

文章编号: 1006-4710(2014)02-0231-07

基于 PSO 的无源电力滤波器支路拓扑的优化设计

姬军鹏, 华志广, 胡雪利, 张静刚, 曾光

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 无源电力滤波器(Passive Power Filter, PPF)以其高性价比在电力系统中得到了广泛的应用。用不同阻抗频率特性的 PPF 拓扑支路组成无源滤波网络是目前无源滤波的通用方法, 实际中 PPF 支路拓扑设计通常依靠设计者的工程经验, 缺少系统的设计方法, 更谈不上对支路拓扑的优化设计。本研究提出了一种基于粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)的 PPF 支路拓扑的优化设计方法, 解决了工程设计中单纯依靠工程经验设计 PPF 支路拓扑的盲目性问题。本方法首先基于 PSO 优化了各种滤波支路中补偿容量的分配, 然后以总投资成本、单调谐滤波支路平均品质因数及电流谐波平均含有率为目标函数优化出最佳 PPF 滤波支路网络。并以一个实际的工况为例, 验证了优化设计效果。

关键词: 无源电力滤波器; 支路拓扑; PSO; 优化设计; 滤波网络

中图分类号: TM711, TN713 **文献标志码:** A

Optimal design of branch topologies of passive power filter based on PSO

JI Junpeng, HUA Zhiguang, HU Xueli, ZHANG Jinggang, ZENG Guang

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In power system, Passive Power Filter (PPF) is widely used because of its advantage in performance—price ratio. Currently, it is a common solution of harmonic suppression to use passive filter network composed by PPF branch topologies with different impedance—frequency characteristics. In this solution, topology design of PPF network usually depends on engineering practical experience of PPF designer, there has a gap in the systematic design method, let along optimal design of branch topologies. This paper presents an optimization design method of PPF branch topologies based on PSO, and this method solves the problem that PPF branch topologies are blindly selected only relying on engineering experience. The method firstly optimizes the allocation of reactive power compensation capacity of each branch based on PSO. Then, total investment cost, average quality factor of all single-tuned filter branch and average harmonic current ratio are used as the objective function, PPF filter network is optimally obtained. Finally, the optimal effect has been verified by an actual work condition of power system.

Key words: passive power filter; branch topology; Particle Swarm Optimization; optimization design; filter network

随着电网中电力电子设备使用量的不断增加, 负荷的非线性、冲击性和不平衡性对电网造成严重的谐波污染, 所以谐波治理问题备受关注。

无源电力滤波器(PPF)以其结构简单、成本低、运行可靠性高等优势在中高压电网中仍得到了广泛

应用。

目前, 国内外对于 PPF 的研究, 主要集中在滤波支路的参数优化设计方面, 如文献[1]提出了一种基于 PSO 对混合滤波器中 PPF 参数进行优化的方法, 该方法以初期投资成本、无功补偿容量和滤波效

收稿日期: 2013-12-10

基金项目: 陕西省重点学科建设专项基金资助项目(105-00X1201)。

作者简介: 姬军鹏, 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统谐波分析及抑制。E-mail: jijunpeng@xaut.edu.cn.

果为优化目标。文献[2]提出了一种改进 PSO 算法对 PPF 进行多目标优化,该方法实现了 PPF 参数的多目标优化。文献[3]提出一种基于随机权重的遗传算法求解 PPF 参数的方法,以谐波抑制、经济指标、无功功率补偿等为多目标综合优化了 PPF 参数。文献[4]提出了一种不影响收敛性的计算量很小的优化设计方法,该方法不是一味获得单一目标的最优,而是取得多限制目标的有效折中。

另外,还有一些文献对滤波支路补偿容量的分配方法进行研究,如文献[5]提出了一种以经济成本为目标的设计方法,该方法通过建立 PPF 多支路数学模型、以经济成本为目标对 PPF 的补偿容量进行优化设计。文献[6]对无功补偿容量的三种常用分配方法进行仿真及实际工况验证,给出特定工况下的最优分配方法。

