

LC 振荡回路模拟 FSR 短路开断试验

丁少纯

(永安火电厂, 福建 永安 366013)

摘要: 分析了 LC 振荡回路模拟 FSR 短路开断试验的等效原则, 并以永安火电厂 5 号厂高变出口短路为例, 进行了模拟试验回路的参数选择, 通过现场试验验证了用 LC 振荡回路法模拟 FSR 短路开断试验的有效性, 为大容量短路开断设备的出厂验收和设备检查提供了一种经济适用的试验方法。

关键词: 振荡回路; 模拟试验; 短路开断; 截止电流

中图分类号: TM 762.1*4

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)02-0098-03

短路开断试验是检验断路器或开断装置开断能力的一种直接有效的方法, 通常是用冲击发电机作为试验电源, 但试验设备昂贵、技术复杂、操作烦琐, 生产厂家一般不具备这样的试验手段, 只能列为型式试验项目, 由专门的检测机构进行。为此, 寻求一种既能客观地检验设备的开断能力, 又能方便操作、减少投资、输出较大冲击电流的试验装置, 对提高产品出厂质量和运行可靠性有积极意义。

1 模拟试验的等效原则^[1-3]

在冲击发电机容量不能满足短路电流开断试验要求时, 国标中曾推荐采用 LC 振荡回路或复合振荡回路(由电流振荡回路和电压振荡回路组成)来等效模拟短路开断试验。这种模拟开断试验的等效原则是: 最大冲击电流相等、电流作用时间相同、断口恢复电压相同。下面分析一种具有截流和限流特性的新型爆炸开关^[4]——熔断器非线性电阻式高速开关装置 FSR(Fuse Switch Resistance), 用 LC 振荡回路进行模拟开断试验时的等效情况, 其等效原则有 3 个。

a. 最大冲击电流。由于 FSR 的截流特性, 开断过程中设备所承受的最大冲击电流即等于 FSR 的截流值。

b. 电流作用时间。电流作用时间影响的是热稳定指标 I^2t 和开断过程中需要断口消耗的能量。FSR 截流时间大约为 1 ms, 电流在非线性电阻中衰减时间小于 2 ms, 电流持续时间不到 3 ms。考虑三相电流之间的相位差后, 电流持续时间最大不超过 7 ms。在这样短的时间内, 电源提供的能量可以忽略, 只需考虑在截流时刻电感中储存的磁能, 由于 FSR 的快速性和截流性, 可使 I^2t 降低数百倍甚至上千倍。在满足了截流值和能量相等的条件下, I^2t 自然满足。而在截流值相等的条件下, 能量相等就是电感相同。

c. 断口恢复电压。截流之前作用在断口上的最大电压不大于截止电流在熔断器冷态电阻上产生的

压降。而且, 这个只有几百欧电阻的恢复电压对断口根本不构成威胁。截流瞬间作用在断口上的恢复电压为熔断器熔断时产生的弧压。非线性电阻导通后, 作用在断口上的恢复电压由非线性电阻的残压决定。在满足截流值相同的原则下, 作用在断口上的恢复电压自然等效。

因此, 用 LC 振荡回路进行 FSR 的短路开断试验时, 应遵循的等效原则简化为: 截流值相同、试验回路的电感相同、非线性电阻的残压相等。

2 模拟开断试验回路的参数确定

2.1 FSR 装置的动作原理与参数设定

FSR 装置主要由 FUR^[5](高能 ZnO 非线性电阻 R_F 和高压限流熔断器 FU 并联组成的保护装置)、测量线圈、电子逻辑控制器和爆炸桥式载流体组成, 原理图如图 1 所示。

其动作原理为: 正常情况下, 电流从封闭的桥式载流体和 FUR 中流过, 桥式载流体的电阻为 FUR 的 1/50, 因此, 从载流体中流过的电流比从 FUR 中流过的电流大 50 倍, 这样, 在不改变限流熔断器^[6]额定电流的情况下, 大大提高了整个装置的额定电流。电子逻辑控制器随时检测系统电流瞬时值 i 和电流变化率 di/dt , 一旦发生短路故障, 当 i 和 di/dt 大于整定值 i_{limi} 时, 电子逻辑控制器在 t_0 时刻发出点火脉冲, 经脉冲变压器点燃爆炸桥中的雷管及炸药, 大约 0.2 ms 后爆炸桥动作, 载流导体从中部断开, 在爆炸冲击力的作用下, 分开的载流体向 6 个方向卷曲, 形成隔离断口, 将电流全部转移至 FUR, 熔断器 FU 在 t_1 时刻内熔断截流, 并产生弧压将电流逼入非线性电阻 R_F 中快速衰减。此时, 短路电流只上升到 I_p , 仅为预期短路

