

# 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

秦晓辉, 黄少锋

(华北电力大学四方研究所, 北京 102206)

摘要: 在变电站的保护与控制二次回路及直流操作系统中,经常发生如 IEC61000 - 4 (GB/T 17626)中所规定的电快速瞬变脉冲群模拟的电磁干扰。这类干扰对于微机保护装置的影响极大,该文研究了这种干扰的机理和模型,并利用 MATLAB对断路器辅助触点断开时产生电快速瞬变的过程进行了建模和仿真。并结合实际情况,得出了一些有用的结论。这对于开展从干扰源通过各种干扰途径耦合到微机保护装置的电磁兼容系统级仿真,以及进一步提高微机保护装置的电磁兼容抗扰度性能和改进变电站内有关元件的安装和布置都有着积极的意义。

关键词: 微机保护; 电快速瞬变; 电磁兼容; 建模; 仿真

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)04-0017-05

## 0 引言

在变电站的保护与控制二次回路及直流操作系统中,由于继电器接点跳动或断路器辅助触点开合,会产生很强烈的电快速瞬变脉冲群干扰。一直以来,电快速瞬变脉冲群抗扰度试验 IEC61000 - 4 (GB/T 17626),都是微机保护装置最难通过的一项电磁兼容试验。可以发现,电快速瞬变脉冲群干扰对于微机保护装置的辅助激励量端口、输入激励量端口、输出端口、输入端口及通信端口都有着很大的影响。但是目前的有关研究大都集中在对这种干扰如何进行抑制的工程实践上,而对其机理和在此基础之上的仿真缺乏进一步的研究。因此,深入研究电快速瞬变脉冲群的发生机理和仿真模型,对于开展从干扰源通过各种干扰途径耦合到微机保护装置的电磁兼容系统级仿真,以及进一步提高微机保护装置的电磁兼容抗扰度性能和改进变电站内有关元件的安装和布置都有着积极的意义。

## 1 干扰机理及模型

当直流系统中的触点断开感性负载(如继电器接点跳动)时,触点间将产生不希望的所谓间熄电弧现象,这种现象引起的电快速暂态称之为电快速瞬变,其特点是:上升时间短,持续时间短,能量低,重复频率高<sup>[1]</sup>。

变电站直流操作回路中具有大电感的线圈,如断路器的跳闸线圈,电磁式继电器的工作线圈等。

以断路器的跳闸线圈为例,其简化接线图一般如图1所示。

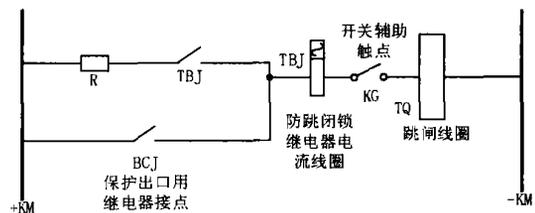


图1 断路器跳闸线圈简化接线示意图

Fig 1 The simplified connection of breaker trip voltage loop

当断路器跳闸时,由断路器的辅助触点 KG 断开跳闸线圈 TQ 中的较大电流,跳闸线圈 TQ 中储存的磁能 ( $0.5LI^2$ ) 释放,此电流不能突变,而跳闸线圈两端不允许并联续二极管等元件,所以线圈两端和断路器辅助触点间都将产生几千伏的过电压,造成不希望的所谓间熄电弧现象,引发电快速瞬变,其电路模型如图 2 所示<sup>[2]</sup>。

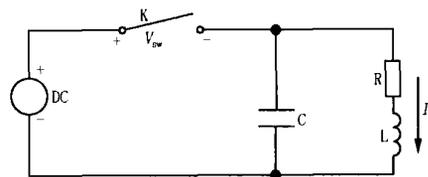


图2 电感负荷的间熄电弧产生的电路模型

Fig 2 The circuit model of interim arc resulted from inductance load

当断路器辅助触点 K 断开时,电感中的电流不

能突变,于是,此电流流向杂散电容 C,给电容器反向充电,提高断路器辅助触点间的电压。当触点间电压升高到其绝缘的击穿电压时,发生一短电弧,辅助触点间电压降低到  $V_A$  (空气中,  $V_A = 12\text{ V}$ )。随后,电弧熄灭,电容又开始重新充电,达到辅助触点间的击穿电压时,又发生电弧(当然关于放电和灭弧条件在理论和试验上有不同的结论<sup>[3]</sup>,这里根据工程经验选取相关数值,而且由于这种辅助触点电弧能量较小,近似可用非线性电阻来描述)。于是,在触点间引起一连串包括上升(当电容充电时)和很快下降(当断路器辅助触点击穿时)的电压,这一现象称做间熄电弧。这一过程详述如下<sup>[4]</sup>:

