



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103208866 B

(45) 授权公告日 2015.09.16

(21) 申请号 201310144178.9

(22) 申请日 2013.04.23

(73) 专利权人 中国科学院电工研究所  
地址 100190 北京市海淀区中关村北二条 6 号

黄学良.《磁耦合谐振式无线电能传输系统串并式模型研究》.《电工技术学报》.2013,第28卷(第3期),第171页-第187页.

审查员 周香

(72) 发明人 廖承林 朱庆伟 王丽芳

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限责任公司 11251

代理人 关玲

(51) Int. Cl.

H02J 17/00(2006.01)

H01F 38/14(2006.01)

(56) 对比文件

CN 102946156 A, 2013.02.27,

CN 102197568 A, 2011.09.21, 全文.

WO 2013/038885 A1, 2013.03.21, 全文.

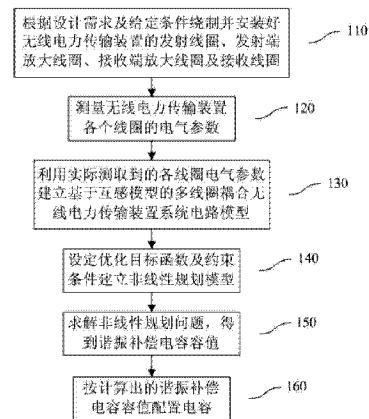
权利要求书3页 说明书7页 附图3页

(54) 发明名称

一种无线电力传输装置的设计方法

(57) 摘要

一种无线电力传输装置的设计方法,包括以下步骤:步骤A、根据设计需求及给定条件绕制并安装无线电力传输装置的发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈及接收线圈;步骤B、测量发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈及接收线圈的电气参数;步骤C、利用实际测取到各线圈的电气参数,建立基于互感模型的多线圈耦合无线电力传输装置系统电路模型;步骤D、设定优化目标函数及约束条件,建立非线性规划模型;步骤E、求解非线性规划问题,得到谐振补偿电容容值;步骤F、按计算出的谐振补偿电容容值配置电容。



1. 一种无线电力传输装置的设计方法,所述无线电力传输装置包括高频电源(2100)、负载(2400)、发射线圈(2210)、发射端放大线圈(2211)、接收端放大线圈(2311)、接收线圈(2310),以及发射线圈谐振补偿电容(2220)、发射端放大线圈谐振补偿电容(2221)、接收端放大线圈谐振补偿电容(2321)、接收线圈谐振补偿电容(2320);所述的发射端放大线圈(2211)与发射端放大线圈谐振补偿电容(2221)并联连接,接收端放大线圈(2311)与接收端放大线圈谐振补偿电容(2321)并联连接;发射线圈(2210)和接收线圈(2310)采用串联补偿或并联补偿,即:发射线圈串联补偿接收线圈串联补偿、发射线圈串联补偿接收线圈并联补偿、发射线圈并联补偿和接收线圈串联补偿、发射线圈并联补偿接收线圈并联补偿,其特征在于所述的设计方法采用非线性规划同时进行4个谐振补偿电容的优化设计,所述的设计方法包含以下步骤:

步骤A、根据设计需求及给定条件绕制并安装无线电力传输装置的发射线圈(2210)、发射端放大线圈(2211)、接收端放大线圈(2311)及接收线圈(2310);

步骤B、测量所述的发射线圈(2210)、发射端放大线圈(2211)、接收端放大线圈(2311)及接收线圈(2310)的电气参数;

步骤C、利用实际测取到的各线圈电气参数建立基于互感模型的多线圈耦合无线电力传输装置系统电路模型;

步骤D、设定优化目标函数及约束条件建立非线性规划模型;

步骤E、求解非线性规划问题,求解流程为:首先代入补偿电容向量的初始值,然后调用电路仿真工具对所建无线电力传输系统模型进行仿真,解出函数集Fun中用户所关心的元素的数值解,代替解析解返回,然后通过返回的函数集Fun仿真结果计算出此次迭代过程中的目标函数值,接着判断是否满足收敛条件,若不满足收敛条件,则依据最优化数学理论计算出补偿电容C向量新值 $C_k$ ,重新调用底层电路仿真工具仿真无线电力传输系统模型;若判断已满足收敛条件,则结束迭代,得到无线电力传输装置各个补偿电容的容值;

步骤F、按计算出的谐振补偿电容容值配置电容,原则是设法配置最接近步骤E求解非线性规划得出的容值,偏差不超过5%。

2. 按照权利要求1所述的无线电力传输装置的设计方法,其特征在于所述的设计方法是设计发射线圈谐振补偿电容(C1)、发射端放大线圈谐振补偿电容(C2)、接收端放大线圈谐振补偿电容(C3),以及接收线圈谐振补偿电容(C4)的电容容值。

3. 按照权利要求1所述的无线电力传输装置的设计方法,其特征在于所述步骤A中的给定条件分为必要条件和非必要条件;所述的必要条件为绕制线圈的必须依据,包括线圈几何尺寸、绕制结构及传输距离;所述的非必要条件为无线电力传输装置的工作频率、输入方式以及补偿方式。

