

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240104

# 计及电流限幅的构网型双馈风机暂态模型建模及适用性分析

王耀函<sup>1</sup>, 张扬帆<sup>1</sup>, 蔡光<sup>2</sup>, 梁恺<sup>1</sup>, 付雪姣<sup>1</sup>, 张书瑞<sup>2</sup>

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100034; 2. 河北省分布式储能与微网重点实验室  
(华北电力大学), 河北 保定 071003)

**摘要:** 在构网型双馈风机(grid-forming doubly-fed induction generator, GFM-DFIG)暂态研究过程中, 通常保留时间尺度较大的同步控制及外环控制环节进行暂态建模。为了适用于暂态能量函数法等传统暂态稳定分析方法, 需要忽略暂态变化过程中外环的积分环节动态, 进一步降为二阶模型, 如此会带来一定的误差。针对忽略积分动态带来的误差问题, 建立了考虑电流限幅环节的 GFM-DFIG 二阶暂态模型, 通过暂态能量函数法计算暂态极限电压(transient stability limit voltage, TSLV)和极限切除时间(critical clear time, CCT)。然后, 基于以上指标分析忽略积分动态对二阶暂态模型的误差影响。最后, 将二阶系统与全阶模型仿真结果进行误差对比, 基于 CCT 误差开展定量分析, 揭示系统参数对相对误差的影响规律, 并总结二阶模型的适用性范围。

**关键词:** 构网型双馈风机; 电流限幅; 暂态建模; 暂态稳定分析; 误差分析

## Transient modeling and applicability analysis of a grid-forming doubly-fed induction generator taking into account current limitation

WANG Yaohan<sup>1</sup>, ZHANG Yangfan<sup>1</sup>, CAI Guang<sup>2</sup>, LIANG Kai<sup>1</sup>, FU Xuejiao<sup>1</sup>, ZHANG Shurui<sup>2</sup>

(1. State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100034, China; 2. Hebei Provincial Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

**Abstract:** In the study of transients in a grid-forming doubly-fed induction generator (GFM-DFIG), synchronous control and outer loop control over a large time scale are usually retained for transient modeling. To be suitable for the traditional transient stability analysis methods such as the transient energy function method, it is necessary to ignore the dynamic of the integral links of the external ring during the transient change process and to further reduce to the second-order model. This will create some errors. To solve the error problem caused by ignoring integral dynamics, a second order transient model of a GFM-DFIG considering current limiting is established. The transient energy function method is used to calculate the transient limiting voltage (TSLV) and critical clear time (CCT). Then, based on the above indices, the influence of integral dynamics on the error of the second-order transient model is ignored. Finally, an error comparison is made between the simulation results of the second-order system and the full-order model, and quantitative analysis is carried out based on the CCT error to reveal the influence law of system parameters on the relative error, and the applicability range of the second-order model is summarized.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 4000-202414073A-1-1-ZN).

**Key words:** GFM-DFIG; current limitation; transient modeling; transient stability analysis; error analysis

## 0 引言

随着“双碳”政策大力推进, 可再生能源发电

领域快速发展<sup>[1-2]</sup>, 新能源电力电子装备接入电网比例大幅提高<sup>[3]</sup>, 在“双高”背景下, 电力系统呈现“弱阻尼、低惯量”特征<sup>[4-6]</sup>, 电网的运行稳定将面临多重挑战。我国大规模新能源基地经直流输电线路远距离送出, 形成了高比例新能源电力系统和弱电网并网场景。风力发电作为可再生能源发电的主

基金项目: 国家电网总部科技项目资助(4000-202414073A-1-1-ZN)

力发电形式之一, 风力发电占总装机容量的 14.3%, 其稳定性问题备受关注。传统锁相环型双馈风电机组无法主动提供电压、频率支撑, 不利于电网的稳定运行, 而构网型双馈风电机组(grid-forming doubly-fed induction generator, GFM-DFIG)利用虚拟同步机(virtual synchronous generator, VSG)技术<sup>[7-9]</sup>, 模拟同步机运动方程, 拥有惯量、阻尼等输出特性, 从而提升并网系统的暂态同步稳定性。

为了研究包括构网型双馈风机等构网型设备的暂态稳定性, 通常会采用等面积法(extended equal area criterion, EAC)<sup>[10]</sup>、暂态能量函数法(transient energy function, TEF)等暂态稳定分析方法<sup>[11-12]</sup>。文献[13-14]利用等面积法对电流饱和的下垂控制并网变换器<sup>[15]</sup>进行研究, 揭示了暂态稳定机理; 文献[16]从能量角度定性分析了虚拟惯量和阻尼参数对虚拟同步机暂态同步稳定性的影响。

若要利用 EAC 和 TEF 开展稳定性分析, 则需要对高阶、非线性、强耦合的全阶模型进行降阶处理<sup>[17]</sup>, 建立对应的二阶暂态模型<sup>[18]</sup>。此类二阶模型通常以保留锁相环、功率同步环等二阶相位同步环节为主, 来分析电力电子设备的暂态同步稳定性。在这一降阶过程中, 由于电流内环的控制响应速度较快, 电流环的忽略对系统整体暂态特性影响较小, 然而电压/功率外环的控制响应速度相对较慢, 与相位同步环节的控制时间尺度相近, 这就意味着忽略电压环积分环节肯定会引入一定误差。

同时, 为考虑变流器设备的过流耐受性, 通常会加入电流限幅环节<sup>[19-22]</sup>。因此构网型设备大扰动暂态同步失稳通常伴随着设备电流达到控制限幅, 此时以等面积法分析的角度来看, 设备无法进一步减少加速面积或增加减速面积, 从而降低了构网型设备的极限暂态稳定裕度。

当电流达到限幅时, 外环积分环节失去作用, 此时可以将构网型设备看作以相位同步环节为主的二阶模型。如文献[23]在分析暂态稳定时将研究对象转变为电流限幅的电流源进行分析, 忽略电压外环的动态影响, 保留虚拟转子运动方程二阶系统, 以方便采用等面积法、暂态能量函数法等经典大扰动暂态分析方法研究构网设备的暂态稳定性。然而, 在故障发生时, 构网型设备的电流并非直接达到限幅, 达到限幅前的动态特性也会受到积分环节的影响, 因此需要考虑电流是否限幅, 对比有无积分的影响。

除了外环积分带来的误差外, 二阶模型的虚拟惯量、虚拟阻尼、电压外环比例系数、电网阻抗、机侧变流器额定电流系数等参数对模型误差的影响也应纳入考虑范围内。因此, 本文建立 GFM-DFIG

二阶暂态模型, 并根据二阶暂态模型建立相应的暂态能量函数, 计算暂态极限电压(transient stability limit voltage, TSLV)、极限切除时间(critical clear time, CCT)等暂态稳定指标。然后, 基于以上指标与考虑外环积分的四阶模型进行对比, 分析外环积分环节对 GFM-DFIG 暂态特性的影响。最后, 针对二阶模型各参数开展关于 CCT 的定量分析, 基于二阶模型定量分析结果和 GFM-DFIG 全阶模型仿真实验, 得到全阶模型 CCT 的定量分析结果, 揭示各参数对 GFM-DFIG 暂态稳定以及二阶模型误差的影响规律, 得到 GFM-DFIG 二阶模型的适用性边界。

