

虚拟空间矢量调制的 NPC 型三电平并网逆变器预测控制

刘俊志,黄景涛,杨清,刘帅

(河南科技大学 电气工程学院,河南 洛阳 471023)

摘要:针对传统有限集模型预测控制算法遍历寻优计算量大的问题,提出一种应用于 NPC 型三相三电平并网逆变器的改进型模型预测控制方法.在建立 NPC 型并网逆变器数学模型的基础上,将虚拟空间矢量调制技术和有限集模型预测控制算法结合,根据中点电压平衡控制原理,通过虚拟空间矢量调制技术把 27 个基本电压矢量重构为 19 个虚拟电压矢量.在原有扇区划分的基础上,增加新的扇区作为辅助扇区,减少模型预测控制遍历寻优次数,降低系统的运算量.同时根据虚拟空间矢量调制技术实现对 NPC 型并网逆变器中点电压的控制,在模型预测控制的代价函数中省去了中点电压平衡控制这一项.在搭建的 NPC 型三相三电平并网逆变器系统模型上进行仿真分析,结果表明所提算法能够有效减少计算量,有效实现了中点电压平衡,系统动态性能和稳态性能均有提高.

关键词:并网逆变器;有限集模型预测控制;虚拟空间矢量调制;中点电压平衡

中图分类号:TP273

文献标志码:A

应对气候变化已经成为世界各国的共识,中国作为负责任的发展中大国在应对气候变化中积极作为,已将“碳达峰、碳中和”纳入生态文明建设整体布局^[1].光伏、风能等新能源产业的发展获得大力支持,并网逆变器(Grid-connected Inverter,GCI)作为连接分布式发电系统(Distributed Generation,DG)和电网的设备,具有电能转换的重要作用,其性能好坏直接影响并网电能质量^[2-5].

近年来,随着微处理器性能的提升,有限控制集模型预测控制(Finite Control Set Model Predictive Control,FCS-MPC)在电力电子领域中的应用越来越广泛^[6-9].其原理简单,可根据逆变器的所有开关状态计算出被控量的预测值,然后通过构建代价函数进行遍历寻优,选出使代价函数值最小的开关状态对逆变器下一周期的动作进行控制,不需要 PWM 调制单元,可以对多个目标进行控制,具有良好的控制性能^[10-13].但对于 NPC 型三相三电平并网逆变器而言,其开关状态有 27 个,在每一个控制周期对这 27 个开关状态进行遍历寻优计算,运算负荷大^[14-15].针对这一问题,国内外学者提出了一些解决方法,文献[16]通过构建基于电压预测值的单目标代价函数,避免设计权重系数问题,简化了单次寻优的步骤,提高寻优效率.文献[17]把电压作为代价函数的控制目标,将其与待选的矢量进行直接比较,把代价函数单次优化的步骤进行了简化.文献[18]提出了一种简化的 FCS-MPC 算法,将上一周期的电压矢量及其相邻的电压矢量作为当前采样时刻的控制集,减少了备选电压矢量控制集,降低了负载电压的变化率,但这种方法可能会漏掉最优控制量,从而对控制性能产生较大的影响.文献[19]在扇区选择的过程中进行比较循环,将预测次数降低到 1,但该方法仅适用于两电平变流器.文献[20-21]把 FCS-MPC 算法和直接电流控制结合,进行最优电压矢量的寻找,但因无法在代价函数中对不同量纲的变量进行控制,因此具有一定局限性.针对 NPC 型并网逆变器固有的中点电压不平衡问题,文献[22]提出了一种虚拟矢量的调制方法,并证明了该方法不会影响中点电位.文献[23]提出了变虚拟矢量的中点电压平衡控制方法,利用虚拟中矢量、正小矢量、负小矢量对中点电位进行控制,

收稿日期:2022-01-23;修回日期:2022-06-22.

基金项目:国家自然科学基金(U1504617)

作者简介:刘俊志(1993-),男,安徽淮南人,河南科技大学硕士研究生,研究方向为电力电子技术,E-mail:1059492099@qq.com.

通信作者:黄景涛(1977-),男,河南汝州人,河南科技大学副教授,博士,研究方向为智能控制,E-mail:jthuang_haust@163.com.

