

计及占空比限幅环节的直流配电系统暂态稳定性分析

蔡元鑫, 彭克, 赵学深, 邢琳, 杨云虹
(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东省淄博市 255000)

摘要: 大功率扰动条件下, 限幅环节容易造成占空比出现饱和现象, 直流配电系统就会由闭环控制退化成开环响应并出现暂态失稳。为此, 文中开展了计及占空比限幅环节的直流配电系统暂态稳定性分析。首先, 文中利用 Sigmoid 函数模拟占空比限幅环节中的非线性特性, 建立了更为贴近工程实际的直流配电系统大信号模型。其次, 利用 Takagi-Sugeno (TS) 模糊模型法, 刻画了计及占空比限幅环节影响的估计吸引域。然后, 通过不同控制参数的估计吸引域变化情况, 揭示了占空比饱和和引发的直流配电系统暂态失稳现象。最后, 针对占空比限幅环节导致已有暂态稳定性提升方法存在的局限性, 提出了一种控制参数优化设计的方法, 为提升系统暂态稳定性的控制参数选择提供了方案。RT-Box 硬件在环实验验证了理论分析的有效性。

关键词: 直流配电系统; 占空比限幅环节; Sigmoid 函数; 暂态稳定性; 参数优化

0 引言

为了推动实现中国“碳达峰·碳中和”的发展目标, 构建现代能源体系, 风电、光伏等新能源发电迈入了快速发展的新阶段, 成为满足日益增长的电力需求的主力之一^[1-2]。直流配电系统可实现光伏、风电等新能源高效接入, 具有巨大的发展前景^[3-4]。然而, 大量电力电子设备接入直流配电系统, 致使其表现出低惯性、弱阻尼的特征^[5]。占空比限幅等限幅非线性环节的存在使得直流配电系统的动态行为特征更加复杂, 失稳风险增加^[6-7], 暂态稳定性问题愈发突出。

目前, 暂态稳定性分析主要采用时域仿真法、李雅普诺夫直接法、逆轨迹法和非线性解耦等方法^[8], 其中, 李雅普诺夫直接法以其计算速度快、可直接获得吸引域等优点, 有着不可替代的作用。

李雅普诺夫直接法主要包括混合势函数法、Takagi-Sugeno (TS) 模糊模型法、平方和规划法。文献[9]研究了带交流恒功率负荷的交直流混合微电网系统暂态稳定性, 利用混合式函数法推导出储能单元充放电状态下的系统暂态稳定性判据, 并根据判据给出了储能单元换流器控制参数的取值范围。文献[10]建立了计及多个恒功率非线性特性的

直流微电网的 TS 模糊模型, 进而刻画出了直流微电网的估计吸引域, 通过在不同位置引入有源阻尼补偿后比较直流微电网估计吸引域的变化, 给出了最佳有源阻尼补偿位置。文献[11]利用平方和规划法研究了级联 DC/DC 换流器系统的大信号稳定性, 通过分析系统参数与暂态稳定边界的关系, 找到了影响系统暂态稳定性的主导参数——电压环比系数。但以上研究均未考虑饱和和限幅环节对暂态稳定性的影响。

针对含饱和和限幅环节的系统暂态稳定性评估问题, 文献[12]建立了以并网电压源换流器为主电源的直流微电网混合势函数模型, 推导了考虑电压环输出限幅下系统的暂态稳定性判据。文献[13-15]建立了下垂控制逆变器的 TS 模糊模型, 分析了不同限幅器的幅值对下垂逆变器暂态稳定性的影响。这些研究集中分析了换流器控制中的限幅器对暂态稳定性的影响, 却未考虑占空比非线性饱和环节。占空比的非线性饱和由脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 的物理特性决定, 具有一般性^[16], 有必要研究换流器占空比的非线性饱和对直流配电系统暂态稳定性的影响。

本文针对不合理的控制参数会导致占空比饱和和达到限幅, 进而引发直流配电系统出现暂态失稳问题, 以 Buck 型 DC/DC 变流器构成的直流配电系统为例, 利用 Sigmoid 函数模拟占空比限幅环节中的非线性特性, 建立计及占空比限幅非线性环节的直

收稿日期: 2024-02-02; 修回日期: 2024-03-22。

上网日期: 2024-07-03。

山东省自然科学基金资助项目 (ZR2023ME034)。

流配电系统大信号模型,利用TS模糊模型法刻画了系统估计吸引域,研究参数变化对直流配电系统暂态稳定性的影响,提出一种基于估计吸引域面积的控制参数优化选择方法。基于RT-Box硬件在环实验平台验证了理论分析与所提方法的正确性。

