

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.2.179

中图分类号: TM724

文献标志码: A

基于恒压输出区间追踪的 WPT 系统 抗偏移方法

黄文聪^{1,2}, 蒋煊焱^{1,2}, 常雨芳^{1,2}, 谭海东^{1,2}, 朱禛浩^{1,2}

(1.湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 武汉 430068;

2.湖北工业大学电气与电子工程学院, 武汉 430068)

摘要: 针对无线电能传输 WPT(wireless power transmission)系统耦合机构发生偏移时, 输出电压波动的问题, 提出 1 种基于恒压输出区间追踪的 WPT 系统抗偏移方法。首先, 建立 CLC-S 型 WPT 系统的模型, 分析该系统在谐振和非谐振状态下的互感与输出电压增益之间的关系, 由分析可知, 系统工作在非谐振状态下的恒压输出区间内抗偏移能力更强; 然后, 设计电感补偿序列, 提出恒压输出区间追踪控制策略, 实现 WPT 系统输出电压恒定控制, 提高系统的抗偏移能力; 最后, 搭建仿真模型和实验平台, 仿真及实验结果均表明, 采用恒压输出区间追踪控制策略, 可以有效减小输出电压的波动, 验证了系统在强互感干扰下的鲁棒性。相较于无恒压输出区间追踪的 WPT 系统, 所提系统具有更好的输出电压动态调节能力。

关键词: 无线电能传输; CLC-S 拓扑; 恒压输出区间追踪; 抗偏移

Anti-offset Method for WPT System Based on Constant-voltage Output Interval Tracking

HUANG Wencong^{1,2}, JIANG Xuanyan^{1,2}, CHANG Yufang^{1,2}, TAN Haidong^{1,2}, ZHU Zhenhao^{1,2}

(1. Hubei Key Laboratory for High-efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System (Hubei University of Technology), Wuhan 430068, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: An anti-offset method for a wireless power transmission (WPT) system based on constant-voltage output interval tracking is proposed to deal with the problem of output voltage fluctuation when the coupling mechanism in the WPT system is shifted. First, a model of a CLC-S WPT system is established, and the relationship between the mutual inductance and output voltage gain in resonant and non-resonant states of the system is analyzed. Based on the analysis, it is found that the system has a stronger anti-offset capability in the constant-voltage output interval when it works in the non-resonant state. Second, an inductance compensation sequence is designed, and a constant-voltage output interval tracking control strategy is proposed to realize the constant output voltage control of the WPT system and improve its anti-offset capability. Finally, a simulation model and a test platform were built, and simulation and experimental results show that the constant-voltage output interval tracking control strategy can effectively reduce the output voltage fluctuation, thus verifying the robustness of the system under strong mutual inductance interference. Compared with the WPT system without constant-voltage

收稿日期: 2022-06-08; 修回日期: 2022-10-22; 录用日期:

2022-11-22; 网络首发日期: 2023-01-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61903129); 湖北省大学生创新创业训练资助项目(S202110500033)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 61903129; Hubei Students' Platform for Innovation and Entrepreneurship Training Program under the grant S202110500033

output interval tracking, the CLC-S WPT system has a better dynamic regulation capability of output voltage.

Keywords: Wireless power transmission (WPT); CLC-S topology; constant-voltage output interval tracking; anti-offset

无线电能传输 WPT(wireless power transmission)技术是一种借助磁场、电场、激光、微波等介质的无电气接触式能量传输方式。该技术克服了传统

有线电能传输系统设备笨重、稳定性差、安全性差等问题,在智能设备、医疗器械、电动汽车等行业中具有极高的应用前景。但在无线电能传输过程中,系统耦合机构常会发生偏移现象,导致耦合机构之间的互感发生变化,从而导致系统输出电压发生波动。如何削弱耦合机构偏移带来的影响,成为促进无线电能传输技术推广的重要因素之一^[1-7]。

目前,针对 WPT 系统的抗偏移方法主要从电路参数优化^[8-13]、电路拓扑结构^[14-19]、控制方法^[20-25]等方面进行了研究。电路参数优化方面,文献[8-12]提出了用优化算法对电路参数进行优化的方法,通过改变谐振网络的元件参数,改变系统的输出特性,提高了系统的抗偏移能力;文献[13]使用粒子群参数优化方法对系统参数进行优化,并使用 DDQ 结构消除了四线圈引起的交叉耦合。上述方法虽然使得系统的抗偏移能力得到了不同程度的提升,但是仅对电路参数进行优化,系统的抗偏移能力依旧有限。电路拓扑结构方面,文献[14-17]提出了 T 型复合拓扑结构,实现了恒压输出,但是其抗偏移特性只能维持在一定的互感范围;文献[18-19]分别提出了 LCC-S 型与 S-LCC 型混合拓扑电路、双边 LCLC 拓扑电路,在理想的状态下可以实现恒压输出,但是电路结构复杂,电路参数难以计算。在上述研究中,复合补偿拓扑结构虽然具有更好的恒压、恒流输出特性,但是其抗偏移能力受制于电路具体参数。控制方法方面,文献[20-21]分别设计了基于算子的积分滑模的控制方式、 $H\infty$ 控制系统结构 2 种非线性控制方法,提高了系统的鲁棒性;文献[22-25]分别设计一阶 LADRC、基于遗传算法的 PID 控制策略 2 种线性控制策略对输出电压进行闭环控制,实现了恒压输出。然而,上述控制方法对 WPT 系统的抗偏移能力的提升并不显著。

