

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.236139

基于 FFT-LSTM 的变速抽蓄机组转子绕组短路故障和 偏心故障诊断方法

尹项根¹, 乔健¹, 贺儒飞², 张豪², 彭煜民², 王文辉²

(1. 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;

2. 南方电网调峰调频发电有限公司储能研究院, 广东 广州 510950)

摘要: 变速抽水蓄能机组是适应系统功率波动的重要调节手段。转子绕组短路故障和转子偏心故障是其常见的故障类型, 两种故障均会在定子侧感应生成特征频带相近的谐波环流, 导致两种故障难以被区分。提出了一种基于快速傅里叶变换-长短期记忆(fast Fourier transform-long short-term memory, FFT-LSTM)网络的故障诊断方法, 以细化分辨故障特征相近的转子绕组短路故障和转子偏心故障。所提方法以定子分支环流的谐波分量为特征量进行故障诊断, 分别推导了两种故障发生时定子侧环流谐波特征, 并总结二者间的相似性和差异性。鉴于该差异较为微弱, 引入长短期记忆(long short-term memory, LSTM)神经网络算法对其进行辨识。利用内部故障仿真模型对可能发生的转子绕组短路故障和偏心故障进行批量仿真, 以得到用于 LSTM 网络训练和测试的数据集。仿真结果表明 FFT-LSTM 能够准确诊断不同转速下变速抽蓄机组的转子绕组短路故障和转子偏心故障。

关键词: 变速抽蓄机组; 转子绕组短路故障; 转子偏心故障; LSTM 神经网络

FFT-LSTM-based fault diagnosis method for a rotor winding short circuit fault and rotor eccentricity fault of a variable-speed pumped storage unit

YIN Xianggen¹, QIAO Jian¹, HE Rufe², ZHANG Hao², PENG Yumin², WANG Wenhui²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. CSG PGC Power Storage Research Institute, Guangzhou 510950, China)

Abstract: The variable speed pumped storage unit is an important means for adjusting the power fluctuation of a system. Rotor winding short-circuit and rotor eccentricity faults are common fault types. Both faults will generate harmonic circulations with similar characteristic frequency bands on the stator side. These lead to a difficulty in distinguishing between the two faults. In this paper, a fault diagnosis method based on fast Fourier transform-long short-term memory (FFT-LSTM) is proposed to distinguish between the rotor winding short circuit and rotor eccentric faults with similar fault characteristics. The proposed method takes the harmonic component of stator branch circulations as the characteristic component for fault diagnosis, deduces the harmonic characteristics of stator side circulations when two kinds of faults occur, and summarizes the similarities and differences between them. In view of the weak difference, an LSTM neural network algorithm is introduced to identify it. The possible short-circuit and eccentricity faults of rotor winding are simulated in batches by using the internal fault simulation model to obtain the data set for LSTM network training and testing. Simulation results show that the FFT-LSTM can accurately diagnose rotor winding short-circuit and rotor eccentricity faults of variable speed pumping and storage units.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 5187708).

Key words: variable speed pumping storage unit; rotor winding short circuit fault; rotor eccentric fault; LSTM neural network

0 引言

变速抽蓄机组不仅能够用于计划调峰调频, 也

能够随新能源功率波动进行宽功率范围的高效实时调节^[1]。变速抽蓄机组作为目前技术较为成熟的大规模储能方式, 是以新能源为主体的新型电力系统的重要组成部分, 也是推动能源转型发展的重要支撑^[2]。为保证其安全稳定的运行, 对其继电保护技术也提出了高要求。转子绕组短路故障和偏心故障

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(5187708); 中国南方电网有限责任公司重点科技项目资助(STKJXM20210102)

是电机最常见的故障类型^[3], 转子绕组短路故障会导致绕组局部过热和机组剧烈振动等问题。转子偏心故障会引起铁芯变形、异常振动和绕组磨损等问题。此外, 两种故障均会产生非均匀的气隙磁场, 进而产生不平衡的磁拉力^[4], 严重时会使机组出现轴承损坏^[5]、甚至机组损毁等故障^[6]。

目前, 专家学者们已对这两种故障的诊断和检测方法开展大量研究。对于转子偏心故障, 文献[7-9]详细推导了双馈感应电机发生偏心故障后定子侧电流的频谱特征。文献[10-11]分别利用霍尔传感器和磁通传感器对永磁同步电机内部磁场进行监视, 以在线诊断电机是否发生了转子偏心故障。文献[12]提出利用 Wigner-Ville 分布检测高次谐波分量来判断鼠笼型电机是否发生转子偏心故障。文献[13]提出了一种基于振动信号监测的永磁同步电机转子偏心故障诊断方法。上述文献的研究对象均侧重于小容量机组, 对于大容量机组, 如水轮发电机、核电机组和抽水蓄能机组关注较少。

