

电容器组串联电抗率优化选择模型和算法研究

王星华¹, 余欣梅²

(1. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510900; 2. 广东省电力设计研究院系统规划部, 广东 广州 510600)

摘要: 在简要分析了电容器对谐波电流放大机理的基础上, 面向整个电网研究了集中补偿电容器组串联电抗器电抗率的优化配置问题, 建立了该问题的内、外双层优化数学模型。内层优化用于搜索给定电抗率配置方案下导致电网谐波畸变最严重的运行方式, 外层优化用于确定电抗率的最优配置方案并利用内层优化的结果判断配置方案是否可行。针对内层优化模型中控制变量的二进制特性, 提出了基于 BPSO 的优化算法, 并给出了详细的算法流程。对 IEEE 14 节点系统进行了算例分析, 计算结果表明了所提模型及算法在抑制谐波放大方面的作用。

关键词: 优化; 电容器; 串联电抗率; 谐波; PSO

Optimal configuration of series reactors in capacitor banks

WANG Xing-hua¹, YU Xin-mei²(1. Department of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510900, China;
2. Power System Planning Division, Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510600, China)

Abstract: This paper pays great attention on the problem of optimal series reactance ratio configuration in capacitor banks. Based on the analysis on the mechanism of harmonic amplification caused by the capacitor banks, the formulation is presented for the reactance ratio optimization, which is divided into two layers. The inner optimization is applied to search the operating mode which may cause the highest THD with the given reactor ratio configuration, while the outer optimization is used to determine the most optimal reactor ratio configuration. The feasibility of the optimal scheme is based on the result of inner optimization. Due to the binary control variables of inner optimal formulation, the BPSO algorithm is presented to solve the problem, and the detailed process is also described in this paper. The proposed modelling and solution method has been implemented on an IEEE 14-bus radial distribution system, and the good performance in feasibility, practicability is demonstrated from the test results.

Key words: optimization; capacitor; series reactance ratio; harmonic; PSO

中图分类号: TM53, TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)16-0042-06

0 引言

串联电抗器是变电站并联补偿电容器装置中重要的配套设备。电容器组中串接电抗器一方面是限制并联电容器投入瞬间所产生的浪涌电流, 另一方面是抑制高次谐波电流的放大^[1,2]。但从实际系统中, 目前仍有许多变电站的电容器组因谐波问题而发生鼓肚、漏油、甚至爆炸等事故。造成这类事故的主要原因之一是电容器组串联电抗器电抗率选择不当, 使电容器组的参数与系统参数构成某次谐波下的并联或串联谐振回路, 导致谐波谐振或谐波电流放大^[2,3]。可见, 串联电抗器电抗率的选择关系着电容器组自身和整个系统的运行安全。现有方法大多把变电站外的电力系统用等效电抗代替, 只针对变电站内局部网络进行谐波分析和计算^[3,4], 因而无

法考虑实际系统中出现多个电容补偿点时同时发生谐振或谐波放大且相互影响的情况。

本文在简要分析电容器对谐波电流的放大机理的基础上, 从整个系统的角度出发, 建立了电抗率优化配置问题的数学模型, 提出了基于改进 PSO 算法的电抗率优化配置模型和相应算法, 并通过 IEEE-14 网络验证了其可行性。

1 电容器对谐波放大的机理分析

系统简化接线图及其等值电路如图 1 所示^[1]。

图 1 中, 下标 h 表示 h 次谐波, 注入系统的谐波电流为 I_{sh} , 注入电容器支路的谐波电流为 I_{ch} , 电容器、电抗器和系统的 h 次谐波和基波电抗的关系为 $X_{ch} = X_c/h$ 、 $X_{lh} = hX_L$ 和 $X_{sh} = hX_s$ 。由图 1 可得系统和电容器支路的谐波电流分别为:

