

王毅颖,刘建功,刘扬. 煤矿井下电网有源电力滤波器接入位置和容量研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(12): 3174–3180. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0476

Wang Yiying, Liu Jianguo, Liu Yang. Research on the allocation and sizing of active power filters in underground coal mine power system [J]. Journal of China Coal Society 2016 41(12): 3174–3180. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.0476

煤矿井下电网有源电力滤波器接入位置和容量研究

王毅颖,刘建功,刘扬

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

摘要: 针对煤矿井下电网谐波污染严重的问题,提出了一种确定井下电网有源电力滤波器接入位置和容量的计算方法,该方法不仅可以抑制煤矿井下电网的谐波污染,还可以有效的降低谐波治理的投资成本。在该方法中,建立了基于瞬时无功功率的离散化 APF 时域模型以及基于固定成本和容量成本的优化模型,使用了粒子群优化算法对优化模型进行了求解,保证了所得最优解更加符合工程实际。通过仿真对有源电力滤波器接入位置和容量的计算方法进行了验证,结果证明了其正确性。

关键词: 煤矿井下电网; 有源电力滤波器; 接入位置; 粒子群算法

中图分类号: TD61

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2016)12-3174-07

Research on the allocation and sizing of active power filters in underground coal mine power system

WANG Yi-ying, LIU Jian-gong, LIU Yang

(School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: A calculation method for the allocation and sizing of active power filters (Active Power Filter, APF) in underground power system is proposed in this paper, considering the severe harmonic pollutions of the underground coal mine power system. The method suppresses the harmonic pollutions of the underground coal mine power system and also minimizes the investment cost largely. A discrete APF time domain model based on instantaneous power theory and an optimization model based on both fixed cost and unit cost are established. A particle swarm optimization is employed to solve the optimization problem. The method presented ensures that the optimal solution is practical. Based on the simulations results, the correctness of the method for the allocation and sizing of active power filters is verified.

Key words: underground coal mine power system; active power filter; placement; particle swarm optimization

随着煤矿综合自动化生产的提高,各种先进、高效率的生产设备用于煤矿生产一线^[1],这些设备在保证煤矿产量的同时,也将变频器、整流器等大量的非线性装置带入了煤矿电网中,产生了大量谐波电流,引起电动机过热、保护装置误操作、敏感负载井下环境不能工作等诸多问题,严重时甚至会损坏设备,

造成电力系统故障,影响煤矿的正常生产运行。

为了抑制煤矿电网的谐波污染,多数煤矿企业一般在地面变电站集中治理非线性负载引起的谐波污染,或者在主要的非线性负载处就地治理。文献[1–3]对矿井提升机运行系统进行了谐波电流分析,采用了无源滤波装置进行了谐波治理,但是动态补偿

效果不甚理想。近年来,有源电力滤波器因其良好的补偿性能等优点逐步取代无源滤波装置^[5-9]。文献[5]在提升机运行系统处安装了并联型有源电力滤波器,进一步提高了谐波治理的效果。但是,煤矿井下的谐波污染问题并未得到有效的解决。由于煤矿井下具有工作面巷道狭窄、瓦斯粉尘爆炸等特殊环境,APF 在井下应用时,需要考虑防爆、散热设计及体积、容量的限制,目前只有较少的几篇文献对井下的谐波治理进行了研究。文献[4]对采煤机牵引系统进行了谐波仿真分析,指出了牵引系统的谐波严重性,但是并未给出解决方案;文献[6]针对煤矿井下 1 140 V 配电网谐波问题,研究了无耦合变压器型并联有源滤波器,文献[7]提出了模块化电能质量治理模块的概念,通过串并联方式适应煤矿井下 1 140 V, 3 300 V 等不同的电压等级,但是,文献[6-7]未对煤矿井下电网的有源电力滤波器接入位置和容量进行研究。

