

# 内嵌同步机支撑特性的含储能并网变流器电流型控制策略

韩宇<sup>1</sup>, 乔学博<sup>2</sup>, 李勇<sup>1</sup>, 喻松涛<sup>2</sup>, 曹一家<sup>1</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东省广州市 510663)

**摘要:** 光储并网变流器具有低惯量、弱阻尼、调压能力弱和功率频繁波动等特征, 大规模接入会影响电力系统安全稳定运行。针对此类含储能并网变流器, 提出了一种内嵌同步机支撑特性的电流型控制策略, 以增强系统的惯性支撑能力。该策略模拟同步机的动力学行为, 将并网变流器输出外特性控制成具有同步机控制特性的受控电流源, 融合了基于虚拟同步机的构网型控制与基于锁相环的跟网型控制两者的优势, 在惯性支撑、故障穿越、电网谐波、孤岛运行等方面具备显著综合优势, 并且虚拟惯性支撑的实现无须对系统输出频率微分进行检测采样, 避免了频率微分检测带来的噪声干扰。此外, 针对交流侧惯性支撑能力与直流侧电压稳定难以调和的矛盾, 设计了兼顾直流侧电压稳定与交流侧惯性支撑的模糊自适应比例-积分(PI)协调控制策略。最后, 硬件在环实验结果验证了所提策略的可行性和有效性。

**关键词:** 并网变流器; 光伏; 储能; 惯性支撑; 虚拟同步机; 电流型控制; 电压稳定性

## 0 引言

光伏等可再生能源发电是有效推进能源革命、实施“双碳”战略的重要技术手段<sup>[1]</sup>。然而, 随着光伏并网渗透率提高, 光伏固有的出力间歇性、波动性与反调峰特性等严重影响了电网稳定运行<sup>[2]</sup>。储能系统能够有效平抑光伏出力波动, 构建光储并网变流器系统, 将有助于缓解大规模光伏并网的不利影响, 提高光伏发电渗透率<sup>[3]</sup>。光储并网变流器系统具有低惯量、弱阻尼、功率频繁波动等特征<sup>[4]</sup>, 其规模化和集群化发展将导致源网交互过程中极易出现电压/频率稳定性恶化、过压/过流等问题, 使大规模新能源面临消纳困难和支撑能力弱等问题, 影响电力系统的安全稳定运行<sup>[5]</sup>。

并网变流器的控制方案可以分为2类。一类是将变流器视作受控电压源<sup>[6-7]</sup>进行控制, 即构网型控制<sup>[8-9]</sup>。虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)控制通过模拟传统同步机的转子摇摆方程与定子电压方程特性<sup>[10-11]</sup>, 使得变流器输出稳定的电压, 具备惯性支撑能力<sup>[12-13]</sup>。然而, 电网电压波动时, 过电流可能会造成逆变器损坏。另一类控制方案则是将变流器作为受控电流源进行控制<sup>[14]</sup>。变

流器根据功率控制器产生的电流参考值控制输出电流, 电能质量更好。为了提供频率支撑, 文献[15]提出了基于频率变化率 $df/dt$ 反馈提供虚拟惯性支撑的电流型控制策略, 将 $df/dt$ 反馈作为外部控制回路加到现有功率变换器的控制系统中, 简化控制难度。然而, 基于 $df/dt$ 的控制算法需要检测频率微分, 会带来高频噪声干扰。为了避免高频噪声, 文献[16-17]通过调节与电网频率成比例的直流链路电压, 有效降低了频率偏差和频率变化率。在此基础上, 文献[18]提出了基于二阶广义积分器-锁频环(second-order generalized integrator based frequency-locked loop, SOGI-FLL)的控制策略, 避免 $df/dt$ 运算。然而, 这种方法引入了频率纹波, 对 $df/dt$ 的估计精度产生了负面影响。进一步地, 文献[19]提出一种基于级联二阶广义积分器-锁频环的虚拟惯性控制策略, 能够准确评估频率信号。以上方法都是利用直流侧电容电压的变化提供虚拟惯性支撑, 当外界扰动发生时, 并网变流器需要向电网注入一定的功率, 提供短时惯性支撑, 由于短时惯性支撑的能量一部分来源于直流侧电容, 直流侧电容电压不可避免地会出现跌落。但直流侧电容电压必须保持在合适的范围内, 以确保并网变流器的正常运行。这种惯性支撑控制与直流侧电压稳定控制之间的矛盾鲜有研究涉及。

鉴于上述研究的不足, 本文以光储并网系统为研究对象, 提出一种内嵌同步机支撑特性的含储能并网变流器电流型控制策略, 兼顾了同步机电压源

收稿日期: 2024-05-27; 修回日期: 2024-07-21。

上网日期: 2024-08-13。

国家自然科学基金联合基金资助项目(U22B20104); 中国博士后科学基金资助项目(2023TQ0375)。

内在支撑特性和锁相环(phase-locked loop, PLL)输出电流源动态特性。本文的主要贡献如下:

1)提出了一种兼顾同步机内在支撑特性与电流输出外特性的通用控制框架及方法。通过内嵌同步机的控制,并网变流器输出外特性被控制成具有同步机特性的受控电流源模型;相较于传统基于PLL的电流型控制方法,该方法既具备PQ电流源外特性又提供惯性阻尼支撑,还具有孤岛自主运行能力;相较于VSG控制,该方法外特性是电流控制内环,便于故障下高低电压穿越。所提方法融合了VSG与PLL的优势,在惯性支撑、故障穿越、谐波电网运行、孤岛自主运行等方面具备综合优势。

2)提出具备自主调频和惯性支撑的PLL型控制方式:与文献[15]及文献[16-17]相比,所提方法无须采样输出频率微分信息,能够有效抵抗输出频率高频噪声的影响。

3)从并网视角充分考虑支撑功能下的源侧特性,设计了基于模糊自适应的比例-积分(proportional-integral, PI)控制器,对直流侧电压稳定与交流侧惯性支撑进行协调控制。此外,建立了系统全阶小信号模型分析系统控制参数对特征根与系统稳定性的影响,为控制参数设计提供指导。

最后,通过硬件在环实验对所提控制策略的有效性以及在惯性支撑、故障穿越、电网谐波、孤岛运行等方面的综合优势进行验证。

## 1 传统光储并网变流器虚拟惯性控制方案

本文聚焦于光储并网变流器并网侧的主动支撑控制方案。图1所示为光储并网变流器系统的结构,三相光储并网变流器直流侧由光伏电池板与储能装置构成。为了使光储并网变流器具备一定的惯性支撑响应与一次调频能力,直流侧需要配置以超级电容和储能电池为主的混合储能。惯性支撑响应较快,惯性支撑功率来源于超级电容;而一次调频响应较慢,一次调频功率来源于储能电池<sup>[20]</sup>。其中,前级光伏模块采用的是最大功率点跟踪控制,储能控制直流侧电容电压。带有输出电感滤波器的光储并网变流器通过高感性线路阻抗与电网相连。

