

一种柔性直流输电系统 PID-ANFIS 优化控制方法

杨天, 霍琳琳

(山东省电力公司威海供电公司, 山东 威海 264200)

摘要: 针对柔性直流输电系统(Voltage Source Converter based High-Voltage Direct-Current, VSC-HVDC)双闭环控制中 PI 控制存在参数整定困难及控制器数量过多等问题, 提出一种具有 PID 功能的自适应神经元模糊推理系统(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System with PID function, PID-ANFIS)控制器用于该系统控制。其中, PID-ANFIS 控制器兼有神经网络控制、二阶模糊控制及 PID 功能; 同时提出的基于三重合作粒子群算法(Treble Cooperative Particle Swarm Optimization, TCPSO)用于优化该控制器中神经网络参数。TCPSO 采用由降维合作、分组合作与记忆合作组成的三重合作策略, 极大程度上提升了神经网络参数优化的精度。深入研究了 TCPSO 优化 PID-ANFIS 控制器参数的步骤。基于 TCPSO 优化的 PID-ANFIS 控制器能够实现 VSC-HVDC 系统的直接功率控制效果。仿真结果表明该控制器具有控制速度快、超调量小、抗干扰能力强等优点, 是 VSC-HVDC 控制系统的一个可行方案。

关键词: 柔性直流输电; PID; 自适应神经元模糊推理系统; 三重合作粒子群算法; 直接功率控制

A control method of PID-ANFIS controller for VSC-HVDC

YANG Tian, HUO Linlin

(Weihai Electric Power Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Weihai 264200, China)

Abstract: Due to the PI control system for VSC-HVDC has problems of parameters difficult to set, too many control users, and so on, a novel controller composed of PID function and multiple-output ANFIS (PID-ANFIS) is presented, which is made up of neural network, two order fuzzy control and PID control. A treble cooperative PSO (TCPSO) is also presented to optimize PID-ANFIS controller's neural parameters. TCPSO is forged by harmonizing the grouping cooperation, the dimension-reduced cooperation and memory cooperation, which is able to improve the precision of optimizing neural networks. This paper provides the process of PID-ANFIS parameters training by TCPSO. Then, the TCPSO based PID-ANFIS controller performs the function of direct power control. The simulation results show that the controller presented has significant advantages of faster speed, smaller overshoot and better robustness by comparing to PI and it is a viable choice for VSC-HVDC control system.

Key words: VSC-HVDC; PID; ANFIS; TCPSO; DPC

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0029-09

0 引言

柔性直流输电系统(VSC-HVDC)是一个非线性、强耦合系统, 工程中一般采用双闭环 PI 控制, 实现调节直流电压、交流电压、有功功率、无功功率等目标。PI 控制器结构简单, 但存在控制参数整定困难、参数整定不能体现整体优化功能等缺点^[1-3]。文献[4]提出以有功功率测量值修正直流电压参考值的外环控制改进方法; 文献[5]引入以相电流有效值为检测目标的外环功率限制器, 故障时修正外环功率参考值生成规则, 从而达到保护换流器的目的;

文献[6]采用检测交流频率修正外环有功功率参考值生成规则的控制方法, 保证了风电场有功功率的实时输出。以上三篇文献均引入新检测量修正 PI 控制外环参考值, 增加了检测系统的复杂性。

神经网络具有自适应学习能力, 可直接根据样本进行有效学习, 但不适于表达知识规则。文献[7-8]提出采用基于 PID 神经网络(PIDNN)作为 VSC-HVDC 直流电压外环控制的方案, 其控制对象为解耦后直流电压传递函数, 条件较为理想化。文献[9]采用模糊神经网络控制 VSC-HVDC, 其控制输入量为直流电压及直流电流, 为直流电网具有相同信息的电量,

而非多变量解耦控制系统。研究进展表明, 常规神经网络用于 VSC-HVDC 控制具有一定的可行性, 然而当前文献并未提出完整的神经网络解耦控制方案。

模糊理论可明确表达知识规则, 但不具有自适应学习能力, 稳态误差较大, 需有专家经验才能得到满意的控制效果。自适应神经元模糊推理系统 (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, ANFIS) 由 Sugeno 模糊模型融合神经网络组成, 兼有模糊控制与神经网络控制的优点, 具有优于常规模糊控制器及常规神经网络控制器的性能; 一些学者采用 ANFIS 作为自动化领域非线性对象的控制器, 取得良好效果^[10-11]。

文献[12]采用粒子群算法(PSO)作为神经元自适应控制系统的反向算法, 取得了良好抗扰动效果, 表明智能优化算法能够提升神经网络性能。文献[13]提出了分组合作粒子群算法(CPSO), 其速度更新公式中随机采用其他子群的最优值作为交流信息; 该算法被用于神经网络反向传播计算。

文献[14]提出了由 PSO 算法融合其他机制的改进算法。以上算法寻优精度较标准 PSO 算法均有略微提升。文献[15]提出了布谷鸟算法, 采用最优向量作为交流信息, 将高维寻优分解为一维寻优, 对高维函数优化精度较高, 表明降维策略为高维优化的有效解决措施; 然而布谷鸟算法机理较为复杂, 运行时间较长, 鲁棒性较差。

