

[文章编号] 1003-4684(2023)02-0017-05

# 基于模型预测的 MMC 容错控制策略研究

汪 健, 余 瑜, 杨文康

(湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 子模块故障是模块化多电平换流器主要的故障类型,提出了一种模型预测容错控制策略,无需设置冗余子模块,故障后只需切除故障子模块,通过基于模型预测控制的软件容错控制方法,在实现 MMC 输出相电流跟踪和子模块均压的同时,通过调整故障桥臂补偿电压来实现三相环流的抑制,仿真实验证明了所提模型预测容错控制策略的有效性。

[关键词] 模型预测控制; 子模块故障; 容错控制; 环流抑制

[中图分类号] TM461 [文献标识码] A

模块化多电平换流器因其模块化设计,在高压柔性直流输电领域有广泛的应用<sup>[1]</sup>,但由于其特殊的拓扑结构,实际工程中上百个子模块串联连接,一旦有子模块发生故障将会对 MMC(modular multi-level converter)的正常运行造成影响<sup>[2-4]</sup>,实际工程中往往会配备热备用子模块,热备用子模块即正常运行时参与系统的投切,其根据故障时切除子模块数量的不同可分为桥臂对称运行和桥臂不对称运行。桥臂对称运行即当桥臂中有子模块发生故障时,不仅切除故障桥臂的故障子模块,并且切除所有桥臂对应数量的正常运行的子模块,这种方式可以保证桥臂对称运行,但是切除了其他桥臂正常运行的子模块,造成了硬件资源的浪费并且降低了 MMC 的输出功率和电压等级<sup>[5]</sup>。桥臂非对称运行方式只切除故障相的故障子模块,这种方式能够保证子模块的利用率,但是由于故障相与非故障相子模块投切数量不一样,会使桥臂处于不对称运行状态,造成负序二倍频环流增大,输出相电流畸变等问题<sup>[6]</sup>。文献[7]提出了一种基于 PI 控制的载波重构建的容错控制策略,故障前后需要对载波进行重新分配,控制过程比较复杂;文献[8]提出切除故障相上下相同的子模块故障个数并且采用 PR 控制器来达到环流成分不改变的目的,但需要整定 PR 参数;文献[9]基于平均开关状态模型分析了环流成分,并且提出了一种通用环流抑制器。文献[10]建立了环流电压数学模型,并且提出了桥臂不对称运行的重复控制策略,需要设计控制参数。

本文提出一种无冗余子模块模型预测容错控制

策略,使子模块之间互为冗余,控制方式采用模型预测控制,无需整定复杂的控制参数,采用分步的最优电平控制,无需设计权重因子,在子模块出现故障时,只需将故障桥臂的故障子模块切除,改变剩余子模块的电平参考值,就可以实现 MMC 子模块故障的无冗余容错控制,在保证控制效果的同时能够最大程度提高子模块的利用率,最后利用 MATLAB/Simulink 搭建了仿真系统,证明了该控制策略在 MMC 发生子模块故障时能够控制系统正常运行。

## 1 MMC 数学拓扑结构及其数学模型

MMC 的原理如图 1 所示,其由三相桥臂并联而成, $L_{arm}$ 为桥臂电感,能够限制环流, $R$ 和  $L$  分别为网侧等效电阻与等效电感, $U_{dc}$ 是直流侧电压源。

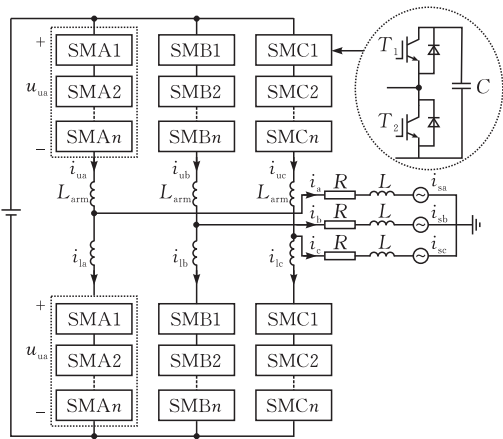


图 1 三相 MMC 拓扑结构

子模块内部结构见图 1,是由两个串联的开关管与一个电容并联组成,并且每个开关管反并联一

个二极管,正常工作模式有两种,当上管开通下管关断时,子模块输出为电容电压,当下管开通上管关断时,子模块输出电压为0。

由于 MMC 三相桥臂是对称结构,本文选取其中的一相为例来进行分析,MMC 的单相等效电路见图 2,各电流量可以表示为:

