

弱电网下计及直流同步特性的跟网型变流器自适应控制策略

易传卓, 张学广, 徐殿国

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江省哈尔滨市 150000)

摘要: 弱电网下,跟网型变流器因锁相环与电网阻抗的交互作用,易引发振荡失稳问题,而构网型技术中直流电压同步控制方法能利用直流动态模拟发电机功角特性,从而实现自主同步,具有更强的稳定性。文中通过对比发电机转子运动方程与直流电压同步控制结构,提出弱电网下计及直流同步特性的跟网型变流器自适应控制策略。该策略将直流动态偏差引入锁相环同步环节,并采用权重系数分配实现2种方法的协调融合,使变流器在弱电网下具备构网型控制的稳定优点。在此基础上,基于系统阻尼特性设计权重系数,揭示其与电网阻抗的关联性;进一步,结合阻抗在线辨识技术,实现参数自适应调整。序阻抗模型分析表明,所提策略可有效抑制弱电网下跟网型变流器的次同步振荡。最后,通过实验验证了所提方法的有效性。

关键词: 弱电网; 跟网型变流器; 直流同步特性; 锁相环; 自适应控制; 次同步振荡; 序阻抗模型

0 引言

随着电力系统中新能源渗透率的提高和电力电子设备的接入,电网易呈现低短路比(short-circuit ratio, SCR)运行状态。弱电网下,基于锁相环(phase-locked loop, PLL)同步的并网变流器,在特定频段可能呈现负电阻特性^[1-3],极易诱发次同步振荡,甚至导致保护装置动作、发电设备脱网等严重后果^[4]。因此,研究提升弱电网下并网变流器的稳定性具有重要意义。

针对上述问题,国内外已提出多种稳定性提升策略。在控制参数优化方面,文献[5]基于无源性分析提出一种系统导纳模块化方法,主要针对不同控制目标进行稳定性评估,进而指导参数优化设计。然而,参数优化法需权衡系统稳定性与动态性能,对于SCR变化工况的适应性较差^[6-7]。在控制结构改进方面,文献[8]分析了PLL同步环节对电流环的作用机制,并提出一种基于并网点电压前馈的改进控制方法,以提高系统稳定性。

相较于PLL同步技术,构网型控制技术能主动支撑电网,增强系统稳定性,使并网变流器即使在弱电网与极弱电网下也能保持稳定运行^[9]。针对不同的并网变流器拓扑结构,构网型控制方法大概能归

纳为2类^[10-11]。其中,基于功率同步的控制方法主要模拟同步发电机有功-频率动态特性,通过主动调节输出功率来控制相角,从而提升变流器在弱电网下的稳定性。基于直流电压同步的控制方法则利用直流动态模拟发电机的功角特性,在维持直流电压稳定的同时实现自主同步。针对构网型控制技术的优势,在基于PLL的成熟同步控制方案中,引入构网型控制支撑能力强、弱电网稳定性强等优点,可以促进高渗透新能源发电系统的高效稳定运行^[12]。

目前,已有相关研究对此开展分析。文献[13]提出将跟网型与构网型2种控制方法通过加权调制直接融合,使控制系统对外呈现电流源与电压源并联的特性。文献[14]则在构网型控制框架内,引入了基于跟网型控制的电流指令以及PLL同步机制,实现混合控制策略;该策略中的虚拟导纳环节不仅能够提供电压支撑,还能有效加快电流响应速度,增强变流器在弱电网下的稳定性。上述研究主要侧重于控制结构的融合,使并网变流器同时具备跟网型与构网型控制结构特点。然而,控制系统的同步环节设计对变流器稳定性同样至关重要^[15]。为此,文献[16]提出将PLL与功率同步环节直接结合,实现混合同步控制策略,通过仿真验证了系统在弱电网下具有较高稳定性。文献[17]进一步指出,混合同步控制中的PLL部分具有等效增加系统阻尼的作用,有利于改善控制系统的暂态稳定性。而针对混合同步控制环节中参数设计的问题,文献[18]通过

收稿日期: 2025-06-25; 修回日期: 2025-11-16。

上网日期: 2026-02-13。

国家自然科学基金资助项目(51977046)。

建立并网变流器系统的状态空间模型,深入分析了不同SCR条件下混合同步参数对系统稳定性的影响机理,并据此提出了PLL支路与功率同步环节参数的协同选取方法,旨在保障变流器在宽范围电网强度下的稳定运行。文献[19]提出一种针对不同SCR工况的自适应控制策略,动态调整PLL同步和功率同步参数,以提高变流器在不同电网强度下的稳定性。

上述文献已提出将PLL同步与功率同步技术相结合的稳定性提升方法,但其中大多未考虑直流电压外环。针对以直流母线电压作为控制目标的变流器系统,如何设计融合直流电压同步技术的控制策略,现有文献研究较少。而相较于融合功率同步方法,两者在同步机制上虽具有一致性,但在控制结构及实现方式上存在差异。该策略在结构上减少了功率计算模块,转而以直流电压作为输入变量,该变量可在变流器直流侧进行本地测量,无需额外计算环节。此外,在其关键技术实现层面,部分研究将电网阻抗视为固定参数,未考虑实际电网阻抗变化情况。因此,实现参数自适应控制策略以抑制弱电网下系统产生的次同步振荡,对于增强变流器在弱电网下的运行稳定性具有重要意义。

针对含直流电压环的跟网型变流器系统,本文首先分析了构网型控制中直流电压同步机制,据此提出一种弱电网下计及直流同步特性的跟网型变流器控制策略,该方法为抑制次同步振荡问题提供了新思路。进一步地,通过分析系统阻尼特性设计关键参数,并结合电网阻抗在线辨识技术,构建了“阻抗检测-参数自适应-稳定控制”的系统化更新机制,从而增强变流器对电网SCR变化的适应性,提升系统运行可靠性与稳定性。然后,基于序阻抗模型分析系统产生次同步振荡的原因。最后,通过实验验证所提控制策略的有效性。

