Vol.35 No.4 Apr. 2015

电缆金属护层环流补偿装置设计

马宏忠1,李超群1,许高俊1,度友林2,羊卫红3

(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 210098;2. 中国石化扬子石油化工有限公司,江苏 南京 210048;

3. 南京扬子石油化工设计工程有限公司,江苏南京 211500)

摘要:首先采用灵敏度方法以电缆稳态热路模型为基础,分析了降低护层环流的重要性。在此基础上,根据电磁感应基本定律,采用在护层接地回路串接电感装置的方式对护层环流进行补偿。结合具体工程实践,从电感铁芯尺寸、绕组导线选择等方面给出了装置设计的详细步骤与具体方法。并进一步指出:装置感应电压与护层感应电压的相位偏差随着护层分段的改变而改变,进而影响护层环流的补偿效果。分析装置本身感应电压的气隙特性和匝数特性得出:感应电压与气隙长度为非线性关系,与绕组匝数成线性增加关系。通过一组工程实践数据验证该装置补偿方式的准确性和可行性。

关键词: 电缆; 稳态热路; 金属护层; 环流; 补偿; 设计; 模型; 感应电压; 灵敏度分析

中图分类号: TM 755 文献标识码: A

0 引言

随着我国城市化建设的发展以及社会对环境保护的重视,在220 kV及以下电压等级城市配电系统中正大力建设和改造电缆线路。区别于中低压三芯电缆,高压单芯电缆在其金属护层上产生的感应电压不为零,当金属护层与大地形成通路时,在金属护层上产生的环流可能达到较高的数值^[1-5],引起护层发热,降低电缆运行的载流量。金属护层过热也会导致电缆绝缘老化,对电缆的安全运行构成威胁^[68]。

目前国内外常采用三段换位法来降低金属护层 电压^[9-11]。但在实际的工程实践中,有时难以保证电 缆护层完全换位,并且也不能保证电缆的敷设方式 是对称敷设,导致有些时候金属护层环流无法通过 换位来完全消除。

本文首先构建了高压电缆稳态热路模型,分析 护层环流对电缆载流量的影响,结合金属护层感应 电压的计算公式,构建护层环流的计算模型。利用在 金属护层接地回路串接电感的方法,研究出一种护 层环流补偿装置,通过实际工程应用,阐述了装置设 计的方法步骤,具体分析了敷设的分段比例、装置气 隙大小以及绕组匝数对补偿效果的影响。

1 高压电缆的热路模型

载流量是电缆的一个重要参数,它受很多因素的 影响,包括电缆的内部结构、敷设环境、环境温度、线 芯电流等。其重要性在电力电缆的工程应用中不言 而喻,对于无铠装层的高压电缆,其热路模型如图 1 所示^[12]。其中,W。为单位长度电缆导体产生的热量;



DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.04.023

图 1 无铠装层电缆热路模型

Fig.1 Thermal circuit model of non-armoured cable

 W_{d} 为单位长度绝缘介质损耗; $\lambda_{1}W_{e}$ 为单位长度的金属护层产生的热量; T_{1} 为导体和金属套单位长度热阻; T_{2} 为电缆单位长度外护层热阻; T_{3} 为电缆表面和周围介质之间单位热阻; θ_{e} 为导体温度; θ_{m} 为护层温度; θ_{0} 为环境温度。

利用电路分析的相关知识得出导体温度的计算 公式为:

 $\theta_{c} = \theta_{0} + (W_{c} + 0.5W_{d})T_{1} + [(1 + \lambda_{1})W_{c} + W_{d}]T_{2} +$

$$(1+\lambda_1)W_c+W_d]T_3 \tag{1}$$

护层环流越大,式(1)中 λ_1 越大。 λ_1 的表达式为:

$$\lambda_1 = \frac{I_{\rm sh}^2 R_{\rm s}}{I^2 R_{\rm c}} \tag{2}$$

其中,*I*_{sh}为护层环流;*R*_s为护层单位电阻;*I*为线芯电流;*R*_c为线芯单位电阻。式(2)代入式(1),用式(3)表述护层环流对导体温度的影响灵敏度^[13]。

$$\frac{\partial \theta_{\rm c}}{\partial I_{\rm sh}} \frac{I_{\rm sh}}{\theta_{\rm c}} = 2I_{\rm sh}^2 R_{\rm s}(T_2 + T_3) \tag{3}$$

