

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108013

基于 Lyapunov 控制的多约束模型预测控制方法*

唐圣学 孙志国 宋晓

(河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室 天津 300130)

摘要: 有限集模型预测控制最大优势在于目标函数增加约束灵活,但加权系数难以确定及多约束间的耦合效应导致的不稳定现象大大限制了其应用。针对这个问题,提出了基于 Lyapunov 控制的多约束模型预测控制方法,该方法首先通过 Lyapunov 控制实现对主约束输出电流的控制,再根据开关转换次数约束项的轻重自由设置加权系数,然后通过目标函数最小化实现多约束协同控制。仿真结果表明所提出方法实现了输出电流、开关转换次数的多约束模型预测协同控制,并对加权系数有良好的鲁棒性,在加权系数偏差高达 10 倍时输出电流 THD 仅为 5.63%。

关键词: 有限集模型预测控制;加权系数;多约束;耦合效应

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Multi-constraint model predictive control method based on Lyapunov control

Tang Shengxue Sun Zhiguo Song Xiao

(State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The biggest advantage of finite set model predictive control is that the objective function increases the flexibility of constraints, but the weighting coefficient is difficult to determine and the instability caused by the coupling effect between multiple constraints greatly limits its application. To solve this problem, a multi-constraint model predictive control method based on Lyapunov control is proposed. This method first realizes the control of the output current of the main constraint through Lyapunov control, and then sets the weighting coefficient freely according to the weight of the constraint term of the switching times, and then realizes the multi-constraint cooperative control by minimizing the objective function. The simulation results show that the proposed method realizes the multi-constraint model predictive cooperative control of output current and switching times, and has good robustness to the weighting coefficient. When the deviation of the weighting coefficient is as high as 10 times, the output current THD is only 5.63%.

Keywords: finite control set model predictive control; weighting factor; multiple constraints; coupling effect

0 引言

因控制算法简单易实现、目标函数增加约束灵活,有限集模型预测控制(finite control set-model predictive control, FCS-MPC)得到了广泛关注^[1-5]。但目标函数包含多个约束时,目标函数加权系数的设置将会直接影响控制性能,故加权系数的设置十分苛刻,且由于各约束物理意义不同,可能会产生耦合效应,某个控制系数的改变可能会导致其他控制量性能的下降^[6]。当前关于加权系数的设置多由实际经验获得,无科学明确的确定方法,若当加权系数设置不合理或多约束间发生耦合效应时,下一时刻控制状态

会选择错误,系统会出现不稳定现象。因此,这方面的研究具有重要意义。

近年来,关于模型预测目标函数的加权系数开始受到关注。文献[7]总结了电力电子系统中常见的基本目标函数,这些目标函数基本都只有一个约束。文献[8]提出多约束的 LCL 并网逆变器模型预测控制方法,但没有明确加权系数的设置方法。文献[9]提出了三电平逆变器模型预测控制方法,其中加权系数是通过实际经验确定,需重复进行多次试验获得。文献[10]提出了一种优化的加权系数配置法,通过计算转矩纹波来获得使转矩脉动最小的加权系数,实现对转矩脉动的抑制。文献[11]采用平均排序概念,实

收稿日期:2021-10-07

* 基金项目:河北省自然科学基金(E2019202481)项目资助

现感应电机转矩和磁链两个控制目标的无加权系数控制,但只适合于两个控制目标的系统。

针对并网逆变器有限集模型预测控制系统,文中以三相两电平逆变器为例,提出了一种基于 Lyapunov 控制的多约束模型预测控制方法。首先通过 Lyapunov 控制实现对主约束输出三相电流的控制,其次通过多约束目标函数保证有良好电流质量的同时降低模型预测控制开关转换次数,提高器件可靠性。所提的方法,可有效消除加权系数设置不合理及多约束耦合效应造成的控制状态选择错误带来的不稳定现象,并对加权系数有良好的鲁棒性。

1 有限集模型预测控制

为了简化,本文选用三相两电平并网逆变器系统为例开展研究,系统拓扑结构如图 1 所示。

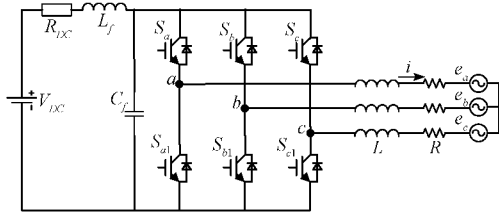


图 1 三相两电平并网逆变器系统

图 1 中逆变器直流母线电压为 V_{DC} , 输出电流为 i , 输出电压为 u , 线路电阻 R_{DC} , 直流侧滤波电感 L_f , 直流侧滤波电容 C_f , 负载为 R , 滤波电感为 L , 并网电压为 e 。

