

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210922

基于 FCS-MPC 的五桥臂 UPQC 电能质量补偿策略研究

刘涛, 何启发, 肖朝霞, 李龙女, 朱高嘉

(天津工业大学电气工程学院, 天津 300387)

摘要: 针对容错模式下的统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC), 提出了一种五桥臂形式的新型拓扑结构, 实现故障下的电能质量扰动综合补偿。在此基础上, 对串联变流器和并联变流器进行统一建模, 提出了一种基于有限集模型预测控制(Finite Control Set Model Predictive Control, FCS-MPC)的五桥臂 UPQC 控制策略。相比传统线性控制策略, 所提算法构建了统一的预测模型以及整合优化的价值函数, 实现串联变流器与并联变流器的协同控制, 提高了两侧变流器的补偿精度、暂态性能以及响应速度, 有效降低了控制算法的复杂度和参数调节难度, 并具有较高的参数鲁棒性。仿真结果验证了所提算法的可行性和有效性。

关键词: 有限集模型预测; 统一电能质量调节器; 电能质量; 五桥臂; 容错控制

A power quality compensation strategy of five-leg UPQC based on FCS-MPC

LIU Tao, HE Qifa, XIAO Zhaoxia, LI Longnü, ZHU Gaojia

(School of Electrical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In this paper, a five-leg topology structure of the unified power quality conditioner (UPQC) is proposed to realize comprehensive compensation of power quality disturbances in fault-tolerant mode. The series converter and parallel converter are modeled uniformly, and a control strategy of five-leg UPQC based on finite control set model predictive control (FCS-MPC) is proposed. Compared with traditional linear control strategy, the proposed algorithm constructs a unified prediction model and integrates the optimized cost function to realize the cooperative control of series and parallel converters. In addition, the compensation accuracy, transient performance and response speed of the converters on both sides are improved. The complexity of the control algorithm and the difficulty of parameter adjustment are effectively reduced with high parameter robustness. Simulation results verify the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51807139 and No. 51977149).

Key words: finite control set model predictive control; unified power quality conditioner; power quality; five-leg; fault-tolerant control

0 引言

随着非线性负载、冲击性负荷、新能源发电系统等设备的接入, 电能质量受到了严重的影响^[1-7]。作为一种综合电能质量治理设备, 统一电能质量调节器(Unified Power Quality Conditioner, UPQC)可同时解决电压和电流质量问题^[8-13]。而随着接入电网的设备愈加复杂, 考虑到 UPQC 使用电力电子功率半导体器件作为开关器件, 在运行过程中, 不可避免

地会发生开关器件的损坏, 严重影响电能质量补偿效果。为此, 如何进行改进以实现 UPQC 在故障场合下的容错运行, 是一个亟待解决的问题。

参考电机控制领域的相关案例, 约有 38% 的故障是由功率器件损坏引起的^[14]。为此, 电机控制系统通常采用五桥臂拓扑结构来实现容错控制^[15-17]。当一组变流器的某相桥臂发生开关器件故障时, 通过故障诊断方法定位故障相, 继而切除故障相并闭合辅助开关组成五桥臂拓扑结构^[18-20]。与之相比, UPQC 的两侧变流器与电机驱动系统具有相似的双向 AC/DC/AC 变流器拓扑结构, 有条件实现五桥臂结构下的容错运行。但与电机控制系统不同, UPQC

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51807139, 51977149); 天津市自然科学基金项目资助(19JCYBJC03600)

的串联侧与并联侧具有完全不同的控制目标和拓扑结构。电机控制领域中五桥臂变流器主要采用线性控制算法, 由于存在算法结构复杂、参数整定困难, 动态响应速度慢、内部耦合等问题, 不利于 UPQC 补偿精度与补偿速度的提高^[21-23]。直接将电机系统的五桥臂控制策略移植至 UPQC 中有较大的困难。目前, 鲜有学者针对 UPQC 五桥臂拓扑结构以及相关容错控制策略的可行性进行研究。如何针对五桥臂 UPQC 的自身特性, 选择合适的控制算法成为亟待解决的问题。

近十几年, 有限集模型预测控制(Finite Control Set Model Predictive Control, FCS-MPC)在多相电机驱动器、矩阵变换器、AC/DC/AC 变流器等领域得到了广泛关注^[24-27]。相比传统电机控制中主流线性控制算法, FCS-MPC 具有算法简单、动态响应速度快、内部解耦、能够附加多种约束的优点, 并在近几年应用于五桥臂模式下的电机驱动系统中^[28-29]。受上述成果启发, 部分学者将 FCS-MPC 应用于 UPQC 的控制中, 通过构建电压补偿单元和电流补偿单元的预测模型、约束条件、评估算法, 实现多目标综合控制^[30-32]。但是, 上述研究仅针对正常工况下的六桥臂 UPQC 拓扑结构, 而针对五桥臂 UPQC 容错模式下控制策略的可行性与鲁棒性研究, 仍相当缺乏。