上述方法虽然对 PPF 参数进行了有效的优化设计,解决了参数设计问题,但是均未涉及到 PPF 的支路拓扑优化方法,滤波拓扑的设计仍然依据工程经验来选择,其选型缺乏理论依据,没有在拓扑组合与 PPF 滤波效果、成本之间取得有效的折中。

本研究针对上述问题,提出了一种基于 PSO 的 PPF 支路拓扑的优化设计方法,该方法基于 PSO 优化了滤波网络中各支路的无功分配容量,以总投资成本最小、单调谐滤波支路平均品质因数最大及电流谐波平均含有率最小为目标优化出最佳 PPF 滤波支路网络,以充分优化 PPF 参数为基础,优化了滤波支路拓扑网络,是一个综合的、全面的优化设计方法。

本研究结合一个电力电网实例验证了所提出方法的正确性。该实例系统结构见图 1。

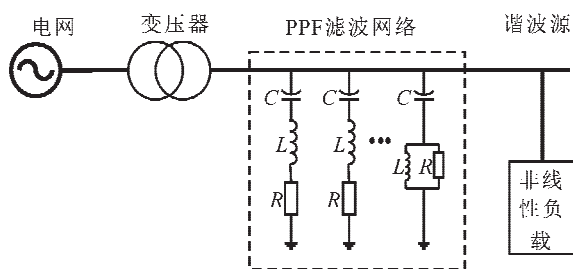


图 1 工程实例系统主电路结构

Fig. 1 Main circuit structure of the project system

图 1 工程实例系统中电网电压 110 kV,最小短路容量 6 000 MVA, X/R 等于 6。变压器容量 63 MVA,变比为 110 kV/10 kV。PPF 滤波网络安装在变压器与非线性负载之间。非线性负载为三相可控整流桥装置,也是本工况的谐波源,产生 $6n \pm 1 (n$

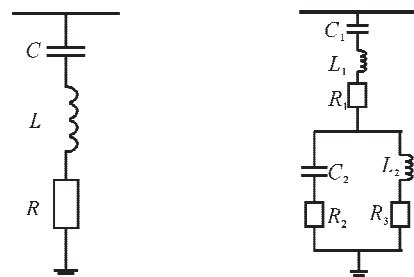
为自然数)次的谐波电流。

1 PPF 支路拓扑

PPF 的支路拓扑结构可分为两大类,即调谐滤波器(Tuned Filter, TF)和高通滤波器(High Pass Filter, HPF)。

1.1 调谐滤波器支路拓扑

调谐滤波器包括单调谐滤波器(Single Tuned Filter, STF)和双调谐滤波器(Double Tuned Filter, DTF),其拓扑结构见图 2,应用最广泛的是 STF,它利用串联电感和电容在某一频次产生串联谐振,使得滤波器在该频次呈现低阻抗特性,从而滤除该频次谐波。其阻抗频率特性曲线如图 3 所示^[3,6]。



(a) 单调谐滤波器 (b) 双调谐滤波器

图 2 调谐滤波器拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of tuned filter

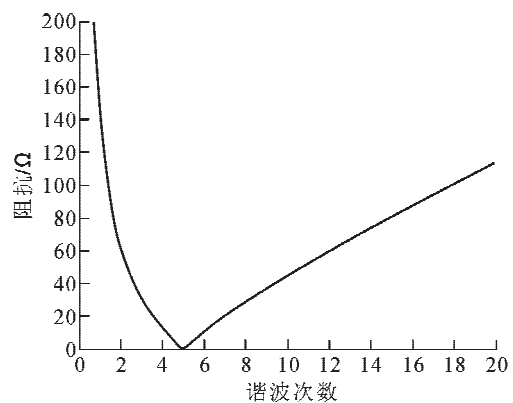
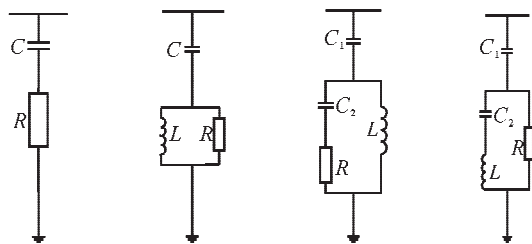


