

基于轨迹灵敏度的风电并网系统短路电流控制参数寻优方法

林威¹, 方宇迪¹, 林毅¹, 王潇²

(1.国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350013; 2.南京邮电大学 自动化学院、人工智能学院, 江苏 南京 210023)

摘要:直驱风力发电机(PMSG)由于其优越性成为主流机型并广泛应用于电网,但由于缺乏量化分析方法,难以评估其控制参数对短路电流特性的影响。文章通过PMSG有功电流和无功电流计算方法,经派克变换得到三相短路电流的解析表达式,并基于轨迹灵敏度方法,从发电机参数、电压跌落系数和PI参数3个方面量化分析不同控制参数对短路电流的影响机理,筛选出灵敏度较大的参数作为主导参数,构建优化目标函数,对PMSG短路电流的主导控制参数进行寻优。最后在PSCAD平台上建立PMSG电磁暂态仿真模型,仿真验证分析PMSG的短路电流特性以及控制参数寻优效果。研究表明,轨迹灵敏度分析法可以量化分析控制参数对短路电流特性的影响,可为实际工程的参数整定提供指导。

关键词:直驱风机; 轨迹灵敏度; 量化分析; 短路电流特性; 控制参数寻优

中图分类号:TK81 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5292(2025)01-0134-09

0 引言

近年来,化石能源危机加剧,以风力发电为代表的新能源发电技术逐渐成为未来的重要发电形式^[1]。在新能源外送工程中,主网与送端系统的电气距离通常较远,且同步电源容量有限,因此新能源汇集地区的电网强度一般较弱^[2]。这些地区出现短路故障时,容易造成风机大规模脱网^[3],因此对风力并网系统短路电流特性进行深入研究具有重要意义。

直驱风力发电机(PMSG)效能高、全负荷工作性能优异、工作转速范围较宽,目前已经被广泛应用于风力发电领域^[4]。由于PMSG发生故障时可能导致直流母线电压大幅上升,进而引起风电机组脱网,影响系统安全稳定运行。为解决这一问题,目前采取的主要保护措施是投入卸荷保护电路,以吸收多余能量保证直流母线电压稳定。在卸荷保护投入后,PMSG类似于异步发电机,已有较多研究分析了该保护措施下的PMSG短路电流特性^[5-8]。然而在电压跌落不深、直流侧电压波动不足以使卸荷电路投入的情况下,继续连接网侧变流器可以充分利用变流器的通流能力,有助于调整故障期间的短路电流^[9]。

受相关控制策略的影响,永磁直驱风机提供持续的短路电流,其对外输出特性与同步机有很大差异,因此不适宜用同步机模型等值。文献[10]提出了将PMSG简化成暂态电动势与电抗并联的模型,以更好地反映其对外输出特性,但是忽略了永磁直驱风机的内部控制策略。在短路电流分析方面,现有文献皆只考虑了卸荷保护投入情况下的短路电流特性。文献[11]表明永磁直驱风机具有无负序、零序阻抗等特点。文献[12]指出永磁直驱风机短路电流的暂态过程短且幅值较小。文献[13]通过理论分析给出直驱风机三相短路电流的近似表达式。文献[14]仿真研究了三相对称短路故障情况下的风电机组动态特性。上述文献虽从不同角度研究了PMSG的短路电流特性,但都是基于卸荷投入的前提,对于机端电压发生浅度故障的短路电流特性分析还不够深入,并且缺少相应的量化指标。

轨迹灵敏度可求解一段时间内系统运行参数或者性能指标对某个控制参数的灵敏度,并定量表征参数对某一特性的影响程度^[15],在众多领域得到广泛应用。文献[16]提出多工况-分步辨识策略,对双馈风机全局控制参数进行动态辨识。文献

收稿日期: 2024-05-22。

基金项目: 国网福建经研院专项项目(B3130N230015)。

作者简介: 林威(1994-),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统规划与优化。E-mail:418446395@qq.com

[17]优化新能源参与调频的控制参数。文献[18]建立耦合解析表达控制参数的轨迹灵敏度向量,分析参数对振荡抑制的影响效果。然而,上述文献仅使用轨迹灵敏度方法分析控制参数的影响程度,且未根据影响程度筛选出主导参数并对其进行寻优,同时现有文献在使用轨迹灵敏度研究风机短路电流特性时,也仅利用该方法分析风机参数可辨识性和辨识难易度,从而得到合理精确的风力发电机参数,并未对该方法筛选出的影响短路电流主导参数进行寻优。

为此,本文以发生三相对称故障为例,针对卸荷未投入的情况,通过研究网侧变流器的解耦控制及降阶过程,计算推导出三相短路电流的解析表达式;然后,基于轨迹灵敏度方法,从理论计算到仿真,筛选出灵敏度较大的参数作为影响短路电流的主导参数,并以短路过程中 PMSG 短路电流暂态分量与其初始稳态值相对偏差为评价指标构建优化目标函数,对 PMSG 短路电流控制参数进行寻优;最后,基于 PSCAD 平台,仿真比较不同控制参数对 PMSG 短路电流的影响效果,验证所提轨迹灵敏度方法的应用价值。

