



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104218608 B

(45)授权公告日 2017.05.03

(21)申请号 201410448440.3

审查员 贾国渊

(22)申请日 2014.09.04

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 104218608 A

(43)申请公布日 2014.12.17

(73)专利权人 同济大学  
地址 200092 上海市杨浦区四平路1239号

(72)发明人 向大为 王腾

(74)专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

代理人 宣慧兰

(51) Int. Cl.  
H02J 3/38(2006.01)  
G01R 31/00(2006.01)

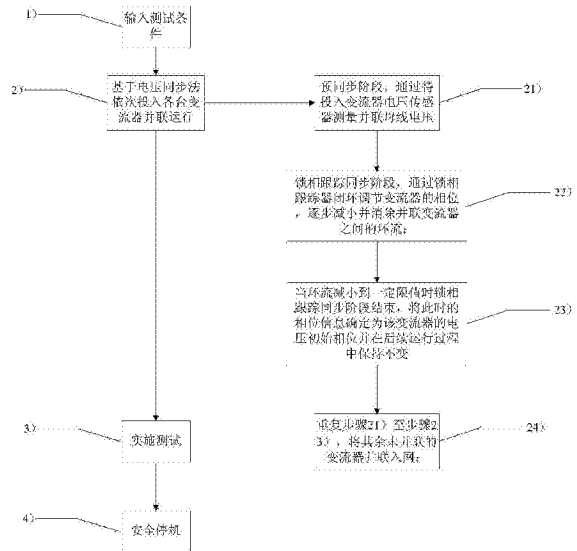
权利要求书1页 说明书5页 附图5页

(54)发明名称

一种电气测试系统中的变流器并联方法

(57)摘要

本发明涉及一种电气测试系统中的变流器并联方法,包括以下步骤:1)输入测试条件;2)基于电压同步法依次投入各台变流器并联运行:21)预同步,在变流器尚未投入并联母线前,通过待投入变流器电压传感器测量并联母线电压;22)锁相跟踪同步,在变流器投入并联母线时,通过锁相跟踪器闭环调节变流器的电压相位,逐步减小并消除并联变流器之间的环流;23)当环流减小到一定限值时锁相跟踪同步阶段结束,将此时的相位信息确定为该变流器的电压初始相位并在后续运行过程中保持不变;24)重复步骤21)至步骤23),将其余未并联的变流器并联入网;3)实施测试;4)安全停机。与现有技术相比,本发明具有成本低、并联性能好、测试效果好等优点。



1. 一种电气测试系统中的变流器并联方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤1:输入测试条件,测试开始前,使并联运行的各台变流器具有相同的电压特性;

步骤2:基于电压同步法依次投入各台变流器并联运行,包括以下步骤:

步骤2-1:预同步阶段,在变流器尚未投入并联母线前,通过待投入变流器电压传感器测量并联母线电压;

步骤2-2:锁相跟踪同步阶段,在变流器投入并联母线时,通过锁相跟踪器闭环调节变流器的相位,逐步减小并消除各并联变流器之间的环流,包括以下步骤:

步骤2-2-1:通过变流器电流传感器直接测量滤波器输入电流得到变流器环流电流,所述的滤波器为普通滤波器;

步骤2-2-2:通过判断变流器环流电流变化率确定相位角调节的方向;

步骤2-2-3:利用PI负反馈控制器根据相位角调节确定的方向,单调增加或减小新投入变流器的相位,减小相位偏差造成的变流器之间的环流;

步骤2-3:当环流减小到5%变流器额定电流时锁相跟踪同步阶段结束,将此时的相位信息确定为该变流器的电压初始相位并在后续运行过程中保持不变;

步骤2-4:重复步骤2-1至步骤2-3,将其余未并联的变流器并联入网;

步骤3:实施测试,闭合开关投入被测系统并按预先设定的测试条件对被测系统进行测试;

步骤4:安全停机,测试完成后安全停机。

2. 根据权利要求1所述的一种电气测试系统中的变流器并联方法,其特征在于,所述的步骤2-2-1中滤波器采用LCL等阻抗网络型滤波器,此时所述的步骤2-2包括以下步骤:

步骤2-2-4:通过滤波器电路模型计算出环流为零时对应的滤波器输入电流的幅值;

步骤2-2-5:通过负反馈控制变流器的电流与该电流值相等,最后消除环流。

3. 根据权利要求1所述的一种电气测试系统中的变流器并联方法,其特征在于,所述的步骤1中的电压特性包括电压幅值、相位和频率。

4. 根据权利要求1所述的一种电气测试系统中的变流器并联方法,其特征在于,所述的步骤4中安全停机的顺序为:

首先减小并关闭被测系统电流,然后通过开关切除被测系统,接下来闭锁变流器触发脉冲,最后通过开关切除变流器。

## 一种电气测试系统中的变流器并联方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种变流器的并联方法,尤其是涉及一种电气测试系统中的变流器并联方法。

### 背景技术

[0002] 随着技术的发展,人们对电气设备的性能与可靠性要求越来越高。为满足工程要求,大多数电气设备如风力发电系统、光伏发电系统以及电气传动系统等都需要在实验室甚至现场进行各种严格的电气测试。以风力发电机组为例,为满足电网并网的要求,大型风机往往需要进行电网电压非对称运行、电网谐波运行、电网故障穿越、电网电压波动、电网频率偏移等一系列测试。

[0003] 为满足测试要求,目前大多采用变流器构成测试电源模拟不同条件对电气设备进行测试。与传统的交流电源波形发生器不同,基于变流器的测试电源不但控制灵活、快速还能实现能量双向流动。然而随着被测电气设备容量的不断增加,测试电源的容量也越来越大。

[0004] 通过变流器并联运行可提高测试电源的容量,目前采用的技术是利用高速通信设备通过主从控制实现变流器并联运行。具体而言,一台变流器作为主机模拟测试条件产生输出电压,而其余变流器则作为从机运行控制自身电流实现电流合理分配。为获取主机电流信息,各台并联变流器之间必需采用高速硬件设备进行实时通信。

[0005] 基于高速通信的主从控制技术能实现变流器并联分流运行增大测试电源容量,但实时控制对硬件通信的性能和成本均提出了较高的要求。另一方面,高速通信设备的安装与调试增加了变流器并联运行的技术复杂性。因此,工程上需要一种简便、灵活与经济的变流器并联方法。该方法无需硬件修改仅通过适当的控制算法就能模拟电源完成大功率电气测试。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种简便、灵活、经济的增大测试电源容量的变流器并联方法。

[0007] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0008] 一种电气测试系统中的变流器并联方法,包括以下步骤:

[0009] 步骤1:输入测试条件,测试开始前,使并联运行的各台变流器具有相同的电压特性;

[0010] 步骤2:基于电压同步法依次投入各台变流器并联运行,包括以下步骤:

[0011] 步骤2-1:预同步阶段,在变流器尚未投入并联母线前,通过待投入变流器电压传感器测量并联母线电压;

[0012] 步骤2-2:锁相跟踪同步阶段,在变流器投入并联母线时,通过锁相跟踪器闭环调节变流器的相位,逐步减小并消除各并联变流器之间的环流,包括以下步骤:

- [0013] 步骤2-2-1:通过变流器电流传感器直接测量滤波器输入电流得到变流器环流电流,所述的滤波器为普通滤波器;
- [0014] 步骤2-2-2:通过判断变流器环流电流变化率确定相位角调节的方向;
- [0015] 步骤2-2-3:利用PI负反馈控制器根据相位角调节确定的方向,单调增加或减小新投入变流器的相位,减小相位偏差造成的变流器之间的环流;
- [0016] 步骤2-3:当环流减小到5%变流器额定电流时锁相跟踪同步阶段结束,将此时的相位信息确定为该变流器的电压初始相位并在后续运行过程中保持不变;
- [0017] 步骤2-4:重复步骤2-1至步骤2-3,将其余未并联的变流器并联入网;
- [0018] 步骤3:实施测试,闭合开关投入被测系统并按预先设定的测试条件对被测系统进行测试;
- [0019] 步骤4:安全停机,测试完成后安全停机。
- [0020] 所述的步骤2-2-1中滤波器采用LCL等阻抗网络型滤波器,此时所述的步骤2-2包括以下步骤:
- [0021] 步骤2-2-4:通过滤波器电路模型计算出环流为零时对应的滤波器输入电流的幅值;
- [0022] 步骤2-2-5:通过负反馈控制变流器的电流与该电流值相等,最后消除环流。
- [0023] 所述的步骤1中的电压特性包括电压幅值、相位和频率。
- [0024] 所述的步骤4中安全停机的顺序为:
- [0025] 首先减小并关闭被测系统电流,然后通过开关切除被测系统,接下来闭锁变流器触发脉冲,最后通过开关切除变流器。
- [0026] 与现有技术相比,本发明具有以下优点:
- [0027] 一、易于实现,成本低,本发明提出的方法无需增加或修改硬件,只需对控制算法进行适当修改就能实现变流器并联运行并模拟电源对被测系统进行电气测试;
- [0028] 二、并联性能好,采用锁相跟踪器闭环调节变流器的相位,消除了并联变流器之间的环流。
- [0029] 三、测试效果好,测试过程中各台并联变流器均按预设条件产生测试电压,能真实模拟瞬间变化的电气条件实施电气测试。

