[耦合状态检测]

LCL-S补偿的IPT系统线圈耦合状态检测方法

文/陈新宁[1,2]，杨博[1,2]，荀帅[3]，程连斌[4]
1. 水声对抗技术重点实验室；2. 91388部队；3. 哈尔滨工程大学智能科学与工程学院；
4. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院

为了使感应无线电能传输系统能够自主判断二次侧电能接收线圈与二次侧电能发送线圈之间的耦合距离是否满足正常工作的条件，从而避免可能的过电压或过电流故障，保障系统的安全可靠运行，设计了一种仅通过动态检测一次侧电压幅值来判断一次侧线圈和副边线圈耦合状态的方法，可以有效简化系统的设计，硬件实验结果表明所设计的方案是可行的。

感应无线电能传输系统的一次侧、二次侧线圈相互靠近或远离时，耦合互感和电路运行状态会发生变化，IPT系统应据此做出适当的调整，避免可能出现的过电压或过电流现象，否则可能导致元器件损坏[1-3]。为了感知一次侧和二次侧线圈耦合距离的变化，可以通过加入辅助线圈[4-5]，或者在电能接收侧设计专门的信号发射电路[7-8]的方式来获得电能接收侧的状态信息，从而来决定电能发送侧的工作方式或启停动作，但是由于前者需加入额外的检测电路[6]，而后者虽然能有效感知接收侧的离合状态，但可能出现电路故障或信号失效，在诸如水下等需要高可靠性要求的特殊场景下应用时存在一定的安全隐患。

拓扑结构与特性分析

LCL-S补偿的感应无线电能传输系统的拓扑结构如图1所示。图1中L_p和L_s分别为线圈自感，L_1为原一次侧补偿电感，C_p为一次侧和二次侧补偿电容，C_s为副二次侧串联补偿电容，r_p和r_s分别为一次侧和二次侧线圈的等效串联电阻。

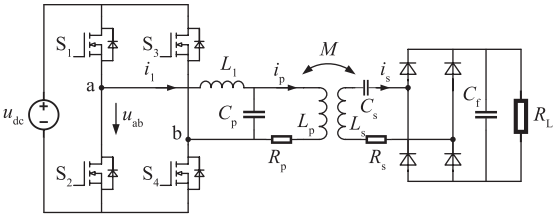


图1　LCL—S补偿的IPT拓扑结构示意图

在图1中，假设一次侧补偿电感L_1、线圈自感L_p与补偿电容C_p分别谐振，一次侧和二次侧的谐振频率满足式（1）

$$f_p=\frac{\sqrt{L_1+L_p}}{2\pi\sqrt{L_1L_pC}}=f_s=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_sC_s}} \tag{1}$$

此时，逆变器输出电流i_1的相量形式为

$$\boldsymbol{I}_1=\frac{\boldsymbol{U}_{ab}}{Z_{in}}=\frac{\boldsymbol{U}_{ab}[(1-\omega^2L_pC)/(Z_r+r_p)+j\omega C]}{1-\omega^2L_1C} \tag{2}$$

式中，Z_r为二次侧反射阻抗，$Z_r=(\omega M)^2/(r_s+R_e)$；$Re=8R_L/\pi^2$为等效负载电阻。

电能发送侧线圈电流为

$$\boldsymbol{I}_p=\frac{-\boldsymbol{U}_{ab}L_p}{(Z_r+r_p)L_1} \tag{3}$$

基金项目：国家自然科学基金（52307006）

可见，线圈电流I_p与其自感L_p成正比，与补偿电感L_1成反比，因此可改变L_p与L_1的倍数来调节线圈电流的大小，使其具有较好的谐振效果。此外，由式（3）可知，当互感M增大时，一次侧线圈电流随之减小；当负载等效电阻增大时，一次侧线圈电流随之增大。

此时一次侧线圈电压$\boldsymbol{U}_p$的幅值为

$$\left|\boldsymbol{U}_p\right|=\left|\boldsymbol{I}_p\right|\sqrt{(\omega L_p)^2+(Z_r)^2} \tag{4}$$

