# 一种基于FCS-MPC的光伏并网电能质量 控制方法

胡东<sup>1</sup>,胡惊涛<sup>1</sup>,张文涛<sup>1</sup>,吕飞春<sup>1</sup>,武旭<sup>2</sup>

(1.国网江西省电力有限公司余干县供电分公司,江西上饶 335100;2.兰州交通大学自动化与电气工程学院,甘肃兰州 730070)

摘要:光伏发电是实现碳中和目标的一种重要发电方式,在光伏发电系统并网过程中,由于逆变器的特性和非线性负载的影响,产生高次谐波,会导致电网的电能质量降低,影响发电与电网系统的安全运行。针对这一问题,首先优化了并网逆变器的拓扑结构,使用三电平逆变器,多电平能够有效改善并网过程产生的谐波;针对负载侧产生的谐波,在公共节点进行谐波检测,在并网的同时改善负载侧电能质量,并使用模型预测控制 对并网过程进行并网控制;最后在 Matlab/Simulink 工具箱中对提出的结构和控制方法进行了验证,结果表明, 在存在谐波污染的情况下,基于有限集模型预测控制的光伏并网电能质量控制系统在向电网注入最大功率的 同时,能对电网非线性负载产生的谐波进行补偿,降低谐波含量,使得电网的谐波总畸变率满足电网标准。

关键词:光伏发电;电能质量;三电平逆变器;谐波治理;模型预测控制
 中图分类号:TM40 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd24476

A Photovoltaic Grid Connected Power Quality Control Method Based on FCS-MPC

HU Dong<sup>1</sup>, HU Jingtao<sup>1</sup>, ZHANG Wentao<sup>1</sup>, LÜ Feichun<sup>1</sup>, WU Xu<sup>2</sup>

(1.Yugan Power Supply Company, State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Shangrao 335100, Jiangxi, China; 2.School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

**Abstract:** Photovoltaic(PV) power generation is an important power generation method to achieve the goal of carbon neutrality. During the grid connection of PV power generation system, due to the characteristics of inverter and the influence of nonlinear load, high-order harmonics are generated, the power quality of the power grid is reduced, and the safe operation of the power generation and grid system is affected. To solve this problem, the topology of grid connected inverter was optimized. Using three-level inverter, multi-level can effectively improve the harmonics generated in the process of grid connection. Aiming at the harmonics generated at the load side, harmonic detection was carried out at the common connection node, and the power quality at the load side was improved at the same time of grid connection. Model predictive control (MPC) was used to control the grid connection process. Finally, the proposed structure and control method were verified in Matlab/Simulink toolbox. The results show that in the case of harmonic pollution, the PV grid connected power quality control system based on finite control set model predictive control (FCS-MPC) can not only inject maximum power into the grid, but also compensate the harmonics generated by the nonlinear load of the grid, reduce the harmonic content, and make the total harmonic distortion(THD) of the power grid meet the power grid standard.

**Key words:** photovoltaic (PV) power generation; power quality; three-level inverter; harmonic control; model predictive control(MPC)

在当代能源危机的背景下,可再生能源发电 是解决能源不足和缓和气候问题的主要途径。 其中,太阳能取之不尽用之不竭、方便快捷且无 环境污染,是当前和未来的研究热点<sup>[1-2]</sup>。光伏发

基金项目:国家电网科技项目(5218C12230UC)

作者简介:胡东(1978—),男,本科,工程师,Email:9528739@qq.com

电可靠性强,使用条件低,能满足大电网和普通居 民的日常使用<sup>[3-5]</sup>。在光伏发电时,光伏发电阵列 产生的直流电需要使用最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,使其一直 保持在最大功率输出状态,然后通过逆变器将直 流变换为交流电供给电网或者负载<sup>[6-8]</sup>。由于变 流器的开关特性,和电网中存在的大量非线性负 载,使得并网系统与电网出现大量谐波污染。本 文提出一种满足光伏并网发电,并对并网过程和 非线性负载产生的谐波进行实时谐波补偿的方 式,通过对逆变器的模型预测控制,保证输出有 功功率的同时,提高了电网电能质量<sup>[9-10]</sup>。

