

发电机运行状态对定转子径向振动特性的影响分析*

万书亭¹ 唐贵基¹ 李永刚²

(1. 华北电力大学机械工程学院 保定 071003;
2. 华北电力大学电气工程学院 保定 071003)

摘要: 分析隐极同步发电机定转子径向振动随发电机运行状态的变化规律。首先通过分析不同运行状态时发电机电磁关系、电枢反应特性,以及正常运行时作用于定子的脉振电磁力特性和作用于转子的不平衡电磁力特性,分别得到定子径向倍频振动和转子径向工频振动在励磁电流一定时随发电机有功功率的变化特征,以及有功功率一定时随励磁电流的变化特征。实测了 SDF-9 型隐极同步发电机定转子振动信号,与理论分析结果基本吻合。另一方面也揭示基于振动特征诊断发电机故障时,必须考虑发电机的运行参数和运行状态,否则其诊断结果在实际应用中是不完整的。

关键词: 发电机 运行状态 转子 定子 径向振动

中图分类号: TM31

0 前言

振动状态监测是汽轮发电机状态监测中非常重要的一部分,引起振动的原因可分为机械、冷却和电气等方面,机械原因如转子不平衡、定转子气隙偏心、动静碰摩和转子支承系统连接松动等;冷却原因如转子冷却风道局部堵塞;电气原因如转子绕组匝间短路、非对称运行等^[1]。文献[2-4]分别研究了转子励磁绕组短路和定子绕组短路故障时的定转子径向振动特性,并提出了基于定转子径向振动特征的绕组故障诊断方法,但是上述文献没有考虑发电机的运行状态对定转子径向振动的影响。事实上发电机的运行参数(如不同的有功功率、无功功率)、不同的运行状态(如进相运行、迟相运行)时的气隙磁场也不同,根据电磁力的计算公式,得到作用于定转子的径向电磁力也不同,从而产生不同的振动特征。因此忽略发电机运行状态去探讨绕组故障时的振动特征,在实际应用中是不完整的。

详细分析了发电机的运行状态对定转子径向振动特性的影响,分别指出了励磁电流一定时不同有功功率对定转子径向振动特性的影响、有功功率一定时不同励磁电流对定转子径向振动特性的影响,并通过实测 SDF-9 型隐极同步发电机定转子振动数据,验证理论分析的正确性。

1 隐极同步发电机的基本电磁关系

对于隐极同步发电机,不考虑饱和时的电动势方程式为^[5]

$$E_0 = U + jIx_s \quad (1)$$

式中 E_0 —— 发电机励磁电动势
 U —— 电枢相电压
 I —— 电枢电流
 x_s —— 同步电抗

相应的矢量图如图 1 所示。

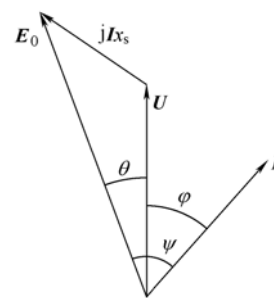


图 1 不考虑饱和时隐极同步发电机矢量图

图 1 中 φ 为 U 与 I 的夹角,即功率因数角; θ 为 E_0 和 U 的夹角,即功角; ψ 为 E_0 和 I 的夹角,即内角,决定了电枢反应的性质。当 I 滞后于 E_0 时,电枢反应磁势的直轴分量起去磁作用,使得气隙合成磁势减小;当 I 超前于 E_0 时,电枢反应磁势的直轴分量起加磁作用,使得气隙合成磁势增强。

由于发电机一般都在迟相运行状态,向电网发

* 河北省教育厅科学指导计划项目(Z2004455)和华北电力大学博士学位教师科研基金资助项目。20051114 收到初稿,20060404 收到修改稿

出感性无功，此时 I 滞后于 U ，也滞后于 E_0 。因此在实际运行的发电机中，当测量得到的无功功率为正时，由于此时产生去磁的电枢反应，对于一定的励磁电动势， $|I| \sin \psi$ 越大，气隙合成磁场相对减弱。内角 ψ 的计算方法如下所述。

根据 $P = m|U||I| \cos \varphi$, $Q = m|U||I| \sin \varphi$ ，得

$$\begin{cases} \sin \varphi = \frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ \cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \end{cases} \quad (2)$$

