DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.51 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

非隔离型光伏并网逆变器漏电流抑制控制策略

高锋阳(中国电源学会高级会员)，杨凯文，宋志翔，高翾宇，高建宁
(兰州交通大学自动化与电气工程学院，兰州 730070)

摘要：非隔离型光伏逆变器并网系统中，电磁干扰易引发漏电流问题。为此，针对三电平逆变器提出1种改进的模型预测控制策略。首先，建立逆变器并网系统数学模型，分析漏电流产生机理及其与共模电压的关系；其次，通过控制共模电压变化率，改进模型预测直接功率控制算法，优化寻优结果，实现对漏电流的抑制；最后，从输出功率、并网电流谐波畸变、直流侧中点电位平衡及漏电流幅值方面，通过仿真对比分析传统策略和所提改进模型预测控制策略的效果。结果表明，所提策略在上述4个方面均有良好表现，相比传统模型预测控制策略，漏电流抑制效果可达99.5%。

关键词：三电平逆变器；光伏系统；模型预测控制；漏电流；共模电压

Control Strategy for Leakage Current Suppression in Non-isolated Grid-connected Photovoltaic Inverter

GAO Fengyang, *Senior Member, CPSS*, YANG Kaiwen, SONG Zhixiang, GAO Xuanyu, GAO Jianning
(College of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In a grid-connected system of non-isolated photovoltaic (PV) inverters, the electromagnetic interference causes the problem of leakage current. Aimed at this problem, an improved model predictive control strategy is proposed for a three-level inverter. First, a mathematical model of the grid-connected inverter system is established to analyze the generation mechanism of leakage current and its relationship with the common-mode voltage. Second, the common-mode voltage variation rate is controlled to improve the model predictive direct power control algorithm, thereby optimizing the optimization result to achieve the suppression of leakage current. Finally, the conventional strategy and the proposed improved model predictive control strategy are compared and analyzed through simulations in terms of output power, harmonic distortion of grid-connected current, DC-side neutral point potential balance and leakage current amplitude. Results show that the proposed strategy performs well in all the above four aspects, and its leakage current suppression effect can reach 99.5% compared with the conventional model predictive control strategy.

Keywords: Three-level inverter; photovoltaic (PV) system; model predictive control; leakage current; common-mode voltage

为实现“双碳”目标，新能源发电替代火力发电在电网中的渗透率逐年提升[1-2]。其中非隔离型光伏发电并网系统因体积小、成本低而被广泛应用。然而，由于缺少电气隔离，形成传导干扰回路，引发漏电流问题[3-4]，导致系统稳定性降低，损耗增加，甚至威胁人身安全[5-6]。

对此，国内外学者已有大量研究。文献[7-15]通过改进电路拓扑结构及增加相应滤波器的设计，实现对漏电流的抑制，但实际推广应用成本较高。若仅依靠控制策略抑制漏电流，基于电压型逆变器的特点，一般通过控制输出共模电压来间接实现对

收稿日期：2022-07-27；**修回日期**：2022-09-12；**录用日期**：2022-10-29；**网络首发日期**：2022-12-14
基金项目：甘肃省科技厅重点研发资助项目(18YF1FA058)
This work is supported by Gansu Provincial Science and Technology Department Key Research and Development Project under the grant 18YF1FA058

漏电流的抑制[16]。文献[17-18]提出新型虚拟空间矢量合成方法，舍弃部分小矢量以抑制共模电压，但忽略了对直流侧中点电位平衡的影响，不适用于高精度大功率场合；文献[19-22]重新划分输出电压矢量分区，通过改进虚拟矢量的合成过程，配合相应的调制策略，实现抑制共模电压及漏电流，但扇区选择和占空比计算过于复杂。模型预测控制 MPC(model predictive control)作为 1 种结果导向型的新型控制策略，更便于处理非线性、多变量问题，近年来在工程领域取得广泛应用[23]，针对换流器的有限集模型预测控制相关研究逐渐成熟[24-30]。依托于其代价函数控制目标易于修改的优势，可以将 MPC 应用于漏电流抑制[31]。文献[32]采用模型预测直接功率控制 MPDPC(model predictive direct power control)策略，针对三电平四桥臂逆变器，用第四桥臂平衡共模电压波动，实现抑制漏电流，但第四桥臂拓扑及控制算法复杂度更高，经济性较差。

为保持较低成本，采用传统电路拓扑结构，通过控制策略抑制漏电流。对于电压型逆变器，其输出电流总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)是输出电能质量的重要考核指标；对于三电平逆变器，中点电位平衡是保证正常电压水平输出的关键；对于 MPC 策略，算法复杂度决定了其遍历寻优的效率。综合漏电流抑制及以上要求，提出 MPDPC 改进策略。在非隔离中点钳位型 NPC (neutral point clamped)三电平光伏逆变器并网系统中，分析漏电流产生机理及共模电压幅值和变化率对漏电流的影响，改进 MPDPC 策略，通过仿真实验对比分析所提策略对漏电流的抑制效果，综合输出电能质量和直流侧中点电位波动，验证策略的有效性。

1 漏电流与共模电压分析

光伏并网系统中，光伏阵列和大地之间有寄生电容(即杂散电容)的存在，构成了共模谐振回路，从而产生共模电流(即漏电流)，造成极大危害[4-7]。

漏电流模型产生原理如图 1 所示。图中：U_{dc} 为直流母线电压；L 为线路电感；R 为线路电阻；C 为线路滤波电容；e 为并网网侧电压；i_a、i_b、i_c 为并网电流。