本文以三相三线制下 UPQC 为研究对象, 提出了一种基于 FCS-MPC 算法的五桥臂 UPQC 控制策略。通过建立统一预测模型, 设计电压电流补偿算法, 构建统一价值函数以及评估方法, 实现 UPQC 故障下的容错控制。相比传统线性控制算法, 所提算法具有算法结构简单、参数整定难度低、无需大量坐标变换的优点, 在电能质量补偿方面具有更高的补偿精度, 更快的响应速度, 更短的稳定时间, 同时具有较高的鲁棒性。仿真结果证明所提五桥臂 UPQC 控制策略容错运行的正确性和有效性。

1 UPQC 拓扑结构与基本原理

统一电能质量调节器由串联变流器和并联变流器组成, 并通过直流支撑环节相连, 分别实现电网侧电压扰动补偿以及负载侧电流扰动补偿, 其拓扑结构如图 1 所示。

图 1 中: v_{sa} 、 v_{sb} 、 v_{sc} 为电网侧电压; i_{sa} 、 i_{sb} 、 i_{sc} 为电网侧电流; v_{la} 、 v_{lb} 、 v_{lc} 为负载侧电压; i_{la} 、 i_{lb} 、 i_{lc} 为负载侧电流; v_{ra} 、 v_{rb} 、 v_{rc} 为变压器的电网侧电压; v_{fa} 、 v_{fb} 、 v_{fc} 为变压器的变流器侧电压; i_{fa} 、 i_{fb} 、 i_{fc} 和 i_{ha} 、 i_{hb} 、 i_{hc} 分别为串联变流器和并联变流器的输出电流; v_a 、 v_b 、 v_c 和 v'_a 、 v'_b 、 v'_c 分别为串

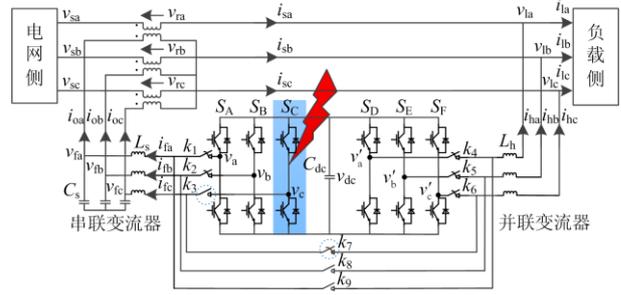


图 1 UPQC 拓扑结构及其故障下的五桥臂结构

Fig. 1 Topological structure of UPQC and its five-leg structure under fault

联变流器和并联变流器的输出电压; L_s 、 C_s 组成 LC 滤波器, 用以滤除串联变流器输出电压的高频谐波; L_h 用以滤除并联变流器输出电流的高频谐波; C_{dc} 为直流侧电容。

设串联变流器的三相桥臂分别为 A、B、C 相, 并联变流器的三相桥臂分别为 D、E、F 相, 在不失一般性的前提下, 当串联变流器的 C 相发生开关故障后, 转换开关 k_3 断开, k_7 闭合, 使 C 相连接到 F 相, 形成五桥臂拓扑结构, 进行容错运行。

五桥臂变流器中, 任一桥臂的开关函数 S_x 为

$$S_x = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂开通, 下桥臂关断} \\ 0 & \text{上桥臂关断, 下桥臂开通} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x = A, B, D, E, F$ 。

设 F 相桥臂为公共桥臂, 则开关状态为 $[S_A \ S_B \ S_D \ S_E \ S_F]$, 变流器共可输出 $2^5 = 32$ 种矢量。其中, 串联变流器的开关状态为 $[S_A \ S_B \ S_F]$, 并联变流器的开关状态为 $[S_D \ S_E \ S_F]$ 。

2 基于 FCS-MPC 的五桥臂 UPQC 控制策略

2.1 五桥臂变流器 FCS-MPC 控制原理

以 UPQC 为被控对象, 基于 FCS-MPC 算法的五桥臂变流器控制系统结构框图如图 2 所示。

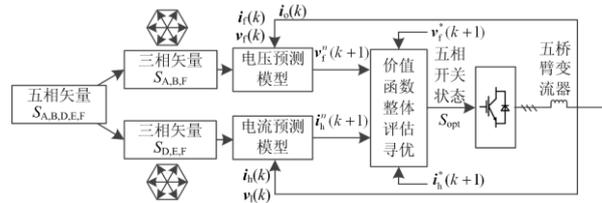


图 2 基于 FCS-MPC 的五桥臂变流器控制结构图

Fig. 2 Control structure diagram of five-leg converter based on FCS-MPC

根据五桥臂控制结构, 可得五桥臂变流器开关状态为 $[S_A \ S_B \ S_D \ S_E \ S_F]$ 。通过建立被控对象的离散化数学模型, 分别构造串联变流器的电压预测模型,

以及并联变流器的电流预测模型。在此基础上, 将五桥臂开关状态分为两组开关状态, 即 $[S_A S_B S_F]$ 、 $[S_D S_E S_F]$, 分别针对两侧变流器进行电压预测与电流预测, 进而得到 $k+1$ 时刻的电压预测值 $v_f^*(k+1)$ 和电流预测值 $i_h^*(k+1)$ 。结合电压参考值 $v_f^*(k+1)$ 与电流参考值 $i_h^*(k+1)$, 通过价值函数计算, 对32个开关状态进行评估、寻优, 最终将最优开关状态 S_{opt} 输出至五桥臂变流器。