1 占空比饱和引起的直流配电系统暂态失稳问题

1.1 直流配电系统的拓扑结构

直流配电系统结构包括单端辐射状、环状结构以及多端辐射状、环状结构等,在不同的应用场景下,可根据具体需求进行选择^[17]。本文的研究对象为下垂双环控制的直流配电系统,其拓扑结构如图1所示。图中: V_s 为换流器的输入电压; L 和 C_f 分别为滤波电感和滤波电容; R_L 和 L_L 分别为直流线路的线路电阻和线路电感; C_{cpl} 为恒功率负荷的滤波电容; I_L 和 I 分别为换流器的滤波电感电流和输出电流; I_{Cf} 和 $I_{C_{cpl}}$ 分别为换流器和恒功率负荷的滤波电容电流; U_{dc} 和 $U_{dc,ref}$ 分别为直流母线电压和直流母线电压参考值; k_d 为下垂系数; k_{vp} 和 k_{vi} 分别为电压比例系数和电压积分系数; k_{ip} 和 k_{ii} 分别为电流比例系数和电流积分系数; U_r 和 I_r 分别为下垂控制输出信号和电流参考值; d 和 D 分别为限幅装置处理前和处理后的占空比; P_{cpl} 、 U_{cpl} 和 I_{cpl} 分别为恒功率负荷的功率、电压和电流。

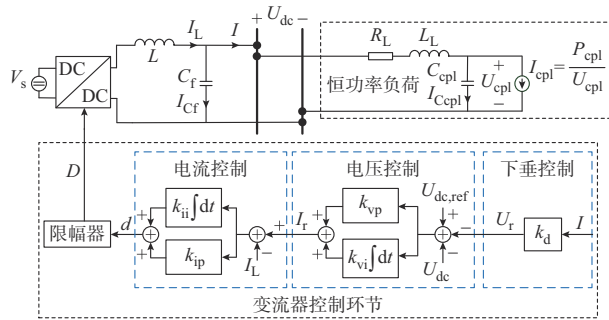


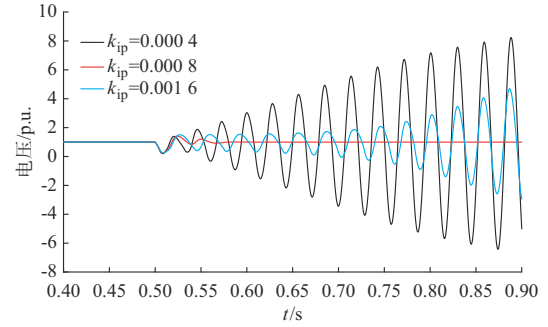
图1 含有限幅装置的直流配电系统拓扑图

Fig. 1 Topology diagram of DC distribution system with limiting device

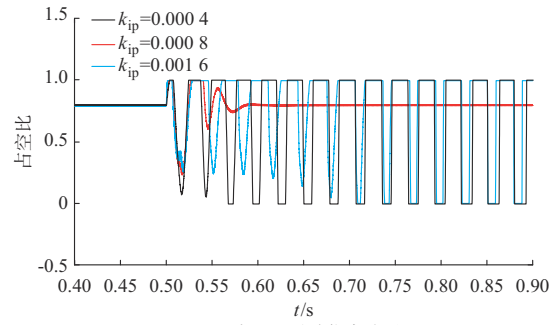
1.2 占空比饱和现象造成的暂态失稳问题

文献[18]指出,增大电流比例参数能够增强系统阻尼,提高系统的暂态稳定性。在PLECS仿真软件中搭建上述直流配电系统开关模型,系统参数见附录A表A1。在0.5 s时,恒功率负荷功率从6 MW突增至16 MW,该系统的直流母线电压波形及对应占空比波形如图2所示。由图2(a)可知,当 k_{ip} 由0.000 4增大至0.000 8时,直流母线电压由暂态失稳

转为暂态稳定;当 k_{ip} 继续增大至0.001 6时,直流母线出现暂态失稳。



(a) 直流母线电压时域仿真波形



(b) 占空比时域仿真波形

图2 直流母线电压及占空比的时域仿真波形

Fig. 2 Time-domain simulation waveforms of DC bus voltage and duty cycle

由图2(b)可以看出,当 k_{ip} 增大至0.000 8时,扰动后的占空比达到限幅后在较短时间内又恢复到正常范围;当 k_{ip} 增大至0.001 6时,受到扰动后占空比持续达到限幅。由此可见,较大的电流比例系数会导致扰动后占空比容易达到饱和,限幅控制极易导致闭环控制退化为开环响应^[19],使得系统出现暂态失稳现象,暂态稳定性下降。

