

基于 Matlab 的高压直流输电系统逆变器的 模糊神经网络控制研究

孔慧超¹, 都洪基², 何洪波³, 田辉⁴

(1. 广东电网公司东莞供电局, 广东 东莞 523008; 2. 南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094;

3. 东莞市质量计量监督检测所, 广东 东莞 523120; 4. 南京市供电公司, 江苏 南京 210037)

摘要: 在研究模糊逻辑控制技术、神经网络技术和高压直流输电系统的基础上, 针对 HVDC 系统的快速、高度可控性, 从原理上说明, 对逆变器采用模糊神经网络控制也能有效地提高 AC/DC 系统的动态特性和恒定性。提取直流线路逆变侧电压误差及其变化率作为模糊控制器的输入, 输出作为神经网络的输入, 控制直流电压。设计非故障和故障模糊神经网络控制器, 用 Matlab 分别对一典型 12 脉冲桥 HVDC 输电系统在传统控制和模糊逻辑控制下分别进行仿真, 结果表明, 与传统的控制方法相比, 当直流线路或者单相交流线路发生接地故障时, 模糊神经网络控制能改善系统直流电流和直流电压的恒定性, 而且提高了交直流系统的暂态稳定性。

关键词: 模糊逻辑控制; 人工神经网络控制; 高压直流输电系统; 改进 BP 算法; Matlab 软件; 逆变控制器

中图分类号: TM721.1; TP273+.4 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)23-0025-06

0 引言

改善系统暂态稳定性的 HVDC 换流控制器一般都偏重于整流控制器的研究与设计, 而研究与设计先进的逆变侧控制器也具有同样重要的意义。文献 [1] 在换流站两侧传统的 PI 型电流调节整流器、电压调节逆变器基础上分别引入模糊逻辑辅助控制变量, 并通过三机系统仿真证明两侧的控制都发挥积极作用。

模糊系统具有处理复杂和不确定性问题的特性, 神经网络具有自学习能力的优点, 本文同样引入这两种控制技术, 设计逆变侧的模糊神经网络 HVDC 控制器, 使逆变侧也具有较好的暂态稳定性。

1 模糊神经网络逆变侧定电压控制器

该逆变控制器选取逆变侧直流电压误差 V_{di} 及其变化率 \dot{V}_{di} 作为模糊逻辑控制器的输入, 其输出结果作为神经网络控制器的输入, 结合具有阻尼项的权值调整算法以及变步长 BP 算法训练神经网络, 神经网络的输出用来修正逆变器的触发延迟角 α_i , 达到控制的目的, $\alpha_i = \alpha_{i0} - (\alpha_{i0} + \mu)$, 其中, α_{i0} 为熄弧超前角, μ 为叠弧角, 叠弧角 μ 决定于 I_d 和换相电压。模糊神经网络控制器分为三部分: 模糊逻辑控制部分、神经网络控制部分以及故障非故障判断部分, 如图 1 所示。

1.1 模糊逻辑控制部分

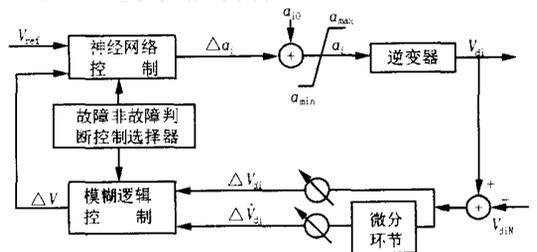


图 1 基于模糊神经网络的逆变控制器

Fig 1 HVDC fuzzy neural inverter controller

本文参考文献 [2~4] 并与直流系统的实际运行、控制特性相结合, 设计了相应的模糊控制方案。模糊逻辑控制包括 4 部分: 模糊化、模糊推理、去模糊和知识库, 如图 2 所示。

