

工业应用

混合滤波补偿装置在矿井提升机配电系统中的应用

李忠^{1,2}, 刘飞³, 张飞^{1,2}, 汤向华⁴, 陈斌⁴, 刘向东^{1,2}

(1. 南京国臣直流配电科技有限公司, 江苏 南京 211110; 2. 江苏省电能质量检测分析工程技术中心, 江苏 南京 210012;
3. 江苏省南通供电公司, 江苏 南通 226001; 4. 江苏省海门供电公司, 江苏 南通 226100)

摘要: 针对矿井配电系统中的负荷特点, 对采用交流变频调速控制的矿井提升机系统产生的无功冲击和谐波污染进行了专项测试, 结果表明其功率因数偏低、无功波动大、谐波污染严重超过国家标准要求, 迫切需要治理。文章从性能和成本角度出发综合比较了有源滤波器 (APF)、动态无功补偿装置 (TSC) 和 “APF+TSC” 装置 3 种治理补偿方案。针对项目实际情况, 提出 APF+TSC 的混合治理方案并阐述了混合滤波补偿方案在非线性和冲击性负荷的电能质量治理上的优势。工程实施后的现场测试结果验证了本文治理方案的有效性。

关键词: 电能质量; 谐波; 无功; 有源滤波器; 无源滤波器

中图分类号: TM714.2; TD534

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2017)06-0073-04

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2017.06.015

Hybrid Filter Compensation Device Applied in Mine Hoist Power Distribution System

LI Zhong^{1,2}, LIU Fei³, ZHANG Fei^{1,2}, TANG Xianghua⁴, CHEN Bin⁴, LIU Xiangdong^{1,2}

(1. Nangjing Golden DC Distribution Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211110, China; 2. Jiangsu Province Power Quality Inspection and Analysis Engineering Technology Research Center, Nanjing, Jiangsu 210012, China; 3. Jiangsu Province Nantong Power Supply Company, Nantong, Jiangsu 226001, China; 4. Jiangsu Province Haimen Power Supply Company, Nantong, Jiangsu 226100, China)

Abstract: According to the load characteristics of mine distribution system, it tested the pollutions of non-active power and harmonics produced by mine upgrade machine system with AC frequency conversion speed control. Test results show that not only its power factor is lower, but also its non-active power fluctuation is larger. In addition, the harmonic pollution exceeds limits seriously according to the national standards requirements. Three schemes based on active power filter (APF) and/or thyristor-switched capacitor (TSC) were given. By comparing the performance and cost of these schemes, the advantages of hybrid power filter compensation in power quality management of nonlinear impulse load are clarified. The effectiveness of the scheme mentioned is verified by practical test on site.

Keywords: power quality; harmonic; reactive power; active power filter; passive power filter

0 引言

随着各种非线性和时变性电子装置、变频调速装置、整流装置、开关电源等的大规模应用^[1-3], 其所产生的谐波和无功冲击导致电网电能质量严重下降, 不仅影响供、用电设备的安全运行, 而且增加了工业能耗成本。

目前, 中国电能质量治理产品市场规模迅速增长, 行业问题也不断显现: 对新用户电能质量预评估不足;

治理方案设计草率; 治理效果不佳, 用户重复投资; 缺乏电能质量危害的经济性评估标准; 缺乏对用户电能质量治理的奖惩措施; 用户对电能质量治理认识的缺乏等。这些问题限制了行业的进一步发展^[4-5], 而对用户电能质量的评估和治理方案的选择是决定电能质量治理效果优劣的关键。

本文以某锑盐公司矿山配电项目为例, 从性能、成本角度分别比较了动态补偿滤波装置 (thyristor-switched capacitor, TSC)、有源滤波器 (active power filter, APF) 和 APF+TSC 这 3 种方案的优劣, 并阐述了 APF+TSC 混合滤波补偿装置针对非线性冲击负荷的

