

电网电压骤升时 DFIG 定转子电流分析及无功电流配置改进

王艳娟, 孙 潇

(国网冀北电力唐山市曹妃甸区供电公司, 河北 唐山 063299)

摘 要: 在双馈感应发电机 (DFIG) 高电压穿越 (HVRT) 问题中, 电压骤升引起的暂态过电流不足以触发撬棒保护动作, 致使 HVRT 下的定转子短路电流特性比低电压穿越 (LVRT) 更复杂。推导了计及电磁暂态过渡过程和转子侧换流器 (RSC) 调控共同作用影响下的定转子电流表达式。在此基础上考虑并网规范要求的 DFIG 无功电流支撑, 控制 RSC 和网侧换流器 (GSC) 输出与骤升幅度相对应的分量, 使 DFIG 工作于无功支持状态。仿真结果表明, 定转子电流表达式准确描述了 HVRT 期间的故障电流, 所得结果更具一般性, 且对故障电气量的计算具有重要意义; 改进无功电流配置实现了 DFIG 的 HVRT。研究结果对掌握 DFIG 的动态过程具有一定的参考价值。

关键词: 双馈感应发电机; 高电压穿越; 定转子电流; 无功电流补偿

中图分类号: TM614 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)04-0103-06

doi: 10.12177/emca.2021.221

Analysis of DFIG Stator and Rotor Current Improvement of Reactive Current Configuration in Case of Grid Voltage Swell

WANG Yanjuan, SUN Xiao

(Tangshan Caofeidian District Power Supply Branch, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Tangshan 063299, China)

Abstract: In the problem of high voltage ride through (HVRT) of doubly-fed induction generator (DFIG), the transient overcurrent caused by voltage swell is not enough to trigger crowbar protection action, which makes the short-circuit current characteristics of stator and rotor under HVRT more complex than those in the case of low voltage ride through (LVRT). Different from the inherent analysis of stator and rotor current, the expressions which take into account the combined influence of electromagnetic transient transition process and rotor side converter (RSC) regulation are derived. On this basis, considering the requirements of grid connection specification for DFIG reactive current support, the outputs of RSC and grid side converter (GSC) related to the swell amplitude are controlled, so as to make DFIG work in the reactive support state. The simulation results show that the expressions of stator and rotor current accurately describe the fault current during HVRT, and the results are more general and are of great significance to the calculation of fault electrical quantity. The improved reactive current configuration realizes the HVRT of DFIG. This research has a certain reference value for mastering the dynamic process of DFIG.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); high voltage ride through (HVRT); stator and rotor current; reactive current compensation

收稿日期: 2021-08-29; 收到修改稿日期: 2022-03-21

作者简介: 王艳娟(1992-), 女, 硕士, 研究方向为新能源发电及控制。

0 引言

随着风力发电的开发成本降低和能源消耗量增加,风电在能源消费结构中越发重要。在风力发电机组并网容量快速提升的同时,系统的安全稳定运行与风力发电机组的稳定性呈正相关^[1-3]。故障穿越运行是运行过程中要求比较高、难度比较大的问题。低电压穿越(LVRT)技术上比较成熟并且具有一定研究成果,但高电压穿越(HVRT)技术还尚未引起足够的重视^[4-7]。

双馈感应风力发电机(DFIG)是风电市场的主流机型,具有换流器的容量小、调速范围宽、有功无功功率解耦控制等许多优势^[8-10]。但由于DFIG特殊的拓扑结构,DFIG对电网电压故障尤为敏感,电压骤升和故障恢复时都会激起不同程度的电磁暂态过渡过程。其中定子磁链的暂态特性是造成转子过电压和过电流的主要原因,对其进行深入分析是实现高电压穿越运行的基础和依据^[11-13]。此外,与低电压穿越过程的研究不同的是,电网电压骤升故障所导致的暂态过电流较小,无法触发Crowbar保护动作。DFIG的定转子电流受电磁暂态过程和换流器调控作用的共同影响,使其电流特性更为复杂,不够精确的故障电流计算方式有可能导致保护装置出现误动现象。因此,有必要深入讨论电网电压骤升故障时的DFIG定转子电流特性。

