

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.01.022

三电平 UPQC 的线性自抗扰模型预测控制策略

蔡修闻¹, 赵涛¹, 张铭洲¹, 陶以彬², 李桂璞¹

(1. 南京工程学院电力工程学院、沈国荣学院, 江苏 南京 211167;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003)

摘要: 由于统一电能质量调节器 (unified power quality conditioner, UPQC) 系统结构复杂、控制难度大, 单一的控制策略不足以使其应对电网系统中的各种故障情况。因此, 文中采用一种线性自抗扰控制 (linear active disturbance rejection control, LADRC) 与模型预测控制 (model predictive control, MPC) 的复合控制策略。在电压外环控制中采用 LADRC 策略以提高系统快速性与抗扰性, 并给电流内环提供更精确的参考电流信号; 在电流内环控制中采用电流 MPC 策略以提高跟踪参考信号的能力与系统的鲁棒性, 同时对模型预测的空间电压矢量的分区进行优化, 减少控制器计算量, 在保证输出电流质量的前提下提高运算速度。最后, 基于 MATLAB/Simulink 仿真实验平台对系统进行建模仿真, 结果验证了采用 LADRC-MPC 控制策略对电网电压暂升/暂降、负载不对称引起的电流畸变与谐波污染等综合电能质量问题, 可以起到更好的补偿效果, 对电网电压的支撑能力也更强。

关键词: 统一电能质量调节器 (UPQC); T 型三电平逆变器; 线性自抗扰控制 (LADRC); 模型预测控制 (MPC); 谐波补偿; 扇区优化

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)01-0218-09

0 引言

随着多元化负荷数量日益增多以及具有非线性特性的电力电子器件在电力系统中的广泛应用, 电力系统中的谐波污染问题日益严重, 电能质量下降, 影响电力系统稳定运行^[1-4]。有源电力滤波器 (active power filter, APF) 是实现谐波补偿、解决电能质量问题的关键设备。日本学者 AKAGI H 提出的统一电能质量调节器 (unified power quality conditioner, UPQC)^[5] 综合了串联型与并联型 APF 的功能, 可根据电力系统的实时状态对电压或电流质量进行补偿, 是国内外学者研究的热点^[6-8]。

目前, UPQC 的控制策略有直接、间接控制策略 2 种。在实际工程应用中, 间接控制策略更常见^[9]。间接控制策略包括基于比例积分 (proportional integral, PI) 控制器的控制策略^[10]、无源控制策略^[11]、无差拍控制策略^[12] 和模型预测控制 (model predictive control, MPC) 策略^[13] 等, 但由于 UPQC 中非线性元件含量较多, 系统相对复杂, 单个控制策略无法满足 UPQC 所有的控制要求^[14], 因此需要分析各策略的优缺点, 结合多种控制策略, 提高 UPQC 控制性能。

韩京清教授提出的自抗扰控制 (auto disturbance rejection control, ADRC) 是一种非线性控制方法, 其基于过程误差降低整个系统的控制误差^[15],

具有实现简单、鲁棒性好、控制精度高、适用模型多样等优点; 文献[16]对永磁同步电机采用 ADRC, 并使用自抗扰技术对同步电机模型进行改进; 文献[17]在 UPQC 的直流电压侧采用 ADRC, 且相对于传统 PI 控制效果更好。但常规非线性 ADRC 可调节的参数多达 12 个, 不利于实际工程应用, 而文献[18]提出的线性自抗扰控制 (linear active disturbance rejection control, LADRC) 方法, 其参数相对较少, 整定更加方便, 因此文中将 LADRC 应用于电压外环控制。

MPC 具有滚动优化和修正功能, 可提高跟踪精度、增强系统鲁棒性^[19-22]。且在线性模型中相较于传统基于 PI 控制器的空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM) 等方法, MPC 的控制系统设计更简单, 能减少系统开关损耗, 降低谐波含量, 提高动态性能^[23-25]。近年来, MPC 被广泛应用于变流器、电机控制领域, 如文献[26]提出了一种使用有限控制集模型预测控制 (finite control set-model predictive control, FCS-MPC) 的并网逆变器, 能够治理系统中的谐波污染问题, 有效利用太阳能并提高电能质量; 文献[27]提出了三电平逆变器、MPC 与状态观测器相结合的复合控制方法, 并将该方法应用于电机驱动系统; 文献[28]提出了基于 FCS-MPC 的 UPQC 直接控制策略, 简化了控制器结构。

由于 T 型中点箝位 (T-type neutral point clamped, TNPC) 型三电平逆变器具有损耗小、效率高等优

收稿日期: 2024-05-24; 修回日期: 2024-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62203211)

点^[29-30],文中将其用于 UPQC,构成主电路为 TNPC 型逆变器的 TNPC-UPQC 系统。在串联侧电压外环控制与并联侧直流电压控制中使用 LADRC,并结合电流内环的 MPC,对模型预测的扇区计算进行优化,以减少运算时间。该方法既可以提高系统的抗扰能力,又可以在电网电压发生故障以及负载发生突变时保障系统的稳定性能。最后,通过 MATLAB/Simulink 平台搭建数学模型进行仿真,仿真结果证明了所提方法的有效性和可行性。

1 TNPC-UPQC 系统的拓扑与数学模型

图 1 为系统整体控制框图,其主电路主要包括串联变流器、并联变流器与直流储能环节。串联变流器通过变压器串联在系统中,以保证负载在电网发生故障时仍能获得三相正弦交流电压;在靠近负载侧并联接入并联变流器,以补偿负载侧因不平衡负载和非线性负载而产生的电流谐波等电能质量扰动。

图 1 中, u_{sn} 为三相电网电压, $n=a,b,c$; i_{sn} 为电网侧三相电流; u_{cn} 为串联变压器对电网补偿的三相电压; i_{1on} 为串联变流器输出的三相补偿电流; u_{1n} 为串联变流器侧三相电压; i_{1n} 、 i_{2n} 分别为串联侧、并联侧输出的三相电流; L_1 、 L_2 分别为串联变流器、并联变流器侧电感; C_1 为滤波电容; C 为直流侧储能电

