

抽水蓄能电动机励磁绕组 匝间短路的环流特性分析*

李泽同¹,李永刚¹,马明晗¹,齐鹏²

(1. 华北电力大学电力工程系,河北保定 071003; 2. 内蒙古大学电子信息工程学院,呼和浩特 010070)

摘要:围绕抽水蓄能电动机励磁绕组早期匝间短路难以识别的难题,提出一种以定子并联支路环流特性为基础的方法。首先,从电磁场理论出发,在电动机运行条件下,建立并推导出励磁绕组匝间短路与定子同相支路环流谐波之间的定量关系式。然后,利用有限元软件建立抽水蓄能电动机的二维仿真模型,模拟正常、轻微及严重短路3种工况,并对气隙磁密和支路环流进行频谱分析。研究发现,匝间短路故障会在定子支路环流中激发出特定的分数次谐波,且这些特征谐波的幅值与故障严重程度呈显著正相关,同时故障磁极处的气隙磁密会相应减小。该方法通过监测环流中的特征谐波,可实现对电动机励磁绕组早期匝间短路的灵敏度、无扰性进行在线检测,为保障机组安全稳定运行提供了有效的技术手段。

关键词:抽水蓄能电动机;励磁绕组;匝间短路;环流时频谱图

中图分类号:TM32 **文献标志码:**A

在全球能源向清洁低碳转型的战略驱动下,大规模开发和利用可再生能源已成为构建新型电力系统的核心。然而,风、光等新能源具有间歇与波动特性,显著冲击电网的稳定运行。抽水蓄能电站作为当前较成熟和具有规模化应用前景的储能技术,凭借其调峰、调频、储能及事故备用等多重功能,在提升电网灵活性和保障电力系统安全方面扮演着至关重要的角色^[1-5]。为确保机组的高度可靠性,向智能化运维转型已是必然趋势。这一转型的物理基础在于先进的传感技术与智慧通信系统^[6]。前者负责精准捕捉机组状态的细微变化,后者则保障海量监测数据能够从强电磁干扰的工业现场实时、可靠地传输至云端或本地监控中心^[7]。尤其对于抽水蓄能机组,其早期故障信号往往非常微弱,构建一个稳定且高效的通信网络是实现精准故障诊断的前提,它为后续的数据分析和诊断模型提供了可靠的数据源。在此基础上,开发灵敏、鲁棒的信号处理与诊断算法,从复杂的运行数据中提取有效的故障特征,是当前该领域亟待解决的核心科学问题。

在各类电气故障中,转子励磁绕组匝间短路(Rotor winding inter-turn short circuit, RWIS)是大型同步电机,特别是抽水蓄能机组中的一种常见且危害性极大的潜伏性故障^[8]。该故障初期特征微弱,但其短路环流产生的热能会迅速破坏绝缘,引发磁场不对称和机组剧烈振动等一系列严重问题,最终可能导致重大停机事故^[9-10]。

从更宏观的视角来看,当前发电设备的故障诊断正经历着从基于模型和专家经验到数据驱动范式的深刻变革^[11]。这种新范式依赖于从海量、多维的实时运行数据中学习和挖掘故障模式。在此背

* 收稿日期:2025-09-25; 修回日期:2025-12-10

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52307053);内蒙古自治区自然科学基金项目(2025QN05012)

作者简介:李泽同(1999—),男,辽宁铁岭人,2023级硕士研究生。E-mail:l1225162313@163.com

通信作者:李永刚(1967—),男,河北保定人,教授,博士。主要从事大型电机在线监测与故障诊断研究。E-mail:

lygzxm0@163.com

景下,通信网络不再仅仅是数据传输的管道,而是构成了整个智能诊断系统的“神经网络”。它将分布在发电机组各位置的传感器(物理层)与远端的计算智能(数字层)紧密耦合,实现了从数据采集、传输、处理到决策的闭环^[12]。特别是在在线监测场景下,实现对电流和振动等高频动态信号的连续采集,对通信的带宽、时延和同步精度提出了极高要求。因此,一个融合了光纤通信、工业实时通信网络以及5G等先进技术的现代化通信架构,是释放人工智能算法潜能、实现高灵敏度、高可靠性故障诊断的基石^[13]。本文研究的环流信号是一种对通信质量要求极高的微弱电气信号,其有效利用充分体现了先进通信技术与前沿诊断算法的深度融合。

针对RWIS故障的在线诊断,基于电气量的分析是当前主流方向。值得注意的是,抽水蓄能机组具备发电机和电动机两种截然不同的运行工况,其电磁环境与故障响应特性存在本质区别。在发电机工况下,电枢反应多表现为去磁或交磁效应,而在电动机工况下,则主要表现为助磁效应^[14]。此根本差异意味着两种工况的故障特征显著不同。然而,当前绝大多数研究,特别是基于环流分析的方法,均是针对发电机工况展开的^[15-16],其结论无法直接应用于电动机工况,构成了该领域一个显著的研究空白。

