轧机配电系统末端电压谐波抑制及应用

李福川，冉照朝，邓肖燕

（济南轨道交通集团建设投资有限公司，山东 济南 250102）

摘要：针对配电系统非线性负载造成系统电力污染，影响电力系统末端用电装置的正常使用，通过对工业现场电能质量情况的测试分析和建模理论仿真，提出解决配电系统电压污染的方法，并以实际应用为例进行验证。

关键词：有源整流；电压谐波；无源抑制装置；有源阻尼；背景谐波

Suppression and application of terminal voltage harmonic in rolling mill distribution system

LI Fuchuan, RAN Zhaochao, DENG Xiaoyan

（Ji'nan Rail Transit Group Construction Investment Co., Ltd., Jinan 250102, China）

Abstract: Through the test and analysis of the power quality in the industrial field, the modeling theory is simulated, and the influence of the nonlinear load in the distribution system on the power pollution and the normal use of the power equipment at the end of the power system is analyzed, the method of solving voltage pollution in distribution system is put forward and verified by practical application.

Key words: active rectification; voltage harmonics; passive suppressor; active damping; background harmonics

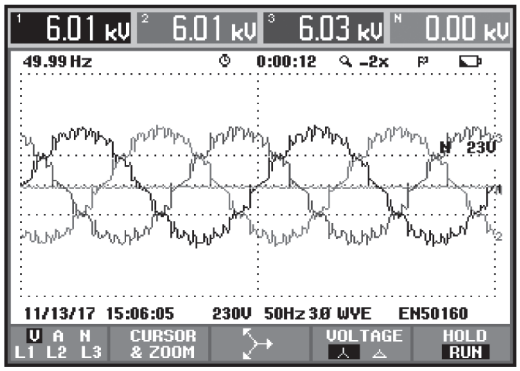
0 引言

随着现代电力电子技术和微电子技术的迅猛发展，高压大功率变频调速装置不断地成熟起来，被广泛地应用于工矿企业的各种风机、水泵、压缩机和轧钢机等。在钢铁冶金行业中随着技术发展，呈现各类冲击性负载设备大型化、设备用电量大的趋势，高压大功率变频调速装置具有优越的调速性能，同时具有运行时功率因数高、谐波电流小的优势，使其在轧钢行业得到了广泛的应用。

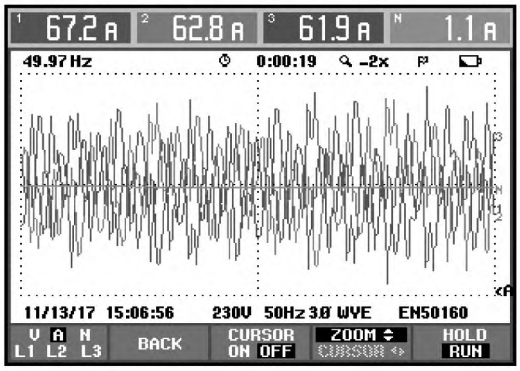
某钢铁企业采用两套中压变频传动系统，中压传动系统采用有源整流方式，产生绝对值基本固定的电流谐波，虽然总谐波电流绝对值较小，但整个配电系统等效阻抗高，使整个配电系统电压畸变较大，通过线路传输影响低压配电用电设备的正常使用，特别是低压设备的数控磨床、不间断电源系统（UPS）和焊机等对电能质量敏感的设备。由于内部有主动电源模块，与系统谐波发生谐振放大，导致后端由于过电压保护经常停机，需要解决系统与负载之间谐振的问题，保证末端数控磨床装置的正常使用。

1 现场情况分析

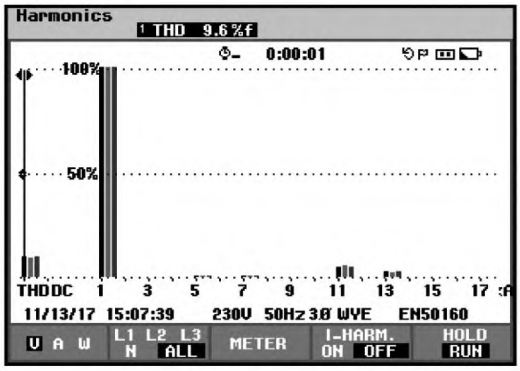
针对中压变频运行后，低压设备无法正常使用频繁保护的问题，对企业的10 kV配电系统进行检测，电能状况如图1所示。变频器电网侧变换器采用前端有源整流的方式，产生的谐波电流为变流器开关时固定含量的电流谐波。变频器运行时谐波电流绝对值不随负载功率增加而线性增加，同时中压变频供电变压器二次侧采用星三角



