

不同结构的旋转式松耦合变压器性能比较与分析

松耦合变压器作为无线输电系统的核心电气元件, 由于其一、二次侧分离的结构特点, 导致磁路有较大距离的空气磁路, 使得变压器漏感较大, 耦合系数较低, 严重影响了变压器的能量传输效率。重点研究变压器磁心结构对传输效率的影响, 利用有限元仿真软件COMSOL, 分别对上下分离式和嵌套式两种磁心结构的变压器传输效率随工作频率和气隙大小的变化规律进行仿真研究, 并且根据仿真结果提出了基于气隙大小的变压器结构选型方法, 以传输效率作为评价指标, 综合考虑气隙和频率对其影响程度, 提出嵌套式结构的松耦合变压器在整体性能上要优于上下分离式结构的结论。

李岩松 王思涵 李柏江 杨奕飞 刘 君/华北电力大学电气与电子工程学院

0 引言

一直以来, 对旋转电气设备的供电都是采用传统接触式滑环能量传输方式, 但是这种方式存在着三个固有可靠性问题: ①有限的磨损寿命; ②有裸露的电极; ③导电环磨屑可能成为妨碍运动的多余物或成为致使电极短路的导电介质。采用基于非接触感应耦合式电能传输的新型供电技术, 可以很好地解决传统接触式供电的缺陷, 克服了接触火花、短路等不安全因素, 因此具有十分广阔的应用前景^[1-4]。

实现非接触电能传输的核心电气元件是一、二次侧分离的松耦合变压器, 针对于本文探讨的旋转供电场合, 需要对松耦合变压器的磁心结构进行特殊设计以满足一、二次侧相对旋转的运动状态。另一方面, 由于松耦合变压器

的磁路中存在气隙, 导致变压器的漏感较大, 耦合系数较低, 因此需要通过调整气隙大小和工作频率来保证足够的传输效率。本文针对影响松耦合变压器传输效率的因素, 利用有限元仿真软件COMSOL分别对上下分离式和嵌套式两种松耦合变压器结构的传输效率进行二维磁场仿真研究, 提出基于气隙这一工况条件的松耦合变压器结构选择策略, 并综合考虑气隙和频率对变压器传输效率的影响程度, 得出整体性能更为优异的结构, 为后续研究作准备。

1 两种旋转式松耦合变压器结构特征

由于松耦合变压器的一端连接的是旋转电气设备, 因此与传统的一、二次侧静止的松耦合变压器结构略有差异, 本文提出两种不同的旋转式松耦合变压器结构, 一种是已经产业化的旋转变压器结构, 一、二次侧是上下分离的, 剖面图如图1所示。

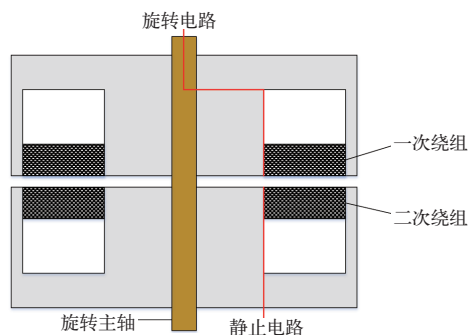


图1 上下分离式结构剖面图

这种磁心在外, 绕组在里的结构, 可以保证变压器自身具有良好的电磁



李岩松/教授

关键词/Keywords

松耦合变压器 ·
磁心结构 ·
传输效率 ·
有限元仿真 ·
场路耦合 ·

国家自然科学基金项目 (51277066)。

屏蔽性和互换性。此外,上下分离式结构的绕组正对面积大,漏感与分布电容小,在相同的体积和重量下可以传递更多的功率。当采用图1的改进式绕线方式时,一次绕组和二次绕组间的正对面积更大,磁感应线可以近似垂直地通过两个绕组间的气隙,因此可以有效地较少变压器内部的漏感,从而提高其耦合性能。在某些场合下,上下分离式变压器的磁心外部还会包裹一个金属护罩,既可以防止灰尘从气隙中进入变压器,影响工作性能,又可以进一步屏蔽恶劣工作环境下的电磁干扰,并增加变压器自身的力学性能。这种结构的缺点是变压器内部线圈散热不良,温升容易过高^[5]。

