

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201231

# 基于保障低压穿越能力的风电机组撬棒自适应投切策略研究

谭爱国<sup>1,2</sup>, 吴颖颖<sup>1</sup>, 王传启<sup>2</sup>, 李飞宇<sup>3</sup>

(1. 湖北民族大学, 湖北 恩施 445000; 2. 天津凯发电气公司, 天津 300392;  
3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 针对风电场低压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)能力提升问题, 以并网型中大规模风电场为研究对象, 从整个风电场层面出发, 分析了故障扰动场景下双馈风机(Doubly-fed Induction Generator, DFIG)的暂态特性及LVRT能力。利用RBF(Radial Basis Function)神经网络对切除后的DFIG转子电流暂态过程进行有效拟合, 提出了一种撬棒保护自适应投切策略。算例仿真结果表明, RBF神经网络对故障后转子侧最大电流预测较为准确, 能够有效避免撬棒的重复投切。该策略进一步提升了故障场景下风电场的无功支撑和LVRT能力, 显著提高了风电场运行的安全稳定性水平。

**关键词:** 无功支撑; 风电场; 低电压穿越; 撬棒保护; 自适应投切

## Adaptive switching strategy for a wind turbine crowbar based on the guarantee of low voltage ride-through capability

TAN Aiguo<sup>1,2</sup>, WU Yingying<sup>1</sup>, WANG Chuanqi<sup>2</sup>, LI Feiyu<sup>3</sup>

(1. Hubei Minzu University, Enshi 445000, China; 2. Tianjin Keyvia Company, Tianjin 300392, China;  
3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To improve the low-voltage ride-through capability of wind farms, this paper takes grid-connected medium and large-scale wind farms as the research object. Starting from the entire wind farm level, it analyzes the transient characteristics and LVRT capabilities of doubly-fed wind turbines under fault disturbance scenarios. The RBF neural network is used to fit the transient process of the DFIG rotor current after removal, and a crowbar protection adaptive switching strategy is proposed. The simulation results of the calculation example show that the RBF neural network is more accurate in predicting the maximum current on the rotor side after a fault, and can effectively avoid repeated switching of the crowbar. This strategy further improves the reactive power support and LVRT capabilities of wind farms under fault scenarios, and significantly improves the safety and stability of wind farm operation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877088) and Enshi Science and Technology Bureau (No. RZ1900001902).

**Key words:** reactive power support; wind farm; LVRT; crowbar protection; adaptive switch-in and switch-off scheme

## 0 引言

随着风电并网规模增大, 风电场的安全稳定运行问题所造成的脱网事故时有发生。风机 LVRT 技术是抵御风机脱网的关键技术<sup>[1-2]</sup>。为了提升风机的 LVRT 能力, 通常采用“短暂中断(Short Term

Interruption, STI)”策略、基于 DFIG 定子电压动态补偿的控制策略、基于转子撬棒保护的控制策略<sup>[3-5]</sup>。

针对运用撬棒保护提升风机在低电压情况下的暂态生存能力, 目前很多学者对 LVRT 过程中风电场的暂态模型进行了研究<sup>[6]</sup>。文献<sup>[7]</sup>考察了 DFIG 在对称三相短路故障时投入撬棒电阻后的电磁暂态特性, 给出了在定转子磁链耦合作用影响下的等效阻抗电压源模型, 探讨了 LVRT 过程中的转子电流暂态模型, 但由于转子电流和电压的非线性关系,

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51877088); 恩施州科技局项目(RZ1900001902)

以及撬棒投切过程中转子侧参数的改变, 使得目前研究提出的转子暂态模型均有一定误差, 转子在撬棒切除后的过电流解析式也难以推导。

针对撬棒保护投切方案的研究, 文献[8]指出撬棒投入对系统的影响包括: 投入撬棒可以使风电场保持并网运行, 有利于系统的恢复; 但投入撬棒之后, 风机运行于异步状态, 吸收无功, 不利于系统恢复。文献[9]分析了 DFIG 在电网故障情况下的运行机理, 结合 DFIG 转子侧电流的阈值, 将 DFIG 风电场分为已投入、未投入撬棒两个阶段, 建立了相应的等值模型, 以期准确反映电网故障期间风电场内电压等参量的变化。文献[10]针对电压跌落时因撬棒保护并非瞬时投入运行而带来的短路电流精确计算问题, 以不对称故障为研究背景, 分别对撬棒保护动作前和撬棒保护动作后两个阶段进行数学解析, 导出了整个故障过程中短路电流的表达式, 分析了撬棒保护动作时间对 DFIG 短路电流特性的影响, 对撬棒保护动作速度整定给出了一定参考。以上研究在一定程度上可以提升风机的 LVRT 能力, 但未量化分析撬棒电阻投入时间过短可能因电流暂态振荡导致撬棒电阻切除后反复投切, 致使转子侧变流器(Rotor Side Converter, RSC)保护损坏。

为此, 本文提出了基于保障系统动态稳定性和提升风电场 LVRT 能力的风机主动控制策略。该策略从整个风电场层面出发, 分析了故障扰动场景下 DFIG 的暂态特性及 LVRT 能力, 在采用神经网络拟合撬棒切除后的 DFIG 转子电流暂态过程的基础上, 设计了合理的撬棒自适应投切方式, 避免了撬棒的重复投切, 保障了故障场景下风电场的无功支撑和 LVRT 能力, 提高风电场并网发电的可靠性。

## 1 现有 DFIG 主动控制策略的局限性

考虑到电网侧扰动和故障很容易引发 DFIG 的暂态问题, 为防止暂态过程中产生的转子过电流和过电压损坏风机及 RSC, 工程中常采用撬棒电路对其实施保护。目前, 大多数撬棒保护的逻辑为: 当转子电流超过设定的门槛值之后, 撬棒投入, 通过串联电阻来衰减转子过电流, 待瞬态过程衰减完毕后, 撬棒切除<sup>[11]</sup>。针对故障清除后撬棒切除, 目前常用方法有: 撬棒延时切除策略<sup>[12]</sup>及撬棒实时投切策略<sup>[13]</sup>。在撬棒实时投切策略中, 为优先保证风电场故障期间的 LVRT 能力, 在运行工况不再满足撬棒动作判据时立即切除撬棒, 使得 DFIG 恢复无功输出。但是在撬棒切除的暂态过程中, 可能会导致转子暂态电流超过撬棒投入门槛, 导致撬棒重复投切, 缩短撬棒保护装置以及转子侧变流器保护电路

的使用寿命<sup>[14]</sup>。要想解决提升风电场内无功支撑能力和防止撬棒反复投切之间的矛盾, 关键在于撬棒切除暂态期间转子电流的计算。

为此, 本文主要对撬棒实时投切策略进行优化, 分析了 DFIG 的暂态特性。针对风电场故障扰动场景, 从整个风电场层面出发, 研究了基于保障 LVRT 能力的 DFIG 机组撬棒自适应投切策略, 调整撬棒保护的投切顺序和时间, 在保证撬棒不重复投切的基础上, 及时将部分撬棒切除, 提高风电场的无功支撑能力。

## 2 含撬棒保护电路的 DFIG 暂态特性分析

本文所提出的保障 LVRT 能力的 DFIG 机组撬棒自适应投切策略的总体流程如图 1 所示。考虑撬棒保护的作用后, 风电场遭受故障扰动后的暂态过程可以分为以下两个部分:

- (1) 故障发生后撬棒投入到撬棒切除时刻;
- (2) 撬棒切除后, 转子电流将会发生暂态振荡, 其暂态特征与 DFIG 的自身参数、运行方式和外部电气量紧密相关。