本文提出一种基于三重合作粒子群算法(Treble Cooperative Particle Swarm Optimization, TCPSO)优化具有 PID 功能的自适应神经元模糊推理系统 (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System with PID function, PID-ANFIS) 控制器, 应用于 VSC-HVDC 系统, 以实现直接功率控制功能。PID-ANFIS 控制器的性能优于 ANFIS 及 PID 控制。TCPSO 算法采用三重合作策略, 对粒子牵引方向实现多样化, 高维优化精度高, 运行速度快, 鲁棒性好。采用 Matlab 仿真软件分别对 ANFIS、具有 PD 功能的 ANFIS (PD-ANFIS)、PID-ANFIS 及 TCPSO 优化 PID-ANFIS 性能进行算例验证; 然后将基于 TCPSO 优化 PID-ANFIS 控制器置入 VSC-HVDC 系统, 仿真结果验证了其可行性和有效性。

1 VSC-HVDC 及其 PI 控制数学模型

柔性直流输电系统换流器 dq 坐标系下电压源换流器(VSC)低频稳态数学模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = u_d - v_d + wLi_q \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = u_q - v_q - wLi_d \\ C \frac{dV}{dt} = i_{dc} - i_L \\ P = 1.5u_d i_d, Q = -1.5u_d i_q \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: R 为交流侧等效损耗电阻; L 为交流侧电抗器电感; C 为直流电容; u_d 、 u_q 分别为交流侧电压的 dq 轴分量; i_d 、 i_q 分别为交流侧电流的 dq 轴分量; V 为直流侧直流电压; i_{dc} 为直流侧直流电流; i_L 为直流侧负载电流; P 、 Q 分别为输入有功功率与无功功率。

图 1 为 VSC-HVDC 系统整流侧双闭环 PI 控制, 其功能为: 外环实现有功功率及无功功率控制量 P^* 、 Q^* 转换为内环电流参考值 i_d^* 、 i_q^* 的功能, 即控制量转换功能; 内环实现由电流参考值 i_d^* 、 i_q^* 至触发电压值 v_d^* 、 v_q^* 的解耦与跟踪功能, 等效于逆系统。

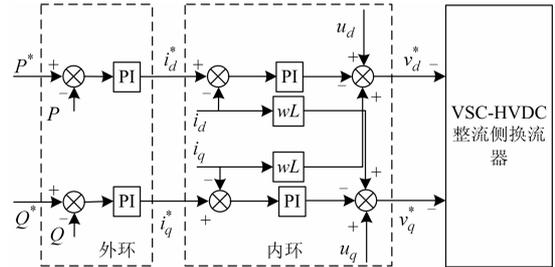


图 1 VSC-HVDC 整流侧换流器双闭环 PI 控制示意图

Fig. 1 PI control of VSC-HVDC rectifier converter

2 PID-ANFIS 控制原理

ANFIS 控制器本质为非线性 T-S 模糊模型(Sugeno 模糊模型), 是一种对数值型输入、输出数据集自动生成模糊推理规则的方法^[16]。

多输出 ANFIS 控制器具有与输出量数目相同个数的后件参数组, 即后件参数组数与总输出个数相等; 采用同一个前件网络产生的激励强度矩阵得到若干个总输出。其本质为多输出模糊神经网络, 具有对非线性方程的无限逼近能力, 理论上可实现两输入两输出系统的静态解耦^[17-18]。

本文提出的 PID-ANFIS 控制器设计思路为: 1) 将误差、误差微分信号作为多输出 ANFIS 控制器输入量, 使之符合二阶模糊控制结构, 成为具有 PD 功能的 ANFIS 控制器(PD-ANFIS); 2) 将误差积分信号作为 PD-ANFIS 的第三个输入量, 即采用误差本

身、误差微分和误差积分信号作为输入量; 利用神经网络的自适应能力调节三者关系, 使之发挥 PID 控制功能, 成为具有 PID 功能的 ANFIS 控制器(PID-ANFIS)。PID-ANFIS 控制器引入误差积分信号, 进一步提升稳态误差控制能力。

PID-ANFIS 控制系统原理如图 2 所示。

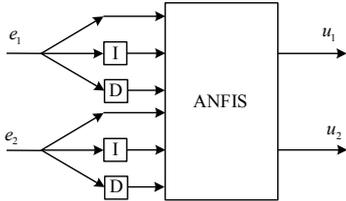


图 2 PID-ANFIS 结构示意图
Fig. 2 Structure of PID-ANFIS

图 2 中, u_1 、 u_2 为控制器输出量, 即被控对象的输入量。 e_1 、 e_2 为控制器输入量, 即被控对象输出量的误差信号。本文采用 PID-ANFIS 控制器置入控制器的等效两端口网络, 即完全撤销图 1 中双闭环 PI 控制系统, 同时实现外环控制量的转换功能和内环的跟踪、解耦功能, 即直接功率控制。VSC-HVDC 整流侧的给定量为 P^* 、 Q^* , 输出量为 v_d^* 、 v_q^* ; 逆变侧的给定量为 V^* 、 Q^* , 输出量为 v_d^* 、 v_q^* ; 控制系统如图 3 所示。

