

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.05.012

一种实用型电能质量调节装置及其控制

栗伟周, 李圣清, 徐文祥, 曾欢悦

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对微电网电能质量问题, 提出一种将微网储能单元与有源滤波器组合的新颖实用型电能质量调节装置, 设计适用于该装置的双级变流器系统。给出了该系统的结构组成, 分析装置的工作原理; 基于含前馈校正的直流母线电压预测控制方法, 控制调节双级变流器的直流母线电压; 运用无需谐波电流检测的直接功率控制方法, 对有源滤波器进行控制。该装置不仅能实现短时供电中断时的UPS功能, 而且能够抑制谐波。仿真结果验证了该装置的可行性和有效性。

关键词: 电能质量; 双级变流器; 预测控制; 前馈校正; 直接功率控制

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)05-0053-05

Design and Control of Practical Power Quality Conditioner

Li Weizhou, Li Shengqing, Xu Wenxiang, Zeng Huanyue

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: According to the problems of micro-grid quality, proposes a new type of power quality regulating device, which combined with micro-grid energy storage unit and the active power filter, applicable to the design of two-stage converter system of the device. Gives the structure of the system, and analyses the basic working principle. The DC bus voltage predictive control with feedforward correction is used to regulate the DC bus voltage of two-stage converter. The direct power control method without the harmonic current detection is used for the control of active power filter. The device not only realizes UPS function at short-term interruptions but also suppresses the harmonics. The simulation results verify the feasibility and effectiveness of the device.

Keywords: electric power quality; two-stage converter system; predictive control; feedforward correction; direct power control

0 引言

微电网(简称微网)技术的不断发展, 为规模化间歇式电源的并网运行提供了安全保障, 但由于

微网中含有较多非线性的电力电子装置, 使微网电能质量受到较大影响, 而其过度的污染反过来又制约了间歇式电源的规模化并网^[1-2]。因此, 研究适用于微网环境下的电能质量治理装置显得尤为迫切。

收稿日期: 2013-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077046), 湖南省自然科学基金资助项目(14JJ2116), 湖南省重点建设学科基金资助项目(201176), 湖南工业大学研究生科研创新基金资助项目(CX1302)

作者简介: 栗伟周(1988-), 男, 河南安阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电网电能质量治理与逆变装置开发, E-mail: liweizhou1988@163.com

通信作者: 李圣清(1961-), 男, 湖南永兴人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力系统谐波的分析与治理, 电能质量调节与控制的研究, E-mail: lsq1961@sohu.com

将微网中的储能单元和有源滤波器进行组合,不失为解决微网电能质量的一种较理想的途径。文献[3]利用微网储能单元与有源滤波器主电路结构相似、功能互补的特点,将二者组合实现“一机多能”,分析了装置的可行性和实现方法,但没有详细给出该装置的具体主电路结构和相关控制策略。文献[4]研究采用双向 Buck-Boost 变换器抑制超级电容器储能的双级式变流器系统直流母线电压波动,提出了电压电流双闭环与功率前馈相结合的控制方法。文献[5]利用经典控制理论,从动态性能方面分别对前后级控制器参数进行设计,利用基于功率平衡和时滞补偿相结合的前馈补偿方法,保证直流母线电压的稳定性,但该装置在实际调节过程中,直流母线电压的调节产生不可定量的滞后时间,利用固定的时滞补偿不一定总能达到良好效果。

本文在上述研究的基础上,提出适用于微网储能单元与有源滤波器组合的双级变流器系统。基于含前馈校正的直流母线电压预测控制方法,实现对直流母线电压的控制;运用直接功率控制方法来验证装置同时具有谐波抑制功能。

