

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.05.013

电源电压严重畸变情况下综合防御装置 在中频感应电炉的现场应用

禄伟, 皇甫灵刚, 赵路飞

(云南驰宏锌锗股份有限公司会泽冶炼分公司, 云南 曲靖 654200)

摘要: 中频感应电炉作为金属熔炼的核心设备,其非线性负载特性导致电网电压严重畸变,表现为谐波含量超标(如5次、7次谐波电流畸变率可达20%以上)、电压波动和功率因数低下。这种电能质量问题不仅影响设备运行效率,还可能引发生产事故。本文结合某冶炼公司2024年实际案例,探讨基于综合防御装置技术的现场应用与效果。

关键词: 中频感应电炉;电源畸变;谐波;电能质量问题;综合防御装置技术

Site Application of Comprehensive Defense Device in Medium Frequency Induction Furnace under Serious Distortion of Power Supply Voltage

LU Wei, HUANGFU Linggang, ZHAO Lufei

(Yunnan Cihong Zinc and Germanium Heti Smelting Branch Company, Yunnan Qujing 654200, China)

Abstract: Medium frequency induction furnace is the core equipment for metal melting. However, its nonlinear load characteristics lead to severe distortion of voltage in the power grid, manifested as excessive harmonic content (such as 5th and 7th harmonic current distortion rates are over 20%), low voltage fluctuations and power factor. This type of power quality issue not only affects operation efficiency of equipment, but may also cause production accidents. In this paper, the on-site application and effectiveness based on comprehensive defense device technology are explored in combination with the actual case of a certain smelting company in 2024.

Keywords: medium-frequency induction furnace; power distortion; harmonic; power quality; comprehensive defense device technology

0 引言

晶闸管中频电源技术的工业化应用起始于1996年,瑞士BBC公司研发的首台晶闸管中频感应熔炼装置标志着该技术进入实用化阶段。经过二十余年的发展,该技术已广泛应用于冶金熔炼、材料热处理、农业加工及环保设备等工业领域。在我国电力系统中,此类装置已成为典型的非线性负载类型,其运行特性导致供电系统产生显著的电能质量问题^[1-6]。

该类设备在实现高效功率调节与能量转换过程中,不可避免地产生非正弦电流波形^[7-10]。研究表明,6脉冲整流结构的中频电源会向公共连接点(point of common coupling, PCC)注入大量特征谐

波,其中5次、7次谐波含量可达基波的20%以上,导致PCC点电压总谐波畸变率(total harmonic distortion rate, THD)普遍超过10%。这种谐波污染不仅引发电网损耗增加,还可能造成继电保护装置误动作、电容器过热损坏等次生危害。

国内工业界为降低谐波干扰,已开发出多脉冲整流技术体系。实验数据表明,12脉冲整流可使5次谐波含量从20%降至4.5%,24脉冲结构更可将THD控制在3%以内。但受限于设备成本,当前90%以上的冶金企业仍采用6脉冲中频炉。

当前,针对中频感应电炉产生的谐波问题,治理手段主要可归纳为两类技术路径^[11-13]。其一为被动式谐波治理策略,该方法聚焦于对已产生谐波的补偿与抑制,通过安装滤波装置等方式改善电网电

能质量;其二为主动式谐波预防策略,旨在通过优化设备设计、改进控制等手段,从源头上减少谐波的产生。主动预防策略虽能从根源上解决谐波污染难题,但鉴于现存中频炉设备基数庞大,对既有设备进行技术改造的成本与难度较高,因而现阶段实际应用中,被动式谐波治理方案仍是应对中频炉谐波问题的主要技术手段^[14-18]。本文将结合中频感应电炉的工作原理及其谐波治理措施进行讨论,提出利用 ENRELY 综合防御装置对中频感应电炉工作的不同阶段产生的谐波进行补偿与治理分析。

1 中频感应电炉的电能质量问题及影响

中频感应电炉凭借显著的技术优势,在冶金行业金属熔炼与热处理领域占据重要地位。其具备加热迅速、生产效能突出的特点,可大幅缩短加工周期^[19-24];同时,能够有效减少氧化脱碳现象,降低材料损耗,实现生产成本的优化控制。此外,该设备加热过程均匀稳定,工件芯部与表面温差微小,配合高精度温控系统,可精准满足各类工艺需求。

然而,该设备也存在明显的技术短板。作为典型的非线性负载,中频感应电炉运行过程中能耗巨大,且功率因数普遍较低,造成电能的严重浪费^[25-28]。更为突出的是,设备运行时会产生严重的谐波畸变问题,对电网电能质量和周边电气设备的稳定运行造成负面影响^[29-30]。随着工业用电需求的增长和对电能质量要求的提高,这些问题日益受到企业生产管理者 and 电力部门的高度重视,成为亟待解决的关键技术难题。

