

适用于低压微电网的负载不平衡补偿系统研究

低压微电网供电系统大多是经10/0.4 kV变压器降压后,以三相四线制为用户供电,是三相生产用电与单相负载混合用电的供电网络。在装接单相用户时,供电部门应该将单相负载均衡地接在ABC三相上,但实际运行过程中,由于单相用户的不可控增容、大功率单相负载接入以及单相负载用电的不同时性,都会造成三相负载的不平衡,从而对系统的安全稳定运行造成影响。提出一种三相四桥臂电流不平衡补偿系统,对其工作原理及控制策略进行分析,并在不平衡负载及非线性负载条件下进行仿真试验。试验结果表明,该系统可以很好地实现负载不平衡补偿。

孙 威 肖海伟 李 颖 郭均柳 黄 煜/欣旺达电子股份有限公司

0 引言

随着分布式能源及储能技术的快速发展,居民园区中的独立微电网技术也得到广泛的研究^[1-3]。由于居民园区微电网为低压系统,往往采用三相四线制结构,因此三相负载平衡已成为低压微电网安全供电的基础。实际运行过程中,由于单相用户的不可控增容,大功率单相负载的突然接入以及单相负载用电的不同时性,都会造成三相负载的不平衡,从而产生负序、零序电流,造成电压不平衡及中性线电流增大,降低线路和配电变压器的供电效率,从而影响用户的电能质量^[4]。

基于上述问题,如何对三相负载不平衡进行有效的动态补偿,提高微电网系统的供电可靠性,国内外学者进行了

大量研究。文献[5]提出在负荷点串并相应的无功导纳网络,将不对称负荷补偿为三相对称的,该方法虽然控制简单、成本低廉,但只适用于静态工作条件,补偿性能受负荷变化影响较大;文献[6]对不平衡电路的瞬时功率进行分析,提出基于时间波动的平衡功率及不平衡功率概念,在此基础上将不平衡电路分为正序和负序网络,并利用不平衡功率的波动特性提出基于SVC的负载不平衡补偿方法;文献[7]基于瞬时功率理论对负载不平衡问题进行分析,提出利用相间耦合电感对三相不平衡负载进行补偿的方法;文献[8]基于三相静止无功补偿器原理,分析开关占空比和补偿器等效电导间的关系,通过计算补偿器开关占空比,来对三相负载不平衡进行补偿。

本文提出了一种三相四桥臂电流不平衡补偿系统,该系统可以检测负载电流的不平衡分量,通过变流装置对电网电流进行补偿,从而保证电网三相电流维持正弦并保证中性线电流为零。全文详细阐述了该补偿系统的拓扑结构及工作原理,并对其主电路及控制系统进行设计分析。相应仿真和试验结果证明了该补偿系统的正确性和有效性。

1 系统结构及工作原理

三相四桥臂电流不平衡补偿系统结构如图1点画线框内所示,主要由指令电流运算电路、补偿电流发生电路、驱动电路、主电路变流器以及LCL滤波器构成。



孙 威/工程师

关键词/Keywords

三相四线制·
负载不平衡·
补偿系统·
非线性负载·

国家高技术研究发展计划项目(863计划)(2014AA052004),国家电网公司软科学项目(WBS:8142DG160001)。

通滤波器后得到基波直流分量 I_{Lf} 、 I_{Lf} ，后与 I_{Ld} 、 I_{Lq} 做差得到不平衡电流直流分量，与 I_{cd} 、 I_{cq} 做差经PI调制及 dq 坐标反变换，后经PWM调制得到三相四桥臂电流不平衡补偿系统前三桥臂的PWM开关信号；将负载中线电流 $-I_{Ln}$ 与补偿系统第四桥臂输出电流 I_{cn} 做差，经PI调节及PWM调制，得到第四桥臂的PWM开关信号。

