

矩阵变换器输入滤波器的多目标优化设计

粟梅, 孙尧, 覃恒思, 张泰山

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南省长沙市 410083)

An Multi-objective Optimized Design of Input Filter of Matrix Converter

SU Mei, SUN Yao, QIN Heng-si, ZHANG Tai-shan

(School of Information Science & Engineering of Central South University, Changsha 410083, Hunan Province, China)

ABSTRACT: Based on analyzing the influence of input filter on matrix converter system, the design guideline of input filter for matrix converter, as well as the proper filter topology, is deduced and generalized. An optimized design method is proposed. The constraints are assurance of stability, minimization of total harmonic distortion, avoidance of resonance caused by harmonic current at the switching frequency, while the objects are construction cost, base frequency voltage drop, base frequency voltage phase shift, stability margin of power and the power consumed by filter resistance. The analytical descriptions of constraints and objects are achieved from the steady-state model of matrix converter. Based on Pareto Optimization, a Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) is presented, which is improved for handling constraints. A multi-object optimizing software for input filter design is developed. The design procedure is detailed in a given example and the result obtained is analyzed.

KEY WORDS: input filter; matrix converter; stability; multi-object optimizing; non-dominated sorting genetic algorithm

摘要: 在深入分析滤波器对系统物理本质影响的基础上, 选取了适当的滤波器结构, 归纳、总结和改善了矩阵变换器输入滤波器的设计原则。提出一种输入滤波器的多目标优化设计方法。该方法以确保系统稳定、谐波总畸变率低、避免开关频率谐波电流造成滤波器谐振为约束, 以工程费用、基频压降、基频相移、功率稳定裕量和阻尼电阻功耗为目标。从矩阵变换器系统稳态数学模型出发, 推导出各项性能指标及约束条件的解析表达式。提出采用基于 Pareto 最优的非劣排序遗传算法 (NSGA-II), 并对此算法的约束处理作了改进。

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674065); 湖南省自然科学基金项目(05JJ30102)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60674065).

开发了通用的基于 Pareto 最优的输入滤波器的多目标优化算法软件, 给出了具体优化实例, 并对优化结果进行了分析。

关键词: 输入滤波器; 矩阵变换器; 稳定; 多目标优化; 非劣排序遗传算法

0 引言

在矩阵变换器的实际应用时, 在电源与开关矩阵之间通常接有滤波器。输入滤波器有 2 个基本功能: ①为了满足电磁兼容性(EMC)的要求, 防止矩阵变换器输入端由于开关器件开断所带来的高频毛刺倒灌进入电网; ②滤除电网中高频电压成分, 以免其进入矩阵变换器输入端, 影响矩阵变换器输出电能质量。然而由于输入滤波器的引入, 改变了原系统的动力学特征, 如果设计不当, 输入滤波器反过来可能会降低矩阵变换器系统的动态性能, 甚至使系统不稳定。因此, 对矩阵变换器输入滤波器的设计不仅应考虑它的稳态的滤波效果, 同时更应从系统动态性能和稳定性的角度考虑限制瞬态谐振峰值。

在矩阵变换器技术发展的二十多年中, 有关输入滤波器的研究也取得了一些成果, 如文献[1]提出多级 LC 滤波器设计方法, 文献[2]提出一种差模 EMC 滤波器方法, 但至今为止还没有找到一种能让人普遍接受的设计方法和一般可以遵循的设计原则。本文归纳、总结和改善了矩阵变换器输入滤波器的设计原则和优化目标函数, 针对矩阵变换器输入滤波器优化设计的多个目标可能是相互冲突的, 而且对目标权值的选择困难等问题, 提出了采用基于 Pareto 最优的精英保留非劣排序遗传算法 (NSGA-II, non-dominated sorting genetic algorithm

