

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.02.004

用于构网型配储风机的储能 DC/DC 变换器动态性能提升方法

史皓男^{1,2}, 孙毅超^{1,2}, 唐小波^{1,2}, 王伟¹, 杨冬梅¹, 韦徵¹

(1. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室(南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司), 江苏 南京 211106; 2. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 风力发电机内部配储系统通常需要采用 DC/DC 变换器连接到直流母线, 而采用传统比例积分(proportional integral, PI)控制的储能 DC/DC 变换器由于动态性能不佳, 在电网惯量/频率支撑过程中易导致母线电压跌落较多甚至产生欠压停机的风险。文中提出采用自抗扰控制对 LLC 型储能 DC/DC 变换器的抗扰性能与动态性能进行提升, 并利用改进灰狼算法对自抗扰控制器的 6 个核心参数进行离线自寻优。改进灰狼算法将动态邻域搜索引入到传统灰狼算法的位置更新策略中, 有效提升了自寻优算法的收敛速度。所提改进灰狼优化自抗扰控制方法能够缩短母线电压恢复时间, 快速协调配储风机和电网之间的能量交换, 有效提升配储风机的母线电压稳定性和惯量/频率支撑能力。MATLAB/Simulink 仿真结果验证了文中所提控制方法的可行性和有效性。

关键词: LLC 型储能 DC/DC 变换器; 自抗扰控制; 改进灰狼算法; 离线自寻优; 动态邻域搜索; 配储风机

中图分类号: TM46

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)02-0034-10

0 引言

双碳背景下, 大规模新能源的高效开发利用和高品质并网发电是构建新型电力系统的关键技术。风力发电作为新能源发电中最成熟、最具商业化前景的发电形式之一, 应用规模逐年增长, 相关技术日趋成熟, 但风电渗透率的提高也带来了包括频率稳定性在内的诸多挑战, 影响电力系统的稳定运行^[1-2]。在风电场站的规划中, 储能设备因其响应速度快、控制灵活等特点受到广泛关注, 成为辅助风电参与常规电网调频、提供必要惯量支撑的重要手段^[3-8]。安装在风机内部的储能设备通常采用两级式架构, 即在网侧逆变器之前配置前级 DC/DC 变换器, 便于协同控制不同电压等级的储能电池。文献^[9-11]表明由于储能电池单体存在差异, 串联电池级数过多会难以管理、降低电池使用寿命, 导致电池组与直流母线之间存在较大的压差, 此时采用隔离型 DC/DC 变换器可显著提高效率。LLC 谐振变换器在隔离型 DC/DC 变换器中具有优异的软开关特性以及高功率密度等优点, 且能满足工作过程中输入输出电压宽范围调节的需求, 因此 LLC 变换器在服务器电源、电动汽车以及新能源等领域应用广泛^[12-16]。

由于电网频率事件的随机性和偶发性, 需要储能系统的频率、惯量支撑能力较优, 保障电网的稳定运行。为在大惯量系统下能进一步加快能量双向流动的速率, 快速响应网侧的调频需求, 通过提

升 LLC 型储能 DC/DC 变换器的动态性能, 缩短输出电压的暂态响应时间, 使母线电压与传输功率迅速稳定。传统比例积分(proportional integral, PI)控制在 LLC 输入电压以及负荷波动时难以快速消除扰动带来的影响, 输出电压振荡时间长, 且由于其被动地基于负反馈来消除误差, 可能导致超调量过大, 影响系统稳定^[17-20]。

韩京清教授在 20 世纪 90 年代提出了一种实时观测系统扰动的自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)方法, 其具有不依赖被控对象模型、不区分系统内外扰动的特点^[21]。LLC 属于复杂的非线性系统, 因此难以对其精确建模。ADRC 可以把建模误差归算到总扰动内, 利用状态观测器将复杂的被控对象还原为积分器串联型^[22], 从而大大简化控制器设计。文献^[23-25]表明 LLC 应用 ADRC 可以解决传统控制环路补偿时带来的带宽设计受限、动态性能不佳等问题。

现阶段, 非线性自抗扰控制器的参数整定通常采用经验试凑法, 其整定过程较为复杂, 往往难以得到精确结果。而线性 ADRC 虽然对控制器进行了简化, 舍弃了跟踪微分器(tracking differentiator, TD), 但扩张状态观测器(extended state observer, ESO)只能跟踪线性变量, 输出精确度有所降低^[26]。应用群体智能算法对非线性自抗扰控制器中的关键参数进行迭代自寻优可以快速找到参数可行域内的最优解。文献^[27-28]表明, 相较于传统 ADRC, 灰狼算法优化后的自适应 ADRC 在总扰动的估计精度上有明显提升, 但其仅优化了 ESO 的

参数, 在输出精确度上仍有提升潜力。

针对非线性 ADRC 的参数计算负担重、参数整定困难的问题, 文中采用改进灰狼算法优化 ADRC, 在经验法的基础上确定核心参数的可行域, 通过参数迭代自寻优的方法找到全局最优解。对于文献[29]中提到的传统灰狼算法容易陷入局部最优解、后期收敛速度慢的问题, 文中通过改进灰狼的位置更新策略, 提升狼群的搜索速度与精度, 从而加快算法收敛速度。仿真结果验证了文中所提优化 ADRC 的方法可以提升 LLC 谐振变换器的动态性能, 配储风机发电系统可以快速与电网进行能量交换。

1 构网型配储风力发电系统描述

1.1 构网型配储风力发电系统架构

构网型配储风力发电系统的拓扑如图 1 所示, 其由风电场、交流联结变压器、本地负载以及常规电网组成。储能设备配置于风储一体机内部, 通过双向 DC/DC 变换器与风机并接在直流母线上, 二者共用一个网侧逆变器, 经过 LC 滤波器接入交流母线。在该系统中, 风电作为主力电源满足电力供应需求, 储能设备可以弥补风能不确定性带来的能量缺口, 平滑风力发电输出, 为电网及本地负载提供稳定的能源供应。图 1 中, P_O 为馈入电网的功率; P_{load} 为本地负载功率; L_g 、 R_g 分别为线路电感和线路电阻; P_{WT} 、 P_{ESS} 分别为风机、储能的输出功率;

C_0 为风储一体机内部的直流母线支撑电容; L_f 、 C_f 分别为滤波电感和滤波电容; u_{abc} 、 i_{abc} 、 u_{dc} 分别为逆变器输出三相电压、电流与直流母线电压; u_{dq} 、 i_{dq} 分别为 u_{abc} 、 i_{abc} 坐标变换后的 d 、 q 轴分量; P_e 、 Q_e 分别为逆变器输出的有功、无功功率; P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功、无功指令值; U_n 、 ω_n 分别为三相电压、角频率额定值; δ 为功角; E 为逆变器输出电动势; u_{ref} 为逆变器输出电动势参考值; g_{1-4} 、 g_{1-6} 为开关管驱动信号; f_s 为储能 LLC 谐振变换器的开关频率; PMSG 为永磁同步发电机。

