

# 三峡左岸电站水轮发电机组失步保护

吴启仁, 尹项根

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 介绍了在 2003 年投产发电的三峡电站水轮发电机组 VGS 机型的配套失步保护。其中, 重点介绍了失步保护的原理、失步逻辑、参数整定等; 并就参数整定中的阻抗整定、系统振荡最大滑差频率做了详细阐述。

关键词: 发电机组; 失步保护; 失步逻辑; 参数整定

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)23-0058-04

## 0 引言

三峡电站供电范围为华中、华东、广东 3 地区。三峡电厂电能采用一级升压至交流 500 kV 送出, 出线 15 回。左岸电厂一母出线 5 回: 到重庆万县变 2 回(其中三万 回缓建), 到宜昌龙泉换流站 3 回, 左岸电厂二母出线 3 回到荆州换流站; 右岸电站一母出线 4 回: 2 回到葛洲坝换流站, 2 回送华中, 右岸电厂二母出线 3 回到右岸换流站。三峡电能通过龙泉、右岸和葛洲坝换流站 ±500 kV 直流送电华东, 通过荆州换流站 ±500 kV 直流送电广东。三峡电站的建成将极大地促进全国电力系统联网。三峡电站除出线上装设了线路继电器和重合闸外, 机组还装设了失步保护。

## 1 水电机组装设失步保护的必要性

三峡电厂电气主接线: 发电机与主变压器连接采用单元接线, 变压器高压侧设置断路器, 左岸电厂发电机出口不装设断路器, 两单元接线组成联合单元(左岸 7 个、右岸 6 个联合单元) 接入 3/2 接线的 500 kV 开关站。左岸电厂与右岸电厂之间无直接电气联系; 左、右岸电厂的 500 kV 母线均设分段断路器, 将母线各分为两段。

由于超高压线路装设了双重化的主保护, 线路故障能快速切除, 从而保证了系统的暂态稳定。但进一步从安全考虑, 当两套主保护由于某种原因失效, 要由线路后备保护带时限切除故障时, 则不能保证系统的暂态稳定。此时, 三峡电站机组会失步, 须将发电机组跳闸。为了保证水轮发电机组的安全和系统稳定运行, 必需对水轮发电机组装设失步保护。

## 2 三峡机组的失步保护

三峡左岸电站 14 台 70 万 kW 机组, 均装设失步

保护。14 台套机组中 8 台套由 ALSTOM 供货, 6 台套由德国 VOITH - SIEMENS 水电公司和加拿大 GE 联营体(简称 VGS 联营体) 供货。由于篇幅有限, ALSTOM 机组失步保护暂不介绍; 本文就 VGS 联营体供货的机组失步保护进行介绍。

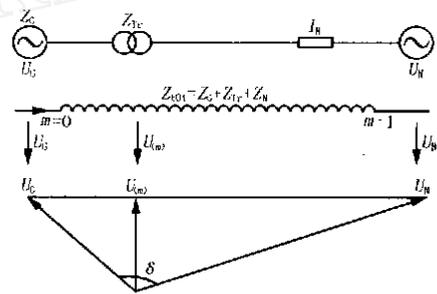


图 1 功率振荡等效图

Fig. 1 Equivalent diagram of power swing

### 2.1 失步保护原理

失步保护用阻抗测量来监测系统振荡, 计算复阻抗矢量的轨迹。而此计算量采用的是正序电压和正序电流量, 最终的跳闸条件取决于阻抗矢量变化率和系统振荡中心位置。失步状态可用以上等效电路图 1 说明。U<sub>G</sub> 和 U<sub>N</sub> 分别代表发电机电压和系统等效电压; Z<sub>G</sub>、Z<sub>T</sub>、Z<sub>N</sub> 分别代表发电机阻抗、变压器阻抗、系统阻抗。即 Z<sub>tot</sub> = Z<sub>G</sub> + Z<sub>T</sub> + Z<sub>N</sub>。