—II), 并对此算法的约束处理作了改进。

1 输入滤波器的设计原则

在 AC/AC 矩阵变换器系统中, 矩阵变换器的调制策略采用文献[3-4]中提供的补偿输入不平衡的空间矢量调制算法, 该算法即使在电源电压不平衡时, 也能产生基本平衡正弦的输出电压。因矩阵变换器是一种交—交直接变换装置, 没有中间的储能元件, 忽略开关损耗, 矩阵变换器瞬时输入功率等于瞬时输出功率。使用空间矢量描述, 功率平衡可表示为

$$p_i = 3\mathbf{u}_i \cdot \mathbf{i}_i / 2 = p_o \quad (1)$$

式(1)表明, 在输出功率 p_o 恒定, 输入相电流矢量 \mathbf{i}_i 被调制到与输入相电压矢量 \mathbf{u}_i 同相位的情况下, 输入相电压矢量 \mathbf{u}_i 的幅值的增加, 必然导致输入相电流矢量 \mathbf{i}_i 幅值的减少, 表明基于此调制策略的矩阵变换器具有类似 DC/DC 变换器的负阻抗特性^[5], 因此输入滤波器对矩阵变换器系统的动态特性和稳定性有负面影响。为将这种负面影响降到最小, 根据阻抗比判据^[5], 可以将输入滤波器的输出阻抗 Z_{of} 降到最小。如果在输入滤波器电感 L_f 的两端并接合适的电阻 R_f , 如图 1 所示。可以降低输入滤波器子系统的输出阻抗 Z_{of} , 更容易满足阻抗比判据, 有利于系统的稳定性, 而且只有高频成分才能顺利通过电阻, 使得电阻 R_f 的损耗的增加较小。因此, 本文将选取如图 1 所示的滤波器拓扑结构作为优化设计的对象。

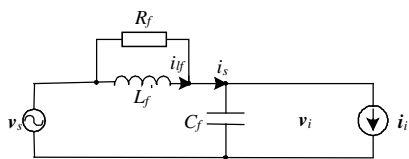


图 1 单相 R-L-C 输入滤波器结构图

Fig. 1 Schematic of input filter

归纳总结现有文献关于输入滤波器的设计要求, 综合考虑电能损耗、电能质量、滤波器的体积、工程费用等因素, 输入滤波器的一般设计原则^[1,6-9]为

- (1) 最小化初投资 (最小化滤波器的体积或重量)。
- (2) 最小化滤波器在额定电流下的压降以取得最高电压传输比。
- (3) 最小化基波功率因数角。
- (4) 总谐波畸变率满足国家标准。
- (5) 滤波器的截止频率低于开关频率。

从上述输入滤波器的设计原则可以看出, 只考虑了系统的静态性能, 本论文将从系统的动态特性和稳定性的角度来完善输入滤波器的设计原则。

阻抗比判据表明, 减少输入滤波器输出阻抗 Z_{of} 有利于系统的稳定性, 据此本论文将稳定功率约束问题转化为输入滤波器输出阻抗最小化为优化目标的问题。因阻尼滤波器的设计中包括电阻参数的选择, 有必要考虑电阻的能量损耗, 因此, 输入滤波器的一般设计原则应增加 2 条:

(6) 最小化输入滤波器输出阻抗 Z_{of} 。

(7) 最小化电阻的能量损耗。

2 输入滤波器稳态数学分析

为了分析简单起见, 假设三相电源对称, 忽略电网阻抗, 矩阵变换器可等效为一电流源^[2], 其单相等效拓扑图如图 1 所示。从数学角度给出了功率变换器的输入电流的表达式

$$\mathbf{i}_i = \sum_k \sqrt{2} I_{ik} \cos(k\omega_1 t - \mathbf{a}_k), \quad k \in N \quad (2)$$

式中 \mathbf{a}_k 为矩阵变换器的输入功率因数角。为分析计算方便, 不妨以电容两端电压的相位为参考, 根据正弦电路相量法, 可令电容两端电压的相量为

$$\mathbf{u}_i = U_i \angle 0^\circ \quad (3)$$

则电源电压可表示为

$$\mathbf{u}_s = \sqrt{2} U_s \cos(\omega_1 t + \mathbf{q}) \quad (4)$$

式中 \mathbf{q} 表示输入滤波器造成的滞后角。根据叠加原理, 利用电路相量法得基频分量的相量

$$\mathbf{i}_{s1} = \frac{(X_C I_{h1} \angle -\mathbf{a}_1 + U_s \angle (\mathbf{q} - 90^\circ))(R_f + jX_L)}{R_f(X_L + X_C) + jX_L X_C} \quad (5)$$

$$\mathbf{u}_{s1} = \frac{(jR_f X_C - X_L X_C) U_s \angle (\mathbf{q} - 90^\circ) - jR_f X_L X_C I_{h1} \angle -\mathbf{a}_1}{R_f(X_L + X_C) + jX_L X_C} \quad (6)$$

