

转子绕组短路故障下不平衡电磁力计算方法^{*}

万书亭, 豆龙江, 张 玉, 张成杰, 周国伟

(华北电力大学机械工程系 保定, 071003)

摘要 通过建立发电机有限元分析模型, 得到故障下发电机内部磁力线走势、发电机气隙磁通密度的变化以及短路位置、短路匝数和励磁电流对转子不平衡电磁力的影响。对工程实际中常用的等效磁通法和磁势叠加法进行了分析比较, 同时改进了现有的等效磁通计算方法。将两种方法不平衡电磁力的计算结果与有限元方法结果进行比较, 指出了结果存在差异的原因。

关键词 转子绕组短路故障; 不平衡电磁力; 有限元法; 等效磁通法; 磁势叠加法

中图分类号 TM311; TH113

引 言

发电机是一个机电耦合的组合物, 定转子绕组故障都将引起电磁力变化, 激励发电机振动^[1-2]。转子绕组短路是发电机常见的电气故障之一, 它将导致转子振动, 甚至发展为转子接地、转子绕组烧损、发电机失磁和发电机部件磁化等, 危及电机和系统的安全。转子绕组短路将引起发电机定转子电流等电气量变化。文献[3]利用交流电机绕组理论和多回路理论分析了发电机转子绕组短路时定转子绕组感应电流谐波特性。文献[4-5]分析了发电机转子绕组短路故障时定子绕组并联支路的环流特征。文献[6]建立了汽轮发电机转子绕组短路故障的多回路数学模型。转子绕组短路将引起气隙磁场畸变, 产生不平衡电磁力, 从而激起发电机转子振动。文献[7-8]所述的发电机组振动超标现象就是由转子绕组匝间短路引起的。为此, 国内外学者研究分析了作用于发电机转子的不平衡电磁力计算方法, 例如: 有限元分析方法^[9-10]、等效磁通法^[11]和磁势叠加法^[2]。由于有限元计算不平衡电磁力需要发电机详细结构尺寸和电气参数(发电厂缺少此参数), 因此在实际故障分析中应用较为困难。等效磁通法和磁势叠加法以励磁电流和转子绕组的槽数以及每槽的绕组匝数为基础进行计算, 不需要发电机的结构参

数且计算简便, 在工程实际中得到了一定的应用; 但忽略因素较多, 计算精度受到质疑。

笔者以 SDF-9 型实验电机为例, 分别利用有限元法、等效磁通法和磁势叠加法计算了转子绕组短路时作用于转子的不平衡电磁力, 并对文献[11]提出的等效磁通计算方法进行改进。以有限元分析结果为参考值, 将有限元方法计算结果与改进后的等效磁通法和磁势叠加法的计算结果进行比较, 分析了工程中常用的两种方法的优劣, 为精确计算不平衡电磁力提供参考。

1 基于有限元的不平衡电磁力计算方法

1.1 电磁力的计算方法

使用电磁场有限元分析软件 Ansoft 作为计算工具, 在求解电磁力时以发电机转子的外表面为基准面进行求解, 最终得到的电磁力作用点为转子外表面。应用 Ansoft 软件可以直接得到发电机气隙磁密在 x 轴分量 $B_x(\alpha_m, t)$ 与 y 轴分量 $B_y(\alpha_m, t)$ 。利用场公式编辑器可以得到发电机运行时的气隙磁密 $B(\alpha_m, t)$ 为

$$B(\alpha_m, t) = B_x(\alpha_m, t) \cos\theta + B_y(\alpha_m, t) \sin\theta \quad (1)$$

其中: α_m 为定子机械角; θ 为计算所用的柱坐标。

作用在转子表面单位面积分布电磁力为

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51177046); 河北省自然科学基金资助项目(E2015502008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(12MS101)