## 1 构网型双馈风机降阶模型

### 1.1 构网型双馈风机原始模型

本文选取构网型双馈风机作为研究对象, 其整体电气结构和控制策略如图 1 所示。

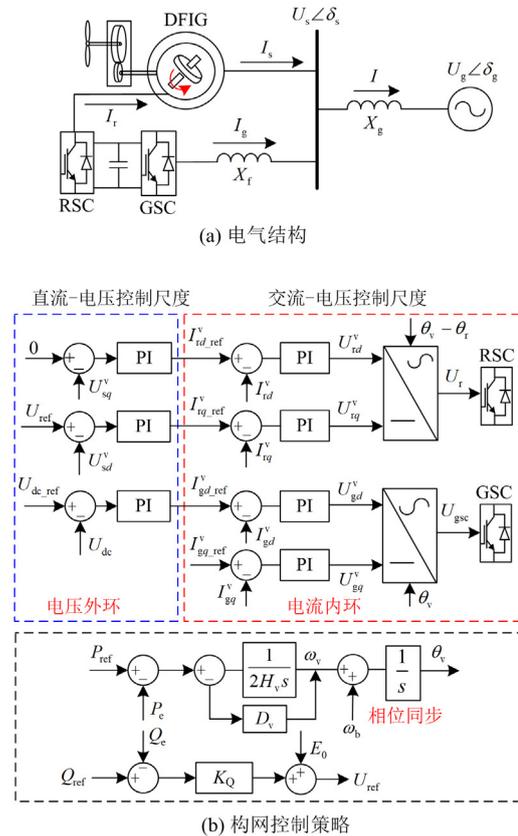


图 1 双馈风机电气结构与构网控制策略

Fig. 1 Electrical structure and control strategy of GFM-DFIG

图中:  $I$ 、 $I_s$ 、 $I_r$  分别为机端、定子、转子电流;  $X_r$  为滤波电抗;  $X_g$  为并网电抗;  $U_s \angle \delta_s$  为机端电压;  $U_g \angle \delta_g$  为电网电压;  $U_{sd}^v$ 、 $U_{sq}^v$  分别为控制器  $dq$  坐标系下的机端电压  $d$ 、 $q$  轴分量, 变量上标

v 表示该变量在控制器 dq 坐标系下, 下同;  $I_{rd}^v$ 、 $I_{rq}^v$  分别为控制器 dq 坐标系下的转子电流 d、q 轴分量,  $I_{rd\_ref}^v$ 、 $I_{rq\_ref}^v$  分别为其参考值;  $U_{rd}^v$ 、 $U_{rq}^v$  分别为转子电压 d、q 轴分量;  $U_{dc}$  为直流母线电压;  $I_{gd}^v$ 、 $I_{gq}^v$  分别为网侧变流器电流 d、q 轴分量,  $I_{gd\_ref}^v$ 、 $I_{gq\_ref}^v$  分别为其参考值;  $P_{ref}$ 、 $Q_{ref}$  分别为有功、无功参考值;  $H_v$  为虚拟惯量;  $D_v$  为虚拟阻尼;  $\omega_b$  为同步转速基准值;  $\omega_v$  为虚拟同步转速;  $\theta_v$  为虚拟同步相位;  $K_Q$  为虚拟励磁系数。

根据双馈风机各物理环节响应快慢以及相应控制环节带宽大小的层级差异<sup>[24]</sup>, 可将图 1(b)中所示的电压外环、电流内环分为机电、电磁尺度<sup>[25-26]</sup>。

### 1.2 构网型双馈风机降阶暂态拓扑

本文针对系统机电暂态过程展开分析, 忽略相对较快的电磁尺度控制动态, 建立构网型双馈风机电机尺度简化暂态模型。

本文建模过程中所采用的具体假设条件如下:

- 1) 因电磁时间尺度与本文关注的机电时间尺度相差较大<sup>[25]</sup>, 所以忽略电流内环动态, 认为输出电流快速跟踪电压外环指令值。
- 2) 因重点关注双馈风机暂态同步外特性, 所以保留相位同步环节, 忽略风力机、发电机等轴系动态。
- 3) 因最大功率点跟踪产生转子转速指令之后的低通滤波器时间常数较大, 所以近似认为转子转速不变。
- 4) 因网侧变换器相对于机侧变换器动态较小, 所以忽略网侧变流器动态。
- 5) 因电阻值远小于感抗值, 所以忽略电阻损耗。

经过以上假设, 得到如图 2 所示的等效机电暂态拓扑。

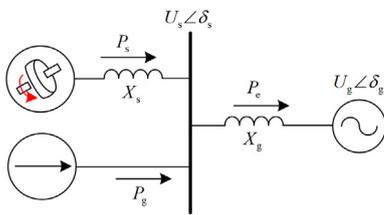


图 2 双馈风机典型机电暂态拓扑

Fig. 2 Typical electromechanical transient topology of GFM-DFIG

在该拓扑下, 忽略电阻和电感微分项, 在电网电压  $U_g$  定向坐标系下, 构网型双馈风机并网电压方程可以表示为

$$\begin{cases} U_{gd,gg} = U_{sd,sq} \mp X_g I_{d,q} \\ I_{d,q} = I_{sd,sq} + I_{gd,gg} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_{gd}$ 、 $U_{gq}$  分别为电网电压 d、q 轴分量;  $U_{sd}$ 、 $U_{sq}$  分别为机端电压 d、q 轴分量;  $I_d$ 、 $I_q$  分别为机端电流的 d、q 轴分量;  $I_{sd}$ 、 $I_{sq}$  分别为定子电流的 d、q 轴分量;  $I_{gd}$ 、 $I_{gq}$  分别为网侧变流器电流的 d、q 轴分量。

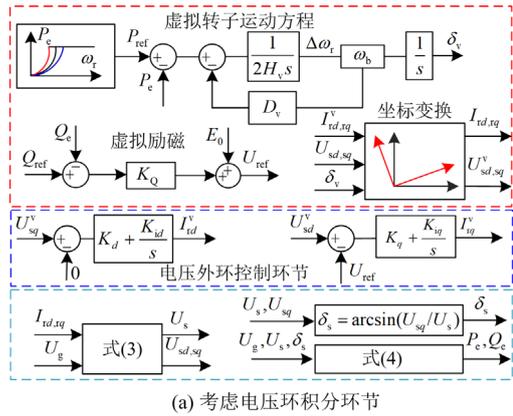
双馈异步电机的电压方程为

$$\begin{cases} U_{sd} = -X_m I_{rq} - X_s I_{sd} \\ U_{sq} = X_m I_{rd} + X_s I_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

