

基于模型预测控制算法的NPC三电平逆变器

钱金跃, 杨玉锐, 姚强, 崔寅, 陶琨, 吴伟健, 陆佳晨, 缪薇, 李德猛

(国网浙江省电力有限公司平湖市供电公司, 浙江 平湖 314200)

摘要: 应用于二极管箝位型 (neutral point clamped, NPC) 三电平逆变器的空间矢量脉宽调制 (space Vector pulse width modulation, SVPWM) 方法, 由于零矢量参与调制或滚动优化, 无法有效降低共模电压 (common-mode voltage, CMV), 且运算时间长。针对上述问题, 提出一种综合考虑中点电位、开关频率和共模电压的模型预测控制算法。首先, 建立NPC三电平逆变器的负载电流、中点电位离散化数学预测模型。然后, 构建中点电位、开关频率、CMV的多约束目标函数, 滚动筛选最优矢量作用NPC三电平逆变器, 降低共模电压且减少运行时间。最后, 在MATLAB/SIMULINK平台搭建仿真模型, 并对算法的运行性能进行验证。

关键词: NPC三电平逆变器; 中点电位; 共模电压; 模型预测控制; 仿真

中图分类号: TM475

NPC Three-Level Inverter Based on Model Predictive Control Algorithm

QIAN Jinyue, YANG Yurui, YAO Qiang, CUI Yin, TAO Kun, WU Weijian, LU Jiachen, MIAO Wei, LI Demeng
(Pinghu Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhejiang Pinghu 314200, China)

Abstract: The space vector pulse width modulation (SVPWM) method applied to the neutral point clamped (NPC) three-level inverter cannot effectively reduce the common mode voltage (CMV) due to the zero vector participating in the modulation or rolling optimization, and the operation time is long. To solve the above problems, a model predictive control algorithm considering neutral point potential, switching frequency and common mode voltage is proposed in this paper. Firstly, the discrete mathematical prediction model of load current and neutral point potential of NPC three-level inverter is established. Then, the multi constraint objective functions of neutral point potential, switching frequency and CMV are constructed, and the optimal vector is selected to act on NPC three-level inverter, reducing common mode voltage and running time. Finally, the simulation model is built on matlab/simulink platform, and the performance of the algorithm is verified.

Key words: NPC three-level inverter; neutral point potential; common mode voltage; model predictive control; simulation

二极管箝位型 (Neutral point clamped, NPC) 三电平逆变器以其低谐波输出、低开关损耗、低器件耐压水平等优点, 被广泛应用于大功率并网控制系统、电力传动系统^[1]。但是NPC型三电平逆变器存在固有缺点, 当中点电位平衡, 同一桥臂上下两个开关管仅承受一半的直流电压; 当中点电位不平衡, 同一桥臂上下两个开关管分别承受不同电压, 将降低开关管使用寿命, 甚至烧毁开关管, 并增加交流侧输出电压的谐波含量。因此, 如何有效控制中点电位平衡一直是学术界研究热点。

软件控制和硬件改造是控制NPC型三电平逆变器中点电位平衡的两种方法。文献[2]研究了合理分配冗余小矢量控制中点电流流向以实现中点电位平衡, 但计算相对复杂, 执行时间较长。文献[3]通过

收稿日期: 2022-05-25

额外增加桥臂的硬件方法控制中点电位, 但是成本昂贵、占地面积大。文献[4]采用的算法虽然减少计算量, 但是器件具有较高的开关频率, 忽视了开关损耗。

应用于驱动领域的NPC三电平逆变器较为突出问题为高频共模电压 (common-mode voltage, CMV), 其在电动机转轴上感应高振幅轴电压并产生轴电流, 破坏绝缘、腐蚀电机、缩短寿命^[5]。此外, 高频漏电流 (高频CMV产生) 会产生电磁干扰, 影响设备正常运行^[6]。

