

基于 SVPWM 算法的三相光伏并网 逆变器控制方法

叶 杉

(国网北京市电力公司亦庄供电公司)

摘要：逆变器控制是三相光伏并网稳定性和安全性的重要保证，是三相光伏并网技术的核心，但现行方法控制效果并不理想，不仅三相光伏并网谐波电流比较高，而且逆变器超调量也比较大，无法达到预期的控制效果，为此提出基于 SVPWM 算法的三相光伏并网逆变器控制方法。根据基尔霍夫电压电流定律对三相光伏并网逆变器数学模型推导，描述逆变器运行状态，根据空间矢量的夹角判断参考电压所在扇区，利用 SVPWM 算法通过改变脉冲宽度，依据相邻的电压两个工作电压矢量和零矢量合成逆变器参考电压，作为逆变器控制量，实现基于 SVPWM 算法的三相光伏并网逆变器控制。经实验证明，设计方法应用下三相光伏并网谐波电流不超过 1A，超调量不超过 0.1%，可以实现对三相光伏并网逆变器精准控制。

关键词：SVPWM 算法；逆变器；基尔霍夫电压电流定律；空间矢量；扇区；参考电压

0 引言

光伏发电的输出功率具有间歇性和波动性的特点，这使得光伏发电系统并网运行时对电网的稳定性和电能质量会产生一定的影响。因此，研究光伏并网逆变器的控制方法，提高光伏发电系统的并网性能，具有十分重要的理论和现实意义^[1]。三相光伏并网逆变器控制方法的优劣直接影响到光伏发电系统的并网效果和电网的稳定性。传统的三相光伏并网逆变器控制方法主要包括双重约束控制、无网压传感器控制等。然而，这些方法在应对光伏发电系统的复杂性和多变性时存在一定的局限性。例如，双重约束控制方法虽然能够保持输出电压的稳定，但无法实现对有功功率和无功功率的灵活控制；无网压传感器控制方法

虽然能够最大限度地提高光伏电池的输出功率，但在光照强度变化较大时，容易导致逆变器输出电压和电流的波动。空间矢量脉宽调制（SVPWM）算法是一种高效、高性能的逆变器控制策略，它基于电压空间矢量的概念，通过合理地组合基本电压空间矢量，形成所需的输出波形，为此提出基于 SVPWM 算法的三相光伏并网逆变器控制方法。

1 建立三相光伏逆变器数学模型

确保构建的并网逆变器数学模型能够更加精确且贴近实际情况，作出如下假设：

假设 1：关于电网电压，假设其为无谐波的纯正弦波。这意味着在建模过程中，忽略电网中可能存在

的谐波干扰，从而简化模型并提高计算效率。这样的假设在实际应用中通常是合理的，因为电网电压在大多数情况下都是相对稳定的正弦波。

假设 2：假设网侧滤波电感在运行时保持线性状态为不饱和。这意味着滤波电感在工作过程中，其电感值保持恒定，不会因为电流过大或其他因素而发生变化^[2]。这样的假设有助于在建模时更准确地描述电感的行为，并减少由于电感非线性引起的误差。

假设 3：假设功率开关管是理想开关器件，无寄生电阻与死区。这意味着开关管在开关过程中没有能量损耗，且能够瞬间完成开关动作，不存在死区时间。这样的假设简化了模型，能够更专注于逆变器本身的控制策略与性能分析。

假设 4：假设三相回路参数严格对称。这意味着在逆变器中，三相之间的电路参数如电感、电容等是完全相同的，不存在任何偏差。这样的假设有助于在建模时简化计算，并使得模型更加易于分析和理解。根据以上假设构建三相光伏并网逆变器拓扑模型如图 1 所示。

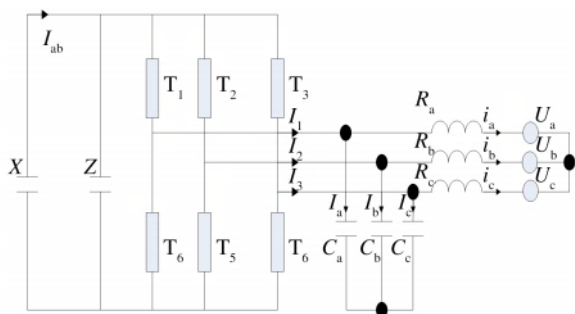


图 1 三相光伏并网逆变器拓扑图

如图 1 所示， X 为三相光伏并网逆变器直流侧电压； Z 为逆变器直流侧电容； $T_1 \sim T_6$ 为逆变器开关管； I_{ab} 为逆变器直流侧电流； I_a 、 I_b 、 I_c 分别为三相滤波电容支路电流； I_1 、 I_2 、 I_3 分别为对应的三相交流侧输出电流； R_a 、 R_b 、 R_c 分别为三相光伏并网变

