

DOI: 10.7667/PSPC161629

MMC-HVDC 无源性 PI 稳定控制与环流抑制方法

薛花¹, 李杨², 王育飞¹, 杨兴武¹, 刘卫东³

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网泗阳县供电公司, 江苏 宿迁 223700;
3. 江苏正大清江制药有限公司, 江苏 淮安 223001)

摘要: 模块化多电平变流器(Modular Multilevel Converter, MMC)日益广泛应用于高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)技术中, 但 MMC 的多变量、强非线性特性, 使其稳定控制问题成为拓展应用的瓶颈所在。从能量耗散和环流抑制的角度出发, 基于 MMC 动态数学模型, 直接在 abc 静止坐标系下建立双线性 Lagrange 方程。以均衡子模块电容电压为目标设计能量函数, 结合 PI 控制简单架构, 提出新型的无源性 PI 控制方法, 使系统沿 Lagrange 积分最小化轨迹移动。在满足系统全局渐进稳定的前提下, 实现期望轨迹的快速跟踪。针对 MMC-HVDC 环流产生的变流器损耗增加问题, 设计 MMC 环流控制器, 获得无源性 PI 控制环节桥臂电压补偿量, 实现电容电压平稳和环流有效抑制。仿真结果表明所提出的方法具有响应快速、稳定性高、鲁棒性强的特点。

关键词: 模块化多电平变流器; 无源性 PI 控制; 环流抑制; 双线性 Lagrangian 方程

Passivity-based PI stability control and circulating current suppression method of MMC-HVDC

XUE Hua¹, LI Yang², WANG Yufei¹, YANG Xingwu¹, LIU Weidong³

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. State Grid Siyang County Power Supply Company, Suqian 223700, China;
3. Jiangsu Chiatai Qingjiang Pharmaceutical Co., Ltd, Huai'an 223001, China)

Abstract: Modular multilevel converter (MMC) is widely used in high voltage direct current (HVDC). However, the multivariate and strongly nonlinear characteristics of MMC make the stable control problem become the key to their application. From the perspective of energy dissipation and circulating current suppression, the bilinear Lagrange equation in a-b-c synchronous reference frame is developed directly on the basis of the dynamic mathematical model of MMC to analyze strictly passive features of the system. Energy function for balancing capacitor voltage is designed. Combining the simple architecture of PI control, a novel passivity-based PI control method is proposed to ensure the whole system along Lagrange integration minimization trajectory. The desired trajectory fast tracking can be realized under the premise of global asymptotic stability. For the increase of converter losses generated by the circulation of MMC-HVDC, this paper designs circulating current controller of MMC to obtain arm voltage compensation in passivity-based PI control and achieves that the capacitor voltage comes to smooth and circulation is effectively suppressed. The simulation results show that the proposed method has the advantages of quick response, high stability and strong robustness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207086).

Key words: modular multilevel converter; passivity-based PI control; circulating current suppression; bilinear Lagrangian equation

0 引言

近年来, 随着高压直流输电系统(High Voltage Direct Current, HVDC)的快速发展, 传统两电平逆变器由于器件耐压性能及控制性能不再能够满足应用需求, 模块化多电平变换器(Modular Multilevel Converter,

MMC)在 HVDC 系统中得到了日益广泛的应用与推广^[1-5]。MMC 具有结构扩展性强、子模块耐压需求小和开关频率低的特点, 被认为是一种最适合应用于高压大功率电能变换与传输的多电平换流器拓扑, 但 MMC 本身的多变量、强非线性特性和环流损耗的问题, 使 MMC 的稳定控制和环流抑制成为其实现进一步推广应用的瓶颈所在^[6-10]。

MMC-HVDC 系统自 2010 年在美国首次实现工程应用以来, 主要采用矢量控制方法, 但在功率变化范围宽、系统参数发生摄动等情形下, 矢量控制

基金项目: 国家自然科学基金项目(51207086); 上海市自然科学基金项目(15ZR1418200, 15ZR1418000); 上海市科技创新行动计划项目(16DZ0503300)

方法往往无法保持优良的动、静态性能, 甚至出现系统失稳、控制失败的情况^[11-14]。针对 MMC 的多变量、强耦合、非线性特性, 多种非线性控制方法从稳定性角度出发, 设计抗扰性优、鲁棒性强的控制系统, 取得了较好的应用效果^[15-19]。但由于 MMC 的控制系统需考虑交流侧电流控制、环流控制与各模块电容电压的平衡控制等诸多因素, 控制器结构复杂, 完成整个控制算法需要较长时间, 这些控制延时会严重影响控制器性能。无源性控制 (Passivity-Based Control, PBC) 较其他非线性方法, 具有结构简单、易于实现的优势, PBC 方法从能量角度出发, 采用适当阻尼注入或能量函数规划的方式, 设计全局稳定控制器, 使系统存在外部干扰或内部参数摄动情形下, 依然稳定运行在期望工作点, 实现期望轨迹的跟踪零误差^[20-25]。文献[23]在 dq 坐标系下提出适于 MMC 的无源性控制律, 设计内环电流 PBC 方法, 实现系统有功功率和无功功率的解耦控制, 控制效果与稳定性皆优于矢量控制方法; 文献[24]设计基于互联和阻尼分配的 MMC 无源性控制器, 在交流侧和直流侧电压阶跃变化条件下, 都可实现系统全局稳定性; 文献[25]将 PBC 方法作为外环, 与内环滑模控制方法相结合, 实现 MMC 系统负载突变时的稳定控制。现有 PBC 方法多数基于坐标变换, 设计 Euler-Lagrange 方程, 实现解耦稳定控制, 但坐标变换会增加控制器设计的复杂度, 能否省去变换环节, 进一步简化 PBC 设计, 提升参数摄动自适应能力, 实现易于应用、性能优良、稳定域宽、鲁棒性好的 PBC 方法, 为非线性控制研究提供新思路。

