

基于改进自抗扰与模糊神经网络的交直流混合配电网电压控制策略


洪建军¹, 顾益磊², 郑振华¹, 谢永胜¹, 毛俊强¹, 齐宗强³

(1. 国网浙江省电力有限公司衢州供电公司, 浙江 衢州 324000;
2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007;
3. 东南大学 电气工程学院, 南京 210096)

摘要: 随着分布式光伏与风电在主动配电网中渗透率的提高, 系统功率波动加剧, 交直流母线电压频繁越限, 对配电网安全稳定运行构成挑战。为此, 以含高比例风光储的交直流混合主动配电网为应用场景, 建立包含光伏、储能、风机、负荷及双向变换器的系统模型, 分析功率波动对配电网电压的影响机理, 提出一种改进的分布式电压协同控制策略。该策略在直流侧采用具备误差驱动型自适应扩张状态观测器的自抗扰控制, 增强对时变扰动的估计与补偿能力; 在交流侧设计模糊神经网络控制器, 实现逆变器电压环参数的自适应优化; 同时, 通过功率前馈机制将交流侧波动信息传递至直流侧储能控制器, 实现交直流双侧协同调节。最后, 基于MATLAB/Simulink的仿真结果, 验证了该协同控制策略在提升主动配电网电压稳定性方面的可行性与有效性。

关键词: 主动配电网; 分布式电压控制; 自抗扰控制; 模糊神经网络控制; 协同控制

DOI: 10.19585/j.zjdl.202603003

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

A voltage control strategy for AC/DC hybrid distribution networks based on improved active disturbance rejection control and fuzzy neural networks

HONG Jianjun¹, GU Yilei², ZHENG Zhenhua¹, XIE Yongsheng¹, MAO Junqiang¹, QI Zongqiang³

(1. State Grid Quzhou Power Supply Company, Quzhou, Zhejiang 324000, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;
3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the increasing penetration of distributed photovoltaic and wind power in active distribution networks, system power fluctuations are intensified, leading to frequent voltage violations on both AC and DC buses and posing challenges to the safe and stable operation of distribution networks. To address this issue, an AC/DC hybrid active distribution network with a high proportion of wind, photovoltaic, and energy storage resources is taken as the application scenario. A system model is developed that includes photovoltaic units, energy storage systems, wind turbines, loads, and bidirectional converters. The mechanism by which power fluctuations influence distribution network voltage is analyzed. Based on this, an improved distributed voltage coordinated control strategy is proposed. On the DC side, an active disturbance rejection control scheme based on an error-driven adaptive extended state observer is adopted to enhance the estimation and compensation capability for time-varying disturbances. On the AC side, a fuzzy neural network controller is designed to achieve adaptive optimization of inverter voltage loop parameters. Meanwhile, a power feedforward mechanism is introduced to transmit AC-side fluctuation information to the DC-side energy storage controller, enabling coordinated regulation between the AC and DC subsystems. Finally, simulation results based on MATLAB/Simulink verify the feasibility and effectiveness of the proposed strategy in improving voltage stability in active distribution networks.

Keywords: active distribution network; distributed voltage control; active disturbance rejection control; fuzzy neural network control; coordinated control

0 引言

随着“双碳”目标的推进,高渗透率分布式电源推动了低压主动配电网的建设。然而,源荷双重随机波动常导致电压频繁越限,威胁系统安全^[1]。主动配电网虽能通过灵活调度缓解冲击,但在孤岛或弱网工况下,其电压稳定性尤为脆弱,若缺乏有效控制将直接影响供电质量与设备运行^[2]。

在面向高比例分布式能源接入的主动配电网电压稳定控制领域,针对交直流各侧关键设备的电压调节策略已较为成熟。在直流侧,为应对光伏波动及负荷扰动,文献[3-4]分别通过神经网络自适应优化及改进下垂控制提升了储能单元对直流母线的稳压能力。文献[5-6]则进一步引入前馈自抗扰及滑模自抗扰技术,显著增强了光储直流微电网在复杂工况下的抗扰性与鲁棒性。在交流侧及交直流接口环节,针对双向变流器的电压跟踪与电能质量改善,文献[7-8]提出了分数阶或增益自适应的滑模控制策略以抑制抖振并提升动态响应。文献[9]则结合无源性理论优化了控制器的阻尼特性。然而,上述研究大多局限于单一侧母线电压的独立控制或局部变流器的性能提升,将另一侧的功率波动视为单纯的外部扰动进行被动抑制,忽略了交直流混合系统中双侧功率的强耦合特性,难以在全局层面有效抑制源荷扰动带来的跨侧电压冲击。

鉴于单侧自治的局限性,利用ILC(互联变流器)构建跨侧功率传输机制,实现交直流双侧的协同互济已成为当前研究的主流。现有协同策略依据响应机制主要可分为两类:基于偏差的被动响应与基于惯量的缓冲响应。第一类为基于下垂特性的互联控制,文献[10-11]通过建立交流频率/电压与直流电压的耦合关系实现功率自主分配,但该方法本质上依赖于电压偏差来触发功率流动,存在调节滞后性,且易导致故障侧波动向全网无差别扩散。第二类为模拟同步机机理的惯量耦合策略,文献[12-13]通过在ILC控制中引入虚拟惯量缓冲两侧功率冲击,虽然提升了系统惯性,但传统VSG(虚拟同步发电机)多采用固定参数设计,在面对源荷随机大幅波动时,难以在动态支撑能力与功率振荡抑制之间取得平衡。此外,虽然基

