

电能质量扰动发生器控制策略及其实现

戴喜良, 李尚盛, 孙建军, 杨泽洲, 吴楠

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了测试电力变压器、CVT、电力电容器、无功与谐波补偿装置等试验设备在电能质量扰动下的工况, 设计了一种电能质量扰动发生器, 能模拟实际电网输出各种形式电压与电流扰动。采用电压外环与电流内环的PWM整流控制实现了直流电压的稳定; 利用电压前馈与重复学习相结合的控制策略实现了发生器较高精度输出; 利用DSP+FPGA构建控制系统具有较好的实时性与可靠性。通过10 kV、2 MVA工业样机实验, 证明了设计的正确性。

关键词: 电能质量扰动发生器; 电压扰动; 电流扰动; 控制策略; DSP+FPGA

Control strategies and implementation of power quality disturbance generator

DAI Xi-liang, LI Shang-sheng, SUN Jian-jun, YANG Ze-zhou, WU Nan

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to test the the working condition of devices such as power transformer, CVT, power capacitor, reactive and harmonic compensator in power quality disturbance environment, a power quality disturbance generator is developed, which can simulate the actual power system to output various forms of power quality voltage and current disturbance. The stability of the DC voltage is realized by use of voltage outer-loop and current inner-loop PWM rectifier control; by use of a control strategy which combines voltage feed-forward and repetitive learning, the high accuracy output is achieved; the control system constructed by DSP + FPGA has good real-time and reliability; the correctness of the design is proved through the tests on 10 kV, 2 MVA industrial prototype.

Key words: power quality disturbance generator; voltage disturbance; current disturbance; control strategy; DSP+FPGA

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0131-07

0 引言

近年来, 我国电力系统飞速发展, 为国民经济的快速发展提供了强有力的电力保障。以特高压交直流输电网络为骨架、多级电网协调补充的智能化坚强电网逐步形成, 很好地解决了输供电容量问题^[1-2]。与此同时, 随着工业技术的发展、高科技的应用, 特别是由此带来的电力电子负荷大量投入, 电能质量和供电可靠性等问题得到越来越多的关注。考虑到电力系统负荷的多样性和复杂性, 现代电力系统负荷的典型特性可以归结为谐波含量大(整流设备)、功率因数低(三相感应电机)、功率波动剧烈(电弧炉)、冲击性强(电气化铁道和城市轨道交通)等几类。当前电网电能质量问题非常突出, 这不仅会缩短设备使用寿命、增加电网损耗、降低成品率等, 严重时甚至会危及电力系统的正常运行^[3-5]。

目前, 出现了大量的电能质量治理设备^[6-12], 较常见的有: 动态电压恢复器(DVR)、固态切换开关(SSTS)、有源电力滤波器(APF)、静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)、不间断电源(UPS)等。除此之外, 还有很多其他定制电力系统装置, 解决了特定工况下的电能质量问题。电能质量问题的突出及电能质量治理设备的发展, 对电力设备测试手段提出了挑战。这些挑战主要来自两个方面:

第一, 电能质量对电力设备的影响, 包括传统设备及新兴设备。在传统电力设备测试中, 由于试验手段及系统需求的限制, 往往忽略了电能质量问题的影响, 而仅仅针对理想工况下的技术指标进行测试, 对于非理想工况, 特别是各种暂态过程及谐波对电力设备的影响, 无法进行测试。

第二, 如何测试和评价电能质量分析理论的正确性及设备的治理性能。在进行电能质量研究时,

需要对电能质量分析理论的正确性进行校验,对电能质量治理设备的应用效果进行检验。针对目前出现的众多电能质量治理设备,缺乏足够的手段对其治理性能等关键性技术指标进行测试与评价。

