

引文格式:

徐国卿, 胡浩. 并列双导体在交变磁场中的电磁效应探讨 [J]. 集成技术, 2019, 8(4): 24-31.

Xu GQ, Hu H. Study on electromagnetic effect of parallel double conductors in alternating magnetic field [J]. Journal of Integration Technology, 2019, 8(4): 24-31.

## 并列双导体在交变磁场中的电磁效应探讨

徐国卿<sup>1,2</sup> 胡 浩<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(上海大学 上海 200444)

<sup>2</sup>(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

<sup>3</sup>(同济大学 上海 201804)

**摘 要** 该文针对并列双导体在交变磁场交变作用下的电磁效应进行了探讨。在建立并列双导体交变磁场中的基本电磁模型和等效分布参数网络模型的基础上, 深入分析了并列双导体在交变磁场激励下的电磁效应和电流行为机理。实验结果显示, 所提出的电流行为模型很好地解释了并列双导体在发电运行时出现的电流高频振荡现象。

**关键词** 并列双导体; 交变磁场; 电磁效应

中图分类号 TM 12 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20190616001

## Study on Electromagnetic Effect of Parallel Double Conductors in Alternating Magnetic Field

XU Guoqing<sup>1,2</sup> HU Hao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(Shanghai University, Shanghai 200444, China)

<sup>2</sup>(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

<sup>3</sup>(Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract** In this paper, the electromagnetic effect of parallel conductors under alternating magnetic fields is investigated. The basic electromagnetic model and the equivalent distributed parameter network model in the alternating magnetic fields of parallel conductors are studied and established. The mechanism of electromagnetic effect and electric current of parallel conductors under the excitation of alternating magnetic fields is analyzed. The results of relevant analysis have been validated. The current behavior model well explains the current high frequency oscillation of parallel double conductors.

**Keywords** two parallel conductors; alternating magnetic field; electromagnetic effect

收稿日期: 2019-06-16 修回日期: 2019-06-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (U16133226)

作者简介: 徐国卿(通讯作者), 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电气自动化、电动汽车能量变换与控制等, E-mail: gq.xu@siat.ac.cn; 胡浩, 博士, 研究方向为轨道车辆电力牵引、电机及其控制技术等。

## 1 引言

并列双导体在很多电力设备和设施中都有应用, 如电力系统输电线路、通信线路等很多应用场合采用紧密并列的双导体。此外, 同轴电缆也可以看作是一种特殊的平行双导线。

在电力系统输电领域, 平行双导体传输线理论和应用研究已经比较成熟, 建立了长传输线的分布参数网络模型<sup>[1-3]</sup>。随着实际应用不断发展, 近十年来, 国内外对电力系统双导体传输线理论的研究主要集中在参数计算与仿真方法、双导体传输线理论的拓展、基于传输线理论的故障定位等方面。如王琦等<sup>[4]</sup>针对同轴电缆和双导线回路两种基本线路形式, 将传统的电感计算方法与有限元数值法计算电感值进行比较, 分析了传统方法计算误差较大的原因, 并在此基础上提出了修正方法。Chabane 等<sup>[5]</sup>将双导体传输线理论推广到多导体传输线理论, 提出了一种改进的多导体增强传输线理论, 该理论的本构方程直接由麦克斯韦方程导出, 不受横向电磁模式的限制, 同时保持了经典传输线理论(TLT)的数学形式。Mora 等<sup>[6]</sup>探讨了扩展传输线理论的有效范围对地平面以上二线线路差模信号进行评估的可能性。分析表明, 传输线理论在差模信号评估中的有效性取决于电线之间的距离, 与电线离地面的高度无关。Suleymanov 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于瞬时电压测量及其导数的短路故障检测方法, 利用电报方程推导了输电线路传递函数, 得到了输电线路中短路信号传播的精确解析描述。Gunawardana 与 Kordi<sup>[8]</sup>将均匀双导体传输线理论进一步拓展到非均匀传输线的处理, 利用散射理论来模拟导体间的相互耦合关系, 提出了一种面向非均匀传输线模拟的改进的传输线方法, 可以精确地模拟不同长度、不同电距离的导体。Ni 等<sup>[9]</sup>讨论了平面波场作用下电力系