本文基于 MMC 动态数学模型, 直接在 abc 静止坐标系下, 建立双线性 Lagrange 方程, 分析系统的严格无源特性, 为简化 PBC 方法设计准备条件。基于双线性模型, 设计 Lagrange 动态可逆规划轨迹, 与简单的 PI 控制有机结合, 提出更为简洁实用的无源性 PI 控制新方法, 实现系统期望轨迹快速跟踪的同时, 满足全局渐进稳定需求。为更好地抑制环流, 减少变流器损耗和平稳电容电压, 设计 MMC-HVDC 环流控制器, 在无源性 PI 控制环节桥臂电压量的基础上叠加补偿量, 实现有效的环流抑制。搭建 MMC-HVDC 仿真系统, 对无源性 PI 方法的稳定控制和环流抑制性能进行测试与验证, 通过与传统矢量控制方法作对比分析, 结果表明: 所提出方法具有结构简单、自由度宽、稳定性高、鲁棒性强的特点, 易于工程实现。

1 MMC-HVDC 数学模型

1.1 MMC-HVDC 动态数学模型

HVDC 单侧 MMC 电路结构及子模块示意图如

图 1 所示, 每相上、下桥臂分别有 N 个子模块, 每个子模块由一个半桥电路并联直流电容构成。为抑制子模块切入切出造成的电压不平衡, 每个桥臂串联一个小电感。MMC-HVDC 系统由图 1 所示的两个对称结构级联而成。

若设由插入系数 $n_{i,j}$ (i 表示上、下桥臂, 取值分别为 u、l; j 表示相数, 取值分别为 a、b、c) 控制桥臂通断, 则定义当桥臂所有子模块被旁通时, $n_{i,j} = 0$; 当桥臂所有子模块都接入时, $n_{i,j} = 1$ 。

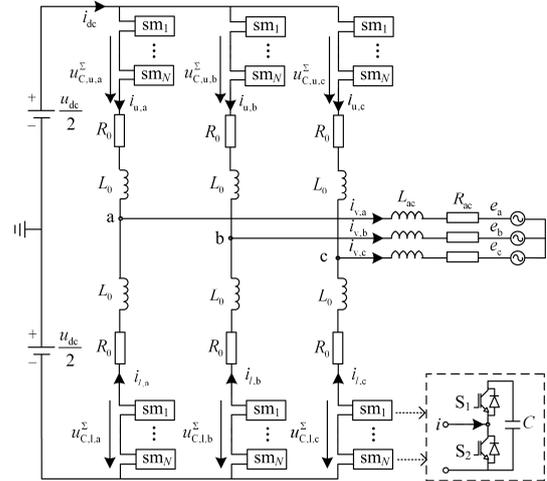


图 1 单侧 MMC-HVDC 电路结构及子模块示意图

Fig. 1 Diagram of single side MMC-HVDC and sub-module

定义每个桥臂子模块电容值为 C 、桥臂串联电容值为 C^{arm} , 则有

$$C^{\text{arm}} = \frac{C}{N} \quad (1)$$

插入的有效电容值为

$$C_{i,j} = \frac{C^{\text{arm}}}{n_{i,j}} \quad (2)$$

式中: i 表示上、下桥臂, 取值分别为 u、l; j 表示相数, 取值分别为 a、b、c。

在 abc 静止坐标系下, 以桥臂间环流最小、能量均衡为目标建立 MMC 动态数学模型。定义 $u_{C,i,j}^{\Sigma}$ ($i=u, l; j=a, b, c$) 为桥臂的可变电压, 则桥臂插入电压 $u_{i,j}$ 为

$$u_{i,j} = n_{i,j} u_{C,i,j}^{\Sigma} \quad (3)$$

定义桥臂充电电流为 $i_{i,j}$, 则桥臂总电容电压可表示为

$$\frac{du_{C,i,j}^{\Sigma}}{dt} = \frac{i_{i,j}}{C_{i,j}} \quad (4)$$

定义每相输出电流为 $i_{v,j}$ 、每相环流为 $i_{\text{diff},j}$ ，则满足：

$$i_{u,j} = \frac{i_{v,j}}{2} + i_{\text{diff},j} \quad (5)$$

$$i_{l,j} = \frac{i_{v,j}}{2} - i_{\text{diff},j}$$

可以推得：

$$i_{v,j} = i_{u,j} + i_{l,j} \quad (6)$$

$$i_{\text{diff},j} = \frac{i_{u,j} - i_{l,j}}{2}$$

由式(2)和式(4)可得：

$$\frac{du_{C,u,j}^{\Sigma}}{dt} = \frac{n_{u,j} i_{u,j}}{C^{\text{arm}}} \quad (7)$$

$$\frac{du_{C,l,j}^{\Sigma}}{dt} = -\frac{n_{l,j} i_{l,j}}{C^{\text{arm}}} \quad (8)$$

