

基于连续细化傅里叶变换的双馈风力发电机电刷滑环磨损故障诊断

宋旺达

华北电力大学, 电气与电子工程学院, 河北 保定

收稿日期: 2023年11月22日; 录用日期: 2023年12月20日; 发布日期: 2023年12月29日

摘要

在实际工程应用中, 电刷滑环系统故障较为频繁。作为双馈风力发电机(DFIG)的重要组成部分, 电刷滑环系统磨损故障将会影响发电机的稳定运行。针对这一问题, 提出一种基于连续细化傅里叶变换的DFIG电刷滑环磨损故障诊断方法。首先分析了DFIG电刷滑环磨损故障机理。然后通过仿真得到不同故障情况下的电气量, 选取定子线电压和定子平均瞬时功率信号, 基于连续细化傅里叶变换进行故障特征量的提取, 验证了诊断方法的可行性。最后对不同故障类型和故障严重程度下的故障特征量进行对比分析。

关键词

双馈风力发电机, 电刷滑环, 磨损故障, 连续细化傅里叶变换

Fault Diagnosis of Brush Ring Wear in Doubly-Fed Induction Generator Based on Continuous Subdivision Fourier Transform

Wangda Song

School of Electrical and Electric Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei

Received: Nov. 22nd, 2023; accepted: Dec. 20th, 2023; published: Dec. 29th, 2023

Abstract

In practical engineering applications, faults in the brush ring system are relatively frequent. As an important component of a doubly-fed induction generator (DFIG), the wear fault of the brush ring system will affect the stable operation of the generator. A DFIG brush ring wear fault diagnosis method based on continuous subdivision Fourier transform is proposed to address this issue.

文章引用: 宋旺达. 基于连续细化傅里叶变换的双馈风力发电机电刷滑环磨损故障诊断[J]. 电气工程, 2023, 11(4): 197-204. DOI: 10.12677/jee.2023.114022

Firstly, the wear mechanism of the DFIG brush ring was analyzed. Then, the electrical quantities under different fault conditions were obtained through simulation. The stator line voltage and average instantaneous power signals were selected, and the fault feature quantities were extracted based on continuous subdivision Fourier transform, verifying the feasibility of the diagnostic method. Finally, the fault characteristic quantities under different fault types and fault severity were compared and analyzed.

Keywords

Doubly-Fed Induction Generator, Brush Ring, Wear Fault, Continuous Subdivision Fourier Transform

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

双馈异步风力发电机(DFIG)凭借其自身转速调节灵敏、功率变换双向、变频控制灵活等特点被广泛应用于风电事业。作为双馈风力发电机动静转换设备,电刷滑环对发电机的稳定运行发挥着至关重要的作用。一旦出现故障,将会导致发电机无法稳定运行甚至停机,造成巨大的经济损失。因此,对电刷滑环系统故障诊断研究具有重要意义。

文献[1]综述了目前对 DFIG 故障检测的方法,但国内外对 DFIG 电刷滑环系统磨损故障的研究尚不充分。文献[2]介绍了 DFIG 电刷滑环火花故障、电刷重度磨损故障等电刷滑环系统常见的故障类型及其故障机理以及常见的故障特征监测方法。文献[3]应用有限元法,对 DFIG 电刷滑环系统电刷电流分布不均匀故障后系统的温度场进行了分析。文献[4]测量了电刷滑环装置的振动信号,并应用小波包变换法,通过分析故障前后的小波包能量谱进行故障诊断。文献[5]通过希尔伯特-黄变换理论来提取电刷滑环励磁电流中的故障特征量,进而进行电刷滑环烧伤故障诊断。针对 DFIG 电刷滑环电弧故障,文献[6]基于长短期记忆-卷积神经网络进行 DFIG 电刷滑环故障电弧诊断,文献[7]基于门控循环单元模型-卷积神经网络进行 DFIG 电刷滑环电弧故障检测,以电流、电压和磁环为特征生成训练数据集,可实现对故障电弧的检测。

文献[8]建立了正常及故障状态下电刷滑环动态电阻数值模型和电路模型,并对电刷电流的间谐波进行理论分析和计算。文献[9]对滑环装置运行电阻进行了定量分析,并对故障前后电刷电流进行 dq0 变换,通过其在 dq 坐标系中的形状来判断滑环装置有无故障。

