

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240034

抗偏移混合拓扑恒流无线充电系统研究

梁雨晴, 唐忠

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对电动汽车无线充电系统因偏移导致充电效率降低的实际问题, 提出一种新型强抗偏移的恒流无线充电系统。首先, 在磁耦合设计上, 引入 DDQD 大解耦线圈有效减缓 X 、 Y 两方向偏移耦合系数衰减, 通过与 DDQ 线圈的对比体现所提出的 DDQD 线圈在抗偏移方面的优越性。然后, 在补偿拓扑设计上, 通过 DDQD 线圈将随耦合系数呈不同变化趋势的 LCC 拓扑和 LC 拓扑进行串联, 使输出功率变化平缓, 进一步提高了系统的抗偏移能力, 并且使系统具有恒流输出特性。最后, 通过仿真实验验证了该方案的有效性, 在磁耦合机构发生偏移时, 减缓了无线充电系统的线圈耦合系数和传输效率的下降程度, 具有一定的现实意义。

关键词: 电动汽车; 无线电能传输; 恒流输出; 抗偏移; 串联混合型

An anti-offset hybrid topology constant current wireless charging system

LIANG Yuqing, TANG Zhong

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: There is a practical problem of reduced charging efficiency due to offset in the wireless charging system for electric vehicles. Thus a new type of strong offset-resistant constant-current wireless charging system is proposed. First, in the magnetic coupling design, a DDQD large decoupling coil is introduced to effectively slow down the attenuation of the coupling coefficients of the X and Y direction offsets, and the comparison with the DDQ coil reflects the superiority of the proposed DDQD coil in anti-offset. Then, in the compensation topology design, the LCC and LC topologies, which have different trends with the coupling coefficients, are connected in series by DDQD coils, so that the output power changes are smoothed out. This further improves the system's ability to resist offsets and provides the system with constant-current output characteristics. Finally, the effectiveness of the scheme is verified through simulation. The scheme slows down the degradation degree of the coil coupling coefficient and transmission efficiency of the wireless charging system when the magnetic coupling mechanism is offset. This is of practical significance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177185).

Key words: electric vehicle; wireless power transfer; constant current output; misalignment tolerance; series hybrid structure

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 电动汽车产业正加速发展, 道路交通电气化势在必行^[1-3]。相比于传统车辆, 电动汽车在环保方面更具优势, 但由于电池容量的限制, 导致电动汽车续航里程短, 充电问题一直是制约电动汽车发展的主要瓶颈问题之一^[4-8]。

目前的充电方式分为有线充电和无线充电。有线充电存在连接部分易积尘老化、雨雪天气易漏电、

插拔时易产生火花安全隐患、需人工操作和维护等局限^[9]。而无线电能传输技术不含外漏端口, 不受恶劣天气影响, 具有与电网互动性强、可实现全自动智能充电等优点, 因而受到越来越多的关注^[10]。无线充电技术能够实现一定空间距离的高效非直接接触电能传输, 在电动汽车、便携式电子设备、植入式医疗电子设备以及某些特殊应用场合(如化工、矿井、油田钻采、高电压环境、水下探测等)的电能传输等领域展开了广泛的研究, 其中磁耦合谐振无线电能传输技术是目前最有前景的热点之一^[11-13]。

在典型的电动汽车无线充电(wireless power

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177185)

transfer, WPT)系统中,磁耦合谐振无线电能传输技术是将经高频逆变器得到的高频交流电输入谐振补偿拓扑中,通过传输线圈磁场耦合传输电能,再经由谐振补偿网络、整流滤波后向负载充电^[14]。由于WPT系统基于电磁谐振原理,需要线圈具有良好的位置对应关系,而电动汽车充电时不可避免会出现车底的接收线圈与安装在地面的发射线圈对位不准的问题,通常包括初级线圈和次级线圈之间的横向(X)、纵向(Y)和垂直方向(Z)失准,会使耦合系数发生剧烈衰减,导致充电电流不稳、功率损耗高和效率降低^[15]。为了缓解这个问题,目前有视频和红外引导、特殊机械或电子操纵以及印刷指南等方法。然而,此类技术会造成建造和维修成本上升。因此需要设计可靠且低成本的电路拓扑及控制方案,使WPT系统在发生偏移时仍能高效运行。若WPT系统能消除初级线圈和次级线圈对位不准造成的影响,而且能够实现恒定输出,将有利于简化无线充电系统的控制方案。

将WPT系统耦合线圈发生相对偏移但仍能恒定输出的特性称为抗偏移特性。当前对抗偏移的研究主要集中于电能传输线圈、补偿拓扑、控制策略和参数设计上。但新的控制策略的控制器和通信速度的准确性都会带来可靠性的问题,增加了系统的复杂性和成本。提高抗偏移能力的首选方法依赖于磁耦合机构的设计,合理的磁耦合机构能够提供相对均匀的磁场,从而降低发射线圈及接收线圈对位不准导致互感变化的影响。同时,引入新颖的电路补偿拓扑也能够提高系统的抗偏移性能。于是,本文从磁耦合机构的电能传输线圈和补偿拓扑的设计出发,设计一套新型组合方式的无线充电系统。

在磁耦合机构的设计方面,较为常用的线圈有圆形线圈、方形线圈、扁平螺线管等。文献[16]提出的双层方形(Double D, DD)线圈提高了磁场利用率和系统效率。文献[17]提出了一种圆形线圈堆叠的三维线圈,相较于传统的平面线圈,抗偏移效果更好。文献[18]在DD线圈的基础上提出了双层正交(Double D Quadrature, DDQ)线圈,进一步提高了抗偏移能力。文献[19]采用多目标优化算法对4种常见的线圈进行求解,DDQ型线圈相比于圆形、方形和DD型线圈有更好的抗偏移能力。文献[20]提出了四方(Quadruple D, QD)线圈,由4个大小相同的正方形线圈组成,在横向和纵向两个方向上均有良好的抗偏移能力。

DDQ线圈的抗偏移能力较强,但仅局限于一个方向,QD线圈在 X 和 Y 两个方向上具有抗偏移能力,但有磁场零点。本文在QD线圈的基础上增加

了一套单极型线圈,提出了DDQD(Double D Quadruple D)线圈,在横向和纵向两个方向均具有良好的抗偏移能力,并解决了线圈中心磁场耦合为零的问题。

