

基于变指数滑模的三相混合变流器模型预测电流控制研究

马辉, 陈伟涛, 余本领, 赵军波, 席磊

(三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 710049)

摘要:为降低三相混合变流器输入电流畸变率并提高系统对负载变化的鲁棒性,提出一种基于变指数趋近律滑模控制的模型预测电流控制方法。首先,在无源变流器前端串联滤波电感,以抑制总输入电流中的周期性畸变。其次,基于系统数学模型,为电压外环设计变指数趋近律滑模控制器,显著提升了系统应对负载扰动的鲁棒性。在内环控制中,为有源变流器设计了快速最优三矢量模型预测控制器,仅需两次寻优即可确定最优矢量组合,大幅降低了计算复杂度;为无源变流器设计了一种基于三阶扩展状态观测器的输入电压观测方法,减少了传感器使用数量,同时有效提升了输入电流质量。最后,将有源变流器的预测目标设定为总输入电流,实现了三相混合变流器总输入电流的高质量控制。

关键词:三相混合变流器;模型预测控制;滑模控制;变指数趋近律;电流畸变

DOI:10.15938/j.emc.2025.07.008

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)07-0075-10

Research on model predictive current control of three-phase hybrid converter based on variable index sliding mode

MA Hui, CHEN Weitao, YU Benling, ZHAO Junbo, XI Lei

(College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 710049, China)

Abstract:In order to reduce the input current distortion rate of a three-phase hybrid converter and improve the robustness of the system to load variations, a model-predictive current control method based on variable-exponential convergence law sliding mode control was proposed. First, a filter inductor was connected in series at the front end of the passive converter to suppress the periodic distortion in the total input current. Second, based on the system mathematical model, a variable exponential convergence law sliding mode controller was designed for the outer voltage loop, which significantly improves the robustness of the system against load disturbances. In the inner-loop control, a fast optimal three-vector model prediction controller was designed for the active converter, which can determine the optimal vector combinations with only two optimization searches and significantly reduces the computational complexity; and an input voltage observation method based on the third-order extended state observer is designed for the passive converter, which reduces the number of sensors used and effectively improves the quality of the

收稿日期: 2025-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(52377191); 湖北省自然科学基金(2024AFB584)

作者简介: 马辉(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力变换器拓扑设计与控制应用;

陈伟涛(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为混合变换器控制与应用;

余本领(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划及运行可靠性分析;

赵军波(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化;

席磊(1982—), 男, 博士, 教授, 研究方向为人工智能技术和自动发电控制。

通信作者: 马辉

input current at the same time. Finally, the prediction target of the active converter was set as the total input current, which realizes the high-quality control of the total input current of the three-phase hybrid converter.

Keywords: three-phase hybrid converter; model prediction control; sliding mode control; variable exponential reaching law; current distortion

0 引言

随着“双碳”目标的推动和新能源汽车的快速发展,现有充电桩的充电速度和效率存在明显不足,且可能对电网造成较大的负荷压力,从而影响用户体验,并无法满足日益增长的社会需求。相比之下,混合变流器具有高效率、高功率因数、优良的可靠性和高功率密度等显著优势,能够实现双向功率流动,且在相同功率等级下优于传统有源变流器。因此,混合变流器^[1]在充电桩中的应用前景十分广阔。除了在充电领域的潜力外,混合变流器在电动飞机、电机驱动等领域也引起了广泛关注,并成为研究人员的重点研究方向^[2-4]。

在混合变流器中,无源变流器在自然换相点处存在较大的电流变化率,导致输入电流出现周期性的电流尖峰,进而影响电流质量。为抑制自然换相点处的电流变化,文献[5]提出在无源变流器的前端串联滤波电感。此外,为了实现混合变流器的稳定控制,使其直流侧电压在受到扰动时保持稳定且无波动,同时降低输入电流的总谐波失真以保证高功率因数运行,设计合适的控制器至关重要。但是目前国内关于混合变流器的研究较少,国内主要以王久和教授团队为代表。而 PWM 变流器的相关研究较多,因此可以借鉴成熟的 PWM 控制技术来设计混合变流器的控制系统。在现有研究中,模型预测控制(model predictive control, MPC)和滑模控制(sliding mode control, SMC)方法已经得到了深入研究。

模型预测控制适用于多约束系统,通过预测未来状态来提升系统的动态性能。同时,它具有较强的适应能力,能够实时调整控制策略,应对系统变化和外部扰动。与无源控制^[5]相比,模型预测控制在设计上更加简洁,逻辑结构更加清晰。文献[6]中提出了一种基于神经网络的模型预测电流控制方法,通过在多步预测中保持神经网络输出层的分类个数恒定,从而使得输入与输出与预测步长无关,有效减少了计算时间和计算损耗。文献[7]采用了模

型预测直接功率控制方法,并引入了一种简化的开关序列选择策略,显著降低了算法的复杂度,同时实现了交流侧功率的最优控制。文献[8]提出了一种小偏差双矢量模型预测控制方法,该方法通过减少候选电压矢量的数量,从而降低了计算量并有效减小了开关频率。为避免控制过程中出现负电压矢量作用时间,该文章还提出了一种小偏差作用时间的计算方法。文献[9]提出了一种基于无模型预测控制的电流梯度更新方法,该方法解决了传统方法中仅对已应用电压矢量的电流梯度进行更新的问题,从而避免了其他矢量电流梯度值停滞所导致的预测不准确现象。无模型预测控制不依赖于系统模型参数,具有较强的参数鲁棒性。文献[10]则提出了一种基于滑模观测器的无模型预测控制方法,该方法避免了使用代数辨识技术所需的大量数据存储空间,并有效提高了系统的动态响应速度。文献[11]提出了一种无模型预测电流控制方法,通过设计扩张状态观测器对系统扰动进行实时观测,并结合梯度下降方法实现自适应增益的动态更新。该方法有效消除了系统参数误差带来的不利影响,显著优化了并网电流的鲁棒性。

