

小型风力发电机组优化控制策略与实验研究

包道日娜¹, 张万祥², 刘志璋¹, 田 瑞¹

(1 内蒙古工业大学 能源与动力工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2 保定天威风电科技有限公司, 河北 保定 071051)

摘 要: 提出一种小型风力发电机组功率的优化控制策略。根据选定的 300 W/24 V 永磁发电机, 使用 Wilson 叶片设计计算模型, 应用 MATLAB 语言设计了 300 W 风机叶片; 并针对现有风机控制系统中将控制器的设计与叶片、电机的匹配特性彼此孤立、分离的现象, 设计出与风力发电机的电机、叶片相互匹配的控制器。在风洞试验中测试了样机在 8、10、12、15 m/s 等风速一定条件下, 功率随系统电压的变化规律, 当降低系统电压时, 风机输出功率会一直下降, 在此过程中并没有出现功率增加的现象, 也就充分证明了工作在峰前区域的风力发电机, 当风速大于额定风速时, 控制系统可以通过减小接入系统的负载电阻值来控制其功率。这对研究小型风力发电系统的可控性、可靠性和耐久性有一定的指导意义和实用价值。

关 键 词: 风力发电机; 叶片设计; 机组功率; PWM 功率控制器; 风洞试验

中图分类号: TM614 文献标识码: A

引 言

传统的小型风力发电机的控制方式在充分考虑能源利用最大化、提高蓄电池组寿命的情况时往往忽视对风机的保护, 使其可靠性、耐久性和安全性大大低于大型风力发电机, 严重地影响了它的发展及应用范围的扩大。本研究以提高小型风力发电机系统的可靠性及实现系统优化运行为目标, 提出一种小型风力发电机组优化控制策略, 对选定的 300 W/24 V 永磁发电机, 设计出与其匹配的风机叶片, 并针对现有风机功率控制系统中将控制器的设计与叶片电机的匹配特性彼此孤立、分离的现象, 设计出与风力发电机的电机、叶片相互匹配的控制器, 最后通过实验测试, 证明了所提出的风力发电机组优化控制策略的可行性, 力求摸索出能够解决小型风力发电机组功率调控问题的更多、更好的办法, 这对小型风力发电系统的推广和应用都有重要的意义。

1 小型风力发电机组优化控制策略

1.1 风力发电机气动性能参数

由空气动力学可知, 风力机的输入功率为:

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot S \cdot V) \cdot V^2 = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (1)$$

式中: ρ —空气密度; S —风力机叶片迎风扫掠面积; V —进入风力机扫掠面之前空气的风速。

由于通过叶片旋转面的风能并非全部都能被风力机所吸收, 可定义其风能利用系数 C_p :

$$C_p = \frac{\text{风力机输出的机械功率}}{\text{输入叶轮面内的风功率}} = \frac{P}{P_V} \quad (2)$$

所以风力机的输出机械功率为:

$$P = C_p P_V = \frac{\pi}{8} \rho D^2 V^3 C_p \quad (3)$$

式中: D —叶片的直径。

风能利用系数 C_p 是表征风力机效率的重要参数, 它与风速、叶片转速和叶片直径均有关系。为了便于讨论 C_p 的特性, 可定义风力机的另一个重要参数叶尖速比 λ , 即叶片尖端线速度与风速之比为:

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} = \frac{\pi R n}{30V} \quad (4)$$

式中: R —叶片的半径; ω —叶片旋转的角速度; $n = 30/(\pi\omega)$ —叶片的转速。

设计风力机叶片, 除了确定其结构外形尺寸外, 还必须对叶片进行气动性能计算。Wilson 设计法是目前国内外用得最为普遍的方法之一。研究了梢部损失和升阻比对叶片最佳性能的影响, 还研究了叶片在非设计状态下的性能。采用 Wilson 计算模型可以得到反映叶片气动性能的 $C_p - \lambda$ 曲线, 如图 1 所示。