在补偿拓扑方面,由于传输线圈间耦合小,通常需要加入补偿拓扑使之发生谐振,降低无功,提高系统传输效率^[21]。根据谐振电感和电容的连接方式,4种简单的基本补偿拓扑分别为S-S(series-series)、S-P(series-parallel)、P-S、P-P。在此基础上衍生了一些高阶的基本补偿拓扑,如S-LCL(series-inductor capacitor inductor)、双边LCL、SPS、LCC-S、LCC-LC、LCL-P等^[22-23]。不同的补偿拓扑有各自的传输特性,可通过基波分析方法得到等效电路,在此基础上分析求解不同偏移情况下的互感公式^[24],可根据需求选择合适的补偿拓扑^[25-26]。

目前对WPT系统的研究主要采用高阶的基本补偿拓扑,但单一类型的补偿拓扑输出特性固定,无法实现抗偏移性能。本文将两种相反输出特性的拓扑进行组合,可以平缓输出随偏移距离的变化,提高系统抗偏移能力。选用具有恒流输出特性的LCC和LC补偿拓扑,LCC拓扑的输出电流变化与互感变化呈正相关,LC拓扑输出电流变化与互感变化呈负相关,串联形成混合拓扑,增强抗偏移能力,且实现系统恒流输出。

本文首先对磁耦合机构进行设计,提出了一种基于单极型线圈与四极型线圈的DDQD线圈,与同样双耦合的DDQ线圈相比,可以实现更大范围的解耦,平缓线圈偏移时耦合系数的下降趋势。在补偿拓扑方面,提出了一种LCC拓扑和LC拓扑串联构成的混合拓扑,并对其简化。磁耦合机构和补偿拓扑配合实现WPT系统抗偏移恒流输出。最后通过仿真验证了方案的有效性。

1 磁耦合机构 DDQD 线圈抗偏移分析

磁耦合机构应满足以下两个要求:

- 1) 混合拓扑的连接需要两个发射线圈和两个接收线圈来形成磁耦合机构;
- 2) 当发射线圈和接收线圈出现对位不准的情况时,应只有两个主耦工作,交叉耦合应小到可以被忽略。

在QD线圈的基础上,增加了一套单极型线圈,提出一种单极型线圈D与四极型线圈QD堆叠形成的DDQD型线圈,主、次DQD线圈对称,放置铁氧体磁芯以增加耦合,与两套具有相反输出特性的拓扑结合,实现WPT系统抗偏移恒流输出。图1为单极型线圈和四极型线圈的绕线图。

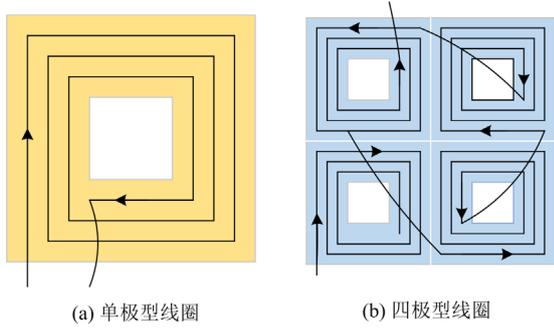


图 1 单极型线圈和四极型线圈绕线图

Fig. 1 A unipolar coil and a quadrupole coil winding diagram

DDQD 中四极型线圈与单极型线圈紧密堆叠构成一侧线圈, 发射线圈与接收线圈为对称结构, DDQD 线圈横截面如图 2 所示。

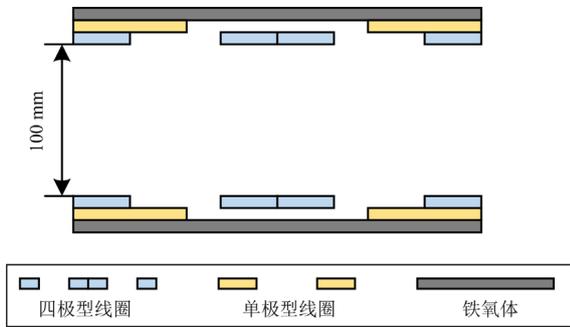


图 2 DDQD 线圈横截面

Fig. 2 DDQD cross section of coils

四极型线圈堆叠在内侧。将发射线圈安装在地面上, 接收线圈安装在车辆底部。图 3 为发射线圈和接收线圈的 Maxwell 模型图。

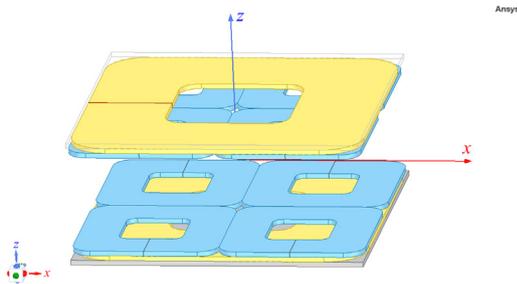


图 3 发射线圈和接收线圈 Maxwell 模型

Fig. 3 Maxwell model for transmitting and receiving coils

两套相互解耦的线圈堆叠, 如两套单极型线圈、两套垂直的双极型线圈和单极型与双极型的组合, 均具有抗偏移能力。目前 DDQ 线圈是较为常用的单极型与双极型线圈组合方式, 结构如图 4 所示, 只能实现 X 或 Y 一个方向上的解耦。

而 DDQD 线圈能实现 X 和 Y 两个方向的解耦。原理是四极型线圈产生的磁场是相邻相反的, 如图

5 所示。同侧和异侧的 D 线圈和 QD 线圈解耦, 四极型线圈产生的磁场会在单极型线圈覆盖范围内抵消, 流入的磁通量等于流出的磁通量, 交叉耦合很小, 接近于零, 实现了两套线圈的相互解耦。当线圈在 X 和 Y 方向出现偏移时, 两套线圈始终解耦, 耦合系数变化慢, 实现强抗偏移性能。

