

引用格式:戎士洋,范辉,梁纪峰,等.多 VSG 单元的惯量协调控制策略研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(2):170-180.

Citation: RONG Shiyang, FAN Hui, LIANG Jifeng, et al. Research on inertia coordinated control strategy of multiple VSG cells[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 170-180.

多 VSG 单元的惯量协调控制策略研究

戎士洋¹, 范辉², 梁纪峰¹, 于腾凯¹, 李铁成¹, 刘佳敏¹

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 国网河北省电力有限公司, 河北 石家庄 050021)

摘要: 大规模光伏并网系统中常采用多个虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)单元进行协调配合, 为电网提供虚拟惯性。但在实际运行中, 虚拟惯量分配不合理会导致系统频率响应差及源端易损等。针对此问题, 提出一种针对混合光储多 VSG 单元的惯量协调控制策略。该策略通过构造隶属函数, 将储能单元荷电状态、换流器可调功率、储能充放电可调功率 3 个指标转化到同一量纲下, 以解决惯量分配时多目标转换困难的问题。同时, 为区分各指标对频率稳定的重要程度, 避免惯量分配时权重选择的主观性, 构建一种权重优化系数, 可根据指标的差异度实时调节权重。通过建立六端交流系统小信号模型, 运用根轨迹法对隶属函数中主导参数进行稳定性分析, 进而确定参数选取范围。在 MATLAB/SIMULINK 中搭建光储六端交流系统模型并进行时域仿真, 仿真结果可以验证所提控制策略的有效性。

关键词: 虚拟同步发电机; 隶属函数; 虚拟惯量; 权重系数

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.02.019 中图分类号: TM732 文章编号: 1673-9140(2024)02-0170-11

Research on inertia coordinated control strategy of multiple VSG cells

RONG Shiyang¹, FAN Hui², LIANG Jifeng¹, YU Teng kai¹, LI Tiecheng¹, LIU Jiamin¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China;

2. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: In large-scale photovoltaic grid-connected systems, multiple virtual synchronous generator (VSG) units are often used to coordinate and provide virtual inertia for the grid. However, the unreasonable distribution of virtual inertia will lead to poor system frequency response and source-end vulnerability in actual operation. To solve this problem, this paper proposes an inertia coordination control strategy for hybrid optical storage multiple VSG cells. By using the membership function, the strategy converts three indicators of the state of charge of the energy storage unit, i.e., the adjustable power of the converter and the adjustable power of the energy storage charge and discharge, into the same dimension, so as to solve the problem of multi-objective conversion in the moment of inertia distribution. At the same time, the parameters in the membership function can be flexibly adjusted according to the index characteristics to adapt to the inertia distribution under different working conditions. By establishing a small signal model of six-terminal AC system, the root locus method is used to analyze the stability of the dominant parameters in the membership function, and then to determine the parameter selection range. The optical storage six-terminal AC system model was built in MATLAB/SIMULINK and the time domain simulation was carried out. The simulation results verified the effectiveness of the proposed control strategy.

Key words: VSG; PV power generation; virtual inertia; membership function

随着光储并网规模的逐步扩大, 电力系统呈现电力电子化趋势, 这会导致系统缺乏惯量支撑, 降

低频率响应能力^[1-3]。为此, 电力系统采用多个虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)单

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-05-17

基金项目: 国网河北省电力有限公司新型电力系统重大科技攻关项目(kj2022-058)

通信作者: 戎士洋(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事新能源电力系统运行分析与控制技术方面的研究; E-mail: 276932693@qq.com

元来提供虚拟惯量,维持频率稳定。然而,多VSG单元在运行时存在多种影响因素,制约了惯量的合理分配,导致系统发生扰动时频率跌落严重,无法快速恢复至正常水平^[4-6]。因此,有必要研究光储多VSG单元的惯量协调分配问题。

现有文献已经针对VSG单元的控制方法^[7-10]、参数优化^[11-14]、控制结构的改进^[15-17]等方面进行了诸多研究。然而,目前对多个VSG单元的研究主要偏向于分析多VSG接入系统时的振荡模式^[18-20],很少涉及多个VSG单元之间的惯量协调分配问题。随着光伏并网规模的扩大,仅靠单一的VSG单元无法支撑整个系统的惯量,需要多个VSG单元协调配合来维持频率稳定。因此,探寻多VSG单元之间的惯量协调分配问题显得尤为重要。

目前对多个VSG单元惯量协调分配问题的研究仍存在不足。一方面,影响惯量分配的约束条件较多,影响特性各不相同,同时考虑起来较为复杂。现有文献仅考虑了主导的约束条件对惯量分配的影响,文献[21]考虑了蓄电池间的储能荷电状态(state of charge, SOC)和换流器额定容量对惯量分配的影响,通过模糊控制实现了VSG单元之间的惯量分配。但控制方程较为简单,无法充分发挥SOC和换流器的惯量支撑能力。文献[22]设计了一种简化的VSG虚拟惯量控制器,应用在了VSG多机并联运行系统中来实现惯量分配,但该控制器仅考虑了微源逆变器容量这一因素,忽略了其他因素。另一方面,在进行惯量分配时,权重系数的选取影响着惯量分配效果,需综合考虑不同指标对惯量分配的影响,灵活调节权重系数,以适应于不同工况下的惯量分配^[23]。

针对多VSG惯量分配时多个约束条件难以统一的问题,文献[24]提出了基于TOPSIS算法的惯量分配策略,该策略将各指标实际值与理想值的偏差作为惯量分配中的评价指数,进而得到指标对应分配的惯量。但该策略不能够直观地反映指标对惯量分配的影响效果,且对指标理想值的检测要求较高,只能在单一工况下实现惯量的最优分配。

相较于TOPSIS算法而言,隶属函数法能够更清楚、更直观地反映各约束条件对惯量分配的影响特性。通过构造各指标的隶属函数,可以将互相冲突的经济性、安全性指标转化成同一量纲、相同数量级的单目标问题,能够兼顾惯量分配时的多个指标。除此之外,隶属函数法无需检测指标的理想值,只需根据指标量计算出对应的隶属度,进而得

到分配的惯量值。因此,将隶属函数法应用于多VSG单元的惯量分配问题中能够取得较好的效果,且隶属函数法能够适用于多种工况下的惯量分配,具有一定的推广价值。

针对以上两方面的不足,本文提出一种多VSG单元的惯量协调控制策略。该策略综合考虑频率变化率、储能装置的荷电状态、换流器可调功率、储能充放电可调功率4个影响因素,利用隶属函数法,结合指标特性将各指标对惯量分配的影响和作用效果进行统一;并构建一种权重优化系数,对虚拟惯量进行优化分配。其次,建立光伏六端交流系统的小信号模型,利用根轨迹法为隶属函数中的关键参数选择取值范围。最后,结合时域仿真,验证所提控制策略的正确性和方法的有效性。

