

文章编号: 2096-1618(2022)03-0276-08

# 电动汽车无线充电系统双边 LCC 补偿网络参数的鲁棒优化设计

庄慧敏, 张江林, 杨鸣凯

(成都信息工程大学控制工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**为解决电动汽车无线充电系统耦合系数发生改变导致系统性能下降的问题,研究磁耦合谐振式无线电能传输(MCR-WPT)双边 LCC 网络的补偿特性,得出补偿线圈参数的合理取值范围,应用信息间隙决策理论的风险规避策略,以转换效率最高为目标,构建考虑耦合系数不确定性的补偿网络参数优化模型,通过优化计算获取补偿线圈参数的最优值,实现在耦合系数变化较大的情况下,仍能在满足充电负荷功率需求的同时使转换效率最大。通过对一个 3 kW 的基于双边 LCC 补偿的无线充电系统算例分析,验证鲁棒优化设计方法的有效性。结果表明:当系统的耦合系数减小 27% 时,系统的输出功率仍然不低于 3 kW,而转换效率仅下降 1%,且不低于 96%。

**关键词:**电动汽车; MCR-WPT 系统; 双边 LCC 补偿; 信息间隙决策理论; 鲁棒优化

**中图分类号:** TM724

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2022.03.007

## 0 引言

在实现“双碳”目标的艰巨任务驱使下,电动汽车(EV)作为行驶中零排放的绿色交通工具,在世界各国得到快速发展与推广,其充电的便利性、安全性和智能性也成为日益关注的焦点。与传统的有线充电方式相比,无线电能传输(wireless power transfer, WPT)能够克服有线充电的诸多弊端,已快速应用于医疗设备、交通运输、航空航天等多个领域<sup>[1]</sup>。其中,磁耦合谐振式无线电能传输(magnetic coupled resonant WPT, MCR-WPT)系统能够实现较大功率及较远距离的电能传输,被广泛应用于电动汽车的无线充电,其理论研究及技术应用已成为研究热点,并取得诸多进展<sup>[2]</sup>。

MCR-WPT 系统的传输线圈之间是松耦合关系,漏感较大,耦合率低,导致系统中无功占比大,功率因素低。为此,在系统中引入谐振补偿模块(由电感和电容元件的串或并联组成),减小无功功率、提高传输效率、改善传输特性等。谐振补偿模块主要有 4 种基本结构及在此基础上衍生的复合型结构<sup>[3]</sup>。已有文献讨论了不同拓扑的特性<sup>[4-6]</sup>,指出:双边 LCL(D-LCL)谐振补偿网络相较于 S-S 结构,具有更好的容偏性能,但传输功率较低;双边 LCC(D-LCC)拓扑具有恒流输出的特点,克服了 D-LCL 传输功率偏小和直流磁化的问题,并在 EV 双向无线充电中具有更强的适应性。因此, D-LCC 已成为 EV 无线充电系统补偿网络

的常见拓扑,具有更加广阔的应用前景。

目前已有不少文献对基于 D-LCC 补偿的无线充电系统展开了相关研究。文献[7-9]通过建模仿真,比较分析了 D-LCC 补偿网络与其他谐振拓扑的输出特性;文献[10-11]研究了 S-S 补偿型感应耦合电能传输系统的补偿特性,利用非线性规划方法对电容参数进行优化,实现满足功率需求的同时效率最大;文献[12]通过分析谐振网络的损耗模型,给出了谐振网络效率优化的方法,并提出一种新型锁相方法,实现了零电压开关运行。还有一些文献研究了补偿网络的参数设计问题。文献[13]针对双 LC 网络的电场耦合式 WPT 系统的补偿网络参数配置问题,以传输效率为目标函数构建优化模型,实现了参数的优化设计;文献[14]通过分析使 D-LCC 型 MCR-WPT 转换效率或输出功率比 SS 型更高的条件,给出了面向效率及功率的补偿网络参数设计方法;文献[15]基于对 D-LCC 补偿网络的传输特性、耐压特性的理论分析,通过仿真逐步确定谐振拓扑补偿电容参数的范围,实现对无线充电系统补偿网络参数的设计。

综上所述,目前关于补偿网络参数设计的问题,无论是基于系统特性分析还是构建优化模型的方法,都没有考虑传输线圈耦合系数变化对参数设计的影响。在实际的电动汽车无线充电过程中,时常会因各种因素导致传输线圈之间的距离发生变化,导致耦合系数随之变化,从而影响基于理想参数设计的 WPT 系统性能。为考虑耦合系数变化对系统性能的不利影响,本文引入信息间隙决策理论(information gap decision theory, IGDТ)的风险规避策略,基于 D-LCC 补偿网络

输出特性的理论和仿真分析结果,构建补偿网络参数设计的鲁棒优化模型,通过优化计算得到补偿网络的参数取值,使 WPT 系统在耦合系数变化严重的情况下,仍能在满足负荷功率需求的同时实现效率最大化。