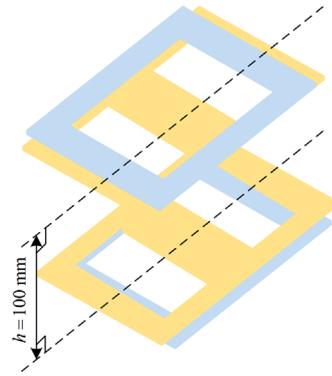


图 4 DDQ 线圈耦合机构图

Fig. 4 Coupled mechanism based on DDQ coils

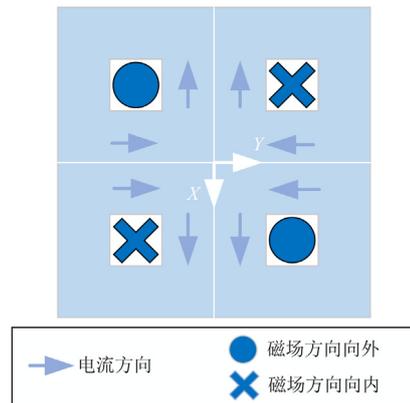


图 5 四极型线圈的磁场

Fig. 5 Magnetic field of quadrupole coil

单极型与双极型线圈组合形式, 如 DDQ 线圈只能实现 X 或 Y 一个方向的解耦, 而单极型与四极型线圈的组合, 如 DDQD 线圈实现了更大范围的解耦特性, 能够在 X 和 Y 两个方向上具有抗偏移性能, 且线圈中心不会出现磁场零点。由于 DDQD 关于 X 和 Y 轴对称, 因此 X 和 Y 方向上的抗偏移性能相同。

2 补偿拓扑设计及特性分析

无线充电系统通常需要加入补偿拓扑, 原因主要有以下几点。

- 1) 改善系统性能。加入补偿网络能够提高系统输出效率和功率, 减小损耗。
- 2) 调整负载特性。根据需求可实现系统恒流/

恒压输出特性。

3) 提高抗偏移能力。选择合理的补偿拓扑能够减小互感变化量,使系统具有抗偏移特性。

2.1 基础拓扑恒流输出特性分析

2.1.1 LCC 拓扑恒流输出特性分析

图 6 为双边 LCC 无线充电拓扑结构电路。

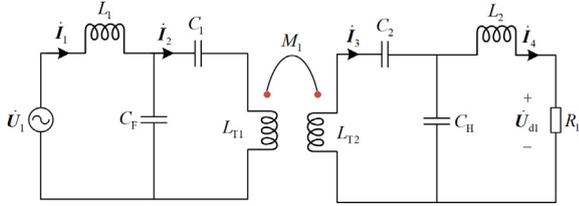


图 6 LCC 拓扑结构

Fig. 6 LCC topology

根据图 6 所示电路,列写 KVL 方程,如式(1)所示。

$$\begin{cases} \left(j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_F} \right) \dot{I}_1 - \frac{1}{j\omega C_F} \dot{I}_2 = \dot{U}_1 - \frac{1}{j\omega C_F} \dot{I}_1 + \\ \left(j\omega L_{T1} + \frac{1}{j\omega C_F} + \frac{1}{j\omega C_1} \right) \dot{I}_2 - j\omega M_1 \dot{I}_3 = 0 \\ -j\omega M_1 \dot{I}_2 + \left(j\omega L_{T2} + \frac{1}{j\omega C_H} + \frac{1}{j\omega C_2} \right) \dot{I}_3 - \frac{1}{j\omega C_H} \dot{I}_4 = 0 \\ -\frac{1}{j\omega C_H} \dot{I}_3 + \left(j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_H} + R_1 \right) \dot{I}_4 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为谐振角频率; \dot{U}_1 为输入电压; L_1 、 L_2 、 L_{T1} 、 L_{T2} 均为补偿拓扑电感, C_1 、 C_F 、 C_2 、 C_H 均为补偿拓扑电容; \dot{I}_1 、 \dot{I}_4 分别为输入和输出电流; \dot{I}_2 、 \dot{I}_3 分别为流过 C_1 、 C_2 所在支路的电流; M_1 为初级线圈和次级线圈间互感; R_1 为系统等效负载。

谐振时解得输出电流 \dot{I}_4 为

$$\dot{I}_4 = -j\omega C_H \omega C_F \omega M_1 \dot{U}_1 \quad (2)$$

由式(2)可以发现, LCC 补偿拓扑具有恒流输出特性。输出电流的数值与互感成正比,不具有抗偏移能力。电流滞后电压 90° 。

2.1.2 LC 拓扑恒流输出特性分析

图 7 为 LC 拓扑结构,列写其 KVL 方程,如式(3)所示。

$$\begin{cases} \left(j\omega L_{Q1} + \frac{1}{j\omega C_3} \right) \dot{I}_5 - j\omega M_2 \dot{I}_6 = \dot{U}_2 \\ -j\omega M_2 \dot{I}_5 + \left(j\omega L_{Q2} + \frac{1}{j\omega C_4} + R_2 \right) \dot{I}_6 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

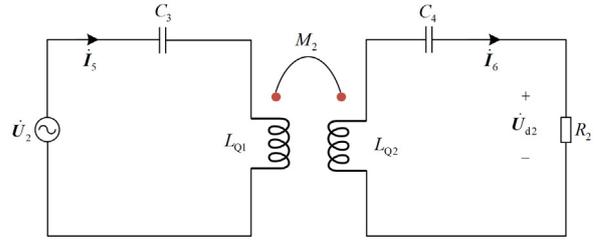


图 7 LC 拓扑结构

Fig. 7 LC topology

式中: \dot{U}_2 为输入电压; \dot{I}_5 、 \dot{I}_6 分别为输入和输出电流; C_3 、 C_4 均为补偿电容; L_{Q1} 、 L_{Q2} 均为补偿电感; M_2 为初级线圈和次级线圈间互感; R_2 为系统等效负载。

谐振时解得输出电流 \dot{I}_6 为

$$\dot{I}_6 = -\frac{\dot{U}_2}{j\omega M_2} \quad (4)$$

由式(4)可以发现, LC 补偿拓扑具有恒流输出特性。输出电流的数值与互感成反比,不具有抗偏移能力。电流超前电压 90° 。所以,混合拓扑构建时需改变同名端方向,使两补偿拓扑输出电流同相位。

2.2 混合拓扑抗偏移及恒流输出特性分析

当发射线圈和接收线圈对位不准造成互感减小时,一个拓扑网络的输出电流随之减小,而另一个的输出电流随之增大,将两个拓扑叠加可实现与负载无关的恒流输出,同时解决功率波动的问题,实现抗偏移特性。通过上述对两种拓扑的分析,需要考虑 LCC 拓扑和 LC 拓扑进行输入端和输出端的串联或并联,能够平缓线圈偏移对输出的影响,使混合拓扑具有抗偏移能力。