故障电流能否精确计算关系着DFIG高电压穿越实现的可能性大小。目前部分文献研究了电网电压出现故障情况时的电流特性。文献[14]通过与传统异步发电机故障电流特性分析方法对比,给出DFIG短路电流的表达式,但却未考虑到转子电流的动态过程,和真实情况差别较大;文献[15]对DFIG理想空载情况下的短路电流进行了推导,但存在较多的近似及简化过程。由于故障过程中DFIG暂态电动势的变化及其复杂的动态特性,上述类比于异步电机的分析方法对DFIG不再适用。文献[16]从暂态电动势的角度考虑,进行DFIG短路电流计算时,考虑到了转子电流动态过程但未考虑到定子磁链的动态过程;文献[17]对DFIG短路电流特性进行了分析,给出定子电流最大值的近似表达式,但仅限于DFIG工作在同步速状态;由于电网电压骤升过程中转子

撬棒保护电路并未投入^[18],其故障电流的分析需要同时考虑电网电压骤升的电磁暂态和换流器控制的耦合影响,使其暂态过程更为复杂。上述基于转子保护的故障电流特性分析方法对HVRT并不适用。文献[19]提出考虑转子侧换流器控制作用影响的转子电流表达式,但并未考虑定子电流的特性分析;文献[20]提出撬棒保护没有投入的短路电流表达式,却没有考虑转子电流的动态过程。上述文献虽考虑了换流器控制作用的影响,但未全面分析电网电压骤升故障下的定转子电流暂态特性。

此外,为满足HVRT并网导则,研究HVRT时DFIG的无功控制尤为关键。文献[16]给出了计及无功支撑的HVRT控制策略,但需其他保护辅助实现HVRT;文献[17]分析出换流器无功出力,但并没有给出电流分配。

故障电流的精确计算关系着DFIG暂态特性的分析及高电压穿越的实现,不精确的故障电流计算有可能造成保护装置的误动现象。考虑到上述问题,本文推导了计及电磁暂态过渡过程和转子侧换流器(RSC)调控作用共同影响的 I_s 、 I_r 表达式。在此基础上增加并网规范对DFIG无功电流支撑的要求,控制RSC和网侧换流器(GSC)骤升幅度和输出相应的 I_{qr} 、 I_{qs} ,使DFIG工作于无功支持状态。仿真结果表明, I_s 、 I_r 表达式准确描述了HVRT期间的故障电流,所得结果更具一般性,且对故障电气量的计算具有重要意义;改进无功电流配置实现了DFIG的HVRT。本文的研究对掌握DFIG的动态过程具有一定的参考价值,为DFIG实现HVRT提供了理论依据。

1 数学模型

依据电动机惯例,将转子侧参数进行折算,折算后的数据换算至定子侧,DFIG在定子坐标系下数学模型为

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r \psi_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_r I_r + L_m I_s \end{cases} \quad (2)$$

式中: U_s 、 I_s 、 ψ_s 、 U_r 、 I_r 、 ψ_r 分别为定转子电压、电

流、磁链矢量; R_s 、 L_s 、 R_r 、 L_r 分别为定转子电阻和电感; L_m 为定转子间互感; ω_r 、 ω_1 、 ω_{sl} 分别为转子旋转角速度、同步旋转角速度、转差角速度, 且 $\omega_{sl} = \omega_1 - \omega_r$ 。

