

DOI: 10.7667/PSPC160904

基于基波检测原理的配电台区有源补偿装置研究与应用

徐在德¹, 范瑞祥¹, 潘本仁¹, 邓才波¹, 黄新²

(1. 国网江西省电力公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096;

2. 国网江西省电力公司宜春供电分公司, 江西 宜春 336000)

摘要: 主要介绍了应用于低压配电网三相四线系统的配电网有源电力电子补偿装置, 分析了直接检测基波有功电流分量的基本原理。利用此种控制方式的配电网有源补偿装置在谐波、无功方面的补偿特性, 尤其在配电台区负荷不平衡情况下, 通过在 Matlab/Simulink 环境下仿真, 证明此种配电网有源补偿装置检测控制方法的可行性和对三相负载不平衡情况下的良好补偿特性。最后通过开发样机证明了此种理论在补偿配电台区无功及三相电流不平衡情况下的有效性。

关键词: 配电网; 有源补偿装置; 不平衡负载; 低压配电台区; Simulink

Research and application for active compensation of power distribution device based on the principle of fundamental wave detection

XU Zaide¹, FAN Ruixiang¹, PAN Benren¹, DENG Caibo¹, HUANG Xin²

(1. Department of Electrical Technology, State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

2. Yichun Power Supply Branch, State Grid Jiangxi Electric Power Company, Yichun 336000, China)

Abstract: This paper mainly introduces an active power electronic compensation device of a power distribution network applied to the low-voltage power distribution network three-phase four-wire system and analyzes the fundamental principles of direct detection on the fundamental wave active current components. After the simulation in Matlab/Simulink environment by using the compensation characteristics of the power distribution network active compensation device in this control mode in the harmonic and reactive aspects, especially on the condition of unbalanced load of the power distribution station area, this paper proves the feasibility of the detection control method of the active compensation device and the good compensation characteristic in the condition of unbalanced three-phase load. Lastly, this paper proves the validity of the theory on the condition of reactive compensation power distribution station area and unbalanced three-phase currents.

Key words: power distribution network; active compensation device; unbalanced load; low-voltage power distribution station area; Simulink

0 引言

低压配电网系统中, 伴随工业用电负载的多样性, 冲击性无功负荷、谐波负荷越来越多应用到工业生产中, 同时伴随居民用电的增加, 单相负荷也越来越多, 造成部分配电台区无功、谐波及三相不平衡严重, 尤其是三相不对称引起配电系统三相电压中性点偏移, 造成了目前较为关注的用户低、高电压、零序电流过大等突出问题, 增加线路、变压器的损耗, 严重威胁配电网和电气设备的安全运行和正常使用。

配电网有源补偿装置(Active Power Electronic

Compensation Device)可以对电网谐波、无功、负序、零序电流进行有效补偿, 实现对电网的净化, 成为解决低压配电网的有效手段之一。在配电网中, 将中小容量的有源补偿装置安装在某些电能质量问题严重的配电台区, 可以明显改善负荷和公共电网连接点的电能质量, 提高功率因数, 治理谐波, 平衡三相电流, 消除高、低电压等问题^[1]。

i_p-i_q 谐波无功检测方法是目前工程应用比较成熟的理论, 大量应用于有源电力滤波器、动态无功补偿等电力电子装置^[2-3]。由于其方法的复杂性, 检测量多, 同时直流侧电容电压稳定及实时跟踪补偿电流需要分别计算, 计算量较大, 造成 CPU 资源不

足,需要扩展 CPU 芯片容量,应用控制策略更为简单实用的基波有功电流法。该方法目前哈尔滨理工大学^[4-5]、山东大学^[6-7]、湖南大学^[8]等国内高校、研究院^[9]及国外期刊文献进行了研究,但是大部分都是停留在理论或者谐波、无功补偿方面的实验研究论证,并没有对补偿三相不平衡进行研究验证其有效性,同时电力电子装置大部分为户内应用。同时针对如 APF、SVG 等电力设备对散热要求较高,本文通过 ANSYS 软件对研发装置进行了整体温度优化设计,实现了电力电子装置的户外应用。针对此基波检测理论本文不仅在理论上验证了谐波、无功及三相不平衡补偿方面的有效性,并且在 Matlab/Simulink 软件下,针对谐波、无功、三相不平衡的情况进行了仿真研究,通过仿真证明采用此种检测方法的有源补偿装置在解决电能质量问题方面具有较好的动态补偿效果。

