

# 模块化多电平换流器的运行边界分析及提高运行稳定性的控制方法

王少伟, 刘天琪, 李保宏  
(四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:**在分析模块化多电平换流器(MMC)稳定运行应满足多种约束条件的基础上,推导了MMC的运行边界;以换流器向交流系统注入的有功功率、无功功率为指标,建立了用于描述换流器运行特性的 $P$ - $Q$ 功率域;分析了影响换流器运行边界的多种因素,并详细阐述了交流系统阻抗对换流器有功传输能力的影响;以增大换流器稳定运行范围为优化目标,提出了一种基于虚拟阻抗控制的优化方法。

**关键词:**直流电网;模块化多电平换流器; $P$ - $Q$ 功率域;控制方式

**中图分类号:**TM 46;TM 721.1

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.201909021

## 0 引言

随着电力电子技术的进步,柔性直流输电技术向着更高电压等级、更大传输容量的方向发展,适合未来输电网络建设的需求。基于模块化多电平换流器的直流输电(MMC-HVDC)技术具有制造难度低、损耗低、波形质量高等优点,成为了国内外研究的热点<sup>[1-2]</sup>。目前关于MMC-HVDC的相关研究主要集中在换流阀建模<sup>[3-4]</sup>、暂态特性<sup>[5-6]</sup>、控制策略<sup>[7-8]</sup>等方面,为分析换流器暂稳特性提供了很多有效的理论工具。随着多端柔性直流输电技术的发展,“直流电网”的概念逐渐形成。分析换流站的运行能力、确定换流器运行边界,对于研究直流电网潮流分布、确定最佳控制方案以及优化直流电网设计方案都具有十分重要的意义。

近年来,针对换流器在实际场景中运行能力的研究越来越多。文献[9]提出了常规直流输电系统的有功传输能力;文献[10]分析了交流系统强度对模块化多电平换流器运行能力的影响;文献[11-12]推导了换流阀稳态传输功率与交流系统强度之间的关系;文献[13]通过寻点-校验的方法初步描述了换流站运行范围。上述文献为分析换流器运行特性提供了研究思路,但都没有从运行边界的角度分析换流器功率传输能力,没有得到用于直观描述换流器运行范围的方法,所得的研究结论也没有转化为用于改善换流器运行特性的方法。综上,目前在分析换流器运行边界以及相应的优化方法方面还存在着值得深入探讨的内容。

为此,本文从交流系统强度、电压调制比、电流限值等角度出发,将换流器正常运行时应满足的要

求总结为2种基本约束。以换流器向交流系统注入的有功功率、无功功率为指标,建立了描述换流器运行范围的 $P$ - $Q$ 功率域。依据不同约束条件,推导了相应的换流器运行边界,从而实现了对换流器稳定运行区域的直观描述。通过分析影响换流器有功传输能力的因素,以增大换流器稳定运行范围为目的,提出了一种基于虚拟阻抗控制的优化方法。最后,基于PSCAD/EMTDC软件搭建了MMC-HVDC仿真模型,验证了所提控制方法的有效性。

## 1 $P$ - $Q$ 功率域的定义

以半桥结构的单换流阀为例,图1为换流阀交流侧等效电路。图中, $U_s$ 、 $U_p$ 、 $U_1$ 分别为交流系统等效母线线电压、公共耦合点(PCC)处线电压、换流阀输出的交流线电压; $I_s$ 为交流相电流; $X_{eq}$ 为变压器电抗与桥臂电抗的等效电抗; $Z_s=R_s+jX_s$ ,为交流系统等值阻抗。

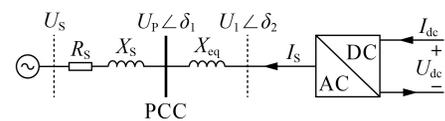


图1 换流阀交流侧等效电路

Fig.1 AC-side equivalent circuit of converter

定义 $X=X_s+X_{eq}$ ,  $Z\angle\phi=R_s+jX$ 。变压器阀侧电压基准值 $U_{VB}$ 、直流侧电压基准值 $U_{DB}$ 分别采用换流变阀侧电压额定值、直流额定电压值,容量基准值采用换流器额定容量 $S_N$ ,并将换流变压器网侧参数折算至阀侧。并定义电压调制比 $m=\frac{2\sqrt{2}U_1U_{DB}}{\sqrt{3}U_{dc}U_{VB}}$ 。规定流出换流阀的有功功率、无功功率、交流电流为正。

假设直流电压为额定值,此时有功功率、无功功率满足:

收稿日期:2019-03-07;修回日期:2019-07-25

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904600)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2018YFB0904600)

$$\begin{cases} P = \frac{U_1^2}{Z} \cos \phi - \frac{U_1 U_s}{Z} \cos(\phi + \delta_2) \\ Q = \frac{U_1^2}{Z} \sin \phi - \frac{U_1 U_s}{Z} \sin(\phi + \delta_2) \end{cases} \quad (1)$$