由于 R_s 非常小, 将其忽略后由式(1)可知, 稳态下 U_s 、 ψ_s 间关系为

$$\psi_s = \frac{U_s}{j\omega_1} e^{j\omega_1 t} \quad (3)$$

t_0 时刻, 电压由 U_s 升高至 $(1+d)U_s$ (d 为电压升高幅度), 此时 ψ_s 为

$$\psi_s = \frac{(1+d)U_s}{j\omega_1} e^{j\omega_1 t} - \frac{dU_s}{j\omega_1} e^{-t/\tau_s} \quad (4)$$

2 定转子电流

不同于 LVRT 过程, HVRT 故障所引起的暂态过电流不足以触发 Crowbar 动作, RSC 仍处于工作状态, 因此, 电流暂态特性的分析除与故障暂态过程相关外还受 RSC 控制作用的影响。传统的类比于同步发电机故障电流的求解方法或基于 Crowbar 保护动作后的故障电流特性分析已不再适用。

根据式(1)、式(2)可得由 I_r 和 ψ_s 表示的 U_r 方程为

$$\sigma L_r \frac{dI_r}{dt} + (R_r + j\omega_{sl}\sigma L_r) I_r = U_r - E_r \quad (5)$$

$$E_r = \frac{L_m}{L_s} \left(\frac{d}{dt} + j\omega_{sl} \right) \psi_s \quad (6)$$

式中: σ 为漏感系数, $\sigma = 1 - L_m^2/(L_r L_s)$; E_r 为转子感应反电动势。

将 ψ_s 的变化代入式(6), 可得机端电压表示的 E_r 为

$$E_r = \begin{cases} \frac{L_m}{L_s} s U_s, & t \leq t_0 \\ \frac{L_m}{L_s} (1+d) s U_s + \frac{L_m}{L_s} d(1-s) U_s e^{-t/\tau_s}, & t > t_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $T = R_s/L_s = 1/\tau_s$ 。

由式(5)可以看出, U_r 反映了 RSC 控制作用对 I_r 的影响; E_r 反映了 ψ_s 动态过程对 I_r 的影响; 因此, HVRT 过程中 I_r 的变化情况由 RSC 的输出电压和 ψ_s 的暂态过程共同决定。

为建立 RSC 输出电压与 I_r 的关系, 图 1 给出了基于 ψ_s 定向的 DFIG 的 RSC 电流内环控制回路。

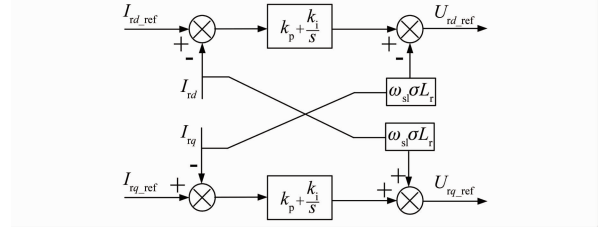


图 1 转子侧换流器电流内环控制回路

由图 1 可得 U_r 为

$$U_r = k_p (I_{r_ref} - I_r) + k_i \int (I_{r_ref} - I_r) dt + j\omega_{sl} \sigma L_r I_r \quad (8)$$

式中: k_p 、 k_i 分别为 PI 调节器的比例和积分时间常数; I_{r_ref} 为 I_r 的参考值矢量。

将式(8)代入式(5), 可得 HVRT 时 I_r 的动态方程为

$$\frac{d^2 I_r}{dt^2} + \alpha \frac{dI_r}{dt} + \beta I_r = \beta I_{r_ref} + \frac{TL_m d(1-s)U_s}{\sigma L_r L_s} e^{-t/\tau_s} \quad (9)$$

式中: $\alpha = \frac{R_r + k_p}{\sigma L_r}$; $\beta = \frac{k_i}{\sigma L_r}$ 。

对上述方程进行求解, 可得:

$$I_r = I_{r_ref} + \frac{L_m T d(1-s)U_s}{\sigma L_r L_s (T^2 - \alpha T + \beta)} e^{-t/\tau_s} + \frac{\lambda_2 I_{r0} e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 I_{r0} e^{\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (10)$$

