

## 发电机失磁保护低电势圆的推导及其动作特性分析

李田刚<sup>1</sup>, 王钢<sup>2</sup>

(1. 广东省电力工业局试验研究所, 广东 广州 510600; 2. 华南理工大学, 广东 广州 510640)

**摘要:** 水轮发电机失磁后, 进入静稳边界的时间很短, 且不允许发电机在异步状态下运行, 必须直接动作于跳闸, 因此, 尽早正确地检测出失磁故障, 就显得意义重大。发电机失磁后, 一个明显的特征就是低电势。基于以无穷大系统电压为参考相量的电压相量图, 利用电压平面、阻抗平面、导纳平面之间的互演关系, 对柳焕章先生提出的发电机失磁保护低电势圆判据进行了推导, 并对低电势圆的动作特性进行了分析和仿真。得出低电势圆具有很高的灵敏度和反应速度。同时, 对于主变高压侧短路故障引起的干扰, 低电势圆具有很强的识别能力。仿真结果证明了推导过程和推理过程的正确性。

**关键词:** 失磁; 失磁保护; 低电势圆; 发电机

## Induction of the low potential criterion for loss-of-excitation protection and its action analysis

LI Tian-gang<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China;

2. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Since hydraulic generator runs into asynchronous state quickly and its sequent is very seriously, the response time of loss-of-excitation protection means lot to the hydraulic generator. Low potential is one of the most important characters while the generator is in loss of excitation process. Based on the generator voltage vector diagram, a low potential criterion has been well discussed in this paper by utilizing three panels: voltage panel, impedance panel and conductance panel. The action of the low potential criterion has also been studied carefully. It shows that the low potential criterion is more sensitive, has shorter react time, even it can distinguish the loss-of-excitation and the short circuit fault occurs on the high voltage side of the main transformer. Simulation results given in the end of the paper proved its validity.

**Key words:** loss of excitation; loss-of-excitation protection; low potential criterion; generator

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)19-0005-04

## 0 引言

水轮发电机失磁后, 很快突破静稳边界, 过渡到异步运行。由于横轴和纵轴的不对称, 进入异步运行后, 同步功率和凸极功率将会引起机组强烈的机械震动和电气震动, 严重危及机组和电网的安全。因此, 尽早正确地检测出失磁故障, 防止机组误跳闸, 对水轮发电机具有重大意义。

发电机失磁后一个明显的特征就是低电势。本文基于无穷大系统电压相量图, 对低电势圆判据进行了推导, 经过分析和仿真得出, 低电势圆比目前的定子静稳边界阻抗判据更加灵敏快速, 从而可以通过更早的采取措施, 提高机组稳定运行的可靠性, 保障机组安全运行。

## 1 低电势圆

## 1.1 电压平面的失磁过程分析

图1是水轮发电机正常运行时的电压相量图。

在相量图中引入凸极等效同步电势 $\Sigma_d$ <sup>[1]</sup>, 由相量图可知:

$$\Sigma_d = u_{st} + jX_{d\Sigma} I \quad (1)$$

式中:  $X_{d\Sigma} = X_d + X_{st}$ 。

式(1)表明, 引入凸极等效同步电势的概念以后, 水轮发电机和汽轮发电机就具有了相同形式的电压相量图形式, 因此根据该电压相量图必定也可以推导出如下类似于汽轮发电机功角特性的功角特性方程:

$$P = \frac{\Sigma_d u_{st}}{X_{d\Sigma}} \sin \delta \quad (2)$$

因此有

$$\Sigma_d \sin \delta = X_{d\Sigma} P / u_{st} \quad (3)$$

发电机失磁后的最初阶段, 有功 $P$ 及系统电压都保持恒定, 从而 $\Sigma_d \sin \delta$ 保持恒定。因此发电机凸极等效同步电势将沿L1水平向左进入进相运行

区域。L1 也称等有功线，不同的有功对应不同的等有功线，等有功线平行于无穷大系统电压线。同样也可以推导出关于凸极等效同步电势的无功功角特性方程，并得到等无功线。等无功线垂直于系统电压。垂足在系统电压处的直线 L2，是进相运行和滞相运行的边界。