以 m 点为例, 失步保护安装处将 Z<sub>tot</sub> 分为 m · Z<sub>tot</sub> 和 (1 - m) · Z<sub>tot</sub>, 在 m 点的测量阻抗 Z(m) = U(m) / I(m), 电流 I(m) = I = (U<sub>G</sub> - U(m)) / Z<sub>tot</sub>; 测量点处电压 U(m) = U<sub>G</sub> - (m · Z<sub>tot</sub> · I), 又因为 U<sub>G</sub> = U<sub>G</sub> e<sup>jG</sup>, U<sub>N</sub> = U<sub>N</sub> e<sup>jN</sup>, ∠ = ∠<sub>G</sub> - ∠<sub>N</sub>, 所以

$$Z(m) = \left[ \frac{1}{1 - \left[ \frac{U_N}{U_G} e^{-j} \right]} - m \right] \cdot Z_{tot}$$

代表发电机电压与系统等效电压之间的偏移角, 通常 取决于负荷情形而且一般是固定的。它

在系统振荡中波动,在失步情况下的变化范围为  $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

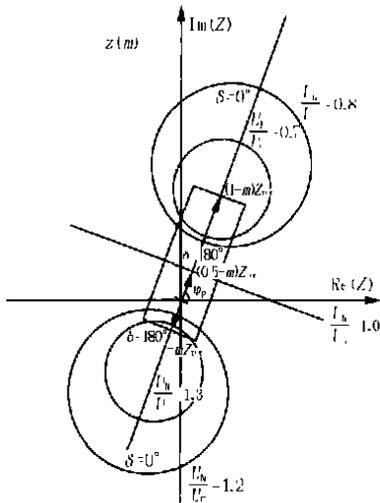


图2 在测量位置 M 处的阻抗

Fig.2 Impedance at the measurement location M

图2表示依据上述公式得到的阻抗矢量轨迹。当  $U_N/U_G$  确定后,  $Z(m)$  随  $\delta$  的变化而变化,最终形成一个圆轨迹。此圆的圆心和半径取决于  $U_N/U_G$ ,不同圆的圆心位于  $Z_{tot}$  所确定的一条直线上。测量阻抗最大值与最小值对应于  $\delta = 0^\circ$  与  $\delta = 180^\circ$  或测量点位于电气中心,则当  $\delta = 180^\circ$  时,  $U(m) = 0$  对应的  $Z(m) = 0$ 。功率振荡矩形:失步保护的测量特性是一个长方形,其宽度和倾斜角都是可调的,这可确保当时状况的最佳匹配。

### 2.2 失步逻辑

图3更详细地描述了失步多边形特性。设定  $\rho = 90^\circ$ ,此多边形由整定量  $Z_a, Z_b, Z_c$  与  $Z_d - Z_c$  决定。它关于纵轴对称,此多边形由 characteristic1 和 characteristic2 组成。当振荡中心落在发电机与变压器之间时, char1 起作用;当振荡中心落在系统中时, char2 发挥作用。对称轴与  $Z_b, Z_c, Z_d$  的交点决定 char1 和 char2 的分配情况。

系统振荡是一种三相对称事件,因为三相对称,所以负序电流很小。因此系统振荡的检测可采取正序电流  $I_1$  和负序电流  $I_2$ ,若正序电流  $I_1$  大于某一设定值,同时负序电流  $I_2$  小于某一设定值,可说明发生了系统振荡。系统振荡包括失步振荡与稳定振荡,而失步保护检测的是失步振荡。当阻抗矢量从多边形一边进入而从另一边出去时,表明发生了失步振荡。具体判别方法是阻抗的实部正负发生变化,即由正变负表明阻抗矢量由一边进而从另一边出;若阻抗矢量由一边进而从同一侧出来,则表明是

