

非接触电能传输系统参数优化的改进遗传解法

赵志斌, 孙跃, 周诗杰, 田勇
(重庆大学自动化学院, 400030, 重庆)

摘要: 为了解决非接触电能传输系统设计中的参数优化问题,提出了一种混合改进遗传解法. 首先建立了非线性规划数学模型,其中对频率稳定性约束条件进行了修正;其次在遗传算法中采用虫口模型产生优良的混沌初始种群,采用“两次归一化”来处理目标及约束函数,并利用可行性规则代替罚函数法来选择优良个体以减少额外的经验参数;最后设计了均匀变异加高斯变异的混合变异算子以提高算法的全局搜索能力. 仿真及实验结果表明:改进后的算法能够较好地突破局部最优解的限制,较快地找到了系统的全局最优参数;优化后的系统达到了设计要求,且对于负载在约束范围内的动态大范围变化有较强的鲁棒性,如当负载增大为原来的2倍时,输出电压及原边电流的大小及频率基本保持不变.

关键词: 非接触电能传输;参数优化;非线性规划;罚函数法;可行性规则;遗传算法;混沌

中图分类号: TM74;TP301 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)02-0106-07

Improved Genetic Algorithm for Parameter Optimization in Contactless-Power-Transfer System

ZHAO Zhibin, SUN Yue, ZHOU Shijie, TIAN Yong
(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: For solving parameter optimization problem in contactless-power-transfer (CPT) system design, a hybrid refined genetic-algorithm (GA) method is proposed. A nonlinear programming (NLP) model is established where the frequency stability constraint condition is modified, then logistic model is considered to produce the fine chaotic initial population in GA, and the two-time normalization is proposed to deal with objective function and constraint functions. And feasibility rules (FR) are used instead of penalty function to choose fine individuals to reduce additional empirical parameters, and a mixture of uniform mutation and Gaussian mutation is designed to improve the global searching capability. The simulation and experiment show that the refined method is endowed with better ability to break the local optimum limitations and to find global optimum parameters quickly, and the optimized system meets design requirements with good robustness when load changes in a large scale within the constraint range. For instance, as the load increases to 2 times of the original, the amplitude and frequency of output voltage and primary current remain unchanged.

Keywords: contactless power transfer; parameter optimization; nonlinear programming; penalty function method; feasibility rules; genetic algorithm; chaos

接触电能传输(CPT)又称感应耦合电能传输(ICPT),是利用电磁感应原理实现能量的无线传输,不需要电气及物理连接,是一种安全有效的新型能量传输方式^[1-2]. CPT 系统原副边线圈耦合系数较小,为了提高能量的传输效率,不同拓扑需要进行不同形式的电容补偿^[3],若补偿电容参数不合理,会使系统出现频率分叉等现象^[4]. 为了使系统稳定可靠地工作,系统参数需要满足一定的约束条件^[5]. 文献[6-9]等对 CPT 系统参数优化设计进行了研究,这些方法的一个共同点是需要数学模型函数可导,一次只能针对一个参数求出最优,不能保证系统多个参数最优. CPT 系统是一种多参数、多约束、非线性系统,传统方法需要对系统模型进行简化,且不能充分利用系统参数的额定条件等对参数设计进行约束. 这样设计的参数在实际应用中需要较大的修正,参数优化过程采用逐步设计的方式效率较低. 本文的主要思想是尽量考虑更多的约束条件来建立系统精确的非线性规划数学模型,利用遗传算法的并行性对多个参数进行同步优化以使系统效率最高.

遗传算法是模拟自然界生物进化及遗传机制而形成的一种自组织、自适应的随机搜索智能算法^[10]. 遗传算法能同时对多个参数进行优化、不依赖于目标函数是否可导、对于所求解的问题具有很强的鲁棒性,特别适合一些非线性系统多目标参数优化^[11]. 遗传算法实际应用中容易过早收敛,这种早熟现象会使算法陷入局部最优解,为此本文利用混沌映射产生高质量的初始种群. 混沌是自然界广泛存在的一种非线性现象,具有随机性、遍历性及对初始值的敏感性^[12-13],能在一定范围内不重复地遍历所有解. 为了进一步提高算法的全局搜索能力,本文利用均匀变异加高斯变异来改进传统的变异算子. 遗传算法解决约束优化问题通常是利用惩罚函数对非可行解进行适当惩罚,降低其适应度,将约束问题变成无约束问题. 这种方法简单,但存在如惩罚度的掌握不当,容易出现过惩罚或欠惩罚问题,且惩罚参数需要反复试错、依靠经验^[14-16]. 本文根据可行性规则^[14]提出一种新的适应值函数,以此改进遗传算法,所有参数可根据当代种群的信息确定,没有额外的参数. 在遗传算法的选择操作过程中,不同的目标及约束函数由于单位不同、数字权重不同,也容易造成算法过早收敛等问题,文中设计了“两次归一化”来处理各个函数. 本文利用该混合改进算法对 CPT 系统进行参数优化设计,通过比较证明比一般算法具有更好的寻优能力,并利用 Matlab 建立电路

模型进行仿真验证,最后制作了样机进行实验验证.

