

# 考虑系统损耗的 MMC 换流阀冗余配置策略

黄守道<sup>1</sup>, 王海宁<sup>1</sup>, 荣飞<sup>1</sup>, 饶宏<sup>2</sup>, 周保荣<sup>2</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 直流输电技术国家重点实验室, 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510620)

**摘要:** 模块化多电平换流阀具有扩展性强、响应速度快等优点, 现已成为柔性直流输电工程建设的首选。其可靠性关系到整个输电系统的安全运行, 而损耗特性则关系到输电系统的经济运行。为了提高柔性直流输电系统的可靠性, 对换流阀一般会设置一定的冗余度, 但过高的冗余度又会带来严重的损耗。基于以上考虑, 分析了冗余度与可靠性、损耗的关系, 推导了其数学解析表达式。然后, 提出了一种基于多目标优化的 MMC 换流阀冗余度优化配置方法, 使得柔性直流输电系统能兼顾可靠性和损耗。最后通过工程算例对所提出的方法进行了验证, 表明采用所提出的方法能提高柔性直流输电系统的综合性能。

**关键词:** MMC; 柔性直流输电; 可靠性; 损耗; 冗余度

## Redundant configuration strategy of MMC converter valve considering system loss

HUANG Shoudao<sup>1</sup>, WANG Haining<sup>1</sup>, RONG Fei<sup>1</sup>, RAO Hong<sup>2</sup>, ZHOU Baorong<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510620, China)

**Abstract:** Modular multi-level converter valve has the advantages of strong expansibility and fast response, etc., and has become the first choice for the construction of flexible HVDC transmission project. Its reliability is related to the safe operation of the whole transmission system, and the loss characteristic is related to the economic operation of the transmission system. In order to improve the reliability of flexible DC transmission system, the converter valve will generally set a certain degree of redundancy, but too high redundancy will bring serious losses. Based on the above considerations, this paper analyzes the relationship between redundancy and reliability and loss, and deduces its mathematical analytical expression. Then, a new optimization method of redundancy of MMC converter valve based on multi-objective optimization is proposed, which can make the HVDC system take into account the reliability and loss. Finally, the method proposed in this paper is verified by engineering examples, which shows that the proposed method can improve the comprehensive performance of the HVDC transmission system.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901001).

**Key words:** MMC; flexible DC transmission; reliability; loss; redundancy

## 0 引言

模块化多电平变流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 2002 年由德国慕尼黑联邦国防大学提出, 它不仅继承了传统级联 H 桥多电平变换器的模块化的优点, 还具有高度模块化、无均压问题等优点, 成为了柔性直流输电换流阀首选拓扑结构<sup>[1-2]</sup>。美国的“Trans Bay Cable Project”换流

器每个桥臂中有 216 个子模块(SM), 2013 年大连的柔性直流输电工程, 换流器每个桥臂有 420 个子模块。随着柔性直流输电电压等级的提高, 可以预计桥臂子模块数量也将变得越来越多<sup>[3]</sup>。在长期运行的情况下, SM 模块的故障是不可避免的。因此, 如何提高 MMC 换流阀运行的可靠性, 是 MMC 变流器亟待解决的难题之一<sup>[4-6]</sup>。为了提高其可靠性, 需要对 MMC 换流阀配置冗余子模块, 目前对冗余子模块的研究, 主要侧重于对 MMC 可靠性的考虑。

文献[4]提出了用于 MMC 冗余配置的 2 个工程

冗余参考值，并定义了冗余和可靠性指标，用于衡量不同冗余的可靠性效率。文献[7]综合考虑了子模块、换流器控制保护装置和阀冷系统的可靠性，定量分析了元件冗余度对 MMC 系统可靠性的影响。文献[8]从系统可靠性、冗余子模块有效利用率和冗余子模块数量出发，提出了 MMC 模块冗余优化配置方法。文献[9]综合考虑半导体器件有效利用率及 MMC 可靠性，通过求解三维曲面中的一阶差分，得到了有直流故障穿越能力的混合 MMC 子模块最优冗余配置。文献[10]基于故障树和  $k/n(G)$  模型，提出了可靠性的模型分析方法，计算了不同功率器件拓扑结构的可靠度，并利用可靠性贡献度的衡量指标，进行了冗余优化设计。文献[11]对混合结构的 MMC 子模块进行了可靠性建模，求得了具有一定故障穿越能力的各种拓扑子模块的最优配置。文献[12]对比了两种利用不同子模块拓扑的 MMC 系统的直流输电可靠性。

上述文献仅仅考虑了冗余度对系统可靠性的影响，而对兼顾 MMC 换流阀可靠性与损耗的分析未曾涉及。本文分析了冗余度与可靠性、损耗的关系，推导了其数学解析表达式，提出了一种基于多目标优化的 MMC 换流阀冗余度优化配置方法，使得柔性直流输电系统能兼顾可靠性和损耗。