图 3 单调谐滤波器的阻抗频率特性

Fig. 3 Impedance-Frequency characteristic of single tuned filter

1.2 高通滤波器支路拓扑

高通滤波器包括一阶 HPF、二阶 HPF、三阶 HPF 及 C 型 HPF,其拓扑结构见图 4,其中二阶 HPF 应用最为广泛。HPF 在谐波频次高于转折频率时,会呈现低阻抗特性,能够滤除高于转折频次的高次谐波。二阶 HPF 阻抗频率特性曲线如图 5 所示^[6]。



(a) 一阶HPF (b) 二阶HPF (c) 三阶HPF (d) C型HPF

图 4 高通滤波器拓扑结构

Fig. 4 Topological structure of HPF

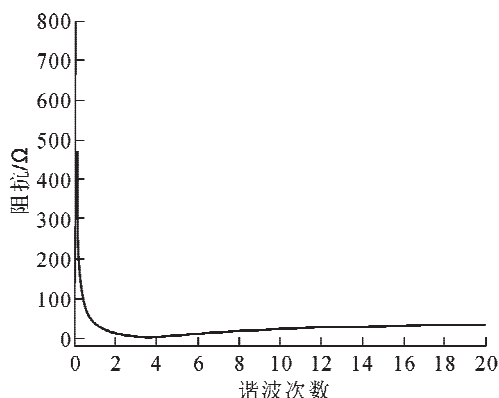


图 5 二阶高通滤波器的阻抗频率特性

Fig. 5 Impedance-Frequency characteristic of second-order HPF

2 PPF 支路拓扑的参数优化

基于 PSO 对各种无源滤波支路拓扑组合进行参数优化,综合考虑了滤波器的支路投资成本、无功补偿容量和滤波效果参数指标,最终得到各拓扑组合支路的最佳补偿容量分配。

2.1 粒子群优化算法

PSO 算法的基本思想是随机的初始化一群没有体积、质量的粒子,将每个粒子视为优化问题的一个可行解,粒子的好坏由一个事先设定的适应度函数来确定。每个粒子将在可行解空间中运动,并由一个速度变量决定其方向和距离。通常粒子将追随当前的最优粒子,并经逐代搜索,最后得到最优解。在每代中粒子将跟踪两个极值,一个是粒子本身当前找到的最优解,另一个是整个群体当前找到的最优解^[7-9]。

假设有 N 个粒子组成的 D 维的群体,粒子 i 的位置为 $\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$,粒子的速度为 $\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$,个体极值表示为 $\mathbf{P}_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})^T$,看作是粒子自身的飞行经验。全局极值为 $\mathbf{P}_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gD})^T$,看作是群体经验^[10-11]。粒子通过自身经验和群体经验来决定下一步的运动。粒子在 $k+1$ 代时,其位置更新公式为:

$$v_{id}^{k+1} = w \times v_{id}^k + c_1 \times r_1 \times (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 \times r_2 \times (p_{gd} - x_{id}^k) \quad (1)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (2)$$

式中, $i=1,2,\dots,N$, N 为群体中粒子的总数; $d=1,2,\dots,D$, D 为自变量的个数; c_1, c_2 为学习因子,通常取 $c_1=c_2=2$,分别是调节向 p_{best} (个体极值)和 g_{best} (全局极值)方向飞行的最大步长; r_1, r_2 为均匀地分布在 $(0,1)$ 之间的随机数; $x_{id} \in (x_{dmin}, x_{dmax})$, $v_{id} \in (v_{dmin}, v_{dmax})$, (v_{dmin}, v_{dmax}) 中的最大速度 v_{max} 决定了问题空间搜索的力度,粒子的每一维速度 v_{id} 都会被限制在 $[x_{dmin}, x_{dmax}]$ 之间,通常 $v_{dmax} = k \cdot x_{dmax}$, $0.1 \leq k \leq 0.2$ 。 w 为惯性权重,其大小决定了粒子对当前速度继承的多少,较大的惯性权重有利于全局寻优,较小的惯性权重则有利于局部寻优。

