

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.026

# 基于改进弗雷歇算法的虚拟直流电机等效惯量计算

王书征, 张少文, 朱海铭, 李先允

(南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

**摘要:** 伴随高密度分布式电源接入, 电网惯量水平持续下降, 尤其是在新能源独立供电条件下, 其惯量远远低于最低惯量需求。通过对端口换流器施加虚拟直流电机控制策略, 可以利用控制参数灵活调整系统惯量, 减少电网惯量差额, 增强电网的稳定性。但该控制方法虚拟出的等效惯量大小暂不明确, 虚拟惯量对等效惯量的影响也有待进一步探究。据此, 文中首先在虚拟直流电机模型的基础上, 利用小信号模型分析虚拟惯量与等效惯量对系统动态特性的影响, 指出两者的惯量等效关系。其次, 基于虚拟惯量与等效惯量的对应关系, 提出一种利用弗雷歇算法度量电压曲线相似度的等效惯量计算方法, 明确虚拟直流电机控制的等效惯量大小。然后, 引入相关性约束与曲线特征约束, 提出一种改进弗雷歇算法, 保证等效惯量计算的正确性。最后, 采用最优拟合方式实现惯量等效关系的函数化, 给出虚拟惯量与等效惯量间的数量关系。仿真结果验证了文中所提等效惯量计算方法的有效性。

**关键词:** 虚拟直流电机; 相关性约束; 曲线特征约束; 惯量等效关系; 弗雷歇算法; 最优拟合方式

**中图分类号:** TM471

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)01-0218-08

## 0 引言

随着新型电力系统的构建, 分布式电源、数据中心、电动汽车等新型直流源荷比重将进一步增大, 配电网的直流特征愈发明显<sup>[1-2]</sup>。新型直流源、荷主要以微电网的形式接入配电网<sup>[3]</sup>, 然而, 直流微电网为小惯量系统, 在离网状态下, 发电功率波动、负荷投切等不确定性扰动均会导致直流母线电压波动, 影响整个微电网的稳定运行<sup>[4-5]</sup>。因此, 如何提高直流微电网的惯性特性, 抑制微电网的电压波动是目前亟须解决的问题。

针对微电网的低惯量问题, 国内外学者从换流器控制方式出发, 提出多种虚拟惯性控制方法<sup>[6-9]</sup>。其中, 虚拟直流电机(virtual direct current motor, VDCM)利用虚拟惯量模拟直流电机的转动惯量, 可有效提升微电网的惯性特性, 获得了广泛关注。文献[10-11]分别针对储能与光伏侧换流器, 在双环控制的基础上引入虚拟角速度, 实现了VDCM控制。文献[12]则在能量路由器中采用VDCM, 保证了不同工作模式下电网的惯性。但上述文献均未对VDCM惯性特性展开分析。文献[13]提出一种基于扩张状态观测器的VDCM控制, 可有效削弱直流母线电压超调量, 但该控制下虚拟惯量的变化规律须进一步分析。文献[14]提出一种简化的VDCM控制, 利用简化的控制结构提升VDCM虚拟惯量, 但虚拟惯量提升对等效惯量的影响仍有待探究。

文献[15]指出VDCM控制思想等价于增加直流母线侧电容, 即等效惯量, 但该文献并未对虚拟惯量与等效惯量间的对应关系展开分析。文献[16]提出一种基于有功调节效果的等效电容计算方法, 但在新能源独立供电条件下, 该计算方法并不适用。

基于此, 文中提出一种基于改进弗雷歇算法的VDCM等效惯量计算方法。首先, 基于虚拟惯量与等效惯量的小信号模型, 确立惯量等效关系。然后, 利用弗雷歇算法度量虚拟惯量与等效惯量的电压阶跃响应曲线相似度, 建立两者数值的对应关系。最后, 采用基于方差、决定系数、标准差的最优拟合方式, 实现惯量等效关系的函数化。针对弗雷歇算法的局部性与准确性问题, 提出基于相关性约束与曲线特征约束的改进弗雷歇算法, 综合考虑系统的稳态与暂态特征, 提高等效惯量计算的准确性。

## 1 VDCM模型建立

文中针对图1所示直流微电网展开研究, 其中光伏系统采用最大功率点跟踪控制, 提取光伏最大功率; 储能装置通过双向DC-DC换流器(bi-directional DC-DC converter, BDDC)接入直流母线。

VDCM由BDDC、直流母线电容 $C$ 和储能装置构成。BDDC包括2个双向开关器件 $S_{b1}$ 、 $S_{b2}$ 和连接在支路中点的滤波电感 $L_b$ , 可等效为一个二端口网络, 与直流电机模型结构相似<sup>[17]</sup>。图1中 $U_b$ 为BDDC输入电压;  $i_b$ 为BDDC输入电流;  $U_{dc}$ 为BDDC输出电压, 即直流母线电压;  $i_{dc}$ 为BDDC输出电流。

为模拟直流电机的惯性特性, 提升微电网电压稳定性, 针对上述BDDC, 在双环控制的基础上, 引

收稿日期: 2022-07-13; 修回日期: 2022-09-05

基金项目: 江苏省重点研发计划资助项目(BE2018130)

