

模块化多电平变流器 HVDC 系统的模型预测控制

朱玲¹, 符晓巍², 胡晓波³, 王晓茹¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710038;
3. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 随着电压源变换器型高压直流(Voltage-Sourced Converter-Based High-Voltage Direct Current, VSC-HVDC)输电需求的持续增加, 模块化多电平变流器(Modular Multilevel Converter, MMC)成为柔性直流输电的研究热点。环流的抑制和子模块电容电压的平衡是 MMC 控制的研究重点之一。推导了模块化多电平变流器高压直流 (Modular Multilevel Converter based HVDC, MMC-HVDC) 输电系统的离散数学模型, 在此基础上针对五电平 MMC 的控制目标提出一种改进的具有工程应用价值的模型预测控制策略(Model Predictive Control, MPC)。通过引入误差因子减小了子模块电压波动范围, 同时通过 MPC 与电压排序算法相结合减小了传统 MPC 的计算量, 并实现了 HVDC 系统传输功率的控制、MMC 环流的抑制和 MMC 子模块中电容电压的平衡。仿真结果验证了所提出的控制策略的有效性。

关键词: 模块化多电平换流器; 高压直流输电; 模型预测控制; 电容电压平衡; 环流抑制

Model predictive control of modular multilevel converter for HVDC system

ZHU Ling¹, FU Xiao-wei², HU Xiao-bo³, WANG Xiao-ru¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710038, China;
3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: With the continuously growing demand of the voltage-sourced converter-based high-voltage direct current (VSC- HVDC) transmission, modular multilevel converter (MMC) achieves great attentions in VSC-HVDC system. Circulating current eliminating and sub-module capacitor voltage balancing is one of the main technical challenges associated with the control of MMC. The discret mathematic model of the modular multilevel converter based HVDC (MMC-HVDC) system is derived, and an improved model predictive control (MPC) strategy with engineering value is proposed for five-level MMC. The sub-module voltage ripple is reduced by introducing the error factor. Furthermore, the combination of MPC and voltage sequencing algorithm reduces the computation burden, and realizes the transmission power control in MMC-HVDC system, circulating current eliminating, sub-module capacitor voltage balancing. Simulation results validate the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51128701).

Key words: MMC; HVDC; MPC; capacitor voltage balancing; circulating current eliminating

中图分类号: TM46 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)16-0001-08

0 引言

近年来, 多电平电压源变换器在世界范围内得到广泛的研究和关注, 并被成功应用于如高压直流输电^[1]、有源滤波^[2]、静止无功补偿^[3-4]等领域。模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)作为一种新型的电压源变换器, 它的优点主

要体现在易于模块化冗余设计, 输出电压谐波小, 易于实现容量扩展和电压等级的提高。由于其具有公共直流母线, MMC 可以应用于背靠背高压直流输电系统中, 因此基于 MMC 的高压直流输电(MMC-HVDC)系统成为柔性直流输电领域的研究热点^[5-7]。

目前针对 MMC 的研究主要集中在主电路参数设计^[8-9]、调制方式^[10-13]、MMC 的建模^[14-15]、子模块电容电压平衡^[16-19]和环流抑制等方面^[20-22]。如何

基金项目: 国家自然科学基金项目(51128701)

保证各独立子模块电容电压的平衡是系统安全稳定运行的基础。文献[16-19]研究了电容电压的均衡控制策略,但它们都忽略了环流的影响。环流的存在使各相桥臂电流畸变,增加了开关器件额定电容量和系统损耗。文献[20]提出一种通用的环流抑制策略,并指出环流中包含可控和不可控分量。文献[21]提出一种环流抑制器,通过负序坐标变换和解耦环节实现环流抑制,仅适用于三相系统,并不具备普遍性。上述环流控制方式都不够直接,增加了系统控制的复杂性。文献[23]将模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)应用于 MMC-HVDC 系统的控制,但计算量过大,另外它对于电容电压的控制效果严重依赖于权重值的选取,不恰当的选取会造成单个子模块电压波动较大,严重时会导致系统运行不稳定。

现有的针对 MMC 的控制大多是基于经典控制理论进行设计的,控制器多数采用 PI 控制器,其结构虽然简单,但是控制过程调节时间过长。另一方面电网侧阻抗参数在实际中一般未知,控制器参数整定依赖于精确的系统模型而不易整定,所以在一定程度上限制了其应用。模型预测控制器是基于目标函数的最优控制器,它的动态响应速度快,对系统中未建模的非线性和不确定因素也有一定的适应性,鲁棒性更好,其数字实现也较简单,相对于经典反馈控制来说更具有优势。本文采用一种应用于 MMC-HVDC 系统中的改进的 MPC,它的控制相对现有的控制策略来说更加简单直接,将环流抑制、电容电压平衡和系统传输功率控制等目标融合在一起,并不增加计算量的前提下实现了对每个子模

