

发电机工况参数模型及进相运行在线监测

史家燕¹, 史源素¹, 赵肖敏¹, 曲世路², 郭永红², 张力²

(1. 北京伏安基业电气技术有限公司, 北京市 海淀区 100085; 2.石景山热电厂, 北京市 石景山区 100041)

The New Method of Determining the Capability of Leading Phase of Generator and Realizing the on-line Monitoring

SHI Jiayan¹, SHIYuan-su¹, ZHAO Xiao-min¹, QU Shi-lu², GUO Yong-hong², ZHANG Li²

(1. Beijing V&A general Electric Technology Co.Ltd : 2.Beijing V&A general Electric Technology Co.Ltd)

ABSTRACT: With the increase of the power grid capacity and the voltage level upgrades, the problems of the power system became important increasingly, such as the reactive power is overmuch, the voltage of the key point is much high in valley load period. “leading phase of generator” mode has been applied gradually as a means for adjusting voltage because it has many special excellence, including simple executive, security, economy, adjust continuously, etc..” But when using the “leading phase” mode, you must determine its capability of the leading phase of the generator scientifically and set up the effective on-line monitoring instrument. In this way you can ensure that “the generator can operate safety” under the “leading phase” mode. Generally it uses the conventional mathematics model which is based of the ideal assume condition to calculate the P-Q capacity figure, but the actual generators in use are not perfect, so there are biggish error in calculation, and it cause the result that the someone restrict the ability of the leading phase of generator blindly. To solve this problem, we research and provide one new “operating conditions parameter mathematics model of generator” to determine the capability of the “leading phase of generator”. We apply it in the project of the fault diagnosis expert system of generator of SHIJINGSHAN thermoelectric power plant, and realize the on-line monitoring of the leading phase of generator.

KEY WORDS: the capability of the leading phase of generator; on-line monitoring; operating conditions parameter; mathematic model

摘要: 随着电网容量的增大、电压等级的提高, 电力系统低谷运行时枢纽点电压偏高的问题日益突出。利用发电机进相运行方式做为一种调压手段, 因无需增加任何设备, 有其简单易行、安全经济的特点, 尤其是具有可连续调节的独特优点, 而逐渐得到应用。但在采用该方式时, 必须科学地确定其进相运行能力, 提供有效的在线监测手段, 以确保进相运行方式下的安全运行。传统的数学模型均采用基于理想电机假设条件计算其 $P-Q$ 容量图, 而实际运行的发电机都不是理

想电机, 因此计算误差较大, 并导致盲目限制发电机进相运行能力的后果。针对此问题, 本文提出了一种新的发电机工况参数数学模型用以确定发电机进相运行能力, 并将其应用到石景山热电厂发电机故障诊断专家系统之中, 实现了发电机进相运行时的在线监测。

关键词: 发电机进相运行能力; 在线监测手段; 发电机工况参数; 数学模型

0 引言

随着电网容量的不断增大, 超高压、远距离输电线路的迅速发展, 电力系统低谷运行时枢纽点电压过高的问题日益突出。为此, 有关电力系统调压方法的研究课题引起了普遍的关注。利用发电机进相运行方式作为一种调压手段, 因无需增加任何设备所以投资低、易于实施, 尤其是它具有可连续调节的独特优点而越来越多地得到应用^[1-9]。但在发电机采用进相运行的方式之前, 必须做好必要的试验、计算等技术准备工作, 科学地确定其进相运行能力, 在运行中设置有效的监测手段, 以确保发电机在进相运行方式下的安全运行。

通常, 均采用传统数学模型(Park 模型)计算发电机进相运行行为、计算 $P-Q$ 容量图^[10], 并用以实现在线监测。但 Park 模型是基于理想电机假设条件建立的, 即: 发电机不饱和、无阻尼、定、转子无齿无槽、气隙电磁场正弦分布等。而实际运行中的发电机都存在着和、阻尼、定、转子齿槽的非线性影响。因此传统算法必然会引起较大的计算误差, 并导致盲目限制发电机进相运行能力的结果^[11]。为了解决这一问题, 本文提出一种新的发电机工况参数数学模型用以确定发电机进相运行能力, 并将其

