

柔性直流输电系统在低短路比下的功率运行区间控制方法

王帆¹,赵路新¹,路鹏程¹,连浩然¹,陈云辉²,范宏³,田书欣³,刘琳琳³

(1. 国网雄安新区供电公司, 河北 保定 071700; 2. 上海电力设计院有限公司, 上海 200025;
3. 上海电力大学, 上海 200090)

A Power Operation Interval Control Method for Flexible DC Transmission System under Low Short-Circuit Ratio

WANG Fan¹, ZHAO Luxin¹, LU Pengcheng¹, LIAN Haoran¹, CHEN Yunhui², FAN Hong³, TIAN Shuxin³, LIU Linlin³

(1. State Grid Xiong'an New Area Power Supply Company, Baoding 071700, Hebei, China; 2. Shanghai Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200025, China; 3. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

ABSTRACT: Thoroughly exploring the power operation interval control strategy of flexible DC transmission systems is crucial for improving the quality of power transmission and ensuring system stability. In this context, this paper proposes a power operation interval control method for flexible DC transmission system under low short-circuit ratio. Firstly, the power operation characteristics and influencing factors of the flexible DC system under the condition of low short-circuit ratio are analyzed, and the constraints that limit the steady-state operation area of the flexible DC transmission of the modular multilevel converter-high voltage direct current (MMC-HVDC) are determined. Secondly, based on these constraints, a theoretical calculation model of the power operation interval of the flexible DC transmission system under low short-circuit ratio is constructed, and the calculation program of the power operating range of the flexible system connected by the flexible DC system with low short-circuit ratio and the weak AC system is developed. Finally, the boundary of the steady-state operation region of MMC on the PQ plane is drawn by using the point-by-point scanning method and the implicit function plotting method in the simulation environment to mutually the accuracy of the calculation results and verify the effectiveness of the proposed control method.

基金项目:上海市2022年度“科技创新行动计划”科技支撑碳达峰碳中和专项项目(22DZ1206100)。

Project Supported by the 2022 Shanghai “Science and Technology Innovation Action Plan”: Special Science and Technology Support Project for Carbon Peaking and Neutrality(22DZ1206100).

KEY WORDS: flexible HVDC transmission; steady-state operating range; modular multilevel converter; short circuit ratio
摘要: 深入探讨柔性直流输电系统的功率运行区间控制策略,对于提高电能传输质量并保障系统稳定至关重要。在此背景下,提出了一种柔性直流输电系统在低短路比下的功率运行区间控制方法。首先,分析低短路比条件下柔性直流系统的功率运行特性和影响因素,并确定了限制模块化多电平换流器的柔性直流输电(modular multilevel converter-high voltage direct current, MMC-HVDC)稳态运行区域的约束条件。然后,基于这些约束条件,构建了柔性直流输电系统在低短路比下的功率运行区间的理论计算模型,并开发了低短路比柔性直流系统和弱交流系统相连的柔性系统功率运行范围的计算程序。最后,在仿真环境中使用逐点扫描法和隐函数绘图法绘制了MMC在PQ平面上的稳态运行区域的边界,互相印证计算结果的准确性,同时证实了所提控制方法的有效性。
关键词: 柔性直流输电; 稳态运行范围; 模块化多电平换流器; 短路比

模块化多电平换流器的柔性直流输电(modular multilevel converter-high voltage direct current, MMC-HVDC)技术的发展与应用,使得高压直流输电再次焕发新生机力,并引起了广泛关注^[1-3]。研究人员正在开展MMC-HVDC控制策略研究,深入探讨现有的控制策略和保护方法,从而提高电能传输质量并保障系统稳定。在此背景下,将从拓扑结构、调制方式、