容; u_{1n} 、 u_{2n} 分别为串联变流器、并联变流器输出的三相电压; T_{nm1} — T_{nm4} 为串联变流器与并联变流器桥臂上的绝缘栅双极晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT), $m=1,2$; u_{1dc} 、 u_{2dc} 为直流储能侧电容电压; i_{1dc} 、 i_{2dc} 为直流储能侧电容电流; u_{Ln} 为负载侧三相电压; i_{Ln} 为负载侧三相电流; u_{fd} 、 u_{fq} 和 i_{fd} 、 i_{fq} 分别为系统检测出的 d 、 q 轴电压和电流补偿量; u_{fdref} 、 u_{fqref} 和 i_{1od} 、 i_{1oq} 分别为 u_{1n} 和 i_{1on} 在 d 、 q 轴上的信号; $i_{fo\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 坐标系下的电流补偿量; $i_{L\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 坐标系下的负载电流; u_{dc} 为直流侧电压实际值; u_{dcref} 为直流侧电压期望值; i_{1d} 、 i_{1q} 分别为串联侧自抗扰控制器对电压解耦后得到的 d 、 q 轴电流; i_{dcd} 、 i_{dcq} 分别为用于控制直流侧电压的 d 、 q 轴电流; $i_{dc\alpha\beta}$ 为 i_{dcd} 、 i_{dcq} 转换到 $\alpha\beta$ 坐标系下的信号; $i_{1\alpha\beta ref}$ 、 $i_{2\alpha\beta ref}$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下的串、并联侧电压外环输入给内环的参考电流; ω 为角频率; g_1 、 g_2 为控制器输出给逆变器的信号。

T 型三电平变流器在工作时 a、b、c 三相均可输出 3 种不同的开关状态,将其组合可得 27 种开关状态。定义开关函数 S 为:

$$S = \begin{cases} 1 & T_{nm1} \text{ 导通} \\ 0 & T_{nm2}, T_{nm3} \text{ 导通} \\ -1 & T_{nm4} \text{ 导通} \end{cases} \quad (1)$$

27 种开关状态可以表示为基本空间电压矢量 u_N , $N=1,2,\dots,27$ 。按照这些基本矢量幅值的不

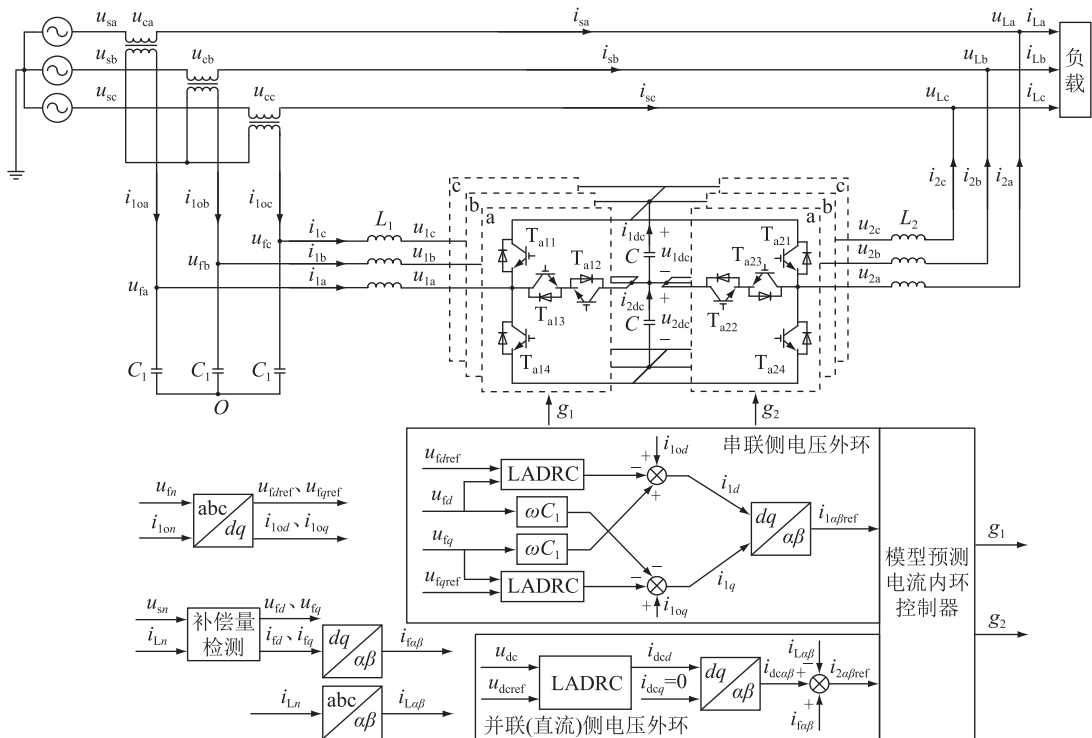


图 1 TNPC-UPQC 系统的整体控制框图

Fig.1 Overall control block diagram of TNPC-UPQC system

同,可以将 u_1 — u_{27} 及对应的开关状态分为 4 类:零矢量、短矢量、中矢量和长矢量。

由图 1 中的 UPQC 主电路拓扑,根据基尔霍夫定律,可得串联侧与并联侧逆变器的数学模型为:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{1n}}{dt} + u_{1n} = u_{in} \\ C_1 \frac{du_{in}}{dt} + i_{1n} = i_{1on} \\ L_2 \frac{di_{2n}}{dt} + u_{2n} = u_{1n} \end{cases} \quad (2)$$

2 UPQC 控制器设计

2.1 线性自抗扰控制器

自抗扰控制器中,参考输入量通过跟踪微分器得出其高阶微分状态变量,并与扩张状态观测器(extended state observer, ESO)所观测到的状态比对,进行非线性状态误差反馈(state error feedback, SEF),最终将系统转化成串联积分型。故 ADRC 有实时估计扰动以及补偿的功能,具备较强的抗扰能力。LADRC 与 ADRC 的不同点为 LADRC 不再安排过渡过程,且 ESO 与 SEF 是线性的,因此参数整定更加简化。