于集中式通信的全局优化策略^[14]能够实现精准协同,但高昂的通信成本与延时风险限制了其在快速电压恢复中的应用。因此,如何在不依赖全局高速通信及复杂ILC控制改造的前提下,克服传统协同策略的被动滞后性,通过本地控制实现对跨侧功率扰动的主动感知与快速平抑,是亟待解决的关键问题。

针对上述问题,本文聚焦于孤岛运行工况下的主动配电网,以其风光储交直流混合这一具体运行形态为研究实例,提出一种改进的分布式电压协同控制策略。首先,建立包含光伏、储能、风机、交直流负荷及双向逆变器的系统模型,为控制策略设计提供基础。在直流侧,设计一种基于误差驱动型自适应扩张状态观测器的ADRC(自抗扰控制),旨在解决传统固定带宽观测器在快速跟踪与噪声抑制之间的矛盾;在交流侧,引入离线训练的FNN(模糊神经网络)控制器替代传统PI(比例-积分)调节器,利用其非线性拟合能力实现电压环参数的自适应优化;进一步,通过功率前馈机制将交流侧波动信息传递至储能控制器,实现交直流双侧协同调节。基于MATLAB/Simulink的对比仿真结果表明,所提策略在动态性能上实现了较好的控制效果,在直流侧,该协同策略将母线电压跌落幅度较传统PI控制降低了约77%,且较标准ADRC有效抑制了约45%的控制量高频抖动;在交流侧,FNN控制器在应对源荷突变时,将电压恢复时间较滑模控制缩短了约73%,并相对于另外3种控制器具有更低的电压偏差和更良好的平滑度。本文的核心在于构建了“自适应ADRC+FNN+功率前馈协同”的分布式控制架构,通过量化的性能提升验证了其在复杂工况下的鲁棒性与优越性,为提升此类主动配电网的电压稳定性提供了一种新型解决方案。

1 交直流混合配电网系统及其电压控制

1.1 系统结构

风光储交直流混合结构是低压主动配电网的一种关键实现形式,通过将分布式电源、储能单元及负荷有机耦合,实现就地能源消纳与灵活调控,在提升主动配电网供电可靠性和电能质量方面具有重要作用^[15]。本文以典型主动配电网中的此类风光储交直流混合结构为研究对象,旨在实

显著电压波动。因此, 引入具备自适应能力的智能控制策略以提升逆变器鲁棒性, 是改善主动配电网电能质量的关键。

2 交直流电压控制策略设计

上述分析表明, 主动配电网在孤岛运行时, 其电压稳定面临双重挑战: 一方面, 交、直流母线电压均需有效抑制其本侧源荷波动引发的扰动; 另一方面, 交流侧的功率波动会经由双向逆变器传递至直流侧, 冲击直流母线电压。因此, 为全面提升系统电压质量, 该系统既需要两侧自治, 又应有单向协同。本章将据此展开直流侧改进 ADRC、交流侧 FNN 控制及交直流协同机制的设计。

2.1 直流侧电压改进 ADRC 设计

鉴于传统 PI 控制在复杂扰动下存在响应迟缓与稳态偏差大的局限, 本文引入 ADRC, 利用 ESO(扩张状态观测器)对总扰动进行实时估计与补偿^[19]。针对传统 ESO 固定带宽在快速跟踪与噪声抑制间的固有矛盾, 本文进一步提出一种误差驱动型 AESO(自适应 ESO), 通过动态调整观测带宽, 在时变工况下实现最优的扰动估计性能。

2.1.1 基于自抗扰的储能设备电压环控制

由式(1)可见, 电压外环控制为一个一阶系统, 为减轻控制器数据计算和参数整定的复杂程度, 本策略对 ADRC 除 ESO 以外的 TD(跟踪微分器)和 LSEF(线性状态误差反馈)进行了适当的简化, 舍去微分跟踪器, 并将 LSEF 简化为一个比例积分控制。将调整后的一阶自抗扰控制器作用于储能 BDC 电压环, 得到图 3 基于改进 ADRC 的储能设备电压-电流双闭环控制结构。

图 3 中一阶扩张状态观测器用于观测系统状态和总扰动^[20], 其表达式为:

$$\dot{z}_1 = z_2 + b_0 u + \beta_1 (y - z_1) \quad (5)$$

$$\dot{z}_2 = \beta_2 (y - z_1) \quad (6)$$

式中: z_1 为对系统状态的估计; z_2 为对总扰动的估计; b_0 为扰动补偿系数; u 为自抗扰控制器的输出(即电流环参考电流 I_L^*); y 为系统的输出(即直流母线电压 V_{dc}); β_1 和 β_2 为 ESO 的观测器增益, 需要根据系统特性和性能要求进行调节, 一般按带宽法分别确定为 $2\omega_0$ 和 ω_0^2 , ω_0 为观测器带宽。

