

# 基于自适应虚拟阻抗的构网型集中式储能 变流器功率分配控制策略

王天宇<sup>1</sup>, 范李平<sup>2</sup>, 倪子华<sup>2</sup>, 张子坤<sup>1</sup>, 马辉<sup>1\*</sup>

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 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)

## Power Distribution Control Strategy of Grid-Forming Centralized Energy Storage Converter Based on Adaptive Virtual Impedance

Wang Tianyu<sup>1</sup>, Fan Liping<sup>2</sup>, Ni Zihua<sup>2</sup>, Zhang Zikun<sup>1</sup>, Ma Hui<sup>1\*</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Grid Hube Electric Power Co., Ltd. Yichang Power Supply Company, Yichang 443000, China)

**Abstract:** [Objective] Under the development background of high-proportion renewable energy integration driven by the "dual carbon" goals, the parallel operation of grid-forming energy storage converter (GFESC) has become the core solution for large-scale energy storage power stations. However, the inability to accurately allocate reactive power proportionally due to line impedance mismatch in parallel operation has emerged as a critical issue that urgently needs to be addressed. [Methods] The power transmission mechanism of the parallel converter system and the generation mechanism of reactive power allocation errors were first analyzed in depth through theoretical derivation. Based on this, an improved droop control strategy based on adaptive virtual impedance was proposed, aiming to dynamically compensate for the impact of line impedance mismatch on reactive power allocation. Finally, a parallel converter system model was built based on the Matlab/Simulink simulation platform, and the effectiveness of the proposed control strategy was verified through comparative experiments. [Results] The simulation results demonstrated that the proposed reactive power allocation strategy achieved high-precision proportional distribution under conditions where the actual line impedance was unknown and no inter-converter communication was required, while effectively reducing the output voltage deviation of the converters. After the

introduction of virtual impedance, the strategy significantly mitigated the conflict between high-precision reactive power allocation and point of common coupling (PCC) voltage drop observed in conventional methods, enabling effective PCC voltage compensation to restore it to the rated operating level. Meanwhile, a double closed-loop control structure consisting of an outer voltage loop and an inner current loop is adopted to effectively maintain the stability of the system's grid voltage and frequency. [Conclusion] The strategy achieves precise matching of equivalent impedance through adaptive virtual impedance, providing a highly reliable solution for the large-scale operation of GFESC.

**Key words:** grid-forming energy storage converter; parallel converter; adaptive virtual impedance; reactive power allocation

**摘要:** [目的]在“双碳”目标驱动下,新能源高比例并网的发展背景下,构网型储能变流器(GFESC)并联运行已成为储能电站规模运行的核心方案,并联工况下因线路阻抗不匹配导致的无功功率无法按容量比例精准分配,成为亟待解决的关键问题。[方法]本文首先通过理论推导,深入分析了并联变流器系统的功率传输机理与无功功率分配误差的产生机制。基于此,提出了一种基于自适应虚拟阻抗的改进型下垂控制策略,旨在动态补偿线路阻抗不匹配对无功功率分配的影响。最后,基于Matlab/Simulink仿真平台搭建并联变流器系统模型,对所提控制策略的效果进行了对比验证。[结果]仿真结果表明,本文所提无功功率分配策略在实际线路阻抗未知、无需变流器间互联通信的条件下,可实现无功功率的高精度按比例分配,同时有效减小变流器输出电压的偏差。

**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)

该策略引入虚拟阻抗后,有效改善了传统方案中无功功率高精度分配与公共连接点(PCC)电压跌落之间的矛盾,可有效补偿 PCC 电压,使其恢复至额定工作水平;同时采用电压外环和电流内环组成的双闭环控制结构,有效维持系统电网电压与频率的稳定。【结论】该策略通过自适应虚拟阻抗实现了等效阻抗的精准匹配,为 GFESC 的规模化运行提供了高可靠性解决方案。

**关键词:** 构网型储能变流器;并联变流器;自适应虚拟阻抗;无功功率分配

## 0 引言

在“碳达峰、碳中和”目标推动下,风电、光伏等新能源装机持续增长,其随机性、波动性给电力系统安全稳定运行带来挑战<sup>[1]</sup>。储能电站(Energy Storage Power Station, ESPS)作为抑制新能源负荷波动、提升电网调峰调频能力、保障能源供给安全的核心基础设施,其规模化应用与高效运行成为能源转型升级的关键部分<sup>[2-3]</sup>。构网型储能变流器(Grid-Forming Energy Storage Converter, GFESC)作为 ESPS 与电网链接的关键接口部件<sup>[4]</sup>,承担着功率转换、电压频率调节等重要功能,多台 ESC 并联运行是实现 ESPS 规模化扩容的主要方案<sup>[5]</sup>。

在孤岛运行或电网支撑场景中,下垂控制因无需通信即可使多台 ESC 共同分担负荷而被广泛应用<sup>[6]</sup>。下垂控制的核心是模拟传统电力系统的自然下垂特性,理论上能让各变流器按自身容量比例分担负荷功率,但受出口线路阻抗不匹配和负荷波动影响,实际系统难以实现无功功率精确分配<sup>[7]</sup>。这种分配偏差会导致部分变流器过载,进而触发过载保护机制,不仅可能造成变流器并联系统运行故障,还容易引发无功环流现象<sup>[8-9]</sup>。

为了提升无功功率分配的精度,解决上述实际应用中的问题,国内外的科研学者已开展了大量研究。文献[10]利用 IHAOAVOA 算法建立多目标模型,实现 ESPS 子系统有功、无功功率分配。文献[11]将端口电压积分与自适应下垂系数结合,实现有功、无功解耦并降低无功分配误差。文献[12]在传统下垂控制中引入电压调节和电流矫正的分布式二次控制,以补偿直流母线电压跌落并提升功率分配精度。文献[13]提出考虑 ESPS 中电池仓健康状态及荷电状态双层控

制下的系统功率分配策略。在保障运行安全的基础上优化输出,但该方法需设定多个滤波参数。文献[14]通过耦合额定电压与系统频率调整电压参考值,改善无功分配效果。

虚拟阻抗法常用于改善无功分配,其通过在控制回路中引入虚拟阻抗调节变流器输出阻抗,削弱有功、无功耦合。文献[15]提出无通信自适应虚拟阻抗压降控制,将无功输出和电压引入控制器以兼顾分配精度与电压降。文献[16]采用自适应电阻,减小线路电阻引起的功率耦合,并在无需测量公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)电压的情况下实现电压同步。文献[17]提出一种基于谐振频率实时检测实现自主阻抗适配控制策略,以用来提升新能源场站并网稳定性。文献[18]考虑了孤岛交流微电网中馈线电阻的不匹配问题,提出基于在线实时测量馈线阻抗确定最优虚拟阻抗,可以消除无功功率分配误差。文献[19-20]通过功率自适应调节下垂系数或改进下垂公式实现功率均分,但下垂系数过小会削弱稳定性。现有基于虚拟阻抗控制策略的研究主要存在以下问题<sup>[21]</sup>:因为 PCC 电压跌落过大<sup>[22]</sup>导致无法实现高精度无功功率分配,需要使用较为复杂的在线测量阻抗的方法,并且需要准确获得线路阻抗值,最终分配效果对通信的可靠性要求较高,难以在实际中运用等。