对于转子绕组短路故障的检测或诊断, 主要分为基于非电气量的方法和基于电气量的方法两类。基于非电气量的方法主要有机组振动信号分析法^[14]和热成像法^[15]。基于电气量的方法主要有探测线圈法^[16]、重复脉冲法^[17]、磁链观测差法^[18]、机器学习法^[19]和定子分支环流法^[20]。其中, 定子分支环流法的本质是将定子绕组本身作为探测线圈来监视转子绕组短路故障产生的畸变气隙磁场, 具有无需额外安装设备的优势。由于变速抽水蓄能采用双馈交流励磁结构, 其工作原理与传统同步转速机组有本质不同。发生转子绕组短路故障时, 其故障电气量特征也与同步机完全不同, 针对同步机的检测或诊断方法不再直接适用。文献[21]分析双馈电机转子绕组短路前后磁链观测差的变化规律, 实现对转子绕组匝间短路故障的早期辨识。文献[22]研究了双馈机组转子绕组短路时的气隙磁场电枢反应机理, 总结了定子侧电气量的特征频率。文献[23]利用滤波器提取定子分支环流 10~40 Hz 的频带分量, 以判断是否发生转子绕组内部短路故障。但变速抽水蓄能机组发生转子偏心故障也会产生该频带的谐波分量^[7-9]。应在滤波器启动后, 进一步诊断具体是哪一种故障, 以便于明确后续的故障检修措施。

本文提出了一种基于快速傅里叶变换-长短期记忆(fast Fourier transform-long short-term memory, FFT-LSTM)网络的变速抽水蓄能机组转子绕组短路故障和转子偏心故障诊断方法, 该方法是针对现有定子分支环流法难以区分转子绕组短路故障和转子偏心故障问题进行的改进。理论分析了转子绕组短路故

障和转子偏心故障发生时会在定子分支环流上感应生成低频谐波分量。在此基础上, 引入长短期记忆(long short-term memory, LSTM)神经网络算法对这两种故障进行区分, 该网络的输入量为定子各分支环流的 FFT 变换结果, 输出量为故障类型的诊断结果。仿真结果表明, 所提方法具有较高的诊断精确度, 能够克服测量噪声的不利影响, 适用于不同的转速工况。

1 定子侧分支环流的谐波特征分析

1.1 转子绕组短路故障

转子绕组短路故障发生后, 短路环中流过较大的短路电流 i_r , 可记为 $i_r = I_r \cos(\omega_r t)$, I_r 为短路电流峰值, ω_r 为转子侧的电角频率。根据傅里叶级数分解, 该短路环电流产生的磁动势可分解为

$$F(\theta, t) = \sum_k \frac{2I_r}{k\pi P} k_{rk} \cos(k\theta) \cos(\omega_r t) = \sum_k \frac{I_r}{k\pi P} k_{rk} \cos(k\theta \pm \omega_r t) \quad (1)$$

式中: k_{rk} 为短路环绕组的短距系数; θ 为转子侧的空间电角度; P 为极对数; k 为谐波次数, $k = 1/P, 2/P, \dots$ 。

假设用 φ 表示定子侧的空间电角度, 则有

$$\varphi = \theta - \frac{1-s}{s} \omega_r t \quad (2)$$

式中, s 为转差率, 由于定、转子电角频率存在关系 $\omega_r = s\omega_s$, 其中 ω_s 为定子侧的电角频率, 等于 314.15 rad/s, 则式(2)可以表示为

$$\varphi = \theta - (1-s)\omega_s t \quad (3)$$

将式(3)代入式(1), 可得短路环磁动势, 在定子空间电角度中表示为

$$F(\varphi, t) = \sum_k \frac{I_r}{k\pi P} k_{rk} \cos(k\varphi + k(1-s)\omega_s t \pm s\omega_s t) \quad (4)$$

假设定子铁芯上槽号为 x 的槽导体在定子空间电角度中的坐标为 φ_x , 则该槽导体受磁动势 $F(\varphi_x, t)$ 随时间变化的影响, 感应生成的槽导体电势可记为

$$E_x = \sum_k E_k \sin(k\varphi_x + k(1-s)\omega_s t \pm s\omega_s t) \quad (5)$$

$$k = \frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \frac{3}{P}, \dots$$

式中, E_k 为 k 次谐波磁场产生的槽导体感应电势的有效值。因此, 对于 k 次谐波磁场, 单个槽导体会感应生成两个频率分别为 $k(1-s)\omega_s + s\omega_s$ 和 $k(1-s)\omega_s - s\omega_s$ 的感应电势。可将该特征谐波频率记为

$$\begin{aligned} f_n^+ &= \left[\frac{n}{P}(1-s) + s \right] f_s \quad n=1,2,3,\dots \\ f_n^- &= \left[\frac{n}{P}(1-s) - s \right] f_s \quad n=1,2,3,\dots \end{aligned} \quad (6)$$

式中, f_s 为定子侧基波频率, 等于 50 Hz。

变速抽蓄机组的定子绕组为多分支结构, 每个分支均由多个槽导体正反交替串联组成^[24-25]。根据其槽导体实际连接顺序可计算式(6)中任一特定谐波磁场下各分支的整体感应电势, 若同相各分支的整体感应电势完全相同, 则分支环流上不会流经该特定谐波频率的电流。反之, 若同相各分支的整体感应电势不相同, 则会在该电势差的影响下, 产生对应于该特定谐波频率的电流环流。对于整数次谐波磁场($k=7/P$), A 相各分支整体感应电势的幅值和相位近乎一致。因此, 定子侧分支环流中几乎不含有 f_7^+ 和 f_7^- 的谐波分量。对于分数次谐波磁场($k=1/P, 2/P, \dots, 6/P$), 由于 A 相四分支的整体感应电势各不相同, 其分支环流含有频率为 $f_1^+, f_1^-, \dots, f_6^+, f_6^-$ 的谐波分量。上述分析的结论对于 $k > 1$ 的各次谐波磁场同样适用。

