

# 1000MW 级氢冷发电机提高氢气品质的运行优化

郑彦

(徐州华润电力有限公司, 江苏 徐州 221000)

**摘 要:** 目前国内大型汽轮发电机主要采用氢气为冷却介质。本文主要从氢气的纯度、湿度、压力、温度四个重要参数对于氢冷发电机安全经济运行的影响及注意事项作出论述, 重点通过介绍本厂通过推行提高氢气纯度标准、氢气中杂质气体分析、24 小时漏氢量跟踪等措施, 对 1000MW 级发电机氢气冷却系统进行的运行优化, 并指出了氢气冷却系统的运行优化在安全节能方面的重要意义和可推广性。

**关键词:** 1000MW 发电机组; 运行优化; 氢气品质; 安全节能

## 1 概述

大型汽轮发电机中存在着损耗, 会导致发电机本体及线圈发热, 如果不及时将这些热量释放掉, 将会导致发电机的绝缘老化, 影响发电机使用寿命, 严重时会引起恶性电气事故的发生。氢气具有导热性高、流动性强、密度小、不助燃等优良的气体特性, 是目前大型汽轮发电机主要采用的冷却介质。而作为冷却介质, 氢气的品质对于氢冷发电机的安全经济运行有着重要影响, 因此, 做好氢气品质的控制是发电厂技术管理的一项长期而重要的工作。

徐州华润电力有限公司两台 1000MW 机组于 2010 年 7 月开始投入商业运营, 由上海电气集团提供的 THDF 125/67 型发电机氢气系统技术参数如下: 发电机内气体空间  $100\text{Nm}^3$ , 正常运行氢气压力  $0.5\text{MPa}$ , 氢气纯度  $\geq 96\%$ , 最大非可控补氢量  $18\text{Nm}^3/\text{day}$ , 用于排除机内空气的  $\text{CO}_2$  体积为  $200\text{Nm}^3$ , 用于排除机内  $\text{CO}_2$  的氢气体积为  $250\text{Nm}^3$ 。本套氢气系统并配有  $\text{CO}_2$  蒸发器、发电机氢气干燥装置、 $4 \times 25\%$  额定容量的氢冷器。

## 2 1000MW 级发电机对氢气品质的要求

根据 DL/1-1980 《电力工业技术管理法规》、GB/T15498-1995 《企业标准体系管理标准和工作标准的构成和要求》、Q/CRP-GE-299.002-2011 《华润电力防止电力生产重大事故的二十八项重点措施》, 以及 THDF 125/67 型发电机对于氢气系统的技术规范要求, 《徐州华润  $2 \times 1000\text{MW}$  集控运行规程》规定, 发电机正常运行中氢气纯度不低于  $96\%$ , 发电机冷却氢气进口温度范围为  $35^\circ\text{C} \sim 46^\circ\text{C}$ , 氢冷却器冷却水进水温度不大于  $39^\circ\text{C}$ , 发电机正常运行氢压范围  $0.47\text{MPa} \sim 0.52\text{MPa}$ , 氢气露点  $-25^\circ\text{C} \sim -5^\circ\text{C}$ , 制氢站提供氢气纯度不低于  $99\%$ 。

## 3 氢气品质对发电机安全经济运行的影响分析

### 3.1 氢气压力对发电机安全经济运行的影响

氢气压力大小直接影响氢气的冷却效率, 同时压力的变化也可以反应机组是否存在漏氢现象。1000MW 机组正常运行时, 额定氢压应保持在  $0.47\text{MPa} \sim 0.52\text{MPa}$ , 且必须略高于定冷水正常运行的压力。

#### 3.1.1 氢气压力过低影响冷却效果, 影响发电机正常接带负荷

氢气压力越高, 氢气密度越大, 导热能力越强, 反之, 氢气压力过低, 说明发电机内氢气量不足, 对发电机的冷却效果就会变差。对于 1000MW 发电机一般要求正常运行氢压为  $0.5\text{MPa}$ , 低于  $0.47\text{MPa}$  或高于  $0.52\text{MPa}$  时报警; 如果发电机氢气压力降到  $0.47\text{MPa}$ , 应将发电机负荷降到 850MW 及以下; 如果发电机氢气压力降到  $0.4\text{MPa}$  以下, 应将发电机负荷降到 700MW 及以下; 如果发电机氢气压力降到