统中双传输线中各点的传输线模型解析解, 利用线路上电压的连续性推导出多阻抗线路各点的频域解析解, 以及负荷下各点的频域解析解。

在通信和电子领域, 并列双导体的研究也一直受到国内外学术界的关注, 并将双导体传输线理论应用于电磁兼容、信号传输等方面, 其并列双导体上传输的电磁功率较小、频率较高(一般高于 100 kHz)。如杜雷鸣等<sup>[10]</sup>提出了一种基于时域反射原理的平行板传输线特性阻抗仿真计算方法, 得到了包含下极板展宽结构在内的不对称结构的平行板传输线特性阻抗计算公式。叶志红等<sup>[11]</sup>采用时域 BLT (Baum-Liu-Tesche) 方程建立多导体传输线对多导体传输线的串扰模型, 分析了不同数目和不同频率正弦波集总电压源激励下的多导体受扰线终端负载串扰电压响应特性。Atasoyu 等<sup>[12]</sup>针对宽带和高功率应用, 提出了一种使用双面并行带状线的混合功率合成器的新设计, 双面平行条带线的使用增加了设计的灵活性。

在机电能量转换装置(如电动机、发电机、变压器等)领域, 其并列双导体与电力系统传输线和电子信息领域的并列双导体有明显的区别。一般电机绕组为多股线并绕多层布置在定子槽内, 其中布置在电机槽内的导体较短, 其长度远远小于电力系统传输线; 而且一般电机的供电频率较低, 即使采用逆变器供电, 绕组导体中的电压变化(谐波频率)为几十千赫兹, 导体中电磁波传播频率小于通信电子领域的双导体。

由于电机槽内导体长度远远小于电磁波传播的波长, 研究人员基本上采用以槽为单位或以组成绕组的线圈为单位的集中参数和模型, 研究电机运行过程的过渡过程或瞬态过程<sup>[13-16]</sup>。一般来说, 引起电机瞬态过程的因素包括外部施加磁场的变化、供电电压的突变(如逆变器供电时绕组输入为脉宽调制波)、绝缘损伤、负载的

突变等情况。在电机供电频率较低、脉宽调制(PWM)频率不是太高(与变频器器件开关过程时间有关)时,采用集中参数来分析电机的过渡过程或瞬态过程已能满足工程需要。当给电机供电的逆变器的开关频率进一步提高,电机内部传输的电磁波波长进一步减小,就需要电机槽内导体在轴向长度上的电磁效应。文献[17-19]对逆变器供电情况下电机绕组输入的电压调制频率较高时的传输线等效电路进行了研究,其特点是以定子相绕组为对象研究绕组相间参数特征和绕组单位长度等效电路。如 Ryu 等<sup>[17]</sup>针对高频开关模式的逆变器供电的交流电机,提出了一种估计交流电机定子绕组高频特性的建模方法。该文献从绕组的频率响应中,提取了单位长度(PUL)传输的频率依赖性,将线路参数简化为脉冲等效电路,其中脉冲电路提供了一个简单的分布式元件绕组模型,能够准确捕捉高频行为。Ryu 与 Han<sup>[18]</sup>提出了一种改进的逆变器供电交流电机的单长度高频等效模型,重点研究了精确提取定子绕组对机壳的电容,并应用德拜模型分析了频率和电容在几个阶段内的下降行为,将相线的输入阻抗和传输阻抗与测量值进行比较来验证等效模型。Ryu 与 Han<sup>[19]</sup>还通过对逆变器供电电机的绕组电压调制频率相关脉冲参数的分析,考察相绕组之间电容、相绕组电阻参数的变化,建立了考虑高频特性的等效电路模型,对逆变器供电的交流电机的宽带频率特性预测分析。

本文以槽内双根并列的导体在交变磁场下发电系统为例,在没有逆变器(和其他具有开关工作特点的电力电子电路)连接的情况下,以定子槽为基本单元,研究电机中同一相绕组内部并列双导体的基本电磁关系模型,同时分析交变磁场下并列双导体的电流和电荷运动特征。其中,针对电机绕组内部槽内双导体电磁效应的研究,目前国内外尚没有相应文献报道。

