



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114186170 A

(43) 申请公布日 2022.03.15

(21) 申请号 202111478257.4

(22) 申请日 2021.12.06

(71) 申请人 中国科学院电工研究所

地址 100190 北京市海淀区中关村北二条6号

(72) 发明人 曹国恩 王一波 曹睿

(74) 专利代理机构 北京瀚仁知识产权代理事务所(普通合伙) 11482

代理人 宋宝库 屠晓旭

(51) Int. Cl.

G06F 17/10 (2006.01)

H01F 27/24 (2006.01)

H01F 27/28 (2006.01)

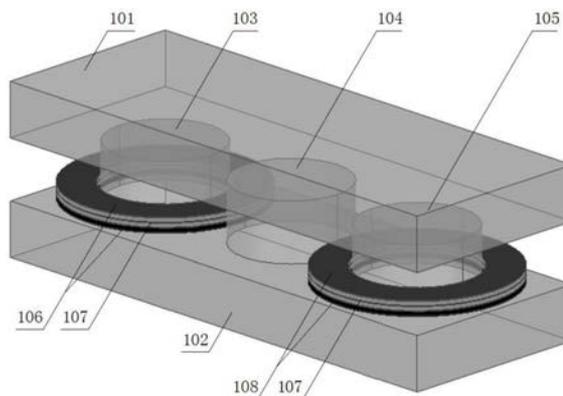
权利要求书2页 说明书10页 附图12页

(54) 发明名称

多相磁集成变压器及其励磁电感和漏感计算方法

(57) 摘要

本发明属于磁集成变压器领域,具体涉及了一种多相磁集成变压器及其励磁电感和漏感计算方法,旨在解决常规磁集成技术需要复杂的磁芯结构、体积大、成本高,且现有磁集成变压器无法对漏感进行精确设计和集成度低的问题。本发明包括:磁芯、原边绕组和多相副边绕组,第一n相副边绕组与原边绕组同向绕制在第一磁芯柱上,第二n相副边绕组与原边绕组方向绕制在第三磁芯柱上,副边绕组弧度和不大于 $(\frac{360}{N})^\circ$ ;副边绕组在一个开关周期中交替工作,形成磁芯中磁通的不平衡分布,通过调整绕组匝数和磁芯气隙的大小,实现对漏感和励磁电感的精确控制。本发明结构简单、体积小、成本低、绕组匝比可灵活调节,特别适合应用于对功率密度要求较高的多相高频变换器中。



1. 一种多相磁集成变压器,其特征在于,该多相磁集成变压器包括磁芯、原边绕组和多相副边绕组;

所述磁芯包括上磁芯盖、下磁芯盖以及所述上磁芯盖和所述下磁芯盖之间的第一磁芯柱、第二磁芯柱和第三磁芯边柱,所述第一磁芯柱、第二磁芯柱和第三磁芯柱与所述上磁芯盖、下磁芯盖组成闭合磁通回路;

所述多相副边绕组数量为 $2N$ 个,包括第一 $n$ 相副边绕组和第二 $n$ 相副边绕组,其中, $1 \leq n \leq N$ ;

所述多相副边绕组分别接入多相电路的副边输出的一相支路;

其中,所述多相磁集成变压器,其励磁电感和副边谐振电感通过原边绕组与副边绕组的匝比以及第一磁芯柱、第二磁芯柱和第三磁芯柱的气隙大小调整。

2. 根据权利要求1所述的多相磁集成变压器,其特征在于,所述第二磁芯柱为所述第一磁芯柱和所述第三磁芯柱中间的磁芯柱或者所述第一磁芯柱和所述第三磁芯柱两边的两个磁芯边柱。

3. 根据权利要求1或2所述的多相磁集成变压器,其特征在于,所述原边绕组分别绕制在所述第一磁芯柱和所述第三磁芯柱上,所述第一磁芯柱上绕制的原边绕组的匝数与所述第三磁芯柱上绕制的原边绕组的匝数相同。

4. 根据权利要求3所述的多相磁集成变压器,其特征在于,所述第一 $n$ 相副边绕组绕制在所述第一磁芯柱上,且所述第一 $n$ 相副边绕组与绕制在所述第一磁芯柱上的原边绕组的绕制方向一致;所述第二 $n$ 相副边绕组绕制在所述第三磁芯柱上,且第二 $n$ 相副边绕组与绕制在所述第三磁芯柱上的原边绕组的绕制方向相反;

所述第一 $n$ 相副边绕组与所述第二 $n$ 相副边绕组以所述第二磁芯柱或所述第一磁芯柱与所述第三磁芯柱的中心线呈镜像对称排布。

5. 根据权利要求4所述的多相磁集成变压器,其特征在于,所述多相磁集成变压器为平板变压器,所述第一 $n$ 相副边绕组和所述第二 $n$ 相副边绕组分布在PCB电路板的顶层或低层,所述原边绕组分布在PCB电路板的中间层,各相绕组为环绕对应磁芯柱的弧形,各弧形绕组的弧度受变压器的变比约束,各绕组的弧度之和不大于 $\left(\frac{360}{N}\right)^\circ$ 。

6. 根据权利要求5所述的多相磁集成变压器,其特征在于,所述第一 $n$ 相副边绕组与所述第二 $n$ 相副边绕组中具有相同弧度的绕组中的电流大小相同、相位相差 $180^\circ$ 。

7. 根据权利要求1所述的多相磁集成变压器,其特征在于,在所述多相磁集成变压器的开关周期中,电路导通关系为:

在所述开关周期的正半周,所述第一 $n$ 相副边绕组及相应的整流电路导通,所述第二 $n$ 相副边绕组及各相应的整流电路不导通;

在所述开关周期的负半周,所述第二 $n$ 相副边绕组及相应的整流电路导通,所述第一 $n$ 相副边绕组及各相应的整流电路不导通;

所述第一 $n$ 相副边绕组和所述第二 $n$ 相副边绕组在所述多相磁集成变压器的开关周期中交替工作,所述多相磁集成变压器的磁芯中磁通不平衡分布,原边绕组产生的磁通不完全耦合到副边,形成大于设定阈值的副边漏感。

8. 一种多相磁集成变压器的励磁电感和漏感计算方法,其特征在于,基于权利要求1-7

任一项所述的多相磁集成变压器,该方法包括:

步骤S10,根据所述多相磁集成变压器的匝比要求 $n$ 设置原边绕组在第一磁芯柱和第三磁芯柱上绕制的匝数为 $N_1$ ,多相副边绕组的每相的绕制匝数为 $N_2$ ;

步骤S20,将第一磁芯柱、第三磁芯柱的气隙磁阻记作 $R_1$ ,将第二磁芯柱的气隙磁阻记作 $R_2$ ;

步骤S30,根据多相磁集成变压器的电感与电流、电压的关系,获取励磁电感 $L_m$ 、原边漏感 $L_{rp}$ 和副边漏感 $L_{rs}$ 与气隙磁阻 $R_1$ 、气隙磁阻 $R_2$ 、原边绕组的匝数 $N_1$ 和副边绕组的匝数 $N_2$ 的第一调整关系;

步骤S40,基于励磁电感 $L_m$ 和副边漏感 $L_{rs}$ ,计算励磁电感和等效谐振电感的比值 $L_n$ ;

$$L_n = \frac{L_m}{n^2 L_{rs}} = \frac{N_2 R_1}{N_2 R_2 + (2N_2 - 2N_1) R_1};$$

步骤S50,获取第一磁芯柱、第三磁芯柱的截面积 $S_1$ ,第二磁芯柱的截面积 $S_2$ ,计算第一磁芯柱和第三磁芯柱的气隙大小 $l_{g1}$ 以及第二磁芯柱的气隙大小 $l_{g2}$ 与比值 $L_n$ 、原边绕组的匝数 $N_1$ 、励磁电感 $L_m$ 的第二调整关系;

步骤S60,基于所述第一调整关系和所述第二调整关系,进行所述多相磁集成变压器的励磁电感和漏感计算。

9.根据权利要求8所述的多相磁集成变压器的励磁电感和漏感计算方法,其特征在于,所述第一调整关系,其表示为:

$$\begin{cases} L_m = \frac{2N_1^2}{R_1 + 2R_2} \\ L_{rp} = 0 \\ L_{rs} = \frac{N_1^2 N_2^2}{2R_1} + \frac{N_1 N_2 (N_1 N_2 - 2N_1)}{2R_1 + 4R_2} \end{cases}。$$

10.根据权利要求8所述的多相磁集成变压器的励磁电感和漏感计算方法,其特征在于,所述第二调整关系,其表示为:

$$\begin{cases} l_{g1} = \frac{2N_1^2 S_1}{L_m} \\ l_{g2} = \frac{2N_1^2 (L_n - 1) S_2}{2L_m} \end{cases}。$$

## 多相磁集成变压器及其励磁电感和漏感计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于磁集成变压器领域,具体涉及了一种多相磁集成变压器及其励磁电感和漏感计算方法。

### 背景技术

[0002] 随着电力电子技术的快速发展,直流变换器在电动汽车、服务器电源、通信电源、柔性直流配电网、航空航天电源系统中得到越来越广泛的应用。高效率、高功率密度一直是直流变换器所追求的目标,且仍是今后的发展方向。磁集成技术是近年来广受关注的电力电子技术,其将多个分立的电感、变压器等在结构上集成在一个磁芯上,可以减小磁性器件的体积和重量,并提高变换器的效率,受到工业界和学术界的广泛关注。

[0003] 多相变换器因具有电流应力低、滤波器体积小等优点,在大功率场合具有较大的应用潜力。通过采用磁集成技术,可将传统多相变换器中的多个分立单相变压器进行集成,解决常规多相变换器中存在的体积大、功率密度低等问题。然而,常规的磁集成技术多是用于实现电感、变压器在结构上的集成,各自的设计仍相对独立,很少考虑两者在功能上的耦合集成,这也限制了变换器功率密度的进一步提升,且多个变压器之间的解耦设计等问题愈加突出,成为多相变压器高效磁集成亟待解决的问题。

[0004] 此外,常规的磁集成技术是将多个变压器在磁芯结构上进行集成,单相变压器在设计中存在的漏感无法精确设计等问题,在常规多相磁集成变压器设计中仍然存在。这极大的限制了多相变换器性能的提高,尤其对于采用变压器漏感作为谐振电感的多相谐振变换器,多相磁集成变压器成为其优化设计的关键技术之一。

[0005] 因此,如何实现电感、变压器在结构和功能上高度集成的同时,对多个电感参数进行精确设计,是目前提高变换器功率密度的关键问题之一。

### 发明内容

[0006] 为了解决现有技术中的上述问题,即常规磁集成技术需要复杂的磁芯结构、体积大、成本高,且现有磁集成变压器无法对漏感进行精确设计和集成度低的问题,本发明提供了一种多相磁集成变压器,该多相磁集成变压器包括磁芯、原边绕组和多相副边绕组;