中频感应电炉的电源通常采用 AC-DC-AC 变换方式,将输入的工频交流电输出为中频交流电供给感应体,且频率变化不受电网频率的限制,在感应体中产生高密度的磁力线,产生中频感应磁场,使熔炉中的炉料产生感应电动势,从而在炉料中产生很大的涡流,涡流的焦耳效应致使炉料被加热升温,直至熔化。

中频感应电炉大部分采用 6 脉波可控硅整流器,其整流环节输出电流包含 $(6k \pm 1)$ 次谐波($k=1, 2, \dots$)。产生 5 次、7 次、11 次等高次谐波,现场实测数据显示,5 次谐波电流有效值可达基波的 21.5%,7 次谐波达 13.45%,导致电网谐波电流总畸变率(THD)高达 28.53%。由于电磁耦合效应感应线圈与金属炉料间的漏磁及趋肤效应还会加剧谐波扩散。中频电炉自然功率因数仅 0.7 左右,由于功率因数偏低,大量无功由电网提供,加重了变压器的负担,使冶炼效率下降,调整电费产生。

谐波污染导致的主要影响包括:

1) 谐波电流的存在会导致集肤效应和邻近效应增强,影响设备的正常工作;

2) 造成变压器、电动机、电容器、电缆等设备高温过热、绝缘老化、噪声严重、寿命缩短,以至损坏引发电气事故;

3) 增加变压器铜损,使线路电阻随频率增加而提高,造成电能浪费;

4) 致使断路器电弧熄灭耗时延长,并可能引发继电保护装置或自动控制设备的误动作;

5) 影响仪表系统及通讯系统的正常工作,破坏通信质量;

6) 在电网中引发局部的并联或串联谐振,导致谐波电流进一步放大,加剧上述危害,造成相关设备损坏。

无功功率存在缺口导致的主要影响包括:

1) 降低变压器有效载荷;

2) 线路损耗;

3) 力调电费支出增加;

4) 末端电压不稳定。

2 案例概述

某冶炼公司熔铸低压配电室共 2 台 10 kV/400 V 双绕组变压器、带 2 套 150 t 感应电炉,功率为 3 200 kW,每套 2 个感应体,4 段低压母线各带 1 个负载感应体。

在电能质量设备改造之前,现场存在谐波污染严重、谐波引起的设备发热、震动、噪声严重、功率因数不达标、功耗高等问题。为解决以上问题,2024 年对现场 2 台中频感应电炉配电系统进行改造,应用 ENRELY 电气安全综合防御装置,投运后系统功率因数跃升至 0.95 以上,谐波污染大幅降低,满足国家标准。谐波污染的有效控制降低了周边电气设备的电磁干扰,减少了电网损耗,实现了节能增效与电力环境保护的双重目标。该案例充分证明,ENRELY 综合防御装置在中频炉场景下的无功补偿与谐波治理应用,不仅能为企业创造可观的经济效益,还具有显著的社会效益,具备广泛推广应用的价值。

3 解决方案

3.1 传统治理措施

1) LC 无源滤波器:其典型构造为电容器与电抗器通过串联方式构成 LC 串联支路,再将该支路并联接入电力系统。作为一种传统谐波治理方案,该

装置兼具谐波抑制与无功补偿双重功能,具有架构简明的技术特点。然而,其补偿效能会受到电网阻抗特性及运行状态变化的影响,在特定条件下可能与系统产生并联谐振现象,且仅能对固定频次的谐波分量进行针对性补偿。

2)有源滤波器(active power filter, APF):基于外部电流互感器 CT 实现负载电流的实时采集,经内置的数字信号处理器运算处理,分离出负载电流中的谐波分量并转换为相应的控制信号,同时数字信号处理器产生一系列 PWM 脉宽调制信号发给内部 IGBT 功率模块,控制逆变器输出相位正好与负载谐波电流方向相反,而幅值大小相等的电流,两种电流正好相互抵消,从而达到滤除谐波的功能。

3.2 单独使用有源滤波器(APF)的局限性

1)中频感应电炉需大量无功功率支撑,而 APF 以谐波滤除为主,单独使用无法兼顾现场无功需求。

2)由于中频感应电炉谐波的特殊性,导致谐波电流幅值高,对滤波设备容量要求严苛,APF 需覆盖全部谐波电流,面对中频炉的大谐波电流时,容量需极大,导致成本高昂,在大容量应用中经济性不足。

3)中频炉运行频率易产生高频谐波,高频谐波补偿需更高开关频率,受硬件带宽限制,单独使用 APF 来承担 2~50 次所有谐波治理任务,难以有效抑制。对 APF 的 IGBT 器件损耗、散热和可靠性提出挑战。

4)当中频炉工作时,内部非线性电力电子器件频繁进行开关动作,导致电流波形发生严重畸变,产生大量高次谐波电流注入电网。这些谐波电流在电网阻抗上产生压降,进而引发电网电压的严重畸变。更为棘手的是,中频炉的生产过程存在显著的负荷波动性。设备的有功功率和无功功率需求会在短时间内剧烈变化,使得电网电压畸变情况呈现显著的时变性和不确定性,中频炉复杂的运行工况对 APF、SVG 设备提出了苛刻要求,多数 APF 和 SVG 设备在面对中频炉负荷时,存在补偿滞后、过载保护频繁动作、内部功率器件过热损坏等问题,运行效果均不理想。

