

# 大扰动下计及风电场低电压穿越恢复差异的频率响应估计方法

程昊<sup>1</sup>, 吕亚洲<sup>1</sup>, 李威<sup>1</sup>, 刘福锁<sup>1</sup>, 赖业宁<sup>1</sup>, 张宇栋<sup>2</sup>

(1. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏省南京市 211106; 2. 国家电网有限公司西南分部, 四川省成都市 610041)

**摘要:** 随着风电渗透率的提高, 多个风电场同时进入低电压穿越(LVRT)后将给电力系统带来巨大冲击, 导致有功输出暂时性下降, 电网频率迅速跌落, 甚至存在触发低频减载的风险, 有必要对暂时性功率扰动下电网频率曲线进行快速在线估计, 以制定相应的控制措施。然而, 由于风电场内部存在的功率恢复差异使其LVRT曲线呈现不同形态, 若忽略此影响将使频率响应曲线估计产生较大误差, 且传统基于详细模型的时域仿真效率较低。因此, 提出一种计及风电场LVRT有功功率恢复差异的扰动功率解析方法, 将风电机组LVRT各阶段造成的有功扰动量采用分段函数进行描述, 基于能量守恒原理对系统总的暂时性扰动功率进行精确估计。考虑风电的调频特性和虚拟惯量作用, 提出适用于高比例新能源电网的系统频率响应改进模型, 并采用差分进化算法对基于实际数据的系统传递函数参数进行辨识, 进而拟合出频率响应轨迹。基于IEEE 39节点系统与实际电网简化系统仿真, 验证了该方法在不同场景的适用性和可靠性。

**关键词:** 低电压穿越; 扰动功率; 能量守恒; 参数辨识; 频率响应估计

## 0 引言

随着新能源发电占比的提高, 电力系统大量同步机被电力电子器件置换<sup>[1]</sup>, 系统惯量水平<sup>[2-3]</sup>和一次调频能力逐步降低, 动态有功<sup>[4]</sup>与无功支撑能力下降, 频率稳定水平总体呈现下降趋势<sup>[5-7]</sup>。

高比例新能源电网中, 风电场近区发生短路故障可能导致大范围风电机组同时进入低电压穿越<sup>[8]</sup>(low voltage ride-through, LVRT)状态, 故障切除后陆续恢复正常运行, 系统将承受大容量暂时性的系统有功扰动功率(system active disturbance power, SADP), 可能引起频率迅速跌落, 甚至触发低频减载<sup>[9]</sup>。未来, 以新能源为主体的新型电力系统安全稳定运行面临严峻挑战<sup>[10]</sup>, 受SADP影响的电网频率轨迹进行快速准确预估是后续采取预防或紧急控制的前提。

由风电LVRT引起的SADP(SADP due to LVRT, SADPL), 其大小与风电场容量、正常运行状态、有功恢复速率等因素有关。随着风电场接入规模增大, 各风电场间的功率恢复差异增加了暂态响应建模维数和难度<sup>[11]</sup>。目前, 已有大量研究聚焦于风电LVRT时的功率响应。一部分主要针对风

电LVRT时如何跟踪功率指令以支撑电压及频率响应<sup>[12-17]</sup>; 另一部分主要提出机组分群方法并建立风电场单机或多机等效模型<sup>[17-25]</sup>。然而, 上述研究无法适用于考虑功率恢复差异下的多风电场LVRT时有功扰动大小量化快速分析。

在电网频率轨迹拟合方面, 系统频率响应(system frequency response, SFR)模型因简化了仿真计算量和建模复杂性, 获得了广泛应用。但是, 传统SFR模型基于同步机的电力系统假设进行计算, 忽略了负载调频特性、调速器动态特性等细节<sup>[26]</sup>, 传递函数为二阶系统函数, 无法准确刻画高比例新能源系统中复杂的非线性动态行为。当各风电场LVRT有功功率恢复差异较大时, 电网频率响应拟合存在较大误差。文献[27-28]针对上述不足进行了SFR模型改进, 但缺乏对新能源的虚拟惯量控制和调频影响的研究, 所提方法未考虑暂时性SADP场景下频率响应的分析, 工程应用范围有局限性。文献[29]通过尝试法确定了改进模型的阶数, 仍缺乏具体推导分析和工程实践之间的对比, 需进一步论证。

综上, 本文首先运用能量守恒原理, 通过将风电LVRT暂态微观过程聚合为一个宏观等效模型来简明描述SADPL的大小; 然后, 计及风电调频和虚拟惯量作用对已有SFR模型在拟合精确性和快速性上进行优化, 采用差分进化算法辨识该SFR模型的传递函数参数; 最后, 以SADPL等效模型为输

收稿日期: 2023-09-14; 修回日期: 2024-03-12。

上网日期: 2024-07-17。

国家电网公司西南分部科技项目(SGSW0000DKJS2310035); 已申请国家发明专利(申请号: 202410212546.7)。

入,经该SFR模型输出为频率响应轨迹。所提方法可用于高比例新能源电力系统SADP影响下频率响应轨迹的快速精确估计,较基于传统方法进行频率响应时域仿真速度大幅提高,为电网在线频率安全稳定分析提供技术支持。

## 1 风电单机LVRT动态特性分析

### 1.1 风电单机LVRT对系统频率的影响分析

《风电场接入电力系统技术规定第一部分:陆上风电(GB/T 19963—2021)》<sup>[30]</sup>规定风电场应具备故障穿越能力。其中,LVRT可能导致风机有功输出功率暂态变化,造成系统暂时性SADPL。忽略故障瞬间功率脉冲对频率的影响,大规模的系统SADPL是频率剧烈变化的主要原因。

SADPL大小由风电有功输出暂态变化量决定,即 $\Delta P_{\text{SADPL}}(t) = P_{\text{LVRT}}(t) - P_{\Sigma}$ ,其中: $\Delta P_{\text{SADPL}}(t)$ 为 $t$ 时刻的SADPL; $P_{\text{LVRT}}(t)$ 为 $t$ 时刻LVRT期间风电有功功率总和; $P_{\Sigma}$ 为风电单机故障前有功功率的总和。无特殊说明,下文功率均以标么值表示,单位为p.u.,基准值为正常运行时该工况下的系统容量。

通常采用频率偏差曲线表征频率响应的态势,即系统频率的实际值与标称值之差,有名值单位为Hz。图1为风电单机SADPL和与之对应的频率响应偏差曲线。

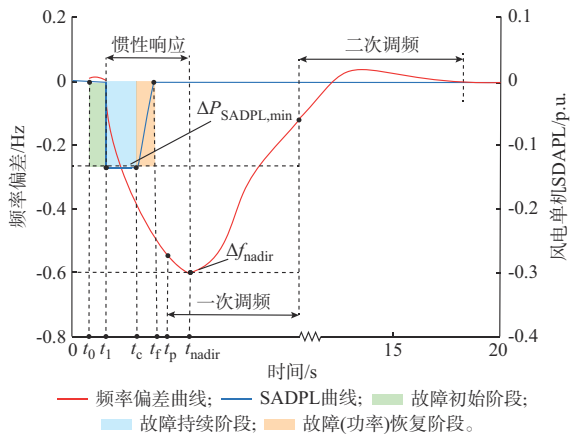


图1 SADPL曲线与频率响应偏差曲线对比  
Fig. 1 Comparison of SADPL curve and frequency response deviation curve