目前,已有多篇文献涉及电能质量扰动发生装置的研究,文献[11]提出了基于交-直-交结构的大功率电能质量信号发生装置,但其逆变侧未采用级联型结构,因而限制了装置电压等级与输出容量,且不易输出较高次谐波;文献[12]提出了新型多功能电压扰动发生器的设计,但只是从仿真的角度验证了设计的正确性,并未进行工程实验论证,而且缺少电流扰动模式;华北电力大学对扰动源方面做了相关研究,并且研制出了工业样机,但也只是处于低压、小容量水平^[13-15]。针对上述问题,此处提出了一种基于全控型电力电子器件的电能质量扰动发生器,其每一相由 N 个背靠背功率单元在逆变侧级联而成,能模拟各类常见的电压与电流扰动,且可实现高压、大容量输出,在实际应用中,可针对电力变压器、CVT、电力电容器、无功与谐波补偿装置等试验设备,测试其在谐波、不平衡、频率变化、波动、暂降等扰动下的工况,进而对其建立测试与评价指标。

1 扰动发生器结构

如图 1 所示,为电能质量扰动发生器单相主回路,主要由输入变压器、扰动发生器与滤波回路等部分组成。扰动发生器可看成三个单相结构在逆变侧采用星形方式连接成三相结构。其中,输入变压器为单相多绕组变压器,主要作用是将系统电压降低到一个额定值,为功率单元提供输入电压,并起到电气上的隔离作用;扰动发生器由 N 个背靠背功率单元在逆变侧级联而成,能够有效提高装置输出的等效开关频率,从而精确控制输出高次谐波,生成给定指令的电压与电流扰动;滤波回路采取 RLC 滤波,能有效消除高次纹波的干扰,主要起平滑输

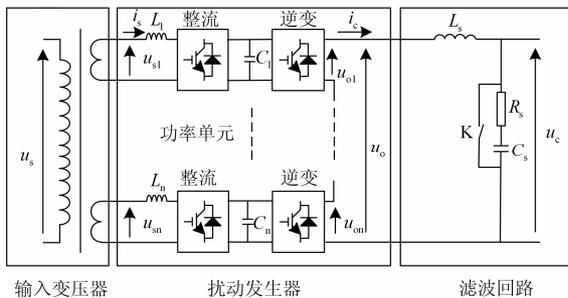


图 1 电能质量扰动发生器单相主回路

Fig. 1 Single-phase circuit of the power quality disturbance generator

出作用。与此同时,由于整流侧和逆变侧均采用全控型器件,使得背靠背结构两侧变流器均能实现四象限运行。

2 扰动发生器等效模型

2.1 电压模式系统等效模型 (图 2)



图 2 电压模式等效模型

Fig. 2 Equivalent model in voltage mode

在电压模式下,被试品通过 RLC 滤波器与扰动发生器相连。根据电压指令调节电压源的电压输出,即可改变被试品两端电压。若只考虑基波与 50 次以下谐波输出,且滤波回路能有效滤除开关纹波,则有

$$u_c = NE \sum_{s=1}^{50} M_s \sin(\omega_0 t + \varphi_s) \quad (1)$$

式中: N 为级联单元数; E 为单元直流电压; s 为谐波次数; M_s 为调制比; φ_s 为初始相位。

2.2 电流模式系统等效模型

在电流模式下,被试品通过变压器接在电网和可控电压源之间,调节可控电压源即可调节被试品两端电压,从而可以控制流过被试品的电流。图 3 为电流模式等效模型,其中, L_{s1} 为滤波电抗, L_{s2} 为输出变压器电抗, L_{s3} 为被试品电抗, u_o 为扰动源输出电压, u_s 为电网电压, i_o 为输出电流,其中

$$i_o = \frac{u_o - u_s}{j\omega \cdot (L_{s1} + L_{s2} + L_{s3})} \quad (2)$$

式中: u_s 为定值; u_o 可变,通过改变 u_o 即实现了对电流的调节,从而实现了电流模式。

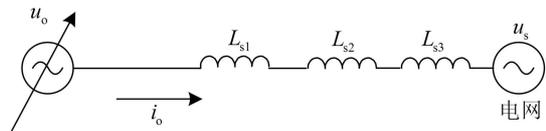


图 3 电流模式等效模型

Fig. 3 Equivalent model in current mode

3 扰动发生器控制策略

如图 4 所示,为扰动发生器其中一个背靠背功率单元主电路。功率单元主要由 PWM 整流桥与 PWM 逆变桥组成,其中: L_1 为输入侧滤波电抗; C_1 为直流侧储能电容; R_1 为均压电阻,可以为能量提供释放通道; u_{dc} 为直流侧电压; u_{s1} 为单元输入电压; u_{o1} 为单元输出电压; i_s 为单元输入电流; i_c 为