2.2.1 混合拓扑连接方式分析

采用输入串联输出串联型(input series output series, ISOS)连接方式,可以实现组合型拓扑的恒流输出,且具有抗偏移性能。串联型混合补偿拓扑如图 8 所示。

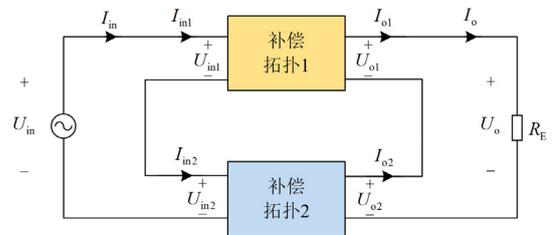


图 8 基于 ISOS 的混合补偿拓扑

Fig. 8 ISOS based hybrid compensation topology

两个补偿拓扑的输入和输出关系为

$$\begin{cases} I_{o1} = I_{o2} = I_o \\ U_{in1} + U_{in2} = U_{in} \end{cases} \quad (5)$$

式中: I_{o1} 、 I_{o2} 分别为补偿拓扑 1、2 的输出电流; I_o 为组合拓扑的输出电流; U_{in1} 、 U_{in2} 分别为补偿拓扑 1、2 的输入电压; U_{in} 为组合拓扑的输入电压。

补偿拓扑 1、2 具有恒流输出特性, 假设两个补偿拓扑均是理想的, 则有

$$\begin{cases} I_{o1} = G_1 U_{in1} \\ I_{o2} = G_2 U_{in2} \end{cases} \quad (6)$$

式中, G_1 、 G_2 分别为补偿拓扑 1、2 的恒流输出增益。

解得:

$$\begin{cases} U_{in1} = \frac{G_2}{G_1 + G_2} U_{in} \\ U_{in2} = \frac{G_1}{G_1 + G_2} U_{in} \end{cases} \quad (7)$$

组合型补偿拓扑的恒流输出增益 G 为

$$G = \frac{I_o}{U_{in}} = \frac{1}{\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}} \quad (8)$$

由 $I_o U_o = I_{in} U_{in}$ 、 $U_o = I_o R_E$ 得到输入阻抗 Z_{in} 。

$$Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}} = \frac{U_{in}^2}{U_o^2} R_E = \frac{\left(\frac{U_{in} R_E}{U_o}\right)^2}{R_E} = \frac{G^2}{R_E} \quad (9)$$

式中, R_E 为系统负载。

将输出增益式(8)代入式(9), 解得

$$Z_{in} = \frac{\left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}\right)^2}{R_E} \quad (10)$$

在恒流输出模式下, 组合型补偿拓扑的输出增益与补偿拓扑 1、2 的输出增益反比之和成反比。当补偿拓扑 1、2 的输出增益随互感呈相反趋势的变化时, 通过设置合理的补偿参数, 可以保持补偿拓扑 1、2 的输出增益反比之和的变化趋势保持平稳。而当两个补偿拓扑的输出增益随互感呈相同变化时, 该组合型拓扑不具有抗偏移能力。同时可知该输入串联、输出串联组合型补偿拓扑可实现与负载无关的恒流输出。

由于 LCC 和 LC 输出与互感呈相反变化, 且可实现与负载无关的恒流输出, 组合型补偿拓扑采用 LCC 与 LC 输入串联、输出串联的连接形式, 满足恒流输出且具有抗偏移性能。

2.2.2 串联混合拓扑特性分析

图 9 是 LCC 和 LC 串联混合补偿拓扑。

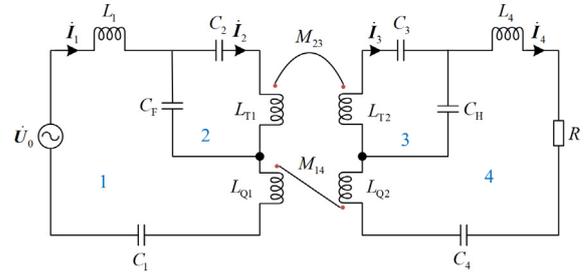


图 9 LCC-LC 串联混合拓扑

Fig. 9 LCC-LC series hybrid topology

将该组合型补偿拓扑进行简化, 将 L_1 与 C_1 合并为 C_M , L_4 与 C_4 合并为 C_N , 提出如图 10 所示的拓扑结构。

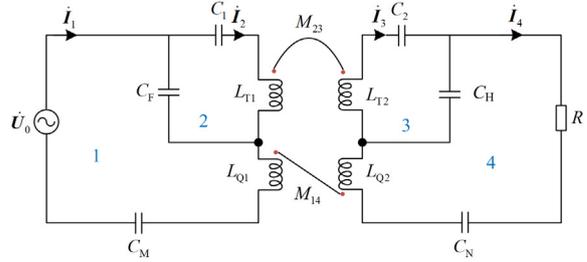


图 10 简化的混合拓扑

Fig. 10 simplified hybrid topology

列写 KVL 方程, 得到矩阵表达式(11)

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & 0 & 0 \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ 0 & 0 & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \\ \dot{I}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中:

$$Z_{11} = j\omega L_{Q1} + \frac{1}{j\omega C_M} + \frac{1}{j\omega C_F}$$

$$Z_{22} = j\omega L_{T1} + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_F}$$

$$Z_{33} = j\omega L_{T2} + \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_H}$$

$$Z_{44} = j\omega L_{Q2} + \frac{1}{j\omega C_N} + \frac{1}{j\omega C_H} + R$$

$$Z_{12} = Z_{21} = -\frac{1}{j\omega C_F}, Z_{34} = Z_{43} = -\frac{1}{j\omega C_H}$$

$$Z_{23} = Z_{32} = -j\omega M_{23}, Z_{14} = Z_{41} = j\omega M_{14}$$

式中: Z_{11} 、 Z_{22} 、 Z_{33} 、 Z_{44} 为各回路的自阻抗; Z_{12} 、 Z_{34} 、 Z_{23} 、 Z_{14} 、 Z_{21} 、 Z_{43} 、 Z_{32} 、 Z_{41} 为各回路共

