

光伏并网逆变系统谐波综合分析

晏坤¹, 甘景福¹, 杜鹏¹, 张梦茹^{2,3}

(1. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 河北 唐山 063000; 2. 山东大学, 济南 250061;
3. 华中科技大学, 武汉 430074)

摘要: 由于光伏系统的随机性和波动性,与电网的交互过程中,将给电网引入一定的谐波和间谐波,引起次同步振荡、电能质量等问题,严重时将导致电网崩溃。针对光伏并网系统的谐波问题,本文从光伏并网系统逆变器本体 PWM 调制、输出侧与电网的交互影响及输入侧光伏电源出力波动三个方面对谐波的影响进行综合分析,以期对谐波治理和电网的安全运行提供谐波分析依据。首先,分析了并网逆变器 PWM 调制会引起高次谐波,计及死区效应时引入低次谐波。其次基于直流纹波形成机理,进一步研究非理想电网对并网系统谐波的交互影响;同时,当电网三相不平衡运行时,逆变器输出电流将出现 3 次谐波分量。然后,从 MPPT 算法和环境因素两个方面研究光伏电源波动对系统谐波影响,建立基于 MPPT 周期振荡的逆变器输出电流间谐波分析模型,并利用光照强度日变化曲线进行仿真,结果表明并网电流总谐波畸变率随光照强度的增大而减小,为谐波检测和谐波治理提供基础。

关键词: 光伏发电; 并网逆变器; 谐波; 间谐波

Comprehensive Analysis of Harmonics of Photovoltaic Grid-connected Inverter System

YAN Kun¹, GAN Jingfu¹, DU Peng¹, ZHANG Mengru^{2,3}

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Tangshan Power Supply Company, Hebei Tangshan 063000, China; 2. Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the interaction with power grid, the randomness and volatility of photovoltaic (PV) system will introduce certain harmonics and inter-harmonics to the power grid, causing such problems as sub-synchronous oscillation and power quality as well as ,in case of serious ,collapse of the grid. Aiming at the harmonic problem of PV grid-connected system, the influence of harmonics is analyzed from such three aspects as PWM modulation of inverter body, interaction between output side and the grid, and fluctuation of PV power output on input side in order to provide harmonic analysis basis for harmonic control and safe operation of power grid. First, the high-order harmonics caused by PWM modulation of grid-connected inverter is analyzed and the low-order harmonics introduced when the dead-time effect is considered. Then, the interaction effect of non-ideal grid on the harmonics of grid-connected system is further investigated based on the formation mechanism of DC ripple; At the same time, in case of three-phase unbalanced operation of the grid, the output current of the inverter will have a third harmonic component. After that, the effect of PV power fluctuation on system harmonics is studied from such two aspects as MPPT algorithm and environmental factors and the daily variation curve of the illumination intensity is used for simulation. The result shows that . the total harmonic distortion rate of grid-connected current decreases with the increase of light intensity, which provides basis for harmonic detection and control.

Keywords: photovoltaic power generation; grid-connected inverter; harmonics; inter-harmonics

0 引言

发展绿色低碳的可再生能源发电是实现“双碳”目标的重要内容^[1-2]。目前光伏发电已经成为发展势头最为迅猛的产业之一^[3-4]。然而,光伏电源采用非线性的电力电子器件作为并网接口,且受运行工况的影响光伏出力呈现波动性、间歇性的特点,将给系统引入复杂的谐波和间谐波^[5-6]。而谐波和间谐波的存在严重降低了电能质量,并产生了许多负面影响^[7-9]。因此,有必要对光伏并网逆变系统的谐波进行分析,为谐波检测和谐波治理提供理论依据,保障电力系统安全、稳定、经济地运行。

基于光伏并网系统的基本结构,系统的谐波主要来源于光伏电源、并网逆变器及电网的交互作用。理想情况下,逆变器的调制作用会引起高次谐波分量^[10-11]。但是在实际应用中,为了防止上下两个桥臂直通而造成短路,通常会在功率管通断切换时加入死区时间,除此之外,功率开关管存在开通延迟时间和关断延迟时间,导致逆变器出现死区效应,使光伏并网系统引入低次谐波分量^[12-13]。而当电网存在背景谐波或三相不平衡运行时会导致直流侧出现纹波^[14],经逆变器的调制作用后对系统的谐波产生影响。受环境因素的影响,同时在MPPT控制的作用下,光伏电源出力具有强烈的波动性,在逆变器的调制作用下,会给系统引入丰富的间谐波^[15]。

迄今为止,对于建立光伏并网系统的谐波分析模型国内外进行了大量研究,理论已经相对成熟。文献[16-18]将分布式光伏等效为谐波电压源或谐波电流源,对配电网的谐波传递特性进行了研究。文献[19]基于青海某50 MVA大型光伏电站分别对光伏阵列、MPPT、考虑死区效应的逆变器以及电站内部阻抗网络进行建模,较为精确地计算了在任意辐照度和温度下光伏电站输出电流的基波和谐波分量。文献[20]建立考虑了死区效应和开关器件非理想特性的逆变器输出阻抗模型,在此基础上进行谐波交互建模与分析,研究了多分布式并网逆变器接入电网时的谐波振荡问题。文献[21]对单相光伏并网逆变器进行谐波状态空间建模,采用特征值分析方法推导了谐波传递函数,用于动态谐波评估,剖析了大型电网中动态下的谐波不稳定现象和稳态下光伏并网逆变器交、直流侧的谐波耦合机制。然而,目前对于光伏并网逆变器系统间谐波问题的理论研究较少。文献[22]根据谐波畸变率指标的不同,将光伏并网逆变器间谐波的实测值进行量化评估。文献[15]基于将光伏电源、逆变器及其控制系

统考虑在内的并网系统模型,对扰动式MPPT导致光伏并网系统产生间谐波的内在机理进行分析,建立了光伏并网逆变器输出电流间谐波的数学模型。

本文从逆变器的调制作用、输出侧与电网的交互影响、输入侧光伏电源波动三个方面对光伏并网逆变系统的谐波问题进行综合研究。首先,分析了理想情况下逆变器PWM控制算法引起的谐波,并基于误差电压研究死区效应对系统谐波的影响。利用开关函数模型及并网逆变器交直流侧电气量的关系,对直流侧纹波形成机理进行分析,研究了非理想电网与并网系统谐波的交互影响。最后,根据导致光伏电源发生波动的原因,基于扰动式MPPT输出振荡特性推导建立间谐波分析模型,同时利用光照强度日变化曲线进行仿真,进一步研究光照强度对系统谐波的影响。