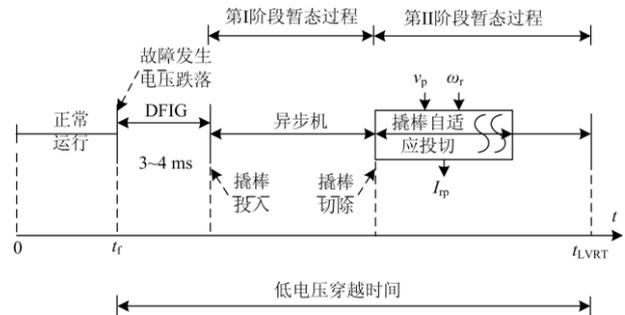


图 1 DFIG 机组撬棒自适应投切策略

Fig. 1 Adaptive switching strategy of DFIG unit crowbar

首先分析第一个过程, DFIG 在同步旋转坐标系下的电势方程和磁链方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_{s,+}^P = R_s i_{s,+}^P + D\psi_{s,+}^P + j\omega_1 \psi_{s,+}^P \\ u_{r,+}^P = R_r i_{r,+}^P + D\psi_{r,+}^P + j\omega_s \psi_{r,+}^P \\ \psi_{s,+}^P = L_s i_{s,+}^P + L_m i_{r,+}^P \\ \psi_{r,+}^P = L_m i_{s,+}^P + L_r i_{r,+}^P \\ u_{s,-}^N = R_s i_{s,-}^N + D\psi_{s,-}^N - j\omega_1 \psi_{s,-}^N \\ u_{r,-}^N = R_r i_{r,-}^N + D\psi_{r,-}^N - j(2-s)\omega_1 \psi_{r,-}^N \\ \psi_{s,-}^N = L_s i_{s,-}^N + L_m i_{r,-}^N \\ \psi_{r,-}^N = L_m i_{s,-}^N + L_r i_{r,-}^N \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_{s,+}^P$ ,  $i_{s,+}^P$ ,  $\psi_{s,+}^P$ ,  $u_{r,+}^P$ ,  $i_{r,+}^P$ ,  $\psi_{r,+}^P$  分别为正序

定转子电压、电流、磁链矢量； $u_{s-}^N$ 、 $i_{s-}^N$ 、 $\psi_{s-}^N$ 、 $u_{r-}^N$ 、 $i_{r-}^N$ 、 $\psi_{r-}^N$  分别为负序定转子电压、电流、磁链矢量； $R_s$  和  $R_r$  分别为定转子侧的绕组电阻； $L_s$ 、 $L_m$  分别为定转子侧的自感和互感； $\omega_1$  为同步角速度， $\omega_s$  为转差角速度， $s$  为转差率。

假设撬棒保护在 DFIG 遭受低压扰动时立即工作，其暂态过程包括故障附加电源作用下的零状态响应和短路残压作用下的零输入响应<sup>[15]</sup>。基于式(1)，通过故障后系统等效电路计算得到短路电流，利用叠加原理可得到撬棒投入情况下的机组总无功功率  $Q$  的表达式为

$$Q = Q_+ + Q_- \approx \frac{U^2 x_x}{X_{ss}^2} [(\sigma - 1)e^{-t/(\sigma T_r)} \cos(\omega_s t + \alpha) + e^{-t/(\sigma T_r)} \cos \alpha]^2 + \left[ \frac{U_x^2}{(r_s + r_r/s)^2 + (x_s + x_r)^2} \right] (1 - e^{-t/T_s})^2 (x_s + x_r) \quad (2)$$

式中： $Q_+$  为暂态过程中 DFIG 发出的无功功率； $Q_-$  为转入异步运行状态后 DFIG 吸收的无功功率； $T_s$  和  $T_r$  分别为定转子时间常数；等效时间常数  $T_a = \frac{x_x + x_s + x_r}{r_x + r_s + r_r/s}$ 。

撬棒投入后，根据式(1)可求得转子电流为

$$I_r = U_- \frac{L_s L_r}{j\omega_1 (L_s L_r^2 - L_r L_m^2)} \{ k_s (k_z - 1) (1 - p) e^{j\omega_1 t} - k_s p e^{-t/\tau_s'} + k_s [1 - k_z (1 - p)] e^{j\omega_1 t} e^{-t/\tau_r'} \} \quad (3)$$

式中： $\omega_r$  为转子角速度； $p$  为电压跌落深度，取值为 0~1， $v_p = 1 - p$  对应机端电压标么值； $k_s$  及  $k_z$  为常数； $\tau_s'$  及  $\tau_r'$  为撬棒投入后的定转子时间常数；其中， $k_z$  和  $\tau_r'$  与撬棒电阻的阻值  $R_c$  有关。

根据式(2)、式(3)可知，撬棒的投切改变了 DFIG 的无功输出和转子电流，其中撬棒投入后的转子电流的大小与参数  $p$ 、 $\omega_r$  和  $R_c$  密切相关。

若变流器恢复控制的时间因撬棒保护电路切除不当而重叠或滞后于电网电压恢复时间，将可能加剧振荡过程，引发撬棒重复投切。在该过程中，DFIG 的转子暂态电流大小与风机的自身参数、运行方式和外部电气量紧密相关，由于暂态过程中电磁参数变化情况复杂，难以得到该过程中转子电流的解析式，为此本文将其视作黑箱模型，忽略其内部变化，仅分析哪些输入变量会对输出量(DFIG 转子电流)造成影响。对于同一台 DFIG，撬棒投入之后的转子电流变化情况与撬棒切除之后的转子电流变化情

况存在类比性，式(3)中指出，撬棒投入后转子电流与参数  $p$ 、 $\omega_r$  和  $R_c$  有关，因此可以认为撬棒切除之后转子电流变化的黑箱模型也受这些变量控制。

另一方面，根据文献[8]中的撬棒不同切除时刻转子电流的变化情况可知，过早或过晚切除撬棒均可能导致切除后产生转子过电流。当转子电流瞬时模值较小时，切除撬棒后转子电流冲击也较小，因此最好在转子电流为 0 时进行撬棒的切除。但是，考虑到三相转子电流之间互相差 120° 相角，切除时刻 A、B、C 三相转子电流瞬时值大小不同，为避免切除后某一相转子电流冲击过大，超过撬棒的设定门槛，需要从减小转子三相电流冲击的角度出发，在三相转子电流的最大瞬时模值达到最小时切除撬棒，此时引起的三相转子过电流最小，引发撬棒的二次投入的风险最低<sup>[16]</sup>。

由于转子三相电流的衰减和振荡规律一致，相互之间相差 120°，假设撬棒投入后转子电流幅值服从函数  $D_r(t)$ ，振荡规律服从函数  $O_r(t)$ ，以 A 相为参考相，则三相转子电流瞬时值分别为

$$\begin{cases} i_{ra} = D_r(t) \sin(O_r(t)) \\ i_{rb} = D_r(t) \sin(O_r(t) - 120^\circ) \\ i_{rc} = D_r(t) \sin(O_r(t) + 120^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

为使得撬棒切除对三相转子电流产生的冲击均较小，需要使得切除时刻转子三相电流都处于模值较小的数值，即保证  $i_{ra}$ 、 $i_{rb}$ 、 $i_{rc}$  中  $i_{r\max}(t)$  的最大模值在  $t_{\text{best}}$  时刻(最佳撬棒切除时刻)取得最小值，如式(5)所示。

$$\begin{cases} i_{r\max}(t) = \max(|i_{ra}|, |i_{rb}|, |i_{rc}|) \\ i_{r\max}(t_{\text{best}}) = \min(i_{r\max}(t)), \text{ when } t = t_{\text{best}} \end{cases} \quad (5)$$