综合考虑成本和体积因素, 软件控制是首选。近年来, 模型预测控制 (model predictive control, MPC) 被广泛应用于现代电力电子领域^[7], 其响应速度快, 适用于多变量和非线性系统, 在许多领域都被证明其优于传统方法。其在NPC型三电平逆变器中点电位的不平衡控制中, 主要以离散化系统数

学模型为基础,根据历史输出预测未来输出,并结合目标函数滚动筛选最优开关状态的控制算法。

本文提出一种综合考虑中点电位、开关频率和共模电压的模型预测控制算法。首先,建立NPC三电平逆变器的负载电流、中点电位离散化数学预测模型。然后,基于MPC适用于多变量和非线性系统,构建中点电位、开关频率、CMV的多约束目标函数,滚动筛选最优矢量作用NPC三电平逆变器,降低共模电压且减少运行时间。最后,在MATLAB/SIMULINK平台搭建NPC三电平逆变器仿真模型,并对算法的运行性能进行验证。

1 NPC三电平逆变器

1.1 工作原理

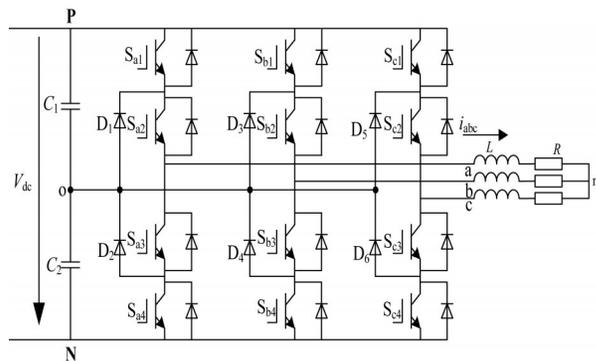


图1 NPC三电平逆变器拓扑结构

RL负载的NPC三电平逆变器拓扑结构如图1所示,其中每个桥臂包含四个IGBT开关器件和两个箝位二极管。直流侧两个电容中点(记作“O”点)连接两个箝位二极管的中点,其中“O”点为零电位参考点。

由图1可知,每相桥臂的开关 S_{a1} 和 S_{a3} (S_{a2} 和 S_{a4})不能同时导通,因此每相桥臂只有三种开关状态,即P、O、N状态。假设用 $\{1, 0, -1\}$ 表示上述状态,输出电压用 v_{ao} 表示,“1”代表 v_{ao} 为 $V_{dc}/2$,“0”代表 v_{ao} 为0,“-1”代表 v_{ao} 为 $-V_{dc}/2$ 。定义开关函数如式(1)所示:

$$S_i = \begin{cases} 1, S_{i1}, S_{i2} \text{通}, S_{i3}, S_{i4} \text{断} \\ 0, S_{i2}, S_{i3} \text{通}, S_{i1}, S_{i4} \text{断} \\ -1, S_{i1}, S_{i2} \text{通}, S_{i3}, S_{i4} \text{断} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i = a, b, c$ 。

为了简述表达每相的三个工作状态与 v_{ao} 的关系,上述分析如表1所示。

表1 每相工作状态与输出电压 v_{ao}

工作状态	开关状态				输出电压
	$S_{\alpha 1}$	$S_{\alpha 2}$	$S_{\alpha 3}$	$S_{\alpha 4}$	
P	1	1	0	0	$V_{dc}/2$
O	0	1	1	0	0
N	0	0	1	1	$-V_{dc}/2$

注: $\alpha = a, b, c$

1.2 数学模型

由图1可知,直流侧两个电容中点“O”为零电位参考点,因此 $\alpha\beta$ 坐标系下的三相输出电压为:

$$u_{\alpha, \beta} = \frac{2}{3} (u_{an} + \alpha u_{bn} + \alpha^2 u_{cn}) \quad (2)$$

式中: $\alpha = e^{j2\pi/3}$; $u_{\alpha, \beta} = u_{\alpha} + ju_{\beta}$, u_{α} 和 u_{β} 是 $\alpha\beta$ 坐标系下 $u_{\alpha, \beta}$ 的实部与虚部; u_{an} 、 u_{bn} 、 u_{cn} 是abc坐标系下三相输出电压,且 $\in \{V_{dc}/2, 0, -V_{dc}/2\}$ 。