4. 按照权利要求1所述的无线电力传输装置的设计方法,其特征在于所述步骤B中待测量的各个线圈的电气参数包括在给定工作频率下发射线圈自感 $L_1$ 、发射端放大线圈自感 $L_2$ 、接收端放大线圈自感 $L_3$ 、接收线圈自感 $L_4$ 、发射线圈与发射端放大线圈互感 $M_{12}$ 、发射线圈与接收端放大线圈互感 $M_{13}$ 、发射线圈与接收线圈互感 $M_{14}$ 、发射端放大线圈与接收端放大线圈互感 $M_{23}$ 、发射端放大线圈与接收线圈互感 $M_{24}$ 、接收端放大线圈与接收线圈互感 $M_{34}$ ,以及发射线圈内阻 $r_{11}$ 、发射端放大线圈内阻 $r_{12}$ 、接收端放大线圈内阻 $r_{13}$ 、接收线圈内阻 $r_{14}$ ,记为线圈耦合矩阵 $M_{coil}$ 及线圈内阻向量 $R_{coil}$ :

$$M_{coil} = \begin{pmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{12} & L_2 & M_{23} & M_{24} \\ M_{13} & M_{23} & L_3 & M_{24} \\ M_{14} & M_{24} & M_{34} & L_4 \end{pmatrix}, R_{coil} = [r_{L1} r_{L2} r_{L3} r_{L4}]^T.$$

5. 按照权利要求 4 所述的无线电力传输装置的设计方法,其特征在于所述步骤 C 的建模过程中,考虑了发射线圈补偿电容 C1 的内阻  $r_{C1}$ 、发射端放大线圈补偿电容 C2 的内阻  $r_{C2}$ 、接收端放大线圈补偿电容 C3 的内阻  $r_{C3}$ 、接收线圈补偿电容 C4 的内阻  $r_{C4}$ ,并对这些电容内阻做以下近似处理:  $R_C = [r_{C1} r_{C2} r_{C3} r_{C4}]^T \approx \frac{1}{\kappa} [r_{L1} r_{L2} r_{L3} r_{L4}]^T = \frac{1}{\kappa} R_{coil}$ ,  $\kappa = 3 \sim 15$ 。

6. 按照权利要求 5 所述的无线电力传输装置的设计方法,其特征在于步骤 C 所述的无线电力传输装置系统中,发射线圈电流  $I_1$ 、发射端放大线圈电流  $I_2$ 、接收端放大线圈电流  $I_3$  和接收线圈的电流  $I_4$  能够写成输出电压  $U$ 、线圈耦合矩阵  $M_{coil}$ 、线圈内阻向量  $R_{coil}$ 、谐振补偿电容向量  $C$ 、谐振补偿电容内阻向量  $R_C$  的函数:

$$I_1 = g_1(U, f, M_{coil}, R_{coil}, C, R_C), I_2 = g_2(U, f, M_{coil}, R_{coil}, C, R_C), \\ I_3 = g_3(U, f, M_{coil}, R_{coil}, C, R_C), I_4 = g_4(U, f, M_{coil}, R_{coil}, C, R_C)$$

而输出电压  $U_o$ 、系统效率  $\eta$ 、电容电压  $U_C$  均为四个线圈电流  $I_1 \sim I_4$  的函数,相应表示成  $U, f, M_{coil}, R_{coil}, C$  的函数;

当电源电压  $U$ 、工作频率  $f$ 、负载  $R$  给定,通过步骤 B 测得线圈的耦合矩阵  $M_{coil}$  以及线圈内阻向量  $R_{coil}$ ,得到电容内阻向量  $R_C$  的近似值后,  $U_o, \eta, U_C$  只与 4 个补偿电容的容值有关,写成补偿电容容值向量  $C$  的函数:

$$U_o = I_4 R = g_4(U, f, M_{coil}, R_{coil}, C, R_C) R = G(U, f, M_{coil}, C, R_{coil}) = G(C)$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_o}{P_o + \sum P_r} = \frac{I_4^2 R}{I_4^2 R + I_1^2 (r_{L1} + r_{L1} + r_{C1}) + I_2^2 (r_{L2} + r_{C2}) + I_3^2 (r_{L3} + r_{C3}) + I_4^2 (r_{L4} + r_{C4})}, \\ = H(U, f, M_{coil}, C, R_{coil}) = H(C)$$

$$U_C = \frac{I_C}{j2\pi f C} = M(U, f, M_{coil}, C, R_{coil}) = M(C)$$

如此,无线电力传输装置系统电路模型等效为以 4 个补偿电容为自变量的函数集  $Fun = \{I_1, I_2, I_3, I_4, U_o, P_o, \eta, U_C \dots\} \subseteq R^4$ ,  $Fun$  为 4 维空间  $R^4$  的一个子集,从函数集  $Fun$  中选择用户所关心的元素:输出电压  $U_o$ 、装置效率  $\eta$ 、输出功率  $P_o$ 、电容电压  $U_C$ ,用于所述步骤 E 中目标函数  $f(C)$  (403) 的计算。

7. 按照权利要求 1 所述的无线电力传输装置的设计方法,其特征在于所述步骤 D 中的优化目标函数通过引入权重向量  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_k]$ ,解决同时含有多项设计需求  $f_1(C)$ 、 $f_2(C)$ 、 $f_3(C) \dots f_k(C)$  的问题,此种情况的非线性规划模型为:

$$\min f(C) = \omega_1 f_1(C) + \omega_2 f_2(C) + \omega_3 f_3(C) + \dots + \omega_k f_k(C)$$

$$s.t. \begin{cases} C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4]^T \geq C_{\min} \\ C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4]^T \leq C_{\max} \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_k = 1 \end{cases} ;$$

其中,  $C_1$  为发射线圈补偿电容的容值、 $C_2$  为发射端放大线圈补偿电容的容值、 $C_3$  为接收端放大线圈补偿电容的容值、 $C_4$  为接收线圈补偿电容的容值,  $C_{\max}$  为补偿电容实际可设计容值的最大值,  $C_{\min}$  为补偿电容实际可设计容值的最小值。

