

电快速瞬变脉冲群干扰频谱分析及其导致微机保护非正常重启实例

赵晓明¹, 吴俊¹, 余志慧²

(1. 浙江省电力试验研究院, 浙江 杭州 310014; 2 杭州市电力局, 浙江 杭州 310016)

摘要: 电快速瞬变脉冲群干扰 (EFT/B) 是微机保护装置最易受到影响的干扰之一, 当干扰水平超过了装置逻辑元件和逻辑回路的抗干扰水平时, 将引起装置不正常工作或程序运行出错。通过一个微机保护装置受到干扰导致频繁重启的实例, 采用实验的方法分析并查找出了继电器触点弹跳是产生本例 EFT/B 干扰的主要原因, 通过更换不同型号的继电器减少了 EFT/B 干扰的耦合程度, 可靠抑制了 EFT/B 干扰。还根据国际 IEC 和 IEEE 标准对 EFT/B 波形进行了理论分析, 在拉普拉斯变换和傅里叶变换的基础上通过几种不同方法计算了 EFT/B 波形的频谱, 给出了工程实践中既简单又合理的计算方法, 并试图通过分析 EFT/B 波形的频谱分布, 使得对 EFT/B 的电磁干扰的防护更具有针对性。

关键词: 电快速瞬变脉冲群; 微机保护; 频谱分析

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)17-0008-05

0 引言

变电站的电磁环境极其复杂, 在正常和异常运行状态下都会产生各种电磁干扰, 比如高压隔离开关和断路器操作时产生快速衰减的脉冲群和暂态过电压、雷击线路和构架或系统短路故障导致大电流流入接地网从而引起二次电缆中产生瞬态电流、高压设备周围的工频电磁场、局部放电导致高频电磁辐射、静电放电、非线性负载引起的谐波和间谐波、电网中负荷变化和运行故障产生的电压暂降以及中断和不平衡、频率变化干扰、地磁干扰和核电磁脉冲干扰、继电器触点投切感性负载和继电器触点弹跳在二次回路引起电快速瞬变脉冲群干扰 (EFT/B) 等。上述各种电磁干扰以电磁感应、辐射和电路传导的方式影响对干扰较为敏感的各种以微电子和计算机技术为基础的自动化设备如继电保护、监控装置等设备。当干扰水平超过了装置逻辑元件和逻辑回路的抗干扰水平时, 将引起装置逻辑回路不正常工作或程序运行出错, 从而使整个装置不能正常工作。

本文通过一个微机保护装置受到干扰导致频繁重启的实例, 采用实验的方法分析并查找出了继电器触点弹跳是产生本例 EFT/B 干扰的主要原因, 通过更换不同型号的继电器减少了 EFT/B 干扰的耦合程度, 可靠抑制了 EFT/B 干扰。文中还根据国际 IEC 和 IEEE 标准对 EFT/B 波形进行了理论分析, 在拉普拉斯变换和傅里叶变换的基础上通过几种不

同方法计算了 EFT/B 波形的频谱, 给出了工程实践中即简单又合理的计算方法, 并试图通过分析 EFT/B 波形的频谱分布, 使得对 EFT/B 的电磁干扰的防护更具有针对性。

