

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.05.002

基于虚拟电阻的双馈风机次同步振荡分数阶 PI 控制

刘志坚, 刘杰, 李鹏程, 自超, 梁宁
(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:针对传统方法抑制双馈风机经不同串补电容并网引发的次同步振荡效果不佳的问题,文中提出一种基于虚拟电阻的风机分数阶比例-积分(FOPI)控制策略。首先,分析风电系统次同步振荡发生机理,并以风机并网电流为输入信号设计宽频带次同步电流滤波器,构建出虚拟电阻控制器以增强系统电气阻尼;之后,利用 Oustaloup 算法改进分数阶积分算子,以网侧变流器控制方程为底层模型重构 FOPI 电流控制环,分析积分阶次对电流跟踪动态特性的影响;然后,通过引入非线性迭代权重以及学习因子改进传统灰狼优化算法,优化控制策略参数;最后,利用 Matlab/Simulink 搭建仿真验证模型,结果表明所提策略能有效抑制不同串补度下的次同步振荡,表现出较强的鲁棒稳定性。

关键词:虚拟电阻;双馈风电场;次同步振荡;改进灰狼优化算法;分数阶比例-积分(FOPI);参数优化

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)05-0012-09

0 引言

大规模双馈风电机组在外送电能过程中,风机与交流电网的动态交互增加了次同步控制相互作用(sub-synchronous control interaction, SSCI)风险^[1],集中表现为一系列的次同步振荡现象。

目前针对 SSCI 引发的次同步振荡问题,相关学者已经开展了多种抑制措施的研究,包括改变系统运行参数及方式、改进风机控制策略及附加滤波装置等^[2-5]。其中,改进风机控制策略因其改造成本较低、适用性较强成为次同步振荡抑制的研究热点。文献[6-7]详细分析了双馈风力发电机(doubly-fed induction generator, DFIG)转子侧和定子侧控制器参数对次同步振荡的影响规律,指出适度调节控制器参数和引入附加阻尼控制能有效抑制 SSCI 发生;文献[8]将虚拟同步控制策略的输出阻抗重塑为电阻电感,提出了一种前馈有源阻尼控制策略来抑制次同步谐振;文献[9]则提出了一种采用静止同步串联补偿器的 SSCI 控制方法。然而,目前风机变流器一般采用比例-积分(proportion integration, PI)控制,但在应对复杂多变的并网工况时,风机的控制性能将受到限制。分数阶控制理论被证明较传统整数阶控制理论具备更强的动态特性^[10],如文献[11]研究了分数阶 PI(fractional-order proportional integral, FOPI)积分阶次对 Buck 变换器的稳定性影响,发现适当增大积分阶次会使变换器

具有更大的参数稳定范围。文献[12]将分数阶比例-积分-微分(proportional integral derivative, PID)应用到区域电网负荷频率控制中,验证了分数阶 PID 具有更优越的控制性能。此外,SSCI 抑制策略中往往包含多个控制参数,因此,如何整定控制策略参数以增强其适应性亦是研究重点。近年来,灰狼优化(grey wolf optimizer, GWO)算法在面对复杂系统时表现出较强的求解能力,因其具备收敛性强、参数少等优点,受到了学者的广泛关注^[13-16]。

基于以上研究成果,文中提出一种基于虚拟电阻的双馈风机次同步振荡 FOPI 控制策略。先后构建虚拟电阻、改进 FOPI 控制规律、重构风机网侧电流跟踪控制环,并利用改进灰狼优化(improved grey wolf optimizer, IGWO)算法整定控制策略参数。该方案通过增强系统次同步电气阻尼,以及提升电流跟踪控制环节动态特性,提高了系统次同步振荡抑制的快速性及鲁棒性。文中仿真分析了双馈风机在不同串补下的并网特性,对比粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法、GWO 算法和 IGWO 算法的参数优化过程以及传统 PI 和 FOPI 的控制效果,结果验证了文中所提控制方法的正确性、有效性。

1 次同步振荡机理分析

对于风电外送系统,为提高输电效率常采用串联电容补偿技术,系统模型如图 1 所示,系统包括轴系、变速箱、感应发电机、转子侧变流器(rotor side converter, RSC)、网侧变流器(grid side converter, GSC)、变压器、输电线路、串补电容等。其中 T_1 为

收稿日期:2022-04-25;修回日期:2022-07-19

基金项目:云南省基础研究计划资助项目(202101AU070-015)

风机并网变压器; X_L, R_L 分别为输电线路电抗、电阻; X_C 为串联补偿电容的容抗。

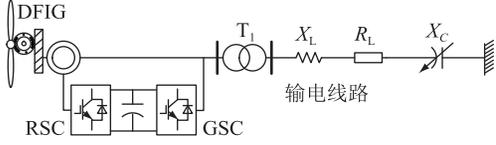


图1 风电外送系统

Fig.1 Wind power transmission system

双馈风机串补并网系统次同步振荡等效电路如图2(a)所示。图中, $u_r/s_{sso}, u_{grid}$ 分别为风机转子电压和电网电压; R_r/s_{sso} 为转子等效电阻; R_{RSC}/s_{sso} 为RSC等效电阻; $s_{sso} = (f_{ro} - f_r)/f_{ro}$ 为次同步振荡状态的转差率; f_{ro}, f_r 分别为次同步振荡频率和转子频率; L_r 为转子电感; L_{mm} 为励磁电感; R_s, L_s 分别为定子电阻、定子电感; R_{grid}, L_{grid} 分别为电网侧系统电阻和电感; C 为包含串补电容的电网可变等值电容。考虑到 L_{mm} 数值较大, 可忽略励磁支路, 将系统阻抗进行等值简化得到简化电路, 如图2(b)所示, Δu 为由扰动电流引起的风机输出扰动电压。