[0007] 所述磁芯包括上磁芯盖、下磁芯盖以及所述上磁芯盖和所述下磁芯盖之间的第一磁芯柱、第二磁芯柱和第三磁芯柱,所述第一磁芯柱、第二磁芯柱和第三磁芯柱与所述上磁芯盖、下磁芯盖组成闭合磁通回路;

[0008] 所述多相副边绕组数量为 $2N$ 个,包括第一 $n$ 相副边绕组和第二 $n$ 相副边绕组,其中, $1 \leq n \leq N$ ;

[0009] 所述多相副边绕组分别接入多相电路的副边输出的一相支路;

[0010] 其中,所述多相磁集成变压器,其励磁电感和副边谐振电感通过原边绕组与副边绕组的匝比以及第一磁芯柱、第二磁芯柱和第三磁芯柱的气隙大小调整。

[0011] 在一些优选的实施例中,所述第二磁芯柱为所述第一磁芯柱和所述第三磁芯柱中

间的磁芯柱或者所述第一磁芯柱和所述第三磁芯柱两边的两个磁芯边柱。

[0012] 在一些优选的实施例中,所述原边绕组分别绕制在所述第一磁芯柱和所述第三磁芯柱上,所述第一磁芯柱上绕制的原边绕组的匝数与所述第三磁芯柱上绕制的原边绕组的匝数相同。

[0013] 在一些优选的实施例中,所述第一n相副边绕组绕制在所述第一磁芯柱上,且所述第一n相副边绕组与绕制在所述第一磁芯柱上的原边绕组的绕制方向一致;所述第二n相副边绕组绕制在所述第三磁芯柱上,且第二n相副边绕组与绕制在所述第三磁芯柱上的原边绕组的绕制方向相反;

[0014] 所述第一n相副边绕组与所述第二n相副边绕组以所述第二磁芯柱或所述第一磁芯柱与所述第三磁芯柱的中心线呈镜像对称排布。

[0015] 在一些优选的实施例中,所述第一n相副边绕组和所述第二n相副边绕组分布在PCB电路板的顶层或低层,所述原边绕组分布在PCB电路板的中间层,各相绕组为环绕对应磁芯柱的弧形,各弧形绕组的弧度受变压器的变比约束,各绕组的弧度之和不大于 $\left(\frac{360}{N}\right)^\circ$ 。

[0016] 在一些优选的实施例中,所述第一n相副边绕组与所述第二n相副边绕组中具有相同弧度的绕组中的电流大小相同、相位相差 $180^\circ$ 。

[0017] 在一些优选的实施例中,在所述多相磁集成变压器的开关周期中,电路导通关系为:

[0018] 在所述开关周期的正半周,所述第一n相副边绕组及相应的整流电路导通,所述第二n相副边绕组及各相应的整流电路不导通;

[0019] 在所述开关周期的负半周,所述第二n相副边绕组及相应的整流电路导通,所述第一n相副边绕组及各相应的整流电路不导通;

[0020] 所述第一n相副边绕组和所述第二n相副边绕组在所述多相磁集成变压器的开关周期中交替工作,所述多相磁集成变压器的磁芯中磁通不平衡分布,原边绕组产生的磁通不完全耦合到副边,形成大于设定阈值的副边漏感。

[0021] 本发明的另一方面,提供了一种多相磁集成变压器的励磁电感和漏感计算方法,基于上述的多相磁集成变压器,该方法包括:

[0022] 步骤S10,根据所述多相磁集成变压器的匝比要求n设置原边绕组在第一磁芯柱和第三磁芯柱上绕制的匝数为 $N_1$ ,多相副边绕组的每相的绕制匝数为 $N_2$ ;

[0023] 步骤S20,将第一磁芯柱、第三磁芯柱的气隙磁阻记作 $R_1$ ,将第二磁芯柱的气隙磁阻记作 $R_2$ ;

[0024] 步骤S30,根据多相磁集成变压器的电感与电流、电压的关系,获取励磁电感 $L_m$ 、原边漏感 $L_{rp}$ 和副边漏感 $L_{rs}$ 与气隙磁阻 $R_1$ 、气隙磁阻 $R_2$ 、原边绕组的匝数 $N_1$ 和副边绕组的匝数 $N_2$ 的第一调整关系;

[0025] 步骤S40,基于励磁电感 $L_m$ 和副边漏感 $L_{rs}$ ,计算励磁电感和等效谐振电感的比值 $L_n$ ;

$$L_n = \frac{L_m}{n^2 L_{rs}} = \frac{N_2 R_1}{N_2 R_2 + (2N_2 - 2N_1) R_1};$$

[0026] 步骤S50,获取第一磁芯柱、第三磁芯柱的截面积 $S_1$ ,第二磁芯柱的截面积 $S_2$ ,计算第一磁芯柱和第三磁芯柱的气隙大小 $l_{g1}$ 以及第二磁芯柱的气隙大小 $l_{g2}$ 与比值 $L_n$ 、原边绕组的匝数 $N_1$ 、励磁电感 $L_m$ 的第二调整关系;

[0027] 步骤S60,基于所述第一调整关系和所述第二调整关系,进行所述多相磁集成变压器的励磁电感和漏感计算。

[0028] 在一些优选的实施例中,所述第一调整关系,其表示为:

$$\begin{cases} L_m = \frac{2N_1^2}{R_1 + 2R_2} \\ L_{rp} = 0 \\ L_{rs} = \frac{N^2 N_2^2}{2R_1} + \frac{NN_2(NN_2 - 2N_1)}{2R_1 + 4R_2} \end{cases}。$$

[0029] 在一些优选的实施例中,所述第二调整关系,其表示为:

$$\begin{cases} l_{g1} = \frac{2N_1^2 S_1}{L_m} \\ l_{g2} = \frac{2N_1^2 (L_n - 1) S_2}{2L_m} \end{cases}。$$

[0030] 本发明的有益效果:

[0031] (1) 本发明多相磁集成变压器,磁芯和绕组结构简单,磁芯仅具有三个磁芯柱(可以是三个磁芯柱,也可以采用两个磁芯边柱替代中间的一个磁芯柱)即可实现多相变压器和电感的高度磁集成,具有结构简单、体积小、重量轻等优点;同时,绕组匝比可灵活调节,多相整流电路输出侧可连接到一个或多个公共输出端,构成单端口或多端口输出。

[0032] (2) 本发明多相磁集成变压器,采用平板变压器结构,绕组采用简单的四层PCB即可实现,其中,单层PCB围绕一个磁芯柱即可实现N相绕组的集成,参数一致性好、损耗低、成本低。

[0033] (3) 本发明多相磁集成变压器,通过在一个开关周期内在磁芯中产生不均衡的磁通分布实现对漏感的精确控制,调整绕组匝数、磁芯气隙可实现励磁电感和漏感的精确设计,解决了常规多相磁集成变压器中漏感无法精确设计的难题。

## 附图说明

[0034] 通过阅读参照以下附图所作的对非限制性实施例所作的详细描述,本申请的其它特征、目的和优点将会变得更明显:

[0035] 图1是本发明多相磁集成变压器的结构示意图;

[0036] 图2是本发明多相磁集成变压器一种实施例的侧剖视图;

[0037] 图3是本发明多相磁集成变压器一种实施例的两相磁集成变压器及电路原理图;

[0038] 图4是本发明多相磁集成变压器一种实施例的四相磁集成变压器及电路原理图;

[0039] 图5是本发明多相磁集成变压器一种实施例的六相磁集成变压器及电路原理图;

[0040] 图6是本发明多相磁集成变压器一种实施例的八相磁集成变压器及电路原理图;

- [0041] 图7是本发明多相磁集成变压器一种实施例的十相磁集成变压器及电路原理图；
- [0042] 图8是本发明多相磁集成变压器一种实施例的十二相磁集成变压器及电路原理图；
- [0043] 图9是本发明多相磁集成变压器一种实施例的匝比为1:0.167的六相磁集成变压器及电路原理图；
- [0044] 图10是本发明多相磁集成变压器一种实施例的匝比为1:0.167和1:0.33的六相磁集成变压器及电路原理图；
- [0045] 图11是本发明多相磁集成变压器一种实施例的匝比为1:1的四相磁集成变压器及电路原理图；
- [0046] 图12是本发明多相磁集成变压器的等效磁路图；
- [0047] 图13是本发明多相磁集成变压器的开关周期的正半周的等效磁路图；
- [0048] 图14是本发明多相磁集成变压器的开关周期的负半周的等效磁路图。

### 具体实施方式

[0049] 下面结合附图和实施例对本申请作进一步的详细说明。可以理解的是,此处所描述的具体实施例仅用于解释相关发明,而非对该发明的限定。另外还需要说明的是,为了便于描述,附图中仅示出了与有关发明相关的部分。

[0050] 需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。下面将参考附图并结合实施例来详细说明本申请。

[0051] 本发明的一种多相磁集成变压器,该多相磁集成变压器包括磁芯、原边绕组和多相副边绕组；

[0052] 所述磁芯包括上磁芯盖、下磁芯盖以及所述上磁芯盖和所述下磁芯盖之间的第一磁芯柱、第二磁芯柱和第三磁芯柱,所述第一磁芯柱、第二磁芯柱和第三磁芯柱与所述上磁芯盖、下磁芯盖组成闭合磁通回路；

[0053] 所述多相副边绕组数量为 $2N$ 个,包括第一 $n$ 相副边绕组和第二 $n$ 相副边绕组,其中, $1 \leq n \leq N$ ；

[0054] 所述多相副边绕组分别接入多相电路的副边输出的一相支路；

[0055] 其中,所述多相磁集成变压器,其励磁电感和副边谐振电感通过原边绕组与副边绕组的匝比以及第一磁芯柱、第二磁芯柱和第三磁芯柱的气隙大小调整。

[0056] 为了更清晰地对本发明多相磁集成变压器进行说明,下面结合图1对本发明实施例中各模块展开详述。

[0057] 本发明第一实施例的多相磁集成变压器,包括磁芯、原边绕组106和多相副边绕组,各模块详细描述如下：

[0058] 磁芯包括上磁芯盖101、下磁芯盖102以及上磁芯盖和下磁芯盖之间的第一磁芯柱103、第二磁芯柱104和第三磁芯柱105,第一磁芯柱103、第二磁芯柱104和第三磁芯柱105与上磁芯盖101、下磁芯盖102组成闭合磁通回路。

[0059] 第二磁芯柱104可以是设置在第一磁芯柱103和第三磁芯柱105中间的磁芯柱,也可以以第一磁芯柱103和第三磁芯柱105两边的磁芯边柱替代第二磁芯柱104。