另一种旋转式松耦合变压器结构是如图2所示的嵌套式结构,该结构由两个同轴空心圆管作为骨架支撑,分别在内管的外壁和外管的内壁上贴附磁心,磁心与上下分离式结构的整块磁心不同,使用条形磁心拼接而成,这种拼接方式不仅可以最大程度降低交流变压器磁场下的涡流损耗,而且减少了装置的重量和体积,在实际应用中更加方便灵活。但是这种嵌套式的结构在一、二次侧高速旋转时容易发生绕组之间的接触,造成系统运行时的安全隐患,因此这种结构较适用于低速旋转的系统中,或者在制作时通过增大一、二次侧的气隙大小来保证系统的安全性和可靠性^[6]。

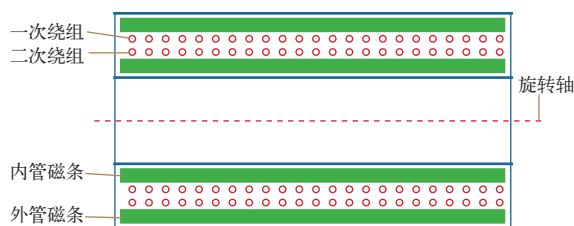


图2 嵌套式结构剖面图

2 松耦合变压器性能仿真分析的理论基础

仿真所采用的数学模型是否合理、准确是正确分析、解决问题的前提,而深刻理解所研究对象的理论基础是验证仿真结果正确与否的先决条件。基于此,本节通过基本磁路理论推导出了更

适用于电路仿真搭建的松耦合变压器数学模型,并且根据该模型推导得到松耦合变压器一次侧输入功率、二次侧输出功率以及系统传输效率的数学表达,以此作为验证仿真结果正确与否的理论基础。

2.1 松耦合变压器互感模型

通过不同的公式变形,可以得到研究松耦合变压器参数问题的两种等效电路模型,分别是互感模型和漏感模型,考虑到本文的研究对象,选择松耦合变压器互感电路模型进行建模分析,如图3所示。

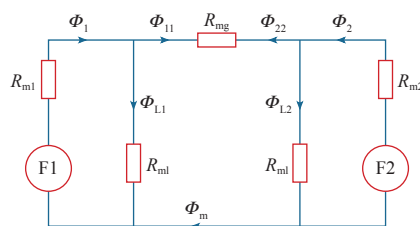


图3 松耦合变压器等效磁路模型

由于松耦合变压器的一、二次绕组不完全耦合,因此链过一、二次绕组的磁通不相等。 Φ_{11} 和 Φ_{22} 分别为一次电流 i_1 和二次电流 i_2 所产生的分别与一、二次绕组相链磁通; Φ_{L1} 和 Φ_{L2} 分别为 i_1 和 i_2 产生的漏磁通,则 i_1 和 i_2 产生的总磁通分别为^[7]

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{L1} \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{L2} \quad (2)$$

Φ_m 为一、二次绕组之间经闭合磁路产生的互感磁通,则与一、二次绕组产生电压的等效磁通分别为

$$\Phi_{1\Sigma} = \Phi_m + \Phi_{L1} = \Phi_{11} + \Phi_{L1} - \Phi_{22} \quad (3)$$

$$\Phi_{2\Sigma} = \Phi_m - \Phi_{L2} = \Phi_{11} - \Phi_{L1} - \Phi_{L2} \quad (4)$$

依据磁路的基本定理可得

$$u_1 = N_1 \frac{d(\Phi_{11} + \Phi_{L1})}{dt} - N_1 \frac{d\Phi_{22}}{dt} \quad (5)$$

$$u_2 = N_2 \frac{d\Phi_{11}}{dt} - N_2 \frac{d(\Phi_{22} + \Phi_{L2})}{dt} \quad (6)$$

令 M 为一、二次绕组之间的互感, L_1 和 L_2 分别为一、二次绕组自感,则有

$$M = \frac{N_2 \Phi_{11}}{i_1} = \frac{N_1 \Phi_{22}}{i_2} \quad (7)$$

$$L_1 = N_1 \frac{(\Phi_{11} + \Phi_{L1})}{i_1} = N_1 \frac{\Phi_1}{i_1} \quad (8)$$

$$L_2 = N_2 \frac{(\Phi_{22} + \Phi_{L2})}{i_2} = N_2 \frac{\Phi_2}{i_2} \quad (9)$$

