

DOI: 10.7667/PSPC171317

## 程跳逆功率保护拒动原因分析及改进技术研究

肖小龙<sup>1</sup>, 余艳伟<sup>2</sup>, 曹浩军<sup>3</sup>

(1. 华能陕西渭南热电有限公司, 陕西 渭南 714000; 2. 河南机电职业学院, 河南 新郑 451191;  
3. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 目前国内不同区域的几台 660 MW 机组陆续发生发电机程跳逆功率保护拒动事故。通过对保护装置的逻辑及计算原理进行分析, 结合现场运行的实际情况对拒动装置进行校验, 发现保护装置在功率平面上的实际动作曲线与理想动作曲线有较大偏差。根据逆功率保护算法原理分析该偏差来自功率因数角的采样误差, 由此面向装置生产厂家给出了功率因数角的优化计算方法。同时针对采用程跳逆功率保护的用户提出了在无功水平很低时进行打闸操作的最优运行策略。

**关键词:** 发电机; 程跳逆功率保护; 拒动; 功率因数角

### Analysis and improved technology research of process-control reverse power protection refusing trip

XIAO Xiaolong<sup>1</sup>, YU Yanwei<sup>2</sup>, CAO Haojun<sup>3</sup>

(1. Huaneng Shaanxi Weinan Thermoelectric Co., Ltd., Weinan 714000, China; 2. Henan Mechanical and Electrical vocational college, Xinzheng 451191, China; 3. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** At present, several sets of 660 MW units in different regions in China have occurred refusing trip failure of generator process-control reverse power protection in succession. Through the analysis of the action logic and calculation principle of the protection device, under the actual situation of the on-site operation of the system, the device which refused to trip is checked, finding out that the actual operating curve of the protection device in the power plane is greatly deviated from the ideal action curve. According to the principle of reverse power protection algorithm, the deviation is derived from the sampling error of the power factor angle. Therefore, the optimal calculation method of the power factor angle is given from the device manufacturer. And present, an optimal operating strategy for manual trip is proposed for the users who adopt process-control inverse power protection when the reactive power level is very low.

**Key words:** generator; process-control reverse power protection; refusing trip; power factor angle

## 0 引言

近年来随着中国电力需求的增长及节能环保政策的要求, 超高压、特高压电网和大型发电机组已成为一种必然的选择方向。大型发电机组在运行过程中会因正常操作或设备消缺需要而进行人工停机, 按照国能安全【2014】161号《防止电力生产事故的二十五项重点要求》规定, 大型发电机组为了防止汽轮机超速不应采用热工保护直跳的方式, 而应采用程序跳闸的方式进行停机<sup>[1]</sup>。此外, 大型发电机定子绕组对称过负荷保护、转子表层负序过负荷保护等异常运行保护通常也设置为程序跳闸的出

口方式。程序跳闸方式首先关闭汽轮机主汽门, 当主汽门完全关闭后, 经过一段时间发电机从发电状态转为电动机运行状态, 发电机有功功率变为负值, 当达到逆功率继电器动作功率值后断开发电机或发电机变压器组断路器、灭磁并切换厂用电源, 实现机组可靠停机。因此, 用于程序跳闸的程序逆功率保护的可靠性对于大型发电机组显得尤为重要。

但近些年随着西北地区750 kV特高压电网的投运, 接入该电网的大型电厂(单机容量 600 MW 级)陆续发生多起人工停机后发电机程序逆功率保护拒动的异常现象, 这不得不引起我们足够的重视。本文将结合上述案例就发电机程跳逆功率保护未正确动作的原因进行分析并提出技术改进意见。

## 1 保护装置动作逻辑及计算原理

### 1.1 保护逻辑

并网运行的发电机主汽门关闭(辅助触点闭合)、PT 无断线信号、发电机从系统吸收有功功率并达到一定值后,保护装置动作,发信及启动程控跳闸并出口解列灭磁<sup>[3]</sup>。以某 660 MW 机组 WFB—805 系列发电机变压器成套保护装置为例,其保护动作逻辑如图 1 所示,具体动作流程如下:

1) 该保护软、硬压板皆投入且程序逆功率保护控制字置“1”。

2) 程跳逆功率启动元件动作。

3) 主汽门关闭位置反馈触点闭合。

4) 反向有功大于整定值。

当且仅当以上条件全部满足时,保护经 1.5 s 延时出口跳闸,出口方式为全停 1。

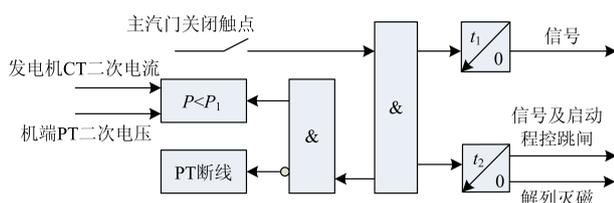


图 1 发电机程跳逆功率保护逻辑图

Fig. 1 Logic diagram of generator process-control inverse power protection

### 1.2 计算原理

根据电力系统故障分析对称分量法理论可知,当发电机外部发生任何故障时,每一相的正序电压总是超前与其对应的正序电流,超前角即为等效阻抗角,此时发电机输出有功功率。因此,当发电机正常运行及发生外部故障情况时,发电机均向外输出有功功率,该输出功率记为正值;当发电机作为电动机运行时(暂不考虑发电机内部故障),发电机从系统吸收有功功率,该有功功率记为负值。发电机逆功率保护装置通过判断发电机从系统吸收有功功率是否达到整定值,从而启动逆功率保护。这种算法可以使逆功率保护中不必设置PT和CT二次断线闭锁装置<sup>[4-5]</sup>。

WFB—805 系列发电机变压器成套保护装置逆功率保护按三相接线,电压取自发电机机端PT,电流取自发电机机端(或中性点)CT。其功率算法如式(1)所示,通过三相电压与其对应相电流相量积的和计算,且发电机输出有功功率记为正值。

$$P = U_a \times I_a \times \cos \phi_a + U_b \times I_b \times \cos \phi_b + U_c \times I_c \times \cos \phi_c \quad (1)$$

式中,  $\phi$  为电压超前电流的角度。

此外,国内其他几种主流发电机变压器组保护装置,如 RCS—985 系列发电机变压器成套保护装置、DGT 801 系列数字式发电机变压器组保护装置等,逆功率保护输入量也均为机端三相电压和三相电流,但算法原理稍有区别。其功率算法如式(2)所示,通过三相正序电压与其对应正序电流相量积的和计算,且发电机输出有功功率记为正值。

$$P = U_{a1} \times I_{a1} \times \cos \phi_1 + U_{b1} \times I_{b1} \times \cos \phi_1 + U_{c1} \times I_{c1} \times \cos \phi_1 \quad (2)$$

式中,  $\phi_1$  为正序电压  $U_{a1}$  超前正序电流  $I_{a1}$  的角度。

程跳逆功率保护的定值一般是按照《大型发电机组保护整定计算导则》(DL/T 684-2012)进行整定的,如式(3)所示。

$$P_{set} = \text{rel}(P_1 + P_2) \quad (3)$$

式中:  $P_1$  为汽轮机在逆功率运行时的最小损耗;  $P_2$  为发电机在逆功率运行时的最小损耗;  $P_{set}$  一般整定为  $(0.5\% \sim 2\%)P_{gn}$ ,  $P_{gn}$  为发电机额定功率。

按主汽门关闭后实测的逆功率值进行校核。而这个实测逆功率值一般也是比较小的。

## 2 保护装置检查及异常现象分析

本文以华能 QL 电厂(2×660MW)7 号机组 WFB—805 系列发电机变压器成套保护装置逆功率保护的工作情况为例,对故障装置按照工作逻辑逐项检查。

1) 检查该厂“7 号发变组保护主汽门关闭”位置反馈触点开入,经试验在主汽门实际开关时,主汽门关闭开入信号能正确瞬时地反馈到 7 号发变组保护开入量内。

2) 检查该厂 7 号发变组程跳逆功率保护整定正确,整定值与定值通知单一致。校验程跳逆功率保护模拟量采样通道精度,其结果满足误差要求。

3) 检查该厂 7 号发变组程跳逆功率保护所用的 PT(机端 8LH)和 CT(机端 1YH),伏安特性曲线无异常,保护交流模拟量输入回路正常,无分流、分压等影响模拟量输入准确性的现象。带负荷后通过比对在相同的一次电流、电压下机端各组 CT 和 PT 二次侧的模拟量输入采样值,基本相同,误差满足要求,从而证明 7 号发变组程跳逆功率保护用的 CT(机端 8LH)和 PT(机端 1YH)能够正确地把一次侧电气量传递给二次侧的保护装置。

4) 对保护装置定值及逻辑进行校验。程跳逆功率保护装置的保护定值如表 1 所示。

表 1 程跳逆功率保护装置保护定值

Table 1 Protection setting value of process-control inverse power protection device

