

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231467

基于五桥臂 MMC-UPQC 的复合模型预测控制研究

李金洪¹, 周建萍², 夏文豪³, 龚益琳⁴

(上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对模块化多电平统一电能质量调节器(modular multilevel unified power quality conditioner, MMC-UPQC)六桥臂结构下的单相桥臂故障问题, 提出了一种五桥臂拓扑, 这种新型拓扑可实现故障情况下的电能质量补偿。首先, 对 MMC-UPQC 串并联侧的数学模型进行分析, 提出了一种复合模型预测控制(hybrid model predictive control, H-MPC), 所提控制方法结合了有限集模型预测控制(finite-control-set model predictive control, FCS-MPC)以及快速模型预测控制(fast model predictive control, F-MPC)。然后, 通过构建两侧独立的价值函数减少了控制方法的计算量, 同时也实现了五桥臂解耦控制。最后, 相比传统线性(例如 PI)和非线性(例如无源控制 passivity-based control, PBC)的控制策略, 所提复合模型预测控制在电压补偿、负序电压抑制以及谐波电流补偿等方面具有一定优势, 并在一定程度上避免了复杂的参数整定及坐标变化环节。仿真实验结果证明了所提控制方法的可行性和优越性。

关键词: 桥臂故障; 电能质量; 模块化多电平统一电能质量调节器; 五桥臂拓扑; 复合模型预测控制

Hybrid model predictive control based on a five-leg MMC-UPQC

LI Jinhong¹, ZHOU Jianping², XIA Wenhao³, GONG Yilin⁴

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

Abstract: A five-leg topology is proposed for a single-phase fault in the six-leg structure of a modular multilevel unified power quality conditioner (MMC-UPQC). This new topology enables power quality compensation in fault conditions. First, after an analysis of the mathematical model of MMC-UPQC in the series and parallel sides, a hybrid model predictive control (H-MPC) is proposed for those sides of the MMC-UPQC. The proposed control method combines finite control set model predictive control (FCS-MPC) and fast model predictive control (Fast-MPC). Then, the computational burden of the control method is reduced by constructing independent cost functions on both sides and the decoupled control of the five-leg topology is also achieved. Finally, compared to traditional linear (for example PI) and nonlinear control strategies (for example passivity-based control, PBC), the proposed hybrid model predictive control has certain advantages in voltage compensation, negative sequence voltage suppression, and harmonic current compensation. It can also avoid complex parameter tuning and coordinate transformation to some extent. Simulation results demonstrate the feasibility and superiority of the proposed control method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61905139).

Key words: bridge leg fault; power quality; modular multilevel unified power quality conditioner (MMC-UPQC); five-leg topology; hybrid model predictive control (H-MPC)

0 引言

随着清洁能源的不断发展, 其在电网中占有的比重也在不断加大, 在碳达峰和碳中和的背景下, 对清洁能源接入电网所产生的电网谐波、电压波动等电能质量问题的研究愈发必要^[1-3]。同时, 在现代电

网的不断发展下, 中高压系统因其传输效率高, 传输距离远等优点使其在电网中的占比不断升高, 针对在此系统中可能存在的电能质量问题可以通过在电网中引入模块化多电平统一电能质量调节器(modular multilevel unified power quality conditioner, MMC-UPQC)来满足中高电压下的电能质量补偿要求^[4-6]。

随着电力电子开关器件在电力系统补偿控制中的占比不断加大, 开关器件故障对补偿系统的影响愈发严重, 例如 MMC-UPQC, 其具有 6 个桥臂且每个桥臂内含有多个子模块; 在比较成熟的电机控

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61905139); 上海市“科技创新行动计划”地方院校能力建设专项项目资助(19020500700)

制领域研究中,有文献指出有三分之一以上的故障是由系统中的开关器件所致^[7],同时 MMC-UPQC 的站内单相接地短路故障也可能导致控制桥臂瘫痪^[8],综上,在故障时切除桥臂是一种较为经济的做法,可在故障发生后将故障桥臂切除并让系统内另一桥臂代行其职能,形成五桥臂模式来实现故障模式下的容错控制^[9-14],同样的交流/直流转换结构都应用于电机驱动系统与 MMC-UPQC 之中,两者之间的主要区别为 MMC-UPQC 两侧 MMC 的控制目标各不相同,且具有不同的拓扑结构^[15]。在电机驱动控制方面,五桥臂结构通常采用的是传统线性控制方法,其鲁棒性差,无法解决内部耦合问题,复杂的参数整定过程,动态响应慢等问题使其难以直接应用在五桥臂 MMC-UPQC^[16-18]中。六桥臂拓扑在串联侧单相故障的情况下其补偿电压的能力会因为缺相而遭到削弱,同时其补偿精度下降。从并联侧引入一个补偿相后得到本文所提的五桥臂拓扑,此拓扑虽然在一定程度上能够缓解单相故障带来的补偿能力下降问题,但由于补偿电压的不平衡特性会产生较大的负序分量,其补偿效果相对于六桥臂拓扑仍有较大差别;同时由于补偿相源于并联侧,所以对电流补偿也有一定影响,需要通过控制方法平衡电压电流以达到最优控制效果。

目前已有一些对 MMC-UPQC 控制的研究,如文献[19]采用了有限集模型预测来对 MMC-UPQC 进行控制,针对计算量的减少进行了改进。文献[20]采用了 Lyapunoy 控制,文献[21]采用了无源超螺旋二阶滑模控制,以上两者都是通过正负序分离后进行控制参数的数学推导得出的控制率,过程复杂且参数整定困难。文献[22]提出了一种快速模型预测控制(fast model predictive control, F-MPC),基于 MMC 数学模型的控制方法结构简单,鲁棒性强。文献[23-25]将不同类型的 MPC 应用于 UPQC,通过构建 UPQC 的串并联侧数学模型并构建统一价值函数实现总体协调控制。文献[26]将有限集模型预测控制(finite-control-set model predictive control, FCS-MPC)应用于统一电能质量调节器(unified power quality conditioner, UPQC)中,分别构建串并联两侧的价值函数,有效减少了计算量和整体复杂度。总的来说,现有研究主要针对 MMC-UPQC 无故障情况下的六桥臂控制抑或是对于子模块故障的研究^[27],而因五桥臂特有的不对称性,所以鲜有对其解耦控制的研究;通过对 MMC 和 UPQC 相关文章的调研,本文提出了一种针对 MMC-UPQC 五桥臂拓扑的复合模型预测控制(hybrid model predictive control, H-MPC),根据并联侧和串联侧的数学模型