在扩张状态观测器实时估计系统状态与总扰动的基础上, 控制律首先计算参考电压 V_{dc}^* 与 AESO 所观测的系统电压 z_1 之间的误差。该误差信号被送入一个线性状态误差反馈控制律, 在此设计中, 为简化整定并保证稳态精度, 该 LSEF 采用 PI 形式, 由此生成未补偿的初步控制信号 u_0 , 其控制方程如下:

$$u_0 = K_p (V_{dc}^* - z_1) + K_i \int (V_{dc}^* - z_1) dt \quad (7)$$

式中: K_p 和 K_i 为 PI 系数。

前述控制量 u_0 是在未考虑系统所受总扰动的情况下生成的。为达成自抗扰的核心目标, 需利用 AESO 观测到的总扰动 z_2 对其进行动态补偿。将 u_0 减去总扰动 z_2 与扰动补偿系数 b_0 的比值, 即可得到最终补偿后的系统控制量 u , 该量即为电流内环的参考电流 I_L^* :

$$u = I_L^* = u_0 - \frac{z_2}{b_0} \quad (8)$$

此补偿环节使得控制器能够主动抵消内外扰动对系统的影响, 从而显著提升了电压环的鲁棒性与抗干扰性能。

2.1.2 误差驱动型 AESO 的设计

传统 ESO 通常采用恒定的观测带宽 ω_0 , 这一固定带宽在设计上存在根本权衡: 取较大值可提高扰动计算速度但会放大测量噪声与导致控制抖动; 取较小值虽有利于抑噪却降低了对突发扰动

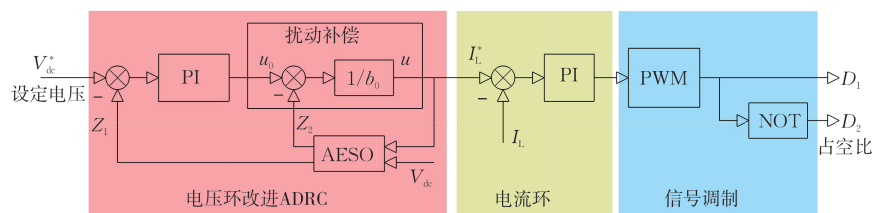


图 3 基于改进 ADRC 的储能设备双闭环控制结构

Fig.3 Double-loop control structure of energy storage devices based on improved ADRC

的响应速度,因而难以在噪声抑制与快速估计间取得同时最优。针对这一不足,本文提出采用误差驱动型 AESO,使观测带宽成为时间变化量 $\omega_0(t)$,并根据观测误差 $e(t)=z_1(t)-y(t)$ 的幅值自适应调节。采用工程上易实现且平滑的自适应律:

$$\omega_0(t) = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{|e(t)|}{|e(t)| + c} \quad (9)$$

式中: ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为带宽上、下限;常数 c 用于尺度归一化与平滑过渡。

该自适应策略在扰动突发时自动增大带宽以加快估计和补偿速度,而在稳态或噪声占优时自动减小带宽以抑制高频噪声放大,从而在响应速度与抗噪性之间取得更优折中,便于在仿真与工程实现中将 ADRC 优势最大化。

2.1.3 收敛性分析与参数整定原则

本文在 ESO 中采用了变带宽的自适应策略,系统由此变成了线性时变系统,因此引入 Lyapunov 理论进行稳定性分析。定义观测误差向量 $\epsilon = [z_1 - x_1, z_2 - x_2]^T$, x_i 为对应真实值。根据式(5)与式(6),观测误差的动态方程可表示为:

$$\dot{\epsilon} = A(t)\epsilon + E f_{\text{dist}} \quad (10)$$

式中: $A(t)$ 为包含时变带宽 $\omega_0(t)$ 的系统矩阵。

为保证系统的收敛性,根据线性时变系统稳定性理论,构造 Lyapunov 候选函数 $V = \epsilon^T P \epsilon$, 其中 P 为正定对称矩阵。系统的收敛条件取决于带宽的变化率 $\dot{\omega}_0(t)$ 。当 $\omega_0(t)$ 满足有界性和缓变性两个条件时,观测器是渐进稳定的;由于带宽始终位于正实数区间内,即 $0 < \omega_{\min} \leq \omega_0(t) \leq \omega_{\max}$ 。本文所设计的自适应律式(9)满足有界性条件,保证了系统矩阵 $A(t)$ 的特征值始终位于左半复平面。缓变性条件要求带宽的变化率受到限制,不发生剧烈突变;本文在带宽自适应变化上采取平滑函数保证了 $\omega_0(t)$ 的一阶导数连续且有界,避免了因参数跳变引起的系统失稳。即使在存在有界扰动 f_{dist} 的情况下,上述条件也能保证观测误差收敛至原点附近的一个有界邻域内。

观测器带宽选取需在快速跟踪与噪声抑制间取得折中。遵循离散系统稳定性原则(带宽 $\leq f_s/5 \sim f_s/10$),结合 10 kHz 采样频率,本文设定带宽上限 $\omega_{\max} = 9000$ (约 $f_s/7$),以确保快速响应下

的稳定裕度;设定下限 $\omega_{\min} = 3000$,以既能覆盖主要扰动频带又能有效衰减高频噪声为准。基于此,该机制实现了“带宽按需分配”:稳态时观测误差 $|e|$ 较小, $\omega_0 \rightarrow \omega_{\min}$,呈现强低通滤波特性,避免噪声放大引发的稳态抖振;扰动突发时 $|e|$ 剧增, $\omega_0 \rightarrow \omega_{\max}$,优先保障对总扰动的快速估计与补偿。该策略从机理上解耦了抗扰性与抑噪性的矛盾,确保系统在不同工况下的平稳运行。

