

电流型变流器的改进模型预测控制

李玉玲, 鲍建宇, 张仲超

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 传统的模型预测控制(MPC)采用脉冲响应的非参数模型作为系统的预测控制模型, 计算量大, 很难直接应用于实时控制系统. 本文提出将传统的 MPC 进行改进, 应用到电流型变流器(CSC)功率因数校正系统中. 改进的 MPC 根据 CSC 控制量与被控制量的传递函数得出 CSC 的一阶差分方程作为预测控制模型, 同时保留传统 MPC 反馈校正、动态优化等优点. 将此改进的 MPC 与传统的 PID 控制进行对比研究, 结果表明: 改进的 MPC 用于电流型变流器, 比传统的 PID 控制具有更好的鲁棒性和更快速的动态响应特性.

关键词: 模型预测控制; 电流型变流器; 功率因数校正; PID 控制

中图分类号: TM464

文献标识码: A

Improved model predictive control in current source converter

LI Yu-ling, BAO Jian-yu, ZHANG Zhong-chao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: In traditional model predictive control (MPC), non-parameter model based on pulse response is usually adopted as predictive control model, which results in complex computation, so this method is difficult to implement directly in realtime control system. Improved MPC was proposed and applied to power factor correction system of current source converter (CSC). In the proposed MPC, the first-order differential equations were derived from the transfer functions of controlling variables and controlled variables in CSC, and the equations were used as predictive control model. Meanwhile, the merits of feedback correction and dynamic optimization in traditional MPC were reserved in the new MPC. The proposed MPC gets better robustness and faster dynamic characteristics than the traditional PID control when used in the CSC power factor correction system.

Key words: model predictive control(MPC); current source converter (CSC); power factor correction; PID control

1 引言(Introduction)

模型预测控制(Model Predictive Control, 简称 MPC)采用基于脉冲响应的非参数模型作为内部模型^[1], 用过去和未来的输入输出信息, 预测系统未来的输出状态, 经过用实测系统输出与预测模型输出的误差来进行反馈校正后, 再与参考输入轨迹进行比较, 通过二次型性能指标动态优化, 计算当前时刻加于系统的控制动作, 完成整个控制循环. 由于这种算法的基本思想是, 首先预测系统未来的输出状态, 再去确定当前的控制动作, 即先控制后动作, 所以具有预见性, 优于先有信息反馈, 再产生控制动作的经典反馈控制系统.

但是, 到目前为止, 预测控制应用于工业领域的例子大都局限于过程控制领域^[2,3], 在快速的电气

传动领域则不多见. 这是因为快速系统中要求控制算法的计算周期必须限制在很短的范围内, 而传统的模型预测控制计算量大, 难于直接实现, 为此必须进行适当的改进.

在电流型变流器(Current Source Converter, 简称 CSC)功率因数校正系统中, 最常用的控制方法是 PID 控制, 该控制具有结构简单, 易于实现等优点. 但是, 工程实际中 PID 控制器参数的整定一般采用经验方法, 很难得到最优的控制参数, 且控制过程调节时间过长, 难以满足系统控制品质的要求. 为了实现系统良好的控制性能, 本文以 CSC 的一阶差分方程作为预测控制模型, 将 MPC 控制应用到 CSC 功率因数校正系统中, 并与传统的 PID 控制对比研究, 得出了一些有益的结论.

2 电流型变流器的数学模型 (Mathematical mode of current source converter)

CSC 是电压型变流器的对偶结构,如图 1 所示.交流侧由 L, C 组成二阶低通滤波器,滤除交流侧电流中的开关谐波;直流侧接大电感作为储能元件,同时使直流侧电流近似为直流.开关器件由可控器件与二极管串联组成,以提高器件关断时承受反压的能力.与电压型变流器相似,CSC 具有 4 象限运行的能力.

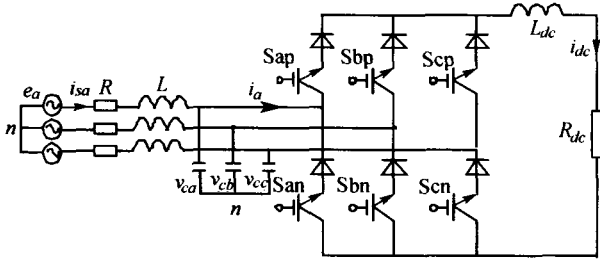


图 1 CSC 拓扑结构
Fig. 1 Topology of CSC

假设三相电路完全对称,开关元件理想,并且开关频率远大于电网频率,电感线性,考虑电感的内阻,设 $L_a = L_b = L_c = L, R_a = R_b = R_c = R$.