控制策略等方面对国内外研究现状进行简要介绍。

国内外关于 MMC 拓扑结构的研探讨从未停歇过。文献[4]详细阐述了半桥子模块(half-bridge sub-module, HBSM)和全桥子模块(full-bridge sub-module, FBSM)的 MMC 换流器拓扑架构。文献[5]介绍了各类电压源型换流器(voltage sourced converter, VSC)拓扑结构及其运行特性,并通过模拟仿真和对比,指出 MMC 拓扑结构输出的高频成分相对较低,更加适用于柔性直流输电系统项目中。然而,无法清除基于 HBSM 拓扑的 MMC 换流器在直流侧的故障,会引发电流极速升高,在子模块闭锁前的短路电流可能会损坏换流器元件。根据 MMC 换流器拓扑的提出者 Rainer Marquardt 在文献[6]中提出的观点来看,建议在直流侧故障情况下 MMC 采用全 FBSM 拓扑结构,子模块拓扑架构内部产生的电容电压通过反向接入到故障电流回路中,以实现故障电流的阻断。在这些研究结果的基础上,文献[7-10]对具有直流侧故障自清除能力的 CDSM、CCSM 等子模块拓扑进行了深入研究,以进一步提升其性能和可靠性。然而,尽管大多数拓扑结构可以有效阻断直流侧故障或提供故障电流通路,但子模块包含的 IGBT 和二极管元件数量显著增加,导致整体结构变得更为复杂,同时操作管理也增加了难度^[11-13]。文献[14]针对直流线路故障严重损坏换流阀内功率器件的问题,提出从能量传递的角度对故障进行分析,建立不同故障下的换流阀桥臂功率解析式,为直流线路故障分析提供基础。直流输电系统转换过程中的换流和逆变不可避免地会引发出输出波形的调制问题,而传统的 VSC-HVDC 模式通常采用的是 PWM 调制方式,这种方式同样适用于 MMC-HVDC 系统的应用^[15-17]。文献[18]通过结合数字孪生技术与差动保护功能,提升了桥臂相间短路情况、电抗器匝间短路故障以及子模块开路故障的识别准确度,从而强化了 MMC 的保护特性。

本文对 MMC-HVDC 系统在三相平衡状态下的稳态运行范围进行了分析,确定了功率运行区间的影响因素,提出了柔性直流输电系统在低短路比下的功率运行区间控制方法。根据求得的约束条件建立了低短路比条件下柔性直流系统功率运行区间的理论计算模型,并设计了一种基于多种低短路比柔直系统与弱交流系统互联的柔直系统功率运行区间计算程序。为验证计算出的稳态运行范围

的正确性,本文在仿真环境中采用逐点扫描法和隐函数画图法来绘制 MMC 在 PQ 平面上的稳态运行范围及其边界,以相互印证。为了便于分析,本文仅研究了单端 MMC-HVDC 系统。

1 MMC-HVDC 建模

1.1 MMC-HVDC 系统功率运行区间影响因素分析

图 1 展示了 MMC-HVDC 接入交流电网的单相等效电路图。

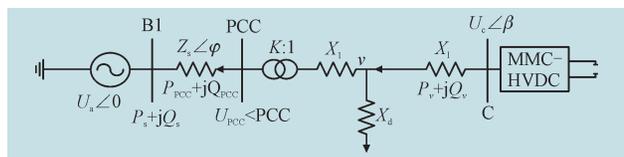


图 1 MMC-HVDC 单端等效电路图

Fig.1 MMC-HVDC single-terminal equivalent circuit diagram

在图 1 中, PCC 为换流站并网点,其向交流系统输送进来的功率为 $P_{pcc} + jQ_{pcc}$, $U_s \angle 0$ 代表了系统的等效电势,而 $Z \angle \varphi = R + jX$ 描述了其等效阻抗的情况。 X_l 表示联接变压器折算至阀侧的基波漏抗。MMC 采用的是单相基波等效电路模型,所以其输出电压为 $\dot{U}_c = U_c \angle \beta$ 。然后, X_c 为基频下的桥臂等效电抗。由于没有考虑联接变压器、阀电抗器的损耗和换流器的损耗,因此可以得出 MMC-HVDC 输入给系统的有功功率和无功功率分别为

$$P = \frac{kU_s U_c}{X} \sin \beta \quad (1)$$

$$Q = \frac{kU_s (kU_s - U_c \cos \beta)}{X} \quad (2)$$

式中: β 为母线 C 电压与交流系统电压之间的相角差。由式(1)、式(2)可知,影响换流站 PQ 运行区间的主要参数有以下 4 点:

- 1) 变压器变比 k ;
- 2) 交流系统的等效电势 U_s ;
- 3) 交流系统等效电压源与换流器出口间的电抗;
- 4) 母线 C 电压幅值和相角 β 。

在柔性直流系统中,交流系统的短路比定义如下。

$$SCR = \frac{S_{ac}}{P_{dn}} = \frac{U_N^2}{P_{dn}} \cdot \frac{1}{|Z|} \quad (3)$$

式中: S_{ac} 为换流母线的短路容量; P_{dn} 为换流器的额定直流输出功率; U_N 为换流线路的标准电压。如果设定交流电压基准值、功率基准值分别为 U_N 、 P_{dn} ,那

么短路比会被确定为

$$\text{SCR} = \frac{1}{|Z|_{\text{pu}}} \quad (4)$$

对于直流输电系统而言,当 $\text{SCR} < 2$ 时,交流系统为极弱系统;当 $2 \leq \text{SCR} < 3$ 时为弱系统;当 $\text{SCR} \geq 3$ 时为强系统。

