

DOI: 10.7667/PSPC151146

基于模型预测控制的 MMC-HVDC 系统控制策略研究

代高富¹, 符金伟², 周胜¹, 张冬凯¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 为提高基于模块化多电平换流器的直流输电系统(MMC-HVDC)电流内环的动态响应速度, 提出了一种 MMC-HVDC 系统的模型预测控制(Model predictive control, MPC)方法。该方法通过预测模型、反馈校正和滚动优化得到最优的电压控制量, 克服了传统双闭环控制 PI 参数整定困难和动态响应慢的问题。针对外环 PI 控制器参数对系统参数敏感的问题, 对 PI 控制器参数进行了自适应调整, 根据控制器的输入偏差和输出的大小来调整 PI 参数, 提高了控制器的鲁棒性。针对子模块电容的均压问题, 采用了基于排序法的最近电平调制(NLM)均压调制算法, 有效地实现了子模块电容电压的平衡。最后, 通过 Matlab/Simulink 平台搭建了 5 电平的 MMC-HVDC 系统仿真模型。仿真结果表明了该控制策略的有效性和可行性。

关键词: 模块化多电平变换器; MPC; 准比例谐振; 参数自适应; NLM

Study of control strategy for MMC-HVDC system based on model predictive control

DAI Gaofu¹, FU Jinwei², ZHOU Sheng¹, ZHANG Dongkai¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to improve the dynamic response speed of the inner loop of the HVDC transmission system based on modular multilevel converter (MMC-HVDC), a model predictive control method (MPC) for MMC-HVDC system is proposed. In this method, the optimal control voltage is obtained by predicting model, feedback correction and rolling optimization. MPC overcomes the problem of PI parameter tuning difficulties and slow dynamic response of traditional double closed loop control. In view of the outer loop PI controller parameters on the system sensitivity problem, the parameters of PI controller are adjusted adaptively. The robustness of the controller is improved by adjusting the PI parameters according to the input error and the output of the controller. In order to realize the voltage balance between sub module capacitor, the NLM voltage balance modulation algorithm based on the ranking method is adopted to realize the capacitor voltage balance between the sub modules. At last, the simulation model of 5 levels MMC-HVDC system is built on Matlab/Simulink platform. The simulation results show the effectiveness and feasibility of the proposed control strategy.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2682014CX028).

Key words: MMC; MPC; quasi proportional resonance; parameter adaptive; NLM

0 引言

2001年, 德国学者首次提出了模块化多电平换流器(Modular multilevel converter, MMC), 这种新型多电平结构因为具有公共直流母线、高度模块化、易于级联、输出波形好等优点得到了广泛的关注,

并成功应用于柔性直流输电领域^[1]。目前, 对 MMC-HVDC 系统的研究主要集中于拓扑结构、控制策略、子模块电容均压、环流的抑制等方面^[2-5]。文献[6]提出了基于 $dq0$ 变换的双闭环控制方式, 实现了有功和无功的独立控制, 由于外环和内环都用到了 PI 控制器, 调节时间长且 PI 参数整定困难; 随着 MMC 电平数的增加, 会造成子模块电容电压不均衡, 影响系统的安全稳定运行, 文献[7]提出了基于能量均分控制的方法来实现子模块电压的平

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2682014CX028)

衡,但每个子模块都需要一个 PI 控制器,增加了系统控制的复杂性;文献[8]提出了基于电容电压排序的均压控制策略,实现了电容电压的均衡;MMC 三相能量的不平衡会形成内部环流,导致各相桥臂电流畸变,增加系统损耗,文献[9]提出了一种基于负序坐标变换和解耦控制的环流抑制方法,降低了环流对系统的影响,同时也增加了系统的复杂性,加大了系统参数设计的难度。

