

电网不平衡时光伏并网逆变器控制技术研究

针对电网不平衡时光伏系统逆变器侧并网电流含有负序分量及大量谐波,且严重畸变,对电网不平衡时 dq 旋转坐标系下正、负序电压分量进行了深入的分析,推导出了正、负序电压分量与电网不平衡程度的关系。基于此关系提出了一种正序分量补偿法控制策略。该控制策略能在很大程度上消除负序电流,抑制电流谐波,使电网不平衡期间并网电流不超过其额定值,避免因电流过大而使光伏系统从电网断开的故障发生。仿真和实验验证了所提控制方法的有效性和优越性。

张林强/国网浙江平湖市供电公司

周 林/重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室

0 引言

并网型逆变器作为分布式发电系统的接口得到越来越广泛的应用^[1]。然而,当电网不平衡时,并网逆变器的运行性能将严重恶化,影响新能源并网。造成电网不平衡的原因有以下方面^[2]。

- 1) 三相电网配电时,三相负载不平衡。
- 2) 大容量单相负载的使用。
- 3) 不对称故障和非全相运行造成的系统不平衡。
- 4) 非全相换位输电线或紧凑型输电线造成的系统不平衡。

常规的控制方法不能保证并网逆变器在电网不平衡条件下很好地运行,因此需要研究电网不平衡时逆变器的控制策略。目前对于电网不平衡情况下逆变器的研究主要集中在以下两点^[3-4]:电网功率和直流侧电压二倍频波动的抑制;并网电流畸变的控制。文献[5]推导了电网不平衡条件下VSC功率传输直角坐标方程,得到了消除功率脉动时VSC输出电压正序分量和负序分量之间的幅值

与相位约束条件,但其采用的是间接电流控制方法,因此控制器响应速度慢,无法直接实现系统电流的监控和功率的解耦控制;文献[6-7]采用了正、负序两套旋转坐标下独立电流跟踪控制方案,将正、负序电流分别变换到正、负序下的直流量,利用PI控制器实现对正、负序电流的无静差跟踪控制,但由于该方案采用两套旋转坐标分别跟踪而构成4个电流内环,使系统结构复杂、参数调整困难;并且简单地将电压、电流分解为正、负序分量而设计的控制器。由于正、负序分解造成的时延问题会给控制系统的动态响应造成不利的影响^[8],文献[9]提出了一种正序控制方法,以消除并网负序电流为出发点,不考虑负序电压。但忽略了负序电压会造成并网电流增大,超过其额定值,对系统的安全造成威胁。

目前光伏系统的控制设计大都建立在电网平衡条件下,如果一旦电网发生故障,由于并网电流的突增,将迫使光伏系统从电网断开。然而随着光伏系统装机容量的增大,一旦光伏系统从电网断开将会对电网带来严重的影响,如功率流动发生大幅度变化、电网电压产生波动等^[10]。如果故障期间光伏系统能尽可能持续连接在电网上,光伏系统的寿命和可靠性也都会得到极大的提高。因此,有必要对电网不平衡情况下光伏逆变器的控制问题进行深入研究。

针对上述问题,通过对电网不平衡时 dq 旋转坐标系下电压正、负序分量与电网不平衡程度关系的深入研究,在正



张林强/工程师

关键词/Keywords

电网不平衡·
光伏系统·
并网逆变器·
 dq 旋转坐标系·
正序分量补偿·

序控制的基础上提出一种正序分量补偿法控制策略。控制原理是将电网不平衡时 dq 旋转坐标系下正序电压分量相对于电网不平衡前的损失量补偿掉,替代原正序电压分量参与计算。该控制方法能够抑制并网负序电流,且使电网不平衡时并网电流不超过其额定值,避免了因并网电流过大而迫使光伏系统从电网断开的故障发生。Matlab仿真和实验验证了控制策略的有效性和优越性。

1 电网不平衡情况下的数学模型分析

1.1 光伏并网逆变器数学模型

所研究的逆变系统如图1所示,该系统是由前级Boost DC/DC升压电路和带单电感 L 滤波器的DC/AC逆变器构成。前级实现Boost升压作用和MPPT控制,后级采用双环控制^[11]。输出电流作为内环,采用PI调节器控制,使其输出电流稳定;直流母线电压作为外环控制,采用带低通滤波器的PI调节器校正成Ⅱ型系统,作为内环的电流参考值。

