

整定值自动随有功变化的转子低压型 (U_L-P 型)失磁保护整定计算的研究

姚晴林 祖伟 汪象侃 宋聚忠

合肥工业大学(230009)安徽电力局(230061)许昌继电器所(461000)

摘要 80年代初在国内外首先由合肥工业大学研制成功“整定值自动随有功功率变化的转子低压型(简称 U_L-P 型)失磁保护装置”,目前在国内外已获得较广泛的应用,但有关这类失磁保护的较准确整定计算至今所有文献中尚无详细的说明及论证。本文深入分析了这一课题,并提出了准确的切实可行的整定计算方法,对继电器制造厂及电力系统运行单位有应用价值。

关键词 转子低压 失磁保护 整定计算

前言

U_L-P 型失磁保护装置是合肥工业大学在国内外首创的新原理的继电保护,其主要优点是具有预测失磁失步的功能,在现有一切原理的失磁保护中它动作最早,当发生凡是能导致失步的失磁初始它就能快速动作,根据发电厂的运行要求,可以立即动作于跳闸,也可以仅仅立即发出减少发电机出力的指令,从而使失磁发电机转入较长时间安全异步运行的可能性显著提高,并有可能重新拉入同步,这对我国有功储备普遍紧张的电力系统是很有经济效益的。当然,在失磁后的异步运行中若系统电压低于允许值或发电机的转差率高于允许值, U_L-P 失磁保护能快速跳闸。它是一种较合乎我国国情的先进的失磁保护,当前国内各大继电器厂都已正式生产这种原理的产品,运行情况良好,而至今尚未发现国外厂家有这种同类原理的产品。 U_L-P 型失磁保护的整定计算与传统阻抗动作圆特性的失磁保护整定计算完全不同,电力工业部颁发的现行继电保护整定计算导则以及高校继电保护教材等文献中都未涉及 U_L-P 失磁保护的整定计算,致于生产这种保护装置的厂家产品说明书中所写的整定计算也不完善或准确度较低,这必然影响 U_L-P 失磁保护运行的可靠性。本文对该专题进行深入研究并得出了有价值的结论。

1 U_L-P 型失磁继电器的动作原理

U_L-P 型失磁继电器是 U_L-P 型失磁保护装置的主体元件。为了研究它的整定计算方法,需首先分析它的基本动作原理。

同步发电机以某一有功功率 P 失磁能达静稳边界的励磁电压最高值称为极限励磁电压 U_{Lj} ,相对应的同步电势最高值称为极限电势 E_{aj} 。以下数学分析的主要目的是为了求得 E_{aj} 随 P 变化的函数关系,从而求得 U_{Lj} 与 P 的关系,建立 U_L-P 型失磁继电器的理论基础。

发电机送至无限大系统母线端的有功功率为:

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

式中 δ ——发电机电势 E_d 与无限大系统母线电压 U_{st} 间的夹角,称为功率角;

X_{st} ——发电机机端至无限大系统母线间的联系电抗。

当忽略线路电阻及变压器损耗时,式 1 的 P 亦为发电机机端输出的有功功率。发电机失磁达静稳边界的条件为 $\frac{dp}{d\delta} = 0$, 式 1 对 δ 求导数并令其为零,得:

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

式中 δ_j 为发电机失磁达静稳边界时的 δ 角,称为静稳极限角。由式 2,汽轮发电机的 $x_d \approx x_q$, $\delta_j = 90^\circ$; 水轮发电机的 $x_d > x_q$, $\delta_j < 90^\circ$ 。

解式 2,可得:

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

设发电机失磁初始的有功功率为 P ,因达静稳边界前为等有功过程,故在静稳边界时的有功功率亦为 P ,由式 1 得:

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

将式 3 代入式 4,得:

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

式中

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

P_T 为发电机的凸极功率,汽轮发电机的 $P_T \approx 0$,水轮发电机的 P_T 通常约为额定功率的 15%~25%。

式 3 被式 5 除之,得:

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

式中系数

$$C = -\frac{\cos 2\delta_j}{\sin^3 \delta_j} \quad (8)$$

可见,发电机的 E_{dj} 值不仅与 P 、 X_d 、 X_{st} 有关,而且与 δ_j 值有关。以下再分析 δ_j 又随什么参数变化。

将式 5 两边平方,并令 $\frac{P}{P_T} = K$,得:

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

上列方程求解,得:

$$\delta_j = \arcsin \frac{\sqrt{2}}{2} \left[\sqrt[3]{k^2 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{k^2}{27}}\right)} + \sqrt[3]{k^2 \left(1 - \sqrt{1 + \frac{k^2}{27}}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

当 $P < P_T$ 时, $K < 1$,代入式 9,得 $\delta_j < 45^\circ$;再由式 7,得 $E_{dj} < 0$ 。这表示:发电机若以 $P < P_T$

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;但是实际上即使是全部失磁,并假定剩磁也为零, E_d 也只是为零,绝不会为负,也就是实际的 E_d 仍高于 E_{dj} ,所以不会失步。可见,水轮发电机以 $P < P_T$ 轻载运行,即使全部失磁,电机也不会失步;或者水轮发电机在 $P > P_T$ 运行中失磁失步,若保护动作于压出力将 P 降低到 $P < P_T$,则电机重新拉入同步。汽轮发电机的 $P_T = 0$,则汽轮发电机 $P = 0$ 空载运行时失磁,不会失步;或者在 $P > 0$ 时失磁失步,若压出力,则必须把 P 降低到零才能重新拉入同步。这是式 6、7、9 所表达的发电机失磁后一些重要的物理特性。

综上所述,式 6、7、9 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_m 的函数。在既定的电网结构情况下, X_d 、 X_q 、 X_m 为常数, E_{dj} 与 P 的函数关系为高次方程,见图 1 中曲线所示,曲线以下为失步区;该曲线十分接近于直线,所以在工程设计中可用图中的一条直线来代替此曲线。该直线通过 $(P_T, 0)$ 点及 (P_e, E_{dj_e}) 点; P_e 为发电机的额定有功功率, E_{dj_e} 为 $P = P_e$ 时的极限电势。

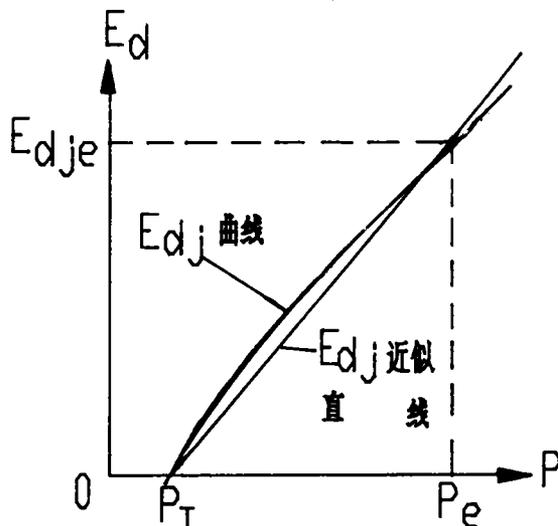


图 1 发电机的 E_{dj} 与 P 的关系曲线

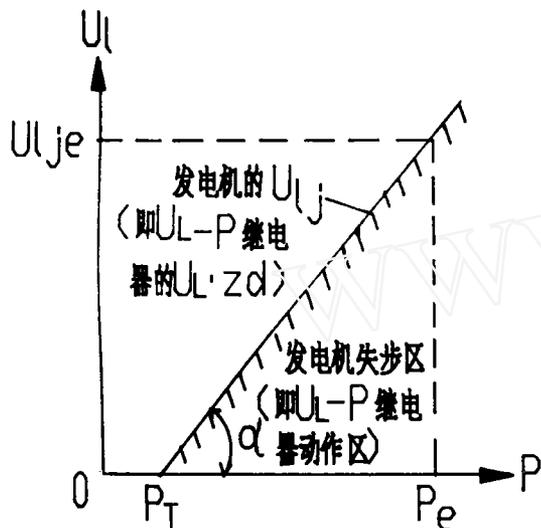


图 2 发电机 U_{Lj} 与 P 的近似关系直线 (即 U_L-P 继电器的动作特性直线)