系统的状态方程如下^[4,5]:

$$C \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中: i_{sj} 为网侧电流, i_j 为变流器输入电流, v_{ej} 为变流器电容电压, e_j 为网侧电压, $j = a, b, c$.

将式(2)代入式(1)得(为简便,只取 A 相进行分析)

$$LC \frac{d^2 i_{sa}}{dt^2} + RC \frac{di_{sa}}{dt} + i_{sa} = i_a + C \frac{de_a}{dt}. \quad (3)$$

可见,通过控制变流器的输入电流 i_a 就可以控制网侧电流 i_{sa} .

式(3)经拉氏变换得 $I_a(s)$ 与 $I_{sa}(s)$ 的传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}. \quad (4)$$

3 CSC 的模型预测控制 (Model predictive control of CSC)

模型预测控制主要包括预测模型、参考轨迹、反

馈校正、动态优化 4 部分^[1].基于单位功率因数校正的 CSC 的 MPC 具体实现如下.

3.1 预测模型 (Predictive model)

预测控制的预测模型是一个广义的概念.任何具有预测功能、能进行预测计算、反映系统特性的模型均可作为它的预测模型.对实时控制而言,在满足要求的情况下(能够复现对象的动态特性),模型应该越简单越好.而在 CSC 中,合理设计交流侧滤波器参数,使 $LC\omega_c^2 \ll 1$ 成立,有^[6,7]

$$\frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} \approx \frac{1}{RCs + 1}. \quad (5)$$

式中 ω_c 为电流内环截止频率.

式(5)经零阶采样保持、离散化的传递函数为

$$Z \left[\frac{1 - e^{-sT_s}}{s} \cdot \frac{1}{RCs + 1} \right] = \frac{b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}}. \quad (6)$$

其中: $a_1 = -e^{-\frac{T_s}{RC}}, b_1(1 - e^{-\frac{T_s}{RC}}), T_s$ 为采样周期.

由式(6)得系统的差分方程为

$$i_{sa}(k) = -a_1 i_{sa}(k-1) + b_1 i_a(k-1). \quad (7)$$

由式(7)可得 $k+1$ 时刻网侧电流的预测模型可写为

$$i_{sam}(k+1) = -a_1 i_{sa}(k) + b_1 i_a(k). \quad (8)$$

式中: $i_{sam}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻预测模型的输出值, $i_{sa}(k)$ 为 k 时刻网侧电流的实测值, $i_a(k)$ 为 k 时刻的控制量.

3.2 参考轨迹 (Reference trajectory)

在控制中,希望被控对象能沿着一条假想的期望轨迹“柔和”地达到设定值,以获得优良的控制品质.这种方法包含“事先”的策略,可以预先采取措施来补偿控制对象中一些不稳定因素所造成的误差.CSC 的控制目标 i_{sa} 为时变参数,可选参考轨迹的形式为^[1]

$$i_{sar}(k+1) = \alpha i_{sa}(k) + (1 - \alpha) i_{sa}^*(k+1). \quad (9)$$

式中: $\alpha = e^{-\frac{T_s}{\tau}}, \tau$ 为参考轨迹的时间常数, $i_{sa}(k)$ 为 k 时刻网侧电流的实测值, $i_{sa}^*(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的给定值, $i_{sar}(k+1)$ 即为 $k+1$ 时刻由参考轨迹所确定的期望输出值.可以看出参考轨迹系数 α 决定了系统输出到达最终设定值的速度. α 越大,控制系统的快速性越差,鲁棒性越好.相反, α 越小,控制系统的快速性越好,鲁棒性越差.因此, α 的选取要折中考虑.

