

# 基于模糊神经网络的 VSC-HVDC 系统控制器的研究

杨伟, 章慧芸, 仲海波

(南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 对同步旋转坐标系下的 VSC-HVDC 系统的控制策略进行研究, 针对传统的 PI 控制在大扰动下难以精确控制的缺陷, 设计了一种新的控制方案及控制器。采用双环控制, 其中内环电流控制器采用 PI 控制, 而外环控制器采用模糊控制与人工神经网络相结合的控制策略, 并采用遗传算法优化模糊神经网络的连接权值和隶属度函数。整流侧有功功率跌落、三相短路等情况下的仿真结果表明, 此种控制方法在大扰动下的动态稳定性明显优于传统 PI 控制。

**关键词:** 模糊控制; 人工神经网络; 电压源换流器 (VSC); 遗传算法; 高压直流输电 (HVDC)

## Research on controller of VSC-HVDC system based on fuzzy neural network

YANG Wei, ZHANG Hui-yun, ZHONG Hai-bo

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The control strategy of VSC-HVDC system is studied. A new control scheme and a controller are designed to solve the deficiencies of conventional PI control that it is hard to control under a large disturbance precisely. This paper adopts double loop control, in which the inner loop controller uses PI control and the outer loop controller combines the fuzzy control and artificial neural network, and uses genetic algorithm to optimize fuzzy neural network connection weights and membership function. Simulation results of drop of rectifier active power and three-phase short circuit show that this control method's response speed and response accuracy are significantly better than that of the traditional PI control under a large disturbance.

**Key words:** fuzzy control; artificial neural network; voltage source converter (VSC); genetic algorithm; high voltage direct current transmission (HVDC)

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0115-06

## 0 引言

基于电压源换流器的高压直流输电 (VSC-HVDC) 采用先进的半导体自换相技术取代传统的晶闸管技术进行交直流之间的电能传输<sup>[1-5]</sup>, 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, 因此在分布式发电、远距离负荷供电等领域有广阔的应用前景<sup>[6]</sup>。

目前, VSC-HVDC 系统采用的控制技术主要是传统的 PI 控制方法<sup>[7-11]</sup>。PI 控制器具有结构简单、适应性强、以及很好的抗干扰能力等优点, 但是 VSC-HVDC 系统是一个多变量、强耦合、非线性的系统, 当系统发生短路故障、电压跌落等大扰动时, 传统 PI 控制器不能有效地调节被控变量, 将可能会引起系统持续的振荡。文献[12]将 SIMPLEX 算法用于优化 PI 参数, 文献[13]提出了三段式的模糊自适应 PI 控制策略, 将控制过程进一步细分为启动、启

动-稳态、稳态过程, 文献[14-15]将模糊算法应用在了传统 HVDC 系统控制器的设计中。

论文采用模糊控制和 BP 人工神经网络相结合的模糊神经网络方法应用与 VSC-HVDC 外环控制系统, 并采用遗传算法优化模糊神经网络的连接权值和隶属度函数, 通过仿真验证了该方法可以克服 PI 控制的缺陷。

## 1 VSC-HVDC 模糊神经网络控制器的设计

控制器采用双环控制, 其中内环电流控制器采用 PI 控制, 而外环控制器引入模糊神经网络和遗传算法进行设计。

### 1.1 整流侧外环控制器的设计

在整流侧外环控制器设计中, 设计了两个双输入单输出的模糊神经网络控制模型, 分别采用整流侧有功功率偏差  $\Delta P$  和有功功率偏差变化率  $\Delta P'$  以及无功功率偏差  $\Delta Q$  和无功功率偏差变化率  $\Delta Q'$  作

为模糊神经网络控制器的两个输入，分别将有功电流控制量  $\Delta i_d^*$  和无功电流控制量  $\Delta i_q^*$  作为模糊神经网络控制器的输出，当有功功率和无功功率发生变化时，有功电流控制量和无功电流控制量将发生相应的变化，进而使 VSC-HVDC 系统输出的有功功率保持稳定，整流侧的换流器发出的无功功率维持恒定。

1.1.1 确定输入输出端论域及隶属度

有功功率偏差  $\Delta P$  的论域为  $[-6, 6]$ ，有功功率偏差的变化率  $\Delta P'$  的论域也为  $[-6, 6]$ ，无功功率偏差  $\Delta Q$  的论域为  $[-6, 6]$ ，无功功率偏差变化率  $\Delta Q'$  的论域也为  $[-6, 6]$ ，有功电流控制量  $\Delta i_d^*$  的论域为  $[-6, 6]$ ，无功电流控制量  $\Delta i_q^*$  的论域为  $[-6, 6]$ ，将上述论域分割为 7 个部分，对应的七个语言变量为 NB、NM、NS、ZE、PS、PM、PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。