为了适应煤矿井下的特殊性环境,减小有源电力滤波器的容量与体积,本文选择谐波治理作为其在井下的补偿目的。主要针对井下电网中谐波污染问题,提出了一种确定井下电网有源电力滤波器接入位置和容量的计算方法,首先建立了基于瞬时无功功率的离散化 APF 时域模型,其次建立了以投资成本为目标函数,各母线的电压谐波畸变率和单次谐波含有率为约束条件的优化模型。该模型可以使用线性规划最优算法^[10-17]和启发式算法^[18-23]求解,本文采用了粒子群优化算法确定了 APF 在煤矿井下电网中的接入位置和容量,在保证井下电网的谐波畸变符合标准的前提下,确定了 APF 的接入位置和容量使项目的投资成本最少,平衡了谐波治理与投资成本之间的关系。

1 煤矿井下谐波治理问题建模

1.1 APF 时域模型

在研究 APF 最优接入位置和容量时,APF 可以视为一个理想的受控电流源,通过控制 PWM 主电路向电网中注入大小相等、方向相反的谐波电流达到谐波治理的目的,其系统原理图如图 1 所示。

使用可靠、精确的谐波检测算法获取指令电流是影响 APF 补偿特性的一个重要因素。文献[21]在频域内计算了负载的谐波电流,并依此建立了 APF 的频域模型,但是在 APF 的频域模型中谐波次数受到了限制。为了消除谐波次数的影响,本文建立了基于瞬时无功功率理论的 APF 时域模型。图 2 为 APF 时域模型的指令电流计算过程。

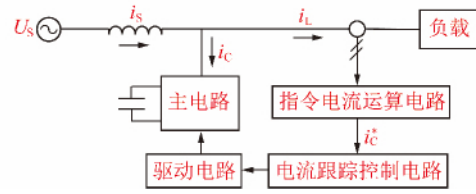


图 1 并联型 APF 系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of shunt APF

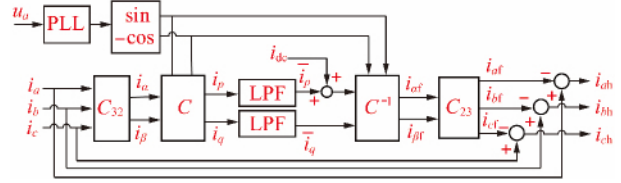


图 2 谐波电流检测原理

Fig. 2 Schematic diagram of harmonic detection

为了提高谐波检测的准确性从而提高 APF 补偿效果,图 2 中采用了基于加强型锁相环的自适应锁相环(Phase Lock Loop, PLL)。加强型锁相环的数学模型可以用式(1)表示:

$$\begin{cases} \dot{A} = \mu_1 e \sin \varphi \\ \Delta \dot{\omega} = \mu_2 e \cos \varphi \\ \dot{\varphi} = \omega_0 + \Delta \omega + \mu_3 e \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$

其中 A 、 ω 、 φ 分别为信号的幅值、角频率、相位角; ω_0 为信号的额定频率为一常数; e 为输入输出信号之差; μ_1 为加强型锁相环增益,为正数。由式(1)的近似线性化模型,可以得到幅值、相位/频率的传递函数:

$$G_A(s) = \frac{\frac{\mu_1}{2}}{s + \frac{\mu_1}{2}} \quad (2)$$

$$G_{\omega\varphi}(s) = \frac{\frac{\mu_3 A_0}{2}s + \frac{\mu_2 A_0}{2}}{s^2 + \frac{\mu_3 A_0}{2}s + \frac{\mu_2 A_0}{2}} \quad (3)$$

其中 A_0 为输入信号的幅值。采用自适应方法对锁相环的增益进行调整,将 μ_2 用 $\bar{\mu}_2$ 代替可得自适应调整方法:

$$\bar{\mu}_2 = \frac{\mu_2}{1 + \lambda \left(\frac{e}{A} \right)^2} = \frac{\mu_2 A^2}{A^2 + \lambda e^2} \quad (4)$$