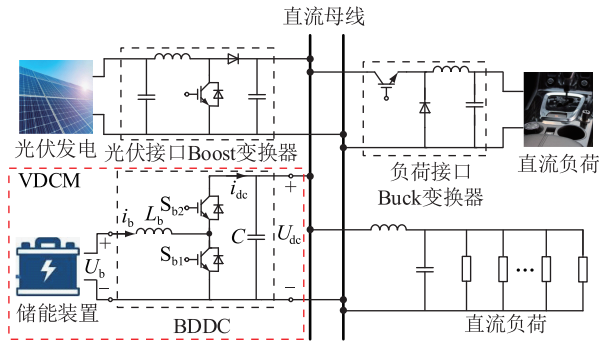


图1 直流微电网架构

Fig.1 Architecture of DC microgrid

入虚拟角速度  $\omega$ , 实现 VDCM 控制。其中 VDCM 电磁转矩  $T_{ev}$  [18] 的表达式为:

$$T_{ev} = \frac{eI_{ref}}{\omega} \quad (1)$$

其中:

$$e = C_t \Phi \omega \quad (2)$$

式中:  $e$  为 VDCM 电枢电动势;  $I_{ref}$  为输出电流参考值;  $C_t$  为转矩常数;  $\Phi$  为磁通。

VDCM 电枢方程为:

$$e - U_b = I_{ref} R \quad (3)$$

式中:  $R$  为 VDCM 电枢电阻。

VDCM 机械方程为 [19]:

$$T_{mv} - T_{ev} = J_v \frac{d\omega}{dt} + D_v (\omega - \omega_0) \quad (4)$$

式中:  $T_{mv}$  为 VDCM 机械转矩;  $J_v$  为虚拟惯量;  $D_v$  为虚拟阻尼系数;  $\omega_0$  为额定角速度。

VDCM 控制电路如图 2 所示 [20]。图 2 中  $U_{ref}$  为直流母线电压参考值;  $s$  为拉普拉斯算子;  $I_{bref}$  为电感电流参考值;  $P_m$  为 VDCM 机械功率;  $S_1$ 、 $S_2$  分别为  $S_{b1}$ 、 $S_{b2}$  的触发信号; PWM 为脉冲宽度调制。

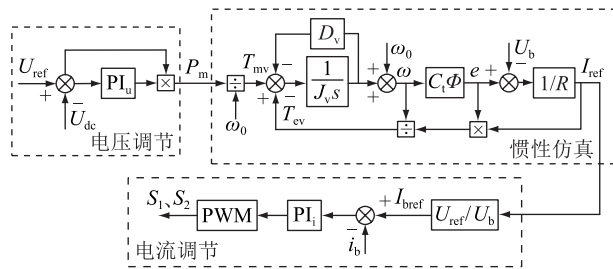


图2 VDCM 控制框图

Fig.2 Block diagram of VDCM control

VDCM 控制分为 3 个目标: 电压调节、惯性仿真和电流调节。首先, 将直流母线电压  $U_{dc}$  与  $U_{ref}$  的偏差量引入电压比例积分 (proportional integral, PI) 控制器, 利用 PI 控制器的调节能力, 实现电压调节; 其次, 将外环 PI 控制器输出与  $U_{ref}$  的乘积作为机械

功率  $P_m$ , 利用虚拟角速度  $\omega$  与  $P_m$  构建直流电机的机械方程和电枢回路方程, 实现惯性仿真; 将惯性环节的输出经  $U_{ref}/U_b$  环节转换为电流调节环节输入  $I_{bref}$ , 最后将  $I_{bref}$  与  $i_b$  的偏差量引入电流 PI 控制器, 实现电流调节。

## 2 惯量等效关系分析

### 2.1 虚拟惯量与等效惯量

由于直流微电网的惯性主要由电容提供, 而直流微电网中母线侧电容受制于体积与成本, 容量较小, 母线电压无法获得有效的惯性支撑 [21], 因此 VCDM 控制所虚拟出的虚拟电容  $C_v$  直接影响直流微电网的惯性支撑作用。依据电容充放电特性, 得到  $C_v$  的动力学方程为:

$$i_v = C_v \frac{dU_{dc}}{dt} + G_v U_{dc} \quad (5)$$

式中:  $i_v$  为流入  $C_v$  的虚拟电流;  $G_v$  为  $C_v$  的寄生电导。分别对  $U_{dc}$  与  $i_v$  添加扰动信号  $\Delta u_{dc}$  和  $\Delta i_v$ , 得出  $\Delta u_{dc}$  和  $\Delta i_v$  间的小信号模型为:

$$G_1(s) = \frac{\Delta u_{dc}}{\Delta i_v} = \frac{1}{C_v s + G_v} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,  $C_v$  的小信号模型近似于一阶惯性环节, 其中  $C_v$  等价于惯性环节中惯性时间常数, 反映了 VCDM 提供的惯量大小, 为 VDCM 的等效惯量。

结合图 2 中的惯性仿真模块与式(1)一式(4)可得:

$$T_{mv} - \frac{(C_t \Phi)^2 \omega}{R} = J_v \frac{d\omega}{dt} + D_v (\omega - \omega_0) \quad (7)$$

对  $\omega$  与  $T_{mv}$ , 分别添加扰动信号  $\Delta \omega$  和  $\Delta T_{mv}$ , 得到  $\Delta \omega$  和  $\Delta T_m$  间的小信号模型为:

$$G_{\omega T}(s) = \frac{\Delta \omega}{\Delta T_{mv}} = \frac{1}{J_v s + (C_t \Phi)^2 / R + D_v} \quad (8)$$