但该方法计算量大,设计烦琐,而且得到的开关信号不能保证最优。

本文针对 NPC 型三相三电平并网逆变器控制问题,在对 FCS-MPC 的控制原理进行分析的基础上,提出一种将虚拟空间矢量调制技术和有限控制集模型预测控制相结合的方法.通过虚拟空间矢量调制技术减少模型预测的遍历寻优次数,减小系统的运算量,同时根据虚拟空间调制可实现对 NPC 型并网逆变器的中点电位控制,减小模型预测控制中代价函数多目标控制权重选择的难度.所提出的控制方法原理简单,可有效提高系统的控制性能.最后通过仿真实验验证了所提算法的可行性和有效性。

1 NPC 型三相三电平逆变器有限集模型预测控制

NPC 型三电平逆变器拓扑如图 1 所示。 U_{dc} 是直流电源, O 为逆变器上下电容中点, n 为电网电压的公共节点。 C_1 和 C_2 是逆变器直流侧上下电容且 $C_1=C_2$, L_1 是逆变器侧滤波电感, L_2 是电网侧滤波电感, C 是滤波电容。 i_{1a}, i_{1b}, i_{1c} 分别是逆变器三相输出电流, i_{2a}, i_{2b}, i_{2c} 分别是三相并网电流, i_{c1}, i_{c2} 分别是直流侧上下电容 C_1 和 C_2 的电流。 u_a, u_b, u_c 分别是逆变器输出电压, e_a, e_b, e_c 分别是三相电网电压。

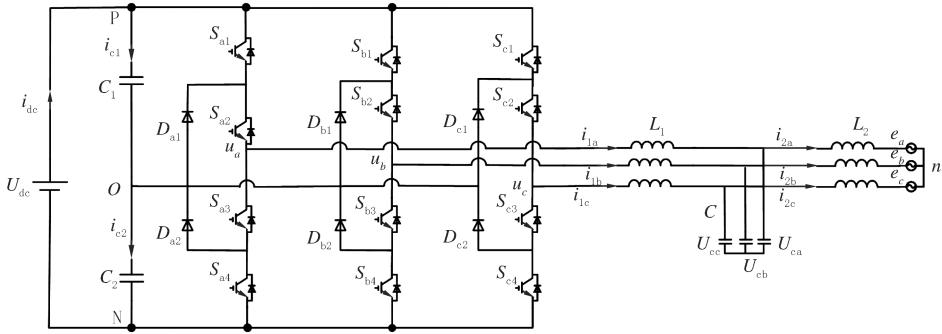


图1 NPC型三相三电平逆变器主电路拓扑结构

Fig.1 Main circuit topology of NPC-type three-phase three-level inverter

NPC 型三电平逆变器的每相桥臂均有 3 种有效开关状态,所以三相桥臂共有 27 种有效开关状态。

根据基尔霍夫定律、逆变器拓扑结构及 Clark 变换,在两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系下,NPC 型三电平逆变器数学模型为

$$L_1 \frac{di_{1\alpha\beta}}{dt} = u_{\alpha\beta} - u_{C\alpha\beta}, \tag{1}$$

$$L_2 \frac{di_{2\alpha\beta}}{dt} = u_{C\alpha\beta} - e_{\alpha\beta}, \tag{2}$$

$$C \frac{du_{C\alpha\beta}}{dt} = i_{1\alpha\beta} - i_{2\alpha\beta}, \tag{3}$$

$$u_{C\alpha\beta} = e_{C\alpha\beta} + L_2 \frac{di_{2\alpha\beta}}{dt}. \tag{4}$$

其中, $i_{1\alpha\beta}$ 是逆变器输出电流 i_1 在 α, β 轴上的分量, $i_{2\alpha\beta}$ 是并网电流 i_2 在 α, β 轴上的分量, $e_{\alpha\beta}$ 是电网电压 e 在 α, β 轴上的分量, $u_{C\alpha\beta}$ 是滤波电容电压 u_c 在 α, β 轴上的分量。

采用前向欧拉法对式(1)和(2)进行离散化,可得:

$$i_{1\alpha\beta}(k+1) = i_{1\alpha\beta}(k) + \frac{T_s}{L_1} [u_{\alpha\beta}(k) - u_{C\alpha\beta}(k)], \tag{5}$$

$$i_{2\alpha\beta}(k+1) = i_{2\alpha\beta}(k) + \frac{T_s}{L_2} [u_{C\alpha\beta}(k) - e_{\alpha\beta}(k)]. \tag{6}$$

