

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.04.023

# 直线移相变压器应用性能优化设计

张书恒, 赵镜红, 郭国强, 吴媚

(海军工程大学电气工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**直线移相变压器具有结构简单、可实现任意角度移相等技术优点,在多重叠加逆变系统中有着广泛的应用。然而,直线移相变压器在边端易形成端部效应,可影响变压器本身的工作性能。首先,文中基于磁路相似化原理,将直线电机与旋转电机的铁芯磁路进行相似化分析;其次,通过改变有效气隙长度,分析输出电流谐波含量和系统效率;最后,通过在边齿部分添加隔磁材料,分析其对变压器端部漏磁通的影响。仿真结果表明,合理选取有效气隙长度、在边齿部分添加隔磁材料可有效削弱边端效应的影响,提高直线移相变压器的应用性能。

**关键词:**直线移相变压器;端部效应;气隙;边齿;有限元仿真

**中图分类号:** TM402

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2021)04-0161-06

## 0 引言

移相变压器<sup>[1-2]</sup>在多重叠加逆变系统中能够发挥重要作用。从铁芯的结构形式出发,目前移相变压器可以分为心柱式、圆形和直线移相变压器3类。心柱式移相变压器的原边绕组通入多组逆变器的输出电压,将在铁芯中产生脉振磁场,从而在副边绕组感应出三相电动势。该方式的缺点在于,利用特定的绕组形式来实现某一角度的移相,当功率较大或相数较多时,变压器的体积和重量巨增,绕组结构将变得十分复杂,而且当匝数比为无理数时不可能实现精确匝数比,如采用近似比时会造成电流不平衡。圆形移相变压器结合感应调压器原理与多相感应电机的理论<sup>[3-4]</sup>,其结构类似于旋转感应电机,将定子侧作为变压器原边,转子侧作为变压器副边,由于同一侧绕组匝数相同且分布于同一圆周上,磁路完全对称,可实现良好的移相功能,但设计复杂,且拓展性较差。直线移相变压器借鉴了直线电机的结构和原理,不同点在于直线移相变压器原副边铁芯(对应电机中定转子)是固定不动的,且长度相同<sup>[5]</sup>。相对于传统移相变压器,直线移相变压器结构简单,易于模块化,便于拓展,能够实现电气隔离。

有鉴于此,许多学者对直线移相变压器进行了研究。文献[5]分析了三相不对称对直线式移相变压器性能的影响,并用于多重化逆变系统,减小了输出谐波含量,优化了输出性能。研究发现直线式移相变压器的能量转换主要是通过气隙磁场实现的,然而变压器两端开口,磁路不对称,边端效应的

存在对气隙磁场和工作性能产生影响。文献[6]通过仿真分析气隙磁场的磁力线分布,得出端部气隙磁场没有明显畸变的结论,但未分析具体影响气隙磁场的主要因素。文献[7]分析了直线式移相变压器边端效应产生的原因,并通过近似处理得到了边端效应影响下感应电动势等电量参数,进而得到影响边端效应的2个主要参数:边齿宽度及气隙大小。由于直线移相变压器与直线电机原理近似,常采用磁场相似化的方法,从变压器铁芯内部磁场分布情况考虑,分析影响气隙磁场的参数,简化变压器纵向边端效应<sup>[8-10]</sup>。

文中从变压器结构、气隙电磁场以及边端效应3个角度出发,建立直线移相变压器有限元模型,研究气隙长度和边齿对削弱边端效应的影响,从而优化变压器的工作性能。

## 1 直线移相变压器工作原理

### 1.1 直线移相变压器结构

直线移相变压器可看作将旋转电机沿径向剖开并拉直,其原副边铁芯长度相等、固定不动,通过调整变压器槽数与绕组连接方式,可实现任意角度的移相,在多重叠加逆变和多脉波整流中应用广泛。

文中对12/3相直线移相变压器在多重叠加逆变系统中的应用性能进行分析,直线移相变压器结构如图1所示。变压器原边嵌放4套3相绕组,构成12相绕组,相邻两套绕组间相位差为15°,变压器副边嵌放一组3相绕组,采用星型连接。