依据图 1 所示的主电路,在 $\alpha - \beta$ 坐标系中,由基尔霍夫定律可得:

$$\begin{cases} L \frac{di_\alpha}{dt} = u_\alpha - Ri_\alpha - e_\alpha \\ L \frac{di_\beta}{dt} = u_\beta - Ri_\beta - e_\beta \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)离散化,利用欧拉公式可得逆变侧电流预测值为:

$$i_\alpha(k+1) = \frac{1}{RT_s + L} [Li_\alpha(k) + T_s u_\alpha(k+1) - T_s e_\alpha(k+1)] \quad (2)$$

$$i_\beta(k+1) = \frac{1}{RT_s + L} [Li_\beta(k) + T_s u_\beta(k+1) - T_s e_\beta(k+1)] \quad (3)$$

式中: T_s 为采样周期, $i_\alpha(k+1)$ 、 $i_\beta(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻电流预测值。

定义目标函数为:

$$g = \lambda_1 |i_{\alpha(\beta)}^*(k+1) - i_{\alpha(\beta)}(k+1)| + \lambda_2 |x^*(k+1) - x(k+1)| + \dots \quad (4)$$

式中: λ_1 、 λ_2 为加权系数, $i_\alpha^*(k+1)$ 、 $i_\beta^*(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻电流参考值和预测值, $x^*(k+1)$ 和 $x(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻其他约束参考值和预测值。

2 基于 Lyapunov 控制的多约束模型预测控制方法

2.1 Lyapunov 控制

根据 Lyapunov 定理,需要构造一个标量函数 V , 函数 V 满足 $V(0)=0; x \neq 0, V(x) > 0; x \neq 0, \dot{V} < 0$; 和 $x \rightarrow \infty, V(x) \rightarrow \infty$ 条件。然后,通过函数 V 判断并控制并网逆变器系统的目标输出^[12-14]。

对于三相两电平并网逆变器,文中根据 Lyapunov 直接法构造变量误差的 Lyapunov 函数。函数以电流变量为自变量,以能量函数 V 一阶导的负定性判断系统稳定性。因此, Lyapunov 函数 V 定义为:

$$V = \frac{1}{2}(i_\alpha^* - i_\alpha)^2 + \frac{1}{2}(i_\beta^* - i_\beta)^2 \quad (5)$$

对式(5)求偏导,可得 \dot{V} , 即:

$$\dot{V} = (i_\alpha^* - i_\alpha)(i_\alpha^* - \frac{di_\alpha}{dt}) + (i_\beta^* - i_\beta)(i_\beta^* - \frac{di_\beta}{dt}) \quad (6)$$

式中: i_α^* 、 i_β^* 为下一时刻电流参考值, i_α 、 i_β 为下一时刻电流预测值。

根据 Lyapunov 的判据,当满足式(7)时,则系统在此状态下满足稳定性要求。

$$\dot{V} < 0 \quad (7)$$

利用 Lyapunov 函数 V 实现有限集模型预测控制系统稳定,选择控制电压矢量时需要同时满足式(7)和目标函数 g 最小。

2.2 多约束模型预测控制方法

功率器件开关转换次数过大导致器件结温升高,影响可靠性。为了减少开关器件转换次数,文中通过在目标函数中引入开关转换约束项来减少开关转换次数,即将式(4)目标函数修改为下式:

$$g = 1 * [(i_\alpha^*(k+1) - i_\alpha(k+1))^2 + (i_\beta^*(k+1) - i_\beta(k+1))^2] + \lambda n_{sw} \quad (8)$$

其中, n_{sw} 定义为:

$$n_{sw} = \sum_{x=\alpha,\beta,c} |S_x(k+1) - S_x(k)| \quad (9)$$

式中: $S_x(k+1)$ 、 $S_x(k)$ 分别为 $k+1$ 和 k 时刻的开关状态, n_{sw} 为一个预测控制周期功率开关器件转换次数,主约束加权系数固定为 1,次约束加权系数设置为 λ 。

FCS-MPC 方法采用遍历法,通过计算每种开关状态输入下的预测值与参考值,获取目标函数值^[15]。目标函数值越小,说明各目标预测越接近参考^[16-17]。三相两电平逆变器有 8 个控制电压矢量,选择最小目标函数 g 所对应的电压矢量作用于开关管可实现对目标的最优跟踪。