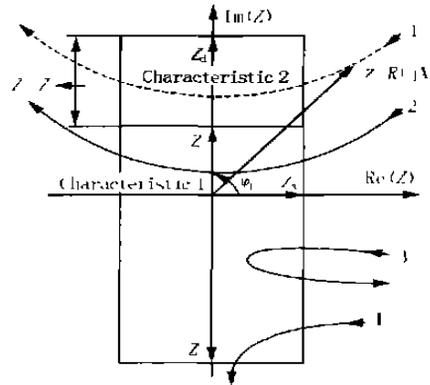


图3 失步特性多边形和典型功率振荡情况

Fig.3 Polygonal out-of-step characteristics and typical power swing

稳定振荡(如图3中3和4所示)。

当检测出失步振荡时,即阻抗矢量穿越失步特性图时,发相应信号并使计数器 n1(char1) 和 n2(char2) 递增。计数器为 1 时,表明失步保护已起动,以后每过一可调整时间,计数器递增一次,并指示出又一次失步振荡。若在此可调整时间内在没检测到失步,则自动复归失步起动。计数器每递增一次则重新触发可调整时间一次。若失步振荡次数达到某一个设定次数,则发跳闸令。此跳闸令保持时间为整定参数 T-HOLDING 整定的时间,当达到该时间失步起动返回时,起动 T<sub>min</sub> TRIP CMD。图4示出失步保护逻辑图,它包括 char1 和 char2 两段特性,可通过开入量闭锁此保护功能。

### 2.3 VGS 机组失步保护参数整定

三峡电站机组台数多,其分批投产发电。发电机失步保护测量点位于发电机机端的 PT、CT。整定计算中按最小方式(三峡4台机)计算系统阻抗,计算如下。

#### 2.3.1 起动

##### 1) 失步保护功能

整定范围: OFF; ON; 不投跳闸; 缺省定值: OFF; 整定原则: 发电机失步保护投入; 整定: OUT-OF-STEP = ON。

##### 2) 正序电流开放元件 $I_1 >$

整定范围: 20.0 ~ 400.0%; 缺省定值: 120.0%; 整定原则: 按 1.3 倍整定。

$$\text{整定: 二次标幺值, } I_1 = \frac{I_1}{I_{G.N}} \times \frac{I_{G.N}}{I_{N.CT.prim}} = 1.30$$

$$\times \frac{22.453}{15000} = 194.59\%$$

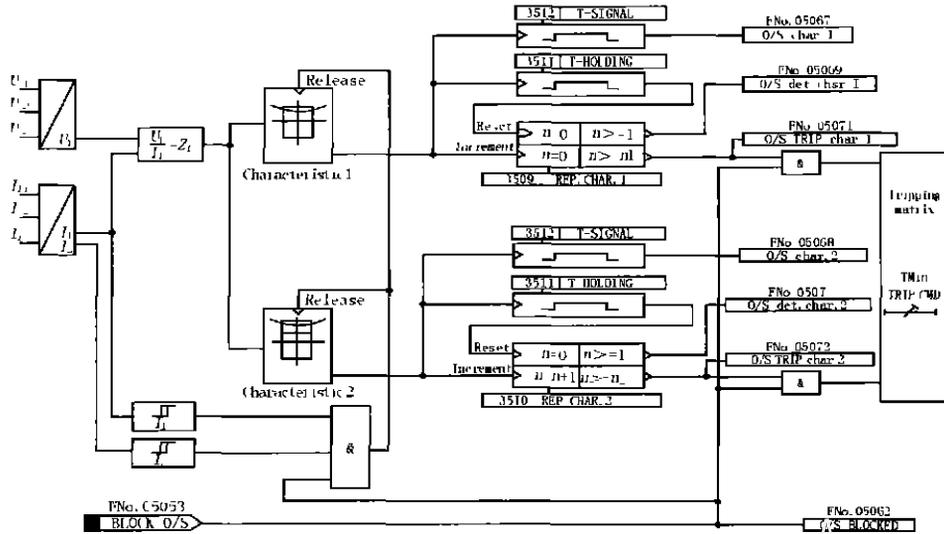


图4 失步保护逻辑图  
Fig. 4 Logic diagram of the out-of-step protection

$I_1 > RELEASE = 194\%$

3) 负序电流开放元件  $I_2 <$

整定范围: 5.0% ~ 100.0%; 缺省定值: 20.0%;