谐波问题容易引起供电侧与负载侧的电压 与电流发生畸变,甚至于在电网中发生谐振现 象,不仅影响电力系统的有效运行,而且会造成 巨大的安全隐患,因此电能质量问题的治理刻不 容缓。目前治理谐波的方式包括主动治理型和被 动治理型。主动治理型包括改进变流器的拓扑 结构,例如多电平结构、Z源逆变器,这些技术能 减少并网过程中产生的谐波量。其次是被动治 理型,使用外部装置减少电网中的谐波,目前常 用的有有源电力滤波器(active power filter, APF)、 静止无功发生器(static var generator, SVG)、统一电 能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC)等[11-13]。但外部添加这些装置需要额外的 费用,增加了光伏发电系统的成本。因此,寻找 一种能够同时实现光伏发电和提高电能质量,又 不需要再增加成本的方式,变得非常迫切。而光 伏发电系统结合 APF 的组合结构需要储能元件, 会额外地增加成本[14]。

三电平结构作为特殊的结构比常用的两电平 逆变器产生更多的输出电平,使输出的电流更接近 正弦波,进一步降低逆变过程产生的谐波对电网 的影响<sup>[15]</sup>,而有限集模型预测控制(finite control set model predictive control, FCS-MPC)是一种成功适 用于变流器的模型预测控制方法,主要利用电力 电子装置的模型根据有限个开关器件的状态来预 测未来的行为,根据控制目标建立目标函数,选取 最优的开关状态,即:使得目标函数最小化的开关 状态,应用于电力电子装置,而且实现简单,无需脉 冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)<sup>[16-17]</sup>。

由于逆变器与APF结构的相似性,可以考虑 功能的同时实现。文献[18]提出了一种储能系统 双向变换器的FCS-MPC方法,提高了并网的响应 速度,但是未考虑负载侧对电网电能质量的影响。文献[19]提出了在PV发电系统进行谐波补偿的方案,考虑了光伏系统的谐波问题,并考虑了接入外部设备降低电网谐波,但是一定程度上提高了并网系统的成本。文献[20]提出了一种基于复合控制的APF结合并网逆变器的方案,但是比例积分(proportion integration, PI)+重复控制的控制方法响应速度慢,控制方式复杂。文献[21]提出了一种新型的带谐波补偿的三电平并网逆变器控制策略,能够有效降低并网过程与非线性负载产生的谐波,但没有考虑系统有效的控制方法以提高系统的响应和稳态性能,降低了并网和谐波补偿的能力。

综上考虑,本文提出一种同时兼顾功率输送 和进行谐波治理功能的光伏并网系统,为进一步 提升控制效果,使用FCS-MPC控制三电平逆变器。 首先通过瞬时无功功率法检测光伏并网系统节点 负载电流的谐波和无功功率,作为指令电流的一 部分,另一部分指令电流为并网逆变过程的参考 电流。FCS-MPC降低了系统的预测延迟造成的 误差,本文对其在三电平逆变器中的使用进行了 研究,不仅提高了光能的利用率,也改善了电网 系统的电能质量,降低了光伏发电系统的成本。

# 1 光伏逆变和谐波治理系统

光伏逆变过程中逆变器不可避免地会产生 谐波,三电平有更多的电平可以被选择,有更多 的矢量输出组合,众多学者提出了一些先进控制 方法<sup>[22]</sup>。本文研究的光伏并网系统如图1所示, 光伏发电模块产生的直流电,利用 MPPT 使其 工作在最大功率点,产生稳定的直流电压,经过 三电平逆变器,与公共节点(point of common coupling, PCC)进行了连接,输出功率给电网。



图1 光伏并网谐波治理系统



### 1.1 三电平并网逆变器

三电平逆变器结构图如图2所示,在每一个 桥臂有4分IGBT,一共有27种不同的开关状态, 如图3所示,由此可以定义P,0,N3种状态,开关 函数如下式所示:

$$S_{x} = \begin{cases} P & S_{x1} = S_{x2} = 1, S_{x3} = S_{x4} = 0\\ 0 & S_{x1} = S_{x4} = 0, S_{x2} = S_{x3} = 1\\ N & S_{x1} = S_{x2} = 0, S_{x3} = S_{x4} = 1 \end{cases}$$
(1)