LVRT期间,风电有功功率作为电网的输入变量,其变化量始终小于0,即 $\Delta P_{\text{SADPL}}(t) \leq 0$ ;频率作为电网的输出变量,由于有功功率减少,其变化量在功率恢复前始终 $\leq 0$ ,即频率偏差大小 $\Delta f \leq 0$ 。

SADPL曲线为暂时性功率不平衡量,分为3个阶段<sup>[11]</sup>:故障初始阶段、故障持续阶段、故障(功率)恢复阶段。

$t_0 \sim t_1$ 为故障初始阶段。 $t_0$ 为故障发生时刻,由

于 $t_0$ 与 $t_1$ 十分接近,下文近似看作同一时间点。

$t_1 \sim t_c$ 为故障持续阶段。 $t_1$ 为SADPL曲线突变时刻; $t_c$ 为故障持续最终时刻,即故障恢复开始时刻。发生故障后,风电LVRT的输出有功功率迅速锐减至0附近,SADPL以最低值 $\Delta P_{\text{SADPL},\text{min}}$ 持续影响频率,使其呈现加速下跌趋势。一般情况下,在恢复至0之前,系统频率处于惯性响应阶段,系统广义惯量<sup>[2]</sup>与 $\Delta P_{\text{SADPL},\text{min}}$ 共同决定频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)。

$t_c \sim t_t$ 为故障(功率)恢复阶段。 $t_t$ 为故障恢复结束时刻。此阶段随着并网节点电压逐渐恢复,风电输出有功功率以一定的速率恢复至故障前正常值,即SADPL逐渐减少至0,RoCoF也逐渐变小。

从 $t_p$ 时刻起,一次调频逐渐发挥作用,并于 $t_{\text{nadir}}$ 时刻与惯性建立平衡状态,频率偏差达到最小值 $\Delta f_{\text{nadir}}$ <sup>[31]</sup>。 $t_{\text{nadir}}$ 时刻后,风电LVRT对频率的影响结束,频率响应逐渐过渡至稳态或恢复到故障前正常值。

综上,SADPL、系统广义惯量、一次调频三者相互制约,共同决定了频率跌落的速率和深度。虽然该功率扰动是暂时性的,但由于电网的新能源渗透率逐渐提高,增加了短时间内产生的有功冲击,同时系统的旋转惯量下降,加剧了频率跌落。

### 1.2 风电单机SADPL响应的多阶段数学模型

由图1可知,风电SADPL响应过程呈现向下阶跃、功率保持、线性恢复等多阶段特性,可描述为阶跃与斜坡函数的线性叠加。

$$\Delta P_{\text{SADPL},i}(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t \leq t_{1,i} \\ (\lambda_i - 1)P_i & t_{1,i} < t \leq t_{c,i} \\ k_i(t - t_{c,i}) + (\lambda_i - 1)P_i & t_{c,i} < t \leq t_{t,i} \\ 0 & t > t_{t,i} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta P_{\text{SADPL},i}(t)$ 为 $t$ 时刻第 $i$ 台风电单机SADPL响应表达式; $t_{1,i}$ 为第 $i$ 台风电单机进入LVRT的时间; $t_{c,i}$ 为第 $i$ 台风电单机恢复开始时刻; $k_i$ 为第 $i$ 台风电单机恢复时期的有功恢复速率; $t_{t,i}$ 为第 $i$ 台风电单机恢复至故障前功率的LVRT结束时刻; $P_i$ 为第 $i$ 台风电单机故障前的正常有功功率; $\lambda_i$ 为第 $i$ 台风电单机LVRT的有功系数,其与LVRT时的有功电流参考值有关。

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{SADPL},i}(t) = \Delta P_{\text{SADPL},i,\text{min}} \epsilon(t - t_{1,i}) + k_i(t - t_{c,i}) \epsilon(t - t_{c,i}) - [\Delta P_{\text{SADPL},i,\text{min}} + k_i(t - t_{t,i})] \epsilon(t - t_{t,i}) \\ \Delta P_{\text{SADPL},i,\text{min}} = P_i(\lambda_i - 1) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为 $t$ 时刻单位阶跃函数; $\Delta P_{\text{SADPL},i,\text{min}}$ 为第 $i$ 台风电单机故障持续阶段SADPL的最低值。假

设 LVRT 开始时有功输出很小,下文为简化计算将  $\lambda_i$  视为 0,即  $\Delta P_{\text{SADPL},i,\min} = -P_i$ 。

风电控制策略的差异可能会导致式(1)中的参数不同。式(1)和式(2)仅对风电单机 LVRT 时有功输出的外特性进行数学解析,不限于某种特定的控制策略。

## 2 考虑风电单机 LVRT 有功恢复差异的 SADPL 解析模型

### 2.1 考虑风电 LVRT 功率恢复差异的必要性

如图 2 所示,不同风电机组初始运行状态、距故障点的电气距离以及 LVRT 恢复策略差别较大,海量风机并网下,其同时进入 LVRT 后对系统总的暂时性 SADP 呈现强非线性,难以直接采用数学式进行描述。为了简化解析,传统方法通常分为 2 种,一种往往忽略风电 LVRT 动态特性,将恢复阶段看作持续阶段,如图 2 所示;另一种采用单机倍乘方法,将不同风机的恢复斜率与功率直接累加。但是,这 2 种方法与实际功率扰动曲线均存在很大误差。

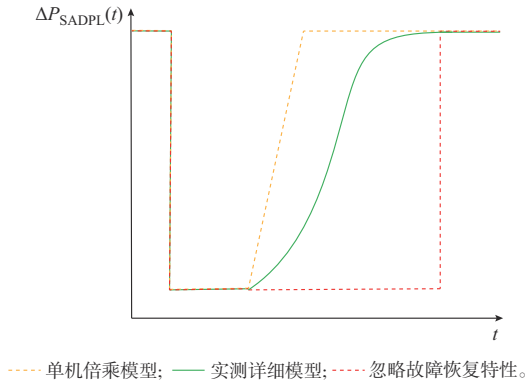


图 2 不同等效模型对计及风电机组 SADPL 分析的影响  
Fig. 2 Impacts of different equivalent models on SADPL analysis considering wind turbine

### 2.2 基于能量守恒原理的 SADPL 等效单机模型

本文着眼于解决考虑风电 LVRT 恢复下的 SFR 的估计问题,故不再对实际的复杂非线性 SADP 曲线进行数学解析,而是从能量的角度,提出暂态过程中系统承受的暂时性能量冲击的等效方法,在满足精确性的同时,便于工程应用。附录 A 表 A1 对比了详细模型、考虑新能源功率分布的模型<sup>[32]</sup>与本文所提方法的优缺点。

同步发电机的原动机和转子由于在旋转过程中储存了动能而具有转动惯量。当风电单机发生 LVRT 故障时,其有功出力降低,进而间接造成了系统的不平衡功率,即 SADPL。此时,同步发电机处于被动应激状态,其将转子中储存的动能通过功频特性转化为电磁功率(即惯量支撑功率<sup>[2]</sup>),向系统释放能量以弥补风电 LVRT 造成输入有功功率

暂时性降低,由此造成发电机转速变化,进而引发频率变化。这一部分被转化的动能应当等于风电 LVRT 引发的冲击能量,即能量守恒。其原理如图 3 所示,本文所提方法通过构造拥有穿越特性的等效单机,使 LVRT 时期能够实现相同大小的冲击能量,而该单机的 LVRT 参数由实际各风电机组参数共同确定。图中:等效模型曲线位于详细模型上方的面积为  $S_1$  和  $S_3$ ,等效模型曲线与详细模型围成的面积为  $S_2$ ,则有  $S_1 + S_3 = S_2$ 。