图 2 为三相转子电流最大值  $i_{r\max}(t)/D_r(t)$  的幅值-相角曲线。当  $O_r(t_{\text{best}})$  为  $\pi/3$  时(以转子 A 相电流为参考相)，1 个变化周期内  $i_{r\max}(t)$  取值最小，此时对应的  $i_{ra} = 0.866D_r(t)$ 、 $i_{rb} = -0.866D_r(t)$ 、 $i_{rc} = 0$ ，则  $t_{\text{best}}$  为最佳切除时间，切除之后引起的三相转子电流波动最小。但由于撬棒切除时刻转子电流的相角将发生突变，因此难以将  $\varphi_{ra} = \pi/3$  作为最佳切除时间的判据。考虑到  $t = t_{\text{best}}$  时，三相转子电流的瞬时值分别为  $0.866D_r(t)$ 、 $-0.866D_r(t)$ 、0，所以可以通过实时测量三相转子电流的瞬时值，来确定撬棒最佳切除时刻，即当某一相转子电流  $i_{r\varphi}$  为 0 时：

$$\begin{cases} t = t_{\text{best}} \\ i_{r\max}(t_{\text{best}}) = \min(i_{r\max}(t)) \end{cases} \quad (6)$$

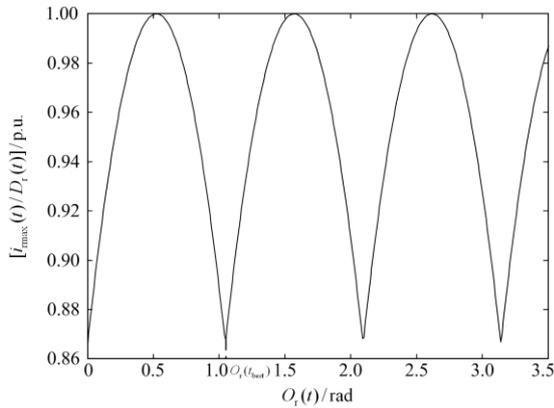


图2 三相转子电流最大值幅值—相角曲线

Fig. 2 Three-phase rotor current maximum amplitude-phase angle curve

综上,合理的撬棒投切策略是保证风电场暂态稳定特性和无功平衡的重要影响因素,撬棒切除之后DFIG暂态过程不仅受外部电气量 $p$ 、 $\omega_r$ 与 $R_c$ 影响,而且与撬棒切除时间密切相关。考虑到撬棒保护电路自身的特征和切除时间特性,对于某特定型号的DFIG,进行如下的假设和简化:

(1) 认为影响其变化的因素包括第一个过程中的外部电气量 $p$ 、 $\omega_r$ 和 $R_c$ 及撬棒切除时间 $t_{c'act}$ ;

(2) 为防止撬棒切除时引起定转子电流振荡,造成撬棒的重复投入,在构建神经网络学习样本时,须在三相最大转子电流的瞬时模值最小时切除撬棒,对应的切除时间定义为 $t_{c'act}$ ;

(3) 将撬棒电阻视为已知量,本文算例分析中选取撬棒电阻为 $1 \text{ p.u.}$ 。

### 3 基于保障风电场LVRT能力的风机撬棒自适应投切策略

#### 3.1 基于RBF神经网络的撬棒切除过程建模

根据上节中的理论分析可知,撬棒切除过程中转子电流的变化情况十分复杂,因此将其描述为黑箱模型<sup>[17]</sup>,并通过神经网络来构造撬棒切除后的转子电流与其影响因素的映射模型,获取撬棒切除之后的最大转子电流 $I_{rp}$ ,并与撬棒保护门限值 $I_{rn}$ 进行比较,判断是否会出现撬棒重复投切现象。

$$\begin{cases} I_{rp} < I_{rn}, \text{ 切除后撬棒不重新投入} \\ I_{rp} \geq I_{rn}, \text{ 切除后撬棒重新投入} \end{cases} \quad (7)$$

为实现撬棒切除之后转子电流变化情况对应的黑箱系统的建模,本文通过仿真模拟撬棒切除后转子电流的变化情况,采用RBF神经网络来构建黑箱系统中输入量与输出量之间的耦合关系,实现撬棒切除之后的最大转子电流 $I_{rp}$ 的预测。

在进行样本训练时,为提高运算效率、简化计算流程,本文做出了以下假设:

(1) 由于风机的机械惯性远大于电磁惯性,且撬棒切除后转子电流将在数百毫秒内达到稳定,因此认为暂态过程中转速 $\omega_r$ 维持不变;

(2) 根据撬棒的动作区域可知,只有当电压发生大幅下降,转子电流增大为额定值两倍以上时才会导致撬棒的动作。因此故障后残压 $v_p$ 取 $0 \sim 0.8 \text{ p.u.}$ 。

(3) 为防止撬棒切除时引起定转子电流振荡而对电网造成二次冲击,导致撬棒的重新投入,根据上节的分析可知,可实时检测三相转子电流的大小,当某一相转子电流过零点时切除撬棒。

根据上述假设条件,采用DIGSILENT仿真软件,搭建如图3所示的风电场仿真模型,算例风电场内含有67台容量为1.5 MW的双馈风机。风电场配套有一个容量为600 MW的火电厂进行风火打捆,打捆的电能通过220 kV的输电线路进行外送。

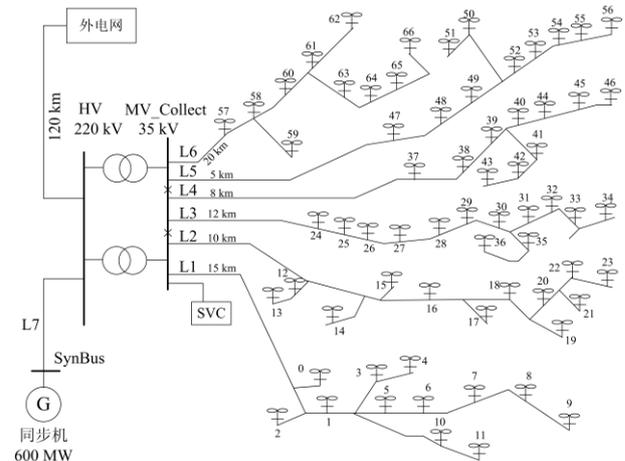


图3 神经网络训练用风电场结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wind farm structure for neural network training

训练样本的生成流程为:在 $t=0 \text{ ms}$ 时故障导致公共耦合节点(Point of Common Coupling, PCC)电压降低,撬棒保护投入运行,随后,实时监测三相转子电流瞬时值,当某一相转子电流过零点时将撬棒切除。本文选取三相对称性短路故障场景,以撬棒切除后瞬间 $i_{rmax}(t)$ 为训练样本,如附表A1所示。

由于目前撬棒切除策略为固定时间切除<sup>[18]</sup>,因此相应地以固定时间切除的样本也进行训练,切除时间设定为 $t_{c'act} = 7.2 \text{ ms}$ ,得到的训练样本如附表A2所示。对比两表结果可知,固定时刻切除撬棒可能导致转子电流冲击较大,进而造成部分可切除的撬棒没有归入到切除集合中,使得风电场内的无功

