

# 并联逆变器的自适应无功均分的改进 虚拟阻抗策略

冯侃<sup>1</sup>, 张乐桢<sup>1</sup>, 周龙<sup>1</sup>, 侯焱伦<sup>1</sup>, 牛炜<sup>2</sup>, 保承家<sup>2</sup>

(1. 国网甘肃省电力公司白银供电公司, 甘肃 白银 730900;

2. 国网甘肃省电力公司, 甘肃 兰州 730030)

**摘要:** 针对孤岛微电网中的并联逆变器无功均分问题和母线压降问题, 提出了一种具有自适应无功均分和母线电压补偿功能的改进虚拟阻抗策略。通过引入基于广义二阶积分器(SOGI)的增强型功率解耦策略, 解决了非线性负载下的谐波虚拟压降问题, 并改善了PI控制器的追踪效果。然后, 通过自适应虚拟压降修正项, 消除线路阻抗的影响, 并提出了虚拟压降修正系数的选取方法。最后, 通过仿真验证了所提策略的有效性, 显示其在复杂工况下具有较好的无功均分精度和母线电压补偿效果。

**关键词:** 并联逆变器; 虚拟阻抗; 无功均分; 电压补偿

**中图分类号:** TM28      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed26282

## Improved Virtual Impedance Strategy for Adaptive Reactive Power Equalisation in Shunt Inverters

FENG Kan<sup>1</sup>, ZHANG Lezhen<sup>1</sup>, ZHOU Long<sup>1</sup>, HOU Yanlun<sup>1</sup>, NIU Wei<sup>2</sup>, BAO Chengjia<sup>2</sup>

(1. State Grid Gansu Power Company Baiyin Power Supply Company, Baiyin 730900, Gansu, China;

2. State Grid Gansu Power Company, Lanzhou 730030, Gansu, China)

**Abstract:** An improved virtual impedance strategy with adaptive reactive power equalisation and bus voltage compensation functions was proposed to address the reactive power equalisation and bus voltage drop issues in parallel inverters in island microgrids. By introducing an enhanced power decoupling strategy based on a second-order generalized integrator (SOGI), the harmonic virtual voltage drop problem under nonlinear loads was solved, and the tracking performance of the PI controller was improved. Then, an adaptive virtual voltage drop correction term was introduced to eliminate the influence of line impedance, and a method for selecting the virtual voltage drop correction coefficient was proposed. Finally, the effectiveness of the proposed strategy was verified through simulations, demonstrating improved reactive power equalisation precision and bus voltage compensation in complex operating conditions.

**Key words:** shunt inverter; virtual impedance; reactive power equalisation; voltage compensation

在双碳目标背景下, 以风力发电和光伏发电等为代表的分布式发电(distributed generation, DG)迅猛发展, 其具有可再生性、绿色清洁以及边际成本低等优势<sup>[1-2]</sup>。为充分利用这些优势并降低其对电网的不利影响, 微电网成为了新能源消纳的重要手段。逆变器的并联是微电网最常见的运行方式之一<sup>[3]</sup>, 目前常用的并联逆变器控制策略为下垂控制, 它无需借助通信互联线, 具有

即插即用、扩容方便和独立运行等特点<sup>[4]</sup>。然而, 基于下垂控制的微电网受到线路阻抗和分布式电源位置差异的影响, 存在功率耦合和无功分配不均的问题, 可能导致逆变器发热、效率降低, 甚至损害逆变器寿命, 影响微电网安全运行<sup>[5]</sup>。

针对基于下垂控制的孤岛微电网存在的功率耦合与无功不均分问题, 现常用的改进策略是引入虚拟阻抗对线路阻抗进行调节<sup>[6-7]</sup>, 主要目的

**基金项目:** 国家电网有限公司科技项目(522703230009); 国家自然科学基金(U24A20148)

**作者简介:** 冯侃(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源发电与并网技术, Email: 274524973@qq.com

**通讯作者:** 张乐桢(1986—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电网运检、数字化技术, Email: 1442743926@qq.com

是提升微电网的感性成分,从而改善功率解耦效果<sup>[8-9]</sup>,并通过合理的参数设置使引入虚拟阻抗后的等效线路阻抗与逆变器容量成反比<sup>[10]</sup>,进而实现并联逆变器无功功率均分。然而,现有策略仍存在一定问题,如虚拟电阻固定值导致无功分配不均<sup>[11]</sup>,通信线路依赖性高且故障时效果不佳<sup>[6,12]</sup>。为此,有研究者提出了自适应虚拟阻抗策略<sup>[13]</sup>,通过实时调整虚拟阻抗来改善无功均分精度,但仍会引起母线压降。文献[14-15]将虚拟电阻设为负值,抵消了低压微电网实际线路阻抗中的阻性成分,但该策略并未考虑线路电感对功率均分精度的影响。此外,虚拟复阻抗控制策略也在优化虚拟电感和负电阻方面取得了进展,但其设计较为复杂<sup>[16]</sup>。

虽然虚拟阻抗在改善功率解耦和无功分配精度方面取得了成效,但同时也引发了额外的母线压降的问题。因此,研究者也提出了电压补偿策略<sup>[17-18]</sup>,以缓解压降问题。然而,大多数策略仍然未能完全消除电压幅值和频率偏移之间的矛盾<sup>[19-20]</sup>。

综上所述,虽然孤岛微电网的功率解耦、无功均分与电压补偿问题已得到一定程度的研究,但多数无功均分策略下无功均分精度的提升以牺牲孤岛微电网的电压质量为代价,这对于微电网长期运行不利。因此,本文提出一种具有自适应无功均分和电压补偿功能的改进虚拟阻抗策略,主要工作如下:

1) 虚拟阻抗改进:结合广义二阶积分器(second-order generalized integrator, SOGI)增强虚拟阻抗滤波效果,提升非线性负载下的PI控制器追踪能力。

2) 自适应无功均分:引入自适应压降修正项,使虚拟压降实时调节,确保无功均分精度不受线路阻抗变化影响。

3) 电压补偿策略:提出自适应母线电压幅值补偿策略,在保证无功均分精度的同时,优化母线电压质量。

## 1 下垂控制原理及逆变器输出功率特性分析

### 1.1 下垂控制原理

受新能源分布位置及单台逆变器容量影响,常采用多台逆变器并联运行方式向负载提供电能。为便于分析,选取两台逆变器,并联模型结

构图如图1所示,将LC型逆变器等效为幅值为 $U_i$  ( $i=1,2$ )、功角为 $\theta_i$  ( $i=1,2$ )的理想电压源, $P_i, Q_i$  ( $i=1,2$ )分别为第 $i$ 台逆变器输出的有功功率和无功功率; $R_i + jX_i$  ( $i=1,2$ )分别为第 $i$ 台逆变器与公共负载之间的线路阻抗; $P, Q$ 分别为公共负载消耗的有功和无功功率; $U_{pcc}$ 为母线电压幅值。

