

# 逆变器死区建模及其对大型光伏并网系统的影响

张前进<sup>1</sup>, 周 林<sup>1</sup>, 毛明轩<sup>1,2</sup>, 解 宝<sup>1</sup>, 李海啸<sup>1</sup>, 郝高峰<sup>1</sup>

(1. 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, 重庆 400044; 2. 重庆大学电气工程博士后流动站, 重庆 400044)

**摘 要:** 光伏并网系统中逆变器的死区及开关延时等非线性环节将会影响并网系统的稳定性及并网电能质量。为分析逆变器死区对并网系统的影响, 该文首先根据逆变器的工作机理, 建立包含死区效应的逆变系统开关平均模型; 然后在大型光伏并网系统多逆变器并联结构的基础上推导出并网系统的等效模型, 并据此探讨死区及光伏电站容量变化对并网电能质量和系统稳定性的影响。研究发现, 死区效应对光伏系统相位裕度的影响随光伏系统容量的增加而降低, 但光伏系统容量变化可能使系统在死区引入的谐波频率处发生不完全谐振, 从而降低系统的并网电能质量。最后仿真和实验验证了理论模型的正确性。

**关键词:** 逆变器; 电能质量; 控制系统稳定性; 死区建模; 光伏并网系统

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

## 0 引 言

国家能源局十三五规划表明, 到 2020 年底, 太阳能发电装机容量将达到 1.6 亿 kWh, 年发电量将达到 1700 亿 kWh 并且年度总投资额约为 2000 亿元。其中光伏发电总装机容量将达到 1.5 亿 kWh<sup>[1]</sup>。光伏电站逐渐趋于大型化, 光伏电站的容量不断增加, 对电能质量和系统稳定性的影响将更加严重<sup>[2-3]</sup>。大量的逆变器并联将会使电网等效阻抗变大, 从而与电站等效输出阻抗相互作用, 导致并网系统谐振等稳定性问题<sup>[4-8]</sup>。另一方面, 为了防止逆变器上、下桥臂的直通, 开关器件的控制信号中必须要注入一定的死区时间, 加之开关器件的动作本身具有一定的延迟时间, 从而导致实际开关信号与理想信号之间具有一定的时间差, 本文将此统称为逆变器死区, 并简称死区。死区的引入将会引发逆变器输出波形的畸变, 降低基波电压, 引入较低次谐波成分<sup>[9-12]</sup>, 并改变逆变器等效输出阻抗, 影响系统的稳定裕度和电能质量。由于开关过程所需时间随着流通电流的增大而变长, 死区时间的长短应根据具体的逆变器功率等级及开关周期确定, 一般是微秒等级。该时间虽然很小, 但会导致逆变器输出波形畸变, 引入较低次谐波成分, 这些谐波本身不会产生较大影响, 但当逆

变器输出阻抗与电网阻抗相匹配时, 会产生准谐振点, 当这些谐波频率与准谐振点频率相同时, 该谐波分量就会在系统谐振的作用下被放大多倍, 从而严重影响并网电能质量。另一方面, 死区还会影响逆变器的输出阻抗, 导致控制系统相位裕度降低, 由于影响很小一般不会造成稳定性问题, 但仍会对电能质量产生一定影响。因此不能只单独考虑逆变器自身的谐波数据, 死区所产生的影响还必须考虑电网条件及光伏电站容量。

目前对并网变换器系统的分析多采用阻抗分析法<sup>[13-14]</sup>, 相比于列写复杂的状态空间矩阵, 阻抗分析法得到广泛应用。然而, 目前鲜有文章将死区纳入到系统的阻抗模型中去。文献[15-17]分析了逆变电源的死区效应并提出补偿技术。文献[7]将死区效应等效为受控电压源建立到逆变器的诺顿模型中, 但未对非线性部分进行处理。后续谐波交互分析中未能体现死区对于系统输出阻抗的影响。文献[8]考虑了脉冲宽度调制(PWM)作用产生的高次谐波和死区效应引入的低次谐波对逆变器输出电压的影响, 但将死区作用形成的等效误差电压看成了额外扰动, 未体现在系统阻抗模型当中。文献[18]在逆变器输出阻抗模型中体现了死区基波的影响, 但未讨论死区谐波成分对于系统的影响, 也

收稿日期: 2018-03-16

基金项目: 国家自然科学基金(51477021)

通信作者: 毛明轩(1988—), 男, 博士, 主要从事新能源电力电子变换器系统和智能控制方面的研究。mingxuan\_mao@cqu.edu.cn

未针对系统容量变化进行讨论,且采用矩阵形式的推到过程也较为复杂。

本文通过对逆变器开关平均模型的推到,将死区建立到单个光伏并网系统的阻抗模型中;通过谐波线性化方法对死区引入的非线性部分进行线性化处理,以方便阻抗分析法的应用。在此基础上,进一步推导出大型光伏并网系统的诺顿等效电路;分析死区基波和谐波对大型光伏并网系统稳定运行和电能质量的影响,并讨论光伏电站容量变化所带来的影响。