- a) 电容首先充电,达到击穿电压后断路器辅助触点间发生电弧放电,触点间电压降低到  $V_A$  (空气中,  $V_A = 12\text{ V}$ ),触点间的放电电流主要受断路器辅助触点接线局部电阻和电感的限制;
- b) 如果断路器辅助触点电流持续超过最小的电弧自持电流  $I_A$  (0.1 ~ 1A),电弧自持。否则,电弧熄灭,电容开始重新充电;
- c) 电压再次超过辅助触点间的击穿电压,再发生一短电弧,辅助触点间电压再降到  $V_A$ ,如果电弧不能自持,电容再次开始重新充电;
- d) 最后,开始时储存的能量耗尽,电容上的电压降到零。

下面假设断路器的辅助触点间的击穿电压很高,永远不会击穿,那么应分析图 3 电路。

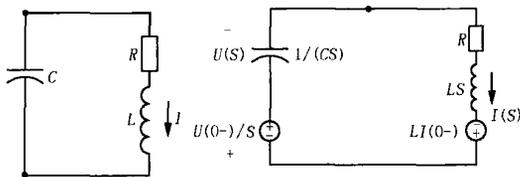


图 3 分析断路器辅助触点间不击穿情况的电路图(右图为其运算电路)

Fig 3 Circuit model used to analyze the situation without assistant contact of breaker breakdown

运算电路求解为:

设电容上的电压为  $U(S)$ ,正方向如图 3 右图所示,则

$$U(S) = \frac{1}{CS} \cdot (LI(0^-) - \frac{U(0^-)}{S}) - \frac{1}{CS + R + LS}$$

$$\frac{U(0^-)}{S}, U(0^-) = E, I(0^-) = \frac{E}{R}$$

上式中,  $E$  为图 2 中直流电源电压,经过推导和拉氏反变换,得:

$$u(t) = \left( \frac{E}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} + ER \cdot \sqrt{\frac{C}{4L - R^2 C}} \right) e^{-t} \cdot \sin t - E \quad (1)$$

$$= -\frac{R}{2L}, \quad = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

一般,杂散电容都很小,当  $C$  较  $L$  很小时,

$$u(t) \approx \left( \frac{E}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \right) e^{-t} \cdot \sin t - E \quad (2)$$

$$= \sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

所以,此时断路器辅助触点间电压为:

$$V_{sw} \approx \left( \frac{E}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \right) e^{-t} \cdot \sin t - E + E = \left( \frac{E}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \right) e^{-t} \cdot \sin t \quad (3)$$

根据上式,即可绘出断路器辅助触点间的恢复电压曲线,如果此曲线高于断路器辅助触点间的击穿特性曲线,那么将发生间熄电弧,这两条曲线在后面仿真中画出。

因此有必要阻止断路器辅助触点间恢复电压超过其击穿电压,与电感并联一足够大的电容,可有效降低断路器辅助触点间的电压及其起始上升速度,后面仿真中有验证。

随着触点间距离增加,也可能发生辉光放电,它可能自持,也可能不自持(空气中  $V_G = 280\text{ V}$ ,  $I_G$  在  $1\text{ mA} \sim 100\text{ mA}$  之间变化),成为小型间熄电弧。