针对上述问题,本文提出一种基于自适应虚拟阻抗的无功功率分配优化策略。该策略无需线路阻抗信息和变流器间通信,仅利用本地信号自适应调节虚拟阻抗,补偿阻抗不匹配造成的无功分配偏差;采用“恒定虚拟电感+自适应虚拟电感”组合,兼顾无功分配精度与 PCC 电压恢复;并与下垂控制及电压电流双闭环结合,在保证功率分配精度的同时维持电压、频率稳定,适用于 ESPS 多机并联场景。本文还通过小信号分析完成参数设计,并基于仿真验证所提策略的有效性。

## 1 变流器并联功率分析

### 1.1 传统下垂控制策略

ESPS 结构如图 1 所示,ESPS 经过 ESC、滤波器、线路阻抗在 PCC 并联,共同为负载供电。图中, $R_f$ 、 $L_f$  和  $C_f$  分别为变流器的滤波电阻、滤波电

感和滤波电容;  $L_g$ 、 $C_g$  分别为电网阻抗、并联无功补偿电容;  $Q_i$ 、 $P_i$  分别为第  $i$  台变流器流向 PCC 的无功功率、有功功率;  $L_i$ 、 $R_i$  分别为第  $i$  台变流器的线路电感、线路电阻。

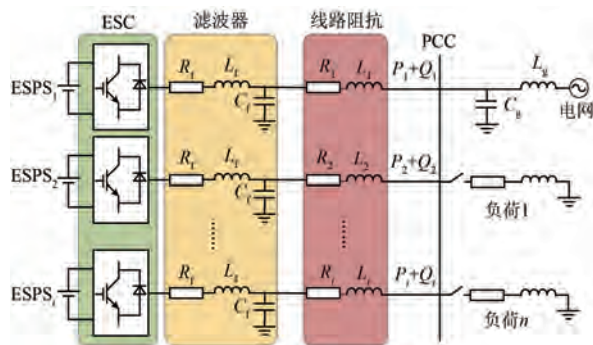


图1 含电网接口的 ESPS 结构图

Fig.1 Structure diagram of ESPS with grid interface

由变流器流向 PCC 的复功率如式(1)所示:

$$S_i = P_i + Q_i = U_i I_i^* = U_i \left( \frac{U_i - U_{PCC}}{R_i + jX_i} \right)^* \quad (1)$$

式中:  $U_i$  为变流器三相输出电压;  $I_i$  为变流器输出三相电流。

将式(1)分解后,单台变流器所分担的有功功率、无功功率分别为

$$P_i = \frac{U_{PCC} R_i (U_i \cos \theta_i - U_{PCC})}{X_i^2 + R_i^2} + \frac{U_i U_{PCC} X_i \sin \theta_i}{X_i^2 + R_i^2} \quad (2)$$

$$Q_i = \frac{U_{PCC} X_i (U_i \cos \theta_i - U_{PCC})}{X_i^2 + R_i^2} - \frac{U_i U_{PCC} R_i \sin \theta_i}{X_i^2 + R_i^2} \quad (3)$$

式中:  $U_{PCC}$  为 PCC 电压;  $\theta_i$  为  $U_i$  与  $U_{PCC}$  之间的相角差;  $X_i$  为第  $i$  台变流器的线路感抗。

由于滤波器的作用,等效输出阻抗为感性。当线路为感性且等效输出阻抗、线路阻抗之和远小于负载阻抗时,变流器输出电压可近似等于  $U_{PCC}$ 。进而  $R_i \approx 0$ , 且相角差  $\theta_i$  通常很小,  $\sin \theta_i \approx \theta_i$ ,  $\cos \theta_i \approx 1$ 。故式(2)、(3)可简化为

$$P_i = \frac{U_i U_{PCC} \theta_i}{X_i} \quad (4)$$

$$Q_i = \frac{U_{PCC} (U_i - U_{PCC})}{X_i} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可知,当线路为感性时,有功功率主要与相角差相关,无功功率主要与电压幅值相关。又因为  $\omega = d\theta/dt$ , 可通过调节角频率和电

压幅值控制有功、无功功率。传统基于下垂原理的 GFESC 策略<sup>[23]</sup>可表示为

$$\omega_i = \omega_{0i} - m_i P_i \quad (6)$$

$$U_i = U_{0i} - n_i Q_i \quad (7)$$

式中:  $\omega_i$  为第  $i$  台变流器实际输出电压的频率;  $\omega_{0i}$ 、 $U_{0i}$  分别为第  $i$  台变流器空载输出电压的频率、幅值;  $m_i$ 、 $n_i$  分别为第  $i$  台变流器的有功下垂系数、无功下垂系数。

## 1.2 无功功率分配分析

无功功率主要通过  $Q-U$  下垂控制来实现。为了使无功功率能够按比例分配,无功功率下垂系数应与无功功率成反比关系,如式(8)所示:

$$n_1 Q_1 = n_2 Q_2 = \dots = n_N Q_N \quad (8)$$

将式(7)代入式(5),可得无功功率表达式为

$$n_i Q_i = \frac{U_{PCC} (U_{0i} - U_{PCC})}{X_i/n_i + U_{PCC}} \quad (9)$$

联立式(8)和(9),可得线路阻抗与无功下垂系数之间的关系式为

$$\frac{X_1}{n_1} = \frac{X_2}{n_2} = \frac{X_3}{n_3} = \dots = \frac{X_N}{n_N} \quad (10)$$

联立式(8)、(10),可得无功功率、线路电感及无功下垂系数三者之间的关系式为

$$\frac{X_1}{X_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (11)$$

由式(11)可得,变流器输出的无功功率与无功下垂系数和线路电感均成反比关系。

假设稳态时各变流器运行频率一致,空载输出频率和幅值相同。若有功下垂系数与额定有功功率成反比,有功功率可按比例分配;但线路压降和阻抗不匹配会导致各变流器输出电压不同,仅依靠无功下垂系数与额定无功功率成反比,难以保证无功精确分配<sup>[24]</sup>。

变流器的无功功率分配误差定义为<sup>[25]</sup>

$$e_i = \frac{\Delta Q_i}{Q_i^*} = \frac{Q_i - Q_i^*}{Q_i^*} \times 100\% \quad (12)$$

式中:  $e_i$  为第  $i$  台变流器的无功功率分配误差;  $Q_i^*$  为第  $i$  台变流器按额定值比例分配的应承担的无功功率;  $\Delta Q_i$  为第  $i$  台变流器实际无功功率与应承担的无功功率之差。

各变流器实际输出无功功率之和等于其参考值之和,则:

$$\Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \dots + \Delta Q_i = 0 \quad (13)$$

