

正多边形离散环路磁场积分问题分析

李深旺¹, 张国庆¹, 郭志忠¹, 于文斌¹, 宋平², 黄华炜²

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 150001 哈尔滨; 2. 国网上海市电力公司, 200122 上海)

摘要:为解决直通光路型光学电流互感器抗外磁场干扰能力差的问题,提出一种零和御磁技术解决方法.在分析离散环路磁场积分的基础上,对离散安培环路定律及其数学模型进行探讨,并具体研究了正多边形离散环路 S^m 模型和 S^m 正分布的 mS^m 模型等两类离散环路磁场积分模型.结果表明: S^m 模型存在 $2m$ 个零和 P 点,干扰电流位于零和 P 点时对 S^m 模型的磁场积分结果的贡献为零; mS^m 模型中任意两个 S^m 位置互换时其原点与零和 P 点互换.据此提出了 S^m 模型的零和定理和 mS^m 模型的互易定理,离散安培环路定律与零和定理、互易定理一起形成了正多边形离散环路磁场积分理论体系.研究结果为光学电流互感器的零和御磁技术奠定了理论基础.

关键词:安培环路定律;离散环路;磁场积分; S^m 模型; mS^m 模型;光学电流互感器

中图分类号: TM452 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2013)12-0057-06

Analysis of magnetic field integral along regular polygonal discrete loop

LI Shenwang¹, ZHANG Guoqing¹, GUO Zhizhong¹, YU Wenbin¹, SONG Ping², HUANG Huawei²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company of State Grid, 200122 Shanghai, China)

Abstract: This paper proposed a zero-sum magnetic field integral technology to minimize the crosstalk effect in straight light path optical current transducer. The discrete Ampere's law was proposed and studied based on analyzing of the magnetic field integral along a discrete loop, and its mathematical model was established. The S^m model of regular polygonal discrete loop and the mS^m model of S^m regular distribution were discussed. The results showed that the S^m model possessed $2m$ zero-sum points, and the currents which placed on the zero-sum points did not contribute to the magnetic field integral result of S^m model. The origin point interchanged with the zero-sum point when any two S^m models of the mS^m model switched places. Based on that conclusion, the zero-sum theorem of S^m model and the reciprocal theorem of mS^m model were proposed. The discrete Ampere's law, the zero-sum theorem of S^m model and the reciprocal theorem of mS^m model together made up the theory system of magnetic field integral along regular polygonal discrete loop, which still met the Ampere's law.

Key words: Ampere's law; discrete loop; magnetic field integral; S^m model; mS^m model; optical current transducer

光学电流互感器(optical current transducer, OCT)基于法拉第磁光效应测量电流,其本质是沿

传感光路的磁场积分^[1-2].按照传感光路结构的不同,光学电流互感器可分为闭合光路型光学电流互感器和直通光路型光学电流互感器.直通光路型光学电流互感器采用磁光玻璃作为光学传感材料,结构简单,可以有效解决光学电流互感器存在的测量精度的温度漂移和长期运行稳定性差的问题,极具实用前景^[3-7].

直通光路型光学电流互感器面临着抗外磁场干扰能力差的问题.安培环路定律的要点是闭合环路,而直通光路型光学电流互感器的光路被分

收稿日期: 2013-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11004040);
黑龙江省自然科学基金资助项目(E201237);
中央高校基本科研业务费专项基金项目(HIT.NSRIF.2013018).

作者简介: 李深旺(1985—),男,博士研究生;
郭志忠(1961—),男,教授,博士生导师.

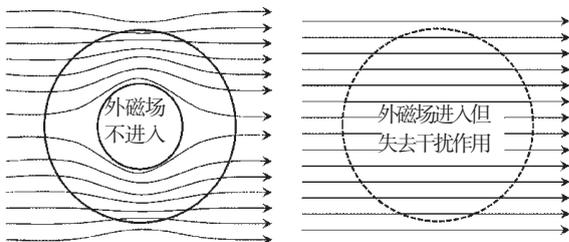
通信作者: 张国庆, guoqingz@126.com.