1 某微机保护非正常重启现象

在对浙江某 500 kV 变电站一套进口主变后备距离保护进行定期校验时, 发现此微机保护装置在连续模拟几次保护动作或几次 PT 断线动作后发生装置非正常重启现象, 严重时每次保护动作或每次 PT 断线动作后均发生装置非正常重启现象, 表现为装置正常工作绿色指示灯闪烁 10 ~ 30 s 后自动复归, 并且内部故障信号掉牌。保护装置在绿灯闪烁时被闭锁, 此段时间内模拟主变故障保护拒动。后对保护装置进行相应检查, 发现绿灯闪烁时 DM 板 (开关量输入输出板) 报错, 但单独更换该 DM 板无效。后又分别更换相邻的 DM 板、MPU 主板、PSM 电源板、AD 采样板、总线板等均无效。上述检查基本排除了保护装置硬件损坏的可能。考虑到保护装置可能是受到某种形式的干扰造成保护非正常重启, 将 DM 板挪至较远的一个插槽, 保护非正常重启、内部故障信号掉牌的频率有所下降, 从而进一步判断是此 DM 板的微处理器等芯片受到电磁干扰。考虑到装置非正常重启均是发生在每次保护动作以及 PT 断线时, 而此 DM 板正是这两个重动信号的开出板, 遂将 DM 板的信号开出的公共正电源解除, 保护非正常重启及内部故障信号掉牌的现象消

失。将 DM板的公共正电源恢复,拆除后面重动的掉牌信号继电器(保护动作以及 PT断线掉牌信号继电器),保护非正常重启及内部故障信号掉牌的现象亦消失。由此可初步判断保护动作以及 PT断线掉牌信号继电器动作的瞬态过程中产生的瞬变脉冲群(EFT/B)是引起装置非正常重启一个主要的干扰源。另一方面也说明此装置的 DM板抗干扰能力值得怀疑。

2 电快速瞬变脉冲群的频谱分析

2.1 概述

上述分析基本确定了保护非正常重启现象是由继电器触点投切感性负载和继电器触点弹跳等瞬跳过程中产生的电快速瞬变脉冲群干扰所致,所以有必要对 EFT/B 干扰加以分析说明。EFT/B 干扰的主要特征是电压上升时间快、能量低、持续时间短、重复率高、相当于一连串前沿陡峭的脉冲群。

按照 IEC61000-4-4 标准的规定,脉冲群典型值具有以下参数:单个脉冲上升时间(10%U~90%U)为 5 ns ±30%;单个脉冲持续时间为 50 ns ±30%;脉冲重复率为 5 kHz 或者 2.5 kHz;脉冲群持续时间为 15 ms;脉冲群周期为 300 ms,即每隔 300 ms 连续发生 75 个脉冲(5 kHz)或 37.5 个脉冲(2.5 kHz)。其波形示意图见图 1。

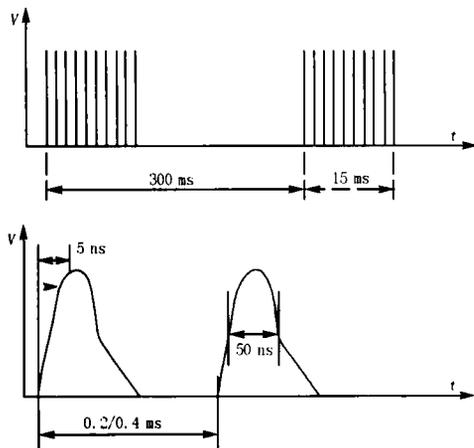


图 1 标准 EFT/B 波形

Fig 1 Standard EFT/B waveforms

2.2 EFT波形的 IEEE描述

根据 IEC 和 IEEE 标准^[4,5]用于仿真电快速瞬变的测试波形均描述为双指数函数,如图 2 所示。对于 5/50 ns 波形,其函数描述为

$$V(t) = AV_p (1 - e^{-t/\tau_1}) e^{-t/\tau_2} \quad (1)$$

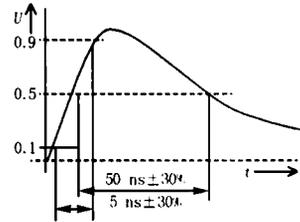


图 2 单个 EFT 脉冲波形

Fig 2 Single EFT/B waveform

式中: $V(t)$ 为 EFT 电压; V_p 是开路峰值电压; A 是标准 EFT 波形的补偿系数; τ_1, τ_2 为波前系数和波长系数。 $A = 1.270$, $\tau_1 = 3.5 \text{ ns}$, $\tau_2 = 55.6 \text{ ns}$, $V_p = 1000 \text{ V}$ 。