## 1 逆变器死区建模

逆变器的死区会使得逆变器输出电压发生畸变,降低基波电压,引入谐波分量,本节将在逆变器开关平均模型的基础上推到逆变器的死区模型。

由于开关状态是不连续的,对于逆变器的建模通常采用状态空间平均法<sup>[19-20]</sup>。本节在详细分析逆变器开关过程的基础上,推导出考虑死区效应的逆变器等效模型。如图 1 所示,为方便分析,将逆变器的直流侧等效为 2 个电容的串联,每个电容的电压为直流侧电压的一半即  $U_{dc}/2$ 。设加入的死区时间为  $t_d$ ,开关器件导通时间为  $t_{on}$ ,关断时间为  $t_{off}$ ,开关周期为  $T_s$ ,开关信号波形图如图 2 所示。其中  $S$  为理想的开关信号,  $S'$  为死区延时之后的开关信号。通过两者对比可以清晰得到死区的延时过程。以 a 相为例可得到逆变器输出电压表达式:

$$U_{aN'} = \frac{1}{2}U_{dc}(2S - 1) \quad (1)$$

式中,  $S$  ——开关函数,当上桥臂导通时,  $S = 1$ ; 当下桥臂导通时,  $S = 0$ 。由于系统开关频率远大于基波频率,为消除逆变器的时变特性,对式(1)取开关周期内的平均值:

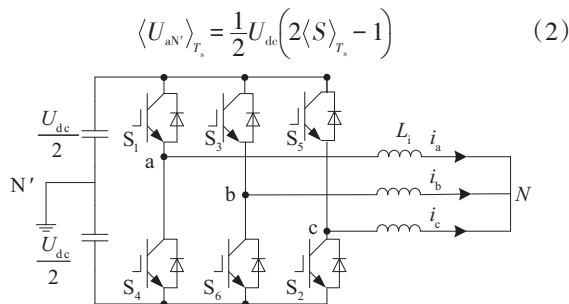


图 1 三相逆变电路原理图

Fig. 1 Principle diagram of three-phase inverter circuit

考虑死区时间及开关管延迟时间后开关函数  $S'$  在一个开关周期内的平均值为:

$$\langle S' \rangle_{T_s} = \frac{T_{on} \pm (t_d + t_{on} - t_{off})}{T_{sw}} = D \pm d \quad (3)$$

式中,  $D$  ——不考虑死区时开关周期占空比;  $d$  ——等效死区延迟时间占空比,两者的代数和为实际占空比,  $T_{on}$  为理想情况下开关管导通时间。当  $i_a < 0$  时,式(3)取正号,  $i_a > 0$  时,取负号。

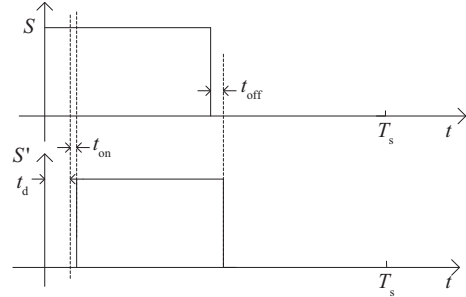


图 2 逆变器开关信号波形图

Fig. 2 Switching signal of inverter

采用 SPWM 调制时,且由于开关频率比基波频率大很多,调制波在一个开关周期中可近似为常数,因此占空比  $D$  可由三角载波幅值  $V_{tri}$  和调制波幅值  $V_m$  表示:

$$D = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{V_m}{V_{tri}} \right) \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(2)得:

$$\langle U_{aN'} \rangle_{T_s} = \frac{U_{dc}}{2V_{tri}} V_m \pm U_{dc} d \quad (5)$$

同理,得到三相系统逆变器输出电压表达式:

$$\begin{cases} \langle u_{aN} \rangle_{T_s} = \frac{V_{dc}}{2V_{tri}} v_m - \text{sign}(i_a) U_{dc} d \\ \langle u_{bN} \rangle_{T_s} = \frac{V_{dc}}{2V_{tri}} v_m - \text{sign}(i_b) U_{dc} d \\ \langle u_{cN} \rangle_{T_s} = \frac{V_{dc}}{2V_{tri}} v_m - \text{sign}(i_c) U_{dc} d \end{cases} \quad (6)$$