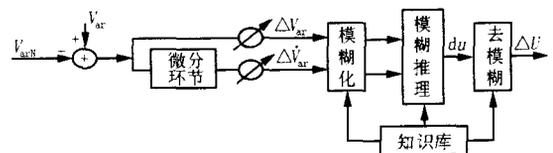


图 2 模糊逻辑整流控制器的结构图

Fig 2 Structure of fuzzy logic inverter controller

以逆变侧直流电压误差及其变化率作为输入量, 具体表达式为:

$$\begin{cases} V_{di}(nT) = V_{di}(nT) - V_{din} \\ \dot{V}_{di}(nT) = \frac{1}{T} [V_{di}(nT) - V_{di}(nT - T)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为采样周期, n 为正整数; $V_{di}(nT)$ 为逆变侧直流电压, V_{din} 为逆变侧直流电压整定值。

首先经过模糊化过程,将 V_{di} 和 \dot{V}_{di} 转化为模糊论域上的值。偏差 V_{di} 和偏差率 \dot{V}_{di} 都采用了 2 个输入语言变量对输入量进行模糊化,即输入为正 ($V_p, V_{\dot{p}}$),输入为负 ($V_n, V_{\dot{n}}$);模糊输出控制量 u 采用 3 个输出语言变量,即输出正 (O_{vp}),负 (O_{vn}) 和零 (O_{vz}),即可达到控制要求。 V_{di} 、 \dot{V}_{di} 和 u 的模糊隶属度函数如图 3 所示,并且它们的隶属函数分别为式 (3)、(4) 和 (5)。

其中, L_i 表示 V_{di} 和 \dot{V}_{di} 分别与 k_{1i} 和 k_{2i} 的乘积的最大值。

$$\begin{cases} -L_i & k_{1i} V_{di} & L_i \\ -L_i & k_{2i} \dot{V}_{di} & L_i \end{cases} \quad k_{1i}, k_{2i} > 0 \quad (2)$$

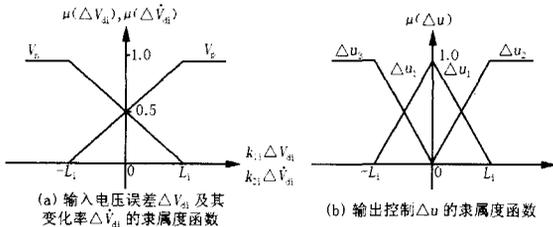


图 3 逆变模糊控制器输入输出的隶属度函数

Fig 3 Fuzzy membership functions inputs and outputs

$$\begin{aligned} \mu_p(V_{di}) &= \frac{k_{1i} V_{di} + L_i}{2L} \quad -L_i \leq k_{1i} V_{di} \leq L_i \\ \mu_n(V_{di}) &= \frac{-k_{1i} V_{di} + L_i}{2L} \quad -L_i \leq k_{1i} V_{di} \leq L_i \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mu_{\dot{p}}(\dot{V}_{di}) &= \frac{k_{2i} \dot{V}_{di} + L_i}{2L_i} \quad -L_i \leq k_{2i} \dot{V}_{di} \leq L_i \\ \mu_{\dot{n}}(\dot{V}_{di}) &= \frac{-k_{2i} \dot{V}_{di} + L_i}{2L_i} \quad -L_i \leq k_{2i} \dot{V}_{di} \leq L_i \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} k_{3i} \mu_{op}(u) &= \frac{u}{L_i} \quad 0 \leq u \leq L_i & k_{3i} \mu_{on}(u) &= -\frac{u}{L_i} \quad -L_i \leq u \leq 0 \\ k_{3i} \mu_{oz}(u) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

k_{3i} 是输出控制 v 的比例因子。

根据专家、运行人员的经验以及文献 [3, 5] 的研究结果,采用以下模糊控制规则。

规则 1:如果 V_{di} 为 V_p and \dot{V}_{di} 为 $V_{\dot{p}}$, 则 u 为 O_{vp} ; 规则 2:如果 V_{di} 为 V_n and \dot{V}_{di} 为 $V_{\dot{p}}$, 则 u 为 O_{vz} ; 规则 3:如果 V_{di} 为 V_p and \dot{V}_{di} 为 $V_{\dot{n}}$, 则 u 为 O_{vz} ; 规则 4:如果 V_{di} 为 V_n and \dot{V}_{di} 为 $V_{\dot{n}}$, 则 u 为 O_{vn} 。