2.2 交流侧电压 FNN 控制设计

2.2.1 基于 FNN 控制的双向逆变器电压环控制

针对交流侧传统 PI 控制在复杂孤岛工况下自适应能力不足且依赖人工经验反复调参的问题,本文为双向逆变器电压环设计了 FNN 控制器。该方法融合了模糊逻辑的推理能力与神经网络的非线性拟合能力,利用神经网络离线逼近模糊控制规则,从而在在线运行中实现 PI 参数的实时自适应调整,显著提升系统的鲁棒性与动态响应速度^[21]。

如图4所示,本文将 FNN 应用于逆变器电压外环,构建参数自适应 PI 控制架构。该控制器实时采集母线电压偏差及其变化率,经归一化处理输入预训练 FNN;网络基于固化的非线性映射关系实时计算当前最优比例与积分增益 (K'_p 和 K'_i),动态更新 PI 调节器以生成电流内环指令。该机制实现了从固定参数向状态依赖型自适应控制的转变,兼顾了模糊逻辑的非线性处理能力与神经网络的平滑计算优势。

2.2.2 FNN 的拓扑结构与训练机制

为克服传统模糊查表法输出不连续及在线计算复杂的局限,本文引入基于离线监督学习的多层前馈神经网络对控制规则进行平滑拟合。训练样本集的构建依据经典 Ziegler-Nichols 整定法则与专家经验,调节并设置误差 e 和误差变化率 e_c 的归一化论域,并划分为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB} 7 个模糊子集;据此建立了包含 49 条逻辑规则的模糊推理库,形成了从系统状态到 PI 参数 (K'_p 、 K'_i) 的非线性映射数据集,以此替代烦琐的规则表查询。

FNN 控制器结构如图5所示,包含 2 个并行的 FNN 子网络,均采用 2-49-14-7-1 拓扑形式。输入层接收归一化的 e 和 e_c , 3 个隐含层利用 Tan-

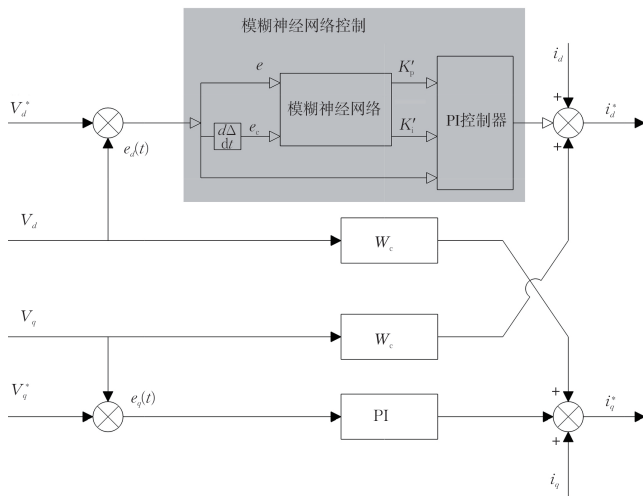


图 4 基于 FNN 的双向逆变器电压环控制

Fig.4 Voltage loop control of bidirectional inverter based on FNN

Sigmoid 激活函数捕捉非线性特征, 输出层直接生成最优控制增益。训练过程采用带动量的梯度下降算法, 以前述 49 组模糊规则数据为样本进行离线迭代, 设定 MSE(均方误差)目标为 0.005。经过 Epoch 迭代收敛后, 网络能够以高精度逼近模糊控制曲面, 在在线运行中根据实时状态直接计算最优 PI 参数, 实现了控制增益的连续、平滑自适应调节。

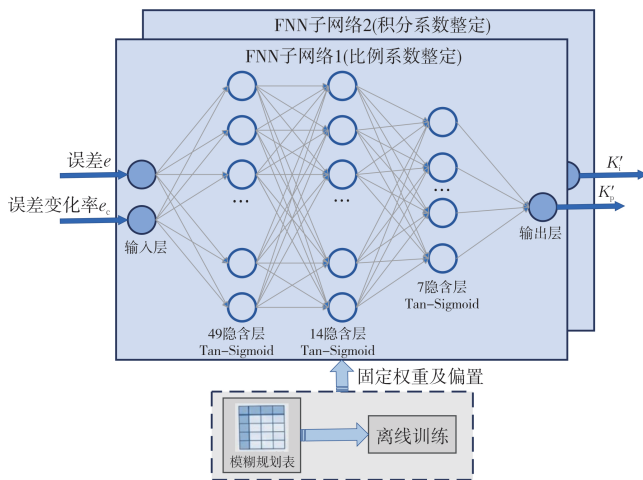


图 5 FNN 控制器结构

Fig.5 FNN controller structure

网络权重参数在仿真前离线确定, 其收敛性由训练算法保证, 消除了在线学习可能引发的参数发散与系统震荡风险。训练样本源于平滑、单调的专家规则曲面而非含有随机噪声的实测数据,

