

# 基于 Lyapunov 法的风电全直流系统大扰动稳定性分析

徐洋, 李凤婷, 刘江山

(新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 全直流型风电场具有良好的主动支撑能力且能解决传统交流输电系统中无功功率和过电压等问题, 受到学术界和工业界的广泛关注。由于风电全直流系统电力电子化程度高, 在发生大扰动时故障发展迅速且具有强时变非线性, 暂态稳定性是影响其稳定运行的关键问题。针对风电全直流系统大扰动稳定性问题, 考虑到稳定性保守性问题, 首先使用 Takagi-Sugeno(T-S)模糊模型方法建立风电全直流系统的主电路和控制器参数的平均模型。其次借助 Lyapunov 第二法构建系统能量函数, 并构造估计系统稳定域, 以此直观地对风电全直流系统进行大扰动稳定性分析。然后根据线性矩阵不等式(linear matrix inequality)工具判断系统电气及控制参数对系统大扰动稳定域的关系, 并通过 Lyapunov 函数绘制出的系统稳定域, 针对各系统参数对风电直流系统的影响进行了比较分析, 实现了大扰动情况下保持系统的稳定性。仿真结果验证了所提方法有效性。

**关键词:** 风电全直流系统; TS 模糊模型; 大扰动稳定性分析; 线性矩阵不等式

## Large Disturbance Stability Analysis of Wind Power Full DC System Based on Lyapunov Method

XU Yang, LI Fengting, LIU Jiangshan

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** Full DC wind farms have good active support capabilities and can solve problems such as reactive power and overvoltage in traditional AC transmission systems, which have attracted widespread attention from academia and industry. Due to the high degree of power electronicization in wind power full DC systems, faults develop rapidly and exhibit strong time-varying nonlinearity in the event of large disturbances. Transient stability is a key issue affecting their stable operation. To address the issue of large disturbance stability in wind power full DC systems, considering the conservatism of stability, the Takagi Sugeno (TS) fuzzy model method is firstly used to establish an average model of the main circuit and controller parameters of the wind power full DC system. Secondly, the Lyapunov second method is used to construct the system energy function and an estimation of the system's stability domain, in order to intuitively analyze the large disturbance stability of the wind power full DC system. Then, based on the linear matrix inequality tool, the relationship between the electrical and control parameters of the system and the large disturbance stability domain of the system is determined. The system stability domain is plotted using the Lyapunov function, and the impact of each system parameter on the wind power DC system is analyzed and compared to achieve system stability analysis under large disturbances. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through simulation results.

**Key words:** wind power full DC system; TS fuzzy model; large disturbance stability analysis; linear matrix inequality

## 0 引言

风电全直流系统<sup>[1]</sup>作为一项新兴的技术方案,能够有效解决传统交流风电系统所存在的无功功率、负序以及锁相等方面的问题,因而受到了研究者和产业界的广泛关注。风电全直流系统借助多个电力电子变换器达成电能的汇集与送出,属于典型的高电力电子化系统。伴随电力电子变换器在电力系统中所占比例的持续增长<sup>[2]</sup>,电网呈现出低惯量、弱阻尼等特征<sup>[3]</sup>,其稳定性问题不容小觑<sup>[4]</sup>。

与传统电网稳定性相类似,风电全直流系统稳定性分析依据干扰的性质可划分为:小扰动稳定性和大扰动稳定性。当前,针对系统小扰动稳定性的分析研究较多<sup>[5-8]</sup>。文献[6]运用根轨迹法剖析了不同电网强度下同步参数对并网系统小扰动稳定性的影响机制。文献[7]通过构建直流电网的小扰动降阶模型对柔性直流系统小扰动展开了分析。然而,小扰动稳定性分析需借助特征值、奈奎斯特和阻抗分析稳定性标准等线性方法以判断系统在平衡点附近能否保持稳定,却难以确定平衡点的稳定域范围以及系统的稳定裕度边界<sup>[8]</sup>。因此,亟待对风电全直流系统大扰动稳定性问题进行深入分析。

暂态稳定性是指运行中的电力系统在遭受暂态大扰动后维持同步运行的能力。当前,研究暂态稳定性的分析方法主要涵盖以下4种:时域仿真法<sup>[9]</sup>、相平面法<sup>[10]</sup>、Lyapunov法<sup>[11-12]</sup>以及人工智能法<sup>[13]</sup>。时域仿真法具备较高的可靠性,常被用于验证系统大扰动稳定性分析方法的准确性。然而,该方法无法提供有关系统稳定性裕度的信息,因而难以指导系统参数的设计。相平面法通过图解方式对系统稳定性展开分析,能够直观呈现非线性系统经受大扰动后的稳定性状况。但对于阶数较高的系统较难得出稳定边界条件<sup>[14]</sup>。人工智能法可兼顾大扰动稳定性分析的快速性与准确性。不过,其局限性在于需要大量样本数据,且准确性与训练样本数据紧密相关。若测量数据与训练数据不一致则精度可能会降低。此外,当系统参数发生变化时原评估模型将不再适用。Lyapunov法作为研究非线性系统稳定性的基础理论被视作分析非线性系统大扰动稳定性的最有效方法之一。针对非线性系统主要存在Lyapunov间接法和Lyapunov直接法。前者依据Lyapunov函数在遭受大扰动后能否逐渐减小并收敛至一个常数

来判断系统的大扰动稳定性。该方法尤其适用于非线性复杂电力系统模型,但仅能得出平衡状态附近的局部稳定性结论,缺乏稳定裕度信息。后者相较于间接法更为直观和直接,能够直接借助系统的动态方程分析稳定性,无需额外求解Lyapunov函数即可获取系统的稳定性信息,这使其在应用上更为灵活,适用于复杂的非线性系统。然而,Lyapunov直接法面临的挑战在于如何选取合适的Lyapunov函数以及如何有效分析系统的动态特性<sup>[15]</sup>。

为了克服运用Lyapunov方法构建能量函数所存在的弊端,本文采用Takagi - Sugeno(TS)模糊方法。该方法是一种基于构建Lyapunov函数的适用于分析系统大扰动稳定性的方法。通过构建风电全直流系统的TS模糊模型并借助线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)能够有效地构建Lyapunov函数,进而对全直流风电系统的大扰动稳定性展开分析。在运用TS模糊方法处理非线性系统时,会将系统划分为多个局部区域,并在每个区域内转化为适用的线性模型。此方法能够针对不同的工作点或运行条件,采用不同的线性模型来近似刻画整体非线性系统的行为。

基于Lyapunov稳定性理论构建系统稳定域以直观评估系统在遭受大扰动时维持稳定的区间<sup>[16]</sup>。通过构造Lyapunov函数所得到的估计稳定域结果,因线性化过程致使估计稳定域存在一定的保守性,故而需探寻风电全直流系统的最大估计稳定域<sup>[17]</sup>。就TS模糊模型方法而言,其复杂度会随非线性变量的增多呈指数级增长,易引发“维数灾难”<sup>[18]</sup>,因此有必要对系统进行简化处理。为剖析风电全直流系统参数对稳定性的影响<sup>[19]</sup>,本文以稳定域<sup>[20-23]</sup>的形式直观呈现系统应对大扰动的抗干扰能力。

文献[24]从解析视角对系统开展大扰动稳定性分析。此研究方法依托非线性系统的主电路拓扑结构,需依据系统主电路中各电气元件的参数展开分析计算。对于控制部分亦是如此,这使得求解过程相对复杂。另一方面,在构建能量函数时需进行多次求偏导运算<sup>[25]</sup>,多次求偏导会致使部分系统参数信息缺失。本文所提出的方法从数值计算的角度切入,以图形形式呈现稳定域的范围边界,如此分析更为直观,且不会丢失系统参数,在一定程度上弥补了系统大扰动稳定性分析保守性的问题。

针对上述问题,本文设计了风电全直流系统,

首先构建风电全直流系统模型并对该模型加以简化。接着提出一种基于系统稳定域估计的大扰动稳定性分析方法, 基于 Lyapunov 法对风电全直流系统进行 Lyapunov 函数构建, 估算系统工作点的稳定域, 并在此基础上探讨系统电气参数和控制参数对系统大扰动稳定性的影响, 确定影响系统大扰动稳定性的关键因素并开展稳定性分析。