3.3 选型与设计

3.3.1 综合滤波方案

建立治理方案的 MATLAB 仿真模型,采用无源(passive filter, PF)+有源(APF)综合滤波方案,针对主导谐波设计 LC 调谐支路,LC 参数设计满足 $f=1/(2\pi\sqrt{LC})$,由 PF 承担 70%谐波治理任务并提供无功功率,降低 APF 容量需求成本。APF 实时检测谐波并注入反向电流,处理动态分量,处理高次谐

波及动态波动谐波,抵消无源滤波器与系统阻抗的谐振风险,确保稳定性。综合滤波方案通过分工协作,可系统解决中频感应电炉复杂谐波问题。

3.3.2 兼顾仪表及控制系统干扰抑制

谐波等各种瞬态高频干扰具有强度大、幅值高、时间短、随机性强等特点,高频瞬态干扰往往是引起仪表及控制系统运行异常的主要原因,等电位连接和电气共用接地的方式为干扰传递提供了高速通道。

当雷击、放电、短路及高压操作等发生时,会产生幅值极高、频谱丰富的强电磁脉冲。这些瞬态高频干扰在地网中传播时,会对仪表及控制系统产生极大的潜在危害,如信号跳变、误动、拒动、PLC 等电子器件故障、端口烧毁、板卡烧毁等局部事故,甚至由于联锁保护导致大范围停电等次生事故。

为此综合防御装置集成主动防御型干扰抑制技术 GDIS,采用两级并联模块对接地网传递到工作接地线上的各种瞬态高频干扰进行分级抑制。

3.4 主要功能

ENRELY 电气安全综合防御装置,其主要功能见图 1。



图1 ENRELY 电气安全综合防御装置主要功能
Fig. 1 Main function of ENRELY electrical safety comprehensive defense device

3.5 基本原理

ENRELY 电气安全综合防御装置消除谐波污染原理示意图见图 2。

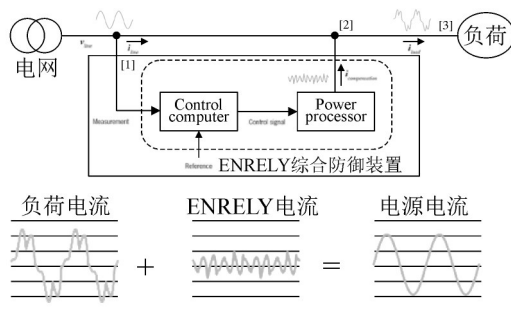


图2 ENRELY 电气安全综合防御装置消除谐波污染原理示意图
Fig. 2 Schematic principle diagram of eliminating harmonic pollution of ENRELY electrical safety comprehensive defense device

1)消除谐波污染

ENRELY 电气安全综合防御装置采用以 IGBT 为核心元器件的电压源型变流器。

ENRELY 电气安全综合防御装置可以等效为一受控的电流源,发出与负荷中谐波电流大小相等、方向相反的电流。这样,负荷的谐波电流就与 ENRELY 电气安全综合防御装置发出的电流相互抵消,从而实现谐波治理的目的。与传统的纯电容电抗型无源滤波器相比,ENRELY 电气安全综合防御装置是技术最先进、运行最可靠的解决方案,具有强大的技术优势和应用优势。

2)调节系统无功

ENRELY 电气安全综合防御装置采用以 IGBT 为核心元器件的电压源型变流器,可简化等效为一受控的电压 U_c ,电网电压用 U_s 表示,无功补偿的原理如图所示。

当系统需要感性无功时,ENRELY 电气安全综合防御装置输出的电压低于电网电压,其功能相当于可调电感,如图 3(a)所示。当系统需要容性无功时,ENRELY 电气安全综合防御装置输出的电压高于电网电压,其功能相当于可调电容,如图 3(b)所示。

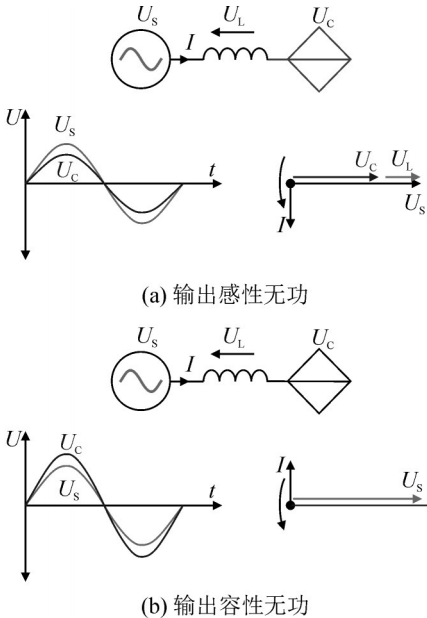


图3 ENRELY 电气安全综合防御装置调节系统无功原理示意图

Fig. 3 Schematic principle diagram of reactive power adjustment system of ENRELY electrical safety comprehensive defense device

