

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.03.017

# 基于二自由度 PID 的三相 PWM 整流器调压改进策略

石荣亮, 刘维莎, 王国斌, 兰才华, 许木元

(桂林理工大学机械与控制工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:**基于前端电压源型整流器(voltage source rectifier, VSR)与后端电压源型逆变器(voltage source inverter, VSI)级联的 VSR-VSI 三相脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)变换器已在电梯能量回馈系统中得到广泛应用,但前端三相 VSR 采用传统比例积分(proportional integral, PI)双闭环控制结构通常存在中端直流母线电压无法兼顾抗干扰性和跟踪性的问题。为此,文中提出一种基于二自由度比例积分微分(proportional integral differential, PID)的三相 PWM 整流器调压改进策略。首先,阐述基于 VSR-VSI 三相 PWM 变换器级联系统的结构和工作原理,并给出前端三相 VSR 的传统 PI 双闭环控制方案及其参数设计过程,分析该方案不能兼具良好的抗干扰性与跟踪性的原因。在此基础上,给出基于二自由度 PID 的前端三相 VSR 直流调压优化策略及其参数设计方法。最后,利用软件仿真与实验测试对比结果共同验证了所述三相 PWM-VSR 直流调压改进策略的有效性与优越性。

**关键词:**能量回馈系统;比例积分(PI)双闭环控制;三相脉冲宽度调制(PWM)整流器;抗干扰性;跟踪性;二自由度比例积分微分(PID);直流调压

中图分类号:TM712

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)03-0149-08

## 0 引言

近年来,能源危机与全球气候变暖已成为人类密切关注的热点问题,低碳环保与节能减排在各行各业领域均已得到重视<sup>[1]</sup>。在电梯节能方面,基于前端电压源型整流器(voltage source rectifier, VSR)与后端电压源型逆变器(voltage source inverter, VSI)级联而成的 VSR-VSI 三相脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)变换器驱动系统已在电梯能量回馈系统中获得越来越多的市场应用。具体而言,当电梯轿厢处于重载上行、轻载下行时, VSR-VSI 使电梯的永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)保持电动运行,输出机械能;当电梯轿厢处于轻载上行、重载下行时, VSR-VSI 使电梯 PMSM 保持发电运行,并向电网回馈能量<sup>[2]</sup>。此外,为保证电梯在不同运行工况下的安全与可靠运行,安装于电梯能量回馈系统中的 VSR-VSI 须克服 PMSM 不同运行模式及其切换过程所带来的冲击与扰动,这就要求 VSR-VSI 同时具备更好的动态和稳态性能<sup>[3]</sup>。

VSR-VSI 将传统电梯 PMSM 驱动系统的前端三相不控整流子系统替换成三相 VSR,而后端三相 VSI 电机调速子系统保持不变,其具备能量可双向流动、并网电流可调与中端直流母线电压可控的新

特征<sup>[4]</sup>。为此,文中将重点分析并研究三相 VSR 前端子系统(简称 VSR)的控制策略,而三相 VSI 后端子系统(简称 VSI)的控制策略可参考传统调速方案,文中不再赘述。基于直流母线电压外环与并网电流内环级联而成的传统比例积分(proportional integral, PI)双闭环控制结构,在  $dq$  坐标系下具有无稳态误差跟踪、易控制实现和参数整定简单等优点,已被广泛应用于 VSR 控制系统<sup>[5]</sup>。然而, VSR 采用的传统 PI 双闭环控制属于一自由度 PI 双闭环级联控制,无法从根本上同时实现 VSR 直流母线电压的抗干扰性与跟踪性能最优<sup>[6-7]</sup>。鉴于此,二自由度比例积分微分(proportional integral differential, PID)控制方法应运而生,其核心思想是通过独立选择与设计不同的 PID 调节器以达到控制系统抗干扰性与跟踪性能均最优的双重目标<sup>[8]</sup>。因此,二自由度 PID 控制方法已在 VSR 调压控制领域得到了国内外诸多学者的广泛关注。

文献[9]提出了一种基于二自由度内模抗扰电压外环与基于内模解耦电流内环的 VSR 双环控制策略,既实现了线性化的间接直流电压控制,又提升了 VSR 直流母线电压的快速跟踪性能与抗干扰性。文献[10]提出了一种基于二自由度虚拟同步发电机的电压源型变换器控制策略,该策略具有可兼顾其直流电压快速跟踪性能与保持高虚拟惯量支撑的优点。文献[11]在传统 PI 双闭环控制结构的基础上提出了一种基于直流电压给定值前馈的二自由度 PID 控制策略,提升了三相 VSR 直流侧电

收稿日期:2022-11-13;修回日期:2023-01-16

基金项目:广西自然科学基金资助项目(2020GXNSFBA297-124,2021GXNSFAA220038)

压的跟踪性能与抗负载扰动性能。文献[12]提出了一种基于二自由度调节器的VSR电流内环控制算法,有效地提升了VSR并网电流的跟踪性能、快速响应性能与谐波抑制能力。文献[13]提出了一种储能型VSR的二自由度内模自抗扰控制策略,即电压外环采用自抗扰控制以增强抗干扰性,而电流内环采用二自由度内模控制以降低参数整定的复杂度、增强对给定电流的跟踪性。然而,上述文献鲜有将基于二自由度PID的VSR控制策略应用于VSR-VSI双PWM变换器系统,而VSR作为VSR-VSI的有源前端运用在电梯能量回馈系统中,实现能量双向可逆并网运行时,由于电梯PMSM作为其负载具有变化范围大、随机性强等特点,对系统直流母线电压的抗负载扰动性能与跟踪性能均提出了更加严苛的要求。

文中在上述文献的基础上,将二自由度PID控制方法应用到VSR控制回路中,提出了一种基于二自由度PID的VSR直流调压改进控制策略,可以分别独立整定主导直流母线电压跟踪性能和抗负载扰动性能的PID参数。通过软件仿真与实验测试对比结果共同验证了所述VSR直流调压改进策略的有效性和优越性。