同支路上的互阻抗； R 为系统等效电阻。

当系统谐振时，解得各支路电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{(\omega C_R)^2 (\omega M_{23})^2 R \dot{U}_0}{\left(\omega M_{14} \omega C_R \omega M_{23} + \frac{1}{\omega C_R} \right)^2} \\ \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_0}{j \left(\omega M_{14} \omega C_R \omega M_{23} + \frac{1}{\omega C_R} \right)} \\ \dot{I}_3 = \frac{\omega C_R \omega M_{23} R \dot{U}_0}{\left(\omega M_{14} \omega C_R \omega M_{23} + \frac{1}{\omega C_R} \right)^2} \\ \dot{I}_4 = \frac{\omega C_R \omega M_{23} \dot{U}_0}{j \left(\omega M_{14} \omega C_R \omega M_{23} + \frac{1}{\omega C_R} \right)} \end{cases} \quad (12)$$

式中， M_{23} 、 M_{14} 分别为两组线圈的原边侧与副边侧的互感。

由式(12)可知，输入电压与输入电流同相位，由于系统工作在谐振条件下，输入阻抗为纯阻性，没有无功输入，提高了系统的传递效率。电流与负载无关，实现恒流输出。

2.3 补偿拓扑与磁耦合机构连接方式分析

当线圈正对时，互感为确定值，但单极型线圈和四极型线圈各自的互感值不一致，需要考虑 LCC 补偿拓扑和 LC 补偿拓扑分别对应何种线圈类型能够使系统具有更高的输出功率。

式(13)、式(14)分别为输出功率 P_0 关于 M_{23} 与 M_{14} 的函数。

$$P_0(|M_{23}|) = \frac{\omega^4 C_R^2 U_0^2 R}{\left(\omega^3 M_{14} C_R + \frac{1}{\omega C_R |M_{23}|} \right)^2} \quad (13)$$

$$P_0(|M_{14}|) = \frac{\omega^4 C_R^2 M_{23}^2 U_0^2 R}{\left(\omega^3 |M_{14}| C_R M_{23} + \frac{1}{\omega C_R} \right)^2} \quad (14)$$

在其他参数一定时，输出功率 $P_0(|M_{23}|)$ 为 M_{23} 的递增函数，输出功率 $P_0(|M_{14}|)$ 为 M_{14} 的递减函数，为了尽可能地增大系统输出功率，所以需要 M_{23} 值尽量大， M_{14} 值尽量小。

因为四极型线圈的互感小于单极型线圈的互感，所以 M_{14} 对应的 LC 补偿拓扑采用四极型线圈， M_{23} 对应的 LCC 补偿拓扑采用单极型线圈。进行输入端的串联和输出端的串联，完成该新型抗偏移恒

流无线充电系统的构建。

3 抗偏移性能原理验证实验

3.1 线圈抗偏移原理验证对比实验

3.1.1 DDQ 线圈

Q 线圈尺寸为 $300 \times 300 \text{ mm}$ ，D 线圈为 $150 \times 300 \text{ mm}$ ，线圈匝数均为 15 匝，两侧线圈垂直高度为 100 mm 。谐振频率根据国际标准设置为 85 kHz ，进行 Maxwell 建模。沿 X 、 Y 轴方向分别平移接收线圈，得到不同偏移程度时的互感值，如图 11 所示。双边单极型线圈间的互感记为 M_1 ，双极型线圈间的互感记为 M_2 ，单极型与双极型线圈间的互感记为 M_3 。

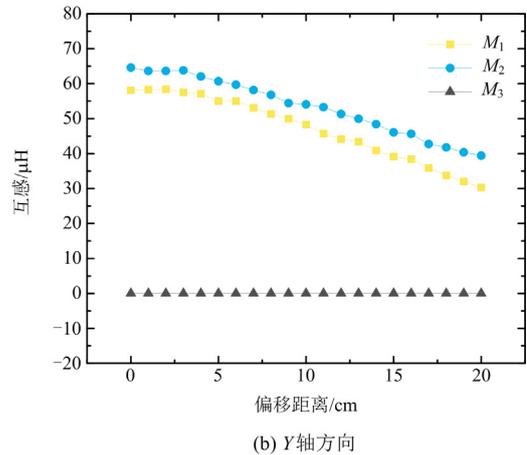
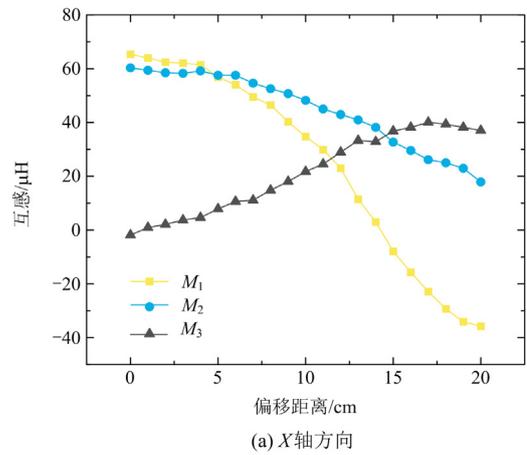


图 11 沿 X 、 Y 轴方向偏移时互感变化曲线

Fig. 11 Mutual inductance variation along X -axis and Y -axis

由图 11(a)可知，接收线圈沿 X 方向移动时，单极型线圈间互感 M_1 与双极型线圈间互感 M_2 均随偏移距离增大而减小，交叉互感 M_3 均随偏移距离增大而增大，交叉耦合不可忽略，不具有 X 方向的抗偏移特性。由图 11(b)可知，接收线圈沿 Y 方向移

动时, M_1 与 M_2 互感变化趋势均为随偏移距离增大而减小, 且交叉互感 M_3 几乎为零, 说明 DDQ 线圈仅在一个方向偏移时保持解耦。

3.1.2 DDQD 线圈

设定两线圈的尺寸均为 300×300 mm, 发射线圈与接收线圈间距设为 100 mm, 单极型线圈匝数为 20, 四极型线圈匝数为 10, 谐振频率根据国际标准设置为 85 kHz, 进行 Maxwell 磁场建模。

线圈的自感不随位置偏移改变, 测得单极型线圈自感为 $190 \mu\text{H}$, 四极型线圈自感为 $92.75 \mu\text{H}$ 。为研究发射线圈与接收线圈偏移时的互感及耦合系数变化规律, 设定两侧线圈正对时为标准工作状态, 再沿 X 轴方向移动接收侧 DQD 线圈, 测量得到 X 方向上各线圈的耦合系数及交叉耦合情况, 如图 12 所示。两组线圈的交叉耦合为零。单极型线圈和四极型线圈的耦合系数均随线圈偏移距离增大而略微减小, 四极型线圈耦合系数小于单极型线圈耦合系数, 且随线圈位置的偏移下降更快。