同理, $\alpha\beta$ 坐标系下的三相负载电流为:

$$i_{\alpha, \beta} = \frac{2}{3} (i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c) \quad (3)$$

式中: $\alpha = e^{j2\pi/3}$; $i_{\alpha, \beta} = i_{\alpha} + ji_{\beta}$, i_{α} 和 i_{β} 是 $\alpha\beta$ 坐标系下 $i_{\alpha, \beta}$ 的实部与虚部; i_a 、 i_b 、 i_c 是abc坐标系下三相负载电流。

因此,连续时域下的NPC型三电平逆变器数学模型为:

$$u_{\alpha, \beta} = L \frac{di_{\alpha, \beta}}{dt} + Ri_{\alpha, \beta} \quad (4)$$

式中: R 为负载电阻; L 为负载电感。

在一个采样周期 T_s 内,采用一阶欧拉公式(式(6)离散化式(5),可得第 $(k+1)$ 时刻的预测电流,如式(7)所示。

$$\frac{dx(t)}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad (5)$$

$$i_{\alpha, \beta}^p(k+1) = i_{\alpha, \beta}(k+1) = \left[1 - \frac{T_s R}{L} \right] i_{\alpha, \beta}^p(k) + \frac{T_s}{L} u_{\alpha, \beta}(k) \quad (6)$$

式中:上标“p”为预测值; k 为第 k 个采样周期; $i_{\alpha, \beta}(k)$ 为第 k 次采样电流。

2 中点电位不平衡及开关频率

2.1 不平衡分析

不对称的三相负载、不同的电容参数、不同空间电压矢量作用下不对称的流出和流入电流都会导

致直流侧上下两个分压电容的不平衡。相关文献详细分析了零矢量、小矢量、中矢量和矢量对中点电位不平衡的影响,并得出结论:中点电位波动的本质是由于小矢量或中矢量作用下产生中点电流*i_o*,且*i_o*与*i_a*、*i_b*、*i_c*的关系为:

$$i_o = (1 - |S_a|)i_a + (1 - |S_b|)i_b + (1 - |S_c|)i_c \quad (7)$$

由1.1节可知,中点“O”为零电位参考点,故*u_o*为零电位点。直流侧上下两个分压电容流过的电流方向及中点电流的流向如图4所示,*i₁*表示流过上分压电容电流,*i₂*表示流过下分压电容电流,*i_o*表示中点电流,以图中所标方向为正方向。

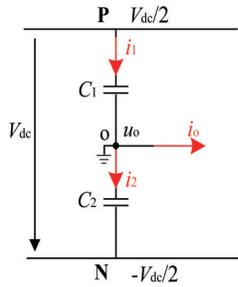


图2 不平衡分析

假设 $C_1 = C_2 = C$, 则 C_1 承受的电压为 v_{dc1} , C_2 承受的电压为 v_{dc2} , 则 i_1 和 i_2 可表示为:

$$i_1 = C_1 \frac{d(V_{dc}/2 - u_o)}{dt} \quad (8)$$

$$i_2 = C_2 \frac{d(u_o - V_{dc}/2)}{dt} \quad (9)$$

在零电位参考点“O”处应用基尔霍夫电流定律,故*i_o*可表示为:

$$i_1 - i_2 = C \frac{d(V_{dc}/2 - u_o)}{dt} - C \frac{d(u_o - V_{dc}/2)}{dt} i_{o'} \quad (10)$$

将式(7)代入式(10),并应用式(6)离散化,可得:

$$u_o^p(k+1) = u_o(k) -$$

$$\frac{T_s}{2C} \cdot [(1 - |S_a|)i_a + (1 - |S_b|)i_b + (1 - |S_c|)i_c] \quad (14)$$