#### 附图说明

- [0030] 图1为本发明的方法流程图;
- [0031] 图2为变流器并联构成的测试电源系统结构图;
- [0032] 图3为电压同步法基本原理图;
- [0033] 图4为变流器等效阻抗的原理图;
- [0034] 图5为锁相跟踪器原理框图;
- [0035] 图6为变流器同步接入过程的仿真结果图,其中,(6a)为第一台变流器电流 $i_{g1}$ 与第二台变流器电流 $i_{g2}$ 的仿真结果,(6b)为第二台变流器电压相位角 $\theta_{g2}$ 的仿真结果。
- [0036] 图7为被测机组低电压穿越测试仿真结果,其中,(7a)为风场母线电压 $v_{pcc}$ 仿真图,(7b)为发电机定子线电压 $v_{s\_ab}$ 仿真图,(7c)为网侧变流器电流 $i_{gc}$ 仿真图,(7d)为定子电流 $i_s$ 仿真图,(7e)为直流母线电压 $V_{dc}$ 仿真图,(7f)为转速 $\omega_r$ 仿真图,(7g)为网侧变流器输出

有功和无功功率 $PQ_{gc}$ 仿真图, (7h) 为电磁转矩 $T_e$ 仿真图;

[0037] 图8为各台并联变流器电流图, 其中, (8a) 为变流器1故障前的输出电流 $I_{gc1}$ 的波形, (8b) 为变流器1解除故障时的输出电流 $I_{gc2}$ 的波形, (8c) 为变流器2故障前输出电流 $I_{gc1}$ 的波形, (8d) 为变流器2解除故障时的输出电流 $I_{gc2}$ 的波形。

[0038] 其中, 1、第一变流器, 2、第二变流器, 3、并联母线。

### 具体实施方式

[0039] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0040] 实施例:

[0041] 如图1所示, 一种电气测试系统中的变流器并联方法, 包括以下步骤:

[0042] 1) 输入测试条件, 测试开始前, 使并联运行的各台变流器具有相同的电压特性, 电压特性包括电压幅值、相位和频率;

[0043] 2) 基于电压同步法依次投入各台变流器并联运行, 包括以下步骤:

[0044] 21) 预同步阶段, 在变流器尚未投入并联母线前, 通过待投入变流器电压传感器测量并联母线电压;

[0045] 22) 锁相跟踪同步阶段, 在变流器投入并联母线时, 通过锁相跟踪器闭环调节变流器的相位, 逐步减小并消除各并联变流器之间的环流, 如图5所示为锁相跟踪器原理框图;

[0046] 23) 当环流减小到一定限值时锁相跟踪同步阶段结束, 将此时的相位信息确定为该变流器的电压初始相位并在后续运行过程中保持不变;

[0047] 24) 重复步骤21) 至步骤23), 将其余未并联的变流器并联入网;

[0048] 3) 实施测试, 闭合开关投入被测系统并按预先设定的测试条件对被测系统进行测试;

[0049] 4) 安全停机, 测试完成后安全停机, 安全停机的顺序为: 首先减小并关闭被测系统电流, 然后通过开关切除被测系统, 接下来闭锁变流器触发脉冲, 最后通过开关切除变流器。

[0050] 步骤22) 包括以下步骤:

[0051] 221) 通过变流器电流传感器直接测量滤波器输入电流得到变流器环流电流, 所述的滤波器为普通滤波器;

[0052] 222) 通过判断变流器环流电流变化率确定相位角调节的方向;

[0053] 223) 利用PI负反馈控制器根据相位角调节确定的方向, 单调增加或减小新投入变流器的相位, 减小相位偏差造成的变流器之间的环流。

[0054] 步骤221) 中滤波器采用LCL等阻抗网络型滤波器, 此时步骤22) 包括以下步骤:

[0055] 224) 通过滤波器电路计算出环流为零时对应的滤波器输入电流的幅值;

[0056] 225) 将负反馈控制变流器的电流与该电流值相等, 最后消除环流。

[0057] 如图2所示, 测试系统中采用两台或多台变流器并联构成大容量测试电源模拟电网故障对被测机组进行测试, 此例中, 采用2台2MVA变流器1、2并联构成4MVA测试电源, 变流器直流母线3额定电压为1150V, 开关频率为2kHz。直流母线3电压由交流电源整流提供。各台变流器均经过LCL滤波器与开关与并联母线3相联。运行过程中通过闭合开关依次投入各台变流器并联运行。