传统的模型预测控制方法通常采用比例积分控制器(proportional integral, PI)生成参考值,并将其传递给代价函数。然而,由于 PI 参数的固定性,这种方法难以满足系统在复杂动态环境下的需求。滑模控制作为一种典型的非线性控制策略,因其简单实现、快速响应以及较强的鲁棒性而在许多应用中得到广泛应用。文献[12]提出了一种自适应滑模控制方案,旨在减少抖振现象,并通过设计三阶超螺旋扰动观测器来实时观测不确定扰动,从而有效提升系统的抗干扰能力。文献[13]采用全局滑模控制设计了控制律,以确保系统的全局鲁棒性,并结合自适应超螺旋算法设计了切换律,以改善系统中的抖振问题,从而确保系统在不确定性条件下依然具有较强的鲁棒性。然而,该方法的设计过程相对复杂。文献[14]则使用扩张状态观测器来消除直流纹波对控制器的影响,并通过设计积分幂次趋近律来消

除滑模控制中因引入自适应律所产生的误差,有效地降低了输入电流的总谐波失真。文献[15]提出了一种基于一阶终端滑模的设计方法,将其应用于二阶非奇异终端滑模面,并设计了扩张状态观测器用于观测和补偿扰动信号,从而有效抑制了抖振对电流的影响,并保证了电机电流的快速跟踪。文献[16]设计了一种二阶非奇异终端滑模控制器,该控制器能够显著抑制抖振现象,并具备较快的动态响应速度,进一步优化了控制性能。

本文针对三相混合变流器提出一种变指数滑模预测电流控制(variable exponent sliding mode predictive current control, V-SMPCC)方法。首先,分析三相混合变流器中存在的周期性电流畸变问题,并通过在无源变流器前端串联滤波电感,有效抑制该现象。然后,基于三相混合变流器的数学模型,设计相应的控制策略。外环采用滑模控制器以增强系统对负载突变的抗扰能力,并引入一种新型变指数趋近律,以减缓系统抖振。内环分别为有源和无源变流器设计快速最优三矢量模型预测控制器和三阶扩展状态观测器(extended state observer, ESO)模型预测控制器。最终,实现三相混合变流器在高功率因数和低输入电流畸变率下的稳定运行。

1 三相混合变流器数学模型

传统混合变流器的结构如图1所示,无源变流器前端没有串联滤波电感。

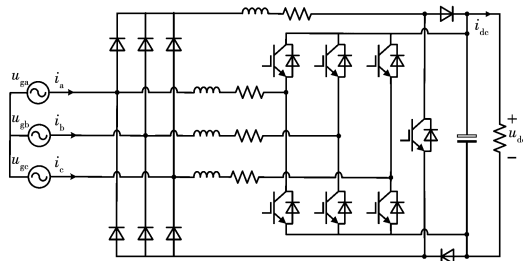


图1 混合三相电压型整流电路拓扑结构

Fig.1 Topology of hybrid three-phase voltage converter circuit

图2为三相混合变流器。图2中： u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 为电网侧三相输入电压； i_a, i_b, i_c 为电网侧三相输入电流； L_1 为有源变流器前端滤波电感； R_1 为滤波电感等效电阻； $S_j (j = 1, 2, \dots, 6)$ 为有源变流器的开关元件； L_{21} 为无源变流器前端串联滤波电感； R_{21} 为滤波电感等效电阻； L_{22} 为无源变流器升压电感，

R_{22} 为升压电感等效电阻； S_7 为无源变流器的开关管； u_{dc} 为直流侧负载电压； i_{dc} 为直流侧负载电流； R_L 为负载电阻； C 为直流侧滤波电容。

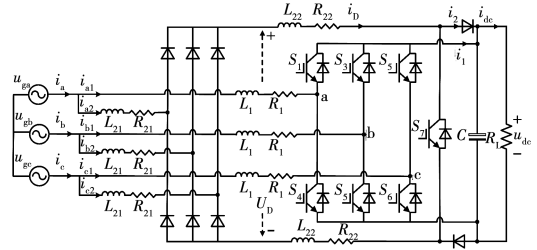


图2 三相混合变流器

Fig.2 Three-phase hybrid converter

1.1 周期性电流畸变分析

无源变流器前端无滤波电感时,总输入电流和无源变流器输入电流如图3所示。

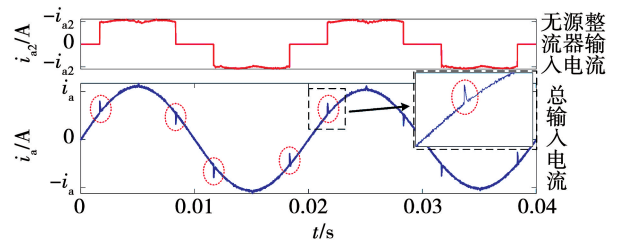


图3 存在畸变的输入电流

Fig.3 Input current with distortion

以a相为例,无源变流器输入电流在半个周期的数学模型为

$$\frac{di_{a2}}{dt} = \begin{cases} 0, & 0 < t < \frac{\pi}{6}; \\ \frac{u_{ga} - u_{gb} - i_{a2}R_{22} - (1 - S_7)u_{dc}}{L_{22}}, & \frac{\pi}{6} < t < \frac{\pi}{2}; \\ \frac{u_{ga} - u_{gc} - i_{a2}R_{22} - (1 - S_7)u_{dc}}{L_{22}}, & \frac{\pi}{2} < t < \frac{5\pi}{6}; \\ 0, & \frac{5\pi}{6} < t < \pi. \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知,无源变流器的输入电流在自然换相点处存在较大的电流变化率,使总输入电流在每个周期的 $\frac{\pi}{6}$ 、 $\frac{5\pi}{6}$ 、 $\frac{7\pi}{6}$ 、 $\frac{11\pi}{6}$ 处发生突变,在 $\frac{\pi}{2}$ 和 π 处发生的突变略小。考虑周期性电流突变是由无源变流器的输入电流变化率过大造成,通过无源变流器前端串联电感减小电流的变化率。

