

低压电器短路分断对自身通信的干扰机理研究

黄世泽¹, 郭其一², 李一祥², 陈 杨²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200331;

2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200331)

摘要: 建立控制与保护开关电器(CPS)触头系统和电弧运动的数学模型,对短路电流进行仿真计算,结果与试验结果较吻合。在 Maxwell 仿真环境下建立了主回路导体和电缆线模型,仿真短路电流下通信电路周边的瞬态空间电磁场分布,进一步得到通信电缆产生的感应电压和感应电流。根据仿真和计算结果,给出了低压电器的设计建议。

关键词: 低压电器网络; 短路分断; 有限元分析; 瞬态电磁场; 电磁兼容; 短路电流; 电弧; 通信

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.024

0 引言

随着计算机技术、通信技术的发展,国内低压电器产品都内置了 RS-485 通信接口,采用 Modbus 协议与上位机交互数据,实现低压电器系统的智能化。低压电器由于结构的限制,实现通信功能的数字化控制器通常与承受大电流的主体布置在一个密闭空间中,由此会引起:低压电器工作在额定电流时,通信控制器可以与上位机正常交互数据;在大电流(一定倍数的额定电流)下工作时,通信电路上的波形会受到干扰而发生改变,但通信控制器通过滤波等措施还能与上位机正常交互数据;而在大电流短路分断时,通信电路的波形已发生严重畸变,通信控制器与上位机都无法识别对方发出的报文,造成通信失败,从而引起整个低压电器系统的短时“失控”。目前,很少有文献研究短路分断造成通信失效的机理。

为了分析短路分断对通信电路的干扰耦合机理,首先要建立短路分断数学模型,获得短路分断过程中短路电流的变化;然后建立有效的主回路导体和电缆线模型,计算通信电路周边的空间电磁场及短路电流耦合的感应电压。近年来,国内外学者在这两方面做了很多研究工作。在短路分断方面,国内外学者根据电弧特性建立了各种电弧数学模型^[1-3],并将其应用到低压电器短路分断过程的仿真中。因为研究者的侧重点不同,所建立的电弧模型也互有区别,但大部分都与柯西模型和麦耶尔模型有关;我国学者陈德桂、李兴文等人利用电磁学数值计算方法耦合多物理场方程并分析预期短路电流^[4-5]。目前,针对低压电器短路分断的研究,主要目的是通过优化设计参数来提高短路分断性能。在干扰机理方面,从 Maxwell 方程出发大致可分为场的方法和等效路的方法。场的方法推导过程较为严

格,结果精确,但每一步都需记录电场分量和磁场分量,容易造成计算机内存不足的问题,目前比较有代表性的数值解析方法有时域有限差分法(FDTD)^[6]、矩量法(MOM)^[7]、有限元法(FEM)^[8]、边界元法(BEM)^[9]。等效路的方法对 Maxwell 方程进行了简化处理,将电磁场耦合问题简化为转移阻抗和转移导纳的耦合关系来求解空间电磁场激励引起的响应,1978 年, F. M. Tesche 基于经典传输线理论推导出了经典 BLT 方程^[10]。传输线耦合计算与空间电磁场理论不断融合和发展,形成了经典的耦合响应的计算模型,即 Taylor 模型^[11]、Agrawal 模型^[12]和 Rachidi 模型^[13]。华北电力大学的崔翔教授主要从现场测量^[14]、实验室模拟^[15]、数值计算^[16-17]三方面展开相关研究工作。但低压电器短路分断的时间(毫秒级)与变电站开关操作的时间(微秒级)相差较大,使用时域有限差分等方法容易造成计算数据量过大等问题,同时低压电器在结构上更为紧凑,线束布置方向各异,不能简单地用传输线进行处理。因此,本文在 Maxwell 仿真环境下建立了主回路导体和电缆线模型,研究低压电器在短路分断过程中对通信电路的场线耦合机理。