1 基波有功电流控制的有源补偿装置

本文应用的有源补偿装置控制方案,采用直接控制基波有功电流的方式,与传统的电力电子设备相比,省去了复杂的谐波和无功的检测结构部分及相应的硬件电路,检测方法计算量相对较少,动态跟踪能力更强^[10-13]。

1.1 基波有功电流控制的有源补偿装置拓扑结构

由图 1 有源补偿装置主回路的原理图可知,有源补偿装置的主回路主要是由三桥臂功率开关、滤波电抗器、串联电容组成。对于三相四线系统,当三相负载不平衡时,a、b、c 三相电流中包含了正序、负序、零序电流分量。零序电流分量通过零线主回路采用分裂电容结构的有源补偿装置,直流侧电容的中性点与零线相连,以此来消除零序电流。

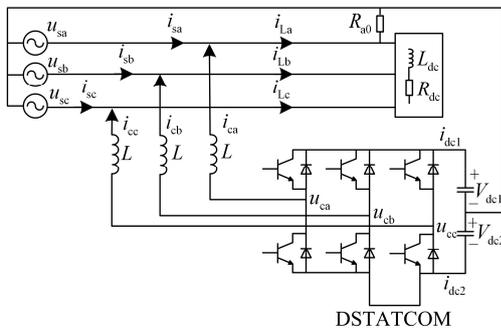


图 1 有源补偿装置主回路拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of a main circuit of an active compensator

1.2 基波有功电流控制的有源补偿装置原理

基波有功电流检测方法仅需要检测输出侧四

相电流互感器和三个电压互感器。对有源补偿装置来说,瞬时无功功率不会引起直流侧与交流侧间的能量交换。如果不考虑器件的损耗,则直流侧瞬时有功功率全部来自交流侧基波有功电流,从而直流侧与交流侧的能量交换取决于瞬时基波有功功率的大小。

图 2 所示为有源补偿装置基波有功电流检测方法的控制原理,电压控制环中, U_{cref} 为直流侧电容电压的设定值, U_c 为直流侧电容电压的瞬时值,两者的差值 ΔU_c 则为电压的控制量,经过 PI 调节后得到有功电流幅值 I_m 。三相电源电压同步的单位正弦信号与有功电流幅值相乘得到三相电流的设定值 i_s^* 。设定信号 i_s^* 和实际电流 i_s 的差值 Δi_s , 经过滞环比较器得到六路脉冲触发信号。

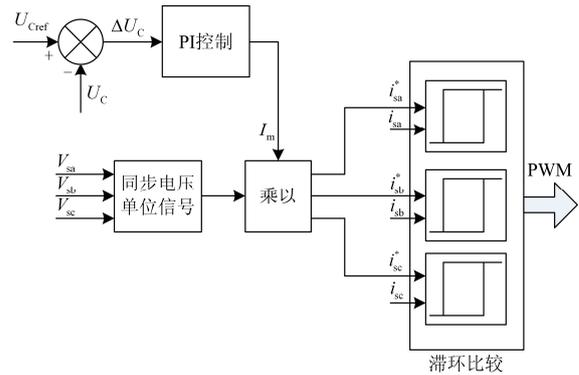


图 2 基波有功电流检测算法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of active current detecting algorithm of a fundamental wave

电容电压和电容电流具有下面的动态关系。

$$u_{dc}(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (1)$$

式中: $u(0)$ 为初始时刻的电压; $i(t)$ 为电容电流。

$$\Delta u_{dc}(t) = u_{dc0} - u_{dc}(t) \quad (2)$$

式中: u_{dc0} 为设定值,在仿真中 $u_{dc0} = 750 \text{ V}$; $u_{dc}(t)$ 为电容电压的实际值。

$$\Delta u_{dc}(t) = 750 - u_{dc}(t) \quad (3)$$

根据能量平衡的原理,直流侧电压的稳定是通过 PI 调节有功电流对电容充放电的过程,由此可知,直流侧电容的有功电流设为 $i(t)$,由式(3)可知,通过 PI 调节后就能获得有功电流幅值 I_m 。

