

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.12.011

双发射无线电能传输系统的同步控制策略研究

陈永明¹, 杨 茹¹, 蒋 成²

(1. 国网镇江供电公司, 江苏 镇江 212000; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘要:在无线电能传输系统的设计中,为了提升系统的功率传输能力以及降低功率变换器件上的电压电流应力,笔者设计了一种双发射无线电能传输系统,该系统有2种工作模式:休眠工作模式和增强工作模式。当接收端所需功率较低时,其中1个发射端在休眠工作模式,仅由另外1个发射端为接收端提供能量;当接收端所需功率较高时,该发射端由休眠工作模式切换到增强工作模式,连同另外1个发射端一起为接收端提供能量。除此之外,针对2个独立发射端逆变器的输出电压相位不一致带来的能量抵消问题,笔者提出同步控制方法使二者保持同步以提升系统的功率传输能力,通过实验验证了所提方案的可行性和有效性。

关键词:无线电能传输;双发射;传输功率提升;同步控制

中图分类号:TM152

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2024)12-114-10

Synchronization control strategy for dual-transmitter wireless power transfer system

CHEN Yongming¹, YANG Ru¹, JIANG Cheng²

(1. State Grid Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang, Jiangsu 212000, P. R. China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, P. R. China)

Abstract: In wireless power transfer(WPT) system design, incorporating multiple transmitters can improve power transmission capacity and reduce voltage and current stress on power conversion components. This paper proposes a dual-transmitter WPT system featuring two operational modes: standby and strengthening. When the receiver requires low power, one transmitter operates in standby mode, while the other provides power to reduce system losses. When the receiver's power demand increases, the system switches from standby to strengthening mode, with both transmitters supplying power to the receiver. Additionally, to address energy cancellation caused by phase inconsistencies in the output voltages of the two transmitter inverters, a synchronization control method is introduced, ensuring synchronized operation and boosting system power capacity. Experimental results confirm the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: wireless power transfer; dual-transmitter; power transfer enhancement; synchronization control

收稿日期:2022-11-23

作者简介:陈永明(1979—),男,高级工程师,主要从事电力系统运行、继电保护和数字化以及无线电能传输方向研究,(E-mail) 18912825260@189.cn。

通信作者:蒋成,男,高级工程师,(E-mail) jiangc327@163.com。

随着无线电能传输(wireless power transfer, WPT)技术的日趋成熟,这项技术已被广泛应用于厨房用品、智能家居、无人机等领域。传统的 WPT 系统多采用单发射单接收的方式,但是当 WPT 系统应用于大功率的场合时,例如电动汽车^[1-2]等,通常会遇到功率传输能力有限,器件的电压电流应力较大等问题,为此,目前多采用多个发射单元来提升 WPT 系统的功率传输能力^[3-4]。

目前关于双发射以及多发射 WPT 系统的研究主要集中在提升系统的传输功率和效率,以及改善系统的性能。文献[5]采用多个重叠的线圈构成 WPT 系统的发射线圈,提升系统的传输性能,通过在发射单元添加附加电容减小多个发射线圈之间的交叉耦合。文献[6]中提出一种全桥双谐振补偿拓扑结构,该拓扑结构可提高 WPT 系统在失谐条件下的传输效率。针对单发射 WPT 系统随着传输距离的增加和频率分裂导致的传输效率和输出功率急剧衰减问题,文献[7]采用了多发射 WPT 技术提高了系统的传输效率和输出功率。针对 WPT 系统中线圈之间径向位移对输出电压的影响,文献[8]通过分析线圈位移与输出电压之间的关系,在阵列式的线圈上实现了不同位移条件下的恒压输出。与单发射 WPT 系统相比,文献[9]设计的双发射 WPT 系统可增加系统的纵向传输距离,且在临界耦合区域内有效扩大系统的横向传输范围。在 WPT 系统中应用多个发射单元,除了提高系统的功率传输能力外,适应接收线圈的角度变化^[10],提高系统的可靠性^[11],降低系统功率损耗^[12],在不增加系统功率变换器件上电压和电流应力的情况下提高系统的功率和效率^[13]。文献[14]设计了一种由平面内 4 个交错重叠放置的线圈构成的原边发射线圈,该线圈在平面内产生二维或三维的旋转磁场,接收端在此范围内任意方向移动时都可以实现高效的能量供给。在文献[15]所设计的多发射单接收 WPT 系统中,通过采用 LCCL-LC 的谐振补偿网络,以及所建立的系统阻抗分析模型,在 6.78 MHz 的 WPT 系统中实现了零电压开通,提升了系统的传输效率。文献[16]提出了一种应用于双发射双接收 WPT 系统的负载识别和功率分配方法,通过调节发射端的谐振频率实现了输出功率的自由分配,并能在负载变化的情况下实现功率的稳定传输。针对动态 WPT 系统中相邻导轨之间的交叉耦合问题,文献[17]通过对系统进行建模分析,以及对谐振补偿网络进行优化,实现了系统整体的高效率传输。文献[18]提出了一种应用于 WPT 系统的磁场编辑技术,通过采用多个发射线圈对磁场进行编辑和约束,从而实现了能量传输路径的延伸。针对多发射 WPT 系统中线圈之间的交叉耦合问题,文献[19]提出了一种新颖的解耦策略,有助于 WPT 系统的模块化设计。文献[20]以实现能量的最大效率传输为目标,提出一种根据线圈之间的耦合系数来选择不同线圈作为发射线圈的策略,从而在多发射 WPT 传输系统中实现了能量的高效率传输。