[0058] 图3为电压同步法基本原理图,图中变流器1与变流器2经过公共母线并联, $v_{PCC}$ 为并联母线电压, $K_1$ 、 $K_2$ 为各台变流器的断路器, $i_{g1}$ 、 $i_{g2}$ 为各台变流器的滤波器输出电流, $v_{g1}$ 、 $v_{g2}$ 为各台变流器的理想空载电压, $Z_{eq1}$ 、 $Z_{eq2}$ 为各台变流器的等效阻抗, $i_c$ 为变流器间的环流。

[0059] 图4为变流器等效阻抗的原理图,图中 $v_{PCC}$ 为并联母线电压, $i_g$ 为变流器滤波器输出电流, $v_{gc}$ 为变流器输出电压, $v_g$ 为变流器理想空载电压, $Z_F$ 为变流器滤波器阻抗, $Z_V$ 为变流器虚拟阻抗, $Z_{eq}$ 为变流器的等效阻抗。

[0060] 图5为变流器锁相跟踪器原理框图,图中 $i_g$ 为滤波器输出电流, $i_{gc}$ 为变流器输出电流, $L_{FG}$ 、 $L_{F1}$ 为LCL滤波器电感, $R_{FY}$ 为滤波器电阻, $C_{FY}$ 为滤波器电容, $Z_{F0}$ 为滤波器总阻抗, $\vec{v}_g$ 为变流器理想空载电压空间矢量, $\vec{I}_{gc0}$ 与 $I_{gc0}$ 分别为理想空载运行时变流器输出电流的空间矢量及其幅值, $\vec{I}_g$ 与 $I_g$ 分别为变流器输出电流空间矢量及其幅值, $\Delta I$ 为电流幅值偏差值, $\theta_{g0}$ 为变流器电压初始相位角, $\theta_g$ 为变流器电压相位角,BPF为带通滤波器模块,abc/SV为三相变量到空间矢量转换模块,PI为PI调节器。

[0061] 如图6所示,图(6a)和(6b)为第二台变流器同步接入过程的仿真结果。根据图3和图4所示的基于电压同步法的变流器并联运行基本原理,第一台变流器投入并联母线后将按恒压源模式工作并输出额定电压与额定频率的三相交流电。从 $t=0.6s$ 起,第二台变流器准备投入并联运行。如仿真结果所示,同步接入过程分为两个阶段: $t=0.6s-1s$ 为预同步阶段而 $t=1s-1.6s$ 为锁相跟踪同步阶段。在预同步阶段,变流器测量并联母线电压 $v_{PCC}$ 并获取第一台变流器所模拟的电压源的相位信息。由于电压频率严格等于设定频率,采用带通滤波器可准确获取电压相位信息。当然,考虑测量误差、AD延迟等实际因素的影响,预同步阶段得到的相位信息可能存在一定误差。通过锁相跟踪同步阶段可进一步减小相位误差实现变流器无环流并联运行。为验证锁相跟踪器的性能,仿真中人为设定预同步得到的结果存在 $6^\circ$ 相差(该条件比工程实际情况更为严重)。锁相控制器的原理如图5所示,由于LCL滤波器输入、输出电流不完全相等,因此锁相控制器利用滤波器电路模型及参数计算出零环流(即输出电流)条件对应的滤波器的输入电流(变流器测量电流)的幅值,并通过负反馈控制变流器电流等于该电流值以达到消除环流目的。从仿真结果中可以看到,尽管第二台变流器投入初期因相位误差产生了一定的环流,但在锁相控制器作用下环流随着相位差的减小而逐渐消除。

[0062] 图7和图8是风电机组低电压穿越测试过程的仿真结果,其中图7为被测机组仿真结果,图7中记录的变量包括:风场母线电压 $v_{PCC}$ 图(7a),网侧变流器电流 $i_{gc}$ 图(7c),直流母线电压 $V_{dc}$ 图(7e),网侧变流器输出有功和无功功率 $PQ_{gc}$ 图(7g),发电机定子线电压 $v_{s\_ab}$ 图(7b)、定子电流 $i_s$ 图(7d)、转速 $\omega_r$ 图(7f)以及电磁转矩 $T_e$ 图(7h)。测试条件为三相对地故障、电压低落深度为 $0.15pu$ 、测试电源等效阻抗为 $Z_{eq}=0.2pu$ (其中阻抗-电阻比 $X/R=4$ )。如图7所示, $t=2s$ 时,被测机组投入并联母线,并网过程无冲击。 $t=2.4s$ 时,机组网侧变流器启动,控制直流母线电压达到额定值。 $t=2.5s\sim 3.5s$ 是被测发电机电磁转矩调节过程,被测机组的功率状态可根据测试条件任意设定。电网故障从 $t=3.5s$ 开始,持续 $600ms$ 后于 $t=4.1s$ 恢复。故障过程中被测机组的控制目标是在保证自身安全运行的前提下输出感性无功电流(此例为 $1pu$ )为电网故障电压提供支持。故障切除后被测机组快速恢复到故障前功率

