

极高比例分布式光伏配电网频率及惯性主动支撑 变论域模糊自适应控制

文贤旭¹, 何明君¹, 周 科¹, 李晓江², 唐 乾²

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵阳 550002; 2. 贵州电网有限责任公司六盘水供电局, 六盘水 553000)

摘 要: 提出一种变论域模糊自适应控制方法, 考虑分布式光伏出力特性及频率时域特征, 实现其主动提供系统频率偏差抑制和惯性支撑。该方法包含多维模糊规则, 涵盖太阳辐照度、系统频率偏差及其变化率, 通过自适应调整功率输出提升系统频率响应特性。仿真结果表明, 该方法能有效提高极高比例光伏接入的电力系统的暂态和稳态频率特性, 增强系统安全稳定性。

关键词: 光伏发电; 配电网; 自适应控制; 模糊控制; 模糊逻辑; 频率响应; 分布式发电; 包括应控制

中图分类号: TM732

文献标志码: A

0 引 言

随着“双碳”战略的推进, 清洁低碳的光伏发电技术迅速发展, 在电力系统中的渗透率不断提高^[1-2], 预计未来以风电、光伏为主体的新能源发电量将占负荷的 1/2 以上^[3]。然而, 光伏发电具有波动性和不确定性, 导致电力系统功率不平衡, 进而引起频率波动。此外, 光伏发电通过并网逆变器接入系统, 缺乏传统同步机的转子, 其等效惯性较低, 增加了频率控制的难度。因此, 极高比例的光伏并网会显著降低电力系统的频率响应能力, 对系统的安全稳定运行构成挑战^[4]。光伏发电通常以集中式和分布式两种方式接入电力系统。集中式光伏大多接入高电压等级的输电网, 其装机容量大, 便于调度中心统一协调控制, 可协助电力系统调节频率; 分布式光伏则主要接入低压配电网, 具有投资成本低、环境污染小、可靠性高等优点, 但由于单机容量小、布局分散, 无法直接采用集中式光伏的控制策略进行规划和调度。传统上, 分布式光伏通常采用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式发电, 不参与电力系统的频率调节^[5], 但随着分布式光伏在配电网中的渗透率大幅提升而具备主动参与频率调整的潜力, 因此亟需研究分布式光伏主动支撑系统频率控制方法以实现分布式光伏参与电力系统调频^[6]。

目前, 国内外学者提出一系列分布式光伏控制策略, 主要分为并联储能装置和光伏减载备用两大类^[7]。尽管并联储能装置效果显著, 但经济性较差^[8], 实际应用受限。光伏减载备用方法主要包括虚拟惯量控制^[9-10]、有功功率-频率下垂控制^[11-12]、虚拟同步机控制^[13-15]等, 通过减载调节输出功率可实

现频率偏差抑制和惯性支撑。然而, 这些方法通常未考虑太阳辐照度等外部因素, 仅在备用充足时才能运行, 且频率支撑的灵活性有限。

为解决上述问题, 部分学者提出基于模糊控制的频率支撑方法。一些研究以太阳辐照度作为模糊控制的输入参数, 结合系统频率偏差调整光伏出力, 以适应光照条件的变化^[16]。针对光伏发电惯性不足的问题, 部分研究将虚拟惯性引入模糊控制, 通过模糊规则实时调整光伏输出, 以实现频率的灵活支撑^[17]。然而, 由于模糊控制器论域设计的刚性特性, 其在复杂工况下存在控制精度不足和适应性较差的问题, 可能导致系统振荡, 难以同时兼顾暂态和稳态性能。为此, 有研究提出通过动态调整模糊控制器论域范围的方法, 使其在频率偏差较小时具备更高的控制精度, 而在频率偏差较大时增强控制灵活性, 从而显著提升系统的综合性能^[18]。

因此, 本文针对极高比例光伏接入对配电网频率响应能力带来的挑战, 提出一种兼顾光伏发电波动性、频率偏差抑制和惯性支撑的模糊自适应控制方法, 该方法可在不同光照条件及频率波动下为电力系统提供主动频率调节与惯性支撑能力。设计一种基于变论域的模糊自适应控制方法, 通过实时调整控制系统的论域范围提高模糊控制精度, 从而更有效地应对复杂工况下的系统频率波动。当采用上述控制方法的分布式光伏并联储能装置时, 进一步提高极高比例光伏接入条件下电力系统的安全性和稳定性。

收稿日期: 2025-02-06

基金项目: 贵州省科技创新人才团队(黔科合平台人才-CXTD [2022] 008); 南方电网科技项目(GZKJXM2022258)

通信作者: 文贤旭(1972—), 男, 学士、正高级工程师, 主要从事储能及新能源方面的研究。13985410224@139.com

1 分布式光伏主动支撑系统频率的模型架构

1.1 分布式光伏双极式并网模型

本文研究背景示意图如图 1 所示。双极式并网系统结构如图 2 所示,包括分布式光伏、DC/DC 变换器、DC/AC 逆变器、变压器和配电网,其中直流侧均加入滤波电容 C_{dc}^1 和 C_{dc}^2 ,光伏输出侧则需加入滤波电感 L_f 和电容 C_f ,平抑功率波动。双极式系统包括两级功率变换器,第一级 DC/DC 环节经过 Boost 升压电路实现最大功率追踪控制和直流电压变换,第二级 DC/AC 环节实现逆变控制和并网控制等控制功能^[19]。