1 直驱风机三相短路电流解析

1.1 直驱风机网侧变流器的解耦控制

本文采用电压定向控制的网侧变流器控制策略,该控制方法可使网侧变流器的输出电流与电网电压的矢量在 d 轴对齐,此时网侧变流器的有功功率、无功功率的表达式为

$$P=u_d i_d; Q=-u_d i_q \quad (1)$$

由式(1)可知,在电压定向控制中,有功功率仅与有功电流 i_d 有关,无功功率仅与无功电流 i_q 有关,实现了有功、无功间的解耦控制。

网侧变流器通常采用双闭环控制,如图 1 所示。

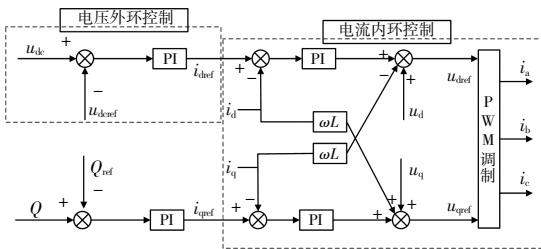


图 1 网侧变流器双闭环控制框图

Fig.1 Grid-side converter double-loop control block diagram

根据直流电压外环可得:

$$i_{dref}=k_{vp}(u_{dc}-u_{dref})+k_{vi} \int (u_{dc}-u_{dref})dt \quad (2)$$

式中: k_{vp}, k_{vi} 为电压外环比例积分系数; u_{dref} 为直流母线电压参考值。

1.2 故障后直驱风机三相短路电流计算

当电网发生三相对称短路时,忽略变流器的功率损耗,网侧变流器的电流方程为^[19]

$$P-\frac{3u_d i_d}{2}=u_{dc}C \frac{du_{dc}}{dt} \quad (3)$$

式中: C 为直流母线电容。

对式(2)两边同时求导并结合式(3)可得:

$$\frac{di_d}{dt}=\frac{Pk_{vp}}{Cu_{dc}}-\frac{3k_{vp}}{2Cu_{dc}}u_d i_d+k_{vi}(u_{dc}-u_{dref}) \quad (4)$$

求解可得有功电流 i_d 的表达式为

$$i_d=\frac{2P}{3u_d}+\frac{\left(i_{d0}-\frac{2P}{3u_d}\right)}{\sqrt{1-M^2}} \cdot e^{-M\omega_1 t} \sin(\omega_1 t+\alpha) \quad (5)$$

式中: i_{d0} 为故障前有功电流; $\omega_1=\sqrt{3k_{vp}u_d/2Cu_{dref}}$; $M=k_{vp}\sqrt{3u_d}/(2\sqrt{2Cu_{dref}k_{vi}})$; $\omega_n=\omega_1\sqrt{1-M^2}$; $\alpha=\arctan(\sqrt{1-M^2}/M)$ 。

网侧变流器并网后经过派克变换,无功电流 i_q 相关表达式为

$$u_q=L \frac{di_q}{dt}+Ri_q+\omega L i_d+v_q \quad (6)$$

式中: L, R 分别为网侧滤波器的等效电感、电阻; v_q 为变流器交流侧交轴电压。

无功电流 i_q 的控制方程为

$$u_q=k_p(i_{qref}-i_q)+k_i \int (i_{qref}-i_q)dt+\omega L i_d+v_q \quad (7)$$

式中: k_p, k_i 分别为电流内环比例系数、积分系数; i_{qref} 为无功电流参考值。

忽略滤波器电阻 R ,并结合式(6)、式(7)对 i_q 进行求导,得到 i_q 的表达式。

$$L \frac{d^2 i_q}{dt^2}+\frac{k_p}{L} \frac{di_q}{dt}+\frac{k_i}{L} i_q=\frac{k_i}{L} i_{qref} \quad (8)$$

$$i_q=i_{qref} \left[1-e^{-\frac{k_p}{2L}t} \frac{2\sqrt{Lk_i}}{\sqrt{4Lk_i-k_p^2}} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{4Lk_i-k_p^2}}{2L}t+\beta\right) \right] \quad (9)$$

式中: $\beta=\arctan(\sqrt{1-N^2}/N)$; $N=k_p/(2\sqrt{Lk_i})$ 。

无功电流参考值 i_{qref} 应满足^[17]:

$$i_{qref} \geq 1.5(0.9-E_d)I_N \quad (10)$$

式中: E_d 为网侧电压标幺值; I_N 为直驱风机的额定电流。

对式(5)和式(9)进行派克变换,得到 abc 三相电流表达式为

$$i_p = \frac{2P}{3u_d} \cos(\omega t + \theta) - i_{qref} \sin(\omega t + \theta) + \frac{(i_{d0} - \frac{2P}{3u_d})}{\sqrt{1-M^2}} \cdot e^{-M\omega t} \sin(\omega_n t + \alpha) \cos(\omega t + \theta) + i_{qref} e^{-\frac{k_r}{2L}t} \frac{2\sqrt{Lk_1}}{\sqrt{4Lk_1 - k_p^2}} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{4Lk_1 - k_p^2}}{2L}t + \beta\right) \sin(\omega t + \theta) \quad (11)$$

