

# 微机 $U_L-P$ 型转子低压失磁继电器 动作方程及整定计算的研究 ——与《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》商榷

姚晴林<sup>1</sup>, 张学深<sup>2</sup>, 张项安<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009; 2. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 分析了微机  $U_L-P$  失磁继电器的准确动作方程及整定计算方法, 弥补了某些文献的不妥或不足之处。

**关键词:** 失磁保护; 转子电压

中图分类号: TM772

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2000)07-0031-04

## 1 前言

整定值自动随有功功率变化的转子低压型失磁继电器(简称  $U_L-P$  失磁继电器)在国内已较广泛应用多年。现有有关资料例如《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》对微机型  $U_L-P$  继电保护整定计算尚存在不完善之处, 值得商榷。本文首先分析微机型  $U_L-P$  失磁继电器准确的动作方程, 以便得出准确的整定计算方法。

## 2 微机型 $U_L-P$ 失磁继电器的动作方程

单机对无限大系统的网络图见图1所示。

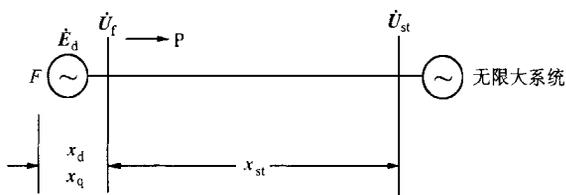


图1 单台发电机对无限大系统网络图

对水轮发电机及汽轮发电机都普遍适用的功角特性方程为

$$P = \frac{E_d U_{st}}{x_d + x_{st}} \sin \delta + \frac{U_{st}^2 (x_d - x_q)}{2(x_d + x_{st})(x_q + x_{st})} \sin 2\delta \quad (1)$$

式中  $E_d$  ——发电机同步电势;  
 $U_{st}$  ——无限大系统母线电压;  
 $U_t$  ——发电机机端电压;  
 $\delta$  —— $\dot{E}_d$  与  $\dot{U}_{st}$  间的夹角, 称为功率角,  $\dot{E}_d$  超前于  $\dot{U}_{st}$  时  $\delta$  为正,  $\dot{E}_d$  滞后于  $\dot{U}_{st}$  时  $\delta$  为负;  
 $x_d$  ——发电机纵轴同步电抗;

$x_q$  ——发电机横轴同步电抗;  
 $x_{st}$  ——发电机机端与无限大系统母线之间的联系电抗;  
 $P$  ——发电机输出的有功功率。

发电机失磁达静稳边界时,  $\frac{dP}{d\delta} = 0$ , 即

$$\frac{E_{dj} U_{st}}{x_d + x_{st}} \cos \delta_j + \frac{U_{st}^2 (x_d - x_q)}{(x_d + x_{st})(x_q + x_{st})} \cos 2\delta_j = 0 \quad (2)$$

汽轮发电机的  $x_d = x_q$ , 见式2知, 汽机的  $\delta_j = 90^\circ$ 。

由式2得

$$E_{dj} = -\frac{U_{st}(x_d - x_q)}{x_q + x_{st}} \cdot \frac{\cos 2\delta_j}{\cos \delta_j} \quad (3)$$

式中  $E_{dj}$  ——静稳极限同步电势;  
 $\delta_j$  ——静稳极限角(当  $\delta > \delta_j$  时失去静稳)。

设发电机失磁前的有功功率为  $P$ , 因失磁开始达静稳边界为等有功过程, 所以静稳边界时的有功功率也为  $P$ , 由式1得

$$P = \frac{E_{dj} U_{st}}{x_d + x_{st}} \sin \delta_j + \frac{U_{st}^2 (x_d - x_q)}{2(x_d + x_{st})(x_q + x_{st})} \sin 2\delta_j \quad (4)$$

将式3代入式4中, 得

$$P = 2 P_t \cdot \frac{\sin^3 \delta_j}{\cos \delta_j} \quad (5)$$

式中  $P_t = \frac{U_{st}^2 (x_d - x_q)}{2(x_d + x_{st})(x_q + x_{st})}$  (6)

$P_t$  称为凸极功率。汽轮发电机的  $x_d = x_q$ , 其  $P_t = 0$ ; 水轮发电机的  $x_d > x_q$ , 其值又与  $x_{st}$  有关, 水机的  $P_t$  一般为额定有功功率的(5%~25%)。