1 双级变流器拓扑结构及原理

基于双级变流器系统的电能质量调节装置整体实现框图如图 1 所示。

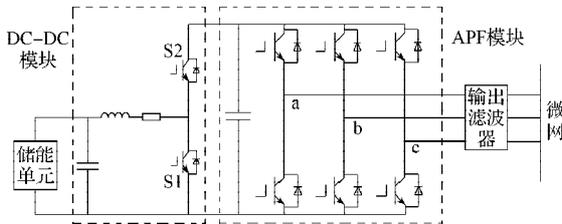


图1 双级变流器拓扑结构图

Fig. 1 Two-stage converter topology

图 1 中装置主要由储能单元模块、DC-DC 模块、典型 APF (active power filter) 模块组成。DC-DC 模块完成对储能单元输出侧电压的升降以及直流母线电压的稳定性处理; APF 模块包含直流母线电容和 DC-AC 模块, DC-AC 模块完成交流和直流之间的相互转换。其中 DC-DC 模块和 APF 中的 DC-AC 模块统称为双级变流器系统。

采用 DC-DC 环节和 DC-AC 环节相结合的双级变流器系统,能有效解决储能单元因输出电压低而无法并网的瓶颈。DC-DC 环节由目前应用较广泛的 Buck-Boost 双向变换器构成。由于储能单元的输出电压一般比较低,而有源滤波器直流侧电压至少要高

于交流侧线电压的有效值,所以必须对储能单元的输出进行升降压处理。DC-DC 变换器低压侧接储能单元,高压侧与直流母线相连。DC-AC 环节作为典型的逆变器,其结构特点和并网逆变器或有源滤波器主电路中的逆变器基本一致,按要求应具有整流和逆变 2 种工作模式^[6]。

升降压 DC-DC 变换器是两象限运行下的 DC-DC 变换器,其两端电压极性不变的情况下,输入、输出电流的方向可以改变,实现能量的双向流动^[7]。DC-DC 模块在 2 种工作状态下控制的目的不同: Buck 电路模式工作状态的目的是给储能单元充电; Boost 电路模式工作状态的目的是维持并网变换器的直流母线电压稳定,以使并网变流器能够向电网输出恒定的有功功率^[8]。DC-DC 变换器控制系统功率输出,电流环通常采用 PI 控制^[9]。DC-AC 模块的主电路是 PWM (pulse width modulation) 变流器,既可工作于整流模式,亦可工作于逆变模式。DC-AC 模块的应用相当广泛,是构成电力电子装置的核心元器件。针对 PWM 变流器有许多控制方法,它的控制性能直接影响装置的整体性能。现行控制策略中以直接电流、间接电流控制为主,这 2 种闭环控制策略算法复杂,且需要调制模块。而直接功率控制因具有控制方法简单,抗干扰能力强,良好的动态性能,可实现有功、无功的解耦控制等诸多优点而被广泛关注^[10-11]。

2 整体模型及直流母线电压控制

2.1 装置的工作模式

图 2 为装置的简化模型图。

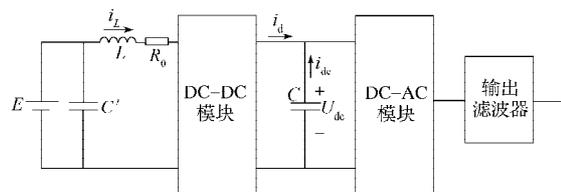


图2 装置简化模型

Fig. 2 Simplified model of the device

该装置有 2 种工作模式:

1) 充电模式。此时装置的能量流动方向由微网侧至储能单元侧, DC-AC 模块处于整流状态, DC-DC 模块处于 Buck 状态。

2) 放电模式。此时装置的能量流动方向由储能单元侧至微网侧, DC-AC 模块处于逆变状态, DC-DC 模块处于 Boost 状态。放电模式下装置在为微网供电的同时具备治理谐波的功能。