传统虚拟惯性控制方案<sup>[17-18]</sup>如附录A图A1所示。图中:同步PLL用于快速、准确地检测输出电压的相位角,实现输出电压相量 $V_{PCC} \angle \delta_{PCC}$ 定向。电流内环采用dq旋转坐标系下的电流矢量控制,当按照输出电压相量 $V_{PCC} \angle \delta_{PCC}$ 定向时,d轴和q轴电流分别代表有功功率和无功功率分量。电流参考外环中,d轴参考电流采用有功功率控制形成有功电流参考以进行有功功率的调控,q轴参考电流采用交流电压控制形成无功电流参考以提供电压支撑。

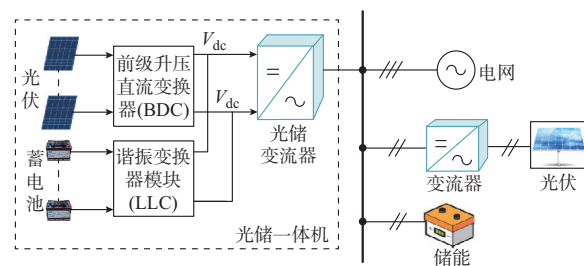


图1 光储并网变流器系统结构  
Fig. 1 Structure of grid-connected converter system with photovoltaic and energy storage

有功功率控制由直流侧电压控制与虚拟惯性控制2个部分共同组成:一方面,直流侧电压控制采用PI控制器,维持直流侧电压稳定;另一方面,基于频率微分的虚拟惯性控制通过模拟同步机转子摇摆方程,在扰动作用时提供虚拟惯性支撑。

### 1.1 基于频率微分的虚拟惯性控制

传统基于频率微分的虚拟惯性控制可表示为:

$$P_{inertia} = k_m(\omega^* - \omega) + k_f \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

式中: $P_{inertia}$ 为虚拟惯性功率; $k_m$ 为一次调频系数; $k_f$ 为虚拟惯性系数; $\omega$ 为电网角频率; $\omega^*$ 为角频率参考值。

当电网频率扰动发生时,根据式(1)通过检测电网角频率变化与频率微分( $d\omega/dt$ )对输出功率指令进行调节,以提供短时惯性支撑。这种方法需要PLL获取公共连接点(PCC)电压频率,还需要对频率微分进行采样,容易受到频率微分带来的高频噪声干扰。

### 1.2 直流侧电压控制

将直流侧电压控制在适当的范围内是并网变流器正常运行的前提。在直流侧电压控制中,引入PI控制器能够实现直流侧电压 $V_{dc}$ 及其参考值 $V_{dc}^*$ 的无误差跟踪。系统总体有功功率指令 $P^*$ 可表示为:

$$P^* = P_{inertia} + \left( k_{pc} + \frac{k_{ic}}{s} \right) [V_{dc}^2 - (V_{dc}^*)^2] \quad (2)$$

式中: $k_{pc}$ 和 $k_{ic}$ 分别为直流侧电容电压PI控制器的比例系数和积分系数; $s$ 为拉普拉斯算子。

文献[19]指出并网变流器所能提供的虚拟惯性将受到其直流侧电容的限制。根据能量守恒定律与直流侧电容方程可得出:

$$CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = P_{in} - P^* - P_{loss} \quad (3)$$

式中: $C$ 为直流侧电容值; $P_{in}$ 为直流侧功率输入; $P^*$ 为有功功率参考值; $P_{loss}$ 为系统功率损耗,在以下讨论中忽略。

直流侧电压是基于直流侧和交流侧的功率平衡

来进行控制的。结合控制律式(1)、式(2)和能量守恒方程式(3)可以得出:

$$V_{dc}^2 = \frac{k_{ic}(V_{dc}^*)^2 + (k_f s^2 + k_m s)\omega}{Cs^2/2 + sk_{pc} + k_{ic}} \quad (4)$$

将直流电压  $\Delta V_{dc} = V_{dc} - V_{dc}^*$  作为输出、 $\Delta\omega = \omega - \omega^*$  作为输入的传递函数可表示为:

$$G(s) = \frac{\Delta V_{dc}(s)}{\Delta\omega(s)} = \frac{k_f s^2 + k_m s}{(V_{dc} + V_{dc}^*)(Cs^2/2 + sk_{pc} + k_{ic})} \approx \frac{k_f s^2 + k_m s}{V_{dc}^*(Cs^2 + 2k_{pc}s + 2k_{ic})} \quad (5)$$

根据式(5)可以得出,当电网频率从-0.4 Hz变化到0.4 Hz时,变流器能提供的虚拟惯性(提供虚拟惯性的能力表现为虚拟惯性系数的大小)与直流侧

电压变化量的三维关系图如附录A图A2所示。当电网频率扰动发生时,若并网变流器要提供更多的惯性支撑,则直流侧电压波动将加剧。

由上述分析可知,直流侧电容电压稳定与虚拟惯性增强之间存在矛盾,传统的PI控制器无法根据系统动态变化进行实时调整,难以协调惯性支撑与直流侧电压稳定。

## 2 内嵌同步机支撑特性的并网变流器电流型控制方案

鉴于传统虚拟惯性控制方案的不足,本文提出一种内嵌同步机支撑特性的含储能并网变流器电流型控制方案,所提方案与现有控制方案的对比如表1所示。

表1 所提方案与常规方案对比  
Table 1 Comparison between proposed scheme and traditional schemes

控制方案	输出外特性	惯性支撑能力	直流侧电压动态与惯性支撑协调控制	是否需要频率微分采样	故障穿越能力	电网畸变下输出电流质量	孤岛运行能力	并网切换
基于VSG的控制方案 <sup>[6-8]</sup>	受控电压源	具备	具备	不需要	弱	不具备高输出电流质量	具备	具备,需预同步
基于PLL的虚拟惯性控制方案 <sup>[16-19]</sup>	受控电流源	具备	具备	需要,或基于锁频环(FLL)采样	较好	采用二阶广义积分器的锁相环(SOGI-PLL)/SOGI-FLL,具备较高的输出电流质量	具备	不具备
所提控制方案	受控电流源	具备	具备	不需要	较好	采用SOGI-PLL,具备较高的输出电流质量	具备	具备

所提方案的控制结构示意图如图2所示。图中: $P_{dc-link}$ 为直流侧电压稳定的功率; $P_{PV-ref}$ 为光伏侧输入功率; $d_d$ 和 $d_q$ 分别为占空比的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量; $I_d$ 、 $I_q$ 和 $V_d$ 、 $V_q$ 分别为输出电流和输出电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $V^*$ 为电压幅值参考值;PWM表示脉宽调制。