式3被式5除之, 得:

$$E_{dj} = -\left( \frac{\cos 2\delta_j}{\sin^3 \delta_j} \right) \cdot \frac{x_d + x_{st}}{U_{st}} P \quad (7)$$

可见,发电机的  $E_{dj}$  值不仅与  $P$ 、 $x_d$ 、 $x_{st}$  值有关,而且与  $j$  值也有关。以下再分析  $j$  又随什么参数而变。

将式 5 两边平方,并令  $K = \frac{P}{P_t}$ , 得

$$(\sin^2 j)^3 + \left(\frac{K}{2}\right)^2 \sin^2 j - \left(\frac{K}{2}\right)^2 = 0$$

上列方程为  $\sin^2 j$  的一元三次方程式,对其求解,得

$$j = \arcsin \frac{\sqrt{2}}{2} \left\{ \sqrt[3]{K^2 \left[ 1 + \sqrt{1 + \frac{k^2}{27}} \right]} + \sqrt[3]{K^2 \left[ 1 - \sqrt{1 + \frac{k^2}{27}} \right]} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

当  $P = P_t$  时,  $K = 1$ , 代入式 8, 得  $j = 45^\circ$ , 再由式 7, 得  $E_{dj} = 0$ , 这说明:对任何发电机(水轮发电机或汽轮发电机)在  $P = P_t$  的情况下即使全部失磁且剩磁也为零,  $E_d$  也只是为零,只是  $E_d = E_{dj} = 0$ , 发电机刚好能达到静稳边界,临界失步。

当  $P < P_t$ ,  $K < 1$ , 代入式 8, 得  $j$  必小于  $45^\circ$ , 再由式 7 得  $E_{dj} < 0$ 。这表示:水轮发电机在  $P < P_t$  情况下失磁,达到静稳边界所需的极限电势  $E_{dj}$  为负值,即需反向激磁才能失步,但实际上  $E_d$  不会为负,即使全失磁且剩磁也为零,  $E_d$  也只是为零,绝不会为负,因此实际的  $E_d$  必高于  $E_{dj}$ , 不会失步;或者水轮发电机在  $P > P_t$  运行中失磁失步,若保护动作于减少发电机出力,将  $P$  压低到  $P < P_t$ , 则发电机会重新拉入同步。汽轮发电机的  $P_t = 0$ , 则汽轮发电机  $P = 0$  空载运行失磁,不会失步;或者汽轮发电机在  $P > 0$  时失磁失步,若减少发电机出力,则必须把  $P$  降低到零才能重新拉入同步。这些结论对设计  $U_L$ - $P$  型失磁保护方案很有价值。

综上分析,式 6、式 7、式 8 联立,可得出发电机极限电势  $E_{dj}$  与有功功率  $P$  的函数关系。 $E_{dj}$  值是  $P$ 、 $x_d$ 、 $x_q$ 、 $x_{st}$  的函数;对既定的机组及既定的电网结构情况下,  $x_d$ 、 $x_q$ 、 $x_{st}$  为既定的常数,  $E_{dj}$  随  $P$  变化,它们的函数关系为高次方程,见图 2 所示,曲线以下为发电机的失步区,图中的  $P_e$  为发电机的额定有功功率,  $E_{dje}$  为  $P = P_e$  时的极限电势。

在正常运行及失磁开始至静稳边界的阶段内,转差率  $S \rightarrow 0$ ,  $E_d$  与励磁电压  $U_L$  在数值上成正比,  $E_{dj}$  与  $U_{Lj}$  也成正比,得

$$U_{Lj} = \frac{E_{dj} U_{L0}}{E_{d0}} \quad (9)$$

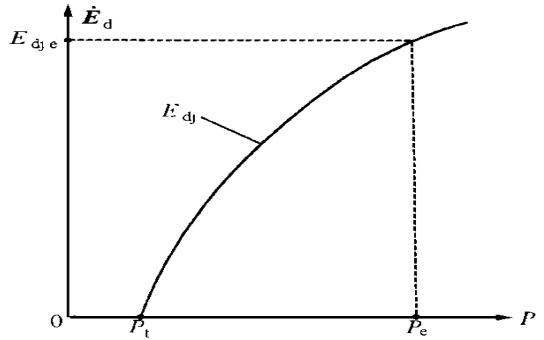


图 2 发电机  $E_{dj}$  随  $P$  变化的曲线

式中  $U_{Lj}$  ——发电机的极限励磁电压,当  $U_L < U_{Lj}$  时预测着必然会失步;  
 $U_{L0}$  ——空载励磁电压;  
 $E_{d0}$  ——空载同步电势。