0.3MPa，将发电机解列。

### 3.1.2 氢气压力过低会造成密封油系统异常

氢气压力过低，会使得密封油系统的压差阀和平衡阀不能正常工作，氢气容易泄漏，造成火灾，还会使得密封油回油不畅通，导致密封油箱满油，造成发电机内部进油。

### 3.1.3 氢气系统泄漏造成氢气压力下降可能引发火灾和爆炸

氢气压力的快速下降，多因氢气系统发生泄漏引起，一旦氢气系统发生泄漏，漏氢遇到明火就会发生火灾或者爆炸，造成严重的后果。

## 3.2 氢气温度对发电机安全经济运行的影响

### 3.2.1 冷氢温度影响冷却效果及发电机绝缘安全

发电机入口风温过高，将使发电机出口风温随之升高。因为发电机出口风温等于入口风温加温升，当温升不变且等于规定的温升时，入口风温超过上限，则发电机出口风温将超过规定，使定子线圈温度铁芯温度相应升高，绝缘发生脆化，丧失机械强度，发电机寿命缩短。

3.2.2 氢温过高会影响发电机绝缘  
正常情况下，发电机入口风温应低于定子冷却水温度 5℃左右，如果发电机定子绕组的冷却水温度比绕组外面氢气温度低，定子绕组外表面就会结露，即定子绕组绝缘表面变得潮湿，降低绝缘能力造成定子绕组绝缘被破坏，从而造成定子绕组局部放电威胁发电机的安全。

## 3.3 氢气纯度对发电机安全经济运行的影响

### 3.3.1 氢气纯度直接影响发电机的安全

氢气作为一种极易爆炸的危险品，如果氢气中含氧量大于 3%，遇火立即爆炸，而发电机在运转过程中可能出现定、转子放电现象，就是说，发电机内氢气纯度的降低将存在发生氢气爆炸的可能；发电机氢气纯度降低，有害的杂质气体还可能造成发电机绕组绝缘下降，严重威胁发电机的安全，同时，也是造成发电机护环存在着氢致裂纹的主要原因；正常运行时一般要求氢气纯度在 95%~98%，我厂规定氢气纯度不低于 96%。所以运行中必须严格监视，及时调整，确保纯度合格。

### 3.3.2 发电机氢气纯度下降增加通风损耗造成发电机效率下降

当发电机内氢气纯度在 95%~98% 的范围内，发电机氢气纯度从额定值下降一个很小的百分数时，对于发电机的安全性不会造成不利影响，但发电机内混合气体的密度增加，会造成通风损耗的增加，从而造成发电机效率下降。具体分析如下：

#### 1) 氢气中杂质气体分析

根据化学分析可以测得，发电机内氢气纯度下降时，混合气体中主要杂质为： $H_2O$ （气态）、空气、 $CO_2$ 、油份等。根据阿伏伽德罗定律的推论：同温同压下，任何气体的密度比等于分子质量之比（摩尔质量之比）。

$$\text{即：} \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{M_1}{M_2} = \rho_{\text{相对}} \quad (T、P \text{ 相同})$$

其中， $H_2$  分子量为 2、 $H_2O$  分子量为 18、空气分子量约为 29、 $CO_2$  分子量为 44。若假定氢气中含有 4% 的  $CO_2$  杂质气体，在同温同压条件下，混合气体的相对密度是氢气的 1.84 倍，同理，如果含有 4% 的空气，混合气体的密度是氢气密度的 1.54 倍，如果含有 4% 的  $H_2O$ （气态），混合气体的密度是氢气的 1.32 倍。由此，我们可以得出，发电机内氢气纯度越低，氢气中含有杂质气体的分子量越大，发电机内混合气体的密度也就越大。

#### 2) 氢气纯度下降对通风损耗的影响

根据 ABB 公司在实验确定旋转电机通风的空载损耗和在实验室、电站现场精确测定电机的空载损耗的成果，可以得到以下结论。

电机的通风损耗产生的原因主要是和转换能量的转子有关，通过计算分析得出通风损耗有关的各个分量如下：

- a.为保证发电机冷却所需要的进气量而连接在转子上的风扇的传动功率。
- b.冷却介质通过转子内冷却管道部分的加速功率。
- c.转子冷却回路中冷却介质泄漏产生的损耗。
- d.由于径向压力差和表面形状不一致在转子外部轮廓产生的循环损耗。
- e.转子表面的摩擦（圆柱和圆盘摩擦）。

在计算电机的通风损耗时，根据流体力学的经典理论我们可以得出，以上 5 个分量和气体的密度都呈线性关系。综上两点得出的结论，当氢气纯度下降，氢气中含有的杂质气体增加，混合气体密度的增大，通风损耗也随之增大，造成了发电机效率下降。

