

# 考虑暂态功角稳定的风机短路电流与无功支撑关键参数优化方法

华文<sup>1</sup>, 董炜<sup>1</sup>, 陆翌<sup>1</sup>, 郑晨一<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 以风电为代表的新能源并网系统暂态功角稳定和电压稳定问题交织, 同时伴随着电网短路电流水平超标风险。当前研究大多聚焦单一问题提升系统的稳定性, 未综合考虑多方面因素制定风机控制参数的优化方法。针对这一问题, 文章提出了考虑暂态功角稳定的风机短路电流与无功支撑关键参数优化方法。首先, 基于风火联合送出系统简化模型分析了功角稳定问题的产生机理, 以及风机有功出力对功角稳定性的影响; 然后, 推导了直驱风机短路电流的解析表达式, 分析了影响有功电流和无功电流水平的关键因素; 最后, 结合仿真研究了短路电流关键参数对风机无功电压支撑能力的影响, 在此基础上, 制定了考虑暂态功角稳定性的风机短路电流与无功支撑关键参数的优化原则及方法。基于实际电网的仿真分析结果表明, 所提方法能够在保障暂态功角稳定裕度和短路电流水平的前提下, 提升风机的无功电压支撑能力。

**关键词:** 功角稳定; 无功电压; 短路电流; 低电压穿越; 控制参数优化

**中图分类号:** TK81; TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)02-0275-10

## 0 引言

近年来, 为有效应对负荷增长、能源枯竭和气候变化等问题, 以风力发电为代表的新能源发电技术得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。过去对于风电并网系统的研究, 大多集中于风电输出功率预测及其对系统惯量和频率稳定性的影响<sup>[2,3]</sup>, 随着风电接入和输电方式的多样化, 电压稳定和功角稳定问题日趋突出。

目前, 已有一些研究致力于风电接入对系统暂态功角稳定性的影响分析。文献[4,5]面向直流送端系统风火打捆交直流联合送出场景, 分析了风火配置比例、风电场与并网点距离等因素对暂态功角稳定性的影响, 以及风电、火电与直流系统之间的交互影响作用。在此基础上, 文献[6]提出了提高功角稳定性的逆变器及系统控制策略。

对于电压稳定问题, 众多研究聚焦于交直流混联电网的电压偏移及控制问题<sup>[7]</sup>。相关文献深入研究了直流系统换相失败或闭锁后, 送端系统交流母线的暂态过电压现象, 进而提出了抑制暂态过电压的新能源参数优化方法或协调控制策略。文献[8]从参数优化的角度, 研究了直驱风机

高/低电压穿越控制参数对暂态过电压的影响, 并给出了相应的优化原则和建议。在此基础上, 文献[9]综合考虑功角稳定和暂态过电压问题, 提出了机电暂态仿真中直驱风机高/低电压穿越控制参数的优化方法, 以期同时满足功角稳定和过电压要求。

除了暂态过电压, 电压过低失稳是电压稳定方面的另一重要问题。文献[10]指出, 新能源机组持续低电压穿越和反复低电压穿越, 是新能源并网区域暂态电压失稳的典型现象。文献[11]剖析了暂态电压失稳和暂态功角失稳的耦合机理, 并提出了相应的耦合程度评价指标。文献[12]针对新能源渗透率逐步提升的电网发展趋势, 根据系统节点与不同分区之间的耦合程度制定无功控制策略, 从而减小暂态电压失稳风险。

随着电网发展, 在传统的功角稳定和电压稳定之外, 短路电流水平逐渐引起重视。在电网密集区域, 新能源装机的不断提升将进一步助推电网短路电流水平提升, 短路电流超标风险增大<sup>[13-15]</sup>。文献[16,17]仿真研究了故障情况下的风机暂态特性, 并结合理论分析给出了直驱风机三相短路

收稿日期: 2024-06-20。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5100-202319032A-1-1-ZN)。

作者简介: 华文(1986-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。E-mail: 2250799089@qq.com

电流的近似表达式。在推导出双馈风电机定子短路电流表达式的基础上,相关研究分析了转子侧变流器 PI 控制参数对定子短路电流的影响,提出了调整优化控制参数的方法<sup>[18,19]</sup>。为进一步改善风电机组的低电压穿越特性及短路电流水平,有研究尝试基于深度神经网络等数据驱动方法优化控制器参数<sup>[20,21]</sup>,但该类方法对训练样本数量和神经网络模型要求较高。

由此可见,当前对于新能源并网引起的功角稳定、电压稳定、短路电流等问题展开了一些研究,但大多聚焦单一因素,综合考虑多方面因素制定新能源低电压穿越控制参数的优化方法研究较少。对于模型参数优化和整定的实现方法,目前主要有工程经验整定和智能算法寻优两类。工程经验法通过反复测试并与实际响应进行比对,从而得到可信度和准确度满足要求的模型参数,但依赖于精确模型且整定过程耗时费力<sup>[22]</sup>。基于智能优化的方法,因其具有不依赖于精确模型及特定条件的优点,而被广泛采用于电力系统中风机等模型的参数优化。根据设定的目标函数和约束条件,通过蚁群算法<sup>[23]</sup>、遗传算法<sup>[24]</sup>、粒子群算法<sup>[25]</sup>等对参数进行迭代优化,从而得到满足控制目标的参数值。目前针对智能寻优方法的研究重点,在于对算法进行改进从而避免陷入局部最优,文献<sup>[26]</sup>中所提出的改进量子粒子群等方法,已被证明能够在高维参数空间中快速搜索得到全局最优参数。