[0060] 原边绕组107分别绕制在第一磁芯柱103和第三磁芯柱105上,其在第一磁芯柱103

和第三磁芯柱105上绕制的匝数相同。

[0061] 多相副边绕组数量为 $2N$ 个,包括第一 $n$ 相副边绕组106和第二 $n$ 相副边绕组108,其中, $1 \leq n \leq N$ 。

[0062] 第一 $n$ 相副边绕组106绕制在第一磁芯柱103上,且第一 $n$ 相副边绕组106与绕制在第一磁芯柱103上的原边绕组107的绕制方向一致,第二 $n$ 相副边绕组108绕制在第三磁芯柱105上,且第二 $n$ 相副边绕组108与绕制在第三磁芯柱105上的原边绕组107的绕制方向相反。

[0063] 当第二磁芯柱104存在时,第一 $n$ 相副边绕组106与第二 $n$ 相副边绕组108以第二磁芯柱104呈镜像对称排布;当采用磁芯边柱替代第二磁芯柱104时,第一 $n$ 相副边绕组106与第二 $n$ 相副边绕组108以第一磁芯柱103与第三磁芯柱105的中心线呈镜像对称排布。

[0064] 如图2所示,为本发明多相磁集成变压器一种实施例的侧剖视图,多相磁集成变压器为平板变压器,第一 $n$ 相副边绕组106和第二 $n$ 相副边绕组108分布在PCB电路板的顶层或底层(附图中201、203、204、205所示的地方),原边绕组107分布在PCB电路板的中间层(附图中202所示的地方),各相绕组为环绕对应磁芯柱的弧形,各弧形绕组的弧度受变压器的变比约束(即各弧形绕组的弧度由变压器的变比决定),各绕组的弧度之和不大于 $\left(\frac{360}{N}\right)^\circ$ 。

[0065] 第一 $n$ 相副边绕组106与第二 $n$ 相副边绕组108中具有相同弧度的绕组中的电流大小相同、相位相差 $180^\circ$ 。

[0066] 多相副边绕组分别接入多相电路的副边输出的一相支路(整流电路),整流电路输出侧连接到一个或多个公共输出端,构成单端口或多端口输出电路。

[0067] 多相磁集成变压器的励磁电感和副边谐振电感通过原边绕组107与副边绕组106、108的匝比和第一磁芯柱103、第二磁芯柱104和第三磁芯柱105的气隙大小调整。

[0068] 在多相磁集成变压器的开关周期中,电路导通关系为:

[0069] 在开关周期的正半周,第一 $n$ 相副边绕组106及相应的整流电路导通,第二 $n$ 相副边绕组108及各相应的整流电路不导通;

[0070] 在开关周期的负半周,第二 $n$ 相副边绕组108及相应的整流电路导通,第一 $n$ 相副边绕组106及各相应的整流电路不导通;

[0071] 第一 $n$ 相副边绕组106和第二 $n$ 相副边绕组108在多相磁集成变压器的开关周期中交替工作,多相磁集成变压器的磁芯中磁通不平衡分布,原边绕组107产生的磁通不完全耦合到副边,形成大于设定阈值的副边漏感(较大的漏感),即为后续作为谐振电路中替代谐振电感的漏感。

[0072] 图3~图8为本发明在副边不同相数情况下的磁集成变压器电路原理图与结构图,为简化分析,将原边绕组在第一磁芯柱和第三磁芯柱上的匝数均设为1匝。

[0073] 如图3所示,为本发明多相磁集成变压器一种实施例的两相磁集成变压器及电路原理图,上半部分为两相磁集成变压器的电路原理图,下半部分为两相副边绕组在磁芯中的绕线结构图,其中左侧为第一相副边绕组,右侧为第二相副边绕组,第一相副边绕组和第二相副边绕组均分布在PCB的顶层,且匝数均为1匝,则变压器每相的匝比为1:1。实际工作中,在开关周期的正半周,第一相副边绕组与SR1开通,在开关周期的负半周,第二相副边绕组与SR2开通。第一相副边绕组与第二相副边绕组在一个开关周期中电流大小相同、相位相差 $180^\circ$ 。

[0074] 如图4所示,为本发明多相磁集成变压器一种实施例的四相磁集成变压器及电路原理图,上半部分为四相磁集成变压器的电路原理图,下半部分为四相副边绕组在磁芯中的绕线结构图,第一2相副边绕组和第二2相副边绕组均分布在PCB的顶层,且匝数均为0.5匝,则变压器每相的匝比为1:0.5。实际工作中,在开关周期的正半周,第一2相副边绕组与SR1、SR2开通,在开关周期的负半周,第二2相副边绕组与SR3、SR4开通。第一2相副边绕组与第二2相副边绕组在一个开关周期中电流大小相同、相位相差180度。

[0075] 如图5所示,为本发明多相磁集成变压器一种实施例的六相磁集成变压器及电路原理图,上半部分为六相磁集成变压器的电路原理图,下半部分为六相副边绕组在磁芯中的绕线结构图,第一3相副边绕组和第二3相副边绕组均分布在PCB的顶层,且匝数均为0.33匝,则变压器每相的匝比为1:0.33。实际工作中,在开关周期的正半周,第一3相副边绕组与SR1~SR3开通,在开关周期的负半周,第二3相副边绕组与SR4~SR6开通。第一3相副边绕组与第二3相副边绕组在一个开关周期中电流大小相同、相位相差180度。

[0076] 如图6所示,本发明多相磁集成变压器一种实施例的八相磁集成变压器及电路原理图,上半部分为八相磁集成变压器的电路原理图,下半部分为八相副边绕组在磁芯中的绕线结构图,第一4相副边绕组和第二4相副边绕组均分布在PCB的顶层,且匝数均为0.25匝,则变压器每相的匝比为1:0.25。实际工作中,在开关周期的正半周,第一4相副边绕组与SR1~SR4开通,在开关周期的负半周,第二4相副边绕组与SR5~SR8开通。第一4相副边绕组与第二4相副边绕组在一个开关周期中电流大小相同、相位相差180度。

[0077] 如图7所示,为本发明多相磁集成变压器一种实施例的十相磁集成变压器及电路原理图,上半部分为十相磁集成变压器的电路原理图,下半部分为十相副边绕组在磁芯中的绕线结构图,第一5相副边绕组和第二5相副边绕组均分布在PCB的顶层,且匝数均为0.2匝,则变压器每相的匝比为1:0.2。实际工作中,在开关周期的正半周,第一5相副边绕组与SR1~SR5开通,在开关周期的负半周,第二5相副边绕组与SR6~SR10开通。第一5相副边绕组与第二5相副边绕组在一个开关周期中电流大小相同、相位相差180度。

[0078] 如图8所示,为本发明多相磁集成变压器一种实施例的十二相磁集成变压器及电路原理图,上半部分为十二相磁集成变压器的电路原理图,下半部分为十二相副边绕组在磁芯中的绕线结构图,第一6相副边绕组和第二6相副边绕组均分布在PCB的顶层,且匝数均为0.167匝,则变压器每相的匝比为1:0.167。实际工作中,在开关周期的正半周,第一6相副边绕组与SR1~SR6开通,在开关周期的负半周,第二6相副边绕组与SR7~SR12开通。第一6相副边绕组与第二6相副边绕组在一个开关周期中电流大小相同、相位相差180度。

[0079] 以上实施例中,多相副边绕组弧度之和均为360度,实际应用中,根据原副边匝比不同,可灵活调整各相副边绕组的弧度。

[0080] 更多相的磁集成变压器的原理图和绕组结构也可以参照上述实施例进行类推,本发明在此不再一一详述。

[0081] 如图9所示,为本发明多相磁集成变压器一种实施例的匝比为1:0.167的六相磁集成变压器及电路原理图,上半部分为六相磁集成变压器的电路原理图,下半部分为六相副边绕组在磁芯中的绕线结构图,第一3相副边绕组和第二3相副边绕组均分布在PCB的顶层,且匝数均为0.167匝,则变压器每相的匝比为1:0.167。实际工作中,在开关周期的正半周,第一3相副边绕组与SR1~SR3开通,在开关周期的负半周,第二3相副边绕组与SR4~SR6

开通。第一3相副边绕组与第二3相副边绕组在一个开关周期中电流大小相同、相位相差180度。

[0082] 如图10所示,为本发明多相磁集成变压器一种实施例的匝比为1:0.167和1:0.33的六相磁集成变压器及电路原理图,根据具体应用进行多相副边绕组每相弧度的灵活调整,上半部分为六相相磁集成变压器的电路原理图,下半部分为六相副边绕组在磁芯中的绕线结构图,第一2相副边绕组和第二2相副边绕组均分布在PCB的顶层,其中,2相副边绕组匝数分别为0.33匝和0.167匝,则相应的变压器变比为1:0.33和1:0.167,因此2相副边绕组经过整流电路后可输出两种不同的电压,可应用于多端口变换器中。实际工作中,在开关周期的正半周,第一2相副边绕组与SR1、SR2开通,在开关周期的负半周,第二2相副边绕组与SR3、SR4开通。第一2相副边绕组与第二2相副边绕组在一个开关周期中电流大小相同、相位相差180度。

[0083] 此外,在PCB电路板的顶层或底层放置分别与第一N相副边绕组、第二N相副边绕组对称的第三N相副边绕组、第四N相副边绕组以及相对应的整流电路,使副边多相电路数量达到4N,可以提高电路的功率容量和功率密度,其中位于第一磁芯柱上的第一N相副边绕组、第三N相副边绕组工作模式相同,位于第三磁芯柱上的第二N相副边绕组、第四N相副边绕组工作模式相同。

[0084] 如图11所示,为本发明多相磁集成变压器一种实施例的匝比为1:1的四相磁集成变压器及电路原理图,上半部分为四相相磁集成变压器的电路原理图,下半部分为四相副边绕组在磁芯中的绕线结构图,第一相副边绕组和第二相副边绕组均分布在PCB的顶层,第三相副边绕组和第四相副边绕组均分布在PCB的底层,且匝数均为1匝,则变压器每相的匝比为1:1。可见,采用相同的绕组结构,通过在PCB底层增加第三相副边绕组和第四相副边绕组,使得图11所示的四相磁集成变压器的副边绕组相数达到图4所示的四相磁集成变压器的2倍。实际工作中,在开关周期的正半周,第一相副边绕组、第三相副边绕组与SR1、SR2开通,在开关周期的负半周,第二相副边绕组、第四相副边绕组与SR3、SR4开通。第一相副边绕组、第三相副边绕组与第二相副边绕组、第四相副边绕组在一个开关周期中电流大小相同、相位相差180度。

[0085] 本发明第二实施例的多相磁集成变压器的励磁电感和漏感计算方法,基于上述的多相磁集成变压器,该方法包括:

[0086] 步骤S10,根据所述多相磁集成变压器的匝比要求 $n$ 设置原边绕组在第一磁芯柱和第三磁芯柱上绕制的匝数为 $N_1$ ,多相副边绕组的每相的绕制匝数为 $N_2$ 。

[0087] 步骤S20,将第一磁芯柱、第三磁芯柱的气隙磁阻记作 $R_1$ ,将第二磁芯柱的气隙磁阻记作 $R_2$ 。

[0088] 如图12所示,为本发明多相磁集成变压器的等效磁路图,忽略磁芯磁阻,同时假设空气中的漏磁通很小且可忽略,并且为了简化分析,将多相副边绕组的弧度设为相同。第一磁芯柱103、第三磁芯柱105上的气隙相同,其等效磁阻为 $R_1$ ,第二磁芯柱104和第一磁芯柱103、第三磁芯柱105的气隙不同,其等效磁阻为 $R_2$ 。多相磁集成变压器原边电流为 $I_p$ 、副边电流为 $I_s$ 。第一磁芯柱103上的原边绕组电压为 $V_{p1}$ ,第二磁芯柱104上的原边绕组电压为 $V_{p2}$ ,第三磁芯柱105上的原边绕组电压为 $V_{p3}$ 。第一磁芯柱103上的磁通为 $\Phi_a$ ,第二磁芯柱104上的磁通为 $\Phi_b$ ,第三磁芯柱105的磁通为 $\Phi_c$ 。

[0089] 如图13和图14所示,分别为本发明多相磁集成变压器的开关周期的正半周和负半周的等效磁路图,以正半周为例,此时第一n相副边绕组106及各自连接的整流电路导通,磁芯中的各磁通如式(1)所示:

$$\begin{cases} \Phi_a = \frac{N_1}{R_1 + 2R_2} I_p - \frac{NN_2(R_2 + R_1)}{R_1^2 + 2R_1R_2} I_s \\ \Phi_b = -\frac{NN_2}{R_1 + 2R_2} I_s \\ \Phi_c = \frac{-N_1}{R_1 + 2R_2} I_p + \frac{-NN_2R_2}{R_1^2 + 2R_1R_2} I_s \end{cases} \quad (1)$$

[0090] 根据法拉第公式,设多相磁集成变压器原边绕组106电压为 $V_p$ ,一相副边绕组的电压为 $V_s$ ,多相副边绕组的总电压为 $V_{ds}$ ,则 $V_p$ 和 $V_{ds}$ 如式(2)所示:

$$\begin{cases} V_p = V_{p1} + V_{p2} + V_{p3} \\ V_{ds} = NV_s \end{cases} \quad (2)$$

[0091] 磁集成变压器的匝数比如式(3)所示:

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{2N_1}{N_2} \quad (3)$$

[0092] 步骤S30,根据多相磁集成变压器的电感与电流、电压的关系,获取励磁电感 $L_m$ 、原边漏感 $L_{rp}$ 和副边漏感 $L_{rs}$ 与气隙磁阻 $R_1$ 、气隙磁阻 $R_2$ 、原边绕组的匝数 $N_1$ 和副边绕组的匝数 $N_2$ 的第一调整关系,如式(4)所示:

$$\begin{cases} L_m = \frac{2N_1^2}{R_1 + 2R_2} \\ L_{rp} = 0 \\ L_{rs} = \frac{N^2N_2^2}{2R_1} + \frac{NN_2(NN_2 - 2N_1)}{2R_1 + 4R_2} \end{cases} \quad (4)$$

[0093] 步骤S40,基于励磁电感 $L_m$ 和副边漏感 $L_{rs}$ ,计算励磁电感和等效谐振电感的比值 $L_n$ ,如式(5)所示:

$$L_n = \frac{L_m}{n^2L_{rs}} = \frac{N_2R_1}{N_2R_2 + (2N_2 - 2N_1)R_1} \quad (5)$$

[0094] 步骤S50,获取第一磁芯柱、第三磁芯柱的截面积 $S_1$ ,第二磁芯柱的截面积 $S_2$ ,计算第一磁芯柱和第三磁芯柱的气隙大小 $l_{g1}$ 以及第二磁芯柱的气隙大小 $l_{g2}$ 与比值 $L_n$ 、原边绕组的匝数 $N_1$ 、励磁电感 $L_m$ 的第二调整关系,如式(6)所示:

$$\begin{cases} l_{g1} = \frac{2N_1^2S_1}{L_m} \\ l_{g2} = \frac{2N_1^2(L_n - 1)S_2}{2L_m} \end{cases} \quad (6)$$

[0095] 步骤S60,基于所述第一调整关系和所述第二调整关系,进行所述多相磁集成变压器的励磁电感和漏感计算。

[0096] 由上面的公式可知,励磁电感 $L_m$ 、副边谐振电感(即副边漏感 $L_{rs}$ )可以通过调整匝数 $N_1$ 、 $N_2$ 和气隙 $l_{g1}$ 、 $l_{g2}$ 来进行精确计算并设置。

[0097] 所属技术领域的技术人员可以清楚地了解到,为描述的方便和简洁,上述描述的方法的具体工作过程及有关说明,可以参考前述系统实施例中的对应过程,在此不再赘述。

[0098] 需要说明的是,上述实施例提供的多相磁集成变压器及其励磁电感和漏感计算方法,仅以上述各功能模块的划分进行举例说明,在实际应用中,可以根据需要而将上述功能分配由不同的功能模块来完成,即将本发明实施例中的模块或者步骤再分解或者组合,例如,上述实施例的模块可以合并为一个模块,也可以进一步拆分成多个子模块,以完成以上描述的全部或者部分功能。对于本发明实施例中涉及的模块、步骤的名称,仅仅是为了区分各个模块或者步骤,不视为对本发明的不当限定。

[0099] 本发明第三实施例的一种设备,包括:

[0100] 至少一个处理器;以及

[0101] 与至少一个所述处理器通信连接的存储器;其中,

[0102] 所述存储器存储有可被所述处理器执行的指令,所述指令用于被所述处理器执行以实现上述的多相磁集成变压器的励磁电感和漏感计算方法。

[0103] 本发明第四实施例的一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机指令,所述计算机指令用于被所述计算机执行以实现上述的多相磁集成变压器的励磁电感和漏感计算方法。

[0104] 所属技术领域的技术人员可以清楚地了解到,为描述的方便和简洁,上述描述的存储装置、处理装置的具体工作过程及有关说明,可以参考前述方法实施例中的对应过程,在此不再赘述。

[0105] 本领域技术人员应该能够意识到,结合本文中所公开的实施例描述的各示例的模块、方法步骤,能够以电子硬件、计算机软件或者二者的结合来实现,软件模块、方法步骤对应的程序可以置于随机存储器(RAM)、内存、只读存储器(ROM)、电可编程ROM、电可擦除可编程ROM、寄存器、硬盘、可移动磁盘、CD-ROM、或技术领域内所公知的任意其它形式的存储介质中。为了清楚地说明电子硬件和软件的可互换性,在上述说明中已经按照功能一般性地描述了各示例的组成及步骤。这些功能究竟以电子硬件还是软件方式来执行,取决于技术方案的特定应用和设计约束条件。本领域技术人员可以对每个特定的应用来使用不同方法来实现所描述的功能,但是这种实现不应认为超出本发明的范围。

[0106] 术语“第一”、“第二”等是用于区别类似的对象,而不是用于描述或表示特定的顺序或先后次序。

[0107] 术语“包括”或者任何其它类似用语旨在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备/装置不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其它要素,或者还包括这些过程、方法、物品或者设备/装置所固有的要素。

[0108] 至此,已经结合附图所示的优选实施方式描述了本发明的技术方案,但是,本领域技术人员容易理解的是,本发明的保护范围显然不局限于这些具体实施方式。在不偏离本发明的原理的前提下,本领域技术人员可以对相关技术特征做出等同的更改或替换,这些