基于上述控制策略，三相四桥臂电流不平衡

补偿系统可以向电网输送与负载电流不平衡分量大小相等极性相反的电流，从而保证电网三相输出电流的对称。

3 系统仿真及结果

为验证所提出的三相四桥臂电流不平衡补偿系统控制策略的正确性，基于图1搭建了系统仿真模型如图3所示。

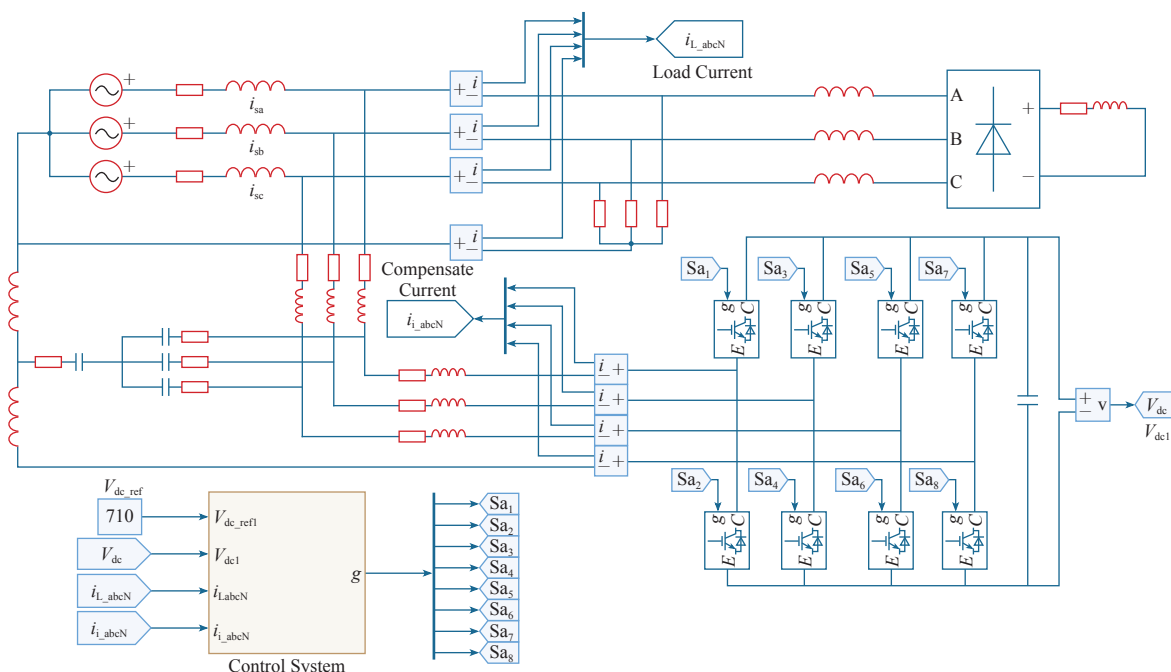
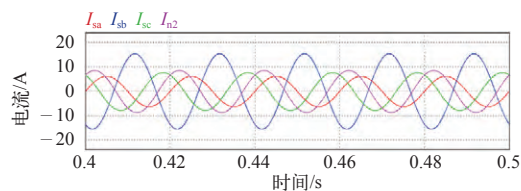


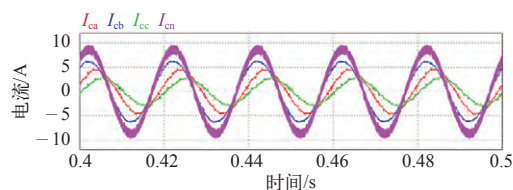
图3 仿真结构图

图3中，三相交流电源相电压峰值为311 V，频率为50 Hz；不平衡负载模块，三相负载电阻分别为40 Ω 、20 Ω 和50 Ω ；非线性负载模块采用直流侧带阻感性负载的三相晶闸管整流桥电路模块。具体仿真结果如图4所示。

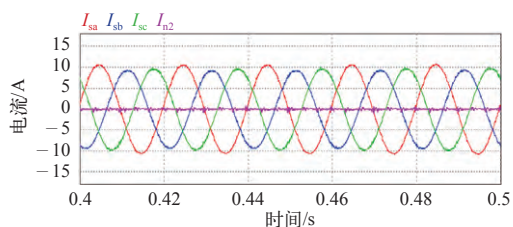
由图4a可以看出，由于负载不对称，b相重载，电流明显高于a相、c相，同时中性线电流也不为零。图4b为三相四桥臂装置输出的电流，从图