资源未得到充分的利用,进而造成 PCC 节点电压无法得到最大程度的抬升,如果 LVRT 时间超过国家限定标准,将导致风电场内风机大规模切机脱网<sup>[19]</sup>。

由附表 A1 和附表 A2 的对比分析可知,撬棒保护电路的切除时间对切除后转子电流最大值  $I_{rp}$  有影响,在相同转速和风机残压情况下,附表 A1 中对应的撬棒切除后转子电流的最大值  $I_{rp}$  较小,扩大了撬棒可切除的风机集合,使得风电场内运行工况允许的风机从异步状态转化为双馈运行状态,保证风电场内的无功资源得到充分的应用<sup>[20]</sup>。

若不考虑撬棒切除时间的影响,RBF 网络学习结果得到某一时刻撬棒切除之后转子绕组电流的最大值,通过判断转子电流最大值是否超过撬棒保护门槛值来确定撬棒是否存在重新投入的情况<sup>[21]</sup>。但是若选择切除撬棒的时间不合适,转子电流瞬时模值较大,可能导致切除撬棒时引起转子电流振荡,使得某些本可以通过延时切除的风机因为  $I_{rp}$  超过门槛值而不允许切除,没有充分利用风电场内无功支撑能力<sup>[22]</sup>。为此,本文通过扫描三相转子电流瞬时值,在某相电流过零点时进行撬棒切除,通过选择撬棒最佳切除时间,获取对应的训练样本列表进行学习,增加了可转变为双馈运行状态风机的数目,以保证系统的无功支撑能力得到及时利用。

### 3.2 基于 RBF 神经网络的撬棒自适应投切策略

为保障风电场内的 LVRT 能力,本文通过采用 RBF 神经网络模型,在保证撬棒不发生多次投切的基础上,提出如图 4 所示的 LVRT 场景下撬棒自适应投切策略。

首先实时测量 DFIG 三相转子电流并与撬棒保护动作值进行比较,当满足动作判据  $I_r > I_{rn}$  时,立即投入撬棒保护。

撬棒投入之后,监测三相转子电流,在某一相转子电流瞬时值为 0 的时刻,将转子转速  $\omega_r$ 、故障后残压  $v_p$  作为黑箱系统的输入量,导入 3.1 节构建的 RBF 神经网络中,获得撬棒切除后转子电流最大值  $I_{es\_RBF}$ ,即为式(7)中的  $I_{rp}$ 。若  $I_r < I_{rn}$ ,说明切除后不会发生重复投切现象,此时发出信号,允许撬棒切除;若  $I_{rp} > I_{rn}$ ,说明切除后会出现撬棒重复投切现象,还未达到撬棒切除的允许条件,继续进行 DFIG 的状态监测<sup>[23]</sup>。同时,考虑到 RBF 网络获得的结果可能存在误差,为防止撬棒的重复投切对 RSC 造成不可逆损伤,策略中在实施撬棒切除之后,应实时监测撬棒的动作行为,如果发现撬棒出现重新投入的现象,将在故障清除、扰动平复前对撬棒保护进行闭锁,并对 RBF 训练样本进行修正。

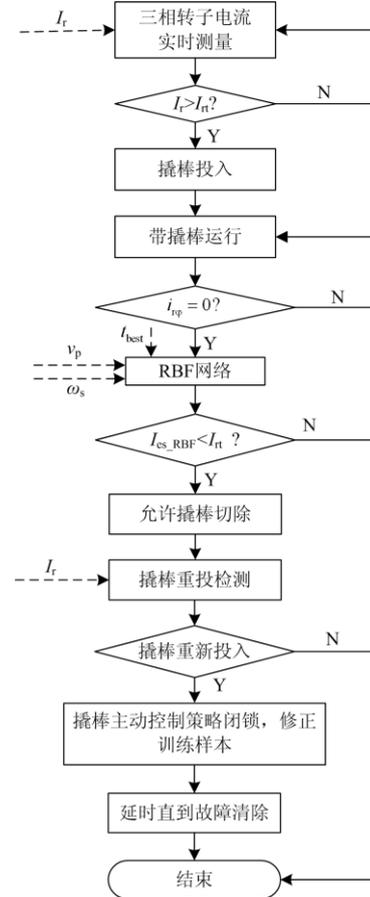


图 4 基于 RBF 神经网络的撬棒自适应投切策略流程图

Fig. 4 Flow chart of adaptive switching strategy for crowbar based on RBF neural network

### 3.3 误差及适应性分析

为评估经训练后网络输出的准确性,取所建立风电场模型中的若干并网 DFIG 并改变故障状态,使  $v_p$  及  $\omega_r$  在其取值范围内变化,其中步长为训练样本的 1/10。进而得到撬棒切除后转子电流最大值的真实值,计为  $I_{rp\_re}$ 。定义 RBF 神经网络的相对误差为

$$E = \frac{I_{rp\_es} - I_{rp\_re}}{I_{rp\_re}} \times 100\% \quad (8)$$

神经网络的逐点误差分布和误差概率分布分别如图 5、图 6 所示,RBF 神经网络的预测误差基本上符合正态分布。对于该型号带撬棒运行的风电机组,利用 RBF 神经网络进行预测的结果样本空间中的误差均分布在  $\pm 3\%$  以内,故在任意输入范围撬棒切除时的转子过电流最大预测数值都能够较好地反映真实情况,RBF 神经网络预测合理。

虽然 RBF 神经网络在一定程度上具有泛化功能,即经过训练后能够对非训练样本中的输入产生

与之匹配的输出,但在同一个网络模型的基础上对同一组训练样本多次反复训练后,其输入/输出关系、误差及误差分布如果呈现较程度的不确定性,甚至导致映射关系的多元化与复杂化,则这种不确定性将会限制相应结构的网络在该问题上的普遍性应用<sup>[24]</sup>。为了避免这种现象产生,需要在预测误差满足应用需求的基础上,进一步对 RBF 神经网络的适应性进行分析,以确保上述结论的稳定性,以及在改变撬棒电阻  $R_c$  后上述结论的适应性。

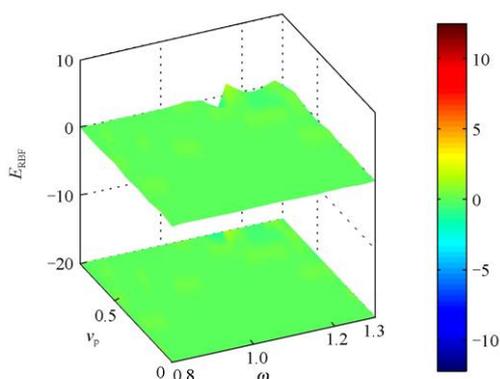


图 5 RBF 网络逐点误差分布

Fig. 5 RBF network error distribution point by point

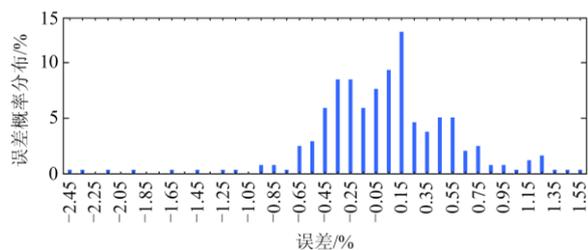


图 6 RBF 网络误差概率分布

Fig. 6 RBF network error probability distribution

(1) 利用训练样本数据,重复 10 次 RBF 神经网络的训练过程。结果显示基于 RBF 神经网络的转子电流预测结果非常稳定,预测逐点误差一致如图 6 所示。

(2) 改变撬棒电阻的大小并重复上述试验,在对 RBF 神经网络训练过程施加同样误差约束条件的情况下,对同一组训练样本,所得预测误差及概率分布未出现明显变化。多次重复的试验结果表明预测结果稳定。