1 CPT 系统非线性规划数学模型

文中以原边串联-副边串联(SS)拓扑为分析对象,其电路原理如图 1 所示. 直流电源 V_d 经过 4 个开关管 $S_1 \sim S_4$ 的功率调节,变为谐振环节的方波输入电压 V_i ,原、副边线圈电感 L_p 、 L_s 分别经过原、副边电容 C_p 、 C_s 补偿,使能量以最大效率传输到负载电阻 R_L ; I_p 、 I_s 分别为原、副边谐振电流, M 为互感, V_L 为 R_L 上的输出电压.

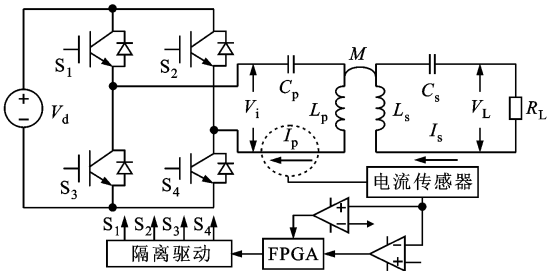


图 1 SS 拓扑电路原理图

在 CPT 系统中,为了提高传输效率需要满足两个基本条件:①原边的工作频率等于副边的谐振频率 f_0 ,这样可以提高系统的输出功率;②原边等效阻抗 Z_i 的虚部为 0,以使 V_i 与 I_p 相角为 0,这样可以减少无功损耗,从而降低系统的输入功率. 所以原边的零相角频率 $f=f_0$ 时,系统效率最高. 文献[5, 17]对系统高效稳定工作的条件进行了研究,然而本文发现这些结论并不能完全保证系统工作频率稳定,需要对其进行修正. 对于 SS 系统,该条件为

$$Q_s < \chi(1 + (1 - k^2)^{1/2})^{1/2} / (2^{1/2}k) \tag{1}$$

式中:副边品质因数 $Q_s = \omega_0 L_s / R_L$,系统最高效率工作角频率 $\omega_0 = 1 / (L_s C_s)^{1/2}$;互感耦合系数 $k = M / (L_p L_s)^{1/2}$. 当修正系数 $\chi = 1$ 时,任取 3 组参数 $P_1 \sim P_3$ 如表 1 所示, Q_{s_max} 为此时 Q_s 的最大值.

表 1 随机 3 组参数表

参数	f_0/kHz	R_L/Ω	V_d/V	V_L/V	k	Q_{s_max}
P_1	20	10	50	50	0.4	2.447
P_2	30	15	40	60	0.5	1.932
P_3	15	5	60	40	0.3	3.295

Q_s 变化对 f 的影响如图 2 所示. 当 $Q_s < 0.5Q_{s_max}$ 时, f 基本等于 f_0 且受 Q_s 变化的影响很小;反之, f 偏离 f_0 较大且随着 Q_s 的增大而增大. 可见,当 $\chi < 0.5$ 时,系统能更好地实现高效稳定工

作,但是如 χ 取值过小,则其他参数不易选择,所以本文取 $\chi=0.5$.

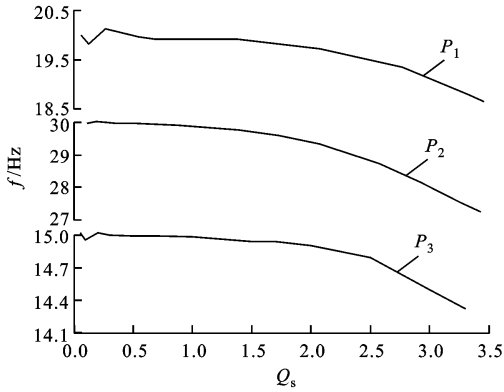


图2 f 与 Q_s 的关系图

当系统高效稳定工作时,不考虑线圈内阻,利用互感模型,可得

$$I_s = \frac{j\omega_0 M I_p}{j\omega_0 L_s + 1/(j\omega_0 C_s) + R_L} = \frac{j\omega_0 M I_p}{R_L} \quad (2)$$

$$V_i = I_p \omega_0^2 M^2 / R_L \quad (3)$$

由式(2),可得

$$V_L = I_s R_L = \omega_0 M I_p \quad (4)$$

在 ω_0 及 M 不变的情况下,由式(4)可知, V_L 只与 I_p 有关, R_L 变化不会影响 V_L . 由式(3)可知, I_p 恒定时, R_L 与 V_i 成反比,即 R_L 增大(负载减轻)则 V_i 减小. 可见,SS系统适合原边 I_p 恒定的控制方式,使 R_L 在一定范围内变化, V_L 基本不变.