根据式（4）可绘制$|\boldsymbol{U}_p|$随互感M与工作频率f_s变化的三维图像，如图2所示。图2中假设一次侧线圈自感L_p固定。可以看出，在M较小的低耦合状态，即一次侧、二次侧线圈之间的距离较大时，一次侧线圈电压会随工作频率的增加高而升高；而在高耦合状态，当IPT系统的工作频率变低时，一次侧线圈电压逐渐升高。图3所示为利用不同距离条件下的实测互感参数M和一次侧线圈电压幅值绘制的分段曲线，其中实线为20 kHz工作频率时的一次侧线圈电压随互感变化的曲线，虚线为工作频率为16.8 kHz时的情况。

根据上述分析，可以设计一种通过动态检测一次侧电压幅值来判断系统耦合状态的方法。思路如下：IPT系统处于待机时（线圈间距大），工作频率16.8 kHz，此时一次侧逆变器两个桥臂之间的移相角很小，检测一次侧线圈电压u_p的幅值是否超出设定的待机阈值电压，在二次侧线圈靠近二次侧线圈，若确认u_p幅值达到阈值后，则可进入正常工作模式，使工作频率变为20 kHz。系统处于正常工作模式时，检测u_p幅值是否低于设定的脱机阈值，若u_p幅值升高达到脱机阈值，说明二次侧线圈已逐渐远离，一次侧电能发送侧进入待机模式。

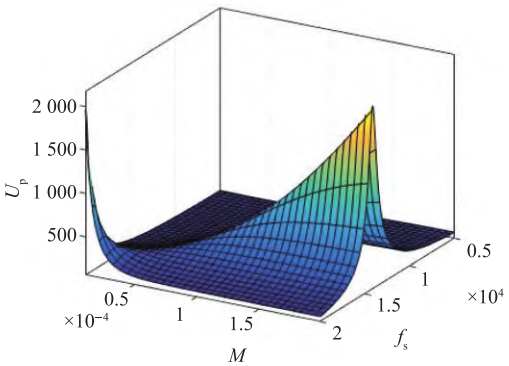


图2　仿真的自感L_p不变时的原边线圈电压三维图

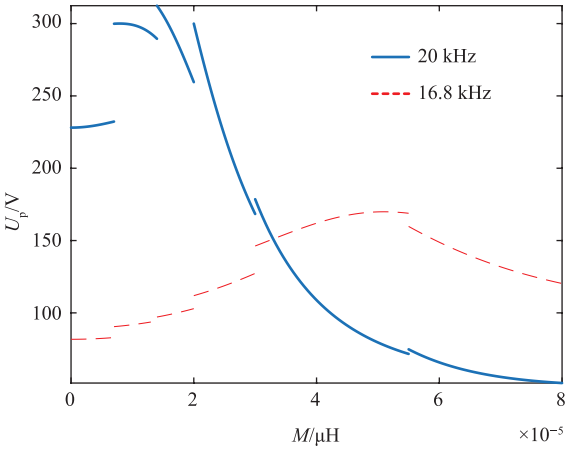


图3　实测的互感M变化时的原边线圈电压分段曲线

实验验证

为了验证上述分析的可行性，搭建IPT系统硬件电路进行实验。一次侧直流侧电压为80 V，实测的IPT系统中一次侧线圈电压峰值随一次侧、二次侧线圈之间距离变化的曲线如图4所示。可见，在不同的工作频率下，随着一次侧、二次侧线圈间距的增加，一次侧绕组电压具有清晰的辨识度。

