

# 非接触式松耦合感应电能传输系统原理分析与设计

## 0 引言

接触式电能传输通过插头—插座等电连接器实现电能传输，在电能传输领域得到了广泛使用。但随着用电设备对供电品质、安全性、可靠性等要求的不断提高，这一传统电能传输方法所固有的缺陷，已经使得众多应用场合不能接受接触式电能传输，迫切需要新颖的电能传输方法[1]。

在矿井、石油钻采等场合，采用接触式电能传输，因接触摩擦产生的微小电火花，就很可能引起爆炸，造成重大事故[2]。在水下场合，接触式电能传输存在电击的潜在危险[3]。在给移动设备供电时，一般采用滑动接触供电方式，这种方式在使用上存在诸如滑动磨损、接触火花、碳积和不安全裸露导体等缺陷[4][5]。在给气密仪器设备内部供电时，接触式电能传输需要采用特别的连接器设计，成本高且难以确保设备的气密性[6]。

为了解决传统接触式电能传输不能被众多应用场合所接受的问题，迫切需要一种新颖的电能传输方法。于是，非接触式感应电能传输应运而生，成为当前电能传输领域的一大研究热点。本文首先给出了这种新颖电能传输方法的基本原理，分析了影响系统电能传输的关键因素；接着围绕着提高系统电能传输效率和减小供电电源的电压电流定额的要求，针对不同应用场合，对原副边进行了相应的补偿设计；对系统的稳定性和可控性问题进行了讨论。最后，基于以上分析，给出非接触式感应电能传输系统的一般设计方法。

## 1 非接触式感应电能传输系统

非接触式感应电能传输系统的典型结构如图 1 所示。系统由原边电路和副边电路两大部分组成。原边电路与副边电路之间有一段空隙，通过磁场耦合相联系。原边电路把电能转换为磁场发射，经过这段气隙后副边电路通过接受装置，匝链磁力线，接受磁场能量，并通过相应的能量调节装置，变换为应用场合负载可以直接使用的电能形式，从而实现了非接触式电能传输（文中负载用电阻表示以简化分析）。磁耦合装置可以采用多种形式。基本形式如图 2(a)原边绕组和副边绕组分别绕在分离的铁芯上；图 2(b)原边采用空芯绕组，副边绕组绕在铁芯上；图 2(c)原边采用长电缆，副边绕组绕在铁芯上。

在该非接触式感应电能传输系统中，原副边电路之间较大气隙的存在，一方面使得原副边无电接触，弥补了传统接触式电能传输的固有缺陷。另一方面较大气隙的存在使得系统构成的磁耦合关系属于松耦合（由此，这种新颖电能传输技术通常也称为松耦合感应电能传输技术，记为 LCIPT），漏磁与激磁相当，甚至比激磁高，限制了电能传输的大小和传输效率。为此，通常需要在原副边采用补偿网络来提升电能传输的大小和传输的效率，同时减小电源变换器的电压电流应力。而且在该系统的分析中，因磁耦合装置为松耦合，因此，通常用于磁性元件分析的变压器模型不再适用，必须采用耦合电感模型分析该系统中的电磁关系，同时考虑漏感和磁化电感对系统工作的影响。

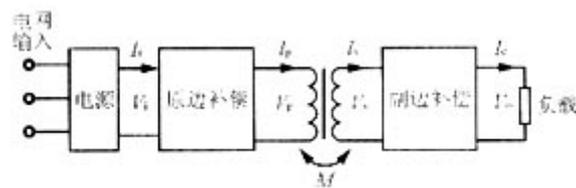
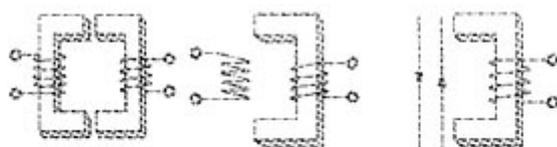