2 占空比限幅环节建模

一般来说,DC/DC换流器的占空比范围为0到1。当占空比为0时,开关管始终关断,输出电压为0;当占空比为1时,开关管始终导通,输出电压达到最大值。占空比限幅环节的输入输出关系如附录A图A1所示。因此,占空比限幅环节的非线性特性可以表述为:

$$D = \begin{cases} 0 & d \leq 0 \\ d & 0 < d < 1 \\ 1 & d \geq 1 \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)不难看出,在 $d=0$ 和 $d=1$ 时, D 不可导,无法运用传统的能量函数方法分析和评估系统稳定性。

为了解决这一问题,引入Sigmoid函数对饱和

限幅环节进行建模。Sigmoid 函数平滑、可微等优点可以用来实现电力系统非连续模型的连续化以及解决系统的能量函数表达式中某处不可导等问题。Sigmoid 函数 $f(x)$ 的定义如下:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

式中: x 为变量。

在 Sigmoid 函数中引入调节系数 a , 函数 $f(x)$ 可改写为函数 $F(x)$, 如式(3)所示。

$$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (3)$$

附录 A 图 A2 给出了调节系数 a 变化时对应的函数 $F(x)$ 的变化情况。

由附录 A 图 A2 可知, 当 $a=5$ 时, $F(x)$ 的变化趋势最为接近传统限幅器的运行特性, 但仍有一定差距。因此, 令 $a=5$ 并对 $F(x)$ 进行向右平移, 设平移量为 b , 平移后的函数 $F_1(x)$ 的表达式为:

$$F_1(x) = \frac{1}{1 + e^{-5(x-b)}} \quad (4)$$

附录 A 图 A3 为不同平移量 b 时的 $F_1(x)$ 函数曲线。

可以看出, 当平移量 $b=0.5$ 时, 函数 $F_1(x)$ 具有较好的模型精度。因此, 基于 Sigmoid 函数的数学特性与占空比饱和限幅环节的输入输出关系, 设计饱和函数为:

$$D = \frac{1}{1 + e^{-5(d-0.5)}} \quad (5)$$

由式(5)可知, 当 $d \leq 0$ 时, D 趋于 0; 当 $d > 0$ 时, D 趋于 1。

为了验证所提饱和限幅器模型的有效性, 在 PLECS 仿真软件中进行了与传统限幅器相同的扰动工况(在 1 s 时, 恒功率负荷功率从 6 MW 突增至 16 MW)验证, 直流母线电压仿真结果如附录 A 图 A4 所示。由图 2(a) 和图 A5 可知, 采用拟合限幅器的系统与采用传统限幅器的系统的直流母线电压会表现出相同的暂态稳定性和不稳定性。由此可以看出, 所提模型的输出特性和动态响应特性与传统占空比饱和限幅模型基本一致。

3 计及占空比限幅环节的 TS 模糊模型

TS 模糊模型是一种用于描述非线性系统的模糊逻辑系统。TS 模糊模型法可以通过采用多个局部线性模型逼近系统的非线性, 对状态变量进行保守估计。已有的研究表明, 利用 TS 模糊模型构建

的系统能量函数具有能包含最多的系统参数、能得到保守性较低的结果等较大优势。

对于一个形如式(6)所示的系统状态空间模型, 假设矩阵 A 中存在非线性项 $f_i(x)$, $i=1, 2, \dots, n$, 那么非线性项都有一个最大值 $f_{i,\max}$ 和最小值 $f_{i,\min}$, 对于 n 个非线性元素, 会出现 $r=2^n$ 个局部线性模型。将非线性项的最大值和最小值组成系数矩阵 A_i , $i=1, 2, \dots, 2^n$, 每个矩阵包含 $f_{i,\max}$ 和 $f_{i,\min}$ 的唯一组合, 以代替它们的非线性对应项。如果每个矩阵 A_i 以及 $A = \sum_{i=1}^{2^n} A_i$ 都是 Hurwitz 稳定的, 则根据式(7)得到的对称矩阵 M , 可以得到李雅普诺夫函数, 如式(8)所示。

$$\dot{x} = Ax + B \quad (6)$$

$$\begin{cases} M = M^T > 0 \\ A_i^T M + M A_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$V(x) = x^T M x \quad (8)$$

式中: \dot{x} 为系统的状态变量矩阵; A 为包含状态变量的非线性矩阵; x 为变量矩阵; B 为系统参数矩阵; $V(x)$ 为系统的李雅普诺夫函数。

最后, 通过设置李雅普诺夫函数的参数可以画出系统的估计吸引域。

针对换流器采用的下垂双闭环控制电路, 有

$$\begin{cases} S_i = k_{vi} \int (U_{dc,ref} - U_{dc} - k_d I) dt \\ I_r = k_{vp} (U_{dc,ref} - U_{dc} - k_d I) + S_i \\ d = k_{ip} (I_r - I_L) + k_{ii} \int (I_r - I_L) dt \end{cases} \quad (9)$$