1 短路电流仿真模型及计算

本文研究对象为控制与保护开关电器(CPS)中的双断点限流触头系统,图 1 给出了系统的受力情况^[18]。

整个触头系统包括 3 个反力弹簧,它们产生的反力分别为短路脱扣器内压力弹簧的反力、铝推杆的压力弹簧反力、动导电杆上的宝塔弹簧反力。系统的作用力为冲击电磁铁的吸力、触头间的电动斥力(只存在于触头闭合时)及导电回路的电动斥力。CPS 的短路分断可分为 2 个过程:一是机构动作过程,二是电弧运动过程和熄弧过程。机构动作过程主要采用触头系统机构的机械动态方程来描述,电弧运动过程和熄弧过程主要决定于开断电弧的数学模

密度(单位为 A/m^2); $\boldsymbol{M}$ 为磁流密度(单位为 V/m^2); ρ_e 为电荷密度(单位为 C/m^3); ρ_m 为磁荷密度(单位为 Wb/m^3)。

Maxwell 有限元法在处理三维瞬变场时,选取 Maxwell 方程组的前 2 个旋度方程,将其导出的电场强度满足矢量亥姆霍兹方程的方程组作为支配方程^[19]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \boldsymbol{E} \right) - k_0^2 \varepsilon_r \boldsymbol{E} = 0 \tag{12}$$

其中, μ_r 为负相对磁导率; k_0 为自由空间波数; $\boldsymbol{E}(x,y,z)$ 为时谐场对应的向量,可由 $\boldsymbol{E}(x,y,z,t)=\text{R}\{\boldsymbol{E}(x,y,z)e^{j\omega t}\}$ 求得, $\text{R}\{\cdot\}$ 表示向量的指数式; ε_r 为考虑了介质损耗后的负相对介电常量。

由变分原理可推导出其泛函为:

$$F(\boldsymbol{E}) = \iiint_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu_r} (\nabla \times \boldsymbol{E}) \cdot (\nabla \times \boldsymbol{E}) - k_0^2 \varepsilon_r \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{E} \right] d\Omega = 0 \tag{13}$$

主回路导体和电缆线实体模型相关尺寸如表 2 所示。在 Maxwell 仿真环境下建立主回路导体和电缆线模型如图 3 所示。图中,A、B、C 分别代表 A、B、C 相主回路导体,RS-485_A、RS-485_B 代表通信接口。本次仿真总时间为 0.0005 s。假设当前时刻 C 相突然短路,电流激励源的设置如表 3 所示。

空间电磁场仿真结果如图 4 所示。由图 4 可知,在短路电流变化最显著的时间,即 0.0002~0.0004 s 内,产生的磁场强度较大,磁场强度峰值达到 0.0142 T。

表 2 实体模型参数
Table 2 Parameters of physical model

元件	材料	正常工作 电流/A	截面/ mm ²	带绝缘 层情况	间隔/ mm	进线 长度/mm	出线 长度/mm
通电 导线	铜	45	10	不带	19	1000	1000
	铜	100	35	不带	27.4	1000	1000
	铜	125	50	不带	27.4	1000	1000
通信 电缆	铜	—	0.75	不带	5	2000	2000

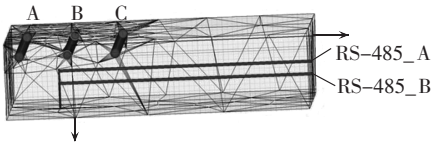


图 3 主回路导体和电缆线模型

Fig.3 Model of main circuit conductors and cable lines

表 3 激励源设置

Table 3 Settings of excitation sources

元件	激励源类型	激励源方程
A	电流源	$63 \sin(2 \pi \times 50 t)$
B	电流源	$63 \sin(2 \pi \times 50 t + 2 \pi / 3)$
C	电流源	$10190 \exp\{-[(t - 0.0023) \div 0.0008933]^2\}$
RS-485_A	外电路激励源	—
RS-485_B	外电路激励源	—

