

# 柔性直流输电系统稳态功率运行区间研究

丁宇,潘本仁,周仕豪,黎鹏程,叶凯

(国网江西省电力有限公司电力科学研究院,江西南昌 330096)

**摘要:**明确柔直功率运行区间是进行柔直设计、制定运行方案的前提和基础。传统的MMC数学模型大多采用闭环方法,需迭代求解,且存在临界发散问题。对此,文中基于Park变换技术,构建了柔性直流输电单相电路数学模型,并采用逐点扫描法,在MATLAB平台上编写程序,求解柔直功率运行区间。通过综合考虑MMC容量、交流电流有效值约束、电压调制比约束条件,在PQ平面上得到柔性直流输电的稳态功率运行范围。研究表明,文中所用方法计算更为快速,换流器额定容量和额定交流电流有效值的减小会导致功率运行区间缩小,电压调制比主要影响柔直发出无功功率的能力。因此,提出提升换流器额定容量和额定交流电流有效值等策略,以有效扩大柔性直流输电系统的稳态功率运行区间。

**关键词:**柔性直流输电;模块化多电平换流器;功率运行区间;换流器建模

**中图分类号:**TM 721.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)02-0021-04

## 0 引言

柔性直流输电(voltage source converter, high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)在异步电网互联、海上风电送出等领域被广泛应用。因模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)具有控制灵活、输电高效等优势,柔性直流输电工程大多采用其作为换流器。

换流器负责实现电能频率转换和工频、直流电网间能量交互,是柔性直流输电系统的核心设备。确定MMC的功率运行区间,是柔性直流输电系统设计与运行策略规划的前提和基础,对明确换流器运行特性及优化主电路参数设计至关重要。目前,已有较多文献对MMC的功率运行区间进行了分析。文献[1]采用相量图法分析了MMC在不同电气约束条件下的功率运行范围;文献[2-3]则运用逐步扫描法,通过对换流器功率的逐点计算,界定了其功率运行区间;文献[4]探究了在不平衡电网条件下换流器的功率运行区间;文献[5-6]讨论了换流器在环流注入控制策略及环流抑制策略下的功率运行区间,但这种分析方法受限于特定的控制模式,实际应用中存在局限性;文献

[7]针对优化MMC的功率运行区间问题,考虑了电容电压波动的影响,并提出了通过调整子模块电容电压基准值及注入三倍频调制电压作为优化手段;文献[8]构建了换流器的稳态模型,借此分析了MMC桥臂环流与功率运行区间之间的关联。

传统的MMC数学模型大多采用闭环方法,需迭代求解,且存在临界发散问题。此外,已有的确定柔直功率运行区间方法大多局限于特定的控制方式,缺乏通用性。

对此,文中基于Park变换,对MMC的电气量进行dq分解,进而建立MMC显式数学模型,直观地展现MMC内部电气量耦合特征,使其更具通用性。在此基础上,考虑换流器容量约束、MMC交流电流有效值约束、电压调制比约束,推导换流器稳态功率运行区间。并根据功率运行区间求解流程图,在MATLAB中采用逐点扫描法编写程序,在PQ平面绘制MMC功率运行区间。

## 1 MMC电路结构及数学模型

### 1.1 MMC拓扑结构

单端柔性直流输电系统的单相等效电路图如图

收稿日期:2025-03-15

作者简介:丁宇(1999),女,硕士,工程师,研究方向为直流输电、继电保护及分频输电技术。

1所示,  $u_s$  为有源交流系统电压;  $i_s$  为交流系统电流,  $Z_s$  为交流系统戴维南等效阻抗,  $u_p$  表示柔直换流站交流母线电压;  $X_T$  表示换流站变压器电抗,  $u_v$ 、 $i_v$  分别表示 MMC 单相交流侧输入电压、电流;  $X_L$  为 MMC 桥臂电抗;  $u_M$  表示 MMC 上下桥臂电抗器虚拟等电位点电压;  $u_{dc}$  表示 MMC 输出直流电压;  $P_S+jQ_S$ 、 $P_P+jQ_P$ 、 $P_V+jQ_V$ 、 $P_M+jQ_M$  分别表示流向电压为  $u_s$ 、 $u_p$ 、 $u_v$ 、 $u_M$  处的功率。