当 $\rho=a$ 时, $\theta=\theta_0$, θ_0 为故障时刻的电流相位; 当 $\rho=b$ 时, $\theta=\theta_0-120^\circ$; 当 $\rho=c$ 时, $\theta=\theta_0+120^\circ$ 。

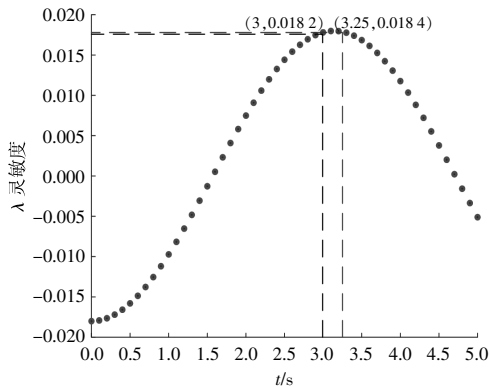
根据式(11)可知,在三相静止坐标系中,直驱风机短路电流分为暂态分量和稳态分量两部分。其中:暂态分量与网侧变流器电流内环 PI 控制参数、电压跌落程度有关;稳态分量受发电机参数以及电压跌落深度的影响,电压跌落系数 $\lambda=\Delta U/U_n$, 即总电压跌落量与额定电压之比。

2 影响直驱风机三相短路电流的主导参数分析

轨迹灵敏度是轨迹关于参数的导数,反映系统中某一参数发生微小变化时动态轨迹的变化程度,常用于分析参数变化所导致的系统轨迹变化^[7]。本文先通过短路电流各参数的轨迹灵敏度表达式作图,再计算各参数轨迹灵敏度大小,最后得出结论,并筛选出影响直驱风机三相短路电流的主导参数。

2.1 参数轨迹灵敏度曲线分析

由 1.2 节分析可知,PMSG 短路电流含稳态分量和暂态分量,两种分量的幅值与发电机参数、机端电压跌落程度及网侧变流器 PI 控制参数有关,且计算短路电流过程忽略了滤波器电阻



(a) λ 灵敏度

R ,故本文选取发电机定子电感 L 、电压跌落系数 λ 和网侧变流器电流内环 PI 参数作为研究对象。

为简化计算,短路电流控制参数的轨迹灵敏度可以表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial i(t)}{\partial \lambda} = \frac{i_{(\lambda+\delta\lambda)}(t) - i_{(\lambda-\delta\lambda)}(t)}{2\delta\lambda} \\ \frac{\partial i(t)}{\partial L} = \frac{i_{(L+\delta L)}(t) - i_{(L-\delta L)}(t)}{2\delta L} \\ \frac{\partial i(t)}{\partial k_p} = \frac{i_{(k_p+\delta k_p)}(t) - i_{(k_p-\delta k_p)}(t)}{2\delta k_p} \\ \frac{\partial i(t)}{\partial k_1} = \frac{i_{(k_1+\delta k_1)}(t) - i_{(k_1-\delta k_1)}(t)}{2\delta k_1} \end{cases} \quad (12)$$

本文以一台 2 MW PMSG 为例,其具体参数如表 1 所示。

表 1 2 MW PMSG 参数
Table 1 2 MW PMSG parameters

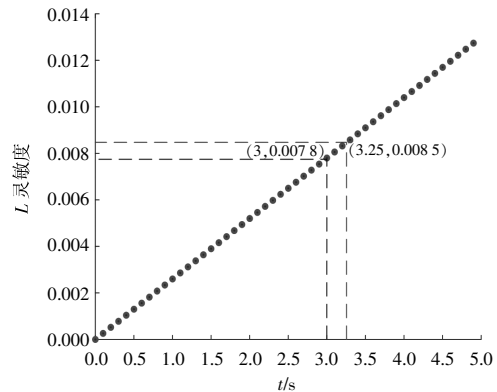
参数	数值	参数	数值
额定电压 U_n/V	690	机侧电感 $L_r/p.u.$	690
额定功率 S/MW	2	直流侧电容 $C/p.u.$	2
定子电阻 $R_s/p.u.$	0.001 7	交轴电抗 $X_q/p.u.$	0.001 7
定子电感 $L/p.u.$	0.18	直轴电抗 $X_d/p.u.$	0.18

设置 $t=3.0$ s 时电网侧母线处发生三相对称短路故障,故障持续时间为 0.25 s。对式(12)进行仿真,得到风电机组不同参数的轨迹灵敏度曲线(图 2),分析各参数的轨迹灵敏度。