根据图 1 所示矢量图得

$$\psi = \arctan \frac{|U| \sin \varphi + |I| x_s}{|U| \cos \varphi} \quad (3)$$

当发电机在进相运行状态时(即测量得到的无功功率为负时)，矢量图如图 2 所示。

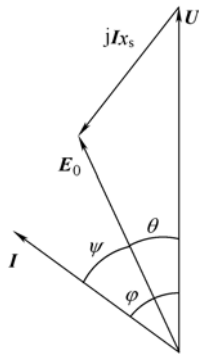


图 2 隐极同步发电机进相运行矢量图

当 $|U| \sin |\varphi| > |I| x_s$ 时， I 超前 E_0 ，此时产生加磁的电枢反应， $|\psi| = \arctan \frac{|U| \sin |\varphi| - |I| x_s}{|U| \cos |\varphi|}$ ，对于一定的励磁电动势， $|I| \sin |\psi|$ 越大，气隙合成磁场相对增强。当 $|U| \sin |\varphi| < |I| x_s$ 时， I 虽然超前 U ，但滞后于 E_0 ，此时仍产生去磁的电枢反应， $|\psi| = \arctan \frac{|I| x_s - |U| \sin |\varphi|}{|U| \cos |\varphi|}$ ，对于一定的励磁电动势， $|I| \sin |\psi|$ 越大，气隙合成磁场相对减弱。

2 正常运行时发电机定子振动特性

发电机($P=1$)正常运行时，气隙磁势为

$$f(\theta_s, t) = F_r \cos(\omega t - \theta_s) + F_s \cos(\omega t - \theta_s - \psi - \frac{\pi}{2}) = F \cos(\omega t - \theta_s - \beta) \quad (4)$$

式中 F_r ——气隙主磁势
 F_s ——电枢反应磁势
 F ——气隙合成磁势

$$F = \sqrt{F_s^2 \cos^2 \psi + (F_r - F_s \sin \psi)^2}$$

θ_s ——定子机械角度

对于理想电动机，忽略定转子齿槽影响，气隙磁导可近似认为常量。实际电动机转子的振动使气隙磁导发生变化，可近似为

$$A(\theta_s, t) = A_0 + A_c \cos(\omega t - \theta_s) \quad (5)$$

式中 A_0 ——气隙磁导的常值分量

A_c ——气隙磁导的偏心分量，一般情况下

$$A_c = A_0$$

作用于定子内圆表面单位面积的径向脉振电磁力为

$$q(\theta_s, t) = \frac{B^2(\theta_s, t)}{2\mu_0} = \frac{1}{2\mu_0} A^2(\theta_s, t) f^2(\theta_s, t) \quad (6)$$

各频率对应力波的幅值如表 1 所示，由于 $A_c = A_0$ ，故其中主要是频率为 $2f$ 的倍频电磁力，将激发定子倍频电磁振动。

表 1 发电机电磁力波频率及幅值

频率	电磁力幅值
f	$\frac{A_0 A_c (2 \cos \beta + 1) F^2}{4\mu_0}$
$2f$	$\frac{F^2}{4\mu_0} (A_0^2 + A_c^2 \cos \beta)$
$3f$	$\frac{A_0 A_c F^2}{4\mu_0}$
$4f$	$\frac{F^2 A_c^2}{16\mu_0}$

3 不同运行状态对定子径向振动特性的影响

(1) 励磁电流一定时有功功率对定子径向振动特性的影响。励磁电流一定时，对应于一定的励磁电动势 $|E_0|$ 和气隙主磁势 F_r ，有功功率对发电机定子径向振动特性的影响需考虑发电机的运行状态。

根据上述分析，当发电机在迟相运行状态，对于一定的励磁电动势， $|I| \sin \psi$ 越大，气隙合成磁场相对减弱，定子倍频振动减小。当发电机在进相运行状态时，如 $|U| \sin |\varphi| > |I| x_s$ 时， I 超前 E_0 ，此时产生加磁的电枢反应，对于一定的励磁电动势， $|I| \sin |\psi|$ 越大，气隙合成磁场相对增强，定子倍频振动增大；如 $|U| \sin |\varphi| < |I| x_s$ 时， I 虽然超前 U ，但滞后于 E_0 ，此时仍产生去磁的电枢反应，对于一定的励磁电动势， $|I| \sin |\psi|$ 越大，气隙合成磁场相对减弱，定子倍频振动减小。