### 1 MMC 拓扑结构及运行原理

经典的 MMC 拓扑如图 1 所示<sup>[13]</sup>。MMC 由 3 个相单元组成，各相分别由上下两个桥臂组成，每个桥臂均由  $N(1+\sigma)$  个子模块和一个桥臂电抗器  $L$  级联组成，三相完全电气对称。其中  $N$  为正常工作时的子模块数量， $\sigma$  为冗余度。

$$N = \frac{U_{dc}}{U_c} \quad (1)$$

式中： $U_{dc}$  为直流电压； $U_c$  为子模块电容电压平均值。

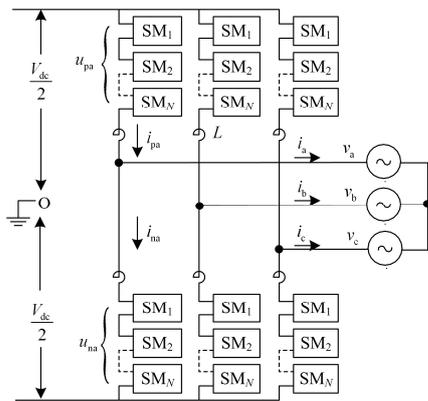


图 1 三相 MMC 拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of three-phase MMC

如图 2 所示，子模块 SM 由半桥结构的 IGBT 和直流电容  $C$  并联构成<sup>[14-16]</sup>，在正常情况下，子模块的 IGBT 处于互补的导通状态，当 IGBT1( $T_1$ )导通时，子模块处于投入状态，输出直流电容上的电压，并且桥臂电流对电容进行充放电，直流电压会产生波动。当 IGBT2( $T_2$ )导通时，子模块处于切出状态，此时输出电压为 0，电容处于悬浮状态，电容电压大小保持不变。图 1 中桥臂电感  $L$  的串入可以抑制稳态运行时相单元直流电压不平等所导致的桥臂间环流，也可以有效降低 MMC 内部或外部故障所带来的不良影响。

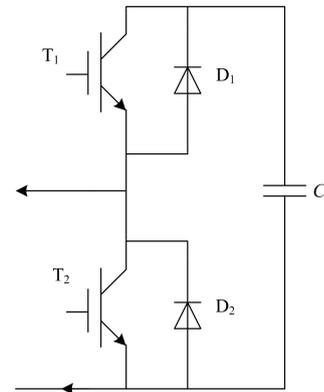


图 2 SM 子模块拓扑结构

Fig. 2 SM sub-module topology

模块由故障状态切换到冗余状态的速度和冗余模块投入系统中的运行状态，是冗余保护提高系统可靠性的关键。基于以上两点，当前普遍提出了三种不同的模块冗余保护方法：冷备用运行、热备用对称运行和热备用非对称运行。本文在同时考虑可靠性和损耗的前提下，针对热备用对称运行的工作状态，选择一种合适的冗余配置方法。这种方法把子模块从故障状态切换到冗余状态的时间比较短，也不会对系统内部的环流产生影响，非常有利于系统的稳定运行。

### 2 MMC 可靠性和损耗特性分析

随着电压等级的升高，功率模块数量将大幅提升，长期运行情况下，功率模块故障是不可避免的，为避免其影响系统的正常运行，需要加上冗余模块。当工作模块故障时，首先将其旁路，然后用冗余模块代替故障模块工作，保证系统安全、可靠运行。MMC 含有大量级联子模块，为保证系统具有足够的容错性，工程中一般选择在每桥臂串联一定个数的冗余模块，为系统留出足够的安全裕度，但是过多的冗余模块为换流阀安全裕度的提升带来的边际

效益较低, 模块资源没有得到最优化的配置。而且随着冗余子模块数量增多, 虽然系统的可靠性提高, 但成本也会提高, 且冗余子模块利用率较低, 不经济; 配置越少, 成本较低, 但是系统的可靠性得不到保障。同时冗余子模块也会引起 MMC 的损耗, 相应的子模块的数量越多, MMC 的损耗也将会越大, 因此, 合理、有效地加上冗余子模块数量十分重要。下面就子模块冗余时对 MMC 系统的可靠性和损耗特性分别进行分析。

## 2.1 MMC 可靠性分析

在经典的 MMC 拓扑中, 每个半桥子模块由 2 个 IGBT、2 个二极管和一个电容器组成, 其可靠性由所含的 IGBT、二极管和电容器的可靠性共同决定。假设系统中各元件处于正常工作状态, 则元件的寿命随时间  $t$  成指数分布, 每个元件的可靠度可表示为