---

更改或替换之后的技术方案都将落入本发明的保护范围之内。

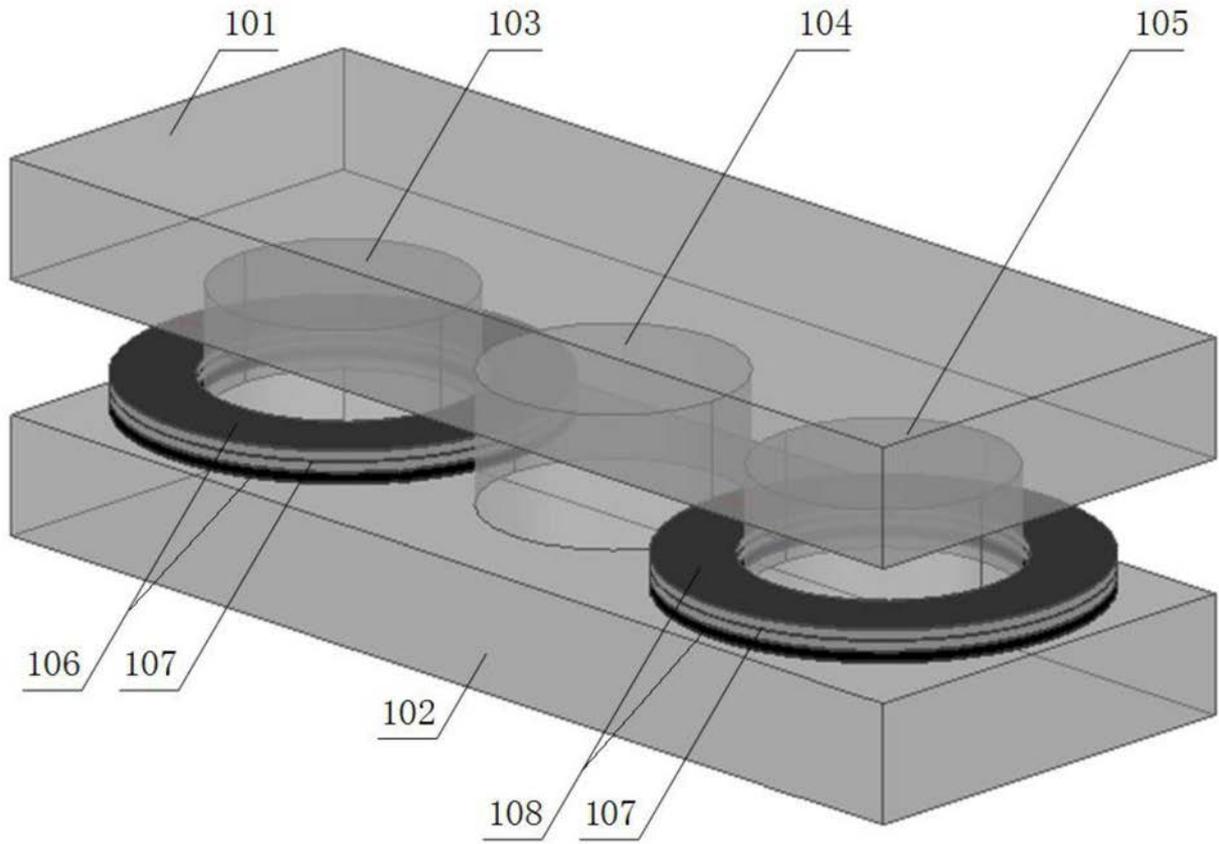


图1

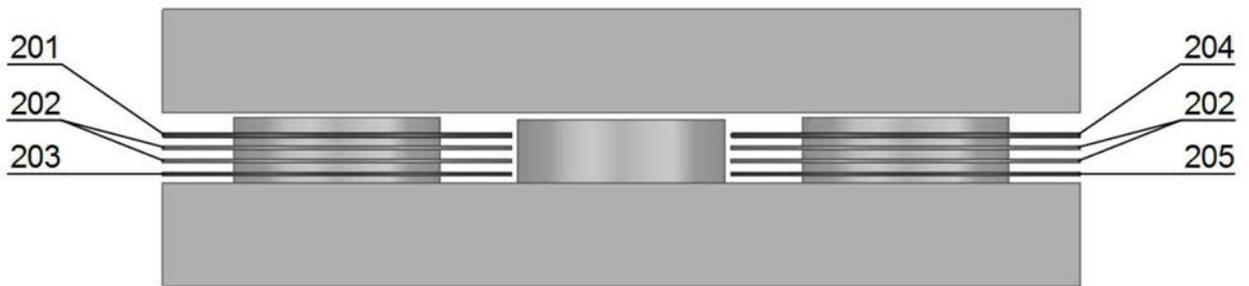


图2

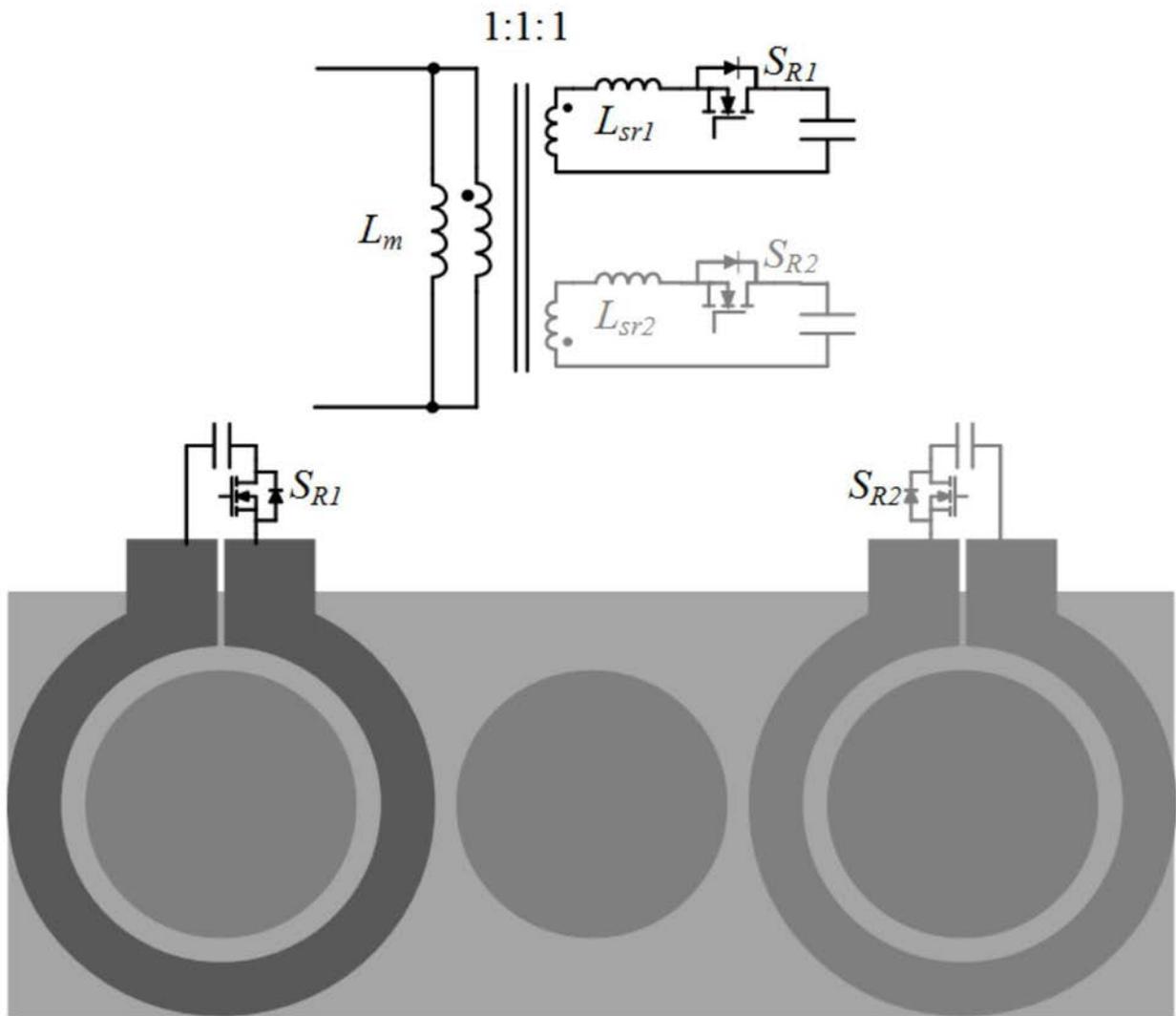


图3

1:0.5:0.5:0.5:0.5