采用后向差分法对式(3)和(4)进行离散化,可得:

$$i_{1\alpha\beta}(k+1) = i_{2\alpha\beta}(k+1) + C \frac{u_{C\alpha\beta}(k+1) - u_{C\alpha\beta}(k)}{T_s}, \tag{7}$$

$$u_{C_{\alpha\beta}}(k+1) = e_{\alpha\beta}(k+1) + L \frac{i_{2\alpha\beta}(k+1) - i_{2\alpha\beta}(k)}{dt}. \quad (8)$$

其中, $i_{1\alpha}(k+1), i_{1\beta}(k+1), i_{2\alpha}(k+1), i_{2\beta}(k+1)$ 是 $k+1$ 时刻逆变器侧电流和网侧电流在 α, β 轴分量的预测值. u_{α}, u_{β} 是逆变器输出电压 u 在 α, β 轴的分量, $u_{c\alpha}, u_{c\beta}$ 是滤波电容 C 两端电压 u_c 在 α, β 轴的分量, e_{α}, e_{β} 是电网电压 e 在 α, β 轴的分量. T_s 是采样周期.

传统的模型预测电流控制算法通常以逆变器侧电流为控制目标, 通过逆变器侧电流间接控制网侧电流, 控制效果不佳. 由式(5)、(7)、(8)可得网侧电流预测模型

$$i_{2\alpha}(k+1) = \frac{T_s^2 i_{1\alpha}(k+1) - T_s C e_{\alpha}(k+1) + C L i_{2\alpha}(k) + T_s C u_{C_{\alpha}}(k)}{T_s^2 + C L_2}, \quad (9)$$

$$i_{2\beta}(k+1) = \frac{T_s^2 i_{1\beta}(k+1) - T_s C e_{\beta}(k+1) + C L i_{2\beta}(k) + T_s C u_{C_{\beta}}(k)}{T_s^2 + C L_2}. \quad (10)$$

得出网侧电流预测模型之后, 选用绝对误差形式的代价函数, 以网侧电流 $i_{2\alpha\beta}$ 为控制目标的代价函数具体形式为

$$g_1 = |i_{2\alpha}^*(k+1) - i_{2\alpha}(k+1)| + |i_{2\beta}^*(k+1) - i_{2\beta}(k+1)|. \quad (11)$$

NPC 型三相三电平逆变器存在中点电压不平衡现象. 代价函数中需要加入中点电压平衡这一控制目标, 最终得到多目标控制代价函数的具体形式为

$$g = |i_{2\alpha}^*(k+1) - i_{2\alpha}(k+1)| + |i_{2\beta}^*(k+1) - i_{2\beta}(k+1)| + \lambda_{dc} |u_{c1}^p(k+1) - u_{c2}^p(k+1)|. \quad (12)$$

上式中有两个控制目标, 分别为网侧电流和中点电位平衡. λ_{dc} 是中点电位平衡的权重系数. 不同的控制目标对应不同的代价函数, 但其作用都是选择使代价函数值最小的电压矢量. NPC 型三相三电平逆变器共有 27 种开关状态, 对应可产生 27 个电压矢量. 通过式(9~10)可得到 $k+1$ 时刻的电流预测值, 并通过式(12)遍历计算出 27 个开关状态下代价函数 g 的函数值, 选出使代价函数 g 最小的开关状态, 将所对应的电压矢量作为控制信号应用于逆变器.

2 虚拟空间矢量调制的有限集模型预测控制

由上节分析可知, NPC 型三相三电平逆变器的有限集模型预测控制算法在每一个开关周期均需遍历 27 个开关状态, 系统计算负荷大. 同时为解决 NPC 型逆变器所固有的中点电压不平衡问题, 还需要在代价函数中添加中点电压平衡这一控制目标项. 在含有多个控制目标的代价函数中, 权重系数主要靠经验和反复试验来获得, 过程烦琐.

本文提出一种将 FCS-MPC 与虚拟空间矢量调制相结合的算法 VSV-FCSMPC, 利用虚拟矢量对中点电压的平衡进行控制, 不再需要在代价函数中加入中点电位平衡控制目标. 而且所提算法仅对 9 个虚拟矢量进行遍历寻优计算, 虚拟空间矢量如图 2 所示.