表 1  $\Delta i_d^*$  的模糊规则表

Table 1 Fuzzy table of  $\Delta i_d^*$

$\Delta P'$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

表 2  $\Delta i_q^*$  的模糊规则表

Table 2 Fuzzy table of  $\Delta i_q^*$

$\Delta Q'$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE
NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PS	PM	PB
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB

1.1.2 模糊神经网络模型的建立

首先设计有功功率控制器的模糊神经网络模型，采用五层网络的双输入单输出模糊神经网络模型，如图 1 所示。

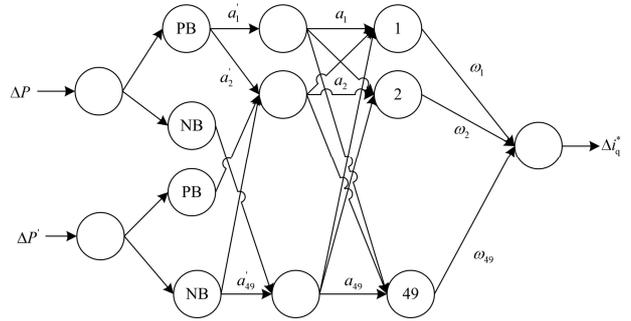


图 1 整流侧模糊神经网络控制框图

Fig. 1 Rectifier fuzzy neural network control block diagram

第一层为输入层，该层有两个输入，分别为有功功率偏差  $\Delta P$  和有功功率偏差变化率  $\Delta P'$ 。

$$X = (\Delta P, \Delta P')^T \quad (1)$$

第二层为模糊化层，用来计算第一层的输入在其相应的语言变量值的模糊论域中的隶属度函数。

$$\mu_i^j = e^{-\frac{(x_i - c_{ij})^2}{\delta_{ij}^2}} \quad (2)$$

式中： $i \in [1, 2]$ ； $j \in [1, 7]$ ； $c_{ij}$  和  $\delta_{ij}$  分别为高斯函数的中心和宽度。

第三层为模糊规则层，因为第一层的输入都有 7 个模糊划分，模糊规则层中，则有

$$a_i' = m_j(\Delta P)\mu_k(\Delta P'), i \in [1, 49]; j \in [1, 7]; k \in [1, 7] \quad (3)$$

第四层为归一化层。

$$a_i = a_i' / \sum_{i=1}^{49} a_i' \quad (4)$$

第五层为输出层，即清晰化层，采用重心法进行清晰化计算，将第四层输出的模糊量转化为清晰的精确值，即

$$\Delta i_{ld}^* = \sum_{j=1}^{49} \omega_j a_j \quad (5)$$

无功功率控制器的设计与有功功率控制器类似。

1.1.3 模糊神经网络的训练

论文采用遗传算法来优化模糊神经网络的归一化层到输出层连接权系数和模糊层的隶属度函数，再将遗传算法优化过的模糊神经网络控制的连接权值和模糊层的隶属函数赋给模糊神经网络，并采用 BP 算法对模糊神经网络控制器的参数进行进一步的训练，通过两种方法的综合使用，可以使模糊神经网络获得很好的全局性和鲁棒性。

在提取输入输出样本时, 论文将模糊控制规则表 1 和表 2 中的每条规则转化为神经网络中的一组输入输出样本, 总共可以获得 169 个样本, 然后, 采用模糊神经网络算法对这些样本进行学习训练, 最后训练好的网络便具有了模糊规则的特点。

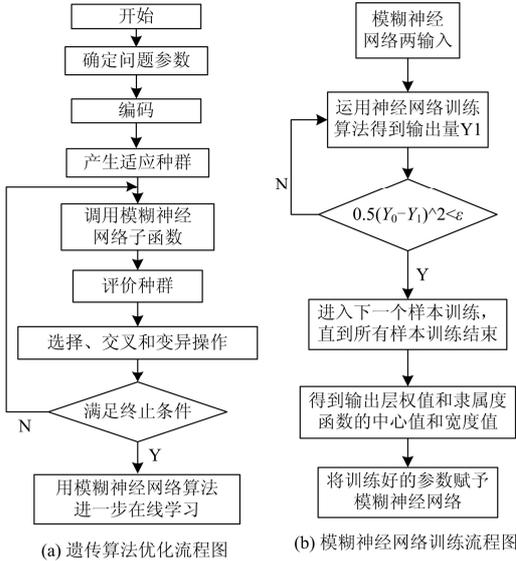


图 2 遗传算法优化的模糊神经网络训练流程图

Fig. 2 Flowchart of fuzzy neural network training optimized by genetic algorithm

将通过遗传算法优化得到网络参数带入模糊神经网络中进行训练, 确立最终的模糊神经网络模型, 神经网络训练步骤如下:

(1) 首先用遗传算法优化模糊神经网络连接权值和高斯函数的中心值和宽度值, 进而得到连接权值和高斯函数中心值和宽度值的近似值。

(2) 将上述得到的近似值赋予模糊神经网络, 采用 BP 学习算法对样本进行训练, 对上述参数进一步优化微调, 最终得到网络参数的精确值, 进而得到优化好的模糊神经网络模型。

然后优化好的模糊神经网络控制器带入到 VSC-HVDC 系统整流侧换流器的外环控制环节中, 系统整流侧的控制结构图如图 3 所示。由于在控制

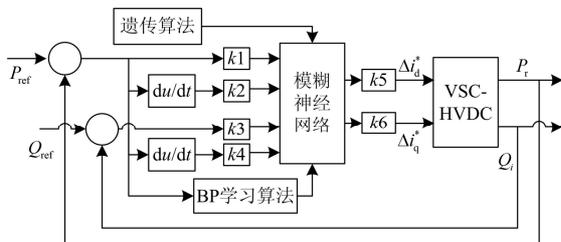


图 3 整流侧控制结构框图

Fig. 3 Diagram of rectifier control structure

器工作时, 神经网络的参数已经被优化为近似值, 并不需要耗费较长的时间寻找最优值, 因此, 模糊神经网络的应用并不会明显增加控制器的耗时。

### 1.2 逆变侧外环控制器的设计

设计逆变侧外环控制器时, 设计了两个两输入单输出的模糊神经网络控制模型, 分别采用逆变侧直流电压偏差  $\Delta U$  和逆变侧直流电压偏差变化率  $\Delta U'$  以及无功功率偏差  $\Delta Q$  和无功功率偏差变化率  $\Delta Q'$  作为模糊神经网络控制器的两个输入, 将有功电流控制量  $\Delta i_d^*$  和无功电流控制量  $\Delta i_q^*$  作为模糊神经网络控制器的输出, 当逆变侧直流电压和无功功率发生变化时, 有功电流控制量和无功电流控制量将发生相应的变化, 进而使 VSC-HVDC 系统直流侧的电压保持稳定, 逆变侧的换流器发出的无功功率维持恒定。

#### 1.2.1 模糊神经网络的建立

由于 VSC-HVDC 系统两端的换流器相互独立且相互对称, 逆变侧定直流电压控制器和无功功率控制器的模糊神经网络设计方法与整流侧有功功率控制器和无功功率控制器的设计方法相同。

#### 1.2.2 模糊神经网络训练

在本侧, 模糊神经网络的训练方法与整流侧模糊神经网络的训练方法相同, 然后得到的模糊神经网络控制器带入到 VSC-HVDC 系统逆变侧换流器外环控制环节中, 系统逆变侧的控制结构图如图 4 所示。

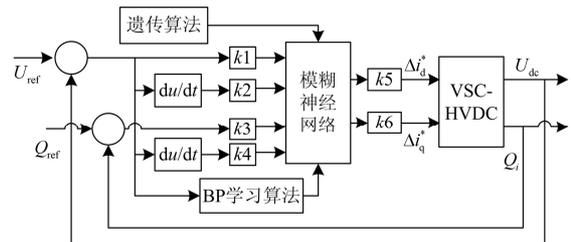


图 4 逆变侧控制结构框图

Fig. 4 Diagram of inverter control structure

### 1.3 内环电流控制器

内环电流控制器采用 PI 控制, 如图 5 所示, 其中电流参考值  $i_{vd}^*$ 、 $i_{vq}^*$  从外环控制器中获得。

## 2 仿真分析

论文用 Simulink 建立双端均为无穷大电源的 VSC-HVDC 系统模型, 如图 6, 分别采用 PI 控制和基于模糊神经网络控制的 VSC-HVDC 系统进行仿真, 比较其系统响应。系统参数如下。