指标	保护定值
有功功率动作值 $P/W$	4.2
保护装置动作时间 $t/s$	1.5

利用 AD661 微机保护测试仪对装置的定值及逻辑进行校验,在此,不采用常规只输入纯有功功率进行测试的方法,而是通过改变 A 相电压和电流的相位关系,采用控制变量法测量程跳逆功率保护动作值,对程跳逆功率保护装置的保护定值进行校验<sup>[6-11]</sup>。以本文所采用的装置为例,设定装置校验的起始工作条件为  $I_A = I_B = I_C = 0.3 A$ ,  $U_A = U_B = U_C = 10 V$ ,其中  $I_A$  超前  $I_B$   $120^\circ$ ,  $I_B$  超前  $I_C$   $120^\circ$ ,  $U_A$  超前  $U_B$   $120^\circ$ ,  $U_B$  超前  $U_C$   $120^\circ$ 。在  $U_A$  超前及滞后  $I_A$  两种情况下,逐渐减小  $U_A$  与  $I_A$  间的夹角,变化范围在  $180^\circ$  到  $95^\circ$  之间,同时保持三相电压幅值及三相电压、电流的正序关系不变,调节三相电流值使发电机程跳逆功率保护动作,测得数据如表 2 所示。

表 2 程跳逆功率保护装置实际动作定值

Table 2 Actual action value of process-control reverse power protection device

$\phi_a / (^\circ)$	$P/W$	$Q/var$
180	-4.190	0
170	-4.195	-0.740
160	-4.219	-1.536
150	-4.226	-2.440
140	-4.244	-3.561
130	-4.275	-5.094
120	-4.305	-7.456
110	-4.385	-12.047
100	-4.635	-26.284
95	-5.420	-61.953
-180	-4.190	0
-170	-4.166	0.735
-160	-4.144	1.508
-150	-4.122	2.380
-140	-4.106	3.445
-130	-4.056	4.834
-120	-4.000	6.928
-110	-3.902	10.722
-100	-3.631	20.592
-95	-3.188	36.441

通过对保护装置试验数据分析,明显可看出:该程跳逆功率保护动作值(绝对值)的大小伴随着无功功率的增加而呈现出逐渐减小的趋势。保护装置只有在发电机无功功率为零时,才能按照保护整定值动作,其他工况下并不能按照整定值正确动作。其在功率平面上的实际保护动作曲线与保护装置说明书上给出的曲线不相符合,如图 2 所示。

同样, RCS—985 系列发电机变压器成套保护装置、DGT 801 系列数字式发电机变压器组保护装置的程序逆功率保护原理也存在类似问题,即逆功率继电器的实际动作特性与理想动作特性不一致。可见目前发电机程跳逆功率保护的自身原理是存在设计缺陷的。

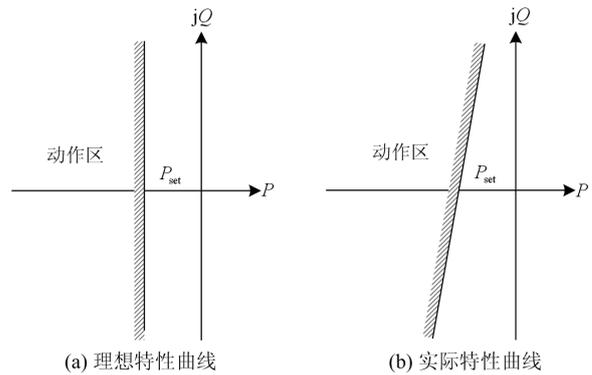


图 2 保护动作特性曲线

Fig. 2 Characteristic curve of protection action

### 3 保护装置拒动原因分析及改进技术研究

#### 3.1 不正确动作原因分析

通过以上试验和分析可知,目前的程跳逆功率保护装置在有功功率的计算上存在误差,且主要误差是来自对功率因数角的采样。功率因素角越趋于  $90^\circ$ ,误差越大。从 WFB—805 系列发电机变压器成套保护装置的实测数据来看,最大误差出现在  $\phi_a = 95^\circ$  时,保护装置的测量值与电气量实际值的误差达到 29%。由图 2 的实际特性曲线可知,在进相运行中,发电机实际的负有功功率虽达到整定值时,程跳逆功率保护可能拒动;在滞相运行中,发电机实际的负有功功率尚没达到整定值时,程跳逆功率保护可能误动。