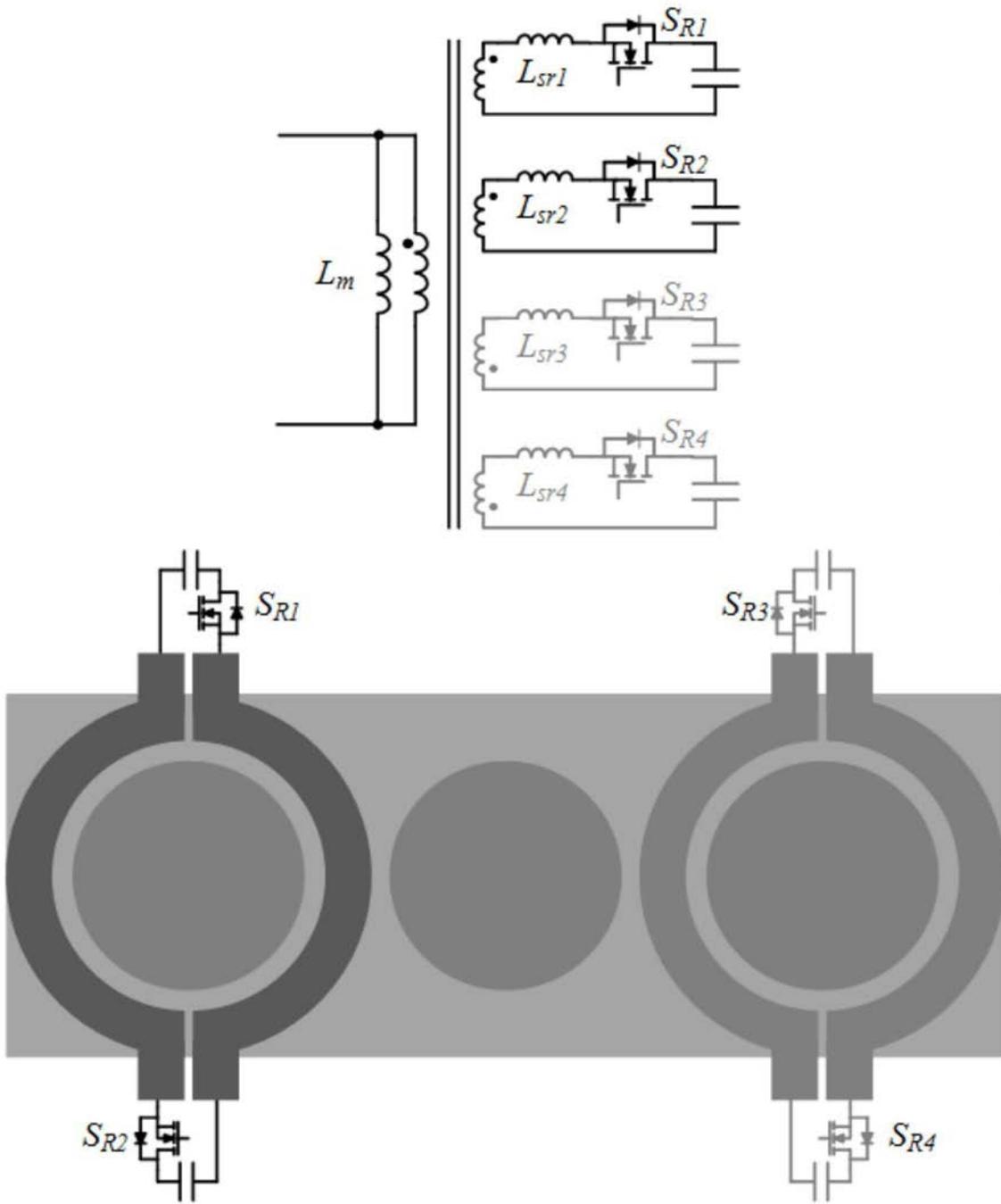


图4

1:0.33:0.33:0.33:0.33:0.33:0.33

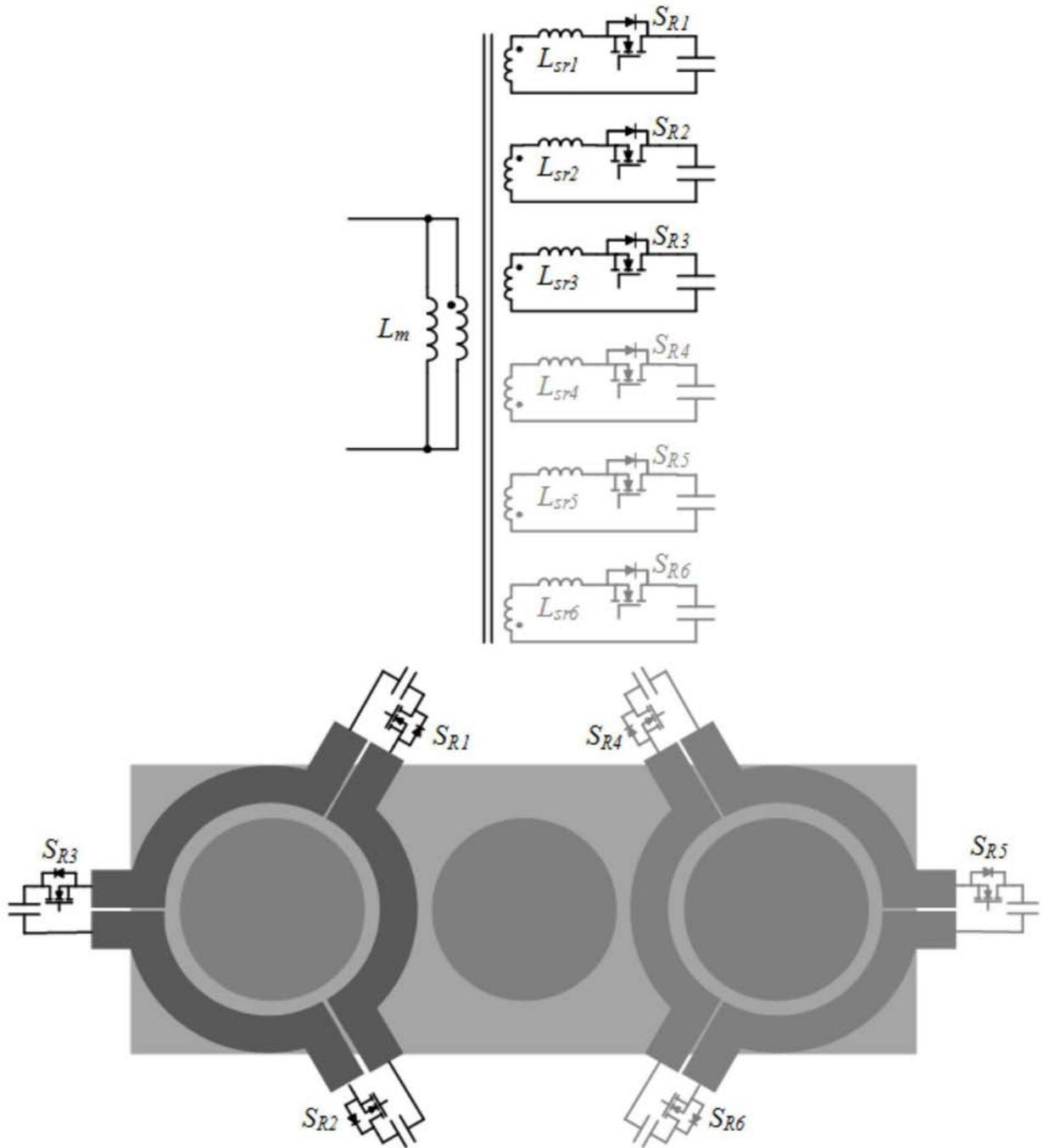


图5

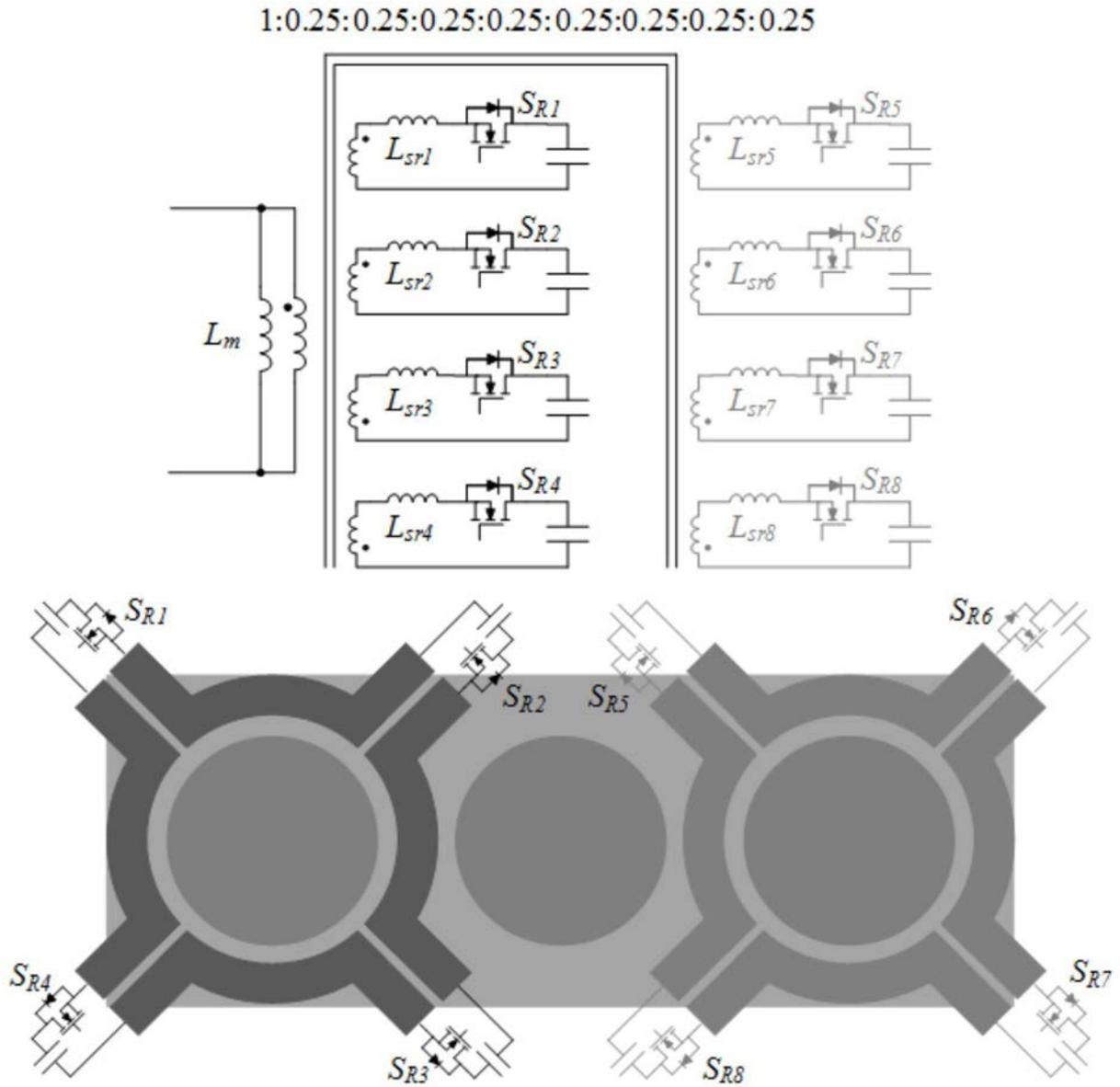


图6

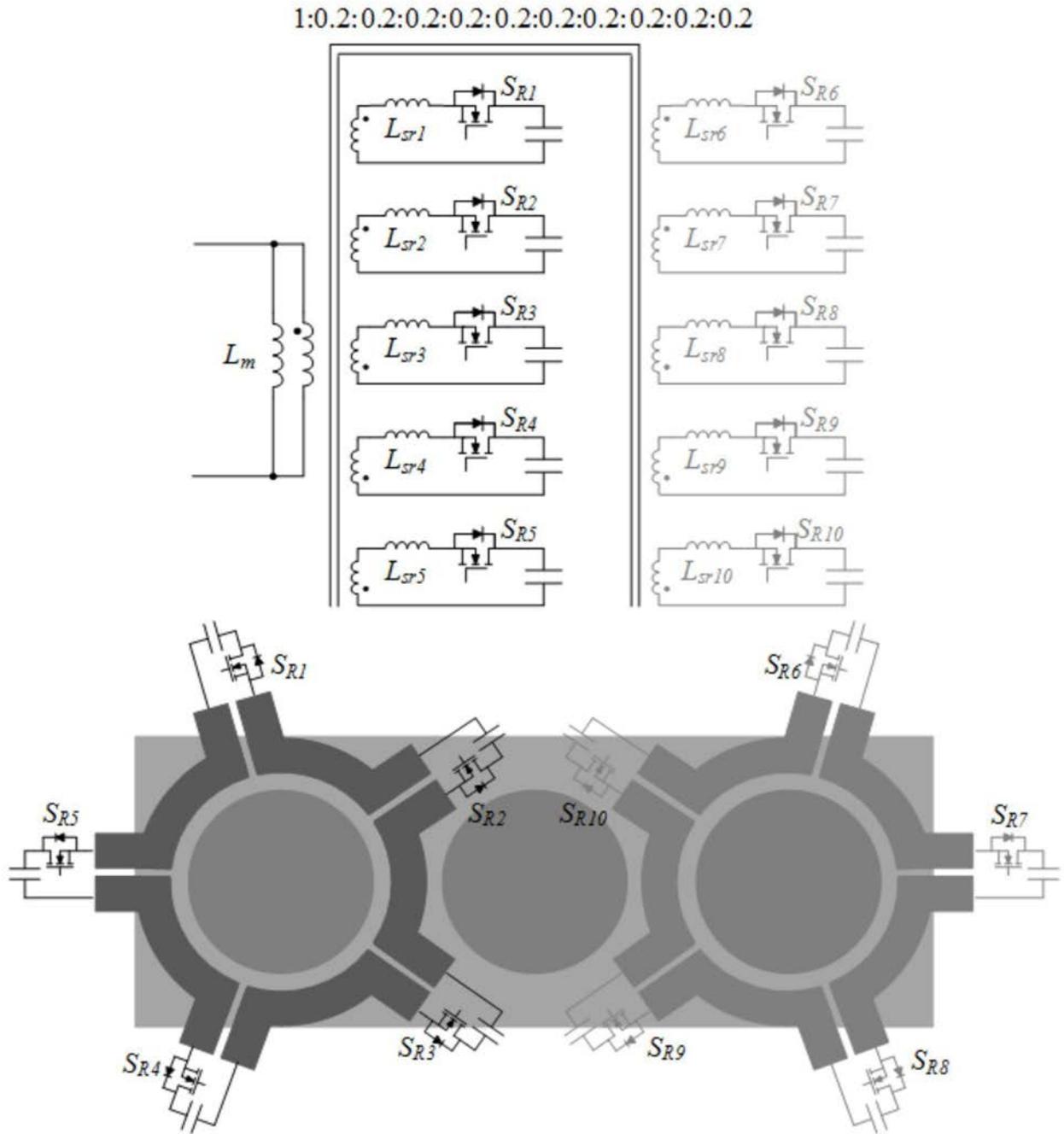


图7

