文章编号：1008-8857(2011)01-0013-07

1 000 MW 级核电机组自并励静止励磁系统的性能参数探讨

石书华，赵正宇

（上海电气电站设备有限公司 上海发电机厂，上海 200240）

摘　要：上海发电机厂引进的西门子 1 000 MW 级核电机组励磁方式为无刷励磁。由于无刷励磁机及其整流盘的容量有限，励磁系统的强励能力受到限制，有时不能满足国内电网对于机组的强励要求。因而具有高强励顶值和电压上升率的自并励静止励磁系统成为 1 000 MW 级核电机组励磁方式的另一选择。就上海发电机厂的 1 000 MW 级核电机组静止励磁系统的主要部件，包括励磁变压器、可控硅整流装置、灭磁及过电压保护装置及自动电压调节器的一些性能参数作了分析探讨，为今后静止励磁系统的具体设计打下基础。

关键词：核电汽轮发电机；励磁变压器；自动电压调节器；可控硅整流；灭磁及过电压保护

中图分类号：TM311　　文献标识码：A

上海发电机厂引进的西门子 1 000 MW 级核电机组励磁方式为无刷励磁。无刷励磁机由于其结构的特殊性，其容量设计受到限制，机组的强励电压较低；而另一方面，国内电网对于大型机组的强励能力要求较高。所以设计静止励磁系统以满足市场的需求。

对于核电而言，为确保电厂运行的安全性、可靠性和高可用率，要求在汽轮发电机组设计和制造中采取一切合理措施以尽量减少由汽轮发电机故障而导致跳机的次数；部件和系统设置足够的冗余以确保机组能安全可靠地运行。这就要求在进行励磁系统的设计时，采取更充足的冗余度，以满足核电对于高可靠性的要求。核电对于柜内电线、电缆应符合核电站用电线、电缆低烟、无卤、阻燃的统一要求。

1　自并励静止励磁系统概述

自并励静止励磁系统主要由励磁变压器、可控硅整流装置、灭磁及过电压保护装置、自动电压调节器等装置组成，如图 1 所示。

发电机的励磁电源来自发电机机端，通过接在发电机出口的励磁变压器，再经过可控硅整流桥整流后供给发电机励磁绕组，而励磁电流的大小则由自动电压调节器(AVR)来控制，灭磁及过电压保护则使发电机励磁绕组免受过电压的伤害。

收稿日期：2010-10-15

作者简介：石书华(1966-)，女(壮)，高级工程师，13512185797@139.com

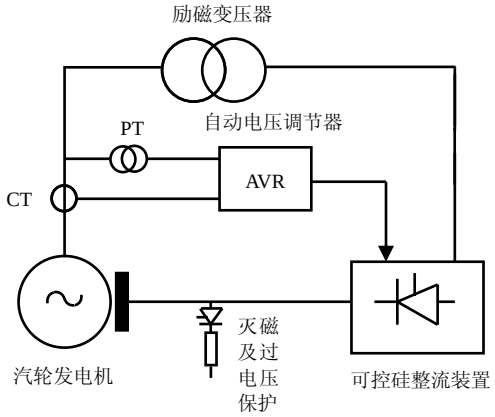

图 1 自并励静止励磁系统原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of the static excitation system

2 发电机相关技术参数

自并励静止励磁系统的设计将针对 QFSN−1100−4/24 型汽轮发电机的参数，相关参数如表 1。

表 1 发电机参数

Table 1 Generator Data

名 称	参 数
发电机型号	QFSN−1100−4/24
发电机额定容量/MVA	1 222
发电机额定功率因数	0.9
发电机额定定子电压 U_N/kV	24
发电机额定定子电流 I_N/A	29 402
发电机额定励磁电压 U_{fd}/V	504
发电机额定励磁电流 I_{fd}/A	7 829
发电机空载励磁电流 I_{f0}/A	2 874
发电机磁场绕组电阻(75℃)/Ω	0.134

3 励磁变压器

励磁变压器的一次侧直接与发电机出口相连，二次侧输出至可控硅整流装置，为静止励磁系统提供电源。

3.1 设计的主要技术规范

(1) 励磁变压器设计由三个单相环氧浇注干式整流变压器组成。

(2) 在规定的环境温度范围内能保证变压器额定容量输出，并允许 10%过负荷长期连续运行。在 2 倍额定励磁电流(2×7 829 A)下运行时间不小于 10 s。