1 计及直流同步特性的变流器控制策略

1.1 跟网型变流器控制结构

跟网型并网变流器控制结构框图如图1所示,主要包括全桥电路、LC滤波器、直流电压环、电流环、PLL以及理想电网。主电路中: U_{dc} 、 C_{dc} 分别为直流侧电压稳态值、直流母线电容; I_{dc} 为输入直流电流; I_{abc} 为变流器三相输出电流,箭头表示正方向; L_f 为滤波电感; U_{abc} 为公共连接点(point of common coupling, PCC)的三相输出电压; C_f 为滤波电容; Z_g 为电网侧线路阻抗; U_g 为理想电网电压;PWM表示脉宽调制模块; g 为并网变流器开关管控制信号。图1中红色虚线框表示PLL同步环节,其中: U_d 、 U_q

分别为PCC电压 d 、 q 轴分量; θ_0 为PLL基准角度; $\Delta\theta_{pll}$ 表示 U_q 经过比例-积分(PI)环节与积分环节的输出角度; s 为复频域微分算子;符号 Δ 代表变量的小信号形式;并网角度 θ_{pll} 为 $\Delta\theta_{pll}$ 与 θ_0 之和。蓝色虚线框表示系统控制环节,其中: $U_{dc,ref}$ 、 u_{dc} 分别为直流电压给定值、实际值; $I_{dq,ref}$ 、 I_{dq} 分别为 dq 坐标系下的电流给定值、实际值; E_{dq} 为控制环节 dq 坐标系下的输出电压; e_{abc} 为 E_{dq} 坐标变换后的结果。

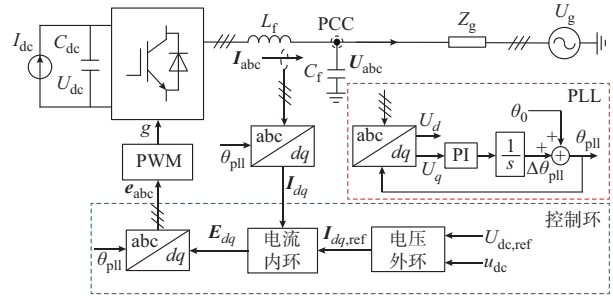


图1 跟网型变流器控制结构

Fig.1 Control structure of grid-following converter

1.2 直流电压同步机制

在弱电网条件下,基于PLL同步的跟网型并网变流器容易面临失稳问题。相较之下,构网型控制系统具有更强的稳定性。因此,可以将构网型控制技术的优势引入跟网型变流器设计中。

构网型并网变流器系统与同步发电机两者之间具有相似的特性,主要体现在构网型并网变流器系统的数学模型与同步发电机转子运动方程之间的内在联系上。具体而言,同步发电机的动态行为可由其二阶转子运动方程描述,公式如下:

$$\begin{cases} \omega_s = \frac{d\delta}{dt} \\ J \frac{d\omega_s}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω_s 为同步发电机角频率; δ 为同步发电机相角; J 为惯性系数; D 为阻尼系数; P_m 、 P_e 分别为同步发电机输入、输出功率; ω 、 ω_0 分别为转子角频率、基准角频率。

根据文献[20]中所述,直流电压同步控制技术的统一结构可以用式(2)进行表示。

$$\begin{cases} \theta_{syn} = \frac{\omega_{syn}}{s} \\ \omega_{syn} = H_{dc}(s)(u_{dc} - U_{dc,ref}) + \omega_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_{syn} 为直流电压同步环节角频率; θ_{syn} 为直流电压同步环节输出角度; $H_{dc}(s)$ 为直流母线电压控制环节。

对于三相电流源型并网变流器,其直流母线电

容动态方程可表示为:

$$C_{dc}U_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = P_s - P_g \quad (3)$$

式中: P_s 、 P_g 分别为三相并网变流器输入、输出功率。

若忽略变流器功率损耗,式(3)中网侧变流器输出功率 P_g 可以表示为:

$$P_g = \frac{U_t U_g}{X} \sin(\theta_{syn} - \theta_g) \quad (4)$$

式中: U_t 为三相并网变流器输出电压; X 为并网变流器主电路的总电感; θ_g 为电网角度。

联立式(2)一式(4),可以得到并网变流器功率与角度之间的方程,具体关系如下:

$$\begin{cases} \theta_{syn} = \frac{\omega_{syn}}{s} \\ \frac{C_{dc}U_{dc}}{H_{dc}(s)} s\omega_{syn} = P_s - \frac{U_t U_g}{X} \sin(\theta_{syn} - \theta_g) \end{cases} \quad (5)$$

对比分析式(1)与式(5)可知,两者在结构上具有相似性。这表明,基于直流电压同步机制的构网型变流器控制系统,能够通过直流动态模拟发电机功角特性,从而实现同步控制策略。

基于上述分析,考虑直流同步特性对控制系统性能的影响,可在基于PLL同步的跟网型变流器中引入如式(2)所示的直流电压同步结构,以提高跟网型变流器在弱电网下的稳定性。

1.3 计及直流同步特性的PLL改进方法

本文所提控制方法主要对图1中的PLL同步环节进行改进设计,改进部分如图2中红线部分所示。

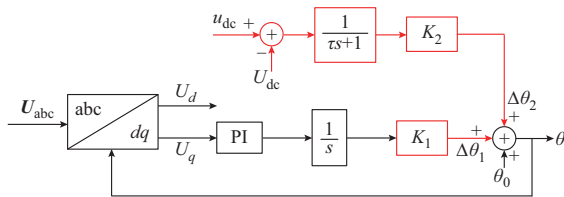


图2 考虑直流同步特性的PLL改进方法
Fig. 2 Improved method for PLL considering DC synchronization characteristic

具体实现方式为:首先,在PLL同步环节中引入权重系数 K_1 ,由此得到修正后的输出角度 $\Delta\theta_1$ 。其次,将 u_{dc} 与 U_{dc} 之间的偏差,经一阶惯性环节(τ 为惯性环节时间常数)处理后,再引入权重系数 K_2 ,即可得到直流电压同步环节的输出角度 $\Delta\theta_2$ 。最后,将 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 与 θ_0 相加,得到系统的实际输出角度 θ 。该方法可使得原跟网型并网变流器系统在弱电网下具备构网型技术的稳定优点。