1 逆变器PWM控制算法引起的谐波

光伏并网逆变器作为将光伏电源并网以及进行直交变换的核心,是系统谐波的主要来源之一。

1.1 理想情况下逆变器输出特性分析

对于三相并网逆变器而言,通常采用双极型SPWM调制,将给系统引入高次谐波分量。基于电压型逆变电路,经傅里叶变换可得逆变器输出电压公式为(以A相桥臂为例)

$$v_a(t) = \frac{M_r V_{in}}{2} \sin \omega_0 t + \frac{2V_{in}}{\pi} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \sum_{n=0,\pm 2,\dots}^{\pm \infty} \left\{ \frac{4}{3} \frac{J_n(mM_r \pi/2)}{m} \sin \frac{m\pi}{2} \sin^2 \frac{n\pi}{3} \cos(m\omega_c t + n\omega_0 t) \right\} + \frac{2V_{in}}{\pi} \sum_{m=2,4,\dots}^{\infty} \sum_{n=\pm 1,\pm 3,\dots}^{\pm \infty} \left\{ \frac{4}{3} \frac{J_n(mM_r \pi/2)}{m} \cos \frac{m\pi}{2} \sin^2 \frac{n\pi}{3} \sin(m\omega_c t + n\omega_0 t) \right\} \quad (1)$$

式中: M_r 为调制度; V_{in} 为逆变器直流侧输入电压; ω_0 为正弦调制波的角频率; ω_c 为载波角频率; $J_n(x)$ 为第一类贝塞尔函数。由式(1)可以发现逆变器交流侧输出电压除了基波外还包含高次谐波分量,且谐波分量只存在于当 $m+n$ 为奇数时的频率处。当 m 为奇数时,谐波分布在 $n=6k \pm 2$ 的偶数边带频率处;而当 m 为偶数时,谐波只分布在 $n=6k \pm 1$ 的奇数边带频率处。此外,在载波频率附近的谐波分量较大,而且随着载波频率倍数的增加,其附近的谐波分量越来越小。

类似地,利用电流型逆变电路对逆变器输出电流进行谐波分析,经傅里叶变换可得逆变器A相桥

臂输出电流公式为

$$i_a(t) = M_r I_d \sin \omega_0 t + \frac{4I_d}{\pi} \sum_{m=1,3,\dots} \sum_{n=0,\pm 2,\dots}^{\pm\infty} \frac{J_n\left(\frac{mM_r\pi}{2}\right)}{m} \sin \frac{m\pi}{2} \cos(m\omega_c t + n\omega_0 t) + \frac{4I_d}{\pi} \sum_{m=2,4,\dots} \sum_{n=\pm 1,\pm 3,\dots}^{\pm\infty} \frac{J_n\left(\frac{mM_r\pi}{2}\right)}{m} \cos \frac{m\pi}{2} \sin(m\omega_c t + n\omega_0 t) \quad (2)$$

式中: I_d 为逆变器直流侧输入电流。将其与式(1)对比可以发现,逆变器输出电流与输出电压分布规律相同,输出电流除了基波外同样也包含高次谐波分量。

1.2 死区效应对逆变器输出特性的影响

理想情况下,对于某一相桥臂而言,上下功率管交替导通。但在实际运行时,为了避免上下两桥臂同时导通进而导致逆变器直流侧电源短路,在开关管通断切换时应当加入一段上下桥臂都施加关断信号的死区时间。此外,功率开关管由于自身的工作特性,存在开通延迟时间和关断延迟时间。由于这种非理想因素的存在,逆变器运行时将会出现死区效应。

考虑到死区效应与功率开关管的续流回路有关,以 A 相桥臂为例,分析死区效应对逆变器输出特性的影响。假设流出桥臂的电流为正,流入桥臂的电流为负,如图 1 所示。

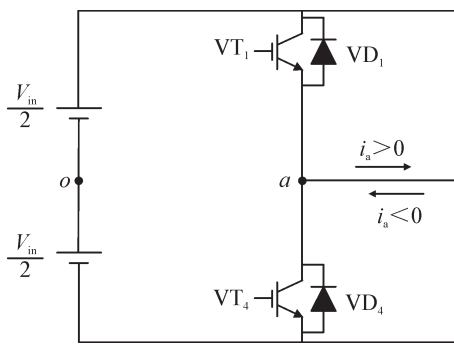


图1 逆变器A相桥臂电流的方向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of arm current direction in phase A of inverter

当逆变器输出电流为正即 $i_a > 0$ 时,在 VT_1 由导通变为关断而 VT_4 由关断变为导通的过程中会出现一段时间的死区,原因是 VT_1 接收到关断信号后不会立刻关断,而需经关断延迟时间 t_{off} 后才可以彻底关断,而 VT_4 接收到开通信号后则需再经过导通延迟时间 t_{on} 以及死区时间 t_d 后才能进入导通状态,在这个过程中逆变器输出电流 i_a 需要通过二极管 VD_4 进行续流,导致输出电压出现负的偏差。

类似地,当逆变器输出电流为负即 $i_a < 0$ 时,死区存在于在 VT_1 的开关状态由关断变为导通而 VT_4 由导通变为关断的过程中,在此过程中逆变器输出电流 i_a 需要通过二极管 VD_1 进行续流,从而导致输出电压出现正的偏差。实际情况下,A 相桥臂输出电压波形与功率管开关状态之间的关系见图 2,其中, t_d 代表死区时间、 t_{on} 和 t_{off} 分别表示功率管的开通延迟时间和关断延迟时间。

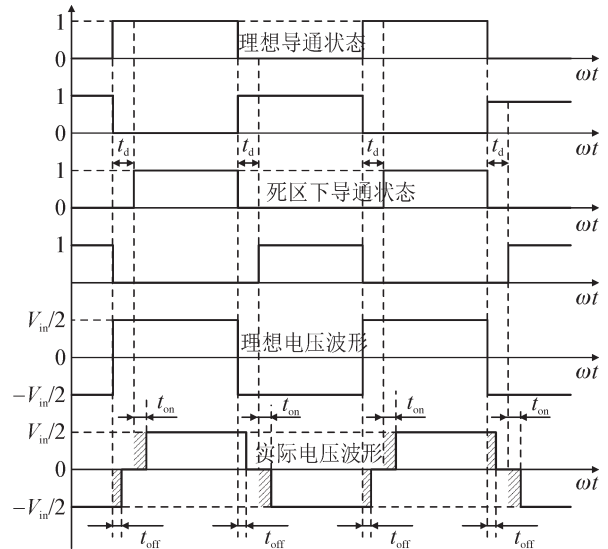


图2 A相桥臂输出电压波形与功率管开关状态的关系
Fig. 2 Relationship between the arm output voltage waveform of phase A and the switching state of the power tube