与线性控制方法对比, FCS-MPC 算法不需要调制算法与大量的坐标变换, 通过建立被控对象的预测模型, 实现开关状态的统一评估与寻优, 进而达到 UPQC 的综合优化控制。

2.2 UPQC 数学模型建立

根据 UPQC 拓扑结构, 对串联变流器和并联变流器进行统一数学建模, 建立电感 L_s 、电容 C_s 和电感 L_h 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的平衡方程式。

$$\begin{cases} L_s \frac{di_f}{dt} = v - v_f \\ C_s \frac{dv_f}{dt} = i_f - i_o \\ L_h \frac{di_h}{dt} = v' - v_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, v 、 v_f 、 i_f 、 i_o 、 i_h 、 v' 、 v_1 为图1中相应变量的矢量形式, 有 $v = v_\alpha + jv_\beta$, $v_f = v_{f\alpha} + jv_{f\beta}$, $i_f = i_{f\alpha} + ji_{f\beta}$, $i_o = i_{o\alpha} + ji_{o\beta}$, $i_h = i_{h\alpha} + ji_{h\beta}$, $v' = v'_\alpha + jv'_\beta$, $v_1 = v_{1\alpha} + jv_{1\beta}$ 。

根据变换公式, 可得

$$\begin{cases} i_f = \frac{2}{3}(i_{fa} + ai_{fb} + a^2i_{fc}) \\ v_f = \frac{2}{3}(v_{fa} + av_{fb} + a^2v_{fc}) \\ i_o = \frac{2}{3}(i_{oa} + ai_{ob} + a^2i_{oc}) \\ v_1 = \frac{2}{3}(v_{1a} + av_{1b} + a^2v_{1c}) \end{cases} \quad (3)$$

变流器输出电压与开关函数 S_x 的关系为

$$\begin{cases} v = \frac{2}{3}v_{dc}(S_A + aS_B + a^2S_F) \\ v' = \frac{2}{3}v_{dc}(S_D + aS_E + a^2S_F) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $a = e^{j(2\pi/3)}$; v_{dc} 为直流侧电容电压。

2.3 串联变流器预测模型

根据 UPQC 平衡方程式构建串联变流器预测模型, 对式(2)中的前两式进行变换, 得到状态方程为

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bv + B_m i_o \quad (5)$$

式中:

$$x = \begin{pmatrix} i_f \\ v_f \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L_s} \\ \frac{1}{C_s} & 0 \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L_s} \\ 0 \end{pmatrix}; B_m = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{C_s} \end{pmatrix}。$$

采用向前欧拉法对式(5)离散化, 可得

$$x(k+1) = A_n x(k) + B_n v(k) + B_{mn} i_o(k) \quad (6)$$

其中,

$$A_n = e^{AT} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega_0 T & -\frac{1}{\omega_0 L_s} \sin \omega_0 T \\ \frac{1}{\omega_0 C_s} \sin \omega_0 T & \cos \omega_0 T \end{pmatrix}$$

$$B_n = \int_0^T e^{A^t} B dt = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\omega_0 L_s} \sin \omega_0 T \\ 1 - \cos \omega_0 T \end{pmatrix}$$

$$B_{mn} = \int_0^T e^{A^t} B_m dt = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \cos \omega_0 T \\ -\frac{\sin \omega_0 T}{\omega_0 C_s} \end{pmatrix}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}$$

式中, T 为系统的控制周期。

分别根据电压矢量 $v_1 \sim v_{32}$ 对 $k+1$ 时刻电压 v_f 进行预测, 并结合式(6)得 $k+1$ 时刻电压预测方程为

$$v_f^*(k+1) = a_3 i_f(k) + a_4 v_f(k) + b_2 v_n(k) + c_2 i_o(k) \quad (7)$$

式中, $n=1, 2, 3, \dots, 31, 32$ 。

串联变流器预测模型如图3所示。

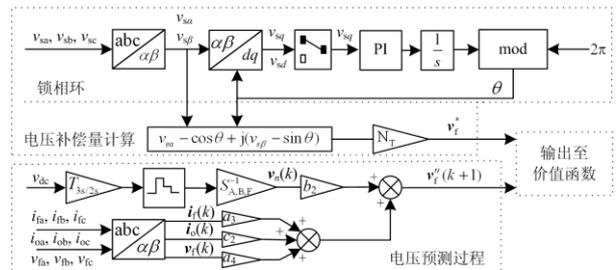


图3 串联变流器预测模型

Fig. 3 Prediction model of series converter

串联变流器可等效为正弦电压源, 实现网侧电能质量扰动的实时补偿。其中, 锁相环(Phase Locked

Loop, PLL)结构通过对网侧电压进行坐标变换、PI控制以及积分等处理环节,得到网侧电压角度估计值 θ 。利用该角度与网侧电压测量值,可得电压补偿值 v_f^* (有 $v_f^* = v_{f\alpha}^* + jv_{f\beta}^*$),并将其作为 $k+1$ 时刻价值函数的电压参考值 $v_f^*(k+1)$ 。与此同时,电压预测过程利用静止坐标系下建立的电压预测式,对 k 时刻的电气量进行计算,最终得到 $k+1$ 时刻的电压预测值 $v_f^n(k+1)$,并将其与电压参考值 $v_f^*(k+1)$ 一同输入至价值函数。