单元输出电流。

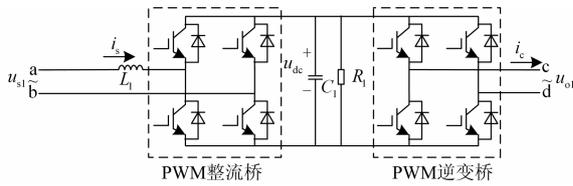


图4 背靠背功率单元主电路

Fig. 4 Main circuit of back-to-back power unit

3.1 PWM 整流桥控制策略

PWM 整流桥目的是为了建立直流电压并维持其稳定。如图5所示，为PWM整流桥的控制框图，主要采用电压外环与电流内环的双环控制算法。控制原理如下：不考虑谐波干扰， u_{dc} 在实际中包含直流分量与脉动的交流分量，而交流分量幅值较小且不易控制，因此通常将 u_{dc} 的控制转变为对直流分量 \bar{u}_{dc} 的控制，实现方法是将 u_{dc} 经过滑窗求平均后得到一个周期的平均值，即直流分量 \bar{u}_{dc} ，然后将其与指令量 u_{dc}^* 进行比较，得到偏差量 Δu_{dc} ，经过PI调节器再与输入电压 u_{s1} 相乘，便可得到与输入电压同相位的指令电流 i_s^* ；将实际输入电流 i_s 与指令电流 i_s^* 进行比较，得到的偏差量 Δi_s 经过比例环节便可得到调制信号 u_{m1} ；另外，为了使直流电压控制效果更加稳定，还需加入电压前馈控制，将 u_{s1} 乘以比例系数 k_{p2} 得到调制信号 u_{m2} 。 u_{m1} 、 u_{m2} 两者相加，即可得到最终所需的调制信号 u_m 。

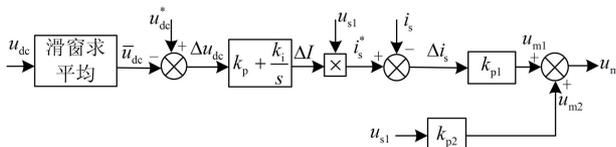


图5 PWM 整流桥控制原理

Fig. 5 Control principle of PWM rectifier bridge

3.2 PWM 逆变桥控制策略

PWM 逆变桥主要作用是生成给定的电压或电流指令信号，实现扰动源的输出。逆变侧采用单极倍频 CPS-SPWM 调制技术，能大大提高等效开关频率，从而保证输出波形的质量与效果。根据功能分类，逆变器控制策略分为电压模式控制策略与电流模式控制策略，现分别对其进行介绍。

1) 电压模式下的控制策略

如图6所示，为PWM逆变桥电压模式控制策略。扰动发生器根据所需的扰动合成指令电压 u_c^* ，将其与输出电压 u_c 进行比较，所得的偏差量进行重复学习控制，便可得到调制波 V_m 。 V_m 经过单极倍

频 CPS-SPWM 调制，再通过级联结构与滤波回路便可输出目标电压 u_c 。采用重复学习控制能够有效消除由于周期性扰动带来的周期性误差，从而提高输出的跟踪效果。