变压器原边由多重叠加逆变系统供电,该系统由4组三相桥式逆变器构成,逆变器工作频率为50 Hz。4组三相桥式逆变器由24个绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)开关管

收稿日期:2021-01-24;修回日期:2021-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007195)

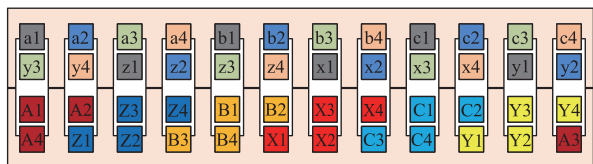


图1 直线移相变压器结构

Fig.1 Structure of linear phase shifting transformer

组成,通过控制 24 个 IGBT 开通与关断的顺序实现电压移相。具体控制方式为:每组桥式逆变器同一桥臂上的开关管相互滞后 180°,同一组逆变器的三相输出依次滞后 120°,而 4 组桥式逆变器相对应的开关管依次滞后 15°。

每组三相桥式逆变器输出 3 组相位互差 120°的六阶梯波,4 组桥式逆变器输出的六阶梯波依次滞后 15°。将多重叠加逆变系统输出的 12 组六阶梯波输入到移相变压器原边对应绕组中,叠加后等效为 3 组正弦度极高的 24 阶梯波,在气隙内生成行波磁场,副边从中感应得到三相交流电。

### 1.2 直线移相变压器电磁场方程

假设直线移相变压器副边导体的电导率和铁芯磁导率在空间中均相同,导体中位移电流为 0。用于分析直线移相变压器的麦克斯韦方程组为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_1 + \mathbf{j}_2 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \mathbf{j}_2 = \gamma \mathbf{E} \\ \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{B}$ 为磁通密度; $\mathbf{H}$ 为磁场强度; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\mathbf{j}_1$ 为副边导体外加电流密度; $\mathbf{j}_2$ 为副边导体感应电流密度; $\mu_0$ 为铁芯磁导率; $\gamma$ 为副边电导率。

由于 $\mu_0, \gamma, \mathbf{j}_1$ 均为已知量,结合麦克斯韦方程组和电磁场边界条件,可求得 $\mathbf{H}, \mathbf{E}, \mathbf{j}_2$ 为:

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{H} - \mu_0 \gamma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{j}_1}{\partial t} \\ \nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{j}_1}{\partial t} \\ \nabla^2 \mathbf{j}_2 - \mu_0 \gamma \frac{\partial \mathbf{j}_2}{\partial t} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{j}_1}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)所求得关于 3 个未知量 $\mathbf{H}, \mathbf{E}, \mathbf{j}_2$ 的方程,均只含有 1 个变量,通过这 3 个方程可求出 $\mathbf{H}, \mathbf{E}, \mathbf{j}_2$ ;也可只求取其中 1 个未知量,再通过式(1)中各变量之间的关系求取其余未知量。

### 1.3 直线移相变压器边端效应

直线移相变压器的能量转换主要是通过气隙

磁场实现的,但直线型结构使得磁路开断,导致气隙磁场发生畸变,将直线型结构对变压器气隙磁场和工作性能的影响称为边端效应,如图 2 所示。

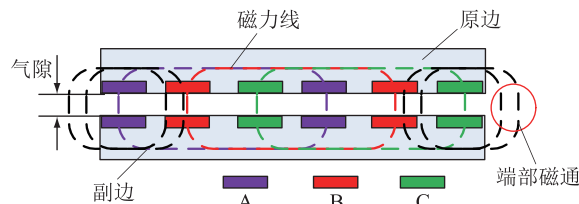


图2 直线移相变压器边端效应示意

Fig.2 Side effect of linear phase shift transformer

直线移相变压器气隙磁场在边端处扩散,气隙有效磁通减少,称为第一类横向边端效应。副边电流在原边有效宽度内形成闭合回路,导致气隙磁密在横向呈现马鞍形分布,称为第二类横向边端效应。由于直线移相变压器有效气隙长度与铁芯宽度的比值较小,且变压器原副边宽度相等,故横向边端效可以忽略。直线移相变压器端部开断,导致三相绕组之间的阻抗不相等,称为第一类纵向边端效应;端部磁通在开断处形成闭合回路,导致气隙磁场增强,称为第二类纵向边端效应。2 类纵向边端效应导致副边输出电压谐波含量增高,严重影响直线移相变压器工作性能。