收稿日期: 2013-05-28; 修回日期: 2013-11-03

$$q(\alpha_m, t) = \frac{B^2(\alpha_m, t)}{2\mu_0} \quad (2)$$

转子表面单位面积的电磁力按照麦克斯韦法进行积分,得到故障下不平衡电磁力在 x 轴与 y 轴分量为

$$\begin{cases} Q_x = LR \int_0^{2\pi} q(\alpha_m, t) \cos(\alpha_m) d\alpha_m \\ Q_y = LR \int_0^{2\pi} q(\alpha_m, t) \sin(\alpha_m) d\alpha_m \end{cases} \quad (3)$$

其中: R 与 L 分别为发电机转子半径与气隙轴向长度。

得到作用于发电机转子的不平衡电磁力为

$$Q = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \quad (4)$$

1.2 仿真用发电机参数

SDF-9 型实验电机主要参数如下:额定容量为 7.5 kVA;额定电压为 400 V;额定励磁电流为 4.92 A;额定转速为 3 kr/min;极对数 $p=1$;定子外径为 270 mm;定子内径为 160 mm;转子外径为 158.4 mm;铁心长为 95 mm;定子槽数为 24;定子绕组为双层短距绕组,每相 2 条并联支路,转子每极虚槽数为 8;转子每极实槽数为 6;转子导线直径为 1.2 mm;转子每槽导线根数为 160;励磁绕组每极匝数为 480。

1.3 基于 Ansoft 软件的转子绕组短路模拟方法

使用 Ansoft 软件中的 RMxpert 模块,根据发电机已有的结构参数和运行参数自动生成该发电机的原始模型,该模型可以模拟发电机正常运行情况,但无法模拟发电机转子绕组短路故障运行情况,因此将该模型导入 Ansoft 软件 Maxwell 2D 模块中,对转子绕组缠绕以及接线方式进行定义,以便对故障情况进行模拟。发电机正常运行结构模型如图 1 所示,其对应的转子绕组接线如图 2 所示。

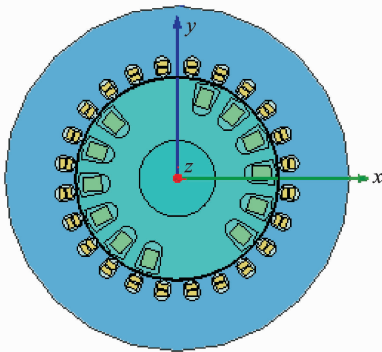


图 1 正常情况下的发电机模型

Fig. 1 The model of generator in normal condition

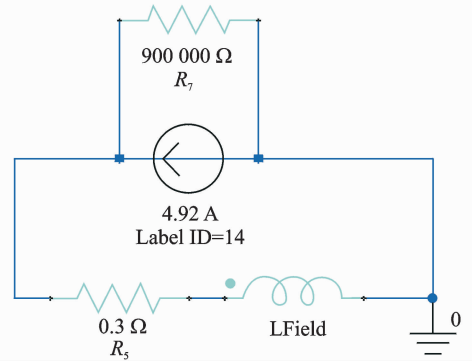


图 2 正常情况下的转子绕组接线

Fig. 2 The rotor winding connection in normal condition

在图 2 中,电阻 R_5 为转子绕组铜线本身的阻值,线圈 LField 表示转子绕组线圈,该绕组通过 4.92 A 的直流源 Label ID=14 进行激励,模拟发电机额定负载情况,电阻 R_7 是为保证电流源所提供电流全部通过转子绕组而添加的,与绕组本身结构无关。

对发电机转子绕组短路故障进行模拟,需要对正常情况下的发电机模型进行修改,其结构如图 3 所示。图 3 模拟的是发电机转子 1 号绕组短路的故障情况,在 1 号绕组所在转子槽多出部分线圈,该部分线圈与原有转子绕组串联,通过 Maxwell 2D 模块中绕组的“Number of Conductors”参数项来控制绕组的短路匝数,并相应减少原绕组的线圈匝数。

