

# 应用改进遗传算法的 S9 型 10kV 级电力变压器优化设计

李辉, 韩力, 何蓓

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆市电力公司杨家坪供电局, 重庆 400036)

**摘要:**以新 S9 型 10kV 级电力变压器为设计对象,对传统遗传算法进行了研究和改进,并在此基础上编制了一套“电力变压器优化设计系统”软件。本文介绍了对遗传算法的改进和电力变压器优化设计软件的功能,同时给出了 S9 型 10kV 级电力变压器优化设计的实例。结果表明,改进遗传算法是一种适合于变压器优化设计的简便有效方法。

**关键词:**电力变压器;改进遗传算法;工程软件;优化设计

**中图分类号:** TM410.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001 - 8425(2001)05 - 0024 - 05

## 1 引言

随着城乡电网改造的不断深入,沈阳变压器研究所设计的新 S9 型 10kV 级节能型电力变压器已越来越被广泛采用。然而从节约能源的观点来看,其损耗仍然不是最佳的。为此,在原有结构设计的基础上,以节能和节材为原则,借助计算机进行辅助优化设计并进行筛选,已找到了较好的优化方法。该方法对提高变压器优化设计水平具有重要的意义<sup>[1]</sup>。

遗传算法(Simple Genetic Algorithm,以下简称 SGA)是 Holland 于 20 世纪 70 年代提出的一种崭新的优化算法<sup>[2]</sup>,近年来在工程优化问题方面得到了广泛应用。它是一种基于自然选择和群体进化体制的启发式全局优化方法。研究结果表明,SGA 对优化问题无可微和连续的要求,适合求解非线性的混合离散规划问题,是求解全局最优值的一种较为理想的方法<sup>[3]</sup>。我们在将 SGA 应用于电力变压器优化设计的最新研究成果基础上<sup>[3]</sup>,又进一步寻求提高 SGA,最终获得了全局最优解的能力和求解精度,又在此基础上对应用于电力变压器优化设计中的遗传算法作了较多的改进研究,形成了改进的遗传算法(Improved Genetic Algorithm,以下简称 IGA)。同时应用该算法,编制了新 S9 型 10kV 级的电力变压器优化设计软件。应用实例证明,本文提出的 IGA 是一种有效的工程实用优化设计方法。开发的优化设计软件将为电力变压器制造企业带来直接的经济效益和社会效益,同时也可为电力运行部门对电力变

压器产品选型提供重要的参考价值。

## 2 遗传算法的改进措施

### 2.1 编码方案

在传统遗传算法中,问题的解往往用二进制编码的数字串(称作染色体)来表示,遗传算子直接对数字串进行操作。本文提出 IGA 采用实数编码方式的数字串来表示问题的解,从而解决了 SGA 在优化过程中由于频繁编码和解码过程而导致的收敛速度慢、求解精度低的不足。在电力变压器优化设计中,本文将铁心直径序号、高压绕组每层匝数、高压绕组线规序号、低压绕组匝数、低压绕组每层匝数和低压绕组线规序号作为设计变量直接编码成优化问题的数字串。由于 IGA 采用特定的实数编码方式,因此缩短了染色体长度,在一定程度上提高了算法的收敛速度和全局寻优能力。

### 2.2 交叉算子

IGA 采用了算术交叉和多点交叉相结合的“双亲四子”交叉算子,即首先产生一组 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数,随机选取一对双亲。若随机数小于交叉概率,则使用以下算术交叉算子:

$$\begin{cases} X = X_1 + (1 - r) X_2 \\ X = (1 - r) X_1 + X_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $X$  和  $X$  为新一代子个体,  $X_1$  与  $X_2$  为参与交叉的父代个体,  $r$  为  $(0, 1)$  之间的随机数,由此产生两个新个体。显然,通过算术交叉产生的后代,其新的分量仍在定义区间之内。另外,两个新个体则采用 SGA 的多点交叉算子方法来繁殖。这样定义新

