

秦山第二核电厂 650 MW 发电机波动原因分析及解决措施

王建成

(核电秦山联营有限公司, 浙江 海盐 314300)

摘要: 秦山第二核电厂 2 台 650 MW 核电机组长期高功率运行, 因电网瞬间波动引起的厂用电系统闪发报警, 威胁着核电机组的安全运行。通过仿真试验建模、优化励磁调节器的参数后, 将电力系统稳定器 PSS 投入运行, 历经机组启动过程中 AVR 性能试验考核、500 kV 系统实际单相短路故障考核, 机组的阻尼特性及稳定裕度明显增强。

关键词: 电力系统; 核电机组; 电力系统稳定器

中图分类号: TM31 **文献标识码:** B **文章编号:** 1003-4897(2004)19-0059-05

1 发电机波动原因分析

1.1 电网与机组结合的暂态分析

所有挂在电网上的机组出力与电力系统负荷需求的拉动力是平衡的, 维持这种动态平衡靠的是系统的网络阻抗。

当电力系统瞬间发生跳闸、相间接地、短路、潮流突变(无论是电气远距离/近距离), 发电机的外部阻抗会忽然发生变化。此时, 运行中的发电机磁场由于惯性作用还瞬时来不及跟随变化, 势必引起发

电机的电势有一个突变量, 随之机组恢复稳态的是依赖于 AVR 的自动励磁调节性能, 瞬时对发电机电势、功角、机端电压进行了重新分配, 平衡了电磁暂态的过渡过程, 实际上也是电网波动与机组的阻尼作用逐步衰减的过程, 严重的致使核安全级的厂用母线上出现闪光报警, 困扰着主控人员的视线。

1.2 发电机区内外瞬时/永久性故障对核电机组群的扰动分析

分析见表 1。

表 1 发电机区内外瞬时/永久性故障对核电机组群的扰动分析

Tab. 1 Analysis of interfere of generator groups with inside and outside instantaneous or permanent fault

发电机区外运行状态	假设电气保护动作行为	对机组影响深度	说明
秦山 500 kV 联合开关母线侧外线路单相接地	重合闸补救成功	电气参数有突变, 30 ~ 40 个周波内自恢复, 机组强励、瞬间失稳	所有挂在网上的机组从理论上分析是应该能承受 500 kV 线路故障、单跳单相的非全相运行小于 1 s 的冲击, 而且很难避免
秦山 500 kV 联合开关线路侧外近三相短路	线路保护拒动	由于国产化核电机组轴系较长, 机组在电磁转换过程中易诱发轴系振动突变, 转子健康潜移默化	500 kV 系统潮流突变, 机组瞬间失稳
秦山二、三厂四台机运行, 忽然一台机跳闸	励磁机有跟随补偿响应	对机组有扰动、瞬间失稳, 50 ~ 70 个周波内自恢复	500 kV 系统潮流突变, 机组瞬间失稳
发电机出线侧三相短路	发电机/变压器组主后备保护拒动	此时全部仰仗热工保护有所作为、主控及时感应紧急打闸、AVR 手动灭磁跳开发电机断路器	停机停堆、恶性事故、机组健康凶多吉少
500 kV 变压器出线侧瞬间故障	500 kV 短引线保护动作, 分别跳开 500 kV 边开关、中开关	500 kV 保护跳闸瞬间, 汽机主调门控制回路响应不及, 汽缸、转子金属受到急剧冷却, 致使其中产生极大的热应力, 直接诱发机组扭矩振动、汽-发-励端大轴极易扭伤、转子匝间短路有累积效应	机组百分之百甩负荷、机组转速明显升高、opc 超速保护动作、停机停堆
500 kV 线路遭受雷击、相间短路、接地	重合闸补救失败, 全线速动跳开两侧开关	1 s 之内机组受到二次扰动, 700 ms 之内线路非全相运行, 对机组运行的影响深度与故障点的电气距离有关, 并与故障瞬间不平衡电流即零序电流大小有关	此现象防不胜防。秦山的发电机保护、安全自动装置已经历此类事件的严峻考验, 分别不误动、不拒动