图1 非接触式感应电能传输系统典型结构



(a) 原边绕组绕在铁芯上 (b) 原边采用空芯绕组 (c) 原边采用长电缆

图2 几种基本的磁耦合装置

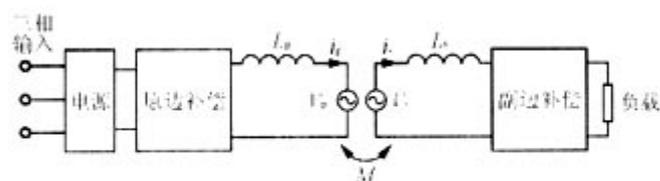


图3 采用耦合电感模型的系统等效电路图

图3 给出磁耦合装置采用耦合电感模型的系统等效电路图。原副边磁耦合装置的互感记为  $M$ 。

设原边用于磁场发射的高频载流线圈通过角频率为  $\omega$ ，电流有效值为  $I_p$  的交流电。根据耦合关系，副边电路接受线圈中将会感应出电压

$$V_{oc} = j\omega MI_p \quad (1)$$

相应的,诺顿等效电路短路电流为

$$I_{sc} = \frac{j\omega MI_p}{j\omega L_s} = \frac{M}{L_s} I_p \quad (2)$$

式中:  $L_s$  为副边电感。

若副边线圈的品质因数为  $Q_s$ , 则在以上参数下, 副边线圈能够获得的最大功率为

$$P_o = \frac{\omega M^2 I_p^2 Q_s}{L_s} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 提高电能传输的大小可以通过增大  $\omega$ ,  $I_p$ ,  $M$  和  $Q_s$  或减小  $L_s$ 。但受应用场合机械安装和成本限制, LCIPT 系统中,  $M$  值一般较小, 而且一旦磁耦合装置设计完成后,  $M$  和  $L_s$  的值就基本固定了。能够作调整的是乘积量 ( $\omega I_p^2 Q_s$ )。从工程设计角度考虑, 在参数选择设计中,  $Q_s$  一般不会超过 10, 否则系统工作状态将对负载变化、元件参数变化和频率变化非常敏感, 系统很难稳定。由此对传输电能大小调节余地最大的是乘积  $\omega I_p^2$ 。从该关系式可见频率与发射电流的关系: 提高频率  $\omega$ , 可以减小原边电流  $I_p$ , 反之亦然。在传输相等电能及其它相关量不变情况下, 采用高频的 LCIPT 系统与采用低频的 LCIPT 系统相比, 所需的发射电流大大降低, 电源变换器电流应力及系统成本大大降低。因而 LCIPT 比较适合采用高频系统。但限于目前功率电子技术水平和磁场发射相关标准, 系统频率受到限制。根据应用场合的不同, 系统采用的频率范围一般在 10kHz~100kHz 之间。

## 2 系统补偿

### 2.1 副边补偿

在松耦合感应电能传输系统中, 若副边接受线圈直接与负载相连, 系统输出电压和电流都会随负载变化而变化, 限制了功率传输。

$$P_o = \frac{RV_{oc}^2}{R^2 + (\omega L_s)^2} \quad (4)$$

为此，必须对副边进行有效的补偿设计。如图 4 所示，基本的补偿拓扑有电容串联补偿和电容并联补偿两种形式。

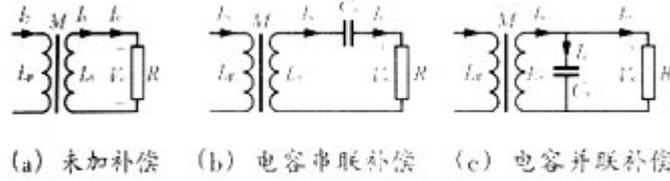


图 4 副边补偿拓扑

在电容串联补偿电路中，副边网络的阻抗为

$$Z_s = R + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (5)$$

输出功率为

$$P_o = \frac{RV_s^2}{R^2 + \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s}\right)^2} \quad (6)$$

当补偿电容  $C_s$  取值满足与副边电感  $L_s$  在系统工作频率处谐振时，副边网络感抗与容抗互消，为纯电阻，输出电压与负载无关，等效于输出电压为副边开路电压的恒压源，理论上电能传输不受限制。

电容并联补偿电路副边网络的导纳为

$$Y_s = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L_s} + j\omega C_s \quad (7)$$

输出功率为

$$P_o = \frac{\frac{1}{R} I_{sc}^2}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\omega C_s - \frac{1}{\omega L_s}\right)^2} \quad (8)$$