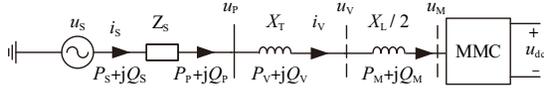


图1 柔性直流输电系统单相等效电路

MMC 的电路拓扑结构如图 2 所示。图中 a、b、c 表示工频交流电网侧三相端口;  $i_{pj}$ 、 $i_{nj}$  ( $j=a、b、c$ ) 分别为上、下桥臂电流;  $L$  为桥臂电感。每个桥臂由电感器(电感值为  $L$ ) 和  $n$  个子模块(SM)级联构成,通过对各桥臂上的子模块进行调制,可以使桥臂输出所需的电压,实现预定控制目标。

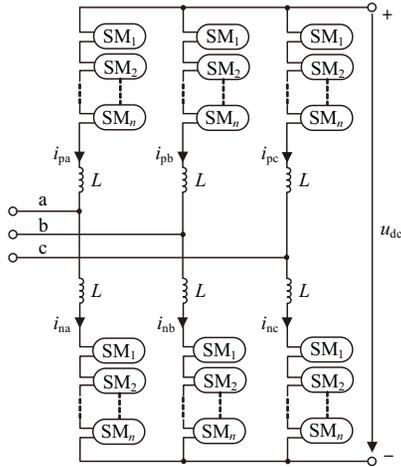


图2 MMC 拓扑结构

### 1.2 MMC 数学模型

假定从换流器 MMC 侧看交流系统为等效无穷大系统,即  $Z_s=0$ 。

在 abc 三相坐标系中, a、b、c 三相存在耦合关系,为了简化计算,通过 Park 变换将 abc 三相坐标系转换为 dq 坐标系。Park 变换公式为:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $x_a$ 、 $x_b$ 、 $x_c$  分别为正弦函数在 abc 坐标系下的 a 相、b 相、c 相分量;  $x_d$ 、 $x_q$ 、 $x_0$  分别为正弦函数经过 Park 变换后在 dq 坐标系下的 d 轴、q 轴、0 轴分量。

当交流系统处于三相平衡状态时, MMC 仅含正序分量;当交流系统三相不平衡时,由对称分量法分析可知,交流系统中同时存在正序、负序和零序分量,变压器选择合理的接线方式可隔离零序分量, MMC 中只含正序和负序分量。因此,在构建 MMC 数学模型时,只需考虑正序、负序分量。

MMC 交流侧输入电流  $i_v$  经过 Park 变换可表示为:

$$i_v = i_{vd} + j i_{vq} \quad (2)$$

根据基尔霍夫电压定律,可得 MMC 交流侧电压  $u_v$  为:

$$u_v = u_s - i_v(jX_T + Z_s) \quad (3)$$

代入式(2)-(3),  $Z_s=0$ , 可得 MMC 交流出口功率:

$$S_V^* = u_v i_v^* \quad (4)$$

$$P_V = 3u_s i_{vd} \quad (5)$$

$$Q_V = 3(-u_s i_{vq} - X_T i_{vd}^2 - X_T i_{vq}^2) \quad (6)$$

由式(5)-(6), 可得  $i_{vd}$ 、 $i_{vq}$  关于  $P_V$ 、 $Q_V$  的表达式:

$$i_{vd} = \frac{P_V}{3u_s} \quad (7)$$

$$i_{vq} = \frac{-u_s \pm \sqrt{u_s^2 - \frac{4X_T Q_V}{3} - \frac{4X_T^2 P_V^2}{9u_s^2}}}{2X_T} \quad (8)$$

由基尔霍夫电压定律,可得 MMC 上下桥臂电抗器虚拟等电位点电压  $u_M$  为:

$$u_M = u_s - i_v \left[ j \left( X_T + \frac{X_L}{2} \right) + Z_s \right] \quad (9)$$

代入式(2)、式(7)-(8), 可得  $u_M$  幅值  $u_{Mmax}$  为:

$$u_{Mmax} = \sqrt{u_s + \left( -u_s \pm \sqrt{u_s^2 - \frac{4X_T Q_V}{3} - \frac{4X_T^2 P_V^2}{9u_s^2}} \right) \left( X_T + \frac{X_L}{2} \right) / (2X_T)}^2 + \left[ \frac{P_V}{3u_s} \left( X_T + \frac{X_L}{2} \right) \right]^2 \quad (10)$$