式(3)说明护层环流越大,其对电缆线芯温度的 影响越灵敏,即对电缆载流量的影响越大。同时表 明降低护层环流对提高电缆载流量有重要现实意义。

2 护层环流计算模型

护层交叉互联的两端接地电缆,护层环流计算模型如图 2 所示^[14]。其中, E_a 、 E_b 、 E_c 分别为 a、b、c 三相电缆线芯电流在其对应金属护层上的感应电动势; R_s 、 X_s 分别为金属护层的电阻和电抗; R_1 、 R_2 为两端

收稿日期:2014-04-23;修回日期:2015-01-07

基金项目:江苏省电力公司 2014 年重点科技项目(J2014055) Project supported by Jiangsu Electric Power Company Key Science and Technology Project in 2014(J2014055)



图 2 护层环流计算模型 Fig.2 Calculation model of metal shield circulating current

接地电阻;R_e为大地泄漏电阻;I_{sa}、I_{sb}、I_{se}分别为三相 护层电流;I_s为接地电流。

金属护层单位感应电压的计算公式为:

$$E_{\rm sha} = 2\omega I \times 10^{-7} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \ln n + j \frac{1}{2} \ln \frac{nL^2}{R_{\rm GMR}^2} \right) \tag{4}$$

$$E_{\rm shb} = 2\omega I \times 10^{-7} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mL}{R_{\rm GMR}} - j \frac{1}{2} \ln \frac{L}{mR_{\rm GMR}} \right) \quad (5)$$

$$E_{\rm shc} = 2\omega I \times 10^{-7} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mL}{R_{\rm GMR}} - j \frac{1}{2} \ln \frac{n^2 L}{mR_{\rm GMR}} \right)$$
(6)

其中, E_{sha} 、 E_{shc} 、 E_{shc} 为金属护层单位感应电压;L为 a、 b相的轴间距离;mL为 b、c相的轴距离;m为 b、c相 电缆轴间距离与L的比值;nL为 c、a相的轴间距 离;n为 c、a相轴间距离与L的比值;I为线芯电流 有效值; R_{CMB} 为金属护层几何平均半径。

对于典型的金属护层三段换位,首末端互联接 地电缆,金属护层换位如图3所示。





Fig.3 Schematic diagram of shield cross connection

因此每一段护层的单位感应电压计算均能在式 (4)—(6)中找到对应公式。由图3可知,金属护层总 的感应电压按实际连接方式矢量叠加。

3 护层环流补偿装置的设计

3.1 护层环流补偿原理

电缆线芯的交变电流在其周围产生交变磁场, 其中部分磁场与金属护层交链,若敷设方式为三角 对称敷设,根据式(4)—(6),线芯电流滞后于与之对 应的护层电压 90°。若电缆敷设方式为水平敷设,根 据式(4)—(6),计算得出其 a、c 相线芯电流对应的 金属护层感应电压与对称敷设相比有一定的角度偏 移,具体相量示意图如图 4 所示。图中,*I*a、*I*b、*I*c 为线 芯电流;*E*al、*E*bl、*E*cl 为对称敷设时护层电压;*E*a2、*E*bl2、



图 4 2 种敷设方式下的金属护层感应电压

Fig.4 Induction voltages of metal shield for two laying modes

*E*_{e2}为水平敷设时护层电压。金属护层三段换位后, 某相金属护层感应电压是三段护层感应电压的矢量 和。因此,最终其超前或滞后线芯电流与金属护层分 段比例有关。

如图 5 所示,在电缆外部套上一个绕有线圈的电 感铁芯,电缆线芯产生的交变磁场在铁芯线圈上感 应出超前或滞后线芯电流 90°的感应电压。将线圈 产生的感应电压串接在电缆金属护层接地回路中, 并使其与金属护层感应电压相抵消,起到补偿金属护 层环流的作用。