整定原则: 按 20% 额定电流整定。

整定: 二次标么值,  $I_2 = \frac{I_2}{I_{GN}} \times \frac{I_{GN}}{I_{N, CT, prim}} = 0.20$

$$\times \frac{22453}{15000} = 29.937\%$$

$I_2 < RELEASE = 29.9\%$

2.3.2 阻抗整定

阻抗整定值取决于系统振荡时的测量阻抗, 对于发电机方向(从变压器位置看过去), 发电机的系统振荡电抗必须考虑, 大约为发电机的暂态电抗  $X_d$ ; 发电机通过变压器连接到系统中, 在系统方向的整定值通常使 char1 中的  $Z_c$  为变压器阻抗值的 0.7 ~ 0.9, 而 char2 的范围达到系统侧, 即变压器阻抗剩下的一部分设置为  $Z_d - Z_c$  (地址 3507)。

1) 电阻定值  $Z_a$

整定范围: 0.20 ~ 130.0; 缺省定值: 4.50;

整定: 按系统小方式, 三峡 4 台机运行求系统阻

抗:  $Z_N = 0.0806$

$$X_{Tr} = 0.168 \times \frac{777.8}{840} = 0.15556$$

$$Z_{tot} = X_d + X_{Tr} + Z_N = 0.32 + 0.15556 +$$

$$0.8006 = 0.556$$

$$Z_a = 0.289 Z_{tot} = 0.289 \times 0.556 = 0.1607$$

$$\text{有名值: } Z_a = \frac{U_{N.g}}{\sqrt{3} \times I_{N.g}} \times Z_a = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 22453} \times$$

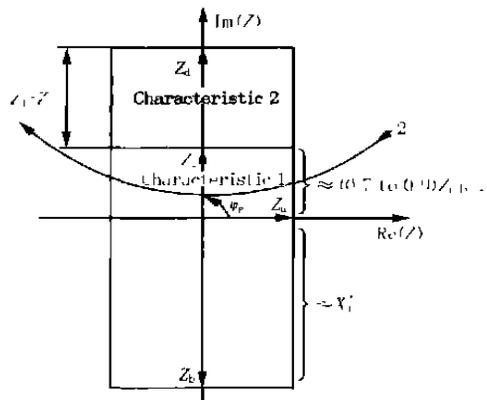


图5 功率振荡多边形  
Fig. 5 Power swing polygon

$$0.1607 = 0.08265$$

$$\text{二次值: } Z_a = 0.08265 \times \frac{15000/1}{20/0.1} = 6.20$$

$$Z_a = 6.20$$

2) 电阻定值  $Z_b$

整定范围: 0.10 ~ 130.0;

缺省定值: 12.00;

整定: 标么值,  $X_d = 0.32$  直轴暂态电抗非饱和值, 即发电机暂态电抗;

$$\text{有名值: } X_d = \frac{U_{N.g}}{\sqrt{3} \times I_{N.g}} \times X_d = \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 22453} \times$$

$$0.32 = 0.16457$$

$$Z_b = X_d = 0.16457$$

$$\text{二次值: } Z_b = 0.16457 \times \frac{15000/1}{20/0.1} = 12.34$$

$$Z_b = 12.34$$

3) 电阻定值  $Z_c$ 

整定范围: 0.10 ~ 130.0 ; 缺省定值: 3.60

整定:

$$X_{Tr} = \frac{U_{N,Tr}^2}{S_{N,Tr}} \times U_k \% \times \frac{U_{N,Th}^2}{U_{N,Th}^2} = \frac{(20 \times 10^3)^2}{840 \times 10^6} \times$$

$$16.8 \% = 0.08$$

$$Z_c = 0.9 \times X_{Tr} = 0.9 \times 0.08 = 0.072$$

$$\text{二次值: } Z_c = 0.072 \times \frac{15\,000/1}{20/0.1} = 5.40$$

$$Z_c = 5.40$$

4) 电阻定值  $Z_d - Z_c$ 

整定范围: 0.10 ~ 130.0 ; 缺省定值: 6.40

整定:

$$Z_d = Z_{Tr} + Z_N = 0.168 \times \frac{777.8}{840} + 0.0806 =$$

$$0.236$$

有名值:

$$Z_d = 0.236 \times \frac{20 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 22\,453} = 0.12145$$

$$\text{二次值: } Z_d = 0.12145 \times \frac{15\,000/1}{20/0.1} = 9.11$$

$$Z_d - Z_c = 9.11 - 5.40 = 3.71$$

$$Z_d - Z_c = 3.71$$

## 5) 特性倾斜角

整定范围: 60.0° ~ 90°; 缺省定值: 90°; 整定: PHI

POLYGON = 90°

## 2.3.3 系统振荡次数

参数 PEP.char.1 (3509) 决定 char1 失步振荡次数。对于 char1 通常此振荡次数规定为 1 或 2。因为当振荡中心落于此范围内不容许时间太长,而且此情况下系统振荡频率加快,所以发电机的电气压力和动态压力都相应增加。另一方面若振荡中心落在系统侧,则振荡次数容许稍长些,一般 PEP.char.2 (3510) 整定为 4。

## 1) char1 滑极次数

整定范围: 1 ~ 4; 缺省定值: 1; 整定: REP.char.1 = 1

## 2) char2 滑极次数

整定范围: 1 ~ 8; 缺省定值: 4; 整定: REP.CHAR.2 = 4

## 3) 故障检测保持时间

整定范围: 0.20 ~ 60.0 s; 缺省定值: 20 s; 整定: T-HOLDING = 20.0 s

## 4) 最小发信时间

整定范围: 0.02 ~ 0.15 s; 缺省定值: 0.05 s; 整定: T-SIGNAL = 0.05 s

## 2.3.4 系统振荡最大滑差频率

多边形中的  $Z_a$  可决定可检测系统振荡最大频率,可检测系统振荡最大频率  $f_p$  可依据下式计算:

$$f_p = \frac{4}{T} \cdot \frac{1}{Z_{tot}} \cdot \frac{Z_a}{Z_{tot}} \quad (T \text{ 表示交流周期})$$

对于额定频率 50 Hz ( $T = 0.02$  s) 可得:  $Z_a = 0.289 Z_{tot}$ ;  $f_p = 18$  Hz。

## 2.4 三峡左岸电站 VGS 机组失步保护特点及目前运行工况

通过对失步保护原理、失步逻辑、参数整定等方面资料的分析,VGS 机组失步保护具有以下特点:

- 1) 基于经实践证明可靠的阻抗测量方法。
- 2) 以序电流分量为启动元件,通过检测正序电流和负序电流判断系统振荡,且正序电流和负序电流两个门槛可分别整定。
- 3) 计算了复阻抗矢量的变化率。
- 4) 可调特性斜率保证与系统状况的最佳匹配。
- 5) 可靠辨别系统振荡中心在系统侧还是在发电机侧。

三峡左岸电站第 1 台机组 (VGS 机组) 于 2003 年 7 月 1 日投入试运行、7 月 7 日正式投入商业运行以来,目前已有 7 台机组发电 (VGS 机组 3 台,ALSTOM 机组 4 台)。截止目前未出现发电机失步情况,同时失步保护也未误动作过。

## 3 结语

如上分析,三峡左岸水轮发电机组装设的失步保护是必需的。当系统失去暂态稳定而导致机组失步时使机组跳闸,确保机组的安全和系统稳定运行。

## 参考文献:

- [1] 王维俭 (WANG Wei-jian). 电气主设备继电保护原理与应用 (The Theory and Application of Electric Main Equipment Protection) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1996.
- [2] 三峡水利枢纽工程初步设计报告 (机电分册) (Preliminary Design Report on the Three Gorges Water Conservancy, M&E) [Z]. 武汉: 长江水利委员机电设计院 (Wuhan: Changjiang Water Resources Commission), 1996.

