

基于遗传算法的换流变压器滤波装置的优化设计

罗隆福, 张杰, 李勇, 许加柱, 李季, 刘福生

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

Optimization Design of Filter Device in New Type Converter Transformer Based on Genetic Algorithm

LUO Long-fu, ZHANG Jie, LI Yong, XU Jia-zhu, LI Ji, LIU Fu-sheng

(College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

摘要: 阐述了新型换流变压器及配套滤波装置的接线方案和滤波器设计特点,在此基础上建立了以初期投资最小为目标函数的滤波装置数学优化模型,在采用遗传算法对优化模型进行优化设计时,考虑到优化模型的特点,采用了混合罚函数法将有约束问题转化成带有罚项的无约束问题的目标函数。最后针对具体的新型高压直流输电平台模型给出了滤波装置优化设计的实例,算例结果验证了该优化设计的正确性。

关键词: 换流变压器; 混合罚函数; 遗传算法; 优化模型; 滤波器

中图分类号: TM402

文献标志码: A

Abstract: This paper introduced the connection plan of the new type converter transformer and filter as well as the design characteristic of the filter. The filter's mathematical optimization model taken the minimum investment as target function was created. This paper adopted the mixed penalty function method changing the restraint problem to the object function with penalty without restraint, when using the genetic algorithm to optimize the model and considering the characteristic of the model. At last, aiming at the specific new type HVDC's platform, an example of the optimization of filter was given. The results of the example prove correction of the optimization design.

Key words: converter transformer; mixed penalty function; genetic algorithm; optimization model; filter

0 引言

换流变压器是直流输电系统中重要的技术装备。传统的换流变压器及滤波方案虽被广泛应用,但其并不完善,存在一些问题。滤波装置接在网侧,谐波和无功电流全部流过变压器的原、副边绕组,铁心和结构件中通过较强的谐波磁通,使得变压器绝缘难度加大,损耗增加,振动和噪音大^[1-3]。

文[4]提出了一种利用变压器耦合绕组的安匝平衡作滤波机理的新型换流变压器并获得专利。为了实现该新型换流变压器的产业化,还需要完成大量的研究工作,笔者所研究的新换流变压器配套滤波装置的优化设计,对滤波装置的参数选择和滤波效果有重要意义。

1 新型换流变压器及配套滤波装置接线方案

新型换流变压器及配套滤波装置接线方案见图1。从图1可以看出,该变压器原边采用星形接法,副边绕组则采用延边三角形接线,在直流输电系统中,其延边端点引出与换流器阀侧相接,共同构成12脉波的换流输出,其三角形端点引出抽头接辅助滤波兼无功补偿装置。该接线方式把网侧滤波模型中的滤波装置移到了靠近阀侧的副边角接三角形绕组的抽头处,从谐波与无功的源头(换流器)加以抑制与部分补偿,使谐波无法从原方通过,从而抑制了谐波通过该变压器时引起的损耗发热和振动噪音^[4]。新型换流变压器及滤波装置的滤波机理详见文[6,7]。

图2为新型换流变压器绕组电压向量图,图中的二次侧相电压与线电压之间的偏移角。对12脉波HVDC系统,由于换流变压器需要提供12相序的交流电源,副边两组线电压相角差必须为 $\pi/6$ 。文[6]研究表明,当偏移角 $\alpha=15^\circ$ 时,可满足要求。

研究采用星形接法的滤波装置与公共绕组电压向量的关系,是为了得到在额定运行状态下滤波装置上的电压分量,也是笔者滤波器优化设计的重要参数。由于副方延边三角形和滤波装置结构的对称性,可以只研究副方任意一个公共绕组和与其相连的滤波支路的电压向量关系。如副方公共绕组上的

收稿日期: 2007-02-08; 修回日期: 2007-05-25

基金项目: 湖南省重大科技专项(05GK1002-1)。

作者简介: 罗隆福(1962-),男,教授,博士生导师,中国电机工程学会高级会员,主要从事现代电器设备的设计、优化及新型换流变压器的研制及对应的高压直流输电新理论研究工作。