2.2 LADRC 电压外环控制

首先,串联侧逆变器的直流侧电流为:

$$i_{1dc} = S_{1a}i_{1a} + S_{1b}i_{1b} + S_{1c}i_{1c} \quad (3)$$

式中: S_{1a} 、 S_{1b} 、 S_{1c} 为串联侧的开关状态。

并联侧逆变器的直流侧电流为:

$$i_{2dc} = S_{2a}i_{2a} + S_{2b}i_{2b} + S_{2c}i_{2c} \quad (4)$$

式中: S_{2a} 、 S_{2b} 、 S_{2c} 为并联侧的开关状态。

因此,直流侧的总电流为:

$$i_{1dc} + i_{2dc} = S_{1a}i_{1a} + S_{1b}i_{1b} + S_{1c}i_{1c} + S_{2a}i_{2a} + S_{2b}i_{2b} + S_{2c}i_{2c} \quad (5)$$

由式(5)可以得到:

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = S_{1a}i_{1a} + S_{1b}i_{1b} + S_{1c}i_{1c} + S_{2a}i_{2a} + S_{2b}i_{2b} + S_{2c}i_{2c} + F \quad (6)$$

式中: F 为系统中的总扰动。

式(6)可变换为:

$$\frac{du_{dc}}{dt} = (S_{1a}i_{1a} + S_{1b}i_{1b} + S_{1c}i_{1c} + S_{2a}i_{2a} + S_{2b}i_{2b} + S_{2c}i_{2c} + F)/C = b_0u + F \quad (7)$$

式中: b_0 为系统输入的控制器增益; u 为最终控制量。可见,直流侧电压为一阶模型,因此选用一阶 LADRC 对其进行控制。

直流侧电压微分方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{u}_{dc} = b_0u + F \\ \dot{F} = h \\ y = u_{dc} \end{cases} \quad (8)$$

式中: h 为扰动量的估计值; y 为控制器输出量。选取状态变量 $x_1 = y = u_{dc}$ 、 $x_2 = F$,可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = b_0u + x_2 \\ \dot{x}_2 = h \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)又可写为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + EF \\ y = Cx \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$; $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $B = \begin{bmatrix} b_0 \\ 0 \end{bmatrix}$; $C = [1 \quad 0]$;

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}。$$

为系统设计的线性扩张状态观测器(linear extended state observer, LESO)为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}$, \hat{x}_1 、 \hat{x}_2 分别为 x_1 、 x_2 的状态估计量; $L =$

$$\begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}, \beta_1、\beta_2为LESO的增益系数;\hat{y} = \hat{x}_1。由式(11)$$

可得,误差传递矩阵 $A-LC$ 的特征方程为:

$$|sI - (A - LC)| = s^2 + \beta_1s + \beta_2 \quad (12)$$

式中: I 为单位矩阵。

将观测器极点配置在观测器带宽 ω_0 处,控制器极点配置在控制器带宽 ω_c 处,可得:

$$\begin{cases} s^2 + \beta_1s + \beta_2 = (s + \omega_0)^2 \\ s + k_p = s + \omega_c \end{cases} \quad (13)$$

式中: k_p 为比例常数, $k_p = \omega_c$; $\beta_1 = 2\omega_0$; $\beta_2 = \omega_0^2$ 。

由于文中采用的是一阶 LADRC,因此线性 SEF 采用纯比例控制,形式为:

$$u_0 = k_p(r - \hat{x}_1) \quad (14)$$

式中: u_0 为等效控制输入; r 为参考量输入值。考虑到扰动补偿,LADRC 的最终控制量 u 为:

$$u = \frac{u_0 - \hat{x}_2}{b_0} \quad (15)$$

其中 LADRC 可调参数为: ω_c 、 ω_0 以及 b_0 。在调整参数时通常可令 b_0 取较大值,单调增大 ω_c 直至系统趋近稳定, ω_0 通常与 ω_c 有一个倍数关系,即近似有 $\omega_0 = 2\omega_c \sim 10\omega_c$ 。图 2 为一阶 LADRC 控制框图。

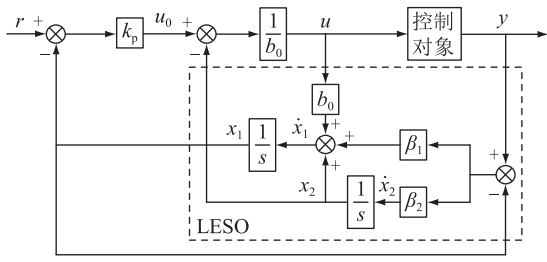


图2 一阶LADRC结构框图

Fig.2 Block diagram of first-order LADRC structure

由上文所述,直流侧电压期望值 u_{dref} 与实际值 u_{dc} 经过自抗扰控制器,得到电流信号 i_{dcd} 。该值经过坐标变换后,与谐波检测环节得到的补偿电流 $i_{ic\beta}$ 和负载电流 $i_{l\alpha\beta}$ 相加,最终得到所需的参考电流 $i_{2\alpha\beta ref}$,并输出给并联侧电流内环控制器。直流侧电压的ADRC原理如图1中直流侧电压外环所示。

与直流侧电压控制相同,串联侧电压外环使用LADRC。将式(2)中的串联侧电容电压转换到 dq 坐标系下,可得:

$$\begin{cases} C_1 \frac{du_{fd}}{dt} = \omega C_1 u_{fq} + i_{1od} - i_{1d} \\ C_1 \frac{du_{fq}}{dt} = -\omega C_1 u_{fd} + i_{1oq} - i_{1q} \end{cases} \quad (16)$$

由此可知,串联侧输出的 d, q 轴电流 i_{1d}, i_{1q} 为:

$$\begin{cases} i_{1d} = i_{1od} + \omega C_1 u_{fq} - C_1 \frac{du_{fd}}{dt} \\ i_{1q} = i_{1oq} - \omega C_1 u_{fd} - C_1 \frac{du_{fq}}{dt} \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可知,串联变流器补偿电压通过LADRC控制器得到电流 i_{1d}, i_{1q} ,然后输出给电流内环控制器。串联侧电压外环LADRC框图同样如图1所示。

2.3 MPC 电流内环控制器设计

将并联侧的数学模型从 abc 三相坐标系转换到 $\alpha\beta$ 坐标系下,可得:

$$L_2 \frac{di_{2\alpha\beta}}{dt} = \mathbf{u}_{1\alpha\beta} - \mathbf{u}_{2\alpha\beta} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{i}_{2\alpha\beta}, \mathbf{u}_{2\alpha\beta}$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下的并联侧输出电流、电压矩阵; $\mathbf{u}_{1\alpha\beta}$ 为 $\alpha\beta$ 坐标系下的负载侧电压矩阵。