收稿日期: 2017-07-13

作者简介: 李忠 (1973-), 男, 高级工程师, 主要从事电能质量测试分析和治理设备的研究开发。

电能质量治理效果的优势。

1 矿山配电概况

该锑盐公司拥有一座特大型保有资源储量为240多万t的天青石稀有矿山,并集矿石开采、提炼、研发、化工于一体,其锑盐化工产品年生产能力为2.5万t。矿区内共有不同工艺生产车间配电室5个,其中烟气除尘、矿山提升机、化工3个配电室均具有大量变频负载,尤其是矿山提升机,谐波超标、无功冲击大,严重干扰矿井下其他设备用电,影响生产安全。其标配的电容补偿装置不仅将谐波放大,而且电容由于自身过流运行经常损坏,造成力率调整电费大幅增加、工业耗电成本增加。

该公司主要配电接线如图1所示。其中,提升机配电室由10kV供电线供电,配电变压器容量为800kVA,额定电压为10kV/0.4kV,短路阻抗为4.26%;配电变压器主要负载为250kW变频电机、250kW直接启动的风镐空压机以及其他井下照明等设施。提升机负荷特点为:载荷运行周期不定;谐波幅值随机变化;无功冲击,但波动的幅度占系统最大总无功的1/3左右。风镐空压机为直接启动的三相异步电机,无谐波、无功功率大、负荷稳定。

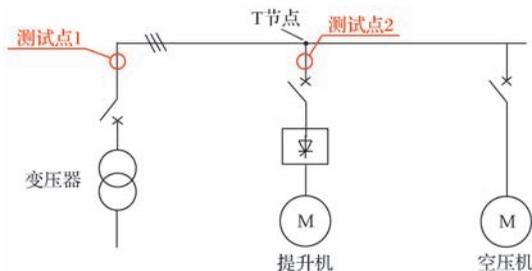


图1 一次侧系统图

Fig. 1 Primary system diagram

2 谐波限值要求及现场测试结果分析

2.1 谐波限值要求

2.1.1 谐波电压

配电变压器低压侧电压、电流、功率因数是测试重点。按照国家标准^[6]规定,公用电网谐波电压(相电压)限值如表1所示。各类谐波源注入系统的各次谐波电流及其在0.4kV母线引起的谐波电压畸变率应小于表1中所列出的限值。

表1 公用电网谐波电压限值

Tab. 1 Harmonic voltage limits for utility networks

电网标称 电压/kV	电压总谐波 畸变率/%	各次谐波电压含有率/%	
		奇次	偶次
0.4	5.0	4.0	2.0

2.1.2 谐波电流

被测提升机配电室由10kV侧供电线供电,最大运行

方式下短路阻抗标么值为0.2685,最小运行方式下短路阻抗标么值为0.7698,该供电线总阻抗标么值为4.2512,该配电室到线路上T节点的阻抗标么值为2.6423。

根据系统最小运行方式计算,10kV侧最小短路容量为13.05MVA,变压器容量为800kVA,短路阻抗4.26%,则0.4kV侧短路容量为7.7MVA。

根据国家标准,接入公共连接点(PCC点)的用户向该点注入的谐波电流不应该超过规定的允许值;允许值需根据PCC点的母线最小短路容量、供电设备容量、用户用电协议容量计算。谐波电流限值计算结果如表2所示。

表2 矿山低压配电室注入电网的谐波电流限值

Tab. 2 Harmonic current limits of power network in the low voltage power distribution room of mine

谐波次数	2	3	4	5	6	7	8	9
谐波电流限值/A	60.06	47.74	30.03	47.74	20.02	33.88	14.63	16.17
谐波次数	10	11	12	13	14	15	16	17
谐波电流限值/A	12.32	21.56	10.01	18.48	14.29	15.58	12.60	23.38
谐波次数	18	19	20	21	22	23	24	25
谐波电流限值/A	11.17	20.78	10.13	11.56	9.22	18.18	8.44	15.58

2.2 测试结果分析

在选择治理方案前,为了解负载工况和准确的电能质量相关参数,通过专业测试仪器对现场进行了电能质量专项测试,测试点如图1所示。图2~图4示出治理前的测试数据。矿山配电室提升机负载周期为5~60s,平均功率因数为0.83,三相有功功率为380kW,三相无功功率在29kvar~260kvar间波动,其余电能质量指标统计数据如表3所示。