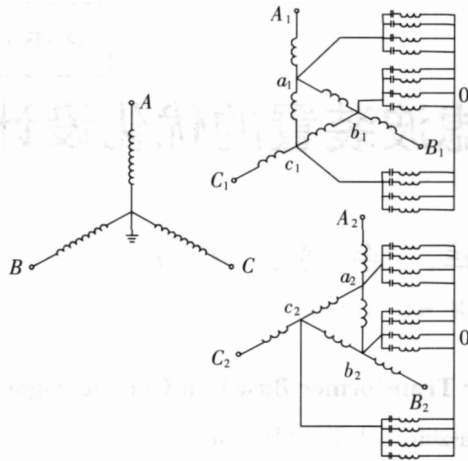


图 1 新型换流变压器及配套滤波装置接线方案

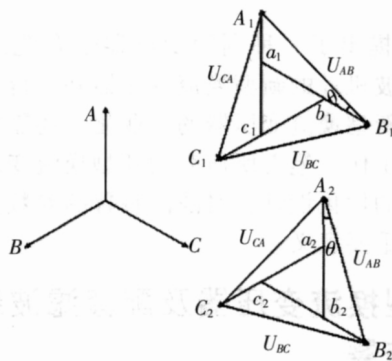


图 2 新型换流变压器绕组电压向量图

电压 $U_{a,b}$ 和与其相连的滤波支路上电压 U_{a10} 和 U_{b10} 的向量关系见图 3。从图 3 可以看出

$$U_{a10} = U_{b10} = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{a,b} \quad (1)$$

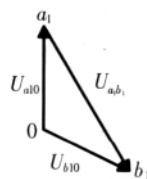


图 3 公共绕组和滤波支路电压向量关系图

新型换流变压器副边绕组接入的滤波器设计完全可以不避开谐振点，也不会出现传统滤波器可能发生的谐波过电压和谐波电流放大等现象^[7, 8]，因此 n 次滤波支路的基波容抗 $X_{Cl(n)}$ 和基波感抗 $X_{L1(n)}$ 可以满足关系式(2)

$$X_{L1(n)} = \frac{X_{Cl(n)}}{n^2} \quad (n=5, 7, 11, 13) \quad (2)$$

2 优化数学模型

在进行滤波器优化设计时，主要考虑了以下几个方面：①经济性，即初期投资最小；② n 次滤波支路的基波容抗 $X_{Cl(n)}$ 和基波感抗 $X_{L1(n)}$ 满足关系式(2)；③滤波器的无功补偿量满足换流器的无功补偿需求。基于上述考虑提出的一种非线性规划方法，通过

公式推导建立以初期投资最小为目标函数，以满足无功补偿需求为约束条件的滤波器优化数学模型。

设电容器和电感器的价格指标分别为 M_c, M_l ； $I_{h(n)}$ 为 n 次滤波支路的谐波电流； $Q_{b(n)}$ 表示 n 次滤波支路基波无功补偿容量； $Q_{Cl(n)}$ 和 $Q_{L(n)}$ 分别为 n 次滤波支路的电容器和电感器的安装容量；换流器整流运行时所需的无功补偿容量为 $Q_{s,s}$ ，分别表示换流器的触发角、换相角； U_d, I_d, P_d 分别表示直流侧电压、电流、功率； \cos 表示换流站功率因数；对于图 1 所示的 a_1 点接的 5、7、11、13 次滤波支路，总的电容器组安装容量和电感器组安装容量分别为 $Q_{cl,c}$ 、 $Q_{cl,l}$ ，则有

总的电容器组安装容量为

$$Q_{cl,c} = \sum_{n=5, 7, 11, 13} \left[\frac{U_{a10}^2}{(X_{L1(n)} - X_{Cl(n)})^2} X_{Cl(n)} + I_{h(n)}^2 X_{Cl(n)} / n \right] \quad (3)$$

其中 U_{a10} 的表达式见式(1)。

总的电感器组安装容量为

$$Q_{cl,l} = \sum_{n=5, 7, 11, 13} \left[\frac{U_{a10}^2}{(X_{L1(n)} - X_{Cl(n)})^2} X_{L1(n)} + I_{h(n)}^2 n X_{L1(n)} \right] \quad (4)$$