式中: I_{r0} 为 I_r 初始值; $\lambda_1 = (-\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 4\beta})/2$;

$\lambda_2 = (-\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4\beta})/2$ 。

由式(10)可以看出, 受 RSC 调控作用的影响, I_r 由三部分组成, 第一部分为 I_r 对 I_{r_ref} 的强制响应分量, 其大小与电压上升程度和 I_r 基频参考值有关; 第二部分为 I_r 对 $\frac{L_m T d(1-s)U_s}{\sigma L_r L_s} e^{-t/\tau_s}$ 响应的暂态直流分量, 其大小不仅和电压上升幅度相关, 和 DFIG 的 PI 调节器参数和运行转速也有关系; 第三部分为与 DFIG 参数和 RSC 控制作用有关的暂态自然响应分量。

I_s 的分析与 I_r 类似, 由式(2)可得 I_s 、 I_r 关系为

$$I_s = \frac{\psi_s - L_m I_r}{L_s} \quad (11)$$

将式(11)代入式(5),可得出以 I_s 和 ψ_s 表示的 U_r 方程:

$$\sigma L_r \frac{d(\psi_s - L_s I_s) / L_m}{dt} + (R_r + j\omega_{sl} \sigma L_r) \cdot \frac{(\psi_s - L_s I_s)}{L_m} = U_r - E_r \quad (12)$$

将式(8)代入式(12),可得 HVRT 故障下的 I_s 动态方程为

$$\begin{aligned} \frac{d^2 I_s}{dt^2} + \alpha \frac{dI_s}{dt} + \beta I_s = & -\frac{L_m}{L_s} \beta I_{r_ref} + \frac{\beta}{j\omega_1 L_s} (1+d) U_s - \\ & \frac{(T^2 - \alpha T + \beta)}{j\omega_1 L_s} d U_s e^{-Tt} - \frac{L_m}{L_s} \frac{TL_m(1-s)}{\sigma L_r L_s} d U_s e^{-Tt} \end{aligned} \quad (13)$$

求解上述 I_s 方程,可得 I_s 为

$$\begin{aligned} I_s = & \left[-\frac{L_m}{L_s} I_{r_ref} + \frac{(1+d)U_s}{j\omega_1 L_s} \right] + \frac{\lambda_2 I_{i0} e^{\lambda_1 t} - \lambda_1 I_{i0} e^{\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} - \\ & \left[\frac{1}{j\omega_1 L_s} + \frac{L_m}{L_s} \frac{TL_m(1-s)}{\sigma L_r L_s (T^2 - \alpha T + \beta)} \right] d U_s e^{-Tt} \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可以看出,受 RSC 控制作用的影响, I_s 同样由三部分组成,即直流分量、交流分量(根据 ψ_s 暂态衰减时间常数变化)和暂态自然分量(受 PI 调节器控制参数影响)。

3 无功电流配置

GSC 连接情况如图 2 所示, GSC 稳态方程为

$$\begin{cases} U_{dgc} = U_{dg} + \omega_1 L_g I_{qg} \\ U_{qgc} = -\omega_1 L_g I_{dg} \end{cases} \quad (15)$$

式中: U_{dgc} 、 U_{qgc} 分别为 GSC 输出电压 d 、 q 轴分量; U_g 为电网电压; U_L 为进线电感电压向量, $U_L = j\omega_1 L_g I_g$; I_g 为 GSC 输入电流; L_g 为电感。