综上所述, 当变速抽蓄机组发生转子绕组短路故障后, 三相分支环流的特征谐波频率为

$$\begin{aligned} f_n^+ &= \left[\frac{n}{P}(1-s) + s \right] f_s \quad n=1,2,3,\dots \text{且 } n \neq 7,14,21,\dots \\ f_n^- &= \left[\frac{n}{P}(1-s) - s \right] f_s \quad n=1,2,3,\dots \text{且 } n \neq 7,14,21,\dots \end{aligned} \quad (7)$$

以某台实际的 7 对极($P=7$)变速抽蓄机组为例, 该机组的基本参数如表 1 所示。当转差率 s 为 0.1 时, 利用式(7)计算分支环流的特征谐波频率的理论值, 计算结果如表 2 所示。当 $k > 2$ ($n > 14$) 时, 其感应生成的谐波电流幅值极小, 不对其进行讨论。

建立表 1 所示机组的转子绕组短路故障仿真模型^[26], 该机组各定、转子分支可等效为电感和电阻的串联, 对定、转子支路的电压电流关系均采用发

表 1 某台实际变速抽蓄机组的基本参数

Table 1 Basic parameters of an actual variable speed pumping and storage unit

参数	定子	转子
槽数 Z	252	294
绕组形式	双层叠绕组	双层波绕组
每相并联支路数	4	2
每分支线圈数	21	49
节距 y_1	15	21
额定电流/A	12 317	6400

表 2 分支环流的特征谐波频率的理论值

Table 2 Theoretical characteristic frequency of the circulating current between stator branches

n	f_n^+/Hz	f_n^-/Hz
1	11.43	1.43
2	17.86	7.86
3	24.28	14.28
4	30.71	20.71
5	37.14	27.14
6	43.57	33.57
8	56.43	46.43
9	62.86	52.86
10	69.29	59.29
11	75.71	65.71
12	82.14	72.14
13	88.57	78.57

电机惯例, 等效电路如图 1 所示。图中, 定子绕组每相 m 分支, 转子绕组每相 n 分支。 i 和 u 分别表示分支电流和电压。上角标 s 和 r 分别表示定子侧和转子侧的电气量。采用正电流产生正磁链规则, 可得定、转子各分支电压方程为

$$p \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & \\ & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: p 为微算子; ψ_s 和 ψ_r 分别为定、转子支路磁链; I_s 和 I_r 分别为定、转子支路电流; U_s 和 U_r 分别为定、转子支路电压; R_s 和 R_r 分别为定、转子支路电阻。具体为

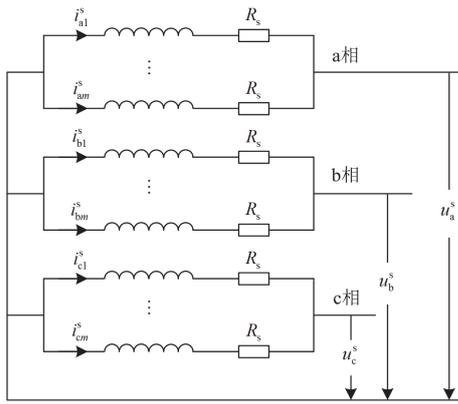
$$\begin{cases} \psi_s = [\psi_{a1}^s, \psi_{a2}^s, \dots, \psi_{am}^s, \psi_{b1}^s, \psi_{b2}^s, \dots, \psi_{bm}^s, \psi_{c1}^s, \psi_{c2}^s, \dots, \psi_{cm}^s]^T \\ \psi_r = [\psi_{a1}^r, \psi_{a2}^r, \dots, \psi_{an}^r, \psi_{b1}^r, \psi_{b2}^r, \dots, \psi_{bn}^r, \psi_{c1}^r, \psi_{c2}^r, \dots, \psi_{cn}^r]^T \\ I_s = [i_{a1}^s, i_{a2}^s, \dots, i_{am}^s, i_{b1}^s, i_{b2}^s, \dots, i_{bm}^s, i_{c1}^s, i_{c2}^s, \dots, i_{cm}^s]^T \\ I_r = [i_{a1}^r, i_{a2}^r, \dots, i_{an}^r, i_{b1}^r, i_{b2}^r, \dots, i_{bn}^r, i_{c1}^r, i_{c2}^r, \dots, i_{cn}^r]^T \\ U_s = [-u_a^s, \dots, -u_a^s, -u_b^s, \dots, -u_b^s, -u_c^s, \dots, -u_c^s]^T \\ U_r = [-u_a^r, \dots, -u_a^r, -u_b^r, \dots, -u_b^r, -u_c^r, \dots, -u_c^r]^T \\ R_s = \text{diag} \left(\overbrace{R_s, R_s, \dots, R_s}^{3m} \right) \\ R_r = \text{diag} \left(\overbrace{R_r, R_r, \dots, R_r}^{3n} \right) \end{cases}$$

另一方面, 定、转子的磁链方程为

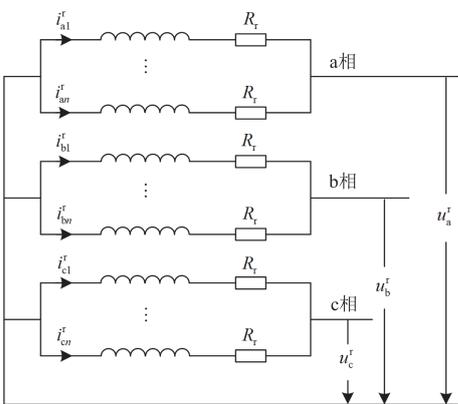
$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: L_{ss} 为 $3m \times 3m$ 阶定子电感矩阵; L_{rr} 为 $3n \times 3n$ 阶转子电感矩阵; L_{sr} 和 L_{rs} 为定、转子互感矩阵。