该控制方案包括5个部分:1)无频率微分采样的虚拟惯性控制;2)基于模糊自适应PI控制器的直流电压控制;3)同步PLL;4)电流参考外环控制;5)电流内环控制。

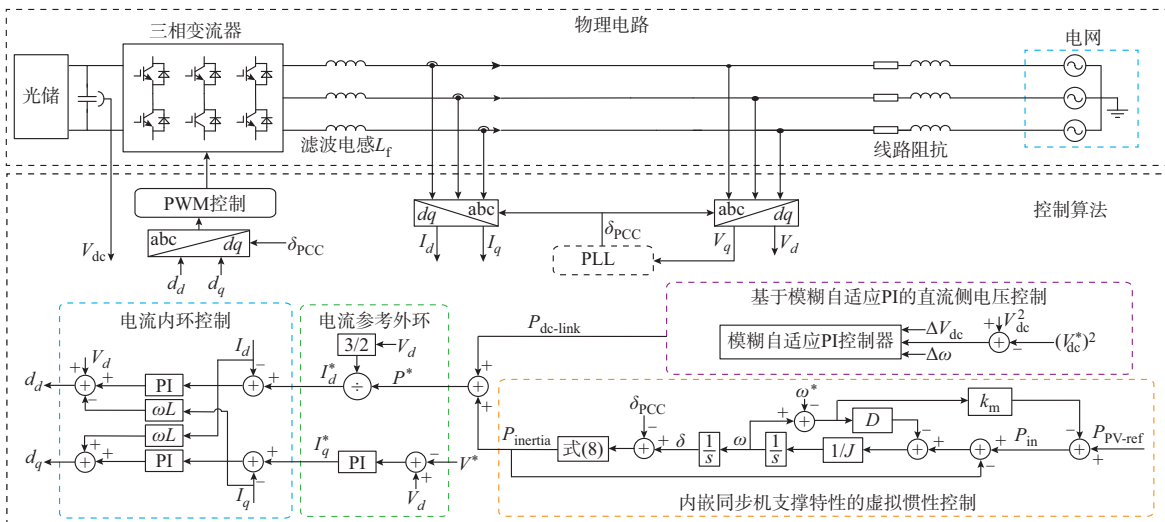


图2 内嵌同步机支撑特性的并网变流器电流型控制结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structure of current-based control for grid-connected converter with embedded synchronous generator support characteristics



显然,本文所提内嵌同步机特性的电流型控制是一种电流型控制方案,并网变流器外特性表现为具有同步机特性(电压源串联阻抗)的受控电流源,基于该控制算法的并网变流器等效模型如图3所示。图中: $V\angle\delta$ 为同步机定子电动势相量; $V_{PCC}\angle\delta_{PCC}$ 为同步机输出端电压相量,即PCC电压相量; $V_g\angle\delta_g$ 为网侧电压相量; $X_s$ 为同步机定子侧电抗; $P$ 为输出功率; $R_l$ 为传输线电阻; $X_l$ 为传输线电抗。所提控制方案具有惯性阻尼支撑、PQ电流源外特性、适用于直流侧光储系统三大优势。所提控制算法的核心在于无频率微分采样的虚拟惯性控制与基于模糊自适应PI控制器的直流侧电压控制。

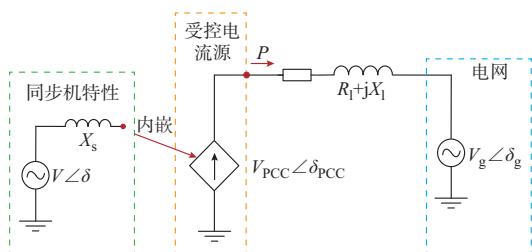


图3 变流器与交流电网连接的等效模型  
Fig. 3 Equivalent model of converter connected to AC grid

### 2.1 内嵌同步机支撑特性的虚拟惯性控制

同步机的转子摇摆方程将反电动势的频率变化与发电机的输出功率相耦合,由于惯性转矩的存在,转子旋转速度以及电网频率在外界扰动作用时不会发生突变,即具有一定的惯性来抵抗频率突变,提供频率支撑能力。

同步机输出有功功率的动力学方程可表示为:

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega \\ J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_{in} - P_{out} - D\omega(\omega - \omega^*) \\ P_{out} = \frac{3VV_g}{X_s X_l} \sin(\delta - \delta_g) \approx \frac{3VV_{PCC}}{X_s} \sin(\delta - \delta_{PCC}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{in}$ 和 $P_{out}$ 分别为输入功率和输出功率; $J$ 为虚拟惯性常数; $D$ 为阻尼系数; $V$ 为输出电压; $\delta$ 为输出相角; $V_{PCC}$ 为PCC电压; $\delta_{PCC}$ 为PCC相角; $V_g$ 为电网电压; $\delta_g$ 为电网相角。传输阻抗可表示为 $Z_{line} = R_l + jX_l$ ,传输阻抗通常呈现出高感性,则 $Z_{line} \approx jX_l$ 。

为了使变流器能够表现出与同步机类似的惯性支撑能力,本文将式(6)中同步机支撑外特性内嵌到并网变流器虚拟惯性控制算法中,其控制律表示如下:

$$\omega = \frac{1}{Js + D} (P_{in} - P_{inertia} + D\omega^*) \quad (7)$$

$P_{inertia}$ 为并网变流器输出有功功率参考值的一部分,这样系统能够成功地响应扰动变化,提供虚拟惯性支撑。 $P_{inertia}$ 可表示为:

$$P_{inertia} = \frac{3VV_{PCC}}{X_s} \sin(\delta - \delta_{PCC}) \quad (8)$$

内嵌同步机特性的电流型控制并网变流器连接到交流电网的等效模型如图3所示。值得注意的是, $P_{inertia}$ 是基于式(6)反推出来的,并非像传统并网惯性功率控制指令由式(1)得到。因此,本文所提出的虚拟惯性控制不需要电网频率微分信息,避免了频率微分高频噪声的干扰。同步机的惯性行为和高质量、快速的并网电流动态响应可通过所提出的虚拟惯性控制策略同时实现。

### 2.2 基于模糊自适应PI控制器的直流侧电压控制策略

基于模糊自适应PI控制器的直流侧电压控制在设计中无须建立受控对象的精确数学模型。在将模糊控制器的输入变量与输出变量联系起来的过程中,模糊规则在代表有经验的控制学习方面起着至关重要的作用。模糊自适应PI控制可以根据系统的实时响应在线调整PI控制器的参数,使其保持适当的值,进而改善系统的动态性能。

直流侧电容释放其存储的能量能够为光储并网变流器提供一部分短时功率支撑,而电容中存储/释放的能量与直流侧电压的变化相关。当电网角频率 $\omega_g$ 波动时, $V_{dc}$ 的动态过程变化如下:当 $\omega_g$ 升高时,输出有功功率将减小,变流器系统短时存储功率增加直流侧电容电压来抑制频率变化。系统达到新的稳定状态后, $V_{dc}$ 返回到PI控制器的参考值。相反,当 $\omega_g$ 降低时,变流器系统提供短时功率输出,降低直流侧电容电压而增加输出有功功率,最终将直流侧电容电压恢复到参考值。

基于上述分析,模糊自适应PI控制器控制框图如附录A图A3所示。图中:比例补偿系数 $\Delta k_{pc}$ 和积分补偿系数 $\Delta k_{ic}$ 选作输出; $k_u$ 和 $k_w$ 为量化系数; $k_{up}$ 和 $k_{ui}$ 为模糊控制器的比例缩放系数。量化系数和比例系数的值会影响模糊控制器的动态性能。

模糊规则的设计是实现模糊控制的关键。由于模糊控制器的输出是对预先设定的比例和积分系数初始值 $k_{pc0}$ 、 $k_{ic0}$ 的实时动态调整,故模糊规则的设计应遵循 $\Delta k_{pc}$ 和 $\Delta k_{ic}$ 设定的基本原则:

1)如果直流侧电压变化量 $\Delta V_{dc}$ 较大,超出正常范围,则保持电压稳定比提供足够的惯性支撑更为重要。选择较大的 $k_{pc}$ 值和较小的 $k_{ic}$ 值是为了保证

较小的过冲超调和较快的响应速度,同时这也意味着提供较小的惯性支撑功率。

2)如果直流侧电压变化量 $\Delta V_{dc}$ 位于正常工作范围边缘的中间位置,而频率变化量 $\Delta\omega$ 位于中间位置,则会出现2种情况。一种情况是直流电压逐渐偏离参考值,两者之间的误差随时间逐渐增大(例如, $\Delta V_{dc}$ 和 $\Delta\omega$ 变化趋势一致、符号相同)。选择相对较大的 $k_{pc}$ 可以快速恢复电压。另一种情况是直流电压逐渐接近参考值(例如, $\Delta V_{dc}$ 和 $\Delta\omega$ 变化趋势相反、符号相反)。选择相对较小的 $k_{pc}$ 和 $k_{ic}$ 是为了提供更大的惯性功率支撑。

3)如果 $\Delta V_{dc}$ 在正常工作范围内较小,则较小的 $k_{pc}$ 和 $k_{ic}$ 可有效提供惯性,从而改善系统动态性能。

根据模糊推理原理和实验经验,得到的模糊控制规则如表2和表3所示。表中:ZE为零,表示常规量;PS和PB分别表示正小量(小电压推导)和正大量(大电压推导);NS和NB分别表示负小量和负大量。

表2  $\Delta k_{pc}$ 的模糊规则  
Table 2 Fuzzy rule of  $\Delta k_{pc}$

$\Delta V_{dc}$	$\Delta k_{pc}$				
	$\Delta\omega$ 取NB	$\Delta\omega$ 取NS	$\Delta\omega$ 取ZE	$\Delta\omega$ 取PS	$\Delta\omega$ 取PB
NB	NB	NS	NS	ZE	PS
NS	NS	NS	NS	ZE	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	ZE	ZE	PS	PS	PS
PB	NS	NE	PS	PS	PB

表3  $\Delta k_{ic}$ 的模糊规则  
Table 3 Fuzzy rule of  $\Delta k_{ic}$

$\Delta V_{dc}$	$\Delta k_{ic}$				
	$\Delta\omega$ 取NB	$\Delta\omega$ 取NS	$\Delta\omega$ 取ZE	$\Delta\omega$ 取PS	$\Delta\omega$ 取PB
NB	PB	PS	PS	PS	ZE
NS	PS	PS	PS	ZE	ZE
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	ZE	ZE	NS	NS	NS
PB	ZE	NS	NS	NS	NB

模糊推理模型主要分为Mamdani和Takagi-Sugeno两种<sup>[21-22]</sup>。本文采用的是Mamdani模型。对模糊推理得到的结果进行去模糊化处理。将模糊控制算法给出的精确量乘以比例因子,将其从模糊集理论域转换到基本理论域。然后,得到PI控制器的比例补偿系数 $\Delta k_{pc}$ 和积分补偿系数 $\Delta k_{ic}$ 。在线修正后的PI参数修正公式可表示为:

$$\begin{cases} k_{pc} = k_{pc0} + \Delta k_{pc} \\ k_{ic} = k_{ic0} + \Delta k_{ic} \end{cases} \quad (9)$$

## 2.3 同步PLL

同步PLL用于快速、准确地检测输出电压 $V_{PCC}$ 的相位角,实现按照输出电压相量 $V_{PCC} \angle \delta_{PCC}$ 定向以便变流器能够顺利并网,本文采用经典PLL控制。根据式(8),PLL锁相得到PCC电压相位角 $\delta_{PCC}$ 用于建立 $P_{inertia}$ 。

## 2.4 电流参考外环控制与电流内环矢量控制

本节将说明电流内外环的设计。电流内环电流矢量控制器的实现基于 $dq$ 同步参考坐标系。2个独立的控制回路负责调节直流和正交电流分量,系统线路动态方程为:

$$\begin{cases} V_d = L_f \frac{dI_d}{dt} - \omega L_f I_q + V_{PCCd} \\ V_q = L_f \frac{dI_q}{dt} + \omega L_f I_d + V_{PCCq} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $V_{PCCd}$ 和 $V_{PCCq}$ 分别为PCC电压的 $d$ 轴和 $q$ 轴分量。显然, $V_d$ 和 $V_q$ 之间存在耦合。为了实现对参考电流 $I_d^*$ 和 $I_q^*$ 的无差错跟踪,电流内环采用了带有去耦反馈的PI控制器,以提高控制器的性能。

电流参考外环控制则是通过有功功率指令和电压幅值指令分别生成电流参考值 $d$ 轴与 $q$ 轴分量。电流参考外环可以设计为:

$$\begin{cases} I_d^* = \frac{P^*}{3V_d/2} \\ I_q^* = k_p^q (V - V^*) + k_i^q \int (V - V^*) dt \end{cases} \quad (11)$$

式中: $k_p^q$ 和 $k_i^q$ 分别为参考电流 $I_q^*$ 控制环的比例系数和积分系数。

通过上述电流参考外环控制, $d$ 轴电流参考控制可以用于输出由虚拟惯性控制与直流侧电压控制协调得到的有功功率指令, $q$ 轴电流参考控制则用于建立并网电压幅值支撑。

## 3 稳定性与灵敏度分析

本章建立了所提控制方法的小信号模型,用于分析系统的稳定性,并在系统稳定前提下,考虑动态响应需求,给出了关键参数的参与因子分析结论。

### 3.1 小信号模型主导特征值分析

为了研究所提控制策略下系统的动态性能与稳定性,建立了系统的全阶小信号状态空间模型,如式(12)所示,具体推导过程见附录B式(B1)一式(B7)。

$$\dot{x} = Ax \quad (12)$$

$$x = [\hat{\omega}, \hat{V}_{dc}, \hat{\delta}, \hat{\delta}_{PCC}, \hat{I}_d, \hat{I}_q, \hat{x}_0, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3, \hat{x}_4, \hat{x}_5, \hat{x}_6]^T \quad (13)$$

式中: $A$ 为状态矩阵,具体表达式见附录B式(B8);

$x$  为状态变量;顶标“-”表示相应变量的小扰动量;  
 $\hat{x}_0 = (\hat{\delta} - \hat{\delta}_{PCC})/s$ ;  $\hat{x}_1 = \hat{\delta}_{PCC}/s$ ;  $\hat{x}_2 = \hat{V}_{dc}/s$ ;  $\hat{x}_3 = \hat{x}_2/s$ ;  $\hat{x}_4 = \hat{V}_d/s$ ;  $\hat{x}_5 = \hat{I}_d/s$ ;  $\hat{x}_6 = \hat{I}_q/s$ 。

由于系统的振荡模态由状态矩阵  $A$  的特征值决定,故必须分析这些特征值如何随不同参数而变化。利用给定的模型提取了系统的特征值轨迹图,该系统有3对主导特征值。接下来将讨论不同参数对这些主导特征值的影响,相应主导特征值随控制参数的变化情况如附录A图A4至图A8所示,实轴上的特征值几乎不随参数的变化而变化,故没有显示在图中。