其中 λ 为一个正常数,其中自适应增益 $\bar{\mu}_2$ 随着信号的误差增大而减小,当输入信号差为 0 时 $\bar{\mu}_2 = \mu_2$ 。自适应增益 $\bar{\mu}_2$ 的平均值小于 μ_2 ,因此系统的带宽响应变小,稳态精度提高,降低了由相位突变引起的频

率瞬变,提高了相位信息的获取速度,保证了 APF 时域模型适用于谐波含量高的环境。

图 2 中 i_a, i_b, i_c 为检测的负载电流,经过 Clark 变换矩阵 C_{32} 和 Park 变换矩阵 C 后得到 i_p, i_q ,计算过程如式(5)所示。

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = CC_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

负载的谐波电流 i_{ah}, i_{bh}, i_{ch} 通过式(6)得到:

$$\begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \\ i_{ch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - C_{23} C^{-1} \begin{bmatrix} \bar{i}_p + i_{dc} \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 \bar{i}_p, \bar{i}_q 为 i_p, i_q 经过低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)后输出的负载基波电流; i_{dc} 为直流侧电容稳压指令电流; $C_{23} C^{-1}$ 为矩阵 $C_{32} C$ 的逆矩阵。

将谐波电流取反可得到 APF 输出的补偿电流,由此可得 APF 的时域模型:

$$I_F^m = (I_{Fa}^m, I_{Fb}^m, I_{Fc}^m) \quad (7)$$

其中 I_F^m 为 APF 在接入母线 m 处输出的补偿电流。式(7)确定的补偿电流为连续的补偿电流,但是在实际应用中,APF 的容量为离散值,为了将连续的补偿电流离散化,对 APF 的时域模型进行修正:

$$I_{DF}^m = I_F^m K_c \quad (8)$$

其中 I_{DF}^m 为 APF 输出的离散化补偿电流; K_c 为容量离散化的修正因子,通过式(9)计算:

$$K_c = \frac{S_b}{I_F^m} \text{int} \left(\frac{I_F^m}{S_b} \right) \quad (9)$$

其中 S_b 为人为划分的基本单位容量,为了计算的简便,使用 APF 容量的标么值,本文中选为 0.05, int 函数为上取整函数。经过修正的 APF 容量为基本单位容量的整数倍。例如,如果计算所得 APF 的最优容量为 0.27,那么修正后 APF 的容量即为 0.3。

1.2 目标函数和约束条件

在 APF 实际工程应用中,一般需要考虑谐波的治理效果和项目的投资成本两个因素。煤矿井下电网谐波治理的目标即是在全网谐波畸变符合要求的约束下,最大的降低谐波治理的投资成本。投资成本应包含两种,一种为固定成本,即安装一台 APF 需要的安装费用,独立于 APF 的容量,一般为常数;另一种是容量成本,随着 APF 容量成比例的增加。基于以上考虑,谐波治理的目标函数可建立为

$$OF = C_{fc} N + C_{uc} \sum_{n=1}^N S_n \quad (10)$$

式中, OF 为井下电网谐波治理的投资总成本; C_{fc} 为

安装一台 APF 需要的固定成本(fixed cost, fc); N 为需要安装的 APF 的总数量; C_{uc} 为 APF 容量的单位成本(unit cost, uc); S_n 为每个 APF 的容量。

谐波电流在煤矿井下电网中流动,引起各母线节点电压产生畸变,通常使用电压谐波畸变率(Total Harmonic Distortion, THD)用来衡量电压波形的畸变程度,定义为

$$THD = \frac{1}{|v_1|} \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} |v_n|^2} \quad (11)$$