双级变流器之间通过并联直流母线电容进行解

耦,直流母线电容电压与两级变流器的功率变化联系紧密,其动态电压方程为

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = i_{dc}, \quad (1)$$

式中: U_{dc} 为直流母线电容电压;

i_{dc} 为直流母线电容电流;

i_d 为 DC-DC 模块输出电流。

由功率平衡,直流侧输出功率

$$P_1 = E i_L = U_{dc} i_d, \quad (2)$$

式中 E, i_L 分别为直流侧储能单元端电压和输出电流。

考虑逆变器效率,交流侧输出功率

$$P_2 = U_{dc} (i_{dc} + i_d) \approx 1.5 u_o i_o, \quad (3)$$

式中 u_o, i_o 分别为交流侧电压和电流的有功分量。

直流母线电压控制的目的是通过对两级变流器的适当控制,调节系统的动态平衡,保证直流母线电压的稳定。

2.2 含前馈校正的直流母线电压预测控制

直流母线电压的稳定与否直接决定装置的整体性能,甚至关乎装置是否能够安全运行。对直流母线电压的控制主要由 DC-DC 模块、DC-AC 模块共同完成,这涉及到了协调控制的问题。

为了减少或消除常规控制中 d 轴电流参考滞后直流侧电流输入的问题,文献[5]在控制环节中引入前馈传递函数 $G_{fd}(s)$ 。由于直流侧电流采样存在延时,在微分时间常数中增加了这部分时间,有效地跟踪并调整了直流母线电压的平稳性。但是,装置在实际调节的过程中,比如逆变器的响应时间、指令的运算时间等,都有可能使直流母线电压的调节产生不可定量的滞后时间。将预测控制运用到直流母线电压的稳定性控制中,通过对历史数据的统计以及现场运行情况,推算出下一时刻直流母线电压的走向,从而使其得到有效控制。含前馈校正的直流母线电压预测控制结构如图3所示。

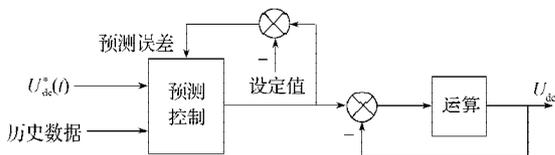


图3 含前馈校正的直流母线电压预测控制

Fig. 3 The DC bus voltage predictive control with feedforward correction

图中 $U_{dc}^*(t)$ 是某一时刻直流母线电压指令值。图中的前馈校正环节,是将预测控制的输出值与设定值进行比较,得出预测控制误差,将该误差重新输入到预测控制中,通过消除预测误差,能更精确地调节直流母线电压。将预测控制模块之后得到的直

流母线电压信号与输出信号值进行比较,经过运算后将驱动信号发给双级变流器系统中的各个模块,根据两模块的实际运行情况,有选择地调节相应的开关,从而达到调节直流母线电压的目的。通过对装置直流母线电压的预测加反馈校正过程,使控制系统抗干扰性能增强,同时也能克服系统潜在的不稳定性,鲁棒性较好。

2.3 直流母线电压参考值预测

为了克服该装置中 PWM 变流器的采样延时和输出延时,同时避免目前很多预测算法运算量大的问题,本文采用线性预测算法。预测算法为

$$U_{dc}^*(t+1) = 2U_{dc}^*(t) - U_{dc}^*(t-1), \quad (4)$$

式中: $U_{dc}^*(t+1)$ 表示下一开关时刻直流母线电压的预测值;

$U_{dc}^*(t)$ 表示当前时刻直流母线电压实际值;

$U_{dc}^*(t-1)$ 表示上一开关时刻直流母线电压实际值。

该预测方法对直流母线电压的线性变化有比较好的预测效果。

3 APF 模块控制及实现

由于实用型电能质量调节装置含有较复杂的双级变流器系统以及所处运行环境的不稳定性,装置要实现滤波功能,需要一种与常规 APF 控制不同的特殊方法。常规控制中,需要检测负载谐波电流以及 APF 的输出电流,然后进行分析运算。如果把常规方法运用到双级变流器的 DC-AC 模块,需要将运算得出的谐波电流指令信号叠加到输出有功电流信号上,这样增加了控制器的不稳定性,同时,电流的检测和计算环节影响了装置补偿谐波的实时性。