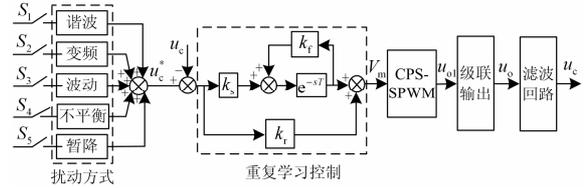


图6 PWM 逆变桥电压模式控制原理

Fig. 6 Control principle of PWM inverter bridge in voltage mode

2) 电流模式下的控制策略

如图7所示，为PWM逆变桥电流模式控制策略。电流模式控制的目标量为输出电流，但在高次谐波下，电流会在连接电抗器上产生较大的电压降，从而影响实际输出，因此需加入相应的补偿量；此外电流模式加入了功率因数连续可调的功能。控制原理如下：扰动发生器根据所需扰动合成指令电流 i_c^* ，同时根据目标功率因数可得有功与无功指令 P_{ref} 和 Q_{ref} ，分别将其与实际输出有功量 P 和无功量 Q 进行比较，经过PI调节后进行dq反变换，可得电流信号 i_t ，将 i_c^* 与 i_t 相加并与输出电流 i_c 进行比较，所得的偏差量进行重复学习控制，便可得到调制波 V_{m2} ；同时，将 i_c^* 与连接阻抗相乘可得到补偿量 V_{m3} ；加入前馈控制可得 V_{m4} ，其中前馈量包含两部分，即与输入电压同相位的分量 $k_{p5} \cdot u_s$ 以及超前于输入电压 90° 的分量 $k_{p6} \cdot u_{s\perp}$ ；将 V_{m2} 、 V_{m3} 、 V_{m4} 三者相加便可得到最终的调制信号 V_{m1} ， V_{m1} 经过单极倍频 CPS-SPWM 调制，便可输出目标电流 i_c 。

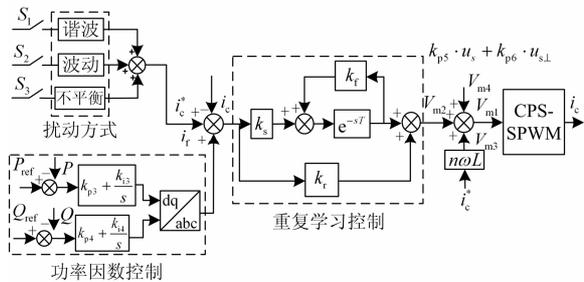


图7 PWM 逆变桥电流模式控制原理

Fig. 7 Control principle of PWM inverter bridge in current mode

3) 重复学习控制参数设计

如图8所示，为重复学习控制原理图，由图可知，其传递函数 $G(S)$ 为

$$G(S) = k_r + \frac{k_s e^{-sT}}{1 - k_f e^{-sT}} \quad (3)$$

式中： k_r 为反馈比例系数，由稳定性判据可知， k_r 的取值范围为0~0.64，为保证一定的稳定裕度， k_r 一般取0.8~2； k_f 为遗忘因子，通常取值小于1，实际中取值为0.95； k_s 为重复控制系数，当 k_r 与 k_f 取值确定后， k_s 取值影响系统稳定性，当 $k_s=2$ 时，系统处于临界稳定，因此 k_s 取值应当小于2，实际中 k_s 取值为1.5。