根据 $C_p - \lambda$ 性能曲线和式 (3) 可以进一步导出不同风速下叶片的输出功率—转速曲线, 如图 2 所示。

收稿日期: 2008-11-10; 修订日期: 2009-07-22

作者简介: 包道日娜(1976-), 女(蒙古族), 内蒙古呼和浩特人, 内蒙古工业大学讲师。

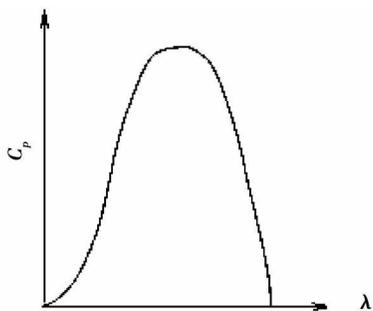


图 1 叶片 Cp-lambda 性能曲线

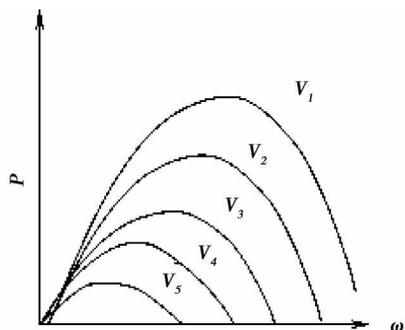


图 2 叶片功率-转速曲线

从图 2 可知,不同风速下风力机的功率-转速曲线为一簇曲线。

1.2 控制方法的理论基础

为了分析风轮与发电机的实际匹配情况,将风轮在各种风速下的功率-转速特性曲线图分为 3 个区域,峰前、峰值和峰后,如图 3 所示。从图中可以看出,各种风速下的最大功率点称为峰值点,各峰值点的连线为峰值线,各风速下峰值点对应的转速为最佳转速 n_{opt} ;风轮转速小于最佳转速 n_{opt} 的部分为峰前,风轮转速大于最佳转速 n_{opt} 的部分为峰后。

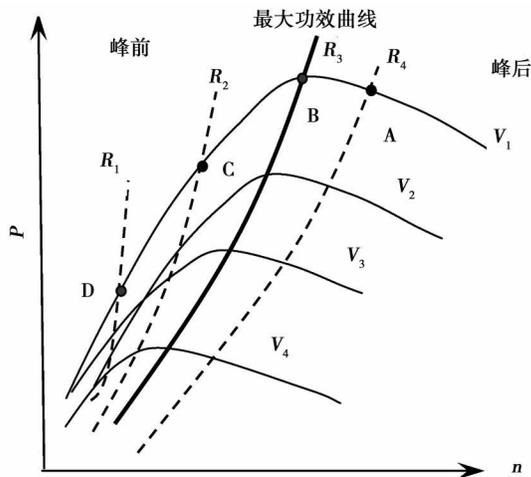


图 3 功率匹配图

曲线 R 代表不同电阻值负载下永磁交流发电机的功率-转速特性曲线, (其中 $R_1 < R_2 < R_3 < R_4$) 曲线代表等风速线 (其中 $V_1 > V_2 > V_3 > V_4$)。

从图 3 上可以看出,当发电机所带的负载阻值不同时,风轮与发电机匹配情况也不同,风力发电机就有不同的输出特性。同一台发电机,负载阻值越小,风轮与发电机的匹配点对应的转速越低。对于匹配在峰前的风力发电机,当风速增加,减小负载电阻值时,根据式(4)尖速比 λ 会减小,又根据 C_p - λ 性能曲线,风能利用系数 C_p 也将降低,最终导致风轮输出机械功率 $P = C_p P_V = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3 C_p$ 减小。从图 3 也可看出,当发电机所带负载值由 R_2 减小到 R_1 时,风轮与发电机的匹配点由 C 点下降到 D 点,风力发电机的输出功率和转速都迅速降低,而且下降速度也很快。所以本文提出,对于工作在峰前区域的风力发电机,当风速大于额定风速时,风机控制系统可以通过减小接入系统的负载电阻值来控制其转速与功率。

对于工作在峰后区域的风力机,如图 3 所示,当发电机所带负载值由 R_4 减小到 R_1 时,风轮与发电机的匹配点由 A 点上升到点 B,然后经过点 C 下降到点 D,风力发电机的转速逐渐降低,输出功率先上升后下降,理论上也可以说达到了限速限载的目的。但在负载电阻减小瞬间由于转速并未立即降低,使得回路内电流明显增大,加之风力发电机的功率有一段上升的过程,致使发电机回路中电流继续增加,如果此时风速也在上升,那么风力发电机将经历一段较长的时间转速和功率才能降下来。而发电机内较大电流如果持续的时间比较长,会造成发电机烧损。所以,如果对此种发电机采用负载阻值减小方式限制其超载超速,可靠性就会比较差。但如果工作在峰后区域的风力机叶片的刚度很高,材料性能很好,那么可以通过增加接入系统负载电阻值的办法来降低风力发电机的输出功率。这种功率控制方法会使电机转速增加,有可能使风机进入机械共振区域,所以本研究认为风轮与发电机匹配在峰后弊大于利。