由图 2 多个参数灵敏度曲线可以看出:在故障发生时刻,所选 4 个参数中,电感的轨迹灵敏度最小,比例系数的轨迹灵敏度最大。

2.2 参数轨迹灵敏度计算

轨迹灵敏度越大,即该参数对轨迹的影响越



(b) L 灵敏度

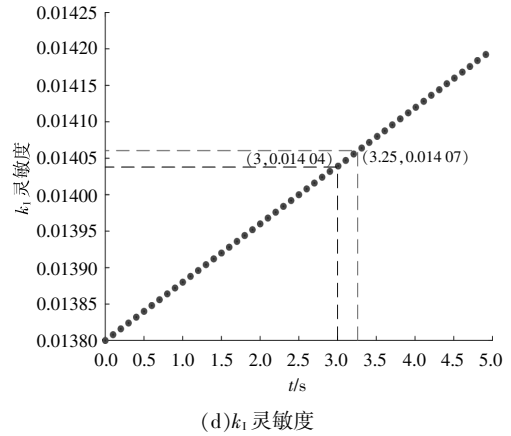
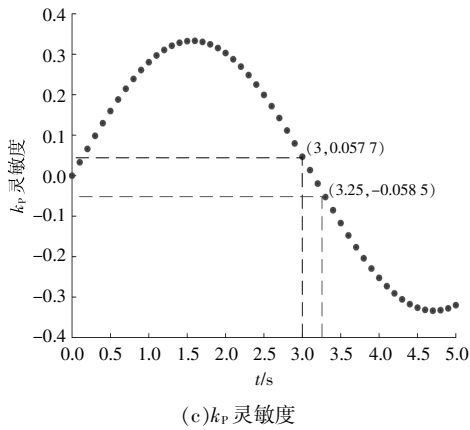


图 2 PMSG 各参数灵敏度曲线
Fig.2 Sensitivity curve of PMSG parameters

大。为了定量比较各参数轨迹灵敏度的大小,有如下计算^[20]:

$$S_{\theta} = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^P |X_{\theta}(i)| \quad (13)$$

式中: S_{θ} 为参数 θ 在采样时窗内的轨迹灵敏度均值; P 为总采样点数; $X_{\theta}(i)$ 为参数 θ 的第 i 个点的轨迹灵敏度数值。

仿真条件与 2.1 节相同,不同观察时窗内各参数的轨迹灵敏度结果如表 2 所示。

表 2 不同时窗下各参数的轨迹灵敏度
Table 2 The trajectory sensitivity of each parameter under different simultaneous windows

时间/s	λ	L	k_p	k_i
3.00~3.05	0.018 2	0.007 9	0.057 8	0.014 04
3.05~3.15	0.018 2	0.008 0	0.058 3	0.014 05
3.15~3.25	0.018 4	0.008 3	0.058 5	0.014 06

由表 2 可以看出,在故障持续期间,所选取的 4 个参数中,比例系数的轨迹灵敏度最大,电压跌落系数与积分系数的轨迹灵敏度较小,电感的轨迹灵敏度最小,该计算结果与图 2 灵敏度曲线结果相一致。所以在本文选取的 4 个参数中,比例系数对短路电流的影响最大,可将其筛选为影响短路电流的主导参数。

2.3 算例分析

在 PSCAD 中搭建了 2 MW 的 PMSG 仿真模型,图 3 为直驱风机并网系统示意图,PMSG 基本参数见表 1。通过仿真结果对比,验证本文轨迹灵敏度分析方法的有效性。

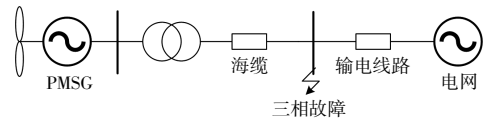
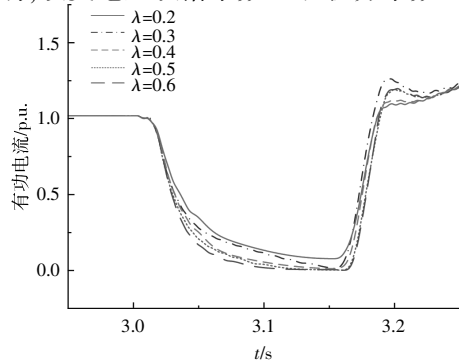
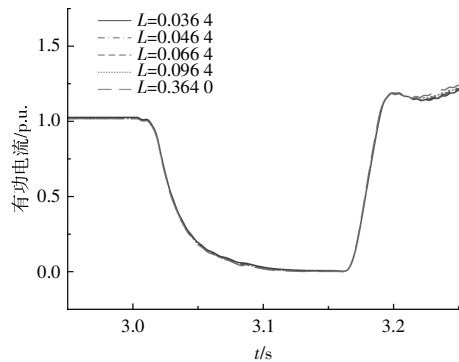


图 3 并网直驱风机系统示意图
Fig.3 Grid connected direct drive fan system diagram

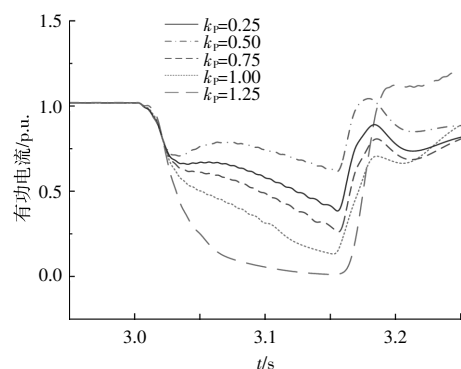
设置 $t=3.0$ s 时发生三相对称短路故障,从故障开始时刻的仿真结果如图 4 所示。当直驱风机发生故障后,改变定子电感 L 对有功电流基本没有影响,改变电压跌落系数 λ 和积分系数 k_i 时影