将式(7)~式(9)分别代入式(5)和式(6)中,得到

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \quad (10)$$

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (11)$$

根据上述绕组电压以及自感、互感的表达式,若采用电流控制电压源表示一、二次绕组中互感电压的作用,则可得到如图4所示的正弦稳态等效电路,其中 $j\omega M\dot{I}_1$ 和 $j\omega M\dot{I}_2$ 分别表示互感对松耦合变压器二次绕组与一次绕组电路的影响^[8]。

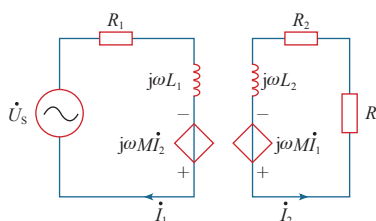


图4 松耦合变压器互感模型等效电路

松耦合变压器的互感等效电路以一次绕组与二次绕组之间的互感磁通为基础导出,在互感确定的情况下,基于互感模型的等效电路能将变压器的一次侧与二次侧分离成两个独立的电路,有利于在COMSOL软件中进行场路耦合分析。

2.2 松耦合变压器传输功率及效率的数学表达

基于上节的等效电路图,另设电源电压为 U_s ,一、二次侧电阻分别为 R_1 和 R_2 ,二次侧带负载为 R ,根据基尔霍夫电流定律,得

$$\begin{cases} \dot{U}_s = (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 - j\omega M\dot{I}_2 \\ j\omega M\dot{I}_1 = (R_2 + R + j\omega L_2)\dot{I}_2 \end{cases} \quad (12)$$

解之,可得

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_s}{Z_1 - \frac{(j\omega M)^2}{Z_2}} \quad (13)$$

$$\dot{I}_2 = \frac{j\omega M\dot{U}_s}{Z_1 \left[Z_2 - \frac{(j\omega M)^2}{Z_1} \right]} \quad (14)$$

式中, $Z_1 = R_1 + j\omega L_1$; $Z_2 = R_2 + R + j\omega L_2$ 。

为简化运算,可考虑对两侧自感进行串联电容补偿,以消去复数因子 $j\omega L_1$ 和 $j\omega L_2$,此时整个传输系统的等效电路如图5所示。

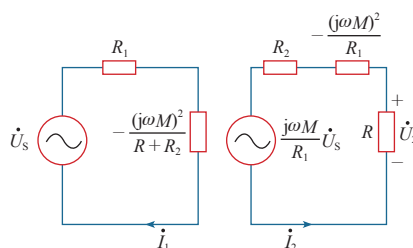


图5 非接触式电能传输系统等效电路图

由等效电路图得到一、二次侧输入、输出功率分别为

$$\dot{S}_1 = \dot{U}_s \dot{I}_1 = \frac{(R_2 + R)U_s^2}{R_1(R_2 + R) + (\omega M)^2} \quad (15)$$

$$\dot{S}_2 = \dot{U}_s \dot{I}_2 = \frac{(\omega M)^2 R U_s^2}{[R_1(R_2 + R) + (\omega M)^2]^2} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可知,一次侧输入功率和二次侧输出功率与电源电压,系统内阻,一、二次侧互感,工作频率和负载电阻相关。

进一步得到系统的传输效率为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(\omega M)^2 R}{[R_1(R_2 + R) + (\omega M)^2](R_2 + R)} \quad (17)$$

由式(17)可知,影响系统传输效率的因素与影响输入、输出功率的因素大致相同,本文重点研究工作频率对输入、输出功率以及传输效率的影响,并根据仿真结果比较两种不同结构的性能差异,给出选择策略。

3 松耦合变压器传输特征及两种结构的性能分析

利用有限元仿真软件COMSOL Multiphysics进行多物理场分析,分别得到两种不同结构的一次侧输入功率、二次侧输出功率和传输效率随工作频率的变化规律,将仿真结果与第2节所述理论基础进行验证对比,证明仿真结果正确,所得结论可以作为进一步研究的理论参考。选择实际应用中更加注重的传输效率作为评价松耦合变压器性能的指标,研究了在一定范围的工作频率和气隙

大小下,不同结构的松耦合变压器性能差异,并提出选择策略。

3.1 一次侧输入功率随频率的变化规律

结合实际情况,设定工作频率的范围为1~150 kHz,步长为10 kHz,在工作频率变化的过程中,保持输入电压、二次侧负载值等其他输入功率的影响因素不变,并设定气隙大小为1 mm,仿真得到上下分离式和嵌套式两种不同结构各自的一次侧输入功率随工作频率的变化规律,分别如图6和图7所示。