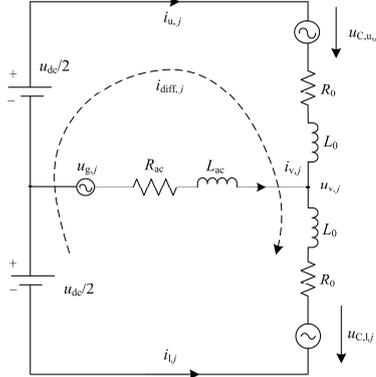


图 2 MMC 单相等效电路

Fig. 2 Single phase equivalent circuit of MMC

MMC 单相等效电路如图 2 所示，定义每个桥臂电阻为 R_0 和电感为 L_0 、与电网连接的线路集总电阻为 R_{ac} 、集总电感为 L_{ac} ，则由基尔霍夫电压定律可得：

$$\frac{u_{dc}}{2} - R_0 i_{u,j} - L_0 \frac{di_{u,j}}{dt} - n_{u,j} u_{C,u,j}^{\Sigma} = u_{v,j} \quad (9)$$

$$-\frac{u_{dc}}{2} - R_0 i_{l,j} - L_0 \frac{di_{l,j}}{dt} + n_{l,j} u_{C,l,j}^{\Sigma} = u_{v,j} \quad (10)$$

$$R_{ac} i_{v,j} + L_{ac} \frac{di_{v,j}}{dt} + u_{g,j} = u_{v,j} \quad (11)$$

由式(6)、式(9)和式(10)得电流 $i_{v,j}$ 和 $i_{\text{diff},j}$ 微分方程：

$$\begin{cases} \frac{di_{\text{diff},j}}{dt} = -\frac{R_0}{L_0} i_{\text{diff},j} - \frac{n_{u,j}}{2L_0} u_{C,u,j}^{\Sigma} - \frac{n_{l,j}}{2L_0} u_{C,l,j}^{\Sigma} + \frac{u_{dc}}{2L_0} \\ \frac{di_{v,j}}{dt} = -\frac{R'}{L'} i_{v,j} - \frac{n_{u,j}}{2L'} u_{C,u,j}^{\Sigma} + \frac{n_{l,j}}{2L'} u_{C,l,j}^{\Sigma} - \frac{u_{g,j}}{L'} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $R'=R_0/2+R_{ac}$ 表示等效电阻； $L'=L_0/2+L_{ac}$ 表示等效电感。

将式(5)代入式(7)和式(8)得上桥臂总电压和下桥臂总电压微分方程：

$$\begin{cases} \frac{du_{C,u,j}^{\Sigma}}{dt} = \frac{n_{u,j}}{C^{\text{arm}}} i_{\text{diff},j} + \frac{n_{u,j}}{2C^{\text{arm}}} i_{v,j} \\ \frac{du_{C,l,j}^{\Sigma}}{dt} = \frac{n_{l,j}}{C^{\text{arm}}} i_{\text{diff},j} - \frac{n_{l,j}}{2C^{\text{arm}}} i_{v,j} \end{cases} \quad (13)$$

式(12)和式(13)构成 MMC 系统动态数学模型状态空间方程。

1.2 MMC 双线性 Lagrange 方程及无源性分析

定义状态变量 $\mathbf{x} = [i_{\text{diff},j}, i_{v,j}, u_{C,u,j}^{\Sigma}, u_{C,l,j}^{\Sigma}]^T$ ($j = a, b, c$)，分别为 j 相环流值、总电流和上、下桥臂电压值；控制变量 $\mathbf{u} = [u_1, u_2]^T = [n_{u,j}, n_{l,j}]^T$ 分别为 j 相上、下桥臂的插入系数。根据双线性 Lagrange 方程的控制特性，在 abc 静止坐标系下，MMC 系统电磁暂态模型状态空间方程式(12)、式(13)可等效变换为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_d(\mathbf{u}) \mathbf{x} + \mathbf{E} \\ \mathbf{A}_d(\mathbf{u}) = \mathbf{A} + u_1 \mathbf{B}_1 + u_2 \mathbf{B}_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_0}{L_0} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R'}{L'} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \frac{u_{dc}}{2L_0} \\ -\frac{u_{g,j}}{L'} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{2L_0} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2L'} & 0 \\ \frac{1}{C^{\text{arm}}} & \frac{1}{2C^{\text{arm}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2L_0} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2L'} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C^{\text{arm}}} & -\frac{1}{2C^{\text{arm}}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