其中 v_1 为节点电压的基波分量; v_n 为节点电压的谐波分量; n 为谐波次数。单次谐波含有率(Harmonic Ratio, HR)用来衡量电压波形中的单次谐波含量,定义为

$$HR = \frac{|v_n|}{|v_1|} \quad (12)$$

IEEE-519 推荐电网中 69 kV 电压以下最高的电压谐波畸变率应小于 5%,同时,最高的单次谐波含有率应小于 3%。煤矿电网电压等级在 69 kV 电压内,因此,本文选取此推荐标准作为煤矿井下电网谐波治理的约束条件,即有:

$$THD_m \leq 5\% \quad (13)$$

$$HR_m \leq 3\% \quad (14)$$

式中 m 为第 m 条母线。

2 APF 接入位置和容量的选择

2.1 粒子群优化算法简介

粒子群优化算法(Particle Swarm Optimization, PSO)是受到自然界中鸟群搜索食物行为启发而提出的一种寻求最优解的寻优算法,自提出之后,由于其概念简明、容易实现,成为研究的热点并在各行各业得到应用。

PSO 通过群体之间的信息共享和个体的自身经验总结来修正个体行动策略,最终求取优化问题的解^[21]。在 PSO 中,问题的每个解都可形象的表示为搜索空间的一只“鸟”,称为粒子。PSO 初始化为一群随机粒子,然后通过迭代寻求问题的最优解。在每一次的迭代中,粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己:第 1 个极值就是粒子本身所找到的最优解,这个极值称为个体极值 p_{best} ,可以视为粒子的自身经验;第 2 个极值就是整个种群目前寻找到的最优解,这个极值为全局极值 g_{best} ,可以视为群体经验。

2.2 APF 接入位置和容量选择步骤

将式(8)中计算得到的 APF 输出补偿电流作为 PSO 中的粒子变量进行寻优,经过以下步骤确定井下电网中 APF 接入位置和容量的最优值:

(1) 参数初始化, 包括煤矿井下电网结构参数输入、粒子群的规模、粒子群变量的初始值、惯性权重值、学习因子等参数。

(2) 初始化后, 可以计算 APF 的补偿电流和井下电网的导纳矩阵, 电网接入 APF 后各母线的谐波电流可以通过式(15)确定:

$$\mathbf{I}_{\text{bus}}^h = \mathbf{I}_{\text{apf}}^h + \mathbf{I}_{\text{nld}}^h \quad (15)$$

其中 $\mathbf{I}_{\text{bus}}^h$ 为电网接入 APF 后各母线的谐波电流向量; $\mathbf{I}_{\text{apf}}^h$ 为 APF 输出的补偿电流向量; $\mathbf{I}_{\text{nld}}^h$ 为未接入 APF 前的各母线谐波电流向量。由电网导纳矩阵可以得到各母线的谐波电压:

$$\mathbf{V}_{\text{bus}}^h = \mathbf{Y}_{\text{bus}}^{-h} \times \mathbf{I}_{\text{bus}}^h \quad (16)$$

其中 $\mathbf{V}_{\text{bus}}^h$ 为接入 APF 后各母线的谐波电压; $\mathbf{Y}_{\text{bus}}^h$ 为对应 h 次谐波的导纳矩阵。根据式(16)、(10)中的目标函数以及式(13)、(14)中的约束条件都可以计算出来。

(3) 根据目标函数的值更新个体极值 p_{best} , 若在此次迭代过程中, 目标函数的值小于上次迭代目标值, 更新个体极值, 否则, 不更新, 如式(17)所示。

$$p_{\text{best}}^{k+1} = \begin{cases} p_{\text{best}}^k & \text{if } \text{OF}_j^{k+1} \geq \text{OF}_j^k \\ X_j^{k+1} & \text{if } \text{OF}_j^{k+1} < \text{OF}_j^k \end{cases} \quad (17)$$

式中 k 为迭代次数; OF_j 为与粒子 j 相关的目标函数值; X_j 为与粒子 j 相关的 APF 输出的补偿电流。

(4) 根据目标函数的值更新全局极值, 若在此次迭代过程中, 目标函数值小于上次迭代目标值, 更新全局极值, 否则, 不更新, 如式(18)所示。

$$g_{\text{best}}^{k+1} = \begin{cases} g_{\text{best}}^k & \text{if } \text{OF}^{k+1} \geq \text{OF}^k \\ p_j^{k+1} & \text{if } \text{OF}^{k+1} < \text{OF}^k \end{cases} \quad (18)$$

