

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211235

## 核电 RAM 系统不正常工况分析及失磁保护优化

肖项涛<sup>1</sup>, 郝亮亮<sup>1</sup>, 梁郑秋<sup>1</sup>, 何鹏<sup>2</sup>, 吴鹏飞<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 辽宁红沿河核电有限公司, 辽宁 大连 116001;  
3. 阳江核电有限公司, 广东 阳江 529599)

**摘要:** 核电站控制棒驱动机构电源系统(RAM)是控制棒驱动机构的唯一供电系统, 目前 RAM 系统存在一系列不正常工况及失磁保护失配问题。为深入了解系统运行规律并解决失磁保护失配问题, 首先, 结合实际数据, 基于 PSCAD 仿真平台建立了 RAM 系统仿真模型。在验证模型正确性的基础上, 对存在的异常工况产生机理进行分析, 通过仿真验证了分析的正确性。其次, 对某核电站失磁保护与过流保护的失配现象进行了仿真复现, 并分析了失配发生的原因。最后对失磁保护进行了逻辑优化及配合优化, 制定了 III 段式失磁保护配置方案, 从不同负载水平时发生不同程度失磁故障两个维度验证了方案的适用性。所开展的 RAM 系统不正常工况分析工作和所提失磁保护方案对保障核电站的安全稳定运行有重要意义。

**关键词:** 核电站 RAM 系统; 不正常工况; 保护失配; 失磁保护优化

### Analysis of abnormal working conditions and optimization of loss of field protection of a nuclear power plant RAM system

XIAO Xiangtao<sup>1</sup>, HAO Liangliang<sup>1</sup>, LIANG Zhengqiu<sup>1</sup>, HE Peng<sup>2</sup>, WU Pengfei<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., Ltd., Dalian 116001, China; 3. Yangjiang Nuclear Power Co., Ltd., Yangjiang 529599, China)

**Abstract:** The nuclear power plant control rod drive mechanism power supply system (RAM) is the only power supply system of that mechanism. In order to analyze abnormal working conditions of the system and solve the problem of loss of field protection mismatch, first, a simulation model of a RAM system is established based on the PSCAD simulation platform. To verify the correctness of the model, the mechanism of abnormal working conditions is analyzed, and the correctness of the analysis is verified by simulation. Secondly, the mismatch between the loss of field protection and overcurrent protection in a nuclear power plant is simulated and replicated, and the causes of the mismatch are analyzed. Finally, the logic optimization and coordination optimization of the loss of field protection are carried out. A III section loss of field protection configuration scheme is developed. The applicability of the scheme is verified from two dimensions of different degrees of excitation failure occurring at different load levels. The analysis of the developed RAM system abnormal operating conditions and the proposed loss-field protection optimization are of guiding significance to improve the safety of nuclear power plants.

This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2020JBM070).

**Key words:** RAM system in nuclear power plant; abnormal working condition; mismatch of protection; loss of field protection optimization

## 0 引言

核电站控制棒驱动机构(CRDM)的作用是提升

和下放核反应控制棒, 其电源系统(RAM)采取百分百冗余配置, 由两列参数及保护配置完全相同的电动机与发电机(M-G)组构成, 正常工作时两列机组并列运行<sup>[1-2]</sup>。完整的 RAM 系统结构如图 1 所示, 分为上游供电部分、RAM 系统及下游负荷部分。上游供电部分由核电站主发电机经分裂变和降压变

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目资助(2020JBM070);  
中广核集团公司科技项目资助(3100077013)

产生 380 V 线电压电源;RAM 系统由笼型异步电动机经过飞轮质量块拖动隐极发电机,产生 260 V 线电压供给下游负荷。RAM 系统出口母线经半波整流,给控制棒驱动机构负荷线圈供电,实现控制棒的插拔。

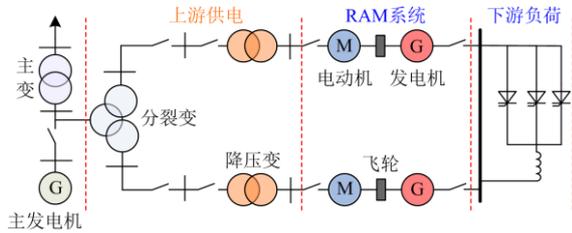


图 1 完整 RAM 系统结构图

Fig. 1 Complete structure diagram of RAM system

目前核电站 RAM 系统按照励磁方式的不同可分为两类,第一类采用相复励有刷励磁,第二类采用相复励无刷励磁。长期的工程实践发现,采用有刷励磁方式的机组,在运行时存在一类机组从相邻机组吸取无功的不正常工况;第二类机组存在异步电机供电有压差,导致两列机组输出有功不一致的不正常工况。此外, RAM 系统还存在失磁保护与过流保护的失配问题。

对于上述不正常工况的分析目前未见公开资料报道。现有的常规发电机失磁保护主要根据失磁故障特征来构成定子判据、转子判据和辅助判据<sup>[3]</sup>。定子侧多以机端测量阻抗轨迹为判据,通过功率的变化来反映功率角和转差率的状态,一般为静稳阻抗圆判据和异步阻抗圆判据<sup>[4-7]</sup>。而西门子失磁保护方案采用基于导纳测量的原理,将 P-Q 平面表示的发电机运行极限特性用导纳表示,并作为失磁保护边界<sup>[8-10]</sup>。转子侧判据多采用变励磁电压判据<sup>[11]</sup>,即有功负荷一定时,根据静稳极限所需的最低励磁电压,来判别是否失磁。该判据灵敏度高,但整定相对复杂。而辅助判据多为逆无功判据和系统侧低电压判据,辅助判据往往动作于信号<sup>[12]</sup>。