结合式(5)可得:

$$U_i = U_{PCC} + \frac{X_i}{U_{PCC}} Q_i \quad (14)$$

综合式(7)、(14)可得:

$$Q_i = \frac{U_{PCC}(U_{oi} - U_{PCC})}{X_i + n_i U_{PCC}} \quad (15)$$

以两台并联的变流器为例,其无功功率满足:

$$\begin{cases} \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = 0 \\ k_{Q1} Q_1^* = k_{Q2} Q_2^* \\ Q_1(X_1 + k_{Q1} U_{PCC}) = Q_2(X_2 + k_{Q2} U_{PCC}) \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可得两台变流器的无功功率分配误差分别为

$$e_1 = \frac{\Delta Q_1}{Q_1^*} = \frac{k_{Q1} X_2 - k_{Q2} X_1}{k_{Q2} [X_1 + X_2 + (k_{Q1} + k_{Q2}) U_{PCC}]} \quad (17)$$

$$e_2 = \frac{\Delta Q_2}{Q_2^*} = \frac{k_{Q2} X_1 - k_{Q1} X_2}{k_{Q1} [X_1 + X_2 + (k_{Q1} + k_{Q2}) U_{PCC}]} \quad (18)$$

由式(17)、(18)可知,为消除无功功率分配误差,变流器线路阻抗还需满足与其无功下垂系数成正比。

## 2 自适应虚拟阻抗控制策略

为了克服传统虚拟阻抗控制在功率均分中的局限性,本文提出一种基于自适应虚拟阻抗法<sup>[26]</sup>的无功功率分配策略。ESC 控制框图如图 2 所示。图中,  $\mathbf{u}_{oabc}$  为滤波电容三相电压;  $\mathbf{i}_{Labc}$  为滤波电感三相电流;  $\mathbf{i}_{oabc}$  为线路三相电流;  $\mathbf{u}_{odq}$ 、 $\mathbf{i}_{Ldq}$ 、 $\mathbf{i}_{odq}$  分别为  $dq$  坐标系下的滤波电容电压、滤波电感电流和线路电流; PWM 为脉宽调制控制器。

首先将  $abc$  坐标轴下的三相滤波电感电流、滤波电容电压转换为  $dq$  坐标轴下的分量。有功功率  $P$  和无功功率  $Q$  根据采集到的滤波电感电流、滤波电容电压和线路电流进行计算,变流器输

出电压参考值  $u_{ref}$  和系统角频率  $\omega$  通过 GFESC 策略得到,变流器内环为电压-电流双闭环控制。加入虚拟电感  $L_v$  后,注入电压环的电压参考值  $u_{vd}$  和  $u_{vq}$  分别为

$$\begin{cases} u_{vd} = u_{refd} + i_{od} \omega L_v \\ u_{vq} = u_{refq} - i_{oq} \omega L_v \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $u_{refd}$ 、 $u_{refq}$  分别为变流器输出电压参考值  $u_{ref}$  的  $d$ 、 $q$  轴分量;  $i_{od}$ 、 $i_{oq}$  分别为线路电流的  $d$ 、 $q$  轴分量。

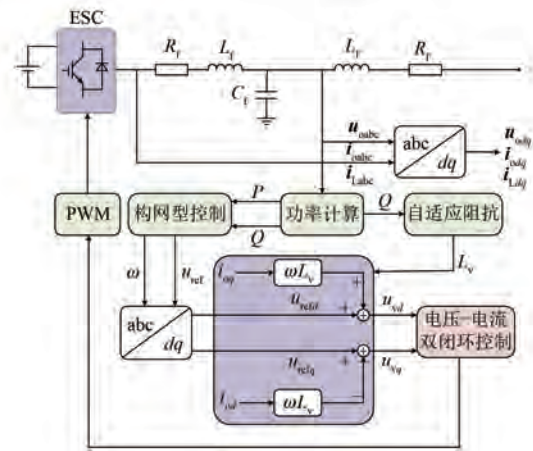


图 2 基于虚拟阻抗的 ESC 控制框图

Fig. 2 Control block diagram of ESC based on virtual impedance

ESC 传递函数框图如图 3 所示。为实现有功、无功独立调节,电压-电流双闭环采用  $dq$  轴解耦控制<sup>[27]</sup>,且均采用比例-积分(Proportional-Integral, PI)控制器,分别表示为  $G_1(s) = K_{p1} + K_{i1}/s$ ,  $G_2(s) = K_{p2} + K_{i2}/s$ 。其中,  $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$  分别为电流内环的比例系数、积分系数;  $K_{p2}$ 、 $K_{i2}$  分别为电压外环的比例系数、积分系数;  $K_{PWM}$  为变流器 PWM 控制的增益系数。

加入虚拟电感前变流器的输出电压表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{u}_{odq} = G_u(s) \mathbf{u}_{refdq} - \mathbf{Z}(s) \mathbf{i}_{odq} \\ \mathbf{Z}(s) = \begin{bmatrix} Z_o(s) & 0 \\ 0 & Z_o(s) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (20)$$

$$G_u(s) = \frac{K_{PWM} K_{p1} K_{p2} s^2 + (K_{i1} K_{p2} + K_{i2} K_{p1}) K_{PWM} s + K_{PWM} K_{i1} K_{i2}}{L_f C_f s^4 + (C_f R_f + C_f K_{PWM} K_{p1}) s^3 + (C_f K_{PWM} K_{i1} + K_{PWM} K_{p1} K_{p2} + 1) s^2 + (K_{i1} K_{p2} + K_{i2} K_{p1}) K_{PWM} s + K_{PWM} K_{i1} K_{i2}} \quad (22)$$

$$Z_o(s) =$$

$$\frac{L_f s^3 + (R_f + K_{P_{PWM}} K_{p1}) s^2 + K_{P_{PWM}} K_{i1} s}{L_f C_f s^4 + (C_f R_f + C_f K_{P_{PWM}} K_{p1}) s^3 + (C_f K_{P_{PWM}} K_{i1} + K_{P_{PWM}} K_{p1} K_{p2} + 1) s^2 + (K_{i1} K_{p2} + K_{i2} K_{p1}) K_{P_{PWM}} s + K_{P_{PWM}} K_{i1} K_{i2}} \quad (22)$$

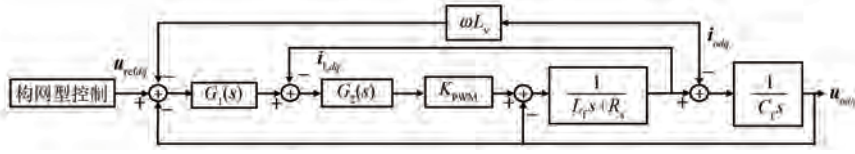


图3 带有虚拟阻抗的ESC传递函数框图

Fig. 3 Control block diagram of ESC transfer function with virtual impedance

式中:  $\mathbf{u}_{refdq} = [u_{refd} \ u_{refq}]^T$ ;  $\mathbf{u}_{odq} = [u_{od} \ u_{oq}]^T$ ;  $\mathbf{i}_{odq} = [i_{od} \ i_{oq}]^T$ ;  $G_u(s)$  为闭环电压传递函数;  $Z_o(s)$  为变流器的等效输出阻抗。

为使得变流器输出电压能完全跟踪参考电压, 应选取合适的控制参数, 满足基频  $|G_u(s)| \approx 1$ ,  $|Z_o(s)| \approx 0$ 。