式中 g_{best} 为全局极值。

(5) 粒子通过个体经验和群体经验决定下一步的行动, 依据式(19)不断的调整自身速度, 直至满足收敛条件:

$$\mathbf{V}_j^{k+1} = w \mathbf{V}_j^k + c_1 \text{rand}() (\mathbf{p}_{\text{best}}^k - \mathbf{X}_j^k) + c_2 \text{Rand}() (\mathbf{g}_{\text{best}}^k - \mathbf{X}_j^k) \quad (19)$$

其中 \mathbf{V}_j^k 为第 k 次迭代时, 粒子 j 的自身速度; w 为惯性权重; c_1 、 c_2 为加速系数或者称为学习因子; $\text{rand}()$ 、 $\text{Rand}()$ 为两个在 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数。可以看出, 粒子 j 通过 3 个值来更新自身的速度: 粒子 j 前一时刻的速度、粒子 j 当前值与自身历史最优值之间距离、粒子 j 当前值与群体最优值之间的距离。式(19)中第 1 部分称为动量部分, 表示粒子对当前自身状态的信任, 为粒子提供了一个必要动量, 使其依据自身的速度进行惯性运动; 第 2 部分为个体认知部分, 代表了粒子自身的思考行为, 鼓励粒子寻求自身

的最优值; 第 3 部分为社会认知部分, 表示粒子间的信息共享与合作, 引导粒子飞向粒子群中的最优位置^[23]。

在搜索过程中, 全局搜索能力与局部搜索能力的平衡对于算法的优化性能起着至关重要的作用, 惯性权重 w 的引入即为实现两者的平衡。较大的 w 有利于提高算法的收敛速度, 而较小的 w 则可以有效地提高算法的收敛精度。本文采用了惯性权重 w 随着迭代次数的增加而线性减少的方法:

$$w = w_{\text{max}} - \frac{w_{\text{max}} - w_{\text{min}}}{\text{iter}_{\text{max}}} \text{iter} \quad (20)$$

式中 w_{max} 和 w_{min} 分别为惯性权重的最大值和最小值; iter_{max} 为迭代次数的最大值; iter 为当前迭代次数。

粒子通过式(21)更新自身的位置:

$$\mathbf{X}_j^{k+1} = \mathbf{X}_j^k + \mathbf{V}_j^{k+1} \quad (21)$$

(6) 若当前迭代次数达到最大的迭代次数或者在目标值变化小于设定值, 步骤终止得到结果, 否则, 回到步骤(2)。

3 算 例

为了验证所述方法的正确性, 以我国某煤矿的井下电网为基础, 确定有源电力滤波器在井下电网中最优的接入位置和容量。图 3 为该矿井下电网简图。

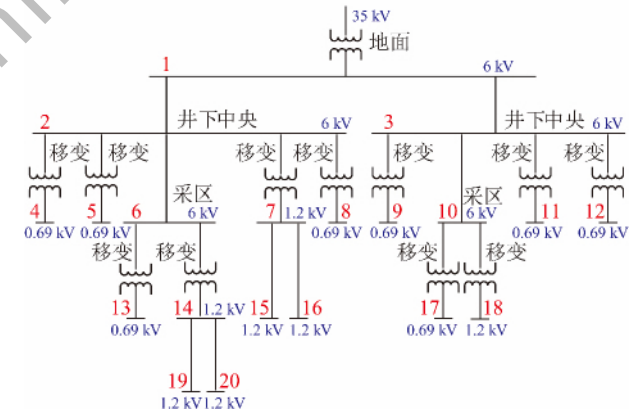


图 3 某煤矿供电系统简图

Fig. 3 Simplified power system of a coal mine

该矿的井下电网进线由煤矿广场 35 kV 地面变电站内的(双绕组主变型号为 SF7-31500/35 ± 2 × 2.5% / 6.3 kV) 低压 6 kV 侧配电柜提供。图 3 中母线 1 代表地面变电站配电柜低压侧母线, 其余各条母线代表井下各个变电站处母线或者隔爆型移动变压器低压侧的母线。使用了 Matlab 软件进行了建模仿真, 对文中所提方法进行了验证。

