

基于 Luenberger 观测器的 SVG 三矢量预测 直接功率控制研究*

郎佳红, 马振亚**, 张 泽, 兰向龙, 郑诗程

(安徽工业大学 安徽省电力电子与运动控制重点实验室, 安徽 马鞍山 243000)

摘 要:传统有限控制集模型预测控制(Finite Control Set Model Predictive Control, FCS-MPC)在一个控制周期输出单一的开关状态,在低采样频率下,控制精度不理想,且不固定的开关频率导致滤波器较难设计;三矢量预测电流控制(Three-vector Model Predictive Current Control, TV-MPCC)提高了控制精度且使开关频率固定;为提高静止无功发生器(Static Var Generator, SVG)的动态响应速度和抗干扰能力,降低网侧输入电流谐波含量,提出了一种基于 Luenberger 观测器的三矢量预测直接功率控制算法(Three-vector Model Predictive Direct Power Control, TV-MPDPC);该控制算法的内环采用三矢量预测直接功率控制,比 FCS-MPC 有更好的控制精度,比 TV-MPCC 具有更好的动态响应性能;同时,针对该控制策略对参数(特别是对并网电感的参数)依赖性高,提出了采用 Luenberger 观测器对由参数失配产生的干扰进行补偿,仿真结果验证了该算法的有效性和可行性。

关键词:静止无功发生器;Luenberger 观测器;预测直接功率控制

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2021)04-0001-09

0 引 言

大容量无功设备导致电网功率因数降低,降低了电能生产、传输和利用效率,甚至影响到负载的正常工作^[1]。静止无功发生器(Static Var Generator, SVG)能够动态、快速、实时补偿无功,因此受到国内外工程企业的广泛关注^[2]。

随着对三相变流器研究的深入,不断有新的研究方法被提出。其中包括电压定向控制(Voltage Oriented Control, VOC)^[3]、直接功率控制(Direct Power Control, DPC)和虚拟磁链定向(Virtual Flux Oriented Control, VFOC)^[4]。VOC 通过同步旋转坐标变换将网侧三相电流分解为 d 轴和 q 轴电流,采

用 PI 控制器分别控制,实现有功和无功的解耦,稳态性能较好。但是 PI 控制器的参数不易整定,依赖于电流内环性能且系统动态响应速度较慢^[5]。DPC 通过滞环控制器和一个预定的开关矢量表来选择输出电压矢量,控制有功功率和无功功率输出,动态响应较电流控制快。但其中的滞环环节使其开关频率不固定,不利于输出端滤波电感的设计。当微处理器和数字信号处理技术得到发展后,模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)便在电力电子领域得到越来越广泛的关注与应用。其中,有限控制集模型预测控制(Finite control Set Model Predictive Control, FCS-MPC)^[6]通过最小化代价函数循环找出最优电压矢量,虽然系统瞬态响应速度优良,但其运行过程中存在计算量大、稳态性能有限、开关频率

收稿日期:2020-09-15;修回日期:2020-10-28.

* 基金项目:安徽省自然科学研究重点项目(KJ2017A044).

作者简介:郎佳红(1975—),男,安徽池州人,副教授,硕士,从事电力电子变流技术研究.

** 通讯作者:马振亚(1993—),男,安徽淮南人,硕士研究生,从事电力电子变流技术研究. Email:2477812701@qq.com.

不固定以及依赖模型参数等缺点。

提高稳态性能可以通过扩大电压矢量的选择范围加以实现,即在一个采样周期内施加有效矢量和零矢量,形成具有占空比的模型预测控制,通过调整零电压矢量的作用时间来改变输出电压幅值。但是,由于不能调整输出电压矢量的方向而使稳态性能受到限制。文献[7]提出了基于双矢量的 MPC,该方法电压矢量的方向和幅值均可调,提高了稳态性能;文献[8]提出了三矢量的 MPC,在每个采样周期中加入两个相邻的有效矢量和一个零矢量形成 3 个电压矢量,进一步提高了 MPC 的稳态性能。

由于 MPC 是基于模型的控制方法,因此更依赖于模型参数,而模型失配会导致预测误差,这会影响电压矢量的选择,从而使控制性能恶化。为了解决这个问题,文献[9]提出了基于最小二乘法的鲁棒 MPC,但是计算量较大;文献[10]提出了无模型预测控制,该方法不依赖于模型参数,但对电流采样精度要求较高;文献[11]设计了新型指数趋近率的滑模观测器观测模型参数扰动,并将其代入系统模型,提高了系统的鲁棒性,但是未能消除滑模观测器的“抖振”的现象;文献[12]提出扩张状态观测器,不需要了解系统参数,但是扩张状态观测器是基于非线性结构,通过非线性反馈估计系统状态和扰动,这使得实现起来较为困难;文献[13]提出卡尔曼滤波,可以准确地实现状态变量的估计,但在实际系统中较难实现,且计算量较大。在各种干扰观测器中,Luenberger 扰动观测器具有设计简单,较易实现等优点。

针对静止无功发生器,提出基于 Luenberger 扰动观测器的三矢量模型预测直接功率控制方法(Three Vector Model Predictive Direct Power Control, TV-MPDPC)。将现有的 TV-MPCC 与直接功率控制相结合,功率控制相比电流控制可以提高系统动态响应速度,设计的 Luenberger 干扰观测器补偿系统由于模型失配造成的扰动可以提高系统的鲁棒性。

1 静止无功发生器的数学模型

静止无功发生器主电路拓扑结构如图 1 所示。其中: e_a, e_b, e_c 为电网三相电压, i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} 为三相交流侧电流, i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc} 为负载侧电流, i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} 为 SVG 逆变输出的补偿电流, u_a, u_b, u_c 为逆变器输出电压, u_{dc} 为直流侧电压, R 为等效电阻, L 为滤波电感, O 为电网中点, C 为直流母线电容。