块电压的控制,减小了电容电压的波动范围。同时引入电压排序算法大幅度减小了传统 MPC 的计算量。通过在 Matlab/Simulink 里搭建五电平 MMC-HVDC 仿真模型,验证了该控制策略的有效性。

1 MMC-HVDC 系统结构

图 1 为 MMC-HVDC 系统的单线图,该系统由两端换流站以及直流线路构成,送端和受端换流站均采用 MMC 拓扑,记为 MMC₁ 和 MMC₂,如图 1 所示。两个 MMC 分别通过三相变压器与交流系统相连。图 2 为 MMC 的主电路拓扑图,每个桥臂都由 n 个相同的子模块和一个换流电抗器串联而成,电阻 R_p 与直流母线并联,用于模拟系统总的开关损耗。MMC 的交流输出端与降压后的交流电网相连,串联的电阻 R 和电感 L 用来模拟实际线路的阻抗。MMC 每个子模块为一个单相半桥结构,包含有一个 IGBT 半桥和直流储能电容,通过控制子模块中开关管 T_1 与 T_2 的通断,可以使其交流端口输出电压在 0 、 v_c 两个电平变换。当各桥臂串联的子模块数为 n 时,MMC 可以实现 $n+1$ 电平波形的输出。为了保证直流侧电压的稳定性,每一时刻各相上下桥臂投入的子模块数之和都为 n ,如果以 $n_{upj}(j=a,b,c)$ 表示各相上桥臂子模块投入数, $n_{lowj}(j=a,b,c)$ 表示各相下桥臂子模块投入数,可以得到如式(1)关系式。

$$\begin{cases} n = n_{upj} + n_{lowj} \\ v_{vj} = \frac{n_{lowj} - n_{upj}}{2n} V_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{dc} 为直流母线电压; $v_{vj}(j=a,b,c)$ 为 MMC 交流端输出电压。

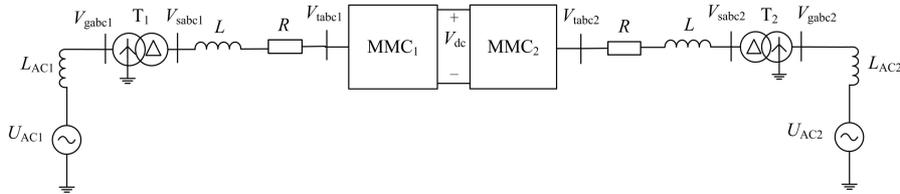


图 1 MMC-HVDC 系统单线图

Fig. 1 Single line diagram of MMC-HVDC system

2 MMC-HVDC 系统数学模型

在 MMC-HVDC 系统中,两个换流站的结构完全相同,为了避免公式推导的重复性,文中以下标 $k=1,2$ 分别表示换流站 MMC₁ 和 MMC₂。

2.1 交流侧数学模型

假定 MMC 的上下桥臂对称,文献[20]指出三相 MMC 的环流包含有可控和不可控两部分,由此可以得到桥臂电流为

$$\begin{cases} i_{upjk} = \frac{i_{jk}}{2} + \frac{i_{dck}}{3} + i_{zjk} \\ i_{lowjk} = -\frac{i_{jk}}{2} + \frac{i_{dck}}{3} + i_{zjk} \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{jk} 为 MMC 的相电流; i_{upjk} 为上桥臂电流; i_{lowjk} 为下桥臂电流; i_{dck} 为直流侧电流, $i_{dck}/3$ 即为各相桥臂中环流不可控部分,它只与系统传输功率有关; i_{zjk} 为环流的可控部分分量, j 为 a,b,c , k 为 $1,2$ 。

由图 2 可得 MMC 输出电压 v_{vj} 与上下桥臂输出

电压和降压后的电网电压 v_{sjk} 的关系为

$$\begin{cases} \frac{V_{dc}}{2} - v_{upjk} = l \frac{di_{upjk}}{dt} + v_{tjk} \\ \frac{V_{dc}}{2} - v_{lowjk} = l \frac{di_{lowjk}}{dt} - v_{tjk} \\ v_{tjk} = Ri_{jk} + L \frac{di_{jk}}{dt} + v_{sjk} \end{cases} \quad (3)$$