对于采用多并联支路的大型机组,转子故障引起的磁场畸变会破坏定子支路电势的对称性,从而激发出包含丰富故障信息的谐波环流^[17-18]。该环流信号信噪比高,对故障极为敏感,是理想的诊断特征载体。近年来,基于环流的诊断方法得到了重点关注。苟小军等^[15]推导了匝间短路故障引起的环流特征谐波数学公式,揭示了其内在机理。范轩杰等^[19]分析了多种工况下利用偶次谐波环流检测转子匝间短路的效果。特别是齐鹏等^[16]在该领域取得了系列创新成果,他们系统研究了匝间短路和动/静偏心等多种工况下的环流演变规律,提出了基于环流时频谱图的故障诊断新方法。该方法能够有效排除静偏心和电枢反应等因素的干扰,通过三维图谱直观展示机组运行状态,实现了对早期故障的有效辨识。后续研究中,齐鹏等^[20]进一步提出了无需额外传感器的检测方案,增强了方法的工程实用性。此外,一些研究开始探索将深度学习等人工智能算法与环流特征相结合,以提升诊断的智能化水平和准确率^[21-22]。尽管已有研究揭示了发电机工况下环流的演变规律,但电动机工况下的环流特性尚待系统研究。

本文聚焦于电动机工况,提出一套基于定子同相支路环流特性的诊断方案。首先,从电磁场理论出发,推导电动机工况下转子匝间短路与定子支路环流谐波的定量关系;然后,通过高精度有限元仿真对该机理进行验证与特征分析。该方法旨在将难以直接测量的转子磁场畸变问题转变为一个定子内部易于监测的电气量增量问题,为大型同步电动机关键故障的在线诊断提供崭新的视角和有效的技术手段。

1 转子绕组匝间短路的气隙磁密分析

在电动机负载正常条件下,由于各相绕组的基频电流存在 $2\pi/3$ 电角差,若将电枢绕组电流的有效值统一记为 I ,则可由此推导出各相电枢绕组所产生的 $\nu(\nu=1, 3, 5, \dots, 2n-1)$ 次谐波电动势^[23]为

$$\begin{cases} f_{a,\nu}(\alpha_s) = \frac{0.9N_a I}{\nu P} k_q k_{y\nu} \cos(\omega t) \cos(\nu\alpha_s) \\ f_{b,\nu}(\alpha_s) = \frac{0.9N_a I}{\nu P} k_q k_{y\nu} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left[\nu\left(\alpha_s - \frac{2\pi}{3}\right)\right], \\ f_{c,\nu}(\alpha_s) = \frac{0.9N_a I}{\nu P} k_q k_{y\nu} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cos\left[\nu\left(\alpha_s - \frac{4\pi}{3}\right)\right] \end{cases}$$

其中, P 表示极对数, ω 表示电角速度, α_s 表示定子空间电角度, N_a 表示一相绕组串联匝数, k_q 表示双层短距绕组的分布系数, $k_{y\nu}$ 表示双层短距绕组的短距系数。

采用三角恒等式中的和差化积公式,将各脉振磁动势分解为两组旋转磁动势,从而得到电枢绕组的磁动势表达式为

$$f_{abc,\nu}(\alpha_s) = \frac{0.9N_a I}{2\nu P} k_{qv} k_{yv} \sum_{m=1}^3 \cos \left[(\omega t + \nu \alpha_s) - (m-1)(\nu+1) \frac{2\pi}{3} \right] + \frac{0.9N_a I}{2\nu P} k_{qv} k_{yv} \sum_{m=1}^3 \cos \left[(\omega t - \nu \alpha_s) - (m-1)(1-\nu) \frac{2\pi}{3} \right]$$

电动机负载时电枢电流产生助磁效应,如图 1 所示,电枢磁动势 f_{abc} 与励磁磁动势 f_n 同向,可得

$$F_{cn} = \sqrt{(F_m + F_{sn} \sin \psi)^2 + (F_{sn} \cos \psi)^2},$$

$$\beta_n = \arctan \left[\frac{F_{sn} \cos \psi}{F_m + F_{sn} \sin \psi} \right],$$

所以

$$B_l = \Delta_0 \sum_{n=1,3,5,\dots} F_{cn} \cos n(\omega t - P\alpha - \beta_n),$$

其中, Δ_0 表示气隙磁导常数分量, ψ 表示内功角, F_{sn} 表示定子绕组磁动势 n 次谐波幅值, β_n 表示合成磁动势与励磁绕组磁动势之间的夹角, F_{cn} 表示合成磁动势 n 次谐波幅值。