## 2 直线移相变压器建模与优化

### 2.1 直线移相变压器具体参数

直线移相变压器采用双层叠绕组,原边使用整距绕组,副边使用长距绕组配合短距绕组。短距绕组导致基波电势有所减小,但大大削弱了高次谐波,提高了供电品质。直线移相变压器主要设计参数如表 1 所示。

表 1 移相变压器参数

Table 1 Parameters of phase shifting transformer

参数	数值	参数	数值
输出相电压/V	200	副边绕组匝数	210
输出频率/Hz	50	槽宽/mm	12
输出功率/kW	1	槽深/mm	25
原边相数	12	槽间距/mm	18
副边相数	3	铁芯长度/mm	216
极对数	1	铁芯高度/mm	40
槽数	12	铁芯叠加厚度/mm	100
原边绕组匝数	340	铁芯材料	DW465-50

### 2.2 等效气隙长度优化

直线移相变压器端部磁场分布较为复杂,难以用精确的数学表达式描述,故文中从铁芯磁场的分布出发,分析纵向端部效应的影响。直线移相变压

器借鉴直线电机的工作原理,其铁芯磁场分布与直线电机类似。图3为直线电机和旋转电机铁芯磁场分布情况示意。

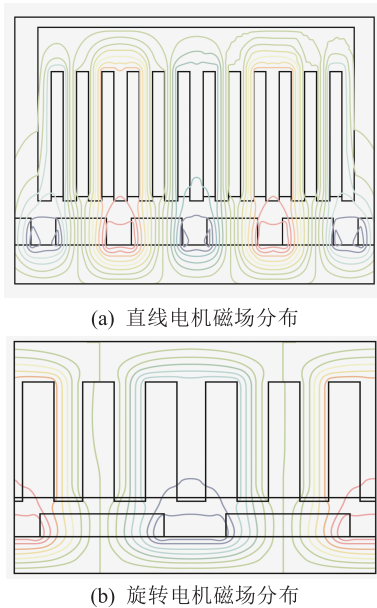


图3 不同电机磁场分布

Fig.3 Magnetic field distribution of different motors

由图3可知,在旋转电机的每一磁极上,磁通分布均匀,而由于纵向边端效应的影响,直线移相变压器的每一磁极上的磁通分布并不均匀。旋转电机、直线电机(二者齿槽结构相同)每一极的磁通量分别如式(3)所示。

$$\begin{cases} \varphi_1 = F/R_1 = K/L_g + L_{g^*} + 2L_{pm} \\ \varphi_2 = F/R_2 = K/2L_g + 2L_{pm} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  分别为直线电机、旋转电机的磁通量;  $R_1$ 、 $R_2$  为对应磁路的磁阻;  $F$  为电机内部磁势;  $K$  为磁路系数;  $L_g$  为气隙长度;  $L_{g^*}$  为初齿的等效气隙长度;  $L_{pm}$  为磁化长度。

为削弱边端效应对直线电机铁芯磁场分布的影响,应尽量保证直线电机的等效气隙长度与旋转电机的气隙长度相等。而直线移相变压器铁芯磁场分布以及磁通表达式均与直线电机相似,故可通过增大边齿宽度、减小边齿气隙长度等措施对直线移相变压器等效气隙长度进行优化,从而削弱边端效应对变压器的影响。