其中, $X_L = \omega_1 L_f$, $X_C = -1/\omega_1 C_f$ 。根据式(3), 令 \mathbf{u}_{i1} 的相位角为零, 可得

$$\frac{R_f U_s \cos \mathbf{q} - X_L U_s \sin \mathbf{q} - R_f X_L I_{h1} \sin \mathbf{a}_1}{R_f U_s \sin \mathbf{q} + X_L U_s \cos \mathbf{q} - R_f X_L I_{h1} \cos \mathbf{a}_1} = \frac{R_f(X_L + X_C) / X_L X_C}{R_f(X_L + X_C) / X_L X_C} \quad (7)$$

从式(9)可得 \mathbf{q} 的解析表达式 $\mathbf{q} = f(\mathbf{a}_1, R_f, X_L, X_C)$ 。

在分析第 k 次谐波分量时, 可将电路中电压源看作短路, 同理可得各次谐波分量的相量

$$\mathbf{u}_{ik} = \frac{-I_{hk} k R_f X_L X_C \angle (90^\circ - \mathbf{a}_k)}{R_f(X_C + k^2 X_L) + jk X_C X_L} \quad (8)$$

$$i_{sk} = \frac{jI_{hk} X_C (jkX_L + R_f) \angle -a_k}{R_f (X_C + k^2 X_L) + jkX_L X_C} \quad (9)$$

3 目标函数描述

(1) 成本因数。

成本因数可以用来比较两种设计在造价方面的优劣。根据文献[6], 滤波器的造价与它的功率容量成正比, 而功率容量与滤波器的体积或重量成正比, 相同容量情况下, 电感器件的造价大约是电容器件的两倍。由此定义成本因数的一般表达式为

$$F_{\text{coast}} = \sum_{n=1}^x 2L_n I_n^2 + \sum_{m=1}^y C_m U_m \quad (10)$$

式中: U_m 为滤波器输出电压有效值(电容两端电压); I_n 为输入电流有效值(电源输出电流); L_n 为滤波电感值; C_m 为滤波电容值; x 为电感个数; y 为电容的数目。

为满足设计原则(1), 要求初投资最小(滤波器的体积或重量最小), 则优化目标函数为 $\min F_{\text{coast}}$ 。

(2) 基波压降和基波功率因数角。

通过对滤波器的分析, 电网电压在滤波器上的压降主要是基频分量在电感上的压降, 为了有效利用电网电压, 因此选择基频压降 U_{drop} 作为优化对象之一。为满足设计原则(2), 最小化基频压降 U_{drop} , 也就是最大化 u_{i1} 的有效值。则优化目标函数为 $\max \text{RMS}(u_{i1})$

为满足设计原则(3), 最小化基波功率因数角, 也就是最小化基波相移角 q 。则优化目标函数为 $\min |q|$ 。

(3) 稳定功率限制。

系统稳定性是系统安全运行的基本要求, 是硬性要求。在优化设计过程中一般将其作为一个约束来处理, 但从文献[4]稳定性分析发现, 若将矩阵变换器系统的小信号模型的状态矩阵作为约束来处理, 优化计算复杂度急剧增加, 本论文提出将该功率限制转化为最小化输入滤波器输出阻抗, 即满足设计原则(6)。故优化目标函数可选为

$$\min |jR_f X_C X_L / [jX_C X_L + R_f (X_L + X_C)]|$$

(4) 阻尼电阻功耗。

在滤波电感上并联电阻的主要原因是增加系统的阻尼比, 提高系统的动态响应性能, 同时降低输入滤波器输出阻抗, 但带来能量损耗。为了降低能量损耗, 满足设计原则(7), 构造优化目标函数为

