

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.10.019

基于PI-D结构的高压直流输电定电流控制器设计

魏 亮^{1,2}, 王渝红², 李兴源², 瑚跃进³, 黎东祥², 刘卫校³

(1. 国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000; 2. 四川大学, 成都 610065;

3. 国家电网公司西北分部, 西安 710048)

摘要: 设计了一种具有PI-D结构的HVDC定电流控制器并提出了相应的控制器参数整定方法,在避免了控制器参数整定盲目性的同时提高了其控制性能。在传统PI控制器的反馈通路上增加了具有提高阻尼作用的微分环节,通过推导包含控制器参数的直流系统传递函数表达式绘制出控制参数变化时系统Bode图的变化规律,根据上述规律和系统的时域响应要求对控制器参数进行整定。通过上述方法设计了CIGRE HVDC标准模型整流侧的PI-D定电流控制器,同时设计了传统的PI和PID控制器进行比较。仿真实验表明,相对于传统PI和PID控制系统,采用PI-D控制器的直流系统具有更好的时域响应特性和抗干扰能力。

关键词: 高压直流输电; PI-D控制器; 参数整定; 抗干扰

Design of HVDC Transmission Constant Current Controller Based on PI-D Structure

WEI Liang^{1,2}, WANG Yuhong², LI Xingyuan², HU Yuejin³, LI Dongxiang², LIU Weixiao³

(1. Qinhuangdao Electric Power Supply Company, Hebei Qinhuangdao 066000, China; 2. Sichuan University, Chengdu 610065

China; 3. Northwest China Grid Company Limited, Xi'an 710048, China)

Abstract: A type of constant current control system which is devised with PI-D structure is designed in this paper, and the parameters optimization method is also put forward. First, a differentiator is added to the feedback path of the traditional PI controller, thus constituting a controller with PI-D structure. Then, formulate the transfer function expression which contains the controller parameters of the HVDC system, and draw the Bode diagrams of the system as the control parameters vary. According to the variation of the Bode diagram, the most appropriate parameters can be found. According to the above-mentioned method, a constant current controller with PI-D structure is designed for the CIGRE HVDC benchmark model. To validate the performance of the designed controller, a traditional PI-D controller is also designed as the contrast. The simulation test demonstrates that, compared with the traditional PI and PID controller, the PI-D controller has better time-domain response characteristic and anti-interference ability.

Key words: HVDC transmission; PI-D controller; parameter tuning; anti-interference

0 引言

高压直流输电 (high voltage direct current transmission) 与交流输电相比最为显著的一个特点是它可以通过对两端换流器的快速控制, 调节交、直流输

电系统的性能^[1-4]。可以说, 直流输电系统的许多运行性能都是由其控制器的结构及参数所确定的^[5-9]。目前, 国内外投入商业运行的 HVDC 控制系统的基本控制器大多都是选用 PI 控制器^[4-7]。工程中 PI 参数的整定一般采用试凑法, 但在使 HVDC 系统满足动

收稿日期: 2016-02-21; 修回日期: 2016-03-18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA05A119); 国家自然科学基金重点资助项目(51037003); 国家电网公司西北分部科技项目课题(5225011350CW)。

Project Supported by Plan of the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A119), the National Natural Science Foundation of China(51037003), the Science Project of Northwest China Grid Company Limited(5225011350CW).

态响应的要求而改变控制参数使某个指标得到改善时,可能会引起其他指标的恶化^[5-7]。整定 PI 参数需要一定的经验和技巧,因此这也成为控制器设计中的一个难点。

文[7]利用系统的 Bode 图求出系统的稳定域,然后再在稳定域中按一定的步长进行 PI 参数寻优,避免了试凑法的盲目性,但得到的优化参数和控制器参数范围与所取的步长相关,不适宜在线优化计算;文[10]基于改进的粒子群(PSO)算法进行 PI 控制器参数的优化,避免了局部最优解的问题;文[11]则是利用人工神经网络和遗传算法等人工智能技术进行 PI 参数的在线优化,所得参数鲁棒性和适应性较文[7]和[11]都有所改善,但是计算量较大,不易工程实现。

针对上述对控制器参数整定方法的不足,文中针对 HVDC 系统设计了一种新型 PI-D 控制器,并给出了参数整定的方法。仿真实验表明,PI-D 控制器不但可以满足直流系统动态响应指标的要求,而且有效地提高了系统的抗干扰能力。