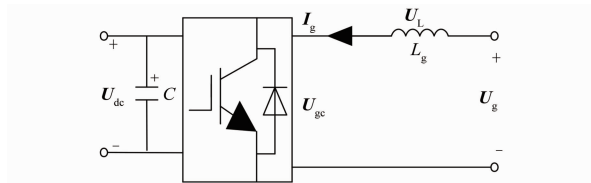


图 2 GSC 示意图

由于 U_{gc} 受 C 电压的约束, GSC 处于可控状

态时, U_{dc} 与 U_{gc} 需满足:

$$U_{dc} > \sqrt{3} U_{gc} \quad (16)$$

因此, U_{dc} 与 U_g 间关系为

$$U_{dc} > \sqrt{3[(U_{dg} + \omega_1 L_g I_{qg})^2 + (-\omega_1 L_g I_{dg})^2]} \quad (17)$$

稳态运行时, GSC 为单位功率因素运行, 此时 U_{dc} 在安全限值以内。但 HVRT 时, 若 GSC 仍保持原状态, 则 U_{dc} 大幅升高, 此时, C 电压大于其允许电压, 必然损坏 GSC。因此, 在 HVRT 期间, 可通过控制 GSC 的无功电流配置来实现 HVRT。

改进无功电流的配置, 一方面改变了 U_L , 利用 L_g 的分压减小换流器直流侧电压, 维持 U_{dc} 的稳定; 另一方面能够给电网提供 Q 支撑, 帮助故障恢复。

由式(17)可得:

$$I_{qg_min} = \frac{1}{\omega_1 L_g} [\sqrt{U_{dc}^2/3 - (-\omega_1 L_g I_{dg})^2} - U_g] \quad (18)$$

HVRT 时 I_{qg} 主要取决于 d , I_{dg} 对其影响可忽略不计, 由此式(18)可转化为

$$I_{qg_min} = \frac{1}{\omega_1 L_g} (U_{dc}/\sqrt{3} - U_g) \quad (19)$$

根据 HVRT 并网规范^[21], 在 $U_s \geq 1.1$ p. u. 时, U_s 每上升 1%, 至少需提供 2% 的 I_{qg} 。由于 GSC 已经输出了 I_{qg} , RSC 的 I_{qs} 需满足:

$$I_{qs} \leq [-2(U_s - 1.1) I_N - I_{qg}] \quad (20)$$

式中: I_N 为额定电流。

RSC 需输出的 I_{qr} 为

$$I_{qr} \geq \frac{L_s}{L_m} [2(U_g - 1.1) I_N + I_{qg}] - \frac{U_g}{\omega_1 L_m} \quad (21)$$

因此, 式(19)和式(21)构成了 HVRT 中 GSC 和 RSC 的无功电流给定。

4 仿真分析

为验证上述理论分析的正确性, 基于 MATLAB/Simulink 仿真平台, 搭建 DFIG 仿真模型, 如图 3 所示。其中 DFIG 参数为, 额定功率 2 MW, 额定频率 50 Hz, 定子额定电压 690 V, 直流母线额定电压 1 200 V, 定子电阻 0.010 8 p. u., 转子电阻 0.010 2 p. u., 定子漏感 0.102 p. u., 转子漏感 0.11 p. u., 定转子间互感 3.362 p. u.。因