联立式(8)和式(9)可得式(10)。



(a) 定子绕组



(b) 转子绕组

图 1 定、转子绕组等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit diagram of stator and rotor windings

$$p \left\{ \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} R_s & \\ & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ U_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于转子绕组短路故障，须在故障后额外增加故障回路方程^[27]。由于式(10)是一个时变常微分方程组，可利用四阶龙格库塔算法对其进行求解。该数学建模方法具有较高的计算精度，与有限元建模方法相比，基于该数学模型得到的特征谐波有效值误差不超过 5%，且两种建模方法得到的特征频率一致^[28]。

假设转子 a 相第二分支第 32 匝线圈与 a 相第二分支第 34 匝线圈发生匝间短路故障，故障匝差为 2 匝，故障时刻为 35 s。以 a 相为例，对 a 相分支环流进行 FFT 变换得到频谱图，如图 2 所示。其特征频率与表 2 中的理论值一致。

1.2 转子偏心故障

变速抽蓄机组的工作原理与双馈风机相似。发生转子偏心故障后，定子绕组感应生成的谐波电流分量的特征频率与双馈风机一致。目前，已有大量文献对此展开研究，该故障特征频率如式(11)。

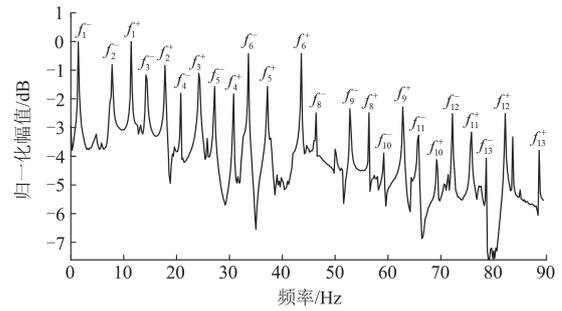


图 2 转子 a 相内部故障时定子侧 a 相分支环流的 FFT 频谱图

Fig. 2 FFT spectrum diagram of stator side a-phase branch circulation when rotor a-phase internal fault occurs

$$\begin{aligned} f_{p,n}^+ &= \left[1 + \frac{n}{P}(1-s) \right] f_s \quad n = 1, 2, 3, \dots \\ f_{p,n}^- &= \left[1 - \frac{n}{P}(1-s) \right] f_s \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (11)$$

对于转子偏心故障，其建模形式与式(10)相同，不同的是其定、转子的电感矩阵的推导过程。仍以前述实际机组为例，当转差率 s 为 0.1 时，利用式(11)计算分支环流的特征谐波频率的理论值，计算结果如表 3 所示。

表 3 分支环流的特征谐波频率的理论值

Table 3 Theoretical characteristic frequency of the circulating current between stator branches

n	$f_{p,n}^+/\text{Hz}$	$f_{p,n}^-/\text{Hz}$
1	56.43	43.57
2	62.86	37.14
3	69.29	30.71
4	75.71	24.28
5	82.14	17.86
6	88.57	11.43
7	95.00	5.00

建立变速抽蓄机组的转子偏心故障仿真模型，假设转子偏心度为 0.05，偏心角为 10°，以 a 相为例，对 a 相分支环流进行 FFT 变换得到频谱图，如图 3 所示。其特征频率与表 3 中的理论值一致。

对比表 2 和表 3、图 2 和图 3 可以发现，有部分频率的谐波分量是两种故障共有的，其本质原因是式(7)中 f_n^+ ($n=1, 2, 3, \dots$ 且 $n \neq 7, 14, 21, \dots$) 经适当变换可转化为式(11)中的 $f_{p,n}^+$ 和 $f_{p,n}^-$ 。因此，不能简单地以定子侧分支环流是否含有低频谐波分量作为是否发生了转子绕组短路故障的判断标准，否则易将转子偏心故障误判为转子绕组短路故障。若要对

这两种故障特征相似的故障进行区分, 则须深入挖掘二者间的差异。对比表 2 和表 3 不难发现: 对于转子绕组短路故障, 其特有的谐波频率为 f_n^- ; 对于转子偏心故障, 其特有的谐波频率为 $f_{p,7}^+$ 和 $f_{p,7}^-$ 。

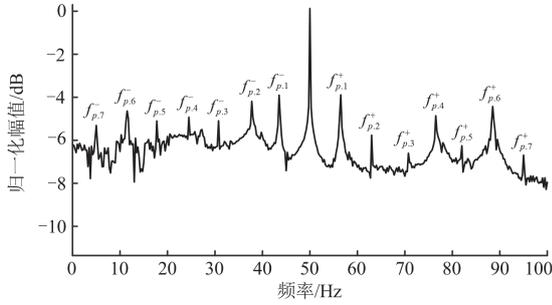


图 3 转子偏心故障时定子侧 a 相分支环流的 FFT 频谱图
Fig. 3 FFT spectrum diagram of a-phase branch circulation on stator side with rotor eccentricity

此外, 两种故障对应的谐波环流产生机理是不同的。对于转子绕组短路故障, 转子侧短路环电流产生的空间磁动势在定子侧同相不同分支中感应生成不等的感应电势, 进而产生特定的特征频率环流; 对于转子偏心故障, 由于气隙磁导在沿圆周方向上分布不均匀, 导致定子侧同相不同分支中感应生成不等的感应电势, 进而产生特定谐波频率的环流。因此, 对于这两种故障, 各次谐波分量的幅值相对大小也会有一定差异, 但很难以一个简单的判据对两种故障进行区分。