如果采用传统的单一线性化自适应调整 w 的策略,则一方面找到的最优值不稳定,容易陷入局部解,另一方面即使能够跳出局部解,其速度也非常缓慢。为了保证全局最优化,本研究采用分段调整 w 的策略。假设将粒子分为 n 段,每段的调整公式为^[11-12]:

$$w = \frac{w_l - w_h}{t_2 - t_0} \times t + \frac{t_2 w_l - t_0 w_h}{t_2 - t_0} \quad (3)$$

$$t_0 \leq t \leq t_2$$

式中, t_0 和 t_2 分别为该阶段的迭代初始值和迭代终止值; w_l, w_h 为 t_0 和 t_2 代对应的 w 值。当分 2 段调整时,在 1 阶段通常取 $w=1.4 \sim 0.7$,在 2 阶段取 $w=0.6 \sim 0.1$ 。

2.2 目标函数、约束条件及适应度函数

2.2.1 目标函数

利用 PSO 对 PPF 支路拓扑组合网络参数的优化,实质上是对各个滤波支路无功补偿容量分配的优化,无功补偿容量以电容值大小体现,所以选取滤波支路中的电容值作为种群离子,用一组 n 维的向量来表示: $\mathbf{X}_i = [C_1, C_2, \dots, C_n]$,其中 n 表示滤波支路的支路数。

选择支路投资成本和电压电流谐波畸变率两个参数作为优化目标函数。

1) 支路投资成本。无源滤波器的投资成本应最小,为简单起见,忽略了较小的附加成本,滤波支路初期成本计算式为:

$$\min F_1, F_1 = \sum_{i=1}^n (k_1 R_i + k_2 L_i + k_3 C_i) \quad (4)$$

其中, k_1, k_2, k_3 分别为无源滤波器的电阻、电感、电容所对应的价格因子(根据 PPF 元件的额定电压、额定电流来确定); i 为滤波器组的序号, n 为滤波

器支路组数。

2) 电压电流谐波畸变率。安装无源滤波器后, 电网谐波含量应低于国家标准。系统的滤波效果以谐波电压、电流的总畸变率最小为衡量标准, 谐波电压、电流的总畸变率公式见式(5)和(6)。

$$\min THD_U, THD_U = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{U_{hi}}{U_1}\right)^2} \leq THD_{Umax} \quad (5)$$

$$\min THD_I, THD_I = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{I_{hi}}{I_1}\right)^2} \leq THD_{Imax} \quad (6)$$

2.2.2 约束条件

PSO 的约束条件为无功补偿容量。PPF 的设计既不能出现无功功率过补偿, 又要使系统的功率因数尽量接近 1。即补偿容量应满足表达式为:

$$Q_{min} \leq \sum_{i=1}^n Q_i \leq Q_{max} \quad (7)$$

式中, Q_{min} 、 Q_{max} 分别是 PPF 提供的基波无功功率的下限值和上限值。

2.2.3 适应度函数

根据目标函数和约束条件, 建立各自的适应度函数。初期投资成本和电压电流谐波畸变率的适应度函数可表示为:

$$Y = \min F(X) = \{F_1(X), F_2(X)\} \quad (8)$$

$$F_1(X) = F_1 \quad (9)$$

$$F_2(X) = \alpha_1 THD_U + \alpha_2 THD_I \quad (10)$$

式中, α_1 、 α_2 都是大于零的常数, 用来匹配电压、电流的权重, 一般取 $\alpha_1 : \alpha_2 = 1 : 10$ 。

2.3 基于 PSO 的参数优化设计

由于双调谐滤波器的安装和调试过程复杂, 在实际工程中很少使用, 且其成本等级与单支路调谐及高通滤波器不在同一等级, 所以本研究对其不予考虑。由于滤波支路不同时优化设计效果无法参考对比, 一般实际应用中以 3 条滤波支路应用最广^[14], 所以本研究选择 3 条滤波支路作为优化条件。因此总共有 5^3 种拓扑组合网络。基于 PSO 的参数优化设计的流程图见图 6 所示。