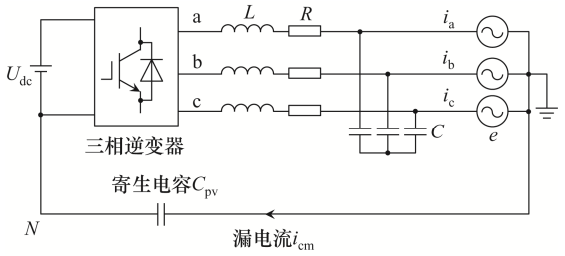


图 1 三相并网逆变器漏电流模型

Fig. 1 Leakage current model of three-phase grid-connected inverter

由电容电流公式可得漏电流计算公式为

$$i_{cm}(t)=-C_{pv}\frac{\mathrm{d}u_p(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中，u_p 为寄生电容两端电压。

图 1 中，根据基尔霍夫电压定律，在 s 域下可得

$$\begin{cases} u_P=u_{aN}+sLi_a+u_R+e_a \\ u_P=u_{bN}+sLi_b+u_R+e_b \\ u_P=u_{cN}+sLi_c+u_R+e_c \end{cases} \tag{2}$$

$$u_p=-\frac{1}{sC_{pv}}i_{cm} \tag{3}$$

式中：u_{aN}、u_{bN}、u_{cN} 为相对于直流母线接地侧的输出三相电压；u_R 为线路压降；e_a、e_b、e_c 为电网电压。

由基尔霍夫电流定律可得

$$i_{cm}=i_a+i_b+i_c \tag{4}$$

共模电压为

$$u_{cm}=\frac{u_{aN}+u_{bN}+u_{cN}}{3} \tag{5}$$

联立式(2)~式(5)可得

$$u_p=\frac{3u_{cm}}{3+s^2C_{pv}L+sRC_{pv}} \tag{6}$$

据式(1)可知，除客观物理量寄生电容外，仅寄生电容电压的变化率影响漏电流大小。根据式(6)可知，除客观物理量外，寄生电容电压仅与共模电

压有关。综上，可以通过控制策略抑制共模电压，达到抑制漏电流的目的。

2　MPDPC 与中点电位控制

采用 MPDPC 策略，以并网逆变器输出有功功率及无功功率为控制目标，确保系统稳定运行。图 2 为 NPC 型三电平并网逆变器电路原理。图中：C_{dc1}、C_{dc2}为三电平逆变器母线中点分压电容；S_a、S_b、S_c为逆变器三桥臂开关；n 为三相电网侧星型连接中性接地点。控制策略思路同样适用于“T”型等其他逆变器结构。

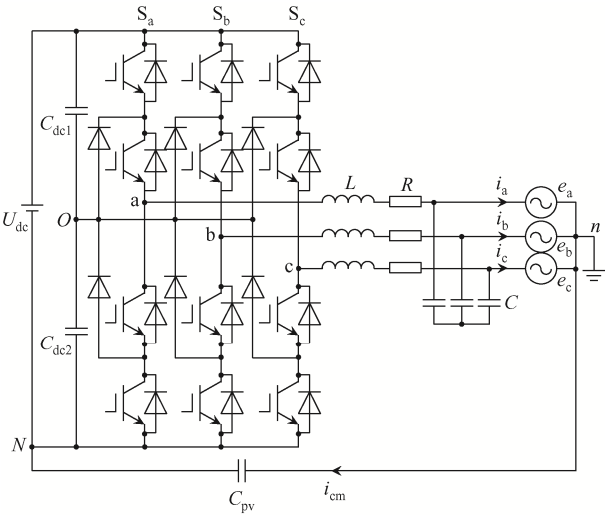


图 2　三电平并网逆变器电路原理

Fig. 2 Schematic of three-level grid-connected inverter circuit

通过等幅值 Clarke 变换公式，将网侧电压电流及逆变器输出电压，变换至 $\alpha\beta$ 坐标系中，即

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中：x_α、x_β为变换至 $\alpha\beta$ 坐标系后的变量；x_a、x_b、x_c为原始三相变量。

$\alpha\beta$ 坐标系下的网侧功率可表示为

$$\begin{cases} P = \dfrac{3}{2}(e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta) \\ Q = \dfrac{3}{2}(e_\beta i_\alpha - e_\alpha i_\beta) \end{cases} \tag{8}$$

式中：P、Q 分别为有功功率和无功功率；e_α、e_β为变换至 $\alpha\beta$ 坐标系下的网侧电压；i_α、i_β为变换至 $\alpha\beta$ 坐标系下的输出电流。

对式(8)求导，可得

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \dfrac{3}{2}\left(e_\alpha \dfrac{\mathrm{d}i_\alpha}{\mathrm{d}t} + i_\alpha \dfrac{\mathrm{d}e_\alpha}{\mathrm{d}t} + e_\beta \dfrac{\mathrm{d}i_\beta}{\mathrm{d}t} + i_\beta \dfrac{\mathrm{d}e_\beta}{\mathrm{d}t}\right) \\ \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = \dfrac{3}{2}\left(e_\beta \dfrac{\mathrm{d}i_\alpha}{\mathrm{d}t} + i_\alpha \dfrac{\mathrm{d}e_\beta}{\mathrm{d}t} - e_\alpha \dfrac{\mathrm{d}i_\beta}{\mathrm{d}t} - i_\beta \dfrac{\mathrm{d}e_\alpha}{\mathrm{d}t}\right) \end{cases} \tag{9}$$