1.2 网侧变换器控制策略

构网型配储风力发电系统常采用虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)控制, 其核心思想为通过反馈系统频率变化来控制风储的有功输出, 保障系统能量平衡。图 1 中红色虚线框内为 VSG 控制结构, 其中滤波电感 L_f 用于模拟同步发电机的同步电抗, 滤波电容 C_f 两端电压 u_{abc} 用于模拟同步发电机的机端电压。

在该控制方式下, 直流母线承担机侧与网侧功率交换的重任, 若不考虑损耗, 功率平衡方程可表示为:

$$(P_{WT} + P_{ESS})n = P_O + \Delta P_{load} \quad (1)$$

式中: n 为风储一体机数量; ΔP_{load} 为负载的功率波动。

风机的功率波动、负荷投切或是交流电网频率波动都会影响直流母线电压的稳定, 使机侧能量不

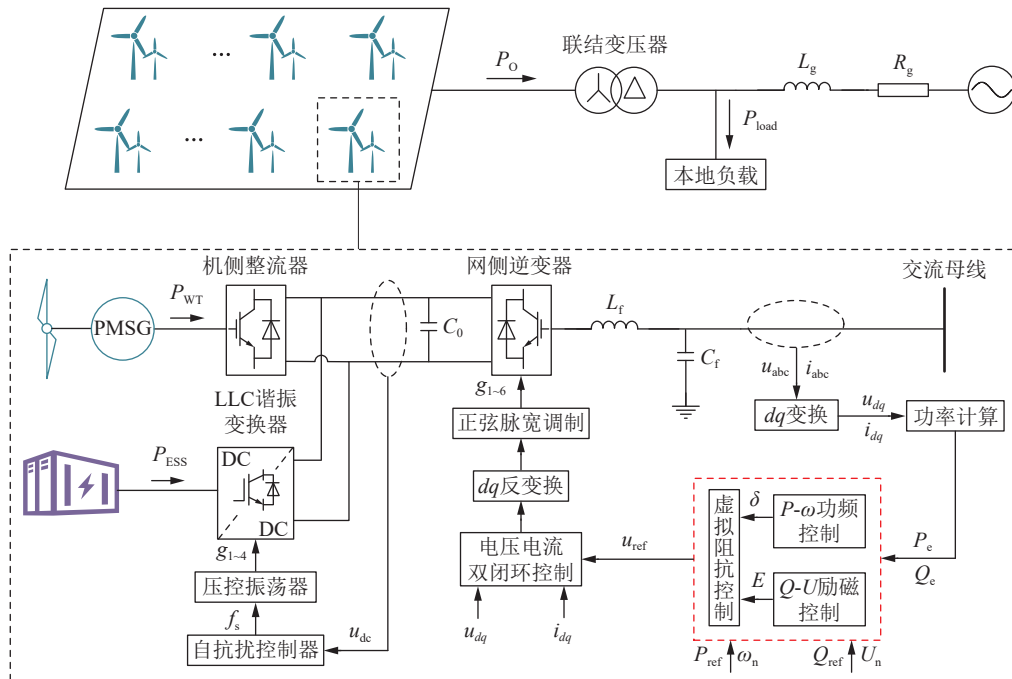


图 1 构网型配储风力发电系统拓扑

Fig.1 Topology of grid-connected wind power generation system with energy storage

能快速传递至网侧,从而影响储能对系统的惯量支撑。因此,当功率需求快速变化时,VSG对母线电压的动态响应有更高要求。

2 LLC型储能DC/DC变换器数学建模

2.1 LLC型储能DC/DC变换器电路拓扑

为快速响应电网功率需求变化,文中以LLC型储能DC/DC变换器的动态性能提升为研究重点。图2为LLC型储能DC/DC变换器的电路拓扑。其中,功率器件 Q_1 — Q_4 为高压侧开关管; Q_5 — Q_8 为低压侧开关管; D_1 — D_8 为体二极管; C_1 — C_8 为开关管结电容; L_r 、 C_r 、 L_m 分别为谐振电感、谐振电容与励磁电感; T_r 为高频变压器; N_r 为变比; U_1 、 U_2 分别为原、副边电压; C_{s1} 、 C_{s2} 分别为原、副边支撑电容。

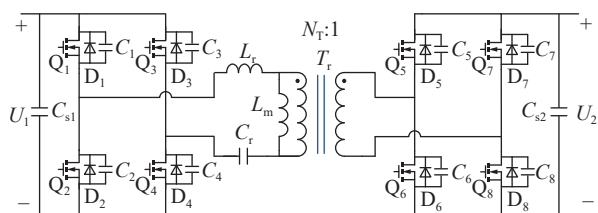


图2 LLC型储能DC/DC变换器电路拓扑

Fig.2 LLC type energy storage DC/DC converter circuit topology

LLC型储能DC/DC变换器的原边和副边均为全控型开关器件,因此能够实现能量双向流动。正向工作时,高压侧的开关管构成逆变网络,通过谐振腔将能量传递给副边,此时低压侧的开关管都处于关闭状态,通过体二极管进行续流组成整流桥,实现正向功率变换。反向工作时, L_m 两端电压受到输入电压钳位,只有 L_r 、 C_r 参与谐振,因此最大电压增益为1,此时高压侧的开关管都处于关闭状态,通过体二极管进行续流实现反向功率变换。考虑到能量从网侧流向储能侧时往往采用降压控制,因此反向工作时的电压增益仍能满足要求。LLC型储能DC/DC变换器的控制方法与单向LLC类似,采用变频控制,即开关管的信号为占空比50%的互补脉冲,通过改变电路的工作频率控制输出电压的升降。

2.2 传递函数推导

LLC谐振变换器由于其固有的非线性特性和输出“小纹波”因素,无法采用状态空间平均法进行建模,因此文中采用扩展描述函数法。该方法作为一种非线性系统分析方法,建模过程十分复杂,故文中仅简述建模的基本思路:基于包括LLC开关网络、谐振槽、整流网络和滤波网络等在内的谐振变换器的整体电路,利用基尔霍夫定律列出非线性状