### 2.3 边齿优化

在直线移相变压器边齿处添加合适的隔磁材料,可有效减小气隙谐波磁密,但基波磁密受影响较小,从而改善气隙磁密波形。PC40\_1 材料同时具有磁吸收特性与电吸收特性<sup>[11]</sup>,可有效对变压器气隙磁场进行优化。图4为边齿处2种不同的优化设计方案。

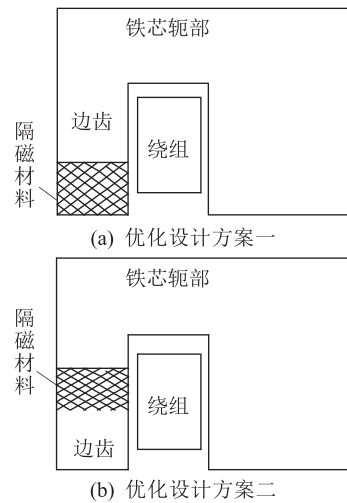


图4 直线移相变压器边齿优化设计

Fig.4 Optimal design of side teeth of linear phase shifting transformer

## 3 仿真验证

### 3.1 气隙长度优化仿真

基于 ANSYS 有限元,搭建直线式移相变压器场路耦合仿真模型<sup>[12-13]</sup>,其原边由多重叠加逆变系统供电,副边负载采用星形接法联结,仿真工况为额定负载。图5为气隙长度为 0.2 mm 时(边齿为 6 mm)的三相输出电流示意,图6为三相输出电流 FFT 分析示意。

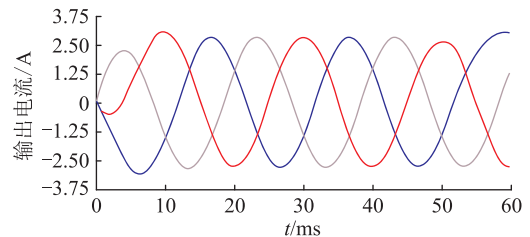


图5 气隙 0.2 mm 时输出电流波形

Fig.5 Waveforms of output current with air gap of 0.2 mm

由图5、图6可以知,副边 A、B、C 相输出电流彼此较为对称且幅值相近,其三相各自的谐波失真值(total harmonic distortion, THD)分别为 2.40%, 3.33%, 2.65%,谐波含量均在 5% 以下,满足工业生产与使用要求。

由 2.2 节分析可知,增大铁芯边齿宽度或减小原副边有效气隙长度均可有效削弱纵向边端效应对系统的性能影响,减小三相输出电流谐波含量。通过保持边齿宽度 6 mm 不变,改变气隙长度,仿真分析验证直线式移相变压器输出电流波形及系统效率。不同气隙长度时输出电流谐波及系统效率如表 2 所示。

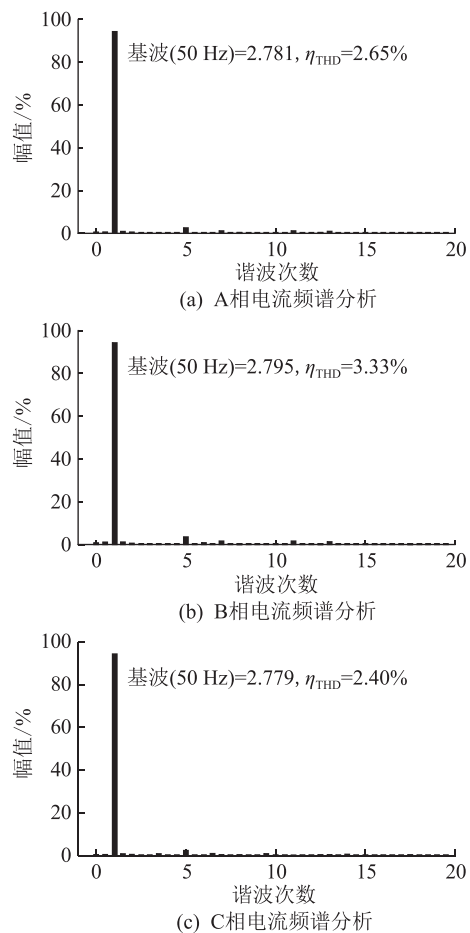


图6 输出三相电流波形及频谱分析

Fig.6 Output three phase current waveform and spectrum analysis

表2 不同气隙大小时电流谐波及仿真系统效率

Table 2 Current harmonics and simulation system efficiency with different air gap sizes