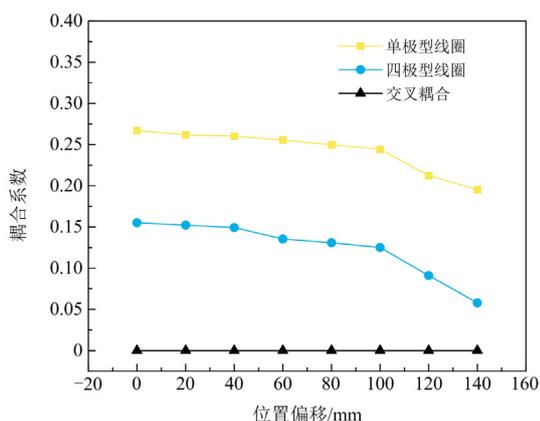


图 12 耦合系数变化

Fig. 12 Change in coupling coefficients

相比于 DDQD 线圈, DDQ 线圈互感变化较大, 且仅在一个方向具有解耦性, 对磁耦合机构的偏移更敏感, 不利于系统稳定输出, 因此本文提出的 DDQD 线圈抗偏移性能优于 DDQ 线圈。

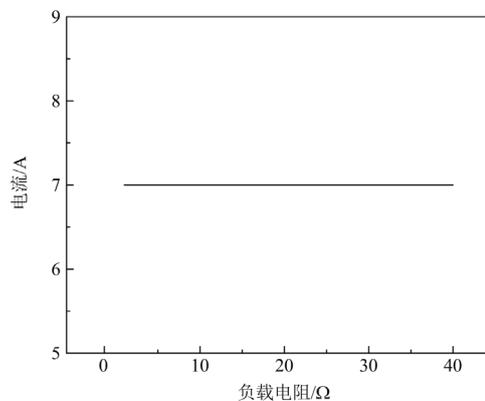
3.2 单一拓扑原理验证实验

3.2.1 LCC 拓扑

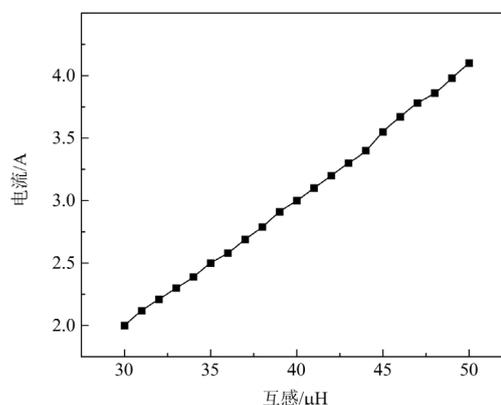
谐振频率取 85 kHz, 线圈自感取 $300 \mu\text{H}$, 负载电阻取 $1 \sim 40 \Omega$ 。在 Matlab/Simulink 中分别搭建 LC 和 LCC 拓扑的电路模型。

在仿真过程中, 通过改变线圈间的互感值来模拟线圈的偏移过程, 互感越大则线圈耦合程度越高, 偏移程度越小。图 13 给出了 LCC 拓扑的输出电流随负载电阻和互感的变化趋势。LCC 拓扑具有恒流

输出特性, 当负载电阻值变化时, 输出电流保持不变。输出电流变化与互感变化呈正相关, 当偏移程度增大时, 即互感减小, 输出电流也随之减小, 不具有抗偏移能力。



(a) 电流随负载变化情况



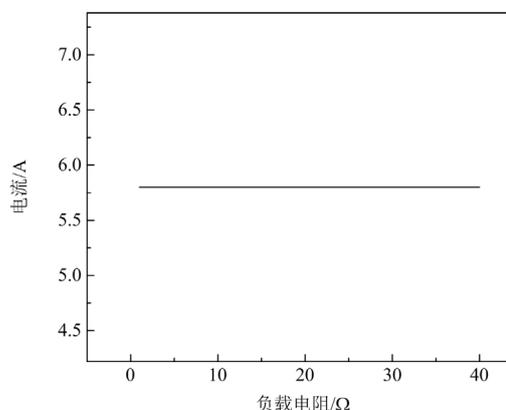
(b) 电流随互感变化情况

图 13 LLC 拓扑的输出电流随负载和互感变化趋势

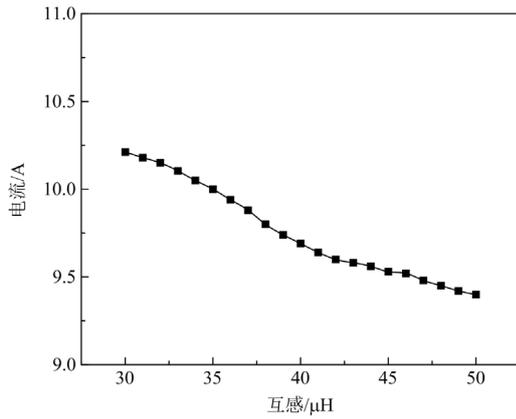
Fig. 13 LLC topology output current varying with load and mutual inductance

3.2.2 LC 拓扑

图 14 给出了 LC 拓扑的输出电流随负载电阻和



(a) 电流随负载变化情况



(b) 电流随负载变化情况

图 14 LC 的输出电流随负载和互感变化趋势
Fig. 14 LC topology output current varying with load and mutual inductance

互感的变化趋势。LC 拓扑具有恒流输出特性，当负载电阻变化时，输出电流保持不变。输出电流变化与互感变化呈负相关，当偏移距离增大时，互感减小，但输出电流增大，不具有抗偏移能力。

4 混合型拓扑抗偏移系统仿真

搭建 LCC 和 LC 混合拓扑电路，与所提出的 DDQD 线圈串联，构成混合拓扑型无线充电系统，通过 Maxwell 和 Simplorer 联合仿真验证该方案的有效性。

