



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104852616 A

(43) 申请公布日 2015. 08. 19

(21) 申请号 201510270499. 2

(22) 申请日 2015. 05. 25

(71) 申请人 合肥工业大学

地址 230009 安徽省合肥市屯溪路 193 号

(72) 发明人 张兴 朱虹 李飞 余畅舟 刘芳

毛福斌

(74) 专利代理机构 合肥和瑞知识产权代理事务

所(普通合伙) 34118

代理人 王挺

(51) Int. Cl.

H02M 7/483(2007. 01)

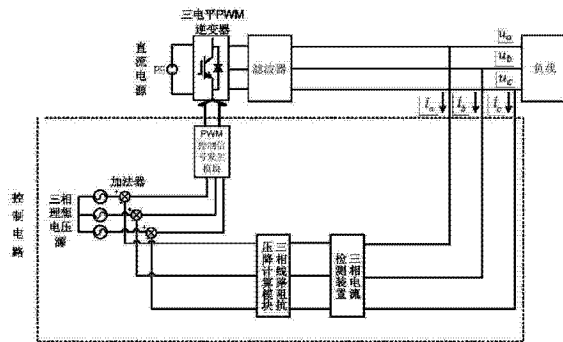
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器及控制方法

(57) 摘要

本发明提供了一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器及控制方法。所述带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器,包括直流电源、三电平 PWM 逆变器、滤波器、负载以及控制电路。其中所述控制电路包括:三相电流检测装置、三相线路阻抗压降计算模块、三相理想电压源、三个加法器和 PWM 控制信号发生模块。所述控制方法包括以下步骤:检测滤波器输出电流;计算模块计算所需模拟的三相线路阻抗压降;计算 PWM 控制信号发生模块的电压指令信号,经过 PWM 控制信号发生模块生成出三电平 PWM 逆变器中功率开关管的驱动信号。本发明不仅可以模拟电网中的理想电压源,还附带了线路阻抗模拟功能,弥补了已有的电网模拟器功能的不足,增强了电网模拟器的功能。



1. 一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器,包括直流电源、三电平 PWM 逆变器、滤波器、负载以及控制电路,其特征在于:

所述控制电路包括三相电流检测装置、三相线路阻抗压降计算模块、三相理想电压源、三个加法器和 PWM 控制信号发生模块;

所述直流电源输出端与所述三电平 PWM 逆变器输入端连接;

所述三电平 PWM 逆变器三相输出端与所述滤波器三相输入端一一对应相连,所述滤波器三相输出端与负载相连,分别输出电压  $u_a$ ,  $u_b$  和  $u_c$ , 输出电流  $i_a$ ,  $i_b$  和  $i_c$ ;

所述三相电流检测装置的三相输入端分别与所述滤波器三相输出端一一对应相连,三相电流检测装置的三相输出端与所述三相线路阻抗压降计算模块的三相输入端一一对应相连;

所述三个加法器之间为并联,每个加法器第一输入端接所述三相理想电压源的对应相,第二输入端接所述三相线路阻抗压降计算模块对应相输出端,输出端接所述 PWM 控制信号发生模块对应相输入端;

所述 PWM 控制信号发生模块的输出端与所述三电平 PWM 逆变器中功率开关管的控制端对应相连。

2. 根据权利要求书 1 所述一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器的控制方法,其特征在于包括以下步骤:

步骤 1,用三相电流检测装置检测滤波器,得到滤波器输出电流  $i_a$ ,  $i_b$  和  $i_c$ ;

步骤 2,用三相线路阻抗压降计算模块计算所需模拟的三相线路阻抗压降  $\Delta u_a$ ,  $\Delta u_b$ ,  $\Delta u_c$ , 即:

$$\Delta u_a = i_a * Z_a$$

$$\Delta u_b = i_b * Z_b$$

$$\Delta u_c = i_c * Z_c$$

其中,  $Z_a$ ,  $Z_b$  和  $Z_c$  为所需模拟的三相线路阻抗,  $Z_a$ ,  $Z_b$  和  $Z_c$  的数值为设定值;