且网络采用了逐层降维的瓶颈结构, 使得网络能够准确捕捉控制规律而非记忆噪点, 有效规避了过拟合现象。这种“离线训练+在线推理”的实施模式, 既赋予了控制器处理非线性工况的自适应能力, 又确保了运算的实时性与系统的稳定, 具有良好的可实施性。

2.3 交流功率前馈协同机制

孤岛模式下, 母线电压稳定直接关乎系统安全^[22]。受双向逆变器控制特性影响, 交流侧源荷波动会经逆变器转化为直流功率需求变化, 进而冲击直流母线; 若仅依赖储能 BDC 电压环被动调节, 系统响应往往滞后, 易引发较大电压偏差。因此, 引入交流功率前馈协同控制, 旨在提前感知交流侧波动并快速传递至储能环节, 通过交直流双侧的主动协同调节, 提升系统整体的动态稳定性。

针对上述问题, 本文提出的前馈协同机制通过实时采集交流侧有功功率 P_{ac} 的变化值 ΔP_{ac} , 经 PI 调节器生成前馈补偿量 ΔV_{ff} , 并叠加至储能 BDC 电压环的参考电压, 实现预先补偿。改进后的电压环参考值表达式如下:

$$V_{dc}^* = V_{dc0}^* + \Delta V_{ff} \quad (11)$$

$$\Delta V_{ff} = k_{pi} \Delta P_{ac} + k_{if} \int \Delta P_{ac} dt \quad (12)$$

式中: V_{dc0}^* 为母线电压基准值; k_{pi} 和 k_{if} 分别为前馈 PI 控制器的比例与积分系数。

通过引入该前馈补偿, 储能电压外环能够提前调整参考电压, 快速释放或吸收功率, 减小交流侧功率扰动对直流母线电压的冲击, 实现交直流两侧的协同稳定控制。

所采用的前馈控制理论上不改变原反馈控制系统的闭环极点分布, 不会破坏系统的绝对稳定性, 但过大的前馈增益系数 k_{pi} 可能导致测量噪声被放大, 进而引发直流母线电压参考值的抖动。为此本文在比例系数的选取上基于系统的功率-电压灵敏度分析, 通过仿真测试确定直流母线电压对交流功率波动的最大允许偏差范围, 以此界定增益的上限, 确保在抑制大扰动的同时, 不对微小的测量噪声产生过度响应。此外本系统还在前馈 PI 控制器输出端设置了饱和限幅环节, 确保了即使在极端功率突变或传感器故障工况下前馈补偿电压也不会导致直流母线参考电压越限, 从而

保证了控制结构在不同功率扰动下的鲁棒性。

3 仿真实验

3.1 仿真平台与参数设置

为验证所提分布式协同策略在孤岛模式下的有效性,本文基于MATLAB/Simulink搭建风光储交直流混合主动配电网仿真平台。为全面评估“自适应ADRC+FNN+功率前馈”策略的性能,设计如下多组对比实验:交流侧逆变器电压环对比考察传统PI、模糊PI、滑模控制及本文FNN控制的响应差异;直流侧储能电压环则针对传统PI、标准ADRC+前馈及本文改进ADRC+前馈3种策略进行性能对照,以此为后续动态特性与波动抑制分析提供数据支撑。

系统主要参数设置如下:光伏支路额定容量为60 kW,开路电压与短路电流分别为375 V和220 A,环境温度与基准光照强度分别设为25 °C和795 W/m²。风机支路额定功率为50 kW,转动惯量为0.192 kg·m²,基准风速为11 m/s。储能单元额定容量为16 kWh,额定电压为400 V,目标直流母线电压设定为750 V,其电压环PI参数分别整定为100和10。双向逆变器交流侧电压为220 V/50 Hz,滤波电感L设置为5 mH,滤波电容C设置为80 μF,SVPWM开关频率10 kHz,其基础电压外环PI参数比例系数取2、积分系数取300,详细控制器参数如表1所示。

表1 控制器参数

Table 1 Controller parameters

| 参数名 | 数值 |
|-------------------------|-----------|
| 自抗扰比例系数 | 100 |
| 自抗扰积分系数 | 10 |
| 扰动补偿系数 b_0 | 8 |
| 观测器最大带宽 ω_{\max} | 9 000 |
| 观测器最小带宽 ω_{\min} | 3 000 |
| 比例系数模糊论域 | [1,3] |
| 积分系数模糊论域 | [200,400] |
| 前馈补偿比例因子 | 0.7 |
| 前馈补偿积分因子 | 1 |

3.2 工况设计

为全面验证所提出的交直流电压协同控制策略在多源功率波动下的动态性能,本文设计了多扰动叠加的典型工况,仿真总时长设置为0.5 s。

在0.1 s时,交流侧负载突变,由20 kW瞬时翻倍至40 kW,用以考察交流负载扰动对系统电压的影响;在0.2 s时,风速由11 m/s骤升至16 m/s,对应风机输出功率由29 kW提升至43.5 kW,验证风机功率突增情况下交流母线电压的波动及控制器的调节能力;在0.3 s时,直流负载由10 kW突增至20 kW,考察直流侧扰动对直流母线电压稳定性的冲击;在0.4 s时,光照强度由795 W/m²提升至1 000 W/m²,光伏输出功率随之由50 kW增至60 kW,用于验证光伏出力变化对整体电压水平的影响。通过上述多时间点、不同源荷侧扰动的叠加,可以综合评估所提协同控制策略的动态响应能力和电压波动抑制效果。