将式 7 代入式 9, 得

$$U_{Lj} = - \left[ \frac{\cos 2j}{\sin^3 j} \right] \frac{(x_d + x_{st}) U_{L0}}{U_{st} E_{d0}} P \quad (10)$$

$$\text{令 } - \frac{\cos 2j}{\sin^3 j} = C \quad (11)$$

$C$  称为修正系数,则式 10 成为

$$U_{Lj} = \frac{C(x_d + x_{st}) U_{L0}}{U_{st} E_{d0}} P \quad (12)$$

式 10(即式 12)表达的  $U_{Lj}$  与  $P$  的关系曲线见图 3 中的曲线所示,该曲线与图 2 中  $E_{dj}$  与  $P$  的关系曲线实质上是相同的,只需将图 2 的纵座标  $E_d$  换成  $U_L$  就是图 3 了,因  $E_d$  与  $U_L$  成正比。

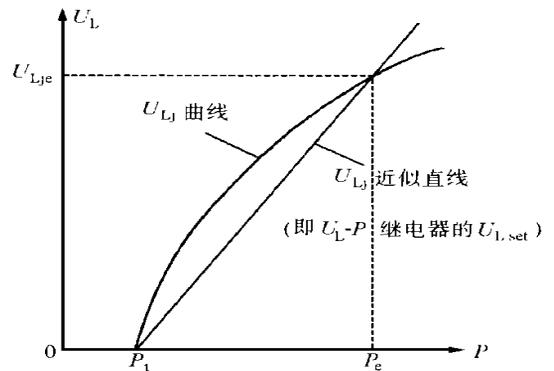


图 3 以直线近似代替  $U_{Lj}$  曲线

图 3 中的  $U_{Lj}$  曲线可以用一条直线近似代替,该直线通过  $(P_t, 0)$  点及  $(P_e, U_{Lje})$  点,  $U_{Lje}$  为额定有功功率  $P_e$  时的极限励磁电压。设计  $U_L$ - $P$  失磁继电器的动作特性为图 3 中的直线,其整定电压  $U_{L,set} = U_{Lj}$  (直线上的  $U_{Lj}$ ), 当  $U_L < U_{Lj}$  时继电器动作,直线以下为继电器的动作区,也为发电机近似的失磁失

步区。

需指出,失磁后  $U_L$  下降快,在失磁的初始  $U_L$  就可下降到  $U_{Lj}$  以下,  $U_L - P$  继电器立即动作,只是预测发电机会失步;待  $E_d$  下降到  $E_{dj}$  才达静稳边界。 $U_L - P$  继电器动作快是它的主要优点,对失磁保护出口动作于切换励磁或压出力很有好处。

图3中直线的方程为:

$$\frac{U_{Lje}}{P_e - P_t} = \frac{U_{Lj}}{P - P_t}$$

$$U_{Lj} = \frac{P - P_t}{P_e - P_t} U_{Lje} \quad (13)$$

设失磁前发电机以额定有功功率  $P_e$  运行,由式12及式11得

$$U_{Lje} = \frac{C_e(x_d + x_{st}) U_{L0}}{U_{st} E_{d0}} P_e \quad (14)$$

式中  $C_e = -\frac{\cos^2 j_e}{\sin^3 j_e}$  (15)

$j_e$  为  $P = P_e$  时的静稳极限角  $j$  的值。

将式14代入到式13中得

$$U_{Lj} = \frac{P_e}{P_e - P_t} \cdot \frac{C_e(x_d + x_{st}) U_{L0}}{U_{st} E_{d0}} (P - P_t) \quad (16)$$

设计  $U_L - P$  低压失磁继电器的动作电压整定值  $U_{Lset} = U_{Lj}$ ,  $U_L - P$  继电器的动作方程为

$$U_L = U_{Lset}$$

即  $U_L \frac{P_e}{P_e - P_t} \cdot \frac{C_e(x_d + x_{st}) U_{L0}}{U_{st} E_{d0}} (P - P_t)$  (17)