RAM 系统不同于并网运行的发电机,其差异主要体现在两方面:一是 RAM 系统发电机不设调速器,但具有惯性质量很大的飞轮;二是 RAM 系统不并网,发电机经出口母线直接连至负荷,无联系电抗,机端电压和频率不恒定。由于 RAM 系统与常规并网发电机存在明显差异,因此工程实际中多采用最简单的转子低电流作为失磁保护判据。在机组失磁时,由于失磁保护与过流保护配合不当,导致故障机组和正常机组均被切除,使得控制棒驱动机构失电,控制棒落棒致反应堆停堆。为提高 RAM 系统的运行可靠性,需对其存在的异常工况及失

磁保护失配现象展开机理分析,并进行保护优化。

为了深入揭示 RAM 系统运行规律,明确不正常状态及相关保护失配的机理,第 1 节根据 RAM 系统拓扑及实际参数建立了仿真模型;在第 2 节中,结合实际运行数据对模型的稳态工况、飞轮作用和励磁调节系统进行了仿真,验证了模型的正确性;在第 3 节中,对第一类机组存在的无功不平衡工况及第二类机组存在的输出有功不一致等不正常工况进行了分析及仿真,解释了其产生机理。在第 4 节中复现了失磁保护与过流保护的失配现象,得到了与现场一致的失磁保护与过流保护失配的动作结果;从保护原理优化及配合优化两方面入手,制定了 III 段式失磁保护配置方案,并通过仿真验证了方案的可行性。

## 1 RAM 系统仿真建模

RAM 机组建模的关键环节是 M-G 机组的建模和励磁调节系统的建模,下面详细介绍两者的建模过程。

### 1.1 M-G 机组的原理及建模

RAM 系统电动机-飞轮-发电机同轴连接,且发电机无调速器。建模时将飞轮转动惯量等效到电动机惯量中, M-G 机组耦合原理如图 2 所示。电动机运行在转矩控制模式,发电机运行在转速控制模式。将电动机-发电机视为一个面向负荷的整体,由机组整体与负荷实现功率与转矩的平衡。在机组内部,发电机将对应负荷条件下所需的电磁转矩传递给电动机,由电动机实现相应转矩下的转速要求,并将此转速传递至发电机使两者运行在同一转速。

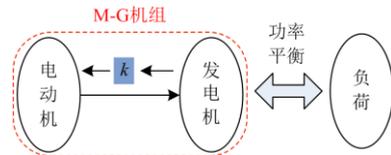


图 2 M-G 机组耦合原理

Fig. 2 Coupling principle of M-G unit

由于 PSCAD 中发电机和电动机模型的转矩输入输出采取标幺值,该标幺值均以各自的额定转矩作为基准值。而系统中电动机和发电机的额定转矩不同,本文将发电机额定电磁转矩与电动机额定电磁转矩之比定义为转矩耦合系数  $k$ ,实现两者转矩的匹配。

$$k = \frac{T_{emG}}{T_{ND}} \quad (1)$$

式中:  $T_{emG}$  为发电机额定电磁转矩,  $N \cdot m$ ;  $T_{ND}$  为

电动机额定转矩,  $N \cdot m$ 。

## 1.2 相复励磁调节系统原理及建模

采用相复励有刷励磁方式的 RAM 机组, 通过接在机端的励磁变进行全桥式整流, 后经由电刷和滑环对发电机励磁。采用相复励无刷励磁方式的 RAM 机组, 通过与发电机同轴旋转的整流器, 将直流电压输出直接施加在发电机励磁线圈上<sup>[13-15]</sup>。

相复励磁调节系统由作为励磁功率单元的相复励装置和作为励磁调节单元的自动电压校正器 AVR 组成<sup>[16-17]</sup>, 其结构如图 3 所示。相复励装置根据发生的扰动进行控制, 即按照发电机负载电流大小和功率因数进行主控制, 以补偿系统的主扰动。而 AVR 对发电机机端具有的电压偏差进行校正, 通过直流侧对交流侧分流进行辅助控制。

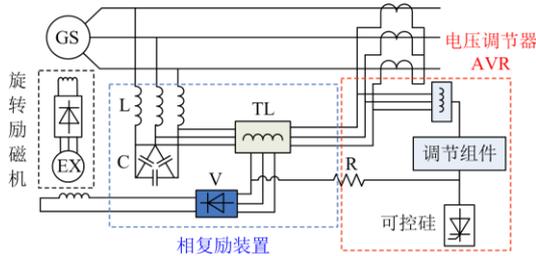


图 3 相复励无刷励磁系统结构

Fig. 3 Structure of phase compound brushless excitation system

由图 3 可知, 相复励装置包含: 电流互感器 TA、移相电抗器 L、谐振电容 C、相复励变压器 TL 和整流器 V。其数学模型可用式(2)描述。

$$U_r = \sqrt{(U_d - KI_q x)^2 + (U_q + KI_d x)^2} \quad (2)$$

式中:  $U_r$  为相复励装置输出电压;  $U_d$ 、 $U_q$  为机端电压  $d$ 、 $q$  轴分量;  $I_d$ 、 $I_q$  为输出电流  $d$ 、 $q$  轴分量;  $K = 9\sqrt{2}/\pi$ ;  $x$  为移相电抗。

AVR 包括两个组件: 调节组件和带有晶闸管分流旁路的触发组件。当存在电压偏差时, AVR 通过电阻 R 及内部晶闸管实现直流侧对交流侧分流。由相复励变压器 TL 的 U 相经电阻 R 到 AVR 内部的晶闸管构成分流路径, 通过调整晶闸管导通角实现分流, 因此只能负向调节。AVR 具体组成有电压差检测单元、相位补偿单元、主控制器单元、比例饱和单元以及反馈单元等部分, 根据各部分功能建立数学模型<sup>[18-19]</sup>。

电压差检测单元:

$$\begin{cases} \Delta U = U_{\text{ref}} + \frac{U_{f0}}{K_e} - U_{\text{if}} + U_{\text{stab}} + U_{\text{ff}} \\ U_{\text{if}} = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \cdot \frac{1}{1 + sT_r} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\Delta U$  为电压差值;  $U_{\text{ref}}$  为电压给定值;  $U_{\text{if}}$  为发电机机端电压;  $U_{\text{stab}}$  为接地零电压;  $U_{f0}$  为励磁电压初始值;  $K_e$  为交流励磁机增益;  $T_r$  为低通滤波器时间常数;  $U_{\text{ff}}$  为反馈环节输出电压。