为实现 WPT 系统在耦合机构发生偏移条件下恒定电压输出的控制需求,本研究提出 1 种基于恒压输出区间追踪控制的 WPT 系统抗偏移方法。首先,建立 CLC-S 型 WPT 系统的模型,分析该系统在谐振和非谐振状态下输出电压的特性,找到系统在非谐振状态下的恒压输出区间;然后,设计基于

恒压输出区间追踪控制的抗偏移控制系统,在耦合机构发生各种偏移情况下,研究和分析控制系统参数优化算法;最后,采用恒压输出区间追踪控制策略,通过输出电压反馈实现输出电压的闭环控制。

1 WPT 系统传输特性分析

1.1 CLC-S 型 WPT 系统拓扑结构

CLC-S 型 WPT 系统的拓扑结构如图 1 所示。图中, E 为直流电压源,经过逆变电路($S_1 \sim S_4$ 组成)逆变为高频交流电压 U_{in} 。交流电压经过原边补偿电容 C_1 、 C_2 、原边补偿电感 L_1 转换为正弦交流电输入原边发射线圈 L_p 产生变化磁场。副边接收线圈 L_s 感应到磁场变化后产生交变电流,交变电流经过副边补偿电容 C_s 后输入整流电路($D_1 \sim D_4$ 组成),经过滤波电容 C_f 后输出到负载 R_L 。 M 为耦合线圈的互感, U_o 为输出电压, R_{L_s} 、 R_{L_p} 为线圈内阻, R_{L_1} 为原边补偿电感 L_1 的内阻, I_1 、 I_2 、 I_3 分别为 $L_1 C_1$ 回路、 $L_1 C_2 L_p$ 回路、 $L_s C_s$ 回路的回路电流。

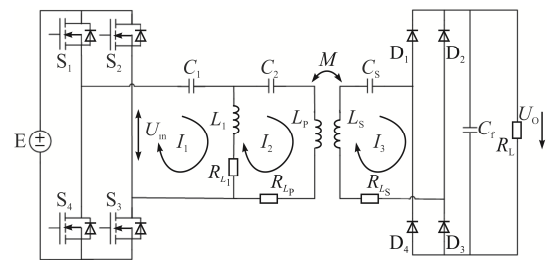


图 1 CLC-S 型 WPT 系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of CLC-S WPT system

根据基尔霍夫电压定律 KVL(Kirchhoff voltage law), 可得电压方程组为

$$\begin{cases} (\frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 + R_{L_1})I_1 - (j\omega L_1 + R_{L_1})I_2 = U_{in} \\ (j\omega L_1 + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_2} + R_{L_p} + R_{L_1})I_2 - \\ \quad (j\omega L_1 + R_{L_1})I_1 = j\omega M I_3 \\ (j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_L + R_{L_s})I_3 = j\omega M I_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω 为系统角频率。

本文以式(1)为基础,研究 CLC-S 型 WPT 系统

分别工作在谐振状态和非谐振状态下的电压传输特性。

1.2 谐振状态下的 WPT 系统电压传输特性分析

当 WPT 系统工作在谐振状态时, 满足条件

$$\begin{cases} \frac{1}{\omega_0 C_1} = \omega_0 L_1 = \frac{1}{\omega_0 C_2} - \omega_0 L_p \\ \frac{1}{\omega_0 C_s} = \omega_0 L_s \end{cases} \quad (2)$$

式中, ω_0 为系统的谐振频率。

由式(1)和式(2)可得系统电压增益 G 为

$$G = \frac{U_o}{U_{in}} = \frac{MR_L \sqrt{(\omega^2 L_1)^2 + (\omega R_{L_1})^2}}{(R_{L_s} + R_L) R_{L_1} \sqrt{(R_{L_s} + R_{L_p} + \omega^2 L_1^2 + R_{L_1})^2 + \omega^2 L_1^2}} \quad (3)$$

由式(3)可知, 系统在谐振工作状态下的电压增益与互感呈线性关系。因此, 电压增益会随着互感的变化发生较大的波动, 对系统输出电压产生较大的影响, 故系统的抗偏移性能较差。

1.3 非谐振状态下的 WPT 系统电压传输特性分析

当 WPT 系统工作在非谐振状态时, 满足条件

$$\begin{cases} \frac{1}{\omega_0 C_2} - \omega_0 L_p = \frac{1}{\omega_0 C_1} \neq \omega_0 L_1 \\ \omega_0 L_s = \frac{1}{\omega_0 C_s} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)求得系统电压增益为

$$G = \frac{MR_L \sqrt{(\omega^2 L_1)^2 + (\omega R_{L_1})^2}}{\sqrt{(K_1 + R_{L_1}(\omega M)^2)^2 + (K_2 + X_1 K_3(\omega M)^2)^2}} \quad (5)$$