式中: S_i 为电压积分状态变量。

根据图 1 可得直流配电系统的主电路状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{L} \left(V_s \frac{1}{1 + e^{-5(d-0.5)}} - U_{dc} \right) \\ \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_L - I) \\ \frac{dI}{dt} = \frac{1}{L_L} (U_{dc} - R_L I - U_{cpl}) \\ \frac{dU_{cpl}}{dt} = \frac{1}{C_{cpl}} \left(I - \frac{P_{cpl}}{U_{cpl}} \right) \end{cases} \quad (10)$$

综上, 针对主电路以及控制策略的状态空间表达式, 定义系统的 6 个状态变量: I_L 、 U_{dc} 、 I 、 U_{cpl} 、 S_i 、 d 。以平衡点为原点将前述状态变量进行坐标变换, 定义 6 个新状态变量 $x_1 \sim x_6$ 如式(11)所示。

$$\begin{cases} x_1 = I_L - I_{L0} \\ x_2 = S_i - S_{i0} \\ x_3 = U_{dc} - U_{dc0} \\ x_4 = I - I_0 \\ x_5 = U_{cpl} - U_{cpl0} \\ x_6 = d - d_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中： I_{L0} 、 U_{dc0} 、 I_0 、 U_{cpl0} 、 S_{i0} 、 d_0 为原状态变量相应的稳态值。

联立式(9)一式(11)得到变换后的状态方程,并将其改写成矩阵形式,如附录B式(B1)和式(B2)所示。易知式(B1)中有两个非线性项 $f(x_5)$ 、 $f(x_6)$,可以通过以下4个规则描述式(B1)的TS模糊模型。

规则1:如果 x_5 趋近于最大值 $x_{5,max}$, x_6 趋近于最大值 $x_{6,max}$,即非线性项 $f(x_5)$ 趋近于 $f_{5,min}$,非线性项 $f(x_6)$ 趋近于 $f_{6,min}$,则非线性系统的局部线性模型见附录B式(B3)。

规则2:如果 x_5 趋近于 $x_{5,max}$, x_6 趋近于最小值 $x_{6,min}$,即非线性项 $f(x_5)$ 趋近于 $f_{5,min}$,非线性项 $f(x_6)$ 趋近于 $f_{6,min}$,则非线性系统的局部线性模型见附录B式(B4)。

规则3:如果 x_5 趋近于最小值 $x_{5,min}$, x_6 趋近于 $x_{6,max}$,即非线性项 $f(x_5)$ 趋近于 $f_{5,max}$,非线性项 $f(x_6)$ 趋近于 $f_{6,max}$,则非线性系统的局部线性模型见附录B式(B5)。

规则4:如果 x_5 趋近于 $x_{5,min}$, x_6 趋近于 $x_{6,min}$,则非线性项 $f(x_5)$ 趋近于 $f_{5,max}$,非线性项 $f(x_6)$ 趋近于 $f_{6,max}$,则非线性系统的局部线性模型见附录B式(B6)。

如果存在对称矩阵 M 满足线性矩阵不等式(式(12)),则可得到系统估计吸引域。

$$\begin{cases} M = M^T > 0 \\ A_1^T M + M A_1 < 0 \\ A_2^T M + M A_2 < 0 \\ A_3^T M + M A_3 < 0 \\ A_4^T M + M A_4 < 0 \end{cases} \quad (12)$$

为了对所提方法的准确性进行验证,对比刻画了文献[18]中17 MW的估计吸引域,如附录A图A5所示。恒功率负荷从14 MW切换至17 MW时直流母线电压实验波形如图A6所示。通过观察图A5可知,在相同场景下,本文考虑的占空比限幅环节模型与文献[18]中的传统模型给出了不同的评估结果,而图A6所示的实验波形验证了本文方法的准确性。

由上述分析可知,本章所建立的直流配电系统TS模糊模型同时考虑了占空比饱和和非线性和恒功率负荷非线性,系统的暂态稳定性判定结果准确性更高,对系统的暂态稳定性判定结果更加有说服力。

4 系统控制参数对稳定性影响分析与实验验证

电路参数和控制参数的选取对系统稳定性具有直接影响,文献[20]表明,增大直流母线电容能够提高系统稳定性,但系统电路参数与电气设备相关,改动困难较大,通常选择更易实现的优化策略或控制参数来提高系统稳定性。文献[19]通过在有功控制回路中引入暂态功角动态补偿项来提高暂态稳定性。文献[18]表明,增大下垂系数以及电流内环的控制参数可以提高系统的暂态稳定性,由第1章的分析可知,当考虑占空比饱和环节时,此结论具有一定的局限性。为了更加贴近实际场景,本章将评估估计及占空比饱和环节时控制参数变化对系统暂态稳定性的影响。