超前滞后补偿器数学模型为

$$U_c = \Delta U \cdot \frac{1 + sT_c}{1 + sT_b} \quad (4)$$

式中:  $U_c$  为补偿器输出电压;  $T_c$  为超前补偿时间常数;  $T_b$  为滞后补偿时间常数。

主调节器数学模型为

$$U_a = U_c \cdot \frac{K_a}{1 + sT_a} \quad (5)$$

式中:  $U_a$  为主调节器输出电压;  $K_a$  为主调节器增益;  $T_a$  为主调节器时间常数。

比例饱和环节数学模型为

$$\begin{cases} E_{fd} = U_a + U_r \\ 0 < E_f < E_{f\text{MAX}}, E_{f\text{MAX}} = \begin{cases} C, K_p = 0 \\ K_p U_{\text{if}}, K_p \geq 0 \end{cases} \\ E_f = E_{fd} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $E_{fd}$  为电压调节器输出电压;  $E_f$  为比例饱和环节输出电压;  $E_{f\text{MAX}}$  为比例饱和环节最大输出电压。

交流励磁机用一阶惯性环节表示。

$$U_f = E_{fd} \cdot \frac{1}{T_{es} + K_e} \quad (7)$$

式中:  $U_f$  为交流励磁机输出电压;  $K_e$  为交流励磁机增益;  $T_{es}$  为交流励磁机时间常数。

反馈稳定环节数学模型为

$$U_{\text{ff}} = U_f \cdot \frac{sK_f}{1 + sT_{\text{ff}}} \quad (8)$$

式中:  $K_f$  为反馈环节增益;  $T_{\text{ff}}$  为反馈环节时间常数。

结合相复励磁调节系统各组成部分数学模型, 基于 PSCAD 仿真平台可建立其完整的仿真模型。

## 2 仿真结果与实际数据的对比验证

本节根据 RAM 系统模型, 给出转矩耦合参数计算过程、稳态工况、飞轮效果和励磁调节系统验证。

### 2.1 实际 RAM 系统参数

电动机参数如表 1 所示, 其中  $M_f$  为转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ; 发电机参数如表 2 所示, 其中,  $I_{f0}$  为空载额定电压下的励磁电流,  $T'_d$  为直轴短路瞬变时间常数。

表 1 电动机参数

Table 1 Motor parameters

$P_N/kW$	$U_N/V$	$n_c/(r/min)$	$\cos\varphi$	$M_f$
135	380	1485	0.89	3.5

表 2 发电机参数

Table 2 Generator parameters

参数	数值	参数	数值
$S_N/kVA$	400	$I_{t0}/A$	0.8
$P_N/kW$	100	$T_d'/s$	0.066
$U_N/V$	260	$x_d/p.u.$	1.96
$n_c/(r/min)$	1500	$x_q/p.u.$	1.96

由于发电机电枢绕组电阻很小，所以忽略在电枢绕组上产生的损耗，于是有

$$P_{em} \approx P_2 = 100 \text{ kW} \quad (9)$$

式中： $P_{em}$ 为发电机电磁功率； $P_2$ 为发电机输出的三相电功率。

发电机额定电磁转矩为

$$T_{emN} = \frac{P_{emN}}{\Omega_s} = \frac{100 \text{ kW}}{2\pi f / p} = \frac{100 \times 10^3}{50\pi} = 636.62 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (10)$$

电动机额定转矩计算公式为

$$T_{ND} = 9550 \frac{P_e}{n_c} = 9550 \times \frac{135}{1485} = 869 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (11)$$

因此，由式(1)可得耦合系数为

$$k = \frac{636.6}{869} = 0.7326 \quad (12)$$

## 2.2 稳态工况仿真

RAM 系统稳态运行时的实际工况数据如表 3 所示，用列号 1、2 来区别第一类的两列机组。由表 3 数据可知，设置稳态工况时负载条件为  $P = 22 \text{ kW}$ 、 $Q = 30 \text{ kvar}$ ，可得仿真结果如图 4 和表 3 所示。

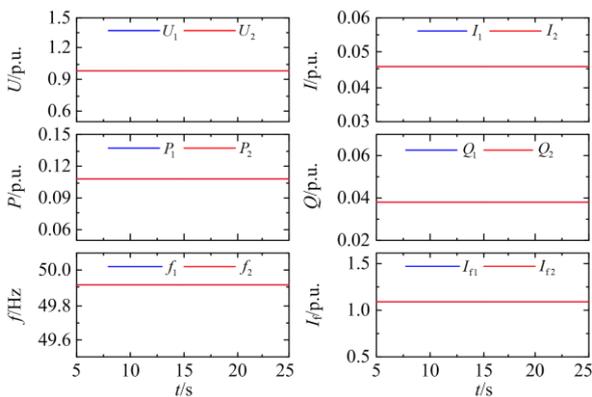


图 4 稳态工况仿真

Fig. 4 Steady-state simulation

由图 4 可知，由于机组参数一致，两列机组运行状态也一致。当 RAM 系统正常运行时，各列机组电气量大小相等，即两列机组均分负荷所需功率。

表 3 RAM 系统稳态工况实际数据和仿真结果

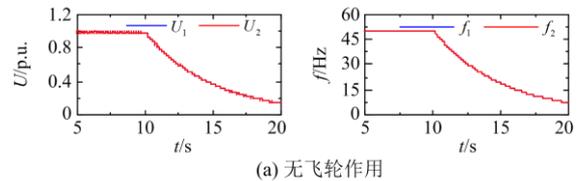
Table 3 Actual data and simulation results of RAM system in steady state