1 HVDC 控制器设计的基本原理

1.1 PI-D 控制器结构

在 HVDC 系统中,整流侧通常采用定电流控制,逆变侧通常采用定关断角控制^[3-4],在忽略交流阻抗抗影响时,整流侧定电流控制系统结构见图 1^[12],图 1 中: I_{d0} 、 I_d 、 I_{dm} 分别为整流侧直流电流的整定值、实际值和测量值; α 为整流器的触发角; $U_{d(0)}$ 为整流侧有相控直流空载电压。

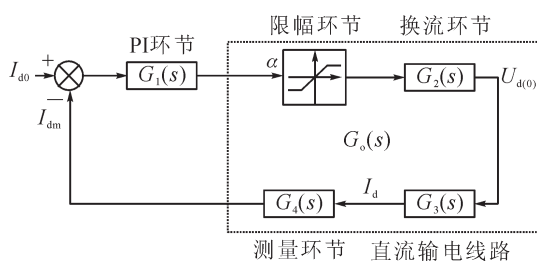


图 1 整流侧定电流控制系统

Fig. 1 Constant current control system at rectifier side

由图(1)可知,HVDC 控制系统的开环传递函数为

$$G(s) = -G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s). \quad (1)$$

式(1)中: $G_1(s)$ 为 PI 控制环节; $G_2(s)$ 为换流器环节; $G_3(s)$ 为直流线路环节; $G_4(s)$ 为测量环节。

将图 1 中虚线框包围部分记为

$$G_o(s) = -G_2(s)G_3(s)G_4(s). \quad (2)$$

为了提高系统的抗干扰能力,同时避免“定点冲击”^[13],在控制系统的反馈通路中加入具有增强阻

尼作用的微分环节,这样便构成了 PI-D 控制器。PI-D 定电流控制器的结构见图 2。

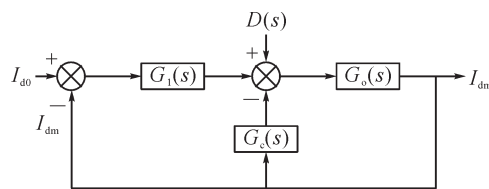


图 2 PI-D 定电流控制器结构

Fig. 2 Constant current control system with PI-D structure

图(2)中: I_{d0} 和 I_{dm} 分别为整流侧直流电流整定值和测量值; $D(s)$ 为扰动输入; $G_1(s)$ 为 PI 环节; $G_0(s)$ 为图 1 中虚线框包围环节; $G_c(s)$ 为微分环节。

1.2 HVDC 系统模型

HVDC 系统模型有以下几个方面。

1.2.1 PI-D 控制环节

控制电路的工作原理是:当测量值高于整定值时,PI 控制器动作,触发角 α 增大,从而使直流电流减小,恢复至整定值^[3-6];反之亦然。PI-D 控制环节的传递函数为

$$G_1(s) = K_p + K_i/s; \quad (3)$$

$$G_c(s) = T_d s. \quad (4)$$

式(3)、(4)中: K_p 、 K_i 、 T_d 分别为控制器比例环节、积分环节和微分环节的控制参数。

1.2.2 换流环节

当负荷的时间常数大于换流器的延迟时间时,换流器可以表示成为一阶惯性环节^[7],其传递函数可表示为

$$G_2(s) = \frac{G}{1+sT}. \quad (5)$$

当控制系统工作在工频 50 Hz、6 脉动换流桥状态时,换流环节的时间常数 $T=3.33 \text{ ms}$ ^[4]。换流器输出的有相控空载直流电压为

$$U_{d(0)} = U_{d0} \cos \alpha. \quad (6)$$

式(6)中, U_{d0} 为无相控直流空载电压。比例增益

$$G = \frac{\Delta U_{d(0)}}{\Delta \alpha} = -U_{d0} \sin \alpha. \quad (7)$$

将式(7)在稳定运行点 α_0 处线性化可得

$$G \approx -U_{d0} \sin \alpha_0 = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} E \sin \alpha_0. \quad (8)$$