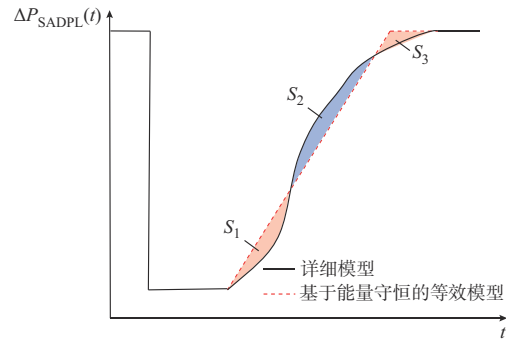


图 3 能量守恒原理示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of energy conservation principle

构建一个含有多个风电场的电网,单个风电场采用相同型号单机组成的风电机组,风电场之间的单机数量与型号存在差异。将同步发电机编号为  $\{1, 2, \dots, l\}$ ,风电机组编号为  $\{l+1, l+2, \dots, n\}$ 。假设风电单机 SADPL 曲线恢复过程为固定斜率。以发生三相永久性短路故障为例,前  $m$  个风电机组(编号为  $\{l+1, l+2, \dots, l+m+1\}$ )同时进入 LVRT 且不发生脱网,其余发电设备稳定运行。

LVRT 过程中,同步机释放动能且发生能量转移,该部分能量记作  $\Delta E_{\text{SADPL}}$ ,等效单机系统第  $j$  个风电机组所释放的能量  $\Delta E_{\text{SADPL},j}$  如式(3)所示。

$$\begin{cases} \Delta E_{\text{SADPL},j} = \int_{t_{1,j}}^{t_{2,j}} \Delta P_{\text{SADPL},j} dt \\ t_{2,j} = t_{c,j} + \frac{P_j}{k_j} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta P_{\text{SADPL},j}$  为第  $j$  台风电机组的 SADPL;  $t_{1,j}$  为第  $j$  台风电机组进入 LVRT 的时刻;  $t_{2,j}$  为第  $j$  台风电机组恢复至故障前功率的 LVRT 结束时刻;  $t_{c,j}$  为第  $j$  台风电机组恢复开始时刻;  $P_j$  为第  $j$  台风电机组故障前的正常有功功率;  $k_j$  为第  $j$  台风电机组恢复时期的有功恢复速率。

等效单机的功率恢复特性能够反映系统整体所能承受的暂时性功率冲击。恢复时长体现了 LVRT 持续阶段的能量大小,即恢复开始时刻越滞后,故障持续时间越长,能量冲击越大。



根据式(1)进一步对式(3)进行简化,如式(4)所示。

$$\Delta E_{\text{SADPL},j} = (t_{c,j} - t_{1,j})P_j + \frac{P_j^2}{2k_j} \quad (4)$$

根据式(4)对风电场中的所有风电 LVRT 损失量进行叠加,电网在 LVRT 故障期间转化的能量大小为:

$$\Delta E_{\text{SADPL}} = - \sum_{j=l+1}^{l+m+1} \left[ (t_{c,j} - t_{1,j})P_j + \frac{P_j^2}{2k_j} \right] \quad (5)$$

同理,该等效模型释放的能量为:

$$\Delta E_{\text{SADPL}} = -(t_{c,\Sigma} - t_{1,\Sigma})\Delta P_{\Sigma} + \frac{\Delta P_{\Sigma}^2}{2k_{\Sigma}} \quad (6)$$

式中: $\Delta P_{\Sigma}$ 为该模型的有功功率极值; $t_{c,\Sigma}$ 为该模型的故障恢复开始时间; $t_{1,\Sigma}$ 为该模型进入 LVRT 的时间,由于编号为 $\{l+1, l+2, \dots, l+m+1\}$ 的风电机组同时进入 LVRT,故 $t_{1,\Sigma} = t_{1,j}$ ;  $k_{\Sigma}$ 为该模型恢复阶段的有功恢复速率。

该模型的最低点,即有功功率极值 $\Delta P_{\Sigma}$ 应与系统实际功率扰动曲线相一致,即

$$\Delta P_{\Sigma} = - \sum_{j=l+1}^{l+m+1} P_j \quad (7)$$

等效风机恢复开始时间 $t_{c,\Sigma}$ 根据实际曲线多折线特点,应选为最先进入恢复阶段的机组时间。

$$t_{c,\Sigma} = \min t_{c,j} \quad (8)$$

设置恢复斜率以限制该模型曲线不偏离实际曲线,可通过联立式(5)一式(8)求得,即

$$k_{\Sigma} = \frac{2\Delta P_{\Sigma}}{t_{c,\Sigma} - t_{1,\Sigma} - \frac{\Delta E_{\text{SADPL}}}{\Delta P_{\Sigma}}} \quad (9)$$

风电场内发生 LVRT 导致的系统暂时性功率扰动可以表示为:

$$\Delta P_{\text{SADPL}}(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t \leq t_{1,\Sigma} \\ \Delta P_{\Sigma} & t_{1,\Sigma} < t \leq t_{c,\Sigma} \\ k_{\Sigma}(t - t_{c,\Sigma}) + \Delta P_{\Sigma} & t_{c,\Sigma} < t \leq t_{t,\Sigma} \\ 0 & t > t_{t,\Sigma} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $t_{t,\Sigma} = t_{c,\Sigma} - \Delta P_{\Sigma}/k_{\Sigma}$ 。

本文除时间之外,变量均为标么值,式(10)为基于能量守恒原理的 SADPL 等效单机(equivalent single-unit for SAPL based on energy-conservation principle, ESSE)模型。

将式(10)进行拉普拉斯变换:

$$\Delta P_{\text{SADPL}}(s) = \frac{\Delta P_{\Sigma}(e^{-st_{1,\Sigma}} - e^{-st_{t,\Sigma}})}{s} + \frac{k_{\Sigma}(e^{-st_{c,\Sigma}} - e^{-st_{t,\Sigma}})}{s^2} \quad (11)$$

式中: $s$ 为拉普拉斯算子。

相较于传统等效模型,本文所提 ESSE 模型从功率角度约束了其等效单机的 LVRT 特性,还从能量角度阐述了频率响应的能量机制,将原本复杂的 SADPL 曲线线性化。下文仿真算例多次证明了该模型能够一直跟踪实际 SADPL 曲线趋势,满足了拟合新能源场站暂态功率及频率轨迹的工程需要,物理含义明晰,所需参数较少,计算效率高。

### 3 适用于高比例新能源电网的 SFR 改进模型

在考虑原动机和调速器动态模型的基础上,高比例新能源电网频率响应模型还应计及负荷频率特性及风电虚拟惯量控制与调频能力<sup>[33-34]</sup>。因此,一般含高比例新能源接入的系统频率-有功功率传递函数 $G_u(s)$ 为:

$$G_u(s) = \frac{\Delta P_w + \Delta P_L - \Delta P_m}{\Delta f} \quad (12)$$

式中: $\Delta P_L$ 为负荷变化; $\Delta P_m$ 为同步机组功率偏差; $\Delta P_w$ 为风电机组功率变化。

上述式(12)作为通用表达式,一般含有广义惯量、阻尼特性、调速器-原动机特性环节。

$$G_u(s) = M_u s + D_u + G_m(s) \quad (13)$$

式中: $M_u$ 为具有广义惯量特性的聚合传递函数; $D_u$ 为具有阻尼特性的聚合传递函数; $G_m(s)$ 为发电系统调速器-原动机模型的频率-功率等值传递函数。