参数	实际数据		仿真结果	
	1号机组	2号机组	1号机组	2号机组
$U_i^*/p.u.$	1~1.01	1~1.01	0.99	0.99
$I_i^*/p.u.$	0.046~0.048	0.045~0.047	0.046	0.046
$P^*/p.u.$	0.1~0.12	0.1~0.12	0.11	0.11
$Q^*/p.u.$	0.036~0.038	0.036~0.038	0.038	0.038
$f/Hz$	49.9	49.9	49.95	49.95
$I_i^*/p.u.$	1.12	1.12	1.09	1.09

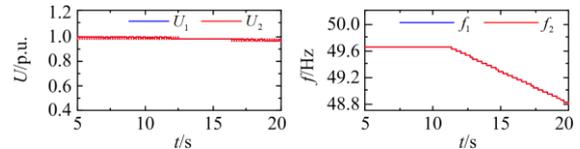
由表 3 可知，模型稳态工况仿真结果与实际数据相吻合。

## 2.3 飞轮效果验证

通过进行上游供电部分失电后无飞轮作用和有飞轮作用的对比仿真，验证设置飞轮的作用。RAM 系统设置飞轮进而实现储能<sup>[20]</sup>，在上游供电部分失电的 1.2 s 内，拖动发电机输出不低于 234 V、44 Hz 的电。电动机转动惯量为  $3.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，飞轮转动惯量为  $74.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，将其等效到电动机中，则电动机转动惯量为  $77.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。RAM 机组并列满载运行，在  $t = 10 \text{ s}$  时令上游供电失电，得到电压及频率波形如图 5 所示。



(a) 无飞轮作用



(b) 有飞轮作用

图 5 飞轮作用对比图

Fig. 5 Flywheel impact comparison

由图 5 可知，无飞轮作用时，上游发生失电后 RAM 系统输出电压及频率衰减严重；而当有飞轮作用时，可以看到，在上游失电的 1.2 s 内，电压和频率衰减缓慢，且满足不低于 234 V、44 Hz 的要求。

## 2.4 励磁调压系统校核

结合实际工况数据，对单列 RAM 机组进行了

22%(最常见负载条件)、50%、100%额定负载条件下的突加突减负载仿真。仿真条件为在  $t = 20$  s 之前带相应程度负载, 在  $t = 20 \sim 25$  s 突减负载至空载, 在  $t = 25$  s 后恢复相应负载水平, 仿真结果如图 6 所示。

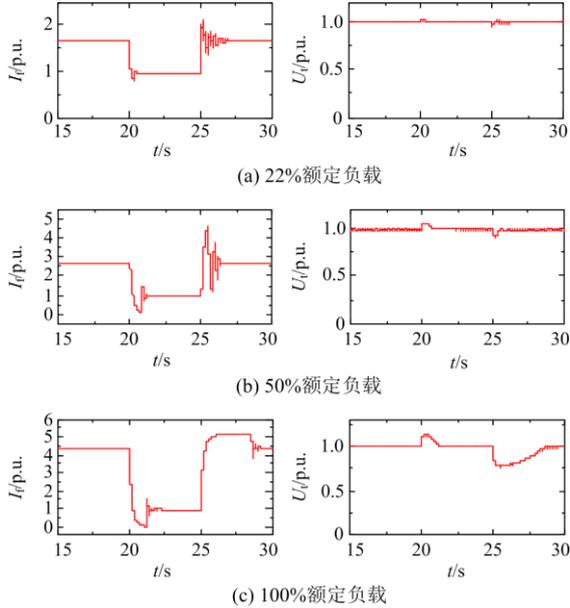


图 6 励磁调节系统校验

Fig. 6 Verification of excitation regulation system

由图 6 仿真结果可知, 22% 额定负载时, 稳态励磁电流  $I_f^* = 1.63$ ; 突减负载至空载后, 励磁电流变为  $I_f^* = 1$ ; 突加负载后, 励磁电流又变为  $I_f^* = 1.63$ , 其余两种负载条件同理。需要注意的是, 在 100% 额定负载由空载突变至额定负载时, 最大励磁为  $I_{fMAX}^* = 5$  p.u., 因此在突加负载未至稳态时, 励磁电流最大为 5 p.u.。

将上述结果稳态时的数据整理如表 4 所示, 由表 4 数据及相对误差大小可知, 所建立的励磁调节系统模型, 在突加突减负载时能够很好地根据端电压变化情况去调节励磁电流的大小, 验证了励磁调节系统的正确性。

表 4 仿真结果与实际数据对比

Table 4 Comparison between simulation result and actual data

负载水平	励磁电流 $I_f^*$			机端电压 $U_t^*$		
	实际数据	仿真结果	相对误差	实际数据	仿真结果	相对误差
22% $P_N$	1.59	1.66	2.5%	1.02	0.99	-2.9%
50% $P_N$	2.66	2.73	2.6%	1.01	0.99	-1.9%
100% $P_N$	4.34	4.37	0.7%	1.00	0.99	1.0%

通过对 RAM 系统稳态工况、飞轮和励磁调节系统进行仿真, 得到与实际数据误差很小的结果,

验证了模型的正确性。

### 3 RAM 系统不正常工况分析及验证

#### 3.1 无功不平衡工况分析及验证

无功不平衡工况数据如表 5 所示, 用 1、2 号机组来区分两列机组。由表 5 数据可知, 两列 RAM 机组励磁电流大小出现了差别。根本原因为机组采用有刷励磁方式, 随着电刷和滑环运行时长的增加, 导致其接触电阻大小发生了变化, 进而使得机组励磁电流大小不一致。

表 5 无功不平衡数据

Table 5 Reactive power imbalance data

参数	1 号机组	2 号机组
$U_t^*/p.u.$	1~1.01	1~1.01
$I_f^*/p.u.$	0.082~0.085	0.030~0.032
$P^*/p.u.$	0.13	0.12
$Q^*/p.u.$	0.08	-0.021
$f/Hz$	49.85	49.9
$E_t/V$	17	17
$I_f^*/p.u.$	1.1	1.0