换流器所需的无功补偿容量为 $Q_{s,s}$ 可以由式(5)确定^[3]

$$\cos = \frac{1}{2} [\cos + \cos(+)] \quad (5)$$

$$P_d = U_d I_d \quad (6)$$

$$Q_{s,s} = P_d \tan \quad (7)$$

n 次滤波支路基波无功补偿容量为

$$Q_{b(n)} = \frac{U_{a10}^2}{X_{L1(n)} - X_{Cl(n)}} \quad (8)$$

设 $f(X_{Cl(n)})$ 为初期投资函数，可以推导出以初期投资最小为目标函数、以满足无功补偿需求为约束条件的优化数学模型

$$\min f(X_{Cl(n)}) = \min(M_c Q_{cl,c} + M_l Q_{cl,l})$$

$$\text{s.t. } \sum Q_{b(n)} = Q_{s,s}$$

$$X_{Cl(n)} > 0 \quad (n=5, 7, 11, 13) \quad (9)$$

3 优化算法

由式(9)可知，该无源滤波器参数的优化属于多约束的非线性优化问题。如果采用基于梯度法的优化算法常易陷入局部最优化，笔者采用遗传算法对模型进行优化设计。但遗传算法一般用于解决单目标、无约束问题，因此要解决含有约束的滤波器优化设计问题，必须对约束要求进行处理^[8, 9]，其中一种处理方法就是罚函数法，罚函数法也称惩罚函数法。罚函数法是间接法求解有约束非线性最优化问题的一种具有代表性的解法。该法将有约束问题转化成带有罚项的无约束问题的目标函数，其基本思想是：对不满足约束条件的点进行惩罚，通过求解多个罚

函数的极小点得到约束问题的最优解^[10]。罚函数法分为外点罚函数法和内点罚函数法和混合罚函数法。考虑到式(9)的优化模型约束的特点,选用混合罚函数法,它是把外点法和内点法结合起来应用、使之具有两者特点的方法。它主要用于求解兼有等式约束和不等式约束的非线性最优化问题^[11]。对式(9)的等式约束问题用外点法构造罚项,对不等式约束问题用内点法构造罚项,定义的混合罚函数如下

$$F(x, \lambda_1, \lambda_2) = f(x) + \lambda_1 \sum_{n=5,7,11,13} (Q_{b(n)} - Q_{9s})^2 - \lambda_2 \sum_{n=5,7,11,13} \ln X_{Cl(n)} \quad (10)$$

从式(10)可以看出,外点法的罚项为 $\lambda_1 \sum_{n=5,7,11,13} (Q_{b(n)} - Q_{9s})^2$,内点法的罚项为 $-\lambda_2 \sum_{n=5,7,11,13} \ln X_{Cl(n)}$ 。 λ_1 为外点法的惩罚因子,在迭代的过程中 λ_1 递增趋于 $+$; λ_2 为内点法的惩罚因子,在迭代的过程中 λ_2 递减趋于 0。当 x 在满足等式约束的可行域之外时,外点法的罚项将是很大的正数,且 x 距可行域越远,罚项越大,可视为对 x 脱离可行域的一种惩罚;当 x 在满足不等式约束的可行域内逐步移动接近边界时,内点法的罚项将趋向无穷大,以阻止 x 出边界。当 $\lambda_1 \rightarrow +\infty, \lambda_2 \rightarrow 0$ 时,即获得式(9)的最优解^[11]。笔者在运用遗传算法寻优时,根据混合罚函数的特点,对惩罚因子 λ_1, λ_2 作为变量处理,即设置罚因子的步长 k, k 为大于 1 的正数。在遗传迭代中,通过评价每一代对约束条件执行情况,而实施不同程度的惩罚,从而达到提高收敛性,获取全局最优解的目的。具体的程序执行流程图见图 4。

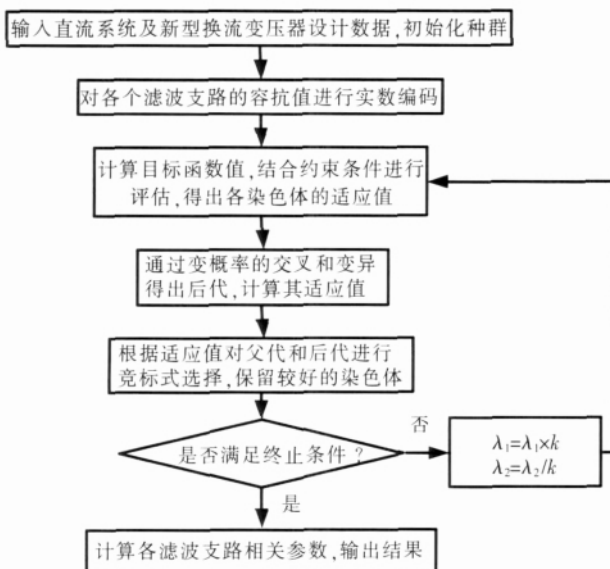


图 4 结合混合罚函数法的遗传算法流程图

4 具体算例

以新型换流变压器的直流输电系统实验平台的

整流侧为例,新型换流变压器的部分技术参数见表 1,已知换流器的脉波数为 12,触发角 $\alpha = 15^\circ$;换相角 $\mu = 20^\circ$;并以单极方式运行,直流侧输出为 1 000 V、100 A。