模型预测控制算法可以实现多目标控制、动态响应快,对系统的非线性和不确定因素有一定的适应性,与传统双闭环 PI 控制策略相比,模型预测控制参数确定无需整定,系统的动态响应速度更快^[10]。文献[11]提出了一种模块化多电平换流器的模型预测控制策略,该方法将交流电流、子模块电压和环流融合在一个目标函数中,通过计算所有的开关状态,找到使得目标函数最优的下一时刻开关状态,从而达到理想控制目标,这种方法虽然简单直接,但由于实际应用的 MMC-HVDC 系统电平数往往几十上百,可能的开关状态数随电平数呈几何级数增长,这加大了模型预测控制的计算量。本文通过预测模型、反馈校正和滚动优化计算出最

优的 MMC 输出电压参考值,这样既保留了模型预测动态响应快、鲁棒性好的优点,又有效减小了开关状态的计算量。针对外环 PI 控制器参数对系统参数敏感度问题,对 PI 控制器参数进行自适应整定,根据控制器的输入偏差和输出的大小来调整 PI 参数,提高了控制器的鲁棒性。针对子模块电容的均压问题,采用了基于排序法的 NLM 均压调制算法,有效地实现了子模块电容电压的平衡。最后,通过 Matlab/Simulink 平台搭建了 5 电平 MMC-HVDC 系统仿真模型,仿真结果表明了该控制方法的有效性。

1 MMC-HVDC 系统结构和数学模型

1.1 MMC-HVDC 系统结构

图 1(a)是双端 MMC-HVDC 系统的单线图,该系统由两个 MMC 换流站和直流线路组成。两个 MMC 换流站两边分别通过三相交流变压器与交流系统相连,换流站之间为直流系统。图 1(b)是两个 MMC 换流器背靠背连接的主电路拓扑图,每个 MMC 换流器包括 6 个桥臂,对于 $N+1$ 电平 MMC 换流器,每个桥臂由 N 个子模块(Sub-Module, SM)