兆瓦级 DFIG 转动惯量数量级很大,且电网电压骤升暂态过程较短,所以整个仿真过程中可以假定 DFIG 的转速不变。

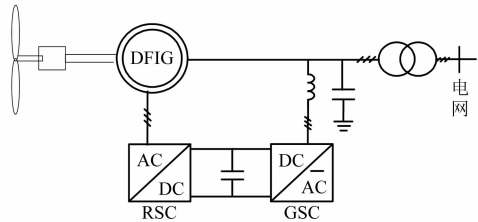


图3 DFIG 仿真模型

4.1 定转子电流

为验证本文所推导 I_s 和 I_r 表达式的正确性,图4以 I_r 为例,给出了 I_r 三相的仿真和计算结果对比波形。

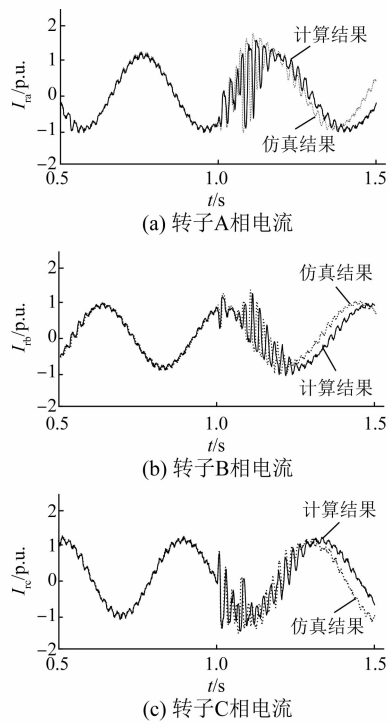


图4 转子电流仿真和计算结果对比

为了更加清晰地表明仿真结果和计算结果的误差,表1给出了转子 A、B、C 相电流的计算结果与仿真结果误差百分比。

表1 计算结果与仿真结果误差

转子电流	A 相电流	B 相电流	C 相电流
误差/%	3.5	4.0	4.3

通过图4和表1可以看出,计算与仿真数据大体相同,最大误差仅4.3%。可以证明本篇文章理论推导是正确的。但对比 I_r 的仿真波形与计算波形,可以发现故障后计算波形逐步滞后,这是因为理论推导中未考虑转子转速的变化,且计算结果中频率为恒定值。而 DFIG 实际运行的过程中,想要保持电网频率不变, I_r 频率提高,又因为电网故障发生时间相对较短,能够不考虑稳态转速导致的误差。此外,本文仅考虑了 RSC 调控作用对 I_s 和 I_r 的影响,忽略了 GSC 对 DFIG 故障输出的贡献。

本文所推导的计及电磁暂态过渡过程和 RSC 调控作用共同影响的 I_s 和 I_r 能够比较准确地描述电压上升期间的故障电流,有利于掌握 DFIG 与换流器暂态过程的耦合机制,对于计算故障电气量具有重要意义。

4.2 无功电流配置

图5给出了 $t=1.5\text{ s}$ 时, U_g 骤升到 1.3 p. u. ,对比无功电流配置和传统控制策略两种策略 Q 和 U_g 的波形。

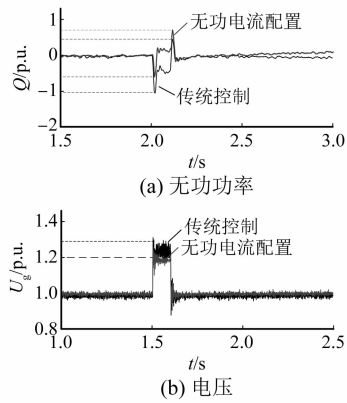


图5 DFIG 瞬态响应对比

由 Q 的波形可以看出,采用无功电流配置, HVRT 故障时 DFIG 吸收的 Q 为 0.6 p.u.,故障恢复时发出的 Q 为 0.8 p.u.;而传统控制下, HVRT 故障时 DFIG 吸收的 Q 为 1 p.u.,故障恢复时发出的 Q 仅为 0.5 p.u.。无功电流配置在 HVRT 期间输出更多的 Q ,有利于 U_g 的下降。由 U_g 波形可以看出, U_g 由传统控制时的 1.35 p.u.降到 1.2 p.u.,且在 HVRT 全过程中,DFIG 始终并网运行。

5 结 语

关于 DFIG 的 HVRT,本文推导出计及电磁暂

态过渡过程与 RSC 控制作用影响的 DFIG 的 I_s 、 I_r 表达式。在此基础上,提出无功电流配置的改进控制策略。理论推导与仿真结果相符,能够证明理论推导的可靠性。得出以下结论:

(1) 计及电磁暂态过渡过程和 RSC 调控作用共同影响的 I_s 、 I_r 表达式较准确地描述了 HVRT 期间的故障电流,所得结果更具一般性,对故障电气量的计算具有重要意义。