虚拟惯性常数  $J$  和阻尼系数  $D$  变化时主导特征值的变化情况见附录A图A4。显然,  $J$  和  $D$  对同一对共轭复特征值  $\lambda_{7,8}$  的影响较大。随着  $D$  的增大,系统特征根逐渐远离虚轴,意味着系统动态具有更快的衰减速度。当  $J$  增大时,系统特征根逐渐接近虚轴,振荡频率逐渐降低,系统动态响应变慢,弱化了系统的稳定性。

附录A图A5显示了直流侧电容  $C_{dc}$  变化时特征值的变化情况。随着  $C_{dc}$  增大,系统主导特征根逐渐靠近实轴,意味着系统阻尼比增大,振荡频率逐渐降低,动态响应更好,有利于系统稳定性。

直流侧电压模糊自适应PI控制器中,PI控制参数对系统主导特征根的影响如附录A图A6所示。可以看出,过小的比例系数  $k_{pc}$  会导致系统特征根靠近虚轴,恶化系统的稳定性,引发系统动态振荡。而随着积分系数  $k_{ic}$  的增大,主导共轭特征根将远离实轴靠近虚轴,降低了系统阻尼,引发潜在的不稳定性风险。

PLL控制参数对系统另一对特征值  $\lambda_{2,3}$  的影响详见附录A图A7。PLL比例系数  $k_{p0}$  的增加引起这对共轭特征根逼近实轴,然而随着  $k_{p0}$  的进一步增大,特征根  $\lambda_2$  将逼近虚轴,这容易导致系统失稳。PLL积分系数  $k_{i0}$  的增加将导致这对共轭特征根远离实轴,系统阻尼进一步降低,容易引发系统潜在的不稳定性风险。合理设计PLL控制参数有助于实现快速性和鲁棒性之间的权衡,从而确保PLL具备较好的动/静态性能。

线路阻抗  $Z_g = r_g + j\omega L_g$  对系统特征根的影响详见附录A图A8。线路电感  $L_g$  的变化主要影响振荡频率及其衰减系数,增加线路电感  $L_g$  会降低系统稳定性。此外,从图A8可以看出,线路电阻  $r_g$  的增加会使特征值稍稍偏离虚轴,增加了系统的阻尼,但效果有限。以上分析表明,线路阻抗中电感分量的增加是恶化弱电网下系统稳定性的主要因素。

### 3.2 参与因子与灵敏度分析

根据前面的分析可知,系统状态矩阵的特征值受控制器参数和线路参数的影响较大。为了进一步证明分析结论的正确性,对系统状态的参与因子进行分析,如附录A图A9所示。状态变量与主要共轭特征值之间的关系如表4所示。在系统额定工作点下,3个主要共轭特征值对系统参数的灵敏度分析详见图A10—图A12。

表4 系统模态分析  
Table 4 System modal analysis

共轭特征值	自然振荡频率/Hz	阻尼比 $\zeta$	主要相关状态变量
$\lambda_{2,3}$	12.50	0.77	$\hat{\delta}_{PCC}, \hat{x}_1$
$\lambda_{5,6}$	2.10	0.50	$\hat{\omega}, \hat{\delta}$
$\lambda_{7,8}$	2.69	0.15	$\hat{V}_{dc}, \hat{x}_2, \hat{x}_5$

结合参与因子分析和灵敏度分析,系统的3个主要共轭特征值与不同的状态变量和参数有关。特征值  $\lambda_{2,3}$  主要与  $\hat{\delta}_{PCC}$  有关,如附录A图A10所示。PLL的PI控制参数  $k_{p0}$  和  $k_{i0}$  主要影响特征根  $\lambda_{2,3}$ 。虚拟惯性控制部分涉及的状态变量  $\hat{\omega}$  和  $\hat{\delta}$  主要影响特征根  $\lambda_{5,6}$ ,它们主要与虚拟惯性常数  $J$  和阻尼系数  $D$  相关。值得注意的是,与其他主要特征值的阻尼比相比,与  $\hat{V}_{dc}$  和  $\hat{I}_d$  有关的特征值  $\lambda_{7,8}$  的阻尼比更难提高。因此,直流侧电压控制器与电流控制器设计尤为关键。

### 4 硬件在环实验验证

为了验证所设计控制方案的有效性,根据图2所示的控制结构和表5中所列的系统参数值,进行了硬件在环测试,硬件在环平台基于OPAL-RT实时仿真器与RT-Box控制器联合搭建,如附录A图A13所示。设计直流电压偏差正常范围为  $[-20, 20]$  V,所允许的最大偏差范围为  $[-40, 40]$  V。

表5 系统与控制参数  
Table 5 System and control parameters

参数	数值	参数	数值
RT-Box 仿真步长	$2 \times 10^{-5}$	直流电压基准 $u_{dc}^*$	600 V
OPAL-RT 仿真步长	$2 \times 10^{-5}$	线路阻抗 $Z_g$	$(0.2 + j0.314)\Omega$
变流器开关频率	10 kHz	虚拟惯性常数 $J$	50
采样频率	10 kHz	阻尼系数 $D$	5
额定交流电压频率 $f$	50 Hz	一次调频系数 $k_m$	500
电压幅值参考值 $V^*$	311 V	PLL 比例系数 $k_{p0}$	0.5
输入有功功率 $P_{in}$	3 kW	PLL 积分系数 $k_{i0}$	40
滤波电感 $L_f$	3 mH	模糊控制器 比例系数初始值 $k_{pc0}$	0.04
直流侧电容 $C_{dc}$	3 500 $\mu$ F	模糊控制器 积分系数初始值 $k_{ic0}$	0.08



#### 4.1 惯性响应的硬件在环实验结果

为验证所提控制方法的惯性响应能力,本文探究了所提控制方案在电网频率跌落时的输出情况。为了突出惯性响应的效果,此时不考虑一次调频控制,  $k_m=0$ 。电网频率在 10 s 下降了 0.2 Hz, 所提控制方法下光储并网变流器并网电压和电流波形如附录 A 图 A14 所示。由该图可知, 电网频率在 10 s 下降了 0.2 Hz 时, 本文所提虚拟惯性控制策略下, 光储并网变流器的并网 PCC 电流能够快速动态响应调节并保持稳定, 并网 PCC 电压基本保持一致。

与传统控制方案对比, 其动态响应波形如图 4 所示。图 4(a) 至 (c) 反映了直流侧电容电压控制参数对电网频率扰动下直流侧电压变化量  $\Delta V_{dc}$  与输出功率  $\Delta P_{out}$  的影响, 其中,  $\Delta f_{grid}$  为电网频率跌落差值。