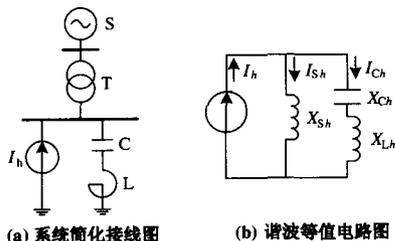


图 1 谐波电流放大原理分析示意图

Fig. 1 Illustrative diagram of harmonic amplification

$$I_{sh} = \frac{hX_L - X_C/h}{hX_S + hX_L - X_C/h} I_h = \alpha_{sh} I_h \quad (1)$$

$$I_{ch} = \frac{hX_S}{hX_S + hX_L - X_C/h} I_h = \alpha_{ch} I_h \quad (2)$$

式中： α_{sh} 和 α_{ch} 分别为以 I_h 为基值的系统和电容器的谐波电流放大倍数。当 $|\alpha_{sh}| > 1$ 时，称为系统谐波电流放大；当 $|\alpha_{ch}| > 1$ 时，称为电容器谐波电流放大；当 $|\alpha_{sh}| > 1$ 和 $|\alpha_{ch}| > 1$ 同时发生时，称为谐波电流严重放大。

定义 $K_S = X_S/X_C$ 和 $K_L = X_L/X_C$ 分别为以 X_C 为基值的系统电抗率和串联电抗器电抗率，则由式 (1)、(2) 易推导出：

$$\alpha_{sh} = \frac{K_L - 1/h^2}{K_S + K_L - 1/h^2} \quad (3)$$

$$\alpha_{ch} = \frac{K_S}{K_S + K_L - 1/h^2} \quad (4)$$

根据式 (3)、(4) 考察以下 4 种特殊情况：

① $h = h_1 = 1/\sqrt{2K_S + K_L}$: $\alpha_{sh} = 2$, $\alpha_{ch} = -1$, 即谐波次数 h_1 下注入系统的谐波电流被放大 1 倍，处于谐波严重放大的第一临界点；

② $h = h_0 = 1/\sqrt{K_S + K_L}$: $\alpha_{sh} = \infty$, $\alpha_{ch} = \infty$ (考虑到电阻的存在, α_{sh} 和 α_{ch} 实际上是有限大值), 处于谐波谐振点, 谐振次数为 h_0 , 注入系统和电容器支路的谐波电流被放大许多；

③ $h = h_2 = 1/\sqrt{K_S/2 + K_L}$: $\alpha_{sh} = -1$, $\alpha_{ch} = 2$, 即谐波次数 h_2 下电容器支路的谐波电流被放大 1 倍，处于谐波严重放大的第二临界点；

④ $h = h'_0 = 1/\sqrt{K_L}$ 时, $\alpha_{sh} = 0$, $\alpha_{ch} = 1$, 此时电容器支路处于串联谐振点, 谐振次数为 h'_0 , 由谐波源产生的 h'_0 次谐波完全被电容器支路吸收, 即呈完全滤波状态。

上述各临界点和谐振点将整个频域空间划分为 4 个谐波放大区域：① $h < h_1$ 时, $1 < \alpha_{sh} < 2$, $-1 < \alpha_{ch} < 0$, 此时注入系统的谐波电流被轻度放大；

② $h_1 < h < h_2$ 时, $|\alpha_{sh}| > 2$, $|\alpha_{ch}| > 2$, 此时注入系统和电容器支路的谐波电流同时被放大了一倍以上，这个频率范围称为谐波严重放大区域；③ $h_2 < h < h'_0$ 时, $-1 < \alpha_{sh} < 0$, $1 < \alpha_{ch} < 2$, 此时电容器支路的谐波电流被轻度放大；④ $h > h'_0$ 时, $0 < \alpha_{sh} < 1$, $0 < \alpha_{ch} < 1$, 此时的电容器支路呈现感性, 它与系统一起各分担一部分谐波源发出的谐波电流。各个谐波放大区域示意图见图 2。

