



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103311949 A

(43) 申请公布日 2013. 09. 18

(21) 申请号 201310148905. 9

(22) 申请日 2013. 04. 26

(71) 申请人 北方工业大学

地址 100144 北京市石景山区晋元庄路 5 号
北方工业大学

(72) 发明人 周京华 李正熙 章小卫 陈亚爱
刘劲东 李津 李秋霏

(51) Int. Cl.

H02J 3/38(2006. 01)

H02J 3/18(2006. 01)

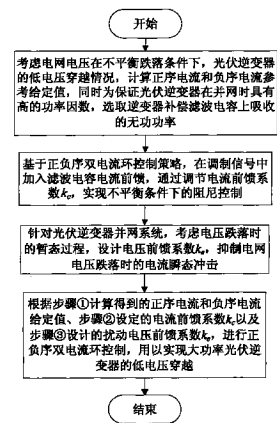
权利要求书1页 说明书9页 附图4页

(54) 发明名称

一种大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法

(57) 摘要

一种大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法, 首先, 基于 LCL 滤波器的大功率光伏逆变器结构, 考虑电网电压跌落尤其是在不平衡跌落条件下的低电压穿越情况, 以抑制负序电流为控制目标, 计算正序电流和负序电流参考给定值, 再通过控制算法补偿滤波电容吸收的无功, 以保证在不同功率等级运行下的高功率因数并网; 其次, 基于正负序双电流环控制, 设计在调制信号中加入滤波电容电流前馈信号, 通过调节前馈系数, 实现不平衡控制下的有源阻尼控制; 最后, 设计扰动量前馈系数, 抑制瞬时电流冲击。该方法可有效抑制电网电压跌落瞬间的电流冲击, 并保证了电网电压跌落前后电流的三相平衡输出, 控制效果满足电网对光伏逆变器并网的电能质量要求。



1. 一种大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法,其特征在于:其步骤为:①考虑电网电压在不平衡跌落条件下,计算出基于 LCL 滤波器条件下的正序电流和负序电流参考给定值,同时为保证光伏逆变器在并网时具有高的功率因数,通过逆变器控制算法来补偿滤波电容上吸收的无功功率;其中,正序电流和负序电流参考给定值的计算表达式为:

$$\begin{cases} i_{inv,d}^{p*} = \frac{2e_d^p P_0 + e_q^p Q_0}{3[(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2]} \\ i_{inv,q}^{p*} = \frac{2e_q^p P_0 - e_d^p Q_0}{3[(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2]} \\ i_{inv,d}^{n*} = 0 \\ i_{inv,q}^{n*} = 0 \end{cases}$$

式中 P_0 、 Q_0 分别为输出有功、无功的直流分量; $i_{inv,d}^{p*}$ 、 $i_{inv,q}^{p*}$ 、 $i_{inv,d}^{n*}$ 、 $i_{inv,q}^{n*}$ 分别为正序 d 轴、q 轴和负序 d 轴、q 轴的电流参考给定值; e_d^p 、 e_q^p 分别为电网电压正序 d 轴和 q 轴分量。

选取逆变器控制算法补偿滤波电容上吸收的无功功率的计算表达式为:

$$\Delta Q = \omega C [(u_{cd}^p)^2 + (u_{cq}^p)^2 + (u_{cd}^n)^2 + (u_{cq}^n)^2]$$

ΔQ 为补偿的无功; ω 为检测到的电网频率; C 为 LCL 滤波器上的滤波电容; u_{cd}^p 、 u_{cq}^p 、 u_{cd}^n 、 u_{cq}^n 分别为滤波电容的正负序 d、q 轴分量。

②基于正负序双电流环控制策略,设计在调制信号中加入滤波电容电流前馈信号,通过调节电流前馈系数 k_c ,以实现不平衡控制条件下的有源阻尼控制;

③针对电压跌落时的瞬态电流冲击,设计扰动电压前馈系数 k_e ,抑制瞬态冲击。

④根据步骤①计算得到的正序电流和负序电流给定值、步骤②设计的电流前馈系数 k_c 以及步骤③设计的扰动电压前馈系数 k_e ,进行正负序双电流环控制,用以实现大功率光伏逆变器的低电压穿越。

2. 根据权利要求 1 所述的大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法,其特征在于:所述步骤②中的电流前馈系数 k_c 的选取范围为 0.2 ~ 0.7。

3. 根据权利要求 1 所述的大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法,其特征在于:所述步骤③中扰动电压前馈系数 k_e 的计算方式

$$k_e = \frac{1}{G_{inv}}$$

G_{inv} 为三相光伏逆变器的等效传递函数。

一种大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法,用于电网故障期间保持光伏逆变器不间断并网运行。

背景技术

[0002] 随着大量的新能源接入电力系统,大功率光伏能源瞬间的切除将造成电网有功的缺失,这对电力系统的稳定恢复造成不可忽视的影响。为维持光伏能源高渗透下电力系统的安全与稳定运行,新的并网接入规则要求大中型光伏逆变器应具备低电压穿越 (Low Voltage Ride Through, LVRT) 能力,即在电网故障期间保持光伏逆变器不间断并网运行。采用传统的双闭环矢量控制策略时,电网电压跌落瞬间会引起并网电流的冲击,可能引起硬件保护跳闸,甚至烧毁功率器件;尤其是在不平衡跌落时将导致并网电流的高度不平衡,从而造成馈入电网的功率发生振荡,影响光伏逆变器和电网的安全运行。为保护光伏电站的安全,维护电力系统的稳定,需对低电压穿越期间光伏逆变器的并网控制方法进行研究。