### 3.4 氢气湿度对发电机安全经济运行的影响

氢气湿度一般用露点来表示，正常运行时，发电机内氢气露点应维持在 $-25^{\circ}\text{C}\sim-5^{\circ}\text{C}$ 之间，补氢用的氢气在常压下的露点一般在 $-25^{\circ}\text{C}$ 。

#### 3.4.1 氢气湿度高可能造成发电机定子线圈端部短路事故

氢气湿度越高，氢气中水分越高，气体的介电强度越低，定子绕组受潮，降低绝缘电阻，从而降低了绝缘表面放电电压，容易发生闪络和绝缘击穿，从而造成事故。

#### 3.4.2 氢气湿度高造成发电机转子护环产生应力腐蚀

发电机氢气湿度高，将对其接触的金属产生应力腐蚀，而应力腐蚀与金属氢脆相互起到催化作用。据有关资料介绍，对非 18Cr18Mn 材料的护环，氢气相对湿度达到 50% 以上时，对其应力腐蚀将急剧加速，即使是采用 18Cr18Mn 材料的护环，氢气相对湿度在 80% 以上时，同样会使发电机转子护环产生应力腐蚀。由于应力腐蚀使护环产生裂纹；同时绝缘瓦松动，引起绝缘瓦同护环端部转子线圈摩擦，引起转子线圈接地或短路。

#### 3.4.3 氢气湿度大，影响发电机运行效率

由于氢气中湿度大，水分高，机内气体密度增大，增加了发电机通风损耗，降低了发电机的运行效率。详细原因已在上文 3.2.2 中分析，在此不作冗述。

#### 3.4.4 氢气湿度过低的危害

氢气湿度过低，氢气过于干燥，长期运行会使发电机内绝缘材料将产生龟裂现象，定子端部垫块的收缩和支撑环也可能产生裂纹，因此当氢气湿度过低时，应及时停止氢气干燥器运行。

## 4 提高氢气品质采取的运行措施

通过氢气品质对发电机安全经济运行影响的全面分析，公司运行人员对于提高氢气品质，防止氢气品质出现异常制定了一系列的防范措施。

### 4.1 氢气压力异常的防范措施

(1) 漏氢检测装置正常投入运行，发现漏氢现象及时处理，防止发生氢气压力急剧下降事故。一旦发现氢气系统发生泄漏，立即终止厂房内的一切动火工作，启动机房内屋顶风机进行通风。

(2) 机组密封油系统差压阀、平衡阀跟踪动作正常，若发现油氢差压出现异常，应及时调节密封油压力，并及时联系检修人员重新整定差压阀、平衡阀。

(3) 完善发电机氢气系统阀门检查卡、操作票，防止发生因人为原因造成的氢气泄漏。有关氢气系统的操作必须有两名或两名以上运行人员进行操作，一人操作，一人监护，严格按照操作规程和操作票执行。

#### (4) 进行 24 小时漏氢量计算跟踪的运行措施优化

徐州华润电力有限公司#5、#6 机组投产以来多次出现因氢气干燥装置排污手动门不严、氢气纯度在线测量装置漏氢等原因造成的氢气压力缓慢下降的情况，这类氢气缓慢泄漏的情况具有氢气压力下降缓慢，不易及时发现，发生后难以排查的特点，对机组的安全经济运行产生了不利影响。

针对于这类情况，徐州华润电力有限公司发电部汽机专业制定了 24 小时漏氢量计算跟踪的运行措

施，该措施规定，根据以下公式计算发电机 24 小时漏氢量：

$$\Delta V_H = 70320 \times \frac{V}{H} \times \left( \frac{P_1 + B_1}{273 + t_1} - \frac{P_2 + B_2}{273 + t_2} \right), m^3/d \quad (1)$$

$\Delta V_H$ —24 小时漏氢量( $m^3/d$ )

H—测试持续时间(h) H=24h

V—发电机充氢容积( $m^3$ ) (THDF 125/67 型发电机机内氢气额定容量为  $100m^3$ )

P1、P2—测试起始、结束时机内氢气压力 (Mpa)

t1、t2—测试起始、结束时内氢气平均温度( $^{\circ}C$ )

B1、B2—测试起始、结束时发电机周围的大气压力 (Mpa)