## 一种无线电力传输装置的设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种无线电力传输装置的设计方法,尤其涉及一种结合电路仿真与非线性规划理论对无线电力传输装置多个谐振补偿电容进行设计的方法。

### 背景技术

[0002] 无线电力传输技术应用前景广大,自 2007 年美国麻省理工学院 (MIT) 通过磁耦合谐振无线电力传输技术,把相隔 2.16m 的一只 60W 灯泡点亮以来,该技术愈来愈受关注,许多基于这种技术的无线电力传输方案相继被提出,它们的一个共同特点为:4 个线圈各接有补偿谐振电容,4 个补偿电容都对系统的工作性能影响很大,两谐振线圈往往工作在谐振点。

[0003] 然而,如果综合考虑无线电力传输装置的传输功率、效率及大功率场合下电容的耐压问题,按照谐振点配置补偿电容往往不能达到最佳的效果。CN 102946156A “一种无线电力传输装置”提出一种用于大功率场合的无线电力传输装置,但没有明确给出无线电力传输装置达到最佳工作状态时各个补偿电容的配置公式。其他的方案往往是通过大量的阻抗匹配测试及调节试验来确定电容容值及设计方案,如 CN 102197568A “非接触电力传输装置及其设计方法”采用了 4 线圈耦合共振结构,设计过程中需要在很宽的频段内在初级线圈测量共振系统的输入阻抗  $Z_{in}$ ,得到输入阻抗  $Z_{in}$  随频率变化曲线后才能确定设计方案。显然,这样的设计方法费时间费人力费物资,更无法满足实际无线电力传输装置需要综合考虑传输功率、传输效率及电容耐压问题多方面因素的设计需求。

### 发明内容

[0004] 本发明要解决的技术问题是提供一种无线电力传输装置的优化设计方法,以解决当前无线电力传输装置设计过程中补偿电容匹配试验及阻抗测试试验盲目重复、低效,以及工作量大的问题,以缩短无线电力传输装置设计周期、节约设计成本。

[0005] 应用本发明设计方法的无线电力传输装置包括高频电源、负载、发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈、接收线圈,以及发射线圈谐振补偿电容、发射端放大线圈谐振补偿电容、接收端放大线圈谐振补偿电容、接收线圈谐振补偿电容。

[0006] 所述的发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈和接收线圈依次安装顺序为发射线圈——发射端放大线圈——接收端放大线圈——接收线圈,或接收线圈——接收端放大线圈——发射端放大线圈——发射线圈;高频电源接发射线圈,接收线圈接负载;所述的发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈和接收线圈均为空心线圈,可采用圆形或正多边形形状;线圈可绕成螺旋管状也可以绕成盘状;可采用单股漆包线、多股漆包线绕制,漆包线材质可为铜、银、镀银铜线等。

[0007] 所述的发射端放大线圈谐振补偿电容与发射端放大线圈并联连接、接收端放大线圈谐振补偿电容与接收端放大线圈并联连接,以放大磁场,提高线圈之间的磁场耦合程度;发射线圈谐振补偿电容与发射线圈可采用串联补偿或并联补偿、接收线圈谐振补偿电容与

接收线圈亦可采用串联补偿或并联补偿,无线电力传输装置共有 4 种补偿方式:发射线圈串联补偿接收线圈串联补偿、发射线圈串联补偿接收线圈并联补偿、发射线圈并联补偿和接收线圈串联补偿、发射线圈并联补偿接收线圈并联补偿。

[0008] 本发明无线电力传输装置的设计方法采用非线性规划同时进行 4 个谐振补偿电容的优化设计,建立非线性规划模型和无线电力传输装置电路模型,在迭代求解非线性规划模型的过程中调用电路仿真工具对无线电力传输装置模型进行仿真优化,将仿真得到数值解代替电路模型的解析解作为计算非线性规划模型目标函数的依据,迭代计算出 4 个谐振补偿电容的容值,具体包含以下步骤:

[0009] 步骤 A、根据设计需求及给定条件绕制并安装无线电力传输装置的发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈及接收线圈;

[0010] 步骤 B、测量所述的发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈及接收线圈的电气参数;

[0011] 步骤 C、利用实际测取到的所述的发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈及接收线圈电气参数,建立基于互感模型的多线圈耦合无线电力传输装置系统电路模型;

[0012] 步骤 D、设定优化目标函数及约束条件,建立非线性规划模型;

[0013] 步骤 E、求解非线性规划问题,得到谐振补偿电容容值;

[0014] 步骤 F、按计算出的谐振补偿电容容值配置电容。

[0015] 由于电容在高频下交流内阻(等效串联电阻)值较小,和电容的容抗比可忽略

$r_c \ll \frac{1}{j\omega C}$ ,因此本发明对 4 个补偿电容的设计是针对电容容值进行的,发射线圈谐振补

偿电容 C1 容值  $C_1$ 、发射端放大线圈谐振补偿电容 C2 容值  $C_2$ 、接收端放大线圈谐振补偿电容 C3 容值  $C_3$ 、接收线圈谐振补偿电容 C4 容值  $C_4$ 合称为谐振补偿电容向量,记为  $C = [C_1, C_2, C_3, C_4]^T$ 。

[0016] 所述的步骤 A 中的设计需求为用户对无线电力传输装置的各项技术指标,如无线电力传输装置的物理尺寸、重量、传输功率、传输距离、传输效率、工作频率、负载范围,以及输入输出要求等。

[0017] 所述步骤 A 中的给定条件分为必要条件和非必要条件。所述的必要条件为绕制线圈的必须依据,包括线圈的几何尺寸、结构及无线电力传输装置的传输距离;其他条件如无线电力传输装置的工作频率、装置的输入方式为非必要条件。

