

基于 Dual-PCHD 模型的电网不平衡下 MMC 无源性控制方法

田广平, 薛花

(上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对模块化多电平变换器(MMC)在电网发生单相短路时的稳定运行需求, 提出基于双端口受控耗散哈密顿系统(Dual-PCHD)模型的无源性控制方法。设计交互矩阵, 建立电网不平衡情形下 MMC 的 Dual-PCHD 模型, 使并网正序电流与负序电流子系统具有同步渐进跟踪特性; 从能量角度出发, 设计全局能量函数, 求取无源性控制律, 实现负序电流快速抑制与正序电流期望轨迹快速跟踪目标同步达成的同时, 确保系统的全局渐进稳定性。基于 Matlab/Simulink 的仿真结果表明: 所提无源性控制方法在电网发生单相短路与有功功率变化、系统参数摄动同时发生时具有优动态性能、宽稳定域和强鲁棒性。

关键词: 模块化多电平变换器; Dual-PCHD 模型; 无源性控制; 正序电流渐进跟踪; 负序电流快速抑制

中图分类号: TM28 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23100

Passivity-based Control Method with Dual-PCHD Model of MMC Under Unbalanced Grid

TIAN Guangping, XUE Hua

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

Abstract: In response to the stable operation demand of modular multilevel converter (MMC) with single-phase short circuit fault, a passivity-based method based on dual-port controlled Hamiltonian with dissipation (Dual-PCHD) model was proposed. To make the grid-connected positive sequence and negative sequence current subsystems have synchronous and progressive tracking characteristics, the Dual-PCHD model of MMC under unbalanced grid was established and the interconnection matrix of current subsystems was designed. From the energy point of view, the global energy function was designed to obtain passivity-based control law. The fast suppression of the negative sequence current and the asymptotic tracking of the desired trajectory of the positive sequence current were achieved. At the same time, the global and gradual stability of the closed control system was guaranteed. It is shown by the simulation results based on Matlab/Simulink that the proposed method has the advantages of good dynamic performance, wide stability range and strong robustness when the single-phase short circuit fault, active power mutation and internal bridge arm resistance parameter perturbation occurring at the same time.

Key words: modular multilevel converter (MMC); dual-port controlled Hamiltonian with dissipation (Dual-PCHD) model; passivity-based control; progressive tracking of the positive sequence current; fast suppression of the negative sequence current

模块化多电平变换器(modular multilevel converter, MMC)谐波性能好、开关损耗低、降低滤波需求、具有模块化结构等特点成为大规模可再生能源并网场合广泛应用的一种变换器^[1-3]。但当电网发生单相短路时, 系统交流电流产生负序分量, 引发功率振荡, 影响 MMC 并网系统稳定运

行, 严重时导致系统失稳。

传统矢量控制方法运用局部线性化理论对 MMC 数学模型进行分析, 设计控制器, 当发生外部扰动或系统内部发生参数摄动时, 稳定域较窄, 鲁棒性较差^[4]。与传统矢量控制方法相比, 无源性控制方法为电网不平衡条件下 MMC 并网稳

基金项目: 国家自然科学基金(51407114); 上海市科技创新行动计划项目(19DZ2204700);

上海市科委地方能力建设计划(16020500900)

作者简介: 田广平(1995—), 女, 硕士研究生, Email: tiangp95@163.com

定控制提供了全新的思路^[5]。2020年,燕伯峰等^[6]提出电网不平衡电压下基于端口受控耗散哈密顿系统(port controlled Hamiltonian with dissipation, PCHD)模型的无源性控制方法,实现MMC正序和负序电流的渐进跟踪,同时确保系统渐进稳定,但该方法无法确保正、负序独立子系统控制的同步性。如何在不增加控制器设计复杂度的前提下,实现双系统同步渐进稳定跟踪,是进一步增强无源性控制方法工程适用性必须解决的关键问题。

考虑电网电压不平衡情形下MMC正序和负序电流子系统同步渐进跟踪问题,提出基于双端口受控耗散哈密顿系统(dual-port controlled Hamiltonian with dissipation, Dual-PCHD)模型的MMC无源性并网控制方法。通过合理设计交互矩阵和全局能量函数,求取无源性控制律,实现负序电流的快速抑制与正序电流的期望轨迹同步准确跟踪。基于Matlab/Simulink的仿真结果表明,所提方法在系统单相短路与有功功率波动、系统参数扰动同时发生情况时,能够实现负序电流快速抑制与正序电流期望轨迹快速跟踪目标的同步达成,维持系统三相平衡,具有计算量小、稳定性好、鲁棒性强的优点。