(a) 补偿前电网电流



(b) 三相四桥臂电流不平衡补偿系统输出电流



(c) 补偿后电网电流

图4 三相负载不平衡仿真结果

4b中可以看出，负载不对称产生的中性线电流可

以完全通过补偿装置补偿。由图4c可以看出,经补偿装置后电网输出电流的波形为三相对称正弦波,且中性线电流为零,证明了所提电流不平衡补偿策略的有效性。

在不平衡负载条件下加入非线性负载的仿真结果如图5所示。

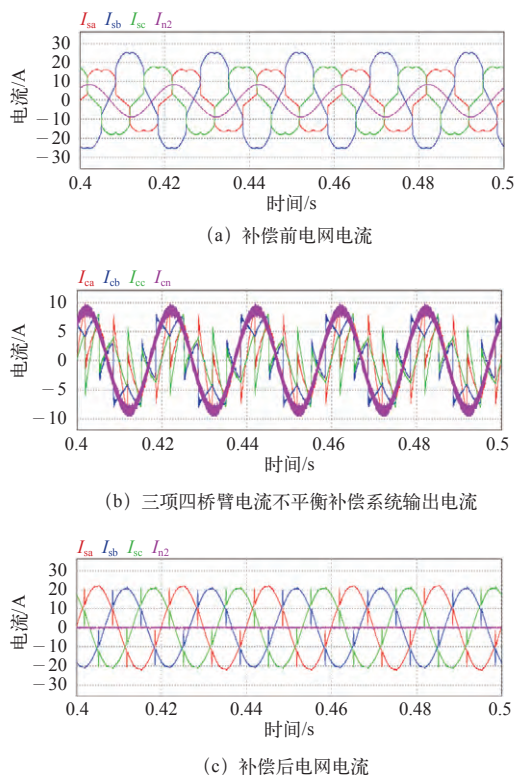


图5 加入非线性负载后仿真结果

由图5a可以看出,由于非线性负载的引入,使三相电网电流发生较大的畸变,同时由于仍存在不对称负载,中性线仍有电流。图5b为三相四桥臂逆变器的补偿电流。由图5c可以看出,经补偿后,电网三相输出电流恢复正弦,同时中性线电流也变为零。

4 系统试验和结果

为了验证上述仿真结果的正确性,在实验室搭建了小型试验样机,具体参数如下。电源为380 V/50 Hz,系统阻抗可忽略不计;非线性负载为三相全控整流桥带阻感负载,其中感性负载 $L_d=2$ mH,阻性负载 $R_d=30$ Ω ;LCL滤波器参数分别为:电感 $L_1=2$ mH, $L_2=0.5$ mH, $C=2$ μ F;系统采样率为