本文采用能量注入及自由谐振方式来调节 V_i 以使 I_p 恒定(见图1). 该方法在 I_p 的自然换相点来对开关管 $S_1 \sim S_4$ 进行控制,不会对系统的工作频率造成影响,开关管零电流切换,有效降低了开关损耗. 实时检测 I_p , 并与参考值 $I_{p,ref}$ 进行比较,若 $I_p > I_{p,ref}$, S_1, S_2 关断, S_3, S_4 开通,谐振电路自由谐振, I_p 逐渐减小;反之,若 $I_p < 0$, S_1, S_4 开通, S_2, S_3 关断,若 $I_p < 0$, S_2, S_3 开通, S_1, S_4 关断, I_p 逐渐增大. 在该控制方式下,为了满足负载功率需求,系统参数需要满足约束

$$2^{3/2} V_d I_p / \pi > V_L^2 / R_L \quad (5)$$

令 C_p, C_s 额定电压分别为 $V_{C_{p-rate}}, V_{C_{s-rate}}$, I_p, I_s 的额定值即 C_p, L_p 及 C_s, L_s 的最小额定电流值分别为 I_{p-rate}, I_{s-rate} , 则系统参数还需满足约束

$$\left. \begin{aligned} V_{C_p} &= I_p / (\omega_0 C_p) < V_{C_{p-rate}} \\ V_{C_s} &= I_s / (\omega_0 C_s) < V_{C_{s-rate}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\{I_p < I_{p-rate}, I_s = V_L / R_L < I_{s-rate}\} \quad (7)$$

式中: V_{C_p}, V_{C_s} 分别为 C_p, C_s 上的电压. 参数设计中,

根据实际情况, C_p 有最大值 C_{p-max} 及最小值 C_{p-min} (C_s, L_p, L_s 同理), 开关管有最大工作频率 f_{0-max} (f_{0-min} 为其解空间设定的最小值), V_L 恒定时, 输出功率的最大值对应 R_L 的最小值 R_{L-min} (R_{L-max} 为其解空间设定的最大值), 所以有

$$\left. \begin{aligned} C_{p-min} &< C_p < C_{p-max}, & C_{s-min} &< C_s < C_{s-max} \\ L_{p-min} &< L_p < L_{p-max}, & L_{s-min} &< L_s < L_{s-max} \\ f_{0-min} &< f_0 < f_{0-max}, & R_{L-min} &< R_L < R_{L-max} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

若已知 k, V_L, V_d 及文中提到的各参数最大、最小及额定值(如 $C_{p-max}, C_{p-min}, I_{p-rate}$ 等), 优化 L_p, L_s, f_0 及 R_L , 使系统开关损耗最小且输出功率最大, 即目标函数

$$f_{obj} = f_0 + R_L \quad (9)$$

达到最小. 将约束式(2)~式(4)代入式(1)、式(5)~式(8)中, 得到系统最终的不等式约束为

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= 2^{3/2} \pi k f_0 L_s - 0.5(1 + (1 - k^2)^{1/2})^{1/2} R_L < 0 \\ g_2 &= \pi^2 V_L k f_0 (L_p L_s)^{1/2} - 2^{1/2} V_d R_L < 0 \\ g_3 &= V_L L_p - V_{C_{p-rate}} k (L_p L_s)^{1/2} < 0 \\ g_4 &= 2\pi V_L f_0 L_s - V_{C_{s-rate}} R_L < 0 \\ g_5 &= V_L - 2\pi k I_{p-rate} f_0 (L_p L_s)^{1/2} < 0 \\ g_6 &= V_L - I_{s-rate} R_L < 0 \\ g_7 &= 1 - 4\pi^2 C_{p-max} f_0^2 L_p < 0 \\ g_8 &= 4\pi^2 C_{p-min} f_0^2 L_p - 1 < 0 \\ g_9 &= 1 - 4\pi^2 C_{s-max} f_0^2 L_s < 0 \\ g_{10} &= 4\pi^2 C_{s-min} f_0^2 L_s - 1 < 0 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(9)、式(10)即 SS 系统的非线性规划(NLP)数学模型, 优化变量的解空间见式(8).