2.3 EFT波形的频谱计算分析

对于计算 EFT 的频谱,通过幅值密度函数的包络线足以发现干扰成分在最坏情况下的最大幅值。因此可以通过分析 EFT/B 的一个单个脉冲的频谱分布来代替分析整个脉冲序列,这使得分析简化了很多^[2]。

为求得 EFT 波形的频谱,首先对式(1)进行拉普拉斯变换得

$$V(s) = AV_p \left(\frac{1}{s + 1/\tau_2} - \frac{1}{s + (1/\tau_1 + 1/\tau_2)} \right) \quad (2)$$

整理式(2)

$$V(s) = AV_p \left(\frac{1/\tau_1}{s^2 + (1/\tau_1 + 2/\tau_2)s + (1/\tau_2)(1/\tau_1 + 1/\tau_2)} \right) \quad (3)$$

令 $s = j\omega$

把 V_p, A, τ_1, τ_2 代入式(3),再通过 Matlab 编程,绘制 $|V(j\omega)|$ 的对数幅频响应曲线包络线,绘好后如图 3 中 3 号曲线。图 3 中横坐标为频率,单位 Hz;纵坐标为 dB ($\mu\text{V/s}$)。

工程中往往把幅频响应曲线的包络线通过 3 条直线段近似表示:第一条直线段平行于横轴,初始值为 $|V(0)|$,截至于 f_1 ;第二条直线段起始于 f_1 截至于 f_2 ,斜率为 $-10 \text{ dB}(\mu\text{V/s})/10 \text{ 倍频}$;第三条直线段起始于 f_2 ,斜率为 $-20 \text{ dB}(\mu\text{V/s})/10 \text{ 倍频}$ 。

由式(1)可得

$$V(j\omega) = AV_p \left(\frac{1}{j\omega + 1/\tau_2} - \frac{1}{j\omega + (1/\tau_1 + 1/\tau_2)} \right) \quad (4)$$

$$|V(j\omega)| = AV_p \frac{1/\tau_1}{\sqrt{(\omega^2 + 1/\tau_2^2)(\omega^2 + (1/\tau_1 + 1/\tau_2)^2)}} \quad (5)$$

$$|V(0)| = AV_p \frac{1/\tau_1}{(1/\tau_2)(1/\tau_1 + 1/\tau_2)} \quad (6)$$

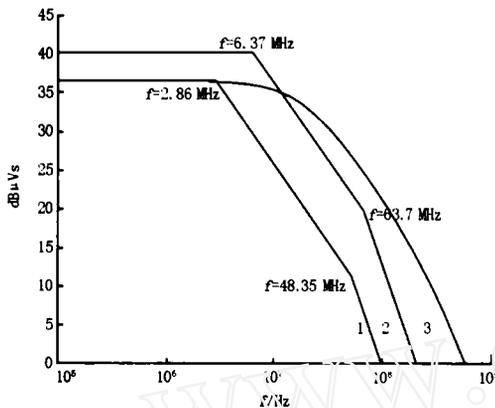


图 3 EFT波形的频谱伯德图

Fig 3 Frequency-spectra of EFT/B

由式 (6) 带入 EFT 参数并取对数得

$$20 \log |V(0)| = 36.5 \text{ dB}\mu\text{Vs}$$

由式 (4) 得到两个转折频率^[3]

$$f_1 = \frac{1}{2t_2} = 2.86 \text{ MHz}$$

$$f_2 = \frac{1/t_1 + 1/t_2}{2} = 48.35 \text{ MHz}$$

通过上述算得的参数, 绘制图 3 EFT 频谱伯德图中 1 号曲线。

工程中为了简单起见, 也会用梯形脉冲的频谱近似代替图 2 中双指数波形的频谱进行频率分量估算^[1]。这样知道波形的上升时间和波形持续时间就可以绘制 EFT 频谱伯德图。