基于上述原因,给出一种无需谐波电流检测的直接功率控制方法。这种方法直接省去复杂的负载谐波电流检测和运算环节以及 APF 的输出电流检测环节。采用直接功率控制方法能有效提高系统的动态性能,实现对微网的功率调节和谐波补偿^[12-14]。不含谐波电流检测的直接功率控制如图4所示。

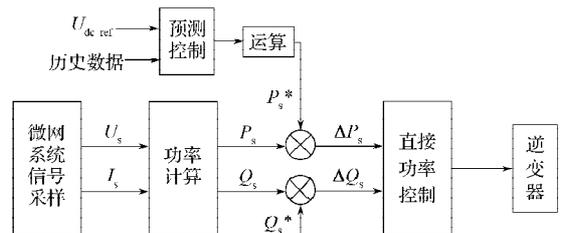


图4 无谐波电流检测的有源滤波器控制

Fig. 4 The control diagram of APF without harmonic current detection

图4中 U_s, I_s 分别为微网系统电压电流信号。将经过功率运算模块得出系统的功率信号 P_s, Q_s 与给定信号 P_s^*, Q_s^* 比较后, 输入直接功率控制环节, 最后输出信号对逆变器进行控制。给定信号 P_s^*, Q_s^* 为微网有功和无功参考值, 数值上等于系统电源提供给负载的基波功率和开关损耗值之和。

4 仿真结果分析

为了验证实用型电能质量调节装置的可行性, 搭建基于 Matlab7.1 的双级变流器仿真平台。其中微网线电压等级为 380 V, 频率为 50 Hz; 储能单元端口电压为 630 V, 直流母线电压标准值为 800 V, 储能单元输出侧直流电感为 5 mH; DC-DC 侧开关频率为 3 200 Hz, DC-AC 侧开关频率为 10 kHz。

图5为系统发生短时供电中断时的 UPS (uninterruptible power system) 功能仿真效果图。由图可知, 当系统电源在 0.04 s 时供电发生中断, 此时调节装置投入并运行于放电模式, 向系统输出有功功率, 减小负载因供电中断带来的损失。由于系统电压中断后, 负荷全部电能由储能单元提供, 而仿真过程中逆变器使用 SVPWM 方式进行调制, 故其会产生一定的开关毛刺, 但并不影响装置的整体运行。

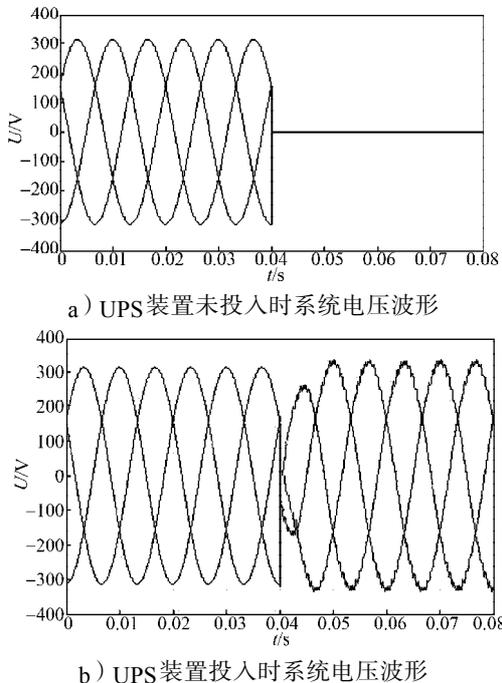


图5 UPS 功能仿真效果

Fig. 5 Simulation results of UPS

图6为不加任何前馈校正和预测控制时, 直流母线电压 U_{dc} 在该装置功率突然变化时的波形。从图可以看出, 由于未加任何前馈和预测, 在扰动突然出现时, 直流母线电压 U_{dc} 受到的冲击很大, 且恢复时