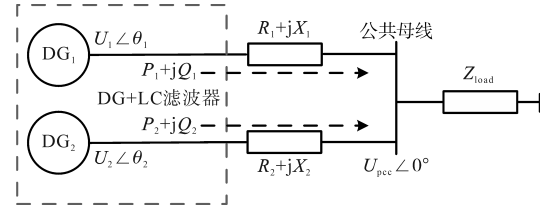


图1 并联逆变器等效结构图

Fig.1 Equivalent structure diagram of shunt inverter

根据图1,分析得到两台逆变器输出功率表达式为

$$\begin{cases} P_i = \frac{[U_i U_{pcc} \cos(\alpha_i - \theta_i) - U_{pcc}^2 \cos \alpha_i]}{\sqrt{X_i^2 + R_i^2}} \\ Q_i = \frac{[U_i U_{pcc} \sin(\alpha_i - \theta_i) - U_{pcc}^2 \sin \alpha_i]}{\sqrt{X_i^2 + R_i^2}} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\alpha_i = \arctan(X_i/R_i)$

式中: $\alpha_i$ 为第 $i$ 条线路的阻抗角。

高电压等级下,线路阻抗近似呈感性,满足 $\alpha \approx 90^\circ$ ,稳态运行时逆变器输出功角较小,有 $\sin \theta \approx \theta, \cos \theta \approx 1$ ,则式(1)可简化为

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_i U_{pcc} \theta_i}{X_i} \\ Q_i = \frac{U_{pcc} (U_i - U_{pcc})}{X_i} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)表明:当线路阻抗呈感性时,逆变器输出有功功率主要与输出电压功角 $\theta$ 有关,而逆变器输出无功功率则主要与输出电压幅值 $U$ 有关。因此,分别控制功角 $\theta$ 和幅值 $U$ 就能实现对有功功率和无功功率的独立调节,但实际应用中难以对输出电压的功角 $\theta$ 进行直接控制,常通过控制输出电压的角频率 $\omega$ 或频率 $f$ 来间接控制功角 $\theta$ 。线路阻抗呈感性条件下,下垂控制表示为

$$\begin{cases} f = f_n + m(P_{ref} - P) \\ U = U_n + n(Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f, f_n$ 分别为下垂控制频率参考值与工频; $U, U_n$ 分别为下垂控制的电压幅值参考值与电网电压额定值; $m, n$ 分别为有功、无功下垂系数。

根据式(3)可得传统下垂控制框图,如图2所示。为降低测量有功和无功功率的噪声干扰,首

先通过低通滤波对有功、无功功率进行处理,图2中 $\omega_c$ 为低通滤波器的截止频率,再通过有功、无功下垂运算得到电压参考值 $u_{gd}^*$ 与 $u_{gq}^*$ 。

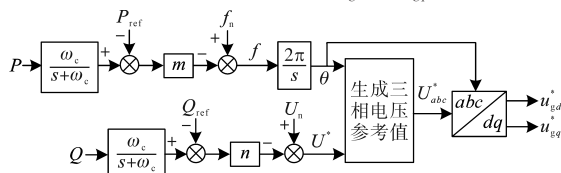


图2 并联逆变器等效结构图传统下垂控制框图

Fig.2 Conventional sag control block diagram of the equivalent structure of shunt inverter

## 1.2 基于下垂控制的并联逆变器功率传输特性分析

根据式(3)和图2可得基于下垂控制的逆变器功率传输特性如下:

$$\begin{cases} P(s) = \frac{2\pi U U_{pcc} (f_{ref} - f + m P_{ref})}{2\pi m U U_{pcc} + sX} \\ Q(s) = \frac{(U_n - U_{pcc} + n Q_{ref}) U_{pcc}}{n U_{pcc} + X} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $s$ 为拉普拉斯算子。

频率属于全局变量,系统稳定运行时各逆变器输出电压频率相等。系统运行至稳态时微分项为0,根据式(4)可知逆变器输出有功功率只和有功下垂系数 $m$ 有关,因此有功下垂系数与逆变器有功容量成反比即能实现有功自然均分,不受线路阻抗影响。

据式(4)可知,无功功率均分应满足如下条件:

$$\begin{cases} U_1 = U_2 \\ n_1 Q_{ref1} = n_2 Q_{ref2} \\ \frac{X_2}{X_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Q_{ref1}}{Q_{ref2}} \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)可知逆变器输出无功功率不仅与无功下垂系数 $n$ 有关,还需满足线路阻抗与无功容量成反比才能实现无功功率均分。然而在实际工况下,因分布式电源位置远近不同,线路阻抗很难与逆变器容量匹配,因此基于下垂控制的并联逆变器难以实现无功均分。

## 2 基于传统虚拟阻抗的功率解耦及无功均分策略

### 2.1 基于虚拟阻抗的功率解耦策略

由1.1节分析可知,实现 $P-f$ 与 $Q-U$ 的独立下垂控制的前提是线路阻抗呈感性,但微电网电压等级较低,线路电阻不能被忽略,直接使用下垂控制可能导致逆变器输出功率之间产生耦合。

为此,有学者提出在电压电流双环控制中引入虚拟阻抗来增大系统等效线路阻抗中的感性成分,进而满足下垂控制的前提条件。本节以 $d$ 轴为例分析引入虚拟阻抗 $L_v$ 对等效线路阻抗的影响。

引入虚拟阻抗 $L_v$ 后的双环解耦控制框图如图3所示。图3中, $G_u(s)$ , $G_i(s)$ 为电压、电流调节的PI控制器, $k_{pwm}$ 为逆变器增益系数,其余参数已在前文提及,此处不再介绍。本文根据文献[21]的选取原则,设定 $k_{pwm} = 1$ 。

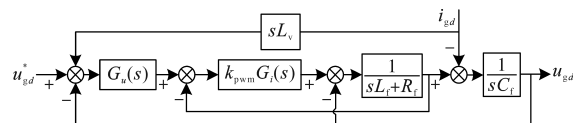


图3 引入虚拟电感后d轴电压电流双环控制框图

Fig.3 Block diagram of  $d$ -axis voltage-current dual-loop control after introduction of virtual inductor

可得 $d$ 轴双环控制传递函数,表示为

$$Z'_o(s) = \frac{\alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s}{\beta_4 s^4 + \beta_3 s^3 + \beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0} \quad (6)$$

其中

$$\begin{cases} \alpha_3 = k_{pwm} k_{pu} k_{pi} L_v + L_f \\ \alpha_2 = k_{pwm} L_v (k_{pu} k_{ii} + k_{pi} k_{iu}) + R_f + k_{pwm} k_{pi} \\ \alpha_1 = k_{pwm} k_{iu} k_{ii} L_v + k_{pwm} k_{ii} \\ \beta_4 = L_f C_f \\ \beta_3 = C_f (R_f + k_{pwm} k_{pi}) \\ \beta_2 = k_{pwm} (k_{pu} k_{pi} + k_{ii} C_f) + 1 \\ \beta_1 = k_{pwm} (k_{pu} k_{ii} + k_{pi} k_{iu}) \\ \beta_0 = k_{pwm} k_{iu} k_{ii} \end{cases}$$