式中： $I_{sc}$  为副边短路电流。

当补偿电容  $C_s$  取值满足与副边电感  $L_s$  在系统工作频率处谐振时，副边网络感纳与容纳互消，为纯电导，输出电流与负载无关，等于副边短路电流，理论上电能传输不受限制。

为使副边谐振频率为系统频率，补偿电容的取值应满足式 (5) 和式 (7) 中的虚部为零。

在松耦合感应电能传输系统中，副边电路对原边电路的工作的影响，可以用副边电路反映至原边电路的反映阻抗  $Z_r$  来表示。

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{Z_s} \quad (9)$$

式中： $Z_s$  对应副边网络阻抗，见式(5)和式(7)，反映阻抗结果列于表 1 中( $\omega_0$  为系统频率)。

表 1 原副边采取不同补偿拓扑时的  
补偿电容及反映阻抗值

副边补偿拓扑	副边补偿电容 $C_s$ 值	副边电路反映至原边的阻抗	
		电阻	电抗
电容串联补偿	$1/(\omega_0^2 L_s)$	$(\omega_0^2 M^2)/R$	0
电容并联补偿	$1/(\omega_0^2 L_s)$	$(M^2 R)/L_s^2$	$-(\omega_0^2 M)/L_s$

电气自动化技术网

## 2.2 原边补偿

LCIPT 系统中，原边载流线圈中流过有效值较高的高频电流，可直接采用 PWM 工作方式的变换器获得这一高频电流，变换器的电压电流定额较高，系统成本高。为此，必须采取必要的补偿措施，来有效降低变换器电压电流定额。与副边补偿相似，根据电容接入电路的连接方式，也可采用串联补偿和并联补偿两种基本补偿电路。

在电容串联补偿电路中，电源的负载阻抗为

$$Z_1 = j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p} + Z_r \quad (10)$$

电容电压补偿了原边绕组上的电压，从而降低了电源的电压定额。

在电容并联补偿电路中，电源的负载导纳为

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1} = j\omega C_p + \frac{1}{j\omega L_p + Z_r} \quad (11)$$

电容电流补偿了原边绕组中的电流，从而降低了电源的电流定额值。设计时保证式(10)和式(11)的虚部在系统谐振频率处为零，可以有效降低电源的电压电流定额，使得电压电流同相位，输入具有高功率因数。其结果列于表2中。

原边采取何种补偿电路，对应用场合的依赖性很大。当原边采用较长电缆时，电缆端电压会很高，适合采用串联补偿，降低电源电压应力；当原边采用集中绕组时，为了磁场发射需要，一般要求较高电流，适合采用并联补偿，降低电源电流应力[7]。

### 3 系统稳定性和控制

LCIPT系统中，原副边都采用电容补偿时，系统是一个四阶系统，在某些情况下，会出现分歧现象[8]。特别是在原边电路的品质因数 $Q_p$ 比副边电路的品质因数 $Q_s$ 小，或两者相当时，系统很可能不稳定，此时必须对系统进行透彻的稳定性分析。同时，在LCIPT系统中，控制方案的合理选择对系统稳定和电能传输能力非常关键。目前，常采用两种基本控制方案：恒频控制和变频控制[9]。

表2 原边补偿电容值

副边补偿拓扑	原边补偿拓扑	原边补偿电容值
电容串联补偿	电容串联补偿	$\frac{1}{\omega_0^2 L_p}$
电容串联补偿	电容并联补偿	$\frac{1}{\omega_0^2 L_p - \frac{\omega_0^2 M^2}{L_s}}$
电容并联补偿	电容并联补偿	$\frac{\frac{1}{\omega_0} \left( \omega_0 L_p - \frac{\omega_0 M^2}{L_s} \right)}{\left( \frac{M^2 R}{L_s^2} \right)^2 + \left( \omega_0 L_p - \frac{\omega_0 M^2}{L_s} \right)^2}$
电容并联补偿	电容串联补偿	$\frac{\frac{1}{\omega_0} (\omega_0 L_p)}{\left( \frac{\omega_0 M^2}{R} \right)^2 + (\omega_0 L_p)^2}$