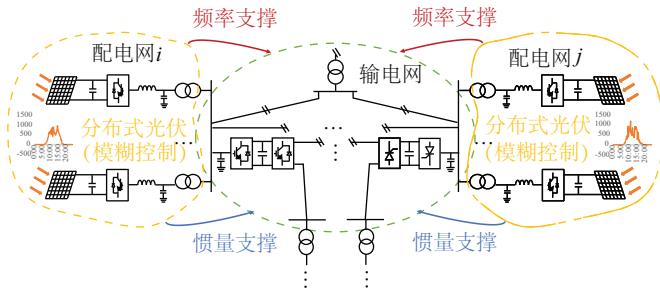


图 1 本文研究背景示意图

Fig. 1 Schematic diagram of research background of this paper

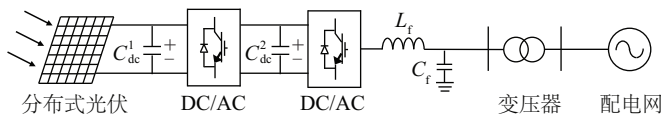


图 2 分布式光伏双极式并网模型

Fig. 2 Distributed photovoltaic bipolar grid-connection model

1.2 电力系统频率响应模型

电力系统的频率与其发电设备的输出功率和负荷密切相关,系统频率的动态特性反映在功率不平衡情况下频率上升或下降的动态过程。这种动态特性对于维持电力系统的稳定性至关重要。对于传统由同步发电机主导的电力系统,根据转子运动方程(式(1)),理想情况下,发电侧的等效机械功率(P_m)和负荷侧的等效电磁功率(P_e)相等,系统频率保持不变。然而,在实际运行中发电和负荷的不确定性会导致转矩的不平衡,从而引发频率波动。在发电侧,光伏出力对太阳辐照度变化的敏感性使分布式光伏发电的等效机械功率(P_m)受到显著影响。当太阳辐照度波动时,分布式光伏的输出功率随之变化,进而改变系统的等效机械转矩(T_m)。在负荷侧,负荷的波动性或由于切负荷操作等情况,也会改变系统的等效电磁转矩(T_e)。这种转矩的波动直接打破了转子运动方程的平衡状态,导致系统频率的波动。因此,在高比例分布式光伏接入的电力系统中,频率动态特性的复杂性显著增加。针对上述问题,需研究有效的控制策略以在光伏发电

和负荷波动的场景下,抑制频率偏差并提升系统的惯性支撑能力。

$$T_J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_N) = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_N) \quad (1)$$

式中: T_J ——系统等效转动惯量, kg/m^2 ; D ——阻尼系数, $(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})/\text{rad}$; ω_N ——系统额定频率, rad/s ; P_m 、 P_e ——系统等效机械功率、等效电磁功率, kW 。

2 分布式光伏逆变器控制策略

2.1 传统 PQ 控制策略及其局限性

针对分布式光伏双极式变流器,第二级为 DC/AC 逆变器,可采用跟网型 PQ 控制策略调节其输出的有功功率。在 PQ 控制策略中,逆变器通过锁相环(phase-locked loop, PLL)测量并网点电压的相角 θ_{pli} ,与配电网保持相位同步。功率外环根据有功、无功功率设定值,计算内环 d 、 q 轴电流设定值 $i_{d,ref}$ 、 $i_{q,ref}$ 。随后,电流内环通过设定值计算调制信号,并通过脉宽调制(pulse width modulation, PWM)生成控制信号,驱动逆变器以实现期望的功率输出。在有功功率设定值低于最大功率的情况下, PQ 控制策略可使分布式光伏按照有功、无功功率设定值运行。然而,以 PQ 控制运行的分布式光伏存在局限性:在电力系统出现频率或电压波动时无法提供有效的频率调节或电压支撑能力。这种局限性限制了分布式光伏在提升电力系统动态响应和稳定性方面的作用。

针对上述问题,需探索更为灵活的控制策略,使分布式光伏在参与电力系统运行时,不仅能满足基本的功率输出需求,还能在频率和电压波动的情况下提供主动支撑功能,从而增强系统的安全性和可靠性。

2.2 分布式光伏虚拟惯量下垂控制策略

为应对频率波动对电力系统稳定性带来的潜在威胁,有必要在传统 PQ 控制的基础上改进,对逆变器引入适应性更强的频率控制策略。通常的改进思路是依据锁相环(PLL)实时跟踪电力系统频率的变化,动态调整有功功率的设定值,从而改善系统的整体频率响应能力。目前,常用的变流器控制策略主要有下垂控制和虚拟惯性控制。前者如式(2)所示,基于频率偏差动态调整分布式光伏的有功功率输出,以平衡系统的不平衡功率^[20];后者如式(3)所示,通过对锁相环所测频率变化率的识别,调整分布式光伏的输出功率,为系统提供类似于传统同步机惯性的动态支撑能力。

$$f = f_N - m_p \Delta P_{\text{Droop}} \quad (2)$$

$$\Delta P_{\text{VIC}} = 2H_{\text{PV}} \frac{df}{dt} = 2H_{\text{PV}} \cdot \frac{U_{iq} \cdot k_{pli}}{2\pi} \quad (3)$$

式中: f_N ——额定频率, Hz ; m_p ——下垂系数, kW/Hz ; ΔP_{Droop} 、 ΔP_{VIC} ——下垂控制、虚拟惯性控制下有功功率的增量, kW ; H_{PV} ——虚拟惯性时间常数, $(\text{kW} \cdot \text{s})/\text{Hz}$; U_{iq} ——分布式光伏并网点的 q 轴电压, V ; k_{pli} ——锁相环的积分系数。

将两种控制策略相结合能同时改善系统频率的稳态、暂态特性^[21],控制框图如图 3。虽然虚拟惯量下垂控制在一定程度上模拟了分布式光伏在系统频率偏差和频率变化率改变时的出力调节,但由于其控制规律通常为简单的线性关系仍存在不足,尤其在以下场景中表现较为明显:1)当配电网因故障而失去大量负荷时,系统的功率裕量突然增加,导致频率偏移和频率变化率急剧上升。此时,理想的控制应能快速减少分布式光伏的出力以匹配失去的负荷,从而迅速恢复新的功率平衡,但仅依赖线性控制策略往往难以提供足够的灵活性,可能不足以维持系统频率稳定;2)日照条件急剧恶化时,分布式光伏最大输出功率显著下降传统控制策略备

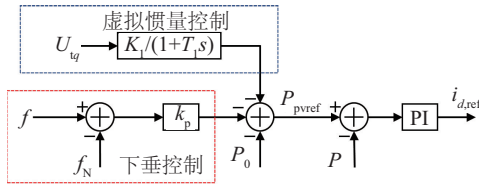


图3 虚拟惯量下垂控制框图

Fig. 3 Virtual inertia droop control block diagram

用容量不足,难以调整出力,进而造成系统频率调节能力缺失。

因此,需探索新的控制方法,使分布式光伏能针对不同工况提供更加准确、灵活且高效的出力调节能力。这种方法应在传统下垂控制和虚拟惯性控制的基础上进行改进,充分考虑光照条件及负荷特性,实现主动频率调节和惯性支撑能力的提升。

3 考虑分布式光伏出力特性变论域模糊自适应控制系统

为应对分布式光伏接入带来的频率响应挑战,本文提出一种分布式光伏变论域模糊自适应控制系统。该系统包含两阶段:以配电网为单位的功率生成和配电网内的分布式光伏功率分配。前者配电网内的实际运行工况,利用变论域模糊自适应控制策略生成整个配电网中分布式光伏的总功率出力参考值,后者根据配电网级功率生成的参考值,结合各分布式光伏的实时太阳辐照度,对功率进行分配,实现光伏发电设备的协调运行,提升配电网整体的频率响应能力。光伏变论域模糊自适应控制系统的整体控制框图如图 4 所示。