## 2 利用 MATLAB 建模与仿真分析

本小节利用 MATLAB 的 Simulink,自己动手搭建了一些模块对产生电快速瞬变的上述干扰源进行了建模和仿真。

a) 对断路器辅助触点间不击穿时的触点间恢复电压仿真。

图 4 中,直流电源电压为  $220\text{ V}$ ,断路器辅助触点用一个自定义的非线性电阻来表示,为图中 subsystem 所示。设置它的击穿电压很高,为  $1 \times 10^5\text{ V}$ ,则此非线性电阻永远不可能被击穿。根据一些资料实际值并考虑仿真需要,可设置杂散电容  $C = 1 \times 10^{-5}\text{ F}$  (实际上一般远比这个值小,之所以取得很大是为了更清楚在一个坐标尺度下比较恢复电压和击穿电压),图中线圈电感  $L = 160\text{ H}$  线圈电阻  $R = 44$ 。通过 powergui 模块设置电容 C 上的初始电压为

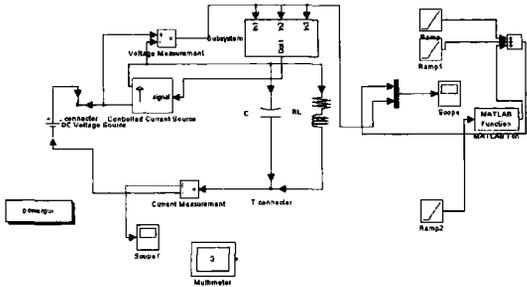


图 4 仿真断路器辅助触点间恢复电压和击穿特性的 Simulink 模型

Fig 4 Simulink model to simulate the breaker assistant contact resuming voltage and breakdown character

直流电源电压 220 V,流过电感的初始电流为 5 A,然后开始仿真,测量这个非线性电阻两端的电压即可得到触点间恢复电压的曲线(击穿特性曲线预先设置好,为了和恢复电压比较用),比较仿真曲线如图 5 所示。

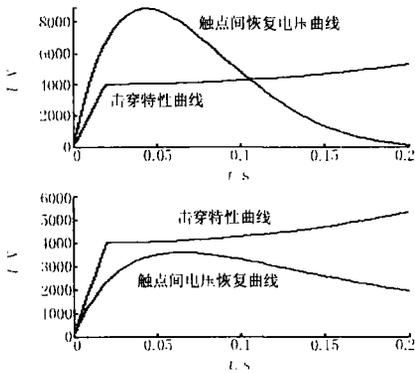


图 5 触点间恢复电压曲线与击穿特性曲线比较仿真图

Fig 5 Comparison of breaker assistant contact resuming voltage curve and breakdown character curve

图 5 中右图为设置  $C = 3 \times 10^{-5}$  F 时的恢复电压与击穿特性曲线之间的关系,可以看出,此时,击穿特性高于恢复电压,从而验证了与电感并联一足够大的电容,可降低断路器辅助触点间电压及其起始上升速度。左图为  $C = 1 \times 10^{-5}$  F 时的情况,此时,恢复电压高于击穿特性,将会出现一连串の間熄电弧,示意图如图 6 所示。