通过前向欧拉离散化可得:

$$\mathbf{i}_{2\alpha\beta}(k+1) = \frac{T_s}{L_2} (\mathbf{u}_{1\alpha\beta}(k) - \mathbf{u}_{2\alpha\beta}(k)) + \mathbf{i}_{2\alpha\beta}(k) \quad (19)$$

式中: k 为离散时间的步长, $k \in \mathbf{N}; T_s$ 为采样周期。

根据 \mathbf{u}_N 对 $k+1$ 时刻的电流进行预测,有:

$$\mathbf{i}_{2\alpha\beta N}(k+1) = \frac{T_s}{L_2} (\mathbf{u}_{1\alpha\beta}(k) - \mathbf{u}_{2\alpha\beta N}(k)) + \mathbf{i}_{2\alpha\beta}(k) \quad (20)$$

式中: $\mathbf{i}_{2\alpha\beta N}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻 $\mathbf{i}_{2\alpha\beta}$ 在逆变器 27 种不同开关状态下的对应量; $\mathbf{u}_{2\alpha\beta N}(k)$ 为 k 时刻 $\mathbf{u}_{2\alpha\beta}$ 在逆变器 27 种不同开关状态下的对应量。

然后建立价值函数 g_2 , 对电流预测量进行评估,有:

$$g_{2N}(k+1) = |\mathbf{i}_{2\alpha\beta ref}(k+1) - \mathbf{i}_{2\alpha\beta N}(k+1)| \quad (21)$$

式中: $g_{2N}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻 \mathbf{u}_N 的不同 g_2 输出值。

$k+1$ 时刻的参考电流矩阵 $\mathbf{i}_{2\alpha\beta ref}(k+1)$ 由拉格朗日二阶外推法预测得到:

$$\mathbf{i}_{2\alpha\beta ref}(k+1) = 3\mathbf{i}_{2\alpha\beta ref}(k) - 3\mathbf{i}_{2\alpha\beta ref}(k-1) + \mathbf{i}_{2\alpha\beta ref}(k-2) \quad (22)$$

选择使得价值函数最小的开关状态序号 n_0 作为输出给并联侧变流器的开关状态,其中:

$$n_0 = \arg_N \min g_{2N}(k+1) \quad (23)$$

由式(19)一式(21)可知, g_2 由 $\mathbf{u}_{2\alpha\beta}(k)$ 构成,但由于三电平逆变器产生的 27 个基本空间电压矢量都参与滚动优化计算,大幅增加了模型预测控制器的计算量,算法运算速度受到影响。因此文中采用一种全新的 MPC 扇区优化方案^[31],将式(22)中的参考电流 $\mathbf{i}_{2\alpha\beta ref}(k+1)$ 代入式(20),得到 k 时刻逆变器输出的参考电压 $\mathbf{V}_{\alpha\beta ref}(k)$,如式(24)所示。

$$\mathbf{V}_{\alpha\beta ref}(k) = \frac{L_1}{T_s} (\mathbf{i}_{2\alpha\beta ref}(k+1) - \mathbf{i}_{2\alpha\beta}(k)) + \mathbf{u}_{1\alpha\beta}(k) \quad (24)$$

电压空间矢量分布如图3所示,其中,“N”“O”“P”分别对应式(1)中 1、0、-1 这 3 种不同开关状态; $\mathbf{V}_{zero}, \mathbf{V}_{small}, \mathbf{V}_{medium}, \mathbf{V}_{large}$ 分别为零矢量、短矢量、中矢量、长矢量。27 个电压矢量可通过中矢量的不同方向分为 6 个六边形扇区,每个扇区包括 3 个零矢量、6 个短矢量、2 个中矢量和 1 个长矢量,共计 12 个空间电压矢量。

设参考电压 \mathbf{V}_{ref} 与长矢量 \mathbf{V}_{large} 的夹角为 θ ,由此可定义扇区序号 M 与夹角 θ 之间的数学关系为:

$$M = \text{Ceil}((\theta + 30^\circ)/60^\circ) \quad \theta \in [0^\circ, 360^\circ] \quad (25)$$

式中: $\text{Ceil}(\cdot)$ 为返回大于或等于指定表达式的最小整数的函数。

这样划分区域的优点在于,相比传统算法,代价函数计算减少了对开关状态量的判断,从而提高了预测算法的计算速度。

为与并联侧一致,串联侧 MPC 电流内环控制器

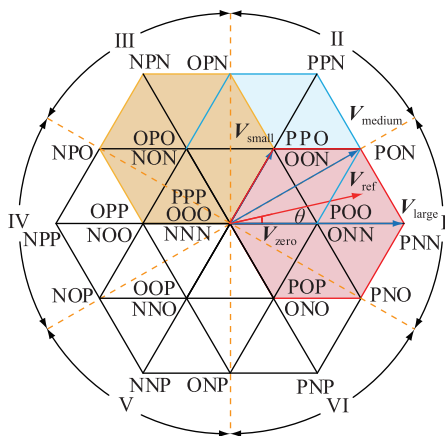


图3 电压空间矢量分布

Fig.3 Voltage space vector distribution

将外环输出的电流信号进行坐标变换,可知串联变流器输出电压为:

$$\mathbf{u}_{1\alpha\beta}(k+1) = \frac{L_1}{T_s}(\mathbf{i}_{1\alpha\beta\text{ref}}(k) - \mathbf{i}_{1\alpha\beta}(k)) + \mathbf{u}_{1\alpha\beta}(k) \quad (26)$$

式中: $\mathbf{u}_{1\alpha\beta}(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻 $\alpha\beta$ 坐标系下的串联变流器侧电压矩阵; $\mathbf{i}_{1\alpha\beta}(k)$ 、 $\mathbf{u}_{1\alpha\beta}(k)$ 分别为 k 时刻 $\alpha\beta$ 坐标系下的串联侧输出电流、电压矩阵; $\mathbf{i}_{1\alpha\beta\text{ref}}(k)$ 为 k 时刻 $\alpha\beta$ 坐标系下的串联侧电压外环输入给内环的参考电流矩阵。