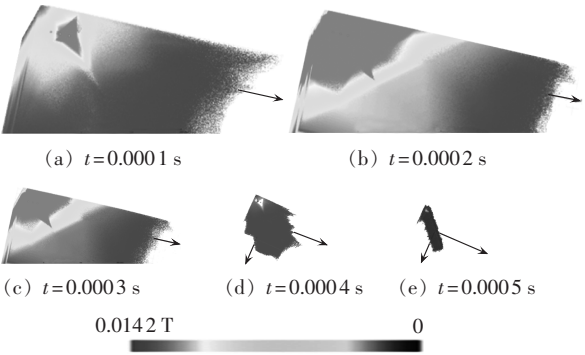


图 4 短路分断电流下空间电磁场在不同时间的分布情况

Fig.4 Space electromagnetic field distribution of short circuit breaking current at different time instants

空间磁场矢量图如图 5 所示。通过对 0.0002 s 时的空间磁场矢量的分析,可以判断径向磁场矢量和法向磁场矢量对通信电缆的干扰较大,并且电缆线布置与通电导体的距离越近,产生的干扰越大。空间磁场随距离的分布图如图 6 所示,由图 6 可知,在距离通电导线 0~15 mm 的范围内,磁场强度最大,磁场强度范围在 0.010~0.0142 T;在 15~20 mm 范围内,属于中等干扰区域,磁场强度范围在 0.004~0.010 T;在大于等于 20 mm 的范围内,磁场强度对通信电缆的干扰较少。结果符合磁场强度与距离平方呈反比的预期关系。

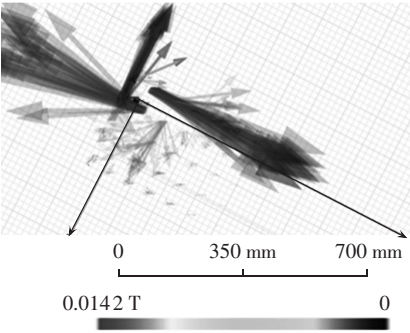
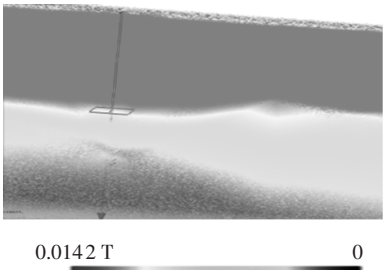


图 5 空间磁场矢量图

Fig.5 Vector chart of space magnetic field



Position 1 (Reference)=[10,0,0]mm
Position 2 (Current)=[-5,0,0]mm
Distance=15 mm,X Distance=15 mm
Y Distance=0 mm,Z Distance=0 mm
Angle(P20-P10)=180°

图 6 空间电磁场随距离的分布图

Fig.6 Distribution of space electromagnetic field along with distance

3 感应电压计算

3.1 不同布线方向下的感应电压

低压电器受开关柜体积的限制,通信线的布置通常会贴着产品边缘走线,从开关柜出线口出线,然后沿墙壁与上位机连接。通信线与开关主体的相对位置根据实际情况可能会进行不同的调整。通电导线与电缆线的相对位置总体分为垂直、平行、倾斜和垂直相交这 4 种情况,如图 7 所示。下文就这 4 种相对位置下在同一短路电流激励作用下所产生的感应电压大小进行分析,同时分析不同位置下通信波形是否符合通信要求。