间较长, 图中在 0.09 s 时才基本恢复到设定值。

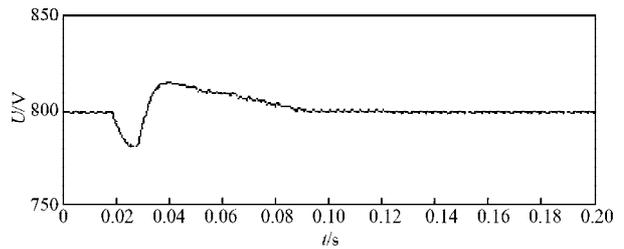


图6 传统控制下直流母线电压波形

Fig. 6 The DC voltage waveform under the traditional control

图7为应用本文提出的含前馈校正的直流母线电压预测控制方法时, 直流母线电压 U_{dc} 在该装置功率突然变化时的波形。由图可明显看出, 在本文提出的控制策略作用下, 两级变流器控制的协调性增强, 直流母线电压在功率突变时的响应速度明显得到提高, 其受到的冲击和波动得到有效控制。

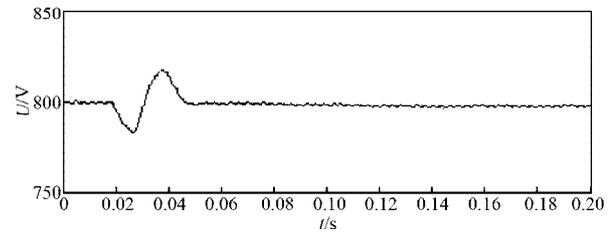


图7 本文控制方式下直流母线电压波形

Fig. 7 The waveform for DC bus voltage under the proposed control method

图8为采用直接功率预测控制方法进行控制时, 系统放电模式下对微网谐波电流补偿的效果图。由图可以看出, 补偿前谐波电流畸变严重, 补偿后得到明显改善。

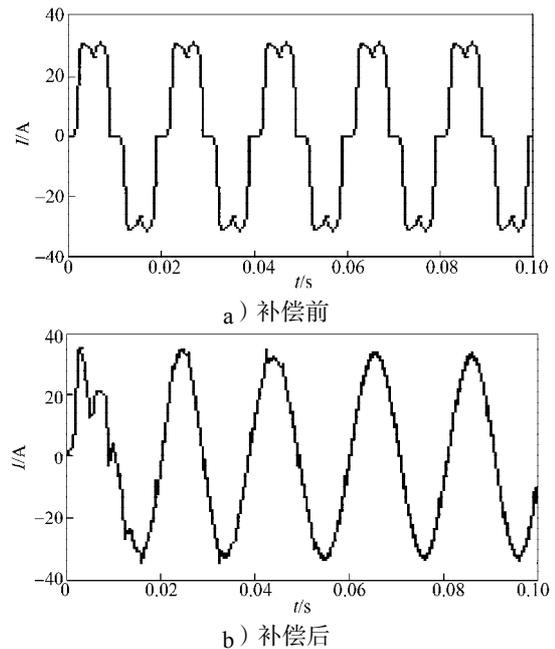


图8 谐波电流补偿效果图

Fig. 8 Effect of harmonic current compensation

在放电模式下对系统谐波电流进行 FFT (fast fourier transform) 谐波分析, 结果如图 9 所示。由图可知, 补偿前畸变率达 24.72%, 补偿后畸变率降至 2.36%。补偿的第一个周期内有轻微的波动, 是由于装置刚投入时, 对系统的冲击所引起, 但并不影响其总体补偿效果。