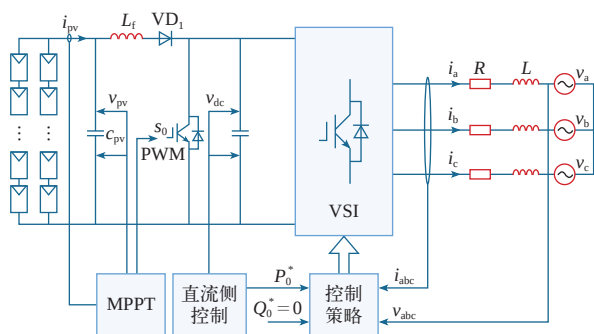


图1 三相光伏系统结构图

对于前级的MPPT和DC/DC升压部分,本文不作详细的讨论,主要集中分析光伏逆变器和电网不平衡之间的相互影响。

三相电网不平衡,且只考虑基波电动势,则电网电动势 E 可描述为正序电动势 E^P 、负序电动势 E^N 和零序电动势 E^0 三者之和^[12],即

$$E = E^P + E^N + E^0 \quad (1)$$

对于三相无中线连接光伏系统,一般不考虑零序电动势的影响,即 $E^0 = 0$ 。

将上面等式表示成正交的正、负序分量,即

$$E_{dq} = e^{j\omega t} E_{dq}^P + e^{-j\omega t} E_{dq}^N \quad (2)$$

式中, $e^{j\omega t} E_{dq}^P$ 为按逆时针旋转的电网电压正序复矢量; $e^{-j\omega t} E_{dq}^N$ 为按顺时针旋转的电网电压负序复矢量。

其中, $E_{dqs} = 2/3[E_a + e^{j2\pi/3}E_b + e^{-j2\pi/3}E_c]$, $E_{dq}^P = E_d^P + jE_q^P$, $E_{dq}^N = E_d^N + jE_q^N$ 。

图1所示的系统结构的电压等式可表示为^[13]

$$E = V + L \frac{dI}{dt} + RI \quad (3)$$

其中, $E = [E_a \ E_b \ E_c]$, $V = [V_a \ V_b \ V_c]$, $I = [I_a \ I_b \ I_c]$ 。 V 和 I 可以表示为 $V = e^{j\omega t} V_{dq}^P + e^{-j\omega t} V_{dq}^N$, $I = e^{j\omega t} I_{dq}^P + e^{-j\omega t} I_{dq}^N$ 。

将式(1)代入到式(3)可以得到两个解耦的子系统^[6],即

$$E_{dq}^P = L \frac{dI_{dq}^P}{dt} + RI_{dq}^P + j\omega LI_{dq}^P + V_{dq}^P \quad (4)$$

$$E_{dq}^N = L \frac{dI_{dq}^N}{dt} + RI_{dq}^N + j\omega LI_{dq}^N + V_{dq}^N \quad (5)$$

其中, $I_{dq} = I_d + jI_q$, $V_{dq} = V_d + jV_q$ 。

1.2 电网电压不平衡时的功率模型

三相电网不平衡时,光伏并网逆变器侧的复功率为

$$S = (e^{j\omega t} E_{dq}^P + e^{-j\omega t} E_{dq}^N)(e^{j\omega t} I_{dq}^P + e^{-j\omega t} I_{dq}^N)^* = P + jQ \quad (6)$$

式中, $(e^{j\omega t} I_{dq}^P + e^{-j\omega t} I_{dq}^N)^*$ 为 $(e^{j\omega t} I_{dq}^P + e^{-j\omega t} I_{dq}^N)$ 的共轭复矢量。

得到有功功率 P 和无功功率 Q 表达式^[14],即

$$P(t) = P_0 + P_{c2} \cos(2\omega t) + P_{s2} \sin(2\omega t) \quad (7)$$

$$Q(t) = Q_0 + Q_{c2} \cos(2\omega t) + Q_{s2} \sin(2\omega t) \quad (8)$$

式中, P_0 、 Q_0 为有功、无功功率平均值; P_{c2} 、 P_{s2} 为二次有功余弦、正弦功率峰值; Q_{c2} 、 Q_{s2} 为二次无功余弦、正弦功率峰值。

2 正、负序分量补偿法控制策略

2.1 正、负序电压分量与电网不平衡程度关系

电网平衡时三相电压为

$$\begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} = E_m \begin{pmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{pmatrix} \quad (9)$$