备注 秦山 500 kV 联合开关站 4 个完整串, 其秦山二、三厂各两台机组以发电机/变压器/线路串的接线方式与华东 500 kV 系统并网。

1.3 核电机组的阻尼特性分析

从秦山第二核电厂 650 MW 发电机日常运行曲线可以看出,有功在 650 ~ 670 MW、无功在滞后 200 MW——超前 61.28 MW 运行,根据发电机的矢量方程,可以计算出发电机的运行功角,表 2 为一组计算数据。

根据表 2 可以看出,秦山二厂发电机运行时负荷大、无功较小、功率角比较大,根据 phillips - Hefron 单机 - 无穷大系统框图计算可知道:当电网瞬间波动引起发电机扰动时,AVR 产生负阻尼转矩,振荡持续时间较长。

自从核电机组运行以来,多次发生波动,情况如表 3 所示。

表 2 发电机功率与功角关系

Tab. 2 Relationship between generator power and its angle

有功功率 / MW	无功功率 / MVar	电压电流相角 $\phi / (^\circ)$	功率因数	功率角 $\delta / (^\circ)$
670.00	269.00	21.88	0.9280	42.95
670.00	100.00	8.49	0.9890	50.59
670.00	0.00	0.00	1.0000	56.08
670.00	- 55.38	4.73	0.9966	59.46
650.00	314.30	25.81	0.9003	40.36
650.00	100.00	8.75	0.9884	49.73
650.00	0.00	0.00	1.0000	55.27
650.00	- 61.28	5.39	0.9956	59.08

表 3 电网瞬间波动与核电机组低频振荡关系

Tab. 3 Relationship between instant fluctuation of power system and low-frequency oscillation of nuclear power units

序号	时间	基本情况描述	P_1	P_2	T	阻尼比	振荡频率/Hz
1	2003.08.10 14:55	瓶窑—武南线路重合闸成功	64.27	40	0.87	0.08	1.15
2	2003.08.10 15:02	繁昌—瓶窑线路重合闸成功, 15:03 繁昌—瓶窑线路跳闸	123	108.8	0.9	0.02	1.11
3	2003.08.10 15:29	没有查明原因	33	22	0.96	0.06	1.04

如图 1 所示,秦山二厂机组对电网操作或故障反应非常敏感,弱阻尼使低频功率振荡持续时间长。因此,为了提高机组并网运行的稳定能力,必须对励磁系统调节参数进行优化,并投入电力系统稳定器。

2 解决措施

2.1 励磁系统仿真计算

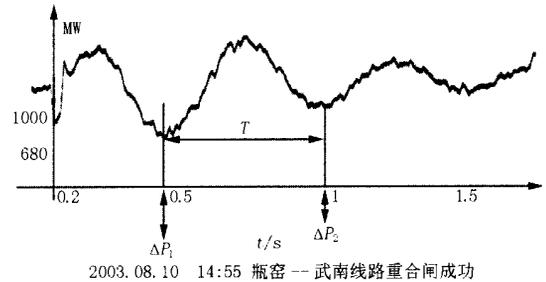


图 1 秦山二厂核电机组某次振荡曲线

Fig. 1 Certain oscillation curve of power units in Qinshan nuclear power plant

对励磁调节器参数进行优化,必须确定影响励磁控制系统稳定裕度和阻尼的关键参数。

分析秦山二厂机组励磁系统的传递函数框图(图 2),可以知道对机组阻尼特性产生影响的参数为 T_{lead} 、 T_{lag} 、 K_I 和 T_i 等。为此分别在较宽泛的取值范围内变化这些参数,通过电力系统故障仿真计算和小干扰稳定分析计算,研究这些参数的取值大小对机组稳定阻尼性能的影响。

2.2 励磁系统参数优化

由发电机大干扰响应的仿真试验表明: T_{lead} 、 T_{lag} 、 K_I 和 T_i 对励磁系统阻尼特性的影响较大。由此,根据励磁系统的安全稳定综合性能的要求,优化励磁系统的参数如下:

超前校正时间常数 $T_{lead} = 0.214$ (三菱原定值为 0.128)

比例增益放大倍数 $K_{PR} = K_I = 1.8$ (三菱原定值为 3.095)

积分增益放大倍数 $K_{IR} = \frac{K_I}{T_i} = \frac{1.8}{2} = 0.9$ (三菱原定值为 0.619)