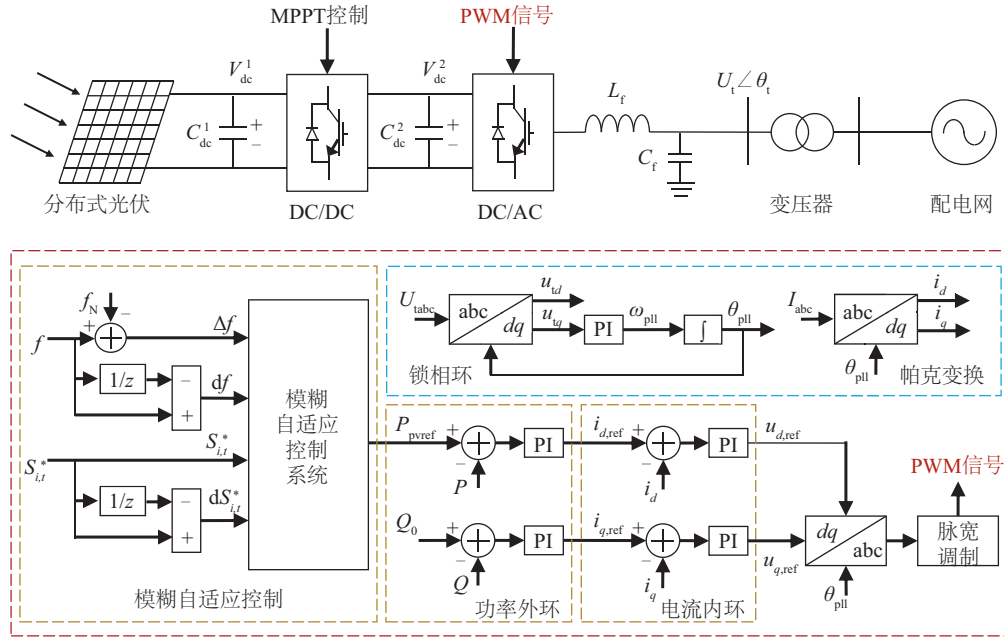


图4 分布式光伏变论域模糊自适应控制系统的整体控制框图

Fig. 4 Overall control block diagram of photovoltaic fuzzy adaptive control system

3.1 配电网光伏模糊自适应控制策略

模糊自适应控制是一种智能控制策略,它结合了模糊逻辑和自适应控制理论,能在系统参数和环境条件变化时自动调整控制策略^[16]。本节提出一种模糊自适应控制系统,以配电网为单位,以频率偏差、频率变化率、平均太阳辐照度和平均太阳辐照度变化率的适应程度作为模糊控制输入量,解模糊后输出配电网的中央功率,代表配电网中所有分布式光伏

的有功出力参考值之和。如图 5 所示,该模糊自适应控制系统主要由 4 个模糊控制器组成,每个模块根据不同的控制目标分别设置模糊规则,通过联合解模糊最终输出功率参考值。

1)模糊控制器 I 通过实时频率偏差 $\Delta f(t)$ 和平均太阳辐照度 $S_{t,i}$ 作为输入,输出分布式光伏的功率调整量 γ_1 。配电网 t 时刻的频率偏差 $\Delta f(t)$ 可表示为:

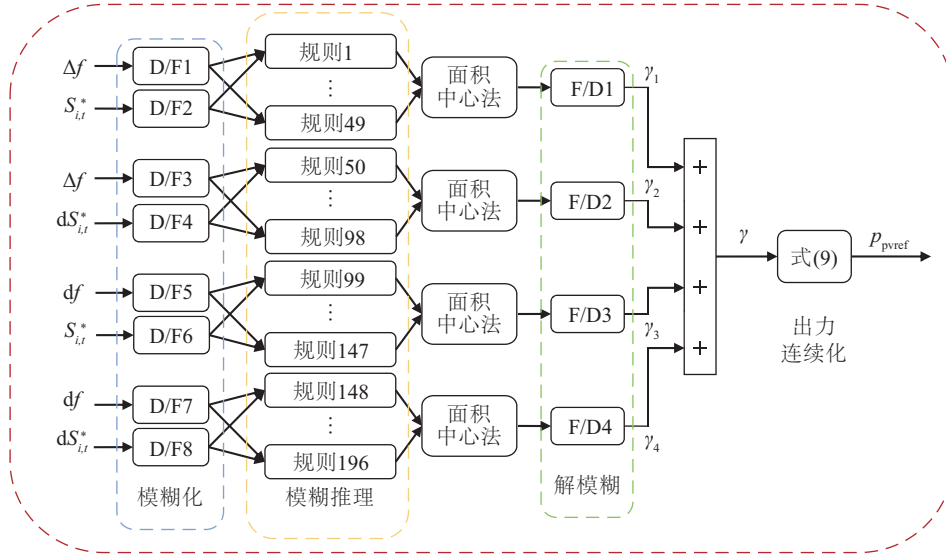


图5 配电网光伏模糊自适应控制系统

Fig. 5 Photovoltaic fuzzy adaptive control strategy of distribution network

$$\Delta f(t) = f_{\text{pll}}(t) - f_N \quad (4)$$

式中: f_{pll} —— t 时刻分布式光伏锁相环跟踪的频率, Hz; f_N ——额定频率, Hz。

第 i 个配电网内各分布式光伏的平均太阳辐照度 S_{ia}^* 为:

$$S_{ia}^* = \frac{1}{J_i} \sum_{j=1}^{J_i} S_{ij}^* \quad (5)$$

式中: J_i ——第 i 个配电网内所含分布式光伏的总数; S_{ij}^* ——第 i 个配电网内第 j 个分布式光伏在 t 时刻的太阳辐照度, W/m^2 。

该模糊控制器的模糊规则和隶属度的三维视图如图 6a 所示。该模糊规则对应的场景为: 频率小于额定频率时, 其值越小电力系统负荷量超出发电机出力越多, 即应提高分布式光伏的出力, 减少系统的不平衡功率; 太阳辐照度越大则分布式光伏的出力上限越高, 即应提高分布式光伏的出力, 充分利用光伏资源。