转换到dq旋转坐标系中, 即

$$\begin{pmatrix} e_d \\ e_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} E_m \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{pmatrix}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} E_m \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{3}{2} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{1}{6}} \begin{pmatrix} 0 \\ -3E_m \end{pmatrix} \quad (10)$$

当电网不平衡时, 三相电压可以表示为

$$\begin{pmatrix} e'_a \\ e'_b \\ e'_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (E_m - a) \sin(\omega t) \\ (E_m - b) \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \\ (E_m - c) \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{pmatrix} \quad (11)$$

其中, a 、 b 和 c 分别为三相电网电压各相的损失量。此时, 电网电压含有负序分量, 进行正、负序分解^[15], 即

$$\mathbf{v}_{abc}^+ = \begin{pmatrix} v_a^+ & v_b^+ & v_c^+ \end{pmatrix}^T = [T_+] \mathbf{v}_{abc} \quad (12)$$

$$\mathbf{v}_{abc}^- = \begin{pmatrix} v_a^- & v_b^- & v_c^- \end{pmatrix}^T = [T_-] \mathbf{v}_{abc} \quad (13)$$

$$[T_+] = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & q & q^2 \\ q^2 & q & 1 \\ 1 & q^2 & q \end{pmatrix}, \quad [T_-] = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & q^2 & q \\ q & 1 & q^2 \\ q^2 & q & 1 \end{pmatrix},$$

$$q = e^{j\frac{2}{3}\pi}.$$

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} v_\alpha & v_\beta \end{pmatrix}^T = [T_{\alpha\beta}] \mathbf{v}_{abc}$$

$$[T_{\alpha\beta}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (14)$$

故, α 、 β 静止坐标系下电压正、负序分量为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{\alpha\beta}^+ &= [T_{\alpha\beta}] \mathbf{v}_{abc}^+ = [T_{\alpha\beta}] [T_+] \mathbf{v}_{abc} \\ &= [T_{\alpha\beta}] [T_+] [T_{\alpha\beta}]^T \mathbf{v}_{\alpha\beta} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & -m \\ m & 1 \end{pmatrix} \mathbf{v}_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{\alpha\beta}^- &= [T_{\alpha\beta}] \mathbf{v}_{abc}^- = [T_{\alpha\beta}] [T_-] \mathbf{v}_{abc} \\ &= [T_{\alpha\beta}] [T_-] [T_{\alpha\beta}]^T \mathbf{v}_{\alpha\beta} \\ &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & m \\ -m & 1 \end{pmatrix} \mathbf{v}_{\alpha\beta} \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $m = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ 。

电网不平衡时电压的 α 、 β 分量为

$$v_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\frac{3}{2} E_m \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} (b-c) \cos \omega t - \left(a + \frac{1}{4} b + \frac{1}{4} c \right) \sin \omega t \right] \quad (17)$$

$$v_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[-\frac{3}{2} E_m \cos \omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} (b-c) \sin \omega t + \frac{3}{4} (b+c) \cos \omega t \right] \quad (18)$$

由式(17)、式(18)可知

$$\begin{aligned} v_\alpha^+ &= \frac{1}{2} (v_\alpha + jv_\beta) \\ &= \sqrt{\frac{1}{6}} [3E_m \sin \omega t - (a+b+c) \sin \omega t] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} v_\beta^+ &= \frac{1}{2} (-jv_\alpha + v_\beta) \\ &= \sqrt{\frac{1}{6}} [-3E_m \cos \omega t + (a+b+c) \cos \omega t] \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} v_\alpha^- &= \frac{1}{2} (v_\alpha - jv_\beta) \\ &= \sqrt{\frac{1}{6}} \left[-a \sin \omega t - b \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) - c \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} v_\beta^- &= \frac{1}{2} (jv_\alpha + v_\beta) \\ &= \sqrt{\frac{1}{6}} \left[-a \cos \omega t - b \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) - c \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

将静止坐标系的正、负序分量分别在正、负序旋转坐标系中进行转换, 即

$$\begin{pmatrix} e_d^+ \\ e_q^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_\alpha^+ \\ v_\beta^+ \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$e_d^+ = v_\alpha^+ \cos \theta + v_\beta^+ \sin \theta = 0 \quad (24)$$

$$e_q^+ = -v_\alpha^+ \sin \theta + v_\beta^+ \cos \theta = \sqrt{\frac{1}{6}} (-3E_m + a + b + c) \quad (25)$$

$$\begin{pmatrix} e_d^- \\ e_q^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_\alpha^- \\ v_\beta^- \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$e_d^- = v_\alpha^- \cos \theta - v_\beta^- \sin \theta = \frac{\sqrt{2}}{4}(c-b) \quad (27)$$

$$e_q^- = v_\alpha^- \sin \theta + v_\beta^- \cos \theta = \sqrt{\frac{1}{6}} \left(-a + \frac{1}{2}b + \frac{1}{2}c \right) \quad (28)$$

