

发电机气隙静态偏心对电磁转矩的影响^{*}

何玉灵¹, 王发林¹, 唐贵基¹, 刘会兰², 邓玮琪¹, 万书亭¹

(1. 华北电力大学机械工程系 保定, 071003) (2. 华北电力大学电力工程系 保定, 071003)

摘要 针对发电机气隙静态偏心前后的电磁转矩特征进行了理论分析、仿真计算和动模实验验证。首先,对发电机气隙静态偏心前后的电磁转矩进行了理论推导,得到了两种运行状态下电磁转矩的具体表达式;然后,分别应用 Matlab 和有限元软件 Ansoft 针对实验室 MJF-30-6 型动模机组的具体参数进行了数值计算和建模仿真,并将所得结果与实验数据进行了对比,三者基本吻合。分析表明:气隙静偏心将引发电磁转矩产生二倍频波动,同时将使电磁转矩的平均值有所增大,但鉴于气隙偏心的数值较小,其增幅很小;随着静偏心程度的加剧,电磁转矩的二倍频波动程度将加剧,同时平均值增幅将扩大。本成果可在现有基础上丰富气隙静偏心故障的诊断判据,为该故障的监测与控制提供方便。

关键词 发电机;气隙静态偏心;电磁转矩;波动特性

中图分类号 TM311;TH113.1

引言

气隙偏心广泛存在于发电机和电动机中,这是一种由于制造及安装误差、导轴承偏移、定子铁芯变形等原因所导致的定转子间气隙不均匀(一侧气隙大另一侧气隙小)的状况^[1-2]。根据偏心情况的不同,气隙偏心又可分为气隙静态偏心(最小气隙位置固定不动),气隙动态偏心(最小气隙位置将随着转子的旋转而发生改变)以及气隙混合偏心(既有静态偏心又有动态偏心)^[2]。轻微的气隙偏心不会对发电机的正常运行产生太大的影响,然而当偏心程度超过 10% 时,将会使定转子径向振动激增,恶化轴承工作环境,磨损绕组绝缘,此时转子所受的不平衡磁拉力将会使转子进一步向最小气隙方向变形,使得最小气隙进一步减小,形成恶性循环,严重时导致碰摩故障的发生^[3]。因此,掌握发电机气隙偏心状态下所对应的典型机电特征对于该类故障的监测与控制具有重要意义。

已有成果对于气隙偏心故障的研究主要集中在磁场分析^[4-6]、定子侧的感应电势及电流分析^[7-9]、转子不平衡磁拉力分析^[10-14]、定转子振动特性^[3,15-19]等方面。采用的分析方法主要有有限元计

算^[4,7,10-14]、基于绕组函数理论的电感矩阵变化计算^[5-6]及基于麦克斯韦方程组的理论解析与验证^[3,8-9,17,19]。这些成果对于电机气隙偏心故障的分析与诊断奠定了良好的基础。在这些研究成果中,对不平衡磁拉力及其引发的振动响应,以及定子侧电流分析的研究占大多数,鲜见关于电磁转矩方面的分析。研究对象以电动机居多,水轮发电机次之,汽轮发电机最少。

在已有的这些研究成果中,基于某一单一特性的方法在偏心故障的实际监测中实现起来有困难,例如:基于定子并联支路环流特性的检测方法^[9]、基于磁场参量变化的检测方法^[4-6],以及目前已见报道用于实际监测的探测线圈法^[20],都需要安装额外的探测线圈或支路电流互感器,而对于目前大多数并未安装探测线圈及支路环流互感器的机组而言,这种需要停机开盖并安装附加器件的检测方法不仅成本较高,而且操作相对困难,并不受现场管理和运行人员的欢迎。相较而言,基于定子端部电流谐波特性^[5-8]和定转子径向振动特性^[17-19]的检测方法不需要停机和在发电机内部安装额外器件,因此在操作的方便性上具有很大优势。但由于影响定子电流和定转子振动的因素众多,多种不同的故障有可能会对应相似或相同的定子电流特征和定转子振动特