## 1 基于VSR-VSI的双PWM变换器系统

### 1.1 双PWM变换器系统的结构和工作原理

基于VSR-VSI的双PWM变换器的电梯能量回馈系统主电路结构如图1所示<sup>[14-15]</sup>。其中, $e_a, e_b, e_c$ 为电网的电压; $i_{x1}, i_{x2}(x=a, b, c)$ 分别为VSR、VSI的三相电流; $L, L_s$ 分别为VSR滤波电感、PMSM定子电感; $R, R_s$ 分别为VSR等效电阻、PMSM定子电阻; $C, i_c, i_L$ 分别为直流母线滤波电容、电容电流、直流负载电流;IPM为智能功率模块;从图1中可发现,电梯能量回馈系统采用VSR

与VSI级联的结构,一方面从拓扑的角度出发,系统结构是关于直流母线电容 $C$ 对称的;另一方面从运行模式的角度出发,VSR-子系统和VSI-子系统的运行模式总是对等、互逆的,即VSR整流而VSI逆变地从电网吸收能量的PMSM电动工作模式,或VSR逆变而VSI整流地给电网回馈能量的PMSM发电工作模式。

### 1.2 VSR的数学模型与控制结构

三相VSR在 $dq$ 坐标系下的数学模型可利用式(1)进行描述<sup>[16]</sup>。从式(1)可看出,在 $dq$ 坐标系下,可用 $i_{d1}, i_{q1}$ 分别描述VSR并网电流的有功、无功分量,故在VSR电流内环实现解耦的前提下,易对其并网的有功、无功电流进行独立控制。

$$\begin{cases} L \frac{di_{d1}}{dt} - \omega Li_{q1} + Ri_{d1} = e_d - u_{dc} S_d \\ L \frac{di_{q1}}{dt} + \omega Li_{d1} + Ri_{q1} = e_q - u_{dc} S_q \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = i_{dc} - i_L = \frac{3}{2}(i_{d1} S_d + i_{q1} S_q) - i_L \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为电网的角频率; $e_d, e_q$ 分别为电网电压的 $d, q$ 轴分量; $S_d, S_q$ 分别为开关函数 $S$ 的 $d, q$ 轴等效分量。

图2给出了VSR在 $dq$ 坐标系下采用传统PI双闭环的控制结构<sup>[17]</sup>。其中, $u_{dcr}$ 为直流母线电压的参考值; $i_{dr}, i_{qr}$ 分别为VSR并网电流有功、无功的参考值; $\theta$ 为电网电压的相位。VSR的传统PI双闭环控制过程具体为:先将 $u_{dcr}$ 与 $u_{dc}$ 的误差信号输入至直流电压外环PI调节器得到 $i_{dr}$ ,并令 $i_{qr} = 0$ 以保证VSR以单位功率因数并入电网;然后将 $i_{dr}$ 与 $i_{d1}, i_{qr}$ 与 $i_{q1}$ 的误差信号分别输入至电流内环PI调节器得到电压调制信号 $u_{dr}, u_{qr}$ ;再通过空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)模块得到VSR开关器件的驱动信号 $S_{abc}$ ,最终完成VSR的传统PI双闭环控制<sup>[18]</sup>。

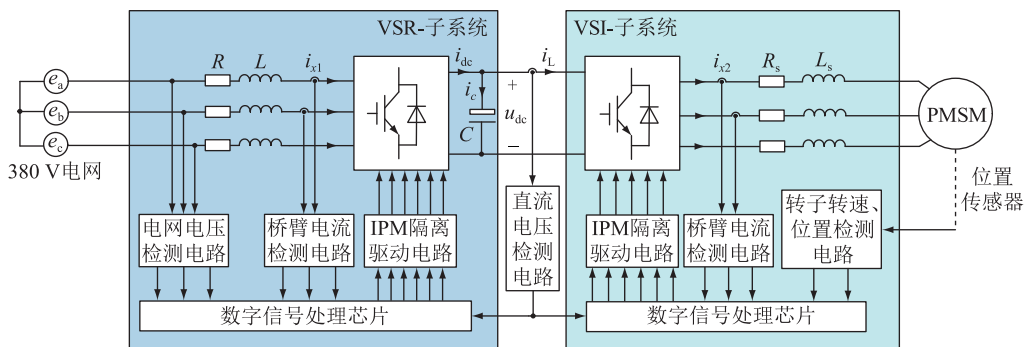


图1 基于VSR-VSI的双PWM变换器的电梯能量回馈系统主电路结构

Fig.1 Main circuit structure of elevator energy feedback system based on VSR-VSI double PWM converter

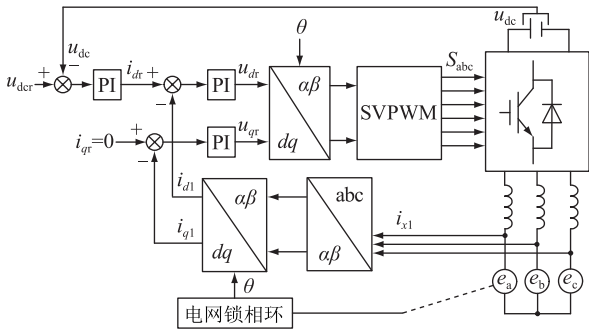


图2 VSR的传统PI双闭环控制结构

Fig.2 The traditional PI double closed-loop control structure of VSR

### 1.3 VSR的PI双闭环参数设计

在VSR电流内环解耦的前提下结合图2,可得到VSR的传统PI双闭环等效控制结构,如图3所示<sup>[19]</sup>。图中, $G_{PIC}(s)$ 、 $G_{PIU}(s)$ 、 $G_c(s)$ 分别为电流PI调节器、电压PI调节器、电流内环等效闭环传递函数,且设 $G_{PIC}(s) = K_c [1 + 1/(T_c s)]$ 、 $G_{PIU}(s) = K_u [1 + 1/(T_u s)]$ , $K_c$ 、 $T_c$ 分别为电流PI调节器的比例系数与积分时间常数, $K_u$ 、 $T_u$ 分别为电压PI调节器的比例系数与积分时间常数; $T_s$ 、 $\tau_u$ 、 $\tau_d$ 分别为开关周期、电压环控制延迟时间、直流电压检测时间; $K_{VSR}$ 、 $K_{CC}$ 分别为VSR的等效增益、电流调制增益; $u_d$ 为VSR桥臂电压的d轴分量。