目前对故障特征量进行定量分析的研究较少,为提高诊断的精确性和可靠性,本文提出了基于连续细化傅里叶变换的 DFIG 电刷滑环系统磨损故障诊断方法,通过 Matlab/Simulink 软件进行 DFIG 电刷滑环系统磨损故障仿真,得到故障后 DFIG 定转子侧电气量。在实际工程中,DFIG 定子线电压信号易于测取,实用性强,定子平均瞬时功率信号频谱简洁清晰,因此本文选取定子线电压和定子平均瞬时功率信号,采用连续细化傅里叶变换方法,从中提取故障特征量,并对不同故障类型和故障严重程度下的故障特征量进行对比分析。

2. 双馈异步发电机电刷滑环磨损故障机理

DFIG 发生电刷滑环磨损故障后,当滑环旋转到与故障电刷接触时,二者接触电阻较滑环正常运行时大大增加。

当 DFIG 发生电刷滑环磨损故障后, 转子电路结构上的对称性将破坏。当定子外加三相对称电压时, 定子三相基波电流会产生圆形旋转磁场, 将在转子绕组中感应频率为 sf_1 的交流电势及电流, 其中 s 为转差率, f_1 为定子电流基波频率。由于转子已不再对称, 转子绕组产生的磁势为椭圆形, 可以将其分解为相对于转子的正转分量和反转分量。正转分量与定子磁势相对静止, 反转分量相对于定子参考系的转速为 $(1-2s)n_1$, 因此会在定子绕组中感应出频率为 $(1-2s)f_1$ 的电势和电流。同时, 频率为 $(1-2s)f_1$ 的电流分量和气隙磁场作用, 产生以 $2sf_1$ 频率波动的转矩, 进而使气隙磁通出现频率为 $(1\pm 2s)f_1$ 的成分, 在定子绕组中感应出同频率的电势和电流[10]。

进一步分析, 定子电流中频率为 $(1\pm 2s)f_1$ 的成分所产生的旋转磁场将在转子绕组中感应出频率为 $3sf_1$ 的电势和电流, 从而在定子绕组中感应出频率为 $(1-4s)f_1$ 的电势和电流。以此类推, 定子电压和电流中将出现 $(1\pm 2ks)f_1$ 的故障特征分量, k 为整数。其中 $(1\pm 2s)f_1$ 为主要故障特征频率分量。

定子平均瞬时功率可以定义为

$$P_s = \sqrt{3}(u_{sab}i_{sa} + u_{sbc}i_{sb} + u_{sca}i_{sc})/3 \quad (1)$$

其中 u_{sab} 、 u_{sbc} 、 u_{sca} 为定子三相线电压, i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为定子三相线电流[11]。

DFIG 运行在稳定工况下, 忽略电机结构的不对称, 定子电压、电流应为与电网同频的正弦波, 各相线电压和线电流可以表示为

$$\begin{aligned} u_{sab} &= U_m \cos \omega t \\ u_{sbc} &= U_m \cos(\omega t - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2)$$

$$u_{sca} = U_m \cos(\omega t + 2\pi/3)$$

$$\begin{aligned} i_{sa} &= I_m \cos(\omega t - \varphi) \\ i_{sb} &= I_m \cos(\omega t - \varphi - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (3)$$

$$i_{sc} = I_m \cos(\omega t - \varphi + 2\pi/3)$$

其中 U_m 、 I_m 分别为定子基波线电压、线电流幅值, ω 为电网电压角频率, φ 为基波线电流滞后于线电压的相位角。

将式(2)、式(3)代入式(1)中, 可得正常情况下 DFIG 平均瞬时功率 P_{s0} 为

$$P_{s0} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_m I_m \cos \varphi \quad (4)$$

可以看出, 定子平均瞬时功率中含有直流成分。

DFIG 发生电刷滑环磨损故障时, 同时考虑定子电压和定子电流中产生的频率为 $(1\pm 2s)f_1$ 的故障分量。此时定子三相线电压和线电流可以表示为

$$\begin{aligned} u_{sab} &= U_m \cos \omega t + U_n \cos((1-2s)\omega t) + U_p \cos((1+2s)\omega t) \\ u_{sbc} &= U_m \cos(\omega t - 2\pi/3) + U_n \cos((1-2s)\omega t - 2\pi/3) + U_p \cos((1+2s)\omega t - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (5)$$