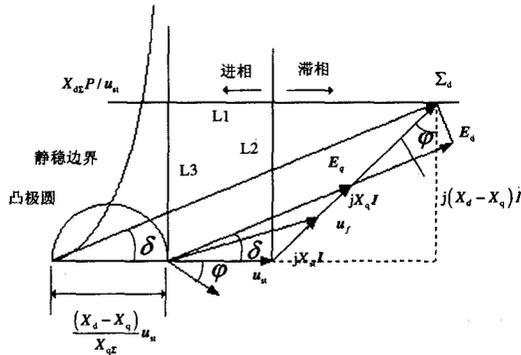


图 1 水轮发电机正常运行的电压相量图

Fig.1 Vector diagram of hydraulic generator in normal operation

### 1.2 低电势圆的推导

在机端阻抗平面上，由发电机向内，则定子电势处的观测点在纵轴的负方向上，设其为 \$(0, -X\_z)\$，\$Z\_z\$ 为定子电势处观测到的机端测量阻抗，如图 2 所示。

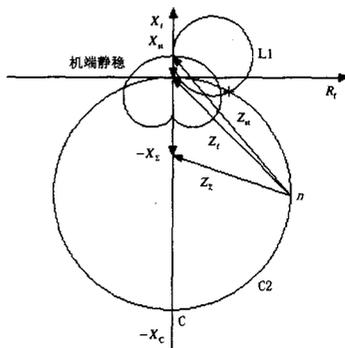


图 2 机端阻抗平面示意图

Fig.2 Generator impedance characteristic of the low potential criterion

发电机失磁后，电势 \$E\_d\$ 将降低，当降低到一定值时认为发生了失磁故障。因为无穷大系统电压 \$u\_{st}\$ 不变，则令不同运行条件下失磁时 \$\frac{\Sigma\_d}{u\_{st}} = K\$，\$K\$ 为常数，则

$$\frac{\Sigma_d}{u_{st}} = \frac{IZ_z}{IZ_{st}} = \frac{Z_z}{Z_{st}} = K \quad (4)$$

动点 \$n\$ (\$n\$ 对应于不同的运行状态) 至固定点 \$(0, X\_z)\$ (凸极等效同步电势处) 和 \$(0, X\_{st})\$ (无穷大系统处) 的距离之比 (\$Z\_z : Z\_{st}\$) 为常数，其轨迹方程为圆，推导得：

$$\frac{Z_z}{Z_{st}} = \frac{\sqrt{R_n^2 + (X_n + X_z)^2}}{\sqrt{R_n^2 + (X_n - X_{st})^2}} = K \quad (5)$$

由以上分析可知，发电机失磁时对应的电势反映在机端阻抗平面上是一种等电压圆，称之为低电势圆，其中 \$K\$ 和 \$X\_z\$ 为未知量。圆心坐标为

$$\begin{cases} R_c = 0 \\ X_c = -\frac{X_z + K^2 X_{st}}{1 - K^2} \end{cases}, \quad \text{半径为 } \left| \frac{K(X_z + X_{st})}{1 - K^2} \right|$$

根据发电机失磁的特点，低电势圆的选取原则可定为：①发电机的无功功率为负值；②发电机在额定功率附近运行时，应具有足够的灵敏度和精度<sup>[2]</sup>。为了寻找能够和发电机失磁、静稳破坏相联系的等电势圆，将低电势圆反演到系统端电压平面，如图 3 所示。

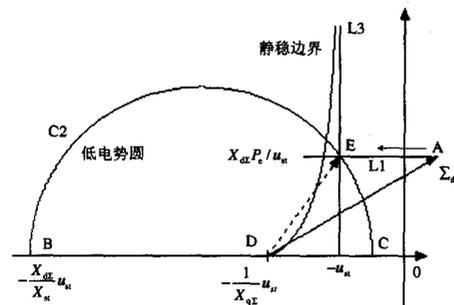


图 3 系统电压相量平面

Fig.3 System voltage vector diagram of the low potential criterion

根据原则①，低电势圆在机端阻抗平面上可选择经过原点，以保证等电势圆是在吸收无功的条件下，反演到系统电压平面上是 B 轴的 \$(0, -\frac{X\_{st}}{X\_c} u\_{st})\$ 点。在系统电压平面上，可选取额定功率与静稳边界渐近线 L3 的交点 E，从而满足在额定功率附近运行时低电势圆具有较好的灵敏度和精度，反演到机端阻抗平面是额定等有功圆与静稳渐进圆的交点。可以推导得：

$$\begin{cases} K = \frac{X_c}{X_c + 2X_{st}} \\ X_z = \frac{X_c X_{st}}{X_c + 2X_{st}} \end{cases} \quad (6)$$