本文提出了考虑暂态功角稳定的风机短路电流与无功支撑关键参数优化方法。根据风机有功出力对功角稳定性的影响机理,通过调节风机有功出力和低电压穿越有功控制参数,提升风火联合送出系统的暂态功角稳定裕度。保持有功控制参数不变,考虑短路电流水平约束,以并网点电压偏差最小为单优化目标,采用改进的量子粒子群算法对风机低电压穿越控制中影响短路电流的关键参数进行优化,从而提升风机的无功电压支撑能力。结合实际电网的机电暂态模型进行了仿真分析,验证了所提方法的有效性。

### 1 风火联合送出系统的功角稳定性

目前电网中新能源与火电机组联合送出是典型的一类供电场景,如图 1 所示。该系统中既有暂态功角稳定问题,又有无功电压支撑问题。本文基

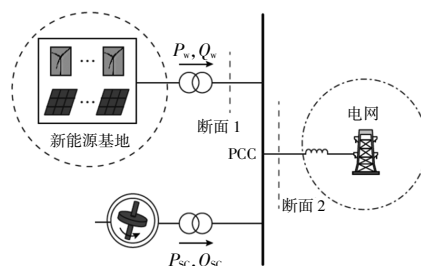


图 1 新能源与传统机组联合送出示意图

Fig.1 Schematic diagram of joint transmission of new energy and traditional units

于简化的风火联合送出系统,分析功角稳定问题的产生机理,以及风电有功出力对功角稳定性的影响。

#### 1.1 系统模型及运动方程

图 2 为风火联合送出系统模型,母线 1 和 2 分别连接发电机 1 和 2,母线 3 连接直驱风机,风机与发电机 1 输出的功率在母线 6 汇合后向系统供电,母线 4 下负荷采用感应电动机模型。

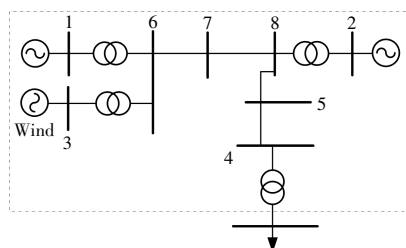


图 2 系统简化仿真模型

Fig.2 Simplified system simulation model

上述系统发生短路故障后通常表现为双机失稳模式,当不考虑风电时,交流系统等值发电机的转子运动方程可以写成:

$$\begin{cases} T_1 \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = P_{G1} - \frac{U_1 U_2}{x_{12}} \sin(\theta_1 - \theta_2) \\ T_2 \frac{d^2\delta_2}{dt^2} = P_{G2} + \frac{U_1 U_2}{x_{12}} \sin(\theta_1 - \theta_2) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T_1$  和  $T_2$  分别为等值发电机  $G_1$  和  $G_2$  的惯性时间常数; $\delta_1$  和  $\delta_2$  分别为  $G_1$  和  $G_2$  的功角; $P_{G1}$  和  $P_{G2}$  分别为  $G_1$  和  $G_2$  的机械功率; $x_{12}$  为联络线电抗; $U_1$  和  $U_2$  分别为两侧等值母线电压幅值; $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为两侧等值母线电压相角; $\omega_N$  为系统额定角频率。

将式(1)转换成如下形式:

$$\begin{cases} \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = \frac{1}{M_1} \left[ P_{G1} - \frac{U_1 U_2}{x_{12}} \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] \\ \frac{d^2\delta_2}{dt^2} = \frac{1}{M_2} \left[ P_{G2} + \frac{U_1 U_2}{x_{12}} \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $M_1=T_1/\omega_N$ ;  $M_2=T_2/\omega_N$ 。

进一步将式(2)中两式相减,并整理化简后可得:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \left( \frac{P_{G1}}{M_1} - \frac{P_{G2}}{M_2} \right) - \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \frac{U_1 U_2}{x_{12}} \sin\delta' \quad (3)$$

式中:  $\delta'$  为等值发电机功角差。

式(3)为交流系统的等值发电机转子运动方程,其中等值机械功率和等值电磁功率可写成如下形式:

$$\begin{cases} P_T' = \left( \frac{P_{G1}}{M_1} - \frac{P_{G2}}{M_2} \right) \\ P_{\text{emax}}' = \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \frac{U_1 U_2}{x_{12}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_T'$  为等值机械功率;  $P_{\text{emax}}'$  为等值电磁功率最大值。

当考虑风电时,  $P_T'$  将近似变为

$$P_T' \approx \left( \frac{P_{G1}}{M_1} - \frac{P_{G2}}{M_2} \right) + \frac{P_w}{M_1} \quad (5)$$

式中:  $P_w$  为风机输出的有功功率。

由式(5)可以看出,故障期间风机输出的有功功率越大,  $P_T'$  越大,根据等面积法则,其相当于送电区域机组加速面积越大。此外,风机的无功输出越小,母线电压越低,相当于等值电磁功率越小,总体而言,系统功角稳定性越差。