应用到石景山热电厂发电机故障诊断专家系统^[12]之中，实现了石景山热电厂发电机进相运行时的在线监测。

1 确定发电机进相运行能力的方法

1.1 发电机进相运行时的限制条件

发电机进相仍属同步运行方式，但由于它是在欠励状态下运行，可能带来稳定裕度低、定子端部结构件温度高、机端电压低(并导致厂用电电压低)等一系列的问题，因此发电机在进相运行时，要受到某些条件的限制，应根据限制条件确定其进相运行能力。发电机进相运行时的限制条件为：

(1) 发电机在电网中的运行稳定性，按相关规程规定，静稳裕度不得低于1.1。

(2) 发电机定子端部结构件温度不超过规定值。

(3) 其它：①发电机定子电流不得超过额定值；②发电机定子电压不得低于规定值；③厂用电母线电压不得低于规定值；④系统母线电压不得低于规定值。

1.2 确定发电机进相运行能力的方法

1.2.1 通用方法

为保证发电机在进相运行方式下的安全运行，必须在采用进相运行方式之前用试验和计算的方法确定其进相运行能力。

(1) 试验方法。目前多数情况下均采用试验的方法确定发电机进相运行能力。试验时，调节发电机带不同的有功功率，分别在每一个负荷点维持有功功率不变，调整励磁电流使功率因数在+0.85~-0.95的区间内(有条件的情况下功率因数可以更高一些)，选择5~6个不同的功率因数点作为试验工况，测取有功功率、无功功率、定子电压、定子电流、功率因数、转子电流和功角，一般以功角为65°或70°时的有功功率和无功功率为保证稳定的进相运行能力。同时，在各试验工况下测量定子端部结构件温度，如果在满足稳定条件下的工况点定子端部结构件的温度不超过规定值，则端部结构件温度不作为进相运行的限制条件。反之，则应以对应于定子端部结构件温度规定值的有功功率和无功功率为进相运行的能力。

以上方法使用多年，但仍有不足之处：①由于结论是在试验当时特定的运行方式下(包括系统运行方式、本厂其它发电机的运行方式、厂用电运行方式等)得出的，而实际运行中运行方式千变万化，用试验结果确定的阈值难于对发电机实行在线实时

的监控；②为保证安全必然要留有一定的裕度，其结果是限制了发电机实有的进相运行能力。

(2) 计算方法。计算方法的优点是可根据当前不同的运行方式计算出静稳裕度并用以对发电机进相运行进行监控。但要求必须具有较高的计算精度。

1) 通用计算方法，分为发电机功角特性计算和计算机静稳裕度计算。

①发电机功角特性计算

目前均采用通用数学模型计算发电机功角特性。其表达式为

$$P = [(E \times U) / X_d] \times \sin \delta \quad (1)$$

式中：P为发电机有功功率；E为发电机励磁感应电势(与发电机转子电流成正比)； X_d 为发电机同步电抗； δ 为发电机功角。

由于通用发电机数学模型基于理想电机的假设条件，所以式(1)中E、U、 X_d 均为常数。

②计算静稳裕度。

设发电机当前运行工况为

$$P_i = [(E_i \times U_i) / X_d] \times \sin \delta_i \quad (2)$$

如果维持发电机转子电流不变、发电机机端电压不变，其最大有功功率 P_{max} 为

$$P_{max} = (E_i \times U_i / X_d) \times \sin(\pi/2) = E_i \times U_i / X_d \quad (3)$$

则发电机静稳裕度为

$$P_{max} / P_i = [\sin(\pi/2)] / \sin \delta_i \quad (4)$$

如果满足静稳裕度不小于1.1的条件，则 δ_i 应小于65°。(因为 $1/\sin 65^\circ = 1.099$)。由此可以看出，试验时以功角等于65°为限制条件的依据即在于此。

2) 通用计算方法误差分析

由于实际运行中的发电机存在饱和、有阻尼、有齿、有槽，不但饱和的程度随发电机运行工况的不同而不同，而且齿、槽的影响也与工况相关。通过容量为200MW~600MW各不同型号的18台发电机的实测结果表明，发电机同步电抗和空载感应电势不再是常数，而是工况的函数，并且变化范围较大。因此，用通用模型计算发电机运行行为必然会带来较大的误差，若以此确定发电机的进相运行能力将不利于发电机在进相情况下的安全、合理运行。

总结以上可看出，无论是试验方法还是计算方法，用通用方法均难以精确的静稳裕度对发电机进相运行实现在线监控。同时用通用方法确定进相运行阈值时必然会限制发电机实有的进相运行能力。