态方程;通过谐波近似法将各状态变量等效为幅值时变的正余弦信号叠加,对非线性环节进行线性化处理;用谐波平衡法得到其大信号模型,并对其进行小信号扰动与线性化处理,最终得到某个稳态工作点的小信号模型。以正向工作模式为例,可得到由输出电压 v_o 到开关频率 f_s 的传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{f}_s(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (2)$$

式中: \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{D} 为系数矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵; $\hat{v}_o(s)$ 、 $\hat{f}_s(s)$ 分别为 v_o 、 f_s 的小扰动信号。

根据式(2)和下文LLC仿真参数可以计算得出 $G_p(s)$ 为七阶传递函数^[30],结构复杂,后续设计控制器十分困难,因此文中选用扫频法对LLC变换器的数学模型进行降阶处理。

设定LLC的稳态工作点为 $f_s=f_r$, f_r 为 L_r 、 C_r 的谐振频率,向稳态工作点注入幅值为5 kHz的扰动信号,即扰动信号幅值约为稳态值的5%,频率在800 Hz~90 kHz之间。在对数空间内等距选取20个数据点间隔排列,通过测量输出信号的幅值和相位,建立输入和输出之间的频率响应关系。注入小信号扰动后,得到如图3所示的输入输出小信号响应,其中输出电压稳定在800 V左右,开关频率为75 kHz。

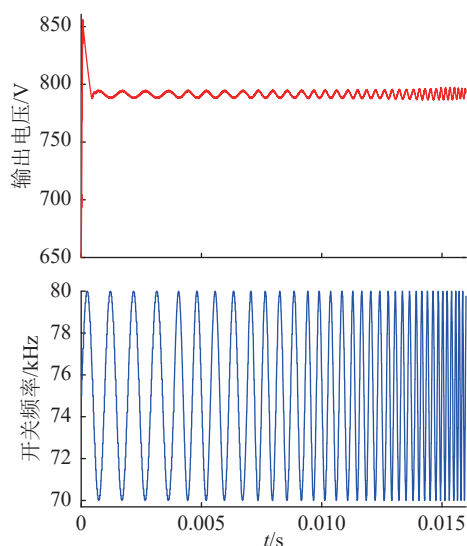


图3 输入输出小信号响应

Fig.3 Input and output small signal response

对所有数据点进行曲线拟合得到降阶后的二阶传递函数 $G_i(s)$,如式(3)所示。图4给出了系统降阶前后的波特图,其中“*”标记为扫频法选取的数据点。

$$G_i(s) = \frac{-0.79s - 1.60 \times 10^5}{s^2 + 2.21 \times 10^4 s + 1.44 \times 10^9} \quad (3)$$

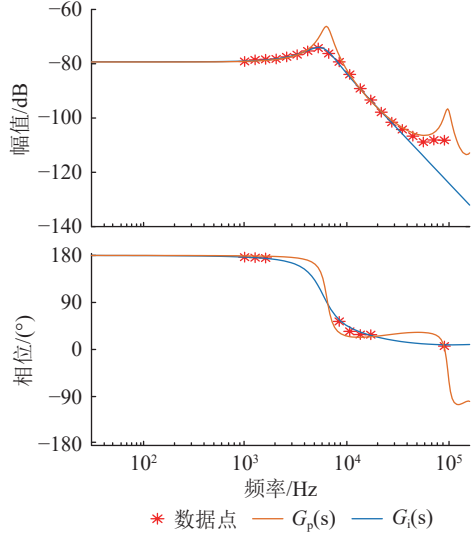


图4 系统降阶前后的波特图

Fig.4 Bode plots of before and after system order reduction

可以看出,系统降阶前后的波特图在设计控制器时较为关注的中低频段匹配度较高,在高频段略有差别,验证了所求传递函数的准确性,同时降低了后续控制器设计难度。

3 基于改进灰狼算法参数寻优的 ADRC 方法

3.1 二阶自抗扰控制器

采用二阶自抗扰控制器对上述降阶后的二阶系统进行控制。ADRC 的优势在于能够主动提取扰动信息并实时给予扰动补偿。图 5 为二阶自抗扰控制器的基本结构。其中, v_{ref} 为输入信号,即母线电压指令值; v_1 为平滑处理后的参考信号,可以快速无超调地跟踪 v_{ref} ; v_2 为 v_{ref} 的微分; e_1 、 e_2 分别为参考值和观测值的误差量; u_0 为误差积分信号; b_0 为系统补偿因子; u 为系统控制量,即 LLC 谐振变换器的开关频率 f_s ; v 为 LLC 谐振变换器的输出电压,即母线电压; z_1 为系统状态的跟踪信号; z_2 为系统状态的微分; z_3 为观测的系统总扰动。

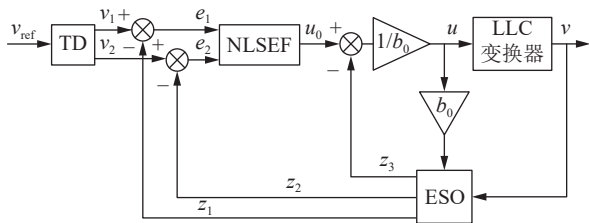


图5 二阶自抗扰控制器结构框图

Fig.5 Block diagram of second-order active disturbance rejection controller

二阶自抗扰控制器各模块算法如下。

(1) TD。当输入信号变化时,TD 可根据控制目标安排合适的过渡过程,TD 输出过渡过程微分信号,使其能在短时间内无超调地跟踪输入信号。建立的跟踪-微分系统如式(4)所示。

$$\begin{cases} f = \text{fhan}(v_1(k) - v_{\text{ref}}(k), v_2(k), r_0, h_0) \\ v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hf \end{cases} \quad (4)$$

式中: k 、 $k+1$ 分别为当前采样时刻和下一采样时刻; r_0 为决定跟踪速度的快速因子; h_0 为采样步长; h 为积分步长; $\text{fhan}(\cdot)$ 为最速综合函数。为简化表达,定义函数 a 为:

$$a = \begin{cases} v_2 + \frac{\sqrt{d^2 - 8r_0|h_0|} - r_0h_0}{2} \text{sgn}(v_1 - h_0v_2) & |v_1 - h_0v_2| > h_0d \\ v_2 + \frac{v_1 - h_0v_2}{h_0} & |v_1 - h_0v_2| \leq h_0d \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为单位模函数; $d = r_0h_0^2$ 。

$$f = \begin{cases} -r_0 \text{sgn}(a) & |a| > d \\ -r_0 \frac{d}{a} & |a| \leq d \end{cases} \quad (6)$$