根据图2可以得到控制系统同步环节中实际并网角度的输出表达式:

$$\begin{cases} \Delta\theta_1 = K_1(U_q - U_{q,ref}) \left(k_{ppll} + \frac{k_{ipll}}{s} \right) \frac{1}{s} \\ \Delta\theta_2 = K_2(u_{dc} - U_{dc}) \frac{1}{\tau s + 1} \\ K_1 + K_2 = 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\theta = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \theta_0 \quad (7)$$

式中: k_{ppll} 、 k_{ipll} 分别为PLL中的比例、积分系数; $U_{q,ref}$ 为 q 轴电压的给定值。

为分析所提方法提升稳定性的机理,将式(6)中的直流电压同步环节代入式(3)中,可以得到描述变流器功率与同步角度之间动态关系的小信号模型如下:

$$\frac{\tau C_{dc}U_{dc}}{K_2} s^2 \Delta\theta_2 + \frac{C_{dc}U_{dc}}{K_2} s \Delta\theta_2 = P_s - P_g \quad (8)$$

再将式(4)谐波线性化后代入式(8)中,可建立系统二阶等效模型的小信号方程如下:

$$\Delta P_s = J_{dc} s^2 \Delta\theta_2 + M_1 s \Delta\theta_2 + M_2 \Delta\theta \quad (9)$$

$$\begin{cases} J_{dc} = \frac{\tau C_{dc}U_{dc}}{K_2} \\ M_1 = \frac{C_{dc}U_{dc}}{K_2} \\ M_2 = \frac{U_t U_g}{X} \cos \theta_0 \end{cases} \quad (10)$$

对比式(9)与式(1)可知,两者均包含惯性系数、阻尼系数以及同步系数^[21]。其中,系数 J_{dc} 表征控制系统提供的虚拟惯量;阻尼系数项 M_1 产生的阻尼作用力可有效抑制系统振荡;同步系数项 M_2 产生的同步作用力则有助于系统恢复稳定。

因此,可从阻尼特性角度分析本文所提控制方法能够提高系统稳定性的原因。

2 系统参数设计及自适应控制方法

为简化控制系统设计流程,本章基于所提方法的阻尼特性进行参数选取,并结合电网阻抗在线辨识技术,使控制系统具备参数自适应调整能力,从而提升跟网型变流器在弱电网下的稳定性。

基于上文分析,系统权重系数可以根据控制环节的阻尼特性进行选取。将式(7)代入式(9)中,根据线性系统叠加定理,可得如下表达式:

$$\Delta P_{s1} = M_2 \Delta\theta_1 \quad (11)$$

$$\Delta P_{s2} = J_{dc} s^2 \Delta\theta_2 + M_1 s \Delta\theta_2 + M_2 \Delta\theta_2 \quad (12)$$

$$\Delta P_s = \Delta P_{s1} + \Delta P_{s2} \quad (13)$$

式中: ΔP_{s1} 为由 $\Delta\theta_1$ 提供的同步作用力项; ΔP_{s2} 为直流同步特性对控制系统的影响。

对应的特征方程可表示为:

$$J_{dc}s^2 + M_1s + M_2 = 0 \quad (14)$$

其特征根为:

$$\lambda_{1,2} = \omega_n(-\xi \pm \sqrt{\xi^2 - 1}) \quad (15)$$

$$\begin{cases} \xi = \frac{1}{2\tau\omega_n} \\ \omega_n = \sqrt{\frac{K_2U_tU_g \cos \theta_0}{\tau C_{dc}U_{dc}X}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: ξ 为控制系统阻尼比; ω_n 为系统自然振荡角频率。

因此,针对不同SCR工况下的并网变流器控制系统,只需明确相应的 ξ 与 ω_n 设计指标就能依据式(6)与式(16)确定 τ 、 K_1 、 K_2 的取值。本文参考《构网型储能变流器技术规范》中的要求^[22],为确保系统具备良好的动态性能,可选取误差带不超过2%且调节时间不大于0.01 s作为设计指标。

然而,实际电力系统中的电网阻抗并非恒定,其复杂的动态特性给系统稳定运行带来极大挑战。为解决上述问题,本文引入了电网阻抗在线辨识技术。该技术能实时计算不同SCR工况下电网的实际阻抗值,进而实现控制参数自适应调整。

电网阻抗辨识方法大致可以分为2类:1)基于扰动注入的主动检测方法;2)无扰动注入的被动检测方法。其中,前者更适用于系统原本处于稳定状态的工况。然而,弱电网下当系统出现干扰或者产生振荡时,向变流器注入的扰动信号易被淹没。此时,即使采用滤波等信号处理手段,也难以有效提取所需的扰动信号。因此,针对弱电网下的并网变流器控制系统,采用基于无扰动注入的被动检测技术更具优势。

基于上述分析,本文参考文献[23],采用递归离散傅里叶变换(recursive discrete Fourier transform, RDFT)方法提取电网谐波信息以实现阻抗辨识。该方法具有辨识精度高、速度快等特点,其基本原理可描述如下。

设任意周期为 T 的离散信号 $y(kT)$,其采样点数为 N ,该信号可使用各次频率分量之和表示,即

$$y(kT) = \sum_{i=1}^N A_i \cos(i\omega_0 kT) + \sum_{i=1}^N B_i \sin(i\omega_0 kT) \quad (17)$$

$$\begin{cases} A_i = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k\lambda) \cos(i\omega_0 k\lambda) \\ B_i = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k\lambda) \sin(i\omega_0 k\lambda) \end{cases} \quad (18)$$

式中: A_i 、 B_i 分别为 ω_0 的第 i 次谐波正弦、余弦分量幅值; $k=0,1,2,\dots,N-1$; λ 为采样时间间隔。

进一步地,可得以下迭代关系:

$$\begin{cases} A_i = A'_i + \frac{2}{N} [y(N_a\lambda) - y(N_a\lambda - N\lambda)] \cdot \cos(i\omega_0 N_a\lambda) \\ B_i = B'_i + \frac{2}{N} [y(N_a\lambda) - y(N_a\lambda - N\lambda)] \cdot \sin(i\omega_0 N_a\lambda) \end{cases} \quad (19)$$

