



上海交通大学学报
Journal of Shanghai Jiaotong University
ISSN 1006-2467, CN 31-1466/U

《上海交通大学学报》网络首发论文

题目: 考虑惯量安全需求的风电场控制参数优化方法
作者: 李鸿鑫, 钟祖浩, 卢艺, 文云峰
DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.380
收稿日期: 2023-08-09
网络首发日期: 2023-12-22
引用格式: 李鸿鑫, 钟祖浩, 卢艺, 文云峰. 考虑惯量安全需求的风电场控制参数优化方法[J/OL]. 上海交通大学学报. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.380>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

考虑惯量安全需求的风电场 控制参数优化方法

李鸿鑫¹, 钟祖浩², 卢艺¹, 文云峰²

(1. 深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘要：高比例新能源电力系统惯量和调频资源匮乏, 存在较为突出的频率稳定问题。针对该问题, 将风电场潜在频率支撑能力纳入电网频率控制措施, 提出了一种考虑惯量安全需求的风电场控制参数优化方法。事故发生后, 首先根据频率安全限值, 在线计算满足暂态频率稳定的系统惯量和调频需求, 形成惯量安全约束。其次, 对风电场在不同风况下的惯量和调频能力进行建模, 以事故后对应风况下风电场虚拟惯量和频率下垂参数调整量最小为目标, 建立风电场频率控制参数的动态优化模型; 最后, 解算频率控制参数, 基于改进的 IEEE RTS-79 系统进行算例测试。结果表明, 所提参数优化方法有效地改善了风电场暂态频率响应过程, 有助于提升高比例新能源电力系统频率稳定裕度。

关键词：风电场; 频率稳定; 惯量安全需求; 虚拟惯量; 下垂参数

中图分类号：TM712

文献标志码：A

DOI：10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.380

收稿日期：2023-8-09 修回日期：2023-11-02 录用日期：2023-12-18

基金项目：南方电网有限责任公司科技项目（090000KK52222151），国家自然科学基金（52077066）

作者简介：李鸿鑫（1986-），博士，高级工程师，从事电力系统稳定控制研究。

通信作者：文云峰，教授，博士生导师；E-mail: yunfeng.8681@163.com。

Frequency Control Parameters Optimization of Wind Farms Considering Inertia Security Requirement

LI Hongxin¹, ZHONG Zuhao², LU Yi¹, WEN Yunfeng²

(1. Shenzhen Power Supply Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The inertia and frequency regulation resources in high proportion of renewable energy power systems are scarce, resulting in prominent frequency stability issue. In response, this paper incorporates the potential frequency support capability of wind farms into the frequency control measures of the power grid, and proposes an optimization method for wind farm control parameters that considers the security requirements of system inertia. After the credible disturbance, based on the transient frequency index limit, calculate the system inertia security requirement that meets the frequency stability constraint at first. Then, model the primary frequency regulation capability that wind farms can provide under different wind conditions, with the goal of minimizing the adjustment of wind farm virtual inertia and frequency droop parameters under disturbances, and establish a dynamic optimization model for wind farm frequency control parameters; Finally, calculate the frequency control parameters and conduct numerical tests were conducted on the modified IEEE RTS-79 system, and the results showed that the proposed parameter optimization method effectively improved the transient frequency response process of wind farms, and helped to enhance the frequency stability margin of the system.

Keywords: wind farm; frequency stability; inertia security requirement; virtual inertia; droop parameter

在“双碳”目标驱动下，以风、光为主的新能源发电占比逐年提升，电力系统结构形态和运行特性正在发生深刻变化^[1]。风电场通常由数十台以上风机构成，通过电力电子变流器馈入电网，常规控制方式下不具备频率主动响应能力。同时，大规模风电并网将挤占同步电源开机容量，致使电力系统惯量响应和一次调频能力进一步削弱，大功率扰动下系统频率变化速率、频率偏差等指标容易越限，进而引起切机、切负荷等频率稳定事故。2016年9月28日，新能源出力占比近一半的南澳电网发生大面积停电，是世界上第一次由极端天气诱发新能源大规模脱网导致的局部电网大停电事件，系统转动惯量不足是该事故主要诱因之一^[2]。因此，在风电大量并网并持续挤占同步电源开机容量的背景下，维持系统惯量水平，对保障高比例新能源电力系统频率稳定具有重要意义。

传统风电接入电网后长期运行在最大功率跟踪状态(Maximum Power Point Tracking, MPPT)，风机转速与电网频率解耦，无法主动响应电网频率波动。针对风电场无法为系统提供惯量支撑的问题，有学者提出虚拟惯量控制(Virtual Inertia Control, VIC)的概念，通过并网逆变器模拟同步机的摇摆方程，以虚拟惯量的形式响应频率变化^{[3][4]}，改善暂态频率响应。根据风电机组不同运行状态，可将风电虚拟惯量控制方法分为备用功率控制和转子动能控制^[5]。备用功率控制通过调整风机桨距角改变风电机组获取的风能量，或直接降低风机输出功率预留部分有功备用，但这种方式降低风能利用效率，不利于风电场经济运行；转子动能控制通过释放转子中储存的动能提高风电机组并网功率，包括虚拟惯量控制和下垂控制，扰动下可为电力系统提供短时惯性支撑而不需要预留风电功率，对风电场运行效益影响小^[6]。

风电场参与惯性响应、一次调频中对频率控制参数的整定是目前研究的热点问题。近年来，国内外学者针对全风况下风电虚拟惯量、频率下垂控制参数的整定开展了初步研究，并取得一些成果。对于风机参数整定与一次调频、系统稳定结合的问题，文献[7]分析了风电机组一次调频特性，提出风电静调差系数的整定策略；文献[8]分析不确定下的系统频率响应，

提出了计及频率稳定的风电频率参数整定方法；文献[9]提出了评价频率响应效果的多目标函数，利用遗传算法确定频率控制参数，提高风电频率控制效果。

上述研究主要针对特定风况的风机频率控制参数整定，为实现全风况下风电参与调频，文献[10]提出在 MPPT 区采用转子动能控制，在恒转速区采用备用功率控制，使风电在全风况下具备调频能力。考虑到风机在不同运行工况下的惯量支撑和调频能力不同^[11]，文献[12]提出了一种虚拟惯量参数控制方法，风机参数随风速变化，在风速较高时转子侧释放更多动能，提升风能利用率。文献[13]指出可通过搜索算法持续调整最优控制系数，降低风况对调频效果的影响。