## 1 D-LCC 补偿网络稳态建模

基于 D-LCC 谐振补偿的 MCR-WPT 系统拓扑如图 1 所示。图 1 中,由开关管  $S_1 \sim S_4$  构成高频逆变电路,输入电压为  $u_{in}$ ,输出电压为  $u_{AB}$ ;耦合线圈原、副边的自感分别为  $L_1$ 、 $L_2$ ,互感为  $M$ ;谐振补偿网络的原、副边补偿电感分别为  $L_{\Pi}$ 、 $L_{\Sigma}$ ,串联补偿电容分别为  $C_1$ 、 $C_2$ ,并联补偿电容分别为  $C_{\Pi}$ 、 $C_{\Sigma}$ ;流经耦合线圈  $L_1$ 、 $L_2$  的电流分别为  $I_1$ 、 $I_2$ ,流经补偿线圈  $L_{\Pi}$ 、 $L_{\Sigma}$  的电流分别为  $I_{L_{\Pi}}$ 、 $I_{L_{\Sigma}}$ ,副边补偿网络的输出电压为  $u_{ab}$ ;二极管  $D_1 \sim D_4$  构成副边整流桥,通过滤波电路  $C_0$ 、 $L_0$  为电池负载提供能量。

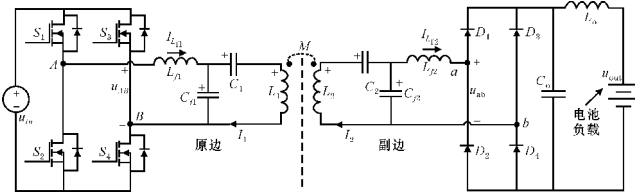


图1 D-LCC 型 MCR-WPT 系统拓扑

电路中线圈和电容的内阻通常远小于感抗和容抗,对谐振网络电气参数的影响可以忽略不计<sup>[9]</sup>。此外,文献[15]通过对 D-LCC 网络的高次谐波分析,得出结论:高次谐波在计算过程中可忽略不计。为简化分析,将输入直流电压  $U_{in}$  和原边逆变器简化为幅值为  $U_1$  的正弦交流电源,副边整流环节和电池负载简化为等效电阻  $R_e$ 。由此得到图 2 所示的 D-LCC 补偿拓扑的等效原理图,串联电容  $C_1$ 、 $C_2$  分别与耦合线圈电感  $L_1$ 、 $L_2$  的串联等效电感  $L_{1e}$ 、 $L_{2e}$  满足条件:  $\omega L_{1e} = \omega L_1 - \frac{1}{\omega} \cdot C_1$ ,  $\omega L_{2e} = \omega L_2 - \frac{1}{\omega} \cdot C_2$ 。

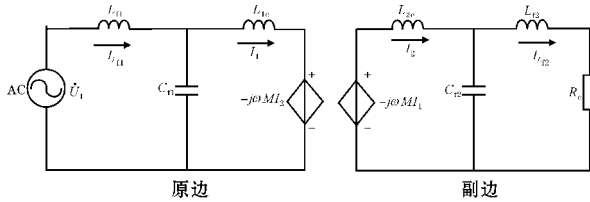


图2 双边 LCC 补偿拓扑等效原理图

$$U_1 = \frac{4}{\sqrt{2}\pi} U_{in} \quad (1)$$

采用相量法对电路拓扑展开分析。以  $U_1$  为参考相量,基于基尔霍夫电压定律列写图 2 中 4 个回路的电压方程:

$$\begin{bmatrix} j\omega L_{\Pi} + \frac{1}{j\omega C_{\Pi}} & -\frac{1}{j\omega C_{\Pi}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{j\omega C_{\Pi}} & \frac{1}{j\omega C_{\Pi}} + j\omega L_{1e} & j\omega M & 0 \\ 0 & j\omega M & \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_{2e} & \frac{1}{j\omega C_{\Sigma}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{j\omega C_{\Sigma}} & j\omega L_{\Sigma} + \frac{1}{j\omega C_{\Sigma}} + R_e \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{L_{\Pi}} \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_{L_{\Sigma}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

D-LCC 原、副边补偿网络谐振条件为

$$L_{\Pi} C_{\Pi} = (L_1 - L_{\Pi}) C_1 = L_{\Sigma} C_{\Sigma} = (L_2 - L_{\Sigma}) C_2 = \frac{1}{\omega^2}$$

因此:

$$\begin{aligned} j\omega L_{\Pi} + \frac{1}{j\omega C_{\Pi}} &= \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_{1e} = 0 \\ j\omega L_{\Sigma} + \frac{1}{j\omega C_{\Sigma}} &= \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_{2e} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

由式(2)、(3)求得各回路电流的有效值为

$$\begin{aligned} I_{L_{\Pi}} &= \frac{U_1 R_e}{(\omega L_3)^2}, I_{L_{\Sigma}} = \frac{U_1}{\omega L_3} \\ I_1 &= \frac{U_1}{\omega k_1 L_1}, I_2 = \frac{U_1 R_e}{\omega^2 k_2 L_2 L_3} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $k_1 = L_{\Pi}/L_1$ ,  $k_2 = L_{\Sigma}/L_2$ ,  $L_3 = \frac{k_1 k_2}{k} \sqrt{L_1 L_2}$ ,  $k$  为线圈  $L_1$ 、 $L_2$  的耦合系数。