将其转换到  $\alpha\beta$  坐标系下,对于 LCL 型三相并网逆变器,可得到并网逆变器在  $\alpha\beta$  坐标系下电流内环控制框图如图 3a 所示。图中  $K_{pwm} = U_{dc}/2V_{tri}$ ;  $k_c$  为电容电流反馈系数;  $U_d$  为死区及开关延时产生的等效畸变电压幅值,即  $U_d = U_{dc} d$ ;  $I_{\alpha\beta}$  为逆变器输出电流;  $I_{\alpha\beta}^*$ 、 $I_{\alpha\beta}$  分别为并网电流参考值和实际值;  $\Delta V_d$ 、 $V_{\alpha\beta}$  分别为等效死区畸变电压和逆变器输出理想电压;  $U_{pv}$  为并网点电压。  $G_c(s)$  为 PR 控制器的传递函数,设  $k_p$ 、 $k_r$  分别为比例系数和谐振系数,  $\omega_c$  为带宽频率,  $\omega_0$  为谐振频率,则  $G_c(s)$  表达式为:

$$G_c(s) = k_p + k_r \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (7)$$

由式(6)可看出逆变器输出电压由理想的逆变器输

出电压减去死区畸变电压 2 部分组成。死区畸变电压对系统的影响和逆变器输出电流的方向有关, 如式(8)所示, 从而使得系统中含有非线性环节, 系统分析变得困难。由于系统的线性部分具有良好的低通滤波性能, 故可采用描述函数<sup>[21]</sup>表征系统的非线性环节, 从而将系统线性化, 便于应用频率分析法, 和阻抗分析法分析死区对大型光伏并网系统的影响。

设  $i_{ia\beta}$  为输入变量且其表达式为:  $i_{ia\beta} = A \sin(\omega t)$ ,  $A$

为逆变器输出电流幅值,  $\omega$  为基波角频率;  $\Delta V_d$  为输出变量。由描述函数的定义可得到  $i_{ia\beta}$  到  $\Delta V_d$  的描述函数  $N$ , 如式(9)所示:

$$\Delta v_d = \begin{cases} U_{dc} d, & i_{ia\beta} < 0 \\ -U_{dc} d, & i_{ia\beta} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$N = -\frac{4U_{dc}d}{\pi A} \quad (9)$$

因此, 可将图 3a 所示的非线性系统近似为图 3b 所示的线性系统。

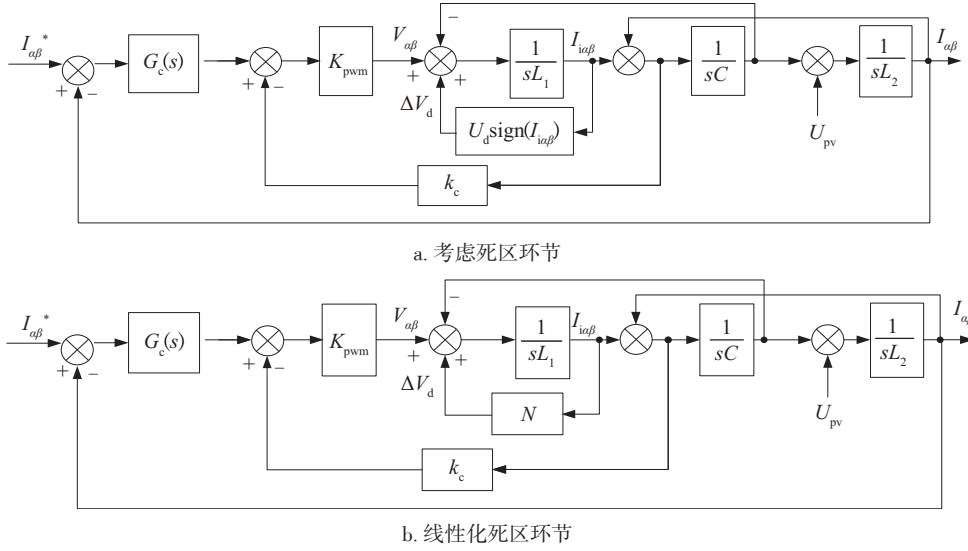


图3 光伏并网逆变器电流内环控制框图

Fig. 3 Control diagram of inner current loop in PV inverters

## 2 大型光伏并网系统分析

假设逆变器直流侧电压保持恒定, 由逆变器电流内环控制框图可得到逆变器的诺顿等效电路, 进而得到  $n$  个逆变器相并联的大型光伏并网系统的等效电路。在此基础上分析死区对于系统稳定性及电能质量的影响。

### 2.1 大型光伏并网系统阻抗模型

通过对图 4 进行等效化简可得到:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha^* \\ \hat{i}_\beta^* \end{bmatrix} - Y_{eq} \begin{bmatrix} U_{pv\alpha} \\ U_{pv\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中:

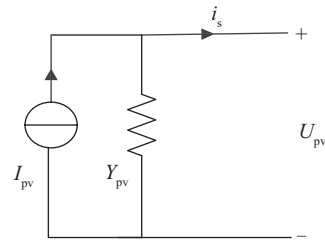
$$G = \frac{K_{pwm} G_c}{L_1 L_2 C s^3 + (k_c K_{pwm} L_2 C - N L_2 C) s^2 + (L_1 + L_2) s + K_{pwm} G_c - N} \quad (11)$$

$$Y_{eq} = \frac{L_1 C s^2 + (k_c K_{pwm} C - C N) s + 1}{L_1 L_2 C s^3 + (k_c K_{pwm} L_2 C - N L_2 C) s^2 + (L_1 + L_2) s + K_{pwm} G_c - N} \quad (12)$$