2.4 并联变流器预测模型

根据UPQC的平衡方程式构建并联变流器预测模型,提取式(2)中的最后一式,有

$$L_h \frac{di_h}{dt} = v' - v_1 \quad (8)$$

式中: v' 为并联变流器的输出电压; v_1 为负载侧三相电压。

分别根据电压矢量 $v'_1 - v'_{32}$ 对 $k+1$ 时刻电流 i_h 进行预测,可得 $k+1$ 时刻电流预测方程为

$$i_h^n(k+1) = i_h(k) + \frac{T}{L_h} v'_n(k) - \frac{T}{L_h} v_1(k) \quad (9)$$

式中, $n=1,2,3,\dots,31,32$ 。

并联变流器预测模型如图4所示。

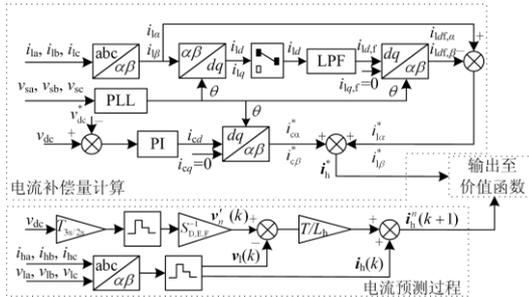


图4 并联变流器预测模型

Fig. 4 Prediction model of parallel converter

并联变流器可等效为正弦电流源,实现负载侧电能质量扰动的实时补偿。 $i_{q,d}$ 和 $i_{c,q}$ 设为0,用以补偿电流谐波和无功功率。负载侧电流测量值经过坐标变换与低通滤波器(Low-Pass Filter, LPF)后,与电压预测模型中锁相环输出的网侧电压角度 θ 共同计算出电流期望值 $i_{d,f,\alpha}$ 、 $i_{d,f,\beta}$,该期望值与电流实际值作差得到电流参考值 i_{α}^* 、 i_{β}^* 。直流电压控制环节将直流侧电压参考值 v_{dc}^* 与实际值 v_{dc} 作差并经PI控制器与坐标变换得到电流参考值 $i_{c\alpha}^*$ 、 $i_{c\beta}^*$,该参考值用于控制直流电压稳定,平衡系统功率。将两组电流参考值相加得到最终的负载电流补偿值参考值 i_h^* (有 $i_h^* = i_{h\alpha}^* + i_{h\beta}^*$),并作为价值函数 $k+1$ 时刻负载

电流参考值 $i_h^*(k+1)$ 。与此同时,电流预测过程利用静止坐标系下建立的电流预测式,通过对 k 时刻的电气量进行计算,最终可以得到 $k+1$ 时刻的电流预测值 $i_h^n(k+1)$,并将其与负载电流参考值 $i_h^*(k+1)$ 一同输入至价值函数。

2.5 价值函数与寻优算法设计

基于串联变流器和并联变流器的预测模型,分别以电压补偿量与电流补偿量为控制对象,设计两侧变流器所对应的价值函数。

串联变流器的价值函数为

$$g_s^n(k+1) = |v_f^*(k+1) - v_f^n(k+1)|^2 \quad (10)$$

并联变流器的价值函数为

$$g_p^n(k+1) = |i_h^*(k+1) - i_h^n(k+1)|^2 \quad (11)$$

由于两侧变流器存在耦合的公共桥臂,为实现电压补偿与电流补偿环节的整体优化,将价值函数进行整合,可得统一价值函数为

$$g^n(k+1) = \lambda_s g_s^n(k+1) + \lambda_p g_p^n(k+1) = \lambda_s |v_f^*(k+1) - v_f^n(k+1)|^2 + \lambda_p |i_h^*(k+1) - i_h^n(k+1)|^2 \quad (12)$$

式中, λ_s 、 λ_p 为价值函数中的权值。

通过合理选择权值大小,可以改变不同控制目标的侧重性,实现网侧电压补偿与负载侧电流补偿的灵活调节与综合优化。

利用价值函数对电压矢量 $v'_1 - v'_{32}$ 进行评估,筛选出 $g^n(k+1)$ 最小值所对应的开关状态 S_{opt} ,并在 $k+1$ 时刻将其输出至五桥臂变流器。

$$S_{opt} = \arg \min_n g^n(k+1) \quad (13)$$

式中, $n=1,2,3,\dots,31,32$ 。

本文基于FCS-MPC算法自身算法简单、动态性能好等优点设计了算法流程图(图5),并在1个系统控制周期 T 内能完成包括电气量检测、参考值计算和预测寻优等过程,整体算法结构简单、实时性较强^[33-34]。