[0003] 根据电网电压正常和三相平衡跌落的运行条件,(郑飞,张军军,丁明昌.基于RTDS的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略.电力系统自动化,2012,36(22):19-24)采用常规控制与LVRT控制相切换的策略实现低电压穿越,但未对不平衡跌落进行分析,难以实现光伏发电系统在电网电压在不同故障跌落期间低电压穿越要求。而针对不平衡跌落的控制策略研究,经典控制是由对称分量法将不平衡量进行正、负序分解,并建立了正、负序对称条件下的功率方程,根据选取的控制目标,计算出所需的电流指令,通过控制器实现对指令电流的无静差跟踪,以实现不平衡条件下的控制。由于并网电抗器上存在功率波动,不可完全忽视,因此(廖勇,庄凯,姚骏.电网电压不平衡时全功率风电并网逆变器的控制策略.电网技术.2012,36(1):72-78)考虑了电抗器上的功率波动并建立新的电压方程,同时引入机侧电流前馈实现不平衡条件下的稳定控制,但实验仅针对轻微的不平衡条件,对于能否满足不平衡跌落时的低电压穿越要求还有待验证;另外,实验中采用电感滤波器,而大功率条件下常采用滤波效果和经济性能更好的LCL滤波器,故还需对基于LCL滤波器的控制方法进行分析。目前,研究LCL滤波器的控制方式大多基于电网电压对称来研究的,在低电压穿越过程中必须考虑电网电压跌落尤其是不对称跌落时系统运行的稳定性,因此现有方法难以解决电网电压不对称跌落时的问题,综上所述,现有的控制算法无法满足大功率光伏逆变器并网发电系统(基于LCL滤波器的并网拓扑)在不同电网电压跌落条件下的低电压穿越控制要求。

发明内容

[0004] 本发明的技术问题:克服了现有大功率光伏逆变器不能有效抑制电网电压在跌落时带来的瞬时电流冲击的问题,提出了一种低电压穿越电压控制方法,实现了电网电压跌落前后系统的稳定运行,并满足了并网规则中的无功支撑要求。

[0005] 本发明的技术方案为:一种大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法,其步

骤为：

[0006] ①考虑电网电压在跌落,尤其是在不平衡跌落条件下,光伏逆变器的低电压穿越情况,计算正序电流和负序电流参考给定值,同时为保证光伏逆变器在并网时具有高的功率因数,选取逆变器补偿滤波电容上吸收的无功功率;其中,正序电流和负序电流参考给定值的计算表达式为：

$$[0007] \begin{cases} i_{inv_d}^{p*} = \frac{2e_d^p P_0 + e_q^p Q_0}{3[(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2]} \\ i_{inv_q}^{p*} = \frac{2e_q^p P_0 - e_d^p Q_0}{3[(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2]} \\ i_{inv_d}^{n*} = 0 \\ i_{inv_q}^{n*} = 0 \end{cases}$$

[0008] 式中 P_0 、 Q_0 分别为输出有功、无功的直流分量; $i_{inv_d}^{p*}$ 、 $i_{inv_q}^{p*}$ 、 $i_{inv_d}^{n*}$ 、 $i_{inv_q}^{n*}$ 分别为正序 dq 轴和负序 dq 轴的电流参考给定值; e_d^p 、 e_q^p 分别为电网电压正序 dq 轴分量。

[0009] 选取逆变器补偿滤波电容上吸收的无功功率的计算表达式为：

$$[0010] \Delta Q = \omega C_f [(u_{cd}^p)^2 + (u_{cq}^p)^2 + (u_{cd}^n)^2 + (u_{cq}^n)^2]$$

[0011] 式中 ΔQ 为补偿的无功; ω 为检测到的电网频率; C 为 LCL 滤波器上的滤波电容; u_{cd}^p 、 u_{cq}^p 、 u_{cd}^n 、 u_{cq}^n 分别为滤波电容的正负序 dq 轴分量。

[0012] ②基于正负序双电流环控制策略,设计在调制信号中加入滤波电容电流前馈,通过调节电流前馈系数 k_c ,实现不平衡条件下的阻尼控制;

[0013] ③针对光伏逆变器并网系统,考虑电压跌落时的暂态过程,设计扰动电压前馈系数 k_e ,抑制电网电压跌落时的电流瞬态冲击;

[0014] ④根据步骤①计算得到的正序电流和负序电流给定值、步骤②设定的电流前馈系数 k_c 以及步骤③设计的扰动电压前馈系数 k_e ,进行正负序双电流环控制,用以实现大功率光伏逆变器的低电压穿越。

[0015] 所述步骤②中的 k_c 选取范围为 0.2 ~ 0.7,其中所述的有源阻尼控制,是一种基于正负序双电流环的不平衡控制算法,通过在 SPWM 调制波中加入滤波电容电流前馈信号,与载波比较生成最终的 PWM 波形。

[0016] 所述步骤③中的扰动电压前馈系数 k_e 的表达式为：

$$[0017] k_e = \frac{1}{G_{inv}}$$

[0018] G_{inv} 为三相光伏逆变器的等效传递函数。

[0019] 本发明的原理为：

[0020] 本发明所述的大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法适用于非隔离型单级式光伏并网结构,其拓扑结构由光伏阵列、并网逆变器、LCL 滤波器和控制系统组成,如图 2 所示,图中 L_{inv} 为逆变器侧电感值; L_g 为电网侧电感值; C_f 为滤波电容。建立数学模型：

$$[0021] u_{inv_x} = L_{inv} \frac{di_{inv_x}}{dt} + u_{c_x}$$

$$[0022] i_{inv_x} = i_{g_x} + i_{c_x}$$

$$[0023] \quad u_{c_x} = L_g \frac{di_{g_x}}{dt} + e_x \quad (1)$$

[0024] 式中： $x = a, b, c$ ，其中 a, b, c 代表三相； u_{inv_x} 、 i_{inv_x} 、 e_x 、 i_{g_x} 、 u_{c_x} 、 i_{c_x} 分别表示逆变器输出侧某一相电压和电流、电网电压和电流、滤波电容上的电压和电流。

[0025] 考虑复杂的不平衡跌落条件下低电压穿越情况，整个方法控制框图如图 3 所示。其中，通过锁相环和正负序分离模块对输入量进行处理，获取控制时所需要的各变量；控制环路由电压外环和电流内环组成，当电网正常时，通过电压外环控制以实现光伏电池板的最大功率点追踪；当电压跌落时，根据检测条件实时切除电压外环而采用电流内环控制；当电网恢复后，切入电压外环，电压环的参考给定以斜坡方式恢复到故障前的值。控制方法主要分为三个部分，第一部分是电流指令值的计算，第二部分是正负序双电流环有源阻尼的实现方式，以及滤波电容电流前馈系数 k_c 的确定，第三部分是扰动电压前馈系数 k_e 的确定。