网侧电流的变化率可以由电感电压公式和基尔霍夫电压定律计算得到，即

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}i_\alpha}{\mathrm{d}t} = \dfrac{u_\alpha - e_\alpha - Ri_\alpha}{L} \\ \dfrac{\mathrm{d}i_\beta}{\mathrm{d}t} = \dfrac{u_\beta - e_\beta - Ri_\beta}{L} \end{cases} \tag{10}$$

式中，u_α 和 u_β 为逆变器相对于网侧中性点的输出电压 u_{an}、u_{bn}和 u_{cn}经坐标变换后的值。

正常工况下，网侧电压变化率可表示为

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}e_\alpha}{\mathrm{d}t} = -\omega e_\beta \\ \dfrac{\mathrm{d}e_\beta}{\mathrm{d}t} = -\omega e_\alpha \end{cases} \tag{11}$$

式中，ω 为角频率。

对于三电平逆变器，定义各桥臂开关状态为

$$S_i = \begin{cases} 1 & S_{i1}、S_{i2}导通，S_{i3}、S_{i4}关断 \\ 0 & S_{i2}、S_{i3}导通，S_{i1}、S_{i4}关断 \\ -1 & S_{i3}、S_{i4}导通，S_{i1}、S_{i2}关断 \end{cases} \tag{12}$$

式中，i=a, b, c。

将式(10)和式(11)代入式(9)，可得

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = \dfrac{3}{2}\left[e_\alpha\left(\dfrac{u_\alpha - e_\alpha - Ri_\alpha}{L} + \omega i_\beta\right) + e_\beta\left(\dfrac{u_\beta - e_\beta - Ri_\beta}{L} - \omega i_\alpha\right)\right] \\ \dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = \dfrac{3}{2}\left[e_\beta\left(\dfrac{u_\alpha - e_\alpha - Ri_\alpha}{L} + \omega i_\beta\right) - e_\alpha\left(\dfrac{u_\beta - e_\beta - Ri_\beta}{L} - \omega i_\alpha\right)\right] \end{cases} \tag{13}$$

三电平逆变器共有 27 种不同开关状态，对应 19 个输出电压矢量，如图 3 所示。

图 3 中，零矢量对应 3 种开关状态，其冗余状

态的作用主要是在合成虚拟矢量时平衡每周期的作用时间，降低开关频率，延长器件使用寿命。这在 MPDPC 策略中意义不大，因此可舍弃 2 个冗余状态，仅保留零矢量开关状态(0,0,0)，减小寻优计算量，提高运行速度。

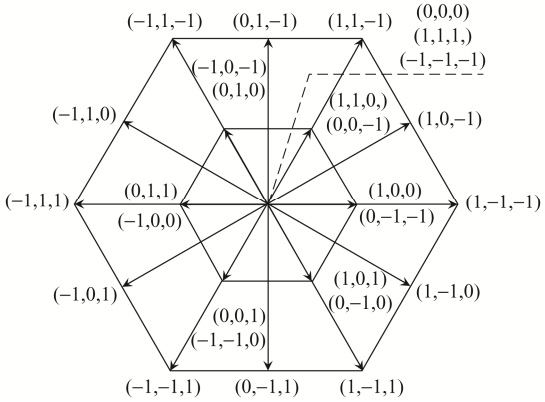


图 3 三电平逆变器输出电压矢量

Fig. 3 Output voltage vector from three-level inverter

将图 3 中的电压矢量变换到 $\alpha\beta$ 坐标系下，代入式(13)，替代 u_α 和 u_β，得到有功功率和无功功率变化率。为得到下一时刻的功率预测值，需再对其离散化。有限集模型预测控制中采样频率较高，寻优速度要求尽可能快，而后向欧拉法需解隐式方程，双线性变换法计算量较大，在此采用前向欧拉法进行离散化，得到下一时刻的预测值为

$$\begin{cases} P(k+1)=P(k)+\dfrac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}T_\mathrm{s} \\ Q(k+1)=Q(k)+\dfrac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}T_\mathrm{s} \end{cases} \tag{14}$$

式中：k 为当前时刻，k+1 为下一时刻；T_s 为采样周期。

由此可得功率控制的代价函数项为

$$g_\mathrm{P}=\left|P_\mathrm{ref}-P(k+1)\right|+\left|Q_\mathrm{ref}-Q(k+1)\right| \tag{15}$$

式中，P_ref 和 Q_ref 分别为期望输出有功功率和无功功率。

三电平逆变器还需考虑直流侧两电容中点电位的平衡问题。根据电容电压公式

$$\frac{\mathrm{d}U_C}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{C}i_C \tag{16}$$

式中：U_C 为直流母线侧单个分压电容的电压；i_C 为其对应的电流。电容电流与逆变器开关状态有关，令

$$H_i=\begin{cases}1 & S_i=0\\ 0 & S_i\neq 0\end{cases} \tag{17}$$

式中，H_i 为定义的指令开关中间量。结合式(16)和式(17)，可得下一时刻的预测电容电压差值为

$$U_{C_1}(k+1)-U_{C_2}(k+1)=U_{C_1}(k)-U_{C_2}(k)+\frac{T_\mathrm{s}}{C}(H_\mathrm{a}i_\mathrm{a}+H_\mathrm{b}i_\mathrm{b}+H_\mathrm{c}i_\mathrm{c}) \tag{18}$$