综上所述,为模拟带撬棒运行的 DFIG 的撬棒切除暂态,本节采用神经网络对其黑箱过程进行了建模。该模型不仅能够在误差、精度及试验的可重复性上提供更为良好的结果,而且其准确性不受撬棒电阻阻值的影响。

#### 4 采用撬棒自适应投切策略下的风电场内连锁故障推演

算例 1: 不采用撬棒自适应投切策略的故障演进过程

风电场外送线路在  $t = 0$  ms 时三相短路,故障点距离 PCC 节点为全长的 5% 处,短路点接地电阻设为  $115 \Omega$ 。仿真得到不采用自适应投切策略的风机撬棒投入时刻表,如附表 A3 所示。

根据附表 A3 可知,故障后风电场内撬棒保护分为 3 个批次逐步投入<sup>[25]</sup>。第一组撬棒投入时间为 5.7 ms,为 1 号风机到 29 号风机。一段时间后,处于异步运行状态的 DFIG 开始从风电场内吸收无功,加剧风电场内的无功缺额,继续降低风机的机端电压,引发第二组风机的撬棒保护电路的投入,对应的第二组撬棒投入时间为 11.5~13.3 ms,对应的风机编号为 30 号到 60 号风机。同理,随着风电场内异步运行状态的风机比例越来越高,风电场内无功不足的情况更加严重,在 19.0 ms 时刻第三组风机的撬棒保护电路投入,剩余的风机全部转变为异步运行状态。

风电场内各台风机稳定运行后对应的机端电压如附表 A3 所示。根据 LVRT 标准计算得到各台风机的 LVRT 时间为 1.790~1.843 s。要保证风电场的正常运行状态,保护需要在 1.790 s 之内完成动作,切除低电压扰动,否则 DFIG 会逐步发生脱网。综上可知,撬棒保护的存在避免了低压扰动对 RSC 及风机本身造成的损坏,提供了一定的 LVRT 能力,但长期带撬棒运行的 DFIG 将处于异步运行状态,从系统吸收无功,拉低风电场 PCC 节点电压,导致风机的脱网事故。

若采用实时撬棒动作方案,某些风机将出现撬棒重复投切的现象,以 15 号 DFIG 为例,其机端电压变化如图 7 所示。在 0 s 故障发生后迅速投入撬

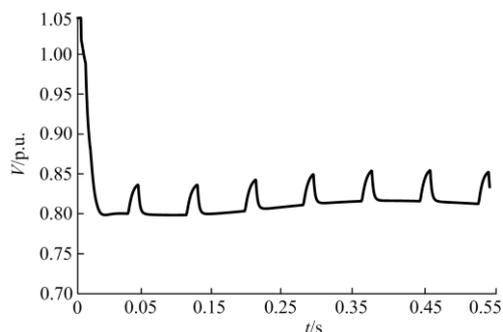


图 7 采用实时动作策略后的 15 号 DFIG 机端电压

Fig. 7 No. 15 DFIG terminal voltage after real-time action strategy

棒, 0.050 s 时撬棒切除, 但切除之后的暂态过程中转子电流超过  $I_n$ , 0.058 s 时撬棒重新投入。若不对撬棒是否出现重复投切进行判断, 15 号 DFIG 在 0~0.450 s 时间段内, 撬棒总计投入了 7 次, 其中有 6 次为重复投切, 每一次撬棒投切都会给 RSC 带来很大的电流冲击, 对设备造成损害, 因此需要选择合适的风机在恰当的时刻切除撬棒, 在不损害设备的前提下保障风电场内的无功支撑<sup>[25]</sup>。

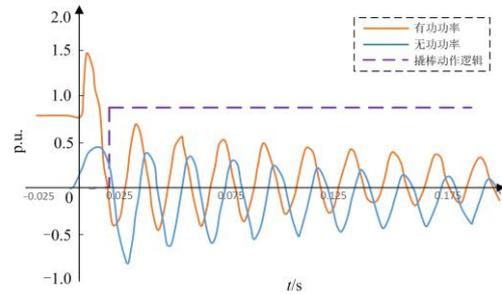
算例 2: 采用撬棒自适应投切策略的故障演进过程

针对上述相同的故障场景, 采用撬棒自适应投切策略, 通过仿真模拟风电场内的故障演进过程, 记录各 DFIG 撬棒的投切时刻, 如附表 A4 所示。

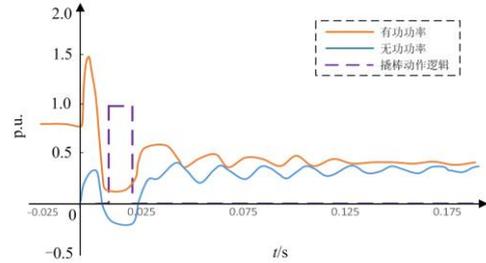
对比附表 A3 和附表 A4 可知, 当风电场内的所有 DFIG 均配置有撬棒自适应投切后, 第一组 DFIG 的撬棒投入时间在 5.7 ms, 与不采用自适应投切策略相同; 第一组 DFIG 的撬棒投入运行后, 该组风机从双馈运行进入异步运行状态, 开始从系统中吸收无功, 导致风机机端电压进一步降低, 在 11.5~13.3 ms 时, 第二组风机的撬棒保护电路开始投入, 该段故障推演情况与不采用自适应投切策略的情况一致; 当时间推移到 13 ms 左右时, 通过 RBF 网络的计算可知, 第一组投入撬棒保护的部分风机已经达到撬棒切除的运行工况, 且不会造成撬棒的二次投入, 因此在 13.1~13.6 ms 之间, 部分风机选择将撬棒保护电路切除, 此部分风机将由异步运行状态转变为双馈运行状态, 同时向电网提供无功, PCC 节点电压升高, 使得风电场 LVRT 能力增加; 故障后 18.7~20.0 ms 的时间段, 第一组投入撬棒保护电路的部分风机成功切除撬棒; 在故障后 20.4~22.1 ms 时间段, 第三组风机撬棒投入, 由附表 A3 可知, 若不采用自适应投切策略, 第三组撬棒投入的时间为 19.0 ms, 由于此前已经有部分风机成功切除撬棒, 因此风电场内的电压缺额减小, 进而导致了第三轮撬棒的延迟投入; 随着时间继续推移, 其他达到正常运行工况的风机的撬棒保护电路完成自适应切除, 风电场内的无功及电压逐步趋于稳定。

图 8 为故障期间 37 号 DFIG 分别在两种运行策略下的运行特征, 即传统延时策略和自适应策略<sup>[26]</sup>。其中, 撬棒初始投入时刻不变, 自适应策略中撬棒及时成功切除。采用自适应投切策略后, 风电场内已投入的撬棒保护将得到及时、合理的切除: (1) 撬棒切除之后, 转子电流维持在动作值以下, 并没有发生重复投切的现象, 保障了设备(风机本体、撬棒电路和 RSC)的安全稳定运行; (2) 撬棒切除后, 风机从异步运行状态恢复为双馈运行状态, 同时开始

向电网发出无功。由此可见, 本文提出的自适应投切策略提升了风电场的 LVRT 能力。



(a) 传统延时策略下 37 号 DFIG 的出力状况和保护动作逻辑



(b) 自适应策略下 37 号 DFIG 的出力状况和保护动作逻辑

图 8 传统及自适应策略下 37 号 DFIG 故障期间运行特征

Fig. 8 Operational characteristics during No. 37 DFIG fault under traditional and adaptive strategies