1 多VSG惯量控制系统

1.1 系统拓扑

本文以含多混合光储单元的六端交流系统为研究对象,系统拓扑如图1所示。其中, G_1 为发电机组, G_2 为调频机组,BAT为储能模块,PV为光伏模块。该系统含有3个光储VSG单元,正常运行时,光伏发电处在最大功率跟踪状态,当系统出现功率扰动时,3个VSG单元通过控制储能装置来提供虚拟惯量,维持功率平衡。

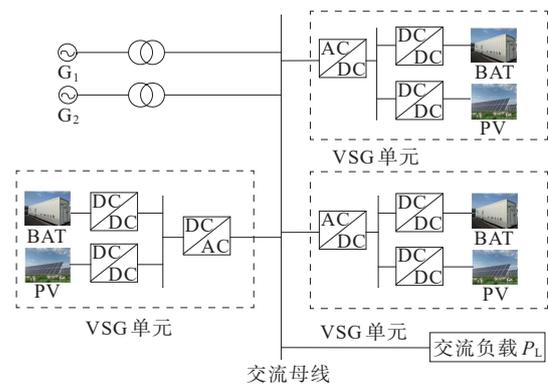


图1 含多VSG单元的六端系统结构

Figure 1 Six terminal system with multiple VSG units

1.2 多VSG单元总惯量控制

已知VSG单元的有功-调频控制方程为

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} [P_{ref} - P_0 - K_d(\omega - \omega_g)] \quad (1)$$

式中, ω 为VSG单元输出电压的角频率; H 为虚拟惯量; P_{ref} 为设定的有功功率值; P_0 为VSG单元输出的有功功率; K_d 为阻尼系数; ω_g 为公共母线电压的角频率。

当系统发生频率扰动时,可根据文献[7]提出的改进灵活虚拟惯量(improved flexible virtual inertial, IFVI)控制计算出需要分配的全部惯量,计算公式为

$$H_{\text{IFVI}} = \begin{cases} \alpha k_1 |df/dt|^{k_2} + H_0, & |df/dt| \geq M \\ H_0, & |df/dt| < M \end{cases} \quad (2)$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^3 S_{Ni} (\delta_{\text{SOC.a}} - \delta_{\text{SOC.i}})}{\sum_{i=1}^3 S_{Ni} (\delta_{\text{SOC.a}} - \delta_{\text{SOC.N}})}, & df/dt > 0 \\ \frac{\sum_{i=1}^3 S_{Ni} (\delta_{\text{SOC.i}} - \delta_{\text{SOC.b}})}{\sum_{i=1}^3 S_{Ni} (\delta_{\text{SOC.N}} - \delta_{\text{SOC.b}})}, & df/dt < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(2)~(3)中, S_{Ni} 为第*i*个单元的储能额定容量; $\delta_{\text{SOC.a}}$ 、 $\delta_{\text{SOC.b}}$ 分别为储能容量的上、下限; $\delta_{\text{SOC.i}}$ 为第*i*个单元的储能实际容量; $\delta_{\text{SOC.N}}$ 为储能的额定容量; α 为考虑储能荷电状态时的调整系数; k_1 、 k_2 为虚拟惯量调整系数; df/dt 为实时检测的频率变化率; H_0 为数值较小的初始惯量; f 为系统频率; M 为频率变化切换的阈值。采用改进的IFVI控制能够实现对系统总惯量的优化调整,多VSG单元的惯量协调分配策略可在IFVI控制基础上进行改进和提高。

2 基于隶属函数的多VSG惯量分配策略

系统总惯量确定之后,需要合理分配至各VSG单元中。由于多VSG单元的惯量分配是一个多目标寻优问题,不同量纲下的影响因素难以统一,且各影响因素在不同时期的作用效果不尽相同,选取固定的权重值不能充分发挥其惯量支撑能力。为解决上述问题,本文提出了基于隶属函数的惯量分配策略。首先,根据指标特性,构造各约束条件在 $[0,1]$ 区间的隶属函数;其次,根据不同指标对系统的影响程度构建一种权重优化系数,实时调整指标在惯量分配中的占比;最后,通过加权再求比例的方法得到各指标需要分配的惯量值。

2.1 隶属函数选取

不同类型的隶属函数对惯量分配有不同的影响。隶属函数从总体上可分为偏大型和偏小型^[25],偏大型是指目标函数随着对应的隶属度的增加而增大,适合于决策值越大满意度越高的情况,偏小型则反之。隶属函数进一步可分为非线性函数和非线性函数,其中非线性函数有不同的曲线类型,

需要根据目标函数预期达到的效果来设定具体的函数类型。

多VSG单元间影响频率稳定性的主要指标为储能装置的荷电状态 S_{OC} 、换流器可调功率 ΔP_N 和储能充放电可调功率 ΔP_I 。本节分别分析3个指标模块的惯量分配原则,并结合指标特性给出相应隶属函数的建立过程。

2.1.1 储能荷电状态(SOC)模块

储能单元在系统中起着能量双向流动的作用,对维持系统稳定性至关重要。根据储能单元荷电状态将系统工作状态划分为

$$S_{\text{OC}} = \begin{cases} a_1 - b_1, & \text{过度放电区} \\ b_1 - c_1, & \text{正常工作区} \\ c_1 - d_1, & \text{过度充电区} \end{cases} \quad (4)$$

储能SOC的惯量分配原则:当系统工作在放电状态时,表明系统需要有功功率的支撑。 S_{OC} 越大,即储能剩余容量越多,越有利于提供更多的有功功率。处在过度充电区的蓄电池剩余容量多,应分配的 H 越大,处在过度放电区的蓄电池剩余容量少,应分配的 H 越小,故应选取偏大型隶属函数。当系统工作在储能充电状态时,表明系统需要释放有功功率来维持稳定。 S_{OC} 值越小,即储能剩余容量越少,越有利于吸收更多的有功功率,处在过度放电区的蓄电池剩余容量少,应分配的 H 越大,处在过度充电区的蓄电池剩余容量多,应分配的 H 越小,因此应选取偏小型隶属函数。

依据上述划分的工作状态和SOC的惯量分配原则,得到SOC模块的隶属函数曲线如图2所示。为了能够更好地体现图2中的变化趋势,本文选取指数函数作为储能SOC指标的隶属函数类型。