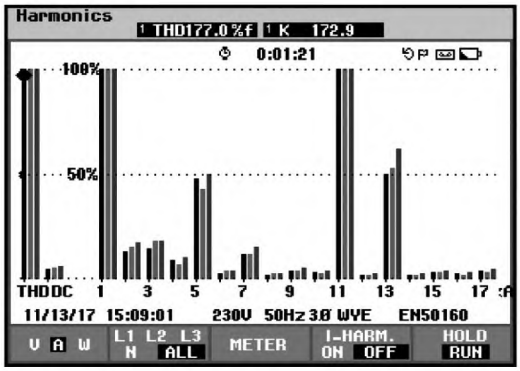
（a）三相电压波形



（b）三相电流波形



（c）电压畸变率



（d）电流畸变率

图 1　10 kV 配电系统电能状况

Fig. 1　Power condition of 10 kV distribution system

双绕组的方式实现12脉冲二极管整流器，在高压侧将5次和7次谐波电流通过移相80%抵消。中压传动两套变频设备都运行时，系统中主要的电流谐波为11次、25次和47次，单套变频器空载运行总电流超过60 A，系统总电流谐波超过100 A。配电系统存在一定的等效阻抗，电流谐波流经系统时由于谐波阻抗原因产生谐波电压。整个系统中阻抗较高，使整个系统10 kV电压畸变率为10%左右。根据趋肤效应和邻近效应原理，谐波阻抗比基波阻抗高很多。交流电流的趋肤深度与频率的二次方根成反比，因此当线路导体的直径或厚度大于2倍趋肤深度时，线路的等效交流电阻将与电流频率或谐波次数的二次方根成反比。故频率越高的电流谐波产生的电压谐波畸变越高。

低压侧数控磨床设备供电通过埋地多芯电缆经10 kV配电室接入，经过变压器将10 kV转换为400 V，给低压设备供电，数控磨床设备由变频器驱动，为了提高输入侧的功率因数，在变频器前端并联主动电源模块，主动电源模块内部由电感电容及电子元器件组成，通过专用IC调整电流的波形，对电流电压间的相位差进行补偿。主动电源模块可以达到较高的功率因数，变频器输入侧基波功率因数可以达到98%以上。而且主动电源模块输出直流电压的纹波很小，其滤波电容容量较小。通过10 kV中压传动不同的工作状态，对低压侧数控磨床设备变频器输入侧电压进行检测，电压波形和电压畸变情况如图2所示。通过图2可以看出，在10 kV中压传动未工作时，数控磨床设备的变频器前端电压波形和状况良好，电压畸变率满足GB/T 14549—1993的电压限制值，低压设备运行正常，数控磨床前端的主动电源模块额定电流为8 A。当中压传动设备运行时，数控磨床的变频器入口电压畸变严重，电压畸变率为19.1%，变频器的主动电源模块回路电流增加4倍，导致变频器数控磨床无法运行。

通过对10 kV中压传动系统和400 V数控磨床系统的检测和分析，中压传动产生1～2 kHz频率的谐波电流，由于配电系统阻抗的存在产生了谐波电压，对低压辅助设备，该谐波电压为背景