其中:*u_o*(*k*)是第*k*时刻零电位值。

因此,根据式(11)可预测第(*k*+1)时刻的零电位值。

2.2 开关频率分析

降低开关频率通过选择第*k*-1时刻和第*k*时刻开关状态变换最少的空间电压矢量,减少器件频繁投切的次数,延长器件使用寿命。定义从第*k*-1时

刻到第*k*时刻的一个周期内开关切换次数为开关频率,可表示为:

$$S_{switch} = |S_a(k) - S_a(k-1)| + |S_b(k) - S_b(k-1)| + |S_c(k) - S_c(k-1)| \quad (12)$$

其中:*S_j*(*k*)(*j*=a,b,c)表示第*k*时刻的开关状态,*S_j*(*k*-1)表示第(*k*-1)时刻的开关状态。

2.3 共模电压分析

由表1可知,输出相电压可由开关函数表示为

$$\begin{cases} u_{ao} = \frac{1}{2} V_{dc} S_a, \\ u_{bo} = \frac{1}{2} V_{dc} S_b, \\ u_{co} = \frac{1}{2} V_{dc} S_c. \end{cases} \quad (13)$$

在图1中,定义“n”和“o”之间的电位差为共模电压(*u_{com}*),理想情况下,三相负载电流*i_a*+*i_b*+*i_c*=0,根据基尔霍夫电压定律可将*u_{com}*可表示为

$$u_{com} = \frac{1}{3} V_{dc} (u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \quad (14)$$

将式(13)代入式(14),*u_{com}*可表示为

$$u_{com} = \frac{1}{6} V_{dc} (S_a + S_b + S_c) \quad (15)$$

由式(15)可知,*u_{com}*由开关状态决定,每个开关状态对应的*u_{com}*如表2所示。

表2 开关状态和共模电压之间的关系

矢量	开关状态	<i>u_{com}</i>
大矢量	[1 -1 -1] [-1 1 -1] [-1 -1 1]	- <i>V_{dc}</i> /6
	[1 1 -1] [-1 1 1] [1 -1 1]	<i>V_{dc}</i> /6
中矢量	[1 0 -1] [0 1 -1] [-1 1 0]	0
	[-1 0 1] [0 -1 1] [1 -1 0]	
正小矢量	[0 -1 -1] [-1 0 -1] [-1 -1 0]	- <i>V_{dc}</i> /3
	[1 1 0] [0 1 1] [1 0 1]	<i>V_{dc}</i> /3
负小矢量	[1 0 0] [0 1 0] [0 0 1]	<i>V_{dc}</i> /6
	[0 0 -1] [-1 0 0] [0 -1 0]	- <i>V_{dc}</i> /6
零矢量	[-1 -1 -1]	- <i>V_{dc}</i> /2
	[1 1 1]	<i>V_{dc}</i> /2
	[0 0 0]	0

由表2可知,27个开关状态共对应7个不同的*u_{com}*,最小值为0,最大值为|*V_{dc}*/2|。

3 模型预测控制

3.1 目标函数

MPC算法的灵活性和适用性主要表现为可将多

个控制目标、控制变量及约束条件整合在一个目标函数，但是不同的控制目标存在不同的数量级或者优先级，因此需要在目标函数中引入权重因子 λ ，本文定义中点电位，开关频率以及共模电压的权重因子分别为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 。对于NPC型三电平逆变器，保证中点电位是其正常运行的关键，故 $\lambda_1 \neq 0$ ，考虑控制优先级顺序（依次为中点电位控制、CMV限制、开关频率），故设置 $\lambda_1 > \lambda_2 = \lambda_3 > 0$ 。

综合上述分析，本文定义目标函数为：

$$g = |i_a^*(k+1) - i_a^p(k+1)| + |i_b^*(k+1) - i_b^p(k+1)| + \lambda_1 |u_o^p(k+1)| + \lambda_2 S_{\text{switch}} + \lambda_3 |u_{\text{com}}| \quad (16)$$

式中： $i_a^p(k+1)$ 、 $i_b^p(k+1)$ 、 $i_a^*(k+1)$ 和 $i_b^*(k+1)$ 分别是 $\alpha\beta$ 坐标系下 $k+1$ 时刻的负载电流预测值和参考值； λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别是3个不同约束的权重因子； S_{switch} 如式(15)所示； u_{com} 如式(20)所示。