风电场频率控制的目的是使并网运行的风电场功率输出能够响应电网频率变化、改善频率稳定性，然而上述研究提到的风电场频率控制参数优化方法在数学模型中鲜有对系统惯量或频率指标的直接约束，这导致风电场在事故后不能充分发挥其惯量和频率支撑能力，无法确保系统的调频能力足以应对大型事故，暂态频率有潜在越限风险。针对该问题，本文提出了一种考虑系统惯量安全需求的风电场控制参数优化方法。首先，根据系统惯量对频率安全指标的影响机理，推导频率指标的线性化表达式，求解系统惯量安全需求。其次，建立风电场频率控制参数优化模型，在对应风况满足暂态频率稳定的惯量水平下，动态优化事故后风电场虚拟惯量和频率下垂参数。最后，解算频率控制参数，基于改进的 IEEE RTS-79 系统验证参数优化结果的有效性。

1 考虑暂态频率稳定的系统惯量需求

1.1 系统惯量对频率安全指标的影响

电力系统在遭受有功功率缺额扰动后、稳定控制措施动作前，暂态频率响应过程可以表述为^[14]：

$$\frac{2H_{sys}}{f_N} \frac{df_{COI}(t)}{dt} + D\Delta f_{COI}(t) = P_{loss} - P_G(t) - P_{EFC}(t) \quad (1)$$

其中, H_{sys} 为系统惯量水平, Δf_{CoI} 为惯性中心频率偏差量, D 为阻尼系数, f_N 为额定频率, P_{loss} 为初始有功扰动量, P_G 表示电源一次调频响应总量, P_{EFC} 为紧急控制响应量。等式右侧表示系统不平衡功率。系统受扰后最大频率变化速率 (RoCoF) 和最大频率偏差 (Δf_{max}) 与惯量水平密切相关, 事故大小和调频容量一定时, 系统惯量越低, RoCoF 变化越快, 频率偏差越大, 如附录图 A1 所示。

图 1 示意了线性化近似的系统频率与不平衡功率之间变化曲线。扰动瞬间功率不平衡量最大, 频率开始偏移, 超过调频死区 f_{db} 后, 一次调频开始响应; 到达紧急控制预置时延 t_{EFC} 后, 不平衡功率进一步缩小。随后在紧急控制、一次调频响应中功率不平衡逐渐降低, 当一次调频附加功率和紧急控制响应功率完全抵消初始不平衡功率时 $\text{RoCoF}=0$, 频率达到极小值。随着调频过程的结束, 系统最终进入准稳态, 由二次调频继续调整^{[15][16]}。

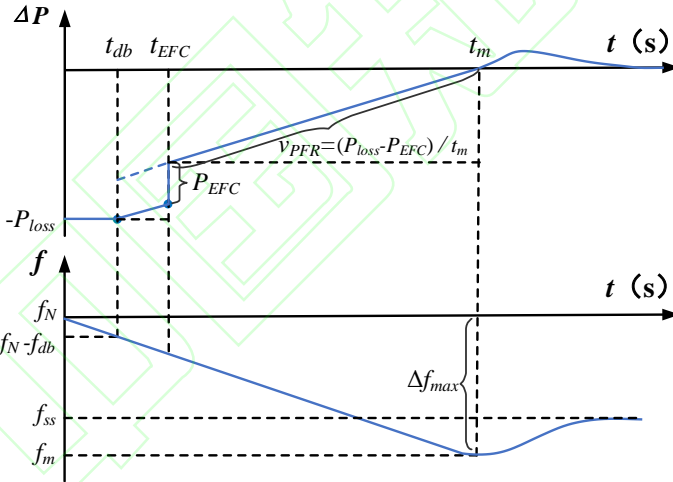


图 1 不平衡功率对频率安全指标的影响

Fig. 1 Influence of unbalanced power on frequency security index

1.2 频率安全指标确定的惯量安全需求

N-1 原则要求正常运行方式下电力系统的任一元件断开事故, 即便不采取安全稳定控制措施, 系统仍应保持稳定运行^[17], 而随着新能源电源的大量投运并持续挤占同步电源开机空间, 电力系统在遭受大功率扰动事故后暂态频率问题愈发凸显。电力系统暂态频率稳定的指标约束包含对频率变化率最大值 ($\text{RoCoF}_{\text{max}}$)、暂态最大频率偏差 (Δf_{max}) 和准稳态频率 (f_{ss}) 的要求, 应保证各频率安全指标满足要求的同时留有一定裕度。

(1) 计及频率变化率约束的系统惯量需求

频率变化率在扰动初始时刻具有最大值, 通常以扰动初始时刻不触发保护装置动作为原则, 确定频率变化率约束下的最小系统惯量需求 H_{sys_RoCoF} :

$$H_{sys_RoCoF} \geq \frac{P_{loss} \cdot f_N}{2RoCoF_{max}} - H_{loss} \quad (2)$$

式中, H_{loss} 是因事故产生的系统惯量损失。

(2) 计及暂态频率偏差约束的系统惯量需求

为避免因低频减载引起停电事故, 扰动后的频率最低点 $f_m = f_N - \Delta f_{max}$ 不应低于三道防线低频减载装置动作值。将事故造成功率缺额 P_{loss} 下的系统调频响应过程线性化表示, 一次调频响应过程线性化近似后, 暂态频率偏差约束下的系统惯量安全需求 $H_{sys_f_m}$ 为^[18]

$$H_{sys_f_m} \geq \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{b_1 + b_2} - H_{loss} \quad (3)$$

式中包含的线性化算子表示为:

$$\begin{cases} a_1 = 2t_{EFC} f_N v_{PFR} P_{loss} \\ a_2 = f_N (P_{loss} - P_{EFC})^2 \\ a_3 = Dt_{EFC} f_N v_{PFR} (f_m - f_N) \\ a_4 = Df_N (P_{loss} - P_{EFC}) (f_m - f_N) \\ b_1 = 4H_{sys} f_m \\ b_2 = -4H_{sys} f_N \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中各量均有在图 1 中示意, 其中 v_{PFR} 为线性化近似的一次调频响应速率, t_m 为事故发生后到达频率极值点的时间。当 $t=t_m$ 时, 系统不平衡功率为 0。用抛物线近似的频率偏移量时域表达式, 得到系统总频率响应 s 域表达式, 通用平均响应模型的频率最低点时间 t_m 可由下式迭代估算^[19]:

$$P_{PFR}(t_m) = P_{loss} - P_{EFC} = \sum_i \Delta P_i(t_m) + \sum_j \Delta P_{wj}(t_m) + D\Delta f_{max} \quad (5)$$

式中, ΔP_i 和 ΔP_{wj} 分别为同步电源和新能源事故后调频附加输出功率。

估算出 t_m 后, 将系统一次调频过程线性化近似的大扰动下系统调频速率通过式(6)计算:

$$v_{PFR} = (P_{loss} - P_{EFC}) / t_m \quad (6)$$

基于 N-1 原则，系统在发生最大 N-1 事故后，应确保暂态过程频率安全指标 $RoCoF_{max}$ 和 f_m 不越限。而准稳态频率主要取决于各调频电源在一次调频结束后的附加输出功率总量，与系统惯性水平无关，对其约束将在后文说明。