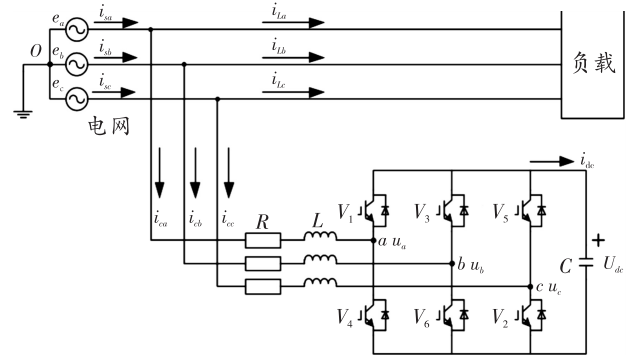


图 1 SVG 主电路

Fig. 1 Main circuit diagram of SVG

根据图 1 所示的电路,两相静止坐标系下 SVG 数学模型:

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

式(1)中, e_{α}, e_{β} 表示电网电压矢量幅值, $i_{c\alpha}, i_{c\beta}$ 表示电网电流矢量幅值, $u_{c\alpha}, u_{c\beta}$ 表示变换器交流侧电压矢量在 α, β 轴下的分量。

在理想电网电压下,可得瞬时电网电压的变化率如式(2):

$$\begin{cases} \frac{de_{\alpha}}{dt} = \omega |e_{\alpha\beta}| \cos(\omega t) = -\omega e_{\beta} \\ \frac{de_{\beta}}{dt} = \omega |e_{\alpha\beta}| \sin(\omega t) = \omega e_{\alpha} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $e_{\alpha\beta}$ 为电网电压矢量幅值, ω 为电网角频率。

系统网侧有功功率 p 和无功功率 q 可描述为

$$\begin{cases} p = e_{\alpha} i_{c\alpha} + e_{\beta} i_{c\beta} \\ q = e_{\beta} i_{c\alpha} - e_{\alpha} i_{c\beta} \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)求微分后可得功率变化率如式(4):

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = e_{\alpha} \frac{di_{c\alpha}}{dt} + e_{\beta} \frac{di_{c\beta}}{dt} + i_{c\alpha} \frac{de_{\alpha}}{dt} + i_{c\beta} \frac{de_{\beta}}{dt} \\ \frac{dq}{dt} = e_{\beta} \frac{di_{c\alpha}}{dt} - e_{\alpha} \frac{di_{c\beta}}{dt} + i_{c\alpha} \frac{de_{\beta}}{dt} - i_{c\beta} \frac{de_{\alpha}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

将式(1)和式(2)代入式(4)整理可得到

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{1}{L} (e_{\alpha}^2 + e_{\beta}^2 - (e_{\alpha} u_{c\alpha} + e_{\beta} u_{c\beta})) - \frac{R}{2} p - \omega q \\ \frac{dq}{dt} = \frac{1}{L} (e_{\alpha} u_{c\beta} - e_{\beta} u_{c\alpha}) - \frac{R}{2} q + \omega p \end{cases} \quad (5)$$

2 三矢量模型预测直接功率控制

2.1 电压矢量选择

图 2 为电压空间矢量分布与扇区划分,三相变

流器电压可分别用8个电压矢量表示,其中 $V_1 \sim V_6$ 为有效矢量, V_0, V_7 为零矢量。各矢量在两相静止坐标系中对应值及相应的开关状态如表1所示,变流器在每个扇区内开关表如表2所示。

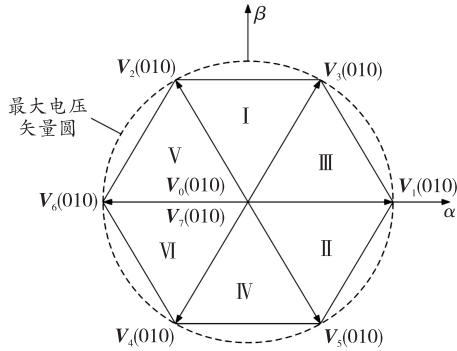


图2 电压矢量及扇区定义

Fig. 2 Voltage vector and sector definitions

表1 两相静止 α, β 坐标系中各矢量值及开关状态

Table 1 Voltage vector value and switch states in two phase static α and β axis coordinate

电压矢量 ($S_a S_b S_c$)	u_{α}	u_{β}
$V_1(100)$	$\sqrt{2/3} u_{dc}$	0
$V_2(010)$	$-\sqrt{1/6} u_{dc}$	$\sqrt{1/2} u_{dc}$
$V_3(110)$	$\sqrt{1/6} u_{dc}$	$\sqrt{1/2} u_{dc}$
$V_4(001)$	$-\sqrt{1/6} u_{dc}$	$-\sqrt{1/2} u_{dc}$
$V_5(101)$	$\sqrt{1/6} u_{dc}$	$-\sqrt{1/2} u_{dc}$
$V_6(001)$	$-\sqrt{2/3} u_{dc}$	0
$V_0(000), V_7(111)$	0	0

表2 变流器开关表

Table 2 Switch table for converter

顺 序	扇 区					
	I	II	III	IV	V	VI
1	V_0/V_7	V_0/V_7	V_0/V_7	V_0/V_7	V_0/V_7	V_0/V_7
2	V_2	V_1	V_1	V_4	V_2	V_4
3	V_3	V_5	V_3	V_6	V_6	V_5

2.2 电压矢量作用时间计算

当选定每个周期的有效矢量和零矢量组合后,每个周期的3个候选电压矢量可表示为 $V_j, j \in \{0, 1, 2\}$, 其中下标“0”代表零矢量,“1”和“2”代表两个有效矢量, e_{pi}, e_{qi} 表示每个采样周期中3个电压矢量对应的功率变化率,可以用式(6)求得:

$$e_{pi} = \left. \frac{dp}{dt} \right|_{V_i}, e_{qi} = \left. \frac{dq}{dt} \right|_{V_i}, i=0, 1, 2, \dots, 7 \quad (6)$$