式中，U_{C_1}、U_{C_2} 分别为直流母线侧 2 个中点分压电容的电压。

由此可得控制中点电位的代价函数项为

$$g_\mathrm{C}=\left|U_{C_1}(k+1)-U_{C_2}(k+1)\right| \tag{19}$$

结合式(15)和式(19)，可构造传统 MPDPC 策略中的代价函数，即

$$g_1=g_\mathrm{P}+\lambda_1 g_\mathrm{C} \tag{20}$$

式中，λ_1 为控制中点电位平衡的权重系数。

通过式(20)寻优出使代价函数最小的开关状态，输出至逆变器，完成控制操作。

3 共模电压变化率抑制

模型预测控制中，可以通过改写代价函数，方便快捷地实现诸如功率控制、中点电位控制、开关频率优化等目标。为抑制漏电流，将共模电压项加入代价函数中。图 2 所示电路中，以直流侧负极 N 点作为共模电压参考点，通过图 3 可得每项输出电压与开关状态变量的关系式为

$$\begin{cases} u_{aN}=\dfrac{U_\mathrm{dc}}{2}+\dfrac{U_\mathrm{dc}}{2}S_\mathrm{a} \\ u_{bN}=\dfrac{U_\mathrm{dc}}{2}+\dfrac{U_\mathrm{dc}}{2}S_\mathrm{b} \\ u_{cN}=\dfrac{U_\mathrm{dc}}{2}+\dfrac{U_\mathrm{dc}}{2}S_\mathrm{c} \end{cases} \tag{21}$$

将式(21)代入式(5)，可得共模电压与开关状态的关系式为

$$u_\mathrm{cm}(k)=\frac{U_\mathrm{dc}}{2}+\frac{U_\mathrm{dc}}{6}\left[S_\mathrm{a}(k)+S_\mathrm{b}(k)+S_\mathrm{c}(k)\right] \tag{22}$$

分析式(1)和式(6)可知，影响漏电流的变量是

共模电压变化率，而非共模电压自身幅值。若直接在代价函数中加入$|u_{cm}(k+1)|$项，对共模电压幅值进行抑制，理论上能间接降低其变化率。若直接对共模电压的变化率进行抑制，可以取得更好的抑制漏电流的效果。

根据式(5)采样得到 k 时刻的共模电压，由式(22)计算得到下一时刻(k+1时刻)的共模电压，最后结合采样频率，即可得到共模电压的变化率项，即

$$\frac{\mathrm{d}u_{cm}}{\mathrm{d}t}\approx\frac{u_{cm}(k+1)-u_{cm}(k)}{T_s} \tag{23}$$

其中，$u_{cm}(k)$可根据式(5)采样计算得到，$u_{cm}(k+1)$可根据式(20)，由下一时刻开关状态预测计算得到。由式(23)计算得到的数值，相当于 k+0.5 时刻的共模电压变化率，一定程度上起到了多步预测的作用，缓解实际应用中预测计算延迟，提高了工程应用的准确性。

由此可构造抑制共模电压变化率的代价函数项，即

$$g_{cmr}=\left|\frac{u_{cm}(k+1)-u_{cm}(k)}{T_s}\right| \tag{24}$$

综上可得，抑制共模电压变化率的 MPDPC 代价函数为

$$g_2=g_P+\lambda_1 g_C+\lambda_2 g_{cmr} \tag{25}$$

式中，λ_2为抑制共模电压的权重系数。图 4 为所提改进 MPDPC 控制逻辑流程框图。

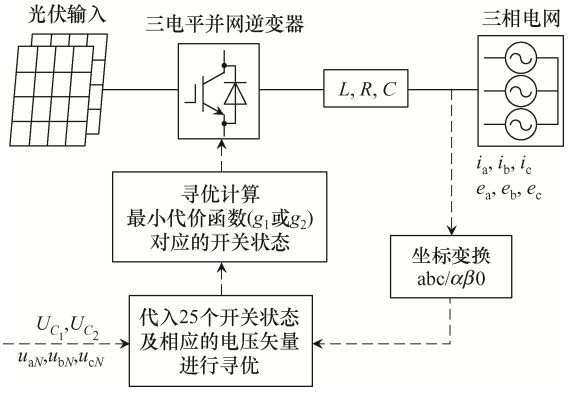


图 4　MPDPC 流程

Fig. 4 Flow chart of MPDPC

4　仿真验证分析

对所提策略进行仿真验证分析，参数设置见表 1。其中，寄生电容一般为每千瓦有功功率对应 50~150 nF[28]，此处取 1 μF。

表 1　仿真参数设置

Tab. 1 Setting of simulation parameters

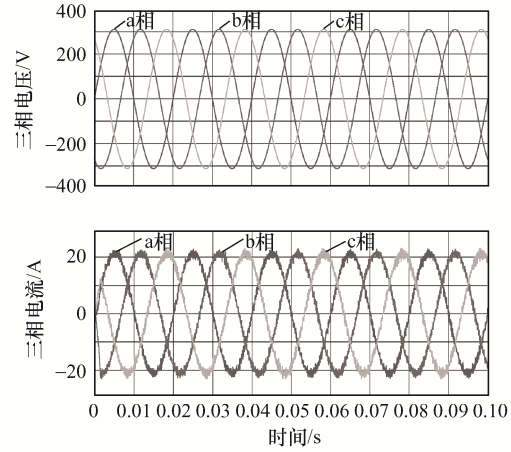
参数	数值
直流侧电压/V	650
对称三相网侧线电压/V	380
期望输出有功功率/kW	10
期望输出无功功率/var	0
电网频率/Hz	50
等效线路电阻/Ω	0.1
滤波电感/mH	5
采样频率/kHz	20
滤波电容/μF	0.5
寄生电容/μF	1