## 1 风电全直流系统

传统交流风电系统在并网、系统稳定性方面存在一些问题, 如频率调节和电压稳定性、无功功率补偿不足、惯性响应不足、暂态和动态稳定性等问题。随着风电规模的增大传统电网在调度过程中面临更复杂的负荷预测、出力波动和电力平衡问题。风电机组的功率预测难度大, 且风电的间歇性和不确定性增加了电力调度的难度。而全直流风电系统通过将风电机组的输出电能直接转换为直流电, 并通过直流输电技术进行远程输送, 能够有效避免交流系统中的频率和电压波动问题, 更加适应远离电网的风电场并实现大规模并网, 并且能够提升系统稳定性。对于直流系统在大扰动发生时系统的动态响应能力显得尤为重要。直流系统与传统交流系统相比缺少惯性响应, 因此需要开发新的调度算法和

控制策略, 确保风电系统在遇到大扰动时能够快速响应、有效调节, 从而保障电网的稳定运行。

为避免直流变压器升压比过高带来的制造困难的问题, 本文风电全直流系统采用由二级升压的并联型直流汇集直流送出系统<sup>[23]</sup>, 图 1 所示为风电全直流系统结构示意图。以永磁直驱风力发电机 (permanent magnet synchronous generator, PMSG) 组成的风电场为例, 风电全直流系统经直流风电机组发出直流电后通过中压 DC/DC 变换器进行一次升压, 风电场中多台风机经直流汇集后再通过大功率高压 DC/DC 变换器进行二次升压。最后, 通过并网逆变器传输至交流电网。二级升压的风电全直流系统通过在机侧配置直流变换器使风电输出的直流电能在汇集过程中降低汇集损耗。通过二级升压还能降低直流变换器的升压比, 从而大幅降低了直流变换器的设计难度, 且风机与电网之间存在两级变换有助于提高风电场的故障穿越能力。下文将介绍风电全直流系统中各电力电子变换器的电气特性。

## 2 风电全直流系统关键设备模型及其控制策略

### 2.1 直流风机模型及控制策略

本文将永磁直驱风机及整流站视做一个整体,

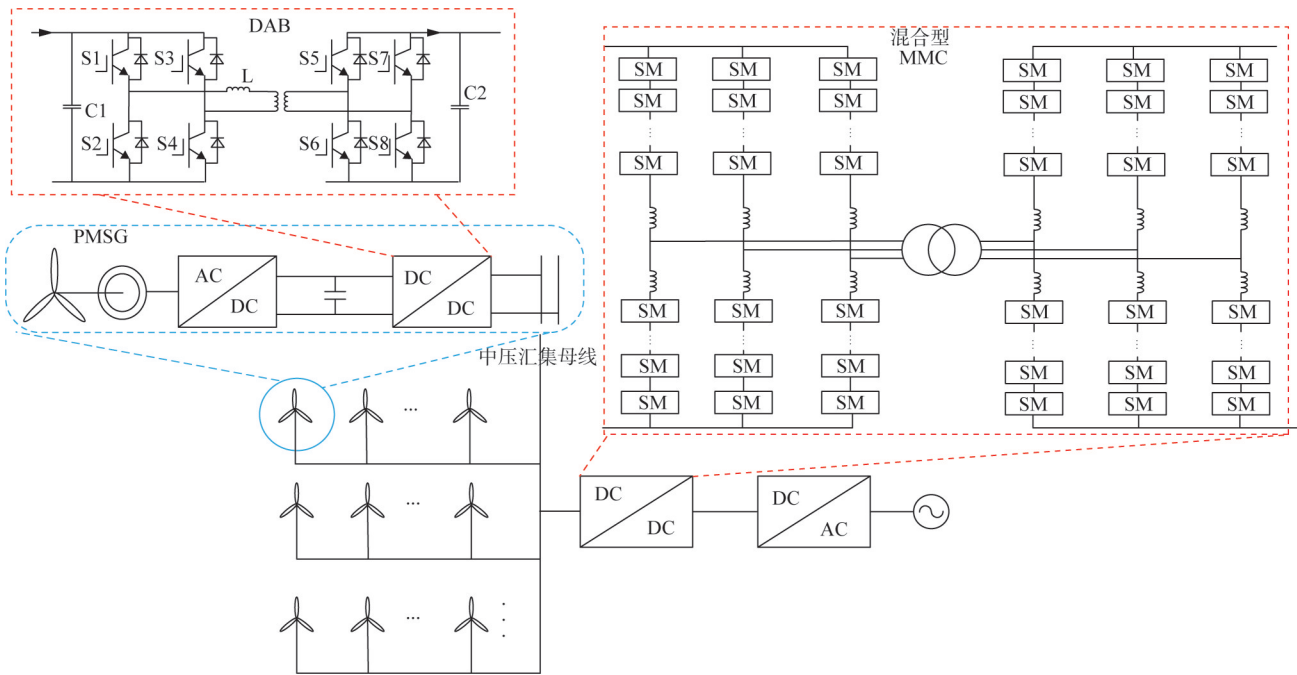


图 1 风电全直流系统

Fig. 1 Full DC wind power system



用直流风机(DC wind turbine)表示。永磁直驱风机捕获风能发电后经整流器站将输出交流电整流成直流,其中整流站负责对风机的转速、有功功率、无功功率等方面进行控制,保证直流风机的稳定运行。研究风电全直流系统大扰动稳定性时,因为风电场内存在大量风机,若采用全阶模型进行建模将会导致系统阶数急剧增加且时间尺度增大。因此,根据文献[26]中奇异摄动理论对直流风机降阶。图2为直流风机整流器 $dq$ 轴等效模型。

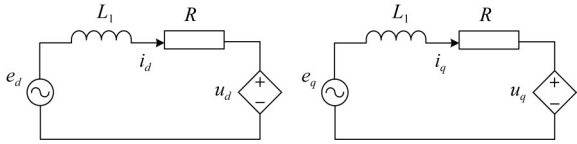


图2 整流器 $dq$ 轴等效模型

Fig. 2 Equivalent model of rectifier  $dq$  axis

此时,直流风机状态方程为:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega_s}{dt} = P\psi_f i_q - f\omega_s \\ e_d = L_d \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q + u_d \\ e_q = L_q \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: $J$ 为转子的惯性时间常数; $P$ 为发电机转子极对数; $\omega_s$ 为发电机电角速度; $\psi_f$ 为转子永磁体磁链,下标 $f$ 为摩擦系数; $e_d$ 、 $e_q$ 分别为风机侧三相电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $i_d$ 、 $i_q$ 分别为直流风机侧电流的 $d$ 、 $q$ 轴分量; $L_d$ 、 $L_q$ 为机侧电感; $R$ 为电路等效串联电阻; $\omega Li_d$ 、 $\omega Li_q$ 为耦合量; $\omega$ 为角频率; $L$ 为风机转子电感。

整流站采用转速外环和电流内环的双环控制策略。对于整流站的内电流回路采用传统的前馈解耦方法,其表达式如式(2)所示。

$$\begin{cases} i_{dref} = k_{p1}(\omega_{sref} - \omega_s) + k_{i1} \int (\omega_{sref} - \omega_s) dt \\ u_{dref} = e_d - [k_{p2}(i_{dref} - i_d) + k_{i2} \int (i_{dref} - i_d) dt - \omega Li_q] \\ u_{qref} = e_q - [k_{p2}(i_{qref} - i_q) + k_{i2} \int (i_{qref} - i_q) dt + \omega Li_d] \end{cases} \quad (2)$$

式中 $i_{dref}$ 、 $u_{dref}$ 、 $u_{qref}$ 分别为直流风机侧电流 $d$ 轴分量、直流风机侧电压 $d$ 、 $q$ 轴分量参考值; $\omega_{sref}$ 为发电机参考电角速度; $k_{p1}$ 、 $k_{i1}$ 分别为电压外环的PI系数; $k_{p2}$ 、 $k_{i2}$ 分别为电流内环控制系数。