在此基础上,对电力系统稳定器的参数也作了响应的优化,以提高机组的稳定性能。

2.3 现场发电机重载时 $\pm 3\%$ 阶跃响应试验

为了验证励磁系统参数优化的效果,在秦山第二核电厂 2 号发电机上进行了发电机负载 $\pm 3\%$ 阶跃响应试验。负载阶跃响应试验在发电机重载(有功 670 MW,无功 4 MVar)工况下进行。

从图 3~图 6 可以看出,PSS 投入运行后,大大提高了发电机组稳定运行的阻尼性能。而且,无论 PSS 未投入还是 PSS 投入,发电机励磁系统采用优化参数,与采用三菱原参数相比,都能够为发电

机组提供更大的稳定裕度和更好的阻尼性能。

2.4 电网实际故障考核与验证

华东电网有限公司于 2004 年 4 月 8 日深夜在上海黄渡 500 kV 变电站实施了一次 500 kV 线路人工单相短路试验,这次试验性故障在电网中造成的

冲击对在 500 kV 电网中运行的机组的暂态稳定性和动态稳定性都是一次考核。秦山第二核电厂 2 号机组在完成 PSS 试验后以优化参数作为运行参数,同时将 PSS 投入运行,以这次电网实际故障来检验机组的稳定性能。