根据每个矢量的功率变化率对实际功率的影响可以求得每个电压矢量的作用时间。理想情况下,每个周期内功率变化趋势如图3所示。

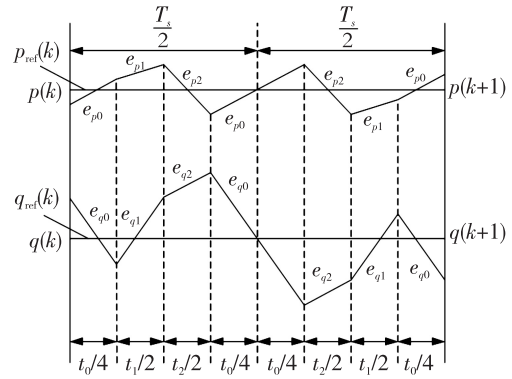


图3 单一开关周期内功率变化趋势

Fig. 3 Power change trend in a single switch period

功率跟踪误差在一个开关周期结束后可以用下列函数表示(式(7)):

$$\begin{cases} E_p = \tilde{p} + e_{p1}t_1 + e_{p2}t_2 + e_{p0}t_0 \\ E_q = \tilde{q} + e_{q1}t_1 + e_{q2}t_2 + e_{q0}t_0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, $\tilde{p} = p^{\text{ref}} - p, \tilde{q} = q^{\text{ref}} - q$ 。

为了实现功率误差最小化,定义价值函数:

$$W = E_p^2 + E_q^2 \quad (8)$$

以价值函数最小为约束条件求出每个控制周期 T_s 内有效矢量和零矢量的作用时间,应满足下列条件^[14]:

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial t_1} = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial t_2} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)求解得到各矢量作用时间 t_0, t_1 和 t_2 分别是

$$\begin{cases} t_1 = \frac{(e_{q2} - e_{q0})\tilde{p} + (e_{p0} - e_{p2})\tilde{q} + (e_{q0}e_{p2} - e_{q2}e_{p0})T_s}{e_{q2}e_{p1} - e_{q0}e_{p1} - e_{q1}e_{p2} + e_{q0}e_{p2} - e_{q2}e_{p0} + e_{q1}e_{p0}} \\ t_2 = \frac{(e_{q0} - e_{q1})\tilde{p} + (e_{p1} - e_{p0})\tilde{q} + (e_{q1}e_{p0} - e_{q0}e_{p2})T_s}{e_{q2}e_{p1} - e_{q0}e_{p1} - e_{q1}e_{p2} + e_{q0}e_{p2} - e_{q2}e_{p0} + e_{q1}e_{p0}} \\ t_0 = T_s - t_1 - t_2 \end{cases} \quad (10)$$

确定选择的电压矢量和每个矢量的作用时间后,按照空间矢量调制法进行调制产生 PWM 波。为了使开关次数最少,首先使用零矢量,然后选择两个有效矢量,中间再插入零矢量。以扇区 III 为例, PWM 开关模式调制生成方法如图4所示。根据传统电压调制方法,在某个开关周期内,若两个非零矢量的作用时间之和 $t_1 + t_2 > T_s/2$ 时,可进行如下修正:

$$\begin{cases} t'_1 = \frac{t_1}{t_1 + t_2} T_s \\ t'_2 = \frac{t_2}{t_1 + t_2} T_s \\ t'_0 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: t'_1, t'_2, t'_0 分别为修正后非零矢量的作用时间和零矢量的作用时间。

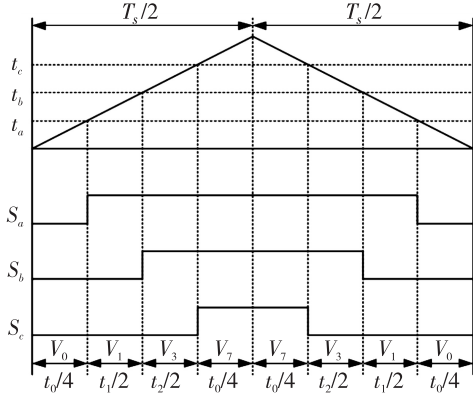


图 4 扇区 III 内的开关模式

Fig. 4 Switch pattern in sector III

3 基于离散 Luenberger 扰动观测器的 TV-MPDPC

3.1 离散 Luenberger 扰动观测器设计

由于模型预测控制中参数失配降低了电流预测控制性能,为了提高三矢量模型预测直接功率控制对参数失配的鲁棒性,这里引入 Luenberger 扰动观测器对扰动量进行估计。Luenberger 扰动观测器可以补偿实际系统与用于控制的模型之间的参数偏差,并且可以消除系统干扰和噪声。

为了观测到系统参数的扰动项,需要在 SVG 的输出电压方程中考虑电感扰动 ΔL 、电阻扰动 ΔR ,则 SVG 功率方程变为

$$\begin{cases} (L_0 + \Delta L) \frac{dp}{dt} = e_\alpha^2 + e_\beta^2 - (e_\alpha u_{c\alpha} + e_\beta u_{c\beta}) - (R_0 + \Delta R)p - \omega(L_0 + \Delta L)q \\ (L_0 + \Delta L) \frac{dq}{dt} = e_\alpha u_{c\beta} - e_\beta u_{c\alpha} - (R_0 + \Delta R)q + \omega(L_0 + \Delta L)p \end{cases} \quad (12)$$

整理可以得到式(13):

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = -\frac{R_0}{L_0}p - \omega q + \frac{1}{L_0}(e_\alpha^2 + e_\beta^2) - \frac{1}{L_0}(e_\alpha u_{c\alpha} + e_\beta u_{c\beta}) + \frac{f_p}{L_0} \\ \frac{dq}{dt} = \omega p - \frac{R_0}{L_0}q + \frac{1}{L_0}(e_\alpha u_{c\beta} - e_\beta u_{c\alpha}) + \frac{f_q}{L_0} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中:下标“0”代表标称值,提取方程中含有参数的所有项,并将其设置为 f_p, f_q , 分别表示有功和无功功率的扰动量,假设有功和无功的参数扰动 f_p 和 f_q 的变化率为 0,即 $df_p/dt=0, df_q/dt=0$ 。选择 p, q, f_p, f_q 为状态变量,则考虑模型参数扰动的系

统状态方程可表示为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (14)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (15)$$