3.3 结果分析

按照上述系统参数以及工况进行仿真,得到的仿真结果如图6—8所示。图6为系统各支路输出功率变化曲线,可以看到交流负载、风机、直流负载、光伏分别在相应时刻发生突变,双向DC/AC逆变器平衡交直流两侧的功率分配,储能不断地随系统总输出功率变动而变动,吸收多余能量。

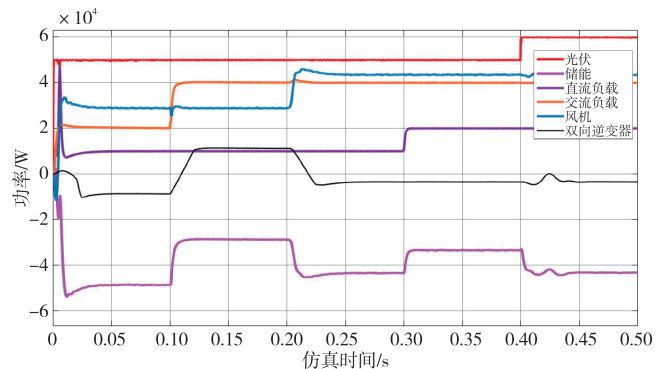


图6 输出功率变化曲线

Fig.6 Output power variation curves

交流侧逆变器电压环控制效果如图7所示,具体暂态指标见表2和表3。在0.1 s负载突增工况下,传统与模糊PI控制电压跌落显著,峰值偏差分别达53.33 V与52.12 V;滑模控制虽具鲁棒性,但稳态误差(1.14 V)与恢复时间(0.398 7 s)较大,且因固有抖振导致STD(平滑度指标)高达0.579 8,约为其他方法的3.5倍,波形质量欠佳。相比之下,本文FNN控制器综合性能最优:跌落幅度限

制在 51.18 V, 恢复时间缩短至 0.108 3 s, 并保持最低的整体跟踪 RMSE(均方根误差)与 STD, 兼顾了快速响应与抖动抑制。此外, 在 0.2 s 风机功率突增时, FNN 参数自适应优势凸显, 超调量仅 3.70 V, 较传统 PI(7.20 V)与滑模控制(6.04 V)降低约 40%~50%, 且恢复时间仅需 0.008 3 s。上述量化数据证实, 所提策略在动态抗扰、稳态精度及波形平滑度方面均优于现有主流算法。

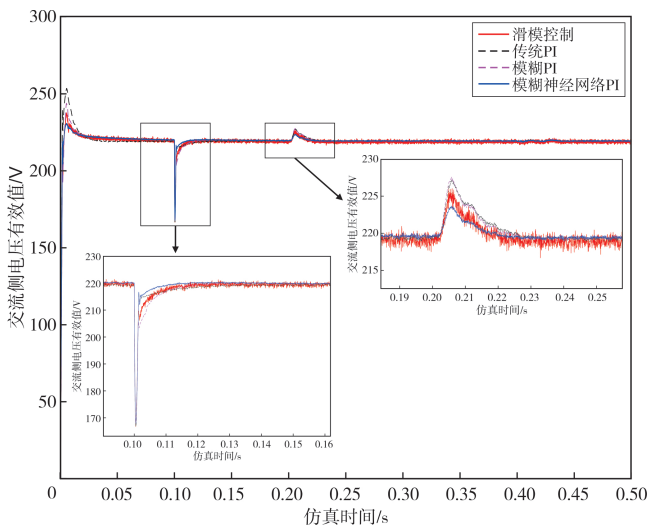


图 7 交流侧电压有效值变化曲线

Fig.7 Variation curves of the effective values of the AC side voltage

表 2 交流负载突变下交流母线电压暂态性能指标对比
Table 2 Comparison of transient performance indicators of AC bus voltage under AC load sudden change

| 参数名 | 峰值 偏差/V | 稳态 误差/V | 恢复 时间/s | RMSE | STD |
|----------|------------|------------|------------|------|---------|
| 传统PI | 53.33 | 0.62 | 0.115 0 | 2.58 | 0.159 9 |
| 模糊PI | 52.12 | 0.61 | 0.113 8 | 2.71 | 0.164 9 |
| 滑模控制 | 53.29 | 1.14 | 0.398 7 | 2.68 | 0.579 8 |
| 模糊神经网络PI | 51.18 | 0.59 | 0.108 3 | 2.34 | 0.146 9 |

表 3 风机功率突增下交流母线电压动态性能指标对比
Table 3 Comparison of dynamic performance indicators of AC bus voltage under sudden wind turbine power increase

| 参数名 | 峰值 偏差/V | 稳态 误差/V | 恢复 时间/s | RMSE | STD |
|----------|------------|------------|------------|------|---------|
| 传统PI | 7.20 | 0.64 | 0.105 0 | 1.13 | 0.159 5 |
| 模糊PI | 7.59 | 0.60 | 0.013 8 | 1.13 | 0.162 7 |
| 滑模控制 | 6.04 | 1.16 | 0.298 7 | 1.35 | 0.577 3 |
| 模糊神经网络PI | 3.70 | 0.61 | 0.008 3 | 0.73 | 0.144 0 |