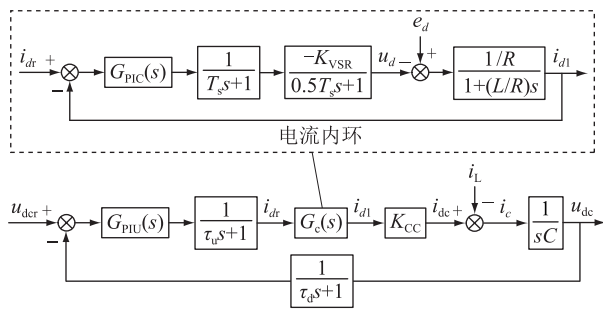


图3 VSR的PI双闭环等效控制结构

Fig.3 The PI double closed-loop equivalent control structure of VSR

由图3可知,VSR电流内环的开环传递函数 $G_{co}(s)$ 可表示为:

$$G_{co}(s) = \left(1 + \frac{1}{T_c s}\right) \frac{K_{VSR}}{0.5T_s s + 1} \times \frac{1}{T_s s + 1} \times \frac{K_c}{Ls + R} \quad (2)$$

文中依据阻尼系数最优的西门子最优参数设计方法<sup>[20]</sup>,对式(2)进行参数整定,可得到:

$$\begin{cases} T_c = L/R \\ K_c = L/(3K_{VSR} T_s) \end{cases} \quad (3)$$

此时,VSR电流内环的等效闭环传递函数 $G_c(s)$ 可近似表示为:

$$G_c(s) = \frac{i_{d1}(s)}{i_{dr}(s)} \approx \frac{1}{3T_s s + 1} \quad (4)$$

VSR直流电压外环的开环传递函数 $G_{uo}(s)$ 可表示为:

$$G_{uo}(s) = \left(1 + \frac{1}{T_u s}\right) \frac{K_u}{\tau_u s + 1} \times \frac{1}{\tau_d s + 1} \times \frac{K_{CC}}{sC} \times \frac{1}{3T_s s + 1} \quad (5)$$

文中可依据闭环幅频特性峰值最小的参数设计方法,对式(5)进行参数整定。令 $T_{ueq} = 3T_s + \tau_u + \tau_d$ , $T_u = \lambda T_{ueq}$ ,其中 $\lambda \in [3, 10]$ 为中频带宽,可得比例系数 $K_u$ 为:

$$K_u = \frac{2C(1 + \lambda)}{3\lambda T_{ueq}} \quad (6)$$

依据以上步骤即可完成VSR的传统PI双闭环参数设计。

根据图3可发现,VSR所采用的传统PI双闭环级联控制属于一自由度PID控制,虽然可对直流母线电压实现无静差跟踪,但对其PI参数进行调整将会同时影响直流调压系统的跟踪性能与抗负载扰动性能。换言之,若按照跟踪性能最佳的原则整定参数,则将难以兼顾其抗负载扰动性能;若按照抗负载扰动性能最佳的原则整定参数,则将难以兼顾其跟踪性能,故只能通过折衷跟踪性能与抗干扰性的方式来整定PI参数。因此,将负载范围变化大且随机性强的电梯PMSM作为负载的VSR直流调压系统,难以满足直流母线电压要兼备优良的抗干扰性和跟踪性能的要求,进而会影响电梯的运行稳定性与乘坐舒适性。

## 2 VSR直流调压优化策略及其参数设计

### 2.1 基于二自由度PID的VSR直流调压策略

针对VSR采用传统PI双闭环控制结构所存在的不足,文中将反馈补偿型二自由度PID控制结构<sup>[21-22]</sup>和给定值前馈型二自由度PID控制结构<sup>[23]</sup>应用到VSR双闭环控制中,提出一种如图4所示的基于二自由度PID的VSR直流调压改进控制策略。其中, $u_T$ 为直流电压检测电路的扰动分量; $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 、 $G_3(s)$ 均为PID调节器,且 $G_1(s)$ 为主调节器, $G_2(s)$ 为反馈调节器, $G_3(s)$ 为前馈调节器。

由图4可知,VSR直流电压外环的开环传递函数 $G_{uo1}(s)$ 可表示为:

$$G_{uo1}(s) = \frac{K_{CC}}{C} \times \frac{G_1(s) + G_2(s)}{s(\tau_u s + 1)(\tau_d s + 1)(3T_s s + 1)} \quad (7)$$



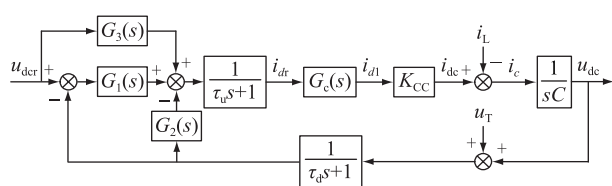


图4 基于二自由度PID的VSR直流调压控制框图  
Fig.4 Block diagram of VSR DC voltage regulation control using two-degree-of-freedom PID

令  $K_{eq} = K_{CC}/C$ , 对式(7)的小惯性环节进行合并处理, 可得:

$$G_{uo1}(s) \approx K_{eq} \frac{G_1(s) + G_2(s)}{s(T_{ueq}s + 1)} \quad (8)$$

负载电流扰动  $i_L(s)$  至  $u_{dc}(s)$  的闭环传递函数  $G_L(s)$  可表示为:

$$G_L(s) = -\frac{1}{C} \times \frac{T_{ueq}s + 1}{s(T_{ueq}s + 1) + K_{eq}(G_1(s) + G_2(s))} \quad (9)$$

直流电压检测扰动  $u_T(s)$  至  $u_{dc}(s)$  的闭环传递函数  $G_T(s)$  可表示为:

$$G_T(s) = -\frac{K_{eq}(G_1(s) + G_2(s))}{s(T_{ueq}s + 1) + K_{eq}(G_1(s) + G_2(s))} \quad (10)$$