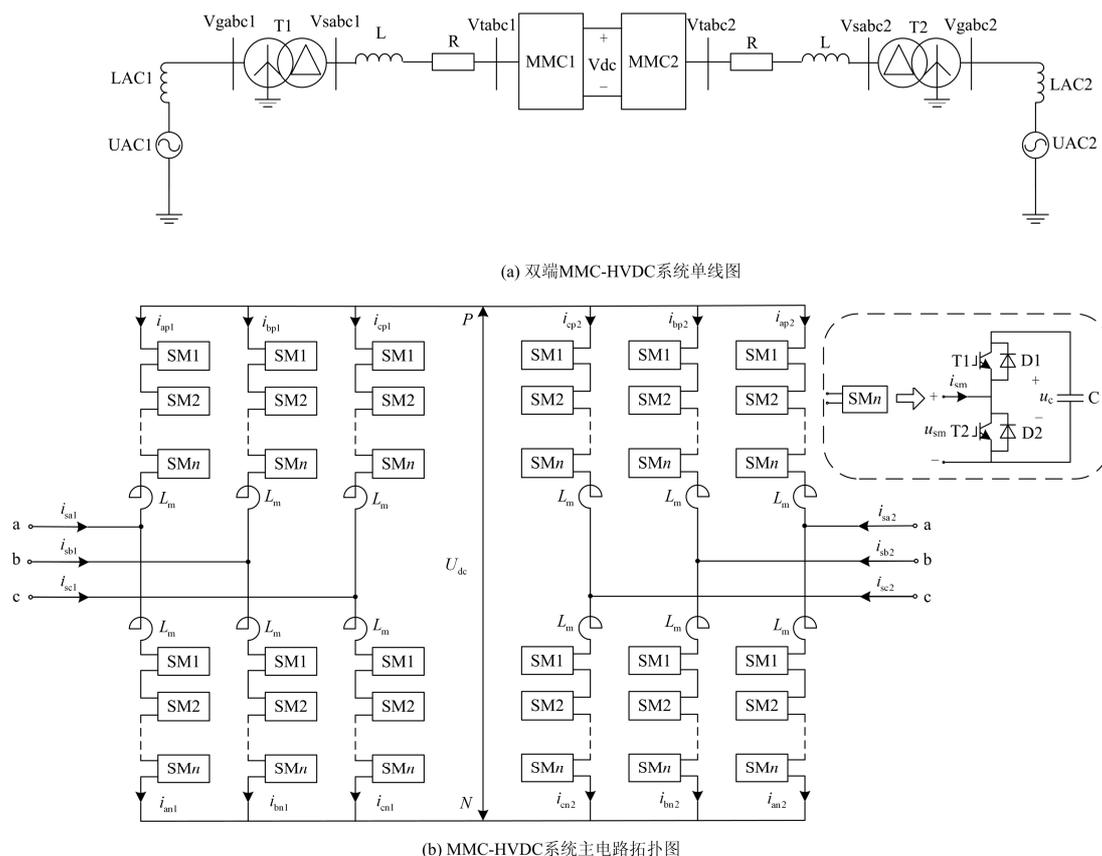


图 1 MMC-HVDC 系统结构

Fig. 1 Structure of MMC-HVDC system

和一个电抗器 L_m 串联组成。MMC 的每个子模块是一个由 2 个 IGBT 和 1 个直流储能电容器组成的半 H 桥结构。当 T1 导通, T2 关断, 子模块输出电压 $u_{sm} = u_c$, 此时子模块处于“投入”状态; 当 T1 关断, T2 导通, 子模块输出电压 $u_{sm} = 0$, 此时子模块处于“切除”状态。为得到稳定的直流电压, 必须保证每相上、下桥臂投入的子模块总数为 N , 通过合适的控制策略调整上、下桥臂投入子模块的个数, 可以输出期望的交流电压。

1.2 MMC-HVDC 数学模型

图 2 是在不考虑桥臂电能损失下单相 MMC 的等效电路图。 u_{sj} 、 u_{oj} 、 i_j ($j=a,b,c$) 分别是交流侧电压, MMC 输出电压和交流侧电流, L_s 、 R_s 分别是交流侧电感和电阻, L_m 是桥臂电感, i_{pj} 、 i_{nj} 分别是 j 相的上、下桥臂电流, i_{sj} 是 MMC 内部环流, 上、下桥臂电压等效为一个可控的电压源, 分别为 e_{pj} 和 e_{nj} , MMC 输出电压为 u_{oj} 。

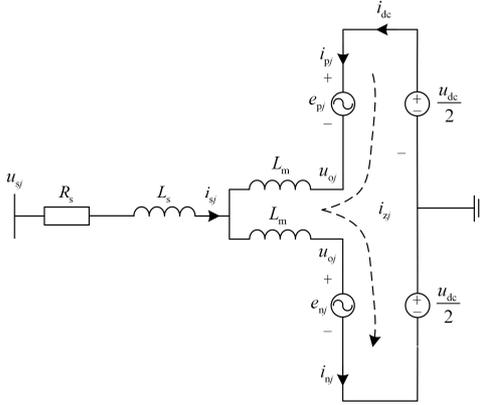


图 2 单相 MMC 等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of single phase MMC

根据图 2 列 KVL 方程

$$u_{sj} = u_{oj} + L \frac{di_{sj}}{dt} + Ri_{sj} \quad (1)$$

$$\frac{u_{dc}}{2} - e_{pj} = L_m \frac{di_{pj}}{dt} - R_s i_{sj} - L_s \frac{di_{sj}}{dt} + u_{sj} \quad (2)$$

$$-\frac{u_{dc}}{2} + e_{nj} = -L_m \frac{di_{nj}}{dt} - R_s i_{sj} - L_s \frac{di_{sj}}{dt} + u_{sj} \quad (3)$$

式(1)中

$$L = L_s + \frac{L_m}{2} \quad (4)$$

MMC 三相电压的不平衡会形成相间环流 i_{zj} , 由文献[4]知

$$i_{zj} = \frac{i_{pj} + i_{nj}}{2} \quad (5)$$

由式(2)、式(3)、式(5)得

$$\frac{u_{dc}}{2} - \frac{e_{pj} + e_{nj}}{2} = L_m \frac{di_{zj}}{dt} \quad (6)$$