选取对系统稳定性影响较大的电流比例系数、电压比例系数以及下垂系数^[11,18],刻画参数变化时的估计吸引域,分别以流经恒功率负荷的输出滤波电感电流 I 和负荷两端的直流母线电压 U_{dc} 为横、纵坐标进行作图,绘制恒功率负荷的估计吸引域如图3所示,除图注中单独列出的参数外,其他参数与附录A表A1中一致。

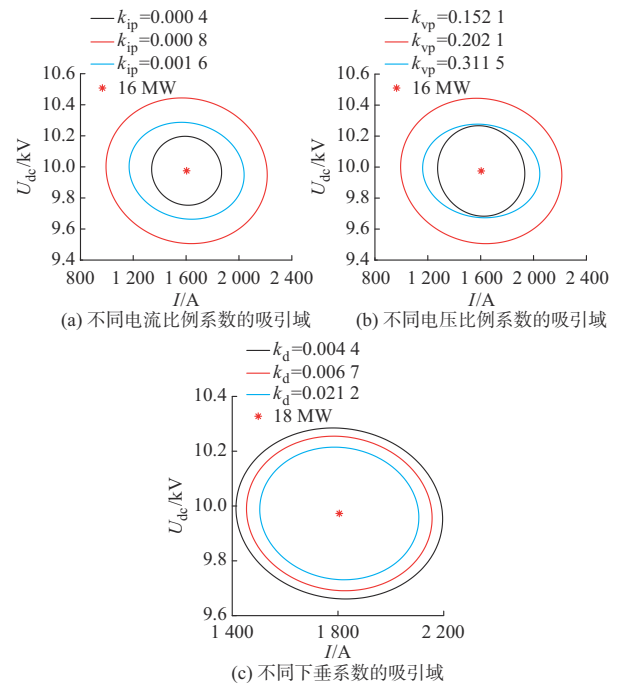


图3 不同控制参数时的吸引域
Fig. 3 Attraction domain with different control parameters

图3(a)展示了电流比例系数对吸引域的影响,可以看出,增大电流比例系数,吸引域没有随之持续增大,过大的参数甚至会导致吸引域减小。即增大电流比例系数可以提高系统暂态稳定性,但过大的系数会导致系统暂态稳定性下降,这与第1章的仿真结果相符。

图3(b)表明,在一定范围内,增大电压比例参数同样可以提高系统稳定性,但同样存在一个优化极限,超过极限反而会使系统的稳定性下降。

图3(c)表明考虑占空比限幅环节后,系统的吸引域会随着下垂系数的增大而减小,即系统的暂态稳定性会下降。

为验证上述分析的正确性,基于附录A图A7所示的RT-Box硬件在环实验平台搭建了如图1所示的直流配电系统模型,参数设置见附录A表A1,得到恒功率负荷阶跃突变时的母线电压变化情况,如图4所示。

在1s时,设置恒功率负荷扰动工况从6 MW突增至16 MW,采用不同电压比例系数的换流器直流母线电压变化情况如图4(a)所示。

对图4(a)仿真结果进行分析,当 k_{vp} 分别为0.152 1与0.311 5时,在系统负荷功率扰动后,直流母线电压发生不同程度的暂态失稳;当 $k_{vp}=0.202 1$ 时,直流母线电压经过短暂振荡后趋于稳定,系统经过一段收敛的暂态过程到达新的稳定运行点。实验结果与前述吸引域评估得到的结论保持一致,验证了分析的有效性。

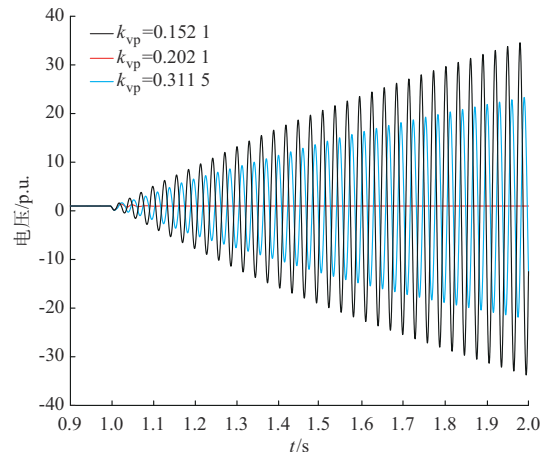
图4(b)中,在1s时,恒功率负荷功率从13.17 MW突增至18.00 MW,下垂系数由0.004 4增大至0.006 7后,直流母线电压由暂态稳定转为暂态失稳。这就意味着增大下垂系数使得占空比更容易达到饱和,从而降低了直流配电系统的暂态稳定性。由图4(c)可知,恒功率负荷功率从13.25 MW突增至18.00 MW后,根据第2组下垂系数的直流母线电压波形可以得到相同的结论。

