

基于内模控制理论的 HVDC IMC-PID 控制器设计

曾 果¹, 李兴源¹, 段 毅²

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 四川电力公司 乐山电力局, 四川 乐山 614000)

摘要: 分析了内模控制(IMC)理论的优越性,推导了HVDC控制系统的传递函数,在IMC理论上设计了直流控制系统IMC-PID控制器。控制系统的性能指标采用平方积分误差值(ISE)衡量,鲁棒稳定性指标采用 M 值进行评定,在综合考虑两者的基础上进行IMC-PID控制器参数的整定。在MATLAB中搭建标准模型进行数字仿真,结果显示在系统参数发生一定变化时系统仍能够保持稳定,具有较好的动态性能,由此证明了所提设计方法的可行性和有效性。

关键词: 高压直流输电; 内模控制; IMC-PID; 仿真; 控制器; 整定

中图分类号: TM 721.1

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.027

0 引言

高压直流输电(HVDC)是解决高电压、大容量、远距离输电和电力并网互联的重要手段,特高压直流输电技术在该方面也有显著表现^[1],而控制系统在HVDC系统中具有重要地位。构成闭环的控制系统,既可改善HVDC系统自身的运行特性,又能充分利用其快速调节的特点改善交流系统的运行特性,因而其中的控制器特性就显得非常重要^[2-4]。比例-积分(PI)控制器因具有结构简单、鲁棒性强、易于工程实现等特点而在控制领域中得到了广泛应用^[5-10]。PI控制器参数整定的好坏与控制的静态稳定性和动态响应特性有密切的关系。目前,国内外投入商业运行的HVDC控制系统的基本控制器也都是选用PI控制器^[11]。

HVDC控制器的设计必须使控制系统的动态响应满足相应的技术准则,则相应对控制的参数整定提出一定的要求。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。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。

文献[12]利用电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC对天生桥—广州直流工程中的PI参数进行了整定,采用试凑的方法调节控制器参数,使系统满

足动态响应的要求。文献[13-14]采用粒子群优化算法来进行参数寻优,整定PI控制器参数,避免了粒子群优化算法陷入局部最优。文献[15]应用Bode图求出满足系统稳定PI控制器参数的范围,再按一定的步长确定PI寻优参数的样本集,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。针对上述对控制器参数整定方法的不足,本文针对HVDC系统提出采用一种新型控制器并给出了参数整定的方法。首先推导出HVDC系统的传递函数,引入先进的内模控制(IMC)理论并设计了IMC-PID控制器,控制器参数中只有滤波常数需要整定。整定的原则综合考虑系统性能指标函数(即平方积分误差值(ISE)函数)和鲁棒性能函数(即 M 值函数),目的性强,不存在试探性,容易在线校正,另外系统参数发生变化时可通过在线调整控制器参数来保证鲁棒稳定性和控制器的调节作用都处于适当的状态。

1 IMC 理论

IMC是由Garcia和Morari在史密斯估计补偿控制的基础上提出的一种先进控制理论,在控制系统分析设计中得到广泛应用^[16]。IMC-PID控制器不但保持了传统PID控制的特点,还具有IMC的所有优点,控制器的设计基于过程模型和一个用于鲁棒特性的低通滤波器,并易于采用硬件控制来实现对现有控制系统的改造。

图1为IMC系统控制图。图中, $G(s)$ 为控制对象; $H(s)$ 为过程模型; $C_{\text{IMC}}(s)$ 为IMC控制器; $U(s)$ 为控制器输出; $R(s)$ 为输入信号; $D(s)$ 为干扰信号; $Y(s)$ 为输出信号。

由图1可得出控制系统的反馈信号为:

$$\hat{d} = [G(s) - H(s)]U(s) + D(s) \quad (1)$$

收稿日期:2013-05-19;修回日期:2014-03-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA05-A119);国家自然科学基金重点资助项目(51037003);国家电网公司和浙江电力公司重大科技专项(SGCC-MPLG027-2012) Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05-A119),the Key Project of National Natural Science Foundation of China(51037003) and the Key Project of State Grid Corporation and Zhejiang Electric Power Corporation(SGCC-MPLG027-2012)