3.2 控制策略

图3为NPC型三电平逆变器模型预测控制算法结构框图。

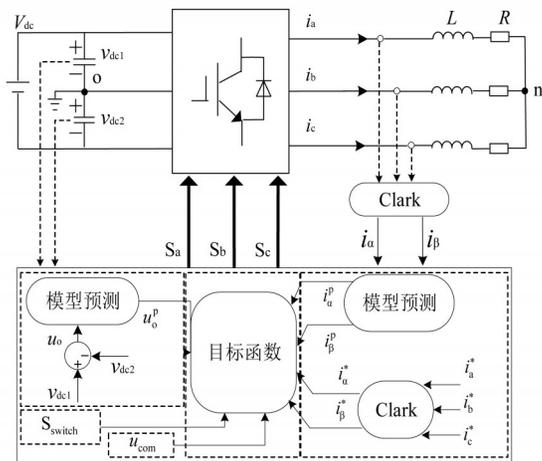


图3 MPC算法结构框图

4 仿真实验

在分析上述工作原理、数学模型、中点电位不平衡、开关频率和共模电压的基础上，结合模型预测控制策略，在MATLAB/SIMULINK平台搭建基于模型预测控制算法的NPC三电平逆变器仿真模型，并对算法的运行性能进行验证。仿真参数如表3所示。

基于模型预测控制算法的稳态线电压和中点电位

表3 主要参数

参数	数值	参数	数值
直流侧电压/V	500	参考电流频率/Hz	50
电容/ μF	3300	采样频率/kHz	10
负载电感/mH	5	λ_1	1.5
负载电阻/ Ω	20	λ_2	0.5
参考电流/A	12	λ_3	0.5

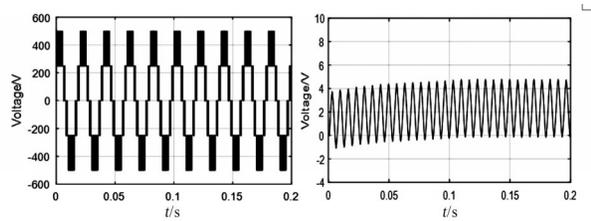


图4 稳态线电压和中点电位波形图

如图4所示，从图中可以看出中点电位稳定在0~5V。

基于模型预测控制算法的共模电压如图5所示，从图中可以看出该算法限制共模电压幅值范围为 $|V_{\text{dc}}/6|$ ，且负载电流能快速跟踪参考电流。

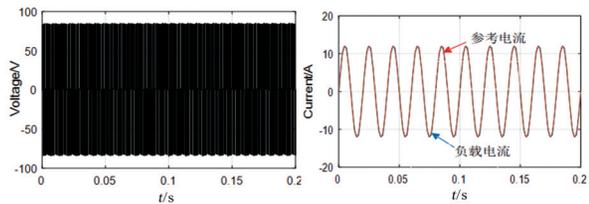


图5 共模电压、负载电流与参考电流的对比图

表4对比SVPWM与MPC的运行时间。相比SVPWM，MPC单个周期的运行时间明显下降，大概节约33%。相同硬件条件下，相比SVPWM，MPC运行效率更高。

表4 运行时间对比

	运行时间/ μs	降低率(对比SVPWM)/%
SVPWM	19.78	—
MPC	13.26	33

5 结束语

本文提出一种综合考虑中点电位、开关频率和共模电压的模型预测控制算法。在NPC三电平逆变器的负载电流、中点电位离散化数学预测模型的基础上构建中点电位、开关频率、CMV的多约束目标函数，滚动筛选最优矢量作用NPC三电平逆变器，