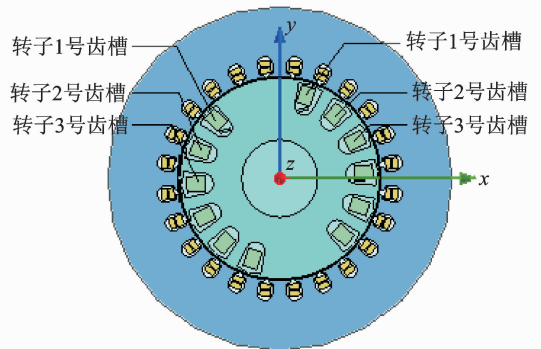


图 3 转子绕组短路故障下的发电机模型

Fig. 3 The model of generator under rotor short-circuit fault

发电机转子绕组故障下的转子绕组接线如图 4 所示。图中, LField_x 为原绕组中多出的部分线圈,电阻 R_5 为该部分线圈的内阻。通过线圈 LField 与线圈 LField_x 的连接来模拟发电机转子绕组匝间短路的故障情形。通过图 3 所示的 1,2,3 号不同的转子槽位置设置短路线圈便可以对发电机

转子不同短路位置的故障情况进行模拟。通过改变线圈的“Number of Conductors”参数项和转子接线中电阻 R_8, R_5 的参数便可以控制短路的线圈数,实现发电机转子不同短路程度的故障模拟。

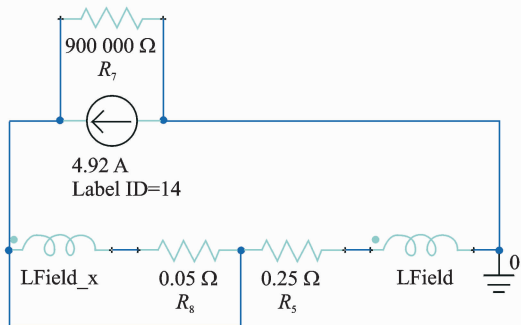


图4 转子绕组短路下的转子绕组接线

Fig. 4 The rotor winding connection under rotor short-circuit fault

1.4 有限元仿真结果与分析

发电机并网运行,励磁电流 $I_f = 4.92\text{ A}$,图5为发电机正常情况时磁力线分布。

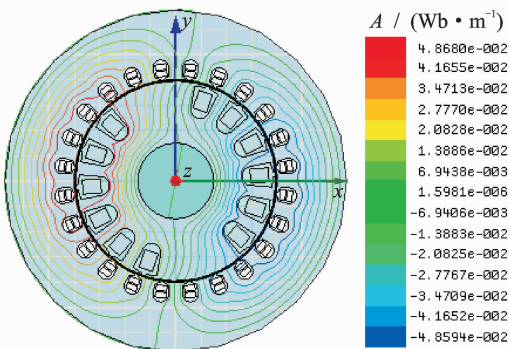


图5 正常情况下的磁力线分布

Fig. 5 Magnetic force line distribution in normal condition

Ansoft 提供了路径映射的后处理功能,通过定义某条路径并将求解到的指定物理量映射到这条路径上,利用后期场处理器编辑式(1),得到转子外圆表面磁密分布曲线,如图6所示。横轴为整个转子外圆表面,并以其圆周长为单位“1”。

对发电机转子绕组短路故障下的运行情况进行仿真,设置转子1号槽绕组短路30匝(每极短路6.25%),仿真得到发电机内部的磁力线分布如图7所示。转子外圆表面磁密分布曲线如图8所示。