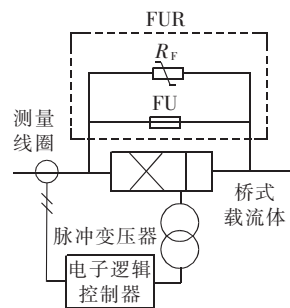


图 1 FSR 装置原理图
Fig.1 Principle of FSR

电流峰值的 $1/5 \sim 1/10$, 最终完成开断。短路及开断后的电流波形如图 2 所示 (图中 1 为短路电流曲线, 2 为 FSR 电流曲线, 3 为 FSR 启动电流曲线, 4 为截住电流衰减曲线, 5 为 FSR 电流变化率曲线)。

以永安火电厂 5 号厂高变高压侧出口短路为例 (系统接线图如图 3 所示), 进行 FSR 装置的参数设定。5 号厂高变高压侧开关为 SN₄-10G 少油断路器, 沈阳高压开关厂 1983 年出厂, 开关额定短路开断电流为 58 kA, 额定电压 U 为 10.5 kV, 在最大运行方式下高压侧发生三相短路时, 预期短路电流的有效值为 I_k 为 90 kA。通过对 FSR 装置的有关参数计算后, 设定参数如下: 载流桥体的额定电流取 $I_e = 1 \text{ kA}$; 装置动作电流 $I_{dz} = 25 \text{ kA}$; 装置启动电流 $i_{\text{limit}} = 6.5 \text{ kA}$; 电流变化率 $di/dt = 10.91 \text{ A}/\mu\text{s}$; 装置运算时间 $t_0 = 0.162 \text{ ms}$; 装置截止时间 $t_1 = t_0 + 0.5 = 0.662 \text{ ms}$; 装置截止电流 $I_p = 26.3 \text{ kA}$; 残压 U_z 限制在设备允许的 2.5 倍相电压幅值以内, 即 $U_z \leq 2.5\sqrt{2}U/\sqrt{3} = 21.43 \text{ (kV)}$ 。

2.2 模拟试验回路接线

试验振荡回路由 1 个电感线圈 L 与若干台并联的脉冲电容器组串联组成, 并配有充电设备、分断开关 S 和辅助测量系统, 模拟试验原理图如图 4 所示。

当电容器组的充电电压达到预先确定的数值时, 合上开关 S , FSR 装置动作, 并产生弧压将电流逼入非线性电阻中快速衰减, 由计算机数据采集系统记录 FSR 动作时的电流、电压曲线和有关数据。

2.3 振荡回路电感量 L 的数值确定

由 5 号厂高变出口短路电流有效值 $I_k = 90 \text{ kA}$, FSR 开断时的截止电流 $I_p = 26.3 \text{ kA}$, 可求得系统参数:

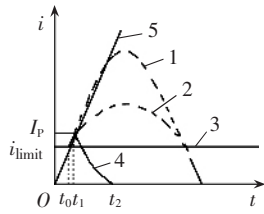


图 2 短路开断波形图
Fig.2 Current waves of short-circuit break

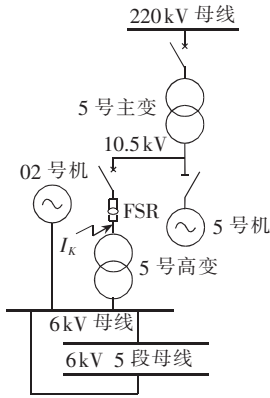


图 3 系统接线图
Fig.3 The system wiring

短路阻抗为 $X_L = U/(\sqrt{3}I_k) = 0.067(\Omega)$
等效电感为 $L = X_L/\omega = 0.213(\text{mH})$
磁场能量为 $W_L = I_p^2 L/2 = 73.66(\text{kJ})$

由于熔丝熔断后氧化锌阀片将电压限制在氧化锌阀片的残压 $U_z = 21.43 \text{ kV}$ 上, 即 FSR 断口要承受 21.43 kV 的恢复电压。于是, 模拟试验时必须达到: 在截流时间 $t_1 = 0.662 \text{ ms}$ 时, 截流值 $I_p = 26.3 \text{ kA}$; 试验回路的电感 $L \geq 0.213 \text{ mH}$, 磁场能量为 $W_L \geq 73.66 \text{ kJ}$; FSR 断口恢复电压 $U \geq 21.43 \text{ kV}$, 考虑断口不重燃。