3.3 反馈校正 (Feedback correction)

考虑实际对象中存在时变、非线性及系统中的

各种随机干扰,可通过实测系统输出与预测模型输出的误差进行反馈校正后,作为 $k+1$ 时刻系统的闭环预测输出,即

$$i_{sap}(k+1) = i_{sam}(k+1) + e(k). \quad (10)$$

式中: $i_{sap}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的预测电流输出值, $e(k)$ 为 k 时刻实测电流与预测模型输出电流的误差

$$e(k) = i_{sa}(k) - i_{sam}(k).$$

3.4 动态优化(Dynamic optimization)

在控制过程中,既希望未来时刻的预测电流 $i_{sap}(k+1)$ 尽可能地接近由参考轨迹所确定的期望输出 $i_{sar}(k+1)$, 又不希望控制量过大. 因此,优化性能指标取为

$$J = q[i_{sap}(k+1) - i_{sar}(k+1)]^2 + \lambda[i_a(k)]^2. \quad (11)$$

式中 q, λ 为权系数, 分别表示对跟踪误差和控制量的约束. 合理选择 q, λ [8,9], 可得到使控制目标 $J \rightarrow \min$, 且使预测输出与参考轨迹确定的期望输出间的偏差最小的控制量 $i_a(k)$:

$$i_a(k) = \frac{-qb_1}{\lambda + qb_1^2} [-a_1 i_{sa}(k) + e(k) - i_{sar}(k+1)]. \quad (12)$$

3.5 模型预测控制电路结构图(Diagram of the MPC block)

CSC 网侧电流的 MPC 控制如图 2 所示. 系统在时刻 k 采样, 得到变流器实测的网侧电流值 $i_{sa}(k)$, 实时计算系统实测输出与预测模型输出的误差 $e(k)$, 进行反馈校正后, 得到预测输出值 $i_{sap}(k+1)$, 再与参考轨迹输出值 $i_{sar}(k+1)$ 进行比较, 通过动态优化计算当前时刻加于系统的控制动作 $i_a(k)$, 完成一个控制循环, 等待 $k+1$ 时刻到来重复上述过程.

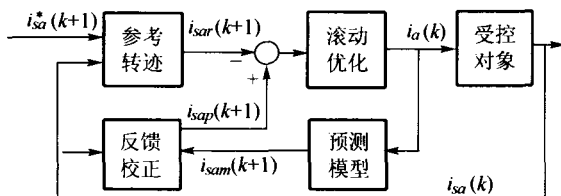


图2 CSC 的 MPC 控制原理

Fig. 2 MPC scheme of CSC

综上所述, MPC 具有实时预测、实时优化、实时校正的特点. 式(10)以预测误差补充了模型预测, 形成了闭环预测的机制. 模型外的不确定因素对系统动态的影响通过闭环预测反馈到控制律式(11)的计算中, 使模型失配或扰动的影响得到了适当补偿, 因

而提高了控制系统的鲁棒性和抗干扰能力. 而系统通过 $k+1$ 时刻的期望输出, 求得 k 时刻相应的控制量, 使得控制目标 i_{sa} 快速的跟踪期望的输出, 因而具有快速的动态响应性能.

4 CSC 单位功率因数的实现(Unity power factor realization of the CSC)

在 CSC 功率因数校正系统中, 采用直流电流和交流电流的双闭环控制, 外环的直流电流环采用典型的 PI 控制, 目的是保持直流电流 i_{dc} 恒定. 外环的输出为变流器网侧电流峰值 I_m^* , 将 I_m^* 与电网电压归一化的同步信号(单位幅值正弦波)相乘, 作为内环(交流电流环)的电流指令信号, 通过模型预测控制(MPC), 使网侧电流跟踪网侧电压, 实现网侧电流和电压的单位功率因数. CSC 单位功率因数的实现如图 3 所示.

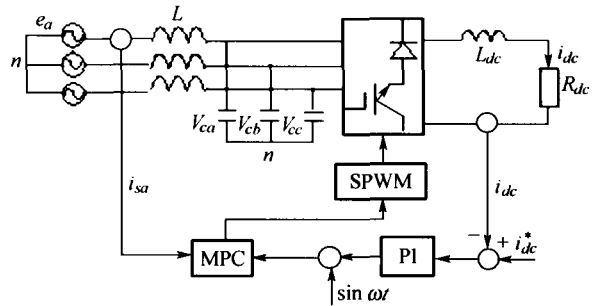


图3 CSC 功率因数校正原理图

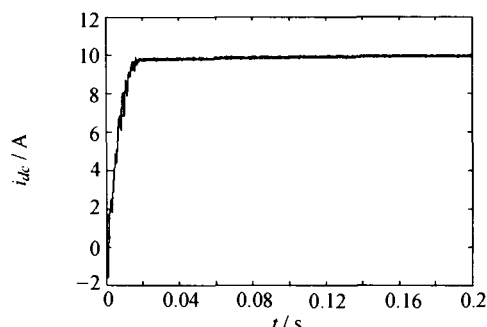
Fig. 3 Scheme for power factor correction of CSC

