

一次回路形成电快速瞬变脉冲群骚扰的研究及防护

王玉峰, 邹积岩, 廖敏夫

(大连理工大学 电气工程与应用电子技术系, 辽宁 大连 116024)

摘要: 对开关分断操作引起的电快速瞬变脉冲群(EFT/B)骚扰信号的时域和频域特性进行研究。分析了开关分断操作时电感中的电流对杂散电容充电引起 EFT/B 骚扰的过程, 采用电力系统电磁暂态仿真软件 ATP 仿真电力系统一次回路中开断空载变压器和空载长线时形成的 EFT/B 骚扰。采取金属氧化物避雷器(MOV)保护、RC 保护和选相分闸等防护措施可抑制开关分断操作引起的 EFT/B 骚扰的幅值, 减小 EFT/B 骚扰的振荡频率。

关键词: 电快速瞬变脉冲群; 杂散电容; 干扰源

中图分类号: TM 774

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)09-0022-05

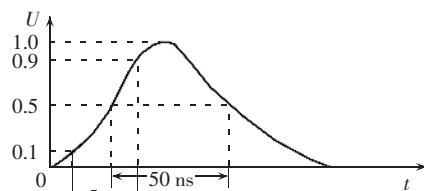
0 引言

随着电力系统自动化水平的提高, 以计算机和微电子技术为基础的微机保护装置在电力系统中得到广泛的应用。微机保护装置被安装在电磁环境恶劣的高压开关场内或靠近高压电气设备的地方已成为发展趋势, 很容易遭受电磁干扰而误动或拒动。目前, 微机保护装置抗高压、抗浪涌、防静电等技术已经比较成熟, 而电快速瞬变脉冲群 EFT/B(Electrical Fast Transient/Burst)骚扰由于具有上升时间和持续时间短、幅值和重复频率高等特点, 其对微机保护装置的干扰长期以来难以克服^[1-3]。

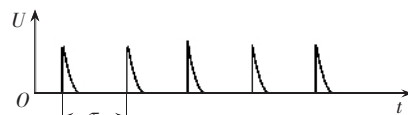
我国在微机保护装置抗 EFT/B 骚扰方面的研究工作刚刚起步, 主要集中在如何进行抑制的工程实践上, 对 EFT/B 骚扰的形成、耦合和作用机理缺乏深入的研究。这里基于 ATP 对电力系统一次回路中 EFT/B 骚扰的形成机理进行仿真研究。在此基础上, 制定主动防护措施从干扰源上抑制 EFT/B 骚扰。

1 电快速瞬变脉冲群骚扰

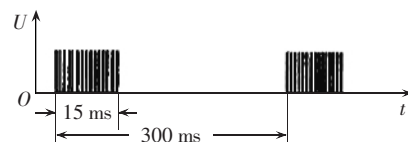
国内外的试验研究表明, 变电站中开关的关、合过程会引起 EFT/B 骚扰, EFT/B 骚扰的上升时间为纳秒级, 持续时间从几微秒到几十毫秒, 过电压幅值能够达到相电压幅值的几倍^[4-5]。根据 EFT/B 骚扰信号的特征, 国际标准 IEC61000-4-4 和国家标准 GB/T19626.4 对 EFT/B 骚扰电压的上升时间、持续时间和脉冲重复频率等作了统一的规定, 如图 1 所示。EFT/B 骚扰电压的幅值根据不同的试验等级从 0.5~4 kV, 单个脉冲上升时间 5 ns, 单个脉冲持续时间 50 ns, 脉冲重复频率为 5 kHz 或 100 kHz,



(a) 单个脉冲波形



脉冲重复频率 5 kHz/100 kHz
(b) 脉冲重复频率



(c) 脉冲群持续时间和周期

图 1 电快速瞬变脉冲群波形

Fig.1 Waveforms of EFT/B

脉冲群持续时间 15 ms, 脉冲群周期 300 ms^[6-8]。

图 1(a)中 EFT/B 骚扰电压的单个脉冲波形可以用双指数函数表示, 其函数方程:

$$u(t) = KU_0(e^{-\tau_\alpha t} - e^{-\tau_\beta t}) \quad (1)$$

式中, K 是比例常数; U_0 是电压峰值; τ_α 、 τ_β 分别是与脉冲持续时间和上升时间相关的时间常数^[9]; 根据 EFT/B 骚扰信号单个脉冲波形的上升时间和持续时间, 可确定比例常数 K 为 1.269 94, 时间常数 τ_α 、 τ_β 分别为 $1.798 6 \times 10^{-7}$ 和 3.037×10^{-8} 。