式(8)中, E 为换流器交流侧电压有效值^[4,12]。

1.2.3 直流输电线路

通常在高压直流输电系统的逆变侧,为保持直流电压恒定,一般采用定关断角控制或定电压控制^[4]。如果直流线路用等值 T 型网络表示,则直流输电线路的等值电路见图 3。

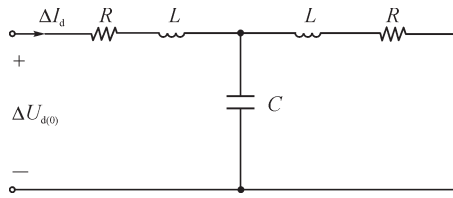


图3 直流线路的T型等值回路

Fig. 3 T-shape equivalence circuit for DC line

图3中: R 和 L 分别为直流线路中点到换流器出口之间线路的电阻值和电感值; C 为直流线路的并联电容值^[6]; $\Delta U_{d(0)}$ 和 ΔI_d 为整流侧直流电压和电流变化值,则直流输电线路环节的传递函数为

$$G_3(s) = \frac{\Delta I_d}{\Delta U_{d(0)}} = \frac{s^2 LC + s RC + 1}{s^3 L^2 C + 2s^2 RLC + s(R^2 C + 2L) + 2R}. \quad (9)$$

1.2.4 测量环节

可以用一阶惯性环节来模拟 HVDC 系统中的电流测量环节^[4],传递函数可表示为

$$G_4(s) = \frac{K}{1+s\tau}. \quad (10)$$

式(10)中:惯性时间常数 τ 用于反应测量设备的响应速度,对于电流测量一般取为0.001 25;增益 K 用于将直流电流有名值转换为标幺值,因此通常取为电流基准值的倒数^[5]。

1.2.5 HVDC 系统传递函数

根据图2可知,当无扰动输入时,系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{G_1(s)G_0(s)}{1+[G_1(s)+G_c(s)]G_0(s)} = \frac{(K_p s + K_i)G_0(s)}{s+[T_d s^2 + K_p s + K_i]G_0(s)}. \quad (11)$$

同理,当不考虑参考输入时,扰动输入和输出之间的传递函数为

$$G_D(s) = \frac{G_0(s)}{1+[G_1(s)+G_c(s)]G_0(s)} = \frac{sG_0(s)}{s+[T_d s^2 + K_p s + K_i]G_0(s)}. \quad (12)$$

CIGRE HVDC 标准模型系统是研究高压直流输电系统控制的标准测试系统,其具体参数选取如下^[14]:假设整流侧稳定运行点处 $\alpha_0=15^\circ$,换流器交流侧线电压 $E=211.42$ kV;直流线路中取 $L=0.5968$ H, $R=2.5$ Ω , $C=26.0$ μ F;直流电流额定值为2 kA,所以测量环节中比例增益 $K=0.5$ 。将上述数据带入式(2)-(10)中得到传递函数 $G_0(s)$ 的表达式

$$G_0(s) = \frac{5.725 \times 10^{-4} s^2 + 2.4 \times 10^{-3} s + 36.935}{4.195 \times 10^{-8} s^4 + 9.61 \times 10^{-6} s^3 + 5.485 \times 10^{-3} s^2 + 1.216 s + 5}. \quad (13)$$

将式(13)代入式(11)、(12)中即可得到直流系统的传递函数。

2 控制器参数整定

直流系统控制器的设计及参数的整定一定要

使系统的动态响应满足一定的技术要求,对于定电流控制,当直流电流整定值的变化量不超过直流电流裕度时,上升时间不得大于70 ms,超调量不得超过整定电流值变化量的30%^[15-16]。为满足上述要求,现绘制电流闭环传递函数以及扰动传递函数的Bode图,以分析3种控制参数变化时对系统暂态性能的影响,进而获得各个参数的选取原则。