1.2 影响系统稳态运行范围的因素

1.2.1 换流器容量约束

换流器容量限制对 MMC-HVDC 稳态工作区域的负面影响可以表述为

$$P_v^2 + Q_v^2 \leq S_{\text{VN}}^2 \quad (5)$$

式中: Q_v 和 P_v 分别表示 v 点测量得到的无功和有功功率; S_{VN} 表示换流器设定的视在功率值。

1.2.2 电压约束

假设 B1 母线电压 $U_s \angle 0$ 已知且保持不变,则换流器交流侧相电压方程为

$$\dot{U}_v - I(jX_T + Z) = U_s \angle 0 \quad (6)$$

式中:换流器出口电压 \dot{U}_v 与电流 I 为未知量。为减少式(6)中未知量的个数,式(6)可改写为

$$\dot{U}_v + \frac{P_v - jQ_v}{U_v \angle -\delta_v} (jX_T + Z) = U_s \angle 0 \quad (7)$$

令 $U_v \angle \delta_v = U_{vd} + jU_{vq}$, $U_s \angle 0$ 为参考变量,将其带入式后,实部虚部分开可得

$$\begin{cases} U_{vd}^2 + U_{vq}^2 - Q_v(X_T + X) - P_v R - U_s U_{vd} = 0 \\ P_v(X_T + X) - Q_v R - U_s U_{vq} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

若 MMC-HVDC 工作在稳定运行范围内, U_v 一定有解,由于 U_{vq} 一定有解,只需判别 U_{vd} 是否有解即可判断当前功率点是否运行在稳定运行范围内,即

$$\Delta = (U_s)^2 - 4 \left[\left(\frac{P_v(X_T + X) - Q_v R}{U_s} \right)^2 - Q_v(X_T + X) - P_v R \right] \geq 0 \quad (9)$$

式(9)揭示了在特定的工作状态下(相应于已知的 U_s 和 Z),换流器能够在 v 点产生 $P_v + jQ_v$ 的功率。一旦计算出 v 点处交流电压,就可以计算出 PCC 的注入功率。

$$P_{\text{PCC}} + jQ_{\text{PCC}} = P_{\text{PCC}} + j[Q_v - \frac{P_v^2 + Q_v^2}{U_v^2} X_T] \quad (10)$$

该点功率所覆盖的范围就是 MMC 的功率运行范围。

1.2.3 输出电压调制比约束

电压调制比 m 定义为 $m = \frac{\sqrt{2}U_c}{\sqrt{3}U_{dc}}$ 。 U_{dc} 为换流

站直流侧电压。实际运行时输出电压调制比不应超过 1,即 $0 \leq \frac{\sqrt{2}U_c}{\sqrt{3}U_{dc}} \leq 1$,但由实际工程经验所得的

调制比范围在 $[0.75, 0.95]$,本文取 $0.75 \leq m \leq 0.95$,所以进一步把调制比约束转化成对电压 U_v 的约束,而 U_v 可由式(6)和式(7)得出。

1.2.4 变压器容量约束

同样地,联接变压器也受到换流器自身的容量限制,这个限制条件可以表述为

$$P_{\text{PCC}}^2 + Q_{\text{PCC}}^2 \leq S_{\text{TN}}^2 \quad (11)$$

式中: P_{PCC} 和 Q_{PCC} 分别为 PCC 点处的有功和无功功率; S_{TN} 为联接变压器的标准视在功率。再把 PCC 点处的功率用 v 点的功率代替,对应的关系有

$$\begin{cases} P_{\text{PCC}} = P_v \\ Q_{\text{PCC}} = Q_v - I^2 X_T \end{cases} \quad (12)$$

所以,联接变压器的最大容量限制可以被改写为

$$P_v + (Q_v - I^2 X_T)^2 \leq S_{\text{TN}}^2 \quad (13)$$

1.2.5 额定交流电流约束

已知的交流电流 I_s 、桥臂电流 I_{bj} 、直流电流 I_{dc} 都满足以下条件。

$$\begin{cases} I_{bj} = \frac{I_{dc}}{3} + \frac{I_s}{2} \\ U_{dc} I_{dc} = \sqrt{3} U_v I_s \cos \delta \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\cos \delta$ 为换流阀交流出口处的功率因数,本文选的取功率因数数值为 0.9。

将 I_{bj} 限值 $I_{b\max}$ 、 I_{dc} 限值 $I_{d\max}$ 分别代入式(14)中,得到等值后的交流电流限值为

$$I_s = \frac{2\sqrt{3}U_{dc} I_{b\max}}{1.8U_v + \sqrt{3}U_{dc}} \quad (15)$$

令交流侧额定电流为 I_{VN} ,该约束可表示为: $I_s \leq I_{\text{VN}}$ 。

1.3 定有功控制和定交流电压控制

1.3.1 Q_v 解析式

对于图 1 系统,忽略交流线路的电阻,可得

$$\begin{cases} U_c U_s \cos \beta = Q_c X_2 + U_c^2 \\ U_c U_s \sin \beta = P_c X_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $X_2 = \frac{(X + X_T)X_L}{X_d} + X_T + X_L$; P_c 、 U_c 由 MMC 控制,