消去式(1)中 $\delta_2$ ,得到:

$$\left(P - \frac{U_1^2}{Z} \cos \phi\right)^2 + \left(Q - \frac{U_1^2}{Z} \sin \phi\right)^2 = \left(\frac{U_1 U_s}{Z}\right)^2 \quad (2)$$

以换流站 MMC 换流阀流向交流侧的功率  $P$ 、 $Q$  作为坐标轴,构成描述换流站运行范围的  $P$ - $Q$  坐标平面。将式(2)描述的电气量关系反映到  $P$ - $Q$  坐标平面中,可以得到以  $\left(\frac{U_1^2}{Z} \cos \phi, \frac{U_1^2}{Z} \sin \phi\right)$  为圆心、 $\frac{U_s U_1}{Z}$  为半径的圆轨迹,如图2所示。

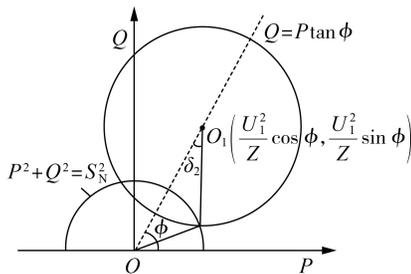


图2  $P$ - $Q$  坐标系下的交流电气量关系

Fig.2 Relationship of AC electrical quantities in  $P$ - $Q$  coordinate frame

对于某一确定  $U_1$  值,式(2)在  $P$ - $Q$  平面中对应唯一的一个圆轨迹。改变  $U_1$  相角  $\delta_2$  可以实现换流器运行点在圆轨迹上的移动;改变  $U_1$  幅值,式(2)对应圆轨迹的圆心将沿着以  $\tan \phi$  为斜率的直线移动,圆半径也将随之变化。MMC-HVDC 通过改变  $U_1$  的相角与幅值来控制输出的有功、无功功率, $P$ - $Q$  坐标平面内的圆轨迹可以很好地反映这一控制关系。

由于系统参数的限制及其相互间的约束关系使得圆轨迹只能在一定范围内缩放和移动,这意味着换流器稳态运行点只能在  $P$ - $Q$  坐标平面内某一区域

移动。本文将这一区域称为  $P$ - $Q$  功率域,功率域的边界称为运行边界。

## 2 构成 $P$ - $Q$ 功率域的约束条件

### 2.1 电压约束

半桥结构 MMC 的电压调制比具有一定的范围:  $0 < m < 1$ 。当  $m$  由 1 向 0 变化时,式(2)所描述的圆轨迹的圆心将沿着直线  $Q = P \tan \phi$  向坐标原点移动,圆轨迹的边界会在移动过程中扫过一个区域,即该区域内的任意运行点都在某一圆轨迹上。将“运行点在某一圆轨迹上”称为电压约束,满足该约束条件的运行范围称为电压约束域。位于该区域之外的运行点不满足换流阀交流侧电气量关系,无法实现稳定运行。

换流站一般运行在额定容量之内,因而关键是推导电压约束域在额定容量范围内的边界曲线。但计算电压约束域需要通过式(2)将所有圆轨迹依次绘出,过程繁琐。随着调制比减小,圆轨迹曲率增大,曲率较大的圆轨迹更容易被包含于曲率较小的圆轨迹范围中。因此第一、二象限内的边界曲线可以由  $m=1$  时的圆轨迹曲线近似表示为:

$$\left(P - \frac{3U_{dc}^2 U_{VB}^2}{8ZU_{DB}^2} \cos \phi\right)^2 + \left(Q - \frac{3U_{dc}^2 U_{VB}^2}{8ZU_{DB}^2} \sin \phi\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{3} U_{dc} U_{VB} U_s}{2\sqrt{2} Z U_{DB}}\right)^2 \quad (3)$$

第三、四象限内的边界曲线可以由最下方运行点所在的圆轨迹,即  $m = \frac{\sqrt{2} U_s U_{DB}}{\sqrt{3} U_{dc} U_{VB}}$  时的圆轨迹曲线

近似表示为:

$$\left(P - \frac{U_s^2}{4Z} \cos \phi\right)^2 + \left(Q - \frac{U_s^2}{4Z} \sin \phi\right)^2 = \left(\frac{U_s^2}{2Z}\right)^2 \quad (4)$$