2) 模糊控制器 II 通过实时频率偏差 $\Delta f(t)$ 和平均太阳辐照度变化率 dS_{ia}^* 作为输入, 后者反映光照变化的动态特征, 输出调整量为 γ_2 。 dS_{ia}^* 为第 i 个配电网中光伏在 t 时刻的平均太阳辐照度变化率, 可表示为:

$$dS_{ia}^* = (S_{ia}^* - S_{ia-1}^*) / \Delta t \quad (6)$$

式中: Δt ——太阳辐照度变化率采样的时间间隔, s。

该模糊控制器的模糊规则和隶属度的三维视图如图 6b 所示。该模糊规则对应的场景为: 若分布式光伏上方的云层忽然遮蔽, 太阳辐照度变化率为较大的负值时, 太阳辐照度会突然下降, 根据模糊规则 I, 分布式光伏的出力也骤降, 引起系统较大的功率波动。为了维持系统的功率平衡, 需新增模糊规则 II, 略微增加分布式光伏的出力, 避免光伏出力因太阳辐照度的突变而突变, 类似于给太阳辐照度影响光伏出力的变化加入“惯性”; 频率对分布式光伏出力的影响同模糊

控制器 I。

3) 模糊控制器 III 通过频率变化率 $df(t)$ 和平均太阳辐照度 S_{ia}^* 作为输入, 用于快速响应系统的频率动态, 输出调整量为 γ_3 。 $df(t)$ 为电力系统 t 时刻的频率变化率, 其离散模型为:

$$df(t) = (\Delta f(t) - \Delta f(t - \Delta t)) / \Delta t \quad (7)$$

该模糊控制器的模糊规则和隶属度的三维视图如图 6c 所示。该模糊规则对应的场景为: 若系统负荷突然下降, 频率变化率为较大的正值, 仅依靠模糊控制器 I 和 II, 分布式光伏的出力响应较慢, 将导致系统频率突增, 可能对配电网的稳定运行带来挑战。为了维持系统暂态频率稳定性, 需新增模糊控制器 III, 在上述场景下迅速减少分布式光伏的出力, 抑制负荷改变导致的不平衡功率, 模拟虚拟惯量控制的“惯性”; 太阳辐照度对分布式光伏出力的影响同模糊控制器 I。

4) 模糊控制器 IV 以频率变化率 $df(t)$ 和平均太阳辐照度变化率 dS_{ia}^* 为输入, 综合控制器 II 和 III 的功能, 输出调整量为 γ_4 , 其模糊规则和隶属度的三维视图如图 6d 所示。该模糊规则是对模糊规则 II 和 III 的补充, 进一步提高系统稳定性。将模糊控制器 I ~ IV 解模糊, 输出之和相加得第 i 个配电网中模糊自适应控制的输出 γ_i :

$$\gamma_i = \sum_{k=1}^4 \gamma_{ik} \quad (8)$$

由于模糊自适应控制的输入量都是以 Δt 为时间单元采样的, 模糊控制器 I ~ IV 的输出之和 $\gamma_i(t_i)$ 将不断突变, 为了保证光伏出力的连续性, 采用平滑连接方式, 得到配电网光伏的集中功率:

$$P_{i,\text{sum}}(t) = \gamma_i(t_j) + \frac{\gamma_i(t_{j+1}) - \gamma_i(t_j)}{\Delta t} \cdot (t - t_j) \quad (9)$$

式中: t_j ——第 j 次采样对应的时间, s。

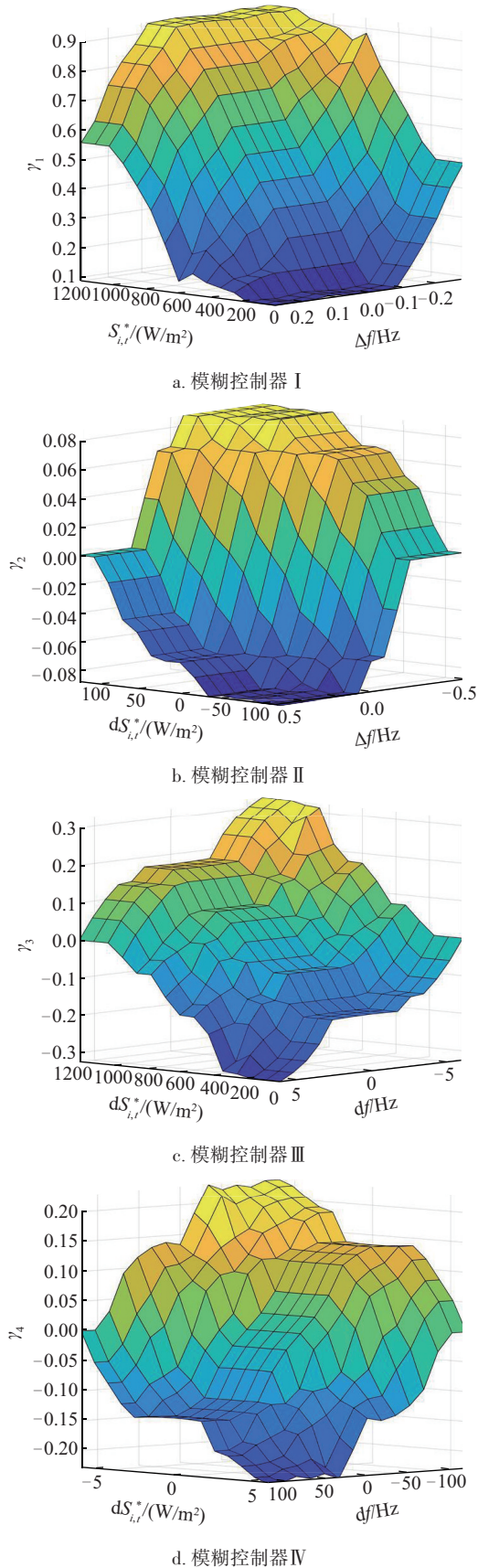


图6 模糊控制器 I~IV 的三维视图

Fig. 6 3D view of fuzzy controller I~IV

得到配电网的功率后,需按照各分布式光伏的光照情况进行功率分配。对于第 i 个配电网中第 j 个分布式光伏,其有功出力为:

$$P_{ij}(t) = \rho \cdot P_{\text{rated}} \cdot P_{i,\text{sum}}(t) \cdot \frac{S_{ij,t}^*}{J_i \cdot S_{i,t}^*} \quad (10)$$

式中: ρ ——备用系数,取 0.9; P_{rated} ——有功功率参考值, kW。

由此,光伏模糊自适应控制系统可在考虑光照条件的前提下,实现分布式光伏的调频控制。

3.2 变论域方法下的模糊自适应控制系统

在 3.1 节中,各模糊控制器的论域固定,将其划分为 7 个区域。然而,在应对海量的复杂运行场景时,固定的论域可能导致控制精度不足,尤其是对小误差变化,控制器可能做出过大反应,进而引发系统的振荡或不稳定。为了改善这一问题,实际生产中往往会通过调节死区来缓解频率波动过大带来的不良影响。为进一步提高模糊控制对系统波动的调节能力,特别是在处理不同频率波动和光照变化的情况下,本文提出一种变论域模糊控制方法,即在不同工况下动态调整模糊控制器的论域。该方法能根据实际工况的变化来灵活调整控制精度,从而提升控制系统的适应性和精度^[22]。