由式(4)可以看出,D-LCC 补偿网络在输入电压和系统参数不变的情况下,输出电流不变,从而实现了恒流输出。

由图 2 的等效电路,可以推导出原边输入阻抗  $Z_{in}$  为

$$Z_{in} = \left( \frac{\omega L_{\Pi} L_{\Sigma}}{M} \right)^2 / R_e = (\omega L_3)^2 / R_e \quad (5)$$

由此得出补偿网络输入功率为

$$P_1 = U_1 I_{L_{\Pi}} = \frac{U_1^2}{Z_{in}} = \left( \frac{U_1}{\omega L_3} \right)^2 R_e \quad (6)$$

一般情况下,补偿元件的电阻比耦合线圈的电阻(设为  $R_{L1}$ 、 $R_{L2}$ )小得多,其损耗可以忽略不计。因此,在损耗分析中只考虑耦合电感的损耗:

$$P_{loss} = I_1^2 R_{L1} + I_2^2 R_{L2} = \frac{U_1^2}{\omega^2} \left[ \frac{R_{L1}}{k_1^2 L_1^2} + \left( \frac{R_e}{\omega L_3 k_2 L_2} \right)^2 R_{L2} \right] \quad (7)$$

输出功率  $P_2$  及效率  $\eta$  如下:

$$P_2 = P_1 - P_{loss} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{P_1 - P_{\text{loss}}}{P_1} \times 100\% = 1 - \left( \frac{R_{L1} L_2 k_2^2}{R_e k^2 L_1} + \frac{R_e R_{L2}}{\omega^2 L_2^2 k_2^2} \right) \times 100\% \quad (9)$$

## 2 D-LCC 补偿网络特性分析

为分析 D-LCC 补偿网络输出特性,给参数优化设计提供一定的依据,以无线充电系统取如下参数为例,基于已建立的稳态数学模型,应用 MATLAB 进行仿真分析:高频逆变电源输入直流电压  $U_{\text{in}}$  为 100 V、耦合线圈的初级侧和次级侧线圈电感均为 50  $\mu\text{H}$ 、耦合线圈的电阻均为 70  $\text{m}\Omega$ 、谐振频率为 85 kHz、等效负载电阻为 10  $\Omega$ 。

### 2.1 输入阻抗特性

由式(7)可知,输入电压一定时,输入功率与输入阻抗成反比,因此先分析补偿网络参数对输入阻抗的影响。式(6)表明,输入阻抗与耦合系数和补偿参数有关:随着耦合系数增大而减小,随着补偿电感增大而增大。为分析方便,假设原边、副边的补偿电感系数相等,  $k_1 = k_2 = k_L$  仿真分析输入阻抗随着耦合系数及补偿参数变化的特性,仿真得到输入阻抗特性曲线如图 3(a)所示。输入阻抗受  $k_L$  的影响较大,当  $k_L$  增大到 0.3 时,输入阻抗快速增大。为使输入阻抗较小,取  $0.1 \leq k \leq 0.3, 0.1 \leq k_L \leq 0.3$ ,得到如图 3(b)所示的输入阻抗特性曲线,此时输入阻抗最大值为 71.31  $\Omega$ ,约负载电阻的 7 倍。因此,  $k_L$  不宜超过 0.3。

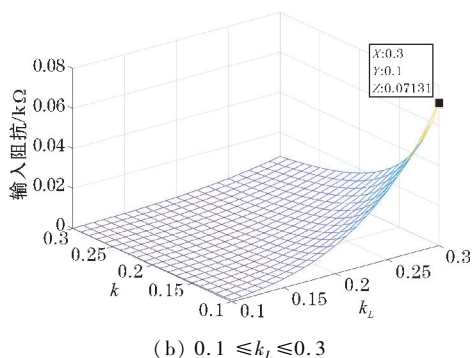
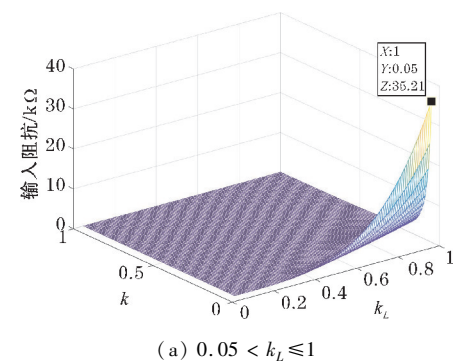


图3 输入阻抗特性曲线

### 2.2 输入与输出电流特性

由式(4)中输入电流  $I_{L1}$  和输出电流  $I_{L2}$  的表达式可以看出,当输入电压、谐振频率、负载阻抗一定时,输入和输出电流均随着耦合系数增大而增大,随着补偿电感增大而减小。为分析方便,仍假设  $k_1 = k_2 = k_L$ ,仿真分析输入与输出电流随着耦合系数及补偿参数变化 (0.1 ~ 0.3) 的特性,如图 4 ~ 5 所示。