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  为器件的故障率, 由此可得子模块 SM 的可靠度为

$$R_{SM}(t) = R_I^2(t) \times R_D^2(t) \times R_C(t) \quad (3)$$

式中,  $R_I(t)$ 、 $R_D(t)$ 、 $R_C(t)$  分别为 IGBT、二极管和电容器的可靠性函数, 由各元件的故障率代入式(2)计算可得。

MMC 系统是由众多的 SM 子模块构成的, 所以, MMC 系统的可靠性主要由 SM 的可靠性决定, 为了达到更好的说明效果, 本文对其他器件和附属设备的可靠性暂不考虑。在工程实际中, 出于对 MMC 系统可靠性的考虑, 在 MMC 的上下桥臂都配置有冗余的 SM 子模块, 如果有 SM 发生故障, 其他冗余子模块就会代替故障子模块继续维持 MMC 系统正常运行。根据实际情况, 在热备用对称运行的情况下, 可以得到 MMC 单个桥臂的可靠性为

$$R_M = \sum_{i=0}^{N\sigma} C_{N(1+\sigma)}^i (1 - R_{SM})^i R_{SM}^{N(1+\sigma)-i} \quad (4)$$

式中,  $i$  为桥臂中故障子模块数量。

由于之前假设 MMC 系统的可靠性  $R_{MMC}$  仅与单个子模块的可靠性  $R_{SM}$  有关, 其他器件和附属设备的可靠性暂不考虑, 可得 MMC 系统的可靠性  $R_{MMC}$  为

$$R_{MMC} = \left[ \sum_{i=0}^{N\sigma} C_{N(1+\sigma)}^i (1 - R_{SM})^i R_{SM}^{N(1+\sigma)-i} \right]^6 \quad (5)$$

## 2.2 MMC 换流阀损耗特性分析

MMC 换流阀的损耗主要包含两部分: 通态损耗和开关损耗<sup>[17]</sup>。

### 1) MMC 通态损耗计算

IGBT 和二极管的通态损耗可以表示为

$$\begin{cases} P_{Tcond}(i_{ce}) = i_{ce} V_{ce0} + i_{ce}^2 r_{ce} \\ P_{Dcond}(i_f) = i_f V_{f0} + i_f^2 r_f \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $V_{ce0}$ 、 $V_{f0}$  分别为 IGBT 和二极管的通态电压偏置;  $r_{ce}$ 、 $r_f$  分别为 IGBT 和二极管的通态电阻;  $i_{ce}$ 、 $i_f$  分别为 IGBT 和二极管导通期间流过器件的电流。

在理想的情况下, 由于三相电源的对称性以及桥臂之间上下的对称性, 所以理论上整个 MMC 的通态损耗可以按 a 相上桥臂的 6 倍来计算。

设在图 2 的电流参考方向下电流为正, 如果处于投入状态时, 则只有二极管  $D_1$  导通, 如果是切除状态, 则只有  $T_2$  导通, 在电流为负的情况投入时只有  $T_1$  导通, 切除时则只有二极管  $D_2$  导通, 上面的关系可用图 3 表示<sup>[18]</sup>。

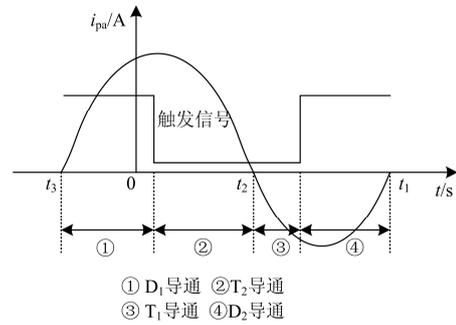


图 3 导通器件与桥臂电流以及触发信号的关系

Fig. 3 Relationship between the conduction device and the arm current and the trigger signal

当某个工作子模块发生故障时, 通过开关将其旁路后投入冗余模块, 代替其工作, 避免了系统停运, 提高了系统可靠性和工作效率。因为冗余的子模块处于旁路状态, 所以在  $t_3$  到  $t_2$  这段时间内  $i_{pa} > 0$ , 上桥臂将会投入  $n_{pa}$  个二极管  $D_1$ , 此时将会切除  $(N - n_{pa})$  个  $T_2$ , 由于剩下  $N\sigma$  个冗余子模块处于旁路状态, 故其不会产生损耗, 在  $t_2$  到  $t_1$  这段时间内  $i_{pa} < 0$ , 上桥臂将会投入  $n_{pa}$  个  $T_1$ , 此时将会有  $(N - n_{pa})$  个二极管  $D_2$  切除, 同样由于剩下  $N\sigma$  个冗余子模块处于旁路状态, 故其不会产生损耗。因此 a 相上桥臂的通态损耗表达式可按式(7)进行计算。