2 考虑惯量安全需求的风电场控制参数优化

2.1 风电场频率控制参数

风电场频率控制包含虚拟惯量和频率下垂两个环节，基于跟网型逆变器锁相环的频率信号进行附加功率控制^[20]，在控制环节引入频率偏差 Δf 的比例和微分环节，模拟同步机惯性和调频响应特性，实现风电场并网输出功率响应频率变化，如附录图 A2 所示。该控制方式属于比例-微分控制，后文将风电场虚拟惯量和频率下垂控制简称为 PD-VIC 控制。

风电场运行在转子动能控制模式下，PD-VIC 指令的实时并网功率 P_w 为

$$P_w = P_{w_ref} + k_d \frac{d\Delta f}{dt} + k_w \Delta f \quad (7)$$

式中， P_{w_ref} 为扰动前并网功率；其余两部分为风电在 PD-VIC 指令的附加输出功率，由虚拟惯量和频率下垂两部分响应组成， k_d 、 k_w 分别为风电 PD-VIC 的微分（惯量）、比例（下垂）控制系数。

设风电场等效虚拟惯性时间常数为 H_{vir} ，将微分系数表示为

$$k_d = 2H_{vir} \quad (8)$$

类似地，将风电场等效成同步电源后的频率下垂系数表示为

$$R = P_{wN} \Delta \omega^* / \Delta P_G \quad (9)$$

式中， P_{wN} 代表风机在该风况下额定功率。风电并网逆变器控制环节中引入虚拟惯量和频率下垂后，其一次调频、惯性响应能力与其等效下垂系数 R 和 H_{vir} 有关。其中， k_d 直接影响风电场虚拟惯性响应过程，同时影响一次调频过程。将 H_{vir} 表示为^[21]：

$$H_{vir} = \gamma(\omega_w, \omega) H_w \quad (10)$$

式中， H_w 为风电场固有惯性时间常数， γ 为风电场虚拟惯量调整系数，反映风电场提供虚拟惯量的能力，是可变的。风电场参与一次调频主要由下垂控制环节实现，将风机等效成同步

机后，有 $\Delta P_G = k_w \Delta \omega^*$ 。比例系数 k_w 可由式(11)计算得到

$$k_w = P_{wN} / R \quad (11)$$

由此可见，风电场虚拟惯性特性与其运行工况和固有惯性时间常数有关，频率下垂特性与风电场额定容量和下垂系数有关。通过优化风电场的虚拟惯量系数 H_{vir} 和频率下垂系数 k_w ，可以调整风电场的虚拟惯性响应和一次调频能力。

在实际运行中， γ 和 R 的取值需根据运行风况确定^[22]。图 2 示意了全风况下风电机组运行工况，横坐标 v 表示风速，决定风机工况， v_{min} 、 v_{max} 分别为风机切入、切出风速。风况由小到大依次将风机运行工况分为启动区、MPPT 区、恒转速区和恒功率区，对应运行风速为 $v_{\omega 1}$ 、 $v_{\omega s}$ 和 v_n 。

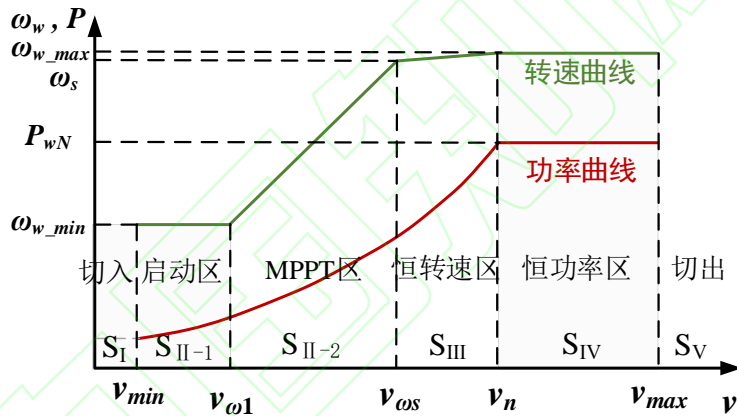


图 2 全风况下风电机组运行工况曲线

Fig. 2 Operating condition of WTG under full wind condition

采用转子动能控制方式时，在弱风速下（启动区），受限于风况，转子动能小，可提供的附加调频功率十分有限；在高风速下（恒转速区），风机虽然具有很高的转子动能，但风机转子减速后会迅速进入 MPPT 区，且受限于变流器容量，能够提供的附加功率同样很低；在极高风速下（恒功率区），转子转速和并网功率均保持不变，不响应系统频率变化。风机在启动区、恒转速区和恒功率区时无法有效参与调频；只有在 MPPT 区运行时，转子具有足够动能和调频容量，通过控制风机转速实现虚拟惯量和调频控制。将 MPPT 区可参与调频的风速区间分为中低风况和高风况，根据式(10)、式(11)界定频率控制参数取值范围。

2.2 考虑系统惯量安全需求的风电场频率控制参数优化模型

考虑惯量安全需求和不同风况调频能力的风电场频率控制参数优化框架如图 3 示意。

事故发生后，首先根据故障量大小及频率安全指标限值，计算维持暂态频率稳定的系统惯量安全和调频需求；随后，考虑运行风况及其调频能力，界定风电场频率控制参数阈值；最后，建立频率控制参数优化模型，并解算风电场虚拟惯量系数 H_{vir} 和频率下垂系数 k_w 。本节着重探讨频率控制参数优化模型的构建。

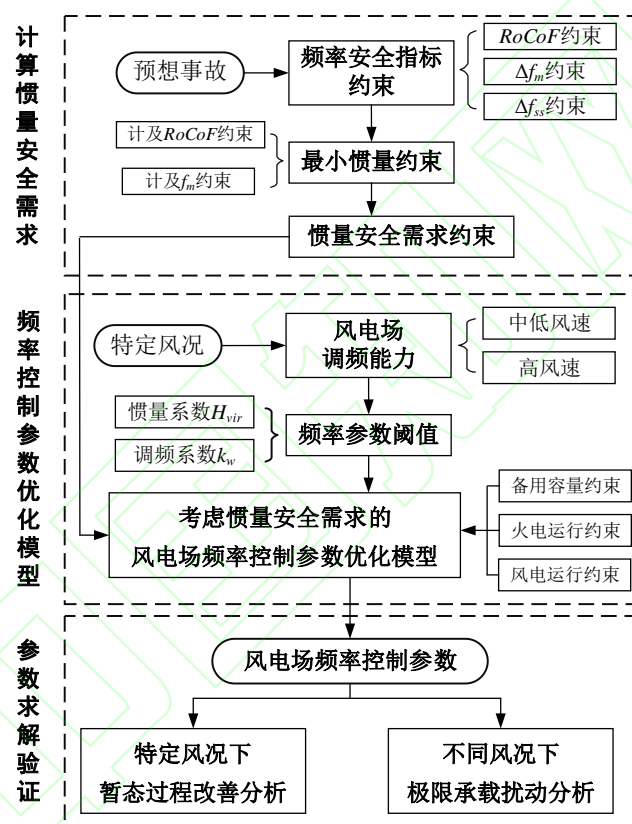


图 3 考虑惯量需求和运行风况的风电场频率控制参数优化框架
Fig. 3 Parameter optimization framework of wind farm PD-VIC considering inertia security demand and wind conditions