式中, v_{upjk} 和 v_{lowjk} 分别为上桥臂和下桥臂电压。

由式(2)可得环流和相电流的表达式为

$$i_{zjk} = \frac{1}{2}(i_{upjk} + i_{lowjk}) - \frac{i_{dc}}{3} \quad (4)$$

$$i_{jk} = i_{upjk} - i_{lowjk} \quad (5)$$

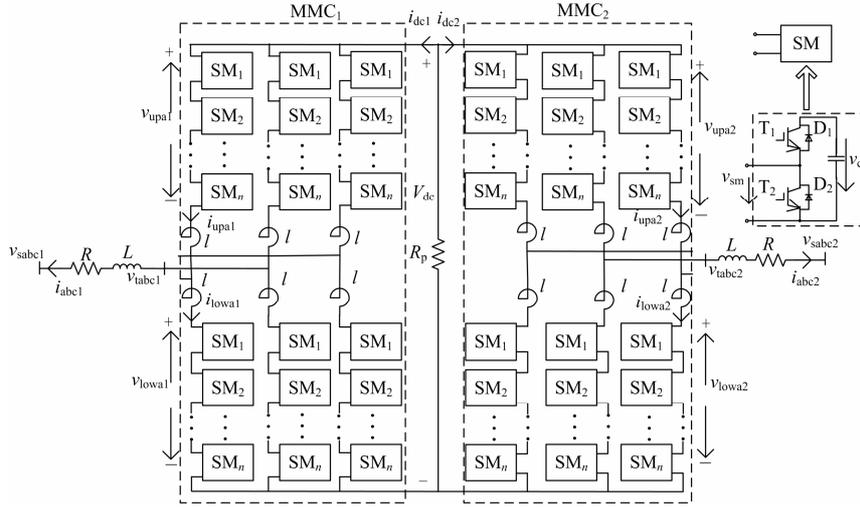


图2 MMC-HVDC 系统拓扑电路图

Fig. 2 Circuit diagram of MMC-HVDC system

联合式(3)、式(4)和式(5)可得, 相电流与桥臂电压、电网电压的关系, 可控环流与桥臂电压关系如式(6)、式(7)所示。

$$v_{lowjk} - v_{upjk} = l \frac{di_{jk}}{dt} + 2Ri_{jk} + 2L \frac{di_{jk}}{dt} + 2v_{sjk} \quad (6)$$

$$l \frac{di_{zjk}}{dt} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{v_{upjk} + v_{lowjk}}{2} \quad (7)$$

2.2 子模块及桥臂数学模型

对于投入的子模块, 其电容电压为

$$C \frac{dv_{cijik}}{dt} = i_{cijik} \quad (8)$$

式中: v_{cijik} 为子模块电容电压 ($i = 1, 2, \dots, 2n$); 若是上桥臂中的子模块, 则 $i_{cijik} = i_{upjk}$, 如是下桥臂中的子模块, 则 $i_{cijik} = i_{lowjk}$ 。

2.3 直流侧数学模型

MMC-HVDC 系统中, 控制的主要目标在于实现有功、无功功率的控制和直流母线电压的稳定。直流母线电压的动态特性如式(9)所示。

$$C_{eq} \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{R_p} V_{dc} - (i_{dc1} + i_{dc2}) \quad (9)$$

其中: $C_{eq} = 6C/n$; i_{dc1} 与 i_{dc2} 分别为 MMC₁ 与 MMC₂ 的直流电流。

在忽略损耗的情况下, 直流侧的功率与 MMC 交流侧输出有功功率相等, 由此得

$$V_{dc} i_{dc} = \frac{3}{2} (v_{tdk} i_{dk} + v_{tqk} i_{qk}) \quad (10)$$

式中: v_{tdk} 与 v_{tqk} 分别为 MMC 在两相同步 dq 坐标系下 dq 轴上的输出电压; i_{dk} 与 i_{qk} 分别为 MMC 在 dq 坐标系下的电流。

由式(9)、式(10)可得

$$C_{eq} \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{R_p} V_{dc} - \frac{3}{2V_{dc}} [(v_{td1} i_{d1} + v_{tq1} i_{q1}) + (v_{td2} i_{d2} + v_{tq2} i_{q2})] \quad (11)$$

交流电网侧的瞬时功率如式(12)所示。

$$\begin{cases} P_k = \frac{3}{2} v_{sdk} i_{dk} \\ Q_k = -\frac{3}{2} v_{sdk} i_{qk} \end{cases} \quad (12)$$

忽略 MMC 输出端与电网之间的有功损耗, 式(11)可简化为

$$C_{eq} \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{R_p} V_{dc} - \frac{3}{2V_{dc}} (v_{sd1} i_{d1} + v_{sd2} i_{d2}) \quad (13)$$

3 改进的模型预测控制

由上面的讨论可知, 通过控制上下桥臂投入的子模块即可控制相电流、环流和子模块的电容电压。换句话说, 只要选取合适的开关状态, 即能达到 MMC 的控制目标。在每一时刻, 每相上下桥臂投入的子模块数总和为 n , 可能的开关状态数即为 $N = C_{2n}^n$ 。定义一个性能指标函数用于评估系统性能与期望之间的差距, 在可能的开关状态里, 总存在一个最佳的开关状态使得性能指标函数值最小及系统性能最优, 这就是模型预测控制的基本思想。对于模型预测控制来说, 最关键的在于预测模型的选取。理论上任何具有预测功能可以反映系统特性的模型均可作为它的预测模型。本文选取离散化后的上述相关数学模型作为控制目标的预测模型, 离散化方法选择向后差分法。