2 号 RAM 的接触电阻比 1 号 RAM 大, 如式(13)所示。

$$\Delta R = \frac{E_{t2}}{I_{t2}} - \frac{E_{t1}}{I_{t1}} = \frac{17}{50} - \frac{17}{55} = 0.031 \Omega \quad (13)$$

在理想情况下, 机组采取有刷励磁方式, 且不具有调差环节, 为均衡无功, 需将两列 RAM 的励磁回路并联, 其功率流向如图 7 所示。

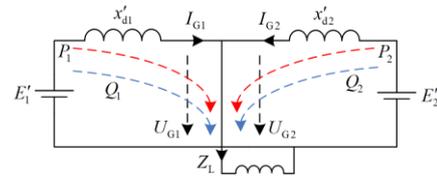


图 7 理想情况功率流向

Fig. 7 Ideal power flow direction

发电机用电抗后电势暂态模型表示, 其中  $E'$  为发电机暂态电势,  $x'_d$  为发电机暂态电抗,  $I_G$  为发电机定子电流,  $U_G$  为机端电压。在正常情况下, 两列机组各电气量大小相等。励磁电流大小不一致时, 发电机内电动势不一致, 如图 8 所示, 内电动势表达式为

$$E' = x_{ad} \cdot i_f \quad (14)$$

式中:  $x_{ad}$  为电枢反应电抗;  $i_f$  为励磁电流。

无功从电势高的一方流向电势低的一方, 因此无功从 1 号机组流向 2 号机组, 产生了无功不平衡现象。而发电机输出有功取决于原动机输出机械功

率, 两列机组仍平分有功负荷, 由 M-G 机组耦合原理可知, 两列机组转速仍保持一致, 因此发电机输出有功也一致。功率流向由图 7 变为图 8。

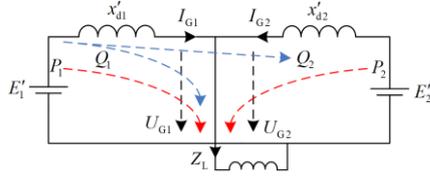


图 8 不平衡工况功率流向

Fig. 8 Power flow direction under unbalanced conditions

对上述工况进行仿真, 负载条件为:  $P = 23 \text{ kW}$ 、 $Q = 24 \text{ kvar}$ , 可得各机组仿真结果如图 9 所示。

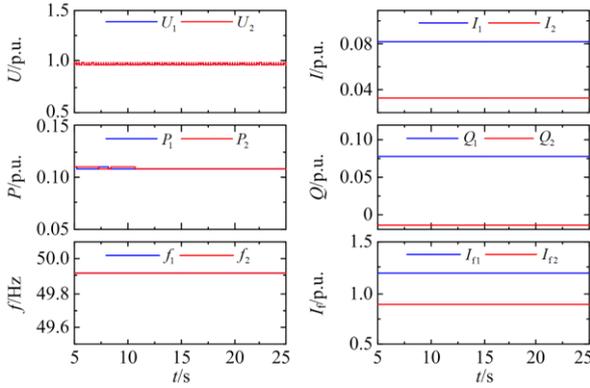


图 9 不平衡工况仿真结果

Fig. 9 Unbalance condition simulation

由图 9 可知, 仿真结果与实际数据相吻合。励磁电流不一致只影响了两列机组的无功分配不平衡, 对有功没有影响。

### 3.2 上游电机电源波动工况分析及验证

RAM 机组并列运行时, 出现了两列机组上游供电电压不一致的现象。假设两列机组电动机供电电压为  $U_3$ 、 $U_4$ , 忽略电动机定子铁耗和铜耗, 则电动机输出电磁功率近似等于从电网侧吸收的功率。电动机从上游供电侧吸收的功率之比为

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{U_3^2}{U_4^2} \quad (15)$$

由 M-G 耦合原理可知, 电动机-发电机视为面向负荷的整体, 忽略发电机绕组上的损耗, 则电动机从电网吸收的功率即为发电机输出的电磁功率, 即有

$$\frac{P_{emG3}}{P_{emG4}} \approx \frac{P_3}{P_4} = \frac{U_3^2}{U_4^2} \quad (16)$$

由发电机功角特性同样可得式(16)成立。发电

机功角特性如图 10 所示, 正常工况下, 两列机组运行状态相同, 则两列机组处在同一个平衡点, 如 A 点所示, 且发电机功角都为  $\delta_0$ 。当电动机供电电压不一致时, 使得电动机输出机械功率不同, 进而导致两列机组平衡点不同。电压高的机组处在高功率水平平衡点, 即 B 点; 电压低的机组处在低功率水平平衡点, 即 C 点。

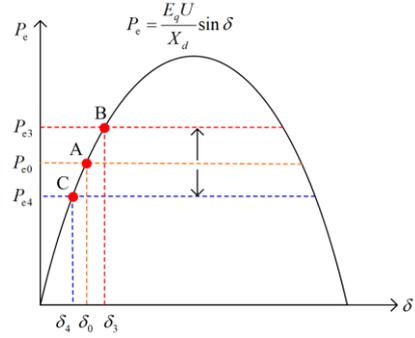


图 10 发电机功角特性

Fig. 10 Generator power angle characteristic

且由发电机功角特性可知式(17)成立。

$$P_{em} = \frac{E_f U_t}{x_t} \sin \delta \quad (17)$$

两列机组励磁电压不受上游电源电压大小的影响, 也即励磁电压大小仍相同, 即有

$$\frac{\sin \delta_3}{\sin \delta_4} = \frac{P_{em3}}{P_{em4}} \quad (18)$$

RAM 系统电动机转子为笼型结构, 其转子导条电阻很小, 因此忽略其转子上的损耗, 则电动机转子转轴上的功率近似等于从电网侧吸收的功率。

$$P_{mec} \approx P_3 \quad (19)$$

根据异步电机转矩平衡关系<sup>[21]</sup>, 忽略空载制动转矩, 则有

$$T_{em} \approx T_2 \quad (20)$$

式中:  $T_{em}$  为驱动性质的电磁转矩;  $T_2$  为负载制动转矩。电动机电磁转矩正比于定子电压的平方, 因此有

$$\frac{T_{em3}}{T_{em4}} = \left( \frac{U_3}{U_4} \right)^2 \quad (21)$$

由于机组转速由电动机决定, 而电动机转速为

$$\Omega = \frac{P_{mec}}{T_{em}} \quad (22)$$

则结合式(15)、式(19)、式(21), 可得式(23)成立。

$$\frac{\Omega_3}{\Omega_4} = \frac{P_{mec3}/T_{em3}}{P_{mec4}/T_{em4}} = 1 \quad (23)$$