图3为机侧变换器双环解耦控制策略框图。

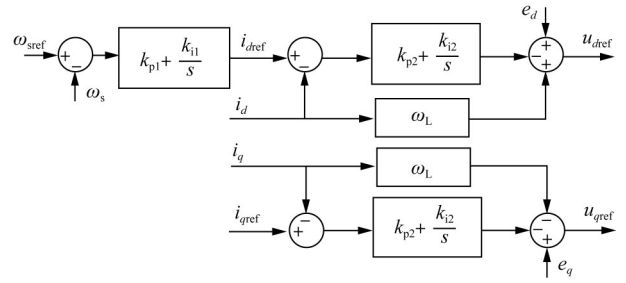


图3 整流站控制策略框图

Fig. 3 Rectifier station control block diagram

PI控制器中含有积分环节,不利于列出状态空间方程。为此定义PI控制器的积分输出量为新的量,这样就得到了PI控制器的表达式如式(3)所示。

$$\begin{cases} \int (\omega_{sref} - \omega_s) dt = S_s \\ \int (i_{dref} - i_d) dt = S_d \\ \int (i_{qref} - i_q) dt = S_q \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i_{qref}$ 为直流风机侧电流 $q$ 轴分量的参考值; $S_s$ 、 $S_d$ 、 $S_q$ 分别为角频率差、 $d$ 轴电流差和 $q$ 轴电流差稳态积分数值。

## 2.2 DAB模型及其控制策略

双有源桥直流变换器(dual-active-bridge, DAB)因其模块化的对称结构、较高的功率密度、零电压开关、双向能量传输能力以及简单移相控制(phase-shift)等优势<sup>[27]</sup>,成为电力电子变压器功率传输级的常用拓扑。DAB基于全桥结构的DC-DC变换器的基本工作原理是通过两个独立的全桥变换器(分别位于输入端和输出端)实现电能的传递。在DAB拓扑中两个全桥变换器分别位于直流输入侧和直流输出侧,通过一个高频变压器隔离并传输功率。通过将理想变压器原边和副边的H型全桥开关控制信号相位错开可通过控制信号的相位差异使得电感两端的电压波形呈现相位差,从而影响能量的流动方向以及传输的强度。图4为其拓扑图。

由图4可知, $U_{dc1}$ 和 $U_{dc2}$ 分别为DAB变换器原边、副边电压, $i_{in}$ 和 $i_{out}$ 分别为DAB变换器的输入和输出电流。在输入电压高、输出电流大的场合中,由DAB级联而成的直流固态变压器(DC solid state transformer, DCSST)转换效率更高<sup>[28]</sup>,得到了广泛的应用。根据拓扑图得到关于双有源桥直流

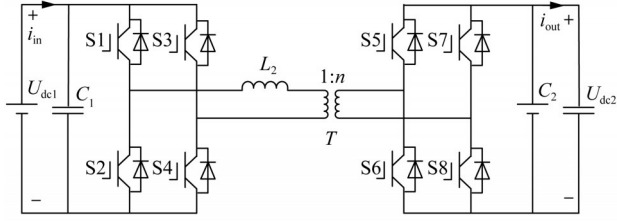


图 4 DAB 拓扑结构图

Fig. 4 DAB topology structure diagram

变换器输入输出状态方程。

$$\begin{cases} C_2 \frac{dU_{dc2}}{dt} = i_{out} - \frac{3 \cdot (U_{sd}I_{sd} + U_{sq}I_{sq})}{2} \\ L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} = U_{dc1} - nU_{dc2} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $U_{sd}$ 、 $U_{sq}$  分别为 DAB 交流电源电压  $d$ 、 $q$  轴分量;  $I_{sd}$ 、 $I_{sq}$  分别为电流  $d$ 、 $q$  轴分量;  $n$  为变比;  $C_2$ 、 $L_2$  分别为二次侧电容和电感。

根据 DAB 变换器的功率公式<sup>[29]</sup>, 在一个开关周期内对输入、输出电流进行状态空间平均化, 可得平均输入电流  $I_{in}$ 、平均输出电流  $I_{out}$  及其控制策略分别为:

$$\begin{cases} I_{in} = \frac{P_{out}}{U_{dc}} = \frac{U_{dc2}D(1-D)}{2nf_sL_1} \\ I_{out} = \frac{P_{out}}{U_{dc1}} = \frac{U_{dc1}D(1-D)}{2nf_sL_1} \\ D = (U_{dcref2} - U_{dc2})k_{p4} + k_{i4} \int (U_{dcref2} - U_{dc2})dt \\ S_{dc1} = \int (U_{dcref2} - U_{dc2})dt \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $k_{p4}$ 、 $k_{i4}$  为 DAB 变换器 PI 控制参数;  $D$  为占比;  $f_s$  为开关频率;  $S_{dc1}$  为 DAB 电压稳态积分数值;  $P_{out}$  为 DAB 变换器输出功率;  $U_{dcref2}$  为二次侧直流电压参考值。

全直流系统中 DAB 变换器用于稳定中压侧直流电压, 故采用输出侧稳压控制策略, 控制框图如图 5 所示, 其中  $\varphi$  为移相角。

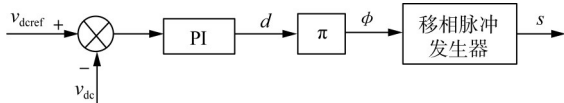


图 5 DAB 控制策略框图

Fig. 5 Control strategy block diagram of DAB

### 2.3 MMC 模型及其控制策略

MMC 换流站是风电全直流系统中的重要组成部分, 是其二级升压和与交流电网连接的最后一个

环节。图 6 为 MMC 单相等效电路图。对于模块化多电平换流器, 由于其特有的拓扑结构, 对于电压有极高的承受能力, 可以很好地应用于风电全直流系统中。风电场二级升压后产生的高压经 MMC 汇入交流电网, 在系统受到大扰动时能够保证风电全直流系统的稳定以及向交流电网提供一定的支撑能力。

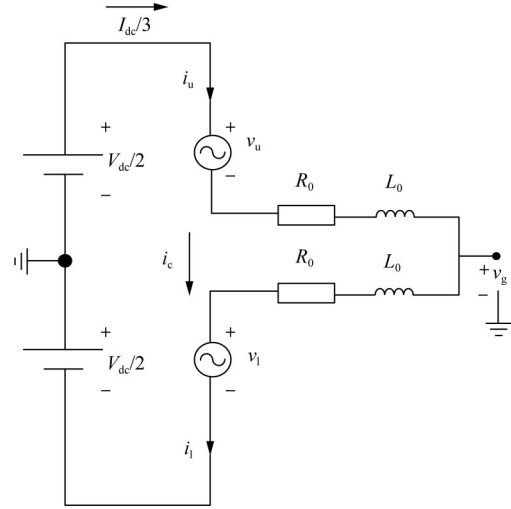


图 6 MMC 单相等效电路图

Fig. 6 Single phase equivalent circuit diagram of MMC

图 6 中  $V_{dc}$  和  $I_{dc}$  分别为直流侧电压和电流,  $i_u$  和  $i_l$  分别为 MMC 上、下桥臂电流,  $v_u$  和  $v_l$  为上、下桥臂子模块电压。  $R_0$  与  $L_0$  分别为等效电阻和桥臂电感。  $V_g$  为交流侧电压。由基尔霍夫定律得出:

$$\begin{cases} v_g + L_0 \frac{di_u}{dt} + R_0 i_u + v_u = \frac{V_{dc}}{2} \\ v_g - L_0 \frac{di_l}{dt} - R_0 i_l - v_l = -\frac{V_{dc}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

换流站采用双环控制策略如图 7 所示, 其中电流内环调节是由于外环电压的状态变化而引起的, 这是因为外环电压的调整影响了内环电流。电流内环具有较高的带宽和快速调节能力, 因此在评估大信号扰动时, 通常认为内环电流能够实时准确地跟踪参考值。这种设计策略的优势在于内环控制的快速响应能力, 使系统能够在大信号扰动下保持稳定性, 并且通过内外环之间的耦合, 确保了系统整体的稳定性和性能。将式(6)由 abc 静止坐标系转换为  $dq$  旋转坐标系并进行简化, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} L_0 \frac{di_{vd}}{dt} + Ri_{vd} = -u_{sd} + u_{diffd} + \omega Li_{vq} \\ L_0 \frac{di_{vq}}{dt} + Ri_{vq} = -u_{sq} + u_{diffq} - \omega Li_{vd} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $u_{diffd}$ 和 $u_{diffq}$ 分别为三相差模电压在 $dq$ 旋转坐标系下 $d$ 、 $q$ 轴分量； $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ 、 $i_{sd}$ 、 $i_{sq}$ 分别为电网侧电压、电流在 $dq$ 旋转坐标系下 $d$ 、 $q$ 轴分量； $i_{vd}$ 、 $i_{vq}$ 分别为交流侧电流在 $dq$ 旋转坐标系下 $d$ 、 $q$ 分量。