同样地,对各扇区12个电压矢量情况下 $k+1$ 时刻的输出电压进行预测,在此不再赘述。

3 仿真结果与分析

在MATLAB/Simulink环境下,根据上述控制算法搭建系统模型,模型各参数如表1所示。

表1 系统主要仿真参数

Table 1 Main simulation parameters of the system

参数	数值
电网电压/V	220
电网频率/Hz	50
变压器变比	1
串联变流器侧电感/mH	10
串联变流器滤波电容/ μF	10
并联变流器侧电感/mH	4
直流侧储能电容/ μF	4 700
直流侧电压期望值/V	750
采样周期/ μs	40

3.1 直流侧电容电压仿真结果

在电网电压故障情况下,直流侧电压波形如图4所示。对比PI-SVPWM、PI-MPC和LADRC-MPC控制下的直流侧电压可知,PI控制下的直流侧电压

超调波动大,而LADRC下的直流侧电压在上升过程中整体快速无超调。当电网电压发生幅值突变时,并联侧变流器通过直流侧储能电容与电网之间的能量交换为电网电压提供电压支撑,因此故障期间直流侧电容电压也会随电网电压发生变化。由图4可知,在0.2 s—0.4 s的故障时间内,LADRC-MPC控制的直流电压波动更小;在0.5 s发生负载突变时,LADRC-MPC控制下的直流侧电压相比PI-SVPWM和PI-MPC控制跌落幅度更小,进入恢复状态的速度更快,在0.56 s左右趋于稳定;而PI-SVPWM和PI-MPC控制下的直流侧电压直到0.6 s左右才趋于稳定,因此LADRC-MPC控制下的系统具有更强的鲁棒性。在电网电压与负载侧发生故障时,LADRC-MPC控制器对直流侧电压的控制效果更稳定。

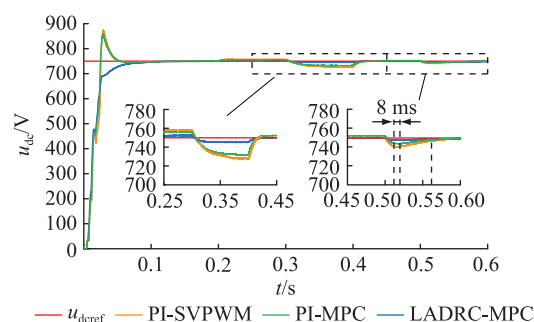


图4 直流侧电压波形

Fig.4 DC voltage waveforms

3.2 电网侧电压故障补偿仿真

电网电压补偿情况如图5所示。图5(a)为发生故障时的电网侧三相电压波形,0.1 s—0.2 s,电网在正常状态下稳定工作;0.2 s—0.3 s,向电网注入幅值为0.2 p.u.的三次谐波和幅值为0.15 p.u.的二次谐波;0.3 s—0.4 s,电网电压突变,幅值上升20%;0.4 s—0.5 s,电压发生跌落,幅值下降20%;0.5 s—0.6 s,负载侧的a相负载发生突变。图5(b)、(d)、(f)分别为LADRC-MPC、PI-MPC、PI-SVPWM控制下UPQC补偿后的负载侧电压,图5(c)、(e)、(g)分别为3种控制下串联侧a相的补偿电压波形。可见,3种控制下UPQC补偿后得到的电压都接近三相正弦波形,但LADRC-MPC控制下的负载电压波形更平缓,谐波含量更少,电压暂升、暂降故障切换处反应速度更快,动态性能更好,体现了MPC的优势。

3.3 负载侧故障电流补偿仿真

当三相电网电压受到污染以及含整流的非线性负载发生不平衡变化时,负载侧电流如图6(a)所示,图6(b)、(d)、(f)分别为3种控制下并联侧补

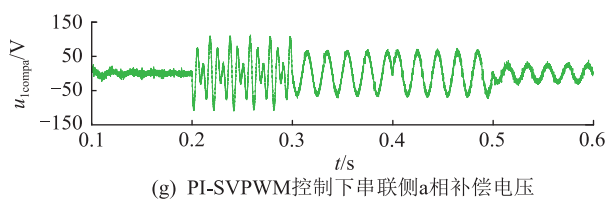
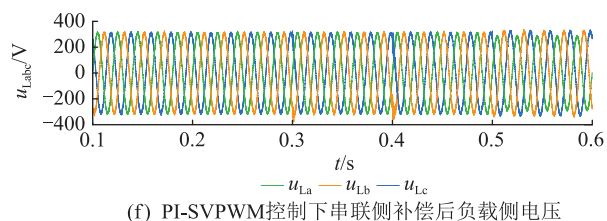
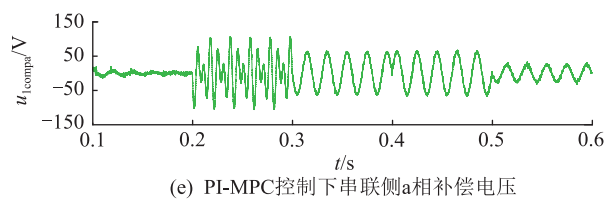
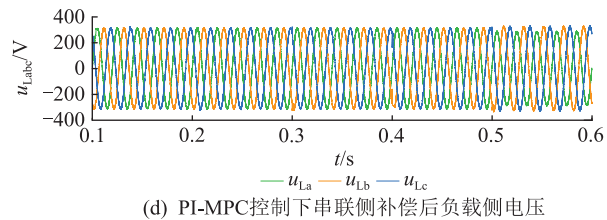
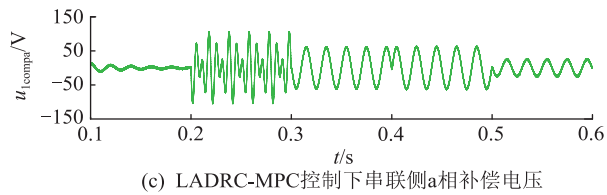
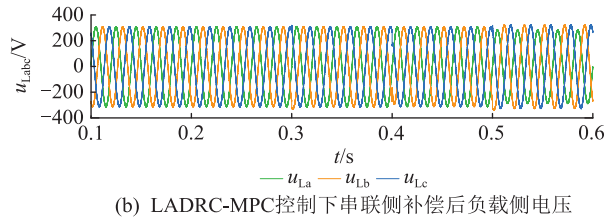
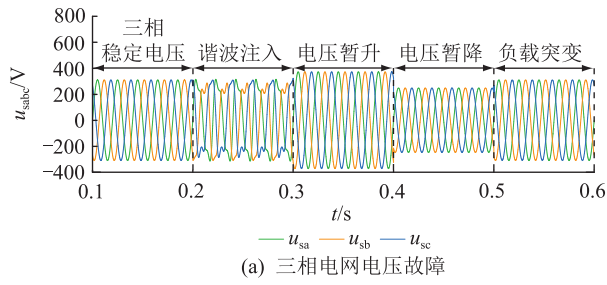