从式(6)、式(8)可以看出, 惯量仿真模块的小信号模型与  $C_v$  的小信号模型在结构上具有一致性, 其中  $J_v$  与  $C_v$  均可反映 VDCM 中惯量大小, 具有一定的等效关系。

### 2.2 小信号模型分析

为验证  $J_v$  与  $C_v$  的等效关系, 对 VDCM 的小信号模型展开分析, 其中  $i_b$  的扰动信号  $\Delta i_b$  与  $\Delta u_{dc}$  对占空比  $D$  的扰动信号  $\Delta d$  的传递函数 [22] 分别为:

$$G_{id}(s) = \frac{\Delta i_b}{\Delta d} = \frac{s C U_{dc} + (1 - D) i_b}{s^2 C L_b + s C R_b + (1 - D)^2} \quad (9)$$

$$G_{ud}(s) = \frac{\Delta u_{dc}}{\Delta d} = - \frac{(s L_b + R_b) i_b - (1 - D) U_{dc}}{s^2 C L_b + s C R_b + (1 - D)^2} \quad (10)$$

式中: $R_b$ 为电感内阻。VDCM 控制策略中, $\Delta u_{dc}$ 对  $e$  的扰动信号  $\Delta e$  的传递函数<sup>[23]</sup>为:

$$G_{ue}(s) = \frac{\Delta u_{dc}}{\Delta e} = \frac{U_{ref} C_t \Phi R (s k_{pu} + k_{iu})}{s \omega_0 [J_v R s + (C_t \Phi)^2 + D_v R]} \quad (11)$$

式中: $k_{pu}$ 、 $k_{iu}$ 分别为电压 PI 控制器的比例系数和积分系数。 $\Delta e$ 对  $\Delta i_b$ 的传递函数为:

$$G_{ei}(s) = \frac{\Delta e}{\Delta i_b} = \frac{U_{ref}}{R U_b} \quad (12)$$

依据上述传递函数,可建立图 3 所示 VDCM 小信号模型。

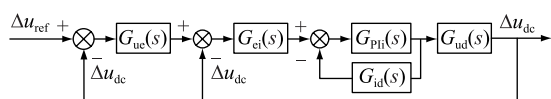


图 3 VDCM 小信号模型

Fig.3 Small signal model of VDCM

其中  $G_{Pli}(s)$  为电流控制器函数。由图 3 得出  $U_{ref}$  的扰动信号  $\Delta u_{ref}$  对  $\Delta u_{dc}$  的传递函数为:

$$G(s) = \frac{\Delta u_{ref}}{\Delta u_{dc}} = G_{ue}(s) G_{ei}(s) G_{Pli}(s) G_{ud}(s) / (1 + G_{Pli}(s) G_{id}(s) + G_{ei}(s) G_{Pli}(s) G_{ud}(s) + G_{ue}(s) G_{ei}(s) G_{Pli}(s) G_{ud}(s)) \quad (13)$$

表 1 为 VDCM 参数。依据表 1 与式(13),分别绘制  $J_v$  在  $1 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  内, $J_v$ 与  $C_v$ 以相同变化率增长过程中系统的特征根轨迹,结果分别如图 4、图 5 所示。

表 1 VDCM 参数

Table 1 VDCM parameters

参数	数值	参数	数值
$U_{ref}/V$	400	$D$	0.1
$L_b/mH$	5	$C/mF$	0.3
$C_t \Phi$	5.1	$\omega_0 / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	314

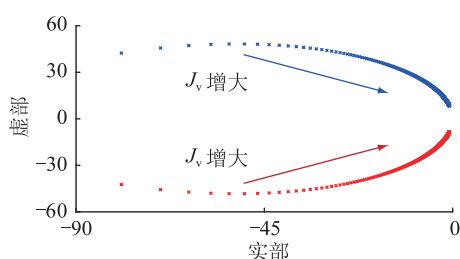


图 4  $J_v$ 对系统特征根的影响

Fig.4 Influence of  $J_v$  on the characteristic root of system

由图 4 可知,随着  $J_v$  数值的增加,VDCM 的特征根向虚轴移动,系统惯性提升,但稳定性裕度与动态特性裕度逐步降低。从图 5 可以发现,随着  $C_v$  数

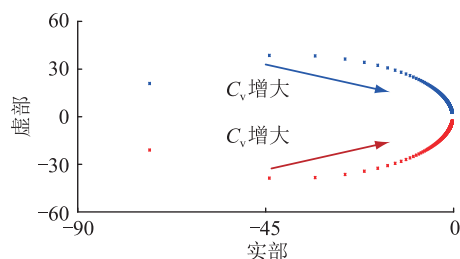


图 5  $C_v$ 对系统特征根的影响

Fig.5 Influence of  $C_v$  on the characteristic root of system

值的增加,系统特征根的整体变化规律与  $J_v$  具有一致性,表明  $C_v$  与  $J_v$  具有等效关系,可以通过改变  $J_v$  的大小调节系统的惯量特性。但在初始期间, $J_v$  增加时系统特征根更密集,表明在  $J_v$  与  $C_v$  增长过程中,特征根移动速度存在差异性,即  $J_v$  与  $C_v$  在相同数值下系统特征根不具有—致性,因此  $J_v$  与  $C_v$  间不存在直接等价关系。