发电机在发生转子绕组短路后,有效安匝数降低,短路匝所在槽产生的磁密减小,导致发电机气隙

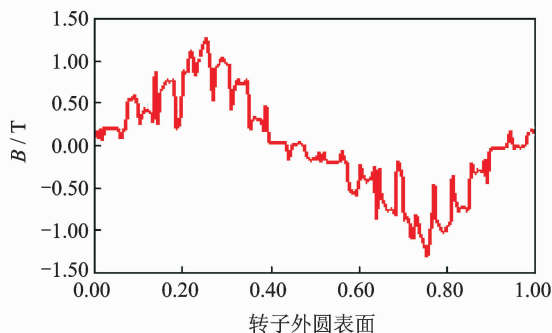


图6 正常情况下磁通密度分布

Fig. 6 The field density in normal condition

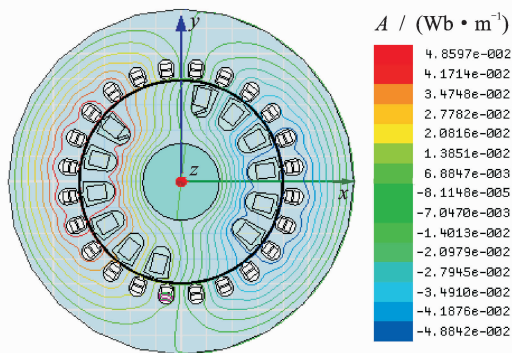


图7 转子绕组短路故障下的磁力线分布

Fig. 7 Magnetic force line distribution under rotor short-circuit fault

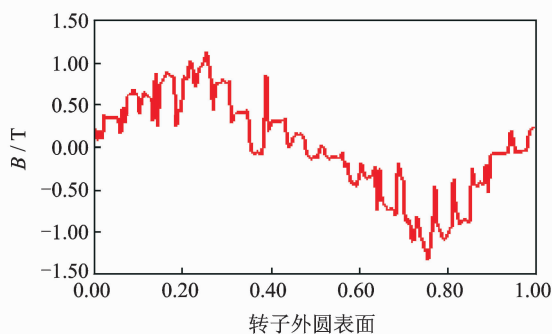


图8 转子绕组短路故障下的磁通密度分布

Fig. 8 The field density under rotor short-circuit fault

磁密分布不在对称,这必然导致作用于转子的电磁力不再保持平衡。按照式(2)~(4)得到作用于转子的不平衡电磁力为628.4 N。

1.4.1 短路位置对不平衡电磁力的影响

发电机并网运行,励磁电流为4.92 A,分别在转子1号、2号、3号槽设置绕组短路,短路匝数统一为20匝(每极短路4.17%),结果如表1所示。可以看出,短路匝所在绕组距离转子大齿越远,对不平衡电磁力的影响越小。

表1 不同短路位置下的不平衡电磁力

Tab. 1 The unbalanced electromagnetic force in different short position

短路位置	不平衡电磁力/N
1号槽	508.2
2号槽	413.6
3号槽	368.9

1.4.2 短路程度对不平衡电磁力的影响

发电机并网运行,励磁电流为4.92 A,在转子1号槽设置绕组短路,短路匝数分别为5匝、10匝、15匝、20匝,结果如表2所示。在表2中,在相同的短路位置保持励磁电流不变,随着转子绕组短路匝数的增加,发电机转子受到的不平衡电磁力越来越大。

表2 不同短路匝数下的不平衡电磁力

Tab. 2 The unbalanced electromagnetic force in different short circuit turns

短路程度	不平衡电磁力/N
5匝	256.4
10匝	348.7
15匝	435.1
20匝	508.2

1.4.3 励磁电流对不平衡电磁力的影响

发电机并网运行,在转子1号槽设置转子绕组短路20匝,依次施加励磁电流为2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 A,结果如表3所示。比较表3中不同励磁电流下的不平衡电磁力可以发现,在相同的转子绕组短路故障中,随着励磁电流的增大,不平衡电磁力也越大。

表3 不同励磁电流下的不平衡电磁力

Tab. 3 The unbalanced electromagnetic force in different excitation current

励磁电流/A	不平衡电磁力/N
2.0	195.6
2.5	264.3
3.0	315.8
3.5	406.3
4.0	486.5

2 不平衡电磁力的等效磁通计算方法

文献[11]提出了一种不平衡电磁力计算方法,转子绕组发生短路后,由于存在安匝差,两磁极的磁通密度存在差异。按照假设N极与S极的磁通相同的等效原则计算,找到磁密零点,重新计算对应于

N极与S极的线圈数。如图9所示,发生匝间短路后,磁通分布发生变化,磁通密度为0的点 β 为

$$\frac{N_t}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) = \frac{N_t - N_s}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + \beta \right) \quad (5)$$