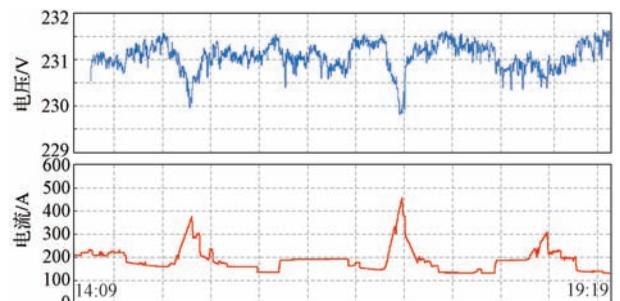


图2 测试点1的电压及电流平均值变化情况

Fig. 2 Mean voltage and current of test point 1

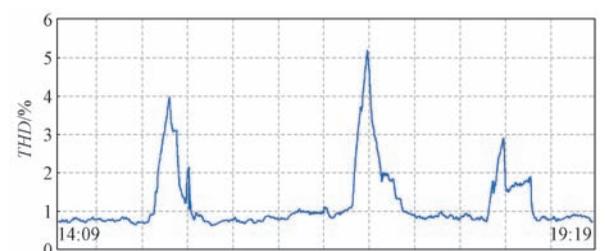


图3 测试点2电压畸变率变化情况

Fig. 3 Distortion rate of 400 V bus voltage of test point 2

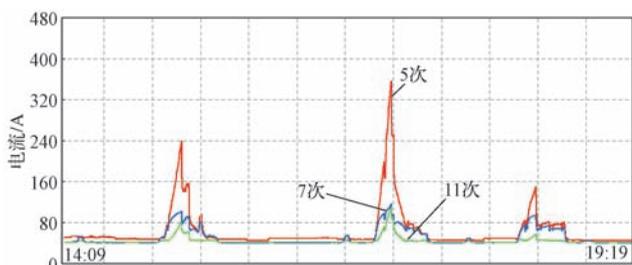


图4 测试点2各次谐波电流有效值变化情况

Fig. 4 Effective values of different order harmonic currents of test point 2

表3 矿山配电室电能质量指标统计

Tab. 3 Power quality index statistics of mine power distribution room

	电压畸变率/%	测试点1 谐波电流/A	
		5次	7次
治理前 CP95 值	4.3 (无背景谐波)	106.4	53.5
治理前瞬时值	2.2~5.7	0~307.6	0~74.1

注：CP95 值——95% 概率最大值。

把表3的实测结果和表1、表2的限值要求进行比较，并结合图2~图4的变化趋势进行分析。可以看出：

- (1) 提升机负荷波动大，变化频繁；
- (2) 电能质量问题主要表现在谐波电流超限和无功冲击；
- (3) 谐波问题主要表现为5次、7次谐波电流超出限值要求，且连续冲击变化；
- (4) 无功冲击虽然存在，但并非所有负荷都是冲击性的，其中一半以上负荷是工况稳定的异步电机。

3 补偿方案选择

3.1 治理目标

为降低电压畸变率，需将谐波电流控制在国标限值内，月平均功率因数达到0.95以上。

3.2 治理方案性价比较

常用的治理方案有TSC和APF。TSC对谐波的吸收调节主要依靠晶闸管动态投切来完成，价格便宜，但整机响应速度较慢^[7]；APF则通过IGBT等功率器件实现对谐波电流的快速补偿，响应速度快^[8-11]，但目前工程造价较高。

本文案例中，提升机的谐波是冲击变化的。TSC因响应速度和性能缺陷而无法满足滤波治理效果的要求；APF的性能和响应时间能够同时满足滤波和无功补偿需求，但同等容量装置成本是TSC方案的6倍，一般客户无法承受；TSC+APF混合方案中，TSC主要功能是滤除部分5、7次谐波，以无功补偿为主，而APF的快速响应和较宽的滤波频谱可以弥补TSC滤波效果不佳的缺陷，且混合方案的成本是TSC方案的2倍左右，是APF方案的1/3，故该案例中采用TSC+APF的混合