表 1 新型换流变压器部分技术参数

主要参数	容量/kV·A	电压/V	电流/A	等值电抗/
原边绕组	8.956 7 × 2	220	40.824 8 × 2	0.429 200
公共绕组	4.636 3 × 2	196.702 5	23.570 2 × 2	0.002 111
延边绕组	4.636 3 × 2	113.566 2	40.824 8 × 2	0.130 400

(1) 由 n 次谐波电流与换相角、触发角之间的函数关系^[12],可以得到换流器单桥交流侧 n 次谐波电流与基波电流之比。5、7、11、13 次谐波电流与基波电流之比见表 2。

表 2 基波电流与谐波电流

基波或谐波次数	n 次谐波含有率/%	基波或谐波电流/A
1	100.000 0	77.595 0
5	17.682 0	13.720 3
7	11.159 0	8.658 9
11	4.704 8	3.650 7
13	2.897 5	2.248 3

(2) 换流器消耗的无功功率由式(5)~(7)算出,因为滤波装置的无功容量必须满足换流器本身的无功消耗,所以换流器消耗的无功功率应由图 1 所示的 6 组滤波装置提供。

(3) 根据国家发布的注入公共连接点的谐波电流允许值的规定^[12]计算出国家允许的该换流站交流网侧的谐波电流见表 3。

表 3 国家允许的该换流站交流网侧的谐波电流

谐波次数	谐波电流容许值/A
5	0.666 38
7	0.472 91
11	0.300 95
13	0.257 95

(4) 采用笔者提出的优化数学模型和改进的遗传算法,优化的精确结果见表 4。

表 4 单相滤波装置优化的精确结果

	无功补偿度/%	无功补偿 /Kvar	电容 /mF	电感 /mH	电容器容量/Kvar	电容器容量/Kvar
5 次支路	31.59	2.660 7	0.630 4	0.642 9	2.961 7	0.301 0
7 次支路	35.19	2.963 3	0.716 4	0.288 6	3.072 6	0.109 3
11 次支路	13.38	1.126 6	0.275 8	0.303 7	1.150 0	0.023 4
13 次支路	19.84	1.670 7	0.409 9	0.146 3	1.683 7	0.013 0

(5) 新型换流变压器谐波屏蔽效果见表 5,由表 5 可知,采用改良的遗传算法优化后的滤波装置与新型换流变压器配置,能达到良好的谐波屏蔽效果,流入交流电网的 5、7、11、13 谐波电流都远远小于国家规定的最大泄漏标准,滤波效果显著。

5 结语

(1) 在分析新型换流变压器滤波装置的接线方案和滤波器设计特点的基础上提出(下转第 367 页)

[0.98, 0.243 3, 0.067 0, 0.243 3, 0.446 0], ANN2- 1 诊断结果为[0.803 4, 0.196 6], 根据最大隶属度原则诊断为电弧放电故障。实际检查结果为: A 相外数第 1 层围屏的第 1 张绝缘纸板有 8 个击穿点, 第 2 张绝缘纸板有贯穿性树枝放电, 是电弧放电故障。CP 网络诊断结果都与实际检查情况一致。

表 6 中的样例 3 为某变压器的油色谱数据, 根据 DLT/T 722- 2000 推荐的变压器油中溶解气体浓度注意值, 总烃的体积分数已经严重超标, 可以确定为有故障; C₂H₂ 在总烃中所占的比例为 3.9%, 小于 RULE 1 规定的 5%, 应该属于过热性故障, 经特征浓度归一化处理后, 输入数据样本为[0.381 7, 0.237 0, 0.058, 0.665 8, 0.040], ANN2- 2 诊断结果为[0.809 4, 0.190 6], 根据最大隶属度原则诊断为高温过热故障。实际检查结果为: 相分接开关动触头与显示档位的刻度盘相差 120°, 而静触头烧伤比较严重, 动触头轻微烧伤, 是高温过热故障。CP 网络诊断结果也与实际检查情况一致。