(2) 有功功率一定时励磁电流对定子径向振动

特性的影响。根据隐极同步发电机的基本电磁关系和相电压、有功功率为常数时调节励磁电流时的矢量图^[5], 增大励磁电流将增大气隙主磁势 F_r , 无论电枢反应磁势是去磁作用还是加磁作用, 都将使气隙合成磁势 F 增大。由表 1 所示各电磁力波频率及幅值, 可得励磁电流增大, 定子倍频振动将增大。

4 不同运行状态对转子径向振动特性的影响

影响发电机转子径向振动的主要因素为有功功率和励磁电流。

(1) 励磁电流一定时有功功率对转子径向振动特性的影响。有功功率的波动将引起作用于转子转矩的波动, 当增加有功功率时, 将增加作用于转子的转矩, 从而激发转子扭转振动。根据文献[6-7], 对于不平衡转子, 扭转振动将增大弯曲振动的幅值, 但不影响转子的振动频率, 转子的振动频率仍由不平衡激励所控制。因此励磁电流一定时有功功率的增加将引起转子径向弯曲振动增加。

(2) 有功功率一定时励磁电流对转子径向振动特性的影响。增加励磁电流将增大气隙主磁势 F_r , 在其他运行参数不变的情况下, 将增加气隙合成磁势 F 。一方面由于发电机本身的固有不对称, 增大气隙磁势将可能增大作用于转子的不平衡电磁力, 从而增大转子工频振动; 另一方面, 根据表1, 增大气隙磁势将会增大作用于定子内圆表面的脉振电磁力, 引起定子振动增大, 由于定转子直接连接, 也将引起转子振动增大。

5 定转子振动特性的试验分析

试验电动机为华北电力大学电动机实验室 SDF-9 型隐极同步发电机(图 3), 参数如下。



图3 SDF-9 型隐极同步发电机

额定容量: 7.5 kV · A

额定电压: 400 V

额定转速: $n_r=3\ 000\ \text{r/min}$, 极对数: $P=1$

定子槽数: $K=24$

定子绕组: 双层短距绕组, 节距 10, 每相 2 条并联支路

转子槽数: 12(每极大齿占 2 槽)

同步电抗: $x_s=2.802\ \Omega$

由于转子支承水平方向刚度小于垂直方向刚度, 水平方向振动大于垂直方向, 并且受空间限制, 测量转子振动的电涡流传感器无法安装, 故选择轴承水平方向振动代表转子径向振动。在轴承座水平方向和定子垂直方向分别安装 CD-21S 型和 CD-21C 型速度传感器(北京测振仪器厂生产, 灵敏度为 30 mV/mm/s), 采集仪采用北京波谱公司生产的 U60116C 型采集仪, 每通道采样频率 10 kHz。发电机并网运行, 线电压/相电压为 390 V/225 V。图 4、5 分别为有功功率 $P=2.6\ \text{kW}$, 无功功率 $Q=1.593\ \text{kW}$, 励磁电流 $I_f=2.6\ \text{A}$, 电枢电流 $|I|=4.9\ \text{A}$ 时的定子径向振动速度频谱图和转子振动速度频谱图。从图 4 可知, 发电机正常运行时, 受倍频电磁力的影响, 定子振动以倍频振动为主; 从图 5 可知, 由于转子的不平衡和作用在转子的不平衡电磁力的影响, 转子振动以基频振动为主。

