

大型水轮发电机冷却方式综合评价方法的研究

滕启治 谭欣 武紫玉 沈俊 王海峰

Comprehensive evaluation method in the cooling mode of large-scale hydro-generators

Teng Qi-Zhi Tan Xin Wu Zi-Yu Shen Jun Wang Hai-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 178802 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.178802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.178802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I17>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三结太阳能电池在非均匀光照下光斑强度和覆盖比率的优化研究

Optimization of light spot intensity and coverage to a triple-junction solar cell under non-uniform illumination

物理学报.2014, 63(16): 168801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.168801>

一种风电功率混沌时间序列概率区间简易预测模型

A simple model for probabilistic interval forecasts of wind power chaotic time series

物理学报.2014, 63(13): 138801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.138801>

大型水轮发电机冷却方式综合评价方法的研究*

滕启治¹⁾ 谭欣¹⁾ 武紫玉²⁾ 沈俊³⁾ 王海峰^{2)†}

1) (天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

2) (中国科学院电工研究所, 北京 100190)

3) (中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

(2015年4月20日收到; 2015年5月4日收到修改稿)

随着水轮发电机的大型化发展, 对发电机冷却技术的要求也越来越高. 不同冷却方式不仅会影响水轮发电机的结构, 同时也会影响发电机的能耗和可靠性. 本文首先对水轮发电机三种常见冷却方式进行了定性对比分析, 然后提出基于层次分析法的水轮发电机冷却方式综合评价方法. 最后, 利用该方法对李家峡400 MW空冷机组和蒸发冷却机组进行了综合评价, 评价结果表明蒸发冷却方式优于空冷方式, 本文所提出的评价方法能够定量计算冷却方式带来的水轮发电机性能差异, 为水轮发电机的节能改造提供了指导依据.

关键词: 水轮发电机, 冷却方式, 层次分析法, 综合评价

PACS: 88.60.-m, 88.60.K-, 88.05.Bc

DOI: 10.7498/aps.64.178802

1 引言

中国水能资源十分丰富, 总储量居世界第一. 2014年我国水电装机容量突破 3×10^8 kW, 发电量达 10661×10^8 kW·h, 占全国总发电量的19.2%, 在电力结构中仅次于煤电. 水电是清洁的可再生能源, 可以为我国经济发展提供大量电力. 此外, 开发水电可以节约煤炭资源, 减少温室气体和各种有害气体的排放, 具有显著的环境效益. 2010年中国水电发电量 6867×10^8 kW·h, 相当于年可节约标准煤 2.14×10^8 t, 减少CO₂排放量约 5.12×10^8 t^[1]. 大力发展水电符合我国能源发展及可持续发展战略.

水轮发电机是水电站将水能转换为电能的核心设备. 随着水坝技术的成熟, 水电站的建设规模越来越大, 相应地, 水轮发电机的单机容量正向巨型迈进, 目前已超过700 MW, 呈现出进一步增长的趋势.

特大型、巨型水轮发电机对冷却技术提出了更

高要求. 大型水轮发电机组由于运行过程中损耗发热较大, 设备运行温度高, 因此需要安装冷却系统带走热量, 以防止设备发生过热故障. 冷却系统的优劣会决定水轮发电机的运行温度, 而水轮发电机的绝缘性、热物理性等均与设备的运行温度密切相关^[2,3]. 特大型水轮发电机冷却方式的选择对发电机长期安全可靠运行和电机的使用寿命有着重要的影响. 为了定量评价不同冷却方式的优劣, 为发电机选型和节能改造提供指导, 本文提出采用层次分析法对水轮发电机冷却方式进行综合评价^[4].

2 水轮发电机冷却方式

水轮发电机的冷却方式可分为全空冷和介质内冷两大类. 由于采用的冷却介质不同, 内冷又可分为水内冷和蒸发冷却两种方式. 采用何种冷却方式, 关系到水轮发电机参数选择、结构设计、重量、造价及安全稳定运行等方面, 是水轮发电机需解决的关键问题之一, 也是机电领域长期以来一直重点探索的课题.