5 仿真实验结果(Simulation and experiment results)

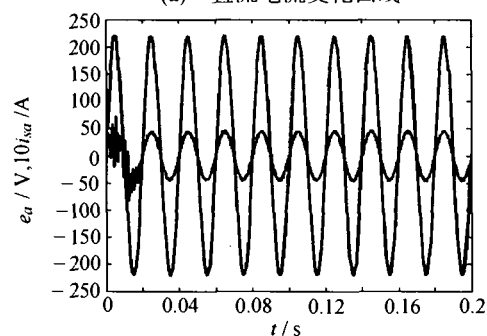
本文对所提的 MPC 法和传统 PID 法进行了仿真和实验. 参数如下: $e_a = 220\text{ V}$, $L = 0.8\text{ mH}$, $R = 0.5\text{ }\Omega$, $C = 56\text{ }\mu\text{F}$, $L_{dc} = 150\text{ mH}$, $R_{dc} = 15\text{ }\Omega$, $q = 9$, $\lambda = 1$, 直流电流给定值 $i_{dc}^* = 10\text{ A}$. MPC 和 PID 仿真结果分别如图 4, 5 所示. 可以看出, 两种方法均可实现网侧电流电压同相位, 直流侧电流达到稳定值; 但 MPC 法大约需 20 ms 达到稳态, 而 PID 法则需 40 ms 达到稳态. 进一步计算得到, MPC 与 PID 控制的功率因数分别为 0.997 和 0.989, 网侧电流总谐波畸变率(THD)分别为 0.0122 和 0.0502. 可见, MPC 控制比 PID 控制具有更快的动态响应和更优的稳态控制性能.

为了进一步证明理论分析和仿真结果的正确性, 构造了一台 1.5 kW 的实验装置, 控制系统由 DSP 芯片 TMS320LF2407 完成. 采用 C 语言编程, 实验中开关频率和采样频率均取为 5 kHz. 实验系统利

用 MPC 和 PID 方法所得的 A 相网侧电流和电压稳态波形如图 6 所示,由实验结果可看出本文提出的 MPC 法有效地减少了网侧电流的低次谐波,实现了网侧电压电流的高功率因数。



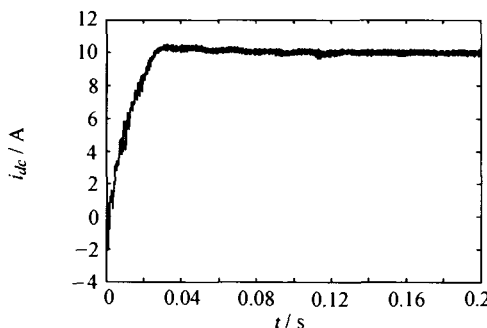
(a) 直流电流变化曲线



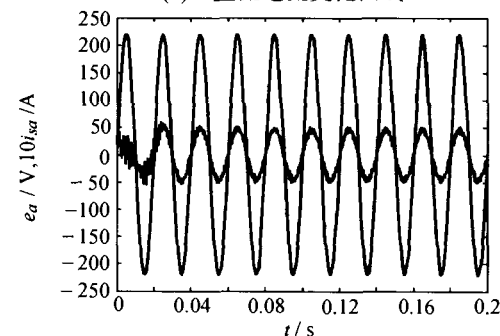
(b) A 相网侧电压和电流

图 4 CSC 的 MPC 控制仿真波形

Fig. 4 MPC simulation waveform of CSC



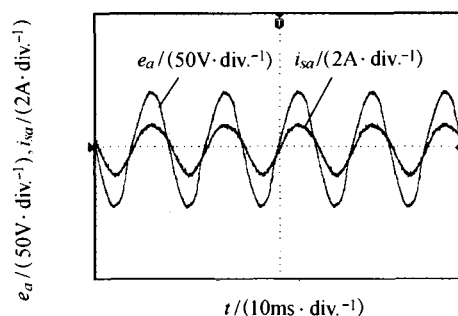
(a) 直流电流变化曲线



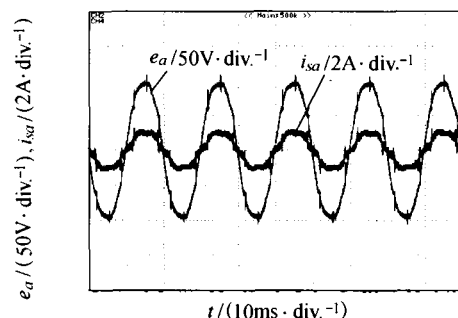
(b) A 相网侧电压和电流

图 5 CSC 的 PID 控制仿真波形

Fig. 5 PID simulation waveform of CSC



(a) MPC 法 A 相电压和电流的稳态波形



(b) PID 法 A 相电压和电流的稳态波形

图 6 MPC 和 PID 实验波形

Fig. 6 Experiment waveforms with MPC & PID

6 结论 (Conclusion)