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51307058);河北省自然科学基金资助项目(E2014502052,E2015502013);中央高校科研业务费专项基金资助项目(2015ZD27)

收稿日期:2015-08-21;修回日期:2015-11-30

征,因此仅靠电流量或振动量的变化较难精确反推和唯一确定发电机的故障种类,故而需要联合其他量进行辅助诊断^[18-19]。

事实上,除了定子端部电流和振动参量外,现场对电磁转矩的测量和获取也较为方便,可以由发电机二次端所测取的定子电压、电流及转子转速折算得到^[21],不需要额外安装监测设备;其变化特性结合现有的研究成果能够进一步提高气隙偏心故障诊断的快速性和准确性,为该种故障监测与控制的实际推广应用提供可能。当前的已有成果中暂未见关于气隙偏心对发电机稳态电磁转矩影响的报道,鉴于此,作为补充和改进,笔者将从气隙偏心对发电机气隙磁密的影响机理入手,通过磁场能量折算的方法来推导和分析气隙静态偏心对于发电机稳态电磁转矩的影响,并采用数值计算和实验进行验证。

1 发电机气隙静态偏心前后的电磁转矩

1.1 正常运行时的电磁转矩

正常与气隙静偏心情况下发电机定转子间气隙如图1(a)和(b)所示,正常情况下气隙均匀,气隙单位面积磁导为

$$\Lambda(\alpha_m, t) = \frac{\mu_0}{g_0} = \Lambda_0 \quad (1)$$

其中: Λ 为气隙单位面积磁导; Λ_0 为气隙磁导常值量; α_m 为用于表征气隙周向位置的机械角; g 为径向气隙长度; g_0 为平均径向气隙长度; t 为时间; μ_0 为空气磁导率; δ_s 为相对静偏角。

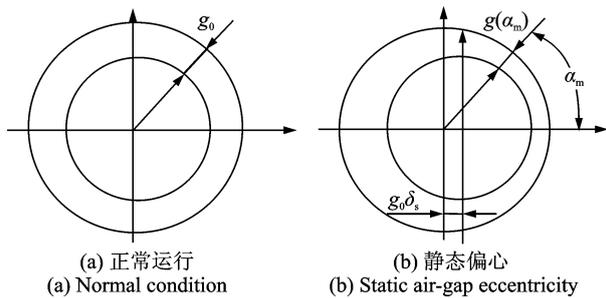


图1 发电机偏心前后的气隙

Fig. 1 Generator air-gap before and after eccentricity

正常运行时发电机气隙磁势如图2所示。图中: F_s 为定子绕组所产生的电枢反应基波磁势,与励磁绕组有效安匝数成正比; F_r 为转子励磁绕组所产生的基波主磁势; F_1 为发电机基波合成磁势; ψ 为发电机的内功角,其值由负载性质决定; I 为电枢电流; E_0 为励磁电动势。根据图2中所示的定转子

磁势之间的关系,忽略高次谐波,可将发电机气隙磁势表达式为

$$f(\alpha_m, t) = F_s \cos(\omega t - \alpha_m - \psi - \frac{\pi}{2}) + F_r \cos(\omega t - \alpha_m) \quad (2)$$

其中, α_m 为气隙周向角。

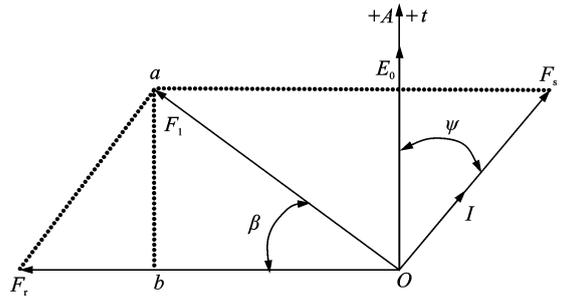


图2 发电机正常运行下的磁势

Fig. 2 Magnetomotive force under normal condition

采用基于气隙磁场能量折算的方法来推导电磁转矩,发电机气隙磁场能量为

$$W = \int_v \frac{[B(\alpha_m, t)]^2}{2\mu_0} dv = \frac{1}{2} L \int_0^{2\pi} \{R(\alpha_m, t) \Lambda(\alpha_m, t) [f(\alpha_m, t)]^2\} d\alpha_m \quad (3)$$

