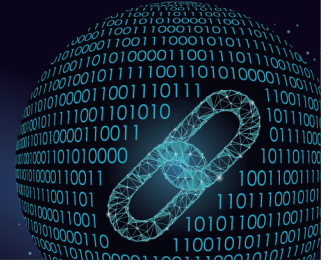




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



不平衡电网电压下MMC-UPQC的无源超螺旋二阶滑模控制策略

黄祖繁, 周建萍, 茅大钧, 齐国庆, 从帆平

引用本文:

黄祖繁, 周建萍, 茅大钧, 齐国庆, 从帆平. 不平衡电网电压下MMC-UPQC的无源超螺旋二阶滑模控制策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1487–1497.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0964>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller
控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

基于高阶滑模速度控制器的异步电机模型预测转矩控制

A model predictive torque control for induction motor based on high order sliding mode speed controller
控制与决策. 2021, 36(4): 953–958 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0650>

磁悬浮开关磁阻电机的自适应终端滑模控制

Adaptive terminal sliding mode control of bearingless switched reluctance motor
控制与决策. 2021, 36(6): 1449–1456 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1064>

基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制

Coordinated impedance control for dual-arm robots based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller
控制与决策. 2021, 36(6): 1311–1323 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1701>

直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor
控制与决策. 2021, 36(3): 693–698 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>

不平衡电网电压下MMC-UPQC的 无源超螺旋二阶滑模控制策略

黄祖繁, 周建萍[†], 茅大钧, 齐国庆, 从帆平

(上海电力大学 自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的统一电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC)在电网电压不平衡时,采用传统控制方法存在补偿效率和精确性较低的问题. 针对这一情况,提出一种无源超螺旋二阶滑模控制策略. 首先,基于MMC-UPQC的数学模型和无源控制理论,设计不平衡电网电压下基于欧拉-拉格朗日模型的正负序无源控制器;然后,加入超螺旋二阶滑模控制对无源控制器进行改善,抑制常规滑模存在的抖振,并解决无源控制对系统精度要求高的问题,提高系统的响应速度、补偿精度和抗干扰能力,提升系统的整体性能;最后,在Matlab/Simulink平台上进行仿真,并与PI控制和单独的无源控制对比,仿真结果验证了所提无源超螺旋二阶滑模控制策略的有效性和优越性.

关键词: 模块化多电平换流器; 统一电能质量调节器; 电网电压不平衡; 无源超螺旋二阶滑模控制; 欧拉-拉格朗日模型

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0964

引用格式: 黄祖繁,周建萍,茅大钧,等. 不平衡电网电压下MMC-UPQC的无源超螺旋二阶滑模控制策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(5): 1487-1497.

Passive super-twisting second-order sliding mode control strategy for MMC-UPQC under unbalanced grid voltage

HUANG Zu-fan, ZHOU Jian-ping[†], MAO Da-jun, QI Guo-qing, CONG Fan-ping

(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: When the voltage of the grid is unbalanced, it is difficult to use traditional control methods for the unified power quality conditioner (UPQC) of a modular multilevel converter (MMC) to comprehensively control the power quality, and the compensation efficiency and accuracy are low. To solve these problems, a passive super-twisting second-order sliding mode control strategy is proposed. Firstly, based on the mathematical model of the MMC-UPQC and passive control theory, a positive and negative sequence passive controller based on the Euler-Lagrange model under unbalanced power grid voltage is designed. Then, super-twisting second-order sliding mode control is added to improve the passive controller, which suppresses chattering of the conventional sliding mode, and solves the problem that passive control requires high precision of the system. It improves the response speed, compensation accuracy and anti-interference ability of the system, and improves the overall performance of the system. Finally, the simulation is carried out on the Matlab/Simulink platform and compared with PI control and independent passive control. Simulation results verify the effectiveness and superiority of the proposed passive super-twisting second-order sliding mode control strategy.

Keywords: modular multilevel converter; unified power quality regulator; power grid voltage imbalance; passive super-twisting second-order sliding mode control; Euler-Lagrange model

0 引言

随着分布式能源的应用和电力系统的不断升级,电力电子设备被大量使用,与此同时带来了一系列

电能质量问题^[1-2]. 因此,各种电能质量调节器应运而生. 早期使用的静止无功发生器(SVG)、有源电力滤波器(APF)等,解决电能质量问题的能力非常有限,

收稿日期: 2022-05-30; 录用日期: 2023-02-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61275038); 上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设专项项目(19020500700).

[†]通讯作者. E-mail: zhoujianping@shiep.edu.cn.

而统一电能质量调节器(UPQC)能够同时解决多种电能质量问题,具有极好的性能,被广泛研究^[3].然而由于器件的限制,UPQC只适用于低电压场合.如今,电力行业不断发展,电力系统不断升级,电能传输也逐渐向着高压大电流方向发展,相对应的高电压场合下的电能质量治理显得愈发重要^[4].模块化多电平换流器(MMC)集成了大量的子模块,使用灵活,具有耐压等级高、容量大、频率高等优点,应用领域广泛^[5].将MMC与UPQC相结合,很好地解决了UPQC在中高压场合中的应用问题.目前,基于模块化多电平换流器的统一电能质量调节器已成为UPQC在高压大电流系统中的主要应用形式^[4].目前针对MMC-UPQC的研究大多在电网平衡的状况下,环境设置过于理想,实用参考价值不大.三相电压不平衡是电网常见的故障之一,电网长期在不平衡状况下运行,不仅会增加电能损耗,还会严重危害变压器和用电设备.实验证明,利用传统的控制方法对电网电压不平衡下的MMC-UPQC进行控制,系统的响应速度和补偿精度都大大降低,效果并不理想^[4].因此,研究新的控制策略,使MMC-UPQC在电网电压不平衡状况下正常运行十分重要.

文献[6]提出了一种UPQC串并联单元的协调控制,文献[7]将无源控制方法用于MMC-UPQC,但都是在电网电压平衡的前提下.文献[8]考虑了电网电压三相不平衡,首先对MMC-UPQC的数学模型进行了正负序分离,再设计无源控制器,其控制方法可以处理不平衡情况下串联侧和并联侧补偿问题.文献[9]同样是针对电网电压不平衡情况下的系统控制,提出了一种基于正负序分离的微分平坦控制(DFBC)方法,有较好的动态和静态性能,但必须证明分析系统的平坦性和稳定性,较为繁琐.

无源控制方法有响应速度快、鲁棒性强、成本低且易于实现等优点,同时也存在抗干扰能力差的缺点,在系统受到外界干扰时,控制效果会大打折扣,因此亟需对这一点进行改进.在非线形控制技术中,滑模控制(SMC)是最具成本效益的方法之一,因为它具有鲁棒性、稳定性、良好的动态响应,且与功率转换器固有的开关特性高度兼容^[10].滑模控制不易受外界扰动的影响,并且能够克服系统的不确定性.文献[11-12]将滑模控制运用于并网变流器上,验证了滑模控制较强的抗干扰能力;文献[13]将滑模运用于MMC的控制,提出一种基于直接功率控制的滑模变结构控制策略,得到了较好的控制效果.综上,将滑模控制与无源控制相结合,可提高无源控制的抗干扰能力.文献[14]针对MMC-UPFC提出了一种无源性滑模控制策略,并搭建系统仿真,验证了无源滑模控制

的可行性;文献[15]将无源滑模控制用于UPQC-PV,提高了系统的补偿精度和速度.目前还没有研究将无源滑模控制方法运用到MMC-UPQC中,并且文献[14-15]中所结合的都是传统的滑模控制,存在抖振和控制精度低的问题.文献[16]比较了常规滑模和超螺旋二阶滑模的抖振,得出超螺旋二阶滑模可以很好地抑制抖振;文献[17]分析了超螺旋二阶滑模的具体实现,以及如何构建超螺旋二阶滑模观测器;文献[18]提出了一种基于超螺旋二阶滑模控制的电流跟踪控制方法,并将其应用在有源电力滤波器的控制中;文献[19]将超螺旋二阶滑模用于自主水下滑翔机的控制,并将其控制性能与传统的滑模控制进行对比,仿真结果表明,该控制在存在干扰的情况下具有更好的性能.以上结果显示,超螺旋二阶滑模控制在保留传统滑模控制优点的基础上,有效地抑制了抖振,提升了系统的动静态品质.