1.3 PWM 控制原理

对于工作在峰前区域的风力机,通过调节风力发电机负载可以有效地控制风力发电机运行的输出功率和转速,有效避免超载超速,如图 3 所示。控制系统采集风力发电机的输出电流、转速等参数,采用 PWM 控制方式可以动态的改变等效负载的大小。

采样控制理论中有一个重要结论:冲量相等而

形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时, 其效果基本相同。PWM 控制技术就是以该结论为理论基础, 对半导体开关器件的导通和关断进行控制, 使输出端得到一系列幅值相等而宽度不相等的脉冲, 用这些脉冲来等效模拟控制。控制系统可以实时检测风力发电机输出电流, 把设定的输出电流与实际采样到的输出电流进行比较, 通过改变 PWM 控制脉冲的占空比, 等效地改变风力发电机负载大小。若实际电流偏小则增大 PWM 控制脉冲的占空比, 相当于增大了负载电阻; 若实际电流偏大则减小 PWM 控制脉冲的占空比, 相当于减小了负载电阻。

当需要发电机的功率由点 C 降低到点 D, 则减小 PWM 控制脉冲的占空比, 相当于减小了负载电阻; 当需要发电机的功率由点 D 升高到点 C, 则增大 PWM 控制脉冲的占空比, 相当于增大了负载电阻, 如图 3 所示。如此则能把发电机的输出功率控制在点 C 到点 D 之间。

2 300 W/24 V 峰前匹配风力发电系统设计

2.1 根据发电机输出特性设计 300 W 风机叶片

2.1.1 发电机输出特性的测试

永磁交流发电机在负载不同时其输出特性也不同, 所测定的 300 W/24 V 永磁交流发电机负载电阻分别为 3、6、8 Ω 时的功率—转速的特性曲线, 如图 4 所示。

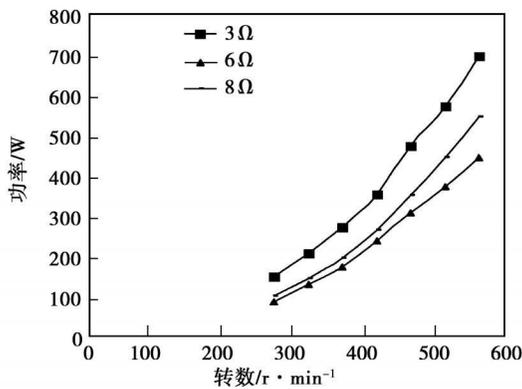


图 4 发电机输出特性曲线

2.1.2 根据发电机输出特性设计 300 W 风机叶片

使用概念清晰、逻辑性强和设计精度较高的 Wilson 叶片设计方法, 应用 MATLAB 语言, 计算叶片各截面弦长和安装角, 预测扭矩和风能利用系数, 初步计算出叶片与电机在不同风速下的功率—转速的匹配曲线。根据此匹配曲线图, 再对最初计算的叶

片外型参数进行调整, 经过一系列的外型设计—气动设计—外型调整—气动调整的反复过程, 最终设计出与发电机匹配在峰前的叶片, 外型参数如表 1 所示。

表 1 风力发电机叶片外形参数

截面	截面到叶尖距/mm	弦长/mm	扭角/(°)
1	680	140	24
2	595	135	17
3	510	123	13
4	425	104	6.8
5	340	90	4.7
6	255	76	3.4
7	170	61	2.3
8	85	44	1.1
9	0	24	-0.8