2.2 正序分量补偿法控制策略

上面推导出了dq旋转坐标系下正、负序电压分量与电网不平衡程度的关系，由式(27)~式(29)可知，电网不平衡时正、负序分量与电网不平衡程度有关，且相比于电网不平衡前的损失值为

$$\Delta e_q = \sqrt{\frac{1}{6}}(a+b+c) \quad (29)$$

所提出的正序分量补偿法控制原理为：将电网不平衡后dq旋转坐标系下电压正序分量相对于电网不平衡前的损失量补偿掉，构造出一个正常的正序分量参与控制。 a 、 b 和 c 可以通过式(27)~式(29)联立解出，即

$$\begin{cases} a = \frac{\sqrt{6}(e_q^+ - 2e_q^-)}{3} + E_m \\ b = \frac{\sqrt{6}(e_q^+ + e_q^-)}{3} + E_m - \sqrt{2}e_d^- \\ c = \frac{\sqrt{6}(e_q^+ + e_q^-)}{3} + E_m + \sqrt{2}e_d^- \end{cases} \quad (30)$$

式中， E_m 为电网平衡时的相电压峰值，但在实际情况下，电网本身存在波动， E_m 很难直接测量，故在这里引入一个变量 k ，令 $k = E_m$ ，变量 k 可以根据电网波动情况实时改变。当处于用电高峰期时，测量电网相电压峰值，令 k 等于三者平均值；其他情况下 k 取电网电压标准值，即311 V^[16]。

补偿后的电压分量为

$$\begin{cases} e_d' = e_d^+ \\ e_q' = e_q^+ - \Delta e_q \end{cases} \quad (31)$$

将上述电压损失值的推导过程概括为图2。其中，式(15)、式(16)、式(23)和式(26)分别为相对应的推导公式。虚线框为指令电压的求取方法。

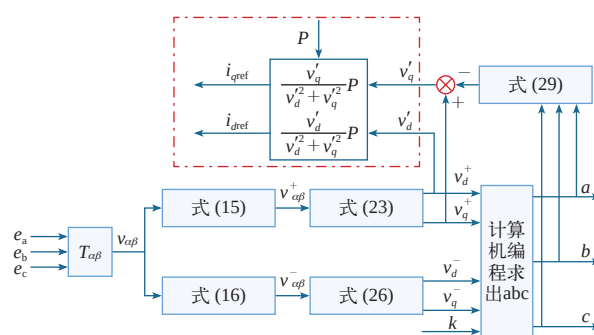


图2 控制策略结构框图

3 仿真与实验

3.1 Matlab仿真

为了验证所提方法的有效性，在Matlab中搭建了系统仿真模型。光伏电池模型采用文献[17]中的数学模型，MPPT控制算法采用变步长电导增量法。经串并联后的阵列参数如表1所示，仿真模型参数如表2所示。

表1 光伏阵列参数

STC: 日照1 000 W/m², 组件温度25 ℃, AM=1.5

开路电压	最佳工作电压	短路电流	最佳工作电流	STC峰值功率
V_{oc}/V	V_m/V	I_{sc}/A	I_m/A	P_m/W
454	366	11.38	10.66	3 900

注: STC, Standard Test Conditions, 标准测试条件; AM, Air Mass, 大气质量。

表2 仿真模型参数

模型参数	数值
输入电容 $C_{pv}/\mu F$	200
Boost电感 L_{pv}/mH	4.2
支撑电容 $C_{dc}/\mu F$	1 000
逆变桥滤波 L/mH	8.72

为了滤除高频谐波，消除稳态误差，电压外环采用的控制器形式为

$$G_{cv}(s) = \frac{\tau_1 s + 1}{\tau_0 s(\tau_2 s + 1)} \quad (32)$$

电流内环采用控制器形式为

$$G_{ci} = k_p \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \quad (33)$$