综上所述,目前所研究的双发射和多发射 WPT 系统多用来提升系统的功率传输能力,但是当接收端所需功率较小时,仍采用多发射的方式将带来能量浪费。不同于以往的双发射和多发射 WPT 系统,研究提出的双发射无线电能传输(dual-transmitter wireless power transfer, DT-WPT)系统不仅可以提升系统的功率传输能力,且当发射端所需能量较低时,系统可以在休眠工作模式运行,降低系统损耗。当接收端所需能量增大时,系统可以从休眠工作模式动态切换到增强工作模式,提升系统的发射功率,除此之外,本文提出了一种同步控制方法使 2 个相互独立发射端逆变器的交流输出电压保持同相,有效避免 DT-WPT 系统由于 2 个发射单元相位不一致带来的能量抵消。除了双发射 WPT 系统之外,所提出的同步控制策略也可以应用到更多发射单元,进一步提升系统的功率传输能力,根据接收端的能量需求对发射端传输的能量进行有效调节。

1 DT-WPT 系统建模及 2 种工作模式

图 1 展示了所提出的 DT-WPT 系统的原理图,系统包含 2 个发射端(发射端 1 和发射端 2)和 1 个接收端,每个发射端均由 3 部分组成:直流电源、全桥变换器和谐振补偿网络。为方便分析系统,给出基本定义。每个发射端的直流输入电压被表示为 U_{dc_i} ($i=1,2$),系统的工作频率被表示为 f ,角频率为 ω ($\omega=2\pi f$)。2 个发射端采用 LCC(L_{11} - C_{11} - C_{12} - L_{12} 和 L_{21} - C_{21} - C_{22} - L_{22})的拓扑结构,接收端采用串联连接(L_{32} - C_{32})的拓扑结构,线圈自感分别为 L_{12} , L_{22} 和 L_{32} ,线圈内阻分别被表示为 $R_{L_{12}}$, $R_{L_{22}}$ 和 $R_{L_{32}}$,线圈之间的互感被表示为 M_{12} , M_{13} 和 M_{23} ,负载电阻被表示为 R 。

在图 1 所示的系统中,当系统各部分谐振网络的参数满足公式(1),那么系统将表现为纯阻性。

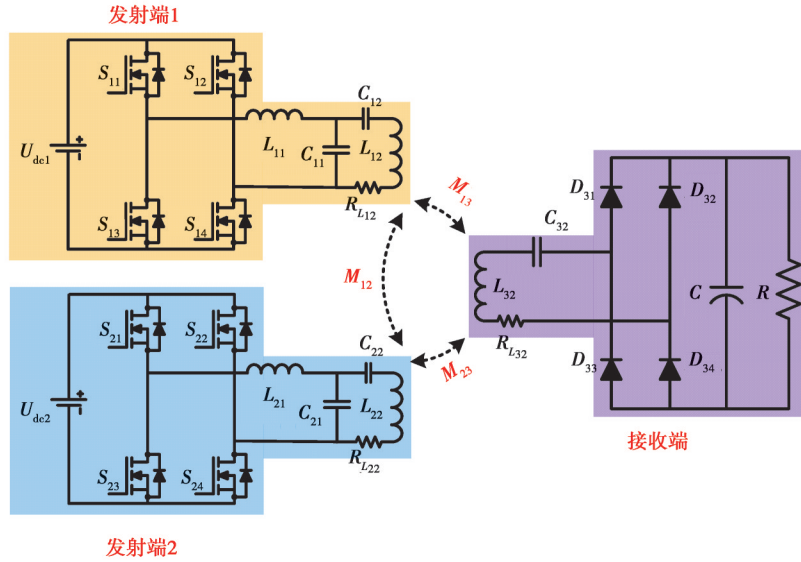


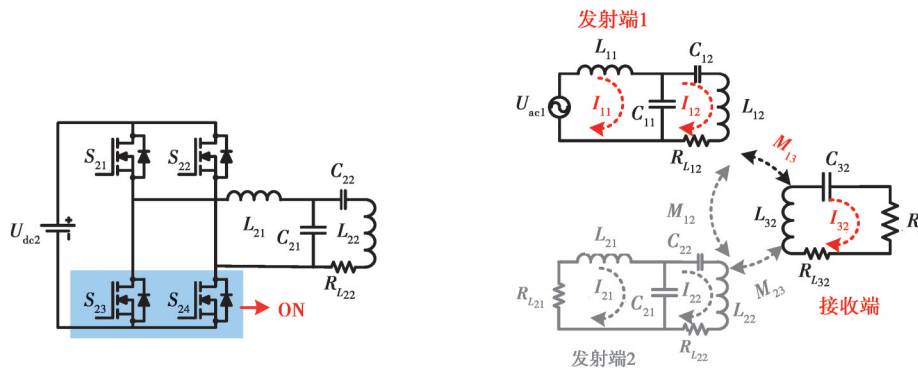
图 1 DT-WPT 系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the proposed DT-WPT system

$$\begin{cases} \omega^2 = \frac{1}{L_{i1}C_{i1}} = \frac{1}{L_{32}C_{32}}, & (i=1,2). \\ \frac{1}{j\omega C_{i2}} + j\omega L_{i2} = j\omega L_{i1} \end{cases} \quad (1)$$