割为若干分离的直线段,变成离散环路,失去了连续闭合性,属于离散环路磁场积分范畴,不满足安培环路定律^[8],因此,其抗外磁场干扰能力较差.抗外磁场干扰能力差成为阻碍直通光路型光学电流互感器实用化的关键技术障碍.目前解决这一问题的主要方法有:磁屏蔽技术、集磁环聚磁技术、传感头结构优化、差分式传感技术等^[3, 9-14].这些方法可以取得一定的抑制外磁场干扰的效果,但效果有限,不能从根本上解决直通光路型光学电流互感器抗外磁场干扰能力差的问题.

文献[12-13]研究了安培环路定律的等价解环条件:特定条件下离散环路的磁场积分仍满足安培环路定律.本文在文献[12-13]的基础上研究正多边形离散环路磁场积分问题,对离散安培环路定律进行了初探,并定义了离散环路磁场积分的两个模型:正多边形离散环路 S^m 模型和 S^m 正分布的 mS^m 模型,通过对两种模型零和 P 点特性的研究,提出了 S^m 模型的零和定理、 mS^m 模型的互易定理,形成了以零和 P 点为基点的、仍然遵守安培环路定律的正多边形离散环路磁场积分理论体系,为光学电流互感器的零和御磁技术奠定了重要的理论基础.本文的研究为解决直通光路型光学电流互感器的抗外磁场干扰技术难题提供新的方法.

1 离散安培环路定律

离散环路磁场积分问题来自光学电流互感器抵御外磁场干扰的零和御磁技术^[12-13].与磁屏蔽技术不同,零和御磁技术不是阻止外磁场的进入,而是让其进入但失去干扰作用,简捷有效,如图1所示.



(a) 磁屏蔽技术 (b) 零和御磁技术

图1 零和御磁技术与磁屏蔽技术的不同

安培环路定律表明,磁场环路积分与环路外的电流无关,即

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \begin{cases} \mu_0 I, & P \in L; \\ 0, & P \notin L. \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{B} 为磁感应强度; P 为载导体置放点; L 为闭合环路; μ_0 为真空磁导率; I 为环内电流.

1.1 约定

约定1:离散环路.保留了若干相互分离有向线段(直线或者曲线) $l_k(k=1,2,\dots,m)$ 的环路,记作 L .

约定2:参考方向.相对离散环路 L 内的任意点,逆时针方向为有向线段正方向,如图2(a)所示.

约定3: P 点、 P 点张角. P 点是置放载流导体的几何点; P 点张角是 P 点向有向线段两个端点张开的角度,记为 $\alpha_k(k=1,2,\dots,m)$,简称张角.如图2(b)所示.

约定4:张角符号.张角 $\alpha_k(k=1,2,\dots,m)$ 的符号为沿有向线段 l_k 的磁场积分符号,即

$$\begin{cases} \alpha_k \geq 0, & \int_{l_k} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} \geq 0; \\ \alpha_k < 0, & \int_{l_k} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} < 0. \end{cases} \quad (2)$$

在式(2)约束条件下,对于环内 P 点,有

$$\int_{l_k} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \alpha_k, \quad P \in L. \quad (3)$$

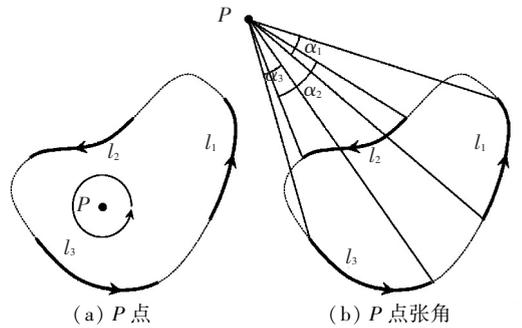


图2 离散环路

约定5:零和 P 点.满足下式的 P 点为零和 P 点,零和 P 点是对离散环路磁场积分不起作用的几何点.显然,在上述约定下零和 P 点存在且只存在于离散环路之外.

$$\sum_{k=1}^m \alpha_k = 0. \quad (4)$$

1.2 离散安培环路定律

在1.1节的约定下,容易理解如下的离散安培环路定律.