图5 3种控制策略下的电压补偿波形

Fig.5 Waveforms of voltage compensation under three control strategies

偿后的电网侧三相电流。可见,在非线性的影响下,负载侧电流畸变严重,而通过UPQC治理后,电网侧电流基本为正弦波形,且由图6(c)、(e)、(g)可知,LADRC-MPC控制下的并联侧补偿效果更

好,谐波含量更少。

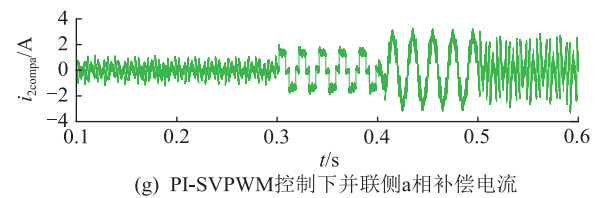
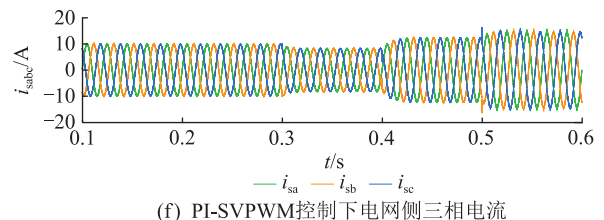
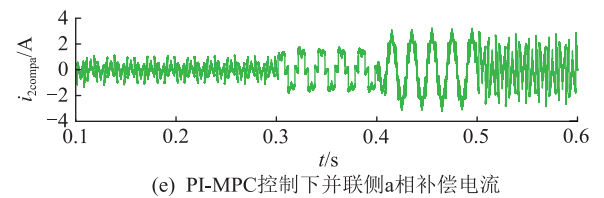
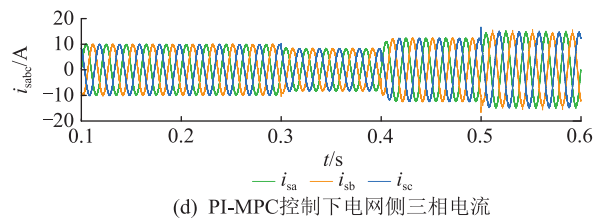
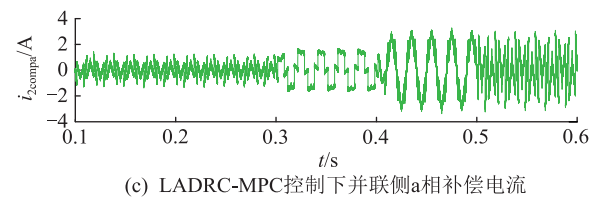
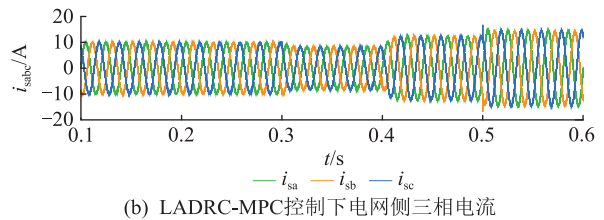
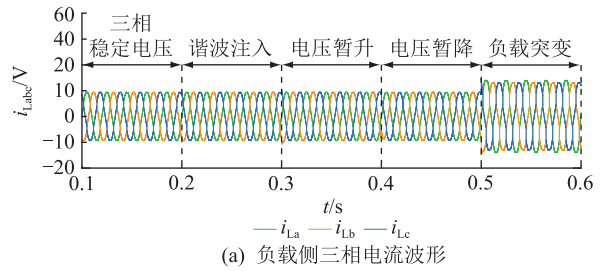
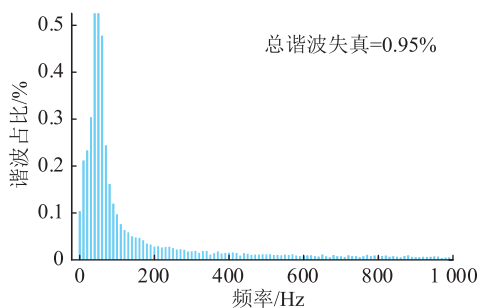


图6 3种控制策略下的电流补偿波形

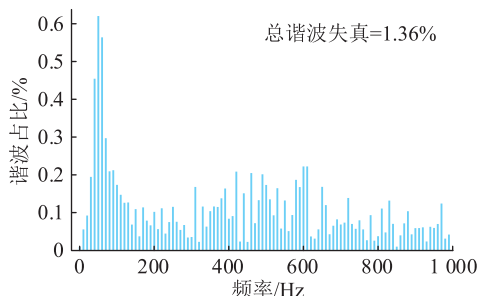
Fig.6 Waveforms of current compensation under three control strategies