## 2 交变磁场激励的双导体电磁效应模型

### 2.1 并列双导线体的分布参数电磁模型

为了研究并列双导体在电机领域应用的电磁特征与规律,考察一种以在定子槽内两根上下层并布置的双导体为基本单元组成的永磁发电系统,具体如图 1 所示。其中,永磁体产生的磁场大部分作用在导线上,而导线端部区域没有磁场作用,在外动力作用下永磁体与导体之间发生相对运动,在双导体上产生感应电势。当将所有导体串联在一起形成单相发电系统的绕组时,绕组端部输出感应电势,接负载后输出电流。

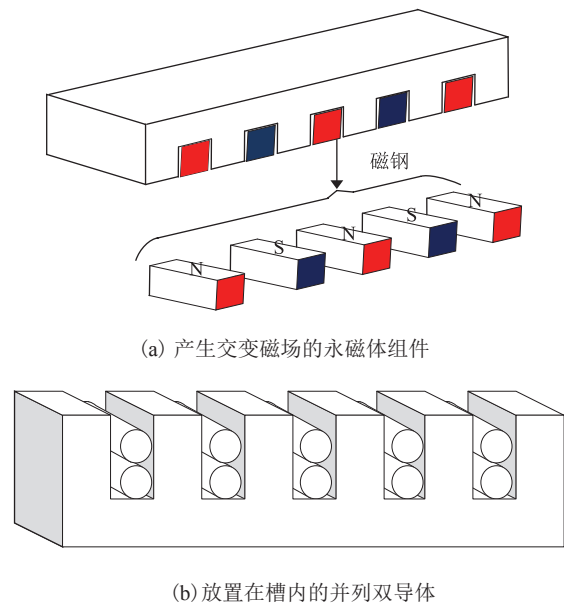


图 1 发电系统的永磁体组件和放置在槽内的导体示意图

Fig. 1 Permanent magnet components and conductor diagrams placed in slots of power generation systems

所有的双导体之间通过串联连接,同槽中的两个导体也通过其他导体串联。如图 2(a)所示,上下导体的连接用虚线表示连接,这种连接方式与电力系统输电线的并列双导体具有明显的区别,即上下导体的输入端与输出端电流相位一致。

当导体上的感应电势频率较高时,图 2(b)给出了双导体模块上下层导体之间形成电场和电容模型。需要说明的是,双导体模块的电容,与一

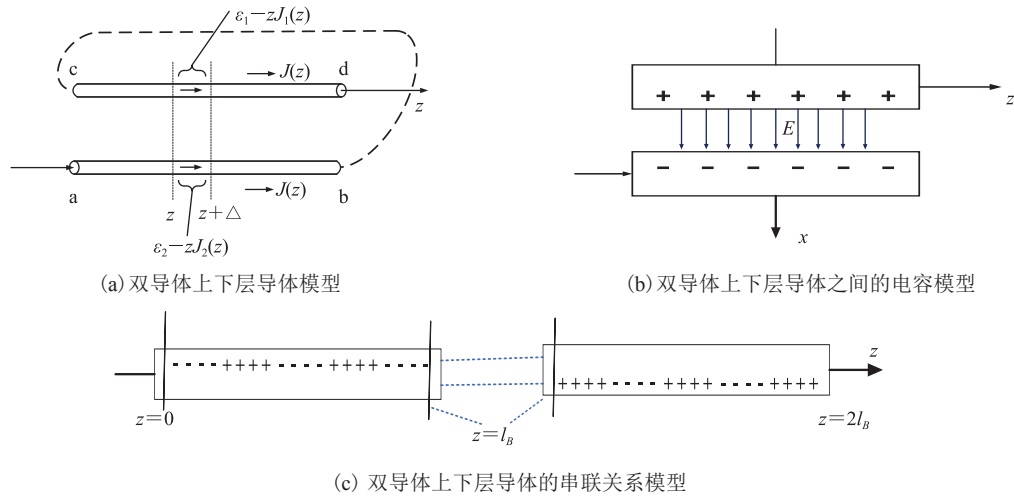


图 2 双导体上下层导体模型和电容模型

Fig. 2 Double conductor upper and lower conductor model and capacitance mode

般的双导体极板形成的电容有较大的区别, 两个导体之间除了存在交变电场, 还存在交变磁场, 为分析方便, 将磁场对电容的影响等效处理为电容值的修正。图 2(b) 中,  $z$  为双导线轴向方向,  $x$  为双导线内部电场方向(忽略导体表面电场)。由于上下层导体之间距离较近, 双导体模块之间具有电场。通过后续的分析可知, 该电场方向基本垂直于导体表面。图 2(b) 为双导体的串联模型, 注意在磁场中导体的有效部分长度为  $l_B$ 。