$$u_{sca} = U_m \cos(\omega t + 2\pi/3) + U_n \cos((1-2s)\omega t + 2\pi/3) + U_p \cos((1+2s)\omega t + 2\pi/3)$$

$$\begin{aligned} i_{sa} &= I_m \cos(\omega t - \varphi) + I_n \cos((1-2s)\omega t - \delta) + I_p \cos((1+2s)\omega t - \theta) \\ i_{sb} &= I_m \cos(\omega t - \varphi - 2\pi/3) + I_n \cos((1-2s)\omega t - \delta - 2\pi/3) + I_p \cos((1+2s)\omega t - \theta - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (6)$$

$$i_{sc} = I_m \cos(\omega t - \varphi + 2\pi/3) + I_n \cos((1-2s)\omega t - \delta + 2\pi/3) + I_p \cos((1+2s)\omega t - \theta + 2\pi/3)$$

其中 U_n 为定子线电压 $(1-2s)f_1$ 分量幅值; U_p 为定子线电压 $(1+2s)f_1$ 分量幅值; I_n 为定子线电流 $(1-2s)f_1$

分量幅值, δ 为初始相位; I_p 为 $(1+2s)f_1$ 分量幅值, θ 为初始相位。

将式(5)、式(6)代入到式(1)中, 可以得到 DFIG 发生电刷滑环磨损故障时定子平均瞬时功率 P_{st} 为

$$P_{st} = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[U_m I_m \cos \varphi + U_m I_n \cos(2s\omega t + \delta) + U_m I_p \cos(2s\omega t - \theta) \right. \\ \left. + U_n I_m \cos(2s\omega t - \varphi) + U_n I_n \cos \delta + U_n I_p \cos(4s\omega t - \theta) \right. \\ \left. + U_p I_m \cos(2s\omega t + \varphi) + U_p I_n \cos(4s\omega t + \delta) + U_p I_p \cos \theta \right] \quad (7)$$

可以看出, 此时定子平均瞬时功率中包含直流分量和频率为 $2ksf_1$ 的故障特征分量。

3. 连续细化傅里叶变换方法

相比于快速傅里叶变换方法, 应用连续细化傅里叶变换方法, 可以求出待分析信号中某一主要频率分量的精确解析表达式, 即频率、幅值与初相角[12]。

采样频率为 f_s , 采样点数为 N 的时间序列 $i(t_k)$, 其离散傅里叶级数为

$$\begin{cases} a(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(t_k) \cos(2\pi kn/N) \\ b(n) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(t_k) \sin(2\pi kn/N) \\ a(0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(t_k) \\ n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $t_k = kT_s$, $T_s = 1/f_s$, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

当 $N = 2^m$ (m 为正整数) 时, 上述离散变换即快速傅里叶变换。此时傅里叶变换可采用递推快速算法。快速傅里叶变换频率分辨单元为 $\Delta f = f_s/N$, 与采样点数 N 成反比。因此, 只有通过成倍地增加采样点数, 才能进一步提高频率分辨能力。

时间序列 $i(t_k)$ 包含信号在 0 到 $f_s/2$ 这一频域内的信息, 如果将频谱曲线看作连续, 即认为上式中的 n 是一个属于区间 $[0, N/2]$ 的连续实数, 式(8)可改写成

$$\begin{cases} a(f) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(t_k) \cos(2\pi kf/f_s) \\ b(f) = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(t_k) \sin(2\pi kf/f_s) \\ 0 < f \leq f_s/2 \end{cases} \quad (9)$$

此时的频率分辨能力不再受采样点数的限制, 频率 f 的取值是连续的。

应用连续傅里叶变换有助于提高电刷滑环磨损故障检测的灵敏度与可靠性。

4. 电刷滑环磨损故障仿真建模

本文在 Matlab/Simulink 平台仿真模型基础上, 通过在转子侧串联电阻以进行不同故障程度的仿真。图 1 为搭建的 DFIG 仿真模型示意图。图中, 与电网相连的为网侧变流器 GSC (Grid Side Converter), 与转子侧相连的为转子侧变流器 RSC (Rotor Side Converter)。DFIG 的基本参数为: 额定电压为 575 V, 额定频率为 60 Hz, 极对数为 3, 定子每相电阻为 0.023 p.u., 转子每相电阻为 0.016 p.u., 定子每相漏感为 0.18 p.u., 转子每相漏感为 0.16 p.u., 定转子间的互感为 2.9 p.u.。