2.4 振荡回路电容器组的数量确定

设电容器总容量为 $C, C = 1/(\omega^2 L) = 47.62(\text{mF})$; 将其两端电压充至 U_c , 使 $U_c = \sqrt{2}I_k\omega L = 8513(\text{V})$ 。

由于市面上可供选用的脉冲电容器额定电压为 $U_N = 10 \text{ kV}$, 单台容量 $C_N = 0.12 \text{ mF}$, 若选择工频振荡回路, 所需要的电容器组数量 $n = C/C_N = 47.62/0.12 = 397(\text{台})$, 会造成试验装置的体积庞大。若选用高频振荡回路, 可大大减少脉冲电容器的数量, 下面计算高频振荡回路电容器组数量 n' 。

令工频电流 i 的角频率为 ω ; 高频电流 i' 的角频率为 ω' , 分别把电容器组充至 $U_c = 8513 \text{ V}$, 则

$$i = \sqrt{2}I_k \sin \omega t = \frac{U_c}{\omega L} \sin \omega t$$

$$i' = \sqrt{2}I'_k \sin \omega' t = \frac{U_c}{\omega' L} \sin \omega' t$$

$$di/dt|_{t=0} = (U_c/\omega L) \omega \cos \omega t = U_c/L$$

$$di'/dt|_{t=0} = (U_c/\omega' L) \omega' \cos \omega' t = U_c/L$$

由于 $di/dt|_{t=0} = di'/dt|_{t=0}$, 假设很短的 t_1 时刻 i 和 i' 曲线在过原点时切线重合, 令 $\sin \omega t_1 \approx \omega t_1$, $\sin \omega' t_1 \approx \omega' t_1$, $I_p = I'_p = 26.3 \text{ kV}$ 且 $\omega' t = \pi/6$, 则

$$I_p = \sqrt{2}I_k \sin \omega t_1 = \sqrt{2}I_k \omega t_1$$

$$I'_p = \sqrt{2}I'_k \sin \omega' t_1 = \sqrt{2}I'_k \omega' t_1$$

$$I_k/I'_k = \omega'/\omega = \sqrt{C'/C} = K, I_k = K I'_k$$

因 $I'_p = \sqrt{2}I'_k \sin 30^\circ = \sqrt{2}I'_k/2 = 26.3 \text{ (kA)}$, 故 $I'_k = 26.3/0.707 = 37.2 \text{ (kA)}$ 。

由 $I'_k = U_N/(\sqrt{2}\omega' L)$ 得:

$$\omega' = \frac{U_N}{\sqrt{2}I'_k L} = 892 \text{ (rad/s)}$$

又因 $\omega' = 1/\sqrt{LC'}$, 所以

$$C' = \frac{1}{\omega'^2 L} = \frac{1}{892^2 \times 0.213 \times 10^{-3}} = 5.9 \text{ (mF)}$$

电容器组的台数为 $n' = 5.9/0.12 = 49.2$, 取 $n' = 50$, 则电场能量 $W_C = C'U_N^2/2 = 300 \text{ (kJ)}$; 由假设产生的

$$\text{误差 } \varepsilon = \frac{\sin \omega' t - \omega' t}{\sin \omega' t} \times 100\% = -4.7\%。$$

该误差在工程上是可以接受的。从截流的时间看, 工频 30° 时间为 1.667 ms , 高频 30° 的时间为 $1.667/K \text{ ms}$, 只要在 $t_1 \leq 1.667/K \text{ ms}$ 时间内开断电

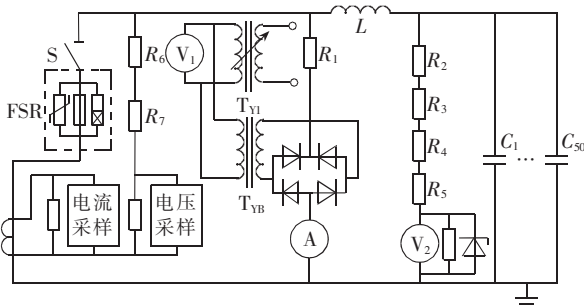


图 4 模拟试验原理图
Fig.4 Principle of the emulational test

路,高频振荡回路开断电流值 I_p' 与工频振荡回路开断电流值 I_p 几乎相等。在 $t > t_1$ 后电流曲线沿着 i 曲线上升还是沿着 i' 曲线上升已不重要,因为后面的过程仅仅是“预期电流”,实际上并不发生。这样,只要电感不变, $I_p = I_p'$, 开断后电路释放的磁场能量就不变。熔丝断开后电流流入氧化锌阀片,产生的恢复电压由阀片残压 ($U_s = 21.43 \text{ kV}$) 决定,所以 3 原则均能满足。如果按照短路开断的要求配置试验回路电感和非线性电阻的残压值后,只要截流值控制在允许的误差范围内,用幅值较小的高频电流取代幅值较大的工频电流,进行模拟短路开断试验的方法是可行的。而产生高频试验电流所需的电容量却比产生工频试验电流所需的电容量小得多。