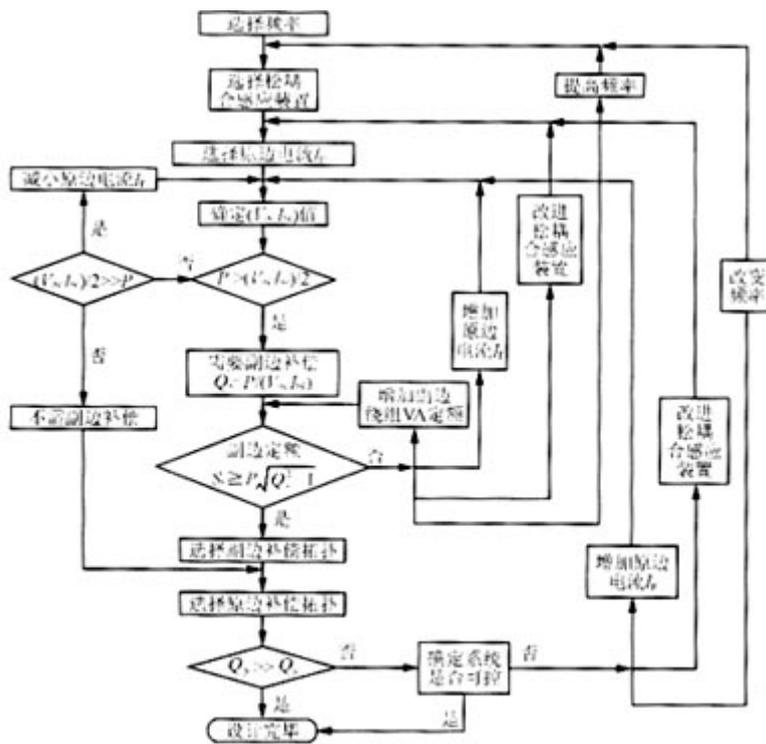


图5 LCIPT系统设计流程

恒频控制有利于电路元件的选择，但恒频控制对应的问题是，电路实际工作中电容不可避免地会因为损耗产生温升，导致电容量下降，副边实际工作谐振频率会升高，原副边电路不同谐，使得电能传输受损[10]。变频控制可以通过实时控制原边谐振频率，使其跟踪副边谐振电路频率，使得原副边电路同谐，获得最大电能传输。但在变频控制中，电源输入电压和输入电流相角与频率之间的关系很可能出现分歧现象，引起系统不稳定。为此，必须对原副边的品质因数加以严格限制。

#### 4LCIPT 系统设计

对于紧耦合感应电能传输系统，原副边的电能关系可以近似用原副边匝比变换关系来表示，因而其系统设计可以分为三个独立部分：原边电路、紧耦合磁件、副边电路，分别进行设计。紧耦合磁件的设计也有较成熟的设计步骤可依。

但在松耦合感应电能传输系统中，原副边电路的工?依赖性很大，如式(3)所示，原副边的电能传输关系由多个变量决定，这些变量必须根据现有功率电子水平，及相关设计经验初选一些值，然后根据相关公式进行下一步计算，确定参

数。在整个设计过程中，所出现的多个变量都必须进行选择，而这些变量并非孤立的，而是相互之间都存在着一定的制约关系。因而，松耦合感应电能传输系统的设计比紧耦合感应电能传输系统要复杂得多。这里把松耦合感应电能传输系统中出现的每个变量的含义，及选取方法做一说明，并绘成相应的流程图，如图 5 所示，以便理解。设计步骤如下。

4.1 选择频率选择系统工作频率是 LCIPT 系统设计的第一步，从式 (3) 可以看出，频率大小的选取，与电源的复杂程度、成本及系统电能传输大小有密切关系。要综合考虑应用场合对系统体积重量要求、目前功率电子水平及相关系统的设计经验来选取频率。就目前功率电子水平及系统成本考虑，选择 10kHz~100kHz 之间的频率比较合理。随着功率电子水平的不断进步，系统频率可望进一步提高，从而使得系统体积更小、重量更轻。

电气自动化技术网

#### 4.2 选择松耦合感应装置

紧耦合感应装置(如广泛采用的变压器)的结构一般受限于现有的铁芯结构，因而结构形式有限。但松耦合感应装置却不受铁芯结构限制，根据各种应用场合的需要，可能会出现多种结构形式。在很大程度上，这些松耦合感应装置要依靠相关的设计经验来选择。确定松耦合感应装置结构后，要标定一些基本的参数，如原副边线圈电感量、耦合系数、互感等。