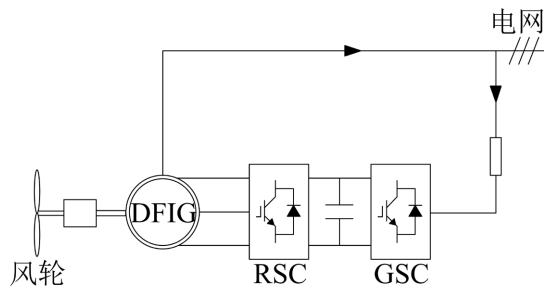


Figure 1. DFIG simulation model diagram

图 1. DFIG 仿真模型图

仿真过程中设定风速为 15 m/s，转差率为-0.2。

5. 仿真结果分析

5.1. 定子线电压

通过仿真得到定子线电压 u_{sab} 进行连续细化傅里叶变换后结果如图 2(a)所示，此时转子侧 a 相串联电阻 $r_a = 0.01 \Omega$ ，可以看出在 $(1 \pm 2s)f_1$ 频率分量处存在故障特征量。相比之下， $(1+2s)f_1$ 频率处故障特征更为显著。

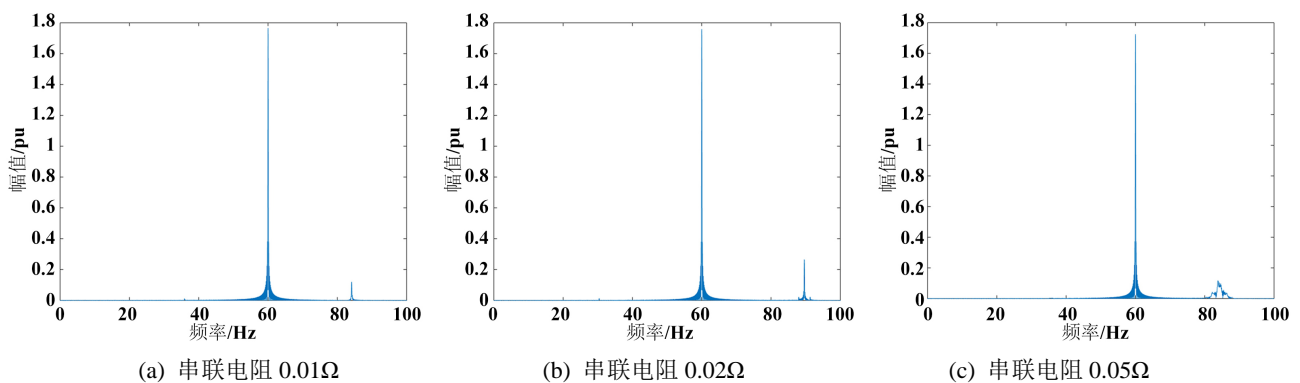


Figure 2. Spectrum diagram of stator line voltage

图 2. 定子线电压频谱图

当电刷滑环磨损程度增加时，相应的电阻值也会增大，当 $r_a = 0.02 \Omega$ 时，对 u_{sab} 进行连续细化傅里叶变换如图 2(b)所示。可以看出，此时的故障特征量幅值增大。

通过改变串联电阻值以进行不同故障程度的仿真，得到结果如表 1 所示，其中故障特征量幅值为标么值。可以看出，磨损故障程度增加时，相应的故障特征量幅值随之增加。当磨损故障严重到一定程度时，DFIG 线电压信号中谐波分量增加。 $r_a = 0.05 \Omega$ 时 u_{sab} 连续细化傅里叶变换结果如图 2(c)所示。

Table 1. Characteristics of u_{sab} faults in different degrees of phase faults表 1. a 相不同程度故障时 u_{sab} 故障特征量

r_a / Ω	0.001	0.005	0.01	0.015	0.02	0.05
$(1-2s)f_1 / \text{pu}$	0.003529	0.003814	0.01288	0.01414	0.01454	0.0057
$(1+2s)f_1 / \text{pu}$	0.01346	0.06263	0.1215	0.1791	0.2666	0.1183

当发生两相故障时，针对不同故障情况进行仿真，结果如表 2 所示。可以看出，两相故障程度相同时，故障特征量幅值较小于同样程度的单相故障。两相故障程度不同时，当故障不平衡程度增大时，相应的故障特征量幅值增大。