由图 2 可知输出电压的实际值 u_{an} 和理想值 u_{an0} 之间存在一个脉冲误差电压 Δu_{an} ,在此基础上,可以进一步得到逆变器 A 相桥臂输出的理想电压 u_{an0} 、实际电压 u_{an} 和误差电压 Δu_{an} 的波形,见图 3。

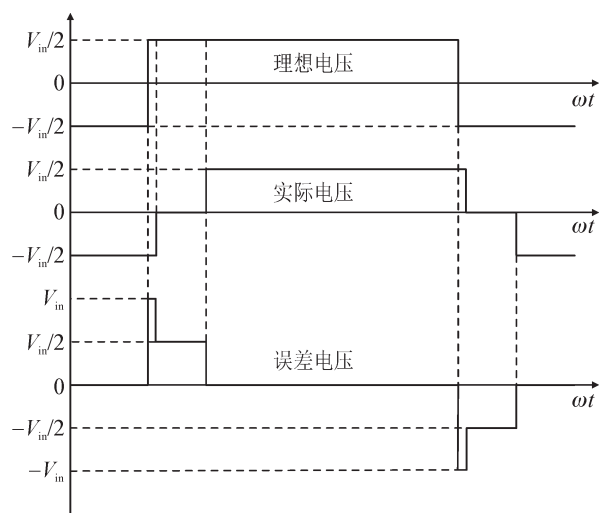


图3 A相桥臂输出的理想、实际与误差电压波形
Fig. 3 Ideal, actual and error voltage waveform of arm output of phase A

利用等时间电压面积法可得平均误差电压为

$$\Delta u_{an} = \begin{cases} f_c T_d V_{in}/2, & i_a > 0 \\ -f_c T_d V_{in}/2, & i_a < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $T_d = t_d + t_{on} + 2t_{off}$, f_c 为载波频率。将其进行傅里叶级数展开可得

$$\Delta u_{an} = \frac{2f_c T_d V_{in}}{n\pi} \sin[n(\omega t - \theta)] \quad (4)$$

式中: $n = 3, 5, 7, 9, \dots$ 。基于理想电压 u_{an0} 、实际电压 u_{an} 和误差电压 Δu_{an} 三者之间的数学关系式 $u_{an} = u_{an0} - \Delta u_{an}$, 即可求出逆变器 A 相桥臂实际输出电压的平均值。

根据上述分析可知,在考虑实际情况中逆变器存在死区效应的情况下,逆变器的输出电压在原有 SPWM 作用下导致的高次谐波的基础上又引入了 3、5、7、9 等奇数次谐波分量。此外,在逆变器功率管的开关频率 f_c 和直流侧输入电压 V_{in} 确定后,逆变器输出误差电压幅值的大小会同时受到死区时间和功率管的开通关断延迟时间的影响,并且呈现正相关,即对应的延迟时间越长,误差电压的幅值会变得越大,同时逆变器输出的低次谐波也会相应的增大。

2 非理想电网对系统谐波的影响

当电网存在背景谐波或三相不平衡运行时,逆变器直流侧输入的电气量中将出现纹波分量,经逆变器的调制作用后与电网交互影响,将在系统中引入更加丰富的谐波分量。

2.1 直流侧纹波机理分析

纹波是指叠加在恒定直流分量上的交流分量。单级式光伏并网系统基本结构见图 4。图中, u_{dc} 、 i_{pv} 分别为光伏电源的输出电压和电流; i_{dc} 为逆变器直流侧的输入电流; u_{ca} 、 u_{cb} 、 u_{cc} 为逆变器输出电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为逆变器交流侧的输出电流; e_{sa} 、 e_{sb} 、 e_{sc} 为并网点电压; C 为直流侧稳压电容; L 和 R 分别为交流滤波器的等效电感和电阻。

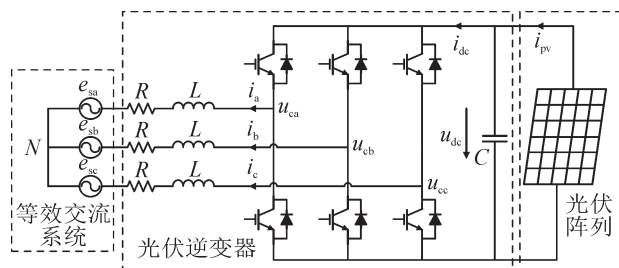


图4 单级式光伏并网系统电路拓扑图

Fig. 4 Circuit topology of single-stage grid-connected PV system

逆变器直流侧电流和交流侧电流之间的关系为

$$i_{dc} = \frac{1}{2} \sum S_x i_x \quad (5)$$

式中: S_x 为开关函数。当选择逆变器直流侧电压的中点为参考电位时,逆变器低频开关函数模型为

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = M_r \begin{bmatrix} \sin(\omega_0 t) \\ \sin(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

假设接入的交流电网中含有 k 次背景谐波电流,其数学表达为

$$\begin{cases} i_{ka} = I_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k) \\ i_{kb} = I_k \cos(k\omega_0 t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_k) \\ i_{kc} = I_k \cos(k\omega_0 t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_k) \end{cases} \quad (7)$$

式中: I_k 和 φ_k 分别为 k 次谐波电流的幅值和初相位。将式(6)和式(7)代入式(5)中,整理可得此时逆变器直流侧输入量中含有的纹波电流为

$$\widetilde{i}_{dc} = \frac{3}{4} M_r I_k \sin[(k-1)\omega_0 t + \varphi_k] \quad (8)$$

当电网三相不平衡运行时,设 A 相电流值为

$$i_a = \sum I_y \cos(\omega_0 t - \varphi_y), \quad y=0,1,2 \quad (9)$$

式中: I_y 、 φ_y 分别表示零序、正序和负序分量电流的幅值和相位。在 A 相电流的基础上可以得到 B 相和 C 相的电流。将其与式(6)代入式(5)中可得直流侧电流为

$$i_{dc} = \frac{3}{4} M_r I_1 \sin \varphi_1 + \frac{3}{4} M_r I_2 \sin(2\omega_0 t - \varphi_2) \quad (10)$$