直流母线电压参考  $u_{der}(s)$  至  $u_{dc}(s)$  的闭环传递函数  $G_{uc}(s)$  可表示为:

$$G_{uc}(s) = \frac{K_{eq}(\tau_d s + 1)(G_1(s) + G_3(s))}{s(T_{ueq}s + 1) + K_{eq}(G_1(s) + G_2(s))} \quad (11)$$

根据式(9)和式(10)可发现, 直流调压系统可通过整定  $G_1(s) + G_2(s)$  来抑制负载电流扰动和直流电压检测扰动, 保证系统具有优良的抗负载扰动性能和消除直流电压检测扰动特性。又由式(11)可知, 直流调压系统在具备良好的抗干扰性的基础上, 可通过整定  $G_1(s) + G_3(s)$  来加快系统对直流母线电压参考值的跟踪速度。换言之, 基于二自由度PID的VSR直流调压控制策略可通过依次独立整定  $G_1(s) + G_2(s)$  和  $G_1(s) + G_3(s)$  这2个控制自由度, 来改善直流调压系统的控制效果, 使其能同时优化抗干扰性和跟踪性。

## 2.2 二自由度PID的参数设计方法

在保证VSR直流调压系统稳定且兼备良好抗干扰性和跟踪性的条件下, 文中将  $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 、 $G_3(s)$  调节器分别设置为:

$$\begin{cases} G_1(s) = a_1 + b_1/s \\ G_2(s) = a_2 + b_2s \\ G_3(s) = a_3 + b_3s \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $a_1$ 、 $b_1$  分别为  $G_1(s)$  的比例、积分系数;  $a_2$ 、 $b_2$  分别为  $G_2(s)$  的比例、微分系数;  $a_3$ 、 $b_3$  分别为  $G_3(s)$  的比例、微分系数。

为抵消  $G_L(s)$  表达式中的零点, 即保证  $G_L(s)$  在负载电流阶跃扰动下具有零稳态误差响应, 令:

$$G_1(s) + G_2(s) = \frac{b_1(\lambda T_{ueq}s + 1)(T_{ueq}s + 1)}{s} \quad (13)$$

则有:

$$\begin{cases} a_1 + a_2 = b_1(1 + \lambda)T_{ueq} \\ b_2 = b_1\lambda T_{ueq}^2 \end{cases} \quad (14)$$

$G_L(s)$  的表达式可等效化简为:

$$G_L(s) = -\frac{1}{C} \times \frac{s}{s^2 + K_{eq}b_1(\lambda T_{ueq}s + 1)} \quad (15)$$

一方面, 为保证直流母线电压在负载电流扰动下无电压超调, 即消除负载电流扰动对直流电压的影响, 可将系统阻尼设定为临界阻尼或过阻尼(最好为临界阻尼状态)<sup>[24]</sup>。则有:

$$\begin{cases} \lim_{s \rightarrow 0} \left( s \frac{1}{s} G_L(s) \right) = 0 \\ \lim_{s \rightarrow 0} \left( s \frac{1}{s} \times \frac{G_L(s)}{s} \right) = \frac{-1}{CK_{eq}b_1} \end{cases} \quad (16)$$

根据式(16)可得:

$$b_1 = \frac{4}{K_{eq}(\lambda T_{ueq})^2} \quad (17)$$

将式(12)一式(17)代入式(11)进行等效变换, 可得:

$$G_{uc}(s) = \frac{K_{eq}(\tau_d s + 1)[(a_1 + a_3)s + b_1 + b_3s^2]}{s^2(T_{ueq}s + 1) + K_{eq}b_1(\lambda T_{ueq}s + 1)(T_{ueq}s + 1)} \quad (18)$$

另一方面, VSR直流母线电压的跟踪误差  $G_e(s)$  可表示为:

$$G_e(s) = u_{der}(s) - \frac{K_{eq}[(a_1 + a_3)s + b_1 + b_3s^2]u_{der}(s)}{s^2(T_{ueq}s + 1) + K_{eq}b_1(\lambda T_{ueq}s + 1)(T_{ueq}s + 1)} \quad (19)$$

为保证VSR能对直流母线电压参考值实现无稳态误差跟踪, 要求基于二自由度PID的VSR直流调压系统在直流母线电压参考值为斜坡与阶跃信号的情况下, 其输出直流电压均可快速且无误差地跟踪上直流母线电压参考值。在直流母线电压参考值为斜坡、阶跃给定信号时, 也要求  $G_T(s)$  不存在稳态误差, 即有  $G_e(s) = 0$ , 则:

$$\lim_{s \rightarrow 0} \left\{ s \frac{1}{s^3} \{ 1 - K_{eq} [ (a_1 + a_3)s + b_1 + b_3s^2 ] / [ s^2 (T_{ueq}s + 1) + K_{eq} b_1 (\lambda T_{ueq}s + 1) (T_{ueq}s + 1) ] \} \right\} = 0 \quad (20)$$

则有:

$$\begin{cases} a_1 + a_3 = b_1(1 + \lambda)T_{ueq} \\ b_3 = 1/K_{eq} + b_1\lambda T_{ueq}^2 \end{cases} \quad (21)$$

为不失一般性,设定  $a_1 = b_1\lambda T_{ueq}$ , 以确保文中所述二自由度PID控制策略中的  $G_1(s)$  与传统一自由度PI控制策略中的  $G_{PIU}(s)$  保持一致,那么  $a_2 = a_3 = b_1T_{ueq}$ 。依据以上步骤即可完成对VSR的二自由度PID控制策略中  $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 、 $G_3(s)$  的参数整定。