此外,分析图 4 发现, $J_v$  数值选取不当会影响整个系统的稳定裕度与动态特性裕度。因此,考虑稳定性及动态特性约束<sup>[24]</sup>,最终确定  $J_v$  阈值约束范围,即:

$$J_{vmin} \leq J_v \leq J_{vmax} \quad (14)$$

式中: $J_{vmax}$ 、 $J_{vmin}$  分别为  $J_v$  阈值约束的最大值与最小值。

依据文献[24]所提出的稳定运行边界计算方法,以稳定性与动态响应为约束集,利用传递函数的主导特征根,最终确定阈值约束的最小值与最大值分别为  $2.6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  与  $5.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

### 3 等效惯量计算方法

#### 3.1 改进的弗雷歇算法

为明确 VDCM 控制所虚拟出的  $C_v$  大小,参考文献[25]中户变关系识别中弗雷歇算法对电表电压曲线相似度的度量方法,以  $J_v$  与  $C_v$  对应关系为基础,提出一种通过度量电压曲线相似度计算等效惯量的方法。弗雷歇算法是一种用于描述曲线空间相似度的算法,具体求解过程<sup>[26]</sup>为:

假设曲线  $L_C$  和  $L_D$  分别具有  $m$  与  $n$  个特征点,特征点集分别表示为  $L_C \{p_1, \dots, p_m\}$  和  $L_D \{q_1, \dots, q_n\}$ ,第  $i$  次循环下 2 条曲线间特征点对如式(15)所示。

$$L_i \{(p_1, q_i), (p_2, q_i), \dots, (p_m, q_i)\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

度量函数下 2 条曲线在第  $i$  次循环下的相对距离为  $\|L_i\|$ ,表达式如式(16)所示。

$$\|L_i\| = \max_{k=1,2,\dots,m} d(p_k, q_i) \quad (16)$$

可以得出最终弗雷歇距离为:

$$F(L_C, L_D) = \min \|L_i\| \quad (17)$$

由式(15)一式(17)发现,弗雷歇距离将部分匹配点之间的距离作为相似性结果的一部分,是一种局部匹配度量法,未考虑系统的稳态与暂态特征。

为提高弗雷歇距离的准确性与全局性,在计算 $\|L_i\|$ 之前引入相关性约束与曲线特征约束,实现弗雷歇算法的改进。

**相关性约束:**为了保证2条曲线的全局相关性,引入皮尔逊相关系数 $P$ ,利用相关程度对2条曲线之间总体变化趋势进行衡量,并通过限制 $P$ 的取值范围,实现相关性约束。

**曲线特征约束:**电压偏差是衡量电能质量的一项基本指标,电压偏差一般用电压偏差值与系统标称电压的百分比表示。此外,面对风、光等间歇性能源输出功率波动、负荷投切等常见扰动时,直流配电系统将会面临更多快速的功率波动,因此换流器输出电压须尽量避免电压超调,保证系统的暂态特性。

综上,通过规定曲线相对超调量 $\Delta\sigma_p$ 与电压偏差 $\Delta U'$ 的取值范围,实现曲线特征约束,提高曲线的特征相似度。 $\Delta U'$ 与 $\Delta\sigma_p$ 的计算公式为:

$$\Delta U' = |\Delta U_1 - \Delta U_2| \quad (18)$$

$$\Delta\sigma_p = \left| \frac{U_{pp1} - U_{pp2}}{U_{pp1}} \right| \times 100\% \quad (19)$$

式中: $\Delta U_1$ 、 $\Delta U_2$ 分别为曲线 $L_C$ 和曲线 $L_D$ 的电压偏差; $U_{pp1}$ 、 $U_{pp2}$ 分别为曲线 $L_C$ 和曲线 $L_D$ 的最大峰值或最小谷值。

### 3.2 基于改进弗雷歇算法的等效惯量计算

基于改进弗雷歇算法与 $J_v$ 和 $C_v$ 间的等效关系,最终确定等效惯量计算方法为:首先,确定阈值约束范围内 $J_v$ 的数值,依据传递函数 $G(s)$ 构建固定 $J_v$ 与不同 $C_v$ 下电压阶跃响应曲线;其次,利用相关性约束与曲线特征约束,筛选 $C_v$ 的取值大小;最后,度量固定 $J_v$ 与不同 $C_v$ 下电压阶跃响应曲线的弗雷歇距离,弗雷歇距离最小值即为该 $J_v$ 下VDCM所对应 $C_v$ ,从而实现VDCM惯性特性的量化分析。具体流程如图6所示。

为验证改进弗雷歇算法在VDCM等效惯量计算中的有效性,依据上述等效惯量计算流程,分别对比传统弗雷歇算法与改进弗雷歇算法的弗雷歇距离、相对超调量、电压偏差与相关系数,其结果分别如图7—图10所示。