其中: $B(\alpha_m, t) = f(\alpha_m, t) \Lambda(\alpha_m, t)$,为气隙磁密; $R(\alpha_m, t) = R_0$ 为定子内圆半径; L 为电机轴向有效长度。

根据虚位移原理,发电机转子作微分虚位移 $\Delta\psi$,转子磁动势在空间位置将移动 $\Delta\psi$,由此可得电磁转矩^[22]为

$$T = p \frac{\partial W}{\partial \psi} \quad (4)$$

将式(1),(2)代入式(3),(4),得到正常情况下电磁转矩为

$$T_{\text{normal}}(t) = -pL\Lambda_0\pi R_0 F_r F_s \cos\psi \quad (5)$$

由式(5)可知,正常情况下,发电机的稳态电磁转矩为一与负载相关(内功角 ψ 取决于负载)的直流量,此时这一电磁转矩等于汽机输入机械转矩(电磁转矩为阻力矩),发电机稳定发电。

1.2 气隙静态偏心下的电磁转矩

气隙偏心主要通过影响发电机的气隙磁导来对气隙磁密产生影响,而其气隙磁势则与基本正常运行时一致。发电机在气隙静偏心情况下气隙磁导非对称分布(图1(b)),单位面积气隙磁导与气隙周向角有关,忽略二次以上高次谐波,用幂级数展开后其表达式为

$$\Delta(\alpha_m, t) = \frac{\mu_0}{g(\alpha_m, t)} = \frac{\mu_0}{g_0(1 - \delta_s \cos \alpha_m)} = \frac{\Delta_0 [1 + \delta_s \cos \alpha_m + \delta_s^2 \cos^2 \alpha_m]}{\quad} \quad (6)$$

将式(2), (6)代入式(4), (5)得气隙静态偏心下的电磁转矩为

$$\begin{aligned} T_{\text{SAGE}}(t) = & -pL\Delta_0\pi R_0(1 + \frac{\delta_s^2}{2})F_r F_s \cos\psi - \\ & pL\Delta_0\pi R_0\delta_s^2[-F_r^2 \sin(2\omega t + 2\psi) + \\ & F_r F_s \cos(2\omega t + \psi)] = \\ & -pL\Delta_0\pi R_0(1 + \frac{\delta_s^2}{2})F_r F_s \cos\psi - \\ & pL\Delta_0\pi R_0 F_r \delta_s^2 \sqrt{\frac{F_r^2 + F_s^2}{2F_r F_s \sin\psi}} \cos(2\omega t + \psi + \gamma) \end{aligned} \quad (7)$$

由式(6)与式(7)对比可知,气隙静态偏心下,发电机电磁转矩除了直流量外,还增加了二次谐波分量。换言之,气隙静态偏心将会使发电机的稳态电磁转矩呈现出二倍基频的波动特性,且其波动幅值为 $pL\Delta_0\pi R_0 F_r \delta_s^2 \sqrt{\frac{F_r^2 + F_s^2}{2F_r F_s \sin\psi}}$, 可见随着气隙静态偏心程度的加剧,二倍频波动程度也将加剧。而对比式(7)与式(5)则可发现,气隙静态偏心下的直流分量较正常情况下要大(系数中多了 $\delta_s^2/2$ 成分),但鉴于静态偏心数值较小,其增幅也较小,以 10% 气隙静偏心为例,其增幅仅为 0.5%。