器滤波电感； i_a 、 i_b 、 i_c 分别为三相光伏并网电流； U_a 、 U_b 、 U_c 分别为三相光伏并网电压^[3]。根据以上搭建的逆变器拓扑结构可知，三相光伏并网逆变器的上桥臂和下桥臂不能同时导通，因此逆变器开关函数：

$$T_k = \begin{cases} 1, & \text{上桥臂导通, 下桥臂导通} \\ 0, & \text{下桥臂导通, 上桥臂导通} \end{cases} \quad (1)$$

式中， k 为逆变器开关数量；1 为逆变器开关开启；0 为逆变器开关关闭^[4]。根据基尔霍夫电压电流定律这一基础的电路分析原理，进一步推导出三相光伏并网逆变器网侧输出电流方程、逆变输出侧电流方程以及滤波电容电压方程^[5]。推导出网侧输出电流的数学表达式描述逆变器与电网之间的电流关系，是控制逆变器并网性能的关键^[6]。同时，推导出逆变输出侧的电流方程，这个方程反映逆变器内部电流的分布和变化情况，对于逆变器的稳定运行和效率优化至关重要。滤波电容电压方程描述滤波电容上的电压变化情况，综合三相光伏并网逆变器网侧输出电流方程、逆变输出侧电流方程以及滤波电容电压方程，可以得到三相光伏并网坐标系下逆变器数学模型为：

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{L_{ab}} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \\ \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{1}{C_k} \begin{bmatrix} U_a - i_a \\ U_b - i_b \\ U_c - i_c \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

根据式 (2) 可知，在当前的坐标系下，三相光伏并网逆变器的数学模型展现出了明确的物理意义，可以描述出并网过程中逆变器的运行状态。

2 参考电压所在扇区判断

根据建立的逆变器数学模型描述的运行状态,判断三相光伏并网过程中电压矢量是否发生误差,当出现异常状态时采用 SVPWM 算法对逆变器控制。SVPWM 算法通过改变脉冲宽度来实现对逆变器输出电流和电压的精确控制。其原理在于,利用相邻的两个工作电压矢量和零矢量,根据平行四边形规则,合成一个有效的参考电压矢量。通过控制这些工作电压矢量的工作时间,可以合成出任意方向的参考电压矢量,使电压矢量按照近似圆形的轨迹运行,从而得到近似圆形的磁链轨迹^[7]。在利用 SVPWM 算法对逆变器控制之前,需要根据空间矢量的夹角判断参考电压所在扇区^[8]。具体来说,当需要合成一个参考电压矢量时,利用相邻的工作电压矢量和零电压矢量进行合成。而为了确定使用哪些工作电压矢量,就需要进行扇区判断。扇区判断的依据是参考电压矢量与各个基本空间矢量的夹角关系^[9]。通过判断夹角,可以确定参考电压矢量位于哪个扇区,进而确定应该使用哪些基本空间矢量进行合成。通常情况下参考电压矢量幅值是三相光伏并网电压的 1.5 倍,则三相光伏并网正弦电压为:

$$\begin{cases} U_A = \frac{2}{3}U_a \cos \alpha \\ U_B = \frac{2}{3}U_b \cos \alpha \\ U_C = \frac{2}{3}U_c \cos \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中, U_A 、 U_B 、 U_C 分别为三相光伏并网正弦电压; α 为相角^[10]。将一个电源周期按照每个区间占有 60° 分成六个扇区,根据三相正弦电压计算出光伏坐标系下相邻两相水平方向间距,其用公式表示为:

$$\begin{cases} X_{ab} = \ln(U_a - U_b) \\ X_{bc} = \ln(U_b - U_c) \\ X_{ac} = \ln(U_a - U_c) \end{cases} \quad (4)$$