2 CPT 系统参数的遗传优化

遗传算法是一种智能随机算法, 适合于解决多约束、多参数系统的非线性规划问题. 利用遗传算法对 CPT 系统参数优化的基本思想为: 首先利用虫口模型对种群进行混沌初始化, 产生一组可以遍历解空间的优良群体; 接着利用可行性规则对群体进行选择操作, 为了避免算法过早收敛, 设计了“两次归一化”法对 SS 系统的 NLP 模型进行处理; 最后以适当概率对群体进行算术交叉及混合变异操作, 提高算法全局及局部搜索能力, 以生成更多优良个体.

2.1 混沌初始化

虫口模型即 logistic 映射, 如式(11)所示, 控制

参数 $\rho=4$ 时,输出 $y_n (y_n \in [0\ 1])$ 没有稳定解,随着迭代次数 n 的增加, y_n 将遍历 $[0\ 1]$ 区间,呈现出完全混沌状态,第 n 代虫口数量为

$$y_n = \rho y_{n-1} (1 - y_{n-1}), \quad n = 1, 2, 3 \cdots \quad (11)$$

采用浮点数编码,假设得到待优化变量的染色体形式为 $X=[x_1, x_2, \cdots, x_l]=[L_p, L_s, f_0, R_L], l$ 为变量个数, $x_i (i=1, 2, \cdots, l)$ 的最小值和最大值分别为 $x_{i_{\min}}, x_{i_{\max}}$,混沌初始化的步骤为:①在 $[0\ 1]$ 区间随机产生 l 个不同的初始值 $y_{1,i} (i=1, 2, \cdots, l)$;②利用式(11),以 $y_{1,i}$ 为始点迭代 $N-1 (N$ 为种群数)次,产生 l 个不同轨迹的混沌变量 $y_{k,i} (k=1, 2, \cdots, N; i=1, 2, \cdots, l)$;③按照式(12),将 $y_{k,i}$ 由混沌空间载波变换到变量的解空间,得到满映射到变量空间的优良种群

$$x_{k,i} = x_{i_{\min}} + (x_{i_{\max}} - x_{i_{\min}}) y_{k,i} \quad (12)$$

2.2 可行性选择操作

Deb 提出的可行性规则^[14]为:①两个可行解比较,具有较好目标函数值的占优;②可行解与非可行解比较,可行解占优;③两个非可行解比较,违反约束程度较小的占优.该规则相比于罚函数法没有多余的经验参数,依靠种群信息采用锦标赛方式完成优良个体的选择. Deb 提出的改进遗传算法(记为 DGA)使用小生境排挤法^[16],克服了该规则容易引起过早收敛的问题,但带来了计算量大、优化时间长的新问题.本文设计了一种“两次归一化”方法来预防算法早熟,基于排序的适应度分配方式,采用最优保存策略及随机遍历抽样方式对所有群体进行比较选择,降低了计算量,减小了选择误差.具体操作过程如下.

首先,对目标函数及约束进行“一次归一化”处理,即

$$f'_{\text{obj}} = \frac{f_0 - f_{0_{\min}}}{f_{0_{\max}} - f_{0_{\min}}} + \frac{R_L - R_{L_{\min}}}{R_{L_{\max}} - R_{L_{\min}}}$$
$$g'_1 = \frac{2^{3/2} \pi k f_0 L_s}{0.5(1 + (1 - k^2)^{1/2})^{1/2} R_L} - 1 < 0$$

同理得到 $g'_2 \sim g'_6$,所有约束均具有两项参数积相减的形式,对约束归一化的原则是使含有优化变量较少的该项为 1,这样可使 f'_{obj} 及 $g'_j (j=1, 2, \cdots, 10)$ 权重相等,不会因为单位不一或个别参数过大对遗传选择进行误导,使算法陷入局部最优.

其次,由于可行性规则的操作种群主要以可行的个体为主,所以 f'_{obj} 对种群的进化起主要作用,需要对其进行“二次归一化”处理,即 $f''_{\text{obj}} = (f'_{\text{obj}} - f'_{\text{obj}_{\min}})/(f'_{\text{obj}_{\max}} - f'_{\text{obj}_{\min}})$,其中 $f'_{\text{obj}_{\max}}, f'_{\text{obj}_{\min}}$ 分别

为当前种群 f'_{obj} 最大、最小值.这样 $f'_{\text{obj}_{\max}}$ 与 $f'_{\text{obj}_{\min}}$ 的差值随着进化过程种群个体差异的减小而不断减小,减小了进化初期的差异,增大了进化后期的差异,避免算法过早收敛,同时提高了算法的局部搜索能力.