即不同供电电压下, 两列机组的转速仍相等。又因发电机跟电动机保持相同转速, 所以两列机组发电机转速及输出频率相等, 即

$$f_3 = f_4 \quad (24)$$

对上述分析进行仿真验证, 负载条件为:  $P_D = 100 \text{ kW}$ 、 $Q_D = 387.3 \text{ kvar}$ 。令两列机组上游供电出现压差,  $U_3 = 350 \text{ V}$ 、 $U_4 = 380 \text{ V}$ 。则电动机侧仿真结果如图 11 所示, 发电机侧仿真结果如图 12 所示。

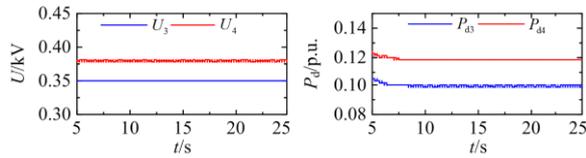


图 11 电动机侧波形

Fig. 11 Waveform of motor side

由图 11 可知, 当机组上游供电出现压差时, 电动机从电网吸收的有功与电压的平方成正比, 即

$$\frac{P_{d3}}{P_{d4}} = \frac{U_3^2}{U_4^2} \approx 0.85 \quad (25)$$

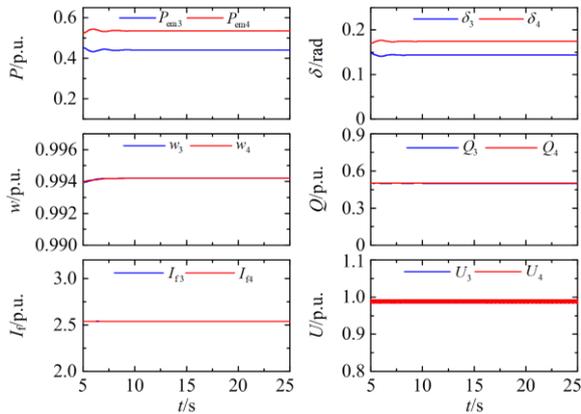


图 12 发电机侧波形

Fig. 12 Waveform of generator side

由图 12 可知, 当机组上游供电出现压差时, 忽略发电机绕组上的各种损耗, 则电动机吸收的功率即为发电机输出的电磁功率, 且有

$$\frac{P_{emG3}}{P_{emG4}} = \frac{0.44}{0.54} = 0.82 \approx \frac{P_{d3}}{P_{d4}} \quad (26)$$

且发电机功角正弦值之比同样满足式(18)。

$$\frac{\sin \delta_3}{\sin \delta_4} = \frac{\sin\left(\frac{0.144}{\pi} \times 180^\circ\right)}{\sin\left(\frac{0.174}{\pi} \times 180^\circ\right)} = 0.83 \approx \frac{P_{emG3}}{P_{emG4}} \quad (27)$$

由图 12 可知, 两列机组转速相等。由于上游电

机存在的电压差不影响发电机励磁, 因此两列机组励磁电流大小仍相等, 也即机端电压、输出无功仍相同, 仿真结果与理论分析结果相吻合。

## 4 失磁故障复现及保护优化

2019 年 11 月 14 日, 某核电站并列运行机组中一列因故障导致失磁, 故障机组从对列吸取无功, 进而造成正常列过流。由于保护之间配合不当, 使得过流保护动作先将正常列切除, 而后失磁保护将故障列切除, 控制棒线圈失电落棒导致反应堆停堆。由于不是微机型保护装置, 因此没有故障录波, 保护动作时序图如图 13 所示。

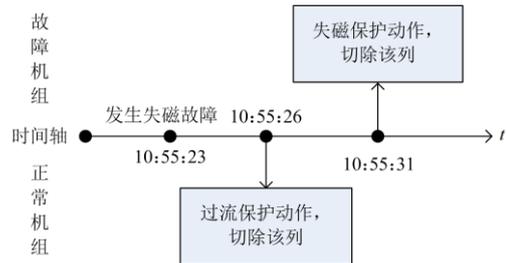


图 13 保护动作时序图

Fig. 13 Timing diagram of protective action

### 4.1 原有失磁保护配置分析及动作校验

用下标 3、4 对两列机组进行区分, 失磁保护与过流保护整定值及出口方式如表 6 所示。

表 6 第二类机组失磁及过流保护配置及出口

Table 6 Loss of field protection and overcurrent protection configuration and outlet of class II unit

	3 号 RAM	4 号 RAM	保护出口
失磁保护	0.4 A, 5 s	0.4 A, 5 s	跳发电机出口开关、电动机 电源开关、合灭磁开关
过流保护	888 A, 0.4 s	888 A, 0.4 s	跳发电机出口开关、电动机 电源开关、合灭磁开关

失磁保护以转子电流为判据, 当转子电流低于整定值时, 延时动作, 整定如下:

$$I_{fd} < 50\% I_{f0}, t_d = 5 \text{ s} \quad (28)$$

其整定值选取原则:  $I_{f0}$  为发电机空载励磁电流, 其值为 0.8 A。当励磁电流低于空载励磁电流的 50%, 且持续时间超过 5 s 时, 判定为发电机失磁, 失磁保护出口。