与传统的接触器投切电容器、可控硅投切电容器相比,ENRELY 电气安全综合防御装置是技术最先进、运行最可靠的解决方案,具有强大的技术优

势和应用优势。

3)抑制系统振荡

ENRELY 电气安全综合防御装置采用实时检测与监控母线电压、系统谐波电流和系统无功电流,系统振荡的原理见图 4。

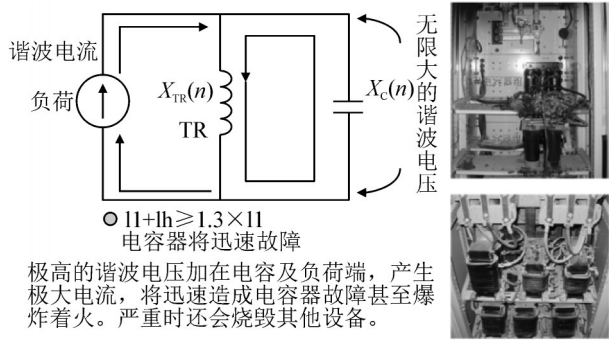


图4 系统振荡的原理示意图
Fig. 4 Schematic principle diagram of system oscillation

当检测到系统母线电压发生振荡时,ENRELY 电气安全综合防御装置输出方向的无功和谐波,快速抑制振荡,稳定母线电压,保证连接在母线上的其他设备不会因为振荡过电压而烧毁,ENRELY 电气安全综合防御装置抑制系统振荡见图 5。

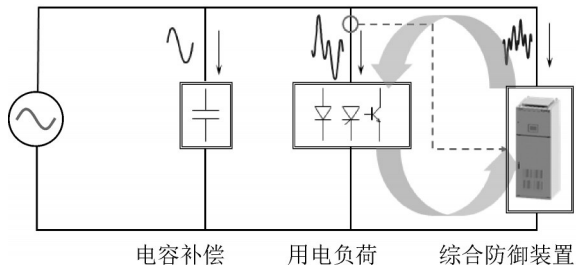


图5 ENRELY 电气安全综合防御装置抑制系统振荡
Fig. 5 ENRELY electrical safety comprehensive defense device for system oscillation suppression

4)补偿负荷三相不平衡

ENRELY 电气安全综合防御装置采用以 IGBT 为核心元器件的电压源型变流器,补偿负荷不平衡的原理图见图 6。

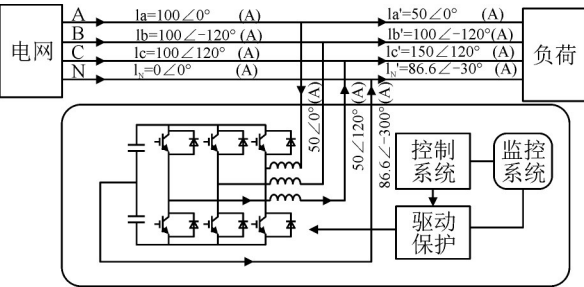


图6 ENRELY 电气安全综合防御装置调节三相不平衡原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the principle of ENRELY's comprehensive electrical safety defense device for adjusting three-phase imbalance

在纯电阻的三相四线制系统中,电网三相电流分别为 50 A、100 A 和 150 A。ENRELY 电气安全综合防御装置投运后,从电网 A 相吸收 $50\angle 0^\circ$ A 电流,通过控制系统的协调控制,再将 $50\angle 120^\circ$ A 电流发送到 C 相,同时发出与负荷相同的 N 线电流。此时,电网侧每相电流均控制为 100 A,N 线电流控制为 0 A,有效实现配电网侧的不平衡补偿功能。

5)地电位反击与地网干扰抑制

当谐波等各种瞬态高频干扰在地网传播时,干扰电流会通过共用接地系统流入仪表及控制系统的工作接地线中,导致数据异常或设备故障。如果在关键的仪表及控制系统的工作接地端,接入 ENRELY 电气安全综合防御装置就可以大大降低干扰电流窜入仪表及控制系统的几率与幅值,实现安全保障的目标。