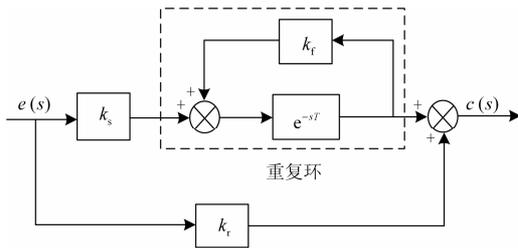


图8 重复学习控制原理图

Fig. 8 Principle of repetitive learning control

4 基于 DSP+FPGA 控制器的实现方法

如图9所示，为扰动器硬件实现结构图，主要由后台工作站、就地工作站、信号调理板、主控制器、功率单元等几部分组成。其中，主控制器由DSP+FPGA的结构组成，DSP主要负责整个系统的流程控制、数据处理、一次交流回路保护等，FPGA主要负责系统状态量监测、功率单元控制、器件及单元保护等，通过6根光纤与每相功率单元连接，其中2根光纤实现命令下发与数据交换，2根光纤发送PWM整流信号，2根光纤发送PWM逆变信号。就地工作站承担信号录波功能并负责与主控制器进行通信，通过RS422与主控制器相连，通过TCP/IP协议与后台工作站相连。后台工作站承担人机界面、录波信号、故障记录、后台通信、启动、停机控制功能，通过TCP/IP协议与就地工作站相连。信号调理板主要为高压互感器二次侧输出信号以及开关量信号与数据采集卡之间提供通信接口，并起到录波作用。

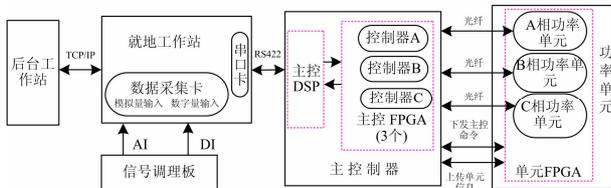


图9 电能质量扰动器硬件结构图

Fig. 9 Hardware structure diagram of the power quality disturbance generator

5 工程实验验证

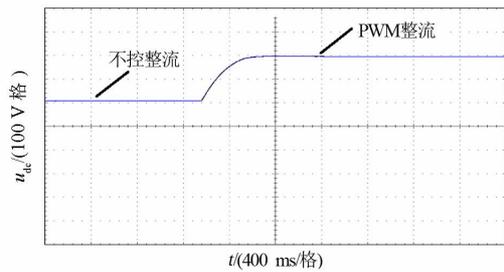
根据之前所述原理，最终可制成10 kV电压质量扰动发生器工业样机，主要参数为：输出额定容量1.5 MVA，每相功率单元数量14个，单元输入额定电压500 V，单元直流额定电压800 V，单元输出额定电压500 V，单元输入滤波电抗0.2 mH，单元直流侧电容4500 μF，单元直流侧并联电阻7.5 kΩ，单元开关频率6 kHz。

5.1 整流实验

如图10所示，为A相PWM整流实验数据，从实验数据可以看出，经过整流后，各相单元直流电压稳定在799~800 V之间，由此可知，整流控制算法实验效果良好。

编号	直流电压	交流电压	输入电流	温度
A01	799.0	512.0	2.0	29.0
A02	799.0	502.0	2.0	29.0
A03	799.0	521.0	2.0	33.0
A04	799.0	510.0	4.0	29.0
A05	799.0	503.0	4.0	29.0
A06	799.0	502.0	4.0	29.0
A07	799.0	503.0	4.0	29.0
A08	799.0	502.0	4.0	29.0
A09	799.0	500.0	4.0	29.0
A10	799.0	503.0	4.0	29.0
A11	799.0	501.0	4.0	29.0
A12	799.0	502.0	4.0	29.0
A13	800.0	502.0	4.0	28.0
A14	799.0	502.0	4.0	28.0

(a) A相整流直流电压数据



(b) A相单元整流前后波形

图10 A相整流实验数据

Fig. 10 Rectifier experimental data of A-phase

5.2 电压模式下输出实验

电压模式输出实验主要验证电压模式下扰动源输出特性，包括基波输出、谐波输出、电压暂降输出、波动输出以及不平衡输出等。通过PS-8电能质量分析仪可观察到扰动发生器不同特性下的电压输出波形。

如图11所示，为电压模式下输出实验波形，表1为试验数据。由试验结果可知，逆变侧均能根据给定的指令输出效果理想的电压波形，且具有稳态效果好、暂态响应快、输出纹波小、输出精度高等优点。