1.2 三相混合变流器数学建模

有源变流器通过三个滤波电感与电网相连,根据基尔霍夫电压定律,列写方程可得有源变流器的数学模型为

$$L_1 di_{x1}/dt = u_{gx} - R_1 i_{x1} - u_{x0} \quad (2)$$

式中 $x = a, b, c$ 。将其转换到 dq0 坐标系可以得到:

$$\left. \begin{aligned} L_1 di_{d1}/dt &= u_{gd} - R_1 i_{d1} - u_d + \omega L_1 i_{q1}; \\ L_1 di_{q1}/dt &= u_{gq} - R_1 i_{q1} - u_q - \omega L_1 i_{d1} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 i_{d1}, i_{q1} 分别为 i_{a1}, i_{b1}, i_{c1} 在 dq0 轴上有源变流器的输入电流; u_{gd}, u_{gq} 分别为 u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 在 dq0 轴上的电网电压; $u_d = S_d u_{dc}, u_q = S_q u_{dc}$; ω 为电网角频率。

为了简化分析,将无源变流器中三相电源经过不控整流桥后输出的电压等效为一恒定直流电压源 U_D 。无源变流器在三相静止坐标系下的状态平均方程为

$$L_{22} di_D/dt = 0.5 U_D - R_{22} i_D - 0.5(1-D)u_{dc} \quad (4)$$

式中: i_D 为不控整流桥的输出电流; D 为占空比。直流侧共用电容,由基尔霍夫电流定律可得

$$i_1 + i_2 = C du_{dc}/dt + u_{dc}/R_L \quad (5)$$

其中

$$i_2 = \begin{cases} i_D, & \text{开关 } S_7 \text{ 关断;} \\ 0, & \text{开关 } S_7 \text{ 导通。} \end{cases} \quad (6)$$

2 控制器设计

图4展示了V-SMPCC的控制框图。在该控制系统中,采用快速最优三矢量模型预测控制来控制有源变流器,而无源变流器则采用三阶扩展状态观测器模型预测控制器。通过模型预测控制,可以有效降低输入电流的畸变率,并实现系统的高功率因数运行。电压外环采用基于变指数趋近律的滑模控制策略,旨在稳定直流输出电压并提高系统对负载变化的动态响应能力。在控制过程中,直流电压的采样值被反馈至滑模控制器,以生成内环电流参考值。此参考值分别乘以相应的增益,作为两个电流内环的参考输入。快速最优三矢量模型预测控制通过优先计算最优矢量所在的扇区位置,从而获得最优的三矢量组合,并计算出作用时间。对于无源变流器,三阶扩展状态观测器模型预测控制器通过将无源变流器的电感电流和负载电压输入扩展状态观测器,提供整流电压和电感电流的观测值,这些信息将作为输入传递给模型预测控制器,最终通过调整占空比实现对无源变流器的控制。

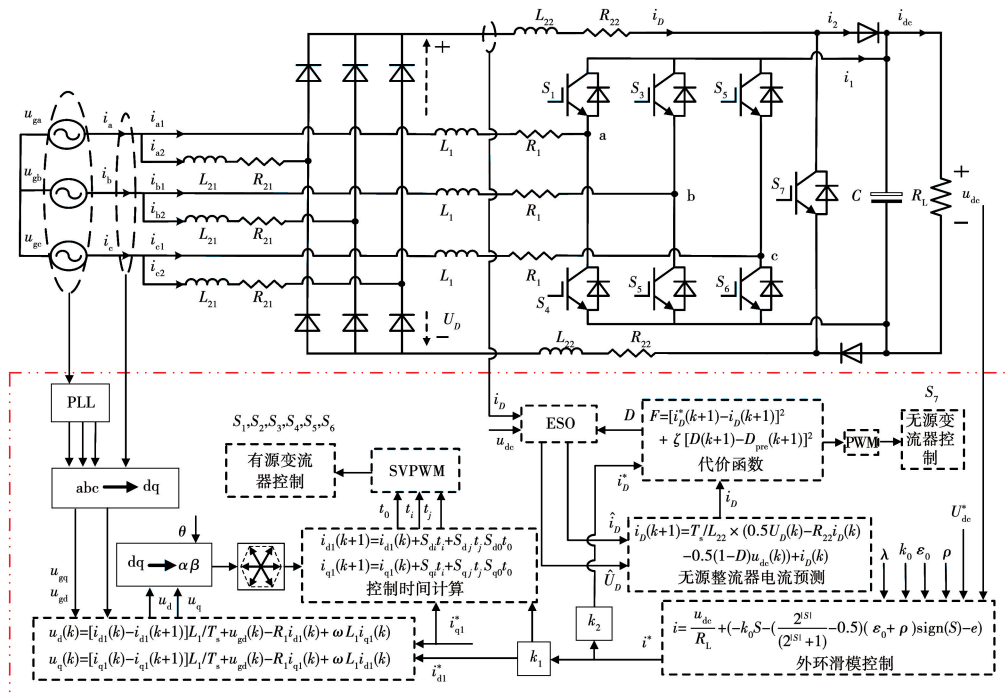


图4 变指数滑模预测电流控制框图

Fig. 4 Block diagram of variable exponent sliding mode predictive current control

2.1 内环模型预测控制设计

如图5所示,有源变流器的快速最优三矢量模型预测控制通过参考电流直接计算得到最优矢量所处的扇区位置,通过计算得到各个电压矢量的作用时间并通过调制实现三相混合变流器控制,并有效减少寻优次数^[17]。