模糊控制器的变论域可通过伸缩因子实现。以模糊控制器 I 为例,若输入量频率偏差 Δf 的论域为 $[-E_f, E_f]$, 输出量 γ_1 的论域为 $[0, U_1]$, 则通过伸缩因子 α_1 、 β_1 得到的新论域为 $[-\alpha_1 E_f, \alpha_1 E_f]$ 和 $[0, \beta_1 U_1]$, 以反映不同工况下的控制差异。依次引入 α_2 、 $\beta_1 \sim \beta_4$, 分别代表输入量频率变化率和输出量 $\gamma_1 \sim \gamma_4$ 的伸缩因子。在伸缩因子的设计中,输入量的伸缩因子一般以输入量本身为函数,而输出量的伸缩因子通常依赖于最能反映工况的输入量,以更精确灵活地匹配多种工况。本文中,由于变论域控制引入频率调节死区,提升系统的暂态频率特性,故各输出量的伸缩因子均为相应频率输入量 (Δf 或 df) 的函数,即 $\alpha_1(\Delta f)$ 、 $\alpha_2(df)$ 、 $\beta_1(\Delta f)$ 、 $\beta_2(df)$ 、 $\beta_3(df)$ 、 $\beta_4(df)$ 。采用该变论域控制方法,以输入端伸缩因子 $\alpha_1(\Delta f)$ 为例:若系统频率偏差较大, $\alpha_1(\Delta f) \approx 1$, 论域几乎不变,采用原始模糊规则进行控制;若频率偏差较小,其论域应变小以使模糊规则密集,提供更高控制精度,即 $\alpha_1(\Delta f)$ 应较小。该设计方法解决了模糊控制器在处理不同工况时出现的精度与论域大小之间的矛盾。通过调整论域大小,控制器可在保持高精度的同时避免过度调整导致的系统振荡^[18]。变论域光伏模糊自适应控制系统结构如图 7 所示。

在工程应用中,常通过函数形式选取伸缩因子,采用指数型伸缩因子建立频率偏差与伸缩因子的函数^[23]:

$$\begin{cases} \alpha_1(\Delta f) = 1 - 0.4e^{-100\Delta f^2} \\ \alpha_2(df) = 1 - 0.6e^{-0.1df^2} \\ \beta_1(\Delta f) = \beta_2(\Delta f) = 1/(|\Delta f| + 0.8) \\ \beta_3(df) = \beta_4(df) = 1/(0.04|df| + 0.8) \end{cases} \quad (11)$$

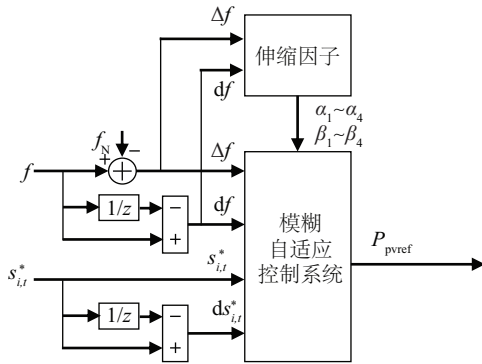


图7 变论域的光伏模糊自适应控制系统结构

Fig. 7 Variable universe PV fuzzy adaptive control system structure

4 算例分析

基于 Matlab/Simulink 环境构建所提出的控制方法及策略。通过极高比例分布式电源配电网算例验证分布式光伏变论域模糊自适应控制的有效性。

4.1 不同控制策略下系统频率响应分析

采用图 8 所示的双机系统进行仿真验证,其中 PV 为分布式光伏,SG 为同步发电机,系统功率基准值为 100 kW,负荷 1 和负荷 2 消耗的有功功率分别为 150 kW 和 20 kW。在 $t=5\text{ s}$ 时,加入负荷 2,得到的系统频率变化、系统频率变化率。频率变化即为系统频率与原稳态频率的差值,故各控制方式的起点均为 0 Hz。为研究不同控制策略对系统频率响应的影响,本文分别从负荷波动和太阳辐照度两个维度进行仿真分析。算例 1 聚焦于负荷波动条件下不同控制方法的频率响应特性;算例 2 则进一步探讨太阳辐照度变化对模糊控制及变论域模糊控制性能的影响。

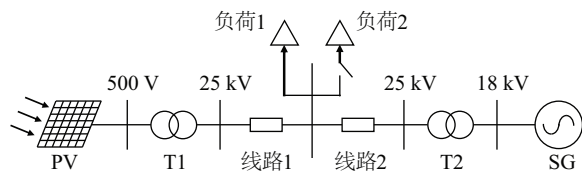


图8 双机测试系统

Fig. 8 Dual-machine test system

4.1.1 频率波动下不同控制方法的频率响应特性

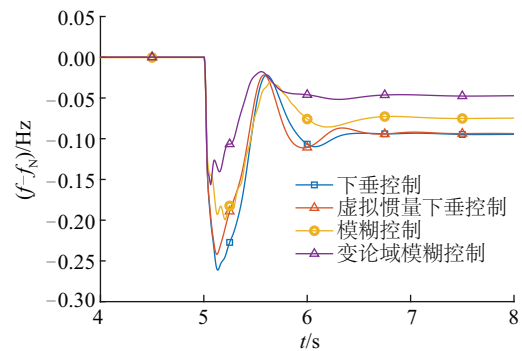
算例 1 中仅考虑负荷波动对系统频率的影响,比较下垂控制、虚拟惯量下垂控制、模糊控制以及变论域模糊控制 4 种控制方法下的频率响应特性。仿真过程中,设定负荷突增为扰动源,记录各控制方法下的系统频率和频率变化率。仿真结果如图 9 所示,可看出:

1) 当光伏发电采用下垂控制时,两台发电机根据下垂特性曲线改变出力,以调节系统的稳态频率偏差。然而,下垂控制对暂态频率特性的调节能力较弱。当系统负荷增加时,

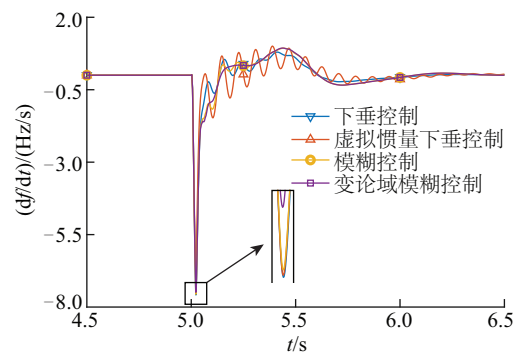
频率变化率最大,且频率最低点可能接近电力系统安全运行的下限,存在一定的安全隐患。随着负荷波动的进一步增大,这种安全风险也会加剧。