从图7可以看出,引入相关性与曲线特性约束

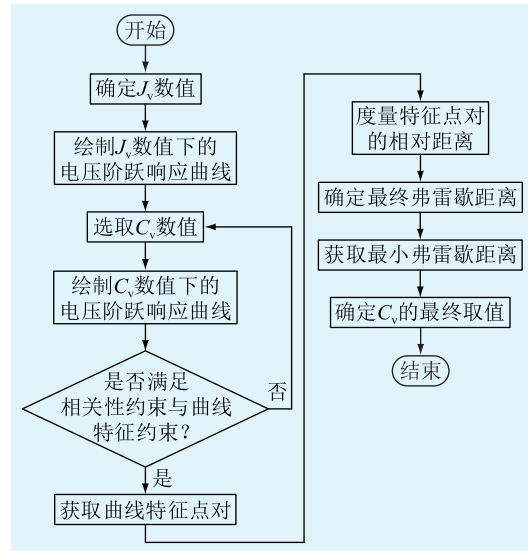


图6 基于改进弗雷歇算法的等效惯量计算流程

Fig.6 Equivalent inertia calculation flow based on improved Frechet algorithm

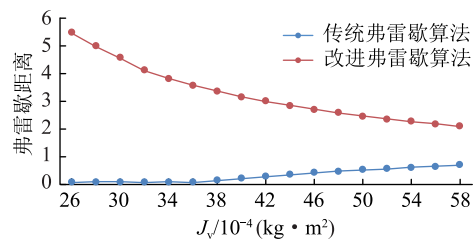
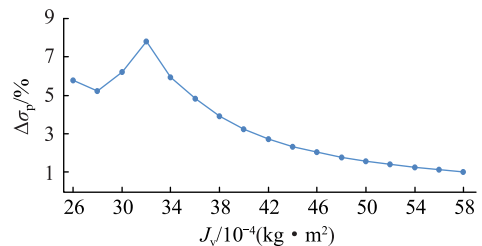
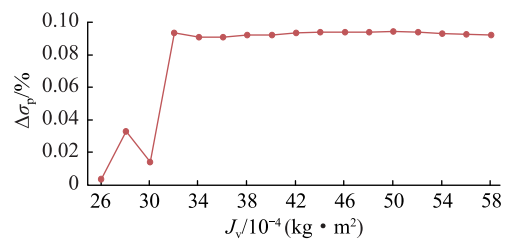


图7 弗雷歇距离对比

Fig.7 Comparison of Frechet distance



(a) 传统弗雷歇算法



(b) 改进弗雷歇算法

图8 相对超调量对比

Fig.8 Comparison of relative overshoot

后,弗雷歇距离数值明显上升。图8、图9中相比于传统弗雷歇算法,改进弗雷歇算法的曲线相对超调量、电压偏差量明显下降,表明改进弗雷歇算法可以有效抑制相对超调量的增长与电压偏差量的提



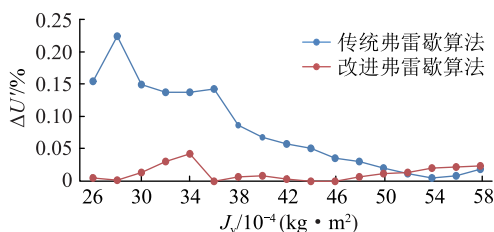


图9 电压偏差对比

Fig.9 Comparison of relative voltage deviation

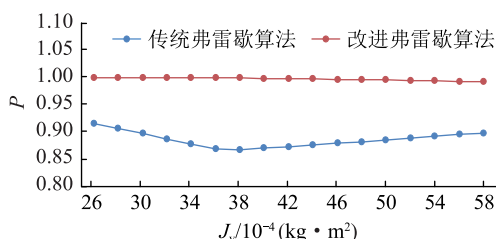


图10 相关系数对比

Fig.10 Comparison of correlation coefficient

升,保持相对超调量与电压偏差量的稳定,增加电压曲线的特征相似度。从图10可以发现,通过引入皮尔逊相关系数约束,可以有效提升曲线相关性,保证曲线变化趋势的一致性。

综上,相对于传统弗雷歇算法,改进后弗雷歇算法虽然扩大了2条曲线间的弗雷歇距离,但增加了曲线相关性与曲线特征相似度,提高了电压曲线对比的准确性,保证了等效惯量计算的正确性。

### 3.3 惯量等效关系

基于改进弗雷歇算法获取的 $J_v$ 与 $C_v$ 对应数值,分别选取幂指数逼近法、有理数逼近法、多项式逼近法对 $J_v$ 与 $C_v$ 的等效关系进行拟合。针对拟合结果,分别从和方差、决定系数、标准差对3种方式进行对比,选取最优的拟合方式。其中和方差与标准差可以衡量拟合数据与拟合结果之间的偏离度,数值越小,拟合结果越精确。决定系数可以衡量拟合数据与拟合结果之间的契合度,数值越接近1,拟合程度越好。拟合方式对比结果如表2所示。

表2 拟合方式对比

Table 2 Comparison of fitting methods

拟合方式	和方差	决定系数	标准差
幂函数逼近	$4.51 \times 10^{-8}$	0.969 5	$3.83 \times 10^{-5}$
有理数逼近	$2.52 \times 10^{-8}$	0.983 1	$3.11 \times 10^{-5}$
多项式逼近	$3.08 \times 10^{-9}$	0.997 9	$1.01 \times 10^{-5}$

由表2可知,相比幂函数逼近法与有理数逼近法,多项式逼近法拟合结果精度最高,拟合效果最好。因此将多项式逼近法中的一元三次式作为最优拟合方式,最终确定 $C_v$ 与 $J_v$ 的函数关系为:

$$C_v = p_1 J_v^3 + p_2 J_v^2 + p_3 J_v + p_4 \quad (20)$$

其中 $p_1 = -833.7, p_2 = 15.18, p_3 = 0.014 67, p_4 = 2.169 \times 10^{-5}$ 。由式(20)可知,在虚拟惯量阈值约束范围内 $J_v$ 与 $C_v$ 之间存在非线性关系, $C_v$ 随着 $J_v$ 的增大而增大。该函数关系实现了 $J_v$ 和 $C_v$ 数值变换,定量描述了VDCM控制在负荷波动时所提供的惯量大小,表征了VDCM控制的惯性支撑作用,便于直流微电网系统惯量的调节。