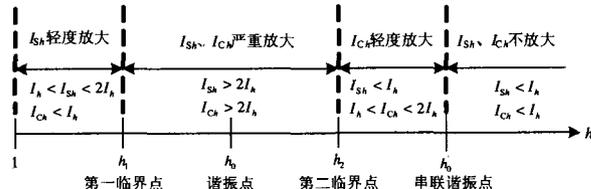


图 2 谐波放大区域示意图

Fig. 2 Representation of harmonic amplification regions

以 $K_S = 5\%$ 、 $K_L = 6\%$ 的情况为例，此时 $h_1 = 2.50$, $h_0 = 3.02$, $h_2 = 3.43$, $h'_0 = 4.08$, 可见，3 次谐波正好落在谐振点的附近。若系统中存在 3 次谐波源，必将发生 3 次谐波谐振；而对于 5 次、7 次及更高次数的谐波，由于满足 $h > h'_0$ 的条件，不会发生这些次数的谐波电流放大。 $K_S = 5\%$ 、 $K_L = 6\%$ 的谐波电流放大曲线如图 3 所示。

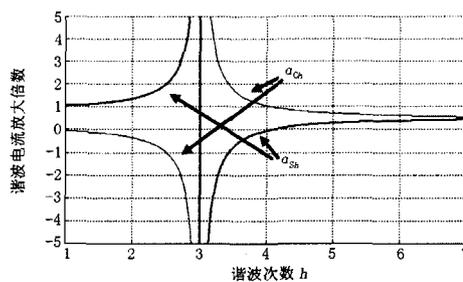


图 3 谐波电流放大倍数与谐波次数关系图

Fig. 3 Curve of harmonic amplification

由式 (1) ~ (4) 可知，影响谐波电流放大倍数大小的 h 、 X_S 、 X_C 和 X_L 四个量。由于并联电容器主要用于无功补偿，其容量由无功优化确定， X_S 由外部系统确定，通常均视作不可变动的量。因此，在所研究的谐波次数 h 给定时，只有电抗器的电抗率 K_L 可调。综合上述分析，我们可以得出如下重要结论：① 电容器支路中串接电抗器，可以降低谐振的谐波次数，且 K_L 越大，谐波谐振次数越低；② K_L 越大，谐波严重放大区域的宽度越窄，这对减小谐波电流的放大作用有一定效果；③ 当满足 $h > 1/\sqrt{K_L}$ 即 $K_L > 1/h^2$ 条件时，电容器支路在 h 次谐波下呈现

感性, 不会发生 h 次谐波电流放大。

上述简化的机理分析中, 将系统的谐波阻抗简单地表示为 $X_{sh} = hX_s$ 。但实际系统是一个十分复杂的网络, 系统中还包含有其它并联电容器组及线路分布电容, 此时系统的谐波阻抗与谐波次数之间是一个复杂的函数关系, 不能简单地表示为 $X_{sh} = hX_s$ 。因此, 必须通过整个系统的谐波分析计算, 才能得到真正符合实际的计算结果。

2 电抗率配置的优化模型

为保证优化方案在任何运行方式下的可行性, 在建立整个电网的电容器组电抗率优化配置模型时, 采用了内外两层优化。其中, 外层优化用于搜索电抗率的最优配置方案, 内层优化则用于搜索各方案下谐波畸变最严重的运行方式, 并把该方式的谐波计算结果传送给外层优化, 作为评价各电抗率方案是否满足谐波约束的依据。

2.1 外层优化模型

电抗率优化选择的根本目的是, 从系统整体的角度出发, 经济合理地配置所有集中补偿电容器组中串联电抗器的电抗率, 以使在各种可能的运行方式下系统的谐波畸变水平均能限制在规定范围内, 保证电容器和系统的安全运行。

2.1.1 目标函数

若不考虑谐波因素, 单以限制电容器组的合闸涌流为目的, 显然选择小电抗率的串联电抗器更为经济。因此, 以所有串联电抗器的电抗率之和最小作为电抗率优化问题的目标函数, 即:

$$\text{Minimize } F = K_{L_1} + K_{L_2} + \dots + K_{L_m} \quad (5)$$

式中: m 为系统所有电容器组的组数, 也就是待求变量个数; $K_{L_1}, K_{L_2}, \dots, K_{L_m}$ 为各电容器组串联电抗器的电抗率, 是优化问题的待求变量。