3.1 交流侧相电流控制

假定系统采样周期为 T_s , 由式(6)可得相电流 $k+1$ 时刻的预测模型为

$$i_{jkm}(k+1) = \frac{1}{\beta} (v_{lowjk}(k+1) - v_{upjk}(k+1) - 2v_{sjk}(k+1) + \alpha i_{jk}(k)) \quad (14)$$

式中: $\alpha = (2L+l)/T_s$; $\beta = 2R + \alpha$; $v_{lowjk}(k+1)$ 与 $v_{upjk}(k+1)$ 分别为上下桥臂输出的预测值; $v_{sjk}(k+1)$ 为电网电压预测值, 当采样周期足够小时, 可近似认为 $v_{sjk}(k+1) = v_{sjk}(k)$; $i_{jkm}(k+1)$ 为相电流下一时刻预测值。

为克服实际中存在的非线性和模型失配等因素对模型预测的影响, 引入反馈校正机制对模型预测值进行修正, 得到如式(15)所示关系。

$$i_{jkp}(k+1) = i_{jkm}(k+1) + \mu_i (i_{jk}(k) - i_{jkm}(k)) \quad (15)$$

式中: μ_i 为相电流误差项权重因子, 可以根据实际中预测模型的准确程度进行恰当选取; $i_{jk}(k)$ 为相电流实测值; $i_{jkp}(k+1)$ 为相电流修正后预测值。

在控制中, 希望相电流能尽可能地接近其给定参考值, 其优化性能指标函数选取为

$$J_{jk} = q_{ik} (i_{jkref}(k+1) - i_{jkp}(k+1))^2 \quad (16)$$

式中: q_{ik} 为相电流权重因子, 它反映相电流控制在所有控制目标中对指标函数的贡献程度; $i_{jkref}(k+1)$ 为参考相电流超前一步预测值。

3.2 电容电压平衡控制策略

3.2.1 传统电容电压平衡控制

由式(8)得到电容电压的预测模型为

$$\begin{cases} v_{Cijkm}(k+1) = v_{Cijk}(k) + \frac{i_u(k+1)T_s}{C}, SM = 1 \\ v_{Cijkm}(k+1) = v_{Cijk}(k), SM = 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $SM=0,1$ 分别代表子模块的切除和投入; 对于上桥臂子模块 $i_u(k+1) = i_{upjk}(k+1)$, 对于下桥臂子模块 $i_u(k+1) = i_{lowjk}(k+1)$ 。

同样对电容电压预测值引入反馈校正, 得到

$$v_{Cijkp}(k+1) = v_{Cijkm}(k+1) + \mu_C (v_{Cijk}(k) - v_{Cijkm}(k)) \quad (18)$$

式中, μ_C 为电容电压预测值修正权重因子。

传统的模型预测控制将式(16)进行扩展以便将投入的子模块电容电压控制在其额定值 V_{dc}/n 。

$$J'_{jk} = J_{jk} + q_{Ck} \sum_{i=1}^n e_{ijk}^2 = J_{jk} + q_{Ck} \sum_{i=1}^n \left(v_{Cijkp}(k+1) - \frac{V_{dc}}{n} \right)^2 \quad (19)$$

但通过这种方法控制电容电压严重依赖于权重值 q_{Ck} 的选取, 不恰当的权重值会造成单个子模块电压波动范围过大。因此, 在控制中对单个子模块电容电压进行限定控制是有必要的。

3.2.2 改进的电容电压平衡控制

本文针对 MMC 的控制特点提出一种改进的模型预测控制方法用于电容电压的平衡。根据子模块电容充放电的基本原理, 本文在进行电容电压平衡控制时考虑桥臂电流的方向, 在电容电压额定值附近设定一组电压上限和下限, 对于超过此上限和下限的子模块进行处理后再对性能指标函数进行扩展, 具体思路如下。

1) 如果桥臂电流使子模块充电, 则下一次倾向于投入电容电压超过设定下限的子模块, 对于电容电压超过设定上限的子模块则不希望其投入, 因为模型预测控制下一次开关状态是由性能指标函数决定的, 所以这种情况下子模块预测电容电压与其额定值之间的误差可以表示为

$$\begin{cases} e_{ijk} = \lambda_{\min} \left(v_{Cijkp}(k+1) - \frac{V_{dc}}{n} \right), v_{Cijk}(k) < v_{\min} \\ e_{ijk} = \lambda_{\max} \left(v_{Cijkp}(k+1) - \frac{V_{dc}}{n} \right), v_{Cijk}(k) > v_{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中: λ_{\min} 为误差缩小因子, 取值小于 1, 它的作用是为了增大下一次投入该子模块的概率; λ_{\max} 为误差增大因子, 取值大于 1, 它的作用是增大下次切除该子模块的概率; v_{\min} 与 v_{\max} 分别为电压下限和上限值。