离散安培环路定律:若环外电流置放在零和 P 点上,离散环路磁场积分可表达为

$$\sum_{k=1}^m \int_{l_k} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{r} = \begin{cases} \frac{\mu_0 I}{2\pi} \sum_{k=1}^m \alpha_k, & P \in L; \\ 0, & P \notin L, \text{为零和} P \text{点.} \end{cases} \quad (5)$$

其中: μ_0 为磁导率, I 为环内电流.

若任意有向线段的间隔趋于无限小,则 $\sum_{k=1}^m \alpha_k \rightarrow 2\pi$.此时,离散环路闭合起来,离散安培

环路定律转化为安培环路定律的标准形式.

2 S^m 模型及零和定理

2.1 定义

定义 1 正多边形离散环路模型. $S^m (m \geq 2)$ 表示 m 条有向线段组成的离散环路, 并满足以下条件: 1) 有向线段 $l_k (k = 1, 2, \dots, m)$, 隔边相望, 取正 $2m$ 边形的 m 条边; 2) 有向线段方向遵守 1.1 节的约定 2.

2.2 约定

约定 6: S^m 坐标系. S^m 坐标系原点取其中心点 O , 横轴为原点 O 与某一有向线段 l_i 中点的连线.

约定 7: P 线、 P 线角. P 线是 S^m 原点 O 指向环外 P 点的矢量; P 线与 S^m 横轴 x 的夹角 θ 叫 P 线角.

约定 8: 零和 P 线、无向零和 P 线. 零和 P 线是零和 P 点对应的 P 线; 不考虑方向的零和 P 线为无向零和 P 线.

约定 9: 线段角. S^m 原点 O 向有向线段两个端点张开的角度, 记为 φ , 显然有

$$\varphi = \frac{\pi}{m}. \quad (6)$$

2.3 张角向量

如图 3 所示的 S^m 模型, 对于环外任意 P 点, 有

$$\begin{cases} A_1^k = R_1^k - P, & k = 1, 2, \dots, m; \\ A_2^k = R_2^k - P, & k = 1, 2, \dots, m. \end{cases} \quad (7)$$

$$R_1^k = Re^{j\left(\frac{2(k-1)\pi}{m} - \frac{\pi}{2m}\right)}, \quad k = 1, 2, \dots, m;$$

$$R_2^k = Re^{j\left(\frac{2(k-1)\pi}{m} + \frac{\pi}{2m}\right)}, \quad k = 1, 2, \dots, m.$$

$$P = Pe^{j\theta}.$$

其中: R 为 S^m 外接圆半径, P 为 P 线幅值.

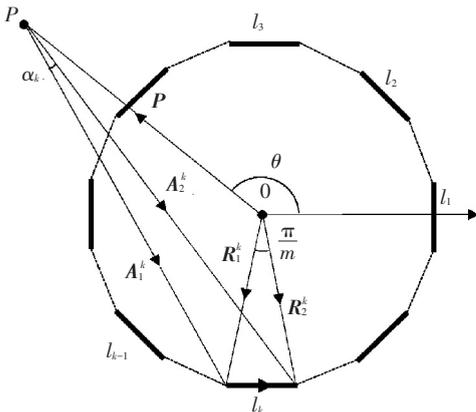


图 3 S^m 模型

令 $\tilde{\beta}_k = A_1^k \hat{A}_2^k, k = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$