虚拟空间矢量共有 6 个大扇区、12 个辅助小扇区. 以虚拟小矢量 V_{ZS1} 为例, 其基本合成矢量是 V_{ONN} 和 V_{POO} . 根据伏秒平衡原则, 考虑对中点电压平衡的控制, 两个基本合成矢量的总作用时间与虚拟矢量作用时间应该相等, 因此伏秒平衡方程为

$$V_{ZS1} T_s = V_{ONN} \left(\frac{1}{2} + m \right) T_s + V_{POO} \left(\frac{1}{2} - m \right) T_s. \quad (13)$$

其中, m 为均压因子, 取值范围为 $-\frac{1}{2} \leq m \leq \frac{1}{2}$.

虚拟中矢量的三个基本合成矢量都不是冗余矢量, 它们的方向和大小各不相同, 不适合采用在时间分配阶段加入均压因子的控制方法. 本文采用在构建虚拟中矢量时, 就使得其具备对中点 O 的电压进行平衡控制的功能. 以扇区 I 虚拟中矢量的构建为例,

$$V_{ZM1} = \frac{(1+\tau)}{3} V_{ONN} + \frac{(1+n)}{3} V_{POO} + \frac{1}{3} V_{PON}. \quad (14)$$

其中, τ, n 为重构因子, 取值为 $0, \pm 1$.

结合矢量控制原理,首先确定寻优的扇区,剔除掉明显错误的开关状态,以降低每个控制周期所需要的寻优遍历次数.图 3 为大扇区 I 的虚拟空间矢量图.以一扇区为例,采用虚拟空间电压矢量调制可以将空间电压矢量的数量从 10 个缩减到 6 个,空间电压矢量从 27 个变为 19 个,并且可利用虚拟矢量脉宽调制进行中点电压的平衡控制.

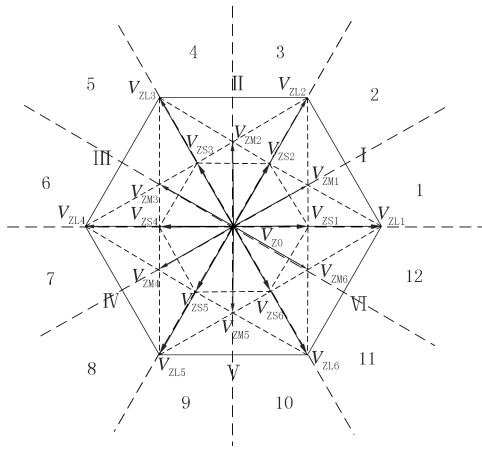


图2 虚拟空间矢量示意图

Fig.2 Diagram of virtual space vector

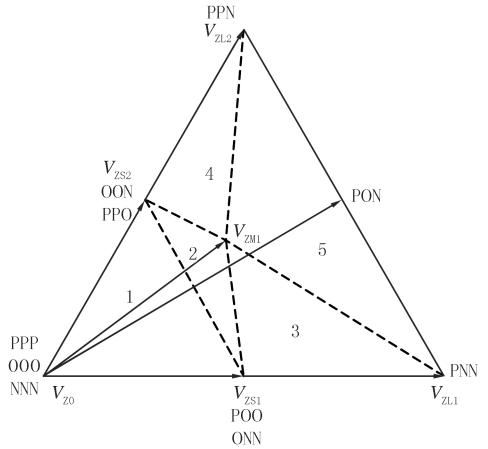


图3 大扇区I的虚拟空间矢量图

Fig.3 Virtual space vector of sector I

参考电压矢量 $V_{La/\beta}^*(k+1) \approx$

$$u_{Ca/\beta}(k) + \frac{L}{T_s}(i_{La/\beta}^*(k+1) -$$

$i_{La/\beta}(k))$,再计算出 $V_{La/\beta}^*(k+1)$ 所在扇区及辅助扇区位置后,可根据表 1 选择适当的空间虚拟矢量进行遍历寻优计算.与传统有限集模型预测控制方法相比,所提方法的计算次数从 27 次减少为 9 次.将所得到的虚拟矢量,按照(13)~(14)式进行伏秒特性分解计算,最后输出开关状态.代价函数中不需要加入中点电位均压控制环节,该均压控制由虚拟矢量进行控制,有效降低了代价函数的设计难度.