一个控制参数变化而其他参数不变情况下的电流闭环传递函数Bode图见图4。

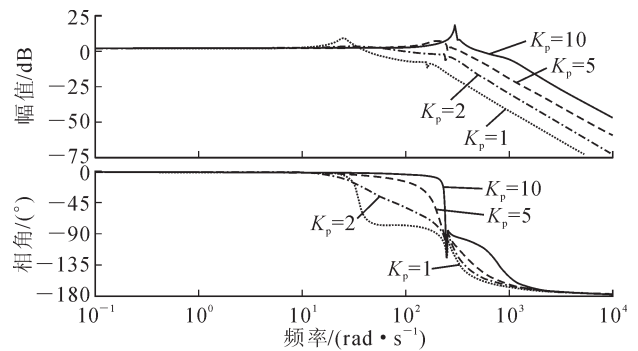
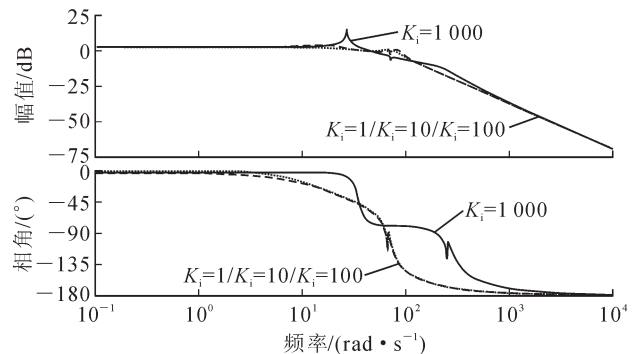
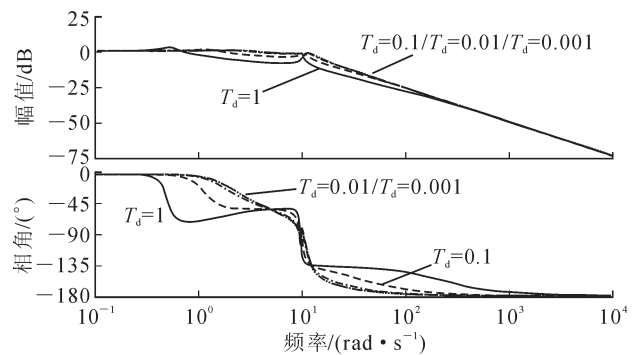
(a) 比例系数 K_p 变化(b) 积分系数 K_i 变化(c) 微分系数 T_d 变化

图4 不同参数时的电流传递函数Bode图

Fig. 4 Bode programs of current transfer functions with various parameters

由图4可知,比例系数影响系统带宽,比例系数 K_p 越大,频带越宽,系统响应越快,但是会引起过调量等问题^[17]。积分系数 K_i 主要影响闭环系统的谐振峰值,积分系数越大,谐振峰值越大,时域响应的过调量越大,所以应注意减小积分系数。当微分系

数在 0.001~1 之间变化时,对系统的影响较小,当微分系数较大时,会影响系统的谐振峰值。

相应的扰动传递函数 Bode 图见图 5,由图 5 可知,比例系数 K_p 和积分系数 K_i 对于扰动输入的抑制作用影响较小,主要是微分系数 T_d 影响对于扰动输入的反向增益。随着 T_d 的增大,反向增益随之增大,但是较大的微分系数会造成电流传递函数谐振峰值的增加。