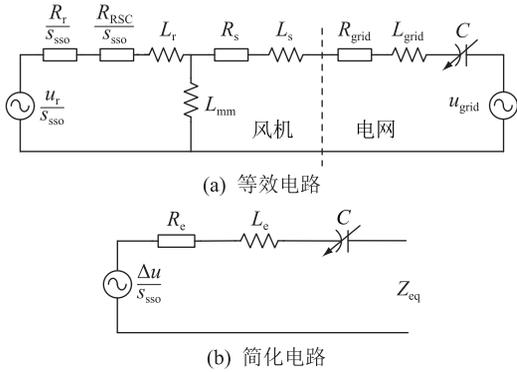


图2 次同步振荡等效电路模型

Fig.2 Sub-synchronous oscillation equivalent circuit model

参考文献[17—18]相关结论, 可推导出风机串补系统等效电阻 R_e 和电感 L_e 为:

$$\begin{cases} R_e = (R_r + R_{RSC})/s_{sso} + R_s + R_{grid} \\ L_e = L_r + L_s + L_{grid} \end{cases} \quad (1)$$

由简化等效电路分析可知, 系统等值阻抗为:

$$Z_{eq} = R_e + j\omega L_e - 1/(j\omega C) \quad (2)$$

当系统等值感抗与等值容抗相等, 即:

$$j\omega(L_r + L_s + L_{grid}) = 1/(j\omega C) \quad (3)$$

系统将引发串联电气谐振, 其谐振频率 f_{ro} 为:

$$f_{ro} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_e C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_r + L_s + L_{grid}) C}} \quad (4)$$

串补电容的接入可能导致系统产生次同步振荡, 由于次同步振荡频率低于工频, 故 $f_{ro} < f_r, s_{sso} < 0$,

双馈风机并网系统的电气阻尼受到转差率的影响, 此时若系统等效电阻为负, 即:

$$(R_r + R_{RSC})/s_{sso} + R_s + R_{grid} < 0 \quad (5)$$

则系统对谐振分量呈现负阻尼特性, 使得系统振荡幅值持续变大^[19], 因缺乏足够的阻尼, 系统将处于次同步振荡频率 f_{ro} 下的不稳定运行状态。

2 SSCI 抑制策略

文中提出一种双馈风机 GSC 附加虚拟电阻控制策略, 见图3, 包括直流电压控制环、虚拟电阻、电流跟踪控制环以及 GSC 控制信号调制环等。文中双馈风机采用空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM) 实现对 GSC 的控制。图中 u_{dref}, u_{dc} 分别为直流电压参考值和测量值; i_{dref}, i_{qref} 分别为定子电流 d, q 轴参考值; i_{dg}, i_{qg} 分别为定子输出电流 d, q 轴分量; u_d, u_q 分别为风机输出电压 d, q 轴分量; u_{cd}, u_{cq} 分别为定子电压 d, q 轴的调制信号; L_C 为 GSC 自感, ωL_C 为交叉解耦项, 实现电压 d, q 轴分量间的解耦控制; u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 为 SVPWM 单元三相调制指令; S_a, S_b, S_c 为 GSC 控制信号; θ 为通过锁相环 (phase locked loop, PLL) 得到的线路电压相位; $v_{pcc, abc}, i_{1, abc}$ 分别为风机并网三相电压、电流; i_{ro} 为风机并网滤波电流; i_d, i_q 分别为滤波电流 d, q 轴分量; K_R 为虚拟电阻值比例系数; u_R 为虚拟电阻电压控制量。

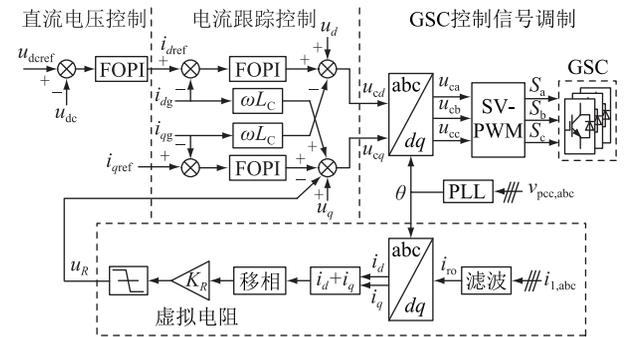


图3 GSC的SSCI抑制策略

Fig.3 SSCI suppression strategy for GSC

参照 dq 坐标系, 双馈感应发电机的电压、磁链方程^[20]为:

$$\begin{cases} u_{sd} = R'_s i_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} + \frac{d}{dt} \psi_{sd} \\ u_{sq} = R'_s i_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} + \frac{d}{dt} \psi_{sq} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} - \omega_{slip} \psi_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \omega_{slip} \psi_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} \end{cases} \quad (6)$$

式中： u_{sd}, u_{sq} 分别为定子电压 d, q 轴分量； u_{rd}, u_{rq} 分别为转子电压 d, q 轴分量； i_{sd}, i_{sq} 分别为定子电流 d, q 轴分量； i_{rd}, i_{rq} 分别为转子电流 d, q 轴分量； ψ_{sd}, ψ_{sq} 分别为定子磁链 d, q 轴分量； ψ_{rd}, ψ_{rq} 分别为转子磁链 d, q 轴分量； $\omega_{slip} = \omega_1 - \omega_r$ 为滑差角频率， ω_1 为定子角频率， ω_r 为转子角频率； R_r 为转子电阻； L_m 为互感； R'_s, L'_s, L'_l 分别为考虑串联电容补偿影响的等效定子电阻、等效定子电感和等效转子电感，即：

$$\begin{cases} R'_s = R_s + R_L \\ L'_s = L_s + L_{lr} + L_L - 1/(\omega_1^2 C_C) \\ L'_r = L_r - L_m^2/L'_s \end{cases} \quad (7)$$