气隙/mm	A相谐波/%	B相谐波/%	C相谐波/%	系统效率/%
0	3.92	4.26	3.24	92.1
0.10	2.19	4.03	3.03	92.4
0.15	2.58	3.69	3.01	92.8
0.20	2.40	3.33	2.65	94.7
0.25	2.22	3.32	2.54	94.6
0.30	2.08	3.26	2.31	93.1
0.35	1.99	3.21	2.27	90.0
0.40	1.97	3.16	2.19	89.5

由表2可知,气隙长度在0~0.4 mm间变化时,随着气隙长度的增加,三相输出电流谐波含量变小,系统效率呈现先增加后减小的趋势,且在气隙长度为0.2 mm时,系统效率达到最大值。这是由于气隙小于0.2 mm时,变压器原副边铁芯距离过近,磁场相互干扰导致系统效率降低;当气隙长度大于0.2 mm时,纵向边端效应对气隙磁场的影响加剧,导致系统效率降低。

### 3.2 边齿优化仿真

图7为未添加隔磁材料、边齿末端添加隔磁材料、边齿中部添加隔磁材料3种情况下气隙磁场的瞬时分布图。

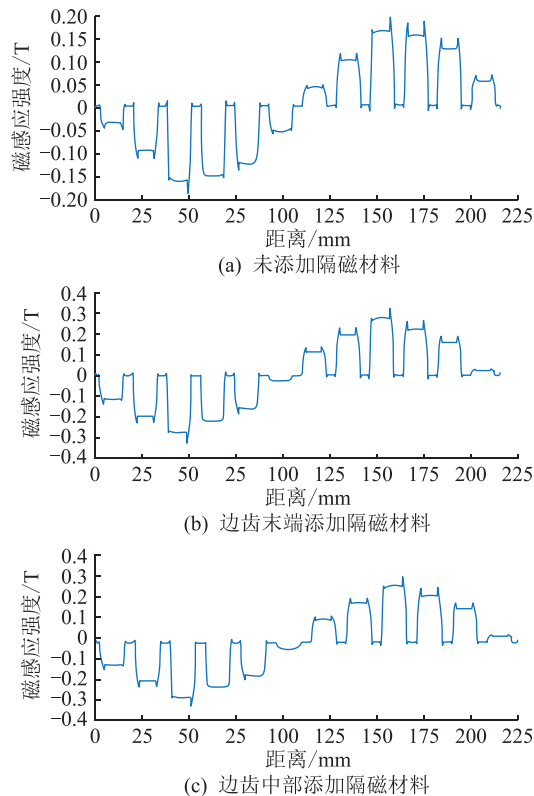


图7 采用不同优化设计的气隙磁场分布

Fig.7 Air gap magnetic field diagrams with different optimized designs

由图7可知,未添加隔磁材料时,气隙磁场波形较差,正弦化较低;边齿末端添加隔磁材料和边齿中部添加隔磁材料2种优化方案均能有效改善气隙磁场波形,使之趋近于正弦波。

保持边齿宽度6 mm,气隙长度0.2 mm不变,对额定负载工况下,使用不同优化方案时的A相谐波及变压器效率进行对比分析,结果如表3所示。

表3 额定负载时不同优化设计时测量数据

Table 3 Measured data during different optimized design at rated load %

隔磁材料	A相谐波分量	变压器效率
无	2.40	91.5
边齿末端	1.71	94.6
边齿中端	1.69	94.3

表3中效率为变压器本体效率(非系统效率),当未采用隔磁材料时,A相电流谐波含量为2.40%;在边齿末端添加隔磁材料和边齿中部添加隔磁材料2种优化方案中,A相电流的谐波含量分别为1.71%与1.69%,谐波含量明显降低。这是由于在