表 1 遍历寻优的矢量选择规则

Tab. 1 Vector selection rules for traversal optimization

扇区 N	辅助扇区 n	所选择的遍历寻优矢量
扇区 I	辅助扇区 1	$V_{Z0}, V_{ZM1}, V_{ZM6}, V_{ZS1}, V_{ZS6}, V_{ZS2}, V_{ZL1}, V_{ZL2}, V_{ZL6}$
扇区 I	辅助扇区 2	$V_{Z0}, V_{ZM1}, V_{ZM2}, V_{ZS1}, V_{ZS2}, V_{ZS3}, V_{ZL1}, V_{ZL2}, V_{ZL3}$
扇区 II	辅助扇区 3	$V_{Z0}, V_{ZM1}, V_{ZM2}, V_{ZS1}, V_{ZS2}, V_{ZS3}, V_{ZL1}, V_{ZL2}, V_{ZL3}$
扇区 II	辅助扇区 4	$V_{Z0}, V_{ZM2}, V_{ZM3}, V_{ZS2}, V_{ZS3}, V_{ZS4}, V_{ZL2}, V_{ZL3}, V_{ZL4}$
扇区 III	辅助扇区 5	$V_{Z0}, V_{ZM2}, V_{ZM3}, V_{ZS2}, V_{ZS3}, V_{ZS4}, V_{ZL2}, V_{ZL3}, V_{ZL4}$
扇区 III	辅助扇区 6	$V_{Z0}, V_{ZM3}, V_{ZM4}, V_{ZS3}, V_{ZS4}, V_{ZS5}, V_{ZL3}, V_{ZL4}, V_{ZL5}$
扇区 IV	辅助扇区 7	$V_{Z0}, V_{ZM3}, V_{ZM4}, V_{ZS3}, V_{ZS4}, V_{ZS5}, V_{ZL3}, V_{ZL4}, V_{ZL5}$
扇区 IV	辅助扇区 8	$V_{Z0}, V_{ZM4}, V_{ZM5}, V_{ZS4}, V_{ZS5}, V_{ZS6}, V_{ZL4}, V_{ZL5}, V_{ZL6}$
扇区 V	辅助扇区 9	$V_{Z0}, V_{ZM4}, V_{ZM5}, V_{ZS4}, V_{ZS5}, V_{ZS6}, V_{ZL4}, V_{ZL5}, V_{ZL6}$
扇区 V	辅助扇区 10	$V_{Z0}, V_{ZM5}, V_{ZM6}, V_{ZS5}, V_{ZS6}, V_{ZS1}, V_{ZL5}, V_{ZL6}, V_{ZL1}$
扇区 VI	辅助扇区 11	$V_{Z0}, V_{ZM5}, V_{ZM6}, V_{ZS5}, V_{ZS6}, V_{ZS1}, V_{ZL5}, V_{ZL6}, V_{ZL1}$
扇区 VI	辅助扇区 12	$V_{Z0}, V_{ZM1}, V_{ZM6}, V_{ZS1}, V_{ZS6}, V_{ZS2}, V_{ZL1}, V_{ZL2}, V_{ZL6}$

3 仿真与结果分析

为验证所提方法的有效性,针对 NPC 型三相三电平并网逆变器入网电流控制,在 MATLAB/Simulink 中搭建系统仿真模型,分别采用传统 FCS-MPC 控制算法和本文所提的 VSV-FCSMPC 控制算法对 NPC 型逆变器进行控制,并做比较分析,系统主要参数见表 2.

表 2 NPC 型三相三电平逆变器主要参数

Tab. 2 Main parameters of the 3-phase 3-level NPC inverter

参数	数值	参数	数值	参数	数值
直流母线电压/V	700	电网相电压有效值/V	220	网侧电感 L_2 /mH	0.5
电网频率/Hz	50	逆变器侧电感 L_1 /mH	15	滤波电容 C /μF	10

图 4 是 A 相电压 e_a 和并网电流 i_{2a} 的波形图.由图 4 可知,当采样频率为 100 kHz 时,传统 FCS-MPC 控

制方法和 VSV-FCSMPC 控制方法对并网电流均具有良好的控制效果,可以在一个基波周期内达到稳定状态.并网电流的相位与电网电压的相位差很小,有良好的动态特性.

图 5 是两种控制方法作用下的三相并网电流波形和 THD 值.由图 5 可知,当采样频率为 50 kHz 时,改进型 FCS-MPC 作用下的三相并网电流 THD 值为 0.58%,而传统 FCS-MPC 作用下的三相并网电流 THD 值为 0.74%.这是因为改进型模型预测控制使用扇区剔除掉了误差较大的开关控制集,而且目标函数中主要以并网电流的损失值最小为遍历寻优目标,目标函数中不含有中点电压平衡控制这一环节,从而使得改进型模型预测控制的总谐波含量小于传统模型预测控制.