模糊推理使模糊规则库中的规则与输出状态语言术语相匹配,并且完成推理。对于给定的 V_{di} 和 \dot{V}_{di} ,从规则 1 到规则 4 分别得到 a_{1i} 到 a_{4i} 的触发强度:

$$a_{ji} = t[\mu_p(V_{di}), \mu_{\dot{p}}(\dot{V}_{di})] \quad j=1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

其中, $t[]$ 是模糊 t -范数运算。规则 2 和规则 3 有相同的输出模糊集,采用 Zadeh“或”。

中心平均解模糊器是最好的解模糊器,因此去模糊的输出为:

$$V = \frac{a_{1i} u_2 + a_{4i} u_3}{a_{0i} + a_{1i} + a_{4i}} \quad (7)$$

分析图 3 及式 (3~7),下面分两种情况讨论触发强度的计算公式。

a) 当 $k_{2i} |\dot{V}_{di}| \leq k_{1i} |V_{di}| \leq L_i$ 时

$$V = \frac{k_{3i} L_i (k_{2i} \dot{V}_{di} + k_{1i} V_{di})}{3L_i - k_{1i} |V_{di}|} \quad (8)$$

b) 当 $k_{1i} |V_{di}| \leq k_{2i} |\dot{V}_{di}| \leq L_i$ 时

$$V = \frac{k_{3i} L_i (k_{2i} \dot{V}_{di} + k_{1i} V_{di})}{3L_i - k_{2i} |\dot{V}_{di}|} \quad (9)$$

由此可见, v 是 V_{di} 和 \dot{V}_{di} 的非线性函数。

1.2 神经网络控制部分

参考文献 [6],本文设计了神经网络控制部分。神经网络控制器采用 BP神经网络,分为 3 层:输入层、隐含层和输出层。本文设计神经网络控制器时分为电压非故障和故障神经网络控制器,控制器的启动判断条件是逆变侧直流线路上的电压误差以及变化率。经过仿真实验表明,三层的神经网络能达到比较好的效果。电压非故障和故障控制器结构一致,训练的时候使用对应不同的学习样本。输入层由 10 个神经元组成 n_{21} 至 n_{30} ;隐含层由 20 个神经元组成: n_{11} 至 n_{20} ;输出层包含一个神经元 n_{31} ,其结构图如图 4 所示。

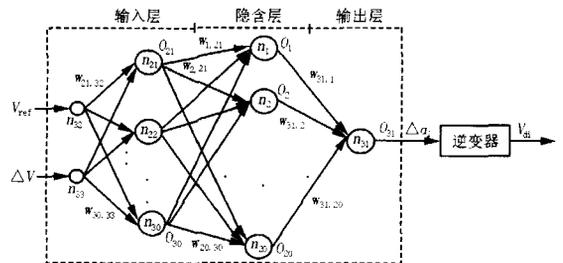


图 4 神经网络逆变控制器结构图

Fig 4 Structure of ANN inverter controller

输入层和隐含层的激励函数都采用对称 S 型传

递函数,输出层采用线性传递函数。有关参数定义如下: w_{ij} 为神经元之间的连接权; n_i 为神经元的加权输入($i=1, 2, \dots, 31$)。 $n_i = \sum w_{ij}x_j$,其中 x_j 为上一层神经元的输出 O_j ,即为本层加权输入, $x_j = O_{j0}$ 为神经网络控制器的输出, $x_{31} = O_{310}$ 。

由文献[6]叙述的BP学习算法并且权值调整计算公式推导过程,结合直流输电系统的实际情况进行设计^[2]。输出样本为直流电压的整定值 V_{ref} 对应的 i 值。

