

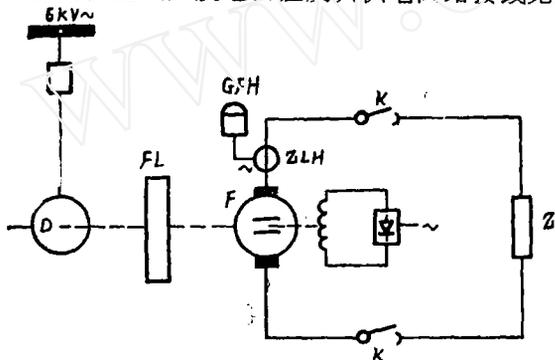
大功率直流脉冲发电机的过负荷保护装置

合肥工业大学
中国科学院等离子体物理研究所

邱国义
刘福国 许成金

一、直流脉冲发电机的运行方式

大功率直流脉冲发电机是一种直流飞轮发电机组，它由异步电动机、飞轮及直流脉冲发电机组组成，发电机组及其供电回路接线见图1所示。发电机组由异步电动机驱动，



F、直流脉冲发电机 D、异步电动机
FL、飞轮 Z、负载阻抗

图1 脉冲发电机组及其供电回路接线图

使发电机转子和飞轮在起动升速过程中积聚着巨大的机械动能，当转速达到额定值时，给发电机加上励磁，使发电机达到额定电压，然后向负载供电，这时，发电机转子与飞轮中储藏的机械动能，在很短时间（零点几秒或几秒）转换成大功率脉冲电磁能。直流脉冲发电机组作为大功率脉冲电源，在受控核聚变研究，大电流直流开关试验以及其他需要大功率脉冲电源的试验研究中，获得了广泛的应用。

一般说来，大功率直流脉冲发电机都有着类似的断续工作制工况，它的负载持续率

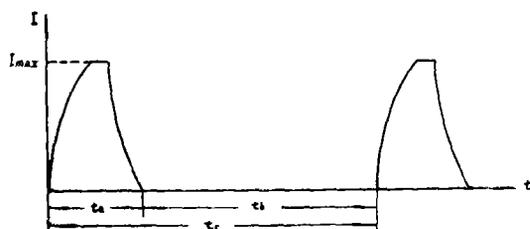


图2 脉冲发电机的典型负载曲线

特别短，几乎没有稳定负载的阶段，图2为直流脉冲发电机典型的负载曲线， t_a 为发电机在一个工作周期内的负载持续时间， t_b 为一个工作周期内的负载断开时间， t_c 是发电机的工作周期， I_{max} 则是发电机脉冲负载的峰值电流。ZMF—500—50直流脉冲发电机的最大脉冲功率为20000瓦，额定空载电

压为500伏,额定峰值电流50000安,设计负载持续时间 $t_0 = 7$ 秒,工作周期 $t_c = 600$ 秒,在励磁控制设计中,考虑了发电机可以输出任意波形的电流,该发电机的负载电流波形(一个工作周期内)见图3所示。当负载所要求的电压或电流较大时,发电机还可采取多台并联、串联或混联的接线方式。

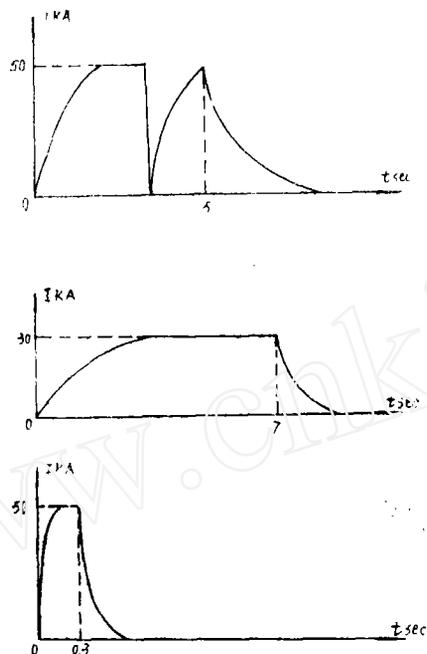


图3 ZMF—500—50的几种负载曲线

二、直流脉冲发电机的过负荷判据

大功率直流脉冲发电机是按断续工作的工况来设计的,发电机在负载时间里的电枢热负荷 $A \Delta a$ 值(A :电枢线负荷安/厘米; Δa :电枢绕组电流密度安/毫米²)可达正常设计电机的十几倍乃至五十几倍。发电机在运行中,由于控制系统的故障、主电路开关拒动、励磁调整失误等原因,都可能使电枢的热负荷超过允许的极限值,或者负载持续的时间超过该负载下允许的数值,从而导致电枢绕组的温度超过绝缘的允许温度,使发电机遭受损害。因此,对于这种脉冲发电机来说,电枢绕组的过负荷不应该仅仅看作是一般的非正常工作状态,而应该看作是故障。当发电机一旦出现危及电机安全的过负荷时,保护装置应立即动作至使发电机退出运行。

直流脉冲发电机可能担负的负载电流波形是多种多样的,而且几乎没有稳定负载的阶段,因此,判断发电机是否过负荷,既不能单纯以电流大小为依据,也不能单纯以负载持续时间的长短为依据,而应采用一个反应电枢绕组温升的量,作为是否过负荷的判据。

?