2) 当光伏发电采用虚拟惯量下垂控制时,系统频率特性得到改善。一方面,在功率突增瞬间,虚拟惯量控制部分通过增发功率可有效抑制频率跌落,频率最低点高于下垂控制的情况;另一方面,在稳态阶段,系统的功率分配由下垂控制部分完成,此时光伏和同步发电机的有功功率输出与下垂控制情况一致。因此,虚拟惯量下垂控制在暂态特性上优于传统下垂控制,而稳态特性则相同。

3) 当光伏发电采用模糊自适应控制,在光照适中的条件下运行时,系统的暂态和稳态频率特性均优于下垂控制和虚拟惯量下垂控制。一方面,在功率突增瞬间,模糊控制器 III 和 IV 能够根据频率偏差动态调整光伏发电的有功出力,显著抑制频率跌落,使频率最低点高于前两种控制方式,暂态特性更优;另一方面,在稳态阶段,模糊控制器 I 和 II 根据新增负荷引起的频率偏差进一步调整光伏和同步发电机的有功输出,从而减小稳态频率偏差,获得更优的稳态特性。



a. 系统频率变化



b. 系统频率变化率

图9 不同控制下系统频率特性

Fig. 9 Frequency characteristics of system under different controls

4) 当光伏发电采用变论域模糊自适应控制,在光照适中的条件下运行时,系统频率特性进一步优化。一方面,在功率突增瞬间,变论域模糊控制器能够通过动态调整模糊论域范围,使光伏发电机增发更多的有功功率,进一步抑制频率

跌落,频率最低点高于模糊自适应控制,暂态特性最优;另一方面,在稳态阶段,变论域模糊控制器能够更精确地根据频率偏差调整光伏和同步发电机的输出,从而实现更小的稳态频率偏差。因此,变论域模糊自适应控制在暂态和稳态特性上均优于其他控制方式。

4.1.2 太阳辐照度变化下不同控制方法的频率响应特性

为进一步研究太阳辐照度对模糊控制性能的影响,算例2选取光照适中和光照充足两种典型工况分别对模糊控制和变论域模糊控制的频率响应特性进行对比分析。在仿真过程中,保持负荷波动条件不变,通过调整太阳辐照度模拟光伏出力的变化并记录系统频率和频率变化率。仿真结果如图10所示,可看出,在光照适中条件下,模糊控制和变论域模糊控制均能够较好地调节系统频率,但变论域模糊控制在动态响应速度和稳态偏差方面表现更优。当光照充足时,两种控制方法下的频率偏差均增大,这是因为光照充足情况下,模糊规则尽量追求光伏满发,即使频率偏差从ZO变为PB,对应的输出调整幅度有限(从PM到PB)。因此,在光照充足时光伏的频率调节能力较弱,频率波动相对较大。

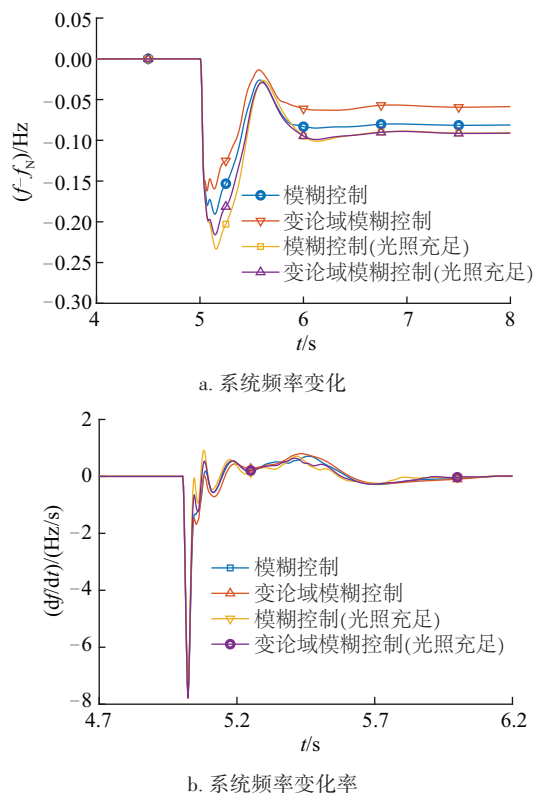


图10 光照变化下系统频率特性

Fig. 10 Frequency characteristics of system under illumination variation

通过上述两部分算例分析可知,负荷、光照波动条件下,变论域模糊控制相较于传统下垂控制、虚拟惯量下垂控制以及普通模糊控制能显著改善系统频率响应性能,在复杂工况下提供更灵活的频率支撑。

4.2 计及太阳辐照度的极高比例光伏发电主动参与电网频率调节的仿真分析

分布式新能源在配电网中的渗透率逐年增高是新型电力系统的发展趋势,因此电力系统大量接入采用变论域模糊自适应控制策略的分布式光伏,将大大提升整个电力系统的频率调节能力、电能质量和电力系统可靠性。为此,搭建如图11所示的改进IEEE-58节点系统,具体电气参数见文献[2],包含一个6节点主网和4个经过折算的13节点配电网,其中13节点配电网中接入3个经过等效折算后的光伏,光伏并联储能装置,如图12。