变压器边齿部分添加隔磁材料,使得端部漏磁通减少,有效削弱了边端效应的影响,从而改善了输出电流波形质量,较大程度上提高了变压器的效率。

#### 4 结论

文中分析了直线移相变压器工作原理,搭建了变压器有限元模型,基于磁路相似化原理,通过优化气隙长度和边齿部分来削弱边端效应的影响,提高变压器工作性能,并得出以下结论:

(1) 直线移相变压器结构简单,直线型结构导致的两类纵向边端效应对变压器的气隙磁场和工作性能造成影响。

(2) 随着有效气隙长度的增加,直线移相变压器输出电流谐波含量减小,系统效率先增加后减小。当气隙长度为 0.2 mm 时,系统效率最大。

(3) 边齿末端添加隔磁材料和边齿中部添加隔磁材料 2 种优化方案均能削弱边端效应的影响,有效改善气隙磁密,减小输出电流谐波含量。

#### 参考文献:

- [1] ABDOLLAHI R, JALILIAN A. Application of pulse doubling in delta/polygon-connected transformer-based 36-pulse ac-dc converter for power quality improvement[C]//2012 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC). Tehran, Iran. IEEE, 2012:428-434.
- [2] 孟凡刚, 满忠诚, 高蕾, 等. 基于电力电子移相变压器的 12 脉波整流技术[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18):3865-3872. MENG Fangang, MAN Zhongcheng, GAO Lei, et al. 12-pulse rectification technology based on power electronic phase-shifting transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(18):3865-3872.
- [3] 杨律, 张俊洪, 吴旭升, 等. 一种用于 24 脉波整流的圆形移相变压器[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(3):24-28. YANG LYU, ZHANG Junhong, WU Xusheng, et al. A round-shaped phase-shift transformer applied in 24-pulse rectifier[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2016, 28(3):24-28.
- [4] 王铁军, 方芳, 姜晓弋, 等. 圆形变压器在 24 脉波整流系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13):172-179. WANGTiejun, FANG Fang, JIANG Xiaoyi, et al. Application of round-shaped transformers in 24 pulses rectifier systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13):172-179.
- [5] 赵镜红, 马远征, 孙盼. 基于直线式移相变压器的多重叠加逆变系统[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12):183-188. ZHAO Jinghong, MA Yuanzheng, SUN Pan. Multi-module inverter system based on linear phase-shifting transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12):183-188.
- [6] 孙盼, 赵镜红, 熊欣, 等. 用于多脉波整流的直线式移相变压器[J]. 电工技术学报, 2017, 32(S1):169-177. SUN Pan, ZHAO Jinghong, XIONG Xin, et al. A linear-shaped phase-shift transformer applied in multi-pulse rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1):169-177.
- [7] 熊欣, 赵镜红, 丁洪兵, 等. 直线式移相变压器边端效应研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(8):110-115. XIONG Xin, ZHAO Jinghong, DING Hongbing, et al. Reducing end effect impact on linear phase-shifting transformer[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(8):110-115.
- [8] 王昊, 张之敬, 刘成颖. 永磁直线同步电机纵向端部效应补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(36):46-52. WANG Hao, ZHANG Zhijing, LIU Chengying. Compensation methods of longitudinal end effects in permanent-magnet linear synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(36):46-52.
- [9] 刘慧娟, 马杰芳, 张千, 等. 双边型长初级直线感应电机电磁推力特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(S1):268-277. LIU Huijuan, MA Jiefang, ZHANG Qian, et al. Research on electromagnetic thrust characteristic of double sided long primary linear induction motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1):268-277.
- [10] 钟添明. 机床用永磁直线电机的推力波动优化研究[J]. 机电工程技术, 2019, 48(3):118-120, 163. ZHONG Tianming. Study on optimization of force ripple of PM linear motor for machine tools[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(3):118-120, 163.
- [11] 郑宗良. 高频铁氧体材料的磁介性能调控研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016. ZHENG Zongliang. Study on magnetic and dielectric properties of high frequency ferrite materials[D]. Chengdu:University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [12] 龙遐令. 直线感应电动机的理论和电磁设计方法[M]. 北京:科学出版社, 2006. LONG Xialing. Theory and electromagnetic design method of linear induction motor[M]. Beijing:Science Press, 2006.
- [13] 陆秋瑜, 夏天, 朱誉, 等. 基于有载调压变压器线性化模型的配电网无功优化二阶锥松弛建模及仿真[J]. 智慧电力, 2019, 47(9):91-96. LU Qiuyu, XIA Tian, ZHU Yu, et al. SOCP relaxed modeling and simulation of VAR optimization in distribution networks based on linearized model of OLTC transformer[J]. Smart Power, 2019, 47(9):91-96.
- [14] 王仁, 李正绪, 杨家辉, 等. 换流变压器空载合闸励磁涌流有限元磁场仿真及受力分析[J]. 广东电力, 2020, 33(7):113-120. WANG Ren, LI Zhengxu, YANG Jiahui, et al. Converter transformer no-load inrush current based on FEM magnetic field simulation and force analysis[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(7):113-120.
- [15] 赵镜红, 许浩, 孙盼, 等. 直线式移相变压器两类纵向边端效应分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5):984-995. ZHAO Jinghong, XU Hao, SUN Pan, et al. Research on two