步骤 3,利用步骤 2 得到的三相线路阻抗压降  $\Delta u_a$ ,  $\Delta u_b$ ,  $\Delta u_c$  计算 PWM 控制信号发生模块的电压指令信号  $U_a^*$ ,  $U_b^*$ ,  $U_c^*$ ,

$$U_a^* = U_a - \Delta u_a;$$

$$U_b^* = U_b - \Delta u_b;$$

$$U_c^* = U_c - \Delta u_c;$$

其中,  $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$  分别为三相理想电压源电压,其数值为设定值;

步骤 4,将步骤 3 得到的电压指令信号  $U_a^*$ ,  $U_b^*$ ,  $U_c^*$  经过 PWM 控制信号发生模块生成出三电平 PWM 逆变器中功率开关管的驱动信号,并通过 PWM 控制信号发生模块的输出端对三电平 PWM 逆变器中的功率开关管进行控制。

## 带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器及控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电能质量分析和控制领域,涉及一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器及控制方法,在分布式发电研究中,为系统提供真实的电网环境的发生装置。

### 背景技术

[0002] 电网提供的电压为低谐波的标准正弦电压,电网故障具有偶然性和不可控性,在分布式发电的研究以及系统测试时,仅通过电网本身无法模拟出各种故障状态。因此,需要通过一些专门的设备来模拟电网的故障情况。

[0003] 目前,电网模拟器的研究已经成为分布式发电研究的热点问题,如实用新型专利文献《一种电网模拟器》(公开号 CN202818122U)和《一种全能量回馈型电网模拟器》(公开号 CN 203911496U),其中:

[0004] 中国实用新型专利说明书 CN202818122U 于 2013 年 3 月 20 日公开的《一种电网模拟器》,这种电网模拟器能输出三相独立可调,有谐波、可做低电压穿越实验的交流电源;

[0005] 中国实用新型专利说明书 CN203911496U 于 2014 年 10 月 29 日公开的《一种全能量回馈型电网模拟器》,该实用新型可以实现电网电压渐变、零电压穿越、频率渐变、过(欠)压、过(欠)频等功能的模拟,可以满足光伏逆变器各种电气性能测试及电网故障模拟。

[0006] 纵观现有相关电网模拟器授权专利,没有任何电网模拟器包含线路阻抗模拟功能,仅仅是从理想电源的角度对电网进行模拟,其存在的技术问题如下:

[0007] 1、实际的电网并非理想电源,不带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器无法真实地反映系统的实际情况;

[0008] 2、通常电网和负载之间会有一定的传输线路,不带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器无法体现出线路阻抗对电网的影响。

### 发明内容

[0009] 本发明提出的一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器及控制方法,可以根据实际所需模拟的线路阻抗,通过对负载电流进行反馈调节的方式实现线路阻抗模拟的功能,弥补了现有电网模拟器功能上的不足,具有创新性和实际应用价值。

[0010] 本发明的目的是这样实现的。

[0011] 本发明提供了一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器,包括直流电源、三电平 PWM 逆变器、滤波器、负载以及控制电路;所述控制电路包括:三相电流检测装置、三相线路阻抗压降计算模块、三相理想电压源、三个加法器和 PWM 控制信号发生模块;

[0012] 所述直流电源输出端与所述三电平 PWM 逆变器输入端连接;

[0013] 所述三电平 PWM 逆变器三相输出端与所述滤波器三相输入端一一对应相连,所述滤波器三相输出端与负载相连,分别输出电压  $u_a$ ,  $u_b$  和  $u_c$ , 输出电流  $i_a$ ,  $i_b$  和  $i_c$ ;

[0014] 所述三相电流检测装置的三相输入端分别与所述滤波器三相输出端一一对应相连,三相电流检测装置的三相输出端与所述三相线路阻抗压降计算模块的三相输入端一一

对应相连；

[0015] 所述三个加法器之间为并联，每个加法器第一输入端接所述三相理想电压源的对应相，第二输入端接所述三相线路阻抗压降计算模块对应相输出端，输出端接所述 PWM 控制信号发生模块对应相输入端；

[0016] 所述 PWM 控制信号发生模块的输出端接所述三电平 PWM 逆变器中功率开关管的控制端对应相连。

[0017] 本发明还提供了一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器的控制方法，包括以下步骤：