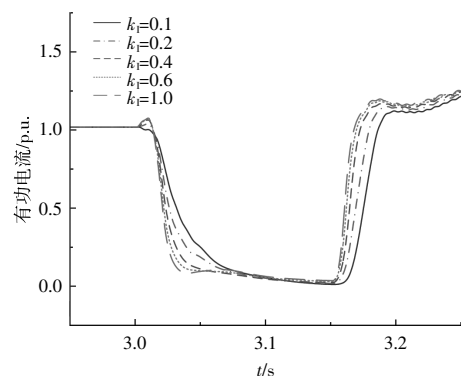
(a) 改变 λ 值



(b) 改变 L 值



(c) 改变 k_p 值



(d) 改变 k_i 值

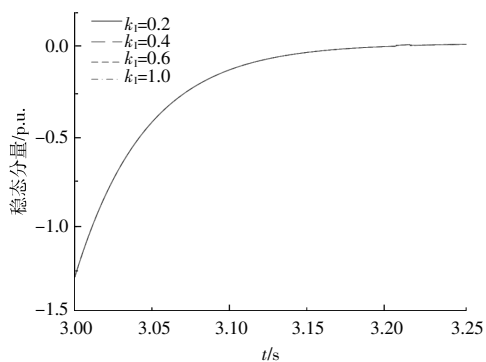
图 4 不同参数下的 PMSG 有功电流

Fig.4 PMSG active current under different parameters

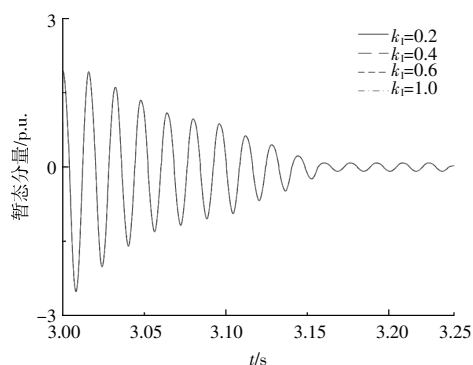
响较小,改变比例系数 k_p 时影响较大。

由图 4 可以看出,该仿真结果与 2.2 节分析的结果一致,进一步验证了轨迹灵敏度分析方法的有效性。

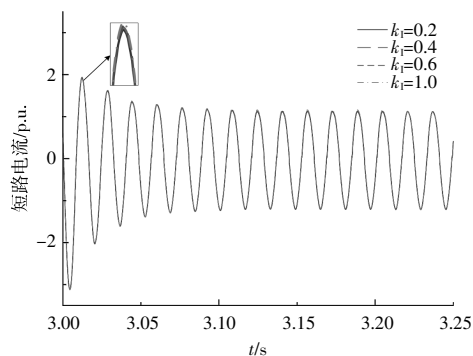
仿真研究 PI 参数对短路电流的影响,以 PMSG 发生三相对称短路且机端电压跌落至 0.7 p.u.的情况为例, k_p 不变,调整 k_i 得到 PMSG 短路电流波形对比曲线,如图 5 所示。由图 5 可知,随着 k_i 的增大,短路电流稳态分量基本无变化,暂态分量略有增大。



(a) 短路电流稳态分量



(b) 短路电流暂态分量

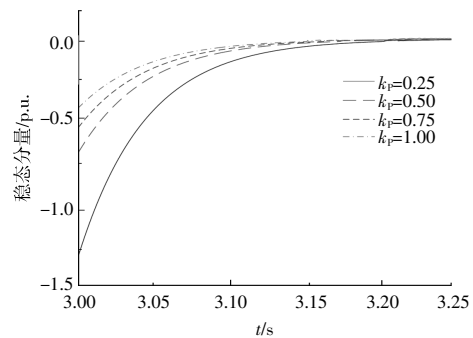


(c) 短路电流全波形

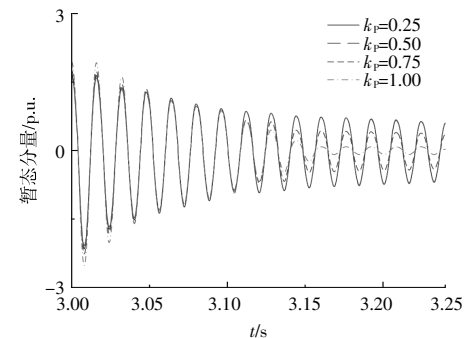
图 5 不同 k_i 下的短路电流波形对比

Fig.5 Comparison of short circuit current waveforms under different k_i conditions