最后,将可行性规则解释成数学形式为

$$F_{\text{obj}} = \begin{cases} f''_{\text{obj}}, & g'_j < 0, j = 1, 2, \cdots, 10 \\ f'_{\text{obj}_{\max}} + \sum_{j=1}^{10} \max(g'_j, 0), & g'_j \geq 0, j = 1, 2, \cdots, 10 \end{cases} \quad (13)$$

式中: F_{obj} 为处理后的目标函数值.为了克服锦标赛选择误差大、容易丢失优良个体的缺点,本文采用了最优保存策略加随机遍历选择方式.首先采用排序方式将个体按照 F_{obj} 由小到大顺序分配由大到小的适应度值 f_{Fit} ,设目标函数的位置为 P_{os} ,选择压力为 P_{sel} ,则 $f_{\text{Fit}} = 2(P_{\text{sel}} - 1) \frac{P_{\text{os}} - 1}{N - 1} - P_{\text{sel}} + 2, P_{\text{sel}} \in [1\ 2]$;其次,找出当前最好个体及最差个体,若最好个体的 f_{Fit} 比前面所有代的最好个体还优,则该个体保存下来,并用它替换当前最差个体,剩余个体以一定概率 $P_f (P_f = f_{\text{Fit}}(p) / \sum_{p=1}^N f_{\text{Fit}}(p))$ 通过随机抽样方式获得.

2.3 交叉、变异操作

算术交叉适合于浮点数编码所表示的个体,假设以交叉概率 $P_c (0.4 \sim 0.9)$ 选择的待交叉操作的两个个体为 X'_A, X'_B ,算术交叉后的新个体 X'_A, X'_B 表示为

$$\begin{cases} X'_A = \alpha X_A + (1 - \alpha) X_B \\ X'_B = \alpha X_B + (1 - \alpha) X_A \end{cases}$$

式中: $\alpha = G_0 / G_{\max}, G_0$ 为当前代数, $G_{\max}$ 为最大代数.这样在进化初期交叉作用明显,有利于大范围寻找全局最优,到进化后期交叉作用越来越小,有利于变异算子进行局部最优搜索.

变异操作决定遗传算法的局部搜索能力,本文设计了一种混合变异算子,令当前种群的 F_{obj} 最大值及最小值分别为 $F_{\text{obj}_{\max}}, F_{\text{obj}_{\min}}$,若 $F_{\text{obj}_{\max}} - F_{\text{obj}_{\min}} > \epsilon (\epsilon$ 为一很小的正数),采用均匀变异,否则采用高斯变异.这样,进化初期主要进行的是均匀变异,增加了群体的多样性,进化后期进行高斯变异,提高对重点区域的搜索能力.

3 仿真及实验验证

以 SS 拓扑的 NLP 模型为优化对象,其中系统

已知条件为 $k=0.4$, $V_d=60\text{ V}$, $V_L=50\text{ V}$; 参数约束值为 $V_{C_{p_rate}}=V_{C_{s_rate}}=300\text{ V}$, $I_{p_rate}=25\text{ A}$, $I_{s_rate}=20\text{ A}$, $C_{p_min}=C_{s_min}=0.1\text{ }\mu\text{F}$, $C_{p_max}=3\text{ }\mu\text{F}$, $C_{s_max}=4\text{ }\mu\text{F}$; 优化变量 $L_p/\mu\text{H}$, $L_s/\mu\text{H}$, f_0/kHz , R_L/Ω 的解空间分别为 $[10\ 200]$, $[10\ 100]$, $[1\ 15]$, $[1\ 10]$. 分别用简单遗传算法 (SGA)、DGA、本文的混合改进遗传算法 (记为 HGA) 对系统进行参数优化, 结果如图 3 所示.

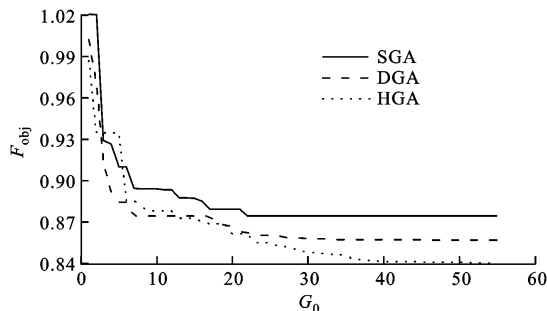


图3 3种遗传算法优化比较

由图 3 可知: 由于采用混沌初始化、“两次归一化”以及混合变异等多种改进策略, HGA 的局部搜索能力明显提高, 优化结果最好; DGA 与 HGA 在 10 代以前比 SGA 具有更快的收敛速度, 这是由于可行性规则没有充分利用非可行解的信息, 容易陷入局部最优; DGA 采用小生境方法增强算法局部搜索能力, 效果没有本文方法好.