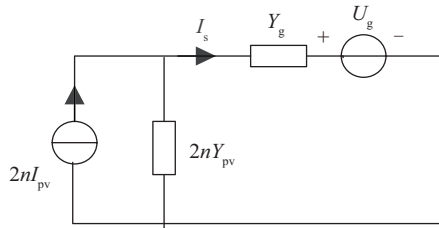
考虑分裂变压器等效电感  $L_t$ , 得到单个逆变器并网系统的诺顿等效电路如图 4a。在图 4a 中,  $I_{pv}$  为等效输出电流,  $Y_{pv}$  为等效输出导纳, 表达式如式(13):

$$\begin{cases} I_{pv} = \frac{G_i^*}{1 + Y_{eq} L_t s} \\ Y_{pv} = \frac{Y_{eq}}{1 + Y_{eq} L_t s} \end{cases} \quad (13)$$

考虑电网导纳  $Y_g$  和电网电压  $U_g$ , 可得到  $n$  个并网逆变器相并联的大型光伏并网系统等效电路如图 4b 所示。



a. 并网逆变器



b. 大型光伏电站

图4 诺顿等效电路

Fig. 4 Equivalent Norton circuits

## 2.2 死区对系统稳定性及电能质量影响分析

由图4b可得到整个大型光伏并网系统的并网电流表达式:

$$I_s = (2nI_{pv} - 2nY_{pv}U_g) \cdot \frac{1}{1 + \frac{2nY_{pv}}{Y_g}} \quad (14)$$

根据阻抗稳定性判据<sup>[22]</sup>,大型光伏并网系统的稳定性由2部分组成:①参考电流系数 $2nG$ 和电网电压系数 $2nY_{eq}$ 不包括右半平面极点。②由于并网电流表达式的右半部分可看成是前向通道增益为1的闭环传递函数的表达式,所以 $2nY_{pv}/Y_g$ 应满足奈奎斯特稳定性判据。

当死区时间变化时,参考电流系数和电网电压系数根轨迹如图5所示,可看出,两者均不包含右半平面极点。且随着死区时间的变化,靠近虚轴的主导极点并没有发生变化,远离虚轴的其他极点变化也很小,因此本文忽略死区效应对第一条稳定性判据的影响,而将研究重点放在死区对于等效开环传递函数 $2nY_{pv}/Y_g$ 的影响上面。

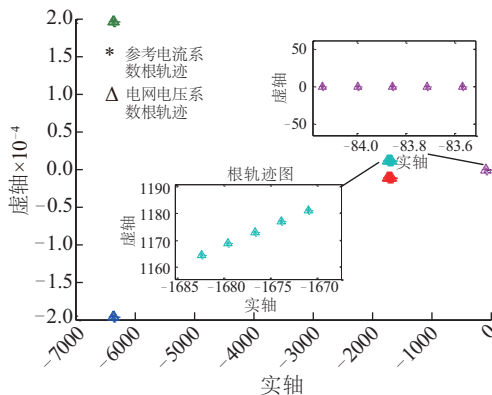
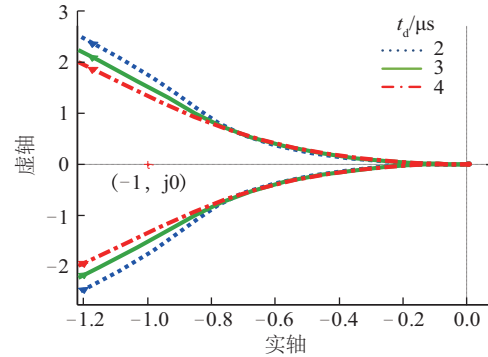


图5 参考电流和电网电压系数根轨迹

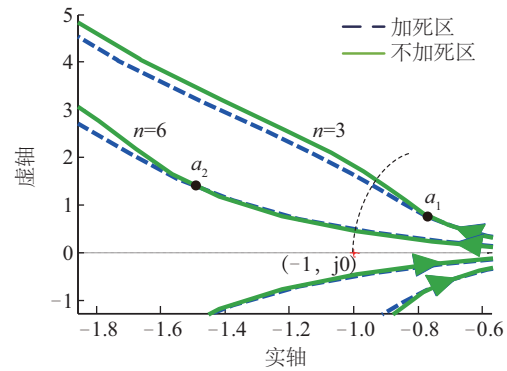
Fig. 5 Root locus of reference current and grid voltage