由于并列的双导体之间距离很小, 满足横向似稳条件<sup>[1]</sup>, 可以得到图 3 所示的双导体分布参数电路模型。其中, 图 3 中没有表示出导体上因交变磁场引起的感应电势。

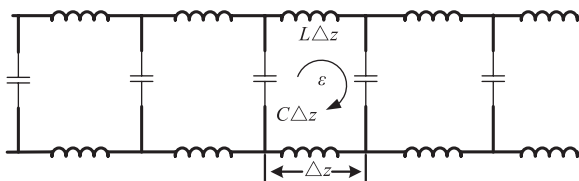


图 3 双导线的等效分布参数电路模型

Fig. 3 Equivalent distributed parameter circuit model of double wires

## 2.2 并列双导体的电磁关系模型

具有交变磁场激励的平行双导体, 设  $\varepsilon$  为单位长度的双导体在磁场下的感应电动势(同一空间

位置的上下层导体的电势不相等), 同时设双导体单位长度等效电容  $C$ 、单位长度电阻  $R$ 、单位长度电感  $L$  为常数, 得到双导体上波动方程如下:

$$\frac{1}{C} \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} - R \frac{\partial I}{\partial t} - L \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} + \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

其中,  $I$  为导体上的电流;  $t$  为时间。

(1) 当  $R=0$ 、 $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}=0$  时, 上述方程(1)与理想

传输线模型相同, 满足波动方程:

$$\frac{\partial^2 I}{\partial z^2} - LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

该方程的电流解为行波, 电流方向与导体之间的电场方向垂直。

(2) 当  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}=0$ 、电阻  $R \neq 0$  时, 方程(1)的电流解为衰减的波, 不能传播电磁能。

(3) 当  $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \neq 0$ 、电阻  $R \neq 0$  时, 设交变磁场作用下导体上感应电势为正弦波:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{j\omega t} \quad (3)$$

在一定的条件下, 上述方程(1)有如下形式的行波解:

$$I(z, t) = I_0 e^{j(kz + \omega t + \phi)} \quad (4)$$

其中,  $k$  为传播系数;  $\phi$  为代表电流相位角。

### 3 交变磁场激励的双导体上的电流

根据图 2(c) 所示的串联模型, 下层导体的  $z$  方向坐标区间为  $[0, l_B]$ , 上层导体的  $z$  方向坐标区间为  $[l_B, 2l_B]$ , 电流  $I$  在  $[0, 2l_B]$  区间是以  $l_B$  为中心点的周期函数, 傅里叶级数展开如下:

$$I(z, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n(t) e^{jk_n(z-l_B)} \quad (5)$$

其中,

$$k_n = \frac{n\pi}{l_B} (n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (6)$$

上下导体的电荷数字值相等但符号相反, 因此在  $[0, 2l_B]$  区间, 电流  $I$  是以  $l_B$  为中心点的奇函数。

$$I(z, t) = \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots}^{\infty} I_n(t) e^{jk_n(z-l_B)} (0 \leq z \leq l_B) \quad (7)$$

$$I(z, t) = - \sum_{n=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots}^{\infty} I_n(t) e^{jk_n(z)} (l_B \leq z \leq 2l_B) \quad (8)$$

其中,

$$k_n = \frac{n\pi}{l_B} (n=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots) \quad (9)$$

由于磁场不是覆盖整个导体, 导体上的感应电势可表示为如下形式:

$$\varepsilon(z, t) = \varepsilon(t) + E_{xp} \varepsilon(t) \delta(z - z_H) \quad (10)$$

其中,  $E_{xp}$  为比例系数;  $z_H$  为磁场发生变化的位置。

考虑冲激函数  $\delta(z)$  傅里叶积分形式如下:

$$\delta(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{jkz} dk \quad (11)$$

将公式 (7) ~ (10) 代入方程 (1), 以  $z_H = l_B$  为例, 整理后得到<sup>[20-21]</sup>:

$$\begin{aligned} & \sum_{n=\pm 1}^{\infty} \left[ k_n^2 I_n(t) + RC \frac{dI_n(t)}{dt} + LC \frac{d^2 I_n(t)}{dt^2} \right] e^{j \frac{n\pi}{l_B} (z)} \\ &= -C \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} - \frac{CE_{xp}}{l_B} \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{jk(z-l_B)} dk \end{aligned} \quad (12)$$