式中： L_L 为输电线路电感； L_{lr} 为变压器电感； C_C 为输电线路串联补偿电容。

基于附加虚拟电阻和分数阶控制理论，重构 GSC 电流环跟踪控制器如下：

$$\begin{cases} u_{cd} = \left(K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} \right) (i_{dref} - i_{dg}) + u_d - i_{qg} \omega L_C \\ u_{cq} = \left(K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} \right) (i_{qref} - i_{qg}) + u_q + i_{dg} \omega L_C - u_R \end{cases} \quad (8)$$

式中： $1/s^\lambda$ 为积分算子； K_p 为比例系数； K_i 为积分系数。虚拟电阻增大了系统次同步阻尼，FOPI 则提高了 GSC 电流跟踪控制环节的动态特性。

2.1 虚拟电阻设计

为提升风机 SSCI 下的并网稳定性，次同步振荡期间在定子侧控制策略中附加电压负反馈控制，相当于对风机 GSC 增加了一个虚拟电阻^[21]。结合双馈风机控制策略对虚拟电阻设计如下：虚拟电阻以 $i_{1,abc}$ 为输入信号，经次同步量提取、坐标变换、比例移相及限幅后生成 u_R ，其结构如图 3 所示。虚拟电阻的电压值 u_R 同 FOPI 控制器生成的定子 q 轴电压信号，经加法器生成 u_{cd}, u_{cq} ，使得反馈信号 u_R 等效为串入系统中的正电阻 R_R ，GSC 附加虚拟电阻后系统等效电路如图 4 所示。

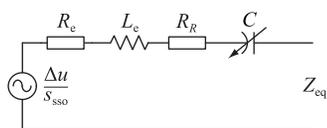


图 4 附加虚拟电阻的等效模型

Fig.4 Equivalent model with additional virtual resistance

该虚拟电阻可与实际的电阻作用等效，能够改善风机次同步振荡时的欠阻尼状态，从而提高系统稳定性。通过适当调节 R_R ，能使风机串补并网系统的阻尼增强，当系统等效电阻为正时，即满足式(9)

时系统呈现正阻尼特性，从而达到抑制次同步振荡的目的。

$$(R_r + R_{RSC})/s_{sso} + R_s + R_{grid} + R_R > 0 \quad (9)$$

虚拟电阻大小为：

$$R_R = \Delta u_R / \Delta i_1 \quad (10)$$

式中： $\Delta i_1, \Delta u_R$ 分别为虚拟电阻输入电流增量和输出电压增量。虚拟电阻的传递函数为：

$$G_{RR}(s) = G_1(s) G_2(s) G_3(s) G_4(s) \quad (11)$$

式中： $G_1(s), G_2(s), G_3(s), G_4(s)$ 分别为滤波、坐标变换、加法器和比例移相环节的传递函数。

滤波环节的作用是滤除并网三相电流中的高次谐波及工频分量，提取并网电流中的次同步分量^[22-23]。电网拓扑的易变性使得系统串补度易发生变化，为适应不同串补度下次同步信号的提取，利用 Matlab 设计宽频带滤波器，其中包括二阶 Butterworth 低通及二阶 Butterworth 带阻滤波器。

二阶低通滤波器的传递函数为：

$$G_L(s) = \frac{\omega_L^2}{s^2 + 2\xi\omega_L s + \omega_L^2} \quad (12)$$

二阶带阻滤波器的传递函数为：

$$G_B(s) = \frac{s^2 + \omega_B^2}{s^2 + 2\xi\omega_B s + \omega_B^2} \quad (13)$$

式中： ω_L 为低通滤波器的截止角频率； ω_B 为带阻滤波器的中心角频率； ξ 为阻尼系数。

根据次同步频率范围取 ω_L 为 200 Hz， ω_B 为 60 Hz，带宽范围为 58~62 Hz。所设计的宽频带滤波器的传递函数为：

$$\begin{aligned} G_1(s) = & (1.579 \times 10^6 s^4 + 4.484 \times 10^{11} s^2 + \\ & 3.183 \times 10^{16}) / (s^6 + 1.813 s^5 + 1.927 \times 10^6 s^4 + \\ & 5.699 \times 10^8 s^3 + 4.785 \times 10^{11} s^2 + \\ & 4.378 \times 10^{13} s + 3.183 \times 10^{16}) \end{aligned} \quad (14)$$

基于宽频带滤波器传递函数得到的幅频、相频特性如图 5 所示。可见，当系统中存在次同步扰动量时，宽频带滤波器可将次同步电流滤出，此时虚拟电阻值不为零；当系统在正常状态，次同步电流为零，此时虚拟电阻值亦为零，则风机无附加反馈控制信号。

此外，为减少电流在滤波后产生的相位偏移，保证虚拟电阻在次同步频率下可等效为纯电阻，在加法器后用移相环节对反馈信号进行相位补偿^[24]。比例移相环节的传递函数为：

$$G_4(s) = K_R \frac{1 - T_k s}{1 + T_k s} \quad (15)$$

式中： T_k 为时间常数。增益 K_R 直接影响 u_R 幅值的大小，文中按其极大值不超过 1 整定增益 K_R 。

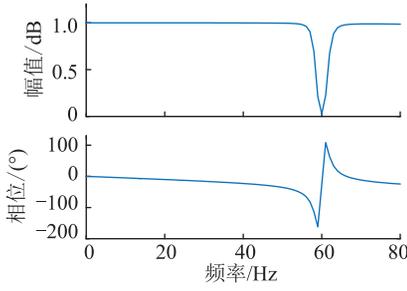


图5 宽频带滤波器幅相特性

Fig.5 Amplituit-frequency and phase-frequency characteristics of wideband filters

2.2 FOPI 控制器设计

系统的 FOPI 控制方法,也记为 PI^λ 控制,与传统 PI 控制器相比引入了积分阶 λ 。FOPI 控制系统结构如图 6 所示,其中 $r(t)$, $y(t)$ 分别为系统的输入、输出信号; $e(t)$ 为系统误差信号; $u(t)$ 为控制器的输出。FOPI 控制器传递函数见式(16),当 $\lambda = 1$ 时即为传统的整数阶 PI 控制器。