通过谐波分析不同控制策略下补偿后的负载侧电压与电网电流,得到对应的总谐波畸变率,如图7和图8所示,可知LADRC-MPC控制下补偿后

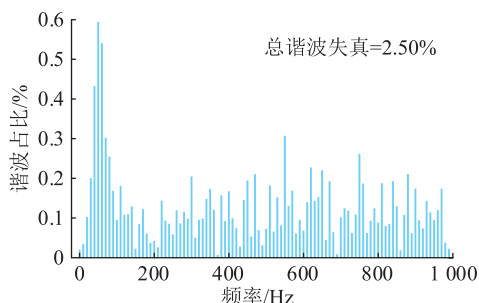
的负载侧电压和电流相比于其他控制谐波含量更少。



(a) LADRC-MPC控制下补偿后负载侧电压频谱分析



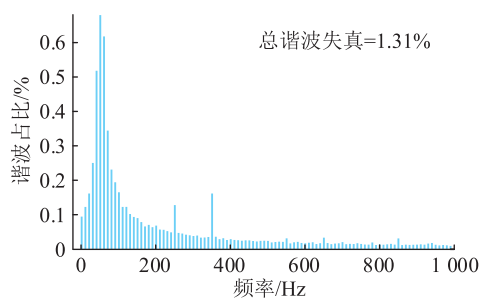
(b) PI-MPC控制下补偿后负载侧电压频谱分析



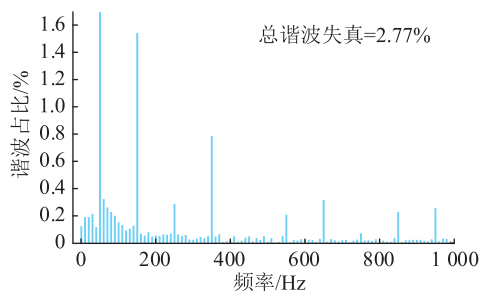
(c) PI-SVPWM控制下补偿后负载侧电压频谱分析

图7 3种控制策略下补偿后的负载侧电压频谱分析

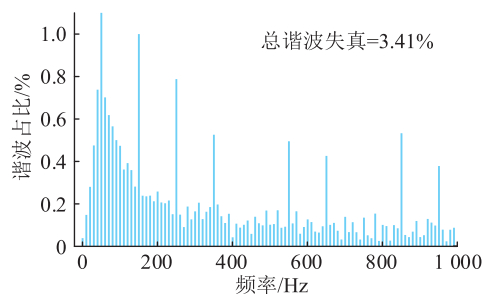
Fig.7 Spectrum analysis of load voltage after compensation under three control strategies



(a) LADRC-MPC控制下补偿后电网电流频谱分析



(b) PI-MPC控制下补偿后电网电流频谱分析



(c) PI-SVPWM控制下补偿后电网电流频谱分析

图8 3种控制策略下补偿后的电网电流频谱分析

Fig.8 Spectrum analysis of power grid current after compensation under three control strategies

4 结论

文中设计了一种基于 LADRC-MPC 的 TNPC 结构的 UPQC 控制策略,并通过仿真分析得到以下结论:

(1) LADRC-MPC 控制策略能够解决直流侧电压在传统 PI 电压外环控制下超调过大的问题,不仅可以快速到达期望电压,还能在故障工况下表现出更小的波动、更快的恢复速度以及更强的系统鲁棒性。

(2) 相比于 PI-SVPWM 与 PI-MPC 控制策略,文中采用的 LADRC-MPC 在故障工况下能使经 UPQC 补偿后的负载电压与电网电流中的谐波含量更少,电能质量更高。

参考文献:

[1] 王燕. 电能质量扰动检测的研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(13):174-186.
WANG Yan. Review of research development in power quality disturbance detection [J]. Power System Protection and Control,2021,49(13):174-186.

[2] 汪飞,全晓庆,任林涛. 电能质量扰动检测与识别方法研究综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):4104-4121.
WANG Fei, QUAN Xiaoqing, REN Lintao. Review of power quality disturbance detection and identification methods [J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(12):4104-4121.

[3] 张成,赵涛,朱爱华,等. 弱电网下并联逆变器稳定性及电能质量治理研究[J]. 电力工程技术,2022,41(3):224-230.
ZHANG Cheng, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Stability and power quality control of parallel inverters in weak current network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41 (3):224-230.

[4] 成煜铃,李帅,孟高军,等. 基于微电网储能控制系统的电能质量综合治理研究[J]. 可再生能源,2023,41(6):810-817.
CHENG Yuqian, LI Shuai, MENG Gaojun, et al. Research on comprehensive power quality control based on microgrid energy storage system [J]. Renewable Energy Resources,2023,41(6):810-817.