单个 EFT/B 骚扰脉冲的幅值密度频谱见图 2 (A_d 为幅值密度, 单位为 dB; 横轴单位为 MHz)。从图中可以看出: EFT/B 骚扰的能量主要集中在 40 MHz 以下的频段; 40~400 MHz 频段内 EFT/B 骚扰的幅值衰减不大, 能量仍然较大; 400 MHz 以上频段的

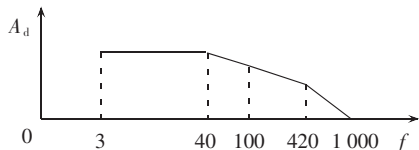


图2 电快速瞬变脉冲群骚扰电压的幅值密度频谱

Fig.2 Amplitude density spectrum of EFT/B

EFT/B 骚扰的幅值衰减很快,到 1 GHz 基本衰减为零,此频段内骚扰能量较小。

2 电快速瞬变脉冲群骚扰形成机理

开关分断操作引起 EFT/B 骚扰的等效电路模型如图 3 所示^[10]。其中, L_0 、 R_0 、 C_0 分别为回路的杂散电感、导线电阻和杂散电容。

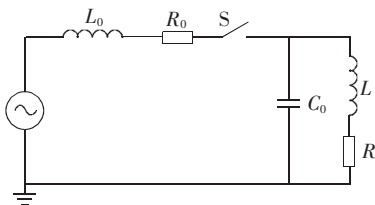


图3 形成电快速瞬变脉冲群骚扰的等效电路模型

Fig.3 Equivalent circuit model of EFT/B generation

在开关断开电感性负载电路的过程中,由于电感中的电流不能突变,此电流流向杂散电容 C_0 ,对其反向充电,电感负载两端出现暂态过电压,此过电压与电源电压叠加后加在开关触头两端,当触头两端电压高于介质击穿电压时,触头间形成电弧,开关重燃。开关导通后, C_0 放电,形成高频电流,触头间的重燃电弧熄灭,两端又出现过电压。上述过程重复发生,直至电容上电压不能使开关的动、静触头击穿为止。其典型暂态过程如图 4 所示。



图4 开关断开感性负载的暂态过程

Fig.4 Transient process of inductive load trip

研究开关分断电感性负载引起的 EFT/B 骚扰电压可以分为 2 个步骤:首先确定电路分断前负载电感线圈中的电流;把负载电感线圈中的电流作为初始条件计算开关分断操作引起的 EFT/B 骚扰电压^[11]。图 5 为计算回路模型。

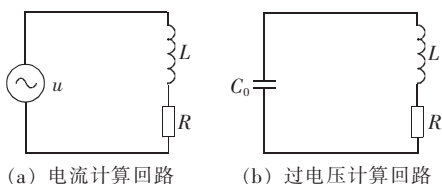


图5 计算回路模型

Fig.5 Circuit models for current/voltage computation

图 5(a)为计算电感线圈中电流的等效电路。当电感线圈中的电流最大时,开关分断操作引起的 EFT/B 骚扰最严重。首先,求解电感线圈中电流的最大值。当开关闭合时,电源电压直接加在负载的两端,电感线圈中的电流为

$$i = \frac{u}{R + j\omega_1 L} \quad (2)$$

其中, ω_1 为电源电压 u 的角频率。电感线圈中的电流最大值为

$$I_{\max} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{R^2 + \omega_1^2 L^2}} \quad (3)$$

然后,根据电感线圈中的电流值计算开关分断时引起的 EFT/B 骚扰电压,其计算回路等效电路如图 5(b)所示。根据基尔霍夫电压定律,其二阶电路的微分方程为

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + RC \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (4)$$