### 3 测试对比结果和分析

#### 3.1 软件仿真对比结果及分析

为验证上述理论分析的正确性,文中搭建了如图1所示的基于VSR-VSI的电梯能量回馈系统Matlab仿真平台。其中,PMSM的仿真参数如下:额定电压为380V、额定功率为10kW、额定频率为24Hz、额定负载为1000kg、额定速度为1.5m/s、转动惯量为  $5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 、额定电流为25.2A、额定转矩为  $670 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、曳引比为2:1、 $L_s = 13.3 \text{ mH}$ 、 $R_s = 0.67 \Omega$ 、极对数为12;VSR的仿真参数如下: $u_{dcr} = 700 \text{ V}$ 、 $L = 4.0 \text{ mH}$ 、 $R = 0.01 \Omega$ 、 $C = 3000 \mu\text{F}$ 、 $K_{CC} = 0.75$ 、 $K_{VSR} = 1$ 、 $\lambda = 8$ 、 $\tau_u = \tau_d = T_s = 0.1 \text{ ms}$ 。依据上述参数整定过程可计算得到: $T_c = 0.4$ 、 $K_c = 13.33$ 、 $T_u = 0.004$ 、 $K_u = 4.5$ 、 $K_{eq} = 250$ 、 $b_1 = 1000$ 、 $b_2 = 0.002$ 、 $b_3 = 0.006$ 、 $a_1 = 4$ 、 $a_2 = a_3 = 0.5$ 。

将以上参数分别代入式(5)和式(7),即可利用Matlab仿真软件分别画出如图5所示的VSR直流调压开环系统的Bode图。

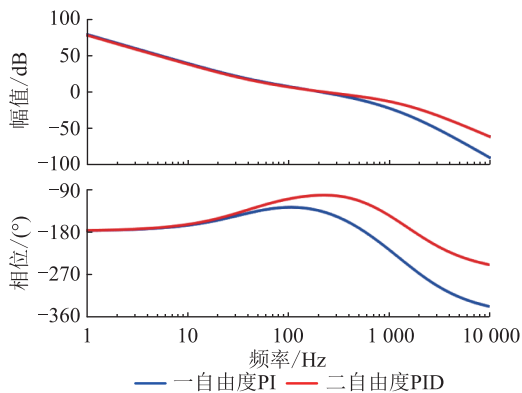
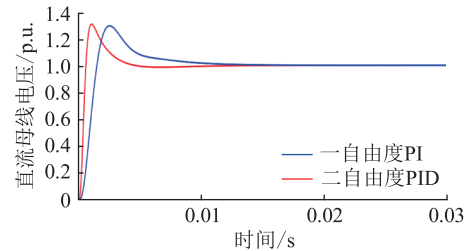


图5 VSR直流调压开环系统的Bode图

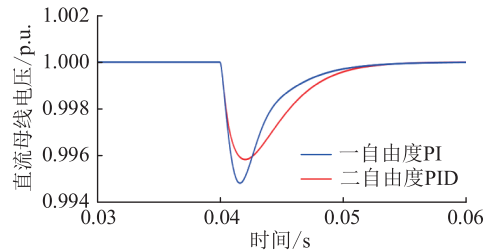
Fig.5 Bode diagram of VSR DC voltage regulation open-loop system

由图5可发现,所述二自由度PID控制系统的相角裕度、幅值裕度分别为  $75.2^\circ$  和  $23.5 \text{ dB}$ , 高于传统一自由度PI控制系统的相角裕度  $46.4^\circ$ 、幅值裕度  $14.3 \text{ dB}$ 。这一结果说明了基于二自由度PID的VSR直流调压控制系统相较于基于传统一自由度PI的VSR直流调压控制系统具有更优良的动态响应特性与稳定性能。

VSR直流母线电压响应的仿真对比结果如图6所示。图6(a)给出了  $t=0 \text{ s}$  时刻直流母线电压参考值从  $0 \text{ V}$  阶跃至  $700 \text{ V}$  的动态过程,用于模拟电梯启动特别是新安装电梯上电调试的场景;图6(b)给出了  $t=0.04 \text{ s}$  时刻负载电流  $i_L$  从  $0 \text{ A}$  阶跃到  $12 \text{ A}$  的动态过程,用于模拟电梯重载上行与轻载下行启动的场景。



(a) 直流母线电压参考值阶跃扰动



(b) 负载电流阶跃扰动

图6 VSR直流母线电压响应对比结果

Fig.6 Comparison results of VSR DC bus voltage response

由图6可知,文中所述二自由度PID控制方法相较于传统一自由度PI控制方法,在相同直流电压参考值阶跃的扰动下具有更快的电压响应速度,这表明了前者具有更优越的直流电压跟踪性能,可提高电梯启动速率。另一方面,二自由度PID控制方法相较于传统一自由度PI控制方法,在相同负载电流阶跃的扰动下具有更小的直流电压响应峰值,这表明了前者在抑制负载扰动方面也具有更优越的响应性能,为电梯带载启动提供稳定的拖动力。

图7为基于Matlab/Simulink中的离散电力电子模块所搭建的基于VSR-VSI的电梯能量回馈系统的仿真对比结果。仿真设置电梯PMSM的负载转矩为  $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;转速外环的饱和电流值为  $20 \text{ A}$ 。设置  $t=0 \text{ s}$  时刻转速指令从  $0 \text{ r/min}$  阶跃至  $300 \text{ r/min}$ ,  $t=0.40 \text{ s}$  时刻转速指令从  $300 \text{ r/min}$  阶跃至  $-300$

r/min,用于模拟 VSR 直流负载突变的情况。

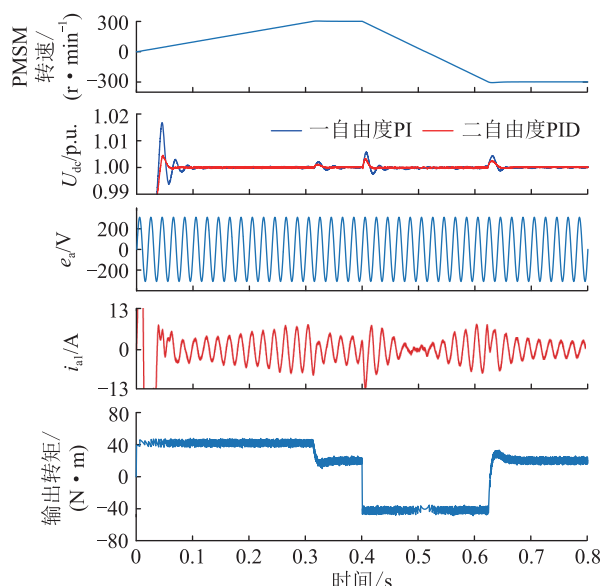


图7 仿真对比结果

Fig.7 Comparative simulation results

图7中,0 s—0.31 s为恒流加速阶段,可模拟电梯重载加速的上升过程;0.31 s—0.40 s为恒转矩恒速阶段,可模拟电梯重载恒速的上升过程;0.40 s—0.51 s为正向制动阶段,可模拟电梯重载减速至0 r/min的上升过程;0.51 s—0.62 s为反向电动阶段,可模拟电梯轻载加速的下降过程;0.62 s以后为恒转矩反向恒速阶段,可模拟电梯轻载恒速的下降过程。