其中: $\mathbf{x} = [p \ q \ f_p \ f_q]^T, \mathbf{y} = [p \ q \ p \ q]^T, \mathbf{u} =$

$$[e_\alpha - u_{c\alpha} \ e_\beta - u_{c\beta}]^T, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_0}{L_0} & -\omega & \frac{1}{L_0} & 0 \\ \omega & -\frac{R_0}{L_0} & 0 & \frac{1}{L_0} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L_0}e_\alpha & \frac{1}{L_0}e_\beta \\ \frac{1}{L_0}e_\beta & -\frac{1}{L_0}e_\alpha \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

则由此建立的 Luenberger 扰动观测器如下:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{L}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \quad (16)$$

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \quad (17)$$

其中: $\hat{\mathbf{x}}$ 为状态变量的估计值, $\hat{\mathbf{y}}$ 为输出变量的估计值, $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{p} \ \hat{q} \ \hat{f}_p \ \hat{f}_q]^T, \hat{\mathbf{y}} = [\hat{p} \ \hat{q} \ \hat{p} \ \hat{q}]^T$, 观

$$\text{测器反馈矩阵 } \mathbf{L} = \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_2 \end{bmatrix}.$$

离散 Luenberger 扰动观测器如式(18)所示:

$$\begin{bmatrix} \hat{p}(k+1) \\ \hat{q}(k+1) \\ \hat{f}_p(k+1) \\ \hat{f}_q(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} \hat{p}(k) \\ \hat{q}(k) \\ \hat{f}_p(k) \\ \hat{f}_q(k) \end{bmatrix} + \mathbf{T}_s \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{L}_T \begin{bmatrix} p(k) - \hat{p}(k) \\ q(k) - \hat{q}(k) \\ p(k) - \hat{p}(k) \\ q(k) - \hat{q}(k) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\text{其中: } \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R_0}{L_0} & -\omega T_s & -\frac{T_s}{L_0} & 0 \\ \omega T_s & 1 - \frac{T_s R_0}{L_0} & 0 & -\frac{T_s}{L_0} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{u}(k) = [e_\alpha(k) - u_{c\alpha}(k), e_\beta(k) - u_{c\beta}(k)], \mathbf{L}_T =$$

$$\begin{bmatrix} l_{T1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_{T1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_{T2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_{T2} \end{bmatrix}, l_{T1} = l_1 T_s, l_{T2} = l_2 T_s. \text{ 图 5 为离散}$$

域 Luenberger 扰动观测器框图。

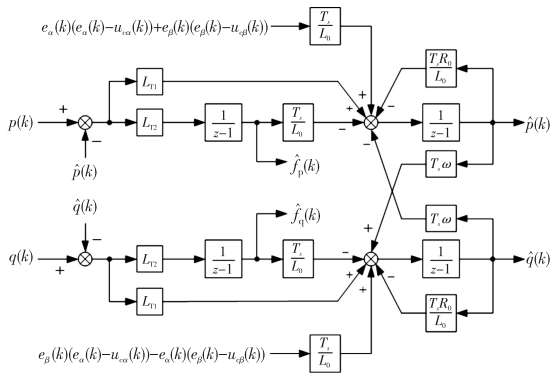


图5 离散域 Luenberger 干扰观测器框图

Fig. 5 Block diagram of Luenberger disturbance observer in the discrete-time domain

3.2 离散 Luenberger 干扰观测器稳定性分析

离散 Luenberger 干扰观测器稳定性可以通过闭环极点来分析。将式(18)改写为式(19)：

$$\begin{bmatrix} \hat{p}(k+1) \\ \hat{q}(k+1) \\ \hat{f}_p(k+1) \\ \hat{f}_q(k+1) \end{bmatrix} = (\mathbf{E} - \mathbf{L}_T \mathbf{C}) \begin{bmatrix} \hat{p}(k) \\ \hat{q}(k) \\ \hat{f}_p(k) \\ \hat{f}_q(k) \end{bmatrix} + \mathbf{B} \mathbf{u}(k) + \mathbf{L}_T \begin{bmatrix} p(k) \\ q(k) \\ p(k) \\ q(k) \end{bmatrix} \quad (19)$$

由式(19)可知:收敛速度主要取决于系数矩阵 $(\mathbf{E} - \mathbf{L}_T \mathbf{C})$ 的特征值。要使得观测器稳定,式(19)的系数矩阵的特征值就要全部位于 Z 域的单位圆内。可利用式(20)得到观测器的闭环特征方程:

$$D(z) = \det(z\mathbf{I} - (\mathbf{E} - \mathbf{L}_T \mathbf{C})) = \det \begin{pmatrix} z - 1 - \frac{T_s R_0}{L_0} l_{T1} & -\omega T_s & -\frac{T_s}{L_0} & 0 \\ \omega T_s & z - 1 - \frac{T_s R_0}{L_0} l_{T1} & 0 & -\frac{T_s}{L_0} \\ -l_{T2} & 0 & z - 1 & 0 \\ 0 & -l_{T2} & 0 & z - 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (20)$$

考虑采样周期 T_s 较小,可以忽略式中的耦合项。因此,观测器的特征方程可化简为:

$$D(z) = a_2 z^2 + a_1 z + a_0 = 0 \quad (21)$$

其中: $a_2 = 1$, $a_1 = \frac{T_s R_0}{L_0} + l_{T1} - 2$, $a_0 = 1 - \frac{T_s R_0}{L_0} - l_{T1} - l_{T2} \frac{T_s}{L_0}$ 。由朱利判据可以得到观测器稳定的充要条件如式(22)所示:

$$\begin{cases} -l_{T2} \frac{T_s}{L_0} > 0 \\ 4 - \frac{2T_s R_0}{L_0} - 2l_{T1} - l_{T2} \frac{T_s}{L_0} > 0 \\ \left| 1 - \frac{T_s R_0}{L_0} - l_{T1} - l_{T2} \frac{T_s}{L_0} \right| < 1 \end{cases} \quad (22)$$

解该式,可以得到观测器需要满足的稳定性条件:

$$\begin{cases} l_{T2} < 0 \\ -\frac{T_s R_0}{L_0} - l_{T2} \frac{T_s}{L_0} < l_{T1} < 2 - \frac{T_s R_0}{L_0} - l_{T2} \frac{T_s}{L_0} \end{cases} \quad (23)$$