由于直流脉冲发电机负载的峰值电流很大，负载持续时间很短（小于10秒），因此，电枢绕组在负载电流下的发热可近似地按绝热状态考虑，即在负载电流作用下，电枢绕组损耗所产生的热量全部用来提高电枢绕组的温度。设在负载电流*i*下，在*dt*时间内绕组的温升为*dθ*，则：

$$0.24i^2 R_{cs} dt = C_{cu} l s r_{cu} d\theta$$

式(1)中：
 C_{cu} ——铜的比热 $C_{cu} = 0.093$ 卡/克·度，
 r_{cu} ——铜的比重 $r_{cu} = 8.9$ 克/厘米³，
 S ——电枢绕组截面积，
 l ——电枢绕组长度，
 R_s ——电枢绕组电阻，
 θ ——电枢绕组温升。

已知

$$R_s = \frac{l}{S} \rho_0 (1 + \alpha \theta) \quad (2)$$

式(2)中： ρ_0 ——绕组初始温度*t₀*下的电阻率，
 α ——电阻的温度系数。

将式(2)代入式(1)得

$$0.24i^2 \frac{l}{S} \rho_0 dt = C_{cu} l s r_{cu} \frac{d\theta}{1 + \alpha \theta} \quad (3)$$

则

$$\int_0^{t_{ix}} i^2 dt = \frac{C_{cu} r_{cu} S^2}{0.24 \rho_0 \alpha} \ln(1 + \alpha \theta) \quad (4)$$

设*t* = *t_{ix}*时， $\theta = \theta_{ix}$ ， θ_{ix} 为温升极限允许值，则式(4)可写成：

$$\int_0^{t_{ix}} i^2 dt = \frac{C_{cu} r_{cu} S^2}{0.24 \rho_0 \alpha} \ln(1 + \alpha \theta_{ix}) \quad (5)$$

取

$$i_0 = I_{max.n}$$

$I_{max.n}$ ——发电机额定峰值电流

则

$$\int_0^{t_{ix}} i_0^2 dt \frac{C_{cu} r_{cu} S^2}{0.24 \rho_0 \alpha I_{max.n}^2} \ln(1 + \alpha \theta_{ix}) \quad (6)$$

设

$$\frac{C_{cu} r_{cu} S^2}{0.24 \rho_0 \alpha I_{max.n}^2} \ln(1 + \alpha \theta_{ix}) = A_0 \quad (7)$$

式(7)中，对于某一发电机来说，各项参数均为定值，故*A₀*为常数，同时，对于不同波形的*i₀*来说，*t_{ix}*也不是定值，因此，式(6)可写为：

$$\int_0^{t_{ix}} i_0^2 dt = A_0 \quad (8)$$

式(8)即直流脉冲发电机电枢绕组的过负荷判据。当 $\int_0^t i_a^2 dt \leq A_0$ 时, $\theta \leq \theta_{jz}$, 发电机是安全的, 当 $\int_0^t i_a^2 dt > A_0$ 时, $\theta > \theta_{jz}$, 发电机是不安全的。

三、过负荷保护装置

直流脉冲发电机的过负荷保护由直流电流互感器ZLH与过负荷保护装置GFH两部分组成, ZLH装设在发电机主回路中, 过负荷保护装置接于ZLH二次侧的交流输出端(见图1)。

直流电流的测量, 除了直流电流互感器以外, 还有分流器、电阻分压器, 霍尔效应计以及磁加法器等, 各有优缺点, 其中直流电流互感器具有简单可靠、输出信号功率大、初次级电气隔离、线性度与测量准确度高等特点, 是过电流或过负荷保护装置较为理想的信号电源。直流电流互感器的作用与交流系统中的交流电流互感器相似, 但工作原理却根本不同, 直流电流互感器基于磁放大器的工作原理, 一次侧被测直流电流相当于磁放大器的直流控制绕组电流, 二次侧电流则相当于交流工作绕组电流。

用于过电流、过负荷保护的直流电流互感器, 一般可采用BLZ—2K系列, 该系列互感器采用串联线路, 二次侧有交流输出端, 可获得随一次侧直流电流正比变化的交流电流信号, 额定电流为150~3000安, 其原理接线见图4所示。对于大功率的直流脉冲发电机, 额定电流可达50KA, BLZ—2K系统已不能满足要求, 可采用BLZ—1C系列, 亦是串联线路, 额定电流为0.4~100KA, 其原理接线见图5所示。

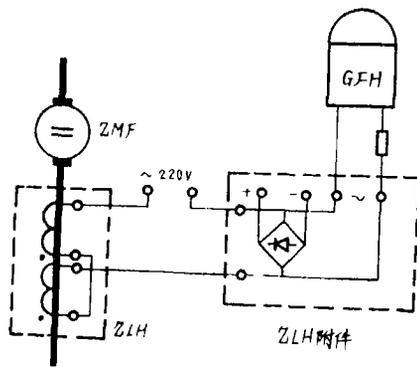


图4 BLZ—2K直流互感器电路

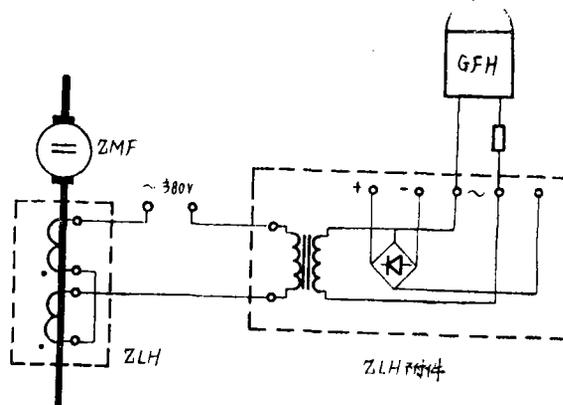


图5 BLZ—1C直流互感器电路

过负荷保护装置的逻辑框图见图6所示, 保护装置由反时限过负荷保护与定时限过电流保护两部分组成。反时限过负荷保护具有 $\int_0^t i_a^2 dt = A_0$ 的动作特性, 为发电机过负荷的主保护, 当发电机由于控制系统故障、主电路开关拒动、励磁调整失误等原因引

起发电机过负荷时, 如果 $\int_0^t i_*^2 dt = A_0$ 判据被满足, 保护将动作于发电机灭磁, 并向值班人员发出信号。定时限过电流保护作为反时限过负荷保护的后备, 其延时大小的选择应与负载持续时间 t_a 相配合, 并略大于 t_a , 定时限过电流保护动作后, 亦作用于发电机灭磁及信号。为了防止元件损坏而引起反时限部分误动作, 反时限延时元件由反时限起动元件与定时限起动元件共同起动。