2 动模实验与数值计算验证

本研究采用动模机组实验与数值计算来对前面的理论分析结果进行检验,其中,数值计算部分包括理论解析计算和有限元仿真计算。理论解析计算采用 Matlab 按照式(5)与式(7)代入相应参数进行计算,有限元仿真计算采用 Ansoft Maxwell 进行。

2.1 动模实验方法

采用华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室 MJF-30-6 型隐极动模发电机进行实验验证,如图 3(a)所示。电机为双层短距绕组,相关的参数如下:额定容量为 30 kVA;额定电压为 400 V;定子槽数为 54;每极每相槽数为 3;额定转速为 $n_r = 1000$ r/min;极对数为 $p = 3$;气隙为 0.85 mm;定子绕组匝数为 72;同步电抗为 $x_s = 2.0308 \Omega$;功率因数为 0.8;极距为 221.5 mm;定子铁芯内径为 $R_0 = 615$ mm;定子铁芯长度为 $L = 220$ mm。经测量,该故障模拟发电机存在一定程度的气隙静态偏心,如图 3(b)所示,发电机励端视图上偏左 22° 附近为气隙最小处,最小气隙 $g_{\min} = 0.80$ mm,下偏右 22° 为气隙最大处,最大气隙 $g_{\max} = 0.90$ mm。发电机平均气隙为 0.85 mm,测量采用高精度塞尺进行,塞尺由一组不同厚度规格的塞片组成,测试精度可