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \left\{ \int_{t_3}^{t_2} [n_{pa} P_{Dcond}(i_{pa}) + (N - n_{pa}) P_{Tcond}(i_{pa})] dt + \int_{t_2}^{t_1} [n_{pa} P_{Tcond}(-i_{pa}) + (N - n_{pa}) P_{Dcond}(-i_{pa})] dt \right\} \quad (7)$$

$$n_{pa} = U_{pa} / U_c \quad (8)$$

$$u_{pa} = \frac{U_{dc}}{2}(1 - m \cos \omega t) \quad (9)$$

$$i_{pa} = \frac{1}{2} I_a \cos(\omega t - \varphi) + \frac{m}{4} I_a \cos \varphi \quad (10)$$

$$\begin{cases} t_1 = (\pi + \varphi + \arccos \beta) / \omega \\ t_2 = (\pi + \varphi - \arccos \beta) / \omega \\ t_3 = (-\pi + \varphi + \arccos \beta) / \omega \end{cases} \quad (11)$$

式中： $T$ 为系统的控制周期； $n_{pa}$ 为每个时刻桥臂需要投入的子模块个数； $u_{pa}$ 、 $i_{pa}$ 分别为a相上桥臂电压和电流； $U_{pa}$ 为 $u_{pa}$ 幅值； $m$ 为调制比； $I_a$ 为交流侧接入电网电流幅值； $\varphi$ 为功率因数角； $\omega$ 是交流电压的基波角频率； $\beta = m \cos \varphi / 2$ 。

## 2) MMC 开关损耗计算

IGBT 的每一次开关动作都会产生开通能量损耗和关断能量损耗，影响 MMC 开关损耗的因素有两类，第一类为必要开关动作，是 MMC 在输出电压变化时，需要增加或减少子模块投入时的开关动作。

假设直流电流为正，则 MMC 的必要开关损耗可以使用下列式子进行估算<sup>[18]</sup>：

$$\begin{aligned} P_{nec} = & \frac{1}{T} \int_{t_1'}^{t_2'} \left\{ \rho \left[ E_{on}(-i_{pa}) + E_{rec}(-i_{pa}) \right] \right\} dt + \\ & \frac{1}{T} \int_{t_3'}^{t_4'} \left\{ \rho \left[ E_{off}(-i_{pa}) \right] \right\} dt + \\ & \frac{1}{T} \int_{t_4'}^{t_5'} \left\{ \rho \left[ E_{on}(i_{pa}) + E_{rec}(i_{pa}) \right] \right\} dt + \\ & \frac{1}{T} \int_{t_4'}^{t_5'} \left\{ \rho \left[ E_{off}(i_{pa}) \right] \right\} dt \\ & \begin{cases} E_{off} = a_1 + b_1 |i_{pa}| + c_1 i_{pa}^2 \\ E_{on} = a_2 + b_2 |i_{pa}| + c_2 i_{pa}^2 \\ E_{rec} = a_3 + b_3 |i_{pa}| + c_3 i_{pa}^2 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式中， $t_1', \dots, t_5'$ ，表示桥臂电流  $i_{pa}$  或者开关变化率  $\rho$  等于零的时刻，具体表达式为

$$\begin{cases} t_1' = \frac{\pi + \varphi + \arccos \beta}{\omega} \\ t_2' = \frac{\pi}{\omega} \\ t_3' = \frac{\pi + \varphi - \arccos \beta}{\omega} \\ t_4' = 0 \\ t_5' = \frac{-\pi + \varphi + \arccos \beta}{\omega} \end{cases} \quad (14)$$

$\rho$  为投入运行的子模块个数  $n$  的时间变化率

函数。

$$\rho = \frac{dn}{dt} = \frac{d\left(\frac{u_{pa}}{U_c}\right)}{dt} = \frac{U_{dc}}{2U_c} m \omega \sin \omega t \quad (15)$$

$a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为开关能量损耗的拟合系数，以 ABB Hipak<sup>TM</sup> IGBT 模块 5SNA1200E330100 为例，参数见表 1。

表 1 ABB Hipak<sup>TM</sup> IGBT 模块开关能量损耗拟合系数

Table 1 ABB Hipak <sup>TM</sup> IGBT module switching energy loss fit factor			
开关能量/mJ	$a$	$b$	$c$
$E_{off}(i=1)$	28.562	1.871 4	$-1.972 4 \times 10^{-4}$
$E_{on}(i=2)$	422.965	0.539 2	$5.495 3 \times 10^{-4}$
$E_{rec}(i=3)$	457.000	2.400 0	$-3.570 0 \times 10^{-4}$

另一类为附加开关动作，是由于电容电压平衡的需要，在投入子模块数量不变时，按均压的要求交换投入子模块时的开关动作。子模块在发生一次附加开关动作时，开关损耗情况分析如下。

如图 4 所示，当  $i_{pa} > 0$  时，开关过程由切出变投入状态时，器件的状态为二极管  $D_1$  导通， $T_2$  关断，此时会产生 IGBT 的关断损耗  $E_{off}$ 。