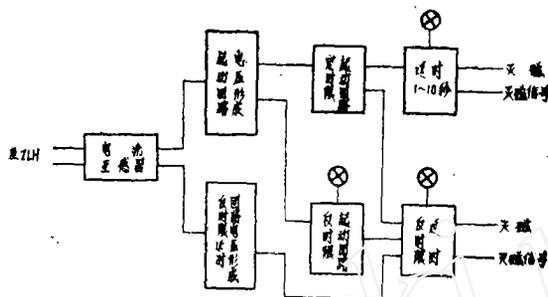


图6 过负荷保护装置逻辑框图

根据直流脉冲发电机的工作特点, 对过负荷保护装置有如下要求:

(1) 保护装置要求有尽量小的起动电流, 希望在 $0.05 \sim 2 I_{max}$ 很广的范围内满足一定的反时限特性, 这就要求反时限延时电路有较宽的工作范围与足够小的最小工作电压。

(2) 希望能较精确地满足反时限积分特性, 要求电路的充电电流只反映工作电压大小, 而不受充电时间影响。

(3) 在发电机电流随时间任意变化的情况下, 均能得到较精确的 $\int_0^t i_*^2 dt = A_0$ 反时限动作特性。 A_0 值的误差不大于 5%。

(4) 直流电流互感器二次侧输出为方波电流, 希望保护装置在方波电流作用下的动作特性与正弦波电流作用下的相同。

(5) 保护装置应有较高的动作可靠性。

许昌继电器研究所研制的 BFL-9 型负序电流保护装置, 采用了由两级恒流充电回路构成的反时限延时电路, 其充电电流只反应工作电压的大小, 而不受充电时间的影响, 与其他反时限电路相比, 有较多的优越性。直流脉冲发电机的过负荷保护装置系在 BFL-9 的基础上改制而成 (BFL-9 负序过电流保护的原理、线路及参数请参阅文献 1), 为了适应直流脉冲发电机的要求, 对 BFL-9 作如下的改制。

(1) 取消负序电流过滤器, 改换成电流互感器, 并保留原装置中的 LH_2 (即图 7 中的 LH)。

(2) 为了降低反时限延时回路的起动电流, 将电阻 R_{16} 改换成二极管 D_6 。

(3) 为了在大电流情况下保持较精确的 $\int_0^t i_*^2 dt = A_0$ 特性, 取消 R_{67} 及 W_{Y1} 回路。

(4) 取消1000秒延时回路与作为反时限上限的1~10秒延时电路及其相应的信号与出口电路。

(5) 改变 $R_{0.2}$ 的数值, 使 $R_{0.2} C_{1.2} = T$, T 为发电机电枢绕组的散热时间常数(ZMF-500-50发电机 $T = 1800$ 秒), 使保护装置能较准确地模拟发电机退出运行时, 电枢绕组温升降低的变化规律。

改制后的过负荷保护装置的原理接线见图7所示。经多次定值正弦交流电流下的试验表明, 在继电器电流 $I_T = 1 \sim 6$ A范围内, A_0 值的误差均不超过5%。

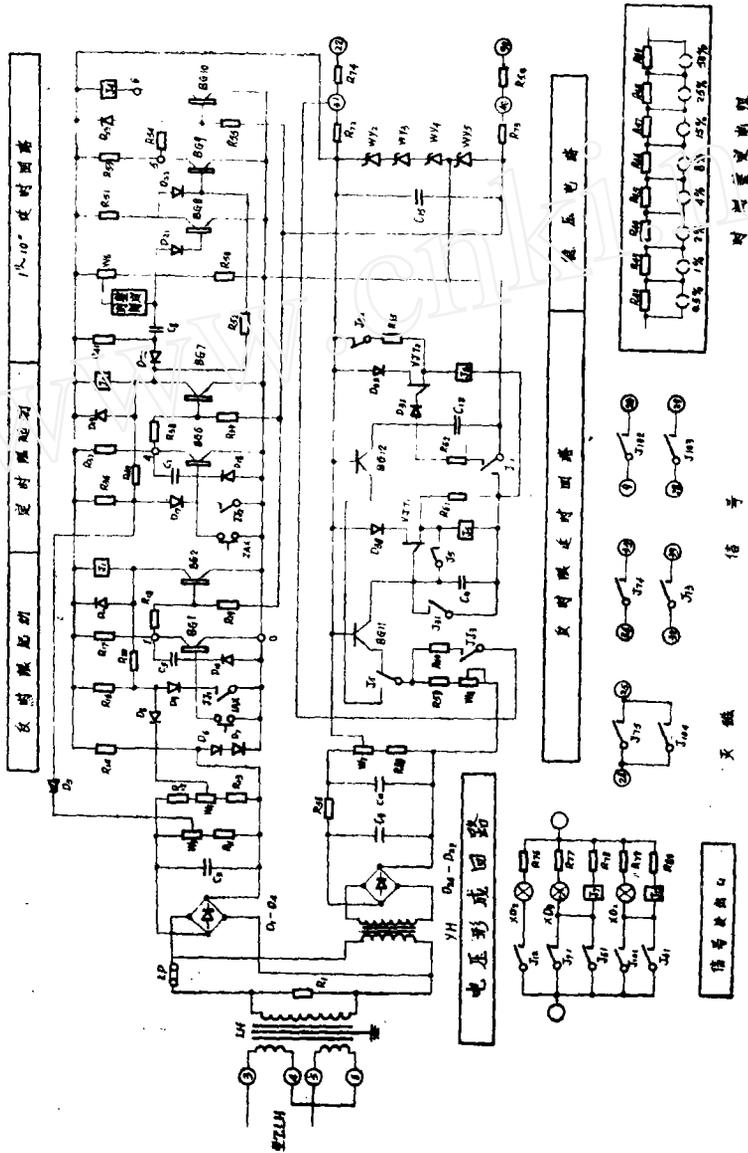


图7 过负荷保护装置原理接线图

四、两级恒流充电电路在时变电流下的工作特性

保护装置反时限延时电路所采用的两级恒流充电电路的接线见图 8 所示。在忽略三极管发射结电压 V_{be} 及基极电流 I_b 的情况下，保护装置的动作为

$$V^2 t = K \quad (9)$$

$$K = \frac{V_1 V_2 C_{11} C_{12} R_c^2}{\Delta t}$$

式 (9) 中:

V —加在反时限延时电路的正比于发电机电流 i 的工作电压;

$V_1 V_2$ —单晶管 VJT_1 与 VJT_2 的触发电压;

Δt —继电器 J_s 从动作至返回的时间。

因此，保护装置在定值电流下的动作特性可写成

$$I_*^2 t = A_0 \quad (10)$$

直流脉冲发电机的负载电流不是定值，而可能是随时间任意变化的，这就要求保护装置在时变电流下亦能较准确地符合 $\int_0^t i_*^2 dt = A_0$ 的动作特性。由于发电机负载电流随时间的变化规律 $i(t)$ 是不定的，我们很难针对每一种 $i(t)$ 来分析电路的工作状态，但是，对于任何一个 $i(t)$ 来说，在某一个不大的时间内，都可近似地用直线来表示。因此，为了分析两级恒流充电回路在时变电流作用下的一般规律，可以用图 9 的直线表示时变电流曲线 $i(t)$ ，即

$$i(t) = K_t t \quad (11)$$

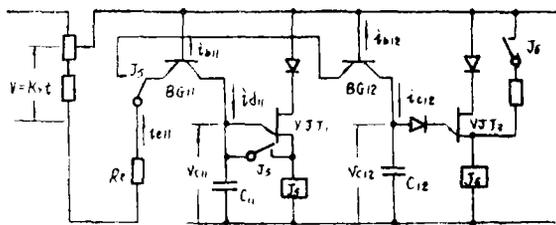


图 8 两级恒流充电电路图

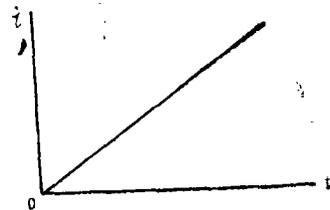


图 9 时变电流曲线

加在充电电路上的工作电压 V 则可表示为

$$V = K v t \quad (11)$$

$K v$ ——与 K_t 及回路参数有关的常数 $K v = \frac{dv}{dt}$

假设:

(1) 单晶管 VJT_1 与 VJT_2 的触发电压分别为 V_1 与 V_2 ;

(2) 忽略三极管的 V_{be} 及 I_b ,

(3) 第一级充电回路由充电开始到达 V_1 的时间 t 远大于 V_{JT} , 触发后 J_0 动作至返回的时间 Δt , 即 $t \gg \Delta t$ 。

第一级充电电路:

(1) 第一次充电

$$i_{c11} = \frac{V}{R_e} = C_{11} \frac{dV_{c11}}{dt}$$

$$V_{c11} = \int_0^t \frac{V}{R_e C_{11}} dt$$

设 $t = t_1$ 时, $V_{c11} = V_1$

$$\begin{aligned} \text{则 } V_1 &= \int_0^{t_1} \frac{V}{R_e C_{11}} dt = \int_0^{t_1} \frac{K_v t}{R_e C_{11}} dt \\ &= \frac{K_v}{R_e C_{11}} \frac{t_1^2}{2} \end{aligned}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{2 V_1 R_e C_{11}}{K_v}} \quad (12)$$

(2) 第二次充电

$$V_1 = \int_{t_1}^{t_2} \frac{K_v t}{R_e C_{11}} dt = \frac{K_v}{R_e C_{11}} \left(\frac{t_2^2}{2} - \frac{t_1^2}{2} \right)$$

$$t_2 = \sqrt{2} \sqrt{\frac{2 V_1 R_e C_{11}}{K_v}} = \sqrt{2} t_1 \quad (13)$$

(3) 第 n 次充电

.....

$$V_1 = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{K_v t}{R_e C_{11}} dt = \frac{K_v}{R_e C_{11}} \left(\frac{t_n^2}{2} - \frac{t_{n-1}^2}{2} \right)$$

$$t_n = \sqrt{n} \sqrt{\frac{2 V_1 R_e C_{11}}{K_v}} = \sqrt{n} t_1 \quad (14)$$

第二级充电电路:

由于第二级充电电路每次工作时间 Δt 很小, 假设在此时间内工作电压 V 不变, 则第一次充电

$$\Delta V_1 = \frac{V}{R_e} \frac{\Delta t}{C_{12}} = \frac{K_v t_1}{R_e} \frac{\Delta t}{C_{12}}, \quad (15)$$

第二次充电

$$\Delta V_2 = \frac{K_v t_2}{R_e} \frac{\Delta t}{C_{12}}, \quad (16)$$

第 n 次充电

$$\Delta V_n = \frac{K_V t_n \Delta t}{R_c C_{12}} \quad (17)$$

设经充电n次后 $V_{C_{12}}$ 到达 VJT₂ 触发电压 V_2 , 则

$$\begin{aligned} V_2 &= \Delta V_1 + \Delta V_2 + \dots + \Delta V_n = \frac{K_V \Delta t}{R_c C_{12}} (t_1 + t_2 + \dots + t_n) \\ &= \frac{K_V \Delta t}{R_c C_{12}} \sqrt{\frac{2V_1 R_c C_{11}}{K_V}} (1 + \sqrt{2} + \dots + \sqrt{n}) \\ &= \frac{\Delta t}{C_{12}} \sqrt{\frac{2V_1 K_V C_{11}}{R_c}} (1 + \sqrt{2} + \dots + \sqrt{n}) \end{aligned} \quad (18)$$

式(18)中, 数列 $1, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \dots, \sqrt{n}$ 的前n项之和无准确的表达式, 当 $n \gg 1$ 时可相当近似地用下式表示:

$$n > 1, \quad 1 + \sqrt{2} + \dots + \sqrt{n} \approx \frac{2}{3} n^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{2} n^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

*注: 本式的证明见附录。

因此, V_2 可近似的表示为

$$V_2 = \frac{\Delta t}{C_{12}} \sqrt{\frac{2V_1 K_V C_{11}}{R_c}} \left(\frac{2}{3} n^{\frac{3}{2}} + \frac{1}{2} n^{\frac{1}{2}} \right) \quad (20)$$