下文考虑风电拥有虚拟惯量控制和调频特性对广义惯量与阻尼特性进行分析。由于风电等新能源的接入代替了部分含有旋转惯量的同步机组,系统的广义惯量特性聚合传递函数 $M_u$ 、阻尼特性传递函数 $D_u$ 可以分别表示为:

$$M_u = (1 - \eta)T_J + M_w \quad (14)$$

$$D_u = (1 - \eta)D_m + K_L + D_w \quad (15)$$

式中: $T_J$ 、 $D_m$ 分别为系统内同步发电机的惯量、阻尼系数; $K_L$ 为负荷的频率调节系数; $\eta$ 为新能源渗透率,为风电装机量与系统装机总容量的比值; $M_w$ 和 $D_w$ 分别为风电机组的虚拟惯量和频率调节系数, LVRT 期间 $M_w$ 、 $D_w$ 恒定不变。

下文对含风电调速特性的调速器-原动机模型 $G_m(s)$ 进行推导。SFR 模型<sup>[26]</sup>,即经典 SFR 模型<sup>[29]</sup>,将调速器-原动机的传递函数 $G_m(s)$ 描述为:

$$G_m(s) = G_{\text{turb}}(s)G_{\text{gov}}(s) \quad (16)$$

$$G_{\text{turb}}(s) = \frac{K_m(1 + F_H T_R s)}{1 + T_R s} \quad (17)$$

$$G_{\text{gov}}(s) = \frac{1}{R} \quad (18)$$

式中: $G_{\text{turb}}(s)$ 为原动机传递函数; $G_{\text{gov}}(s)$ 为调速器传递函数; $F_H$ 为高压缸功率占比; $K_m$ 为机械功率增

益系数;  $R$  为调速器调差系数;  $T_R$  为原动机再热时间常数。

式(18)的缺点在于聚合调速器模型仅采用了描述静态特性的比例环节。为了描述调速器的动态过程,有必要对调速器传递函数进行适当改进。

需要指出的是,部分文献中水轮机模型为二阶振荡模型<sup>[35]</sup>,汽轮机为一阶惯性模型。但是,在频率暂态响应最低点时刻前后,SFR主要由惯量响应决定。因此,既要考虑调速器的动态过程,又要兼顾计算精度和效率。对于等值调速器动态模型而言,采用一阶惯性环节描述以满足实际的工程需求。

$$G_{\text{gov}}(s) = \frac{K_g}{T_g s + 1} \quad (19)$$

式中:  $K_g$  为调速器频率调节系数;  $T_g$  为调速器时间常数。

含风电场的电力系统频率-有功功率传递模型框图如图4所示,依照上文分析可推导出计及风电虚拟惯量控制和一次调频能力的系统频率-有功功率传递函数  $G_u(s)$ ,如式(20)所示。

$$G_u(s) = \frac{(M_u T_R T_g)s^3 + (M_u T_R + M_u T_g + D_u T_R T_g)s^2 + T_R T_g s^2 + (T_R + T_g)s + 1}{(M_u + D_u T_R + D_u T_R + K_g K_m F_H T_R)s + T_R T_g s^2 + (T_R + T_g)s + 1} + \frac{D_u + K_g K_m}{T_R T_g s^2 + (T_R + T_g)s + 1} \quad (20)$$

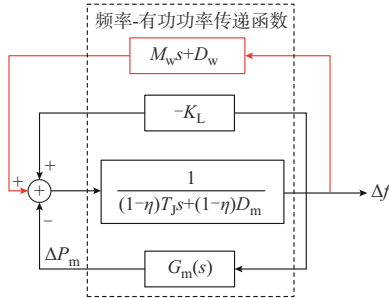


图4 含风电场的电力系统频率-有功功率传递模型框图  
Fig. 4 Block diagram of frequency-active power transfer model of power system with wind farm

由式(20)可知,  $G_u(s)$  分母为二阶多项式,分子为三阶多项式,可归纳为一般表示形式。取该一般形式的倒数,可得以功率扰动为输入的通用传递函数形式。

$$G(s) = \frac{1}{G_u(s)} = \frac{\Delta f(s)}{\Delta P_{\text{SADP}}(s)} = \frac{\sum_{\beta=0}^{I-1} b_{\beta} s^{I-1-\beta}}{\sum_{\beta=0}^I a_{\beta} s^{I-\beta}} \quad I=2 \quad (21)$$

式中:  $\Delta P_{\text{SADP}}(s)$  为 ASDP 函数;  $a_{\beta}$ 、 $b_{\beta}$  均为系数。

式(21)为 SFR 优化 (optimized SFR model, OSFR) 模型。由于该模型实际为存在 3 个极点和 2 个零点的传递函数形式,故也可称为 SFR 的三阶模型。

若要求解风电 LVRT 时的频率响应,将式(11)代入式(21),便可推导出频率偏差的解析式,可通过 MATLAB 求解时域表达式,绘制其曲线图像。

OSFR 模型充分考虑了风电机组接入电网时扰动功率的动态变化,具备一定的通用性和泛化能力,可以应用于不同情境和场景的电网频率响应刻画。由于不同工况下系统的动态响应存在差异,故模型参数在工况变化时可能不同。

## 4 SFR 的参数辨识与曲线拟合方法

### 4.1 基于差分进化算法的 OSFR 模型参数辨识

由于含新能源系统的频率响应模型存在非线性、复杂高维度的特点,传统算法将造成局部不收敛问题,从而影响精确性和快速性。本文采用差分进化 (differential evolution, DE)<sup>[36-39]</sup> 算法对式(21)的模型参数进行辨识。DE 算法的详细介绍见附录 B,其中,种群规模  $M$ 、变异因子  $F_{\text{va}}$ 、交叉因子  $F_{\text{cr}}$ 、迭代次数  $G$  统称为遗传算子 (genetic operator, GO)。

通过比较模型预测输出量  $\hat{y}(t)$  和仿真系统实测量  $y(t)$  之间的平方误差总和 (summation square error, SSE),定量评价不同迭代次数的拟合程度,即

$$e_{\text{ss}}^2 = \sum_{t=1}^G (\hat{y}(t) - y(t))^2 \quad (22)$$

SSE 曲线下下降快慢与 GO 大小、待辨识参数个数、输入与输出量的复杂程度有关。图5为 IEEE 39 节点系统参数辨识时的 SSE 曲线,算法验证见附录 B,待辨识参数共 6 个,  $M=40$ ,  $F_{\text{va}}=0.45$ ,  $F_{\text{cr}}=0.6$ ,  $G=300$ ,通过 300 次迭代,  $e_{\text{ss}}^2$  可减小至 0.651%。

### 4.2 频率响应拟合效果的量化评估

拟合效果的评价包括精确性和收敛快速性两方面。收敛快速性以 4.1 节中的 SSE 曲线下下降速度为参考。

精确性以相对误差率 (relative error rate, RER) 作为参考,评估频率特征量的拟合值与实际值之间的误差百分比。

$$\delta = |Y_{\text{sim}} - Y_{\text{fit}}| \times 100\% \quad (23)$$

式中:  $\delta$  为 RER;  $Y_{\text{sim}}$  为通过仿真或实际采样得到的频率特征量标么值;  $Y_{\text{fit}}$  为拟合求得的频率特征量标么值。特征量包括初始 RoCoF (故障发生后的 100 ms 时的取值)、最低点、稳态值等。