由于

$$\alpha_k = -\arg \frac{A_1^k}{A_2^k}, \quad k = 1, 2, \dots, m.$$

因此

$$\alpha_k = -\arg \frac{A_1^k}{A_2^k} = -\arg \tilde{\beta}_k, \quad k = 1, 2, \dots, m.$$

将式(8)展开

$$\tilde{\beta}_k = \frac{1 + \left(\frac{R}{P}\right)^2 e^{-j\frac{\pi}{m}} - 2\frac{R}{P} e^{-j\frac{\pi}{2m}} \cos\left(\frac{2(k-1)\pi}{m} - \theta\right)}{1 + \left(\frac{R}{P}\right)^2 - \frac{R}{P} \cos\left(\frac{2(k-1)\pi}{m} + \frac{\pi}{2m} - \theta\right)}.$$

考虑到

$$\delta_k = \frac{2(k-1)\pi}{m} - \theta, \quad k = 1, 2, \dots, m;$$

$$M = Me^{-j\frac{\pi}{2m}};$$

$$M = \frac{R}{P}. \quad (9)$$

可得到张角向量

$$\beta_k = \left(1 + \left(\frac{R}{P}\right)^2 - \frac{R}{P} \cos\left(\frac{2(k-1)\pi}{m} + \frac{\pi}{2m} - \theta\right)\right) \tilde{\beta}_k = 1 + M^2 - 2M \cos \delta_k, \quad k = 1, 2, \dots, m. \quad (10)$$

式中: \hat{A}_2^k 为 A_2^k 的共轭. β_k 的角度即为 P 点张角, 因此称 β_k 为张角向量.

令

$$\beta_{\Pi} = \prod_{k=1}^m \beta_k. \quad (11)$$

显然有

$$\arg \beta_{\Pi} = \sum_{k=1}^m \arg \beta_k = \sum_{k=1}^m \alpha_k. \quad (12)$$

由式(12)可得

$$\beta_{\Pi} = 1 + M^{2m} - 2M^m \cos m\theta. \quad (13)$$

对式(13)证明如下: 对于以下的复因子序列

$$\begin{cases} \{e^{\pm j\delta_k}\} = (e^{\pm j\delta_k}, k = 1, 2, \dots, m); \\ k, m \in \mathbb{N}; \delta_k \in \mathbb{R}; e^{\pm j\delta} \in \mathbb{C}. \end{cases} \quad (14)$$

设式(14)的 C 积和是复因子以 C_m^k 方式相乘后的累加, 记作 $C_m^k \{e^{\pm j\delta}\}$, 上标 k 叫 C 积和的阶, k 是复因子序列 $\{e^{\pm j\delta}\}$ 的维数, 也是 C 积和的最大阶数, δ_k 是角度, 约定 $C_m^0 \{e^{\pm j\delta}\} = 1$. 若复因子序列 $\{e^{\pm j\delta}\}$ 的角度序列为

$$\{\delta\} = (\delta_k, k = 1, 2, \dots, m), \quad (15)$$

等分圆周, 即满足条件

$$\delta_k = \frac{2(k-1)\pi}{m} + \alpha, \quad k = 1, 2, \dots, m;$$

$$\alpha \in [0, 2\pi); \quad m > 1. \quad (16)$$

则 C 积和的取值为

$$C_m^k \{ e^{\pm j\delta} \} = \begin{cases} 0, & k = 1, k < m; \\ (-1)^{k-1} e^{\pm jk\alpha}, & k = m. \end{cases} \quad (17)$$

若复因子序列 $\{ e^{\pm j\delta} \}$ 的元素对应的函数为 $\beta_k = 1 + M^2 - 2M \cos \delta_k, k = 1, 2, \dots, m, \beta_k \in C.$ (18)