1 电网不平衡下MMC并网Dual-PCHD模型与无源性分析

1.1 电网不平衡下MMC并网Dual-PCHD模型

电网不平衡下三相MMC电路结构及子模块拓扑图如图1所示。

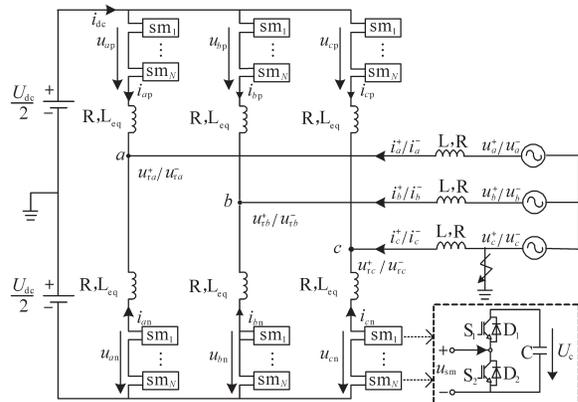


图1 电网不平衡下三相MMC电路结构及子模块

Fig.1 Three-phase MMC circuit structure and submodule under unbalanced grid

由图1分析可知,当系统发生单相接地故障,考虑隔离变压器作用,MMC系统状态方程可写为正序分量和负序分量两个子系统:

$$\begin{cases} u_{rd}^+ = u_d^+ - L_{eq} \frac{di_d^+}{dt} - Ri_d^+ + \omega L_{eq} i_q^+ \\ u_{rq}^+ = u_q^+ - L_{eq} \frac{di_q^+}{dt} - Ri_q^+ - \omega L_{eq} i_d^+ \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{rd}^- = u_d^- - L_{eq} \frac{di_d^-}{dt} - Ri_d^- - \omega L_{eq} i_q^- \\ u_{rq}^- = u_q^- - L_{eq} \frac{di_q^-}{dt} - Ri_q^- + \omega L_{eq} i_d^- \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_{rd}^+, u_{rq}^+, u_{rd}^-, u_{rq}^-$ 分别为MMC交流侧输出电压 u_{ij} 的 d, q 轴正、负序分量; $i_d^+, i_q^+, i_d^-, i_q^-$ 分别为交流侧电源电流 i_j 的 d, q 轴正、负序分量; $u_d^+, u_q^+, u_d^-, u_q^-$ 分别为交流侧电源电压 u_j 的 d, q 轴正、负序分量。

为了分析发生单相接地故障时MMC并网系统的无源特性,选择状态变量为 $\mathbf{X} = [\mathbf{x}_1^T \quad \mathbf{x}_2^T]^T$,其中, $\mathbf{x}_1 = [x_{11} \quad x_{12}]^T = [L_{eq} i_d^+ \quad L_{eq} i_q^+]^T$, $\mathbf{x}_2 = [x_{21} \quad x_{22}]^T = [L_{eq} i_d^- \quad L_{eq} i_q^-]^T$;选择输入变量为 $\mathbf{u} = [\mathbf{u}_1^T \quad \mathbf{u}_2^T]^T$,其中, $\mathbf{u}_1 = [u_{sd}^+ - u_d^+ \quad u_{sq}^+ - u_q^+]^T$, $\mathbf{u}_2 = [u_{sd}^- - u_d^- \quad u_{sq}^- - u_q^-]^T$;选择输出变量为 $\mathbf{y} = [\mathbf{y}_1^T \quad \mathbf{y}_2^T]^T$,其中, $\mathbf{y}_1 = [i_d^+ \quad i_q^+]^T$, $\mathbf{y}_2 = [i_d^- \quad i_q^-]^T$ 。设计正定二次型全局能量函数为

$$H_1(\mathbf{x}_1) = \frac{1}{2L_{eq}} (x_{11}^2 + x_{12}^2) \quad (3)$$

$$H_2(\mathbf{x}_2) = \frac{1}{2L_{eq}} (x_{21}^2 + x_{22}^2) \quad (4)$$

将式(3)、式(4)代入式(1)、式(2),可得电网不平衡条件下MMC并网系统PCHD模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = [\mathbf{J}'(\mathbf{X}) - \mathbf{R}'(\mathbf{X})] \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} + \mathbf{g}(\mathbf{X}) \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{g}^T(\mathbf{X}) \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{H}(\mathbf{X}) = H_1(\mathbf{x}_1) + H_2(\mathbf{x}_2) \quad (6)$$