根据式(8)和式(10)可知:当电网存在 k 次背景谐波时,将会导致直流侧电压和电流出现 $(k-1)$ 次纹波分量;而当电网电流三相不平衡时,负序分量 $I_2 \neq 0$,光伏逆变器直流侧的输入电流包含两部分,一部分是直流分量,另一部分为频率是两倍工频的交流分量即二次纹波分量。

2.2 电网三相不平衡运行对系统谐波的影响

电流型逆变器电路 A 相桥臂输出电流为式(2),计及滤波器的滤波作用,输出电流可只考虑基波即

$$i_a = M_r I_d \sin \omega_0 t \quad (11)$$

假定光伏逆变器直流侧输入电流 i_{dc} 为恒定值

I_d 即没有纹波电流,此时逆变器输出的 A 相电流与式(11)一致。而当电网三相不平衡运行时,逆变器直流侧输入电流存在二次纹波,为便于分析,设输入电流 i_{dc} 为

$$i_{dc} = I_d + kI_d \cos(2\omega_0 t + \varphi) \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)中的 I_d 可得

$$i_a = M_r I_d \sin \omega_0 t + \frac{kM_r I_d}{2} \sin(3\omega_0 t + \varphi) - \frac{kM_r I_d}{2} \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (13)$$

上述分析可知:在光伏并网逆变系统中,当电网三相不平衡运行时,逆变器交流侧输出电流除了基波外,还存在 3 次谐波分量。

2.3 仿真验证

基于 Matalab/Simulink 进行仿真。向电网中注入约基波电流幅值 2% 的 7 次谐波电流,分别对直流侧电压和注入逆变器电流进行频谱分析,见图 5。

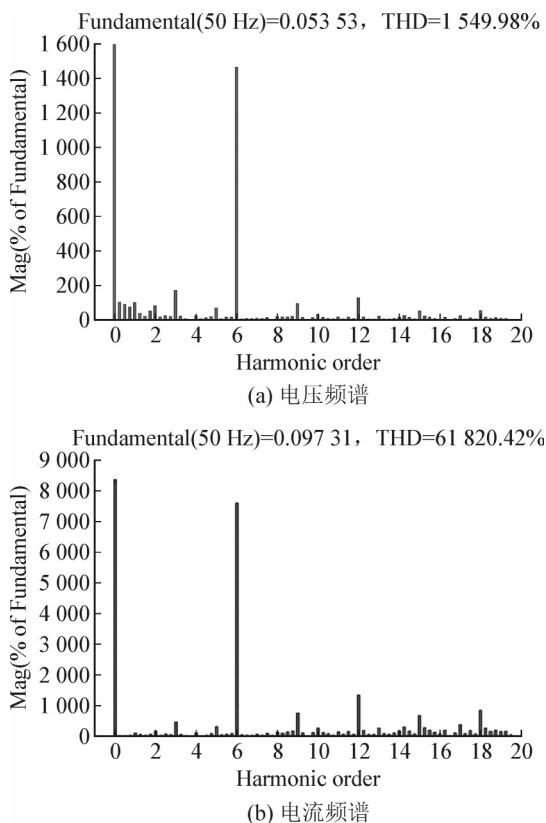


图5 电网存在背景谐波时的频谱分析图

Fig. 5 Spectrum analysis diagram of power grid with background harmonics

在三相对称电网中加入负序分量,从而使电网处于三相不平衡运行状态,进行仿真,再次对逆变器直流侧电压及注入逆变器电流进行频谱分析见图 6,对逆变器输出电流进行频谱分析见图 7。

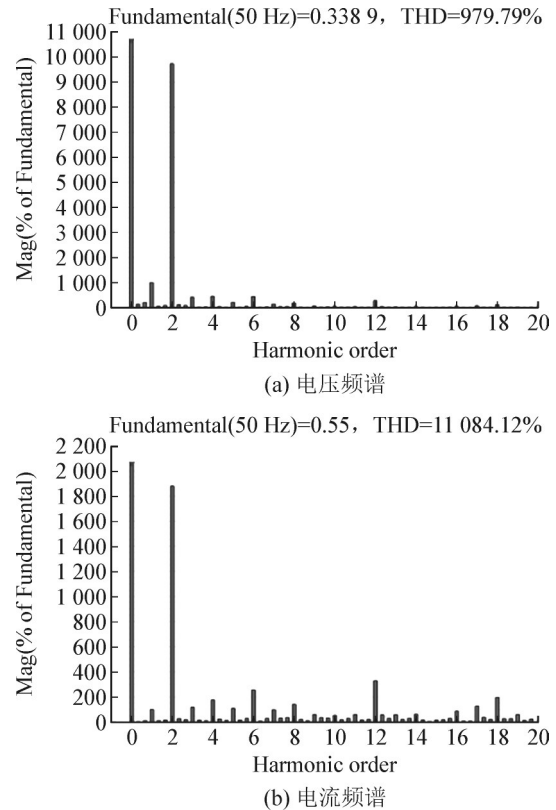


图6 并网电流频谱图

Fig. 7 Spectrum diagram of grid connected current

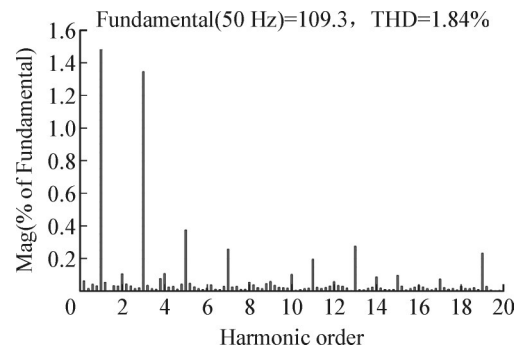


图7 电网三相不对称运行时的频谱分析图

Fig. 7 Spectrum analysis diagram of three-phase asymmetric operation of power grid

根据图 5 可知当电网存在 7 次背景谐波时,直流侧电气量将出现 6 次纹波,由图 6 和图 7 可以发现当电网三相不平衡运行时,逆变器直流侧电气量将出现二次纹波,其输出电流中 3 次谐波的含量相对于其他次数的谐波来说最高,均与理论分析一致。