具体而言,在0 s—0.10 s时段,电梯处于重载上行启动过程,VSR 整流直流电压逐渐稳定于设定值。此后为电机带载运行过程,当输出转矩与负载转矩匹配时,电机转速加速至给定值 300 r/min。0.40 s开始,电机转速从 300 r/min 减至 0 r/min,输出转矩和负载转矩共同制动电梯,此时电机的部分能量回馈至母线。0.51 s 之后,电机转速从 0 r/min 加速至-300 r/min,输出转矩和负载转矩共同对电梯做功。当转速达到-300 r/min 后,负载转矩拖动电机做功,部分能量回馈母线。由图7可看出,所述二自由度 PID 控制方法相较于一自由度 PI 控制方法,能使 VSR 直流输出电压在跟踪直流母线电压参考值与抑制负载扰动方面均具有更小的超调量与更快的响应速度,这表明了前者在保证 VSR-VSI 系统直流母线电压的跟踪性能与抗负载扰动能力方面均具有更优越的性能。值得指出的是,PMSM 转速、 $e_a$ 、 $i_{a1}$ 、输出转矩的仿真波形在2种方案下区别不大,故图7中只给出采用二自由度 PID 控制方法时所对应的动态响应波形。

### 3.2 实验测试对比结果及分析

与此同时,为进一步验证所述二自由度 PID 控制方法的有效性,在如图8所示的储能微网系统实验平台上进行对比实验验证。该实验平台主要由2套 100 kV·A-VSR(在实验中用作蓄电池模拟器)和 100 kV·A-VSG(在实验中用于模拟电梯 PMSM)级联而成的背靠背 VSR-VSG 系统与1套 250 kW 电阻负载等组成<sup>[25-26]</sup>。100 kV·A-VSR 与100 kV·A-VSG 具有相同的电路结构与硬件参数,100 kV·A-VSG 的硬件与控制参数可参考文献[26],文中不再赘述;VSR 的主要控制参数为: $u_{dcr} = 700\text{ V}$ 、 $T_c = 0.0056$ 、 $K_c = 1.87$ 、 $T_u = 0.004$ 、 $K_u = 9$ 、 $K_{eq} = 125$ 、 $b_1 = 2000$ 、 $b_2 = 0.004$ 、 $b_3 = 0.012$ 、 $a_1 = 8$ 、 $a_2 = a_3 = 1$ 。由于 VSG 具有与真实同步机相媲美的外特性,该实验过程中利用其模拟电梯 PMSM,且为保持两者动态性能的一致性,设置 100 kV·A-VSG 的虚拟惯量为  $5\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。实验工况设置为:5.30 s 时刻 100 kV·A-VSG 的有功功率指令由 50 kW 阶跃至 100 kW,5.60 s 时刻恢复至 50 kW,用于模拟 100 kV·A-VSR 拖动电梯运行中,电梯轿厢载重存在增加和减少的负载突变场景。

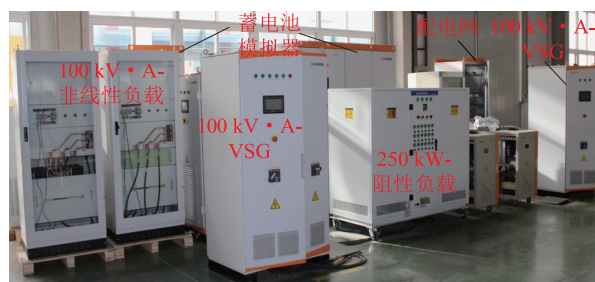


图8 储能微网系统实验平台

Fig.8 Energy storage microgrid system platform

值得指出的是,为防止 100 kV·A-VSR 在启动过程中出现过大大冲击电流而导致其过流保护停机,且为能平稳地建立 700 V 直流母线电压,其直流母线电压参考值在实验过程中采用从 540 V 爬坡至 700 V 的电压缓启模式,故文中对 100 kV·A-VSR 直流母线电压参考值阶跃的响应实验不作测试。

图9给出了 100 kV·A-VSR 在50 kW 负载突增和突减下的实验对比结果。为便于观察  $e_a$  与  $i_{a1}$  的相位对应关系,将  $e_a$  缩小 10 倍之后再行观察。此外,在负载阶跃测试对比实验中发现,当 100 kV·A-VSR 分别采用传统一自由度 PI 控制方法与所述二自由度 PID 控制方法时,由于直流母线电压在动态方面存在的差异不大且依据前级 100 kV·A-VSR 与后级 100 kV·A-VSG 的有功功率守恒关系,100 kV·A-VSR 的并网电流动态响应波形区别不大,文中仅给出采用二自由度 PID 控制方法时  $e_a$  与  $i_{a1}$  的