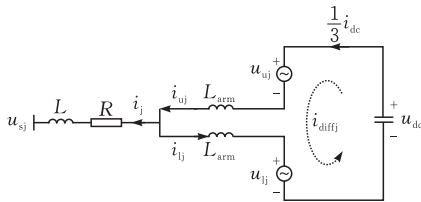


图 2 MMC 单相等效电路

$$i_{\text{diffj}} = \frac{i_{\text{lj}} + i_{\text{uj}}}{2}$$

$$i_j = i_{\text{uj}} - i_{\text{lj}}$$

$$i_{\text{zj}} = i_{\text{diffj}} - \frac{i_{\text{dc}}}{3}$$

其中  $i_{\text{uj}}$  是上桥臂电流,  $i_{\text{lj}}$  是下桥臂电流,  $i_j$  为换器输出相电流,  $i_{\text{dc}}$  是直流电流,  $i_{\text{diffj}}$  为内部电流, 由  $1/3 i_{\text{dc}}$  和三相环流  $i_{\text{zj}}$  组成,  $j$  为各相的相序  $a, b, c$ 。由基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律可得到如下方程:

$$\frac{U_{\text{dc}}}{2} - u_{\text{uj}} - u_{\text{sj}} - Ri_j = L_{\text{arm}} \frac{di_{\text{uj}}}{dt} + L \frac{di_j}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{U_{\text{dc}}}{2} - u_{\text{lj}} + u_{\text{sj}} + Ri_j = L_{\text{arm}} \frac{di_{\text{lj}}}{dt} - L \frac{di_j}{dt} \quad (2)$$

将式(1)和式(2)作差值与求和可以分别得到式(3)和式(4):

$$e_j = \frac{u_{\text{lj}} - u_{\text{uj}}}{2} = u_{\text{sj}} + Ri_j + \left( L + \frac{L_{\text{arm}}}{2} \right) \frac{di_j}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{U_{\text{dc}}}{2} - \frac{u_{\text{uj}} + u_{\text{lj}}}{2} = L_{\text{arm}} \frac{di_{\text{diffj}}}{dt} \quad (4)$$

其中  $e_j$  为换流器输出相电压,  $u_{\text{uj}}, u_{\text{lj}}$  分别为上下桥臂输出电压,  $u_{\text{sj}}$  为网侧电压,  $i_j$  为输出相电流, 式(3)是 MMC 的外部特性方程, 分析式(3)可知, 换流器输出相电流与上下桥臂电压之差有关; 式(4)是 MMC 的内部特性方程, 分析式(4)可知, 桥臂内部电流与直流电压跟上下桥臂电压之和的差有关。

## 2 交流电流容错控制

本文设计了一种逆向预测的控制方法。对公式(3)进行一阶向前差分可以得到:

$$e_j = u_{\text{sj}}(k) + Ri_{\text{sj}}(k) + \left( L + \frac{L_{\text{arm}}}{2} \right) \frac{(i_j(k+1) - i_j(k))}{T_s} \quad (5)$$

将式(3)中的相电流预测值  $i_j(k+1)$  用相电流参考  $i_j^*(k+1)$  值代替, 得到的  $e_k^*$  为最优输出相压。其中  $u_{\text{sj}}(k)$  为  $k$  时刻交流侧电压采样值,  $i_j(k)$

为  $k$  时刻输出相电流采样值,  $T_s$  为模型预测的采样周期。根据上下桥臂电压与输出相电压的关系, 再利用最近电平逼近, 可以得到上下桥臂需要投入子模块的个数, 记为  $N_{\text{uj}}, N_{\text{lj}}$ 。

$$N_{\text{uj}} = \text{round}\left(\frac{U_{\text{dc}} - 2e_j^*}{2u_c^*}\right) \quad (6)$$

$$N_{\text{lj}} = \text{round}\left(\frac{U_{\text{dc}} + 2e_j^*}{2u_c^*}\right) \quad (7)$$

其中  $u_c^*$  是正常运行时子模块电容电压参考值, 若此时某相上桥臂有  $N_{\text{err}}$  个子模块因为故障被切除, 为保持三相瞬时投入的电压与直流电压相等, 则此相上桥臂直流侧电压由  $N - N_{\text{err}}$  个子模块分担, 此相下桥臂子模块投切个数仍为  $N$  个不变, 即此时故障相上桥臂子模块电容电压的参考值为  $u_c^{\text{err}}$ , 其中:

$$u_c^{\text{err}} = \frac{U_{\text{dc}}}{N - N_{\text{err}}} \quad (8)$$

故障相下桥臂的子模块电压则保持不变。其中设  $u_{\text{cmax}}$  为子模块电压的额定值, 则每相桥臂能够最大的故障子模块数量

$$N_{\text{err}}^{\text{max}} = N - \text{floor}\left(\frac{U_{\text{dc}}}{u_{\text{cmax}}}\right)$$