5 控制参数优化设计

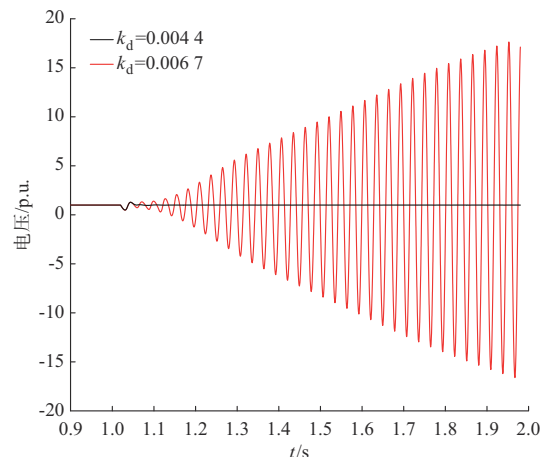
本章将从系统暂态稳定性角度出发,开展控制参数的优化设计。

5.1 刻画三维控制参数稳定域

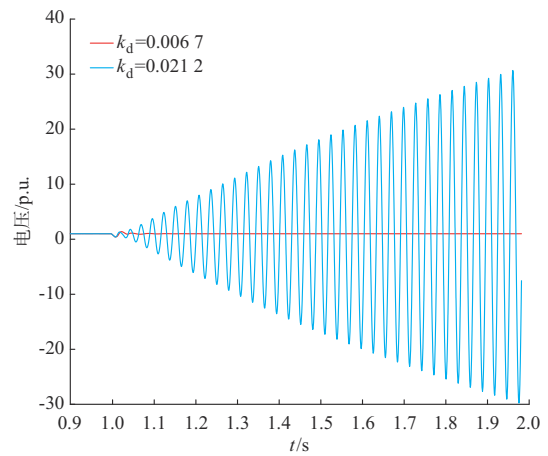
由第4章的分析可知,在一定范围内增大电压比例系数与电流比例系数能够提高系统暂态稳定性,但是过大的参数又会使得系统占空比容易饱和达到限幅,导致系统暂态失稳,传统参数优化方法具有一定的局限性。为此,本文提出了寻找定义范围



(a) 不同电压比例系数下的电压波形



(b) 第1组下垂系数下的电压波形



(c) 第2组下垂系数下的电压波形

图4 不同控制参数下的电压波形
Fig. 4 Voltage waveforms with different control parameters

内最优暂态稳定性控制参数的方法,为系统控制参数设计提供参考。方法示例具体如下。

步骤1:根据系统需求,选定各参数范围。本文选择系统恒功率负荷为16 MW,根据第4章分析结果,以电流比例系数和电压比例系数为例, k_{vp} 的取

值范围为 $[0.15, 0.30]$, k_{ip} 的范围为 $[0.000\ 5, 0.001\ 5]$ 。

步骤 2: 在步骤 1 选定的控制参数范围的基础上, 刻画三维控制参数稳定域。

以电流比例系数和电压比例系数为例, 三维控制参数稳定域刻画的方法如附录 C 所示。基于上述所提控制参数优化设计方法刻画出的可行域如图 5 所示。图中: S 为估计吸引域面积。

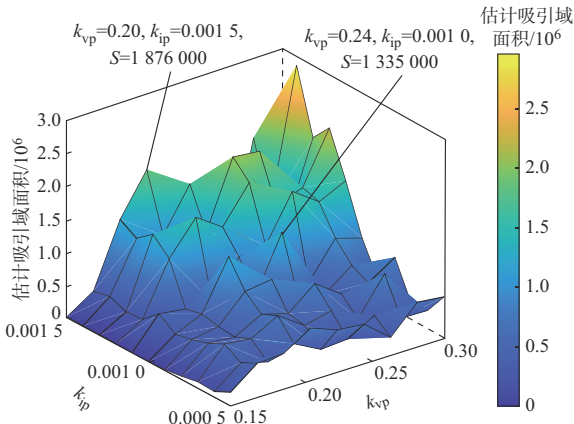


图 5 三维控制参数可行域
Fig. 5 Feasible domains for three-dimensional control parameters

步骤 3: 根据步骤 2 刻画三维控制参数稳定域, 选择系统暂态稳定性较高的控制参数。

5.2 理论分析与实验验证

由图 5 可知, 随着电流比例系数或电压比例系数的增大, 估计吸引域的面积没有随之线性增大, 即系统暂态稳定性不会随之线性提高。当同时考虑电流比例系数与电压比例系数时, 三维控制参数可行域可以直接反映不同参数组合的暂态稳定性情况。例如, 第 1 组控制参数 ($k_{ip}=0.20, k_{vp}=0.001\ 5$) 的暂态稳定性优于第 2 组控制参数 ($k_{ip}=0.24, k_{vp}=0.001\ 0$)。