3 光伏电源波动对系统谐波的影响

光伏电源发生波动的原因包括两个方面,一是由光照强度和温度等环境条件变化直接引起,二是由 MPPT 算法间接导致。两方面因素均会使光伏电源发生波动,在控制系统的作用下,进而影响系统谐波。以单级式光伏并网逆变系统为例进行

分析。

3.1 光伏并网系统数学模型

单级式光伏并网逆变系统包括主电路和控制系统两部分,主电路见图4,而控制系统也包含两部分如图8所示,一是MPPT控制,二是并网控制。MPPT控制的输入量是光伏电源电压 u_{dc} 及其输出电流 i_{pv} ,输出为直流指令电压 u_{dcref} ;并网控制采用

双闭环控制。其中, e_d 和 e_q 、 i_d 和 i_q 分别表示电网电压和逆变器交流侧输出电流的dq轴分量; i_{dref} 和 i_{qref} 、 u_{odref} 和 u_{oqref} 分别为逆变器输出电流和电压参考值的dq轴分量,且 $i_{qref}=0$; k_{pwm} 是PWM的等效放大倍数; k_{ip} 、 k_{ii} 和 k_{vp} 、 k_{vi} 分别表示电流内环和电压外环所使用的PI调节器的比例、积分系数。

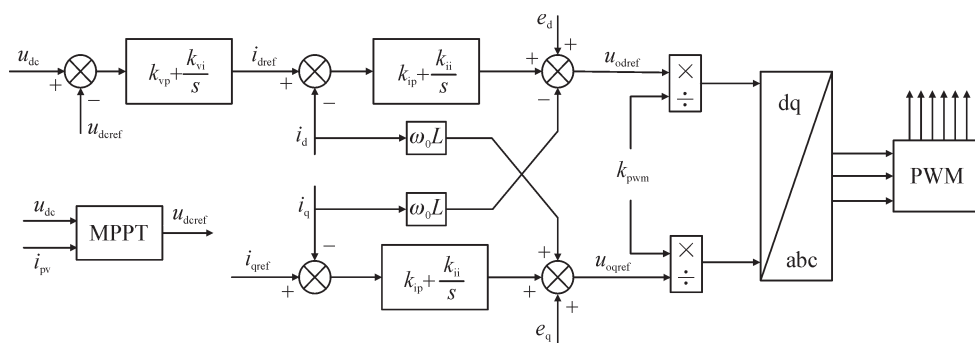


图8 光伏并网系统控制框图
Fig. 8 Control block diagram of photovoltaic grid-connected system

在图4中,使用简化的工程实用数学模型来描述光伏电源^[23],具体表达式为

$$\begin{cases} I_{pv} = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{u_{dc}}{C_2 U_{oc}}\right) - 1 \right] \right\} \\ C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}}\right) \\ C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) / \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (14)$$

式中: I_{sc} 、 U_{oc} 、 I_m 、 U_m 分别为标况下光伏电源的短路电流、开路电压、最大功率点电流和电压。其中标况是指光照强度为 1000 W/m^2 ,大气质量取AM为1.5,光伏板温度为 25°C 。

当运行工况变化时,需修正式(14),在任意条件下,有

$$\begin{cases} I'_{sc} = I_{sc} \frac{S}{1000} (1 + \alpha \Delta T) \\ U'_{oc} = U_{oc} (1 - \gamma \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S) \\ I'_m = I_m \frac{S}{1000} (1 + \alpha \Delta T) \\ U'_m = U_m (1 - \gamma \Delta T) \ln(e + \beta \Delta S) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\Delta T = T - 25$ 表示一般工况与标况的温度差; $\Delta S = \frac{S}{1000} - 1$ 代表相对光照强度差; α 、 β 、 γ 为常数。

光伏逆变器在dq坐标系下的数学模型可表示为

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_{od} - Ri_d - e_d + \omega_0 Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} = u_{oq} - Ri_q - e_q - \omega_0 Li_d \end{cases} \quad (16)$$

式中: u_{od} 、 u_{oq} 分别代表逆变器输出电压的dq轴分量。采用前馈解耦的方式实现电流内环的控制,对应的方程为

$$\begin{cases} u_{odref} = \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{dref} - i_d) + e_d - \omega_0 Li_q \\ u_{oqref} = \left(k_{ip} + \frac{k_{ii}}{s} \right) (i_{qref} - i_q) + e_q + \omega_0 Li_d \end{cases} \quad (17)$$

u_{odq} 与近似相等 u_{odqref} ,联立式(16)和式(17),可以求出电流内环控制的数学关系式为

$$\begin{cases} i_d = \frac{k_{ip}s + k_{ii}}{Ls^2 + Rs + k_{ip}s + k_{ii}} i_{dref} \\ i_q = \frac{k_{ip}s + k_{ii}}{Ls^2 + Rs + k_{ip}s + k_{ii}} i_{qref} \end{cases} \quad (18)$$

电压外环控制的数学表达式为

$$i_{dref} = \left(k_{vp} + \frac{k_{vi}}{s} \right) (u_{dc} - u_{dcref}) \quad (19)$$

直流母线稳压电容C的数学模型为

$$u_{dc} = \frac{1}{sC} (i_{pv} - i_{dc}) \quad (20)$$

忽略能量损耗,有

$$i_{dc} = \frac{3e_d}{2u_{dc}} i_d \quad (21)$$

综合式(14)–(21)可以得到光伏并网逆变系统d轴分量的传递函数框图,见图9。

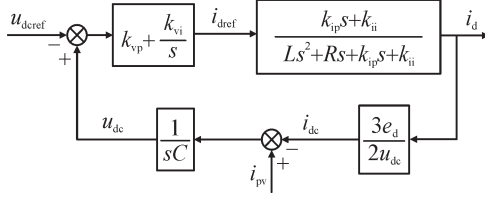


图9 光伏并网系统模型框图

Fig. 9 Block diagram of PV grid-connected system model

在图9中, i_{pv} 需用式(14)和式(15)共同描述, 光伏电源输出电流和电压之间存在较强的非线性函数关系, 为了简化分析过程, 在 u_{mpp} 处将式(14)线性化^[24], 可得

$$i_{pv} \approx i_{mpp} + f'(u_{mpp})(u_{dc} - u_{mpp}) = i_{mpp} + \frac{I_{sc} C_1 u_{mpp}}{U_{oc} C_2} e^{\frac{u_{mpp}}{U_{oc} C_2}} - \frac{I_{sc} C_1}{U_{oc} C_2} e^{\frac{u_{mpp}}{U_{oc} C_2}} u_{dc} = i_{pv_equal} - G u_{dc} \quad (22)$$