$$\mathbf{J}'(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\mathbf{x}_1) & 0 \\ 0 & \mathbf{J}_2(\mathbf{x}_2) \end{bmatrix}, \mathbf{J}_1(\mathbf{x}_1) = \begin{bmatrix} 0 & \omega L_{eq} \\ -\omega L_{eq} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_2(\mathbf{x}_2) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_{eq} \\ \omega L_{eq} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}'(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1(\mathbf{x}_1) & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_2(\mathbf{x}_2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_1(\mathbf{x}_1) = \mathbf{R}_2(\mathbf{x}_2) = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_1(\mathbf{x}_1) & 0 \\ 0 & \mathbf{g}_2(\mathbf{x}_2) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{g}_1(\mathbf{x}_1) = \mathbf{g}_2(\mathbf{x}_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $\mathbf{H}(\mathbf{X})$ 为MMC并网正、负序子系统和环境能量系统的总能量函数。

矩阵 $\mathbf{J}_1(\mathbf{x}_1), \mathbf{J}_2(\mathbf{x}_2)$ 可反映系统能量平衡互联结

构,且满足反对称特性,即 $J_1(\mathbf{x}_1) = -J_1^T(\mathbf{x}_1)$, $J_2(\mathbf{x}_2) = -J_2^T(\mathbf{x}_2)$;阻抗矩阵 $R_1(\mathbf{x}_1)$, $R_2(\mathbf{x}_2)$ 可反映系统内部电阻结构;内外部交互结构矩阵 $g_1(\mathbf{x}_1)$, $g_2(\mathbf{x}_2)$ 可反映系统端口特性。

为实现正、负序子系统 PCHD 模型互联,合理设计交互矩阵 K_{ij} 为

$$K_{ij} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = g_i(\mathbf{x}_1) K g_j^T(\mathbf{x}_2) \quad i, j=1, 2 \quad (7)$$

其中

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}$$

式中: K 为对称矩阵,满足 $k_{12} = k_{21}$ 。

交互矩阵式(7)同时满足:

$$\begin{cases} R_1(\mathbf{x}_1) + K_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) > 0 \\ R_2(\mathbf{x}_2) + K_{22}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_2) > 0 \end{cases}$$

引入形式简单的输出反馈控制律:

$$\mathbf{u} = -K(\mathbf{y}_1 - \mathbf{y}_2) \quad (8)$$

将式(8)代入式(5),可得电网不平衡条件下 MMC 并网系统 Dual-PCHD 模型为

$$\dot{X} = [J(X) - R(X)] \frac{\partial H(X)}{\partial X} \quad (9)$$

其中

$$\frac{\partial H(X)}{\partial X} = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_1(\mathbf{x}_1)}{\partial \mathbf{x}_1} & \frac{\partial H_2(\mathbf{x}_2)}{\partial \mathbf{x}_2} \end{bmatrix}^T$$

$$J(X) = \begin{bmatrix} J_1(\mathbf{x}_1) & K_{12}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \\ -K_{21}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) & J_2(\mathbf{x}_2) \end{bmatrix}$$

$$R(X) = \begin{bmatrix} R_1(\mathbf{x}_1) + K_{11}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1) & 0 \\ 0 & R_2(\mathbf{x}_2) - K_{22}(\mathbf{x}_2, \mathbf{x}_2) \end{bmatrix}$$

1.2 电网不平衡下 MMC 并网系统无源特性分析
联立式(6)和式(9),可得系统总耗散不等式为

$$\begin{aligned} \dot{H}(X) &= \frac{\partial H^T(X)}{\partial X} \dot{X} \\ &= \mathbf{u}^T \mathbf{y} - \frac{\partial H^T(X)}{\partial X} R(X) \frac{\partial H(X)}{\partial X} \\ &\leq \mathbf{u}^T \mathbf{y} \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)分析可知,系统能量增量总和总是不大于外部注入能量总和,则由无源性理论^[7]可知系统具有无源特性,这为电网不平衡条件下 MMC 并网系统无源性控制器的设计准备了条件。