分别建立预测控制模型,后通过串联侧代价函数与并联侧代价函数相结合的方法来实现跨越故障相的解耦控制,本文提出的复合模型预测控制相比于传统线性控制和非线性控制具有无复杂参数整定、鲁棒性高等优点,在电能质量补偿方面精度更高,控制效果更好。仿真结果及分析证明了本文所提复合模型预测控制在五桥臂 MMC-UPQC 拓扑下的优越性。

1 MMC-UPQC 拓扑

MMC-UPQC 由串联侧 MMC 和并联侧 MMC 通过一个大电容 C 作为直流源侧背靠背组成,串联侧由电容 C_f 、桥臂电感 L_1 和电阻 R_1 组成,经由变压器串联入网,负责对网侧电压进行补偿;并联侧则由桥臂电感 L_2 、电阻 R_2 组成,目的为防止谐波电流进入电网;当非线性负载工作时,负载电流中会存在一定的谐波成分,这些谐波电流会通过电网传输,导致电网电流质量下降,影响电力系统的正常运行。图 1 为其拓扑结构。图 1 中: V_{sk} 为电源电压 ($k = a、b、c$); i_{sk} 为网侧电流; i_{sek} 为串联侧输出电流; V_{fk} 为串联侧输出电压; V_{sek} 为串联侧 MMC 输出电压; V_{lk} 为负载侧电压; i_{shk} 为并联侧输出电流; V_{shk} 为并联侧 MMC 的输出电压; $R_1、R_2$ 为串并联侧的桥臂电阻。MMC 由上(p)、下(n)两个桥臂组成,每个桥臂分别有 N 个子模块(submodule, SM)和一个电感 L_m 组成,子模块由两个 IGBT 半桥与电容 C_{cap} 并联组成。串联侧 MMC 分为 $A_1、B_1、C_1$ 相,并联侧 MMC 分为 $A_2、B_2、C_2$ 相,当 A_1 相发生故障时,断路器 KA_1 断开, K_1 闭合,使 A_2 相可兼并行行使 A_1 相的功能,形成五桥臂拓扑,在故障条件下运行。

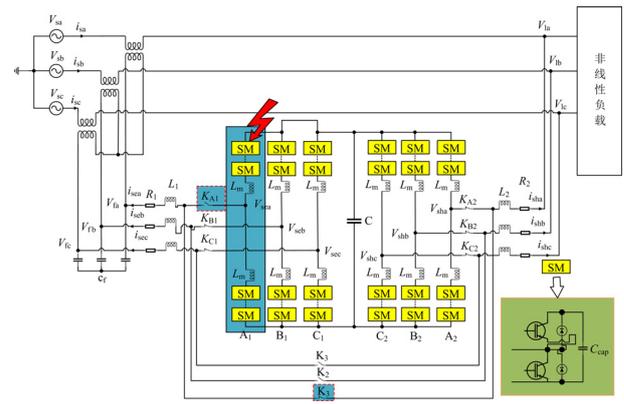


图 1 MMC-UPQC 五桥臂拓扑

Fig. 1 MMC-UPQC five-bridge leg topology

2 五桥臂 MMC-UPQC 控制策略及数学模型

如图 2 所示, MMC-UPQC 五桥臂模式下的控

制结构主要分为串联侧的电压电流复合控制以及并联侧的电流快速控制, 两者的有机结合组成了整个控制的主要框架。

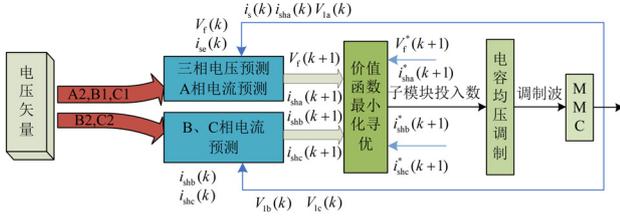


图 2 基于五桥臂 MMC-UPQC 的复合模型预测控制结构图

Fig. 2 Control structure diagram of five-leg MMC-UPQC based hybrid MPC

在五桥臂拓扑下, 可把所有 MMC 输出电压矢量总结为 5 个矢量, 如图 3 所示, 外环控制系统会将预测的参考电压 $V_{se}^*(k+1)$ 以及 A 相参考电流 $i_{sha}^*(k+1)$ 计算出来并输入到内环系统, 并经其产生调制波, 并联侧原理同上。总的来说串联侧价值函数负责电压以及补偿相电流控制, 并联侧价值函数则对余下两相电流进行控制。