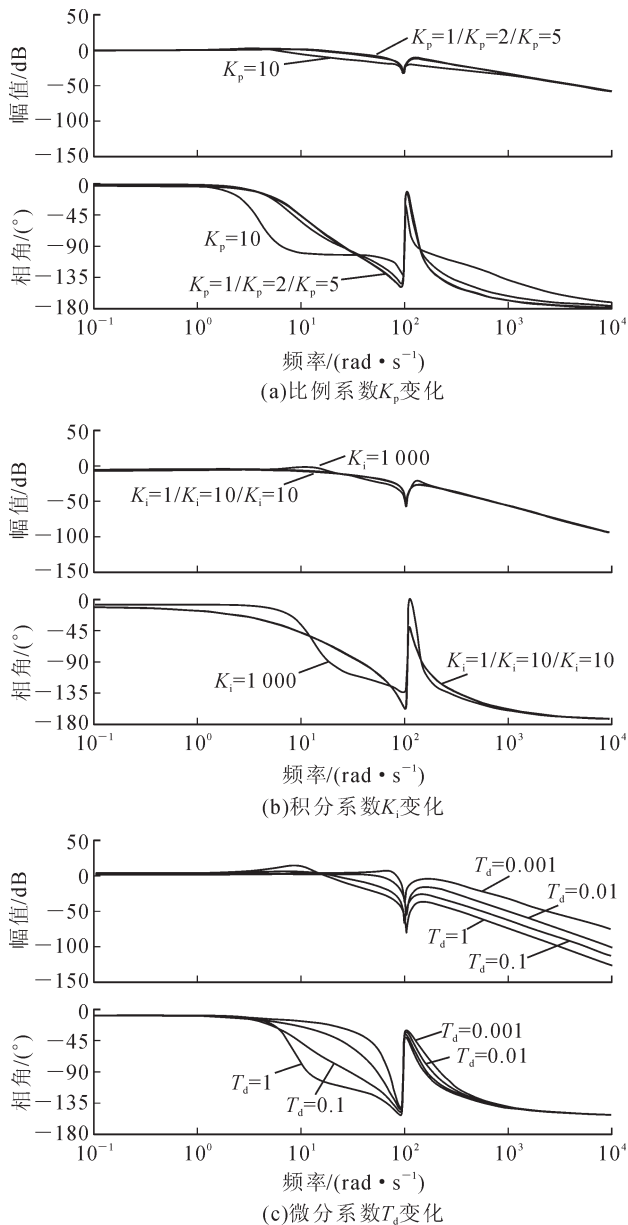


图 5 不同参数时的扰动传递函数 Bode 图

Fig. 5 Bode programs of disturbance transfer functions with various parameters

综合考虑图 4、5 中系统传递函数 Bode 图的变化趋势,并结合系统响应要求对控制器的参数选取如下:比例系数选取为 $K_p=2$,积分系数选取为 $K_i=50$,微分系数选取为 $T_d=0.01$ 。设计出 PI-D 控制器

后,为与传统控制方法比较,再次设计实际工程中广泛采用的经典 PI 和 PID 控制器,PI 控制器结构见图 1。控制参数选择 CIGRE 标准模型参数: $K_p=1.098\ 9$, $K_i=91.575$ 。此外,令图 1 中 $G_1=K_p+K_i/s+T_d s$,便构成了 PID 控制系统。采用文中参数整定方法,设计出 PID 控制器参数如下: $K_p=2$, $K_i=100$, $T_d=0.02$ 。

3 仿真分析

3.1 瞬态响应和稳态响应分析

在 MATLAB 中,分别对采用传统 PI 控制器、PID 控制器和 PI-D 控制器的系统进行阶跃试验。图 6 是 HVDC 系统直流电流阶跃响应曲线图,由阶跃试验计算出的各项时域性能指标值,见表 1。

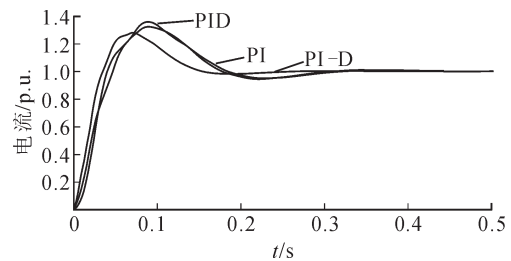


图 6 系统阶跃响应曲线

Fig. 6 Response curves to step change of current

表 1 两种控制器对应的各项时域指标

Table 1 Index values of the two controllers

控制器	上升时间 t_r/ms	调整时间 t_s/ms	过调量 $\sigma/\%$	稳态误差 $e_\infty \times 10^{-5}$
PI-D	24.6	353	27.65	2.241
PI	34.2	412	29.82	4.918
PID	28.7	400	31.51	2.780

图 6 和表 1 可以相互验证。可知,相对于 PI 和 PID 系统,当系统采用 PI-D 控制器时,系统的响应速度和过调量及稳态误差在一定程度上均得到了优化。与此同时,采用 PID 控制器的系统,比传统的 PI 控制系统响应更快,稳态误差更小,但是系统过调量有所增加。

3.2 仿真实验

根据图 2,在 Pscad/Emtc 中对 CIGRE HVDC 标准模型进行数字仿真,对整流侧直流电流测量值进行观测,并与传统的 PI 控制器及 PID 控制器仿真结果进行对比分析。

3.2.1 电流阶跃响应实验

在 1 s 时刻,将电流整定值从 1 p.u. 降低至 0.9 p.u.,在 1.5 s 时刻,将电流整定值恢复至 1 p.u.。分别配置 3 种定电流控制器后,整流侧直流电流见图 7。