式(23)确定了观测器系数的一般范围,在此范围内进行调整得到观测器的合适系数。根据观测器的闭环极点分布图,可以确定满足系统稳定条件的 l_{T1} 和 l_{T2} 的值。图6(a)为当 $l_{T1} = 1.8$, $-50 < l_{T2} < -5$ 时闭环极点分布图,图6(b)为当 $l_{T2} = -30$, $1.1 < l_{T1} < 2.4$ 时闭环极点分布图。选择合适的观测器系数对系统稳定性较为重要,这里选择 $l_{T1} = 1.8$, $l_{T2} = -30$ 。

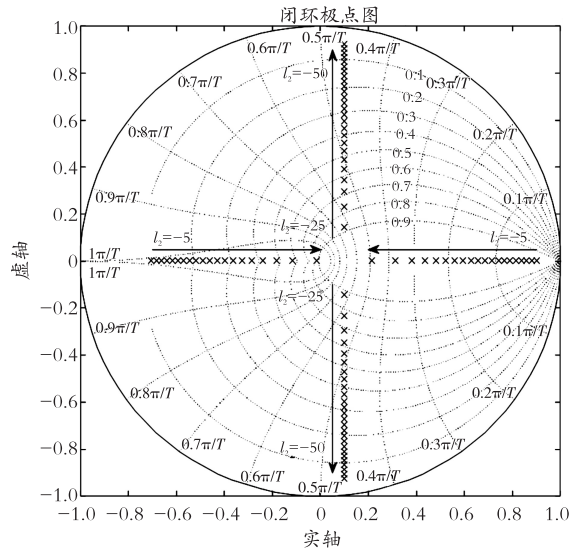
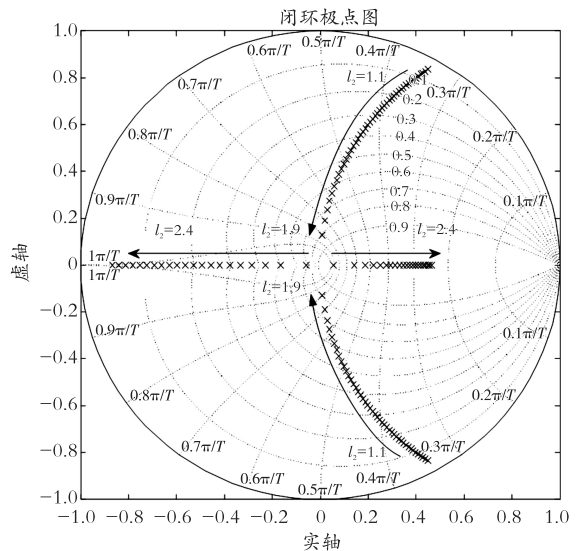
(a) $l_{T1} = 1.8, -50 < l_{T2} < -5$ (b) $l_{T2} = -30, 1.1 < l_{T1} < 2.4$

图6 闭环极点图

Fig. 6 Closed-loop pole graph

4 仿真验证

为验证本文所提出的基于 Luenberger 干扰观测器的模型预测直接功率控制算法的可行性和有效性,在 MATLAB/Simulink 中搭建了三相电压型静止无功发生器系统模型进行仿真验证。仿真采用的基

本参数:三相交流相电压 220 V,电网电压频率 $f=50$ Hz,交流侧输入标称电感 $L_0=3$ mH,交流侧等效标称电阻 $R_0=0.1\ \Omega$,直流侧电容为 $C=2\ 200\ \mu\text{F}$,采样频率为 10 kHz。负载为 10 kW 有功负载和 10 kvar 感性负载或 10 kW 有功负载和 10 kvar 容性负载。图 7 为基于离散 Luenberger 干扰观测器的三矢量模型预测直接功率控制框图。

