



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104036921 A

(43) 申请公布日 2014. 09. 10

(21) 申请号 201410246738. 6

(22) 申请日 2014. 06. 05

(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 张国强 李康

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责
任公司 11251

代理人 关玲

(51) Int. Cl.

H01F 19/04 (2006. 01)

H01F 27/28 (2006. 01)

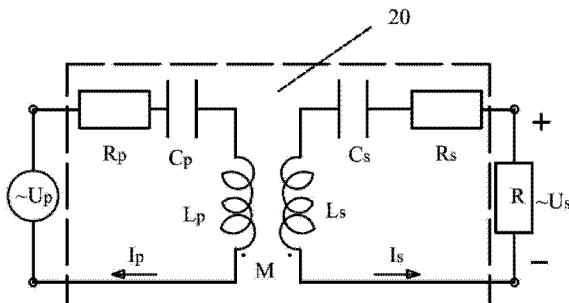
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种磁耦合谐振的高频空心变压器

(57) 摘要

一种磁耦合谐振的高频空心变压器，包括原边绕组、副边绕组、绕组骨架、原边匹配电容、副边匹配电容。所述原边绕组与原边匹配电容串联或并联连接，且工作时原边绕组及原边匹配电容构成的电路发生串联或并联谐振，所述副边绕组与副边匹配电容串联或并联连接，其构成电路发生串联或并联谐振。所述副边绕组及副边匹配电容可以是一对、两对或多对；原边谐振频率与副边谐振频率相同。所述原边绕组、副边绕组绕制在绕组骨架上；所述绕组骨架为非导磁材料，优选为环氧树脂材料。所述高频空心变压器绕组骨架可以是圆环形或其他形状，原边绕组、副边绕组绕制在绕组骨架上，保持较高的耦合系数。



1. 一种磁耦合谐振的高频空心变压器，其特征在于：所述的变压器包括原边绕组、副边绕组、绕组骨架、原边匹配电容和副边匹配电容；所述的原边绕组与原边匹配电容串联连接，且工作时原边绕组及原边匹配电容构成的串联电路发生串联谐振，所述副边绕组与副边匹配电容串联连接，副边绕组与副边匹配电容构成的串联电路发生串联谐振；原边谐振频率与副边谐振频率相同；所述高频空心变压器的变比 K，原边绕组与副边绕组的互感 M，谐振频率 ω ，原边绕组的等效电阻 R_p 、副边绕组的等效电阻 R_s ，以及负载电阻 R 满足如下关系：

$$\omega \cdot M = \frac{R/K + \sqrt{(R/K)^2 - 4R_p(R_s + R)}}{2}$$

$$\text{且 } R \geq 2K^2 \cdot R_p + 2K \cdot \sqrt{(K \cdot R_p)^2 + R_p \cdot R_s}.$$

2. 一种磁耦合谐振的高频空心变压器，其特征在于：所述的变压器包括原边绕组、副边绕组、绕组骨架、原边匹配电容和副边匹配电容；所述原边绕组与原边匹配电容串联连接，且工作时原边绕组及原边匹配电容构成的串联电路发生串联谐振，所述副边绕组与副边匹配电容并联连接，副边绕组与副边匹配电容构成的并联电路发生并联谐振；原边谐振频率与副边谐振频率相同；所述高频空心变压器的副边绕组电感 L_s ，原边绕组与副边绕组的互感 M，谐振频率 ω ，原边绕组的等效电阻 R_p 、副边绕组的等效电阻 R_s ，以及负载电阻 R 满足如下关系：

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega \cdot L_s \gg \sqrt{R_p \cdot R_s} \\ \omega \cdot L_s \gg R_s \\ R \gg \omega \cdot L_s \\ (\omega \cdot L_s)^2 \gg R \cdot R_s \\ [R_p \cdot R_s + (\omega \cdot M)^2] \cdot R \gg R_p(\omega \cdot L_s)^2 \end{array} \right.$$