为满足

$$\mathbf{P} \mathbf{A}_d(\mathbf{u}) + \mathbf{A}_d(\mathbf{u}) \mathbf{P} = -2 \text{diag}\{2R_0, R', 0, 0\} \leq 0 \quad (15)$$

取观测器矩阵 \mathbf{P} 为

$$P = \begin{bmatrix} 2L_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L' & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C^{\text{arm}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C^{\text{arm}} \end{bmatrix} > 0 \quad (16)$$

由式(15)定义半正定矩阵 Q 为

$$Q = -\frac{1}{2}[PA_d(u) + A_d(u)P] = \text{diag}\{2R, R', 0, 0\} \quad (17)$$

设计正定二次型能量函数 $H(x)$ 为

$$H(x) = \frac{1}{2}x^T p x \quad (18)$$

由双线性 Lagrange 方程式(14)和能量函数式(18)可得:

$$x^T p \dot{x} = x^T p A_d(u)x + x^T p E = -x^T Q x + x^T p E \quad (19)$$

式(18)等式两边积分可得:

$$H(x(t)) - H(x(0)) = -\int_0^t x^T Q x d\tau + \int_0^t x^T p E d\tau < \int_0^t x^T p E d\tau \quad (20)$$

式(20)左侧表达式为 MMC 系统能量的增量, 右侧表达式为外部提供的能量供给。由无源性定义可知, 若将 E 看作是 MMC 系统的输入, x 看作是 MMC 系统的输出, 则映射 $E \mapsto x$ 为输出严格无源的。

2 MMC-HVDC 无源性 PI 稳定控制方法设计

2.1 双线性 Lagrange 动态可逆规划轨迹设计

定义期望轨迹为 x^* , 则根据 MMC 双线性 Lagrange 方程式(13)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}^* = A_d(u^*)x^* + E \\ A_d(u^*) = A + u_1^* B_1 + u_2^* B_2 \end{cases} \quad (21)$$

系统控制目标需满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |x(t) - x^*(t)| = 0 \quad (22)$$

若定义差量信号为

$$\begin{cases} \tilde{x} = x - x^* \\ \tilde{u} = u - u^* \end{cases} \quad (23)$$

则由式(13)和式(21)设计 Lagrange 动态可逆规划轨迹为

$$\dot{\tilde{x}} = A_d(u) \tilde{x} + (\tilde{u}_1 B_1 + \tilde{u}_2 B_2) x^* \quad (24)$$

选取 Lyapunov 能量方程:

$$V(\tilde{x}) = \frac{1}{2} \tilde{x}^T p \tilde{x} \quad (25)$$

求导得系统耗散不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}(\tilde{x}) &= \tilde{x}^T p [A_d(u) \tilde{x} + (\tilde{u}_1 B_1 + \tilde{u}_2 B_2) x^*] = \\ &= -\tilde{x}^T Q \tilde{x} + \tilde{x}^T p B_1 x^* \tilde{u}_1 + \tilde{x}^T p B_2 x^* \tilde{u}_2 \leq \\ &= \tilde{x}^T p B_1 x^* \tilde{u}_1 + \tilde{x}^T p B_2 x^* \tilde{u}_2 = y^T \tilde{u} \end{aligned} \quad (26)$$

式中:

$$y = \begin{bmatrix} x^{*T} B_1^T \\ x^{*T} B_2^T \end{bmatrix} p x = \begin{bmatrix} -x_3^* x_1 - \frac{1}{2} x_3^* x_2 + x_1^* x_3 + \frac{1}{2} x_2^* x_3 \\ -x_4^* x_1 + \frac{1}{2} x_4^* x_2 + x_1^* x_4 - \frac{1}{2} x_2^* x_4 \end{bmatrix}$$

由耗散不等式(26)可以看出, 系统 Lyapunov 稳定性与输出 y 密切相关, 因此选择形式简单的 PI 控制, 与无源性控制有机结合, 使系统满足控制目标的同时, 沿 Lagrange 积分最小化轨迹移动, 快速跟踪期望轨迹, 实现全局渐进稳定控制。

2.2 无源性 PI 全局稳定控制器设计

选取 PI 控制的简单架构, 设计无源性 PI 反馈控制闭环。

$$\begin{cases} \dot{z} = y \\ u = u^* - K_p y - K_i z \end{cases} \quad (27)$$

式中: $K_p = K_p^T > 0$ 、 $K_i = K_i^T > 0$ 分别为 PI 控制比例系数、积分系数, K_p 、 K_i 设计方法与传统 PI 控制器一致, 可采用典型二阶系统参数整定法^[26]。

将差量信号式(23)代入无源性 PI 控制器式(27), 可得:

$$\begin{cases} \dot{z} = y \\ \tilde{u} = -K_p y - K_i z \end{cases} \quad (28)$$