初始化滤波支路电容值时, 按照 1.3 倍经验值设置滤波电容最大值, 按照 0.7 倍经验值设置滤波电容最小值, 初始化电容值在最大值和最小值之间随机选取。

每个粒子的最大速度取变量的最大值, 统一选取品质因数为 60, 每种组合均可以优化出一组最优值。

125 种组合优化出的最优电容值见图 7, 其中 3 条单调谐拓扑组合的电容值 C_5 为 $15.78 \mu F$, C_7 为 $7.96 \mu F$, C_{11} 为 $15.78 \mu F$, 由此计算出滤波器电感

值 L_5 为 $25.68 mH$, L_7 为 $25.97 mH$, L_{11} 为 $25.68 mH$ 。

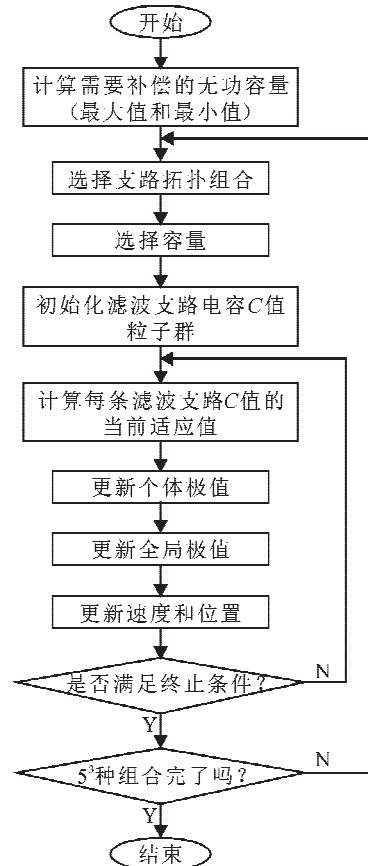


图 6 基于 PSO 的各支路参数优化设计流程框图
Fig. 6 The parameter optimization flow diagram of each branch based on PSO

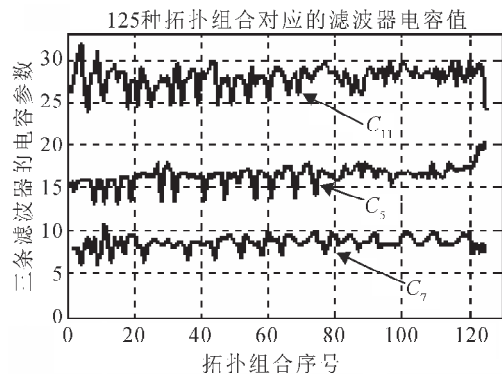


图 7 125 种组合优化后的电容值
Fig. 7 The capacitor values of 125 topology combinations after optimization

3 PPF 拓扑网络的优化设计

3.1 设计指标

对于不同种滤波器拓扑组合考察其总投资成本、单调谐滤波支路平均品质因数及电流谐波平均含有率三个指标。

1) 总投资成本指标

对于由三条滤波支路构成的 5³ 种拓扑组合网络,要找出总投资成本最小的拓扑组合网络。

2) 单调谐滤波支路平均品质因数

滤波器产生的功率损耗主要是电阻上的热损耗,电阻的大小由品质因数 Q 决定。对于高通滤波器,其阻抗与品质因数 Q 只有在转折频率处关系密切,在高频通带关系并不明显;而调谐滤波器的谐振点正是滤波频率点,因此,功率损耗指标可以转化为单调谐滤波器的品质因数 Q 指标。对各个滤波网络中的单调谐滤波器的品质因数 Q 取平均值,品质因数 Q 值越大,PPF 功率损耗越小,滤波拓扑组合越好。

3) 电流谐波平均含有率

电流谐波含有率表示为:

HRI_h = (I_h / I_1) * 100% (11)