实现降低共模电压,并减少运行时间。

参考文献

- [1] Yuan Qingqing, Li An, Qian Jinyue, Xia Kun. Dc-link capacitor voltage control for the NPC three-level inverter with a newly MPC-based virtual vector modulation [J]. IET Power Electronics, Vol. 13, No. 5, pp. 1093-1102, 2020.
- [2] 李宁, 王跃, 王兆安, 等. 一种三电平NPC变流器SVPWM策略的新型等效算法研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(11): 11-17, 42.
- [3] 林茂, 李颖晖, 李宁, 等. 三电平容错拓扑分析及预测控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 60-66.
- [4] Li Chen, Yang Tao, PonggornKulsangcharoen et al. A Modified Neutral Point Balancing Space Vector Modulation for Three-Level Neutral Point Clamped Converters in

High-Speed Drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 910-921.

- [5] Jiang Dong, Shen Zewei, Wang Fei, "Common-Mode Voltage Reduction for Paralleled Inverters," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 5, pp. 3961-3974, May. 2018.
- [6] Hou C C, Shih C C, Cheng P T, et al. "Common-mode voltage reduction pulsewidth modulation techniques for three-phase grid-connected converters," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 28, No. 4, pp. 1971-1979, Apr. 2013.
- [7] 钱金跃, 吴佳, 施文杰, 等. 基于SVPWM的简化MPC算法的NPC三电平逆变器[J]. 浙江电力, 2022, 41(1): 80-88.

作者简介

钱金跃(1994—),男,助理工程师,逆变器控制研究。

(责任编辑:刘艳玲)

(上接第18页)

电压、电流、有功功率、无功功率等电气参数,并监测低压配电网的功率超前、滞后裕度量及潮流方向等电能质量指标。

根据检测的数据,通过功率裕度量及潮流方向采用密度法、稳态暂估建模等算法,形成合理的无功电容投退方案,并能自动执行操作投入、切除智能感容性功率抑制模块组单元,进行控制感容性功率平衡模组调节,实现功率线性全象限平滑调整,实现低压配电网的感容性功率吸收和抑制调节,保证功率不超前运行;减小电网电压变化对配电网络的冲击,减小系统对地电容放电引起的电流过高问题,杜绝发生系统弧光接地现象;同时提高供电质量,增加电网安全运行的高可靠性。

最终实现电网的功率智能化、动态化跟踪均衡。

同时装置具有完善的测量、保护、控制、和通信功能。可将城区低压配电网的电能质量和安全运行管理工作提升一个显著层次,切实有助于实现低压电网值守无人化、智能化的管理要求,给低压电网和电器设备的安全和经济运行提供重要的保护。

4 结束语

建立低压配电网智能感容性功率抑制策略

本研究设计的感容性功率平衡模组满足了GB/

T 17626规定的所有电磁兼容最高等级的要求。系统可以根据低压配电网全功率监测仪的监测数据形成合理无功电容和线性、感性负载的投退方案,发出控制指令后,执行相应的调节策略。可安全、可靠、稳定地进行合、分闸并联定制感性负载,以达到优化抑制弗兰梯效应,提高配网用电效率,减少配变损耗,改善低压配电网供电质量目的。

参考文献

- [1] 徐海珍, 张兴, 刘芳, 等. 基于虚拟电容的微网逆变器无功均分控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 59-65.
- [2] 朱一听, 卓放, 王丰, 等. 用于微电网无功均衡控制的虚拟阻抗优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4552-4563.
- [3] 陈昕, 张昌华, 黄琦. 引入功率微分下垂控制的微电网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 46-53.
- [4] 乐健, 周谦, 王曹, 等. 无功补偿设备和分布式电源协同的配电网优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 38-47.
- [5] 应丽云, 欧家祥, 王俊融, 等. 配电台区的三相负荷不平衡治理技术[J]. 贵州电力技术, 2017, 20(6): 16-18.
- [6] 张丽芳. 电网规划中对变电容载比配置的研究[J]. 电力系统装备, 2020, (11): 96-97.
- [7] 陈晓林, 刘俊勇, 宋永华, 等. 考虑运行方式转移过程的无功优化控制[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(7): 94-97.

(责任编辑:张峰亮)