保持风机和发电机 1 输出的总有功功率为  $P_0$ ,当风机有功出力占比为  $k$  时,等值机械功率可表示为  $P_{T1}=(1-k)P_0$ 。将风机电机械功率和输出有功功率等值为  $G_1$  机械功率的增量,则超前机组  $G_1$  等值机械功率将增加  $\Delta P_{mw} - \Delta P_{ew}$ ,  $\Delta P_{mw}$  和  $\Delta P_{ew}$  可由下式进行计算:

$$\Delta P_{mw} = \frac{M_w}{M_1 + M_2} P_{mw} \quad (6)$$

$$\Delta P_{ew} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \frac{h P_w U_1}{U_3} \quad (7)$$

式中:  $P_{mw}$  为风机机械功率;  $M_w$  为风机等值惯量;  $M_w$  为风机并网点母线 3 电压幅值;  $h$  为风电和火电出力比例变化引起的系统网络节点导纳矩阵元素变化的修正系数<sup>[4]</sup>。

由以上可得考虑风电后的转子运动方程:

$$f = \frac{d\delta^2}{dt^2} = \left( \frac{P_{G1}}{M_1} - \frac{P_{G2}}{M_2} + \frac{M_w}{M_1 + M_2} P_{mw} - \frac{h P_w U_1}{U_3} \right) - \left( \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right) \frac{U_1 U_2}{x_{12}} \sin\delta' \quad (8)$$

## 1.2 风机出力对功角稳定性的影响

当风机输出有功功率发生变化时,在保持风火联合送出功率总量不变的条件下,火电机组的数目将发生相应的变化。由于滞后机组  $G_2$  的等值机械功率及式(8)中等式右边第二项受风机输出功率变化影响较小,故仅考虑其对超前机组  $G_1$  等值惯量的影响。

$$M_1 = (1-k)M_0 \quad (9)$$

式中:  $M_0$  为不考虑风电时火电机组总惯量。

将式(8)代入式(7)中,可求出考虑风电后的转子运动方程关于风电出力比例的导数:

$$\frac{df}{dk} = \frac{M_w}{(1-k)^2 M_0 M_2} P_{mw} - \frac{U_1 P_w}{(1-k)^2 M_0 M_2} \cdot \left[ h + (1-k) \frac{dh}{dk} \right] - \frac{h U_1}{(1-k) M_0 U_3} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 f}{dk^2} = & \frac{-2U_1}{(1-k)^3 M_0 M_w} \cdot \left[ h + (1-k) \frac{dh}{dk} \right] \cdot \\ & \left[ P_w + (1-k) \frac{dP_w}{dk} \right] + \frac{2M_w P_{mw}}{(1-k)^3 M_0 M_R} - \frac{U_1 P_w}{(1-k) M_0 U_w} \frac{d^2 h}{dk^2} \end{aligned} \quad (11)$$

根据文献[4]中的研究,修正系数对风电出力比例  $k$  的一阶导数和二阶导数均小于 0,且  $k \in [0, 1]$  内的任意实数,可知转子运动方程关于风电出力比例的二阶导数大于 0。当  $k$  增加时,暂态过程中机械功率与电磁功率间的不平衡量主要由系统功角加速度的变化趋势决定,而该不平衡量是  $k$  的凸函数。故当风火联合送出系统功率总量不变时,系统的暂态功角稳定裕度随风电出力比例的增加呈现先增大后减小的趋势。尽管  $k$  值的大小对系统功角的影响并非是完全线性的,但在实际工程应用中求解功角稳定裕度随  $k$  变化的精确拐点是没有必要的,因为此时往往更关心的是保证系统暂态功角稳定的风电有功出力合理范围。因此,可采用仿真方法,在设置相同交流线路短路故障的条件下,按照一定梯度依次增加风电出力,根据暂态功角响应曲线判断系统是否能维持功角稳定以及功角首摆大小,从而确定维持系统功角稳定的风电可出力范围。

## 2 提升无功电压支撑能力的风机短路电流关键参数优化

### 2.1 直驱风机短路电流解析

直驱风机网侧变流器的控制通常采用电网电压定向相量控制,电压相量定向于  $d$  轴时有:

$$\begin{cases} u_d=u_s \\ u_q=0 \end{cases} \quad (12)$$

式中： $u_d, u_q$  分别为电网电压的  $d, q$  轴分量； $u_s$  为电网电压。

此时网侧变流器发出的有功功率、无功功率表达式为

$$\begin{cases} P=1.5u_d i_d \\ Q=-1.5u_d i_q \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知,在电网电压一定时,有功功率与有功电流  $i_d$  成正比,无功功率与无功电流  $i_q$  成正比。当电网发生故障时,风机依据无功电流参考值  $i_{qref}$  确定无功电流,向系统提供无功功率。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<sup>[16,17]</sup>

$$P - \frac{3u_d i_d}{2} = u_{dc} C \frac{du_{dc}}{dt} \quad (14)$$

式中： $P$  为输出功率； $C$  为直流母线电容。

结合直流电流外环控制,可得到:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{Pk_{vp}}{Cu_{dc}} \left( P - \frac{3k_{vp}}{2Cu_{dc}} u_d i_d \right) + k_{vi} (u_{dc} - u_{dref}) \quad (15)$$

式中： $k_{vp}, k_{vi}$  分别为比例系数、积分系数； $u_{dref}$  为直流母线电压参考值。

求解可得有功电流  $i_d$  的表达式为

$$i_d = \frac{2P}{3u_d} + \frac{i_{d0} - \frac{2P}{3u_d}}{\sqrt{1-M^2}} \cdot e^{-M\omega_1 t} \sin(\omega_1 t + \alpha) \quad (16)$$

