

基于单神经元的 VSC-HVDC 控制器设计与研究

李远景¹, 李志雄², 汤双清²

(1. 广东电网公司广州番禺供电局, 广东 广州 511400; 2. 三峡大学机械与材料学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 对同步旋转坐标系下 VSC-HVDC 系统的控制策略进行了设计研究。基于 VSC-HVDC 系统在 $dq0$ 坐标下的动态模型, 采用双闭环直接电流控制策略, 实现对有功、无功功率的独立调节; 其中主要针对外环中常使用的传统 PID 控制器自适应差的缺陷, 引入单神经元对 PID 参数在线调节以增强其自适应能力, 提高系统动态和稳态性能。数字仿真验证了该控制器的控制性能比传统 PID 控制器好。

关键词: 电压源换流器; 高压直流输电; 直接电流控制; 单神经元

Controller design for VSC-HVDC system based on single neuron

LI Yuan-jing¹, LI Zhi-xiong², TANG Shuang-qing²

(1. Panyu Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 511400, China;

2. College of Mechanical and Material Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The control strategy of the VSC-HVDC system are studied in this paper. The direct current control strategy and dual closed loop structure are designed based on the dynamic model of VSC-HVDC in $dq0$ synchronous reference frame. The main concern is on the shortcoming of traditional PID adopted in the outer loops, and the single neuron PID controller is introduced to enhance the system's adaptation. Simulation results show that the designed control system obtains satisfactory performance and is better than PID controller.

Key words: voltage source converter (VSC); HVDC; direct current control; single neuron

中图分类号: TM721 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0010-05

0 引言

新型直流输电系统 (VSC-HVDC) 采用以 IGBT 为基础的电压源换流器, 结合 PWM 技术, 既能同时单独控制有功和无功功率, 又能向无源网络系统供电, 还能控制潮流快速反转等, 因此在分布式发电、远距离负荷供电等诸多领域具有广阔的应用前景^[1-4]。

VSC-HVDC 是较新的研究领域^[2], 许多基础理论和相关的应用基础问题尚需要研究。文献[2,4,5,6]分析了 VSC-HVDC 系统在 $dq0$ 坐标下有功功率与无功功率独立调节的控制方法与策略, 但其外环控制器采用传统 PI 控制, PI 参数的确定繁琐以及不能随外界干扰自适应调节, 限制了系统控制性能的进一步提高。鉴于文献[7,8]等将智能控制器应用于传统 HVDC 控制中并取得了较好的效果, 本研究将单神经元 PID (SNPID) 控制器应用于 VSC-HVDC 外环控制中, 利用单神经元自学习能力在线调节 PID 参数, 以提高系统控制性能。数字仿真证明了该控制器能

够快速反应系统各种不同干扰与故障, 并具有较高的稳态精度。

1 VSC-HVDC 动态模型

两端 VSC-HVDC 系统基本原理如图 1 所示。文献[2,4]等较详细地介绍了其基本工作原理, 这里不再赘述。图 1 中, L 为换流变压器等效电感, R 用于等效换流器损耗和变压器电阻损耗, C 为直流电容器电容。

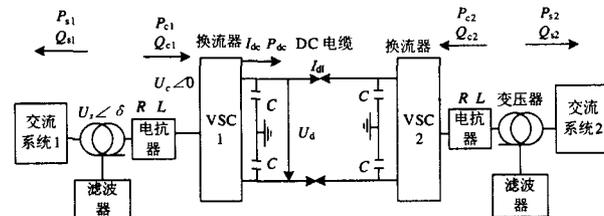


图1 两端有源交流网络 VSC-HVDC 系统

Fig. 1 Circuit model of two terminals VSC-HVDC

VSC-HVDC 系统中某一换流器 (逆变器) 交流

侧动态数学模型在 dqo 坐标中可以表示为^[2]:

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} = -Ri_{sd} + \omega Li_{sq} + u_{sd} - u_{cd} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} = -Ri_{sq} - \omega Li_{sd} + u_{sq} - u_{cq} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{直流侧为: } i_{dc} - i_{dl} = C \frac{du_{dc}}{dt} \quad (2)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 和 i_{sd} 、 i_{sq} 分别为交流源电压、电流的 d 、 q 轴分量; u_{cd} 和 u_{cq} 为VSC交流侧电压 d 、 q 轴分量; u_{dc} 、 i_{dc} 分别为VSC直流侧电压值、电流值; i_{dl} 为输电电缆的直流电流值。

令电网电压 a 相电压初始相位角为 0° , 即 $u_{sd} = |u_s|$, $u_{sq} = 0$; 则在平衡稳态情况下, VSC交流侧的无功功率 Q 和有功功率 P 分别为^[2,4]:

$$Q = -3u_{sd}i_{sq} / 2 \quad (3)$$

$$P = 3[u_{sd}i_{sd} + R(i_{sd}^2 + i_{sq}^2)] / 2 \quad (4)$$

由式(3)和(4)可以看出, 当 u_{sd} 保持常值时, Q 只与 i_{sq} 成正比; 忽略换流器和电抗器损耗功率, P 与 i_{sd} 近似成正比。因此通过直接控制 i_{sq} 和 i_{sd} 就可以达到控制有功和无功功率的目的, 此即为直接电流控制。

2 控制策略

本文提出的控制器结构如图2所示。控制器由外环单神经元控制器、内环电流控制器和锁相环(PLL)等组成。外环单神经元控制器实现定直流电压控制、定有功功率控制和定无功功率控制; 内环电流控制器实现换流器交流侧电流波形和相位的直接控制; PLL提供用于电压矢量定向控制和触发脉冲生成所需的基准相位。

2.1 外环控制器

1) 定直流电压控制

由式(2)得:

$$u_{dc} C \frac{du_{dc}}{dt} = u_{dc} i_{dl} - u_{dc} i_{dc} = P - u_{dc} i_{dc} \quad (5)$$

系统稳态时有 $Cu_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = 0$, 根据式(4)并忽略损耗有:

$$u_{dc} = 3u_{sd}i_{sd} / 2i_{dc} \quad (6)$$

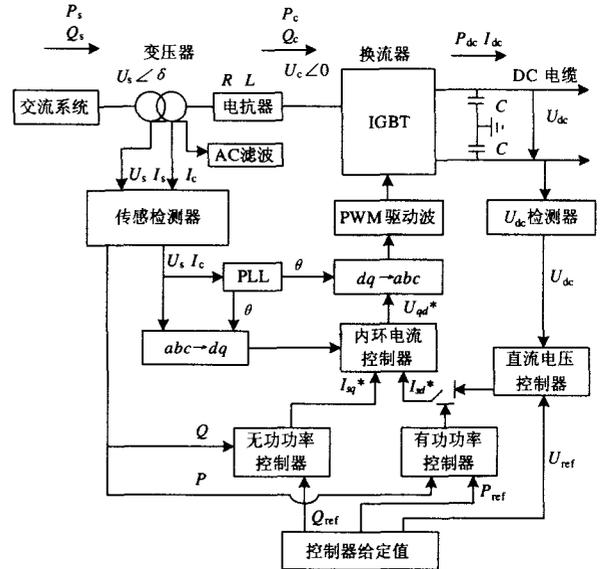


图2 VSC-HVDC控制结构图

Fig. 2 Control structure of VSC-HVDC

当参考指令 u_{dc}^* 和 Q_{ref} 给定时, 定直流电压控制框图如图3, 其中比例因子 $K_{dc} = 2U_{dc}^* / 3U_{sd}$, U_{sd} 为 u_{sd} 的模。则图3说明直流电压偏差经单神经元PID调节后得到修正量, 加上实际直流电流 i_{dc} 与 K_{dc} 的乘积来作为有功电流的参考值 i_{sd}^* ; 无功电流参考值 i_{sq}^* 则由无功功率偏差经单神经元PID调节后的修正量与无功电流的预估值($-Q_{ref} / U_{sd}$)之和得到。