2.3 基于 Lyapunov 控制的多约束模型预测控制方法

本文所提的基于 Lyapunov 控制的多约束模型预测控制整体框图如图 2 所示,控制算法寻优流程如图 3 所示,图中 g_{opt} 、 x_{opt} 和 S_{opt} 分别为最优目标函数、最优电压矢量标号 and 最优开关状态。

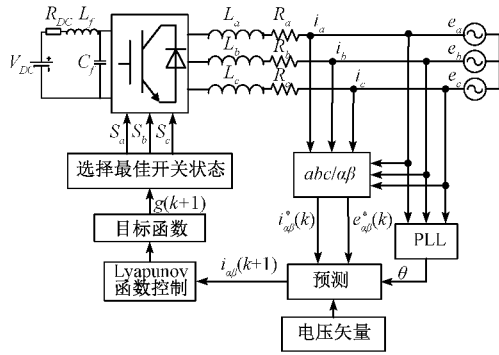


图 2 控制结构框图

具体流程为：

第 1 步：初始化。初始化参数 λ, n 及 g_{out} 。

第 2 步：采集数据。采集 k 时刻输出电流 $i(k)$ 、电网电压 $e(k)$ ，对 $i(k)$ 、 $e(k)$ 进行 Clark 变换，得到 $\alpha\beta$ 坐标下电网电压、电流分量。

第 3 步：计算预测电流和函数 V 导数值 \dot{V} 。利用式(2)和(3)预测计算 $k+1$ 时刻电流 $i_a(k+1)$ 、 $i_b(k+1)$ ，利用式(6)计算 Lyapunov 函数导数 \dot{V} 。

第 4 步：判断、选取最优矢量。利用导数 \dot{V} 判断式(7)是否满足，满足则计算目标函数式(8)；否则，进行下一矢量判断。循环 8 次后，利用目标函数值最小确定最优开关状态 $S_{opt}(k+1)$ ，即 $k+1$ 时刻最优电压矢量 $u(k+1)$ 和开关状态 $S_x(k+1)$ 。

第 5 步：返回第 1 步，进行下一采样预测循环。

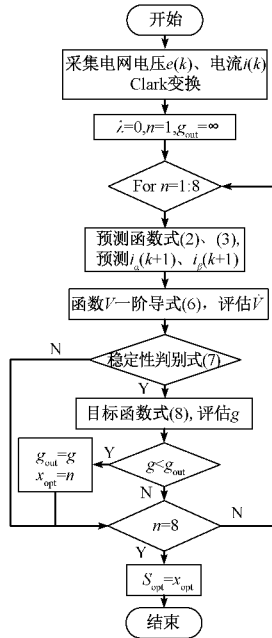


图 3 寻优算法流程

3 仿真验证

为验证本文所提策略性能，在 MATLAB/Simulink 中

搭建模型，并进行仿真实验，模型相关参数如表 1 所示。

表 1 模型参数

参数	数值
直流电压 V_{DC}/V	600
交流电压 e/B	220
线路电阻 R_{DC}/Ω	0.06
直流侧滤波电感 L_f/mH	5.5
直流侧滤波电容 $C_f/\mu F$	1 200
滤波电感 L/mH	1
负载 R/Ω	1
频率 f/Hz	50
采样周期 T_s/s	2×10^{-6}
开关频率 f_{sw}/kHz	15

图 4 为不同控制方法下的直流侧电压及三相电流波形。图 4(a)为常规单约束 FCS-MPC 方法，直流侧电压波动幅值较小，波动幅值为 $\pm 16 V$ ；三相电流 THD 为 3.56%。图 4(b)为传统多约束模型预测控制方法，仅在电流约束基础上引入转换次数约束项，由于电流约束和转换次数约束项间的耦合作用，干扰下一时刻开关状态正确选择。从图中可得，直流侧电压大幅振荡，最大电压偏移可达 593 V，三相电流畸变，系统发生不稳定现象。图 4(c)为本文所提的基于 Lyapunov 控制的多约束模型预测控制方法，从图中可以看出在多约束模型预测控制的基础上增加 Lyapunov 控制保证主约束输出的前提下，可有效消除各约束间耦合作用带来的不稳定现象，其直流侧电压波动幅值最大为 $\pm 16 V$ ，三相电流 THD 为 5.11%，系统不稳定现象消失。