引入虚拟阻抗  $X_v$  后, 变流器的输出电压表达式为<sup>[28]</sup>

$$\mathbf{u}_{odq} = G_u(s) (\mathbf{u}_{refdq} - X_v \mathbf{i}_{odq}) - Z_o(s) \mathbf{i}_{odq} = G_u(s) \mathbf{u}_{refdq} - [Z_o(s) + G_u(s) X_v] \mathbf{i}_{odq} \quad (23)$$

变流器的等效输出阻抗为

$$Z'_o(s) = Z_o(s) + G_u(s) X_v \quad (24)$$

系统总阻抗由变流器等效输出阻抗和线路阻抗组成。传统下垂控制以系统阻抗为纯感性为前提, 可实现  $P$ - $f$ 、 $Q$ - $U$  解耦; 而低压电网线路多呈阻感性, 有功、无功难以直接解耦, 影响分配精度。为此, 可通过配置系统输出阻抗提升解耦效果。本文将虚拟阻抗设计为纯感性, 由恒定虚拟电感和自适应虚拟电感组成: 前者改善功率耦合, 后者实现动态阻抗匹配和高精度功率分配。

假设变流器等效输出阻抗近似为纯感性, 结合式(21)、(22)和(24), 并考虑无功分配精度与  $U_{PCC}$  跌落的影响。未加入虚拟电感时, 基频下闭环传递函数幅值接近 1, 输出阻抗幅值和阻抗角较小; 加入虚拟电感后, 系统等效输出阻抗近似纯感性, 基频感抗约等于输入虚拟电感值, 说明虚拟阻抗可改变系统等效输出阻抗, 从而适配传统下垂控制。

当并联变流器的额定无功功率不同时, 系统的总输出阻抗应与额定无功功率成反比, 与其无功下垂系数成正比。第  $i$  台变流器的虚拟电感为

$$L_{v0,i} = \frac{k_{Qi}}{k_{Qj}} L_{v0,j} \quad (25)$$

功率解耦程度与虚拟电感正相关, 恒定虚拟电感越大, 解耦速度和无功分配精度越高, 但也会引起  $U_{PCC}$  跌落。因此, 则第  $i$  台变流器的自适应虚拟电感  $\Delta L_{vi}$  的表达式为

$$\Delta L_{vi} = k \frac{e_i}{U_i} \quad (26)$$

式中:  $k$  为自适应虚拟阻抗系数。

第  $i$  台变流器的总虚拟电感  $L_{vi}$  为恒定虚拟电感和自适应虚拟电感之和, 即:

$$L_{vi} = L_{v0,i} + \Delta L_{vi} \quad (27)$$

加入虚拟阻抗后, 第 1 台变流器的无功功率分配误差由式(17)变为

$$e_{v1} = \frac{k_{Q1}(X_2 + \omega L_{v2}) - k_{Q2}(X_1 + \omega L_{v1})}{k_{Q2}[X_1 + \omega L_{v1} + X_2 + \omega L_{v2} + (k_{Q1} + k_{Q2})U_{PCC}]} \quad (28)$$

令  $e_{v1} = e'_1 + e''_1$ , 其中:

$$e'_1 = \frac{k_{Q1}X_2 - k_{Q2}X_1}{k_{Q2}[X_1 + \omega L_{v1} + X_2 + \omega L_{v2} + (k_{Q1} + k_{Q2})U_{PCC}]} \quad (29)$$

$$e''_1 = \frac{(k_{Q1}L_{v0,2} - k_{Q2}L_{v0,1}) + k\omega \left( k_{Q1} \frac{e_2}{U_2} - k_{Q2} \frac{e_1}{U_1} \right)}{k_{Q2}[X_1 + \omega L_{v1} + X_2 + \omega L_{v2} + (k_{Q1} + k_{Q2})U_{PCC}]} \quad (30)$$

加入虚拟阻抗后, 第 2 台变流器的无功功率分配误差由式(18)变为

$$e_{v2} = \frac{k_{Q2}(X_1 + \omega L_{v1}) - k_{Q2}(X_2 + \omega L_{v2})}{k_{Q1}[X_1 + \omega L_{v1} + X_2 + \omega L_{v2} + (k_{Q1} + k_{Q2})U_{PCC}]} \quad (31)$$

令  $e_{v2} = e'_2 + e''_2$ , 其中:

$$e'_2 = \frac{k_{Q2}X_1 - k_{Q1}X_2}{k_{Q1}[X_1 + \omega L_{v1} + X_2 + \omega L_{v2} + (k_{Q1} + k_{Q2})U_{PCC}]} \quad (32)$$

$$e_2'' = \frac{(k_{Q2}L_{v0,1} - k_{Q1}L_{v0,2}) + k\omega \left( k_{Q2} \frac{e_1}{U_1} - k_{Q1} \frac{e_2}{U_2} \right)}{k_{Q1} [X_1 + \omega L_{v1} + X_2 + \omega L_{v2} + (k_{Q1} + k_{Q2}) U_{PCC}]} \quad (33)$$

假设 2 台变流器满足  $k_{Q1}Q_1^* = k_{Q2}Q_2^*$ , 但输出阻抗不匹配。由式(17)、(18)、(28)可知,  $e_1 < 0, e_2 > 0$ , 且引入虚拟阻抗后式(28)分母增大、误差减小。因此, 第 1 台变流器的无功功率分配误差减小。第 2 台变流器的无功功率分配误差分析同理。

本文所提策略以无功功率分配误差为输入量, 通过 ESC 闭环控制实现线路阻抗匹配, 在不增大虚拟阻抗幅值的前提下提高功率分配精度。

### 3 小信号稳定性分析

为了确保系统的稳定性, 在所提控制策略下建立小信号模型, 并分析稳定性<sup>[29]</sup>。对式(2)、(3)进行线性化处理, 可得:

$$\hat{P} = \frac{\partial P}{\partial U} \hat{U} + \frac{\partial P}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial P}{\partial X_v} \hat{X}_v = k_{PU} \hat{U} + k_{P\theta} \hat{\theta} + k_{PX} \hat{X}_v \quad (34)$$

$$\hat{Q} = \frac{\partial Q}{\partial U} \hat{U} + \frac{\partial Q}{\partial \theta} \hat{\theta} + \frac{\partial Q}{\partial X_v} \hat{X}_v = k_{QU} \hat{U} + k_{Q\theta} \hat{\theta} + k_{QX} \hat{X}_v \quad (35)$$

式中:  $\hat{\cdot}$  为各变量的小信号扰动;  $U$  为 ESC 的输出电压;  $k_{PU}$ 、 $k_{P\theta}$ 、 $k_{PX}$ 、 $k_{QU}$ 、 $k_{Q\theta}$ 、 $k_{QX}$  为同一稳态工作点处的相应偏导数。

变流器的输出功率由输出电压和输出电流经过派克变换后得到的  $dq$  轴分量<sup>[30]</sup> 计算得出, 再经过低通滤波环节提取获得。故:

$$\begin{cases} P_0 = \frac{3}{2}(u_{od}i_{od} + u_{oq}i_{oq}) \\ Q_0 = \frac{3}{2}(u_{oq}i_{od} - u_{od}i_{oq}) \end{cases} \quad (36)$$