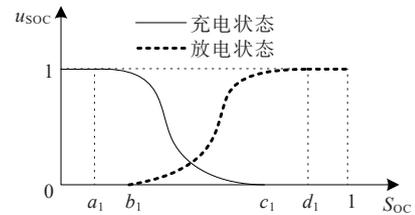


图2 SOC隶属函数曲线

Figure 2 SOC membership function curve

充电状态时的隶属函数为

$$u_{\text{soc}}(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x \leq a_1 \\ e^{-[\frac{(x-a_1)^{m_1}}{\sigma_1}]}, & a_1 \leq x \leq c_1 \\ 0, & c_1 < x \leq 1 \end{cases} \quad (5)$$

放电状态时的隶属函数为

$$u_{\text{soc}}(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq b_1 \\ e^{-\left[\frac{(-x+d_1)^{p_1}}{\sigma_1}\right]}, & b_1 \leq x \leq d_1 \\ 1, & d_1 < x \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

2.1.2 换流器可调功率 ΔP_N

换流器可调节的功率范围应该越大越好,但最大不能超过换流器的额定功率,因此应选取偏大型隶属函数。 ΔP_N 的隶属函数曲线如图 3 所示,本文选取二次函数来描述 ΔP_N 指标隶属函数变化趋势。

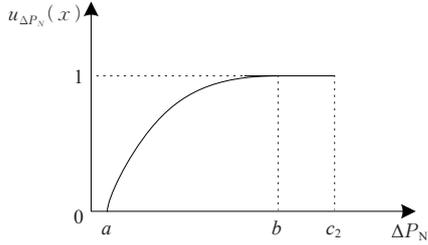


图 3 ΔP_N 隶属函数曲线

Figure 3 ΔP_N membership function curve

隶属函数表达式为

$$u_{\Delta P_N}(x) = \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq a_2 \\ p_2 x^2 + q_2 x + C_2, & a_2 \leq x \leq b_2 \\ 1, & b_2 \leq x \leq c_2 \end{cases} \quad (7)$$

储能充放电可调节功率 ΔP_t 的隶属函数曲线和 ΔP_N 相似,此处不再赘述。

2.2 虚拟惯量分配

根据上述指标对应隶属度,通过加权求和的方式,得到最终各 VSG 单元分配的惯量值。因此在虚拟惯量分配前,需对不同指标进行权重选取。

假设有 n 个 VSG 单元, S_{soc} 、 ΔP_N 、 ΔP_t 3 个指标的权重优化系数表达式为

$$\begin{cases} M_{\text{soc}} = \sum_{i=1}^n |\delta_{\text{soc}_i} - \delta_{\text{soc}_{\text{avg}}}| / \sum_{i=1}^n \delta_{\text{soc}_i} \\ M_{\Delta P_N} = \sum_{i=1}^n |\Delta P_{N_i} - \Delta P_{N_{\text{avg}}}| / \sum_{i=1}^n \Delta P_{N_i} \\ M_{\Delta P_t} = \sum_{i=1}^n |\Delta P_{t_i} - \Delta P_{t_{\text{avg}}}| / \sum_{i=1}^n \Delta P_{t_i} \end{cases} \quad (8)$$

式中, M_{soc} 、 $M_{\Delta P_N}$ 、 $M_{\Delta P_t}$ 分别为荷电状态、换流器可调功率、储能充放电可调节功率 3 个指标的权重系数; δ_{soc_i} 、 ΔP_{N_i} 、 ΔP_{t_i} 分别为第 i 个 VSG 单元下的 3 个指标的已知量; $\delta_{\text{soc}_{\text{avg}}}$ 、 $\Delta P_{N_{\text{avg}}}$ 、 $\Delta P_{t_{\text{avg}}}$ 分别为 n 个 VSG 单元下的 3 个指标平均值。

通过对 3 个指标进行加权得到第 i 个 VSG 单元对应的占比 k_i ,进而得到对应分配的惯量, k_i 、 h_i 表达式分别为

$$\begin{cases} k_1 = \frac{M_{\text{soc}} u_{\text{soc}1} + M_{\Delta P_N} u_{\Delta P_{N1}} + M_{\Delta P_t} u_{\Delta P_{t1}}}{M_{\text{soc}} \sum_{i=1}^n u_{\text{soc}_i} + M_{\Delta P_N} \sum_{i=1}^n u_{\Delta P_{N_i}} + M_{\Delta P_t} \sum_{i=1}^n u_{\Delta P_{t_i}}} \\ k_2 = \frac{M_{\text{soc}} u_{\text{soc}2} + M_{\Delta P_N} u_{\Delta P_{N2}} + M_{\Delta P_t} u_{\Delta P_{t2}}}{M_{\text{soc}} \sum_{i=1}^n u_{\text{soc}_i} + M_{\Delta P_N} \sum_{i=1}^n u_{\Delta P_{N_i}} + M_{\Delta P_t} \sum_{i=1}^n u_{\Delta P_{t_i}}} \\ \dots \\ k_n = \frac{M_{\text{soc}} u_{\text{soc}n} + M_{\Delta P_N} u_{\Delta P_{Nn}} + M_{\Delta P_t} u_{\Delta P_{tn}}}{M_{\text{soc}} \sum_{i=1}^n u_{\text{soc}_i} + M_{\Delta P_N} \sum_{i=1}^n u_{\Delta P_{N_i}} + M_{\Delta P_t} \sum_{i=1}^n u_{\Delta P_{t_i}}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} h_1 = k_1 H \\ h_2 = k_2 H \\ \dots \\ h_n = k_n H \end{cases} \quad (10)$$

式(9)、(10)中, u_{soc_i} 、 $u_{\Delta P_{N_i}}$ 、 $u_{\Delta P_{t_i}}$ 为第 i 个 VSG 单元中 3 个指标对应的隶属度; k_1 、 k_2 、 \dots 、 k_n 分别为 n 个 VSG 单元在总惯量中所占比例; h_1 、 h_2 、 \dots 、 h_n 分别为 n 个 VSG 单元分配的惯量; H 为总惯量。

综上所述,基于隶属函数的惯量分配策略步骤如下:

- 1) 利用改进的 IFVI 控制得到系统所需的总惯量;
- 2) 根据 δ_{soc_i} 、 ΔP_{N_i} 、 ΔP_{t_i} 3 个指标量要达到的惯量分配预期效果确立目标函数,分析各指标对惯量分配效果的影响,构造对应的隶属函数;
- 3) 通过构建的权重优化系数计算每个指标对应的权重值,并运用加权求比例的方法得到各 VSG 单元对应分配的惯量。