3 模拟试验结果

试验装置由 50 台 10 kV , $120 \mu\text{F}$ 的电容器并联与电感量为 0.213 mH 的电感线圈、分断开关 K 及被试品 FSR 装置串联组成,整个试验过程分动作试验和开断试验 2 种形式:动作试验是在试验电流达到启动电流值时,检查装置能否可靠动作,但不启动爆炸桥体;而开断试验是在装置达到整定值时,直接出口启动爆炸桥体进行全过程分断。现场开断试验中,计算机数据采集系统记录的波形图较多,这里从略。其他有关数据汇总如下:充电电压 8328 V 、截止电流 24303 A 、截流时间 0.68 ms 、电流变化率 $11.81 \text{ A}/\mu\text{s}$ 、衰减完成时间 0.928 ms 、实测预期电流峰值 126984 A 。

通过所施加的充电电压推算预期电流的理论峰值为 124288 A ,与实测值误差仅为 2.166% ,在允许的范围内。

4 结论

a. 在模拟试验中,由于充电电压的数值调整不易控制,实际充电电压比理论计算值小,但实测预期数据已接近理论计算值,且试验结果误差小于 2.5% ,该误差在允许的范围内,能满足工程需要。

b. 模拟试验表明,FSR 装置在短路电流第 1 半波未升起之前,强制切断短路电流,高能 ZnO 电阻

限制了操作过电压,说明了该装置能迅速切断短路电流,能有效地防止其他设备的损坏。

c. 本次试验测得 FSR 装置截流时间为 0.68 ms ,衰减完成时间为 0.928 ms ,现场实际测试 5 号厂高变微机差动保护从启动到出口的最短时间为 55 ms ,说明了该装置比微机保护动作更快。

d. 整个试验过程中,试验装置安全可靠,且结构简单、操作方便,是生产运行单位进行动态模拟试验的简便设备。由于本次试验采用高频振荡回路,振荡频率比工频高近 3 倍,建议生产厂家尽量采用工频振荡回路进行试验,虽然试验设备投资增加,但更接近实际运行状况,真正起到模拟试验的效果。

参考文献:

- [1] 刘伯涛,田萃英. GB/T 14824-1993 发电机断路器通用技术条件[S]. 北京:中国电力出版社,1993.
- [2] 曹荣江,顾霓鸿. DL/T 615-1997 交流高压断路器参数选用导则[S]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [3] 曹荣江,庄稼人. GB/T 4473-1996 交流高压断路器合成试验[S]. 北京:中国标准出版社,1997.
- [4] 宋执权,傅鹏. 爆炸开关系统的研制[J]. 高压电器,2005, 41(4):245-248.
SONG Zhi-quan, FU Peng. Development on explosive breaker system[J]. **High Voltage Apparatus**, 2005, 41(4): 245-248.
- [5] 郭思君. 高压限流熔断器组合保护装置作发电机短路保护的探讨[J]. 四川水力发电,2000,19(增刊):60-61.
GUO Si-jun. The discuss of taking the HV restricted-current fuse combination as the generator short circuit protection[J]. **Sichuan Water Power**, 2000, 19(Supplement): 60-61.
- [6] 王季梅. 高压限流熔断器[M]. 西安:西安交通大学出版社,1991.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

丁少纯(1965-),男,福建晋江人,工程师,主要从事火力发电厂发输电设备的检修、试验和技术管理工作(E-mail: dsc@yatp.com.cn)。

Emulation of FSR short-circuit break test with LC oscillation circuitry

DING Shao-chun

(Fujian Yong'an Thermal Power Plant, Yong'an 366013, China)

Abstract: The equivalent rules in the emulation of FSR short-circuit break test with LC oscillation circuitry is focused on and with an example of no.5 high voltage plant service transformer short-circuit in Yong'an thermal power plant, the parameter selection of emulational test circuitry is introduced. The effectiveness of FSR short-circuit break test with LC oscillation circuitry is proved by field test, which provides an economical substitute for short-circuit break test of large capacity devices in factory acceptance and device inspection.

Key words: oscillation circuitry; emulational test; short-circuit break; cut-off current