当  $i_{pa} < 0$  时，开关过程由切出变投入状态时，器件的状态为  $T_1$  导通，二极管  $D_2$  关断，此时会产生 IGBT 的开通损耗  $E_{on}$  以及二极管的反向恢复损耗  $E_{rec}$ 。

当  $i_{pa} > 0$  时，开关过程由投入变切出状态时，器件的状态为  $T_2$  导通，二极管  $D_1$  关断，此时会产生 IGBT 的开通损耗  $E_{on}$  以及二极管的反向恢复损耗  $E_{rec}$ 。

当  $i_{pa} < 0$  时，开关过程由投入变切出状态时，器件的状态为  $D_2$  导通， $T_1$  关断，此时会产生 IGBT 的关断损耗  $E_{off}$ 。

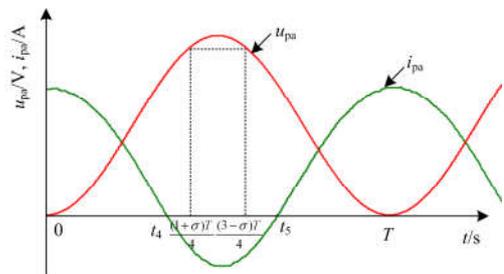


图 4 桥臂电流与调制波关系

Fig. 4 Relationship between bridge arm current and modulated

从上面的分析知道，在相同的桥臂电流方向下，切出变投入状态和投入变切出状态的子模块的开关损耗和为一次开通损耗、一次关断损耗及一次二极

管反向恢复损耗, 附加开关动作正好对应投入子模块和切出子模块的一次状态交换, 因此, 发生一次子模块状态的交换, 对应的损耗能量为

$$E = E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{rec}} \quad (16)$$

令  $n_{\text{add}}$  表示每个控制周期结束后, 子模块可能要动作的次数, 要动作的次数有多种情况, 最小为 0, 最大与调制波的值直接相关。

当投入的子模块个数  $n_{\text{pa}} < N(1+\sigma)/2$  时, 在一个控制周期内还剩下  $N(1+\sigma)-n_{\text{pa}}$  个子模块能进行交换, 因为  $n_{\text{pa}} < N(1+\sigma)-n_{\text{pa}}$ , 所以此时子模块的动作次数最大为  $2n_{\text{pa}}$ 。

当  $n_{\text{pa}} > N(1+\sigma)/2$  时, 在一个控制周期内还剩下  $N(1+\sigma)-n_{\text{pa}}$  个子模块能进行交换, 因为  $n_{\text{pa}} > N(1+\sigma)-n_{\text{pa}}$ , 所以此时子模块的动作次数最大为  $2[N(1+\sigma)-n_{\text{pa}}]$ 。

因此每个控制周期结束后, 子模块可能要动作的次数的最大值可以表示为<sup>[19]</sup>

$$n_{\text{add}} = \begin{cases} 2n_{\text{pa}}, & \text{round}\left(\frac{U_{\text{dc}} - e_a \cos(\omega t)}{U_c}\right) \leq \frac{N(1+\sigma)}{2} \\ 2[N(1+\sigma) - n_{\text{pa}}], & \text{round}\left(\frac{U_{\text{dc}} - e_a \cos(\omega t)}{U_c}\right) > \frac{N(1+\sigma)}{2} \end{cases} \quad (17)$$

运用面积等效法, 可知在一个工频周期内, 桥臂上子模块总的由均压控制引起的附加开关损耗可表示为

$$P_{\text{add}} \cong \frac{1}{T} \int_0^T \frac{n_{\text{add}} (a_4 i_{\text{pa}}^2 + b_4 |i_{\text{pa}}| + c_4) |i_{\text{pa}}|}{2C\Delta u} dt \quad (18)$$

$$\begin{cases} a_4 = a_1 + a_2 + a_3 \\ b_4 = b_1 + b_2 + b_3 \\ c_4 = c_1 + c_2 + c_3 \end{cases} \quad (19)$$

$$\Delta u = \frac{1}{C} \int_{kT}^{(k+1)T} |i_{\text{pa}}| dt \quad (20)$$

式中,  $\Delta u$  表示子模块电压偏差。

总损耗为通态损耗与开关损耗之和。

$$P_{\text{total}} = P_{\text{cond}} + P_{\text{nec}} + P_{\text{add}} \quad (21)$$

### 3 MMC 系统的最优冗余配置

前文已经对 MMC 系统的可靠性和损耗特性进行了分析, 根据实际工程经验可以发现, 要获得较高的可靠性, 则需要较高的冗余度, 但随着冗余度的提高, MMC 系统所产生的损耗必然增加, 如何提高可靠性并降低损耗, 从而选择合适的冗余度, 业内尚未有明确的认识。为解决这些问题, 本文提出了一种基于多目标优化的 MMC 模块冗余优化配