* 国家自然科学基金 (批准号: 51177157, 51322605) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wanghf@mail.iee.ac.cn

2.1 全空冷方式

水轮发电机全空冷机组结构简单, 其典型通风系统结构如图1所示. 冷却空气由冷却器流出后分成两路分别从上、下进风道进入电机, 然后一部分进入转子, 经风沟和磁极径向进入气隙; 另一部分沿轴向流经磁极, 与径向进入气隙的气流合并, 经定子风沟到热风室, 最后流入冷却器, 经过冷却后重复上述循环, 从而将定子产生的热量经冷却空气带出.

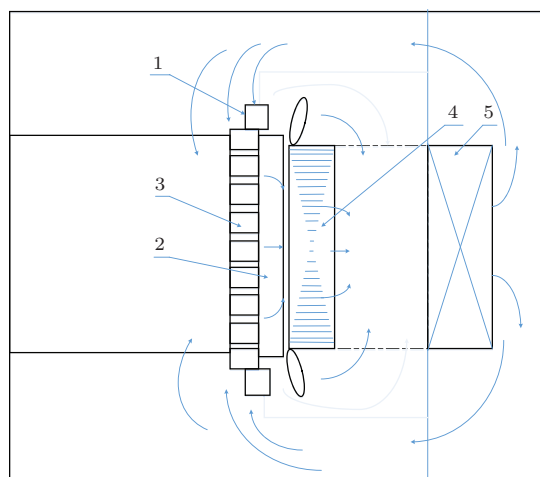


图1 空冷水轮发电机通风系统 (1 为风扇, 2 为磁极, 3 为磁轭, 4 为定子铁心, 5 为冷却器)

Fig. 1. Ventilation system of air-cooled hydro generator.

空气冷却方式利用在电机内部开通风槽和通风沟的方式形成通风系统, 无需添加辅助设备, 电机结构简单. 但是, 由于空气比热较小, 能够带走的热量有限, 因此一般来说, 空冷发电机在运行时机组温升较高, 设备绝缘寿命会受影响, 发电机容量受限. 近年来, 国内外在空冷系统的理论设计、风循环系统设计、风道密封以及减少风损等方面, 不断取得技术进步. 700 MW 全空冷水轮发电机已经成功应用于三峡电站, 相关研究人员正在研制百万千瓦空冷机组, 希望突破空冷技术的极限容量限制^[5].

2.2 水内冷方式

水内冷方式水轮发电机定子线棒由实心股线和通冷却水的空心股线组成, 利用空心股线带走实心股线产生的损耗热量. 由于内冷水直接通过线棒内部, 冷却效果好, 但是在另一方面, 对冷却水的电导率及离子含量要求十分严格.

纯水循环系统如图2所示, 冷却水必须经过纯水系统处理后才能流入电机定子线棒中. 为保证线棒的绝缘性, 经过纯水处理装置处理过的冷却水要求达到: 水质纯净、无固体杂质、pH 值为 7.5—8.5、硬度小于 $2 \mu\text{mol/L}$ 、水温 25°C 时电导率小于 $1.7 \mu\text{S/cm}$. 经过处理后的纯水用循环压力泵打入定子线棒的空心股线进行冷却并带走实心股线产生的热量, 升温的纯水进入冷却器, 与二次冷却水进行热交换, 降温后的纯净冷却水再次经过纯水处理装置, 进行下一次循环.

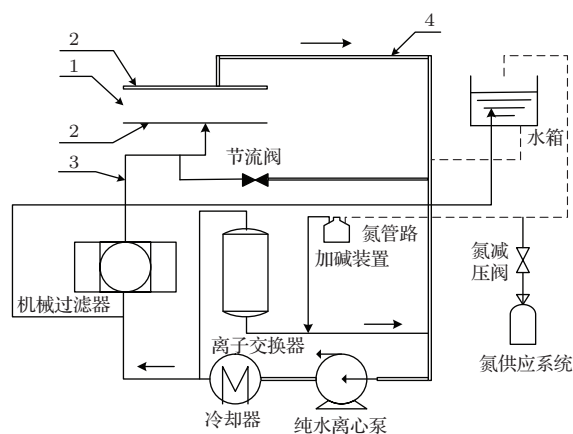


图2 水冷轮发电机纯水循环系统 (1 为定子线圈; 2 为汇水管; 3 为冷水管; 4 为热水管)

Fig. 2. Pure water cycle of water-cooled hydro generator.