2 基于 Dual-PCHD 模型的 MMC 无源性控制器设计

2.1 基于 Dual-PCHD 模型的 MMC 无源性并网控制器设计

为使闭环系统在期望平衡点能量达到最小

值,设计 MMC 并网系统期望的全局能量函数为

$$H_d(X) = H(X) + H_a(X) \quad (11)$$

式中: $H_a(X)$ 为系统注入的能量。

将式(11)代入式(9),可得电网不平衡条件下 MMC 并网系统闭环状态方程为

$$\dot{X} = [J_d(X) - R_d(X)] \frac{\partial H_d(X)}{\partial X} \quad (12)$$

其中

$$J_d(X) = J(X) + J_a(X)$$

$$R_d(X) = R(X) + R_a(X)$$

式中: $J_a(X)$, $R_a(X)$ 分别为注入的耗散矩阵、阻尼矩阵。

设置电网不平衡条件下 MMC 并网系统期望平衡点为

$$X^* = [\mathbf{x}_1^* \quad \mathbf{x}_2^*]$$

则电网电压不平衡条件下 MMC 并网系统期望能量函数可设计为

$$H_d(X) = \frac{1}{2} X_e^T D^{-1} X_e \quad (13)$$

其中

$$X_e = X - X^*$$

$$D = \text{diag}(L_{eq}, L_{eq}, L_{eq}, L_{eq})$$

联立式(9)、式(12)和式(13),则控制律可写为

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{g}^{-1}(X) \{ -R_a(X) D^{-1} X_e - [J'(X) - R'(X)] \cdot \\ &D^{-1} X^* + \begin{bmatrix} -K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & -K_{22} \end{bmatrix} D^{-1} X_e \} \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)可写为

$$\begin{cases} u_d^+ = u_{sd}^+ + \omega L_{eq} i_q^{+*} - R i_d^{+*} + r_{a1}(i_d^+ - i_d^{+*}) + E \\ u_q^+ = u_{sq}^+ - \omega L_{eq} i_d^{+*} - R i_q^{+*} + r_{a2}(i_q^+ - i_q^{+*}) + E \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} u_d^- = u_{sd}^- - \omega L_{eq} i_q^{-*} + R i_d^{-*} + r_{a3}(i_d^- - i_d^{-*}) + F \\ u_q^- = u_{sq}^- + \omega L_{eq} i_d^{-*} + R i_q^{-*} + r_{a4}(i_q^- - i_q^{-*}) + F \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$E = -k_{11}(i_d^+ - i_d^{+*}) - k_{12}(i_q^+ - i_q^{+*}) + k_{11}(i_d^- - i_d^{-*}) + k_{12}(i_q^- - i_q^{-*})$$

$$F = -k_{21}(i_d^- - i_d^{-*}) - k_{22}(i_q^- - i_q^{-*}) + k_{21}(i_d^+ - i_d^{+*}) + k_{22}(i_q^+ - i_q^{+*})$$

由式(15)和式(16)可得基于 Dual-PCHD 模型的 MMC 并网电流无源控制器结构图,如图 2 所示。

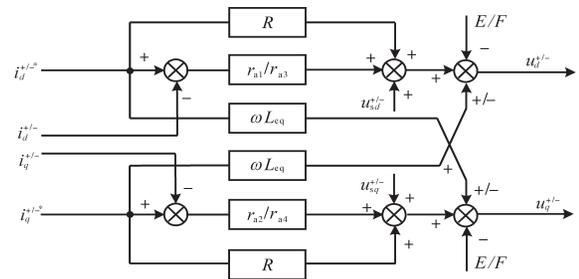


图2 基于 Dual-PCHD 模型的 MMC 并网电流无源控制器结构图
Fig.2 Block diagram of MMC based on the Dual-PCHD grid-connected current passivity-based controller

基于PCHD模型的MMC环流系统控制律求取可参考文献[8]。

2.2 电网不平衡下MMC并网无源性控制系统稳定性分析

利用La Salle不变集定理证明无源性控制电网不平衡下MMC并网系统的全局渐进稳定性^[9-10]。选取全局能量函数 $V(X) = H_d(X)$ 为Lyapunov函数, $V(X)$ 对状态变量求导可得:

$$\dot{V}(X) = -\frac{\partial H_d^T(X)}{\partial X} R_d(X) \frac{\partial H_d(X)}{\partial X} \leq 0 \quad (17)$$