总控制流程如图 4 所示,其中 f_n 为系统额定频率。

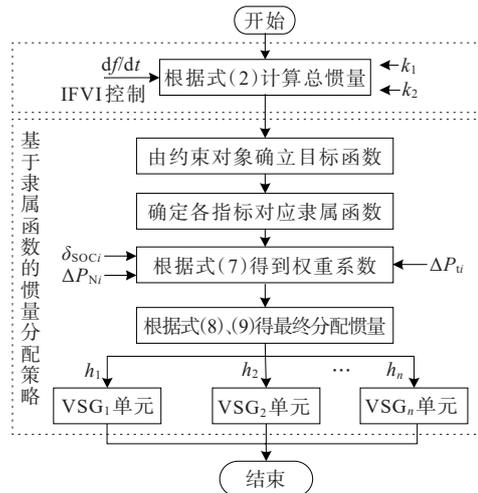


图 4 基于隶属函数惯量分配策略流程

Figure 4 Flow chart of inertia allocation strategy based on membership function

3 隶属函数关键参数的确定方法

为充分发挥虚拟惯量灵活可变的特点,可通过改变隶属函数中的控制参数来调整惯量分配曲线。但多VSG系统结构复杂,控制参数选取不当会影响惯量的最终分配效果,进而影响系统的稳定。因此,为提高参数选取的准确性,本文对图1所示的六端交流系统建立小信号模型,利用根轨迹法分析文2.2建立的隶属函数中关键参数 m_1 、 σ_1 以及 p_2 的变化对系统稳定性的影响,确定参数取值范围。

图1中,由于发电机组 G_1 的有功输出和交流负载 P_L 在系统运行中能够保持恒定,可以忽略其对系统稳定性的影响,故本节建立3个VSG单元和调频机组 G_2 的小信号模型。

3.1 VSG单元的小信号模型

各VSG单元的模型建立过程相似,现以光储VSG $_1$ 单元为例阐述其小信号模型的建立过程。将VSG $_1$ 单元的控制结构中DC/DC模块进行简化,等效电路如图5所示,功率环控制如图6所示。

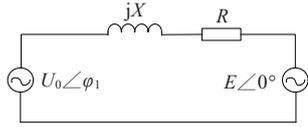


图5 VSG $_1$ 单元等效电路

Figure 5 Equivalent circuit diagram of VSG1 unit

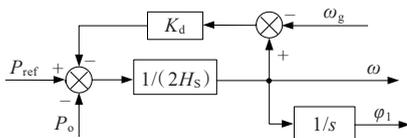


图6 VSG $_1$ 单元有功-频率控制

Figure 6 Active frequency control block diagram of VSG $_1$ unit

图5中, U_0 、 φ_1 分别为逆变器输出的电压幅值和相角, R 、 X 分别为输电线路的电阻和电抗, E 为电网侧交流电压有效值。逆变器输出的实际功率为

$$P_o = \frac{RU_0^2 - RU_0E \cos \varphi_1 + XU_0E \cos \varphi_1}{R^2 + X^2} \quad (11)$$

对式(12)进行线性化:

$$\begin{cases} \Delta P_o = M_0 \Delta \varphi_1 \\ M_0 = \frac{-RU_0E \sin \varphi_{10} + XU_0E \cos \varphi_{10}}{R^2 + X^2} \end{cases} \quad (12)$$

其中, φ_{10} 为 φ_1 的稳态值。将文1.2中的式(1)线性化

并联立式(12),可得VSG $_1$ 单元的小信号模型:

$$\begin{cases} s \Delta \varphi_1' = -\frac{K_d}{2H} \Delta \varphi_1' + \frac{M_0}{2H} \Delta \varphi_1 \\ \Delta \varphi_1 = \omega \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)改写成相量形式为

$$\begin{cases} \Delta x_{b1}' = A_{b1} \Delta x_{b1} \\ \Delta x_{b1} = [\Delta \varphi_1' \quad \Delta \varphi_1]^T \end{cases} \quad (14)$$

$$A_{b1} = \begin{bmatrix} -\frac{K_d}{2H_1} & -\frac{M_0}{2H_1} \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.2 调频机组的小信号模型

调频机组(frequency modulation, FM) G_2 的等效模型如图7所示,主要包括控制系统、原动机和调速器3个模块,其中控制系统和原动机模块的控制框图分别如图8、9所示。

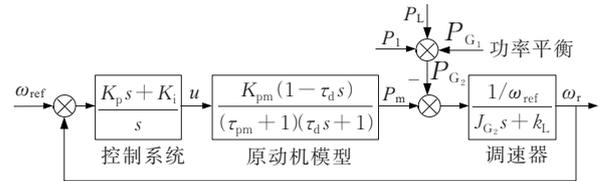


图7 调频机组 G_2 模型

Figure 7 Model of FM unit G_2

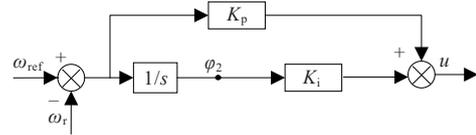


图8 调频机组 G_2 中PI控制模型

Figure 8 PI control model of FM unit G_2

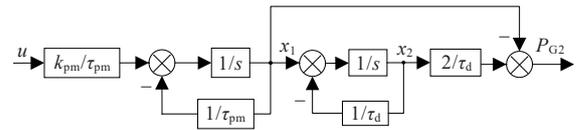


图9 调频机组 G_2 中原动机控制模型

Figure 9 G_2 prime mover control model of FM unit

根据图7~9推导出发电机 G_2 的状态方程为

$$\begin{cases} \Delta \varphi_2 = \omega_{ref} - \omega_r \\ \Delta x_1 = -\frac{1}{\tau_{pm}} x_1 + \frac{k_{pm}}{\tau_{pm}} [K_p(\omega_{ref} - \omega_r) + K_i \varphi_2] \\ \Delta x_2 = -\frac{1}{\tau_d} x_2 + x_1 \\ J_{G2} \Delta \omega_r = \frac{P_m - (P_L - P_1 - P_{G1})}{\omega_{ref}} - k_l \omega_r \end{cases} \quad (16)$$

式中, φ_2 为发电机 G_2 输出电压与母线电压相角差; x_1, x_2 为图 9 中虚设的状态变量; τ_{pm} 为燃油喷射系统时间常数; k_{pm} 为柴油发动机的增益与燃油喷射系统的增益之和; K_p 为 PI 控制器比例增益; K_i 为积分增益; τ_d 为柴油发动机停滞时间的一半; P_1, P_{G1} 为光储 VSG 单元、发电机单元 G_1 输入到交流母线的有功功率, P_m 相当于发电机的输出功率 P_{G1} ; J_{G2} 为发电机 G_2 的转动惯量; k_L 为发电机损耗系数。