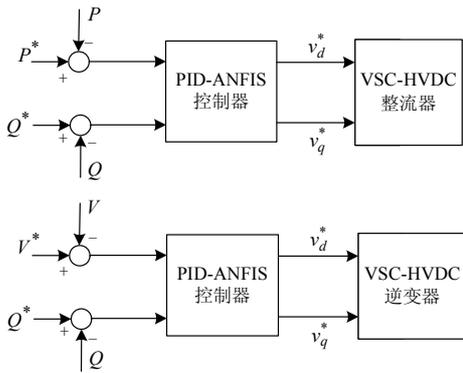


图 3 VSC-HVDC 的 PID-ANFIS 控制系统示意图
Fig. 3 PID-ANFIS control system of VSC-HVDC

PID-ANFIS 控制器包含神经网络结构, 具有自适应调节参数功能, 能够适应不同被控对象的控制要求。该控制器中亦包含模糊推理结构, 具有处理已有被控对象知识的功能, 能够缩短神经网络自适应调节所需时间。同时该控制器包含 PID 环节作为输入处理环节, 使 ANFIS 具有误差微分及误差积分信息的处理功能, 进一步提升跟踪能力及稳态误差补偿能力。

然而常规神经网络所采用的 BP 算法容易陷入局部最优, 导致其控制性能不足。

3 三重合作粒子群算法(TCPSO)原理

3.1 标准 PSO 及全维搜索策略的早熟缺陷

标准 PSO 算法是一种模拟鸟群运动规律的智能优化算法, 其速度和位置的更新公式为

$$\begin{cases} v_i^{t+1} = \omega' v_i^t + c_1 R_1 (P_Z^t - pop_i^t) + c_2 R_2 (P_{Gi}^t - pop_i^t) \\ pop_i^{t+1} = pop_i^t + v_i^t \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $t \in [1, \dots, maxgen]$ 为当前迭代次数, $maxgen$ 为最大迭代次数; $i \in [1, \dots, sizepop]$ 为种群中粒子的编码, $sizepop$ 为粒子个数; $pop_i^t = (pop_{i1}^t, \dots, pop_{iD}^t)$ 表示第 t 次迭代时第 i 个粒子的位置, D 为解空间的维数; $v_i^t = (v_{i1}^t, \dots, v_{iD}^t)$ 表示第 t 次迭代时第 i 个粒子的速度; P_{Gi}^t 表示第 t 次迭代时第 i 个粒子搜索过的最优位置, 即粒子最优记忆; P_Z^t 表示第 t 次迭代时种群中最优粒子的位置, 即全局最优; c_1 、 c_2 为加速系数; R_1 、 R_2 为介于[0,1]之间的随机数; ω' 为第 t 次迭代时的惯性因子。

全维搜索策略指算法个体表示一个由各维元素组成的完整解, 且每次迭代都同时更新各维元素的机制。全维搜索策略早熟的原理为: 当某些元素向着理论最优值移动时, 其他元素值远离了理论最优值; 某次迭代中变好元素的比重大于变坏元素的比重即可认为该个体是一个全新的解。例如一个三维优化情况, 适应度函数为 $f = (x - a)^2$, 其中 $a = [20, 20, 20]$ 。对于 $x_1 = [0, 20, 0]$, 可得到 $f_1 = 800$; 对于 $x_2 = [20, 0, 20]$, 可得到 $f_2 = 400$ 。此时就认为 x_2 优于 x_1 , 粒子会更新位置, 但第二维的有效信息就会丢失。常见算法均采用全维搜索模式, 在高维函数寻优过程中容易陷入早熟。

3.2 降维合作策略

降维合作策略指粒子的每个元素均具有适应度值, 且粒子的元素每优化一维更新一次适应度值的机制, 即逐维搜索。

该策略将一个 D 维粒子种群分解为 D 个 1 维粒子种群; 定义一个利用各维最优元素值构成的 D 维最优向量 $best$, 以解决计算适应度值必须代入完整解的困境。 $best$ 的使用方法为: 更新到第 j 个粒子群(对应原来的第 j 维)中第 i 个元素时, 将 $best$ 的第 i 个元素替换为当前元素值, 进行适应度值计算; 若得到较优适应度值, 将该元素代替 $best$ 中的第 i 个元素, 形成新的 $best$ 用于下一次迭代。降维合作策略的原理如图 4 所示。

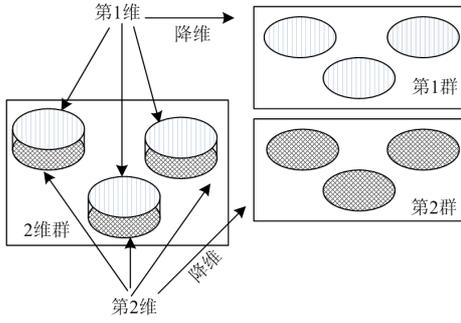


图4 降维合作策略原理示意图

Fig. 4 Cooperative strategy of reducing dimensions

3.3 分组合作策略

分组合作策略指采用若干子群搜索解空间，且速度更新公式中随机采用其他子群最优值 $P_A(r)$ 作为寻优方向的机制。该策略同时保留个体自己子群的最优位置 P_A 作为寻优方向之一。分组合作粒子群算法(CPSO)的速度更新公式如下：

$$v_{ik}^{t+1} = \omega^t v_{ik}^t + c_1 R_1 (P_{Ak}^t - pop_{ik}^t) + c_2 R_2 (P_{Al}^t - pop_{ik}^t) \quad (3)$$

式(3)中： $k \in [1, \dots, m]$ ， k 为子群编码， m 为子群的数量； l 为介于 $[1, m]$ 之间的一个随机整数，用于选择不同子群的最优值，以达到交流信息的目标； P_{Al}^t 表示第 t 次迭代时随机采用的其他子群最优粒子； pop_{ik}^t 表示第 t 次迭代时第 k 个子群的第 i 个粒子的位置； v_{ik}^t 表示第 t 次迭代时第 k 个子群的第 i 个粒子的速度； P_{Ak}^t 表示第 t 次迭代时第 k 个子群的最优粒子。