式中: N_a 为最新采样点数; A'_i 、 B'_i 分别为上一采样时刻所计算出的第 i 次谐波的正弦、余弦分量幅值。

根据式(19),并网变流器控制系统的第 i 次电压、电流谐波的幅值与相位可以分别表示为:

$$\begin{cases} V_{\text{Amp},i} = \sqrt{A_{i,V}^2 + B_{i,V}^2} \\ I_{\text{Amp},i} = \sqrt{A_{i,I}^2 + B_{i,I}^2} \\ V_{\text{Phase},i} = \arctan \frac{B_{i,V}}{A_{i,V}} \\ I_{\text{Phase},i} = \arctan \frac{B_{i,I}}{A_{i,I}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $V_{\text{Amp},i}$ 和 $I_{\text{Amp},i}$ 分别为第 i 次电压和电流谐波的幅值; $V_{\text{Phase},i}$ 和 $I_{\text{Phase},i}$ 分别为第 i 次电压、电流谐波的相位; $A_{i,V}$ 、 $B_{i,V}$ 和 $A_{i,I}$ 、 $B_{i,I}$ 分别为第 i 次电压和电流谐波的正弦、余弦分量幅值。

因此,在并网变流器控制系统出现次同步振荡时,只需利用RDFT方法检测相应振荡频率下的电压、电流谐波幅值,即可推导出实际电网阻抗。具体计算公式如下:

$$L_g = \frac{V_{\text{Amp},i}/I_{\text{Amp},i}}{2\pi f_i} \quad (21)$$

式中: L_g 为电网电感值; f_i 为第 i 次谐波频率。

最后,将计算得到的实际电网电感值 L_g 代入式(16)中,控制系统即可依据实际电网数据在线计算相应的权重系数,从而实现本文所提出的自适应控制策略,具体实现流程如图3所示。

本文所述自适应控制策略中的阻抗辨识环节主要采用基于RDFT的阻抗辨识方法。该方法是一种适用于本文改进设计的常规检测方法,无须注入外部扰动信号,能适配弱电网工况需求。

在该算法的实现中,采样点数 N 的选择是影响检测时间的主要因素。增大 N 有助于提升辨识精度,但同时也导致检测时间增加以及内存占用率上升。需特别强调的是,对于基于数字信号处理器(digital signal processor, DSP)的实时控制系统,过高的内存占用会直接影响系统的核心性能与可靠

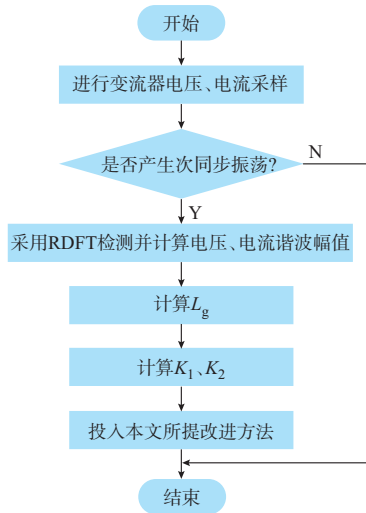


图3 参数自适应控制方法流程图

Fig. 3 Flow chart of parameter adaptive control method

性。其主要危害在于破坏控制环路的实时性,具体表现为控制环路延迟增大、抖动加剧。这些影响可能引发控制性能恶化,甚至导致系统失稳、功能失效等严重后果。然而,减小 N 值虽能缩短检测时间,却会严重影响辨识结果的准确性,最终导致自适应控制策略失效。因此,在实际工程应用中,需要根据 DSP 的具体资源分配实际情况权衡 N 的取值。

3 控制系统建模与稳定性分析

3.1 系统建模及扫频验证

相关研究已对序阻抗建模进行了较详尽的分析^[24],其主要步骤包括:首先,设定变流器的电压、电流扰动量;继而,依次推导直流电压环、同步环节、电流环以及调制模型的小信号扰动表达式;最后,将这些表达式代入主电路方程求解,得到相应的阻抗矩阵。鉴于已有研究基础,本节仅说明建模过程中的关键表达式。

在控制系统建模中,系统同步单元至关重要,其扰动分量的频域表达式为:

$$\begin{cases} \Delta\theta_1[f_p - f_0] = \mp jK_1 G_p [f_p - f_0](U_p - U_n) \\ \Delta\theta_2[f_p - f_0] = K_2 H_{dc}(s) U_{dc} \end{cases} \quad (22)$$

$$G_p[f_p - f_0] = \frac{k_{pll}s + k_{ipll}}{s^2 + U_0 k_{pll}s + U_0 k_{ipll}} \quad (23)$$

式中: f_p 为正序扰动频率; f_0 为基波频率; U_p 、 U_n 分别为 PCC 电压在扰动频率下的正、负序分量; U_{dc} 为直流母线电压扰动分量的频域表达式; U_0 为电网电压峰值。

根据式(22)可计算得到全新的系统输出角度,进而推导出系统在频域下的 dq 轴电压、电流扰动分

量。通过系统控制环节与调制模块能求得变流器输出电压。最后,结合控制系统主电路方程,得到系统序导纳矩阵如下:

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{pn} \\ Y_{np} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ U_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中: I_p 、 I_n 分别为输出电流在扰动频率下的正、负序分量; Y_{pp} 、 Y_{nn} 分别为正、负序自导纳, Y_{pn} 、 Y_{np} 则为相应的互导纳。

为验证所建立系统输出导纳模型的正确性,对其进行仿真扫频验证,具体参数见附录 A 表 A1,扫频结果如附录 A 图 A1 所示。根据并网变流器扫频结果,通过对比分析可知,仿真结果与理论曲线基本重合,从而验证了理论模型的准确性。然而,式(24)虽能够分析系统的频率耦合特性与稳定性,但仍需要采用广义 Nyquist 判据,其分析过程较为复杂。

利用等效输出阻抗模型变换公式(25),可将多输入-多输出系统转化为单输入-单输出系统。该等效模型仍能准确描述并网变流器与电网之间的交互作用,并且仍然可以采用传统的阻抗稳定性判据进行分析^[25]。因此,下文将基于等效输出阻抗模型进行控制系统稳定性分析。

$$\begin{cases} Z_{gp} = Z_g s \\ Z_{gn} = Z_g (s - j2\pi f_0) \\ Z_p = \frac{Y_{nn} Z_{gn} + 1}{Y_{pp} + (Y_{pp} Y_{nn} - Y_{pn} Y_{np}) Z_{gn}} \\ Z_n = \frac{Y_{pp} Z_{gp} + 1}{Y_{nn} + (Y_{pp} Y_{nn} - Y_{pn} Y_{np}) Z_{gp}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: Z_g 为电网阻抗,其中的电阻一般较小,可以忽略; Z_{gp} 、 Z_{gn} 分别为电网阻抗的正、负序分量; Z_p 、 Z_n 分别为控制系统正、负序等效输出阻抗。