如图6a所示,当光伏电站容量为3 MW且死区时间逐渐增大时,系统的奈奎斯特曲线逐渐贴近负实轴,

即系统的相位裕度逐渐减小,系统的阻尼效应降低。从阻抗的角度分析,光伏电站输出阻抗与电网阻抗之间的夹角逐渐接近 $180^\circ$ ,在特定频率处,系统的总阻抗变小,从而对该频率的谐波具有放大作用。



a. 死区时间变化时



b. 光伏电站容量变化时

图6 等效开环传递函数奈奎斯特曲线

Fig. 6 Nyquist curve of equivalent open loop transfer function

由图6b可看出,在光伏电站容量一定的情况下,加死区和不加死区时的等效开环传递函数的奈奎斯特曲线有1个交点如 $a_1$ 或 $a_2$ 所示;在交点右边2条曲线基本无差异,而在交点左边2条曲线有明显差异。当该交点位于以原点为圆心过 $(-1, j0)$ 点的圆弧之内时,死区效应将会降低系统的稳定裕度从而影响系统的阻尼特性;当该点位于圆弧之外时,死区效应对系统的稳定性影响微乎其微。随着光伏电站容量的增加,该交点会从圆弧之内移动到圆弧之外。如图6b所示,当光伏电站容量从3 MW增大到6 MW时,该交点由 $a_1$ 点移动到 $a_2$ 点。即随着光伏电站容量逐渐增大,死区效应对系统的影响降低。

死区畸变电压的傅里叶级数分解表达式如式(15)所示;其中, $T_d = t_d + t_{on} - t_{off}$ ,  $k = 6n \pm 1$ 且 $n$ 为整数。可看出,死区畸变电压除含有主要的基波分量之外,还含有少量幅值随谐波次数逐渐衰减的奇次谐波分量<sup>[23]</sup>。



$$\Delta U = \frac{4}{\pi} U_{dc} T_d \int_s \sum_k \frac{1}{k} \sin(k\omega t) \quad (16)$$

描述函数法仅仅考虑死区基波分量的影响,当系统设计的线性部分具有良好的低通滤波性能时,能够较为准确反映真实情况。然而,当死区引入的5、7、11、13次等较低次谐波分量与系统的准谐振点相吻合时,即使其含量非常小,也会在谐振的作用下被成倍放大,从而降低系统的并网电能质量。然而由于谐波成分相对于死区畸变电压的基波来说幅值较小,对于逆变器等效输出导纳的影响可忽略,所以近似认为其对于并网系统的准谐振点无影响。

如图7所示,由于50 Hz及以上频率处电网导纳的相角为 $-90^\circ$ ,则当光伏电站输出导纳的相角为 $90^\circ$ 时(相位图中与虚线相交的点),系统达到谐振的相位条件;且只有此时光伏电站输出导纳幅值与电网导纳幅值相等(谐振的幅值条件),系统才有可能在该频率处发生谐振,满足这些条件的点为准谐振点。当光伏电站容量由1 MW变化到2 MW时,光伏电站输出导纳由 $Y_{eq1}$ 变化到 $Y_{eq2}$ ,其幅值等效增大2倍而相角保持不变,即满足谐振幅值条件的点发生变化。从而有可能使某些频率既满足谐振的幅值条件又满足谐振的相位条件而成为准谐振点,当系统含有该频率分量时,将会发生谐振现象。虽然产生完全吻合谐振幅值和相位条件频率点的概率很小,但某些在完全满足谐振幅值或相位条件上有微小差异的频率分量也会在不完全谐振的作用下被放大,从而影响并网电能质量。

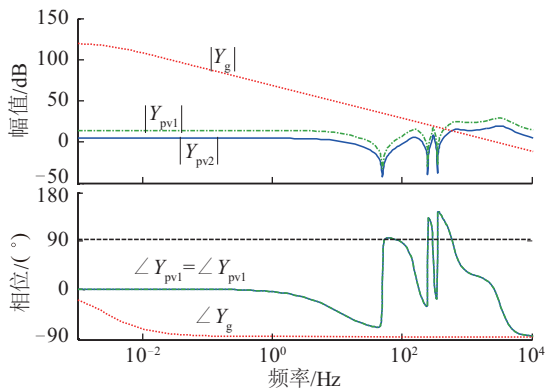


图7 光伏电站输出导纳和电网导纳波德图

Fig. 7 Bode diagram of PV station output and grid admittance

### 3 仿真和实验验证

为验证以上分析结果的正确性,用 Matlab 仿真软

件搭建三相光伏并网系统,逆变器采用500 kW容量等级,取电网阻抗等效电感 $L_g$ 为 $10 \mu\text{H}$ ,等效电阻 $R_g$ 为 $1 \mu\Omega$ ,电路参数和控制参数如表1所示。