[0018] 步骤 1，用三相电流检测装置检测滤波器，得到滤波器输出电流  $i_a$ 、 $i_b$  和  $i_c$ ；

[0019] 步骤 2，用三相线路阻抗压降计算模块计算所需模拟的三相线路阻抗压降  $\Delta u_a$ 、 $\Delta u_b$ 、 $\Delta u_c$ ，即：

$$[0020] \quad \Delta u_a = i_a * Z_a$$

$$[0021] \quad \Delta u_b = i_b * Z_b$$

$$[0022] \quad \Delta u_c = i_c * Z_c$$

[0023] 其中， $Z_a$ 、 $Z_b$  和  $Z_c$  为所需模拟的三相线路阻抗， $Z_a$ 、 $Z_b$  和  $Z_c$  的数值为设定值；

[0024] 步骤 3，利用步骤 2 得到的三相线路阻抗压降  $\Delta u_a$ 、 $\Delta u_b$ 、 $\Delta u_c$  计算 PWM 控制信号发生模块的电压指令信号  $U_a^*$ 、 $U_b^*$ 、 $U_c^*$ ，

$$[0025] \quad U_a^* = U_a - \Delta u_a；$$

$$[0026] \quad U_b^* = U_b - \Delta u_b；$$

$$[0027] \quad U_c^* = U_c - \Delta u_c；$$

[0028] 其中， $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$  分别为三相理想电压源电压，其数值通过设定得到。

[0029] 步骤 4，将步骤 3 得到的电压指令信号  $U_a^*$ 、 $U_b^*$ 、 $U_c^*$  经过 PWM 控制信号发生模块生成三电平 PWM 逆变器中功率开关管的驱动信号，并通过 PWM 控制信号发生模块的输出端对三电平 PWM 逆变器中的功率开关管进行控制。

[0030] 相对于现有技术，本发明的有益效果是：

[0031] 1、将电网等效成理想电源串联阻抗模型，提高了电网模拟的准确度；

[0032] 2、可以模拟带线路阻抗的电网，便于研究线路阻抗对系统的影响。

## 附图说明

[0033] 图 1 为本发明的一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器结构图。

[0034] 图 2 为具体实施例中电网模拟器接实际线路阻抗时结构图。

[0035] 图 3 为具体实施例中电网模拟器模拟线路阻抗输出电压波形图。

[0036] 图 4 为具体实施例中电网模拟器接实际线路阻抗输出电压波形图。

## 具体实施方式

[0037] 利用 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建系统模型，提供了一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器，具体如图 1 所示。

[0038] 由图 1 可见，本发明包括直流电源、三电平 PWM 逆变器、滤波器、负载以及控制电路。其中控制电路包括：三相电流检测装置、三相线路阻抗压降计算模块、三相理想电压源、

三个加法器和 PWM 控制信号发生模块。

[0039] 具体各个部分的连接如下：

[0040] 所述直流电源输出端与所述三电平 PWM 逆变器输入端连接；

[0041] 所述三电平 PWM 逆变器三相输出端与所述滤波器三相输入端一一对应相连，所述滤波器三相输出端与负载相连，分别输出电压  $u_a$ ,  $u_b$  和  $u_c$ ，输出电流  $i_a$ ,  $i_b$  和  $i_c$ ；

[0042] 所述三相电流检测装置的三相输入端与所述滤波器三相输出端一一对应相连，三相输出端与所述三相线路阻抗压降计算模块的三相输入端一一对应相连；

[0043] 所述三个加法器之间为并联，每个加法器第一输入端接所述三相理想电压源的对应相，第二输入端接所述三相线路阻抗压降计算模块对应相输出端，输出端接所述 PWM 控制信号发生模块对应相输入端；