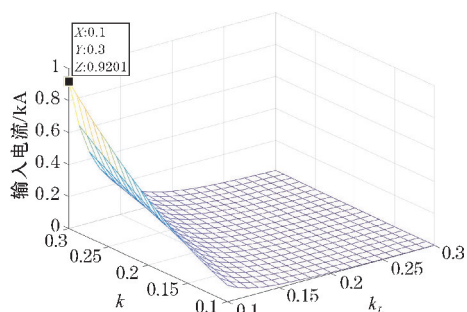


图4 输入电流特性曲线

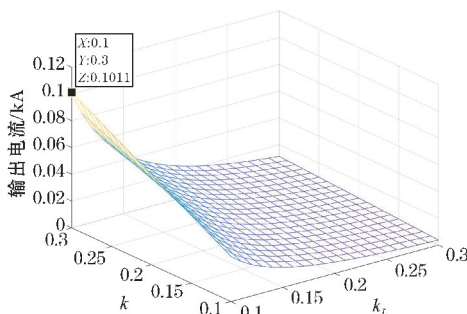


图5 输出电流特性曲线

由图 4、5 可知,当耦合系数越大、补偿电感越小时,输入、输出电流越大。文中输入、输出最大电流分别为 920 A、101 A。虽然输出电流越大,输出功率也越大,然而,线圈中电流过大,将导致线圈工作温度过高,影响线圈正常工作及使用寿命。因此,当耦合系数较大时,补偿电感不宜太小。

### 2.3 输出功率与效率特性

由式(7) ~ (9)可以看出,当谐振频率  $\omega$  与输入电压一定,补偿系统的输出功率和效率随耦合系数  $k$  及补偿电感系数 (取  $k_1 = k_2 = k_L$ ) 变化 (0.1 ~ 0.3) 的特性曲线如图 6 ~ 7 所示。

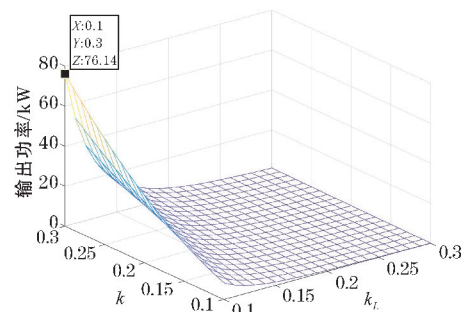


图6 输出功率特性曲线



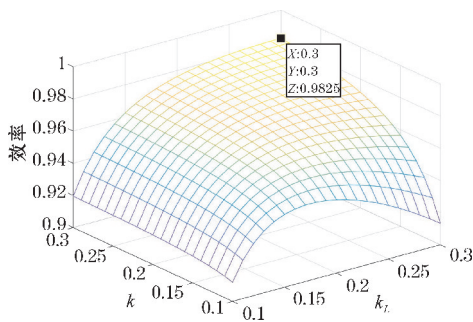
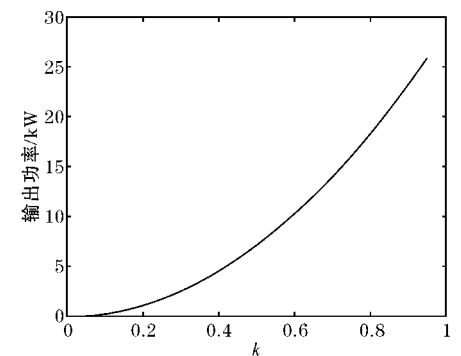


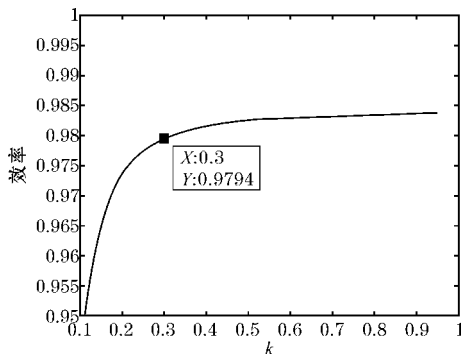
图7 效率特性曲线

由图6、7可知,输出功率与效率的最大值点并不一致。转换效率受补偿电感系数的影响较大;耦合系数较大、补偿电感系数较小时,输出功率比较大;耦合系数一定时,输出功率随着补偿电感系数的增大而较小,转换效率则先增大到最大值,而后下降。

首先分析耦合系数  $k$  对系统输出功率与效率影响。取  $k_1 = k_2 = 0.25$ ,  $k$  从0.05增加0.95,仿真得到如图8所示的随耦合系数变化的特性曲线。图8(a)表明:随着耦合系数  $k$  的增大,输出功率增加,这是由于耦合电感的内阻远小于负载电阻,使耦合系数对输入功率的影响远大于对功率损耗的影响。由图8(b)可知,效率先随  $k$  的增加快速增加,当  $k$  接近0.3时,增加趋缓,  $k$  超过0.3后效率基本稳定。因此,电动汽车无线充电系统的耦合系数不宜超过0.3,通常取  $0.1 \leq k \leq 0.3$ <sup>[5]</sup>。