2.1.2 约束条件

(1) 控制变量及其取值范围

根据高压并联电容器用串联电抗器订货技术条件 (DL 462-92) [2] 规定, 额定电抗率优先从以下数值中选取: 0.1%、0.3%、0.5%、1%、1.5%、4.5%、5%、6%、12%、13%。因此, 优化问题的控制变量需在这 10 个数值之间取值, 即

$$K_{L_i} \in \{0.1, 0.3, 0.5, 1, 1.5, 4.5, 5, 6, 12, 13\} \quad (6)$$

(2) 电压总谐波畸变率约束

各节点电压总谐波畸变率满足国标要求, 即

$$THD_j = \left(\sqrt{\sum_{k=2}^h |V^k|^2} / |V^1| \right) \times 100\% \leq THD_{\max}, j = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中: V^k 为第 k 次谐波电压有效值, V^1 为基波电压有效值。根据国标要求 [2], 35 kV、66 kV 电网 THD_{\max}

为 3%, 110 kV 及以上为 2%。

(3) 电抗器的过载能力约束
电抗器的允许电流须满足 [2]

$$I_{L,j} = \sqrt{(I_{L,j}^1)^2 + \sum_{h \in H} (d_j^h I_{L,j}^h)^2} \leq 1.35 I_{LN,j} \quad (8)$$

$j = 1, 2, \dots, m$

式中: d_j^h 为电抗器 j 的 h 次谐波电流等值基波发热系数; $I_{L,j}^1$ 、 $I_{L,j}^h$ 和 $I_{LN,j}$ 分别为电抗器 j 的基波电流、 h 次谐波电流和额定电流; H 为所研究的谐波次数的集合。

2.2 内层优化模型

系统运行方式和各电容器组的投切状态经常随负荷变化而改变, 系统的等值电抗 X_s 和电容器的容抗 X_c 也随之变化。根据式 (1) 和式 (2), X_s 和 X_c 的值直接影响电容器组对谐波电流的放大程度, 说明在某些运行方式下不会发生谐波放大的电抗率方案, 在其他运行方式下则可能会发生谐波放大。

为保证各种可能的运行方式下系统均不会发生各次谐波放大, 内层优化的目标就是针对各个电抗率配置方案搜索谐波畸变最严重的运行方式以判断该配置方案是否能满足谐波限制的要求。因此, 其目标函数是节点电压总谐波畸变率最大, 即:

$$\text{Maximize } F' = \max_{j=1, \dots, N} \{THD_j\} \quad (9)$$

3 基于 PSO 算法的电抗率优化计算

谐波畸变最严重的运行方式搜索是一个典型的非线性离散优化问题 [5], 自变量包括系统中各电容器组的投切状态 (投入或断开) 和系统的运行方式 (大方式或小方式), 因此适于应用 PSO 这类随机搜索算法进行计算。

3.1 内层 PSO 算法

内层优化问题的控制变量是各电容器组的运行状态和系统的运行方式, 而每个电容器组只有投入和断开两个状态, 系统运行方式一般也只需考虑大方式和小方式两种, 即所有控制变量均只有两个状态, 因而可采用二进制形式进行变量的编码。编码时, 设定电容器的投入状态为 1, 断开为 0; 系统的大方式为 1, 小方式为 0。因此, 内层优化在数学上被描述为一个非线性、无约束的 0/1 优化问题。

针对优化变量为 0/1 的特点, 本文采用离散二进制 PSO 算法 [1, 6] BPSO (discrete Binary Particle Swarm Optimization) 进行内层优化。BPSO 算法在标准 PSO 的基础上, 对微粒位置的更新公式作了重新定义, 以使 PSO 算法适用于解决 0/1 优化问题。