即

$$\beta = \frac{\pi N_s}{4N_t - 2N_s} \quad (6)$$

其中: N_t 为每极励磁线圈的总匝数; N_s 为引起短路的匝数。

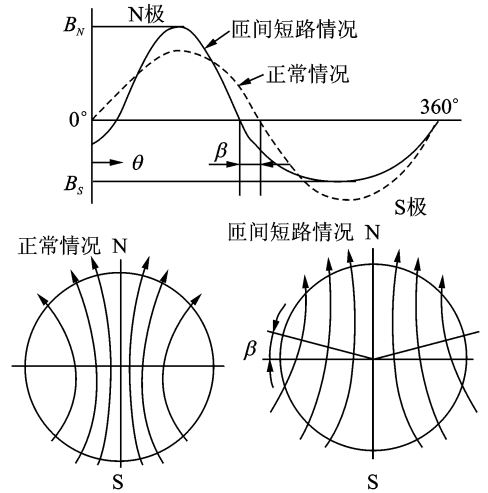


图9 正常情况与匝间短路情况下的磁流分布

Fig. 9 Magnetic flux distribution under normal condition and rotor interturn short circuit fault

由于 β 的存在,N极对应的圆心角由 π 减小为 $\pi - 2\beta$,S极对应的圆心角由 π 增加为 $\pi + 2\beta$,即S极短路 N_s 时,N极对应的励磁线圈总匝数已不是 N_t ,将小于 N_t 。N极励磁线圈的总匝数 N_1 和S极励磁线圈的总匝数 N_2 为

$$\begin{cases} N_1 = (\pi - 2\beta) \frac{N_t}{\pi} \\ N_2 = 2\beta \frac{N_t}{\pi} + (N_t - N_s) \end{cases} \quad (7)$$

文献[11]中推导的式(5)应修改为

$$\begin{aligned} (\pi - 2\beta) \frac{N_t}{\pi} (\pi - 2\beta) &= (2\beta \frac{N_t}{\pi} + \\ &N_t - N_s) (\pi + 2\beta) \end{aligned} \quad (8)$$

即式(6)得到修正

$$\beta = \frac{\pi N_s}{8N_t - 2N_s} \quad (9)$$

N极和S极磁通密度可表示为

$$\begin{cases} B_N = N_1 I_f \mu_0 / 2\delta \\ B_S = N_2 I_f \mu_0 / 2\delta \end{cases} \quad (10)$$

其中: I_f 为励磁电流; μ_0 为空气磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m; δ 为气隙长度。

作用于转子的不平衡电磁力可推导为

$$W = \left\{ \int_{\beta}^{\pi-\beta} B_N^2 \sin^2 \left[(\theta - \beta) \frac{\pi}{\pi - 2\beta} \right] \sin \theta d\theta + \int_{\pi-\beta}^{2\pi+\beta} B_s^2 \sin^2 \left[(\theta - \pi + \beta) \frac{\pi}{\pi + 2\beta} \right] \sin \theta d\theta \right\} \frac{LR}{2\mu_0} \quad (11)$$

其中: L 为转子长度; R 为转子半径。

发电机并网运行, 励磁电流为 4.92 A, 在转子 1 号槽设置绕组短路, 短路匝数分别为 5 匝、10 匝、15 匝和 20 匝。改进前后的等效磁通计算方法结果如表 4 所示, 改进的等效磁通法计算结果略偏小。

表 4 改进前后的等效磁通计算结果对比

Tab. 4 The comparison of calculation results of the equivalent magnetic flux method

短路匝数	文献[11]等效磁通法/N	改进的等效磁通法/N
5	100.9	99.6
10	203.7	197.6
15	300.8	294.1
20	399.6	389.0

3 不平衡电磁力的磁势叠加计算方法

文献[2]提出了不平衡电磁力的磁势叠加计算方法, 设 $F_k(\theta_r)$ 为转子第 k 个线圈在转子 θ_r 角位置时产生的磁势

$$F_k(\theta_r) = \begin{cases} \frac{n_k I_f (2\pi - \alpha_k)}{2\pi} & (-\frac{\alpha_k}{2} < \theta_r < \frac{\alpha_k}{2}) \\ -\frac{n_k I_f \alpha_k}{2\pi} & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中: n_k 为转子第 k 个线圈的匝数; α_k 为第 k 个转子槽对应的圆心角。