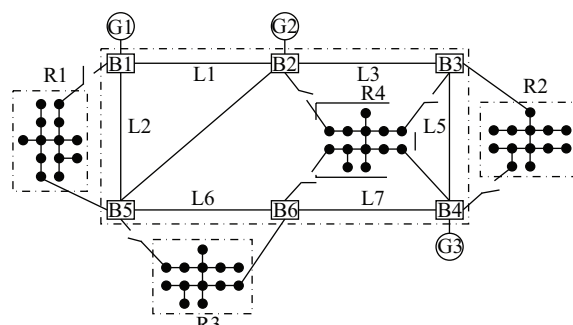


图11 改进的IEEE-58节点系统拓扑

Fig. 11 Improved IEEE-58 nodes system topology

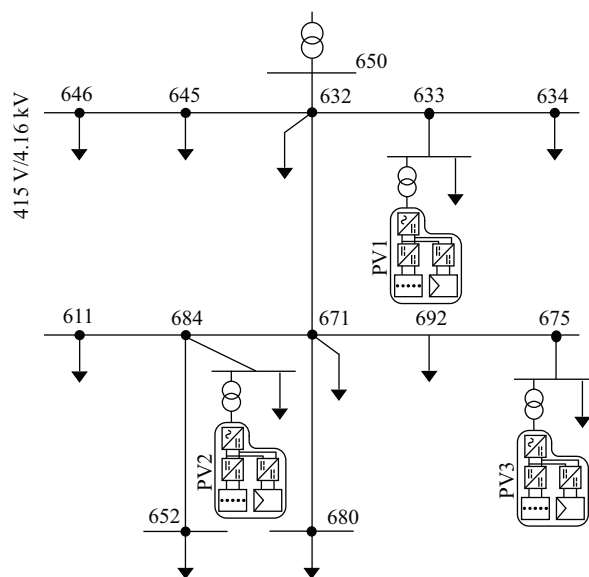


图12 配电网中接入光储系统示意图

Fig. 12 Distribution network diagram with integrated photovoltaic storage system

储能装置的建模详见文献[24],将其建模为具有内阻 R_B 的串联可控理想直流源。根据电池的荷电状态(state of charge, SOC),采用非线性方程式(12)计算电池的无载电压 E_B ,其中参数 A 、 B 和 K 可调整,以模拟特定电池类型的放电特性。此时,式(10)所得的 $P_{i,j(t)}$ 为光伏储能系统的出力参考值,光伏按照MPPT的方式运行。全系统光伏装机容量为总

负荷的 80%。测试光储系统采用变论域模糊自适应控制时, 整个电力系统频率变化。

$$E_B = E_0 - K \frac{1}{S_{OC}} + A^{-BQ(1-S_{OC})} \quad (12)$$

式中: E_0 ——电池恒压, V; K ——极化电压, V; Q ——电池容量, A·h; A 、 B ——决定电池充放电特性的参数。

仿真考虑实际太阳辐照度和负荷的变化, 采用 4 个典型日的光照数据, 分别对应所示系统中的 4 个配电网, 如图 11, 节点 3、5、6 的负荷采用 1 个典型日的负荷数据。以系统中配电网 R3 为例, 得到各光储系统输出功率曲线如图 13 所示, 系统的频率响应如图 14 所示。由图 13 可知, 当太阳辐照度极低时, 光储系统依靠储能装置出力, 防止系统因功率缺额过大而频率越限; 随着太阳辐照度的增加, 光储系统的出力逐渐由光伏产生; 当太阳辐照度较大时, 储能装置反向充电, 光储系统完全由光伏进行发电。该过程对应的频率变化如图 14, 在整个变化过程中, 系统频率在合适的范围内波动, 证明该变论域模糊自适应控制系统满足极高比例光伏并网需求。

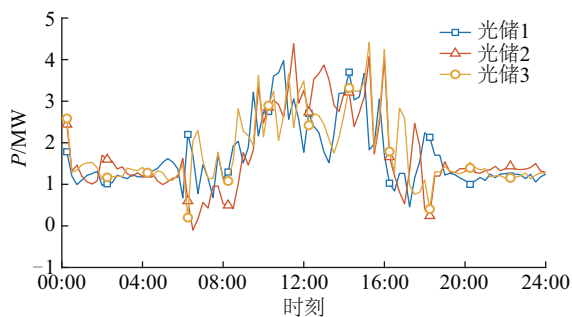


图 13 配电网 R3 内各光储系统输出功率

Fig. 13 Output power curves of each photovoltaic storage system in distribution network R3

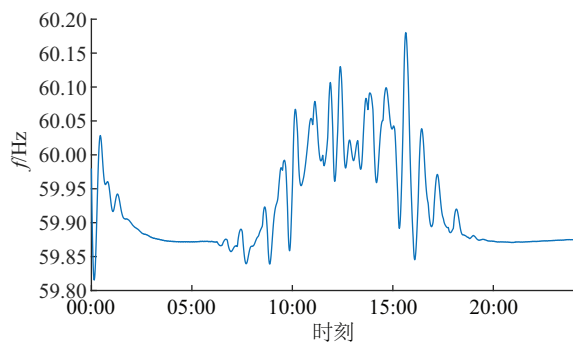


图 14 系统的频率响应

Fig. 14 System frequency response curve

5 结 论

本文针对极高比例分布式光伏接入配电网后频率支撑能力不足的问题, 提出一种基于频率偏差和惯性支撑的变论

域模糊自适应控制方法。该方法通过实时监测太阳辐照度、系统频率偏差及其变化率, 动态调整模糊控制的论域范围, 使光伏发电在暂态阶段能够快速响应功率需求, 有效抑制频率跌落; 在稳态阶段则进一步优化功率分配, 减小频率偏差, 显著提升系统的频率响应特性。与传统控制方法相比, 该策略克服复杂工况下适应性不足的缺陷, 同时具备较强的环境适应能力, 可在多种光照条件下稳定运行。仿真结果表明, 在双机系统和改进的 IEEE-58 节点系统中, 所提出的控制方法在暂态阶段有效提升了频率最低点, 显著改善了频率跌落特性; 在稳态阶段进一步减小了频率偏差, 优化了系统的动态和稳态性能, 研究结果验证了该方法在极高比例光伏接入条件下对电力系统安全性和稳定性的显著提升。

[参考文献]

- [1] 李红岩, 王磊, 安平娟, 等. 基于改进黏菌算法的局部遮阴下光伏 MPPT 研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 129-134.
LI H Y, WANG L, AN P J, et al. Study on photovoltaic MPPT under local shade based on improved slime mold algorithm[J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(10): 129-134.
- [2] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 计及间歇性新能源的弹性城市电网输配电协同供电恢复方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2764-2774.
YANG Q M, LI G F, BIE C H, et al. Coordinated power supply restoration method of resilient urban transmission and distribution networks considering intermittent new energy[J]. High voltage engineering, 2023, 49(7): 2764-2774.
- [3] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 3-16.
LU Z X, LIN Y S, QIAO Y, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy [J]. Automation of electric power systems, 2022, 46(16): 3-16.
- [4] 程珊珊, 王海鑫, 杨子豪, 等. 虚拟同步发电机对系统低频振荡的影响及抑制方法综述[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 119-129.
CHENG S S, WANG H X, YANG Z H, et al. Overview of effect of virtual synchronous generators on low-frequency oscillation of power system and suppression methods [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(8): 119-129.
- [5] 张志敏, 彭红义, 潘若妍, 等. 基于 MPPT 的光伏并网逆变器研究[J]. 电源技术, 2023, 47(1): 108-111.
ZHANG Z M, PENG H Y, PAN R Y, et al. Research on