将式(16)的状态方程线性化,得到调频发电机 G_2 的小信号模型:

$$\begin{cases} \Delta x'_{G2} = A_{G2} \Delta x_{G2} + B_1 \Delta x_b \\ \Delta x_{G2} = [\Delta \varphi'_2 \ \Delta \varphi_2 \ \Delta x_3 \ \Delta x_4]^T \end{cases} \quad (17)$$

$$A_{G2} = \begin{bmatrix} -\frac{k_L}{J_{G2}} & 0 & \frac{1}{J_{G2} \omega_{ref}} & -\frac{2}{\tau_d J_{G2} \omega_{ref}} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ k_{pm} K_p & k_{pm} K_i & -\frac{1}{\tau_{pm}} & 0 \\ \tau_{pm} & \tau_{pm} & \tau_{pm} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{\tau_d} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{M_0}{J \omega_{ref}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

联立上述各模块的小信号模型,得到整体六端系统小信号模型为

$$\begin{cases} \Delta x_{sys} = [\Delta x_b \ \Delta x_{G2}]^T \\ \Delta x'_{sys} = A_{sys} \Delta x_{sys} \end{cases} \quad (20)$$

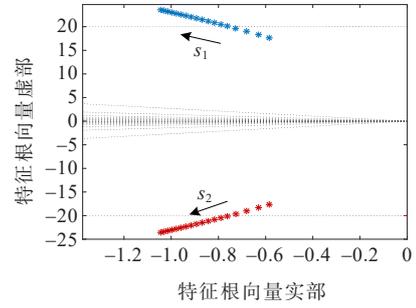
$$A_{sys} = \begin{bmatrix} A_{b1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_{b2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{b3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_{G2} \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中,整体小信号模型一共有 10 个变量。

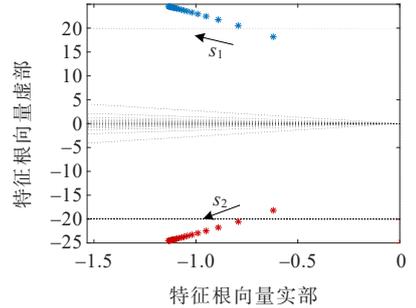
3.3 隶属函数中关键参数的稳定性分析

基于上述小信号模型,采用根轨迹法,对指标的隶属函数参数进行稳定性分析,如图 10、11 所示。一共有 10 个特征根,图 10、11 中只显示主导根 s_1, s_2 的变化,非主导根基本不变,不改变系统的稳定性。

首先对储能 SOC 模块的 m_1 参数进行分析,图 10(a)中,设定参数 $\sigma_1=0.5$ 不变,观察参数 m_1 变化对系统稳定性影响。随着 m_1 从 0 到 6 逐渐增大, s_1, s_2 根轨迹逐渐远离虚轴,系统稳定性增强。

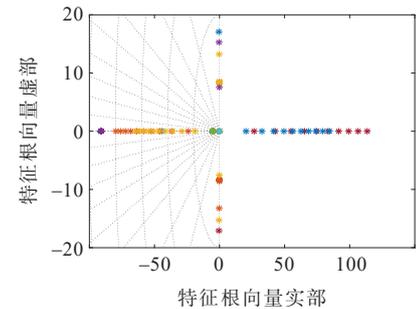


(a) m_1 从 0 到 6 根轨迹曲线

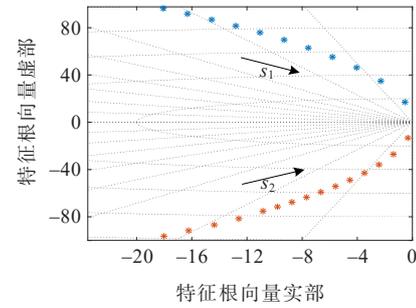


(b) σ_1 从 0 到 3 根轨迹曲线

图 10 储能 SOC 隶属函数下的根轨迹运动曲线
Figure 10 Root locus motion curve under SOC membership function of energy storage



(a) p_2 从 0 到 10



(b) p_2 从 0 到 -10

图 11 ΔP_N 隶属函数下的根轨迹运动曲线
Figure 11 Root locus motion curve of converter with ΔP_N membership function

其次,对储能 SOC 模块的 σ_1 参数进行分析,如图 10(b),设定控制参数 $m_1=5$,观察 σ_1 从 0 到 3 过程中根轨迹变化趋势。与图 10(a)中变化轨迹相似,

随着 σ_1 的增加,系统稳定性逐渐增强。综上,参数 m_1 和 σ_1 增大均会使得系统的稳定性增强。

为了进一步确定参数的取值范围,需要对图2进行分析。根据图2的曲线走势可以得到储能SOC下的隶属函数应满足以下约束。

1) 充电状态。

$$\begin{cases} x = a_1, u_{\text{soc}} = 1 \\ x = c_1, u_{\text{soc}} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (22)$$

2) 放电状态。

$$\begin{cases} x = d_1, u_{\text{soc}} = 1 \\ x = b_1, u_{\text{soc}} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (23)$$

综合根轨迹分析结果和式(22)、(23)的约束条件,经过多次试验,得到参数 m_1 和 σ_1 的最优取值范围分别为 $[3, 6], [0.01, 0.8]$ 。

图11为换流器可调功率 ΔP_N 隶属函数下的根轨迹变化曲线。图11(a)为参数 p_2 从0到10的根轨迹曲线,可以看出有特征根位于复平面右侧,系统不稳定。图11(b)为参数 p_2 从0到10的根轨迹曲线,特征根均在复平面左半平面,且随着 p_2 减小,根轨迹逐渐靠近虚轴,系统稳定性逐渐减弱。上述可以看出,只有在参数 $p_2 < 0$ 时才能够保证系统稳定,为了进一步确定参数取值范围,根据图3的大致曲线得到 ΔP_N 下的隶属函数,应满足以下约束条件:

$$\begin{cases} x = 1, u_{\Delta P_N} = 0 \\ x = 5, u_{\Delta P_N} = 1 \\ -\frac{q_2}{2p_2} \geq 5 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q_2 = -6p_2 + \frac{1}{4} \\ C_2 = 5p_2 - \frac{1}{4} \\ -\frac{q_2}{2p_2} \geq 5 \end{cases} \quad (24)$$

将 $p_2 < 0$ 代入式(24)并化简得到参数 p_2 、 q_2 、 C_2 的取值范围为

$$\begin{cases} p_2 \in \left[-\frac{1}{(b_2 - a_2)^2}, 0 \right) \\ q_2 \in \left[\frac{1}{b_2 - a_2}, \frac{2b_2}{(b_2 - a_2)^2} \right] \\ C_2 \in \left[\frac{a_2^3 - a_2^2 b_2 - 2a_2 b_2^2}{(b_2^2 - a_2^2)(b_2 - a_2)}, \frac{a_2}{a_2 - b_2} \right] \end{cases} \quad (25)$$