(2) 增加并网规范对 DFIG 无功电流支撑的要求,控制 RSC 和 GSC 输出和 d 相适应的 I_{qr} 、 I_{qs} ,使 DFIG 工作于无功支持状态。

(3) 改进无功电流配置实现了 DFIG 的 HVRT,不仅符合 HVRT 并网导则对的要求,而且加快了故障电网的恢复速度。

本文的研究对掌握 DFIG 的动态过程具有一定的参考价值,为 DFIG 实现 HVRT 提供了理论依据。

【参考文献】

- [1] 贺益康,胡家兵. 双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题[J]. 中国电机工程学报,2012,32(27): 1.
- [2] WEISE B. Impact of K-factor and active current reduction during fault-ride-through of generating units connected via voltage-sourced converters on power system stability [J]. IET Renewable Power Generation,2015,9(1): 25.
- [3] 徐海亮,章玮,陈建生,等. 考虑动态无功支撑的双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36): 112.
- [4] 郑涛,魏占朋,李娟,等. 计及撬棒保护的双馈风电机组不对称短路电流特性分析[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(2): 7.
- [5] 尹俊,毕天姝,薛安成,等. 计及低电压穿越控制的双馈风力发电机组短路电流特性与故障分析方法研究[J]. 电工技术学报,2015,30(23): 116.
- [6] 刘曼琴,周羽生,许振华,等. 双馈风电机组在不对称电网故障下的稳定性控制研究[J]. 电测与仪表,2021,58(1): 131.
- [7] 钟旭,常鹏飞,侯凯,等. 风电场功率控制一体化监控系统开发与应用[J]. 电测与仪表,2021,58(3): 168.
- [8] XU L. Coordinated control of DFIG's rotor and grid side converters during network unbalance [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23 (3): 1041.
- [9] 王涛,高靖,王优胤,等. 基于改进经验模态分解和支持向量机的风电功率预测研究[J]. 电测与仪表,2021,58(6): 49.
- [10] 孙丽玲,王艳娟. 电网电压对称骤升时 DFIG 暂态电流分析及限流电阻阻值优化[J]. 电力系统自动化,2018,42(7): 123.
- [11] 姚俊,郭利莎,曾欣,等. 采用串联网侧变换器的双馈风电系统不对称高电压穿越控制研究[J]. 电网技术,2016,40(7): 2067.
- [12] 栗然,李增辉,王义贺,等. 电网短路故障下 DFIG 的电磁特性研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(10): 13.
- [13] 李俊杰,蒋昆,刘国平,等. 采用串联网侧变换器的双馈风电系统高电压穿越控制策略[J]. 电网技术,2014,38(11): 3037.
- [14] 郭家虎,张鲁华,蔡旭. 双馈风力发电系统在电网故障下的动态响应分析[J]. 太阳能学报,2010,31(8): 1023.
- [15] 周士琼,王倩,吕潇,等. 定子 Crowbar 电路模式切换的双馈风力发电机组低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(4): 33.
- [16] 尹俊,李彦彬,闫哲昆,等. 改进的双馈风电机组短路电流计算及保护方案研究[J]. 太阳能学报,2017,38(6): 1475.
- [17] 蔚芳,刘其辉,谢孟丽,等. 适应多类型故障的双馈风电机组低电压穿越综合控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(5): 23.
- [18] 李少林,王伟胜,王瑞明,等. 双馈风电机组高电压穿越控制策略与试验[J]. 电力系统自动化,2016,40(16): 76.
- [19] 熊小伏,欧阳金鑫. 电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. 中国电机工程学报,2012,32(28): 114.
- [20] 欧阳金鑫,熊小伏,张涵轶. 电网短路时并网双馈风电机组的特性研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(22): 17.
- [21] EON GmbH. Grid code: high and extrahigh voltage [S]. Bayreuth: EON GmbH,2006: 18-19.