其中,x = a, b, c为三相桥臂; $S_{x1}, S_{x2}, S_{x3}$ 和 $S_{x4}$ 为每 个IGBT的开关,27个开关状态可以生成19种类型 的向量,这27种开关状态和矢量可以表示为图3。



图2 光伏并网三电平逆变器

Fig.2 PV grid connected three-level inverter



### 1.2 光伏并网数学模型

对于光伏并网逆变器部分,假设三相电网的 电压平衡,根据基尔霍夫电压定律可得:

$$\begin{cases} u_{an} = L \frac{\mathrm{d}i_a}{\mathrm{d}t} + e_a + Ri_a \\ u_{bn} = L \frac{\mathrm{d}i_b}{\mathrm{d}t} + e_b + Ri_b \\ u_{cn} = L \frac{\mathrm{d}i_c}{\mathrm{d}t} + e_c + Ri_c \end{cases}$$
(2)

式中: $u_{an}$ , $u_{bn}$ , $u_{cn}$ 为逆变器的输出电压;L为滤波电 感;R为线路及滤波电感的等效电阻; $i_a$ , $i_b$ , $i_c$ 为三 相并网电流; $e_a$ , $e_b$ , $e_c$ 为三相电网电压。

由式(2)可以建立在*α-β*坐标系下的数学模 2 型如下式:

$$\begin{cases} L \frac{\mathrm{d}i_{\alpha}}{\mathrm{d}t} = u_{\alpha} - e_{\alpha} - Ri_{\alpha} \\ L \frac{\mathrm{d}i_{\beta}}{\mathrm{d}t} = u_{\alpha} - e_{\beta} - Ri_{\beta} \end{cases}$$
(3)

式中: $i_{\alpha}$ , $i_{\beta}$ 为 $\alpha$ - $\beta$ 坐标系下的状态电流; $u_{\alpha}$ , $u_{\beta}$ 为 APF输出电压; $e_{\alpha}$ , $e_{\beta}$ 为 $\alpha$ - $\beta$ 坐标系下的电网电压。 三电平直流侧的电容电压动态方程如下式:

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{el}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{C}i_{\mathrm{el}}$$

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{e2}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{C}i_{\mathrm{e2}}$$
(4)

式中: $u_{c1}$ , $u_{c2}$ 分别为电容 $C_1$ , $C_2$ 的电压; $i_{c1}$ , $i_{c2}$ 为电 容 $C_1$ , $C_2$ 的电流;C为电容 $C_1$ 和 $C_2$ 的电容值大小, 其大小相同,都为 $C_0$ 

### 1.3 变步长最大功率跟踪法

采用变补偿扰动观测法实现 MPPT,这种方 法可以得到一定外界环境下光伏电池的最大功 率点电压参考值,该参考值与光伏电池的实际输 出的差,通过 PI 控制器后,作为并网有功电流参 考值的一部分,则该部分指令电流幅值 I<sup>\*</sup><sub>de</sub>如下式 所示:

$$I_{\rm dc}^* = k_{\rm p} (u_{\rm ref} - u_{\rm dc}) + k_{\rm i} \int (u_{\rm ref} - u_{\rm dc}) dt \qquad (5)$$

式中:*u*<sub>ref</sub>为扰动观察法下最大功率点对应的工作 电压;*u*<sub>de</sub>为直流电压;*k*<sub>p</sub>,*k*<sub>i</sub>分别为直流侧电压控 制器的比例系数、积分系数。

变步长扰动观察法的流程图如图4所示。



Fig.4 Variable step perturbation observation method

每个采样周期下直流母线电压参考值*U*<sub>ref</sub>如 下式所示:

$$U_{\rm ref} = U(k) + \lambda \frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}U} = U(k) + \lambda \cdot \frac{P(k) - P(k-1)}{U(k) - U(k-1)}$$
(6)

72

式中:λ为变步长的系数;P为功率;U为电压。 可以看到,当λ一定时,当实际工况远离最大功率 点,电压扰动步长变大,当接近最大功率点时,扰 动步长减小,当dP和dU达到设定阈值时,扰动步 长为零,即稳态时功率无波动。