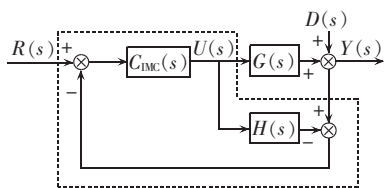


图 1 内模控制结构图

Fig.1 Structure of IMC

如果模型精确且当 $D(s)=0$ 时,由式(1)可以看出过程的输出和模型的输出相同,系统处于开环状态,此时不需要引入反馈信号,系统的输出值取决于系统的前向通道的传递函数。

定义灵敏度函数 $\varepsilon(s)$,互补灵敏度函数 $\eta(s)$,则有:

$$\varepsilon(s) = \frac{1 - H(s)C_{\text{IMC}}(s)}{1 + C_{\text{IMC}}(s)[G(s) - H(s)]} \quad (2)$$

$$\eta(s) = \frac{G(s)C_{\text{IMC}}(s)}{1 + C_{\text{IMC}}(s)[G(s) - H(s)]} \quad (3)$$

对于一般模型族:

$$\Pi = \left\{ G(s) : \frac{|G(j\omega) - H(j\omega)|}{|H(j\omega)|} \leq l_m \right\} \quad (4)$$

采用 IMC 闭环系统,由式(2)、式(3)可得出鲁棒稳定性的条件

$$|C_{\text{IMC}}(j\omega)H(j\omega)l_m(j\omega)| < 1 \quad (5)$$

和鲁棒性能的条件

$$|C_{\text{IMC}}(j\omega)H(j\omega)l_m(j\omega)| + | [1 - C_{\text{IMC}}(j\omega)H(j\omega)]W | < 1 \quad (6)$$

其中, W 为性能加权函数。对于一个确定的 l_m ,只取决于控制器 C_{IMC} 和滤波器,而后者只需调整滤波时间常数,相对于 W 的定义更加简单。

2 IMC-PID 控制器的设计

将图 1 等效为图 2,其中 $F(s)$ 为等效的经典控制器,则有:

$$F(s) = \frac{C_{\text{IMC}}(s)}{1 - C_{\text{IMC}}(s)H(s)} \quad (7)$$

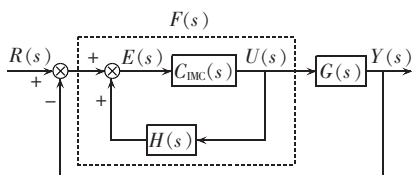


图 2 等效反馈控制结构图

Fig.2 Structure of equivalent feedback control

对 $H(s)$ 作因式分解,有:

$$H(s) = H_+(s)H_-(s) \quad (8)$$

其中, $H_+(s)$ 包含了标称模型中所有的时滞和右半平面零点,并规定其静态增益为 1; $H_-(s)$ 为控制模型中的最小相位部分。

令内模控制器为:

$$C_{\text{IMC}}(s) = L(s)(H_-(s))^{-1} \quad (9)$$

$$L(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (10)$$

其中, $L(s)$ 为低通滤波器。

将式(8)—(10)代入式(7)即可得到基于 IMC 的经典控制器,但滤波时间 λ 的选择必须满足式(5)、式(6), n 的选择则需保证 $F(s)$ 为正则。

为了得到 IMC-PID 控制器参数^[17],将式(7)改写如下:

$$F(s) = \frac{1}{s} g(s) \quad (11)$$

利用 Taylor 公式将式(11)展开,有:

$$F(s) = \frac{1}{s} \left[g(0) + g'(0)s + \frac{1}{2!} g''(0)s^2 + \dots + \frac{1}{m!} g^{(m)}(0)s^m + \dots \right] \quad (12)$$

对应于经典 PID 参数 K_c, τ_i, τ_d ,由式(12)有:

$$\begin{cases} K_c = g'(0) \\ \tau_i = g'(0)/g(0) \\ \tau_d = g''(0)/(2g'(0)) \end{cases} \quad (13)$$