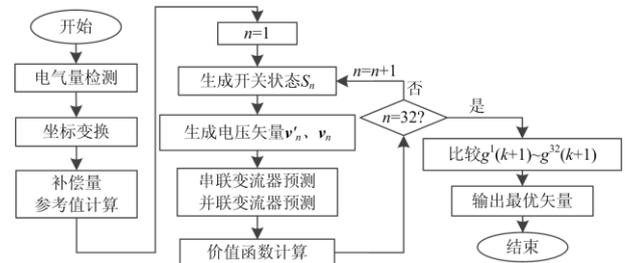


图5 算法流程图

Fig. 5 Algorithm flow chart

3 仿真结果与分析

基于 FCS-MPC 的五桥臂 UPQC 控制策略框图如图 6 所示。

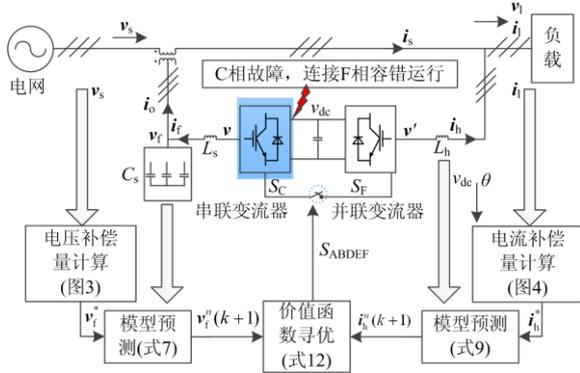


图 6 基于 FCS-MPC 的五桥臂 UPQC 控制框图

Fig. 6 Control block diagram of five-leg UPQC based on FCS-MPC

在 Matlab/Simulink 环境下构建仿真模型，相应的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

仿真参数	数值
电网电压/V	220
电网频率/Hz	50
串联变流器电容 $C_s/\mu\text{F}$	10
串联变流器电感 L_s/mH	10
直流侧电容电压 v_{dc}/V	800
变压器变比 N_T	1:1
系统控制周期 $T/\mu\text{s}$	20
并联变流器电感 L_h/mH	50
电压基值/V	$220\sqrt{2}$
电流基值/A	10
λ_s/λ_p	1

其中，在单一系统控制周期 T 内将完成图 5 所示算法流程图。

五桥臂 UPQC 拓扑结构下，对所提控制策略和传统线性控制策略的仿真结果进行对比。其中，图 7 为两种控制策略在电网电压暂降、暂升以及中断情况下的电压补偿效果对比。

图 7 中，暂降过程的电压降幅为 30%，暂升过程的电压升幅为 30%，中断过程的电压降幅为 95%，三个过程的持续时间均为 0.05 s。通过对比可得：所提方法与传统线性控制方法在电压幅值暂降、暂升 30% 的时候均有较好的补偿效果，但线性控制方法存在局部波形畸变与暂态波动幅度过大的问题，

而所提算法基本不存在这类现象；对于电压中断故障的实时补偿，所提方法的电压波形畸变更小，暂态波动幅度更小，稳定时间更短。

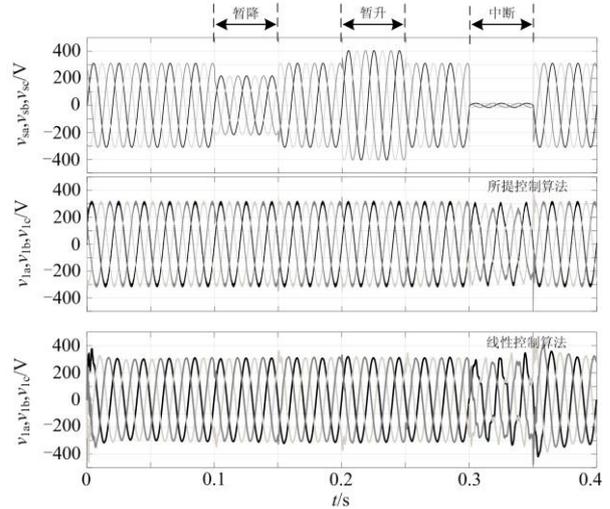


图 7 电网电压暂降、暂升和中断扰动下的补偿效果对比
Fig. 7 Comparison of compensation results under voltage sag, swell and interruption disturbance

图 8 为两种算法对谐波扰动的补偿效果对比。

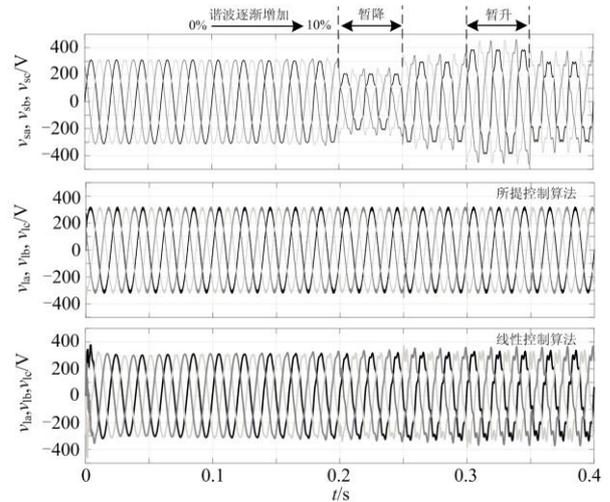


图 8 电网电压谐波扰动下的补偿效果对比
Fig. 8 Comparison of compensation results under harmonic disturbance of grid voltage