[0026] 对于第一部分，从图 2 我们可以得到逆变器输出的功率可表述为：

$$[0027] \quad S = \frac{3}{2} (u_{inv_dq}^p e^{j\omega t} + u_{inv_dq}^n e^{-j\omega t}) \overline{(i_{inv_dq}^p e^{j\omega t} + i_{inv_dq}^n e^{-j\omega t})} \quad (2)$$

[0028] 输出有功功率和无功功率可表示为：

$$[0029] \quad P = (P_0 + P_{c2} \cos 2\omega t + P_{s2} \sin 2\omega t) \quad (3)$$

$$[0030] \quad Q = (Q_0 + Q_{c2} \cos 2\omega t + Q_{s2} \sin 2\omega t) \quad (4)$$

[0031] 式中： P_0 、 Q_0 分别为输出有功、无功的直流分量； $u_{inv_dq}^p$ 、 $u_{inv_dq}^n$ 分别为逆变器输出侧电压正负序 d 轴、q 轴分量； $i_{inv_dq}^p$ 、 $i_{inv_dq}^n$ 分别为逆变器输出侧电流正负序 d 轴、q 轴分量； P_{c2} 、 P_{s2} 、 Q_{c2} 、 Q_{s2} 为输出有功、无功的波动分量； ω 为电网电压角频率。将有功分量和无功分量展开为：

$$[0032] \quad \begin{bmatrix} P_0 \\ P_{c2} \\ P_{s2} \\ Q_0 \\ Q_{c2} \\ Q_{s2} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} u_{inv_d}^p & u_{inv_q}^p & u_{inv_d}^n & u_{inv_q}^n \\ u_{inv_d}^n & u_{inv_q}^n & u_{inv_d}^p & u_{inv_q}^p \\ u_{inv_q}^n & -u_{inv_d}^n & -u_{inv_q}^p & u_{inv_d}^p \\ u_{inv_q}^p & -u_{inv_d}^p & u_{inv_q}^n & -u_{inv_d}^n \\ u_{inv_q}^n & -u_{inv_d}^n & u_{inv_q}^p & -u_{inv_d}^p \\ -u_{inv_d}^n & -u_{inv_q}^n & u_{inv_d}^p & u_{inv_q}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{inv_d}^p \\ i_{inv_q}^p \\ i_{inv_d}^n \\ i_{inv_q}^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0033] 为了利用电网电压这一已知测量量，获取精确的指令电流，需对式 (5) 进行变换。由式 (1) 进行坐标变换，并进行正负序分离可得正负序分量下的数学模型可表示为：

[0034]

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\text{inv}} \frac{di_{\text{inv_dq}}^{\text{p}}}{dt} = u_{\text{inv_dq}}^{\text{p}} - u_{\text{c_dq}}^{\text{p}} \pm \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_qd}}^{\text{p}} \\ L_{\text{g}} \frac{di_{\text{g_dq}}^{\text{p}}}{dt} = u_{\text{c_dq}}^{\text{p}} - e_{\text{dq}}^{\text{p}} \pm \omega L_{\text{g}} i_{\text{g_qd}}^{\text{p}} \\ C_{\text{f}} \frac{du_{\text{c_dq}}^{\text{p}}}{dt} = i_{\text{inv_dq}}^{\text{p}} - i_{\text{g_dq}}^{\text{p}} \pm \omega C_{\text{f}} u_{\text{c_qd}}^{\text{p}} \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\text{inv}} \frac{di_{\text{inv_dq}}^{\text{n}}}{dt} = u_{\text{inv_dq}}^{\text{n}} - u_{\text{c_dq}}^{\text{n}} \mp \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_qd}}^{\text{n}} \\ L_{\text{g}} \frac{di_{\text{g_dq}}^{\text{n}}}{dt} = u_{\text{c_dq}}^{\text{n}} - e_{\text{dq}}^{\text{n}} \mp \omega L_{\text{g}} i_{\text{g_qd}}^{\text{n}} \\ C_{\text{f}} \frac{du_{\text{c_dq}}^{\text{n}}}{dt} = i_{\text{inv_dq}}^{\text{n}} - i_{\text{g_dq}}^{\text{n}} \mp \omega C_{\text{f}} u_{\text{c_qd}}^{\text{n}} \end{array} \right.$$

[0035] 由式 (6) 可得, 系统稳态条件下, 逆变器侧电压与电网电压之间的关系为:

$$\begin{aligned} [0036] \quad u_{\text{inv_d}}^{\text{p}} &= e_{\text{d}}^{\text{p}} - \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_q}}^{\text{p}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gq}}^{\text{p}} \\ u_{\text{inv_q}}^{\text{p}} &= e_{\text{q}}^{\text{p}} + \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_d}}^{\text{p}} + \omega L_{\text{g}} i_{\text{gd}}^{\text{p}} \\ [0037] \quad u_{\text{inv_d}}^{\text{n}} &= e_{\text{d}}^{\text{n}} + \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_q}}^{\text{n}} + \omega L_{\text{g}} i_{\text{gq}}^{\text{n}} \\ [0038] \quad u_{\text{inv_q}}^{\text{n}} &= e_{\text{q}}^{\text{n}} - \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_d}}^{\text{n}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gd}}^{\text{n}} \end{aligned} \quad (7)$$

[0039] 将式 (7) 带入式 (5) 可得

$$[0040] \quad \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \\ P_{\text{c2}} \\ P_{\text{s2}} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} e_{\text{d}}^{\text{p}} & e_{\text{q}}^{\text{p}} & e_{\text{d}}^{\text{n}} & e_{\text{q}}^{\text{n}} \\ e_{\text{q}}^{\text{p}} & -e_{\text{d}}^{\text{p}} & e_{\text{q}}^{\text{n}} & -e_{\text{d}}^{\text{n}} \\ e_{\text{d}}^{\text{n}} & e_{\text{q}}^{\text{n}} & e_{\text{d}}^{\text{p}} & e_{\text{q}}^{\text{p}} \\ e_{\text{q}}^{\text{n}} & -e_{\text{d}}^{\text{n}} & -e_{\text{q}}^{\text{p}} & e_{\text{d}}^{\text{p}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\text{inv_d}}^{\text{p}} \\ i_{\text{inv_q}}^{\text{p}} \\ i_{\text{inv_d}}^{\text{n}} \\ i_{\text{inv_q}}^{\text{n}} \end{bmatrix} + \quad (8)$$