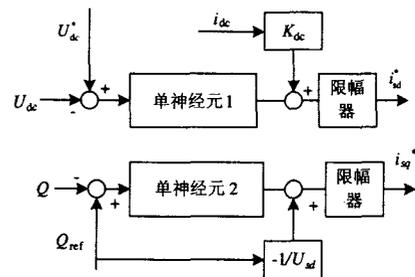


图3 定直流电压控制框图

Fig. 3 Diagram of constant DC line voltage control

2) 功率控制

有功和无功功率控制器与定直流电压控制器类似, 如图4所示。

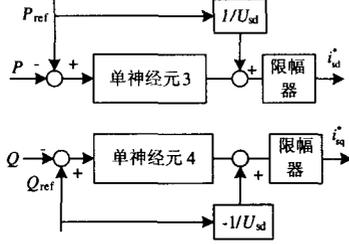


图4 有功和无功功率控制框图

Fig. 4 Diagram of respective power control

图4中,有功电流的预估值 P_{ref}/U_{sd} , 它与由有功功率偏差经单神经元PID调节的修正量之和作为有功电流的参考值 i_{sd}^* 。

2.2 内环电流控制

电流内环控制器如图5所示。采用PI控制器,通过引入电压耦合补偿 ωLi_{sq} 、 ωLi_{sd} ,同时采取电压 u_{sd} 、 u_{sq} 前馈补偿,实现d、q轴电流的独立解耦控制,以提高系统的动态性能。

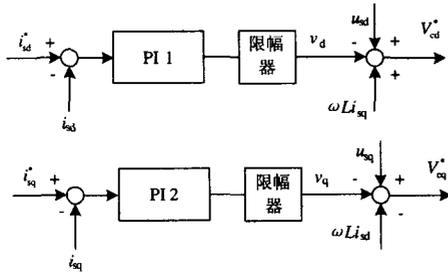


图5 电流内环控制框图

Fig. 5 Diagram of inner current loop control

3 SNPID控制器

常规PID控制器的参数一经选定,便不能进行自适应调节,在非线性时变系统中控制性能明显不足;利用单神经元自学习、自适应能力在线调节PID参数,提高其自适应能力,以满足VSC-HVDC对非线性的要求。SNPID控制器结构如图6所示。

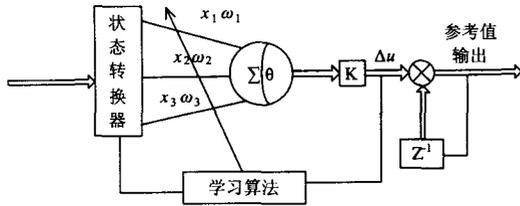


图6 SNPID控制器结构图

Fig. 6 Structure of SNPID controller

根据设定参考值及实际输出值计算出神经元控制所需要的输入状态量:

$$x_1(k) = r(k) - y(k) = e(k)$$

$$x_2(k) = e(k) - e(k-1) = \Delta e(k) \quad (7)$$

$$x_3(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) = \Delta^2 e(k)$$

控制器的输出为:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (8)$$

式(7)、(8)和图6中, $r(k)$ 、 $y(k)$ 、 $e(k)$ 和 $u(k)$ 分别为k时刻系统给定参考值、实际输出值和两者误差以及SNPID输出控制量;状态量 $x_i(k)$ ($i=1, 2, 3$)相当于PID控制器的积分项、比例项、微分项; $w_i(k)$ 为权值系数; $\Delta u(k)$ 为SNPID在k时刻输出增量; K 为增益。