通过 3.1.2 节中的 DDQD 线圈原理验证实验已知线圈电感值，通过谐振条件求得各电容值，参数如表 1 所示。

表 1 电路参数表

Table 1 Parameters of circuit

参数	数值
发射和接收线圈间距离 d/mm	100
频率 f/kHz	85
补偿电容 C_2/nF	19.14
补偿电容 C_T/nF	510.52
补偿电容 C_M/nF	41.18
补偿电容 C_{II}/nF	508.49
补偿电容 C_3/nF	19.15
补偿电容 C_N/nF	41.2
直流源电压 U/V	100
单极型线圈间互感 $M_{23}/\mu\text{H}$	51.67
四极型线圈间互感 $M_{14}/\mu\text{H}$	14.65
线圈内阻 $r/\text{m}\Omega$	8

为验证该无线充电系统在 X 和 Y 方向上的偏移性能，分别从 0~140 mm 移动接收线圈，得到对应

的效率如图 15 所示，在 0~100 mm 偏移范围内，效率基本保持平稳，即输出效率几乎不受偏移程度影响，实现了抗偏移性能。而在偏移距离大于 100 mm 时，线圈间耦合系数下降使得效率降低，但效率始终保持在 84.4% 以上。

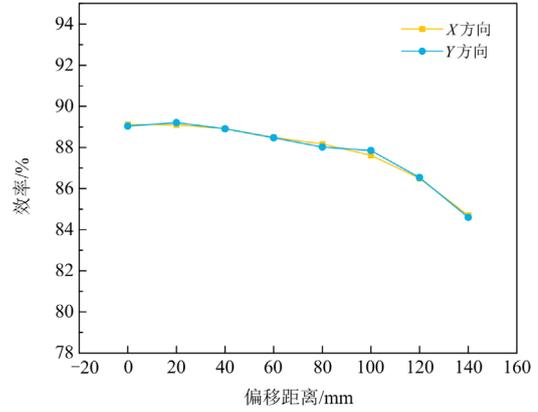


图 15 线圈在不同偏移距离时的效率特性
Fig. 15 Efficiency characteristics of coils at different offset distances

图 16 为线圈偏移时不同负载的输出电流，在 0~100 mm 偏移距离内，输出电流平稳，输出波动不超过 5%，在 X 和 Y 两个方向实现了较大偏移范围内的抗偏移恒电流输出^[15,18,26]。

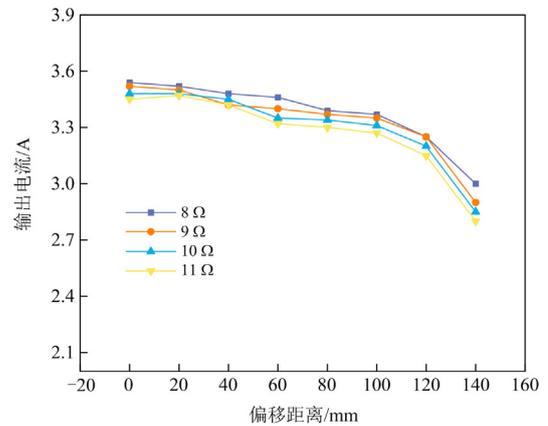


图 16 线圈在不同偏移距离时的不同负载输出电流
Fig. 16 Output current of each load at different offset distances of the coils

对比已有的工作，如表 2 所示，本文的方案在 X 和 Y 两个方向实现了较大偏移范围内的抗偏移输出，且具有恒流输出特性，该方案对要求恒流输出的充电场景更有价值，且为电动汽车抗偏移无线充电系统的研究提供了一种行之有效的组合方式。

表 2 与现有工作的对比

Table 2 Comparisons with existing methods

文献	连接方式	耦合线圈	拓扑	抗偏移程度/%	恒压/恒流输出特性	输出波动/%	传输效率/%
[18]	原边串联	DDQ 线圈	LCL-LCL	$X: 49.3$	恒流输出	5	84
	副边串联		LC-LC	$Y: 不能实现$			
[26]	原边并联	DDQ 线圈	LCL-LCL	$X: 不能实现$	恒压输出	5	88.7
	副边并联		S-S	$Y: 42.5$			
[27]	原边串联	交叠的单极型线圈	LCC-LCC	$X: 13.5$	恒流输出	16	86.4
	副边串联		S-S	$Y: 42.4$			
[28]	原边串联	单极型线圈	LCC-S	$X: 37.5$	无	5	84
	副边并联	田字型线圈	S-LCC	$Y: 37.5$			
本文	原边串联	单极型线圈	LCC-LCC	$X: 33.3$	恒流输出	5	87.6
	副边串联	四极型线圈	LC-LC	$Y: 33.3$			

5 结论

1) 通过对磁耦合机构线圈的设计, 无线充电系统的耦合范围由单一方向增加为 X 和 Y 两个方向, 增强了线圈中心耦合, 提高了系统的抗偏移能力。与抗偏移无线充电系统仅在 X 或 Y 一个方向具有抗偏移能力相比, 本文的 DDQD 线圈在两个方向抗偏移, 具有优越性。

2) 通过串联两种具有相反输出特性的补偿拓扑, 提高了系统抗偏移能力。线圈同时起到补偿电感作用, 无额外增加电感, 提高了系统紧凑性, 同时实现了抗偏移恒流输出。本文在抗偏移充电系统的基础上, 增加了恒流输出性能, 对要求恒流输出的场景更具价值。

3) 本文仅在磁耦合机构与补偿拓扑的设计上提高了系统的抗偏移能力, 并未对提出的抗偏移恒流无线充电系统进行控制策略和参数的优化, 优化之后会进一步提高系统的抗偏移能力, 优化方法将在后续一系列研究中给出。

参考文献

- [1] 安佳坤, 杨书强, 王涛, 等. 电动汽车聚合下的微能源互联网优化调度策略[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 80-88. AN Jiakun, YANG Shuqiang, WANG Tao, et al. Optimal scheduling strategy for micro energy internet under electric vehicles aggregation[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 80-88.
- [2] 贾俊, 范炜豪, 吕志鹏, 等. 用于电动汽车集群并网的直流变压器启动研究[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 875-882. JIA Jun, FAN Weihao, LÜ Zhipeng, et al. Research on startup of DC transformer for electric vehicle cluster grid-connection[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 875-882.
- [3] 刘迪迪, 杨益菲, 杨玉荟, 等. 随机环境下电动汽车充电实时管理与优化控制算法[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(1): 1-9.