其中, I_h 为 h 次谐波电流值, I_1 为基波电流值。

这里提出谐波电流含有率用于考察各个滤波支路的滤波效果。基于仿真计算出滤波环境中各个谐波电流的含有率,并对其求平均值,谐波电流平均含有率最小的滤波拓扑组合最优。

3.2 优化设计方法及结果

PPF 支路拓扑网络优化详细流程图见图 8。

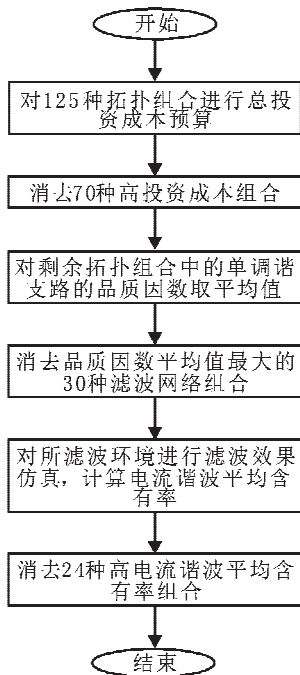


图 8 PPF 支路拓扑网络优化流程框图

Fig. 8 Optimization flow diagram of PPF branch topology net based on total investment cost, average quality factor of monotone harmonic filtering branch

数及电流谐波平均含有率三个指标,对 5³ 种 PPF 支路拓扑网络进行优化筛选。按照总投资成本指标消去 70 种高投资成本组合网络,按照单调谐滤波支路平均品质因数指标消去品质因数平均值最大的 30 种滤波网络组合网络,按照电流谐波平均含有率指标消去 24 种高电流谐波平均含有率组合网络,最终得到最优的 1 种 PPF 支路拓扑网络。其中,三种消去法的顺序可以随意变化,根据数据验证结果显示,三种消去法顺序的随意调整不会影响最优结果的产生。

通过这样的优化方法,得出 3 条单调谐滤波支路拓扑组合最优,滤波器具体参数见表 1。表 1 同时也给出了根据工程实际经验得出的 3 条单调谐滤波器组合的参数值,以验证提出方法的优化效果。

表 1 本研究提出方法优化设计的 PPF 滤波支路网络 Tab.1 PPF filtering branch net optimized by the optimization method of this paper

Table with 7 columns: 谐波次数, PSO 优化设计 PPF (C/μF, L/mH, Q), 工程经验 PPF (C/μF, L/mH, Q). Rows for 5, 7, and 11 harmonics.