因 1000MW 发电机组正常运行中氢气压力为 0.5MPa，24 小时漏氢量  $\Delta V_H$  按式 (1) 计算外，还需要考虑密封油溶解并带走部分的气体量，这部分融入密封油的气体量计算如式 (2)

$$V_{\text{溶}} = 1.44 \times P \times q \times V_0 \quad (2)$$

$$\Delta V_H' = \Delta V_H - V_{\text{溶}} \quad (3)$$

由式 (3) 计算出 24 小时漏氢量，该计算值按照 THDF 125/67 型发电机说明书中技术参数规定应  $< 18m^3/d$ ，否则为不合格，需对发电机氢系统进行查漏，并及时处理漏点，以防氢气压力不合格造成的安全隐患，以及对发电机经济运行造成不利影响。

#### 4.2 氢气温度异常的防范措施

(1) 检查氢气冷却器正常投运，对氢气冷却器水侧定期放空气，防止有空气积累在水侧，使得实际换热面积减少，造成氢冷器冷却效果下降。

(2) 保证氢气冷却器冷却水温度在正常范围内，一般规定氢气冷却器冷却水温度不高于  $38^{\circ}C$ ，如冷却水温度过高，应及时进行相关的运行调整，调整无效时，需降低机组负荷运行，保证氢气温度不超限。

(3) 保证发电机内氢气纯度合格，防止因氢气纯度低造成的热容量及换热能力降低。

(4) 低负荷或停机时，也应保持氢温在正常范围，如氢温过低应及时调整氢冷器运行方式。

#### 4.3 氢气纯度不合格的防范措施

(1) 发电机进行气体置换时，严格按照规程和操作票上的规定，在发电机内氢气纯度大于 96% 后进行全面排放死角 2 分钟，然后再进行升压，避免发生气体置换时排死角不彻底的问题。

(2) 检查无  $CO_2$  瓶接入发电机氢气系统，发电机经  $CO_2$  置换后及时将  $CO_2$  瓶与氢气系统彻底隔离。

(3) 正常运行中，应保证氢气压力在正常范围内，并略高于发电机定子冷却水压力，尽量避免定冷水泵切换中两台泵并列运行造成定冷水压力过高的情况，从而降低发电机进水的可能性。

(4) 严格控制氢站提供氢气的纯度，一般要求氢站供氢纯度不低于 99%，以防止发生发电机内氢气纯度下降时，通过排补氢长时间无法使氢气纯度提高。

(5) 保证密封油系统的正常运行，维持正常的油氢差压，尽量减少密封油和氢气的直接接触中，油份杂质进入氢气系统。

(6) 严格控制密封油油质，控制密封油温度，以防止密封油含水量大或油温过高，造成密封油中水分、油分子、空气混入氢气系统。

(7) 使用氢气纯度在线监测装置和人工取样测量相结合的办法，每班次对氢气纯度进行测量分析，及时发现氢气纯度下降，采取相应措施，保持发电机内氢气较高的纯度。

#### 4.4 氢气湿度不合格的防范措施

(1) 运行管理上加强重视，对于发电机运行中氢气纯度、湿度实施跟班取样分析制度，建立相关的监督考核机制，纳入化学专业监督和考核范畴。

(2) 根据每班氢气湿度检测报告，合理的投退氢气干燥装置，检查氢气干燥装置的安装合理性和投运效果，对于安装不合理的和投运后效果不明显的进行技术改造。

(3) 严格控制氢冷器冷却水压力，防止因氢冷器冷却水量控制不当或冷却水温度过低造成氢温过低产生凝露。

(4) 对定冷水机内接头和氢冷器内部在检修时进行查漏工作，防止运行时通过管道接头细微的渗漏导致机内氢气湿度增大。

(5) 严格控制密封油含水率。在汽轮机运行中，由于多方面原因，造成轴封蒸汽进入轴承油室，凝结成水进入油中，这些水分通过密封油在密封瓦中蒸发进入氢气内。

## 5 运行优化的经济性分析

通过专业措施的制定执行，运行人员的悉心调整，徐州华润电力有限公司 2×1000MW 氢冷发电机氢气品质有了大幅提高，在保证机组的安全稳定运行的基础上，在经济运行方面也取得了相当可观的成效。