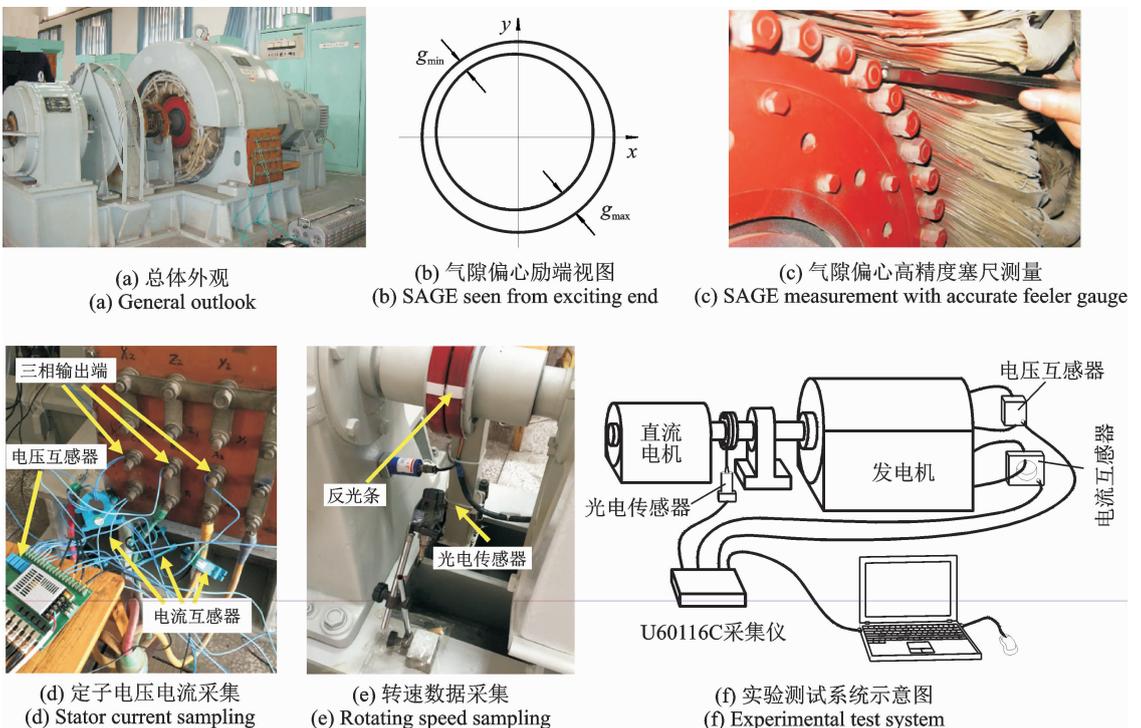


图3 MJF-30-6型故障模拟机组

Fig. 3 MJF-30-6 type fault simulating generator set

达 0.01 mm,组合不同塞片使其填充定转子气隙,可实现对 360°圆周气隙的厚度测量,如图 3(c)所示。

实验过程中发电机并网运行,负荷为 1 000 W,励磁电流 $I_f=1$ A,线电压 $U=380$ V。采用光电传感器测试转子实时转速(在连轴器部位贴反光条作为脉冲鉴相),在定子三相出线端安装电流互感器(输入输出参数为 20 A/5 V)和电压互感器(输入输出参数为 400 V/5 V),采用北京波谱公司 U60116C 型采集仪,设置采样频率为 5 kHz,电流互感器输出信号接入采集仪中,再将采集仪输出信号接至上位机中进行后处理和存储,如图 3(d)~(f)所示。

利用实验所测得的发电机电压、电流和转速数据计算得到发电机电磁转矩,计算公式为

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{\sqrt{3}UI\cos\varphi}{2\pi n/60} \quad (8)$$

2.2 仿真方法与设置

仿真对象与实验对象一致,所建立的 MJF-30-6 型模拟发电机二维分析模型如图 4(a)所示,图中 A_1, B_1, C_1 表示 A 相, B 相, C 相第 1 条支路绕组, A_2, B_2, C_2 表示 A 相, B 相, C 相第 2 条支路绕组, F_S 和 F_N 分别表示励磁绕组 S 极和 N 极绕组。本研究分别建立了正常运行模型(无气隙偏心)和 0.05 mm 气隙静态偏心模型共两个计算模型,静态偏心模型建模时将电机转子及励磁绕组参照图 3(b)所示偏心情况进行了 0.05 mm 偏移,以保证与实验机组的实际情况相一致,模型对应的网格划分情况如图 4(b)所示,气隙及绕组槽内网格最大边长为 0.008 mm,得到 10 710 个网格单元。仿真过程

中励磁电流设置与实验相同。

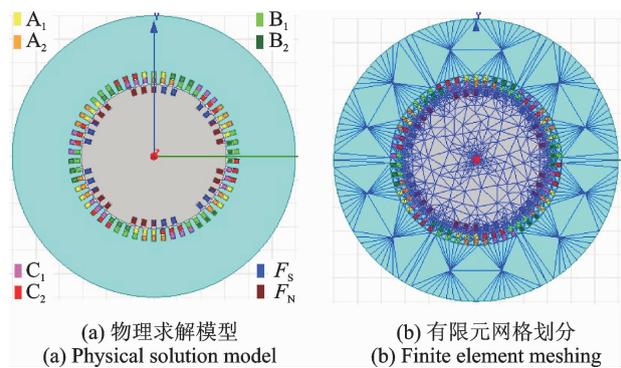


图 4 0.05 mm 气隙静态偏心下的数值仿真模型

Fig. 4 Analysis model of turbo-generator for simulation with 0.05 mm static air-gap eccentricity

2.3 数值计算与实验结果分析

仿真与实验波形如图 5(a), (b) 所示;按照式(5)与式(7)计算得到的频谱如图 5(c)所示;有限元仿真得到的频谱如图 5(d)所示。由于实验时机组已存在气隙静态偏心,因此无法实现对严格无偏心情况下电磁转矩的测试,作为对比,本研究调取了 2002 年相同设置情况的历史实验数据与本次实验数据进行对比,结果如图 5(e), (f) 所示。

从图 5(c), (d) 看出,通过有限元仿真计算得到气隙静态偏心下的电磁转矩呈现出与理论解析相同的波动规律,其二倍频幅值由正常的 0.012 N·m 增加到了 0.26 N·m,增幅了 20.67 倍;理论解析数值结果与仿真数值结果吻合良好。