这样,当正常停机操作时,发电机刚好处在较深进相的工况下,主汽门关闭后,发电机的有功功率变为负值,这个实际的负有功功率值虽已超过保护装置程跳逆功率整定值,但由于此工况下,保护装置测量到的逆功率值比发电机实际有功功率值偏小,达不到保护动作定值,从而造成保护装置发生拒动的现象。

### 3.2 改进技术研究

针对功率因数角的测量误差, 可以在软硬件设计方面做出相应的改进, 如通过相位差法减小同步误差, 通过记录采样初相角动态修正采样频率减小频差序数, 通过旋转因子运算减小舍入误差等手段。

在功率因数角测量的计算过程中, 先利用 FFT 求出电压电流向量, 所求向量如图 3 所示。由等面法可计算出相应功率因数角, 计算公式如式(4)、式(5)、式(6)所示。该方法计算简单步骤少, 可以有效地减小功率因数角的测量计算误差<sup>[12-15]</sup>。

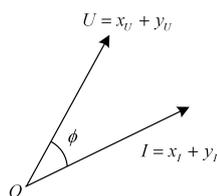


图 3 FFT 变换后电压电流向量

Fig. 3 Voltage and current vectors with FFT transform

$$S_{\Delta UIO} = |\hat{U}| \cdot |\hat{I}| \cdot \sin \varphi \quad (4)$$

$$S_{\Delta UIO} = \begin{vmatrix} x_U & y_U & 1 \\ x_I & y_I & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{2}(x_U \cdot y_I - x_I \cdot y_U) \quad (5)$$

$$\sin \varphi = \frac{x_U \cdot y_I - x_I \cdot y_U}{\sqrt{(x_U^2 + y_U^2) \cdot (x_I^2 + y_I^2)}} \quad (6)$$

对于逆功率因计算延迟造成计算结构偏小的情况, 可以通过采集故障前后几个时窗的信息, 进行逆功率因数的积分计算, 从而得到较为准确的计算。

此外, 目前该保护装置在无功率绝对值很小时, 保护装置对机组有功功率的测量值与其实际值接近相等, 因此现有用户可以在此时进行打闸停机操作。

对保护装置采取上述改进措施后重新整定保护定值, 或者机组停机操作时, 注意在无功率水平很低时进行打闸操作, 基本可以解决现有机组拒动问题。

### 4 采取措施后的效果

华能 QL 电厂 7 号机组(660 MW)采用的是某公司生产的 WFB—805 系列发电机变压器成套保护装置。2015 年 4 月 4 日, 7 号机组正常停机操作, 运行人员手动关闭“危急保安器”(手动打闸)后, 机组实际有功功率虽已达到程跳逆功率保护动作定值, 但程跳逆功率保护拒动, 未解列灭磁。经调取 DCS 上打闸时刻机组无功功率曲线查看, 发现打闸

时刻机组从系统吸收无功功率 63.8 MVar。

另外, 陕西华电 YH 电厂 1 号机组(660 MW)采用的是某公司生产的 RCS—985 系列发电机变压器成套保护装置。该机组于 2015 年 6 月 13 日正常停机时, 运行人员手动打闸后, 机组实际有功功率虽达到程跳逆功率保护动作定值, 但程跳逆功率保护拒动。调取 DCS 上打闸时刻机组无功功率曲线查看, 发现打闸时刻机组从系统吸收无功功率 149.9 MVar。

按照本文给出的措施, 华能 QL 电厂运行部制定相应制度, 要求运行人员在停机操作时, 先将发电机无功功率的绝对值调整到很低水平后, 再进行手动打闸操作。采取该措施后, 从 2015 年 4 月 4 日至今, 多次停机操作, 发电机程跳逆功率保护均能正确动作。同时, 陕西华电 YH 电厂运行部也实行同样的制度, 截止目前, 机组数次停机, 发电机程跳逆功率保护也都能正确动作, 有效地解决了保护拒动的问题。

### 5 结论

现行各厂家生产的微机型发变组保护装置的程跳逆功率保护动作特性较差, 发电机在不同工况下停机, 保护动作所需的有功功率值不同。随着发电机吸收无功功率的增大, 其动作所需逆向有功功率值越大, 即动作功率值不再是理论上的直线。

针对目前程跳逆功率保护停机的状况, 提出以下建议:

- 1) 各发变组保护生产厂家应对保护装置的功率采样功能进行检查和校验, 并采取切实可行的改进措施。
- 2) 运行中的发电厂, 应注意打闸时刻发电机无功功率的绝对值保持在很低水平。

### 参考文献

[1] 陈超虎, 王永乐. 发电机组电气原因非计划停运分析及对策研究[J]. 设备管理与维修, 2016(8): 29-31.  
CHEN Chaohu, WANG Yongle. Analysis and countermeasure study on the electrical reasons of generator sets[J]. Plant Maintenance Engineering, 2016(8): 29-31.