2.3 蒸发冷却方式

水轮发电机蒸发冷却自循环系统示意图见图3, 利用水轮发电机立式结构的特点, 在线棒空心股线中注入低沸点、绝缘性能良好的介质, 线棒中通过电流所产生的热量使介质温度升高, 当冷却介质的温度上升至饱和温度时就会发生相变, 沸腾汽化, 利用汽化潜热带走线棒中的热量. 由于介质的潜热高于显热, 介质在相变时吸收的热量远大于传导时的热量. 冷却介质发生相变的点称为蒸发起始点, 蒸发起始点之前介质为液相, 之后介质变为气液两相. 液相介质的密度大于气液两相, 密度差在重力的作用下形成流动压头, 流动压头克服循环回路中的阻力, 从而维持系统循环. 空心线棒中的气液两相混合物进入到冷凝器中, 与冷凝器内的冷却水进行热交换, 热量被冷却水带走, 两相流中被汽化的介质又重新变成液态, 进入回液管、下集液管, 在压头的作用下, 再重新进入线棒, 构成封闭式自循环系统^[6].

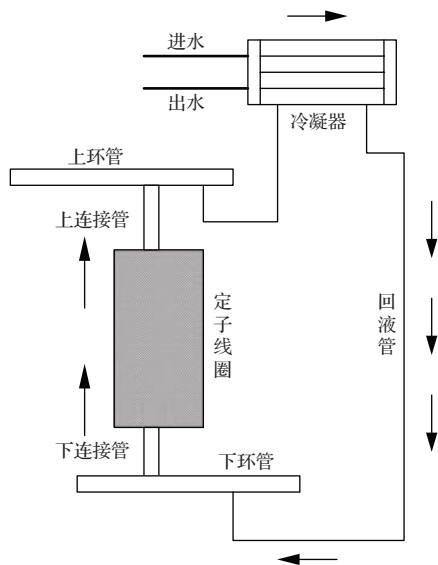


图3 蒸发冷却水轮发电机自循环示意图
Fig. 3. Self-circulation of evaporative cooling hydro generator.

蒸发冷却方式采用相对比热更高的冷却介质,由表1可知,蒸发冷却介质的相对吸热能力为水的5—6倍,发电机运行时温升较低.同时,介质具有

良好的绝缘性能,利用冷却介质的两相流自循环,无需添加泵循环系统及介质处理系统,辅助设备少,运行维护少.不过,由于定子端部需要安装电、介质接头,安装工期较空冷长.

表1 三种冷却介质对比
Table 1. Comparison of three different kind of cooling medium.

名称	相对比热	相对比重	相对的消耗量 /kW	相对吸热能力 (近似值)
空气	1	1	1	1
水	4.16	1000	0.012	50
蒸发冷却介质	166	1400	0.012	280(沸腾)

表1对三种介质的性能作了对比,水的相对比热为空气的4倍,相对吸热能力为空气的50倍,可见,水内冷冷却效果比全空冷好,运行时发电机绕组温升较低.但是,水内冷方式需要安装纯水处理设备,设备造价高,占地面积大.蒸发冷却利用液态介质沸腾传热,传热能力强.

表2 三种冷却方式对比
Table 2. Comparison of three different kind of cooling methods.

冷却方式	体积重量	安全隐患	工作温度	维护	附加设备	电机造价
全空冷	较大	工作温度高 易绝缘击穿	高	经常维护	风机、风道	高
水内冷	小	水泄漏造成短路 故障、氧化物堵塞	低	电机与水处理 系统经常维护	纯水设备、水泵	较低
蒸发冷却	小	无	低	基本免维护	无	适中

三种冷却方式定性对比见表2.由表2可知,三种冷却方式各有优劣,仅仅靠单个指标定性分析难以对比出冷却方式在能耗、经济性以及可靠性方面的优劣.为了定量评价不同冷却方式水轮发电机的优劣,必须从发电机运行时的能源消耗、制造时的资源消耗以及运行可靠性等多个方面对水轮发电机进行全面的定量评价.