图 5(e), (f) 的实验数据表明:a. 2002 年该机组发电机电隙就存在一定的静态偏心,体现在其频谱

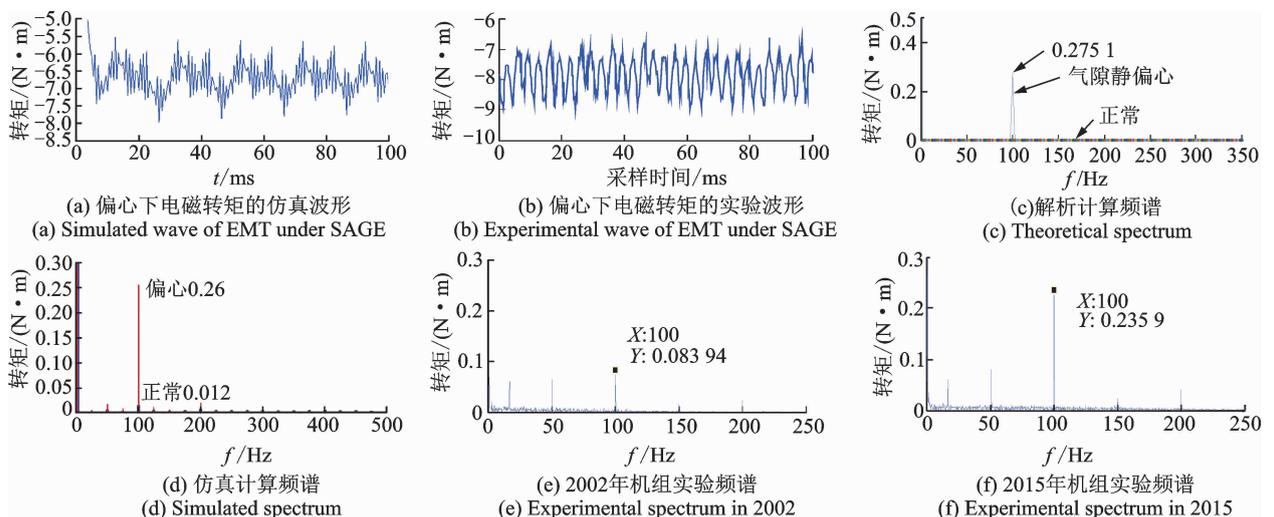


图 5 电磁转矩的数值计算结果与实验结果对比

Fig. 5 Comparison between the digital calculation and the experiment result of the electromagnetic torque

二倍频幅值占比明显,已超过除直流外的其他频率成分,这与前面理论推导分析部分所得到的定性结论相一致;b. 历经13年后,发电机气隙的静态偏心有所加剧,二倍频幅值从 $0.08394 \text{ N}\cdot\text{m}$ 增加到了 $0.2359 \text{ N}\cdot\text{m}$,增幅为181%。虽然限于条件限制未能测取无偏心状态下的电磁转矩数据,但实验结果与理论解析结果和仿真结果总体相一致。

为更加直观地对不同方法所获取的电磁转矩结果进行对比,将各方法结果所得统计结果进行综合,如表1所示。综合图5与表1的数据可发现,理论解析结果、仿真结果、实验结果三者基本吻合。气隙静态偏心下发电机的电磁转矩二倍频成分较正常情况下有极为明显的增长,其中仿真值增长了2067%,实验值增长了181%,这一结果与前面理论推导部分所得到的公式(7)和(5)的对比结果相一致。除此之外,气隙偏心下的电磁转矩平均值也较正常时有所增长,其中仿真值增长了 $0.31 \text{ N}\cdot\text{m}$,增幅为4.8%;实验值(2015年相较于2002年,相当于偏心程度加剧)增长了 $0.2092 \text{ N}\cdot\text{m}$,增幅为2.6%。这些对比数据表明,气隙静偏心所导致的电磁转矩均值增长幅度较小,这与前面理论分析中式(5)及式(7)的对比结果相吻合(偏心后与偏心前比值为 $1+\delta_s^2/2$)。