[0018] 所述步骤 B 中的各个线圈的电气参数,包括在给定工作频率下发射线圈自感  $L_1$ 、发射端放大线圈自感  $L_2$ 、接收端放大线圈自感  $L_3$ 、接收线圈自感  $L_4$ 、发射线圈与发射端放大线圈互感  $M_{12}$ 、发射线圈与接收端放大线圈互感  $M_{13}$ 、发射线圈与接收线圈互感  $M_{14}$ 、发射端放大线圈与接收端放大线圈互感  $M_{23}$ 、发射端放大线圈与接收线圈互感  $M_{24}$ 、接收端放大线圈与接收线圈互感  $M_{34}$ ,以及发射线圈内阻  $r_{L1}$ 、发射端放大线圈内阻  $r_{L2}$ 、接收端放大线圈内阻  $r_{L3}$ 、接收线圈内阻  $r_{L4}$ ,按下式记为线圈耦合矩阵  $M_{coil}$ 及线圈内阻向量  $R_{coil}$ :

$$[0019] \quad M_{coil} = \begin{pmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{12} & L_2 & M_{23} & M_{24} \\ M_{13} & M_{23} & L_3 & M_{34} \\ M_{14} & M_{24} & M_{34} & L_4 \end{pmatrix}, R_{coil} = [r_{L1} \ r_{L2} \ r_{L3} \ r_{L4}]^T$$

[0020] 耦合矩阵  $M_{coil}$  及内阻向量  $R_{coil}$  测量得越准确, 采用本发明设计的实际无线电力传输装置越接近通过模型仿真优化得到的结果。

[0021] 所述的步骤 C 中, 可采用各种支持外部调用的电路仿真分析工具或模型仿真分析工具建立基于互感模型的多线圈耦合无线电力传输装置系统电路模型。

[0022] 所述步骤 C 中的基于互感模型的多线圈耦合无线电力传输装置系统电路模型, 包括构成一套完整无线电力传输装置的高频交流电源、线圈、补偿电容及负载。所述高频交流电源根据实际情况可用理想电压源、电流源、逆变器等建模, 所述负载 R 为实际负载等效到接收线圈端的等效阻抗的实部。

[0023] 无线电力传输装置采用“发射线圈串联补偿接收线圈串联补偿”的补偿方式时, 根据电路理论, 所述步骤 C 中建立基于互感模型的多线圈耦合无线电力传输装置系统电路模型, 发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈、接收线圈的电压电流满足以下关系式:

$$[0024] \quad \begin{cases} U = I_1 \left( (r_{L1} + r_{C1}) + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 \right) + I_2 j\omega M_{12} + I_3 j\omega M_{13} + I_4 j\omega M_{14} \\ 0 = I_2 \left( (r_{L2} + r_{C2}) + \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_2 \right) + I_1 j\omega M_{12} + I_3 j\omega M_{23} + I_4 j\omega M_{24} \\ 0 = I_3 \left( (r_{L3} + r_{C3}) + \frac{1}{j\omega C_3} + j\omega L_3 \right) + I_1 j\omega M_{13} + I_2 j\omega M_{23} + I_4 j\omega M_{34} \\ 0 = I_4 \left( (R + r_{L4} + r_{C4}) + \frac{1}{j\omega C_4} + j\omega L_4 \right) + I_1 j\omega M_{14} + I_2 j\omega M_{24} + I_3 j\omega M_{34} \end{cases}$$

式中, U 为电源电压,  $\omega$  为角频率, 与工作频率 f 的关系为  $\omega = 2\pi f$ ,  $I_1, I_2, I_3, I_4$  分别为发射线圈电流、发射端放大线圈电流、接收端放大线圈电流、接收线圈电流,  $r_{C1}, r_{C2}, r_{C3}, r_{C4}$  分别为发射线圈补偿电容 C1 的内阻、发射端放大线圈补偿电容 C2 的内阻、接收端放大线圈补偿电容 C3 的内阻、接收线圈补偿电容 C4 的内阻, 合称谐振补偿电容内阻向量  $R_C = [r_{C1} \ r_{C2} \ r_{C3} \ r_{C4}]^T$ , R 为负载。

[0025] 以上方程组为发射线圈串联补偿接收线圈串联补偿的无线电力传输装置线圈的电路关系式, 其余 3 种补偿方式列写的方程组有所差异, 但是不论方程组是哪种形式, 求解方程组后  $I_1, I_2, I_3, I_4$  都可以写成输出电压 U、线圈耦合矩阵  $M_{coil}$ 、线圈内阻向量  $R_{coil}$ 、谐振补偿电容向量 C、谐振补偿电容内阻向量  $R_C$  的函数:

$$[0026] \quad I_1 = g_1(U, f, M_{coil}, R_{coil}, C, R_C), I_2 = g_2(U, f, M_{coil}, R_{coil}, C, R_C)$$

$$[0027] \quad I_3 = g_3(U, f, M_{coil}, R_{coil}, C, R_C), I_4 = g_4(U, f, M_{coil}, R_{coil}, C, R_C)$$

[0028] 根据设计经验, 各个谐振补偿电容的内阻跟与之相连的线圈的内阻相比小得多,

因此对电容内阻做以下近似处理:  $R_C = [r_{C1} \ r_{C2} \ r_{C3} \ r_{C4}]^T \approx \frac{1}{K} [r_{L1} \ r_{L2} \ r_{L3} \ r_{L4}]^T = \frac{1}{K} R_{coil}$ ,  $K =$