实际用于控制的有功功率和无功功率可表示为

$$\begin{cases} P = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} P_0 \\ Q = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} Q_0 \end{cases} \quad (37)$$

式中:  $\omega_c$  为滤波器的截止频率;  $P_0$ 、 $Q_0$  分别为直接计算得到的有功功率、无功功率。

由式(36)、(37)可得:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(u_{od}i_{od} + u_{oq}i_{oq}) \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \\ Q = \frac{3}{2}(u_{oq}i_{od} - u_{od}i_{oq}) \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \end{cases} \quad (38)$$

对式(38)进行线性化处理, 可得:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{P}_0}{dt} = -\omega_c \hat{P}_0 + \frac{3}{2}\omega_c(\hat{u}_{od}i_{od} + \hat{u}_{oq}i_{oq} + u_{od}\hat{i}_{od} + u_{oq}\hat{i}_{oq}) \\ \frac{d\hat{Q}_0}{dt} = -\omega_c \hat{Q}_0 + \frac{3}{2}\omega_c(-\hat{u}_{od}i_{oq} + \hat{u}_{oq}i_{od} + u_{oq}\hat{i}_{od} - u_{od}\hat{i}_{oq}) \end{cases} \quad (39)$$

对式(6)、(7)进行线性化处理, 可得:

$$\hat{\omega} = -m\hat{P} \quad (40)$$

$$\hat{U} = -n\hat{Q} \quad (41)$$

此外:

$$\frac{d\hat{\theta}}{dt} = \hat{\omega} = -m\hat{P} \quad (42)$$

$$\frac{d\hat{X}_v}{dt} = L_{v0}\hat{\omega} + \omega_n\hat{I}_v = -mL_{v0}\hat{P} + \frac{k\omega_n}{U_n Q^*}\hat{Q} \quad (43)$$

式中:  $\omega_n$ 、 $U_n$  分别为变流器的额定频率、额定电压;  $Q^*$  为变流器无功功率的参考值。

综合式(34)~(43), 可得:

$$\frac{d\hat{P}}{dt} = -\omega_c \hat{P} - \omega_c k_{PU} k_Q \hat{Q} + \omega_c k_{P\theta} \hat{\theta} + \omega_c k_{PX} \hat{X} \quad (44)$$

$$\frac{d\hat{Q}}{dt} = -\omega_c \hat{Q} - \omega_c k_{QU} k_Q \hat{Q} + \omega_c k_{Q\theta} \hat{\theta} + \omega_c k_{QX} \hat{X} \quad (45)$$

综合式(39)~(45), 可得系统的状态空间方程为

$$\frac{dx}{dt} = Ax \quad (46)$$

$$x = [\hat{P} \quad \hat{Q} \quad \hat{\theta} \quad \hat{X}_v]^T \quad (47)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\omega_c & -n\omega_c k_{PU} & \omega_c k_{P\theta} & \omega_c k_{PX} \\ 0 & -\omega_c(1 + nk_{QU}) & \omega_c k_{Q\theta} & \omega_c k_{QX} \\ -m & 0 & 0 & 0 \\ -mL_{v0} & \frac{k\omega_n}{U_n Q^*} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (48)$$

根据式(48)可得系统的特征方程为

$$a_0s^4 + a_1s^3 + a_2s^2 + a_3s + a_4 = 0 \quad (49)$$

式中:

$$\begin{cases} a_0 = 1 \\ a_1 = \omega_c(2 + nk_{QU}) \\ a_2 = \omega_c^2(1 + n)k_{QU} + \omega_c(k_{P\theta} + mL_{v0}k_{px} - \frac{kk_{QX}\omega_n}{U_n Q^*}) \\ a_3 = -\frac{kk_{QX}\omega_c^2\omega_n}{U_n Q^*} + \omega_c^2(k_{P\theta} + nk_{QU}k_{P\theta} - nk_{PU}k_{Q\theta}) + m\omega_c^2L_{v0}(k_{PX} + nk_{PX}k_{QU} - nk_{PU}k_{QX}) \\ a_4 = m\omega_c^2\frac{kk_{QX}\omega_n}{U_n Q^*}(k_{Q\theta} - k_{QX}) \end{cases} \quad (50)$$

根据式(49)可得有功功率下垂系数  $m$ 、无功功率下垂系数  $n$  和自适应虚拟阻抗系数  $k$  的根轨迹,如图4~6所示。当  $m$  增大时,共轭特征根  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  逐渐靠近虚轴,系统稳定性降低。当  $m > 3.28 \times 10^{-3}$  时,特征根进入右半平面,系统失稳。随着  $n$  增大,共轭特征根  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  也逐渐靠近虚轴,系统稳定性降低。当  $n > 7.3 \times 10^{-2}$  时,特征根进入右半平面,系统失稳。当  $k$  逐渐增大,特征根  $\lambda_2$  逐渐靠近虚轴,阻尼减小,可见引入虚拟阻抗会影响系统的稳定性。基于此,本文选取  $m = 2.3 \times 10^{-4}$ ,  $n = 4 \times 10^{-4}$ ,  $k = 3.0$ 。

