

多馈入交直流输电系统的模糊控制器 协调优化算法

朱浩骏¹, 蔡泽祥¹, 刘皓明², 贾庆山³, 倪以信⁴, 吴复立⁵

(1. 华南理工大学电力学院, 广东省广州市 510640; 2. 河海大学电气工程学院, 江苏省南京市 210098;
3. 清华大学自动化系智能与网络化系统研究中心, 北京市海淀区 100084; 4. 清华大学深圳研究生院, 广东省深圳市 518055; 5. 香港大学电机电子工程系, 香港)

Coordinate Optimization Algorithm of Fuzzy Controller in Multi-infeed AC/DC Power Systems

ZHU Hao-jun¹, CAI Ze-xiang¹, LIU Hao-ming², JIA Qing-shan³, NI Yi-xin⁴, Felix WU⁵

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu Province, China; 3. Department of Automation, CFINS, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 4. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong Province, China; 5. The University of Hong Kong, Hong Kong, China)

ABSTRACT: A fuzzy damping controller is designed to damp inter-area power oscillation. The proposed fuzzy controller is applied to dc power control system and excitation system of a multi-infeed AC/DC power system with coordination of controller parameters. To avoid obtaining locally optimized solutions, genetic algorithm is used to search optimal parameters of fuzzy controllers. Moreover ordinal optimization is introduced to guarantee the quality of solution at high probability. Simulation results demonstrate that coordinated optimal fuzzy controllers can enhance dynamic stability of AC/DC interconnected system more effectively and have better robustness than conventional damping controllers. The ordinal optimization based genetic algorithm has more stable performance than conventional genetic algorithm, and is proved to be a promising method for controller parameters optimal coordination of multi-infeed AC/DC power systems.

KEY WORDS: multi-infeed HVDC transmission; power system stability; fuzzy control; genetic algorithm; ordinal optimization

摘要: 设计了一套阻尼区域间功率振荡的模糊控制器。在多馈入交直流输电系统的直流功率控制系统和发电机励磁系统中同时采用了该模糊控制器, 并对影响其性能的关键参数进行了协调优化。为了解决优化结果容易限于局部最优的问题, 采用了遗传算法进行全局并行寻优。同时引入序优化理

论在概率意义上保证优化解的质量。仿真结果表明: 与常规阻尼控制器相比, 模糊控制器能更好地提高交直流互联系统的动态稳定性且具有鲁棒性。序优化遗传算法比传统遗传算法具有更稳定的性能, 可作为多馈入交直流输电系统的模糊控制器参数协调优化的一种有效方法。

关键词: 多馈入直流输电; 电力系统稳定; 模糊控制; 遗传算法; 序优化

0 引言

随着三峡和西电东送工程的实施, 越来越多的大规模交直流互联系统(如南方电网和华东电网的多馈入直流系统)在我国电网中出现。这种复杂的大规模交直流互联系统为电网安全稳定带来了一些新的问题, 如多个直流控制器间的协调, 多模式低频振荡等。为了提高交直流互联系统的动态稳定性, 除了装设常用的发电机励磁附加控制即电力系统稳定器(PSS)外, HVDC 线路的直流功率调制控制器也可用于阻尼区域间的功率振荡^[1-2]。在 PSS 和 HVDC 常规功率调制控制器设计中一般采用基于线性化系统特征根分析的极点配置法, 因此控制器效果依赖于系统工作点且对系统非线性适应性较差。而模糊控制由于能方便地计及专家经验、可适应大规模非线性系统, 从而在电力系统稳定控制器中得到应用和研究。文献[3-6]报道了 HVDC 模糊控制器阻尼和

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50337010)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (50337010).