逆变侧直流电压与触发延迟角 α 的关系为:

$$V_{di}(i) = \frac{- (R_{cr} + R_L) V_{dno} \cos(i + \mu) - R_{ci} V_{dno} \cos i}{R_{cr} + R_L - R_{ci}} \quad (10)$$

式中: $i = \alpha + \beta$, $\alpha = 90^\circ$ 为初始触发延迟角; β 为逆变器的触发延迟角;其余参数意义见文献[2]。

把实际的神经网络控制器的输出变量和输出样本代入下式求网络的总目标函数 J ,即:

$$J(t) = \sum_p E_p(t) = 0.5k \sum_p [V_{ref} - V_{dip}(t)]^2 \quad (11)$$

下面根据反向传播算法推导实际高压直流输电系统逆变侧的权值修正公式。

a) 隐含层和输出层之间的权值修正公式。 n_{31} 为输出节点,单个学习误差性能指标的计算如式(12), $i=k=31$,由此:

$$\frac{\partial E_p(t)}{\partial w_{ij}(t)} = \frac{\partial E_p(t)}{\partial O_{31}} \cdot \frac{\partial O_{31}}{\partial w_{ij}(t)} \quad (i=31; j=1, 2, \dots, 20) \quad (12)$$

由式(6)和式(7)得:

$$\frac{\partial E(t)}{\partial w_{ij}(t)} = - \frac{(R_{cr} + R_L) V_{dno} \sin i}{R_{cr} + R_L - R_{ci}} \cdot k(V_{ref} - V_{dip}) \cdot f(n_{31}) x_{ip} \quad (13)$$

采用改进的BP算法可改进梯度下降法的不足。为使学习速率足够大,又不易产生振荡,在文献[5]中权值调整算法式中加入阻尼项,并结合变步长算法,经过推导的改进BP算法的权调节量的表达式为:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) - \frac{\partial J(t)}{t \partial w_{ij}(t)} + [w_{ij}(t) - w_{ij}(t-1)] \quad (14)$$

即:

$$w_{ij}(t+1) = - \frac{\partial J(t)}{t \partial w_{ij}(t)} + w_{ij}(t) \quad (15)$$

设 $l = - \frac{(R_{cr} + R_L) V_{dno} \sin i}{R_{cr} + R_L - R_{ci}}$,则:

$$w_{ij}(t+1) = - \frac{l}{t} \cdot \sum_p k(V_{ref} - V_{dip}) f(n_{31}) \cdot x_{ip} + w_{ij}(t) \quad (16)$$

实际系统中,因为 $\frac{1}{2} < i < \pi$, $\sin i > 0$, $V_{dno} > 0$,

所以 $l < 0$,即在式(16)中 k 不影响权值的修正方向,它只影响权值的修正幅值,而权值的修正幅值可以通过学习率加以调整。其中, $w_{ij}(t)$ 是经 t 次调整后的权值; l 为学习算子; $\frac{1}{t}$ 是阻尼系数。

b) 由反向传播计算算法知,当 n_i 不为输出节点时,即 $i=1, \dots, 30$,权值的调整应该采用下式。

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}} = f(x_{ip}) I_p \sum_{m_1} \frac{\partial E_p}{\partial x_{m_1 p}} w_{m_1 i} = f(x_{ip}) I_p \sum_{m_1} m_{1p} w_{m_1 i} = \frac{\partial E_p(t)}{\partial O_j} \cdot \frac{\partial O_j}{\partial w_{ij}(t)} \quad i=1, \dots, 20, j=21, \dots, 30 \text{ 或 } i=21, \dots, 30, j=32, 33 \quad (17)$$

首先计算输入层至隐含层之间的权值修正公式。同理可得输入层和隐含层之间的学习误差性能指标对权值的偏微分如下式:

$$\frac{\partial E_p(t)}{\partial w_{ij}(t)} = l \cdot k(V_{ref} - V_{dip}) f(n_{31}) x_{ip} f(n_{ip}) w_{31, ip} \quad (18)$$