直线上各点的纵坐标既是不同的 P 所对应的发电机极限励磁电压 U_{Lj} 值,也是 U_L-P 继电器的动作整定值 U_{Lzd} 。可见,这种 U_L-P 继电器的 U_{Lzd} 能自动跟随有功功率 P 的变化而变化,具有自适应效能。

式 10 只是表达了 U_{Lj} 与 E_{dj} 在数值上的关系。失磁后 U_L 衰减得快而 E_d 衰减得慢,当 U_L 衰减到 U_{Lj} 时, E_d 还远远没有衰减到 E_{dj} ; U_L 衰减到 U_{Lj} 的瞬时并不是静稳边界的瞬时,待 E_d 衰减到 E_{dj} 时才达静稳边界。在通常工况下全失磁, U_L 衰减到 U_{Lj} 的瞬时大约比静稳边界点提前 1 秒钟以上。 U_L-P 继电器的重要优点是充分利用了失磁后 U_L 衰减快的特性,当 U_L 一旦衰减

发电机失磁后至静稳边界的过程中有功功率 P 基本不变,滑差 $S \approx 0$,又忽略磁路饱和的影响,所以可认为励磁电压 U_L 与同步电势 E_d 成正比关系,即它们的标么值相等。

$$\begin{aligned} U_{Lj_e} &= E_{dj_e} \\ U_{Lj_e} &= E_{dj_e} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, U_{Lj_e} 为极限励磁电压的标么值, E_{dj_e} 为极限电势的标么值。图 1 中的纵坐标 E_d 可以换成 U_L , “ $E_{dj}-P$ ” 直线可以转换成 “ $U_{Lj}-P$ ” 直线,见图 2 所示,该直线的方程为:

$$U_{Lj} = \frac{P - P_T}{P_e - P_T} U_{Lj_e} \quad (11)$$

式中 U_{Lj_e} 为 $P = P_e$ 时的极限励磁电压。

设计 U_L-P 继电器的动作特性为图 2 中的直线,该直线以下是发电机的失步区,也是 U_L-P 继电器的动作区。

到继电器的整定值 $U_{Lj.d}$ 以下(即发电机的极限励磁电压 U_{Lj} 以下), 就立即动作, 有预告失磁失步的功能。

2 U_L-P 失磁继电器应用于水轮发电机时的整定计算

U_L-P 失磁继电器的整定值有二: 其一是动作特性直线在横轴上的截距, 即发电机的凸极功率 P_T 相对于发电机额定有功功率 P_e 的标么值 P_{T*} ; 其二是动作特性直线的斜率 $\text{tg}\alpha$ 。

2.1 P_{T*}

以已知的 U_{st}, X_d, X_q, X_{st} 值代入式 6, 可求得 P_T 的有单位值, 则其标么值为:

$$P_{T*} = \frac{P_T}{P_e} \quad (12)$$

U_L-P 继电器有若干个 P_{T*} 的整定档次, 选择其中之一与上式的计算结果相近。

2.2 $\text{tg}\alpha$

2.2.1 系数 C 与 K 对应表的来源

整定计算 $\text{tg}\alpha$ 时需应用式 9(由 K 值求解 δ_i) 及式 8(由 δ_i 值求系数 C), 但这两式的计算过程太繁琐。为了使电力运行人员简化计算量, 这里事先制订一个任何发电机任何电网都能通用的计算表, 见表 1。

表 1 的来源是: 以不同的 K 值($K=P/P_T$)代入式 9, 可求得各相应的 δ_i 值; 再以各 δ_i 值代入式 8, 可求得相应的 C 值。计算结果列于表 1 中。

表 1 C 与 K 对应表

$K = \frac{P}{P_T}$	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	10.0
δ_i (度)	70.45	71.83	73.04	74.11	75.07	75.92	76.68	77.37	78.00	79.09
C	0.927	0.939	0.948	0.955	0.961	0.966	0.970	0.973	0.976	0.981