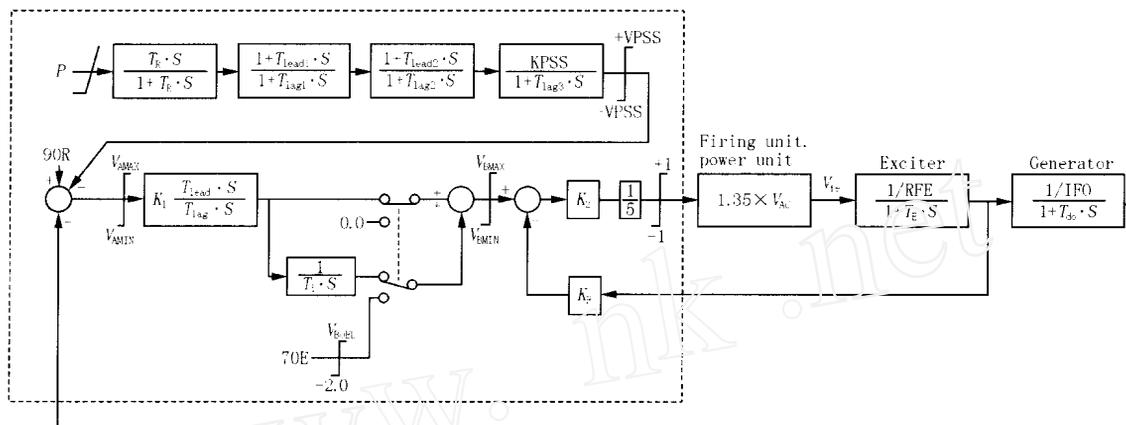


图 2 秦山二厂的励磁系统传递函数框图

Fig. 2 Transfer function of excitation system of Qinshan nuclear power plant

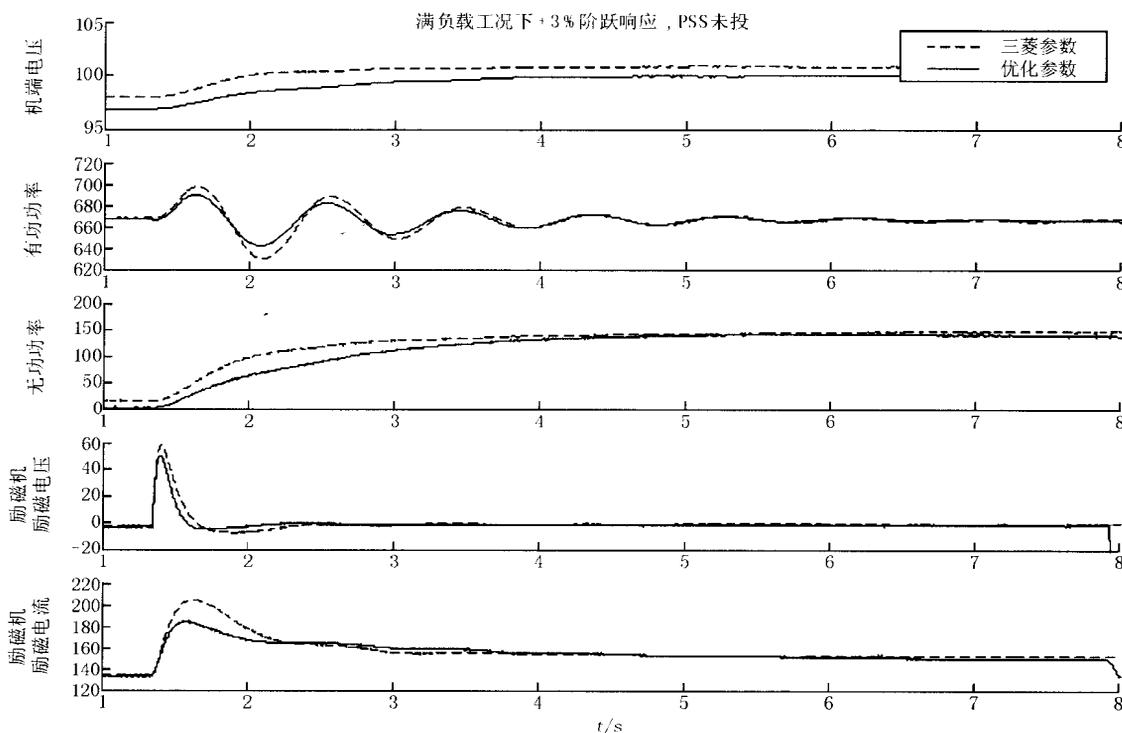


图 3 发电机重载 +3% 阶跃响应比较 (PSS 未投, 励磁调节器分别采用三菱原参数和优化参数)

Fig. 3 Comparison of +3% step response of generator in heavy loading (PSS is not used, the exciter uses the MITSUBISHI former parameter and optimized parameter)

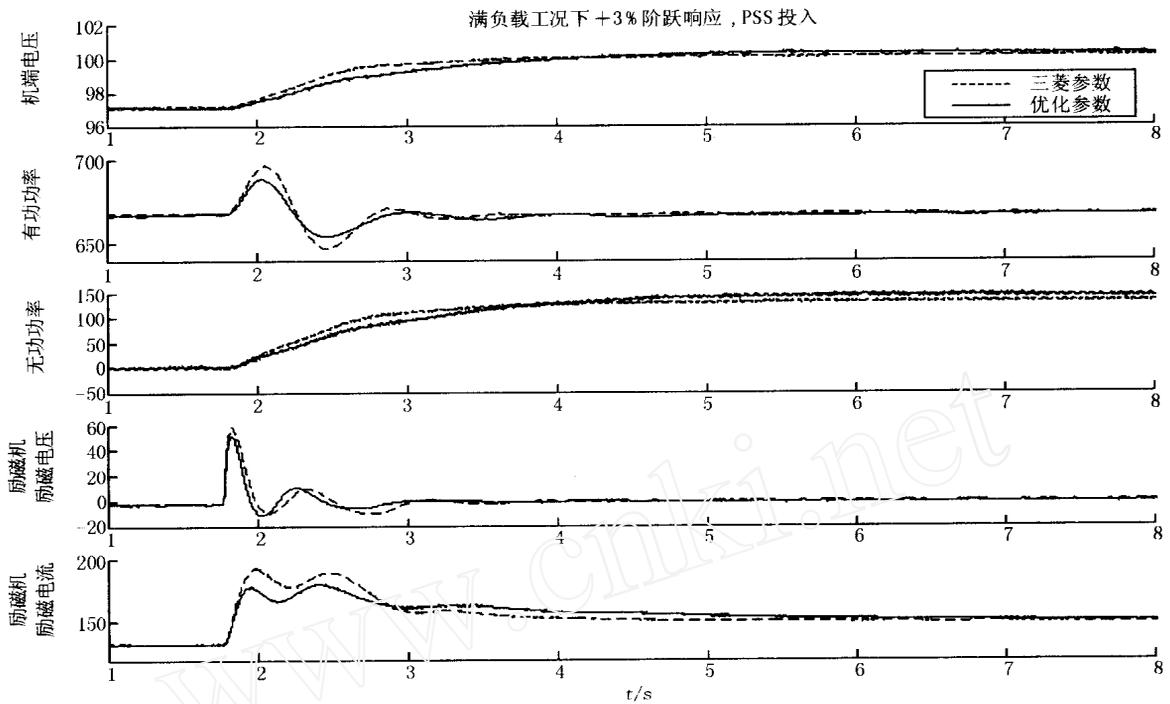


图4 发电机重载+3%阶跃响应比较(PSS投入,励磁调节器分别采用三菱原参数和优化参数)