式中: $X_1 = \omega L_1 - 1/\omega C_1$; $K_1 = (R_L + R_{L_s})(R_{L_1} R_{L_p}^2 + (\omega L_1)^2 - X_1^2)$; $K_2 = X_1(R_{L_p} + R_{L_1})(R_L + R_{L_s})$; $K_3 = 2 + R_{L_1}$ 。

为了分析非谐振状态下电压增益随耦合机构互感变化的趋势, 对电压增益表达式(5)关于 M 求导, 得

$$\frac{dG}{dM} = \frac{[\sqrt{(2R_{L_1} K_1 + 2K_2 K_3)^2 \omega^2 - 4(K_3^2 + 2R_{L_1}^2) \omega^3 - 2(K_3^2 + 2R_{L_1}^2) \omega^3 M} / [(K_1 + R_{L_1}(\omega M)^2)^2 + (K_2 + X_1 K_3(\omega M)^2)^2]}{dM} \quad (6)$$

对式(6)分析可知, 由于 $\frac{dG}{dM}|_{M=0} > 0$ 、 $\frac{dG}{dM}|_{M \rightarrow \infty} < 0$,

所以电压增益在 $M \in [0, +\infty)$ 内必存在极值点 M_0 , 由此可得电压增益的单调性表达式为

$$\begin{cases} \frac{d|G|}{dM} < 0 & M > M_0 \\ \frac{d|G|}{dM} > 0 & 0 < M < M_0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知, 电压增益在互感处于 $(0, M_0)$ 时随耦合机构互感的增大而增大, 处于 $(M_0, +\infty)$ 时随互感的减小而减小。

1.4 谐振状态和非谐振状态电压传输特性对比

为进一步研究系统工作在谐振和非谐振状态下电压增益的区别, 绘制谐振和非谐振下的电压增益曲线如图 2 所示。图中, 曲线 1 为谐振状态下的电压增益曲线, 该曲线斜率固定且为常数; 曲线 2 为非谐振状态下的电压增益曲线, 该曲线具有连续性和非线性, 且存在极值点 M_0 。在极值点附近存在区域 $[M_1, M_2]$ 使得 $dG/dM \ll \beta$, 在该区域内, 电压增益 ΔG 波动范围足够小。将互感变化区间 $[M_1, M_2]$ 记为恒压输出区间 δ , 当耦合机构偏移量较小, 互感 M 未脱离恒压输出区间 δ 时, WPT 系统工作在非谐振状态下, 电压波动较小, 抗偏移性能好; 当耦合机构偏移量过大, 互感 M 脱离恒压输出区间 δ 时, 系统不能保持恒压输出, 需要进行追踪控制以保证系统输出电压恒定在允许范围内。

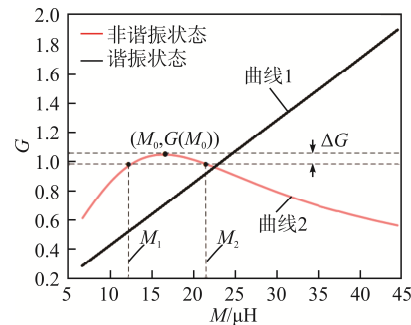


图 2 谐振和非谐振状态下的电压增益曲线

Fig. 2 Voltage gain curves in resonant and non-resonant states

2 恒压输出区间追踪抗偏移优化策略

2.1 策略原理分析

当非谐振状态下系统耦合机构偏移过大时,导致互感过小而脱离恒压输出区间 δ 。为了继续维持系统恒压输出,本文提出恒压输出区间追踪抗偏移优化策略,以提高系统的抗偏移能力。

为了保证系统处于恒压输出区间,本文分析了非谐振状态下电压增益极值点与补偿电感 L_1 的关系,令 $dG/dM=0$,求得电压增益的极值点 M_0 为

$$M_0 = \frac{\sqrt{K_5 - 4K_4\omega}}{2K_4\omega^2} \quad (8)$$

式中: $K_4 = K_3^2 + 2R_{L_1}^2$; $K_5 = (2R_{L_1}K_1 + 2K_2K_3)^2$ 。由式(8)可知,电压增益曲线的极值点 M_0 与系数 K_5 成正相关,而 K_5 与补偿电感 L_1 成正相关,因此,降低 L_1 可以减小 M_0 ,而 M_0 的移动会带动电压增益曲线的平移。

为了方便说明,绘制不同电感的电压增益曲线如图3所示。可知,原边补偿电感 L_1 减小后,电压增益曲线和恒压输出区间 δ 也会随之左移。当耦合机构发生过量偏移,互感从 M^* 降低至 M 时,系统的互感不再处于恒压输出区间 δ ,电压增益降低,离开期望输出电压增益区间 ΔG 。此时降低 L_1 ,使恒压输出区间更新为 δ' ,输出电压增益重新回到期望输出电压增益区间 ΔG ,从而实现了恒压输出区间的扩展,提升了系统的抗偏移能力。