(3) 变压器冷却方式为自然冷却，且考虑在封闭的变压器柜内全容量运行时，无需强迫风冷仍能保证各部位温升在规定的 B 级温升范围内。变压器的防护等级为 IP21。

3.2 励磁变压器容量计算

（1）励磁变压器二次侧线电压 U_{L}（V）

$$U_{\mathrm{L}}=\frac{K_{\mathrm{c}}U_{\mathrm{fd}}+3/\pi k_{\mathrm{c}}\times I_{\mathrm{fd}}X_{\mathrm{e}}+\sum\Delta U}{1.35\times\cos\alpha_{\min}} \tag{1}$$

式中，K_{c} 为强励电压倍数，发电机额定电压 100%时取 2.5 倍；X_{e} 为换弧电抗；$\sum\Delta U$ 为滑环和线路等压降；$\alpha_{\min}$ 为可控硅最小触发角，取 15°。

考虑换弧压降、线路压降及滑环压降等为二次侧电压的 10%，则式(1)简化为

$$U_{\mathrm{L}}=\frac{K_{\mathrm{c}}U_{\mathrm{fd}}}{1.35\times\cos\alpha_{\min}}\times1.1 \tag{2}$$

（2）励磁变压器二次侧电流 I_{L}（A）

$$I_{\mathrm{L}}=\frac{1.1\,I_{\mathrm{fd}}}{K_{\mathrm{L}}} \tag{3}$$

式中，系数 1.1 为考虑发电机低功率因素运行时的富裕系数；K_{L} 为整流系数，取 1.22。

（3）励磁变压器容量 S（kVA）

$$S=1.732\times10^{-3}\times I_{\mathrm{L}}\times U_{\mathrm{L}} \tag{4}$$

对于 1 100 MW 发电机，励磁变压器的二次侧线电压 U_{L} 为 1 062.9 V、二次侧电流 I_{L} 为 7 058.9 A、容量 S 为 12 995 kVA。考虑到励磁变压器容量大，且放置于室内，故选用 3 个单相、单个容量不小于 4 332 kVA 的环氧浇注干式变压器，其变比为 24 kV∶1 062.9 V

4 可控硅整流装置

可控硅整流装置的交流输入来自励磁变压器的低压侧，其直流输出至发电机磁场绕组，作为发电机的励磁电流。可控硅整流装置输出电流的大小则由数字式自动电压调节器(DAVR)控制。

4.1 可控硅整流装置设计选型要求

（1）可控硅整流装置能连续提供 1.1 倍额定励磁电流，并能提供短时(10 s)强励顶值电流。

（2）可控硅的重复峰值反向电压以及重复峰值断开电压应不低于励磁变压器次级峰值电压的 2.7 倍。

（3）根据系统对冗余度的要求，可控硅整流器的配置至少为 n−1 型配置，即 n 个可控硅整流桥并联，因故障退出一个可控硅整流桥时仍能满足 1.1 倍励磁电流和强励要求。

4.2 可控硅元件参数设计

（1）元件额定电流 I(A)的选择

额定电流按发电机运行的强励工况选择，每桥臂元件额定正向平均电流 I 参照下式选择

$$I=\frac{K_{\mathrm{Y}}\times K_{I}\times I_{\mathrm{fd}}}{3} \tag{5}$$

式中，K_{Y} 为电流裕度系数，整流桥考虑采用 n−1 型配置，取 K_{Y}=2；K_{I} 为强励电流倍数，考虑到整流元件的过载能力，取 1.3~1.5；取 K_{Y}＝2，K_{I}＝1.5。

对于 1 100 MW 发电机，额定电流 I 为 7 829 A。若采用 2 000 A 额定输出的整流元件，整流桥间的均流系数为 0.85。每桥臂至少有 5 个元件并联运行。考虑 n−1 型配置，可选用 6 个整流桥。