ENRELY 电气安全综合防御装置,其功能类似一面“防火墙”,能够阻隔地网各种干扰电流向仪表及控制系统传输。也就是说,ENRELY 电气安全综

合防御装置的加入,净化了仪表及控制系统的“地”,大大提高了系统的安全性。

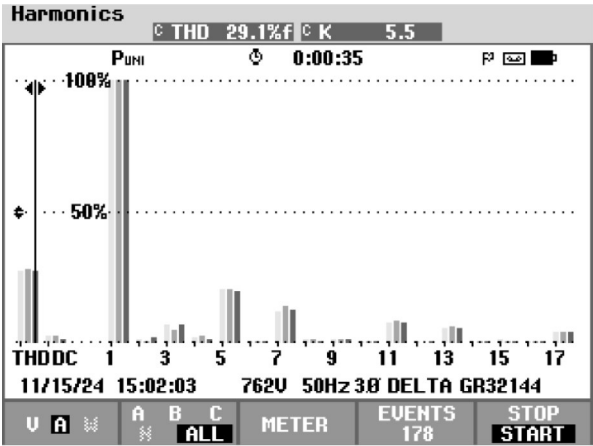
4 应用效果

4.1 现场测试数据

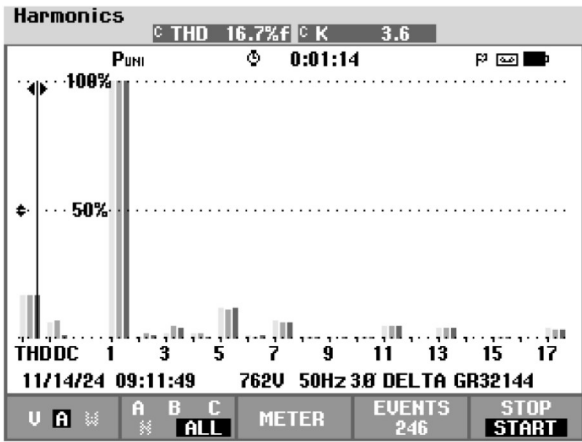
现场测试前后数据见表 1 和图 7。由图可知,谐波电流总畸变率由 29.1% 降至 16.7%,总谐波电流含量由 405.5 A 降至 179.6 A,5 次谐波电流含量由 282.6 A 降至 84.5 A,7 次谐波电流含量由 179.5 A 降至 49.8 A,系统功率因数由 0.67 提升至 0.95。

表 1 现场测试数据治理前后数据汇总表
Table 1 On-site test data summarization table before and after data governance

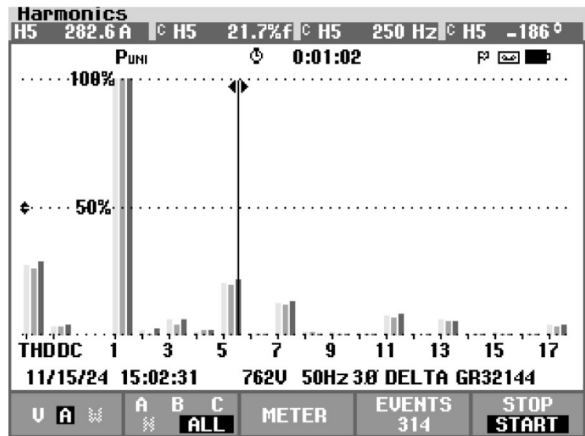
关键指标	治理前	治理后
功率因数	0.67	0.95
电流 THD/%	29.1	16.7
总谐波电流/A	405.5	179.6
5 次谐波电流/A	282.6	84.5
7 次谐波电流/A	179.5	49.8
变压器温度/℃	80	50