BPSO 的速度和位置更新公式如下:

$$\begin{cases} v_{id}^{j+1} = \omega \cdot v_{id}^j + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{id}^j - x_{id}^j) + \\ \quad c_2 \cdot r_2 \cdot (p_{gd}^j - x_{id}^j) \\ \text{if } (r_3 < S(v_{id}^{j+1})) \quad x_{id}^{j+1} = 1 \\ \text{else} \quad x_{id}^{j+1} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: r_1 、 r_2 和 r_3 为三个独立产生且均匀分布于闭区间 $[0,1]$ 内的随机数; $S(v)$ 为 Sigmoid 函数, 有 $S(v) = 1/(1 + e^{-v})$; 其余参数的意义参见文献[1]。

由式 (10) 可见, 在 BPSO 算法中, 微粒的速度不再作为微粒位置的变化率, 而是充当了确定微粒位置取 0 或取 1 的概率的作用。若微粒速度大于 0, 则微粒位置取 1 值的概率大于取 0 值的概率, 且速度越大, 位置取 1 值的概率就越大; 若微粒速度小于 0, 则微粒位置取 0 值的概率大于取 1 值的概率, 且速度的绝对值越大, 位置取 0 值的概率就越大; 若微粒速度等于 0, 则微粒位置取 1 和取 0 的概率相等。文献[6]对 5 个 De Jong 经典测试函数进行了优化, 结果表明 BPSO 算法用于求解 0/1 优化问题是非常有效的。

3.2 算法步骤

应用双层 PSO 算法实现电容器组串联电抗器电抗率的优化配置的步骤如下:

Step 1: 读入系统数据, 设置算法的参数。

Step 2: 生成外层 PSO 的初始微粒群体。

在满足控制变量约束式 (6) 的条件下, 随机生成初始微粒群体。

Step 3: 检查是否满足控制变量约束, 若不满足则将这些变量置为约束的上限或下限值。

Step 4: 调用内层 PSO 优化, 计算各微粒适应度。

Step 4(a): 随机生成内层 PSO 的初始微粒群体;

Step 4(b): 对每个内层 PSO 的微粒个体, 进行基波潮流和各次谐波潮流的计算, 以获取 $\max_{j=1, \dots, N} \{THD_j\}$

作为内层 PSO 微粒的适应度;

Step 4(c): 计算每个内层 PSO 微粒的最优解 $Pbest_i$

和群体的全局最优解 $Gbest$;

Step 4(d): 按式 (10) 更新内层微粒的速度和位置;

Step 4(e): 若内层 PSO 的当前迭代次数等于其最大迭代次数 T' , 进入 Step 5; 否则转到 Step 4(b), 继续进行内层优化搜索;

Step 5: 在外层 PSO 中对内层 PSO 计算得到的最优微粒 (即实际问题的谐波畸变最严重的运行方式) 进行基波潮流和各次谐波潮流的计算, 以获取约束

式 (7) ~ (8) 中的各个状态变量;

Step 6: 判断各状态变量约束式 (7) ~ (8) 是否得到满足, 若存在约束超限, 按文献[1]方法引入罚函数项 $f_{penalty}$, 计算各微粒的适应度:

$$F_{fitness} = \sum_{i=1}^m K_{Li} + f_{penalty} \quad (11)$$

Step 7: 确定外层 PSO 各微粒的当前个体最优解 $Pbest_i$ 和群体的全局最优解 $Gbest$

$$Gbest = \min_i \{Pbest_i\} \quad (12)$$

Step 8: 更新外层 PSO 各微粒的速度和位置。

Step 9: 判断迭代终止条件是否满足。

若当前迭代指针已到达最大迭代次数 T , 停止迭代; 否则转到 Step 3。

Step 10: 输出优化问题的最优解。

迭代结束时, 微粒群体中的最优微粒即为电抗率优化问题的最优配置方案。

4 算例分析

本节针对一个含谐波源的 IEEE 14 节点电力系统^[7], 采用所提模型和算法对系统中所有并联补偿电容器组的串联电抗器电抗率进行了优化计算。系统示意图如图 4 所示。