1:0.167:0.167:0.167:0.167:0.167:0.167:0.167:0.167:0.167:0.167:0.167

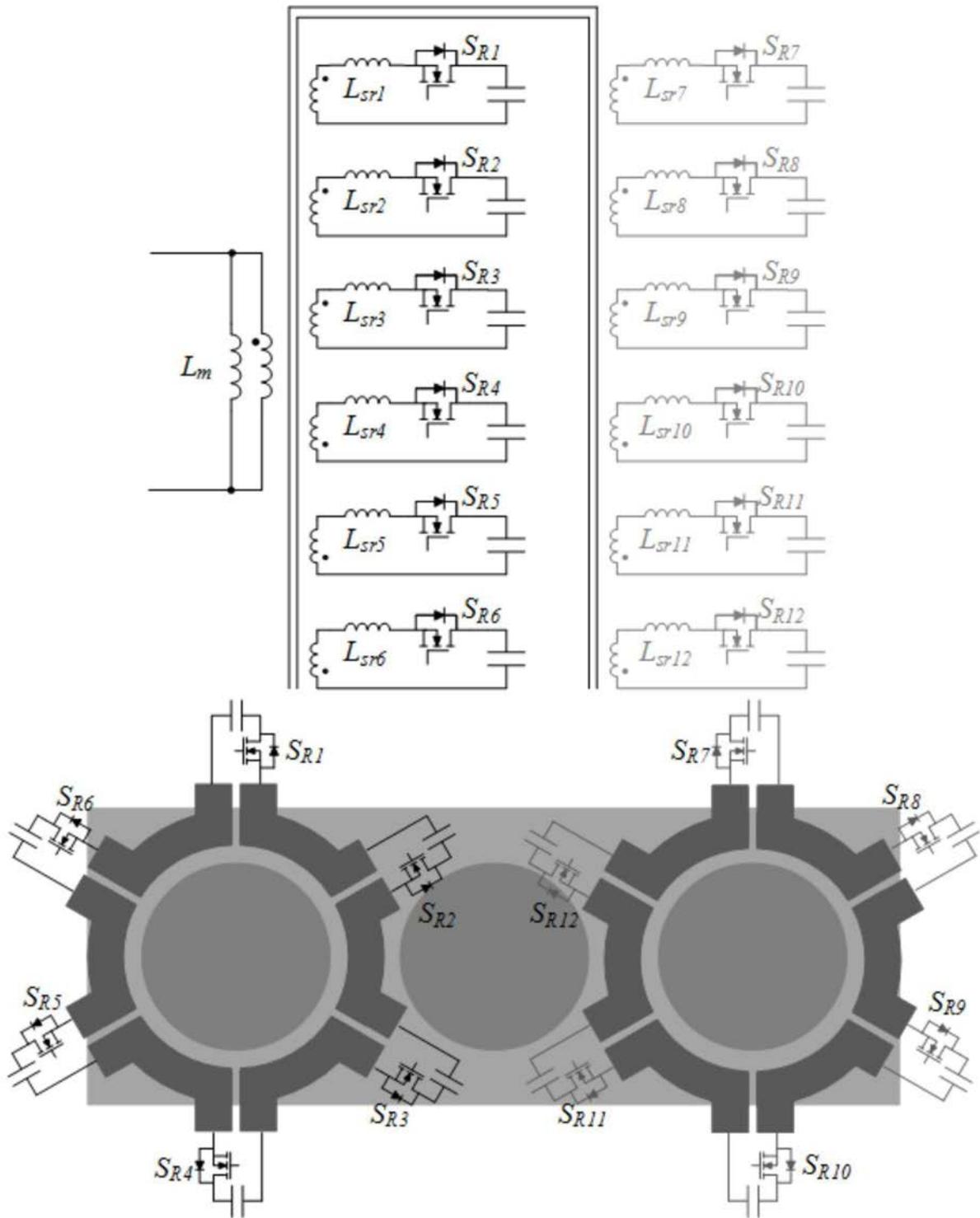


图8

1:0.167:0.167:0.167:0.167:0.167:0.167

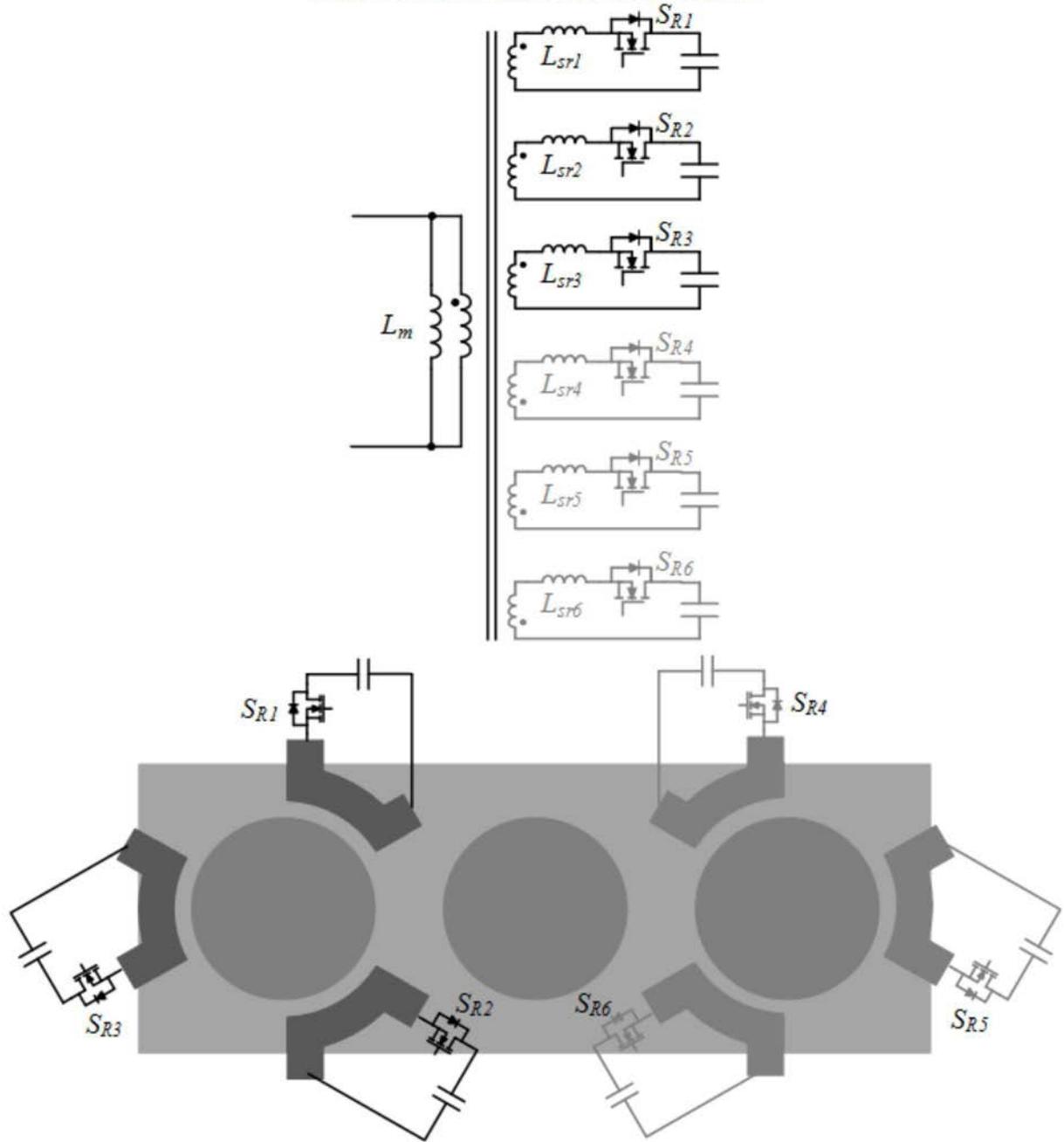


图9

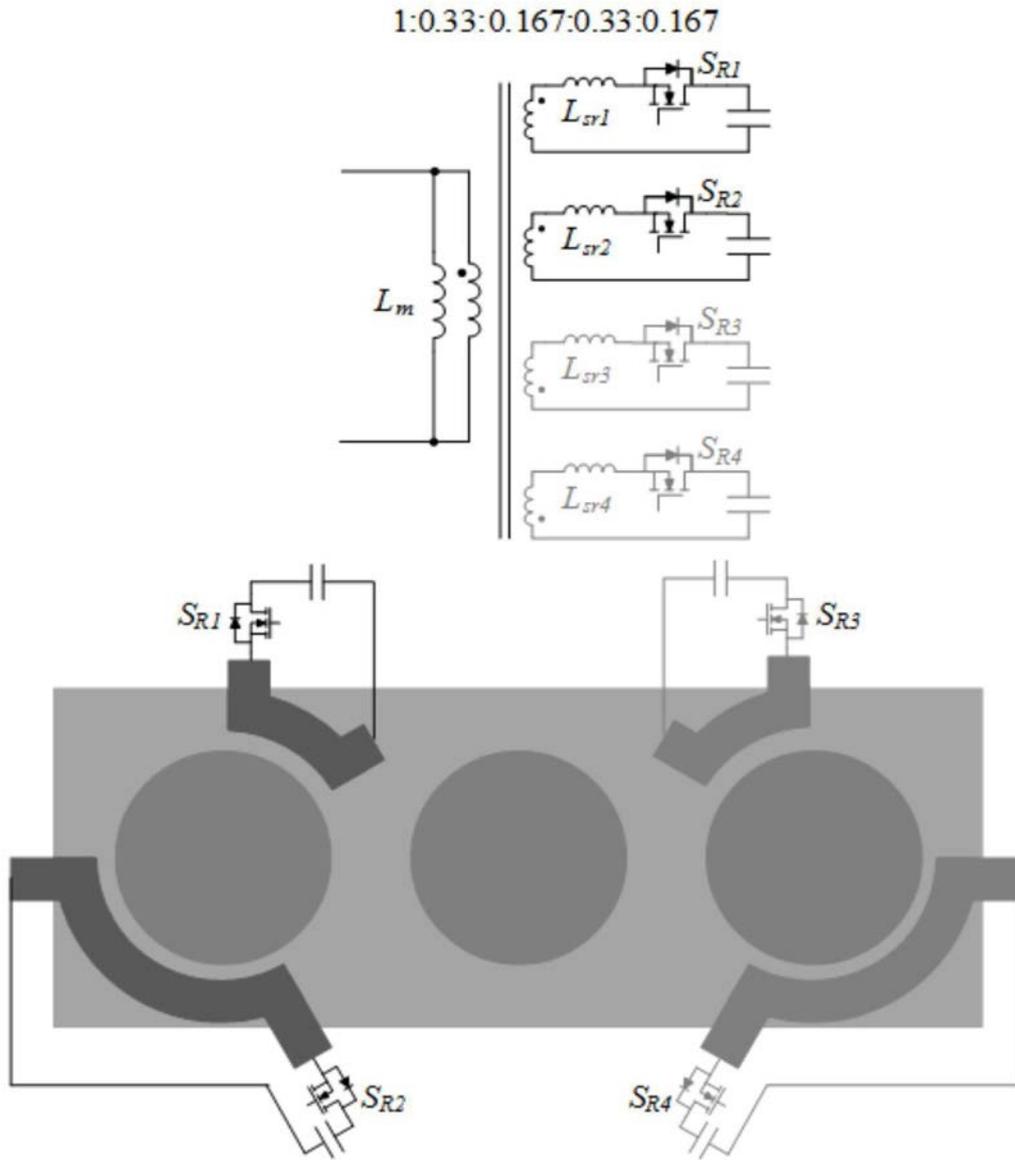