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

网侧变流器并网后经过派克变换,无功电流  $i_q$  表达式为

$$u_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + v_q \quad (17)$$

式中： $L, R$  分别为网侧滤波器的等效电感、电阻。

无功电流  $i_q$  的控制方程为

$$u_q = k_p (i_{qref} - i_q) + k_i \int (i_{qref} - i_q) dt + \omega Li_d + v_q \quad (18)$$

若忽略滤波器电阻,可求得无功电流  $i_q$  的表达式为

$$i_q = i_{qref} \left[ 1 - e^{-\frac{k_i}{2L} t} \cdot \frac{2\sqrt{Lk_i}}{\sqrt{4k_i L - k_p^2}} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{4k_i L - k_p^2}}{2L} t + \beta\right) \right] \quad (19)$$

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

由式(16)可知,有功电流  $i_d$  包括两部分,一部分是大小为  $2P/(3u_d)$  的阶跃响应,另一部分为随时间按指数规律衰减的零输入响应,可见  $i_d$  的最大值与风机输出的有功功率成正相关。同理,式(19)中,无功电流  $i_q$  是  $i_{qref}$  倍的阶跃响应, $i_q$  越大, $i_q$  的最大值越大。对于短路电流水平而言,通常考察的是短路电流的最大值,故由上述分析可知,风机低电压穿越过程中的有功输出和无功电流参考值是影响短路电流的关键参数。

### 2.2 短路电流关键参数对无功支撑能力的影响

在基于 PSD-BPA 的机电暂态仿真中,风机进入低电压穿越后,通常按有功功率相对初始的百分比进行设置,恢复期间有功功率按照指定斜率进行恢复,无功电流参考值则受无功调整系数和无功电流最大限幅影响。本文在 PSD-BPA 中搭建图 1 所示系统,通过在风机低电压穿越控制环节中设置不同的参数模拟风机的输出特性,从而分析短路电流关键参数对无功支撑能力的影响。

保持低电压穿越有功控制参数不变,设置无功调整系数为 1.5, 3.0, 4.5, 其对并网点电压和机组无功功率的影响分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 和图 4 可知,无功调整系数由 1.5 增大到 4.5 时,故障期间并网点电压由 0.70 p.u. 提升至 0.75 p.u. 左右,机组输出的无功功率由 0.4 MVar 提升至 0.8 MVar,低电压穿越期间的基本趋势是,无功调整系数越大,风机输出的无功功率越大,因而并网点电压水平越高。

保持低电压穿越有功控制参数不变,无功调

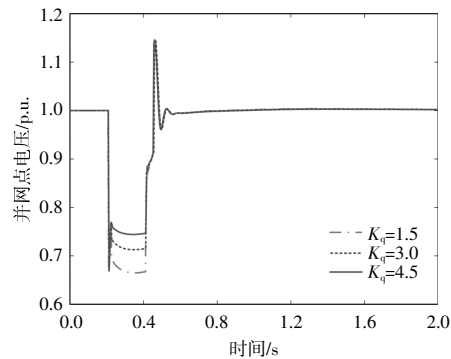


图 3 不同无功调整系数时的电压曲线  
Fig.3 Voltage curves with different reactive power adjustment parameters

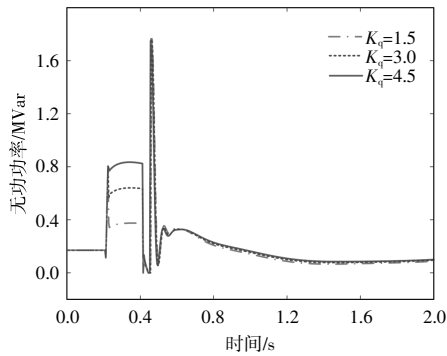


图4 不同无功调整系数时的无功功率曲线

Fig.4 Reactive power curves with different reactive power adjustment parameters

调整系数设为 5.0,无功电流限值分别为 0.5,0.6,0.7 p.u.时,其对并网点电压和机组无功功率的影响如图 5 和图 6 所示。由图 5 和图 6 可知,无功电流限值由 0.5 p.u.增大到 0.7 p.u.时,故障期间并网点电压由 0.70 p.u.提升至 0.75 p.u.以上,机组输出的无功功率由 0.6 MVar 提升至 0.8 MVar 以上,低电压穿越期间的基本趋势是,无功电流限值越大,风机输出的无功功率越大,因而并网点电压水平越高。