其中, K_c, τ_i, τ_d 分别为比例放大系数、积分时间常数、微分时间常数。

3 HVDC 控制系统数学模型

3.1 控制系统的开环传递函数

HVDC 的控制系统如图 3 所示。控制系统由 4 个环节组成, $G_1(s), G_2(s), G_3(s), G_4(s)$ 分别为控制器环节、换流器环节、直流线路环节和测量环节。图 3 中, $I_{\text{dref}}, I_{\text{d}}$ 分别为整流侧直流电流的整定值、实际输出值; $\alpha_{\text{max}}, \alpha_{\text{min}}$ 分别为整流器触发角 α 的最大值和最小值; U_{d0} 为整流侧相控理想空载直流电压值; s 为拉普拉斯算子。

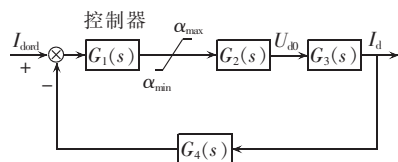


图 3 HVDC 定电流控制系统

Fig.3 HVDC constant current control system

由图 3 可以得到控制系统开环传递函数的表达式:

$$G(s) = -G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s) \quad (14)$$

3.2 各环节的传递函数

a. 控制器环节。

HVDC 采用经典的 PID 控制器,其传递函数可表示为:

$$G_1(s) = K_c + \frac{1}{\tau_1 s} + \tau_D s \quad (15)$$

b. 换流器环节。

动态过程中,可将换流器看成是一个滞后环节,其滞后效应是由晶闸管的失控时间引起的,其传递函数可表示为:

$$G_2(s) = K_s e^{-\theta s} \quad (16)$$

$$K_s = \Delta U_{d0} / \Delta \alpha = -U_{d0} \sin \alpha = -\frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_1 \sin \alpha$$

其中, K_s 为放大系数; θ 为失控时间。

考虑最严重的情况,对于六脉波换流器,最大失控时间为:

$$T_s = T_{\text{smax}} = \frac{1}{6f} = 3.33 \text{ (ms)}$$

c. 直流线路环节。

直流线路环节可用 T 型电路表示^[13-14],如图 4 所示。

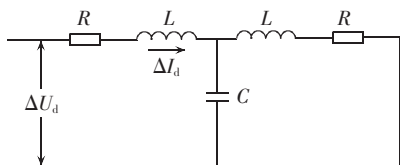


图 4 直流环节等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of DC link

由图 4 可得出直流环节的传递函数:

$$G_3(s) = \frac{\Delta I_d}{\Delta U_d} = \frac{LCs^2 + RCs + 1}{L^2 Cs^3 + 2RLCs^2 + (R^2 C + 2L)s + 2R} \quad (17)$$

d. 直流电流测量环节。

测量环节通常用于模拟测量过程,可用一阶惯性环节来表示,即:

$$G_4(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (18)$$

其中, τ 为惯性时间常数,反映测量设备的响应速度;增益 K 用于将实际直流电流值变换为无量纲的标么值。

4 HVDC 的 IMC-PID 控制器的设计

为获取使 HVDC 系统能够获得最优的动态响应的控制器参数,需要给出相应的性能指标函数。本文控制系统的性能指标采用 ISE 值评定^[18],基于 ISE 的性能指标设计的控制器能够抑制过渡过程中大偏差的出现^[19]。定义 ISE 为:

$$\text{ISE} = \int_0^\infty (y - y_s)^2 dt \quad (19)$$

鲁棒性指标采用 M 值函数衡量,其定义为:

$$M = \max |\eta| \quad (20)$$

其中, η 即为式(3)的互补灵敏度函数。

图 5 为 HVDC 等效的单位反馈系统, $G_c(s)$ 定义如下:

$$G_c(s) = G_2(s)G_3(s)G_4(s) \quad (21)$$

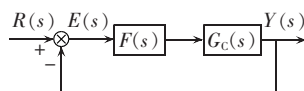


图 5 HVDC 等效单位反馈系统

Fig.5 HVDC equivalent feedback system

式(17)中含高次多项式,但高次项的系数较一次项和常数项系数差若干个数量级,为了设计的简便只保留一次项和常数项。根据式(21)有:

$$G_c(s) = \frac{KK_s}{2(\tau s + 1)(Ls + R)} e^{-\theta s} \quad (22)$$

对纯滞后时间使用一阶 Pade 近似有:

$$G_c(s) \approx \frac{KK_s}{2(\tau s + 1)(Ls + R)} \frac{1 - \theta s}{1 + \theta s} \quad (23)$$