为了保证输出相电流的控制, 上下桥臂需要投入子模块的个数为:

$$N_{\text{lj}} = \text{round}\left(\frac{U_{\text{dc}} + 2e_j^*}{2u_c^{\text{err}}}\right) \quad (9)$$

$$N_{\text{uj}} = \text{round}\left(\frac{U_{\text{dc}} - 2e_j^*}{2u_c^{\text{err}}}\right) \quad (10)$$

图 3 为模型预测交流电流容错控制流程图。

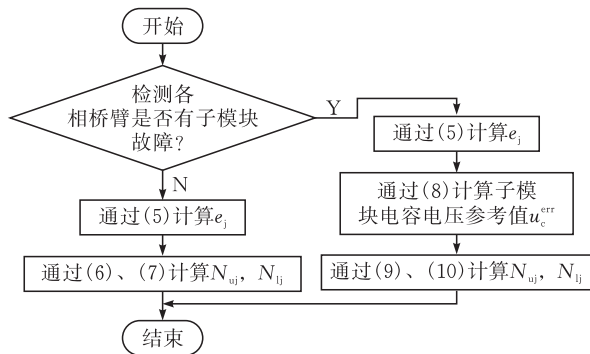


图 3 交流电流输出容错控制

## 3 环流抑制控制

公式(3)是 MMC 的外部输出特性, 输出相电流由上下桥臂电压之差决定, 公式(4)是 MMC 的内部特性, 内部电流由直流侧电压与上下桥臂电压之和的差值决定, 所以可以在保证上下桥臂电压之差不变的情况下, 减少上下桥臂电压之和与直流侧电压差的差值的方法来降低各相之间的环流。具体的做法是在上下桥臂补偿相同的电压, 使得直流侧与换流器电容电压之和的差最小。采用五电平电平补

偿,当桥臂没有子模块故障时,每个子模块的电压参考值为  $\frac{U_{dc}}{N}$ ,则补偿电压集

$$u_{diff} \supset \left\{ -\frac{2U_{dc}}{N}, -\frac{U_{dc}}{N}, 0, \frac{U_{dc}}{N}, \frac{2U_{dc}}{N} \right\} \tag{11}$$

当桥臂内有  $N_{err}$  个子模块发生故障时,此时故障桥臂相的子模块电容电压的参考值则为  $u_c^{err}$ ,则故障桥臂的补偿电压参考值

$$u_{diff} \supset \left\{ -\frac{2U_{dc}}{N - N_{err}}, -\frac{U_{dc}}{N - N_{err}}, 0, \frac{U_{dc}}{N - N_{err}}, \frac{2U_{dc}}{N - N_{err}} \right\} \tag{12}$$

非故障桥臂的补偿电压参考值不变。具体过程如下,对公式(4)采用一阶向前差分可以得到:

$$i_{diff}(k+1) = \frac{T_s}{2L_{arm}}(U_{dc} - u_{uj}(k+1) - u_{lj}(k+1) - 2u_{diff}) + i_{diff} \tag{13}$$

由于三相相间电流是由三分之一的直流电流与相间环流组成,为了尽可能的抑制环流,则三相相间内部电流的参考值  $i_{diff}^* = \frac{1}{3}i_{dc}$ 。构建环流抑制价值函数:

$$J = |i_{diff}^* - i_{diff}(k+1)| \tag{14}$$

通过滚动计算,可以得到  $J$  取最小所对应的补偿电压,通过环流抑制最优补偿电压计算出最优补偿电平,最优补偿电平数记为  $n_{diff}$ 。

$$n_{diff} = \frac{u_{diff}}{u_c} \tag{15}$$

其中  $u_c$  为子模块的额定电压,正常桥臂的额定电压为  $u_c^*$ ,故障桥臂的额定电压为  $u_c^{err}$ 。其环流抑制容错控制的流程见图 4。