2) 如果桥臂电流使子模块放电, 则下次倾向于投入电容电压超过设定上限的子模块, 对于电容电压超过设定下限的子模块则不希望其投入, 同样得

到修正后的误差表达式如式(21)。

$$\begin{cases} e_{ijk} = \lambda_{\max} \left(v_{C_{ijk}}(k+1) - \frac{V_{dc}}{n} \right), v_{C_{ijk}}(k) < v_{\min} \\ e_{ijk} = \lambda_{\min} \left(v_{C_{ijk}}(k+1) - \frac{V_{dc}}{n} \right), v_{C_{ijk}}(k) > v_{\max} \end{cases} \quad (21)$$

通过引入误差增大缩小因子, 可以对电容电压超过限定值的模块进行处理以增大或减小相应子模块投切的概率, 达到对单个子模块的电容电压进行限定的目的, 增强了系统的可靠性。

3.3 环流的控制

由式(7)得到环流的预测模型为

$$i_{zjkm}(k+1) = \frac{T_s}{2l} (V_{dc} - v_{upjk}(k+1) - v_{lowjk}(k+1)) + i_{zjk}(k) \quad (22)$$

经过反馈校正后得到

$$i_{zjkp}(k+1) = i_{zjkm}(k+1) + \mu_{iz} (i_{zjk}(k) - i_{zjkm}(k)) \quad (23)$$

其中, μ_{iz} 为环流预测修正权重。

根据式(19)得到最终的性能指标函数为

$$J_{jk}'' = J_{jk}' + q_{zk} i_{zjkp}^2(k+1) \quad (24)$$

3.4 开关状态的优化选择

传统的 MPC 中考虑所有的开关状态, 并计算每一种开关状态下的性能指标函数, 取最理想的一种开关状态使得式(24)达到最小。MMC 可能的开关状态数为 $N = C_{2n}^n$, 本文以五电平 MMC 为例, 它可能的开关状态数为 70, 实际中要使控制效果越好, 采样周期必须足够小, 但是考虑到微控制器的性能, 要在一个较短的采样周期内完成 70 次计算是不现实的, 因此传统的 MPC 在 MMC 中的应用只具有理论价值。针对此问题, 本文以五电平 MMC 为例对其开关状态的选择进行改进, 以减小其计算量。

对于任意时刻确定的相电流, MMC 交流输出端的电压也是确定的, 则每一相上下桥臂各自投入的子模块数也是确定的, 由式(1)可以确定:

$$n_{dcal} = \frac{2nv_{jk}}{V_{dc}} \quad (25)$$

式中, n_{dcal} 为计算得到的上下桥臂投入子模块数之差。

MMC 输出电压的预测值可由式(3)得到

$$v_{yjk}(k+1) = \left(\frac{L}{T_s} + R \right) i_{yjk}(k+1) - \frac{L}{T_s} i_{yjk}(k) + v_{sijk}(k+1) \quad (26)$$

系统处于稳态时, 相电流完全跟随其指令值, 所以 i_{yjk} 可由其指令值代替进行计算。联合式(25)、式(26)即可得到上下桥臂投入子模块之差的计算

值。以五电平 MMC 为例, 实际上下桥臂模块数之差 n_d 只可能是 -4、-2、0、2、4 这五种情况, 若计算出来的 n_{dcal} 为一个小数, 则上下桥臂投入模块之差为与之相邻的两个数, 如 $n_{dcal}=1.5$, 则下一次上下桥臂投入模块数之差只可能为 0 和 2, 通过这种方式就去除了多余的开关状态。

但是只依靠上述方式, 每次采样周期中的计算量依然很大, 若 $-2 < n_{dcal} < 2$, 此时可能的开关状态数只减少为 $N = C_4^2 C_4^2 + C_4^1 C_4^3 = 52$ 。所以需要进一步对其开关状态选择进行优化。

通过电容电压平衡控制, 假定所有子模块电容电压基本相等, 那么确定了上下桥臂投入子模块数量后, 即认为投入任意的子模块对系统的影响都很小。当桥臂电流对电容充电时, 我们总倾向于投入电压较低的子模块, 而桥臂电流对电容放电时, 倾向于投入电压较高的子模块。由此确定了一个新的开关状态选择规则: 当桥臂电流为正时, 确保每个桥臂中电压最高的模块切除; 而桥臂电流为负时, 确保每个桥臂电压最低的模块切除。这样就减少了每个桥臂可以投入的子模块数, 最大可能开关状态数大大减少了, 仅为 $N = C_3^2 C_3^2 + C_3^1 C_3^3 = 12$ 。若极端情况下只进行子模块电容电压排序控制, 则对于任意电平数的 MMC, 其开关状态数减小为 2, 但此时环流的抑制能力被弱化了, 这也是现有的只进行电压排序控制算法存在的问题。通过 MPC 与电压排序相结合, 使环流得到了有效抑制, 同时相对于传统 MPC 的 $N=70$ 来说, 每个采样周期计算量大幅减小, 更利于实际工程实现。改进的模型预测控制的实现过程如图 3 所示。