置方法。

考虑系统可靠性和损耗特性的多目标优化函数为

$$\begin{cases} R_M(n) = \min \left\{ - \left[ \sum_{i=0}^n C_{N+n}^i (1-R_{\text{SM}})^i R_{\text{SM}}^{N+n-i} \right]^6 \right\} \\ P_m(n) = \min(P_{\text{total}}) \end{cases} \quad (22)$$

为求解 2 个目标函数的共同最优结果, 可以把 2 个目标函数统一为一个共同的目标函数为

$$\begin{cases} F = \omega_1 R_M + \omega_2 P_m \\ \omega_1 = \frac{1}{R_M(n)} \\ \omega_2 = \frac{1}{P_m(n)} \end{cases} \quad (23)$$

在工程实际中, 也可根据实际情况对  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的值做适当调整, 但显然  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的值不同时, 目标函数值存在较大差异, 冗余度计算结果也会发生变化。

### 4 算例验证

上一节介绍了本文所提出的考虑系统损耗和可靠性的 MMC 换流阀冗余配置优化策略, 为了更为具体地介绍该方法的优越性, 本节将运用数学方法进行验证。

首先, 取额定传输容量为 10 MW 的 MMC 系统, 直流电压为 100 kV, 每个桥臂含若干额定电压为 1 kV 的子模块, 则不计冗余时, 根据系统的电压等级和子模块额定电压, 由式(1)得系统正常运行时投入的子模块数目  $N$  最少为 100, 令  $R_{\text{SM}}=0.96$ , 则由式(5)运用 Matlab 计算各冗余条件下 MMC 系统的可靠性, 随着冗余度的变化, 可得 MMC 的可靠性曲线如图 5 所示。

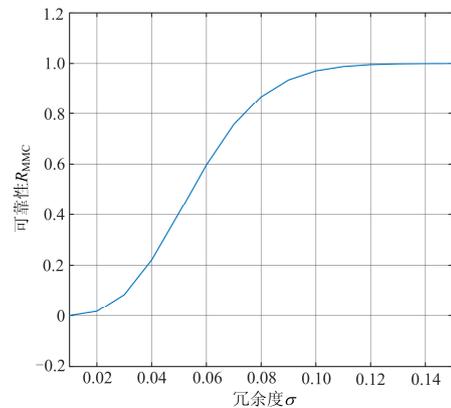


图 5 MMC 系统可靠性随冗余度变化的曲线

Fig. 5 Reliability of MMC system changing with redundancy

其次, 本文运用 Matlab 对 MMC 系统损耗进行了仿真计算, 设置仿真参数如表 2 所示。

表 2 MMC 系统损耗仿真参数设置

Table 2 MMC system loss simulation parameter settings

参数	数值
直流侧电压/V	100 000
额定频率/Hz	50
子模块额定工作电压/V	1 000
子模块电容C/ $\mu$ F	4 700
调制比 $m$	0.95
$\Delta u$	5
IGBT的通态偏置电压 $V_{CE0}/V$	1.480 7
IGBT的通态电阻 $r_{ce}/\Omega$	0.001 293 2
二极管的通态偏置电压 $V_{f0}/V$	1.317 3
二极管的通态电阻 $r_T/\Omega$	0.000 758 7

根据 MMC 系统损耗与冗余度关系的表达式 (21), 将仿真参数代入 Matlab 程序中运行, 可得 MMC 系统损耗与冗余度之间的关系曲线, 如图 6 所示。

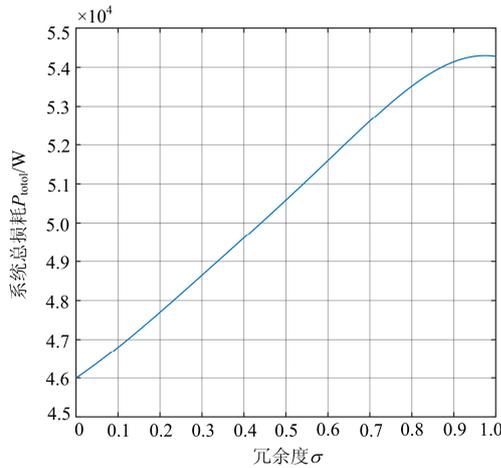


图 6 MMC 系统损耗随冗余度变化的曲线

Fig. 6 MMC system loss changing with redundancy

由上文分析可知, 随着系统子模块冗余度的增大, 系统的可靠性和损耗同时增大, 因此在工程实际中, 应兼顾可靠性和损耗来选取合适的冗余度, 以使可靠性足够高的同时损耗尽可能小, 而通过遗传算法进行两个目标函数的优化, 可以解决这个问题。本文通过遗传算法对系统的可靠性和系统的损耗同时进行了研究, 可以分别得出系统可靠性和损耗随冗余度变化的最值, 如图 7 和图 8 所示, 在遗传算法中运算结果默认取最小值, 其中适应度值表示目标函数值, 代数表示迭代的次数。