(2) ESO。ESO 将系统的内外部扰动合并成一个新的状态变量,利用输入输出观测出所有状态变量的状态。设计的观测器如下:

$$\begin{cases} z_1(k+1) = z_1(k) + h[z_2(k) - \beta_1(z_1(k) - v(k))] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(z_3(k) - \beta_2l + b_0u) \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h\beta_3l \end{cases} \quad (7)$$

式中: β_1 、 β_2 、 β_3 为观测器增益; l 为最优控制函数,对噪声干扰有很好的滤波效果,其表达式见式(8)。

$$l(x_0, a_0, z) = \begin{cases} z^{\frac{x_0}{1-a_0}} & |x_0| \leq z \\ \text{sign}(x_0)|x_0|^{a_0} & |x_0| > z \end{cases} \quad (8)$$

式中: x_0 、 a_0 、 z 分别为状态误差、非线性测度和区间阈值; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

(3) 非线性状态误差反馈 (nonlinear state error feedback, NLSEF) 控制律。NLSEF 控制律可以通过跟踪过渡过程产生的误差信号,完成非线性的控制组合,对状态变量给予动态补偿,其控制形式为:

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1 \\ e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = k_p l(x_0, a_0, z) + k_d l(x_0, a_0, z) \end{cases} \quad (9)$$

式中: k_p 、 k_d 分别为比例和微分增益。

结合式(4)~式(9)可计算出系统的控制量 u 为:

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} \quad (10)$$

自抗扰控制器对于电压波动、负载变化等扰动

具有较强的适应性和鲁棒性,因此适用于 LLC 变换器这种强耦合的非线性系统。

ESO 中的观测器增益 β_1 、 β_2 、 β_3 决定了系统状态与扰动估计精度, NLSEF 控制律中的比例和微分增益 k_p 、 k_d 会影响系统的动态表现, 补偿因子 b_0 则主导控制器输出量的匹配度, 确保其适配系统特性。合理设置这些参数能够确保 LLC 变换器在对外界扰动时保持良好的鲁棒性和快速性, 故文中选取上述 6 个参数作为待优化的核心参数。

3.2 基于改进灰狼算法的 ADRC 核心参数寻优

目前, ADRC 常用的优化算法有粒子群算法、遗传算法及蚁群算法 3 种。粒子群算法易于实现, 但对外部噪声较为敏感, 适用于电力系统调度等多重约束下的场景; 遗传算法具有并行化优势, 自适应能力强, 但存在遗传过程随机化、不确定性较高的问题; 而蚁群算法具有启发式概率搜索能力, 适用于组合优化问题。

选取 3 种具有代表性的测试函数对上述 3 种算法以及文中提出的改进灰狼算法进行性能评估, 结果如图 6—图 8 所示。其中, F_1 为 Rosenbrock 非线性函数, 形状为狭窄抛物线, 优化时易陷入局部最优解; F_2 为 Katsuura 函数, 具有多峰特性, 需要算法处理周期性变化; F_3 为 Shubert 函数, 梯度变化较快, 通过复杂梯度场对算法的收敛性进行测试。由图 6、图 7、图 8 可知, 在高精度需求方面, 粒子群算法、蚁群算法与改进灰狼算法均能快速收敛, 全局搜索能力较优; 对于宽范围的非线性问题, 改进灰狼算法的收敛速度与精度对比其余 3 种算法具有数量级优势, 收敛精度为 10^{-7} ; 在处理多维度、周期性变化的问题过程中, 蚁群算法与改进灰狼算法的适应性较优, 具有在多峰环境中找到精确解的能力。

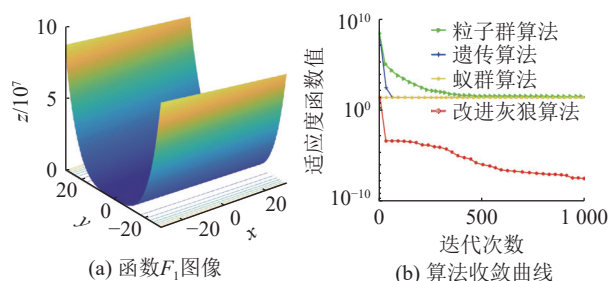


图 6 基于函数 F_1 的算法性能评估结果
Fig.6 Algorithm performance evaluation results based on function F_1

因此, 对于 LLC 型储能 DC/DC 变换器这类强非线性高阶系统, 文中采用改进灰狼算法优化 ADRC 方法, 实现对核心参数的自寻优, 从而提高

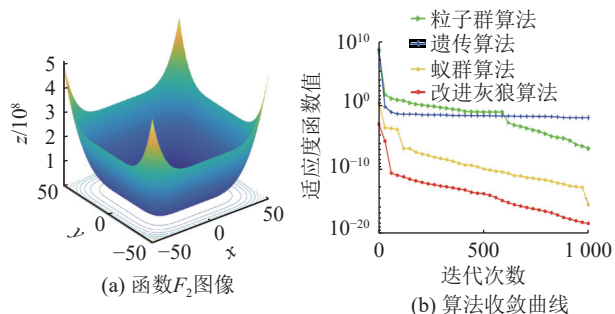


图 7 基于函数 F_2 的算法性能评估结果

Fig.7 Algorithm performance evaluation results based on function F_2

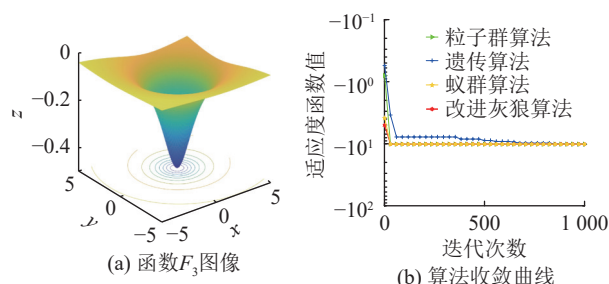


图 8 基于函数 F_3 的算法性能评估结果

Fig.8 Algorithm performance evaluation results based on function F_3

收敛性与控制精度。灰狼算法的核心思想为灰狼群根据头狼的位置实时更新自身位置, 逐渐逼近猎物。根据适应度函数值的优劣对灰狼群划分等级, 将函数值最佳的 3 个灰狼个体设为头狼并依次命名为 α 、 β 、 γ 。LLC 变换器的动态性能由输出电压体现, 故文中设定的适应度函数为:

$$F = \frac{1}{2} (v_{ref} - v_o)^2 \quad (11)$$

灰狼捕猎过程的数学模型如下:

$$\begin{cases} D_\alpha = |E_1 X_\alpha(k) - X(k)| \\ D_\beta = |E_2 X_\beta(k) - X(k)| \\ D_\gamma = |E_3 X_\gamma(k) - X(k)| \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha(k) - D_\alpha A_1 \\ X_2 = X_\beta(k) - D_\beta A_2 \\ X_3 = X_\gamma(k) - D_\gamma A_3 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} A_i = 2br_i - b \\ E_i = 2r_2 \end{cases} \quad i = 1, 2, 3 \quad (14)$$

$$b = 2 \left(1 - \frac{I}{I_{max}} \right) \quad (15)$$

式中: D_α 、 D_β 、 D_γ 为灰狼个体与 3 头头狼的距离; $X_\alpha(k)$ 、 $X_\beta(k)$ 、 $X_\gamma(k)$ 、 $X(k)$ 分别为 k 时刻 α 狼、 β 狼、 γ 狼和灰狼个体的位置; X_1 、 X_2 、 X_3 分别为灰狼个体在 α 狼、 β 狼、 γ 狼的指导下更新的位置; A_i 为位置收敛系数; b 为收敛因子, 其会随着迭代次数从 2 线性减小至 0; E_i 为扰动系数; r_1 、 r_2 为 0~

1 之间的随机数; I 为当前迭代次数; I_{\max} 为最大迭代次数。

传统灰狼算法仅用头狼指导位置的平均值对灰狼个体位置进行更新, 因此文中引入动态邻域搜索(dynamic neighborhood search, DNS)对灰狼算法的位置更新策略进行优化, 考虑灰狼个体的搜索速度以及捕猎经验, 避免提前出现寻优停滞。在式(13)的基础上, 对位置策略进行更新。

$$V_j(k+1) = V_j(k) + c_1 r_1 (P_j - X_j(k)) + c_2 r_2 (\omega_1 X_1 + \omega_2 X_2 + \omega_3 X_3 - X_j(k)) \quad (16)$$

$$X_j(k+1) = X_j(k) + V_j(k+1) \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{|X_1|}{|X_1| + |X_2| + |X_3|} \\ \omega_2 = \frac{|X_2|}{|X_1| + |X_2| + |X_3|} \\ \omega_3 = \frac{|X_3|}{|X_1| + |X_2| + |X_3|} \end{cases} \quad (18)$$

式中: N 为灰狼个体数量; $V_j(k)$ 、 $X_j(k)$ 分别为 k 时刻灰狼个体 j 的搜索速度与移动位置; P_j 为灰狼个体 j 目前经历过的最优位置; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为权重系数; c_1 、 c_2 分别为灰狼个体捕猎经验和认知行为的权重因子; $c_1 r_1 (P_j - X_j(k))$ 为灰狼个体的捕猎经验; $c_2 r_2 (\omega_1 X_1 + \omega_2 X_2 + \omega_3 X_3 - X_j(k))$ 为灰狼个体向头狼学习的认知行为。

文中对所提二阶自抗扰控制器中的核心参数采用上述方法进行自寻优, 优化 ADRC 的参数整定流程如图 9 所示。

4 仿真验证

为验证文中所提改进灰狼算法优化 ADRC 方法的有效性, 文中基于配储风机的并网工况, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了配储风机并网仿真模型, 其中储能设备的前级 DC/DC 变换器为上文所述的 LLC 谐振变换器, 仿真参数如表 1 所示, 其余并网仿真参数如表 2 所示。为模拟风电出力波动与电网随机频率事件对直流母线电压造成的冲击响应, 设置具体仿真工况如下: 风机与储能设备合并汇入 800 V 直流母线, 然后经过 LC 滤波器接入 380 V 交流母线。逆变器构网控制策略采用 VSG, VSG 功率调度指令等于风机的输出功率, 风机工作在最大功率点附近, 设置本地负载功率为 75 kW。为模拟电网的随机频率事件, 设置在 1 s 时投入 30 kW 负荷, 在 2~2.5 s 时电网频率暂降 0.1 Hz, 2.5 s 后恢复正常, 仿真运行至 3 s 时结束。

负荷投入造成的 VSG 输出功率和系统频率变化如图 10(a)、(b) 所示。可以看出, 负荷投入瞬间,

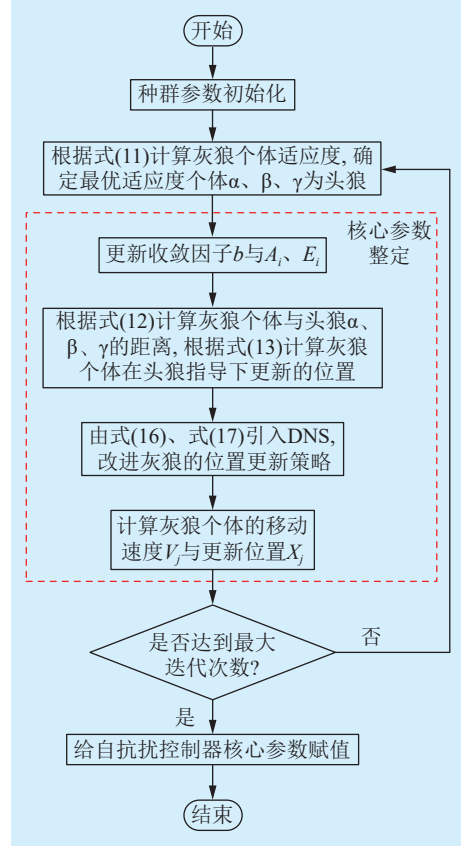


图 9 优化 ADRC 的参数整定流程

Fig.9 Flow chart of optimizing ADRC parameter tuning

表 1 LLC 型储能 DC/DC 变换器仿真参数

Table 1 LLC type energy storage DC/DC converter simulation parameters

仿真参数	数值
输入电压/V	800
输出电压/V	250
谐振电感/ μ H	36
谐振电容/ μ F	0.125
励磁电感/ μ H	143
谐振频率/kHz	75
变压器匝数比	3.2
死区时间/ns	200
滤波电容/ μ F	2 000

VSG 的输出功率从 90.4 kW 升高至 100.8 kW, 系统频率从 50 Hz 跌落至 49.82 Hz, 1.5 s 时恢复至额定值。当电网频率暂降时, VSG 的输出功率从 90.4 kW 缓慢升高至 94.5 kW, 系统频率从 50 Hz 缓慢跌落至 49.9 Hz, 在 2.8 s 左右恢复至额定值。

图 11(a)、(b)、(c) 分别为负荷投入时 VSG 的三相输出电压波形、电流波形以及电网频率暂降时 VSG 的三相输出电流波形。可以看出, 负荷投入及调频时, VSG 的输出相电压峰值为恒定值 311 V, 输出电流增加以响应网侧的功率需求。

表 2 配储风机系统仿真参数
Table 2 Simulation parameters of wind turbine system with energy storage