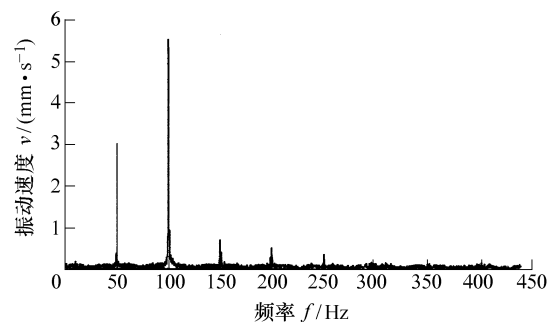


图4 定子径向振动频谱图

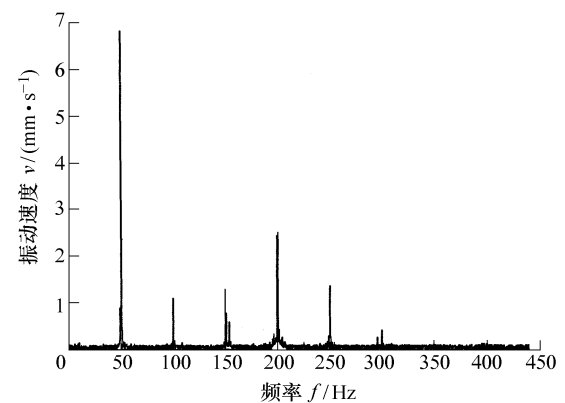


图5 转子振动频谱图

(1) 励磁电流一定时有功功率对定子径向振动特性的影响试验。励磁电流 I_f 分别为 1.8 A、2.6 A

时调节发电机有功功率 P 、无功功率 Q 、电枢电流 I 的变化及 φ 、 ψ 、 $|I|\sin|\psi|$ 的计算值如表2所示。

由表2可得对于一定的励磁电流，定子倍频振动随功率变化而变化，并且变化规律基本符合第3节中的理论分析结果。

(2) 有功功率一定时励磁电流对定子径向振动特性的影响试验。发电机有功功率 P 分别为 1 kW、1.4 kW、2.5 kW、2.6 kW 时调节励磁电流 I_f ，采集得到的电枢电流、定子径向倍频振动如表 3 所示。由于试验设备条件所限，在调节励磁电流时，有功功率略有漂移。由表 3 可知，对于一定的有功功率，励磁电流越大，定子径向倍频振动越大，符合第 3 节中理论分析结果。

(3) 不同运行状态对转子径向振动特性的影响试验。表 4 为发电机不同运行状态时转子径向工频振动变化特性数值。从表 4 可知，对于一定的有功功率，励磁电流越大，转子工频振动越大；同样对于一定的励磁电流，有功功率越大转子工频振动越大；并且有功功率和励磁电流同时增大时，转子工频振动增加也很快；但有功功率和励磁电流一项增大，而另一项减小时无法判断转子工频振动的变化趋势。

表 2 励磁电流一定时定子径向倍频振动随功率变化特性

序号	1	2	3	4
有功功率 P/kW	1.0	2.8	1.12	2.6
无功功率 Q/kW	-0.346	-0.693	1.801	1.593
励磁电流 I_f/A	1.8	1.8	2.6	2.6
电枢电流 $ I /\text{A}$	1	4	4.1	4.9
功率因数角 $\varphi /(^{\circ})$	-19.08	-13.90	58.12	31.50
内角 $\psi /(^{\circ})$	-18.40	-11.10	58.98	34.38
$ I \sin \psi $	0.31	0.77	3.51	2.77
运行状态	进相	进相	迟相	迟相
电枢反应	加磁	加磁	去磁	去磁
定子倍频振动速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	4.9	5.3	5.3	5.6

表 3 有功功率一定时定子径向倍频振动随励磁电流变化特性

序号	有功功率 P/kW	无功功率 Q/kW	励磁电流 I_f/A	电枢电流 $ I /\text{A}$	定子倍频振动速度 $v/(\text{mm} \text{gs}^{-1})$
1	1.0	-0.346	1.8	1.0	4.9
2	1.08	3.118	3.2	6.1	6.4
3	0.96	4.572	3.8	8.1	8.2
4	1.4	-4.087	0.5	5.9	5.9
5	1.36	-0.416	1.7	1.9	6.4
6	2.52	-1.871	1.5	4.4	5.0
7	2.48	3.464	3.5	7.2	6.4
8	2.6	1.593	2.6	4.9	5.6
9	2.6	2.563	3	6.1	6.1

6 结论

(1) 对于一定的励磁电流，如发电机运行在迟相状态， $|I|\sin\psi$ 越大，定子倍频振动减小；如发电机运行在进相状态时，当 $|U|\sin|\varphi| > |I|x_s$ 时， $|I|\sin|\psi|$ 越大，定子倍频振动增大；当 $|U|\sin|\varphi| < |I|x_s$ 时， $|I|\sin|\psi|$ 越大，定子倍频振动减小。