考虑到深度学习对准确分类差异微弱的样本具有天然优势, 故引入转到引言部分 LSTM 算法对转子绕组短路故障和转子偏心故障进行精确的故障诊断。

2 基于 FFT-LSTM 的故障诊断方法

LSTM 网络是递归神经网络(recurrent neural network, RNN)的改进, 通过引入记忆神经元有效改善了 RNN 中存在的梯度消亡或爆炸问题, 针对序列数据的拟合和分类有很高的精度。LSTM 网络由输入层、LSTM 层和输出层组成。输入层中 x_1, x_2, \dots, x_n 为分支环流的快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)变换结果, 输出层中 0 对应转子绕组短路故障, 1 对应转子偏心故障。LSTM 层由多个神经元组成。LSTM 层的每个神经元的内部结构由遗忘门、输入门、记忆细胞和输出门 4 部分组成, 详细计算流程为

$$\begin{cases} f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \\ i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \\ \tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \\ C_t = f_t \cdot C_{t-1} + i_t \cdot \tilde{C}_t \\ o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \\ h_t = o_t \cdot \tanh(C_t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: f_t 为遗忘系数; i_t 为输入系数; \tilde{C}_t 为输入数据; C_t 为更新后的细胞状态; o_t 为输出系数; h_t 为输出数据; σ 为 sigmoid 激励函数; W_f 、 W_i 、 W_c 和 W_o 分别为遗忘门权重、输入门权重、输入数据权重和输出门权重; b_f 、 b_i 、 b_c 和 b_o 分别为遗忘门偏置、输入门偏置、输入数据偏置和输出门偏置。

由于 FFT 变换结果的频率分辨率为 $1/T$, T 为时窗长度。该时窗长度的选择本质上是保护可靠性和快速性博弈的结果。若选取的时窗越长, FFT 变换结果的频率分辨能力越强, 越有利于两种故障的识别, 保护的可靠性越强, 但故障诊断所需时间变长, 保护的快速性越差。反之, 若选取的时窗越短, FFT 变换结果可能出现频谱泄露问题, 故障诊断结果有误的风险增高, 保护的可靠性越差, 但故障诊断所需时间变短, 保护的快速性越强。因此, 该时窗选择应在保证保护具有较高可靠性的前提下, 尽可能地具有更优的快速性。由于转子微弱匝间短路故障和偏心故障的早期危害较小, 难以被发现, 通常会持续较长一段时间。本文将 FFT 变换的时窗选为 1 s, 变换结果的频率分辨率为 1 Hz, 既保证了保护具有较高的可靠性, 也能够微弱故障发生 1 s 后及时发现, 避免故障持续恶化。

为避免电磁式电流互感器测量超低频电流精度低带来的影响, 选取 FFT 变换结果中特征较为明显的 5~95 Hz 频段作为输入量。因此, 输入层为

$$x = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_j & \dots & x_{91} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{M-5 \text{ Hz}} & H_{M-6 \text{ Hz}} & \dots & H_{M-i \text{ Hz}} & \dots & H_{M-95 \text{ Hz}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $M = A, B$ 或 C ; $H_{A-i \text{ Hz}}$ 、 $H_{B-i \text{ Hz}}$ 和 $H_{C-i \text{ Hz}}$ 分别为定子侧 A 相、B 相和 C 相分支环流 FFT 变换结果中 i Hz 分量的幅值大小。LSTM 层的神经元个数为 91。

相较于其他机器学习算法, LSTM 法特有的记忆功能使其更适用于学习长序列且特征前后关联的数据。因此, 选用 LSTM 辨别变速抽蓄机组的转子绕组短路故障和转子偏心故障更有优势。

3 仿真分析与验证

3.1 数据集生成

转子绕组短路故障通常是由绝缘损坏引起的。根据故障发生位置可分为槽内故障和端部故障。对于槽内故障，顾名思义，短路故障发生在同一槽内的 2 根线棒间。可能发生的短路故障数目等于转子总槽数，记为 Z 。对于端部故障，需要考虑转子双层波绕组的具体连接形式。参考文献[29]中故障形式分析，端部故障数目为 $(y_1 + y_2 - 2)Z$ 种，其中 y_1 和 y_2 分别为转子绕组的第一节距和第二节距。

仍以前述变速抽蓄机组为例，经统计分析，该机组可能发生的转子绕组短路故障数目如表 4 所示，故该机组转子绕组短路故障的样本数据集有 12 054 组，可由前述内部故障仿真模型计算得到。

表 4 可能发生的转子绕组短路故障数目

Table 4 Number of possible rotor winding short circuit failures

	同相同分支	同相异分支	异相	总数
槽内故障数	252	42	0	294
端部故障数	1584	1944	8232	11 760
故障总数	1836	1986	8232	12 054

在机器学习中，若不同标签的训练集数量严重不平衡，训练过程中为追求准确率最高会更偏向于将分类结果输出为训练集中比例更大的类别^[30]。因此，为保证所提故障诊断模型具有较高的可靠性，所选的转子偏心故障数据集应与转子绕组短路故障数据集数目相近。选择该机组转子偏心故障的样本数据集 10 800 组，其中偏心度为 0.01, 0.02, ..., 0.3，共有 30 种；偏心角为 1°, 2°, ..., 360°，共有 360 种，二者组合共有 10 800 种转子偏心故障。