仅考虑电压约束域时,近似边界与实际边界对比如图3所示。图中  $P$ 、 $Q$  均为标么值。可见近似边界曲线可以很好地描述重叠区域的边界,但随着  $Z$

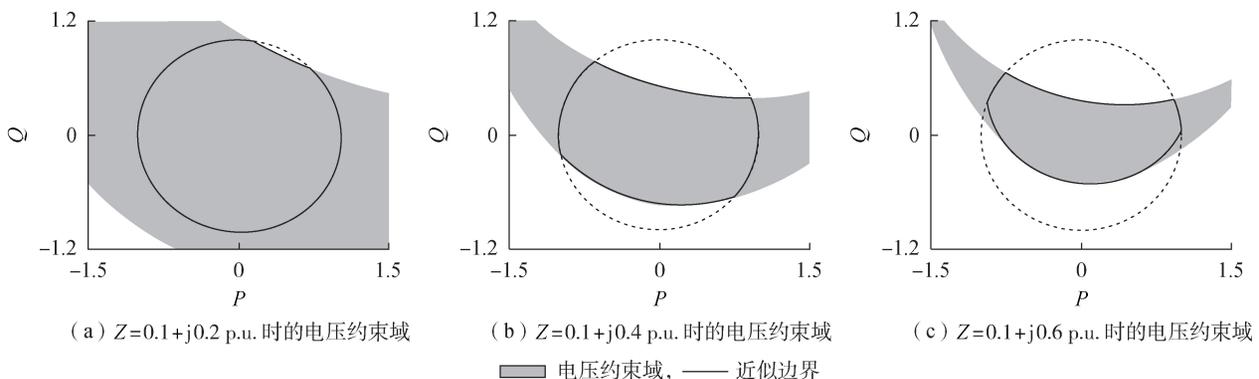


图3 仅考虑电压约束域时,近似边界与实际边界对比

Fig.3 Comparison between approximate boundary and actual boundary only considering voltage constraint domain

的增大,位于第三、四象限的近似边界曲线逐渐偏离实际边界。对于系统强度较弱的弱交流系统和无源网络,仍需要通过式(2)计算该边界曲线。

## 2.2 电流约束

在确定电压约束域后,为描述不同运行点的电流水平,需要将电流限值反映到 $P$ - $Q$ 域中。将“运行点的电流不超过系统允许的上限值”称为电流约束,满足该约束条件的运行范围称为电流约束域。首先,可用式(5)描述交流电流约束域。

$$\begin{cases} \left(P - \frac{U_1^2}{Z} \cos \phi\right)^2 + \left(Q - \frac{U_1^2}{Z} \sin \phi\right)^2 = \left(\frac{U_1 U_s}{Z}\right)^2 \\ P^2 + Q^2 = (I_x U_1)^2 \end{cases} \quad (5)$$

其中, $I_x$ 为交流电流限值。

可得电流约束条件所描述的运行边界为:

$$P^2 + Q^2 = \left[ Zk + \frac{U_s^2 + \sqrt{(2Zk + U_s^2)^2 - 4Z^2(P^2 + Q^2)}}{2} \right] I_x^2 \quad (6)$$

其中, $k = P \cos \phi + Q \sin \phi$ 。

换流站内各元件所承受的电流可以分为交流电流、桥臂电流、直流电流3类。目前,实际工程大多采用环流抑制控制(CCSC),桥臂电流中2倍频环流含量很低,可以认为桥臂电流只含有基频交流和直流成分。由文献[14]可知,可以通过一个经验公式描述桥臂电流峰值与IGBT额定电流等级之间的关系:

$$I_{bj\max} \approx \alpha I_{C\text{nom}} \quad (7)$$

其中, $I_{bj\max}$ 为额定运行状态下的桥臂电流峰值; $I_{C\text{nom}}$ 为IGBT集电极额定电流; $\alpha$ 为比例系数,一般取值为1.0~1.2。因此通过对比桥臂电流实际峰值与额定运行状态下的桥臂电流峰值,可以反映桥臂稳态电流过流程度。其次,考虑到在目前的三段式桥臂过流保护<sup>[15]</sup>中,以桥臂瞬时电流作为动作判据。结合这2点,选取桥臂电流峰值作为桥臂电流约束条件。

若要得到描述不同电流水平的约束域,需先将各类电流实际值折算至交流侧。已知交流电流 $I_s$ 、桥臂电流 $I_{bj}$ 、直流电流 $I_{dc}$ 满足:

$$\begin{cases} I_{bj} = \frac{I_{dc}}{3} + \frac{I_s}{2} \\ U_{dc} I_{dc} = \sqrt{3} U_1 I_s \cos \phi \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\cos \phi$ 为换流阀交流出口处的功率因数。