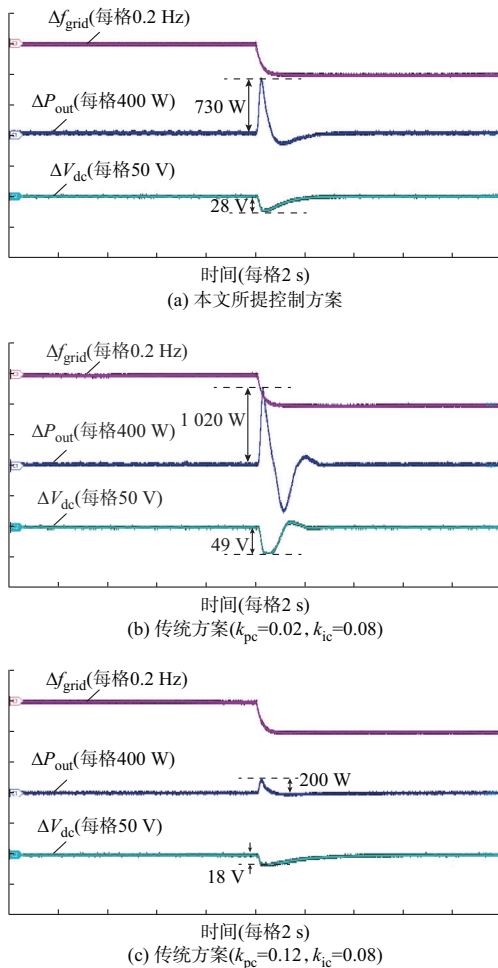


图 4 惯性响应硬件在环实验结果

Fig. 4 Results of hardware-in-the-loop experiment for inertial response

当电网频率跌落 0.2 Hz 时, 可以观察到在所提控制策略下, 模糊自适应 PI 控制器中 PI 参数会随着

系统的变化而及时调整。变流器能够提供 730 W 的  $\Delta P_{out}$  作为瞬时时功率支撑, 同时, 直流电压下降了 28 V, 实验结果如图 4(a) 所示。当直流侧电压在正常范围内运行时, 变流器能够提供足够的虚拟惯性, 而当直流电压即将超出正常允许范围时, 保持直流侧电压稳定则更为重要。传统控制方法采用了直流侧电容电压 PI 控制器, 图 4(b) 所示为控制参数  $k_{pc}=0.02$ 、 $k_{ic}=0.08$  时的实验结果, 虽然此时变流器能够提供 1 020 W 的瞬时功率支撑, 但直流侧电压跌落 49 V, 超过了所设计的允许最大电压, 这对电压稳定性构成了威胁。图 4(c) 所示为控制参数  $k_{pc}=0.12$ 、 $k_{ic}=0.08$  时的实验结果, 虽然此时直流侧电压跌落只有 18 V, 但变流器只能提供 200 W 的惯性功率支撑。由式 (5) 可以看出, 当积分系数  $k_{ic}$  不变时, 较大的比例系数  $k_{pc}$  会增加传递函数  $\Delta V_{dc}/\Delta\omega$  的阻尼比, 降低频率扰动作用时系统输出的超调量, 导致较小的直流侧电压跌落, 进而导致较小的惯性功率支撑。因此, 本文所提的基于模糊自适应 PI 控制器的控制方法既能提供一定的惯性支撑, 又能确保动态变化时直流侧电压变化稳定在允许范围内。

#### 4.2 加入一次调频后的硬件在环实验结果

在 4.1 节基础上, 加入了一次调频控制, 其中, 参与一次调频所需的能量来源于直流侧储能系统。考虑一次调频控制后,  $k_m=500$ , 电网频率在 10 s 跌落了 0.2 Hz, 光储并网变流器输出功率  $P_{out}$ 、虚拟惯性功率  $P_{inertia}$ 、用于直流侧电压稳定的功率  $P_{dc-link}$  和直流侧电压变化量  $\Delta V_{dc}$  的波形如图 5 所示。光储并网变流器的输出功率  $P_{out}$  是由内嵌同步机特性控制律得到的虚拟惯性功率  $P_{inertia}$  与用于直流侧电压稳定的功率  $P_{dc-link}$  两部分组成,  $P_{out}=P_{inertia}+P_{dc-link}$ 。

由图 5(a) 至 (c) 可以看出, 加入一次调频控制后, 并网变流器输出功率 ( $P_{out}=P_{inertia}+P_{dc-link}=P_{ref}+k_m(\omega^*-\omega)$ ), 其中,  $P_{ref}$  为直流侧光伏发电的输出功率) 会根据一次调频特性由 3 000 W 增加至 3 630 W。另一方面, 直流侧电压会发生波动, 在直流侧电压控制环节的作用下, 最终仍保持在 600 V。所提方法采用的模糊 PI 控制器的直流侧电压控制, 能够兼顾暂态过程功率输出与直流侧电压波动。

此外, 为了进一步区分并明晰不同控制环节的动态响应性能、稳态特性及其支撑作用, 附录 A 图 A15(a) 给出  $P_{inertia}$ 、 $P_{dc-link}$ 、参与一次调频功率  $P_{fr}$  以及输出功率的响应曲线, 图 A15(b) 给出了输出频率与功角变化的曲线。

#### 4.3 考虑电网谐波的硬件在环实验结果

为验证所提控制方法在电网谐波下的控制性能, 本文探究了所提控制方案在电网 3 次谐波注入

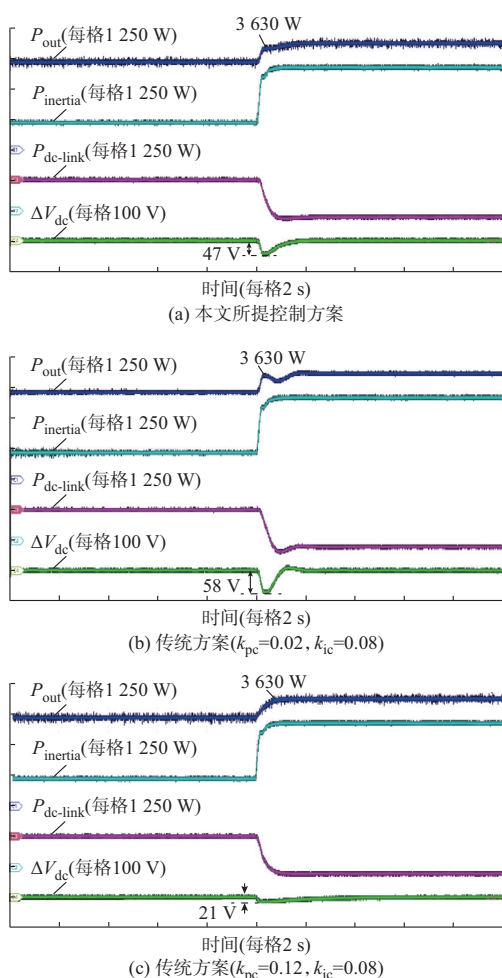


图5 加入一次调频控制后的实验结果  
Fig. 5 Experimental results after primary frequency regulation control is incorporated

下的输出情况。为了减少谐波电压对相位检测的影响,在电网谐波下采用级联双二阶广义积分器的锁相环(cascaded dual second-order generalized integrator based phase-locked loop, CDSOGI-PLL)的改进方案来替代传统PLL<sup>[23]</sup>。在10 s时,电网侧注入了有效值为50 V的3次谐波电压,所提控制方法下光储并网变流器并网电压、电流、输出功率、直流侧电压波形如图6所示。图中: $V_{PCCa}$ 、 $I_{PCCa}$ 分别为PCC电压a相分量和流过PCC的电流a相分量。

由图6可知,在10 s时注入3次谐波后,系统依然能够稳定,并网输出功率保持为3 000 W,直流侧电压保持为600 V,光储并网变流器输出电流质量基本不受影响。注入3次谐波后,光储并网变流器输出电流的总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)从3.74%变化至3.90%,所提电流型控制方案在谐波电网下电流质量效果较好。