可设 P_c 、 U_c 为已知量,可求得变量 Q_v 的解析式为

$$Q_c = \frac{\sqrt{U_c^2 U_s^2 - P_c^2 X_2^2} - U_s^2}{X_2} \quad (17)$$

$$Q_v = Q_c - \frac{P_c^2 + Q_c^2}{U_c} X_L \quad (18)$$

为确保潮流方程组存在实数解,需满足:

$$-\frac{P_c X_2}{U_s} \leq U_c \leq \frac{P_c X_2}{U_s} \quad (19)$$

1.3.2 约束条件

除与第 1.2.2 小节的电压约束条件不同,其余都类似。由此,可以得出以下约束式。

$$\begin{cases} P_v + Q_v \leq S_{VN}^2 \\ -\frac{P_c X_2}{U_s} \leq U_c \leq \frac{P_c X_2}{U_s} \\ 0.75 \leq \frac{\sqrt{2}U_c}{\sqrt{3}U_{dc}} \leq 0.95 \\ P_v^2 + (Q_v - I^2 X_T)^2 \leq S_{TN}^2 \\ \text{abs}(I) \leq I_{VN} \\ I_s \leq I_{VN} \end{cases} \quad (20)$$

首先,由式(18)和输出电压调制比约束可知

$$\frac{0.75\sqrt{3}U_{dc}}{\sqrt{2}} \leq U_c \leq \min\left\{\frac{0.95\sqrt{3}U_{dc}}{\sqrt{2}}, \frac{P_c X_2}{U_s}\right\} \quad (21)$$

可以确定 U_c 可被调节的范围,再被约束的 U_c 代入式(18),即可得出 Q_v 运行范围,根据式(10)可得 MMC 稳态运行范围。

1.4 定无功控制和定直流电压控制

1.4.1 P_v 解析式

由于 MMC 使用的是定无功控制和定直流电压控制方式, Q_c 、 U_{dc} 则为 MMC 的控制量。设 Q_c 、 U_{dc} 为已知量,可求得变量 P_c 的解析式,由输出电压调制比约束可得 U_{dc} 的表达式为

$$U_{dc} = \frac{\sqrt{2}U_c}{\sqrt{3}m} \quad (22)$$

因此可得出 $U_c = \frac{\sqrt{3}U_{dc}m}{\sqrt{2}}$,再由式(16)得出 P_c 为

$$P_c = \frac{U_c U_s}{X_2} \sqrt{1 - \left(\frac{Q_c X_2 + U_c^2}{U_c U_s}\right)^2} \quad (23)$$

而 $P_v = P_c$,于是求得 P_v 的解析式。

1.4.2 约束条件

为确保潮流方程组存在实数解,需满足

$$1 - \left(\frac{Q_c X_2 + U_c^2}{U_c U_s}\right)^2 \geq 0 \quad (24)$$

这一约束条件中已经含有对 Q_c 和 U_{dc} 的约束。

于是整体约束条件为

$$\begin{cases} 1 - \left(\frac{Q_c X_2 + U_c^2}{U_c U_s}\right)^2 \geq 0 \\ P_v + Q_v \leq S_{VN}^2 \\ 0.75 \leq m \leq 0.95 \\ P_v^2 + (Q_v - I^2 X_T)^2 \leq S_{TN}^2 \\ \text{abs}(I) \leq I_{VN} \\ I_s \leq I_{VN} \end{cases} \quad (25)$$

2 系统稳定运行条件下功率区间的求解方法

对 MMC-HVDC 稳定状态下工作运行区域的影响因素进行分析,先通过用逐点扫描的方法在仿真软件中绘制 PQ 平面上 MMC 稳态运行范围。接着利用隐函数绘图技术在仿真软件中画出 PQ 平面上 MMC 稳定的工作区间的边。最后,借助逐点扫描法和解析法相互验证该稳态运行范围的有效性和准确性。

2.1 逐点扫描法

当确定了 MMC-HVDC 稳定状态下工作区域的约束限制后,根据这些约束条件编写逐点扫描法求解稳定状态下运行范围的程序。逐点扫描法求解 MMC-HVDC 稳态运行范围的流程图如图 2 所示,在仿真软件中编写程序之后,即可得到在 PQ 平面上画出三相平衡情况下的 MMC-HVDC 稳态运行范围。