表1 光伏并网系统参数

Table 1 Parameter of grid-connected photovoltaic system

参数	数值
电网线电压有效值 $u_g/\text{V}$	270
电网频率 $f_g/\text{Hz}$	50
直流母线电压 $U_{dc}/\text{V}$	700
开关频率 $f_s/\text{kHz}$	5
逆变器等效环节 $k_{pwm}$	350
变流器侧电感 $L_1/\text{mH}$	0.2
电网侧电感 $L_2/\text{mH}$	0.01
滤波器电容 $C/\mu\text{F}$	220
谐振频率 $\omega_0/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$	314
比例系数 $k_p$	0.001695
谐振系数 $k_r$	0.37332
控制器参数 $\omega_c$	3.14
有源阻尼系数 $k_c$	0.009
开关管导通延迟时间 $t_{on}/\mu\text{s}$	0.5
开关管关断延迟时间 $t_{off}/\mu\text{s}$	0.7

当光伏电站容量 $n=1 \text{ MW}$ 保持不变时,将逆变器的死区时间由 $1 \mu\text{s}$ 变化到 $3 \mu\text{s}$ ,2种情况下并网电流的快速傅里叶频谱分析如图8a和图8b所示。由图8a和图8b可知,死区效应在并网电流中引入了5、7、11、13等奇次谐波分量且随着死区时间的增加,并网电流的基波分量有所衰减,谐波含量增大,并网电能质量降低。根据以上理论分析可知,谐波含量的增大主要是由系统的稳定裕度降低和死区效应本身引入的少量谐波分量增加所致。

图8c为保持死区时间为 $3 \mu\text{s}$ ,光伏电站容量由1 MW增加到2 MW时,并网电流的频谱分析图。并网电流的总谐波畸变率由3.31%降低到3.13%,从而证明随着光伏电站容量的增加死区效应对于并网电能质量的影响将会减弱。随着光伏电站容量增加,电网电感相对于单台逆变器的等效电感增大,相当于增大了电网侧滤波电感,系统的截止频率左移,系统的总谐波含量降低。

将逆变器死区时间设置为 $3 \mu\text{s}$ ,根据图7分析思路,当光伏电站容量 $n=1 \text{ MW}$ ,电网电感为 $60 \mu\text{H}$ 时光

光伏电站输出导纳与电网等效导纳在 571 Hz 处满足谐振的幅值条件,在 300 Hz 及 500~650 Hz 频率处虽然不满足谐振的幅值条件,但幅值差都在 4.5 dB 以内,且这些频率都靠近满足谐振相位条件的点,电站输出导纳和电网等效导纳的相位差在  $20^\circ$  以内。所以这些频率点是系统的不完全谐振点,相应的频率分量会被放大。如图 8d 所示,死区效应引入的 11 次和 13 次谐波分量在不完全谐振的作用下被显著放大,系统的并网电能质量降低。

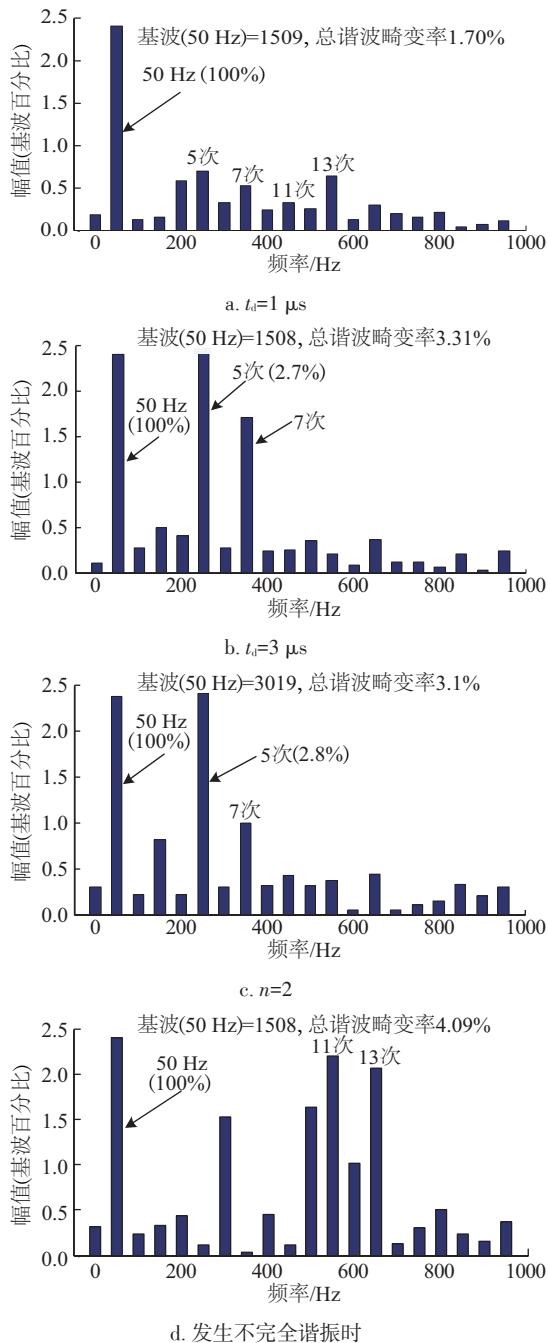


图 8 并网电流频谱分析图

Fig. 8 FFT analysis of grid-connected current

根据以上分析方法,考虑到实验室已有设备,以 10 kW 光伏并网系统为例进行实验验证,电网相电压为 220 V,电网电感为  $5 \mu H$ 。当逆变器的死区时间为  $1 \mu s$  和  $4 \mu s$  时并网电流的波形如图 9a 和图 9b 所示。可看出死区时间的增加使得系统稳定裕度降低,并网电流波形畸变加剧,并网电能质量降低。保持死区时间为  $4 \mu s$ ,当电网电感为  $60 \mu H$  时,从图 9c 死区引入的 11 次及 13 次谐波在不完全谐振的作用下被放大,并网电流的谐波含量显著上升,并网电能质量严重降低。