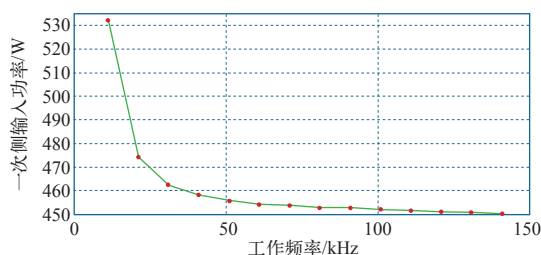


图6 上下分离式结构输入功率随频率变化曲线

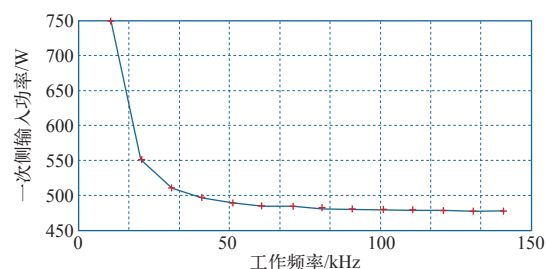


图7 嵌套式结构输入功率随频率变化曲线

由图可知,两种结构下变压器一次侧输入功率均随频率的增加而减小,变化规律与公式 $\dot{S}_1 = \dot{U}_s \dot{I}_1 = \frac{(R_2 + R)U_s^2}{R_1(R_2 + R) + (\omega M)^2}$ 所呈现的一致,说明仿真结果准确。在1~10 kHz区间段内,上下分离式磁心结构的一次侧输入功率从900 W大幅降至500 W,之后再逐渐增加频率,下降的幅度有所减缓,但总体上,变化呈单调降低趋势。这是因为在一次侧输入电压保持不变的情况下,随着频率的升高,变压器的耦合系数逐渐升高,带相同负载所需的励磁电流逐渐减小,从而降低了一次侧输入功率。

3.2 二次侧输出功率随频率的变化规律

保持工作频率的范围和步长不变,设定气隙

大小为1 mm,仿真得到上下分离式和嵌套式两种不同结构各自的二次侧输出功率随工作频率的变化规律,分别如图8和图9所示。

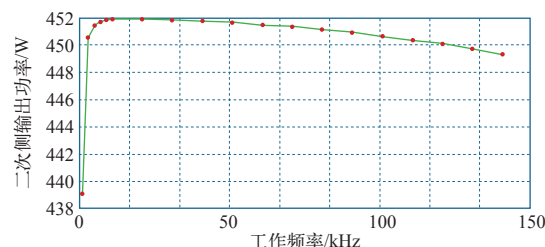


图8 上下分离式结构输出功率随频率变化曲线

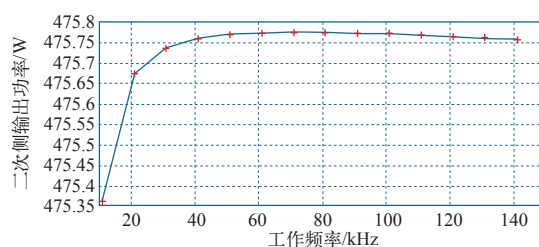


图9 嵌套式结构输出功率随频率变化曲线

由图8和图9可知,随着频率的增加,两种结构的变压器二次侧输出功率先增加后减小,在某个工作频率下存在着对应的最大输出功率,变化规律与公式 $\dot{S}_2 = \dot{U}_s \dot{I}_2 = \frac{(\omega M)^2 R U_s^2}{[R_1(R_2 + R) + (\omega M)^2]^2}$ 所呈现的一致,验证了仿真结果的正确性^[9]。

3.3 不同结构松耦合变压器性能分析与比较

本文以变压器的传输效率作为评价指标,通过考虑工作频率和气隙大小的变化对传输效率的影响程度,综合判断不同结构的变压器性能差异。需要指出的是,在重点考虑传输效率这一评价指标时,还需针对不同结构的特点考虑如下因素:当输入电流相同时,上下分离式结构的一次绕组电流密度远大于嵌套式,由于电流密度与绕组温升呈正相关,因此上下分离式结构应考虑绕组内部温度过高的问题^[4],在实际使用时,工作频率不宜过高;针对嵌套式结构,如果制作时气隙大小设置过低,当应用在转速较高的工况下,一、二次绕组间容易发生接触,造成极大的安全隐患,因此为保证嵌套式结构的适用性,在实际制作过程中,气隙大小至少为1 mm。