1.1 休眠工作模式

如图 2(a) 所示, 当发射端 2 逆变器的 S_{23}/S_{24} 导通时, 发射端 2 工作在休眠工作模式。发射端 1 的逆变器以固定频率 f 被驱动, 此时系统的等效电路如图 2(b) 所示。



(a) 发射端 2 的逆变器在休眠工作模式下的工作状态

(b) 系统在休眠工作模式下的等效交流电路

图 2 休眠工作模式

Fig. 2 Standby operation mode

在图 2 所示的等效交流电路模型中, 等效交流阻抗被表示为 R_i , R_i 和 R 之间的关系可以被表示为: $R_i = 8R/\pi^2$ 。交流电压 U_{ac1} 是 U_{dc1} 的逆变输出电压, U_{ac1} 被表示为

$$U_{ac1} = \frac{2\sqrt{2}U_{dc1}}{\pi} \quad (2)$$

根据图 2(b) 所示的系统等效电路, 系统的 KVL 方程可得

$$\begin{cases} \dot{U}_{ac1} = \left(j\omega L_{11} + \frac{1}{j\omega C_{11}} \right) \dot{I}_{11} - \frac{1}{j\omega C_{11}} \dot{I}_{12}, \\ 0 = -\frac{1}{j\omega C_{11}} \dot{I}_{11} + \left(j\omega L_{12} + \frac{1}{j\omega C_{11}} + \frac{1}{j\omega C_{12}} + R_{L12} \right) \dot{I}_{12} + j\omega M_{12} \dot{I}_{22} + j\omega M_{13} \dot{I}_{32}, \\ 0 = \left(j\omega L_{21} + \frac{1}{j\omega C_{21}} + R_{L21} \right) \dot{I}_{21} - \frac{1}{j\omega C_{21}} \dot{I}_{22}, \\ 0 = -\frac{1}{j\omega C_{21}} \dot{I}_{21} + \left(j\omega L_{22} + \frac{1}{j\omega C_{21}} + \frac{1}{j\omega C_{22}} + R_{L22} \right) \dot{I}_{22} + j\omega M_{12} \dot{I}_{12} + j\omega M_{23} \dot{I}_{32}, \\ 0 = j\omega M_{13} \dot{I}_{12} + j\omega M_{23} \dot{I}_{22} + \left(j\omega L_{32} + \frac{1}{j\omega C_{32}} + R_{L32} + R_l \right) \dot{I}_{32}, \end{cases} \quad (3)$$

由公式(3)可知,当系统各部分参数处于谐振状态,即谐振网络的参数满足公式(1)时,系统的输出电压可以被表示为

$$\dot{U}_{out} = \frac{\dot{U}_{ac1} M_{13} R_l}{L_{11} (R_l + R_{L32})}. \quad (4)$$

当系统工作在休眠工作模式时,发射端2的总阻抗可以被表示为

$$Z_2 = R_{L22} + j\omega L_{22} + \frac{1}{j\omega C_{22}} + \left(\frac{1}{j\omega C_{21}} // (j\omega L_{21} + R_{L21}) \right). \quad (5)$$

根据公式(1),化简公式(5)可得

$$Z_2 = \frac{(\omega L_{21})^2}{R_{L21}} + R_{L22}. \quad (6)$$

在此状态下,发射端2接收到的功率 P_{out2} 为

$$P_{out2} = \frac{U_2^2}{Z_2}, \quad (7)$$

R_{L21} 和 R_{L22} 分别是 L_{21} 和 L_{22} 的内阻,二者都很小,均为 $m\Omega$ 级, U_2 为发射端2的感应电压。从公式(6)可知 Z_2 趋近于无穷大,进而通过公式(7)可知, P_{out2} 很小,可知发射端2接收到的能量很小。因此,当系统工作在休眠工作模式时,发射端2被解耦,既不发出能量,也不消耗能量。