这里考虑开关操作引起 EFT/B 骚扰最严重的情况,即假设开关在电感线圈中的电流最大时分断,忽略杂散电容的初始电压,则电路的初始条件为

$$u_c(0+) = 0 \quad (5)$$

$$\left. \frac{du_c}{dt} \right|_{t=0+} = \frac{I_{\max}}{C_0}$$

一般情况下,电路中的负载电感 L 的参数值远大于杂散电容 C_0 的参数值,负载电阻 $R < 2\sqrt{L/C_0}$,电路工作在欠阻尼振荡放电状态,则杂散电容 C_0 两端的电压为

$$u_c = \frac{U_{\max}}{\omega_2 C_0 \sqrt{R^2 + \omega_1^2 L^2}} e^{-\sigma t} \sin(\omega_2 t) \quad (6)$$

式中 $\omega_2 = \sqrt{1/(LC_0) - R^2/(4L^2)}$ 为自由谐振角频率; $\sigma = R/(2L)$ 为衰减系数。

3 一次系统中电快速瞬变脉冲群骚扰形成机理仿真研究

开关在正常工作的状况下分断一次回路主要有如下 2 种情况:开断电感性负载,如切空载变压器、电抗器及电动机等;切除容性负载,如空载长线、电容器组等。这里以切空载变压器和空载长线为例研究开关分断操作所引起的 EFT/B 骚扰。

3.1 切空载变压器

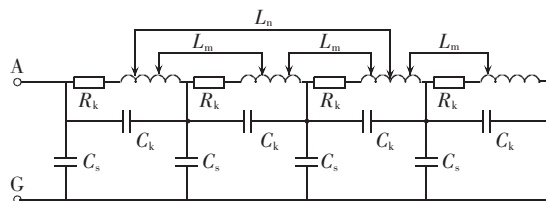
EFT/B 骚扰属于宽频带的电磁骚扰信号,包含大量的高频成分,变压器的匝间电容不能忽略。单相变压器的暂态特性可以用图 6(a)所示的链型等值电路描述,又可进一步简化为图 6(b)的形式,其中 R_e 为绕组电阻, L_e 为绕组电抗, C_e 为变压器的入口电容。

沃里波夫根据大量测量数据^[12],总结出了计算变压器入口电容 C_e 的经验公式:

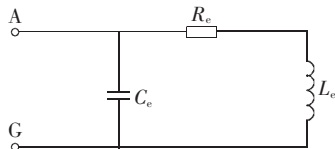
$$C_e = K \sqrt{nS} \text{ (pF)} \quad (7)$$

式中, S 为变压器容量 (MV·A), n 和 K 的取值如下:

$$n = \begin{cases} 4 & 500 \text{ kV 及以上电压等级} \\ 3 & 220 \text{ kV 及以下电压等级} \end{cases} \quad (8)$$



(a) 链形等效电路



(b) 简化等效电路

图 6 变压器暂态模型

Fig.6 Transient model of transformer

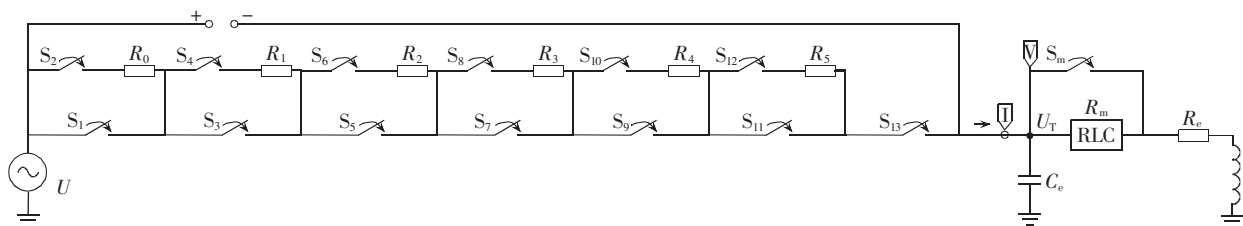


图 7 开断空载变压器的仿真电路模型

Fig.7 Simulative model of no-load transformer trip

仿真开始时,开关 $S_1, S_3, S_5, S_7, S_9, S_{11}, S_{13}$ 处于闭合状态,而 $S_2, S_4, S_6, S_8, S_{10}, S_{12}$ 和 S_m 处于分断状态。仿真过程中, S_1 首先分断,线路处于被开断状态,同时, S_m 闭合切除励磁阻抗。延迟一段时间后, S_2 闭合,模拟开关电弧第一次重燃,线路重新导通。再延迟一段时间后, S_3 分断,模拟电弧熄灭,线路又重新分断。依此类推重复上述过程,直至 S_{13} 分断后,开关的分断操作过程结束,空载变压器被切除。一般而言,开关切感性负载过程中的电弧持续时间大约从几微秒到几毫秒。本文建立的开关模型的电弧持续时间为 1 ms,模拟开关分断过程中电弧重燃和熄灭的开关分、合时间见表 1。