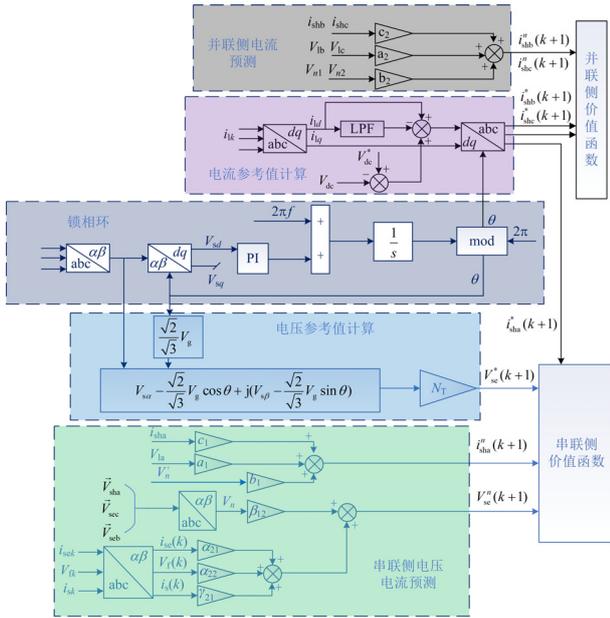


图 3 复合 MPC 的预测模型

Fig. 3 Prediction model of hybrid MPC

在本文中以 6 ($N=6$) 个子模块组成的 MMC 为例, 每个矢量包含 7 个电平, 如表 1 所示。其中 $V_{cap} = V_{dc} / 2N$ 。按照传统有限集模型预测统一价值函数的遍历方法, 在一个周期内需要遍历 $7^5 = 16807$ 次; 本文提出的复合模型预测控制则只需要经过 $7^3 + 7 + 7 = 357$ 次遍历即可, 极大程度上缩减了计算量。

表 1 桥臂电压矢量表

Table 1 Bridge leg voltage vector table

子模块投入数	输出电压
0	$-3V_{cap}$
1	$-2V_{cap}$
2	$-V_{cap}$
3	0
4	V_{cap}
5	$2V_{cap}$
6	$3V_{cap}$

本文根据参考文献[28]的 MMC-UPQC 的串并联数学模型可以推导出其单相数学模型, 如式(1)—式(3)所示。

$$\frac{di_{sek}}{dt} = \frac{V_{fk}}{L_{se}} - \frac{V_{sek}}{L_{se}} - \frac{R_1 i_{sek}}{L_{se}} \quad (1)$$

$$\frac{dV_{fk}}{dt} = \frac{i_{sek}}{C_f} - \frac{i_{sk}}{C_f} \quad (2)$$

$$\frac{di_{shk}}{dt} = \frac{V_{lk}}{L_{sh}} - \frac{V_{shk}}{L_{sh}} - \frac{R_1 i_{shk}}{L_{sh}} \quad (3)$$

式中: $L_{se} = L_1 + \frac{L_m}{2}$; $L_{sh} = L_2 + \frac{L_m}{2}$ 。其余参数如图 1 所示。

2.1 串联侧 MMC 模型预测

串联侧采用 $\alpha\beta$ 变换来实现解耦控制, 对式(1)、式(2)进行坐标变换后可得状态方程如式(4)所示。

$$\frac{dx}{dt} = Ax + BV + bi_s \quad (4)$$

式中: $x = \begin{bmatrix} i_{se} \\ V_f \end{bmatrix}$, $i_{se} = i_{se\alpha} + ji_{se\beta}$, $V_f = V_{f\alpha} + jV_{f\beta}$;

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_{se}} & \frac{1}{L_{se}} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{se}} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix}; \quad V \text{ 为}$$

桥臂电压矢量; $i_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}$ 。

采用前向欧拉法对式(4)进行离散化可得

$$x(k+1) = A_n x(k) + B_n V(k) + b_n i_s(k) \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} A_n = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} = e^{AT_s} \approx I + AT_s + \frac{A^2 T_s^2}{2} \\ B_n = \begin{bmatrix} \beta_{11} \\ \beta_{12} \end{bmatrix} = \int_0^{T_s} e^{A\lambda} B d\lambda \approx \int_0^{T_s} (I + A\lambda) B d\lambda \\ b_n = \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{21} \end{bmatrix} = \int_0^{T_s} e^{A\lambda} b d\lambda \approx \int_0^{T_s} (I + A\lambda) b d\lambda \end{cases}$$

式中: T_s 为系统控制周期; λ 为 x 的离散化形式。

依据式(5)可得出所有电压矢量 $V_n(k)$ (343种) 的电压预测方程如式(6)所示。

$$V_{se}^n(k+1) = a_{21}i_{se}(k) + a_{22}V_f(k) + \beta_{12}V_n(k) + \gamma_{21}i_s(k) \quad (6)$$

同理, 根据式(3)对并联侧 A 相进行前向欧拉离散化可得式(7)。

$$i_{fa}^n(k+1) = a_1V_{la}(k) + b_1V_{n'}(k) + c_1i_{sha}(k) \quad (7)$$

式中: $a_1 = \frac{1}{L_{sh}}$; $b_1 = -\frac{1}{L_{sh}}$; $c_1 = -\frac{R_2}{L_{sh}}$; $n =$

$1, 2, 3, \dots, 343$; $n' = \text{mod}\left(\frac{n}{49}\right)$ 。

如图3下半部分所示, 串联侧 MMC 以逆变的方式进行工作, 在整个系统中可以等效为一个电压源, 不断为系统补偿电压或是抑制谐波, 其中本文采用 SOGI 锁相环通过对网侧电压的坐标变换等计算可以得到参考电压角度 θ 。控制外环通过所得电角度的坐标变换可得出需要补偿的电压 V_{se}^* 以及电流 i_{sha}^* 并将两者作为下一时刻 $(k+1)$ 的电压电流参考值。同时, 电压电流预测将会按照式(6)、式(7)根据 MMC 各桥臂输出电压矢量计算得出 $(k+1)$ 时刻的电压预测值 $V_{se}^n(k+1)$ 以及 A_2 相的电流预测值 $i_{sha}^{n'}(k+1)$, 最后电压电流预测值将会与参考值一起投入到串联侧价值函数中进行最小化筛选。

2.2 并联侧 MMC 模型预测

根据式(3)可得并联侧的 B_2 、 C_2 相的电流预测模型分别为

$$i_{shb}^{n_1}(k+1) = a_2V_{lb}(k) + b_2V_{n_1}(k) + c_2i_{shb}(k) \quad (8)$$

$$i_{shc}^{n_2}(k+1) = a_2V_{lc}(k) + b_2V_{n_2}(k) + c_2i_{shc}(k) \quad (9)$$

式中: $a_2 = \frac{1}{L_{sh}}$; $b_2 = -\frac{1}{L_{sh}}$; $c_2 = -\frac{R_2}{L_{sh}}$; $n_1, n_2 =$