由式(26)可知,当参数 a_2 和 b_2 确定时,可以得到 p_2 、 q_2 、 C_2 的取值范围。储能充放电可调节功率 ΔP 隶属函数下的根轨迹变化曲线与 ΔP_N 基本相同,此处不再赘述。

4 算例分析

为验证所提控制策略的有效性,在MATLAB/Simulink中搭建光储多VSG单元交流系统模型。验证本文所提基于隶属函数算法的有效性,仿真分别从储能荷电状态SOC、换流器额定功率 ΔP_N 2个指标出发,与模糊控制算法^[21]和TOPSIS算法^[24]进行对比验证。由于储能充放电可调功率 ΔP_i 与换流器额定功率 ΔP_N 的仿真结果相似,因此本文不再对其展开。

为方便对比,仿真均设置在20s时负荷突增5kW,太阳能光伏发电系统的辐照强度恒为1000W/m²。仿真的具体参数如表1所示,其中 U_d 为各VSG单元中直流母线电压大小, U_{BAT} 为蓄电池的额定电压。所选的隶属函数关键参数如下: $m_1=4$, $\delta_1=0.03$, $p_2=-1/16$, $q_2=5/8$, $C_2=-9/16$,储能充放电可调功率 ΔP_i 隶属函数与 ΔP_N 一致。

表1 六端交流系统参数

Table 1 Parameters of six-terminal AC system

$R/$ Ω	$L/$ mH	$S_{N1}/$ (A·h)	$S_{N2}/$ (A·h)	$S_{N3}/$ (A·h)	$U_d/$ V	$U_{\text{BAT}}/$ V	H_0	K_p
0.1	30	4	4	5	500	270	0.2	405
K_d	$\delta_{\text{soc.a}}$	$\delta_{\text{soc.N}}$	$\delta_{\text{soc.b}}$	k_{pm}	τ_{pm}	τ_d	K_i	J_{G2}
12	90%	50%	10%	0.2	0.2	0.111	363.4	0.66
k_L	$\omega_{\text{ref}}/$ (rad·s ⁻¹)	k_1, k_2	$a_1, d_1/$ %	$b_1/$ %	$c_1/$ %	$a_2/$ kW	$b_2/$ kW	$c_2/$ kW
0.11	314	30, 0.5	0.1, 0.9	0.25	0.75	1	5	7

4.1 储能SOC指标

储能荷电状态的大小影响着系统调频能力,是惯量分配的重要指标。为突出本文算法在不同 δ_{SOC} 下惯量分配的优化效果,仿真从惯量变化、荷电状态变化、有功功率变化以及系统频率变化4个方面,与模糊控制算法、TOPSIS算法进行对比验证。仿真中设置的3个VSG单元的 δ_{SOC} 分别为 $\delta_{\text{SOC.1}}=80\%$, $\delta_{\text{SOC.2}}=50\%$, $\delta_{\text{SOC.3}}=20\%$,各VSG单元的其他2项指标取相近值。

图12为本文算法下3个VSG单元分配的惯量曲线,可以看出在负荷突增需要储能放电时, $\delta_{\text{SOC.1}}$ 最大,表示剩余可用电量最大,故分配给VSG₁的惯量 H_1 最多; $\delta_{\text{SOC.3}}$ 最小,表示剩余可用电量最少,分配给VSG₃单元的 H_3 最少。

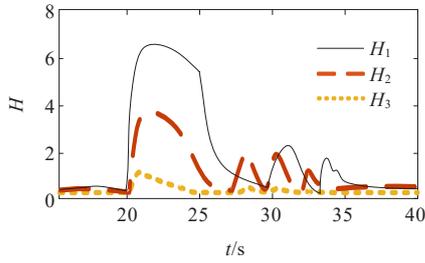
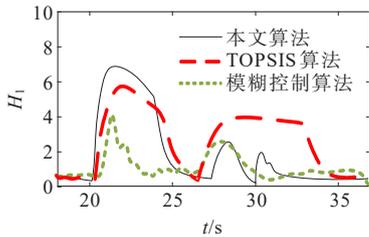


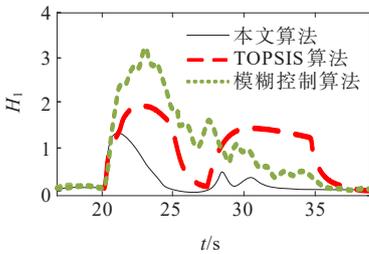
图 12 3个 VSG 单元的惯量曲线
Figure 12 Inertia curve of three elements

4.1.1.1 惯量变化

当 δ_{SOC} 值为 80% 和 20% 时,本文算法和模糊控制算法、TOPSIS 算法的 VSG₁ 惯量分配对比如图 13 所示。可知,在 $\delta_{SOC,1}=80\%$ 时,表明 VSG₁ 单元能够释放的有功功率多,因此应分配的惯量相较于 $\delta_{SOC,2}$ 和 $\delta_{SOC,3}$ 多,而模糊控制算法和 TOPSIS 算法分配的惯量较本文算法少;同理,在 $\delta_{SOC,3}=20\%$ 时,表明该单元储能剩余容量少,不能够提供足够的有功功率,因此应分配的惯量较 $\delta_{SOC,1}$ 和 $\delta_{SOC,2}$ 少,而模糊控制算法和 TOPSIS 算法分配的惯量较本文算法多,这表明模糊控制算法和 TOPSIS 算法相较于本文算法没有起到合理分配惯量的作用。



(a) $\delta_{SOC,1}=80\%$ 惯量对比



(b) $\delta_{SOC,3}=20\%$ 惯量对比

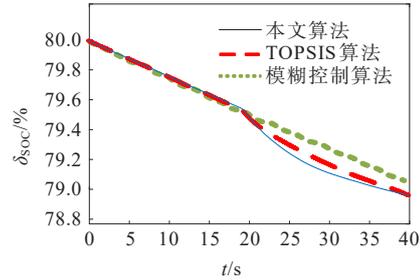
图 13 惯量分配效果对比

Figure 13 Effect drawing of inertia distribution

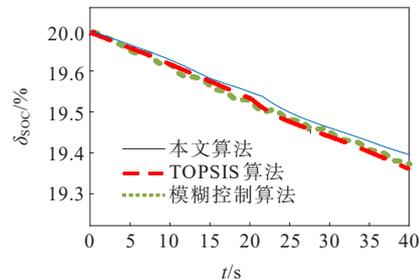
4.1.1.2 荷电状态变化

当 δ_{SOC} 为 80% 和 20% 时,隶属函数算法与模糊控制算法、TOPSIS 算法的 VSG₁ 荷电状态变化对比如图 14 所示。图 14(a) 中,在 20 s 后本文算法下的 SOC 下降幅度较另 2 种算法的下降幅度大,而图 14(b) 中的 SOC 下降幅度较另 2 种算法的下降幅度小。