逆变器控制参数如表3所示。

系统控制原理图如图3所示。其中， I_{dref} 、 I_{qref} 由图2产生， I_d 、 I_q 为并网电流的dq分量。

表3 逆变器控制参数

τ_0	τ_1	τ_2	k_p	τ_i
6.5×10^{-5}	3.8×10^{-2}	3.65×10^{-3}	0.04	1.5×10^{-3}

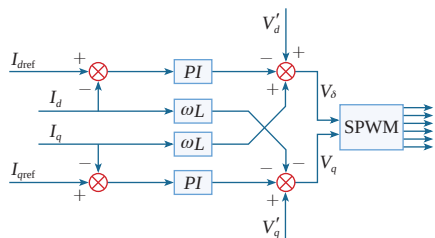
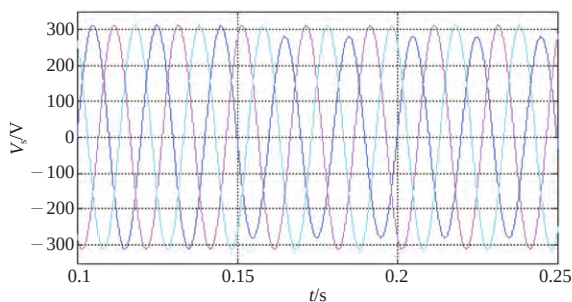
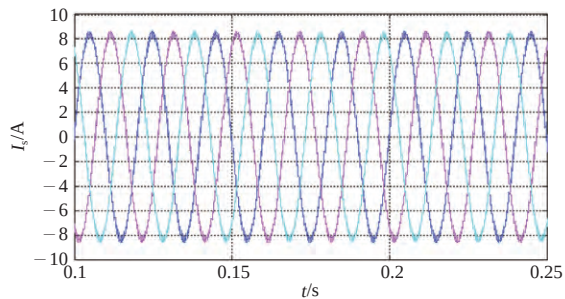


图3 系统控制原理图

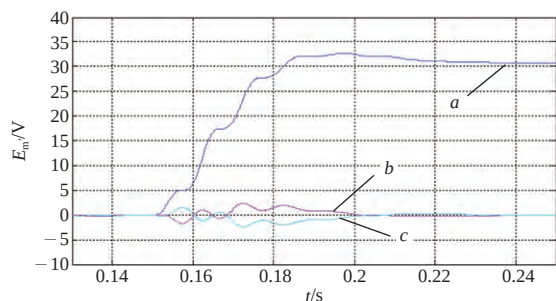
图4a为电网A相电压在0.15 s时刻突然从311 V降到280 V时的电压动态响应图，相位未发生变化；图4b为正序补偿控制方法下的并网电流波形，可以看出，电压不平衡期间，并网电流畸变消除了，负序电流分量也抑制了，且并网电流没



(a) A相电压突降



(b) 并网电流波形

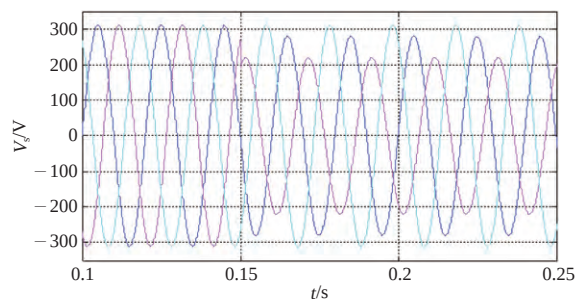


(c) 电网电压损失量分离图

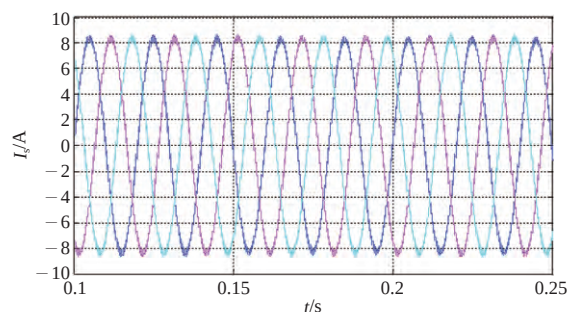
图4 A相电压突降控制波形图

有增大，从而避免了光伏系统从电网断开的故障发生；图4c则为电网电压损失量分离图，可以看出，A相电压的损失量 $a=31$ V， b 、 c 为零，与实际电网情况相符合。