对式(17)分析,当 $\dot{V}(X) = 0$ 时, $X = X^*$,则系统在 $\{X \in R^n | \dot{V}(X) = 0\}$ 内的解只有 $\{X \in R^n | X = X^*\}$,即系统的最大不变集只有 $X = X^*$ 。由La Salle不变集定理分析可知,系统是渐进稳定的,能够收敛于期望工作点 X^* 。

又由式(17)可得, $V(X)$ 是径向无界的,即 $\|X\| \rightarrow \infty$ 时, $H_d(X)$ 趋近于无穷大,则由Lyapunov稳定理论可知,系统是全局渐进稳定的。含MMC环流系统的闭环控制系统全局渐近稳定性可利用La Salle不变集定理同理证明。

3 基于Matlab的仿真结果分析

利用Matlab/Simulink平台搭建电网单相短路故障工况下的MMC仿真模型。对系统参量进行标么化,将所提方法与传统矢量控制方法进行仿真对比研究。MMC系统仿真参数如下:单桥臂子模块数量 $n=6$,子模块电容 $C=9$ mF,桥臂电感 $L_{eq}=60$ mH,桥臂电阻 $R=6$ Ω ,交流侧额定电压 $u_j=100$ kV,交流系统频率 $f=50$ Hz,直流侧电压 $U_{dc}=180$ kV,交流侧电感 $L=25.5$ mH,额定有功功率 $P=180$ MW。电网不平衡条件下MMC并网控制方法的仿真参数如下:采用传统矢量控制方法时, $k_{p1}=k_{p2}=35, k_{i1}=k_{i2}=100$;采用基于Dual-PCHD模型的无源性控制方法时, $r_{a1}=r_{a2}=30, r_{a3}=r_{a4}=30, J_1=J_2=0$ 。其中矢量控制PI参数通过扩充响应曲线法整定获得^[11]。

3.1 系统短路故障与有功功率变化同时存在情形仿真结果分析

考虑系统短路故障与有功功率变化同时发生:1) $t=0.2$ s时系统 a 相交流电压幅值下跌96%, $t=0.3$ s时返回平稳运行状态;2) $t=0.2$ s时MMC有功功率由2 000 MW突增至2 200 MW, $t=0.3$ s时MMC有功功率突降至2 000 MW。

MMC正序和负序 d, q 轴电流波形如图3所

示。分析可知,系统短路故障与有功功率变化同时发生,系统短路故障切入与切出时,所提控制方法实现了更小的稳态静差,表明所提控制方法对于有功功率变化的控制性能较直流侧电压突变具有更优的控制效果,因所提无源性控制方法应用于电流环,对于有功功率变化具有更强的调节性能,同时对正、负序电流期望轨迹跟踪保持了较好的同步性。

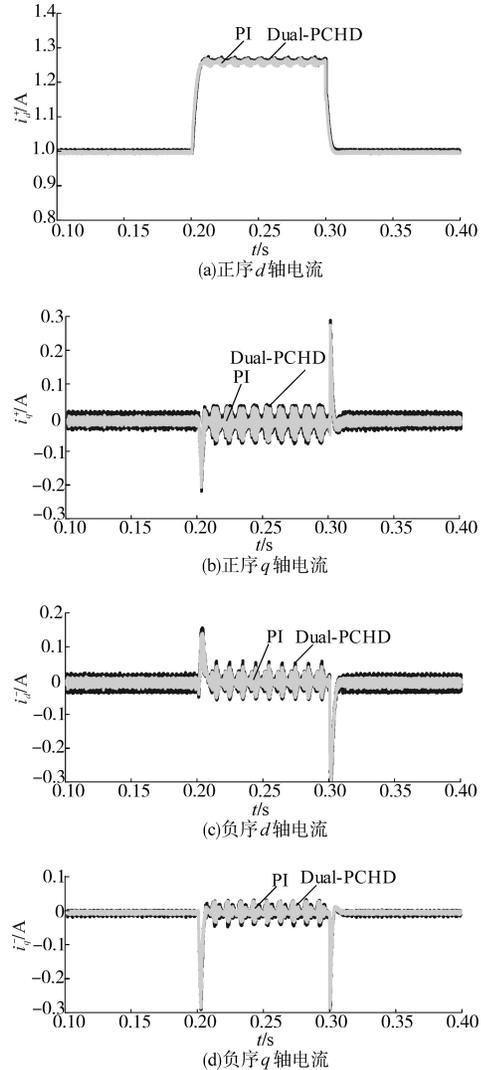


图3 系统短路故障与MMC有功功率变化时仿真波形
Fig.3 Simulation waveforms of system short-circuit fault and MMC active power change