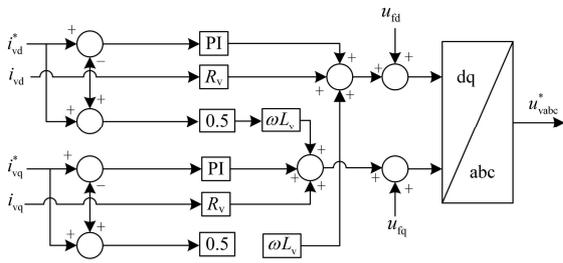


图 5 内环电流控制器框图

Fig. 5 Diagram of inner current loop control

整流侧采用有功功率控制和无功功率控制，逆变侧采用定直流电压控制和无功功率控制。整流侧、逆变侧的无穷大电源的额定线电压均为 300 kV，容量均为 2 000 MVA，频率为 50 Hz，两侧的换流电抗器参数为  $L_1=L_2=23.9$  mH， $R_1=R_2=0.075$   $\Omega$ ，直流线路的等效电阻和等效电容分别为为 2.84  $\Omega$  和 0.032 H，直流侧电容为  $C_1=C_2=70$   $\mu$ F，直流侧的额定电压为 200 kV。在 PI 控制中，三个外环 PI 控制器（直流电压控制器，有功功率控制器以及无功功率控制器）的参数分别为  $kp_1 = 0.01$ ， $ki_1 = 1.6$ ， $kp_2 = 3.0$ ， $ki_2 = 3.0$ ， $kp_3 = 3.0$ ， $ki_3 = 3.0$ 。

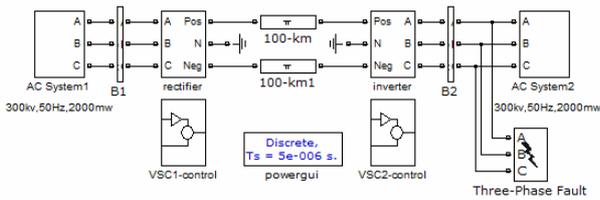


图 6 VSC-HVDC 系统

Fig. 6 VSC-HVDC system

### 2.1 整流侧有功功率跌落

整流侧有功功率 1.5 s 时，由 1 pu 突然跌落到 0.7 pu。整流侧 a 相电流，直流侧电压如图 7、图 8 所示。

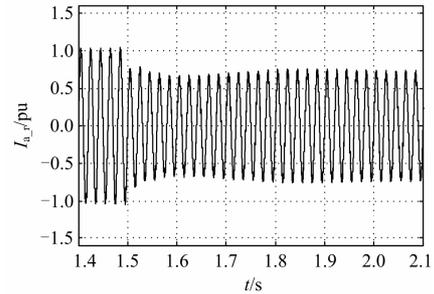
整流侧有功功率跌落 0.3 pu 后，前者系统的整流侧的三相交流电流、直流电压经过 0.3 s 的波动后进入稳定状态，而后者仅需 0.15 s 便进入稳定状态；前者的直流电压在波动期间跌落幅值达 0.08 pu，且 0.2 s 后出现超调，而后的直流电压跌落幅值仅为 0.05 pu。

### 2.2 逆变侧三相接地短路

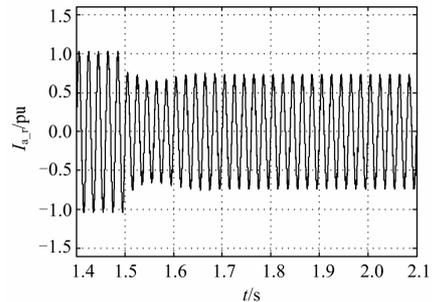
逆变侧 2.2 s 时发生三相接地短路，2.25 s 切除短路故障，短路故障持续时间为 50 ms。整流侧 a 相电流，直流侧电压如图 9、图 10 所示。