所以输入层和隐含层之间的权值调整表达式如下:

$$w_{ij}(t+1) = - \frac{l}{t} \cdot \sum_p k(V_{ref} - V_{dip}) f(n_{31}) \cdot x_{ip} f(n_{ip}) w_{31, ip} + w_{ij}(t) \quad (19)$$

其中: $i=1, 2, \dots, 20$; $j=21, 22, \dots, 30$ 。

下面同理根据高压直流输电系统实际情况推导输入至输入层之间的权值修正公式。

$$\frac{\partial E_p}{\partial w_{ij}} = f(n_{ip}) x_{ip} \sum_{m_1} [l \cdot k(V_{ref} - V_{dip}) f(n_{m_1}) f(n_{31}) w_{31, m_1} w_{m_1 i}] \quad (20)$$

式中: m_1 是节点 i 后边一层的第 m_1 个节点。得输入至输入层之间的权值调整表达式:

$$w_{ij}(t+1) = - \frac{l}{t} \cdot \sum_p [f(n_{ip}) x_{ip} \sum_{m_1} k(V_{ref} - V_{dip}) f(n_{m_1}) f(n_{31}) w_{31, m_1} w_{m_1 i}] + w_{ij}(t) \quad (21)$$

其中: $i=21, 22, \dots, 30$; $j=32, 33$ 。

综合a)和b)推导的公式下面设计神经网络HVDC逆变控制器控制具体的步骤为:

1) 输入 V_{ref} 和 V ,赋予 w_{ij} , \dots , 初值;

- 2) 计算输入层和隐含层的加权输入 n_{21} 至 n_{30} , n_1 至 n_{20} 与输出 O_{21} 至 O_{30} , O_1 至 O_{20} ;
- 3) 计算输出层的加权输入 n_{31} 与输出 O_{31} , 计算直流电压值 V_{d1} 以及误差函数 E ;
- 4) 按照式 (19)、式 (21)和式 (15)修正输入至输入层、输入层至隐含层之间的权值;
- 5) 重新计算隐含层的输出 O_1 和 O_{20} , 计算输出层的加权输入 n_{31} 与输出 O_{31} ;
- 6) 按照式 (16)和式 (15)修正隐含层与输出层之间的权值;
- 7) 判断是否满足条件, 若满足 $E < \epsilon$, 转至 8), 否则转至 2);
- 8) 计算控制目标 i_c , 将输出结果 i_c 输入到直流系统中。

1.3 故障非故障判断

根据高压直流系统的实际运行情况, 系统分为非故障运行以及故障运行, 故障开始后直流电压和电流误差的绝对值突然增大, 误差变化率值绝对值比非故障运行时要大得多。根据这一特点, 本文设计神经网络控制器时分为电压非故障和故障控制器, 控制器的启动判断条件是逆变侧直流线路上的电压误差以及变化率的绝对值, 非故障情况下神经网络 4 运行, 交流单相接地故障时使整流器运行于定熄弧角状态, 即 $\alpha = 5^\circ$; 提高传输线路的直流电流值; 而直流线路接地故障时, 神经网络 3 运行。这样可以用较少的神经元和隐含层达到所需精度要求。流程如图 5 所示。

2 仿真分析

本文采用的典型 12 脉冲桥 HVDC 输电系统如图 6 所示。整流器和逆变器均采用 2 个 6 脉冲桥串联而成的 12 脉冲桥结构, 换流器间连接 0.5 H 平滑电抗器和 500 kV 直流架空线路 (长 300 km)。整流