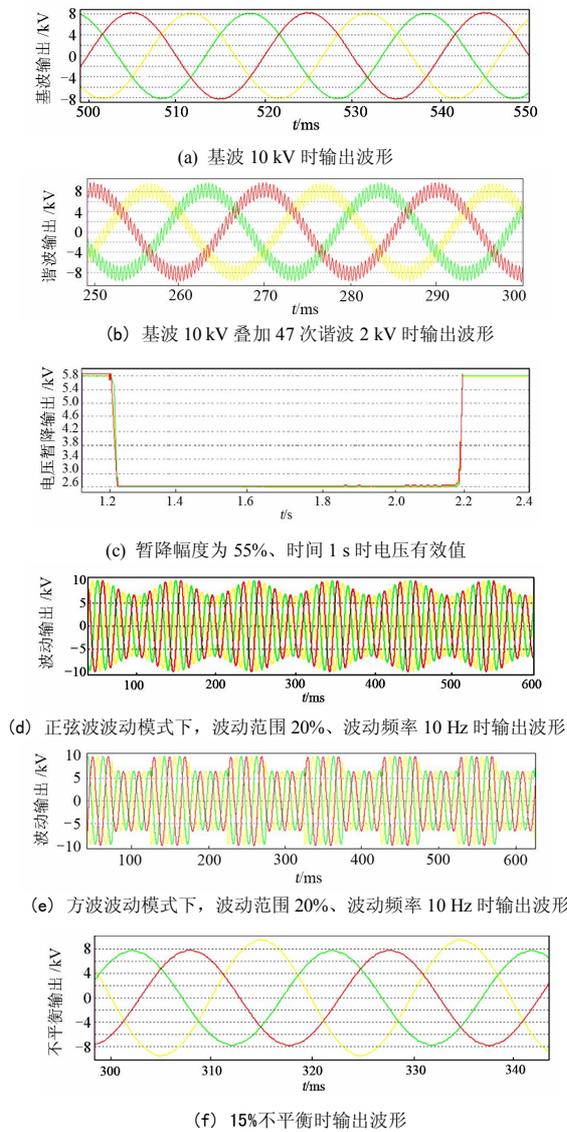


图 11 电压模式下空载输出特性实验波形

Fig. 11 Waveforms of no-load output characteristics experiment in voltage mode

表 1 电压模式试验数据

Table 1 Main parameters of voltage test

输出条件(线值)	测量值(相值)		
	参数	实测	精度
基波 10 kV	基波	5.72 kV	99.07%
基波 10 kV + 13 次 2 kV	13 次	1.15 kV	99.68%
基波 10 kV + 47 次 2 kV	47 次	1.08 kV	93.90%
基波 10 kV + 5 次 1 kV + 7 次 1 kV	5 次	0.56 kV	97.68%
	7 次	0.57 kV	98.03%
基波 10 kV + 20% 波动	波峰	6.79 kV	97.99%
基波 10 kV + 55% 暂降	暂降输出	2.56 kV	98.84%
基波 10 kV + 15% 不平衡	不平衡度	14.89%	99.27%

5.3 电流模式输出实验

电流模式输出实验主要验证电流模式下的输出特性, 将包括基波输出特性、谐波输出特性、波动输出特性以及功率因数输出特性等。通过 Fluke1750 可观察到扰动发生器不同特性下的电流输出波形。