首先分析优化算法的收敛性。使用的粒子群算法参数如下: 种群大小 N 为 300, 惯性权重按线性递减策略从最大值 0.9 到最小值 0.4, 加速因子 c_1 、 c_2 的

值都为 2.0 ,最大迭代次数为 300 ,算法使用 Matlab 软件编写 ,计算结果如图 4 所示 ,由图 4 可以看出 ,在 100 次迭代后 ,该优化算法可以收敛到满意的最优解。

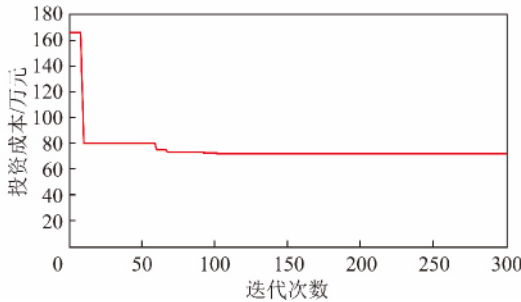


图 4 优化算法的收敛性

Fig. 4 Convergence characteristic of optimal algorithm

在不考虑使用优化算法的前提下 ,谐波治理的普遍方法是在每一个非线性负载侧安装 APF。在此方法下 ,谐波畸变值可以降到最低 ,但是投资成本会很高;使用优化算法确定 APF 的接入位置和容量 ,不仅可以保证谐波畸变程度符合标准 ,而且可以有效的降低投资成本。首先比较两种不同治理方法下的谐波治理效果及 APF 的容量。电网中未安装 APF、非线性负载侧均安装 APF、使用优化算法安装 APF 三种情况下电压的总谐波畸变率见表 1。

由表 1 中可以看出 ,未安装 APF 时 ,井下电网中的谐波污染较为严重 ,母线 7、11、15、16、17、19、20 的 THD 均超过了规定的 5% ,在母线 15、16 处具有最大值 9.62%;在非线性负载侧均安装 APF 的法后 ,各母线的 THD 都有大幅度的降低 ,谐波治理效果最优 ,母线 15、16 的 THD 降到 2.3% 左右;依据粒子群优化算法安装 APF 后 ,各母线的 THD 降低幅度较小 ,但是所有母线的 THD 都在标准 5% 以下 ,母线 15、16 的 THD 在 4.96% 左右。两种谐波治理方法下 APF 的安装位置及未离散化的 APF 的容量值(100 A 为基准)见表 2 ,其中“-”表示在该母线处没有安装 APF。

由表 2 可以看出 ,使用粒子群优化算法后 APF 的容量从 4.786 pu 降到了 2.15 pu。依据市场价格 ,本文假设在煤矿井下安装一台隔爆型 APF 时需要的固定成本约为 8 万元 ,每单位(per unit ,pu)的容量成本约为 22 万元。使用粒子群优化算法计算并将 APF 的容量离散化后可以得出:在母线 7、11、14 处分别安装容量为 0.0 pu、0.9 pu、0.35 pu 的 3 台 APF 即可。两种谐波治理方法需要的 APF 的总容量和目标成本见表 3。

表 1 各母线的电压谐波畸变率

Table 1 THDs in different buses %

母线	未安装 APF	非线性负载侧均安装 APF	粒子群优化算法安装 APF
1	0.86	0.18	0.57
2	1.97	0.41	1.14
3	1.37	0.28	0.97
4	2.31	0.55	1.42
5	2.29	0.55	1.40
6	2.05	0.43	1.19
7	7.30	1.77	3.88
8	2.12	0.40	1.18
9	1.53	0.35	1.12
10	1.43	0.32	1.03
11	8.17	2.08	4.88
12	1.30	0.29	1.43
13	2.35	0.57	1.34
14	6.26	1.58	4.07
15	9.62	2.29	4.96
16	9.62	2.30	4.97
17	6.04	1.53	4.76
18	3.83	1.01	3.66
19	6.92	1.75	4.77
20	9.94	2.41	4.57