4 结语

(1) 不同归一化方法处理的训练样本的 Fisher 准则函数值以及几种输入模式下的结果的比较分析都表明, 针对电性故障训练样本采用混合归一化处理、对热性故障采用特征浓度归一化处理能很好地减小样本数据间的差异, 提高网络诊断的正判率。

(2) 结合电力变压器绝缘故障诊断的特点, 用组合神经网络判别不同的故障种类, 提高了网络的训

(上接第 363 页)

表 5 注入交流侧系统的谐波电流

	谐波源 发出的 谐波电流/A	滤波装置 屏蔽的 谐波电流/A	流入交流 电网的 谐波电流/A	国家允许 流入的 谐波电流/A
5 次支路	13.720 3	13.653 1	0.067 2	0.666 38
7 次支路	8.658 9	8.616 6	0.0423	0.472 91
11 次支路	3.650 7	3.632 8	0.017 9	0.300 95
13 次支路	2.248 3	2.237 3	0.011 0	0.257 95

一种非线性规划方法, 通过公式推导建立以初期投资最小为目标函数, 以满足无功补偿需求为约束条件的新型换流变压器配套滤波装置优化数学模型。

(2) 在采用遗传算法对模型进行优化设计时, 考虑到优化模型的特点, 采用了混合罚函数法将有约束问题转化成带有罚项的无约束问题的目标函数。

(3) 该优化模型及算法对小容量变压器有一定的正确性, 但对现有的大容量高压直流输电工程的适用性仍有待继续研究。

参考文献:

[1] POVH D. Role of HVDC Transmission in Future Energy Development [J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, (2): 10-25.

练效率和诊断的准确性。通过对诊断实例的计算分析表明, 用基于对向传播算法的人工神经网络模型作为基本分类器构建的组合诊断网络在基于 DGA 的电力变压器的绝缘故障诊断中能够取得比较理想的结果, 故障实例检测结果表明该算法判断模式、诊断结果均准确。

参考文献:

[1] 飞思科技产品研发中心. 神经网络理论与 MATLAB 7 实现[M]. 北京: 电力工业出版社, 2005.
 [2] 贺国芳, 许海宝. 可靠性数据的收集与分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
 [3] 钱政. 大型电力变压器绝缘故障诊断中人工智能技术的应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2000.
 [4] 杨启平, 薛五德, 蓝之达. 变压器故障诊断技术的研究[J]. 变压器, 2002, 39(10): 38-42.
 [5] 徐文, 王大忠. 神经网络在变压器特征气体诊断中的应用[J]. 高电压技术, 1996, 20(11): 51-54.
 [6] 杨奇岭. 变压器油中氢气含量异常情况的分析 [J]. 变压器 2004, 20(11): 39(8).
 [7] 丁晓群, LIU Y, 林钟云. 神经网络应用于电力变压器故障诊断 [J]. 电力系统自动化, 1996, 20(2): 32-35.
 [8] 王哲, 蔡惟铮, 陈学允. 树状放电的 CPN 识别方法[J]. 哈尔滨工业大学, 2000, 32(5): 5-8.
 [9] DL/T 596-1996. 中华人民共和国电力工业部. 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1996.
 [10] 边肇琪, 张学工. 模式识别 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

[2] 韩晓东, 翟亚东. 高压直流输电换流变压器[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 5-7.
 [3] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
 [4] 刘福生. 自耦补偿与谐波屏蔽整流变压器 [P]. 中国: ZL200320124015.6. 2003.
 [5] 罗隆福, 刘福生. 自耦补偿和谐波屏蔽换流变压器及其应用前景[J]. 大众用电, 2005, 21(7): 26-28.
 [6] 许加柱, 罗隆福, 李季, 等. 自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器的接线方案和原理研究 [J]. 电工技术学报, 2006, 21(9): 44-50.
 [7] 罗隆福, 李勇, 刘福生, 等. 基于新型换流变压器的直流输电系统的滤波装置[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 108-115.
 [8] 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.
 [9] 任震, 曾坚永, 张勇军. 基于遗传算法的直流输电系统中混合交流滤波器的优化设计 [J]. 电网技术, 2004, 28(21): 22-25.
 [10] 薛毅. 最优化原理与方法[M].北京: 北京工业大学出版社, 2003.
 [11] 卢险峰. 最优化方法应用基础 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2003.
 [12] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功功率补偿 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.