对于转子绕组短路故障，随机选取 5000 组样本数据作为训练集，其余 7054 组样本数据作为测试集；对于转子偏心故障，随机选取 5000 组样本数据作为训练集，其余 5800 组样本数据作为测试集。两种故障的数据集标签分别为 0 和 1。需要说明的是，由于现场数据会受到噪声的影响，故在仿真得到的分支环流信号上叠加信噪比为 10 dB 的高斯白噪声，来模拟噪声对检测信号的影响。若所提方法在后续验证过程中能够准确分辨两类故障，则说明所提方法具有抗噪能力。

综上，本文所提的转子绕组短路故障和偏心故障诊断方法的实现流程如图 4 所示。

3.2 性能分析

LSTM 网络的训练参数设置为：最大迭代次数为 100 次；初始学习率为 0.004；每经过 25 次迭代学习率衰减一半；指定求解器为 adam。

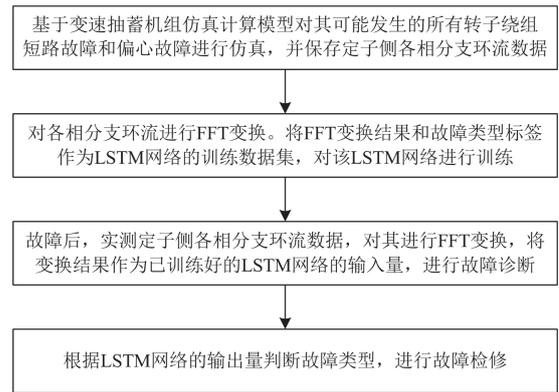


图 4 所提诊断方法的实现流程图

Fig. 4 Implementation process of the proposed diagnosis method

当转差率 s 为 0.1 时，训练过程中训练集的正确率变化曲线如图 5 所示，损失函数的变化情况如图 6 所示。当迭代次数超过 50 次时，神经网络的拟合正确率已接近 100%。

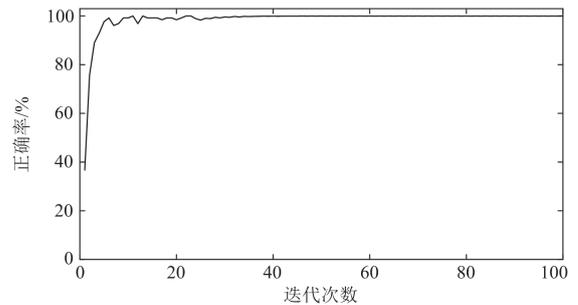


图 5 训练集正确率的变化情况

Fig. 5 Change of correct rate of training set

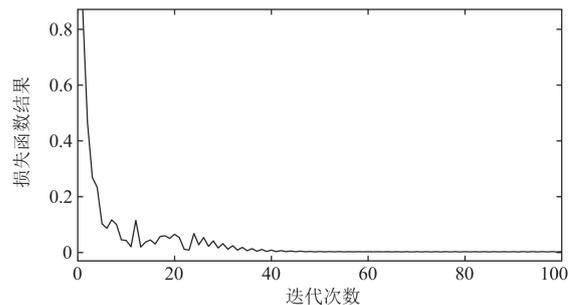


图 6 损失函数的变化情况

Fig. 6 Change of the loss function

将测试集代入训练好的神经网络进行检验，其中有 5 种故障被误判，故障诊断结果的混淆矩阵如表 5 所示。总体诊断结果的正确率为 99.96%，正确率较高，能够满足实际应用的要求。

考虑到变速抽蓄机组的转子转速可变 $(s \in [-0.1, 0.1])$ ，利用 $s = 0.1$ 时的仿真数据训练得到的网

表 5 故障诊断结果的混淆矩阵

Table 5 Confusion matrix of fault diagnosis results

混淆矩阵		诊断结果	
		短路故障	偏心故障
真实标签	短路故障数	7051	3
	偏心故障数	2	5798

络模型一定不满足 $s = -0.1$ 时的故障诊断需求。但若对所有可能的转速工况都分别训练一个 LSTM 诊断模型, 所需的训练成本过高, 不切实际。因此, 一个可行的解决办法是: 等间隔的选取数个转速工况, 分别训练一个 LSTM 诊断模型。发生故障后, 实测机组转速, 选择和机组实际转速最接近的诊断模型进行故障诊断。在本文中, 以 0.01 为间隔对 $s = -0.1, -0.09, \dots, 0.1$ 等转速工况训练相应的诊断模型。将该间隔选为 0.01 的原因如下: 以式(7)中的 f_1^+ 为例, 当 $s = 0.1$ 时, $f_1^+ = 11.43$ Hz; 当 $s = 0.09$ 时, $f_1^+ = 11$ Hz, 特征频率相差 0.43 Hz。由于 FFT 变换结果的频率分辨率为 1 Hz, 特征频率差值小于频率分辨率。因此, 只要机组实际转速的转差率 s 介于 0.09 和 0.1 之间, 其分支环流的 FFT 变换结果差异不大, 不会影响 LSTM 网络的正确诊断。针对转差率 $s = -0.1, -0.09, \dots, 0.1$ 等工况训练相应的诊断模型。将测试集代入训练好的模型, 测试集的诊断正确率均高于 99.9%。各种工况下, 误诊断数均不超过 10 种, 能够准确区分转子绕组短路故障和转子偏心故障。