图 5 补偿装置示意图 Fig.5 Schematic diagram of compensation device

3.2 补偿装置的设计方法

补偿装置的设计需要考虑的因素很多,本文给出 金属护层环流补偿装置的总体设计步骤。

首先要确定补偿装置线圈的额定导线匝数 N, 线芯导体相当于电流互感器的一次侧,电感线圈则相 当于电流互感器二次侧,则补偿装置的额定工作电流 为线芯负荷电流除以线圈额定匝数,依据补偿装置的 额定工作电流(通常为 5 A)确定绕组匝数。其次,选 定铁芯的额定磁通密度 B_N,磁通密度选择 1.5 T^[15]。 则铁芯截面积的近似计算公式如下:

$$A_{\rm c} = \frac{0.45I_2Z_2}{B_{\rm N}N}$$
(7)

其中,A。为铁芯截面积;I2为二次侧电流;Z2为二次 回路阻抗。得出铁芯截面积与绕组匝数之后,需要 确定补偿装置所用绕组的规格尺寸,绕组规格的选 择受到热稳定、动稳定以及电缆相关规程规定的约 束。在热稳定校验中当电缆发生三相短路时,由于铁 芯处于饱和状态,导致护层环流很大,需要按照式 (8)确定绕组截面面积[16]。

$$S \ge \frac{I_{\rm d}}{K} \sqrt{t} \tag{8}$$

其中,*I*_d为短路时护层环流;*t*为短路持续时间;*K*值的选取遵循表1数据。

表 1 不同芯线不同绝缘的 K 值 Table 1 K values for different wire cores and insulations

芯线	K			
	聚氯乙烯	普通橡胶	交联聚乙烯	油浸纸
铜芯线	115	131	143	107
铝芯线	76	87	94	71

注:K值不适合截面积 $S < 10 \text{ mm}^2$ 的导体。

综合考虑高压电缆结构尺寸、补偿装置绕组匝数、 铁芯截面积、铁芯磁导率、绕组导线规格尺寸等因素 设计铁芯尺寸。在设计的过程中也要符合电缆运行 的规程规定,根据规程,电力电缆上一般不允许直接 加装闭合磁路(否则会导致感应电压很大,对电缆绝 缘造成损坏),因此在铁芯的设计过程中必须留有气 隙。气隙对于整个补偿装置的补偿效果影响很大。 补偿效果还受到线圈匝数的影响,线圈匝数与气隙长 度是补偿装置2个重要的可变参数,其对环流补偿效 果的影响值得进一步探讨。

4 补偿效果分析

4.1 补偿装置初步计算与设计

在工程应用中,补偿装置的设计依据具体情况进行分析。本文以扬子集团某一新厂区 110 kV 电缆护 层环流补偿装置设计为例进行分析。电缆线路敷设 方式为水平敷设,轴间距离为 250 mm,额定负荷电 流为 500 A,金属护层采用三段交叉互联两端接地的 方式^[17-18]。

根据上文给出的护层感应电压计算公式,利用 厂家提供的数据求得各相护层感应电压如表2所 示。其与对称敷设感应电压的相位偏差很小,可以 实现很好的补偿效果。

表 2	线路各相护层感应电压计算结果
Table 2	Calculated results of shield induction
voltage	for different shield phase sequences

护层相序列	护层末端电压/V	电压相位/(°)
c - b - a	31	-90
a-c-b	13.4	141
b-a-c	30	24.5

理论计算结合工程实践得出的补偿装置具体尺 寸为:铁芯内径 210 mm,外径 258 mm,厚度 50 mm, 线圈额定匝数 100 匝。电感绕组采用 4×13.2 mm² 绝 缘扁铜线。