将桥臂电流峰值限值 $I_{b\max}$ 、直流电流限值 $I_{d\max}$ 分别代入式(8)中,得到等值后的交流电流限值 $I_{Xeql}$ 、 $I_{Xeql}$ 分别为:

$$I_{Xeql} = \frac{2\sqrt{3} U_{dc}}{2U_1 \cos \phi + \sqrt{6} U_{dc}} I_{b\max} \quad (9)$$

$$I_{Xeql} = \frac{U_{dc} I_{d\max}}{U_1 \cos \phi} \quad (10)$$

将式(9)和式(10)代入式(6)可得到描述直流电流、桥臂峰值电流水平的电流约束域为:

$$\begin{cases} P = U_{dc} I_{d\max} \\ P^2 + Q^2 = \left( \frac{2\sqrt{3}q U_{dc} I_{b\max}}{2\sqrt{q} \cos \phi + \sqrt{6} U_{dc}} \right)^2 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $q = Zk + \frac{U_s^2 + \sqrt{(2Zk + U_s^2)^2 - 4Z^2(P^2 + Q^2)}}{2}$ 。至此,通过式(6)和式(11),将交流电流、桥臂电流、直流电流约束反映在同一坐标系中。

若换流器可以运行在 $P$ - $Q$ 坐标平面中任意一点,当阻抗角 $\phi = 90^\circ$ 时,交流额定电流、直流电流限值、桥臂电流峰值限值的电流约束域边界可用图4表示。

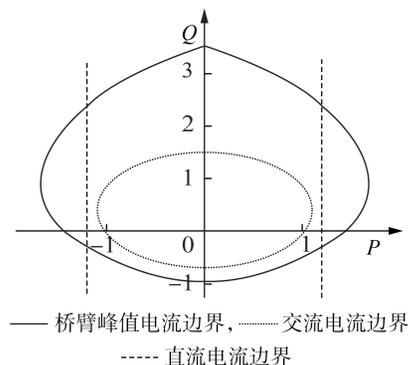


图4 3种电流域边界

Fig.4 Three kinds of current domain boundaries

## 2.3 满足不同约束条件的 $P$ - $Q$ 功率域

本文仿真参数如下:换流器额定容量 $S_N = 400$  MW,换流变压器变比为220:193,额定直流电压 $U_d = \pm 200$  kV,交流系统电压 $U_s = 1.1$  p.u.,换流变压器电抗 $X_T = 0.15$  p.u.,桥臂电抗 $X_L = 0.1$  p.u.,交流电流限值 $I_x = 1$  p.u.。

以 $\phi = 90^\circ$ 为例,结合上述多种约束条件,计算了该端换流站运行边界,得到 $P$ - $Q$ 功率域如图5所示。

图5中各区域所满足的约束条件如表1所示。

## 2.4 运行边界的仿真验证

根据上述仿真参数在PSCAD/EMTDC软件中搭建了两端MMC-HVDC模型。定功率换流站同时控制流入交流系统的有功和无功,可通过改变功率指令值实现运行点的移动。为维持直流电压不变,将定电压换流站用等值直流电压源代替。算例所选取区域如图5所示。

算例1:为验证计及电压、交流电流约束关系的功率域划分情况,设置4个期望运行点(点A运行于

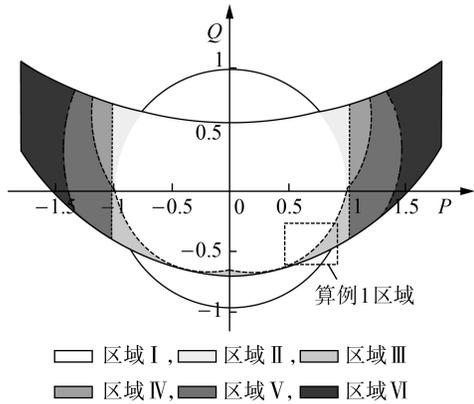


图 5 换流器运行范围

Fig.5 Operating range of converter

表 1 各区域内运行点的越限情况

Table 1 Limit situation of operation points in different regions

区域	越限情况
I	满足全部约束条件
II	满足全部约束条件,在额定容量之外
III	仅不满足交流电流约束
IV	仅不满足直流电流约束
V	仅不满足交流电流、直流电流约束
VI	不满足所有的电流约束

区域 I,点 B、C 运行于区域 III,点 D 运行于区域 VII), 见图 6。图中 P、Q 均为标么值。仿真时序如下:换流器启动后,维持在工作点 A(0.8 p.u., -0.3 p.u.); 1.4 s 时,换流器功率指令值变更为点 B(0.8 p.u., -0.4 p.u.); 1.8 s 时,换流器功率指令值变更为点 C(0.8 p.u., -0.5 p.u.); 2.2 s 时,换流器功率指令值变更为点 D(0.8 p.u., -0.55 p.u.)。