## 4 仿真实验

### 4.1 VDCM 控制有效性验证

为验证VDCM控制的有效性以及所提等效惯量计算方式的正确性,在PSCAD/EMTDC中搭建图1所示直流微电网仿真模型。其中,直流母线电压为400V,光伏阵列输出电压为124V,VDCM参数选择见表1。图11为双环控制、VDCM控制与并联电容策略下母线电压响应的对比。

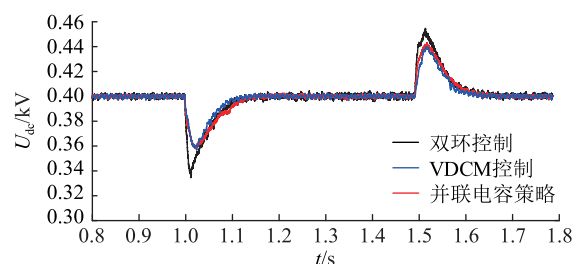


图11 不同控制方式下的直流母线电压

Fig.11 DC bus voltage under different control modes

由图11可知,相比于双环控制策略,VDCM控制策略可以有效抑制电压突变,降低直流母线电压超调量。对比VDCM控制与并联电容策略下直流母线电压的变化曲线,可以看出2条曲线的变化趋势、超调量、稳态误差基本一致。

因此,相比于双环控制,VDCM控制与并联电容策略可以有效抑制电压突变,提高系统的稳定性。此外,VDCM控制与并联电容策略在改善电压质量、增强直流系统惯性能力方面具有类似性,验证了VDCM控制中 $J_v$ 与 $C_v$ 间的等效性。

### 4.2 等效惯量计算方法正确性验证

通过对比不同 $C_v$ 与固定 $J_v$ 下直流母线电压波形,观察曲线的相似程度,确立 $C_v$ 的取值范围,并利用弗雷歇算法确定两者的对应数值,对等效惯量计算方法的正确性进行验证。图12为不同等效惯量下母线电压波形。

对比图12中电压曲线,可知当 $C_v$ 为0.04mF时,母线电压超调量偏大,响应时间偏短;而当 $C_v$ 为0.36mF时,超调量偏小,响应时间偏长;仅当 $C_v$ 为

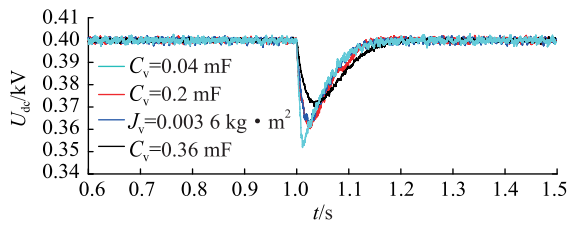


图 12 不同等效惯量下母线电压波形

Fig.12 Bus voltage waveforms at different kinds of equivalent inertia

0.2 mF 时,  $J_v$  与  $C_v$  的电压超调量与响应时间具有相似性, 因此初步确定  $C_v$  的取值范围为 0.04 ~ 0.36 mF。其次, 分别采用传统弗雷歇算法与改进弗雷歇算法获取  $J_v$  为  $3.6 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  时  $C_v$  的对应数值, 结果分别为 0.08 mF 与 0.2 mF。图 13 为不同算法下母线电压波形。

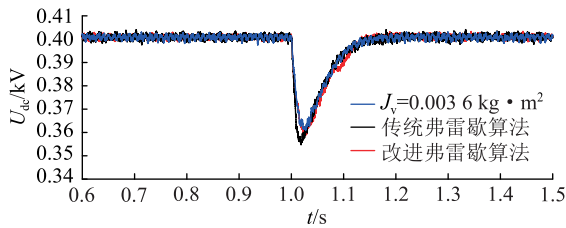


图 13 不同算法下母线电压波形

Fig.13 Bus voltage waveforms under different algorithms

依据图 13 中传统弗雷歇算法与改进弗雷歇算法下母线电压波形和式 (18)、式 (19), 最终得出传统弗雷歇算法下  $J_v$  与  $C_v$  两者母线电压波形之间的  $\Delta\sigma_p$  与  $\Delta U'$  分别为 4.8%、0.11%, 改进弗雷歇算法下  $\Delta\sigma_p$  与  $\Delta U'$  分别为 0.095%、0.01%, 与阶跃响应曲线分析结果具有一致性, 验证了改进弗雷歇算法在 VDCM 等效惯量计算方法上的有效性。

为充分验证惯量等效关系的准确性, 文中采用上述计算方法分别在阈值约束范围内、外各取 3 组等效惯量的对应数据, 对惯量等效关系曲线进行验证, 结果如图 14 所示。

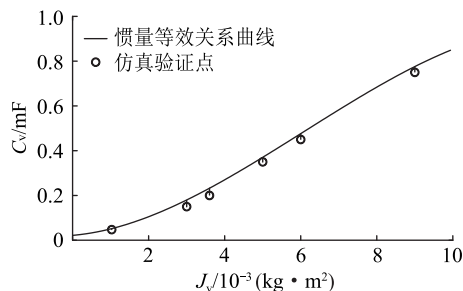


图 14 惯量等效关系验证结果

Fig.14 Verification results of equivalence relation of inertia

由图 14 可知, 验证数据基本落在惯量等效关系曲线附近, 其中验证数据与拟合曲线间的决定系数、相关系数与显著水平均为 1, 表明两者具有强相关性, 且无显著性差异。此外验证点的残差平方和仅为 0.054, 而残差平方和数值越小, 则文中得出的惯量等效关系和  $J_v$  与  $C_v$  间实际关系的相似程度越高, 从而验证了该计算方法的正确性。