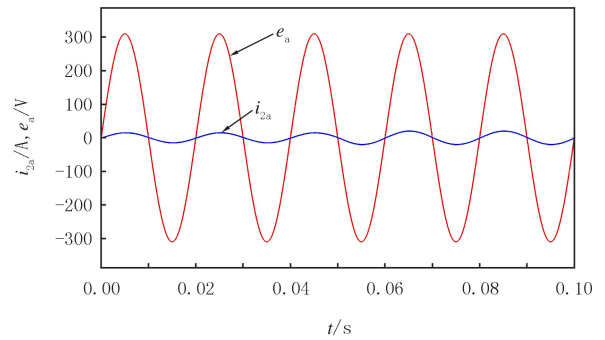


图4 VSV-FCSMPC控制效果

Fig. 4 The control effect of VSV-FCSMPC

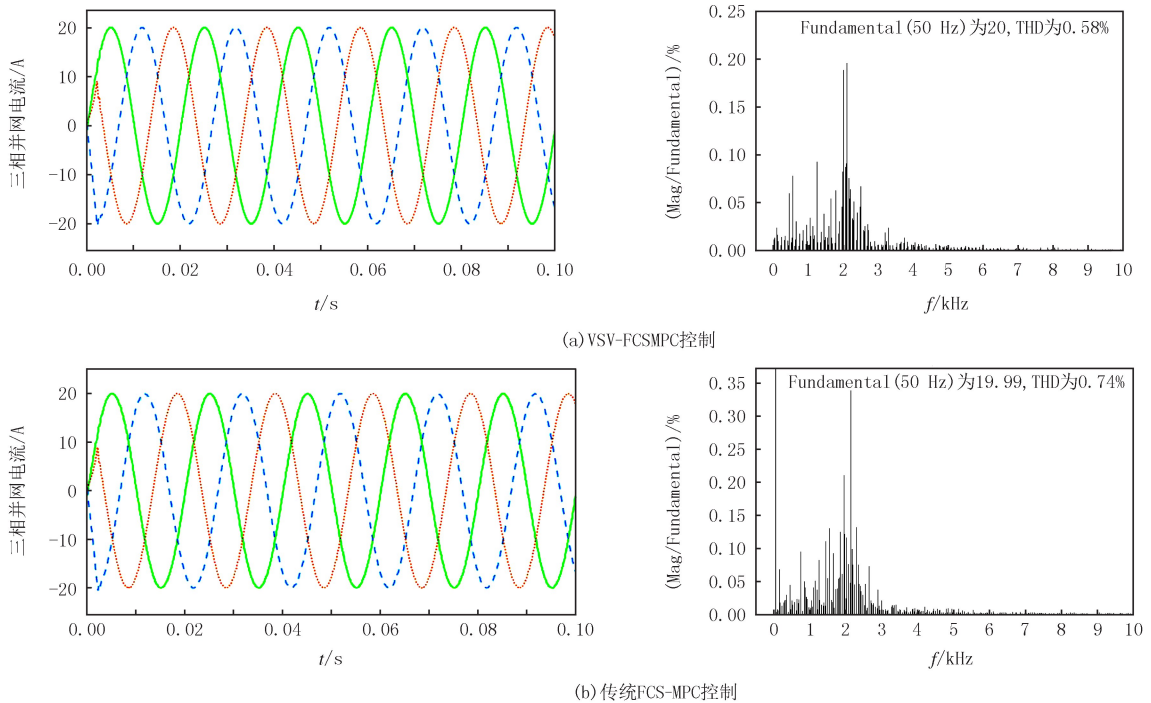


图5 三相并网电流波形及 THD

Fig. 5 Three-phase grid-connected current waveform and THD

为分析在并网功率变化时的控制效果,接下来进一步对 VSV-FC-SMPC 的动态特性进行仿真分析.图 6 是当电流给定值突变时三相并网电流的波形图.由图 6 可知,改变并网电流给定值后,在一个周期内,改进型模型预测控制能够快速跟随参考电流给定值达到稳态,并且没有出现冲击电流的现象,三相并网电流的纹波较小.这说明 VSV-FCSMPC 具有良好的动态特性.