令整定系数  $K_{set} = \frac{P_e}{P_e - P_t} \cdot \frac{C_e(x_d + x_{st}) U_{L0}}{U_{st} E_{d0}}$  (18)

则  $U_L - P$  继电器的动作方程为

$$U_L = K_{set} (P - P_t) \quad (19)$$

对汽轮发电机而言,  $x_d = x_q$ ,  $j = 90^\circ$ , 只算一个特例,则  $P_t = 0$  (见式6)、 $C_e = 1$  (见式11、式15), 所以汽机的  $K_{set}$  为

$$K_{set} = \frac{(x_d + x_{st}) U_{L0}}{U_{st} E_{d0}} \quad (20)$$

### 3 微型 $U_L - P$ 失磁继电器的整定计算

式19、式18、式6表达的  $U_L - P$  继电器动作方程中,整定值有二:  $P_t$  及  $K_{set}$ 。对既定的电网及既定的机组,  $x_d$ 、 $x_q$ 、 $x_{st}$  (取经常运行方式下机端至无限大系统间的联系电抗值)、 $U_{st}$ 、 $E_{d0}$ 、 $U_{L0}$  皆为已知常数,而修正系数  $C_e$  计算较复杂,可以用查表或查曲线法求得 (见本文的附录),从而依据式18能整定计算

出  $K_{set}$  值、依据式6能整定计算出  $P_t$  值。

整定计算中各个参数都归算到发电机机端电压的有名单位值,再归算到电流电压互感器二次侧的值,而  $U_{L0}$  取实际的空载励磁电压值。这样各参数都以有名单位值计算,制造厂家保护软件的编制较简化,用户整定计算也较习惯,不会出现差错。

$U_L - P$  继电器整定计算实例

[已知] 一台水轮发电机变压器组经150km的220kV线路与系统中一枢纽母线相联,该枢纽母线与无限大系统等值发电机间的系统电抗  $X_{s*} = 0.025$  (对于100MVA的标么值)。水轮发电机的额定参数:  $P_e = 150\text{MW}$ ,  $U_{fe} = 15.75\text{kV}$ ,  $\cos \phi_e = 0.85$ ,  $x_{d*} = 1.09$ ,  $x_{q*} = 0.684$ ,  $I_{fe} = 6476\text{A}$ ,  $U_{L0} = 180\text{V}$ 。主变的额定参数:  $S_{te} = 180\text{MVA}$ ,  $242/15.75\text{kV}$ , Y/11接线,短路电压  $U_{k*} = 0.13$ 。机端TV变比  $N_{TV} = 15000/100 = 150$ , 机端TA变比:  $N_{TA} = 8000/5 = 1600$ 。

[求]  $U_L - P$  继电器的整定值  $K_{set}$  及  $P_t$ 。

[解] (1) 将发电机、变压器、线路、系统电抗都归算到机端电压15.75kV级的有单位(即)值

$$\text{发电机: } x_d = x_{d*} \times \frac{U_{fe}}{\sqrt{3} I_{fe}} = 1.09 \times \frac{15.75 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6476} =$$

$$1.53$$

$$x_q = x_{q*} \times \frac{U_{fe}}{\sqrt{3} I_{fe}} = 0.684 \times \frac{15.75 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6476} =$$

$$0.96$$

$$\text{变压器: } x_t = U_{k*} \times \frac{U_{fe}^2}{S_{te}} = 0.13 \times \frac{(15.75 \times 10^3)^2}{180 \times 10^6} =$$

$$0.18$$

$$\text{线路: } x_L = 0.4 \times 150 \times \frac{15.75^2}{230^2} = 0.281$$

$$\text{系统: } x_s = 0.025 \times \frac{(15.75 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 0.062$$

发电机机端至无限大系统间的  $x_{st}$ :

$$x_{st} = x_t + x_L + x_s = 0.18 + 0.281 + 0.062 = 0.523$$

$$\text{凸极功率: } P_t = \frac{U_{st}^2 (x_d - x_q)}{2(x_d + x_{st})(x_q + x_{st})} =$$

$$\frac{(15.75 \times 10^3)^2 (1.53 - 0.96)}{2(1.53 + 0.523)(0.96 + 0.523)} = 23.2\text{MW}$$