当引入的虚拟阻抗 $L_v = 5 \text{ mH}$ 时,逆变器输出阻抗可表示为

$$Z'_o(j50) \approx 3.94 \angle 86^\circ \quad (7)$$

由式(7)可得,基于虚拟阻抗的功率解耦策略能提升微电网线路阻抗的感性成分,基频下的逆变器输出阻抗相角接近纯感性。但实际工况中存在大量非线性负载,产生的谐波电流流经虚拟阻抗时,会产生谐波虚拟压降,由于PI控制器只能实现对直流量的无差调节,因此谐波虚拟压降不利于PI控制器对直流分量的追踪效果。

### 2.2 基于虚拟阻抗的无功均分策略

由1.2节分析可知线路阻抗 $X$ 与无功均分精度相关,有学者提出通过虚拟阻抗来控制逆变器之间的线路阻抗比,进而提高无功均分精度。此处的虚拟阻抗作用不仅是提升线路阻抗的感性成分来实现解耦控制,更重要的是让线路阻抗与

逆变器容量成反比。引入虚拟阻抗后可将其等效为线路阻抗的一部分,如图4所示。

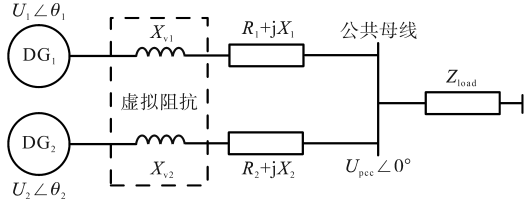


图4 含虚拟阻抗的并联逆变器等效图

Fig.4 Equivalent diagram of shunt inverter with virtual impedance

根据式(5)可知,实现无功均分时引入的虚拟阻抗应满足如下关系:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{(X_2 + X_{v2})}{(X_1 + X_{v1})} = \frac{Q_{ref1}}{Q_{ref2}} \quad (8)$$

$d$ - $q$  坐标系下,基于虚拟阻抗的无功环控制方程表达式为

$$\begin{cases} U_{i\_droop} = U_n + n(Q_{refi} - Q_i) \\ U_{gd}^* = U_{i\_droop}^d + \omega L_v i_{gq} \\ U_{gq}^* = U_{i\_droop}^q - \omega L_v i_{gd} \end{cases} \quad (9)$$

该方法必须提前知晓线路阻抗的信息,无功均分精度受线路阻抗测量精度影响较大,并且线路阻抗变化会使得设定的固定虚拟阻抗无法与逆变器容量匹配,进而影响虚拟阻抗策略下的无功均分精度。

尽管现有改进虚拟阻抗策略能根据线路阻抗变化调整虚拟阻抗大小实现自适应无功均分<sup>[22]</sup>,但自适应虚拟阻抗在调整过程中可能会降低虚拟阻抗大小,从而影响功率解耦控制效果。此外,无论是固定虚拟阻抗还是自适应虚拟阻抗,在实现无功均分时都会引起母线电压压降,严重影响母线电压质量。

### 3 具有自适应无功均分及电压补偿功能的改进虚拟阻抗策略

#### 3.1 基于SOGI的增强型功率解耦控制策略

有功、无功的解耦控制是实现相应控制效果的前提,由2.1节分析可知,引入虚拟阻抗可实现低压微电网的功率解耦,然而该方法在谐波电流影响下,会产生谐波虚拟压降,不利于PI控制器对直流量的控制效果。为此,本文在虚拟阻抗的基础上进行了改进,提出一种基于SOGI的增强型功率解耦策略。

基于SOGI的增强型功率解耦策略提高PI控制器的追踪效果主要体现在精确的功率解耦效果,引入SOGI,有效地滤除了高频噪声,使PI控

制器更精准地追踪目标功率和电压值,避免了由于噪声引起的误差。此外,引入SOGI对于提高PI控制器对负载变化的响应、减少振荡与超调、提高低频信号的精确追踪也有显著优势。

SOGI是一种频率可变的谐振器<sup>[23]</sup>,其控制框图如图5所示。 $u(s)$ 为输入量, $\omega$ 为设定的谐振频率, $d(s)$ 和 $q(s)$ 分别为SOGI的2个输出量, $k_g$ 为增益系数。

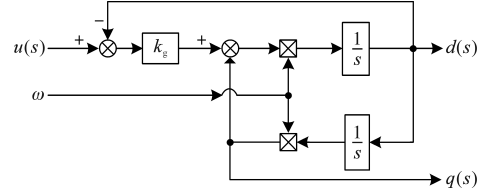


图5 SOGI控制框图

Fig.5 SOGI control block diagram

SOGI在信号噪声滤波中通过其频率选择性和谐振特性,有效抑制高频噪声,并改善信号的质量<sup>[24]</sup>。SOGI对含噪声的正弦信号的滤波效果如图6所示,噪声信号经SOGI后基本消失。 $u(s)$ 、 $d(s)$ 和 $q(s)$ 的幅值相同,但 $q(s)$ 的相位比 $u(s)$ 和 $d(s)$ 滞后 $90^\circ$ 。

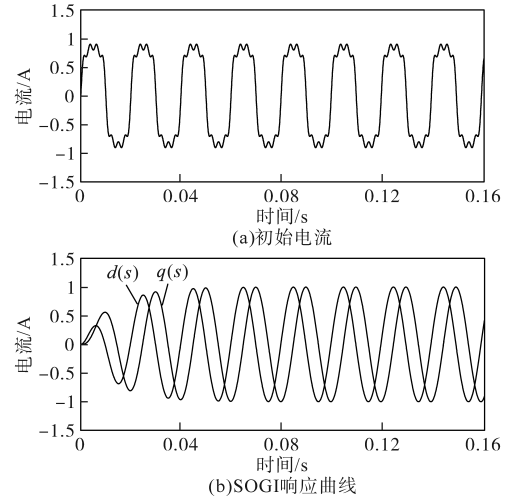


图6 SOGI滤波效果图

Fig.6 SOGI filter effect diagram

根据虚拟阻抗的定义,电流通过虚拟电感时产生的压降可表示为

$$U_v = L_v \frac{di(t)}{dt} \quad (10)$$

式中: $U_v$ 为虚拟压降; $i(t)$ 为流经虚拟阻抗的电流信号。

将电流信号 $i(t)$ 表示为正弦形式:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) \quad (11)$$

式中: $I_m$ 为电流幅值。

将式(11)代入式(10)可将虚拟压降表示为



$$U_v = \omega I_m L_v \cos(\omega t) \quad (12)$$

根据式(10)和式(11)可得虚拟压降与电流信号的幅值、相位关系:

$$\begin{cases} \frac{\angle i(j\omega)}{\angle U_v(j\omega)} = -j \\ \left| \frac{i(j\omega)}{U_v(j\omega)} \right| = \frac{1}{\omega L_v} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)可知,电流信号的相位比虚拟压降滞后 $90^\circ$ 。将流经虚拟阻抗的电流信号 $i(s)$ 作为SOGI的输入信号,结合 $q(s)$ 与 $u(s)$ 的相位关系,可得电流信号 $i(s)$ 、输出信号 $q(s)$ 及虚拟压降 $U_v(s)$ 的相位关系,如图7所示。