- photovoltaic grid connected inverter based on MPPT [J]. Chinese journal of power sources, 2023, 47(1): 108-111.
- [6] 杨鹏程, 冯启帆, 韦巍, 等. 分布式光伏电源分散式自适应主动频率支撑控制[J]. 电网技术, 2025, 49(9): 3566-3576.
YANG P C, FENG Q F, WEI W, et al. Decentralized adaptive frequency support control of distributed PV sources [J]. Power system technology, 2025, 49 (9) : 3566-3576.
- [7] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 179-186.
ZHANG J P, WANG N B, HUANG R, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic [J]. Power system protection and control, 2019, 47(15): 179-186.
- [8] 钟诚, 周顺康, 严干贵, 等. 基于变减载率的光伏发电参与电网调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 1013-1024.
ZHONG C, ZHOU S K, YAN G G, et al. A new frequency regulation control strategy for photovoltaic power plant based on variable power reserve level control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 1013-1024.
- [9] 杜永安, 杜丽艳, 徐岩. 光伏发电接入柔直互联区域调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 1-9.
DU Y A, DU L Y, XU Y. Frequency regulation for PV generation connected to an interconnection area by VSC-HVDC[J]. Power system protection and control, 2021, 49(6): 1-9.
- [10] 田雨果, 王彤, 邢其鹏, 等. 计及虚拟惯量控制与低电压穿越的光伏发电系统暂态稳定分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(2): 52-59.
TIAN Y G, WANG T, XING Q P, et al. Transient stability analysis of a photovoltaic generation system considering virtual inertia control and low voltage ride-through [J]. Power system protection and control, 2022, 50(2): 52-59.
- [11] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 277-296.
LIU H, YU S Q, SUN D W, et al. An overview of control technologies and principles for grid-forming converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 277-296.
- [12] WANG T, JIN M X, LI Y D, et al. Adaptive damping control scheme for wind grid-connected power systems with virtual inertia control [J]. IEEE transactions on power systems, 2022, 37(5): 3902-3912.
- [13] GONZÁLEZ-CAJIGAS A, ROLDÁN-PÉREZ J, BUENO E J. Design and analysis of parallel-connected grid-forming virtual synchronous machines for island and grid-connected applications [J]. IEEE transactions on power electronics, 2022, 37(5): 5107-5121.
- [14] 曹炜, 钦焕乘, 陆建忠, 等. 新型电力系统下虚拟同步机的定位和应用前景展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(4): 190-207.
CAO W, QIN H C, LU J Z, et al. Orientation and application prospect of virtual synchronous generator in new power system [J]. Automation of electric power systems, 2023, 47(4): 190-207.
- [15] 张冠锋, 杨俊友, 王海鑫, 等. 基于虚拟同步机技术的风储系统协调调频控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(S1): 83-92.
ZHANG G F, YANG J Y, WANG H X, et al. Coordinated frequency modulation control strategy of wind farm-storage system based on virtual synchronous generator technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(S1): 83-92.
- [16] 李忠文, 吴龙, 程志平, 等. 参与微电网频率调节的光伏发电系统模糊自适应功率控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 126-138.
LI Z W, WU L, CHENG Z P, et al. Fuzzy adaptive power control for photovoltaic power generation participating in frequency regulation of microgrid [J]. Electric machines and control, 2023, 27(9): 126-138.
- [17] DATTA M, SENJYU T. Fuzzy control of distributed PV inverters/energy storage systems/electric vehicles for frequency regulation in a large power system [J]. IEEE transactions on smart grid, 2013, 4(1): 479-488.
- [18] 朱志超, 崔森, 陈来军, 等. 基于改进模糊自适应的先进绝热压缩空气储能一次调频控制策略[J]. 电网技术, 2025, 49(12): 5137-5146.
ZHU Z C, CUI S, CHEN L J, et al. Primary frequency modulation control strategy of advanced adiabatic compressed air energy storage based on improved fuzzy adaptive control [J]. Power system technology, 2025, 49(12): 5137-5146.
- [19] 方治, 宋绍剑, 林予彰, 等. 含光伏电站和蓄电池储能系统的主动配电系统状态估计[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 71-79.
FANG Z, SONG S J, LIN Y Z, et al. State estimation for active distribution systems incorporating photovoltaic plant and battery energy storage system [J]. Automation of electric power systems, 2019, 43(13): 71-79.
- [20] 许诒翊, 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.
- [21] 孙铭爽, 贾祺, 张善峰, 等. 面向机电暂态分析的光伏发电参与电网频率调节控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 28-37.
- SUN M S, JIA Q, ZHANG S F, et al. Single-stage grid-connected photovoltaic generation takes part in grid frequency regulation for electromechanical transient analysis[J]. Power system protection and control, 2019, 47(18): 28-37.
- [22] 孙国鑫, 余永恒, 吴林锋, 等. 基于变论域模糊控制的复合供暖系统温度控制研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 435-441.
- SUN G X, YU Y H, WU L F, et al. Reserch on temperature control of composite heating system based on fuzzy control of variable domain domain[J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(9): 435-441.
- [23] 冯陈, 刘朝爽, 吴春旺, 等. 抽水蓄能机组新型变工况自适应模糊控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2815-2822, I0053-I0055.
- FENG C, LIU C S, WU C W, et al. Innovative adaptive fuzzy control strategy for pumped storage units under variable operating conditions [J]. Power system technology, 2024, 48(7): 2815-2822, I0053-I0055.
- [24] FARROKHABADI M, KÖNIG S, CAÑIZARES C A, et al. Battery energy storage system models for microgrid stability analysis and dynamic simulation [J]. IEEE transactions on power systems, 2018, 33(2): 2301-2312.

VARIABLE UNIVERSE FUZZY ADAPTIVE CONTROL FOR ACTIVE FREQUENCY-INERTIA SUPPORT IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH ULTRA-HIGH PENETRATION OF DISTRIBUTED PVs

Wen Xiankui¹, He Mingjun¹, Zhou Ke¹, Li Xiaojian², Tang Qian²

(1. Power Science Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. Liupanshui Power Supply Bureau of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Liupanshui 553000, China)

Abstract: This paper proposes a variable universe fuzzy adaptive control method that considers both the output characteristics of distributed PV and time-domain frequency features, enabling active provision of system frequency deviation suppression and inertial support. The proposed method incorporates multidimensional fuzzy rules encompassing illumination variation, system frequency deviation, and its rate of change. By adaptively adjusting power output, it enhances system frequency response characteristics. Simulation results demonstrate that this approach effectively improves both transient and steady-state frequency performance in power systems with ultra-high PV penetration, thereby strengthening grid security and stability.

Keywords: PV power generation; distribution network; adaptive control; fuzzy control; fuzzy logic; frequency response; distributed power generation; adaptive control