由式(23)综合考虑系统可靠性和损耗, 使系统

运行状况最优, 即共同的目标函数值最小时, 取  $\omega_1=1/0.85$ ,  $\omega_2=1/(4.6\times 10^4)$ , 利用遗传算法进行多目标优化, 得出结果如图 9 和图 10 所示, 在遗传算法中, 当前最佳个体为所得最优冗余, 变量个数为目标函数中自变量的个数。

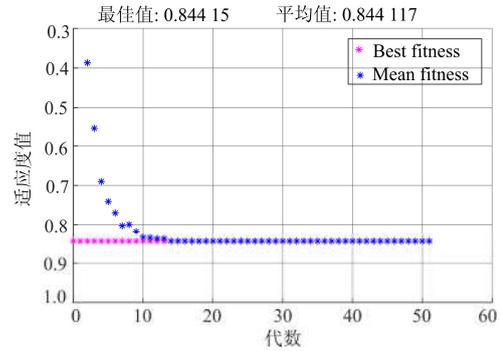


图 7 遗传算法所得 MMC 系统可靠性最大值

Fig. 7 Maximum reliability of MMC system based on genetic algorithm

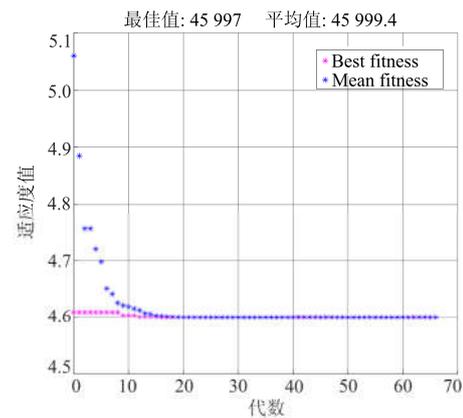


图 8 遗传算法所得 MMC 系统损耗最小值

Fig. 8 Minimum loss of MMC system by genetic algorithm

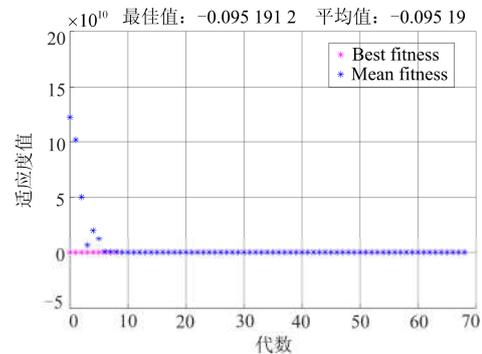


图 9 遗传算法所得目标函数最小值

Fig. 9 Minimum value of the objective function obtained by genetic algorithm

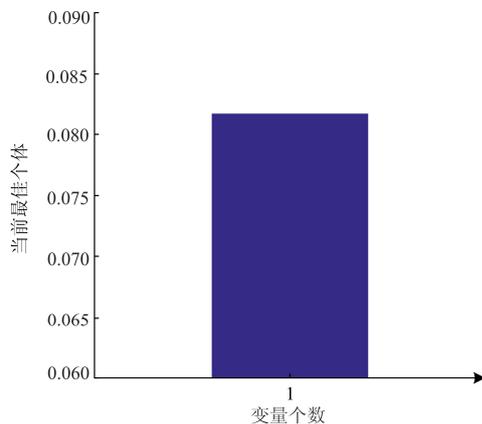


图 10 遗传算法所得 MMC 系统最优冗余配置  
Fig. 10 Optimal redundancy configuration of MMC system based on genetic algorithm

由以上运算结果可知, 当 MMC 系统子模块冗余度达到 8.2% 时, 目标函数  $F$  达到最小值, 即系统的运行效果最优。实际工程中, MMC 常设 6%~8% 的冗余子模块<sup>[20]</sup>, 此时, 本文在同时考虑 MMC 系统可靠性与损耗的情况下, 得出系统的最佳冗余度配置为 8.2%, 可见, 本文计算结果与实际情况较接近。

## 5 结论

本文从 MMC 系统的可靠性、损耗特性这两个目标出发, 通过遗传算法对两个目标函数同时进行最佳优化配置, 最终得出了在考虑系统可靠性并兼顾系统损耗的情况下, MMC 系统子模块的最优冗余配置, 为工程实际提供了参考, 具有一定的实用价值, 仿真结果验证了该方法的有效性和可行性。