$$I_m = kp \cdot \Delta u_{dc}(t) + ki \int_0^t \Delta u_{dc}(t) dt \quad (4)$$

$$V_s = V_m \sin(\omega t) \quad (5)$$

式中: V_m 为峰值电压; V_s 为三相电网电压。

对式(4)两边求导数,对于任意系统来说,有功

电流都是常量, 而 I_m 为有功电流的幅值, 所以此时 I_m 为一常数, 因而求得导数为 0。

$$kp \cdot \frac{d\Delta u_{dc}(t)}{dt} + ki \cdot \Delta u_{dc}(t) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d\Delta u_{dc}(t)}{\Delta u_{dc}(t)} = -\frac{ki}{kp} \quad (7)$$

最后解得: $\Delta u_{dc}(t) = ae^{-\frac{ki}{kp}t}$, 其中 a 为常数。

当 t 趋近于无穷大时, Δu_{dc} 无限趋近于零。由此可见, 有源补偿装置直流侧电容电压都能够达到稳定, 所以证明了此种控制方案的可行性。

$$\begin{cases} \sin(\omega t) = V_{sa} \cdot \frac{1}{V_m} \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) = V_{sb} \cdot \frac{1}{V_m} \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) = V_{sc} \cdot \frac{1}{V_m} \end{cases} \quad (8)$$

式中, V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} 为三相电压。

$$i_s^* = I_m \cdot \sin(\omega t) \quad (9)$$

式中: i_s^* 为基波有功电流; I_m 为有功电流的幅值。

2 仿真分析

根据上述分析, 对采用直接控制基波有功电流方式的有源补偿装置, 在 Matlab/Simulink 环境下分别进行仿真, 基波有功电流检测方法均采用电容分裂法对谐波、无功、不平衡的补偿效果进行分析。仿真系统的基本参数为: 系统电源电压 $u_s = 220$ V, 直流侧电容 $C = 3300 \mu\text{F}$, 电容电压的设定值 $U_{\text{Cref}} = 630$ V, 滞环比较器的环宽 0.5 A, 输出电感值 $L = 0.5$ mH, 负载侧 $R_{dc} = 10 \Omega$, $L_{dc} = 10$ mH, A 相对零线负载 $R_{a0} = 5 \Omega$ 。

根据上述参数, 图 3 三相四线不平衡负载系统下有源电力补偿装置投入前明显地看出三相电流中含有大量无功及谐波电流, 并且存在严重的三相不平衡现象。图 4 为三相四线制不平衡负载有源电力

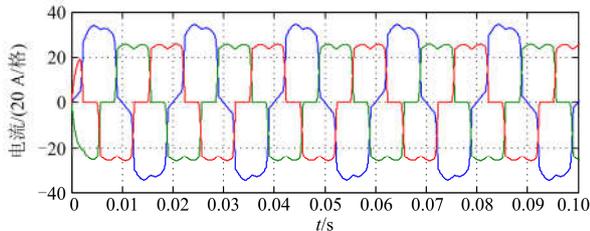


图 3 有源补偿装置补偿前三相电流波形

Fig. 3 Three-phase current waveform before compensation of the active compensator

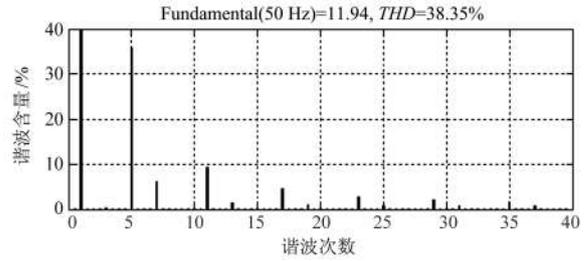


图 4 有源补偿装置补偿前电流波形频谱图

Fig. 4 Frequency spectrogram of a current waveform before compensation of the active compensator