考虑到磁场的边界条件和对称性<sup>[14-15]</sup>, 且上下导体电荷的电荷数字值相等但符号相反, 故有:

$$\int_0^{2l_B} \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} dz = \int_0^{l_B} \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} dz + \int_{l_B}^{2l_B} \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} dz = 0 \quad (13)$$

进一步可以得到电流关于时间变量  $t$  的方程:

$$LC \frac{d^2 I_n(t)}{dt^2} + RC \frac{dI_n(t)}{dt} + k_n^2 I_n(t) = f_c \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \quad (14)$$

其中,  $f_c$  为与时间  $t$  无关的常量。交变磁场在导体上的感应电势可表示为:

$$\varepsilon(t) = \sum_{n=1, 3, 5, \dots}^{\infty} \varepsilon_n \cos(n\omega t + \alpha_n) \quad (15)$$

电流的特解形式为:

$$I_n(t) = I_{n\max} \cos(n\omega t + \beta_n) \quad (16)$$

$(n=1, 3, 5, \dots)$

公式 (14) 的电流特解对应的齐次方程如下:

$$LC \frac{d^2 I_n(t)}{dt^2} + RC \frac{dI_n(t)}{dt} + k_n^2 I_n(t) = 0 \quad (17)$$

其中,  $k_n = \frac{n\pi}{l_B} (n=1, 3, 5, \dots)$ 。

上述齐次方程的通解具有三类形式<sup>[16]</sup>。

(1) 当  $(RC)^2 = 4LCk_n^2$  时, 齐次方程有两个相等的实根。

$$\text{特征根为: } r_1 = r_2 = -\frac{R}{2L} \quad (18a)$$

齐次方程通解为:  $I_n(t) = (c_1 + c_2 t) e^{r_1 t}$

(2) 当  $(RC)^2 > 4LCk_n^2$  时, 齐次方程有两个不等的实根。

$$\begin{aligned} \text{特征根为: } r_1 &= \frac{-RC + \sqrt{(RC)^2 - 4LCk_n^2}}{2LC} \\ r_2 &= \frac{-RC - \sqrt{(RC)^2 - 4LCk_n^2}}{2LC} \end{aligned} \quad (18b)$$

齐次方程通解为:  $I_n(t) = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t}$

(3) 当  $(RC)^2 < 4LCk_n^2$  时, 齐次方程有一对共轭的复根。



齐次方程通解为:

$$I_n(t) = Ae^{-\alpha t} \cos(\omega_n t + \phi_n) \quad (18c)$$

$$\omega_n = \frac{\sqrt{4LCk_n^2 - (RC)^2}}{2LC}$$

可见, 当电磁参数满足  $(RC)^2 < 4LCk_n^2$  时, 电流通解具有衰减振荡特征。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 电磁效应分析

由上述分析可知, 双导体在磁场激励下, 电流在导体轴线方向为行波。其中, 电流随时间的变化由两部分组成, 分别对应公式 (16)、(18a~c) 表示的特解和通解。

#### (1) 双导体上的电流特解

双导体上的电流特解与双导线外部的输入和负载有关。在本文实验中, 外部输入为永久磁体运动产生的交变磁场, 负载为纯电阻。该特解所对应的电流波形与交变磁场产生的感应电势、导体的材料与尺寸、导体所处的电磁环境(电磁参数)有关。

#### (2) 双导体上的电流通解

由本文分析建立的并列双导体行波电流的通解, 对应双导体发电系统中出现的高频振荡电流(衰减波), 虽然出现在发电系端部(测量原因), 但实质上是由于双导线内部电磁效应产生。行波电流的通解(高频振荡电流)与导线的电磁特性参

数有关。

### 4.2 实验结果及分析

本实验的发电系统由永磁体组件(转子)和双导体组件(包括铁心与双导体)等组成, 具体如图 4 所示。该系统由外部动力驱动永磁体转子, 在发电系统输出端产生的感应电势频率为 938 Hz。当发电系统未接负载时, 输出电压如图 5(a) 所示, 交流电压峰值为 230 V, 在导线感应的电压中没有振荡现象。