3 ~ 15 跟所选取电容的品质因数 Q 有关, 品质越好,  $\kappa$  值越大。

[0029] 那么, 输出电压  $U_o$ 、系统效率  $\eta$ 、所关心电容的电压  $U_c$  等也可相应表示成  $U, f, M_{coil}, R_{coil}, C$  的函数, 当给定电源电压  $U$ 、工作频率  $f$ 、负载  $R$ , 测得线圈的耦合矩阵  $M_{coil}$  及内阻向量  $R_{coil}$  后,  $U_o, \eta, U_c$  只跟 4 个补偿电容有关, 如下式:

$$[0030] \quad U_o = I_4 R = g_4(U, f, M_{coil}, R_{coil}, C, R_c) R = G(U, f, L_{coil}, C, R_{coil}) = G(C)$$

[0031]

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{P_o}{P_o + \sum P_r} = \frac{I_4^2 R}{I_4^2 R + I_1^2 (r_{Ls} + r_{L1} + r_{C1}) + I_2^2 (r_{L2} + r_{C2}) + I_3^2 (r_{L3} + r_{C3}) + I_4^2 (r_{L4} + r_{C4})}$$

$$= H(U, f, L_{coil}, C, R_{coil}) = H(C)$$

$$[0032] \quad U_c = \frac{I_c}{j\omega C} = M(U, f, L_{coil}, C, R_{coil}) = M(C)$$

[0033] 如此, 步骤 C 中所述建立的无线电力传输装置系统电路模型可以看做是以优化对象—4 个补偿电容为自变量的函数集 Fun, Fun 为 4 维空间  $R^4$  的一个子集

$$Fun = \{I_1, I_2, I_3, I_4, U_o, P_o, \eta, U_c \dots\} \subseteq R^4$$

[0034] 每次外部调用模型仿真工具对步骤 C 中所述无线电力传输装置系统电路模型进行仿真时, 输入一组特定的电容值  $[C_{1k}, C_{2k}, C_{3k}, C_{4k}]^T$ , 设定足够小仿真步长, 通过仿真工具

快速解出上述方程组的数值解  $\overline{Fun} \Big|_{C_k = [C_{1k}, C_{2k}, C_{3k}, C_{4k}]^T}$  可以无限逼近解析解  $Fun \Big|_{C_k}$ , 避免了

由于模型阶数高且非线性导致的解析解形式过于复杂甚至不存在的问题。

[0035] 所述步骤 C 中建立基于互感模型的多线圈耦合无线电力传输装置系统电路模型, 在调用电路仿真工具对上述模型仿真后, 从得到的函数集 Fun 中选择用户所关心的元素返回到顶层软件做进一步分析计算。

[0036] 所述步骤 D 中的优化目标函数是无线电力传输装置设计需求指定的各项电气指标, 如最受关注的输出功率、效率等, 或是其他指标。

[0037] 所述步骤 D 中的约束条件主要有两方面, 一是装置体积等因素限制了补偿电容的串并联数目, 补偿电容实际可设计容值有一个上限  $C_{max}$  和下限  $C_{min}$ ; 二是电容电压不能超过电容标称耐压值。

[0038] 所述步骤 D 中的非线性规划模型为标准的目标函数最小化模型  $\min f$ , 其他非最小化形式的优化设计需求, 应通过人为变换转换成最小化形式。

[0039] 进一步的, 对于最大化效率  $\eta$  设计需求, 采用  $\min f(C) = (1 - \eta)$  的形式描述; 对于给定的额定输出功率  $P_e$  设计需求, 采用  $\min f(C) = |P_o - P_e|$  的形式描述。

[0040] 所述步骤 D 中的优化目标函数不限于一项设计需求, 可以引入权重向量  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_k]$ , 同时优化多项设计需求:  $f_1(C), f_2(C), f_3(C) \dots f_k(C)$ , 此种情况的非线性规划模型为:

$$[0041] \quad \min f(C) = \omega_1 f_1(C) + \omega_2 f_2(C) + \omega_3 f_3(C) + \dots + \omega_k f_k(C)$$



$$[0042] \quad s.t. \quad \begin{cases} C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4]^T \geq C_{\min} \\ C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4]^T \leq C_{\max} \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \dots + \omega_k = 1 \end{cases}$$

[0043] 所述步骤 E 中,求解非线性规划问题可采用各种常用的非线性规划求解算法,如单纯型法、最速下降法、牛顿法等。

[0044] 所述步骤 E 中,求解非线性规划问题的流程为:

[0045] 首先代入补偿电容向量的初始值,然后调用电路仿真工具对所建无线电力传输系统模型进行仿真,解出函数集 Fun 中用户所关心的元素的数值解,代替解析解返回,然后通过返回的函数集 Fun 仿真结果计算出此次迭代过程中的目标函数值,接着判断是否满足收敛条件,若不满足收敛条件,则依据最优化数学理论计算出补偿电容 C 向量新值  $C_k$ ,重新调用底层电路仿真工具仿真无线电力传输系统模型;若判断已满足收敛条件,则结束迭代,得到补偿电容的最优参数。

[0046] 在设计要求限制下实际通过串并联方式配置电容时,容值不可能严格连续调节,所述步骤 F 中的电容配置的原则是:应该设法配置出最接近步骤 E 求解非线性规划得出的最优容值,偏差不超过 5%。

[0047] 本发明具有以下优点和有益效果:

[0048] 1、能够避免盲目低效的人工试探性电容匹配试验,减小无线电力传输装置设计过程中的人力物力消耗,节约了设计工作的物资成本;

[0049] 2、大大缩短了无线电力传输装置的设计周期,节约了设计工作的时间成本;

[0050] 3、设计准确性高,能够满足设计需求。

## 附图说明

[0051] 图 1 本优化设计方法的流程图;