补偿装置投入前电流波形频谱图, 由图可知补偿前谐波电流总畸变率 THD 高达 38.35%, 尤其是 5, 11 次谐波含量较高。

2.1 基本有功电流法分裂电容有源补偿装置仿真分析

仿真过程中, 在 0.01 s 投入基于基波有功电流方法的有源补偿装置。

通过图 5 及图 6, 可以看出基波有功电流法 PI 控制的有源补偿装置投入瞬间基本上没有冲击电流, 补偿之后波形较好。

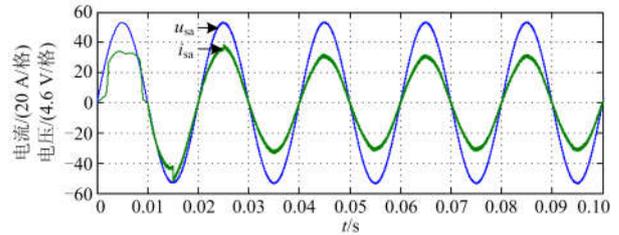


图 5 A 相电压与电流的过渡曲线

Fig. 5 Transition curve of A-phase voltage and current

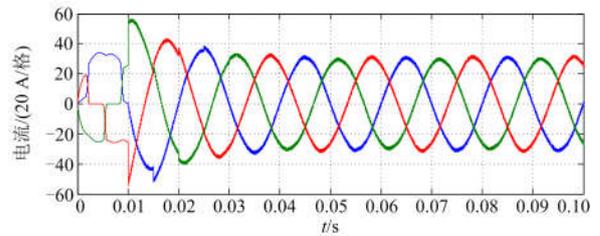


图 6 三相电流的过渡曲线

Fig. 6 Transition curve of three-phase current

投入有源补偿装置之后, 大概需要一个周期的时间, 系统达到稳定状态。由图 7 可知, THD 减小到 1.57%, 5, 11 次谐波明显减小。图 8 为直流侧电容电压波动曲线, 采用 PI 调节系统稳定到额定电压值 630 V, 大概需要 0.03 s, 电容电压稳定时间较短, 系统的响应速度快。由图 9 发现, 零序电流没有毛刺。

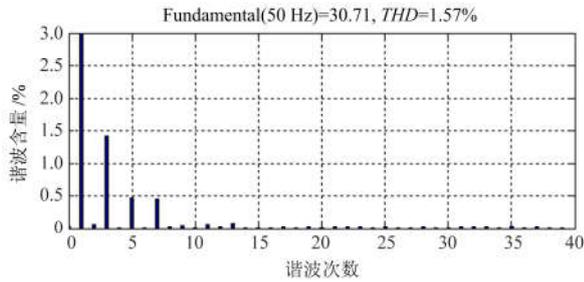


图 7 有源补偿装置补偿后电流波形频谱图

Fig. 7 Frequency spectrogram of the current waveform after compensation of the active compensator

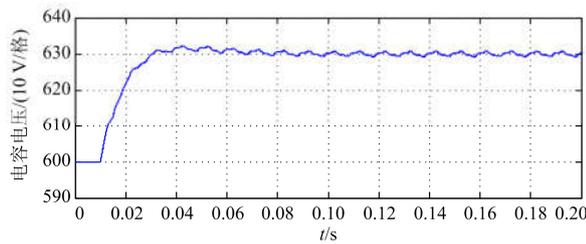


图 8 电容电压的过渡曲线

Fig. 8 Transition curve of capacitance-voltage

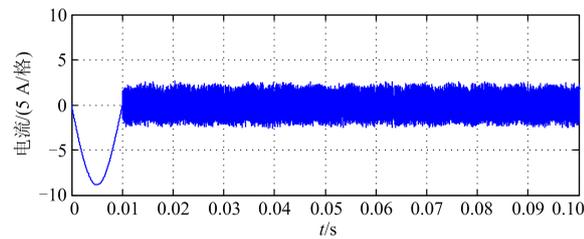


图 9 零序电流的曲线

Fig. 9 Curve of zero-sequence current

3 开发样机实验

3.1 硬件设计

参照图 1 三相四线制有源补偿装置结构图开发样机, 实验的基本参数: 三相电压为线电压 380 V, 采用英飞凌 FF450R17ME4, 电解电容 10 000 μ F/450 V, 直流侧电压 750 V, 滤波电抗器 2 mH, 采用三桥臂分裂电容拓扑结构, 通过 PORE 软件, 将实物按 1:1 的比例设计, 从而有效解决了空间问题, 使内部部件得到优化布局, 如图 10 所示。