3 水轮发电机综合评价模型

3.1 层次分析法基本原理

美国学者Satty于20世纪70年代提出了以定性与定量相结合,系统化、层次化分析解决问题的方法,即为层次分析法[7].层次分析法将复杂问题

分解成各个组成因素,又将这些因素按支配关系分组形成递阶层次结构.通过两两比较的方式确定各个因素相对重要性,然后综合决策者的判断,确定决策方案相对重要性的总排序.针对水轮发电机冷却方式带来的多方面影响,采用层次分析法可以综合多方面因素,对不同冷却方式水轮发电机的综合性能进行排序.

3.2 层次结构模型的建立

水轮发电机是实现水能转换为电能的机构,同时,水轮发电机在运行和制造过程中自身也需要消耗能源、资源.因此,评价冷却方式的性能因素包含:资源消耗、能源消耗以及可靠性三个方面.具体的层次结构模型见图4.

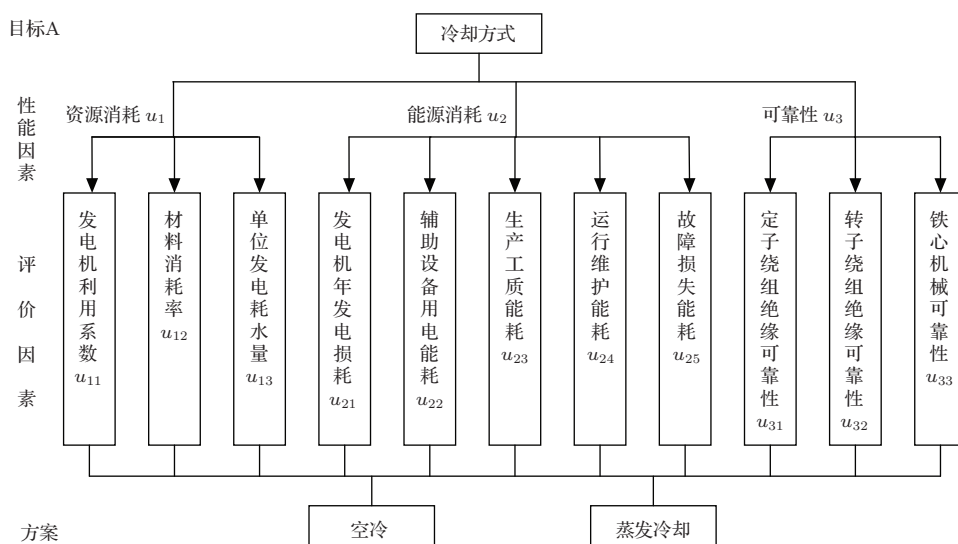


图4 水轮发电机冷却方式评价层次结构模型

Fig. 4. Hierarchical model of cooling methods evaluation of hydro generator.

资源消耗是用发电机制造过程中发电机利用系数 u_{11} 、材料消耗率 u_{12} 以及发电机运行过程中单位发电耗水量 u_{13} 三个指标来衡量的。发电机利用系数计算方法见(1)式, 单位为 $\text{kVA}/\text{m}^3 \cdot \text{rpm}$ 。该指标与电机的类型、容量、运行条件, 特别是冷却系统的形式有密切关系[8]。对电厂而言, 发电机利用系数的提高, 可以减小厂房吊车容量, 降低厂房高度, 减少土建费用及运输成本。

$$u_{11} = \frac{P}{D^2 l n}, \quad (1)$$

式中, P 为电机的功率, D 为定子内径; l 为铁心长度; n 为电机的转速。

电机设计的基本规律说明, 单机容量越大, 其经济性能越好, 而单机容量的增大, 主要依靠冷却技术的改进。材料消耗率计算方法见下式:

$$u_{12} = \frac{G}{S}, \quad (2)$$

式中, G 为发电机总重量, S 为发电机容量。

单位发电耗水量 u_{13} 通过统计水轮发电机发电时二次冷却水的消耗量得到。

能源消耗由发电机年发电损耗 u_{21} 、辅助设备用电能耗 u_{22} 、生产工质能耗 u_{23} 、运行维护能耗 u_{24} 以及故障损失能耗 u_{25} 这5个指标组成。其中, 发电机年发电损耗是指发电机铜耗、铁耗以及风磨损耗造成的能耗。辅助设备用电能耗是指发电机冷却系统引入泵系统、纯水系统运行时的能耗。生产工质能耗是指冷却系统消耗的二次冷却水的能耗。运行维护能耗和故障损失能耗是指冷却系统日常维护