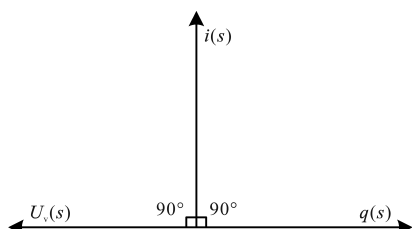


图7  $i(s)$ 、 $q(s)$ 及 $U_v(s)$ 相位关系示意图

Fig.7 Schematic diagram of  $i(s)$ 、 $q(s)$  and  $U_v(s)$  phase relationship

根据图7所示相位关系和式(13)的幅值关系,可将基于SOGI的虚拟阻抗压降设计为

$$U_v = -\omega L_v q(s) \quad (14)$$

传统虚拟阻抗策略与本文所提给予SOGI的虚拟阻抗策略的控制结构分别如图8a、图8b所示, $u_{\text{droop}}$ 为下垂控制生成的电压幅值参考值。从图8a可知,传统虚拟压降由电流信号直接生成,当电流信号存在谐波时会生成谐波虚拟压降,由于PI控制器只能实现对直流量的无差调节,因此谐波虚拟压降不利于PI控制器对直流分量的追

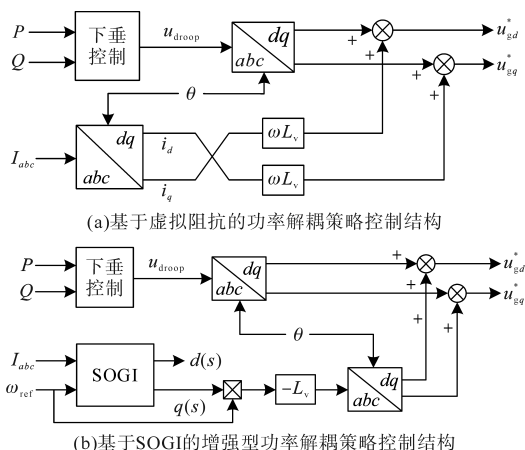


图8 传统虚拟阻抗策略与基于SOGI的虚拟阻抗策略控制结构  
Fig.8 Control structure of conventional virtual impedance strategy and SOGI-based virtual impedance strategy

踪效果。根据式(14)设计的基于SOGI的增强型功率解耦策略的控制结构如图8b所示,虚拟压降由SOGI与电流信号共同生成,在实现功率解耦的同时抑制因非线性负载引起的谐波虚拟压降,提高PI控制器的控制效果。

### 3.2 自适应无功均分环节设计

引入虚拟阻抗 $X_v$ 可使线路阻抗与逆变器容量匹配,改善无功均分精度,但精度易受等效阻抗变化影响。由图8a可知,虚拟阻抗本质是以虚拟压降的形式与下垂控制生成的电压参考值共同调整逆变器输出电压。为此,本文在传统虚拟阻抗的基础上增加了自适应虚拟压降修正环节,提出一种基于无功偏差驱动的自适应无功均分策略,与传统基于虚拟阻抗的无功均分策略相比,本策略的无功均分效果不受本地负载投切及线路阻抗变化影响,且控制更为简单。

根据式(14)可得并联逆变器无功功率之比表达式为

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{X_2}{X_1} \cdot \frac{U_1 - U_{\text{pcc}}}{U_2 - U_{\text{pcc}}} \quad (15)$$

考虑线路阻抗变化场景,自适应虚拟压降修正项应满足如下条件:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{(X_2 + \Delta X_2)}{(X_1 + \Delta X_1)} \cdot \frac{(U_1 + \tilde{U}_1) - U_{\text{pcc}}}{(U_2 + \tilde{U}_2) - U_{\text{pcc}}} = \frac{Q_{\text{ref}1}}{Q_{\text{ref}2}} \quad (16)$$

式中: $\tilde{U}_1, \tilde{U}_2$ 分别为逆变器1和逆变器2的自适应虚拟压降补偿项; $\Delta X_1, \Delta X_2$ 为线路阻抗变化量。

引入自适应虚拟压降修正项后的改进无功下垂方程表达式为

$$\begin{cases} U_{i,\text{droop}} = U_n + n(Q_{\text{ref}i} - Q_i) + \tilde{U}_i \\ \tilde{U}_i = \frac{k_{vi}}{s} \cdot (Q_i^* - Q_i) \\ Q_i^* = \frac{Q_{\text{ref}i}}{\sum_{k=1}^i Q_{\text{ref}k}} \\ U_{gd}^* = U_{i,\text{droop}}^d + \omega L_v i_{gq} \\ U_{gq}^* = U_{i,\text{droop}}^q - \omega L_v i_{gd} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $Q_i^*$ 为第 $i$ 台逆变器无功均分理论值; $k_{vi}$ 为第 $i$ 台逆变器的虚拟压降修正系数。

根据式(17)可知,虚拟压降修正系数的大小会影响系统稳定性以及无功均分过程动态性能,因此还需对 $k_{vi}$ 的取值进行分析。结合式(1)和式(17)可得一阶动态相量模型下小信号模型<sup>[25]</sup>,表示为

$$\begin{cases} \Delta Q_i = \frac{\omega L_i U_{\text{pcc}}}{(sL_i + R_i)^2 + (\omega L_i)^2} \Delta U_i \\ \Delta U_i = \Delta U_n - n_i \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \Delta Q_i - \frac{\lambda k_{vi}}{s} \Delta Q_i \\ \lambda_i = \frac{\sum_{k \neq i, k=1}^n Q_{\text{ref } k}}{\sum_{k=1}^n Q_{\text{ref } k}} \end{cases} \quad (18)$$

根据式(18)可得引入自适应虚拟压降修正项后第*i*台逆变器的无功控制环小信号框图,如图9所示,为便于分析,省去下标*i*。

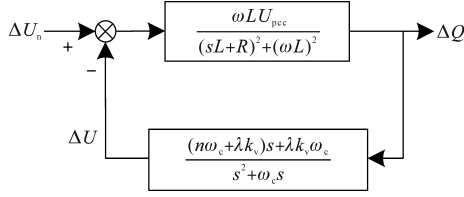


图9 引入自适应虚拟压降修正项后的无功控制环小信号框图

Fig.9 Small-signal block diagram of the reactive power control loop after introducing the adaptive virtual voltage drop correction term

根据图9可得对应的传递函数,表示为

$$\frac{\Delta Q}{\Delta U_n} = \frac{b_1 s^2 + b_0 s}{As^4 + Bs^3 + Cs^2 + Ds + E} \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} b_1 = \omega L U_{\text{pcc}} \\ b_0 = \omega \omega_c L U_{\text{pcc}} \\ A = L^2 \\ B = (2R + L\omega_c)L \\ C = R^2 + \omega^2 L^2 + 2LR\omega_c \\ D = \omega_c (R^2 + \omega^2 L^2) + \omega L U_{\text{pcc}} (n\omega_c + \lambda k_v) \\ E = \lambda \omega \omega_c L U_{\text{pcc}} k_v \end{cases}$$