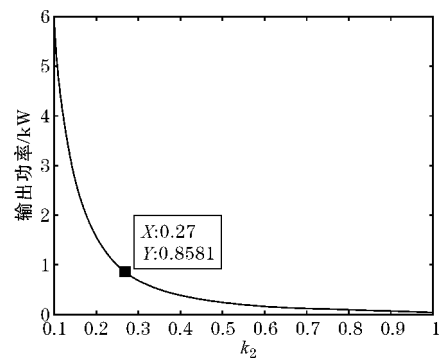
(a) 输出功率特性曲线



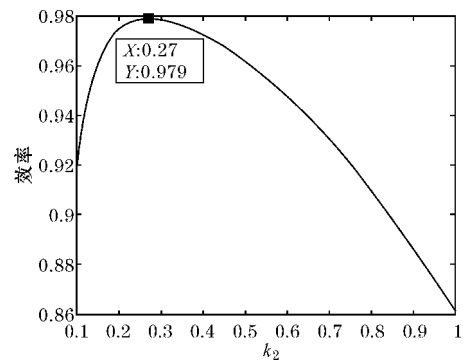
(b) 转换效率特性曲线

图8  $k_1 = k_2 = 0.25$  的特性曲线

式(7)~(9)表明:当谐振频率  $\omega$  与输入电压一定,耦合线圈参数不变时,补偿系统的输出功率由补偿电感系数  $k_1$ 、 $k_2$  确定,而效率仅由  $k_2$  决定。为此,取  $k_1 = k = 0.25$ ,仿真得到输出功率与效率关于  $k_2$  的特性曲线分别如图9所示。可以看出:随着补偿电感系数的增加,输出功率下降,而效率先增加到最大值后迅速下降;  $k_2$  在0.1~0.3,功率与效率随之变化的趋势完全相反,当输出效率达到最高时,输出功率已下降到0.858 kW。由此可见,输出功率与效率不可能同时取得最大化。当  $k_2 = 0.27$  时,效率取得最大值,  $k_2 > 0.27$  时,随  $k_2$  的增加效率迅速降低。从这一点也说明,  $k_2$  不宜超过0.3。



(a) 输出功率特性曲线



(b) 转换效率特性曲线

图9  $k_1 = k = 0.25$  的特性曲线

另一方面,补偿系统的副边设备安装在电动汽车上,体积受限,故在满足系统运行要求的情况下尽可能选择较小的补偿线圈。基于上述分析,得出补偿电感的约束条件:

$$0.1 < k_2 \leq k_1 < 0.3 \quad (10)$$

对于实际无线充电系统,往往会给定额定输出功率的需求,然后使传输效率尽可能大。通过上述特性分析可知,对于无线传输系统的耦合线圈参数确定的情况,通过优化设计补偿系统的参数能够实现这一目标。

### 3 基于IGDT的补偿网络参数优化

为确保基于D-LCC补偿的MCR-WPT系统在满足所需输出功率的前提下,传输效率最高,需对D-LCC谐振补偿网络参数进行优化设计。另一方面,电动汽车充电时可能因错位等导致无线传输系统的等效耦合系数发生变化。因此,在进行补偿网络的参数设计时,需要考虑耦合系数变化对系统输出功率及效率的影响。

#### 3.1 IGDT概述

Ben-Haim于2001年提出了信息间隙决策理论(IGDT),从非概率的角度考察不确定性的特征,利用“间隙”定义已知与未知信息之间的差异,并根据不确定性对最终结果的不同影响(可能有害,也可能有利),给出两种策略:风险规避策略和机会寻求策略,通过定义相应的性能函数对不确定性进行量化<sup>[16-17]</sup>。该方法的主要思路:首先根据决策者的风险偏好制定目标期望值,然后寻求满足目标期望的不确定参数容许的波动范围。

IGDT优化模型的建立通常包含3个部分:系统模型、参数的不确定模型及性能要求<sup>[16]</sup>。系统模型亦称为基础模型或确定性模型,该模型不考虑参数的不确定性,如式(11)所示:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{X}, \gamma) \\ \text{s. t.} \quad & h(\mathbf{X}, \gamma) = 0 \\ & g(\mathbf{X}, \gamma) \leq 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{X}, \gamma$ 分别为决策变量向量及不确定参数; $f, h, g$ 分别为目标函数、等式约束及不等式约束。

当前不确定集模型主要包括:包络约束模型、能量约束模型及变化率约束模型。其中,包络模型简单直观,被使用较多,描述如下:

$$\gamma \in U(\alpha, \bar{\gamma}) = \left\{ \gamma: \left| \frac{\gamma - \bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} \right| \leq \alpha \right\} \quad (12)$$

式中, $\alpha$ 称为不确定半径或不确定度,表示参数 $\gamma$ 的波动幅度; $\bar{\gamma}$ 为 $\gamma$ 的预测值。

根据决策者对不确定性的评估及期望的决策目标,IGDT采用两种性能要求表述:风险规避策略下的鲁棒性函数和机会寻求策略下的机会性函数,分别表示如下:

$$\hat{\alpha} = \max \{ \alpha: \max f(\mathbf{X}, \gamma) \leq f_c = (1 + \sigma) f_0 \} \quad (13)$$

$$\hat{\alpha} = \min \{ \alpha: \min f(\mathbf{X}, \gamma) \leq f_c = (1 - \sigma) f_0 \} \quad (14)$$