1.2.2 发电机工况参数数学模型

针对上述问题，北京伏安基业电气技术有限公

司提出用发电机工况参数数学模型计算发电机运行行为的新方法^[13-14]。在该模型中，发电机电枢反应电抗 X_{ad} 及与之相关的暂态电抗、次暂态电抗均不再是常数，而是工况的函数。并给出计算发电机稳态运行特性的数学模型如下：

$$\begin{cases} \vec{E} = \vec{U} + j\vec{I}(X_{ad} + X_t) \\ \vec{I}_f = K \times \vec{E} \end{cases} \quad (5)$$

式中： \vec{I} 为发电机定子电流； \vec{I}_f 为发电机转子电流； X_{ad} 为电枢反应电抗； X_t 为定子漏抗； K 为励磁电流 \vec{I}_f 和与之对应的定子侧励磁感应电势 E 之间的比例系数； X_{ad} 和 K 均为工况的函数，且有

$$X_{ad} = f(P, Q, U, I) \quad (6)$$

$$K = f(P, Q, U, I) \quad (7)$$

由式(5)~(7)推导出的功角特性为

$$P = E \times U / (X_{ad} + X_t) \times \sin \delta \quad (8)$$

式中 E 是工况的函数。由此可以看出：发电机的失稳点不一定是在功角 δ 为90°、满足静稳裕度为1.1的条件时，功角 δ 也不一定是65°。

式(6)、(7)中的待定系数是根据试验数据和大量实际运行中数据采集的结果用最小二乘或神经网络的方法确定的。

近几年来应用本文提出的工况参数数学模型对6种型号18台发电机的稳态运行特性和动态过渡过程进行了计算，为考核其计算精度，每台发电机都与各个不同运行工况下的实测值进行了比较，结果表明，功角的平均相对误差为0.85°、转子电流的平均相对误差为1.2%，完全满足工程的需要。

1.2.3 用发电机工况参数及温度系数辨识的方法计算发电机定子端部结构件温度

由于发电机定子端部结构十分复杂，要用温度场的计算方法计算定子端部温度分布是十分困难的，而且很难满足精度的要求。目前通用的方法是基于试验结果的推算法，但受发电机参数和温度系数的影响，计算精度不够理想，本文用工况参数和采用辨识技术确定温度系数的方法，对原有的方法做了改进，提高了计算精度。

1.2.4 数学模型

定子端部某一点磁密 B_e 应是定子磁势在该点产生的磁密 B_a 与转子磁势在该点产生的磁密 B_f 的相量和。由定子磁势在该点产生的磁密可表示为

$$\vec{B}_a = N_a \times j\vec{I}X_d \quad (9)$$

同理，由转子磁势在该点产生的磁密可表示为

$$\vec{B}_f = N_f \times \vec{E} \quad (10)$$

所以，定子端部在该点的磁密为

$$\vec{B}_e = \vec{B}_a + \vec{B}_f \quad (11)$$

其相量图如图1所示。将式(9)、(10)代入式(11)得

$$\begin{aligned} Be^2 &= (N_f \times E)^2 + (N_a \times I \times X_d)^2 + \\ &2N_f N_a E I X_d (\pi/2 - \delta - \varphi) \end{aligned}$$

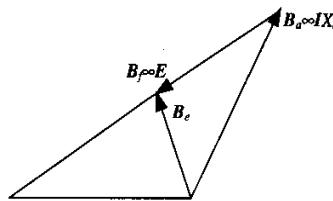


图1 磁密相量图

Fig. 1 Phase diagram of magnetic flux density

由于可近似地认为温度与磁密的平方成正比，故定子端部某点温度可由下式表示。

$$T_e = T_w \times B_e^2$$

式中 T_w 为温度系数，即

$$\begin{aligned} T_e &= T_w [(N_f \times E)^2 + (N_a \times I \times X_d)^2 + \\ &2N_f N_a E I X_d (\pi/2 - \delta - \varphi)] \end{aligned} \quad (12)$$

式中 T_w 、 N_f 、 N_a 为待定系数。

式(12)即为用工况参数计算定子端部温度的数学模型，其待定系数是用参数辨识的方法确定的。

近几年来用该模型分别对双水内冷冷却方式和水氢氢冷却方式的汽轮发电机定子端部温度(包括迟相运行和进相运行方式下的定子端部温度)进行了计算，经与实测值比较，平均误差为0.914%，由此证明该方法具有较高的计算精度。