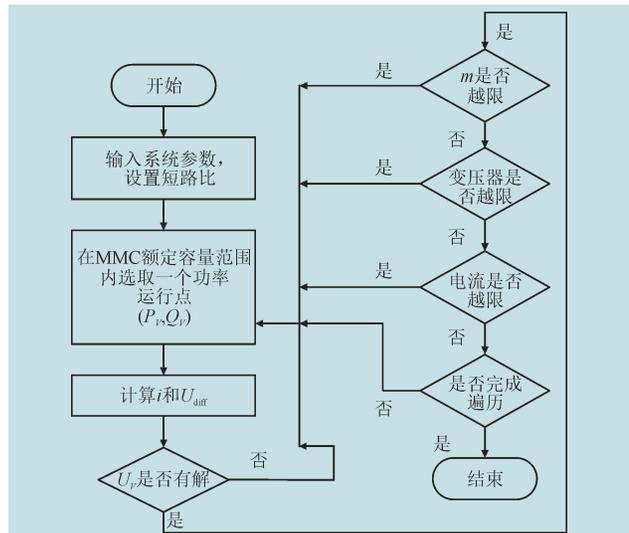


图2 逐点扫描法求解 MMC-HVDC 稳态运行范围流程图
Fig.2 Flow chart of point-by-point scanning method for solving the steady-state operation range of MMC-HVDC

2.2 解析法

虽然用逐点扫描法确定出了 MMC-HVDC 的稳态运行范围,但是该方式计算出的运行结果并不能明确指出各限制条件对应的运行边界。为处理这一问题,首先采用解析法求解出 P_v 、 Q_v 的隐函数表达式,然后在仿真软件中画出该隐函数对应的曲线图像。最后,求解出 MMC-HVDC 的稳态运行范围,与逐点扫描法求解得到的结果相对比,即可得到各限制条件对应的边界。

3 MMC-HVDC 功率越限控制策略

3.1 MMC-HVDC 电流越限控制策略

本文提出的 MMC-HVDC 电流过载管理方案为:若系统的电力输出仍在电流限制条件下可接受的区间内,则维持当前的输送能力;如果由于交流侧的三相失衡而造成电力输出超过了预设的阈值并引发电流过大,那么通过调整 MMC 交流侧电流的 dq 轴分量的比例来降低其大小,从而使得新设置的电力输出位置重新回到电流限制区域。MMC-HVDC 电流越限控制策略如图 3 所示。

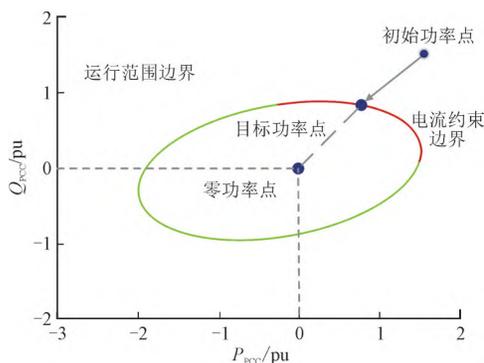


图3 电流越限控制策略

Fig.3 Current overrun control strategy

3.2 MMC-HVDC 电压越限控制策略

本研究提出的 MMC-HVDC 电流过载保护方案如下:如果系统的负荷工作点落在可接受的工作区间内,那么维持其现有负荷水平。然而,若在三相均衡运转过程中出现交流侧的不对称故障,这可能引发负荷工作点超过容许范围并触发输出电压超越限制阈值的情况,此时应启动调整至零功率点 $(P_0, Q_0)=(0, 0)$ 的过程,以确保新设定的负荷工作点落入调节比限制区域。MMC-HVDC 输出电压越限控制策略如图 4 所示。

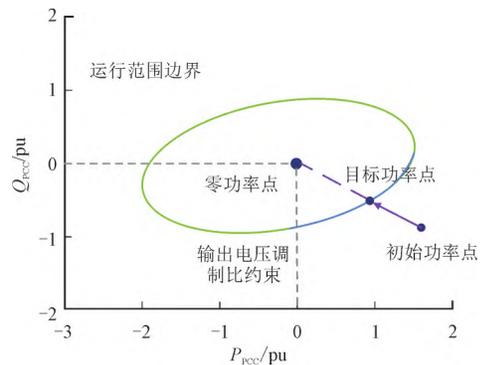


图4 输出电压调制比的越限控制策略

Fig.4 Crossing limit control strategy of the output voltage modulation ratio

4 仿真分析

4.1 原始数据

本次建模选取五马至兴隆一线,其中五马和兴隆为 2 个等值电源,经背靠背柔直站进行连接,将线路中其他单元进行连接。交流系统的等值电源参数如表 1 所示。

表1 交流系统等值电源参数

Table 1 Equivalent power supply parameters of the AC system

母线名称	戴维南等值阻抗	戴维南等值电源
五马母线等值电源	0.931 3 Ω+0.069 0 H	522.550 kV(-2.658°)
隆盛母线等值电源	0.807 6 Ω+0.052 7 H	515.465 kV(-1.729°)
宜都母线等值电源	0.958 3 Ω+0.166 6 H	513.000 kV(-0.750°)
兴隆母线等值电源	0.958 3 Ω+0.068 6 H	500.000 kV(-3.650°)