综上可知,结合滑模控制可以加强无源控制的抗干扰能力,而超螺旋二阶滑模可以抑制抖振.因此,本文提出一种针对MMC-UPQC的无源超螺旋二阶滑模控制策略,将无源控制律和超螺旋二阶滑模控制律相结合,改进系统的电流内环,提高系统的快速响应能力、补偿质量和抗干扰能力.最后在Matlab/Simulink上仿真,对所提控制方法的性能进行测试,并与比例积分控制和单独的无源控制进行比较,进一步验证所提控制策略的有效性和优越性.

1 MMC-UPQC的拓扑结构与数学模型

1.1 MMC-UPQC的拓扑结构

MMC-UPQC与传统UPQC的区别在于并联侧与串联侧换流器采用了MMC结构.两MMC的直流侧采用大电容 C_1 连接,即直流母线电容,可以消除直流侧电压波动.MMC-UPQC的整体拓扑结构如图1所示.图1中: U_{j1} 、 U_{j2} ($j \in a, b, c$)分别为串联侧、并联侧MMC输出电压, i_{j1} 、 i_{j2} 分别为串联侧、并联侧MMC输出电流, u_{sj} 为电网三相电压, U_j 为串联补偿器补偿电压, U_{Lj} 为负载侧电压, i_{Lj} 为负载侧电流, L_1 、 L_2 分别为串联侧、并联侧电感, R_1 、 R_2 分别为串联侧、并联侧电阻, L_s 为MMC桥臂电感, C_1 为直流侧电容, C_2 为串联侧并联电容.

MMC-UPQC并联侧MMC换流器直接接入中高压电网,起到补偿电流的作用;串联侧MMC换流器通过耦合变压器与电网相联,起到与电网隔离以及补偿电压的作用^[20].MMC由三相上、下共6个桥臂构成,各桥臂均由结构相同的 n 个子模块(SM)和一个桥臂电感组成.每个SM采用半桥结构,由一个带有两个反并联二极管的IGBT电路和一个电容并联而成.

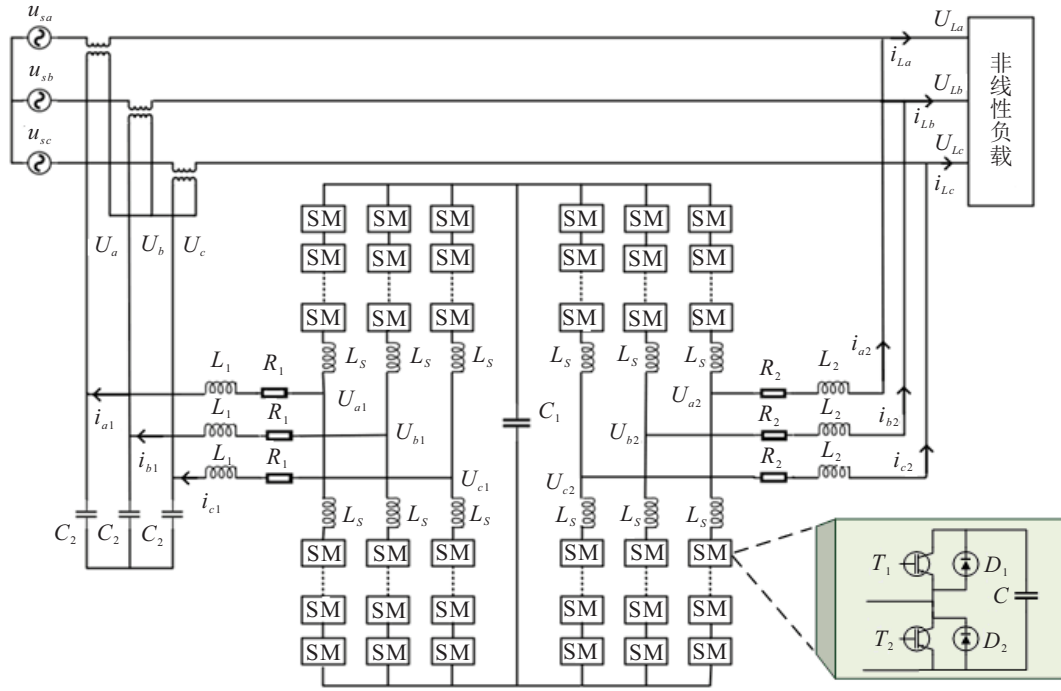


图1 MMC-UPQC拓扑结构

1.2 MMC-UPQC的数学模型

根据基尔霍夫(Kirchhoff)定律,由图1可得MMC-UPQC串联侧、并联侧在abc三相静止坐标系下的数学模型分别为

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{a1}}{dt} + R_1 i_{a1} + U_a = U_{a1}, \\ L_1 \frac{di_{b1}}{dt} + R_1 i_{b1} + U_b = U_{b1}, \\ L_1 \frac{di_{c1}}{dt} + R_1 i_{c1} + U_c = U_{c1}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_2 \frac{di_{a2}}{dt} + R_2 i_{a2} + U_{La} = U_{a2}, \\ L_2 \frac{di_{b2}}{dt} + R_2 i_{b2} + U_{Lb} = U_{b2}, \\ L_2 \frac{di_{c2}}{dt} + R_2 i_{c2} + U_{Lc} = U_{c2}. \end{cases} \quad (2)$$

为了简化并利于分析,将MMC-UPQC的数学模型从abc三相静止坐标系下转换到dq两相同步旋转坐标下,考虑到电网三相不平衡,再进行正负序分离,可得

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{d1}^+}{dt} + R_1 i_{d1}^+ - \omega L_1 i_{q1}^+ + U_d^+ = U_{d1}^+, \\ L_1 \frac{di_{q1}^+}{dt} + R_1 i_{q1}^+ + \omega L_1 i_{d1}^+ + U_q^+ = U_{q1}^+, \\ L_1 \frac{di_{d1}^-}{dt} + R_1 i_{d1}^- + \omega L_1 i_{q1}^- + U_d^- = U_{d1}^-, \\ L_1 \frac{di_{q1}^-}{dt} + R_1 i_{q1}^- - \omega L_1 i_{d1}^- + U_q^- = U_{q1}^-; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} L_2 \frac{di_{d2}^+}{dt} + R_2 i_{d2}^+ - \omega L_2 i_{q2}^+ + U_{Ld}^+ = U_{d2}^+, \\ L_2 \frac{di_{q2}^+}{dt} + R_2 i_{q2}^+ + \omega L_2 i_{d2}^+ + U_{Lq}^+ = U_{q2}^+, \\ L_2 \frac{di_{d2}^-}{dt} + R_2 i_{d2}^- + \omega L_2 i_{q2}^- + U_{Ld}^- = U_{d2}^-, \\ L_2 \frac{di_{q2}^-}{dt} + R_2 i_{q2}^- - \omega L_2 i_{d2}^- + U_{Lq}^- = U_{q2}^-; \end{cases} \quad (4)$$

为方便说明,下标*i*取1表示串联侧,取2表示并联侧. i_{di}^+ 、 i_{di}^- 和 i_{qi}^+ 、 i_{qi}^- 分别为*i*侧输出电流*d*轴分量的正序、负序分量和*q*轴分量的正序、负序分量; U_{di}^+ 、 U_{di}^- 和 U_{qi}^+ 、 U_{qi}^- 分别为*i*侧输出电压*d*轴分量的正、负序分量和*q*轴分量的正、负序分量; U_d^+ 、 U_d^- 和 U_q^+ 、 U_q^- 分别为串联侧补偿电压*d*轴分量的正、负序分量和*q*轴分量的正、负序分量; U_{Ld}^+ 、 U_{Ld}^- 和 U_{Lq}^+ 、 U_{Lq}^- 分别为负载侧电压*d*轴分量的正、负序分量和*q*轴分量的正、负序分量; ω 为电网基波角频率.