过流保护整定原则: RAM 系统并列满载运行时, 负载电流  $I_{DN} = 888 \text{ A}$ , 因此过流保护按照单列机组满载运行整定。

$$I_G > I_{DN}, t_d = 0.4 \text{ s} \quad (29)$$

式中,  $I_G$  为发电机输出电流。当电流大小满足式(29)



况, 仿真波形如图 16 所示。

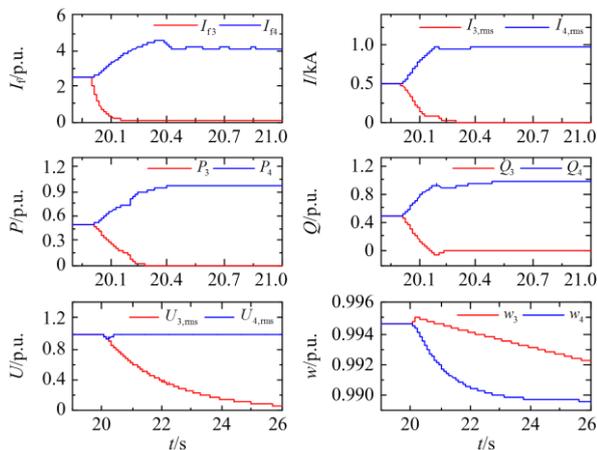


图 16 优化后失磁保护仿真波形

Fig. 16 Optimized LOF protection action waveform

由图 16 可知, 在  $t = 20\text{ s}$  RAM 3 机组发生完全短路失磁, 励磁电流  $I_{f3}$  迅速下降, 在  $t = 20.08\text{ s}$  故障机组转子低电流判据触发; 失磁导致无法维持机端电压恒定, 在  $t = 20.12\text{ s}$  机组低电压判据触发;  $Q_3$  迅速减小并反向, RAM 4 列增加输出无功电流来增加无功输出; 因此在  $t = 20.17\text{ s}$  故障机组逆无功判据触发, 在  $t = 20.2\text{ s}$  正常列过流保护触发。

由上述保护配置方案可知, 此时应由失磁保护 III 段动作, 即在封锁对列机组过流保护出口的同时, 跳开故障机组发电机出口开关、电动机电源开关及合灭磁开关, 因此在故障机组失磁保护动作之后, RAM 3 机组各电气量迅速降低到零, 转速  $w_3$  在飞轮作用下缓慢下降; 此时的负载全部由 RAM 4 列承担, 因此 RAM 4 列运行在满载工况。

优化后的失磁保护满足了选择性, 只切除了故障机组, 正常机组继续带载运行, 验证了优化后配置方案的可行性。

为验证所制定失磁 III 段保护方案的适用性, 增设不同负载水平下不同失磁故障程度的仿真, 观察保护能否合理动作。增设 4 种负载条件, 分别为 10% 额定负载、30% 额定负载、60% 额定负载和 100% 额定负载水平; 增设 3 种失磁故障水平, 分别为励磁电压部分失磁至 0.8 p.u.、0.3 p.u. 及全失磁; 仿真条件及保护动作结果整理如表 7 所示。

表 7 III 段式失磁保护适用性校验

Table 7 III sections loss of field protection applicability calibration

	10% $P_N$	30% $P_N$	60% $P_N$	100% $P_N$
失磁至 0.8 p.u.	I 段	I 段	I 段	I 段
失磁至 0.3 p.u.	II 段	II 段	III 段	III 段
全失磁	II 段	II 段	III 段	III 段

综合表 7 仿真结果可知, 所制定的 III 段式失磁保护配置方案, 在不同负载水平下发生不同程度失磁故障时均能正确、可靠动作。

## 5 结论

本文以核电站 RAM 系统为研究对象, 对其出现的不正常工况及失磁故障工况进行了机理分析及仿真计算, 结论如下。

1) 无调差环节的 RAM 机组并列运行时, 并联励磁回路中励磁电流不一致会导致无功不平衡。

2) 列运行的机组, 原动机供电电压出现差别将导致发电机输出有功不同, 但不影响励磁和发电机输出频率大小。

3) III 段式失磁保护配置方案有效地解决了保护失配问题, 且能够实现机组不同负载水平下不同程度失磁故障的可靠动作。

本文通过对两类机组存在的不正常工况进行分析, 更深入地揭示了 RAM 系统的运行规律。所制定的 III 段式失磁保护配置方案, 充分保证了保护的选择性、灵敏性、可靠性和速动性, 对提高核电站系统安全可靠运行具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 俞高伟, 周蕴花, 沈志华, 等. 核电站控制棒驱动机构电源系统[J]. 发电设备, 2012, 26(4): 278-281.  
YU Gaowei, ZHOU Yunhua, SHEN Zhihua, et al. Power system for control rod drive mechanism of nuclear power plants[J]. Power Equipment, 2012, 26(4): 278-281.
- [2] 孟子荣. 核电站控制棒驱动机构电源机组励磁方式的选择[J]. 电气开关, 2015, 53(5): 96-97.  
MENG Zirong. Selection of exciting system of M-G set in a nuclear power plant[J]. Electric Switchgear, 2015, 53(5): 96-97.
- [3] 殷建刚, 彭丰, 杨平, 等. 发电机失磁保护中系统低电压判据的探讨[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 28-31.  
YIN Jiangang, PENG Feng, YANG Ping, et al. Discussion on low voltage criterion in field-loss protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 28-31.
- [4] 贾德峰, 王明东, 傅润炜, 等. 抽水蓄能机组 RTDS 仿真与失磁保护改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 158-164.  
JIA Defeng, WANG Mingdong, FU Runwei, et al. RTDS simulation and improvement of excitation-loss protection for pumped storage units[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 158-164.
- [5] 季学军, 刘宏博, 姜玉磊, 等. 阻抗原理发电机失磁保护的改进[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 74-76.  
JI Xuejun, LIU Hongbo, JIANG Yulei, et al. Improvement on generator loss of excitation protection based on impedance principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(18): 74-76.
- [6] 徐健, 徐金, 王翔. 发电机失磁保护和失步保护的冲突与协调[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 61-64.  
XU Jian, XU Jin, WANG Xiang. Coordination between