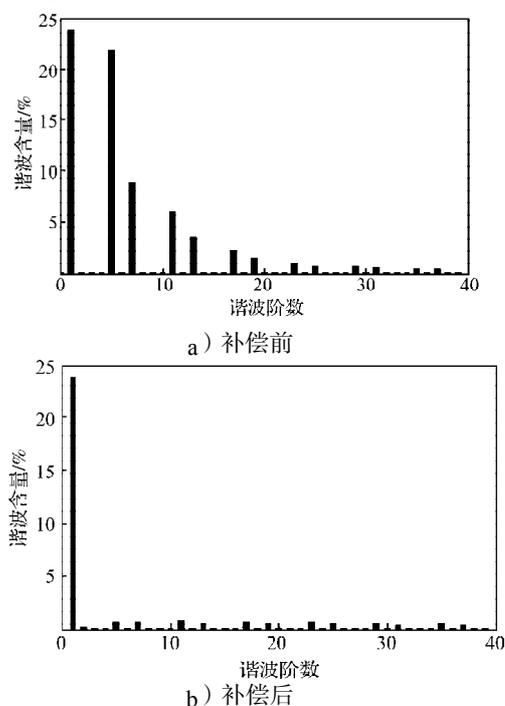


图 9 系统谐波电流 FFT 谐波分析图

Fig. 9 FFT analysis of harmonic current

5 结语

本文针对微网中存在的严重电能质量问题, 提出将微网储能单元与有源滤波器进行组合, 构成一个实用型电能质量调节装置。针对该装置设计一种双级变流器系统, 双级变流器中 DC-DC 模块完成对储能单元输出电压的升降压处理, DC-AC 模块完成由直流向交流的转换, 且同时具有发出谐波补偿电流的功能。为控制直流母线电压的稳定性, 提出含前馈校正的直流母线电压预测控制方法。仿真结果证实该控制策略是有效可行的。本文为解决微网电能质量问题提供了一个新颖且成本较低的方法, 为间歇式电源的并网环境提供保障。

参考文献:

[1] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
Lu Zongxiang, Wang Caixia, Min Yong, et al. Overview on Microgrid Research[J]. Automation of Electric Power

Systems, 2007, 31(19): 100-107.

- [2] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32.
Chen Wei, Ai Xin, Wu Tao, et al. Influence of Grid-Connected Photovoltaic System on Power Network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [3] 李圣清, 栗伟周, 徐文祥, 等. 微电网储能单元与有源电力滤波器的组合研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 56-60.
Li Shengqing, Li Weizhou, Xu Wenxiang, et al. Combination Reseraching of Micro-Grid Storage Unit and Active Power Filter[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 56-60.
- [4] 张国驹, 唐西胜, 周龙, 等. 基于互补 PWM 控制的 Buck/Boost 双向变换器在超级电容器储能中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 15-21.
Zhang Guojun, Tang Xisheng, Zhou Long, et al. Research on Complementary PWM Controlled Buck/Boost Bi-Directional Converter in Supercapacitor Energy Storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 15-21.
- [5] 王成山, 李霞林, 郭力. 基于功率平衡及时滞补偿相结合的双级式变流器协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 109-117.
Wang Chengshan, Li Xialin, Guo Li. Coordinated Control of Two-Stage Power Converters Based on Power Balancing and Time-Delay Compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 109-117.
- [6] 杨刚, 张涛, 刘志超, 等. 基于电流前馈补偿的双极式变流器控制策略[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 77-80.
Yang Gang, Zhang Tao, Liu Zhichao, et al. The Feedforward Compensation Based Control Strategy of Bipolar System Converters[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 77-80.
- [7] 张方华, 朱成花, 严仰光. 双向 DC-DC 变换器的控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 46-49.
Zhang Fanghua, Zhu Chenghua, Yan Yangguang. The Controlled Model of Bi-Directional DC-DC Converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 46-49.
- [8] 马奎安. 超级电容器储能系统中双向 DC/DC 变流器设计[D]. 浙江大学, 2010.
Ma Kuian. The Design of Bi-Directional DC/DC Converter Applied in Super-Capacitor Storage Systems[D]. Zhejiang University, 2010.
- [9] Fakham H, Lu Di, Francois B. Power Control Design of a Battery Charger in a Hybrid Active PV Generator for Load-Following Applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 85-92.

(下转第 71 页)