为验证上述理论分析的有效性, 令恒功率负荷从 6 MW 阶跃至 16 MW, 对应的系统直流母线电压如附录 A 图 A8 所示。由图 A8 可知, 第 1 组控制参数的实验结果是大扰动稳定的, 第 2 组控制参数的实验结果是大扰动失稳的。该结论与基于本文刻画的三维控制参数可行域评估得到的结论保持一致, 实验结果验证了本文方法的有效性与可行性。

6 结语

本文以由一台 Buck 型 DC/DC 换流器构成的直流配电系统为研究对象, 针对占空比饱和和限幅环节

导致的暂态失稳问题, 建立了饱和环节数学模型, 进而利用 TS 模糊模型法对系统暂态稳定性进行了评估, 通过刻画估计吸引域, 分析了控制参数对系统暂态稳定性的影响, 并提出了一种控制参数优化设计的方法。通过理论分析与实验所得的结论如下:

1) 针对占空比饱和和非线性环节数学模型中的不可导点, 可以通过 Sigmoid 函数建立其近似模型。时域仿真结果表明, 本文提出的饱和和非线性模型能够较好地模拟传统饱和和限幅器。

2) 增大电流比例系数与电压比例系数, 能够有效提高系统暂态稳定性, 但是由于占空比饱和环节的存在, 过大的参数反而使得系统容易暂态失稳。例如, 当 6 MW 运行点突变至 16 MW 运行点时, 如果电压比例系数从 0.202 1 增大至 0.311 5, 系统状态则由暂态稳定变为暂态失稳。

3) 利用本文提出的控制参数优化设计的方法, 能够在目标参数范围内寻找到系统最优暂态稳定性对应的控制参数, 进而有效提高直流配电系统的暂态稳定性。

对于含移相全桥变换器等复杂 DC/DC 换流器的直流配电系统, 考虑多种场景下占空比限幅环节对系统暂态稳定性和长期稳定性的影响, 是接下来需要研究的方向。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>), 扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 张宁, 李姚旺, 黄俊辉, 等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 2-12.
ZHANG Ning, LI Yaowang, HUANG Junhui, et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9): 2-12.
- [2] 韩雪姣, 屈鲁, 王长永, 等. 数据中心全直流供电系统的构建及其综合评价[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 75-83.
HAN Xuejiao, QU Lu, WANG Changyong, et al. Construction and comprehensive evaluation of a full DC power supply system in data centers[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 75-83.
- [3] 王家乾, 赵晋斌, 曾志伟, 等. 基于虚拟惯性控制的光伏直流微电网稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 55-61.
WANG Jiaqian, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, et al. Stability analysis of photovoltaic DC microgrid based on virtual inertia control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 55-61.
- [4] 杨明扬, 王晗, 蔡旭, 等. 基于二极管分散整流的风电机组中压