4.2 柔直系统功率运行区间仿真实证

为确认前述 2 类稳定工作区域的结果,使用了仿真工具来描绘交流电力网络中的 MMC-HVDC 设备在三相均衡状态下的工作区间,并将其与其他方式所得出的结果进行了比较。图 1 所示的柔直换流站的相关参数已经列在了表 1 里。对于变压器的阀侧及直流侧电压参考点,将其设定为换流变阀侧和直流侧电压的标准值,而容量的标准则取自于换流器的最大容量,同时将换流变压器网侧参数转换到阀侧。

据表 1 中的数据,将其转换为标么值后,在仿真软件中按照图 4 展示的步骤进行逐点扫描法程序的编写。设定每个点的扫描步长为 0.01 pu,通过这种方式可以计算出在三相平衡条件下的 MMC 实际交流出口 v 点的稳态运行范围。

逐点扫描法确定短路比 SCR=5、SCR=2.5、SCR=1.5、SCR=1 这 4 种情况下的 P_v 、 Q_v 运行范围如图 5 所示。

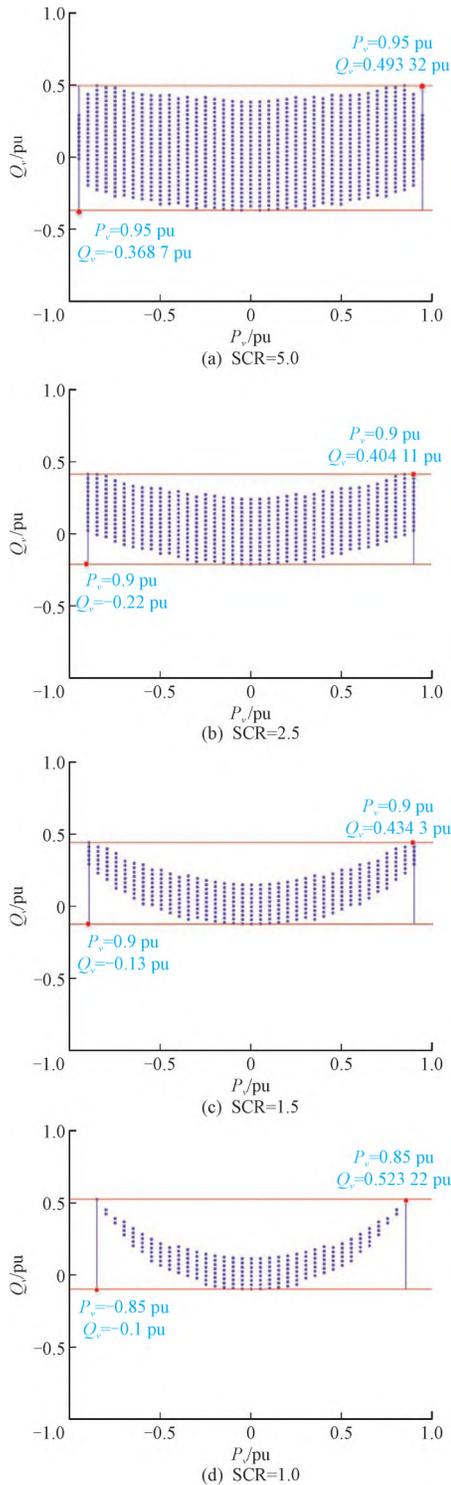


图 5 逐点扫描法确定的三相平衡情况下 P_v 、 Q_v 运行范围
 Fig.5 Operating range of P_v and Q_v determined by point-by-point scanning method under three-phase equilibrium