空气中,  $V_A = 12$  V,  $V_G = 280$  V。

b) 对触点间击穿时产生的快速瞬变脉冲群仿真

图 7 中除了为了使仿真效果更加真实明显,而将电容 C 设为  $C = 500 \times 10^{-12}$  F 外,其他参数和图 4 中相同。

c) 电快速瞬变脉冲群仿真结果

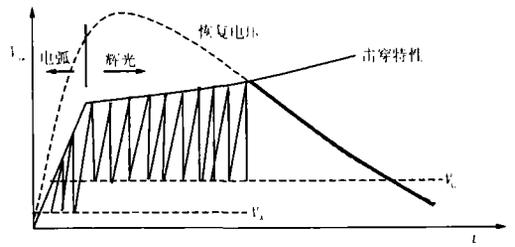


图 6 间熄电弧(电快速瞬变脉冲群)产生示意图

Fig 6 Process of interm arcs being generated

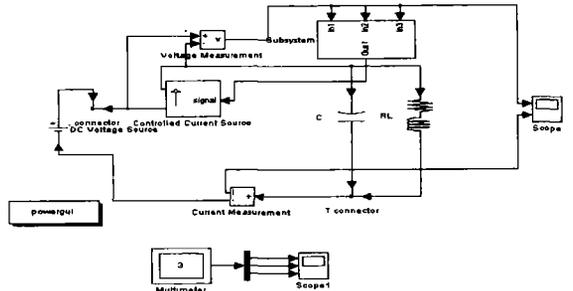
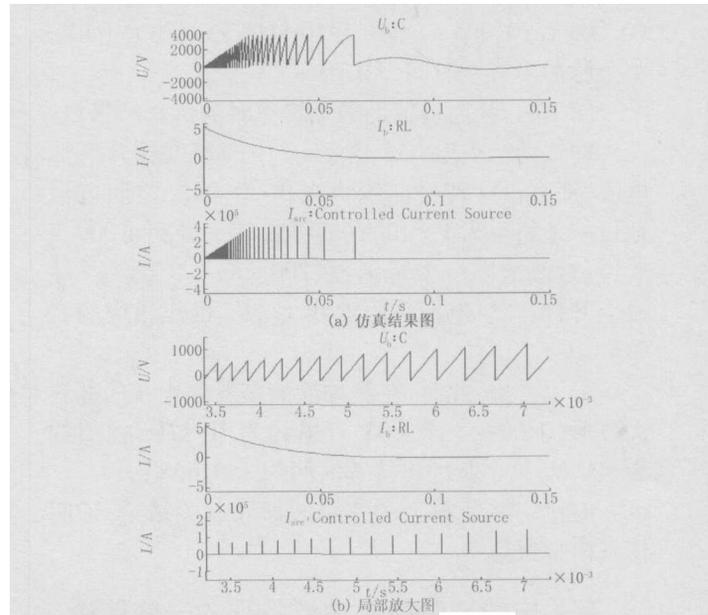


图 7 仿真触点间击穿形成电快速瞬变脉冲群的 Simulink 模型

Fig 7 Simulink model to simulate the breaker assistant contact breakdown and produce the electrical fast transient/burst

图 8 为当电感初始电流为 5 A 时的仿真结果。



注:从上往下依次为电容两端电压波形,电感电流波形,流过触点间的电流波形。

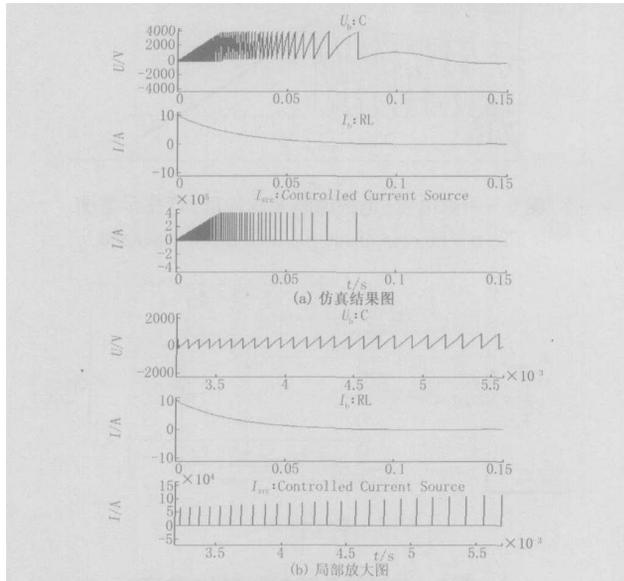
图 8 初始电感电流为 5A 时的仿真结果图

Fig 8 Simulated curves under the initial current 5A

可以看出,脉冲群的重叠频率在局部放大波形(0.004 s~0.005 s)里约为 4 kHz,幅值约为 1 kV,

整个脉冲群持续时间 0.065 s

图 9 为当电感初始电流为 10 A 时的仿真结果。



注:从上往下依次为电容两端电压波形,电感电流波形,流过触点间的电流波形。

图 9 初始电感电流为 10 A 时的仿真结果图

Fig 9 Simulated curves under the initial current 10 A

可以看出,脉冲群的重复频率在局部放大波形 (0.004 s ~ 0.005 s) 里约为 10 kHz,幅值约为 1 kV,整个脉冲串持续时间为 0.08 s

图 10 为断路器辅助触点慢拉时的仿真结果。

即辅助触点以 0.5 倍于 b) 中的速度拉开感性电流,那么击穿特性曲线将在 0 ~ 0.04 s 之间近似地以一条斜率为  $1 \times 10^5$  的直线快速上升到 4 000 V 后,再近似地以一个幂函数  $(200 \times (t - 0.04))^2$  缓慢上升,击穿后电压下限曲线  $V_G, V_A$  也作相应的调整。