图 7 为 PI 解耦控制器的控制模型，可得下列方程。

$$\begin{cases} u_{diffd} = k_{p4}(i_{vdref} - i_{vd}) + k_{i4} \int (i_{vdref} - i_{vd}) + u_{sd} - \omega Li_{vq} \\ u_{diffq} = k_{p4}(i_{vqref} - i_{vq}) + k_{i4} \int (i_{vqref} - i_{vq}) + u_{sq} + \omega Li_{vd} \\ S_{vd} = \int (i_{vdref} - i_{vd}), S_{vq} = \int (i_{vqref} - i_{vq}) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $k_{p4}$ 、 $k_{i4}$ 为控制器电流内环的 PI 控制参数。

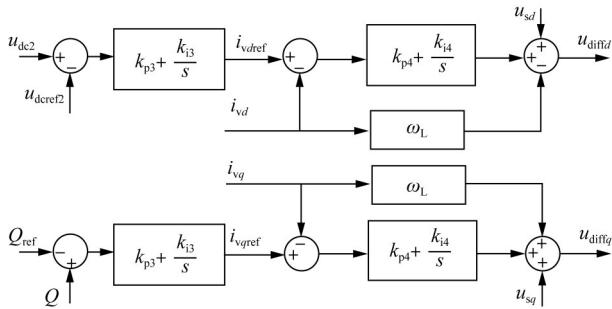


图 7 MMC 解耦控制器

Fig. 7 MMC decoupling controller

为了保证两级升压型直流组网系统的稳定运行，实现风能的最大限度的送出，需对中、高压 DC/DC 变换器进行定直流输入电压控制。同时网侧 MMC 换流站具备无功功率的控制自由度，可以用于支撑所连接交流系统的电压来维持系统稳定。

### 3 基于 TS 模糊模型的大扰动稳定性分析

#### 3.1 TS 模糊模型渐进稳定域分析方法

TS 模糊模型由 Sugeno 和 Takagi 于 1985 年提出，它是一种描述复杂非线性系统的方法。该方法将状态变量输入空间划分为几个模糊子空间，并分别进行原始系统线性化，分别得到该子空间局部线性模型。最后，将所有局部线性模型进行集成通过加权的非线性隶属函数求和以形成全局模糊模型来

近似原始非线性系统。TS 模型是由“IF-THEN”规则来描述系统的局部化线性模型，以下是对该规则的描述。

非线性系统可描述为：

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{u}(t) \quad (9)$$

式中： $\dot{\mathbf{x}}(t)$ 状态空间表达式； $\mathbf{x}(t)$ 为状态向量，表示系统的内部状态； $\mathbf{A}_i$ 、 $\mathbf{B}_i$ 分别为系统矩阵，描述状态之间的内部动态关系； $\mathbf{u}(t)$ 为表示系统的外部控制输入。

模糊规则的数量是影响 TS 模糊模型精度的一个重要因素。通常，模糊规则的数量由输入变量的模糊划分和输入空间的粒度来决定。在实际应用中模糊规则的选择不仅要考虑输入变量的范围，还要兼顾系统的动态特性和建模精度。若规则过少，可能导致模型无法准确捕捉到系统的非线性动态；若规则过多，则会导致计算复杂度的增加，并且可能引入冗余的规则，反而影响模型的可解释性。模糊集的隶属度函数的选择决定了输入变量模糊划分的精度。对于不同的输入变量，选择恰当的隶属度函数是非常重要的。不同类型的隶属度函数会导致模糊推理过程的差异，进而影响到最终的输出。因此依据决策变量对模糊子集的隶属度构造以下权重函数并进行归一化处理。

$$\begin{cases} w_i = w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^q F_j(z(t)), i = 1, 2, \dots, r \\ h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))}, i = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (10)$$

式中： $w_i(z(t))$ 为未归一化权重； $z(t)$ 为关于时间 $t$ 的输入变量； $h_i(z(t))$ 为模糊权值； $q$ 为参与运算的数量； $r$ 为输出对象的数量。

最后，通过归一化权函数把所有局部化线性模型合并为全局模糊模型。以下是对非线性系统的状态空间进行描述的方程。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))(\mathbf{A}_i \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_i \cdot \mathbf{u}(t)) \\ \mathbf{y}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))\mathbf{C}_i \cdot \mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\mathbf{A}_i$ 、 $\mathbf{B}_i$ 、 $\mathbf{C}_i$ 为常数矩阵； $h_i(z(t))$ 为模糊权值； $r$ 为模糊规则的数量。通过选用适合的模糊规则和线性函数来构造出线性子系统的合集，以此近似表示出非线性系统。

系统稳定域是指系统在无外部干扰下随着时间的

推移, 系统状态将收敛到的一个区域或集合。通过估计平衡点的稳定域, 可以有效直接地反映非线性系统的稳定性。对于系统实际稳定域的范围是很难获取的, 因此采用适合的方法构建渐进稳定域。但是渐进稳定域都是比较保守的, 其稳定域范围要小于实际稳定域。对于渐进稳定域, 本文将其作为系统稳定域的一个充分不必要条件, 即起始点位于渐进稳定域内, 系统最终能够在平衡点保持稳定运行。

根据 Lyapunov 稳定性定理, 满足以下线性矩阵不等式的条件下系统是渐进稳定的。

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \mathbf{M}^T < 0 \\ \mathbf{A}_i^T \cdot \mathbf{M} + \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}_i < 0, i \in \{1, 2, \dots, q\} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为正定矩阵;  $i$  为状态变量中非线性相数量, 每个非线性相有至少两个值: 最小值  $f_{\min}$  和最大值  $f_{\max}$ , 因此所得模型至少有  $i=2q$  个规则。在这种情况下 TS 模糊模型的所有线性局部模型都是稳定的, 而原始系统是小信号稳定的。对基于 TS 模糊模型求取系统的 Lyapunov 函数, 进行大信号稳定性分析。假设 Lyapunov 函数, 如  $\mathbf{V}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{x}$  ( $\mathbf{x}$  是  $n$  维实列向量) 所示, 那么基于 Lyapunov 稳定性理论第二定理, 只要满足  $\mathbf{V}(\mathbf{x})$  的变化率  $\dot{\mathbf{V}}(\mathbf{x}) \leq 0$ , 非线性系统就是渐进稳定的。因此, 将 TS 模糊模型(11)带入即可得到渐进稳定的条件如式(12)所示。如果 LMI(11)是可行的, 那么该系统是渐近稳定的。此时, 可以确定常数矩阵  $\mathbf{M}$ , 所构造的 Lyapunov 函数可以完全确定为  $\mathbf{V}(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{x}$ 。在此基础上, 系统渐进稳定域为  $\Omega = \{\mathbf{x} | \mathbf{V}(\mathbf{x}) \leq V_c\}$ , 其中  $V_c$  为围绕系统平衡点的一个有界区域。

### 3.2 基于风电全直流系统的 TS 模糊模型建立

根据所提出 TS 模糊模型, 对风电全直流系统进行大扰动稳定性分析, 步骤如下。

1) 首先建立风电全直流系统的状态空间平均模型;

2) 在坐标变换的基础上建立电全直流系统的 TS 模糊数学模型;

3) 基于 Lyapunov 定理估算出风电全直流系统的大扰动稳定域;