应用 MATLAB 语言得出的 300 W 叶片与电机匹配特性曲线如图 5 所示。

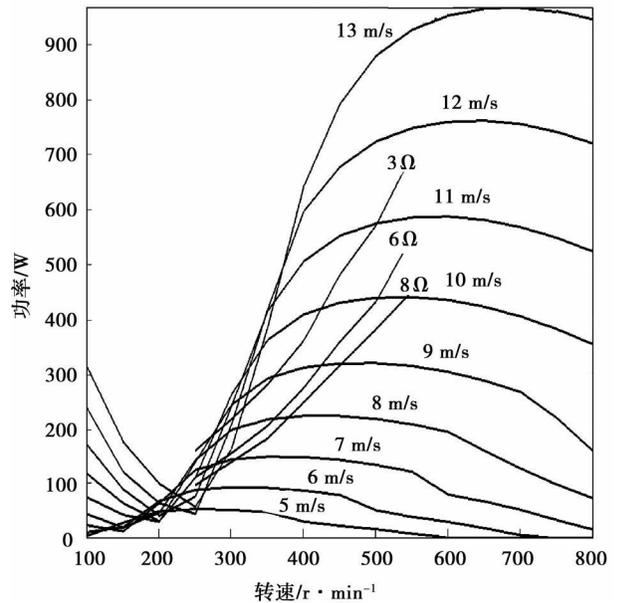


图 5 300 W 叶片与电机匹配特性曲线

2.2 PWM 型风力发电机控制器的设计

小型风力发电机组控制器主回路如图 6 所示, 采用降压方式进行控制。

图 6 中三相风机输入经三相不控整流桥形成直流 BUS, QXH 是泄荷控制开关, RXH 是泄荷电阻。QCD 为控制充电的开关。D 防止在泄荷时对电池放电。控制电路以 Atmega 8 单片机为核心, 附加必要的采样和驱动电路。QXH 和 QCD 选用 MOSFET,

MOSFET 具有开关迅速、开通阻抗低、性价比高等特色。

携带所设计的控制系统的情况下的输出功率随风速变化特性曲线,如图 8 的曲线 2 所示。

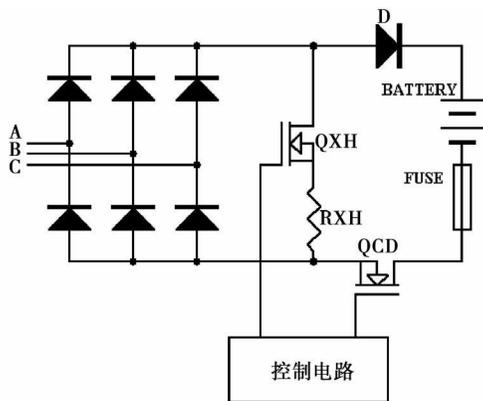


图 6 小型风力发电机组控制器主回路图

本控制器设计了比较完善的保护功能:可以承受电池反接保护;过充电保护;过放电保护;风机过功率保护。系统实时检测风力发电机输出电流和输出电压,计算出输出功率。把设定的输出功率与实际采样到的输出功率进行比较,通过智能控制,实时改变 PWM 控制脉冲的占空比,等效改变风力发电机负载大小。

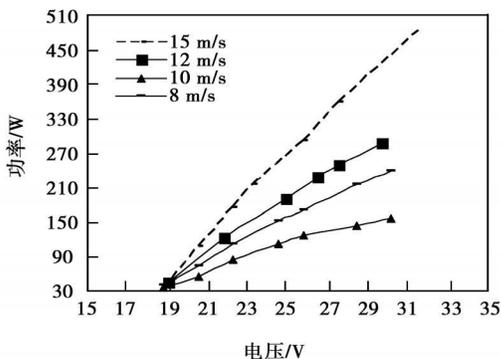


图 7 样机功率随系统电压的变化曲线

3 实验测试

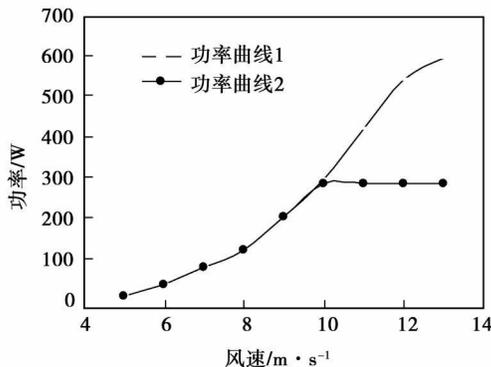


图 8 风机输出特性图

对所设计的 300 W/24 V 峰前匹配风力发电系统进行了风洞测试,以验证所提出的小型风力发电系统优化控制策略的可行性。本次实验所用的风洞全长 24.6 m,洞体部分长 20.8 m,中心线高 1.7 m。测试设备采用了软硬件组态的虚拟仪器,可以实现对被测风力发电机实时实地的数据采集监控以及数据分析处理功能负载两端的电压、流过负载的电流以及风速、大气温度、大气压力等数据均由虚拟仪器测试系统自动采集,每隔 1 min 记录一个数据。