3.3.1 固定气隙大小, 改变工作频率

图10为固定气隙大小为1 mm, 工作频率从1 kHz逐渐升高至100 kHz, 两种结构变压器传输效率随工作频率的变化曲线。

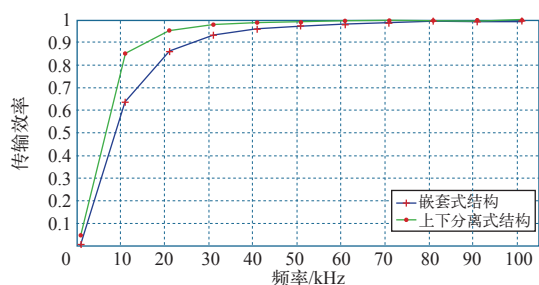


图10 1 mm气隙下传输效率随频率变化曲线

由图10可知, 在气隙大小为1 mm的工况下, 两种结构的松耦合变压器传输效率与频率正相关, 且在频率达到30 kHz时, 两种结构的变压器传输效率均超过了90%, 该结论与式(17)所描述内容一致, 证明仿真结果正确。此外, 如图10所示在给定频率范围内, 上下分离式结构的传输效率要优于嵌套式结构, 并且该结构在20 kHz左右即可达到95%, 已经可以满足大部分工况下的传输效率要求, 不必进一步提高工作频率来改善传输效率。

如图11所示, 固定气隙大小为10 mm, 工作频率从1 kHz逐渐升高至100 kHz, 两种结构变压器传输效率随工作频率的变化曲线。

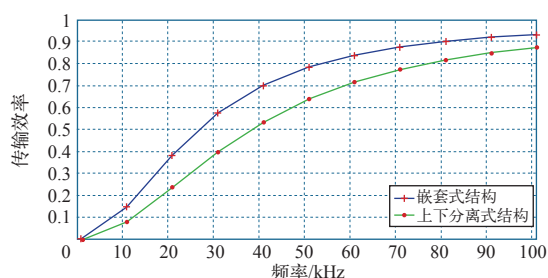


图11 10 mm气隙下传输效率随频率变化曲线

由图11可知, 在气隙大小为10 mm的工况下, 两种结构变压器的传输效率都比气隙大小为1 mm时有明显的下降, 这是因为随着气隙的逐渐增加, 变压器一、二次绕组的漏磁更加严重, 导致耦合系数逐渐变小, 严重降低了功率的传输效

率, 仿真得到结论与已知理论相符, 证明仿真结果准确。此外, 随着气隙由1 mm增加至10 mm, 嵌套式结构的传输效率在给定的频率范围内均大于上下分离式结构, 在80 kHz左右可以达到90%的功率传输效率。

如图12所示, 固定气隙大小为3 mm, 工作频率从1 kHz逐渐升高至100 kHz, 两种结构变压器传输效率随工作频率的变化曲线。

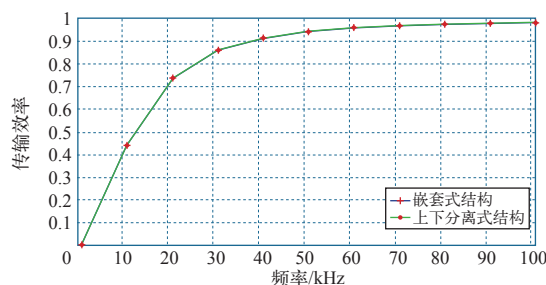


图12 3 mm气隙下传输效率随频率变化曲线

由图12可知, 在气隙大小为3 mm的工况下, 两种结构变压器的传输效率在给定频率变化范围内数值近似相等, 变化趋势相同。在气隙小于3 mm的情况下, 上下分离式结构在1~100 kHz的工作频率下, 传输效率高于嵌套式结构, 但是随着气隙的逐渐增加, 上下分离式结构的传输效率下降得更加明显, 当气隙大于3 mm时, 嵌套式结构在1~100 kHz的工作频率范围内, 传输效率高于上下分离式结构。

通过固定气隙大小, 改变工作频率得到的仿真结果来看, 实际使用中可以根据工况所要求的气隙大小来选择合适的结构, 在此提出下述选择策略。

1) 若系统要求的气隙大小不超过3 mm, 考虑选择上下分离式结构的松耦合变压器。因为在3 mm气隙下, 该结构在工作频率为40 kHz左右时可以达到90%。随着气隙的减小, 工作频率可以进一步降低, 不仅能够满足多数场合下的效率要求, 而且由于工作频率相对较低, 不用考虑锰锌铁氧体材料的铁心损耗以及上下分离式结构固有的内部绕组温升过高的问题。