#### 4.3 选择原边电流 $I_p$

在 LCIPT 系统中，传输电能大小、原边电源变换器的成本都与用于磁场发射的原边电流  $I_p$  直接相关。一般从相对较小的电流值开始选取  $I_p$ ，从而对应电源的低电流应力。若经计算后，这一  $I_p$  电流值不满足系统电能传输要求，可进一步增大电流值，再进行计算验证，直至系统设计满足要求。

#### 4.4 确定 $(V_{oc}I_{sc})$ 值

根据所选择的电磁装置，在原边电流为所选  $I_p$  时，测试出副边接受线圈的开路电压  $V_{oc}$  和短路电流  $I_{sc}$ 。确定这一乘积  $(V_{oc}I_{sc})$  也可以用一个与设计的接受线圈同匝数的小尺寸接受线圈来完成，避免因为接受线圈电流定额不够而返工。当然，也可采用相应的电磁场仿真软件包进行模拟设计。但仿真设计过程比较复杂[11]。

#### 4.5 确定副边补偿

##### 4.5.1 副边补偿等级

副边电路不加补偿时，负载能够获得的最大功率传输等于  $(V_{oc}I_{sc}/2)$  [11]。如果负载所需功率值超过这一值，则副边需要采用补偿电路，副边电路的品质因数可用式 (12) 计算。

$$Q_s = \frac{P}{V_{oc}I_{sc}} \quad (12)$$

式中：P 为至负载的传输功率。

从而副边所需要的 V·A 定额为

$$S = P \sqrt{Q_s^2 + 1} \quad (13)$$

如果副边实际的 VA 定额高于式 (13) 的计算值，系统就可以传输所需的功率。反之，该设计不能传输所需功率 P，必须对设计作出相应的调整来增加功率传输能力。一般可以考虑以下 4 种途径：

- 加粗接受线圈绕组线径或增大铁芯截面积；
- 增大原边电流；
- 改进电磁装置的耦合程度，提高互感值 M；
- 适当提高系统频率。

第 1 种方案增加了副边的成本；第 2 种方案增加了原边的成本；第 3 种方案增加了松耦合感应装置的成本；第 4 种方案受现有功率电子技术的限制。实际设计中，应综合考虑性能和成本选择性价比最好的方案作为最优设计。

#### 4 .5 .2 副边补偿拓扑

当副边 VA 定额满足设计要求后，下一步就应当确定副边补偿具体采用的拓扑形式。补偿拓扑的选择依赖于具体的应用场合。并联补偿对应电流源特性，适合于电池充电器等场合；串联补偿对应于电压源特性，适用于电机驱动供电等场合。

#### 4 .6 确定原边补偿

副边补偿设计完成后，设计原边补偿。根据已知的原边电流和松耦合感应装

置原边绕组电感量，可以确定原边绕组端电压。从而计算出原边 VA 定额，用实际传输功率除以这一 VA 定额，可以得到原边品质因数  $Q_p$  的大小。如前所述，原边补偿电路形式也取决于应用场合。当原边采用较长电缆时，适合采用串联补偿；当原边采用集中绕组时，适合采用并联补偿。

#### 4 .7 系统稳定性和控制性核查

最后一步要对系统稳定性和控制性进行核查，这是系统能否在实际应用场合被采用的最关键的一步。如上所述，若  $Q_p < Q_s$  必须对系统进行透彻的稳定性分析。若系统不能保证在所有工作情况下控制稳定，就必须对系统参数进行调整。常用的方法包括增大原边电流、改进松耦合感应装置的结构或改变系统频率等。

#### 5 结语

文中给出了松耦合感应电能传输的基本原理，基于系统补偿设计和系统控制问题的讨论，给出了松耦合感应电能传输系统的一般性设计方法，这一系统的设计在很大程度上依赖于设计者对各设计参量之间相互依赖关系的理解，需要特别注意的是在各参数设计完成后，要对整个系统的稳定性和可控性进行全面的考察，确保系统设计的有效性。