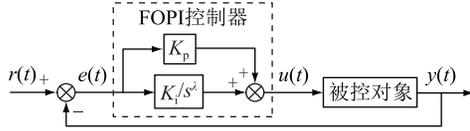


图6 FOPI 控制器结构

Fig.6 The structure of FOPI controller

$$G(s) = K_p + K_i/s^\lambda \quad (16)$$

Riemann-Liouville 给出了分数阶积分最常见的一种定义^[25],即:

$${}_a D_t^\lambda f(t) = \frac{1}{\Gamma(n-r)} \left(\frac{d}{dt} \right)^n \int_a^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{1-(n-r)}} d\tau \quad (17)$$

其中, $n-1 < r < n$, $\Gamma(n-r)$ 计算公式为:

$$\Gamma(n-r) = \int_0^\infty t^{n-r-1} e^{-t} dt \quad (18)$$

式中: ${}_a D_t^\lambda$ 为分数阶微积分的基本操作算子; a, t 分别为操作算子的上、下限; r 为微积分阶次; $\Gamma(r-n)$ 为 r, n 定义的 Euler Gamma 函数, r, n 为正实数。文中分数阶积分算子 s^r ($-1 < r < 0$) 采用改进 Oustaloup 算法在拟合频段 $[\omega_b, \omega_h]$ 内对传递函数 $K(s)$ 进行近似。

$$K(s) = \left[\left(1 + \frac{s}{d\omega_b/b} \right) / \left(1 + \frac{s}{d\omega_h/b} \right) \right]^r \quad (19)$$

式中: $s = j\omega$; d, b 为调节系数, $b > 0, d > 0$ 。当 $\omega_b < \omega < \omega_h$ 时,式(19)在频段 $[\omega_b, \omega_h]$ 内由泰勒级数展开得:

$$K(s) = \left(\frac{bs}{d\omega_b} \right)^2 \left[1 + rp(s) + \frac{r(r-1)}{2} p^2(s) + \dots \right] \quad (20)$$

其中, $p(s)$ 的计算公式为:

$$p(s) = \frac{-ds^2 + d}{ds^2 + b\omega_h s} \quad (21)$$

对式(20)的泰勒级数进行一级截断,得到:

$$K(s) \approx \frac{(d\omega_b)^r b^{-r}}{1 + rp(s)} \left[\left(1 + \frac{s}{d\omega_b/b} \right) / \left(1 + \frac{s}{d\omega_h/b} \right) \right]^r \quad (22)$$

将式(21)代入式(22),整理得到:

$$K(s) \approx \frac{ds^2 + bs\omega_b}{d(1-r)s^2 + bs\omega_h + dr} \left(\frac{d\omega_b}{b} \right)^r \times \left[\left(1 + \frac{s}{d\omega_b/b} \right) / \left(1 + \frac{s}{d\omega_h/b} \right) \right]^r \quad (23)$$

进一步地,将式(23)中非有理部分用 Oustaloup 算法递推展开,即得出改进的分数阶算子为:

$$s^r \approx \left(\frac{d\omega_h}{b} \right)^r \left[\frac{ds^2 + b\omega_h s}{d(1-r)s^2 + b\omega_h s + dr} \right] \prod_{j=-N}^N \frac{s + \omega'_j}{s + \omega_j} \quad (24)$$

式中: ω'_j, ω_j 分别为实数零点和极点; j, N 为大于零的整数。基于以上算法,通过参数的合理设置,理论上可以实现 FOPI 控制器任意阶次的设计。为提高近似频段两端的效果,文中取 $b = 10, d = 9, N = 4$, 研究频段 $\omega_b = 0.001, \omega_h = 1000$ ^[12,26]。

3 参数优化整定

所提风机 SSCI 抑制策略中有 4 个参数需要优化整定,即 FOPI 控制器中比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、分数阶次 λ 以及虚拟电阻的比例系数 K_R , 这 4 个参数直接影响振荡抑制效果,因此需要谨慎选择。

文中将 IGWO 算法应用于参数寻优,当系统串补度 k 发生变化时,控制策略将选取最匹配的参数,系统控制流程如图 7 所示。考虑到串补度过高导致的继保整定困难和短路稳定性问题,因此一般 k 不大于 0.5。文中选取并网中典型串补度工况进行参数优化整定和分析。

3.1 适应度函数设计

风机稳定并网条件下,电压波形是标准正弦波,但由于 SSCI 影响,风机电压、功率会发生振荡。文中采用风机输出功率的误差积分函数 f_{ITAE} 和风机并网电压总谐波畸变率 f_{THD} 的加权函数作为系统优化目标。 f_{ITAE} 反映了风机功率的控制稳定性及振荡抑制的动态响应速度, f_{THD} 则反映了风机并网电压波形质量。系统次同步振荡程度越大,系统谐波量越大,风机输出功率及并网电压振荡越剧烈。适应度函数的大小反映了风机的运行稳定性,设计适应

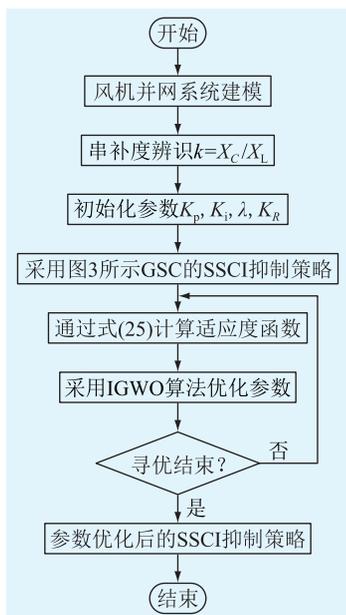


图7 控制流程

Fig.7 Control flow chart

度函数 f_{fit} 为:

$$f_{fit} = K_{\alpha} f_{ITAE} + K_{\beta} f_{THD} = K_{\alpha} \int_0^t |P_{ref} - P_t| dt + K_{\beta} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{u_n^2}{u_1^2}} \times 100\% \quad (25)$$