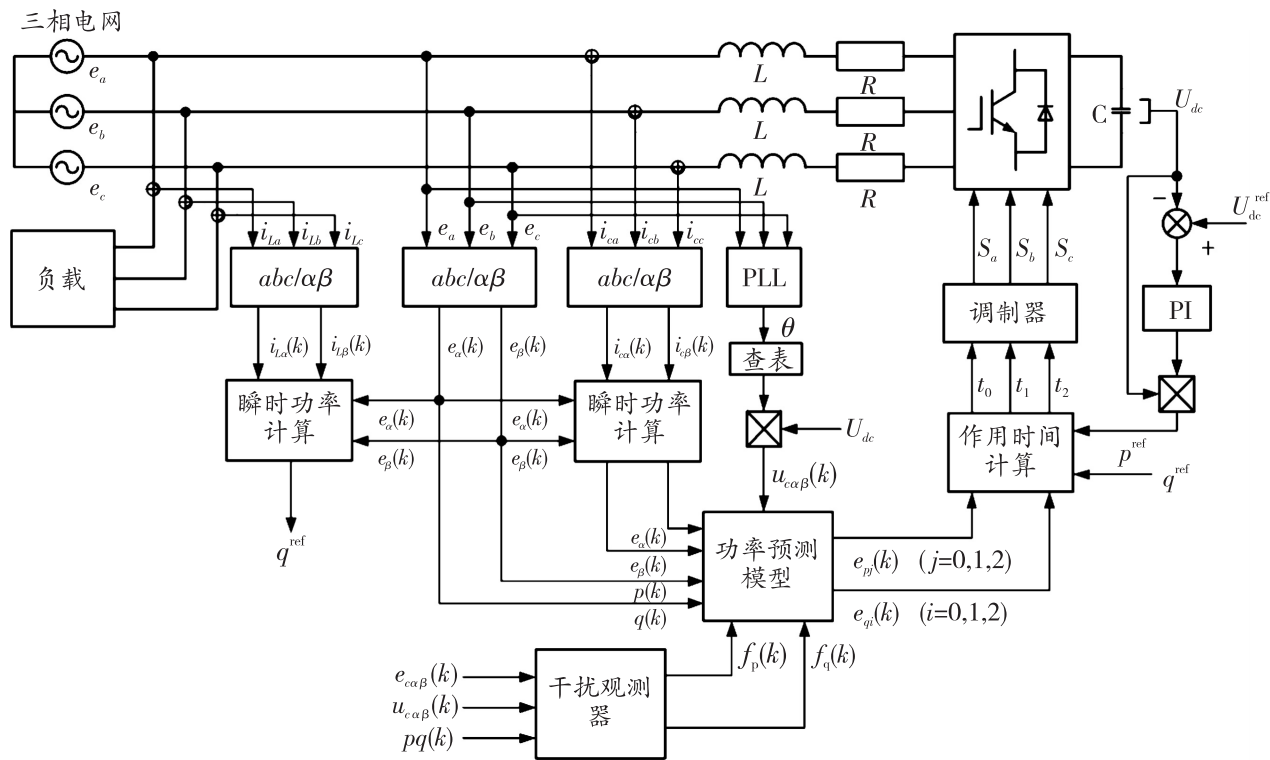


图 7 基于离散 Luenberger 干扰观测器的三矢量模型预测直接功率控制框图

Fig. 7 Block diagram of TV-MPDPC with Luenberger observer in the discrete-time domain

4.1 动态性能分析

仿真通过切换负载对比三矢量模型预测电流控制(TV-MPCC)和直接功率控制(TV-MPDPC)的动态性能。图 8 为 TV-MPCC 与 TV-MPDPC 电压波形图,在 $t=0.8$ s 时,由阻感负载切换至阻容负载。图 8 表明:当负载切换时,采用 TV-MPCC 的输出电压需要 315 ms 才能完成无差跟踪,而采用 TV-MPDPC 的输出电压只要 25 ms 就能完成无差跟踪。图 9 为 TV-MPCC 与 TV-MPDPC 电压电流波形对比图,图 9 表明:当负载切换时,采用 TV-MPCC 的电网侧电流在一个电网周期之后能恢复与电网电压同相位,采用 TV-MPDPC 的电网电流在半个电网周期之后就能恢复与电网电压同相位。因此,与 TV-MPCC 相比,TV-MPDPC 表现出更快速的动态响应

性能。

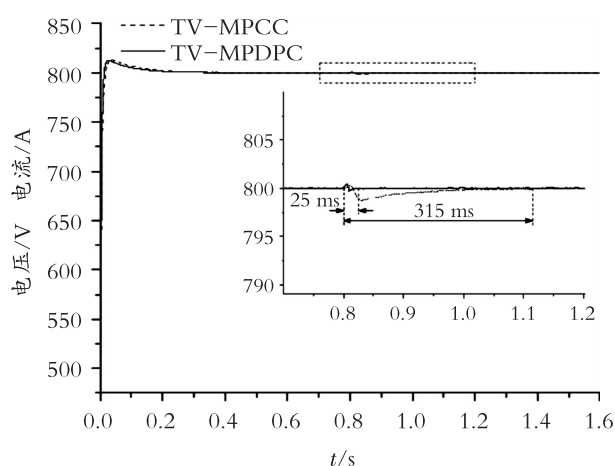


图 8 TV-MPCC 与 TV-MPDPC 直流测电压仿真图

Fig. 8 DC-voltage simulation of TV-MPCC and TV-MPDPC

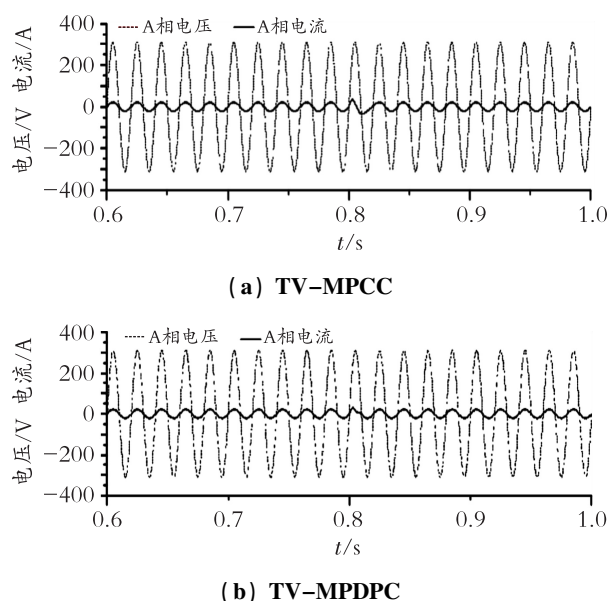


图9 TV-MPCC 与 TV-MPDPC 电压电流仿真图

Fig. 9 Voltage and current simulation of

TV-MPCC and TV-MPDPC

4.2 电感参数变化鲁棒性验证

下面验证文中所提 TV-MPDPC 方法在参数失配情况下控制系统的鲁棒性,由于滤波电感的电阻参数失配影响较小,这里只选择滤波电感的电感参数作为测试参数。测试方式是在控制器的程序中改变其模型参数值,电感参数在额定值的 50% 和 200% 之间变化。在电感参数增加和减小时功率变化率的干扰量分别如图 10 和图 11 所示。由图可以看出,当不考虑过渡状态时有功功率变化率的干扰量变化较大,而无功功率变化率基本不变。这是由于 SVG 主要补偿无功电流,所以无功电流较大,而有功电流较小,但由于系统是一个耦合系统,所以电感参数误差和有功功率相乘耦合到无功变化率上形成的干扰量较小,相反,则有功变化率上形成的干扰量较大。因此,扰动观测器可以有效观测系统扰动。图 12 为 Luenberger 干扰观测器补偿前后的性能对比图,其中电感参数值取 5 mH。由图 12(a) 可以看出,在干扰观测器补偿前,由于电感参数误差,输出电流存在较大畸变,由图 12(b) 可知谐波畸变率达 7.52%,超过国家标准;加入干扰观测器补偿后,输出电流较平滑,由图 12(c) 可知谐波畸变率只有 3.63%,低于国家标准。因此,当加入 Luenberger