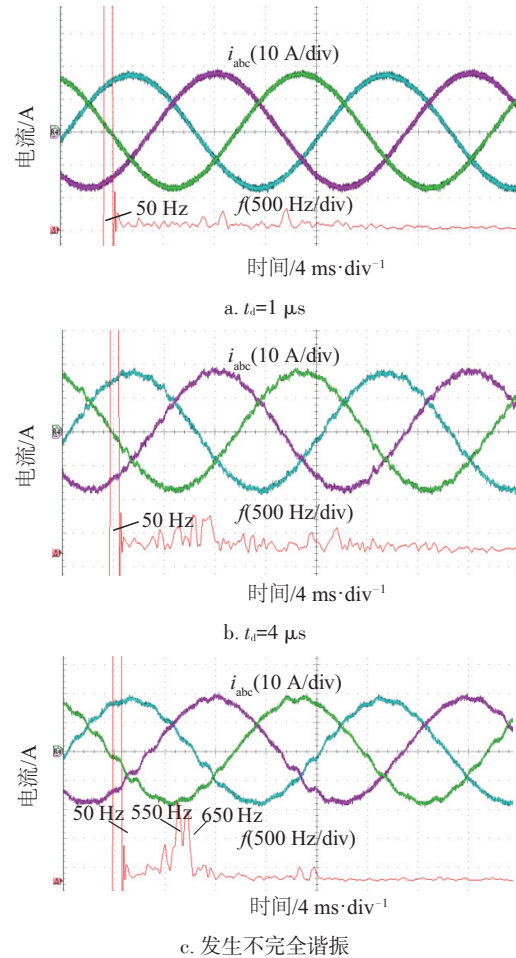


图 9 并网电流波形及频谱图

Fig. 9 Waveform and frequency analysis of grid-connected current

## 5 结 论

将逆变器死区效应建立到大型光伏并网系统的阻抗模型中,给出在考虑死区效应的情况下逆变器开关平均模型的推导过程。对死区效应所产生的非线性环节,采用工程上常用的描述函数法进行线性化处理,并在此基础上得出大型光伏并网系统的诺顿等效电路。以

500 kW 光伏逆变器相并联的大型光伏并网系统为例, 应用频率分析法, 得出:

1) 死区效应会降低光伏并网系统的相位裕度影响系统的阻尼特性, 且随着光伏电站容量的增大死区对于系统的影响降低。

2) 当光伏电站容量变化导致死区引入的谐波频率分量在光伏电站等效输出导纳与电网等效导纳谐振点附近时, 这些频率分量会在不完全谐振的作用下被放大, 从而降低系统的并网电能质量。