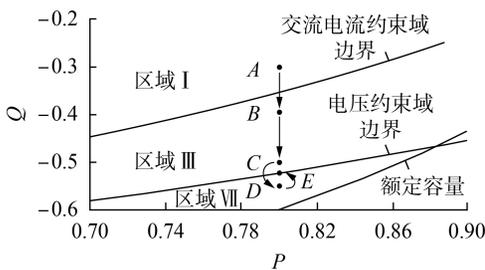


图 6 算例 1 中设置的期望运行点

Fig.6 Expected operating point in Example 1

算例 1 的仿真结果如图 7 所示。图中 P、Q、I<sub>s</sub> 均为标么值。由图 7 可以知道,点 A 位于可运行域内,可稳定运行于该点且电流不越限;点 B、C 位于电压约束域内、额定交流电流约束域外,换流器可运行于该点,但交流电流越限;系统指令变更为点 D 后,由于不满足电压约束条件,无法实现稳定运行,故迫使换流器回到位于电压约束域边界上的点 E(0.8 p.u., -0.525 p.u.),验证了电压约束、电流约束的准确性。

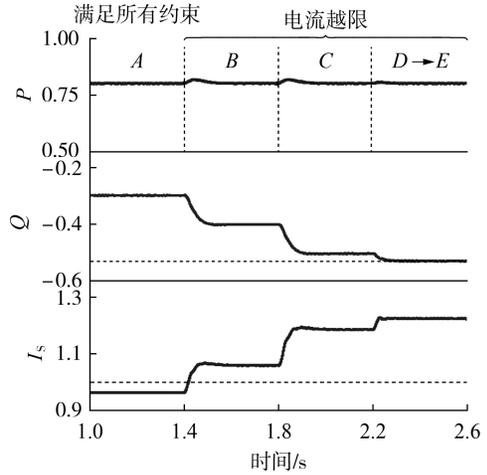


图 7 算例 1 的仿真结果

Fig.7 Simulative results of Example 1

### 3 增大换流器稳定运行范围的优化方法

#### 3.1 换流器运行范围的影响因素

通过上文分析可知,影响换流器稳定运行范围的因素可以分为 2 类:第一类是换流器交、直流侧系统参数,包括交流系统强度、交直流电压等参数;第二类是换流器控制参数,这类参数由换流器输出的 U<sub>1</sub> 的幅值与相角体现。几种典型参数和控制方式对换流器稳定运行范围的影响如图 8 所示。图中 P、Q 均为标么值。

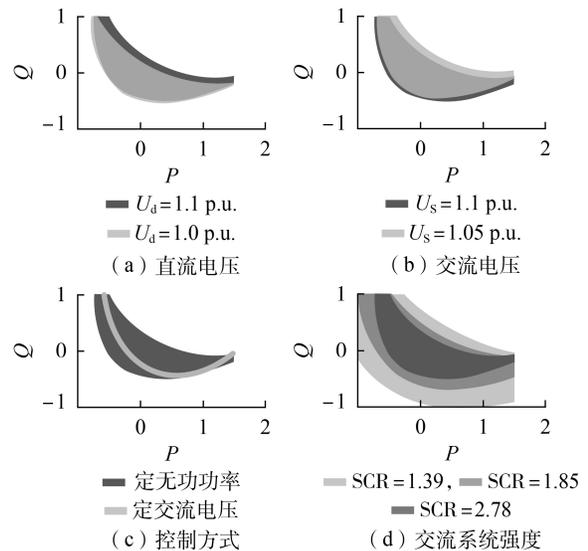


图 8 换流器运行范围的影响因素

Fig.8 Influencing factors of converter operating range

通过图 8(d) 可以发现,换流器的稳定运行范围对交流系统强度较为敏感,而交流系统强度可以等效为阻抗 Z<sub>s</sub>。在不同的 Z<sub>s</sub> 场景下,换流器的功率传输能力不同。以换流器向交流系统注入纯有功为例,换流器可输出的最大有功功率 P<sub>max</sub> 满足:

$$(P_{\max} - \Delta \cos \phi)^2 + (\Delta \sin \phi)^2 = \frac{\Delta U_s^2}{Z_s^2} \quad (12)$$

$$\Delta = \frac{U_s^2 + 2P_{\max} R_s + \sqrt{(2R_s P_{\max} + U_s^2)^2 - 4P_{\max}^2 Z_s^2}}{2Z_s}$$

$$\phi = \arctan \frac{X_s}{R_s}$$

根据上述仿真参数,可以得到当  $X_s=0.6$  p.u. 时  $P_{\max}$  随  $R_s$  变化的曲线,以及当  $R_s=0.4$  p.u. 时  $P_{\max}$  随  $X_s$  变化的曲线,如图 9 所示。图中  $P_{\max}$ 、阻抗值均为标么值。