且序列 $\{\delta\}$ 等分圆周, 即满足式 (15), 根据 Euler 公式有

$$2 \cos \delta_k = e^{j\delta_k} + e^{-j\delta_k}. \quad (19)$$

得到

$$\beta_k = 1 + M^2 - 2M \cos \delta_k = (1 - Me^{j\delta_k})(1 - Me^{-j\delta_k}). \quad (20)$$

因此

$$\prod_{k=1}^m \beta_k = \prod_{k=1}^m (1 - Me^{j\delta_k}) \prod_{k=1}^m (1 - Me^{-j\delta_k}). \quad (21)$$

注意到

$$\prod_{k=1}^m (1 - Me^{\pm j\delta_k}) = \sum_{i=0}^m (-M)^i C_m^i \{ e^{\pm j\delta} \}. \quad (22)$$

根据式 (17), 当 $i < m$ 时, $C_m^i \{ e^{\pm j\delta} \} = 0$, 于是

$$\prod_{k=1}^m (1 - Me^{\pm j\delta_k}) = 1 + (-M)^m C_m^m \{ e^{\pm j\delta} \} = 1 + (-1)^{2m-1} M^m e^{\pm jm\alpha} = 1 - M^m e^{\pm jm\alpha}. \quad (23)$$

如此可得

$$\prod_{k=1}^m \beta_k = \prod_{k=1}^m (1 - Me^{j\delta_k}) \prod_{k=1}^m (1 - Me^{-j\delta_k}) = (1 - M^m e^{jm\alpha})(1 - M^m e^{-jm\alpha}). \quad (24)$$

即为

$$\prod_{k=1}^m \beta_k = 1 - M^m (e^{jm\alpha} + e^{-jm\alpha}) + (-M)^{2m} e^{j(m\alpha - m\alpha)} = 1 + M^{2m} - M^m (e^{jm\alpha} + e^{-jm\alpha}). \quad (25)$$

再根据 Euler 公式, 得到

$$\prod_{k=1}^m \beta_k = 1 + M^{2m} - 2M^m \cos m\alpha.$$

证明完毕.

2.4 零和定理

定理 1 零和定理. 对 S^m 模型, 满足如下 P 线角关系的 $2m$ 条 P 线为零和 P 线.

$$\theta_k = \frac{(2k-1)\pi}{2m}, k = 1, 2, \dots, 2m. \quad (26)$$

证明 容易理解如下等价关系:

$$\sum_{k=1}^m \alpha_k = 0 \Leftrightarrow \text{img}(\beta_{\Pi}) = 0.$$

结合式 (13), 可得

$$\text{img}(M^{2m} - 2M^m \cos m\theta) = 0.$$

考虑 M 的取值, 上式等价于

$$M^{2m} \sin(-\pi) - 2M^m \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \cos m\theta = 0.$$

就是

$$\cos m\theta = 0.$$

于是

$$\theta_j = \frac{2(j-1)\pi}{m} \pm \frac{\pi}{2m}, j = 1, 2, \dots, m.$$

将上式展开, 并划分为如下两个集合:

$$\{\theta_k^+\} = \left(\frac{\pi}{2m}, \frac{5\pi}{2m}, \frac{9\pi}{2m}, \dots, 2\pi - \frac{\pi}{2m} \right),$$

$$\{\theta_k^-\} = \left(-\frac{\pi}{2m}, \frac{3\pi}{2m}, \frac{7\pi}{2m}, \dots, 2\pi - \frac{5\pi}{2m} \right).$$

考察发现, 两个集合可统一记作式 (26) 的形式. 证明完毕.

推论 S^m 模型有 m 条无向零和 P 线.

证明 根据式 (26), 有

$$\theta_{m+k} - \theta_k = \pi, k = 1, 2, \dots, m.$$

即第 $m+k$ 条和第 k 条零和 P 线的方向相反.