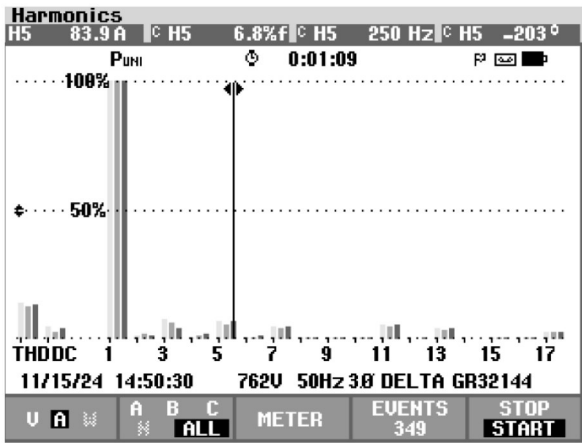
(a) 谐波电流总畸变治理前



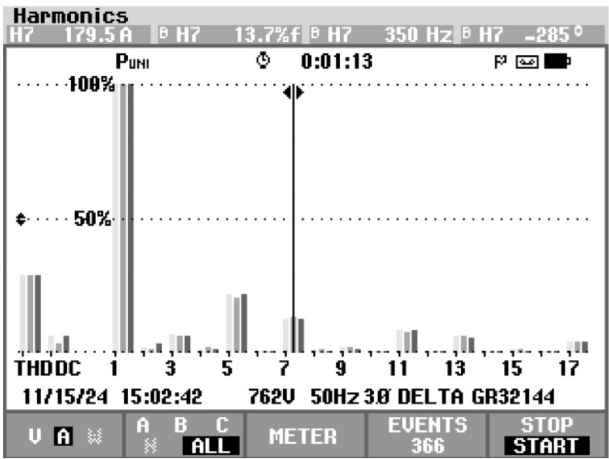
(b) 谐波电流总畸变治理后



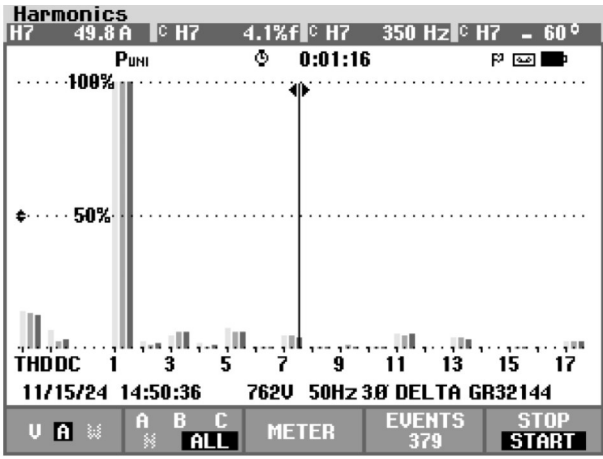
(c) 5次主导谐波治理前



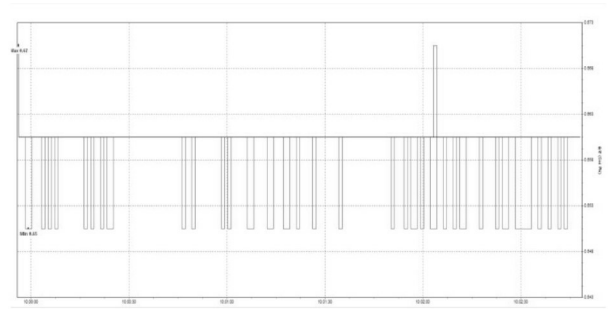
(d) 5次主导谐波治理后



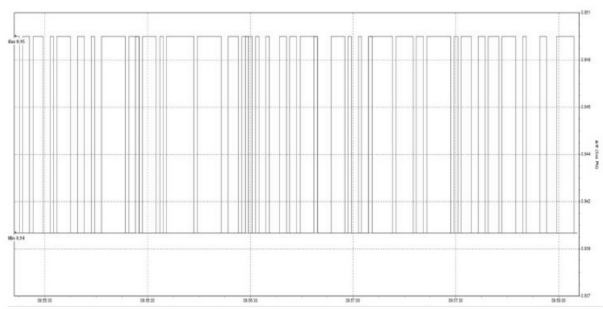
(e) 7次谐波治理前



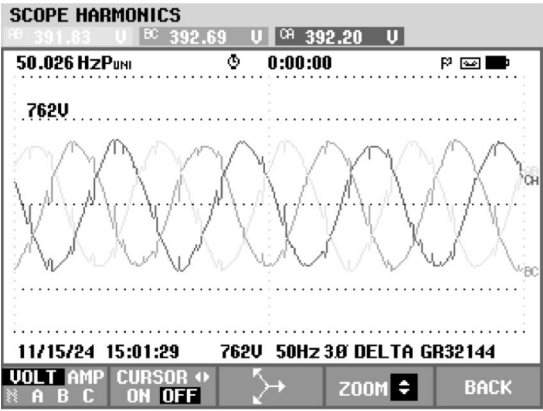
(f) 7次谐波治理后



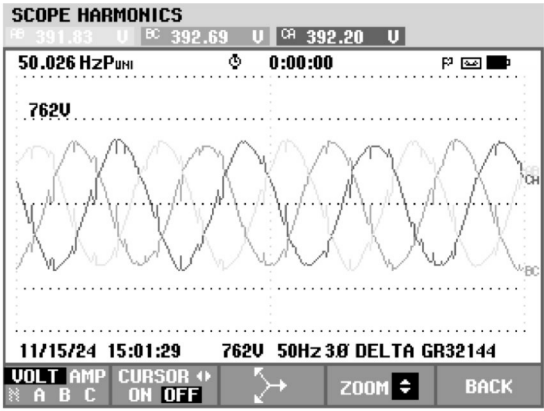
(g) 功率因数治理前



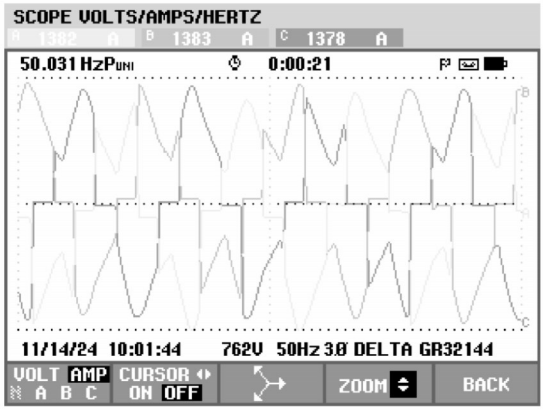
(h) 功率因数治理后



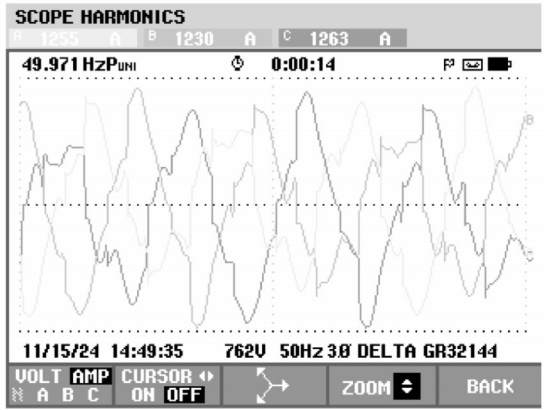
(i) 电压波形治理前



(j) 电压波形治理后



(k) 电流波形治理前



(l) 电流波形治理后

图7 现场测试数据治理前后对比图
Fig. 7 Comparison diagram of on-site test data governance

4.2 治理效果

由综合防御装置提供无功功率优化、谐波治理抑制。方案实施以后,达到以下治理效果:

1)节能降耗。按需提供负载所需的无功功率,有效降低电网向感性负荷输送、以及线路传输的无功功率总量。线路与变压器因传输无功功率而产生的电能损耗随之降低。通过谐波治理可以降低谐波引起的各设备的损耗,达到节能降耗的效果。无功补偿装置进行更换升级后,综合节能效率可达5~25%。

2)提高系统电能质量水平。综合防御装置可有效滤除谐波,将系统谐波电流降至安全值以下,谐波电流含量(THDi)满足国标《谐波.公用电网谐波》GB/T14549—93 要求。系统谐波电压含量(THDu)在容量范围内各次不超过2%,满足国标《谐波.公用电网谐波》GB/T 14549—93 要求。系统原始功率因数低,存在大量的无功,这部分无功的损耗较高,在设备安装后,系统功率因数可达到0.95以上,大大降低系统无功的损耗;

3)提高系统安全性能。进行改造升级后,有效滤除电网中的谐波电流,使电流波形更接近正弦波。受谐波引起的设备发热、震动、噪声等问题得到治理,提高设备的运行效率和可靠性。消除谐波集肤效应,避免发热引起的电气安全火灾,延长变压器、电容器、电缆等设备的使用寿命。消除谐波引起的谐振过电压,保护系统正常运行。将三相不平衡度控制在合理范围内,减少因三相不平衡对三相电机、变压器等设备的损害,延长设备的使用寿命,同时降低设备的能耗和发热。无功补偿装置进行更换升级后,提高抗过电压保护能力。减少电磁干扰对通信设备、电子仪器的影响,提高设备的正常工作性能。

4)提升系统运行容量。进行无功补偿装置升级更换后,系统视在功率减少,运行电流降低,有效提升了变压器载荷。提高系统的功率因数,减少无功功率的传输,降低线路损耗和变压器的铜损,提高系统的输电能力和电能利用效率,改善供电环境。

5 结语

本文通过数据分析与工程实践,验证了 ENRELY 电气安全综合防御装置方案在中频感应电炉配电系统谐波畸变治理中的有效性。该方案不仅改善了电网电能质量,还提升了感应电炉的运行效率和可靠性,为类似工业场景提供了可借鉴的技术方案。

参考文献

- [1] 电能质量 公用电网谐波:GB/T 14549—1993[S]. 1993.
Quality of electric energy supply—Harmonics in public supply network:GB/T 14549—1993[S]. 1993.
- [2] 翁利民,张莉. 供配电系统的电能质量问题与谐波抑制[J]. 电气时代,2005(10):54-57.