由式(14)可知,

$$\sqrt{n} = \frac{t_n}{t_1} = t_n \sqrt{\frac{K_V}{2V_1 K_V C_{11}}} \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)可得:

$$\begin{aligned} V_2 &= \frac{\Delta t}{C_{12}} \sqrt{\frac{2V_1 K_V C_{11}}{R_c}} \left(\frac{2}{3} t_n^3 \sqrt{\frac{K_V}{2V_1 R_c C_{11}}} + \frac{1}{2} t_n \sqrt{\frac{K_V}{2V_1 R_c C_{11}}} \right) \\ &= \frac{K_V^2 t_n^3}{3} \frac{\Delta t}{V_1 C_{11} C_{12} R_c^{\frac{3}{2}}} + \frac{K_V t_n \Delta t}{2 C_{12} R_c} \end{aligned} \quad (22)$$

则

$$\begin{aligned} \frac{V_2 V_1 C_{11} C_{12} R_c^2}{\Delta t} &= \frac{K_V^2 t_n^3}{3} + \frac{V_1 C_{11} R_c K_V t_n}{2} \\ &= \int_0^{t_n} (K_V t)^2 dt + \frac{V_1 C_{11} R_c K_V t_n}{2} \\ &= \int_0^{t_n} V^2 dt + \frac{V_1 C_{11} R_c K_V t_n}{2} \\ &= K' + \Delta K \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)中:

$$K' = \int_0^t i^* V^2 dt, \quad \Delta K = \frac{V_1 C_{11} R_c}{2} K_V t_n$$

则

$$\int_0^t i^* V^2 dt = K' = K - \Delta K \quad (24)$$

对式(24)的分析:

(1) 在时变电流下, $\int_0^t i^* V^2 dt \neq K$, ΔK 值与 $K_V t_n$ 有关, 即与 V_n 有关, 不为定值, 故 K' 不为常数。

(2) 在定值电流下, $K_V = \frac{dv}{dt} = 0$, $\Delta K = 0$, $K' = K$

(3) 在时变电流下 $\int_0^t i^* V^2 dt < K$, 即 $\int_0^t i^* i^2 dt < A$ 。

(4) 在时变电流下 K' 值的动态误差 S 为

$$S = \frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta K}{K' + \Delta K} = \frac{1}{\frac{2}{3} \frac{K_V t_n^2}{V_1 C_{11} R_c} + 1} = \frac{1}{\frac{4}{3} n + 1} \quad (25)$$

式(25中), n 为使电容器 C_{21} 充电至 V_2 时继电器 J_5 的动作次数。当 K 值为一定时, K_V 愈大则 V_n 愈大, n 愈小, S 则愈大。下面, 我们来估算保护用于 ZMF-500-50 直流脉冲发电机时可能的最大误差 S_{max} 。

根据定值电流下继电器 J_5 动作次数表达式 (参阅文献 1) 可得:

$$n = \frac{V_2 C_{12} R_c}{V \Delta t} = \frac{V t}{C_{11} V_1 R_c} \quad (26)$$

由式(26)可知, n 的最小值出现在最大负荷电流亦即最大工作电压时。

取 $I_{max} = 50000 \text{ A}$, $I_j = 5 \text{ A}$, $V_{max} = 115 \text{ 伏}$, $t = 6.41 \text{ 秒}$, $V_1 = 18 \text{ 伏}$, $C_{11} = 33 \times 10^{-6} \text{ f}$, $R_c = R_{s0} + R_{o0} = 60 \text{ k}\Omega$, 则

$$n_{min} = \frac{115 \times 6.41}{33 \times 10^{-6} \times 18 \times 60 \times 10^3} = 20.68$$

运用此值可估算出时变电流下 K' 的最大误差

$$S_{max} = \frac{1}{\frac{4}{3} n_{min} + 1} = \frac{1}{\frac{4}{3} \times 20.68 + 1} = 0.035$$

由此可知, 在发电机峰值电流 $I_{max} < 50000 \text{ A}$ 的各种负载曲线下, S 必小于 S_{max} 。以上分析计算说明, 在时变电流下, 保护装置的動作特性可近似地用定值电流下的動作特性表示, 仍有足够的准确性。即:

$$\int_0^t i^2 dt = A \quad (27)$$

五、方波电流作用下保护装置的工作情况

图7中保护装置的电压形成回路，一般用于交流系统的保护装置，通过电流互感器LH一次绕组的电流为工频正弦电流。当保护装置用于直流系统，接于直流电流互感器的交流输出端时，通过LH一次绕组的电流为工频方波电流。为了使保护装置用于大功率直流脉冲发电机时，仍然有符合要求的工作特性，有必要进一步研究保护装置在方波电流作用下的工作情况，并与正弦波电流相比较。在这里，我们着重分析对保护装置工作特性起决定作用的反时限电路。

电流互感器LH与反时限延时电压形成回路的接线图见图10所示，在LH的一次线圈中分别加入工频正弦电流及有效值相同的工频方波电流，实测所得电流、电压波形见图11所示。