2 参考谐波电流和瞬时无功功率理论

# 2.1 谐波参考电流计算

三相电路的瞬时无功功率理论在许多方面 得到了成功应用。以该理论为基础,可以得出用 于有源电力滤波器的谐波和无功电流实时检测 方法。文中使用图5所示的基于瞬时无功功率理 论的*i<sub>n</sub>-i<sub>n</sub>*方法<sup>[23]</sup>。



Fig.5  $i_p - i_q$  method for harmonic detection of the reference current

图5中, C<sub>da</sub>, C<sub>32</sub>如下式:

$$C_{dq} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ -\cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \end{bmatrix}$$
(7)

$$\boldsymbol{C}_{32} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$
(8)

式中: $\omega$ 为由锁相环(phase locked loop, PLL)得到的电网频率值。

该方法需要用到与a相电网电压 $e_a$ 同相位的正弦 信号 sin( $\omega t$ )和对应的余弦信号 cos( $\omega t$ ),它们由 正余弦信号发生电路得到。

## 2.2 并网参考电流计算

采用变步长扰动观察法可以得到一定外界 环境下光伏电池的最大功率点电压参考值,该参 考值与光伏电池的实际输出值之差通过PI控制 器后,作为并网有功电流给定值的一部分,该部 分指令电流幅值在*d-q*坐标系中如下式所示:

$$\begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_p (U_{de} - u_{de}) + k_i \int (U_{de} - u_{de}) dt \\ 0 \end{bmatrix}$$
(9)

式中:U<sub>de</sub>为并网逆变器直流侧参考电压;u<sub>de</sub>为并 网逆变器直流侧当前电压;k<sub>p</sub>,k<sub>i</sub>分别为PI控制的 比例系数、积分系数。

3 三电平逆变器的预测控制

为了补偿非线性负载和并网过程引起的电力 系统谐波电流污染,建立了一种兼顾功率输出 和谐波治理的并网系统,其控制原理如图6所示。



Fig.6 System control schematic diagram

图 6 中,  $e_{a,b,c}$ 为电网电压;  $i_{La,Lb,Lc}$ 为电网负载 侧的负载电流;  $i_{ea,cb,cc}$ 为 APF 的补偿电流; R, L分 别为滤波器电阻和电感。

APF中,每相由2个二极管和4个IGBT器件 组成,两个二极管的中点连接到直流侧的中点。 直流侧由电容器C<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>组成,对于三电平结构, C<sub>1</sub>和C<sub>2</sub>的电压需要相对平衡地控制。在光照条 件下,光伏系统工作时逆变器输出功率到电网, 同时补偿无功功率和高次谐波;在光照不足光伏 系统无法工作时,逆变系统执行 APF或 SVG 的功 能,单独补偿无功功率和高次谐波。直流侧的 电容电压使用 PI 控制,用以维持直流侧电压稳 定在参考电压。为了充分体现所提控制方法的 可靠性与有效性,仅考虑在光照充足条件下的工 作过程。

上文建立α-β坐标系下的数学模型,共包括 27个电压矢量,在每个采样时刻,轮流循环所有 的开关状态,将检测到的谐波电流值作为参考 值,和预测值求方差。

同时加入使电容电压平衡的项,进行权重因 子分配,综合所有的参考跟踪误差,选择使价值 函数最小的开关状态作为开关量输出到APF,在 以后的时刻不断重复上述的过程,可以实时地跟 踪谐波电流,而无需脉冲宽度调制,FCS-MPC 原 理图如图7所示。



$$\begin{cases} i_{\alpha}(k+1) = \frac{T_{s}}{L}u_{c\alpha}(k) - \frac{T_{s}}{L}e_{\alpha}(k) + (1 - \frac{RT_{s}}{L})i_{\alpha}(k) \\ i_{\beta}(k+1) = \frac{T_{s}}{L}u_{c\beta}(k) - \frac{T_{s}}{L}e_{\beta}(k) + (1 - \frac{RT_{s}}{L})i_{\beta}(k) \end{cases}$$
(10)

$$\begin{cases} u_{c1}(k+1) = \frac{1}{C}i_{c1}(k)T_{s} + u_{c1}(k) \\ u_{c2}(k+1) = \frac{1}{C}i_{c2}(k)T_{s} + u_{c2}(k) \end{cases}$$
(11)