2 MMC-UPQC的无源超螺旋二阶滑模控制策略

系统并联侧的控制策略推导过程与串联侧相似,现以串联侧为例.

2.1 基于E-L模型的MMC-UPQC无源控制器设计

将式(3)和(4)写成E-L模型的形式如下:

$$M\dot{x} + Jx + Rx = u. \quad (5)$$

可得

$$\begin{cases} M_1 \dot{x}_1^+ + J_1^+ x_1^+ + R_1 x_1^+ = u_1^+, \\ M_1 \dot{x}_1^- + J_1^- x_1^- + R_1 x_1^- = u_1^-; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} M_2 \dot{x}_2^+ + J_2^+ x_2^+ + R_2 x_2^+ = u_2^+, \\ M_2 \dot{x}_2^- + J_2^- x_2^- + R_2 x_2^- = u_2^-. \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$M_1 = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & L_1 \end{bmatrix}, J_1^+ = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_1 \\ \omega L_1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$J_1^- = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_1 \\ -\omega L_1 & 0 \end{bmatrix}, R_1 = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_1 \end{bmatrix};$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} L_2 & 0 \\ 0 & L_2 \end{bmatrix}, J_2^+ = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_2 \\ \omega L_2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$J_2^- = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_2 \\ -\omega L_2 & 0 \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} R_2 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix};$$

$$x_1^+ = \begin{bmatrix} i_{d1}^+ \\ i_{q1}^+ \end{bmatrix}, x_1^- = \begin{bmatrix} i_{d1}^- \\ i_{q1}^- \end{bmatrix},$$

$$u_1^+ = \begin{bmatrix} U_{d1}^+ - U_d^+ \\ U_{q1}^+ - U_q^+ \end{bmatrix}, u_1^- = \begin{bmatrix} U_{d1}^- - U_d^- \\ U_{q1}^- - U_q^- \end{bmatrix};$$

$$x_2^+ = \begin{bmatrix} i_{d2}^+ \\ i_{q2}^+ \end{bmatrix}, x_2^- = \begin{bmatrix} i_{d2}^- \\ i_{q2}^- \end{bmatrix},$$

$$u_2^+ = \begin{bmatrix} U_{d2}^+ - U_{Ld}^+ \\ U_{q2}^+ - U_{Lq}^+ \end{bmatrix}, u_2^- = \begin{bmatrix} U_{d2}^- - U_{Ld}^- \\ U_{q2}^- - U_{Lq}^- \end{bmatrix}.$$

M 为正定对角阵; J 为反对称矩阵, $J = -J^T$; R 为反映系统能量耗散特性的对称正定矩阵; x 为状态变量向量; u 为系统输入向量.

考虑 m 输入, m 输出系统, 有

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u); \\ y = h(x), x(0) = x_0 \in R^n. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $x \in R^n$ 为系统状态向量, $u \in R^m$ 为系统输入向量, $y \in R^m$ 为系统输出向量, f 为关于 (x, u) 的局部 Lipschitz 函数. 若存在连续可微半正定函数 $H(x)$ 和正定函数 $Q(x)$, 对于 $\forall t > 0$, 能得到耗散不等式为

$$H(x(t)) - H(x(0)) \leq \int_0^t y^T u d\tau - \int_0^t Q(x) d\tau \quad (9)$$

或

$$\dot{H}(x) \leq y^T u - Q(x), \quad (10)$$

对输入 u 、输出 y 及能量供给率 $y^T u$ 成立, 则系统被称为是严格无源的.

针对 MMC-UPQC 系统, 可设置存储函数为

$$H(x) = \frac{1}{2} x^T M x. \quad (11)$$

其导数为

$$\dot{H} = x^T M \dot{x} = x^T (u - Jx - Rx) = x^T u - x^T R x. \quad (12)$$

令 $y = x, Q(x) = x^T R x$, 则得到

$$\dot{H} = y^T u - Q(x). \quad (13)$$

满足式(10), 可知系统为严格无源. 根据无源控制的理论, 严格无源的系统一定可以采用无源控制且控制系统是稳定的^[21-22].

根据文献[23], 本文同样可以选择系统的误差变量 $x_e = x - x^*$, x^* 为系统期望的平衡点. 选取系统的误差存储能量函数为

$$H_e = \frac{1}{2} x_e^T M x_e. \quad (14)$$

对于 E-L 模型的无源控制器, 只需使得 H_e 快速趋近于 0, 则 x_e 也可以快速趋近于 0, 即可达到无源控制的目的. 但系统仍存在收敛速度过慢的可能, 为了减小震荡, 加快收敛速度, 可以通过注入阻尼提高系统的能量耗散速率, 保证系统的动态性能. 选取注入阻尼耗散项为

$$R_d x_e = (R + R_a) x_e. \quad (15)$$

与文献[23]的推导类似, 本文不再赘述. 可以得到改进后的控制律

$$u = M \dot{x}^* + Jx + Rx^* - R_a x_e, \quad (16)$$

此时

$$M \dot{x}_e + R_d x_e = 0. \quad (17)$$

验证误差存储能量函数导数为

$$\dot{H}_e = x_e^T M \dot{x}_e = -x_e^T R_d x_e < 0. \quad (18)$$

由式(6)和(16)可得

$$\begin{cases} u_1^+ = M_1 \dot{x}_1^{+*} + J_1^+ x_1^+ + R_1 x_1^{+*} - R_a x_{1e}^+, \\ u_1^- = M_1 \dot{x}_1^{-*} + J_1^- x_1^- + R_1 x_1^{-*} - R_b x_{1e}^-. \end{cases} \quad (19)$$

其中

$$x_1^{+*} = \begin{bmatrix} i_{d1ref}^+ \\ i_{q1ref}^+ \end{bmatrix}, x_1^{-*} = \begin{bmatrix} i_{d1ref}^- \\ i_{q1ref}^- \end{bmatrix},$$

$$R_a = \begin{bmatrix} R_{a1} & 0 \\ 0 & R_{a2} \end{bmatrix}, R_b = \begin{bmatrix} R_{b1} & 0 \\ 0 & R_{b2} \end{bmatrix}.$$

i_{d1ref}^+, i_{d1ref}^- 和 i_{q1ref}^+, i_{q1ref}^- 分别为状态变量 i_{d1}^+, i_{d1}^- 和 i_{q1}^+, i_{q1}^- 的参考值.