表 1 仿真电弧重燃和熄灭的时间

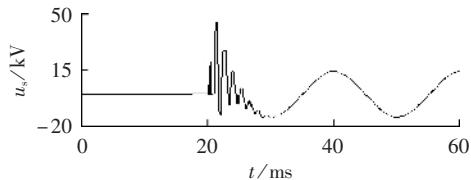
Tab.1 Simulative arc restrike and extinction times

开关	$t_{分}$	$t_{合}$	开关	$t_{分}$	$t_{合}$
S_1	0.020 00	-1	S_8	2	0.020 22
S_2	2	0.020 02	S_9	0.020 26	-1
S_3	0.020 25	-1	S_{10}	2	0.020 35
S_4	2	0.020 06	S_{11}	0.020 4	-1
S_5	0.020 07	-1	S_{12}	2	0.020 6
S_6	2	0.020 11	S_{13}	0.021	-1
S_7	0.020 15	-1	S_m	2	0.02

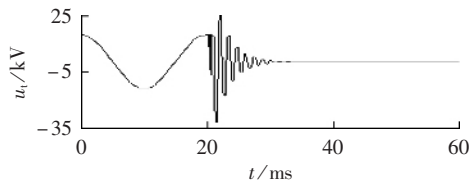
在开关切空载变压器的过程中,由于开关触头间发生多次重燃,从而形成 EFT/B 骚扰。图 8 和图 9 分别为 EFT/B 骚扰电压和骚扰电流的仿真波形。从图中可以看出,EFT/B 骚扰电压单极性,电流呈双极性。它们的上升和持续时间短,幅值和重复频率高。

$$K = \begin{cases} 800 & 750 \text{ kV 电压等级} \\ 940 & 500 \text{ kV 电压等级} \\ 540 & 110 \text{ kV 电压等级} \\ 350 & 35 \text{ kV 电压等级} \end{cases} \quad (9)$$

对一台 10 kV 的配电变压器进行实际测量,变压器的入口电容为 345 pF,绕组电感为 130 mH,直流电阻为 110 Ω 。在 ATPDraw 中建立的开关切空载变压器的模型如图 7 所示。图中,单相电压源 u 的幅值为 14 140 V,频率 50 Hz,相位为 0;用 13 个时间控制开关模拟电弧重燃和熄灭的过程;电阻 $R_0 \sim R_5$ 分别与相应的开关串联模拟电弧重燃的电弧电阻; C_e, R_e 和 L_e 等效空载变压器。 R_m 和 S_m 模拟空载变压器的励磁阻抗。电压测量元件分别测量开关触头间的电压波形和变压器的电压波形。电流测量元件与主回路串联测量回路中的电流波形。



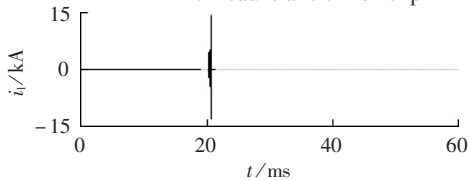
(a) 开关两端电压波形



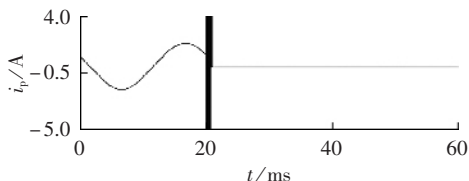
(b) 变压器电压波形

图 8 切空载变压器时过电压波形

Fig.8 Over-voltage waveforms during no-load transformer trip



(a) 回路电流波形



(b) 局部电流波形

图 9 切空载变压器时过态电流波形

Fig.9 Transient current waveforms during no-load transformer trip

3.2 切空载长线

图 10 是一条三相均匀换位输电线,长 300 km,电压 110 kV,空载^[13]。电源电抗 263.2Ω ,单位长度零序电感 $0.002\ 075\ 01\ \text{H/km}$,正、负序电感 $0.000\ 885\ \text{H/km}$,零序电容 $0.009\ 066\ 9\ \mu\text{F/km}$,正、负序电容 $0.013\ 175\ 7\ \mu\text{F/km}$ 。三相电源电压的相位分别为 0° 、 120° 、 -120° 。