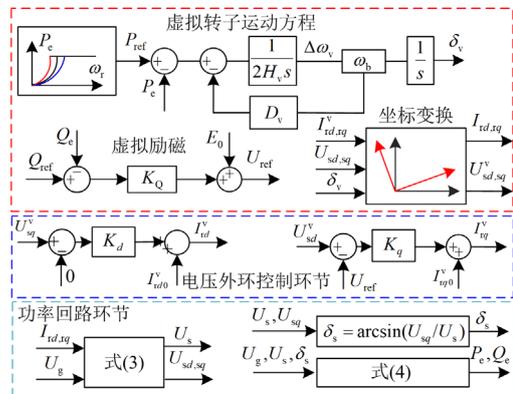
式中:  $X_s$ 、 $X_m$  分别为定子电抗和互感电抗;  $I_{rd}$ 、 $I_{rq}$  分别为转子电流的 d、q 轴分量。

### 1.3 GFM-DFIG 二阶及四阶暂态模型

经过 1.2 节的降阶假设, 得到如图 3 所示的 GFM-DFIG 暂态模型。根据是否忽略外环积分动态, 可分为如图 3(a)所示的保留外环完整动态特性的四阶模型以及如图 3(b)所示的将积分环节替换为当前转子电



(a) 考虑电压环积分环节



(b) 不考虑电压环积分环节

图 3 GFM-DFIG 暂态模型

Fig. 3 GFM-DFIG transient model

流稳态值, 仅保留外环比例环节动态的二阶模型。

图3中式(3)和式(4)分别为

$$\begin{cases} U_{sd} = \frac{X_s U_{gd} - \omega_r X_g X_m I_{rq}}{X_s + \omega_r X_g} \\ U_{sq} = \frac{X_s U_{gq} + \omega_r X_g X_m I_{rd}}{X_s + \omega_r X_g} \\ U_s = \sqrt{U_{sd}^2 + U_{sq}^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_e = \frac{U_g U_s}{X_g} \sin \delta_s \\ Q_e = \frac{U_s^2}{X_g} - \frac{U_g U_s}{X_g} \cos \delta_s \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\omega_s$  为电网同步转速;  $\omega_r$  为风机转速;  $s$  为转差率,  $s = (\omega_s - \omega_r) / \omega_s$ ;  $P_e$ 、 $Q_e$  分别为有功功率和无功功率;  $\delta_s$  为机端功角,  $\delta_s = \arcsin(U_{sq} / U_s)$ 。

由于功率同步环节动态响应, 风机并网系统存在两个  $dq$  坐标系, 电网同步  $dq$  坐标系以及虚拟同步  $dq$  坐标系。在功率同步环节收敛至稳态之前, 虚拟同步相位  $\theta_v$  与电网同步相位  $\theta_g$  存在偏差, 即  $\theta_v = \theta_g - \delta_v$ ,  $\delta_v$  定义为虚拟功角。

虚拟功角  $\delta_v$  可通过参考有功功率  $P_{ref}$  和有功功率  $P_e$  构成的虚拟转子运动方程获得。

$$\begin{cases} 2H_v \frac{d\Delta\omega_v}{dt} = P_{ref} - P_e - D_v \Delta\omega_v \\ \frac{d\delta_v}{dt} = \Delta\omega_v \omega_b \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\Delta\omega_v$  为虚拟同步转速偏差。

另外, 电网同步  $dq$  坐标系与虚拟同步  $dq$  坐标系两个坐标系的变换关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} T_d^v \\ T_q^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_v & \sin \delta_v \\ -\sin \delta_v & \cos \delta_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_d \\ T_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $T$  为电压、电流等变量。

#### 1.4 模型验证

采用仿真来验证 GFM-DFIG 降阶模型对其暂态特性的保留程度。在  $t = 1\text{s}$  时, 电网电压跌落至  $0.6\text{ p.u.}$ , 在  $1.2\text{ s}$  时结束电压跌落, 并绘制出电磁功率  $P_e$  和虚拟功角  $\delta_v$  偏差响应图, 如图4所示。

从图4可得, 虽然二阶模型很好地保留了全阶模型的暂态特性, 但是由于二阶模型忽略网侧变流器和直流母线的动态特性, 导致与全阶模型存在一定的误差, 本文将针对二阶模型进行误差和适用性边界分析。

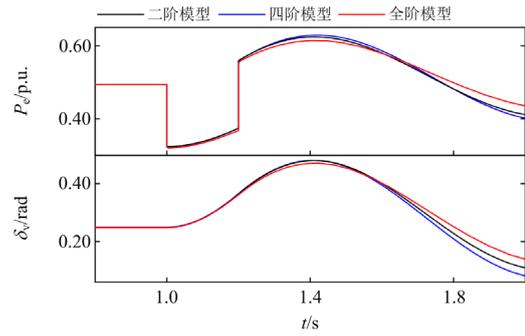


图4 暂态特性对比

Fig. 4 Comparison of transient characteristics

## 2 构网型双馈风机暂态稳定评估

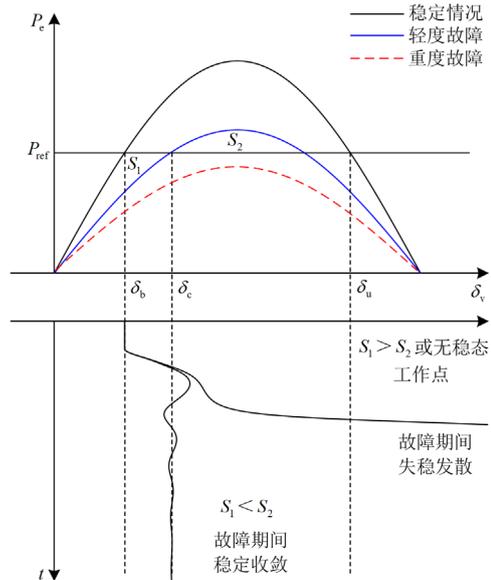
### 2.1 基于 EAC 的暂态失稳机理初步分析

由于 GFM-DFIG 的功角同步方式与同步机类似, 可以沿用图5所示等面积法揭示其暂态失稳机理<sup>[27-28]</sup>。

若发生严重电压故障, GFM-DFIG 功角曲线形态发生改变, 导致功角曲线位于参考功率之下, 与参考功率之间不存在稳态工作点, 虚拟功角则会在故障期间不断加速直至暂态失稳。

当存在稳态工作点时, 若故障期间的加速面积  $S_1$  大于减速面积  $S_2$ , 虚拟功角会越过不稳定点  $\delta_u$ , 依旧会引发暂态失稳; 当  $S_1$  小于  $S_2$  时, 系统才能够过渡到新的稳态工作点, 保持暂态同步稳定。