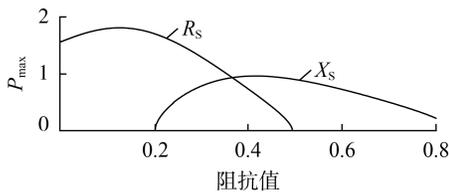


图 9  $R_s$ 、 $X_s$  与  $P_{\max}$  的关系

Fig.9 Relationship between  $R_s$ ,  $X_s$  and  $P_{\max}$

随着  $R_s$  或  $X_s$  的减小,  $P_{\max}$  呈现先增大后减小的变化趋势。在本文的算例中换流器交流侧阻抗较大,这成为影响换流器运行稳定性的主要因素之一,适当减小  $R_s$ 、 $X_s$  将有利于系统稳定运行。而对于在  $R_s$  很小的场景下工作的换流器,适当增加换流器交流侧  $R_s$  将有利于换流器的稳定运行。综上,若能将  $Z_s$  改变为某一优化值  $Z'_s$ ,换流器的稳定运行范围将得到改善。下文将基于这一点,计算  $Z'_s$  的具体值。

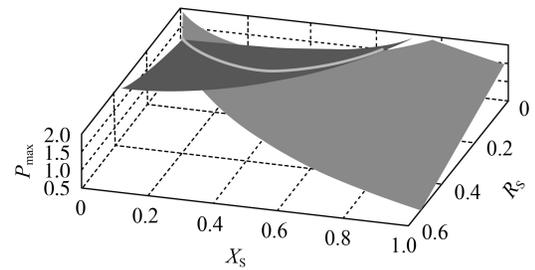
### 3.2 $Z'_s$ 的计算方法

以换流器向交流系统注入纯有功为例,其他场景下的计算方式与之相似。可将式(12)视为函数  $P_{\max}=f(R_s, X_s)$ ,将  $Z'_s$  的取值问题转化为  $f(R_s, X_s)$  的取值问题。若仅考虑  $P_{\max}$  与  $Z_s$  的关系,阻抗  $Z_s$  减小,  $P_{\max}$  趋向于增大,但减小  $Z_s$  将会使交流稳态电流  $I_s$  增大。因而在选择  $Z'_s$  的配置方案时,应保证  $I_s$  在安全范围之内,即:

$$\frac{2P^2}{U_s^2 + 2PR_s + \sqrt{(2R_s P + U_s^2)^2 - 4P^2 Z_s^2}} \leq I_s^2 \quad (13)$$

$Z'_s$  的取值范围如图 10 所示,可以将式(12)和式(13)所描述的函数关系绘于同一坐标系内。图中  $P_{\max}$ 、 $R_s$ 、 $X_s$  均为标么值。可见平面 1 位于平面 2 下方的区域是  $Z'_s$  取值范围,在这一区域中,不同  $Z'_s$  都对应着某一  $P_{\max}$  值。若已知期望的  $P_{\max}$  值,可以选择相应的阻抗值。

在实际工程中,换流器交流侧等值阻抗可能会随交流系统运行方式变化而改变。为避免由此带来的参数失配问题,可以先离线计算交流系统短路容量并得到各种运行方式下的等值阻抗,基于离线计算的不同阻抗值确定多套整定参数,在线运行时再



式(12)所绘平面1, 式(13)所绘平面2

图 10  $Z'_s$  的取值范围

Fig.10 Range of  $Z'_s$

根据离线计算的结果进行匹配。同时,在选取期望的  $P_{\max}$  时考虑一定裕度。如在下文的仿真中,原先期望的  $P_{\max}=1.25$  p.u.,计算时则按  $P_{\max}=1.4$  p.u. 求得虚拟阻抗  $Z_V$  值。

### 3.3 基于虚拟阻抗控制的优化方法

对于交流系统阻抗  $Z_s=R_s+j\omega L_s$ ,通过物理手段改变  $Z_s$  会增加工程整体成本,因而本文考虑通过控制的方式将  $Z_s$  等效为阻抗  $Z'_s$ ,即在换流器交流侧增加一个虚拟阻抗  $Z_V=R_V+j\omega L_V$ ,使得  $Z'_s=Z_s-Z_V$ 。

此时,  $U_s$ 、 $U_1$  满足:

$$(L_s - L_V) \frac{di}{dt} + (R_s - R_V) i = U_s - U_1 \quad (14)$$

式(14)经  $dq$  变换、拉斯变换后得到:

$$\begin{cases} U_{ld} = U_{ld0} + \Delta U_{ld} \\ U_{lq} = U_{lq0} + \Delta U_{lq} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} U_{ld0} = U_{sd} + \omega L_s i_q - (R_s + sL_s) i_d \\ U_{lq0} = U_{sq} - \omega L_s i_d - (R_s + sL_s) i_q \\ \Delta U_{ld} = -\omega L_V i_q + (R_V + sL_V) i_d \\ \Delta U_{lq} = \omega L_V i_d + (R_V + sL_V) i_q \end{cases}$$