3.2 系统稳定性分析

为研究弱电网下计及直流同步特性的 PLL 改进设计方法对变流器稳定性的影响,本节针对控制系统的等效输出阻抗展开分析。图 4 和图 5 分别为弱电网下 PLL 同步控制系统等效输出阻抗 Bode 图和引入改进控制策略后系统的等效输出阻抗 Bode 图,参数见附录 A 表 A1,弱电网的 SCR 为 2。

如图 4 所示,在弱电网条件下,采用基于 PLL 同步控制策略的并网变流器系统,其正序阻抗幅频特性曲线与电网阻抗曲线存在 3 个交点,对应的频率分别为 18、31、86 Hz。其中,位于次同步频段 31 Hz 的交点相位裕度(phase margin, PM)为 -61° ,是引发系统振荡的主要原因。同时,系统负序阻抗幅频特性曲线与电网阻抗曲线仅存在 1 个交点,频率为

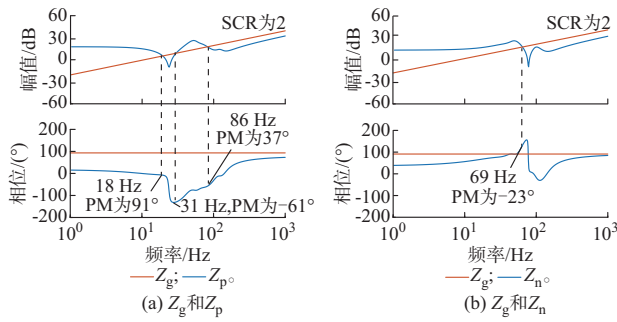


图4 弱电网下PLL同步控制系统的等效输出阻抗Bode图
Fig. 4 Bode plots of equivalent output impedance of PLL-synchronized control system in weak grid

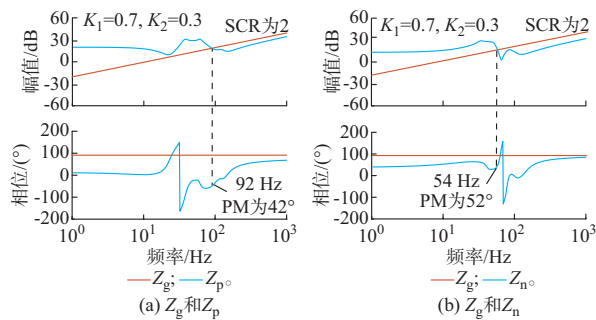


图5 弱电网下改进控制系统的等效输出阻抗Bode图
Fig. 5 Bode plots of equivalent output impedance of improved control system in weak grid

69 Hz,对应的PM为 -23° 。根据阻抗稳定性判据:当电网阻抗与变流器输出阻抗的幅频特性曲线在某频率点相交时,该点处的PM需要大于 0° ,系统判定为稳定。然而,在上述系统中正负序阻抗存在2个交点,其PM均为负值,不满足该判据要求,表明系统处于振荡失稳模态。进一步分析可知,次同步频段的失稳点对系统振荡起主导作用,后文将其定义为振荡主导交点。

如图5所示,若采用本文提出的PLL改进设计方法,并选取 K_1 为0.7、 K_2 为0.3,在弱电网条件下,并网变流器控制系统的正序阻抗幅频特性曲线与电网阻抗曲线仅存在1个交点,其频率为92 Hz,具有较高的PM(42°)。同时,系统负序阻抗幅频特性曲线与电网阻抗也仅存在1个交点,其频率为54 Hz,具有较高的PM(52°)。相较图1所示的传统PLL控制方法,本文所提设计方案减少了系统阻抗曲线与电网阻抗曲线的相交点数量,并且所有交点均具有充足且数值为正的PM。因此,该控制系统满足阻抗稳定性判据的要求。

选取不同的权重系数会影响并网变流器控制系统的稳定性。为此,图6展示了控制系统在次同步与超同步频段下正、负序等效输出阻抗的三维图,以便直观表征系统稳定性。

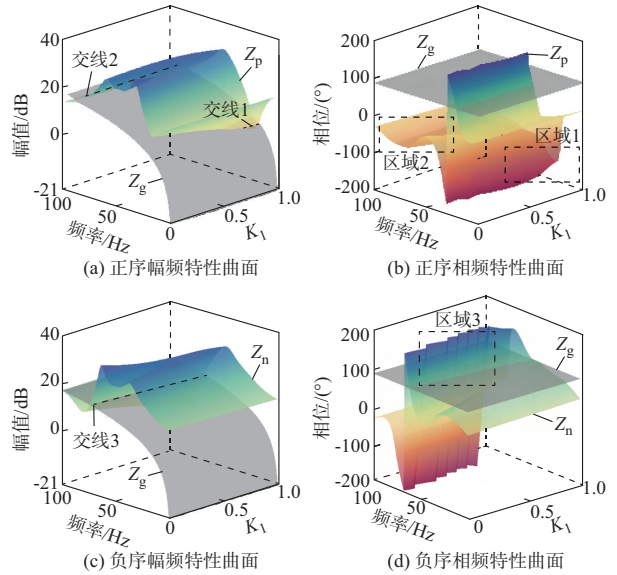


图6 不同 K_1 下正、负序等效输出阻抗的三维图
Fig. 6 Three-dimensional diagrams of positive and negative sequence equivalent output impedances with different values of K_1

图6表示基于本文所提出的改进设计方法,在弱电网条件下,并网变流器控制系统选取不同权重系数时,其阻抗特性曲线与电网阻抗曲线产生的阻抗交点在三维图中的分布情况。这些交点可连接形成交线1、交线2以及交线3,分别对应图中的区域1、区域2以及区域3。同样,基于阻抗稳定性判据,可通过分析区域1至3对应的PM是否大于 0° 来评估控制系统在弱电网下的稳定性。