[0044] 所述 PWM 控制信号发生模块的输出端接所述三电平 PWM 逆变器中功率开关管的控制端对应相连。

[0045] 在实施例中，系统的相关参数如下：

[0046] 直流电源电压  $U_{dc} = 400V$ ；

[0047] 三电平 PWM 逆变器功率等级  $P = 125Kw$ ，开关频率  $f_{sw} = 8KHz$ ；

[0048] 滤波器采用 LC 滤波器，具体参数滤波电感  $0.12e-3H$ ，滤波电容  $30e-6F$ ；三相理想电压源分别为：

[0049]  $U_a = 81.6497\sin(100\pi t)$ ，

[0050]  $U_b = 81.6497\sin(100\pi t - \frac{2}{3}\pi)$ ，

[0051]  $U_c = 81.6497\sin(100\pi t + \frac{2}{3}\pi)$ ；

[0052] 其中， $t$  为时间，为设定值。

[0053] 负载选用三相电阻型负载，阻值为  $0.5$  欧姆。

[0054] 另外，本发明还提供一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器的控制方法，包括以下步骤：

[0055] 步骤 1，用三相电流检测装置检测滤波器，得到滤波器输出电流  $i_a$ ,  $i_b$  和  $i_c$ ；

[0056] 步骤 2，用三相线路阻抗压降计算模块计算所需模拟的三相线路阻抗压降  $\Delta u_a$ ,  $\Delta u_b$ ,  $\Delta u_c$ ，即：

[0057]  $\Delta u_a = i_a * Z_a$

[0058]  $\Delta u_b = i_b * Z_b$

[0059]  $\Delta u_c = i_c * Z_c$

[0060] 其中， $Z_a$ ,  $Z_b$  和  $Z_c$  为所需模拟的三相线路阻抗， $Z_a$ ,  $Z_b$  和  $Z_c$  的数值为设定值。本具体实施例中，三相所需模拟的线路阻抗分别为：A 相电阻  $R = 0.01\Omega$ ，B 相电感  $L = 1e-5H$ ，C 相电容  $C = 1e-2F$ ，即分别设置三相的线路阻抗为：

[0061]  $Z_a = 0.01\Omega$

[0062]  $Z_b = \omega L = 2 * \pi * 50 * 1e-5 = 0.0031\Omega$

[0063]  $Z_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 * \pi * 50 * 1e-2} = 0.3183\Omega$ ，

[0064] 步骤 3，利用步骤 2 得到的三相线路阻抗压降  $\Delta u_a$ ,  $\Delta u_b$ ,  $\Delta u_c$  计算 PWM 控制信号

发生模块的电压指令信号  $U_a^*, U_b^*, U_c^*$ ,

$$[0065] \quad U_a^* = U_a - \Delta u_a;$$

$$[0066] \quad U_b^* = U_b - \Delta u_b;$$

$$[0067] \quad U_c^* = U_c - \Delta u_c;$$

[0068] 其中,  $U_a, U_b, U_c$  分别为三相理想电压源电压, 其数值通过设定得到。本实施例中:

$$[0069] \quad U_a = 81.6497 \sin(100 \pi t)$$

$$[0070] \quad U_b = 81.6497 \sin(100 \pi t - \frac{2}{3} \pi)$$

$$[0071] \quad U_c = 81.6497 \sin(100 \pi t + \frac{2}{3} \pi)$$

[0072] 步骤 4, 将步骤 3 得到的电压指令信号  $U_a^*, U_b^*, U_c^*$  经过 PWM 控制信号发生模块生成三电平 PWM 逆变器中功率开关管的驱动信号, 并通过 PWM 控制信号发生模块的输出端对三电平 PWM 逆变器中的功率开关管进行控制。

[0073] 图 3 为本实施例输出电压  $u_a, u_b$  和  $u_c$  波形图。

[0074] 同时, 为了验证本发明中线路阻抗模拟功能的有效性, 实施例还仿真了系统接实际线路阻抗的情况, 具体结构参见图 2。

[0075] 系统的相关参数如下:

[0076] 直流电源电压  $U_{dc} = 400V$ ;

[0077] 三电平 PWM 逆变器功率等级  $P = 125Kw$ , 开关频率  $f_{sw} = 8KHz$ ;

[0078] 滤波器采用三相 LC 滤波器, 具体参数滤波电感  $0.12e-3H$ , 滤波电容  $30e-6F$ ;