需要说明的是，随着数字均流技术的应用，整流桥间的均流系统已可达 0.95，但考虑到核电对于设备有更高的要求，故仍按国标中规定的均流系数为 0.85 的基本要求，进行整流桥的设计选型，以保证更充足的冗余，进一步提高励磁系统的可靠性。

（2）元件额定电压 U_{RRM}(V)的选择

可控硅的额定重复反向峰值电压 U_{RRM} 可按下式计算

$$U_{RRM}=K_1\times K_2\times K_3\times U_{ARM} \tag{6}$$

式中，K_1 为电压裕度系数，可取 K_1=1.5；K_2 为过电压冲击系数，由过电压保护装置的性能定，可取 K_2=1.3~1.6；K_3 为电源电压升高系数，可取 K_3=1.1；U_{ARM} 为桥臂反向工作电压最大瞬时值，U_{ARM}＝1.414 U_L。

对于 1 100 MW 发电机，U_{RRM} 为 3 968 V。如选用 ABB 公司的 5STP 34Q5000 型可控硅元件，U_{RRM}＝4 200 V，此时的电压裕度系数 K_1 为 1.588。每桥臂用一只元件即可，无需元件串联。

5 灭磁及过电压保护

对于发电机的灭磁，要求灭磁装置可靠动作，同时要求灭磁时间应尽量短。为此，采用直流灭磁开关灭磁方式，即直流灭磁断路器+线性电阻灭磁方案，如图 2。

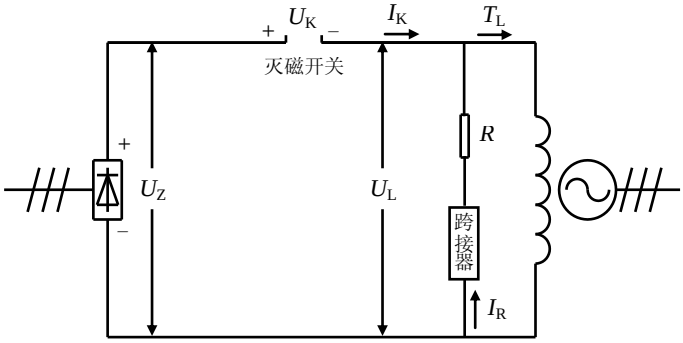

图 2 线性电阻灭磁系统

Fig. 2 Diagram of the de-excitation system

灭磁直流断路器(灭磁开关)采用单极，与发电机磁场绕组串联；另由并联连接的正、反向晶闸管整流器组成的晶闸管跨接器与灭磁电阻 R 相接后并联接在励磁绕组两端。

当收到来自发电机保护或者来自内部的励磁保护跳闸命令，在断开直流断路器的同时，由跨接器的触发单元触发晶闸管以接通灭磁电阻灭磁。即使跨接器的触发单元故障，由直流断路器断开时所产生的过电压亦能足以使跨接器导通以接通灭磁电阻灭磁。

5.1 灭磁电阻的选择

对于灭磁电阻，不管是线性或非线性电阻都属于外加，仅对励磁电流纵轴磁通起灭磁作用，对阻尼或横轴磁通不起作用。所以对于阻尼回路时间常数与发电机时间常数 T'_{do} 处于同一数量级的汽轮发电机而言，不必过分追求励磁电流的衰减速度，以简单、可靠为主，常值电阻就是一种好的选择。

采用线性电阻灭磁，灭磁时间与灭磁回路的阻值成反比，灭磁电阻阻值选得越大，灭磁速度也越快，但此时转子励磁绕组所承受的过电压倍数也越大。取灭磁电阻为励磁绕组热态电

阻值的 2~3 倍，这样在 2 倍额定励磁电流的强励状态下灭磁时，励磁绕组将承受 4~6 倍额定电压值，低于励磁绕组的绝缘耐压水平。

线性电阻作为灭磁电阻，其负载电流的幅值较大，但在几秒内就完成灭磁，载流时间较短，电阻散热可忽略不计，根据热平衡方程式确定电阻的温升不超过允许值，并具有一定的安全裕度。