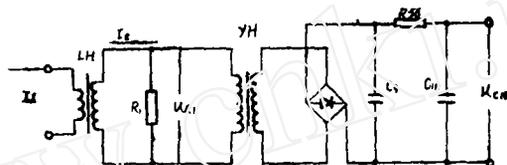


图 10 反时限延时电压形成回路

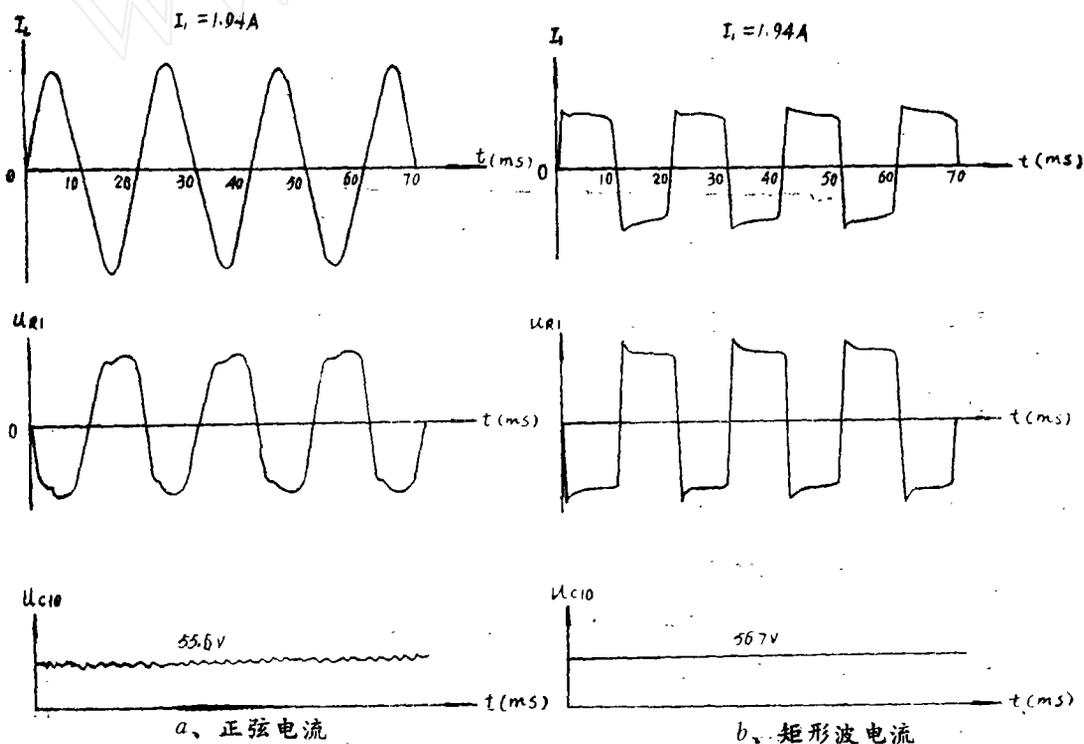


图 11 正弦电流及方波电流下波形图

根据理论分析与实测电流、电压的波形可知，当方波电流通过LH的一次绕组时，电压形成回路的工作情况具有以下特点：

1、LH的二次侧电流波形与一次侧电流波形相似，仍为方波（ $u_{R1} = I_2 R_1$ ， u_{R1} 的波形与 I_2 相似）。

电流互感器LH的等值电路如图12所示。当 I_1 为周期性方波电流时，其傅氏级数的展开式为：

$$I_1(t) = \frac{4I_{1m}}{\pi} \left[\sin \omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5} \sin 5\omega_0 t + \dots + \frac{1}{K} \sin K\omega_0 t + \dots \right] \quad (28)$$

式(28)中： I_{1m} ——方波电流幅值；

ω_0 ——基波角频率；

K ——奇数1, 3, 5, ...。

由式(28)，可知 $I_1(t)$ 中除了工频基波电流外，还包含有大量高次谐波。由于电流互感器LH工作在线性段，励磁阻抗 Z_{LC} 很大， $Z_{LC} \gg Z_2' + Z_{fh}$ ，因此， $I_1(t)$ 中各次谐波通过互感器都能得到很好的传变，故二次侧电流波形改变不大，仍为方波。

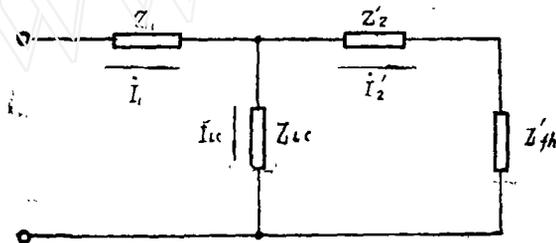


图 12 LH的等值电路图

2、在LH一次电流的有效值相同的情况下，方波的二次电流略大于正弦波的二次电流。

由图12可知

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{LC} + \dot{I}_2' \quad (29)$$

式(29)中： \dot{I}_1 ——LH一次绕组电流；

\dot{I}_{LC} ——LH励磁电流；

\dot{I}_2' ——LH换算至一次侧的二次绕组电流。

在理想的情况下， $Z_{LC} = \infty$ 、 $I_{LC} = 0$ ，则

$$\frac{I_1}{I_2} = n_{LH} = \text{常数} \quad (30)$$

式(30)中： n_{LH} ——LH的变比

在实际情况下 $I_{LC} \neq 0$, 电流互感器总是有误差的, 误差 $\frac{I_{LC}}{I_1}$ 的大小与 Z_{LC} 有关, $Z_{LC} \approx \omega L_{LC}$, 当 L_{LC} 一定时, Z_{LC} 与 ω 成正比, ω 愈大则 Z_{LC} 愈大, $\frac{I_{LC}}{I_1}$ 愈小, $\frac{I_2'}{I_1}$ 愈大。

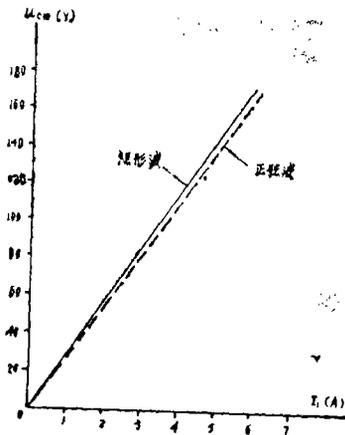


图13 不同波形电流下的 $u_{c10} = f(I_1)$ 图

方波电流中含有大量高次谐波, 高次谐波通过电流互感器的传变比基波更好, $\frac{I_2'}{I_1}$ 将略大一些。 I_1 为不同波形时, 试验所得的 $u_{c10} = f(I_1)$ 曲线见图13所示。由图13可知, 在同样的一次电流有效值下, 方波电流下的输出电压 u_{c10} 比正弦波电流下的输出电压略有增大。

3、 I_1 与 u_{c10} 成正比。

由图13还可见, 在方波电流下, I_1 与 u_{c10} 仍然是较为理想的线性关系, 而且与正弦电流下的 $u_{c10} = f(I_1)$ 曲线很接近, 误差在0.02左右。