1.2.5 确定发电机进相运行能力的新方法

由于发电机工况参数数学模型及应用工况参数计算定子端部温度的计算方法具有较高的计算精度。因此可在测定参数后，用计算的方法确定发电机在各种运行方式下的进相运行能力(给出 $P-Q$ 容量图)。确定参数模型中待定系数所需要的数据可通过数据采集系统在运行中获取，为提高精度，在采集数据时，最好安排有浅进相的运行方式。采用本方法时，简化了试验过程(在有条件的情况下甚至可不必安排专门的试验)并达到了较高的精度。

2 发电机进相运行时的在线监测

2.1 用发电机工况参数数学模型在线实时计算发电机静稳裕度

由于发电机进相运行时必须遵循上述限制条件，因此对在线监测也有特殊的要求。运行时除对有功功率、无功功率、定子电压、定子电流等常规

监测量进行在线实时监测之外,还应对发电机的静稳裕度、功角、发电机端部结构件温度(对某些不受定子端部结构件温度限制的发电机可不做监测)及与进相运行限制条件相关的各监测量实现在线监测。而在以上各量中,发电机静稳裕度不可能直接获取。针对这一问题,石景山热电厂与北京伏安基业电气技术有限公司,合作开发用发电机工况参数数学模型在线实时计算发电机静稳裕度,并实现了石景山热电厂发电机进相运行时静稳裕度的在线监测。具体方法如下:

通过数据采集系统在线实时采集到发电机当前工况 P_o 、 Q_o 、 U_o 、 I_o 、 I_{fo} ,维持 U_o 、 I_{fo} 不变,用式(6)以叠代方法计算出 P_{max} ,并据此计算静稳裕度为

$$W = P_{max} / P_o$$

2.2 石景山热电厂发电机进相运行的在线监测

石景山热电厂是北京电网中重要的电源支撑点,担负着调频、调压的任务,几乎在每天的负荷低谷时段发电机都要进相运行。考虑到石景山热电厂发电机进相运行对电厂本身及对北京电网安全、经济运行的重要性,在石景山热电厂3号发电机故障诊断专家系统中特增设发电机进相运行监测屏实现了对发电机进相运行的在线监测和故障诊断。

(1) 在线监测。在监测屏上在线实时显示发电机有功功率、无功功率、定子电压、定子电流、6kV母线电压、220kV母线电压、功角(实测值或计算值)及用工况参数数学模型计算出的静稳裕度,且用户可任意点选其趋势图,观察其发展、变化的趋势。在监测屏上同时给出进相运行时以上各监测量的限制条件(阈值)及发电机在进相运行时的注意事项。

(2) 与发电机进相运行相关的故障诊断功能。石景山热电厂3号发电机故障诊断专家系统可对发电机可能发生的159种故障进行诊断,并给出有关运行、试验、检修、故障诊断和处理的专家建议,其中包括进相运行时可能发生的故障。当以上某监测量超过规定的阈值和有相关先兆出现时,系统发出报警信号,同时对所发生的故障进行诊断,并根据诊断的结果给出有关运行、检修等相关的专家建议,协同用户及时消除故障,保证发电机的安全运行。

3 发电机工况参数模型在其它方面的应用

3.1 在线实时诊断及定量分析

多年来,全国发电机事故统计的结果表明,转子线圈匝间短路故障在转子绝缘故障中所占比例较大。发电机转子线圈匝间短路故障可分为稳定性匝

间短路和不稳定性匝间短路,稳定性匝间短路是指发电机处于静止、旋转中不同转速及带负荷运行等各种状态下都存在的匝间短路。由于发电机转子线圈在静止或不同转速下受力不同及在不同负荷(亦即不同温度)下热膨胀不同,因此某些匝间短路故障点只在某种工况下出现,称这种匝间短路故障为不稳定性匝间短路。由此可以看出:发电机转子匝间短路故障在某些情况下可能不会影响发电机的正常运行,但在某些情况下将会对发电机的安全运行带来危害。此外对转子匝间短路故障的处理十分复杂,需要抽转子、拔护环,停机时间长、耗资较大等。因此,合理地制定运行、检修决策、确定最佳检修时机,是处理转子匝间短路的技术关键。