4 实验结果及分析

安装滤波器之前,10 kV 母线上的电压电流波形见图 9。电压谐波状况见表 2,电流谐波数据见表 3。

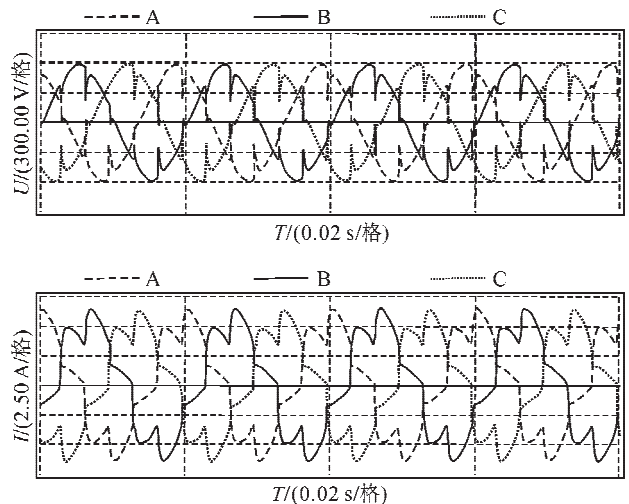


图 9 滤波前 10 kV 母线的电压电流波形

Fig. 9 The voltage and current waveforms before filtering on 10 kV busbar

工程经验选择的 PPF 滤波网络的滤波后电压电流波形见图 10,电压谐波状况见表 2,电流谐波数

据见表 3。

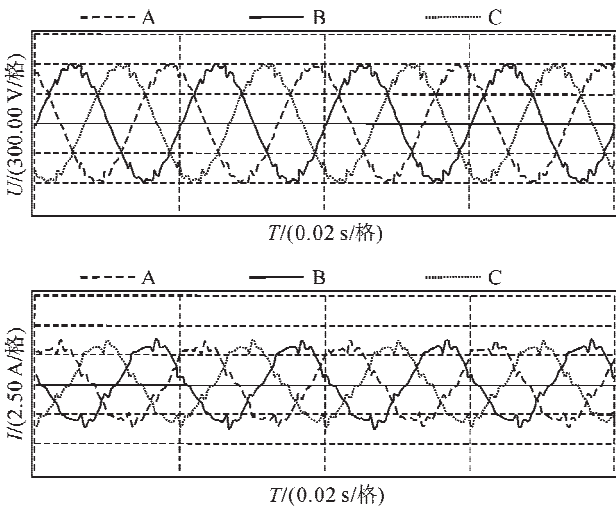


图 10 工程经验 PPF 拓扑滤波后 10 kV 母线电压电流波形

Fig. 10 The voltage and current waveforms of 10 kV busbar with PPF topology which is selected by engineering experience

本研究提出方法得到的 PPF 滤波网络滤波后的电压电流波形见图 11,电压谐波状况见表 2,电流谐波数据见表 3。

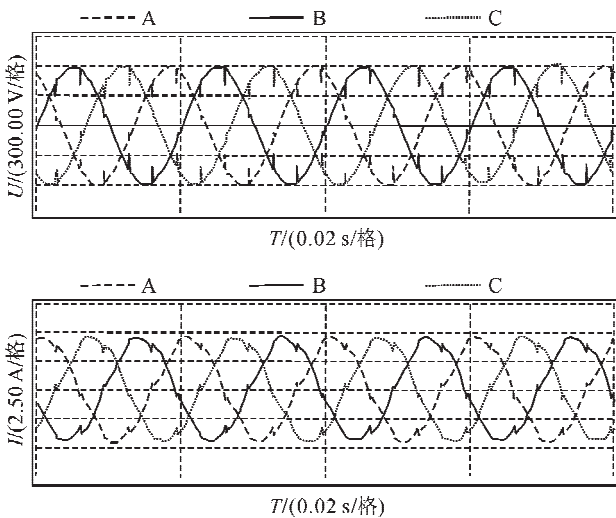


图 11 带有最优 PPF 拓扑的 10 kV 母线电压电流波形

Fig. 11 The voltage and current waveforms of 10 kV busbar with the optimal PPF

从图 9、图 10、图 11 可以看出,本研究提出的方法优化的 PPF 支路拓扑明显优于根据传统经验设计的 PPF 支路拓扑。

从表 2 可以看出,本研究最优设计 PPF 在电压总畸变率、奇偶次谐波电压含有率比工程经验 PPF 明显小,完全达到国家标准。

从表 3 可以看出,本研究最优设计 PPF 在抑制

各次谐波电流方面比工程经验 PPF 明显有优势,完全达到国家标准。

表 2 滤波前后及国标电压谐波状况
Tab. 2 The harmonic voltage status without and with PPF filter and state standard

类别	THD _U /%	谐波电压含有率/%	
		奇次	偶次
无 PPF	6.3	3.3	0.1
国家标准	4.0	3.2	1.6
本文最优 PPF	1.1	1.2	0.03
工程经验 PPF	2.8	2.5	0.07

表 3 滤波前后及国标电流谐波数据表
Tab. 3 The harmonic current status without and with PPF filter and state standard

类别	对应各主要谐波次数的谐波电流/A					
	5	7	11	13	17	19
无 PPF	1299	585	462	309	260	163
国家标准	20	15	9.3	7.9	6	5.4
本文最优 PPF	18.3	14.1	9.1	5.0	4.2	3.1
工程经验 PPF	19.5	14.8	9.1	7.0	5.3	4.7

5 结 论

1) 本研究提出了基于 PSO 的无源电力滤波器支路拓扑的选择方法,可以给出某安装接点处安装 PPF 的最优拓扑结构及支路参数。

2) 该方法中滤波支路参数基于 PSO 对其进行优化,达到了支路投资成本最小、补偿容量合理、补偿效果满足国标的条件。该方法中滤波支路拓扑的优化,实现了总投资成本最小、功率损耗最小及滤波效果最好的目标。