所提基于Dual-PCHD模型的无源性控制方法对于有功功率突变具有更优的动、静态性能,正序电流快速跟随有功功率变化,同时抑制交流侧电压不平衡产生的负序电流,响应快速,超调和稳态误差更小,稳定性好。

3.2 系统短路故障与MMC参数摄动同时存在情形仿真结果分析

考虑系统短路故障与MMC参数摄动同时发

生:1) $t=0.2$ s时系统 a 相交流电压幅值下跌96%, $t=0.3$ s时返回平稳运行状态;2) $t=0$ s时MMC桥臂电阻由 $0.006\ \Omega$ 突增为 $0.0108\ \Omega$,桥臂电感由 0.06 H突增为 0.108 H。

MMC正序和负序 d, q 轴电流波形如图4所示。分析可知,由于传统矢量控制方法依赖于局部线性化的小信号模型,对MMC参数变化较敏感,在MMC桥臂阻感参数发生大幅扰动情形下,闭环控制系统出现失稳现象,正、负序电流出现大幅波动,未收敛至期望工作点;所提基于Dual-PCHD模型的无源性控制方法在单相不平衡且MMC桥臂阻感变化同时发生情形下,仍能保持系统稳定运行,且正、负序电流参考轨迹跟踪响应

快速,同步性好,超调和稳态误差都很小,所提全局渐进稳定的无源性控制器对于MMC参数扰动具有较强鲁棒性。所提基于Dual-PCHD模型的无源性控制方法克服了传统矢量控制方法的不足,对于MMC参数扰动具有较好的动、静态控制性能,鲁棒性较强,稳定域较宽。

为评估系统运行条件状态变化下MMC并网电流的波动程度,引入波动幅度评价指标:

$$\Delta i^{\text{avg}} = \frac{1}{2} \left[\max_{t \in [0.2, 0.3]} \frac{|i_d^+(t) - i_{dref}^+|}{i_{dref}^+} + \min_{t \in [0.2, 0.3]} \frac{|i_d^+(t) - i_{dref}^+|}{i_{dref}^+} \right] \quad (18)$$

式中: Δi^{avg} 为波动幅度; i_{dref}^+ 为突变时正序 d 轴分量参考值。

依据式(18),可求得传统矢量控制方法与所提控制方法动态性能指标量化计算结果如表1所示。其中,情形1、情形2指系统短路故障分别与有功功率变化情形、MMC参数扰动同时存在的情形。由表1量化计算结果分析可知,所提基于Dual-PCHD模型的无源性控制方法在系统短路故障分别与有功功率变化、系统参数扰动同时发生情形下,较传统矢量控制方法,正序 d 轴电流期望轨迹跟踪响应时间更短,超调和波动幅度更小,稳定性好,综合控制性能较优。

表1 两种控制方法动态性能指标量化计算结果

Tab.1 Dynamic property of two methods				
	控制方法	响应时间/ms	超调/%	波动幅度/%
情形1	传统矢量控制方法	2.13	35.2	19.6
	所提控制方法	2.10	32.3	12.3
情形2	传统矢量控制方法	-	-	-
	所提控制方法	2.12	7.3	15.3

4 结论

针对电网电压不平衡下MMC的稳定控制问题,提出基于Dual-PCHD模型的MMC无源性控制方法,实现正、负序电流子系统达到对期望值的同步渐进跟踪。与传统矢量控制方法相比,所提方法通过设计互联矩阵,建立电网不平衡情形下MMC的Dual-PCHD模型,实现并网正序电流的渐进跟踪和负序电流的快速抑制,同步性好;通过设计全局能量函数,确保闭环控制系统全局渐进稳定,克服了传统矢量控制依赖于局部线性化小信号模型的不足,具有稳定域宽、鲁棒性强的特点;所提无源性控制器设计简单,计算量小,易于工程实现。