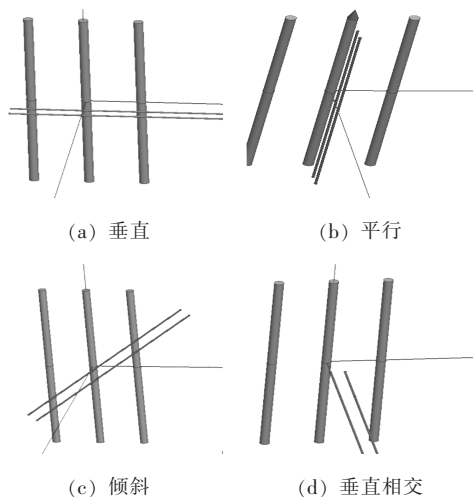


图 7 通电导线与电缆线相对位置

Fig.7 Relative positions of conductors to cable lines

对 KBO 系列 CPS 进行短路电流激励下的电磁场仿真,在 4 种相对位置下,分别仿真得到在相同激励下的感应电压如图 8 所示。

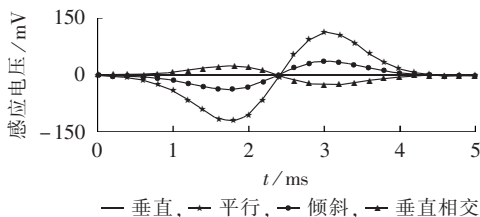


图 8 通电导线与电缆线相对位置对通信的影响

Fig.8 Influence of relative position of conductors to cable lines on communication

由图 8 可知:当通信电缆与通电导线呈相对垂直布置时,所产生的感应电压最小,而两者呈平行布置时所产生的感应电压最大,其他情况下的感应电压介于这 2 种极限电压之间。在平行布置通电导线与电缆时,感应电压峰值达到 120 mV,对通信波形已产生较大干扰,应避免这种情况的发生。受开关柜体积和产品外形限制,走线将不可避免地形成通信线与通电导线平行的情况,这时候应延长相对位置呈垂直的情况,在远离开关主体的地方再采用平行的

布线方式。

3.2 控制器与主回路的距离对通信的影响

低压电器的主回路都承载短路电流,而包含通信电路的控制器就在主回路的附近,只是不同的低压电器中控制器与主回路的距离不同。低压电器的设计趋向于小型化,以提高空间利用率、便于管理和节约成本。受产品自身体积的影响,控制器与主回路的距离在不断减小,以控制与保护开关为例,其最短距离缩小到了 10 mm,而过短的间距势必会带来感应电压的增大,降低通信质量。本文仿真了控制器与主回路间距在 5~93 mm 时的感应电压,结果如图 9 所示。

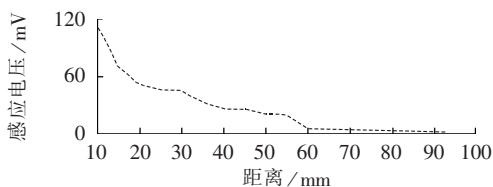


图 9 控制器与主回路的距离对通信的影响

Fig.9 Influence of distance between controller and main circuit on communication

感应电压峰值随着距离的增加而减小,且与距离的倒数成正比,这与基于有限元的空间电磁场仿真方法的假定完全一致。控制器与主回路的距离小于 20 mm 时,所产生的感应电压较大;大于 50 mm 时,产生的感应电压较小但是不利于产品的小型化设计;而在 20~50 mm 的范围内,存在一个感应电压较小的区域。

3.3 短路分断电流对通信的影响

由定性分析可知,感应磁场的强度取决于短路峰值电流的大小和短路电流的变化率。在短路电流产生阶段,提高电源电压峰值,将使短路电流的增长率变大,系统的作用力也将随之变大,从短路电流产生到触头分开所需的时间越短,反之,则会使触头分开前的机构动作时间越长;在电弧熄灭阶段,如果电源电压峰值变大,则熄弧时间越长。同时,在不同的电压合闸相角下,短路分断的动态特性,包括峰值电流、燃弧时间、分断时间等都有很大的区别。因此,短路分断电流对通信的影响主要体现在产品的分断电压和电压合闸相角。

预期分断电流为 15 kA、功率因数为 0.3、电压合闸相角为 105° 保持不变,分断电压为 380 V 和 690 V 时,短路电流波形和感应电压波形分别如图 10、图 11 所示。