其中,  $U_{ld0}$ 、 $U_{lq0}$  为原电流控制器输出的交流电压;  $\Delta U_{ld}$ 、 $\Delta U_{lq}$  为引入阻抗  $Z_V$  后的电压优化量。为了通过控制实现改变  $Z_s$  的目的,可在电流控制器输出的交流电压指令  $U_{l0}$  上增加优化量  $\Delta U_1$ ,即引入关于交流电流的比例-微分反馈环节。考虑到单纯的微分环节在实际工程中难以实现,可将微分环节设计为  $\frac{K_L T_s}{1 + T_s}$ ,其中  $K_L$  为根据  $Z_V$  选取的控制器参数,  $T$  为时间常数。基于虚拟阻抗的优化控制器框图如图 11 所示,图中  $U'_{ref}$  为控制器实际输出的交流电压指令值。

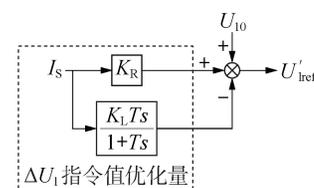


图 11 引入  $Z_V$  后的控制框图

Fig.11 Control block diagram with  $Z_V$

### 3.4 控制方式的仿真实证

当交流系统等值阻抗  $Z_s=0.4+j0.6$  p.u. 时,期望换流器稳定输出有功功率 500 MW,取  $P_{\max}=1.4$  p.u.,相应地,  $K_n=0.18, K_L=0.23$ 。

仿真时序如下:定功率站功率指令从 2 s 开始,以 100 MW/s 速度从 200 MW 上升至 500 MW。6 s 后,分别在 H、I、J、K 这 4 个时间点处,将  $Z_s$  改变为  $0.3+j0.6$  p.u.、 $0.3+j0.5$  p.u.、 $0.4+j0.7$  p.u.、 $0.5+j0.7$  p.u.。引入  $Z_v$  前、后换流器输出有功功率  $P$  的仿真波形如图 12 所示。由图 12 可知,未引入  $Z_v$  的换流器随着输出功率的提升,逐渐进入失稳状态:320 MW 后功率波形出现明显波动,380 MW 后进入失稳状态;引入  $Z_v$  后,换流器输出功率平稳上升至 500 MW,且可以维持稳定运行;在考虑了参数整定裕度后,交流侧等值阻抗变化并不会明显影响换流器运行的稳定性。

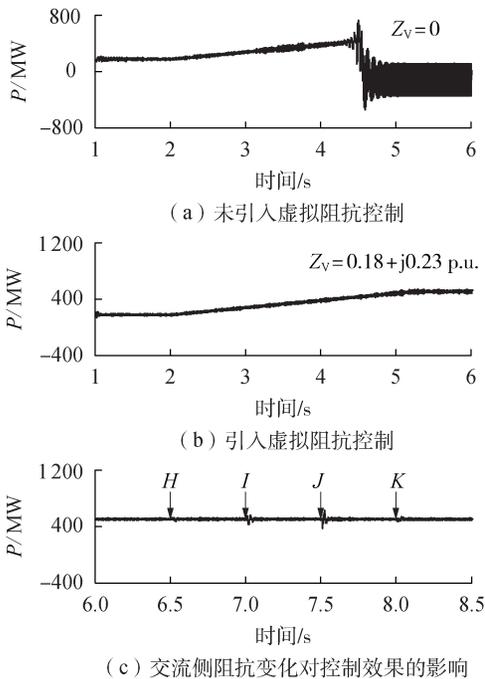


图 12 引入  $Z_v$  前、后换流器输出功率对比

Fig.12 Comparison of active power for converter before and after adding  $Z_v$

## 4 结论

为确定换流器安全运行范围,本文推导了换流器稳定运行边界,建立了用于描述换流器运行特性的  $P$ - $Q$  功率域。利用推导的运行边界,进一步分析了换流器运行范围与换流器功率传输能力的影响因素,并提出了一种用于提高换流器运行稳定性的控制方法。经仿真实证可知所提的方法可以明显增加换流器的稳定运行范围。本文的研究内容可以进一步得从以下 2 个方面展开讨论。

(1) 本文虽然以单端系统作为分析对象,但得到

的结论同样适用于多端系统。对于多端系统中定功率站而言,其与单端系统模型的区别在于换流器直流电压数值不同,需要考虑从定电压站到定功率站的线路上的压降损耗;由于定电压站起到平衡有功功率的作用,定功率站运行范围还会受到定电压站的有功传输能力的影响。

(2) 由于部分系统参数在实际场景中可能发生变化,如交流网架结构变化导致换流器交流侧阻抗值变化等,换流器的运行边界并非固定不变的。原先可以稳定运行的换流器可能会因此进入不稳定区域,导致失稳。