根据式(19)可得虚拟压降修正系数 $k_v$ 变化时无功环的根轨迹图,如图10所示,箭头代表 $k_v$ 增大时极点位置的移动方向。根据图10可知,随着虚拟压降修正系数 $k_v$ 的增大, $p_3$ 与 $p_4$ 极点的实部由负转正,因此过大的虚拟压降修正系数 $k_v$ 会引起系统失稳。

除考虑稳定性外,还需考虑虚拟压降修正系数 $k_v$ 对无功环动态过程的影响。以2台逆变器并联为例,参考文献[26]的分析方法,逆变器1的虚拟压降修正项小信号模型可表示为

$$\Delta \tilde{U}_1 = -\frac{\lambda_1 k_{v1}}{s} \Delta Q_1 \quad (20)$$

计及一阶低通滤波环节,引入虚拟压降修正项后的逆变器输出无功可表示为

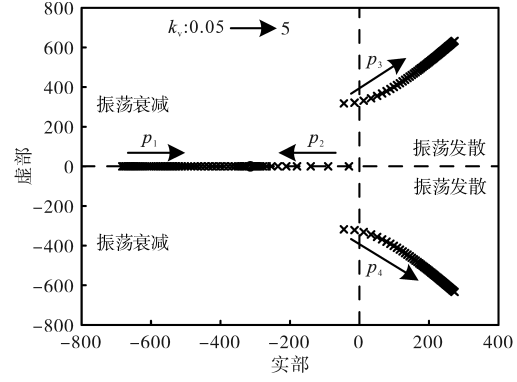


图10 不同虚拟压降修正系数 $k_v$ 无功环的根轨迹

Fig.10 Root trajectories of  $k_v$  reactive loops with different virtual voltage drop correction factors

$$Q_1 = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \times \frac{U_{\text{pcc}}}{X} (U_{1n} + \tilde{U}_1) \quad (21)$$

式中: $U_{1n}$ 为采用下垂控制方式的逆变器输出电压幅值。

式(21)的小信号模型可表示为

$$\Delta Q_1 = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \times \frac{U_{\text{pcc}}}{X} \Delta \tilde{U}_1 \quad (22)$$

根据式(20)和式(22)可得引入虚拟压降修正项后的传递函数框图,如图11所示。

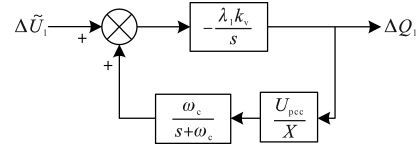


图11 引入自适应虚拟压降修正项后的传递函数框图

Fig.11 Block diagram of the transfer function after introducing the adaptive virtual voltage drop correction term

根据图11可得对应的传递函数,表示为

$$\frac{\Delta \tilde{U}_1}{\Delta Q_1} = -\frac{\lambda_1 X k_{v1} (s + \omega_c)}{s^2 + \omega_c s + \frac{\lambda_1 U_{\text{pcc}} \omega_c k_{v1}}{X}} \quad (23)$$

式(23)表示一个二阶系统,其阻尼系数和自然振荡频率分别为

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{\lambda_1 U_{\text{pcc}} \omega_c k_{v1}}{X_1}} \\ \zeta = \frac{\omega_c}{2\omega_n} \end{cases} \quad (24)$$

根据式(24)可知,选取较大的虚拟压降修正系数 $k_{v1}$ 可提高无功环的动态响应速度,但 $k_{v1}$ 取值过大又会降低系统阻尼系数 $\zeta$ ,影响系统稳定性。不同虚拟压降修正系数 $k_{v1}$ 下的单位阶跃响应如图12所示,根据图12可知,随着 $k_{v1}$ 增大,系统动态响应时间加快,但系统阻尼逐渐由过阻尼状态转变为欠阻尼状态。为兼顾无功环的动态

响应速度和稳定性,本文选取的虚拟压降修正系数 $k_{v1}$ 的值为0.8。

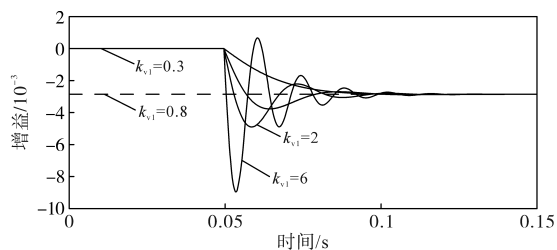
图 12 不同虚拟压降修正系数  $k_{vj}$  下的单位阶跃响应

Fig.12 Unit step response with different virtual voltage drop correction factors  $k_{v1}$

### 3.3 自适应母线电压幅值补偿环节设计

值得注意的是,引入虚拟压降修正项能提升并联储逆变器在线路阻抗变化场景下的无功均分精度,但也会造成不同程度的母线压降。为此,本节在2.3节基础上提出一种自适应母线电压幅值补偿方法,对逆变器输出电压施加自适应幅值补偿项,在不影响无功均分精度的前提下实现对母线电压幅值的无差调节,消除因虚拟阻抗造成的母线压降。

根据式(2)可得并联逆变器输出无功功率与输出电压的关系,表示为

$$U_{\text{pcc}} = \frac{U + \sqrt{U^2 - 4XQ}}{2} \quad (25)$$

根据式(25)可知影响母线电压  $U_{\text{pec}}$  的变量包括逆变器输出电压  $U$  与线路阻抗  $X$ 。由于调整虚拟阻抗会影响逆变器的功率解耦效果,为消除因虚拟阻抗造成的母线压降,本文对输出电压  $U$  施加幅值无差补偿项,补偿后的母线电压幅值应满足:

$$U_{\text{pec}} = \frac{(U + \bar{U}) + \sqrt{(U + \bar{U})^2 - 4XQ}}{2} = U_{\text{pec}}^* \quad (26)$$

式中:  $\bar{U}$  为幅值无差补偿项;  $U_{\text{pcc}}^*$  为母线电压参考值。

引入幅值无差补偿项后的无功下垂方程为

$$\left\{ \begin{aligned} U_{i\_droop} &= U_n + n(Q_{ref\ i} - Q_i) + \tilde{U}_i + \bar{U}_i \\ \tilde{U}_i &= \frac{k_{vi}}{s} (Q_i^* - Q_i) \\ Q_i^* &= \frac{Q_{ref\ i}}{\sum_{k=1}^i Q_{ref\ i}} \sum_{k=1}^i Q_i \\ \bar{U}_i &= \frac{k_{ui}}{s} (U_{pc}^* - U_{pc}) \\ U_{i\_gd}^* &= U_{i\_droop}^d + \omega L_{vg} i_{vg} \\ U_{i\_gd}^* &= U_{i\_droop}^q - \omega L_{vg} i_{gd} \end{aligned} \right. \quad (27)$$

式中: $k_{mi}$ 为第*i*台逆变器的幅值补偿系数。

根据式(25)和式(27)可得引入自适应虚拟压降修正项和幅值无差补偿项后的改进无功环控制框图,如图13所示。母线电压幅值 $U_{\text{pec}}$ 的变化将驱动逆变器输出电压 $U$ 变化, $U$ 反作用调整 $U_{\text{pec}}$ ,直至其稳定在额定值 $U_{\text{pec}}^*$ 。