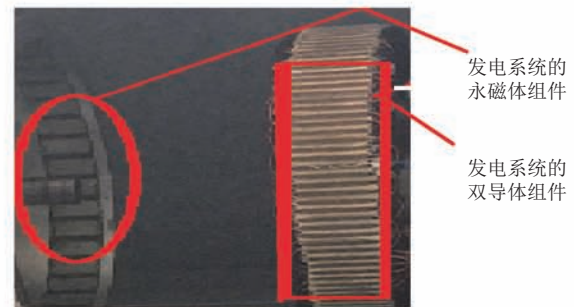
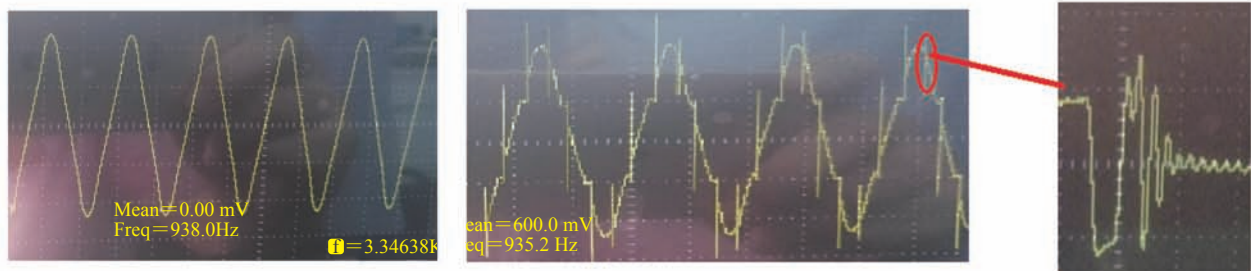


图 4 发电系统实验装置的组成

Fig. 4 Composition of experimental device for power generation system

当发电系统输出端接纯电阻负载时, 电流波形中除了与磁场交变对应的感应电势的稳态波形外, 还出现呈衰减振荡的高频电流。其中, 输出电流波形如图 5(b) 所示, 电流稳态部分的峰值为 47 A。瞬态电流峰-峰值最大达到 50 A, 振荡频率(大于 500 kHz)远远高于磁场交变频率(938 Hz), 显然该高频振荡电流频率与磁场交变频率基本上无关。



(a) 发电系统的导线未接负载的电压波形

(b) 发电系统接纯电阻负载时的电流波形(含高频衰减振荡)

图 5 发电系统未接负载的电压波形和接负载时的电流波形

Fig. 5 Voltage waveform without load and current waveform with load in power generation system

需要说明的是, 因为一个磁极下对应三个槽(和槽内双导体), 而所有双导体在本文的实验装置中为串联连接, 因此在一个电流周期中, 磁极交变会在串联的发电系统中包含 6 次磁场的脉动, 当然这种脉动从整体输出的电压波形上并不明显。

实验表明, 在交变磁场作用下, 并列双导体的电流波形由两部分组成: 一部分是与交变磁场频率一致的交变电流, 另一部分代表了瞬态过程的高频振荡(衰减)电流。

实验证实, 导体上流过的稳态电流与交变磁场和电势的频率是一致的, 在相位上滞后交变的电势。本文分析得到的双导体电流特解, 与集中参数表示的电路解在形式上是一致的。因此, 实验结果证实了电流特解这一分析结果。

从实验结果可以看出, 在导体上出现了代表瞬态过程的高频振荡(衰减)电流, 该电流出现在磁场交变对应的时间区域。本文分析得到的双导体电流通解, 其出发时间与导体上轴向方向的磁场突变有关, 电流特征与双导线内部特殊的电磁效应有关。当满足公式(18c)的情形时, 电流为按时间衰减的振荡波, 因此, 实验结果与本文分析的电流特解是吻合的。

### 4.3 并列双导体上电荷分布分析

上述分析中, 公式(14)反映了交变磁场激励下双导体电磁模型和电流行为。双导体在磁场激励下的电流具有行波解表明, 上下导体在同一位置的电荷数值相同、方向相反。电流和电荷在双导体内分布不均匀, 电流沿轴线  $z$  方向为行波, 电流方向与电场方向垂直, 具体如图 6 所示。