(下转第 71 页 continued on page 71)

否,是保证母线差动保护制动特性的前提条件。

在此次中阻抗母线差动保护误动后开展的反措的过程中,花都供电公司其中一套保护的差流整流回路中的二极管发生接近软击穿现象,用 500 V 摇表测量,仅 5 M $\Omega$ 。根据故障时短路电流在整流回路中的分配情况,在短路电流较大的枢纽变电站,某只二极管将承受所有的故障电流的总和,在短路电流较大时,会导致二极管损坏,并造成其他二极管工作条件恶劣,二极管元器件损坏的情况增加,使事故扩大。

所以此次中阻抗母线差动保护整流回路中二极管开展的反措是很有必要的,而且在执行反措的过程中,还对差电流整流回路、引导二极管等相关回路进行了检查,因为这些二极管的作用同样很重要。但由于中阻抗母线差动保护整流回路的二极管存在老化损坏的可能,而且在运行中无法进行实时监测,为了防止类似事故的发生,建议在今后安排更换为微机型母差保护。

### Simply analyzing the countermeasure of mid-impedance bus differential protection s rectifying circuit

HAN Wei-min<sup>1</sup>, YANG Cheng-sheng<sup>2</sup>

(1. Huadu Power Supply Branch, Guangzhou 510800, China; 2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The theory of mid-impedance bus differential protection is introduced and its restricted characteristics are qualitatively analysed and inferred. The necessary condition of the bus protection s normal working is pointed out. According to the local accident instance, the necessity of countermeasure to the protected rectifying circuit is rectified and analysed.

**Key words:** mid-impedance bus differential protection; restricted characteristics; rectifying circuit; countermeasure; necessity

(上接第 61 页 continued from page 61)

- [3] Voith-Siemens Relay Protective Guide 027[Z]. 2003.
- [4] 史世文(SHI Shi-wen). 大电机继电保护(Protection for Large Generator)[M]. 北京:水电出版社(Beijing: Water and Electricity Publishing Company), 1987.
- [5] 史世文(SHI Shi-wen). 大型发电机失步保护及低阻抗保护探讨(Discussion of Out-of-step Protection and Low Impedance Protection for Large Generator)[J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 1981, 1(2): 23-25.
- [6] 王维俭,候炳蕴(WANG Wei-jian, HOU Bing-yun). 大型机

### 3 结论

由于晶体管保护元件的不可靠性造成了保护的误动,除了继续改进硬件回路、增强继电保护人员的水平外,使用先进可靠的保护,才能避免事故的再次发生。

### 参考文献:

- [1] 贺家李(HE Jia-li). 继电保护原理(The Theory of Relay Protection)[M]. 天津:天津大学出版社(Tianjin: Tianjin University Press), 1988.

收稿日期: 2004-03-19; 修回日期: 2004-08-12

### 作者简介:

韩卫民(1972 - ),男,工程师,从事继电保护运行管理、整定计算工作; E-mail: hdhwm@21cn.com

杨乘胜(1977 - ),男,助理工程师,从事变电站综合自动化设计工作。

组继电保护原理与实践(Theory and Practice of Protection for Large Unit)[A]. 中国电机工程学会(Chinese Society for Electrical Engineering). 1990.

收稿日期: 2004-03-31; 修回日期: 2004-04-20

### 作者简介:

吴启仁(1972 - ),男,硕士研究生,目前从事电力系统及其自动化继电保护研究; E-mail: wu-qiren@ctgpc.com.cn

尹项根(1956 - ),男,博士导师,教授,主要从事电力系统继电保护、变电站综合自动化等研究。

### Out-of-step protection for hydro-generators of power plant at Three Gorges left bank

WU Qi-ren, YIN Xiang-gen

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Out-of-step protection equipped with VGS hydro-generators of Three Gorges power plant, which came to commission in 2003, is introduced. Thereinto, principle, logic and parameters setting of out-of-step protection are detailed. The impedance settings and maximum frequency power swing in parameters setting are discussed.

**Key words:** generating units; out-of-step protection; logic of out of step protection; parameters setting