1.2 增强工作模式

根据图3所示的系统在增强工作模式下的等效电路,交流电压 U_{ac2} 是 U_{dc2} 的逆变电压, U_{ac2} 被表示为

$$U_{ac2} = \frac{2\sqrt{2} U_{dc2}}{\pi}. \quad (8)$$

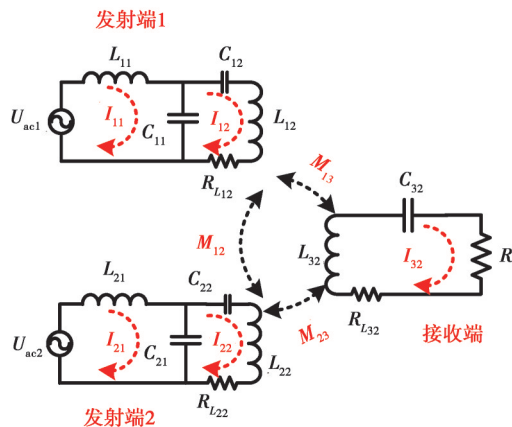


图3 增强工作模式

Fig. 3 Strengthening mode

列写系统的KVL方程可得

$$\begin{cases} \dot{U}_{ac1} = \left(j\omega L_{11} + \frac{1}{j\omega C_{11}} \right) \dot{I}_{11} - \frac{1}{j\omega C_{11}} \dot{I}_{12}, \\ 0 = -\frac{1}{j\omega C_{11}} \dot{I}_{11} + \left(j\omega L_{12} + \frac{1}{j\omega C_{11}} + \frac{1}{j\omega C_{12}} + R_{L12} \right) \dot{I}_{12} + j\omega M_{12} \dot{I}_{22} + j\omega M_{13} \dot{I}_{32}, \\ \dot{U}_{ac2} = \left(j\omega L_{21} + \frac{1}{j\omega C_{21}} \right) \dot{I}_{21} - \frac{1}{j\omega C_{21}} \dot{I}_{22}, \\ 0 = -\frac{1}{j\omega C_{21}} \dot{I}_{21} + \left(j\omega L_{22} + \frac{1}{j\omega C_{21}} + \frac{1}{j\omega C_{22}} + R_{L22} \right) \dot{I}_{22} + j\omega M_{12} \dot{I}_{12} + j\omega M_{23} \dot{I}_{32}, \\ 0 = j\omega M_{13} \dot{I}_{12} + j\omega M_{23} \dot{I}_{22} + \left(j\omega L_{32} + \frac{1}{j\omega C_{32}} + R_{L32} + R_l \right) \dot{I}_{32}, \end{cases} \quad (9)$$

由公式(1)和(9)可知,当系统工作在增强工作模式时,系统的输出电压可表示为

$$\dot{U}_{out} = \left(\frac{\dot{U}_{ac1} M_{13}}{L_{11}} + \frac{\dot{U}_{ac2} M_{23}}{L_{21}} \right) \frac{R_l}{R_l + R_{L32}}. \quad (10)$$

2 同步控制方法

在无线电能传输系统中加入多个发射源通常是为了提升系统的功率容量,但由公式(10)可知,当2个发射端的逆变器输出电压 U_{ac1} 和 U_{ac2} 相位不一致时,系统的输出功率不仅不会提升,反而会相互抵消。笔者提出了一种同步控制方法使2个发射端中逆变器的输出电压保持同相,该方法也可以被扩展到多个发射端的情况,以下是具体的同步控制方法。

如图4(a)所示,在发射端2中添加检测模块来检测发射端1中 U_{ac1} 的相位,调整 U_{ac2} 的相位,保持二者同步。检测模块采用LCL(L_{d1} - C_d - L_{d2})的拓扑结构,其参数满足公式(11)。