本文提出 CSC 模型预测控制,具有传统预测控制反馈校正、动态优化等特点,但又避免了其计算量大的缺点.同时,该方法也优于 CSC 常用的比例积分控制.本文研究表明:预测控制理论运用于 CSC 这样的快速系统的控制,具有优良的控制性能.将预测控制理论推广应用到其他快速控制领域,有着十分广阔的应用前景。

参考文献 (References):

- [1] 舒迪前. 预测控制系统及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 1996:40-44.
(SHU Diqian. *Predictive Control and Application* [M]. Beijing: China Machine Press, 1996:40-44.)
- [2] 唐功友. 时滞系统的降维状态预测观测器及预测控制器设计[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(2): 295-298.
(TANG Gongyou. Design of reduced-order predictive state observer and predictive controller for systems with time-delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 21(2): 295-298.)
- [3] 许振飞, 蒋静坪, 骆再飞. 模糊模型算法控制的永磁同步电动机位置伺服系统[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 99-102.
(XU Zhenwei, JIANG Jingping, LUO Zaifei. Permanent magnet synchronous motor position servo system controlled by fuzzy model algorithmic control [J]. *Trans on China Electrotechnical Society*, 2003, 18(4): 99-102.)

- [4] 王长永. 组合变流器相移 SPWM 技术及其在有源电力滤波器中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2000 年.
(WANG Changyong. *Multi-modular converter with phase-shifted SPWM technique and its application to active power filter* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000.)
- [5] WANG X, OOI B T. Unity PF current-source rectifier based on dynamic tri-logic PWM [J]. *IEEE Trans on Power Electron*, 1993, 8(3): 288 - 294.
- [6] KAZERANI M, ZHANG Zhongchao, OOI B O. Linearly controllable boost voltage from tri-Level PWM current-source inverter [J]. *IEEE Trans on Ind Electron*, 1995, 42(1): 72 - 77.
- [7] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 321 - 359.
(ZHANG Congwei, ZHANG Xing. *PWM Rectifiers and Control* [M]. Beijing: China Machine Press, 2003: 321 - 359.)
- [8] BOTAN C, ONEA A. The weight selection in the LQ optimal control for an electrical drive system [J]. *Industrial Electronics Proceedings of the IEEE Int Symposium*, 1997, 7(3): 1039 - 1043.
- [9] 刘豹. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 272 - 293.
(LIU Bao. *Modern Control Theories* [M]. Beijing: China Machine Press, 1999: 272 - 293.)

作者简介:

李玉玲 (1973—), 女, 博士生, 主要从事有源滤波、功率因素校正方面的研究, E-mail: liyl@cee.zju.edu.cn;

鲍建宇 (1976—), 男, 从事多电平变流器方面的研究, E-mail: jianyu_bao@163.com;

张仲超 (1942—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力电子技术和应用方面研究, E-mail: zhangzc@public.zju.edu.cn.

(上接第 977 页)

- [8] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
(HU Luxian. *Earthquake Engineering* [M]. Beijing: Earthquake Press, 1988.)
- [9] 闵书亮. 主附结构的组合及控制机理研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1993, 26(4): 12 - 18
(MIN Shuliang. Study on the composition and control principles of main-secondary structure [J]. *J of Harbin Archit & Civ Eng Inst*, 1993, 26(4): 13 - 18.)
- [10] 陈仁福. 大跨悬索桥理论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1994.
(CHENG Renfu. *Theory of Large Span Suspend Bridge* [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1994.)

作者简介:

邹立华 (1966—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构减振控制研究, E-mail: zoulhua66@163.com;

赵建昌 (1962—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构工程研究, E-mail: zhaojchang@163.com;

虞庐松 (1968—), 男, 教授, 博士, 主要从事工程抗震研究, E-mail: yls@163.com.