$1, 2, 3, \dots, 7$ 。

并联侧 MMC 可等效为电流源, 可以对接入非线性负载时产生的谐波电流进行补偿, 同时对直流电容和无功功率起到一个补偿作用, 如图3上半部分的电流外环所示, 负载侧的三相电流经过坐标变化后得到有功电流 i_{ld}^* , i_{ld}^* 经过一个低通滤波器 (low-pass filter, LPF) 后与原值相减, 得到需要补偿的有功电流, 这个有功电流与直流侧参考值相加得到电流参考值 i_{sed}^* , 最后与 i_{lq}^* 一起通过坐标变换得到电流参考值 $i_{sha,b,c}^*(k+1)$, 方便解耦控制。同时, 按式(8)、式(9)进行 B_2 、 C_2 相 $(k+1)$ 时刻的电流预测, 得到 $i_{shb}^{n_1}(k+1)$ 、 $i_{shc}^{n_2}(k+1)$, 最后将 B_2 、 C_2 相的电流参考值和预测值都投入串联侧价值函数。

2.3 价值函数与最小寻优算法

结合串并联侧 MMC 的预测模型输出, 分别构建了价值函数, 其中串联侧的价值函数结合了电压和电流控制, 并联侧则主要负责电流控制。其中串联侧的价值函数为

$$g_{se}^n(k+1) = \lambda_1 \left| V_{se}^*(k+1) - V_{se}^n(k+1) \right|^2 + \lambda_2 \left| i_{sha}^*(k+1) - i_{sha}^{n'}(k+1) \right|^2 \quad (10)$$

式中, λ_1 、 λ_2 为串联侧价值函数权值。

通过控制权值大小可在电压、电流控制之间选择侧重点以实现不同的控制目标, 基于此可调控五桥臂 MMC-UPQC 对电网电压电流的不同补偿力度。最后通过最小寻优算法, 对 343 种电压矢量情况进行逐个评估, 寻找最小值后得到最优子模块投入数 $N_{SB1,SC1,SA2}$, 如式(11)所示。

$$N_{SB1,SC1,SA2} = \arg \min g_{se}^n(k+1) \quad (11)$$

并联侧的价值函数 $g_{sh}^n(k+1)$ 为

$$g_{sh}^n(k+1) = \left| i_{shb}^*(k+1) - i_{shb}^n(k+1) \right|^2 + \left| i_{shc}^*(k+1) - i_{shc}^n(k+1) \right|^2 \quad (12)$$

通过对 $n^* = 1, 2, 3, \dots, 14$ 进行筛选可得最优子模块投入数 $N_{SB2,SC2}$ 。

$$N_{SB2,SC2} = \arg \min g_{sh}^{n^*}(k+1) \quad (13)$$

将串并联侧所得的最优子模块投入数输入电容均压调制中得到 MMC 调制波, 最终实现对整个系统的控制。

本文提出了一种针对五桥臂 MMC-UPQC 的复合模型预测控制, 在减少计算量的基础上继承了算法简单、响应迅速等优点。一个周期 T_s 内需要进行如图4所示的坐标变换, 价值函数最小寻优等步骤, 算法整体结构简单, 易于理解且鲁棒性较强。

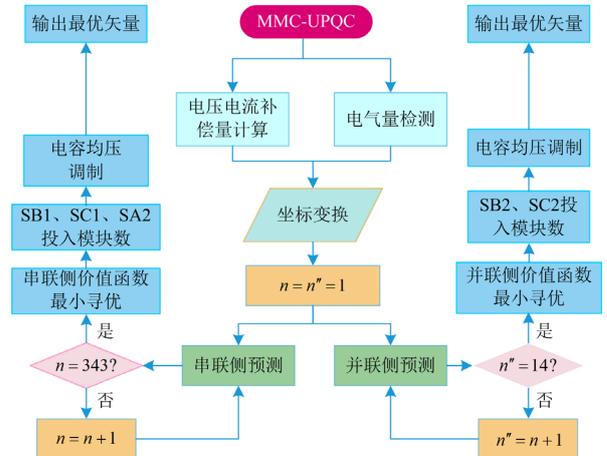


图4 算法流程图

Fig. 4 Algorithm flow chart

3 仿真结果及分析

本文在 Matlab/Simulink 平台上构建了 MMC-UPQC 的五桥臂控制模型, 如图 5 所示, 并对提出的控制策略进行了仿真。

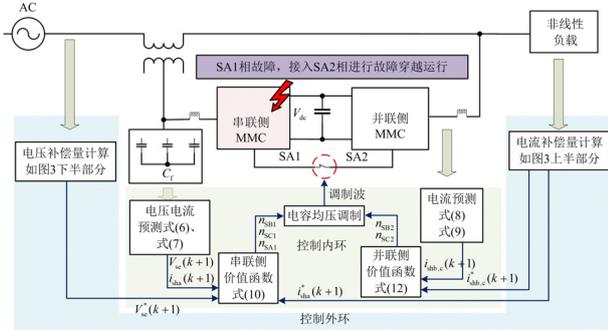


图 5 基于复合 MPC 的 MMC-UPQC 五桥臂控制框图

Fig. 5 Block diagram of MMC-UPQC five-leg control based on hybrid MPC

实验针对 3 种复合工况进行了分析: 高次谐波注入+电网电压的暂降暂升、非线性负载+电压暂升暂降以及非线性负载+高次谐波注入。将传统的线性 PI 控制, 无源控制(passivity-based control, PBC)与本文使用的复合模型预测控制(H-MPC)进行对比分析。本次实验参数如表 2 所示, 验证系统在中高压场合下对电能质量控制的准确性。

表 2 仿真参数表

Table 2 Simulation parameter table

仿真参数	数值
电网电压/kV	2
电网频率/Hz	50
桥臂子模块数	6
子模块电容/ μF	1200
桥臂电感/mH	4
直流侧电容电压/kV	6
串/并联侧电感/mH	5
串/并联侧电阻/ Ω	10
直流侧电容/mF	12
串联侧变压器变比	1