优化得到系统的最优参数为 $L_p=177.9\text{ }\mu\text{H}$, $L_s=99.3\text{ }\mu\text{H}$, $f_0=7.98\text{ kHz}$, $R_L=4.1\text{ }\Omega$, 代入式 (10), 可知这些参数均满足约束. 计算可得仿真及实验所需的其他参数为 $M=53.17\text{ }\mu\text{H}$, $I_{p_ref}=18.75\text{ A}$ (式 (4)), $C_p=2.23\text{ }\mu\text{F}$, $C_s=3.98\text{ }\mu\text{F}$. 通过 Simulink 对系统的控制方式及优化参数进行仿真验证, 由图 4 可看出, V_L 及 I_p 均达到控制要求, 利用 Origin 对仿真数据分析可得 $V_L=48.9\text{ V}$, $I_p=18.5\text{ A}$, $f_0=7.92\text{ kHz}$, $I_s=12.1\text{ A}$, $V_{C_p}=165.3\text{ V}$, $V_{C_s}=59.8\text{ V}$, 均达到系统设计要求.

考察 R_L 变化对系统参数的影响, 同时检验系统的动态稳定性, 设计了动态负载 $R_L/\Omega=10\rightarrow5\rightarrow2.5$, 仿真波形如图 5 所示, R_L 分别在 2、4 ms 处切换 (由 I_s 的变化可看出). 当 R_L 在约束范围内 ($R_L > 4.1\text{ }\Omega$) 切换时, V_L 、 I_p 基本保持不变; 当 R_L 不满足约束时, V_L 、 I_p 发生改变, 整个系统在切换前后均能快速实现稳定, 说明具有较强的动态稳定性.

为了进一步验证系统性能, 设计了实验样机, 实验参数与仿真参数一致, 直流电源采用 Agilent

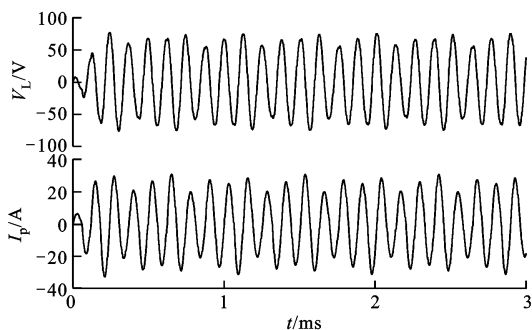


图4 最优参数时 V_L 、 I_p 仿真波形

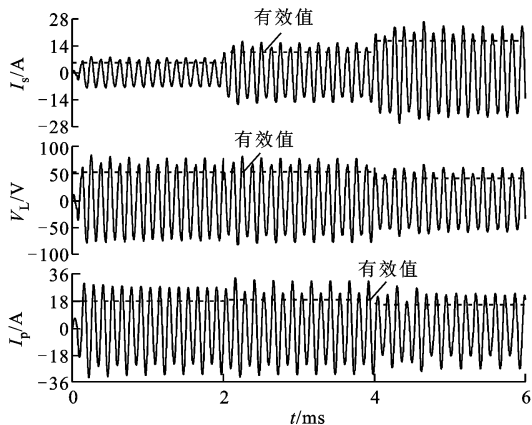


图5 动态负载下 I_s 、 V_L 、 I_p 波形

6574A (60 V/35 A) 开关电源, 开关管采用 IRF250, 驱动芯片采用 IR2101, 电流检测采用霍尔传感器 TBC50AP, 次级输出电阻为 $100\text{ }\Omega$, 这样次级 1 V 对应原级 10 A, 原副边电感采用同轴矩形框结构, 用李兹线绕制 (减小高频电流的集肤效应). 实验波形如图 6~图 9 所示.

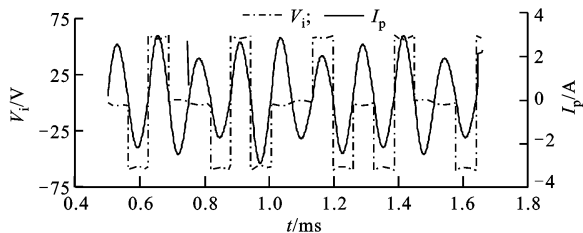


图6 $R_L=4.1\text{ }\Omega$ 时 V_i 及 I_p 的对比关系

图 6 给出 V_i 与 I_p 的对比关系, 可以看出系统工作于能量注入及自由谐振状态, 开关管实现了零电流切换, 降低了开关损耗. 图 7 为最优负载时的 V_L 、 I_p 波形, 与图 4 基本一致, 实际测得 $V_L=47.8\text{ V}$, $I_p=19.1\text{ A}$, $f_0=7.93\text{ kHz}$, $I_s=12.3\text{ A}$, $V_{C_p}=167.1\text{ V}$, $V_{C_s}=60.1\text{ V}$, 符合最优化设计要求. 图 8、图 9 分别给出负载由 $10\text{ }\Omega$ 到 $5\text{ }\Omega$ 以及由 $10\text{ }\Omega$ 到 $2.5\text{ }\Omega$ 动