式中: K_{α}, K_{β} 分别为 f_{ITAE} 和 f_{THD} 在适应度函数中的权重系数, 文中取 $K_{\alpha} = K_{\beta} = 0.5$; P_{ref}, P_t 分别为风机输出功率的参考值和实际值; u_n 为并网电压 n 次谐波幅值; u_1 为并网电压基波幅值。

3.2 GWO 算法的改进

GWO 算法是一种模仿灰狼捕食猎物活动的启发式算法, 其优化过程包含灰狼的社会等级分层、包围猎物和攻击猎物等步骤^[27]。其中灰狼位置更新公式为:

$$X(i+1) = (X_{\alpha} + X_{\beta} + X_{\delta})/3 \quad (26)$$

式中: i 为当前迭代次数; $X_{\alpha}, X_{\beta}, X_{\delta}$ 分别为 α, β, δ 狼的当前位置, 传统 GWO 算法的局限是灰狼位置更新由 α, β, δ 狼位置的算术平均确定, 在迭代过程中位置权重始终不变, 三狼的位置关系无法进行相互沟通。此外, 算法中头狼 α 不一定是全局最优解, 随着底层狼不停地向头狼逼近, 寻优过程可能陷入局部最优^[28]。

为此, 文中提出一种 IGWO 算法, 通过引入动态递减的非线性迭代权重以及学习因子, 在更新灰狼位置时考虑 α, β, δ 狼位置的相互影响, 使得算法在迭代初期搜索范围较大, 在迭代后期搜索范围较小, 从而加强局部搜索能力, 减少寻优收敛时间。设计非线性迭代权重如式(27)所示。

$$\omega_i = 1 - \frac{e^{p(i-M)/M}}{q} \quad (27)$$

式中: p 为非线性因子; q 为权重限制因子; M 为最大迭代次数。文中取 $p=5, q=3$ 。非线性迭代权重变化规律如图 8 所示。

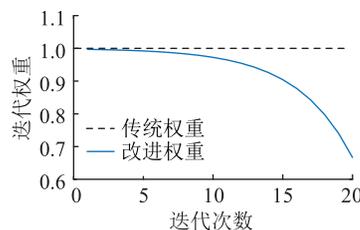


图8 非线性权重变化规律

Fig.8 Nonlinear weight variation law

结合非线性迭代权重 ω_i , 灰狼位置更新公式为:

$$X(i+1) = \omega_i (W_1 X_{\alpha} + W_2 X_{\beta} + W_3 X_{\delta}) \quad (28)$$

式中: W_1, W_2, W_3 分别为底层狼对 α, β, δ 狼的学习因子, 其数学表达式如下:

$$\begin{cases} W_1 = \sigma_1 / (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ W_2 = \sigma_2 / (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \\ W_3 = \sigma_3 / (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = |X_{\alpha} - (X_{\alpha} + X_{\beta} + X_{\delta})/3| \\ \sigma_2 = |X_{\beta} - (X_{\alpha} + X_{\beta} + X_{\delta})/3| \\ \sigma_3 = |X_{\delta} - (X_{\alpha} + X_{\beta} + X_{\delta})/3| \end{cases} \quad (30)$$

非线性权重以及学习因子使得灰狼位置向量的计算权重动态变化, 在迭代中不断调节头狼所占比重, 避免算法在迭代后期陷入局部最优。文中分别设置参数 K_p, K_i, λ, K_R 的优化范围为 $\{(0, 10), (0, 10), (-1, 0), (0, 3)\}$ 。一般地, 狼群数量 S 及最大迭代次数 M 越大, 优化得到的解越佳, 但运算求解时间代价也越大, 文中取 $S=50, M=20$ 。

4 算例分析

文中利用 Matlab/Simulink 仿真软件, 基于修改的 Wind Farm DFIG Average Model 搭建如图 1 所示的仿真模型, 验证所提控制策略的有效性。该系统包含 6 台型号相同且运行状态一致的 1.5 MW 双馈风电机组。为验证 IGWO 算法对所提策略多参数优化的适应性, 在同种工况下, 将 IGWO 算法与 PSO 算法、GWO 算法的参数优化性能进行比较。

图 9 给出了不同算法在迭代 20 次后得到的适应度函数, 表 1 为不同算法参数整定值、适应度值以及算法优化执行时间统计结果。可见, 所提 IGWO 算法的收敛稳定性最高, 通过引入非线性迭代权重以及学习因子, 能在保证寻优精度的前提下, 使得

寻优速度提升,其寻优速度较传统 PSO 算法、GWO 算法分别提高 5%和 3%。

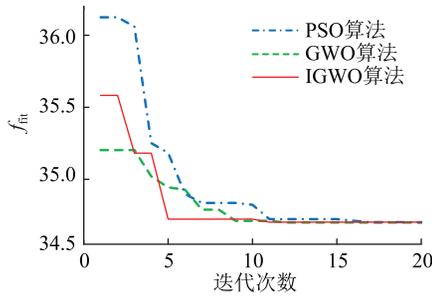


图 9 不同算法的适应度函数

Fig.9 Fitness function of different algorithms

表 1 不同算法统计结果

Table 1 Statistical results of different algorithms

算法	K_p	K_i	K_R	λ	f_{fit}	t/s
PSO-PI	0.497 7	1.672 0	1.618 0	1.000 0	34.762 0	5 583
PSO-FOPI	0.493 2	1.671 0	1.588 3	1.347 7	34.724 4	6 320
GWO-FOPI	0.524 8	2.431 0	1.634 1	1.345 2	34.712 0	5 966
IGWO-FOPI	0.561 7	2.403 6	1.632 7	1.346 3	34.701 5	5 707