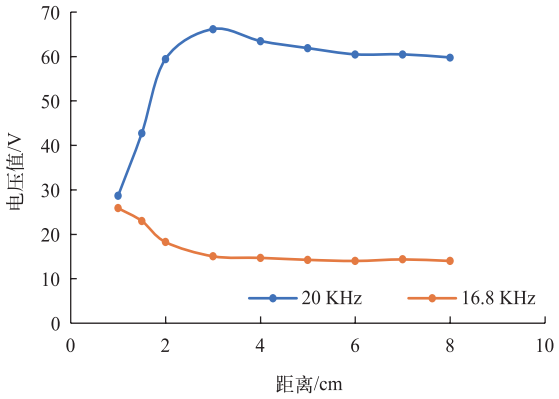
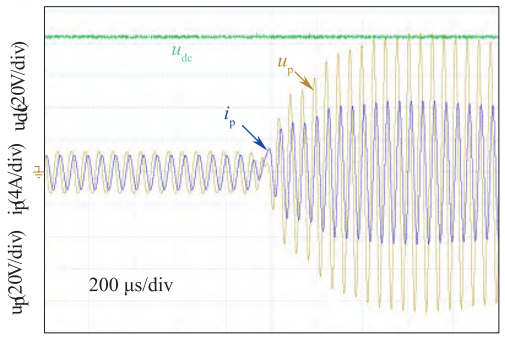
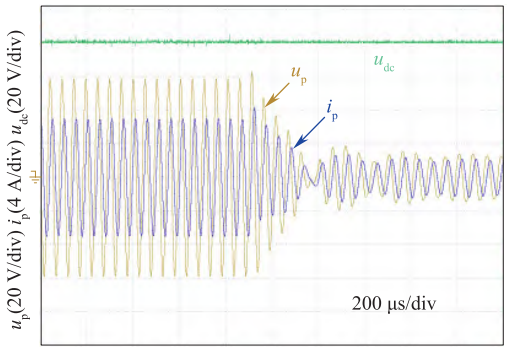


图4　一次侧线圈电压随间距变化的曲线

实验的IPT系统设计以10 mm间距为一次侧、二次侧线圈的额定工作距离。实验波形如图5所示。当系统处于待机状态时，控制u_{ab}的等效占空比为0.24，工作频率为16.8 kHz，u_p的待机阈值为15 V，即在16.8 kHz条件下，随着线圈间距减小，u_p幅值升高到15 V时系统转入正常工作模式；当系统处于正常工作状态时，u_{ab}等效占空比为0.5，工作频率为20 kHz，随着线圈间距增大u_p幅值升高到脱机阈值59 V时，系统将进入待机模式。



（a）原一次侧、二次侧线圈间距由大变小



（b）原一次侧、二次侧线圈间距由小变大

图5　工作模式切换时的原边线圈电压和电流波形

结论

根据LCL-S补偿的感应无线电能供传输系统自身特性，本文设计了一种仅通过动态检测一次侧电压幅值来判断一次侧线圈和二次侧线圈处于远离或靠拢状态（耦合状态）的方法，而无需额外的信号线圈和辅助电路，因此可以有效简化系统的设计。论文通过理论分析和硬件实验说明了所设计方案的可行性。EA

（收稿日期：2024-04-25）

参考文献

[1] 王晓兰，石圣昀，王惠中．基于模型预测控制的谐振式无线电能传输系统[J]．电子设计工程，2022，30(23)：143-147．

[2] GUO Y，ZHANG Y，ZHANG W，et al．Battery parameter identification based on wireless power transfer system with rectifier load[J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics，2021，68(8)：6893-6904．

[3] 程连斌．LCL补偿的感应电能传输技术研究[D]．哈尔滨：哈尔滨工程大学，2020．

[4] MAI R，LIU Y，LI Y，et al．An active-rectifier-based maximum efficiency tracking method using an additional measurement coil for wireless power transfer[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2018，33(1)：716-728．

[5] ZHONG W，HUI S Y R．Auxiliary circuits for power flow control in multifrequency wireless power transfer systems with multiple receivers[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2015，30(10)：5902-5910．

[6] 黄创大，唐宁，李荣毅．一种无线充电识别电路的设计[J]．桂林电子科技大学学报，2013，33(1)：9-13．

[7] HU J，ZHAO J，CUI C．A wide charging range wireless power transfer control system with harmonic current to estimate the coupling coefficient[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2021，36(5)：5082-5094．

[8] HU J，ZHAO J，GAO F．A real-time maximum efficiency tracking for wireless power transfer systems based on harmonic-informatization[J]．IEEE Transactions on Power Electronics，2023，38(1)：1275-1287．