对传统 MPDPC 策略和所提抑制共模电压变化率改进 MPDPC 策略进行对比仿真实验。为方便与共模电压对比，输出 a 相电压与共模电压统一取 N 点为参考点，即 u_{aN}。

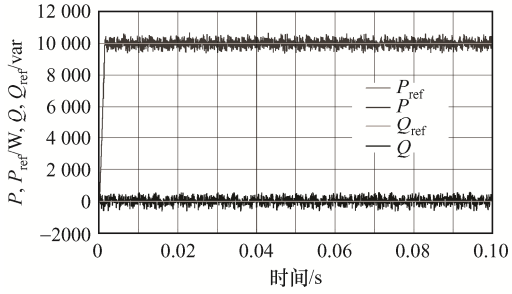
传统 MPDPC 策略采用式(20)所示的代价函数 g_1，控制目标为输出功率和直流侧中点电位平衡。在代价函数 g_1 中，由于控制目标少、牵制关系弱，为优先保证输出功率尽可能跟随给定期望功率，权重系数 λ_1 应取较小值。结合当前参数设置，其中 g_P 项为期望功率与预测功率之差，数值估算在 10^2 数量级；g_C 项为直流侧电容电压之差，数值估算在 10^{-2} 数量级。结合文献[32]中权重系数取值及多次实验，最终得到当 $\lambda_1=10^{-4}$ 时，达到良好的输出效果。图 5 为仿真实验结果，分别为输出并网电压电流、输出功率与期望功率对比、并网电流 THD、直流侧中点电位波动、输出 a 相电压及共模电压和漏电流。

所提抑制共模电压变化率的 MPDPC 策略采用式(25)所示的代价函数 g_2，控制目标新增共模电压变化率抑制项。在代价函数 g_2 中，由于引入共模电压变化率抑制项，影响输出电压，使输出功率误

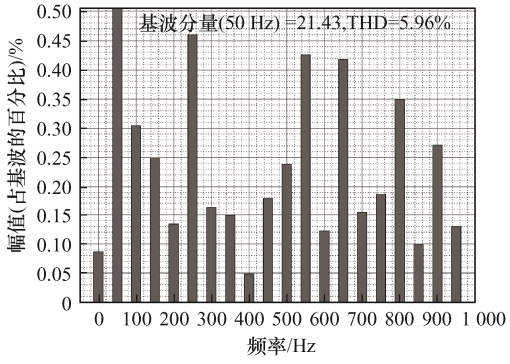
差有所增加，g_P项数值估算在 10^3 数量级，g_C项数值估算在 10^{-2} 数量级，g_{cmr} 项为共模电压变化率，由于采样频率高，其数值较大，估算在 10^4 数量级。代价函数 g_1 中，2 项控制目标加入权重系数后的数量级比约为 1:10^{-8}。基于此，在 g_2 中应维持首项 g_P 与另外 2 项的数量级比约 1:10^{-8}。由此可推出 λ_1 取值约在 10^{-3} 数量级，根据比例，λ_2 取值约在 10^{-9} 数量级，而为了在保证输出电能质量在允许范围内尽可能抑制共模电压变化率，逐数量级放大 λ_2，分析实验对功率跟踪和中点电位漂移的影响，最终确定 λ_1=10^{-3}、λ_2=5×10^{-3}时，功率跟踪误差维持在 10^3 数量级，中点电位误差保持在 10^{-2} 数量级。仿真结果如图 6 所示。



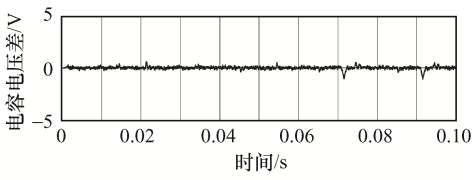
(a)并网电压与电流



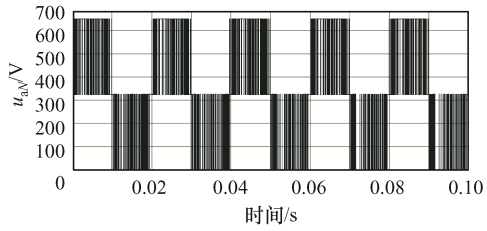
(b)输出功率与期望功率



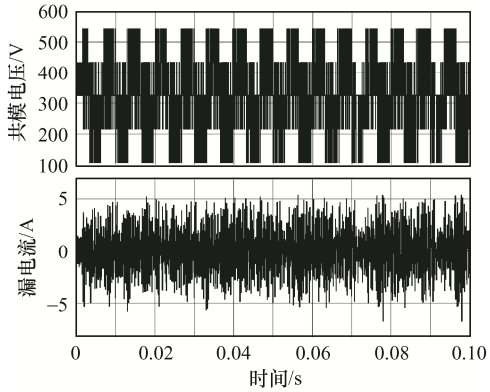
(c)并网电流快速傅里叶分解分析



(d)中点电位



(e)a相输出电压u_{aN}



(f)共模电压与漏电流

图 5 传统 MPDPC 策略仿真结果

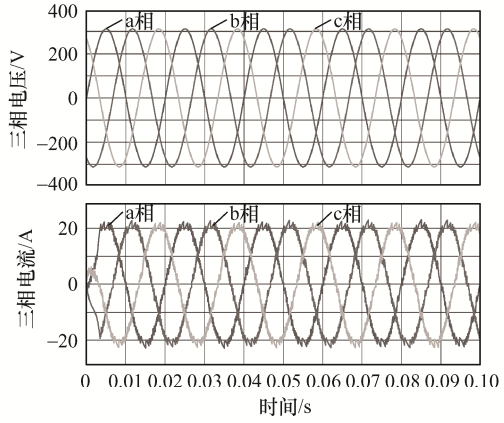
Fig. 5 Simulation results under conventional MPDPC strategy