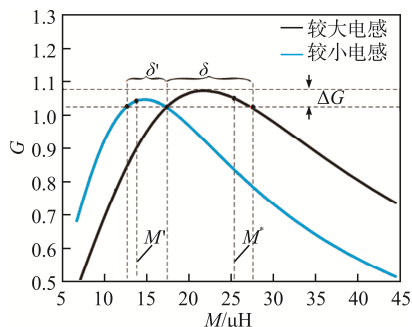


图3 不同电感的电压增益曲线

Fig. 3 Voltage gain curves with different inductors

2.2 控制方法

由2.1节可知,当系统耦合机构过偏移时,可

通过改变原边补偿电感,使恒压输出区间追踪耦合机构偏移后的互感,从而保证系统工作在恒压输出区间。由此,本文提出1种新型电感补偿序列使得恒压输出区间可控,并以其为基础设计1种CLC-S型WPT系统恒压输出区间追踪控制方法。电感补偿序列如图4所示,系统整体结构如图5所示。图4中, $L_{L_i} (i=1, 2, \dots, n)$ 为 n 个补偿电感构成的电感补偿序列,电感值随编号 i 的增大而增大, SW_i 为电感补偿序列中编号为 i 的开关。当控制器的输出控制量从 $i+1$ 更新为 i 时, SW_i 开通, SW_{i+1} 关断,原边补偿电感由 $L_{L_{(i+1)}}$ 更新为 L_{L_i} ,恒压输出区间 δ_{i+1} 变化为 δ_i ,实现了对恒压输出区间 δ 的控制。图5中,当耦合机构发生偏移时,电压检测机构将输出电压数据传输至控制器,控制器再根据恒压输出区间追踪控制方法对电感补偿序列进行切换控制,从而实现恒压输出区间对变化互感的追踪控制。

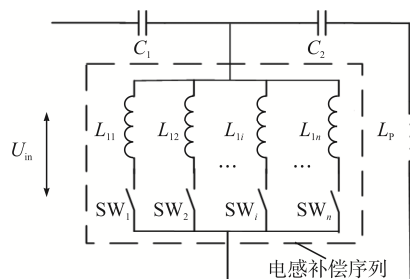


图4 电感补偿序列

Fig. 4 Inductance compensation sequence

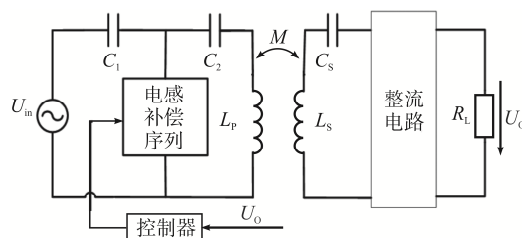


图5 系统整体结构

Fig. 5 Overall structure of system

3 仿真实验

3.1 参数求解法则

为了得到电感补偿序列中的电感值,提出求解

电感补偿序列的方法。控制策略需要保证电压增益在线圈互感发生变化时仍处于误差允许范围内, 即

$$G_0(1-e\%) \leq G \leq G_0(1+e\%) \quad (9)$$

式中: G_0 为期望电压增益; G 为实际电压增益; $e\%$ 为误差允许范围。

设置误差允许范围 $e\%=7.5\%$ 、期望电压增益 $G_0=1.02$ 、直线 $G=G_0(1-e\%)$ 为误差曲线。经过多次迭代, 当保证维持系统恒压输出的互感变化范围为 $[M_{\min}, M_{\max}]$ 时, 解集可作为电感补偿序列。由实际测量的数据得知, M_{\min} 、 M_{\max} 的取值分别为 12.3、44.5 μH 。

求解法则具体步骤如下。

步骤 1 对所有参数进行初始化。包括各个元件内阻、电容、工作频率、补偿电感初值。

步骤 2 以 0.1 μH 为步长更新原边补偿电感 L_1 , 并保证 L_1 使系统工作在非谐振状态, 若满足条件, 则执行步骤 3, 若不满足条件, 则重新执行步骤 2。

步骤 3 计算 L_1 对应的电压增益曲线, 求得曲线与误差曲线的 2 个交点。若左交点大于 M_{\min} , 说明此时的 L_1 不能保证系统的恒压输出, 执行步骤 2; 若左交点小于 M_{\min} 且右交点大于 M_{\min} 时, 说明此时的 L_1 可以保证系统在 M_{\min} 附近实现恒压输出, 可将其加入解集并将 M_{\min} 更新为右交点并执行步骤 4。判断 M_{\min} 是否大于等于 M_{\max} , 如是, 说明此时的解集可以满足系统恒压输出的要求; 如否, 返回执行步骤 2。