状态正常运行。测试过程于 $t=4.5s$ 结束,此后系统进入安全停机程序。

[0063] 测试过程中两个变流器并联运行共同分担被测机组的输出电流。图8为测试电源中各并联变流器电流,图(8a)为变流器1故障前的输出电流 $I_{gc1}$ ,图(8c)变流器2故障前输出电流 $I_{gc1}$ 的波形,图(8b)为变流器1解除故障时的输出电流 $I_{gc2}$ ,图(8d)变流器2解除故障时的输出电流 $I_{gc2}$ 的波形。如图8所示,由于等效阻抗相同,两台变流器在测试过程中实现均流运行。仿真结果表明本发明提出的方法能实现变流器无环流并联运行,并模拟电源特性完成电网故障模拟等高速、大容量电气测试。

[0064] 以上实例仅用于解释本发明的具体实施方案,本发明的使用范围并不受该实例限制。针对实际电气测试中不同对象和目的,根据本发明提供的基本方法可制定出不同的技术方案。所有这些技术方案同样属于本发明的范畴,本发明的专利保护范围由权利要求限定。

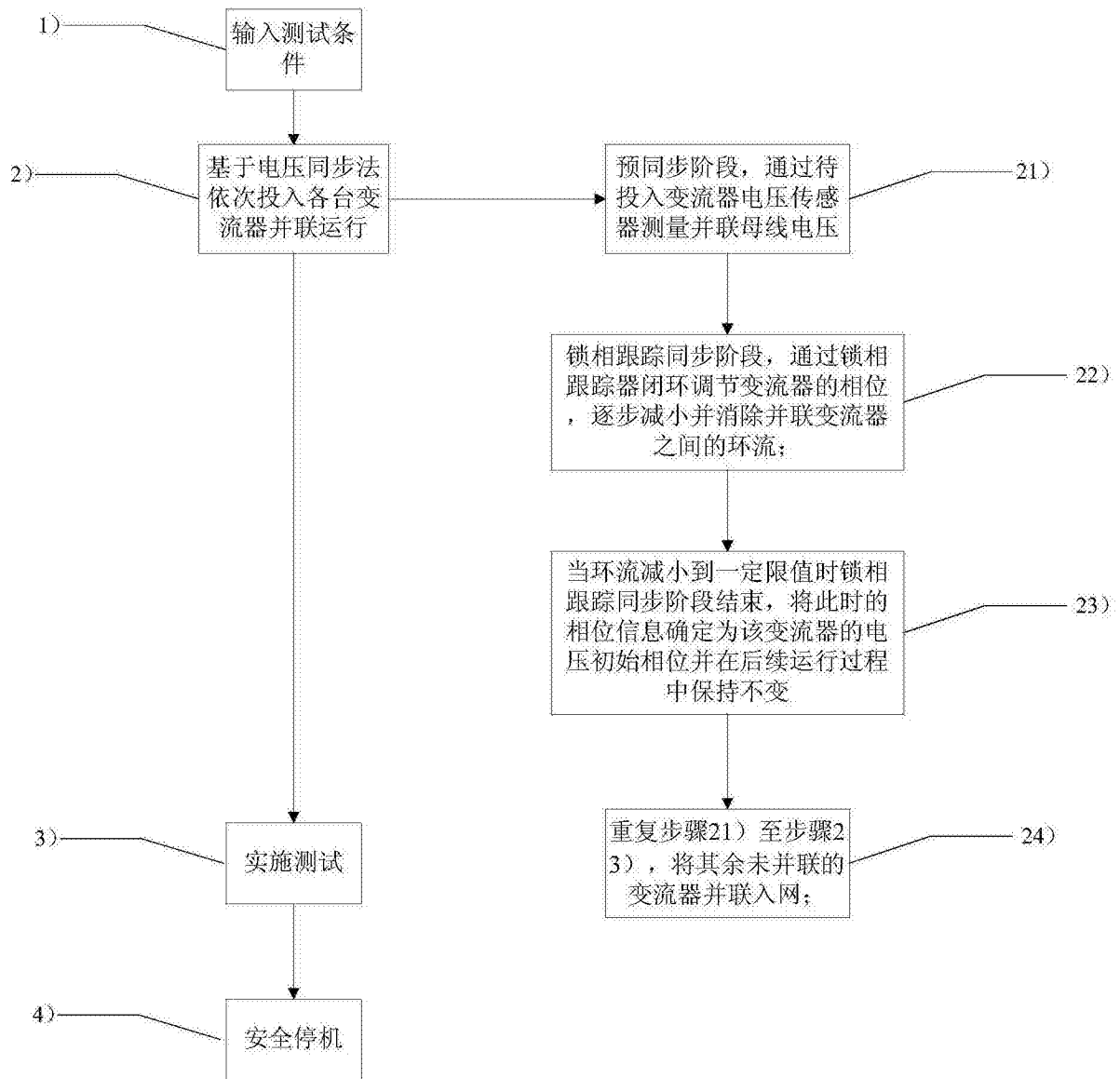


图1



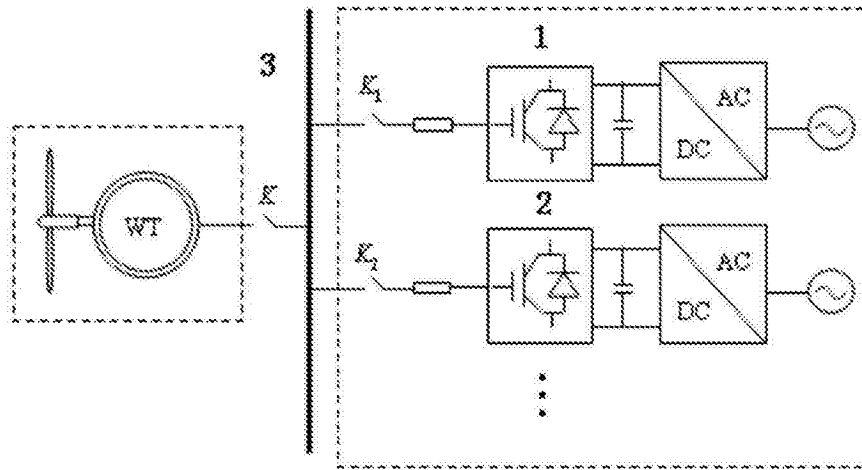


图2

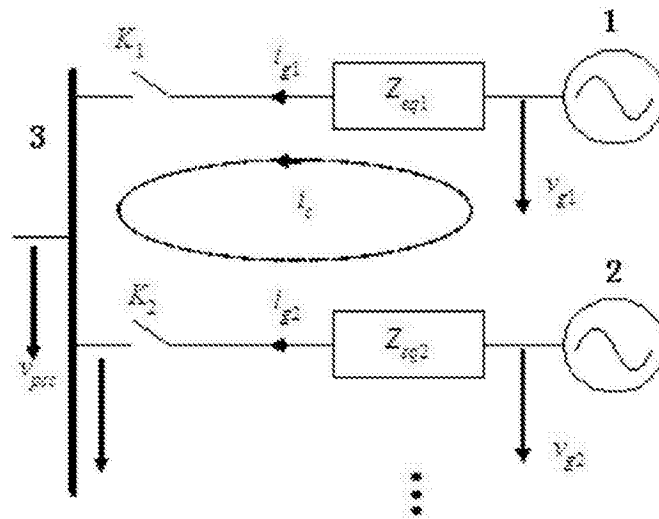


图3

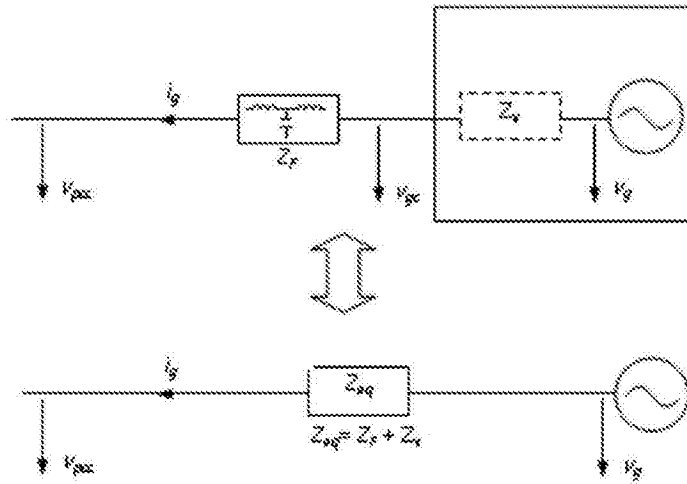


图4

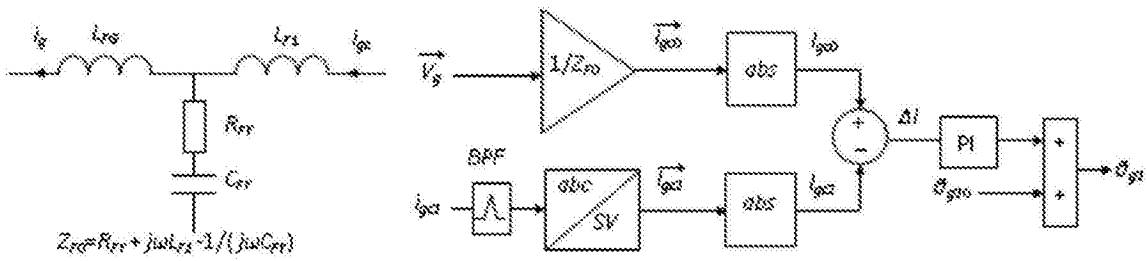