动态响应波形。

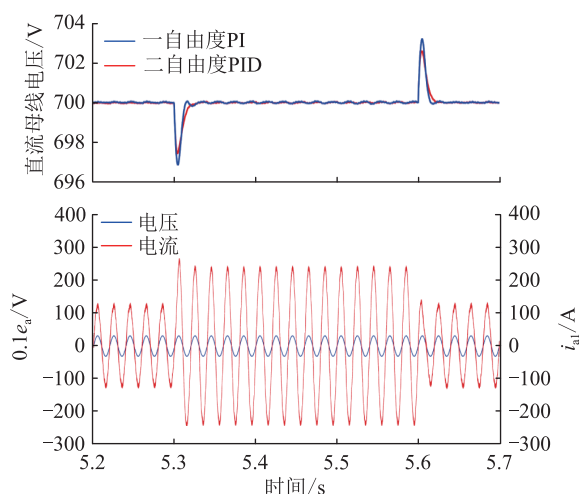


图9 实验对比结果

Fig.9 Comparative experimental results

根据图9不难发现,所述二自由度PID控制方法相较于传统一自由度PI控制方法在50kW负载突增扰动的启动阶段和50kW负载突减扰动的启动阶段,均具有更小的直流电压响应峰值,其中50kW负载突增扰动可模拟电梯重载上行(PMSM正向电动)与电梯轻载下行(PMSM反向电动);50kW负载突减扰动可模拟电梯轻载上行(PMSM正向制动)与电梯重载下行(PMSM反向制动)。结合对比该实验测试结果与图6、图7中的仿真测试结果,可表明文中所述二自由度PID控制方法具有更为优越的抑制负载扰动性能。

## 4 结论

针对VSR采用传统PI双闭环控制方法时,基于VSR-VSI双三相PWM变换器驱动的电梯能量回馈系统直流母线电压难以兼顾抗干扰性与跟踪性的问题,文中提出一种基于二自由度PID的三相VSR直流调压改进控制策略。通过理论分析、数学建模、仿真与实验对比验证,得出以下结论:

(1) 通过建立三相VSR采用传统一自由度PI双闭环控制策略时的数学模型、仿真与实验测试平台,验证了该策略存在系统直流母线电压抗干扰性和跟踪性难以兼顾的缺点。

(2) 所述基于二自由度PID的三相VSR直流调压改进控制策略相较于传统一自由度PI控制策略,在提升VSR-VSI系统直流母线电压跟踪性能与抗负载扰动性能2个方面均更具优势。

### 参考文献:

[1] 石荣亮,张烈平,王文成,等. 基于频率微分原理的储能变换器虚拟惯量控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41

(6):2088-2101.

SHI Rongliang, ZHANG Lieping, WANG Wencheng, et al. Research on virtual inertia control strategy for energy storage converters based on a frequency derivative scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2088-2101.

[2] 周璐璐,卢俊文,陈敏. 电梯能量回馈装置的应用实例及存在问题分析[J]. 山东工业技术,2021(3):84-88.

ZHOU Lulu, LU Junwen, CHEN Min. Application example of elevator energy feedback device and analysis of existing problems[J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2021(3): 84-88.

[3] 姚绪梁,罗兴鸿,马赫,等. 小电容双PWM调速系统直流母线电压波动抑制策略[J]. 电工技术学报,2022,37(12):2971-2981.

YAO Xuliang, LUO Xinghong, MA He, et al. DC bus voltage fluctuation suppression strategy for small capacitance dual-PWM speed regulating system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 2971-2981.

[4] 刘航,郎宝华. 基于PWM整流器的电梯能馈控制系统的设计仿真[J]. 舰船电子工程,2019,39(1):60-64,105.

LIU Hang, LANG Baohua. Design of the elevator feeding control system based on PWM rectifier[J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(1): 60-64, 105.

[5] 郭成涛,白云飞,王钊,等. 三相PWM整流器启动冲击电流的抑制方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(8):146-150.

GUO Chengtao, BAI Yunfei, WANG Zhao, et al. Suppression method for start-up inrush current of three-phase PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2021, 33(8): 146-150.

[6] PAN Z B, DONG F, ZHAO J W, et al. Combined resonant controller and two-degree-of-freedom PID controller for PMSLM current harmonics suppression[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7558-7568.

[7] 梁祺祺,程旭峰,张逾良,等. 三相PWM整流器高阶积分末端滑模控制策略[J]. 电网与清洁能源,2022,38(6):37-43.

LIANG Qiqi, CHENG Xufeng, ZHANG Yuliang, et al. High-order integral terminal sliding mode control strategy of three-phase PWM rectifier[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 37-43.

[8] MOHAMMADI M, DEHBASHI A, GHAREHPETIAN G B, et al. A family of soft-switching DC-DC converters with two degrees of freedom[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(10): 9398-9409.

[9] 朱志键,唐卫民. 三相电压型PWM整流器的新型双闭环控制方法[J]. 电力工程技术,2018,37(1):86-90.

ZHU Zhijian, TANG Weimin. A novel double closed loop control strategy of three-phase voltage-sourced PWM rectifier[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(1): 86-90.

[10] LEON A E, MAURICIO J M. Virtual synchronous generator for VSC-HVDC stations with DC voltage control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(1): 728-738.