3. 一种磁耦合谐振的高频空心变压器，其特征在于：所述的变压器包括原边绕组、副边绕组、绕组骨架、原边匹配电容和副边匹配电容；所述原边绕组与原边匹配电容并联连接，且工作时原边绕组及原边匹配电容构成的并联电路发生并联谐振，所述副边绕组与副边匹配电容串联或并联连接，副边绕组与副边匹配电容构成的电路发生串联或并联谐振；所述原边谐振频率与副边谐振频率相同。

4. 按照权利要求 1 或 2 或 3 所述的磁耦合谐振的高频空心变压器，其特征在于：所述的原边绕组和副边绕组绕制在绕组骨架上；所述绕组骨架为非导磁材料制作。

5. 根据权利要求 4 所述的磁耦合谐振的高频空心变压器，其特征在于所述的绕组骨架的材料优选环氧树脂材料。

6. 根据权利要求 1 或 2 或 3 所述的磁耦合谐振的高频空心变压器，其特征在于：所述高频空心变压器的原边绕组和副边绕组采用利兹线绕制，或采用超导线或铜线或铝线或电缆绕制。

7. 根据权利要求 1 或 2 或 3 所述的磁耦合谐振的高频空心变压器，其特征在于：所述的高频空心变压器的原边绕组、副边绕组优选采用利兹线绕制。

一种磁耦合谐振的高频空心变压器

技术领域

[0001] 本发明涉及一种高频变压器，特别涉及一种用于电力电子变压器的基于磁耦合谐振技术的高频空心变压器。

背景技术

[0002] 为了适应未来大规模直流电能发电、存储、传输、使用，尤其是面向大规模光伏发电、大规模电化学电池存储与转换、大规模直流电能远距离传输、大规模直流电网建设、以及大容量直流电能的使用，建立和发展高压直流电网成为可能。我国在大力发展战略形式的大规模直流电源，如光伏发电电源、电化学电池储能和燃料电池电源等，这些大规模直流电源的理想接入方式应该是直接接入高压直流电网。此外，海岸风电场的优选接入方式也是与直流电网连接，与接入交流电网相比，可以节省一半的电力电子器件。建立和发展高压直流电网需要很多关键设备的支撑，其中高压直流断路器和高压直流电力变压器是两种关键装备。高压直流断路器用于切断和隔离高压直流故障线路或故障单元。高压直流电力变压器具有和高压交流电力变压器类似的功能，即实现直流电能在不同直流电压等级的变换。除电力电子变压器之外，高压开关直流电源也是与高压直流变压器相关的电力电子设备。开关直流电源在工业、农业和民用的各个行业都有广泛应用，例如电镀工业、静电除尘、静电杀菌等行业。

[0003] 基于对直流电力变压器的巨大需求，国内外的研究人员做了大量研究工作，目前电力电子变压器的物理实现基本分为两种大的技术方案。

[0004] 一是基于全电力电子技术的，高低压侧直接电气连接、无变压器；如美国电科院于1995年制出第一台全电力电子变压器实验样机，其主电路拓扑采用 Buck 主电路结构。该电路结构简单，容易实现电压调节。但这种电路也有很多缺点：电路包含串联器件，难以控制；没有实现变频；没有电气隔离；不能抑制输入的电流谐波和调整功率因数。

[0005] 二是基于变压器磁耦合的电力电子技术，通过变压器磁耦合实现高低压侧逆变/整流电路的电气隔离。通过变压器磁耦合实现高低压侧电路的电气隔离，有利于保证电力系统的安全，且控制方案简单。应用于交流电网的电力电子变压器拓扑结构一般是含直流变换环节的交流/直流/交流/直流/交流多次电力变换。利用高频铁心变压器实现电压变换和原、副边电路隔离，有利于提高电力变换效率，降低直流变压器造价和运行成本、提高直流电网运行安全性。然而，由于采用了环氧化体等导磁材料作为芯体，随着需求容量的不断提高，变压器体积不断增大，虽可通过提高工作频率的办法减小高频变压器本体的物理体积，但是随着工作频率的提高，可供散热的表面积随之减小，铁芯和高频损耗也随之增加，导致电能传输效率降低，铁芯材料是影响高频变压器性能的重要因素。

[0006] 另一种可能的措施是采用空心变压器，空心式变压器的优点是由于没有铁芯，不存在铁损问题，其使用频率不受铁磁材料的限制，同时，空心变压器过载能力强，是一种较有前景的能量传输方式。然而空心变压器磁阻大，能量传输效率低。