交叉算子有利于在新一代中产生更多优良的个体,从而增加种群的多样性,提高了IGA的全局搜索能力<sup>[4]</sup>。

### 2.3 变异算子

在SGA中,变异算子的作用与迭代次数无关,导致算法迭代到一定次数后,缺乏局部搜索能力。而文献[5]提出的非一致性变异算子虽然加强了算法的局部搜索能力,但局部搜索的范围只与迭代次数有关,导致无论解的好坏,其搜索范围都是相同的缺陷。本文提出的IGA在非一致性变异算子的基础上,增加考虑了解的质量,提出了自适应变异算子。其具体描述为:等概率地生成二值随机数 $rd$ ( $rd \in \{0,1\}$ ),然后按下式进行变异:

$$x_i = \begin{cases} x_i + (t, u_i - x_i) & rd = 0 \\ x_i - (t, x_i - l_i) & rd = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $(t, y) = y(1 - r^t)$ , 其中 $r$ 为均匀分布在 $[0, 1]$ 上的随机数,  $t = 1 - FF(X)/FF_{\max}$ ,  $FF(X)$ 为当前个体的适应值,  $FF_{\max}$ 为当前群体中的最大适应值,  $x_i$ 为子代个体 $X$ 的第 $i$ 个分量,  $x_i$ 为父代个体 $X$ 的第 $i$ 个分量,  $u_i, l_i$ 为 $x_i$ 取值范围的上、下界。从 $(t, y)$ 函数可以看出,在 $y$ 值一定的条件下,随着 $t$ 的减少(适应值增加),其函数值接近0的概率就会增加,从而使得适应值大的个体在较小范围内搜索,而适应值小的个体在较大范围内搜索。这样变异算子能根据解的好坏自适应地搜索区域,从而提高了算法的收敛速度和搜索能力。

### 2.4 约束条件和适应值函数的处理

遗传算法本身是一种无约束的优化算法,而电力变压器优化设计是约束非线性优化问题。对于有约束问题

$$\begin{cases} \min f(X) \\ \text{s.t. } g_i(X) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (3)$$

时常采用罚函数方法(如序贯无约束极小化SUMT法)将其转化为无约束的问题。然而较多文献研究表明,罚因子的选取对遗传算法的收敛性影响很大。如果罚因子取得过大,有可能使算法过早地收敛于非极值点;而罚因子取得过小,又可能使算法的收敛性能很差<sup>[3,5]</sup>。因此,在基于SGA的变压器优化设计中,罚因子在大多数情况下只能根据经验来选取。

为此在处理约束函数时,引入了退火罚因子 $k$ 的方法<sup>[6]</sup>,其增广目标函数和罚函数选取为:

$$\begin{cases} F(X, k) = f(X) + P(X, k) \\ P(X, k) = k \sum_{i=1}^m \max(0, g_i(X)) \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $k = 1/T, T = T_0 \exp(-k)$ ,  $T_0 \in [0, 1]$ 。

罚因子 $k$ 的计算吸取了模拟退火思想,使控制温度值 $T$ 逐渐下降,即 $k$ 逐渐增大,其增大速度由温度冷却系数来控制。这样随着种群进化的不断进行,对非可行解的惩罚压力随之加大,最终使解群趋于可行解。

IGA定义适应值函数为:

$FF(X) = F_{\max} - F(X, k)$ , 其中 $F_{\max}$ 为当代群体的最大增广目标函数值。这样定义的适应值函数能够保证各候选解染色体的适应值非负和极大化,以及较好的分散程度,同时使环境条件随遗传代的加深而变得苛刻,充分体现了自然界优胜劣汰的变化情况。

## 3 电力变压器优化的数学模型

电力变压器优化设计的数学模型可以归结为式(3)的形式,其具体数学模型的建立包括独立变量的选取、目标函数的确定和约束条件的选择<sup>[2]</sup>。下面以高低压绕组为圆筒式结构的电力变压器优化设计为例,分别介绍独立变量 $X$ 、目标函数 $f(X)$ 和约束函数 $g_i(X)$ 选取。

### 3.1 独立变量的选取

结合电力变压器设计特点以及改进遗传算法的编码方案,将独立变量 $X$ 选为:

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8]^T = [ID, Wc_1, N_2, IDa_1, IDb_1, IDa_2, IDb_2, Wc_2]^T$$