4) 根据渐进稳定域对系统的大扰动稳定性进行分析为了方便系统大扰动稳定性分析。

在分析风电全直流系统稳定性之前, 需要将模

糊模型坐标系原点设为稳态工作点, 使模型中各变量为相应稳态点误差, 得到风电全直流系统的 12 阶模糊模型。

$$\begin{cases} x_1 = \omega_s - \omega_{s0}, x_2 = i_d - I_{d0}, x_3 = i_q - I_{q0} \\ x_4 = U_{dc1} - U_{dc10}, x_5 = i_{vd} - I_{vd0}, x_6 = i_{vq} - I_{vq0} \\ x_7 = S_\omega - S_{\omega0}, x_8 = S_d - S_{d0}, x_9 = S_q - S_{q0} \\ x_{10} = S_{dc2} - S_{dc20}, x_{11} = S_{vd} - S_{vd0}, x_{12} = S_{vq} - S_{vq0} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $x_1 \sim x_{12}$  为 12 个状态变量; 下标 0 为将模糊模型坐标系原点设为稳态工作点的参考变量。

本文建立了风电全直流系统的 TS 模糊模型, 经过上述过程简化后, 基于系统的平均值模型式(1)~(8), 得出系统的状态方程式(14)。

其中, 上述状态方程式(14)中包含了 2 个非线性项  $f_1(x_2) = x_2 + I_{d0}$ ,  $f_2(x_4) = x_4 + U_{dc0}$ 。根据状态变量的最小值和最大值来确定非线性项的值范围, 以划分线性模糊子空间。基于状态变量最小值和最大值构造模糊集, 对非线性相  $f_1(x_2)$ 、 $f_2(x_4)$ , 取:

$$\begin{cases} f_{1\min} = x_{2\min} + I_{d0}, f_{1\max} = x_{2\max} + I_{d0} \\ f_{2\min} = x_{4\min} + U_{dc0}, f_{2\max} = x_{4\max} + U_{dc0} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $f_{1\max}$ 、 $f_{1\min}$  分别为  $f_1$  的最大值和最小值;  $f_{2\max}$ 、 $f_{2\min}$  分别为  $f_2$  的最大值和最小值。

根据模糊规则有:

1) 如果  $x_2 = x_{2\max}$ , 则  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{2\min} \cdot \mathbf{x}_0$ 。

2) 如果  $x_2 = x_{2\min}$ , 则  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{2\max} \cdot \mathbf{x}_0$ 。

3) 如果  $x_4 = x_{4\max}$ , 则  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{4\max} \cdot \mathbf{x}_0$ 。

4) 如果  $x_4 = x_{4\min}$ , 则  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{4\min} \cdot \mathbf{x}_0$ 。

式中  $\mathbf{A}_{2\min}$ 、 $\mathbf{A}_{2\max}$ 、 $\mathbf{A}_{4\min}$  和  $\mathbf{A}_{4\max}$  分别是由式(13)用极值代入得到的修正状态矩阵,  $\mathbf{x}$  是系统的状态偏差向量,  $\mathbf{V}(\mathbf{x})$  为李雅普诺夫候选函数(二次型形式)。如果 TS 模型建立完成后, 两个线性子系统满足以下线性矩阵不等式(15), 能找到相应的对称正定矩阵  $\mathbf{M}$ , 则保证系统渐进稳定。其中满足  $\mathbf{M} = \mathbf{M}^T > 0$ , 才能保证  $\mathbf{V}(\mathbf{x})$  是正定函数, 只有正定的  $\mathbf{V}(\mathbf{x})$  才能用其导数的符号来判定系统稳定性。

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \mathbf{M}^T > 0 \\ \mathbf{A}_{2\max}^T \cdot \mathbf{M} + \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}_{2\max} < 0 \\ \mathbf{A}_{2\min}^T \cdot \mathbf{M} + \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}_{2\min} < 0 \\ \mathbf{A}_{4\max}^T \cdot \mathbf{M} + \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}_{4\max} < 0 \\ \mathbf{A}_{4\min}^T \cdot \mathbf{M} + \mathbf{M} \cdot \mathbf{A}_{4\min} < 0 \end{cases} \quad (15)$$



$M =$

|           |           |           |        |            |            |           |            |            |           |           |            |
|-----------|-----------|-----------|--------|------------|------------|-----------|------------|------------|-----------|-----------|------------|
| 453.14    | 176.59    | -2 013.58 | -1.711 | -0.518     | -0.065     | 258.39    | -41 196.7  | -1 139.83  | 2 394.91  | 34.44     | -2 229.31  |
| 176.59    | 436.74    | 383.91    | -5.221 | 0.147      | 0.592 7    | 1 653.6   | -486.15    | 4 119.28   | -5 810.82 | -1 550.85 | 5 781.57   |
| -2 013.58 | 383.91    | 18 089.74 | -4.461 | 1.028      | -0.912     | 694.84    | -3 988.61  | -857.47    | -1 765.8  | 2 432.25  | 1346.31    |
| -1.711    | -5.221    | -4.461    | 0.394  | 0.033      | 0.0036     | 0.840 7   | 10.66      | -5.98      | -6.87     | -10.32    | -1.405     |
| -0.518    | 0.147     | 1.028     | 0.033  | 0.008      | 1.59e - 05 | 0.528     | 0.633      | -0.883     | -0.036    | -0.194    | 7.9e - 4   |
| -0.065    | 0.592     | -0.912    | 0.003  | 1.59e - 05 | 0.019      | 0.389     | -2.051     | -0.485     | -0.331    | -0.011    | -0.16      |
| 258.39    | -1 653.69 | 694.84    | 0.841  | 0.528      | -0.389     | 22 978.9  | 34 049.8   | -79 368.8  | 7 7981.7  | 1 072.02  | -78 173.3  |
| -41 196.7 | -486.15   | -3 988.6  | 10.665 | 0.633      | -2.051     | 34 049.8  | 6.3e + 6   | -4.03e + 5 | 4.01e + 5 | 5 405.66  | -4.02e + 5 |
| -1 139.83 | 4 119.28  | -857.47   | -5.981 | -0.883     | 0.485      | -79 368.8 | -4.03e + 5 | 58 053.2   | 6 0261.1  | 1 163.41  | 59 932.3   |
| 2 394.91  | -5 810.82 | -1 765.81 | -6.877 | -0.036     | -0.331     | 7 7981.7  | 4.01e + 5  | 60 261.1   | 60 066.9  | -8.399    | 60 093.2   |
| 34.44     | -1 550.85 | 2 432.25  | -10.32 | -0.194     | -0.011     | 1 072.02  | 5405.66    | 1 163.41   | -8.399    | 79.024    | 323.49     |
| -2 229.31 | 5 781.57  | 1 346.31  | -1.405 | 7.9e - 4   | -0.16      | 78 173.3  | -4.02e + 5 | 59 932.3   | 60 093.2  | 323.49    | 60 085.2   |

(16)

当上述式(15)有可行解时,得到的 $M$ 矩阵是对称正定的。如果 $x_2$ 和 $x_4$ 的范围不断扩展到式(15)没有可行解的范围时,则得到 $x_2$ 和 $x_4$ 存在值的最大范围。同时,所得到的Lyapunov函数的表达式如下。

$$V(x) = x^T \cdot M \cdot x \quad (17)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -\frac{f}{J} x_1 + \frac{P\psi_f}{J} x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} &= \frac{1}{L_1} (-k_{p1} k_{p2} x_1 - k_{p2} x_2 - R_1 x_2 + k_{p1} k_{p2} x_7 + k_{i2} x_8) \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{1}{L_1} (-R_1 x_3 - k_{p2} x_3 + k_{i2} x_9) \\ \frac{dx_4}{dt} &= \frac{3[e_d + k_{p2}(x_2 + I_{d0}) - RI_{d0}]x_2}{2C_1(x_4 + U_{dc1})} + \frac{3k_{p1}k_{p2}(x_2 + I_{d0})x_4}{2C_1(x_4 + U_{dc1})} - \frac{3k_{i2}(x_2 + I_{d0})x_8}{2C_1(x_4 + U_{dc1})} - \frac{3k_{p2}k_{i1}(x_2 + I_{d0})x_{10}}{2C_1(x_2 + U_{dc1})} \\ \frac{dx_5}{dt} &= \frac{1}{L_2} (-k_{p3}k_{p4}x_4 - R_2x_5 - k_{p3}x_5 + k_{p4}k_{i3}x_{10} + k_{i4}x_{11}) \\ \frac{dx_6}{dt} &= \frac{1}{L_2} (-R_2x_6 - k_{p4}x_6 + k_{i4}x_{12}) \\ \frac{dx_7}{dt} &= -k_{p1}x_1 + k_{i1}x_7 - x_2 \\ \frac{dx_8}{dt} &= -x_3 \\ \frac{dx_9}{dt} &= -x_4 \\ \frac{dx_{10}}{dt} &= -k_{p3}x_4 - x_5 + k_{i3}x_{10} \\ \frac{dx_{11}}{dt} &= -x_6 \\ \frac{dx_{12}}{dt} &= -x_5 \end{aligned} \right. \quad (18)$$