5.2　灭磁开关的选择

按图 2 所标示的电压极性：$U_K=U_L+U_Z$。按最严重工况考虑，必须保证

$$U_{KM} \geq U_{LM} + U_{ZM} \tag{7}$$

式中，U_{KM} 为磁场断路器保证能达到的最大开断弧压；U_{LM} 为最大(强励)励磁电流 I_{LM} 流过 R 时，其两端最高残压；U_{ZM} 为最大(强励)电源电压峰值。

要达到正确良好的换流必须满足式(7)的条件，U_K 能保证达到的最大值 U_{KM} 是磁场断路器的重要技术参数之一。U_L 的最大值 $U_{LM}=I_{LM}\times R$，如 R 的阻值过大，使 $U_{LM}>U_{KM}-U_Z$，则式(7)不能成立，这时励磁电流 I_{LM} 不能全部进入 R 中衰耗，能进入 R 的最大电流 $I_{RM}=(U_{KM}-U_Z)/R<I_{LM}$，其余部分将在灭磁开关中续流燃弧，这就大大延长了换流时间，可使灭磁开关烧损。

由此可见，式(7)是保证灭磁开关正确换流的必要条件，即灭磁开关保证能达到的最大开断电压必须大于电源电压最大(强励时)峰值与灭磁电阻两端最大压降(强励电流通过时)之和。

$U_{ZM}=1.414\ U_L=1.414\times1\ 062.9=1\ 503$ V。若灭磁电阻取励磁绕组热态电阻值的 2 倍，强励磁电流为 2 倍额定励磁电流时，$U_{LM}=4\ 196$ V，则 $U_{KM} \geq U_{LM}+U_{ZM}=5\ 699$ V，即磁场断路器的最大开断弧压应不小于 5 699 V

目前，所能选择的灭磁开关，最大开断弧压为 3 100 V 左右，完全不能满足要求。若要选用成熟可靠的灭磁开关，则要降低灭磁电阻阻值。

按最大开断弧压为 3 100 V，即 $U'_{KM}=3\ 100$ V，$U'_{ZM}=U_{ZM}=1\ 503$ V，则 $U'_{LM}=U'_{KM}-U'_{ZM}=1\ 597$ V。

此时所能选取的灭磁电阻值为：$R'=1\ 597/(2\times7\ 829)=0.102\ \Omega$，仅为励磁绕组热态电阻值 0.134 Ω的 0.76 倍。

6　数字式自动电压调节器(DAVR)

自动励磁调节装置是发电机重要的辅助设备之一，对发电机稳定和安全运行起着重要的作用。目前，应用中占主导地位的是数字式自动电压调节器(DAVR)。

DAVR 的主要功能有维持发电机端电压恒定，合理分配发电机间的无功负荷，提高电力系统的输送功能极限等。

DAVR 控制模式主要有恒机端电压控制、恒转子电流控制；另有恒功率因数控制、恒无功控制及恒定子电流控制等供选择。

6.1　自动励磁调节装置辅助功能

自动励磁调节装置的辅助功能包括：电力系统稳定器(PSS)；最低励磁(欠励磁)限制；过励磁瞬时限制；过励磁反时限限制；电压互感器熔丝熔断保护；伏/赫过激磁限制；过励磁保

护；励磁机时间常数补偿；故障自动诊断、故障记忆、故障录波、试验录波；通讯(包括远方通讯)等。

6.2 DAVR 的一般构成和要求

6.2.1 构成

DAVR 采用以微处理器为核心的硬件及功率部分组成硬件系统，量测及运算由软件进行数字控制。设备主要由信号采样单元、计算机或微处理器单元、执行单元和内外接口等组成。

为提高可行性，目前，国内的大中型汽轮发电机组的静止励磁系统的 DAVR 均采用双通道结构，如图 3 所示。即 DAVR 由结构、功能等完全相同、硬件上完全独立的两套自动调节通道组成。