式中, $ID$ 为铁心直径序号, $Wc_1$ 为高压绕组每层匝数, $N_2$ 为低压绕组匝数, $IDa_1, IDb_1$ 分别是高压绕组导线厚序号、导线宽序号, $IDa_2, IDb_2$ 分别为低压绕组导线厚序号、导线宽序号, $Wc_2$ 为低压绕组每层匝数。

### 3.2 目标函数的确定

为了使优化结果符合工程实际需要,以便对电力变压器产品进行综合经济指标分析,分别建立了以下三类不同的目标函数:

#### 3.2.1 材料成本最低

该目标函数是电力变压器制造企业十分关心的一项经济指标,主要由材料重量和材料单价的乘积之和组成。其中主要材料包括铜材、硅钢片、变压器油、油箱以及附件等。

#### 3.2.2 十年变电成本最低

该目标函数标志着电力变压器在十年正常运行情况下,其材料消耗、劳动力消耗以及能源消耗的总和最小,它反映了电力变压器设计制造与运行的综合经济指标,是国家电力部门评价电力变压器设计

方案的一项重要指标。它主要由两部分组成,一部分包括电力变压器产品的价格和维修费,以及两者十年利息之和;另一部分包括产品在十年运行中的电费与利息总和

### 3.2.3 十年产品费用和十年运行费用两者最低

为了对电力变压器制造、运行等多种因素进行综合权衡,本文用变加权系数的多目标优化理论和遗传算法,对电力变压器十年最低的产品费用和运行费用的多个优化设计方案进行了研究。

### 3.3 约束条件的选择

为了使优化结果满足工程设计与制造的实际要求,约束条件除了独立变量自身的约束外,还包括电压比、短路阻抗、空载损耗、负载损耗、空载电流、绕组平均温升、高低压绕组温差、油面最高温升等性能指标约束。扁导线宽厚比、单根导线截面积、铁心各级片宽(取5或0为尾数)的工艺约束。磁通密度、电流密度等材料约束以及绕组导线拉应力、电抗高度差等应力约束。另外,为了提高优化软件的通用性,优化设计软件中还包括变压器铁心最佳截面积的计算和绕组线规自动搜索回归方程的建立。

## 4 电力变压器优化设计软件的功能

本文应用 IGA 全局最优化算法,在中文 Windows 平台上利用可视化编程工具 Visual Basic 5.0 开发了电力变压器优化设计软件。该软件参照沈阳变压器研究所新 S9 型 10kV 的结构进行程序设计,其中:30~500kVA 高低压绕组采用圆筒式结构,630~1600kVA 高压绕组采用圆筒式结构,低压绕组为新型螺旋式结构,其结构设计符合沈阳变压器研究所 1985 年编制的《变压器设计手册》的要求。整个软件系统包括电力变压器的分析校核、综合设计、优化设计以及数据库管理等功能模块。

### 4.1 分析校核

通过给定设计初值之后,可以对已有或特殊的电力变压器进行校核计算,包括高低压绕组结构参数、负载性能参数、空载性能参数、铁心和油面温升、短路电动力以及变压器重量等。

### 4.2 综合设计

在规定的产品性能和技术条件下,自动选择适当技术参数和结构尺寸,从而得出可行的设计方案。

### 4.3 优化设计

技术人员可以方便地调整材料单价以及一些经济指标参数,灵活选择材料成本、运行费用和十年变

电成本等单目标或产品费用和运行费用,同时对最低的双目标选项进行优化。优化设计后同时显示前八个最优的设计方案,并可以将其与分析校核、综合设计的方案进行对比,最后选择出合适的设计方案。另外,技术人员可以方便地查看和打印各种优化设计方案的详细计算清单,同时该软件还可以连续多次地进行优化设计,将多次优化结果记录下来,可以方便地和前几次的优化结果进行对比,然后将较优方案的详细计算清单予以保存,最终可以选出较适合的设计方案指导产品生产。

### 4.4 数据库管理

为满足电力变压器实际生产和工艺要求,技术人员可以对电力变压器的基本参数进行浏览和修改,如主绝缘距离、纵绝缘尺寸、硅钢片性能、扁导线尺寸、材料单价以及各种性能指标约束参数等。