图 10 给出了 IGWO 算法下 FOPI 控制器中积分环节阶次 λ 与适应度函数的关系。可见,当 $\lambda = 1.347$ 时系统适应度最优,即在抑制次同步振荡和稳定风机并网电流时,系统 FOPI 控制较传统 PI 具有更强的控制稳定性。

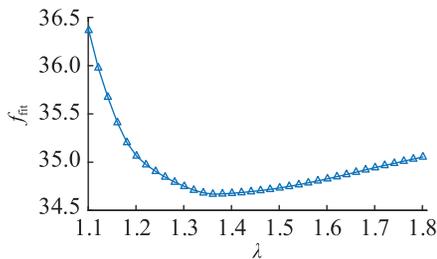


图 10 积分阶次与适应度函数关系

Fig.10 Relationship between integration order and fitness function

图 11 给出了不同算法下双馈风机的并网功率响应。可以看出,IGWO-FOPI 能更平稳、更快速地调节风机功率。为进一步验证所提 SSCI 抑制策略对不同串补下系统的次同步振荡抑制效果,系统仿真设置风速为 15 m/s,在 1.5 s 时系统分别接入 15%、30%以及 50%的串补电容,并在 2.0 s 接入附加虚拟电阻控制,控制策略参数采用 IGWO-FOPI 优化后的整定值。风机并网电流 i 、经滤波环节的次同步振荡电流 i_{ov} 、虚拟电阻电压反馈量 u_R 、风机并网功率 P 如图 12 所示。由图可知,在 1.5~2.0 s 时因串补电容的接入,风机并网电压、电流和功率均产生不同程度的振荡。在风机输出功率一定的情况

下,系统接入的串补电容越大,SSCI 引发的振荡幅值越大。

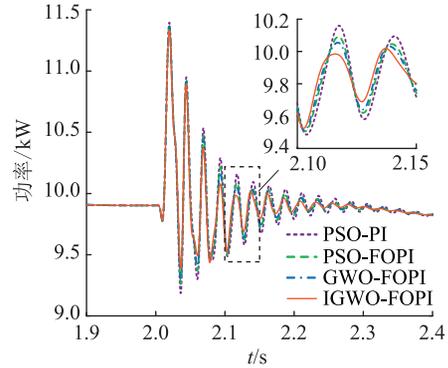
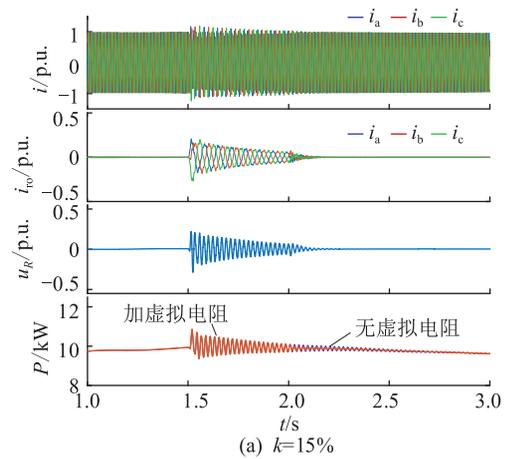


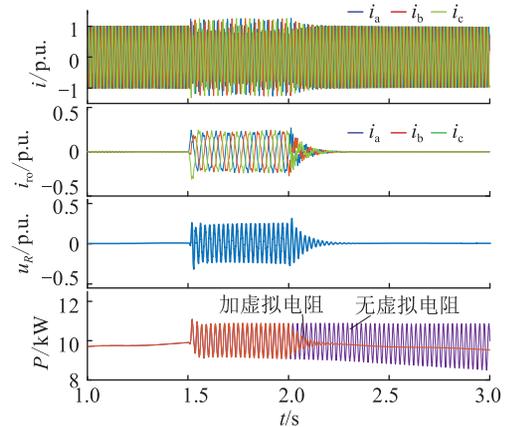
图 11 不同算法整定的风机功率响应

Fig.11 Power response of DFIGs with different algorithms

分别截取图 12 中 1.5~2.0 s 的风机 a 相并网电流 i_a 进行傅里叶分析,得到并网电流各频率分量如图 13 所示,可知电流基频分量频率为 60 Hz,此外 15%、30%以及 50%的串补电容分别引发了频率为 14.8 Hz、15.7 Hz、18.2 Hz 的次同步电流谐波,其谐波畸变率分别为 1.68%、4.68%、6.18%,严重影响系统并网稳定性。较小的串补电容引发较低频的次同步振荡,此时系统的自身调节能力对其有一定的抑制作用($k < 15\%$),但在较大串补引发的次同步振



(a) $k=15\%$



(b) $k=30\%$

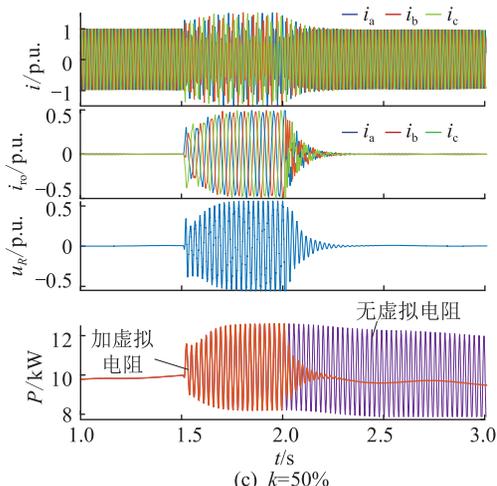


图 12 附加虚拟电阻的系统响应

Fig.12 System response controlled by virtual resistance

荡中,风机因自身的弱阻尼特性,系统自身调节作用十分有限,甚至将导致振荡发散。而在 2.0 s 接入附加虚拟电阻的阻尼控制后,系统的振荡现象迅速减弱,并在约 0.2 s 的振荡衰减后重新步入稳定状态。所设计的虚拟电阻对不同串补引发的宽频带次同步振荡均有较好的抑制效果,表现出良好的宽频带适应性。