如图6(a)和(b)所示,对于交线2对应的区域2,可以计算区域内各点对应的PM。例如:当 $K_1=1$ 、 $K_2=0$ 时,交点频率为86 Hz,PM为 37° 。经计算发现,区域2内所有交点的PM均大于 0° 。因此,可以判断区域2始终为稳定区域。这表明控制系统正序输出阻抗的稳定性主要由交线1及其对应的区域1决定。然而,位于次同步频段的交线1,其对应区域1内各点的PM经计算均为负值。例如:当 $K_1=0.9$ 、 $K_2=0.1$ 时,交点频率为24 Hz,PM为 -46° 。该结果表明交线1上的所有交点均处于不稳状态。因此,若权重系数选取不当导致出现交线1时,并网变流器控制系统存在振荡风险。在系统参数设计时,应避免选择导致交线1出现的权重系数。

如图6(c)和(d)所示,对于交线3对应的区域3,同样可以计算区域内各点对应的PM。例如:当 $K_1=0.8$ 、 $K_2=0.2$ 时,交点频率为69 Hz,PM为 -7° ;当 $K_1=0.7$ 、 $K_2=0.3$ 时,交点频率为54 Hz,PM为 52° 。计算结果表明,区域3中心曲面呈现明

显的下降趋势且梯度较大,这说明随着 K_1 减小(K_2 增加),负序阻抗相频特性曲线远离负电阻区域,其PM显著提升,相较于正序阻抗模型,该区域表现出更高的稳定性裕度。

基于阻抗稳定性分析,本文提出的PLL改进设计方法,通过重塑控制系统正、负序阻抗模型在次同步与超同步频段下的特性,能够有效抑制并网变流器产生的次同步振荡,从而增强控制系统在弱电网下的稳定性。

4 实验验证

基于三相并网变流器实验平台,对本文提出的系统稳定性分析结果的正确性以及PLL改进设计方法的有效性进行实验验证。实验平台如附录B图B1所示,其中,核心芯片为TMS320F28377D,具体参数配置见附录A表A1。

为验证本文提出的控制策略对PLL引发次同步振荡问题的抑制效果,在SCR为2的弱电网工况下进行实验研究,相应的实验波形如图7所示。

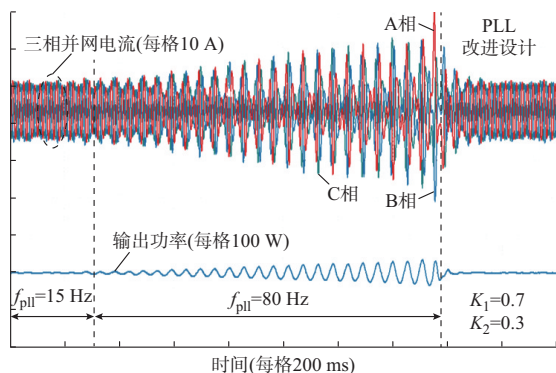


图7 在SCR为2的工况下投入PLL改进设计的实验波形
Fig.7 Experimental waveforms with improved PLL design under operating condition that SCR is 2

如图7所示,并网变流器控制系统在稳态运行时输出的有功功率为0.9 kW。当系统处于稳定状态时,PLL带宽 f_{pll} 从15 Hz提升到80 Hz,系统出现次同步振荡现象。随后,引入本文提出的自适应控制策略,其具体实施步骤如下: DSP控制器首先分配用于存储三相输出电压、电流谐波信号的内存空间;然后,调用RDFT方法实时检测电压、电流中的谐波分量。基于检测到的电压、电流次同步谐波分量,进一步计算控制系统所需的权重系数;完成计算后,投入PLL改进设计方法。最后,控制系统恢复稳定运行。在抑制由PLL引起的次同步振荡过程中,实验观测到的最大功率波动偏差小于10%;在振荡阶段,三相并网输出电流波动的最大峰值约为20 A,控制系统收敛时间约为50 ms;系统恢复稳态

后,功率波动保持在稳定功率的5%以内。上述实验结果表明,本文所提控制策略具有较好的动态响应性能以及稳态精度。

附录B图B2展示了系统改进方案投入前后的电网电流快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析结果。分析表明,当PLL带宽变化时,系统有功功率中观测到18.4 Hz的次同步振荡分量;同时,并网电流中则分别出现了31.6 Hz和68.4 Hz的振荡分量。该现象与理论分析结果相符。在投入改进设计方案后,电流总谐波畸变率(THD)由32.52%降低至2.97%,满足并网标准对谐波含量的要求。

附录B图B3表示控制系统振荡后,在未启用电网阻抗在线辨识技术的情况下,仍引入所提控制策略的实验波形。此时,控制器的权重系数维持上一次计算所得的固定值。实验结果显示,系统响应在初始阶段表现出微弱收敛趋势;然而,根据理论分析,该权重系数取值位于系统失稳区域,故波形最终发散,系统仍处于振荡失稳状态。从图中可见,三相并网电流波动超过30 A,功率波动偏差值超过自适应控制策略的2倍,最终触发设备跳闸保护。此结果证明了引入电网阻抗辨识技术的必要性。

在本文所提控制策略中,选取不同的权重系数会对控制系统的动态响应性能产生影响。式(15)表明,当 $\xi \in (0, 1)$ 时,控制系统表现为欠阻尼特性;而当 $\xi \in [1, +\infty)$ 时,控制系统表现为过阻尼或临界阻尼状态。因此,为保证并网变流器具备良好的动态调节性能,需要谨慎选择权重系数,使其在合理的范围内。针对本文所研究的变流器运行工况,结合式(16)与式(6)的约束条件可知, K_2 与 ω_n 之间呈正相关关系。这也说明 K_2 增加(K_1 减小)将导致 ξ 减小,进而使控制系统的动态性能下降。

因此,为评估本文参数选取方法的合理性,额外设计了 K_2 系数取值偏大时的对比工况,相应控制效果见附录B图B4。在采用所提控制策略后,控制系统虽最终能够达到稳定状态,但其响应速度显著降低,收敛时间延长至2.5 s以上,系统动态性能明显恶化。该结果表明,过大的 K_2 系数不利于维持控制系统的良好动态性能。