3) 该方法的优化结果并不是在任何时候都是 3 条单调谐滤波支路网络最优,虽然不能给出一个适用于任何电力系统接入点的拓扑组合网络结论,但是给出了优化设计的方法与流程,给出了一种理论依据,在拓扑组合网络与 PPF 滤波效果、成本之间给出了优化设计,这对实际的工程设计过程很有帮助。

参考文献:

[1] 何娜, 黄丽娜, 武健, 等. 基于粒子群优化算法的混合有源滤波器中无源滤波器的多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 63-69.
He Na, Huang Lina, Wu Jian, et al. Multi-objective optimal design for passive part of hybrid active power filter based on particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 63-69.

[2] 李永安, 李圣清, 罗晓东, 等. 混合有源电力滤波器中无源滤波器多目标优化设计[J]. 湖南工业大学学报,

- 2012, 26(1): 46-49.
- Li Yongan, Li Shengqing, Luo Xiaodong, et al. Multi-objective optimal design for passive part of hybrid active power filter[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2012, 26(1): 46-49.
- [3] 魏伟, 许胜辉, 孙剑波. 一种无源滤波器的优化设计方法[J], 电力自动化设备, 2012, 32(1): 62-66.
- Wei Wei, Xu Shenghui, Sun Jianbo. Optimal design of passive filter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 62-66.
- [4] Zobia A F. Optimal multi-objective design of hybrid active power filters considering a distorted environment [J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2013, 61(1): 107-114.
- [5] Elmathana M T, Zobia A F, Abdel Aleem S H E. Economical design of multiple-arm passive harmonic filters for an industrial firm-Case study; IEEE 15th international conference on harmonics and quality of power [C]. Hong Kong; IEEE, 2012; 438-444.
- [6] 姬军鹏. SVC 系统滤波器的设计及分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- Ji Junpeng. The design and analysis of SVC system filter[D]. Xi'an; Xi'an University of Technology, 2009.
- [7] 黄磊. 粒子群优化算法综述[J]. 机械工程与自动化, 2010, (5): 197-199.
- Huang Lei. Overview of particle swarm optimization [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2010, (5): 197-199.
- [8] Hashemi A B. A note on the learning automata based algorithms for adaptive parameter selection in PSO[J]. Applied Soft Computing Journal, 2011, 11 (1): 689-705.
- [9] Tsujimoto T, Shindo T, Kimura T, et al. A relationship between network topology and search performance of PSO; IEEE congress on evolutionary computation, QLD; IEEE[C]. Brisbane, 2012; 1-6.
- [10] Rakhshani E, Cantarellas A M, Remon D, et al. PSO-based LQR controller for multi modular converters; IEEE annual international on energy conversion congress and exhibition, VIC; IEEE [C]. Melbourne, 2013; 1023-1027.
- [11] 余健明, 马小津, 倪峰, 等. 基于改进 PSO-LSSVM 的风电场短期功率预测[J]. 西安理工大学学报, 2013, 29(2): 176-181.
- Yu Jianming, Ma Xiaojin, Ni Feng, et al. Short-term power forecasting of wind farm based on an improved PSO-LSSVM[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(2): 176-181.
- [12] Ling Haifeng, Xiao Yihong, Zhou Xianzhong, et al. An improved PSO algorithm for constrained multi-objective optimization problems; international conference on computer science and service system [C]. Nanjing China; IEEE, 2011; 3859-3863.
- [13] Vazquez J C, Valdez F. Fuzzy logic for dynamic adaptation in PSO with multiple topologies; IFSA world congress and NAFIPS annual meeting, AB; IEEE[C]. Edmonton, 2013; 1197-1202.
- [14] 陈静, 雷磊, 袁佑新, 等. 新型动态调谐无源滤波器的研制与应用[J]. 电工技术, 2013, (2): 3-13.
- Chen Jing, Lei Lei, Yuan Youxin. et al Development and application of a new dynamic tuned passive filter [J]. Electric Engineering, 2013, (2): 3-13.

(责任编辑 李虹燕)