电力运行人员在整定计算时, 由已知的 K 值可从表 1 中直接查出系数 C 值, 避免了复杂的计算。

2.2.2 $\text{tg}\alpha$ 的整定计算步骤

以发电机有功功率输出为额定值 P_e 时发电机发生失磁故障为整定计算条件, 这基本符合实际情况。水轮发电机都是长期以 $P=(0.8\sim 1)P_e$ 的有功输出运行的, 基本上不运行于中等出力及轻出力, 因为中等出力时水轮机有卡门涡流效应, 机组震动厉害, 轻出力时由于水流不平衡也有震动。

以 $P=P_e$ 计算 K 值, 即 $K=P_e/P_T$; 以此 K 值查表 1 得 C 值, 此 C 值就是 $P=P_e$ 时的 C, 以符号 C_e 表示; 再将 C_e 及 P_e 值代入式 7, 可求得 $P=P_e$ 时发电机的极限同步电势 $E_{dj.e}$ 为:

$$E_{dj.e} = \frac{C_e P_e (X_d + X_{st})}{U_{st}} \quad (12)$$

又标么值

$$U_{Lj.e*} = E_{dj.e*}$$

所以
$$U_{Lj.e} = \frac{E_{dj.e}}{E_{do}} \times U_{L0} \quad (13)$$

式中 U_{L0} ——发电机的空载励磁电压;

E_{d0} ——发电机的空载同步电势；

$U_{Lj.e}$ —— $P=P_e$ 时发电机的极限励磁电压。

根据图 2,得:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{U_{Lj.e}}{P_e - P_T} \quad (14)$$

上式的分子分母都应当归算到 U_L-P 继电器端子上的值。

U_L-P 继电器的动作特性直线斜率 $\operatorname{tg}\alpha$ 有若干个整定档次,选择其中之一为整定档次,该档次与式 14 的计算结果相近。

〔算例 1〕

已知:一台大型水轮发电机—变压器组经 150km 的 220kV 输电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电抗 $X_{\omega} = 0.025$ (对于 100MVA 的标么值电抗)。水轮发电机的 $P_e = 150\text{MW}$, $U_{fe} = 15.75\text{kV}$, $\cos\phi_e = 0.85$, $U_{Lo} = 180\text{V}$, $X_{d*} = 1.09$, $X_{q*} = 0.684$ 。主变压器的额定参数为: $S_{B.e} = 180\text{MVA}$, $242/15.75\text{kV}$, 短路电压 $U_{d*} = 0.13$ 。机端电压互感器变比 $K_{vt} = 15000/100$, 电流互感器变比 $K_{Lr} = 8000/5$ 。本发电机装设有以 U_L-P 继电器为主体元件构成的失磁保护。

求: U_L-P 继电器的整定值。

解:将发电机、主变压器、线路等电抗都归算到机端电压 15.75kV 级的欧姆值:

$$\text{发电机 } I_{fe} = \frac{P_e}{\sqrt{3} U_{fe} \cos\phi_e} = \frac{150 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 15.75 \times 10^3 \times 0.85} = 6469\text{A}$$

$$X_d = X_{d*} \times \frac{U_{fe}}{\sqrt{3} I_{fe}} = 1.09 \times \frac{15.75 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6469} = 1.53\Omega$$

$$X_q = X_{q*} \times \frac{U_{fe}}{\sqrt{3} I_{fe}} = 0.684 \times \frac{15.75 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6469} = 0.96\Omega$$

$$\text{主变压器 } X_B = U_{d*} \times \frac{U_{fe}^2}{S_{B.e}} = 0.13 \times \frac{(15.75 \times 10^3)^2}{180 \times 10^6} = 0.18\Omega$$

$$\text{线路 } X_{XL} = 0.4 \times 150 \times \frac{15.75^2}{230^2} = 0.281\Omega$$

$$\text{系统等值电抗 } x_{\omega} = 0.025 \times \frac{(15.75 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 0.062\Omega$$