2 种 MPDPC 策略均具有良好的电能输出效果，实现期望功率的精准跟踪，如图5(a)、(b)和图6(a)、(b)所示。由于所提策略在代价函数中增加了抑制共模电压变化率项，降低了前 2 项的占比，导致其动态性能快速性相比传统策略略差，表现在输出功率上升时间为 3.312 ms，传统策略的上升时间为 1.336 ms。此外，所提策略的误差带为 8.8%，而传统策略误差带为 6.0%。

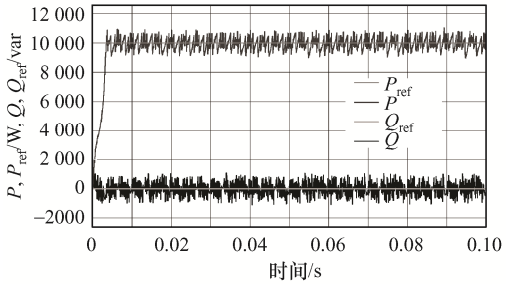
通过输出电流 THD 值来衡量电压型逆变器的输出电能质量，从图 5(c)和图 6(c)中可以看出，并网电流 THD 均在 5%左右，保持了较高的输出电流质量，结合图 5(b)和图 6(b)可以直观看出其良好的输出电能质量。

图 5(d)和图 6(d)反映了直流侧中点电位平衡

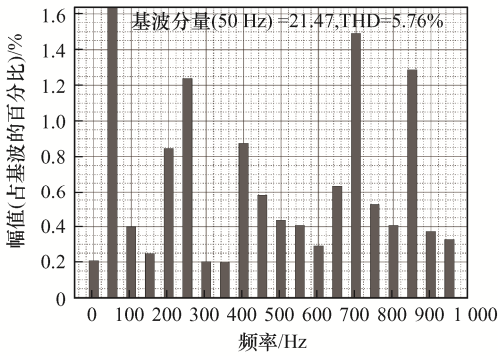
问题，传统策略由于控制目标少、牵制效果弱，中点电位的波动较为恒定，所提策略的中点电位波动有所增大，但仅在 4 V 以内，且波动稳定，系统保持稳定运行。



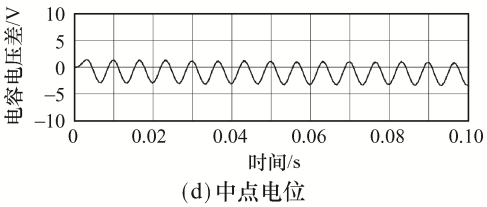
(a)并网电压与电流



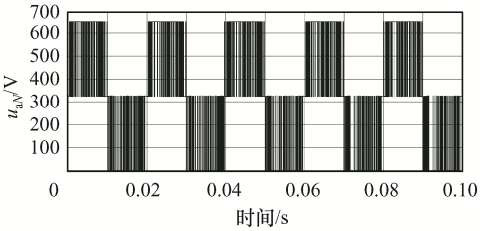
(b)输出功率与期望功率



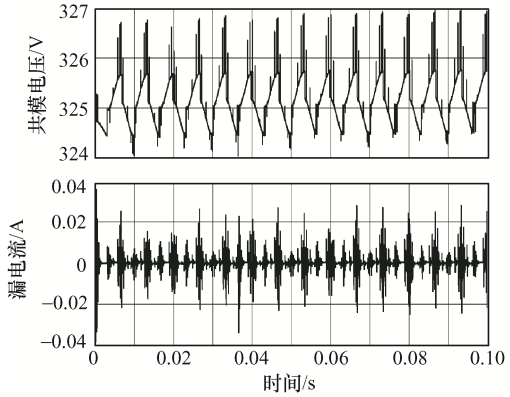
(c)并网电流快速傅里叶分解分析



(d)中点电位



(e)a相输出电压u_{aN}



(f)共模电压与漏电流

图 6　所提 MPDPC 策略仿真结果

Fig. 6 Simulation results under proposed MPDPC strategy

对比图 5(e)、(f)和图 6(e)、(f)，相比传统策略，所提策略输出单相电压波形变化频率有所降低，波形规律稳定，其输出共模电压在 325 V 左右波动，波动幅度在 2 V 以内，变化率相较传统策略明显降低。传统策略下的漏电流值很大，峰值为 6.67 A，不符合 NB/T 32004—2018《光伏并网逆变器技术规范》规定的对于额定输出小于或等于 30 kVA 的逆变器，漏电流要求不超过 300 mA。所提策略稳态时将漏电流控制在[−33.70 mA, 28.21 mA]，且大部分在±20 mA 以内，抑制效果显著，漏电流峰值仅为传统策略的 0.51%。

2 种 MPDPC 策略的输出效果对比见表 2。所提策略与传统策略相比，输出功率上升时间延长了 1.976 ms，误差带增加了 2.8%，但漏电流抑制率达 99.50%，利远大于弊，具有更高的工程应用价值。

表 2　MPDPC 策略对比

Tab. 2 Comparison between different MPDPC strategies

MPDPC	输出功率上升时间/ms	输出功率误差带/%	漏电流波动范围/mA
传统策略	1.336	6.0	[−6 670, 5 360]
所提策略	3.312	8.8	[−33.70, 28.21]