2) 若系统要求的气隙大小不能低于3 mm, 考虑选择嵌套式结构, 其不仅传输效率高于上下分

离式结构,并且在较大的气隙下,嵌套式结构的变压器也可以用在—、二次侧高速旋转的场合。另外,由于嵌套式结构中绕组的电流密度远低于上下分离式结构,因此其工作频率相对于上下分离式结构可以设置得更高,在气隙较大的场合具有更加显著的优势。

3.3.2 固定频率,改变气隙大小

当固定工作频率,改变气隙大小时,所得仿真结果可以用来研究气隙对不同结构变压器传输效率的影响程度,对于实际应用具有一定的指导意义^[10-12]。本文设置的三个工作频率分别为20 kHz、65 kHz和90 kHz,均是—目前研究中常用的松耦合变压器工作频率。

图13分别为在20 kHz、65 kHz和90 kHz的工作频率下,气隙大小从1 mm逐渐增加至10 mm,步长为1 mm,两种结构变压器传输效率随气隙的变化曲线。

由图13可知,在不同的工作频率下,不同结构松耦合变压器的传输效率随气隙增加呈现相似

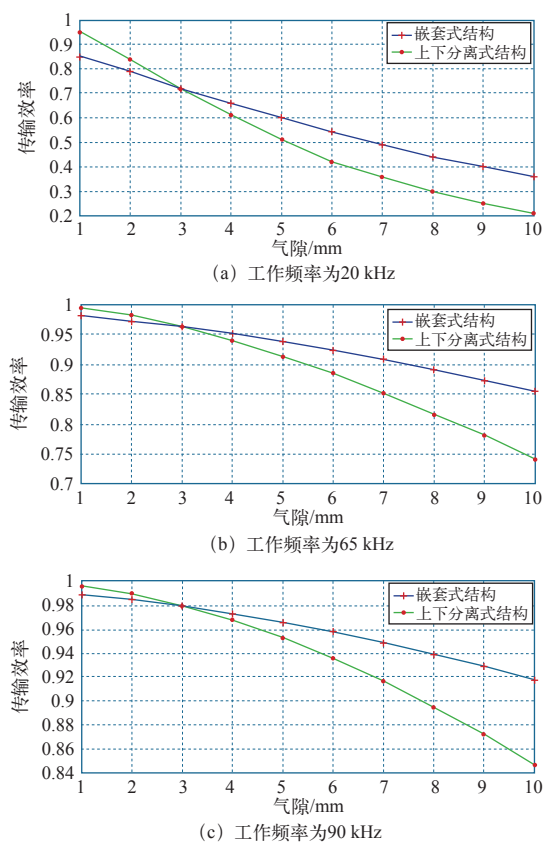


图13 不同工作频率下变压器传输效率随气隙变化曲线

的变化趋势:当—、二次侧气隙小于3 mm时,上下分离结构变压器的传输效率要高于嵌套式结构变压器;但是随着气隙的增大,其对嵌套式结构的传输效率的影响程度要明显小于上下分离式结构,在气隙大于3 mm的情况下,嵌套式结构的传输效率高于上下分离式结构,并且随着气隙和频率的进一步增大,两者传输效率的差异更加显著。仿真结果说明,虽然嵌套式结构在气隙较小的情况下传输效率低于上下分离式结构,但其传输效率的平稳区更宽,因此如果以传输效率作为评价指标,综合考虑气隙和频率对其的影响程度,嵌套式结构的松耦合变压器整体性能要优于上下分离式结构。

4 结束语

本文首先介绍了两种不同的旋转式松耦合变压器的磁心结构和各自的优缺点,并在COMSOL软件中建立了两种结构的二维轴对称模型。根据基本磁路理论推导松耦合变压器的互感模型,并依据该模型在COMSOL软件中搭建电路模型,根据基尔霍夫电流定律推导松耦合变压器一次侧输入功率、二次侧输出功率和系统传输效率的数学表达式,并将其作为验证仿真结果的理论依据。最后,在COMSOL软件中,对两种不同结构的松耦合变压器进行了频域稳态仿真,仿真结果与理论依据相吻合。根据仿真结果提出了基于气隙大小的变压器结构选型方法:在系统允许的气隙大小低于3 mm时,上下分离式结构变压器是更优选择;当系统对气隙的要求大于3 mm时,应选择嵌套式结构;将传输效率作为评价指标,综合考虑气隙和频率对其的影响程度,提出嵌套式结构的松耦合变压器在整体性能上要优于上下分离式结构,因此接下来将重点研究嵌套式松耦合变压器。

参考文献

- [1] 李小平,谢楷,傅灵忠,等. 太阳能帆板驱动装置非接触供电技术可行性研究[J]. 载人航天, 2014, 20(1): 75-77.