因此 S^m 有 m 条无向零和 P 线. 根据零和定理知道, S^m 模型的零和 P 线具有如下基本性质: 1) 零和 P 线由且仅由 P 线角决定; 2) 有向线段端点与 S^m 原点的连线是零和 P 线的一部分; 3) 零和 P 线在离散环路外的任意点都是零和 P 点.

2.5 零和定理应用举例

本节以 $m = 6$ 为例, 讨论 S^m 模型及零和定理在零和御磁技术中的应用. 图 4 为 S^6 模型的示意图. 取 6 块相同的磁光玻璃材料按照 S^6 模型布置, 即 6 块磁光玻璃的传感光路分别与 S^6 模型的有向线段 $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6$ 重合, 磁光玻璃的通光方向与约定 2 的方向相同, 从而构成 S^6 结构 OCT. 下面分析 S^6 模型的零和御磁问题.

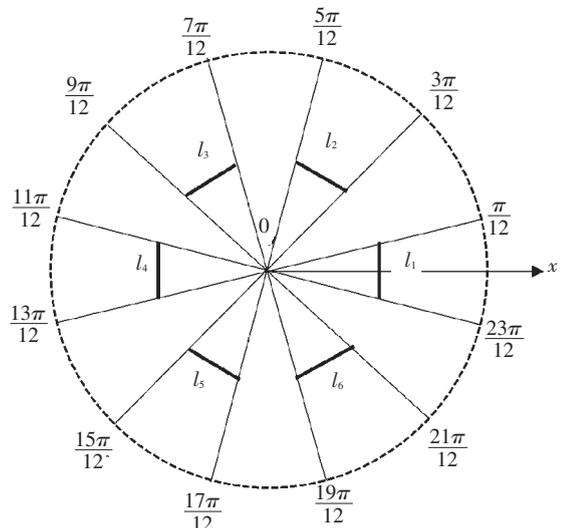


图 4 S^6 模型

由式 (26) 可知, S^6 模型有 12 条零和 P 线, 这些零和 P 线将圆周均匀分割为 12 等份, 如图 4 所

示. 将待测电流 i_c 布置于 OCT 的中心、干扰电流 i_g 布置于 OCT 的零和 P 线上, 则 OCT 对待测电流 i_c 产生磁场 B_c 的积分结果为

$$\sum_{k=1}^6 \int_{l_k} B_c \cdot dl = \frac{\mu_0 i_c}{2\pi} \left(6 \times \frac{\pi}{6} \right) = \frac{1}{2} \mu_0 i_c. \quad (27)$$

OCT 对干扰电流 i_g 产生磁场 B_g 的积分结果为

$$\sum_{k=1}^6 \int_{l_k} B_g \cdot dl = 0. \quad (28)$$

由式(27)、(28)可见, 干扰电流 i_g 产生的磁场 B_g 对 OCT 的测量结果没有贡献, 这意味着干扰电流产生的磁场虽然可以通过 OCT 的内部但完全失去了干扰作用, 采用零和御磁技术设计的 OCT 可以实现对待测电流 i_c 的无干扰测量.

S^m 模型适用于存在一个或多个干扰电流情况下对待测电流的抗干扰测量.

3 mS^m 模型及互易定理

3.1 定义

定义 2 S^m 正对称分布模型 mS^m . mS^m 是 m 个相同 S^m 组成的几何图形, 每个 mS^m 的原点为正 m 边形的一个顶点, 且满足不重叠条件

$$D \geq 2R. \quad (29)$$

其中: D 为相邻 S_k^m 中心点的距离. mS^m 模型描述 m 个 S^m 同时存在的正对称分布情况.