图 8 中，3、5、7 次谐波在 0.1 s 开始逐渐注入，相应幅值逐渐上升为电网电压幅值的 10%。在此基础上，在 0.2 s 与 0.3 s 时刻分别发生一次 30% 幅值的电压暂降和暂升扰动。可以看到，所提算法可以有效地对谐波扰动进行补偿，同时，对于谐波+暂降、谐波+暂升的复合扰动，所提算法同样可达到良好的补偿效果。与之相比，线性控制算法虽能实

现电压暂降和暂升的补偿,但随着谐波幅值的增大,补偿效果逐渐变差,从而无法有效地对谐波扰动进行抑制。

图 9 为两种控制算法对负载侧无功功率补偿效果对比。

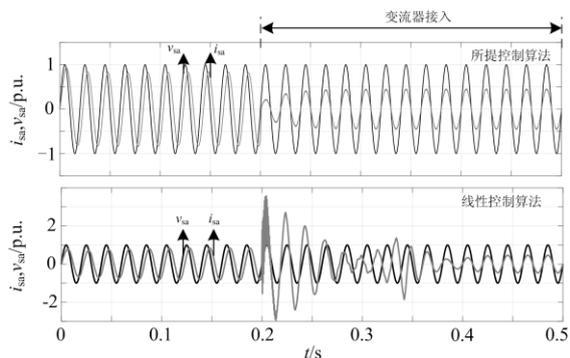


图 9 负载无功功率的补偿效果对比

Fig. 9 Comparison of compensation results of load reactive power compensation

从图 9 中可以看到,当并联变流器未切入主电路时,由于感性负载的作用,电流滞后于电压一定的相位角,在 0.2 s 时刻并联变流器切入,所提算法控制下电流与电压迅速保持同相位,实现了电网单位功率因数的运行;与之相比,线性控制虽然最终实现了无功功率补偿,但调节时间长,且调节过程中存在较大的电流波动。

图 10 为两种算法对负载侧非线性电流的补偿效果对比。

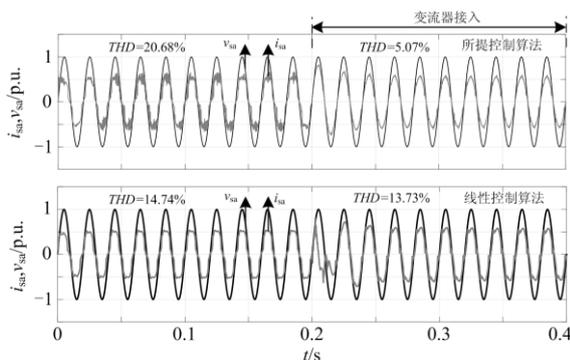


图 10 负载非线性电流补偿效果对比

Fig. 10 Comparison of load nonlinear current compensation results

为了产生非线性电流,负载侧采用二极管整流器串接直流负载的形式。因此在图 10 中可以看到,并联变流器切入前,电流波形具有很高的畸变率。并联变流器在 0.2 s 切入后,所提算法对应的负载电流基本为正弦波形,且与电压保持同相位。与之相比,

线性控制下负载电流在切入后仍具有很高的失真率。

图 11 为电网电压中断再恢复时,两种算法直流电压动态恢复效果对比。

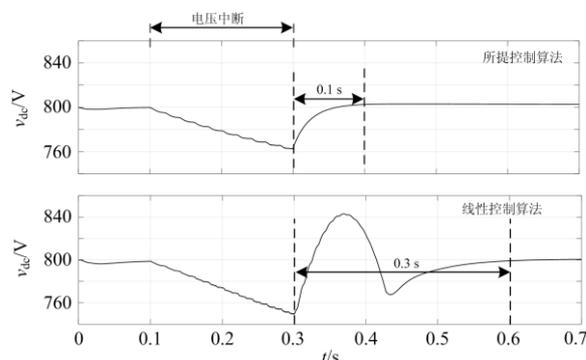


图 11 直流电压动态恢复效果对比

Fig. 11 Comparison of dynamic recovery results of DC voltage

图中,电网电压在 0.1 s 发生中断,并在 0.3 s 恢复。可以看到,所提控制算法下的 v_{dc} 恢复时间(0.1 s)明显短于线性控制对应的 v_{dc} 恢复时间(0.3 s)。较快的直流侧电压恢复速度有利于提高 UPQC 对电网暂态中断故障的抵抗能力。

为测试所提控制算法的参数鲁棒性,通过逐渐改变串联变流器预测方程中的电感 L_s 、电容 C_s 的参数设定值以及并联变流器预测方程中的电感 L_h 的参数设定值,并分析补偿结果,分别如表 2、表 3 所示。

表 2 串联侧模型参数误差对电能质量补偿效果的影响

Table 2 Influence of series side model parameter error on

power quality compensation results			
L_s 、 C_s 参数变化 (90%~50%)	偏移量/V	L_s 、 C_s 参数变化 (40%~10%)	偏移量/V
90	0.419	40	2.392
80	1.509	30	2.677
70	1.783	20	5.431
60	1.979	10	11.34
50	2.017	<10	系统失控