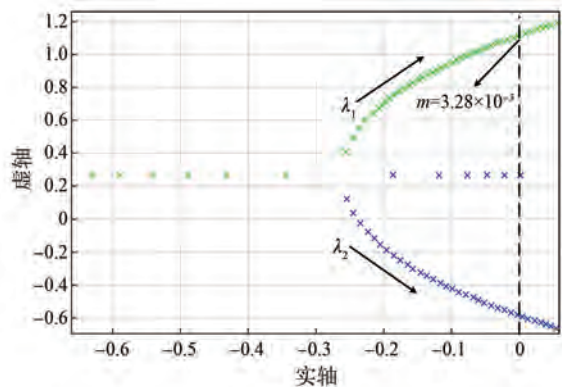


图4 有功功率系数  $m$  的根轨迹图

Fig. 4 Root locus plot of active power coefficient  $m$

## 4 仿真分析

为了验证所提控制策略的有效性,本文基于 Matlab/Simulink 平台搭建了两台等容量的并联变流器,对所提自适应虚拟阻抗控制与传统控制下

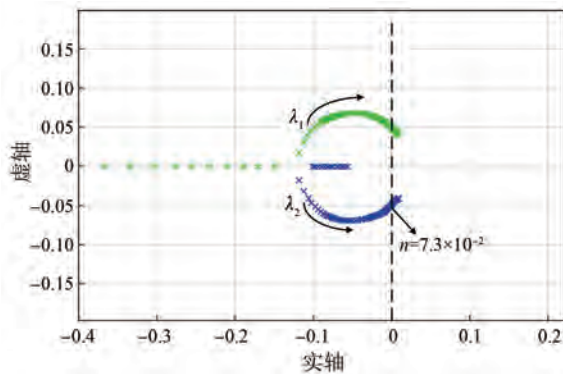


图5 无功功率系数  $n$  的根轨迹图

Fig. 5 Root locus plot of reactive power coefficient  $n$

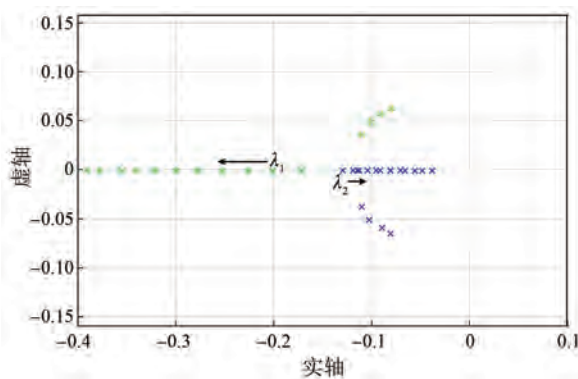


图6 自适应虚拟阻抗系数  $k$  的根轨迹图

Fig. 6 Root locus plot of adaptive virtual impedance coefficient  $k$

的无功功率分配进行对比分析,系统仿真参数如表1所示,其中部分参数含有两个数值的表示两台ESC各自的值。

表1 系统仿真参数

Tab. 1 System simulation parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
直流电压 $U_{dc}/V$	800	额定电压幅值 $U_n/V$	311
额定频率 $f_n/Hz$	50	线路电感 $L_i/mH$	[0.12, 1.1]
额定有功功率 $P_n/kW$	70	有功下垂系数 $m_i/10^{-4}$	[2, 3]
额定无功功率 $Q_n/kvar$	25	无功下垂系数 $n_i/10^{-3}$	[2, 3]
滤波电容 $C_f/\mu F$	20	电压环比例系数 $K_{pv}$	0.5
滤波电感 $L_f/mH$	3	电压环积分系数 $K_{iv}$	10
线路电阻 $R_i/\Omega$	[0.02, 0.015]	电流环比例系数 $K_{pc}$	50
负载/kVA	15+j15	电流环积分系数 $K_{ic}$	100

按照系统参数建模后,加入自适应虚拟阻抗控制策略。该控制由虚拟阻抗校正项生成虚拟电

感和虚拟电阻,虚拟电感用于补偿感性线路阻抗不匹配,虚拟电阻用于提供阻尼。二者与输出电流形成虚拟阻抗压降并作用于  $U_{PCC}$ ,从而实现电压恢复。自适应虚拟阻抗控制参数如表 2 所示。

表 2 自适应虚拟阻抗控制参数

Tab. 2 Adaptive virtual impedance control parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
虚拟电容 $C_Q/\mu\text{F}$	6.5	角频率 $\omega_n/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	314
给定系数 $K_{PQ}$	0.1	给定系数 $K_{iQ}$	0.2
给定系数 $K_{QL}$	$1.2\times 10^{-4}$	给定系数 $K_{OR}$	0.25
虚拟电感/mH	0.3	虚拟电阻/ $\Omega$	0.1

系统频率波形如图 7、8 所示。假设有功功率下垂系数和额定频率不变,施加负载时有功功率增大,频率降低;切除负载时,有功功率减小,频率增大。0.2 s 时施加负载,0.6 s 时切除负载。

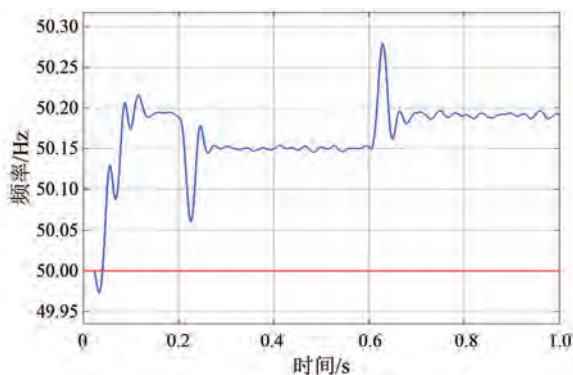


图 7 未加入频率补偿的系统频率

Fig. 7 System frequency without frequency compensation

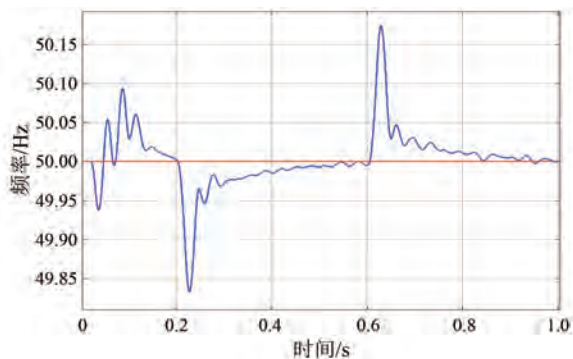


图 8 加入频率补偿的系统频率

Fig. 8 System frequency with frequency compensation

由图 7 可知,未加入频率补偿时,系统在 0.62 s 时频率上升到 50.27 Hz,超调量  $\sigma$  为 0.43%,超过了  $\pm 0.2$  Hz 的要求,严重影响稳定性。由图 8 可知,加入频率补偿后,在 0.62 s 时系统的

频率下降到 50.17 Hz,降低了 0.1 Hz,超调量  $\sigma$  仅为 0.36%,系统频率控制在  $\pm 0.2$  Hz 以内,并在 1 s 时达到稳定基频。

系统设定额定功率的比为 1:1。0.2 s 时施加负载,各变流器输出的有功功率可按比例分担,如图 9、10 所示。由图 9、10 可知,未加入自适应虚拟阻抗时,系统最终有功输出为 62 kW,加入自适应虚拟阻抗控制后有功输出为 70 kW。其原因在于自适应虚拟阻抗可补偿线路阻抗差异,使等效阻抗与无功下垂系数成正比,实现无功均分,并使  $U_{PCC}$  恢复至额定值,从而增强有功传输能力,使变流器输出接近额定设计值。

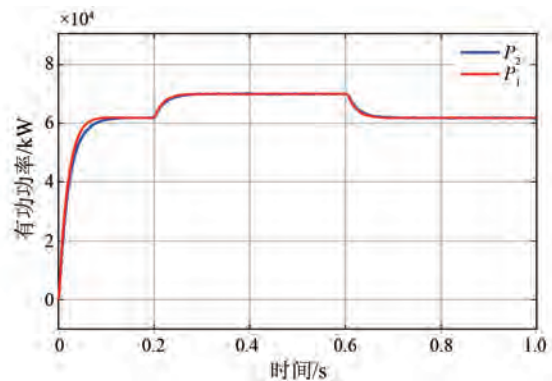


图 9 未加入虚拟阻抗的变流器输出的有功功率

Fig. 9 Active power output by the converter without virtual impedance

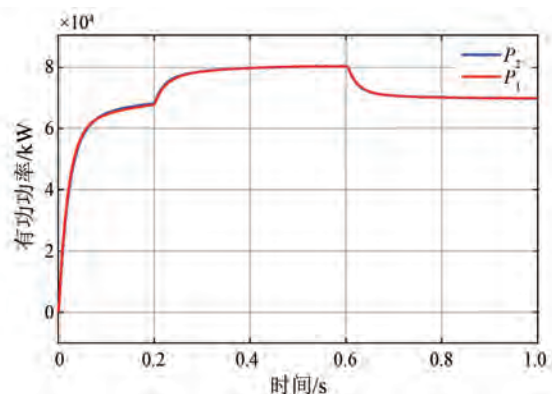


图 10 加入虚拟阻抗的变流器输出的有功功率

Fig. 10 Active power output by the converter with virtual impedance

未加入电压补偿、加入电压补偿的  $U_{PCC}$  分别如图 11、12 所示。传统下垂控制为平衡无功环流,需调节输出电压,导致  $U_{PCC}$  偏离额定值并发生跌落。由图 11 可知,未加入电压补偿时,  $U_{PCC}$  本应与变流器输出电压一致为 311 V,但实际为