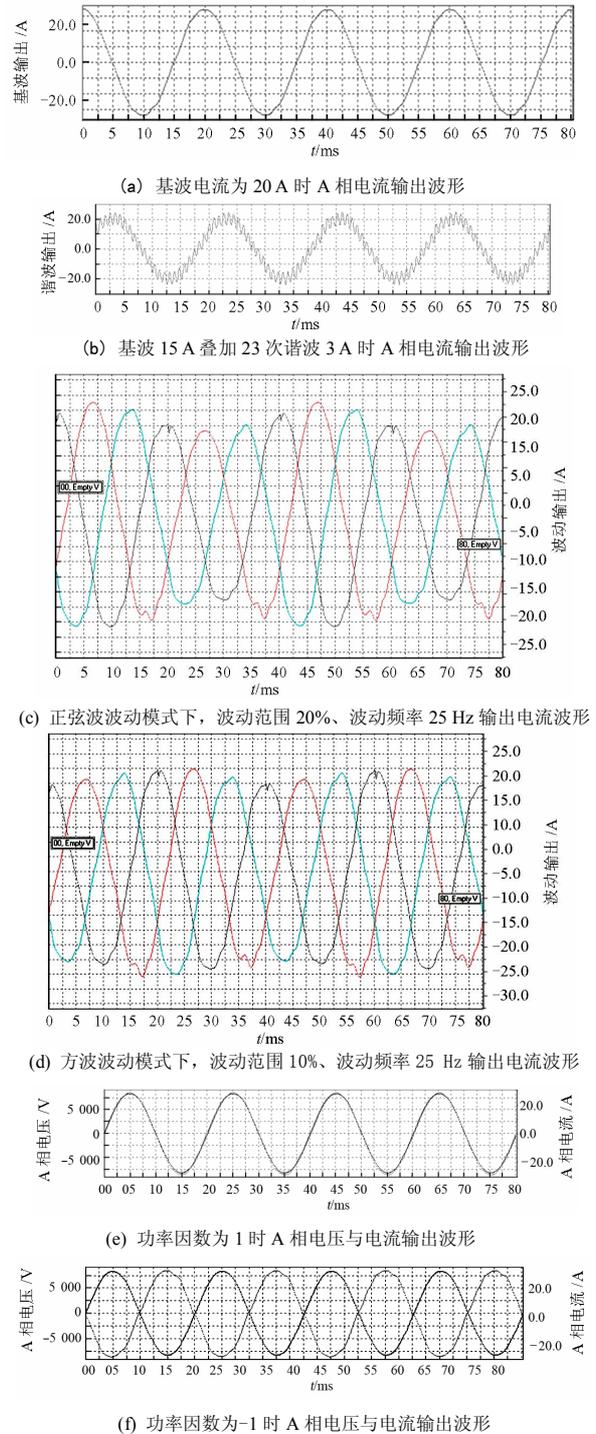


图 12 电流模式下输出特性实验波形

Fig. 12 Waveforms of output characteristics experiment in current mode

如图 12 所示, 为电流模式输出特性实验波形, 表 2 为试验数据。由试验结果可知, 在不同的输出特性下, 逆变侧均能根据给定的指令输出效果较为理想的电流波形, 输出精度也较高, 但是相比于电压模式而言, 电流模式往往达不到额定容量输出, 主要是由于在电流模式下, 整个回路的等效内阻抗较大, 给扰动源造成了很大的内压降, 可通过优化线路参数设计来改善系统的等效阻抗或改进控制算法来提高输出波形的效果。

表 2 电流模式试验数据

Table 2 Main parameters of current test

输出条件(相值)	测量值(相值)		
	参数	实测	精度
基波 20 A	基波	19.80 A	99.0%
基波 15 A+13 次 5 A	13 次	4.91 A	98.2%
基波 15 A+23 次 3 A	23 次	2.78 A	92.67%
基波 15 A+5 次 5 A+7 次 2 A	5 次	4.70 A	94.0%
	7 次	1.98 A	99.0%
基波 15 A+20%波动	波峰	16.95 A	94.17%
功率因数输出为 1	PF	0.99	99.0%

6 结论

本文提出了一种基于全控型电力电子器件的电能质量扰动发生器, 并对其控制策略与硬件实现进行研究。本文所提出的电能质量扰动发生器最大特点就是能输出各种类型的电能质量扰动, 可以模拟现场扰动环境。该扰动发生器每相主拓扑由 N 个背靠背功率单元在逆变侧级联构成, 其中单元整流侧采用单相多绕组变压器输入, 在电气上起到隔离作用, 逆变侧采用级联方式, 可有效提高装置输出电压等级以及输出波形质量。在控制方式上, 本文采用电压前馈以及重复学习控制, 能够保证指令的准确跟踪输出。最后, 通过电压与电流模式各种类型的扰动试验, 证明了该拓扑结构的良好性以及控制策略的正确性。

参考文献

[1] 李兴源, 魏巍, 王渝红, 等. 坚强智能电网发展技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 1-7.
LI Xing-yuan, WEI Wei, WANG Yu-hong, et al. Study on the development and technology of strong smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 1-7.