3.2 互易定理

mS^m 每个顶点有 $m-1$ 条顶点连接线, 它们将内角分割为 $m-2$ 个相等的角, 取值为

$$\chi = \frac{\pi}{m}. \quad (30)$$

显然, 此角度恰好等于式(6)的线段角 φ , 完全吻合地放置顶点为原点的 S^m . 一个 S^m 有 m 条无向零和 P 线, 其中的 $m-1$ 条线为 mS^m 顶点间的连接线, 剩余 1 条是 mS^m 外接圆在顶点的切线. 如此, 任意 S^m 原点都处在所有其他 S_k^m ($k=1, 2, \dots, m; k \neq i$) 零和 P 线的交点上. 这样, 如果 mS^m 中任意两个 S^m 互换位置, 必然是原点与零和 P 点的互换.

定理 2 互易定理. 如果 mS^m 中任意两个 S^m 位置互换, 则原点与零和 P 点互换; 其中一个 S^m 的原点成为另一个 S^m 的零和 P 点, 反之亦然.

3.3 互易定理应用举例

本节以 $m=6$ 为例, 讨论 mS^m 模型及互易定理在零和御磁技术中的应用, $6S^6$ 模型的示意图如图 5 所示.

将 6 个 S^6 结构的 OCT 按照 $6S^6$ 模型布置,

即将 6 个 S^6 结构的 OCT 布置于正六角形的 6 个顶点, 各个顶点与 S^6 模型 OCT 的中心重合, 调整各个 OCT 的安装角度使其满足定理 2, 从而构成 $6S^6$ 结构的 OCT 组合. 下面分析 $6S^6$ 模型的零和御磁问题.

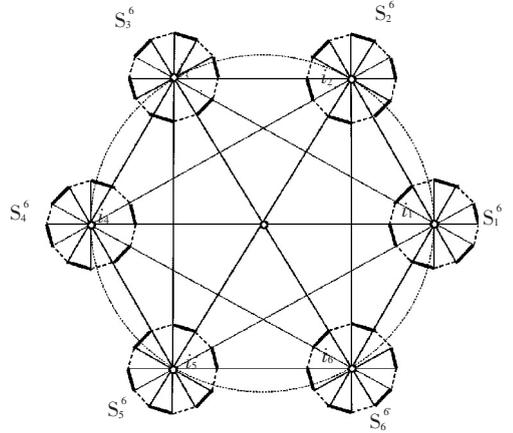


图 5 $6S^6$ 模型

将 6 个待测电流 i_j ($j=1, 2, \dots, 6$) 分别布置于 6 个 S^6 结构 OCT 的中心, 则对于任意一个 S^6 结构 OCT 而言, 其他 5 个电流都是干扰电流, 但是这 5 个干扰电流都位于它的零和 P 线上. 以 S_1^6 为例, i_1 为待测电流, 其他电流为干扰电流, 则 S_1^6 对待测电流 i_1 产生磁场 B_1 的积分结果为

$$\sum_{k=1}^6 \int_{l_k} B_1 \cdot dl = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi} \left(6 \times \frac{\pi}{6} \right) = \frac{1}{2} \mu_0 i_1. \quad (31)$$

对干扰电流 i_j ($j=2, 3, 4, 5, 6$) 产生磁场 B_j 的积分结果为

$$\sum_{k=1}^6 \int_{l_k} B_j \cdot dl = 0. \quad (32)$$

由式(31)、(32)可见, 干扰电流 i_j 产生的磁场 B_j 对 S_1^6 的测量结果没有贡献, 这意味着干扰电流产生的磁场虽然可以通过 OCT 的内部但完全失去了干扰作用, 采用零和御磁技术设计的 OCT 可以实现对待测电流 i_1 的无干扰测量. 同理可知, 该结论对于 S_j^6 ($j=2, 3, 4, 5, 6$) 同样成立, 此处不再赘述.

mS^m 模型适用于对多个电流进行测量且各个待测电流互为干扰电流的情况.

4 拓展模型

定义 3 拓展 S^m 模型. 若端点位置不变, 无论有向线段 l_k ($k=1, 2, \dots, m$) 形状如何, 都属 S^m 模型, 也称为拓展 S^m 模型.

本定义意味着 S^m 模型的有向线段可以是直线、圆弧和任意曲线, 如图 6 所示.