由图 10、11 分析可知,短路电流的变化率是影响感应电压的关键因素,在短路电流产生阶段,690 V 分断电压下的短路电流变化率大,因此产生的感应

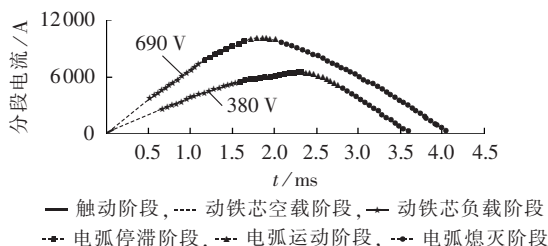


图 10 不同分断电压下的短路分断电流

Fig.10 Short circuit breaking current for two short circuit breaking voltages

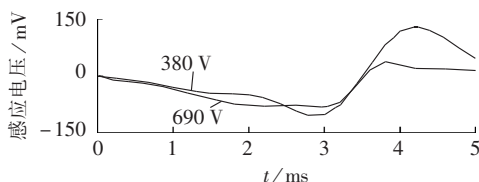
图 11 不同分断电压下的短路分断
电流产生的感应电压波形

Fig.11 Voltage waveform induced by short circuit breaking current for two short circuit breaking voltages

电压较大,而在后续的电弧熄灭阶段,690 V 分断电压下的熄弧时间长、电流变化率较缓,因此后续感应电压较小。

4 设计建议

根据第 3 节的仿真结论和分析,建议在产品设计和使用中注意以下几个方面。

a. 通信线的走线对于通信电路的干扰有影响,根据仿真结果,通信线的走线应尽量与主回路走线垂直。另一方面在产品安装方式和外接电源走线上也应该引起注意。

b. 低压电器小型化设计与通信可靠性之间要取得一定的平衡,现有设计中将控制器与主回路间距最小设为 10 mm 的做法将会引起通信质量问题。在不添加其他抗干扰措施的前提下,为满足紧凑型电器设计,该距离应控制在 20~50 mm 范围内。

c. 短路分断时间越短,限流效果越好,但所带来的电磁干扰也相应增大,应统筹设计限流与抗干扰之间的需求,通过本文所提供的仿真方法,不断改变低压电器短路分断的动态特性,得到满足通信可靠性的动态参数来指导设计生产。

5 结论

本文针对由于低压电器控制器与开关本体布置距离较近而引起在大电流作用时通信波形严重畸化这一工程问题,通过仿真分析研究了在短路分断过程中短路电流产生的空间瞬态电磁场对通信的干扰。

a. 以主电路接触组为对象建立了触头系统和电

弧运动的数学模型并获得短路电流,短路电流仿真结果与试验结果比较误差较小,符合激励源的准确性要求。

b. 总结了电磁场数值仿真计算方法,并针对低压电器场线耦合激励源持续时间长、开关主回路线束布置较复杂、控制器与主回路距离过近这些特点,在 Maxwell 仿真环境下建立了主回路导体和电缆线模型,并通过此模型得到短路分断过程中产生的瞬变电磁场和感应电压。

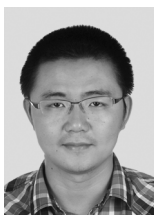
c. 分析了不同低压电器额定参数以及空间结构下的感应电压大小,定性分析了不同布线方向、控制器与主回路的距离和短路分断电流对通信的影响,并给出了对应的工程建议。

参考文献:

- [1] CASSIE M. Arc rupture and circuit severity: a new theory[R]. Paris, France: CIGRE, 1939.
- [2] ST-JEAN G, LANDRY M, LECLERC M, et al. A new concept in post-arc analysis applied to power circuit-breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 1036-1044.
- [3] JR BROWNE T E. A study of AC arc behavior near current zero by means of mathematical models[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1948, 67(1): 141-153.
- [4] 季良, 陈德桂, 刘颖异, 等. 利用电弧动态数学模型的低压断路器开断过程仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 107-113.
JI Liang, CHEN Degui, LIU Yingyi, et al. Simulation of the interruption process of low voltage circuit breaker using dynamic mathematic arc model[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 107-113.
- [5] 李兴文, 陈德桂. 空气开关电弧的数学模型及其特性的研究综述[J]. 高压电器, 2007, 43(4): 269-273.
LI Xingwen, CHEN Degui. Review of the investigations on the modeling and characteristics of air switching arc[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(4): 269-273.
- [6] YEE K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302-307.
- [7] HARRINGTON R F. Matrix methods for field problems[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(2): 136-149.
- [8] CSENDES Z J, SILVESTER P. Numerical solution of dielectric loaded waveguides: infinite-element analysis[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1970, 18(12): 1124-1131.
- [9] JIN J. The finite element method in electromagnetics[M]. New York, USA: John Wiley, 2014: 39-40.
- [10] RACHIDI F. A review of field-to-transmission line coupling models with special emphasis to lightning-induced voltages on overhead lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(4): 898-911.
- [11] TAYLOR C, HARRISON C. The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1965, 13(6): 987-989.
- [12] AGRAWAL A K, PRICE H J, GURBAXANI S H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on

- Electromagnetic Compatibility, 1980(2):119-129.
- [13] RACHIDI F. Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation field [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993, 35(3):404-407.
- [14] 卢斌先. 变电站开关瞬态场干扰耦合机理研究[D]. 保定:华北电力大学, 2006.
- LU Binxian. Research on coupling mechanism of switching field transient in substation[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006.
- [15] 由建, 刘洋, 谷雪松, 等. 基于开路阻抗参数的 EMI 电源滤波器插入损耗研究[J]. 电气应用, 2006, 25(3):94-97.
- YOU Jian, LIU Yang, GU Xuesong, et al. Insertion loss research of EMI power-line filter based on open-circuit impedance parameter[J]. Ectrotechnical Application, 2006, 25(3):94-97.
- [16] 赵志斌, 崔翔, 张波, 等. 应用矩量法计算变电站内的空间电磁场[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11):148-153.
- ZHAO Zhibin, CUI Xiang, ZHANG Bo, et al. The electromagnetic field calculation in substation by the method of moment [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11):148-153.
- [17] 齐磊, 崔翔. 变电站开关操作对屏蔽电缆电磁干扰的预测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9):46-51.
- QI Lei, CUI Xiang. Prediction of electromagnetic interference on the shielded cable due to the switching operation in substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9):46-51.
- [18] 黄世泽, 郭其一, 陈杨, 等. CPS 短路分断能力仿真及试验[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5):149-153.
- HUANG Shize, GUO Qiyi, CHEN Yang, et al. Experiment and simulation of CPS short circuit breaking capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5):149-153.
- [19] 曹善勇. Ansoft HFSS 磁场分析与应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010:1-3.

作者简介:



黄世泽

黄世泽(1983—),男,河南商城人,助理教授,博士,从事智能低压电器研究开发及电力系统电磁兼容技术方面的研究(E-mail: hsz@tongji.edu.cn);

郭其一(1961—),男,浙江建德人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统故障诊断技术等(E-mail: gqiyi@263.net);

李一祥(1990—),男,浙江温州人,硕士研究生,研究方向为电力系统电磁兼容技术(E-mail: richieli4job@163.com);

陈杨(1991—),男,江苏淮安人,硕士研究生,研究方向为低压电器虚拟样机技术(E-mail: 18721905903@163.com)。

Research on short circuit breaking interference of low-voltage apparatus with its own communication

HUANG Shize¹, GUO Qiyi², LI Yixiang², CHEN Yang²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200331, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200331, China)

Abstract: Mathematical models are established for the contact system of CPS(Control & Protection Switch) and the arc movement, based on which, the short circuit current is simulated and calculated. The simulative results coincide with the experimental results quite well. The model of main circuit conductors and cable lines is established in Maxwell simulation environment, based on which, the distribution of transient space electromagnetic field around the communication circuit is simulated and the induced voltage and current are further calculated, according to which, suggestions on the design of low-voltage apparatus are given.

Key words: low-voltage apparatus network; short circuit breaking; finite element analysis; transient electro-magnetic field; EMC; short circuit currents; electric arcs; communication