转子磁势为

$$F_r(\theta_r) = \sum_k F_k(\theta_r) \quad (13)$$

主磁势产生的单位面积电磁力为

$$q = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0}{2\delta^2} F_r^2 = kF_r^2 \quad (14)$$

其中: δ 为均匀气隙长度。

电磁力沿转子外圆周的合力(设转子半径为 R , 转子长度为 L)为

$$\begin{cases} Q_d = LR \int_0^{2\pi} q \cos \theta_r d\theta_r \\ Q_q = LR \int_0^{2\pi} q \sin \theta_r d\theta_r \end{cases} \quad (15)$$

其中: Q_d 为沿纵轴方向的合力; Q_q 为沿横轴方向的合力。

4 不同故障情况下计算结果对比

使用改进的等效磁通法和磁势叠加法计算发电

机在不同短路位置、不同短路程度和不同励磁电流的不平衡电磁力, 并将结果与有限元方法计算结果进行比较。

发电机并网运行, $I_f = 4.92$ A, 1, 2, 3 号槽短路 20 匝的不平衡电磁力计算结果如表 5 所示。其中, 计算相对误差是相对于有限元法计算结果。

表 5 不同短路位置下的计算结果对比

Tab. 5 The comparison of calculation results in different short position

短路位置	有限元法/N	改进的等效磁通法/N/相对误差/%	磁势叠加法/N/相对误差/%
1号槽	508.2	389.0/23.5	583.5/14.8
2号槽	413.6	389.0/5.9	495.7/19.9
3号槽	368.9	389.0/5.4	423.1/14.7

1 号槽依次短路 5 匝、10 匝、15 匝和 20 匝的不平衡电磁力的计算结果如表 6 所示。1 号槽短路 20 匝, 励磁电流依次为 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 A 的不平衡电磁力的计算结果如表 7 所示。

表 6 不同短路匝数下的计算结果对比

Tab. 6 The comparison of calculation results in different short circuit turns

短路匝数	有限元法/N	改进的等效磁通法/N/相对误差/%	磁势叠加法/N/相对误差/%
5	256.4	99.6/61.2	315.8/23.2
10	348.7	197.6/43.3	405.0/16.1
15	435.1	294.1/32.4	507.5/16.6
20	508.2	389.0/23.4	583.5/14.8

表 7 不同励磁电流下的计算结果对比

Tab. 7 The comparison of calculation results in different excitation current

励磁电流/A	有限元法/N	改进的等效磁通法/N/相对误差/%	磁势叠加法/N/相对误差/%
2.0	195.6	64.3/67.1	289.1/47.8
2.5	264.3	100.4/62.0	353.6/33.8
3.0	315.8	144.6/54.2	408.0/29.2
3.5	406.3	196.9/51.5	482.2/18.7
4.0	486.5	257.1/47.2	536.4/10.2

对比以上计算结果, 等效磁通法和磁势叠加法与有限元方法在各种故障类型的不平衡电磁力的变化趋势是一致的, 即在相同励磁电流和相同短路匝数下, 短路匝所在绕组越靠近大齿, 则引发的不平衡电磁力越大; 在相同励磁电流、同一短路位置下, 短路匝数越大则引起的不平衡电磁力越大; 相同的短路位置和短路匝数, 则励磁电流越大引起的不平衡电磁力越大。

改进的等效磁通法在计算时无法考虑短路位置

对于不平衡电磁力的影响,而且会减小两个磁极之间磁通密度的差异,因此计算的不平衡电磁力均偏小,而磁势叠加法的计算结果均偏大。这主要是由于磁势叠加法未能考虑发电机的电枢反应,在实际中发电机一般均处于迟相运行状态,产生去磁的电枢反应,所以磁势叠加法计算的不平衡电磁力均偏大。