[0007] 此外，还有一种在脉冲功率源领域经常采用 Tesla 变压器，该变压器是一个具有

特殊结构的空心变压器，以保证其在高压下不发生放电；变压器电源是一个电容器，变压器负载是一个容性的脉冲形成线；工作时原边绕组与对绕组放电的电容器谐振、副边绕组与负载脉冲形成线电容谐振，且具有相同的谐振频率。该变压器的设计目的是得到尽量高的输出电压，为了达到目的，耦合系数 k 只能取某些固定的值。如上述，Tesla 变压器的特殊结构只是为了在极高的电压下不发生放电，并不能保证稳定的能量输出，同时原、副边耦合系数需要严格控制，而这在生产中是不容易实现的。

[0008] 目前还有一种技术即磁耦合谐振的无线能量传输技术，该技术最早有美国麻省理工大学的研究组发现，可以实现中远距离（即传输距离是发射线圈尺寸的几倍）的传输，且仍能得到较高的效率和较大的功率，但其主要目标是实现远距离、高效率的能量传输。

[0009] 专利 CN201210301956.6、CN201310035764.x 及 CN201310061424.4 中都提到采用磁耦合谐振技术进行中远距离能量传输的设备，但其中主要目的是实现较高传输效率、较远距离的能量传输，并不能实现电压变化。

发明内容

[0010] 本发明的目的是克服上述现有空心变压器磁阻大，效率低的缺点，提出一种采用空心结构的高频变压器。本发明不但能够克服空心变压器磁阻大，效率低的缺点，还因对耦合系数 k 的取值范围相对宽松，且能够稳定传输能量。

[0011] 为了实现上述目的，本发明采用以下技术方案：

[0012] 所述高频空心变压器包括原边绕组、副边绕组、绕组骨架、原边匹配电容和副边匹配电容 5 个部分。

[0013] 所述高频空心变压器原边绕组、副边绕组、原边匹配电容、副边匹配电容可以为以下所述四种结构之一：

[0014] 所述原边绕组与原边匹配电容串联连接，且工作时原边绕组及原边匹配电容构成的串联电路发生串联谐振，所述副边绕组与副边匹配电容串联连接，副边绕组与副边匹配电容构成的串联电路发生串联谐振。

[0015] 所述原边绕组与原边匹配电容串联连接，且工作时原边绕组及原边匹配电容构成的串联电路发生串联谐振，所述副边绕组与副边匹配电容并联连接，副边绕组与副边匹配电容构成的并联电路发生并联谐振。

[0016] 所述原边绕组与原边匹配电容并联连接，且工作时原边绕组及原边匹配电容构成的并联电路发生并联谐振，所述副边绕组与副边匹配电容串联连接，副边绕组与副边匹配电容构成串联电路发生串联谐振。

[0017] 所述原边绕组与原边匹配电容并联连接，且工作时原边绕组及原边匹配电容构成的并联电路发生并联谐振，所述副边绕组与副边匹配电容并联连接，副边绕组与副边匹配电容构成并联电路发生并联谐振。

[0018] 所述原边谐振频率与副边谐振频率相同。

[0019] 所述的绕组骨架采用圆环形、方形等多种结构，原边绕组、副边绕组绕制在绕组骨架上，可以同心绕制即内圈为原边、外圈为副边，也可以不同心绕制，但需保持较高的耦合系数，降低线材的用量。绕组骨架的材质为非导磁材料，优选环氧树脂材料。

[0020] 所述的副边绕组及副边匹配电容可以为两个或多个。多个对副边绕组与多个副边

匹配电容之间可以串联或并联连接,多对副边绕组与多个副边匹配电容构成的电路可以是串联谐振电路或并联谐振电路。

[0021] 所述的副边绕组与副边匹配电容构成并联电路时,高频空心变压器的副边绕组电感 L_s ,原边绕组与副边绕组的互感 M ,谐振频率 ω ,原边绕组的等效电阻 R_p 、副边绕组的等效电阻 R_s ,负载电阻 R 满足如下关系:

$$\begin{aligned} [0022] \quad & \left\{ \begin{array}{l} \omega \cdot L_s \gg \sqrt{R_p \cdot R_s} \\ \omega \cdot L_s \gg R_s \\ R \gg \omega \cdot L_s \\ [R_p \cdot R_s + (\omega \cdot M)^2] \cdot R \gg R_p (\omega \cdot L_s)^2 \end{array} \right. \quad (1) \end{aligned}$$