[0052] 图 2 为本发明所针对的无线电力传输装置结构示意图;

[0053] 图 3 本发明适用的 4 线圈结构无线电力传输装置的 4 种补偿拓扑示意图;

[0054] 其中:

[0055] 图 3a 发射线圈串联补偿接收线圈串联补偿 SS4 补偿拓扑示意图;

[0056] 图 3b 发射线圈串联补偿接收线圈并联补偿 SP4 补偿拓扑示意图;

[0057] 图 3c 发射线圈并联补偿接收线圈串联补偿 PS4 补偿拓扑示意图;

[0058] 图 3d 发射线圈并联补偿接收线圈并联补偿 PP4 补偿拓扑示意图;

[0059] 图 4 调用电路仿真工具求解非线性规划问题的流程图;

[0060] 图 5 本发明对 SS4 结构无线电力装置进行优化设计的实际效果。

## 具体实施方式

[0061] 下面结合附图和具体实施方式对本发明做进一步说明。

[0062] 应用本发明设计方法的无线电力传输装置的结构如图 2 所示,包括高频电源 2100、负载 2400、发射线圈 2210、发射端放大线圈 2211、接收端放大线圈 2311、接收线圈 2310,以及发射线圈谐振补偿电容 2220、发射端放大线圈谐振补偿电容 2221、接收端放大

线圈谐振补偿电容 2321 和接收线圈谐振补偿电容 2320。发射线圈与发射端放大线圈构成发射端 2200；接收端放大线圈与接收线圈构成接收端 2300。

[0063] 无线电力传输装置的发射端放大线圈 2211 与发射端放大线圈谐振补偿电容 2221 并联连接,接收端放大线圈 2311 与接收端放大线圈谐振补偿电容 2321 并联连接,发射线圈 2210 和接收线圈 2310 采用串联补偿或并联补偿,无线电力传输装置共有 4 种补偿方式:发射线圈串联补偿接收线圈串联补偿 SS4、发射线圈串联补偿接收线圈并联补偿 SP4、发射线圈并联补偿和接收线圈串联补偿 PS4、发射线圈并联补偿接收线圈并联补偿 PP4,如图 3 所示。

[0064] 以下就本发明的实施例进一步说明本发明。

[0065] 实施例的基本设计需求为:无线电力传输装置的传输距离  $D$ 、效率在 85% 以上、负载为  $R_1$ ,输入电压为  $U$  时要求输出功率为  $P_{obj}$ 。

[0066] 作为一种实施例,给定线圈安装结构为:发射线圈 2210、发射端放大线圈 2211、接收端放大线圈 2311、接收线圈 2310 均由线径为  $d$  的漆包线绕成螺线管线圈,四个螺线管线圈的半径均为  $R$ ,匝数分别为  $N_1$ 、 $N_2$ 、 $N_3$ 、 $N_4$ ,匝间距分别为  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$ 。发射线圈 2210、发射端放大线圈 2211、接收端放大线圈 2311、接收线圈 2310 平行同轴叠放。发射线圈 2210 与发射端放大线圈 2211 之间的距离为  $L_1$ ,接收线圈 2310 与接收端放大线圈 2311 之间的距离为  $L_2$ ,发射端放大线圈 2211 与接收端放大线圈 2311 之间的距离为传输距离  $D$ 。给定电容补偿方式为如图 3a 所示的发射端串联补偿接收端串联补偿 SS4 方式。

[0067] 步骤 A、根据设计需求及给定条件绕制并安装好无线电力传输装置的发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈及接收线圈；

[0068] 步骤 B、测量所绕制的发射线圈、发射端放大线圈、接收端放大线圈及接收线圈的耦合矩阵  $M_{coil}$  及内阻向量  $R_{coil}$ ；

[0069] 步骤 C、用 SIMULINK 建立基于互感模型的多线圈耦合无线电力传输装置系统电路模型  $mdl$ ,将所测耦合矩阵  $M_{coil}$ 、内阻向量  $R_{coil}$  分别代入 SIMULINK 互感模型的 Inductance Matrix 参数与 Resistance Matrix 参数,将负载电阻值设为  $R_1$ ,设定电源电压  $U$ 、频率  $f$ ;在模型中使用 Active\_Reactive Power 及 Subtract 模块计算出仿真的无线电力传输装置的输出功率  $P_o$  及效率  $\eta$ ,作为模型的输出量。

[0070] 步骤 D、设定优化目标函数及约束条件,建立非线性规划模型；

[0071] 根据需求,当输入电压为  $U$  时要求输出功率为  $P_{obj}$ ,受尺寸限制电容最大串并数目为  $n$ ,可获符合要求的最大单只电容标称容值为  $C_{m1}$ ,最小单只电容标称容值为  $C_{m2}$ ,可确定电容容值上下限为  $C_{max} = nC_{m1}$ ,  $C_{min} = \frac{C_{m2}}{n}$ ;优化目标既要追求效率又要满足功率,因而引入权重向量  $\omega = [\omega_1 \ 1 - \omega_1]$ ,将功率目标归一化,建立如下非线性规划模型：

[0072]  $\min f(C) = \omega_1(1 - \eta) + (1 - \omega_1) |1 - P_o/P_{obj}|$

[0073]  $s.t. \begin{cases} C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4]^T > C_{m2}/n \\ C = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4]^T \leq nC_{m1} \end{cases}$