干扰观测器后,系统对电感参数变化具有较好的鲁棒性。

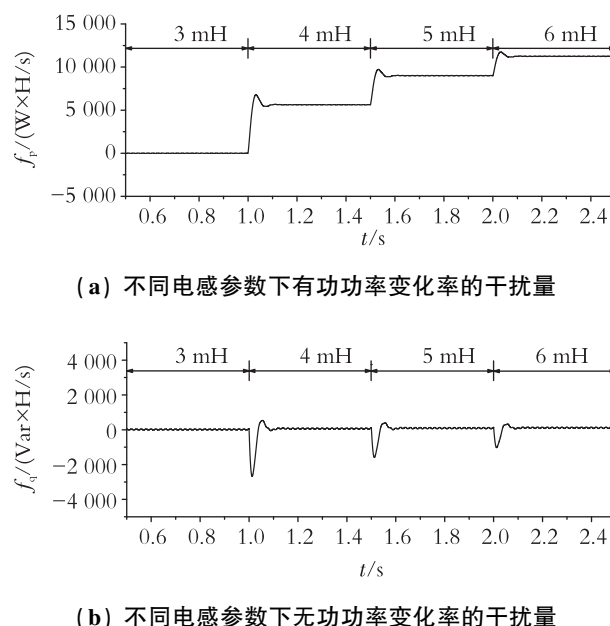


图10 不同电感参数下功率变化率的干扰量(电感参数增加)

Fig. 10 Interference amount of power change rate under different inductance parameters (increase of inductance parameters)

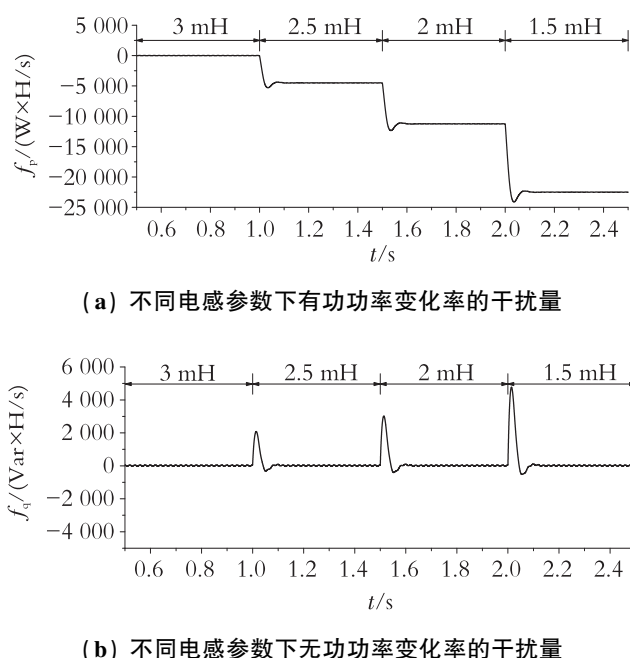
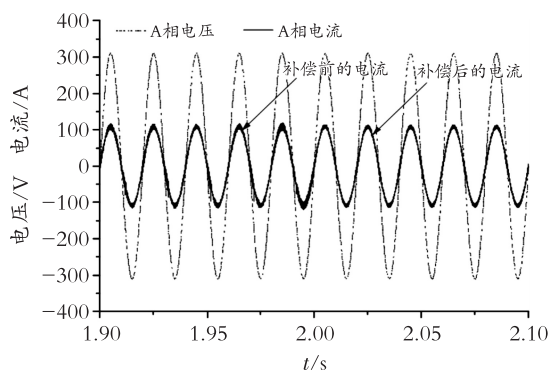
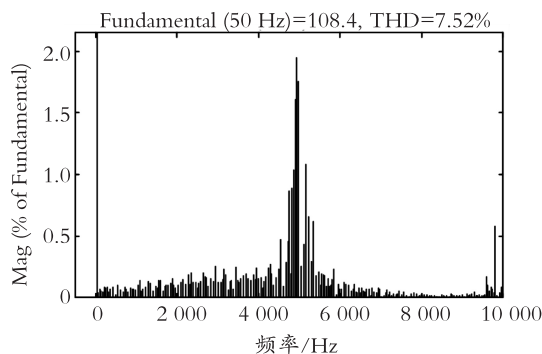


图11 不同电感参数下功率变化率的干扰量(电感参数减小)

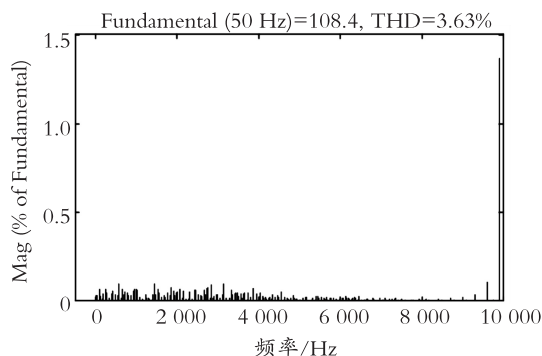
Fig. 11 Interference amount of power change rate under different inductance parameters (inductance parameter reduction)



(a) 扰动观测器补偿前后电压电流



(b) 扰动观测器补偿前电流频谱



(c) 扰动观测器补偿前电流频谱

图 12 扰动观测器补偿前后电压电流及 THD 值

Fig. 12 Voltage current and THD value before and after disturbance observer compensation