5 结 论

1) 转子绕组短路故障将引起不平衡电磁力,且此不平衡电磁力的大小与短路位置、短路匝数和励磁电流有关。

2) 与不平衡电磁力的有限元精确计算结果相比,改进的等效磁通法不能体现短路位置对不平衡电磁力的影响,且计算得到的不平衡电磁力数值偏小。磁势叠加法在计算中没有考虑到发电机的电枢反应对磁场的影响,使其计算得到的不平衡电磁力偏大。

参 考 文 献

- [1] 万书亭,姚肖方,朱建斌,等. 发电机定子绕组端部径向和切向电磁力分析[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(3):488-493.
Wan Shuting, Yao Xiaofang, Zhu Jianbin, et al. Analysis on radial and tangential electromagnetic force of stator end windings in generator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(3): 488-493. (in Chinese)
- [2] 万书亭,李永刚. 转子绕组短路故障中短路因素对转子振动的影响[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(2): 131-134.
Wan Shuting, Li Yonggang. Analysis of generator rotor vibration characteristics on different rotor winding inter-turn short circuit status[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(2): 131-134. (in Chinese)
- [3] 张超,夏立,吴正国,等. 同步发电机转子绕组匝间短路故障特征规律分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1506-1512.
Zhang Chao, Xia Li, Wu Zhengguo, et al. Analysis on fault characteristics law of interturn short circuit in synchronous generator rotor winding[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6):1506-1512. (in Chinese)
- [4] 黄顺礼,黄春阳. 定子相绕组横联电势分析及励磁绕组匝间短路故障监测[J]. 东方电气评论, 1998, 12(3): 142-145.
Huang Shunli, Huang Chunyang. Analysis of transverse electromotance in stator phase-windings and monitoring fault of shorted turns in field winding[J]. Dongfang Electric, 1998, 12(3):142-145. (in Chinese)
- [5] 李和明,万书亭,李永刚. 基于定子绕组并联支路环流特性的发电机故障识别方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6):75-78,107.
Li Heming, Wan Shuting, Li Yonggang. The generator fault diagnosis method based on stator winding parallel branches circulating current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 75-78, 107. (in Chinese)
- [6] 李和明,侯纪勇,李俊卿,等. 汽轮发电机励磁绕组短路多回路数学模型及电感系数[J]. 高电压技术, 2010, 36(10):2576-2581.
Li Heming, Hou Jiyong, Li Junqing, et al. Multiloop mathematical model and Inductance of turbo-generator with field winding inter-turn short circuits[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2576-2581. (in Chinese)
- [7] 朱玉璧,洪水盛. 平圩电厂1号发电机10号轴振动分析[J]. 中国电力, 2000, 33(10):45-47.
Zhu Yubi, Hong Shuisheng. Vibration analysis of shaft No. 10 for generator No. 1 in Pingwei power plant[J]. Electric Power, 2000, 33(10): 45-47. (in Chinese)
- [8] 李鹏,张秀阁,代国超. 转子匝间短路引起发电机组振动的分析及处理[J]. 华中电力, 2008, 2:8-10,13.
Li Peng, Zhang Xiuge, Dai Guochao. Analysis and treatment of vibration of turbo generator unit induced by turn-to-turn short circuit of rotor windings[J]. Central China Electric Power, 2008, 2: 8-10, 13. (in Chinese)
- [9] Damir Z, Drago B, Ivan V. 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.
- [10] Wang Lin, Cheung R 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.
- [11] 渡边孝. 汽轮发电机转轴的热振动平衡法(热振动的解析方法)[J]. 国外大电机, 1997(6):14-21.
Takashi W. Thermal vibration balancing method for turbine generator rotor(rotor vibration analysis method due to thermal unbalance[J]. External Big Motor, 1997(6):14-21. (in Chinese)



第一作者简介:万书亭,男,1970年12月生,教授、博士生导师。主要研究方向为汽轮发电机状态监测与故障诊断。曾发表《发电机定子绕组端部径向和切向电磁力分析》(《振动、测试与诊断》2013年第33卷第3期)等论文。
E-mail: wanshutingle@sina.com