4、电压形成回路输出电压 u_{c10} 曲线平直。

当 LH 一次电流为方波时, YH 二次侧输出电压仍近似为方波, 通过整流及滤波, 可以得到很平直的输出电压 u_{c10} 。在正弦电流作用下, u_{c10} 曲线则有较明显的脉动。(见图11所示)。

根据以上试验与分析的结果, 可以得出如下几点结论:

1、在方波电流作用下, $u_{c10} = f(I_1)$ 线性度好。 u_{c10} 波形平直, 可使保护装置同样获得较为理想的工作特性。

2、方波电流下的 $u_{c10} = f(I_1)$ 曲线与正弦波电流下的曲线很相近, 误差很小。因此, 保护装置的调试与整定可以在实验室的工频交流电源上进行, 其误差不会超过允许范围。

六、过负荷保护装置的模拟试验

1、试验电路

过负荷保护装置的试验电路见图14所示, 试验电路中主要设备的参数见表一所示。

2、试验方法

先合发电机主回路开关 K , 再合交流电动机供电回路开关 KK , 启动电动机将直流发电机带至正额定转速。合发电机励磁回路接触器 JC , 直流发电机的电动势及主回路电流 I 按指数规律上升, 形成随时间变化的“时变电流”。当保护的判据被满足时, 保护装置动作于跳开励磁回路, 开关 JC 及电动机开关 KK , 主回路电流按指数规律下降到零。在试验过程中记录下分流器电流 I_f 及互感器电流 I_1 的波形, 波形图上记录有保护起

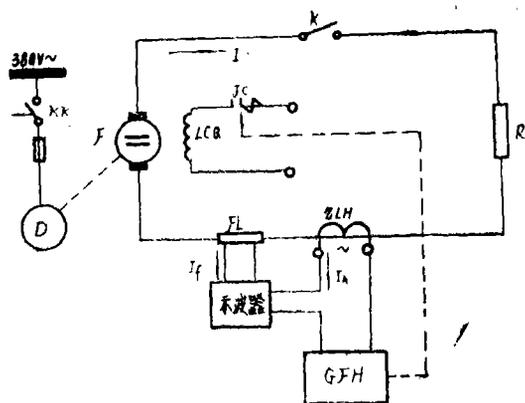


图14 试验电路图

表一

符号	名称	参 数
F	直流发电机	60KW, 6V, 10000 A.
ZLH	直流互感器	15KA/5A 0.5级
FL	分流器	5KA/75mv 1.0级

动时间 t_1 及动作时间 t_2 , 可根据 I_f 的示波图计算 $\int_{t_1}^{t_2} i_*^2 dt = A'$ 并与定值正弦电流下的整定值 A 作比较, 即可求得在时变方波电流下 A' 相对于 A 的误差。

在试验中, 我们利用 I_f 的曲线来计算 A' 值, 这对于保护装置实际的检测电流 I 来说是有误差的。为了检验 I_f 的准确性, 进行了 I_f 与 I_* 相对误差的试验, 试验结果见表二所示。

符 号	参 数		
I_f (A)	6900	8800	10000
I_* (A)	6825	8600	9930
$\Delta I = \frac{I_* - I_f}{I_*}$	0.011	0.023	0.007
ΔI 平均值	0.014		

表二的结果说明, I_f 相对于 I_* 的误差平均值为 0.014, 很小, 可以认为用 I_f 来计算 A' 有足够的准确性。

3. 时变方波电流下的保护动作特性试验

(1) 定值正弦电流试验

取 $I_j = 5 \text{ A}$, 即 $I_{j*} = 1$ 。

测得: $u_{R1} = 76 \text{ V}_{AC}$, $u_{C3} = 78 \text{ V}_{DC}$, $u_{C10} = 144 \text{ V}_{DC}$,

调整使: $u_{\omega 3} = u_{\omega 4} = 45 \text{ V}_{DC}$, $u_{\omega 7} = 115 \text{ V}_{DC}$,

整定: 保护动作时间 $t = 6.41$ 秒, 即 $A_0 = 6.41$ 。

(2) 定值方波电流试验

在保护装置中通入不同数值的定值方波电流, 试验结果见表三所示

表三

I_j (A)	1	2	3	4	5	7
$t_{测}$ (秒)	178	42.5	17.8	9.9	6.41	3.38
$A_{0测}$	7.12	6.8	6.41	6.34	6.41	6.62
$\frac{6.41 - A_{0测}}{6.41} \%$ 平均值	3.3%					
$t_{计}$ (秒)	160	40.1	17.8	10	6.41	3.27
$A_{0计}$	6.4	6.42	6.41	6.4	6.41	6.41
$\frac{6.41 - A_{0计}}{6.41} \%$ 平均值	0.08%					

表三中,

$t_{测}$ ——仪器测量所得保护动作时间;

$t_{计}$ ——根据示波图计算所得保护动作时间。

(3) 时变方波电流试验

主回路通过不同峰值的时变电流, 通入保护装置的则是时变方波电流, 试验结果见表四所示, 对应的电流示波图见图15所示。

表四

序 号	1	2	3
I_{max} (A)	11250	14310	17160
$t_{计}$ (秒)	13.7	9	6.36
$\int_{t_1}^{t_2} i_*^2 dt = A'_0$	6.33	6.50	6.56
A'_0 平均	6.46		
$\frac{6.41 - A'_0 \text{ 平均}}{6.41} \%$	0.8%		