式(6)描述了 MMC 系统的内部特性。

2 MMC-HVDC 控制策略

2.1 外环控制器设计

MMC-HVDC 系统外环控制器主要分为有功类和无功类控制, 计算出内环电流控制器所需要的参考指令值 i_{dref} 、 i_{qref} 。外环控制器多采用 PI 控制, 如图 3 所示。

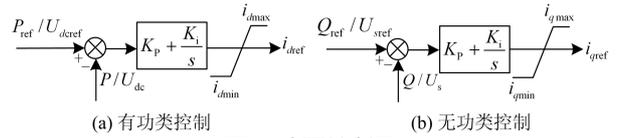


图 3 外环控制器

Fig. 3 Outer loop controller

由于常规 PI 控制器会导致系统 PI 参数难以整定, 动态性能不足等问题, 提出了一种 PI 参数自适应调整的 PI 控制器。

比例环节是成比例的放大系统偏差 e , 一旦偏差 e 产生, 比例环节就产生作用以减小 e 。 K_p 不能取值太大或太小, K_p 太大会引起系统振荡, 破坏系统动态性能, K_p 太小会影响系统的响应速度。因此, 当偏差 e 较大时, 为提高响应速度应增大 K_p , 当偏差 e 较小时, 为防止超调产生振荡应减小 K_p 。通过上述分析得到如式(7)的整定规则。

$$K_p = \begin{cases} \alpha K_p, & |e| > e_{max} \quad (\alpha > 1) \\ \beta K_p, & |e| < e_{min} \quad (0 < \beta < 1) \end{cases} \quad (7)$$

式中, e_{max} 、 e_{min} 为决定 K_p 是否调节的误差上限值和下限值。

积分环节主要是为了消除静差, 提高系统的稳态精度。对偏差信号进行积分, 对系统控制有一定的滞后作用, 积分系数 K_i 过大, 会引起系统超调增大, 甚至造成系统振荡, 因此, 为防止上述现象的发生, 通过对积分器输出进行限幅, 得到式(8)的 K_i 整定规则。

$$K_i = \begin{cases} \gamma K_i, & |y| > y_{max} \\ K_i, & |y| < y_{max} \end{cases} \quad 0 < \gamma < 1 \quad (8)$$

式中, y_{max} 为积分器的输出限幅。

2.2 内环控制器设计

电流环的动态响应速度是影响系统快速性的关键因素, 对于 MMC-HVDC 控制系统, 内环多采

用 PI 控制器, 但由于 PI 控制器存在积分饱和, 参数整定复杂和对系统参数依赖性很强等问题, 限制了电流内环的响应速度。

模型预测控制是基于离散系统数学模型的控制算法, 对模型的要求很低, 参数确定, 响应速度快, 非常适合于电流内环的设计。将模型预测控制应用到内环控制器, 方便了数字控制系统的实现, 同时也加快了系统的动态响应速度。其主要步骤分为预测模型、反馈校正和滚动优化, 具体过程如下。

(1) 预测模型

在 dq 旋转坐标系下, 将式(1)所示的数学模型改写为

$$\begin{cases} u_{od} = -L \frac{di_{sd}}{dt} + \omega L i_{sq} - R_s i_{sd} + u_{sd} \\ u_{oq} = -L \frac{di_{sq}}{dt} - \omega L i_{sd} - R_s i_{sq} + u_{sq} \end{cases} \quad (9)$$