$$\min \{ |jX_L i_{s1} / (R_f + jX_L)|^2 R_f \}$$

(5) 约束条件。

1) 总谐波畸变率 h_{THD} 值。

矩阵变换器是一种电压型直接变换器, 矩阵变换器输入端电压波形质量直接关系到输出波形质量, 因此将输入滤波器电容端电压谐波畸变率作为约束条件

$$h_{\text{THDv}} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \frac{U_k^2}{U_1^2}} \leq 5\% \quad (11)$$

其中 U_k 为输入滤波器电容端第 k 次谐波电压的有效值, U_1 为基波电压有效值。从以上对输入滤波器的数学模型分析可知, U_k 可按下式计算

$$U_k = |u_{ik}|; \quad k \in (1, \infty) \quad (12)$$

在矩阵变换器系统中装设输入滤波器的最初目的是为了为了满足矩阵变换器与电网之间的电磁兼容性问题, 防止矩阵变换器输入端由于开关器件开断所带来的高频毛刺(高频谐波电流)倒灌进入电网, 为了满足电网电能质量的要求, 根据国家《电能质量公用电网谐波》标准 GB/T14549-93, 要求输入滤波器输入端电流(即电网电流)满足以下约束条件^[10]

$$h_{\text{THDi}} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{I_k^2}{I_1^2}} \leq 5\% \quad (13)$$

式中: I_k 表示电网第 k 次谐波电流有效值; I_1 为基波电流有效值。 I_k 可按下式计算

$$I_k = |i_{sk}|, \quad k \in (1, \infty) \quad (14)$$

2) 截止频率。

经频谱分析, 开关频率附近的谐波成分很高, 故输入滤波器的截止频率应小于开关频率

$$w = 1/\sqrt{LC} < w_{\text{switch}} \quad (15)$$

4 多目标优化遗传算法

4.1 精英保留非劣排序遗传算法NSGA-II

一般来说, 多目标优化问题的解不是一个, 而是一组, 也就是所说的Pareto解集^[11]。多目标优化问题的解是一组解的集合, Pareto最优性是指该集合中的每个元素, 不可能进一步优化某一个或几个目标函数的同时, 保证其他目标函数不至于劣化。Pareto最优概念是建立在集合论的基础上对多目标解的一种向量评估模式。基于种群操作的遗传算法可以并行地搜索解空间的多个解, 并能利用不同解之间的相似性来提高其并发求解问题的效率, 与Pareto最优概念相结合, 可以产生基于Pareto最优概念的多目标优化的遗传算法。

非劣排序遗传算法NSGA是一种基于Pareto最

优概念的多目标遗传算法。精英保留非劣排序遗传算法NSGA-II对NSGA算法进行了以下改进：

- (1) 提出一种快速非劣排序法；
- (2) 定义了一个拥挤距离(crowding distance)估计某个点周围的解密度，取代适应值共享；
- (3) 定义了一种偏序关系。

4.2 改进的约束处理

现实中的所有优化问题实际都是带约束问题^[12]，遗传算法并不固有处理约束的能力，关于单目标优化中的约束问题，近年来取得了诸多的成果，如静态惩罚^[13]，动态惩罚，自适应惩罚。但对于多目标优化中约束处理的成果相对较少，主要是由于基于Pareto的遗传算法是靠某一点的等级而不是该处的函数值来寻找最优解的，传统的罚函数法直接将罚函数的值加在适应度值后面，这样得到的和并不能反映出点离可行域的远近。

针对多目标遗传算法约束处理问题，文献[14]提出一种基于非劣概念的约束处理方法，定义了一个约束主导原理。

定义 1 称解*i*约束主导解*j*，当仅满足下列条件：

- (1) 解*i*是可行解，而解*j*不是；
- (2) 解*i*和*j*是可行解且*i*主导*j*；
- (3) 解*i*和*j*都不可行，但解*i*有较低的总约束违反度。