4.2 护层分段对补偿效果的影响

在水平敷设情况下,护层三段换位,当第3段的 长度与前2段长度相差较大时(尽量保证前2段的长 度相等),护层感应电压与其末端相线芯电流所成角 度在 90° 左右。且无论分段比例如何变化,b 相护层 感应电压与其对应相线芯电流成 90°,a、c 相角度具 有对称关系。因此建立下列模型来描述不同分段情 况对相位偏差的影响。定义 *d* 为第 3 段与前 2 段长 度平均值之比,θ 为护层感应电压与对应线芯电流 相位差,δ 反映护层电压相位与理想角度 90° 的偏离 程度。

$$l = 2L_3 / (L_1 + L_2) \tag{9}$$

 $\theta = \left| \left| \phi_1 - \phi_2 \right| - 90^\circ \right|, \ \delta = \theta / 90^\circ \tag{10}$

其中, L_1 , L_2 , L_3 为电缆护层换位的3段长度; ϕ_1 , ϕ_2 分别为护层电压相位及其对应线芯电流相位。利用 MATLAB 绘制 $d-\delta$ 曲线,如图6所示。曲线反映分 段变化对于护层感应电压相位的影响。



图 6 护层感应电压相位偏差与分段比值关系曲线 Fig.6 Curve of induction voltage phase deviation vs. segment ratio

由图 6 可知,分段比例通过改变金属护层电压的相位来影响补偿装置的补偿效果。为了使补偿装置感应电压尽可能抵消护层电压,保证分段比值在0.5 以内,则相位偏差控制在 9° 以内。利用多项式拟合后得到的函数关系为:

 $d = 1.1\delta^3 - 0.84\delta^2 + 0.412\delta - 0.184$ (11) 其中,0<d<1_o

图 7 反映的是分段比例为 3:3:1 的电缆线路护 层电压矢量示意图。由此可以定量分析相位偏差对 补偿效果的影响。图中,θ 为相位偏差;E_{shl} 为对称敷 设(三角形敷设)下金属护层感应电压;E_{sh} 为水平敷 设下护层电压;E_{ind} 为补偿装置感应电压;E_Σ 为护层 回路补偿后的总电压。根据几何知识补偿的最佳效 果是:

$$E_{\Sigma} = E_{\rm sh} \sin \theta \tag{12}$$



图 7 电压补偿矢量图

Fig.7 Vector diagram of voltage compensation

定义补偿率为:

η= 补偿前的护层电压-补偿后的总电压 补偿前的护层电压 ×100%(13) 则补偿率为 1-sin θ。进一步说明控制 d 在 0.5 以内则相位差 θ 小于 9°,从而补偿率高达 85%(而对于护层环流,因为补偿装置的接入使得回路阻抗增大,因此补偿率更高)。

4.3 补偿装置的气隙特性

输配电线路为了满足负荷变化及调度的需要, 其输送容量可能是一个变化量,金属护层感应电压 也会随之改变,这就需要补偿装置参数可调。根据电 磁感应理论得出的计算公式为:

$$L_{\rm c} = \frac{N^2}{l_1 / (\mu_1 A_{\rm c}) + l_2 / (\mu_0 A_{\rm c})}$$
(14)

$$M = \frac{N}{l_1 / (\mu_1 A_c) + l_2 / (\mu_0 A_c)}$$
(15)

其中,*l*₁为铁芯磁路长度;*l*₂为气隙磁路长度;μ₀、μ₁ 分别为装置气隙磁导率和铁芯磁导率;*A*_e为铁芯截 面积;*L*_e为补偿装置自感;*M*为补偿装置与铁芯的互 感。补偿装置感应电压的计算公式为^[18]:

$$E = \omega M I$$
 (16)

其中,ω为电角频率。结合式(15)、(16)可以计算出 不同气隙下补偿装置的感应电压的大小。

令补偿绕组匝数 N=100,改变气隙的大小得到 不同的补偿装置感应电压。气隙-感应电压曲线如图 8(a)所示。《电力工程电缆设计规程》要求金属护层 任意一点的感应电压不能超过 50~100 V,这就需要 依据理论计算和电缆分段比值对于补偿效果的影响 合理划定分段长度,从而计算出各相护层的感应电 压,大致确定合理的气隙长度。图 8(a)反映,随着气 隙的增大,补偿装置感应电压迅速减小,起始阶段气 隙对感应电压的影响非常灵敏,当气隙大于 0.7 mm 之后,影响感应电压的灵敏性逐渐降低。