采用一阶欧拉法将式(9)离散化, 以 MMC 交流侧输出电压的增量 Δu_{od} 、 Δu_{oq} 作为控制的输入, 得到电流内环的预测模型

$$\begin{cases} \hat{i}_{sd}(k+1) = ai_{sd}(k) + bi_{sq}(k) + cu_{sd}(k) - cu_{od}(k-1) - c\Delta u_{od}(k) \\ \hat{i}_{sq}(k+1) = ai_{sq}(k) - bi_{sd}(k) + cu_{sq}(k) - cu_{oq}(k-1) - c\Delta u_{oq}(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $a = 1 - \frac{R_s T_s}{L}$, $b = \omega T_s$, $c = \frac{T_s}{L}$, T_s 为采样周期;

$\hat{i}_{sd}(k+1)$ 、 $\hat{i}_{sq}(k+1)$ 是对下一时刻的预测值; $u_{sd}(k)$ 、 $u_{sq}(k)$ 、 $i_{sd}(k)$ 、 $i_{sq}(k)$ 是当前时刻网侧电压电流的采样值; $u_{od}(k-1)$ 、 $u_{oq}(k-1)$ 是上一时刻 MMC 输出电压的采样值。

(2) 反馈校正

由于式(10)所示的预测模型是开环模型, 在实际系统中将受到参数不准确、系统干扰等诸多不利因素的影响, 为提高控制器的鲁棒性, 在预测模型中引入误差校正项, 形成闭环控制。

$$\begin{cases} \hat{i}_{sdm}(k+1) = \hat{i}_{sd}(k+1) + e_d \\ \hat{i}_{sqm}(k+1) = \hat{i}_{sq}(k+1) + e_q \end{cases} \quad (11)$$

式中: $e_d = \lambda_1(i_{sd}(k) - \hat{i}_{sdm}(k))$; $e_q = \lambda_2(i_{sq}(k) - \hat{i}_{sqm}(k))$; λ_1 、 λ_2 为误差校正系数, 取值一般为 1。

(3) 滚动优化

模型预测控制与其他优化算法最大的区别就是滚动优化, 模型预测控制的优化不是离线的, 而是随着时间的推移在每个采样时刻采用局部优化目

标。在 k 时刻, 控制的目标是使得预测的电流值和电流的指令值尽可能接近, 并且希望控制量的变化不要太大, 因此选取式(12)作为控制的目标函数。

$$J = \varepsilon_1 [i_{dref}(k+1) - \hat{i}_{sdm}(k+1)]^2 + \varepsilon_2 [i_{qref}(k+1) - \hat{i}_{sqm}(k+1)]^2 + \mu_1 \Delta u_{od}^2(k) + \mu_2 \Delta u_{oq}^2(k) \quad (12)$$

式中, ε_1 、 ε_2 、 μ_1 、 μ_2 是 d 轴电流误差、 q 轴电流误差、 d 轴控制电压增量误差、 q 轴控制电压增量误差在目标函数所占权重系数; $i_{dref}(k+1)$ 、 $i_{qref}(k+1)$ 分别是 d 、 q 轴电流的参考值。

为使目标函数 J 值最小, 可对目标函数 J 求偏

导 $\frac{\partial J}{\partial \Delta u_{od}} = 0$, $\frac{\partial J}{\partial \Delta u_{oq}} = 0$ 得到最优的控制量。

$$\begin{cases} \Delta u_{od}(k) = \frac{c\varepsilon_1}{c^2\varepsilon_1 + \mu_1} [i_{sdref}(k+1) - ai_{sd}(k) - bi_{sq}(k) + cu_{sd}(k) - cu_{od}(k-1) - e_d] \\ \Delta u_{oq}(k) = \frac{c\varepsilon_2}{c^2\varepsilon_2 + \mu_2} [i_{sqref}(k+1) - ai_{sq}(k) - bi_{sd}(k) + cu_{sq}(k) - cu_{oq}(k-1) - e_q] \end{cases} \quad (13)$$

2.3 子模块电容电压的平衡

对于 MMC-HVDC 系统, 不仅需要控制直流母线电压的稳定, 同时需要控制 MMC 各个子模块电容电压的均衡。文献[8]提出了基于排序法的 NLM 均压调制算法, 可以有效实现子模块电容电压的平衡。由于篇幅有限, 其原理本文不再赘述。图 4 是子模块电容均压控制的原理框图。