3.2 软件设计

有源补偿装置控制器通过 DSP+FPGA 控制, 通过 AD 采样负荷电流, 逆变器输出电流、网侧电压数据, 采样频率为 8 kHz, 每一个电网周波 160 个点, 装置投入后首先进入升压、稳压模式, 待直流侧电压升高至 650 V 时, 切除并网电阻, 继续升压

直到电压稳定到 750 V 后, 电压稳定之后进入工作模拟, 通过采集数据进行相应的计算, 从而反向补偿, 达到净化电网的目的, 如图 11 所示。

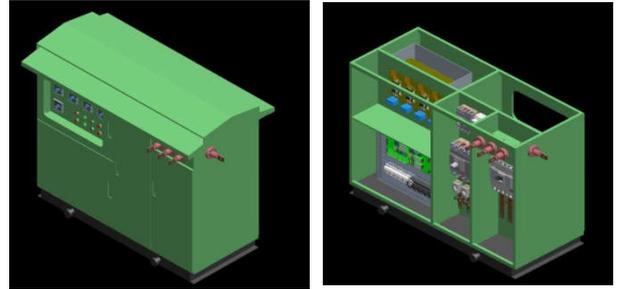


图 10 柜内设备三维设计视图

Fig. 10 3D design view of equipments in a cabinet

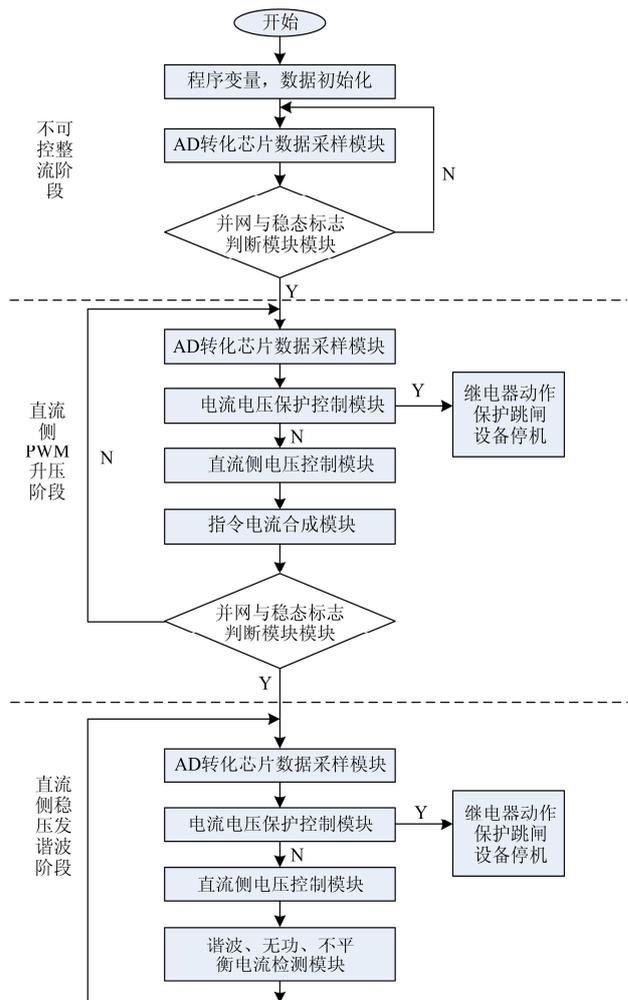


图 11 软件流程图

Fig. 11 Flow chart of software

3.3 不平衡实验

调节三相负荷不一致从而模拟真实配电网台区, 其中 A 相负载 2.5 Ω , B 相负载 2.3 Ω , C 相没

有负载, 因为负荷分配不均匀造成三相电压不同, 从而充分模拟配电网常用的“高、低电压”问题。

通过开发实际样机验证该检测方法的可行性, 同时在实验过程中明显地发现, 当三相负荷不一致时, 容易造成变压器出口电压的不一致, 从而单相重负荷出现低电压的情况, 通过开发有源电力补偿装置补偿负载电流中的负序、零序、无功电流实现了三相电压基本一致, 零序电流由原来的 88.1 A 降低到 10.6 A, 不平衡度由原来的 50.9% 降至 2.9%, 满足标准中的配电变压器三相负荷不平衡度 15% 的要求。如图 12 所示。