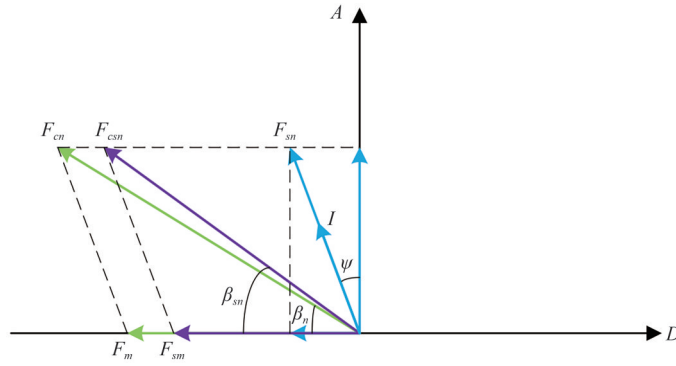


图 1 气隙磁动势矢量图

Fig. 1 Vector diagram of air-gap magnetomotive forces

当励磁绕组发生匝间短路故障时,磁动势的变化如图 2 所示。由图 2 可知,合成磁动势为

$$B_{ls} = \Delta_0 \left[\sum_{n=1,3,5,\dots} F_{csn} \cos n(\omega t - P\alpha - \beta_{sn}) - \sum_{k=1,2,3,\dots} F_{sk} \cos \frac{k}{P} (\omega t - P\alpha) \right],$$

$$F_{csn} = \sqrt{(F_{sm} + F_{sn} \sin \psi)^2 + (F_{sn} \cos \psi)^2},$$

$$\beta_{sn} = \arctan \left[\frac{F_{sn} \cos \psi}{F_{sm} + F_{sn} \sin \psi} \right],$$

其中, F_{sk} 为反向磁动势 k/P 次谐波的幅值。

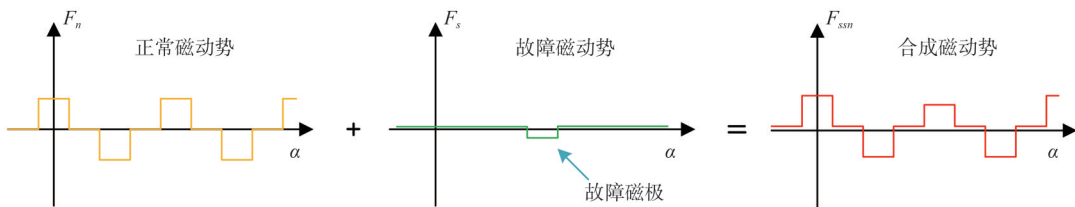


图 2 磁动势合成图

Fig. 2 Magnetomotive force synthesis diagram

2 同相支路环流理论推导

2.1 同相支路电动势分析

以发电机电枢绕组3条同相支路为例,如图3所示,对支路电动势进行分析,单支路的电动势为^[23]

$$E_w = KB_{mr} \cos(\nu\omega t \mp \nu\gamma) \left(K = \frac{2P}{a} \cdot 3.99N_q \nu l \tau, k_y, k_{qv} \right),$$

其中, k_y 表示绕组的短距系数, a 表示同相并联支路的数量, l 表示定子绕组有效长度, τ 表示 ν 次谐波所对应的极距, N_q 表示单个线圈所含匝数, k_{qv} 表示绕组的分布系数, γ 表示两个并联支路之间的空间位置差。

当 $\gamma = \frac{2P\pi}{3}$ 时, 电动势差为

$$\Delta E_w = E_{w1} - E_{w2} = KB_{vm} \left[\cos(\nu\omega t) - \cos\left(\nu\omega t \mp \nu \frac{2P\pi}{3}\right) \right],$$

其中, B_{vm} 表示气隙磁密 ν 次谐波的最大幅值。

对于发电机工况来说, 水能转换成电能, 由水流驱动水轮机, 水轮机带动发电机转子正转(默认发电状态时为正转)进而输出电能。而对于电动机工况来说, 电能转换成水能。当电网输入电能时, 电机作为电动机运行, 此时转子反转驱动水泵抽水至水库, 即电动机旋转方向与发电机相反。由此可得, 发电状态时的电势差为

$$\Delta E_w^{\text{gen}} = 2KB_{vm} \sin\left(\nu\omega t - \frac{\nu P\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{\nu P\pi}{3}\right)。$$

电动状态时的电势差为

$$\Delta E_w^{\text{mot}} = 2KB_{vm} \sin\left(\nu\omega t + \frac{\nu P\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{\nu P\pi}{3}\right)。$$

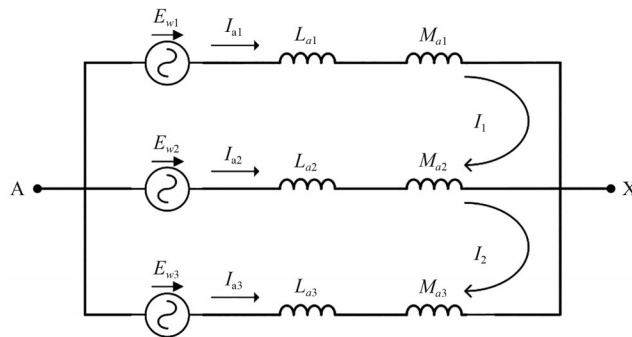


图3 电枢绕组同相支路

Fig. 3 In-phase branch of the armature winding

2.2 同相并联支路环流的特性分析

根据图3的电枢绕组同相支路结构, 由基尔霍夫电压定律得

$$j\omega(L_a + M_a)I_{\text{circ}} = \Delta E_w,$$

其中, L_a 为电路自感, M_a 为电路互感, I_{circ} 为电路环流。环流表达式为

$$I_{\text{circ}} = \frac{\Delta E_w}{j\omega(L_a + M_a)}。$$

当电路发生匝间短路时, 引入 $\nu = k/P$ 次谐波, 则

$$I_{\text{circ}}^{\text{fault}} = \frac{2KB_{vm}}{j\omega(L_a + M_a)} \sin\left(\frac{k}{P}\omega t + \frac{k\pi}{3}\right) \sin\left(\frac{k\pi}{3}\right)。$$