Fig.4 Comparison of +3% step response of generator in heavy loading(PSS is used, the exciter uses the MITSUBISHI former parameter and optimized parameter)

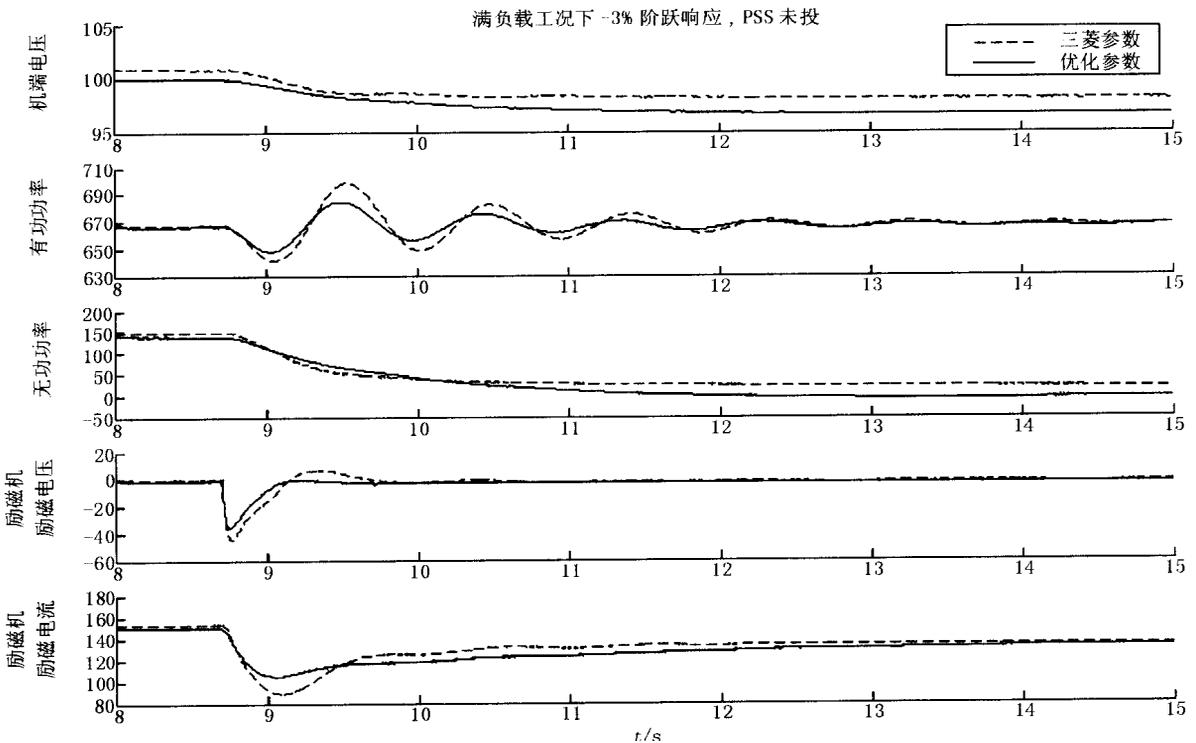


图5 发电机重载-3%阶跃响应比较(PSS未投,励磁调节器分别采用三菱原参数和优化参数)

Fig.5 Comparison of -3% step response of generator in heavy loading(PSS is not used, the exciter uses the MITSUBISHI former parameter and optimized parameter)