20 kHz;试验样机容量为6 kV·A。试验系统结构图如图6所示。

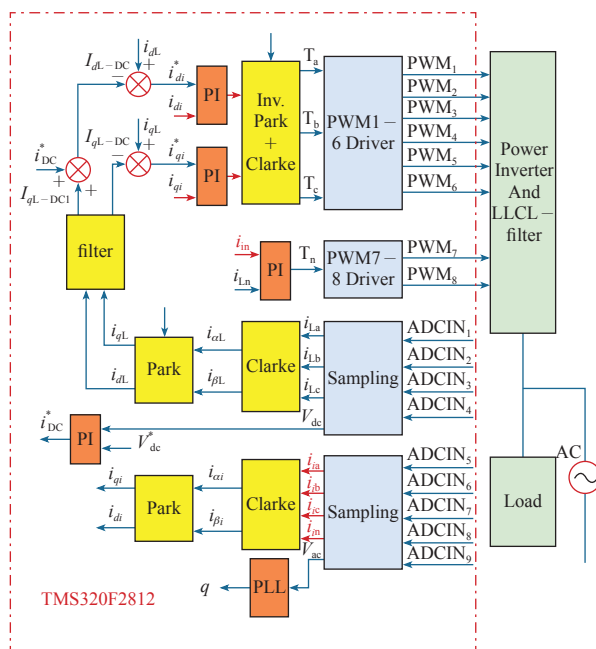


图6 试验结构图

具体试验结果如图7所示。

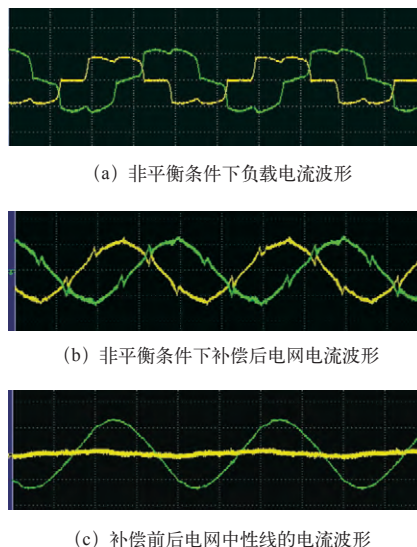


图7 试验结果

图7a为负载不平衡条件下的A相、B相的负载电流波形,试验过程中令A相阻性负载断路,实现负载不平衡工况。从图7a中可以看出,A相、B相电流幅值不等且存在大量谐波;图7b为补偿后电网A、B两相的电流。可以看出,原来不平衡的电流经过三相四桥臂电流不平衡补偿样机补偿后达

到平衡,而且波形为正弦波。图7c为补偿前后电网中性线的电流波形,其中绿色为补偿前电网中性线上的电流,黄色为补偿后的电网电流的波形。可以看出,经过三相四桥臂电流不平衡补偿样机补偿之后,电网中性线上电流为零。试验结果验证了所提控制策略的有效性。

5 结束语

三相四桥臂电流不平衡补偿系统作为一种有效的动态补偿装置,已经成为电力电子领域的研究热点。该系统可以实时检测、补偿低压微电网中的不平衡电流,具有良好的动态补偿功能。所研究的重点是三相四桥臂电流不平衡补偿系统的控制方法,主要结论如下。

1) 根据三相四桥臂电流不平衡补偿系统的拓扑结构,分析了其工作原理,并针对各部分的功能进行详细研究,选择了基于瞬时无功率理论的 $i_p - i_q$ 运算方式作为不平衡电流检测模块的核心方法。

2) 对三相四桥臂电流不平衡补偿系统的控制电路进行设计,实现负载不平衡电流的跟踪,并控制主电路功率器件的开关,生成补偿电流,保证电网电流的正弦。

3) 对三相四桥臂电流不平衡补偿系统进行仿真建模,并基于TMS320F2812芯片进行控制系统设计。仿真和试验结果证明了所提电流不平衡补偿系统的正确性和有效性。

参考文献

- [1] 王成山,武震,李鹏.微电网关键技术研究[J].电工技术学报,2014,29(2):1-12.
- [2] 沈沉,吴翔宇,王志文,等.微电网实践与发展思考[J].电力系统保护与控制,2014,42(5):1-11.
- [3] 罗奕,王钢,汪隆君.微网可靠性评估指标研究[J].电力系统自动化,2013,37(5):9-14.
- [4] 白丹,蔡志开,彭力.三相逆变电源不平衡负载研究[J].电力系统自动化,2004,28(9):53-57.
- [5] 张勇军,韩东昆,刘巍.受端电网静态/动态无功补偿综合优化[J].电力自动化设备,2009,29(3):32-36.
- [6] 丁仁杰,刘建,赵玉伟.不平衡电路的瞬时功率分析及不对称负荷补偿方法[J].电工技术学报,2007,34(1):120-125.
- [7] 王茂海,孙元章.通用瞬时功率理论在三相不平衡负载补偿中的应用[J].中国电机工程学报,2003,23(11):56-59.
- [8] Lee S, Wu C. Reactive power compensation and load balancing for unbalanced three-phase four-wire system by a combined system of an SVC and a series active filter[J]. IEEE Proceedings: Electric Power Applications, 2000, 147(6): 563-571.

(收稿日期:2016-03-21) **EA**

(上接第28页)

- [7] 薛辰东,杨晓洪,崔鼎新,等.1 000 kV交流输电线路架空地线感应电压测试分析[J].高电压技术,2009,35(8):1802-1806.
- [8] 王小凤.CDEGS软件在电力系统中的应用[D].杭州:浙江大学,2007.
- [9] 冯桂宏,张炳义,王晓晖,等.500 kV同塔四回

路生态环境影响分析[J].电网技术,2007,31(23):52-56.

- [10] 张振泉,陈先勇,贺义平.750 kV输电线路下方感应电的原因分析及防范措施[J].电子世界,2013(13):73-74.

(收稿日期:2015-04-23) **EA**