式中, X_{ab} 、 X_{bc} 、 X_{ac} 分别为光伏坐标系下 a 相 b 相、b 相 c 相、c 相 a 相水平间距。由此可以得到参考电压矢量所在扇区判断条件,用公式表示为:

$$H = 3X_{ab} + \frac{1}{2}X_{bc} + 2X_{ac} \quad (5)$$

式中, H 为扇区判断条件。根据 H 值确定参考电压矢量所在扇区,对应关系如表 1 所示。

表 1 H 与六扇区对应关系

序号	H 值	扇区
1	3	第一扇区
2	2	第二扇区
3	4	第三扇区
4	6	第四扇区
5	5	第五扇区
6	1	第六扇区

根据表 1 即可判断出参考电压所在扇区,为后续基于 SVPWM 算法的逆变器调控奠定基础。

3 基于 SVPWM 算法的逆变器调控

在上述基础上,利用 SVPWM 算法对参考电压扇区相邻的电压(两个工作电压矢量和零矢量)合成一个有效参考电压,作为三相光伏并网逆变器控制量。根据建立的逆变器数学模型可知,三相光伏并网逆变器存在六个功率开关管,因此共存在 8 种开关状态,开关状态与逆变器电压矢量关系如表 2 所示。

表 2 逆变器开关管状态与电压矢量关系表

T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	电压矢量
0	0	0	0	0	1	Y_0
0	0	0	0	1	0	Y_1
0	0	0	1	0	0	Y_2
0	0	0	1	1	0	Y_3
0	0	1	1	1	0	Y_4
0	1	0	0	0	1	Y_5
1	0	1	0	1	0	Y_6

如表 2 所示, Y_0 和 Y_6 为零电压矢量, $Y_1 \sim Y_5$ 将电压矢量复平面等分为六个扇区,参考电压矢量转到

任意一个扇区时均能由该扇区两侧相邻的电压矢量和零矢量合成，但是需要保证参考电压矢量要始终保持匀速旋转。假设参考电压所在扇区相邻两侧电压矢量和零矢量的作用时间分别为 t_1 、 t_2 、 t_0 ，其需要满足以下条件：

$$\frac{t_1 + t_2}{t_0} = T_{\text{SVPWM}} \quad (6)$$

式中， T_{SVPWM} 为三相光伏并网逆变器 SVPWM 控制周期。根据平衡等效原理可以得到：

$$T_{\text{SVPWM}} Y_u = t_1 \rho_A + t_2 \rho_B + t_0 \rho_C \quad (7)$$

式中， Y_u 为三相光伏并网逆变器参考电压； ρ_A 、 ρ_B 、 ρ_C 分别为参考电压所在扇区两侧相邻有效电压矢量和零矢量。利用以上公式生成三相光伏并网逆变器参考电压，每个 SVPWM 周期内生成一个参考电压，将其作为控制量导入到逆变器数学模型中，对三相光伏并网逆变器优化，以此实现基于 SVPWM 算法的三相光伏并网逆变器控制。

4 实验论证

4.1 实验准备与设计

为验证本文所提出的基于 SVPWM 算法的三相光伏并网逆变器控制方法的有效性与可靠性，以某三相光伏电站为实验对象。该光伏电站是一个典型的三相并网光伏系统，主要用于将光伏阵列产生的直流电转换为可并入公共电网的交流电。通过采用先进的逆变技术和控制策略，电站能够实现高效、稳定的并网运行。光伏电站的逆变器能够将直流母线上的直流电转换为符合电网要求的交流电，同时实现对输出电压、频率和相位的精准控制。在实验前，对该光伏电站的逆变器进行详细的参数设置和校准，确保实验条件的准确性和可重复性。具体参数如下：

逆变器滤波电感为 0.5mH，滤波电容为 120μF，直流侧电压为 400V，电网频率为 45.54Hz，开关频率

为 85.25Hz，额定功率为 5MW，开关角个数为 8，死亡区间为 20μs。采样过程中，采用高精度的采样设备，将采样频率设置为 1.25kHz，以捕捉光伏并网过程中电流和电压的细微变化。采集的电流电压信号经过 SVPWM 处理后，输出 PWM 信号，对三相光伏并网过程中的逆变器进行实时控制。

在实验过程中，重点关注逆变器在并网过程中的动态性能和稳态性能。启动阶段，由于直流侧电压稳定在 400V，SVPWM 算法迅速计算出合适的开关序列，确保逆变器输出的交流电在不到 0.5s 内与公共电网的电压、频率和相位同步，展现了其快速响应能力。在模拟光照强度从 1000W/m² 突降至 500W/m² 的情况下，SVPWM 算法通过调整 PWM 信号的占空比，迅速稳定了直流侧电压，保证了并网电流的稳定性和谐波含量在可接受范围内。同时，在模拟电网频率从 50Hz 突然降低至 45.54Hz 的故障情况下，逆变器在 SVPWM 算法的控制下，于 0.2s 内完成了调整，维持了并网电流的稳定性和相位同步。在稳态运行阶段，监测数据显示，采用 SVPWM 算法的逆变器总谐波失真低于 2%，功率因数接近 1，展现了优异的电能量质量。此外，在额定功率为 5MW 的条件下，逆变器的效率高达 98.5%，证明了 SVPWM 算法对于提升效率的有效性。同时，实验表明，当开关频率设置为 85.25Hz、开关角个数为 8 时，逆变器不仅保持高性能，还具有较低的开关损耗和良好的电磁兼容性。