[0023] 所述高频空心变压器还需满足如下条件:

$$(\omega \cdot L_s)^2 \gg R \cdot R_s$$

[0025] 且此时所述高频空心变压器变比 K 为最大值,如下所述:

$$[0026] \quad K = \frac{|\dot{U}_s|}{|\dot{U}_p|} \approx \frac{L_s}{M}$$

[0027] 所述高频空心变压器的原边绕组、副边绕组优选采用利兹线绕制,可以有效降低趋肤效应、邻近效应的影响,使得得到相同电感值时原边绕组的等效电阻 R_p 、副边绕组的等效电阻 R_s 较低。同时,利兹线的分布电容可以用作匹配电容。

[0028] 所述高频空心变压器的副边绕组与副边匹配电容构成串联电路时,所述变压器的变比 K ,原边绕组与副边绕组的互感 M ,谐振频率 ω ,原边绕组的等效电阻 R_p 、副边绕组的等效电阻 R_s ,负载电阻 R 满足如下关系:

$$[0029] \quad \omega \cdot M = \frac{R/K + \sqrt{(R/K)^2 - 4R_p(R_s + R)}}{2} \quad (2)$$

$$[0030] \quad \text{且 } R \geq 2K^2 \cdot R_p + 2K \cdot \sqrt{(K \cdot R_p)^2 + R_p \cdot R_s} \quad (3)$$

[0031] 所述高频空心变压器原边绕组、副边绕组优选采用利兹线绕制,可以有效降低趋肤效应、邻近效应的影响,使得得到相同电感值时原边绕组的等效电阻 R_p 、副边绕组的等效电阻 R_s 较低。

[0032] 采用上述方式的高频空心变压器,由于不使用铁芯,避免了高频下产生的铁磁损耗,可以高效的传输能量,在一定场合可以替代高频铁心变压器;同时由于采用了谐振技术,克服了空心变压器磁阻大的问题,同时耦合系数 k 取值范围大,便于设计制作。

附图说明

[0033] 图 1a 为本发明的一种实施方式的结构简图;

[0034] 图 1b 为所述实施方式绕组骨架圆形截面图;

[0035] 图 1c 为所述实施方式绕组骨架方形截面图;

[0036] 图 2 为本发明串 - 串结构磁耦合谐振高频空心变压器原理示意图;

[0037] 图 3 为图 2 所述串 - 串结构磁耦合谐振高频空心变压器变比 K 和效率随负载电阻

R 变化示意图；

[0038] 图 4 为本发明串 - 并结构磁耦合谐振高频空心变压器原理示意图；

[0039] 图 5 为图 4 所述串 - 并结构磁耦合谐振高频空心变压器变比 K 随负载电阻 R 变化示意图；

[0040] 图 6 为本发明并 - 串结构磁耦合谐振高频空心变压器原理示意图；

[0041] 图 7 为本发明并 - 并结构磁耦合谐振高频空心变压器原理示意图；

[0042] 图 8 为本发明含有两个副边绕组磁耦合谐振高频空心变压器原理示意图。

具体实施方式

[0043] 以下结合附图和具体实施方式进一步说明本发明。

[0044] 图 1a 为本发明的一种实施方式的结构简图。如图 1a 所示，本发明串 - 并结构磁耦合谐振空心变压器包括绕组骨架 1、原边绕组 4、原边匹配电容 5、副边绕组 2 和副边匹配电容 3。所述绕组骨架 1 为一圆环形结构，材质为环氧树脂等绝缘材料。原边绕组 4 和副边绕组 2 以非同心的方式绕制在绕组骨架 1 上，且绕制方向使得同名端在同一方向，所述绕组骨架 1 的截面可以是如图 1b 截面 10 所示的圆形，也可以是如图 1c 截面 11 所示的方形。所述原边绕组 4 的一端接地，另一端与原边匹配电容 5 串联连接；所述副边绕组 2 的一端接地，另一端与副边匹配电容 3 的高压端相连，副边匹配电容 3 的低压端接地，即副边绕组 2 与副边匹配电容 3 并联连接；所述原边匹配电容 5 和副边匹配电容 3 安置在绕组骨架 1 的中央位置，且三者互相绝缘。