该方法在存在双约束情形下的优化问题很有效，但在约束项大于2的情形下，要求权系数的调整，为了降低算法对参数的敏感性，文献[15]提出一种新的广义约束主导原理，它的核心思想是将非主导概念从目标空间拓宽到约束空间，于是将定义1重新定义为定义2。

定义 2 称解*i*约束主导解*j*，当仅满足下列条件：

- (1) 解*i*是可行解，而解*j*不是；
- (2) 解*i*和*j*是可行解且*i*主导*j*；
- (3) 解*i*和*j*都不可行，但是解*i*在约束空间主导解*j*，其中约束空间主导有如下定义3。

定义 3 称一个解*i*在约束空间主导解*j*，当仅满足下列条件：

$$\forall k \in \{1, 2, \dots, n\} : G_n(i) \leq G_n(j) \wedge \exists l \in \{1, 2, \dots, n\} : G_n(i) < G_n(j)$$

其中 $G_n(i) = \max(0, g_n(i))$ 。

广义约束主导原理统一了有、无约束多目标优化问题的处理，消除了以前约束处理中对权系数的

依赖问题，即使每个约束违背度有着相当的差别，该方法依旧有效，而且十分方便移植到NSGA-II，只需要将由定义2和3描述的该广义约束主导原理取代由定义1描述的约束主导原理进行排序即可。

5 算法实现及仿真分析

本优化是基于如图2所示结构进行的，该结构由三相理想对称电源(相电压 220V，50Hz)、输入滤波器、矩阵变换器及其驱动的三相对称阻感性负载组成。仿真软件采用 MATLAB6.5，利用 MATLAB\SIMULINK 的电力系统工具箱 (PSB) 提供各种功率器件、电源、滤波电路、保护电路、测量模块和负载等，结合 *s* 函数的强大的接口功能，建立了矩阵变换器系统的实用仿真模型仿真算法为 ode15s，假定矩阵变换器的开关为理想开关，调制频率 $f_s=10\text{kHz}$ ，调制输出频率为 40Hz。负载参数:电感取 20mH，电阻为 10Ω。

具体步骤如下：为了获取等效电流源的基波及各次谐波分量，在以上矩阵变换器系统模型上去除输入滤波器，将电压传输比设为 0.8(因为这一设置使变换器工作在负载较重情况下,在该情况所得的模型设计更具保守性,保证一定的设计裕量)。对电网端电流进行 FFT 分析，从而得到等效电流源数据。由于采用基于 Pareto 最优概念的 NSGA-II,无需任何加权系数，且由于对该算法处理约束的方法加以改造，进一步省去了约束项系数的决策，在该算法所涉及的参数仅为：最大迭代次数 200 次，种群规模取 40，交叉概率取 0.6，变异概率为 0.05。

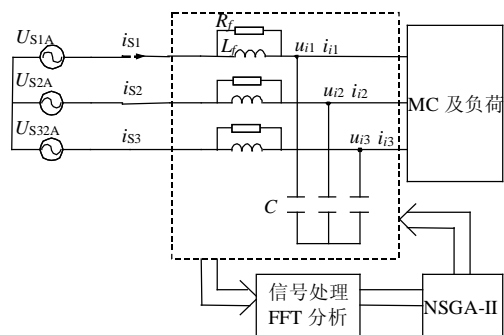


图 2 矩阵变换器输入滤波器优化算法示意图
Fig. 2 Optimized algorithm structure of MC input filter

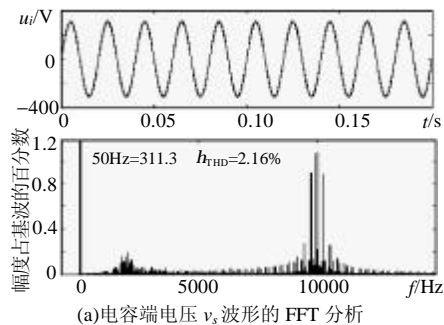
应用基于约束处理改进的NSGA-II的矩阵变换器输入滤波器的多目标优化设计算法得到的是一组Pareto解，如表1所示。左边6列为各项性能指标，右边3列为被优化参数。其中第1列中的电压传输比是指在滤波器参数取该行优化参数时，系统稳定工作的最大输出功率对应的电压传输比，按文献[4]中