### 4.3 SFR 曲线快速拟合操作流程

SFR 曲线快速拟合流程如图6所示。

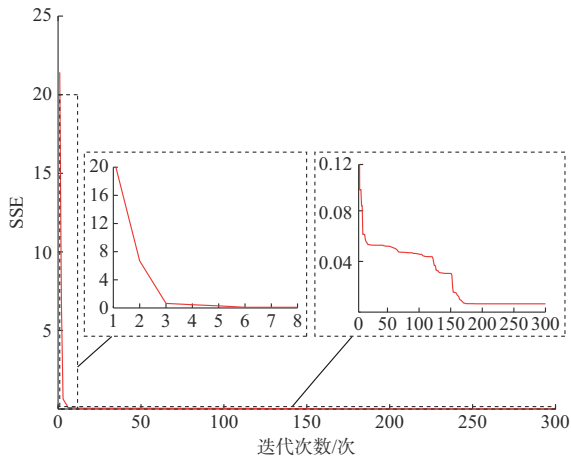


图5 DE算法参数辨识时的典型SSE曲线

Fig. 5 Typical SSE curves in parameter identification of DE algorithm

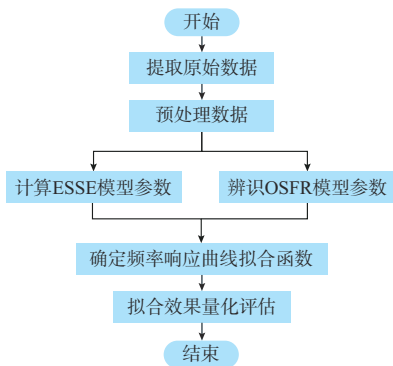


图6 SFR曲线快速拟合流程图

Fig. 6 Flow chart of rapid fitting of SFR curve

步骤1:原始数据提取。从电网调度控制系统中获取实际故障后风电场LVRT、SFR等数据。若实际案例较少,可采用商业仿真软件对某预想故障进行时域仿真,提取频率偏差曲线轨迹及采样数据、风电发生LVRT时输出的有功功率曲线及采样数据,输出该场景下各台风电单机的进入LVRT时间、LVRT结束时间、恢复速率。

步骤2:预处理数据。计算SADPL,并转化为标幺值。由于仿真或者测量的SADPL与频率偏差数据通常会掺杂较多噪声,可以利用局部加权回归分析法对输出的频率扰动数据进行滤波,剔除尖波和低频成分,使得数据平滑去噪。

步骤3:计算ESSE模型解析式。以各风机进入LVRT时间、LVRT结束时间、恢复速率、有功功率为数据,依据能量守恒原理计算出考虑功率恢复差异的单机等效模型参数。

步骤4:采用DE算法进行OSFR模型参数辨识。以SADPL数据为输入集,系统频率偏差数据为输出集,采用DE算法求得OSFR模型传递函数

的系数。

步骤5:确定频率响应曲线拟合函数。将步骤3中的ESSE模型解析式与步骤4中的OSFR模型参数相乘,可求出频率响应在对应频域下的拟合函数,并转化为时域曲线。

步骤6:拟合效果的量化评估。采用RER指标评估拟合的精确性和收敛的快速性。

## 5 仿真实验

采用含新能源的IEEE 10机39节点标准系统与某实际电网简化系统进行验证。接入新能源的处理方式为:将部分同步机置换为风电机组,采用双馈模型,配有LVRT控制和快速频率响应控制。负荷类型为90%恒阻抗+5%恒电流+5%恒功率,额定频率为50 Hz。系统详细拓扑图如附录C图C1和图C2所示。扰动均为发生在0s时的三相短路N-1故障(接地阻抗为0),故障在100 ms时切除。

### 5.1 SADPL解析模型适应性的验证

在10机39节点系统中设置3种不同场景下的SADPL曲线,并使用ESSE模型、单机倍乘模型以及忽略LVRT恢复特性的模型进行适应性对比。将系统接入的风电机组分为2组,依据表1方式改变风电机组LVRT有功恢复速率,选取3种场景进行验证。

表1 各场景的风电机组恢复速率大小对比  
Table 1 Comparison of recovery rates for wind turbines in different scenarios

场景序号	有功恢复速率变化(以初始为基准)/%	
	风电机组1	风电机组2
1	50	80
2	50	150
3	150	120

仿真结果如图7所示。从图中可以看出,在考虑风电机组LVRT有功恢复差异时,忽略风电LVRT恢复特性的模型及单机倍乘模型均存在较大误差。

而本文提出的ESSE模型,在3种场景中都能够准确地反映有功扰动功率的响应特性,与详细模型曲线相比,有较高的一致性和准确性。

以实际系统为例,ESSE模型曲线如图8所示。由于风电场站表现出差异化的LVRT机电暂态性质,详细模型的恢复阶段呈现多折线的特点,而新能源场站数越多,该折线越平滑,本文所提方法同样具有较高的精确性。

### 5.2 SFR估计效果验证

#### 5.2.1 不同频率响应模型对比

为了验证本文所提OSFR模型(三阶)在精度、

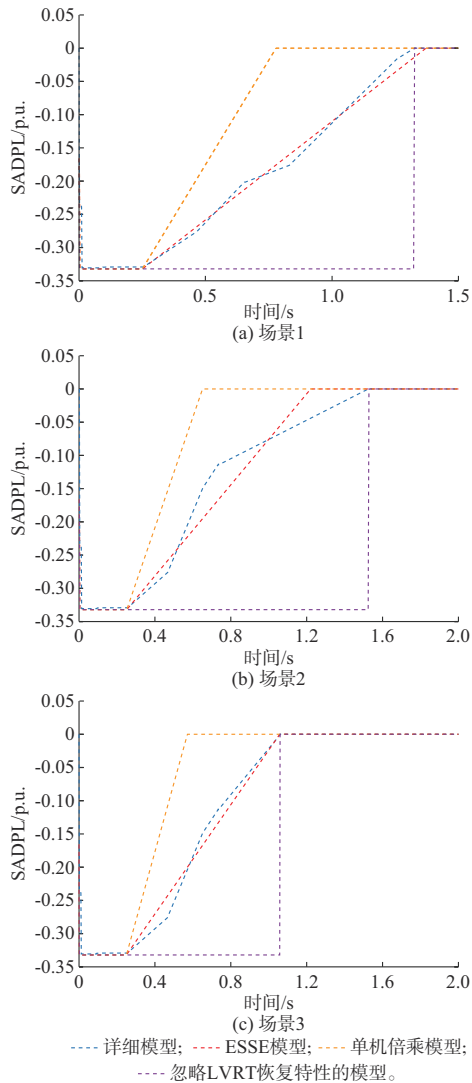


图7 不同风电机组恢复斜率下ESSE模型与详细模型的SADPL曲线对比  
 Fig. 7 Comparison of SADPL curves between ESSE model and detailed model with different wind turbine recovery slopes