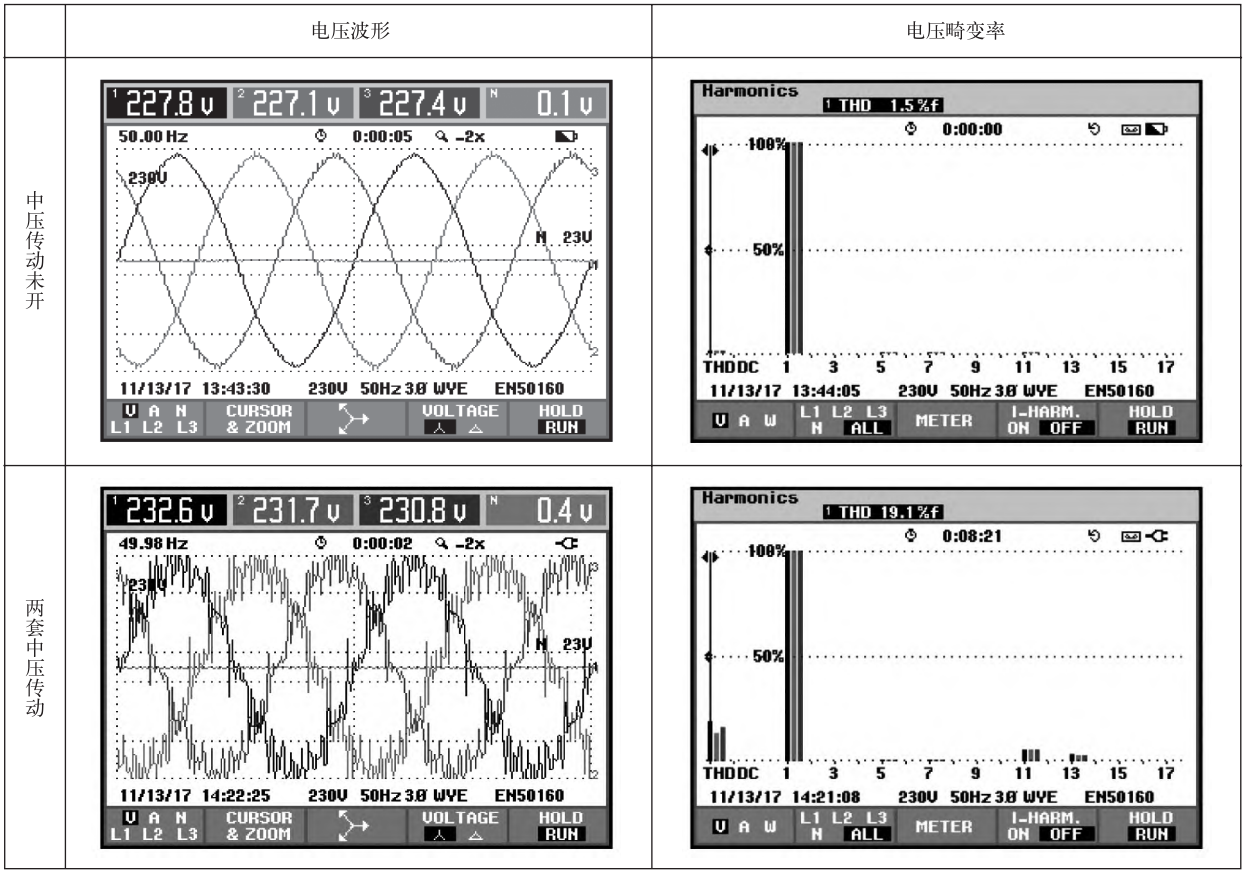


图 2　400 V 磨床电压状况

Fig. 2 400 V grinder voltage condition

谐波，影响整个配电系统的用电质量，同时给低压数控磨床供电的变频器内置的主动电源模块其等效的*LC*频率与中压传动产生的谐波频率谐振放大，使变频器输入侧的电压畸变率翻倍接近20%。

2　系统仿真试验

根据现场测试的10 kV电压各次谐波含量、变频器负载主动电源模块的电流值以及线路距离，搭建仿真系统，模拟现场的实际负载情况。根据线路电缆长度和线径线路等效电感为200 mH，变频器负载主动电源模块8 A左右，推算其负载等效电容容值约为125 μF，根据线路和负载等效参数搭建仿真电路，通过调整系统参数模拟现场实际电压情况，在仿真系统中增加电压谐波抑制装置并进行理论仿真。仿真电路如图3所示，在系统输入侧增加输入电感L_1，使变频器负载主动电源模块的等效*LC*频率下移，与中压传动产生的电压谐波频率段分离，避免其谐振放大。同时在配电系统末端增加无源抑制装置和有源阻尼装置进行效果仿真。无源抑制装置设计为三阶高通滤波器，主要用于吸收系统中的高次谐波，有源阻尼根据检测的电压波形，反相补偿低次的电压谐波。

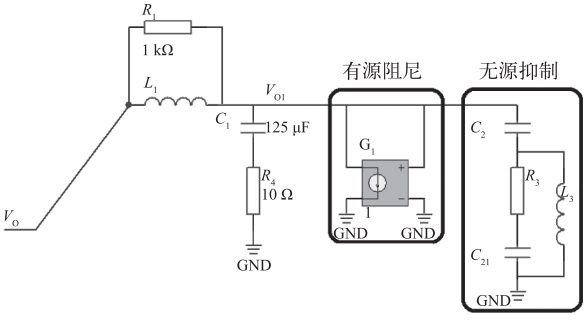
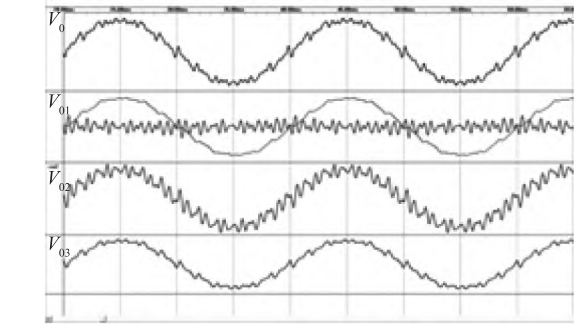