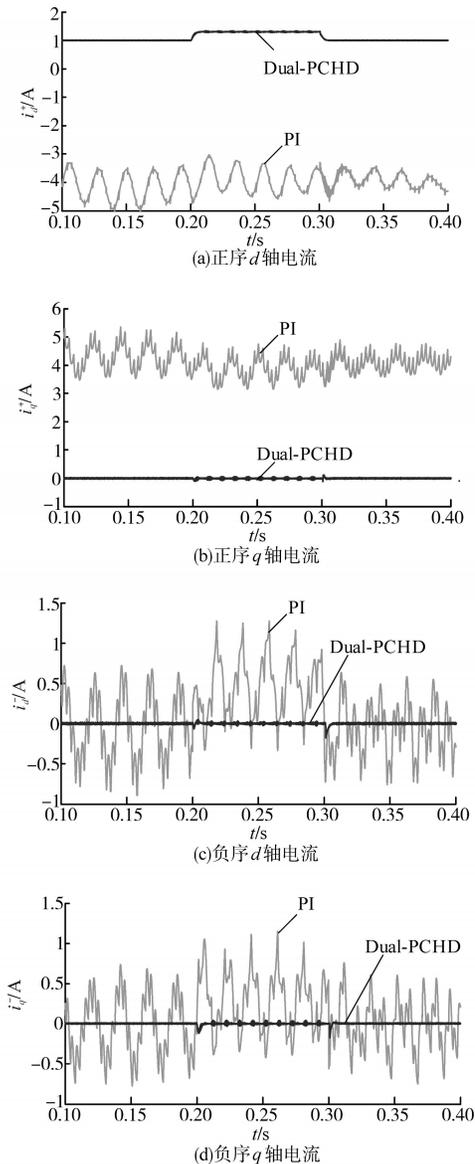


图4 系统短路故障与MMC参数扰动时仿真波形
Fig.4 Simulation waveforms of system short-circuit fault and MMC parameter disturbance

参考文献

- [1] Huang J, Yang B, Guo F, *et al.* Priority sorting approach for modular multilevel converter based on simplified model predictive control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 4819–4830.
- [2] 陶雪峰,陈媛媛,叶磊,等. 模块化多电平变换器快速模型预测控制器设计[J]. 电气传动, 2020, 50(10): 72–78.
Tao Xuefeng, Chen Yuanyuan, Ye Lei, *et al.* Design of fast model predictive controller for modular multilevel converter[J]. Electric Drive, 2020, 50(10): 72–78.
- [3] Zhang L, Zou Y, Yu J, *et al.* Modeling, control, and protection of modular multilevel converter-based multi-terminal HVDC systems: a review[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 340–352.
- [4] 满九方,郝全睿,高厚磊,等. 基于MMC-UPFC对称分量控制的输电线路三相不平衡治理[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7143–7153, 7428.
Man Jiufang, Hao Quanrui, Gao Houlei, *et al.* Suppression of three-phase unbalanced current of transmission lines based on symmetrical component control of MMC-UPFC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7143–7153, 7428.
- [5] 蔡新红,赵成勇. 基于欧拉-拉格朗日模型的模块化多电平换流器的无源控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 224–232.
Cai Xinhong, Zhao Chengyong. Euler-Lagrange model based passive control for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 224–232.
- [6] 燕伯峰,曾鸣. 电网不平衡电压下基于PCHD模型的MMC-HVDC无源控制策略[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 93–100.
Yan Bofeng, Zeng Ming. Passivity-based control strategy of MMC-HVDC based on PCHD model under unbalanced grid voltage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(7): 93–100.
- [7] Uddin M N, Zhai Z, Amin I K. Port controlled Hamilton with dissipation-based speed control of IPMSM drive[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1742–1752.
- [8] 薛花,潘哲晓,王育飞,等. 基于端口受控耗散哈密顿系统模型的模块化多电平变换器无源反步环流抑制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(12): 2596–2611.
Xue Hua, Pan Zhexiao, Wang Yufei, *et al.* MMC passivity-based and backstepping circulating current suppressing method based on port-controlled Hamiltonian with dissipation model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(12): 2596–2611.
- [9] Slotine Jean-Jacques E, Li Weiping. Applied nonlinear control [M]. Englewood: Prentice Hall, 1991.
- [10] Murray Richard M, Li Zexiang, Shankar Sastry S. A mathematical introduction to robotic manipulation[M]. Florida: CRC, 1994.
- [11] 蒋存波,张淑贞,覃彦芝. 一种单参数PID控制算法参数整定方法研究[J]. 自动化与仪表, 2010, 25(7): 32–36.
Jiang Cunbo, Zhang Shuzhen, Qin Yanzhi. Parameter tuning method of a single-parameter PID control algorithm[J]. Automation & Instrumentation, 2010, 25(7): 32–36.

收稿日期:2021-02-22

修改稿日期:2021-04-22