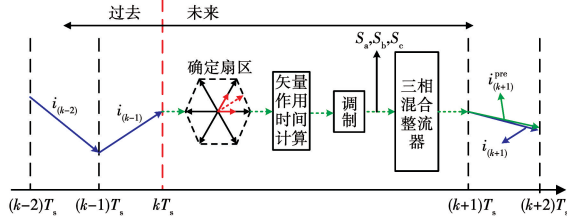


图5 快速最优三矢量模型预测电流控制过程

Fig.5 Fast optimal three-vector model predictive current control process

对式(3)和式(4)进行离散化处理得到:

$$\left. \begin{aligned} i_{d1}(k+1) &= T_s/L_1 \times (u_{gd}(k) - R_1 i_{d1}(k) - u_d(k) + \omega L_1 i_{q1}(k)) + i_{d1}(k); \\ i_{q1}(k+1) &= T_s/L_1 \times (u_{gq}(k) - R_1 i_{q1}(k) - u_q(k) - \omega L_1 i_{d1}(k)) + i_{q1}(k). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$i_D(k+1) = T_s/L_{22} \times (0.5U_D(k) - R_{22}i_D(k) - 0.5(1-D)u_{dc}(k)) + i_D(k). \quad (8)$$

式中 T_s 为采样时间。此外,采样周期远小于电网电压周期,所以相邻周期的电网电压离散值近似相等,即

$$u_g(k+1) = u_g(k). \quad (9)$$

式(7)中 $i_{d1}(k)$ 和 $i_{q1}(k)$ 是经过 dq 变换的有源变流器输入电流的采样值。在此过程中,有源变流器的功能是控制其输入电流正弦化且保持与电网电压同相位。此时总输入电流为

$$i_x = i_{x1} + i_{x2}. \quad (10)$$

总输入电流由2个并联变流器的输入电流叠加构成,即正弦波和近似方波的叠加,这会导致总输入电流产生明显的畸变。为了解决这一问题,本文将有源变流器的电流采样值调整为总输入电流,从而将其控制目标转变为实现总输入电流的正弦化。即确保有源变流器的输入电流与无源变流器的输入电流叠加后,总输入电流仍能保持理想的正弦波形。

有源变流器:在传统单矢量模型预测控制中,通过遍历计算六种非零开关矢量对应的电流值,并利

用代价函数选择误差最小的开关矢量以作用于系统。然而,该方法存在的问题是,所选择的作用矢量与参考电压矢量之间的误差较大,从而影响了控制效果。而三矢量模型预测控制能够在一个控制周期内显著减小输出控制电压矢量与参考电压矢量之间的误差,从而提高系统的控制精度和性能。

由式(7)可得 $u_d(k)$ 和 $u_q(k)$ 为:

$$\left. \begin{aligned} u_d(k) &= [i_{d1}(k) - i_{d1}(k+1)]L_1/T_s + u_{gd}(k) - R_1 i_{d1}(k) + \omega L_1 i_{q1}(k); \\ u_q(k) &= [i_{q1}(k) - i_{q1}(k+1)]L_1/T_s + u_{gq}(k) - R_1 i_{q1}(k) - \omega L_1 i_{d1}(k). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

通过式(11)变换到 $\alpha\beta$ 坐标系求解 $u_\alpha(k)$ 和 $u_\beta(k)$ 可以经过一次比较得到最优矢量所在的扇区,并得到2个非零电压矢量。

当三矢量作用时,需要求解3个矢量的作用时间,设2个常矢量分别为 V_i 和 V_j ,零矢量为 V_0 ,作用时间分别为 t_i, t_j, t_0 。预测电流公式为:

$$\left. \begin{aligned} i_{d1}(k+1) &= i_{d1}(k) + S_{di}t_i + S_{dj}t_j + S_{d0}t_0; \\ i_{q1}(k+1) &= i_{q1}(k) + S_{qi}t_i + S_{qj}t_j + S_{q0}t_0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 S_{xi}, S_{xj}, S_{x0} ($x = d, q$) 为矢量 V_i, V_j 和 V_0 作用时的电流变化率。将三矢量代入式(3)并联立式(12),可以得到3个矢量的作用时间:

$$\left. \begin{aligned} t_i &= \frac{(i_{dr} - (i_{d1} + S_{d0}T_s))(S_{qj} - S_{q0}) - (S_{qj} - S_{d0})(i_{qr} - (i_{q1} + S_{q0}T_s))}{(S_{di} - S_{d0})(S_{qj} - S_{q0}) - (S_{dj} - S_{d0})(S_{qi} - S_{q0})}; \\ t_j &= \frac{(S_{di} - S_{d0})(i_{qr} - (i_{q1} + S_{q0}T_s)) - (i_{dr} - (i_{d1} + S_{d0}T_s))(S_{qi} - S_{q0})}{(S_{di} - S_{d0})(S_{qj} - S_{q0}) - (S_{dj} - S_{d0})(S_{qi} - S_{q0})}; \\ t_0 &= T_s - t_i - t_j. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

最后结合调制进行开关控制,可以有效降低计算时间。

无源变流器:由式(8)可知无源变流器的预测模型中需要输入电压的信息,所以设计三阶ESO观测器用于观测输入电压,减少额外的传感器使用。观测器方程为:

$$\left. \begin{aligned} d\hat{x}_1/dt &= 1/L_{22}(0.5\hat{x}_2 - \hat{x}_1 R_{22} - 0.5(1-D)u_{dc}) + l_1(i_D - \hat{x}_1); \\ d\hat{x}_2/dt &= \hat{x}_3 + l_2(i_D - \hat{x}_1); \\ d\hat{x}_3/dt &= l_3(i_D - \hat{x}_1). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 $\hat{x}_1$ 、 $\hat{x}_2$ 、 $\hat{x}_3$ 分别为无源变流器电感电流的观测值、输入电压的观测值和有界扰动。 l_1 、 l_2 、 l_3 为观测器增益。观测器增益为:

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= 3\omega - R_{22}/L_{22}; \\ l_2 &= 3L_{22}\omega^2; \\ l_3 &= L_{22}\omega^3. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中 $\omega = 628 \text{ rad/s}$ 为观测器截止角频率。将式(14)离散化后,由式(8)和式(14)可得经过观测器后的电感电流预测公式。无源变流器的代价函数为

$$F = [i_d^*(k+1) - i_d(k+1)]^2 + \zeta [D(k+1) - D_{\text{pre}}(k+1)]^2. \quad (16)$$

式中 ζ 为占空比的权重系数,此处为 0.6。 i_d 为无源变流器的预测电感电流。 D_{pre} 为上一控制周期占空比。

另外,在实际控制系统中使用预测方程进行控制时,会产生一步延迟的问题。这种问题会导致模型预测存在误差,影响控制效果。为了解决这个延迟问题,通常使用通过模型获得的第 $k+2$ 个预测值,而不是第 $k+1$ 个预测值。

快速最优三矢量模型预测控制通过直接求解 $u_\alpha(k)$ 和 $u_\beta(k)$ 减少了系统的寻优次数,仅通过两次寻优就可以得到最优矢量。并且作用于控制的 3 个矢量能够合成任意方向的矢量,在寻优次数和作用电压矢量的控制效果上都优于单矢量模型预测控制,大大减少了计算损耗。而三阶扩张状态观测器模型预测控制可以减少传感器的使用,并对输入电流的质量有一定的提高。

2.2 外环滑模控制器设计

在传统控制器设计中,直流侧通常使用 PI 控制器的输出作为内环的参考值。然而,这种方法在系统运行过程中无法调整控制器的参数。为了应对负载变化和直流母线电压波动等扰动,使用滑模控制替代 PI 控制,以提高系统的鲁棒性。

2.2.1 滑模面设计

将控制变量定义为直流母线电压误差,则滑模面的表达式如下:

$$e = u_{\text{dc}} - U_{\text{dc}}^*; \quad (17)$$

$$S_V = a_1 e + a_2 \int e dt. \quad (18)$$

式中 U_{dc}^* 是直流侧电压参考值。到达滑模面时可得

$$S_V = \lambda e + \int e dt = 0. \quad (19)$$

式中 $\lambda = a_1/a_2$, 且 λ 是正常数,可以调整到达稳态

时间、稳态误差以及超调量等控制性能。

对式(19)求导可得

$$\dot{S}_V = \lambda \dot{e} + e. \quad (20)$$

2.2.2 滑模控制律

由式(5)可得

$$i = i_1 + i_2 = C du_{\text{dc}}/dt + u_{\text{dc}}/R_L. \quad (21)$$

由式(21)可得

$$\dot{u}_{\text{dc}} = i/C - u_{\text{dc}}/CR_L + d. \quad (22)$$

式中 d 表示直流母线电压中的不确定扰动。设 d 的边界为 $|d| \leq \rho < 1$, ρ 为给定的正常数。

为了减小滑模面附近的抖振,使用指数趋近律设计滑模控制器可得

$$\dot{S} = -k_0 S - \varepsilon_0 \text{sign}(S). \quad (23)$$

式中 $k > 0$ 。

但是,传统指数趋近律的参数是固定的,所以系统在接近滑模面时仍然存在抖振问题。因此,本文使用的变指数趋近律如下:

$$\dot{S} = -k_0 S - (2^{|S|}/(2^{|S|} + 1) - 0.5) \varepsilon_0 \text{sign}(S). \quad (24)$$

当系统远离滑模面时,参数 k_0 的主要作用是使系统快速趋近参考值。当到达参考值附近时, $k_0 S$ 近似为 0,此时第二项起主导作用。由于第二项的参数是可变的,当系统的误差为零时,第二项的参数也会等于零。因此,变指数趋近律可以减小系统在滑动面附近的抖振。

所以控制器可以设置为

$$i = u_{\text{dc}}/R_L + C(-k_0 S - ((2^{|S|}/(2^{|S|} + 1) - 0.5) \times \varepsilon_0 + \lambda \rho) \text{sign}(S) - e)/\lambda. \quad (25)$$

式中 ε_0 表示控制增益,且 $\varepsilon_0 > 0$; $\text{sign}(S)$ 为符号函数,当 $S > 0$ 时, $\text{sign}(S) = 1$,当 $S \leq 0$ 时, $\text{sign}(S) = 0$ 。

滑模控制器的原理框图如图 6 所示。

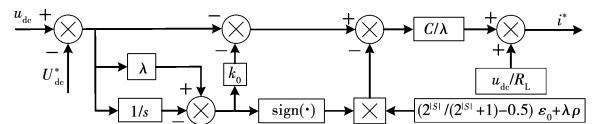


图6 滑模控制器原理框图

Fig. 6 Sliding mode controller block diagram

采用传统的指数趋近律时,切换控制量 $\text{sign}(S)$ 导致控制律的不连续性,如图 7 所示,从而引发抖振现象,抖振的幅度与增益项 ε_0 相关。这种抖振使得输入电流发生畸变,从而降低了输入电流