由图 5 可知,随着 SCR 的降低, P_v 、 Q_v 运行范围不断缩小。

利用解析法描绘 4 种情况下的约束条件边界,如图 6 所示。

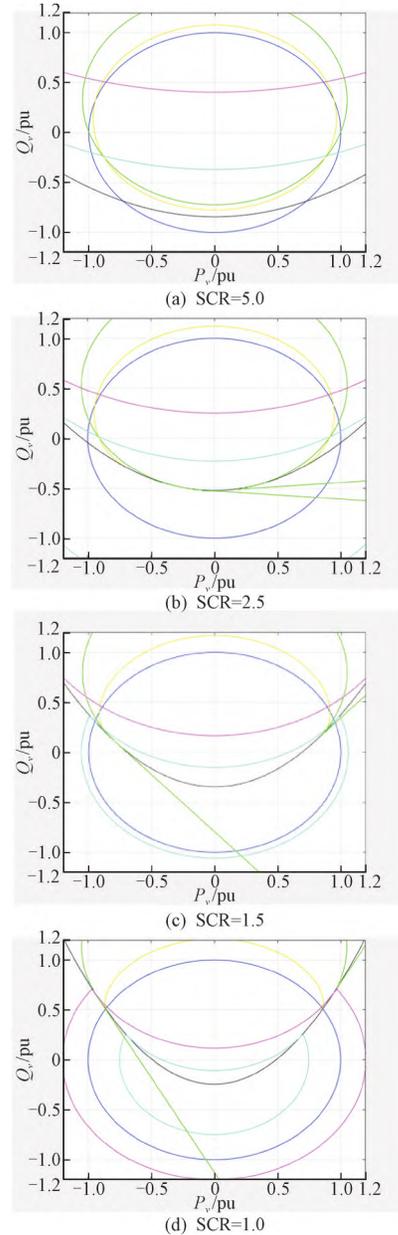


图 6 解析法确定的三相平衡情况下 P_v 、 Q_v 运行范围边界
 Fig.6 Boundary of P_v and Q_v operating range determined by analytical method under three-phase equilibrium

在绘制 MMC 的稳态运行区域时,可以使用仿真软件中的绘图函数来实现。通过运用逐点扫描法和隐函数画图方法,可以得到系统的稳态运行区域,并确定其边界。对比图 5、图 6,可知逐点扫描法和解析法 2 种方法下所得到的 P_v 、 Q_v 稳态运行范

围完全一致。 Q_r 运行上边界为电流约束,下边界为电压调制比约束。在稳态运行过程中,需要控制电流和电压调制比,以确保系统运行在安全的范围内。

根据 MMC-HVDC 功率越限控制策略,当 SCR 降低时,系统功率运行点会超出允许范围,此时系统新的功率运行点不断向零功率点迁移,稳态运行范围逐渐缩小。这表明在低短路比下,柔性直流输电系统的稳态运行范围会受到限制,需要采取一些措施来确保系统的安全运行。

综上所述,通过仿真分析,可以充分体现系统稳态运行范围的准确性,进一步证实提出的功率运行区间控制方法的有效性,并为系统运行的安全性提供支持。

5 结论

本文提出了一种柔性直流输电系统在低短路比下的功率运行区间控制方法。首先,对低短路比柔性直流系统功率运行特性和其影响因素进行了深入探讨,并寻找限制 MMC-HVDC 稳态运行区域的约束条件。然后,构建了一个关于低短路比柔性直流系统功率运行区间的理论计算模型,并且设计了一种基于多种低短路比柔直系统与弱交流系统互联的柔直系统功率运行区间计算程序。最后,在仿真环境下,通过使用逐点扫描法和隐函数画图方法绘制出 PQ 平面上 MMC 的稳态运行区域及其边界,证实了计算出的稳态运行范围的准确性与提出功率运行区间控制方法的有效性。

关于柔性直流系统功率运行区间的研究仍有一些问题值得进一步的探讨。本研究仅针对 MMC-HVDC 的稳定工作区间在系统达到三相平衡时展开了探讨,并未涉及到当系统出现三相失衡时的稳定状态分析。此外,在现实应用场景下,非对称电压的表现形式可能会更加繁杂。所以,可以考虑在未来深入探究系统处于三相失衡状况下的稳定操作区域,并基于多种类型的非对称电压来开展相关研究。

参考文献

- [1] 黄通,陈新,张东辉,等.考虑电压前馈控制的 MMC-HVDC 并网稳定性分析及其阻抗控制优化方法[J].中国电机工程学报,2023,43(23):8987-8997.
HUANG Tong, CHEN Xin, ZHANG Donghui, et al. MMC-HVDC integrated system stability analysis and impedance optimization method with consideration of voltage feed-forward control[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 8987-8997.
- [2] CHEN Lei, ZHAO Zekai, QIAO Xuefeng, et al. A novel current-limiting method for MMC-HVDC by coordinating virtual impedance control and fault current limiter[J]. Energy Reports, 2022, 8(S15):385-398.
- [3] HUANG Tong, CHEN Xin. Sequence impedance modeling and optimization of MMC-HVDC considering DC voltage control and voltage feedforward control[J]. Energies, 2022, 15(24):9649-9649.
- [4] 辛业春,刘熠,江守其,等.计及零直流电压控制的混合型 MMC-HVDC 输电系统短路电流计算方法[J].电网技术,2023,47(7): 2820-2828.
XIN Yechun, LIU Yi, JIANG Shouqi, et al. Short-circuit current calculation method for FHMMC-HVDC transmission systems with zero DC voltage control[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2820-2828.
- [5] 杨万开,张书瑀,于华龙,等.柔直联于弱交流系统分析和仿真试验研究[J].电网技术,2021,45(6): 2457-2464.
YANG Wankai, ZHANG Shuyu, YU Hualong, et al. System analysis and simulation experimental research of VSC-MMC HVDC connected to AC weak system[J]. Power System Technology, 2021, 45(6):2457-2464.
- [6] 王琛,谭开东,王毅,等.具备直流故障清除和自均压能力的 MMC 移位全桥子模块拓扑[J].电力系统自动化,2020,44(24):151-160.
WANG Chen, TAN Kaidong, WANG Yi, et al. Topology of MMC oblique-connection full-bridge sub-module with capability of DC fault clearing and voltage self-balancing [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 151-160.
- [7] KANG F S, SONG S G. Fault-tree-based failure-rate analysis for clamped-double submodule employing DC-short current protecting function[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 16(1):357-365.
- [8] 王琛,陶建业,王毅,等.具备故障电流对称清除能力的双向开关钳位式全桥子模块[J].电网技术,2021,45(7): 2596-2604.
WANG Chen, TAO Jianye, WANG Yi, et al. Bidirectional switch clamp full bridge submodule with fault current symmetrical clearing capability[J]. Power System Technology, 2021, 45(7):2596-2604.
- [9] 尹晓东,郝全睿,李正,等.具备直流故障电流阻断能力