- [2] 陈林, 李淑琴, 王晓波, 等. 非接触式旋转高频链变压器在卫星电源上的应用 [J]. 电源技术应用, 2007, 10 (7): 46-49.
 - [3] Izzul Fahmi Zambari, Chiah Yi Hui, Ramizi Mohanned. Development of wireless energy transfer module for solar energy harvesting [J]. Procedia Technology, 2013, 11 (1): 882-894.
 - [4] 郑颖楠, 陈红, 张希恩. 非接触电能传输系统的松耦合变压器实验研究 [J]. 电工电能新技术, 2011, 30 (1): 64-68.
 - [5] 闫美存. 非接触式励磁电源谐振补偿的设计与研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
 - [6] 王旭东, 闫美存, 刘金凤, 等. 相对旋转时非接触式励磁系统磁罐变压器研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (22): 5915-5923.
 - [7] 陈珂睿. 非接触式电能传输系统功率及传输效率研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
 - [8] 马慧, 王刚. COMSOL Multiphysics基本操作指南和常见问题解答 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 10-99.
 - [9] Thierry Bieler, Marc Perrottet, Valerie Nguyen, et al. Contactless power and information transmission [J]. IEEE Transaction on Industry Application, 2002, 38 (5): 1266-1272.
 - [10] 肖海荣. 小功率非接触旋转式供能系统的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
 - [11] 李松林. 基于电磁感应耦合的无线电能传输研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
 - [12] 于建阁, 吕干云, 吴张勇, 等. 基于松耦合变压器的小功率CPT系统 [J]. 电工电能新技术, 2012, 31 (3).

(收稿日期: 2016-11-14) **EA**

(上接第28页)

- [2] 李从善, 刘天琪, 李兴源, 等. 用于电力系统状态估计的WAMS/SCADA混合量测数据融合方法[J]. 高压技术, 2013, 39(11): 2686-2691.
 - [3] 马世英, 刘道伟, 吴萌, 等. 基于WAMS及机组对的电网暂态稳定态势在线量化评估方法[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1323-1328.
 - [4] 李大路, 李蕊, 孙元章. WAMS/SCADA混合测量状态估计数据兼容性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 60-66.
 - [5] 张俊利, 潘莹. 基于电网扰动PMU数据的同步发电机参数辨识方法[J]. 电气应用, 2015, 34(4): 62-66.
 - [6] 刘志坚, 周术明, 宋琪, 等. 基于PMU的LEF法对电力系统低频振荡的分析[J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 2012, 37(3): 41-44, 49.
 - [7] 王克英, 穆钢, 陈学允. 计及PMU的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 30-34.
 - [8] 丁蓝, 欧智乐, 王先洪, 等. 输电线路参数获取方
 - [9] 王茂海, 鲍捷, 齐霞, 等. 基于PMU实测数据的输电线路参数在线估计方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 25-27, 31.
 - [10] 宫杨非, 衣涛, 桂萍, 等. 基于 π 型等值模型的线路参数计算和估计方法[J]. 华东电力, 2012(4): 586-589.
 - [11] 石光, 赵军, 孔圣立, 等. 基于增广状态估计的厂站拓扑错误辨识研究[J]. 电气应用, 2015, 34(15): 149-155.
 - [12] 全玉生, 杨敏中, 王晓蓉, 等. 双端测距中的自适应线路参数在线估计[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11): 26-30.
 - [13] 王进, 韩学山. 基于SCADA信息的变压器运行性能渐进变化规律的估计方法[J]. 电气应用, 2016, 35(16): 92-97.
 - [14] 李钦, 项凤雏, 颜伟, 等. 基于SCADA及PMU多时段量测信息的独立线路参数估计方法[J]. 电网技术, 2011(2): 105-109.

(收稿日期: 2017-01-23) **EA**