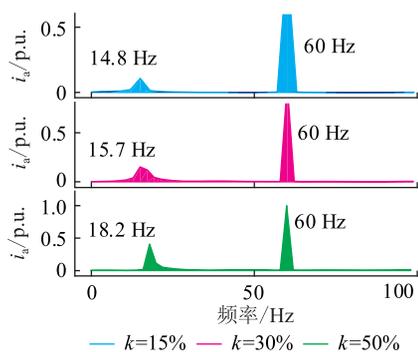


图 13 风机 a 相并网电流分量

Fig.13 Wind turbine a-phase grid-connected current component

5 结论

文中针对双馈风机串补系统引发的次同步振荡问题,提出一种基于虚拟电阻的双馈风机次同步振荡 FOPI 控制策略,通过理论研究和仿真验证,得到如下结论:

(1) 设计虚拟电阻能有效改善系统次同步电气阻尼,可在较短时间内抑制次同步振荡,稳定线路电流和风机功率,显著降低了系统不同串补度下的 SSCI 风险。

(2) 利用改进 Oustaloup 算法对分数阶积分算子进行近似,重构风机网侧电流环 FOPI 控制器,改

进分数阶控制规律,提升了电流跟踪动态特性,提高了系统次同步振荡的稳定性及鲁棒性。

(3) 通过引入非线性迭代权重以及学习因子,对传统 GWO 算法进行改进,提高了 SSCI 抑制策略参数寻优适应度以及收敛速度,增强了不同工况下控制器多参数适应性。

参考文献:

[1] 王胜利,许刚. 特高压近区风电汇集地区次同步振荡特征及防控措施[J]. 中国电力,2020,53(3):28-34,65.
WANG Shengli, XU Gang. Subsynchronous oscillation features and control measures for wind power influx area near HVDC [J]. Electric Power,2020,53(3):28-34,65.

[2] SHAIR J, XIE X R, LIU W, et al. Modeling and stability analysis methods for investigating subsynchronous control interaction in large-scale wind power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2021,135:110420.

[3] 单碧涵,王宝华,刘洋,等. 基于定子侧模拟电阻的双馈风电场次同步振荡抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(5):10-16.
SHAN Bihan, WANG Baohua, LIU Yang, et al. Analysis of a new control strategy based on stator-side virtual resistance to suppress sub-synchronous oscillation in DFIG-based wind farms [J]. Power System Protection and Control,2020,48(5):10-16.

[4] 杨博闻,占颖,谢小荣,等. 双馈风电场接入串补输电系统引发次同步谐振的研究模型[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(8):120-126.
YANG Bowen, ZHAN Ying, XIE Xiaorong, et al. A study model for subsynchronous resonance in DFIG based wind farms connected to a series-compensated power system[J]. Power System Protection and Control,2020,48(8):120-126.

[5] 杨琳,张晓寒, PANG Chengzong, 等. 储能位置和容量对次同步振荡抑制效果的影响[J]. 电力电容器与无功补偿,2021,42(3):138-143.
YANG Lin, ZHANG Xiaohan, PANG Chengzong, et al. Influence of energy storage position and capacity on SSO suppression [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3):138-143.

[6] 吴熙,关雅静,宁威,等. 双馈风机转子侧变换器参数对次同步振荡的交互影响机理及其应用研究[J]. 电网技术,2018,42(8):2536-2544.
WU Xi, GUAN Yajing, NING Wei, et al. Mechanism of interactive effect of RSC parameters in DFIG on SSO and its application [J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2536-2544.

[7] 董晓亮,谢小荣,田旭. 双馈风机定子侧逆变器的附加阻尼抑制次同步振荡方法[J]. 高电压技术,2016,42(9):2785-2791.
DONG Xiaoliang, XIE Xiaorong, TIAN Xu. Sub-synchronous resonance mitigation scheme by stator side converter in doubly fed induction generator [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9):2785-2791.