292 V, 跌落 6%, 说明无功分配对  $U_{PCC}$  影响明显。由图 12 可知, 加入电压补偿后, 通过将无功分配误差与输出电压结合设计虚拟阻抗,  $U_{PCC}$  恢复至额定值。

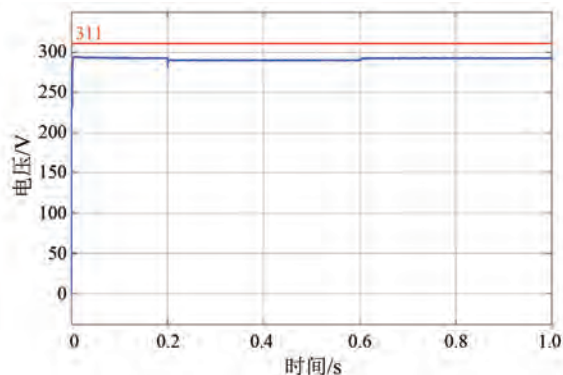


图 11 未加入电压补偿的  $U_{PCC}$

Fig. 11 The  $U_{PCC}$  without voltage compensation

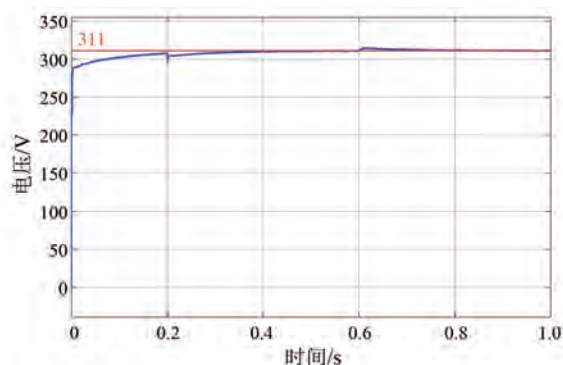


图 12 加入电压补偿的  $U_{PCC}$

Fig. 12 The  $U_{PCC}$  with voltage compensation

系统额定无功功率比为 1:1。未加入虚拟阻抗、加入虚拟阻抗变流器输出的无功功率分别如图 13、14 所示。

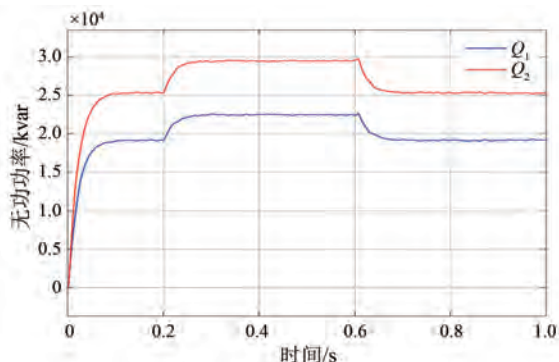


图 13 未加入虚拟阻抗变流器输出的无功功率

Fig. 13 Reactive power output by the converter without virtual impedance

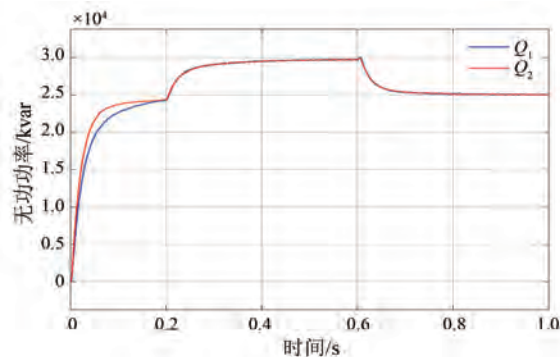


图 14 加入虚拟阻抗变流器输出的无功功率

Fig. 14 Reactive power output by the converter with virtual impedance

由图 13 可知, 在传统下垂控制中, 假设线路阻抗与无功下垂系数成正比, 但 ESPS 的变流器出口线路长度存在差异导致  $X_i$  不匹配, 无功功率  $Q_1$ 、 $Q_2$  不能按比例分配,  $Q_1 \approx 25.2$  kvar,  $Q_2 \approx 19.1$  kvar。由图 14 可知, 加入自适应虚拟阻抗后  $Q_1:Q_2 = 1:1$ , 输出的无功功率为 25 kvar。

## 5 结语

为解决 GFESC 并联时由线路阻抗不匹配引起的无功功率分配偏差, 本文提出基于自适应虚拟阻抗的优化控制策略, 主要结论如下。

(1) 在虚拟阻抗的设计中引入变流器的无功功率分配误差和三相输出电压, 并且该控制策略可与下垂控制有效结合。

(2) 无需知道线路阻抗并且无需分布式单元之间的互联通信, 可自适应调节等效阻抗的虚拟值使其实现阻抗匹配, 进而实现无功功率的高精度分配, 同时  $U_{PCC}$  跌落程度更低。

(3) 在加入自适应虚拟阻抗控制的同时加入频率补偿控制, 极大程度上维持了系统频率稳定。

所提策略主要适用于控制特性与下垂控制相近的储能变流器。对于其他控制方式、不同额定功率比以及复杂电网拓扑下的适用性, 仍需进一步研究。

## 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

王天宇进行了方案设计、内容总结与论文撰写,张子坤、范李平和倪子华进行了仿真研究,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。

The scheme design, content summarization, and paper writing were conducted by Wang Tianyu. The simulation research was carried out by Zhang Zikun, Fan Liping and Ni Zihua. The paper review and modification were participated in by Ma Hui. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

## 参考文献

- [ 1 ] 盛万兴, 吴鸣, 季宇, 等. 分布式可再生能源发电集群并网消纳关键技术及工程实践[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2175-2186.  
Sheng W X, Wu M, Ji Y, et al. Key techniques and engineering practice of distributed renewable generation clusters integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2175-2186.
- [ 2 ] 许崇福, 李菀茹, 徐宁一, 等. 应用于储能变流器的虚拟同步发电机阻尼特性分析与改进[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1656-1665.  
Xu C F, Li W R, Xu N Y, et al. Analysis and improvement of damping characteristics of virtual synchronous generator control applied to energy storage converter [J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1656-1665.
- [ 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 ] 张世旭, 李姚旺, 刘伟生, 等. 面向微电网群的云储能经济-低碳-可靠多目标优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 21-30.  
Zhang S X, Li Y W, Liu W S, et al. Economic, low-carbon and reliable multi-objective optimal configuration method of cloud energy storage for microgrid clusters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 21-30.
- [ 5 ] 许诤翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控

制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3594.