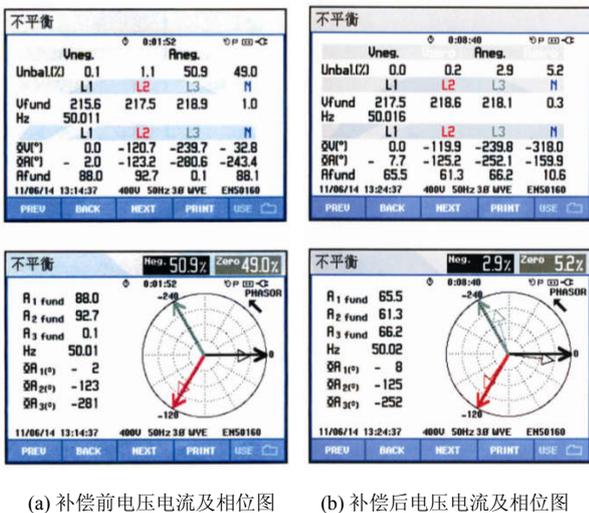


图 12 不平衡实验前后对比

Fig. 12 Comparison before and after the unbalanced experiment

3.4 无功补偿实验

阻感负载中电阻为 11 Ω, 电感值为 30 mH, 补偿前功率因数 0.76, 三相负荷平衡。

补偿前的电流电压相位波形和功率因数如图 13 所示。当有源电力补偿装置投入运行之后, 如图 14 所示, 各相电压与电流保持同相位, 功率因数为 0.99, 且三相平衡, 各相系统侧电流明显下降, 无功电流基本上被补偿, 完全满足工业要求。

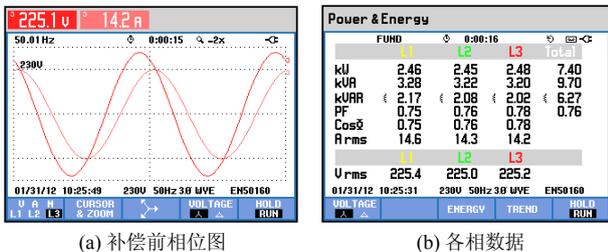


图 13 补偿前的电流电压相位波形和功率因数

Fig. 13 Diagram of voltage and current and power factor before compensation

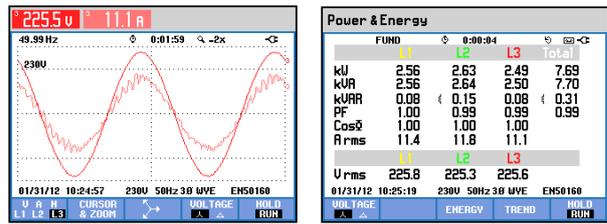


图 14 补偿后的电流电压相位波形和功率因数

Fig. 14 Waveform between voltage and current and power factor after compensation

4 应用与推广

4.1 装置户外应用难点

有源电力补偿装置为电力电子设备, 该装置应用在变压器出口侧进行无功、不平衡的补偿。装置研发过程中主要克服了以下两个难点。

难点一, 温度: 以江西为例夏季温度高温达 43 °C, 选择在恶劣的工业现场情况下, 45 °C 的环境温度中, 整个系统采用风冷, 冷却叶片高速地强制对流: $h = 51 \text{ W/m}^2\text{°C}$, 晶体管放置在铜热片上, 该铜热片放置在铝制散热器上。IGBT 产生热量的同时, 还要接收附近电气设备的辐射能。其他设备辐射的等效热流: $q^* = 1500 \text{ W/m}^2$ 。

一个 IGBT 模块的尺寸等效为: 长 60 mm, 宽 20 mm, 高 10 mm 的长方体, 仿真的散热器模型尺寸长 65 mm, 宽 60 mm, 高 20 mm, 6 个散热槽, 7 个散热齿。通过散热片仿真图 15 可以明显地看出, 温升为 35 °C 左右, 最高温度为 90 °C, 而本文选择 FS200R12KT4R 型号的 IGBT, 最大壳温 $T_{cmax} = 95 \text{ °C}$, 达到要求。