其中

$$\begin{cases} i_{c1}(k) = i_{dc}(k) - G_{1a}i_{a}(k) - G_{1b}i_{b}(k) - G_{1c}i_{c}(k) \\ i_{c2}(k) = i_{dc}(k) + G_{2a}i_{a}(k) + G_{2b}i_{b}(k) + G_{2c}i_{c}(k) \end{cases}$$
(12)

$$\begin{cases} G_{1x} = \begin{cases} 1 & S_x = P \\ 0 & \text{others} \end{cases} \\ G_{2x} = \begin{cases} 1 & S_x = N \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad x = a, b, c \quad (13)$$

式中:X(k+1)为 $\alpha-\beta$ 坐标系下的下一时刻的预测 值;X(k)为当前时刻的参数值; $T_s$ 为采样时间;  $i_{c1}(k)$ , $i_{c2}(k)$ 为开关和输出电流一起决定的电容 电流值; $i_{dc}(k)$ 为当前时刻的直流侧电流。

在谐波的检测环节,从锁相环到计算得到谐 波参考电流,具有一定的延迟,即APF的输出跟 随的是上一时刻的参考电流。在建立目标函数 的时候,跟随电流为下一时刻的预测值,在这个 过程中,延迟会产生一定的误差。文中为了减少 检测环节造成的延迟,使用拉格朗日插值预测法 对参考电流进行预测,插值后的下时刻的参考电 流值如下式:

$$i_{\alpha\beta}^{m}(k+1) = \sum_{i=0}^{n} (-1)^{n-i} \frac{(n+1)!}{i!(n+1-i)!} \cdot i_{\alpha\beta}^{m}(k+i-n)$$
(14)

为了减小计算量,使用三阶插值预测,即*n*=3,将 *n*=3代入式(14)后可以得到下式:

$$i^{*}(k+1) = 4i^{*}(k) - 6i^{*}(k-1) + 4i^{*}(k-2) - i^{*}(k-3)$$
(15)

根据预测方程,建立目标函数J:

$$J = \lambda_{1} \| \dot{i}_{\alpha}^{*}(k+1) - \dot{i}_{\alpha}(k+1) \| + \lambda_{2} \| \dot{i}_{\beta}^{*}(k+1) - \dot{i}_{\beta}(k+1) \| + \lambda_{3} \| u_{e1}(k+1) - u_{e2}(k+1) \|$$
(16)

式中: $\lambda_1$ , $\lambda_2$ , $\lambda_3$ 为权重系数。

将开关矢量代入式(10)可以得到下一时刻 的预测值,求出该矢量对应的目标函数J。在每 个采样点,循环所有可能的矢量,得到使得目标 函数J最小的开关矢量,这个开关矢量就是求得的最优矢量,根据最优矢量对应的开关组合,控制逆变器就可得到最优的输出结果。

# 4 仿真分析

为验证文中所提方法和控制系统在光伏接 入电网时的谐波治理效果,在 Matlab/Simulink 工 具箱中搭建了图1仿真模型,具体参数如下:并网 电压 380 V,频率 50 Hz;直流电压 700 V;电容器  $C=3\ 000\ \mu$ F;电感 $L=4\ m$ H;阻抗 0.01  $\Omega$ ;负载 5  $\Omega_{\circ}$ 

以控制光伏发电模块、逆变器并网以及谐波 补偿为目标,将非线性负载设置为不可控的二 极管整流桥。验证过程中光照强度在0.1 s从 600 W/m<sup>2</sup>变为1000 W/m<sup>2</sup>,在0.2 s时设置负载发 生波动,负载从5Ω变为2.5Ω。设定存在谐波的 情况下,使用有限集模型预测控制,将未进行谐 波消除的系统和本文提出的系统表现性能进行 对比。图8为通过瞬时无功功率法检测到的谐波 电流,可以明显地发现,在0.2 s负载发生变化时, 检测到的谐波电流也随之波动。



在光照充足的条件,电流输出波形如图9所示,谐波补偿前,电网的畸变较为严重,在0.2s非 线性负载变化时,畸变电流也随之变化。在加入 谐波补偿后,电网电流的畸变减小,更加接近正 弦波。当负载发生变化,本文提出的控制方法能 及时跟随参考值,且这种系统有效地提高了电能 质量。