因为保护装置能够采集到的是机端的电气量，因此由图 2 可得低电势圆的动作特性为：

$$|Z_f + X_\Sigma| = |Z_\Sigma| < K |Z_{st}| = K |Z_f + X_{st}| \quad (7)$$

即:

$$|u_f + jIX_\Sigma| < K |u_f - jIX_{st}| \quad (8)$$

根据上式, 可以构成以系统电压  $u_{st}$  为极化量的绝对值比较式阻抗继电器。式中  $K < 1$  表示低电势。令  $u_{st} = 1$ , 得:

$$\begin{cases} B_{C2} = \frac{X_{st}^2 - X_{d\Sigma}^2 + X_{d\Sigma}^2 X_{st}^2 P_e^2}{2X_{st}(X_{d\Sigma} - X_{st})} \\ G_{C2} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

因此可以推导出在电压平面上 C 点的坐标为:

$$\begin{cases} B_C = \frac{X_d - X_{st} X_{d\Sigma}^2 P_e^2}{X_d} \\ G_C = 0 \end{cases} \quad (10)$$

将其反演至机端阻抗平面上, 得图 2 中:

$$X_C = \frac{X_{d\Sigma} X_d}{X_d - X_{st} X_{d\Sigma}^2 P_e^2} - X_{st} \quad (11)$$

式 (11) 即为低电势圆的整定公式。

## 2 低电势圆的动作分析

电流正方向与有功功率正方向有关, 与无功功率无关, 则失磁故障时电流正方向与正常运行时电流正方向相同。这里为了分析方便, 据图 1 及图 2, 不妨假定正常运行时失磁继电器中的电流正方向是这样规定的: 由系统端流向机端, 由机端流向电势端, 如图 4 所示。

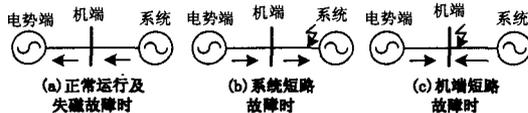


图 4 不同运行状态下电流流向示意图

Fig.4 Current direction in different situation

发电机发生失磁故障时, 故障点在发电机内部, 不影响电流的流向。失磁后发电机从系统吸收无功功率, 导致机端电流上升。则在图 5 中, 补偿电压  $|u_f + jIX_\Sigma|$  向 X 轴负向移动, 相当于等电势处的观测点  $X_\Sigma$  向下移, 其值增大, 由式 (5) 可知, 则在 n 点看到的电势圆半径增大, 运行点 n 有进入以  $u_{st}$  为极化电压的低电势圆的趋势, 即 K 有减小的趋势。而极化电压  $|u_f - jIX_{st}|$  则向 X 轴正向移动,  $|u_f - jIX_{st}| > u_{st}$ , 也有使 K 值减小的趋势, 因而低电势圆能够迅速地识别失磁故障。

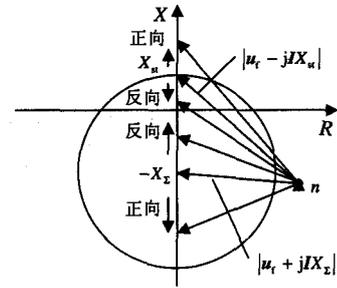


图 5 低电势圆方向性示意图

Fig.5 Movement direction of the low potential boundary

当主变高压侧和系统中发生短路故障时, 电流是从电势端和机端流向故障点的, 如图 4 (b) 所示。外部故障同样导致机端电流增大, 则在图 5 中, 补偿电压  $|u_f + jIX_\Sigma|$  反向增大, 向 X 轴正向移动, 等电势观测点上移, n 点感受到的电势圆半径减小, n 点有远离等电势圆的趋势, 即 K 值有增大的趋势。而极化电压  $|u_f + jIX_\Sigma|$  反向增大, 相当于向 X 轴负向移动,  $|u_f + jIX_{st}| < u_{st}$ , 也使得 K 值增大, 低电势圆不会动作。

当机端发生短路时, 电流是流向机端的, 如图 4 (c) 所示。则在图 5 中, 同样是机端电流增大, 但补偿电压  $|u_f + jIX_\Sigma|$  向 X 轴正向移动, 有使 K 增大的趋势。而极化电压  $|u_f + jIX_{st}|$  是向 X 轴正向移动, 有使 K 减小的趋势。则 K 值取决于两者变化的幅度不同, 测量阻抗可能会进入低电势圆。将电流正方向设定为从发电机流向系统, 也可以分析出同样的结果。