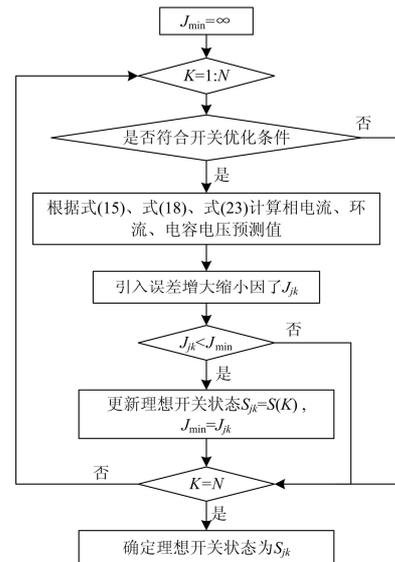


图 3 改进的 MMC 模型预测控制实现框图

Fig. 3 Implementation block diagram of the improved model predictive control for MMC

4 MMC-HVDC 系统直流侧控制

式(13)左右两边同时乘以 V_{dc} 得

$$\frac{d(\frac{1}{2}C_{eq}V_{dc}^2)}{dt} = -\frac{1}{R_p}V_{dc}^2 - \frac{3}{2}(v_{sd1}i_{d1} + v_{sd2}i_{d2}) \quad (27)$$

定义两个 MMC 的 d 轴参考电流为

$$\begin{cases} i_{dref1} = -i_{Pref1} + i_{dcref} \\ i_{dref2} = i_{Pref2} + i_{dcref} \end{cases} \quad (28)$$

式中: i_{Pref1} 与 i_{Pref2} 是跟系统传输的有功功率相关的电流, $i_{Prefk} = 2P_{ref}/3v_{sdk}(k=1,2)$; i_{dcref} 是一个用于调节直流母线电压的电流。

稳态时实际 d 轴电流跟随其指令值, 得

$$\begin{cases} i_{d1} = i_{dref1} \\ i_{d2} = i_{dref2} \end{cases} \quad (29)$$

由式(27)、式(28)、式(29)得

$$\frac{dV_{dc}^2}{dt} + \frac{2}{R_p C_{eq}} V_{dc}^2 = -\frac{3(v_{sd1} + v_{sd2})}{C_{eq}} i_{dcref} \quad (30)$$

由式(30)可得 i_{dcref} 到 V_{dc} 传递函数为

$$V_{dc}^2(s) = G(s)i_{dcref}(s) = -\frac{3R_p(v_{sd1} + v_{sd2})}{2 + R_p C_{eq}s} i_{dcref}(s) \quad (31)$$

i_{dcref} 可以由直流电压平方与其指令值平方的误差 $e = V_{dc}^2 - V_{dc}^2_{ref}$ 经过 PI 调节器得到, 根据表 1 所示的系统参数, 利用 Matlab SISO 工具箱可以得到合适的 PI 控制器参数, 本文中 $k_p = -1.36 \times 10^{-6}$, $k_i = -1.52 \times 10^{-7}$ 。

表 1 MMC-HVDC 系统参数

Table 1 Parameters of MMC-HVDC system

参数	数值
R/Ω	0.03
L/mH	15
l/mH	10
$R_p/k\Omega$	3.6
V_{dc}/kV	60
$T/\mu s$	100
$C/\mu F$	3 300
交流系统频率 f/Hz	50
交流电网幅值 kV	30

5 仿真实验

为了验证本文提出的 MMC-HVDC 系统模型预

测控制策略的正确性和有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建了五电平 MMC-HVDC 系统的仿真模型。系统参数如表 1 所示。子模块电容电压上限为 15.3 kV、下限为 14.7 kV、 $\lambda_{max}=3$ 、 $\lambda_{min}=0.4$ 。传统 MPC 与改进 MPC 中相应权重值均选择一致以确保本文提出的问题的可靠性。由于篇幅有限, 故只给出 MMC₁ 的仿真波形, 结果如图 4~图 6 所示。

5.1 单个子模块电容电压控制仿真结果

传统 MPC 未对子模块电压进行限制, 使单个子模块电压波动范围变大, 严重时可能影响系统的稳定性。系统传输的有功功率指令值为 30 MW 时, 该控制下 MMC₁ 中 A 相所有子模块的电容电压波动情况如图 4 所示。