由此可知, 在电动机负载工况下, 气隙磁密中同样包含 k/P 次分数谐波。但与发电机工况不同的

是,受电枢反应助磁效应的影响,其基波与 n 次谐波幅值会有所增大。即当一个磁极发生匝间短路时,该磁极的励磁磁动势减弱,破坏了转子磁场原有的 P 个极对的对称性。这种不对称的磁动势可以被傅里叶分解为一系列新的空间谐波分量,其谐波次数满足 $\nu = k/P$ (k 为不被 P 整除的整数)。这些新的空间磁场谐波在定子绕组中感应出相应频率的谐波电动势,最终在并联支路中形成了特征谐波环流。

3 抽水蓄能电动机的仿真分析

电动机参数来源于某电机厂生产的发电机,其数据见表 1。

表 1 抽水蓄能电动机的主要参数
Table 1 Main parameters of a pumped-storage motor

基本参数	数值	基本参数	数值
额定容量/(MVA)	322	额定电流/A	10 328
功率因数	0.98	额定电压/kV	$18 \pm 5\%$
额定励磁电压/V	290	转子磁极对数	9
额定励磁电流/A	1 712	额定转速/(r/min)	333.3
额定频率/Hz	$50 \pm 1\%$	气隙长度/mm	39.5
定子槽数	216	每相并联支路数	3

运用 Ansys Maxwell 软件建立抽水蓄能电动机的二维有限元模型,如图 4 所示。

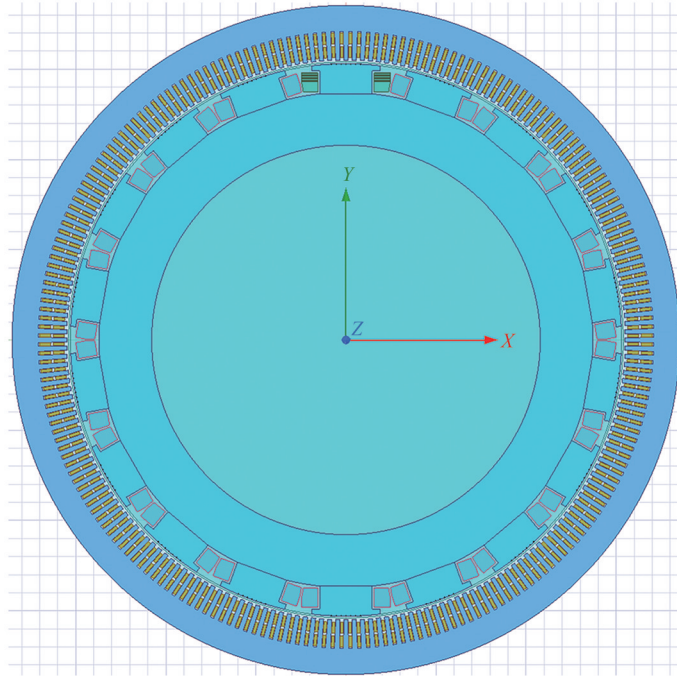


图 4 电动机二维仿真图

Fig. 4 Two-dimensional simulation diagram of the electric motor

建立二维有限元模型时,首先,配置励磁与电枢绕组的激励,对于同步电动机,因其无法直接工频自启动(通常采用变频器或阻尼绕组启动),且本文主要关注稳态运行特性,故仿真时不考虑机械瞬态过程。此外,由于电动机空载状态为调相机,所以本文仿真不考虑空载状态。当电机带载时通过调整电压源的相角即改变功角来模拟电动机的运行状态;其次,为贴近现场工况,在电动机运行的某时刻令其某一转子绕组匝间短路,短路匝数分别设置为 3 匝与 6 匝,如图 5 所示;最后,将电机模