- generator loss-of-excitation protection and out-of-step protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 61-64.
- [7] NIAZ A M. A setting-free flux-based synchronous generator loss of excitation protection[J]. Electrical Engineering, 2018, 100(4): 2329-2339.
- [8] 兀鹏越, 徐雷钧, 王正元, 等. 基于导纳测量原理的隐极发电机失磁保护应用[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 205-210.  
WU Pengyue, XU Leijun, WANG Zhengyuan, et al. Application of demagnetization protection for hidden pole generator based on admittance measurement principle[J]. Electric Power Automation Equipment 2017, 37(5): 205-210.
- [9] 沈全荣, 陈佳胜, 陈俊, 等. 基于导纳特性的水轮发电机失磁保护新判据[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 220-223.  
SHEN Quanrong, CHEN Jiasheng, CHEN Jun, et al. LOE protection criterion based on admittance characteristic for hydraulic generator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 220-223.
- [10] 吴建洪, 胡明康. 浅析西门子 7UM622 发电机失磁保护[J]. 机电信息, 2015, 435(9): 46-47.  
WU Jianhong, HU Mingkang. Analysis of Siemens 7UM622 generator loss of field protection[J]. Mechanical and Electrical Information, 2015, 435(9): 46-47.
- [11] 柳焕章. 发电机失磁保护的原理及整定计算[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 72-75.  
LIU Huanzhang. Principle of generator loss-of-excitation protection and its setting calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 72-75.
- [12] 林莉, 牟道槐. 直接测量  $\delta$  和  $S$  的同步发电机低励磁保护与控制研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(6): 20-22.  
LIN Li, MU Daohuai. A study of low excitation protection and control of synchronous generator by directly measuring  $\delta$  and  $S$ [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2001, 13(6): 20-22.
- [13] 王杰, 孙中华, 王瑞成. 无刷交流发电机励磁系统分析[J]. 电气自动化, 2018, 40(4): 13-15.  
WANG Jie, SUN Zhonghua, WANG Ruicheng. Analysis on the excitation system of the AC brushless synchronous generator[J]. Electrical Automation, 2018, 40(4): 13-15.
- [14] 贺仁睦, 沈峰, 韩冬, 等. 发电机励磁系统建模与参数辨识综述[J]. 电网技术, 2007, 31(14): 62-67.  
HE Renmu, SHEN Feng, HAN Dong, et al. The study of generator excitation system modeling and parameters estimation[J]. Power System Technology, 2007, 31(14): 62-67.
- [15] 袁鹏, 李红江, 甄洪斌. 可控相复励无刷励磁系统仿真[J]. 船电技术, 2010, 30(3): 22-26.  
YUAN Peng, LI Hongjiang, ZHEN Hongbin. Simulation of the controllable phase-compounding and brushless exciting system[J]. Marine Electric, 2010, 30(3): 22-26.
- [16] 巩洁, 魏雨谷. 相复励励磁系统功率源断线故障现象及原因分析[J]. 船电技术, 2019, 39(10): 25-27.  
GONG Jie, WEI Yugu. Analysis of the failure phenomenon and cause of power source disconnection in THYRIPART excitation system[J]. Marine Electric, 2019, 39(10): 25-27.
- [17] 武福愿, 高海波, 赵文科. 船用同步发电机可控相复励励磁系统的仿真[J]. 船海工程, 2008, 37(5): 82-85.  
WU Fuyuan, GAO Haibo, ZHAO Wenke. Simulation of the controllable phase-compounding excitation system for marine synchronous generator[J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(5): 82-85.
- [18] 孙磊, 薛士龙, 张亚明, 等. 船舶直流电力系统建模与仿真[J]. 上海电机学院学报, 2017, 20(3): 132-138, 167.  
SUN Lei, XUE Shilong, ZHANG Yaming, et al. Modeling and simulation of ship DC power supply[J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2017, 20(3): 132-138, 167.
- [19] 杨蕾, 黄伟, 张丹, 等. 异步联网下云南电网低频与超低频振荡综合抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 133-140.  
YANG Lei, HUANG Wei, ZHANG Dan, et al. Comprehensive suppression strategy of low frequency and ultra low frequency oscillation in Yunnan Power Grid under asynchronous networking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 133-140.
- [20] 余豪杰, 李官军, 杨波, 等. 基于分布式光伏/飞轮储能联合发电系统的并网点电压主动调控技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 48-56.  
YU Haojie, LI Guanjun, YANG Bo, et al. Research on the active control technology of grid voltage based on a distributed photovoltaic/flywheel energy storage combined generation system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 48-56.
- [21] SOUKAINA E D, LOUBNA L, MUSTAPHA A L. Sliding mode approach applied to sensorless direct torque control of cage asynchronous motor via multi-level inverter[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 56-65.
- [22] ABBAS H, FARHAD H, FILIPE F D S, et al. Synchronous generator loss of field protection: a real-time realistic framework and assessment of some recently proposed methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(3): 971-979.
- [23] 王维俭, 桂林, 王雷, 等. 发电机失磁保护阻抗元件定值整定的再讨论——对 2007 年版《IEEE Guide for AC Generator Protection》的斟酌[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(12): 1-3.  
WANG Weijian, GUI Lin, WANG Lei, et al. Re-discussion of setting calculation for impedance element of generator loss-of-excitation protection: thinking of IEEE Guide for AC Generator Protection 2007[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(12): 1-3.

收稿日期: 2021-09-07; 修回日期: 2021-12-31

作者简介:

肖项涛(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统主设备故障分析及保护; E-mail: 19121511@bjtu.edu.cn

郝亮亮(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统主设备故障分析及保护、直流输电控制与保护、励磁控制。E-mail: llhao@bjtu.edu.cn

(编辑 许威)