## 3 等电势圆动作特性仿真结果

在额定有功的条件下, 发生励磁故障全失磁, 发电机失磁后机端阻抗的 Matlab 仿真波形如图 6 所示。失磁后 1.2 s, 发电机进入静稳边界, 静稳边界动作<sup>[3]</sup>。

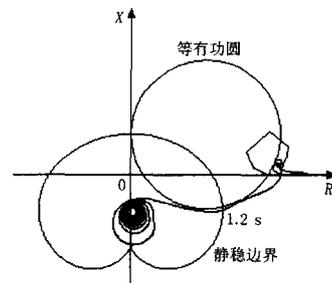


图 6 失磁后发电机机端阻抗仿真波形

Fig.6 Simulation results of the full loss-of-excitation in the rating load condition

同等条件下, 低电势圆的动作特性如图 7 所示。

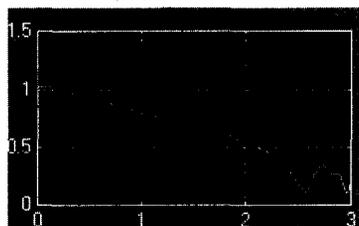


图 7 全失磁故障时等电势圆的动作特性

Fig.7 Action characteristic of the low potential criterion when full loss-of-excitation fault occurred

图中横线为低电势圆整定值, 曲线为阻抗运行轨迹。在 0.8 s 时等电势圆动作。比之静稳边界的 1.2 s, 快了 0.4 s。其他仿真结果还表明, 主变高压侧无论发生何种短路故障, 低电势圆都不会动作, 且其阻抗轨迹向背离低电势圆的方向变化。而对于机端三相短路和两相短路, 低电势圆可能会误动。仿真结果证明了推理的正确性。

#### 4 结论

本文通过分析失磁后发电机电势的变化规律, 利用电压平面、阻抗平面和导纳平面之间的互演关系, 进行了低电势圆的推导过程, 并对其动作特性进行了分析和仿真。得出低电势圆具有很高的灵敏度和反应速度以及对主变高压侧短路故障的强干扰能力。仿真结果反映了推理过程的正确性。

(上接第 4 页 continued from page 4)

在变电所普遍采用综合自动化技术的今天, 充分利用综合自动化系统中的信息冗余取代硬件冗余, 使得方案具有较好的可行性和经济性。

#### 参考文献

- [1] 闻新, 张洪钺, 周露. 控制系统的故障诊断和容错控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.  
WEN Xin, ZHANG Hong-yue, ZHOU Lu. Fault Diagnosis and Tolerant Control of Control System[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] Carlson N A, Berarducci M P. Federal Kalman Filter Simulation Results[J]. Navigation, 1994, 41(3): 297-321.
- [3] 马昕, 袁信. 基于神经元的容错组合导航系统设计[J].

低电势圆动作快速的特点对于水轮发电机具有重大意义; 而对于系统振荡等干扰, 由于反应迅速, 为延时躲过故障提供了更大的冗余。将文中的凸极等效同步电势换成同步电势, 就可以类推出隐极机的等电势圆。

#### 参考文献

- [1] 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 Huan-zhang. Principle of Generator Loss-of-excitation Protection and Its Setting Calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 72-75.
- [2] 姚晴林. 同步发电机失磁及其保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [3] 李田刚. 水轮发电机失磁保护的研究[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005.  
LI Tian-gang. Study of the Loss-of-excitation of the Hydraulic Generator[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2005.

收稿日期: 2007-05-10; 修回日期: 2007-06-10

作者简介:

李田刚(1978-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事继电保护方面的研究、应用和工程调试工作; E-mail: linaldo@163.com

王钢(1968-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护、控制和自动化方面的研究工作。

宇航学报, 1999, 20(2): 7-13.

MA Xin, YUAN Xin. Fault-tolerant Integrated Navigation System Based on Neurons[J]. Journal of Astronautics, 1999, 20(2): 7-13.

收稿日期: 2007-04-26; 修回日期: 2007-06-14

作者简介:

程宏波(1979-), 男, 助教, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护及综合自动化; E-mail: hbcheng@4y.com.cn

王勋(1960-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为变电站综合自动化;

伦利(1980-), 女, 助工, 主要研究方向为电力系统保护。