步骤 4 求解得到补偿电感序列。求得解集及每个解的电压增益曲线和误差曲线的交点见表 1。可知, 每个解和误差曲线的左、右交点完整覆盖了

表 1 每个解的电压增益曲线和误差曲线的交点

Tab. 1 Intersection between voltage gain curve and error curve for each solution

解/ μH	左交点/ μH	右交点/ μH
13.5	12.3	17.3
15.0	15.5	23.6
16.0	17.2	25.4
17.0	19.2	29.3
18.0	28.5	44.5

$[12.3, 44.5] \mu\text{H}$, 说明此时系统理论上在互感变化范围为 $[12.3, 44.5] \mu\text{H}$ 时维持恒压输出。

3.2 电路仿真模型

得到耦合机构互感变化范围和最优补偿电感序列后, 在 Simulink 中设计电路仿真模型, 以证明控制策略的有效性。设定互感为自变量, 输入电压为 12 V, 实际负载为 13 Ω 。将解集设定为电感补偿序列, 以互感为自变量, 恒压输出区间追踪控制策略仿真结果如图 6 所示。可知, 在加入控制策略之后, 在互感的变化范围为 $[12.3, 44.5] \mu\text{H}$ 时, 系统的电压增益波动范围稳定在 0.95~1.10 之间。期间经历了 5 次较大幅度的电压增益波动, 这是控制器切换补偿电感产生的电压增益变化。仿真结果和理论计算曲线的差距较小, 证明了理论分析的正确性。

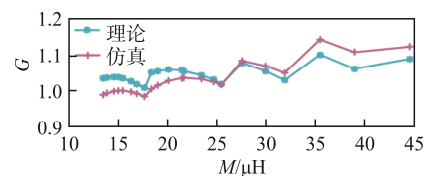
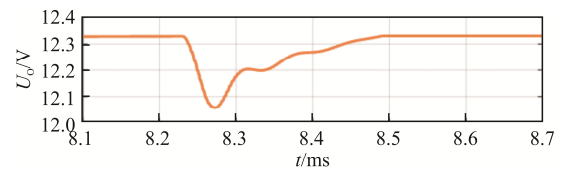


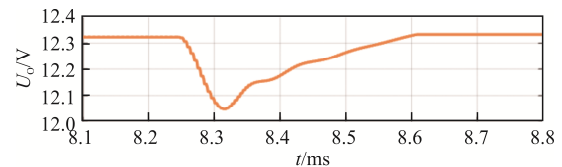
图 6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

为了进一步研究恒压输出区间追踪控制策略在补偿电感切换过程中对系统输出电压的影响, 设计耦合机构偏移仿真实验, 水平偏移量由 2 cm 分别增加到 4、8 cm, 竖直间隙由 2 cm 分别增加到 4、8 cm, 互感由 41.8 μH 降至 21.6 μH 、再由 21.6 μH 降至 12.3 μH , 输出电压仿真波形如图 7 所示。可知, 当耦合机构发生偏移时, 互感由 41.8 μH 降至 21.6 μH



(a) 互感由 41.8 μH 降至 21.6 μH



(b) 互感由 21.6 μH 降至 12.3 μH

图 7 输出电压仿真波形

Fig. 7 Simulation waveforms of output voltage

后, 原边补偿电感由 $17.0 \mu\text{H}$ 切换为 $15.0 \mu\text{H}$, 输出电压在经过 0.3 ms 的振荡后, 稳定输出为 12.32 V , 这与发生偏移前输出电压为 12.33 V 基本一致, 输出电压最大跌落幅值为 0.25 V 。互感由 $21.6 \mu\text{H}$ 降至 $12.3 \mu\text{H}$ 后, 原边补偿电感由 $15.0 \mu\text{H}$ 切换为 $13.5 \mu\text{H}$, 输出电压在经过 0.35 ms 的振荡后, 稳定输出为 12.33 V , 输出电压最大跌落幅值为 0.27 V , 电压跌落较小。

4 实验验证

为验证恒压输出区间追踪控制策略的有效性, 搭建实验平台如图 8 所示。实验平台中, 直流电源电压通过逆变电路转换为 85 kHz 交流电, 经过补偿电路传输到耦合机构, 发射线圈和接收线圈为 3 mm 利兹线缠绕而成的圆环型线圈, 使用电子负载模拟实际负载。由控制器输出控制逆变电路工作频率的 PWM 波, 除此之外, 控制器还将运行控制代码利用继电器实现对电感补偿序列的控制。