通过上述分析可知, Lyapunov函数的确定仅取决于 $M$ 的最大可行解对应的线性矩阵不等式,并且对 $M$ 矩阵中状态变量的搜索来确定矩阵 $A_{2min}$ 和 $A_{2max}$ ,  $A_{4min}$ 和 $A_{4max}$ 。在求解式(18)中的可行性问题后,可以得到二次Lyapunov函数 $V(x)$ 和最小值 $V(x)_{min}$ 。具体地说,如果 $V(x) \leq V(x)_{min}$ ,则认为它是渐近稳定的。即稳定域为:

$$\Omega = \{x | V(x) \leq x_{min}^T \cdot M \cdot x_{min}\} \quad (19)$$

以上是稳定域的估计过程。为验证所提出的稳定域计算方法的有效性,将表1中的系统参数引入上述理论计算过程,得到常正定常数矩阵 $M$ 系统稳定域。

$$\Omega = \{x | V(x) \leq 8.4235 \times 10^6\} \quad (20)$$

$V(x)$ 有12个维度,因此 $V(x) \leq V(x)_{min}$ 的几何图像描述了一个拥有12维的超椭球体。它可以被定义为基于一个特定的稳态操作点的稳定域。在稳定域中,所有的初始状态都可以经过一个瞬态过程后收敛到坐标原点。然而,如果状态变量的值在瞬态过程中脱离了稳定域,则可能会发生Hopf分岔,导致系统不稳定。由于高阶系统构成的稳定域表达式无法直观表现出系统稳定域的几何意义,通常将稳定域进行投影,对需要分析的状态变量投影到二维状态空间上进行稳定性分析。本文将系统稳定域投影到 $x_2-x_4$ 坐标,观察电路参数变化时系统稳定域的情况。

## 4 算例分析

### 4.1 稳定域估计

稳定域是指在非线性系统中系统从任意初始状态出发,经过一段时间暂态过程后收敛到平衡点所有初始状态的集合。即稳定域描述了系统在扰动或



表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

| 系统参数                                                           | 数值          |
|----------------------------------------------------------------|-------------|
| 机侧 DC/DC 直流电压 $U_0/\text{kV}$                                  | 5           |
| 风电场直流输出电压 $U_{\text{dc1}}/\text{kV}$                           | 30          |
| 网侧线电压有效值 $U_{\text{ac2}}/\text{kV}$                            | 200         |
| 整流器, 逆变器电感 $L_1, L_2/\text{H}$                                 | 0.03, 0.004 |
| 整流器, 逆变器电阻 $R_1, R_2/\Omega$                                   | 0.1, 0.48   |
| 直流电容 $C_1/\mu\text{F}$                                         | 500         |
| 整流侧转速环 PI 参数 $k_{p1}, k_{i1}$                                  | 1, 0.8      |
| 整流侧电流环 PI 参数 $k_{p2}, k_{i2}$                                  | 0.4, 0.4    |
| 逆变侧电压环 PI 参数 $k_{p3}, k_{i3}$                                  | 1, 0.2      |
| 逆变侧电流环 PI 参数 $k_{p4}, k_{i4}$                                  | 10, 150     |
| 开关频率/kHz                                                       | 5           |
| PMSM 转矩系数 $\Psi_r/\text{Nm}$                                   | 0.496       |
| PMSM 摩擦系数 $f/(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 0.002       |
| PMSM 惯性常数 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$                     | 0.003 2     |

初始条件不同的情况下能否最终恢复到平衡状态, 并且恢复的速度如何。通过估算系统的稳定域能够量化系统在受到扰动时能够回归平衡点的范围, 这对于理解非线性系统的稳定性非常重要。

直接法(即李雅普诺夫第二法)通过分析系统的初始状态是否位于稳定平衡点稳定域内来判断系统最终是否会稳定。因此使用该方法分析直流配电系统大扰动稳定性时的关键任务为明确系统稳定域。然而, 对于大多数非线性自治系统准确描绘其稳定域通常非常困难。因此, 常见且简便的方法是用稳定域的子集来近似真实的稳定域, 这个过程被称为估计稳定域。不同的能量函数构造方法会导致不同的稳定域估计结果。选择适当的构造方法可减少稳定域估计的保守性, 分析直流配电系统大扰动稳定性的关键在于构造恰当的能量函数。

具体来说, 稳定域的规模与形态可体现系统在应对各类初始扰动时的鲁棒特性。举例来讲, 若稳定域范围较大, 意味着系统能够承受较大程度的扰动而不丧失稳定性; 反之, 若稳定域范围较小, 则说明系统对初始条件的敏感度较高, 易出现不稳定状况。因此, 通过对稳定域的研究能够更为清晰地把握非线性系统的稳定性特征, 从而为系统设计与控制策略的制定提供关键依据。

TS 模糊模型的系数矩阵  $A_i$  包括主要电路参数、控制器参数和工作点信息。因此, 利用得到的稳定域进行分析, 可以直观地研究它们对系统稳定性的

影响。图 8 描述了不同功率等级下系统稳定域的趋势范围, 可以看出随着功率等级的增加系统稳定域范围逐渐减小。表明机侧变换器的稳态功率越大则其渐进稳定域越小。在此情况下母线电压或并网电流因系统瞬时故障或负荷投切引起的小范围扰动可能使工作点越过系统稳定域边界进而造成系统不稳定。

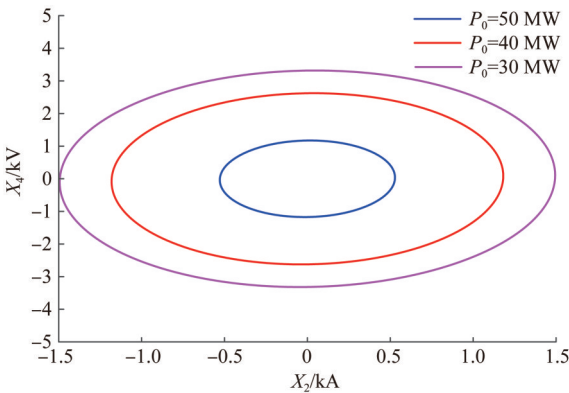


图 8 直流风机不同功率对系统稳定域的影响

Fig. 8 Influence of different powers of DC fans on the stability domain of the system

图 9—10 为相同额定功率下电路参数对风电全直流系统大扰动稳定性的影响。图 9 为直流风机不同电感对系统稳定域的影响, 表明了在一定范围内风电全直流系统随系统直流风机侧变换器电感的增大而增大。同样, 图 9 表明风电全直流系统稳定域随直流风机侧变换器电容的增大而减小, 系统越不稳定。