RBF 网络采用不同的训练样本进行学习时, 得到的结果有所不同。由 2.1 节的分析可知, 在  $i_{rmax}(t)$  达到最小时切除撬棒能够降低转子过电流, 提高撬棒单次成功切除的概率, 因此采用该组学习样本能够充分利用风电场内的可用无功资源, 提高风电场 PCC 节点电压。图 9 给出了采用不同学习样本的撬棒自适应投切策略后由故障暂态到稳态过程中风电场 PCC 节点电压转变情况。在采用自适应撬棒投切策略后, 将在  $i_{rmax}(t)$  最小时切除的情况作为学习样本, PCC 节点的稳态电压为 0.764 p.u.; 将定时切除撬棒的情况作为学习样本, PCC 节点的稳态电压为 0.609 p.u.; 采用传统延时动作策略时, PCC 节点稳态电压为 0.527 p.u.; 采用传统实时动作策略时, 由于存在撬棒重复投切的现象, PCC 节点的电压也在不断地波动, 该策略对 RSC 损伤较大<sup>[27]</sup>。根据风电场 LVRT 标准, 自适应策略( $i_{rmax}(t)$  样本)、自适应策略(定时样本)和传统延时动作策略所能提供的并网运行时间分别为 1.732 s、1.428 s 和 1.267 s, 当故障在上述并网时间内切除时, 风电场将恢复正常运行工况, 进而避免风机脱网。因此, 采用  $i_{rmax}(t)$  样本训练的自适应策略后, LVRT 场景下 DFIG 的并网时间分别延长了 304 ms(采用定时切除样本进行训练)和 465 ms(采用  $i_{rmax}(t)$  最小时刻切除样本进行训练), 保护的允许动作时间也相应延长了 304 ms 和 465 ms。

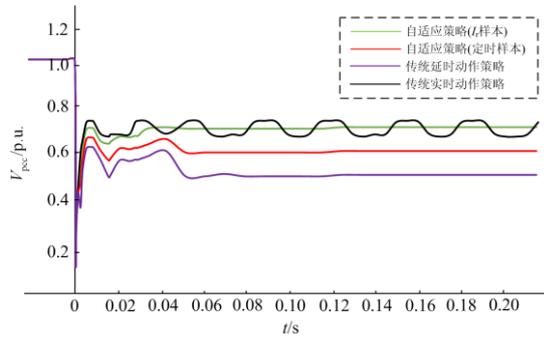


图 9 传统及自适应策略下 PCC 节点电压变化  
Fig. 9 PCC node voltage variation under traditional and adaptive strategies

### 5 结论

本文首先分析了 LVRT 场景下, 风电场内 DFIG 的现有撬棒切除策略的局限性。针对风电场故障扰动场景下, 对计及撬棒保护的 DFIG 暂态特性、运行模态和控制策略进行了分析。在此基础上, 计及撬棒保护电路切除过程中转子侧参数改变及转子电流与电压的强非线性, 构建 RBF 网络对该黑箱过程进行描述, 并基于预测的转子过电流最大值提出撬棒自适应投切策略。算例仿真结果表明, 该策略在保证风机自身安全的前提下避免了撬棒的重复投切, 提升了风电场的 LVRT 能力。

### 附表

附表 A1 撬棒切除后转子电流的训练样本 (撬棒切除时  $i_{r0}=0$ )

Attached Table A1 Training sample of rotor current after crowbar removal (Crowbar removal:  $i_{r0}=0$ )

$I_r/p.u.$		$v_p/p.u.$								
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$\omega_r/p.u.$	0.8	3.818	2.672	2.398	2.327	2.314	2.015	1.791	1.593	1.502
	0.82	3.740	2.698	2.385	2.302	2.296	2.036	1.795	1.576	1.503
	0.84	3.629	2.650	2.345	2.359	2.222	1.973	1.744	1.532	1.479
	0.86	3.652	2.545	2.342	2.332	2.217	1.945	1.684	1.504	1.399
	0.88	3.530	2.561	2.273	2.258	2.201	1.908	1.664	1.469	1.380
	0.9	3.471	2.534	2.291	2.274	2.089	1.887	1.657	1.455	1.371
	0.92	3.441	2.493	2.247	2.197	2.089	1.826	1.614	1.412	1.330
	0.94	3.420	2.464	2.202	2.144	2.042	1.815	1.623	1.421	1.319
	0.96	3.457	2.447	2.141	2.190	2.032	1.800	1.559	1.396	1.265
	0.98	3.387	2.440	2.125	2.167	2.043	1.794	1.546	1.367	1.255
	1	3.308	2.330	2.142	2.149	2.003	1.703	1.532	1.334	1.212
	1.02	3.295	2.370	2.128	2.052	1.926	1.705	1.472	1.282	1.225
	1.04	3.310	2.286	2.084	2.085	1.973	1.651	1.451	1.268	1.194
	1.06	3.242	2.318	2.089	2.075	1.882	1.655	1.442	1.276	1.146
	1.08	3.229	2.273	2.071	1.994	1.852	1.628	1.434	1.226	1.146
	1.1	3.172	2.238	1.989	2.033	1.827	1.606	1.403	1.209	1.096
	1.12	3.139	2.177	1.972	1.978	1.803	1.570	1.355	1.173	1.108
	1.14	3.098	2.203	2.017	1.950	1.782	1.547	1.363	1.171	1.068
	1.16	3.050	2.184	1.939	1.936	1.803	1.548	1.349	1.151	1.028
	1.18	3.066	2.117	1.917	1.960	1.795	1.541	1.308	1.138	1.018
1.2	2.976	2.119	1.887	1.886	1.755	1.511	1.294	1.106	0.964	
1.22	2.967	2.103	1.912	1.914	1.743	1.496	1.283	1.111	0.958	
1.24	2.887	2.106	1.876	1.854	1.681	1.460	1.261	1.092	0.934	
1.26	2.858	2.030	1.872	1.876	1.693	1.411	1.210	1.075	0.915	
1.28	2.845	2.017	1.873	1.838	1.683	1.423	1.208	1.047	0.922	
1.3	2.804	2.007	1.801	1.830	1.647	1.401	1.172	1.029	0.878	



附表 A2 撬棒切除后转子电流的训练样本(固定撬棒切除时间  $t_{\text{cact}}=7.2$  ms)

Attached Table A2 Training sample of rotor current after crowbar removal (Fixed crowbar removal time:  $t_{\text{cact}}=7.2$  ms)