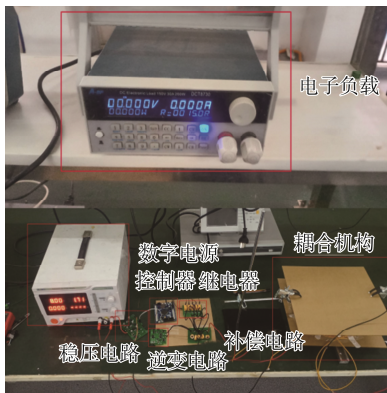


图 8 实验平台

Fig. 8 Test platform

设计 15 组耦合机构偏移情况, 并具体测量了每种偏移情况的互感, 利用 15 组耦合机构偏移情况进行对比实验, 实验组使用恒压输出区间追踪抗偏移优化策略, 对照组使用 $18 \mu\text{H}$ 的固定补偿电感实验, 实验结果见表 2。可知, 互感从 $44.452 \mu\text{H}$ 变化到 $14.955 \mu\text{H}$ 的过程中, 电压增益从 1.110 下降至 0.960 。其中, 在互感为 44.452 、 35.431 、 28.970 、 21.551 、 $16.820 \mu\text{H}$ 时, 原边补偿电感分别切换为 18.0 、 17.0 、 16.0 、 15.0 、 $13.5 \mu\text{H}$, 在互感变化过

程中系统电压增益维持在 $[0.960, 1.110]$, 处于误差允许范围内, 验证了系统恒压输出的鲁棒性。

表 2 实验结果

Tab. 2 Test results

互感/ μH	原边补偿电感/ μH	使用控制策略后的电压增益	使用控制策略前的电压增益
44.452	18.0	1.110	1.110
41.787	18.0	1.100	1.102
35.431	17.0	1.100	1.043
30.234	17.0	1.090	0.993
28.970	16.0	1.100	0.943
28.170	16.0	1.080	0.918
25.678	16.0	1.070	0.860
21.551	15.0	1.010	0.785
21.404	15.0	1.040	0.785
21.364	15.0	1.040	0.776
20.851	15.0	1.000	0.726
18.937	15.0	0.960	0.701
16.820	13.5	1.020	0.684
14.955	13.5	0.960	0.654

为了进一步说明本文控制策略的优越性, 将使用控制策略前后的电压增益及理论曲线、仿真和实验结果进行对比, 分别如图 9 和图 10 所示。由图 9 可知, 在互感较大时, 系统的电压增益接近 1.1 , 但是随着偏移量的增加, 耦合机构互感逐渐减小, 在互感低于 $35.4 \mu\text{H}$ 之后, 系统电压增益开始大幅下降, 最小值低于 0.7 。在使用了恒压输出区间追踪控制策略之后, 系统的电压增益一直稳定在 $0.96\sim 1.10$ 之间, 实现了系统的恒压输出。此外, 使用控制策略之后, 维持系统恒压的互感变化范围达到了 $[14.955, 44.452] \mu\text{H}$, 相较于使用控制策略之前互感变化范围 $[30.234, 44.452] \mu\text{H}$, 在宽度上提升了 107.46% , 证明了控制策略的优越性。由图 10

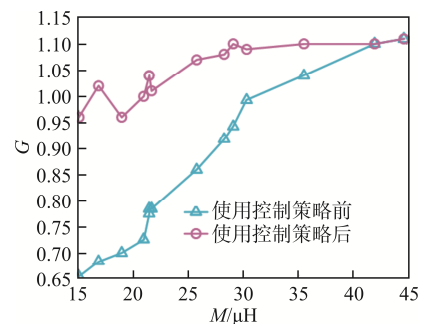


图 9 使用控制策略前、后对比

Fig. 9 Comparison before and after using control strategy

可知, 理论曲线和仿真结果相吻合, 实验结果在 2 条曲线上上下下小幅波动, 充分证明了实验结果和仿真结果的一致性。

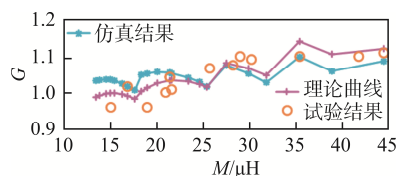


图 10 理论曲线、仿真结果和实验结果

Fig. 10 Theoretical curves, simulation results and test results

5 结语

本文针对 WPT 系统输出电压受耦合机构偏移量影响较大的问题, 提出 1 种恒压输出区间追踪控制策略。首先, 对比分析了系统工作在谐振和非谐振状态下互感对电压增益的影响, 得出了在恒压输出区间内非谐振状态下系统的抗偏移能力强于谐振状态的结论; 然后, 设计了电感补偿序列, 使得恒压输出区间可控; 最后, 利用电压反馈控制方法追踪变化互感的恒压输出区间, 提高了系统的抗偏移能力。为了证明控制策略的有效性, 搭建了基于恒压输出区间追踪控制抗偏移方法的 WPT 系统仿真模型和实验平台, 仿真和实验表明: 当 WPT 系统工作在非谐振状态时, 维持系统恒压输出的互感变化范围较宽, 相对于谐振状态提升了 197.21%; 采用原边补偿电感切换控制相对原边补偿电感固定方案, 系统恒压输出互感变化范围提升了 107.46%。因此, 本文提出的控制方法是可行且有效的, 可适用于多种静态及动态无线电能传输应用场合。

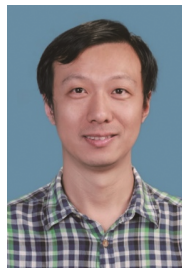
参考文献:

- [1] 吴理豪, 张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述(上篇)[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1153-1165.
Wu Lihao, Zhang Bo. Overview of static wireless charging technology for electric vehicles: Part I [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1153-1165. (in Chinese)
- [2] 吴理豪, 张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述(下篇)[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1662-1678.
Wu Lihao, Zhang Bo. Overview of static wireless charging technology for electric vehicles: Part II [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1662-1678. (in Chinese)
- [3] 王振亚, 王学梅, 张波, 等. 电动汽车无线充电技术的研究进展[J]. 电源学报, 2014, 12(3): 27-32.
Wang Zhenya, Wang Xuemei, Zhang Bo, et al. Advances of wireless charging technology in electric vehicle [J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(3): 27-32. (in Chinese)
- [4] 夏晨阳, 赵书泽, 杨颖, 等. 电动汽车无线充电系统研究综述[J]. 广东电力, 2018, 31(11): 3-14.
Xia Chenyang, Zhao Shuze, Yang Ying, et al. Research review on electric vehicle wireless charging system [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(11): 3-14. (in Chinese)
- [5] 陈浩, 丘东元, 张波, 等. 植入式医疗设备无线供电技术综述[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 188-199.
Chen Hao, Qiu Dongyuan, Zhang Bo, et al. Overview of wireless power transfer technology for implantable medical devices [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 188-199. (in Chinese)
- [6] 王长清, 蒋帅, 贺坤宇, 等. 低成本具备最大效率追踪功能的 WPT 系统[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 200-208.
Wang Changqing, Jiang Shuai, He Kunyu, et al. Low-cost WPT system with maximum efficiency tracking function [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 200-208. (in Chinese)
- [7] 朱春波, 姜金海, 宋凯, 等. 电动汽车动态无线充电关键技术研究进展[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(2): 60-65, 72.
Zhu Chunbo, Jiang Jinhai, Song Kai, et al. Research progress of key technologies for dynamic wireless charging of electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 60-65, 72. (in Chinese)
- [8] Li Siqi, Li Weihai, Deng Junjun, et al. A double-sided LCC compensation network and its tuning method for wireless power transfer [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2261-2273.
- [9] 任洁, 刘野然, 岳鹏飞, 等. 基于参数优化法的输出抗偏移感应电能传输系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1452-1460.
Ren Jie, Liu Yeran, Yue Pengfei, et al. Study on anti-misalignment inductive power transfer system based on

- parameter optimized method [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1452-1460. (in Chinese)
- [10] 常雨芳, 尹帅帅, 阎晟, 等. 多方位无线电能传输耦合机构设计与分析[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 230-241.
Chang Yufang, Yin Shuashuai, Yan Sheng, et al. Design and analysis of multi-directional WPT coupling mechanism [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 230-241. (in Chinese)
- [11] 田勇, 朱泽, 田劲东, 等. 基于 LCC-S 补偿的电动汽车动态无线充电系统拓扑参数优化[J]. 机械工程学报, 2021, 57(14): 150-159.
Tian Yong, Zhu Ze, Tian Jindong, et al. Parameters optimization of electric vehicles dynamic wireless power transfer system based on LCC-S compensation topology [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(14): 150-159. (in Chinese)
- [12] 张朱浩伯, 徐德鸿, PHILIP Tkrein, 等. 一种高偏移容限的无线电能传输系统设计[J]. 电源学报, 2021, 19(1): 155-164.
Zhang Zhuhaobo, Xu Dehong, Tkrein P, et al. Design of a wireless power transfer system with high misalignment tolerance [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(1): 155-164. (in Chinese)
- [13] 李中照, 王鹏, 巩兆伟, 等. 具有抗偏移特性的无线电能传输系统研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20): 11-16.
Li Zhongzhao, Wang Peng, Gong Zhaowei, et al. Research of wireless power transfer system with anti-migration characteristics [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(20): 11-16. (in Chinese)
- [14] 赵锦波, 蔡涛, 段善旭, 等. 适用于分段式动态无线充电的 T 型抗偏移补偿拓扑[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 36-43.
Zhao Jinbo, Cai Tao, Duan Shanxu, et al. A T-type high misalignment tolerant compensated topology for sectional track-based dynamic wireless power transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 36-43. (in Chinese)
- [15] 胡鹏, 杨庆胜, 王宁, 等. SS 型 PT 对称磁耦合无线电能传输系统特性分析[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 43-48.
Hu Peng, Yang Qingsheng, Wang Ning, et al. Characteristic analysis of SS topological PT symmetrical magnetic coupling wireless power transfer system [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 43-48. (in Chinese)
- [16] 张杰, 赵航, 许知博, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统变电容调谐控制方法研究[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 102-110.
Zhang Jie, Zhao Hang, Xu Zhibo, et al. Variable capacitance tuning control method for magnetically-coupled resonant wireless power transfer system [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 102-110. (in Chinese)
- [17] 王懿杰, 姚友素, 刘晓胜, 等. 无线电能传输用 S/CLC 补偿拓扑分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 34-41.
Wang Yijie, Yao Yousu, Liu Xiaosheng, et al. Analysis on S/CLC compensation topology for wireless power transfer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 34-41. (in Chinese)
- [18] Lu Fei, Zhang Hua, Hofmann H, et al. A double-sided LCLC-compensated capacitive power transfer system for electric vehicle charging [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6011-6014.
- [19] 寇志豪, 杨斌, 陈阳, 等. 二维平面具有抗偏移恒压输出特性的感应式无线充电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4576-4584, 4658.
Kou Zhihao, Yang Bin, Chen Yang, et al. Study on IPT charging systems with the characteristics of misalignment tolerant in 2-dimension plane and constant voltage output [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4576-4584, 4658. (in Chinese)
- [20] Masaki K, Gao Xudong, Deng Mingcong, et al. Experimental study on operator-based integral sliding mode robust nonlinear control for WPT systems [C]// 2018 IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR). Shenyang, China, 2018: 385-388.
- [21] 戴欣, 余奎, 孙跃. CLC 谐振型感应电能传输系统的 H_{∞} 控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(30): 47-54.
Dai Xin, Yu Kui, Sun Yue. Study on H_{∞} control method for CLC resonant inductive power transfer system [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(30): 47-54. (in Chinese)
- [22] 苏建强, 任凯斌, 刘利强, 等. 基于 ADRC 的 LCC-S 谐振型无线充电副边闭环控制研究[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 111-119.