[0079] 三相理想电压源分别为:

$$[0080] \quad U_a = 81.6497 \sin(100 \pi t)$$

$$[0081] \quad U_b = 81.6497 \sin(100 \pi t - \frac{2}{3} \pi)$$

$$[0082] \quad U_c = 81.6497 \sin(100 \pi t + \frac{2}{3} \pi)$$

[0083] 其中,  $t$  为时间, 为设定值。

[0084] 负载选用三相电阻型负载, 阻值为  $0.5$  欧姆。

[0085] 如图 2 所示, 直流电源输出端与三电平 PWM 逆变器输入端连接; 三电平 PWM 逆变器三相输出端与滤波器三相输入端一一对应相连, 滤波器三相输出端分别连接不同的实际阻抗, 其中 A 相接电阻  $R$ , B 相接电感  $L$ , C 相接电容  $C$ , 计算公式如下:

$$[0086] \quad R = 0.01 \Omega,$$

$$[0087] \quad L = 1e-5H,$$

[0088]  $C = 1e-2F$ , 这样输出电压  $u_a', u_b'$  和  $u_c'$ ;

[0089] 图 4 为输出电压  $u_a', u_b'$  和  $u_c'$  波形图。

[0090] 通过图 3 和图 4, 列出表格 1 为时间  $0.315s$  时所述控制方法得到的输出电压值与接实际线路阻抗得到的输出电压值:

[0091] 列表 1

[0092]

	A相（接电阻R）	B相（接电感L）	C相（接电容C）
本发明控制方法 输出电压/V	80.5	-19.6	-60.1
接实际线路阻抗 输出电压/V	80	-19.1	-60.6

[0093] 由表格 1 很清楚地看出,与系统接实际的线路阻抗相比,采用本发明控制方法的电网模拟器输出的电压值近似相等,误差在 1%以内,说明所述一种带有线路阻抗模拟功能的电网模拟器及其控制方法能够实现线路阻抗的模拟,是有效可行的。