式中: $f'(u_{mpp})$ 是式(14)在 u_{mpp} 的一阶导数; 将 i_{pv_equal} 定义为光伏电源注入的等效电流源, 用 G 来表示光伏电源输出的等效电导。在此基础上可将图9简化为图10所示的模型。

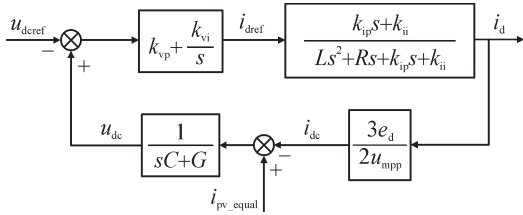


图10 光伏并网系统简化模型框图

Fig. 10 Block diagram of simplified model of grid-connected PV system

由图10可得

$$i_d = H_{id} i_{pv_equal} - G_{vd} u_{dcref} \quad (23)$$

式中: H_{id} 、 G_{vd} 分别为光伏逆变器交流侧输出电流 d 轴分量对 i_{pv_equal} 和 u_{dcref} 的传递函数。

3.2 扰动式 MPPT 引起的间谐波及特性分析

电导增量法和扰动观察法是典型的 MPPT 控制策略^[25], 它们原理类似, 输出都具有扰动特征, 可将二者统称为扰动式 MPPT。扰动式 MPPT 输出的电压指令值 u_{dcref} 在选取合适的控制周期和扰动步长情况下, 达到稳态时在光伏电源的最大功率点附近, 将表现出如图11所示的三点式周期性振荡特性^[26]。图中, u_{dcref} 为扰动式 MPPT 输出的电压指令值; ΔU 为 MPPT 控制的扰动步长; u_{mpp} 为最大功率点电压; T_{mppt} 是 MPPT 的控制采样周期。

将 u_{dcref} 进行傅里叶级数分解, 可得

$$u_{dcref} = U_{mpp} + \sum_{n=1,3,5,\dots} u_n \cos(n\omega t + \varphi_n) \quad (24)$$

式中: $\omega = \frac{\pi}{2T_{mppt}}$, $u_n = \frac{2\Delta U}{\pi} \frac{1}{n} \left(\cos \frac{n\pi}{4} - \cos \frac{3n\pi}{4} \right)$, u_n

和 φ_n 分别是 u_{dcref} 经傅里叶变换后各次频率分量电压的幅值和相位。此外, 可知 u_{dcref} 在最大功率点处的振荡模式仅受到扰动步长和控制采样周期的影响, 与运行环境无关。

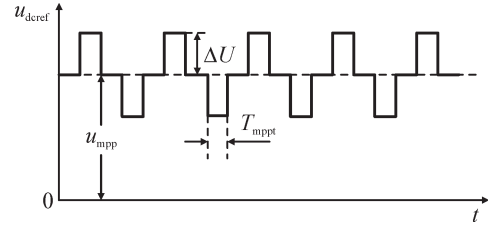


图11 扰动式 MPPT 输出指令电压

Fig. 11 Perturbed MPPT output command voltage

将式(24)代入式(23)整理可得

$$i_d(t) = i_{d0} + \sum_{n=1,3,5,\dots} i_{dn} \cos(n\omega t + \varphi_{dn}) \quad (25)$$

式中: i_{d0} 为逆变器输出电流 d 轴分量中的直流量, i_{dn} 和 φ_{dn} 分别代表 MPPT 的作用下导致的 d 轴电流各次频率扰动分量的幅值和相位。

在此基础上, 由式(18)可知 $i_q = 0$, 利用 Park 反变化, 可以求出三相静止坐标系下逆变器输出的三相电流, 以 A 相为例其表达式为

$$i_a = i_{d0} \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \frac{1}{2} \sum_{n=1,3,5,\dots} i_{dn} \cos[(n\omega + \omega_0)t + \varphi_{dn} + \varphi_0] + \frac{1}{2} \sum_{n=1,3,5,\dots} i_{dn} \cos[(n\omega - \omega_0)t + \varphi_{dn} - \varphi_0] \quad (26)$$

式中: $\omega_0 t + \varphi_0$ 是 d 轴轴线和电网电压 A 相轴线之间的夹角。

由式(26)可知, 当 MPPT 输出指令电压发生振荡时, 光伏逆变器输出电流除了基波分量外, 还存在角频率为 $\omega_0 + n\omega$ 和 $\omega_0 - n\omega$ 的谐波分量, 它们的幅值相等而相位不同。当 $\omega \neq k\omega_0$ (k 为任意整数) 时, 这些电流分量将呈现间谐波的性质, 而这些间谐波电流的大小会受到 MPPT 的控制采样周期和扰动步长等控制参数、一次电路和控制器等系统参数以及光照强度和温度等环境条件的影响。

其中, 在运行工况不变的情况下, 系统稳态运行时, u_{dcref} 的振幅只取决于扰动步长的大小, 所以扰动步长仅影响间谐波分量的幅值, 且并网电流中的间谐波分量的幅值会随着扰动步长的增大成正

比增加;而扰动式 MPPT 的控制采样周期决定了 u_{dref} 周期性振荡的频率,由于光伏逆变器输出电流存在角频率为 $\omega_0 + n\omega$ 和 $\omega_0 - n\omega$ 的间谐波分量的规律始终成立,且间谐波分量的幅值会随着 n 的增大而减小,因此,控制采样周期会同时影响逆变器输出电流间谐波分量的幅值大小和频率分布,在此基础上相邻的电流间谐波分量之间的频率间隔会随着控制采样周期的增加而减小,所以当控制采样周期增大时,注入电网电流的间谐波分量也会更加丰富。

3.3 仿真验证

在 Simulink 中搭建如图 4 和图 8 所示的模型,并设置适当系统的参数,其中光伏组件的光照强度为 $S=1\,000\text{ W/m}^2$,温度为 $T=25\text{ }^\circ\text{C}$,且在仿真过程中保持不变。保持控制采样周期 $T=0.1\text{ s}$ 不变,改变扰动步长,对逆变器输出 A 相电流进行频谱分析,见图 12;扰动步长 ΔU 保持为 5 V ,改变扰动式 MPPT 的控制采样周期,同样进行频谱分析,见图 13。