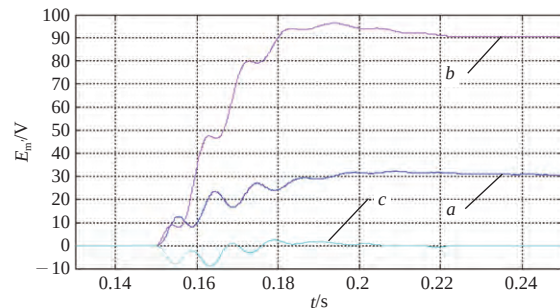
图5a为电网A、B两相电压在0.15 s时同时发生突降：A相由311 V降到280 V，B相由311 V降到220 V时的动态响应图；图5b为所提控制方法下的并网电流波形，可以看出，电网不平衡期间并网电流畸变基本消除，负序电流分量也抑制了，且电流没有超过其额定值；图5c为电网电压损失量的分离图，可以看出， $a=31$ V， $b=91$ V， $c=0$ V，与实际情况相符合。



(a) A、B两相电网电压突降



(b) 并网电流波形

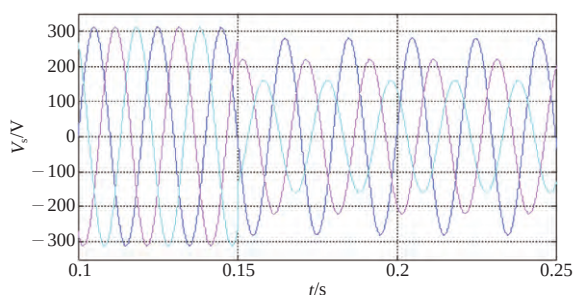


(c) 电网电压损失量分离图

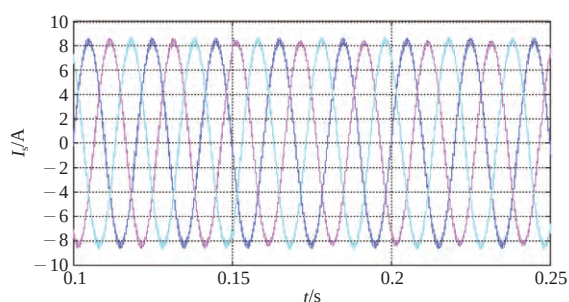
图5 A、B两相电压突降控制波形图

图6a为电网A、B和C三相电压在0.15 s时同时发生突降：A相由311 V降到280 V，B相由311 V降

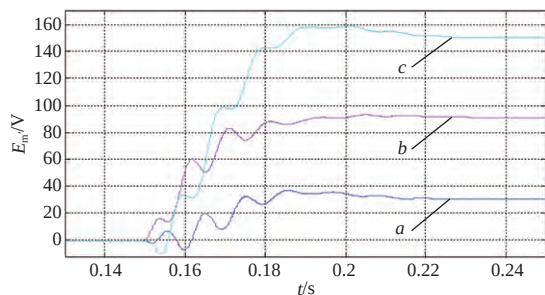
到220 V, C相由311 V降到160 V时的动态响应图, 图6b为正序补偿法控制策略下的并网电流波形。



(a) 三相电压同时突降



(b) 并网电流波形



(c) 电网电压损失量分离图

图6 三相电压同时突降时控制波形

图7为在图6所示电压不平衡情况下的正、负序电压分量。其中 V'_d 、 V'_q 为补偿后的电压分量, 可以看出, 补偿后与电网不平衡前的电压分量基

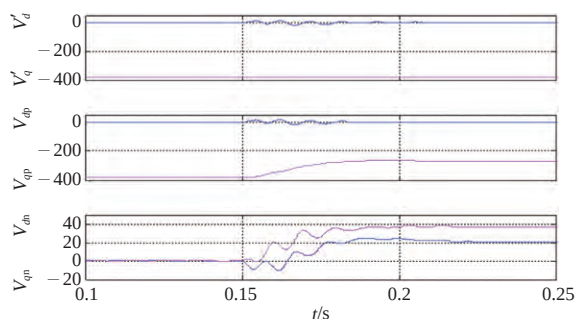


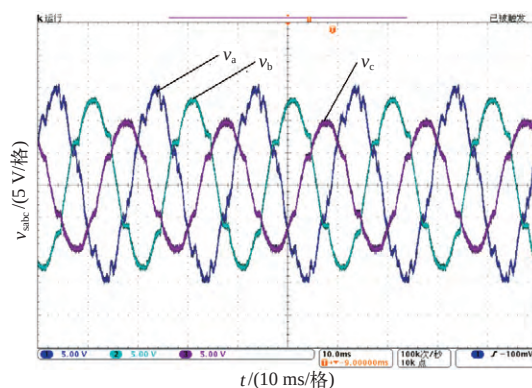
图7 补偿前后的正负序电压分量

本保持一致, 即所提出的正序补偿法完全可以满足将不平衡时的正序分量补偿到不平衡前的状态。 V_{dp} 、 V_{qp} 为电网不平衡时正序电压分量在正序旋转坐标系中的转换量。 V_{dn} 、 V_{qn} 为电网不平衡时负序电压分量在负序旋转坐标系中的转换量。