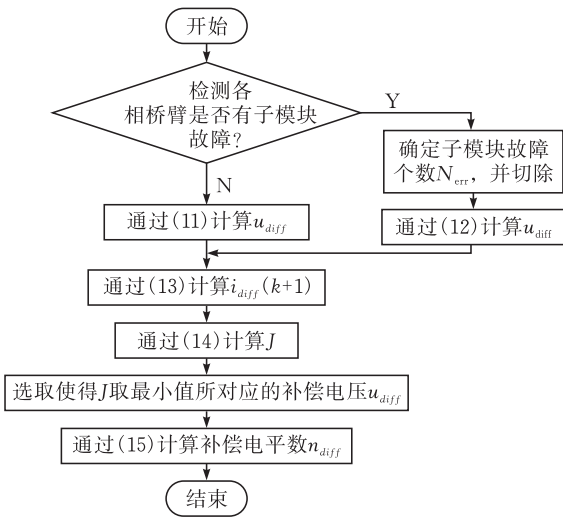


图 4 环流抑制容错控制流程图

4 仿真实验

为验证本文所提容错控制策略,在 MATLAB/Simulink 中搭建 41 电平仿真平台来验证随提

MMC 容错控制策略的有效性。仿真参数见表 1。

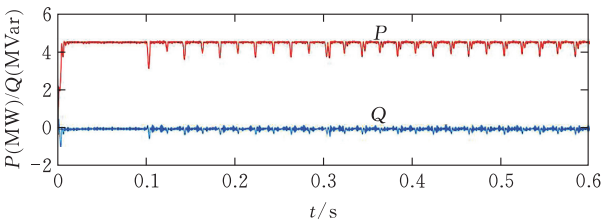
表 1 仿真系统参数

参数	数值
交流测电压/kV	10
直流侧电压/kV	20
采样周期/s	0.00002
系统频率/Hz	50
桥臂电感/mH	20
交流侧电感/mH	2
子模块电容值/μf	4700
单桥臂子模块个数/N	40

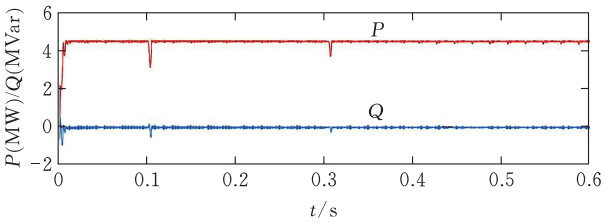
本文选取的外环控制方法是定有功功率  $P$  与无功功率  $Q$ ,通过功率方程和坐标  $T_{abc/dq}$  变换得到两相静止坐标系下的相电流的参考值,再经过坐标  $T_{dq/abc}$  变换,得到直角坐标系下的三相相电流参考值。

在子模块出现故障时,为了验证系统的输出表现,在  $t=0.1s$  时,  $b$  相上桥臂设置 5 个子模块出现故障,在  $t=0.3s$  时,  $a$  相下桥臂设置 3 个子模块出现故障,并且将故障子模块切除出主电路,但不投入容错控制策略。同时设置对比实验,在故障时刻投入本文提出的子模块故障模型预测容错控制策略。外环采用定有功功率  $P$  和定无功功率  $Q$  控制,给定有功功率  $P=4.5\text{ MW}$ ,无功功率  $Q=0\text{ MVar}$ 。

观察图 5a 可以看到,在出现子模块故障后,如果没有容错控制,系统的有功功率和无功功率会有很大的波动,观察图 5b 可以看到,系统的有功功率和无功功率只是在出现故障的时刻有一个抖动,在投入本文的容错控制策略之后,系统能够追踪给定的有功功率和无功功率。