将 $G_c(s)$ 分解为:

$$G_{c1}(s) = 1 - \theta s$$

$$G_{c2}(s) = \frac{KK_s}{2(\tau s + 1)(Ls + R)} \frac{1}{1 + \theta s}$$

则由式(7)、(9)、(10),并取 $n=1$,可得:

$$F(s) = \frac{2(\theta s + 1)(Ls + R)(\tau s + 1)}{KK_s(\lambda + \theta)s} \quad (24)$$

为获取 IMC-PID 参数,采取近似处理将小惯性环节合并可得:

$$F(s) \approx \frac{2(Ls + R)[(\theta + \tau)s + 1]}{KK_s(\lambda + \theta)s}$$

则 IMC-PID 参数为:

$$\begin{cases} K_c = \frac{2[L + R(\tau + \theta)]}{K_s K(\lambda + \theta)} \\ \tau_1 = \frac{2R}{K_s K(\lambda + \theta)} \\ \tau_D = \frac{2L(\theta + \tau)}{K_s K(\lambda + \theta)} \end{cases}$$

从实际投入的 HVDC 来看,一般用 PI 控制器,由于 HVDC 的滞后时间非常小,从系统稳定性的角度考虑,IMC-PID 控制器不取微分环节,对系统的稳定影响很小。从上面计算结果可知,IMC-PID 需要整定的参数只有滤波时间常数 λ ,因此 IMC-PID 控制器的参数整定实质上就是滤波器参数的整定。滤波时间常数 λ 的整定与控制系统的动态性能和鲁棒性密切相关,整定时必须综合考虑。

由 HVDC 等效单位反馈系统容易得出输入/输出关系,即:

$$\frac{Y}{R} = \frac{FG_c}{1 + FG_c} = \frac{e^{-\theta s}(\theta s + 1)}{(\lambda + \theta)s + (\theta s + 1)e^{-\theta s}} \quad (25)$$

根据拉普拉斯时间比例尺定理,由式(25)可以

看出系统的响应只与参数 λ 、 θ 相关,与系统模型的其他参数无关,因此 y 与 t/θ 的关系输出曲线的形状只与 λ/θ 的值相关。

计算互补灵敏度函数:

$$\eta=\frac{e^{-\theta s}(\theta s+1)}{(\lambda+\theta)s+(\theta s+1)e^{-\theta s}} \tag{26}$$

同理, η 和 t/θ 的关系输出曲线也只和 λ/θ 的值有关。由上面的分析可知,控制系统的动态性能和鲁棒稳定性都只与 λ/θ 相关。故只需计算 ISE 值和 M 值,在兼顾两者的基础上整定参数 λ [20]。

5 HVDC 算例分析

5.1 参数计算

为验证上述 HVDC 系统 IMC-PID 控制器设计的有效性,本文以国际大电网会议(CIGRE)HVDC 标准测试模型为对象进行算例仿真,其主电路结构及具体参数见文献[21]。该系统是用于 HVDC 控制研究的标准系统,便于用各种仿真程序或仿真器在相似的主电路模型上进行不同的直流控制设备和控制策略性能的比较研究,其直流系统主电路结构比较简单,事实上它已逐步发展成为研究 HVDC 控制的标准。

根据 CIGRE 模型的相关参数,可求得 IMC 系统的等效控制器为:

$$F(s) \approx \frac{(1.1936s+5)(0.0045s+1)}{85.41(\lambda+0.0033)s}$$

利用 CIGRE 模型中的参数计算不同 λ/θ 时的 M 值、ISE 值和系统的其他动态指标。计算结果如表 1 所示。

表 1 λ/θ 不同时单位阶跃响应性能指标计算结果
Tab.1 Calculated performance indexes responding to unit step change for different λ/θ values