- 的 MMC 改进型拓扑的快速仿真算法[J].高电压技术, 2017,43(7):2183-2193.
- YIN Xiaodong, HAO Quanrui, LI Zheng, et al. Fast simulation method for improved topologies of modular multilevel converter with DC fault current blocking capability[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2183-2193.
- [10] 朱雯清,赵西贝,赵成勇.一种嵌套型 MMC 拓扑及其直流故障穿越策略[J].中国电机工程学报, 2023, 43 (21): 8434-8444.
- ZHU Wenqing, ZHAO Xibei, ZHAO Chengyong, et al. Research on topology and fault ride-through strategy of converter embedded MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8434-8444.
- [11] 江友华,陈芳,赵乐,等.不平衡电网电压条件下 MMC 控制策略综述[J].电源学报, 2023, 21 (4): 74-87.
- JIANG Youhua, CHEN Fang, ZHAO Le, et al. Review on control strategy of modular multilevel converter under unbalanced grid voltage[J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 74-87.
- [12] 付鹏宇. 压接型 IGBT 器件子模组封装的放电特性及机制研究[D].北京:华北电力大学, 2019.
- [13] LIU Yiqi, DUAN Zhaoyu, CHEN Qichao, et al. MMC-modified sub-module structure with double reverse blocking IGBTs[J]. Journal of Power Electronics, 2022, 23 (3):434-444.
- [14] 雷顺广,束洪春,李志民,等.柔性直流输电系统的桥臂功率解析[J].电网技术, 2023, 47(4):1490-1500.
- LEI Shunguang, SHU Hongchun, LI Zhimin, et al. Bridge arm power analysis of flexible HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2023, 47 (4):1490-1500.
- [15] 王立功,麻恒远.电网不对称故障下 VSC-HVDC 控制策略研究[J].电力电子技术, 2023, 57(3):91-94.
- WANG Ligong, MA Hengyuan. Research on VSC-HVDC control strategy under asymmetric faults in the power grid [J]. Power Electronics, 2023, 57(3):91-94.
- [16] KHAN S, BHOWMICK S. A comprehensive power-flow model of multi-terminal PWM based VSC-HVDC systems with DC voltage droop control[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018, 102:71-83.
- [17] ZHOU J, CHEN Y, RAN L. MMC equivalent modeling method of AC/DC hybrid system based on model-data hybrid drive[C]//the International Society for Applied Computing (ISAC), The Technical Institute for Engineers (TIE.). Proceedings of 2021 2nd International Conference on Electronics, Communications and Information Technology (CECIT 2021). Chongqing: Chongqing Electric Power Research Institute State Grid Corporation of China, School of Electrical Engineering Chongqing University, 2021:7.
- [18] 和敬涵,张佳宝,李猛,等.基于孪生模型的模块化多电平换流器保护原理[J].电力系统自动化, 2023, 47(2): 119-126.
- HE Jinghan, ZHANG Jiabao, LI Meng, et al. Protection of modular multilevel converter based on digital twin model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47 (2): 119-126.

收稿日期:2023-11-27。 修回日期:2024-01-22。

作者简介:

王帆(1983—),男,硕士,高级工程师,研究方向为综合能源处理、源网荷储一体化平台设计和配电网规划相关研究;

范宏(1978—),女,通信作者,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为综合能源系统、实时仿真;

田书欣(1985—),男,博士,副教授,研究方向为电力系统规划、智能配电网运行等;

刘琳琳(2000—),女,硕士研究生,研究方向为综合能源系统优化。

(编辑 冯露)