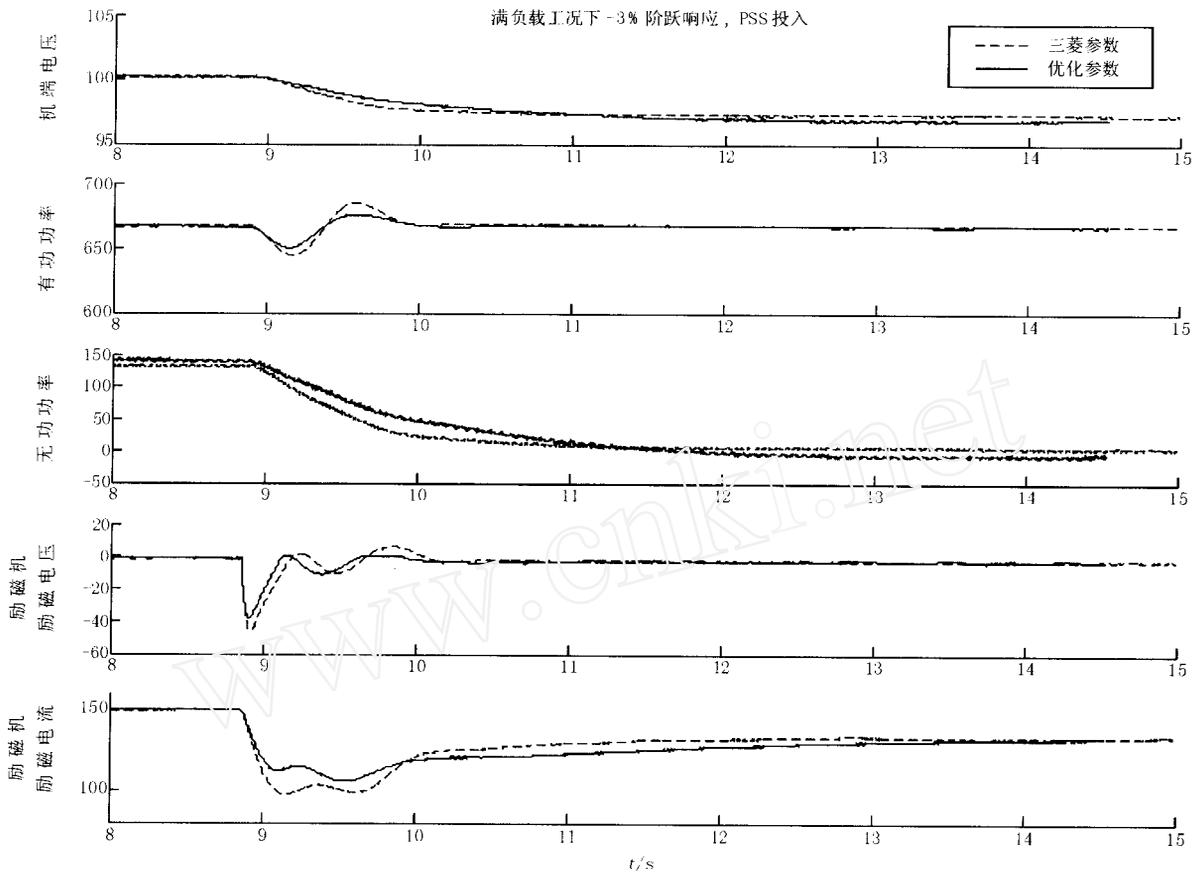


图 6 发电机重载 - 3% 阶跃响应比较 (PSS 投入, 励磁调节器分别采用三菱原参数和优化参数)

Fig. 6 Comparison of - 3% step response of generator in heavy loading (PSS is used, the exciter uses the MITSUBISHI former parameter and optimized parameter)

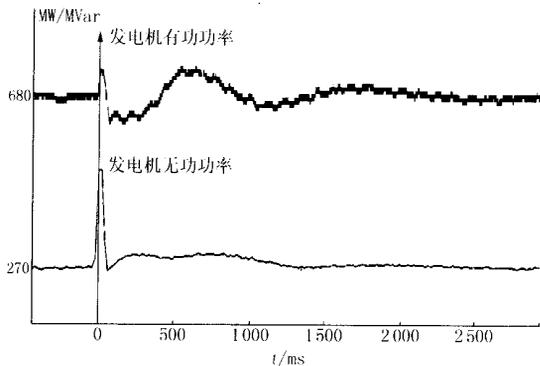


图 7 黄渡站短路试验时秦山第二核电厂 2 号发电机有功功率和无功功率波动波形

Fig. 7 Surge curve of active power and reactive power of 2# unit in Qinshan nuclear power plant while Huangdu substation is in short circuit testing