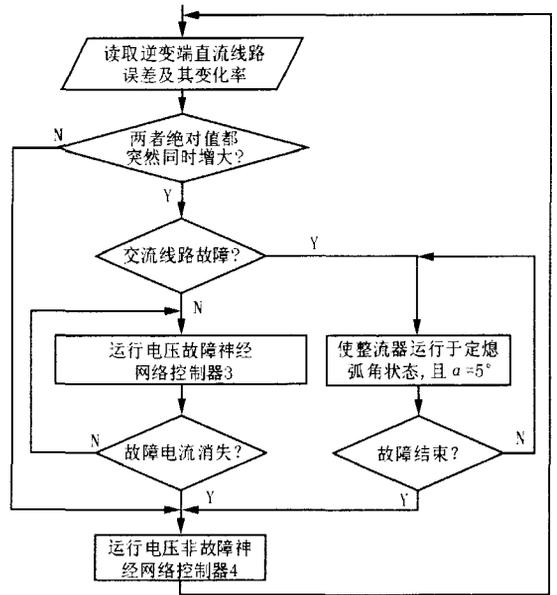


图 5 逆变侧神经网络故障非故障控制器判断流程图
Fig 5 Flow chart of neural controller between stabilization and unstabilization

侧交流源是短路容量为 5 000 MVA 的 500 kV 电力网络 (频率为 60 Hz); 逆变侧则连接 10 000 MVA 的 345 kV 交流网络 (频率为 50 Hz)。换流器所需的无功功率由一组滤波器 (电容器组, 11 次, 13 次及高通滤波器) 提供。“DC Fault”和“AC Fault”分别表示整流侧直流线路和交流线路单相对地故障。两端变压器容量都为 1 200 MVA。

整流侧直流线路对地故障时间设置为 [0.50 0.51] s, 交流母线单相对地故障时间故障设置为 [0.50 0.52] s, 整个仿真时间为 1 s。图 7 给出了在两端都是传统 P 控制方式 (图中“1”), 逆变侧是模糊神经网络控制而整流侧是 PI 控制方式下的直流系统的带有直流线路故障的动态响应 (图中“3”); 而图 8 给出了带有交流线路单相对地故障的动态响应 (图中“1”和“3J”)。