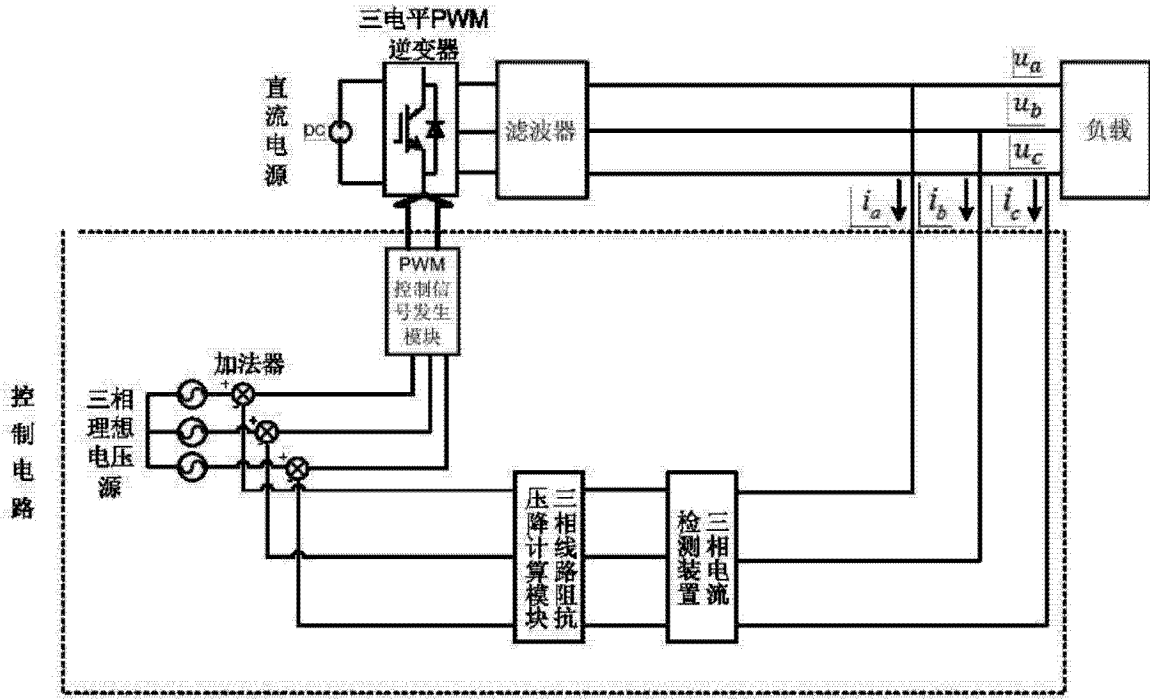


图 1

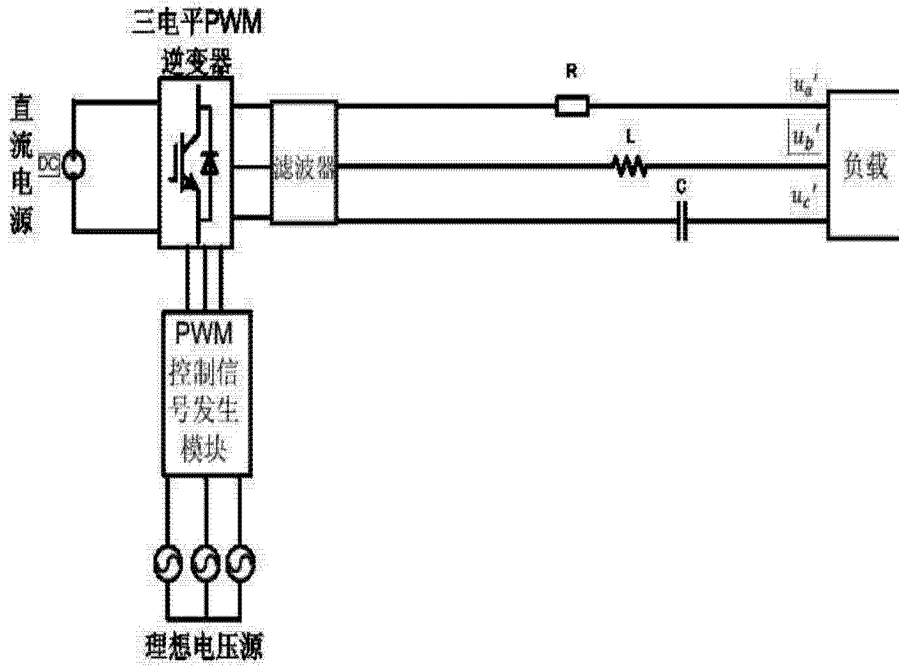


图 2