4.4 补偿装置的匝数特性

由式(15)、(16)知,当补偿装置的气隙长度固定时,其与线芯导体的互感和绕组匝数成正比,同时感应电压与互感成正比,因此通过理论分析得出补偿装置的感应电压与匝数成正比。图8(b)为气隙固定为0.5 mm 情况下装置感应电压与绕组匝数的关系曲线。





4.5 补偿前后数据对比

根据扬子集团提供的现场数据以及本文所建立 的模型,按照 4.1 节给出的尺寸数据研制实物装置, 进行现场安装测试,绕组匝数按 a、b、c 相顺序依次 为 90、80、100 匝;气隙大小依次设为 0.3、0.3、0.2 mm。 补偿前后的金属护层环流数据如表 3 所示。

表 3 补偿前后环流数据(线芯电流 120 A) Table 3 Data of circulating current before and

after compensation(wire core current is 120 A)

相别	补偿前电流/A	匝数	气隙/mm	补偿后电流/A
а	35.1	90	0.5	0.25
b	21.0	100	1.5	0.35
с	44.7	100	0.5	0.56

5 结论

本文在分析了降低电缆金属护层环流重要性的 基础上根据电磁感应基本定律,设计并研制出一套 金属护层环流补偿装置,整体结构类似于电流互感器, 为具有矩形截面的螺绕环结构。该装置串接在电缆 金属护层接地回路中,在电缆线芯磁场的作用下装置 绕组上产生感应电压,合理确定接线方式和装置参数 (气隙大小、绕组匝数)便能基本抵消金属护层感应 电压,进而起到补偿金属护层环流的作用。

本文还详细分析了电缆分段比例、补偿装置气隙 大小、绕组匝数等参数对补偿效果的影响。分析结果 表明:文中定义的电缆分段比例越小,最终达到的补 偿效果越好,补偿装置感应电压大小与绕组匝数成 正比,但是随着磁路气隙大小的变化规律是非线性 的。这为整套装置的合理高效利用提供了理论依据。 最后利用一组工程实践数据验证了该补偿装置的准 确性和可行性。

参考文献:

- [1] 董小兵,蔡军,江秀臣,等. 10~35 kV XLPE 电缆在线检测技术
 [J]. 电力自动化设备,2005,25(9):20-24.
 DONG Xiaobing,CAI Jun,JIANG Xiuchen,et al. On-line monitoring techniques for 10~35 kV XLPE cable[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(9):20-24.
- MAMISHEY A V,SHORT S X,KAO T W,et al. Nonintrusive sensing techniques for discrimination of energized electric cables
 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1996,45(2):457-461.
- [3] 熊兰,徐敏捷,杨子康,等. 高压开关柜电缆室温度场分析及在线 监测系统构建[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):153-157. XIONG Lan,XU Minjie,YANG Zikang,et al. Thermal field analysis for cable room of high-voltage switchgear and design of online monitoring system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014,34(6):153-157.
- [4] 杨永明,程鹏,陈俊,等. 基于耦合场的通风电缆沟敷设电缆载流量 计算及其影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):139-143. YANG Yongming,CHENG Peng,CHEN Jun,et al. Currentcarrying capacity calculation based on coupling fields for cable in ventilate trench and its influencing factors[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(7):139-143.

[5] 王有元,陈仁刚,陈伟根,等. 电缆沟敷设方式下电缆载流量计算

及其影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):24-29. WANG Youyuan,CHEN Rengang,CHEN Weigen,et al. Calculation of trench laying cable ampacity and its influencing factors[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(11):24-29.

[6] 庄小亮,余兆荣,牛海清,等. 日负载系数与 10 kV XLPE 电缆周 期负荷载流量关系的试验研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(4): 168-172.

ZHUANG Xiaoliang,YU Zhaorong,NIU Haiqing,et al. Experimental research of relationship between daily load factor and cyclic ampacity of 10 kV XLPE cable[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):168-172.

[7] 贾欣,曹晓珑,喻明. 单芯电缆计及护套环流时载流量的计算[J]. 高电压技术,2001,27(1):25-26,38.