[0045] 图 2 为本发明串 - 串结构磁耦合谐振高频空心变压器原理示意图。图 2 中虚线框 20 所包含部分即为串 - 串结构磁耦合谐振高频空心变压器。所述变压器原边绕组 L_p 与原边匹配电容 C_p 串联连接，副边绕组 L_s 与副边匹配电容 C_s 串联连接。工作时电源 U_p 向变压器提供频率与原边绕组、副边绕组谐振频率相同的交流电，原边绕组 L_p 与原边匹配电容 C_p 在电源激励下发生串联谐振，产生高频磁场；高频磁场与副边绕组 L_s 耦合，在副边绕组 L_s 中感应出电流，副边绕组 L_s 与副边匹配电容 C_s 也产生串联谐振，并向负载 R 输出能量，同时负载 R 电压 U_s 为所需电压。

[0046] 图 3 为图 2 所述串 - 串结构磁耦合谐振高频空心变压器变比 K 和效率随负载电阻 R 变化示意图。按照所述公式 (2)、(3) 设计的磁耦合谐振空心变压器，变压器额定变比 K 为 2，额定负载电阻 R 为 1 欧姆，负载电阻由 0.2 欧姆增至 2 欧姆，变比 K 及效率的变化情况如图 3 所示。该结构的变压器，负载电阻 R 变化，变比 K 及效率变化随之变化，因此负载电阻 R 需满足设计条件运行。

[0047] 图 4 为本发明串 - 并结构磁耦合谐振高频空心变压器原理示意图。图 4 中虚线框 40 所包含部分即为串 - 并结构磁耦合谐振高频空心变压器。所述变压器原边绕组 L_p 与原边匹配电容 C_p 串联连接，副边绕组 L_s 与副边匹配电容 C_s 并联连接。

[0048] 图 5 为图 4 所示串 - 并结构磁耦合谐振高频空心变压器变比 K 随负载电阻 R 变化示意图。按照所述公式 (1) 设计的磁耦合谐振空心变压器，变压器额定变比 K 为 2，额定负载电阻 R 为 10 欧姆，负载电阻由 2 欧姆增至 20 欧姆，变比 K 及效率的变化情况如图 5 所示。可见在负载电阻 R 在 (50% ~ 200%) 的范围内，变比 K 及效率变化不大。

[0049] 图 6 为本发明并 - 串结构磁耦合谐振高频空心变压器原理示意图。图 6 中虚线

框 60 所包含部分即为并 - 串结构磁耦合谐振高频空心变压器。所述变压器原边绕组 Lp 与原边匹配电容 Cp 并联连接, 副边绕组 Ls 与副边匹配电容 Cs 串联连接。

[0050] 图 7 为本发明并 - 并结构磁耦合谐振高频空心变压器原理示意图。图 7 中虚线框 70 所包含部分即为并 - 并结构磁耦合谐振空心变压器的电路。所述变压器原边绕组 Lp 与原边匹配电容 Cp 并联连接, 副边绕组 Ls 与副边匹配电容 Cs 并联连接。

[0051] 图 8 为本发明含有两个副边绕组磁耦合谐振高频空心变压器原理示意图。如图 8 所示, 虚线框 80 所包含部分即为两个副边绕组磁耦合谐振空心变压器。所述变压器原边绕组 Lp 与原边匹配电容 Cp 串联连接, 副边绕组 Ls 与副边匹配电容 Cs 串联连接, 副边绕组 Ls1 与副边匹配电容 Cs1 串联连接。