考虑到 $\dot{x}^* = 0$, 则可得到无源控制律

$$\begin{cases} U_d^+ = U_{d1}^+ + \omega L_1 i_{q1}^+ - R_1 i_{d1ref}^+ \\ \quad R_{a1} (i_{d1}^+ - i_{d1ref}^+), \\ U_q^+ = U_{q1}^+ - \omega L_1 i_{d1}^+ - R_1 i_{q1ref}^+ \\ \quad R_{a2} (i_{q1}^+ - i_{q1ref}^+); \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} U_d^- = U_{d1}^- - \omega L_1 i_{q1}^- - R_1 i_{d1ref}^- + \\ \quad R_{b1}(i_{d1}^- - i_{d1ref}^-), \\ U_q^- = U_{q1}^- + \omega L_1 i_{d1}^- - R_1 i_{q1ref}^- + \\ \quad R_{b2}(i_{q1}^- - i_{q1ref}^-). \end{cases} \quad (21)$$

2.2 MMC-UPQC的无源超螺旋二阶滑模控制器设计

传统滑模控制产生抖振的原因可以归结为控制量的不连续.当状态量运动到滑模面时,惯性使其继续运动,穿越过滑模面,在控制的反向作用生效前已经穿过了一定的距离.这样,系统状态点将会一直反复穿越滑模面,最终在宏观上形成抖振.抖振的产生会极大地影响控制效果,降低系统效率.

超螺旋二阶滑模控制方法相对于其他方法有以下两个优点:

- 1) 只需要用到滑模面 S 的信息,而不需要用到 \dot{S} 的信息;
- 2) 当 u 与 S 的相关度为1时,可以直接设计 u ,而不需要重新设计 \dot{u} .

超螺旋二阶滑模的一般形式为

$$\begin{cases} u = u_1 + u_2, \\ u_1 = -\int \varepsilon \text{sign}(S) dt, \\ u_2 = -\lambda |S|^\rho \text{sign}(S), \\ \dot{u} = -\varepsilon \text{sign}(S). \end{cases} \quad (22)$$

其中: u_1 为关于滑模面符号函数在时间上的积分函数; u_2 为关于滑模面符号函数的一个连续函数; S 为滑模面; λ 和 ε 为两个增益,是大于0的常数; ρ 为系统达到二阶滑动模态的参数.

当 ρ 取值为0.5时,系统将最大概率实现二阶滑动模态,所以 $\rho = 0.5$, u 可以写成

$$u = -\lambda |S|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S) - \int \varepsilon \text{sign}(S) dt. \quad (23)$$

由式(23)可以看出,超螺旋二阶滑模控制将传统滑模控制中不连续的高频切换项转移到 \dot{u} ,不再直接影响到 u ,使控制量在时间上连续,所以输出为连续信号,在保留传统滑模控制优点的基础上抑制了抖振的产生.

为保证超螺旋二阶滑模控制结构在有限时间内收敛,需满足条件

$$\begin{cases} \varepsilon > \frac{\varphi}{K_m}, \\ \lambda^2 \geq \frac{4\varphi}{K_m^2} \cdot \frac{K_M(\varepsilon + \varphi)}{K_m(\varepsilon - \varphi)}. \end{cases} \quad (24)$$

其中 K_m 、 K_M 和 φ 均是大于0的常数.

图2展示了存在外界扰动时,传统滑模控制、二

阶滑模控制以及超螺旋二阶滑模控制的控制律 u 的波形情况.

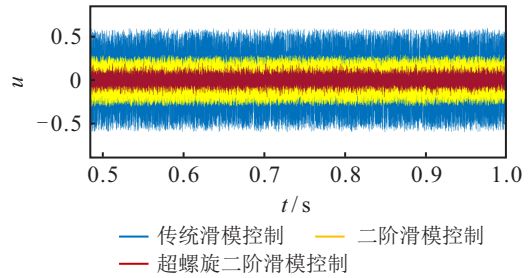


图2 3种控制下的控制律波形对比

从图2可以看出,传统滑模控制的抖振最为明显,二阶滑模控制能对抖振进行一定的抑制,而超螺旋二阶滑模控制对抖振的抑制最为有效和明显.

无源控制是基于精确数学模型推导得到的,而在实际运行中,系统不断受到外界干扰,平衡点也会发生变化,这会对控制律造成相应的扰动,影响控制效果.此时利用超螺旋二阶滑模控制来进一步优化无源控制,既可以抑制传统滑模带有的抖振,也可以增强系统的抗干扰能力.

针对MMC-UPQC系统,首先确定滑模面

$$\begin{cases} S_d^+ = i_{d1}^+ - i_{d1ref}^+, \\ S_q^+ = i_{q1}^+ - i_{q1ref}^+, \\ S_d^- = i_{d1}^- - i_{d1ref}^-, \\ S_q^- = i_{q1}^- - i_{q1ref}^-. \end{cases} \quad (25)$$

滑动向量则为

$$\sigma = [S_d^+ \quad S_q^+ \quad S_d^- \quad S_q^-]^T. \quad (26)$$

其导数为

$$\dot{\sigma} = \begin{bmatrix} \dot{S}_d^+ \\ \dot{S}_q^+ \\ \dot{S}_d^- \\ \dot{S}_q^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{d1}^+ - i_{d1ref}^+ \\ i_{q1}^+ - i_{q1ref}^+ \\ i_{d1}^- - i_{d1ref}^- \\ i_{q1}^- - i_{q1ref}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{di_{d1}^+}{dt} \\ \frac{di_{q1}^+}{dt} \\ \frac{di_{d1}^-}{dt} \\ \frac{di_{q1}^-}{dt} \end{bmatrix}. \quad (27)$$

令滑模面,即输入的误差函数为目标函数,可得

$$\dot{S} = -\lambda |S|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S) - \int \varepsilon \text{sign}(S) dt. \quad (28)$$

由式(3)和(27)可得

$$\begin{cases} L_1 \dot{S}_d^+ = U_{d1}^+ - U_d^+ + \omega L_1 i_{q1}^+ - R_1 i_{d1}^+, \\ L_1 \dot{S}_q^+ = U_{q1}^+ - U_q^+ - \omega L_1 i_{d1}^+ - R_1 i_{q1}^+, \\ L_1 \dot{S}_d^- = U_{d1}^- - U_d^- - \omega L_1 i_{q1}^- - R_1 i_{d1}^-, \\ L_1 \dot{S}_q^- = U_{q1}^- - U_q^- + \omega L_1 i_{d1}^- - R_1 i_{q1}^-. \end{cases} \quad (29)$$

由式(20)、(21)、(28)和(29)可得最终控制律为

$$\left\{ \begin{aligned} U_d^+ &= U_{d1}^+ + \omega L_1 i_{q1}^+ - R_1 i_{d1ref}^+ \\ &\quad \frac{R_{a1} \left[\lambda_1 |S_d^+|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_d^+) + \int \varepsilon_1 \text{sign}(S_d^+) dt \right]}{R_1 + R_{a1}}, \\ U_q^+ &= U_{q1}^+ - \omega L_1 i_{d1}^+ - R_1 i_{q1ref}^+ \\ &\quad \frac{R_{a2} \left[\lambda_2 |S_q^+|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_q^+) + \int \varepsilon_2 \text{sign}(S_q^+) dt \right]}{R_1 + R_{a2}}, \\ U_d^- &= U_{d1}^- - \omega L_1 i_{q1}^- - R_1 i_{d1ref}^- \\ &\quad \frac{R_{b1} \left[\lambda_3 |S_d^-|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_d^-) + \int \varepsilon_3 \text{sign}(S_d^-) dt \right]}{R_1 + R_{b1}}, \\ U_q^- &= U_{q1}^- + \omega L_1 i_{d1}^- - R_1 i_{q1ref}^- \\ &\quad \frac{R_{b2} \left[\lambda_4 |S_q^-|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_q^-) + \int \varepsilon_4 \text{sign}(S_q^-) dt \right]}{R_1 + R_{b2}}. \end{aligned} \right. \quad (30)$$

同理,可以推导得到并联侧的无源超螺旋二阶滑模控制律.