表 2 APF 容量

Table 2 Rating of APF pu

母线	非线性负载侧均安装 APF	粒子群优化算法安装 APF
7	-	0.9
11	1.541	0.9
14	-	0.35
15	0.683	-
16	0.683	-
17	0.871	-
18	0.316	-
19	0.354	-
20	0.338	-
总容量	4.786	2.15

表 3 容量及投资成本比较

Table 3 Comparison of rating and cost

方法	总容量/pu	投资成本/万元
非线性负载侧均安装 APF	4.95	164.9
粒子群优化算法安装 APF	2.15	71.3

由表 3 可以看出 ,使用粒子群优化算法后 ,投资成本从 164.9 万元降到了 71.3 万元。

综合表 1~3 可以得出结论:煤矿井下电网中存在较为严重的谐波污染问题 ,若在线性负载侧均安

装 APF, 谐波畸变可以降至最低, 但是 APF 的总容量和投资成本分别达到了 4.95 pu 及 164.9 万元。而使用粒子群优化算法安装 APF 后, 谐波畸变程度接近标准 5%, 但是总容量和投资成本分别降低了 56.6% 和 56.8%。由此可知, 使用粒子群优化算法安装 APF 为在井下电网的谐波畸变符合标准的约束下, 牺牲了一定的谐波治理效果来换取投资成本的降低。在谐波畸变程度要求更低的工程中, 只需将约束条件中 THD 和 HR 的值降低即可。

4 结 语

提出了确定煤矿井下电网中有源电力滤波器最优接入位置和容量的计算方法, 在保证谐波畸变符合标准的基础上, 有效的降低了谐波治理的投资成本。其中, 基于瞬时无功功率的离散化 APF 模型避免了谐波次数的限制, 简化了计算过程; 基于固定成本和容量成本的优化模型更加符合工程实际, 从而保证使用粒子群算法所得最优解更加接近实际问题的解。最后在理论分析的基础上对该计算方法进行了仿真验证。仿真结果证明了本文所述方法的正确性, 论文后续工作为该算法在煤矿井下电网中的工程验证。

参考文献:

- [1] Wang Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines[J]. International Journal of Coal Science & Technology 2014, 1(3): 253 - 260.
- [2] 宋虎, 焦文良, 全吉男. 顺序控制的矿井直流提升机谐波电流分析[J]. 煤炭学报 2002, 27(6): 661 - 664.
Song Hu, Jiao Wenliang, Quan Ji'nan. Study on harmonic current caused by mine DC-elevator sequencing control[J]. Journal of China Coal Society 2002, 27(6): 661 - 664.
- [3] 王社平, 刘建功, 祁泽民, 等. 邢东煤矿绿色矿山建设集中技术[J]. 煤炭科学技术 2009, 37(11): 125 - 128.
Wang Sheping, Liu Jiangong, Qi Zemin, et al. Integrated technology of green mine construction in Xingdong Mine[J]. Coal Science and Technology 2009, 37(11): 125 - 128.
- [4] 任子晖, 仇润鹤, 张艳. 煤矿电网谐波分析模型的建立与滤波器设计[J]. 中国矿业大学学报 2004, 33(1): 45 - 49.
Ren Zihui, Qiu Runhe, Zhang Yan. Formation of power system harmonic model of mine and design of harmonic filter for mine hoister[J]. Journal of China University of Mining & Technology 2004, 33(1): 45 - 49.
- [5] 陈辉, 张帆, 李靖兆. MG900/2210 - WD 采煤机牵引系统谐波仿真分析[J]. 煤炭科学技术 2013, 41(5): 93 - 96.
Chen Hui, Zhang Fan, Li Jingzhao. Analysis on harmonic simulation of haulage system for MG900/2210 - WD coal shearer[J]. Coal Science and Technology 2013, 41(5): 93 - 96.
- [6] 王雪丹. 矿井提升机用串联谐振有源电力滤波器 PWM 控制策略研究[J]. 煤炭学报 2010, 35(2): 338 - 341.
Wang Xuedan. Research on PWM control strategies of active power filter with series resonance designed for mine hoists[J]. Journal of China Coal Society 2010, 35(2): 338 - 341.
- [7] 杜少通, 伍小杰, 魏琛, 等. 新型无变压器型并联有源电力滤波器[J]. 电工技术学报 2013, 28(12): 1 - 7.
Du Shaotong, Wu Xiaojie, Wei Chen, et al. New transformerless-shunt hybrid active power filters[J]. Transaction of China Electrotechnical Society 2013, 28(12): 1 - 7.
- [8] 刘扬. 矿用标准化电能质量治理模块关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学 2014: 6 - 7.
Liu Yang. Key technology research on power quality module of mine[D]. Xuzhou: China University of Mine and Technology 2014: 6 - 7.
- [9] 陈仲, 王志辉, 李梦南, 等. 交错降压式全桥有源电力滤波器[J]. 中国电机工程学报 2013, 33(30): 34 - 40.
Chen Zhong, Wang Zhihui, Li Mengnan, et al. Interleaved buck full-bridge active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(30): 34 - 40.
- [10] Grady W M, Samotyj M J, Noyola A H. Minimizing harmonic voltage distortion with an active power line conditioner[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1690 - 1697.
- [11] Grady W M, Samotyj M J, Noyola A H. The application of network objective functions for actively minimizing the impact of voltage harmonics in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1379 - 1386.
- [12] Chang W K, Grady W M, Samotyj M J. Meeting IEEE - 519 harmonic voltage and voltage distortion constraints with an active power line conditioner[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1531 - 1537.
- [13] Chang W K, Grady W M, Samotyj M J. Controlling harmonic voltage and voltage distortion in a power system with multiple active power line conditioners[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1670 - 1676.
- [14] Chang W K, Grady W M. Minimizing harmonic voltage distortion with multiple current-constrained active power line conditioners[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 837 - 843.
- [15] 帅智康, 罗安, 祝文姬, 等. 并联型有源电力滤波器容量和最优安装位置的选择方法[J]. 中国电机工程学报 2009, 29(13): 92 - 98.
Shuai Zhikang, Luo An, Zhu Wenji, et al. Study on the size and optimal location of shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE 2009, 29(13): 92 - 98.
- [16] Hong Y Y, Chang Y K. Determination of locations and sizes for active power line conditioners to reduce harmonics in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1610 - 1617.
- [17] 帅智康, 罗安, 涂春鸣, 等. 并联混合型有源电力滤波器的最优安装点[J]. 中国电机工程学报 2008, 28(27): 48 - 55.
Shuai Zhikang, Luo An, Tu Chunming, et al. Optimal placement of hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 48 - 55.

- [18] Keypour R, Seifi H, Yazdian-Varjani A. Genetic based algorithm for active power filter allocation and sizing[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 71(4): 41–49.
- [19] 余健明, 李春莹. 基于多谐波源动态运行的配电网滤波装置优化配置[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 22–26.
Yu Jianming, Li Chunying. Optimal filter allocation of distribution network based on multiple harmonic sources dynamic running[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 22–26.
- [20] Ziari I, Jalilian A. A new approach for allocation and sizing of multiple active power-line conditioners[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1026–1035.
- [21] Ziari I, Jalilian A. Optimal placement and sizing of multiple APLCs using a modified discrete PSO[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 630–639.
- [22] 赵波, 曹一家. 电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 1–7.
Zhao Bo, Cao Yijia. A multi-agent particle swarm optimization algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 1–7.
- [23] 何娜, 黄丽娜, 武建, 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算法[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 of hybrid active power filter based on particle swarm optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 63–69.