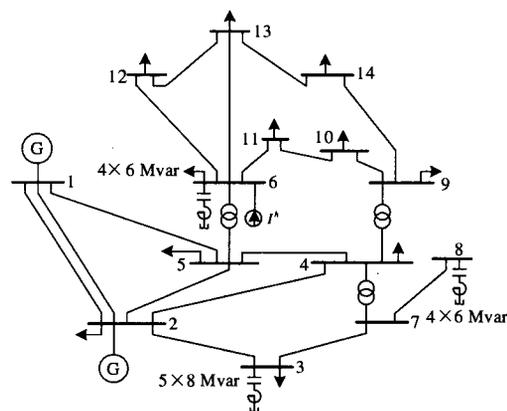


图 4 含谐波源的 IEEE 14 节点系统示意图

Fig. 4 Single-line diagram of a distorted IEEE 14-bus system

示例系统中节点 6 存在谐波源负荷, 占该节点总负荷的 50%, 采用恒流源模型, 向系统注入 3、5、7 次谐波。节点 3、6 和 8 为电容器补偿节点, 其中, 节点 3 装设 5×8 Mvar; 节点 6 和 8 各装设 4×6 Mvar。为说明电容器支路中串联电抗器电抗率的取值对系统谐波畸变程度的影响, 表 1 列出了三种不同电抗率方案下的系统谐波畸变情况:

表 1 不同配置方案下系统谐波畸变比较
Tab.1 Comparison on bus rms THD among cases

方 案	谐波畸变最严重方式	谐波放大次数	谐波最大节点	最大 THD / (%)
1	节点 3 投 5 组 + 节点 6 投 4 组 + 节点 8 投 3 组	5 次	节点 6	3.64
2	节点 3 全不投 + 节点 6 投 4 组 + 节点 8 投 4 组	3 次	节点 8	3.52
3	节点 3 投 5 组 + 节点 6 全不投 + 节点 8 全不投	3 次	节点 6	1.68

说明:

(1) 方案 1: 所有电抗率均取 0%, 即所有的电容器支路都不串接电抗器。

(2) 方案 2: 所有电抗率均取 6%。这是目前不少实际的电力系统所采用的电抗率配置方案, 其初衷是为了避免 5 次谐波放大。

(3) 方案 3 (优化方案): 节点 3 的 5 组电容器组的电抗率均为 0.1%, 节点 6 的 4 组均为 4.5%, 节点 8 的 4 组均为 1.0%。

(4) 上述不同的电抗率配置方案中谐波畸变最严重的方式均是利用基于 BPSO 算法的内层优化计算得到。不失一般性, THD 计算中仅考虑了 3、5、7 次谐波简化计算。

(5) 表中的方案 3 是按本文模型和算法得到的电抗率优化方案。优化计算时设置算法的主要参数如下: 外层 PSO 优化的微粒群体规模为 50, 最大迭代次数为 50, 在控制变量约束内随机初始化微粒群体, 非均匀变异率取 0.02; 内层 PSO 优化的群体规模为 50, 最大迭代次数为 50, 变异率为 0.02。