3 MMC-UPQC 的控制系统

综上所述,设计 MMC-UPQC 总体控制框图如图 3 所示.

首先,从交流侧获取三相电压和三相电流信号,通过正负序分离和 dq 变换得到两相旋转坐标系下的电压电流信号;然后,进行参考值计算,得到参考电流和参考电压,再根据式(30)加入无源超螺旋二阶滑模控制环节,将其应用于电流内环,经过 dq 反变换得到等效三相输出电压的参考值,与经过均压和环流抑制环节得到的 u_c 一起进行移相载波调制产生控制信号,对串联侧和并联侧 MMC 各个子模块进行控制.

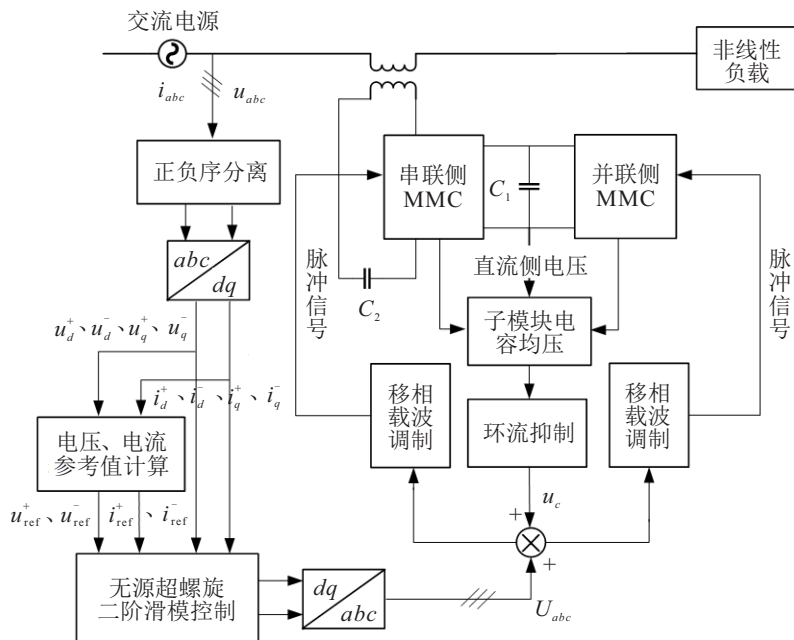


图3 MMC-UPQC 系统控制框图

MMC-UPQC 系统中的串联侧检测电源电压畸变,当电压产生波动时,负责补偿电压,使负载侧电压稳定;并联侧检测电流畸变,当电流异常时,负责补偿电流,使负载电流稳定.

4 系统仿真分析

本文在 Matlab/Simulink 平台中搭建 MMC-UPQC 模型,对所提控制策略进行仿真. 设置电网电压单相暂降暂升、单相注入谐波和搭配非线性负载 3 种情况. 分析对比无源超螺旋二阶滑模控制与无源控制及 PI 控制的效果. 实验设置的电网友电压为 2 kV,以此来验证中高压场合下的系统运行情况.

系统仿真参数见表 1. 单个桥臂子模块数为 6,即系统为 7 电平.

表1 实验参数

参数	数值	参数	数值
交流电压/kV	2	串联侧电感/mH	2
电网电压频率/Hz	50	并联侧电感/mH	3
桥臂子模块数	6	串联侧电阻/ Ω	0.1
子模块电容/ μ F	2520	并联侧电阻/ Ω	0.2
桥臂电感/mH	4	直流侧电容/mF	12
直流侧电容电压/kV	6	串联侧变压器变比	1

4.1 电网电压暂降暂升

当电网电压发生暂降和暂升时,设置仿真条件为 a 相电压在 $[0.5, 0.6]$ s 发生电压 20% 的暂降,在 $[0.6, 0.7]$ s 发生电压 20% 的暂升; b 、 c 相的电压维持正常. 电网电压情况如图 4 所示.

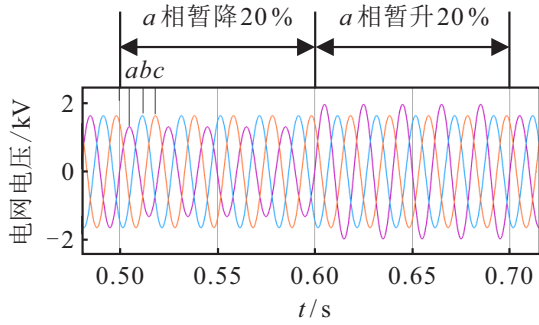


图4 a相暂升暂降时的电网电压情况

图5为a相电网电压发生暂降和暂升时,PI控制、

单独的无源控制以及无源超螺旋二阶滑模控制的控制效果对比图. 本文主要进行3项指标的对比,包括治理后的负载侧电压对比、补偿电压的对比和谐波含量的对比. 由图5可见,当a相电压发生暂升暂降时,无源超螺旋二阶滑模控制可以在0.02s的时间内使负载侧电压恢复平衡且稳定,比PI控制和单独的无源控制都要快,超调量也比无源控制和PI控制都小. 从补偿电压对比图可以看出,无源超螺旋二阶滑模控制的补偿电压波形比PI控制和无源控制都更加清晰、平滑,说明其补偿精度更高,更加准确.