式中, $\hat{\alpha}$ 为 $\alpha$ 最大值, $\sigma$ 称为偏差因子,由决策者根据实际情况确定; $f_c$ 为决策者预设的可接受目标值; $f_0$ 为

基础模型的最优目标值。

式(13)为鲁棒模型,该模型求取的决策值 $\mathbf{X}^*$ 对于任意扰动 $\gamma \in U(\alpha, \bar{\gamma})$ ,都能确保目标函数不超过预设的值,能够获得最大的鲁棒性。式(14)为机会模型,对于该模型求取的决策值 $\mathbf{X}^*$ ,至少存在一个 $\gamma \in U(\alpha, \bar{\gamma})$ ,使目标函数不高于预设的值。

#### 3.2 基于IGDT的参数优化模型

由文中补偿网络特性分析可知,耦合系数的变化对输出功率影响比较大,对效率影响较小;随着耦合系数的减小,输出功率和效率都会降低。考虑在实际的电动汽车无线充电过程中,系统耦合系数可能因各种干扰因素小于理想的设计值,本文采用风险规避策略建立参数优化模型。

##### 3.2.1 基础模型

根据前文补偿系统的数学模型及特性分析,以补偿线圈的电感系数 $k_1, k_2$ 为变量,即向量 $\mathbf{X} = [k_1 \ k_2]$ ,以传输效率最大为目标,建立如下优化模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & \eta(k_2) \\ \text{s. t.} \quad & P_{\text{set}} - P_2(k_1, k_2) \leq 0 \\ & 0.1 < k_2 \leq k_1 < 0.3 \end{aligned} \quad (15)$$

式中, $P_{\text{set}}$ 为负荷所需的充电功率。

该模型目标函数表达式为式(9),等式约束由式(7)、(8)确定,因此是一个非线性凸规划模型。

为了应用MATLAB提供的fmincon函数求解式(11),将其改为如下标准形式:

$$\min \quad f(\mathbf{X}, k) = -\eta(k_2) \quad (16)$$

$$\text{s. t.} \quad g(\mathbf{X}, k) = \begin{Bmatrix} P_{\text{set}} - P_2(k_1, k_2) \\ k_2 - k_1 \\ \mathbf{X} - [0.3, 0.3] \\ [0.1, 0.1] - \mathbf{X} \end{Bmatrix} \leq 0 \quad (17)$$

##### 3.2.2 鲁棒模型

首先采用包络模型描述耦合系数的不确定性。由于实际情况中耦合系数 $k$ 通常都小于预测值 $\bar{k}$ (即,理想设计值),因此, $k$ 的波动范围为

$$U(\alpha, \bar{k}) = \{ k: (1 - \alpha)\bar{k} \leq k \leq \bar{k} \} \quad (18)$$

在基础模型中,当耦合系数小于理想设计值时,效率将减小,目标函数 $f$ 将增大。因此,当耦合系数为最小值 $(1 - \alpha)\bar{k}$ 时,对应得目标函数 $f$ 最大。此时,鲁棒模型中的 $\max f$ 将退化为 $f$ ,从而由双层规划模型转化为单层优化模型。此外,由鲁棒模型的含义可知,最恶劣情况下的转换效率不得小于理想效率的 $(1 - \sigma)$ 倍,故目标函数 $f$ 不超过 $(1 - \sigma)f_0$ 。由此得到式(19)所示的鲁棒模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & -\alpha \\ \text{s. t.} \quad & f(\mathbf{X},k) \leq (1-\sigma)f_0 \\ & k = (1-\alpha)\bar{k} \\ & g(\mathbf{X},k) = \begin{cases} P_{\text{set}} - P_2(k_1,k_2) \\ k_2 - k_1 \\ \mathbf{X} - [0.3, 0.3] \\ [0.1, 0.1] - \mathbf{X} \end{cases} \leq 0 \\ & 0 \leq \alpha \leq 1 \end{aligned} \tag{19}$$

3.2.3 优化计算

求解非线性凸规划模型的常用算法包括内点法、序列二次规划法(目标函数为二次函数)、梯度投影法等。MATLAB 提供的 fmincon 函数能够求解非线性规划有约束极值优化问题,其默认情况下使用的算法为内点法。内点法是罚函数法的一种,通过引入障碍函数将约束条件转化为目标函数,生成等价于原模型的优化问题。该方法在可行域内部进行搜索,约束边界起到“围墙”的作用;若当前解远离约束边界,则罚函数值非常小,否则罚函数值接近无穷大。因此,本文直接应用 fmincon 函数求解优化模型。

- 求解模型(19)的流程如下:
- (1)耦合系数  $k$  取理想设计值,应用 fmincon 函数求解模型(16)、(17),得到目标函数值  $f_0$ ;
  - (2)根据运行经验给出偏差因子  $\sigma$ , 仍然调用 fmincon 函数求解模型(19),得到耦合系数最大允许偏差  $\alpha$  及决策变量  $\mathbf{X}^*$ 。