逆变侧发生三相接地短路时，前者系统的三相交流电流经过 0.2 s 进入稳定，而后者系统的三相交流电流经过 0.1s 便进入稳定；在故障期间，前者的

直流电压波动幅值为 0.25 pu，而后的直流电压波动幅值为 0.15 pu，且后的电压纹波比前的电压纹波要小；故障切除后进入稳态的时间后者比前者要短。



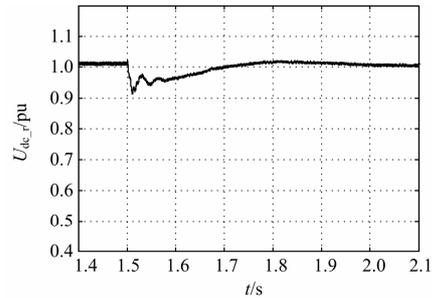
(a) 采用PI控制



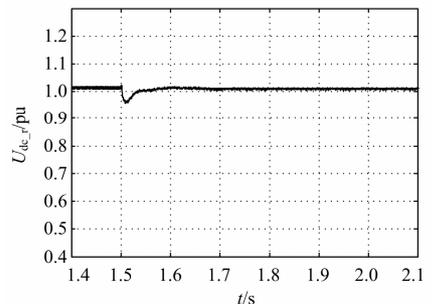
(b) 采用改进模糊神经网络控制

图 7 整流侧 a 相电流

Fig. 7 Rectifier current of phase a



(a) 采用PI控制



(b) 采用改进模糊神经网络控制

图 8 整流侧直流电压

Fig. 8 DC voltage of rectifier

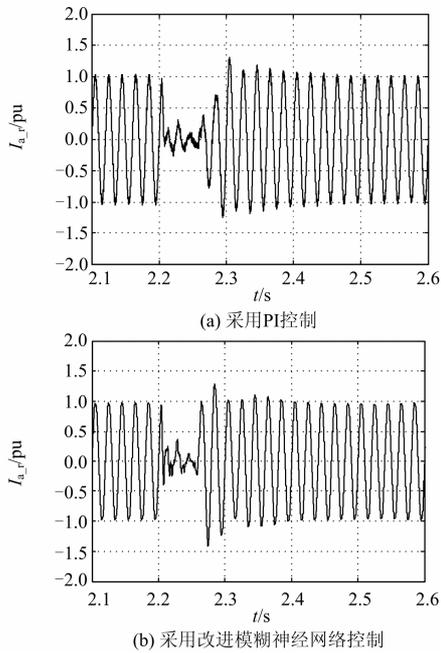


图9 整流侧 a 相电流

Fig. 9 Rectifier current of phase a

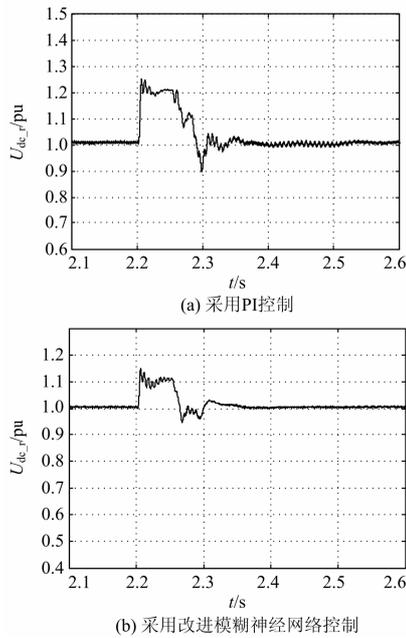


图10 整流侧直流电压

Fig. 10 DC voltage of rectifier

### 2.3 逆变侧直流电压跌落和阶跃

逆变侧的直流电压参考值在 1.5 s 时由 1.0 pu 迅速跌落到 0.9 pu, 在 2.0 s 时由 0.9 pu 迅速上升到 1.0 pu, 整个电压跌落持续时间为 50 ms, 在直流电压跌落和电压上升期间, 整流侧的 a 相电流, 直流侧电压如图 11、图 12 所示。