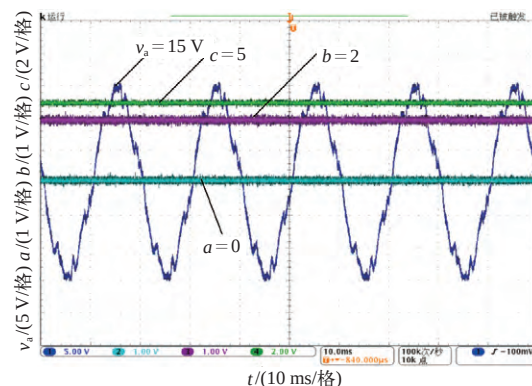
3.2 实验验证

搭建外部电路进行实验验证, 系统参数为: 直流侧电压为40 V, 电网电压峰值为15 V, 有功功率为50 W, 滤波电感为8.72 mH, 开关频率为8 kHz。控制信号由以DSP为控制核心的RT-Lab实验平台产生, 主电路由实际元件搭建而成, 整个系统能够进行实时控制和对外电路进行测试。

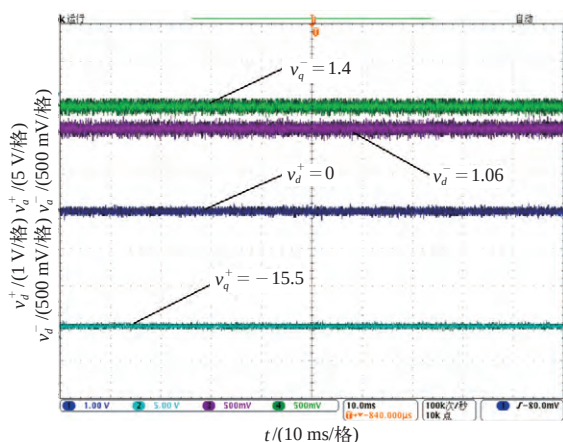
图8为电网电压同时发生变化时的并网电流波形。其中, A相电压由15 V降到14 V, B相电压降到13 V, C相电压降到11 V。图8a为传统控制方法下的并网电流波形, 可以看出, 并网电流畸变严重, 且含有大量负序分量。图8b为所提出控制方法下的并网电流波形, 可以看出, 并网电流基本



(a) 并网点电压波形



(b) 并网点电压损失值

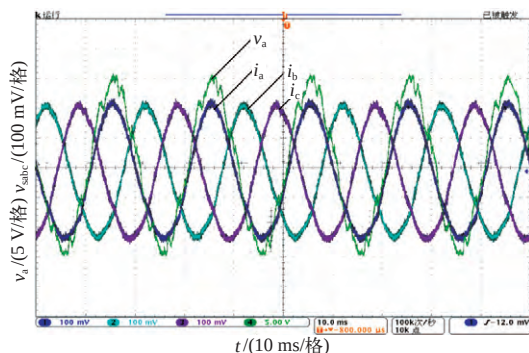


(c) 旋转坐标系正负序电压分量

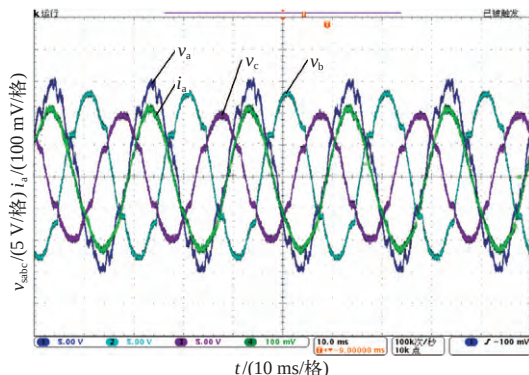
图8 控制策略实验验证波形

对称,畸变很小,且不含负序分量。

图9为电网电压损失量的分离情况。从图中可以看出A相电压的损失量 $a=1\text{ V}$, B相电压的损失量 $b=2\text{ V}$, C相电压的损失量 $c=4\text{ V}$,基本与电网的实际降落相吻合。