图10

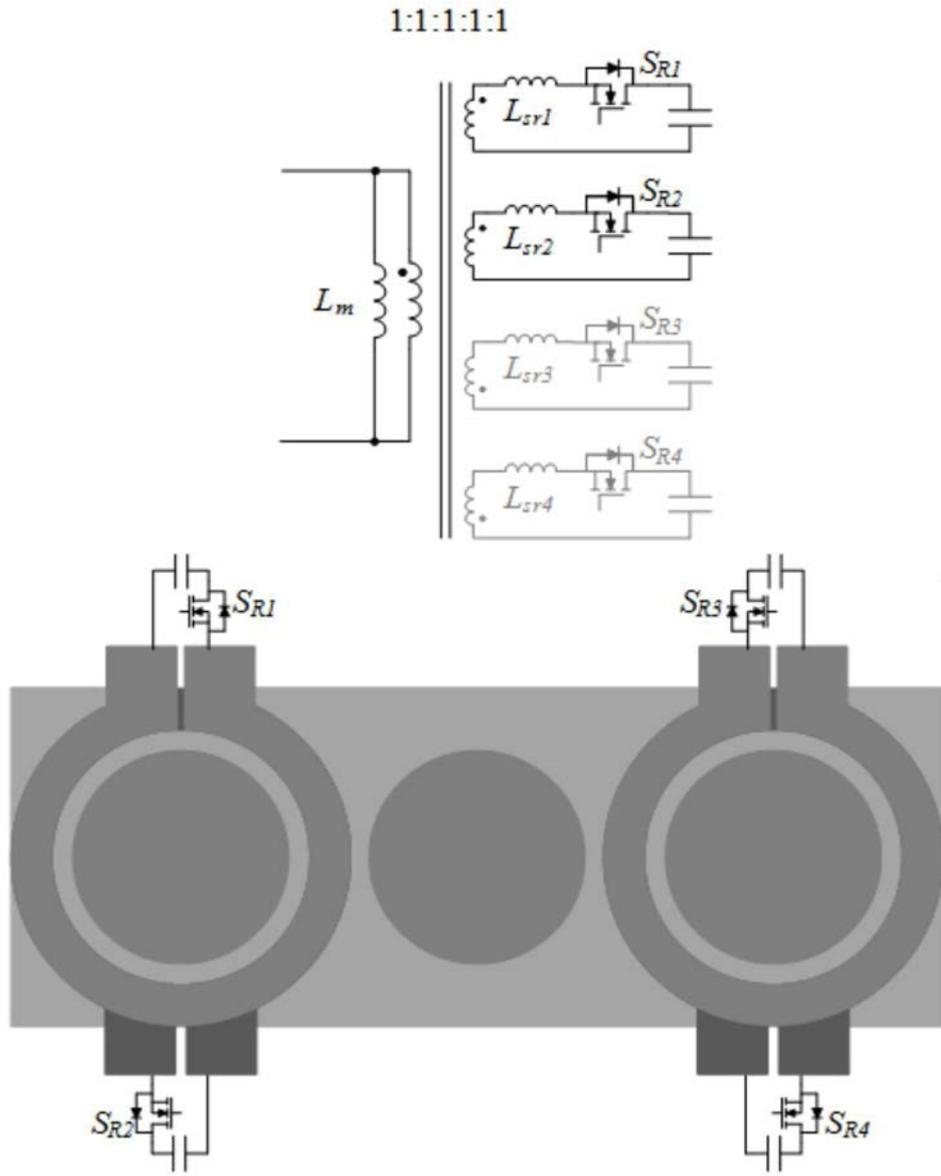


图11

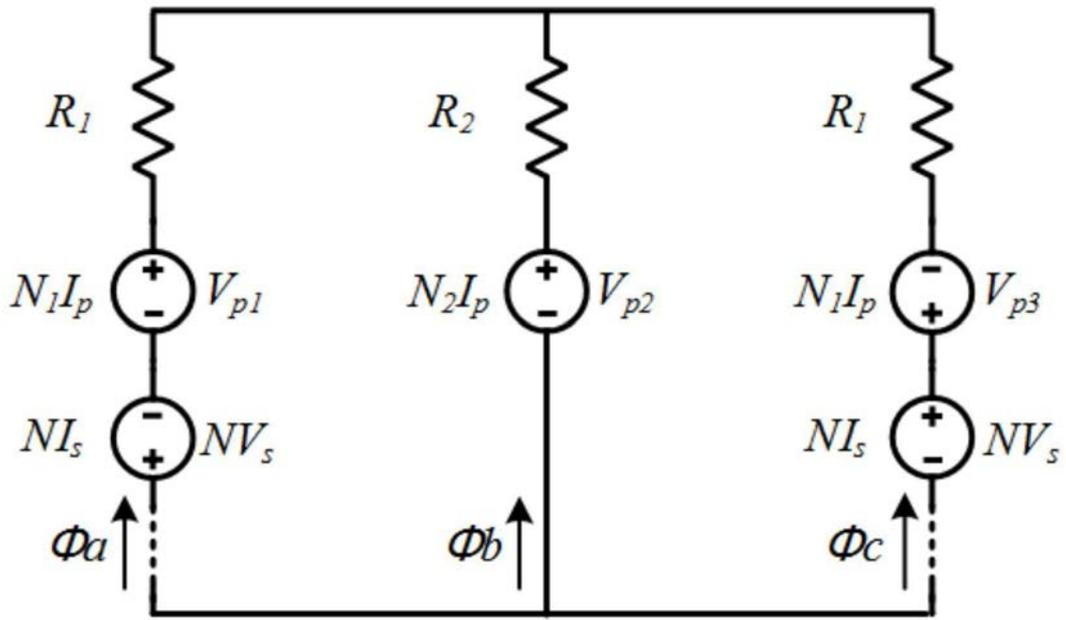


图12

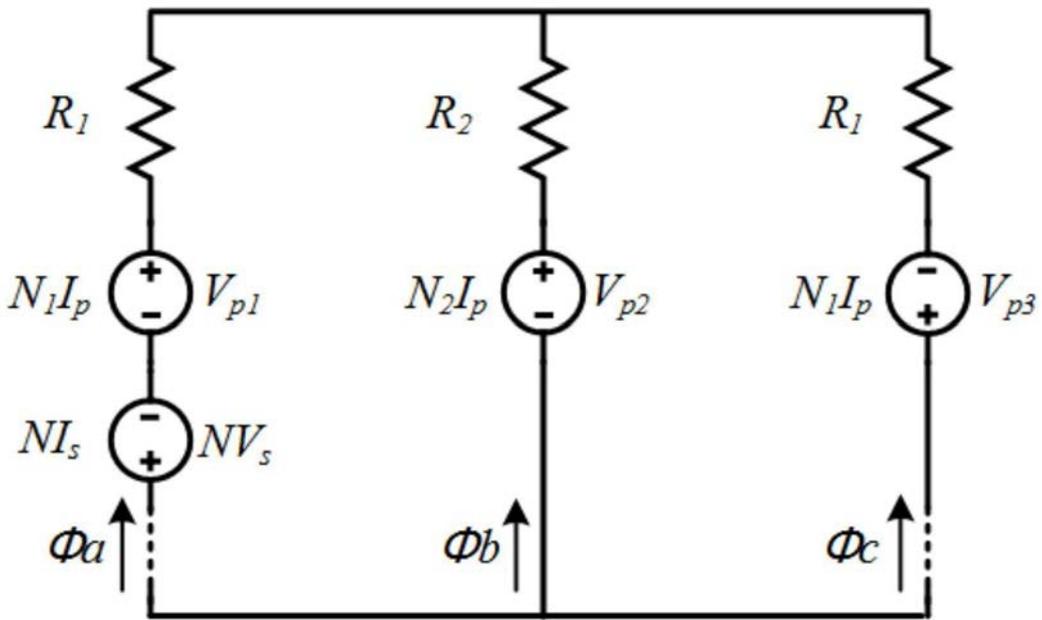


图13

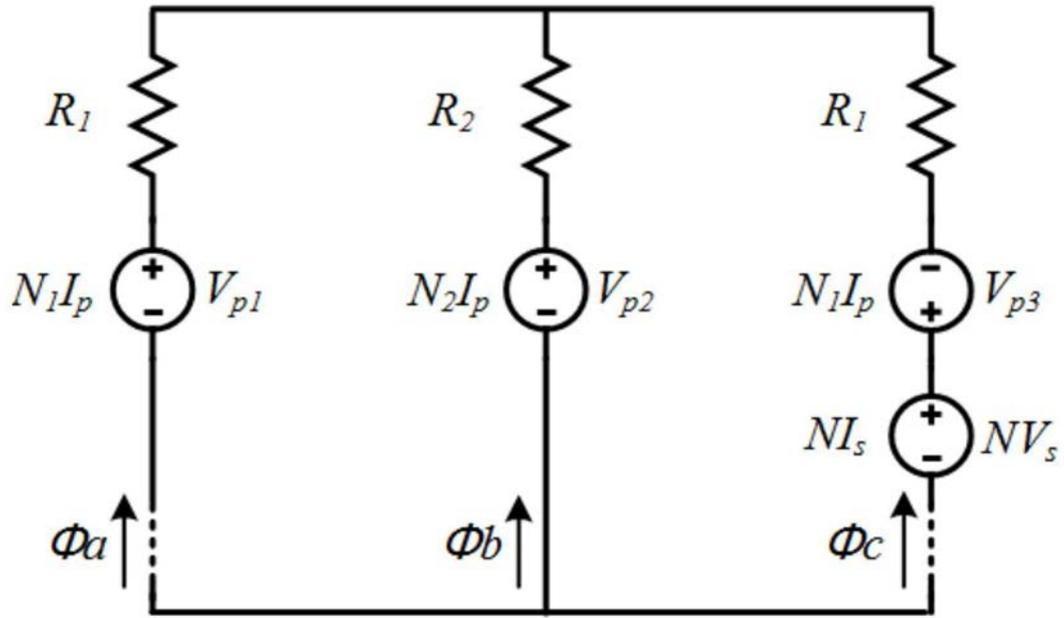


图14