型导入至 circuit 外电路,并依据实际绕组连接关系搭建外部电路中的转子回路和定子回路。抽水蓄能电动机 circuit 外电路如图 6 所示。

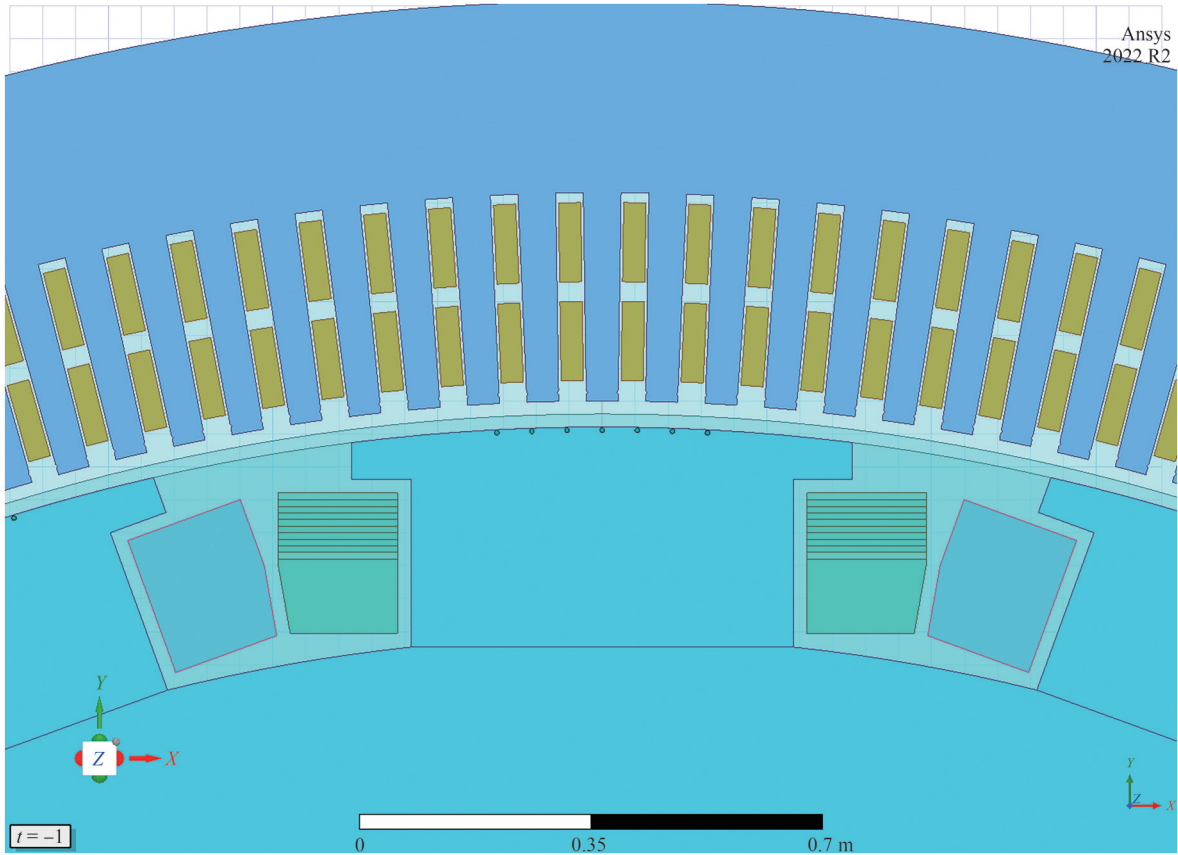


图5 电动机某磁极匝间短路仿真图

Fig. 5 Simulation diagram of inter-turn short circuit of a certain magnetic pole of the motor

3.1 磁通密度分析

将某转子磁极绕组依次设为正常、短路三匝与短路六匝,分析其径向气隙磁密,其负载工况结果见图 7。

由图 7 可见,负载时故障磁极的径向气隙磁密随故障加剧而逐步降低。对该负载工况下的径向气隙磁密进行傅里叶分析,可得到故障磁场的频域特性如图 8 所示。

由图 8 知,当抽水蓄能电动机处于正常运行状态时,电动机的气隙磁密主要以 50 Hz 的基波和奇数次谐波为主。当励磁绕组出现匝间短路,其径向气隙磁密的频谱除基波与奇数次谐波外,还包含分数次谐波,且当短路匝数增多时,分数次谐波的含量会随短路匝数的增多而增加。

3.2 同相支路环流分析

将某转子磁极绕组依次设为正常、短路三匝与短路六匝(同磁密分析的设置方式),分析其同相支路环流,结果如图 9 所示。

由图 9 可知,在电动机负载正常运行条件下,受电枢反应影响,同相支路会产生环流。而随着短路匝数的增加,环流产生畸变且最大幅值会随着故障程度的增加而增大。

由图 10 可以看出,当抽水蓄能电动机处于正常运行状态时,电动机的电枢绕组环流频率主要以 50、150、250 Hz 等基波和奇数次谐波为主,而当励磁绕组发生匝间短路故障时,其电动机的电枢绕组环流频域不仅包含基波及其奇数次谐波,还包含分数次谐波,即 $k/P(k=1, 2, \dots, n, k \neq 3n)$,且分数次谐波含量随着故障程度进一步加深,相关量呈增加趋势,从而验证了前述推导公式的正确性。