## 5 结论

文中提出一种基于改进弗雷歇算法的 VDCM 控制惯量等效关系计算方法, 并以直流微电网为应用场景对该方法进行了验证, 得出以下结论:

(1) 与双环控制相比, VDCM 控制能够抑制直流母线电压突变, 降低母线电压超调量, 提高系统惯量, 且通过小信号模型分析以及仿真结果发现  $J_v$  与  $C_v$  在改善电压质量、增强直流系统惯性方面具有一致性, 表明了  $J_v$  与  $C_v$  间的对应关系。

(2) 与传统弗雷歇算法相比, 文中提出的基于相关性约束与曲线特征约束的改进弗雷歇算法充分考虑了系统的稳态与暂态特征, 提高了弗雷歇算法准确性, 保证了等效惯量计算结果的有效性。

(3) 等效惯量计算方法以函数形式具现了  $J_v$  与  $C_v$  的非线性等效关系, 明确了 VDCM 控制在负荷波动时提供的惯量大小, 便于直流微电网惯量的调节。

## 致谢

本文得到江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX22\_1083), 南京工程学院校级基金项目 (CKJB202114) 资助, 谨此致谢!

## 参考文献:

- [1] GUO Q, TU C M, JIANG F, et al. Improved dynamic voltage restorer with reduced capacity of power inverter and energy storage for voltage sag mitigation[J]. IET Power Electronics, 2021, 14(5): 958-968.
- [2] 王植, 俞子聪, 张泉, 等. 光伏参与直流微电网调压控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3762-3770.  
WANG Zhi, YU Zicong, ZHANG Quan, et al. Voltage regulation control strategy for DC microgrid with photovoltaic participation[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3762-3770.
- [3] 田艳军, 彭飞, 朱晓荣, 等. 直流微网储能单元的灵活类虚拟同步发电机控制[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2316-2328.  
TIAN Yanjun, PENG Fei, ZHU Xiaorong, et al. Flexible analogous virtual synchronous generator control for energy storage units in DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2316-2328.
- [4] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 72-84, 344.  
ZHU Shanshan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop

- control in DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 72-84, 344.
- [5] 杨金文, 吴杰康, 庄仲, 等. 基于小区源-储-荷协同的微网多能协调控制策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 40-49.  
YANG Jinwen, WU Jiekang, ZHUANG Zhong, et al. Multi-energy coordinated control strategy based on source-storage-load micro network in community [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 40-49.
- [6] 王毅, 黑阳, 付媛, 等. 基于变下垂系数的直流配电网自适应虚拟惯性控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 116-124.  
WANG Yi, HEI Yang, FU Yuan, et al. Adaptive virtual inertia control of DC distribution network based on variable droop coefficient [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 116-124.
- [7] WANG Y, WANG C, XU L, et al. Adjustable inertial response from the converter with adaptive droop control in DC grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3198-3209.
- [8] 兰征, 涂春鸣, 姜飞. 基于虚拟电机技术的直流微电网与主电网柔性互联策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1739-1749.  
LAN Zheng, TU Chunming, JIANG Fei. The flexible interconnection strategy between DC microgrid and AC grid based on virtual electric machinery technology [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8): 1739-1749.
- [9] 朱晓荣, 蔡杰, 王毅, 等. 风储直流微网虚拟惯性控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 49-58.  
ZHU Xiaorong, CAI Jie, WANG Yi, et al. Virtual inertia control of wind-battery-based DC micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 49-58.
- [10] GUO Y, MENG J H, WANG Y, et al. A virtual DC machine control strategy for dual active bridge DC-DC converter [C]// IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia. Chengdu, China. IEEE, 2019: 2384-2388.
- [11] 程启明, 杨小龙, 褚思远, 等. 基于虚拟直流发电机的光伏系统控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2097-2104.  
CHENG Qiming, YANG Xiaolong, CHU Siyuan, et al. Research on control strategy of PV system based on virtual DC generator [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2097-2104.
- [12] 盛万兴, 刘海涛, 曾正, 等. 一种基于虚拟电机控制的能量路由器[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3541-3550.  
SHENG Wanxing, LIU Haitao, ZENG Zheng, et al. An energy hub based on virtual-machine control [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3541-3550.
- [13] 崔健, 吕志鹏, 盛万兴, 等. 一种新型虚拟直流电机控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 3029-3038.  
CUI Jian, LYU Zhipeng, SHENG Wanxing, et al. A new control technology based on virtual DC motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 3029-3038.
- [14] 张祥宇, 李浩, 付媛. 含新型虚拟电机的直流微网动态稳定性分析与自适应电压惯性控制[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2865-2874.  
ZHANG Xiangyu, LI Hao, FU Yuan. Dynamic stability analysis and self-adaptive voltage inertia control of DC microgrids with novel virtual machine [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2865-2874.
- [15] 张辉, 谭树成, 肖曦, 等. 具有直流电机特性的储能接口变换器控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 119-125.  
ZHANG Hui, TAN Shucheng, XIAO Xi, et al. Control strategy of energy storage converter with DC machine characteristics [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 119-125.
- [16] 孟建辉, 张赞, 范莹, 等. 基于直流微网虚拟电容控制的等效电容计算方法[J]. 电力建设, 2020, 41(7): 25-32.  
MENG Jianhui, ZHANG Yun, FAN Ying, et al. Equivalent capacitance calculation method based on virtual capacitance control of DC microgrid [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(7): 25-32.
- [17] SAMANTA S, MISHRA J P, ROY B K. Virtual DC machine: an inertia emulation and control technique for a bidirectional DC-DC converter in a DC microgrid [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(6): 874-884.
- [18] 刘玲, 林刚, 焦世青, 等. 充电站直流微网虚拟直流电机控制策略及其动态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 28-35.  
LIU Ling, LIN Gang, JIAO Shiqing, et al. Virtual DC generator control strategy and its dynamic analysis of DC charging station microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 28-35.
- [19] 孟建辉, 郭禹, 王毅, 等. 双有源全桥 DC-DC 变换器的自适应虚拟直流电机控制方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1497-1507.  
MENG Jianhui, GUO Yu, WANG Yi, et al. Adaptive virtual DC machine control strategy for dual active bridge DC-DC converter [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1497-1507.
- [20] WANG P Y, ZHAO J F, LIU K L. Parameter-adaptation-based virtual DC motor control method for energy storage converter [J]. IEEE Access, 2021(9): 90795-90804.
- [21] 尹英龙, 刘宝泉. DC/DC 变换器虚拟直流电机控制稳定机理研究[J]. 陕西科技大学学报, 2021, 39(2): 146-152.  
YIN Yinglong, LIU Baoquan. Research on stabilizing mechanism of distributed DC/DC converter virtual DC motor control [J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2021, 39(2): 146-152.
- [22] 支娜, 丁可, 黄庆辉, 等. 基于  $P-U$  下垂特性的虚拟直流电机控制策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36(6): 1238-1248.  
ZHI Na, DING Ke, HUANG Qinghui, et al. A virtual DC motor control strategy based on  $P-U$  drooping characteristics [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(6): 1238-1248.
- [23] TAN S C, DONG G, ZHANG H, et al. Virtual DC machine control strategy of energy storage converter in DC microgrid [C]// IEEE Electrical Power and Energy Conference. Ottawa, ON, Canada. IEEE, 2016: 1-5.
- [24] 孟建辉, 宋美琪, 王毅, 等. 虚拟电容控制下并网型直流微网 VSC 多约束稳定运行边界[J]. 电力系统自动化, 2019,