故障结束后, 若故障期间的加速面积大于故障结束后的减速面积, GFM-DFIG 依旧面临暂态失稳风险。



(a) 故障期间失稳机理

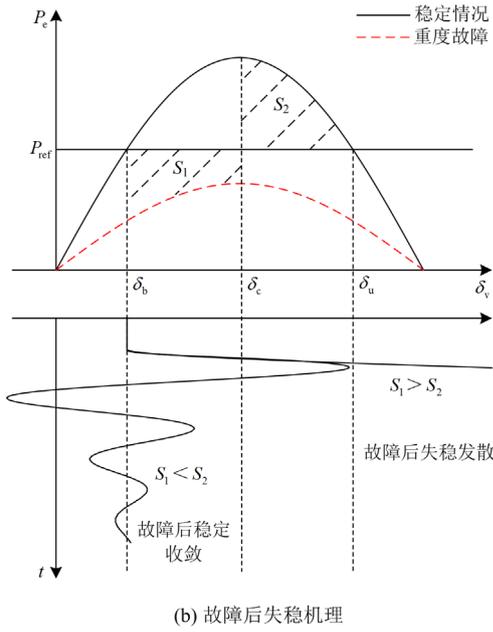


图 5 基于等面积法的暂态失稳机理

Fig. 5 Transient instability mechanism based on the equal area method

### 2.2 暂态能量函数构建及非线性阻尼近似拟合

为了更好地研究 GFM-DFIG 暂态过程中的稳定性问题,对构建的 GFM-DFIG 二阶暂态模型进行首次积分,得到暂态同步能量函数为

$$V(\delta_v, \Delta\omega_v) = H_v \omega_b \Delta\omega_v^2 + \int_{\delta_b}^{\delta_v} (P_e - P_{ref}) d\delta_v = V_k(\Delta\omega_v) + V_p(\delta_v) \quad (7)$$

式中:  $V_k$  为系统动能;  $V_p$  为系统势能;  $(\delta_v = \delta_b, \Delta\omega_v = 0)$  是系统稳定平衡点。

为准确计算 GFM-DFIG 的暂态能量函数,需要刻画出  $P_e$  关于虚拟功角  $\delta_v$  的函数关系,结合图 3(b) 中所示外环控制和式(3)、式(6),并考虑转子电流限幅可得

$$\begin{cases} I_{rd}^v = \min \left\{ \frac{K_1 U_g \sin \delta_v + X_3 I_{rd0}^v}{X_1}, \sqrt{I_{r \max}^2 - I_{rq}^v} \right\} \\ I_{rq}^v = \max \left\{ \frac{K_2 U_g \cos \delta_v - K_3 U_{ref} + X_3 I_{rq0}^v}{X_2}, -I_{r \max} \right\} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $K_1 = K_d X_s$ ,  $K_2 = K_q X_s$ ,  $K_3 = K_q (X_s + \omega_r X_g)$ ;  $X_1 = \omega_r K_d X_g X_m + X_s + \omega_r X_g$ ,  $X_2 = \omega_r K_q X_g X_m + X_s + \omega_r X_g$ ,  $X_3 = X_s + \omega_r X_g$ ;  $\omega_r = (1-s)\omega_s$ ;  $I_{rd0}^v$  和  $I_{rq0}^v$  分别为转子电流  $d$ 、 $q$  轴分量初值;  $I_{r \max}$  为机侧变流器电流限幅值。式(8)经过式(6)坐标变换后,得

到  $I_{rd}^v$  和  $I_{rq}^v$ , 代入式(3)后得到机端电压  $U_s$  和机端功角  $\delta_s$ 。

$$U_s = \sqrt{\left( \frac{X_s U_g - \omega_r X_g X_m I_{rq}^v}{X_s + \omega_r X_g} \right)^2 + \left( \frac{\omega_r X_g X_m I_{rd}^v}{X_s + \omega_r X_g} \right)^2} \quad (9)$$

$$\delta_s = \arcsin \frac{\omega_r X_g X_m I_{rd}^v}{U_s (X_s + \omega_r X_g)} \quad (10)$$

将  $U_s$  和  $\delta_s$  代入式(4)后,最终得到 GFM-DFIG 虚拟功角方程  $P_e(\delta_v)$ , 将其代入到式(7)能够得到对应的暂态同步能量函数。

考虑电流限幅后的 GFM-DFIG 功角曲线如图 6 黑色曲线所示,基于稳态工作点  $\delta_b$  的系统势能曲线如图 6 红色曲线所示。

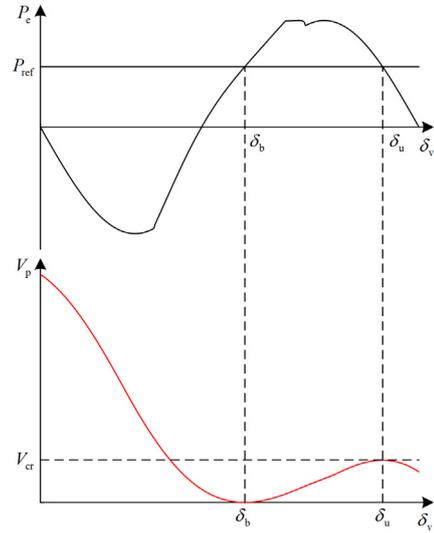


图 6 虚拟功角曲线  $P_e(\delta_v)$  及系统势能  $V_p$

Fig. 6 Virtual power angle curve  $P_e(\delta_v)$  and the system potential energy  $V_p$

暂态能量函数法在数学层面上等价于等面积法<sup>[27]</sup>,系统动能  $V_k$  等价于加速面积,  $V_{cr}$  为系统临界能量,与不稳定点  $\delta_u$  相对应,当  $V$  大于  $V_{cr}$  时,系统暂态失稳,  $V_{cr} - V_k$  等价于减速面积。

为了提升暂态能量函数计算精度,计及功角同步环节的阻尼项,并对故障穿越后的非线性阻尼项进行几何近似处理,如图 7 所示。

计及阻尼项后的加速面积依旧与  $V_k$  等价,而减速面积及其剩余势能  $V_{prd}$  可表示为

$$S_2 = V_{prd} = \int_{\delta_b}^{\delta_u} (P_e - P_{ref}) d\delta_v + \frac{1}{2} D_v \Delta\omega_v (\delta_u - \delta_v) \quad (11)$$

若故障期间,  $V_k$  始终小于  $V_{prd}$ , 则构网型双馈风机能够稳定在新的稳定工作点,反之则暂态失稳。

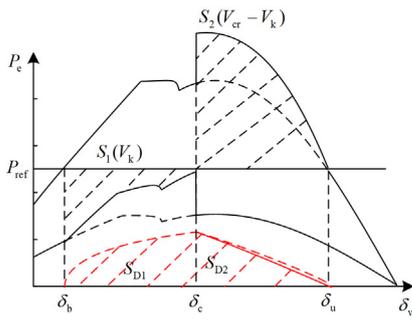


图 7 虚拟功角曲线  $P_e(\delta_v)$

Fig. 7 Virtual power angle curve  $P_e(\delta_v)$

能够使系统在永久故障期间保持暂态稳定的最低故障电压可定义为暂态极限电压(transient stability limit voltage, TSLV)。若故障后存在某一时刻  $V_k = V_{prd}$ ，则需要切除故障，若晚于该时刻，故障结束后依旧会暂态失稳，该时刻可定义为极限切除时间(critical clear time, CCT)。