$I_r/p.u.$		$v_p/p.u.$								
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
$\omega_r/p.u.$	0.8	4.341	3.137	2.862	2.806	2.660	2.428	2.096	1.916	1.770
	0.82	4.326	3.131	2.745	2.761	2.609	2.339	2.057	1.889	1.725
	0.84	4.209	3.049	2.734	2.743	2.559	2.335	2.071	1.850	1.705
	0.86	4.288	3.060	2.750	2.718	2.555	2.294	2.017	1.803	1.637
	0.88	4.204	2.963	2.674	2.647	2.537	2.270	1.996	1.761	1.617
	0.9	4.160	2.978	2.617	2.573	2.503	2.204	1.945	1.696	1.612
	0.92	4.114	2.931	2.589	2.599	2.454	2.168	1.914	1.699	1.547
	0.94	4.032	2.863	2.573	2.582	2.390	2.105	1.869	1.621	1.543
	0.96	3.958	2.818	2.583	2.567	2.367	2.074	1.809	1.601	1.502
	0.98	3.984	2.800	2.542	2.501	2.399	2.055	1.823	1.569	1.449
	1	3.836	2.807	2.496	2.487	2.309	1.995	1.758	1.567	1.446
	1.02	3.781	2.760	2.444	2.422	2.298	2.024	1.723	1.542	1.425
	1.04	3.838	2.702	2.447	2.461	2.286	1.997	1.717	1.517	1.384
	1.06	3.763	2.681	2.444	2.379	2.259	1.907	1.664	1.486	1.362
	1.08	3.710	2.658	2.365	2.388	2.216	1.926	1.638	1.448	1.351
	1.1	3.727	2.642	2.388	2.320	2.150	1.909	1.612	1.436	1.310
	1.12	3.640	2.621	2.321	2.313	2.165	1.859	1.616	1.387	1.267
	1.14	3.564	2.609	2.344	2.310	2.111	1.803	1.551	1.364	1.272
	1.16	3.603	2.529	2.312	2.244	2.089	1.810	1.532	1.356	1.192
	1.18	3.516	2.507	2.279	2.250	2.081	1.773	1.546	1.352	1.156
1.2	3.480	2.482	2.276	2.252	2.057	1.774	1.524	1.288	1.160	
1.22	3.409	2.446	2.210	2.218	1.990	1.747	1.491	1.267	1.132	
1.24	3.421	2.474	2.229	2.219	1.971	1.709	1.440	1.269	1.104	
1.26	3.386	2.405	2.145	2.191	1.940	1.668	1.419	1.268	1.092	
1.28	3.376	2.354	2.169	2.117	1.945	1.646	1.405	1.224	1.069	
1.3	3.292	2.380	2.126	2.142	1.925	1.644	1.395	1.208	1.059	

附表 A3 不采用自适应投切策略的风机撬棒投入时刻表

Attached Table A3 Wind turbine crowbar timetable without adaptive switching strategy

DFIG 编号	稳态 电压/p.u.	LVRT 时间/s									
0	0.797	1.798	17	0.810	1.823	34	0.803	1.808	51	0.818	1.839
1	0.797	1.797	18	0.810	1.823	35	0.802	1.807	52	0.818	1.839
2	0.797	1.797	19	0.810	1.823	36	0.802	1.807	53	0.819	1.840
3	0.796	1.796	20	0.810	1.823	37	0.815	1.833	54	0.820	1.842
4	0.796	1.796	21	0.810	1.823	38	0.815	1.833	55	0.820	1.842
5	0.796	1.796	22	0.810	1.823	39	0.814	1.831	56	0.820	1.842
6	0.796	1.796	23	0.810	1.823	40	0.814	1.831	57	0.794	1.791
7	0.796	1.796	24	0.801	1.805	41	0.814	1.831	58	0.793	1.790
8	0.796	1.796	25	0.800	1.804	42	0.814	1.831	59	0.793	1.790
9	0.796	1.796	26	0.800	1.804	43	0.814	1.831	60	0.793	1.790
10	0.796	1.796	27	0.800	1.804	44	0.815	1.832	61	0.793	1.790
11	0.796	1.796	28	0.799	1.802	45	0.815	1.832	62	0.793	1.790
12	0.808	1.819	29	0.799	1.802	46	0.815	1.832	63	0.793	1.790
13	0.808	1.819	30	0.801	1.804	47	0.819	1.841	64	0.794	1.791
14	0.810	1.823	31	0.802	1.807	48	0.819	1.841	65	0.795	1.793
15	0.811	1.824	32	0.803	1.809	49	0.818	1.839	66	0.795	1.793
16	0.811	1.824	33	0.802	1.807	50	0.818	1.839	—	—	—

附表 A4 风机稳定电压及对应的 LVRT 时间

Attached Table A4 Wind turbine stability voltage and corresponding LVRT time

DFIG 编号	稳态 电压/p.u.	LVRT 时间/s									
0	0.797	1.798	17	0.810	1.823	34	0.803	1.808	51	0.818	1.839
1	0.797	1.797	18	0.810	1.823	35	0.802	1.807	52	0.818	1.839
2	0.797	1.797	19	0.810	1.823	36	0.802	1.807	53	0.819	1.840
3	0.796	1.796	20	0.810	1.823	37	0.815	1.833	54	0.820	1.842
4	0.796	1.796	21	0.810	1.823	38	0.815	1.833	55	0.820	1.842
5	0.796	1.796	22	0.810	1.823	39	0.814	1.831	56	0.820	1.842
6	0.796	1.796	23	0.810	1.823	40	0.814	1.831	57	0.794	1.791
7	0.796	1.796	24	0.801	1.805	41	0.814	1.831	58	0.793	1.790
8	0.796	1.796	25	0.800	1.804	42	0.814	1.831	59	0.793	1.790
9	0.796	1.796	26	0.800	1.804	43	0.814	1.831	60	0.793	1.790
10	0.796	1.796	27	0.800	1.804	44	0.815	1.832	61	0.793	1.790
11	0.796	1.796	28	0.799	1.802	45	0.815	1.832	62	0.793	1.790
12	0.808	1.819	29	0.799	1.802	46	0.815	1.832	63	0.793	1.790
13	0.808	1.819	30	0.801	1.804	47	0.819	1.841	64	0.794	1.791
14	0.810	1.823	31	0.802	1.807	48	0.819	1.841	65	0.795	1.793
15	0.811	1.824	32	0.803	1.809	49	0.818	1.839	66	0.795	1.793
16	0.811	1.824	33	0.802	1.807	50	0.818	1.839	—	—	—

附表 A5 采用自适应投切策略下风电机组撬棒保护投切时刻 (“—”表示不切除)

Attached Table A5 Wind turbine crowbar timetable with adaptive switching strategy (“—” means no cutting)

DFIG 编号	撬棒投入 时刻/ms	撬棒切除 时刻/ms									
0	5.7	13.3	17	5.7	—	34	12.4	—	51	13.3	—
1	5.7	13.3	18	5.7	—	35	12.4	19.7	52	13.3	—
2	5.7	13.3	19	5.7	13.4	36	12.4	19.9	53	13.3	—
3	5.7	13.3	20	5.7	—	37	12.4	19.9	54	13.3	—
4	5.7	13.5	21	5.7	—	38	12.4	—	55	13.3	—
5	5.7	13.5	22	5.7	—	39	12.4	—	56	13.3	—
6	5.7	13.6	23	5.7	—	40	12.4	—	57	13.3	22.0
7	5.7	13.6	24	5.7	13.6	41	12.4	—	58	13.3	21.5
8	5.7	13.6	25	5.7	13.4	42	12.4	—	59	13.3	22.3
9	5.7	13.6	26	5.7	13.3	43	12.4	—	60	13.3	22.2
10	5.7	13.2	27	5.7	13.3	44	12.4	—	61	21.3	26.1
11	5.7	13.5	28	5.7	13.5	45	12.4	—	62	20.7	26.5
12	5.7	—	29	5.7	13.5	46	12.4	—	63	22.1	26.7
13	5.7	—	30	11.5	18.7	47	12.4	—	64	20.4	—
14	5.7	—	31	11.5	18.7	48	13.3	—	65	21.8	25.9
15	5.7	—	32	11.5	18.8	49	13.3	—	66	21.9	26.6
16	5.7	—	33	12.4	19.9	50	13.3	—	—	—	—

## 参考文献

[1] XIANG D, TURU J C, MURATEL S M, et al. On-site LVRT testing method for full-power converter wind turbines[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(1): 395-403.

