[13] Rosso R, Wang X F, Liserre M, et al. Grid-forming converters: Control approaches, grid-synchronization, and future trends—A review [J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2021, 2: 93-109.

[14] 韩应生, 孙海顺, 秦世耀, 等. 电压源型双馈风电并网系统小扰动低频稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1312-1324+1374.
Han Y S, Sun H S, Qin S Y, et al. Low-frequency stability analysis of voltage-sourced doubly-fed wind power grid-connected system under small disturbance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1312-1324+1374.

[15] Mirmohammad M, Azad S P. Control and stability of grid-forming inverters: A comprehensive review [J].

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

Energies，2024，17(13)：3186.

[16] 胡宇飞，田震，查晓明，等. 构网型与跟网型变流器主导孤岛微网阻抗稳定性分析及提升策略[J]. 电力系统自动化，2022，46(24)：121-131.
Hu Y F，Tian Z，Zha X M，et al. Impedance stability analysis and promotion strategy of islanded microgrid dominated by grid-connected and grid-following converters [J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46(24)：121-131.

[17] 朱冠南，陈敏，王鹏程，等. 低电网阻抗下构网型直挂式储能系统稳定性提升控制[J]. 电工技术学报，2025，40(9)：2697-2711.
Zhu G N，Chen M，Wang P C，et al. Stability enhancement control strategy for grid-forming transformerless energy storage system under low grid impedance conditions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2025，40(9)：2697-2711.

[18] 陈祯怡，杨黎晖，史金柱，等. 考虑暂态模式切换的构网型变换器并联跟网型变换器系统暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报，2025，45(15)：6025-6037.
Chen Z Y，Yang L H，Shi J Z，et al. Transient stability analysis of system with paralleled grid-following converter and grid-forming converter considering transient mode switching [J]. Proceedings of the CSEE，2025，45(15)：6025-6037.

[19] 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 M，Chang Y K，Mao Y T，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.

[20] 李明，张兴，郭梓暄，等. 弱电网下基于 D 分割法的逆变器 PI 参数设计及稳定域分析[J]. 电力系统自动化，2020，44(15)：139-147.
Li M，Zhang X，Guo Z X，et al. Proportional-integral parameter design for inverter based on D-partition method and its stability region analysis in weak grid [J]. Automation of Electric Power Systems，2020，44(15)：139-147.

[21] Li M，Zhang X，Guo Z X，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.

[22] Li M，Zhang X，Yang Y，et al. The grid impedance adaptation dual mode control strategy in weak grid [C]// 2018 International Power Electronics Conference，Niigata，Japan，2018：2973-2979.

[23] 李功强，赵璐璐，谢凤祥，等. 储能变流器跟网/构网无扰切换控制技术研究[J]. 储能科学与技术，2025，14(8)：2983-2993.
Li G Q，Zhao L L，Xie F X，et al. Disturbance-free switching control technology for energy storage converters between grid-following and grid-forming modes [J]. Energy Storage Science and Technology，2025，14(8)：2983-2993.

[24] He X Q，Desai M A，Huang L B，et al. Cross-forming control and fault current limiting for grid-forming inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2025，40(3)：3980-4007.

[25] Pavankumar Y，Luo X，Batzelis E，et al. Seamless transition between grid forming and grid following inverters based on online grid impedance estimation [C]// 2025 IEEE Power & Energy Society General Meeting，Austin，TX，USA，2025：1-5.

收稿日期：2026-04-20
收到修改稿日期：2026-07-20

作者简介：

何志龙(2003—)，男，硕士研究生，研究方向为有源配电网稳定，3306219471@qq.com；

*通信作者：马 辉(1985—)，男，博士，副教授，研究方向为综合能源系统规划及控制，mahuizz119@126.com。

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