考虑系统惯量安全需求，计及对应风况调频能力，构建风电场频率控制参数优化模型。

事故后，带 PD-VIC 的风机跟随指令短暂释放部分转子动能，增加风机有功输出。若当前系统惯量水平和调频能力不足以应对事故，风电场需动态调整频率控制参数，改善暂态频率过程。同时，为尽量避免频率二次跌落等现象给系统稳定带来新的问题^[23]，事故后风机频率控制参数不宜设置过大，因此以事故后风电频率控制参数调整量最小为优化目标：

$$\min \quad a \cdot \Delta H_{vir}^2 + b \cdot \Delta k_w^2 \quad (12)$$

式中, ΔH_{vir} 、 Δk_w 为事故前后风电场虚拟惯量和频率下垂系数调整量, 通过式(13)计算。由于无法事先判断参数上调或下调, 因此取调整量平方和。 a 、 b 为虚拟惯量和频率下垂控制参数调整量权重。

$$\begin{cases} \Delta H_{vir} = H_{vir} - H_{vir0} \\ \Delta k_w = k_w - k_{w0} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $H_{vir}(H_{vir0})$ 、 $k_w(k_{w0})$ 分别表示事故前(后)风电场虚拟惯量和频率下垂系数。

设事故造成功率缺额为 P_{loss} , 考虑以下约束, 使得系统有足够的频率稳定裕度应对有功扰动:

首先, 满足功率平衡是电力系统正常运行的基本要求:

$$\sum_i P_i + \sum_j P_{wj} = P_{load} \quad (14)$$

式中, P_i 为同步电源 i 提供的有功功率, P_{wj} 为风电 j 的有功功率, P_{load} 是负荷功率。

其次, 在事故后系统应有充足的调频裕度以应对功率扰动, 系统中各类资源调频备用容量应满足:

$$\sum RG_i + \sum RW_i \geq P_{loss} \quad (15)$$

$$\begin{cases} RG_{i_min} \leq RG_i \leq RG_{i_max} \\ RW_{i_min} \leq RW_i \leq RW_{i_max} \end{cases} \quad (16)$$

式中, RG_i 、 RW_i 分别为同步电源和风电预留的调频备用容量, R_{i_min} 、 R_{i_max} 分别为单个电源备用上下限。式(15)使得系统总调频裕度足以弥补事故造成的功率缺额, 确保一次调频结束后频率能够恢复到安全范围。

再次, 调频电源应有足够的响应能力, 对系统中调频电源控制系数的约束表示为:

$$-(K_i + K_w + K_D) \Delta f_{max} \geq P_{loss} \quad (17)$$

$$K_i = \sum_i k_i, K_w = \sum_j k_{wj} \quad (18)$$

式中, K_i 、 K_w 和 K_D 分别表示同步电源一次调频系数、风电频率下垂系数和系统阻尼系数。

式(17)确保系统调频能力能够应对事故带来的频率偏移。

然后是对惯量安全的约束。系统惯量应满足事故发生后频率安全指标不越限，事故后短时间内频率响应过程与系统惯量水平密切相关，引入虚拟惯量控制技术后，风电可以主动响应频率变化，为电网提供短时惯量支撑，改善暂态过程。此时系统总惯量由同步电源旋转惯量和风电虚拟惯量共同提供，由式(19)计算：

$$H_{sys} = \sum_i H_i P_i + \sum_j H_{vir} P_{wj} \quad (19)$$

式中， H_i 、 H_{vir} 分别是单台同步电源旋转惯性时间常数和风电虚拟惯性时间常数。

为确保事故后频率响应过程不触发频率保护装置动作，需将频率指标 $RoCoF$ 和 f_m 限制在安全范围内。因此，结合式(2)-(4)，取 $RoCoF$ 和 f_m 指标约束确定的惯量大者作为系统惯量安全需求：

$$H_{sys} \geq \max \{ H_{sys_RoCoF}, H_{sys_f_m} \} \quad (20)$$

系统惯量安全约束保证系统在面对突发负荷变化或其他功率扰动时能够及时响应并保证暂态频率稳定，式(20)确保该惯量水平下频率指标始终不会超过安全限值。

暂态过程结束后，系统频率进入准稳态。准稳态频率 (f_{ss}) 是二次调频的重要依据，对其约束如下：

$$f_{ss} = f_N - \frac{P_{loss} - \sum R}{D} \leq f_{ss_max} \quad (21)$$

式中， $\sum R$ 为各类调频电源在事故中一次调频响应量之和。

最后，是在对应风况下对单个风电场频率控制参数的限制：

$$H_{j,w_min} \leq H_{j,vir} \leq H_{j,w_max} \quad (22)$$

$$k_{j,w_min} \leq k_{j,w} \leq k_{j,w_max} \quad (23)$$

式中， H_{j,w_min} 、 H_{j,w_max} 是风电场 j 并网逆变器虚拟惯性时间常数限值， k_{j,w_min} 、 k_{j,w_max} 为频率下垂系数限值，由式(10)、式(11)，依据风电场自身参数和运行风况，确定风电场并网逆变器频率控制参数取值范围。

综上所述，以式(12)为目标函数，式(13)-(23)为约束条件建立风电场频率控制参数优化模型。该模型以事故后风电频率控制参数调整量最小为优化目标，纳入了对频率、惯量安全和对对应风况风电调频能力的考虑，不仅能够确保系统在事故后有充足的惯量水平和调频能力应对功率缺额事故，还能最大限度地延长风电参与调频过程时间，改善暂态响应过程，提升频率稳定裕度。

值得注意的是，本文研究重点是针对特定风况和频率安全要求下，对事故后系统惯量水平和调频能力进行评估，并以此优化风电频率控制参数。而参数更新频率主要取决于电网数据输入间隔，按照电网调度运行情况进行设置。一般来说，发电机组向调度机构 EMS 系统每 5 分钟（288 点日发电计划）或者每 15 分钟（96 点日发电计划）提供一个采样点。参照此标准，风电频率控制参数可每 5 min/15 min 动态更新一次。

3 算例分析

为验证考虑惯量安全需求的风电场控制参数优化方案可行性，基于改进的 IEEE RTS-79 系统，并在 MATLAB/Simulink 中搭建多机 SFR 模型，同步电源、风电场的频率响应模型分别如附图 A3、附图 A4 所示。所用计算机配置为 CPU AMD R7-5800H、内存 16GB。系统内设置 32 个电源场站（包括 22 个同步电源，10 座带 PD-VIC 的风电场），风电出力占负荷的 22.3%，接入风电场后的 IEEE RTS-79 测试系统如图 A5 所示。