在后续的研究中将结合这两项指标对 GFM-DFIG 二阶模型暂态特性及适用性进行分析。

### 3 电压外环积分环节对 GFM-DFIG 暂态稳定误差的影响

本节基于图 3 所示的二阶和四阶模型，探究计及电流限幅下电压外环积分对暂态特性的影响。

首先，将  $d$  轴电压外环积分系数  $K_{id}$  和  $q$  轴电压外环积分系数  $K_{iq}$  统一定义为  $K_i$ ，即  $K_i = K_{id} = K_{iq}$ 。然后，设置电压外环积分系数  $K_i$  分别为 0、0.3、0.7，并基于表 1 参数开展仿真分析。

表 1 GFM-DFIG 基本参数

Table 1 Basic parameters of GFM-DFIG

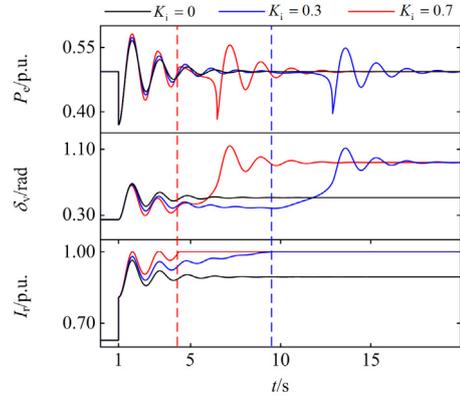
参数	数值	参数	数值
$X_s$ /p.u.	3.08	$H_v$	4.00
$X_m$ /p.u.	2.90	$D_v$	10.0
$X_g$ /p.u.	0.50	$K_d$	0.50
$I_{rmax}$ /p.u.	1.00	$K_q$	2.00

下面针对以下 2 种场景展开分析。

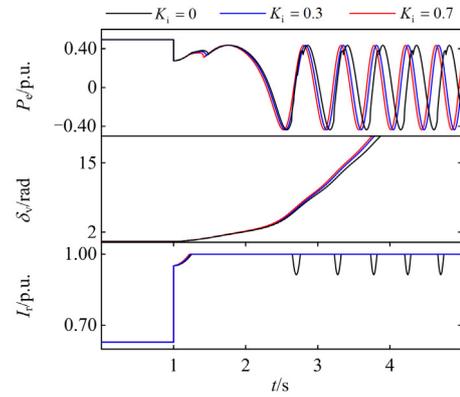
场景一：永久电压跌落故障，其仿真波形如图 8 所示。

图 8(a)中，在轻度电压跌落条件下，若无积分环节，转子电流无需达到限幅即可过渡到新的稳定工作点。若存在积分环节，则会在外环电压偏差的驱动下，最终使转子电流到达限幅，虽然仍然能够保持暂态稳定，但最终的稳定工作点与无积分状态不同，其虚拟功角最终的稳态值也不同。

图 8(b)中，在中度电压跌落下，无论积分环节是否存在，转子电流最终都达到了限幅，并且其功角失稳过程中前几次摆动的动态特性十分接近。



(a)  $U_g$  跌落至 0.7 p.u.



(b)  $U_g$  跌落至 0.5 p.u.

图 8 永久电压跌落故障仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform of the permanent voltage drop fault

通过 2.2 节所介绍方法，可计算得到二阶模型对应的 TSLV 为 0.5833 p.u.，并且如图 9 所示，二阶模型( $K_i = 0$ )可以在  $U_g$  跌落至 0.5833 p.u.时能够一直保持暂态稳定，而考虑积分环节的四阶模型( $K_i = 0.3, 0.7$ )在  $U_g$  跌落至 0.5833 p.u.一段时间后则会发生失稳。

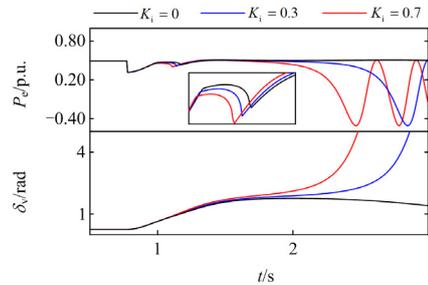


图 9  $U_g$  跌落至 0.5833 p.u.

Fig. 9  $U_g$  drop to 0.5833 p.u.

这是由于电压跌落时在积分环节的作用下，加快  $q$  轴电流达至限幅的速度，进一步压缩了  $d$  轴电流的支撑空间，变相增加了图 10 中 GFM-DFIG 功角曲线中的加速面积，缩小了减速面积，随着积分系数的增加，加速面积进一步增大，减速面积进一步被压缩，降低了暂态极限稳定电压的裕度。

通过仿真实验得到四阶模型  $K_i = 0.3$  时的 TSLV 为 0.5855 p.u.,  $K_i = 0.7$  时的 TSLV 为 0.5884 p.u., 相比二阶模型的结果误差并不大, 其仿真波形如图 11 所示。

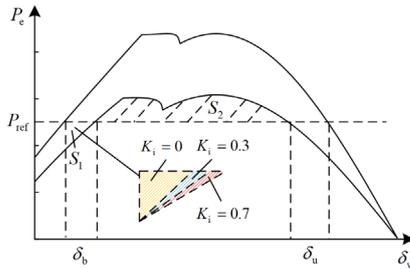


图 10 永久故障下的加速、减速面积  
Fig. 10 Accelerated and deceleration area under permanent failure

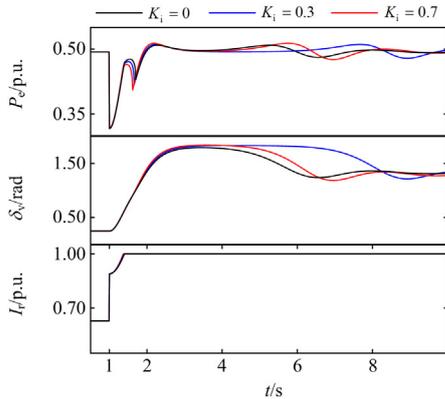


图 11 不同积分参数对应 TSLV 下的仿真波形  
Fig. 11 Simulation waveforms of different integral parameters corresponding to the TSLV