仿真参数	数值
储能电池标称电压/V	250
储能系统额定容量/(A·h)	240
风机额定容量/kW	90
公共直流母线电压/V	800
交流母线额定线电压/V	380
直流母线电容/ μF	5 000
LC滤波器电感/mH	0.8
LC滤波器电容/ μF	10
并网端口线路电感/mH	1.2
储能端口滤波电感/mH	2.5
风机端口滤波电感/mH	2

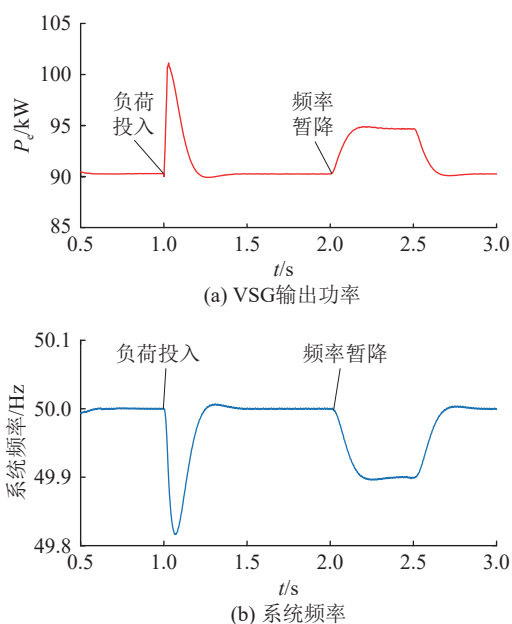


图 10 VSG 输出功率与频率变化

Fig.10 VSG output power and frequency changes

图 12 为改进灰狼算法与传统灰狼算法的适应度函数收敛曲线对比。设置核心参数的总迭代寻优次数为 10, 改进灰狼算法的适应度函数在第 3 次参数迭代时开始向零逐步收敛, 在第 5 次参数迭代时达到完全收敛; 而传统灰狼算法的收敛速度较慢, 需要经过 8 次参数迭代才可以完全收敛。由此可知, 文中提出的灰狼位置更新策略能够有效地提升灰狼群的全局搜索速度与精度, 进而提升算法的收敛能力。适应度函数收敛至零意味着 LLC 的输出电压等于目标值, 验证了所选参数均为决策空间内的最优解。

图 13 为核心参数 β_1 、 β_2 、 β_3 、 k_p 、 k_d 、 b_0 的自寻优曲线。其中, ESO 观测器增益 β_1 、 β_2 、 β_3 的最优整

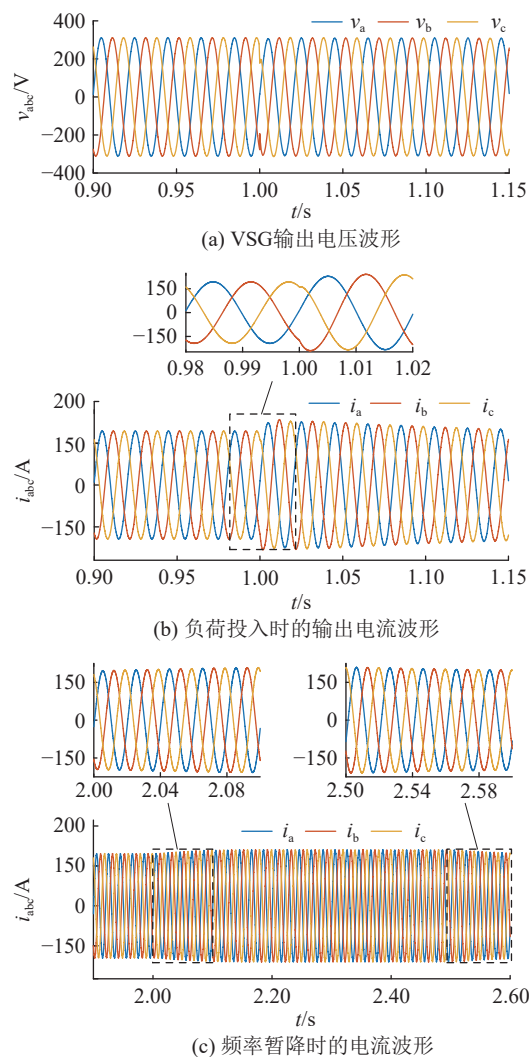


图 11 VSG 三相输出电压和电流

Fig.11 Three-phase output voltages and currents of VSG

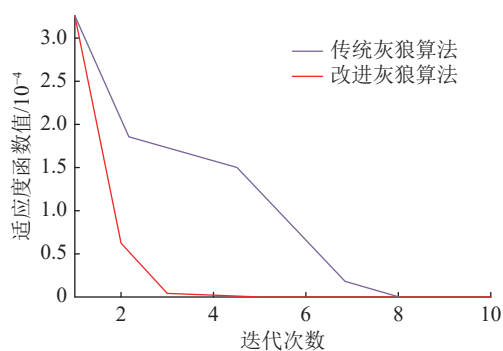


图 12 适应度函数收敛曲线

Fig.12 Fitness function convergence curves

定值分别为 368.2、40 807.3、 1.68×10^6 ; NLSEF 控制律中的比例和微分增益 k_p 、 k_d 的最优整定值分别为 2 126.1、43.8; 补偿因子 b_0 的最优整定值为 177.5。

图 14 为传统 ADRC 与改进灰狼算法优化 ADRC 下的直流母线电压波形对比。可以看出, 在 1 s 负荷投入时, 传统 ADRC 下的电压超调量为 18 V, 调节时间为 0.6 s, 而改进灰狼算法优化 ADRC 下的