(a)未投入容错控制下的功率响应曲线

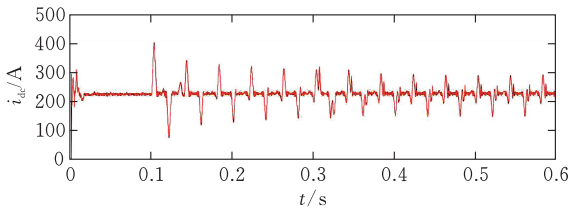


(b)投入容错控制下的功率响应曲线

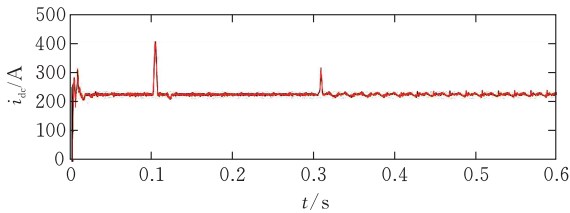
图 5 功率响应曲线对比

图 6 为直流电流对比图,图 6a 为未投入容错控制时系统的直流电流,可以观察到直流电流波动非

常大,对系统的冲击很大,换流器不能正常工作,图6b为容错控制下的直流电流,直流电流只是在出现故障时刻有一个较大的波动,其余情况波动很小。



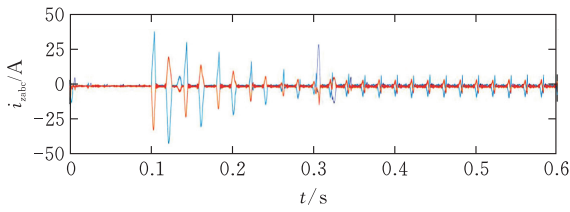
(a)未投入容错控制下的直流电流波形



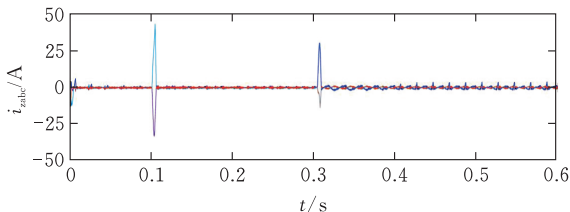
(b)容错控制下的直流电流波形

图6 直流电流曲线对比

根据图7a和图7b的对比,可以看到,在未投入容错控制时,三相环流的幅值很大,在投入了容错控制后,环流的幅值明显变低,并且只是在故障时刻环流有一个较大的波动。



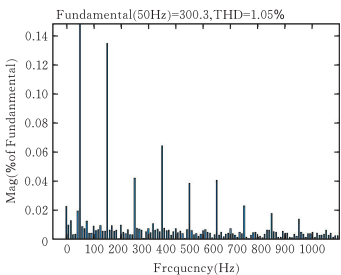
(a)投入容错控制下的三相环流



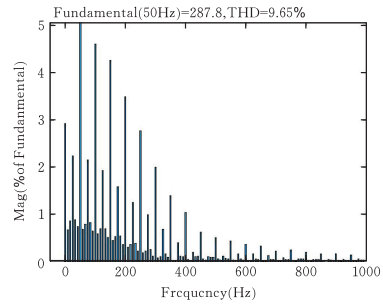
(b)容错控制下的三相环流

图7 三相环流对比

对比图8中三相交流电流的FFT分析可知,在未投入容错控制前,系统的三相输出交流电流的谐波畸变率很大,超出规定标准,在投入容错控制后,三相输出交流电流的谐波畸变率恢复正常。



(a)未投入容错控制下三相交流电流谐波畸变率



(b)容错控制下三相交流电流谐波畸变率

图8 三相交流交流电流FFT对比图

图9中的 $u_{cbup}$ 为**b**相上桥臂子模块电容电压值, $u_{cblo}$ 为**b**相下桥臂子模块电容电压值,在上桥臂出现5个子模块故障并切除后,通过模型预测容错控制策略,保证**b**相总的投入电压不变,**b**相上桥臂的子模块电压值维持在容错控制给定值571V附近上下波动,下桥臂电容电压不受影响,继续在给定值500V上下波动,在 $t=0.3$ s时刻,**a**相下桥臂出现子模块故障并切除主电路,**a**相的上桥臂电压继续工作在500V附近,下桥臂电压通过容错控制,使其稳定在540V附近波动。模型预测容错控制能够很好地控制故障相的子模块电压,使其在容错控制策略下的给定值上下波动。