梯形脉冲的频谱密度函数可通过傅里叶变换求得

$$V(f) = 2A \cdot \frac{\sin(\pi f)}{f} \cdot \frac{\sin(\pi f t_f)}{f t_f} \quad (7)$$

式中: A 是开路峰值电压 1 000 V, t_r 为波形上升时间和波形持续时间 5 ns, 50 ns。对于式 (7) 可以做下列简化:

1) 考虑最强干扰的情况, $\sin x$ 的值取 1;

2) $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x}$ 值取 1;

在低频段有:

$$\frac{\sin(\pi f)}{f} = 1 \quad \frac{\sin(\pi f t_f)}{f t_f} = 1 \text{ 则} \quad V(f) = 2A \quad (8)$$

在中频段有:

$$\frac{\sin(\pi f t_f)}{f t_f} = 1 \quad \sin \pi f = 1 \text{ 则} \quad V(f) = \frac{2A}{f} \quad (9)$$

在高频段有:

$$\sin(\pi f) = 1 \quad \sin(\pi f t_f) = 1 \text{ 则} \quad V(f) = \frac{2A}{2f^2 t_f} \quad (10)$$

由式 (8)、(9) 求得第一个转折频率

$$f_1 = \frac{1}{t_f} \quad (11)$$

由式 (9)、(10) 求得第二个转折频率

$$f_2 = \frac{1}{t_f} \quad (12)$$

故

$$20 \log V(0) = 20 \log 2A = 40 \text{ dB}\mu\text{Vs}$$

$$f_1 = \frac{1}{t_f} = 6.37 \text{ MHz}$$

$$f_2 = \frac{1}{t_f} = 63.7 \text{ MHz}$$

用同样的方法, 由三条直线段绘制 EFT 频谱伯德图中 2 号曲线。

对 EFT 频谱带宽更粗略的估算可用 EFT 波形的上升时间 t_r 直接求得

$$f_b = \frac{0.35}{t_r} \quad (13)$$

上式的依据是, 只考虑波形的上升时间, 则

$$V(t) = A(1 - e^{-t/t_r}) \quad (14)$$

因为上升时间为 10%V ~ 90%V, 带入式 (14) 得

$$0.1A = A(1 - e^{-t_1/t_r}) \quad 0.9A = A(1 - e^{-t_2/t_r})$$

$t_r = t_2 - t_1$ 经计算得

$$t_r = \frac{t_r}{\ln 9} \quad (15)$$

又因只考虑一阶低通环节, 则

$$f_b = \frac{1}{2t_r} \quad (16)$$

把式 (15) 带入式 (16) 得

$$f_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln 9}{2t_r} = \frac{0.35}{t_r} = 70 \text{ MHz}$$

可知 EFT 频谱粗略估计的带宽约 70 MHz。

比较上述计算 EFT 频谱的四种不同方法, 工程中采用第三种方法即图 3 中的曲线 2, 作者认为是既简单又合理的。

2.4 EFT 波形的干扰分析

从幅值频谱图可以看出, 电快速瞬变脉冲群干扰波形的频谱主瓣在 100 MHz 以内。其中高频部分能量虽小, 但辐射能力强, 所以即使比例较小也足以影响半导体电路的正常运行。

试验表明 EFT 的干扰一般不会损坏装置, 但因

为装置微处理器及外围器件的各个逻辑元件都有相应的电平和噪声容限,侵入系统的外来噪声一旦噪声超过了某种容限,就可能造成微处理器系统出错,使受干扰设备工作出现软故障,如程序混乱、数据丢失、逻辑回路不正常工作、数字系统的位错、系统复位、内存错误以及死机等现象,使产品性能下降或功能丧失。一旦对产品进行人工复位,或将数据重新写入芯片,在无 EFT 的情况下,产品又能正常工作,本文所举实例就是个很好的例子。值得注意的是,在 IC 输入端,电快速瞬变脉冲群对寄生电容充电,经过累积,最后达到并超过 IC 芯片的抗扰度电平。本文所举实例就出现这样的情况:几个脉冲(或短时间的脉冲群)不会每次引起保护装置重启,而长时间、频繁的脉冲群将使保护装置重启。