λ/θ	ISE	M	$\sigma/\%$	t_r/ms	t_s/ms
0	∞	∞	—	—	—
0.25	5.625×10^{-3}	1.582	58.20	3.332	54.29
0.50	4.320×10^{-3}	1.325	32.50	4.461	35.06
0.75	4.326×10^{-3}	1.123	12.30	5.258	19.66
1.00	4.408×10^{-3}	1.000	0	6.061	20.81
1.25	4.677×10^{-3}	1.000	0	17.850	24.45
1.50	4.994×10^{-3}	1.000	0	19.260	29.47
1.75	5.337×10^{-3}	1.000	0	21.060	33.23
2.00	5.697×10^{-3}	1.000	0	23.060	39.66

绘制不同 λ/θ 时的 M 值函数曲线和 ISE 曲线如图 6 所示。从表 1 和图 6 可以看出,取 $\lambda/\theta=1$ 较为合适,上升时间 t_r 和调整时间 t_s 都较小,系统响应很快且系统无超调。同时, $M=1$ 和 ISE 值也较小,能够兼顾系统的动态性能和鲁棒稳定性。

5.2 算例仿真及分析

本文利用 MATLAB 7.1 进行仿真,软件包中的 Simulink 通用模块和 SimPowerSystems 工具箱提供

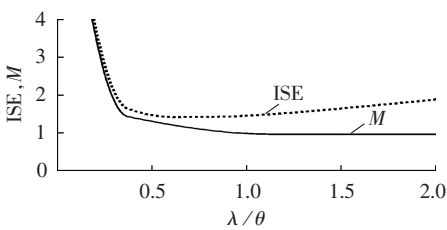


图 6 λ/θ 不同时 ISE 和 M 值
Fig.6 Values of ISE and M for different λ/θ values

的专用模块[22],可搭建 CIGRE HVDC 标准测试模型的时域仿真模型。HVDC 系统控制方式为整流侧定电流控制、逆变侧定熄弧角控制,电流裕度设置为 $0.1I_d$ (p.u.),进行阶跃响应仿真。考虑到实际系统中存在高频信号,并且微分环节对高频信号非常敏感,故在控制器前加装一个小惯性环节。

5.2.1 电流的阶跃响应测试

系统控制器采用 IMC-PID,滤波时间取上述整定的 $\lambda/\theta=1$ 作为最优参数,进行电流阶跃响应计算, $t=0.5\text{ s}$ 时使电流整定值下降 10%, 0.6 s 时恢复电流给定值。整个过程中直流电流的阶跃响应曲线如图 7 所示。

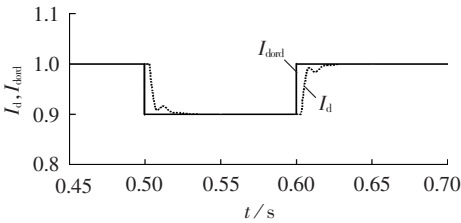


图 7 电流的阶跃响应曲线
Fig.7 Current curve responding to step change

从图 7 可以看出,当整流侧电流整定值发生阶跃变化时,系统响应非常快,上升时间 t_r 和调节时间 t_s 都很小,同时系统无超调量,系统的动态响应性能很好,控制其参数满足系统要求。

5.2.2 系统的鲁棒稳定性测试

当系统变化运行发生改变时,系统的参数也相应发生变化,则要求控制器在参数一定范围内变化时拥有保持系统的稳定能力。因此,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。

以整流侧定电流控制为例,逆变侧使直流电压恒为额定值。直流系统稳定运行时,触发角 $\alpha=20^\circ$ 。 $t=0.2\text{ s}$ 时,直流电流增加 10%, 0.2 s 后恢复电流整定值。由于电压保持不变,该过程也相当于使功率整定值发生了阶跃变化,系统处于过负荷运行状态。直流电流响应曲线如图 8 所示,可以看出,利用计算得到的参数,控制器在过负荷运行点也能满足动态响应要求,说明采用 IMC-PID 控制器具有良好的鲁棒性。