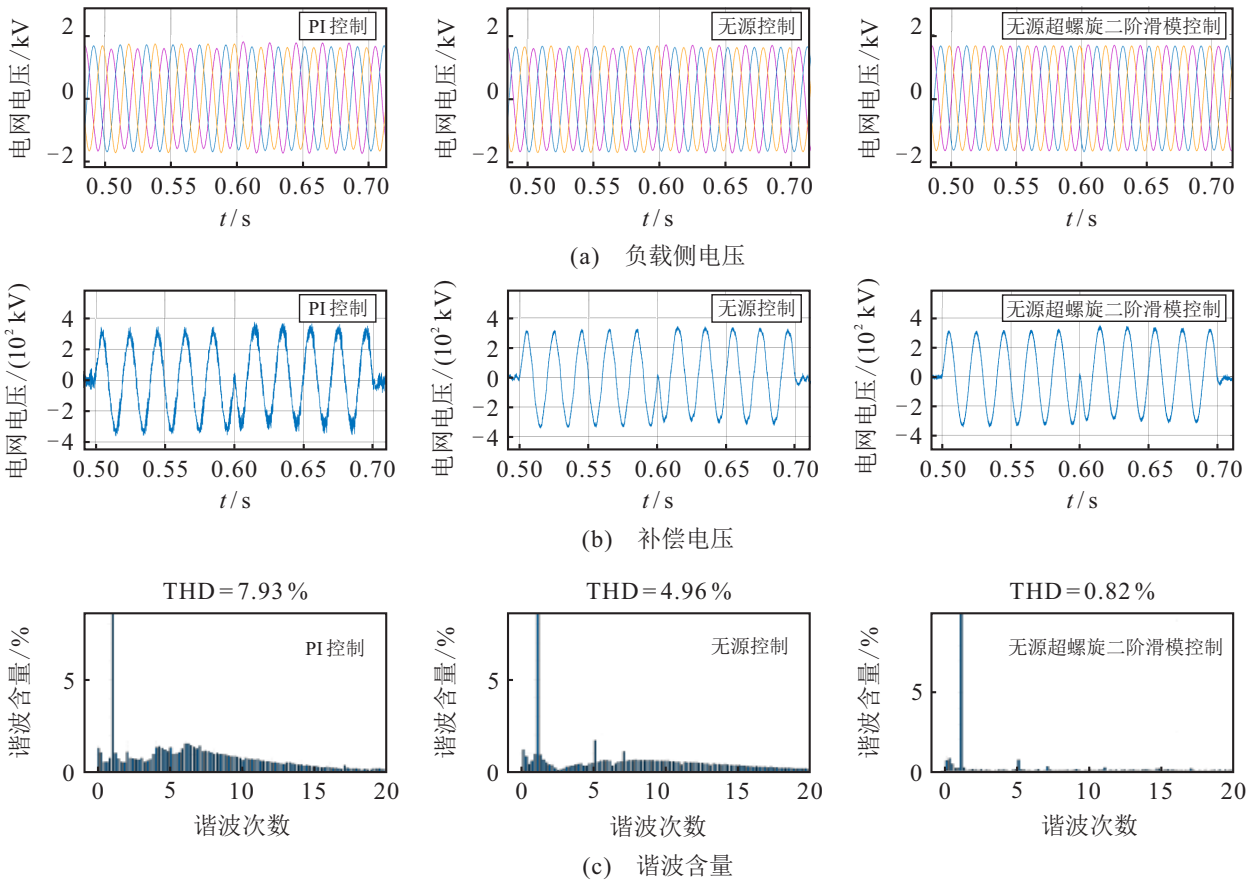


图5 a相电压暂升暂降时3种控制方法比较

可以从总谐波失真度对控制效果做进一步分析对比,无源超螺旋二阶滑模控制的总谐波畸变率为0.82%,比PI控制的7.93%和无源控制的4.96%要低很多. 可见,采用无源超螺旋二阶滑模控制,电压补偿的速度和精度都最高,负载侧电压波形最好. 一系列详细指标可见表2.

表2 电压暂升暂降时3种控制结果指标对比

指标	PI控制	无源控制	无源超螺旋二阶滑模控制
恢复时间/s	0.075	0.030	0.020
超调量/%	8.20	4.50	2.13
总谐波失真度/%	7.93	4.96	0.82

4.2 电网电压注入谐波

为了体现控制策略在不平衡状况下补偿电网电压谐波的能力,设置[0.2, 0.5]s内a相出现含量为20%的5次谐波和含量为10%的7次谐波.

电网电压情况如图6所示,控制效果对比如图7所示.

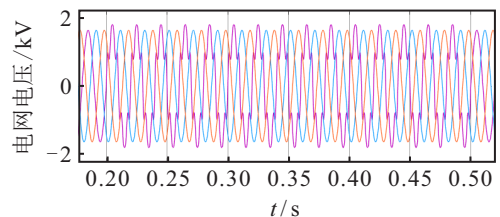


图6 a相注入谐波时电网电压情况

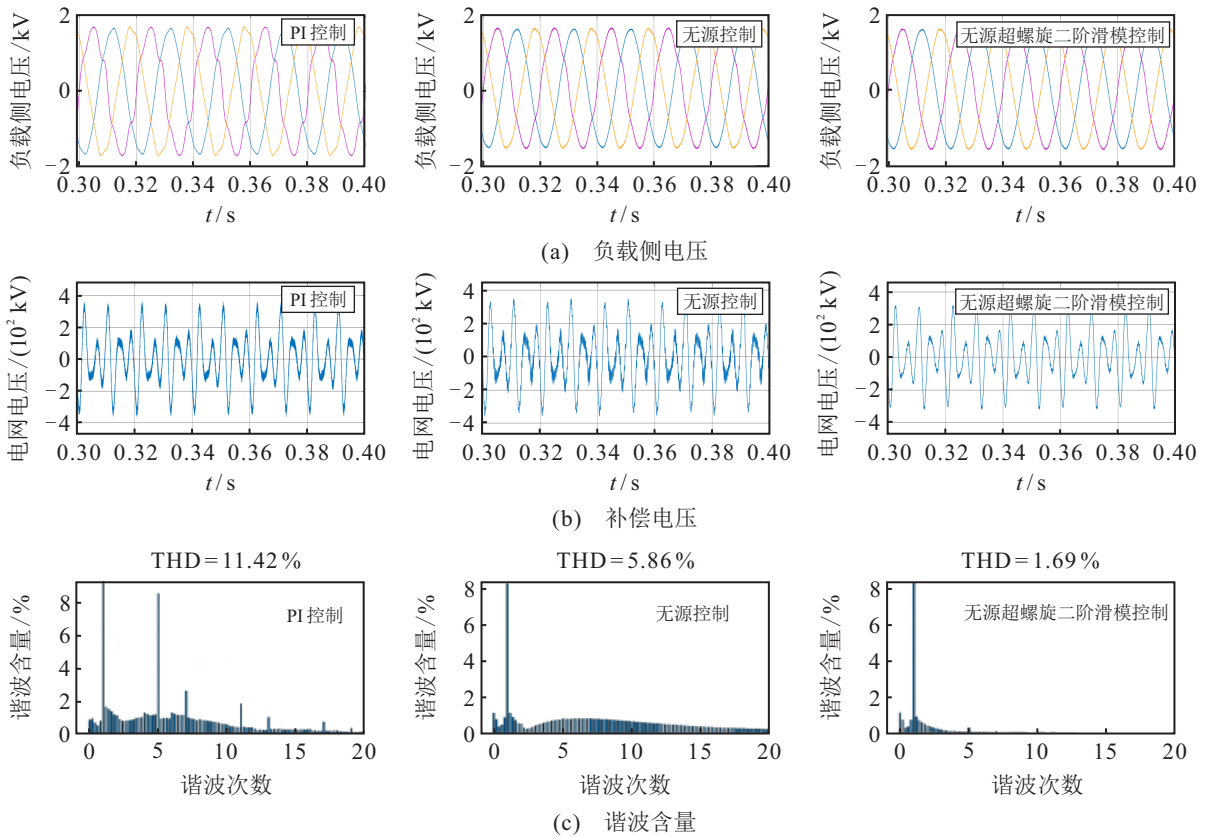


图7 a相注入谐波时3种控制方法比较

由图7可见,当a相电压注入谐波时,无源超螺旋二阶滑模控制可以在0.015s的时间左右达到补偿效果,稳定电压波形.比PI控制和单独的无源控制都要快的同时,补偿电压波形依旧更加清晰,补偿质量更高.同时,从图7可以看出,PI控制补偿之后的负载侧电压波形仍然与规范的正弦波相差甚远,难以达到控制目标.从总谐波失真度对控制效果做进一步分析可得,无源超螺旋二阶滑模控制的总谐波畸变率为1.69%,比PI控制的11.42%和无源控制的5.86%都要低,可见无源超螺旋二阶滑模控制对电压谐波的补偿效果也更好.详细指标见表3.

表3 注入谐波时3种控制结果的指标对比

指标	PI控制	无源控制	无源超螺旋二阶滑模控制
恢复时间/s	0.080	0.040	0.015
超调量/%	8.90	4.70	2.30
总谐波失真度/%	11.42	5.86	1.69

4.3 非线性负载

为了验证系统在搭配非线性负载状况下的运行情况以及补偿电流的效果,进行非线性负载仿真.非线性负载在系统并联侧见图1,具体电路如图8所示.当负载为非线性负载时,电流会含有大量谐波,从图9可知 $THD = 22.77\%$.设置电网电压在[0.5,0.6]s发生电压20%的暂降,在[0.6,0.7]s发生电压20%的暂升来增加干扰,观察各个控制方法的治理效果.