这表明本文算法尽可能地让“能力”大的储能元件出力更多,故下降得更快,让“能力”小的储能元件出力更少,故下降得较慢,体现了算法分配的合理性。



(a) $\delta_{SOC,1}=80\%$ 时 δ_{SOC} 对比



(b) $\delta_{SOC,3}=20\%$ 时 δ_{SOC} 对比

图 14 储能荷电容量效果

Figure 14 Effect drawing of energy storage charge capacity

4.1.1.3 有功功率变化

图 15 为换流器额定容量 ΔP_N 均为 5 kW 时,上述 3 种算法下的 P_1 有功功率变化对比。可知,在负荷突变后,本文算法控制的有功功率曲线变化幅度较小,且恢复速度较快。这说明在负荷突变时,本文算法能够在一定程度上抑制功率波动并快速恢复至正常水平,提高系统稳定性。

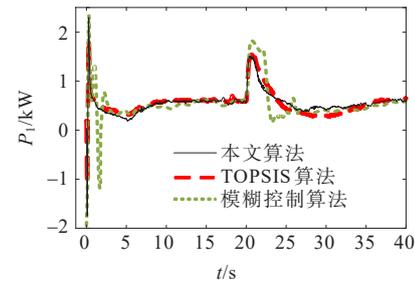


图 15 有功功率效果对比

Figure 15 Effect drawing of active power

4.1.1.4 系统频率变化

图 16 为上述 3 种算法下的系统频率对比。可知,本文算法控制下的频率下降幅度较另 2 种算法小,表明本文算法能够在功率扰动时提供更多的惯性支撑,维持频率稳定。

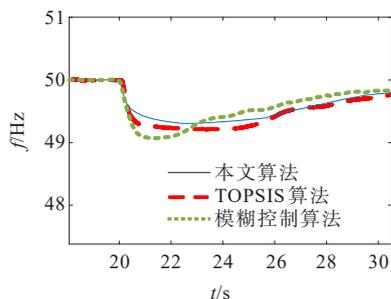


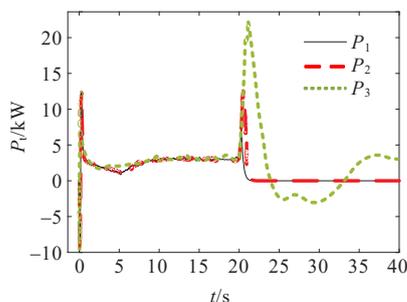
图 16 系统频率效果对比

Figure 16 Effect drawing of system frequency

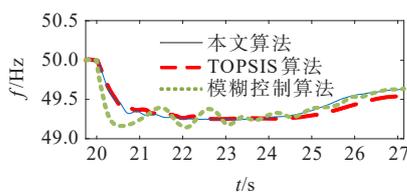
4.2 换流器额定功率指标

换流器额定功率也是多VSG单元惯量分配的重要指标,超过额定功率的VSG单元将退出运行,这会造成系统频率波动。本节验证本文算法在部分VSG单元退出运行后的频率调节能力。仿真中设置3个换流器的额定功率分别为 $P_{N1}=1.5\text{ kW}$, $P_{N2}=2\text{ kW}$, $P_{N3}=5\text{ kW}$,并设置断路器开断来模拟变流器超出额定功率时的场景。系统在20s时突增负荷5kW,当功率超出所设置的额定功率时,触发断路器断开,模拟变流器过电流停机。

图17(a)为3个VSG单元在不同换流器额定功率差异下的有功功率曲线。可知,20s后 P_1 达到额定容量并迅速切机,随后 P_2 也达到额定功率退出运行, P_3 承担剩下所有功率运行。图17(b)为本文算法与模糊控制算法、TOPSIS算法下的频率变化对比。



(a) 3个单元功率曲线



(b) 2种算法频率对比

图 17 ΔP_N 差异下的惯量分配优化效果Figure 17 Optimization effect of inertia distribution under ΔP_N difference

比。可知,本文算法在负荷突变时频率的波动程度较模糊控制算法小,频率恢复速度较TOPSIS算法快。这表明在部分换流器发生过电流停机时,本文算法相较于另2种算法能够更好地抑制频率的下降,提高了系统稳定性。

5 结语

1) 针对多VSG单元惯量分配时不同指标难以统一的问题,提出隶属函数法对惯量进行协调分配。通过构造隶属函数,将各指标对惯量的影响特性统一到同一量纲、相同数量级下,克服了惯量分配过程中多个目标转换困难的问题。并构建一种权重优化系数,能够实时根据指标量变化调整权重大小,避免了传统方法在选取权重时存在的较强主观性。

2) 针对构建的各指标隶属函数中参数选取问题,建立光储六端交流小信号模型,利用根轨迹法分析参数变化对系统稳定性的影响,为参数选定取值范围。

3) 搭建含多VSG单元的光储六端交流系统仿真模型,将本文算法与模糊控制算法和TOPSIS算法进行对比。结果表明:本文算法能够在合理分配惯量的基础上,抑制功率和频率的波动,使系统较快恢复至正常状态。

参考文献:

- [1] 刘灏,商峻,毕天姝,等.基于实测数据的电网频率信号特征分析与提取方法[J].电力系统自动化,2023,47(10):135-144.
LIU Hao, SHANG Jun, BI Tianshu, et al. Feature analysis and extraction method of power grid frequency signal based on measured data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 135-144.
- [2] 朱介北,王云逸,仲悟之,等.基于超级电容的新能源惯量—阻尼—电抗综合模拟控制方案[J].电力系统保护与控制,2023,51(19):135-143.
ZHU Jiebei, WANG Yunyi, ZHONG Wuzhi, et al. Composite inertia-damping-impedance emulation control scheme for renewable energy sources based on supercapacitor[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 135-143.
- [3] 张克勇,王冠瑞,耿新,等.含高比例光—储单元的主动配电网并网功率分布式协同控制策略[J].电力科学与