## 参考文献

- [1] 赵文健. 模块化多电平变流器关键控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.  
ZHAO Wenjian. Research on key control technology of modular multilevel converter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [2] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究电力系统保护与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.  
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [3] 行登江, 吴金龙, 杨美娟, 等. 模块化多电平换流器多维度建模方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 108-115.  
XING Dengjiang, WU Jinlong, YANG Meijuan, et al. Study on multi-dimension model of modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 108-115.
- [4] 王朝亮, 赵成勇, 许建中. 模块化多电平换流器的子模块冗余配置计算方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 103-107.  
WANG Chaoliang, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. A method for calculating sub-module redundancy configurations in modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 103-107.
- [5] 孙晓云, 同向前, 高鑫. VSC-HVDC 系统中 IGBT 的开路故障特性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2541-2549.  
SUN Xiaoyun, TONG Xiangqian, GAO Xin. Analysis of IGBT open-circuit fault characteristic in VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2541-2549.
- [6] 孙晓云, 同向前, 尹军. VSC-HVDC 系统换流器故障仿真分析及诊断方法的研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1383-1390.  
SUN Xiaoyun, TONG Xiangqian, YIN Jun. Simulation analysis and diagnosis method research on the converter fault in VSC-HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1383-1390.
- [7] 王秀丽, 郭静丽, 庞辉, 等. 模块化多电平换流器的结构可靠性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1908-1914.  
WANG Xiuli, GUO Jingli, PANG Hui, et al. Structural reliability analysis of modular multi-level converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1908-1914.
- [8] 王宝安, 谭风雷, 商姣. 模块化多电平换流器模块冗余优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(1): 13-19.  
WANG Baoan, TAN Fenglei, SHANG Jiao. Optimal configuration of modular redundancy for MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1): 13-19.
- [9] 许建中, 赵鹏豪, 江伟, 等. 具备直流故障穿越能力的混合 MMC 可靠性分析和冗余配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 953-960.  
XU Jianzhong, ZHAO Penghao, JIANG Wei, et al. Reliability analysis and redundancy configuration of hybrid MMCs with DC fault blocking capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 953-960.
- [10] 朱晋, 韦统振, 霍群海. A2MC VSC-HVDC 系统可靠性分析与冗余度优化研究[J]. 电工技术学报, 2013,

- 28(增刊 2): 319-323.  
ZHU Jin, WEI Tongzhen, HUO Qunhai. Reliability model analysis and redundancy design of A2MC VSC-HVDC power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 319-323.
- [11] XU J, ZHAO P, ZHAO C. Reliability analysis and redundancy configuration of MMC with hybrid sub-module topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 2720-2729.
- [12] GUO J, WANG X, BIE Z, et al. Reliability modeling and evaluation of VSC-HVDC transmission systems[C] // IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2014: 1-5.
- [13] 蒋冠前, 李志勇, 杨慧霞, 等. 柔性直流输电系统拓扑结构研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 145-153.  
JIANG Guanqian, LI Zhiyong, YANG Huixia, et al. Research review on topological structure of flexible HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 145-153.
- [14] 代高富, 符金伟, 周胜, 等. 基于模型预测控制的 MMC-HVDC 系统控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 10-16.  
DAI Gaofu, FU Jinwei, ZHOU Sheng, et al. Study of control strategy for MMC-HVDC system based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 10-16.
- [15] TAO Fen, XIE Zhujun, CHENG Jie, et al. Fast valve power loss evaluation method for modular multi-level converter operating at high-frequency. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 26-36. DOI: 10.1186/s41601-016-0015-z.
- [16] Md Habibur Rahman, XU Lie, YAO Liangzhong. Protection of Large Partitioned MTDC Networks Using DC-DC Converters and Circuit Breakers. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 170-178. DOI: 10.1186/s41601-016-0030-0.
- [17] 饶宏, 李建国, 宋强, 等. 模块化多电平换流器直流输电系统损耗的计算方法及其损耗特性分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 101-106.  
RAO Hong, LI Jianguo, SONG Qiang, et al. Loss calculation method and characteristics analysis for MMC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 101-106.
- [18] 张哲任, 徐政, 薛英林. 基于分段解析公式的 MMC-HVDC 阀损耗计算方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 109-116.  
ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin. Topology of a hybrid HVDC transmission system for wind power grid connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 109-116.
- [19] 黄守道, 廖武, 高剑, 等. 基于改进均压算法的模块化多电平变流器开关频率分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 36-45.  
HUANG Shoudao, LIAO Wu, GAO Jian, et al. Switching frequency analysis of modular multilevel converter based on the improved capacitor voltage balancing algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 36-45.
- [20] HUANG S, LIAO W, LIU P, et al. Analysis and calculation on switching frequency and switching losses of modular multilevel converter with maximum sub-module capacitor voltage deviation[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(2): 188-197.

收稿日期: 2017-03-10; 修回日期: 2017-05-16

作者简介:

黄守道(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子传动装置及其控制、新能源发电;

王海宁(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流电网技术;

荣飞(1978—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子变流技术及新能源技术。E-mail: rf\_hunu@126.com

(编辑 魏小丽)