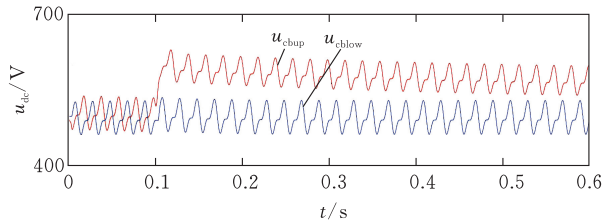


图9 b相电容电压

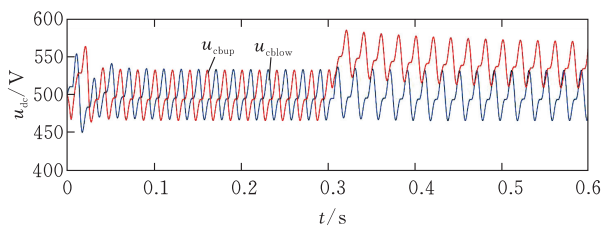


图10 a相电容电压

观察图11c相电容电压可知,通过模型预测容错控制策略,**c**相子模块电容电压不受故障相的影响,始终维持在500V附近波动。

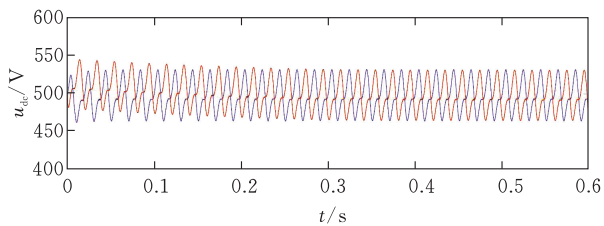


图11 c相电容电压



5 结 论

针对传统的子模块故障冗余控制策略需要设置冷备用子模块或热备用子模块,子模块利用率低等问题,本文提出了一种无冗余子模块模型预测容错控制策略,通过改变子模块电容电压的参考值,将故障子模块的能量由剩下的正常子模块平均分担,环流抑制控制中,通过改变故障桥臂补偿电压的方式,使得直流侧电压与换流器三相电容电压差值最小,来达到更好的环流抑制效果。通过实验仿真和分析,可以得到如下结论:

- 1)本文提出的无冗余子模块容错控制策略不需要设置冗余的冷备用或热备用子模块,并且在发生子模块故障时,只需要切除故障桥臂的故障子模块,其余桥臂的子模块数量不改变,最大限度地提高了子模块的利用率。
- 2)通过仿真实验可以证明本文提出的子模块模型预测容错控制策略不仅仅能够实现子模块故障后正常运行,并且能够保证故障前后,系统的运行效果没有明显差别。
- 3)本文提出的模型预测容错控制策略虽然能对子模块故障进行容错控制,并且不影响换流器的输出功率的大小和输出电流质量,但是在突变时刻,有功功率、无功功率、三相环流、直流电流都有一个很短时间的波动,如何减小波动是接下来要研究的问题。

[参 考 文 献]

[1] 郭春义,吴张曦,赵成勇.特高压混合级联直流输电系统中多 MMC 换流器间不平衡电流的均衡控制策略[J].中国电机工程学报,2020,40(20):6653-6663.

[2] 胡鹏飞,江道灼,周月宾,等.模块化多电平换流器子模块故障冗余容错控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(15):66-70.

[3] 管敏渊,徐政.模块化多电平换流器子模块故障特性和冗余保护[J].电力系统自动化,2011,35(16):94-99.

[4] 郝亮亮,张静,顾亚旗,等.基于桥臂能量预测的模块化多电平换流器子模块故障优化容错控制策略[J].电工技术学报,2018,33(16):3697-3706.

[5] 李可军,张正发,刘智杰,等,王卓迪.MMC 桥臂不对称运行特性分析及子模块故障下的控制策略[J].高电压技术,2016,42(10):3059-3067.

[6] 刘英培,杨海悦,梁海平,等.MMC-HVDC 系统冗余容错模型预测控制[J].电网技术,2017,41(08):2443-2454.

[7] 林周宏,刘崇茹,林雪华,等.基于载波移相调制的模块化多电平换流器冗余保护策略[J].电力系统自动化,2015,39(20):109-115

[8] 武文,吴学智,荆龙,等.模块化多电平变流器子模块故障容错控制策略[J].电网技术,2016,40(01):11-18.

[9] 吴学智,武文,荆龙,等.MMC 子模块故障运行特性分析与容错控制策略研究[J].高电压技术,2016,42(10):3083-3091.

[10] 李凯,赵争鸣,袁立强.模块化多电平变换器上、下桥臂不对称运行环流重复控制[J].电工技术学报,2016,31(20):122-129

MMC Fault Tolerant Control Based on Model Predictive Control

WANG Jian ,YU Yu ,YANG Wenkang

(School of Electrical and Electronic Engineering , Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068,China )

**Abstract:** Sub module failure is the main failure type of modular multilevel converter (modular multilevel converter MMC). A model predictive fault tolerant control strategy is proposed. There is no need to set up redundant su-modules. After failure, only the faulty sub-module needs to be removed. A software fault tolerant control method based on model predictive control. While realizing MMC output phase current tracking and sub-module voltage equalization, the three-phase circulating current is suppressed by adjusting the compensation voltage of the faulty bridge arm. Simulation experiments prove the proposed fault tolerant control strategy Effectiveness.

**Keywords:** Model predictive control; sub-module failure; fault tolerant control; circulation suppression

[责任编辑: 张岩芳]