[8] LI G X, CHEN Y D, LUO A, et al. Analysis and mitigation of

- subsynchronous resonance in series-compensated grid-connected system controlled by a virtual synchronous generator[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35 (10): 11096-11107.
- [9] 高本锋,王飞跃,于弘洋,等. 应用静止同步串联补偿器抑制风电次同步振荡的方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(6): 1346-1356.
GAO Benfeng, WANG Feiyue, YU Hongyang, et al. The suppression method of wind power sub-synchronous oscillation using static synchronous series compensator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(6): 1346-1356.
- [10] 高哲. 一类采用分数阶 PI^λ 控制器的分数阶系统可镇定性判定准则[J]. *自动化学报*, 2017, 43(11): 1993-2002.
GAO Zhe. Stabilization criterion for a class of interval fractional-order systems using fractional-order PI^λ controllers[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(11): 1993-2002.
- [11] 张晓超,李虹,苏文哲,等. DC-DC 变换器分数阶 PI^λ 控制与稳定性分析研究[J]. *电工电能新技术*, 2019, 38(5): 21-31.
ZHANG Xiaochao, LI Hong, SU Wenzhe, et al. Study on fractional-order PI^λ control and stability analysis of DC-DC converter[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2019, 38(5): 21-31.
- [12] 单华,和婧,范立新,等. 面向抽水蓄能电站区域负荷频率的分数阶 PID 控制研究[J]. *电网技术*, 2020, 44(4): 1410-1418.
SHAN Hua, HE Jing, FAN Lixin, et al. Research on fractional order PID control of regional load frequency of pumped storage power station [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(4): 1410-1418.
- [13] ZHANG G Z, HU W H, CAO D, et al. A data-driven approach for designing STATCOM additional damping controller for wind farms[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 117: 105620.
- [14] 韩太林,张延雪,王啸,等. 改进型灰狼算法在热电偶动态补偿中的应用[J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 61-67.
HAN Tailin, ZHANG Yanxue, WANG Xiao, et al. Application of improved grey wolf algorithm in dynamic compensation of thermocouple[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(1): 61-67.
- [15] 马永翔,陈昊睿,闫群民,等. 基于灰狼优化算法的 SSSC 阻尼功率振荡控制器设计[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(3): 1-6.
MA Yongxiang, CHEN Haorui, YAN Qunmin, et al. Design of SSSC damping power oscillation controller based on grey wolf optimization algorithm[J]. *Power Capacitors & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(3): 1-6.
- [16] 俞沛宙,王澍,杨继辉,等. 基于灰狼优化的永磁同步电机自适应反推鲁棒控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(2): 39-46.
YU Peizhou, WANG Shu, YANG Jihui, et al. Adaptive backstepping robust control strategy of PMSM based on grey wolf optimization[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(2): 39-46.
- [17] 朱廷猛,孙海顺,秦世耀,等. 弱电网下双馈风机并网系统的次同步振荡研究[J]. *电网技术*, 2021, 45(5): 1641-1648.
ZHU Tingmeng, SUN Haishun, QIN Shiyao, et al. Sub-synchronous oscillation in DFIG system connected to weak grid [J]. *Power System Technology*, 2021, 45(5): 1641-1648.
- [18] 王利超,于永军,张明远,等. 直驱风电机组阻抗建模及次同步振荡影响因素分析[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(1): 170-177.
WANG Lichao, YU Yongjun, ZHANG Mingyuan, et al. Impedance model and analysis of subsynchronous oscillation influence factors for grid-connected full-converter wind turbines [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(1): 170-177.
- [19] LI Y, FAN L L, MIAO Z X. Replicating real-world wind farm SSR events[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(1): 339-348.
- [20] LI P H, XIONG L Y, WU F, et al. Sliding mode controller based on feedback linearization for damping of sub-synchronous control interaction in DFIG-based wind power plants[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 107: 239-250.
- [21] 郭春义,赵剑,刘炜,等. 一种适用于混合多馈入直流输电系统的附加虚拟电阻阻尼控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(12): 3400-3409.
GUO Chunyi, ZHAO Jian, LIU Wei, et al. A supplementary virtual-resistor damping control for hybrid multi-infeed HVDC system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(12): 3400-3409.
- [22] 张旭,谢小荣,刘辉,等. 网侧次同步阻尼控制器的设计及其 RTDS 测试[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(22): 6503-6511.
ZHANG Xu, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Design and RTDS test of the grid-side subsynchronous damping controller [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(22): 6503-6511.
- [23] 黄亮,杨雪梅,张锐明,等. 基于 LLCL 滤波器混合阻尼策略设计方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(9): 150-156.
HUANG Liang, YANG Xuemei, ZHANG Ruiming, et al. Design method of hybrid damping strategy based on an LLCL filter [J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(9): 150-156.
- [24] 万玉良,朱玲,项颂,等. 直驱风电机组与弱电网交互作用稳定分析[J]. *中国电力*, 2019, 52(9): 118-125.
WAN Yuliang, ZHU Ling, XIANG Song, et al. Interactive stability analysis between direct-drive wind turbines and weak power system [J]. *Electric Power*, 2019, 52(9): 118-125.
- [25] PODLUBNY I. Fractional-order systems and $PI^\lambda/spl lambda$ - $D^\mu/spl mu$ -controllers [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, 44(1): 208-214.
- [26] 刘勇智,李杰,戴聪,等. 基于改进 Oustaloup 滤波器的分数阶 PID 控制器简化设计[J]. *信息与控制*, 2019, 48(6): 723-728, 737.
LIU Yongzhi, LI Jie, DAI Cong, et al. Design of simplified frac-

- tional-order PID controller based on improved Oustaloup filter [J]. Information and Control, 2019, 48(6):723-728, 737.
- [27] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69:46-61.
- [28] 赵瑞锋, 郭文鑫, 王彬, 等. 基于群灰狼优化算法的双馈感应电机最优控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 150-158.
- ZHAO Ruifeng, GUO Wenxin, WANG Bin, et al. Gathered grey wolf optimizer based optimal control of doubly-fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48

(14):150-158.

作者简介:



刘志坚

刘志坚(1975),男,博士,教授,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:248400248@qq.com);

刘杰(1996),男,硕士,研究方向为电力系统稳定与分析;

李鹏程(1995),男,硕士,研究方向为电力系统控制与优化。

Virtual resistance-based fractional-order PI control strategy for sub-synchronous oscillation in doubly-fed wind turbines

LIU Zhijian, LIU Jie, LI Pengcheng, ZI Chao, LIANG Ning

(School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming at the ineffective suppression results of sub-synchronous oscillation under grid connection of doubly-fed wind turbines process with traditional method, a virtual resistance-based fractional-order proportional integral (FOPI) control strategy is proposed. Firstly, the sub-synchronous oscillation mechanism of wind power systems is analyzed, and the grid-connected current of the wind turbine is selected as the input signal to design the sub-synchronous broadband current filter. To improve the electrical damping of the wind turbine system, a virtual resistance controller is constructed. After that, the influence of the integral order on the dynamic characteristics of current tracking is analyzed. Where the fractional integral operator is improved by employing Oustaloup algorithm, and the FOPI current control loop is reconstructed by choosing the grid-side converter's control equation as the bottom model. Then, the non-linear iterative weights and learning factors are introduced to improve the traditional gray wolf algorithm, as well as optimize the parameters of control policy. Finally, the simulation verification is carried out under Matlab/Simulink platform. The results show that the proposed strategy can suppress the sub-synchronous oscillation effectively under different compensation levels and exhibit strong robust stability.

Keywords: virtual resistance; doubly-fed wind farms; sub-synchronous oscillation; improved grey wolf optimizer algorithm; fractional-order proportional integral (FOPI); parameter optimization

(编辑 陆海霞)