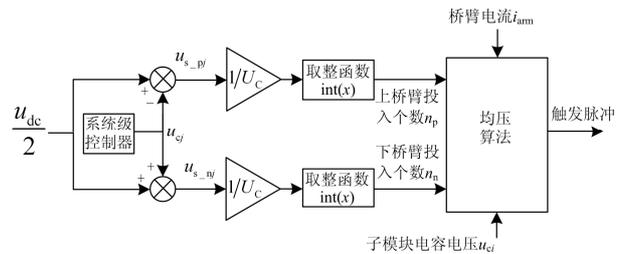


图 4 电容均压控制框图

Fig. 4 Block diagram of capacitor voltage balancing control algorithm

电压排序法的主要思想是, 首先对桥臂子模块电容电压进行排序, 然后结合桥臂电流的充放电方向, 优先投入电容电压较低的子模块, 同时优先切除电容电压较高的子模块, 从而实现子模块电容电压的平衡。

2.4 环流的抑制

由于环流的主要成分是二倍频率的基波分量^[5], 可以采用陷波器来提取环流的二次分量, 为了无静差

地得到抑制环流的电压补偿信号,设计了准比例谐振控制器来跟踪电压信号,图5是环流抑制的控制框图。

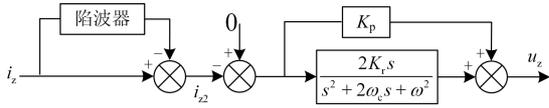


图5 环流抑制框图

Fig. 5 Block diagram of circulating current suppression

陷波器的作用是陷除环流 i_z 中的二次分量,再将其与原环流 i_z 做差得到环流的二次分量 i_{z2} ,二次分量 i_{z2} 与参考值 0 做差,送入 PR 控制器进行跟踪处理,得到补偿电压的参考值。

准 PR 控制器既保持了 PR 控制器在谐振频率处高增益的优点,又增大了带宽,减小由电网频率偏移带来的影响。准比例谐振控制器的传递函数为

$$G(s) = K_p + \frac{2K_r s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2} \quad (14)$$

其中: K_p 、 K_r 分别是比例系数和谐振系数; ω_c 、 ω_0 分别是截止频率和谐振频率。

3 仿真分析

为了验证本文所提控制算法在 MMC-HVDC 系统中的正确性和有效性,在 Matlab/Simulink 平台搭建了双端的 5 电平 MMC-HVDC 系统,MMC1 端采用定有功和定无功的控制方式,MMC2 端采用定直流电压和定无功控制方式,模型仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Parameters of simulation

变量名称	数值
交流侧电压 U_s	35 kV
直流侧电压 U_{dc}	60 kV
子模块电容 C	3 mF
桥臂电感 L_m	10 mH
电阻 R	0.01 Ω
连接电抗器 L	5 mH
开关频率 f	1 kHz

(1) 功率阶跃响应

为验证模型预测控制与传统双闭环 PI 控制相比的优越性,图 6 给出了两种控制策略下 MMC1 侧的 P 、 Q 、 i_d 、 i_q 的仿真结果,在 $t=0.5$ s 时有功功率的参考值 P_{ref} 从 0.8 p.u. 阶跃到 0.4 p.u.,在 $t=0.8$ s 时无功功率的参考值 Q_{ref} 从 0 阶跃到 0.3 p.u.,从图 6 中可以看出,两种控制策略都可以实现 P 、 Q 、 i_d 、

i_q 的解耦控制。对比结果显示,模型预测控制方式下, P 、 Q 、 i_d 、 i_q 的跟踪速度较快,并且超调量更小。图 6(e)给出了功率阶跃时的网侧电流波形,可以看出,在功率发生跳变时,电流会受到影响,但随着功率稳定下来,电流也恢复稳定。