表 4 交流负载突变下直流母线电压暂态性能指标对比
Table 4 Comparison of transient performance indicators of DC bus voltage under AC load sudden change

| 参数名 | 峰值 偏差/V | 稳态 误差/V | 恢复 时间/s | RMSE | STD |
|------------|------------|------------|------------|------|---------|
| 传统PI、无协同 | 16.15 | 0.011 1 | 0.304 2 | 3.21 | 1.083 2 |
| 自抗扰、前馈协同 | 7.38 | 0.018 1 | 0 | 2.16 | 2.295 9 |
| 改进自抗扰、前馈协同 | 3.72 | 0.011 7 | 0 | 1.15 | 1.256 6 |

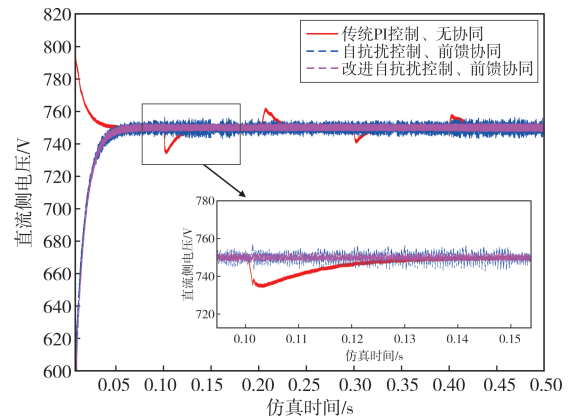


图 8 直流侧电压曲线

Fig.8 DC side voltage curves

直流侧储能系统电压环的控制效果对比如图 8 所示, 性能指标对比如表 4 所示。仿真数据表明, 传统 PI 控制(无协同)在面对跨侧功率冲击时抗扰能力显著不足, 直流母线电压跌落幅度高达 16.15 V, 且需 0.304 2 s 才能恢复稳态, 整体跟踪误差高达 3.21。引入标准 ADRC 与功率前馈协同机制后, 电压跌落被大幅抑制至 7.38 V, 验证了前馈补偿的有效性; 然而, 标准 ESO 采用固定高带宽, 导致系统对高频噪声敏感, 其稳态 STD 恶化至 2.295 9, 波形呈现出明显的“抖振”现象。相比之下, 本文提出的改进自抗扰结合前馈协同策略得到了较好的综合性能: 得益于带宽的动态调节, 该方法在保持极速响应的同时, 将电压最大偏差进一步压缩至 3.72 V, 仅为传统 PI 的 23%, 并将 RMSE 降至最低的 1.15; 同时 STD 优化至 1.256 6, 相比标准 ADRC 降低了约 45%, 有力证明了自适应机制在抑制噪声放大、提升控制平滑性方面的显著优势。

综合上述分析结果, 所提策略能够显著抑制主动配电网中交直流两侧因光伏、风机功率和交直流负载突变所引起的电压跌落与过冲, 缩短电

压恢复时间,提高母线电压的稳定性和系统的电能质量。

4 结语

本文针对孤岛模式下风光储交直流混合配电网的电压稳定问题,建立了系统全链路数学模型,并提出一种分布式协同控制策略。在直流侧,设计了误差驱动型自适应ADRC以增强对时变扰动的补偿能力;在交流侧,引入FNN控制器实现了逆变器参数的在线自适应优化;同时,构建了基于交流功率前馈的跨侧协同机制,有效缓解了交流波动对直流母线的冲击。

尽管本文提出的协同控制策略在仿真环境下展现了优异的电压控制性能,但研究仍存在一定的局限性,有待后续工作进一步完善:

1)本文仿真主要聚焦于系统额定容量内的源荷功率突变工况,且假设电池SOC(荷电状态)在短时仿真中维持恒定,未深入探讨SOC越限或逆变器过载限功率等极端边界条件下的控制保护逻辑。