定义 4 拓展 mS^m 模型. 拓展 S^m 对应的 mS^m

为拓展 mS^m 模型.

磁场积分只依赖线段两端向 P 点张开的角度,因此拓展 S^m 模型和拓展 mS^m 模型完全遵守零和定理以及互易定理.

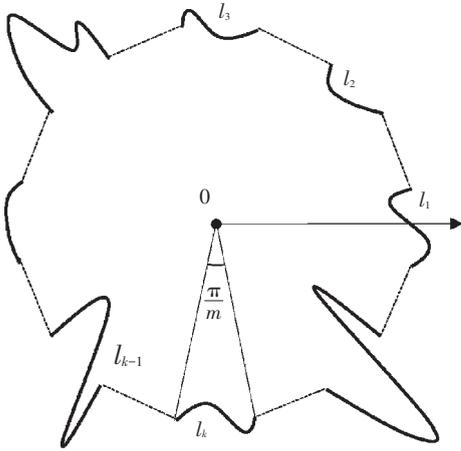


图6 拓展 S^m 模型

5 结 论

1)分析了直通光路型光学电流互感器抗外磁场干扰能力差的根本原因,提出了一种零和御磁技术解决方法.若离散环路外 P 点的张角之和为零,则离散环路的磁场积分与安培环路定律具有类似形式,这就是离散安培环路定律.

2)研究了正多边形离散环路 S^m 模型和 S^m 正对称分布的 mS^m 模型,提出了关于离散环路磁场积分的两个重要定理:零和定理和互易定理.零和定理的实质是 S^m 模型下的离散安培环路定律;互易定理表达 mS^m 模型中所有 S^m 共同遵守离散安培环路定律之条件.分析结果表明,光学电流互感器按照两个定理设计时,干扰电流产生的磁场可以进入光学电流互感器内部但失去干扰作用.

3)零和定理和互易定理形成了正多边形离散环路磁场积分理论体系,是光学电流互感器的零和御磁技术的重要理论基础,为解决直通光路型光学电流互感器的抗外磁场干扰技术难题提供了有益的思路.

参考文献

- [1] Emerging Technologies Working Group. Optic current transducer for power systems; a review [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(4): 1778-1788.
- [2] KUCUKSARI S, KARADY G G. Experimental comparison of conventional and optical current transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2455-2463.
- [3] 张国庆. 光学电流互感器的理论与实用化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [4] 于文斌. 光学电流互感器光强的温度特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.
- [5] 陈金玲, 李红斌, 刘延冰, 等. 一种提高光学电流互感器温度稳定性的新方法 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 97-101.
- [6] 王佳颖, 郭志忠, 张国庆, 等. 光学电流互感器长期运行稳定性的试验研究 [J]. 电网技术, 2012, 36(6): 37-41.
- [7] 孙如京, 王红星, 于文斌, 等. 自愈光学电流互感器技术及其工程应用 [J]. 广东电力, 2012, 25(1): 100-104.
- [8] 冯慈璋. 电磁场 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [9] NIEWCZAS P, MADDEN W I, MICHIE W C, et al. Magnetic crosstalk compensation for an optical current transducer [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5): 1071-1075.
- [10] 李红斌, 陈庆, 刘延冰, 等. 相间磁干扰对点式光学电流互感器影响的研究 [J]. 传感器技术, 2004, 23(4): 16-18.
- [11] PERCIANTE C D, FERRARI J A. Magnetic crosstalk minimization in optical current sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(10): 2304-2308.
- [12] 路忠峰. 御磁技术及其在光学电流传感器中的应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [13] 路忠峰, 郭志忠. 磁场环路积分的等价解环 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(11): 1781-1784.
- [14] 于文斌, 张国庆, 路忠峰, 等. 光学电流互感器的抗干扰分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 8-12.

(编辑 魏希柱)