5 结束语

以静止无功发生器为控制对象,提出基于 Luenberger 干扰观测器的 TV-MPDPC 策略。三矢量模型预测控制在一个周期使用三矢量代替了传统 FCS-MPC 的单矢量控制,实现了开关频率固定,在较低开关频率下提高了控制精度,克服了 FCS-MPC 计算量大、稳态误差大等缺点,其动态响应性能又较 TV-MPCC 好。为了提高该控制算法在电感参数发生改变时的鲁棒性,设计了 Luenberger 干扰观测器,对电感参数的失配扰动进行了观测并补偿,并通过仿真验证了该方法的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 舒泽亮,丁娜,郭育华,等. 基于 SVPWM 的 STATCOM 电压电流双环控制[J]. 电力自动化设备,2008(9): 27—30
SHU Z L, DING N, GUO Y H, et al. SVPWM-based Voltage-loop Controls of STATCOM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008(9): 27—30 (in Chinese)
- [2] 赵国生,路向东,刘楷. 链式 SVG 直流侧电压分层控制策略的研究[J]. 电测与仪表,2014,51(9): 45—49, 72
ZHAO G S, LU X D, LIU K. Hierarchical Control Strategy of DC Line-side Voltage for Chain SVG[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(9): 45—49, 72 (in Chinese)
- [3] BAHRAI B, RUFER A, KENZELMANN S, et al. Vector Control of Single-Phase Voltage-Source Converters Based on Fictive-Axis Emulation[J]. Industry Applications, IEEE Transactions, 2011, 47(2): 831—840
- [4] 陈伟丽,刘沛津,彭莉峻,等. 一种基于改进模型预测控制算法的空间矢量 PWM 虚拟磁链直接功率控制策略[J]. 电测与仪表,2019,56(14): 110—115, 136
CHEN W L, LIU P J, PENG L J, et al. A Strategy of Space Vector PWM Virtual Flux Direct Power Control Strategy Based on Improved Model Predictive Control Algorithm[J]. Electrical Measurement and Instrumentation; 2019, 56(14): 110—115, 136 (in Chinese)
- [5] 杨兴武,牛梦娇,李豪,等. 基于开关状态函数计算的改进模型预测控制[J]. 电工技术学报,2018,33(20): 4834—4844
YANG X W, NIU M J, LI H, et al. Improved Model Predictive Control Based on Switching State Function Calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4834—4844 (in Chinese)
- [6] 邓知先,宋文胜,曹梦华. 单相 PWM 整流器模型预测电流控制算法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(11): 2996—3004
DENG Z X, SONG W S, CAO M H. A Model Predictive Current Control Scheme for Single-phase PWM Rectifiers, 2016, 36(11): 2996—3004 (in Chinese)
- [7] ZHANG Y, YANG H. Generalized Two-Vector-Based Model-Predictive Torque Control of Induction Motor Drives[J]. Power Electronics, IEEE Transactions, 2015, 30(7): 3818—3829
- [8] ZHANG Z, FANG H, GAO F, et al. Multiple-Vector Model Predictive Power Control for Grid-Tied Wind Turbine System with Enhanced Steady State Control Performances[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6287—6298
- [9] 周宇,胡卫丰,胥峥,等. 基于扰动观测器的光伏逆变器鲁棒分数阶 PID 控制[J]. 电测与仪表,2020,57(11): 108—114
ZHOU Y, HU W F, XU Z, et al. Perturbation Observer

- Based Robust Fractional - order PID Control for PV Inverters[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(11): 108—114 (in Chinese)
- [10] ZHANG Y, XIE W, LI Z, et al. Model Predictive Direct Power Control of a Pwm Rectifier with Duty Cycle Optimization [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5343—5351
- [11] 罗雯,赵峰,高锋阳,等. 基于新型指数趋近率和转子位置观测器的 PMSM 积分滑模控制[J/OL]. 电测与仪表: 1—6 [2020-06-23]. HTTP://KNS. CNKI. NET/KCMS/DETAIL/23. 1202. TH. 20190711. 1023. 006. HTML
- LUO W, ZHAO F, GAO F Y, et al. The Integral Sliding Mode Control of PMSM Based on a Novel Exponent Reaching Law and a Rotor Position Observer [J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation: 1—6 [2020-06-23]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/23. 1202. TH. 20190711. 1023. 006. html (in Chinese)
- [12] 夏长亮,刘均华,俞卫,等. 基于扩张状态观测器的永磁无刷直流电机滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2006(20): 139—143
- XIA C L, LIU J H, YU W, et al. Variable Structure Control of BLDCM Based on Extended State Observer [J]. Proceedings of the CSEE: 2006 (20): 139—143 (in Chinese)
- [13] SZABAT K, TRAN-VAN T, KAMINSKI M. A Modified Fuzzy Luenberger Observer for a Two - Mass Drive System[J]. Industrial Informatics, IEEE Transactions, 2015, 11(2): 531—539 (in Chinese)
- [14] 王萌. 电网故障下双馈风力发电系统功率变换器运行控制[D]. 天津: 天津大学, 2012
- WANG M. Control of PWM Converters in Doubly - fed Induction Generator Systems for Wind Turbines During Grid Fault [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012 (in Chinese)

Research on SVG Three Vector Predictive Direct Power Control Based on Luenberger Observer

LANG Jia-hong, MA Zhen-ya, ZHANG Ze, LAN Xiang-long, ZHENG Shi-cheng

(Key Lab of Power Electronics & Motion Control of Anhui Province, Anhui University of Technology, Anhui Ma' anshan 243000, China)

Abstract: The traditional finite control set model predictive control (FCS-MPC) outputs a single switching state in a control cycle. When the sampling frequency is low, the control accuracy is poor, and the unfixed switching frequency makes it difficult to design the filter. Three vector model predictive current control (TV-MPCC) improves the control accuracy and keeps the switching frequency fixed. In order to improve the dynamic response speed and anti-interference ability of the static var generator (SVG) and reduce the harmonic content of the input current on the network side, a three vector model predictive direct power control (TV-MPDPC) algorithm based on the Luenberger observer is proposed. The inner loop of the control algorithm adopts three vector predictive direct power control, which has better control accuracy than FCS-MPC and better dynamic response performance than TV-MPCC. At the same time, aiming at the high dependence of the control strategy on the parameters, especially on the parameters of the grid connected inductor, the Luenberger observer is proposed to compensate the disturbance caused by the parameter mismatch. The simulation results show that the algorithm is effective and feasible.

Key words: SVG; Luenberger observer; predictive direct power control

责任编辑: 李翠薇

引用本文/Cite this paper:

郎佳红, 马振亚, 张泽, 等. 基于 Luenberger 观测器的 SVG 三矢量预测直接功率控制研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2021, 38(4): 1—9

LANG J H, MA Z Y, ZHANG Z, et al. Research on SVG Three Vector Predictive Direct Power Control Based on Luenberger Observer[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2021, 38(4): 1—9