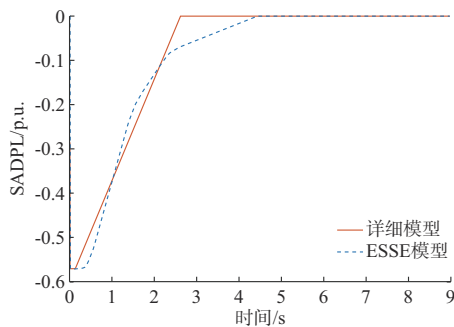


图8 实际电网简化系统下ESSE模型的SADPL曲线  
 Fig. 8 SADPL curves of ESSE model in simplified system for actual power grid

计算效率与收敛性能之间的平衡性及优势,在仿真算例中选取详细模型、经典SFR模型(二阶)和四阶

模型进行对比,结果如图9和表2所示。

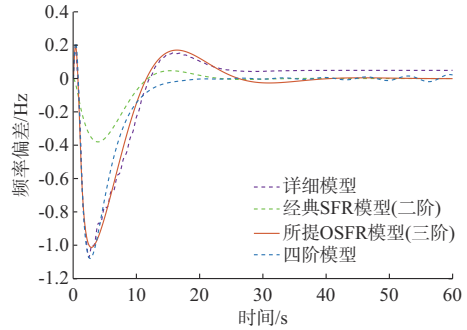


图9 不同SFR模型的频率偏差拟合曲线对比  
 Fig. 9 Comparison of frequency deviation fitting curves of different SFR models

表2 不同SFR模型的频率拟合相对误差对比  
 Table 2 Comparison of frequency fitting relative errors of different SFR models

模型	$\delta/\%$		
	初始RoCoF	最低点	稳态值
经典SFR模型	0.586	1.386	0.099
OSFR模型	0.111	0.120	0.098
四阶模型	0.029	0.014	0.098

经典SFR模型存在较大误差,原因在于其简化程度过高,忽略了很多系统内在的动态过程。而本文所提OSFR模型,考虑了风电的调频特性和虚拟惯量作用,能够在快速计算的同时保证较好的精度,动态响应表现优于二阶模型,满足工程应用需求。四阶模型虽然精度更高,如图10所示,虽然四阶模型的精度高,但在设置相同的GO情况下,四阶模型点速度小于三阶模型。

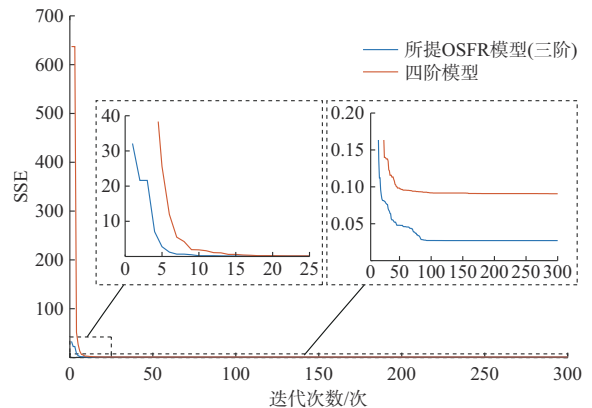


图10 三阶与四阶模型的计算收敛性对比  
 Fig. 10 Comparison of computational convergence of third- and fourth-order models

上述分析表明,四阶模型难以在计算复杂度和收敛性之间取得平衡,甚至可能由于模型过于复杂,引入不必要的计算误差。



### 5.2.2 不同 SADPL 模型输入下 SFR 估计效果

采用所提 OSFR 模型,以表 1 中场景 2 为例,对比了不同 SADPL 模型输入下 SFR 的估计效果,结果如图 11 所示,拟合相对误差如表 3 所示。

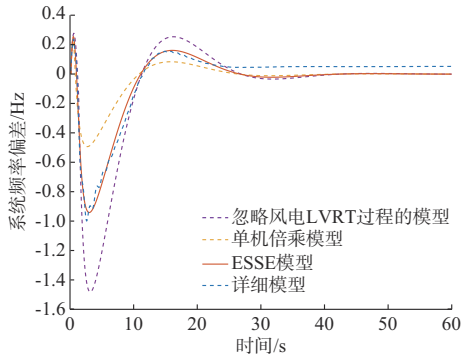


图 11 不同 SADPL 模型的频率偏差拟合曲线对比图  
Fig. 11 Comparison of frequency deviation fitting curves of different SADPL models

表 3 不同 SADPL 模型的频率拟合特性对比  
Table 3 Comparison of frequency fitting characteristics of different SADPL models

模型	$\delta/\%$		
	初始 RoCoF	最低点	稳态值
忽略 LVRT 恢复特性的模型	1.163	1.010	0.104
单机倍乘模型	0.699	0.967	0.104
ESSE 模型	0.389	0.113	0.103

由表 3 可见,ESSE 模型考虑了风电 LVRT 有功恢复差异的影响,能够较为精确地拟合详细模型的频率响应。实际电网的验证以图 8 中的 ESSE 曲线为输入,可以得到该场景下的频率响应估计,如图 12 所示,拟合效果较好。

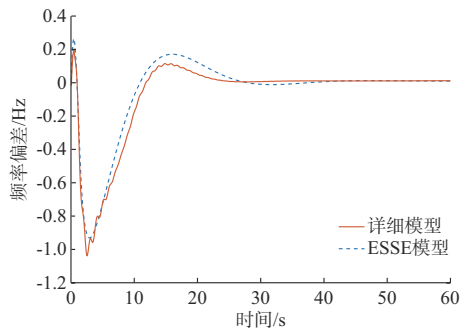


图 12 基于 ESSE 模型的某实际电网简化系统频率偏差曲线

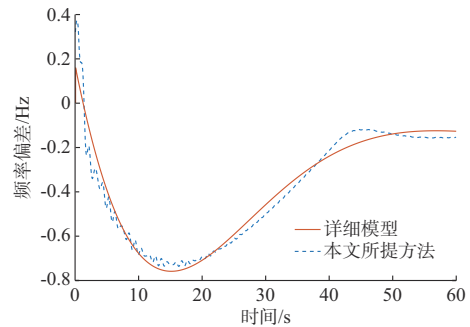
Fig. 12 Frequency deviation curve of simplified actual power grid based on ESSE model

### 5.3 风电 LVRT 与脱网共存场景下的电网频率响应估计

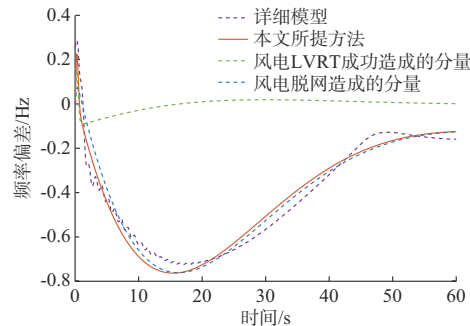
风电机组进入 LVRT 后可能出现各种复杂的动态行为,典型场景有 3 种:1)风电机组全部 LVRT

失败且脱网,可能引起频率迅速下降;2)部分机组 LVRT 成功,部分机组失败且脱网;3)风电机组全部 LVRT 成功。风电机组脱网将视为电网永久性有功阶跃扰动。

针对永久性有功扰动造成的 SFR,基于 IEEE 39 节点系统验证了发生故障后风电机组全部脱网后的频率响应的拟合情况,如图 13(a)所示。针对 LVRT 成功和脱网共存的场景,分别求出 LVRT 成功的机组等效的暂时性 SADPL 单机模型参数和脱网机组的有功扰动大小,再进行叠加,如图 13(b)所示。