从图 8 可以看出,随着风速的增加,如果对实验样机不加任何控制,其功率会一直增加,但在高风速段,对匹配在峰前的风力发电机进行减小负载电阻值的功率控制,可以安全地将其功率控制在额定值附近。

在风洞实验中测试了样机在 8、10、12 和 15 m/s 等风速一定条件下,功率随系统电压的变化规律,如图 7 所示。

4 结 论

当降低系统电压(也就是减小风机所带负载电阻值)时,风机输出功率会一直下降,在此过程中并没有出现功率增加的现象,也就充分证明了所设计的实验样机,其叶片与电机匹配在峰前,在高风速段或在风速达到切除风速时,对样机进行减小负载电阻值的功率控制是安全的。

(1) 根据 300 W/24 V 永磁发电机输出特性,使用 Wilson 叶片设计方法,应用 MATLAB 语言设计了 300 W 风机叶片。本研究将叶片设计与发电机的输出特性紧密结合起来,避免了单纯盲目地追求叶片的优化设计,而忽略了整机性能的传统设计思路,将叶片的优化设计放在考虑整机总体性能的基础上。

在系统电压为 28 V、不加控制器的情况下,测试了样机在不同风速下的输出功率,如图 8 的功率曲线 1 所示。当风速大于 10 m/s 时,测试了样机在

(2) 针对现有风机控制系统中将控制器的设计与叶片、电机的匹配特性彼此孤立、分离的现象,设
(下转第 811 页)

表5 模拟氦气轮机工作条件密封泄漏测量结果

密封部位	名义压力/MPa		实际压力/MPa		泄漏/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$		
	封前	封后	封前	封后	1	2	平均
低压出口/低压进口	1.018	0.653	1.018 8	0.693 6	3.304 2	3.267 8	3.286 0
高压出口/高压进口	1.567	1.0	1.567 4	0.967 1	10.835 9	10.265 0	10.550 5
高压出口/涡轮出口	1.567	0.677	1.566 4	0.655 7	13.241 3	12.901 1	13.071 2

5 结 论

(1) 试验表明,组合活塞环密封具有良好的密封效果。在氦气轮机的低压压气机出口/低压压气机进口、高压压气机出口/高压压气机进口以及高压压气机出口/涡轮出口3处密封的泄漏分别占设计流量的0.0322%、0.1035%、0.1282%。

(2) 氦气的密封泄漏明显大于空气的泄漏,封前压力越高,氦气的泄漏越明显,当封前压力为0.6~1.0 MPa时,氦气的泄漏约为空气泄漏的2倍;当封前压力较低时(0.1~0.2 MPa),氦气与空气的泄漏比较接近。

(3) 模拟氦气轮机工作条件下组合弹性环密封氦气泄漏的测量结果,可作为机组性能和氦气输运

系统设计的依据。

参考文献:

- [1] 陈莹. 闭式循环氦气压气机气动设计方法的研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2007.
- [2] 朱荣凯, 张健, 邹积国, 等. 轴流压气机氦气和空气工质相似问题研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(6): 595-600.
- [3] MUTO Y. Design study of helium turbine for the 300 MW HTGR-GT power plant //The International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition[C]. Munich, 2000. 8-11.
- [4] 彭宝成, 朱玉峰. 弹力环对活塞环密封及寿命影响的研究[J]. 润滑与密封, 2006(8): 97-98.
- [5] 王树青, 吴国栋. 活塞环动力学数值模拟计算及试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2008(1): 14-19.
- [6] 李椿, 章立源, 钱尚武. 热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

(编辑 何静芳)

(上接第806页)

计出与风力发电机的电机、叶片相互匹配的控制器。本控制器设计了比较完善的保护功能: 可以承受电池反接保护; 过充电保护、过放电保护; 风机过功率保护。

(3) 对所设计的300 W/24 V峰前匹配风力发电系统的风洞测试结果表明: 在高速风段, 对匹配在峰前的风力发电机进行减小负载电阻值的功率控制, 可以安全地将其功率控制在额定值附近。

参考文献:

- [1] 陈云程, 叶枝全, 朱程明. 风力机设计及应用[M]. 上海: 上海科技出版社, 1994.
- [2] MILLER A, MULJADI E, ZINGER D S. A variable speed wind turbine power control[J]. Energy Conversion, IEEE Transaction, 1997, 12(2): 181-186.