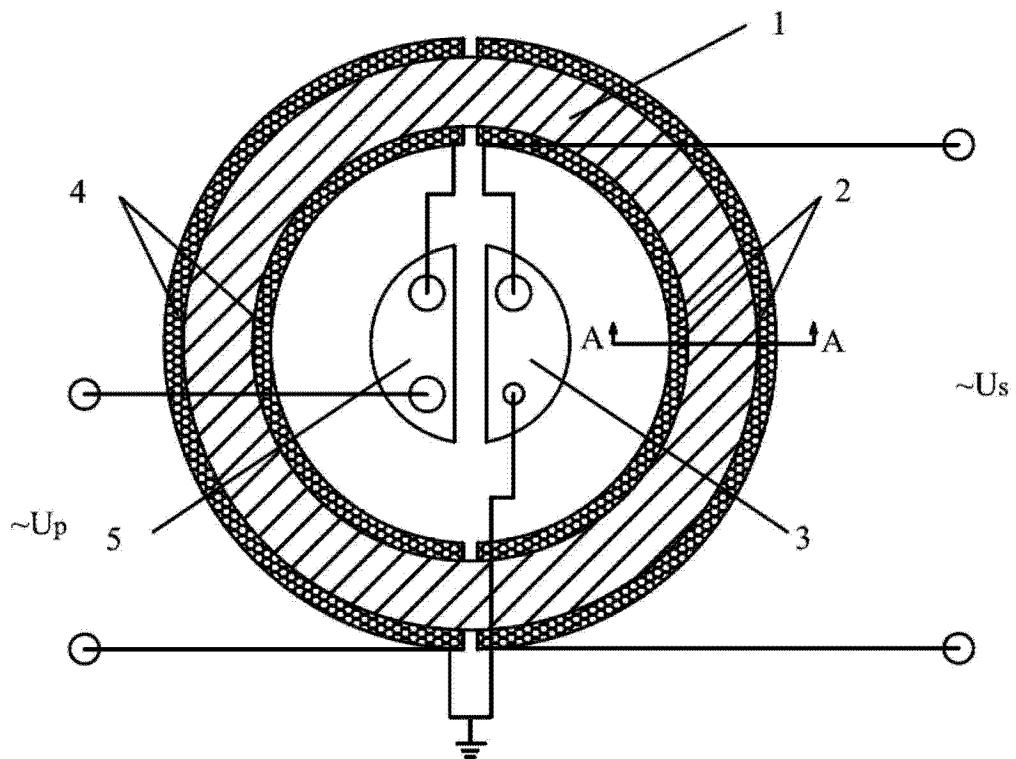


图 1a

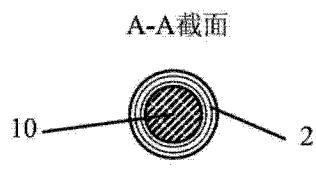


图 1b

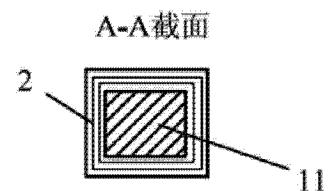


图 1c