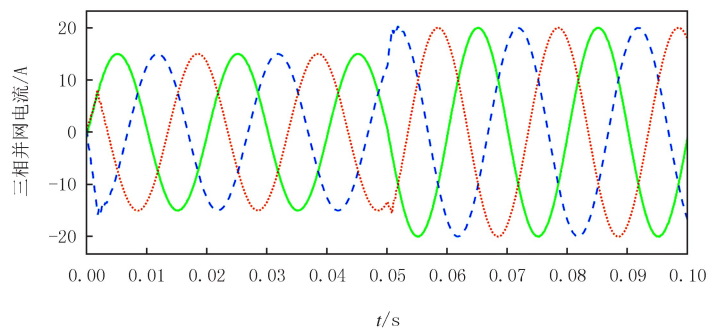


图6 电流给定值突变时并网电流波形

Fig. 6 The waveform of grid-connected current with current change

中点电压平衡控制效果显示,上下电容 C_1 和 C_2 的电压在 ± 0.5 V 之间波动.这说明本文所提方法对中点电压平衡具有良好的控制效果.改进型模型预测控制结合了虚拟空间矢量调制技术,对中点电位控制原理进行分析,使用虚拟小矢量,与重构的虚拟中矢量对中点电流进行控制,可实现中点电位的均衡控制.

4 结 论

本文针对传统有限集模型预测控制方法计算量大的问题,在对传统模型预测控制的基本原理进行分析和阐述的基础上,提出一种将有限控制集模型预测控制算法和虚拟空间矢量调制算法相结合的改进型模型预测控制算法 VSV-FCSMPC.本文的改进型模型预测控制方法使遍历寻优所需的矢量数目明显减少,有效提高了计算效率.并且引入了中点电压偏差信号,把伏秒平衡原理与中点电位控制原理相结合,将虚拟电压矢量进行分解,所得到的基本电压矢量具备中点电压平衡控制能力.因此在代价函数中省略了中点电压平衡的控制项,有效降低了代价函数的设计难度.在一个 NPC 型三相三电平并网逆变器系统上进行了仿真实验,结果表明所提算法相较于传统 FCS-MPC 控制算法,可以有效减少系统计算量,具有良好的控制性能.

参 考 文 献

- [1] 张鸿宇,黄晓丹,张达,等.加速能源转型的经济社会效益评估[J].中国科学院院刊,2021,36(9):1039-1048.
ZHANG H Y, HUANG X D, ZHANG D, et al. Evaluating economic and social benefits of accelerated energy transition[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1039-1048.
- [2] 徐君,张兴,赵涛,等.单相级联 H 桥光伏并网逆变器的分布式控制策略[J].电力电子技术,2019,53(9):83-85.
XU J, ZHANG X, ZHAO T, et al. A distributed control strategy for single-phase cascaded H-bridge photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power Electronics, 2019, 53(9): 83-85.
- [3] 李伟锋,陆小辉,陈赛男,等.新型频率自适应复合重复控制及并网逆变器应用[J].电力系统保护与控制,2020,48(6):10-17.
LI W F, LU X H, CHEN S N, et al. Improved frequency adaptive compound RC scheme for grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 10-17.
- [4] 张汀荟,谢明成,王蓓蓓,等.分布式光伏的共享价值及其对配电网影响的系统动力学仿真[J].电力系统自动化,2021,45(18):35-44.
ZHANG T H, XIE M C, WANG B B, et al. System dynamics simulation of shared value of distributed photovoltaic and its impact on distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 35-44.
- [5] 苑文凯,郑天文,陈来军,等.基于耗散理论的分布式发电组网系统小干扰稳定性分析方法[J].高电压技术,2021,47(10):3497-3504.
YUAN W K, ZHENG T W, CHEN L J, et al. Small-signal stability analysis method of grid-forming distributed generation system based on the dissipation theory[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3497-3504.
- [6] 李琰琰,潘超,曹宏,等.组合开关状态的 NPC 三电平模型预测不平衡治理策略[J].电力系统保护与控制,2020,48(12):97-106.
LI Y Y, PAN C, CAO H, et al. Combined switching state of model predictive control for unbalance regulation strategy for three-level NPC inverter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(12): 97-106.
- [7] 李立雄,阳同光,袁越阳,等.基于改进有限集模型预测控制策略的光伏发电系统最大功率点追踪算法[J].电力系统保护与控制,2021,49(17):28-37.
LI L X, YANG T G, YUAN Y Y, et al. Maximum power point tracking algorithm of a photovoltaic power generation system based on an improved finite set model predictive control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 28-37.
- [8] 韩建定,齐蓉,雷晓彝,等.三相逆变电路的离线模型预测控制研究[J].电工技术学报,2016,31(15):163-169.
HAN J D, QI R, LEI X B, et al. The off-line model predictive control for three-phase inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 163-169.
- [9] 梁莹玉,张涛,刘建政,等.模型预测控制在 MMC-HVDC 中的应用[J].电工技术学报,2016,31(1):128-138.
LIANG Y Y, ZHANG T, LIU J Z, et al. The applications of the model predictive control for MMC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 128-138.
- [10] AZAB M. Performance of model predictive control approach for single-phase distributed energy grid integration with PQ control[J]. IET Energy Systems Integration, 2019, 1(2): 121-132.
- [11] ZHANG X, TAN G J, XIA T, et al. Optimized switching finite control set model predictive control of NPC single-phase three-level rectifiers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10097-10108.
- [12] RODRIGUEZ J, KAZMIERKOWSKI M P, ESPINOZA J R, et al. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 1003-1016.
- [13] RODRÍGUEZ PÉREZ J, ESTAY P C. Predictive control of power converters and electrical drives[M]. Chichester: Wiley, 2012.