WENG Limin, ZHANG Li. Analysis of quality of electric energy supply of power supply and distribution systems and harmonics suppression[J]. Electric Age, 2005(10): 54-57.
- [3] 郑俊观,张勇跃,刘静霞,等. 低压配电系统谐波源分析及谐波影响下导体截面积的选择研究[J]. 东北电力技术,2023,44(10):9-12.
ZHENG Junguan, ZHANG Yongyue, LIU Jingxia, et al. Analysis of harmonic sources in low-voltage distribution systems and research on selection of conductor cross-sectional area under influence of harmonics[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(10): 9-12.
- [4] 吴怀诚,刘家强,岳蕾,等. 基于多特征融合的卷积神经网络的电能质量扰动识别方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(9): 19-23.
WU Huaicheng, LIU Jiaqiang, YUE Lei, et al. Identification of power quality disturbances based on MFCNN [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(9): 19-23.
- [5] 刘宏伟,郑遵国,李玉付,等. 一种基于交流电场感应的取能电源设计[J]. 电力工程技术,2023,42(6):214-222.
LIU Hongwei, ZHENG Zunguo, LI Yufu, et al. Optimal design of energy harvesting power supply based on AC electric field induction[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 214-222.
- [6] 王红标,栗时平,胡亚杰,等. 含电动汽车快速充电站配电网的暂态电能质量特性研究[J]. 电测与仪表,2024,61(6):159-166.
WANG Hongbiao, SU Shiping, HU Yajie, et al. Study on transient power quality characteristics of distribution network with EV quick charging stations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 61(6): 159-166.
- [7] 陈立,周华. 工业用户电能质量综合治理装置设计与应用[M]. 中国电力出版社,2020
- [8] 王晖. 谐波背景下的无功补偿[J], 电气时代, 2006(7): 72-74.
- [9] 常尼亚,张金晔,郭建宏,等. 谐波对电网影响的探讨[J]. 电气开关,2006,44(5):54-56.
CHANG Niya, ZHANG Jinye, GUO Jianhong, et al. Discussion on influence of harmonic to electric network[J]. Electric Switchgear, 2006, 44(5): 54-56.
- [10] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [11] 赵欣洋,刘红恩,陆洪建,等. 动态无功补偿装置电压调节增益自动优化研究[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(5):