为评估所提控制策略在弱电网条件下对SCR时变特性的适应能力,设计了一组对比实验,在该实验中控制系统所连接的电网SCR由3切换到2,其实验波形如图8所示。实验结果表明所提自适应控制策略在电网SCR变化工况下具备较好的动态性能。

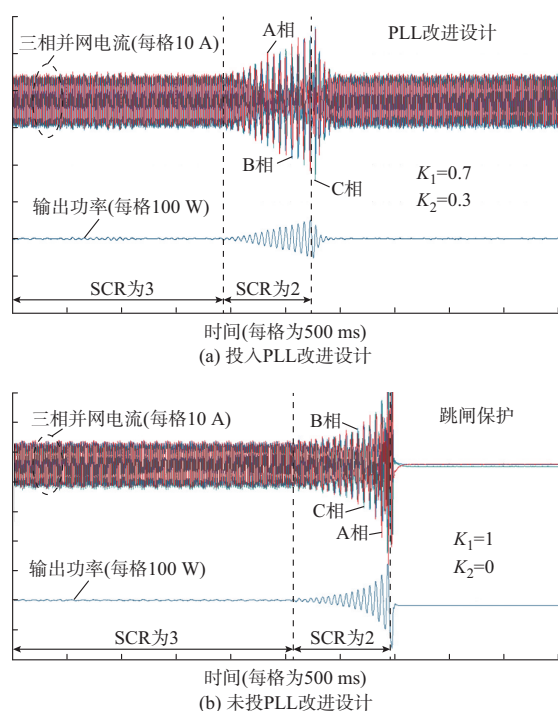


图8 SCR由3切换到2时三相并网电流与输出功率波形
Fig. 8 Three-phase grid-connected current and output power waveforms when SCR switches from 3 to 2

如图8(a)所示,当弱电网的SCR从3切换至2时,系统由稳定状态转入次同步振荡状态。随后,投入本文所提出的自适应控制策略。该策略首先对并网变流器控制系统的实际电网阻抗进行实时检测。并基于检测结果投入由自适应控制算法计算得出的权重系数。在应用所提改进设计方法后,并网变流器控制系统的次同步振荡在150 ms内迅速收敛,恢复至稳定状态,达到稳态时输出功率偏差小于5%。从SCR切换到投入自适应控制方法的过程中,三相输出电流峰值最高约为20 A;投入控制后,输出电流与功率波形实现平稳过渡,振荡被有效抑制,电流迅速恢复至正常值,振荡电流衰减率约为60%,最大功率波动偏差小于15%。

相比之下,如图8(b)所示,当弱电网的SCR从3切换至2时,系统未采用自适应控制策略。在SCR切换后,控制系统出现次同步振荡,且振荡持续加剧并迅速导致系统失稳,最终在约1 s后触发实验平台跳闸保护。此时,电流最大峰值超过30 A,其功率波动超过150%。

本文所提自适应控制方法根据系统阻尼特性进行关键参数设计,旨在实现弱电网条件下控制系统稳定性与动态性能之间的协调平衡。实验结果表明,该方法在PLL带宽变化以及弱电网SCR波动的运行工况下,均能够实现权重系数的平滑切换,不仅

保证了控制系统具有良好的动态响应性能,还有效提升了跟网型变流器在弱电网中的适应性与运行稳定性。

5 结语

为有效抑制弱电网下跟网型变流器可能出现的次同步振荡,本文提出了一种计及直流同步特性的跟网型变流器自适应控制策略,并通过实验验证了该策略的有效性。主要结论如下:

1)针对三相并网变流器控制系统,本文所提方法在原有PLL同步环节中引入了计及直流同步特性的构网型控制技术。该方法提高了跟网型变流器在弱电网下的稳定性,为抑制弱电网下的次同步振荡问题提供了一种新的解决方案。

2)通过对改进后系统的阻尼特性进行分析,可为控制环节参数的选取提供理论依据。其中,权重系数的取值范围与电网阻抗密切相关,需要根据实际电网阻抗数据进行针对性设计。

3)基于序阻抗模型的稳定性分析表明,所提策略能够重塑并网变流器控制系统在次同步与超同步频段下的阻抗特性,从而有效降低弱电网下系统发生次同步振荡的风险。

4)所提控制策略结合电网阻抗在线辨识技术,实现了系统参数自适应调整,形成了“阻抗检测-参数自适应-稳定控制”的系统化更新机制。该机制对SCR变化工况具有较强适应能力,为控制系统的稳定运行提供了新的控制思路。

本文提出的控制策略主要针对次同步振荡进行抑制。对于其他频率振荡模式,需要深入研究宽频带信号检测分析方法及其对应的抑制策略。在复杂电网环境下,如何建立一套能够全面抑制宽频带振荡的综合抑制方法,是后续研究的重点方向。

附录见本刊网络版,点击<http://www.aeps-info.com/aeps/article/abstract/20250625007>,或扫描英文摘要后二维码,可阅读全文。

参考文献

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [2] 刘威,谢小荣,黄金魁,等.并网变流器的频率耦合阻抗模型及其稳定性分析[J].电力系统自动化,2019,43(3):138-146.
LIU Wei, XIE Xiaorong, HUANG Jinkui, et al. Frequency-coupled impedance model and stability analysis of grid-connected

- converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 138-146.
- [3] 高磊, 吕敬, 马骏超, 等. 基于电路等效的并网逆变器失稳分析与稳定控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2325-2341.
GAO Lei, LÜ Jing, MA Junchao, et al. Instability analysis and stability control of grid-connected inverter based on impedance circuit equivalent [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2325-2341.
- [4] 张东辉, 陈新. 基于阻抗视角的新能源发电系统宽频振荡抑制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9672-9690.
ZHANG Donghui, CHEN Xin. Overview of broadband oscillation mitigation of new energy generation power system based on impedance perspective [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9672-9690.
- [5] XIE C, LI K, ZOU J X, et al. Passivity-based stabilization of LCL-type grid-connected inverters via a general admittance model [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6636-6648.
- [6] GONG H, WANG X F, HARNEFORS L. Rethinking current controller design for PLL-synchronized VSCs in weak grids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(2): 1369-1381.
- [7] 郑宇婷, 肖凡, 谢伟杰, 等. 基于并网变流器电流稳定运行域的锁相环参数设计方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(10): 3181-3194.
ZHENG Yuting, XIAO Fan, XIE Weijie, et al. A phase-locked loop parameter design method based on current stable operation domain of grid-connected converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(10): 3181-3194.
- [8] 张学广, 付志超, 陈文佳, 等. 弱电网下考虑锁相环影响的并网逆变器改进控制方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 139-145.
ZHANG Xueguang, FU Zhichao, CHEN Wenjia, et al. An improved control method for grid-connected inverters considering impact of phase-locked loop under weak grid condition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 139-145.
- [9] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
CAO Wei, QIN Huancheng, LU Jianzhong, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [10] 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 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): 2339-2358.
- [11] 郭贤珊, 张国华, 李健栋, 等. 构网型变流器技术发展现状与工程应用[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(22): 1-19.
GUO Xianshan, ZHANG Guohua, LI Jiandong, et al. Development status and engineering application of grid-forming converter technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(22): 1-19.
- [12] 张兴, 战祥对, 吴孟泽, 等. 高渗透率新能源发电并网变流器跟网/构网混合模式控制综述[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(21): 1-15.
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): 1-15.
- [13] HAN F, ZHANG X, LI M, et al. Stability control for grid-connected inverters based on hybrid-mode of grid-following and grid-forming [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(9): 10750-10760.
- [14] MOUTEVELIS D, ROLDAN-PEREZ J, JANKOVIC N, et al. Recursive secondary controller for voltage profile improvement based on primary virtual admittance control [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(6): 4296-4311.
- [15] 迟永宁, 江炳蔚, 范译文, 等. 构网型变流器: 控制与稳定特性[J]. 高电压技术, 2025, 51(4): 1527-1542.
CHI Yongning, JIANG Bingwei, FAN Yiwen, et al. Grid-forming converters: control and behavior of stability [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 1527-1542.
- [16] HARNEFORS L, KUKKOLA J, ROUTIMO M, et al. A universal controller for grid-connected voltage-source converters [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5761-5770.
- [17] LIU T, WANG X F. Physical insight into hybrid-synchronization-controlled grid-forming inverters under large disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(10): 11475-11480.
- [18] 邱晓燕, 林号缙, 周毅, 等. 基于混合同步控制的构网型逆变器并网系统小扰动稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 172-178.
QIU Xiaoyan, LIN Haojin, ZHOU Yi, et al. Study on small-signal stability of grid-connected grid-forming inverter system based on hybrid-synchronous control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 172-178.
- [19] LIU P Y, XIE X R, SHAIR J. Adaptive hybrid grid-forming and grid-following control of IBRs with enhanced small-signal stability under varying SCRs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(6): 6603-6607.
- [20] 秦垚, 王晗, 邓桢彦, 等. 自同步电压源永磁直驱风电机组的直流电压同步机制及其统一控制结构[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 31-41.
QIN Yao, WANG Han, DENG Zhenyan, et al. Synchronization mechanism and unified control structure for PMSG-based WTGs by using the DC-link voltage to realize self-synchronous voltage source control [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 31-41.
- [21] 方正, 黄云辉, 严文博, 等. 构网型变流器功率同步控制稳定性机理分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(19): 101-108.
FANG Zheng, HUANG Yunhui, YAN Wenbo, et al. Stability mechanism analysis of power synchronization control for grid-forming converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(19): 101-108.
- [22] 中关村储能产业技术联盟. 构网型储能变流器技术规范: T/CNESA 1008—2023[S]. 2023.

China Energy Storage Alliance. Technical specification for grid-forming power conversion system: T/CNESA 1008—2023 [S]. 2023.

[23] 潘海龙,张兴,郭梓暄,等. 并联多逆变器系统稳定性变化趋势估计方法[J]. 电力电子技术, 2021, 55(3): 86-89.

PAN Hailong, ZHANG Xing, GUO Zixuan, et al. Estimation method for stability variation trend of paralleled multi-inverter system[J]. Power Electronics, 2021, 55(3): 86-89.

[24] 年珩,徐韵扬,陈亮,等. 并网逆变器频率耦合特性建模及系统稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019(5): 1421-1432.

NIAN Heng, XU Yunyang, CHEN Liang, et al. Frequency coupling characteristic modeling of grid-connected inverter and system stability analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2019 (5): 1421-1432.

[25] XU J M, ZHONG J F, KANG J H, et al. Stability analysis

and robust parameter design of DC-voltage loop for three-phase grid-connected PV inverter under weak grid condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(4): 3776-3787.

易传卓(1998—),男,博士研究生,主要研究方向:新能源并网控制与建模分析。E-mail:yichuanzhuo@163.com

张学广(1981—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:新能源发电技术与大功率电力电子技术。E-mail:zxghit@126.com

徐殿国(1960—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:交流电机无传感器控制、交流伺服系统、电力电子化电力系统。E-mail:xudiang@hit.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

Adaptive Control Strategy for Grid-following Converter Considering DC Synchronization Characteristics in Weak Grid

YI Chuanzhuo, ZHANG Xueguang, XU Dianguo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: In a weak grid, grid-following converters are prone to oscillation instability due to the interaction between the phase-locked loop (PLL) and the grid impedance. However, the DC voltage synchronization control method in the grid-forming technology can achieve autonomous synchronization by utilizing DC dynamics to emulate generator power angle characteristics, offering enhanced stability. By comparing the generator rotor motion equation with the DC voltage synchronization control structure, this paper proposes an adaptive control strategy for the grid-following converter in a weak grid, considering DC synchronization characteristics. This strategy introduces the DC dynamic deviation into the PLL synchronization link and employs weight coefficient allocation to achieve coordinated integration of both methods, enabling the converter to possess the stability advantages of the grid-forming control in weak grids. On this basis, the weight coefficients are designed according to system damping characteristics, and their correlation with the grid impedance is revealed. Further, the adaptive parameter adjustment is realized by integrating the online impedance identification technology. The sequence impedance model analysis shows that the proposed strategy can effectively suppress the sub-synchronous oscillation of grid-following converters in weak grids. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through experiments.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51977046).

Key words: weak grid; grid-following converter; DC synchronization characteristic; phase-locked loop; adaptive control; sub-synchronous oscillation; sequence impedance model