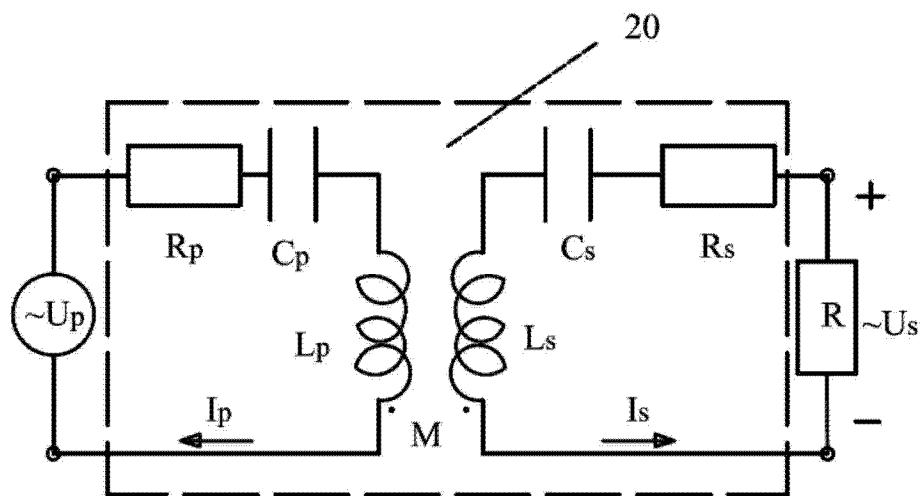


图 2

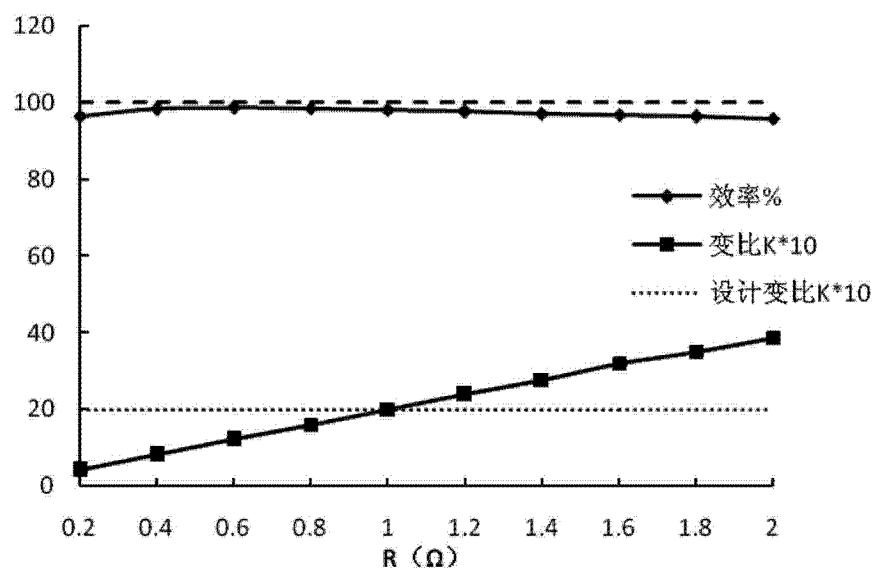


图 3

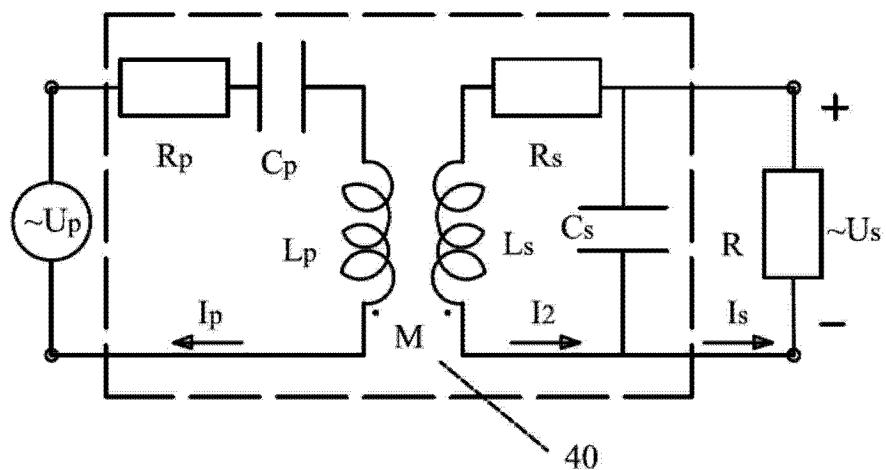


图 4

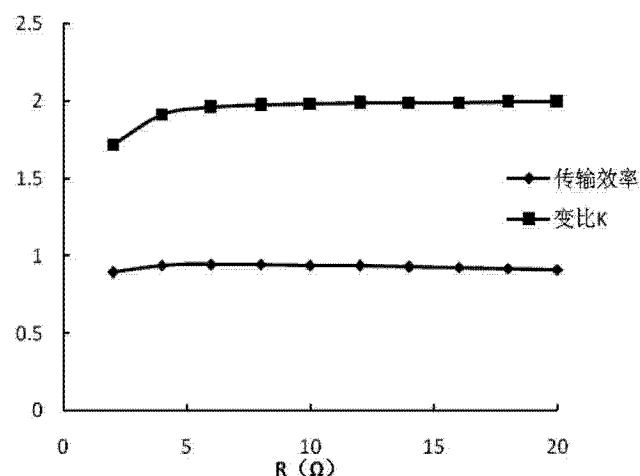