方案性价比更合适。各方案性价比较如表4所示。

表4 各方案性价比较

Tab. 4 Comparison of performance-price ratio of each scheme

方案	优点	缺点	成本
TSC	结构简单，单机功率大，无功补偿成本低廉	整机响应时间 ≥ 100 ms，只能滤除特征次谐波，滤波效果受系统阻抗影响而无法保证，有放大谐波和过流风险	成本低廉
APF	整机响应时间 ≤ 10 ms，滤波频谱宽，效率达97%，不受系统阻抗影响	价格昂贵，装置容量小，须牺牲滤波容量	等容量装置是TSC的6倍
TSC+APF	两种滤波器性能互补	价格较TSC贵	等容量装置是TSC的2倍

3.3 设备选型计算

3.3.1 TSC容量计算

本项目方案中，有功功率P为380 kW，补偿前功率因数 $\cos\Phi_1$ 为0.83，补偿后目标功率因数 $\cos\Phi_2$ 为0.96，其补偿基波容量为

$$Q_c = P \times [\text{tg}(\arccos\Phi_1) - \text{tg}(\arccos\Phi_2)] \times 1.26 \quad (1)$$

式中1.26为裕量系数，用于考虑未来负荷扩容和电容衰减。

串联电抗率选为7%，以抑制5次及以上谐波电流。电容器采用三角形接线方式，其工作端电压为

$$U'_c = 1.07U_s + \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} X_{Ch}^2 I_h^2} \quad (2)$$

式中： U_s ——系统额定电压； X_{Ch} ——h次谐波容抗； I_h ——进入电容器的h次谐波电流。

考虑谐波、串联电抗率、基波补偿容量及电压波动因素，电容器额定电压 U_c 取经验值480 V，则电容器装机容量为

$$Q'_c = Q_c \times (U_c / U_s)^2 \quad (3)$$

由式(1)~式(3)计算可得，电容器装机容量为290 kvar，取整后为300 kvar。

3.3.2 APF容量计算

根据表3可知，5次谐波电流统计数据(CP95值)为106.43 A，7次谐波电流统计数据(CP95值)为53.46 A，则APF的额定电流为

$$I_{APF} = \sqrt{I_5^2 + I_7^2} = 119 \text{ A} \quad (4)$$

考虑提升机负荷的冲击特性，对于谐波电流冲击比较大的负荷，有源滤波器容量选择时应适当留有裕度(本工程取值为20%)。实际工程中，结合APF产品规格，

本方案中选择额定电流为 150 A 规格的 APF, TSC 安装在主变低压侧和提升机支路之间, APF 安装在提升机支路开关和提升机之间(图 5)。TSC 采用可控硅开关, 分 4 个分支, 按照 1:2:4:8 比例投切, 控制目标为功率因数和无功容量。

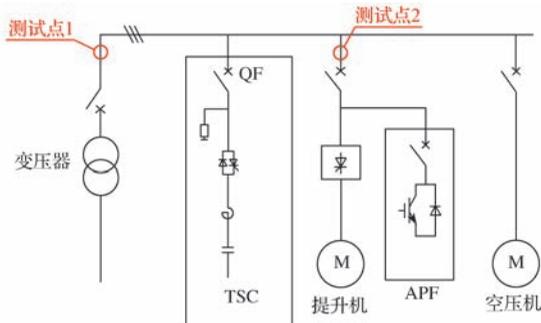


图 5 TSC 和 APF 的安装位置示意

Fig. 5 Schematic diagram of the installation location of TSC and APF

4 运行效果测试分析

TSC+APF 混合滤波补偿装置投运前后各项电能质量参数如表 5~表 7 所示, 电压和电流波形如图 6、图 7 所示。可以看出, TSC+APF 混合滤波补偿装置取得了较好的实践效果, 验证了本文所提混合型治理方案的有效性。

表 5 测试点 1 装置投运前后谐波电压畸变率对比

Tab. 5 Comparison of harmonic voltage distortion rates before and after commissioning of test point 1

投运前	投运后	国标
4.27%	1.96%	5.00%

表 6 测试点 1 装置投运前后谐波电流有效值对比

Tab. 6 Comparison of harmonic current effective values before and after commissioning of test point 1

谐波次数	谐波电流/A		限值
	补偿前	补偿后	
基波	513.34	509.73	—
5 次	104.3	11.134	47.74
7 次	49.97	8.827	33.88
11 次	18.59	4.313	21.56