[0041]

$$\frac{3}{2} \begin{bmatrix} -\omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_q}}^{\text{p}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gq}}^{\text{p}} & \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_d}}^{\text{p}} + \omega L_{\text{g}} i_{\text{gd}}^{\text{p}} & \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_q}}^{\text{n}} + \omega L_{\text{g}} i_{\text{gq}}^{\text{n}} & -\omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_d}}^{\text{n}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gd}}^{\text{n}} \\ \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_d}}^{\text{p}} + \omega L_{\text{g}} i_{\text{gd}}^{\text{p}} & \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_q}}^{\text{p}} + \omega L_{\text{g}} i_{\text{gq}}^{\text{p}} & -\omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_d}}^{\text{n}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gd}}^{\text{n}} & -\omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_q}}^{\text{n}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gq}}^{\text{n}} \\ \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_q}}^{\text{n}} + \omega L_{\text{g}} i_{\text{gq}}^{\text{n}} & -\omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_d}}^{\text{n}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gd}}^{\text{n}} & -\omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_q}}^{\text{p}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gq}}^{\text{p}} & \omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_d}}^{\text{p}} + \omega L_{\text{g}} i_{\text{gd}}^{\text{p}} \\ -\omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_d}}^{\text{n}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gd}}^{\text{n}} & -\omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_q}}^{\text{n}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gq}}^{\text{n}} & -\omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_d}}^{\text{p}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gd}}^{\text{p}} & -\omega L_{\text{inv}} i_{\text{inv_q}}^{\text{p}} - \omega L_{\text{g}} i_{\text{gq}}^{\text{p}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\text{inv_d}}^{\text{p}} \\ i_{\text{inv_q}}^{\text{p}} \\ i_{\text{inv_d}}^{\text{n}} \\ i_{\text{inv_q}}^{\text{n}} \end{bmatrix}$$

[0042] 式 (8) 为已知测量量与逆变器输出功率之间的关系。为消除负序电流即以式 (8) 中 $i_{\text{inv_d}}^{\text{n}}=0$ 、 $i_{\text{inv_q}}^{\text{n}}=0$ 为目标, 考虑到满功率运行时, 在设计运行参数下, 式 (8) 右侧耦合项所占的比例很小, 为简化计算, 忽略该项的影响, 因此电流参考给定值为

$$[0043] \quad \begin{cases} i_{\text{inv}_d}^{p*} = \frac{2e_d^p P_0 + e_q^p Q_0}{3[(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2]} \\ i_{\text{inv}_q}^{p*} = \frac{2e_q^p P_0 - e_d^p Q_0}{3[(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2]} \\ i_{\text{inv}_d}^{n*} = 0 \\ i_{\text{inv}_q}^{n*} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

[0044] 式 (9) 中, $i_{\text{inv}_d}^{p*}$ 、 $i_{\text{inv}_q}^{p*}$ 、 $i_{\text{inv}_d}^{n*}$ 、 $i_{\text{inv}_q}^{n*}$ 为逆变器输出侧的电流指令值, 在低功率并网条件下, 滤波器对并网功率因数的影响不可忽略。为确保光伏电站在并网运行时保持较高的功率因数, 需补偿滤波电容上吸收的无功功率, 吸收无功功率 ΔQ 可选取:

$$[0045] \quad \Delta Q = \omega C [(u_{cd}^p)^2 + (u_{cq}^p)^2 + (u_{cd}^n)^2 + (u_{cq}^n)^2] \quad (10)$$

[0046] 在稳定运行状态时, 令 $Q_0 = \Delta Q$, 带入式 (7) 即可获得单位功率因数并网运行时的内环电流给定值。低电压穿越时, 根据检测到的电压跌落深度, 实时修改 Q_0 的大小以调节无功功率输出。为保证并网电流不超过安全限定值, 输出的有功、无功电流分量大小应满足

$$[0047] \quad i_{\text{inv}_d}^{p*} \leq \sqrt{(i_{\text{max}})^2 - (i_{\text{inv}_q}^{p*})^2} \quad (11)$$

[0048] 式 (11) 中, i_{max} 表示输出电流的最大限定幅值。电压跌落后的稳定控制和无功支撑通过动态改变 d 轴、q 轴电流指令值来实现, 并选取适当的控制器参数以保证系统的稳定性。

[0049] 对于第二部分, 在大功率条件下, LCL 滤波器可显著降低滤波电感设计值, 减小系统的体积和损耗, 但存在谐振问题。在不影响光伏逆变器并网效率的前提下, 常采用有源阻尼以抑制谐振。在电网电压平衡条件下, 有源阻尼电流环控制框图如图 4 所示。其中, G_{inv} 为逆变器的数学模型, $G_i(s)$ 为电流控制器传递函数, $3s/2r$ 、 $2r/3s$ 表示坐标变换, 虚线框部分为 LCL 滤波器的等效数学模型。但由于不平衡条件下采用正负序双电流环控制方式, 电压、电流均被分离为正序分量和负序分量, 而滤波电容电流 i_c 主要为高频分量, 常用的正负序分离方式均无法得到高频下的正序和负序分量, 故采用平衡条件下的有源阻尼控制方式, 在不平衡条件下无法实现阻尼控制, 甚至影响系统的稳定。基于正负序双电流环控制策略, 本发明采用的电流环控制框图如图 5 所示。在图 5 中, G_{inv} 为逆变器的数学模型, $G_i(s)$ 为电流控制器传递函数, $3s/2r$ 、 $2r/3s$ 表示坐标变换, 虚线框 1 为不平衡控制算法的控制框图, 虚线框 2 为 LCL 的等效数学模型。图 5 所示的前馈方式, 有效避免了对前馈量 i_c 进行正负序分离, 且前馈系数 k_c 的调节, 并不影响图 4 中有源阻尼算法的传递函数, 可有效抑制 LCL 滤波器存在的谐振。