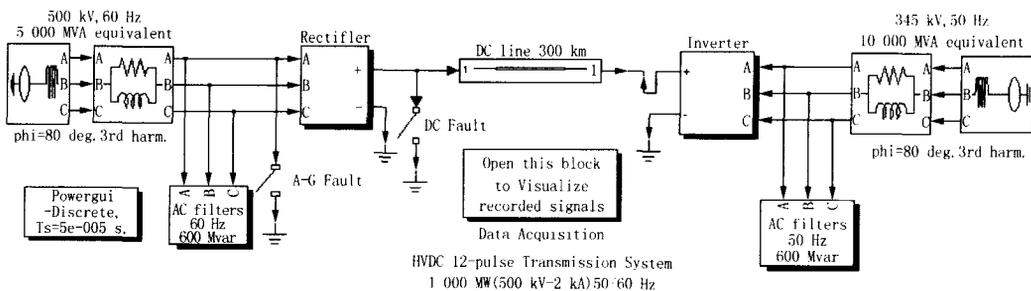


图 6 典型 12 脉冲桥 HVDC 输电系统 PSB 仿真原理图

Fig 6 HVDC 12-pulse transmission system based on MATLAB/PSB

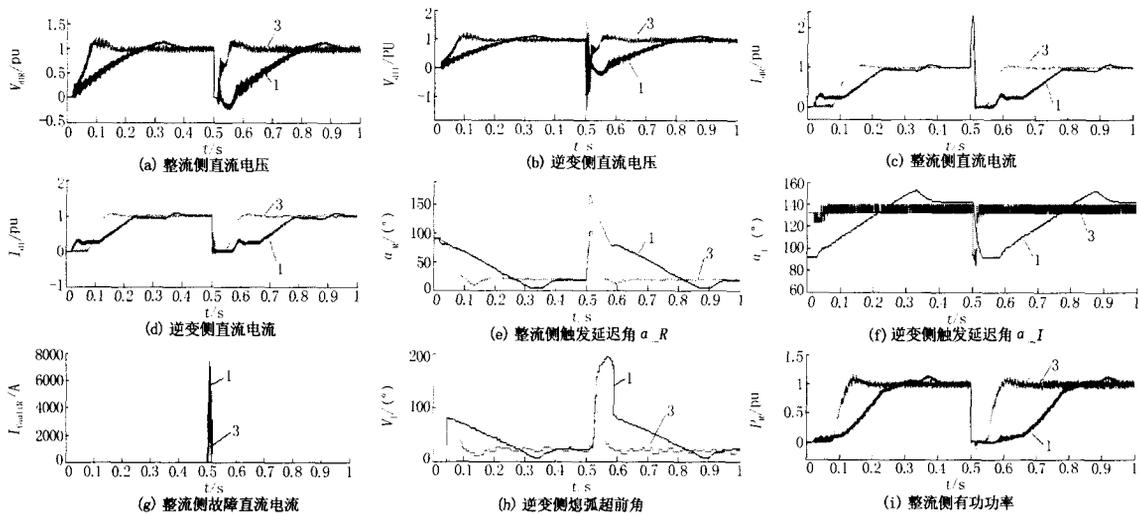


图 7 带直线路路接地故障时的直流系统仿真结果

Fig 7 Simulation result for a DC fault(during [0.50 0.51]s)

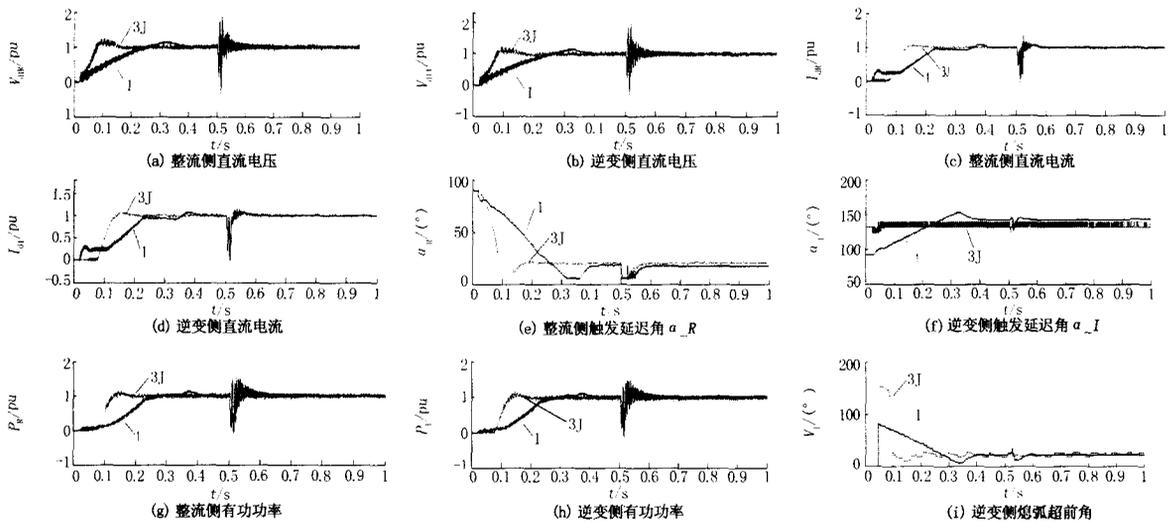


图 8 带交流线路单相接地故障时的直流系统仿真结果

Fig 8 Simulation result for a A-G fault(during [0.50 0.52]s)

逆变侧采用模糊神经网络控制器时,由图 7和图 8可见,直流线路上电压和电流达到稳态所需的响应时间比两侧都采用 P控制要快,约为 P控制的 1/3,这是由于在电流和电压都达到 1(pu)后,在模糊神经控制器的制约下,控制角不做大程度的变化,而 P控制的角度在达到谷底才能逐渐上升至稳定状态。电流响应时间较 P控制要快,但较整流侧采用模糊神经要慢一点,这样直流电流在初始状态没有超调量,很平稳地达到额定值,直流电压有很小的振荡时间和超调量等优点。