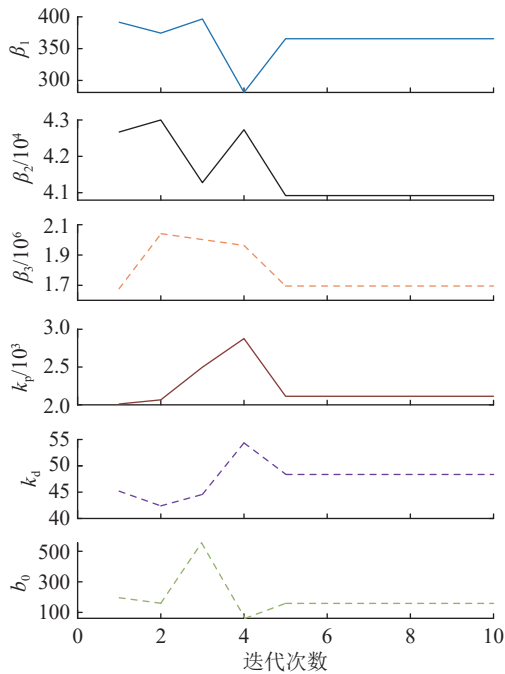


图 13 核心参数自寻优曲线

Fig.13 Self-optimization curves of core parameters

电压超调量为 9.3 V, 调节时间为 0.4 s。因此, 在电网频率波动时, 改进灰狼算法优化后的自抗扰控制器可以明显提升 LLC 变换器的动态性能。在 2 s 系统频率暂降时, 传统 ADRC 下的电压超调量为 4.8 V, 恢复至稳态的时间为 0.45 s; 而改进灰狼算法优化 ADRC 下的电压超调量为 2.5 V, 恢复至稳态的时间为 0.35 s。因此, 对于频率暂降这类短暂频率故障事件, 文中提出的优化方法也能很好地提升直流母线电压的抗扰性能, 进而加快配储风机与电网之间的能量交换速率。仿真结果验证了改进灰狼算法优化 ADRC 方法的有效性。

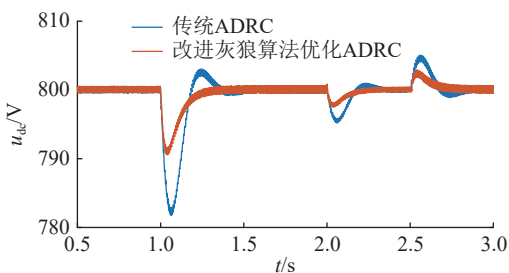


图 14 直流母线电压波形对比

Fig.14 Comparison of DC bus voltage waveforms

5 结论

文中面向构网型风电应用场景, 对配储风机中 LLC 型储能 DC/DC 变换器的动态性能展开研究, 提出了一种改进灰狼算法优化 ADRC 的方法。该方法考虑了系统在惯量支撑过程中对风机母线电压稳定产生的影响。针对传统 PI 控制下 LLC 型储

能 DC/DC 变换器动态性能欠佳、功率传递速率慢的问题, 文中所提的改进灰狼算法优化 ADRC 方法可以实现 ADRC 核心参数的迭代自寻优, 提升了变换器的抗扰性能与动态性能。针对传统灰狼算法收敛速度慢、易陷入局部解的问题, 文中引入 DNS 优化了灰狼算法的位置更新策略, 提升了配储风机母线电压的控制速度及精度, 从而加快了惯量支撑过程中配储风机与电网之间的能量交换速率。最后, 仿真分析表明, 当发生负荷投入及频率暂降事件时, 相比于传统 ADRC, 采用改进灰狼算法优化 ADRC 可使 LLC 型储能 DC/DC 变换器的输出电压超调减少, 暂态响应时间缩短, 验证了所提控制方法的有效性和可行性, 且在构网型风力发电系统中应用前景广阔。

致谢

本文得到智能电网保护和运行控制国家重点实验室项目(SGNER0000KJJS2302136)资助, 谨此致谢! 参考文献:

- [1] 刘军, 朱世祥, 柳盼攀, 等. 考虑系统频率安全稳定约束的风储联合频率响应控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 73-84.
- LIU Jun, ZHU Shixiang, LIU Panpan, et al. Coordinated control strategy for wind turbine and energy storage equipment considering system frequency safety and stability constraints[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 73-84.
- [2] 刘洪波, 刘永发, 任阳, 等. 高风电渗透率下考虑系统风电备用容量的储能配置[J]. 发电技术, 2024, 45(2): 260-272.
- LIU Hongbo, LIU Yongfa, REN Yang, et al. Energy storage configuration considering the system wind power reserve capacity under high wind power permeability[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(2): 260-272.
- [3] XIE M, TIAN G Z, KANG Y J, et al. Research on control strategies of energy storage participating in primary frequency regulation of wind farm[C]//2024 IEEE 4th New Energy and Energy Storage System Control Summit Forum (NEESSC). Hohhot, China. IEEE, 2024: 138-142.
- [4] HAN X Y, QIAO S Q, XIE M, et al. Research on combined frequency modulation strategy of wind turbines and storage system[C]//2023 3rd New Energy and Energy Storage System Control Summit Forum (NEESSC). Mianyang, China. IEEE, 2023: 116-120.
- [5] WU L L, GAO W Z, CUI Z P, et al. A novel frequency regulation strategy with the application of energy storage system for large scale wind power integration[C]//2015 Seventh Annual IEEE Green Technologies Conference. New Orleans, LA, USA. IEEE, 2015: 221-226.
- [6] 文凌锋, 党广宇, 田伟, 等. 基于多时间尺度风储协同的微电网能量管理策略研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(3): 123-128.
- WEN Lingfeng, DANG Guangyu, TIAN Wei, et al. Research on micro-grid energy management system based on multi-time