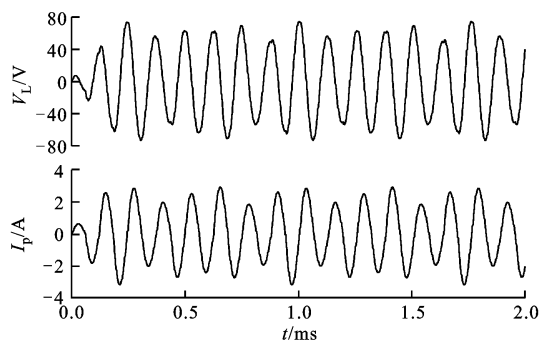


图 7 $R_L=4.1\ \Omega$ 时的 V_L 及 I_p 波形

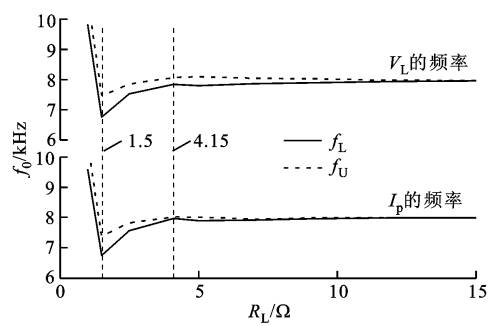


图 10 V_L 、 I_p 的频率随 R_L 变化的关系

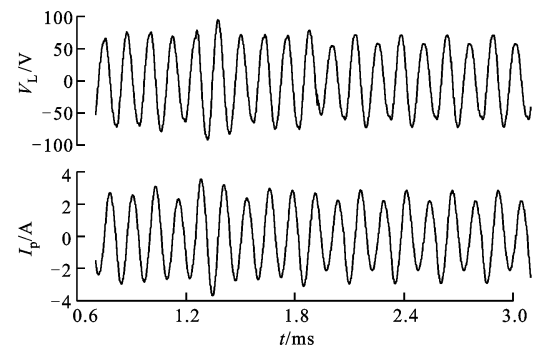


图 8 R_L 由 $10\ \Omega$ 到 $5\ \Omega$ 变化时的 V_L 及 I_p 波形

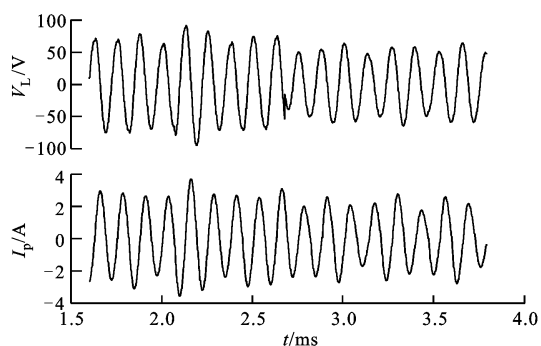


图 9 R_L 由 $10\ \Omega$ 到 $2.5\ \Omega$ 变化时的 V_L 及 I_p 波形

态切换时 V_L 、 I_p 波形,切换时刻均在时间轴的中点处,可以看出在 R_L 约束范围内的负载变化(图 8)对系统的影响小于在约束范围之外的负载变化的影响(图 9),说明系统在约束范围内有较强的鲁棒性,与图 5 的结果基本一致。

对不同 R_L 下系统 f_0 的测量可得, V_L 及 I_p 的工作频率有分岔现象,即频率不稳定,如图 10 所示,其中, f_L 、 f_U 分别表示 V_L 的最低、最高工作频率(I_p 同理),验证了系统最优负载范围为 $R_L>4.1\ \Omega$ 时,系统对于频率影响具有较好的鲁棒性;在 $R_L<4.1\ \Omega$ 范围,分岔现象较明显,尤其当 $R_L<1.5\ \Omega$ 时,频率陡增,系统容易失控。

4 结 论

通过对 CPT 系统的 SS 拓扑进行原理分析,建立了相应的非线性规划数学模型. 以该模型为对象,利用改进的遗传算法对系统参数进行了优化设计. 具体改进之处有:采用虫口模型产生混沌初始种群,可行性选择规则中加入了“两次归一化”,采用混合变异,增强了算法的局部搜索能力,避免过早收敛. 设计了 Simulink 仿真模型以及实验样机来验证优化结果,证明了系统参数在设计要求内具有最优性,且对负载变化及频率影响有良好的鲁棒性。

参考文献:

[1] KEELING N A, COVIC G A, BOYS J T. A unity-power-factor IPT pickup for high-power applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 744-751.