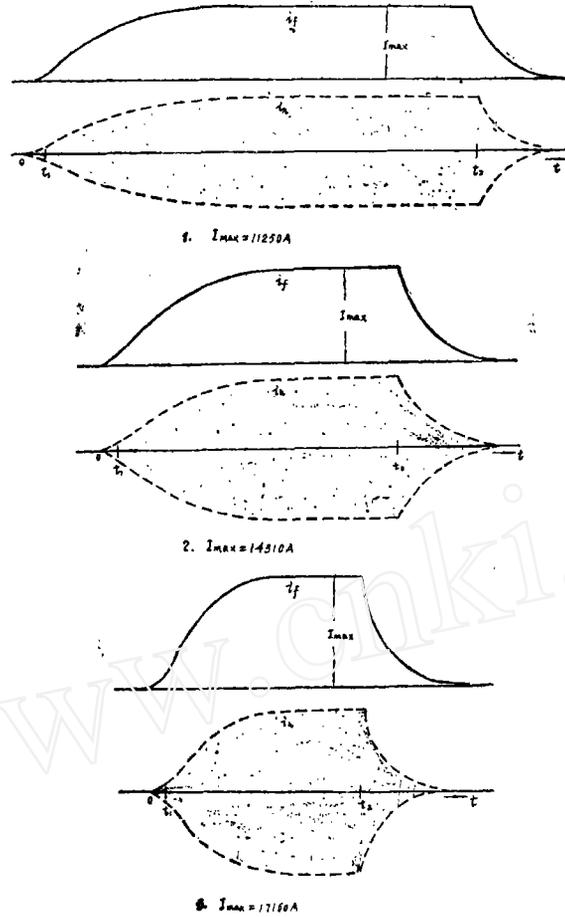


图 15 时变方波电流试验示波图

七、结 论

1. 直流脉冲发电机的过负荷判据是

$$\int_0^t i^2 \cdot dt = \frac{C_{C*} \gamma_{C*} S^2}{0.24 \rho_0 \alpha I_{*a}^2} \ln(1 + \alpha \theta_{jz})$$

2. 两级恒流充电电路不仅在定值电流下有较准确的积分特性，而且在时间常数足够大的（ 10^{-1} 秒级或秒级）时变电流下亦有较准确的积分特性。相对于定值电流而言，时变电流下 A_0 值的误差不超过 5%，因而过负荷保护装置的动作特性仍可表示为：

$$\int_0^t i^2 \cdot dt = A_0$$

3. 过负荷保护装置接于直流电流互感器二次测的交流输出端时，通过保护装置的是周期性方波电流，试验表明， $u_{e,0} = f(I_1)$ 仍然是线性关系，并与具有相同有效值

的正弦电流下的直线接近，因而保护装置同样可获得较为理想的动作特性，保护装置的整定与调试亦可在正弦交流电源上进行。

4. 在BFL—9的基础上改制的过负荷保护装置，不仅可以成功地应用于直流脉冲发电机，亦可应用于直流系统中需要装设过负荷保护的其他电气设备。

附 录

数列 $\sqrt{1}, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \dots, \sqrt{n}$ 前 n 项之和的近似表达式

$$\text{设 } \sqrt{1} + \sqrt{2} + \sqrt{3} + \dots + \sqrt{n} = M \quad (\text{附 } 1)$$

式(附1)可改写为

$$M = \sqrt{1} \cdot 1 + \sqrt{2} \cdot 1 + \sqrt{3} \cdot 1 + \dots + \sqrt{n} \cdot 1$$

M 可表示为图附1中宽为1，高分别为 $\sqrt{1}, \sqrt{2}, \sqrt{3}, \dots, \sqrt{n}$ 的矩形面积的总和，即图附1中虚线阶梯形的总面积，这一面积可用两部分面积之和来表示：

$$M = M_1 + M_2 \quad (\text{附 } 2)$$

M_1 为曲线 $f(n) = \sqrt{n}$ 以下所包含的面积，即

$$M_1 = \int_0^n \sqrt{n} \, dn = \frac{2}{3} n^{\frac{3}{2}} \quad (\text{附 } 3)$$

M_2 为各阴影面积之和。我们把每一个小阴影近似地看成三角形，则

$$\begin{aligned} M_2 &= \sum_{i=1}^n (\sqrt{i} - \sqrt{i-1}) \cdot \frac{1}{2} \\ &= \frac{1}{2} \left[(1 - 0) + (\sqrt{2} - 1) + (\sqrt{3} - \sqrt{2}) + \dots + (\sqrt{n} - \sqrt{n-1}) \right] \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{n} \quad (\text{附 } 4) \end{aligned}$$

则 M 的近似值 M' 可表示为

$$M' = M_1 + M_2 = \frac{2}{3} \sqrt{n}^3 + \frac{1}{2} \sqrt{n}$$

$$\text{即 } \sqrt{1} + \sqrt{2} + \sqrt{3} + \dots + \sqrt{n} \approx \frac{2}{3} \sqrt{n}^3 + \frac{1}{2} \sqrt{n} \quad (\text{附 } 5)$$

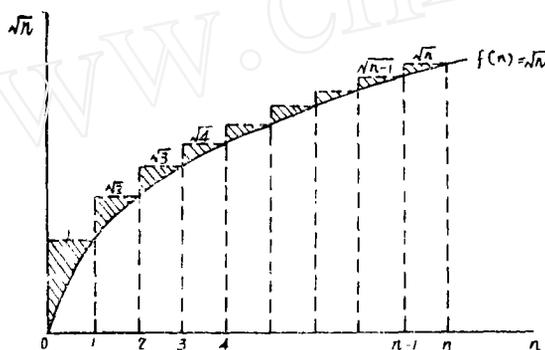
M 与 M' 比较表见表附1。

附表 1

M与M'比较表

n	M	M'	$\Delta M = M' - M$	$\frac{\Delta M}{M} \%$
1	1	1.17	0.17	17
2	2.414	2.587	0.173	7.17
3	4.15	4.326	0.176	4.24
5	8.38	8.57	0.19	2.27
10	22.466	22.66	0.194	0.86
20	61.65	61.86	0.21	0.34

由表可知: $n \geq 3$, 误差 $\frac{\Delta M}{M} \% < 5 \%$; $n \geq 10$, $\frac{\Delta M}{M} \% < 1 \%$.

图附 1 $M = \sqrt{1} + \sqrt{2} + \dots + \sqrt{n}$ 计算图

参 考 文 献

1. BFL—9 型负序过电流保护产品说明书 许昌继电器研究所
2. 直流互感器及其应用 保定市电器控制设备厂