的质量。

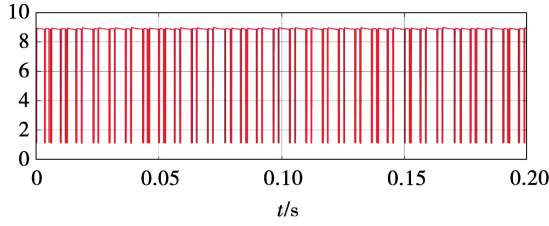


图7 传统指数趋近律控制信号的抖振

Fig. 7 Chattering in control signal of traditional exponential reaching law

本文采用的变指数趋近律滑模控制输出信号如图8所示。在与传统指数趋近律相同的大增益条件下,变指数趋近律能够有效减少系统抖振,改善控制性能,进而确保输入电流的稳定性和高质量输出。

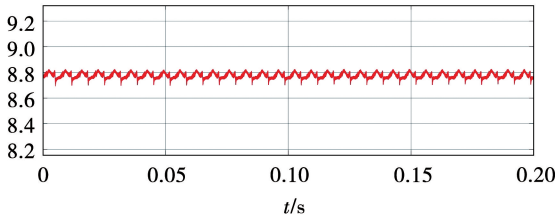


图8 变指数趋近律控制信号的抖振

Fig. 8 Chattering in control signal of variable exponential convergence law

2.2.3 稳定性证明

选取李雅普诺夫函数为

$$V = S^2/2. \quad (26)$$

对式(26)求导可得

$$\dot{V} = \dot{S}S. \quad (27)$$

将式(20)、式(22)和式(25)代入式(27)可得

$$\begin{aligned} \dot{V} = S\dot{S} = S[-k_0S - ((2^{|S|})/(2^{|S|} + 1) - 0.5)\varepsilon_0 + \lambda\rho)\text{sign}(S) + \lambda d] = \\ -k_0S^2 - ((2^{|S|})/(2^{|S|} + 1) - 0.5)\varepsilon_0|S| + \\ (d - \rho\text{sign}(S))\lambda S. \end{aligned} \quad (28)$$

为了保证滑模面附近一定区域内的点都能在有限的时间内到达滑模面,需要满足

$$\lim_{s \rightarrow 0} \dot{V} = \lim_{s \rightarrow 0} \dot{S}S < 0. \quad (29)$$

当 $S > 0$ 时,由式(28)有

$$\begin{aligned} \dot{V} = -k_0S^2 - ((2^{|S|})/(2^{|S|} + 1) - 0.5)\varepsilon_0|S| + \\ (d - \rho\text{sign}(S))\lambda S < (d - \rho)\lambda S < 0. \end{aligned} \quad (30)$$

当 $S < 0$ 时,由式(27)有

$$\begin{aligned} \dot{V} = -k_0S^2 - ((2^{|S|})/(2^{|S|} + 1) - 0.5)\varepsilon_0|S| + \\ (d - \rho\text{sign}(S))\lambda S < (d + \rho)\lambda S < 0. \end{aligned} \quad (31)$$

由式(30)和式(31)可以得出结论,只需要选取合适的滑动系数 λ, ε_0 和 k_0 就能够使得 $\dot{V} \leq 0$ 成立。并且其在滑动面附近的所有轨迹点都能在有限时间内到达设计的滑动面,所以滑模控制系统是渐进稳定的。

3 实验验证

为验证本文所提出控制方法的有效性,本节使用变指数滑模预测控制(variable exponent sliding mode predictive current control, V-SMPCC)和比例积分滑模预测控制(proportional integral sliding mode predictive control, PISMPC)进行了对比实验验证。试验样机采用 110 V/50 Hz 交流电供电,有源变流器前端滤波电感为 5 mH;无源变流器前端滤波电感为 0.2 mH;直流侧升压电感为 10 mH;直流侧参考电压为 300 V,直流侧电容为 1 100 μF ,直流侧额定功率为 1.5 kW。控制器参数如表 1 所示。

三相混合变流器总输入电流实验波形如图 9 所示。当滤波电感设计合适时,无源变流器的自然换相点处输入电流的变化率减小,总输入电流中的周期性电流尖峰被有效抑制。但是总输入电流仍然存在畸变,通过增大有源变流器的滤波电感可以使其更平滑。此外,有源变流器和无源变流器之间的功率分配会影响总输入电流的畸变率,本文中为平均分配功率。仿真模型的参数如表 1 所示。

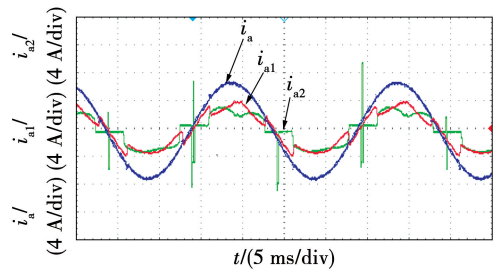


图9 串联滤波电感的输入电流

Fig. 9 Input current of series filter inductor

图 10 所示为三相混合变流器的 a 相输入电流和电压波形,由图可知,本文所使用的方法可以使输入电流和电压保持相同相位,并且 THD 为 2.71%,满足 IEEE 519 小于 5% 的标准。

表1 控制器参数

Table 1 Controller parameters

参数	数值
λ	0.012
ε_0	1 000
k_0	350
ρ	0.1
k_p	0.18
k_i	12
$T_s/\mu s$	40

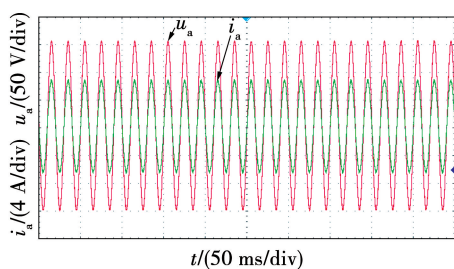


图10 a相输入电流和电压波形

Fig. 10 Phase input current and voltage waveform

图11为三相混合变流器在PISMPC和V-SMPCC 2种控制策略下参考电压跃变电压电流实验波形,用于比较2种控制器作用时的动态响应速度。将参考电压由初始的300 V升高到350 V,经过0.3 s后,再将参考电压从350 V降低到325 V。