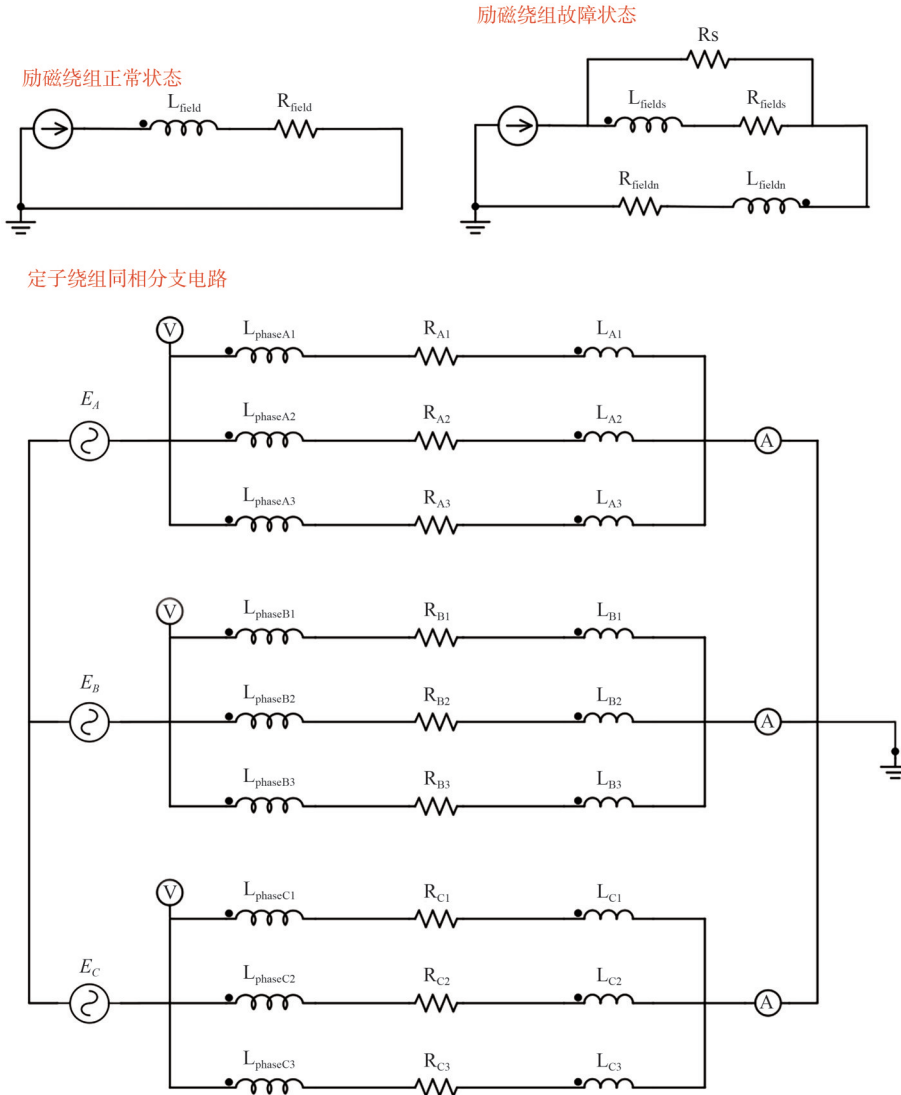


图 6 电动机 circuit 外电路仿真图

Fig. 6 Simulation diagram of the external circuit of the electric motor

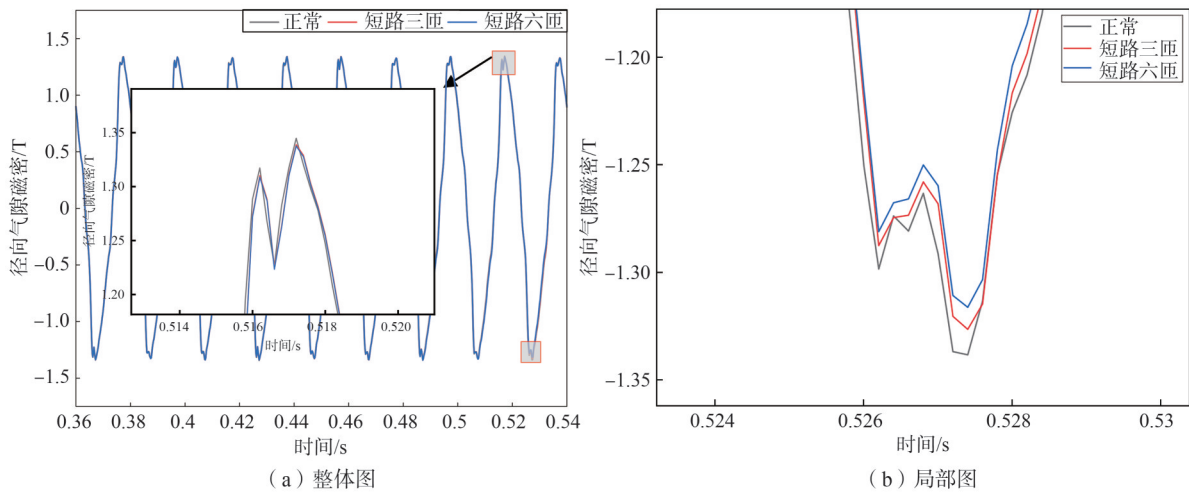


图 7 负载状态下气隙磁密图

Fig. 7 Magnetic flux density diagram of air-gap under load condition

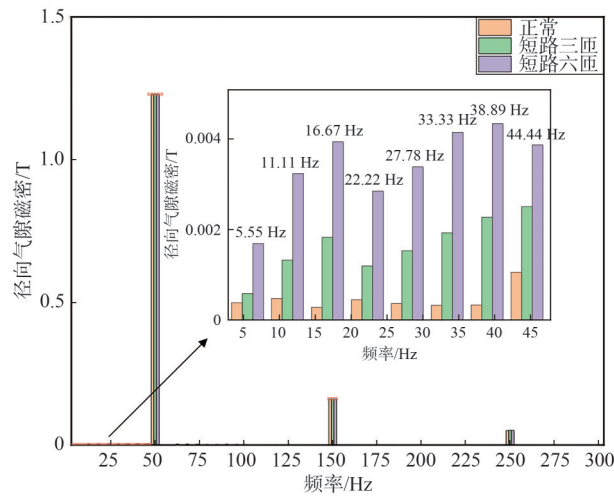


图8 负载状态下气隙磁密频域图

Fig. 8 Frequency-domain diagram of air-gap magnetic flux density under load condition

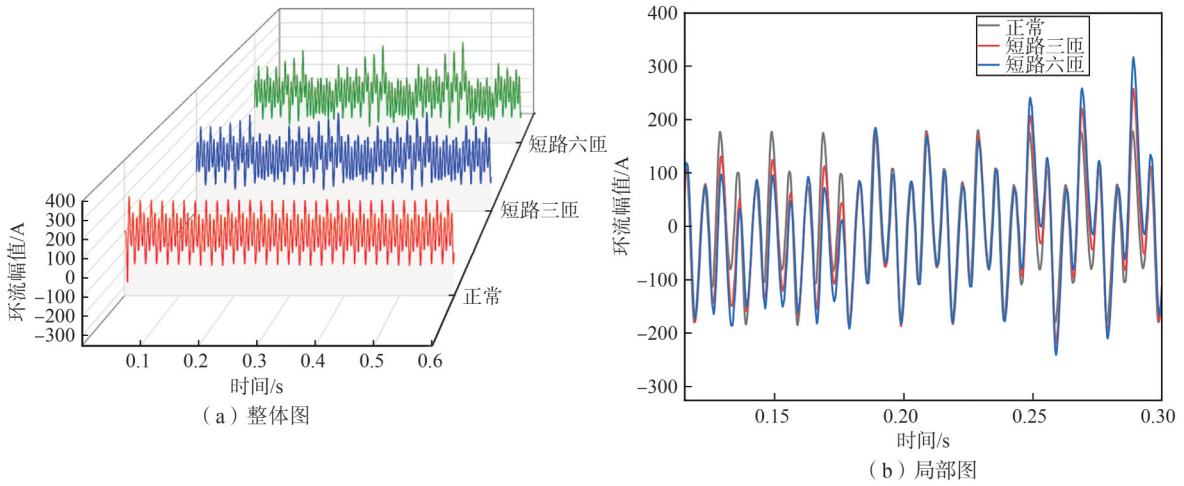


图9 负载状态下电枢绕组环流时域图