表 7 测试点 1 装置投运前后功率因数对比

Tab. 7 Comparison of power factors before and after commissioning of test point 1

补偿前功率因数	补偿后功率因数
0.830	0.994

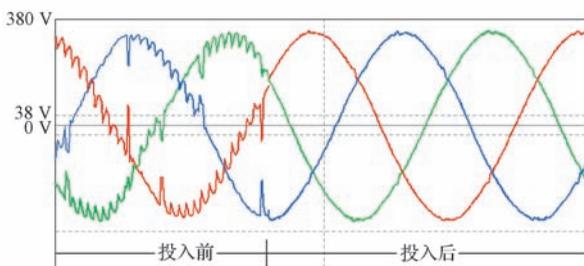


图 6 装置投运前后测试点 2 的电压波形

Fig. 6 Voltage waveforms of test point 2 before and after the device putting into operation

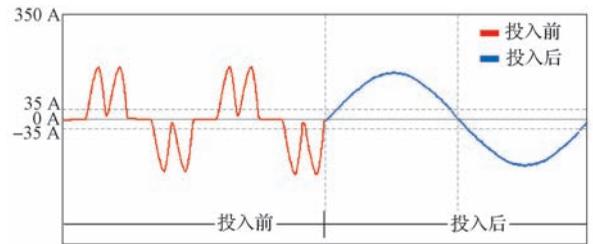


图 7 装置投运前后测试点 2 的电流波形

Fig. 7 Current waveforms of test point 2 before and after the device putting into operation

5 结语

提升机负荷谐波变化非常频繁、幅值连续变化, 因此治理时如果单纯采用传统的 TSC 方案很难满足要求; 而单纯采用 APF 的方案价格偏高, 不利于治理产品的推广和实践。本文采用“APF+TSC”混合型的治理方案既满足了技术要求, 又为用户大大节约了治理成本, 对相同工况下的谐波治理工作具有较大的参考价值。

参考文献:

- [1] 宋晓刚. 电力谐波治理方案 [J]. 上海电力, 2008 (6): 534-537.
- [2] 徐敏敏. 电网的无功补偿与谐波治理 [J]. 电气应用, 2008, 27(13): 21-25.
- [3] XU J M. Reactive Compensation and Harmonic Tackling of Grid [J]. Electrical Applications, 2008, 27 (13): 21-25.
- [4] 姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源电力滤波器 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [5] 吕天文. 中国电能质量治理产品市场现状与分析 [C] // 全国交流电源供电质量及谐波治理技术研讨会. 济南: 中国电源学会, 2008: 1-3.
- [6] 周松伟. 我国公用电网电能质量治理设备的发展及规模分析 [J]. 电力需求侧管理, 2010, 12(1): 5-7.
- [7] ZHOU S W. Analysis of China's public power quality control equipment development and scale [J]. Power Demand Side Management, 2010, 12 (1): 5-7.
- [8] 全国电压电流等级及频率标准化技术委员会. GB/T 14549-1993, 电能质量公用电网谐波 [S].
- [9] 李刚, 樊晓平, 彭劲杰. 低成本的新型混合型有源滤波器 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1): 91-95.
- [10] LI G, FAN X P, PENG J J. Design and Simulation of a Novel Hybrid APF [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2013, 25(1): 91-95.
- [11] 游龙华. 有源电力滤波器在电能质量控制中的应用 [J]. 华东科技: 学术版, 2015 (6): 244.
- [12] CORASANITI V F, BARBIERI M B, ARNERA P L, et al. Comparison of active filters topologies in medium voltage distribution power systems [C] // Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the Century. USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [13] BRIZ F, GARCIA P, DEGNER M W, et al. Dynamic Behavior of Current Controllers for Selective Harmonic Compensation in Three-Phase Active Power Filters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1411-1420.
- [14] 沈攀, 韩杨, JOSEP M. 有源电力滤波器新型拓扑结构及控制策略 [J]. 大功率变流技术, 2015(4): 7-13.
- [15] SHEN P, HAN Y, JOSEP M. New Topologies and Control Strategies for Active Power Filters [J]. High Power Converter Technology, 2015(4): 7-13.