## 5 结 论

本文从平行双导线发电实验出现的高频振荡电流现象入手, 分析揭示该发电系统双导线负载条件下产生的电流振荡机理。运用 Maxell 电磁

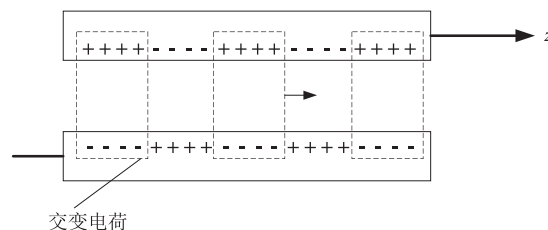


图 6 双导线模块导体表面电荷分布示意图

Fig. 6 Charge distribution on conductor surface of double conductor module

理论研究平行双导线内部的基本电磁关系和等效分布参数网络模型, 建立了平行双导线在交变磁场激励下的电磁效应和电流行为模型。

实验和分析表明, 本文提出的平行双导体电流行为模型, 很好地解释了发电系统出现的高频振荡点振荡现象。值得注意的是, 电流中出现高频衰减振荡, 这是电流通解的一种情况。当导体参数(如材料、尺寸等)发生变化时, 电流通解中可能不会出现高频衰减振荡波。本文进一步分析了交变磁场激励下平行双导线实现内部电流传输的特点, 该研究结果也揭示了电磁感应发电系统新的能量传输方式的可能性。

未来的研究工作, 还需要进一步研究交变磁场对并列双导体电容、电感等参数的影响, 以及并列双导体电磁能量的传输行为特点等。

## 致 谢

本文的研究过程和相关实验工作中, 得到冯伟博士、钱辉环博士、雷电博士等的帮助和支持, 谨此致谢。

## 参 考 文 献

- [1] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [2] 刘天琪. 电力系统分析理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] 孟昭敦. 电磁场导论[M]. 北京: 中国电力出版社,

- 2008.
- [4] 王琦, 赵启明, 袁建生. 长直平行双导线电感传统计算方法误差分析与修正 [J]. 电线电缆, 2017(6): 14-40.
- [5] Chabane S, Besnier P, Klingler M. A modified enhanced transmission line theory applied to multiconductor transmission lines [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(2): 518-528.
- [6] Mora N, Lugrin G, Junqua I, et al. On the validity limits of the transmission line theory in evaluating differential-mode signals along a two-wire line above a ground plane [C] // 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015: 797-800.
- [7] Suleymanov M, Pinhasi Y, Yahalom A. Short circuit fault detection in two wire transmission line [C] // 2016 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering (ICSEE), 2016.
- [8] Gunawardana M, Kordi B. An enhanced model for the analysis of non-uniform multiconductor transmission lines based on scattering theory [C] // 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), 2018: 559-564.
- [9] Ni G, Li Y, Zhang MS. Frequency-domain analytical solutions of two-wire transmission line with multi-impedance [C] // 2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS), 2016: 4025-4030.
- [10] 杜雷鸣, 谢彦召, 王绍飞. 平行板传输线特性阻抗仿真计算及解析修正 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(8): 160-164.
- [11] 叶志红, 廖成, 张敏, 等. 基于时域 BLT 的多导体传输线串扰响应分析 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(7): 201-204.
- [12] Atasoyu M, Ozoguz S, Paker S, et al. Wideband hybrid power combiner using double-sided-parallel-strip lines [C] // 2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2016: 227-230.
- [13] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析 (第 2 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [14] 胡之光. 电机电磁场的分析与计算 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [15] 陈世坤. 电机设计 (第 2 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [16] 徐国卿. 城市轨道交通车辆电力传动 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- [17] Ryu Y, Park BR, Han KJ. Estimation of high-frequency parameters of AC machine from transmission line model [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3): 1-4.
- [18] Ryu Y, Han KJ. High-frequency stator-to-frame admittance modeling for AC machine by using Debye model [C] // The Proceedings of Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2016: 1181-1183.
- [19] Ryu Y, Han KJ. Improved transmission line model of the stator winding structure of an AC motor considering high-frequency conductor and dielectric effects [C] // 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC), 2017: 1-6.
- [20] 郭玉翠. 数学物理方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [21] 同济大学数学系. 高等数学 (第七版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2014.