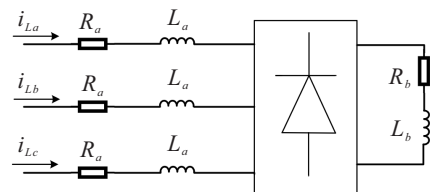


图8 非线性负载

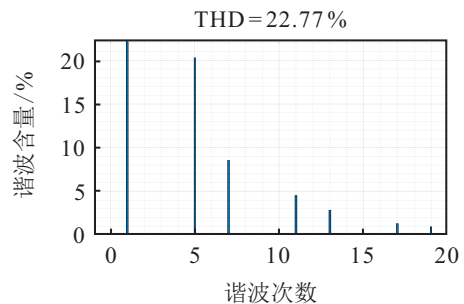


图9 非线性负载时谐波失真情况

图10为系统搭配非线性负载且未采用任何控制方法时的负载侧电流情况,可见有明显畸变.图11为各个控制方法在此状况下的控制效果对比图.

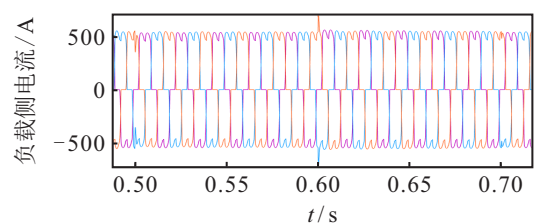


图10 非线性负载时负载侧电流波形

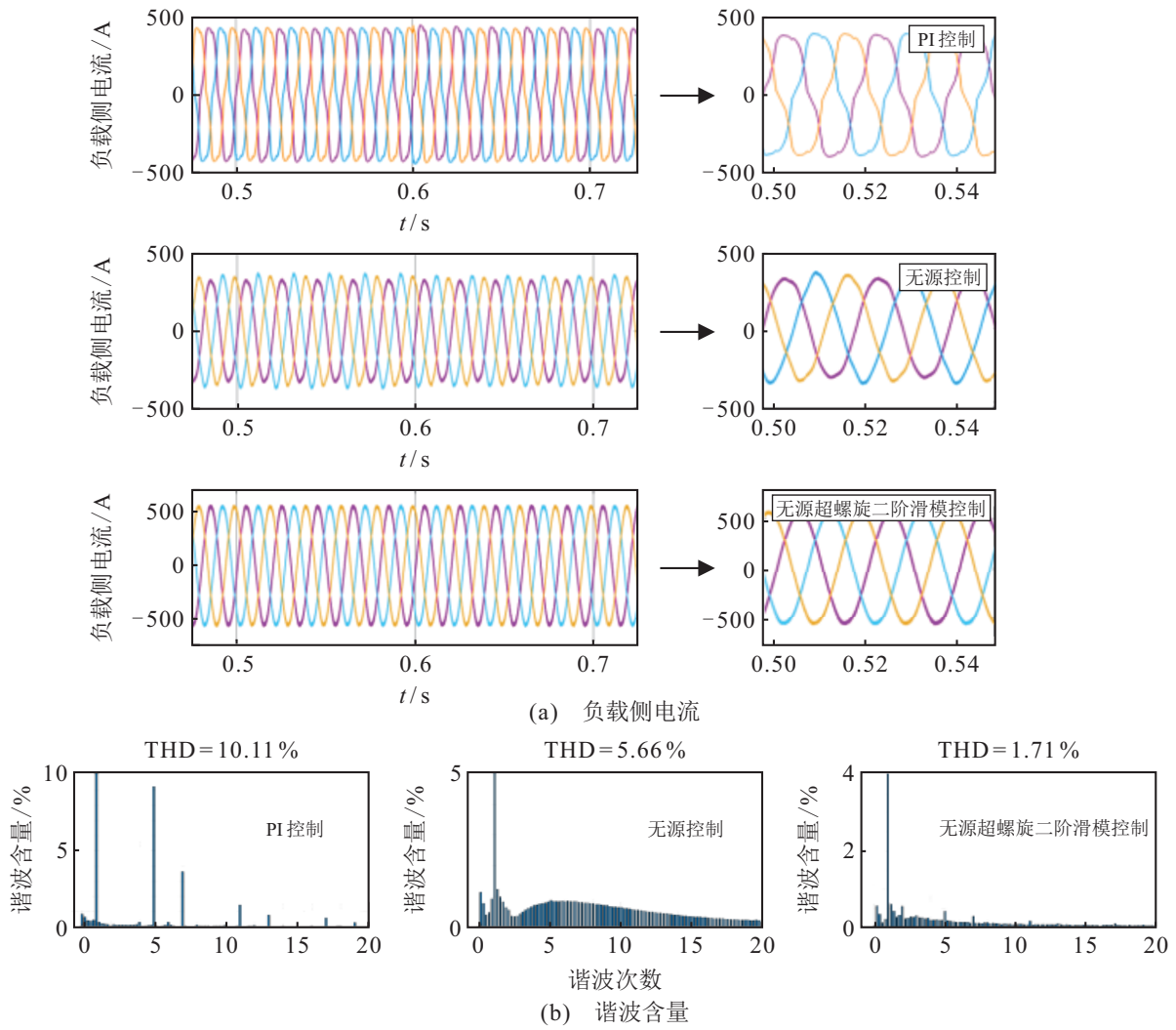


图 11 非线性负载时3种控制方法比较

由图 11 可见,系统搭配非线性负载且电网电压有暂降暂升时,无源超螺旋二阶滑模控制可以在 0.03s 的时间左右达到补偿效果,稳定电流波形,比 PI 控制和单独的无源控制都要快。从图 11 也可以看出,PI 控制补偿之后的负载侧电流波形并不光滑,仍然存在波动且与规范的正弦波相差甚远,无源控制之后的电流幅值仍然不平衡,而经过无源超螺旋二阶滑模控制补偿之后的负载侧电流波形则非常接近于正弦波且三相幅值相同。另外,无源超螺旋二阶滑模控制的总谐波畸变率为 1.71%,仍然比 PI 控制的 10.11% 和无源控制的 5.66% 都要低。因此,无源超螺旋二阶滑模控制有着更好的电流补偿效果。详细指标见表 4。

表 4 非线性负载时3种控制结果指标对比

指标	PI控制	无源控制	无源超螺旋二阶滑模控制
恢复时间/s	0.090	0.042	0.030
超调量/%	10.20	5.50	2.98
总谐波失真度/%	10.11	5.66	1.71

本文提出的控制策略主要为改进系统串联侧以及并联侧控制的电流内环,使得电流能够更加快速准确地跟踪指定值。电流跟踪的效果越好,系统的补偿量也会更加快速和准确地被检测出来,使得 MMC-UPQC 的补偿更加及时有效,保证综合补偿的实时性和准确性。图 12 展示了系统运行时,采用 PI 控制、无源控制和无源超螺旋二阶滑模控制下串联侧正序有功电流对参考值的跟踪情况。

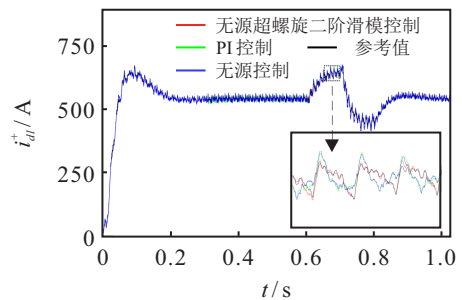


图 12 3种控制策略下 i_{d1}^+ 的仿真结果

图 12 中黑色为串联侧正序有功电流参考值,可以看出,在无源超螺旋二阶滑模控制策略下,电流跟

踪最为快速准确,误差最小.因此,图12进一步说明了本文所提控制策略的优越性.