通过以上分析不难看出,确定匝间短路故障检修决策的重要依据是故障的严重程度^[15]。据此原则部颁汽轮发电机运行规程[SCCC]6.3.5中规定:当转子线圈因匝间短路而引起不允许的振动或转子电流明显增大(变化达10%以上),必须立即减少负荷,使振动或转子电流减少到允许的范围,尽快停机检查、处理。因此可以认为对匝间短路故障实现在线监测和决定停机处理的最终判据为振动和转子电流,振动可直接从数据采集系统中获取,而转子电流则需要与正常值进行比较,并以比较的结果作为判据。

根据部颁规程规定,可以转子电流比即转子电流实测值与相同工况下转子电流正常值之比作为判据判断,转子线圈有无匝间短路和故障的严重程度。亦即如果转子电流比大于或等于1.1,则应立即采取措施,尽快停机检查、处理。

石景山热电厂和北京伏安基业电气技术有限公司在该厂发电机故障诊断专家系统中,用发电机工况参数模型在线实时计算发电机转子电流正常值(指纹计算)并与实测值进行比较,得出转子电流比,用以对发电机有无转子匝间短路故障和故障的严重程度实行在线监测。一年多的实践证明,用工况参数数学模型计算发电机转子电流,其平均误差约为0.6%,完全满足工程的需要,为贯彻部颁汽轮发电机运行规程提供了切实可行的方法和可靠的判据。

3.2 计算发电机动态过程

用工况参数可建立计算发电机动态过程的3阶和5阶模型,曾以天津杨柳青电厂、通辽电厂、马头电厂的100MW和200MW汽轮发电机为例计算了在多种不同工况、不同励磁扰动情况下的动态过程,计算结果与实测曲线达到了很好的拟合。与通用模型的计算结果相比,计算精度有较大的提高。

4 结论

(1)本文提出的发电机工况参数数学模型由于较好地描述了饱和的非线性影响，在计算发电机运行行为时达到了较高的计算精度，所用参数的获取方法简单易行，便于现场使用。

(2)用发电机工况参数数学模型及应用工况参数计算定子端部温度的计算方法确定发电机进相运行能力时，不仅简化了试验过程(试验方法简单、且不影响发电机的安全运行)，而且可以得出在任何运行方式下的P-Q容量图。

用工况参数数学模型在线实时计算发电机静稳裕度，具有较高的计算精度，既充分利用了发电机实有的进相运行能力，又提供了可靠的安全保证。系统提供的进相运行实时监测屏使用户可以一目了然地了解当前处于进相运行下的发电机运行状态，可协同运行人员实时掌握发电机进相运行能力和发电机静稳裕度的变化情况，保证发电机在进相运行方式下的安全运行。

(3)用工况参数数学模型在线实时计算转子电流的正常值，与实测值相比，可准确、定量地诊断转子有无匝间短路和故障的严重程度，为贯彻部颁汽轮发电机运行规程提供了切实可行的方法和可靠的判据，同时为合理制定检修决策提供了科学依据。

参考文献

- [1] 胡念苏, 陈波, 周宇阳. 汽轮发电机组经济性监测诊断系统中失效参数的处理[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(6): 91-95.
Hu Niansu, Chen bo, Zhou Yuyang. Treatment of failure parameters in an economy detection and diagnosis system for turbo-generator sets [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 2003, 36(6): 91-95(in Chinese).
- [2] 陈新琪, 竹士章, 袁斌, 等. 同步发电机参数与工况关系初探[J]. 中国电力, 2001, 34(10): 31-34.
Chen Xinqi, Zhu Shizhang, Yuan Bin, et al. Preliminary study of the relations between generator parameters and operation conditions [J]. Electric Power, 2001, 34(10): 31-34(in Chinese).
- [3] 唐建辉, 胡敏强. 隐极同步发电机进相运行功角计算方法初探[J]. 江苏电机工程, 2004, 23(3): 34-35, 37.
Tang Jianhui, Hu Minqiang. A New calculation method of power angle of non-salient pole synchronous generator in under-excitation operation[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2004, 23(3): 34-35, 37(in Chinese).
- [4] 谢小荣, 肖晋宇, 李建, 等. 一种估计同步发电机功角的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 106-110.
Xie Xiaorong, Xiao Jinyu, Li Jian, et al. A new approach to estimating power angle of synchronous generators[J]. Proceedings of the Csee, 2003, 23(11): 106-110(in Chinese).
- [5] 朱启贵, 田春光. 发电机静态稳定计算方法的改进[J]. 吉林电力, 2001(1): 23-25, 52.
Zhu Qigui, Tian Chungua. Improvement of static stability calculation method on generator[J]. Jilin Electric Power, 2001(1): 23-25, 52(in Chinese).
- [6] 郭景斌, 单周平. 凸极同步电机静稳定边界的解析法和应用[J]. 中

国电力, 2000, 33(10): 39-41, 47.