[11] ÖZTÜRK N, ÇELİK E. Two-degrees-of-freedom PID controller

- for AC/DC converters[C]//2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). Brasov, Romania. IEEE, 2019:973-976.
- [12] TARCZEWSKI T, SZCZEPANSKI R, ERWINSKI K, et al. A novel sensitivity analysis to moment of inertia and load variations for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(11):13299-13309.
- [13] 王云. 超导磁储能变流器在微网中的控制策略研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2019.  
WANG Yun. Research on control strategy of superconducting magnetic energy storage converter in microgrid[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2019.
- [14] 杨迪瑞, 姜建国, 钱侃. 计及转矩振荡的双 PWM 交流调速系统谐波阻抗模型及电网低频振荡机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3):980-992.  
YANG Dirui, JIANG Jianguo, QIAN Kan. Harmonic impedance model of dual-PWM adjustable speed drives under torque oscillation and the mechanism of low-frequency oscillation in distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3):980-992.
- [15] 章勇高, 秦盛, 刘鹏. 一种基于多调整策略的电机相电流重构技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14):63-72.  
ZHANG Yonggao, QIN Sheng, LIU Peng. A motor phase current reconstruction technology based on multiple adjustment strategies[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14):63-72.
- [16] XIE S M, SUN Y, LIN J H, et al. Resistance-emulating control strategy for three-phase voltage source rectifiers under unbalanced grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2):1103-1113.
- [17] GUO X, REN H P. A switching control strategy based on switching system model of three-phase VSR under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(7):5799-5809.
- [18] 赵峰, 李述特, 陈小强, 等. 不平衡电网下三相 PWM 整流器预测直接功率控制[J]. 电网技术, 2022, 46(3):870-879.  
ZHAO Feng, LI Shute, CHEN Xiaoqiang, et al. Predictive direct power control of three phase PWM rectifier under unbalanced grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(3):870-879.
- [19] 袁敞, 戴笃猛, 邱俊卿. 应用新型能量函数的 PWM 整流器无源性控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(3):45-50.  
YUAN Chang, DAI Dumeng, QIU Junqing. Passivity-based control method for PWM rectifier with the application of novel energy function[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(3):45-50.
- [20] 郭强, 周琛力, 李山. 面向电流源型 PWM 整流器直流侧电压的多环路控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(8):2051-2063.  
GUO Qiang, ZHOU Chenli, LI Shan. A multiple loops control strategy based on DC link voltage of current source PWM rectifiers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(8):2051-2063.
- [21] CHEN S Y, YANG B C, PU T A, et al. Active current sharing of a parallel DC-DC converters system using bat algorithm optimized two-DOF PID control[J]. IEEE Access, 2019, 7:84757-84769.
- [22] AHMAD S, ALI A. Unified disturbance-estimation-based control and equivalence with IMC and PID: case study on a DC-DC boost converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6):5122-5132.
- [23] HANIF M, KHADKIKAR V, XIAO W D, et al. Two degrees of freedom active damping technique for LCL filter-based grid connected PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6):2795-2803.
- [24] SHI T C, HE Y G, WANG T, et al. An improved open-switch fault diagnosis technique of a PWM voltage source rectifier based on current distortion[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12):12212-12225.
- [25] 石荣亮, 张烈平, 王文成, 等. 基于改进型级联 SOGI-FLL 的虚拟惯量控制技术[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1):235-241.  
SHI Rongliang, ZHANG Lieping, WANG Wencheng, et al. Virtual inertia control technology based on improved cascade SOGI-FLL[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2022, 43(1):235-241.
- [26] 石荣亮, 张烈平, 王文成, 等. 基于改进型二阶广义积分器-锁频环的储能变换器惯量模拟方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12):428-434.  
SHI Rongliang, ZHANG Lieping, WANG Wencheng, et al. A inertia simulation method based on improved second-order generalized integrator-frequency-locked loop[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021, 42(12):428-434.

作者简介:



石荣亮

石荣亮(1987),男,博士,副教授,研究方向为新能源利用与分布式发电技术(E-mail: shirl163@163.com);

刘维莎(2001),女,硕士在读,研究方向为电梯曳引驱动系统及其能量回收技术;

王国斌(1996),男,硕士在读,研究方向为分布式发电技术。

(下转第 178 页)



## Non-contact measurement method for voltage phasor

LI Jiaxian, LIU Hao, BI Tianshu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** The synchronous phasor measurement technology offers data for dynamic security monitoring in power systems. The non-contact voltage sensing technology has the advantages of safety, convenience and low cost, which is helpful for massive distribution of measurement devices. The defect of the existing non-contact voltage measurement technology is that the voltage probe may cause voltage distortion, and it is difficult to figure out the primary voltage phasor. In order to solve the problem of voltage distortion, the distortion law of voltage is revealed by analyzing the non-contact probe's equivalent circuit and transmission characteristic, and a phasor measurement algorithm for each in-band signal is proposed. Signal pre-processing is used to filter the out-of-band signals and noise first; The matrix pencil method is used to calculate the in-band signal's frequencies, which is used to build signal model, then the in-band signal phasors are figured out by fitting in time-domain; Lastly, the secondary phasors are restored to obtain the primary in-band signal phasors and synthetic phasor. The simulation results show that the proposed method can figure out the primary voltage phasor by using the sample of the probe output voltage. Experiment data show that the amplitude measurement error is less than 4.5%, the phase error is less than  $1^\circ$ , the frequency error is less than 0.04 Hz, and the frequency change rate error is less than 4 Hz/s.

**Keywords:** synchronous phasor measurement algorithm; non-contact voltage measurement; capacitive coupling voltage probe; measurement band extraction; matrix pencil method; least square method

(编辑 吴昊)

(上接第 156 页)

## An optimization strategy for voltage regulation of three-phase PWM rectifier based on two-degree-of-freedom PID

SHI Rongliang, LIU Weisha, WANG Guobin, LAN Caihua, XU Muyuan

(College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The VSR-VSI dual three-phase pulse width modulation (PWM) converters based on the cascade connection of a front-end three-phase voltage source rectifier (VSR) and a back-end three-phase voltage source inverter (VSI) have been widely used in elevator energy feedback systems, but the front-end three-phase VSR using the traditional proportional integral (PI) double closed-loop control structure usually has the problem that the mid-end DC voltage cannot take into account the disturbance immunity and the follow-ability. Given this, an improved DC voltage regulation strategy of the three-phase PWM rectifier based on two-degree-of-freedom proportional integral differential (PID) is proposed. Firstly, the structure and working principle of the three-phase VSR-VSI dual three-phase PWM converters are expounded. Then, the PI double closed-loop control scheme of the front-end three-phase VSR and its parameter design process are given to analyze the reasons why this traditional scheme cannot have good disturbance immunity and follow-ability of the DC voltage regulation system. On this basis, an optimized DC voltage regulation improvement strategy for the front-end three-phase VSR based on two-degree-of-freedom PID and its corresponding parameter design method are given. Finally, the correctness and the superiority of the proposed three-phase PWM-VSR DC voltage regulation strategy are verified by using the simulation and experimental comparison results.

**Keywords:** energy feedback system; proportional integral (PI) double closed-loop control; three-phase pulse width modulation (PWM) rectifier; disturbance immunity; follow-ability; two-degree-of-freedom proportional integral differential (PID); DC voltage regulation

(编辑 陆海霞)