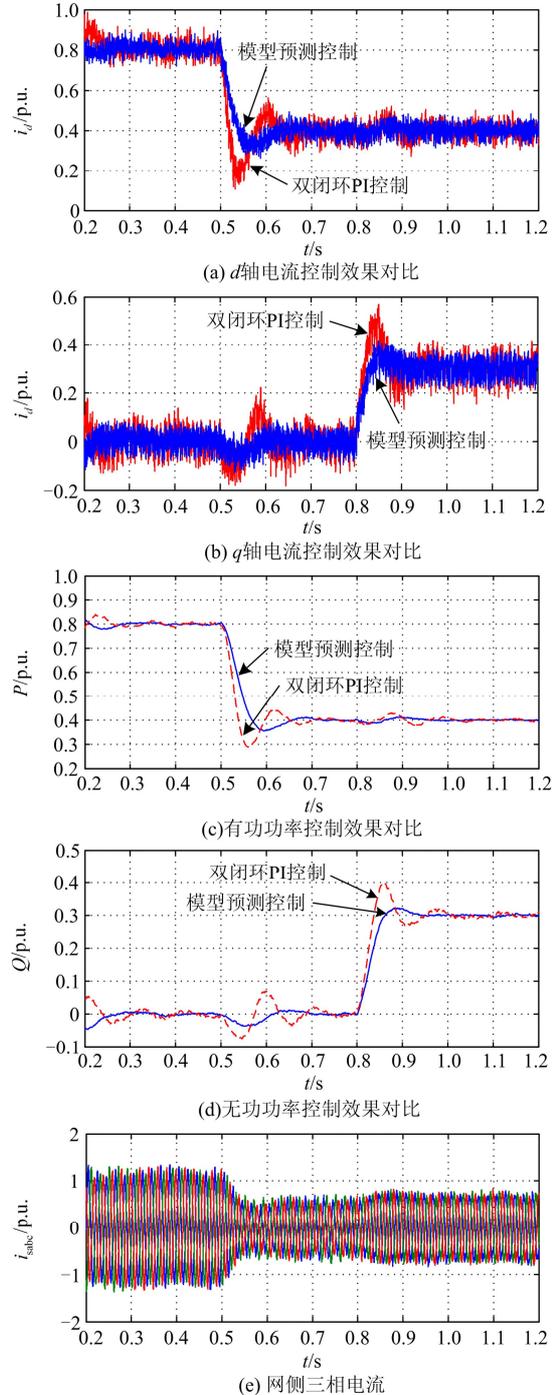


图6 功率阶跃响应仿真结果

Fig. 6 Simulation results of power change

(2) 电容电压的平衡

图 7 是子模块电容电压和直流母线电压的波形, 在 $t=0.5$ s 时, 由于有功功率阶跃跳变引起了直流侧电压的少许跌落, 但很快恢复稳定, 响应速度快。图 7 是 A 相上、下桥臂子模块电容电压的波形, 8 个子模块电容电压保持在 15 kV 左右, 波动范围在 ± 1 kV 内, 小于 10%, 均压效果较好。

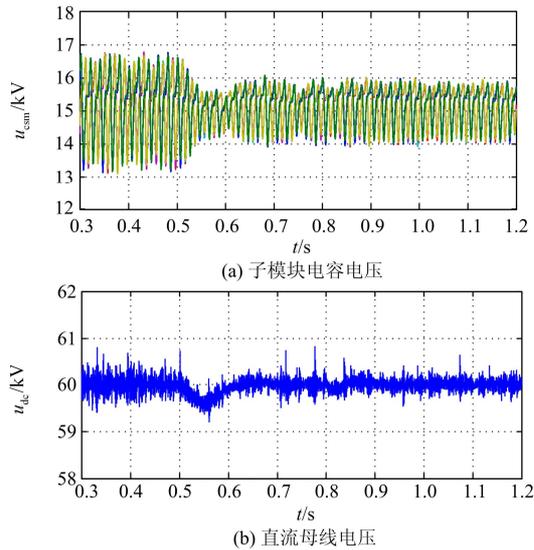


图 7 电容电压的平衡

Fig. 7 Balance of capacitor voltage

(3) 环流的抑制

为验证环流控制器的效果, 图 8 给出了 A 相桥臂环流的波形, 在 $t=0.4$ s 时投入环流控制器, 环流峰值从 0.6 kA 下降到 0.2 kA 左右, 可见环流控制器对环流的抑制效果很明显。