### [参考文献]

- [1] 国家能源局. 太阳能利用十三五发展规划征求意见稿 [EB/OL]. [http://www.aski.com/news/change/2015/12/30/14653hmi2\\_6.shtml](http://www.aski.com/news/change/2015/12/30/14653hmi2_6.shtml), 2015-12-30.
- [2] 周林, 曾意, 郭珂, 等. 具有电能质量调节功能的光伏并网系统研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 137-145.  
ZHOU L, ZENG Y, GUO K, et al. Research progress of photovoltaic grid-connected system based on power quality regulation[J]. Power system protection and control, 2012, 40(9): 137-145.
- [3] 杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 等. 光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 69-74.  
YANG Q X, LIU D P, WANG H C, et al. Photovoltaic power generation with the unified power quality conditioner control system[J]. Power system protection and control, 2015, 43(5): 69-74.
- [4] 杨明, 周林, 张东霞, 等. 考虑电网阻抗影响的大型光伏电站并网稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 214-223.  
YANG M, ZHOU L, ZHANG D X, et al. Analysis of grid-connected stability of large-scale photovoltaic power plant considering the influence of power grid impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 214-223.
- [5] 张密. 大型光伏并网系统谐振现象分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.  
ZHANG M. Analysis of resonance phenomenon of large photovoltaic grid connected system [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [6] 周林, 张密, 居秀丽, 等. 电网阻抗对大型并网光伏系统稳定性影响分析[J]. 中国电机工学报, 2013, 33(34): 34-41.  
ZHOU L, ZHANG M, JU X L, et al. Stability analysis of large-scale photovoltaic plants due to grid impedances [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 34-41.
- [7] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 64-71.  
XU D Z, WANG F, MAO H L, et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 64-71.
- [8] 谢宁, 罗安, 陈燕东, 等. 大型光伏电站动态建模及谐波特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 10-17.  
XIE N, LUO A, CHEN Y D, et al. Dynamic modeling and characteristic analysis on harmonics of photovoltaic power stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 10-17.
- [9] 张辑, 彭彦卿, 陈天翔. 一种基于电流空间矢量的新型死区补偿策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 127-132.  
ZHANG J, PENG Y Q, CHEN T X. New dead time compensation of current space vector [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 127-132.
- [10] ITKONEN T, LUUKKO J, SANKALA A. Modeling and analysis of the dead-time effects in parallel PWM two-level three-phase voltage-source inverters [J]. IEEE transactions on power electronics, 2009, 24(11): 2446-2455.
- [11] 贾学瑞, 粟时平, 刘桂英, 等. 并网逆变器死区效应消除补偿方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 1-6.  
JIA X R, SU S P, LIU G Y, et al. A novel strategy of dead-time elimination and compensation for grid-tied inverters [J]. Power system protection and control, 2016, 44(5): 1-6.
- [12] 肖海峰, 刘海龙, 贺昱曜, 等. 基于电压空间矢量控制的PMSM系统新型死区补偿方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 114-119.  
XIAO H F, LIU H L, HE Y Y, et al. In the voltage space vector control PMSM system new method of dead time compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 114-119.
- [13] CHEN X, SUN J. A study of renewable energy system harmonic resonance based on a DG test-bed [C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition, Texas: IEEE, 2011: 995-1002.
- [14] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-

- connected inverters [J]. IEEE transactions on power electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [15] 段善旭, 孙朝晖, 张凯, 等. 基于重复控制的 SPWM 逆变电源死区效应补偿技术 [J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 52-58.
- DUAN S X, SUN Z H, ZHANG K, et al. A Compensation strategy for dead-time effect of SPWM inverters based on repetitive control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 52-58.
- [16] 杨波, 吴建德, 李武华, 等. 在线自适应 PWM 死区消除方法 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(11): 45-52.
- YANG B, WU J D, LI W H, et al. Online adaptive dead-time elimination method for PWM voltage source inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 45-52.
- [17] 刘陵顺, 尚安利, 顾文锦. SPWM 逆变器死区效应的研究 [J]. 电机与控制学报, 2001, 5(4): 237-241.
- LIU L S, SHANG A L, GU W J. Analysis and simulation of the dead-time effect in the PWM converter [J]. Electric machines and control, 2001, 5(4): 237-241.
- [18] SARA A, ZHIYU S, PAOLO M, et al. Small-signal model of voltage source inverter (VSI) and voltage source converter (VSC) considering the deadtime effect and space vector modulation types [J]. IEEE transactions on power electronics, 2017, 32(6): 4145-4156.
- [19] LEGGATE D, KERKMAN R J. Pulse-based dead-time compensator for PWM voltage inverters [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 1997, 44(2): 191-197.
- [20] MARIAN P, KAZMIERKOWSKI, LUIGI Malesani, Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: A survey [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 1998, 45(5): 691-703.
- [21] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 296-321.
- HU S S. Principle of autocontrol [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2008: 296-321.
- [22] MAURICIO C, SUN Jian. Modeling and mitigation of harmonic resonance between wind turbines and the grid [C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Phoenix, USA, IEEE, 2011: 2109-2116.
- [23] 王少杰, 罗安. 谐波死区效应分析及补偿方法的研究 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 111-119.
- WANG S J, LUO A. Study on the analysis and compensation method of the dead zone effect in harmonic domain [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 111-119.

## INVERTER DEADTIME MODELING AND ITS INFLUENCE ON GRID-CONNECTED PV SYSTEM

Zhang Qianjin<sup>1</sup>, Zhou Lin<sup>1</sup>, Mao Mingxuan<sup>1,2</sup>, Xie Bao<sup>1</sup>, Li Haixiao<sup>1</sup>, Hao Gaofeng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Postdoctoral Station of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** With the increasing proportion of renewable energy such as photovoltaic power generation in the power system, the power system has higher requirements for the stability and power quality of grid-connected photovoltaic system. However, the dead time and switching delay of inverter in photovoltaic system will affect the stability and power quality of grid-connected system. In order to analyze the influence of inverter dead time on grid connected system, this paper first establishes the switching average model of inverter system including dead time effect according to the working mechanism of inverter; then, based on the parallel structure of multiple inverters in large-scale grid-connected photovoltaic system, the equivalent model of the grid-connected system is derived, and the influence of dead time and the capacity variation of photovoltaic station on grid connected power quality and system stability is discussed. Finally, the theories are verified by simulation and experiment.

**Keywords:** inverters; power quality; control system stability; modeling of deadtime; grid-connected PV system