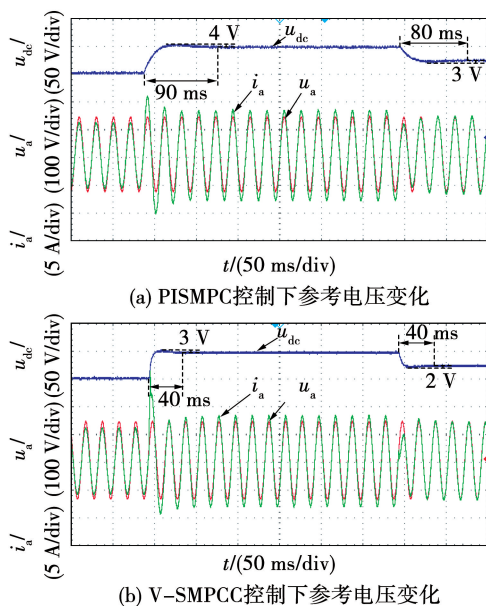


图11 参考电压连续变化实验波形

Fig. 11 Reference voltage continuous change experiment waveform

如图11(a)所示,在PISMPC控制下,参考电压由300 V变化到350 V时,经过90 ms恢复到稳定状态,母线电压过冲约为4 V;参考电压由350 V变化到325 V时,经过80 ms恢复到稳定状态,母线电压跌落约3 V。图11(b)显示,在V-SMPCC控制下,参考电压由300 V变化到350 V时,经过40 ms恢复到稳定状态,母线电压过冲约为3 V;参考电压由350 V变化到325 V时,经过40 ms恢复到稳定状态,母线电压跌落约为2 V。本文所使用的方法在控制直流电压恢复稳定上具有较快的速度。

图12为三相混合变流器在2种控制策略下负载跃变时电压电流的实验波形,用于比较2种控制器作用时,直流母线电压抗负载扰动的能力。图12(a)、图12(b)分别采用PISMPC和V-SMPCC,在负载从60 Ω 到30 Ω 再到60 Ω 下的实验结果。如图12(a)所示,在PISMPC控制时,负载由60 Ω 变化到30 Ω 时,经过100 ms恢复到稳定状态,母线电压跌落约为23 V;负载由30 Ω 变化到60 Ω 时,经过90 ms恢复到稳定状态,母线电压过冲约25 V。图12(b)显示,在V-SMPCC控制时,负载由60 Ω 变化到30 Ω 时,经过50 ms恢复到稳定状态,母线电压跌落约为10 V;负载由30 Ω 变化到60 Ω 时,经过50 ms恢复到稳定状态,母线电压过冲约为11 V。

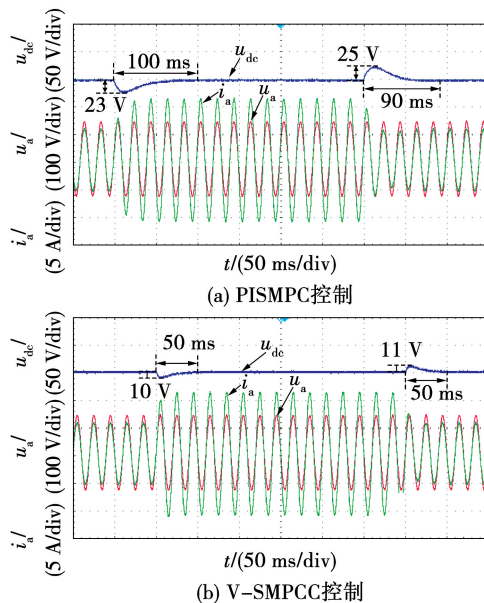


图12 负载连续变化实验波形

Fig. 12 Experimental waveforms with continuous load change

实验结果表明,与传统的PI-模型预测电流控

制方法相比,本文提出的 V-SMPCC 在应对负载扰动时表现出显著优势。该方法能够使三相混合变流器的直流链路电压快速恢复稳定,同时有效抑制负载突变时直流电压的波动范围。此外,ESO 可以降低输入电流约 0.2% 的畸变率。

本文通过使 DSP 在算法执行 I/O 口输出高电平,结束运行时输出低电平来获取算法执行时间。传统三矢量 MPC 时长为 32 μs ;快速最优三矢量 MPC 时长为 17.1 μs 。所以,与传统三矢量 MPC 相比,快速最优三矢量 MPC 的计算时间减少了 46.56%。

图 13 展示了三相混合变流器在不同负载条件下的工作效率折线图。可以看出,当变流器在额定功率下运行时,其工作效率达到 97.58%;而在负载仅为额定功率一半时,工作效率则降低至 96.1%。

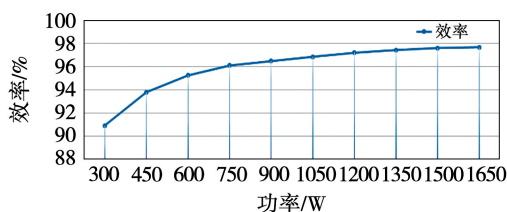


图 13 负载效率折线图

Fig. 13 Load efficiency curve

4 结 论

本文提出了一种基于变指数滑模预测电流控制的三相混合变流器控制方案,能够有效提升电流质量,并增强系统对负载扰动的抗干扰能力。外环通过引入变指数趋近律,有效抑制了滑模控制在高增益情况下出现的抖振。内环通过在有源变流器中采用快速最优三矢量预测控制方法,使计算时间减少了 46.56%,又提高了电流跟踪精度;同时,为无源变流器设计的三阶扩展状态观测器减少了对传感器的依赖,能够实时观测并补偿纹波干扰,有效减小了六倍频纹波对无源变流器模型预测控制的影响,从而进一步提高输入电流质量。实验结果表明,该复合控制策略有效提升了系统性能,使输入电流的总谐波畸变率降至 2.71%,直流母线电压调整时间缩短至 50 ms,明显优于传统的 PI 模型预测控制。此外,该方案在额定负载下的工作效率为 97.58%。