[2] 冯子木, 孙国强, 滕德红, 等. 永磁直驱风电机组低电压穿越研究综述[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 75-85.  
FENG Zimu, SUN Guoqiang, TENG Dehong, et al. Reviews of LVRT technology for D-PMSG[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 75-85.

- [3] ZHU R, CHEN Z, WU X, et al. Virtual damping flux-based LVRT control for DFIG-based wind turbine[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(2): 714-725.
- [4] TAHIR K, BELFEDAL C, ALLAOUI T, et al. A new control strategy of WFSG-based wind turbine to enhance the LVRT capability[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 79: 172-187.
- [5] 周步祥, 董申, 林楠, 等. 计及撬棒电路的双馈风电机组二次骤升故障穿越特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 152-159.  
ZHOU Buxiang, DONG Shen, LIN Nan, et al. Analysis of double-fed wind turbine's secondary high voltage ride-through characteristics considering the crowbar circuit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 152-159.
- [6] 陈洁, 郭志, 付翔翔, 等. 基于撬棒控制策略的 DFIG 风电场动态等值建模研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 190-196.  
CHEN Jie, GUO Zhi, FU Hanxiang, et al. Research on dynamic equivalence modeling of wind farm composed of double fed induction generators based on crowbar control strategy[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 190-196.
- [7] 翟佳俊, 张步涵, 谢光龙, 等. 基于撬棒保护的双馈风电机组三相对称短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 18-23.  
ZHAI Jiajun, ZHANG Buhuan, XIE Guanglong, et al. Three-phase symmetrical short-circuit current characteristics analysis of wind turbine driven DFIG with crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 18-23.
- [8] 徐殿国, 王伟, 陈宁, 等. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 30(4): 44-51.  
XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning, et al. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 30(4): 44-51.
- [9] 王振树, 刘岩, 雷鸣, 等. 基于 Crowbar 的双馈机组风电场等值模型与并网仿真分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 44-51.  
WANG Zhenshu, LIU Yan, LEI Ming, et al. Doubly-fed induction generator wind farm aggregated model based on crowbar and integration simulation analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 44-51.
- [10] 郑涛, 魏占朋, 迟永宁, 等. 考虑撬棒保护动作时间的双馈式风电机组短路电流特性[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 45-52.  
ZHENG Tao, WEI Zhanpeng, CHI Yongning, et al. Short-circuit current characteristic of doubly fed induction generator considering crowbar protection insertion time[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 45-52.
- [11] 周宏林, 杨耕. 不同电压跌落深度下基于撬棒保护的双馈式风机短路电流特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊 1): 184-191.  
ZHOU Honglin, YANG Geng. Short circuit current characteristics of doubly fed induction generator with crowbar protection under different voltage dips[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 184-191.
- [12] 王增平, 李菁, 郑涛, 等. 不同撬棒保护投入时刻下双馈风电机组短路电流计算分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 109-117.  
WANG Zengping, LI Jing, ZHENG Tao, et al. Calculation and analysis of three-phase short-circuit current of doubly fed wind turbine considering different crowbar protection insertion time[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 109-117.
- [13] 姜惠兰, 范中林, 陈娟. 动态调整转子撬棒阻值的双馈风电机组低电压穿越方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 125-131.  
JIANG Huilan, FAN Zhonglin, CHEN Juan. Low voltage ride-through method of DFIG based wind turbines by dynamically adjusting crowbar resistance of rotor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 125-131.
- [14] 崔杨, 严干贵, 孟磊, 等. 双馈感应风电机组异常脱网及其无功需求分析[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 158-163.  
CUI Yang, YAN Gangui, MENG Lei, et al. Analysis on abnormal disconnection of doubly fed induction generator wind turbines from power grid and its demand on reactive power[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 158-163.
- [15] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.  
LIU Qihui, HE Yikang, BIAN Songjiang. Study on the no-load cutting-in control of the variable-speed constant frequency (VSCF) wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11.
- [16] 蒋卫宏. 基于 Crowbar 控制的双馈风电系统低压穿越运行[J]. 制造业自动化, 2008, 30(10): 104-108.  
JIANG Weihong. Low-voltage-ride-through operation of DFIG-based wind-power generation system based on crowbar action[J]. Manufacturing Automation, 2008, 30(10): 104-108.
- [17] 成和祥. 基于双馈风机短路特性的风电场集电线路继电保护整定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020,

- 48(16): 93-99.  
CHENG Hexiang. Discussion on setting scheme of collecting line relay protection in wind farm based on a DFIG short-circuit characteristic[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 93-99.
- [18] 姚骏, 廖勇. 基于 Crowbar 保护控制的交流励磁风电系统运行分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 79-83.  
YAO Jun, LIAO Yong. Analysis on the operations of an AC excited wind energy conversion system with crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 79-83.
- [19] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩, 等. 具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62.  
QI Shangmin, LI Fengting, HE Shi'en, et al. Research on fault characteristics of grid-connected large scale wind farms with LVRT capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 55-62.
- [20] 孙丽玲, 王艳娟. 双馈风力发电机高电压穿越暂态全过程分析及控制策略性能评估[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 593-599.  
SUN Liling, WANG Yanjuan. Analysis and performance evaluation for transient whole process of improved control strategy for doubly-fed induction generator crossed by high voltage ride through[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 593-599.
- [21] 王书征, 李先允, 许峰. 不对称电网故障下级联型光伏并网逆变器的低电压穿越控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 84-91.  
WANG Shuzheng, LI Xianyun, XU Feng. Low voltage ride-through controlling of cascaded inverter for grid-connected photovoltaic systems under asymmetric grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 84-91.
- [22] 宋文峰, 王倩, 李亚楠, 等. 基于双馈风电场低电压穿越的高温超导故障限流器建模及其参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 99-107.  
SONG Wenfeng, WANG Qian, LI Yanan, et al. A comprehensive low voltage ride through control strategy of wind turbine driven doubly-fed induction generator adapted to multi-type faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 99-107.
- [23] MORREN J, DE HAAN S W. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.
- [24] 孟岩峰, 胡书举, 王玲玲, 等. 电网故障条件下双馈机组运行特性分析及其协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 106-113.  
MENG Yanfeng, HU Shuju, WANG Lingling, et al. Characteristics analysis and coordinated control of the doubly-fed wind power system under grid transient fault[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 106-113.
- [25] TONG N, HE S, LIN X, et al. RBFNN-based adaptive crowbar protection scheme designed for the doubly fed induction generator in large-scale wind farms[J]. IEEE Transactions on Electrical & Electronic Engineering, 2015, 10(6): 644-652.
- [26] 孙银锋, 李国庆, 王利猛, 等. 基于撬棒保护的双馈风电机组动态特性分析[J]. 电测与仪表, 2014, 51(2): 23-26.  
SUN Yinfeng, LI Guoqing, WANG Limeng, et al. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator based on crowbar protection[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(2): 23-26.
- [27] HAN J, KONG X, LI P, et al. A novel low voltage ride through strategy for cascaded power electronic transformer[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 227-238. DOI: 10.1186/s41601-019-0137-1.

收稿日期: 2020-10-13; 修回日期: 2021-04-23

作者简介:

谭爱国(1979—), 男, 博士, 讲师, 主要从事含新能源电力系统优化运行方面的工作; E-mail: 752645293@qq.com

李飞宇(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事含新能源的电力系统规划和优化运行方面的工作。E-mail: 347199767@qq.com

(编辑 魏小丽)