k_i 不变,调整 k_p 得到 PMSG 短路电流波形对比曲线,如图 6 所示。由图 6 可知,随着比例系数



(a) 短路电流稳态分量



(b) 短路电流暂态分量

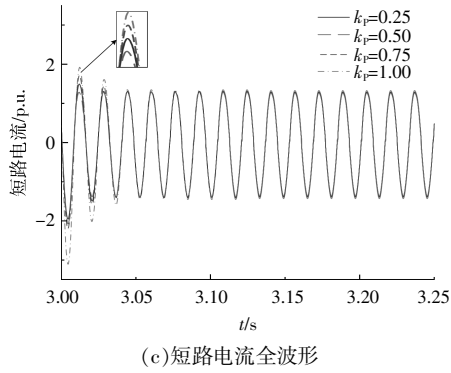

 图 6 不同 k_p 下的短路电流波形对比

 Fig.6 Comparison of short circuit current waveforms under different k_p conditions

k_p 的增大,短路电流稳态分量略微增大,而暂态分量随之有较为明显的变化。

由于短路电流中暂态分量占比大于稳态分量,故随着比例系数 k_p 的增大,短路电流有先减小后增大的明显变化趋势。

由以上分析可知,在卸荷未投入时,可以通过合理调节网侧变流器 PI 控制参数,从而影响短路电流中的稳态分量和暂态分量,达到抑制短路电流的目的,并且相比于调节积分参数 k_i ,调节比例参数 k_p 能达到更好的效果。

3 适用于风电系统的比例参数优化方法

3.1 比例参数优化模型

结合第 2 节理论分析结果,本文构建 PMSG 短路电流控制参数优化模型及粒子群优化算法模型,以短路过程中 PMSG 短路电流暂态分量与其初始稳态值相对偏差为评价指标,令该电流偏差达到最小值以优化 k_p 。

$$\min f(x) = \int_{t_0}^{t_1} \left[\frac{i(t) - i(t_0)}{i(t_0)} \right]^2 \quad (14)$$

式中: $i(t)$ 为 PMSG 在 t 时刻的短路电流暂态分量; t_1 为仿真结束时刻。

当 PMSG 发生短路故障后,故障电流远高于额定电流,为了避免过流引起的过热,应限制短路电流在 PMSG 允许的范围内。

$$|i(t)| \geq k I_{dc} \quad (15)$$

式中: k 为允许的过流系数; I_{dc} 为 PMSG 正常工作时的电流。

粒子群优化算法具有计算简单、求解效率高优点,因此选取该算法对风机短路电流的比例参数 k_p 进行优化。

有约束条件:

$$k_p^{\min} \leq k_p \leq k_p^{\max} \quad (16)$$

式中:上标 min 与 max 分别表示下限和上限。

粒子群算法(PSO)优化模型如下:

$$\begin{cases} V_{j,g}^{i+1} = \omega V_{j,g}^i + c_1 r_1 (p_{bestj,g}^i - x_{j,g}^i) + c_2 r_2 (g_{bestj,g}^i - x_{j,g}^i) \\ X_{j,g}^{i+1} = X_{j,g}^i + V_{j,g}^{i+1} \end{cases} \quad (17)$$

式中: v 为速度向量; x 为位置向量; p_{best} 为粒子的个体极值; g_{best} 为粒子群的全局极值; ω 为惯性权重系数; c_1, c_2 为加速度因子; r_1, r_2 为服从伯努利分布的 0~1 随机数; i 为迭代次数; j 为粒子个数; g 为参数个数。

惯性权重系数 ω 是影响粒子群优化算法寻优能力的重要参数, ω 值大,利于全局搜索, ω 值小,利于局部搜索。根据粒子权重自适应调整惯性权重系数,使得权重随着粒子适应度值的改变而改变。

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{f_j - f_{\min}}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}, & f_j \leq f_{\text{avg}} \\ \omega_{\max}, & f_j > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\omega_{\min}, \omega_{\max}$ 分别为惯性权重系数的最小值、最大值; f_{avg}, f_{\min} 分别为群体适应度的平均值、最小值; f_j 为当前粒子适应值。

采用 PSO 算法优化直驱风机系统参数的流程图如图 7 所示。

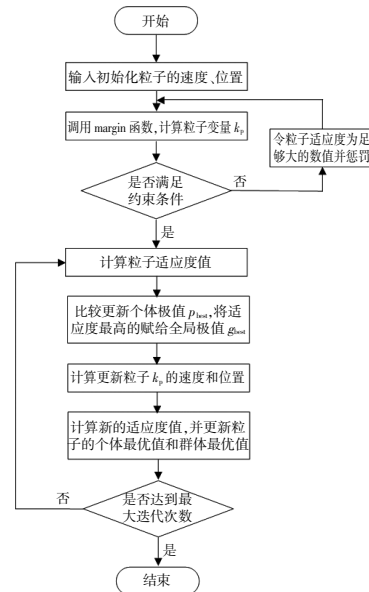


图 7 PSO 算法参数优化流程图

Fig.7 PSO algorithm parameter optimization process

3.2 算例分析

粒子群采用实数编码, 种群规模 $M=100$, 进化次数为 50, 优化变量个数为 1, 即比例系数 k_p , 其对系统性能和算法性能都产生直接影响, 以最优结果对应的参数值为最优参数。此外, 标准粒子群优化参数 $c_1=c_2=2$, 最大速度 $V_{max}=28$ 。设置参数 k_p 取值为 $[0, 5]$, 采用 PSO 算法优化模型对其进行寻优, 得到最佳适应度为 17.847 6, 对应的最优参数 $k_p=0.463$, 适应度曲线如图 8 所示。