3 继电器触点开闭引起电快速瞬变脉冲群干扰分析

以上分析指出保护装置非正常重启是由于继电器的触点断开感性负载或触点闭合时在触点弹跳产生快速瞬变干扰所致。

对于第一种情况即触点断开感性负载时,线圈电感和杂散电容之间会形成 LC 振荡回路,电容周期充放电。如图 4 所示,开关触点从 t_0 时刻开始逐渐分开,当触点间的电压超过绝缘电压时,开始火花放电,触点间的电压瞬时下降,然后又上升,由于开关触点间距增大,故再次发生火花放电,此时的电压也相应增大。然后触点间距继续增大,触点间的电压再上升,触点再放电直至电感中的能量全部消耗。图 5 是本文所提到的继电器触点断开时的实际录波图,从图中可以清楚看到触点的一次明显放电过程,从图中还可以看到波形虽然有瞬变但没有形成脉冲群。

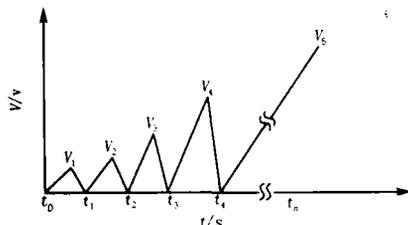


图 4 继电器触点断开感性负载放电示意图

Fig 4 Inductive load discharge of a relay contact switching off

对于第二种情况,图 6 显示继电器触点弹跳的实际波形。可以看出此波形类似于 EFT/B 波形,脉冲重复频率在 1 kHz 至 1 MHz。对单个脉冲而言,其上升沿在纳秒级,脉冲持续期在几十纳秒至数毫

秒之间。图 5、图 6 用示波器记录了继电器触点断开和闭合时所录到的波形,可以帮助我们对 EFT/B 现象有一个更直观的了解。

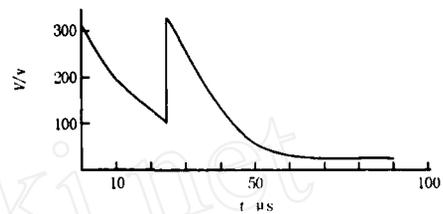


图 5 继电器触点断开时实测波形

Fig 5 A real waveform of a relay contact switching off

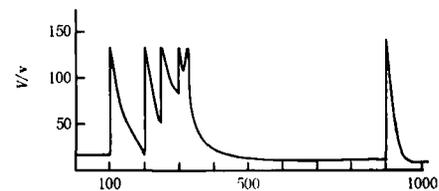


图 6 继电器触点闭合时弹跳实测波形

Fig 6 A real waveform of a relay contact switching on

4 电快速瞬变脉冲群干扰的抑制

因为 EFT 的频谱能量主要集中在 100 MHz 以下,故继电器触点的闭合或断开的瞬间产生的 EFT 干扰可以主要认为是电容、电感耦合的传导方式通过共模干扰(即发生于保护装置电路中某点各导线对和接地线或外壳之间的干扰)和差模干扰(即发生在电路各导线之间的干扰,是和有用信号传递途径相同的一种干扰)作用于供电电源端口、信号和控制端口,从而对保护装置产生严重影响。

对 EFT 干扰的抑制可以采用如隔离、屏蔽、滤波、退耦、接地、限幅以及合理布线以减少杂散电容等措施。本例中,将后面重动的保护动作及 PT 断线掉牌信号继电器用另外一种型号继电器代替以减少电感、杂散电容耦合程度。保护装置经重新测试,内部故障信号的现象消失,保护不再非正常重启,EFT 干扰被可靠抑制。