图 5

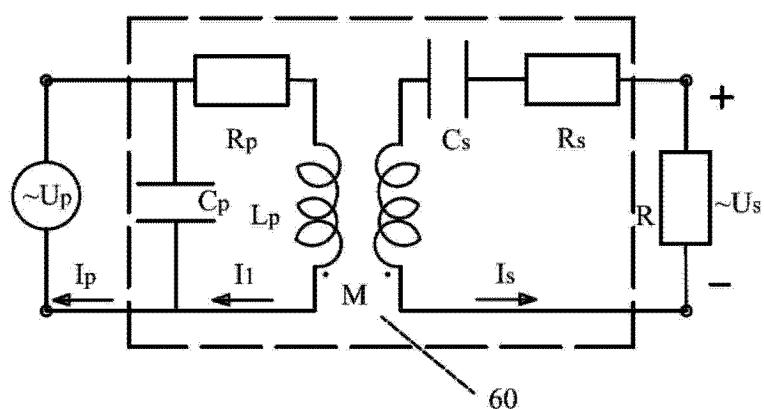


图 6

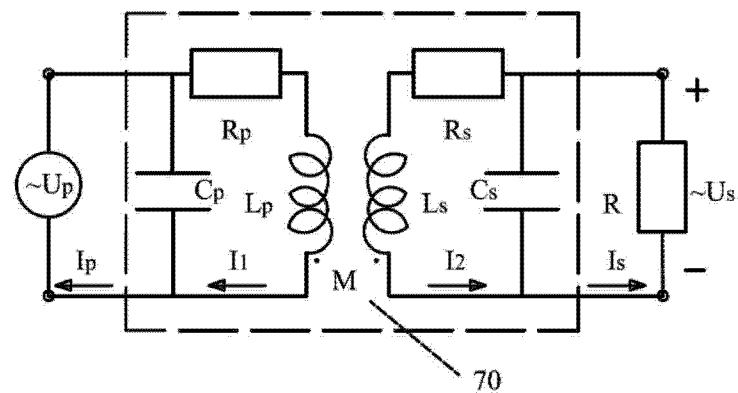


图 7

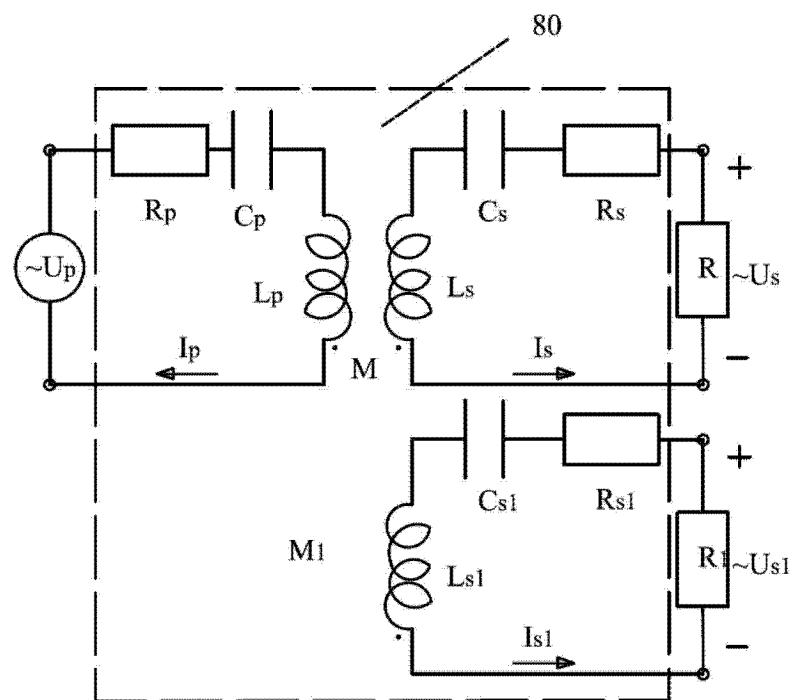


图 8