4 算例分析

以负载电阻10  $\Omega$ 、功率需求3 kW为例,无线充电系统中,耦合线圈耦合系数的设计值  $\bar{k}$  为0.25,其他参数取值与第 2 节补偿特性分析的取值相同。

4.1 基础模型的优化结果分析

采用本文的方法,在 MATLAB 中,根据公式(16)~(17)构建补偿网络参数优化模型式,调用 fmincon 函数,运算结果为: $k_1 = k_2 = 0.22$ ;  $\eta = 97.42\%$ ;  $P_2 = 3$  kW。此时,补偿电感  $L_{\text{r1}} = L_{\text{r2}} = 10.7 \mu\text{H}$ ,并联补偿电容  $C_{\text{r1}} = C_{\text{r2}} = 318.72 \text{ nF}$ ,串联补偿电容  $C_1 = C_2 = 89.88 \text{ nF}$ 。

该优化结果与其他取值的比较,见表 1,其中  $k_1 = k_2 = 0.25$  是文献[15]采用的经验值。

表 1 补偿电感不同取值的结果比较

$k_1$	$k_2$	输出功率/kW	效率/%
0.208	0.208	3	97.42
0.25	0.25	1.78	97.73
0.25	0.2	2.75	97.1
0.2	0.2	4.31	97.1

由表 1 可以看出,当补偿电感取其他非优化值时,若输出功率增加,则效率降低;若效率提高,则输出功率降低。文献[14]采用的补偿参数获得的效率比本文的优化算法仅提高0.3%,但功率却降低了40.7%,不能满足充电负荷的需求。由此可见,采用本文优化方法得到的补偿系统参数能使系统性能得到较大提高。

当耦合系数  $k$  减小为0.22时,无线充电转换效率为97.27%,仍然较高,但是输出功率为2.28 kW,不能满足充电负荷的需求。由此可知,如果不考虑耦合系数变化的影响,通过确定性优化计算得到的补偿系统参数无法满足系统的实际需求。

4.2 鲁棒模型的优化结果分析

取系统输出效率的偏差因子为 2%,即效率不低于95.47%,求解鲁棒优化模型式(19),得到:耦合系数  $k$  的允许最大偏差  $\alpha = 0.42$ ,决策变量  $k_1 = k_2 = 0.17$ ;  $\eta = 95.47\%$ ;  $P_2 = 3$  kW。此结果表明:若取  $k_1 = k_2 = 0.17$ ,则当耦合系数减小到原来的 58% 时,在满足输出功率需求的情况下,转换效率只减小了原来的 2%,仍能够满足负荷充电要求。

偏差因子取不同值时的优化结果如表 2 所示。

表 2 不同偏差因子下的鲁棒优化结果比较

$\sigma/\%$	$\alpha$	$k_1$	$k_2$
0.5	0.15	0.2	0.2
1.0	0.27	0.19	0.19
1.5	0.35	0.18	0.18
2.0	0.42	0.17	0.17
2.5	0.48	0.16	0.16
3.0	0.52	0.15	0.15
5.0	0.52	0.15	0.15

由表 2 可以看出,当偏差因子  $\sigma \leq 2.5\%$  时,耦合系数关于决策变量的灵敏度较大,而当  $\sigma \geq 3\%$  时,灵敏度非常小,近似为 0。考虑电动汽车无线充电系统在实际应用中,耦合系数的偏差一般不大于 30%,所以可取  $k_1 = k_2 = 0.19$ ,此时输出功率仍然为3 kW,效率



为96.44%,依然比较高,完全满足实际需求。

## 5 结论

谐振补偿模块是电动汽车无线传输系统的重要组成部分,目的在于提高系统功率因素,进而提高电能的传输效率。而谐振补偿元件参数的优化设计是实现这一目标的基础与关键。本文以应用前景广阔的 D-LCC 型谐振补偿网络为对象,考虑耦合线圈等效耦合系数在实际充电过程中可能减小对系统输出功率及效率的影响,在分析耦合电感耦合系数及补偿电感自感系数对补偿网络输出特性影响的基础上,应用信息间隙决策理论,构建 D-LCC 参数设计的鲁棒优化模型,通过优化计算得到适应耦合电感系数变化最恶劣情况的补偿网络参数。

通过 D-LCC 谐振补偿网络的特性分析得出:

(1)网络的输入阻抗随着耦合系数增大而减小,随着补偿电感增大而增大,但受补偿电感的影响更大。因此为获得较小的输入阻抗,补偿电感宜取较小值;而输入、输出电流随耦合系数及补偿电感的变化趋势与之相反。为避免过大的电流影响电感的正常工作及寿命,当耦合系数较大时,补偿电感不宜太小。