表1 电磁转矩结果对比

Tab. 1 Harmonics amplitudes of electromagnetic torque

| 运行状态 | | 电磁转矩/(N·m) | |
|------------------|---------|------------|----------|
| | | 正常 | 静态偏心 |
| 平均值 (直流 0 Hz) | 解析 | -6.635 | -6.646 8 |
| | 仿真 | -6.42 | -6.73 |
| | 2002 实验 | | -8.167 6 |
| | 2015 实验 | | -8.376 8 |
| 100 Hz | 解析 | 0 | 0.275 1 |
| | 仿真 | 0.012 | 0.26 |
| | 2002 实验 | | 0.083 94 |
| | 2015 实验 | | 0.235 9 |

3 结束语

笔者结合理论推导、数值仿真计算和动模实验分析了发电机气隙静偏心对发电机电磁转矩的影响,结果表明:

1) 气隙静偏心将引发电磁转矩产生二倍频波动,且波动程度将随静偏心程度的加剧而增大,波动幅值为 $pL\Lambda_0\pi R_0 F_r \delta_s^2 \sqrt{F_r^2 + F_s^2} + 2F_r F_s \sin\psi$;

2) 气隙静偏心将使发电机的电磁转矩平均值(直流分量)比正常运行时有所增大,这一增大值将

随静偏心程度的加剧而增长,但鉴于气隙偏心的数值较小,其增幅很小。

笔者推导得到了发电机正常运行和气隙静态偏心情况下电磁转矩的具体表达式,并得到了电磁转矩平均值和二倍频幅值的定性变化规律,论文成果可在现有研究的基础上进一步丰富气隙静偏心故障的诊断判据,例如,将论文成果与文献[18-19]的分析结果相结合有望在现有基础上提高气隙静态偏心故障的识别精度和效率,为该故障的监测与控制提供方便,是对现有技术的一个重要补充。

参 考 文 献

- [1] Smith C F, Johnson E M. The losses in induction motors arising from eccentricity of the rotor [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1912, 48 (212): 546-569.
- [2] Rosenberg L T. Eccentricity, vibration, and shaft currents in turbine generators [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1955, 74 (3): 38-41.
- [3] Wan Shuting, He Yuling. Investigation on stator and rotor vibration characteristics of turbo-generator under air gap eccentricity fault [J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2011, 35(2): 161-176.
- [4] 诸嘉慧,邱阿瑞.大型水轮发电机转子偏心磁场的计算 [J].大电机技术,2007(3): 1-4, 26.
Zhu Jiahui, Qiu Arui. Eccentric magnetic field calculation for a large hydrogenerator [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2007 (3): 1-4, 26. (in Chinese)
- [5] Toliyat H A, Al-Nuaim N A. Simulation and detection of dynamic air-gap eccentricity in salient-pole synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(1): 2265-2271.
- [6] Tabatabaei I, Faiz J, Lesani H, et al. Modeling and simulation of a salient-pole synchronous generator with dynamic eccentricity using modified winding function theory [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40 (3): 1550-1555.
- [7] 诸嘉慧,邱阿瑞,陶果.转子偏心及定子斜槽凸极同步发电机支路的感应电动势 [J].清华大学学报:自然科学版,2008,48(4):453-456.
Zhu Jiahui, Qiu Arui, Tao Guo. Branch voltage of a salient pole synchronous generator with eccentric rotor and skewed slots [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(4): 453-456. (in

Chinese)