的方法计算得到。表1中的这组Pareto解在不同的目标上各占优势，决策者可以根据不同的需求，在这些解中进行选择。

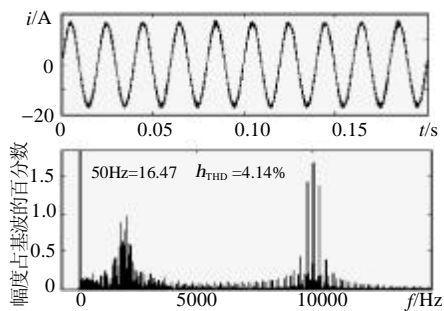
表1 优化参数及其各项性能
Tab. 1 Optimized parameters and results

电压传 输比	输出 阻抗	能量损 耗/W	工程造 价/万元	电流谐波 畸变率%	电压谐波 畸变率%	电阻/ Ω	电感/ mH	电容/ μF
0.86	0.0938	0.0581	0.0325	4.04	2.37	15.9	0.298	21.2
0.85	0.1502	0.1337	0.0438	3.29	2.32	17.8	0.47	21.2
0.86	0.1467	0.1447	0.0431	3.68	2.35	15.7	0.46	21.2
0.70	0.6978	1.8950	0.1549	2.79	2.01	27	2.2	21.2
0.65	0.3443	0.4932	0.0961	4.35	2.52	31	1.1	15.9
0.63	0.2119	0.1480	0.0588	4.95	2.07	35	0.67	19.2
0.74	0.2224	0.2357	0.0623	4.97	2.58	25	0.71	18.3
0.7350	0.1955	0.1896	0.0563	4.05	2.4	24.2	0.62	18.1
0.71	0.1735	0.1392	0.0515	5.81	2.61	26.2	0.55	17.9
0.76	0.4566	1.3382	0.1332	3.9	3.9	22	1.5	13.2
0.73	0.3544	0.7585	0.1066	4.9	3.4	22	1.1	13.1

在图2所示的矩阵变换器系统的实用仿真模型中，滤波器参数采用表1第1行的优化参数，可以得到电容端电压 u_i 和电源端电流 i_s 的仿真波形及FFT分析，如图3所示。从图3(a)的电容端电压 u_i 波形的FFT分析可知，电容端电压 u_i 的谐波畸变率 $h_{\text{THD}}=2.16\%$ ，从图3(b)的电源端电流 i_s 波形的FFT分析可



(a) 电容端电压 u_i 波形的 FFT 分析



(b) 电源端电流 i_s 的波形及 FFT 分析

图3 仿真波形及其 FFT 分析

Fig. 3 Simulation waveforms and their FFT

知，电源端电流 i_s 的谐波畸变率 $h_{\text{THD}}=4.14\%$ ，与表1中优化的结果基本一致。因此，该优化算法是一种较为实用的矩阵变换器输入滤波器的多目标优化算法。该方法与简单遗传算法比较，优势主要体现如下：

(1)不会涉及到目标权值和约束权值的选择问题。

(2)算法灵活性好。利用简单遗传算法进行矩阵变换器输入滤波器的优化设计时，在不同的决策情况下，当目标或约束的重要程度发生改变时，需要再次设计目标或约束的权重，然后进行解算。而利用基于约束处理改进的NSGA-II算法，一次可以得到一组Pareto解，决策者可以根据目标和约束的重要程度，做出相应的选择。

6 结论

(1)归纳、总结和完善了矩阵变换器输入滤波器的设计原则。

(2)建立了优化矩阵变换器输入滤波器的目标函数和约束条件的数学描述。

(3)提出采用基于Pareto最优的精英保留非劣排序遗传算法(NSGA-II)，并对此算法的约束处理作了改进。该算法无需任何加权系数对设计者的经验依赖少，具有较强的鲁棒性。