故障设置在整流侧,不管整流侧直流线路还是交流母线发生接地故障,模糊神经控制器都比 PI调节器具有更高响应准确率和更快的响应速度。直流

线路接地故障时,整流器运行于逆变器状态,线路上的有功功率能迅速减少,而故障恢复后,直流线路能传输更多的有功功率,弥补了系统功率缺额,故障电流要比 P控制时小。交流母线单相接地后,也确实比传统控制方式下的振荡振幅要小。即在逆变侧采用模糊神经控制代替传统控制方式也能有效地改善交直流系统的电压、电流和有功功率,加快故障线路的恢复。这说明逆变侧定电压模糊神经控制也能发挥很好的作用。

3 结论

本文设计的基于模糊神经网络的逆变控制器根据模糊推理规则,三层 BP网络,结合实际的高压直

流系统,利用改进的BP算法,并且设计故障非故障判断器,可以有效地解决系统动态问题,提高直流电流和电压的恒定性,改善了交直流系统的暂态稳定性。

参考文献:

- [1] 陈汉雄,刘天琪. HVDC系统中换流站的辅助模糊控制[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 5-8
CHEN Han-xiong, L U Tian-qi An Auxiliary Fuzzy Logic Control for Converter Substation in HVDC System [J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 5-8
- [2] 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, 1998
L I Xing-yuan Operation and Control of HVDC Transmission System [M]. Beijing: Science Press, 1998
- [3] 庄侃沁,李兴源. 高压直流输电系统在线模糊神经网络控制器的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(24): 3-6
ZHUANG Kan-qin, L I Xing-yuan Study of an On-line HVDC Controller Based on Fuzzy Logic and ANN [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 3-6
- [4] 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, L I Xing-yuan, YAN Quan, et al HVDC Fuzzy Neural Controller for Improving the Transient Stability of System [J]. Relay, 2004, 32(11): 16-19
- [5] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003
WANG Li-xin Tutorial of Fuzzy System and Fuzzy Control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003
- [6] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 北京:电子工业出版社, 2003
XU Li-na Neural-network Control [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003
- [7] Dash P K, Liew A C, Poutray A. High-performance Controllers for HVDC Transmission Links [J]. IEE Proceedings—Gener, Transm and Distrib, 1994, 141(5): 422-428

收稿日期: 2005-04-12; 修回日期: 2005-07-04

作者简介:

孔慧超(1980-),女,硕士研究生,研究方向为高压直流输电技术和继电保护;E-mail: khc_2004@163.com

都洪基(1960-),男,硕士,高级工程师,研究方向为继电保护和高电压技术。

Study of HVDC fuzzy neural inverter controller based on Matlab

KONG Hui-chao¹, DU Hong-ji², HE Hong-bo³, TAN Hui⁴

(1. Dongguan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company, Dongguan 23008, China; 2 Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 3 Dongguan Insitute of Metrology and Quality Supervision Testing, Dongguan 523120, China; 4 Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210037, China)

Abstract: Based on the study of fuzzy logic control technology and artificial neural-network (NN) control technology and HVDC system, the quick controlling of inverter can advance the dynamic behavior of AC/DC and steadiness of DC current and voltage theoretically. The inverter selects the voltage of the DC line nearby the inverter and rate ratio as input signals of fuzzy control, the output of fuzzy part as one of the input signals of neural-network. This paper designs fuzzy neural rectifier stabilization-controller and unstabilization-controller. The simulation for a HVDC 12-pulse transmission system is carried out by traditional control method and fuzzy neural network control method respectively by Matlab. The simulation results show that compared with traditional control method when it happens grounding fault on the DC line or single-phase AC bus, the fuzzy neural-network control can improve the steadiness of DC current and voltage in inverter substation and the transient stability of AC-DC system is enhanced as well.

Key words: fuzzy logic control; artificial neural-network control; HVDC; improved BP algorithm; Matlab software; inverter control