3.4 三重合作策略及 TCPSO 原理

本文提出的三重合作策略由降维合作、分组合作与记忆合作组成。其中记忆合作指标准 PSO 速度更新公式中采用个体最优值记忆项 P_G 作为寻优方向之一的机制。

该策略的核心是多层分组机制与多方向寻优机制。多层分组指将一个 D 维种群划分为 m 个 D 维子群，然后在每个 D 维子群内部逐维划分为 D 个 1 维子群进行逐维寻优的机制。该机制使种群中每一个元素均可单独寻优；等效于 $m \times D$ 个 1 维子群合作寻优，也等效于融合分组合作与降维分组合作策略。多方向寻优机制指得是速度更新公式中寻优方向的多样化，其各个方向对应于多层分组机制中的各个最优值。

TCPSO 算法中第 t 次迭代时第 k 个 D 维子群中第 j 个 1 维子群的第 i 个元素 pop_{ijk}^t ，其速度更新公

式中的寻优方向包括：全局最优值的对应第 j 维元素 P_{Zj}^t 、本子群最优值的对应元素 P_{Ajk}^t 、随机其他子群最优值的对应元素 P_{Al}^t 和本元素的历史最优值 P_{Gijk}^t 。速度更新公式如下：

$$v_{ijk}^{t+1} = \omega^t v_{ijk}^t + 0.5 R_1 (P_{Zj}^t - pop_{ijk}^t) + 0.5 R_2 (P_{Ajk}^t - pop_{ijk}^t) + 0.5 R_3 (P_{Al}^t - pop_{ijk}^t) + 0.5 R_4 (P_{Gijk}^t - pop_{ijk}^t) \quad (4)$$

式(4)中，为了平衡各个牵引方向的比例且不过度增大速度值，将各个寻优方向的加速系数全部取为 0.5(对应 3.1 节中的加速系数)。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为介于 $[0, 1]$ 之间的随机数。多方向寻优提供更强的多样性，有利于避免早熟且提升精度。

本节所提 TCPSO 算法具有良好的高维优化能力，可用于神经网络反向传播计算，代替 BP 算法，以提升神经网络性能。

4 基于 TCPSO 优化 PID-ANFIS 控制器的原理

本文中 PID-ANFIS 控制器的神经网络参数总数不少 100 个，采用全维搜索算法难以有效优化^[19-20]；故采用本文的 TCPSO 算法作为反向传播算法，其验证结果见 5.2 节。TCPSO 算法训练 PID-ANFIS 控制器的具体步骤归纳如下：

- (1) 随机初始化 PID-ANFIS 控制器的参数。
- (2) 初始化 TCPSO 算法的基本参数。将控制器参数赋予粒子位置的初值 pop ；确定群体规模 $sizepop$ 、迭代次数 $maxgen$ 、解空间维数 D 和 D 维子群数量 m ；随机初始化粒子速度 V ；随机初始化最优向量 $best$ ；在 $best$ 中代入当前元素，计算元素适应度值。记录个体最优元素 P_G 、 D 维子群最优粒子 P_A 及全局最优粒子 P_Z 。
- (3) 给定阶跃输入或载入训练样本，运行一次 PID-ANFIS 控制系统，更新 $best$ 、 P_G 、 P_A 及 P_Z 。
- (4) 循环迭代开始；更新元素的速度与位置。
- (5) 用更新得到的元素代入 $best$ ，将得到的新 $best$ 赋值给 PID-ANFIS 控制器运行一次，计算 MSE 作为该元素的适应度值。
- (6) 更新 $best$ 、 P_G 、 P_A 及 P_Z 。
- (7) 返回第(4)步，进入新的迭代过程，直至达到设定循环次数 $maxgen$ ；最后获得控制器最优参数。

TCPSO 算法优化 PID-ANFIS 控制器参数的流程如图 5 所示。

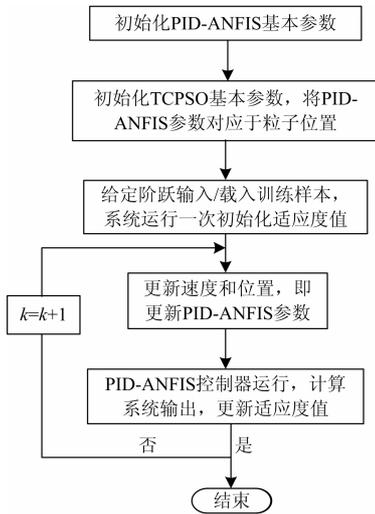


图5 TCPSO 算法 PID-ANFIS 控制器参数的流程图

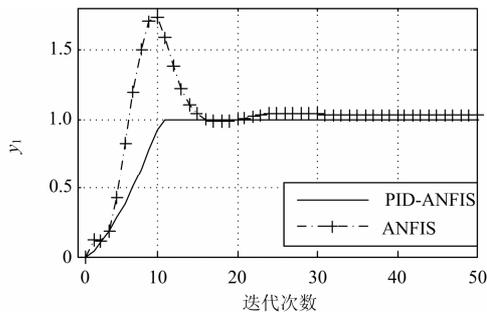
Fig. 5 Process of PID-ANFIS parameters trained by TCPSO