而SNPID工作过程是在某一性能指标的基础上,通过某一学习算法,根据输入状态不断的调整权值系数,即相当于不断自适应调整积分项、比例项、微分项,来满足这一指标,从而实现期望控制性能的。本文借助二次型性能指标思想^[9],在加权系数的调整中引入二次型性能指标,使输出误差和控制增量加权平方和最小。即,设性能指标为:

$$\begin{cases} J = \frac{1}{2} [M(r(k) - y(k))^2 + N\Delta u(k)^2] \\ \Delta u(k) = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^m \Delta u(k-j) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\Delta u(k)$ 为k时刻控制输出增量在m个步长段内的加权平均值; M 、 N 分别为输出误差和控制增量的权重系数,是已知的。

对权值系数 $w_i(k)$ 进行负梯度方向搜索调整,则权值调整增量 $\Delta w_i(k)$ 为:

$$\Delta w_i(k) = \eta_i \frac{\partial J}{\partial w_i(k)} = \eta_i K [M b_0 e(k) x_i(k) - \quad (10)$$

$$\frac{NK}{m} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^3 (w_j(k-j) x_i(k)) (e(k) + \Delta e(k))$$

式中:下标 $i=1,2,3$ 分别对应积分、比例和微分项; $\eta_i > 0$ 为学习速率; b_0 为零初态时过程单位阶跃响应的第一个值。

则规范处理后权值更新值和神经元输出为:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 w_i(k)' x_i$$

$$w_i(k)' = w_i(k) / \sum_{i=1}^3 |w_i(k)| \quad (11)$$

$$w_i(k) = w_i(k-1) + \Delta w_i(k)$$

4 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中构建图 1 所示的 VSC-HVDC 两端系统。本模型中 VSC1 为整流器, 采用定有功功率控制, VSC2 为逆变器, 采用定直流电压控制, 同时两端都采用定无功功率控制。

模拟系统两端对称, 参数为: 交流额定相电压 110 kV, 交流系统电阻/电抗为 6.89 Ω/15.01 mH, 交流系统额定频率 50 Hz; 换流器额定功率 100 MW, 换流电抗器电感 L 为 11.93 mH, 等效损耗电阻 R 为 0.075 Ω; 直流额定电压 100 kV, 直流侧电容 C 为 50 μF, 直流线路等效电阻/电感为 0.1 Ω/1 mH, PWM 开关频率为 1.35 kHz。图 7 和 8 分别为潮流反转和接地故障实验的仿真结果, 实验中各变量的单位均采用标么值 (p.u.), 交流侧和直流侧功率基准均为 100 MW; 交流侧电压基准 50 kV, 直流侧电压基准 100 kV。

图 7(a)、(b) 分别为采用 SNPID 控制和传统 PID 控制的参考值阶跃仿真实验。其中, 在 1.5 s 时, 潮流反转; 在 1.0 s 和 2.0 s 时, VSC2 和 VSC1 分别发生无功功率指令阶跃。图 7(a) 自上而下各波形分别为:

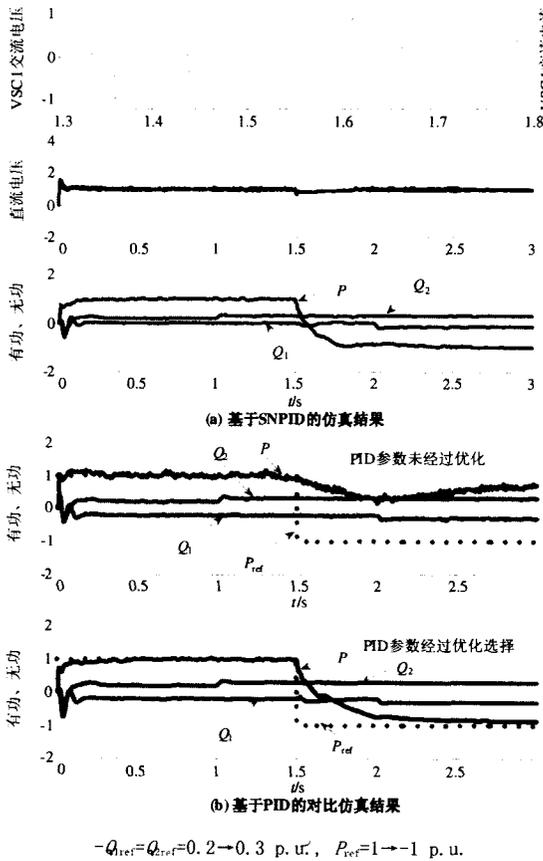


图7 参考指令阶跃实验仿真结果

Fig.7 Simulation results of reference orders stepping

VSC1交流侧B相电压和电流、直流侧电压 U_{dc} 、系统输送有功功率 P 和两个换流器发出或吸收的无功功率 Q_1 和 Q_2 。图 7(b) 上下图形分别为传统 PID 控制器参数未优化和优化后的系统有功、无功功率波形。

图 8 为故障仿真实验。其中, 在 0.8 s 至 1.1 s 时, 在 VSC2 交流侧发生三相接地故障, 故障相的电压降到零。图 8 自上而下各波形分别为: 采用 SNPID 控制的 VSC1 交流侧电流、VSC2 交流侧电压、直流侧电压 U_{dc} 和分别采用 SNPID 和 PID 控制的系统输送有功功率 P 和两个换流器发出或吸收的无功功率 Q_1 和 Q_2 结果对比图形、有功功率 P 局部放大对比图。

对比图 7(a) 和 (b) 可知, SNPID 和 PID 都能够很好地实现有功、无功功率的独立解耦控制, 并对无功功率参考指令变化适应快, 稳态精度高; 但是, 在潮流反转时, 参数未优化的 PID 反转失败, 而参数优化好的 PID 对反转控制适应慢, 大约在 2.4 s 时有稳

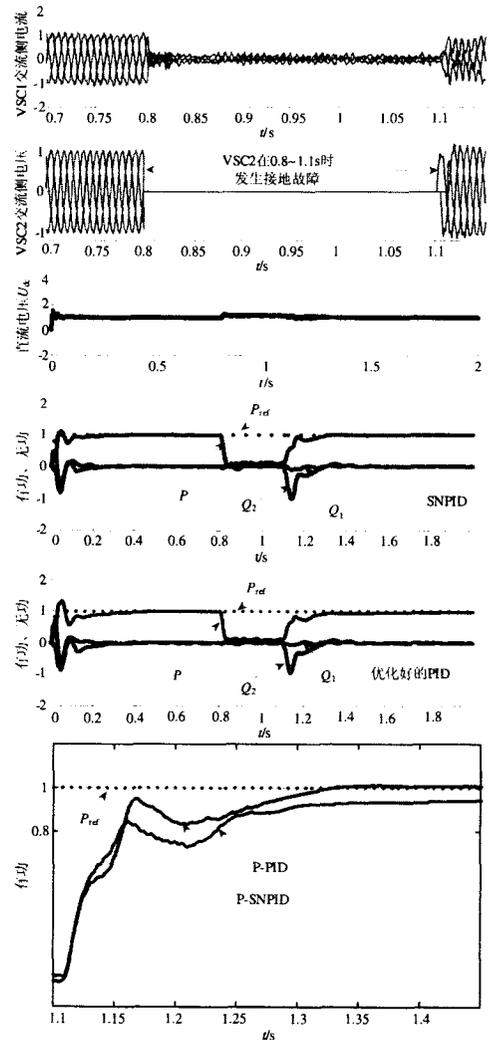


图8 接地故障实验仿真结果

Fig. 8 Simulation results of three-phase to ground fault test

定趋势,但稳态精度较低;而SNPID不需要额外的优化,并大约在1.7 s时就达到稳定,稳态精度也较高。可见,SNPID控制性能更佳。

从图8可见,接地故障时系统输出的有功功率接近为零,直流电压有小的提升,另外,由于采用电压前馈,在启动时需要电压进行抑制,故实验启动波动较明显。结合有功、无功功率对比图形可以看出,系统启动时SNPID控制超调小,响应快速;当故障恢复时,有功 P 在大约1.35 s时就重新达到稳定,而参数优化好的PID则在大约1.8 s时恢复稳定。可见,SNPID自适应调整能力较好,系统从故障中恢复快,控制性能明显比PID好。