(d) 三相电流与A相电压



(e) 三相电压与A相电流

图9 并网电流与并网点电压

4 结束语

对光伏并网逆变器在电网不平衡情况下的控制情况进行了深入研究。

1) 分析了电网不平衡故障下的数学模型,列出了故障情况数学模型的一些常用基本方程。

2) 推导出了电网任意相故障时正、负序分量在正、负序旋转坐标系中的直流量与电网不平衡程度的关系。基于此关系提出了正序分量补偿法控制策略,并且分离出了电网的损失量,为后续的研究打下了基础。

3) 通过仿真实验对电网任意相发生故障时的情况进行了分析比较,验证了正序分量补偿法控制策略能有效地消除故障情况下的负序电流,抑制故障情况下过电流的产生,从而证明了所提出控制方法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] Blaabjerg F, Hen Z C, Jaer S B K. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems [J]. IEEE Transactions Power Electron, 2004, 19 (5) : 1184-1194.
- [2] 姜齐荣. 新型静止无功发生器建模及其控制的研究 [D]. 北京: 清华大学, 1997.
- [3] Enjeti P Shireen W. A new technique to reject DC-link voltage ripple for inverters operating on programmed PWM waveforms [C]. Power Electronics Specialists Conference, 1990 : 705 - 713.
- [4] Moran L, Ziogas P, Joos G. Design aspects of synchronous PWM rectifier-inverter systems under unbalanced input voltage conditions [C]. Industry Applications Society Annual Meeting, 1989 : 877-884.
- [5] 李金丰, 李广凯, 赵成勇, 等. 三相电压不对称时带有电压源换流器的HVDC系统控制策略 [J]. 电网技术, 2005, 29 (16) : 16-12.
- [6] Song H, Nam K. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage [J].

- IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46 (5) : 953-959.
- [7] Xü L, Cartwright P. VSC transmission under unbalanced AC conditions-analysis and control design [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1) : 427-434.
- [8] 巍晓光. 电压源换流器高压直流输电控制策略及其在风电场并网中的应用研究 [D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2007.
- [9] Komatsu Y. Application of the extension pq theory to a mains-coupled [C]. Power Conversion Conference, 2002 : 816-821.
- [10] Bletterie B, Bründlinger R, Fechner H. Sensitivity of photovoltaic inverters to voltage sags-test results for a set of commercial products[C]. International Conference & Exhibition on Electricity Distribution, 2010 : 1-4.
- [11] 程军照, 吴夕科, 李澍森, 等. 采用Boost的两级式光伏发电并网逆变系统 [J]. 高电压技术, 2009, 35 (8) : 2048-2052.
- [12] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京, 机械工业出版社, 2003.
- [13] Song Xianwen, Wang Yue, Hu Weihao, et al. Three reference frame control scheme of 4 wire grid-connected inverter for micro grid under unbalanced grid voltage conditions [C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009: 1301-1305.
- [14] Rioual P, Pouliquen H, Louis J. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11 (3) : 495-502.
- [15] Podriguea P, Timbus A V, Teodorescu R, et al. Flexible active power control of distributed power generation systems during grid faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (5), 2583-2592.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 156—2007 标准电压 [S].
- [17] 苏建徽, 余世杰, 赵为, 等. 硅太阳能电池工程用数学模型 [J]. 太阳能学报, 2001, 22 (4) : 409-412.

(收稿日期: 2016—04—18) EA

(上接第61页)

- [7] 张磊, 俞恩科, 陈国志, 等. 提升海底电缆载流量的2种方法及其试验研究 [J]. 高电压技术, 2015, 41 (8) : 2716-2722.
- [8] 李翔忠. 220 kV珠江虎门海底电缆敷设完成 [J]. 电线电缆, 1987 (2) : 36.
- [9] 王瑛, 华良伟, 片冈敬一郎. 110 kV 海底光电复合缆的设计与制造 [J]. 装备机械, 2009 (2) : 28-34.
- [10] International Electrotechnical Commission. IEC 60287-1-1 Electric cables-calculation of the current rating part 1-1: current rating equations (100% load factor) and calculation of losses [S]. 2006.
- [11] International Electrotechnical Commission. IEC 60287-2-1 Electric cables-calculation of the current rating part 2-1: thermal resistance—calculation of thermal resistance [S]. 2006.

(收稿日期: 2016—03—14) EA