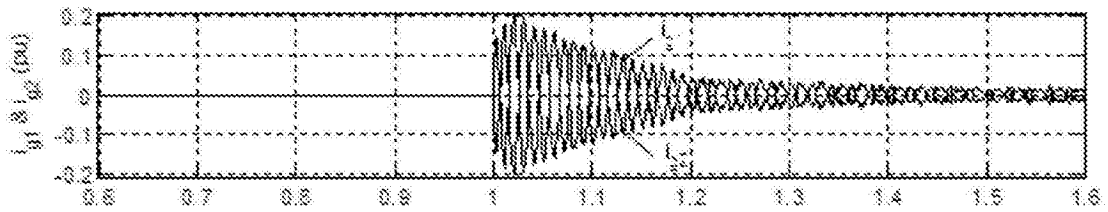
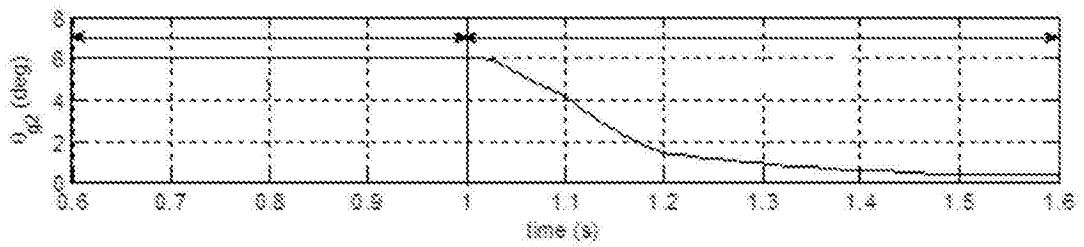


图5

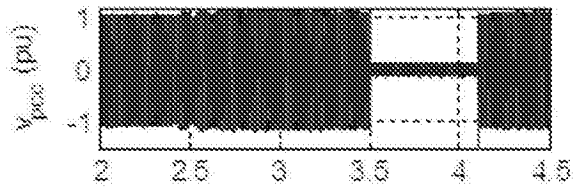


(6a)

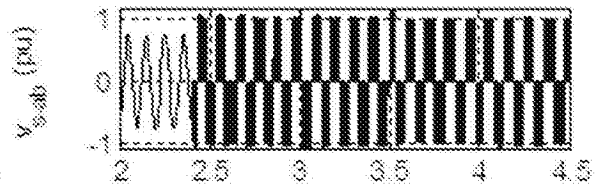


(6b)

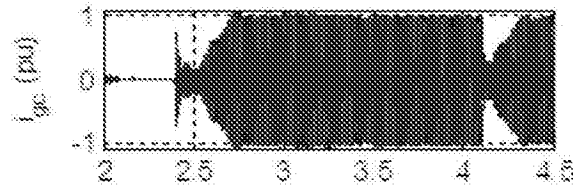
图6



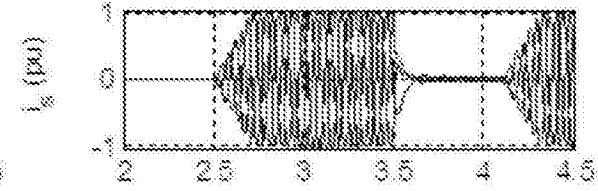
(7a)



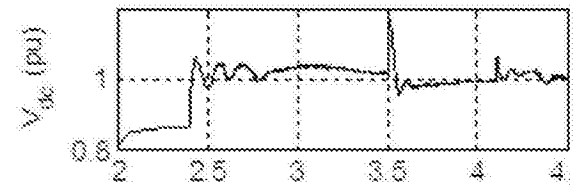
(7b)