假设变速抽蓄机组的实际转差率为 0.014。此时, 机组转速更接近于 $s = 0.01$ 的工况。故将 $s = 0.014$ 时的 12 054 组转子绕组短路故障和 10 800 组转子偏心故障代入 $s = 0.01$ 的已训练完成的诊断模型, 诊断结果的混淆矩阵如表 6 所示。此时, 有较多的短路故障被误判为偏心故障, 但诊断结果的总体正确率为 99.83%。正确率虽略有下降, 但完全能够满足实际应用的需要, 证明了所提方法能够有效适用于不同的转速工况。

表 6 另一种情况下的故障诊断结果的混淆矩阵

Table 6 Another case of fault diagnosis results in confusion matrix

混淆矩阵		诊断结果	
		短路故障	偏心故障
真实标签	短路故障数	12 018	36
	偏心故障数	3	10 797

假设变速抽蓄机组的转子转速测量有误, 误将机组转速判断为更接近于 $s = 0.002$ 的工况。此时, 将 $s = 0.014$ 时的 12 054 组转子绕组短路故障和 10 800 组转子偏心故障代入 $s = 0.02$ 的已训练完成的

诊断模型, 诊断结果的混淆矩阵如表 7 所示。诊断结果的总体正确率为 99.78%, 证明了该方法对转速测量误差也有较高的鲁棒性。

表 7 第 3 种情况下的故障诊断结果的混淆矩阵

Table 7 Confounding matrix of fault diagnosis results in the third case

混淆矩阵		诊断结果	
		短路故障	偏心故障
真实标签	短路故障数	12 007	47
	偏心故障数	3	10 797

文献[31]根据定子分支环流的谐波特征, 针对转子绕组短路故障提出了一种具体的保护判据。该保护判据为

$$I_{op} = \max \left(\sqrt{\sum_{f_k} I_{A.f_k}^2}, \sqrt{\sum_{f_k} I_{B.f_k}^2}, \sqrt{\sum_{f_k} I_{C.f_k}^2} \right) > I_{set} \quad (14)$$

$$f_k = [k(1-s) \pm s] f_s$$

式中: I_{op} 为保护动作值, I_{op} 的计算值越大, 则对应的故障程度越严重; $I_{A.f_k}$ 、 $I_{B.f_k}$ 和 $I_{C.f_k}$ 分别为 A 相、B 相和 C 相分支环流经 FFT 变换后特征频率 f_k 对应的幅值; I_{set} 为保护定值, 取值为 0.1 p.u.。该式中的特征频率与式(7)中的特征频率一致。

转差率为 0.1, 当发生转子绕组 A2 分支第 32 匝线圈与 A2 分支第 34 匝线圈之间的短路故障时, 式(14)中的保护动作值为 0.163 p.u., 该保护方法能够动作。当发生偏心度为 0.2、偏心角为 30°的转子偏心故障时, 式(14)中的保护动作值为 0.121 p.u., 该保护方法会误动作。由此可见, 现有的定子分支环流法难以区分转子绕组短路故障和转子偏心故障。而表 5—表 7 中的结果说明了本文所提方法对这两种故障具有较强的区分能力。

4 结论

本文提出了一种基于 FFT-LSTM 的变速抽蓄机组转子绕组短路故障和转子偏心故障诊断方法, 并得到以下结论:

1) 分析了转子绕组短路故障和转子偏心故障发生时定子分支环流谐波分量的特征频率, 并总结了二者间的异同。

2) 提出了利用 FFT-LSTM 法对转子绕组短路故障和转子偏心故障进行区分的故障诊断方法。LSTM 网络的输入量为分支环流的 FFT 频谱变换结果, 输出量为诊断结果。