(a) LVRT 失败脱网场景下的电网频率响应拟合



(b) LVRT 成功与脱网混合场景下的电网频率响应拟合

图 13 含风电脱网场景下的电网频率响应拟合  
Fig. 13 Grid frequency response fitting in scenarios with off-grid wind farms

上述场景的频率响应拟合误差分析见附录 C 表 C1,可见本文所提方法在风电 LVRT 与脱网共存场景下误差较小,具有较高的适应性。

## 6 结语

本文提出了一种考虑风电单机 LVRT 有功恢复差异的系统暂时性功率扰动估计方法,计及风电的调频特性和虚拟惯量作用,提出了适用于高比例新能源电网的 SFR 改进模型,实现了大扰动场景下计及风电场 LVRT 恢复差异的频率响应快速估计,相关结论如下。

1)针对风电机组 LVRT 过程引发的系统有功扰动功率无法用简洁拟合式表示的问题,本文考虑了 LVRT 有功恢复差异的特点,基于能量守恒原



则,将所有风电机组功率响应等效为单机扰动,实现海量风机同时进入LVRT时系统暂时性功率扰动的解析,为SFR拟合提供了基础;

2)提出了适用于高比例新能源电网的SFR改进模型。该模型充分考虑了同步机、风机、负荷等参与调频的影响,在计算快速性与准确性之间取得了平衡,相较于传统模型,更加适用于新能源LVRT场景下复杂频率响应的拟合;

3)本文所提频率响应估计是基于某一典型运行工况下进行的,当工况发生改变时,频率响应模型的参数可能发生变化。实际在线应用中,应预先对不同新能源发电下的运行工况进行分类,分别辨识其模型参数。当运行工况变化时,采用该工况对应的频率响应模型,给出预想故障下的频率响应估计,针对频率越限风险,应提前给出相应的控制措施;

在实际电网中,新能源LVRT机理往往更加复杂,其虚拟惯量与调频效应也并非保持定值。特别是在直流受端电网发生大型故障时,极有可能发生直流换相失败、新能源脱网与LVRT共存的现象,使频率拟合与估计更加复杂,需要进一步深入研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参 考 文 献

- [1] 鲁宗相,汤海雁,乔颖,等.电力电子接口对电力系统频率控制的影响综述[J].中国电力,2018,51(1):51-58.  
LU Zongxiang, TANG Haiyan, QIAO Ying, et al. The impact of power electronics interfaces on power system frequency control: a review[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 51-58.
- [2] 孙华东,王宝财,李文锋,等.高比例电力电子电力系统频率响应的惯量体系研究[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5179-5192.  
SUN Huadong, WANG Baocai, LI Wenfeng, et al. Research on inertia system of frequency response for power system with high penetration electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5179-5192.
- [3] 张剑云,李明节.新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(11):3498-3507.  
ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3507.
- [4] 高丙团,胡正阳,王伟胜,等.新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述[J/OL].中国电机工程学报[2023-05-01].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230530.1551.003.html>.  
GAO Bingtuan, HU Zhengyang, WANG Weishen, et al. Review on fast active power control and frequency support technologies of renewable energy stations[J/OL]. Proceedings of the CSEE [2023-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230530.1551.003.html>.
- [5] 张恒旭,李常刚,刘玉田,等.电力系统动态频率分析与应用研究综述[J].电工技术学报,2010,25(11):169-176.  
ZHANG Hengxu, LI Changgang, LIU Yutian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [6] 陈雪梅,陆超,韩英铎.电力系统频率问题浅析与频率特性研究综述[J].电力工程技术,2020,39(1):1-9.  
CHEN Xuemei, LU Chao, HAN Yingduo. Review of power system frequency problems and frequency dynamic characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 1-9.
- [7] 陈亦平,卓映君,刘映尚,等.高比例可再生能源电力系统的快速频率响应市场发展与建议[J].电力系统自动化,2021,45(10):174-183.  
CHEN Yiping, ZHUO Yingjun, LIU Yingshang, et al. Development and recommendation of fast frequency response market for power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 174-183.
- [8] 张兴,张龙云,杨淑英,等.风力发电低电压穿越技术综述[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(2):1-8.  
ZHANG Xing, ZHANG Longyun, YANG Shuying, et al. Low voltage ride-through technologies in wind turbine generation[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Its Automation, 2008, 20(2): 1-8.
- [9] 唐倩,沈旭,李圆智,等.电网低频减载技术及标准研究[J].电工技术,2021(23):46-48.  
TANG Qian, SHEN Xu, LI Yuanzhi, et al. Research on low-frequency load reduction technology and standard of the power grid[J]. Electric Engineering, 2021(23): 46-48.
- [10] 刘洋,王聪颖,夏德明,等.电网故障导致大面积风电低电压穿越对电网频率的影响分析及措施[J].电网技术,2021,45(9):3505-3514.  
LIU Yang, WANG Congying, XIA Deming, et al. Influence of large area wind power low voltage ride-through on power grid frequency caused by power grid faults[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3505-3514.
- [11] 孙华东,李佳豪,李文锋,等.大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(一):模型结构[J].中国电机工程学报,2023,43(4):1378-1389.  
SUN Huadong, LI Jiahao, LI Wenfeng, et al. Research on model structures and modeling methods of renewable energy station for large-scale power system simulation (part I): model structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1378-1389.
- [12] 贺益康,周鹏.变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J].电工技术学报,2009,24(9):140-146.  
HE Yikang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [13] 单佳航.风电低电压穿越稳定控制方法研究[D].杭州:浙江大学,2022.  
SHAN Jiahang. Research on low voltage ride through stability control method of wind turbine generators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [14] 张艳,魏慧慧.基于风力发电系统低电压穿越技术研究[J].电