上述研究主要通过改变系统主电路参数来影响

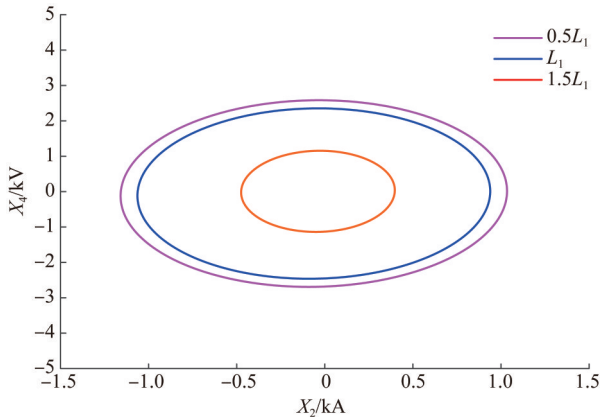


图 9 电感变化对系统稳定域的影响

Fig. 9 Influence of inductances variation on system stability domain

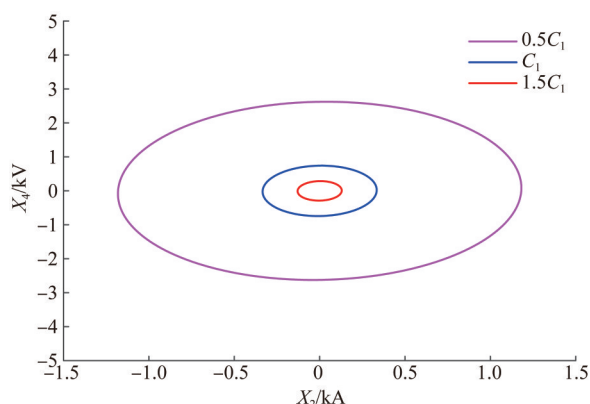


图 10 电容变化对系统稳定域的影响

Fig 10 Influence of capacitive changes on the stability domain of the system

系统稳定域,为新系统的设计提供理论参数依据。对于已经建成运行的电力系统,改变系统参数成本过大不符合工程实际。因此,本文进一步分析系统控制参数对系统大扰动稳定性的影响。图 11 以整流侧控制器控制参数为例,通过控制  $k_{i1}$  不变改变  $k_{p1}$  参数大小发现,随  $k_{p1}$  参数的减小,系统稳定域呈现出减小的情况。同时,当  $k_{p1}$  参数不变,  $k_{i1}$  越小则系统稳定域范围越大。当其他参数不发生改变时,通过减少整流器比例增益系数或增加整流器积分增益系数可以扩大系统稳定域。然而过分降低系统比例增益系数会影响系统的响应速度,积分增益系数的改变会引起超调。因此需要平衡系两者之间的关系来选择适合的 PI 控制系数。

## 4.2 实验验证

为验证分析上述结果,基于 MATLAB/

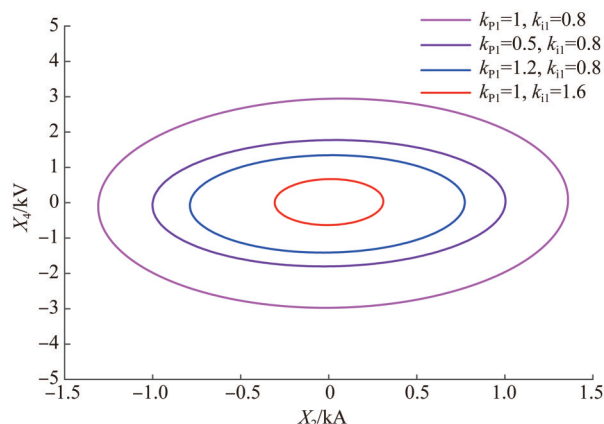


图 11 控制参数对系统稳定域的影响

Fig. 11 Influence of rectifier control parameters on system stability domain

Simulink 搭建仿真模型,其参数与表 1 一致以分析风电全直流系统大扰动稳定性。本文通过监测风电全直流系统正常工况和负载功率突变情况下系统输出侧电压变化来分析系统经受大扰动时电压波动情况。并基于上文提出的风电全直流系统参数对系统稳定域范围的影响,改进系统参数设置,以此增强系统的抗干扰能力。

电力系统的大扰动类型主要包括:短路故障、断线故障、大容量用电设备的投切造成的负荷剧烈波动、发电机变压器等器件投切。这些大扰动可能会引起系统的暂态或长期稳定性问题,需要通过合适的稳定性分析和控制措施来应对。考虑到系统负载功率波动是一种常见的大扰动情况,在 1.5s 时,基于系统设置负载功率突变为原来的两倍以分析风电全直流系统的大扰动稳定性分析。针对该故障情况找出系统电感、电容以及系统控制参数对系统稳定域影响的临界点。通过改进系统稳定域来使系统运行始终处于稳定域内。

图 12 为风电全直流系统风机侧变换器的瞬时电压电流波形。可以看出当 1.5s 发生故障时,经过一个短时的功率瞬态波动后系统能够稳定运行,机电电压维持稳定,电流随功率上升而上升。

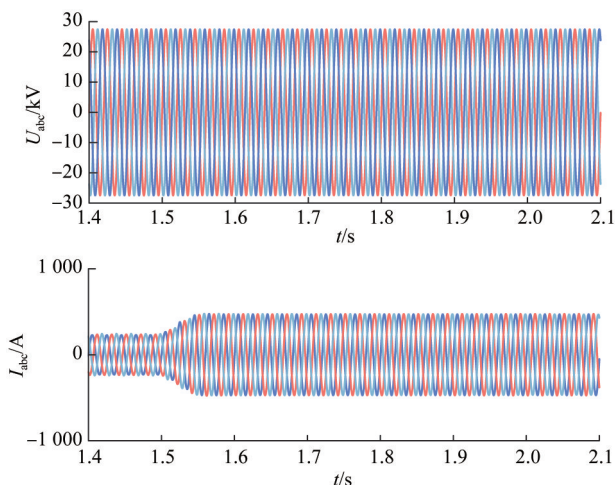


图 12 直流风机侧电压电流

Fig. 12 Voltages and currents on the DC fan side

风电全直流系统经二级升压后直流送出电压为 200 kV,图 13(a)为正常工况下系统直流电压。当系统经受负载功率突变时直流送出电压失稳。图 13(b)为系统二级升压侧直流电压,在 1.5 s 出经历系统负荷突变后引发系统失稳,在 2 s 时负载

功率恢复, 系统经 0.2 s 恢复稳定。图 13(c) 为改进主电路参数后系统二级升压侧直流电压。由 4.1 节可知系统电容的减小有助于系统稳定。此时系统直流母线电容临界值为  $0.72 C_1$ , 为给系统稳定运行留有一定冗余, 将直流母线电容减小为  $0.5 C_1$ , 重复图 13(a) 的瞬态过程对比仿真结果。对比可知减小直流母线电容值, 系统承受相同的大干扰时其状态轨迹始终处于稳定域内, 提高了系统稳定性。

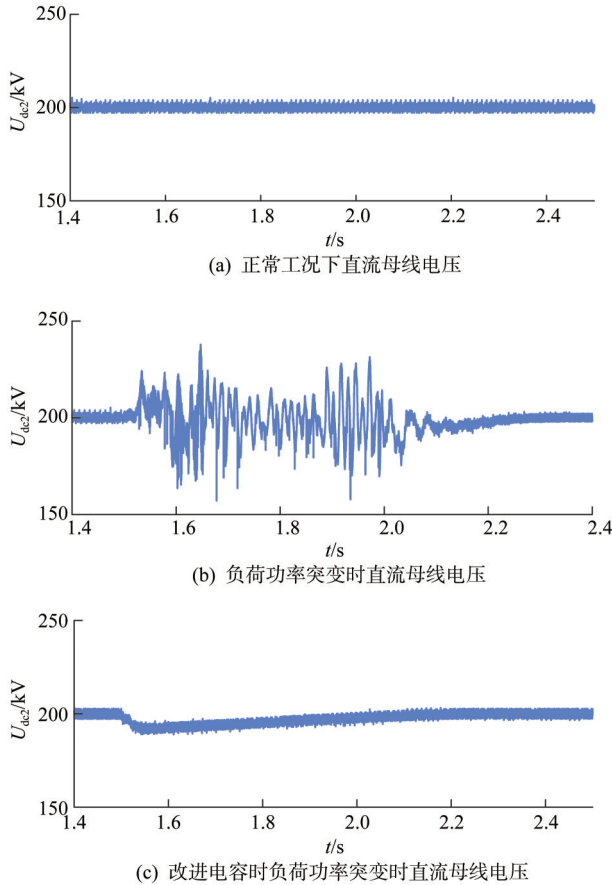


图 13 功率扰动下系统直流母线电压

Fig. 13 DC bus voltages of the system under power disturbance

同样, 从 4.1 节稳定域中得出系统电感的增大有利于系统稳定。此时系统直流母线电容临界值为  $1.23 L_1$ , 为给系统稳定运行留有一定冗余, 将直流母线电感增大为  $1.5 L_1$ , 重复图 13(a) 的瞬态过程对比仿真结果, 结果如图 14(a) 所示。通过控制系统控制参数同样能起到改进效果, 如图 14(b) 所示, 调整  $k_{p1}$  和  $k_{i1}$  的大小将系统稳定域范围扩大至一定范围后, 系统在承受相同的大干扰时其状态轨迹始终处于稳定域内, 提高了系统稳定性。