费用、故障恢复费用和故障损失发电量。这些能耗、费用统一折算为标准煤含量进行计算。

可靠性方面主要包含定子绕组绝缘可靠性以及铁心机械可靠性三个指标。定子绕组绝缘可靠性计算方法为

$$u_{31} = \frac{D}{A_0} = e^{\frac{-\ln 2}{m} T}, \quad (3)$$

式中, D 为材料的绝缘寿命, A_0 为温度 0°C 时材料绝缘寿命, T 为绝缘持续的温度, m 为常数, 若电机绝缘等级为 F 级, m 取 12。

同理, 按照(3)式可以求得转子绕组绝缘可靠性指标。铁心机械可靠性 u_{33} 通过实际测量得到。

建立水轮发电机层次结构模型后, 按照利用层次分析法确定各评价指标的权重。最后, 按照(4)式即可求得不同冷却方式水轮发电机的综合评分。

$$P = \sum_{i=1}^n U_i \cdot W_i, \quad (4)$$

式中, U_i 为评价指标归一化后的值, W_i 为指标对应的权重。

4 实例应用

4.1 评价对象的选取

李家峡水电站位于青海省尖扎县和化隆县交界处的黄河干流李家峡河谷中段, 是黄河上游水电梯级开发中的第三级大型水电站。电站安装4台混流式水轮发电机组, 单机容量 $40 \times 10^4 \text{ kW}$, 总装机

160×10^4 kW, 年均发电量 47×10^8 kW·h. 其中, 1—3 号机组采用空冷方式, 4 号机组采用蒸发冷却新技术, 在国内尚属首例^[9].

选取李家峡 2# 空冷发电机和 4# 蒸发冷却发电机作为评价对象. 这是由于: 两台机组容量相同, 均为 400 MW. 两台机组 2013 年发电量接近, 分别为 193×10^4 kW·h 和 194×10^4 kW·h. 两台发电机结构大致相似, 仅采用的冷却方式不同. 因此, 在确保机组容量、结构、出力相同的情况下, 两台机组的评价结果差异是由于采用的冷却方式不同所造成的.

4.2 评价指标计算结果

利用搜集到的两台发电机组数据, 分别对两台机组的各项评价指标进行计算, 计算结果见表 3.

表 3 评价指标计算值
Table 3. Results of evaluation indicators.

指标	2# 空冷 机组	4# 蒸发 冷却机组
发电机利用系数 $U_{11}/(\text{kg}/\text{kW}\cdot\text{h})$	8.0535	8.6481
材料消耗率 $U_{12}/(\text{kgf}/\text{kVA})$	5.259	5.241
单位发电耗水量 $U_{13}/(\text{kg}/\text{kW}\cdot\text{h})$	0.28	0.28
发电损耗标准煤量 $U_{21}/(\text{t}/\text{年})$	3424	3132.8
辅助设备用电煤耗 $U_{22}/(\text{t}/\text{年})$	92.5	93
耗能工质煤耗 $U_{23}/(\text{t}/\text{年})$	541.7	544.8
运行检修煤耗 $U_{24}/(\text{t}/\text{年})$	1705.8	1374.6
故障损失煤耗 $U_{25}/(\text{t}/\text{年})$	5197.1	0
定子绕组绝缘可靠度 U_{31}	0.015	0.0313
转子绕组绝缘可靠度 U_{32}	0.0166	0.0209
铁心形变率 U_{33}/mm	19.2	0

表 4 评价指标判断矩阵
Table 4. Comparison matrix of evaluation indicators.