$$\omega^2 = \frac{1}{L_{d1} C_d} = \frac{1}{L_{d2} C_d}. \quad (11)$$

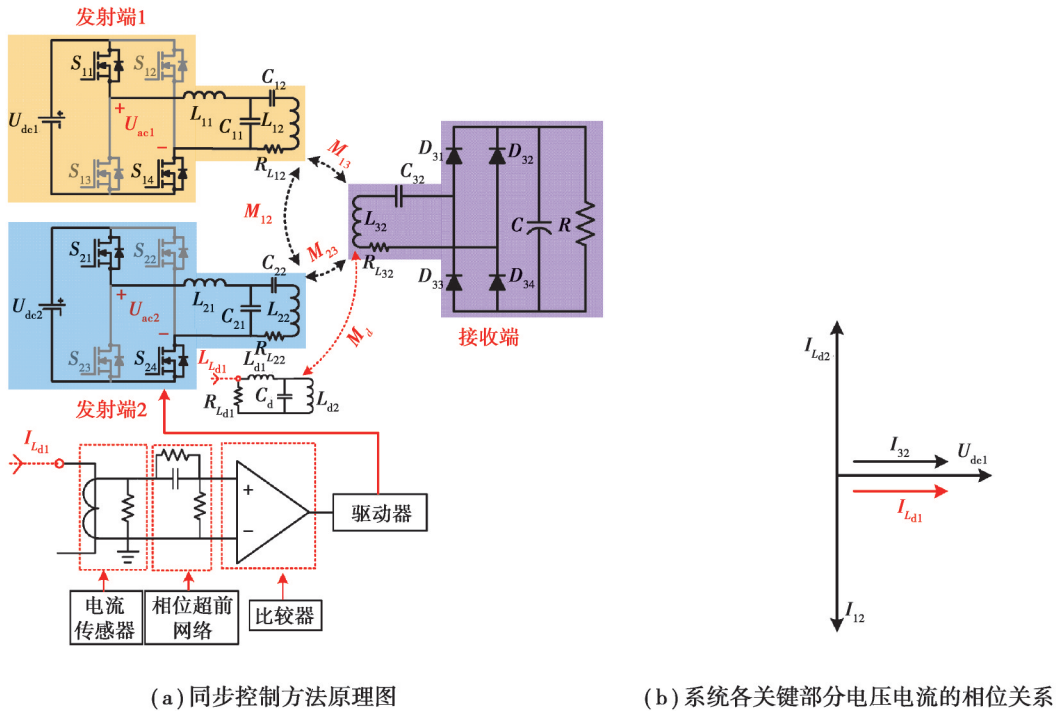


图4 同步控制方法原理图和系统各关键部分电压电流的相位关系

Fig. 4 Schematic diagram of synchronization control method and the phase relationship of voltage and current of each key part of the system

在此条件下,检测模块的总阻抗为

$$Z_d = \frac{(\omega L_{d1})^2}{R_{L_{d1}}}, \quad (12)$$

其中: $R_{L_{d1}}$ 是电感 L_{d1} 的内阻;检测模块中的线圈 L_{d2} 与接收端线圈 L_{32} 耦合,二者之间的互感被表示为 M_d 。则检测模块到接收端的反射阻抗为

$$Z_{rd} = \frac{M_d^2 R_{L_{d1}}}{L_{d1}^2}. \quad (13)$$

由于检测模块采用的线圈和电感都很小,因此,检测线圈与接收端线圈之间的互感 M_d 以及电感 L_{d1} 的内阻 $R_{L_{d1}}$ 都很小,因此,检测模块到接收端的反射阻抗很小,检测模块不会影响系统的传输效率。

由图 4(b)中系统各关键部分之间的电压电流相位关系可知,当发射端 1 中逆变器的 S_{11}/S_{14} 开通, S_{12}/S_{13} 关断时,检测模块中 $I_{L_{d1}}$ 的相位与 U_{ac1} 的相位一致,从而可以调节 U_{ac2} 的相位与 $I_{L_{d1}}$ 的相位一致。具体方法是:首先通过电流传感器采集电流 $I_{L_{d1}}$,再通过相位超前网络来弥补相位检测过程中存在的延时问题,然后通过比较器输出与 $I_{L_{d1}}$ 同相的方波信号,最后通过驱动器将信号加载到发射端 2 的逆变器上,以此来控制发射端 2 的逆变器输出 U_{ac2} 。同步控制流程图如图 5 所示。

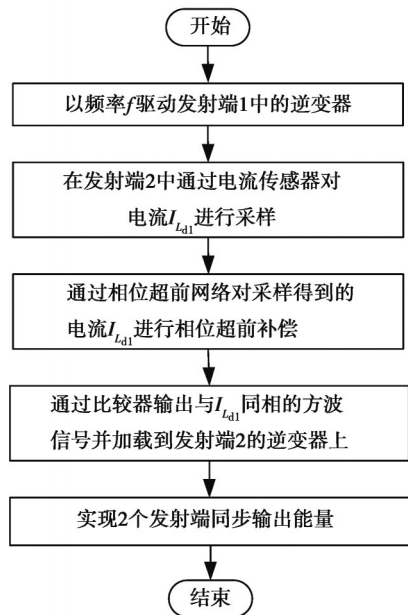


图 5 同步控制流程图

Fig. 5 Synchronization control flow chart

3 系统的磁场仿真

通过以上分析可知,线圈之间的互感对输出功率影响很大,为降低损耗,应当尽量减小休眠工作模式下 2 个线圈之间的交叉耦合,因此,有必要对系统在 2 种工作模式下的磁感应强度进行分析。根据描述,搭建了如图 6 所示的 Comsol 仿真模型对系统在 2 种工作模式下的磁场进行仿真,仿真模型参数如表 1 所示。

系统在 2 种工作模式下的磁场仿真结果如图 7 所示,从图 7(a)可看出,在休眠模式下,由发射线圈 1 向接收线圈提供能量,发射线圈 2 处于休眠状态,并且 2 个发射线圈之间的交叉耦合很小,因此,在休眠工作模式下,发射端 2 的损耗很小。从图 7(b)可以看出,在增强工作模式下,由发射端 1 和发射端 2 同时向接收端提供能量,增强了系统的功率发射能力。

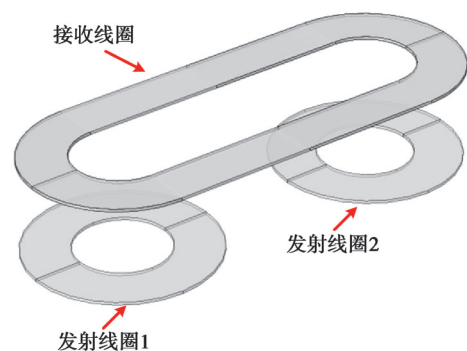


图 6 系统的 Comsol 仿真模型

Fig. 6 Comsol simulation model of system

表 1 Comsol 仿真模型的参数

Tab. 1 Parameters of Comsol simulation model

| 线圈 | 参数 | 值 | 线圈 | 参数 | 值 |
|-----------|-------|-----|------|---------|-----|
| 发射线圈 | 外径/mm | 100 | 接收线圈 | 外径长度/mm | 300 |
| | 内径/mm | 50 | | 内径长度/mm | 250 |
| | 线径/mm | 2 | | 线径/mm | 2 |
| | 匝数 | 10 | | 匝数 | 10 |
| | 层数 | 2 | | 层数 | 1 |
| 发射线圈与接收线圈 | 距离/mm | 50 | | | |