[2] 王友明. 逆功率保护的运行问题及其对策[J]. 电力安全技术, 2006, 8(1): 30-31.  
WANG Youming. The operation of reverse power protection and its countermeasures[J]. Electric Safety Technology, 2006, 8(1): 30-31.

[3] 陈刚, 杨国辉. 一次大联锁试验中灭磁开关拒动的分析及处理[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 222-223, 230.  
CHEN Gang, YANG Guohui. Analysis and solution of

- the excitation switch refusing trip in an interlocking experiment[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 222-223, 230.
- [4] 冯亚光. 6 kV 厂用电自动切换失灵的分析[J]. 电力安全技术, 2006, 8(1): 18.  
FENG Yaguang. 6 kV auxiliary power switch failure analysis[J]. Power System Protection and Control, 2006, 8(1): 18.
- [5] 金建波, 董晓英, 李志超. 三峡水力发电厂水轮发电机组逆功率保护应用分析[J]. 华电技术, 2010, 32(3): 17-18.  
JIN Jianbo, DONG Xiaoying, LI Zhichao. The Three Gorges hydropower plant water wheel generator reverse power protection application analysis[J]. Huadian Technology, 2010, 32(3): 17-18.
- [6] 杨慧霞, 余姿雨, 赵瑞辰, 等. 继电保护装置测试用例智能生成技术的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 124-129.  
YANG Huixia, YU Ziyu, ZHAO Ruichen, et al. Research and implementation of intelligent generation technology for test case of relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 124-129.
- [7] 崔敏, 梁爽, 洪瑜, 等. 一起大型机组逆功率保护动作[J]. 河南科技, 2016(11): 130-131.  
CUI Min, LIANG Shuang, HONG Yu, et al. A reverse power protection action of a large generator[J]. Henan Science & Technology, 2016(11): 130-131.
- [8] 周特军, 邱建, 王春艺, 等. 基于 SVG 的可视化技术在继电保护定值在线校核系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 112-117.  
ZHOU Tejun, QIU Jian, WANG Chunyi, et al. Application of visualization technology based on SVG in on-line relay settings verification system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 112-117.
- [9] 毛锦庆, 屠黎明. 电力设备继电保护技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [10] 查卫华, 王建成, 李德佳. WFB-100 微机保护在秦山第二核电厂的应用[J]. 继电器, 2003, 31(6): 73-77.  
ZHA Weihua, WANG Jiancheng, LI Dejia. Application of WFB-100 microprocessor-based protection in Qinshan nuclear power station[J]. Relay, 2003, 31(6): 73-77.
- [11] 徐业荣, 包明磊, 李玉平, 等. 大型汽轮发电机失磁保护定值整定探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 154-159.  
XU Yerong, BAO Minglei, LI Yuping, et al. Discussion on setting calculation of large steam turbine generator loss-of-excitation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 154-159.
- [12] 刘轩, 王士敏. 软件设计中减小交流采样测量功率因数误差的一些方法[J]. 电测与仪表, 2005, 42(12): 10-13.  
LIU Xuan, WANG Shimin. Some methods for software design to improve precision of power factor measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2005, 42(12): 10-13.
- [13] 王艳萍, 吴兵. 基于 CPLD 的电动机软启动控制系统中功率因数角的测量[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2006, 20(4): 64-66.  
WANG Yanping, WU Bing. The measurement of power factor angle in the control system of motor soft starter based on CPLD[J]. Journal of Shandong University of Technology (Science & Technology), 2006, 20(4): 64-66.
- [14] 路秋生, 石红梅. 功率因数校正与实现[J]. 电子世界, 2011(15): 17-19.  
LU Qiusheng, SHI Hongmei. Power factor correction and implementation[J]. Electronics World, 2011(15): 17-19.
- [15] 李凯. 功率因数校正技术研究及校正控制芯片设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
LI Kai. Research on power factor correction technology and its controller chip design[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.

收稿日期: 2017-07-04; 修回日期: 2017-09-16

作者简介:

肖小龙(1979—), 男, 本科, 工程师, 从事发电厂电气技术管理工作; E-mail: 13572735138@139.com

余艳伟(1980—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为配电网自动化;

曹浩军(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为发电厂继电保护及发电机励磁控制。

(编辑 张爱琴)