方案 3 的分析计算结果参见表 2 和表 3。

表 2 采用方案 3 时系统各节点电压水平和谐波畸变率
Tab.2 Bus rms voltages and THDs in case 3

节点号	各次电压 / (p. u.)				电压值 / p. u.	THD / (%)
	基波	3 次	5 次	7 次		
1	1.100	0.0058	0.0022	0.0031	1.1000	0.63
2	1.091	0.0059	0.0023	0.0034	1.0910	0.66
3	1.064	0.0070	0.0038	0.0012	1.0640	0.76
4	1.041	0.0045	0.0015	0.0006	1.0411	0.45
5	1.047	0.0042	0.0019	0.0007	1.0470	0.44
6	0.960	0.0082	0.0102	0.0094	0.9601	1.68
7	0.971	0.0030	0.0029	0.0023	0.9712	0.49
8	0.971	0.0030	0.0029	0.0023	0.9712	0.49
9	0.956	0.0029	0.0040	0.0034	0.9558	0.63
10	0.948	0.0034	0.0049	0.0043	0.9483	0.77
11	0.950	0.0055	0.0073	0.0066	0.9503	1.19
12	0.946	0.0077	0.0096	0.0088	0.9460	1.60
13	0.940	0.0071	0.0090	0.0083	0.9399	1.51
14	0.929	0.0042	0.0059	0.0052	0.9287	0.96

表 3 采用方案 3 时系统各电容器支路的谐波电流
Tab.3 Harmonic currents of capacitor banks in case 3

补偿节点	电容器编号	电抗率 / (%)	投切状态 (投:1, 切:0)	各次谐波电流占基波电流百分比 / (%)		
				3 次	5 次	7 次
3	1	0.1	1	1.992	1.831	0.842
	2	0.1	1	1.992	1.831	0.842
	3	0.1	1	1.992	1.831	0.842
	4	0.1	1	1.992	1.831	0.842
	5	0.1	1	1.992	1.831	0.842
6	6	4.5	0	/	/	/
	7	4.5	0	/	/	/
	8	4.5	0	/	/	/
	9	4.5	0	/	/	/
8	10	1.0	0	/	/	/
	11	1.0	0	/	/	/
	12	1.0	0	/	/	/
	13	1.0	0	/	/	/

由表 2 和表 3 可见: 采用方案 3 时, 在任何一种电容器投切方式下, 系统都不会发生 3 次、5 次和 7 次谐波放大。从谐波畸变最严重方式下的谐波电压和 THD 值来看, 各节点的 3 次、5 次和 7 次谐波电压的数值均很小, 且所有节点的 THD 值都保持在限值 2% 以内, 最大的 THD 值 (节点 6 处) 为 1.68%; 从投运的电容器支路中的谐波电流值来看, 各次谐波电流与基波电流相比, 数值均非常地小。

对上述 3 种电抗率方案的系统谐波计算结果进行对比。为保证可比性, 三种方案均取所有电容器组全部投运的方式。图 5 所示即为三种方案下各节点的 THD 曲线。由图 5 可知, 方案 1、2 在节点 6 和节点 12 两处会发生谐波电压放大, 而方案 3 (即电抗率优化方案) 可使所有节点的 THD 平稳地保持在低水平范围之内。

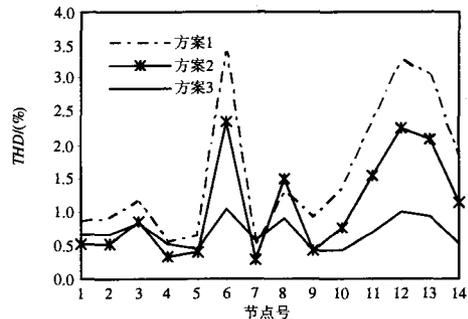


图 5 各方案电容器组全投时的节点电压总谐波畸变率

Fig.5 THDs in different cases

5 结论

本文面向整个电网研究了集中补偿电容器组

电抗率的优化配置问题,提出了该问题的内、外双层优化模型,其中内层优化用于搜索给定电抗率方案下谐波畸变最严重的运行方式,外层优化用于确定电抗率的最优配置方案。该模型可保证优化方案在各种可能的运行方式下均满足谐波畸变约束。针对该模型,提出了基于改进 PSO 算法的电抗率优化配置算法,利用该算法对一个含谐波源的 IEEE 14 节点系统进行了算例研究,优化结果验证了所提模型及算法在电容器组电抗率优化配置问题中的有效性。