## 5 电力变压器设计实例

应用开发的电力变压器优化设计软件,对某变压器厂实际生产的 S9 系列三相电力变压器进行了优化设计,现将 S9 - 315/10 和 S9 - 1000/10 两种型号电力变压器(电压组合为 10 ±5 %/0.4kV)的原始设计方案和经优化后的方案列于表 1 和表 2,同时表 3 还列出优化前后设计方案的成本比较。

### 5.1 技术经济分析

从以上优化结果的比较可以看出,在满足性能指标的前提下,材料成本、变电成本都有较大幅度的下降,结果令人满意,从而可以说明变压器制造企业仍可进一步挖掘设计潜力,以进一步降低材料成本和产品制造费用。需要强调的是,现有多数文献[3]对电力变压器优化设计仅仅是用单一的优化方案与原设计方案进行比较,而本文则将多种优化方案列于同一表中,方便了技术人员从不同角度对电力变压器产品进行技术经济指标的综合评价和分析。

### 5.2 可靠性分析

优化软件开发一方面参照了沈阳变压器研究所新 S9 型 10kV 的结构设计,铁心采用三级接缝,并采用管式散热器,满足了电力部门安全可靠性的需要。另外,在优化计算中对绕组导线拉应力和电抗高度差进行了约束,对绕组在短路状态下进行了静态强度计算,如在 S9 - 315/10、S9 - 1000/10 材料成本最优设计中,高压绕组拉应力分别为 19.6MPa、38.7MPa,大大小于铜导线的许用拉应力 100MPa 的要求。当然,如何提高变压器可靠性问题一直是研究热点,如在大容量的电力变压器设计时,还必须对绕组在短路状态下进行动态强度计算。

表1 S9 - 315/ 10 电力变压器的单目标优化结果

名称	S9 - 315/ 10	原始方案	综合设计	优化设计方案	
				材料成本最低	变电成本最低
主要变量	铁心直径/mm	180	165	170	185
	高压每层匝数	66	70	70	74
	高压绕组导线线规/mm ×mm	1.7 ×4.0	1.6 ×4.75	1.8 ×4.25	1.9 ×4.75
	低压绕组匝数	27	31	29	30
	低压绕组导线线规/mm ×mm	4.0 ×10.0	4.0 ×10.6	3.55 ×10.0	3.55 ×11.2
	低压每层匝数	14	17	15	16
主要约束变量值	电压比/%	0.05	0.05	0.07	0.05
	空载损耗/W	676	674	661	508
	负载损耗/W	3 696	3 594	3 717	3 488
	空载电流/%	0.756	0.932	0.816	0.323
	短路阻抗/%	3.932	4.03	3.97	3.908
	绕组温升/K	58.5	54.5	54	49.5
	油面温升/K	51.5	53.5	53	52.5
经济指标	材料成本/元	14 286	14 457	13 870	17 199
	十年产品费用/元	47 714	48 286	46 324	57 444
	十年运行费用/元	1 435 730	1 589 162	1 488 939	1 086 175
	十年变电成本/元	1 483 444	1 637 448	1 535 263	1 143 619

注:材料单价设为:硅钢片14元/kg,铜线24元/kg,变压器油6元/kg,钢材3元/kg。

表2 S9 - 1 000/ 10 电力变压器的单目标优化结果

名称	S9 - 1 000/ 10	原始方案	综合设计	优化设计方案	
				材料成本最低	变电成本最低
主要变量	铁心直径/mm	230	245	230	240
	高压每层匝数	49	60	47	48
	高压绕组导线线规/mm ×mm	2.12 ×9.0	1.7 ×7.5	2.0 ×9.0	2.0 ×9.5
	低压绕组匝数	16	15	16	16
	低压绕组导线线规/mm ×mm	2.8 ×14.0	1.8 ×14.0	3.0 ×13.2	3.0 ×13.2
	低压辐向并联根数	7	16	6	6
主要约束变量值	电压比/%	0.03	0.08	0.03	0.03
	空载损耗/W	1 583	1 472	1 502	1 312
	负载损耗/W	9 992	9 555	10 437	10 255
	空载电流/%	0.713	0.355	0.619	0.308
	短路阻抗/%	4.419	4.462	4.514	4.465
	绕组温升/K	61.5	60.5	61.5	58
	油面温升/K	51.5	52	52	52
经济指标	材料成本/元	32 935	58 087	31 377	34 300
	十年产品费用/元	110 002	194 007	104 796	114 560
	十年运行费用/元	4 712 862	3 848 964	4 539 228	3 736 898
	十年变电成本/元	4 822 864	4 042 971	4 644 024	3 851 458