4.2 实验结果与讨论

实验的主要目的是通过对逆变器进行精准补偿控制，来抑制光伏并网产生的谐波电流，从而确保光伏并网系统的稳定运行。为了量化评价控制方法的性能，选择三相光伏并网谐波电流和超调量作为关键评价指标，表 3 统计三相光伏并网谐波 80 次的平均谐波电流情况，表 4 统计八组实验中光伏并网逆变器超调量。

表 3 三相光伏并网谐波电流 (A)

谐波次数/次	设计方法	传统方法 1	传统方法 2
10	0.06	5.16	3.15
20	0.08	5.42	3.36
30	0.14	5.36	3.52
40	0.15	5.42	3.89
50	0.16	5.45	3.94
60	0.16	5.46	3.85
70	0.18	5.59	3.95
80	0.17	5.68	3.88

表 4 三相光伏并网逆变器超调量 (%)

实验组别	设计方法	传统方法 1	传统方法 2
第一组	0.01	2.61	1.16
第二组	0.02	2.25	1.25
第三组	0.05	2.34	1.52
第四组	0.04	2.54	1.69
第五组	0.06	2.59	1.75
第六组	0.04	2.58	1.85
第七组	0.05	2.54	1.69
第八组	0.06	2.62	1.15

对比表 3、表 4 中数据可以得出实验结论：在设计方法应用下，三相光伏并网谐波电流显著低于传统方法，且未超过 1A，远低于通常认为的对电站产生谐波影响的阈值。设计方法的超调量远低于传统方法，表明设计方法在逆变器调控方面的精准性和稳定性更高。相比于传统方法 1，传统方法 2 在谐波电流和超调量方面也有一定改善，但仍不及设计方法。因此，实验证明本文所提的基于 SVPWM 算法的三相光伏并网逆变器控制方法更适用于三相光伏并网逆变器控制，能够有效保证光伏并网的稳定性和安全性。

5 结束语

经过对基于 SVPWM 算法的三相光伏并网逆变器控制方法的深入研究和探讨，发现这一控制策略在提升光伏发电系统并网性能、优化电能质量以及增强系统稳定性方面展现出显著的优势。通过 SVPWM 算法的应用，不仅提高了直流电压利用率，降低了电流谐

波，还实现了对有功功率和无功功率的灵活控制，从而提升光伏发电系统的整体运行效率。通过仿真和实验验证，进一步证明基于 SVPWM 算法的三相光伏并网逆变器控制方法的有效性和优越性。与其他控制方法相比，该方法在多种运行条件下均表现出良好的性能表现和适应性，为光伏发电系统的稳定并网运行提供了有力的技术支持。

参考文献

- [1] 杨清, 黄景涛, 关海平. 基于 SVPWM 补偿优化的三电平 NPC 并网逆变器容错控制 [J]. 电力工程技术, 2024, 43 (2): 199-209.
- [2] 曹文平, 王尧, 张悦, 等. 计及采样噪声补偿的并网逆变器三矢量无模型预测电流控制方法 [J/OL]. 上海交通大学学报, 1-20[2024-10-15]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.499>.
- [3] 闫军, 胡云鹏, 刘鉴钧, 等. 结合参数辨识和牛顿插值的并网逆变器延时补偿策略 [J/OL]. 现代电力, 1-8[2024-10-15]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2023.0135>.
- [4] 方健, 李辉. 基于状态重构谐振扩张状态观测器的 LCL 型并网逆变器电流控制策略研究 [J]. 发电技术, 2024, 45 (1): 170-179.
- [5] 陈志刚, 高冰, 李滨, 等. 基于双重约束的并网逆变器电流自动化控制方法研究 [J]. 自动化与仪表, 2024, 39 (2): 30-34.
- [6] 王晓东, 倪喜军, 王宪萍, 等. 基于广义积分器二自由度 PID 控制的 LCL 逆变器 [J]. 电子器件, 2024, 47 (1): 164-169.

(下转第 67 页)