图 3　仿真电路

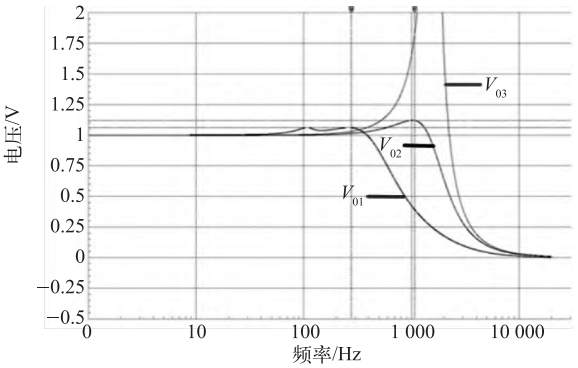
Fig. 3 Simulation circuit

通过Protel99软件进行仿真分析，结果如图4所示。图4a中，V_0为系统电压；V_{01}为理想的治

理输出；V_{02}为负载参数模拟输出；V_{03}为仅加理想的有源阻尼。仿真时采用小信号励磁源1 V，V_{01}放大峰为1.06 V，V_{02}不加措施放大峰达到10 V（1.6 kHz），V_{03}仅加理想的电压谐振抑制放大峰为1.12 V（1 kHz）。从图4b中谐振抑制放大峰可以看出，有源阻尼的谐波电压抑制是理想状态，能达到较好的效果。按照仿真效果配置参数，当有源阻尼或者无源抑制装置单独运行时，也能达到较好的抑制效果，系统能稳定运行。



（a）仿真波形



（b）谐振抑制放大峰

图 4　仿真效果图

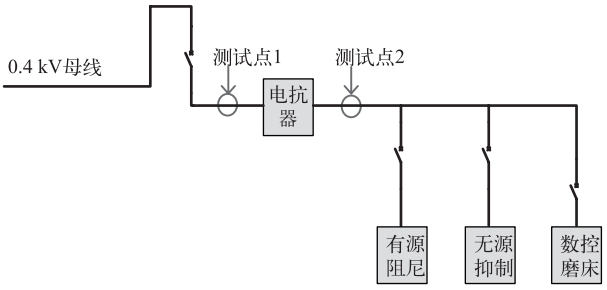
Fig. 4 Simulation effect diagram

3　现场实施案例

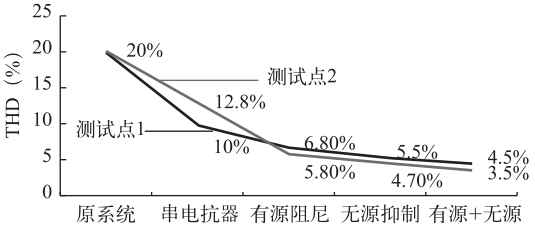
根据仿真试验的结果，参照仿真参数配置无源抑制装置和有源阻尼容量，在低压系统与数控磨床的变频器前端串联电抗器，电感后端并联无源抑制装置和有源阻尼装置，对电抗器两侧电压进行监测，电压谐波抑制装置在不同运行状况下，对数控磨床变频器输入侧电压的抑制情况如图5所示。通过电抗器串联在线路中，使整个系统等效的LC频率点下移，将背景电压谐波和负载产生的电压谐波整体的谐振频率下移；同时可以通过增加系统电感的方式来抑制谐波，降低整个系统的谐波畸变。将有源阻尼、无源抑制装置分别运行和配合运行的状况进行测试。测试电压的电能质量状况如图6所示。