图 10 为并网电流的 THD 动态变化图,展示 了系统在各个参数变化下的电网畸变率。图 10a 为加入谐波治理的系统,在进行并网的同时进行 谐波治理,可以发现其 THD 满足电网小于 5% 的 畸变要求;图 10b 为治理前,0.1 s系统畸变率高达 11.62%,系统以 5次、7次、11次、13次谐波为主; 图 10c 为治理后,0.1 s时 THD = 4.35%,谐波次数 分布分散化,其中包括逆变器产生的高次谐波。





图 11 为光伏发电系统的输出功率,在负载改 变时,由于需要对谐波含量进行补偿,而要达到 双端功率平衡,需要消耗输出功率,所以在 0.2 s 时发生了波动,但是在 FCS-MPC 算法下,很快又 达到了平衡。



# 5 结论

本文提出了一种使用 FCS-MPC 控制三电平 并网逆变器兼谐波治理系统,使得利用太阳能资 源的同时又能提高电能质量,解决了并网系统和 负载带来的电能质量下降问题,在未来的微电网 系统具有广泛的应用前景。本文提出的方案具 有以下优点:1)从实验结果可以看出,结合后的光 伏系统,在光伏功率注入电网时,对整个电网影 响较小。2)使用 FCS-MPC 控制三电平逆变器,具 有良好的动态性能和稳态性能,有效地降低了电 网的 THD,提高了电网的电能质量。3)整个系统 不需要额外的设备,起到了两种装置的作用,有 效地降低了投入成本。

### 参考文献

 [1] 吴硕.光伏发电系统功率预测方法研究综述[J]. 热能动力工 程,2021,36(8):1-7.

WU Shuo. Summary of research on power prediction methods of photovoltaic power generation system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8):1–7.

[2] 李洪珠,刘飞扬,李洪璠.应用于分布式单相光伏并网发电系统的组合双极性直流变换器[J].高电压技术,2020,46 (11):3725-3733.

LI Hongzhu, LIU Feiyang, LI Hongfan. Combined bipolar DC converter applied to distributed single-phase photovoltaic grid connected power generation system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3725–3733.

[3] 徐远洋,王明渝.低压微电网中新型控制策略研究[J].太阳 能学报,2020,41(9):70-77.

XU Yuanyang, WANG Mingyu. Research on new control strategy in low voltage microgrid[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020,41(9):70-77.

- [4] 李蕊.基于不同商业运营模式的分布式电源/微电网综合效 益评价方法[J].电网技术,2017,41(6):1748-1758.
   LI Rui. Comprehensive benefit evaluation method of distributed generation/microgrid based on different commercial operation modes[J]. Power System Technology,2017,41(6):1748-1758.
- [5] 杨重伟,梁旭,毛岚.基于高比例光伏接入低压系统的电压 控制研究[J].电气传动,2022,52(8):60-67.

YANG Chongwei, LIANG Xu, MAO Lan. Research on voltage control based on high proportion photovoltaic access to low voltage system[J]. Electric Drive, 2022, 52(8):60–67.

- [6] LIAO Y, WANG X. Small-signal modeling of AC power electronic systems: critical review and unified modeling[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2021, 2:424-439.
- [7] 苏杰,曾喆昭.基于ACPI的风力发电系统MPPT控制方法
  [J].电力系统保护与控制,2021,49(18):119-127.
  SU Jie, ZENG Zhezhao. MPPT control method of wind power generation system based on ACPI[J]. Power System Protection and Control,2021,49(18):119-127.
- [8] LI Yu, ZHANG Zhenbin, LI Kejun, et al. Predictive current control for voltage source inverters considering dead-time effect
   [J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2020,4(1):35-42.
- [9] 张思,杨晓雷,阙凌燕,等.高比例光伏发电对浙江电网电力 平衡的影响及应对策略[J].浙江电力,2022,41(11):9-16. ZHANG Si, YANG Xiaolei, QUE Lingyan, et al. The impact of high-proportion photovoltaic power generation on the power balance of Zhejiang power grid and its countermeasures[J]. Zhejiang Electric Power,2022,41(11):9-16.
- [10] 马汇海,杜鹃,孟彦京.带有源滤波功能的三相四桥臂并网 逆变器仿真研究[J].陕西科技大学学报,2019,37(3):146-152.
  MA Huihai, DU Juan, MENG Yanjing. Simulation sesearch on three-phase four leg grid connected inverter with source filtering function[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology,2019,37(3):146-152.
- [11] 廖常超,周兰,潘昌忠,等.基于等价输入干扰补偿的改进型 重复控制系统参数优化设计[J].控制理论与应用,2022,39
   (4):653-662.