励磁模糊控制器的模糊规则和推理机制的设计，然而以上文献对于模糊控制器关键参数大多只采用 2 次性能指标方法进行调整，缺乏系统的优化方法，难以适应大规模交直流系统中多模糊控制器的参数协调优化问题。

近 30 年来，国内外学者在电力系统多参数优化协调问题如多机系统 PSS 参数优化方面进行了大量的研究工作。线性最优控制理论、梯度法及线性规划等优化方法^[7-10]都被应用到这个问题中，但它们或者依赖于大量状态反馈量和经验加权参数，或者需要训练样本，有时对初值较敏感而且容易收敛于局部最优值。近年来，现代全局优化方法如模拟退火、禁忌搜索和遗传算法等逐渐被用于电力系统协调优化问题^[11-13]中。其中的遗传算法是应用较为广泛的一种，它具有在全局范围内寻优的能力，对优化问题本身没有特别的限制，对于复杂的优化问题具有很强的优势。但遗传算法也存在缺乏算法终止指标、优化解难以定量评估等缺点，且在大规模优化问题中更为突出。因此，为了适应大规模交直流系统中的多模糊控制器的参数协调优化问题，这里引入序优化理论^[14]与遗传算法结合，基于目标软化(goal soften)的思想，以一定概率获得次最优解，为遗传算法提供定量的终止指标和优化解评估机制。

本文针对大规模交直流互联系统的区域间振荡问题设计了一套模糊阻尼控制器，应用在交直流互联系统的直流功率调制控制和交流发电机励磁附加控制中。仿真结果表明，体现专家知识的模糊阻尼控制器比常规阻尼控制器具有更好的鲁棒性。在一个以南方电网为背景的多馈入交直流系统中应用多个模糊阻尼控制器，并采用序优化遗传算法对其中关键参数进行全局协调优化，可有效地阻尼系统中多种振荡模式。与传统遗传算法相比，序优化遗传算法能在概率意义上保证解的质量，其优化解具有更稳定的性能，且与求解空间规模无关，求解空间越大该算法越显示出优势。同时由于遗传算法的通用性，针对组合或函数优化问题设计的许多遗传操作均可被序优化遗传算法采用，因此本文采用的优化算法在大规模电力系统的参数协调优化中具有很大的潜力和应用价值。

1 模糊阻尼控制器的设计

传统阻尼控制器(CDC)是基于线性系统的相位补偿原理设计的，一种典型结构^[1]如图 1。

对直流功率调制阻尼控制器来说，图 1(a)中输

入信号常取并联的交流联络线有功潮流 P_L ，输出信号 dmp_sig 作为整流侧直流定功率控制的参考功率 $P_{dc,ref}$ 的调制信号，而对于发电机励磁系统的附加阻尼控制器(即 PSS)，图(a)中的输入信号常取发电机转速 w ， dmp_sig 作为励磁控制器的附加输入，迭加在励磁参考电压 U_{ref} 上。

与 CDC 相似，本文设计了 PI 型模糊阻尼控制器(FDC)，用于阻尼交直流互联系统中交流联络线的功率低频振荡，其结构如图 2 所示。图 2 中，输入信号通过一个复位(washout)环节滤出低频振荡信号，然后分 2 条支路得到比例放大信号 x_1 和积分信号 x_2 。这里取积分信号是因为它与微分信号相比具有更小的噪声，而对于正弦振荡而言，其积分信号和负的微分信号近似同相位。增益模块 K_1 和 K_2 使得模糊化模块的输入信号取值限于 $[-1,1]$ ，输出路径上的增益模块 K_3 将反模糊化模块的输出信号转化为恰当的实际物理信号。

FDC 输入信号的隶属函数选用可微的高斯函数，如图 3(a)所示，输出信号的隶属函数选用三角型函数，如图 3(b)所示。定义了 7 个在 $[-1,1]$ 内均匀分布的模糊集：NB, NM, NS, ZR, PS, PM 和 PB，分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中和正大。在实际过程中，输入信号可能较大，故 PB 和 NB 分别适当延扩到 2 和 -2。

表 1 给出了体现专家经验的直流功率调制的模糊推理规则表。以第 1 个单元为例，相应的控制规则为：若交流联络线功率偏差信号 x_1 为“正大”(PB)，且偏差之积分信号 x_2 为“负大”(NB)，则调制信号 y 为“正大”(PB)。对于交流联络线功率的正弦振