需要指出的是,本文的数学模型是在假设系统各变电站的无功补偿容量和分组容量都已由无功优化计算确定的前提下建立的,控制变量仅考虑串联电抗器的电抗率。如何将传统的无功优化问题和本文的电抗率优化问题结合起来,统一确定电容器组的补偿容量、分组容量和电抗率,以最大程度地节约电容器组综合投资和抑制谐波放大,是需要进一步研究的问题。

参考文献

- [1] 余欣梅.考虑谐波影响的配电网电容器优化模型及相关算法研究(博士学位论文)[D].武汉:华中科技大学,2004.
YU Xin-mei.Study on Modeling and Solution Algorithms of Capacitor Optimization with Harmonic Consideration in Distribution Systems,Doctoral Dissertation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2004.
- [2] 国家技术监督局. 并联电容器装置设计规范 (GB

50227-95)[M]. 北京: 中国计划出版社,1995.

State Bureau of Technical Supervision.Design Specification of Shunt Capacitors(GB 50227-95)[M]. Beijing: China Planning Press, 1995.

- [3] 陈伯胜. 串联电抗器抑制谐波的作用及电抗率的选择[J]. 电网技术,2003, 27(12): 92-95.
CHEN Bo-sheng. Harmonics Restraining Function of Serial Reactor and Selection of Reactance Rate[J].Power System Technology, 2003, 27(12): 92-95.
- [4] Schmill J V. Optimum Size and Location of Shunt Capacitors on Distribution Feeders[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(9): 825-832.
- [5] Richards G G, Yang H. Distribution System Harmonic Worst Case Design Using a Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1484-1491.
- [6] Kennedy J, Eberhart R. A Discrete Binary Version of the Particle Swarm Algorithm[A].In: Proceedings IEEE International Conference on Neural Network[C]. Perth(Australia): 1997.4104-4108.
- [7] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation. Test Systems for Harmonic Modeling and Simulation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(2): 579-585.

收稿日期: 2007-11-21; 修回日期: 2008-05-20

作者简介:

王星华(1972-),男,硕士,讲师,从事电力系统分析、继电保护及电力系统软件技术等领域的研究; E-mail: riskmouse@163.com

余欣梅(1978-),女,工程师,从事电力系统分析、规划等方面的工作。

(上接第 41 页 continued from page 41)

4 结论

为了验证所设计的直流系统鲁棒近似反馈线性化基本控制器的有效性,采用 Matlab7.0 对直流输电系统进行了仿真,结果证明控制器可以有效地保持系统稳定。

参考文献

- [1] 吕伟业. 中国电力工业发展及产业结构调整[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [2] Tornambe A, Valigi P A. Decentralized Controller for the Robust Stabilization of a Class of MIMO Dynamical Systems[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control,1994,116:293-304.
- [3] Indri M, Tornambe A. Robust Trajectory Tracking for Flexible Piezoelectric Structures[J].IEE Proceedings on Control Theory and Applications, 1994, 141(5):289-294.
- [4] 曾河华. 发电机组的自抗扰 PID 控制[D]. 北京:清华大学,2005.

[5] 宁喜荣. 水轮机调节系统的非线性鲁棒控制优化研究[D]. 北京:清华大学,2006.

[6] 黄炳红. 自抗扰控制器在飞控及火控系统中的应用研究[D]. 北京:北京理工大学, 2006.

[7] Isidori A. Nonlinear Control Systems, 3rd ed[M]. Berlin(Germany): Springer-Verlag, 1995.112-120.

[8] 陈凌云. 高压直流输电系统中非线性控制策略的研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.

[9] 段富海,韩崇昭. 动态逆方法和微分几何反馈线性化方法的对比[J]. 自动化与仪器仪表, 2002, (3): 4-5.

收稿日期: 2008-01-26

作者简介:

姚致清(1960-),男,本科,高级工程师,从事电力系统保护与控制研究; E-mail: zhiqingy@xjgc.com

刘喜梅(1961-),女,教授,硕士学位,从事网络控制系统和故障诊断研究;

于洁(1983-),女,硕士研究生,从事控制理论与控制工程研究。