[0050] 对于第三部分, 在电压跌落瞬间, 对稳定并网运行与低电压穿越运行状态切换过程中的电流冲击现象, 必须加以控制以保证光伏逆变器能安全进入跌落后的运行区间。对图 5 所示的环路进行简化, 如图 6 所示, 并求出系统的闭环传递函数:

[0051]

$$I_g = \frac{G_i(s)G_1(s)G_2(s)}{1 + G_i(s)G_1(s)G_2(s)} I_{inv}^* - \frac{G_2(s)(k_e G_1(s) - 1)}{1 + G_i(s)G_1(s)G_2(s)} E \quad (10)$$

[0052] 式中, k_e 为扰动电压前馈系数。

[0053]

$$G_1(s) = \frac{G_{inv}}{L_{inv} C_f s^2 + (G_{inv} G_i(s) - k_c G_{inv}) C_f s + 1} \quad (11)$$

[0054]

$$G_2(s) = \frac{L_{inv} C_f s^2 + (G_{inv} G_i(s) - k_c G_{inv}) C_f s + 1}{L_{inv} C_f L_g s^3 + (G_{inv} G_i(s) - k_c G_{inv}) L_g C_f s^2 + s(L + L_g)} \quad (12)$$

[0055] 由式 (12) 可知, 控制输出量 I_g 与输入量 I_{inv}^* 和电网电压 E 均存在联系。将 E 视为扰动项, 电压跌落瞬间, 并网电流将成比例增大。因此, 为了消除扰动量对并网电流的影响, 引入电网电压前馈, 如图 6 虚线部分所示。

[0056] 若完全消除扰动项, 可得

[0057]

$$k_e = \frac{1}{G_1(s)} = \frac{1}{G_{inv}} (L_{inv} C_f s^2 + (G_{inv} G_i(s) - k_c G_{inv}) C_f s + 1) \quad (13)$$

[0058] 采用式 (13) 的扰动电压前馈系数 k_e 可实现对扰动量 E 的完全抑制, 即 E 的畸变不会影响 I_g 的输出。因式 (13) 中存在微分项和二阶微分项, 其中, 微分项和二阶微分项对高频分量有抑制作用, 比例项则影响低频分量的作用。对于电网电压 e 跌落, 尤其是在 e 瞬间跌落时, 微分量的存在将导致前馈信号趋于无穷大, 使系统不稳定。在电网电压跌落瞬间, 为了抑制并网电流瞬态冲击, 保护并网设备安全运行, 适应 LVRT 要求, 对式 (13) 进行简化, 忽略前馈系数中的微分项和二阶微分项, 可得

$$[0059] \quad k_e = \frac{1}{G_{inv}} \quad (14)$$

[0060] 即将前馈系数简化为比例环节。同时, 在采集通道中加入低通滤波器, 以消除前馈信号 e 中存在的高频量对并网输出电流波形的影响, 前馈量的引入将对电网电压跌落引起的瞬时电流冲击起到很好的抑制作用。

[0061] 本发明所述方法在实际应用时, 当检测到电压跌落, 跌落标志位将使能, 控制策略将切除实现最大功率点追踪的电压外环, 采取电流内环控制。同时减小有功给定, 并动态修改无功给定, 限定条件如式 (11), 以实现低电压穿越期间的无功输出。通过控制参数调节, 选取最优的参数以保证电流环路的稳态和动态性能, 从而实现低电压穿越前后的稳定并网控制。

[0062] 本发明与现有技术相比的优点在于:

[0063] 本发明所述的针对大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法, 针对基于 LCL 滤波器的大功率光伏逆变器, 考虑到在不同类型电网电压跌落尤其是电网出现严重的不平衡跌落情况, 通过引入负序电流控制环, 并计算出简化的电流指令值以抑制负序电流, 从而实现并网电流三相平衡输出; 针对正负序双电流控制方式, 设计的适应不平衡控制下的滤波电

容电流前馈方式保证了并网系统的稳定；在电网电压跌落瞬间，采用的电网电压前馈可有效抑制瞬时电流冲击，从而保护逆变器安全过渡到低电压穿越运行状态，结合快速的正负序分量提取和精确的电网电压信号同步，可确保控制中信号获取的实时性，并根据需求动态调节无功电流的输出，控制效果保证了电压跌落前后系统的稳定运行，并满足电力系统对于光伏并网逆变器的低电压穿越要求。

附图说明

[0064] 图 1 为本发明大功率光伏逆变器低电压穿越控制方法流程图。

[0065] 图 2 为单级式光伏并网系统的拓扑结构图。

[0066] 图 3 为本发明所述方法的正负序双电流环控制框图。

[0067] 图 4 为平衡条件下的有源阻尼电流环控制框图。

[0068] 图 5 为低电压穿越控制策略下的 LCL 有源阻尼控制框图。

[0069] 图 6 为系统控制的简化框图

[0070] 图 7 为应用本发明方法所采用的平台硬件结构图。

[0071] 图 8 为电网电压在平衡跌落下的实验波形，其中图 8a 为传统控制方法的电压电流波形，图 8b 为 500kW 条件下，电网电压跌落 20% 时的电压电流波形，图 8c 为三相电网电压平衡跌落至 20% 时瞬间的电压电流波形。

[0072] 图 9 为电网电压在不平衡跌落条件下的实验波形，其中图 9a 为并网输出侧 a 相（单相）跌落条件下的并网电压电流波形，图 9b 为并网输出侧 b-c 两相跌落条件下的并网电压电流波形。

具体实施方式

[0073] 一种大功率光伏逆变器的低电压穿越控制方法，如图 1 所示，其步骤为：①考虑电网电压跌落尤其在不平衡跌落条件下，光伏逆变器的低电压穿越情况，计算正序电流和负序电流参考给定值，同时为保证光伏逆变器在并网时具有高的功率因数，选取逆变器补偿滤波电容上吸收的无功功率；其中，正序电流和负序电流参考给定值的计算表达式为：

$$[0074] \begin{cases} i_{inv_d}^{p*} = \frac{2e_d^p P_0 + e_q^p Q_0}{3[(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2]} \\ i_{inv_q}^{p*} = \frac{2e_q^p P_0 - e_d^p Q_0}{3[(e_d^p)^2 + (e_q^p)^2]} \\ i_{inv_d}^{n*} = 0 \\ i_{inv_q}^{n*} = 0 \end{cases}$$