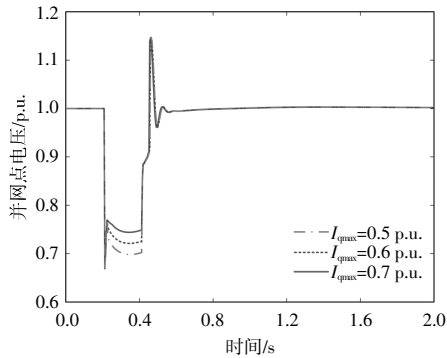


图5 不同无功电流限值时的电压曲线

Fig.5 Voltage curves with different reactive power current limits

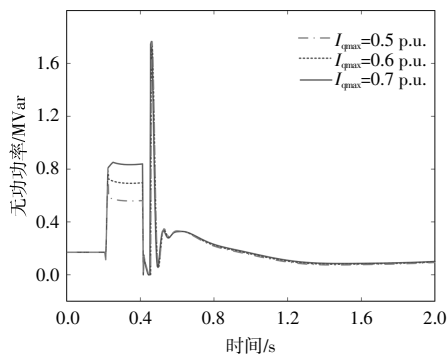


图6 不同无功电流限值时的无功功率曲线

Fig.6 Reactive power curves with different reactive power current limits

保持低电压穿越无功控制参数不变,分别设置低电压穿越期间有功电流占初始电流的 10%,20%,50%,其对机组无功支撑和并网点电压的影响如图 7、图 8 所示。由图 7 和图 8 可知,低电压穿越期间有功电流占初始电流的百分比对风机输出的无功功率影响不大,因而并网点电压水平差别不大。

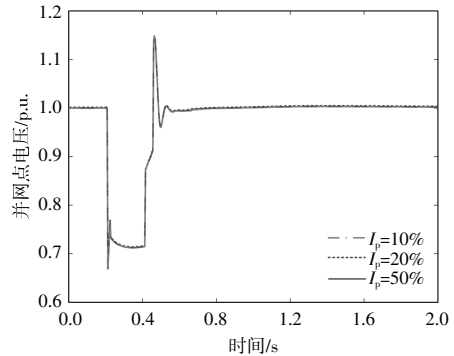


图7 不同有功电流比例时的电压曲线

Fig.7 Voltage curves with different proportions of active current

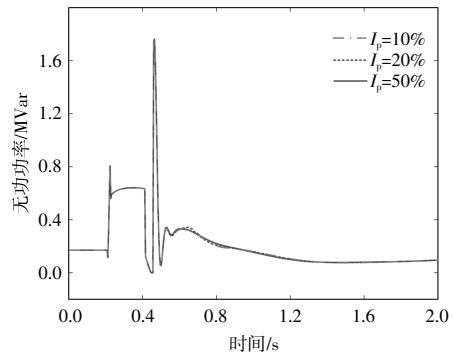


图8 不同有功电流比例时的无功功率曲线

Fig.8 Reactive power curves with different proportions of active current

综上所述,从整体上看,低电压穿越期间的有功电流控制参数对风机无功输出和并网点电压影响不明显,无功电流控制参数中的无功电流调整系数和无功电流限值则影响较大。考虑到低电压穿越期间采用的是无功优先的电流控制方式,因此本文选取无功电流调整系数和无功电流限值作为进一步待优化的参数。

### 2.3 参数优化原则和方法

根据上文对功角稳定、短路电流及无功支撑的分析,拟定考虑暂态功角稳定性的风机短路电流与无功支撑关键参数的优化原则,如图 9 所示。首先,若风机与传统机组总出力保持不变,则通过

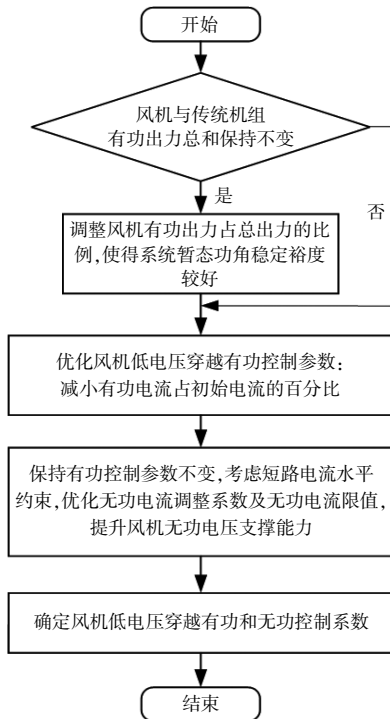


图9 关键参数优化原则

Fig.9 Principle of key parameter optimization

调整风机有功出力占总出力的比例保证系统的暂态功角稳定裕度;然后,调整风机低电压穿越有功控制参数,减小故障后低电压穿越期间有功电流占初始电流的百分比,从而减小故障期间风机输出的有功功率,根据前文分析,其相当于减小等值机械功率,即减小送电区域机组加速面积。通过上述对风机稳态时输出功率和暂态时低电压穿越有功控制参数的调整,能够使系统具有较好的暂态功角稳定裕度。在此基础上,保持风机有功控制参数不变,以并网点电压差最小为目标、短路电流水平为约束条件,采用优化算法对风机低电压穿越控制中的无功调整系数和无功电流限值进行单目标优化。

根据上文所述,在对无功电流调整系数和无功电流限值进行优化时,可采用智能优化算法得到满足要求的参数值,粒子群算法具有进化和群体智能的特点,种群中的每个粒子根据目标函数确定其适应值,通过追随自身最好位置和全局最好位置动态调整自身速度,进而改变自身位置。在此基础上,为了增加算法的全局收敛性,防止陷入局部最优,采用量子粒子群算法,其种群中粒子的位置更新不再依赖于速度变化,而是基于当前位置、平均最好位置和全局最优位置确定其下一次

位置在空间中的概率分布。算法中粒子*i*的位置更新公式如下:

$$X_i(t+1)=p_i(t)\pm\alpha\cdot|C(t)-X_i(t)|\cdot \ln[1/u_i(t)], u_i(t)\sim U(0,1) \quad (20)$$