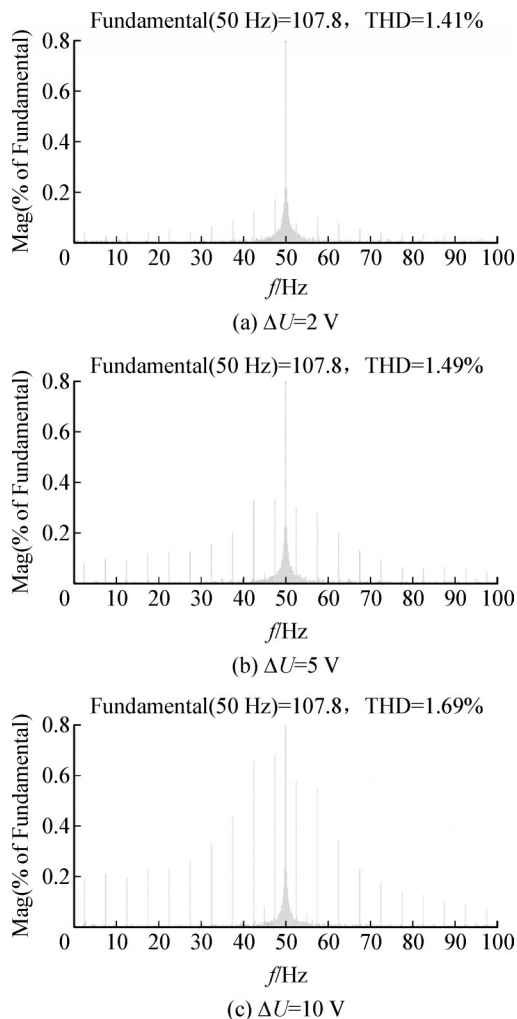


图 12 不同扰动步长下的 A 相电流频谱
Fig. 12 Current spectrum of phase A under different disturbance steps

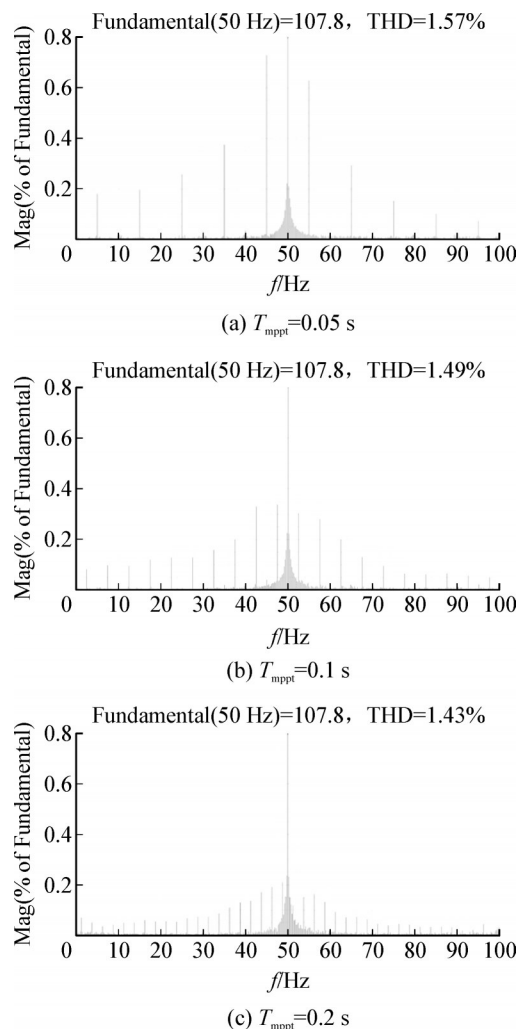


图 13 不同控制周期下的 A 相电流频谱
Fig. 13 Current spectrum of phase A under different control periods

由图 12 可得,间谐波电流的幅值随扰动步长的增大而增大,而其频率分布始终保持不变;根据图 13 可知,随着 MPPT 控制采样周期的增加,相邻间谐波电流分量之间的频率间隔减小,频谱分布越来越密集,然而其幅值却随之减小,与前文的理论分析一致。

3.4 仿真研究光照强度对系统谐波的影响

基于 3.3 节在 Matlab/Simulink 中搭建的模型,设置合适的 MPPT 控制参数,保持温度 $T=25\text{ }^\circ\text{C}$ 不变,光照强度按图 14 所示的规律变化进行仿真,并网电流总谐波畸变率的变化曲线见图 15。

图 14 模拟了一天中光照强度的变化情况,中午的光照强度达到峰值,早上和傍晚光照强度很小,几乎为零,形状与抛物线类似。综合图 14 和图 15 可以发现在最开始时,光照强度为零,并网电流的总谐波畸变率很高,随着光照逐渐增强,总谐波畸变率逐渐减小,在光照强度达到最大时,总谐波畸变