[0075] 式中 P_0 、 Q_0 分别为输出有功、无功的直流分量； $i_{inv_d}^{p*}$ 、 $i_{inv_q}^{p*}$ 、 $i_{inv_d}^{n*}$ 、 $i_{inv_q}^{n*}$ 分别为正序 dq 轴和负序 dq 轴的电流参考给定值； e_d^p 、 e_q^p 分别为电网电压正序 dq 轴分量。

[0076] 选取逆变器补偿滤波电容上吸收的无功功率的计算表达式为：

$$[0077] \Delta Q = \omega C [(u_{cd}^p)^2 + (u_{cq}^p)^2 + (u_{cd}^n)^2 + (u_{cq}^n)^2]$$

[0078] ΔQ 为补偿的无功； ω 为检测到的电网频率； C 为 LCL 滤波器上的滤波电容； u_{cd}^p 、 u_{cq}^p 、 u_{cd}^n 、 u_{cq}^n 分别为滤波电容的正负序 d 轴、q 轴分量。

[0079] ②基于正负序双电流环控制策略,在调制信号中加入滤波电容电流前馈,通过调节电流前馈系数 k_c ,实现不平衡条件下的阻尼控制; k_c 选取范围为 0.2 ~ 0.7,在发明中,优选 $k_c = 0.5$,在能够有效的抑制谐振的同时,还可减小对系统稳定性的影响。

[0080] ③针对光伏逆变器并网系统,考虑电压跌落时的暂态过程,设计扰动电压前馈系数 k_e ,抑制电网电压跌落时的电流瞬态冲击;

[0081] ④根据步骤①计算得到的正序电流和负序电流给定值、步骤②设定的电流前馈系数 k_c 以及步骤③设计的扰动电压前馈系数 k_e ,进行正负序双电流环控制,用以实现大功率光伏逆变器的低电压穿越。

[0082] 所述步骤③中的 k_e 的表达式为:

$$[0083] \quad k_e = \frac{1}{G_{inv}}$$

[0084] G_{inv} 为三相光伏逆变器的等效传递函数。

[0085] 为了表明本发明所述方法的有益效果,实验平台硬件结构如图 7 所示,为 500kW 大功率光伏逆变器实验平台硬件结构图,主要包括电网 1、电网模拟器 7 和大功率光伏逆变器主回路 6 所组成。电网模拟器 7 由三相不控整流桥 3 和三相 PWM 逆变器 4 组成;光伏逆变器主回路由三相逆变器、LCL 滤波电感和直流侧滤波电容组成;其中,电网与电网模拟器之间由变压器 2 联接,电网模拟器与光伏逆变器由隔离变压器 5 联接。

[0086] 电网模拟器采用台湾艾普斯生产的模拟电网可编程电源,型号为 ACST-L-33800,其交流输出端三相电压、相位角独立可调,可模拟低电压穿越时的电网电压跌落。电网模拟器输入端经变压器接电网,其直流母线联结到光伏逆变器的直流输入端,光伏逆变器的输出端通过隔离变压器联结在电网模拟器的交流输出端,这样,光伏逆变器所需能量由电网模拟器提供,并回馈至电网模拟器输出端,实现能量循环利用。

[0087] 为实现光伏逆变器的控制,需在主回路中加入不同类型的传感器,其中,需在网侧加入 2 个电压传感器,测量网侧电压 e_{ab} 和 e_{bc} ;在滤波电感上加入 2 个电流传感器,测量滤波电感电流 i_{c_a} 、 i_{c_b} ;在逆变器输出侧加入 2 个电流传感器,测量输出电流 i_{inv_a} 、 i_{inv_b} 。传感器采集信号经采样调理电路,送入 DSP(本发明采用的是 TMS320LF28335),DSP 的控制算法即为本设计的发明,控制算法计算出的脉冲信号经光纤传送至开关管驱动电路,控制其导通与关断。

[0088] 采用 500kW 光伏并网逆变器,系统的参数如表 1 所示。

[0089] 表 1 500kW 光伏并网逆变器系统参数表

光伏逆变器系统实验参数表		
[0090] 逆变器参数	功率等级 P	500kW
	开关频率 f_s	3kHz
	直流母线电压 U_{dc}	950V
	直流侧电容 C_{dc}	6000uF
电网参数	网侧电压 e	270V
	电网频率 f	50Hz
LCL 滤波器参数	逆变器侧电感 L_{inv}	0.17mH
	滤波电容 C_f	200uF
	网侧电感 L_g	0.05mH

[0091] 假定采取传统的限定幅值保护控制措施,在电网电压跌落瞬间通过减小电流指令值以实现 LVRT,设定测试条件(实验选取 50kW 运行条件)以保证充足的安全裕量。电网电压跌落设定为三相对称跌落至 20% 额定电压,测试波形如图 8(a) 所示。采用本发明所述的控制方法控制并网系统运行在 500kW 条件下,跌落至 20% 的测试波形如图 8(b) 所示,该条件下跌落瞬间展开波形如图 8(c) 所示。从图 8(a) 可知,电压跌落瞬间, i_c 电流过冲现象非常明显,且过冲的幅值远大于稳定运行值。若满功率条件下发生跌落,过冲电流将会导致硬件保护使得网侧断路器跳闸,从而与电网断开,甚至有烧毁逆变器的危险。与图 8(a) 相比,在图 8(b) 中,稳定并网运行状态和穿越状态之间切换瞬间,电流冲击现象被完全抑制,实验中有功恢复按照 80kW/s(大于 10%) 的速率恢复至故障前的运行条件。跌落瞬间的波形展开如图 8(c) 所示,该过程保证了低电压穿越期间逆变器的安全稳定运行。