第一种复合工况为高次谐波注入+电网电压的暂降暂升, 由电压源输出幅值为相电压 5% 的 5 次谐波以及幅值为相电压 2% 的 7 次谐波在 0.05 s 时注入电网, 在 0.1~0.2 s 时电网电压会下降 20%, 0.3~0.4 s 时电网电压会上升 20%, 如图 6 所示。

图 7 为第一种复合工况下 3 种控制方法的对比图, 通过对其的分析可知, 采用 PI 控制^[29-30]时即使在正常工况(0~0.05 s)下, 因五桥臂的不平衡特性,

其负载电压会呈现出三相不平衡状态。

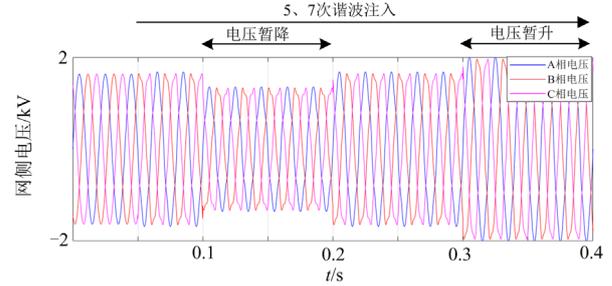


图 6 高次谐波注入+电压暂升暂降

Fig. 6 High-order harmonic injection + voltage sag/swell

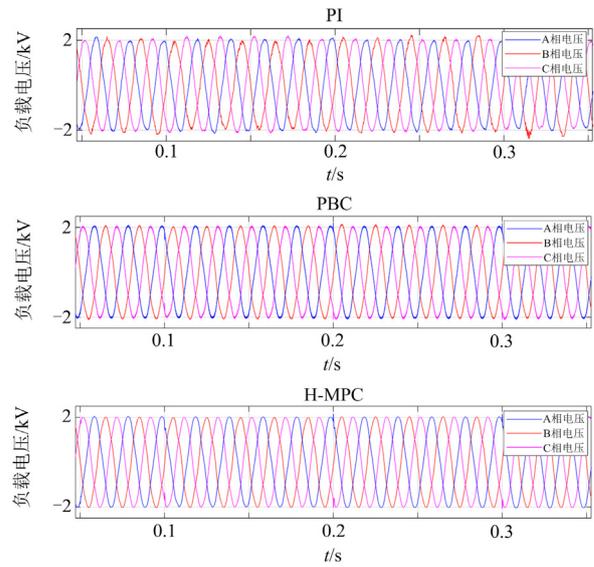


图 7 谐波注入+电压暂升暂降补偿效果对比图

Fig. 7 Comparison of harmonic injection + voltage sag/swell compensation effect

在电压暂降和暂升工况下可以看出无源控制(passivity-based control, PBC)^[31-32]的纹波较大; 同时通过图 8 的负序分量对比图可知, 相比 PI 和无源控制(PBC), 所提复合模型预测控制对负序电压的抑制能力更强。通过图 9 的对比可知, 在谐波+电压暂升暂降工况下, 所提控制方法的补偿精度更高, 补偿后畸变率相较于传统线性和非线性方法更小。

如图 10 所示, 在第二种复合工况下, 系统接入非线性负载且网侧电压在 0.1~0.2 s 内下降 20%, 在 0.3~0.4 s 内上升 20%, 非线性负载会使网侧电流产生高次谐波, 影响系统正常运行, MMC-UPQC 通过接入并联侧 MMC 来输出补偿电流以使网侧电流不受谐波影响。本次实验设置在 0.05 s 时接入并联侧 MMC 变流器, 以观察接入前后的网侧电流变化, 同时对电压突变处的波形畸变率 T_{HD} 值进行记录以分析各个控制方法在这种复合工况下的优劣。

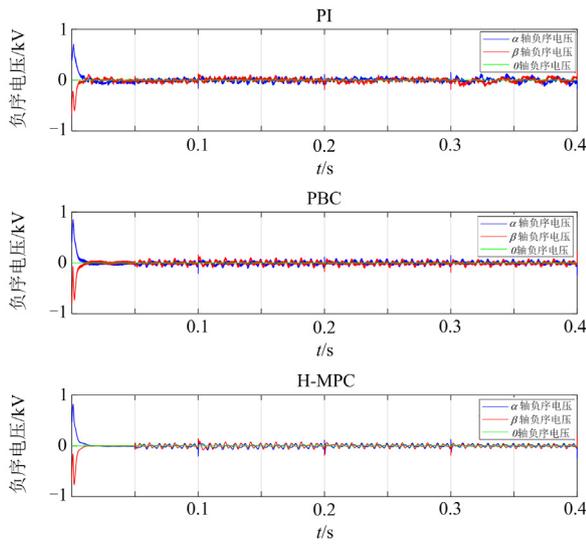


图 8 负载电压 $\alpha\beta$ 负序分量
Fig. 8 Load voltage $\alpha\beta$ negative sequence

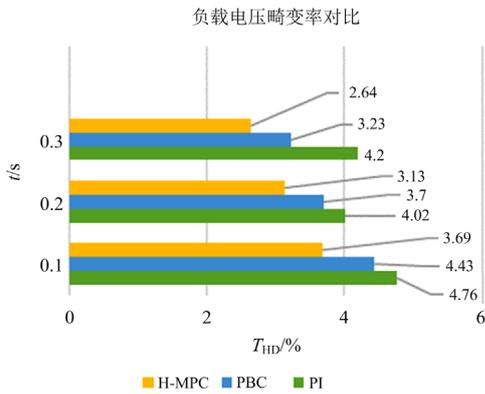


图 9 谐波+电压暂升暂降畸变率对比
Fig. 9 Comparison of harmonic + voltage sag/swell distortion rates