- LIU Didi, YANG Yifei, YANG Yuhui, et al. Management and optimal control algorithm for electric vehicle charging in random environment[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(1): 1-9.
- [4] 丁屹峰, 曾爽, 张宝群, 等. 光伏-直流智能充电桩有序充电策略与应用效果[J]. 中国电力, 2024, 57(5): 70-77. DING Yifeng, ZENG Shuang, ZHANG Baoqun, et al. Orderly charging strategy and application effect of PV-DC intelligent EV chargers[J]. Electric Power, 2024, 57(5): 70-77.
- [5] 林晓明, 唐建林, 张帆, 等. 基于虚拟同步策略的电动汽车 V2G 技术在多能互补系统中的研究及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 143-150. LIN Xiaoming, TANG Jianlin, ZHANG Fan, et al. Research and application of electric vehicle V2G technology based on a virtual synchronization strategy in a multi-energy complementary system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 143-150.
- [6] 姜晓峰, 魏巍, 王永灿, 等. “车-路-网”协同优化下的电动汽车有序充电引导策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 44-56. JIANG Xiaofeng, WEI Wei, WANG Yongcan, et al. Orderly charging guidance strategies for electric vehicles under Evs-traffic-distribution collaborative optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 44-56.
- [7] 张美霞, 张倩倩, 杨秀, 等. 基于交通-电力均衡耦合的电动汽车快充站与配电网联合规划[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 51-63. ZHANG Meixia, ZHANG Qianqian, YANG Xiu, et al. Joint planning of electric vehicle fast charging stations and distribution network based on a traffic-electricity equilibrium coupling model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 51-63.
- [8] XU Biao, ZHANG Guiyuan, LI Ke, et al. Reactive power optimization of a distribution network with high-penetration of wind and solar renewable energy and electric vehicles[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 801-813.

- [9] GU Yu, WANG Jiang, LIANG Zhenyan, et al. Single-transmitter multiple-pickup wireless power transfer: advantages, challenges and corresponding technical solutions[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2020, 14(4): 123-135.
- [10] 沈栋, 杜贵平, 丘东元, 等. 无线电能传输系统电磁兼容研究现状及发展趋势[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2855-2869.
SHEN Dong, DU Guiping, QIU Dongyuan, et al. Research status and development trend of electromagnetic compatibility of wireless power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2855-2869.
- [11] 张献, 白雪宁, 沙琳, 等. 电动汽车无线充电系统不同结构线圈间互操作性评价方法研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(19): 4150-4160.
ZHANG Xian, BAI Xuening, SHA Lin, et al. Research on interoperability evaluation method of different coil in wireless charging system of electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4150-4160.
- [12] PATIL D, MCDONOUGH M K, MILLE J M, et al. Wireless power transfer for vehicular applications: overview and challenges[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 3-37.
- [13] KIM S, CONIC G A, BOYS J T. Tripolar pad for inductive power transfer systems for EV charging[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5045-5057.
- [14] 苏玉刚, 刘家鸣, 王智慧, 等. 磁耦合机构拾取线圈平面金属的影响及其抑制方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 578-588.
SU Yugang, LIU Jiaming, WANG Zhihui, et al. Influence analysis of metal in the same plane with pickup coil on magnetic coupler and suppression method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 578-588.
- [15] 王懿杰, 陆凯兴, 姚友素, 等. 具有强抗偏移性能的电动汽车用无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3907-3916.
WANG Yijie, LU Kaixing, YAO Yousu, et al. An electric vehicle (EV)-oriented wireless power transfer system featuring high misalignment tolerance[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3907-3916.
- [16] 赵争鸣, 刘方, 陈凯楠. 电动汽车无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 30-40.
ZHAO Zhengming, LIU Fang, CHEN Kainan. New progress of wireless charging technology for electric vehicles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 30-40.
- [17] LIU D, HU Hao, GEORGAKOPOULOS S V. power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(7): 5509-5519.
- [18] 任洁, 周坤卓, 李宏超, 等. 基于 DDQ 线圈的双耦合 LCL 拓扑 IPT 系统及其抗偏移方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2778-2788.
REN Jie, ZHOU Kunzhuo, LI Hongchao, et al. Study of dual coupled LCL topology IPT system based on DDQ coils and its anti-misalignment method[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2778-2788.
- [19] BANDYOPADHYAY S, VENUGOPAL P, DONG J, et al. Comparison of magnetic couplers for IPT-based EV charging using multi-objective optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 541-5429.
- [20] AHMAD A, ALAM M S, MOHANMED A S. Design and interoperability analysis of quadruple pad structure for electric vehicle wireless charging application[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 934-945.
- [21] ZHANG Yiming, YAN Zhengchao, KAN Tianze, et al. Modelling and analysis of the distortion of strongly-coupled wireless power transfer systems with SS and LCC-LCC compensations[J]. IET Power Electronics, 2019, 12(6): 1321-1328.
- [22] AHMAD A, ALAM M S, CHABAAN R. A comprehensive review of wireless charging technologies for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(1): 38-63.
- [23] KAN TIANZE, LU Fei, NGUYEN T, et al. Integrated coil design for EV wireless charging systems using LCC compensation topology[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9231-9241.
- [24] 蒋昭, 赵晋斌, 张俊伟, 等. 基于 DS-LCC 拓扑抗偏移性的建模与优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 99-108.
JIANG Zhao, ZHAO Jinbin, ZHANG Junwei, et al. Modeling and optimization of anti-offset based on DS-LCC topology[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 99-108.
- [25] 疏许健, 张波. 感应耦合无线电能传输系统的能量法模型及特性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 28-32.
SHU Xujian, ZHANG Bo. Energy model and characteristic analysis for inductively coupled power transfer system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 28-32.
- [26] 李砚玲, 杜浩, 何正友. 基于双 D 形正交混合拓扑的感应电能传输系统恒流输出研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(3): 942-951.
LI Yanling, DU Hao, HE Zhengyou. Research on constant current output of inductive power transfer system with double-D quadrature hybrid topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 942-951.
- [27] QU Xiaohui, YAO Yunchang, WANG Dule, et al. A family of hybrid IPT topologies with near load-independent output and high tolerance to pad misalignment[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 6867-6877.
- [28] KE Guangjie, CHEN Qianhong, XU Ligang, et al. Analysis and optimization of a double-sided S-LCC hybrid converter for high misalignment tolerance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4870-4881.

收稿日期: 2024-01-07; 修回日期: 2024-05-22

作者简介:

梁雨晴(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为无线电能传输; E-mail: lyq797979@126.com

唐忠(1964—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: tangzhong64@163.com

(编辑 张颖)