- 技术学报,2022,37(2):147-155.
- ZHANG Keyong, WANG Guanrui, GENG Xin, et al. Distributed cooperative control strategy for grid-connected power in ADN with high proportion of PV-ESS units[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(2):147-155.
- [4] 于彦雪,马慧敏,陈晓光,等.弱电网下基于准静态模型的混合控制微电网逆变器同步稳定性研究[J].电工技术学报,2022,37(1):152-164.
- YU Yanxue, MA Huimin, CHEN Xiaoguang, et al. Synchronous stability research of inverters in hybrid microgrid based on the quasi-static models under weak grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,37(1):152-164.
- [5] 禹海峰,马俊杰,周年光,等.面向储能惯量支撑能力评估的新型电力系统惯性系数辨识方法[J].智慧电力,2023,51(5):1-7+72.
- YU Haifeng, MA Junjie, ZHOU Nianguang, et al. New power system inertia coefficient identification method for energy storage inertia support capability evaluation [J]. Smart Power,2023,51(5):1-7+72.
- [6] 张军六,李佳朋,唐震,等.基于本地测量的高比例新能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):50-60.
- ZHANG Junliu, LI Jiapeng, TANG Zhen, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(3): 50-60.
- [7] 杨萍,陈卓,罗婷,等.基于VSG的光伏发电与混合储能的控制方法[J].电网与清洁能源,2023,39(2):83-91+113.
- YANG Ping, CHEN Zhuo, LUO Ting, et al. A control method of photovoltaic power generation and hybrid energy storage based on VSG[J]. Power System and Clean Energy,2023,39(2):83-91+113.
- [8] 赵炳洋,赵波,胡娟,等.考虑VSG构网储能暂态与稳态优化的自适应策略[J].高压电器,2023,59(7):39-47.
- ZHAO Bingyang, ZHAO Bo, HU Juan, et al. Adaptive strategy considering transient and steady-state optimization of VSG grid-forming energy storage[J]. High Voltage Apparatus, 2023,59(7):39-47.
- [9] 郑云平,亚夏尔·吐尔洪.基于VSG技术的风—光—储系统自适应调频控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):12-19.
- ZHENG Yunping, YAXAR·Turgun. Research on Adaptive Frequency Modulation Control Strategy of Wind-PV-storage System Based on VSG Technology[J]. High Voltage Apparatus, 2023,59(7):12-19.
- [10] 高子轩,赵晋斌,杨旭红,等.基于RBF的VSG转动惯量和阻尼系数自适应控制策略[J].电力建设,2022,43(9):132-139.
- GAO Zixuan, ZHAO Jinbin, YANG Xuhong, et al. RBF-based adaptive control strategy of rotational inertia and damping coefficient for VSG[J]. Electric Power Construction,2022,43(9):132-139.
- [11] 陈来军,王任,郑天文,等.基于参数自适应调节的虚拟同步发电机暂态响应优化控制[J].中国电机工程学报,2016,36(21):5724-5731+6014.
- CHEN Laijun, WANG Ren, ZHENG Tianwen, et al. Optimal control of transient response of virtual synchronous generator based on adaptive parameter adjustment[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5724-5731+6014.
- [12] 项颂,苏鹏,吴坚,等.基于多源储能协同的交直流送端系统惯量优化控制模型[J].中国电力,2023,56(4):68-76.
- XIANG Song, SU Peng, WU Jian, et al. Inertia optimization control model of AC/DC sending-end system based on multi-source energy storage coordination[J]. Electric Power,2023,56(4):68-76.
- [13] GUAN M Y, PAN W L, ZHANG J, et al. Synchronous generator emulation control strategy for voltage source converter (VSC) stations[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(6):3093-3101.
- [14] 王绪伟,苏建徽,秦骏达,等.基于补偿二乘法的VSG惯性辨识问题及解决方法[J].电测与仪表,2023,60(7):52-57.
- WANG Xuwei, SU Jianhui, QIN Junda, et al. Problems and solutions of VSG inertial identification based on compensation least squares[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2023,60(7):52-57.
- [15] 姚玉永,张立臣,穆勇,等.基于自适应虚拟电机策略的微电网储能控制研究[J].供用电,2022,39(7):84-92.
- YAO Yuyong, ZHANG Lichen, MU Yong, et al. Research on energy storage control in microgrid based on adaptive virtual machine strategy[J]. Distribution & Utilization, 2022,39(7):84-92.
- [16] 方仍存,雷何,杨东俊,等.变流器辅助换流的柔性切换开关拓扑与控制[J].电力工程技术,2023,42(1):43-49+123.
- FANG Rengcun, LEI He, YANG Dongjun, et al. A converter-assisting flexible switch topology and its control strategy[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(1):43-49+123.
- [17] 范家铭,夏向阳.光伏发电并网的有功功率控制策略[J].

- 电力科学与技术学报,2019,34(4):123-128+147.
- FAN Jiaming, XIA Xiangyang. Active power control strategy for grid connected photovoltaic power generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(4):123-128+147.
- [18] 秦本双,徐永海.多虚拟同步机并网系统功频振荡模态分析[J].中国电机工程学报,2021,41(19):6570-6581.
- QIN Benshuang, XU Yonghai. Modal analysis of multi-virtual synchronous machine grid-connected power-frequency oscillation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19):6570-6581.
- [19] 李建林,丁子洋,刘海涛,等.构网型储能变流器及控制策略研究[J].发电技术,2022,43(5):679-686.
- LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 679-686.
- [20] 艾松波,唐欣,王红亚.光伏电站附加阻尼控制器及控制参数优化设计[J].电力科学与技术学报,2020,35(6):21-27.
- AI Songbo, TANG Xin, WANG Hongya. Optimal design of additional damping controller and control parameters for photovoltaic power station[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2020,35(6):21-27.
- [21] 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.
- [22] 张波,颜湘武,黄毅斌,等.虚拟同步机多机并联稳定控制及其惯量匹配方法[J].电工技术学报,2017,32(10):42-52.
- ZHANG Bo, YAN Xiangwu, HUANG Yibin, et al. Stability control and inertia matching method of multi-parallel virtual synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(10):42-52.
- [23] 胡超,张兴,石荣亮,等.独立微电网中基于自适应权重系数的VSG协调控制策略[J].中国电机工程学报,2017,37(2):516-525.
- HU Chao, ZHANG Xing, SHI Rongliang, et al. VSG coordinated control based on adaptive weight factors in islanded microgrids[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(2):516-525.
- [24] 孟建辉,赵彭辉,王毅,等.基于TOPSIS算法的多VSG单元协同控制策略[J].电力自动化设备,2020,40(9):72-82.
- MENG Jianhui, ZHAO Penghui, WANG Yi, et al. Collaborative control strategy of multiple VSG units based on TOPSIS algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(9):72-82.
- [25] 赵嘉玉,韩肖清,梁琛,等.隶属函数与欧氏距离相结合的配电网优化重构[J].电网技术,2017,41(11):3624-3631.
- ZHAO Jiayu, HAN Xiaoqing, LIANG Chen, et al. Optimal distribution network reconfiguration combining fuzzy membership with euclidean distance[J]. Power System Technology,2017,41(11):3624-3631.