电压调制比  $m$  为上下桥臂电抗器虚拟等电位点基波相电压幅值与 1/2 直流电压之比:

$$m = \frac{u_{Mmax}}{u_{dc}/2} \quad (11)$$

## 2 柔直稳态功率运行区间分析

为了确定柔性直流输电系统稳态功率运行区间,

采用逐点扫描法,在给定的 $(P, Q)$ 范围内,根据各个功率点处的稳态电压、电流等指标是否越过MMC的参数约束,来判断该功率点是否可行,所有可行功率点的集合即为柔直的功率运行区间。约束条件包括换流器容量约束、MMC交流电流有效值约束、电压调制比约束,具体如下。

### 2.1 柔直稳态功率运行区间约束条件

#### 1) 换流器容量约束

由于MMC中含有的桥臂电抗、子模块电容、二极管、IGBT等器件容量有限,MMC的输电容量应限制在额定范围内。换流器容量约束可表示为:

$$P_V^2 + Q_V^2 \leq S_{VN}^2 \quad (12)$$

式中: $S_{VN}$ 为换流器额定容量。

#### 2) MMC交流电流有效值约束

若MMC交流侧电流过大,可能引起电路过载、发热等问题,甚至会导致电路被烧毁,因此MMC交流侧电流应限制在额定范围内。MMC交流电流有效值约束可表示为:

$$\sqrt{(i_{Vd}^2 + i_{Vq}^2)} / 2 \leq i_{VN} \quad (13)$$

式中: $i_{VN}$ 为MMC额定交流电流有效值。

#### 3) 电压调制比约束

在柔性直流输电系统运行过程中,为了减小MMC输出电压、电流的谐波含量,电压调制比应限制在一定范围内。电压调制比约束可表示为:

$$m < m_{\max} \quad (14)$$

式中: $m_{\max}$ 表示电压调制比最大值。

### 2.2 柔直稳态功率运行区间求解

根据2.1节给定的约束条件,在MATLAB中运用逐点扫描法可求解柔直功率运行区间。功率运行区间求解流程图如图3所示,具体求解步骤如下:

1) 将MMC的 $P, Q$ 功率区域在一定范围内分成众多小区域,用小区域中的一个功率点 $(P_{v1}, Q_{v1})$ 代表该小区域,对各小区域进行遍历。

2) 根据式(12),代入 $(P_{v1}, Q_{v1})$ 功率点求解该点是否满足换流器容量约束。若在约束范围内,则判断该点满足换流器容量约束,进行下一步;否则,选取下一个功率点重新计算。

3) 根据式(13),判断该点是否满足交流电流有效值约束。若满足约束,则继续下一步;若不满足,则选取下一个功率点进行计算。

4) 根据式(14),代入 $(P_{v1}, Q_{v1})$ 功率点求解该点是否满足电压调制比约束。若符合约束,则判断该点满足电压调制比约束,进行下一步;否则,选取下一个功率点重新计算。

5) 判断柔直 $P, Q$ 功率区域是否完成遍历。若完成,则结束求解;若未完成,则继续选取功率点进行判断。

## 3 仿真验证

参考闽赣柔直工程参数对仿真测试系统、约束条件参数进行仿真验证,如表1所示。

根据表1参数及式(12)~(14),按照图3所示柔直功率运行区间求解步骤,在MATLAB中编写程序对柔直功率运行区间进行求解,可得柔直功率运行区间,如图4所示。

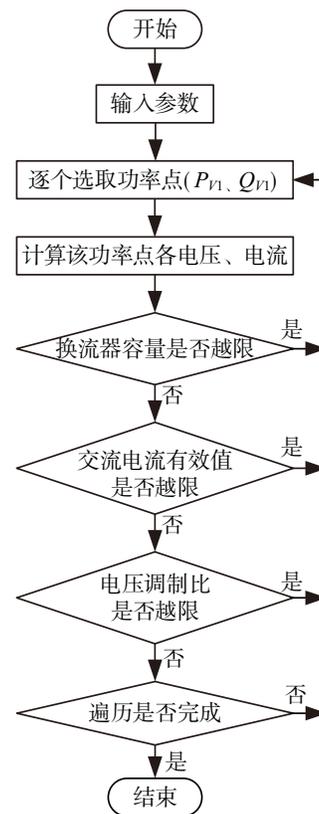


图3 柔直功率运行区间求解流程图

表1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
交流侧单相电压 $u_s$	289 kV	桥臂电抗 $X_L$	17 $\Omega$
直流电压 $u_{dc}$	$\pm 260$ kV	变压器电抗 $X_T$	49 $\Omega$
换流器额定容量 $S_{VN}$	567 MVA	MMC额定交流电流有效值 $i_{VN}$	0.62 kA
电压调制比最大值 $m_{\max}$	1		