式中: $X_i(t)$ 为粒子当前位置; $p_i(t)$ 为粒子*i*的局部吸引子,由全局最好位置和个体历史最好位置共同确定; $C(t)$ 为当前种群的平均最好位置,通过计算所有粒子的个体最优位置的均值得到; $\alpha$ 为超参数,以控制粒子的收敛速度。

对于约束条件,除参数合理可取的上、下限外,主要考虑短路电流约束,具体如下所示:

$$k_{qmin}\leq k_q\leq k_{qmax} \quad (21)$$

$$I_{qmax\_min}\leq I_{qmax}\leq I_{qmax\_max} \quad (22)$$

$$I_{fault}\leq I_{fault\_max} \quad (23)$$

式中: $k_q$ 为风机低电压穿越控制的无功调整系数; $k_{qmin}$ 和 $k_{qmax}$ 分别为无功调整系数的下限和上限; $I_{qmax}$ 为风机低电压穿越控制的无功电流限值; $I_{qmax\_min}$ 和 $I_{qmax\_max}$ 分别为无功电流限值的下限和上限; $I_{fault}$ 为短路电流; $I_{fault\_max}$ 为预设短路电流限值。

在目标函数方面,本文以风机并网点母线电压偏差最小为目标,如式(24)所示。

$$\min\Delta U=\int_{t_0}^{t_1}|U_L(t)-U_{L0}|dt \quad (24)$$

式中: $t_0$ 和 $t_1$ 分别为风机低电压穿越开始时刻和结束时刻; $U_L(t)$ 为风机并网点电压; $U_{L0}$ 为风机并网点的稳态电压。

### 3 仿真分析

为验证所提方法的有效性,本文采用中国电力科学研究院开发的PSD-BPA程序,基于某实际电网数据进行仿真分析。该区域电网为典型的风电机组与火电机组联合送出场景,风机采用直驱模型。风机低电压穿越期间,无功电压调整系数为1.5,无功电流限值为1.1 p.u.,有功电流为初始电流的50%。

设置送出交流通道三相永久性短路N-1故障时,系统的响应曲线如图10~12所示。由图10和图11可以看出,此时系统发生暂态电压失稳,电压未能恢复到故障前稳态值。由图12可以看出,由于电压大幅降低,导致送出区域等值电磁功率减小,在更大的等值机械功率作用下,机组加速最终导致系统功角失稳,此时系统发电机最大功角差远大于180°。

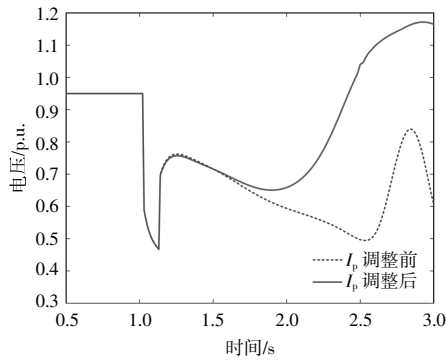


图 10 风机并网点电压曲线

Fig.10 Voltage curve of grid connection point of wind power generators

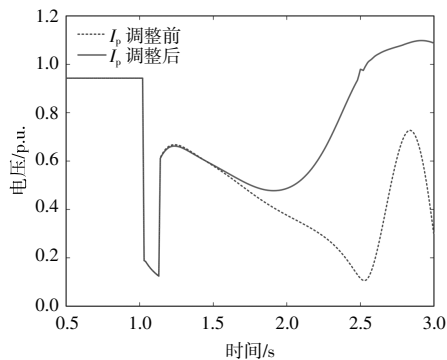


图 11 500 kV 节点电压曲线

Fig.11 Voltage curve of 500 kV node

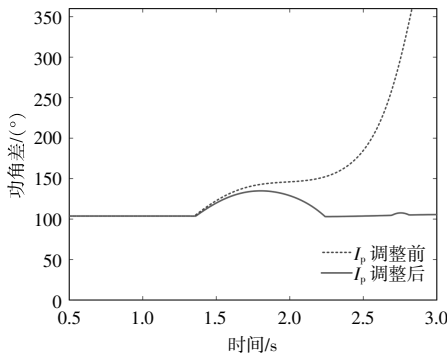


图 12 发电机最大功角差曲线

Fig.12 The maximum power angle curve of generators

根据本文所提参数优化原则和方法,可通过减小风机低电压穿越期间输出的功率提升暂态功角稳定性。保持低电压穿越期间无功控制参数不变,将有功电流设置为初始电流的 20%。根据图 10~12 可知,调整低电压穿越期间有功电流后,电压在持续一段时间的较低值后最终能够恢复到故障前稳定值。由于没有发生暂态电压失稳,最大发电机功角差达到 135°左右,最终随着电压恢复稳定系统能够保持暂态功角稳定。

若不改变风机低电压穿越期间的有功控制参数,而是提升无功控制参数中的无功电流调整系数,则调整前、后的响应曲线对比情况如图 13~15 所示。由图 13~15 可见,增大无功电流调整系数后,机组无功功率输出增大,从而提升了电压支撑能力,风机并网点电压并未出现失稳。同时由于没有发生暂态电压失稳,最大发电机功角差拉大后随着电压恢复稳定系统能够保持暂态功角稳定,这验证了前文对风火联合送出系统功角失稳机理及影响因素的分析。