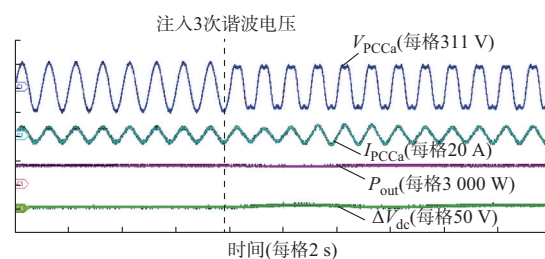


图6 考虑电网谐波影响的硬件在环实验结果  
Fig. 6 Hardware-in-the-loop experiment results considering influence of power grid harmonic

#### 4.4 高频噪声信号影响下的硬件在环实验结果

为进一步说明所提控制方法的优越性,与文献[18-19]中基于频率微分的虚拟惯性电流型控制方法在并网模式高频噪声信号影响下的硬件在环实验结果进行对比验证。高频噪声信号作用在经PLL/FLL获取的频率信号上。10 s时引入了高频噪声信号,所提控制策略和基于频率微分的虚拟惯性电流型控制方法下系统输出有功功率如图7所示。可以看出,2种控制方案都能够保证系统稳定运行,但在高频噪声下基于频率微分的虚拟惯性控制策略的交流器输出有功功率波动得更加剧烈。相较于该控制方法,本文所提电流型控制方案在高频噪声下鲁棒性更好。

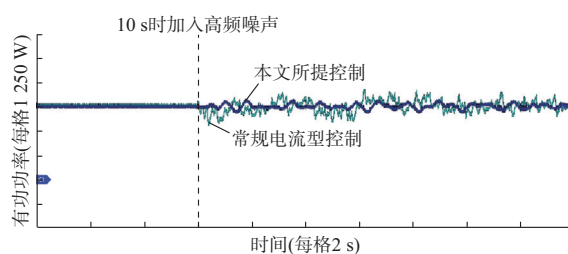


图7 考虑高频噪声信号影响的硬件在环实验结果  
Fig. 7 Hardware-in-the-loop experiment results considering influence of high-frequency noise signals

#### 4.5 离网孤岛运行的硬件在环实验结果

为进一步验证所提控制方法在孤岛模式下运行的有效性,基于所提控制方案进行了离网孤岛运行的硬件在环实验。

系统所带孤岛负载为48.4 Ω的阻性负载。本文所提控制方法下光储并网变流器输出电压、电流、输出功率和频率波形如附录A图A16(a)所示。在10 s时,负载侧原负载并联接入了一个193.6 Ω的阻性负载,频率下降了约0.24 Hz,由图A16(a)实验结果可以看出,在负载突增下,系统输出电流平滑过渡,输出电压基本稳定在311 V。

此外,为进一步验证本文所提方法在任意负载阻抗特性下的适用性,进行了负载切换测试。10 s



时系统负载由阻感性负载(48.4  $\Omega$  阻性负载并联 290.4  $\Omega$  感性负载)切换为阻容性负载(在原先阻感性负载的两侧并联电容),实验结果如附录 A 图 A16(b)所示。此时,输出电压仍维持在 311 V,输出有功功率不变,无功功率由 500 var 变为 -470 var。

综上,所提内嵌同步机支撑特性的电流型控制方法能够在孤岛模式下运行。

#### 4.6 并网切换下的硬件在环实验结果

为进一步说明所提控制方法的优越性,与文献[18-19]中基于频率微分的虚拟惯性电流型控制方法在并网切换情况下的硬件在环实验结果进行对比验证。10 s 时由并网模式切换至离网模式,系统有功功率指令为 3 000 W,输出电压为 311 V,离网时,系统所带孤岛负载为 48.4  $\Omega$  的阻性负载,硬件在环实验结果如附录 A 图 A17 所示。由图 A17(a)可以看出,10 s 时系统由并网切换至离网,本文所提控制方法下,系统能够实现从并网到离网的平滑切换,输出电压基本稳定在 311 V,所提内嵌同步机支撑特性的电流型控制算法能够在并网切换模式运行。由图 A17(b)可以看出,在文献[18-19]中电流型控制方法下,10 s 时系统由并网切换至离网,系统失稳。显然,本文所提控制方法可以实现并离网的平滑切换,进一步说明了所提控制方法是一种具备惯性支撑、调压调频、孤岛自组网等功能的电流型控制方案。

对基于本文所提控制方法与传统 VSG 控制方法的变流器系统在并网故障穿越情况下的控制性能进行对比。在 10 s 时电网电压跌落至 0.5 p.u. 并在 10.2 s 恢复正常,硬件在环实验结果如附录 A 图 A18 所示。图 A18(a)所示为传统 VSG 控制方法的波形图,在故障期间为了实现电流限幅功能,引入用于故障限流的虚拟阻抗,在 10.2 s 电网电压恢复正常时,系统失稳。这是因为虚拟阻抗的引入恶化了系统的暂态同步稳定性<sup>[24]</sup>。图 A18(b)为本文所提控制方法下的波形图,故障时输出电流不越限,当 10.2 s 电网电压恢复正常时,系统仍然可以稳定运行。相较于传统 VSG 控制方法,所提控制方案在故障穿越情况下稳定性更强。

## 5 结语

本文针对含储能的并网变流器提出了一种内嵌同步机特性的电流型控制策略,有效提升了光储并网系统的并网稳定性和惯性支撑能力,通过硬件在环实验验证了所提方法的有效性。主要结论如下:

1) 本文所提方法模拟同步机的动力学行为,将

并网变流器输出外特性控制成具有电压控制(同步机)的受控电流源,既具备传统 PQ 电流源外特性又能提供惯性阻尼支撑,并且具备孤岛运行能力。

2) 本文所提出的虚拟惯性控制不需要检测采样电网频率微分,避免了频率微分高频噪声的干扰。同时,该控制策略实现了同步机的惯性行为 and 高质量、快速的并网电流动态响应。

3) 与传统控制方案相比,本文所提的基于模糊自适应的 PI 控制器能实现对直流侧电压稳定与惯性支撑的协调控制。模糊集的设计要遵循可解释性、实用性原则,本文采用的模糊集逻辑简单,便于工程应用。

4) 本文建立了系统全阶小信号模型,分析了系统控制参数对特征根影响的灵敏性与系统稳定性,能够为控制参数设计提供参考。

本文主要聚焦变流器并网侧的主动支撑控制,后续将进一步研究前级变流器与并网侧的协调稳定控制。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 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): 461-475.  
XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, 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): 461-475.
- [2] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Small signal stability assessment of power systems with increased penetration of photovoltaic generation: a case study[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 960-967.
- [3] 周京华,翁志鹏,宋晓通. 兼顾可靠性与经济性的孤岛型光储微电网容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 166-174.  
ZHOU Jinghua, WENG Zhipeng, SONG Xiaotong. Capacity configuration method of islanded microgrid with photovoltaic and energy storage system considering reliability and economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 166-174.
- [4] MILANO F, DORFLER F, HUG G, et al. Foundations and challenges of low-inertia systems (invited paper) [C]// 2018 Power Systems Computation Conference (PSCC), June 11-15, 2018, Dublin, Ireland.
- [5] 张祥宇,胡剑峰,付媛,等. 风储联合系统的虚拟惯量需求与协同支撑[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 672-685.  
ZHANG Xiangyu, HU Jianfeng, FU Yuan, et al. Virtual inertia demand and collaborative support of wind power and energy storage system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 672-685.