[0074] 步骤 E、选用数值分析工具 MATLAB 及模型仿真工具 SIMULINK,根据图 4 所示求解流程求解非线性规划问题,可分为两个步骤：

[0075] (1) 编写 M 函数 funname.m

[0076] 设置补偿电容向量初值  $C = [C_{10} \ C_{20} \ C_{30} \ C_{40}]^T(400)$ , 通过 sim 命令调用 SIMULINK(401), SIMULINK 对上述电路模型 md1 进行仿真(4021), 仿真结束后返回输出功率  $P_o$  及效率  $\eta$  (4022), 计算目标函数  $f(C)$  (403), 将  $f(C)$  作为 M 函数 funname 的返回值。

[0077] (2) 在工作空间调用最优化函数求解上述非线性规划模型

[0078] 将所编写 M 函数 funname 作为 MATLAB 最优化函数的 'FUN' 参数在工作空间调用最优化函数 fminsearch, fminsearch 会在计算目标函数值(403)后自动判断是否收敛(404), 并计算补偿电容向量新值(405), 经过有限步数的迭代, 得到谐振补偿电容容值  $[C_{op1} \ C_{op2} \ C_{op3} \ C_{op4}]^T(406)$  ;

[0079] 步骤 F、按所得  $[C_{op1} \ C_{op2} \ C_{op3} \ C_{op4}]^T$  在偏差不超过 5% 范围内通过电容器的串并联配置 4 个补偿电容, 完成无线电力传输装置设计。图 5 所示在不同频率下采用本发明对上述 SS4 结构无线电力装置进行设计的实际效果。

[0080] 所述实施例仅是本发明的一种应用范例, 所给定的 4 个线圈, 线径、直径可以不等, 形状不限于圆形单层螺线圈, 也可也是方形、多边形, 多层结构, 或者是盘状线圈等等; 4 个补偿电容的补偿方式可以根据需要选择 SS4、SP4、PS4、PP4 中任意一种。采用本发明进行优化设计时, 都能得到很好的效果。