(2) 将上述第(1)项各值归算到TV、TA二次侧的值

$$x_{d(\text{二次})} = x_{d(\text{一次})} \times \frac{N_{TA}}{N_{TV}} = 1.53 \times \frac{1600}{150} = 16.32$$

$$x_{st(\text{二次})} = x_{st(\text{一次})} \times \frac{N_{TA}}{N_{TV}} = 0.523 \times \frac{1600}{150} = 5.58$$

$$E_{d0}(\text{二次}) = E_{d0}(\text{一次}) \times \frac{1}{N_{TV}} = 15.75 \times \frac{1}{150} = 105V$$

$$U_{st}(\text{二次}) = U_{st}(\text{一次}) \times \frac{1}{N_{TV}} = 15.75 \times \frac{1}{150} = 105V$$

$$U_{L0} = 180V$$

(3) 系数

依据  $K_e = \frac{P_e}{P_t} = \frac{150}{23.2} = 6.47$ , 查本文附录中的

$K_e - C_e$  表得系数  $C_e = 0.954$ 。

$$\text{又 } \frac{P_e}{P_e - P_t} = \frac{150}{150 - 23.2} = 1.183$$

(4) 所以,  $U_L - P$  继电器的整定值为:

$$K_{set} = \frac{P_e}{P_e - P_t} \cdot \frac{C_e(x_d + x_{st}) U_{L0}}{U_{st} E_{d0}} =$$

$$1.183 \times 0.954 \times 180 \times \frac{16.32 + 5.58}{105 \times 105} =$$

$$0.404 \frac{1}{A}$$

$$P_t = P_t(\text{一次}) \times \frac{1}{N_{TV} N_{TA}} = \frac{23.2 \times 10^6}{150 \times 1600} = 96.7W$$

【附录】用户整定计算中,若计算  $C_e$  值则十分复杂,所以这里事先将  $K_e - C_e$  表(或曲线)绘制出来,用户可方便地由  $K_e$  值直接查表(或曲线)得出  $C_e$  值。

$K_e - C_e$  表(或曲线)的制订过程:

$$K_e = \frac{P_e}{P_t}$$

上式中,  $P_e$  为发电机的额定有功功率,  $P_t$  为凸极功率,  $K_e$  为比例系数。

令式 8 中的  $K = K_e$ , 得出  $P = P_e$  时的静稳边界极限角  $\delta_{je}$ 。以若干不同的  $K_e$  值代入式 8, 得出相应的若干不同的  $\delta_{je}$  值; 再将这些不同的  $\delta_{je}$  值代入式 15 中, 可得出相应的不同的  $C_e$  值。从而可制订出  $K_e - C_e$  表(见表 1) 或  $K_e - C_e$  曲线。

表 1  $K_e - C_e$  表

$K_e$	$C_e$	$K_e$	$C_e$	$K_e$	$C_e$
3.3	0.847	5.6	0.941	7.7	0.968
3.6	0.869	6.0	0.948	8.0	0.970
4.0	0.891	6.3	0.953	8.3	0.972
4.3	0.904	6.6	0.957	8.7	0.975
4.7	0.919	6.8	0.959	9.0	0.976
5.0	0.927	7.1	0.962	9.5	0.979
5.3	0.935	7.4	0.965	10.0	0.981

用户由计算出的  $K_e = \frac{P_e}{P_t}$  值, 查表 1 可得  $C_e$  值。

参考文献:

- [1] 赵建国, 姚晴林. 整定值随有功功率自动变化的新型转子低电压失磁继电器的研究. 电力系统自动化, 1984, (4): 47 ~ 55.

收稿日期: 2000-03-21

作者简介: 姚晴林(1932-), 男, 教授, 博导, 从事电力系统继电保护与自动化的研究; 张学深(1964-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力主设备保护的设计、研究工作; 张项安(1967-), 男, 大学本科, 工程师, 从事电力主设备保护的设计、研究工作。

### Study on the setting calculation and operation equation of microprocessor based $U_L - P$ rotor LV loss of excitation relay

YAO Qing-lin<sup>1</sup>, ZHANG Xue-shen<sup>2</sup>, ZHANG Xiang-an<sup>2</sup>

(1. Hefei Industrial University, Hefei 230009, China; 2. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Accurate operation equation and setting calculation on microprocessor based UL - P loss of excitation relay are analyzed in this paper which has supplied a deficiency in some works or papers.

**Keywords:** loss of excitation protection; voltage on rotor

发扬创新求实精神 勇攀科学技术新高峰