Xu J Y, Liu W, Liu S, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594.

[ 6 ] Meng X, Liu J J, Liu Z. A generalized droop control for grid-supporting inverter based on comparison between traditional droop control and virtual synchronous generator control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5416-5438.

[ 7 ] 刘子文, 苗世洪, 范志华, 等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 795-806.

Liu Z W, Miao S H, Fan Z H, et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 795-806.

[ 8 ] 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 J, Liu M A, Chen X, et al. Wireless parallel and circulation current reduction of droop-controlled inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1450-1460.

[ 9 ] 于惠钧, 龚星宇, 黄星, 等. 基于自适应虚拟阻抗的微电网无功均分控制[J]. 湖南工业大学学报, 2020, 34(4): 16-21.

Yu H J, Gong X Y, Huang X, et al. Reactive power sharing control method based on adaptive virtual impedance [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2020, 34(4): 16-21.

[ 10 ] 李明, 武鸿鑫, 甫日甫才仁, 等. 基于 IHAOAVOA 的储能电站有功无功功率分配策略[J]. 太阳能学报, 2025, 46(9): 293-302.

Li M, Wu H X, Furifucairen, et al. Active and reactive power distribution strategy of energy storage power station based on IHAOAVOA [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2025, 46(9): 293-302.

[ 11 ] 白小丹, 苗虹, 曾成碧, 等. 适用于低压微网中逆变器无功均分的改进下垂控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1310-1318.

Bai X D, Miao H, Zeng C B, et al. Improved droop

- control strategy for reactive power sharing of inverters in low-voltage microgrids [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(4): 1310-1318.
- [12] 谢沁园,王瑞田,林克文,等. 基于端口电压积分与变下垂系数的逆变器并联下垂控制策略[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(6): 1596-1607.
- Xie Q Y, Wang R T, Lin K W, et al. Droop control strategy of parallel inverters based on port voltage integration and variable droop coefficient [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(6): 1596-1607.
- [13] 李祥山,杨晓东,张有兵,等. 含母线电压补偿和负荷功率动态分配的直流微电网协调控制[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(1): 198-204.
- Li X S, Yang X D, Zhang Y B, et al. Coordinated control of DC microgrid considering bus voltage compensation and load power dynamic sharing [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(1): 198-204.
- [14] 李建林,李雅欣,刘海涛,等. 计及储能电站安全性的功率分配策略研究[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(23): 5976-5986.
- Li J L, Li Y X, Liu H T, et al. Research on power distribution strategy considering the safety of energy storage power station [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(23): 5976-5986.
- [15] Dheer D K, Gupta Y, Doolla S. A self-adjusting droop control strategy to improve reactive power sharing in islanded microgrid [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(3): 1624-1635.
- [16] Fan B S, Li Q K, Wang W, et al. A novel droop control strategy of reactive power sharing based on adaptive virtual impedance in microgrids [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(11): 11335-11347.
- [17] 吴家杰,陈新,张东辉,等. 构网型储能变换器在新能源接入场景下并网稳定性分析及提升策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(23): 9341-9354.
- Wu J J, Chen X, Zhang D H, et al. Grid-connected stability analysis and improvement strategy for grid-forming energy storage system in new energy access scene [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(23): 9341-9354.
- [18] Chen Z, Pei X J, Yang M, et al. An adaptive virtual resistor (AVR) control strategy for low-voltage parallel inverters [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(1): 863-876.
- [19] 柴秀慧,张纯江,赵晓君,等. 基于自恢复下垂的分布式电源主动同步控制及参数优化[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(19): 128-133.
- Chai X H, Zhang C J, Zhao X J, et al. Self-recovery droop based active synchronization control and parameter optimization of distributed generator [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(19): 128-133.
- [20] 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.
- [21] Deng F, Yao W L, Zhang X L, et al. A decentralized current sharing strategy for islanded resistive microgrids based on iterative virtual impedance regulation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 18(6): 3958-3969.
- [22] 戚瑞雪,韩子娇,董雁楠,等. 电压单相跌落下VSC输出平衡电流控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(10): 39-45.
- Xian R X, Han Z J, Dong Y N, et al. Virtual synchronous generator output balance current control strategy under single-phase voltage drop [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(10): 39-45.
- [23] 蔡浩,唐静,施凯,等. 光伏交直流混合微电网功率分配研究——基于改进下垂控制策略[J]. *太阳能学报*, 2025, 46(5): 227-234.
- Cai H, Tang J, Shi K, et al. Research on power distribution of photovoltaic AC/DC hybrid microgrid-based on improved droop control strategy [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2025, 46(5): 227-234.
- [24] 张继红,赵锐,刘云飞,等. 低压微网阻性逆变器并联运行控制策略[J]. *高电压技术*, 2022, 48(1): 136-146.
- Zhang J H, Zhao R, Liu Y F, et al. Resistive inverters output impedance parallel operation strategy in low-voltage microgrid [J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(1): 136-146.
- [25] Gupta Y, Parganiha N, Rathore A K, et al. An improved reactive power sharing method for islanded microgrid [C]// 2019 IEEE Industry Applications

- Society Annual Meeting, Baltimore, MD, USA, 2019: 1-6.
- [26] 黄炳政, 陈俊儒, 刘牧阳, 等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型变流器暂态稳定性提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(12): 57-68.  
Huang B Z, Chen J R, Liu M Y, et al. Grid-forming converter transient stability enhancement strategy based on adaptive virtual impedance [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(12): 57-68.
- [27] Wang X, Zhang J, Zheng M, et al. A distributed reactive power sharing approach in microgrids with improved droop control [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(6): 1238-1246.
- [28] 李延帅, 徐传芳, 宋阳阳. 单相级联 H 桥整流器平方电压反馈控制算法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 117-124.  
Li Y S, Xu C F, Song Y Y. Square voltage feedback control algorithm for single-phase cascaded h-bridge rectifier [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 117-124.
- [29] 冯春贤, 于彦雪, 时珉, 等. 混合同步控制型构网变流器阻抗建模及稳定性分析[J]. 智慧电力, 2026, 54(1): 118-127.
- Feng C X, Yu Y X, Shi M, et al. Impedance modeling and stability analysis of hybrid synchronization-controlled grid-forming converters [J]. Smart Power, 2026, 54(1): 118-127.
- [30] 张宁, 徐传芳, 李延帅. 基于自抗扰的单相 PWM 整流器直接功率控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(12): 83-91.  
Zhang N, Xu C F, Li Y S. Single-phase PWM rectifier power feedforward decoupling control based on active disturbance rejection [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(12): 83-91.

---

收稿日期:2025-12-18

收到修改稿日期:2026-03-19

作者简介:

王天宇(2001—),男,硕士研究生,研究方向为有源配电网稳定,2328390342@qq.com;

\* 通信作者:马辉(1985—),男,博士,副教授,研究方向为新能源系统规划及控制,mahuizz119@126.com。