- scale[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(3): 123-128.
- [7] 梁恺, 彭晓涛, 秦世耀, 等. 基于协同控制优化风储系统频率响应的策略研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(8): 2628-2641.
- LIANG Kai, PENG Xiaotao, QIN Shiyao, et al. Study on synergetic control strategy for optimizing frequency response of wind farm augmented with energy storage system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(8): 2628-2641.
- [8] 孙广宇, 胡姝博, 谢赐戡, 等. 基于典型风电场景的风储协同频率支撑容量优化配置[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2024, 45(6): 108-118.
- SUN Guangyu, HU Shubo, XIE Cijian, et al. Optimization configuration of wind storage collaborative frequency support capacity based on typical wind power scenarios[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2024, 45(6): 108-118.
- [9] 刘林, 熊兰, 高迎飞. 应用于储能变流器的 LLC/CLLC 谐振变换器综述[J]. *电源学报*, 2021, 19(6): 50-63.
- LIU Lin, XIONG Lan, GAO Yingfei. Review of LLC/CLLC resonant converters applied to power conversion system[J]. *Journal of Power Supply*, 2021, 19(6): 50-63.
- [10] 孙悦. 应用于储能系统的双向 DC/DC 变换器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- SUN Yue. Research on bidirectional DC/DC converter for energy storage system[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2024.
- [11] S C, SINDHU M R. A PFC based onboard battery charger using isolated full-bridge DC-DC converter for electric vehicle application[C]//2022 IEEE IAS Global Conference on Emerging Technologies (GlobConET). Arad, Romania. IEEE, 2022: 581-586.
- [12] 李练兵, 张金龙, 谢朋朋, 等. 大功率 LLC 变换器的谐振参数优化设计[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(1): 71-76.
- LI Lianbing, ZHANG Jinlong, XIE Pengpeng, et al. Optimization design of resonant parameters of high power LLC[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(1): 71-76.
- [13] 夏潇, 龚春阳, 包俊, 等. 宽增益高效率 LLC 谐振变换器拓扑[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(3): 99-107.
- XIA Xiao, GONG Chunyang, BAO Jun, et al. LLC resonant converter topology with wide gain and high efficiency[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 99-107.
- [14] KHAN S, SHA D S, JIA X S, et al. Resonant LLC DC-DC converter employing fixed switching frequency based on dual-transformer with wide input-voltage range[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(1): 607-616.
- [15] ZHANG Y, ZHANG D L, LI J, et al. Bidirectional LCLL resonant converter with wide output voltage range[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(11): 11813-11826.
- [16] KIM C E, BAEK J I, LEE J B. High-efficiency single-stage LLC resonant converter for wide-input-voltage range[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(9): 7832-7840.
- [17] CHEN T P, CHEN Q H, LEI L, et al. Research on full bridge LLC resonant converter based on fuzzy self-adaptive PI control[C]//2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC). Hefei, China. IEEE, 2017: 132-137.
- [18] ZHU A Y, MA Y D, LIU Z S, et al. Optimal design of control strategy for full-bridge LLC converter[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Detroit, MI, USA. IEEE, 2020: 2251-2257.
- [19] SRIDHAR H S, KUNDU S. Design of LLC Resonant Converter using closed loop PI controller for enhanced performance[C]//2023 International Conference on Recent Advances in Electrical, Electronics, Ubiquitous Communication, and Computational Intelligence (RAEEUCCI). Chennai, India. IEEE, 2023: 1-4.
- [20] WEI Y Q, LUO Q M, MANTOOTH A. Overview of modulation strategies for LLC resonant converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(10): 10423-10443.
- [21] 高志强. 自抗扰控制的传承与发展[J]. *控制理论与应用*, 2023, 40(3): 593-595.
- GAO Zhiqiang. ADRC: the deep roots and the latest developments[J]. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(3): 593-595.
- [22] 李杰, 齐晓慧, 万慧, 等. 自抗扰控制: 研究成果总结与展望[J]. *控制理论与应用*, 2017, 34(3): 281-295.
- LI Jie, QI Xiaohui, WAN Hui, et al. Active disturbance rejection control: theoretical results summary and future researches[J]. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(3): 281-295.
- [23] 陈宗祥, 张武林, 陈克难, 等. LLC 谐振变换器自抗扰控制研究[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(8): 130-138.
- CHEN Zongxiang, ZHANG Wulin, CHEN Kenan, et al. Research on active disturbance rejection control of LLC resonant converter[J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(8): 130-138.
- [24] 陈宗祥, 赵欣雨, 张武林, 等. LLC 谐振变换器电荷自抗扰控制策略研究[J/OL]. *电源学报*: 1-12[2024-11-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230517.1300.006.html>.
- CHEN Zongxiang, ZHAO Xinyu, ZHANG Wulin, et al. Research on charge active disturbance rejection control strategy for LLC resonant converter[J/OL]. *Journal of Power Supply*: 1-12[2024-11-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230517.1300.006.html>.
- [25] JI L W, LI X, HAN L, et al. Research on LLC resonant converter control strategy based on sliding mode active disturbance rejection control[J]. *IEEE Access*, 2024, PP(99): 1.
- [26] 李杰, 齐晓慧, 夏元清, 等. 线性/非线性自抗扰切换控制方法研究[J]. *自动化学报*, 2016, 42(2): 202-212.
- LI Jie, QI Xiaohui, XIA Yuanqing, et al. On linear/nonlinear active disturbance rejection switching control[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(2): 202-212.
- [27] REN J, CHEN Z Q, YANG Y K, et al. Improved grey wolf optimizer tuned active disturbance rejection control for ship heading[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2023, 70(2): 680-684.

- [28] WANG H Y, PAN T H, FAN Y. An improved grey wolf optimization algorithm for parameter tuning of active disturbance rejection control[C]//2023 6th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (ICoIAS). Qinhuangdao, China. IEEE, 2023: 309-313.
- [29] 张晓凤, 王秀英. 灰狼优化算法研究综述[J]. *计算机科学*, 2019, 46(3): 30-38.
ZHANG Xiaofeng, WANG Xiuying. Comprehensive review of grey wolf optimization algorithm[J]. *Computer Science*, 2019, 46(3): 30-38.
- [30] TIAN S L, LEE F C, LI Q. Equivalent circuit modeling of LLC resonant converter[C]//2016 IEEE Applied Power Electronics

Conference and Exposition (APEC). Long Beach, CA, USA. IEEE, 2016: 1608-1615.

作者简介:



史皓男

史皓男(1999), 男, 硕士在读, 研究方向为构网型变流器建模、控制及其在电力系统中的应用(E-mail: 1075487057@qq.com);

孙毅超(1987), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用;

唐小波(1977), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电网规划与运行控制、储能技术。

Dynamic performance improvement method of energy storage DC/DC converter for grid-connected wind turbine with energy storage

SHI Haonan^{1,2}, SUN Yichao^{1,2}, TANG Xiaobo^{1,2}, WANG Wei¹, YANG Dongmei¹, WEI Zheng¹

(1. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Operation Control (NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd.), Nanjing 211106, China; 2. NARI School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The internal storage system of a wind turbine usually needs to be connected to the DC bus using a DC/DC converter. However, due to the poor dynamic performance of the energy storage DC/DC converter using traditional PI control, it is easy to cause a large drop in bus voltage or even the risk of undervoltage shutdown during the grid inertia/frequency support process. This paper proposes adopting auto-disturbance rejection control to improve the anti-disturbance performance and dynamic performance of LLC type energy storage DC/DC converter, and employing the improved gray wolf algorithm to perform offline self-optimization on the six core parameters of the auto-disturbance rejection controller. The algorithm introduces dynamic neighborhood search into the position update strategy of the traditional gray wolf algorithm, which effectively improves the convergence speed of the self-optimization algorithm. The proposed improved gray wolf optimized auto-disturbance rejection control method can effectively shorten the bus voltage recovery time, quickly coordinate the energy exchange between the storage wind turbine and the grid, and effectively improve the bus voltage stability and inertia/frequency support capability of the storage wind turbine. The MATLAB/Simulink simulation results verify the feasibility and effectiveness of the control method proposed in this paper.

Keywords: LLC type energy storage DC/DC converter; active disturbance rejection control; improved grey wolf algorithm; offline automatic optimization; dynamic neighborhood search; wind turbine with energy storage

(编辑 陆海霞)