- 42-51.
- ZHAO Xinyang, LIU Hong'en, LU Hongjian, et al. A study on the automatic optimization method of voltage regulation gain of the dynamic reactive power compensator[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5): 42-51.
- [12] 钱长远, 汪良坤, 赵燕, 等. 有源滤波器在6脉中频炉谐波治理中的应用[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5): 19-22.
- QIAN Changyuan, WANG Liangkun, ZHAO Yan, et al. The application of APF in harmonic control of the 6-pulse IF furnace[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(5): 19-22.
- [13] 毛鸿. 电力系统谐波分析理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [14] 郭祥富, 张旭, 刘书铭, 等. 计及动态相关性的配电网稳态电能质量智能评价方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(12): 28-37.
- GUO Xiangfu, ZHANG Xu, LIU Shuming, et al. An intelligent evaluation method for steady-state power quality in distribution networks incorporating dynamic correlations[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(12): 28-37.
- [15] 程锦. 750 kV 交流滤波器用断路器合闸电阻故障预判方法探究[J]. 高压电器, 2023, 59(8): 239-244.
- CHENG Jin. Study on fault prediction methods of pre-insertion resistor for 750 kV circuit breaker for AC filter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 239-244.
- [16] 周志敏. 有源电力滤波器设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2023.
- [17] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [18] 吴竞昌. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [19] 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.
- [20] 李群, 蒋平. 电能质量与节能技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [21] 叶黎明, 肖建华. 电力系统无功补偿及谐波抑制智能系统[J]. 东北电力技术, 2002(6): 29-31.
- YE Liming, XIAO Jianhua. The reactive power compensation of power system and the intelligent harmonic excluder system[J]. Northeast Electric Power Technology, 2002(6): 29-31.
- [22] 史承逵. 电网电容器组谐波谐振和谐波放大的研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(7): 36-38.
- SHI Chengkui. Study on harmonic resonance and harmonic enlargement of power network capacitor bank[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(7): 36-38.
- [23] 杨华, 王孝能. 中频炉谐波实测及治理改造[J]. 四川电力技术, 2005, 28(z1): 49-50.
- YANG Hua, WANG Xiaoneng. Actual measurement for harmonic of medium-frequency electric furnace and its reformation[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2005, 28(z1): 49-50.
- [24] 周勇, 王文峰, 赵慧光. 电容器的谐波放大问题分析[J]. 郑州大学学报, 2005, 26(2): 36-38.
- ZHOU Yong, WANG Wenfeng, ZHAO Huiguang. Analysis of harmonic amplification problem of capacitors[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2005, 26(2): 36-38.
- [25] 祁强, 张广溢. 三相PWM整流技术研究及仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 5(2): 82-84.
- [26] 陈滨斐, 邢宁, 李志新, 等. SVPWM逆变器供电时FSCW-PMSM损耗特性研究[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 73-83.
- CHEN Zhenfei, XING Ning, LI Zhixin, et al. Loss characteristics investigation of FSCW-PMSM under SVPWM inverter supply[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 73-83.
- [27] 王鹏, 赵明, 周群. SVPWM 电压下变频电机绝缘耐电晕寿命研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1): 42-47.
- Wang Peng, Zhao Ming, Zhou Qun. Study of the corona-resistance lifetime for inverter-fed motor insulation under SVPWM voltages[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 42-47.
- [28] 董家睿, 李基民, 魏铭. 谐波激励下电力变压器振动特性[J]. 高压电器, 2023, 59(8): 35-42.
- DONG Jiarui, LI Jimin, WEI Ming. Vibration characteristics of power transformers under harmonic excitation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 35-42.
- [29] 张喆, 孟祥亮, 肖新华, 等. 配电物联网电能质量复合扰动检测研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2): 40-45.
- ZHANG Zhe, MENG Xiangliang, XIAO Xinhua, et al. Research on power quality composite disturbance detection in power distribution IOT[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2): 40-45.

作者简介:

禄伟(1991—), 男, 高级工程师, 从事电气安全防护及供配电系统等方面的工作。E-mail: 842567183@qq.com。

皇甫灵刚(1985—), 男, 高级工程师, 从事供配电系统等方面的工作。

赵路飞(1985—), 男, 高级工程师, 从事电气安全防护等方面的工作。