5 结论

为抑制漏电流，将输出共模电压项加入代价函数中，提出改进的模型预测直接功率控制策略。分析漏电流成因及影响因素，从共模电压变化率方向切入对漏电流进行抑制。对比传统模型预测控制策略及抑制共模电压变化率的控制策略。在保证系统稳定运行，输出电流谐波在允许范围内的前提下，将漏电流抑制到传统策略的 0.51%，大幅降低电能损耗及对人身安全的威胁。所提控制策略成本低、算法复杂度低、应用简便，具有工程应用价值。

所提控制策略算法可以进一步结合多步预测思想，减小实际应用中的预测计算延迟。模型预测控制代价函数中权重系数的求取问题仍是近年研究热点，未来可以结合相关智能算法，增设观测器，实现权重系数的自动化设计，或改进数学建模算法，实现无权重系数控制等，进一步优化模型预测控制策略，提高系统综合性能。

参考文献：

[1] Matevosyan J, Badrzadeh B, Prevost T, et al. Grid-forming inverters: Are they the key for high renewable penetration? [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2019, 17(6): 89-98.

[2] 陈冲, 贾利民, 赵天宇, 等. 去碳化导向的轨道交通与新能源融合发展: 形态模式、解决方案和使/赋能技术[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3321-3337.
Chen Chong, Jia Limin, Zhao Tianyu, et al. Decarbonization-oriented rail transportation and renewable energy integration development: Configurations, solutions, and enabling/empowering technologies [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3321-3337. (in Chinese)

[3] 傅恺宁, 涂江涛, 陈为. 高频变压器传导共模干扰分析与评估[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 37-43.
Fu Kaining, Tu Jiangtao, Chen Wei. Analysis and evaluation of conducted common-mode interference of high-frequency transformer [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 37-43. (in Chinese)

[4] 王建渊, 栗俊明, 陈晓煊, 等. 逆变器共模电压干扰及抑制措施研究[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 195-201.
Wang Jianyuan, Li Junming, Chen Xiaoxuan, et al. Study on common-mode voltage interference of inverter and corresponding suppression measures [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 195-201. (in Chinese)

[5] Xiao Huafeng. Overview of transformerless photovoltaic grid-connected inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 533-548.

[6] 肖华锋, 王晓标, 张兴, 等. 非隔离光伏并网逆变技术的现状与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1038-1054, 1397.
Xiao Huafeng, Wang Xiaobiao, Zhang Xing, et al. State-of-the-art and future trend of transformerless photovoltaic grid-connected inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1038-1054, 1397. (in Chinese)

[7] 唐婷, 石祥花, 黄如海, 等. 非隔离型光伏并网逆变器漏电流抑制机理分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(18): 25-31.
Tang Ting, Shi Xianghua, Huang Ruhai, et al. Mechanism analysis and optimization of leakage current elimination for transformerless photovoltaic grid-connected inverters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37 (18): 25-31. (in Chinese)

[8] 任康乐, 张兴, 王付胜, 等. 非隔离型三电平并网逆变器的输出滤波器优化设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 117-123.
Ren Kangle, Zhang Xing, Wang Fusheng, et al. Optimized design of output filter for transformerless three-level grid-connected inverter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3): 117-123. (in Chinese)

[9] 张志文, 周滔, 刘军, 等. 三相无变压器型 H7 光伏逆变器漏电流分析抑制[J]. 电源学报, 2018, 16(4): 107-112.
Zhang Zhiwen, Zhou Tao, Liu Jun, et al. Analysis and inhibition of leakage current for three-phase transformerless H7 photovoltaic inverter [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(4): 107-112. (in Chinese)

[10] 胡建雨, 肖文勋. 一种交错并联型单相非隔离 MOSFET 并网逆变器[J]. 电源学报, 2020, 18(5): 118-124.

Hu Jianyu, Xiao Wenxun. Interleaved parallel single-phase transformerless MOSFET grid-connected inverter [J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(5): 118-124. (in Chinese)

[11] 宋声远，唐圣学，姚芳. 基于中性点电容的三相光伏逆变器漏电流抑制[J]. 电源学报, 2022, 20(1): 83-90.
Song Shengyuan, Tang Shengxue, Yao Fang. Leakage current suppression of three-phase photovoltaic inverter based on neutral-point capacitance [J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(1): 83-90. (in Chinese)

[12] 胡雪峰，林鑫，龙子康，等. 一种无变压器和漏电流的光伏逆变器[J]. 高电压技术, 2022, 48(6): 2045-2053.
Hu Xuefeng, Lin Xin, Long Zikang, et al. A photovoltaic inverter without transformer and leakage current [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2045-2053. (in Chinese)

[13] 王宝诚，郭小强，杨勇，等. 三电平四桥臂光伏逆变器漏电流抑制研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(14): 4194-4201, 4325.
Wang Baocheng, Guo Xiaoqiang, Yang Yong, et al. Research on leakage current suppression for three-level four-leg PV inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4194-4201, 4325. (in Chinese)

[14] 郭小强，朱铁影. 新型非隔离型三相三电平光伏并网逆变器及其漏电流抑制研究[J]. 电工技术学报，2018，33(1): 26-37.
Guo Xiaoqiang, Zhu Tieying. Research on leakage current suppression of novel three-phase three-level non-isolated PV inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 26-37. (in Chinese)