5 结语

值得引起注意的是,虽然 EFT 频谱能量主要集中在 100 MHz 以下,干扰主要以耦合形式传导。但干扰频谱一旦接近 CPU 工作频率,保护装置可能也会受到辐射干扰的影响。静电场的干扰也可能干扰保护装置的正常运行,需要进一步研究探讨。此

外保护生产厂家应加强保护装置的 EMC 研发,使保护装置能够在变电站恶劣的电磁环境中可靠运行。

参考文献:

- [1] 杨继深. 电磁兼容技术之产品研发与认证 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
YANG Ji-shen EMC Technology—Product Development and Certification [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [2] 马伟明. 电力电子系统中的电磁兼容 [M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000.
MA Weiming EMC in Power Electronics Industry [M]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric Power Press, 2000.
- [3] 莫付江. 浪涌抑制与电磁兼容 [J]. 电网技术, 2004, 28 (5): 69-72
MO Fu-jiang Surge Suppression and Electromagnetic

Compatibility [J]. Power System Technology, 2004, 28 (5): 69-72

- [4] GB/T 17626.1—1998 电磁兼容试验和测量技术抗扰度试验总论 [S].
- [5] IEEE Std C62.41.2-2002, IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-voltage AC Power Circuits [S].

收稿日期: 2006-02-20

作者简介:

赵晓明 (1976 -), 男, 工程师, 从事电力系统继电保护研究和试验工作; Email: zjsbd@sina.com

吴俊 (1980 -), 男, 硕士, 从事电力系统继电保护研究和试验工作;

余志慧 (1976 -), 女, 工程师, 从事电力系统运行管理工作。

Frequency-spectra analysis of electrical fast transient/burst and an instance of microprocessor-based protection abnormally reboot caused by EFT/B

ZHAO Xiao-ming¹, WU Jun¹, YU Zhi-hui²

(1. Zhejiang Electric Power Test & Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. Zhejiang Hangzhou Electric Power Bureau, Hangzhou 310016, China)

Abstract: The electrical fast transient/burst (EFT/B) disturbance is one of the most important transient electromagnetic disturbances which influence the microprocessor-based protection. The relay will fall into failure and its procedure will make an error if the EFT/B disturbances exceed the immune capability. An instance of digital relay abnormally reboot as a result of EFT/B, which is produced by electric magnetic bounce of relay, is presented in this paper. By changing the type of the relay, the electromagnetic coupling is decreased and the disturbance is effectively restrained. The EFT/B waveform is analyzed and its spectrum is calculated by different methods based on LT and FT. The theory and frequency-spectra distribution of EFT/B is also analyzed, simple and sound calculation methods are given which help us to restrain the EFT/B in digital relay.

Key words: EFT/B; microprocessor-based protection; spectrum analysis

《继电器》杂志文摘编写要求

根据国际检索的要求,《继电器》杂志对投稿摘要的编写作以下修改说明:

1. 摘要应是一篇独立的短文,应包含与论文同等量的主要信息,主要由三部分组成,即:研究的问题、过程和方法、结果。

2. 摘要中应排除本学科领域已成为常识的内容,切忌把引言中出现的内容写入摘要,一般也不要对论文内容作诠释和评价,尤其是自我评价。

3. 摘要应用第三人称编写,不必使用“本文”“作者”等作主语。应尽量取消或减少背景信息。

4. 摘要应使用规范化的名词术语,不用非公知公用的符号和术语,新术语或尚无合适汉文术语的,可用原文或译出后加括号注明原文。

5. 摘要一般不用数学公式或化学结构式,不出现插图、表格,不用引文。缩略语、略称、代号首次出现时必须加以说明。

6. 中文摘要一般在 200~250 个字之间,英文一般 150 个单词左右,关键词一般应列出 5~8 个。