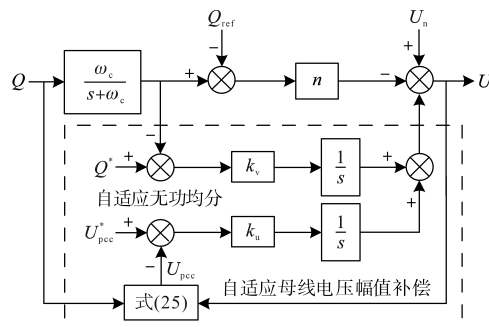


图 13 引入自适应虚拟压降修正项和幅值无差补偿项后的改进无功环控制框图

Fig.13 Block diagram of the improved reactive power loop control with the introduction of an adaptive virtual voltage drop correction term and an amplitude-free compensation term

根据式(27)可知幅值补偿系数 $k_u$ 的取值会影响无功控制环的动态过程,同样采用2.2节选取虚拟压降修正系数的方法,折中考虑参数对系统稳定性和动态性能的影响,最终取幅值补偿系数 $k_u=20$ 。

## 4 仿真验证及分析

为验证本文所提改进虚拟阻抗策略的有效性,在 Matlab/Simulink 平台分别模拟了非线性负载接入和线路阻抗变化场景下两台相同容量逆变器并联运行工况,主要仿真参数如表 1 所示。

表1 下垂控制主要参数

Tab.1 Main parameters of droop control

| 参数                 | 数值  | 参数           | 数值    |
|--------------------|-----|--------------|-------|
| 有功下垂系数 $m/10^{-4}$ | 4   | 频率补偿系数 $k_f$ | 5     |
| 无功下垂系数 $n/10^{-4}$ | 2   | 额定无功功率/var   | 3 000 |
| 虚拟压降补偿系数 $k_v$     | 0.5 | 额定有功功率/W     | 4 000 |
| 电压补偿系数 $k_u$       | 20  | 直流母线电压/V     | 800   |

#### 4.1 算例一:基于 SOGI 的增强型解耦控制策略仿真验证

本节模拟2台容量相同的逆变器在有、无非线性负载工况下的运行情况,模型结构如图14所示,图14中非线性负载为三相不可控二极管整流桥。仿真中,采用了基于SOGI增强型功率解耦策略,以解决常规虚拟阻抗法在非线性负载下存在的谐波虚拟压降问题。

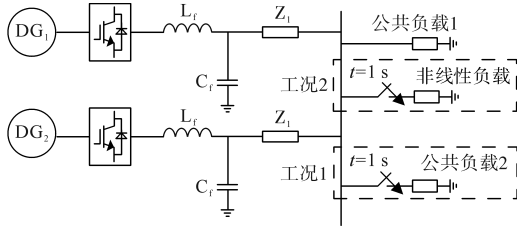


图14 算例一结构图

Fig.14 Structure of example 1

#### 4.1.1 工况1:不含非线性负载

基于虚拟阻抗的功率解耦控制策略和本文所提增强型解耦控制策略下的虚拟压降如图15所示。从图15中可以看出,本文所提增强型解耦控制策略的虚拟压降与虚拟阻抗控制一致,说明本文所提控制在常规工况下具备功率解耦能力。但在谐波影响下,增强型策略由于引入了SOGI滤波器,能够有效减少由谐波电流引起的虚拟压降,改善PI控制器的追踪精度。

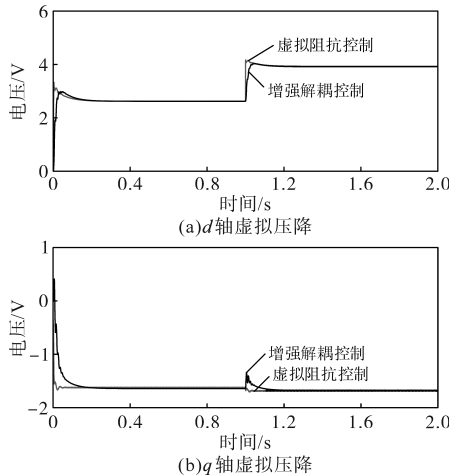


图15 工况1虚拟压降

Fig.15 Virtual pressure drop of case 1

#### 4.1.2 工况2:含非线性负载

本节在工况1的基础上增加非线性负载,初始时刻微电网负载包括公共负载1和非线性负载, $t=1$ s时再接入公共负载2。流经虚拟阻抗的电流波形如图16所示,基于虚拟阻抗的功率解耦控制策略和本文所提增强型解耦控制策略下的虚拟压降如图17所示。

随着非线性负载接入,传统虚拟阻抗策略出现较为明显的功率耦合,逆变器的输出功率波形出现较大的波动。而在采用增强型解耦控制策略时,虚拟压降的变化较小,功率解耦效果显著提高。图17展示了在负载变化过程中,增强型解耦控制策略相较于传统策略的优越性。此外,母线电压幅值在增强型策略下保持稳定,电压波动

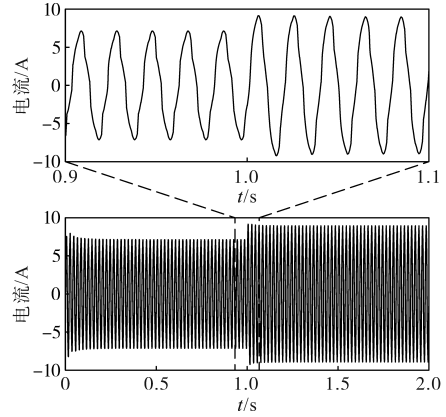


图16 流经虚拟阻抗的电流波形

Fig.16 Waveform of current flowing through virtual impedance

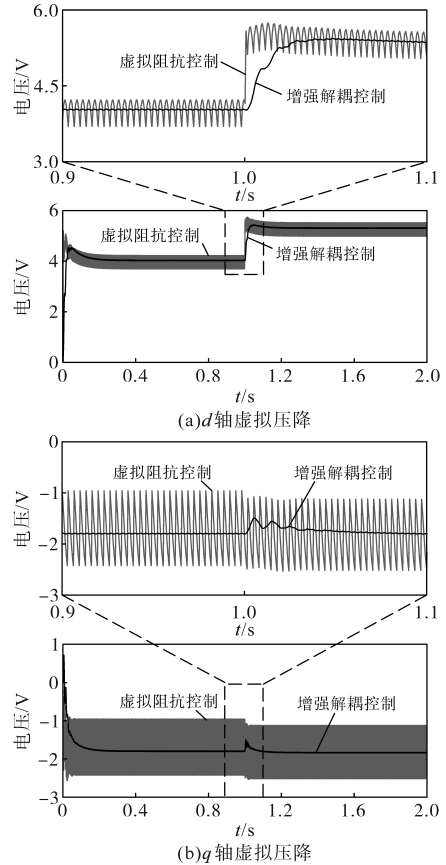


图17 工况2虚拟压降

Fig.17 Virtual pressure drop of case 2

小于传统策略,显示出其在电压质量方面的改进。

## 4.2 算例二:线路阻抗变化场景下的无功均分及电压补偿效果验证

本节模拟2台相同容量的并联逆变器在线路阻抗变化时的运行工况,将传统虚拟阻抗策略、自适应虚拟阻抗策略与本文所提策略进行对比,模型结构如图18所示。3种对比策略均在相同仿真平台和统一系统参数下进行,采用相同的性能评价指标:无功均分与母线电压幅值,以保证