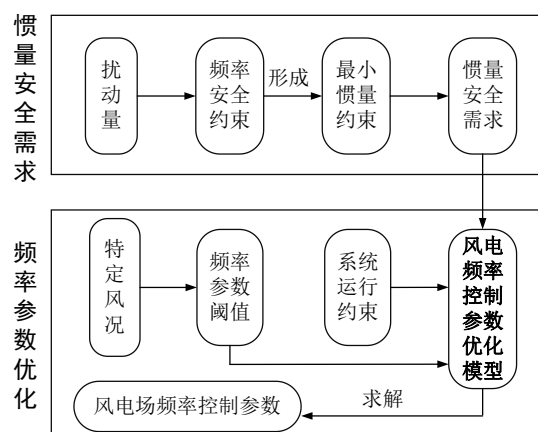


图 4 风电场频率控制参数求解流程

Fig. 4 Solution flowchart of wind power PD-VIC parameter optimization

首先计算满足频率安全的系统惯量和调频需求，其次根据预想风况界定各风电场频率控制参数阈值，再调用 Cplex 求解器解算优化模型，得到事故后各风电场虚拟惯量和下垂参数；最后验证所得频率控制参数优化结果的有效性。风电场频率控制参数求解如图 4 所示。

综合考虑各风电场自身参数以及运行在不同风况的调频能力，设置风电场频率控制系数 H_{vir} 、 k_w 阈值，如表 1 所示。

表 1 风电场频率控制参数取值范围
Tab. 1 Range of frequency control parameters for WF

		W2	W4	W7	W9	W12
中低风况	H_{vir}	[1,3.5]	[1,5]	[1,5]	[1,5]	[1,6]
	k_w	[10,40]	[20,50]	[20,50]	[25,55]	[30,60]
高风况	H_{vir}	[2.5,6]	[3,8.5]	[3,8.5]	[3.5,8]	[5,9]
	k_w	[20,70]	[30,80]	[30,80]	[35,85]	[40,90]
		W15	W19	W24	W27	W29
中低风况	H_{vir}	[1,3]	[1,3]	[1,5]	[1,5]	[1,5]
	k_w	[10,40]	[10,40]	[20,50]	[20,50]	[20,50]
高风况	H_{vir}	[2,4.5]	[2,4.5]	[3,8.5]	[3,8.5]	[4,7.5]
	k_w	[25,75]	[25,75]	[35,85]	[30,80]	[35,85]

3.1 频率控制参数优化结果及分析

以改进的 IEEE RTS-79 系统验证风电场频率控制参数优化方法可行性，设置以下三个案例场景：

场景 1：系统内风电场运行在最大功率跟踪状态，事故后不主动参与调频，仅依靠同步电源一次调频响应不平衡功率，同步电源参数设置如附表 A1 所示；

场景 2：系统内风电场引入 PD-VIC，具有频率响应能力，风电场频率控制参数设置如附表 A2 所示；

场景 3：在场景 2 的基础上采用本文提出的风电场频率控制参数优化模型，根据扰动量和频率安全限值计算系统惯量安全需求，动态优化频率控制参数。

预设系统允许的频率变化率最大限值 $RoCoF_{sys_max}=0.5$ Hz/s，暂态频率最低点限值 $f_{sys_m}=49.6$ Hz，准稳态频率限值 $f_{ss_max}=49.8$ Hz。设置仿真时长为 30s，在 3s 时模拟发生功率缺额扰动事故模拟最大容量发电机跳闸（最大 N-1 事故），事故量占负荷的 8%，对不同场景下 SFR 模型仿真结果进行分析。

1) 场景 1

场景 1 风电场始终运行在最大功率跟踪状态，不主动响应电网频率波动。事故后仅依靠同步电源一次调频响应，调频容量十分有限，频率支撑能力弱。场景 1 系统频率指标响应情况如图 5 所示，经仿真得到频率安全指标 $RoCoF_{max}=0.65$ Hz/s， $f_m=49.19$ Hz， $f_{ss}=49.65$ Hz，均超过频率安全限值。

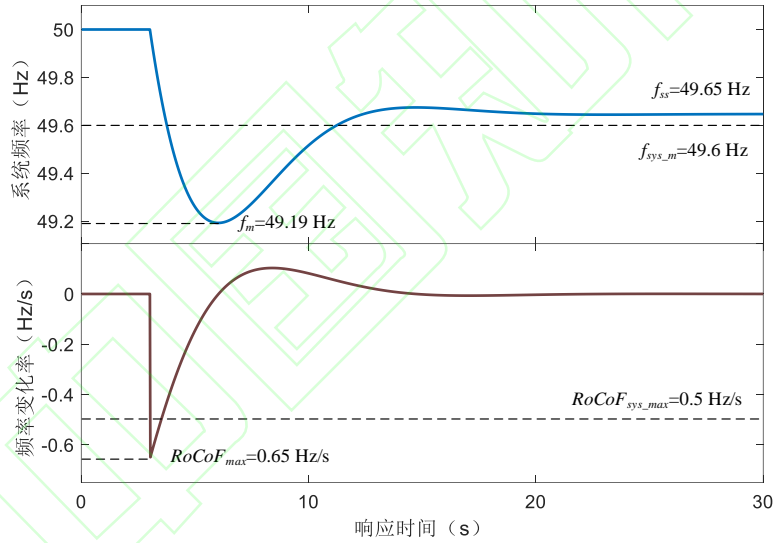


图 5 系统频率响应过程（场景 1）

Fig.5 Frequency response process (case 1)

2) 场景 2

场景 2 风电场并网逆变器控制环节带有 PD-VIC，风电能够主动响应频率变化。场景 2 系统频率指标响应情况如图 6 所示，经仿真得到频率安全指标 $RoCoF_{max}=0.56$ Hz/s， $f_m=49.56$ Hz， $f_{ss}=49.74$ Hz，均超过频率安全限值。

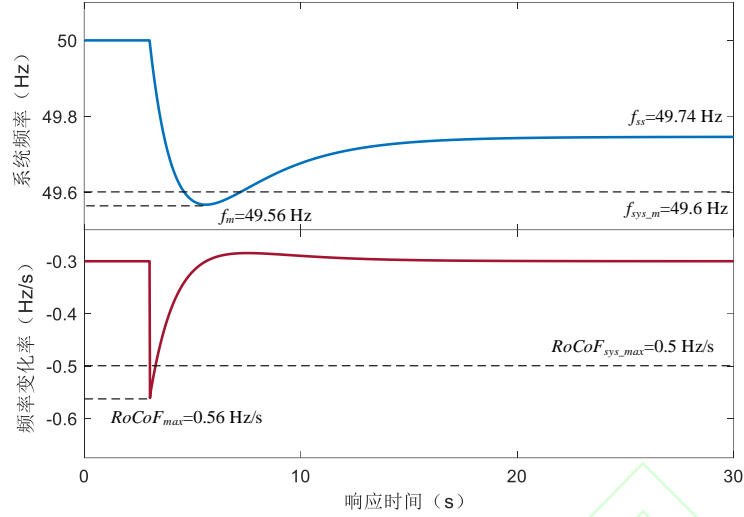


图 6 系统频率响应过程（场景 2）
Fig.6 Frequency response process (case 2)