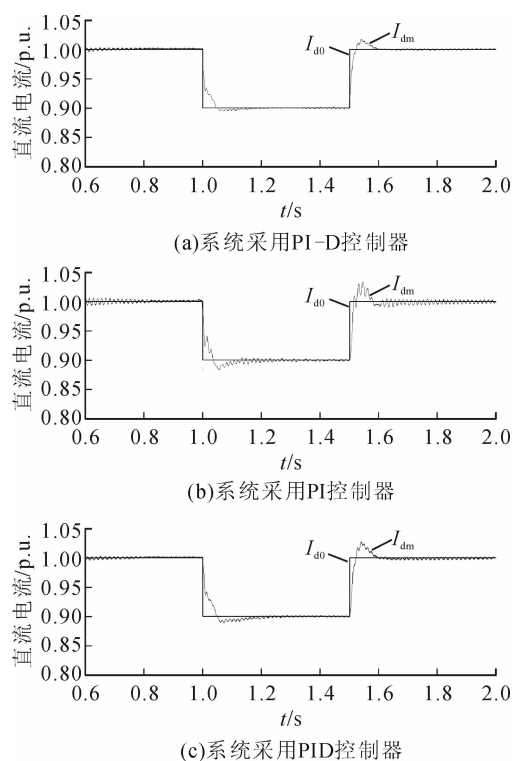


图 7 整流侧直流电流阶跃响应曲线

Fig. 7 The step response curve of the rectifier current

由图 7 和表 1 可知,当直流电流整定值发生 10% 的阶跃变化时,3 种控制器均能满足上升时间 $t_r \leq 70 \text{ ms}$ 和超调量 $M_p \leq 30\%$ 的动态响应要求,直流电流均可以很好地跟踪直流电流整定值的变化。其中,当直流电流整定值下降时,PI 控制系统的动态响应是最好的,但 3 种控制结果相差不大;当直流电流整定值上升时,PI-D 控制系统的动态响应结果是最好的,其次是 PID 控制系统,最后是 PI 控制系统。同时可以发现,微分环节的合理增加可以有效地提高系统阻尼,使直流电流响应值更为平滑。而采用 PI-D 控制器时,得到的直流电流响应值是最为平滑的,说明此时系统的防噪抗干扰能力较 PI 和 PID 控制系统更强。

3.2.2 系统鲁棒性校验

当系统运行方式发生变化时,系统的参数也相应发生改变,因此要求控制器具有一定的鲁棒性,保证当系统参数在一定范围内变化时控制器具有保持系统稳定的能力。因而,必须对系统的鲁棒稳定性进行测试,测试方法是使直流系统运行于不同的工作点,观察阶跃响应特性如何变化。

将直流电流的整定值设为 0.5 p.u.,在 0.5 s 时刻使直流电流整定值提高 0.05 p.u.,在 1 s 时刻恢复原整定值。在此条件下系统采用 PI-D 控制器时,观测到的整流侧直流电流测量值见图 8。

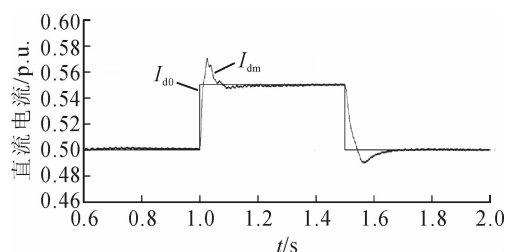


图 8 降功率运行时整流侧电流阶跃响应

Fig. 8 The step response curve of the rectifier current at down-rating state

在保持运行电压不变的情况下,直流电流整定值设为 0.5 p.u.时,直流功率同时降为原来的 50%。由图 8 可知,采用 PI-D 控制器时,系统在低功率运行点同样具有很好的动态响应特性,满足系统动态响应要求,证明所设计控制器具有很好的鲁棒特性。

4 结论

依据系统的传递函数,设计了一种具有 PI-D 控制结构的定电流控制器,并根据系统的 Bode 图,按照时域响应要求整定了控制器参数。通过与 PI 和 PID 控制系统进行仿真对比,结果表明:

1) 系统采用 PI-D 控制器时,系统的响应速度、过调量及稳态误差等动态响应指标在一定程度上均得到了优化。

2) PI-D 定电流控制器可以很好地跟踪直流电流整定值的变化,可以更好地阻尼扰动输入和噪声输入的影响,使直流电流更为平滑稳定。

3) 采用 PI-D 定电流控制器时,系统具有很好的鲁棒特性,使系统具有较好地抗干扰能力。

文中的设计方法简单易行,得到的控制参数可以认为是全局最优解,提供了一种新的直流控制器的设计方法,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 李兴源,赵睿,刘天琪.传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J].电工技术学报,2013,28(10):288-300.
LI Xingyuan, ZHAO Rui, LIU Tianqi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.
- [2] BAHRMAN M P, JOHNSON B K. The ABCs of HVDC transmission technologies[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(2): 32-44.
- [3] 李兴源.高压直流输电系统的运行和控制[M].北京:科学技术出版社,1998.
LI Xingyuan. The operating and control of HVDC system

- [M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 1998.
- [4] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- XU Zheng. Dynamic behaviour analysis of AC/DC system [M]. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [5] 汪峰, 徐政, 黄莹, 等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 135-140.
- WANG Feng, XU Zheng, HUANG Ying, et al. Calculation of main circuit parameters for HVDC transmission[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 135-140.
- [6] 曾果, 李兴源, 段毅, 等. 基于内模控制理论的 HVDC IMC-PID 控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 162-167.
- ZENG Guo, LI Xingyuan, DUAN Yi, et al. Design of IMC-PID controller based on internal model control theory for HVDC control system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 162-167.
- [7] 杨汾艳, 徐政, 张静, 等. 直流输电比例—积分控制器的参数优化[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 15-20.
- YANG Fenyang, XU Zheng, ZHANG Jing, et al. Study on parameter optimization of HVDC PI controllers[J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 15-20.
- [8] 罗隆福, 付颖, 李勇, 等. 直流输电控制器原理及稳态特性分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(1): 65-69.
- LUO Longfu, FU Ying, LI Yong, et al. Controller of HVDC transmission system and its steady-state performance analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(1): 65-69.
- [9] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [10] 周孝法, 陈陈, 宋正强, 等. 基于改进 PSO 算法的 HVDC PI 控制器优化设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 408-414.
- ZHOU Xiaofa, CHEN Chen, SONG Zhengqiang, et al. Optimal design for HVDC PI controllers based on improved PSO algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 408-414.
- [11] 王纪亮, 焦晓红. 具有遗传算法优化 BP 神经网络调节的 HVDC PID 控制器设计[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(4): 5-9.
- WANG Jiliang, JIAO Xiaohong. Design of HVDC PID controller with BP neural network optimized by genetic algorithm[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010, 37(4): 5-9.
- [12] 伍家驹, 孙红艳, 刘斌, 等. 基于 CIGRE HVDC 控制器的 PI 参数可视化整定方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 115-120.
- WU Jiaju, SUN Hongyan, LIU Bin, et al. Visualized tuning of PI parameters for CIGRE HVDC controller[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 115-120.
- [13] KATSUHIKO O. Modern control engineering [M]. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2010.
- [14] HILL R J, LUO F L. Stability analysis of thyristor current controllers [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1987, IA-23(1): 49-56.
- [15] TAN N, KAYA I, ATHERTON D P. Computation of stabilizing PI and PID controllers[C]//Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications. Malatya. Turkey: [s.n.] 2003: 876-881.
- [16] ABB. The three Gorges-Changzho ± 500 kV DC transmission project: DC power and current control modes and features [Z]. Ludvika: ABB, 1999.
- [17] 吴凤江, 孙醒涛. 直流微电网中光伏发电系统的比例—积分—谐振控制[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 271-280.
- WU Fengjiang, SUN Xingtao. Proportional-integral-resonant control of photovoltaic generation system in DC microgrid [J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 275-280.

魏亮(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。

王渝红(1971—), 女, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。

(上接第 113 页)

- Science Press, 2008.
- [19] 刘延柱, 洪嘉振, 杨海兴. 多刚体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- LIU Yanzhu, HONG Jiazhen, YANG Haixing. Multi rigid body system dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.
- [20] 雷天觉. 新编液压工程手册[K]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998.
- LEI Tianjue. The new hydraulic engineering handbook [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998.
- 朱苛婁(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压开关及其弹簧操动机构、永磁、磁力、斥力、电磁机构的研发和仿真分析技术。