- 直流汇集直接送出系统[J].电力系统自动化,2024,48(2):9-19.
- YANG Mingyang, WANG Han, CAI Xu, et al. Medium-voltage DC collection and DC transmission system of wind turbines based on distributed diode rectifiers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2): 9-19.
- [5] 彭克,李云利,赵学深,等.考虑随机扰动的直流配电系统宽频振荡镇定控制[J].电力系统自动化,2023,47(22):129-137.
- PENG Ke, LI Yunli, ZHAO Xueshen, et al. Wide-band oscillation stabilization control of DC distribution system considering random disturbance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(22): 129-137.
- [6] HUANG L B, XIN H H, WANG Z, et al. Transient stability analysis and control design of droop-controlled voltage source converters considering current limitation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 578-591.
- [7] 黄萌,刘浴霜,付熙坤,等.电力电子并网变流器非线性行为机理与安全运行边界研究综述[J].武汉大学学报(工学版),2023,56(11):1380-1392.
- HUANG Meng, LIU Yushuang, FU Xikun, et al. A review of nonlinear behavior mechanism and safety operation boundary for power electronics grid-connected converters [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(11): 1380-1392.
- [8] 潘莉,李霞林,王智,等.弱连接VSC的锁相环同步暂态稳定综述[J].电力自动化设备,2023,43(9):138-151.
- PAN Li, LI Xialin, WANG Zhi, et al. Overview of transient stability analysis of phase locked loop synchronization in weak-grid connected VSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 138-151.
- [9] 刘欣博,刘宁,宋晓通,等.基于交流恒功率负载特性的交直流混合微电网系统大信号稳定性判据[J].高电压技术,2021,47(10):3441-3451.
- LIU Xinbo, LIU Ning, SONG Xiaotong, et al. Large-signal stability criteria of AC/DC hybrid microgrid based on AC constant power loads[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3441-3451.
- [10] 明佳,王玉斌,王璠,等.直流微网的大信号稳定性分析及有源阻尼补偿方法[J].电工技术学报,2021,36(增刊2):517-529.
- MING Jia, WANG Yubin, WANG Fan, et al. Large signal stability analysis and active damping compensation method for DC microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Supplement 2): 517-529.
- [11] SONG Q C, CHEN J W, 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.
- [12] 厉泽坤,孔力,裴玮.直流微电网大扰动稳定判据及关键因素分析[J].高电压技术,2019,45(12):3993-4002.
- LI Zekun, KONG Li, PEI Wei. Analyses of stability criterion and key factors of DC microgrid under large disturbance [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3993-4002.
- [13] 赵峰,帅智康,彭也伦,等.含电流限幅器的逆变器暂态稳定性评估方法[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2245-2255.
- ZHAO Feng, SHUAI Zhikang, PENG Yelun, et al. Evaluation method for transient stability of inverter containing current limiter [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2245-2255.
- [14] HURAYB K, NIEBUR D, KABALAN M. Large-signal stability analysis of grid-connected droop-controlled inverter with saturable power controller [C]// 2022 North American Power Symposium (NAPS), October 9-11, 2022, Salt Lake City, USA.
- [15] CHUN E, KABALAN M. Effects of controller saturation on domain of attraction estimation of droop-controlled inverter [C]// 2019 North American Power Symposium (NAPS), October 13-15, 2019, Wichita, USA.
- [16] 邢光正,闵勇,陈磊,等.并网VSC的大扰动失稳模式[J].电力自动化设备,2022,42(8):47-54.
- XING Guangzheng, MIN Yong, CHEN Lei, et al. Large-disturbance instability patterns of grid-connected VSC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 47-54.
- [17] 张国驹,裴玮,杨鹏,等.中压配电网柔性互联设备的电路拓扑与控制技术综述[J].电力系统自动化,2023,47(6):18-29.
- ZHANG Guoju, PEI Wei, YANG Peng, et al. Review on circuit topology and control technology of flexible interconnection devices for medium-voltage distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(6): 18-29.
- [18] ZHAO X S, GUO L, ZHU L, et al. Power feasible region ensuring transient stability of droop-based multiconverters DC system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(4): 5442-5455.
- [19] 沈霞,帅智康,沈超,等.大扰动时交流微电网的运行与控制研究综述[J].电力系统自动化,2021,45(24):174-188.
- SHEN Xia, SHUAI Zhikang, SHEN Chao, et al. Review on operation and control of AC microgrid under large disturbance [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 174-188.
- [20] 刘宿城,李响,秦强栋,等.直流微电网集群的大信号稳定性分析[J].电工技术学报,2022,37(12):3132-3147.
- LIU Sucheng, LI Xiang, QIN Qiangdong, et al. Large signal stability analysis of DC microgrid cluster [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3132-3147.

蔡元鑫(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向:直流配电系统暂态稳定分析。E-mail:sdutcyx@163.com

彭克(1983—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要研究方向:交直流配电系统与综合能源系统。E-mail: pengke@sdut.edu.cn

赵学深(1991—),男,博士,讲师,主要研究方向:交直流配电系统等效降阶建模、机理分析及控制参数设计。E-mail:sdutdqzs06@sdut.edu.cn

(编辑 杨松迎)

Transient Stability Analysis of DC Distribution System Considering Duty Cycle Limiter

CAI Yuanxin, PENG Ke, ZHAO Xueshen, XING Lin, YANG Yunhong

(College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: Under the condition of high power disturbance, the limiter is prone to the saturation phenomenon of duty cycle, and the DC power distribution system will be degraded from closed-loop control to open-loop response and transient instability. Therefore, this paper carries out the transient stability analysis of DC power distribution system considering the duty cycle limiter. Firstly, this paper uses Sigmoid function to simulate the nonlinear characteristics of duty cycle limiter, and establishes a large-signal model of DC distribution system which is closer to the engineering reality. Secondly, the estimated attraction domain taking into account the influence of the duty cycle limiter is characterized by the Takagi-Sugeno (TS) fuzzy modeling method. Then, the variation of the estimated attraction domain with different control parameters reveals the transient instability phenomenon of the DC distribution system induced by duty cycle saturation. Finally, for the limitations of the existing transient stability improvement methods due to the duty cycle limiter, an optimization design method of control parameters is proposed to provide a scheme for the control parameter selection to improve the transient stability of the system. The effectiveness of the theoretical analysis is verified by the RT-Box hardware-in-the-loop experiment.

This work is supported by Shandong Provincial Natural Science Foundation of China (No. ZR2023ME034).

Key words: DC power distribution system; duty cycle limiter; Sigmoid function; transient stability; parameter optimization