表 3 并联侧模型参数误差对电能质量补偿效果的影响

Table 3 Influence of parallel side model parameter error

on power quality compensation results			
L_h 参数变化 (95%~55%)	THD/%	L_h 参数变化 (45%~5%)	THD/%
95	6.2	45	7.38
85	6.29	35	8.37
75	6.5	25	10.4
65	6.54	15	15.15
55	6.81	5	35.58

为了直观地分析模型参数变化对补偿结果的影响,当 L_s 、 C_s 变化时,扰动由网侧电压暂降30%幅值产生,使用电压偏移量来评估补偿结果,电压偏移量计算方法为补偿后负载侧相电压与理想网侧相电压的差值的绝对值;当 L_h 变化时,扰动由注入谐波产生(与图8情况相同),使用电流 i_s 的总谐波失真率(Total Harmonic Distortion, THD)来评估补偿结果。串联变流器对应的 L_s 、 C_s 的参数设定值在0.1 s开始逐渐降低,并于0.6 s接近为0。由表2可以看出,当参数设定值降至实际值的20%时,负载侧电压补偿出现明显误差,当降至10%以下时,电压偏移量大于10 V,串联变流器已无法实现电压补偿,系统已失控。由表3可以看出,对于并联变流器,当 L_h 的参数设定值降至实际值的45%时,负载侧电流补偿效果开始变差,随着参数进一步降低,补偿后的电流总谐波失真率升高,当降至25%以下时,THD大于10%,并联变流器已无法实现电流补偿。可见,所提算法对模型参数误差的敏感性较低,具有较好的鲁棒性。

图12为 L_s 、 C_s 实际值发生变化时,所提算法对应的电能质量补偿效果变化图。

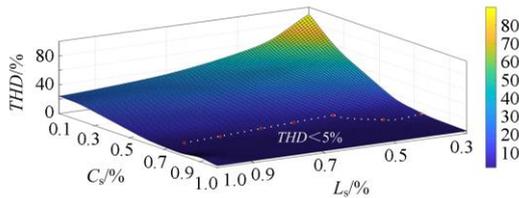


图12 电感电容实际值变化对电能质量补偿效果的影响

Fig. 12 Influence of actual changes of inductance and capacitance on compensation results of power quality

图中,在注入10%电网电压幅值的谐波扰动下(与图8情况相同),采用负载侧电压的THD对电压补偿效果进行评估。由分析结果可知,当 C_s 实际值逐渐降为原值70%, L_s 实际值逐渐降为原值30%时,对应THD值仍能保持在5%以内,表明负载电压失真较小。证明所提算法对参数变化不敏感,鲁棒性较高。

图13为不同权值下电压电流补偿偏移量(Offset)分布。

为研究不同权值下所提算法对电压扰动补偿和电流扰动补偿的效果,进行电压、电流补偿偏移量的分析。设在 $k+1$ 时刻最优开关状态 S_{opt} 输出控制电压 v^{opt} 和控制电流 i^{opt} 。偏移量计算为

$$\begin{cases} V_o = |v_f^*(k+1) - v^{opt}(k+1)| \\ I_o = |i_h^*(k+1) - i^{opt}(k+1)| \\ Z_o = V_o + I_o \end{cases} \quad (14)$$

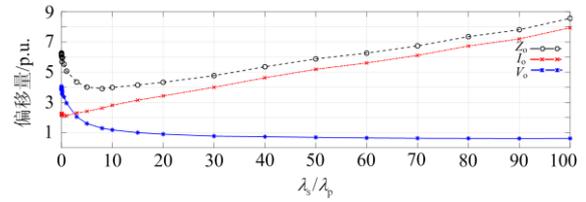


图13 不同权值下电压电流补偿偏移量分布

Fig. 13 Offset distribution of voltage and current compensation under different weights

式中: V_o 为电压补偿偏移量; I_o 为电流补偿偏移量; Z_o 为综合补偿偏移量。

图13中,随着 λ_s/λ_p 的逐渐增大,电压偏移量呈降低趋势,电流偏移量呈增加趋势。在比值为5附近时, Z_o 位于最低点附近,在比值为3附近时,电压偏移量和电流偏移量最接近。而随着 λ_s/λ_p 的进一步降低或增大, V_o 和 I_o 的变化反映了所提算法对电压和电流扰动补偿的不同侧重。可根据对控制目标的侧重,选择相应的权值,实现对电能质量扰动的针对性补偿。

4 结论

本文以三相三线制统一电能质量调节器为研究对象,针对单相桥臂发生器件故障后的容错运行模式,提出了一种基于FCS-MPC算法的五桥臂UPQC电能质量补偿策略。该策略通过构建串联变流器和并联变流器统一预测模型,并整合优化价值函数结构,利用算法的协同控制性,可实现实时最优控制。通过比较所提算法与传统线性控制算法的补偿效果,仿真结果验证了所提控制策略的有效性。得出以下结论:

- 1) 该策略可实现UPQC在五桥臂拓扑下的容错运行。
- 2) 针对电压质量问题,所提算法较传统算法具有更好的补偿精度与动态响应速度。
- 3) 针对电流质量问题,所提算法较传统算法拥有较好的补偿效果和更短的稳定时间。

仿真同时也验证了该策略具有较好的鲁棒性,并给出了权值设定的参考方法,可实现对电能质量的针对性补偿。本文提供了一种故障状态下的容错控制思路,未来在电能质量检测与补偿领域有一定的应用前景。

参考文献

- [1] LI Ruisheng, WONG P, WANG Kun, et al. Power quality enhancement and engineering application with high permeability distributed photovoltaic access to low-voltage

- distribution networks in Australia[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 183-189.
- [2] 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.
- [3] 刘颖英, 冯丹丹, 林才华, 等. 电能质量综合评估研究现状及发展趋势[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 167-176.
LIU Yingying, FENG Dandan, LIN Caihua, et al. Current status and development trend of power quality comprehensive assessment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 167-176.
- [4] 孙东, 张昊, 任伟, 等. 基于正序电流故障分量相位比较的电压暂降扰动源分界[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 115-122, 137.
SUN Dong, ZHANG Hao, REN Wei, et al. Demarcating method for voltage sag source of distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 115-122, 137.
- [5] 李彪, 菅永, 曹雪源, 等. 基于主从控制的微电网电压质量改善策略[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 117-123.
LI Biao, JIAN Yong, CAO Xueyuan, et al. Strategy for improving voltage quality of microgrid based on master-slave control[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 117-123.
- [6] 张树楠, 罗海云, 程晓绚, 等. 基于双 dq 变换正负序提取及锁相环的 FPGA 实现[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 182-189.
ZHANG Shunan, LUO Haiyun, CHENG Xiaoxuan, et al. Realization of positive&negative sequence component picking up and phase locked loop using FPGA based on dual-dq transform[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 182-189.
- [7] 陈砚圃, 杨蕾, 张介秋. 基于组合余弦窗加权的高精度电力谐波分析[J]. 高压电器, 2021, 57(8): 127-135.
CHEN Yanpu, YANG Lei, ZHANG Jieqiu. Analysis on high precision power harmonic based on combinatorial cosine window weighting method[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(8): 127-135.
- [8] BHOSALE S S, BHOSALE Y N, CHAVAN U M, et al. Power quality Improvement by using UPQC: a review[C] // International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT), March 23-24, 2018, Kannur, India: 375-380.
- [9] BORSE N S, SHEMBEKAR S M. Power quality improvement using dual topology of UPQC[C] // International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICCC), December 22-24, 2016, Jalgaon, India: 428-431.
- [10] 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.
- [11] 武昭旭, 杨岸, 祝龙记. 基于循环神经网络的电能质量扰动识别[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 88-94.
WU Zhaoxu, YANG An, ZHU Longji. Power quality disturbance recognition based on a recurrent neural network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 88-94.
- [12] KHADKIKAR V. Enhancing electric power quality using UPQC: a comprehensive overview[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(5): 2284-2297.
- [13] 谭丽平, 粟渊恺, 欧阳盟盟, 等. 静止功率调节器电能质量综合补偿的改进滞环控制方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 91-96.
TAN Liping, SU Yankai, OUYANG Mengmeng, et al. Study on improved hysteresis control method of static power conditioner for comprehensive compensation of power quality[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 91-96.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] GUZMAN H, BARRERO F, DURAN M J. IGBT-gating failure effect on a fault-tolerant predictive current-controlled five-phase induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 15-20.
- [25] FORMENTINI A, TRENTIN A, MARCHESONI M, et al. Speed finite control set model predictive control of a PMSM fed by matrix converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 6786-6796.
- [26] LEE S S, HENG Y E, ROSLAN M A. Finite control set model predictive control of nine-switch AC/DC/AC converter[C] // IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), November 28-29, 2016, Melaka, Malaysia: 746-751.
- [27] SHEN K, FENG J, ZHANG J. Finite control set model predictive control with feedback correction for power converters[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2018: 2(3): 312-319.
- [28] LIM C S, RAHIM N A, HEW W P, et al. Model predictive control of a two-motor drive with five-leg-inverter supply[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 54-65.
- [29] LIM C, LEVI E, JONES M, et al. Fault-tolerant two-motor drive with FCS-MP-based flux and torque control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6603-6614.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] ZHANG Z, WANG F, SUN T, et al. FPGA-based experimental investigation of a quasi-centralized model predictive control for back-to-back converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 662-674.
- [34] GULBUDAK O, SANTI E. FPGA-based model predictive controller for direct matrix converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4560-4570.

收稿日期: 2021-07-18; 修回日期: 2021-10-19

作者简介:

刘涛(1984—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量、新能源发电、电力电子与电机控制; E-mail: liutao@tiangong.edu.cn

何启发(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量、新能源发电; E-mail: heqifa2031@163.com

肖朝霞(1981—), 女, 博士, 教授, 研究方向为交直流微电网系统控制及稳定性分析。E-mail: xiaozhaoxia@tiangong.edu.cn

(编辑 葛艳娜)