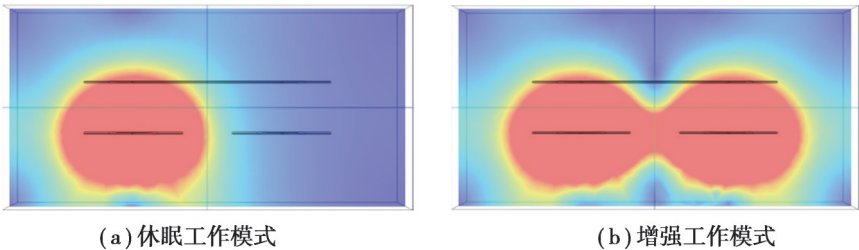


图 7 2 种工作模式下的磁场仿真结果

Fig. 7 Magnetic field simulation results under two operation modes

4 实验验证

为了证明所提出的方法,搭建了如图 8 所示的实验平台对理论分析进行了验证,在实验平台中,发射端 1 和发射端 2 相互独立,检测模块与发射端 2 相连,为了方便展示,将检测线圈置于接收线圈之上。实验参数如表 2 所示。

系统从休眠工作模式切换到增强工作模式的实验结果如图 9 所示,从图 9(a)可以看出,在休眠工作模式下,只有发射端 1 向接收端提供能量,发射端 2 逆变器的驱动电压为 0,系统的输出电压 $U_{out}=17.1\text{ V}$,输出功率 $P_{out}=58.48\text{ W}$ 。从图 9(b)可以看出,在增强工作模式下,发射端 1 和发射端 2 同时向接收端提供能量,并且通过同步控制方法,二者逆变器的驱动电压保持同相,在此条件下,系统的输出电压 $U_{out}=28.2\text{ V}$,输出功率 $P_{out}=159.05\text{ W}$, $\Delta U_{out}=11.1\text{ V}$, $\Delta P_{out}=100.57\text{ W}$ 。从图 9(c)可以看出,系统从休眠工作模式切换到增强工作模式时,输出电压提升明显。由图 9(d)可以看出,当 2 个发射源的相位差 $\theta=120^\circ$ 时,系统的输出电压为 $U_{out}=5.3\text{ V}$,输出功率为 $P_{out}=5.62\text{ W}$,远低于单发射条件下的系统输出功率。由此可见,如果未对双发射条件下的发射端进行同步控制,2 个发射端所激发的磁场会相互抵消,系统的输出功率不仅不会增加,而且还会减小。

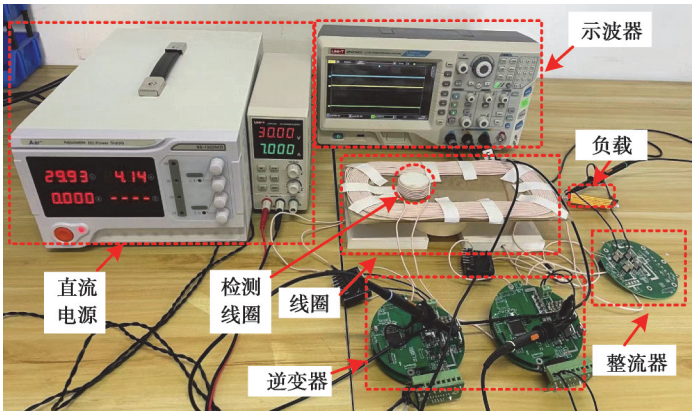


图 8 实验平台

Fig. 8 Experimental platform.

表 2 实验参数

| Tab. 2 Experimental parameters | | | |
|--------------------------------|---------|---------------------|---------|
| 参数 | 值 | 参数 | 值 |
| U_{dc1}/V | 30.000 | U_{dc2}/V | 30.000 |
| f/kHz | 100.000 | $L_{11}/\mu H$ | 13.320 |
| C_{11}/nF | 190.400 | $L_{12}/\mu H$ | 54.500 |
| C_{12}/nF | 71.130 | $L_{21}/\mu H$ | 13.860 |
| C_{21}/nF | 183.000 | $L_{22}/\mu H$ | 53.800 |
| C_{22}/nF | 63.000 | $L_{32}/\mu H$ | 105.800 |
| C_{32}/nF | 24.000 | $M_{13}/\mu H$ | 8.200 |
| $M_{23}/\mu H$ | 6.500 | $M_{12}/\mu H$ | 0.050 |
| $R_{L_{12}}/\Omega$ | 0.021 | $R_{L_{22}}/\Omega$ | 0.025 |
| $R_{L_{32}}/\Omega$ | 0.058 | R/Ω | 5.000 |