表3 优化方案与原始设计方案成本比较

比较项目	S9 - 315/ 10		S9 - 1000/ 10	
	原始设计方案	优化设计方案	原始设计方案	优化设计方案
材料成本/元	14 286	13 870	32 935	31 377
变电成本/元	1 483 444	1 143 619	4 822 864	3 851 458
材料成本下降率/ %	2.91		4.73	
变电成本下降率/ %	22.91		20.14	

## 6 结论

(1) 提出的改进遗传算法(IGA) 具有较强的全局寻优能力和较高的求解精度,是解决电力变压器优化设计问题的一种行之有效的方法。

(2) 尽管本文以 S9 型 10kV 等级的电力变压器为例进行优化,但是通过适当修改电力变压器的优化数学模型,基于 IGA 的优化理论同样可以推广到对大型电力变压器的优化设计以及复杂电机结构的优化设计等工程优化领域。

(3) 开发的电力变压器优化设计软件操作简单、功能全面,技术人员可以针对不同的目的,方便、灵活地选择不同的目标函数进行优化,从而在满足性能指标和可靠性等各种约束条件的前提下,尽可能有效地寻找到最适合的设计方案,以指导产品生产。该软件也可为电力运行部门在对电力变压器产品选型、投资决策等方面提供参考。

## 参考文献:

- [1] 路长柏,朱英浩,张怀灵,等. 电力变压器计算(修订本) [M]. 哈尔滨:黑龙江科学技术出版社,1990.
- [2] Holland J H. Adaptive of natural and artificial systems. Ann Arbor: The university of michigan press, 1975.
- [3] 樊叔维,汪国梁,谢卫. 遗传算法在电力变压器优化设计中的应用研究[J]. 中国电机工程学报,1996,16(5): 346 - 348.
- [4] 李辉. 改进遗传算法在电力变压器优化设计中的应用研究[D]. 重庆大学项士学位论文,2000.
- [5] Fogel D B. A comparison of evolutionary programming and genetic algorithms on selected constrained optimization problems simulation,1995,64(6):397 - 406.
- [6] 吴志远,邵惠鹤,吴新余. 基于遗传算法的退火精确罚函数非线性约束优化方法[J]. 控制与决策,1998,13(2):136 - 140.

# Optimum Design of S9 10kV Power Transformers Using an Improved Genetic Algorithm

LI Hui<sup>1</sup>, HAN Li<sup>1</sup>, HE Bei<sup>2</sup>

(1. Chongqing University, Chongqing 400044; 2. Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400036, China)

**Abstract:** A conventional genetic algorithm is researched and improved for the design of S9 10kV power transformers. Based on the algorithm, a software "Optimum Design System of Power Transformers" is developed. The Improved Genetic Algorithm (IGA) and the software's function are described. The cases of the optimum design of S9 10kV power transformers are given. The results show that IGA is an uncomplicated and efficient method suitable for optimum design of power transformers.

**Key words:** Power transformer; Improved genetic algorithm; Engineering software; Optimum design

收稿日期:2000 - 09 - 06;修订日期:2001 - 02 - 28

作者简介:李辉(1970 - ),男,浙江永康人,重庆大学电气工程学院助教,从事电抗与变压器的计算机辅助优化设计的研究;  
韩力(1963 - ),男,四川重庆人,重庆大学电气工程学院副院长,从事电机与变压器现代设计及CAD技术的研究;  
何蓓(1973 - ),女,四川广安人,重庆市电力公司杨家坪供电局工程师,从事电力系统的可靠性运行分析的研究。