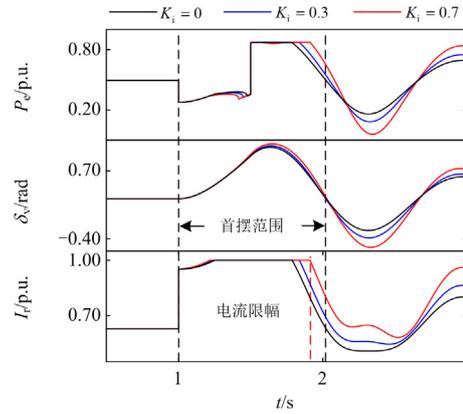
综上，在永久故障工况下，二阶模型更加适用于转子电流达到限幅的情况。

场景二：电压故障穿越，其仿真波形如图 12 所示。

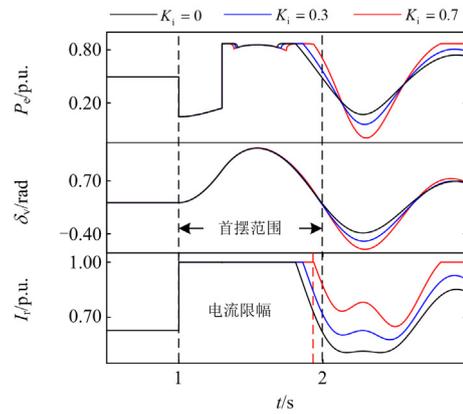
从图 12 中可以看出，无论是否存在电压外环积分环节，转子电流在首摆范围内都会进入限幅饱和状态，而且电压跌落越深，二阶模型和四阶模型的功角动态特性越接近。

图 13 中展示了不同积分参数的暂态模型在故障持续时间为 CCT 下的动态特性，CCT 由二阶模

型计算得到，可以看到在功角首摆范围内，不同积分的暂态模型动态特性几乎完全吻合。因此，电压外环积分对 CCT 计算的影响可忽略不计。



(a)  $U_g$  跌落至 0.5 p.u. 持续 0.5 s



(b)  $U_g$  跌落至 0.2 p.u. 持续 0.3 s

图 12 电压故障穿越仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform of voltage fault passing through

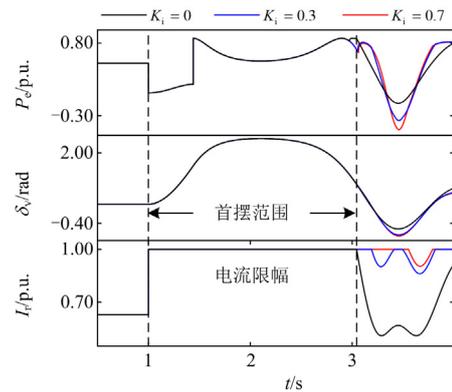


图 13  $U_g$  跌落至 0.2 p.u. 持续 0.439 s (CCT)

Fig. 13  $U_g$  drops to 0.2 p.u. lasting for 0.439 s (CCT)

改变表 1 参数，降低电压外环比例系数  $K_d$  和  $K_q$ ，使  $K_d = 0.2$ ， $K_q = 0.4$ 。在其他参数与表 1 相

同的基础上, 设置不同的电压环积分系数,  $K_i = K_{id} = K_{iq} = 0/0.3/0.7$ 。

当  $K_i = 0$  时, TSLV 为 0.8 p.u., CCT 为 0.315 s;  $K_i = 0.3$  时, TSLV 为 0.671 p.u., CCT 为 0.400 s;  $K_i = 0.7$  时, TSLV 为 0.612 p.u., CCT 为 0.454 s。不同积分参数对应的临界工况仿真波形如图 14 所示。

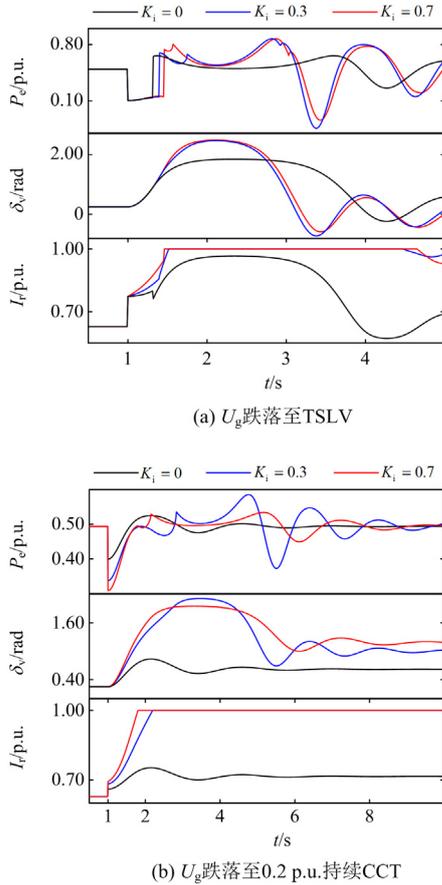


图 14 各积分参数对应 TSLV、CCT 的仿真波形  
Fig. 14 Simulation waveforms of each integral parameter corresponding to TSLV and CCT

减少电压外环  $K_d$  和  $K_q$  后, 转子电流在积分环节的主导下触及限幅条件, 此时风机的动态特性由积分环节决定。由此可知, 二阶模型是否适用, 需要取决于故障发生时仅靠电压外环比例环节生成的参考电流是否到达限幅。

在电压外环比例参数设置合理的情况下, 故障发生时仅靠电压外环比例环节生成的参考电流能够到达限幅, 此时二阶模型可以适用。

#### 4 参数对 GFM-DFIG 暂态稳定定量分析误差的影响

为了进一步验证二阶模型的适用性, 建立了如

图 1 所示的构网型双馈风机的全阶模型, 以分析各参数对 GFM-DFIG 暂态特性的影响。除表 1 参数外, 全阶模型其他参数如表 2 所示。

首先基于暂态能量函数计算  $U_g = 0.2$  p.u. 时, 二阶模型不同  $H_v$ 、 $D_v$ 、 $K_d$ 、 $K_q$ 、 $X_g$ 、 $I_{rmax}$  参数下的 CCT, 定量分析系统参数对 GFM-DFIG 模型暂态稳定性的影响, 然后通过仿真实验统计对应参数的全阶模型 CCT 结果。二阶模型 CCT 定量分析结果及全阶模型对应 CCT 对比如图 15 所示。

表 2 GFM-DFIG 仿真参数

Table 2 GFM-DFIG simulation parameters			
参数	数值	参数	数值
额定机械功率/MW	1.5	网侧外环积分系数	400
额定电磁功率/MW	1.67	网侧内环比例系数	0.83
定子电抗/p.u.	3.08	网侧内环积分系数	5.0
转子电抗/p.u.	3.06	转子侧外环积分系数	0.1
电机互抗/p.u.	2.90	转子侧内环比例系数	0.6
直流母线电容/F	0.01	转子侧内环积分系数	6
网侧外环比例系数	8	—	—

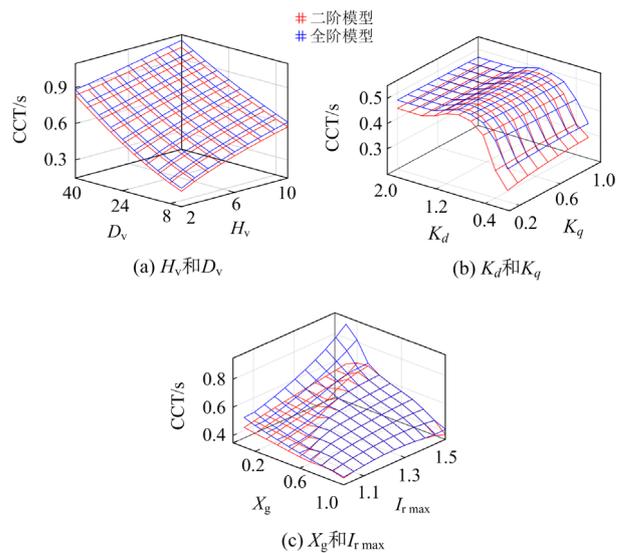


图 15 不同参数下二阶模型与全阶模型的 CCT  
Fig. 15 CCT of second-order and full-order models with different parameters