- [6] 胡正阳,高丙团,张磊,等.风电机组双向支撑能力分析 with 自适应惯量控制策略[J].电工技术学报,2023,38(19):5224-5240.  
HU Zhengyang, GAO Bingtuan, ZHANG Lei, et al. Bidirectional support capability analysis and adaptive inertial control strategy of wind turbine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5224-5240.
- [7] 徐崧,杨博,刘浩,等.一种提高虚拟同步机电流质量的电压-电流级联闭环控制方案[J].电工技术学报,2024,39(6):1871-1885.  
XU Song, YANG Bo, LIU Hao, et al. A cascaded harmonic voltage and current closed-loop control method to improve the current quality of virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(6): 1871-1885.
- [8] 王子骏,庄可好,辛焕海,等.虚拟同步直驱风机低频振荡机理分析及阻尼补偿控制[J].电力系统自动化,2024,48(2):95-104.  
WANG Zijun, ZHUANG Kehao, XIN Huanhai, et al. Low-frequency oscillation mechanism analysis and damping compensation control of virtual synchronous direct-driven wind turbine generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2): 95-104.
- [9] 施兴辉,柯松,张帆,等.考虑充电站可调潜力的虚拟惯性功率补偿控制策略[J].电力系统自动化,2024,48(3):73-81.  
SHI Xingye, KE Song, ZHANG Fan, et al. Control strategy for virtual-inertial power compensation considering adjustable potential of charging station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 73-81.
- [10] SHUAI Z K, HUANG W, SHEN C, et al. Characteristics and restraining method of fast transient inrush fault currents in synchronverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7487-7497.
- [11] 郑峰,苏明鸿,陈静,等.基于改进模型预测的并网变换器自适应虚拟惯性控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(13):35-46.  
ZHENG Feng, SU Minghong, CHEN Jing, et al. An adaptive virtual inertia control strategy for a grid-connected converter based on improved model prediction [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 35-46.
- [12] 王家乾,赵晋斌,曾志伟,等.基于虚拟惯性控制的光伏直流微电网稳定性分析[J].电力自动化设备,2024,44(4):55-61.  
WANG Jiaqian, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. Stability analysis of photovoltaic DC microgrid based on virtual inertia control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 55-61.
- [13] BECK H P, HESSE R. Virtual synchronous machine [C]// 2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, October 9-11, 2007, Barcelona, Spain.
- [14] ARE SUUL J, D' ARCO S. Comparative analysis of small-signal dynamics in virtual synchronous machines and frequency-derivative-based inertia emulation [C]// 2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), August 26-30, 2018, Budapest, Hungary.
- [15] 孟建辉,赵彭辉,王毅,等.基于虚拟惯性控制的多光储单元协同运行研究[J].电网技术,2021,45(5):1921-1932.  
MENG Jianhui, ZHAO Penghui, WANG Yi, et al. Cooperative operation of optical storage system based on virtual inertial control [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1921-1932.
- [16] FANG J Y, LI H C, TANG Y, et al. Distributed power system virtual inertia implemented by grid-connected power converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8488-8499.
- [17] FANG J Y, LI H C, TANG Y, et al. On the inertia of future more-electronics power systems [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(4): 2130-2146.
- [18] FANG J Y, ZHANG R Q, LI H C, et al. Frequency derivative-based inertia enhancement by grid-connected power converters with a frequency-locked-loop [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4918-4927.
- [19] 石荣亮,张烈平,王文成,等.基于改进频率微分运算的虚拟惯量控制策略[J].电力系统自动化,2020,44(20):94-102.  
SHI Rongliang, ZHANG Lieping, WANG Wencheng, et al. Virtual inertia control strategy based on improved frequency differential operation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 94-102.
- [20] XU Q W, HU X L, WANG P, et al. A decentralized dynamic power sharing strategy for hybrid energy storage system in autonomous DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 5930-5941.
- [21] YING H. Fuzzy control and modeling: analytical foundations and applications [M]. Hoboken, USA: Wiley, 2000.
- [22] MENDEL J M. Uncertain rule-based fuzzy systems: introduction and new directions [M]. 2nd ed. Berlin, Germany: Springer International Publishing, 2017.
- [23] 柯善文,李玉忍.一种新型级联CDSOGI-PLL的电网电压同步信号检测技术[J].西北工业大学学报,2023,41(5):842-849.  
KE Shanwen, LI Yuren. A synchronizing signal detection technique for grid voltage based on new CDSOGI-PLL [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(5): 842-849.
- [24] FAN B, LIU T, ZHAO F Z, et al. A review of current-limiting control of grid-forming inverters under symmetrical disturbances [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2022, 3: 955-969.

韩宇(1986—),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:智能配电网运行与控制、微电网稳定控制。E-mail: hanyushue@126.com

乔学博(1992—),男,通信作者,博士,主要研究方向:柔性直流配用电技术、海上风电直流送出技术等。E-mail: qiaoxb@csg.cn

李勇(1982—),男,博士,教授,主要研究方向:能源/电力系统优化运行与控制、电能变换系统与装备等。E-mail: yongli@hnu.edu.cn

(编辑 蔡静雯)

## Current-based Control Strategy for Grid-connected Converter with Energy Storage and Embedded Synchronous Generator Support Characteristics

HAN Yu<sup>1</sup>, QIAO Xuebo<sup>2</sup>, LI Yong<sup>1</sup>, YU Songtao<sup>2</sup>, CAO Yijia<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Company Limited, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** The grid-connected converter with photovoltaic and energy storage has the characteristics of low inertia, weak damping, weak voltage regulation ability, and frequent power fluctuations. Large-scale integration of grid-connected converters with photovoltaic and energy storage will affect the safe and stable operation of the power system. For this kind of grid-connected converter with energy storage, this paper proposes a current-based control strategy with embedded synchronous generator support characteristics to enhance the inertial support capability of the system. This strategy simulates the dynamic behavior of synchronous generators and controls the external characteristics of the grid-connected converter output to a controlled current source with synchronous generator control characteristics. It combines the advantages of grid-forming control based on the virtual synchronous generator and grid-following control based on the phase-locked loop, which demonstrates the significant comprehensive advantages in inertia support, fault ride-through, power grid harmonic, and islanding operation. The proposed strategy does not require detection and sampling of the output frequency differentiation of the system, which avoids noise interference caused by frequency differentiation detection. In addition, to address the irreconcilable contradiction between the inertia support capability on the AC side and the voltage stability on the DC side, this paper designs a fuzzy adaptive proportional-integral (PI) control strategy to coordinate the voltage stability on the DC side and the inertia support on the AC side. Finally, the hardware-in-the-loop experimental results verify the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U22B20104) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2023TQ0375).

**Key words:** grid-connected converter; photovoltaic; energy storage; inertia support; virtual synchronous generator; current-based control; voltage stability