	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{21}	U_{22}	U_{23}	U_{24}	U_{25}	U_{31}	U_{32}	U_{33}
U_{11}	1	1	0.33	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.33	0.33	0.33
U_{12}	1	1	0.33	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.33	0.33	0.33
U_{13}	3	3	1	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	2	2	2
U_{21}	7	7	3	1	1	1	1	1	5	5	5
U_{22}	7	7	3	1	1	1	1	1	5	5	5
U_{23}	7	7	3	1	1	1	1	1	5	5	5
U_{24}	7	7	3	1	1	1	1	1	5	5	5
U_{25}	7	7	3	1	1	1	1	1	5	5	5
U_{31}	3	3	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	1	3	2
U_{32}	3	3	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.33	1	0.5
U_{33}	3	3	0.5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	2	1

4.3 权重的确定

确定各评价指标值后, 按照层次分析法的计算方法, 邀请相关专家填写 11 个指标重要性相关的判断矩阵 $\mathbf{A}$, 结果见表 4.

表 4 中, 数字 1—9 表示元素两两相比前者比后者重要的程度. 其中, 1 表示两个指标同等重要, 9 表示前者比后者极端重要. 此外, 若元素 i 与元素 j 的重要性之比为 a_{ij} , 则元素 j 与元素 i 的重要性之比为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$.

在求得判断矩阵后, 需要对判断矩阵的一致性进行检验, 以确保判断矩阵的合理性. 首先, 求得判断矩阵 $\mathbf{A}$ 的最大特征根为 11.0862. 按照 (5) 式可求得一致性指标 C.I.

$$\begin{aligned} \text{C.I.} &= \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \\ &= \frac{11.0862 - 11}{10} \\ &= 0.0862, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\lambda_{\max}$ 为矩阵 $\mathbf{A}$ 的最大特征根, n 为评价指标个数.

经过查表可知, 11 阶判断矩阵 $\mathbf{A}$ 对应的平均随机一致性指标 R.I. 为 1.52. 由 (6) 式可知, 矩阵 $\mathbf{A}$ 的一致性比例 C.R. 满足一致性要求.

$$\text{C.R.} = \frac{\text{C.I.}}{\text{R.I.}} = \frac{0.0862}{1.52} = 0.05671 < 0.1. \quad (6)$$

求得判断矩阵后, 将 $\mathbf{A}$ 的各个行向量进行几何平均, 然后进行归一化, 得到的行向量就是权重向量. 其计算方法为

$$\omega_1 = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{1/n}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{kj}\right)^{1/n}}, \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (7)$$

式中, a_{ij} 为指标 i 和指标 j 的重要性之比. 若评价总分为 100, 则各评价指标的权重值如表 5 所示.

表 5 各评价指标对应的权重值
Table 5. Weight of evaluation indicators.

指标	U_{11}	U_{12}	U_{13}	U_{21}	U_{22}	U_{23}
权重值	2	2	6	16	16	16
指标	U_{24}	U_{25}	U_{31}	U_{32}	U_{33}	
权重值	16	16	4	3	3	

4.4 评价结果分析

两台机组综合评价得分见表 6, 评价得分分别为 81.5 分和 95.6 分.

表 6 两台机组综合评价结果
Table 6. Evaluation results of the two hydro generators.

	2# 空冷机组	4# 蒸发冷却机组
总分	81.5	95.6

造成空冷机组和蒸发冷却机组评分值不同, 本质在于两台机组采用的冷却技术不同, 不同的冷却技术对电机的能耗、资源利用、可靠性均有影响. 空冷机组虽然结构简单, 但是冷却效果不如蒸发冷却技术, 定转子绕组以及铁心的温升均高于蒸发冷却机组, 机组的发电效率也低于蒸发冷却机组. 除此之外, 由于空冷机组较高的温升带来机组运行维修所花费的人力、物力也多于蒸发冷却机组. 冷却效果的不足使得空冷机组在体积、重量方面都大于蒸发冷却机组, 从而降低了机组的利用率, 提高了机

组的资源消耗. 从而使得空冷机组的综合得分比蒸发冷却机组低了 14 分.

5 结 论

水轮发电机的大型化发展使得发电机冷却问题日益严重. 发电机的冷却方式会影响电机结构、能耗以及可靠性. 传统的发电机冷却方式评价方法仅仅采用单个指标定性分析不同冷却方式水轮发电机的优劣, 难以得到全面综合的评价结果. 本文采用层次分析法构建了水轮发电机综合评价模型, 并且探索对两台机组进行了定量评估, 评价结果与实际运行情况基本相符, 能够为发电机节能改造提供依据.