发电机机端与无限大系统间的联系电抗 X_{st} 为:

$$X_{st} = X_B + X_{XL} + x_{\omega} = 0.18 + 0.281 + 0.062 = 0.523\Omega$$

$$P_T = \frac{U_{st}^2 (X_d - X_q)}{2(X_d + X_{st})(X_q + X_{st})} = \frac{(15.75 \times 10^3)^2 (1.53 - 0.96)}{2(1.53 + 0.523)(0.96 + 0.523)} = 23.2 \times 10^6\text{W}$$

$$P_{T*} = \frac{P_T}{P_e} = \frac{23.2 \times 10^6}{150 \times 10^6} = 15.5\%$$

选取保护装置的 U_L-P 继电器的整定值 $P_{T*} = 15\%$ (假设该保护装置的 P_{T*} 整定档次中有一个档次为 15%)。

根据 $K = \frac{P_e}{P_T} = \frac{150}{23.2} = 6.465$, 查表 1, 得: $C = C_e = 0.954$ 。

$$E_{dj.e} = \frac{C_e P_e (X_d + X_{st})}{U_{st}} = \frac{0.954 \times 150 \times 10^6 (1.53 + 0.523)}{15.75 \times 10^3} = 18.65 \times 10^3\text{V}$$

$$U_{Lj.e} = \frac{E_{dj.e}}{E_{d0}} U_{Lo} = \frac{18.65 \times 10^3}{15.75 \times 10^3} \times 180 = 213\text{V}$$

上式的 $U_{Lj.e}$ 值就是加于 U_L-P 继电器端子上的值,再将 $P_e - P_T$ 的值也归算到 U_L-P 继

电器端子上的值,为:

$$\frac{P_e - P_T}{K_{yf}K_{Ll}} = \frac{(150 - 0.15 \times 150) \times 10^6}{150 \times 1600} = 531\text{W}$$

$$\text{则 } \text{tg}\alpha = \frac{U_{Lj,e}}{\frac{P_e - P_T}{K_{yf}K_{Ll}}} = \frac{213}{531} = 0.401\text{V/W}$$

保护装置铭牌上有若干个斜率整定值档次,它们的量纲也为“V/W”。应当选取其中一个档次,其斜率与上式的计算值(0.401V/W)近似。

3 U_L-P 失磁继电器应用于汽轮发电机时的整定计算

汽轮发电机的 $X_d = X_q$,由式 6 得凸极功率 $P_T = 0$,则 U_L-P 型失磁保护应用于汽轮发电机时应整定它的动作特性直线通过座标原点,见图 3 所示。

由式 1,得汽轮发电机的功角特性为:

$$P = \frac{U_{st}E_d}{X_d + X_{st}} \sin\delta \quad (15)$$

从上式,可见汽轮发电机以 E_d 与 U_{st} 间的夹角所表达的静稳极限角 $\delta_i = 90^\circ$,则系数 $C = 1$ (见式 8)。以下分析图 3 所示动作特性直线的斜率 $\text{tg}\alpha$ 的整定计算方法。

需指出,前述水轮发电机的静稳极限角 δ_i 小于 90° ,其值不但与 X_d, X_q, X_{st} 值有关,而且与发电机失磁前的有功输出 P 值有关,因此 U_L-P 继电器应用于水轮发电机时整定值 $\text{tg}\alpha$ 也与失磁前的 P 值有关,所以在整定计算 $\text{tg}\alpha$ 时需假定失磁前发电机的 $P = P_e$ (或为某一经常性有功输出)。而汽轮发电机不管失磁前的有功输出 P 为何值,其 δ_i 均为 90° ,因此 U_L-P 继电器应用于汽轮发电机时整定值 $\text{tg}\alpha$ 与失磁前的 P 值无关,所以在整定计算 $\text{tg}\alpha$ 时不管选择失磁前的 P 为多少,其 $\text{tg}\alpha$ 的计算结果是相同的。为了方便起见,仍假定汽轮发电机失磁前的 P 为额定值 P_e 来计算 $\text{tg}\alpha$ 。

根据式 7 及 $C = 1, P = P_e$ 时汽轮发电机的极限同步电势 $E_{dj,e}$ 为:

$$E_{dj,e} = \frac{P_e(X_d + X_{st})}{U_{st}} \quad (16)$$

根据式 13,同理可算得 $P = P_e$ 时汽轮发电机的极限励磁电压 $U_{Lj,e}$ 。

由图 3(或由式 14)得 U_L-P 继电器应用于汽轮发电机时的斜率:

$$\text{tg}\alpha = \frac{U_{Lj,e}}{P_e} \quad (17)$$

〔算例 2〕

已知:一台汽轮发电机经主变压器接入 220kV 高压母线,该高压母线与无限大系统等值发电机之间的联系电抗 $X_{\omega} = 0.26$ (以发电机额定容量为基准的标么值)。