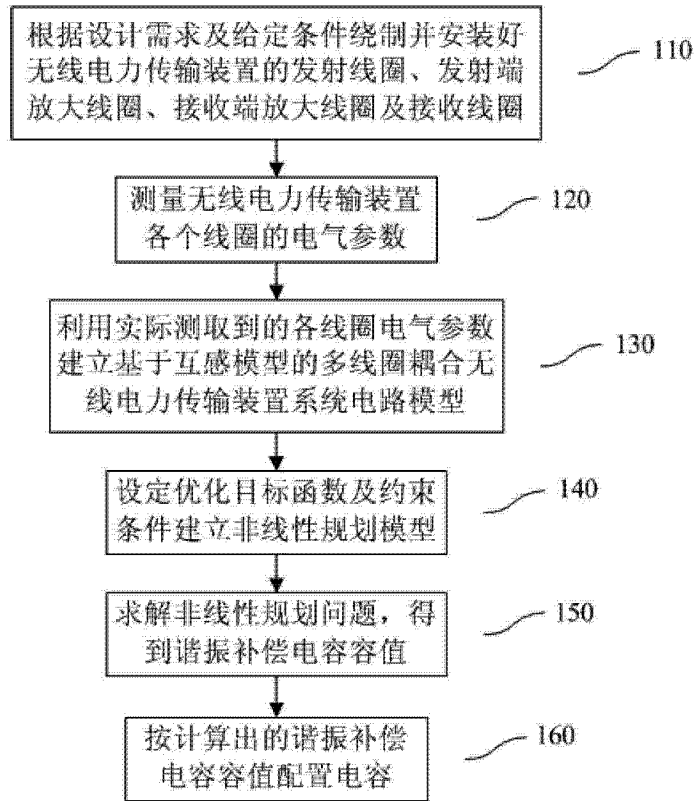


图 1

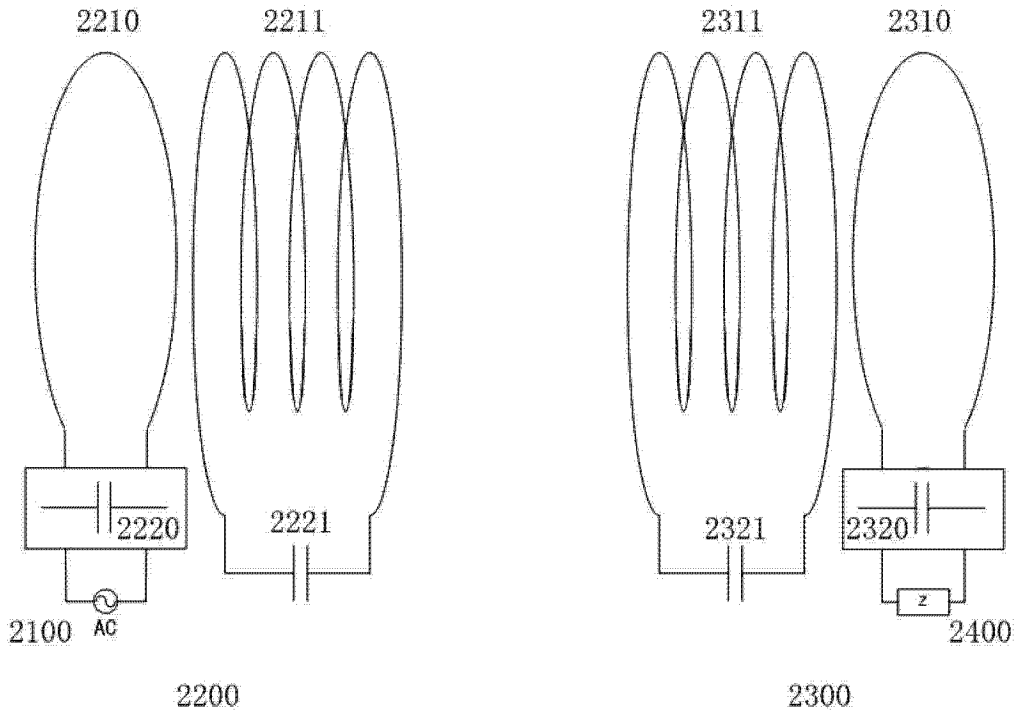


图 2

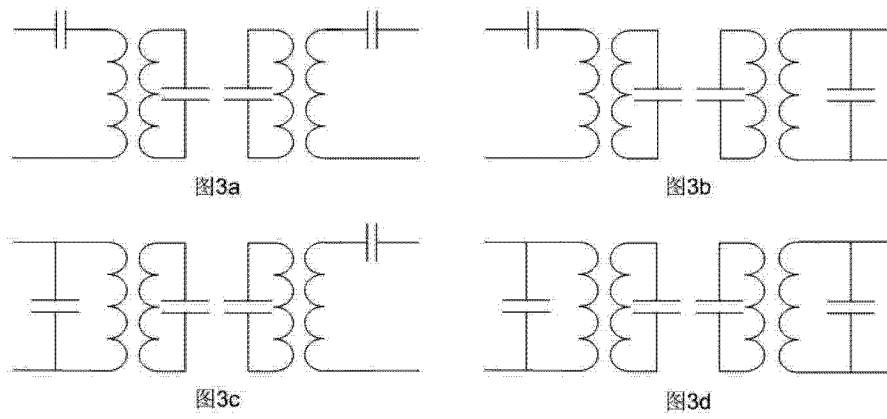


图 3

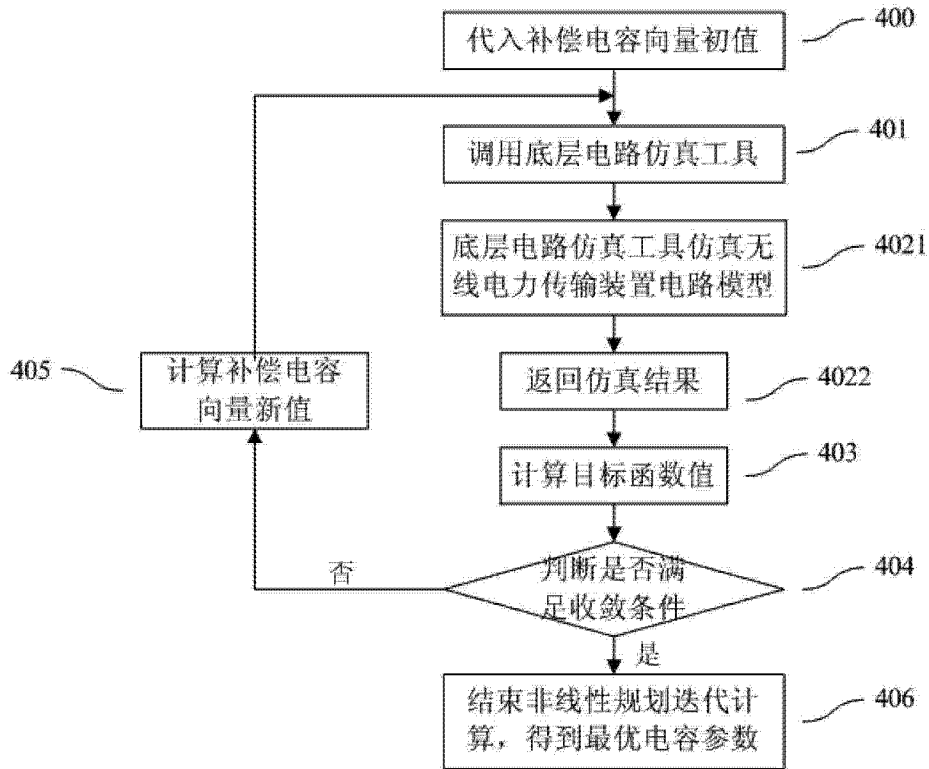


图 4

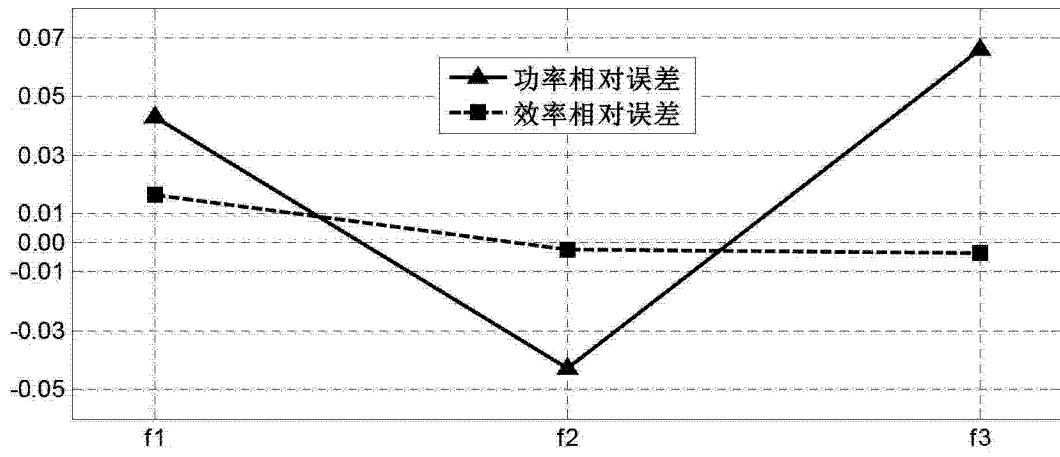


图 5