短路试验时秦山第二核电厂 2 号发电机故障录波器记录的有功功率和无功功率波动情况如图 7 所示。发电机输出无功在故障期间迅速增加以及有功

的迅速恢复,说明励磁系统的强励性能可以保证机组的暂态稳定。另一方面,故障消失后,有功功率波动 1.5 次(波动频率 < 1.1 Hz)后即稳定,稳定时间小于 2 s,这说明 PSS 的投入保证了机组的动态稳定性能,机组具有良好的应对电网故障的稳定性能。

3 结论

秦山第二核电厂 1 号、2 号机组励磁系统通过应用励磁系统模型进行发电机负载阶跃响应试验和负载故障仿真试验,研究了影响电厂机组并网运行稳定性的关键参数,最终确定了励磁调节器和 PSS 调节参数的优化方案。现场试验结果表明机组励磁系统采用优化参数后确实达到了预期的效果,机组投入 PSS 后在电网实际故障情况下表现出很好的稳定性能。

实践证明,采用了优化参数均保证了机组并网 (下转第 79 页 continued on page79)

mal Routing of Distribution Network Considering Reliability Indices [A]. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2000. 2340-2344.

- [30] 杨秀霞, 张晓锋, 等 (YANG Xiuxia, ZHANG Xiaofeng, et al). 基于启发式遗传算法的舰船电力系统网络重构研究 (The Study of Network Reconfiguration of the Shipboard Power System Based on Heuristic Genetic Algorithm) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2003, 23

(10): 42-46.

收稿日期: 2004-01-06; 修回日期: 2004-03-22

作者简介:

杨秀霞 (1975 -), 女, 博士研究生, 从事独立电力系统优化及安全运行方面的研究; E-mail: yangxiuxia @21cn.com

张晓锋 (1963 -), 男, 教授, 博士生导师, 从事独立电力系统规划、优化及安全运行方面的研究。

Present situation and developing trend of isolated power system restoration

YANG Xiuxia¹, ZHANG Xiaofeng¹, ZHANG Yi²

(1. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China)

Abstract: Based on the differences between isolated power system and utility large power system, the paper surveys the characteristics of the isolated system. Calculation methods of the system are analysed and the status that there is no fast and effective method to calculate supply and distribution network integrately is pointed out. Mathematical model of restoration, which belongs to a typical multi-restriction and nonlinear integer combinative optimum problem is summarized. Its solving algorithms are summarized, which mainly consists of heuristic optimization method, traditional mathematical optimization method, modern random optimization method and some mixed methods. The advantages and disadvantages of these methods are compared. Finally, the direction of future research of the isolated power system restoration are proposed.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Hubei Province (No. 2003ABA050).

Key words: isolated power system; system calculation; restoration

(上接第 63 页 continued from page 63)

安全稳定运行,使机组在保障暂态稳定性能的前提下,提高了动态稳定性能。同时,电力系统稳定器 PSS 按照优化参数整定后投入运行,也大大提高了发电机组并网运行的动态稳定性能。

参考文献:

- [1] GB/T 7409.1~7409.3, 同步发电机励磁系统 (Excitation

System of Synchronous Generator) [S].

收稿日期: 2004-05-31; 修回日期: 2004-06-30

作者简介:

王建成 (1954 -), 男, 从事继电保护、机组动态稳定的研究工作。E-mail: Wangjc @npqjvc.cn

Analysis and countermeasures on fluctuation of 650 MW generator of Qinshan nuclear power plant

WANG Jian-cheng

(Nuclear Power Qinshan Joint Venture Co., Ltd, Haiyan 314300, China)

Abstract: The 2 × 650 MW turbo generator units of Qinshan nuclear power plant are always operated over its rated power and the plant power system always gives flash alarms while the off-site power system fluctuates instantly. All these threaten the safety operation of nuclear power plant. Based on the simulation test, modeling and optimizing the parameter of excitation adjuster, the PSS (power system stabilizer) is put into operation. The assess of AVR capability in the course of unit startup and the assess of 500 kV system single-phase earthing fault show that the damp characteristic and the stabilization are enhanced distinctly.

Key words: electric power system; nuclear power unit; PSS