### 5.1 提高运行中氢气纯度对发电机效率的影响

国外有详细的分析研究，对维持高纯度氢气运行的要求非常迫切，美国 2003 年《电力工程》一篇文章进行了氢气纯度对发电机影响的量化分析。见图 1。

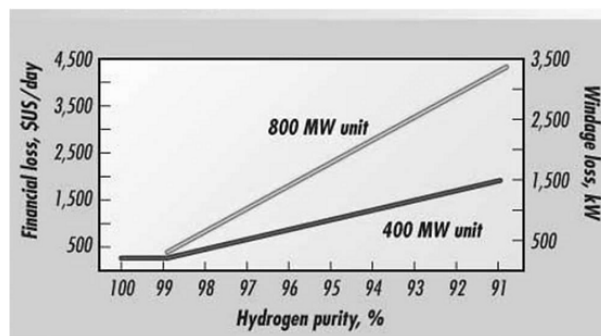


图 1 氢气纯度下降引起发电机通风损耗增加的关系曲线

说明：

- 1) 两条曲线分别是 400MW 和 800MW 发电机。
- 2) 横坐标从左向右延伸表示纯度从 100%下降到 91%每格 1%。
- 3) 左纵坐标表示经济损失单位是美元/每天。
- 4) 右纵坐标表示发电机风摩损耗单位是 kW。
- 5) 在氢气纯度低于 99%左右时风摩损耗就开始随纯度降低而呈反比线性增加。
- 6) 发电机容量越大，风摩损耗随氢气纯度下降而增大的变化斜率越大，即氢气纯度对容量较大的发电机影响更大。
- 7) 图 1 曲线可以查出纯度下降 1%对应的风摩损耗。

根据图 1 可以得出：以 800MW 发电机为例，氢气纯度在 99%以下时，每下降 1%，增加通风损耗 366kW，反之，在我们规定的氢气纯度 95%~98%范围内，氢气纯度从 95%每向上增加 1%，相应就增加发电机输出功率 366kW，如果发电机氢气纯度从 95%升到 98%，在相同燃料量的情况下，发电机组增加了超过 1MW 的输出功率。

根据图 1 可以得出 800MW 和 400MW 发电机的通风损耗与氢气纯度的关系：

800MW 发电机，氢气纯度每提高 1%，损耗减少 366kW

400MW 发电机，氢气纯度每提高 1%，损耗减少 107kW

通过曲线差值法我们可以计算出 1000MW 发电机通风损耗与氢气纯度的关系：

1000MW 发电机，氢气纯度每提高 1%，损耗降低 510kW。

600MW 发电机，氢气纯度每提高 1%，损耗降低 240kW。

300MW 发电机，氢气纯度每提高 1%，损耗降低 78kW。

## 5.2 徐州华润 1000MW 发电机组运行中提高氢气纯度的经济性计算

徐州华润电力有限公司发电部在经过相关专业的分析计算后，优化了氢气系统运行方式。原规定：当氢气纯度取样化验低于 97%时，运行人员通过进行排补氢操作，将氢气纯度提高至 97%以上，以保证运行中发电机内氢气纯度不低于 97%；自 2013 年以来，规定：当氢气纯度取样化验低于 97%时，运行人员通过进行排补氢操作，将氢气纯度提高至 97%以上，以保证运行中发电机内氢气纯度不低于 97%，较以前提高 1%。

根据图 1 中得出的结论，以徐州华润电力有限公司#5 机组为例，氢气纯度提高了 1%，损耗降低 510kW，按照年利用小时数 6000h，上网电价 0.4 元/kWh 计算，一台机组在氢气纯度优化上获得的节能效益就高达 120 万元，两台 1000MW 发电机组即可获得 240 万元以上的节能效益。图 2、3、4 是徐州华润 2012 年、2013 年氢气纯度、氢气湿度、补氢量的比较。