5 结论

本文提出了一种针对电网电压不平衡下MMC-UPQC的无源超螺旋二阶滑模控制策略.通过本文研究可以得到以下结论:

1) MMC-UPQC的数学模型适用于无源超螺旋二阶滑模控制策略,本文设计的串联侧和并联侧控制器具有稳定性和有效性.在中高压电网发生三相电压不平衡时,本文提出的控制方法能很好地解决电能质量问题,使系统正常运行.

2) 无源超螺旋二阶滑模控制策略相比于PI和无源控制方法,补偿更快,更加精准.补偿后的电流和电压谐波畸变率更小,优势非常明显.

3) 无论系统搭配线性负载还是非线性负载,当电网电压发生波动时,本文提出的无源超螺旋二阶滑模控制均有很好的补偿效果.仿真结果表明了本文所提控制方法的有效性和优越性.

参考文献(References)

- [1] 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): 4104-4120.
(Wang F, Quan X Q, Ren L T. Review of power quality disturbance detection and identification methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4104-4120.)
- [2] 易桂平,胡仁杰.分布式电源接入电网的电能质量问题研究综述[J].电网与清洁能源,2015,31(1): 38-46.
(Yi G P, Hu R J. Survey on the power quality question resultant from connection of distributed power generation to the grid[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2015, 31(1): 38-46.)
- [3] Khadkikar V. Enhancing electric power quality using UPQC: A comprehensive overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2284-2297.
- [4] 徐晓刚,李兰芳,吴国兵,等.UPQC在电力系统中的研究现状和挑战[J].广东电力,2017,30(4): 1-9.
(Xu X G, Li L F, Wu G B, et al. Research and challenges of UPQC in power system[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 1-9.)
- [5] 唐俊松.模块化多电平换流器(MMC)通用平台设计与研究[D].杭州:浙江大学,2018: 19-20.
(Tang J S. Design and research of modular multilevel converter (MMC) universal platform[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018: 19-20.)
- [6] 李鹏,杨以涵.基于 H_∞ 控制理论的UPQC串并联单元协调控制的实现[J].中国电机工程学报,2006,26(20): 91-97.
(Li P, Yang Y H. Realization for coordinated control of UPQC series unit and shunt unit based on H_∞ control theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 91-97.)
- [7] 祝贺,王久和,郑成才,等.五电平MMC-UPQC的无源控制[J].电工技术学报,2017,32(S2): 172-178.
(Zhu H, Wang J H, Zheng C C, et al. Passivity based control of five-level MMC-UPQC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S2): 172-178.)
- [8] 刘亨铭,江畅,程启明,等.不平衡电网下基于无源控制的MMC-UPQC电能质量综合治理研究[J].高电压技术,2021,47(4): 1344-1353.
(Liu H M, Jiang C, Cheng Q M, et al. Research on MMC-UPQC power quality comprehensive management based on passive control in unbalanced power grid[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1344-1353.)
- [9] 江畅,程启明,马信乔,等.不平衡电网电压下基于模块化多电平变流器的统一电能质量调节器的微分平坦控制[J].电工技术学报,2021,36(16): 3410-3421.
(Jiang C, Cheng Q M, Ma X Q, et al. Differential flat control for unified power quality controller based on modular multilevel converter under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16): 3410-3421.)
- [10] Sebaaly F, Vahedi H, Kanaan H Y, et al. Sliding mode fixed frequency current controller design for grid-connected NPC inverter[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1397-1405.
- [11] Massaoui Y, Elleuch D, Mehdi D, et al. Improved dynamic response of a non ideal DC-DC boost converter using an Integral sliding mode controller[C]. The 6th International Conference on Systems and Control. Batna, 2017: 532-537.
- [12] Avila E, Pozo M, Camacho O, et al. Sliding-mode control in a cascade scheme for a PMSG based wind energy conversion system[C]. 2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting. Salinas, 2018: 1-6.
- [13] 孙伟莎,程启明,程尹曼,等.不平衡电网电压下MMC滑模变结构控制策略[J].太阳能学报,2020,41(9): 310-317.
(Sun W S, Cheng Q M, Cheng Y M, et al. Mmc control strategy based on sliding mode variable structure under unbalanced grid voltage[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(9): 310-317.)
- [14] 柯顺超,朱淼,陈阳,等.基于MMC-UPFC无源性滑模变结构控制的电网不平衡治理策略[J].高电压技术,2020,46(3): 1077-1085.

- (Ke S C, Zhu M, Chen Y, et al. Treatment strategy of unbalanced grid voltage conditions based on MMC-UPFC passive sliding-mode variable structure control[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 1077-1085.)
- [15] 叶剑桥, 周建萍, 茅大钧, 等. 基于无源滑模和滑模PI的UPQC-PV控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(1): 106-112.
(Ye J Q, Zhou J P, Mao D J, et al. Control strategy of UPQC-PV based on passive sliding mode and sliding mode PI[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 106-112.)
- [16] Swikir A, Utkin V. Chattering analysis of conventional and super twisting sliding mode control algorithm[C]. 2016 14th International Workshop on Variable Structure Systems. Nanjing, 2016: 98-102.
- [17] Chalanga A, Kamal S, Fridman L M, et al. Implementation of super-twisting control: Super-twisting and higher order sliding-mode observer-based approaches[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3677-3685.
- [18] 李志军, 王丽娟, 张奕楠, 等. 超螺旋二阶滑模APF电流跟踪控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 36-42.
(Li Z J, Wang L J, Zhang Y N, et al. APF current tracking control based on super-twisting second-order sliding mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2020, 32(6): 36-42.)
- [19] Mat-Noh M, Arshad M R, Mohd-Mokhtar R. Nonlinear control of autonomous underwater glider based on super-twisting sliding mode control(STSMC)[C]. 2017 7th IEEE International Conference on System Engineering and Technology. Shah Alam, 2017: 71-76.
- [20] 杨用春. 基于MMC的统一电能质量调节器运行控制关键问题研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018: 28-29.
(Yang Y C. Research on key problems of operation control of unified power quality regulator based on MMC[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018: 28-29.)
- [21] 程启明, 马信乔, 江畅, 等. 模块化多电平矩阵变换器输入侧的无源控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 136-143.
(Cheng Q M, Ma X Q, Jiang C, et al. Passivity-based control strategy for input side of modular multilevel matrix converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 136-143.)
- [22] 薛花, 田广平, 扈曾辉, 等. 电网不平衡下模块化多电平变换器无源一致性控制方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 85-95.
(Xue H, Tian G P, Hu Z H, et al. Passivity-consensus based control method for modular multilevel converter in unbalanced power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 85-95.)
- [23] 鲍克勤, 吴浩强, 程启明, 等. 基于E-L模型的电力弹簧无源控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4986-4995.
(Bao K Q, Wu H Q, Cheng Q M, et al. Passive-based control strategy of electric springs based on E-L model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4986-4995.)

作者简介

黄祖繁(1998—), 男, 硕士生, 从事电能质量调节器的控制和应用等研究, E-mail: 1916719080@qq.com;

周建萍(1978—), 女, 副教授, 博士, 从事电力电子技术和微电网技术等研究, E-mail: zhoujianping@shiep.edu.cn;

茅大钧(1966—), 男, 教授, 博士, 从事电站过程自动化、计算机测控技术以及智能仪器仪表等研究, E-mail: maodajun@sina.cn;

齐国庆(1996—), 男, 硕士生, 从事有源电力滤波器控制策略的研究, E-mail: 1095537388@126.com;

从帆平(1996—), 男, 硕士生, 从事电力系统无功优化的研究, E-mail: 992451774@qq.com.