Table 2. Characteristics of u_{sab} faults during ab two-phase faults

表 2. ab 两相故障时 u_{sab} 故障特征量

r_a / Ω	0.001	0.005	0.01	0.005	0.005	0.001
r_b / Ω	0.001	0.005	0.01	0.001	0.01	0.01
$(1-2s)f_1 / \text{pu}$	0.00343	0.006996	0.008762	0.003429	0.01218	0.01193
$(1+2s)f_1 / \text{pu}$	0.01214	0.05572	0.04868	0.05257	0.1109	0.09088

当发生三相故障时，针对不同故障情况进行仿真，结果如表 3 所示。可以看出，三相故障程度相同时，此时 DFIG 转子侧三相仍保持对称，没有相关的故障特征量。当三相故障程度不同时，DFIG 转子侧三相不平衡，将出现故障特征分量，同时当故障不平衡程度增大时，相应的故障特征量幅值增大。

Table 3. Characteristics of u_{sab} faults during three-phase faults

表 3. 三相故障时 u_{sab} 故障特征量

r_a / Ω	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
r_b / Ω	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
r_c / Ω	0.005	0.001	0.002	0.005	0.006	0.01
$(1-2s)f_1 / \text{pu}$	0	0.005441	0.004659	0.005862	0.008672	0.009818
$(1+2s)f_1 / \text{pu}$	0	0.04447	0.03989	0.03382	0.06568	0.08822

5.2. 定子平均瞬时功率

对定子平均瞬时功率 P_{sf} 进行连续细化傅里叶变换后结果如图 3(a)所示，此时转子侧 a 相串联电阻 $r_a = 0.01 \Omega$ ，可以看出在 $2ksf_1$ 频率分量处存在故障特征量，其中 $2sf_1$ 处故障特征最为显著。

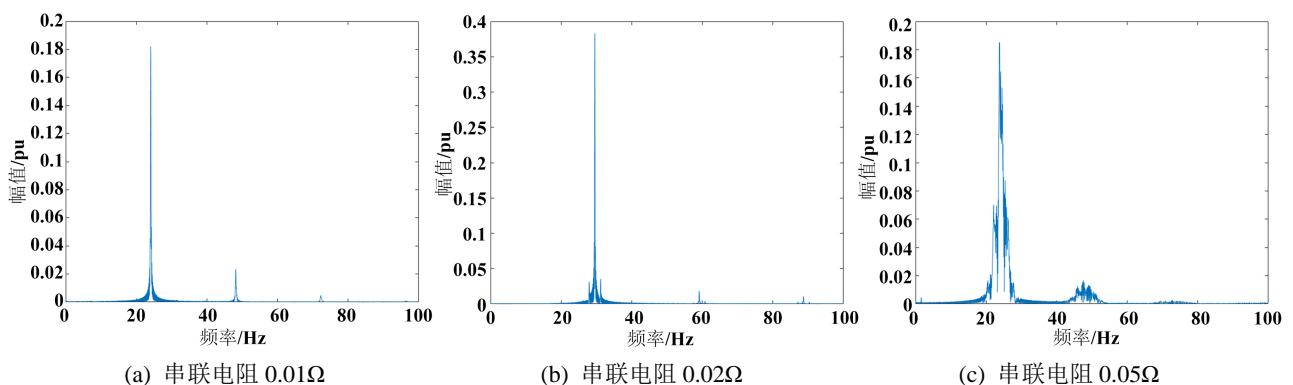


Figure 3. Frequency spectrum of average instantaneous power of stator

图 3. 定子平均瞬时功率频谱图

当 $r_a = 0.02 \Omega$ 时，对 P_{sf} 进行连续细化傅里叶变换如图 3(b)所示。可以看出，此时的故障特征量幅值增大。

进行不同故障程度的仿真，得到结果如表 4 所示。可以看出，磨损故障程度增加时，相应的故障特征量幅值随之增加。当磨损故障严重到一定程度时，DFIG 定子平均瞬时功率中谐波分量增加。 $r_a = 0.05 \Omega$ 时 P_{sf} 连续细化傅里叶变换结果如图 3(c) 所示。

Table 4. Characteristics of P_{sf} faults in different degrees of phase faults

表 4. a 相不同程度故障时 P_{sf} 故障特征量

r_a / Ω	0.001	0.005	0.01	0.015	0.02	0.05
$2sf_1 / pu$	0.01528	0.07109	0.1821	0.268	0.3834	0.1853