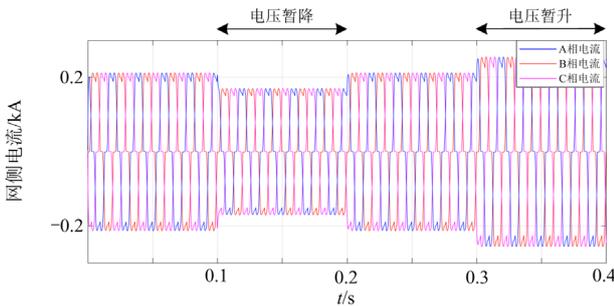


图 10 非线性负载+电压暂升暂降
Fig. 10 Nonlinear load + voltage sag/swell

图 11 为第二种复合工况下 3 种控制方法的对比,对其分析可知,在 PI 控制下,网侧电流在并联侧 MMC 接入后虽有补偿效果但畸变程度大且有超调,同时电流与电压相位差较大,说明其无功补偿精度不高。在无源控制(PBC)下,电流畸变率有所

改善,原始的双峰波形已被补偿至正弦波波形,但超调仍然存在且电压电流相位差较大;在复合模型预测控制下电流不仅已被补偿至正弦波形且无超调,其电流波峰相位与电压波峰相近,说明其同步率高,无功补偿效果要优于 PI、无源控制。而图 12 的畸变率的对比分析可进一步确定本文针对 MMC-UPQC 所提出的复合模型预测控制相较于传统的 PBC 控制和 PI 控制有较大优势。

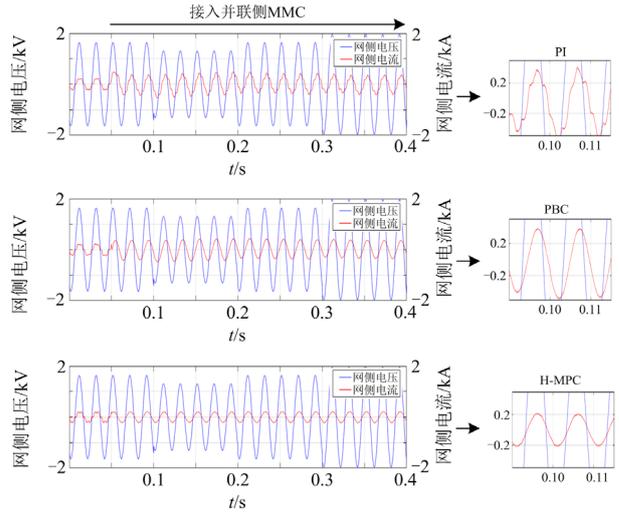


图 11 非线性负载+电压暂升暂降补偿对比图
Fig. 11 Comparison of nonlinear load + voltage sag/swell compensation effect

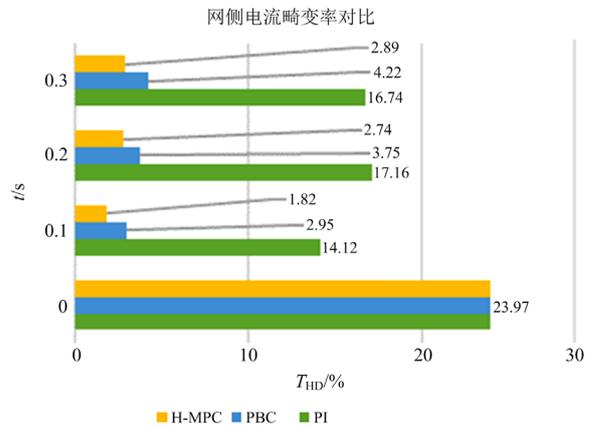


图 12 非线性负载+电压暂升暂降畸变率对比
Fig. 12 Comparison of nonlinear load + voltage sag/swell distortion rates

在第三种工况下,系统在接入非线性负载的同时注入 5、7 次谐波,图 13 为未补偿的网侧电流,可见在谐波注入后电流畸变程度加大。图 14 为网侧电压电流对比图,可知 PI 控制下的电流补偿效果不佳,与网侧电压有较大相位差且畸变大。在无源控

制(PBC)下虽然电流补偿效果改善,但是补偿后的电流幅值仍有一定超调。相比之下,本文所提的复合模型预测控制不仅无超调,无功补偿效果也更好,同时根据图 15 的数据对比可知,所提控制的补偿效果更好,精度更高。