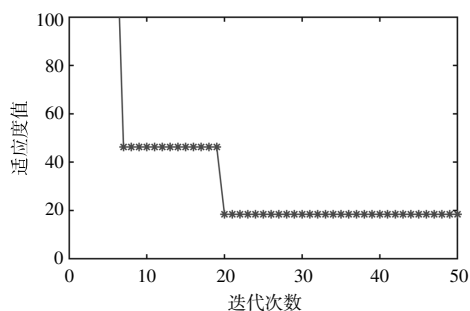
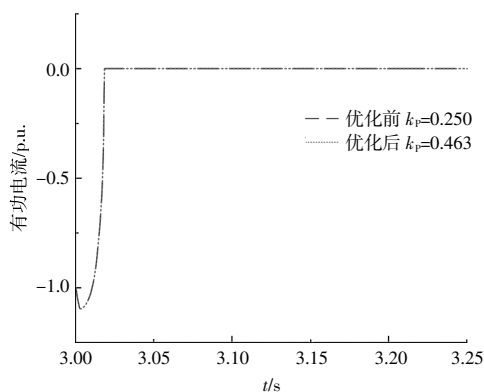


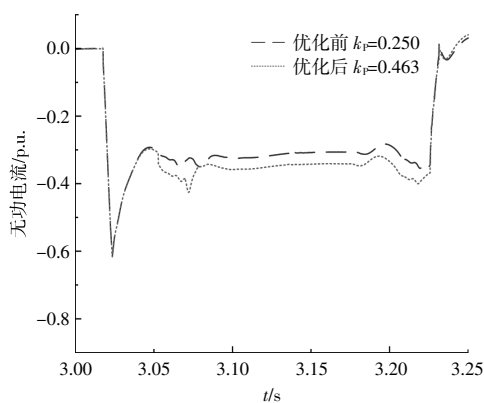
图 8 参数优化适应度曲线

Fig.8 Parameter optimization fitness curve

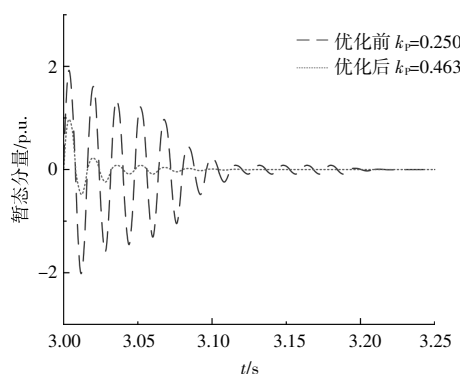
将优化前、后参数代入风电机组, 得到如图 9 所示的结果。



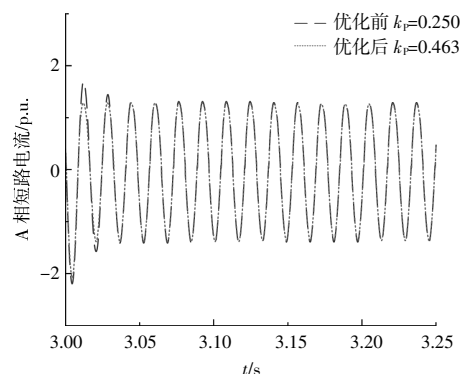
(a)有功电流



(b)无功电流



(c)暂态分量



(d)A相短路电流

图 9 参数优化前、后风机各物理量对比

Fig.9 Comparison of physical quantities of the fan before and after parameter optimization

由图 9 可以看出, PSO 算法优化后的参数达到抑制短路电流的效果, 增强了系统的稳定性, 超调只有优化前的 50%, 暂态过程明显减少, 收敛稳定时间也大幅度缩短。

4 结论

本文通过研究直驱风机网侧变流器的解耦控制过程及降阶处理, 推导出考虑网侧变流器控制策略的 PMSG 有功电流、无功电流及三相电流表达式, 基于轨迹灵敏度方法筛选出对短路电流影响较大的参数, 并研究其对短路电流特性的影响。理论推导和仿真结果表明:

①在三相静止坐标系下, 直驱风机机端电压跌落程度较低, 卸荷电路不投入时, 三相短路电流暂态分量与网侧变流器电流内环 PI 控制参数、电压跌落程度有关, 稳态分量受发电机参数以及电压跌落深度的影响;

②对不同的电压跌落程度、定子电感和 PI 控制参数的短路电流灵敏度情况进行了仿真分析, 结果表明, 在故障发生时刻, 定子电感的轨迹灵敏

度最小,比例系数的轨迹灵敏度最大;