当发生两相故障时，针对不同故障情况进行仿真，结果如表 5 所示。可以看出，两相故障程度相同时，故障特征量幅值小于同样程度的单相故障。两相故障程度不同时，当故障不平衡程度增大时，相应的故障特征量幅值增大。

Table 5. Characteristics of P_{sf} faults during ab two-phase faults

表 5. ab 两相故障时 P_{sf} 故障特征量

r_a / Ω	0.001	0.005	0.01	0.005	0.005	0.001
r_b / Ω	0.001	0.005	0.01	0.001	0.01	0.01
$2sf_1 / pu$	0.0151	0.08053	0.1084	0.06361	0.2135	0.1525

当发生三相故障时，针对不同故障情况进行仿真，结果如表 6 所示。可以看出，三相故障程度相同时，此时 DFIG 转子侧三相仍保持对称，没有相关的故障特征量。当三相故障程度不同时，DFIG 转子侧三相不平衡，将出现故障特征分量，同时当故障不平衡程度增大时，相应的故障特征量幅值增大。

Table 6. Characteristics of P_{sf} faults during three-phase faults

表 6. 三相故障时 P_{sf} 故障特征量

r_a / Ω	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
r_b / Ω	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
r_c / Ω	0.005	0.001	0.002	0.005	0.006	0.01
$2sf_1 / pu$	0	0.05398	0.0468	0.06048	0.1201	0.1728

6. 结论

本文通过对 DFIG 电刷滑环磨损故障的不同故障类型和故障严重程度进行仿真，并对定子线电压、定子平均瞬时功率进行连续细化傅里叶变换进而寻找故障特征，可以得到以下结论：

1) 当 DFIG 发生电刷滑环磨损故障时，定子线电压将出现 $(1 \pm 2s)f_1$ 的特征频率分量，定子平均瞬时功率中将出现 $2ksf_1$ 特征频率分量。

2) 在一定程度上，随着故障严重程度的增加，定子线电压和定子平均瞬时功率中故障特征量幅值随之增大；当 DFIG 发生多相电刷滑环磨损故障时，随着故障不平衡程度的增大，定子线电压和定子平均瞬时功率中故障特征量幅值随之增大。

3) 本文为 DFIG 电刷滑环磨损故障的诊断提供了参考。

参考文献

- [1] Bebars, A.D., Eladl, A.A., Abdulsalam, G.M., *et al.* (2022) Internal Electrical Fault Detection Techniques in DFIG-Based Wind Turbines: A Review. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 7, Article No. 18. <https://doi.org/10.1186/s41601-022-00236-z>
- [2] 陈涛涛, 马宏忠. 双馈异步发电机电刷滑环系统状态监测技术研究现状与发展[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(3): 89-94.
- [3] 陈涛涛, 马宏忠. 基于温度场的双馈异步发电机电刷滑环系统故障诊断模拟[J]. 中国电力, 2015, 48(12): 173-178.
- [4] 张艳, 马宏忠, 陈涛涛, 等. 基于振动信号的双馈异步发电机电刷滑环装置故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 57-62.
- [5] 李思源, 马宏忠, 陈涛涛. 基于 HHT 的双馈异步发电机电刷滑环烧伤故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 68-74.
- [6] 莫英东, 夏鲲, 王晗钰, 等. 基于 LSTM-CNN 的双馈风力发电机电刷滑环电弧故障诊断[J]. 控制工程, 2022, 29(8): 1520-1527.
- [7] 张博文, 莫英东, 王晗钰, 等. 基于 GRU-CNN 的双馈风力发电机电刷滑环电弧故障诊断[J]. 农业装备与车辆工程, 2023, 61(8): 45-50.
- [8] 陈涛涛, 马宏忠. 双馈异步发电机电刷滑环电阻变化理论与仿真研究[J]. 中国电力, 2013, 46(12): 83-89.
- [9] 陈涛涛, 李占朝, 马宏忠. 基于电刷电流的双馈异步发电机电刷滑环装置故障诊断新方法研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(11): 46-51.
- [10] 王慧. 轻载状态下异步电动机断条故障检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- [11] 沈亮印. 双馈风力发电机转子绕组匝间短路故障诊断方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2017.
- [12] 许伯强. 异步电动机绕组故障分析及其检测方法研究[D]: [博士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2002.