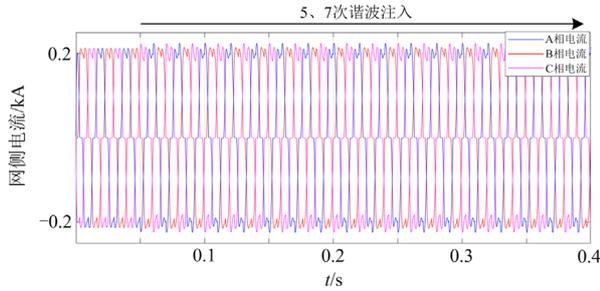


图 13 非线性负载+谐波注入

Fig. 13 Nonlinear load + harmonic injection

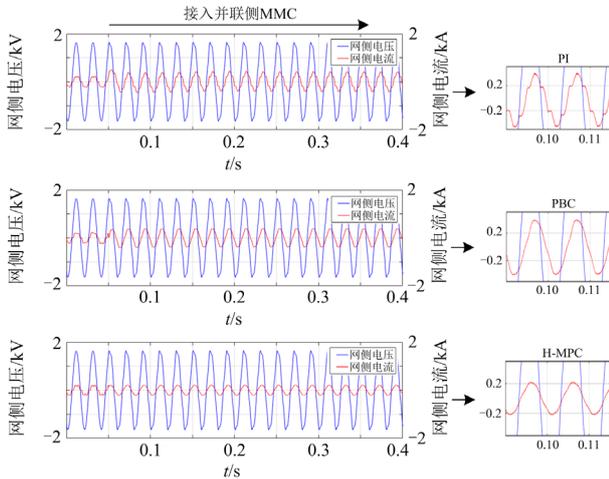


图 14 非线性负载+谐波注入补偿对比图

Fig. 14 Comparison of nonlinear load + harmonic injection compensation effect

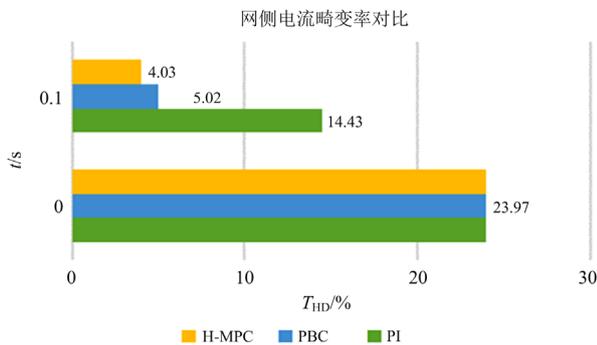


图 15 非线性负载+谐波注入畸变率对比

Fig. 15 Comparison of nonlinear load + harmonic injection distortion rates

针对实际工况下元器件数值可能存在的公差及通态损耗等问题,对 MMC-UPQC 鲁棒性测试十分必要,而本文所用拓扑的并联侧和串联侧外环结构相似,串联侧因电压控制的需要比并联侧多出一组电容,所以本文对串联侧的鲁棒性能进行测试以验证所提控制方法在元器件参数产生偏差的情况下仍能进行有效补偿。如图 16 所示,以网侧电压暂降 30% 时的负载侧电压 T_{HD} 作为补偿效果的参考值;串联侧电容 C_f 逐渐减小,直到为初始值的 10%,桥臂电感 L_{sc} 也逐渐减小到初始值的 30%。可以看出电容实际值为原值的 30%,电感实际值为原始值 50% 时, T_{HD} 都在 1% 以内,足以说明所提控制算法对元器件参数依赖性较低,具有较强的鲁棒性。

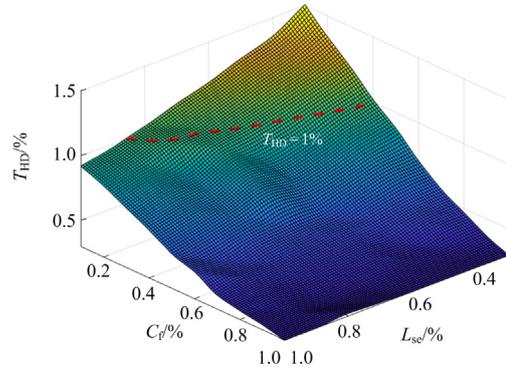


图 16 串联侧鲁棒性测试图

Fig. 16 Series side robustness test

4 结论

本文以三相三线制的五桥臂 MMC-UPQC 拓扑为研究对象,提出了一种复合模型预测控制策略。此拓扑主要有 3 个问题:1) 五桥臂的解耦控制问题;2) 谐波以及不平衡控制带来的负序电压分量;3) 传统模型预测控制 MMC-UPQC 计算量过大。本文通过设计两侧独立的价值函数来实现解耦控制,同时采用模型预测控制以抑制负序电压分量,然后通过融合有限集模型预测的思想解决了计算量过大的问题;最后,仿真实验证明了所提控制策略对五桥臂 MMC-UPQC 的有效性。得出以下结论:

- 1) 复合模型预测控制可以使 MMC-UPQC 在串联侧单相桥臂故障下实现电能质量补偿且鲁棒性较高,对元器件参数变化不敏感;
- 2) 针对电压质量补偿,所提控制策略相较于传统控制有较大优势,对负序分量的控制精度更高;
- 3) 对于电流补偿,所提控制策略的补偿效果更好,无功补偿精度更高。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 伍双喜, 刘洋, 朱誉, 等. 城区电网直流互联系统交流短路后电能质量优化策略[J]. 供用电, 2023, 40(10): 55-62.
WU Shuangxi, LIU Yang, ZHU Yu, et al. Power quality optimization strategy after AC short circuit in DC interconnection system of urban power grid[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(10): 55-62.
- [3] 冯海博, 杨兴武, 刘海波, 等. 基于多变量校正的 MMC 快速有限集模型预测控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 26-36.
FENG Haibo, YANG Xingwu, LIU Haibo, et al. Finite control set model predictive control strategy for an MMC based on multi-variable fast adjusting[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 26-36.
- [4] 王海亮, 王兴贵, 李锦键, 等. 基于改进支持向量机的 MMC-MG 系统桥臂故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 1-13.
WANG Hailiang, WANG Xingguai, LI Jinjian, et al. Bridge arm fault diagnosis of the MMC-MG system based on an improved support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 1-13.
- [5] 王函韵, 周雅婷, 程启明, 等. 非理想条件下 MMC-DVR 的 Lyapunov 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 23-33.
WANG Hanyun, ZHOU Yating, CHENG Qiming, et al. Research on Lyapunov control strategy of an MMC-DVR under non-ideal conditions[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(2): 23-33.
- [6] LIANG Yingyu, REN Yi, YU Jinhua, et al. Current trajectory image-based protection algorithm for transmission lines connected to MMC-HVDC stations using CA-CNN[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 97-111.
- [7] IM W, KIM J, LEE D, et al. Diagnosis and fault-tolerant control of three-phase AC-DC PWM converter systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(4): 1539-1547.
- [8] 范志华. 非正常运行条件下 MMC-UPQC 特性分析及控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
FAN Zhihua. Characteristics analysis and control strategy of MMC-UPQC under abnormal operation conditions[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2020.
- [9] ZHOU D, ZHAO J, LI Y. Model-predictive control scheme of five-leg AC-DC-AC converter-fed induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4517-4526.
- [10] WANG W, CHENG M, ZHANG B, et al. A fault-tolerant permanent-magnet traction module for subway applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1646-1658.
- [11] 唐永聪, 刘涛, 耿强. 双电机五桥臂逆变器模型预测同步控制[J]. 电子测量技术, 2017, 40(10): 61-65.
TANG Yongcong, LIU Tao, GENG Qiang. Model predictive synchronous control for dual PMSM motors and five-leg inverter[J]. Electronic Measurement Technique, 2017, 40(10): 61-65.
- [12] LU B, SHARMA S K. A literature review of IGBT fault diagnostic and protection methods for power inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(5): 1770-1777.
- [13] CHEN T, PAN Y. A novel diagnostic method for multiple open-circuit faults of voltage-source inverters based on output line voltage residuals analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(4): 1343-1347.
- [14] 袁辉. 双异步电机调速系统故障诊断及容错运行控制[D]. 北京: 北方工业大学, 2019.
YUAN Hui. Fault diagnosis and fault-tolerant operation control of double asynchronous motor speed regulation system[D]. Beijing: North China University of Technology, 2019.
- [15] 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): 65-75.
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): 65-75.
- [16] MOHD Y N, IBRAHIM Z, SULAIMAN M, et al. Speed performance of SVPWM direct torque control for five leg inverter served dual three-phase induction motor[C] // IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, June 6-7, 2012, Melaka, Malaysia: 323-328.
- [17] LAZI J M, IBRAHIM Z, SULAIMAN M, et al. Independent control for dual-PMSM drives using five-leg inverter[C] // IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), October 19-20, 2015, Johor Bahru, Malaysia: 143-148.
- [18] 程启明, 胡晓青, 吴凯, 等. 统一电能质量调节器的谐波检测与补偿策略研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(3): 19-23.