- [8] 赵向阳,葛文韬. 基于定子电流法监测无刷直流电动机转子动态偏心的故障模型仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36):124-130.
Zhao Xiangyang, Ge Wentao. Simulation research of fault model of detecting rotor dynamic eccentricity in brushless DC motor based on motor current signature analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(36):124-130. (in Chinese)
- [9] 万书亭,何玉灵,唐贵基,等. 发电机气隙偏心时定子并联支路的环流特性分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1547-1553.
Wan Shuting, He Yuling, Tang Guiji, et al. Analysis on stator circulating current characteristics under eccentricity faults of turbo-generator [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1547-1553. (in Chinese)
- [10] Keller S, Xuan M T, Simond J J, et al. Large low-speed Hydro-Generators-unbalanced magnetic pulls and additional damper losses in eccentricity conditions [J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(5): 657-664.
- [11] Wang Lin, Cheung Richard W, Ma Zhiyun, et al. Finite-element analysis of unbalanced magnetic pull in a large hydro-generator under practical operations [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1558-1561.
- [12] Richard P, Urban L, Mats L. Saturation effects on unbalanced magnetic pull in a hydroelectric generator with an eccentric rotor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(10): 3884-3890.
- [13] Lundstrom L, Gustavsson R, Aidanpaa J O, et al. Influence on the stability of generator rotors due to radial and tangential magnetic pull force [J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(1): 1-8.
- [14] Zarko D, Ban D, Vazdar I, et al. Calculation of unbalanced magnetic pull in a salient-pole synchronous generator using finite-element method and measured shaft orbit [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(6): 2536 - 2549.
- [15] 宋志强,马震岳. 考虑不平衡电磁拉力的偏心转子非线性振动分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(8): 169-173.
Song Zhiqiang, Ma Zhenyue. Nonlinear vibration analysis of an eccentric rotor with unbalance magnetic pull [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(8): 169-173. (in Chinese)
- [16] 姚大坤,邹经湘,黄文虎,等. 水轮发电机转子偏心引起的非线性电磁振动[J]. 应用力学学报, 2006, 23(3): 334-337.
Yao Dakun, Zou Jingxiang, Huang Wenhui, et al. Nonlinear electromagnetic vibrations in hydro-generators with eccentric rotors [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(3): 334-337. (in Chinese)
- [17] 万书亭,李和明,李永刚. 气隙偏心对汽轮发电机定子振动特性的影响[J]. 振动与冲击, 2005, 24(6): 21-23,133-134.
Wan Shuting, Li Heming, Li Yonggang. Analysis on vibration characteristics of generator with the fault of eccentric air-gap [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(6): 21-23,133-134. (in Chinese)
- [18] Cameron J R, Thomson W T, Dow A B. Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors [J]. IEE Proceedings B, Electric Power Applications, 1986, 133(3):155-163.
- [19] 万书亭,孔江生. 发电机偏心故障的机电多重特征分析[J]. 中国机械工程, 2008,19(3): 347-350.
Wan Shuting, Kong Jiangsheng. Composite characteristics of vibration and current of the generator air-gap eccentric fault [J]. China Mechanical Engineering, 2008,19(3): 347-350. (in Chinese)
- [20] Xuan M T, Simond J J, Wetter R, et al. A novel air-gap monitoring system for large low speed hydro-generators[C]//Power Engineering Society General Meeting, IEEE. Montreal, Quebec, Canada; IEEE, 2006: 1-8.
- [21] 方红伟,夏长亮,修杰. 定子绕组匝间短路时发电机电磁转矩分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 83-87.
Fang Hongwei, Xia Changliang, Xiu Jie. Analysis of generator electro-magnetic torque on armature winding inter-turn short circuit fault [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15): 83-87. (in Chinese)
- [22] 汤蕴璆. 电机学[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 267-268.



第一作者简介: 何玉灵,男,1984年7月生,博士、副教授。主要研究方向为测试技术、系统动态特性分析与改进、电站设备状态监测、控制与节能。曾发表《基于正弦结构元素的自适应 Top-Hat 变换及发电机特征振动信号增强检测》(《中国电机工程学报》2016年第36卷第15期)等论文。

E-mail: heyuling1@163.com