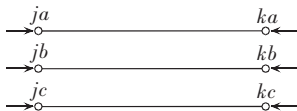


图 10 三相输电线路

Fig.10 3-phase transmission lines

仿真开关切图 10 中空载线路的电路模型如图 11 所示。图中, u 为三相电压源; Z_0 为电源电抗; 采用 Clarke 分布参数传输线模型模拟空载长线; 用 7 个三相时间控制开关模拟电弧重燃和熄灭的过程; R_0 、 R_1 和 R_2 分别与 S_2 、 S_4 和 S_6 串联来模拟电弧重燃的电弧电阻; 电压测量元件分别测量空载线路首端和末端的电压波形。

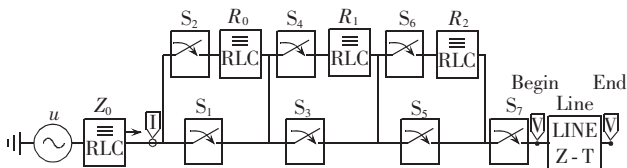


图 11 开断空载线路的仿真电路模型

Fig.11 Simulation circuit model of cutting no-load current

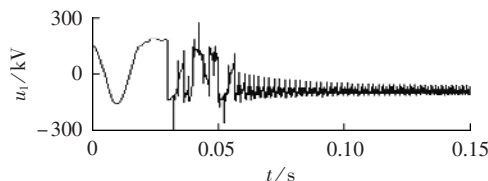
考虑开关分断操作引起 EFT/B 骚扰最苛刻的情况,假设 A、B、C 三相线路中的开关同时分断。根据切除空载线路形成过电压的机理,模拟电弧重燃和熄灭的开关分/合时间(单位 s)分别为^[14]: S_1 0.02/-1、 S_2 2/0.03、 S_3 0.035/-1、 S_4 2/0.04、 S_5 0.045/-1、 S_6 2/0.05、 S_7 0.055/-1。

仿真开始时, S_1 、 S_3 、 S_5 和 S_7 处于闭合状态, S_2 、 S_4 和 S_6 处于分断状态。仿真过程中, S_1 首先分断,线路处于开断状态,延迟一段时间后, S_2 闭合来模拟电弧第一次重燃,线路重新导通。再延迟一段时间后, S_3 分断,模拟熄弧,线路又重新分断。依此类推重复上述过程,直至 S_7 分断后,空载线路被开断。

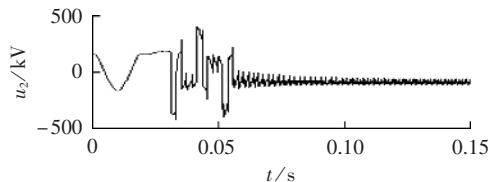
开断空载线路时,由于开关触头间重燃,使线路从电源获得能量并累积起来,从而形成 EFT/B 骚扰。图 12 是仿真得到的 A 相线路首末两端的过电压波形。从图中可以看出,分布参数使首、末两端的过电压不完全相同,末端过电压滞后首端过电压一个时间差,末端过电压的幅值高于首端过电压的幅值,约是电源电压峰值的 2.4 倍。