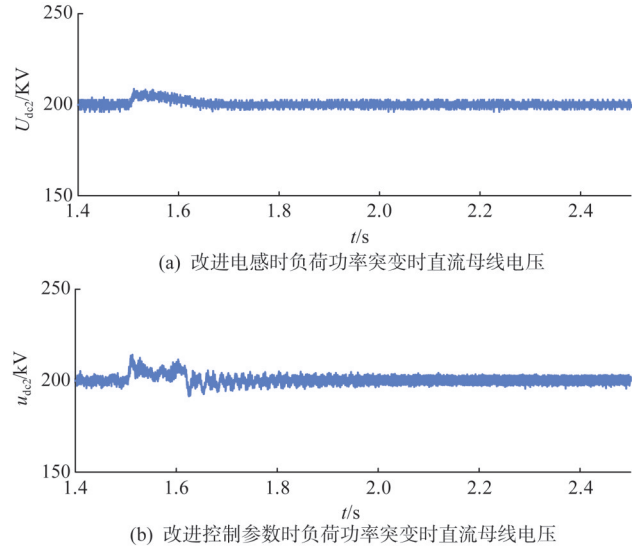


图 14 改进后功率扰动下系统直流母线电压

Fig. 14 DC bus voltages of the system under improved power disturbance

## 5 结语

本文主要研究了风电全直流系统的大扰动稳定性问题。建立了风电全直流系统的大信号模型, 通过 TS 模糊模型和 Lyapunov 稳定性第二定理, 不仅可以分析平衡点的稳定性, 也可以直观地分析系统参数对系统稳定性的影响, 为通过调整系统参数来提高系统的稳定性提供了理论依据。对系统进行大扰动稳定性分析时, 由于采用 TS 模糊模型规则, 基于 Lyapunov 第二法构建的 Lyapunov 函数具有一定的保守性, 但仍能够作为分析系统大扰动稳定性的工具。最后通过时域仿真验证了所提出的大信号稳定性分析方法的可行性和有效性。

## 参考文献

- [1] 蔡旭, 施刚, 迟永宁, 等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2036–2048. CAI Xu, SHI Gang, CHI Yongning, et al. The research status and future development of offshore all DC wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2036–2048.
- [2] 王祥君, 李战龙, 王海云, 等. 基于新型直流风电机组的串联型全直流发电系统设计研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 178–187. WANG Xiangjun, LI Zhanlong, WANG Haiyun, et al. Design and research of a series type all DC power generation system based on a new type of DC wind turbine [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 178–187.
- [3] 姚钢, 杨浩猛, 周荔丹, 等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 33–47. YAO Gang, YANG Haomeng, ZHOU Lidan, et al. Develop-



- ment Status and Key Technologies of Large-capacity Offshore Wind Turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 33 – 47.
- [4] 刘江山, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 换相失败引发送端混合级联直流系统换流母线暂态电压波动机理及抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 36 – 46.
- LIU Jiangshan, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Mechanism and suppression strategy of transient voltage fluctuations in converter busbars of hybrid cascaded DC systems caused by phase change failure[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 36 – 46.
- [5] 曹靖滔, 董朝宇, 王睿, 等. MMC-HVDC 交直流混联系统小扰动稳定域迭代求解和形态分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 40 – 50.
- CAO Jingtao, DONG Chaoyu, WANG Rui, et al. Iterative solution and morphological analysis of small disturbance stability domain for MMC-HVDC hybrid system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 40 – 50.
- [6] 邱晓燕, 林号缙, 周毅, 等. 基于混合同步控制的构网型逆变器并网系统小扰动稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 172 – 178, 185.
- QIU Xiaoyan, LIN Haojin, ZHOU Yi, et al. Small disturbance stability analysis of grid connected inverters based on hybrid synchronous control[J]. Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 172 – 178, 185.
- [7] 王一振, 邱逢良, 雷鸣, 等. 表征柔性直流电网电压动态特性的降阶小扰动稳定模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7593 – 7603.
- WANG Yizhen, QIU Fengliang, LEI Ming, et al. A reduced order small disturbance stability model for characterizing the voltage dynamic characteristics of flexible DC power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7593 – 7603.
- [8] SONG Q, CHEN J, LOO K H, et al. Large-signal stability analysis of two-stage cascaded DC/DC converter systems using sum-of-squares programming[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(2): 2076 – 2085.
- [9] MENG Y, LI S, ZOU Y, et al. Stability analysis and control optimisation based on particle swarm algorithm of modular multilevel matrix converter in fractional frequency transmission system [J]. IET Generation and Transmission Distribution, 2020, 14(14): 2641 – 2655.
- [10] POTTY K A, BAUER E, LI H, et al. Smart resistor: stabilization of DC microgrids containing constant power loads using high-bandwidth power converters and energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2020, 35(1): 957 – 967.
- [11] XIE W, HAN M, CAO W, et al. Vasquez. system-level large-signal stability analysis of droop-controlled DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electron, 2021, 36(4): 4224 – 4236.
- [12] 程启明, 沈治超, 张梁, 等. 面向低频海上风电的六边形变换器李雅普诺夫函数控制策略[J]. 南方电网技术, 2025, 19(8): 92 – 104.
- CHENG Qiming, SHEN Zhichao, ZHANG Liang, et al. Lyapunov function control strategy of Hexverter converter for low frequency offshore wind power[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(8): 92 – 104.
- [13] WU T, ZHANG Y J A, WEN H. Voltage stability monitoring based on disagreement-based deep learning in a time-varying environment[J]. IEEE Transactions on Power System, 2021, 36(1): 28 – 38.
- [14] 李锡林, 唐英杰, 田震, 等. 基于改进等面积法则的并网逆变器同步稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 208 – 215.
- LI Xilin, TANG Yingjie, TIAN Zhen, et al. Synchronous stability analysis of grid connected inverters based on improved equal area rule [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 208 – 215.
- [15] 庞圣钊, 皇甫宜耿, 郭亮, 等. 基于 Lyapunov 间接法分析的恒功率负载电源变换器宽稳定控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(14): 146 – 154.
- PANG Shengzhao, HUANGFU Yigeng, GUO Liang, et al. A novel wide stability control strategy of constant power load power converter based on the analysis of Lyapunov indirect method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(14): 146 – 154.
- [16] KIM H J, KANG S W, SEO G S, et al. Large-signal stability analysis of DC power system with shunt active damper [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6270 – 6280.
- [17] DUAN Z, MENG Y, DUAN Y, et al. Large signal stability analysis and enhancement of modular multilevel matrix converter under power fluctuation based on T-S fuzzy model theory[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14601 – 14613.
- [18] MAGNE P, MARX D, NAHID-MOBARAKEH B, et al. Large signal stabilization of a DC-link supplying a constant power load using a virtual capacitor: Impact on the domain of attraction [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(3): 878 – 887.
- [19] ZHENG H, YUAN X, CAI J, et al. Large signal stability analysis of dc side of VSC-HVDC system based on estimation of domain of attraction [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3630 – 3641.
- [20] LIU S, LI X, XIA M, et al. Takagi sugeno multimodeling-based large signal stability analysis of DC microgrid clusters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 12670 – 12684.
- [21] 聂金铜, 赵争鸣, 袁立强, 等. 级联恒功率负载情况下三相并网 PWM 整流器基于 TS 模糊模型的稳定性分析[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1931 – 1943.
- NIE Jintong, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Stability analysis of three-phase grid connected PWM rectifier under cascaded constant power load based on TS fuzzy model [J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1931 – 1943.
- [22] MARX D, MAGNE P, NAHID-MOBARAKEH B, et al. Large signal stability analysis tools in DC power systems with constant power loads and variable power loads: a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1773 – 1787.
- [23] SONG Q, CHEN J, LOO K H. et al. Large-signal stability analysis of two-stage cascaded DC/DC converter systems using sum-of-squares programming [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(2): 2076 – 2085.
- [24] 李宇骏, 华凤林, 陆艺源, 等. 基于李雅普诺夫函数的带锁环的 VSC 大扰动稳定性判据[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 46 – 54.

(下转第 67 页 Continued on Page 67)