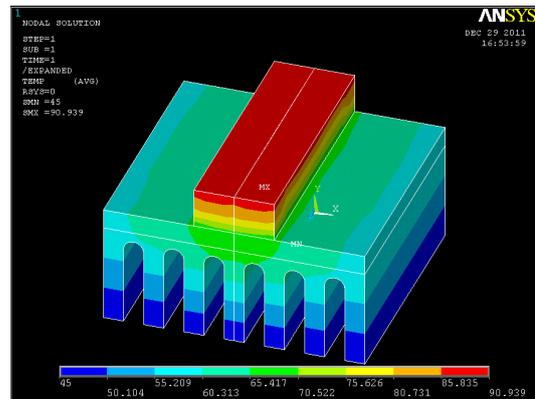


图 15 散热片仿真图

Fig. 15 Simulation diagram of a radiating fin

难点二, 电磁干扰: 因户外应用 IGBT 高速开关、同时电抗器进行高频谐波的滤波, 必然产生强

烈的电磁干扰，为了克服电磁干扰对控制系统的干扰，本装置在设计过程中通过总结问题，分析原因，优化设计的目标，对一二次系统分别设计，其中一次系统加装浪涌开关、避雷器等一次保护设备，增强其户外运行的高可靠性，二次系统电压采样通过空气开关隔离，二次系统电源增加隔离变压器，减少外界系统对控制电源的谐波干扰，如图 16 所示。

4.2 户外应用效果

装置目前已经在江西电网挂网运行多台，尤其对于三相不平衡严重的台区应用效果良好。图 17 为某专变台区 315 kVA 容量变压器，通过长期监测，该专变低压侧出口三相电流严重不平衡，中性电流较大，单相负荷随机性加强，难以通过换相解决该问题，同时该公司有多台航吊车，且异步电机容量较大，瞬间冲击性强。



图 16 装置柜前平面图

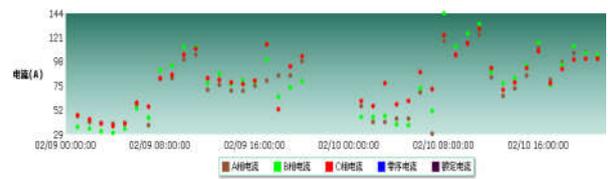
Fig. 16 Plan view of the front face of a cabinet for devices



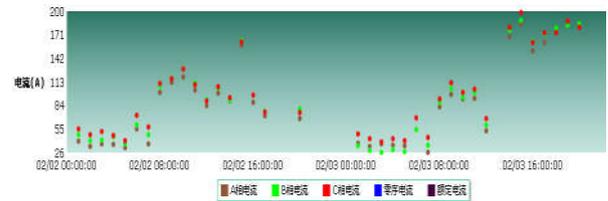
图 17 装置现场应用图

Fig. 17 Application view of installation site

以该专变为例，投入该装置前，三相不平衡严重，零序电流波动较大，并且单相负荷随机性强，通过常用的换相手段难以实现三相平衡。如图 18 所示。



(a) 补偿前三相电流不平衡度



(b) 补偿后三相电流不平衡度

图 18 补偿前后后台采集数据对比

Fig. 18 Comparison of background data collection before and after compensation

投入该装置以后，如图 18(b)所示，通过后台采集数据明显地看出 A、B、C 三相电流几乎重合在一起，零序电流消除，说明三相电流已经达到平衡要求，具备较好的应用效果。

5 结论

针对传统电力电子设备复杂的谐波和无功检测单元，本文采用了结构简单的基波有功电流控制的有源补偿装置，通过 Matlab/Simulink 环境下的仿真表明，采用不检测无功量的有源补偿装置同样能达到补偿谐波、无功、零序电流的目的，该方法响应速度更快，稳定时间更短。同时开发样机，在三相严重不平衡的情况下，投入基波有功电流检测方法的有源补偿装置，实验证明均衡了三相电压，降低了台区出口三相电流不平衡度，使其满足标准要求。装置投入后降低了变压器的损耗，验证了其补偿无功效果的可行性。装置目前已经在江西挂网运行，证明该装置有广阔的使用前景。

参考文献

[1] 范瑞祥, 邓才波, 徐在德, 等. 基于 RTDS 的有源电力滤波器实物控制器闭环仿真技术[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 104-107.
FAN Ruixiang, DENG Caibo, XU Zaide, et al. A RTDS based APF controller closed-loop simulation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 104-107.