Fig. 9 Time-domain diagram of armature winding circulating current under load condition

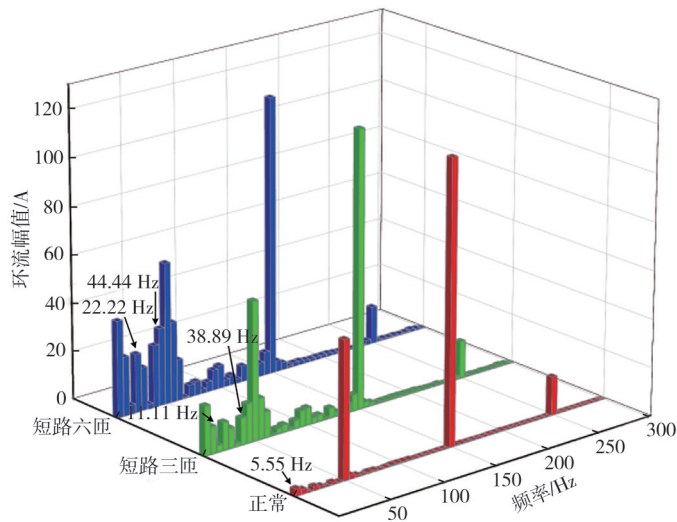


图10 负载状态下电枢绕组环流频域图

Fig. 10 Frequency domain diagram of armature winding circulating current under load condition

4 结论

本研究提出一种基于环流分布特性的诊断模型以识别励磁绕组匝间短路,构建了匝间短路工况下同相并联支路环流的数学模型,并采用有限元仿真对其有效性加以验证。主要结论如下。

(1) 励磁绕组发生匝间短路后,故障磁极的磁场分布显著畸变,表现为径向气隙磁通密度与故障的严重程度呈负相关,且分数次谐波含量的幅值会随故障加重而上升。因此,监测气隙磁密的变化可作为评估机组运行状态的有效手段。

(2) 匝间短路故障会诱发一系列特定的分数次谐波环流,其谐波次数满足 $k/P(k=1, 2, \dots, n, k \neq 3n)$ 的规律。通过有限元仿真数据分析证实,这些特征谐波的幅值随故障程度加剧而进一步增大。