风电场引入 PD-VIC 后能够主动响应电网频率变化、调整输出功率，改善频率响应过程。但由于缺乏对系统惯量的直接约束，风电场在事故后没有充分发挥惯量和频率支撑能力，即使风电能够响应频率变化调整输出功率，频率安全指标仍然越限。

3) 场景 3

场景 3 在场景 2 的基础上采用本文提出的优化模型，根据频率安全限值及扰动量大小，动态优化风电场频率控制参数。

首先根据频率安全指标限值计算该有功功率扰动下维持暂态频率稳定的惯量安全需求：为保证故障后 $RoCoF$ 指标不越限，系统最小惯量需求应不低于 $20524.384 \text{ MW} \cdot \text{s}$ ；为保证故障后最大频率偏差 f_m 不越限，系统惯量水平应不低于 $22741.868 \text{ MW} \cdot \text{s}$ 。因此，针对该场景，系统惯量安全需求取 $22741.868 \text{ MW} \cdot \text{s}$ 。

其次，基于该惯量安全需求，通过 Cplex 解算频率控制参数优化模型，计算结果如表 2 所示。

表 2 频率控制参数优化结果

Tab. 2 Optimization results of PD-VIC parameters

	W2	W4	W7	W9	W12
H_{vir}	2.871	4.592	4.492	4.615	5.934
K_w	38.153	43.709	43.709	43.709	46.487
	W15	W19	W24	W27	W29
H_{vir}	2.323	2.323	4.592	4.592	4.592
K_w	38.153	38.153	43.709	43.709	43.709

最后，通过 MATLAB/SIMULINK 验证所得参数优化结果的可行性，在对应风况下，场景 3 系统频率指标响应情况如图 7 所示，经仿真得到频率安全指标 $RoCoF_{max}=0.43$ Hz/s， $f_m=49.72$ Hz， $f_{ss}=49.81$ Hz，均在频率安全限值内。

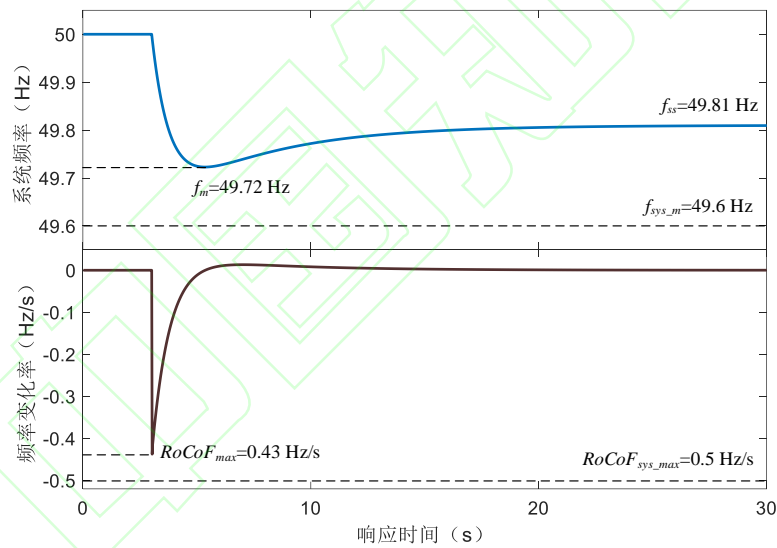


图 7 系统频率响应过程（场景 3）

Fig.7 Frequency response process (case 3)

综上所述，三个测试场景下频率指标对比如表 3 所示。从表 3 可以看出，本文所提频率控制参数优化方法可以充分挖掘风电场惯量和调频潜力，参数动态优化后暂态响应过程得到明显改善，频率指标均在安全限值内。

表 3 不同测试场景下系统频率指标对比
Tab. 3 Comparison of frequency metric under different cases

	$RoCoF_{max} / (\text{Hz} \cdot \text{s}^{-1})$	f_m / Hz	f_{ss} / Hz
风电不参与调频	0.65	49.19	49.65
风电参数优化前指标	0.56	49.56	49.74
风电参数优化后指标	0.43	49.72	49.81

此外，通过对模型多次求解，可得到频率控制参数平均求解时间为 0.24 s，满足风电场设置控制参数的实时性要求，能够有效地协助电网调度运行部门在线分析事故后系统惯量水平、实时调整风电频率控制参数。

3.2 不同风况下系统极限可承载扰动分析

风电场具备虚拟惯量和一次调频能力后，系统在不同风况下的频率支撑能力发生变化，可承载的极限扰动量也对应改变。表 4 列举了在原始系统、风电场运行于中低风况和高风况三种状态下，系统可承载的极限扰动量及确保频率稳定时系统惯量安全需求。

表 4 不同风况下系统可承载的极限功率扰动
Tab. 4 Ultimate power disturbance of system at different wind conditions

运行状态	极限扰动量 / %	系统惯量安全需求 /(MW · s)
原始系统	-5.7	14623.62
中低风况	-8.1	23265.20
高风况	-9.2	29412.97

从表 4 可以看出，与中低风况下运行的风电场相比，高风况下运行的风电场可向系统提供更大的惯量和调频支撑，系统能够承受的功率扰动规模也发生改变。

综上所述，本文所提方法在满足系统惯量安全需求基础上优化风电场频率控制参数，并计及不同风况调频能力，有效改善了系统频率响应过程。通过上述分析，在整定风电场频率控制参数时，应将系统惯量需求和风电运行风况纳入考虑，结合故障量，优化控制参数以保

证系统频率稳定性。

4 结论

本文提出了一种考虑惯量安全需求的风电场频率控制参数优化方法,事故后在线计算维持暂态频率稳定的惯量安全和调频需求,形成惯量安全约束并纳入频率控制参数优化模型,再通过 Cplex 优化对应风况下虚拟惯量和频率下垂系数,最后基于改进的 IEEE RTS-79 系统验证所提方法的有效性。主要结论如下:

(1) 在风电场控制参数优化模型中引入维持暂态频率稳定的惯量安全约束,可确保频率安全指标在事故后不越限,提升暂态频率稳定性。

(2) 通过对运行在不同风况的风电场频率支撑能力建模,以事故后频率控制参数调整量最小为优化目标,能够有效挖掘风电场惯量和调频潜力,改善暂态响应过程。

(3) 在不同风况下风电场呈现出不同的惯量支撑和调频能力,使系统可承载的功率扰动规模发生动态改变。

通过上述工作,可实现对风电场频率控制参数的动态优化,后续将考虑光伏、直流和储能等多类型逆变器接口资源的调频潜力,完善高比例新能源电力系统惯量支撑和频率稳定裕度提升方案的研究。