Guo Jingbin, Shan Zhouping. Analytic method of the static stable boundary for hydro-generator and its application[J]. Electric Power, 2000, 33(10): 39-41, 47(in Chinese).

- [7] 李扬絮, 芮冬阳, 刘勇. 发电机进相运行的静态稳定性研究[J]. 广东电力, 1997, 10(2): 9-12.

Li Yangxu, Rui Dongyang, Liu Yong. The steady state stability research of the leading phase operating of generator[J]. Guangdong Electric Power, 1997, 10(2): 9-12(in Chinese).

- [8] 刘文锦. 水轮发电机定有功状态下静态稳定极限的实用计算方法[J]. 广东电力, 1995, 8(3): 26-31, 53.

Liu Wenjin. The practical calculate method of the steady-static stability limit under the fixing active power state for the water-turbine generator[J]. Guangdong Electric Power, 1995, 8(3): 26-31, 53(in Chinese).

- [9] 梁振光. 发电机功角的实时计算方法[J]. 继电器, 2004, 32(1): 12-15, 42.

Lian Zhenguang. Real-time calculation method of generator power angle[J]. Relay, 2004, 32(1): 12-15, 42(in Chinese).

- [10] 高景德、张麟征. 同步电机过渡过程的基本理论及分析方法[M]. 科学出版社, 1985.

- [11] 史家燕、叶新福. 发电机故障诊断专家系统在上海外高桥发电厂的实现[J]. 中国电力, 2001, 34(11): 5-8.

Shi Jiayan, Ye Xinfu. The realizing of the fault diagnosis expert system for generator in shanghai waigaoqiao power plant[J]. Electric Power 2001, 34(11): 5-8(in Chinese).

- [12] 史家燕, 董明会, 李惠升, 等. 汽轮发电机的饱和 P-Q 容量图[J]. 中国电机工程学报, 1988, 8(5): 55-60.

Shi Jiayan, Dong Minghui, Li Huisheng, et al. Saturation effect on the capability diagram of turbo -generator[J]. Proceedings of the CSEE 1988, 18(5): 55-60(in Chinese).

- [13] Shi Jiayan, Dong Mighui, Zheng Fengshi. A precise regression model of turbogenerator for its stete-state performance caculation [C]. BICRM Paper Beijing, 1987.

- [14] Shi Jiayan. A method of synchrmos parameter calculation for generatora, based on electromagnetic field calculation and least square regression method[C]. BJSEF Paper Beijing, 1988.

- [15] 马宏忠, 李之昆, 彭钱. GP 法在发电机转子绕组匝间短路诊断中的应用[J]. 继电器, 2004, 32(22): 16-19, 28.

Ma Hongzhong, Li Zhikun, PENG Qian. Genetic programming for diagnosing turn-to-turn short fault of generator rotor windings [J]. Relay, 2004, 32(22): 16-19, 28(in Chinese).

收稿日期: 2006-03-22。

作者简介:

史家燕(1934—), 女, 天津人, 教授级高级工程师, 多年来从事发电机运行、检修、试验及发电机模型、参数、运行行为及电机电磁场的计算研究, 近年来专门从事发电机故障诊断专家系统的研究开发工作, shijiayan808@yahoo.com.cn;

史源素(1961—), 女, 山西人, 高级工程师。长期从事发电机运行、检修、试验和管理工作; 近年来主要从事发电机故障诊断专家系统的研发工作;

赵肖敏(1956—), 男, 河北人, 硕士研究生, 高级工程师, 中国电机工程学会大电机专业委员会发电机分委会委员, 中国电力企业联合会全国状态检修专家组成员。从事发电机试验、研究工作多年; 近年来主要从事发电机故障诊断专家系统的研究开发工作;

曲世路(1947—), 男, 教授级高工, 现任北京京能热电股份有限公司副总工程师, 多年来一直从事电气一、二次设备的在线运行研究工作。

郭永红(1970—), 女, 高级工程师, 主要从事 200MW 火力发电厂电气设备技术管理工作;

张 力(1962—), 女, 高级工程师, 主要从事 200MW 火力发电厂电气运行管理工作。

(责任编辑 喻银凤)