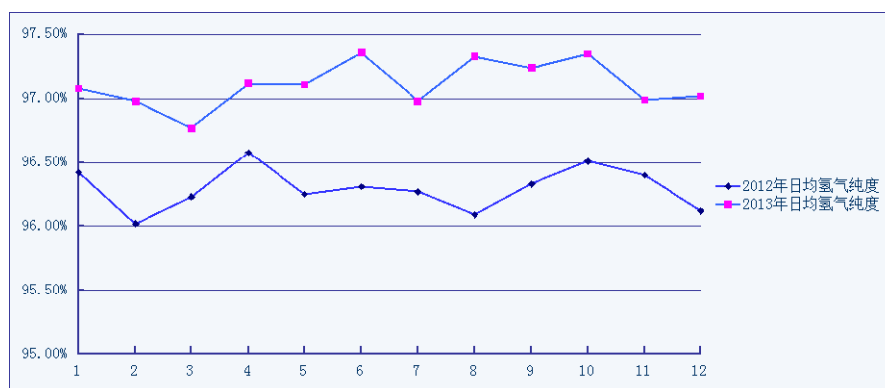


图 2 2012 年、2013 年氢气纯度比较

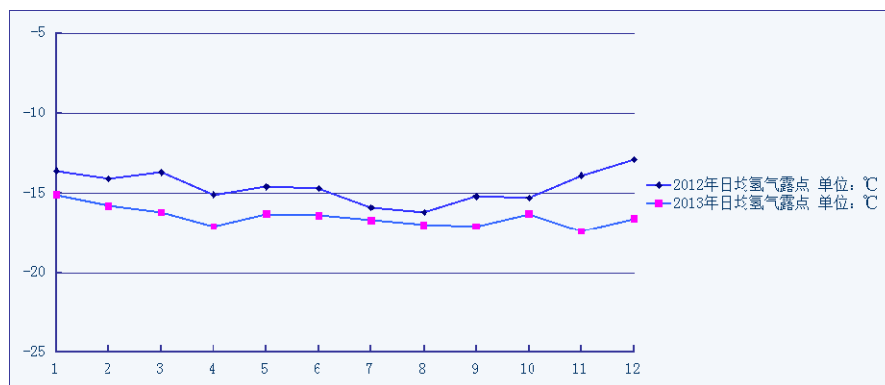


图 3 2012 年、2013 年氢气湿度比较



图 4 2012 年、2013 年日均补氢量比较

以上图 2、图 3、图 4 是由化学专业氢气统计报表数据得出的，通过图中 2013 年和 2012 年数据比较

进行比较不难看出，2013 年日均氢气纯度明显高于 2012 年，氢气湿度明显优于 2012 年，而日均补氢量并无明显增加，制氢成本在提高氢气纯度的运行优化中可以忽略不计，因此提高氢气纯度的运行优化是成功可行的，并可以带来相当可观的经济效益。

5.3 提高运行中氢气纯度的可推广性和节能效益计算

一般火力发电厂，通常有多台发电机组，如果长期氢气纯度在 95%~98%安全范围内，维持在较低水平运行，虽然不存在安全问题，但在消耗同样多燃料的情况下，发电机至少损失几百千瓦的发电功率，而且往往在发电厂经济节能分析中被忽略，直接导致了供电煤耗的增加。

截至 2013 年底，华润电力管理和拥有 70 余家电厂，公司运营权益装机容量达到 2.69 万兆瓦，公司旗下电厂大部分为高效大型发电机组，并且主要分布在用电需求较强的地区，具有单机容量大、机组平均利用小时数长的特点。以华润电力目前 1000MW、600MW、300MW 三个容量等级的主力发电机组为例，粗略计算运行中氢气纯度每提高 1%，每年能够获得的节能效益如表 1 所示。

表 1 华润电力三种容量等级主力机组节能效益表

机组容量	节能效率 (KW)	年利用小时数 (小时/年)	单机节能效益(万元 /年)	机组数(台)	合计 (万元/年)
1000MW 等级机组	510	6000	122.4	8	979.2
600MW 等级机组	240	6000	57.6	26	1497.6
300MW 等级机组	78	5500	17.16	32	549.12

注：表中节能效益以 0.4 元/kWh 上网电价计算

从表 1 中可以得出，通过氢气冷却系统的运行优化，运行中氢气纯度每提高 1%，每年可以为华润电力带来 3000 万元以上的节能效益。将此运行优化推广至全国的氢冷发电机组，可带来更为可观的节能效益。

6 结束语

本文根据运行经验以及国内外相关资料，对氢气品质对于发电机安全经济运行的影响以及相关注意事项进行了详细论述，重点对于氢气纯度对发电机效率的影响进行理论分析和经济性计算，并对徐州华润电力有限公司发电部在提高氢气品质方面作出的运行优化工作进行了详细的阐述和分析。希望本文能够在国家不断强化推进节能工作的政策环境下，在发电企业竞争日趋激烈的市场环境下，对国内同类型氢冷发电机组的安全节能工作有所帮助。

参考文献：

[1] 罗惕乾.流体力学[M].北京:机械工业出版社,2003.  
[2] 曾令全.电机学[M].北京:中国电力出版社,2007.  
[3] J·贝尔, M·盖勒,吕六和,等.旋转电机通风损耗的计算与测量[J].国际水力发电,1992(5):21-26.  
[4] 华润电力防止电力生产重大事故的二十八项重点措施

作者简介：

郑彦 徐州华润电力有限公司发电部集控主值

邮箱: zhengyan\_crep@126.com      电话: 051683425165      手机: 13685132798