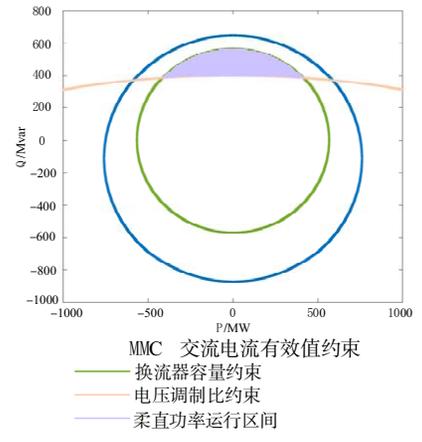


图4 柔直功率运行区间

观察图4可知,柔直功率运行区间为各约束的交集。

文献[9-10]中采用MMC闭环稳态模型,而文中所用MMC数学模型为开环模型。算例计算环境为Windows11下的MATLAB2024,处理器为13th Gen Intel(R) Core(TM) i9-13900H,主频为2.60 GHz,内存为32 GB。文中所提模型计算用时为2.56 s,文献[9-10]所提模型计算用时为101.79 s。

图5所示为MMC换流器额定容量在400 MVA、567 MVA、700 MVA时,在换流器容量约束下的柔直功率运行区间。随着MMC额定容量的减小,在换流器额定容量约束下的柔直功率运行区间呈现出越来越小的圆形。

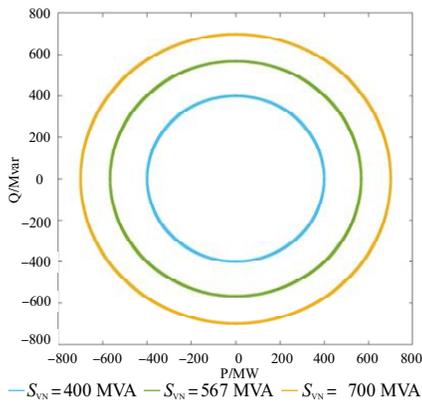


图5 不同额定换流器容量约束下的柔直功率运行区间

图6所示为MMC额定交流电流有效值分别为0.55 kA、0.62 kA、0.7 kA时,在交流电流有效值约束下的柔直功率运行区间。由图6可知,随着额定交流电流有效值的减小,在MMC交流电流有效值约束下的柔直功率运行区间近似于越来越小的椭圆。

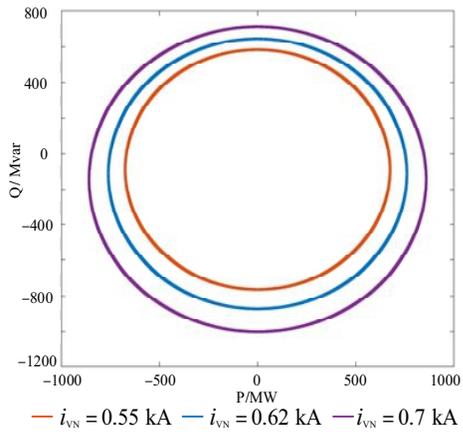


图6 不同额定交流电流有效值约束下的柔直功率运行区间

图7所示为电压调制比最大值为1时在电压调制比约束下的柔直功率运行区间。由图7可知,电压调制比最大值约束会影响柔直发出无功功率的能力。

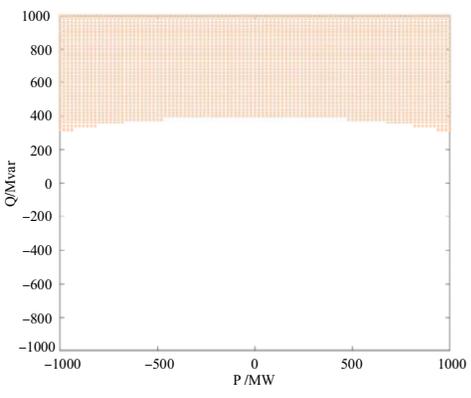


图7 电压调制比最大值  $m_{max}=1$  约束下的柔直功率运行区间

研究表明,随着换流器额定容量、额定交流电压有效值的增大,柔直功率运行区间也随之扩大。因此,可通过增大换流器额定容量、额定交流电流有效值等措施,扩大柔直功率运行区间。