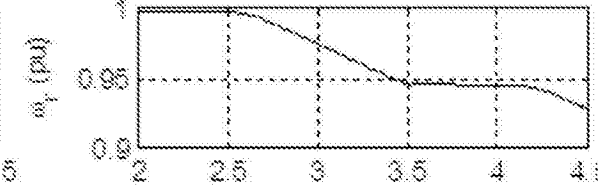
(7c)



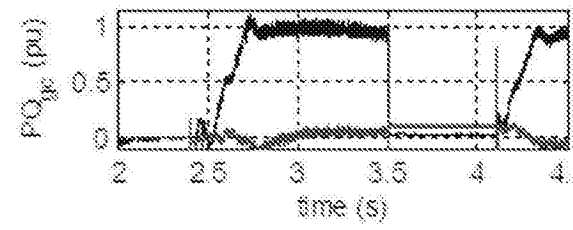
(7d)



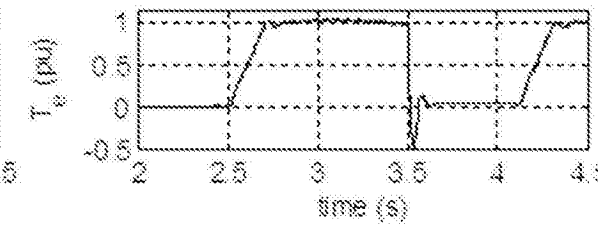
(7e)



(7f)

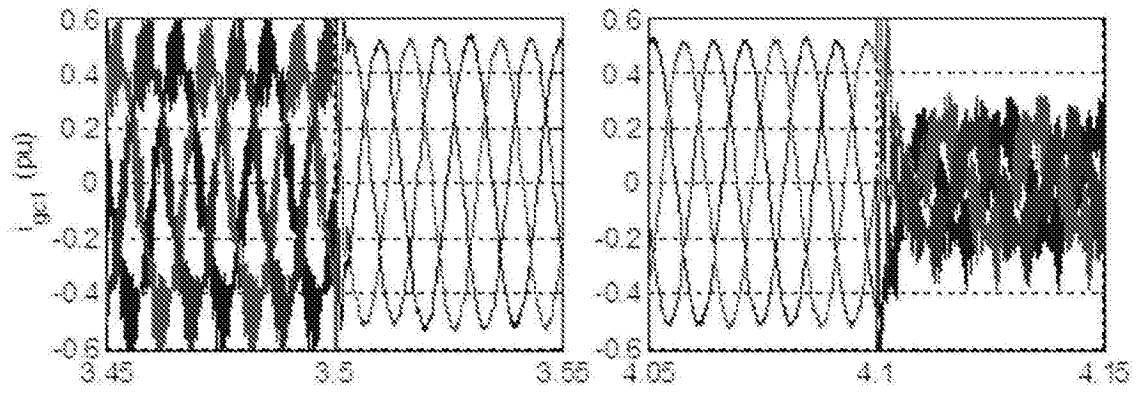


(7g)



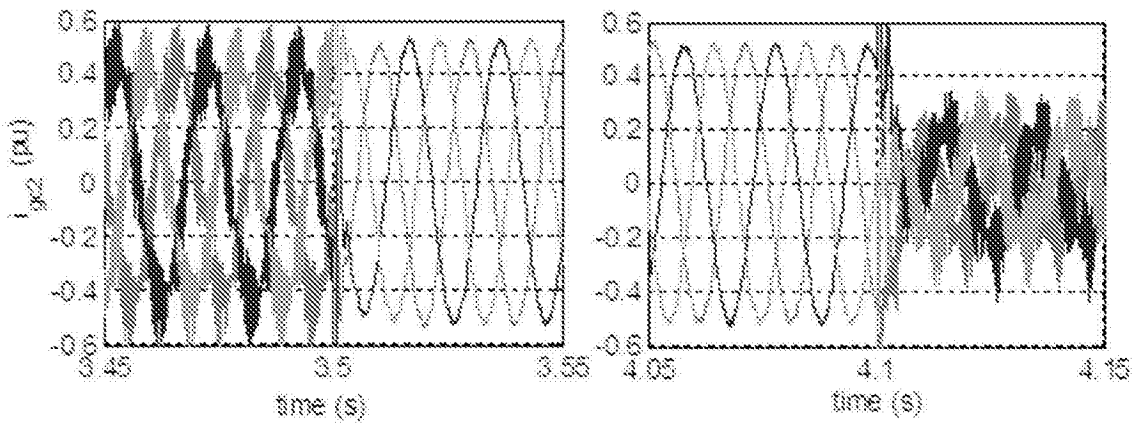
(7h)

图7



(8a)

(8b)



(8c)

(8d)

图8