4 一次回路中电快速瞬变脉冲群骚扰的抑制

EFT/B 对电气、电子设备的干扰长期以来难以



(a) 线路首端过电压波形



(b) 线路末端过电压波形

图 12 切空载线路时过电压波形

Fig.12 Over-voltage waveforms during no-load line

克服,主要有以下 2 个方面的原因: EFT/B 骚扰的幅值高,重复频率高; EFT/B 骚扰的上升时间短,频谱宽,包含大量的高频成分。这里通过对 EFT/B 骚扰形成机理的研究提出主动防护措施,从干扰源上抑制 EFT/B 骚扰的幅值,增大 EFT/B 骚扰的上升时间,以利于进一步的主动防护^[15]。

a. MOV 保护。 MOV 是非线性电阻,它在正常工作电压下的阻值很大,当电压升高到某一设定值时,阻值急剧下降,把过电压的幅值限制在一定的范围内。

b. RC 保护。 RC 保护装置中的电容能够降低回路中的波阻抗,从而减小暂态过电压的振荡频率。同时,电容器的充电过程能够延缓暂态过电压的上升时间。电阻能够吸收负载回路高频振荡时的电磁能量,使重燃时的高频电流快速衰减,从而减少重燃次数。

c. 选相保护。 通过电流检测装置测量回路中的电流,使开关在回路中电流过零的时刻分断电路。此时,回路中储存的能量少,引起的 EFT/B 骚扰幅值小,频率低。

图 13 是在未采取防护措施和采取上述各种主动防护措施的情况下,开关分断 10 kV 空载变压器时在开关和空载变压器上的过电压波形。其中,实线为开关的过电压波形,虚线为变压器的过电压波形。从图中可以看出,未采取防护措施时,开关和空载变压器上过电压幅值都很高,分别接近 50 kV 和 40 kV,暂态过电压的振荡频率也很高。当采取 MOV 保护时,开关和空载变压器上的过电压幅值明显降低,但暂态过电压的振荡频率没有发生改变。在采取 RC 保护的情况下,暂态过电压的幅值和振荡频率都明显降低。效果最为明显的是采取选相分闸的主动防护措施,开关和空载变压器上的过电压幅值都没有超过电源电压幅值,振荡频率也较低,开关分断操作引起的 EFT/B 骚扰得到有效抑制。

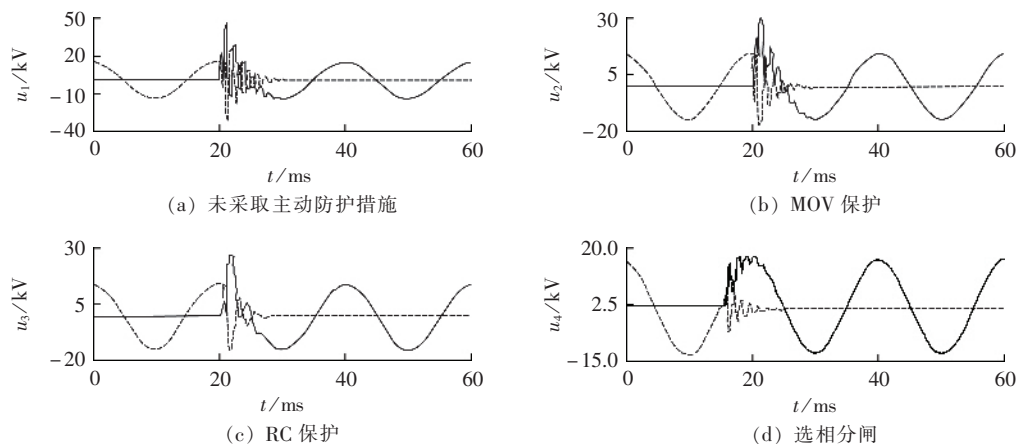


图 13 在未采取防护措施和采取防护措施
情况下切空载变压器时的过电压波形
Fig.13 Over-voltage waveforms during no-load
transformer trip with and without countermeasures

5 结论

为了保障电力系统安全运行,不能仅靠提高微机保护装置抗扰度的方法抑制 EFT/B 骚扰对微机保护装置的干扰,而应该对 EFT/B 骚扰的形成、耦合和作用机理进行深入研究。本文仿真研究电力系统一次回路中形成的 EFT/B 骚扰,制定主动防护措施从干扰源上抑制了 EFT/B 骚扰的幅值,减小了 EFT/B 骚扰的振荡频率。

参考文献:

- [1] 梁志成,傅静波,李富同,等. 微机保护装置的电快速瞬变脉冲群抗扰度研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(11):65-68.
LIANG Zhi-cheng, FU Jing-bo, LI Fu-tong, et al. Electrical fast transient burst immunity of protection equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(11): 65-68.
- [2] 肖保明,王泽忠,卢斌先,等. 微机保护装置对开关瞬态干扰的敏感度研究[J]. 电力系统自动化,2005,29(3):61-64.
XIAO Bao-ming, WANG Ze-zhong, LU Bin-xian, et al. Research on the susceptibility on microprocessor based protection equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 61-64.
- [3] 程利军,邓慧琼. 微机保护抗电快速瞬变脉冲群干扰研究[J]. 电力自动化设备,2002,22(6):5-8.
CHENG Li-jun, DENG Hui-qiong. Research on electrical fast transient / burst immunity for numerical protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(6): 5-8.
- [4] 李清泉,李彦明,牛亚民. 变电站开关操作引起的瞬变电磁场及其防护[J]. 高电压技术,2001,27(4):35-37.
LI Qing-quan, LI Yan-ming, NIU Ya-min. The transient electromagnetic fields caused by the operation of disconnector[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4): 35-37.
- [5] WIGGINS C M, WRIGHT S E. Switching transient fields in substations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(2): 591-600.
- [6] IEC Technical Committee TC77. IEC61000-4-4 Electromagnetic Compatibility(EMC). Part 4-4: testing and measurement techniques — electrical fast transient / burst immunity test[S]. Geneva: IEC, 1995.

- [7] 电子工业部第三研究所. GB/T17626.4-1998 电磁兼容试验和测量技术——电快速瞬变脉冲群抗扰度试验[S]. 上海: [出版者不详], 1998.
- [8] 王玉峰,李立伟,邹积岩,等. 纳秒级上升时间的高压脉冲群电源[J]. 电力系统自动化,2006,30(22):96-99.
WANG Yu-feng, LI Li-wei, ZOU Ji-yan, et al. Nanosecond - risetime high-voltage electrical fast transient / burst generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 96-99.
- [9] MCCONNELL R A. Amplitude and energy spectra of transient test waveform[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Montreal, Canada: [s.n.], 2001: 243-248.
- [10] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [11] 秦晓辉,黄少锋. 保护与控制二次回路内电快速瞬变脉冲群的干扰模型及 Matlab 仿真[J]. 继电器,2006,34(4):17-21.
QIN Xiao-hui, HUANG Shao-feng. Model and Matlab simulation of the electrical fast transient / burst disturbance in protection and control secondary circuit[J]. Relay, 2006, 34(4): 17-21.
- [12] BLANKEN P G. A lumped winding model for use in transformer models for circuit simulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2001, 16(3): 445-460.
- [13] 高爱云. ATPDraw 及其在输电线操作过电压中的应用研究[J]. 广东水利电力职业技术学院学报,2005,3(2):49-51.
GAO Ai-yun. ATPDraw and its application on switching overvoltage of transmission lines[J]. Journal of Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, 2005, 3(2): 49-51.
- [14] 解广润. 电力系统过电压[M]. 武汉: 水利水电出版社, 1985.
- [15] 平绍勋. 电力系统内部过电压保护和实例分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

王玉峰(1978-),男,辽宁海城人,博士研究生,从事 EMC 方面的研究 (E-mail: wang_success@163.com);

邹积岩(1954-),男,辽宁丹东人,教授,博士研究生导师,现主要从事智能化高压电器及高电压新技术的研究;

廖敏夫(1975-),男,湖南益阳人,副教授,博士后,现主要从事智能化高压电器及高电压新技术的研究。

Study of EFT/B generated in primary circuit and its countermeasures

WANG Yu-feng,ZOU Ji-yan,LIAO Min-fu

(Dalian University of Technology,Dalian 116024,China)

Abstract: The time-domain and frequency-domain characteristics of EFT/B(Electrical Fast Transient /Burst) caused by switch operations are studied. The EFT/B generation process is analyzed;the current of inductors during switch - open operation charges the parasitic capacitance,which is simulated for no - load transformer trip and no - load long transmission line trip using the electromagnetic transient simulation software ATP. Countermeasures ,such as MOV(Metal Oxide Varistor),RC protection and selected phase-trip,may suppress the EFT/B caused by trip operation and lower its frequency.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50507001).

Key words: EFT/B; parasitic capacitance; interference source