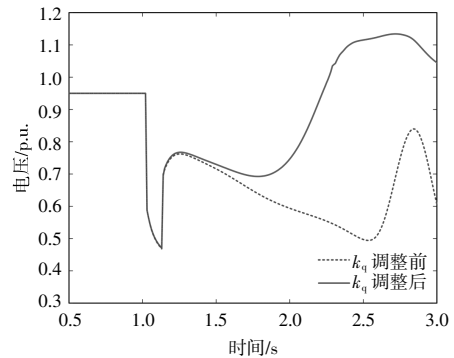


图 13 风机并网点电压曲线

Fig.13 Voltage curve of grid connection point of wind power generators

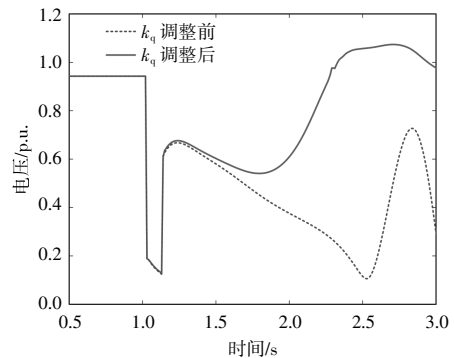


图 14 500 kV 节点电压曲线

Fig.14 Voltage curve of 500 kV node

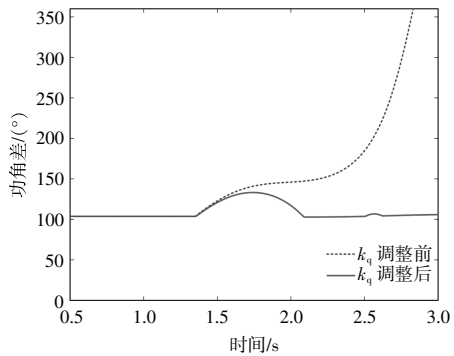


图 15 发电机最大功角差曲线

Fig.15 The maximum power angle curve of generators

在保证系统暂态功角稳定后,针对无功电流调整系数和无功电流限值,进一步采用量子粒子群算法对低电压穿越无功控制参数进行优化。根据须要确定的参数量,设置算法规模为 12,以优化前参数作为初值,即无功电流调整系数初值设为 1.5,无功电流限值初值设为 1.1 p.u.,其可行的参数调整范围约束分别设为 [1.5,4.5] p.u.和 [0.8,1.1] p.u.。经算法迭代后,无功电流调整系数设为 3.75,无功电流限值设为 0.9 p.u.,此时系统响应曲线如图 16~18 所示。与采用优化前的无功

控制参数相比,风机无功电流在合理范围内,不会过多增大短路电流水平,且增加的无功功率使风机并网点及 500 kV 节点电压水平均有所提升。

#### 4 结论

本文针对风火联合送出系统展开研究,提出了考虑暂态功角稳定的风机短路电流及无功支撑关键参数优化方法,通过理论及仿真研究得到以下结论。

①当保持风火联合送出功率总量不变时,系统的暂态功角稳定裕度随风电出力比例的增加呈现先增大后减小的趋势。

②低电压穿越期间的有功电流控制参数对风机无功输出和并网点电压影响不明显,无功电流控制参数中的无功电流调整系数和无功电流限值则影响较大,无功电流调整系数与无功电流限值越大,电压支撑能力越强。