参考文献:

- [1] 黄强, 郭怿, 江建华, 等. “双碳”目标下中国清洁电力发展路径[J]. *上海交通大学学报*, 2021, 55(12): 1499-1509.
HUANG Qiang, GUO Yi, JIANG Jianhua, *et al.* Development pathway of China's clean electricity under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2021, 55(12): 1499-1509.
- [2] 文云峰, 杨伟峰, 林晓煌. 低惯量电力系统频率稳定分析与控制研究综述及展望[J]. *电力自动化设备*, 2020, 40(9): 211-222.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, LIN Xiaohuang. Review and prospect of frequency stability analysis and control of low-inertia power systems[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(9): 211-222.
- [3] 汪梦军, 郭剑波, 马士聪, 等. 新能源电力系统暂态频率稳定分析与调频控制方法综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1672-1694.
WANG Mengjun, GUO Jianbo, MA Shicong, *et al.* Review of transient frequency stability analysis and frequency regulation control methods for renewable power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1672-1694.
- [4] 余威, 杨欢红, 焦伟, 等. 基于优劣解距离算法的光储配电网自适应虚拟惯性控制策略[J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(10): 1317-1324.
YU Wei, YANG Huanhong, JIAO Wei, *et al.* Adaptive virtual inertial control strategy of optical storage and distribution network based on TOPSIS algorithm[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2022, 56(10): 1317-1324.
- [5] 黄俊凯, 杨知方, 余娟, 等. 面向频率稳定校核的风机快速频率响应低阶建模方法及其误差分析[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(18): 6752-6766.
HUANG Junkai, YANG Zhifang, YU Juan, *et al.* Low-order modeling of wind turbine-based fast frequency response and its error analysis for frequency stability assessment[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(18): 6752-6766.
- [6] 王彤, 邢其鹏, 李鸿恩, 等. 计及虚拟惯量控制的DFIG等效惯量在线评估与响应特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(11): 52-60.
WANG Tong, XING Qipeng, LI Hongen, *et al.* Online evaluation and response characteristics analysis of equivalent inertia of a doubly-fed induction generator incorporating virtual inertia control[J]. *Power System Protection & Control*, 2022, 50(11): 52-60.
- [7] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(27): 4706-4716.
FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, *et al.* Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(27): 4706-4716.
- [8] LI H Y, JU P, GAN C, *et al.* Analytic analysis for dynamic system frequency in power systems under uncertain variability[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 34(2): 982-993.
- [9] XU G Y, ZHU C, BI T S, *et al.* Optimal frequency controller parameters of wind turbines participating system frequency control[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Portland, USA. IEEE, 2018: 1-5.
- [10] 赵冬梅, 许瑞庆, 郑立鑫. 全风况下双馈风机参与调频的协调控制策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(12): 53-59.
ZHAO Dongmei, XU Ruiqing, ZHENG Lixin. Research on coordinated control strategy for DFIGs participating in system frequency regulation with different wind[J]. *Power System Protection & Control*, 2017, 45(12): 53-59.
- [11] 马喜平, 何世恩, 姚寅, 等. 计及风速不确定性及相关性的风电场分区虚拟惯量估计[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(10): 123-131.
MA Xiping, HE Shien, YAO Yin. Virtual inertia estimation of wind farm zones with wind speed uncertainty and correlation[J]. *Power System Protection & Control*, 2022, 50(10): 123-131.
- [12] YOU R, CHAI J Y, SUN X D, *et al.* Variable speed wind turbine based on electromagnetic coupler and its experimental measurement[C]//2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition. National Harbor, USA. IEEE, 2014: 1-5.
- [13] WANG X, DU W. Virtual inertia control of grid-connected wind farms[C]//International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015). Beijing, China. Institution of Engineering and Technology, 2015.
- [14] 张武其, 文云峰, 迟方德, 等. 电力系统惯量评估研究框架与展望[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(20): 6842-6856.

- ZHANG Wuqi, WEN Yunfeng, CHI Fangde, *et al.* Research framework and prospect on power system inertia estimation[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2021, 41(20): 6842-6856.
- [15] 王宝财, 孙华东, 李文锋, 等. 考虑动态频率约束的电力系统最小惯量评估[J]. **中国电机工程学报**, 2022, 42(1): 114-127.
- WANG Baocai, SUN Huadong, LI Wenfeng, *et al.* Minimum inertia estimation of power system considering dynamic frequency constraints[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2022, 42(1): 114-127.
- [16] 刘中建, 周明, 李昭辉, 等. 高比例新能源电力系统的惯量控制技术与惯量需求评估综述[J]. **电力自动化设备**, 2021, 41(12): 1-11.
- LIU Zhongjian, ZHOU Ming, LI Zhaohui, *et al.* Review of inertia control technology and requirement evaluation in renewable-dominant power system[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2021, 41(12): 1-11.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定计算规范: GB/T 40581—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration, Standardization Administration of the People's Republic of China. Calculation specification for power system security and stability: GB/T 40581—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [18] 林晓煌, 文云峰, 杨伟峰. 惯量安全域: 概念、特点及评估方法[J]. **中国电机工程学报**, 2021, 41(9): 3065-3079.
- LIN Xiaohuang, WEN Yunfeng, YANG Weifeng. Inertia security region: Concept, characteristics, and assessment method[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2021, 41(9): 3065-3079.
- [19] 张英敏, 彭泽峰, 彭乔, 等. 预测新能源接入电网受扰后频率最低点的通用 ASF 模型[J]. **电网技术**, 2023, 47(5): 1788-1799.
- ZHANG Yingmin, PENG Zefeng, PENG Qiao, *et al.* Generic ASF model of new-energy-integrated power grid for frequency nadir estimation under disturbance[J]. **Power System Technology**, 2023, 47(5): 1788-1799.
- [20] 罗魁, 郭剑波, 王伟胜, 等. 跟网型新能源附加频率控制对频率稳定及小扰动同步稳定影响分析综述[J]. **中国电机工程学报**, 2023, 43(4): 1262-1281.
- LUO Kui, GUO Jianbo, WANG Weisheng, *et al.* Review of impact of grid following variable renewable energy supplementary frequency control on frequency stability and small-disturbance synchronization stability[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2023, 43(4): 1262-1281.
- [21] SHI Q M, WANG G, MA W M, *et al.* Coordinated virtual inertia control strategy for D-PMSG considering frequency regulation ability[J]. **Journal of Electrical Engineering & Technology**, 2016, 11(6): 1556-1570.
- [22] 韩帅, 张峰, 丁磊, 等. 基于混合 Copula 函数的风电场可用惯量评估方法[J]. **电力自动化设备**, 2021, 41(3): 189-195.
- HAN Shuai, ZHANG Feng, DING Lei, *et al.* Available inertia evaluation method of wind farm based on mixed Copula function[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2021, 41(3): 189-195.
- [23] SHI Z, XU Y, WANG Y, *et al.* Coordinating multiple resources for emergency frequency control in the energy receiving-end power system with HVDCs[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2023, 38(5): 4708-4723.