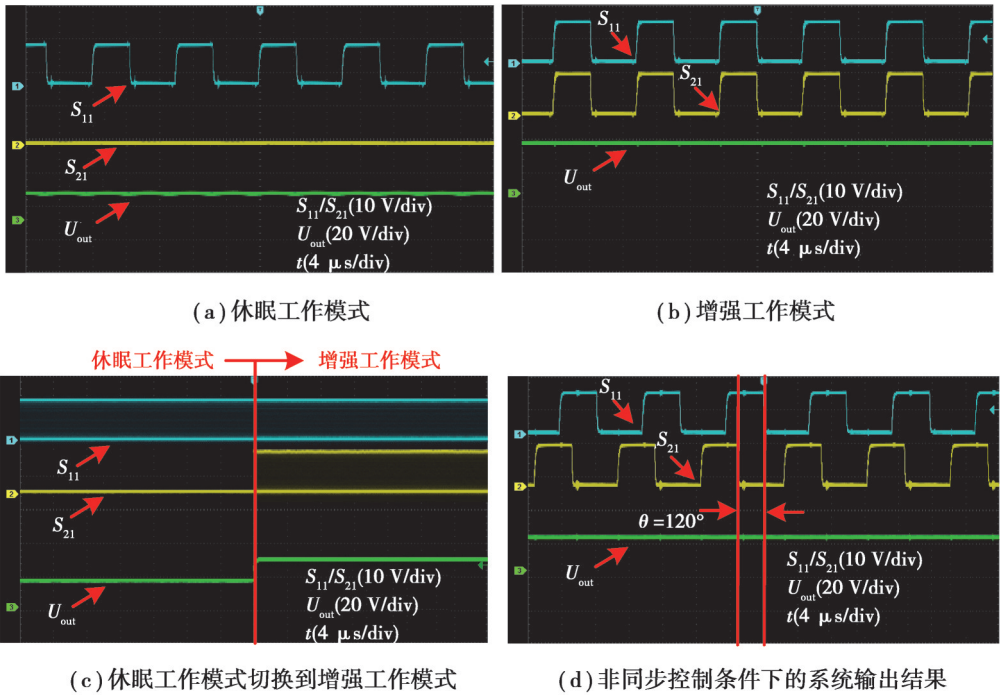


图 9 实验结果

Fig. 9 Experimental results

由图10可以看出,在休眠工作模式下,当负载 R 从 $5\sim 15\ \Omega$ 时,系统的输出电压从 $U_{out1}=17.3\text{ V}\sim U_{out2}=20.3\text{ V}$, $\Delta U_{out}=3\text{ V}$,输出电压的变化率为 $\Delta U_{out}/(U_{out1}+U_{out2})/2=3/(17.3+20.3)/2=16\%$ 。在增强工作模式下,当负载 R 从 $5\sim 15\ \Omega$ 时,系统的输出电压从 $U_{out1}=28.5\text{ V}\sim U_{out2}=33.5\text{ V}$, $\Delta U_{out}=5\text{ V}$,输出电压的变化率为 $\Delta U_{out}/(U_{out1}+U_{out2})/2=5/(28.5+33.5)/2=16\%$ 。由以上实验结果可以看出,在负载变化为原来的3倍的情况下,输出电压仅变化了16%,由此可见,在2种工作模态下,系统的输出减压均关于负载的变化不敏感。

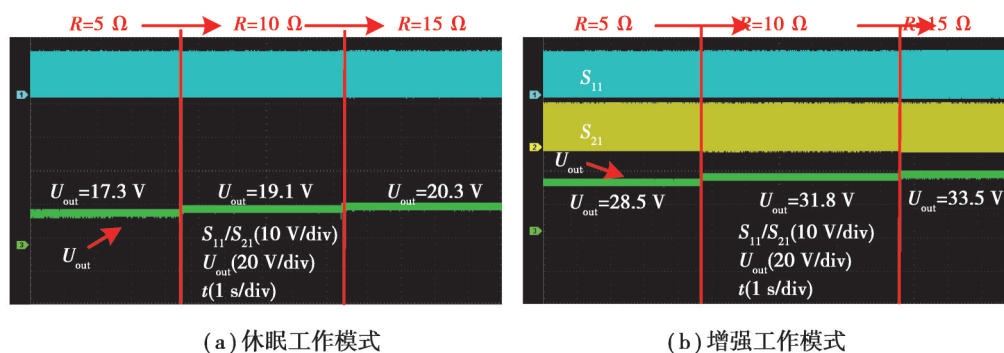


图10 负载变化的系统输出特性分析

Fig. 10 Analysis of system output characteristics under load changes

5 结论

当WPT系统应用在大功率的场合时,通常会遇到功率传输能力有限,器件的电压电流应力较大等问题,为了提升WPT系统的功率传输能力,并且在接收端所需能量较低时可以使系统运行在低功耗模式,提出一种双发射WPT系统,该系统有2种工作模式:休眠工作模式和增强工作模式。当接收端所需能量较低时,系统运行在休眠工作模式,当接收端所需能量增大时,系统由休眠工作模式切换到增强工作模式,以此来提升系统的功率发射能力。同时,提出了一种同步控制方法来使2个相互独立的发射端逆变器的交流输出电压保持同相,并且在实验结果中可以看出两种工作模式下系统的输出电压均关于负载的变化不敏感。研究所设计的系统除了可以应用在双发射WPT系统,还可以应用到多发射WPT系统。