首先, 从二阶模型 CCT 定量分析结果可知,  $H_v$ 、 $D_v$ 、 $K_q$  的增加, 都有利于 GFM-DFIG 暂态稳定的提升。从图 15(b)可以看出,  $K_d$  对暂态稳定的影响较大, 而  $K_q$  对暂态稳定的影响较小, 同时由于  $I_{rmax}$  的限制,  $K_q$  增加到一定程度便无法再提升暂态稳定性。最后, 由图 15(c)可知,  $X_g$  过大有利于暂态稳定性, 提升  $I_{rmax}$  能够提升暂态稳定性, 但

是在  $X_g$  过大的情况下,  $I_{r\max}$  的提升也会恶化暂态稳定性。

从图 15 中不难看出, 全阶模型与二阶模型的 CCT 变化趋势基本一致, 证明了二阶模型在机理层面的正确性。另外, 全阶模型仿真 CCT 全局大于二阶模型计算 CCT, 未出现过于乐观的结果, 印证了所提改进的暂态能量函数法的保守性。

为了进一步分析各参数对二阶模型误差的影响, 对二阶模型与全阶模型的 CCT 进行整理计算, 得到如图 16 所示 CCT 相对偏差。

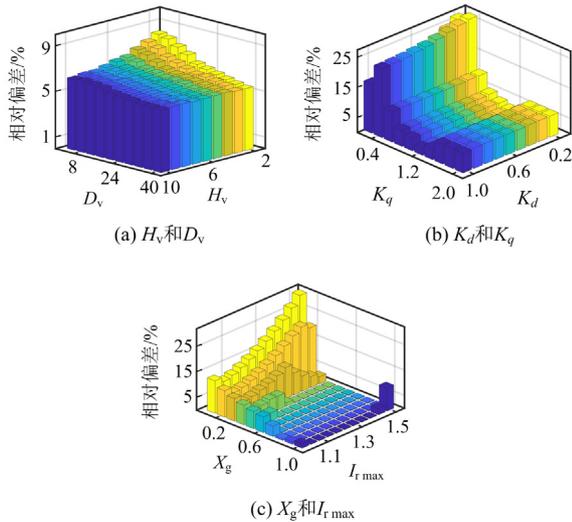


图 16 不同参数下 CCT 的相对偏差

Fig. 16 Relative deviation of the CCT for different parameters

图 16 展示了不同参数变化下两种模型 CCT 之间的相对偏差, 可以发现  $H_v$ 、 $D_v$  对 CCT 误差变化的影响较小,  $K_d$ 、 $K_q$ 、 $X_g$ 、 $I_{r\max}$  对 CCT 误差变化的影响较大, 误差分别在  $K_d$ 、 $K_q$  变小和  $X_g$  变小、 $I_{r\max}$  变大时增大。

图 16(b)中,  $K_q$  低于 0.8 后, CCT 的相对偏差大幅增大, 并且随  $K_d$  减小, 偏差超过了 25%。图 16(c)中  $X_g$  的减小和  $I_{r\max}$  的增大, 都增大了 CCT 的相对偏差。

综上, 二阶模型更加适用于开展对 GFM-DFIG 暂态稳定趋势的机理研究, 若用于计算实际风机系统的 CCT, 其误差与  $K_d$ 、 $K_q$ 、 $X_g$ 、 $I_{r\max}$  紧密相关,  $K_d$ 、 $K_q$ 、 $X_g$  越小,  $I_{r\max}$  越大, 二阶模型结果越保守。

## 5 结论

本文考虑转子电流限幅, 建立了 GFM-DFIG 二

阶暂态模型, 并基于该模型构造暂态能量函数计算 TSLV 和 CCT。通过对比不同电压故障下的仿真结果, 研究外环积分环节对 GFM-DFIG 暂态特性的影响。针对二阶模型参数开展 CCT 定量分析, 明晰各参数对暂态稳定的影响, 并利用仿真实验得到对应全阶模型的 CCT 结果, 进一步揭示各参数下二阶模型相对偏差的变化规律。本文主要结论如下:

1) 二阶模型适用于故障发生时仅靠电压外环比例环节驱动电流能够达到限幅、积分环节失去作用的情况;

2) 由定量分析可知, 增大  $H_v$ 、 $D_v$ 、 $I_{r\max}$ 、 $K_q$ , 减小  $X_g$  都有利于 GFM-DFIG 暂态稳定性的提升, 但是在  $X_g$  过大的情况下, 过多地提升  $I_{r\max}$  反而会削弱暂态稳定性;

3) 由 CCT 相对偏差定量分析可知, 二阶模型能够适用于 GFM-DFIG 暂态稳定的机理性研究, 但存在一定的保守误差,  $K_d$ 、 $K_q$ 、 $X_g$  越小,  $I_{r\max}$  越大, 二阶模型结果越保守。

本文忽略双馈风机网侧变流器和直流母线的动态特性, 导致暂态稳定性分析结果产生偏差, 将在后续研究中考虑网侧变流器和直流母线电压对 GFM-DFIG 暂态稳定性的影响。

## 参考文献

- [1] 韩璐, 尹纯亚, 戴晨, 等. 高比例新能源送端系统暂态电压运行风险分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 23-34.  
HAN Lu, YIN Chunya, DAI Chen, et al. Transient voltage operational risk of a high-proportion new energy sending system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 23-34.
- [2] 高启瑄, 吕世轩, 郑丽君, 等. 高渗透率条件下考虑功率协调性的可再生能源调频方式[J]. 电力建设, 2022, 43(11): 122-131.  
GAO Qixuan, LÜ Shixuan, ZHENG Lijun, et al. Frequency regulation mode of renewable energy considering power coordination under the condition of high penetration[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(11): 122-131.
- [3] 周涛, 陈中, 王毅, 等. 计及异步电机频率响应的电力系统最低惯量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 22-31.  
ZHOU Tao, CHEN Zhong, WANG Yi, et al. Evaluation of minimum inertia in power systems considering frequency response of induction machines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 22-31.
- [4] 郭佳俊, 陈俊儒, 刘雨珊, 等. 构网型新能源电网支撑