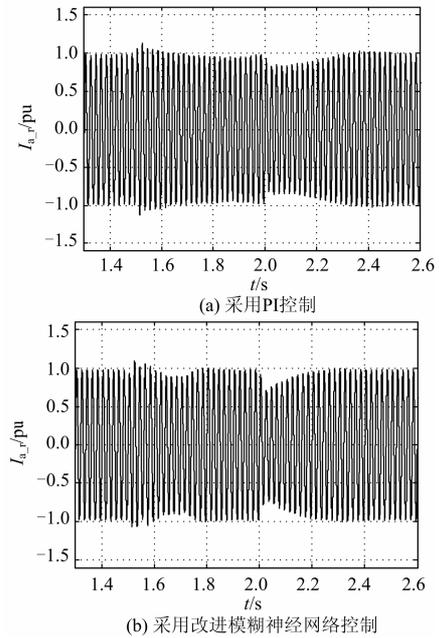


图11 整流侧 a 相电流

Fig. 11 Rectifier current of phase a

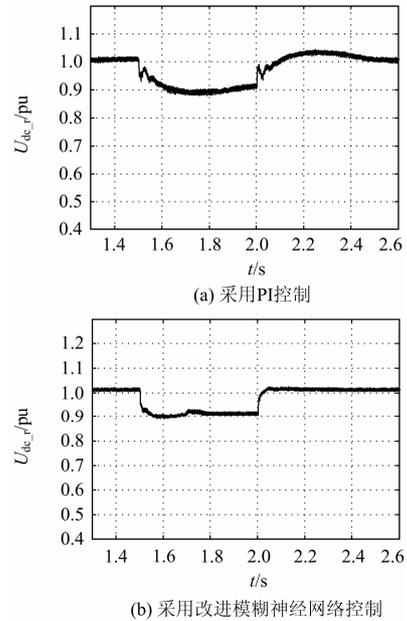


图12 整流侧直流电压

Fig. 12 DC voltage of rectifier

逆变侧直流电压跌落到 0.9 pu 后, 后者系统的三相交流电流和直流电压较前者系统较快达到稳定; 在逆变侧直流电压阶跃到 1.0 pu 后, 前者系统两侧的三相交流电流经过 0.4 s 进入稳定, 直流电压经过 0.5 s 才进入稳定, 而后者系统两侧的三相交流电流经过 0.2 s 便进入稳定, 直流电压经过 0.04 s 便进入稳定。

### 3 结论

论文以 VSC-HVDC 系统控制方式为研究对象, 针对其非线性、强耦合的特点, 将模糊神经网络和遗传算法用于 VSC-HVDC 控制器。仿真结果表明, 这种控制器在大扰动下的响应速度和响应准确率明显优于传统 PI 控制器。

### 参考文献

- [1] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.  
XU Zheng, CHEN Hai-rong. Review an applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [2] 张静, 徐政, 陈海荣. VSC-HVDC 系统启动控制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 159-165.  
ZHANG Jing, XU Zheng, CHEN Hai-rong. Startup procedures for the VSC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 159-165.
- [3] 何大清, 蔡旭. 基于平坦系统的 VSC-HVDC 控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(12): 233-239.  
HE Da-qing, CAI Xu. Flatness-based control of VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 233-239.
- [4] 梁海峰, 李庚银, 王松, 等. VSC-HVDC 系统控制体系框架[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 141-147.  
LIANG Hai-feng, LI Geng-yin, WANG Song, et al. VSC-HVDC control system framework[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 141-147.
- [5] 杨用春, 赵成勇. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 控制性能实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(21): 31-35.  
YANG Yong-chun, ZHAO Cheng-yong. Experimental study on control performance of VSC-HVDC connected to passive network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(21): 31-35.
- [6] 李远景, 李志雄, 汤双清. 基于单神经元的 VSC-HVDC 控制器设计与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 10-14.  
LI Yuan-jing, LI Zhi-xiong, TANG Shuang-qing. Controller design for VSC-HVDC system based on single neuron[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 10-14.
- [7] 黄崇鑫, 张凯峰. 含 LC 低通滤波器的 VSC-HVDC 系统的新型控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 12-17.  
HUANG Chong-xin, ZHANG Kai-feng. Control strategy for VSC-HVDC system with LC low-pass filter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 12-17.
- [8] 胡兆庆. 基于 VSC 的 HVDC 控制及其动态特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [9] 周国梁. 基于电压源换流器的高压直流输电系统控制策略研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- [10] 张静, 徐政. VSC-HVDC 控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- [11] 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): 20-30.  
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): 20-30.
- [12] 郭春义, 赵成勇, 李广凯, 等. 基于 Simplex 算法的 VSC-HVDC 控制参数优化[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9): 13-17.  
GUO Chun-yi, ZHAO Cheng-yong, LI Guang-kai, et al. Control parameter optimization based on simplex algorithm for VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9): 13-17.
- [13] 郑连清, 池俊锋, 陆治国. 基于三级模糊自适应 PI 控制的 VSC-HVDC 控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 117-127.  
ZHENG Lian-qing, CHI Jun-feng, LU Zhi-guo. Three-step fuzzy adaptive PI controller for VSC-HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 117-127.
- [14] 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, 26(6): 23-27.
- [15] 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.

收稿日期: 2013-07-22; 修回日期: 2013-10-28

作者简介:

杨伟 (1965-), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制;

章慧芸 (1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: zhycreon@gmail.com

仲海波 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。