- 气传动自动化,2023,45(2):11-15.
- ZHANG Yan, WEI Huihui. Research on low voltage ride-through technology based on wind power system [J]. Electric Drive Automation, 2023, 45(2): 11-15.
- [15] 齐金玲,李卫星,朱蒙,等.直驱风机低电压穿越行为对并网电压的影响及优化控制[J].电力系统自动化,2023,47(7):105-113.
- QI Jinling, LI Weixing, ZHU Meng, et al. Impact of low voltage ride-through behavior of direct-driven wind turbine on voltage of grid-connected point and optimal control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 105-113.
- [16] 操瑞发,朱武,涂祥存,等.双馈式风力发电系统低电压穿越技术分析[J].电网技术,2009,33(9):72-77.
- CAO Ruifa, ZHU Wu, TU Xiangcun, et al. Analysis on low voltage ride-through techniques for wind turbines using doubly-fed induction generator [J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 72-77.
- [17] 李鲁阳,王方政,陈磊,等.双馈风机对电网频率扰动的动态响应建模与分析[J].电力系统自动化,2024,48(9):75-85.
- LI Luyang, WANG Fangzheng, CHEN Lei, et al. Modeling and analysis of dynamic response to frequency disturbance in power grid from doubly-fed wind turbine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 75-85.
- [18] 何君毅,周瑀涵,王康,等.主导模式保持的风电场自适应等值方法[J].电力系统自动化,2021,45(11):28-36.
- HE Junyi, ZHOU Yuhan, WANG Kang, et al. Self-adaptive equivalence method for wind farm with maintained dominant mode [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 28-36.
- [19] 潘学萍,戚相威,梁伟,等.综合模型聚合和参数辨识的风电场多机等值及参数整体辨识[J].电力自动化设备,2022,42(1):124-132.
- PAN Xueping, QI Xiangwei, LIANG Wei, et al. Multi-machine equivalence and global identification of wind farms by combining model aggregation and parameter estimation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 124-132.
- [20] 周海强,崔晓丹,许剑冰,等.计及低电压穿越及故障全过程动态的双馈风电场等值方法[J].电力系统自动化,2024,48(6):216-225.
- ZHOU Haiqiang, CUI Xiaodan, XU Jianbing, et al. Equivalent method of DFIG-based wind farm considering low voltage ride-through and dynamics of entire fault process [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 216-225.
- [21] 吴磊,晁璞璞,李甘,等.数据-模型混合驱动的风电场聚合等值建模方法[J].电力系统自动化,2022,46(15):66-74.
- WU Lei, CHAO Pupu, LI Gan, et al. Hybrid data-model-driven aggregation equivalent modeling method for wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 66-74.
- [22] 晁璞璞,李卫星,金小明,等.基于有功响应的双馈型风电场实用化等值方法[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1639-1646.
- CHAO Pupu, LI Weixing, JIN Xiaoming, et al. An active power response based practical equivalent method for DFIG wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1639-1646.
- [23] 吴志鹏,裴建华,李银红.基于低电压穿越功率特性的双馈风电场多机等值方法[J].电力系统自动化,2022,46(19):95-103.
- WU Zhipeng, PEI Jianhua, LI Yinhong. Multi-machine equivalent method for DFIG-based wind farm based on power characteristic of low voltage ride-through [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 95-103.
- [24] 古庭赟,杨骐嘉,林呈辉,等.基于单机等值与选择模态分析的风电场等值建模方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(1):102-111.
- GU Tingyun, YANG Qijia, LIN Chenghui, et al. A wind farm equivalent modeling method based on single-machine equivalent modeling and selection modal analysis [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 102-111.
- [25] 周海强,鲁锦文,薛峰,等.计及风电综合惯性控制的电力系统扩展频率响应模型[J].电力系统自动化,2023,47(8):198-205.
- ZHOU Haiqiang, LU Jinwen, XUE Feng, et al. Extended frequency response model for power system considering wind power synthetic inertia control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 198-205.
- [26] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [27] 李东辉,臧晓明,鞠平,等.电力系统频率响应的改进模型与参数估计[J].电力工程技术,2019,38(5):85-90.
- LI Donghui, ZANG Xiaoming, JU Ping, et al. The improved model and parameter estimation for frequency response of power system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 85-90.
- [28] 龚浩岳,周勤勇,郭强,等.高比例新能源接入场景电力系统频率分析模型改进与应用[J].电网技术,2021,45(12):4603-4612.
- GONG Haoyue, ZHOU Qinyong, GUO Qiang, et al. Improvement and application of frequency analysis modules for power system in high proportion of renewable energy situation [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4603-4612.
- [29] HUANG H, JU P, JIN Y, et al. Generic system frequency response model for power grids with different generations [J]. IEEE Access, 2020, 8: 14314-14321.
- [30] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.风电场接入电力系统技术规定 第1部分:陆上风电:GB/T 19963.1—2021 [S].北京:中国标准出版社,2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical specification for connecting wind farm to power system Part 1: on shore wind power: GB/T 19963.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [31] CHENG H, LI W, QIE Z H, et al. Grid frequency trajectory fitting under transient power impact caused by highly proportional wind power fault ride [C]// 2023 IEEE International Conference on Power Science and Technology (ICPST), May 5-7, 2023, Kunming, China: 108-116.
- [32] 孙华东,李佳豪,李文锋,等.大规模电力系统仿真用新能源场站模型结构及建模方法研究(二):机电暂态模型[J].中国电机工程学报,2023,43(6):2190-2202.
- SUN Huadong, LI Jiahao, LI Wenfeng, et al. Research on model structures and modeling methods of renewable energy station for large-scale power system simulation ( II ): electromechanical transient model [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2190-2202.

- [33] 姜超,蔡国伟,杨冬锋,等.基于双馈风电机组频率响应解析模型的系统低频减载策略[J].电力系统自动化,2023,47(21):108-118.  
JIANG Chao, CAI Guowei, YANG Dongfeng, et al. Under-frequency load shedding strategy for power system based on analytical frequency response model of doubly-fed wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 108-118.
- [34] 李少林,王伟胜,张兴,等.风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J].电力系统自动化,2019,43(15):64-70.  
LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 64-70.
- [35] 杜亚伟,王青,江长明,等.发电机典型调速器模型结构和一次调频特性比较[J].水电能源科学,2017,35(7):163-167.  
DU Yawei, WANG Qing, JIANG Changming, et al. Comparison of typical speed governor model with power system primary frequency characteristics [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(7): 163-167.
- [36] CAI H R, CHUNG C Y, WONG K P. Application of differential evolution algorithm for transient stability constrained optimal power flow [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 719-728.
- [37] STORN R, PRICE K. Differential evolution: a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [38] Qing A. Differential evolution: fundamentals and applications in electrical engineering [EB/OL]. [2023-07-01]. <https://ieeexplore.ieee.org/book/5361052>.
- [39] 刘金琨,沈晓蓉,赵龙.系统辨识理论及MATLAB仿真[M].2版.北京:电子工业出版社,2020.  
LIU Jinkun, SHEN Xiaorong, ZHAO Long. System identification theory and MATLAB simulation [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.
- 程昊(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源电力系统安全稳定控制。E-mail:halcyon\_c4559@163.com  
吕亚洲(1988—),男,通信作者,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail:lvyazhou@sgepri.sgcc.com.cn  
李威(1976—),男,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail:liweil0@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 冯慧敏)

## Frequency Response Estimation Method Considering Low Voltage Ride-through Recovery Difference of Wind Farms Under Large Disturbance

CHENG Hao<sup>1</sup>, LYU Yazhou<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, LIU Fusuo<sup>1</sup>, LAI Yening<sup>1</sup>, ZHANG Yudong<sup>2</sup>

(1. NARI Nanjing Control Systems Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** With the increasing penetration rate of the wind power, multiple wind farms entering into the low voltage ride-through (LVRT) at the same time will bring significant impacts to the power system, resulting in temporary drop in active power output, rapid drop in power grid frequency and even the risk of triggering under-frequency load shedding. It is necessary to quickly estimate the frequency curve of the power grid under the temporary power disturbances to develop corresponding control measures. However, due to the difference in power recovery within wind farms, LVRT curves present different shapes. If this impact is ignored, there will be significant estimation errors in the frequency response curve, and traditional time-domain simulation based on detailed model has low efficiency. Hence, a disturbance power analysis method considering LVRT recovery difference of wind farms is proposed. The active power disturbances caused by single-unit wind turbine at each stage of LVRT are described by segment functions, and the total temporary disturbance power of the system is accurately estimated based on energy conservation principle. Considering the frequency regulation characteristics of the wind farm and the virtual inertia effect, an optimized model for system frequency response suitable for power grids with high-proportion renewable energy is proposed. The differential evolution algorithm is used to identify the parameters of the system transfer function based on actual data, and then the frequency response trajectory is fitted. The applicability and reliability of the proposed method in different scenarios are verified by the simulation of IEEE 39-bus system and simplified system for actual power grid.

This work is supported by Southwest Branch of State Grid Corporation of China (No. SGSW0000DKJS2310035).

**Key words:** low voltage ride-through; disturbance power; energy conservation; parameter identification; frequency response estimation