对比的公平性。3种策略下的无功功率和母线电压幅值波形分别如图19和图20所示。

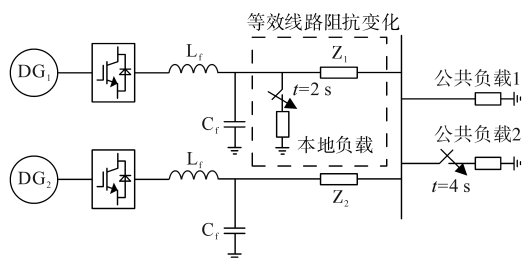


图18 算例二结构图

Fig.18 Structure of example 2

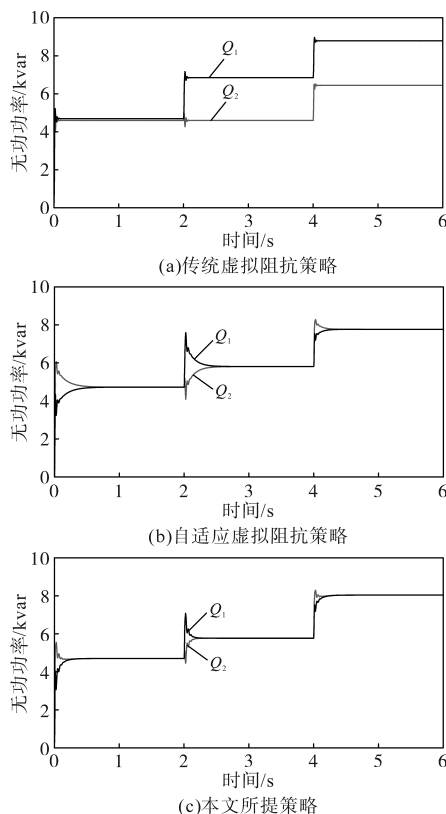


图19 算例二无功功率波形

Fig.19 Reactive power waveform of example 2

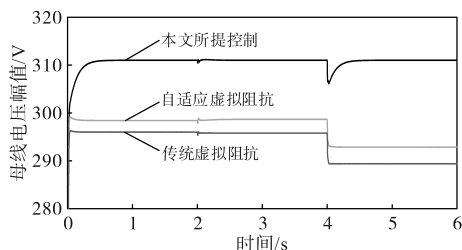


图20 算例二母线电压幅值

Fig.20 Bus voltage magnitude of example 2

根据图19可知,传统虚拟阻抗策略在0 s—2 s期间的无功均分效果较好,但在 $t=2$  s接入本地负载后改变了等效线路阻抗,因此无功均分效果不理想。自适应虚拟阻抗策略与本文所提策略在线路阻抗变化场景下始终能实时调整逆变器输

出无功,无功均分精度不受线路阻抗变化影响。根据图20可知,传统虚拟阻抗策略和自适应虚拟阻抗策略下的母线电压幅值均远远偏离额定值,存在母线压降。本文所提策略在线路阻抗变化以及无功负载变化场景下的母线电压幅值始终维持在额定值附近,有效补偿了母线电压幅值,提高了孤岛微电网的电压质量。

通过对比仿真结果可知,改进虚拟阻抗策略相较于传统虚拟阻抗策略,在无功均分精度和对母线电压幅值进行无差调节方面都取得了显著的改进。具体来说,改进策略能够更好地应对线路阻抗变化和负载波动,保持稳定的母线电压,并实现更精确的无功功率分配。

## 5 结论

针对基于虚拟阻抗的下垂控制的无功均分效果受线路阻抗变化和母线压降等问题,本文提出了一种改进的虚拟阻抗策略,具有自适应无功均分和电压补偿功能,结论如下:

1) 本文提出的结合虚拟阻抗与SOGI以增强功率解耦策略,增强了对电流信号中谐波成分的滤波能力,提高了PI控制器的追踪精度。

2) 在无功下垂控制方程中引入自适应虚拟压降修正项,使得在线路阻抗变化的场景下,能够实现稳定且精确的无功均分,不受线路阻抗变化的影响。

3) 为了消除虚拟阻抗引起的母线压降,基于自适应无功均分策略,本文加入的自适应电压幅值补偿环节,实现了母线电压幅值的无差调节,改善了孤岛微电网的电压质量。

## 参考文献

- [1] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.  
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 郭佳俊,徐志,翟保豫,等. 构网型新能源-储能联合并网系统LVRT控制策略研究[J]. 电气传动, 2024, 54(7): 58-65, 72.  
GUO Jiajun, XU Zhi, ZHAI Baoyu, et al. Research on LVRT control strategy of combined grid-connected system with new energy-energy storage based on grid-forming converters[J]. Electric Drive, 2024, 54(7): 58-65, 72.