[2] 刘志刚, 张巧革, 张杨. 电能质量复合扰动分类的研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 146-153.
LIU Zhi-gang, ZHANG Qiao-ge, ZHANG Yang. Review

of power quality mixed disturbances identification[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 146-153.

[3] 徐政, 卢强. 电力电子技术在电力系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 23-27.
XU Zheng, LU Qiang. Application of power electronic technology in power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 23-27.

[4] 金广厚, 李庚银, 周明. 国内外电能质量控制水平及管理策略[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(1): 1-5.
JIN Guang-hou, LI Geng-yin, ZHOU Ming. Power quality mitigation level and management policy in domestic and foreign electric utilities[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(1): 1-5.

[5] 孙辉, 魏庆海, 邹积岩, 等. 电能质量调节技术及其应用[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(2): 243-247.
SUN Hui, WEI Qing-hai, ZOU Ji-yan, et al. Power quality conditioner technology and its application[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2003, 43(2): 243-247.

[6] 王平, 高阳, 王林泓, 等. 基于 DSP 与 FPGA 的实时电能质量监测终端系统[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 126-129.
WANG Ping, GAO Yang, WANG Lin-hong, et al. Research of real time power quality monitoring system based on DSP and FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 126-129.

[7] JEWE W. Power quality laboratory testing[C] // IEEE Power Engineering Review, Kansas, USA: 2002.

[8] GIRGIS A A, MAKRARN E B, BALDWIN T L. Computer-based harmonic generator facilities to study harmonic related problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(3): 1252-1257.

[9] CHUNG Y H, KWON G H, PARK T B. Voltage sag and swell generator with thyristor controlled[C] // International Conference on Power System Technology, Kunming, China: 2002.

[10] 王晶, 徐爱亲, 翁国庆, 等. 动态电压恢复器控制策略研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 145-150.
WANG Jing, XU Ai-qin, WENG Guo-qing, et al. A survey on control strategy of DVR[J]. Power System

- Protection and Control, 2010, 38(1): 145-150.
- [11] 赵剑峰, 王浔, 潘诗峰. 大功率电能质量信号发生装置设计及实验研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 71-74.
ZHAO Jian-feng, WANG Xun, PAN Shi-feng. Design and experimental study of high-power power quality signal generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 71-74.
- [12] 赵波, 郭剑波, 周飞, 等. 新型多功能 10 kV 电压扰动发生器的设计[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 75-80.
ZHAO Bo, GUO Jian-bo, ZHOU Fei, et al. Design of a novel multi-functional 10 kV voltage disturbance generator [J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 75-80.
- [13] 韩民晓, 金秀月, 尤勇, 等. VSI 型电力扰动发生装置的实现[J]. 电工技术杂志, 2004(10): 65-67.
HAN Min-xiao, JIN Xiu-yue, YOU Yong, et al. Achievement of VSI based on interruption generator[J]. Electric Technology Magazine, 2004(10): 65-67.
- [14] LIU Qiao, YIN Zhong-dong, HONG Qiu, et al. Series-connected hybrid cascaded H-bridge voltage disturbance generator[C] // 2009 International Conference on Energy and Environment Technology, Guilin, China, 2009.
- [15] 查晓明, 孙建军, 陈允平. 并联型有源电力滤波器的重复学习Boost变换控制策略[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 56-62.
ZHA Xiao-ming, SUN Jian-jun, CHEN Yun-ping. An integrated learning boost converter control strategy for PWM-VSI based active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 56-62.

收稿日期: 2014-02-22; 修回日期: 2014-06-06

作者简介:

戴喜良(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: simondai_010@163.com

李尚盛(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为大功率电力电子装置及其在电力系统中的应用;

孙建军(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为大功率电力电子技术应用。