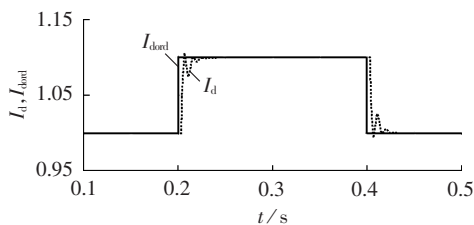


图 8 电流的过负荷响应曲线

Fig.8 Current curve responding to overload

6 结论

本文推导出 HVDC 控制系统的传递函数表达式,用 IMC 理论设计了直流控制系统的 IMC-PID 控制器。控制系统的性能指标采用 ISE 值衡量,鲁棒性指标采用 M 值进行评定,在综合考虑两者的基础上进行了参数整定。利用 MATLAB 搭建 CIGRE HVDC 标准模型进行详细的时域仿真,由仿真结果和电流阶跃变化响应看出,采用 IMC-PID 控制器并基于文中的参数整定方法所得的参数在工程意义上已接近全局最优值,采用该参数的 IMC-PID 控制器具有良好的动态性能和鲁棒性,非常适用于集散控制系统,方便在线计算和调试。这也为直流控制器的设计和参数整定提供了一种新的方法,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 郑晓冬,邵能灵,杨光亮,等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):10-14.
ZHENG Xiaodong,TAI Nengling,YANG Guangliang,et al. Modeling and simulation of UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):10-14.
- [2] 倪林林,陶瑜. 葛洲坝—上海直流输电工程控制调节系统参数的优化[J]. 电网技术,1989,13(3):26-31.
NI Linlin,TAO Yu. Parameter optimization of control system for Gezouba-Shanghai HVDC project[J]. Power System Technology, 1989,13(3):26-31.
- [3] 赵睿,李兴源,刘天琪,等. 抑制次同步和低频振荡的多通道直流附加阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):89-92.
ZHAO Rui,LI Xingyuan,LIU Tianqi,et al. Design of multi-channel DC supplementary damping controller for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):89-92.
- [4] 李兴源,赵睿,刘天琪,等. 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.
- [5] ASTROM K J,HOAGLAND T. PID controllers:theory,design,and tuning[M]. New York,USA:Instrument Society of American,1995: 42-43.
- [6] SARANYA M,PAMELA D. A real time IMC tuned PID controller for DC motor[J]. International Journal of Recent Technology and Engineering,2012,1(1):65-70.
- [7] VILANOVA R. PID controller tuning rules for robust step response of first-order-plus-dead-time models[C]//Proceedings of the 2006 American Control Conference. Minneapolis,USA:[s.n.],2006: 14-16.
- [8] 徐应年,赵阳,谌海涛,等. 电压型逆变电源输出电压 IMC-PID 控制技术[J]. 中国电机工程学报,2007,27(28):90-95.
XU Yingnian,ZHAO Yang,SHEN Haitao,et al. Research on waveform control technique based on IMC-PID for voltage-source inverter[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(28):90-95.
- [9] 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.
- [10] 李天云,刘智铭,党震宇,等. 基于 Simulink 的 HVDC PI 控制器参数优化方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):45-48.
LI Tianyun,LIU Zhiming,DANG Zhenyu,et al. Parameter optimization of HVDC PI controller based on Simulink[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(1):45-48.
- [11] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京:科学出版社, 2010:42-43.
- [12] JING Yong,REN Zhen,OU Kaijiang,et al. Parameter estimation of regulators in Tian-Guang HVDC transmission system based on PSCAD/EMTDC[C]//Proceedings of 2002 International Conference on Power System Technology. Kunming,China:[s.n.],2002: 538-541.
- [13] 胡江,魏星. 基于自适应粒子群算法的直流输电 PI 控制器参数优化[J]. 电网技术,2008,32(2):71-74.
HU Jiang,WEI Xing. Parameter optimization of HVDC technology PI controller based on adaptive particle swarm optimization[J]. Power System Technology,2008,32(2):71-74.
- [14] 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.
- [15] 杨汾艳,徐政,张静. 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. Study on parameter optimization of HVDC PI controllers[J]. Power System Technology,2006,30(11):15-20.
- [16] 高东杰,谭杰,林红权. 先进控制技术应用[M]. 北京:国防工业出版社,2003:24-25.
- [17] 王树青. 先进控制技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2001: 77-79.
- [18] 游浩. 内模控制和 IMC-PID 控制及其应用[D]. 北京:北京化工大学,2000.
YOU Hao. Internal control and IMC-PID applications[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2000.
- [19] 何芝强. PID 控制器参数整定方法及其应用研究[D]. 杭州:浙江

大学,2005.