2)虽然文中提出的自适应ADRC与FNN具备一定的抗噪能力,但针对交直流协同中的功率前馈链路,未详细量化通信延迟对系统稳定性的影响边界。

3)本研究主要针对孤岛运行模式,未来需进一步探究该策略在弱电网并网或并离网平滑切换场景下的适用性。

参考文献

- [1] 吕征宇,周亮.考虑源荷不确定性的主动配电网两段式电压自动控制方法[J].电气传动,2023,53(11):46-52.
LÜ Zhengyu, ZHOU Liang. A two-stage voltage automatic control method for active distribution networks considering source-load uncertainty[J]. Electric Drive, 2023, 53(11):46-52.
- [2] 胡子健,朱红,韦磊,等.考虑风光荷储互动的配电网孤岛划分图计算方法[J].广东电力,2024,37(12):70-78.
HU Zijian, ZHU Hong, WEI Lei, et al. Islanding partition of active distribution network based on graph computation considering wind-solar-storage-load interaction[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(12):70-78.
- [3] 赵虎府,钱佳钰,潘豪,等.孤岛光储直流微电网电压自适应下垂控制[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版),2024:1-11.[2025-09-25].<https://link.cnki.net/urlid/13.1212.TM.20240424.0959.002>.
- [4] 曾伟,熊俊杰,李建林,等.直流微电网多储能并联电压和功率共享控制方法研究[J].电工电能新技术,2023,42(9):36-45.
ZENG Wei, XIONG Junjie, LI Jianlin, et al. Research on voltage and power sharing control method of multi-energy storage parallel connection in DC microgrid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(9):36-45.
- [5] 刘志坚,李晓磊,梁宁,等.基于前馈自抗扰的光伏微电网混合储能控制策略[J].电力建设,2021,42(9):96-104.
LIU Zhijian, LI Xiaolei, LIANG Ning, et al. Control strategy of hybrid energy storage for photovoltaic microgrid applying feedforward active disturbance rejection[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9):96-104.
- [6] 戴腾飞,茅靖峰,吴爱华,等.分布式光储直流微电网滑模自抗扰鲁棒运行控制[J].可再生能源,2022,40(11):1505-1514.
DAI Tengfei, MAO Jingfeng, WU Aihua, et al. Sliding mode active disturbance rejection robust operation control for distributed photovoltaic and energy storage DC microgrid[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(11):1505-1514.
- [7] 王浩,聂晶莹,李斌,等.基于分数阶滑模的混合微电网接口变换器电压稳定控制[J].电力系统及其自动化学报,2024,36(4):141-149.
WANG Hao, NIE Jingying, LI Bin, et al. Voltage stability control of interface converter in hybrid microgrid based on fractional-order sliding mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(4):141-149.
- [8] SHEN X N, LIU J X, LIU Z, et al. Sliding-mode control of neutral-point-clamped power converters with gain adaptation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(8):9189-9201.
- [9] 欧阳鹏,赵世伟.基于无源性PI控制的直流微电网双向变换器电压控制[J].机械制造与自动化,2023,52(5):205-209.
OUYANG Peng, ZHAO Shiwei. Voltage control of DC microgrid bi-directional converter based on passivity PI control[J]. Machine Building & Automation, 2023, 52(5):205-209.
- [10] DU Y, CHONG P Y, WANG X, et al. Adaptive RoCoX droop control strategy for AC/DC hybrid microgrid[J]. In-

- ternational Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 157: 109860.
- [11] 施凯, 张小伟, 徐培凤, 等. 孤岛混合微电网互联变流器自适应功率协调控制[J]. 可再生能源, 2025, 43(7): 943-951.
SHI Kai, ZHANG Xiaowei, XU Peifeng, et al. Adaptive power coordination control of interlinking converters in isolated hybrid microgrid [J]. Renewable Energy Resources, 2025, 43(7): 943-951.
- [12] ZHANG K Z, SU M, LIU Z J, et al. A distributed coordination control for islanded hybrid AC/DC microgrid [J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17(2): 1819-1830.
- [13] XU H Z, YU C Z, MAO F B, et al. Research on direct power control strategy based on voltage controlled virtual synchronous generator [J]. Electronics, 2021, 10(19): 2415.
- [14] ZHANG Y L, LIU Z X, CHEN Z Q. Distributed cooperative control of BESSs in AC and DC hybrid microgrid and its energy Internet paradigm [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 2042-2051.
- [15] 年珩, 孔亮. 直流微电网故障保护技术研究综述[J]. 高压电压技术, 2020, 46(7): 2241-2254.
NIAN Heng, KONG Liang. Review on fault protection technologies of DC microgrid [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2241-2254.
- [16] 刘蓉晖, 陈耿, 孙改平, 等. 考虑风光荷联合场景的配电网动态重构策略[J]. 浙江电力, 2025, 44(7): 93-101.
LIU Ronghui, CHEN Geng, SUN Gaiping, et al. Dynamic reconfiguration of distribution networks considering wind-PV-load scenarios [J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(7): 93-101.
- [17] 管敏渊, 姚瑛, 吴圳宾, 等. 基于RBF神经网络的储能VSG控制策略优化[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 55-64.
GUAN Minyuan, YAO Ying, WU Zhenbin, et al. Optimization of energy storage VSG Control strategy based on RBF neural networks [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 55-64.
- [18] KHAN H S, MEMON A Y. Robust output feedback control of the voltage source inverter in an AC microgrid [J]. Energies, 2022, 15(15): 5586.
- [19] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. Basic Automation, 2002, 9(3): 13-18.
- [20] 谢震, 崔建, 李喆, 等. 基于改进自抗扰的电压控制型双馈风电机组故障穿越策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 160-169.
XIE Zhen, CUI Jian, LI Zhe, et al. Fault ride-through strategy of voltage-controlled doubly-fed wind turbine based on improved active disturbance rejection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 160-169.
- [21] 王志祥, 潘国清, 袁宇波, 等. 基于改进模糊自适应的虚拟同步发电机扰动优化控制[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5): 138-147.
WANG Zhixiang, PAN Guoqing, YUAN Yubo, et al. Disturbance optimization control of virtual synchronous generator based on improved fuzzy adaptive method [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 138-147.
- [22] LIU A D, LIU J, WU Q. Improvement of VSG transient performance based on power feedforward decoupling control [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(20): 4080-4095.

收稿日期: 2025-12-02; 修回日期: 2026-01-23

作者简介:

洪建军(1977), 男, 硕士研究生, 从事电网规划、新型电力系统建设工作。

齐宗强(1994), 男, 博士, 从事电力系统稳定性分析与控制研究。(通信作者)

(本文编辑: 童 凯)