(3) 所提出的环流检测法具有实现简便、对机组正常运行无干扰等优点。该技术能够有效识别处于萌芽阶段的匝间短路故障,并为及时处置故障提供依据,对于遏制故障扩展并保障新型电力系统的可靠运行具有重要意义。

参考文献:

- [1] DIRANI H C, MERKHOUF A, KEDJAR B, et al. Rotor interturn short circuit impact on large hydrogenerator magnetic quantities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4):3702-3711.
- [2] 陈煌, 黄汉昌, 黎值源, 等. 抽水蓄能机组孤网运行稳定特性分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11):113-120.
- [3] 武玉才, 马倩倩, 蔡波冲, 等. 水轮发电机转子绕组匝间短路故障的新型在线诊断方法[J]. 电机控制学报, 2018, 22(11):19-25.
- [4] 李诚, 高建国, 胡平良, 等. 基于深度学习的水轮发电机定转子缺陷智能诊断技术研究[J]. 电子设计工程, 2022, 30(1):80-84.
- [5] EHYA H, NYSVEEN A, SKREIEN T N. Performance evaluation of signal processing tools used for fault detection of hydrogenerators operating in noisy environments[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(4):3654-3665.
- [6] GUNGOR V C, SAHIN D, KOCAK T, et al. Smart grid technologies: Communication technologies and standards [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(4):529-539.
- [7] SISINNI E, SAIFULLAH A, HAN S, et al. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11):4724-4734.
- [8] TALLAM R M, HABELTLER T G, HARLEY R G. Transient model for induction machines with stator winding turn faults[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(3):632-637.
- [9] EBRAHIMI B M, FAIZ J. Feature extraction for short-circuit fault detection in permanent-magnet synchronous mo-

- tors using stator-current monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(10):2673-2682.
- [10] STONE G C. Condition monitoring and diagnostics of motor and stator windings: A review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6):2073-2080.
- [11] ZHANG W, YANG D, WANG H. Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey[J]. IEEE Systems Journal, 2019, 13(3):2213-2227.
- [12] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4):2405-2415.
- [13] CHENG J F, CHENG W H, TAO F, et al. Industrial IoT in 5G environment for smart manufacturing[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2018, 10:10-19.
- [14] 汤蕴璆, 史乃. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [15] 苟小军, 张玮, 李永刚, 等. 抽水蓄能发电机励磁绕组匝间短路的环流特性分析[J]. 大电机技术, 2023(4): 28-34.
- [16] 齐鹏, 李永刚, 马明晗, 等. 基于环流时频图谱的抽水蓄能机组励磁绕组匝间短路故障诊断研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22):6104-6120.
- [17] 何玉灵, 张文, 张钰阳, 等. 发电机定子匝间短路对绕组电磁力的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13):2879-2888.
- [18] 辛鹏, 戈宝军, 陶大军, 等. 多极隐极发电机励磁绕组匝间短路时的定子分支环流谐波特性[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7):67-76.
- [19] 范轩杰, 武玉才, 卢伟甫. 抽水蓄能机组多工况下转子匝间短路故障检测效果分析[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(4):23-33.
- [20] 齐鹏, 李永刚, 马明晗. 抽水蓄能电机转子匝间短路无传感器检测方法研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6431-6443.
- [21] 马明晗, 侯岳佳, 李永刚, 等. 基于MSK-CNN和多源机电信息融合的同步发电机故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(1):1-11.
- [22] 李俊卿, 李斯璇, 陈雅婷, 等. 一种基于CGAN-CNN的同步电机转子绕组匝间短路故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8):169-174.
- [23] 刘英, 夏自平, 王洪林, 等. 多对极发电机励磁绕组匝间短路故障在线定位系统研究与应用[J]. 水电与抽水蓄能, 2022, 8(1):54-60.

Analysis of Circulating Current Characteristics of Inter-Turn Short Circuit in Excitation Winding of Pumped Storage Motor

LI Zetong¹, LI Yonggang¹, MA Minghan¹, QI Peng²

(1. *Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;*

2. *School of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China*)

Abstract: Aimed at the difficulty in early diagnosis of inter-turn short circuit faults in the excitation winding of pumped storage motors, a fault diagnosis method based on the characteristics of circulating current in the stator parallel branches was proposed. Firstly, starting from the electromagnetic field theory, the mathematical relationship between inter-turn short circuit in the excitation winding and the harmonic of the circulating current in the stator same-phase branch under the motor operation condition was derived. Then, a two-dimensional simulation model of the pumped storage motor was established by using the finite element software, and three working conditions of normal, slight and severe short circuit were simulated. The frequency spectrum analysis of the air-gap flux density and the branch circulating current was carried out. The research finds that the inter-turn short circuit fault will excite specific fractional harmonics in the stator branch circulating current, and the amplitude of these characteristic harmonics is significantly positively correlated with the severity of the fault. At the same time, the air-gap flux density at the faulty pole will decrease accordingly. The method can achieve sensitive and non-intrusive online detection of early inter-turn short circuit in the motor excitation winding by monitoring the characteristic harmonics in the circulating current, providing an effective technical means to ensure the safe and stable operation of the unit.

Key words: pumped storage motor; excitation winding; inter-turn short circuit; circulating current spectrogram