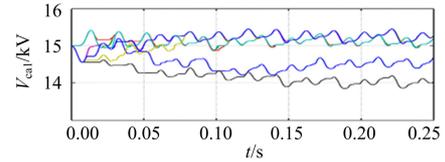


图 4 未控制单个子模块电容电压仿真波形

Fig. 4 Simulation waveform without the limitation of each sub-module capacitor voltage

图 5 为引入单个子模块电容电压限定控制后的仿真波形。由图 5 可以看出使用改进后的模型预测控制, 每个子模块电容电压都得到了控制, 波动范围也基本限定在设定的上下限间了。由图 4 和图 5 对比可知, 实际上针对 MMC 改进的模型预测控制增大了电容电压权重值选择的范围, 减小了对其依赖程度, 提高了系统的稳定性, 并且对单个子模块电压的控制基本没对其他控制目标造成影响。

5.2 进行开关状态优化的 MPC 仿真结果

图 6 为在改进的模型预测控制中进一步考虑开关优化选择的系统仿真波形。为了验证所提出的控制器的动态性能, 我们选择一个阶跃变化的有功功率参考值, 在 $t=0.2$ s 系统传输的有功功率指令值由 20 MW 跳变到 30 MW。由图 6 可以看出, 本文采用的模型预测控制器具有很好的动态性能。由仿真结果可知, 开关状态的优化选择没有对系统的控制造成太大的影响, 子模块电容电压波动范围进一步减小了, 但是三相间的环流相比未对开关优化时略微增长, 这是因为通过开关状态优化这种方式相当于增加了系统对电容电压控制和相电流控制的权重, 但是对系统影响并不大。相比之前, 在一个采样周期系统的计算量大大地减小了, 使改进的 MPC 更利于实际实现。

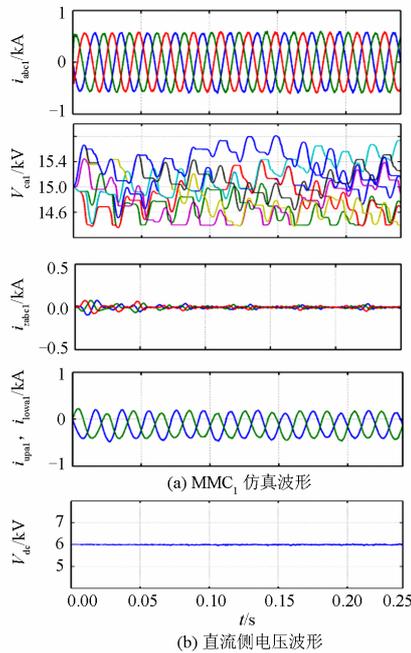


图5 MMC-HVDC 系统仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of MMC-HVDC system

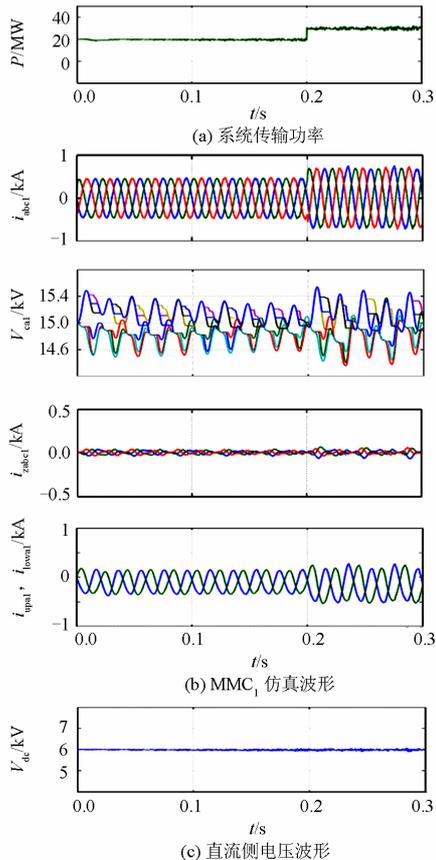


图6 开关状态选择优化后系统仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of the system with optimal switch state selection

6 结论

本文推导了 MMC-HVDC 系统的数学模型, 在此基础上提出了用于五电平 MMC-HVDC 系统的一种改进的模型预测方法。仿真结果表明所提出的控制策略具有如下特点:

1) 相比于传统 MPC 考虑了单个子模块电容电压的限定控制, 增加了系统运行的可靠性;

2) 相比 MMC 现有控制方法更加简单直接, 将各控制目标融合在一起, 控制系统设计简单;