参考文献

- [1] 杨芳勋,孙跃,夏晨阳.求解ICPT电源规划问题的改进混合蛙跳算法[J].重庆大学学报,2012,35(6): 105-111.
Yang F X, Sun Y, Xia C Y. A novel shuffled frog leaping algorithm for ICPT power programming[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(6): 105-111.(in Chinese)
- [2] 欧世锋,肖静,祝文姬,等.应用动态解耦技术的ICPT系统输出功率调节方法[J].重庆大学学报,2020,43(5): 20-30.
Ou S F, Xiao J, Zhu W J, et al. Dual output power regulation method based on dynamic decoupling[J]. Journal of Chongqing University, 2020, 43(5): 20-30.(in Chinese)
- [3] Dai X, Jiang J C, Li Y L, et al. A phase-shifted control for wireless power transfer system by using dual excitation units[J]. Energies, 2017, 10(7): 1000.
- [4] Dai X, Jiang J C, Sun Y, et al. Misalignment tolerance analysis of dynamic wireless charging system based on dual excitation units[C]//2018 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2018: 1-5.
- [5] Li Y, Mai R K, Lu L W, et al. Analysis and transmitter currents decomposition based control for multiple overlapped transmitters based WPT systems considering cross couplings[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1829-1842.
- [6] Mai R K, Yan Z T, Chen Y, et al. A hybrid transmitter-based efficiency improvement controller with full-bridge dual resonant tank for misalignment condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1124-1135.
- [7] 闫小喜,赵振洲,陈雪松.单/多发射极磁谐振式无线电能传输特性研究[J].电力电子技术,2020,54(8): 104-108.

- Yan X X, Zhao Z Z, Chen X S. Research on transfer characteristics of single/multiple emitter in magnetic coupling resonance wireless power transfer[J]. Power Electronics, 2020, 54(8): 104-108.(in Chinese)
- [8] 闫小喜, 尹亚东, 赵振洲. 多发射级无线电能传输的恒压输出[J]. 信息技术, 2019, 43(2): 153-155, 159.
- Yan X X, Yin Y D, Zhao Z Z. Constant output voltage of multi-transmitted wireless power transfer[J]. Information Technology, 2019, 43(2): 153-155, 159.(in Chinese)
- [9] 吴晓春, 田孟林, 连海生, 等. 双发射结构磁谐振式无线电能传输系统传输特性研究[J]. 上海电力学院学报, 2019, 35(4): 321-326, 332.
- Wu X C, Tian M L, Lian H S, et al. Analysis of double transmitters in magnetic resonance coupled WPT system[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2019, 35(4): 321-326, 332.(in Chinese)
- [10] Takeda U, Inada Y, Kimoto Y, et al. Dual transmitter free-positioning wireless power transfer system with optimum switching phase detection technique[C]//2018 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2018: 1261-1264.
- [11] Tan P G, Peng T, Cao S Q. Modeling and implementation of switching control for multi-transmitter wireless power transfer[C]//2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 1987-1991.
- [12] Zhou S J, Mi C C. Multi-paralleled LCC reactive power compensation networks and their tuning method for electric vehicle dynamic wireless charging[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6546-6556.
- [13] Dai X, Jiang J C, Wu J Q. Charging area determining and power enhancement method for multiexcitation unit configuration of wirelessly dynamic charging EV system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4086-4096.
- [14] Feng T X, Zuo Z P, Sun Y, et al. A reticulated planar transmitter using a three-dimensional rotating magnetic field for free-positioning omnidirectional wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9999-10015.
- [15] Feng J J, Li Q, Lee F C, et al. LCCL-LC resonant converter and its soft switching realization for omnidirectional wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 3828-3839.
- [16] Zhang X, Liu F X, Mei T M. Multifrequency phase-shifted control for multiphase multiload MCR WPT system to achieve targeted power distribution and high misalignment tolerance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 991-1003.
- [17] Lee E S, Kim M Y, Kang S M, et al. Segmented IPT coil design for continuous multiple charging of an electrified monorail system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 3636-3649.
- [18] Tian X Y, Chau K T, Liu W, et al. Selective wireless power transfer using magnetic field editing[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2710-2719.
- [19] Jayathurathnage P, Liu Y N, Kyryä J. Self-decoupled and integrated coils for modular multitransmitter wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(11): 12962-12967.
- [20] Huh S, Park B, Choi S, et al. Transmitter coils selection method for wireless power transfer system with multiple transmitter coils and single receiver coil[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 4092-4109.

(编辑 侯 湘)