由式(28)与式(9)、式(10)可求得 $u_{v,abc}$ 。

设计能量函数:

$$W(\tilde{x}, z) = V(\tilde{x}) + \frac{1}{2} z^T K_i z \quad (29)$$

求导得:

$$\dot{W} = -\tilde{x}^T Q \tilde{x} + y^T \tilde{u} + z^T K_i y = -\tilde{x}^T Q \tilde{x} - y^T K_p y \leq 0 \quad (30)$$

由式(29)一式(30), 依据无源性与 Lyapunov 稳定性之间的关系可知, 考虑时变未知扰动的无源性 PI 控制方法不仅能够实现期望轨迹的有效跟踪, 且可确保系统全局渐进指数稳定。

3 MMC-HVDC 环流抑制方法设计

环流的存在并不会影响交流侧电压输出, 但是如果对环流不进行适当的控制, 会导致变流器损耗增加, 且使子模块电容电压的波动增加, 因而要对 MMC 的环流进行控制。由式(9)一式(10)可得, j 相桥臂的环流动态方程式为

$$u_{\text{diff},j} = L_0 \frac{di_{\text{diff},j}}{dt} + R_0 i_{\text{diff},j} = \frac{u_{\text{dc}}}{2} - \frac{u_{C,u,j}^{\Sigma} + u_{C,l,j}^{\Sigma}}{2} \quad (31)$$

式中, $u_{\text{diff},j}$ 为环流控制信号。

式(31)经过坐标变换 $abc-dq$ 转化得控制电压补偿量:

$$\begin{bmatrix} u_{diff,d} \\ u_{diff,q} \end{bmatrix} = L_0 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{diff,d} \\ i_{diff,q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -2\omega_n L_0 \\ 2\omega_n L_0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{diff,d} \\ i_{diff,q} \end{bmatrix} + R_0 \begin{bmatrix} i_{diff,d} \\ i_{diff,q} \end{bmatrix} \quad (32)$$

由无源性 PI 控制器得到的 $u_{v,abc}$ 、直流电压 u_{dc} 和式(32), 得上下桥臂电压的参考值 $u_{u,j,ref}$ 、 $u_{l,j,ref}$ 表达式为

$$\begin{cases} u_{u,j,ref} = \frac{u_{dc}}{2} - u_{v,j} - u_{diff,j} \\ u_{l,j,ref} = \frac{u_{dc}}{2} + u_{v,j} - u_{diff,j} \end{cases} \quad (33)$$

环流控制策略如图 3 所示。

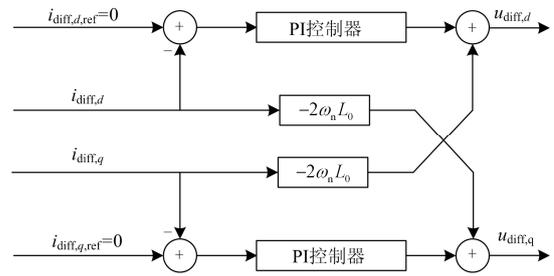


图 3 环流控制策略

Fig. 3 Circulating current control strategy

综上所述, MMC-HVDC 无源性 PI 控制整体结构框图如图 4 所示。无源性 PI 控制器实现期望轨迹的快速跟踪, 确保系统快速跟踪期望控制性能指标的同时, 具有全局渐进稳定特性; MMC 环流控制器可以有效抑制环流, 减少变流器的损耗和子模块电容电压的波动。

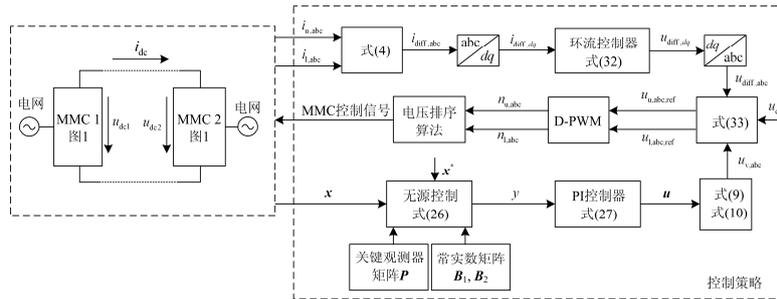


图 4 MMC-HVDC 无源性 PI 控制整体结构框图

Fig. 4 Structure diagram of passive-based PI control for MMC-HVDC

4 仿真结果分析

为验证无源性 PI 控制方法在三相 MMC-HVDC 系统中的控制性能, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建每桥臂含 10 个子模块的三相 MMC-HVDC 系统, 如图 5 所示, 仿真系统参数如表 1 所示^[27]。