JIA Xin, CAO Xiaolong, YU Ming. Calculation of current rate in single-core cable with circulating current[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(1):25-26, 38.

[8] 陈妹敏,杨兰均,张乔根,等. 110 kV 电缆护层连接方式对护层过 电压的影响[J].高电压技术,2006,32(3):37-39.

CHEN Meimin, YANG Lanjun, ZHANG Qiaogen, et al. Effect of sheath-bonding method on induced overvoltage in 110 kV XLPE cable system in the case of ground fault surge[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 37-39.

- [9] 刘子玉. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1981:45-55.
- [10] 王新超,潘贞存. 电力电缆接头故障的预警监测系统[J]. 电力 自动化设备,2001,21(5):25-28.

WANG Xinchao, PAN Zhencun. Power cable junction monitoring system for fault pre-warning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(5):25-28.

[11] 盖文幅. 高压电缆温度在线检测系统中热点位置研究[J]. 电力 设备,2008,9(9):50-52.

GAI Wenfu. Hotspot location of surface temperature on-line monitoring system for high voltage cable[J]. Electrical Equipment,2008,9(9):50-52.

[12] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社,2013: 38-135.

[13] 刘刚,雷成华. 提高单芯电缆短时负荷载流量的试验分析[J]. 高 电压技术,2011,37(5):1288-1293.

LIU Gang, LEI Chenghua. Experimental analysis on increasing temporary ampacity of single-core cable[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5):1288-1293.

- [14] 梁永春. 高压电力电缆载流量数值计算[M]. 北京:国防工业出版社:44-50.
- [15] 肖耀荣. 互感器原理与设计基础[M]. 沈阳:辽宁科学技术出版 社,2003:28-45.
- [16] 刘子玉. 耐热导线应用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2008: 20-25.
- [17] 钱洁. 电力电缆电气参数及电气特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2013.

QIAN Jie. Study on electrical parameter calculation method and electrical characteristics of power cables [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[18] 魏书荣,马宏忠,王东海. 电缆线路改造引起的护层感应电压变 化及其补偿[J]. 电线电缆,2004(4):26-28.

WEI Shurong, MA Hongzhong, WANG Donghai. The variation and compensation of induced voltage in the metal shield for the power cable renovation [J]. Electric Wire & Cable, 2004 (4):26-28.

作者简介:



马宏忠(1962—),男,江苏如皋人,教授,博士,主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断:

李超群(1991—),男,江苏阜宁人,硕士 研究生,主要研究方向为电力设备状态监测 与故障诊断(E-mail:lichaoqundqzy@163.com); 度友林(1968—),男,四川广安人,高级

工程师,主要从事电气运行管理工作:

马宏忠

羊卫红(1966—),男,湖南邵东人,高级工程师,主要从 事电气设计与设计管理工作。

Design of compensation device for metal shield circulating current of power cable

MA Hongzhong¹, LI Chaoqun¹, XU Gaojun¹, TUO Youlin², YANG Weihong³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Sinopec Yangzi Petrochemical Co., Ltd., Nanjing 210048, China;

3. Nanjing Yangzi Petrochemical Design Engineering Company Ltd., Nanjing 211500, China)

Abstract: Based on the static thermal circuit model, the sensitivity analysis method is applied to analyze the importance of reducing the metal shield circulating current, and according to the fundamental law of electromagnetic induction, it is proposed to compensate the circulating current by inserting an inductance device into the metal shield grounding circuit. Combined with an engineering practice, the detailed steps and specific method of compensation device design are given, including the size of inductor core and winding conductor. It is further pointed out that, the phase deviation between the induction voltage of compensation device and that of metal shield changes along with the change of metal shield segmentation, which influences the effect of circulating current compensation. The air-gap and winding-turns characteristics of compensation device are analyzed, which show that, the relationship between induction voltage and air gap length is nonlinear and that between induction voltage and winding turns is linear. The accuracy and feasibility of the proposed compensation method are verified by the engineering practice data.

Key words: cables; static thermal circuit; metal shield; circulating current; compensation; design; models; induction voltage; sensitivity analysis