5 结语

文中基于Park变换建立了柔性直流输电单相电路数学模型,采用逐点扫描法求解柔直功率运行区间,在MATLAB中编写程序,综合考虑换流器容量约束、MMC交流电流有效值约束、电压调制比约束,在PQ平面上求解出柔直稳态功率运行区间。传统的MMC数学模型大多采用闭环方法,需迭代求解,且存在临界发散问题,文中所用方法与闭环方法相比提升38.76倍计算速度。此外,已有的确定柔直功率运行区间方法大多局限于特定的控制方式,文中所用方法更具通用性。(下转第41页)

技术条件下,如出现汽流激振造成的机组振动时,一般首先采取的是改变机组进汽阀序的策略,当此措施难以取得满意的效果时,更多的机组只能采用减负荷、降参数的方法,这将严重影响机组的安全性和经济性。文中所述通过固液两相耦合作用,抑制汽轮机振动的方法和装置,将有效提高汽轮机转子运行的稳定性。随着机械加工精度的不断提高和材料科学的不断进步,这一着眼于提高汽轮机转子本身振动阻尼的技术方法也将会有非常广阔的应用前景。

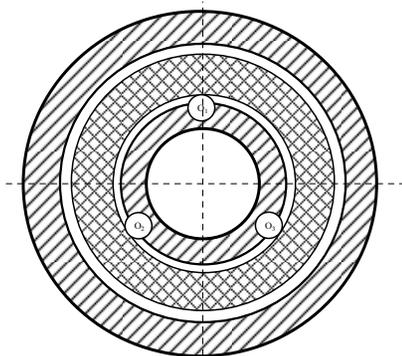


图7 凸轮旋出示意图

## 参考文献:

- [1] 袁惠群. 转子动力学基础[M]. 北京:冶金工业出版社,2014.
- [2] 寇胜利. 汽轮发电机组的振动及现场动平衡[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 施维新,石静波. 汽轮发电机组振动及事故(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,2017.
- [4] Keke Zhang(张可可),Xinhao Liao(廖新浩). 旋转流体理论与数值模拟——热对流、惯性流和进动流[M]. 李力刚,译. 北京:科学出版社,2020.
- [5] 蒋河川. 旋转超重力和非对称表面结构对热湍流的影响[M]. 北京:清华大学出版社,2023.
- [6] 孔珑,蔡国琰,薛海燕. 工程流体力学(第四版)[M]. 北京:中国电力出版社,2014.
- [7] 周衍柏. 理论力学教程(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,2018.
- [8] 陈秀宁,顾大强. 机械设计基础(第五版)[M]. 杭州:浙江大学出版社,2024.

(上接第24页)

研究发现,随着换流器额定容量、额定交流电流有效值的减小,在MMC容量约束、交流电流有效值约束下的柔直功率运行区间也减小;电压调制比约束主要影响柔直发出无功功率的能力。

## 参考文献:

- [1] 屠卿瑞,陈志光,曾耿晖,等. 模块化多电平换流器稳态功率运行范围的确定方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(10):131-137.
- [2] YUE C,HAO Q,WANG S. Operating area of modular multilevel converter station considering the constraint of internal dynamics[C]//2019 4th IEEE Workshop on the Electronic Grid.Xiamen,China:IEEE,2019:1-7.
- [3] 周保荣,李选平,杨健,等. 向无源电网供电的MMC-HVDC稳态运行区域分析[J]. 智慧电力,2020,48(6):98-104.
- [4] HAO Q,LI B,SUN Y, et al. Operating region and boundary control of modular multilevel converter station under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(3):1146-1157.
- [5] KIM H,KIM S,CHUNG Y, et al. Operating region of modular multilevel converter for HVDC with controlled second-order harmonic circulating current: elaborating P-Q capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2016,31(2):493-502.
- [6] 林环城,王志新. MMC功率运行区域分析及环流切换控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):31-37.
- [7] 孔明,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平HVDC输电系统功率运行区间的优化方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):45-52,192.
- [8] 丛佳琦,辛业春,周纯莹. MMC-HVDC功率运行区间的优化控制方法[J]. 电力电子技术,2018,52(2):4-6,20.
- [9] WANG J,LIANG J,GAO F, et al. A closed-loop time-domain analysis method for modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(10):7494-7508.
- [10] LIU Z,LI K,WANG J, et al. A general model of modular multilevel converter for analyzing the steady-state performance optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2021,68(2):925-937.