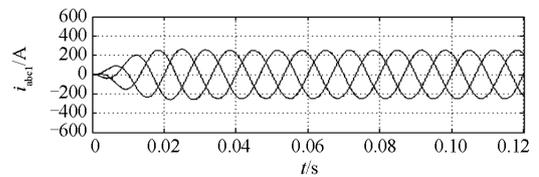
表 1 仿真所用 MMC 逆变器参数

Table 1 Parameters of MMC for simulation

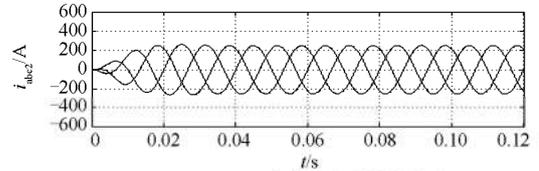
参数	数值
交流电网电压(有效值) e/kV	8
电网频率 f/Hz	50
MMC 交流系统线路电感 L_{ac}/mH	1.935
MMC 交流系统线路电阻 R_{ac}/Ω	2
直流侧电压设定值 u_{Dref}/kV	20
直流侧电容 C_{dc}/mF	8
各桥臂子模块数 N	10
子模块电容 C/mF	2
桥臂电感 L_0/H	0.03
桥臂电阻 R_0/H	0

情形一, 设置系统有功功率指令值在 0.25 s

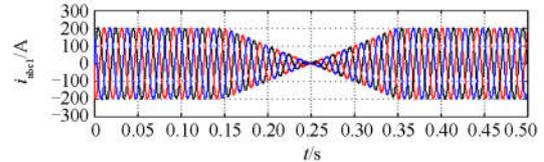
时改变方向, 控制 MMC-HVDC 系统功率双向流动, 以测试系统动态响应性能。



(a) MMC1 交流侧启动电流波形



(b) MMC2 交流侧启动电流波形



(c) MMC1 交流侧电流(无源性 PI 控制)

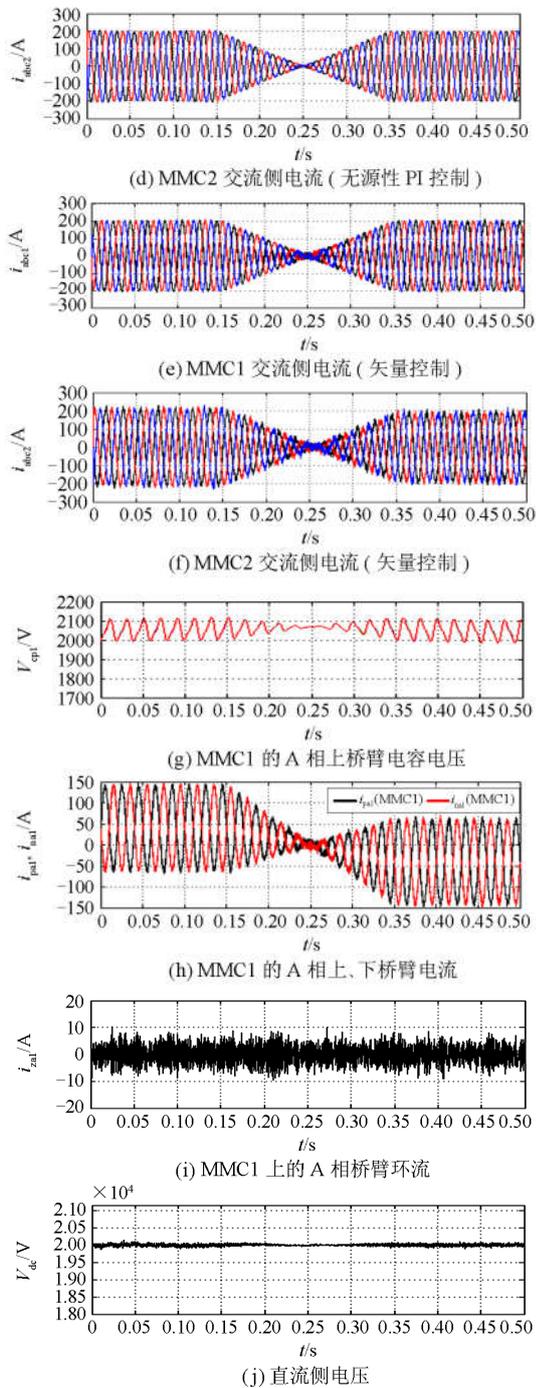


图 5 无源性 PI 控制仿真结果

Fig. 5 Simulation results of passivity-based PI control

图 5(a)、图 5(b)分别为 MMC 1 和 MMC 2 交流侧启动电流波形。可以看出：系统启动过程平稳，响应快速，参考电流信号跟踪无超调。

图 5(c)、图 5(d)分别为采用无源性 PI 控制方法仿真得到的 MMC1 和 MMC2 交流侧电流波形，其中交流电流畸变率为 0.8%；图 5(e)、图 5(f)分别为采用矢量控制方法仿真得到的 MMC1 和 MMC2

交流侧电流波形，其中交流电流畸变率为 1.26%。可以看出，所提方法具有良好的交流电流控制效果和更好的动态响应性能。

图 5(g)、图 5(h)和图 5(i)分别为 MMC1 的 A 相上桥臂电容电压、上下桥臂电流和桥臂环流。可以看出：采用无源性 PI 控制及环流抑制方法在系统有功功率指令值发生变化前后电容电压保持平稳，电流脉动小，稳定性好。