[0092] 采用本发明所述方法还进行了电网电压在不平衡跌落条件下的实验。实验平台中电网模拟器通过调节三相输出电压以模拟不平衡跌落故障。实验中的测试点选择并网线电压 e_{ab} 和 e_{bc} 以及并网输出电流 i_a 和 i_b 。测试条件分别设置为单相跌落(c 相跌落至 20% 额定电压)和两相跌落(a 相和 b 相跌落至 20%),测试波形分别如图 9(a)(单相跌落)、图 9(b)(两相跌落)所示。从图 9(a) 可知,电网模拟器 c 相电压跌落至 20% 额定电压,经隔离变压器,在网侧电压中, e_{ab} 和 e_{bc} 均有不同程度的跌落。在两相跌落时,网侧电压跌落深度更为明显,如图 9(b) 电压波形所示。在不同的电压跌落条件下,跌落瞬间的并网电流冲击均可被完全抑制。当运行在低电压穿越状态时,并网电流的负序分量被消除,电流保持三相平衡输出,且有一定量的无功输出。当电网电压恢复至额定电压的 90% 后,输出电流将会逐渐增大,有功功率以 80kW/s(大于 10%) 的速率恢复至故障前的运行条件,满足行业的测试要求。因此,所提出的控制策略确保光伏逆变器安全穿越低电压运行区间,控制效果符合并网时输出电能质量和无功支撑等功能要求。