[15] 张洪亮，张子成，陈杰，等. 自适应三次谐波注入的回接型 LCL 光伏逆变器共模谐振电流抑制方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 220-233.
Zhang Hongliang, Zhang Zicheng, Chen Jie, et al. Common-mode resonant current suppression for back-connected LCL photovoltaic inverter using adaptive third harmonic injection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 220-233. (in Chinese)

[16] 何杰，刘钰山，毕大强，等. 开关变换器传导干扰抑制策略综述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(6): 1455-1472.
He Jie, Liu Yushan, Bi Daqiang, et al. Review of conducted electromagnetic interference suppression strategies for switching converters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1455-1472. (in Chinese)

[17] 吴可丽，夏长亮，张云，等. 二极管钳位型三电平逆变器共模电压抑制[J]. 电工技术学报，2015，30(24): 110-117, 170.
Wu Keli, Xia Changliang, Zhang Yun, et al. Common-mode voltage suppression for neutral-point-clamped three-level inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 110-117, 170. (in Chinese)

[18] 吕佃顺，许洪华. 二极管箝位三电平逆变器共模电压抑制技术[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 66-73.
Lü Dianshun, Xu Honghua. Common-mode voltage mitigation of diode clamped three-level inverter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 66-73. (in Chinese)

[19] 邱继浪，何英杰，焦乾明，等. 非隔离型三电平逆变器漏电流抑制与中点电位平衡控制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 161-170.
Qiu Jilang, He Yingjie, Jiao Qianming, et al. Leakage current suppression and balance control of neutral point potential for three-level transformerless inverter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 161-170. (in Chinese)

[20] 李善寿，陶勇，叶伟，等. 抑制 T 型三电平逆变器共模电压的调制策略[J]. 高电压技术，2022，48(7): 2826-2839.
Li Shanshou, Tao Yong, Ye Wei, et al. Modulation strategy with reduced common mode voltage for T-type three-level inverter [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2826-2839. (in Chinese)

[21] 叶少茜，张希，朱翀. 兼顾共模电压抑制与中性点电压平衡的 T 型三电平逆变器 DPWM 策略[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 133-142.
Ye Shaoqian, Zhang Xi, Zhu Chong. DPWM strategy for T-type three-level inverter considering common-mode voltage reduction and neutral-point voltage balance [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 133-142. (in Chinese)

[22] Xing Xiangyang, Li Xiaoyan, Gao Feng, et al. Improved space vector modulation technique for neutral-point voltage oscillation and common-mode voltage reduction in three-level inverter [J]. IEEE Transactions on Power

Electronics, 2019, 34(9): 8697-8714.

[23] 柳志飞, 杜贵平, 杜发达. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 58-69.
Liu Zhifei, Du Guiping, Du Fada. Research status and development trend of finite control set model predictive control in power electronics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 58-69. (in Chinese)

[24] 芮涛, 尹政, 汪凤翔, 等. 基于双矢量的并网逆变器无模型预测电流控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3759-3768.
Rui Tao, Yin Zheng, Wang Fengxiang, et al. Model-free predictive current control strategy of grid-connected inverter based on double-vector [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3759-3768. (in Chinese)

[25] 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. (in Chinese)

[26] 刘述喜, 任海峰, 郭强, 等. 基于三矢量的并网逆变器模型预测直接功率控制[J]. 电源学报, 2023, 21(1): 107-117.
Liu Shuxi, Ren Haifeng, Guo Qiang, et al. Three-vector-based model predictive direct power control for grid-connected inverter [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(1): 107-117. (in Chinese)

[27] Wang Xiaodong, Liu Xin, Mo Zhaohong, et al. Novel model predictive direct power control strategy for grid-connected three-level inverters [J]. IET Power Electronics, 2020, 13(16): 3727-3733.

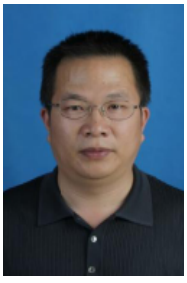
[28] Scoltock J, Geyer T, Madawala U K. Model predictive direct power control for grid-connected NPC converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5319-5328.

[29] 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.

[30] 陈强, 任浩翰, 杨志超, 等. 三相并网逆变器改进型直接功率预测控制[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 100-105.
Chen Qiang, Ren Haohan, Yang Zhichao, et al. Improved predictive direct power control of three-phase grid-connected inverter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 100-105. (in Chinese)

[31] 孙全增, 张志锋. 双三相永磁同步电机低共模电压模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3708-3722.
Sun QuanZeng, Zhang ZhiFeng. Low common-mode voltage model predictive current control for dual three-phase permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3708-3722. (in Chinese)

[32] Gao Fengyang, Yang Kaiwen, Luo Yinhang, et al. Model predictive direct power control strategy for leakage current suppression on a grid-connected three-level inverter [J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2022, 50(7): 2471-2489.



高锋阳

作者简介：

高锋阳(1970—)，男，中国电源学会高级会员，硕士，教授。研究方向：大功率电源及牵引电机系统。E-mail：ljdgaofy@lzjtu.edu.cn。

杨凯文(1997—)，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：电力电子变换器电磁兼容及模型预测控制。E-mail：kaiweny1997@163.com。

宋志翔(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向：牵引供电系统和“源-网-荷-储”。E-mail：402215819@qq. com。

高翾宇(1998—)，女，硕士研究生。研究方向：新型城轨列车的车载储能技术。E-mail：245463970@qq.com。

高建宁(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：永磁同步电机多物理场耦合研究和结构多目标优化设计。E-mail：321513897@qq.com。

(责任编辑：耿越)