(2) 对于一定的有功功率，励磁电流越大，定子倍频振动越大。

(3) 对于一定的有功功率，励磁电流越大，转子工频振动越大；同样对于一定的励磁电流，有功功率越大转子工频振动越大；有功功率和励磁电流同时增大时，转子工频振动增加也很快；但有功功率和励磁电流一项增大，而另一项减小时无法判断转子工频振动的变化趋势。

(4) 由于定转子振动随运行状态变化而变化，因此基于振动特征诊断发电机故障时，必须考虑发电机的运行参数和运行状态，但还不能根据发电机运行状态定量分析定转子径向振动。

表 4 转子径向工频振动随发电机运行状态变化特性

序号	有功功率 P/kW	无功功率 Q/kW	励磁电流 I_f/A	电枢电流 $ I /\text{A}$	转子工频振动速度 $v/(\text{mm} \text{gs}^{-1})$
1	1.0	-0.346	1.8	1.0	4.9
2	1.08	3.118	3.2	6.1	5.0
3	0.96	4.572	3.8	8.1	5.5
4	1.2	-1.940	1.0	2.8	4.6
5	1.12	1.801	2.6	4.1	5.2
6	1.4	-4.087	0.5	5.9	4.5
7	1.36	-0.416	1.7	1.9	5.0
8	2.52	-1.871	1.5	4.4	5.2
9	2.48	3.464	3.5	7.2	6.9
10	2.6	1.593	2.6	4.9	6.8
11	2.6	2.563	3.0	6.1	6.9
12	2.8	-0.693	1.8	4.0	5.5
13	3.24	-3.256	1.5	6.0	5.8
14	3.28	1.524	2.85	6.0	7.2

参 考 文 献

[1] 李伟清. 汽轮发电机故障检查分析及预防[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[2] 万书亭, 李和明, 李永刚. 转子匝间短路对发电机定转子振动特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 122-126.

[3] TRUTT F C, SOTTILE J, KOHLER J L. Detection of AC machine winding deterioration using electrically excited

- vibrations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1): 10-14.
- [4] 万书亭, 李和明, 许兆凤, 等. 定子绕组匝间短路对发电机定转子径向振动特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 157-161.
- [5] 叶东. 电机学[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1995.
- [6] 李舜酩, 李香莲. 不平衡转子弯扭耦合振动分析[J]. 山东工程学院学报, 2000, 14(2): 5-10.
- [7] 傅忠广, 杨昆, 宋之平. 转子动态过程弯扭耦合振动的仿真和实验[J]. 华北电力大学学报, 1999, 26(2): 55-59.

ANALYSIS OF GENERATOR STATOR AND ROTOR VIBRATION CHARACTERISTIC UNDER INFLUENCE OF OPERATION CONDITION

WAN Shuting¹ TANG Guiji¹ LI Yonggang²

(1. College of Mechanical Engineering, North China

Electric Power University, Baoding 071003;

2. College of Electrical Engineering, North China

Electric Power University, Baoding 071003)

Abstract: Stator and rotor vibration characteristics of nonsalient synchronous generator for different operating conditions are

analyzed. Firstly, the electromagnetism characteristics and armature reaction characteristics are calculated for different operating conditions, the frequency characteristics of pulsating electric magnetic force acting on the stator and imbalance electric magnetic force acting on the rotor are analyzed when the generator works normally. Then the changing characteristics, stator radial second frequency vibration and rotor radial fundamental frequency vibration due to the generator active power when the excitation current is constant, can be gotten. And the changing characteristics, due to the excitation current when the generator active power is constant, can also be gotten. Finally, the stator and rotor vibration of a type SDF-9 generator is measured in the laboratory to verify the theoretical analysis presented above. On the other hand, the conclusion can be drawn, which is the generator operation condition must be considered when generator fault is analyzed and diagnosed based on vibration characteristics, otherwise the diagnosis result will be incredulous.

Key words: Generator Operation condition

Rotor Stator Radial vibration

作者简介: 万书亭, 男, 1970 年出生, 博士, 副教授。从事大型发电机在线监测与故障诊断技术研究。

E-mail: wanshuting1@sohu.com