(2)随着耦合系数及补偿电感系数的增加,输出功率及效率的变化趋势并不一致,因此,无法同时获得最大的输出功率与效率。

(3)系统输出功率随着耦合系数增大而增大,随着补偿电感增大而较小;转换效率随耦合系数的增加先快速增加,然后当耦合系数达到0.3后,增加变缓,基本维持稳定;转换效率受补偿电感系数影响更大,但仅受副边补偿电感的影响,与原边补偿电感无关,随着副边补偿电感系数的增加,效率先迅速增大,当副边补偿电感系数接近0.3时,效率达到最大值,而后开始快速下降。由此得出耦合电感系数及补偿电感系数一个合理的取值范围:0.1~0.3。

通过算例结果分析得出:

(1)与经验值相比,通过不考虑耦合系数变化影响的确定性优化计算得到的设计参数,其系统性能更好。在满足负荷功率需求的前提下,效率仅降低0.3%。

(2)由于在实际的充电过程中,常因各种干扰因素导致耦合电感的等效耦合系数降低,可能导致确定性模型得到的设计参数无法满足负荷需求。而基于鲁棒优化模型计算得到的参数,使系统在耦合系数波动

最严重的情况下,仍然满足负荷的充电功率需求,而效率只降低了1%~2%。

## 参考文献:

- [1] 薛明,杨庆新,章鹏程,等.无线电能传输技术应用研究现状与关键问题[J].电工技术学报,2021,36(8):1547-1568.
- [2] 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.
- [3] 陈庆彬,叶逢春,陈为.无线电能传输系统补偿拓扑综述[J].电气开关,2017,55(5):1-4.
- [4] Li Weihang, Zhao Han, Li Siqi, et al. Integrated compensation topology for wireless charger in electric and plug-in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(7):4215-4222.
- [5] Li Siqi, Li Weihang, 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.
- [6] 陈凯楠,赵争鸣,刘方,等.电动汽车双向无线充电系统谐振拓扑分析[J].电力系统自动化,2017,41(2):66-72.
- [7] Li Weihang, Zhao Han, Deng junjun, et al. Comparison study on SS and double-sided compensation topologies for EV/PHEV wireless charges[J]. IEEE Trans. On Vehicular Technology, 2016, 65(6):4429-4439.
- [8] 董纪清,杨上革,黄天祥,等.用于磁耦合谐振式无线电能传输系统的新型恒流补偿网络[J].中国电机工程学报,2015,35(17):4468-4476.
- [9] 杨庆新,章鹏程,祝丽花,等.电动汽车无线充电系统双边 LCC 型谐振补偿网络及电磁安全性研究[J].西安交通大学学报,2021,55(5):171-180.
- [10] ZHU Q, WANG L, LIAO C, et al. Compensate capacitor optimization for kilowatt-level magnetically resonant wire-less charging system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12):6758-6768.

[11] 刘坤,葛佳蔚,杨富尧,等. 用于电动汽车无线充电的电压源型 ICPT 系统最优电容补偿参数选择方法[J]. 电力自动化设备,2021,46(6): 53-58.

[12] 董晓帅,王林,伍敏,等. 基于 LCC 补偿的无线电系统的分析与控制[J]. 电力电子技术, 2021,55(3):10-13.

[13] 苏玉刚,吴学颖,赵鱼名,等. 互补对称式 LCC 谐振网络的电场耦合式无线电能传输系统参数优化[J]. 电工技术学报,2019,34(14):2874-2883.

[14] 刘桃. 电动汽车磁耦合谐振式无线充电系统的电路研究[D]. 绵阳:西南科技大学,2021.

[15] 王松岑,韩秀. 磁耦合谐振式无线充电系统双边 LCC 补偿网络参数设计方法研究[J]. 电气技术,2019,20(6):12-16.

[16] BEN-HAIM Y. Info-gap decision theory[M]. San Diego,CA:Academic,2001.

[17] 彭飞翔,隋鑫,胡姝博,等. 基于信息间隙决策的风火联合投标策略[J]. 电网技术,2021,45(9):3379-3388.

Parameter Robust Optimization of Double LCC Compensation Network for Electric Vehicle Wireless Charging System

ZHUANG Huimin, ZHANG Jianglin, YANG Mingkai

(College of Control Engineering,Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** In order to solve the system performance degradation caused by the change of coupling coefficient of electric vehicle wireless charging system, the characteristics of double LCC compensation network of magnetic coupled resonant wireless power transfer (MCR-WPT) were investigated so that the reasonable value range of compensation coil parameters was gained. And the risk-avoidance strategy based on information gap decision theory was applied to construct the robust optimization model about compensation network parameters considering the uncertainty of coupling coefficient, aiming at the highest conversion efficiency. The optimal values of compensation parameters were obtained through optimization calculation, which can still meet the power demand of charging load and maximize the conversion efficiency when the coupling coefficient changes greatly. By an example of 3 kW wireless charging system with double LCC compensation network analyzed, it verifies the effectiveness of the robust optimization method. The results show that when the coupling coefficient of the system is reduced by 27%, the output power of the system is still not less than 3 kW, while the conversion efficiency is only reduced by 1% and not less than 96%.

**Keywords:** electric vehicle; MCR-WPT system; double LCC compensation; information gap decision theory; robust optimization