(编辑 何静芳)

the ammonia/nitrogen ratio is bigger than 1.0, the growth margin of the NO_x removal rate will decrease with an increase of the above ratio, but the growth margin of the ammonia leakage rate will increase. The temperature window and the NO_x removal rate obtained from the simulation by using software Chemkin 4.1 are basically in agreement with the test results. Through a detailed analysis of the important elements of the mechanism, the main reaction routes at various temperatures were identified. **Key words:** selective non-catalytic reduction (SNCR) denitrification, mixing, gas-state ammonia, simulation conducted by using Chemkin

小型风力发电机组优化控制策略与实验研究= **Optimized Control Tactics and Experimental Study of Small-sized Wind Power Generator Units**[刊, 汉]/BAO Dao-ri-na, LIU Zhi-zhang, TIAN Rui (College of Energy Source and Power Engineering, Inner Mongolia Polytechnic University, Huhhot, China, Post Code: 010051), ZHANG Wan-xiang (Baoding Tianwei Wind Power Science and Technology Co. Ltd., Baoding, China, Post Code: 071051)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 803 ~ 806, 811

Presented were tactics for optimizing and controlling the power of a small-sized wind turbine generator unit. In the light of a 300 W/24 V permanent magnetic power generator being chosen and by using Wilson blades, a calculation model was devised, and blades for 300 W wind turbines were designed by using MATLAB language. From the phenomenon that the design of a controller is isolated and separated from the matching characteristics of blades and generators in the existing control systems for wind turbines, designed was a controller to mutually match the generator and blades of the wind turbine generator. During the wind tunnel tests, the variation law of the prototype power output with the system voltage was tested under the condition of a constant wind speed of 8, 10, 12 and 15 m/s etc., respectively. When the system voltage decreases, the wind turbine power output will all along decrease. In this process, no phenomenon of power output increase emerges. This is fully verified by the wind turbine generator operating in the pre-peak zone. When the wind speed is greater than the rated one, the control system can control the power output of the wind turbine generator by reducing the resistance value of the load of the connect-in system. The foregoing may offer definite guidance and is of practical value for studying the controllability, reliability and durability of a small-sized wind power generation system. **Key words:** wind turbine generator, blade design, unit power, PWM (pulse width modulation) power controller

氦气透平压气机组合弹性环密封试验研究= **Experimental Study of a Combined Elastic Ring Seal in a Helium Turbine Compressor**[刊, 汉]/WANG Xu, XU Li-hua, ZHONG A-xia (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), SHAN Shi-kui (Production Department, Harbin Electric Machinery Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150040)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 807 ~ 811

As an intercooling recuperator (ICR) closed cycle is adopted for a helium turbine compressor, a variety of chambers with different pressures are formed between the seals at the HP/LP compressor and at the turbine inlet/outlet on one side and the outer-layer pressure shell on the other. A kind of combination elastic ring seal is adopted in various chambers at different temperatures and pressures. To verify the sealing effectiveness of the combination elastic rings, a seal test rig and test pieces fully identical to the combination elastic rings used in the turbine unit were designed. Moreover, on the seal test stand, a contrast experiment was performed by using helium and air working medium respectively. The test results show that the combination elastic rings have a good sealing effectiveness. The leakage rates from the seals at three locations, namely, LP compressor outlet/inlet, HP compressor outlet/inlet and HP compressor outlet/turbine outlet, account for 0.0322%, 0.1035% and 0.1282% of the design flow rate respectively. When the pressure before the seal ranges from 0.6 to 1.0 MPa, the leakage rate of helium is about 2 times that of air as compared with the air medium. When the pressure before the seal is relatively low (0.1 to 0.2 MPa), the leakage rate of helium is comparatively close to that of air. **Key words:** helium turbine compressor, elastic ring seal, high temperature gas-cooled reactor, helium/air working medium, leakage rate