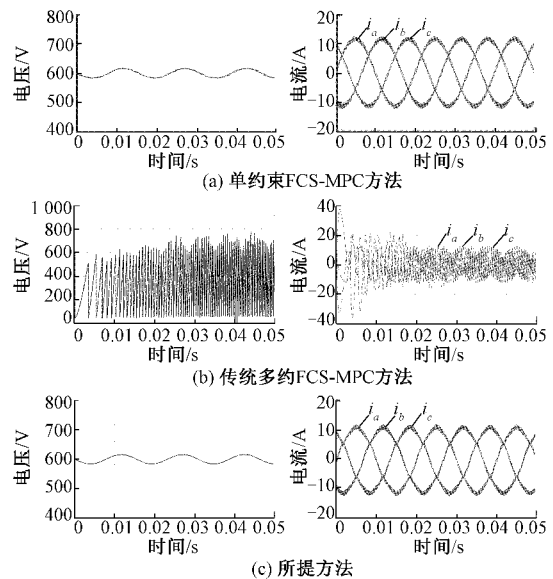


图 4 直流侧电压、三相电流对比

为了说明本文所提出的基于 Lyapunov 控制的多约束模型预测控制方法次约束的控制效果,图 5 所示为一个预测周期 T_s 内开关的转换次数 n_{sw} 变化情况。其中图 5(a) 为单约束 FCS-MPC 方法的次数变化情况,图 5(b) 为所提方法的变化情况。对一个工频周期内控制策略的开关转换次数进行统计,求得其平均转换次数分别为 1.78、1.52 次。此外,降低采样频率,转换次数略有减少,如采样频率为 200、100、50 kHz 时,开关平均转换次数分别为 1.31、1.03、1.01 次。

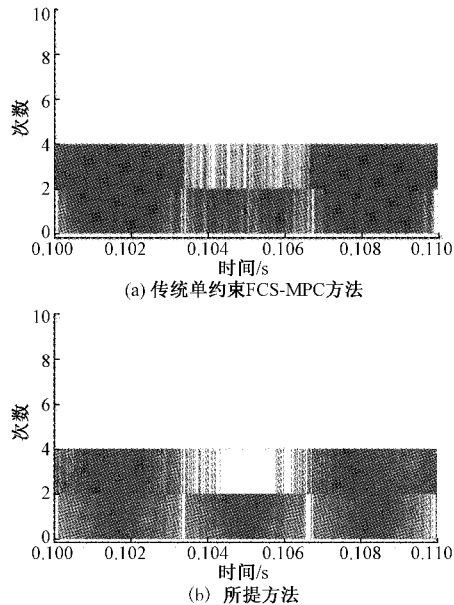


图 5 开关转换次数对比

综上,本文所提方法能有效解决多约束间耦合作用带来的不稳定现象,实现对多目标的有效控制,在保证主约束电流有良好质量的同时,又能大大降低开关转换次数,验证了所提方法消除多约束间耦合效应的有效性。

为验证所提方法对加权系数设置的鲁棒性,对次约束项加权系数为 0.1λ 、 λ 、 10λ 时的平均开关转换次数和三相电流分别进行对比,其平均开关转换次数分别 1.55、1.52、1.42,图 6 所示为三相电流谐波分布图,THD 分别为 5.09%、5.19%、5.63%。可知,随着转换次数约束项加权系数的增大,次约束转换次数权重增加,平均转换次数减少,主约束电流质量略有下降,THD 增加。由此可见,当加

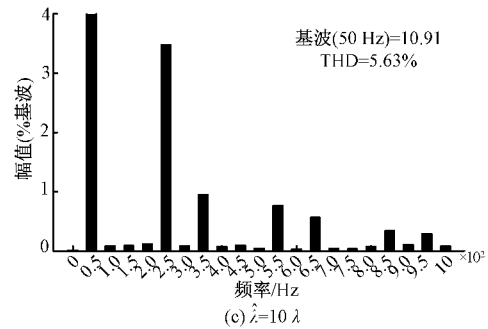
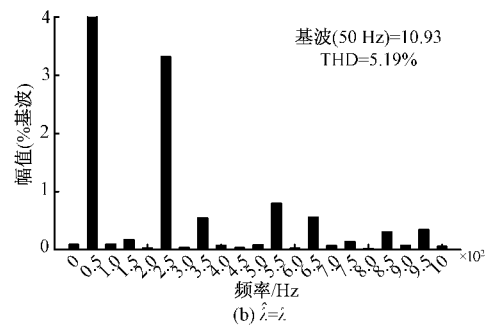
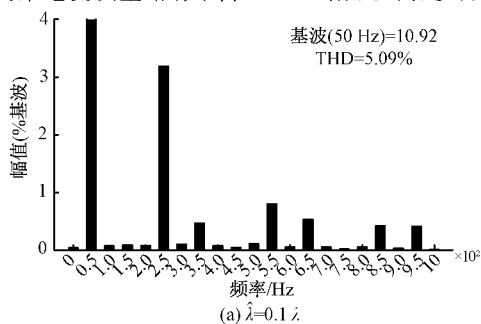