③本文所制定的参数优化原则及方法,能够在保障暂态功角稳定裕度和短路电流水平的前提下,提升风机的无功电压支撑能力。

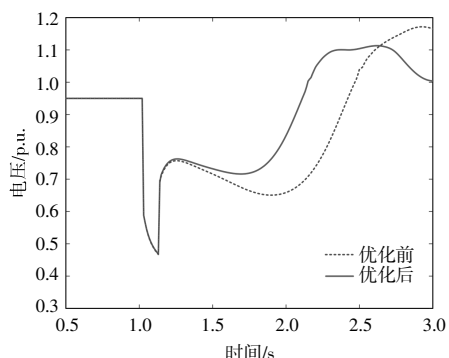


图 16 风机并网点电压曲线

Fig.16 Voltage curve of grid connection point of wind power generators

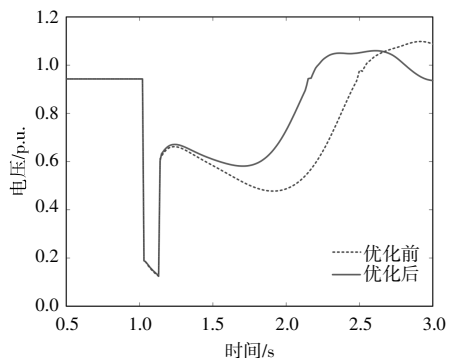


图 17 500 kV 节点电压曲线

Fig.17 Voltage curve of 500 kV node

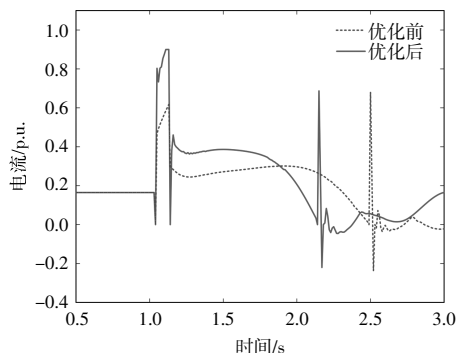


图 18 风机无功电流

Fig.18 Reactive current of wind generator

#### 参考文献:

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904,2205.
- [2] 谢珍建,孙文涛,韩杏宁,等.计及海上风电调频能力的新型电力系统频率态势分析[J].可再生能源,2023,41(9):1232-1238.
- [3] 师洪涛,李希彬,丁茂生,等.基于改进 Mogrifier 门控交互机制的短期风电功率预测[J].中国测试,2023,49(8):110-116.
- [4] 汤奕,赵丽莉,郭小江.风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J].电力系统自动化,2013,37(20):34-40.
- [5] 沈墨涵,严干贵,贾祺.基于阻抗法的风火打捆串补系统次同步振荡分析 [J]. 东北电力大学学报,2022,42(6):72-82.
- [6] 朱灵子,翟勇,马覃峰,等.新能源电力系统功角稳定分布式决策控制模型 [J]. 可再生能源,2022,40(4):536-542.
- [7] 于秋玲,梁锦照,陈康平.基于云边协同的交直流混联电网线路过负荷协调控制方法[J].沈阳工业大学学报,2024,46(3):241-247.
- [8] 王熙纯,刘纯,林伟芳,等.风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J].电网技术,2021,45(12):4612-4621.

- [9] 林伟芳,任晓钰,张桂红,等.考虑功角稳定和暂态过电压的新能源电压穿越控制参数优化[J].电网技术,2023,47(4):1323-1331.
- [10] 兰天楷,孙华东,徐式蕴,等.新能源低电压穿越主导的电力系统暂态电压失稳现象与机理[J].电力系统自动化,2024,48(12):58-67.
- [11] 黎晓,刘崇茹,辛蜀骏,等.暂态功角稳定与暂态电压稳定的耦合机理分析与耦合强度评估指标[J].中国电机工程学报,2021,41(15):5091-5107.
- [12] 贾俊青,段玮頔.基于模糊理论的输电网络电压无功控制策略[J].沈阳工业大学学报,2024,46(1):35-41.
- [13] 李勇,姚文峰,杨柳,等.南方电网主网架热稳定和短路电流超标问题分析[J].南方电网技术,2013,7(2):21-25.
- [14] 廖国栋,谢欣涛,侯益灵,等.特高压接入湖南电网后500 kV 母线三相短路电流超标问题分析[J].高电压技术,2015,41(3):747-753.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 林敏洪,陈建钿,侯祖锋,等.双 PWM 变换器式风电机  
组低电压穿越控制策略研究[J].电子器件,2022,45(2):415-419.
- [18] 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.
- [19] 熊炜,韩力.运用改进磷虾群算法的自抗扰控制方法[J].沈阳工业大学学报,2023,45(4):453-458.
- [20] 余欣梅,陈豪君,王星华.基于深度神经网络的 DFIG 低电压穿越技术研究[J].南方能源建设,2021,8(3):122-130.
- [21] 张哲源,顾幸生.基于分布式深度神经网络的双馈风机低压故障穿越研究[J].华东理工大学学报(自然科学版),2023,49(3):401-409.
- [22] 黄琳妮.基于群飞蛾扑火算法的风力发电系统 PI 控制参数优化整定[D].广州:华南理工大学,2018.
- [23] 谷鑫.基于有功功率平衡和蚁群算法优化 PI 参数的有源滤波器[D].天津:天津大学,2007.
- [24] 陈一鸣,刘赟静,王金鑫.考虑风电出力不确定性的多源联合系统双层优化调度 [J]. 东北电力大学学报,2024,44(1):17-24.
- [25] 刘洋.基于 QPSO 算法的综合负荷模型参数辨识与负荷建模平台[D].济南:山东大学,2013.
- [26] 胡健雄.直流输电系统参数测辨与在线校正方法研究[D].南京:东南大学,2020.

# Key parameters optimization method of wind turbine short circuit current and reactive power support considering transient power angle stability

Hua Wen<sup>1</sup>, Dong Wei<sup>1</sup>, Lu Yi<sup>2</sup>, Zheng Chenyi<sup>2</sup>

(1.Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd., Hangzhou 310014, China;

2.School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The transient power angle stability and voltage stability issues of new energy grid connected systems like wind power are combined, and suffer the risk of short circuit current level. Current research mostly focuses on improving the stability based on single factor, without considering the multiple factors to develop optimization methods for wind turbine control parameters. To solve the issue, an optimization method for key parameters of wind turbine short circuit current and reactive power support is proposed in this paper considering transient power angle stability. Firstly, based on the simplified model of wind-thermal combined system, the mechanism of power angle stability problem and the influence of active power output of the wind turbine on power angle stability are analyzed. Then, the analytical expression for the short-circuit current of the direct-driven wind turbine is derived, and the key factors that influence the levels of active and reactive currents are analyzed. Finally, the influence of key parameters of short circuit current on the reactive power voltage support capacity of wind turbines are studied by simulation, based on which the optimization principles and method for key parameters of wind turbine short circuit current and reactive power support considering transient power angle stability are developed. The simulation analysis results based on actual power grids show that the proposed method can improve the reactive voltage support capacity of wind turbines while ensuring transient power angle stability margin and short circuit current level.

**Keywords:** power angle stability; reactive power and voltage; short circuit current; low voltage ride through; control parameter optimization