3) 仿真结果验证了所提方法的有效性。该方法的诊断正确率高于 99%, 具有抗噪能力, 能够适用

于不同的转速工况。

参考文献

- [1] 贾德峰, 王明东, 傅润炜, 等. 抽水蓄能机组 RTDS 仿真与失磁保护改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 158-164.
JIA Defeng, WANG Mingdong, FU Runwei, et al. RTDS simulation and improvement of excitation-loss protection for pumped storage units[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 158-164.
- [2] QIAO Jian, YIN Xianggen, WANG Yikai, et al. A precise stator ground fault location method for large generators based on potential analysis of slot conductors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(16): 5203-5213.
- [3] ZAPPALÁ D, SARMA N, DJUROVIĆ S. Electrical & mechanical diagnostic indicators of wind turbine induction generator rotor faults[J]. Renewable Energy, 2019, 131: 14-24.
- [4] ZHOU Yang, BAO Xiaohua, DI Chong. Analysis of dynamic unbalanced magnetic pull in induction motor with dynamic eccentricity during starting period[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7).
- [5] DI Chong, BAO Xiaohua, WANG Hanfeng. Modeling and analysis of unbalanced magnetic pull in cage induction motors with curved dynamic eccentricity[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(8).
- [6] SUBRAT S, PEDRO R, MACIEJ S. Evaluation of different monitoring parameters for synchronous machine fault diagnostics[J]. Electrical Engineering, 2017, 99(2): 551-560.
- [7] JAWAD F, MOOSAVI S. Eccentricity fault detection from induction machines to DFIG a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 169-179.
- [8] SAPENA B, MARTINEZ R. Induction machine model with space harmonics for the diagnosis of rotor eccentricity based on the convolution theorem[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117.
- [9] AFSHAR M, ABDI S, ORAEE A. Eccentricity fault detection in brushless doubly fed induction machines[J]. IET Electric Power Applications, 2021, 15(7): 916-930.
- [10] YONGHYUN P, DANIEL F, SANG B. Online detection of rotor eccentricity and demagnetization faults in PMSMs based on hall-effect field sensor measurements[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 55(3): 2499-2509.
- [11] MUHAMMAD F, HANJU K, SANG B. Online airgap flux-based diagnosis of rotor eccentricity and field winding turn insulation faults in synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(1): 359-366.
- [12] CLIMENTE A, ANTONINO D. Application of the Wigner-Ville distribution for the detection of rotor asymmetries and eccentricity through high-order harmonics[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 91: 28-36.
- [13] OLADAPO O, PAUL S, MOHAMED A. Detection of static eccentricities in axial-flux permanent-magnet machines with concentrated windings using vibration analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 4425-4434.
- [14] MAURICIO C, RAPHAËL R. Non-invasive detection of rotor short-circuit fault in synchronous machines by analysis of stray magnetic field and frame vibrations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7).
- [15] RESENDIZ O, OSORNIO R, JUAN P. Induction motor failure analysis: an automatic methodology based on infrared imaging[J]. IEEE Access, 2018, 6: 76993-77003.
- [16] SAEED A, MOSTAFA E. Turn to turn fault detection, discrimination, and faulty region identification in the stator and rotor windings of synchronous machines based on the rotational magnetic field distortion[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 292-301.
- [17] 李天辉, 唐明, 贾伯岩, 等. 发电机转子匝间短路故障的建模仿真及诊断分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3932-3940.
LI Tianhui, TANG Ming, JIA Boyan, et al. Modeling simulation and diagnosis analysis of inter-turn short circuits fault in generator rotor[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3932-3940.
- [18] 魏书荣, 任子旭, 符杨, 等. 基于双侧磁链观测差的海上双馈风力发电机转子绕组匝间短路早期故障辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1470-1479.
WEI Shurong, REN Zixu, FU Yang, et al. Early stage inter-turn faults detection technique for the rotor windings of offshore wind DFIGs based on the differential value of two-side linkage's observation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1470-1479.
- [19] RENATO M, JOSE C, DENIS V. A novel method based on fuzzy logic and data mining for synchronous generator digital protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1487-1494.
- [20] MOSTAFA V, KARI G, ARNE N. Electromagnetic analysis and electrical signature-based detection of rotor inter-turn faults in salient-pole synchronous machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(9).
- [21] FU Yang, REN Zixu, WEI Shurong. Using flux linkage

- difference vector in early inter-turn short circuit detection for the windings of offshore wind DFIGs[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(4): 3007-3015.
- [22] ABDESSELAM L, AMMAR M. Online computational tools dedicated to the detection of induction machine faults[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44: 752-757.
- [23] 陈俊, 叶宏. 变速抽水蓄能机组转子绕组内部短路故障保护研究[J]. 中国电力, 2021, 54(12): 121-127, 136. CHEN Jun, YE Hong. Research on protection of internal short circuit in rotor winding of variable speed pumped-storage generator-motor[J]. Electric Power, 2021, 54(12): 121-127, 136.
- [24] 尹项根, 王义凯, 谭力铭. 故障机理深度关联的大型发电机保护新原理探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 1-7. YIN Xianggen, WANG Yikai, TAN Liming. Discussion on a new principle of large generator protection deeply associated with fault mechanisms[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 1-7.
- [25] 梁廷婷, 王凯, 陈俊. 变速抽水蓄能机组继电保护方案研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2020, 6(5): 62-67. LIANG Tingting, WANG Kai, CHEN Jun. Study on relay protection scheme of variable speed pumped-storage unit[J]. Hydropower and Pumped Storage, 2020, 6(5): 62-67.
- [26] 尹项根, 乔健, 王义凯. 基于内部故障仿真的可变速抽水蓄能发电电动机定子侧主保护优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 1-10. YIN Xianggen, QIAO Jian, WANG Yikai. Optimal configuration of main protection for a variable speed pumped storage power generator based on internal fault simulation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 1-10.
- [27] 牛化敏, 桂林, 孙宇光, 等. 基于多回路理论的交流励磁电机定子绕组内部故障仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(12): 3666-3684. NIU Huamin, GUI Lin, SUN Yuguang, et al. Simulation and experimental research on stator winding internal faults of AC excitation machine based on multi-loop theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3666-3684.
- [28] HE Rufeif, QIAO Jian, PENG Yumin. A rotor winding internal short-circuit fault protection method for variable-speed pumped storage units[J]. Applied Sciences, 2022, 12(15).
- [29] 毛俊喜, 张哲, 尹项根. 水轮发电机定子短路故障形式分析及其算法设计[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 75-80. MAO Junxi, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. Short-circuit fault modality analysis of hydraulic generator stators and design of corresponding algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 75-80.
- [30] KOTSIANTIS, ZAHARAKIS I, PINTELAS P. Machine learning: a review of classification and combining techniques[J]. The Artificial Intelligence Review, 2006, 26(3): 159-190.
- [31] QIAO Jian, WANG Yikai, HE Rufeif. Rotor winding short-circuit-fault protection method for VSPSGM combining the stator and rotor currents[J]. Applied Sciences, 2022, 12(18).

收稿日期: 2022-06-28; 修回日期: 2023-01-31

作者简介:

尹项根(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与安全自动控制; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

乔健(1997—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: 906982507@qq.com

(编辑 周金梅)