[2] 邢姗姗, 田素立, 王振华, 等. 光伏 MPPT 系统电压控制器的优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016,

- 44(12): 114-118.
XING Shanshan, TIAN Suli, WANG Zhenhua, et al. Optimized design of the voltage controller of PV MPPT system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 114-118.
- [3] 张海鹏, 林舜江, 刘明波, 等. 低压配电网无功补偿及效益评估系统的开发及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 129-136.
ZHANG Haipeng, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Development of low voltage distribution networks reactive power compensation and benefit assessment system and its application[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 129-136.
- [4] 刘勇超, 葛兴来, 冯晓云. 两电平与三电平 NPC 逆变器单桥臂故障重构拓扑 SVPWM 算法比较研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 775-783.
LIU Yongchao, GE Xinglai, FENG Xiaoyun. Comparison study of SVPWM algorithms of the post-fault reconfigured topologies for two-level and three-level NPC inverters with failure of a leg[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 775-783.
- [5] 周静, 边海峰, 贾晨, 等. 基于分布的含 DG 配电网实时无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 117-124.
ZHOU Jing, BIAN Haifeng, JIA Chen, et al. Real-time reactive power optimization in distribution network with DG based on partitions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 117-124.
- [6] 陆康, 刁倩. 有源滤波器在不同网络中的应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 143-149.
LU Kang, DIAO Qian. Analysis of active power filter applications in different networks[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 143-149.
- [7] 周晨, 郑益慧, 王听, 等. 基于双闭环控制器的电容分列式三相四线制 DSTATCOM 控制方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 114-121.
ZHOU Chen, ZHENG Yihui, WANG Xin, et al. Control strategy based on dual-loop controller for split-capacitor-type three-phase four-wire DSTATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 114-121.
- [8] 付伟, 刘天琪, 李兴源, 等. 静止无功补偿器运行特性分析与控制方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 147-153.
FU Wei, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Analysis of operating characteristic and survey of control methods used in static var compensator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 147-153.
- [9] 庄述燕. 基于逆系统方法的带 SMSE 的静态无功补偿器的 RBF 滑模控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 91-95.
ZHUANG Shuyan. RBF sliding mode control of STATCOM with SMSE based on inverse system method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 91-95.
- [10] 杨培宏, 刘文颖, 魏毅立, 等. 基于自适应逆推变结构方法的非线性励磁控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 125-129, 144.
YANG Peihong, LIU Wenyong, WEI Yili, et al. Nonlinear excitation control based on adaptive backstepping and variable structure method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 125-129, 144.
- [11] 王烨, 牟宪民, 齐琛. 三相电流源型 STATCOM 的无锁相环控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 131-136.
WANG Ye, MU Xianmin, QI Chen. A control strategy of three-phase current source converter based STATCOM without PLL[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 131-136.
- [12] 丁理杰, 杜新伟, 周惟婧. SVC 与 STATCOM 在大容量输电通道上的应用比较[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 77-81, 87.
DING Lijie, DU Xinwei, ZHOU Weijing. Comparison of application of SVC and STATCOM to large capacity transmission path of power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 77-81, 87.
- [13] 许正平, 李俊. 双向全桥 DC-DC 变换器高效能控制研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 140-146.
XU Zhengping, LI Jun. Research and implementation of bidirectional full bridge DC-DC converter with high-efficiency control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 140-146.

收稿日期: 2016-06-18; 修回日期: 2016-09-25

作者简介:

徐在德(1984—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网无功、谐波、三相不平衡治理研究; E-mail: 357784024@qq.com

范瑞祥(1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为电能质量。E-mail: 416291550@qq.com

(编辑 葛艳娜)