参考文献

- [1] China Society for Hydropower Engineering 2012 *Science and technology development report of Chinese hydropower* (Beijing: China Electric Power Press) chapt. 1 (in Chinese) [中国水力发电工程学会 2012 中国水力发电科学技术发展报告 (北京: 中国电力出版社) 第一章]
- [2] Yan Y Z 2009 *Yangtze River*. **40** 37 (in Chinese) [阎永忠. 2009 人民长江 **40** 37]
- [3] apethko H B P 1959 *Acta Phys. Sin.* **15** 246 (in Chinese) [H. B 查林柯 1959 物理学报 **15** 246]
- [4] Yu H, Liu Z, Li Y J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 020204 (in Chinese) [于会, 刘尊, 李勇军 2013 物理学报 **62** 020204]
- [5] Yuan D F, Liang B 2008 *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*. 2008(1) 1 (in Chinese) [袁达夫, 梁波 2008 大电机技术 2008(1) 1]
- [6] Li G D 2006 *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*. 2006(3) 1 (in Chinese) [李广德 2006 大电机技术 2006(3) 1]
- [7] Saaty T L 1978 *Mathematics and Computers in Simulation* **20** 147
- [8] Li H W, Zhou Y L, Liu X, Sun B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 030508 (in Chinese) [李洪伟, 周云龙, 刘旭, 孙斌 2012 物理学报 **61** 030508]
- [9] Zhang D S, Yuan J Y 2005 *Water Power* **31** 48 (in Chinese) [张东胜, 袁佳毅. 2005 水力发电 **31** 48]

Comprehensive evaluation method in the cooling mode of large-scale hydro-generators^{*}

Teng Qi-Zhi¹⁾ Tan Xin¹⁾ Wu Zi-Yu²⁾ Shen Jun³⁾ Wang Hai-Feng²⁾†

1) (School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

2) (Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 20 April 2015; revised manuscript received 4 May 2015)

Abstract

With the development of large-scale hydro-generators, large hydro-generator cooling technology is increasingly demanded. Different cooling method will not only affect the structure of hydro-generators, also it will affect the energy consumption and reliability of the generators. The commonly large-scale hydro-generator cooling method includes: air cooling, water cooling, and evaporative cooling methods. This paper analyzes the principle of the three cooling methods and describes qualitatively the advantages and disadvantages of them. The air cooling hydro-generator structure is simple, but the generator operating temperature is high; the water-cooling method has a certain superior in cooling performance, but it requires more auxiliary equipments, and has higher equipment failure rates. The evaporative cooling method is a recently developed cooling technique. It not only has a remarkable cooling effect, but also can decrease the equipment failure rates and the cost of maintenance. In order to build a comprehensive model to assess the three hydro-generator cooling methods, this paper proposes a comprehensive evaluation method based on AHP. The method includes 11 indexes of resource consumption, energy consumption and reliability to assess the influence of cooling ways. The energy saving influence of all the 11 indicators are calculated by using the AHP comprehensive evaluation. Finally, comparison between a 400 MW air cooling and an evaporative cooling hydro-generators at Liji Xia hydropower Station are made using the proposed method. Evaluation results indicate that in terms of daily operation, the energy saving of the evaporative cooling hydro-generator can be more than 300 tons standard coal equivalent per year as compared with that of air cooling generator. In terms of maintenance, the evaporative cooling method can save more than 5000 tons of standard coal equivalent per year. The comprehensive evaluation results show that the evaporative cooling method is significantly better than the air cooling. It can be seen that the proposed evaluation method may quantitatively calculate the merits of hydro-generator caused by cooling method, which provides guidance to select and improve cooling method of hydro-generator.

Keywords: hydro-generator, cooling mode, analytic hierarchy process, comprehensive evaluation

PACS: 88.60.-m, 88.60.K-, 88.05.Bc

DOI: 10.7498/aps.64.178802

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51177157, 51322605).

† Corresponding author. E-mail: wanghf@mail.iee.ac.cn