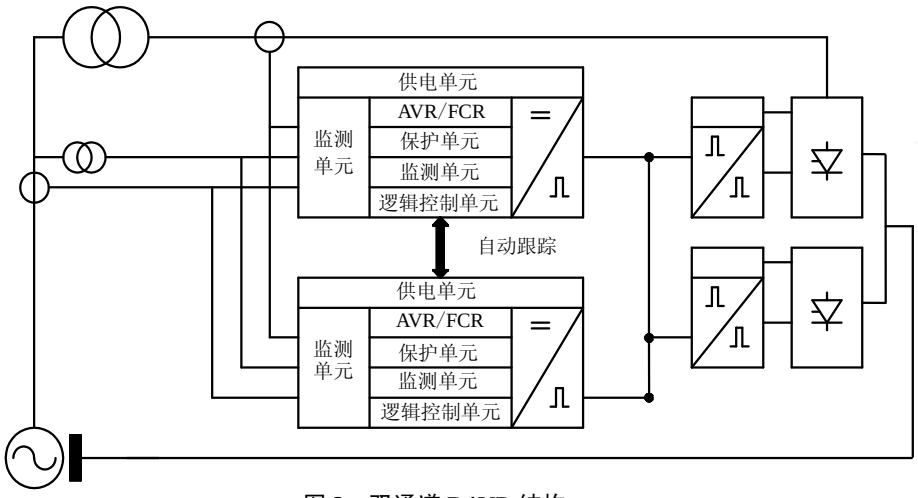

图 3 双通道 DAVR 结构

Fig. 3 DAVR with two independent auto channels

6.2.2 要求

DAVR 要求具有高可靠性、高稳定性，具体体现在：

(1) 硬件方面

① 双重化或多重化，各通道具有相对的独立性。除非全系统异常，否则其功能作用不会终止。

② DAVR 内部采用总线结构，如工业控制标准总线等。

③ 按“宁用软件不用硬件”的原则，做到硬件最少，从而将由于硬件可能引发的故障降至最低。

(2) 软件方面

① 数字式运算回路的特性经久无变化，保持其稳定性、可靠性。

② 软件采用模块化设计，确保其可靠性，可测试性和易维护性。

③ 建立完备的软件文档，包括程序的设计、程序流程图、程序说明及实现原理等。

(3) 在功能方面

① 多种运行方式可选。除恒电压运行方式和恒励磁电流运行方式外，还有恒无功、恒 $\cos\phi$和恒定子电流运行方式供选择。

② 无功电流补偿正负及大小可任选。

③ 智能型调试手段。
④ 完善的附加功能。
⑤ 完善的限制报警功能。
⑥ 完善的保护报警功能。
⑦ 双通道互跟踪，平稳切换。
⑧ 软件防干扰。如软件滤波，程序飞出自复归等。
⑨ 故障自诊断，故障记录和录波。

6.3 DAVR 的主要性能

DAVR 须保证发电机达到如下性能指标：

(1) 自动调节范围：发电机空载额定电压的 70%~110%。
(2) 手动调节范围：空载磁场电流的 20%~额定磁场电流的 110%。
(3) 调节精度：±0.5%。
(4) 端电压调差率：±15%连续可调。
(5) 端电压静差率：±1%。

七　结语

本文对 1 000 MW 级核电机组静止励磁系统的各部件的主要性能参数进行了一些分析、探讨和计算，为今后 1 000 MW 级核电机组采用静止励磁系统方案打下基础。

参考文献:

[1] 李基成. **现代同步发电机励磁系统设计及应用(第二版)**[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
[2] 汪　耕, 李希明. **大型汽轮发电机设计、制造与运行**[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.

On the performance parameters of the static excitation system for 1 000 MW nuclear generators

SHI Shu-hua, ZHAO Zheng-yu

(Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd., Shanghai Generator Works, Shanghai 200240, China)

Abstract: The 1 000 MW nuclear generator, introduced by Shanghai Generator Works from Siemens AG, adopts a brushless excitation system. The field forcing of the excitation system for the generator is limited due to the limited capacities of the main exciter and rectifier and sometimes cannot meet the requirements of the national grid. The static self and shunt excitation system has a high field forcing factor and a high voltage rise rate, and thus it can be selected as the excitation system for 1 000 MW nuclear generators. In this paper, performance parameters of the main devices for the 1 000 MW nuclear generator excitation system were analyzed, inclusive of the excitation transformer, thyristor rectifier bridge, de-excitation and over-voltage protection, and automatic voltage regulation.

Key Words: nuclear generator; excitation transformer; AVR; thyristor rectifier; de-excitation and over-voltage protection