图 5(j)为直流侧电压。可以看出：采用无源性 PI 控制及环流抑制方法在系统有功功率指令值变化时，直流侧的电压波动较小，能够快速恢复系统设定值。

从图 5 的仿真结果可以看出：无源性 PI 控制及环流抑制方法实现了交流侧并网电流的快速跟踪，直流侧电压控制平稳，子模块电容电压均衡，环流抑制有效，具有良好的动、静态性能。

情形二，为了对无源性 PI 控制方法的稳定性进行对比分析，设置线路参数扰动的极端情形：系统稳定运行时，MMC2 交流系统线路电阻在 0.25 s 时上升 100%，线路电感上升 30%。仿真结果如图 6 所示，分别为线路电阻波形、线路电感波形和 MMC2 的 A 相电流波形。

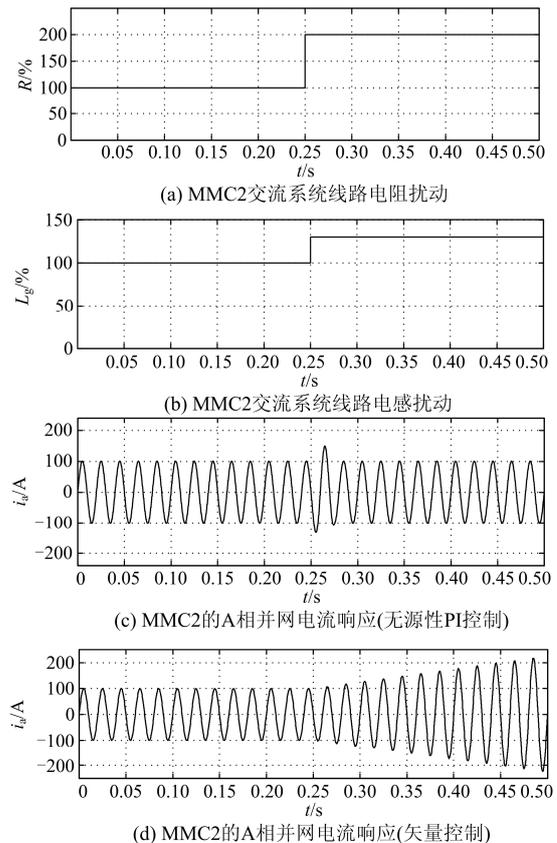


图 6 线路参数扰动时系统仿真结果

Fig. 6 Simulation results at circuit parameters disturbance

由图 6 可以看出,在交流线路电阻、电感参数发生突变的综合性影响下,传统矢量控制可能发生失稳,交流电流出现逐渐增大的趋势,而无源性 PI 控制仍然保持系统稳定运行,并网电流快速恢复设定值,有效抑制了参数摄动给系统造成的不良影响。对单独增大线路电阻或单独增大线路电感的情形进行仿真测试,结果表明:线路电阻单独上升 150%或线路电感单独上升 40%时,传统矢量控制会出现交流电流逐渐增大的现象,无源性 PI 控制依然保持系统稳定,且测试结果表明线路电阻变化对系统的稳定性影响小于线路电感变化所产生的影响。从仿真结果可以看出:无源性 PI 控制方法稳定性好,鲁棒性强。

5 结论

从简洁实用的角度出发,直接在 abc 静止坐标系下建立系统双线性模型,设计 Lagrange 可逆动态规划轨迹,结合 PI 控制,提出新型的无源性 PI 控制方法,实现复杂、动态、多变量、强非线性 MMC-HVDC 系统的全局稳定控制与期望轨迹的快速跟踪。在无源性 PI 稳定控制的基础上,设计环流抑制控制器,使控制系统在满足 Lyapunov 稳定性要求的前提下,实现有效的环流抑制,从而减少变流器损耗,抑制模块电容电压的波动。无源性 PI 稳定控制与环流抑制方法具有结构更为简单、稳定域更宽、约束条件少和鲁棒性能优的特点,适于电力、航空和冶金等高性能、高精度及大功率电力变换工程应用。