③结合控制参数影响分析,基于 PSO 算法优化后参数可以在一定程度上抑制 PMSG 短路电流的大小,增强系统的稳定性。

参考文献:

- [1] 亢丽君,王蓓蓓,薛必克,等.计及爬坡场景覆盖的高比例新能源电网平衡策略研究[J].电工技术学报,2022,37(13):3275-3288.
- [2] 孙泽锋,李渤,王磊.计及风电相关性的电力系统数据驱动分布鲁棒优化调度 [J]. 中国测试,2023,49(8):93-103.
- [3] 孙大卫,刘辉,赵峰,等.不同逆变电源主动支撑控制方式的对比研究[J].电网技术,2019,40(3):910-917.
- [4] 何胜华,黄弘,范必双,等.带自适应模糊神经网络补偿的自耦合 PI 在风力机变桨控制中的应用[J].可再生能源,2023,41(5):618-624.
- [5] 黄弘扬,马骏超,袁嫣红,等.考虑 Crowbar 动作特性的 DFIG 风电场短路电流特性分析[J].可再生能源,2019,37(9):1325-1332.
- [6] 孙大卫,吴林林,刘辉,等.弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响[J].中国电机工程学报,2021,41(14):4777-4786.
- [7] 王献志,赵宇皓,周雪青,等.考虑新能源接入的配电网继电保护研究[J].电子器件,2021,44(2):339-345.
- [8] 李进泽,梅恬语,赵震,等.不同工况下 3.3 MW 永磁直驱风力发电机电磁场仿真分析及损耗修正[J].可再生能源,2022,40(3):338-343.
- [9] 郑涛,魏旭辉,李娟,等.PI 控制参数对双馈风电机组短路电流特性的影响分析 [J]. 电力自动化设备,2016,36(7):15-21.
- [10] 毕天姝,李彦宾,马丽红,等.风场及其送出线保护配置与整定研究[J].电力系统保护与控制,2014(5):45-50.
- [11] Dhiman H S, Deshpande A S. Fault ride-through study of PMSG based offshore wind farms during grid faults [A].2016 1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)[C]. Delhi:IEEE,2016.1-5.
- [12] Ebrahimzadeh E,Blaabjerg F,Wang X,et al.Harmonic stability and resonance analysis in large PMSG-based wind power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2018,9(1):12-23.
- [13] 宋国兵,常仲学,王晨清,等.直驱风机三相短路电流特性分析[J].西安交通大学学报,2015,49(10):1-7.
- [14] 栗然,高起山,刘伟.直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性[J].电网技术,2011,35(10):153-158.
- [15] 李生虎,赵启锐,朱争高.基于轨迹灵敏度的DFIG 直流过电压优化[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(8):1-7.
- [16] Li Hui, Wu You, Li Qinghe, et al. Improved identification method of doubly-fed induction generator based on trajectory sensitivity analysis [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2021,125:106472.
- [17] 田政麟,王正宇.基于轨迹灵敏度的频率协调控制参数影响分析[J].电气自动化,2023,45(5):75-80.
- [18] 李生虎,齐楠,夏伟健.计及风电 PSS 与 PLL耦合对功角振荡影响的 DFIG 控制参数协调优化[J].高电压技术,2024,50(4):1571-1582.
- [19] 齐金玲,李卫星,李志民,等.直驱风机低电压穿越行为对并网点电压的影响及优化控制[J].电力系统自动化,2023,47(7):105-113.
- [20] 潘学萍,殷紫吟,鞠平,等.基于短路电流辨识双馈感应发电机的模型参数 [J]. 电力自动化设备,2017,37(11):27-31.

Parameter optimization method for short-circuit current control in wind power grid connection system based on trajectory sensitivity

Lin Wei¹, Fang Yudi¹, Lin Yi¹, Wang Xiao²

(1.State Grid Fujian Economic Research Institute, Fuzhou 350013, China; 2.College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Direct drive wind turbine (PMSG) has become the mainstream model and is widely used in power grid because of its superiority, but it is difficult to evaluate the influence of its control parameters on short-circuit current characteristics due to the lack of quantitative analysis methods. Therefore, the analytic expression of three-phase short-circuit current is obtained by the calculation method of PMSG active current and reactive current through Parker transformation. Based on the trajectory sensitivity method, the influence mechanism of different control parameters on short-circuit current is quantitatively analyzed from three aspects of generator parameters, voltage drop coefficient and PI parameter, and the parameter with greater sensitivity is selected as the leading parameter. The optimization objective function is constructed to optimize the main control parameters of PMSG short circuit current. Finally, the electromagnetic transient simulation model of PMSG was established on the PSCAD platform to verify and analyze the short-circuit current characteristics of PMSG and the optimization effect of control parameters. The research results show that the trajectory sensitivity analysis method can quantify the influence of control parameters on short-circuit current characteristics, and can provide guidance for parameter tuning in practical engineering.

Keywords: direct-driven wind turbine generators; trajectory sensitivity; quantitative analysis; short-circuit current characteristics; control parameter optimization