5 算例分析及仿真验证

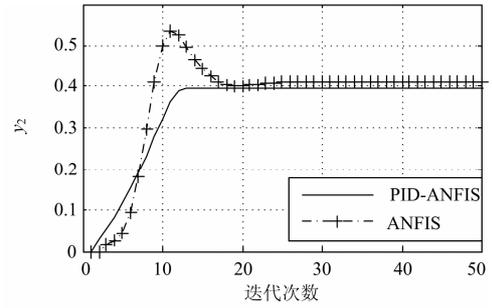
5.1 PID-ANFIS 控制器性能提升的验证

为了验证本文提出的 PID-ANFIS 控制器对于 ANFIS 控制器稳态误差的补偿及动态性能提升效果, 选取阶跃信号 $r_1=1$ 、 $r_2=0.4$ 作为输入信号, 并选取式(5)的二阶强耦合延迟非线性系统作为被控对象进行 PID-ANFIS、ANFIS 对比仿真。设训练次数为 50 次, 仿真结果如图 6 所示。

$$\begin{cases} y_1(k) = 0.9y_1(k-1) + \frac{u_2(k-1)}{1+u_1(k-1)^2} + \\ \quad 0.2u_1(k-1)^3 + 0.5u_1(k-2) + \\ \quad 0.3y_2(k-2) \\ y_2(k) = 0.2y_1(k-2) + \frac{u_2(k-2)}{u_1(k-2)^2+1} + \\ \quad 0.4u_1(k-2)^3 + 0.2u_1(k-1) + \\ \quad 0.3y_1(k-1) \end{cases} \quad (5)$$



(a) 第1通道的给定值与输出量



(b) 控制第2通道的给定值与输出量

图6 解耦控制的波形图

Fig. 6 Decoupling control

由图 6(a)可知, PID-ANFIS 作用下, 输出量 y_1 在约 11 个采样点达到稳定, 对于给定值 r_1 的稳态误差在 0.02 范围内; ANFIS 作用下, 输出量 y_1 在约 20 个采样点达到稳定, 稳态误差在 0.08 范围内。由图 6(b)可知, PID-ANFIS 作用下, 输出量 y_2 在约 14 个采样点达到稳定, 对于给定值 r_2 的稳态误差在 0.02 范围内; ANFIS 作用下, 输出量 y_2 在约 20 个采样点达到稳定, 稳态误差在 0.08 范围内。同时可知, PID-ANFIS 作用下的超调量几乎为零, 优于 ANFIS。

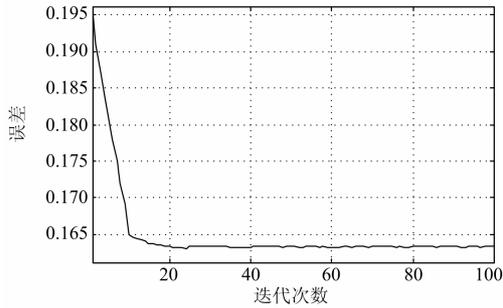
分析可知, ANFIS 属于一阶模糊控制器, 可实现非线性系统的静态解耦控制; 其性能依赖于神经网络固有的动态能力, 其快速跟踪能力、稳态误差控制能力均不足。引入误差微分、误差积分环节的 PID-ANFIS 改善了 ANFIS 的缺陷, 达到设计目标。

5.2 TCPSO 优化 PID-ANFIS 控制器效果的验证

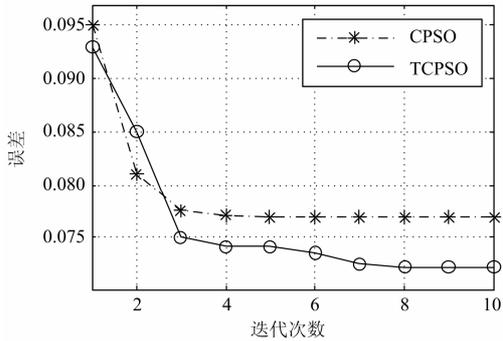
本节采用 TCPSO、CPSO 算法对 PID-ANFIS 进行参数训练, 同时采用基于 BP 算法的 PID-ANFIS 进行参数训练; 最后将三种算法的训练结果进行对比。训练样本为 PI 控制 VSC-HVDC 的启动与各种故障情况的数据记录。

本文所用到的 PID-ANFIS 模糊规则数为 6, 神经网络输入量个数为 6, 计算得到其前件参数个数为 72, 后件参数个数为 84, 参数总数为 156。本文的学习样本个数为 4 051。两种算法的总粒子个数均为 100, TCPSO 算法的 156 维子群个数为 10。三种训练算法误差曲线如图 7 所示。

由图 7(a)可见, BP 算法优化的迭代次数在 20 次左右稳定, 所需时间较长; 23 次迭代出现的误差增大现象可说明 BP 算法的寻优方向具有随机性; BP 算法的最终精度仅为 0.163 2。由图 7(b)可见, TCPSO 优化 PID-ANFIS 的精度较高, 为 0.073 2, CPSO 优化 PID-ANFIS 的精度为 0.074 6。可知 TCPSO



(a) 采用BP算法训练PID-ANFIS的误差



(b) 分别采用CPSO、TCPSO算法训练PID-ANFIS的误差

图7 PID-ANFIS 控制器的训练误差

Fig. 7 Error of PID-ANFIS training

算法是一种更为有效的神经网络训练算法。

5.3 VSC 控制系统仿真验证

本节仿真的被控对象采用 SIMULINK demos 的 VSC-HVDC 输电系统模型，参数如表 1 所示，并以系统容量基准值 200 MVA、线电压基准值 100 kV、直流电压基准值 200 kV 实施标么化。