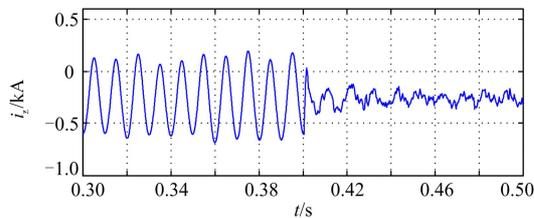


图 8 A 相桥臂环流

Fig. 8 Circulating current of phase A

4 结论

对于 MMC-HVDC 系统, 本文分析和推导了等效电路, 考虑到传统双闭环 PI 控制方式下内环控制器动态响应慢的问题, 将模型预测控制应用到电流内环, 一方面方便了数字控制系统的实现, 另一方面也加快了系统的动态响应速度, 减小了系统超调。针对外环 PI 控制器参数难于整定的问题, 设计了

PI 参数自适应调整的 PI 控制器, 根据控制器的输入偏差和输出的大小来调整 PI 参数, 提高了控制器的鲁棒性。最后, 通过 Matlab/Simulink 平台进行了仿真验证, 仿真结果表明了控制器的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 赵岩, 胡学浩, 汤广福, 等. 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, et al. Control strategy of modular multilevel converters based HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 35-42.
- [2] 邓雪松, 欧开健, 陈鹏, 等. 基于无差拍电流控制的 MMC-HVDC 系统控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 35-39.
DENG Xuesong, OU Kaijian, CHEN Peng, et al. Study of control strategy for MMC-HVDC system based on deadbeat current control[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 35-39.
- [3] 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(8): 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(8): 1-8.
- [4] 胡鹏飞, 江道灼, 郭捷, 等. 基于混合型多电平换流器的柔性直流输电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 40(10): 33-38.
HU Pengfei, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. Fault-tolerant design and control of modular multilevel converter-based STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2013, 40(10): 33-38.
- [5] 杨晓峰, 郑琼林. 基于 MMC 环流模型的通用环流抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 59-65.
YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q. A novel universal circulating current suppressing strategy based on the MMC circulating current model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 59-65.
- [6] 姚为正, 邓祥纯, 易映萍, 等. 基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-76.
YAO Weizheng, DENG Xiangchun, YI Yingping, et al. Research on modeling and simulation of VSC-HVDC

- based on dq0 synchronous coordinate[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 71-76.
- [7] 赵昕, 赵成勇, 李广凯, 等. 采用载波移相技术的模块化多电平换流器电容电压平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 48-54.
ZHAO Xin, ZHAO Chengyong, LI Guangkai, et al. Submodule capacitance voltage balancing of modular multilevel converter based on carrier phase shifted SPWM technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(21): 48-54.
- [8] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 15-20.
TU Qingrui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 15-20.
- [9] 屠卿瑞, 徐政, 管敏渊, 等. 模块化多电平换流器环流抑制控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 57-61.
TU Qingrui, XU Zheng, GUAN Minyuan, et al. Design of circulating current suppressing controllers for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 57-61.
- [10] KOURO S, CORTES P, VARGAS R, et al. Model predictive control — a simple and powerful method to control power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1826-1838.
- [11] QIN J C, 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): 1538-1546.
-
- 收稿日期: 2015-07-04; 修回日期: 2015-08-25
作者简介:
代高富(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电技术; E-mail: 449588364@qq.com
符金伟(1988-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: 304070739@qq.com
周胜(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机转速控制技术。E-mail: 282441859@qq.com
- (编辑 姜新丽)