### 参考文献:

- [1] 安婷, Andersen B, Macleod N, 等. 中欧高压直流电网技术论坛综述[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2407-2416.  
AN Ting, Andersen B, Macleod N, et al. Overview of Sino-European HVDC grid technical forum[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2407-2416.
- [2] TANG G, HE Z, PANG H. R&D and application of voltage sourced converter based high voltage direct current engineering technology in China[J]. Journal of Modern Power Systems & Clean Energy, 2014, 2(1): 1-15.
- [3] 李辉, 邓吉利, 姚然, 等. 计及运行工况的 MMC 换流阀可靠性建模与分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 114-120.  
LI Hui, DENG Jili, YAO Ran, et al. Reliability modeling and analysis of MMC converter valve considering operation conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 114-120.
- [4] 孙谦浩, 李亚楼, 宋强, 等. 基于桥臂基波平均开关函数的 MMC 模型在直流电网仿真中的应用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 31-37.  
SUN Qianhao, LI Yalou, SONG Qiang, et al. Application of MMC model based on arm fundamental wave average switching function in DC grid simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 31-37.
- [5] 孙棚, 王华伟, 雷霄, 等. 架空线柔性直流电网的直流短路电流限制研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 219-223.  
SUN Xu, WANG Weihua, LEI Xiao, et al. Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 219-223.
- [6] 和敬涵, 周琳, 罗国敏, 等. 基于单端电气量的多端柔性直流配电系统暂态保护[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 158-165.  
HE Jinghan, ZHOU Lin, LUO Guomin, et al. Transient protection based on single-end electrical signals for multi-terminal flexible DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 158-165.
- [7] 李威, 李庚银. MMC 控制策略比较分析研究[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(8): 55-63.  
LI Wei, LI Gengyin. Research on comparative analysis of MMC control strategies[J]. Electric Machines & Control, 2016, 20(8): 55-63.
- [8] LI R, FLETCHER J E. A novel MMC control scheme to increase the DC voltage in HVDC transmission systems[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 544-553.
- [9] KRISHAYYA P C S, ADAPA R, HOLM M, et al. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities. Part I: AC/DC system interaction phenomena[R]. Paris, France: CIGRE, 1997.
- [10] BARKER C D, KIRBY N M. Reactive power loading of com-

- ponents within a modular multi-level HVDC VSC converter [C]//2011 IEEE Electrical Power and Energy Conference. Urbana, Illinois, USA:IEEE,2011:86-90.
- [11] ZHOU J Z,GOLE A M. VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics [C]//IET International Conference on AC & DC Power Transmission. Birmingham,UK:IET,2013:1-6.
- [12] ZHOU J Z,GOLE A M. Rationalization of DC power transfer limits for VSC transmission[C]//IET International Conference on AC & DC Power Transmission. Birmingham,UK:IET,2015:1-8.
- [13] ZHANG Z,JIANG W,BIE X,et al. Operating area for modular multilevel converter based high-voltage direct current systems [J]. IET Renewable Power Generation,2016,10(6):776-787.
- [14] HENG W,KWOK-WAI M. IGBT technology for future high-power VSC-HVDC applications[C]//12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Beijing, China: IET,2016:1-6.
- [15] 屠卿瑞,陈桥平,李一泉,等. 柔性直流输电系统桥臂过流保护

定值配合方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):254-262.

TU Qingrui,CHEN Qiaoping,LI Yiquan, et al. Coordination method of arm overcurrent protection settings in flexible HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(22):254-262.

#### 作者简介:



王少伟

王少伟(1994—),男,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制(**E-mail**:ws0345@163.com);

刘天琪(1962—),女,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化(**E-mail**:tqliu@sohu.com);

李保宏(1986—),男,四川平昌人,讲师,博士,通信作者,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制(**E-mail**:scu\_lbh@163.com)。

## Analysis of operation boundary of modular multilevel converter and control method for improving operation stability

WANG Shaowei,LIU Tianqi,LI Baohong

(College of Electrical Engineering,Sichuan University,Chengdu 610065,China)

**Abstract:** Based on the analysis that the stable operation of MMC (Modular Multilevel Converter) should satisfy various constraints, the operation boundary of MMC is deduced. Taking the active power and reactive power injected into the AC system as the index, the  $P$ - $Q$  power domain for describing the operation characteristics of converter is established. The various factors affecting the operation boundary of the converter are analyzed, and the influence of AC system impedance on the active power transmission capability of the converter is expounded in detail. In order to increase the stable operation range of converter, an optimization method based on virtual impedance control is proposed.

**Key words:** DC grid; MMC;  $P$ - $Q$  power domain; control scheme