表 1 VSC-HVDC 参数

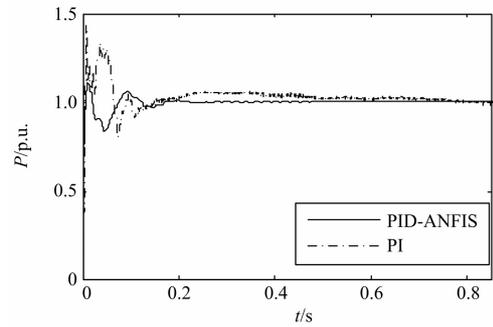
Table 1 VSC-HVDC parameters

参数	数值	参数	数值
电抗器等效电感/H	0.05	电网频率/Hz	50
电抗器等效电阻/ Ω	0.35	开关频率/Hz	1 500
直流母线电容/F	0.003	直流输电电缆等效电阻/ Ω	0.5
直流母线电压/kV	200	交流电压/kV	100

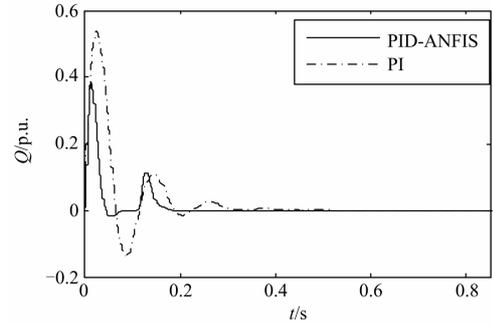
将 PID-ANFIS 代码写入 S-function 模块，其参数采用 5.2 节得到的训练结果；在线控制过程中采用 BP 算法实时修正该控制器的后件参数。

本节整流侧采用 PQ 直接功率控制，逆变侧采用 VQ 直接功率控制，以 PID-ANFIS 与 PI 进行对比验证，仿真过程为两种情况：

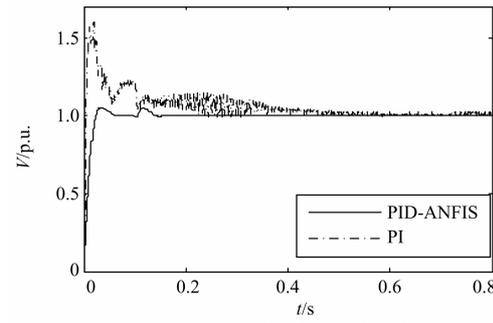
(1) 设整流侧有功功率参考值 P^* 为 1 p.u.，无功功率参考值 Q^* 为 0；设逆变侧直流电压参考值 V^* 为 1 p.u.，无功功率参考值 Q^* 为 -0.2 p.u.，验证启动控制过程；仿真波形如图 8 所示。



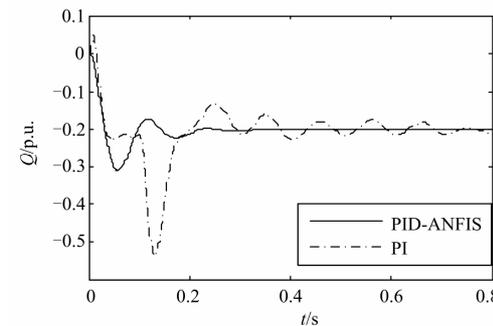
(a) 整流侧输出的有功功率波形



(b) 整流侧输出的无功功率波形



(c) 逆变侧输出的直流电压波形



(d) 逆变侧输出的无功功率波形

图 8 启动波形

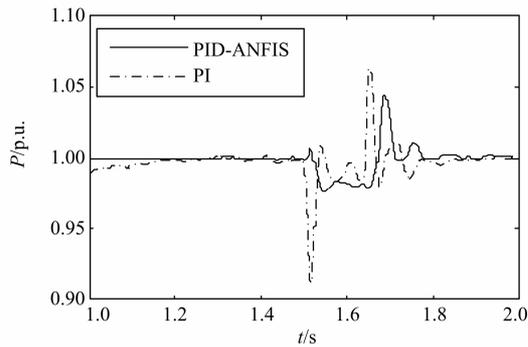
Fig. 8 Start control wave

由图 8(a)可知，整流侧 PI 控制的有功功率超调量为 40%，启动时间为 0.75 s；PID-ANFIS 控制的超调量为 15%，启动时间为 0.25 s。由图 8(b)可知，PI 控制的无功功率超调量为 75%，启动时间为 0.4 s；PID-ANFIS 控制的无功功率超调量较小，为 45%，

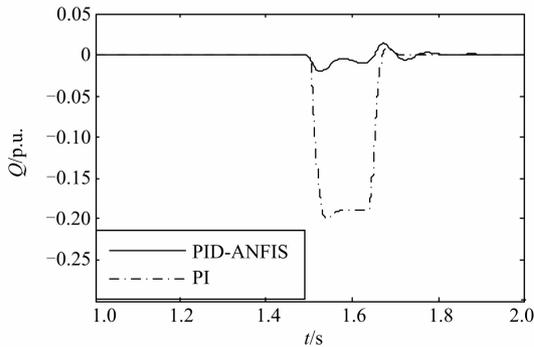
启动时间为 0.2 s。由图 8(c)可知, 逆变侧 PI 控制的直流电压超调量为 60%, 启动时间为 0.5 s, 启动过程中存在小幅度震荡; PID-ANFIS 控制的超调量为 5%, 启动时间为 0.2 s。由图 8(d)可知, PI 控制的逆变侧无功功率超调量为 65%, 启动时间为 0.5 s; PID-ANFIS 控制的超调量为 40%, 启动时间小于 0.2 s。综上, PID-ANFIS 控制器比 PI 的启动速度快, 超调量小, 性能更强。