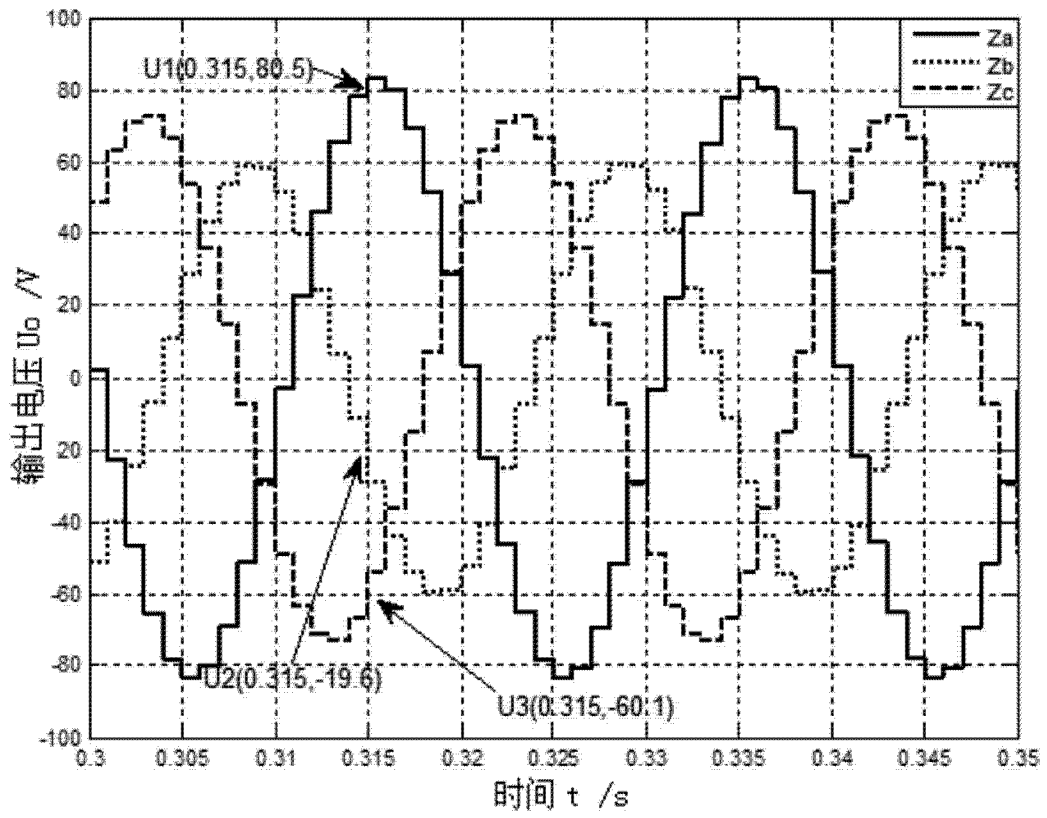


图 3

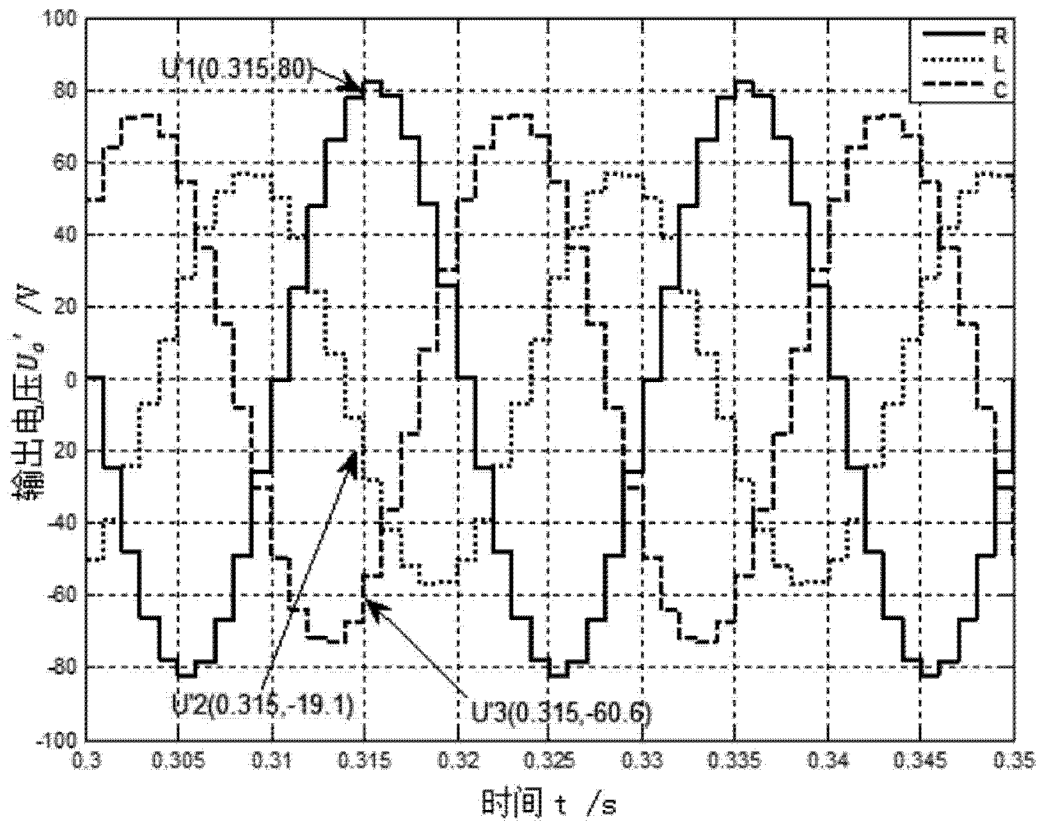


图 4