(4)基于Pareto最优的输入滤波器的多目标优化算法，只要给出不加输入滤波器时的相关数据和约束条件，就能一次性得出一组解，包括已经优化的滤波器参数和各项性能的数据，决策者可以根据具体的工艺要求，选择合适的解；同时，只要给出加输入滤波器时的相关数据和滤波器参数，就能得到各项性能的数据，可对已有系统进行科学的评估。

参考文献

- [1] Neff C L, Schauder C D. Theory and design of a 30-HP matrix converter[C]. 1988 IEEE IAS Annual Meeting, Pittsburgh, PA, USA, 1988.
- [2] Heidwein M L, Nussbaumer T, Kolar J W. Differential mode EMC input filter design for three-phase AC-DC-AC sparse matrix PWM converter[C]. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronic Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [3] casadei D. Reduction of the input current harmonic content in matrix converters under input/output unbalance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(3): 401-11.
- [4] 栗梅, 覃恒思, 孙尧, 等. 矩阵变换器系统的稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 62-69.
Su Mei, Qin Hengsi, Sun Yao, et al. The steady state analysis for the system of matrix converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 62-69(in Chinese).
- [5] Middlebrook R D. Input filter consideration in design and application of switching regulators[C]. IEEE IAS Annual Meeting, Chicago, 1976. 336-382.
- [6] 陈希有, 颜斌, 徐殿国, 等. 变频器输出滤波器的模糊优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 71-75.

- Chen Xiyou, Yan Bin, Xu Dianguo. Fuzzy optimization of inverter output filter in motor drive system[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 71-75(in Chinese).
- [7] Laszio Huber, Duan Borojevic. Input filter design of forced commutated cycloconverters[C]. Proceedings of the 6th Mediterranean Electrotechnical Conference - Melecon, Ljubljana, Slovenia, Yugosl, 1991.
- [8] Erich Sandra Y, William M Polivka. Input filter design criteria for current-programmed regulators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(1): 143-151.
- [9] 朱成花, 石健将, 严仰光. 直/直变换器输入滤波器的设计[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 85-90.
Zhu Chenghua, Shi Jianjiang, Yan Yangguang. Design of input filter for DC/DC converter[J]. Transaction of China electrotechnical society, 2004, 19(1): 85-90(in Chinese).
- [10] 涂春鸣, 罗安, 刘娟. 无源滤波器的多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 17-21.
Tu Chunming, Luo An, Liu Juan. Multi-objective optimal design of passive filters[J]. Proceedings of the CSEE. 2002. 22(3): 17-21(in Chinese).
- [11] 李军, 邓清华, 丰镇平. 基于进化算法的压气机叶型多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 205-209.
Li Ju, Deng Qinghua, Feng Zhenping. Multiobjective optimization design of a compressor airfoil using evolutionary algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 205-209(in Chinese).
- [12] Cooper L, Steinberg D. Introduction to methods of optimization [M]. W. B. Saunders, London, 1970.
- [13] 任震, 曾艳, 戴保明. 高压直流输电系统中 C 型阻尼滤波器的优化模型及其算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 123-126.
Ren Zhen, Zeng Yan, Dai Baoming. Optimization model and algorithm type-c damped filter in high voltage direct current transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 123-126(in Chinese).
- [14] Deb K, Agarwal S, Pratap A, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [15] Ruhul Sarker, Hussein A Abbass, Samin Karim. An evolutionary algorithm for constrained multiobjective optimization problems [C]. Presented at the 5th Australasia-Japan Joint Workshop University of Otago, Dunedin, New Zealand, 2001.

收稿日期: 2006-05-15。

作者简介:

粟 梅(1967—), 女, 博士, 教授, 主要从事电力电子及电力传动方面的研究, sumeicsu@yahoo.com.cn;

孙 尧(1981—), 男, 硕士研究生, 从事电力电子技术及智能控制方面的研究;

覃恒思(1983—), 男, 硕士研究生, 从事电力电子装置建模与控制方面的研究, qinhengsi@gmail.com;

张泰山(1938—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制, 人工生命科学, 先进控制理论方面的研究。

(编辑 王彦骏)