(2) 设整流侧交流电网在 1.5 s 发生单相接地故障, 经过 0.15 s 后故障切除, 各个参考值保持不变, 验证故障控制过程; 仿真波形如图 9 所示。

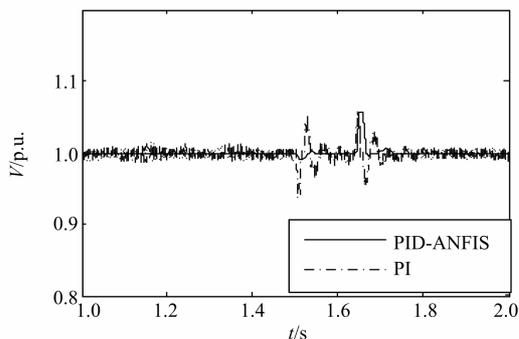
由图 9(a)可知, 整流侧 PI 控制的有功功率波动幅度为 0.07 p.u., 稳定时间为 0.25 s; PID-ANFIS 控制的有功功率波动幅度为 0.05 p.u.左右, 稳定时间为 0.2 s。由图 9(b)可知, 整流侧 PI 控制的无功功率波动幅度为 0.2 p.u.左右, 稳定时间为 0.2 s;



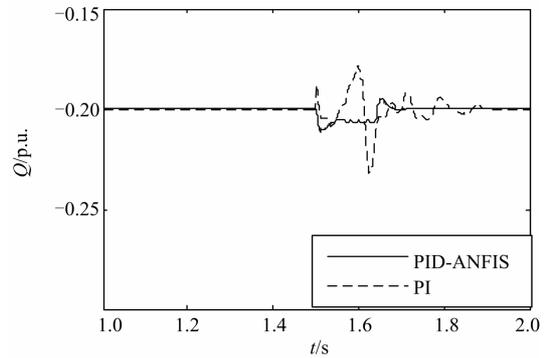
(a) 整流侧输出的有功功率波形



(b) 整流侧输出的无功功率波形



(c) 逆变侧输出的直流电压波形



(d) 逆变侧输出的无功功率波形

图 9 故障控制波形

Fig. 9 Fault control wave

PID-ANFIS 控制的无功功率波动幅度为 0.01 p.u., 稳定时间小于 0.2 s。由图 9(c)可知, 逆变侧 PI 控制的直流电压波动幅度为 0.08 p.u., 稳定时间为 0.2 s, 且运行过程中存在小幅度震荡; PID-ANFIS 控制的直流电压波动幅度小于 0.06 p.u., 稳定时间小于 0.2 s。由图 9(d)可知, 逆变侧 PI 控制的无功功率波动幅度为 0.03 p.u., 稳定时间为 0.4 s; PID-ANFIS 控制的无功功率波动幅度小于 0.01 p.u., 稳定时间小于 0.2 s。综上, PID-ANFIS 控制的单相接地短路故障控制能力(即故障抗扰性能)优于 PI 控制。

以上采用 PI 控制训练样本的 PID-ANFIS 表现出了优于 PI 的性能, 其原因在于: 1) 训练样本记录了 PI 控制下 VSC 的启动与各种故障的输出量, 具有丰富的信息; 2) TCPSO 算法具有强大的高维优化能力, 可以加强 PID-ANFIS 所内置的神经网络提取样本信息的能力; 3) 在训练过程中, PID-ANFIS 提取了 PI 控制过程中成功情况的信息及不成功情况中的合理信息, 并且分布记录于神经网络中, 因而相当于包含若干个最完美的 PI 控制器, 能够根据运行状态瞬时切换; 4) 在控制过程中, PID-ANFIS 包含的 PID 输入处理环节, 能够修正神经网络控制误差, 且保证不低于 PI 控制的精度。

6 结论

本文对常规 ANFIS 控制器和 PSO 算法进行有效改进, 提出了基于 TCPSO 优化 PID-ANFIS 控制器。PID-ANFIS 控制器融合二阶模糊控制、神经网络及 PID 的优点, 实现了多变量解耦控制与直接功率控制; TCPSO 算法采用融合了降维合作、分组合作及记忆合作的三重合作策略, 实现了高维函数寻优精度的提升。最后对 VSC-HVDC 系统启动控制、故障控制在三种仿真条件下进行仿真, 仿真结果验