图 6 三相电流 THD 对比

权系数设置与正常阈值偏差很大时,也能保证对多个目标有良好的控制效果,避免了由于加权系数设置不合理引起的控制状态选择不正确,主约束控制性能大幅下降的现象,对加权系数有很好的鲁棒性。

4 结 论

本文针对目前多约束模型预测控制中多约束间耦合作用和加权系数的问题,提出了基于 Lyapunov 控制的多约束模型预测控制方法。该方法首先通过 Lyapunov 控制实现对主约束输出电流的控制,再根据开关转换次数约束项的轻重自由设置加权系数,然后通过目标函数最小化实现多约束协同控制。

仿真结果表明,本文所提方法实现了输出电流、开关转换次数的多约束模型预测协同控制,消除了多约束间耦合效应带来的不利影响,并对加权系数有良好的鲁棒性,在加权系数偏差高达 10 倍时输出电流 THD 仅为 5.63%。但对如何确定最优的加权系数,使其多个约束呈现综合最优的性能,尚需进行进一步研究。

参考文献

- [1] 毛铮,夏鲲,叶艳红. 基于有限集模型预测控制的无刷直流电机转矩波动抑制[J]. 电子测量技术, 2021, 44(7): 39-45.
- [2] 袁庆庆,张波涛,吴豪栋,等. 基于定子磁链滑模观测器的无速度传感器感应电机模型预测控制[J]. 电子测量技术, 2019, 42(18): 36-41.
- [3] 李琰琰,晋玉祥,郭磊磊,等. 电压源逆变器混合多矢量预测共模电压抑制方法[J]. 仪器仪表学报, 2019,

- 40(9): 237-245.
- [4] 高俊,张河山,彭志远,等. 基于状态转移约束的永磁同步电机模型预测控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(8): 86-92.
- [5] 齐贝贝,齐仲里,王林林. 基于模型预测控制的自主水下航行器模糊回坞导引算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(4): 37-41.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] SEFA I, OZDEMIR S, KOMURCUGIL H, et al. An enhanced lyapunov-function based control scheme for three-phase grid-tied VSI with LCL filter[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 504-513.
- [9] NGO V Q B, VU V H, PHAM V T, et al. Lyapunov-induced model predictive power control for grid-tie three-level neutral-point-clamped inverter with dead-time compensation [J]. IEEE Access, 2019, 7(7): 166869-166882.
- [10] DAVARI S S, KHABURI D, KENNEL R. An improved FCS-MPC algorithm for an induction motor with an imposed optimized weighting factor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(3): 1540-1551.
- [11] ROJAS C A, RODRIGUEZ J, VILLARROEL F, et al. Predictive torque and flux control without weighting factors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 681-690.
- [12] XU X, LIU L, FENG G. Stability and stabilization of infinite delay systems: A Lyapunov-based approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2020, 65(11): 4509-4524.
- [13] 马乐,刘跃峰,李志伟,等. 一种基于 Lyapunov 约束的学习控制方法及应用[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 189-198.
- [14] MILANO F. Analogy and convergence of levenberg's and Lyapunov-based methods for power flow analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1663-1664.
- [15] 赵凯辉,陈跃,张吕凡,等. PMSM 失磁故障的有限集模型预测容错控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 79-87.
- [16] 殷海双,朱哲. 基于双 Luenberger 观测器的永磁同步电机预测控制研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(4): 26-31.
- [17] 任兆文,宋书中,黄景涛,等. 单相三电平并网逆变器多状态模型预测控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 19-28.

作者简介

唐圣学,工学博士,教授,主要研究方向为电力电子技术及其可靠性等。

E-mail: 35762187@qq.com

孙志国,硕士研究生,主要研究方法为电力电子技术及其可靠性。

E-mail: zhiguosun1218@163.com