- [3] 胡长斌,石向一,罗珊珊,等. 微电网多逆变器并联分散动态扰动补偿控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4425-4439.  
HU Changbin, SHI Xiangyi, LUO Shanna, et al. Decentralized dynamic disturbance compensation control strategy for multiple parallel inverters in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4425-4439.
- [4] 王超,曹伟,张旭航,等. 一种改进下垂控制的直流微电网多储能运行方法[J]. 电气传动, 2023, 53(1): 74-80.  
WANG Chao, CAO Wei, ZHANG Xuhang, et al. A multi-energy storage operation method of DC microgrid based on improved power droop control[J]. Electric Drive, 2023, 53(1): 74-80.
- [5] 张继红,杨建民. 孤岛微网并联逆变器环流抑制与母线电压控制[J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 125-132.  
ZHANG Jihong, YANG Jianmin. Circulating current restraining and bus voltage control of parallel inverters in islanding microgrid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(2): 125-132.
- [6] 周镇,彭元修,刘斌,等. 基于自适应虚拟阻抗的改进下垂控制器设计[J]. 电气传动, 2022, 52(17): 40-45.  
ZHOU Zhen, PENG Yuanxiu, LIU Bin, et al. Design of improved droop controller based on adaptive virtual impedance[J]. Electric Drive, 2022, 52(17): 40-45.
- [7] BAINAN S, HONGPENG L, HUI W, et al. A suppression method of circulating current in parallel photovoltaic system based on virtual impedance[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference(IPEMC-ECCE Asia), IEEE, 2016: 1532-1538.
- [8] VIJAY A S, PARTH N, DOOLLA S, et al. An adaptive virtual impedance control for improving power sharing among inverters in islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2991-3003.
- [9] 颜湘武,崔森,贾焦心. 虚拟稳态同步负阻抗的VSG功率解耦策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 102-113.  
YAN Xiangwu, CUI Sen, JIA Jiaoxin. Virtual steady state synchronous negative impedance of a VSG power decoupling strategy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 102-113.
- [10] 杨帅帅,卢子广,宫萍萍. 基于等效阻抗的逆变器并联与环流抑制研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(7): 64-67.  
YANG Shuaishuai, LU Ziguang, GONG Pingping. Research on parallel connection and circulating current suppression of inverters based on equivalent impedance[J]. Power Electronics, 2021, 55(7): 64-67.
- [11] 张宸宇,梅军,郑建勇,等. 一种适用于低压微电网的改进型下垂控制器[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 53-59.  
ZHANG Chenyu, MEI Jun, ZHENG Jianyong, et al. Improved droop controller for low-voltage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 53-59.
- [12] PENG Z, KAI M, JIE Y, et al. Distributed power sharing control based on adaptive virtual impedance in seaport microgrids with cold ironing[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2023, 9(2): 2472-2485.
- [13] 王二永,王帅. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 144-149.  
WANG Eryong, WANG Shuai. Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 144-149.
- [14] BOUZID A E M, SICARD P, YAMANE A, et al. Simulation of droop control strategy for parallel inverters in autonomous AC microgrids[C]//International Conference on Modelling, IEEE, 2017: 701-706.
- [15] 朱作滨,黄绍平,李振兴. 孤岛型微网并联逆变器下垂控制策略研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(2): 119-124.  
ZHU Zuobin, HUANG Shaoping, LI Zhenxing. Research on droop control strategy of parallel inverters for isolated microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(2): 119-124.
- [16] 施家博,苗虹,曾成碧. 新型并联逆变器功率均分与环流抑制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(4): 153-160.  
SHI Jiabo, MIAO Hong, ZENG Chengbi. Power sharing and current-circulation suppression strategy of new shunt inverter[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(4): 153-160.
- [17] 曹文远,韩民晓,谢文强,等. 交直流配电网逆变器并联控制技术现状分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4226-4241.  
CAO Wenyuan, HAN Minxiao, XIE Wenqiang, et al. Analysis on research status of parallel inverters control technologies for AC/DC distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4226-4241.
- [18] 徐远洋,王明渝. 低压微电网中新型控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9): 70-77.  
XU Yuanyang, WANG Mingyu. Research on new control strategy in low-voltage microgrid[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2020, 41(9): 70-77.
- [19] 陈杰,刘名凹,陈新,等. 基于下垂控制的逆变器无线并联与环流抑制技术[J]. 电工技术学报, 2018, 33(7): 1450-1460.  
CHEN Jie, LIU Ming'ao, CHEN Xin, et al. Wireless parallel and circulation current reduction of droop-controlled inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1450-1460.
- [20] SHEIK M, QI J. Optimal distributed control of AC microgrids with coordinated voltage regulation and reactive power sharing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(3): 1789-1800.
- [21] 何国锋,周子淳,张国勇,等. 孤岛光伏并联逆变器系统的固定时间模糊反步控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 147-156.  
HE Guofeng, ZHOU Zichun, ZHANG Guoyong, et al. Fixed-time fuzzy backstepping control strategy for islanded photovoltaic parallel inverters[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 147-156.

- the CSEE, 2018, 38(19):5668-5678.
- [7] 陈锦鹏,胡志坚,陈嘉滨等.考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J].高电压技术,2021,47(9):3094-3106.
- CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering stepped carbon-trading and flexible double response of supply and demand[J]. High Voltage Technology, 2021, 47(9):3094-3106.
- [8] 董晓晶,刘洪,宫建锋,等.考虑多类型综合需求响应的电热耦合能源系统可靠性评估[J].电力建设,2018,39(11):10-19.
- DONG Xiaojing, LIU Hong, GONG Jianfeng, et al. Reliability evaluation of electrothermal coupled energy system considering multi-type comprehensive demand response[J]. Power Construction, 2018, 39(11):10-19.
- [9] TAN Z, YANG S, LIN H, et al. Multi-scenario operation optimization model for park integrated energy system based on multi-energy demand response[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 53:101973.
- [10] 刘文霞,姚齐,王月汉,等.基于阶梯型需求响应机制的供需主从博弈电源规划模型[J].电力系统自动化,2022,46(20):54-63.
- LIU Wenxia, YAO Qi, WANG Yuehan, et al. Power planning model of master-slave game between supply and demand based on stepped demand response mechanism[J]. Automation of Electric Power System, 2022, 46(20):54-63.
- [11] 任洪波,李通,李琦芬,等.考虑可靠性和经济性的综合能源系统优化配置方法[J].科学技术与工程,2021,21(23):9871-9877.
- REN Hongbo, LI Tong, LI Qifen, et al. Optimal allocation method of comprehensive energy system considering reliability and economy[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(23):9871-9877.
- [12] YANG D, WANG M. Optimal operation of an integrated energy system by considering the multi energy coupling, AC-DC topology and demand responses[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 129:106826.
- [13] 陈莉,杨颢.含P2G-CCHP的综合能源系统两阶段鲁棒优化模型[J].电力学报,2022,37(5):422-429.
- CHEN Li, YANG Yang. Two-stage robust optimization model of integrated energy system with P2G-CCHP[J]. Journal of Electric Power, 2022, 37(5):422-429.
- [14] LI Y, HAN M, YANG Z, et al. Coordinating flexible demand response and renewable uncertainties for scheduling of community integrated energy systems with an electric vehicle charging station: a bi-level approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4):2321-2331.

收稿日期:2023-03-15

修改稿日期:2025-08-07

(上接第30页)

- [22] MOHAMMED N, LASHAB A, CIOBOTARU M, et al. Accurate reactive power sharing strategy for droop-based islanded AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3):2696-2707.
- [23] 古超帆,张新燕,童涛,等.基于二阶广义积分器的改进型 $i_p-i_q$ 谐波检测算法[J].电测与仪表,2020,57(10):88-93.
- GU Chaofan, ZHANG Xinyan, TONG Tao, et al. An improved  $i_p-i_q$  harmonic detection algorithm based on second-order generalized integrator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(10):88-93.
- [24] 石径,杨军,文龙,等.基于SOGI和CDCCF的复合前置滤波锁相环研究[J].电源学报,2025,23(6):237-246.
- SHI Jing, YANG Jun, WEN Long, et al. Research on prefiltering phase-locked loop based on SOGI and CDCCF[J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(6):237-246.
- [25] 王晓萌.基于动态相量法的三相光伏并网系统建模及控制策略研究[D].广州:广东工业大学,2022.
- WANG Xiaomeng. Research on modelling and control strategy of three-phase photovoltaic grid-connected system based on dynamic phase approach[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2022.
- [26] 邱晓燕,闫幸,周毅,等.基于自适应虚拟阻抗的构网型与跟网型逆变器主导微网系统无功功率均分控制策略[J].电力建设,2024,45(1):22-32.
- QIU Xiaoyan, YAN Xing, ZHOU Yi, et al. Reactive power sharing control strategy for microgrids dominated by grid-forming and grid-following inverters based on adaptive virtual impedance[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1):22-32.

收稿日期:2024-11-04

修改稿日期:2024-12-24