LIAO Changchao, ZHOU Lan, PAN Changzhong, et al. Parameter optimization design of improved repetitive control system based on equivalent input disturbance compensation[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(4):653–662.

- [12] 王海军,王磊.基于分层 MPC 的风电场电压协调控制策略研究[J].电气传动,2022,52(1):60-67,80.
  WANG Haijun, WANG Lei. Research on voltage coordinated control strategy of wind farm based on hierarchical MPC[J]. Electric Drive,2022,52(1):60-67,80.
- [13] ZHAO Xiaojun, CHAI Xiuhui, GUO Xiaoqiang, et al. Impedance matching-based power flow analysis for UPQC in threephase four-wire systems[J]. Energies, 2021, 14(9):1–7.
- [14] 洪剑峰,张兴,曹仁贤,等.三电平并网逆变器基于有限集模 型预测控制的新型谐波抑制策略[J].太阳能学报,2022,43 (4):184-190.

HONG Jianfeng, ZHANG Xing, CAO Renxian, et al. A new harmonic suppression strategy based on finite set model predictive control for three-level grid connected inverter[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(4):184–190.

[15] 马明,廖鹏,蔡雨希,等.LCL并网逆变器一阶自抗扰控制及 基于粒子群优化的控制参数整定方法[J].电力自动化设备, 2021,41(11):174-182. MA Ming, LIAO Peng, CAI Yuxi, et al. First order active disturbance rejection control of LCL grid connected inverter and control parameter tuning method based on particle swarm optimization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 174–182.

[16] 辛业春,王延旭,李国庆,等.T型三电平并网逆变器有限集
 模型预测控制快速寻优方法[J].电工技术学报,2021,36
 (8):1681-1692.

XIN Yechun, WANG YanXu, LI Guoqing, et al. Finite control set model predictive control method with fast optimization based on T-type three-level grid-connected inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8):1681–1692.

[17] 张原飞,王项南,夏海南,等.基于功率区间划分的潮流能发
 电装置电能质量特性分析[J].太阳能学报,2022,43(4):
 506-511.

ZHANG Yuanfei, WANG Xiangnan, XIA Hainan, et al. Analysis of power quality characteristics of tidal current power generation device based on power interval division[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(4):506–511.

- [18] 刘志坚,刘杰,李鹏程,等.光储微电网逆变器有限集模型预测控制[J].电机与控制应用,2020,47(12):81-86.
  LIU Zhijian, LIU Jie, LI Pengcheng, et al. Finite control set model predictive control of photovoltaic and storage microgrid inverter[J]. Electric Machines & Control Application, 2020,47 (12):81-86.
- [19] LI J,ZHUO F, LIU J, et al. Study on unified control of grid-connected generation and harmonic compensation in dual-stage high-capacity PV system[C]//Energy Conversion Congress and Exposition, IEEE, 2009: 3336–3342.
- [20] 刘述喜, 亢苏占.具有 APF 功能的并网逆变器控制策略研究
  [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(2):191-198.
  LIU Shuxi, KANG Suzhan. Research on control strategy of grid-connected inverter with APF function[J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2018, 32(2):191-198.
- [21] 张国志,施森鑫,魏力.带谐波补偿的T型三电平并网逆变 器控制研究[J].自动化仪表,2022,43(1):29-32,37.
  ZHANG Guozhi, SHI Senxin, WEI Li. Research on control of T-type three-level grid-tied converter with harmonic compensation[J]. Process Automation Instrumentation, 2022,43(1):29-32,37.
- [22] YANG Guoliang, HAO Shuai, FU Chuntian, et al. Model predictive direct power control based on improved T-type grid-connected inverter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1):252-260.
- [23] GÓMEZ J S, SÁEZ D, SIMPSON-PORCO J W, et al. Distributed predictive control for frequency and voltage regulation in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1319–1329.