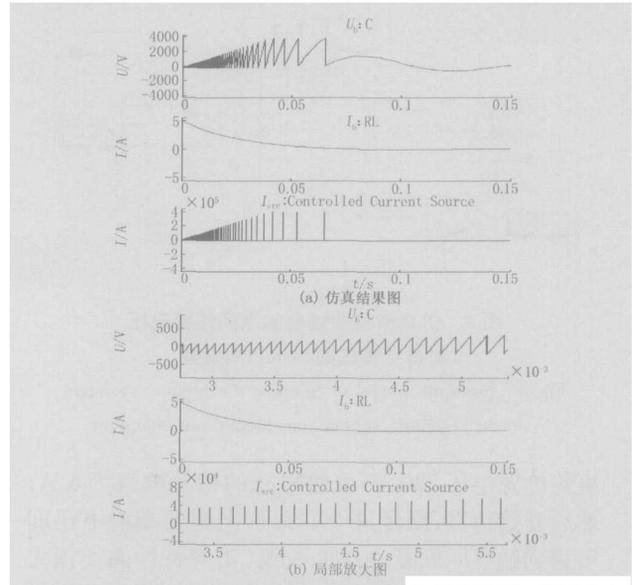
可以看出,此时,在脉冲群的重复频率在局部放大波形 (0.004 s ~ 0.005 s) 里约为 10 kHz,幅值约为 500 V,整个脉冲串持续时间约为 0.065 s

对比一些资料上的实录波形和有关结论,证明仿真模型可信<sup>[4,5]</sup>。

### 3 有关电快速瞬变脉冲群特征的一些结论

根据上述仿真结果,电快速瞬变脉冲群与电感线圈内被拉断的初始电流大小以及触点拉开的快慢有很大的关系,详述如下:

a) 对于相同的拉开速度,如初始电流大就意味着储能大,所产生的脉冲群持续时间就长,相同时段内重复频率也高;如初始电流小则持续时间短,相同



注:从上往下依次为电容两端电压波形,电感电流波形,流过触点间的电流波形。

图 10 初始电感电流为 5 A 时的慢拉仿真结果图

Fig 10 Simulated curves under the initial current 5 A when slow trip

时段内重复频率也低。

b) 对于相同的初始电流,如果拉开快,则相同时段内脉冲群重复频率较低,幅值较高,如拉开慢则重复频率较高,幅值较低。

c) 脉冲群持续时间几乎不受拉开快慢的影响,而仅由初始电流决定。

d) 相同时段内脉冲群的幅值则几乎不受初始电流的影响,而只由辅助触点的拉开快慢决定(实际上还要考虑触点间耐压,即由电压击穿特性决定)。

触点间的击穿电压特性曲线并不能象仿真中的那样单一和理想,因此上述诸如脉冲群持续时间,重复频率,幅值等参数都还要充分考虑触点断开过程中的实际耐压。

触点间拉出的电弧的电阻在每次拉弧的过程中都会发生变化,本次拉弧和上次拉弧的电弧电阻也都不同。而在上述的仿真过程中,为了方便,我们把电弧的电阻设为一个定值 0.01,这样就不可避免地引入了仿真误差。我们经过仿真比较发现,相同条件下,电弧的电阻越大,脉冲群的持续时间就越短,重复率就越低。因此,还应充分考虑电弧电阻变化的影响。

实际情况中,操作交流接触器也会产生电快速瞬变脉冲群,机理类似上述分析。

有一些资料表明,操作 SF<sub>6</sub> 高压断路器也会产生电快速瞬变脉冲群,机理类似上述分析。

通过分析可以看出,触点两端和杂散电容两端都会产生快速瞬变脉冲电压(两个电压之间仅相差一个直流电源幅值的大小),它们都会在二次回路里以传导的形式传播,这是我们通常所熟知的情况。而同时流过触点间的电弧电流也是一个脉冲群的形式,其上升沿比电压脉冲群更加陡峭,其峰值也很大,所以,电流将会在空间形成强烈的辐射电磁场,把电磁干扰以辐射的形式传播耦合到其他二次设备上。