汽轮发电机的额定参数为: $P_e = 100\text{MW}, U_{te} = 10.5\text{kV},$

$\cos\varphi_e = 0.85, X_{d*} = 1.81, U_{L0} = 97\text{V},$ 机端电流互感器的变比 $K_{Ll} = 8000/5,$ 机端电压互感器的变比 $K_{yf} = 10000/100.$ 主变压器的额定参数为: $150\text{MVA}, 242/10.5\text{kV},$ 短路电压 $U_{d*} = 0.13.$

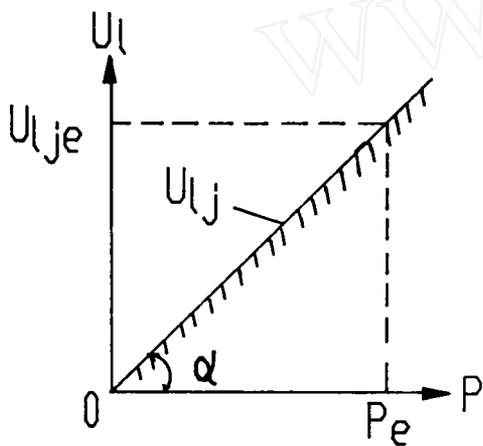


图 3 U_L-P 型失磁继电器应用于汽轮发电机时的动作特性直线

本发电机装设有以 U_L-P 继电器为主体元件构成的失磁保护。

求： U_L-P 继电器的整定值

解：将发电机、主变压器及系统电抗都归算到机端电压 10.5kV 级的欧姆值：

$$X_d = 1.81 \times \frac{10.5^2 \times 0.85}{100} = 1.7\Omega$$

$$X_B = 0.13 \times \frac{10.5^2}{150} = 0.096\Omega$$

$$X_w = 0.26 \times \frac{10.5^2 \times 0.85}{100} = 0.244\Omega$$

发电机机端与无限大系统母线之间的联系电抗 X_{st} 为：

$$X_{st} = X_B + X_w = 0.096 + 0.244 = 0.34\Omega$$

凸极功率 $P_T = 0$, U_L-P 继电器的动作特性直线通过坐标原点。

由式 16, 得：

$$E_{dj,e} = \frac{P_e(X_d + X_{st})}{U_{st}} = \frac{100 \times 10^6(1.7 + 0.34)}{10.5 \times 10^3} = 19.43 \times 10^3 V$$

由式 13, 得：

$$U_{Lj,e} = \frac{E_{dj,e}}{E_{do}} \times U_{Lo} = \frac{19.43 \times 10^3}{10.5 \times 10^3} \times 97 = 179.5 V$$

上式的 $U_{Lj,e}$ 值就是加于 U_L-P 继电器端子上的值。根据式 17, 并将 P_e 值也归算到 U_L-P 继电器端子上的值, 得 U_L-P 继电器动作特性直线的斜率为：

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_{Lj,e}}{\frac{P_e}{K_{Lf}K_{yf}}} = \frac{179.5}{\frac{100 \times 10^6}{1600 \times 100}} = 0.287 V/W$$

本文上述的具体整定计算方法步骤是针对以模拟式手段(如集成电路式、晶体管分立元件式等)构成的 U_L-P 失磁保护装置而言的。显然, 对微机型数字式 U_L-P 失磁保护而言, 根据本文所述的 U_L-P 失磁继电器的动作原理及有关数学模型, 编制软件, 很容易实现发电厂运行人员只需整定 X_d 、 X_w 、 X_{st} 值, 整定计算就十分简单了。

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压失磁继电器的研究. 电力系统自动化, 1984. 4
2. 姚晴林. 同步发电机失磁及其保护. 北京: 机械工业出版社, 1983 年 9 月出版