- CHENG Qiming, HU Xiaoping, WU Kai, et al. The research of harmonic detection and control strategy for unified power quality conditioner[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2012, 49(3): 19-23.
- [19] CHENG Q, ZHOU Y, JIANG C, et al. Finite state based model predictive control method for MMC-UPQC[C] // *Proceedings of the 6th International Conference on Power and Renewable Energy*, September 17-20, 2021, Shanghai, China.
- [20] 莫栋成, 程启明, 陈颖, 等. 不平衡电网电压下 MMC-UPQC 的 Lyapunov 函数控制方法[J]. *高电压技术*, 2023, 49(3): 1284-1293.
- MO Dongcheng, CHENG Qiming, CHEN Ying, et al. Research on Lyapunov function control method of MMC-UPQC under unbalanced grid voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(3): 1284-1293.
- [21] 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/OL]. *控制与决策*: 1-10[2023-08-07]. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0964.
- HUANG Zufan, ZHOU Jianping, MAO Dajun, et al. Passive super-twisting second-order sliding mode control strategy for MMC-UPQC under unbalanced grid voltage[J/OL]. *Control and Decision*: 1-10[2023-08-07]. DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0964.
- [22] GONG Z, DAI P, YUAN X, et al. Design and experimental evaluation of fast model predictive control for modular multilevel converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3845-3856.
- [23] 刘涛, 王慧慧, 葛磊蛟, 等. 基于 FCS-MPC 的电能质量综合调节器补偿策略研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(9): 3377-3384.
- LIU Tao, WANG Huihui, GE Leijiao, et al. Power quality integrated regulator compensation strategy based on FCS-MPC[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3377-3384.
- [24] PÉREZ-GUZMÁN R E, HERRERA F, RIVERA M, et al. Implementation of predictive control in a three-phase neutral point clamped inverter[C] // *IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, November 13-27, 2019, Valparaiso, Chile: 1-6.
- [25] LUO Yanhong, WANG Songsheng, YANG Dongsheng, et al. Direct prediction compensation strategy of unified power quality conditioner based on FCS-MPC[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2020, 14(22): 5020-5028.
- [26] 王贵峰, 武泽文, 祝莘莘, 等. 基于有限集模型预测控制的 UPQC 预测直接控制策略研究[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.
- [27] 夏长江. 模块化多电平换流器子模块故障容错控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- XIA Changjiang. Research on modular multilevel converter sub-modules fault tolerant control[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [28] KOTTURU J, KOTHURU S, AGARWAL P. Simplified predictive control of unified power quality conditioner[C] // *2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, June 25-28, 2018, Charlotte, NC, USA: 1-6.
- [29] 陈程, 薛花, 扈曾辉, 等. 桥臂不对称情形下 MMC 无源性 PI 控制方法[J]. *中国电力*, 2023, 56(7): 107-116, 124.
- CHEN Cheng, XUE Hua, HU Zenghui, et al. Passivity-based PI control method of MMC with asymmetric bridge arms[J]. *Electric Power*, 2023, 56(7): 107-116, 124.
- [30] 卢开诚, 刘铠诚, 董树锋. 基于模糊单神经元 PI 的微电网频率自适应控制[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(5): 131-139.
- LU Kaicheng, LIU Kaicheng, DONG Shufeng. A microgrid frequency control method based on fuzzy single neuron adaptive PI control[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(5): 131-139.
- [31] 刘道兵, 鲍妙生, 李世春, 等. 不平衡电网下 MMC 的 PCHD 模型无源滑模控制策略[J]. *中国电力*, 2023, 56(8): 109-116.
- LIU Daobing, BAO Miaosheng, LI Shichun, et al. Passive sliding mode control strategy for PCHD model of MMC in unbalanced power grid[J]. *Electric Power*, 2023, 56(8): 109-116.
- [32] 刘昊, 马建伟, 赵健, 等. 基于互联和阻尼分配跟踪的孤岛微电网非线性电压功率控制[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(4): 45-53.
- LIU Hao, MA Jianwei, ZHAO Jian, et al. Nonlinear voltage and power control of isolated island microgrids based on interconnection and damping distribution tracking[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(4): 45-53.

收稿日期: 2023-11-17; 修回日期: 2024-03-22

作者简介:

李金洪(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统电能质量补偿; E-mail: 2473731001@qq.com

周建萍(1978—), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为分布式发电与微电网技术。E-mail: zhoujianping@shiep.edu.cn

(编辑 张颖)