根据瞬变脉冲群产生机理及其仿真结果和实录波形,可以看出,实际产生的脉冲群中的脉冲是下降沿比上升沿陡峭,而 IEC61000-4 及 GB/T17626 标准中的单个脉冲波形却都是上升沿比下降沿陡峭<sup>[6]</sup>,这点差异尚有待探讨。

如前 2 a) 中所述,与电感线圈并联一足够大的电容,可降低触点间的电压及电压的起始上升速度,这是抑制电快速瞬变脉冲群干扰源最有效的方法。或者在电感线圈两端并联一个较大的电阻也是一个可行的方法。

#### 4 结论

在变电站的保护与控制二次回路及直流操作系统中,会产生很强烈的电快速瞬变脉冲群干扰,而电快速瞬变脉冲群抗扰度试验又是微机保护装置最难通过的一项电磁兼容试验。电快速瞬变脉冲群干扰对于微机保护装置的各个端口都有着很大的影响。本文深入研究了电快速瞬变脉冲群的发生机理及在此基础之上的 MATLAB 仿真,并进一步得出了一些关于电快速瞬变脉冲群的特征的结论。针对微机保护系统,这对于开展从干扰源通过各种干扰途径耦合到被干扰设备的电磁兼容系统级仿真,以及进一

步提高微机保护装置的电磁兼容抗扰度性能和改进变电站内有关元件的安装和布置都将有着积极的意义。

#### 参考文献:

- [1] 贺景亮. 电力系统电磁兼容 [M]. 北京:水利电力出版社, 1993.  
HE Jing-liang Power System Electro Magnetic Compatibility[M]. Beijing: China Water Power Press, 1993.
- [2] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.  
WANG Mei-yi Applications of Relay Protection in Power Network [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [3] van der Sluis L. 电力系统暂态 [M]. 王一宇,等译. 北京:中国电力出版社, 2003.  
van der Sluis L. Transients in Power Systems[M]. WANG Yi-yu, et al trans Beijing: China Electric Power Press, 2003.
- [4] 国际大电网会议 36.04 工作组. 发电厂和变电站电磁兼容导则 [Z]. 2000.  
36.04 Group, CIGRE EMC Guideline in Power Plant and Substation[Z]. 2000.
- [5] 陈曦,陆俭国,许浩. 继电器引起的电快速瞬变脉冲群强扰及抗扰度措施 [J]. 继电器, 2001, 29(10): 70-73.  
CHEN Xi, LU Jian-guo, XU Hao. Disturbance Rejection Degree and Countermeasures to the Disturbance of Electric Fast Transient Pulse Caused by Relays[J]. Relay, 2001, 29(10): 70-73.
- [6] GB/T 17626.4-1998, 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].  
GB/T 17626.4-1998, Electromagnetic Compatibility Testing and Measurement Techniques Electrical Fast Transient/burst Immunity Test[S].

收稿日期: 2005-06-30; 修回日期: 2005-09-13

作者简介:

秦晓辉 (1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为微机保护电磁兼容; E-mail: gumpqin@163.com

黄少锋 (1958-), 男, 教授, 博导, 研究方向为电力系统微机保护。

### Model and MATLAB simulation of the electrical fast transient/burst disturbance in protection and control secondary circuit

Q N Xiao-hui, HUANG Shao-feng

(Sifang Institute of North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Switching in low voltage DC circuit and protection and control secondary circuit results in the electromagnetic disturbance simulated by electrical fast transient/burst described in IEC61000-4 (GB/T 17626). The disturbance affects seriously on the micro-computer based protection. The paper researches the mechanism and model of the disturbance and models and simulates the disturbance resulted from the switching of assistant contact of breaker. Based on the simulation, some conclusions are reached. It is beneficial to enhance the EMC simulation at system level of the microcomputer based protection devices and improve the installing and configuration of the corresponding devices and components.

**Key words:** microcomputer-based protection; electrical fast transient/burst; EMC; modeling; simulation