[2] MADAWALA U K, THRIMAWITHANA D J. Current sourced bi-directional inductive power transfer system[J]. IET Power Electronics, 2011, 4(4): 471-480.

[3] 周雯琪,马皓,何湘宁. 感应耦合电能传输系统不同补偿拓扑的研究[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 133-139.

ZHOU Wenqi, MA Hao, HE Xiangning. Investigation on different compensation topologies in inductively coupled power transfer system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 133-139.

[4] 韩腾,卓放,闫军凯,等. 非接触电能传输系统频率分叉现象研究[J]. 电工电能新技术, 2005, 24(2): 44-47.

HAN Teng, ZHUO Fang, YAN Junkai, et al. Study of frequency bifurcation phenomenon of a contactless power transmission system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2005, 24(2): 44-47.

[5] 武瑛,严陆光,徐善纲. 新型无接触电能传输系统的稳

- 定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 63-66.
- WU Ying, YAN Luguang, XU Shangang. Stability analysis of the new contactless power delivery system [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 63-66.
- [6] LI H L, HU A P, COVIC G A, et al. Optimal coupling condition of IPT system for achieving maximum power transfer[J]. Electronics Letters, 2009, 45(1): 76-77.
- [7] SALLAN J, VILLA J L, LLOMBART A, et al. Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 2140-2149.
- [8] 孙跃, 夏晨阳, 苏玉刚, 等. 导轨式非接触电能传输系统功率和效率的分析与优化[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 38(10): 123-129.
- SUN Yue, XIA Chenyang, SU Yugang, et al. Analysis and optimization of transmission power and efficiency for rail-type contactless power transfer system[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(10): 123-129.
- [9] PANTIC Z, BHATTACHARYA S, LUKIC S. Optimal resonant tank design considerations for primary track compensation in inductive power transfer systems [C] // Energy Conversion Congress and Exposition. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2010: 1602-1609.
- [10] TESSEMA B, YEN G G. An adaptive penalty formulation for constrained evolutionary optimization [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part A Systems and Humans, 2009, 39(3): 565-578.
- [11] 郝建波, 李宗斌, 赵丽萍. 工步排序问题的约束模型及其遗传算法的求解[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 860-864.
- HAO Jianbo, LI Zongbin, ZHAO Liping. Genetic algorithm with constraint model for sequencing working-steps on machining center[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(7): 860-864.
- [12] 唐巍, 郭镇明, 唐嘉亨, 等. 复杂函数优化的混沌遗传算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(5): 1-5.
- TANG Wei, GUO Zhenming, TANG Jiaheng, et al. Optimizing complex functions by chaos genetic algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2000, 21(5): 1-5.
- [13] 刘宝英, 杨仁刚, 李慧, 等. 基于混沌遗传算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(5): 49-52.
- LIU Baoying, YANG Rengang, LI Hui, et al. Reactive power optimization based on chaos genetic algorithm in electric power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2006, 18(5): 49-52.
- [14] DEB K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2000, 186(2/4): 311-338.
- [15] YENIAY O. Penalty function methods for constrained optimization with genetic algorithms[J]. Mathematical and Computational Applications, 2005, 10(1): 45-56.
- [16] COELLO COELLO C A. Theoretical and numerical constraint handling techniques used with evolutionary algorithms: a survey of the state of the art[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(11/12): 1245-1287.
- [17] WANG C, COVIC G A, STIELAU O H. Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(1): 148-157.

[本刊相关文献链接]

- 空空导弹分数阶三回路自动驾驶仪的分析与参数优化. 西安交通大学学报, 2011, 45(12): 33-38.
- 采用遗传算法的自适应随机共振系统弱信号检测方法研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(3): 32-36.
- 多悬臂梁压电振子频率分析及发电实验研究. 西安交通大学学报, 2010, 44(2): 98-101.
- 摇臂式月球车的运动学建模及悬架参数优化. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 62-66.
- 采用通用膜厚方程的动压径向轴承形状优化. 西安交通大学学报, 2009, 43(1): 57-61.
- 正交频分复用分组传输系统中载波频偏和信道的联合估计. 西安交通大学学报, 2008, 42(6): 739-742.
- 基于 Simplorer 的三相开关磁阻起动/发电系统建模研究. 西安交通大学学报, 2007, 41(10): 1210-1213.
- 遗传算法在直流伺服系统摩擦补偿中的应用. 西安交通大学学报, 2007, 41(8): 944-948.
- 改进粒子群算法及其在超导电缆参数优化中的应用. 西安交通大学学报, 2007, 41(2): 219-222.

(编辑 杜秀杰)