证了本文所提方法的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 侯兆然. 基于虚拟磁链定向的 PWM 整流器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 105-109.
HOU Zhaoran. Research on control method of PWM rectifier based on virtual flux orientation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 105-109.
- [2] 宋国兵, 冉孟兵, 靳幸福, 等. 利用零模电流的 VSC-HVDC 输电线路单端量保护原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 1-7.
SONG Guobing, RAN Mengbing, JIN Xingfu, et al. A novel protection method for VSC-HVDC transmission lines using single-end zero-mode current[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 1-7.
- [3] 李爽, 王志新, 吴杰. 采用基频零序分量注入的 MMC 换流器故障容错控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 1-7.
LI Shuang, WANG Zhixin, WU Jie. Study on fault-tolerant operation control strategy of modular multilevel converters injected with fundamental-frequency zero-sequence voltage component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 1-7.
- [4] 陈海荣, 张静, 屠卿瑞. 电网电压不平衡时电压源换流器型直流输电的负序电压补偿控制[J]. 高电压技术, 2011, 37(11): 2363-2369.
CHEN Hairong, ZHANG Jing, TU Qingrui. Negative voltage compensating control of voltage source converter based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(11): 2363-2369.
- [5] 管敏渊, 徐政, 潘武略, 等. 电网故障时模块化多电平换流器型高压直流输电系统的分析与控制[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1238-1245.
GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Wulüe, et al. Analysis and control of modular multilevel convertor based HVDC transmission systems during grid faults[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1238-1245.
- [6] 范心明, 管霖, 夏成军, 等. 风电场交直流混合输电并网中 VSC-HVDC 的控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4781-4790.
FAN Xinming, GUAN Lin, XIA Chengjun, et al. Control of VSC-HVDC in AC/DC hybrid transmission with wind farms integrated[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4781-4790.
- [7] 李爽, 王志新, 王国强. 基于改进粒子群算法的 PIDNN 控制器在 VSC-HVDC 中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 14-21.
LI Shuang, WANG Zhixin, WANG Guoqiang. Application of an improved PSO-based PID neural network controller for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 14-21.
- [8] 王国强, 王志新. 粒子群与 PIDNN 控制器在 VSC-HVDC 中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 8-13.
WANG Guoqiang, WANG Zhixin. Application of PSO and PIDNN controller for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 8-13.
- [9] 张海燕. VSC_HVDC 输电系统的模糊神经网络控制[J]. 电测与仪表, 2010, 47(535): 34-41.
ZHANG Haiyan. Fuzzy neural network controller for VSC-HVDC transmission system[J]. Electrical Measurement & Instrument, 2010, 47(535): 34-41.
- [10] 陈杰, 陈冉, 陈佳伟, 等. 机组的模糊-单神经元 PID 控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 88-97.
CHEN Jie, CHEN Ran, CHEN Jiawei, et al. Fuzzy single-neuron PID control of variable-speed wind turbines[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 88-97.
- [11] 张钧, 李小鹏, 何正友. 采用自适应神经模糊推理系统的配电网故障分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 87-93.
ZHANG Jun, LI Xiaopeng, HE Zhengyou. Fault classification technique for power distribution network using adaptive network based fuzzy inference system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 87-93.
- [12] 代睿, 曹龙汉, 何俊强, 等. 基于微粒群算法的无刷直流电机单神经元自适应控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 57-70.
DAI Rui, CAO Longhan, HE Junqiang, et al. Particle swarm optimization based single neuron adaptive control for brushless DC motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(4): 57-70.
- [13] 朴海国, 王志新, 张华强. 基于合作粒子群算法的 PID 神经网络非线性控制系统[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(12): 1317-1324.
PIAO Haiguo, WANG Zhixin, ZHANG Huaqiang. Nonlinear control system of PID neural network based on cooperated particle swarm optimization (PSO)[J]. Control

- Theory & Application, 2009, 26(12): 1317-1324.
- [14] 林蔚天. 改进的粒子群优化算法研究及其若干应用[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
LIN Weitian. Research of improved particle swarm optimization and its applications[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013.
- [15] 王李进, 尹义龙, 钟一文. 逐维改进的布谷鸟搜索算法[J]. 软件学报, 2013, 24(11): 2687-2698.
WANG Lijin, YIN Yilong, ZHONG Yiwen. Cuckoo search algorithm with dimension by dimension improvement[J]. Journal of Software, 2013, 24(11): 2687-2698.
- [16] 徐丽娜. 神经网络控制[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 73-91.
- [17] 李兰芳, 杨洪耕, 郭卫明, 等. 基于 TS 模糊推理和李亚普诺夫理论的有源电力滤波器控制[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 165-171.
LI Lanfang, YANG Honggeng, GUO Weiming, et al. Takagi-Sugeno fuzzy control and Lyapunov-function based stability control of active power filter[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 165-171.
- [18] 平玉环, 李宗耀, 孙剑. 模糊神经网络在解耦控制中的研究[J]. 控制工程, 2009, 16(4): 461-463.
PING Yuhuan, LI Zongyao, SUN Jian. Application of fuzzy neural network to decoupling control[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(4): 461-463.
- [19] 马修元, 段钰锋, 刘猛, 等. 基于 PSO-BP 神经网络的水焦浆管道压降预测[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(5): 54-60.
MA Xiuyuan, DUAN Yufeng, LIU Meng, et al. Prediction of pressure drop of coke water slurry flowing in pipeline by SO-BP neural network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(5): 54-60.
- [20] 吴虎胜, 张凤鸣, 吴庐山. 一种新的群体智能算法——狼群算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11): 2430-2438.
WU Husheng, ZHANG Fengming, WU Lushan. New swarm intelligence algorithm-wolf pack algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(11): 2430-2438.

收稿日期: 2014-11-14; 修回日期: 2015-01-26

作者简介:

杨天(1989-), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为柔性直流输电系统分析与控制; E-mail: cathaywarrior@163.com

霍琳琳(1989-), 女, 研究方向为电力系统分析、运行与控制。

(编辑 魏小丽)