43(15):172-179,199.

MENG Jianhui, SONG Meiqi, WANG Yi, et al. Multi-constraint stable operation boundary of grid-connected voltage source converter of DC microgrid with virtual capacitance control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 172-179,199.

[25] 唐冬来,倪平波,张捷,等. 基于离散弗雷歇距离的户变关系识别方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(6):223-230.

TANG Donglai, NI Pingbo, ZHANG Jie, et al. Identification method for relationship between household transformers based on discrete Frechet distance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6):223-230.

[26] 黄世泽,陈威,张帆,等. 基于弗雷歇距离的道岔故障诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2018,46(12):

1690-1695.

HUANG Shize, CHEN Wei, ZHANG Fan, et al. Method of turnout fault diagnosis based on Fréchet distance[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(12): 1690-1695.

作者简介:



王书征

王书征(1983),男,博士,副教授,研究方向为直流配电网运行与控制(E-mail:wsz310@126.com);

张少文(1998),男,硕士在读,研究方向为直流配电网运行与控制;

朱海铭(1996),男,硕士在读,研究方向为分布式光伏调频技术。

## Equivalent inertia calculation of virtual DC motor based on improved Frecher algorithm

WANG Shuzheng, ZHANG Shaowen, ZHU Haiming, LI Xianyun

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

**Abstract:** With the access of high-density distributed power generation, the inertia level of power grid continues to decline. Especially under the condition of independent power supply of new energy, the inertia level of power grid is far lower than the minimum inertia demand. By applying the virtual DC motor control strategy to the port converter, the system inertia can be flexibly adjusted by using the control parameters to reduce the inertia difference of the power grid and enhance the stability of the power grid. However, the magnitude of the virtual equivalent inertia of the control method is not clear, and the influence of the virtual inertia on the equivalent inertia needs to be further explored. Therefore, based on the virtual DC motor model, the small signal model is used to analyze the influence of virtual inertia and equivalent inertia on the dynamic characteristics of the system, and the equivalent relationship between them is pointed out. Secondly, based on the corresponding relationship between the virtual inertia and the equivalent inertia, an equivalent inertia calculation method which uses the voltage curve similarity measured by Frecher algorithm is proposed to determine the equivalent inertia of the virtual DC motor control. Then, the correlation constraint and curve feature constraint are introduced, and an improved Frecher algorithm is proposed to ensure the correctness of the equivalent inertia calculation. Finally, the optimal fitting method is used to realize the function of the equivalent inertia relationship, and the quantitative relationship between the virtual inertia and the equivalent inertia is given. The simulation results verify the effectiveness of the proposed equivalent inertia calculation method.

**Keywords:** virtual DC motor; correlation constraint; curve characteristic constraint; equivalent relation of inertia; Frecher algorithm; optimal fitting method

(编辑 方晶)