- 性能测试评估[J]. 智慧电力, 2023, 51(12): 23-29.
- GUO Jiajun, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. Support performance test and evaluation of grid-forming renewable energy systems[J]. Smart Power, 2023, 51(12): 23-29.
- [5] 李志军, 郭燕龙, 苗庆玉. 基于解析法的高比例可再生能源系统惯量支撑储能配置[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 11-18.
- LI Zhijun, GUO Yanlong, MIAO Qingyu. High proportion of renewable energy storage system for inertial support energy storage configuration based on analytical method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 11-18.
- [6] 郑云平, 亚夏尔·吐尔洪. 基于VSG技术的风-光-储系统自适应调频控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 12-19.
- ZHENG Yunping, YAXAR·Turgun. Research on adaptive frequency modulation control strategy of wind-PV-storage system based on VSG technology[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 12-19.
- [7] 余果, 吴军, 夏热, 等. 构网型变流器技术的发展现状与趋势研究[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(9): 65-70.
- YU Guo, WU Jun, XIA Re, et al. Study on the status quo and development trend of grid-forming converter technology[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(9): 65-70.
- [8] 王德胜, 颜湘武, 贾焦心, 等. 永磁直驱风机基于虚拟同步技术的高、低电压连续故障穿越策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2164-2175.
- WANG Desheng, YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, et al. High/low voltage continuous fault ride through strategy of PMSGs based on virtual synchronization technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2164-2175.
- [9] 李建林, 丁子洋, 刘海涛, 等. 构网型储能变流器及控制策略研究[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 679-686.
- LI Jianlin, DING Ziyang, LIU Haitao, et al. Research on grid-forming energy storage converters and control strategies[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 679-686.
- [10] 李锡林, 唐英杰, 田震, 等. 基于改进等面积法则的并网逆变器同步稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 208-215.
- LI Xilin, TANG Yingjie, TIAN Zhen, et al. Synchronization stability analysis of grid-connected inverter based on improved equal area criterion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 208-215.
- [11] HE X, GENG H, XI J, et al. Resynchronization analysis and improvement of grid-connected VSCs during grid faults[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(1): 438-450.
- [12] 孟志伟, 侯玉强, 方勇杰, 等. 强阻尼电压源型虚拟同步发电机大扰动功角稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 44-50.
- MENG Zhiwei, HOU Yuqiang, FANG Yongjie, et al. Analysis on large disturbance power-angle stability of strong-damping voltage-source virtual synchronous generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 44-50.
- [13] 高凯, 肖凡, 葛平娟, 等. 计及电流限幅环节影响的虚拟同步发电机暂态稳定区间分析[J/OL]. 电网技术: 1-12[2024-07-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0365>.
- GAO Kai, XIAO Fan, GE Pingjuan, et al. Transient stability interval analysis of a virtual synchronized generator considering fault current limitation[J/OL]. Power System Technology: 1-12[2024-07-20]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0365>.
- [14] 黄林彬, 章雷其, 辛焕海, 等. 下垂控制逆变器的虚拟功角稳定机理分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 117-123.
- HUANG Linbin, ZHANG Leiqi, XIN Huanhai, et al. Mechanism analysis of virtual power angle stability in droop-controlled inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 117-123.
- [15] 杨欢红, 焦伟, 黄文焘, 等. 考虑暂态功角稳定和故障限流的并网逆变器下垂暂态控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 59-70.
- YANG Huanhong, JIAO Wei, HUANG Wentao, et al. Droop transient control strategy considering transient power angle stability and fault current limitation of a grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 59-70.
- [16] 纪泰鹏, 赵伟, 李永达, 等. 基于能量函数法的含虚拟惯性控制直驱风电场内部暂态同步稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 38-48.
- JI Taipeng, ZHAO Wei, LI Yongda, et al. Transient synchronization stability analysis of PMSG-based wind farm with virtual inertial control based on an energy function method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 38-48.
- [17] 王晓东, 付腾, 王晓驰, 等. 基于模型降阶的双馈风电机组虚拟同步机控制参数优化[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 210-216.
- WANG Xiaodong, FU Teng, WANG Xiaochi, et al. Control parameter optimization of virtual synchronizer for doubly-fed wind turbines based on model reduction[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(11): 210-216.

- [18] 杜毅, 郑超, 孙华东. 构网型 VSC 暂态稳定机理及改进限幅策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(10): 3753-3766.  
DU Yi, ZHENG Chao, SUN Huadong. Transient stability mechanism analysis of the grid forming voltage source converter and the improved limiting method[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(10): 3753-3766.
- [19] 薛安成, 耿继瑜, 刘瑞煌, 等. 限幅环节对 DFIG 故障中输出特性的影响研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 29-33, 56.  
XUE Ancheng, GENG Jiyu, LIU Ruihuang, et al. Impact of limiter on output characteristics of DFIG during fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 29-33, 56.
- [20] 赵峰, 帅智康, 彭也伦, 等. 含电流限幅器的逆变器暂态稳定性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2245-2255.  
ZHAO Feng, SHUAI Zhikang, PENG Yelun, et al. Evaluation method for transient stability of inverter containing current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2245-2255.
- [21] 张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1702.  
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1702.
- [22] 姜卫同, 胡鹏飞, 尹瑞, 等. 基于虚拟同步机的变流器暂态稳定分析及混合同步控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 124-133.  
JIANG Weitong, HU Pengfei, YIN Rui, et al. Transient stability analysis and hybrid synchronization control strategy of converter based on virtual synchronous generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 124-133.
- [23] 付熙坤, 黄萌, 凌扬坚, 等. 功率耦合和电流限幅影响下构网型变流器的暂态同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2815-2825.  
FU Xikun, HUANG Meng, LING Yangjian, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-forming converter influenced by power-coupling and current-limiting[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2815-2825.
- [24] 郑乐, 胡伟, 闵勇, 等. 基于临界转变理论的电力系统电压稳定分析与预警[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6820-6827, 6937.  
ZHENG Le, HU Wei, MIN Yong, et al. Research on power systems voltage stability assessment and prediction based on critical transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6820-6827, 6937.
- [25] 胡家兵, 袁小明, 程时杰. 电力电子并网装备多尺度切换控制与电力电子化电力系统多尺度暂态问题[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.  
HU Jiabing, YUAN Xiaoming, CHNEG Shijie. Multi-time scale transients in power-electronized power systems considering multi-time scale switching control schemes of power electronics apparatus[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5457-5467, 5594.
- [26] TANG W, HU J, CHANG Y, et al. Modeling of DFIG-based wind turbine for power system transient response analysis in rotor speed control timescale[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6795-6805.
- [27] 薛禹胜. EEAC 与直接法的机理比较(三)定性判稳与定量分析[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 1-5, 25.  
XUE Yusheng. A critical comparison of various methods for transient stability assessment part three qualitative criterion and quantitative analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(13): 1-5, 25.
- [28] 柳飞扬, 曾平, 李征. 电网故障下全功率风电场内部机组的暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 43-54.  
LIU Feiyang, ZENG Ping, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with a full-scale converter under grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 43-54.

收稿日期: 2024-01-22; 修回日期: 2024-08-20

作者简介:

王耀函(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网分析与控制技术; E-mail: ncepuwyh@163.com

张扬帆(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源发电并网技术; E-mail: zhangyangfanhit@163.com

蔡光(1996—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为新能源电力系统分析与控制。

(编辑 魏小丽)