HE Zhiqiang. Parameters tuning of PID controller and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

[20] 潘立登,潘仰东. 先进控制系统应用与维护[M]. 北京:中国电力出版社,2010:263-265.

[21] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. A benchmark model for HVDC system studies[C]//International Conference on AC and DC Power Transmission. London, England: [s.n.], 1991:375-378.

[22] 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算及仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2004:223-224.

作者简介:



曾 果

布式发电等研究工作。

曾 果(1987-),男,四川南充人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电及电力系统稳定性控制(E-mail:garfield1236@163.com);

李兴源(1945-),男,四川宜宾人,教授,博士研究生导师,IEEE 高级会员,长期从事

高压直流输电、电力系统稳定性与控制、分

Design of IMC-PID controller based on internal model control theory for HVDC control system

ZENG Guo¹, LI Xingyuan¹, DUAN Yi²

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Leshan Power Supply Bureau, Sichuan Electric Power Company, Leshan 614000, China)

Abstract: The superiority of IMC (Internal Model Control) is analyzed and the transfer function of HVDC control system is deduced. An IMC-PID controller based on IMC theory is designed for HVDC control system. Its performance is evaluated by ISE (Integral of Square values of Errors) and its robustness is deduced by M values, both of which are applied in the parameter setting for IMC-PID controller. The benchmark model is built with MATLAB for digital simulation and the simulative results illustrate that the system has excellent dynamic performance and keeps stable when system parameters change within a certain range, which proves the feasibility and effectiveness of the proposed design method.

Key words: HVDC power transmission; internal model control; IMC-PID; computer simulation; controller; setting

(上接第 161 页 continued from page 161)

[17] 邓佑满,张伯明,相年德. 配电网重构的改进最优流模式算法[J]. 电网技术,1995,19(7):47-50.

DENG Youman, ZHANG Boming, XIANG Niande. An improved optimal flow pattern algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 1995, 19(7):47-50.

[18] 张栋,张刘春,傅正财. 配电网重构的快速支路交换算法[J]. 电网技术,2005,29(5):82-85.

ZHANG Dong, ZHANG Liuchun, FU Zhengcai. A fast branch exchange algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Power System Technology, 2005, 29(5):82-85.

[19] 王守相,王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京:高等教育出版社,2005:150-153.

[20] LI Hongwei, ZHANG Anan, SHEN Xia, et al. A load flow method for weakly meshed distribution networks using powers as flow variables[J]. International Journal of Electrical Power & Energy

Systems, 2014, 58:291-299.

作者简介:



李红伟

licboy@126.com)。

李红伟(1977-),男,河南安阳人,副教授,博士,主要研究方向为配电网分析与优化、分布式发电等(E-mail:lhwwmail@126.com);

孔 冰(1989-),男,四川自贡人,硕士研究生,主要研究方向为智能体及多代理系统(E-mail:kongbsc@163.com);

李 超(1989-),男,四川峨眉山人,硕士研究生,主要研究方向为配电系统自动化(E-mail:

Design of multi-agent distribution network restoration system based on minimum grid loss

LI Hongwei, KONG Bing, LI Chao

(School of Electrical Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Based on multi-agent technology and JADE development platform, a multi-agent restoration system of distribution network is designed, which takes the minimum power loss after network reconstruction as its objective. The characteristics of agent and multi-agent are presented and the main restoration processes are analyzed, including leader agent selection, blackout area determination, optimal restoration scheme determination and scheme implementation. The role and behavior of each agent during restoration and the development of restoration scheme based on the improved optimal flow pattern algorithm are introduced. The agents restore the power supply for blackout areas gradually according to the developed restoration scheme. The restoration system is applied to optimally reconstruct a 33-bus system with faults in a few regions, verifying the feasibility of the designed multi-agent restoration system.

Key words: electric power distribution; restoration system; network reconfiguration; multi-agent systems; improved optimal flow pattern algorithm; optimization