[0093] 本发明说明书中未作详细说明描述的内容属于本领域专业技术人员公知的现有技术。

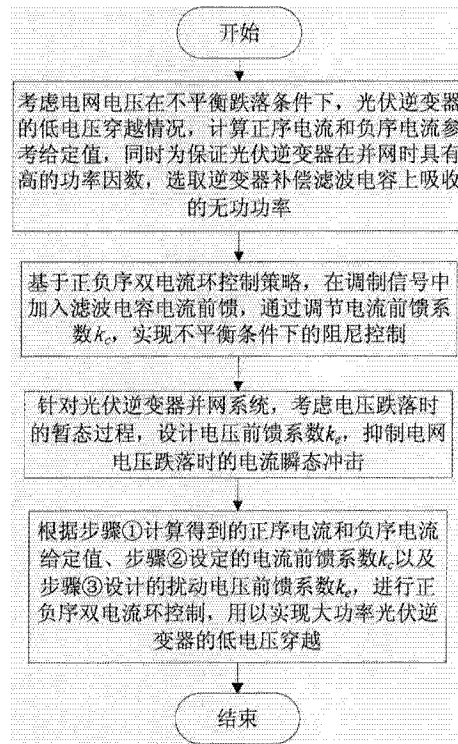


图 1

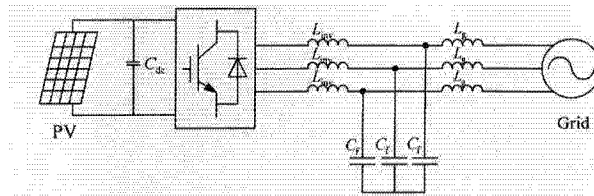


图 2

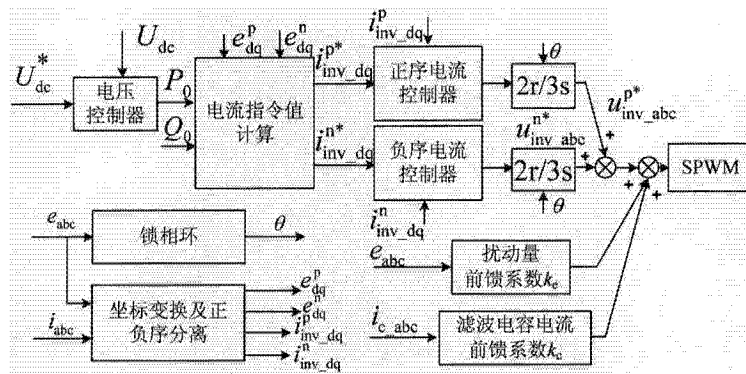


图 3

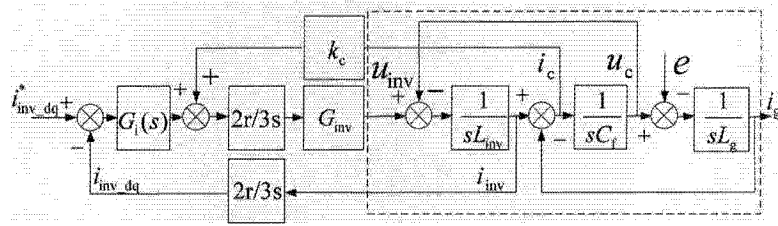


图 4

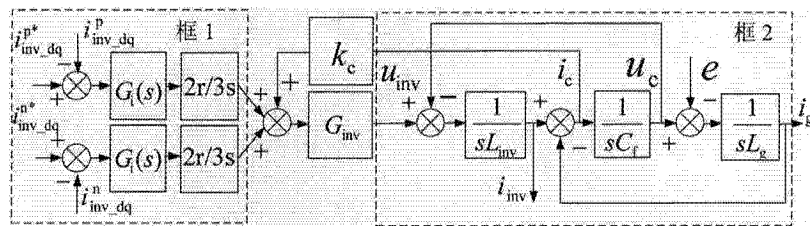


图 5

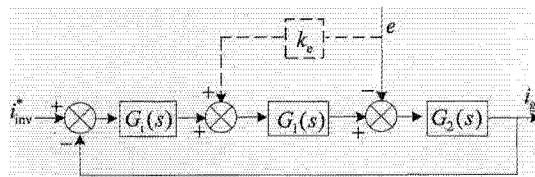


图 6

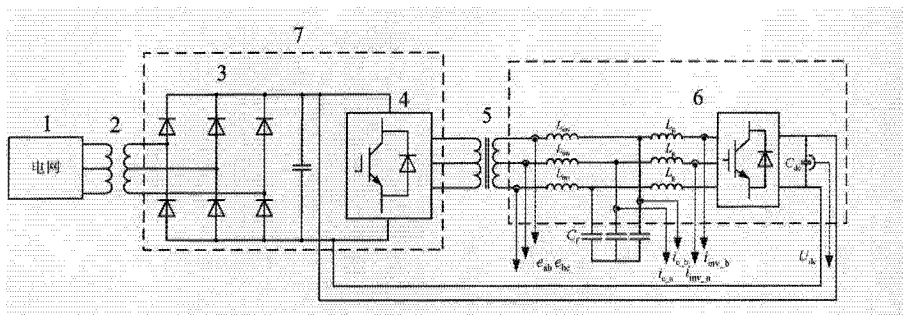


图 7

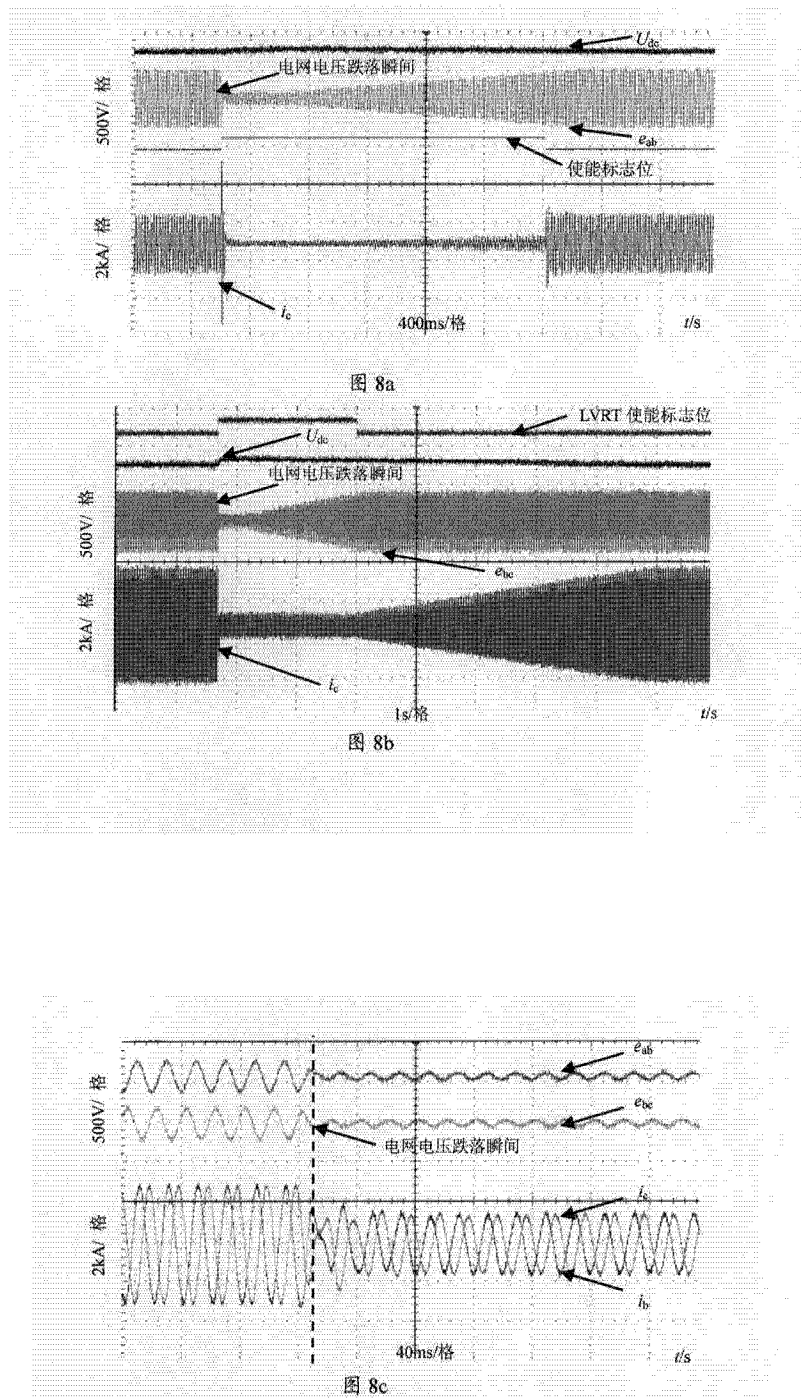


图 8

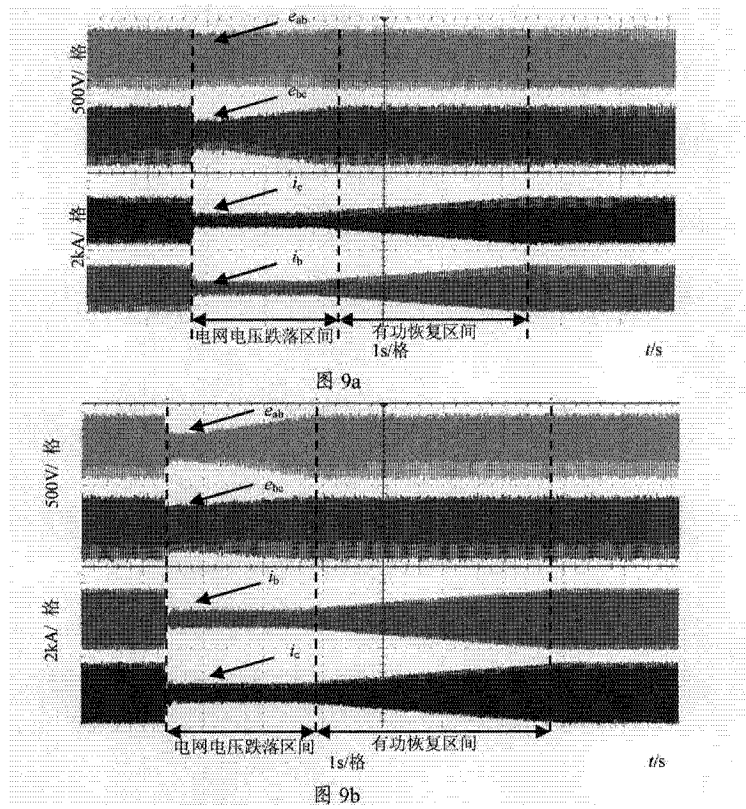


图 9