参 考 文 献:

- [1] SOEIRO T B, KOLAR J W. Analysis of high-efficiency three-phase two and three-level unidirectional hybrid converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3589.
- [2] ZHU J, WU H, CHEN J, et al. A hybrid three-phase AC/DC power system for low-frequency pulsed load applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 1871.
- [3] MENG X, CHEN M, HE M, et al. A novel high power hybrid converter with low cost and high grid current quality for improved efficiency of electrolytic hydrogen production [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(4): 3763.
- [4] BARBOSA V F, ELEODORO O F A, RODRIGUES D B, et al. Three-phase hybrid converter for HVDC distribution system in more electric aircrafts [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(1): 1422.
- [5] 李萍,王久和,李建国,等. 单向混合变流器无源电流控制 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4511.
LI Ping, WANG Jiuhe, LI Jianguo, et al. A passivity-based current control strategy for unidirectional hybrid rectifier [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4511.
- [6] 李耀华,刘东梅,陈桂鑫,等. 基于神经网络的永磁同步电机模型预测电流控制 [J]. 电机与控制学报, 2024, 28(10): 109.
LI Yaohua, LIU Dongmei, CHEN Guixin, et al. Neural-network-based model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(10): 109.
- [7] 黄辉先,肖泽广,陈思溢,等. Vienna 变流器模型预测直接功率控制研究 [J]. 控制工程, 2021, 28(1): 62.
HUANG Huixian, XIAO Zeguang, CHEN Siyi, et al. Research on model predictive direct power control of Vienna rectifier [J]. Control Engineering of China, 2021, 28(1): 62.
- [8] 陈荣,翟凯森,舒胡平. 小偏差永磁同步电机双矢量模型预测控制 [J]. 电机与控制学报, 2024, 28(10): 155.
CHEN Rong, ZHAI Kaimiao, SHU Huping. Small deviation dual vector model predictive control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(10): 155.
- [9] 胡存刚,尹政,张悦,等. 三相 PWM 整流器离散空间矢量无模型预测电流控制策略 [J]. 电机与控制学报, 2024, 28(6): 163.
- [10] HU Cungang, YIN Zheng, ZHANG Yue, et al. Model-free predictive current control of three-phase PWM rectifier based on discrete space vector [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(6): 163.
- [10] 郭磊磊,陈墨,罗魁,等. 基于滑模观测器的电压源逆变器无模型预测控制 [J]. 电机与控制学报, 2023, 27(6): 127.
GUO Leilei, CHEN Mo, LUO Kui, et al. Model-free predictive control method for voltage source inverter based on sliding model observer [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(6): 127.

- (6): 127.
- [11] 芮涛, 冯壮壮, 胡存刚, 等. 基于自适应超局部的并网逆变器三矢量无模型预测电流控制策略[J/OL]. 电工技术学报, 1-10 [2025-06-21]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241226>.
- RUI Tao, FENG Zhuangzhuang, HU Cungang, et al. Model-free predictive current control strategy for grid-connected inverter based on adaptive ultra-local [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1-10 [2025-06-21]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.241226>.
- [12] 张艳, 王丽梅, 方馨. 基于三阶超螺旋扰动观测器的PMLSM全局自适应滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(6): 76.
- ZHANG Yan, WANG Limei, FANG Xin. Global adaptive sliding mode control for PMLSM based on third-order super-twisting disturbance observer[J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(6): 76.
- [13] 王业琴, 杨艳, 李正豪, 等. Boost型PFC变换器的自适应超螺旋全局滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(4): 111.
- WANG Yeqin, YANG Yan, LI Zhenghao, et al. Adaptive super twisting total sliding mode control for Boost-type PFC converter [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(4): 111.
- [14] 马辉, 曾雨涵, 苗桂喜, 等. 基于PFC电路直流纹波抑制的二阶自适应滑模控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5258.
- MA Hui, ZENG Yuhuan, MIAO Guixi, et al. Design of second-order adaptive sliding mode controller based on C ripple suppression of PFC circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5258.
- [15] 东野亚兰, 杨淑英, 王奇帅, 等. 基于增强型扩张状态观测器的永磁同步电机低抖振高抗扰二阶终端滑模电流控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2434.
- DONGYE Yalan, YANG Shuying, WANG Qishuai, et al. Enhanced extended state observer based second order terminal sliding mode current control for permanent magnet synchronous machine with low chattering and improved disturbance rejection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2434.
- [16] 朱艺锋, 夏雷斌, 张艺, 等. 三相Vienna整流器的二阶非奇异终端滑模模型预测控制[J/OL]. 南方电网技术, 1-9 [2025-06-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240730.1235.007.html>.
- ZHU Yifeng, XIA Leibin, ZHANG Yi, et al. Second-order non-singular terminal sliding mode model predictive control for three-phase Vienna converter[J/OL]. Southern Power System Technology, 1-9 [2025-06-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240730.1235.007.html>.
- [17] 易磊, 刘芑芑. 基于优化三矢量模型预测的并网逆变器控制[J]. 电力电子技术, 2025, 59(1): 1.
- YI Lei, LIU Pengpeng. Optimal three-vector model predictive control for grid-connected inverter[J]. Power Electronics, 2025, 59(1): 1.
- [18] 白龙, 孙楚, 王娜, 等. 一种适用于航空电源变换的新型混合整流电路功率控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 1106.
- BAI Long, SUN Chu, WANG Na, et al. Study on power control of a novel hybrid rectifier applied to the aviation power source [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 1106.

(编辑:刘素菊)