- kinds of longitudinal side effects of linear phase-shifting transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021,36(5):984-995.
- [16] 张梓铭,赵镜红,马远征,等. 直线式移相变压器逆变系统的不对称研究[J]. 船电技术,2020,40(1):58-61.  
ZHANG Ziming,ZHAO Jinghong,MA Yuanzheng,et al. Study on asymmetry of inverter system of linear phase shift transformer[J]. Marine Electric & Electronic Engineering,2020,40(1):58-61.
- [17] 张学斌,陈长征. 基于 ANSYS Maxwell 仿真变压器绕组振动受力分析[J]. 机械工程师,2020(9):29-30,34.  
ZHANG Xuebin,CHEN Changzheng. Electromagnetic force simulation analysis of transformer winding vibration based on ANSYS Maxwell[J]. Mechanical Engineer,2020(9):29-30,34.
- [18] 刘梦,胡钢墩,张健,等. 一种基于 ANSYS Maxwell 的变压器漏电感的计算方法研究[J]. 变压器,2020,57(7):20-25.  
LIU Meng,HU Gangdun,ZHANG Jian,et al. Research on calculation of transformer leakage inductance based on ANSYS maxwell[J]. Transformer,2020,57(7):20-25.

作者简介:



张书恒

张书恒(1997),男,硕士在读,研究方向为电力电子与电气传动(E-mail:1577785934@qq.com);

赵镜红(1975),男,博士,教授,研究方向为直线电机;

郭国强(1989),男,硕士在读,研究方向为电力电子与电气传动。

## Design and optimization for application performance of linear phase-shifting transformer

ZHANG Shuheng, ZHAO Jinghong, GUO Guoqiang, WU Mei

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The linear phase-shifting transformer has the advantages of simple structure and realize equal shifting at any angle, and it is widely used in multiple superimposed inverter systems. However, it is easy for linear phase-shifting transformer to lead an end effect, which affects the working performance of the transformer itself. First of all, on the basis of the principle of magnetic circuit similarity, it is analyzed the similarity of the iron core magnetic circuit between the linear motor and the rotating motor in this paper. Secondly, it is obtained the value of output current harmonic content and system efficiency with changing the effective air gap length. Finally, it is analyzed the influence on the leakage flux at the end of the transformer by adding a magnetic isolation material to the side teeth. The simulation results show that it effectively weakens the influence of the side effect and improves the application performance of the linear phase-shifting transformer by the reasonable selection of effective air gap length and the addition of magnetic isolation materials.

**Keywords:** linear phase-shifting transformer; side effect; air gap; side teeth; finite element simulation

(编辑 李栋)