- [14] TARISCIOTTI L, ZANCHETTA P, WATSON A, et al. Modulated model predictive control for a three-phase active rectifier[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(2): 1610-1620.
- [15] TARISCIOTTI L, FORMENTINI A, GAETA A, et al. Model predictive control for shunt active filters with fixed switching frequency[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 296-304.
- [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 Y C, WANG Y X, LI G Q, 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] BARROS J D, SILVA J F A, JESUSÉ A. Fast-predictive optimal control of NPC multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 619-627.
- [18] LIN C K, YU J T, LAI Y S, et al. Simplified model-free predictive current control for interior permanent magnet synchronous motors[J]. Electronics Letters, 2016, 52(1): 49-50.
- [19] 张永昌, 杨海涛, 魏香龙. 基于快速矢量选择的永磁同步电机模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 66-73.
ZHANG Y C, YANG H T, WEI X L. Model predictive control of permanent magnet synchronous motors based on fast vector selection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 66-73.
- [20] ZHANG Y C, XIE W. Low complexity model predictive control—single vector-based approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(10): 5532-5541.
- [21] ZHANG Y C, XIE W, LI Z X, et al. Low-complexity model predictive power control; double-vector-based approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 5871-5880.
- [22] BUSQUETS-MONGE S, BORDONAU J, BORROYEVICH D, et al. The nearest three virtual space vector PWM-a modulation for the comprehensive neutral-point balancing in the three-level NPC inverter[J]. IEEE Power Electronics Letters, 2004, 2(1): 11-15.
- [23] 桂石翁, 吴芳, 万山明, 等. 变虚拟空间矢量的三电平 NPC 变换器中点电位平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 5013-5021.
GUI S W, WU F, WAN S M, et al. A strategy for considering neutral-point potential balance for three-level NPC inverters with the varied virtual space vector[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 5013-5021.

Predictive control of NPC-type three-level grid-connected inverters with virtual space vector modulation

Liu Junzhi, Huang Jingtao, Yang Qing, Liu Shuai

(Electrical Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: To address the problem of large computation of traversal optimization of traditional finite set model predictive control algorithm, an improved model predictive control method applied to NPC three-phase three-level grid-connected inverter is proposed in this paper. Based on the mathematical model of NPC-type grid-connected inverter, the virtual space vector modulation and the finite set model predictive control algorithm are combined to reconstruct the 27 basic voltage vectors into 19 virtual voltage vectors by the virtual space vector modulation technique according to the neutral-point voltage balance control principle. On the basis of the original sector division, new sectors are added as auxiliary sectors to reduce the number of traversal optimization of model predictive control, thus reducing the amount of calculation of the system. At the same time, the neutral-point voltage control of the NPC-type grid-connected inverter is implemented according to the virtual space vector modulation technique, and the neutral-point voltage balance control can be omitted from the cost function of the model prediction control. The simulation analysis on the NPC three-phase three-level grid-connected inverter system model shows that the algorithm proposed in this paper can effectively reduce the amount of computation, realize the neutral-point voltage balance, and improve the system dynamic performance and steady-state performance.

Keywords: grid-connected inverters; finite control set model predictive control; virtual space vector modulation; neutral-point voltage balance