- Su Jianqiang, Ren Kaibin, Liu Liqiang, et al. Research on secondary-side closed-loop control of LCC-S resonant wireless charging based on ADRC [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 111-119. (in Chinese)
- [23] 彭思敏, 张慧成, 吴铁洲, 等. 基于线性自抗扰控制的无线电能恒压无通信传输方法[J]. 电源学报, 2023, 21(6): 120-128.
- Peng Simin, Zhang Huicheng, Wu Tiezhou, et al. Constant-voltage no-communication method of wireless power transfer based on linear active disturbance rejection control [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(6): 120-128. (in Chinese)
- [24] Neath M J, Swain A K, Madawala U K, et al. An optimal PID controller for a bidirectional inductive power transfer system using multiobjective genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1523-1531.
- [25] 夏晨阳, 李晓丽, 韩潇左, 等. IPT 系统线性自抗扰恒压输出和最大效率跟踪复合控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 6042-6052, 6178.
- Xia Chenyang, Li Xiaoli, Han Xiaozuo, et al. A hybrid

control method for achieving constant voltage output with LADRC and maximum efficiency tracking for IPT systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 6042-6052, 6178. (in Chinese)



黄文聪

作者简介:

黄文聪(1977—), 男, 通信作者, 博士, 副教授。研究方向: 电力电子与电力传动、无线电能传输、人工智能与智能制造技术。E-mail: hwc@hbut.edu.cn。

蒋焯焱(2001—), 男, 本科。研究方向: 无线电能传输抗偏移研究。E-mail: 1943050014@qq.com。

常雨芳(1980—), 女, 博士, 教授。研究方向: 电力电子、无线电能传输、微电网。E-mail: changyf@hbut.edu.cn。

谭海东(2001—), 男, 本科。研究方向: 无线电能传输。E-mail: haidongtan@126.com。

朱祺浩(1998—), 男, 硕士研究生。研究方向: 无线电能传输。E-mail: 1575714814@qq.com。

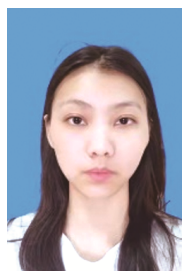
(责任编辑: 郭凯凯)

(上接第 132 页)

- Wang Shuohe, Zheng Junguan, Chen Zucheng, et al. Research on multi-peak MPPT of PV array based on improved PSO algorithm [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(6): 879-885. (in Chinese)
- [17] 王超, 杨莲红, 刘红. 基于 MATLAB 的不完全微分 PID 控制的设计与仿真[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2013, 23(4): 47-50.
- Wang Chao, Yang Lianhong, Liu Hong. Design and simulation of incomplete derivation PID control based on MATLAB [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, 23(4): 47-50. (in Chinese)
- [18] 党选举, 杨阳, 姜辉, 等. 基于不完全微分的自适应步长扰动观察法 MPPT 控制[J]. 太阳能学报, 2016,

37(12): 3022-3029.

Dang Xuanju, Yang Yang, Jiang Hui, et al. MPPT control of adaptive step size perturb & observe method based on incomplete differential [J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2016, 37(12): 3022-3029. (in Chinese)



毛琳

作者简介:

毛琳(1999—), 女, 硕士研究生。研究方向: 光伏 MPPT 控制算法。E-mail: 2389522727@qq.com。

任正云(1969—), 男, 通信作者, 博士, 教授。研究方向: 非线性模型预测控制、组合积分系统先进控制。E-mail: renzhengyun@dhu.edu.cn。

(责任编辑: 耿越)