参考文献

- [1] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133-139.
FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 133-139.
- [2] 李国庆, 谭龙, 王振浩, 等. 单相接地故障对换流器内部环流影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 1-7.
LI Guoqing, TAN Long, WANG Zhenhao, et al. Research of the influence on the circulation for AC system single-phase ground fault[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 1-7.
- [3] YAO Z Q, ZHANG Q, CHEN P, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp.
DOI 10.1186/s 41601-016-0022-0
- [4] Guan M, Xu Z. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(12): 4858-4867.
- [5] 彭浩, 邓焰, 王莹, 等. 模块化多电平变换器模型及稳态特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 120-127.
PENG Hao, DENG Yan, WANG Ying, et al. Research about the model and steady-state performance for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 120-127.
- [6] 高建, 苏建徽, 高航, 等. 模块化多电平换流器电容电压与环流的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 56-62.
GAO Jian, SU Jianhui, GAO Hang, et al. Capacitor voltage and circulation current control strategy in modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 56-62.
- [7] AKAGI H. Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC)[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3119-3130.
- [8] 高航, 苏建徽, 汪晶晶, 等. 模块化多电平型换流器电容电压二倍频波动抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 116-122.
GAO Hang, SU Jianhui, WANG Jingjing, et al. Study on control strategy for suppressing double fundamental frequency fluctuation of capacitor voltage of modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 116-122.
- [9] LI Z, WANG P, CHU Z, et al. An inner current suppressing method for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 4873-4879.
- [10] 张浩, 吴金龙, 杨美娟, 等. 模块化多电平换流器新型桥臂环流抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 73-80.
ZHANG Hao, WU Jinlong, YANG Meijuan, et al. A novel bridge arm circulating current restraint strategy for modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 73-80.
- [11] DORN J, HUANG H, RETZMANN D. A new multilevel voltage-sourced converter topology for HVDC applications[C]// CIGRE Session. Paris, France: International Council on Large Electric Systems, 2008: 1-8.
- [12] 赵岩, 胡学浩, 汤广福. 模块化多电平变流器 HVDC 输电系统控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 35-42.
ZHAO Yan, HU Xuehao, TANG Guangfu. Control

- strategy of modular multilevel converters based HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 35-42.
- [13] 雷鸣, 李耀华, 葛琼璇, 等. 模块化多电平变流器低频控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(24): 59-65.
LEI Ming, LI Yaohua, GE Qiongxuan, et al. Control scheme of modular multilevel converter operating at low frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24): 59-65.
- [14] CHAUDHURI N, OLIVEIRA R, YAZDANI A. Stability analysis of vector controlled modular multilevel converters in linear time periodic framework[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5255-5269.
- [15] 朱玲, 符晓巍, 胡晓波, 等. 模块化多电平变流器 HVDC 系统的模型预测控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 1-8.
ZHU Ling, FU Xiaowei, HU Xiaobo, et al. Model predictive control of modular multilevel converter for HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 1-8.
- [16] QIN J, SAEEDIFARD M. Predictive control of a modular multilevel converter for a back-to-back HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1538-1547.
- [17] 张振华, 江道灼. 基于模块化多电平变流器的 STATCOM 研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 62-66.
ZHANG Zhenhua, JIANG Daozhuo. STATCOM research based on the modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 62-66.
- [18] NAJMI V, NADEMI H, BURGOS R. An adaptive backstepping observer for modular multilevel converter[C]// Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014: 2115-2120.
- [19] 郭佳才, 罗安, 陈燕东, 等. 兼具无功补偿功能的模块化多电平整流器控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 297-303.
GUO Jiakai, LUO An, CHEN Yandong, et al. A control strategy of modular multilevel rectifier with reactive power compensation function[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 297-303.
- [20] 蔡新红, 赵成勇, 庞辉, 等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 系统控制与保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 405-414.
CAI Xinhong, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC supplying passive networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 405-414.
- [21] MANCILLA-DAVID F, ORTEGA R. Adaptive passivity-based control for maximum power extraction of stand-alone windmill systems[J]. Control Engineering Practice, 2012, 20(2): 173-181.
- [22] CISNEROS R, PIRRO M, BERGNA G, et al. Global tracking passivity-based PI control of bilinear systems: application to the interleaved boost and modular multilevel converters[J]. Control Engineering Practice, 2015, 43: 109-119.
- [23] 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): 225-233.
CAI Xinhong, ZHAO Chengyong. Euler-Lagrange model based passive control for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 225-233.
- [24] JAAFAR A, BERGNA G, VANNIER J C, et al. Energy concept-based nonlinear stabilization and control for modular multilevel converters for voltage oscillation reduction[C] // 2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'14-ECCE Europe), Lappeenranta, Finland, 2014.
- [25] POURESMAEIL E, MEHRASA M. Control of modular multilevel converters for integration of distributed generation sources into the power grid[C] // 2015 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Oshawa, Canada, 2015.
- [26] 周倩, 梁辉. 三相 PWM 整流器 PI 参数的设计分析[J]. 电力电子技术, 2011, 45(2): 50-52.
ZHOU Qian, LIANG Hui. The design and analysis of PI regulator of three-phase voltage source rectifier[J]. Power Electronics, 2011, 45(2): 50-52.
- [27] MOON J W, GWON J S, PARK J W, et al. Model predictive control with a reduced number of considered states in a modular multilevel converter for HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 608-617.

收稿日期: 2016-09-28; 修回日期: 2016-12-25

作者简介:

薛花(1979—), 女, 副教授, 研究方向为大功率并网逆变控制技术、非线性理论与控制方法; E-mail: distributepower@163.com

李杨(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为模块化多电平技术、电力电子功率变换器应用技术、大功率风力发电; E-mail: 185171642@qq.com

王育飞(1974—), 男, 副教授, 研究方向为电力变换应用技术、电能质量分析与控制。

(编辑 姜新丽)