5 结论

针对传统PID控制器自适应能力差的劣势,设计了一种参数在线可调的SNPID控制器,并将其应用于两端VSC-HVDC控制系统中。该控制系统采用直接电流控制策略和双闭环结构,外环使用所设计的SNPID控制器,内环采用PI控制和电压前馈补偿。仿真结果表明,该控制方案能够方便迅速地实现电流解耦跟踪控制,潮流反转快速,对系统故障适应快,稳态精度高;控制性能明显好于传统PID控制器。

参考文献

- [1] Ooi B T, WANG Xiao. Voltage Angle Lock Loop Control of the Boost Type PWM Converter for HVDC Application[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2): 229-235.
- [2] 陈海荣,徐政. 基于同步坐标变换的VSC-HVDC暂态模型及其控制器[J]. 电工技术学报,2007,22(2):121-126.
CHEN Hai-rong, XU Zheng. Transient Model and Controller Design for VSC-HVDC Based on Synchronous Reference Frame[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(2): 121-126.
- [3] Lars Weimers. HVDC Light—A New Technology for a Better Environment[J]. IEEE Power Engineering Review, 1998, 18 (8): 19-20.
- [4] 陈谦,唐国庆,胡铭. 采用dq0坐标的VSC_HVDC稳态模型与控制器设计[J].电力系统自动化,2004,28(16): 61-66.
- CHEN Qian, TANG Guo-qing, HU Ming. Steady-state Model and Controller Design of A VSC-HVDC Converter Based on dq0-axis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (16) : 61-66.
- [5] 赵成勇,李金丰,李广凯. 基于有功和无功独立调节的VSC-HVDC控制策略[J].电力系统自动化,2005,29(9) : 20-24.
ZHAO Cheng-yong, LI Jin-feng, LI Guang-kai. VSC-HVDC Control Strategy Based on Respective Adjustment of Active and Reactive Power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (9): 20-24.
- [6] Guibin Z, Xu Zheng. Steady-State Model for VSC Based HVDC and Its Controller Design[A]. in:Power Engineering Society Winter Meeting[C]. 2001.1085 - 1090.
- [7] 房大中,杨晓东,宋文南. 提高交直流电力系统稳定性的HVDC模糊逻辑控制器[J].电力系统自动化,2002, 26(6): 23-27.
FANG Da-zhong, YANG Xiao-dong, SONG Wen-nan. A Fuzzy Logic Controller for the HVDC System to Enhance Stability of AC/DC Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 23 (6): 23-27.
- [8] 许秀芳,李兴源,颜泉,等.改善系统暂态稳定性的HVDC模糊神经控制器[J].继电器,2004,32(11) : 16-19.
XU Xiu-fang, LI Xing-yuan, YAN Quan, et al. HVDC Fuzzy Neural Controller for Improving the Transient Stability of System[J]. Relay, 2004, 32 (11) : 16-19.
- [9] 刘金琨. 先进PID控制及MATLAB仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
LIU Jin-kun. Advanced PID Control and Its Matlab Simulation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

收稿日期:2008-09-18; 修回日期:2008-11-28

作者简介:

李远景(1983-),男,助理工程师,主要从事高压输电工作。E-mail:lxz_520@163.com

许继、MITA强强联合 抢占风电市场

2009年7月8日,许继集团与丹麦米塔(MITA)公司在北京亚洲风能大会上签订风机电控产品战略合作协议。通过此次合作,将进一步加强许继集团风机电控产品的技术及研发实力,提升公司在风机电控产品领域的市场竞争优势;同时许继集团将借助MITA公司在风机电控产品的技术优势,加快电控产品技术人才的培养,并带动公司其他电控产品的研发和市场推广。