3) 大幅减小了传统 MPC 的计算量, 使之更利于工程实现, 并保留了较好的环流抑制能力。

参考文献

- [1] SON G T, LEE H J, NAM T S, et al. Design and control of a modular multilevel HVDC converter with redundant power modules for noninterruptible energy transfer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(3): 1611-1619.
- [2] RASTOGI M, HAMMOND P W, SIMMS S R. Multi-level active filter for medium voltage applications[C] // Power Electronics and Drives Systems, 2005.
- [3] 朱劲松, 李磊. 基于模块化多电平换流器的 STATCOM 分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-117, 124.
ZHU Jin-song, LI Lei. Analysis and control of STATCOM based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 113-117, 124.
- [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 Peng-fei, JIANG Dao-zhuo, 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] 管敏渊, 徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 255-263.
GUAN Min-yuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.
- [6] 屠卿瑞, 徐政, 姚为正. 模块化多电平换流器型直流输电电平数选择研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 33-38, 44.
TU Qing-rui, XU Zheng, YAO Wei-zheng. Selecting number of voltage levels for modular multilevel converter based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 33-38, 44.
- [7] 张哲任, 徐政, 薛英林. MMC - HVDC 系统过电压保

- 护和绝缘配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 58-64.
ZHANG Zhe-ren, XU Zheng, XUE Ying-lin. Study of overvoltage protection and insulation coordination for MMC based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 58-64.
- [8] 丁冠军, 丁明, 汤广福, 等. 新型多电平 VSC 子模块电容参数与均压策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 1-6.
DING Guan-jun, DING Ming, TANG Guang-fu, et al. Submodule capacitance parameter and voltage balancing scheme of a new multilevel VSC modular[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 1-6.
- [9] 周月宾, 江道灼, 郭捷, 等. 模块化多电平换流器子模块电容电压波动与内部环流分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 8-14, 4.
ZHOU Yue-bin, JIANG Dao-zhuo, GUO Jie, et al. Analysis of sub-module capacitor voltage ripples and circulating currents in modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 8-14, 4.
- [10] 孙世贤, 田杰. 适合 MMC 型直流输电的灵活逼近调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 62-67, 18.
SUN Shi-xian, TIAN Jie. Flexible approach modulation strategy for HVDC based on modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 62-67, 18.
- [11] 王晓鹏, 杨晓峰, 范文宝, 等. 模块组合多电平变换器的脉冲调制方案对比[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 28-33.
WANG Xiao-peng, YANG Xiao-feng, FAN Wen-bao, et al. A comparative study of multi-pulse modulation schemes for modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 28-33.
- [12] PEREZ M, RODRIGUEZ J, PONTT J, et al. Power distribution in hybrid multi-cell converter with nearest level modulation[C] // Industrial Electronics, 2007.
- [13] 李强, 贺之渊, 汤广福, 等. 新型模块化多电平换流器空间矢量脉宽调制的通用算法[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 59-64.
LI Qiang, HE Zhi-yuan, TANG Guang-fu, et al. A generalized algorithm of space-vector PWM for a new type of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 59-64.
- [14] PERALTA J, SAAD H, DENNETIERE S, et al. Detailed and averaged models for a 401-level MMC HVDC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(3): 1501-1508.
- [15] XU Jian-zhong, ZHAO Cheng-yong, LIU Wen-jing, et al. Accelerated model of modular multilevel converters in PSCAD/EMTDC[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(1): 129-136.
- [16] LENNART A, ANTONOPOULOS A, SIEMASZKO D, et al. Open-loop control of modular multilevel converters using estimation of stored energy[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2011, 47(6): 2516-2524.
- [17] 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, 20(5): 15-20.
TU Qing-rui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 20(5): 15-20.
- [18] SIEMASZKO D, ANTONOPOULOS A, ILVES K, et al. Evaluation of control and modulation methods for modular multilevel converters[C] // Power Electronics Conference, 2010.
- [19] MESHRAM P M, BORGHATE V B. A novel voltage balancing method applied to direct control strategy of MMC-HVDC system[C] // Advances in Engineering, Science and Management, 2012.
- [20] 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, 178.
YANG Xiao-feng, ZHENG Qiong-lin. A novel universal circulating current suppressing strategy based on the MMC circulating current model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(18): 59-65, 178.
- [21] TU Qing-rui, ZHENG Xu, JING Zhang. Circulating current suppressing controller in modular multilevel converter[C] // 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electron. Phoenix, USA, 2010.
- [22] 杨晓峰, 王晓鹏, 范文宝, 等. 模块组合多电平变换器的环流模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 21-27.
YANG Xiao-feng, WANG Xiao-peng, FAN Wen-bao, et al. Circulating current model of modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 21-27.
- [23] QIN Jiang-chao, MARYAM S. Predictive control of a modular multilevel converter for a back-to-back HVDC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(3): 1538-1547.

收稿日期: 2013-11-18

作者简介:

朱玲(1990-), 女, 工学硕士, 研究方向为电力系统安全稳定与控制及柔性直流输电; E-mail: zhulingepri@126.com

符晓巍(1989-), 男, 工学硕士, 研究方向为微电网、并网逆变器控制与电力电子数字控制;

胡晓波(1981-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源发电、柔性直流输电的仿真建模与应用分析。