附录

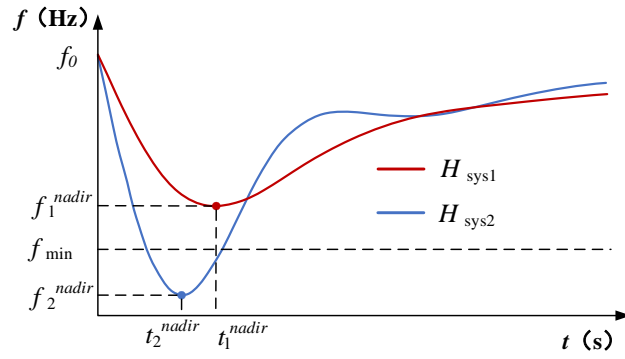


图 A1 不同惯量水平下的系统频率响应

Fig. A1 Frequency response with different system inertia

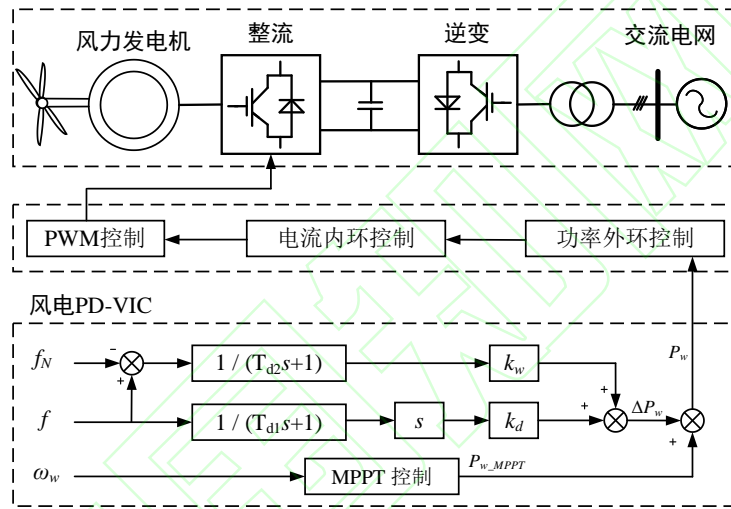


图 A2 跟网型风电场 PD-VIC 环节

Fig. A2 Structure of wind power grid following converter PD-VIC

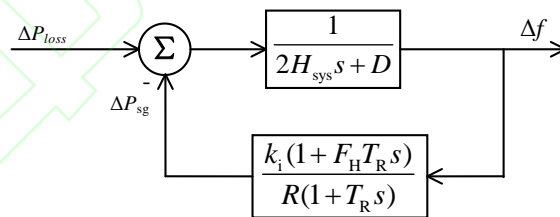


图 A3 同步电源单机 SFR 模型

Fig. A3 Single SFR model of synchronous generator

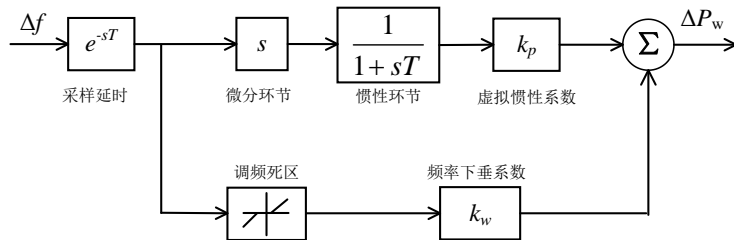


图 A4 带 PD-VIC 的风机功率输出模型

Fig. A4 Power output model of wind generator with PD-VIC

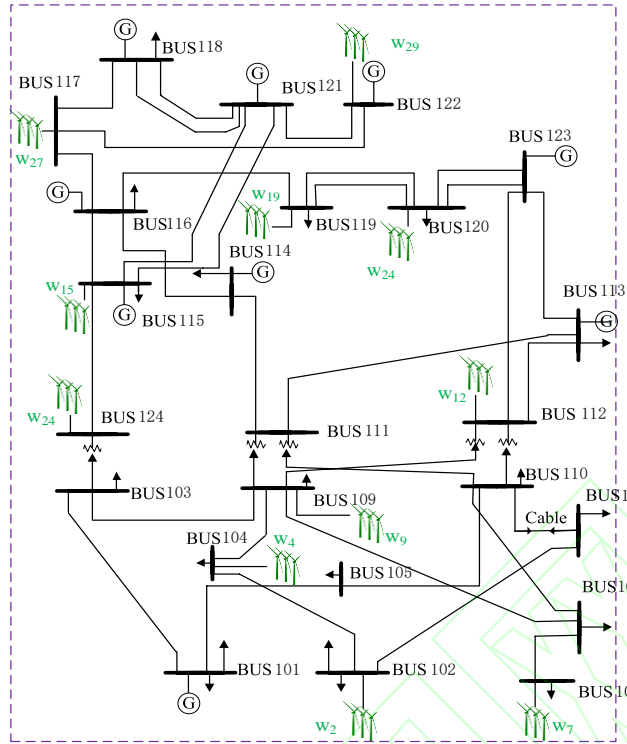


图 A5 改进的 IEEE RTS-79 测试系统

Fig. A5 The modified IEEE RTS-79 system

表 A1 同步电源参数表

Tab. A1 Synchronous generator parameters

	G1	G3	G5	G6	G8	G10	G11	G13	G14	G16	G17
P_i /MW	50	120	50	50	120	150	150	197	197	30	30
H_i	2.8	3	2.8	2.8	3	2.8	2.8	3.2	3.2	2.8	2.8
k_i	13.3	22.2	13.3	13.3	22.2	16.7	16.7	22.2	16.7	13.3	13.3
	G18	G20	G21	G22	G23	G25	G26	G27	G28	G30	G31
P_i /MW	30	250	250	400	400	120	120	120	250	250	350
H_i	2.8	2.8	4	4.8	5	3.5	3.5	3.5	3.5	4	4
k_i	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	22.2	22.2

表 A2 风电场频率控制参数初值

Tab. A2 Initial value of wind farm frequency control parameters

	W2	W4	W7	W9	W12	W15	W19	W24	W27	W29
P_{wN} /MW	50	120	120	150	197	30	30	120	120	120
H_{vir}	2	2.5	2.4	2	2.5	1.8	1.8	2.5	2.5	2.5
k_w	13.3	20	20	20	23.3	13.3	13.3	20	20	20