（a）现场运行磨床

（b）现场末端电压抑制装置



（c）测试位置



（d）测试点电压畸变率

图 5　测试情况

Fig. 5　Test cases

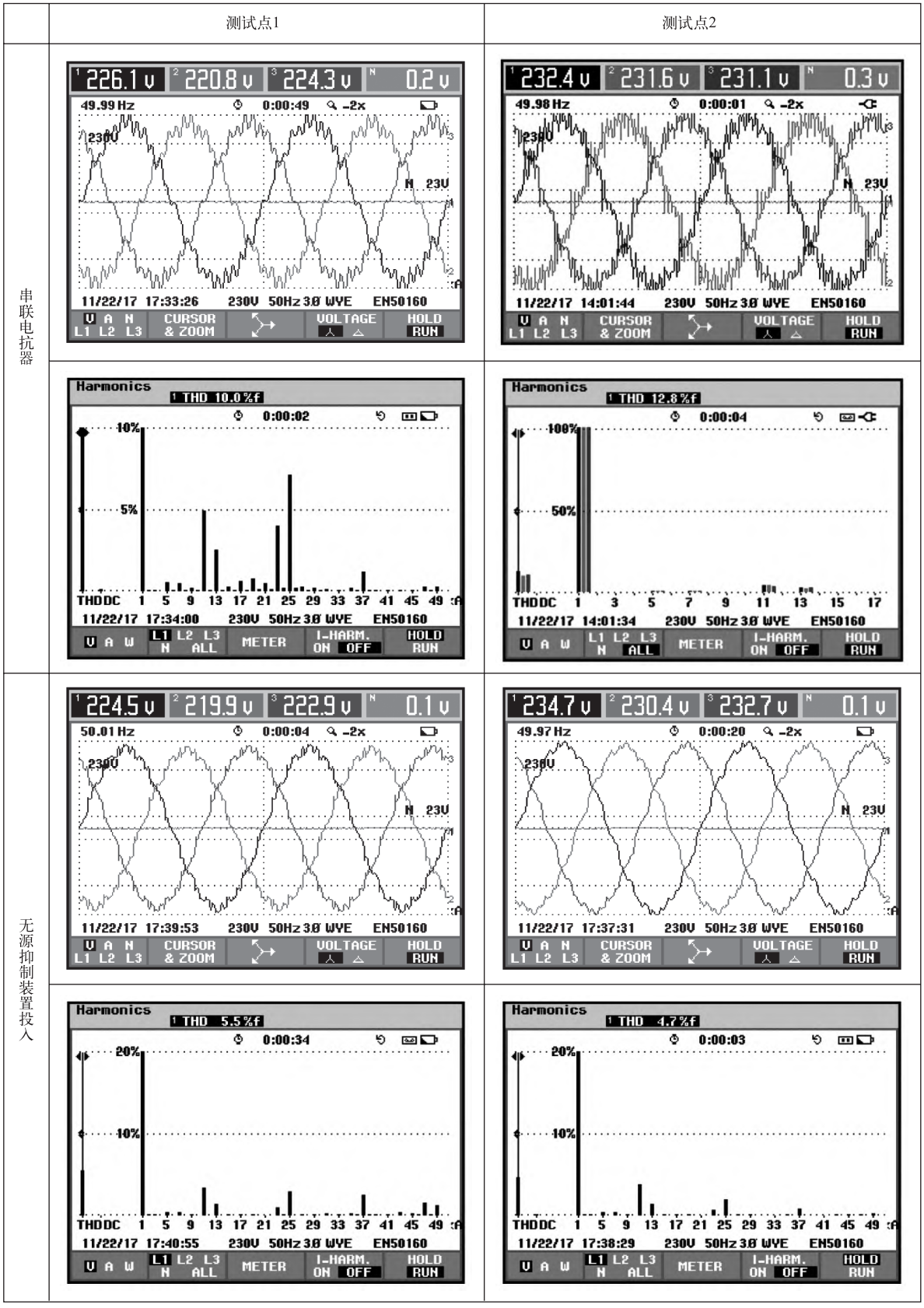


图 6 电能质量状况

Fig. 6 Power quality status

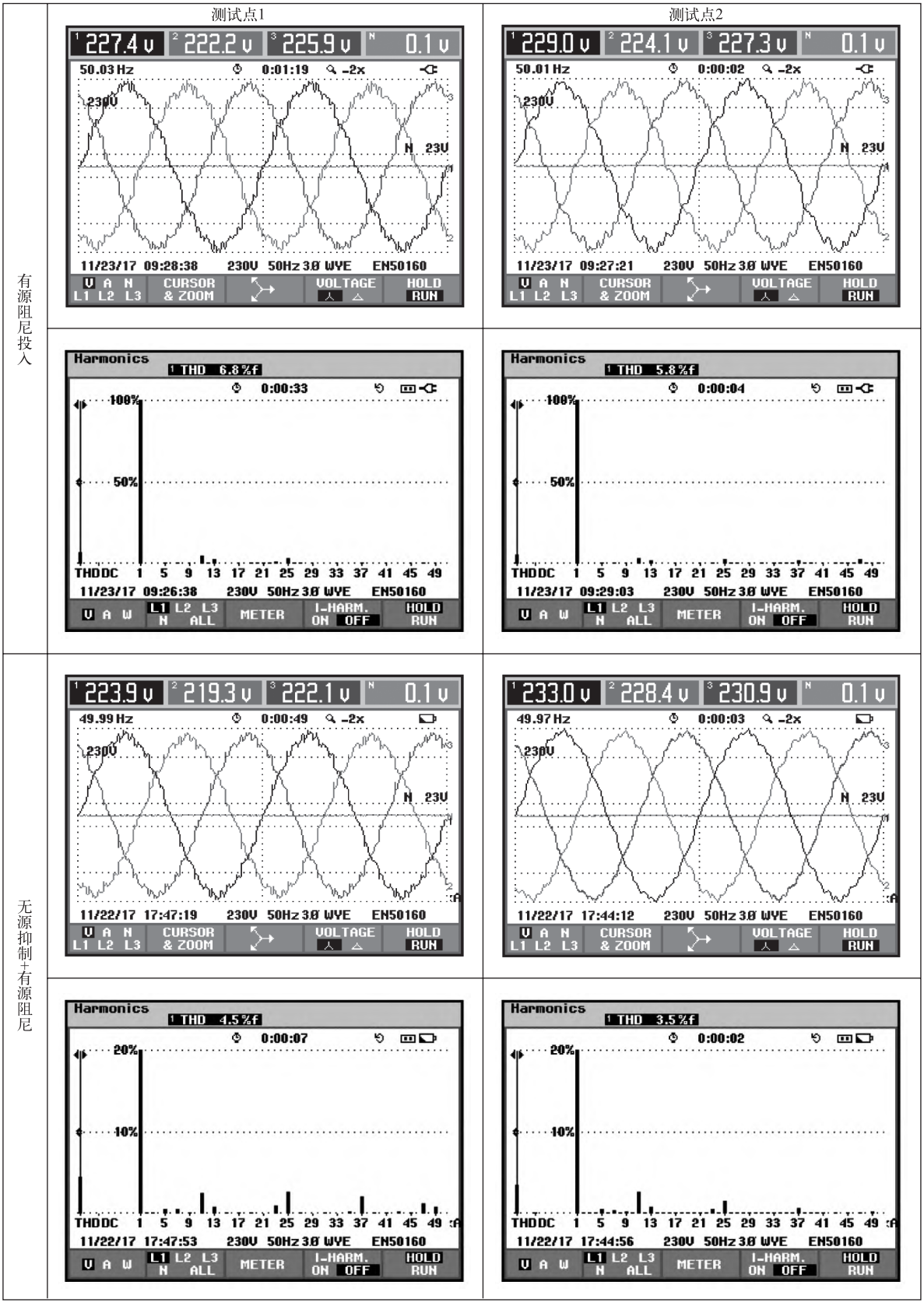


图 6 电能质量状况

Fig. 6 Power quality status

实际仿真和现场工作状况结果一致，中压传动变频装置运行，装置运行时数控磨床前端变频器输入侧电压畸变降低至3.5%，满足GB/T 14549—1993电压畸变5%的限制值，同时变频器内的主动电源模块电流恢复为8 A左右，起动数控磨床后，由于带载后有负载的阻尼作用，测试点两处的电压畸变降至3%以内。数控机床运行正常，未出现过电压报警的现象。解决了电源侧与负载侧谐振的问题。

4 结束语

工业现场中大功率高压电力电子装置的广泛应用，提高了企业的用电效率，同时造成了谐波污染产生背景谐波，使配电系统内其他用电设备的供电电源受到污染，给整个配电系统的供电质量带来安全隐患， 本文在系统末端对系统背景谐波进行有效的抑制，以最佳的性价比投入解决了其电能质量问题，保护了末端用电设备的正常使用。

参考文献

[1] 电能质量 公用电网谐波：GB/T 14549—1993[S].
[2] 罗安．电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]．北京：中国电力出版社，2006.
[3] 张烨林．冶金企业供配电系统电能质量控制[J]．山东工业技术，2016(19)：16-17.

作者简介

李福川（1984—），男，高级工程师，从事轨道交通机电设备设计管理、施工管理等建设工作。

（收稿日期：2021-10-13）