- [5] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [6] 倪福银, 李正明. 统一电能质量调节器的研究发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 177-187.
NI Fuyin, LI Zhengming. Overview of unified power quality conditioner research development[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 177-187.
- [7] AFONSO J L, TANTA M, PINTO J G O, et al. A review on power electronics technologies for power quality improvement [J]. Energies, 2021, 14(24): 8585.
- [8] 李金洪, 周建萍, 夏文豪, 等. 基于五桥臂 MMC-UPQC 的复合模型预测控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 179-187.
LI Jinhong, ZHOU Jianping, XIA Wenhao, et al. Hybrid model predictive control based on a five-leg MMC-UPQC [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 179-187.
- [9] 王久和. 统一电能质量调节器控制策略研究[J]. 发电技术, 2018, 39(4): 313-321.
WANG Jiuhe. Research on control strategy for unified power quality conditioner [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(4): 313-321.
- [10] 张贵涛, 龚芬, 王丽晔, 等. 光伏并网逆变器电能质量控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(4): 50-56.
ZHANG Guitao, GONG Fen, WANG Liyan, et al. Power quality control strategy of photovoltaic grid-connected inverter [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(4): 50-56.
- [11] 陈美锋, 王久和, 夏亮. 一种新型 TNPC-UPQC 混合无源控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 169-176.
CHEN Meifeng, WANG Jiuhe, XIA Liang. A new TNPC-UPQC hybrid passivity based control strategy [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 169-176.
- [12] 王贵峰, 祝莘莘, 武泽文. 一种新型无差拍 UPQC 预测直接控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(11): 40-49.
WANG Guifeng, ZHU Xinxin, WU Zewen. A novel deadbeat predictive direct control strategy of UPQC [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(11): 40-49.
- [13] 刘涛, 何启发, 肖朝霞, 等. 基于 FCS-MPC 的五桥臂 UPQC 电能质量补偿策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 66-74.
LIU Tao, HE Qifa, XIAO Zhaoxia, et al. A power quality compensation strategy of five-leg UPQC based on FCS-MPC [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 66-74.
- [14] 肖丽平, 吕超, 田紫君. 统一电能质量调节器的结构及控制策略综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(12): 1-10.
XIAO Liping, LYU Chao, TIAN Zijun. Review of structure and control strategy of unified power quality conditioner [J]. Smart Power, 2021, 49(12): 1-10.
- [15] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
HAN Jingqing. Auto-disturbance-rejection controller and its application [J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.
- [16] 方圣龙, 樊继东. 一种基于自抗扰的永磁同步电机复合控制策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 62-69.
FANG Shenglong, FAN Jidong. A composite control strategy of permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10): 62-69.
- [17] ZHANG H, XIONG H J, ZHANG Y C, et al. Research on auto disturbance rejection control of unified power quality conditioner [C] // 2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). Chengdu, China. IEEE, 2021: 1-6.
- [18] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C] // Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver, CO, USA. IEEE, 2003: 4989-4996.
- [19] 王治国, 郑泽东, 李永东, 等. 交流电机模型预测控制综述[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(11): 14-30.
WANG Zhiguo, ZHENG Zedong, LI Yongdong, et al. A review of model predictive control for AC motor [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(11): 14-30.
- [20] 叶林, 路朋, 赵永宁, 等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6181-6198.
YE Lin, LU Peng, ZHAO Yongning, et al. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6181-6198.
- [21] 李周华, 陈迟, 刘斌. 基于模型预测控制的不平衡电网电压下三相燃料电池并网发电系统功率解耦控制策略[J]. 可再生能源, 2023, 41(11): 1504-1511.
LI Zhouhua, CHEN Chi, LIU Bin. Power decoupling control strategy for three-phase grid-tied fuel cell system under unbalanced grid voltages with improved model predictive control [J]. Renewable Energy Resources, 2023, 41(11): 1504-1511.
- [22] 蒋正荣, 郝佳奇. 基于 LESO 的有源电力滤波器模型预测控制研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(3): 33-41.
JIANG Zhengrong, HAO Jiaqi. Research on model predictive control of active power filter based on LESO [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(3): 33-41.
- [23] 朱敏龙, 宋慧庆, 李宇航, 等. NPC 型三电平逆变器可视化三矢量无模型预测控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 110-122.
ZHU Minlong, SONG Huiqing, LI Yuhang, et al. Visualized three-vector model-free predictive control strategy for an NPC three-level inverter [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 110-122.
- [24] 张博宸, 周羽生, 周文晴, 等. 基于滑模观测器的三电平风力发电并网逆变器无差拍优化模型预测控制[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4): 176-183.
ZHANG Bochen, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Optimal model predictive control for three-level grid-connected wind power inverters without differential beat based on sliding

- mode observer[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(4):176-183.
- [25] BAIER C R, RAMIREZ R O, MARCIEL E I, et al. FCS-MPC-without steady-state error applied to a grid-connected cascaded H-bridge multilevel inverter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(10):11785-11799.
- [26] 张晓刚, 马俊祥, 马信, 等. 一种基于 FCS-MPC 的光伏并网电能质量控制方法[J]. *机械研究与应用*, 2022, 35(3):126-131.
- ZHANG Xiaogang, MA Junxiang, MA Xin, et al. A photovoltaic grid-connected power quality control method based on FCS-MPC[J]. *Mechanical Research & Application*, 2022, 35(3):126-131.
- [27] 姜泽超, 朱蕴璞, 孙乐, 等. 基于三电平逆变器和模型预测的电机控制方法[J]. *微特电机*, 2022, 50(12):34-42.
- JIANG Zechao, ZHU Yunpu, SUN Le, et al. Motor control method based on three-level inverter and model prediction[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2022, 50(12):34-42.
- [28] 王贵峰, 武泽文, 祝莘莘, 等. 基于有限集模型预测控制的 UPQC 预测直接控制策略[J]. *电网技术*, 2023, 47(12):5206-5215.
- WANG Guifeng, WU Zewen, ZHU Xinxin, et al. Predictive direct control strategy of UPQC based on FCS-MPC[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(12):5206-5215.
- [29] LIU B, PENG Y W, XU J C, et al. Design and implementation of multiport energy routers toward future energy Internet[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(3):1945-1957.
- [30] 王雪, 高云广, 吝伶艳, 等. 有源电力滤波器的研究现状与展望[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(1):177-186.
- WANG Xue, GAO Yunguang, LIN Lingyan, et al. Research status and prospect of active power filter[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(1):177-186.
- [31] ZHAO T, ZHANG M Z, WANG C L, et al. Model-free predictive current control of three-level grid-connected inverters with LCL filters based on Kalman filter[J]. *IEEE Access*, 2023, 11:21631-21640.

作者简介:



蔡修闻

蔡修闻(1999),男,硕士在读,研究方向为新能源并网技术以及电力电子化电力系统稳定性分析(E-mail:1729920687@qq.com);

赵涛(1965),男,博士,教授,研究方向为新能源并网技术及变流装置;

张铭洲(1999),男,硕士在读,研究方向为新能源并网技术以及电力电子化电力系统稳定性分析。

LADRC-MPC strategy for three-level UPQC

CAI Xiuwen¹, ZHAO Tao¹, ZHANG Mingzhou¹, TAO Yibin², LI Guipu¹

(1. School of Electric Power Engineering, School of Shen Guorong, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Given the complexity of the unified power quality conditioner (UPQC) system and the difficulty in its control, a single control strategy is no longer sufficient to address various faults in the power grid system. Consequently, a hybrid control strategy combining linear active disturbance rejection control (LADRC) and model predictive control (MPC) is employed in this paper. The LADRC strategy is used in the voltage outer loop control to enhance the system's rapid response and disturbance rejection capabilities, providing an accurate reference current signal for the current inner loop. In the current inner loop, the current MPC strategy further improves tracking performance and system robustness. The partitioning of the space voltage vector in model prediction is optimized to reduce the controller's computational load, thereby improving computation speed while ensuring the quality of the output current. Finally, the system is modeled and simulated on the MATLAB/Simulink simulation platform. The results validate that the LADRC-MPC control strategy effectively compensates for comprehensive power quality issues such as grid voltage sags/surges, current distortion, and harmonic pollution caused by load imbalance. It also enhances the voltage support capability of the grid.

Keywords: unified power quality conditioner (UPQC); T-type three-level inverter; linear active disturbance rejection control (LADRC); model predictive control (MPC); harmonic compensation; sector optimization

(编辑 陆海霞)