率最小,此后总谐波畸变率随光照强度的减弱逐渐增大。

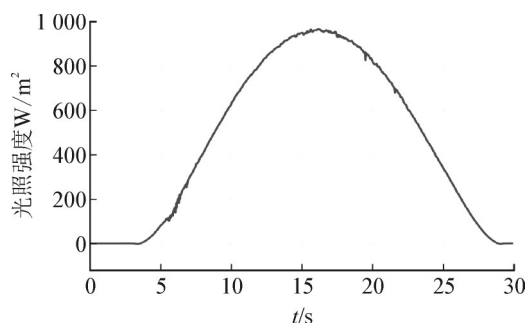


图14 光照强度日变化曲线

Fig. 14 Daily variation curve of light intensity

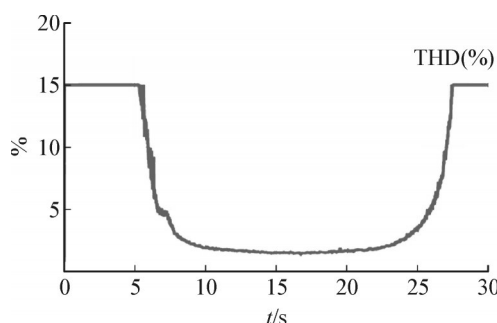


图15 并网电流总谐波畸变率变化曲线

Fig. 15 Variation curve of THD of grid-connected current

综上所述,对于光伏并网逆变系统而言,并网电流的总谐波畸变率与光照强度之间呈负相关,即并网电流的总谐波畸变率随光照强度的增加而减小。

4 结语

针对光伏并网逆变系统的谐波问题,以单级式光伏并网系统为例,从并网逆变器本体 PWM 调制、输出侧与电网的交互影响及输入侧光伏电源出力波动三个方面对谐波的影响进行了综合分析,经推导建立了不同来源的谐波和间谐波数学分析模型,同时利用光照强度日变化曲线通过仿真研究了环境因素对系统谐波的影响。研究结果表明:理想情况下,逆变器 PWM 调制会引起高次谐波分量,计及死区效应时又会引入低次谐波分量;非理想电网会导致逆变器直流侧出现纹波分量,当电网三相不平衡运行时,并网电流将出现 3 次谐波分量;扰动式 MPPT 引起的间谐波分量会受到扰动步长及控制采样周期的共同影响,且并网电流的总谐波畸变率随光照强度的增加而减小。通过对光伏并网系统谐波的综合研究,可为谐波检测和谐波治理提供较为全面的理论基础,对降低谐波危害,改善电网电能质量,提高光伏并网系统的稳定运行水平具有重要意义。

参考文献

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of Carbon emission peak and Carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258.
- [2] 舒印彪,赵勇,赵良,等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1671.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low Carbon energy transition path toward Carbon peak and Carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1671.
- [3] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [4] 李美成,高中亮,王龙泽,等. “双碳”目标下我国太阳能利用技术的发展现状与展望[J]. 太阳能, 2021(11): 13-18.
LI Meicheng, GAO Zhongliang, WANG Longze, et al. The development status and prospect of solar energy utilization technology in China under the goal of double Carbon[J]. Solar Energy, 2021(11): 13-18.
- [5] ZHONG Qing, FENG Junjie, LIN Linxue, et al. Graphical presentation of harmonic operating principles in voltage source converter with sparse vector methods[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(4): 1033-1038.
- [6] 肖湘宁. 新一代电网中多源多变换复杂交流直流系统的基础问题[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 1-14.
XIAO Xiangning. Basic problems of the new complex AC-DC power grid with multiple energy resources and multiple conversions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 1-14.
- [7] 张兴,余畅舟,刘芳,等. 光伏并网多逆变器并联建模及谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 336-345.
ZHANG Xing, YU Changzhou, LIU Fang, et al. Modeling and resonance analysis of multi-paralleled grid-tied inverters in PV systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 336-345.
- [8] 郎维川. 供电系统谐波的产生、危害及其防护对策[J]. 高压技术, 2002, 28(6): 30-31.
LANG Weichuan. Generation and harm of harmonic in power supply system and the countermeasure[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 30-31.

- [9] 郝江涛,刘念,幸晋渝,等. 电力系统间谐波分析[J]. 电力自动化设备,2004,24(12):36-39.
HAO Jiangtao, LIU Nian, XING Jinyu, et al. Study on inter-harmonic of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 36-39.
- [10] DAVID, ARRICIBITA, PABLO, et al. Impedance emulation for voltage harmonic compensation in PWM stand-alone inverters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1335-1344.
- [11] 胡雪峰,王璐,龚春英,等. 并网逆变器的补偿控制技术[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3084-3089.
HU Xuefeng, WANG Lu, GONG Chunying, et al. Compensation control technology of grid-connected inverter[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3084-3089.
- [12] ZHAO Yue, QIAO Wei, WU Long. Dead-time effect analysis and compensation for a sliding-mode position observer-based sensorless IPMSM control system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3): 2528-2535.
- [13] 刘军锋,李叶松. 死区对电压型逆变器输出误差的影响及其补偿[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 117-122.
LIU Junfeng, LI Yesong. Dead-time influence on output error of voltage source inverter and compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 117-122.
- [14] 席晓林,吴杰,王宁,等. 交直流混合微电网中关于纹波的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 76-82.
XI Xiaolin, WU Jie, WANG Ning, et al. Research on ripple in AC/DC hybrid microgrid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 76-82.
- [15] 钟庆,石泉,王钢,等. 基于扰动式MPPT控制的光伏并网系统间谐波分析模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6533-6541.
ZHONG Qing, SHI Quan, WANG Gang, et al. Interharmonic analysis model of photovoltaic grid-connected system based on perturbed MPPT control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6533-6541.
- [16] SAHA S, SUNDARSINGH V P. Novel grid-connected photovoltaic inverter[J]. IEEE Proceedings Generation Transmission & Distribution, 1996, 143(2): 219-224.
- [17] 崔红芬,汪春,叶季蕾,等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [18] PANDI V R, ZEINELDIN H H, XIAO Weidong. Determining optimal location and size of distributed Generation resources considering harmonic and protection coordination limits[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1245-1254.
- [19] 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(36): 10-17.
XIE Ning, LUO An, CHEN Yandong, et al. Dynamic modeling and characteristic analysis on harmonics of photovoltaic powerstations[J]. Proceedings of the CSEE, 2013(36): 10-17.
- [20] 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 Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, 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.
- [21] KWON J B, WANG Xiongfei, BLAABJERG F, et al. Harmonic instability analysis of a single-phase grid-connected converter using a harmonic State-Space modeling method[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 4188-4200.
- [22] AIELLO M, CATALIOTTI A, FAVUZZA S, et al. Theoretical and experimental comparison of total harmonic distortion factors for the evaluation of harmonic and interharmonic pollution of grid-connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1390-1397.
- [23] 傅望,周林,郭珂,等. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 211-216.
FU Wang, ZHOU Lin, GUO Ke, et al. Research on engineering analytical model of solar cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 211-216.
- [24] CHENG Daizhan, LI Zhiqiang. A survey on linearization of nonlinear systems[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2009, 39(2): 26-36.
- [25] KJR S B. Evaluation of the “hill climbing” and the “incremental conductance” maximum power point trackers for photovoltaic power systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(4): 922-929.
- [26] FEMIA N, PETRONE G, SPAGNUOLO G, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 963-973.

作者简介:

晏坤(1988—),男,工程师,主要从事电网调度运行及新型电力系统工作。E-mail:kunyanhb@126.com。

甘景福(1973—),男,高级工程师,主要从事电力系统调度与运行维护检修管理技术工作。E-mail:gan.jingfu@jibei.sgcc.com.cn。

杜鹏(1982—),男,高级工程师,主要从事电力系统及其自动化工作。E-mail:du.peng@jibei.sgcc.com.cn。

张梦茹(2001—),女,硕士研究生,主要从事电力电子与电力传动工作。E-mail:1165230857@qq.com。