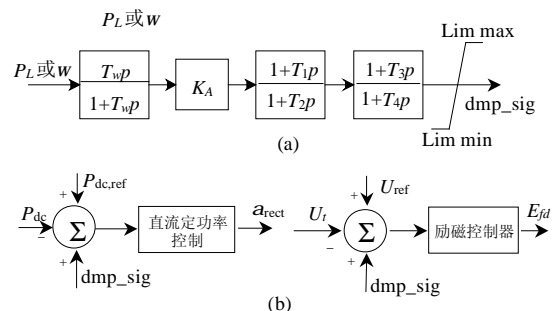


图 1 传统的阻尼控制器

Fig. 1 Conventional damping controller (CDC)

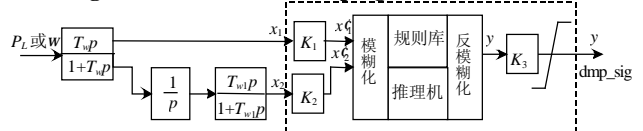


图 2 模糊阻尼控制器

Fig. 2 Fuzzy damping controller (FDC)

荡信号，其积分信号与微分信号近似为反相位关系，所以偏差的积分为“负大”可以理解为偏差的微分为“正大”。上述规则的条件部分表明：交流联络线的功率振荡 ΔP_L 为正且幅值很大，同时 ΔP_L 还以很大的速率增大。为了快速抑制这种振荡，需要迅速增大直流传送功率以平息振荡，即需要一个“正大”的直流功率调制信号，即上述规则的结论。可见，以上规则表根据专家知识进行控制，与运行点工况基本不相关，从而使模糊控制器具有鲁棒性。

同理，对于发电机励磁系统的附加模糊控制器，也可以推出相似的推理规则表。当 FDC 输入信号 $x\zeta$ 为发电机转角偏差 Δw 时，可将其看为发电机功角的微分信号 dd/dt ，则 $x\zeta$ 为 Δw 的积分信号即功角偏差 Δd 。因此只需将表 1 中的输入变量 $x\zeta$ 换为 $-x\zeta$ ，就可以得出所需的发电机励磁的附加模糊控制规则表。

在模糊阻尼控制器中，模糊化、反模糊化和模糊推理分别使用单点模糊化方法、中心点平均反模糊化和乘积推理法^[15]。对表 1 所示的规则按行的顺序分别标注为 1~49，如果忽略模糊集 PB 和 NB 的延扩部分，模糊规则可以用如下非线性函数描述：

$$y = f(x) = K_3 \frac{\sum_{r=1}^M \bar{y}^r \{ \prod_{i=1}^n \exp[-(\frac{K_i x_i - \bar{x}_i^r}{S_i^r})^2] \}}{\sum_{r=1}^M \{ \prod_{i=1}^n \exp[-(\frac{K_i x_i - \bar{x}_i^r}{S_i^r})^2] \}} \quad (1)$$

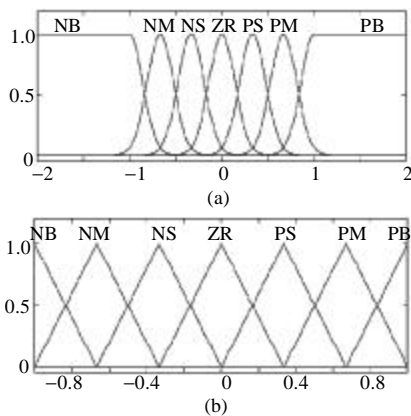


图 3 输入和输出信号的隶属函数

Fig. 3 Membership functions for input and output signals

表 1 直流调制模糊控制规则表

x_1	x_2						
	PB	PM	PS	ZR	NS	NM	NB
NB	PB	PB	PB	PM	PM	PS	ZR
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZR	NS
NS	PB	PM	PM	PS	ZR	NS	NM
ZR	PM	PM	PS	ZR	NS	NM	NM
PS	PM	PS	ZR	NS	NM	NM	NB
PM	PS	ZR	NS	NM	NM	NB	NB
PB	ZR	NS	NM	NM	NB	NB	NB

式中： $M=49$ 为规则总数； $n=2$ 为输入信号总数； $x=[x_1, x_2]$ ； $x'_i = K_i \cdot x_i$ ； \bar{x}_i^r 和 S_i^r 分别为对应于第 r 个规则的输入模糊集 x'_i ($i=1, 2$) 相应的高斯隶属函数的中心矩和标准差； \bar{y}^r 为第 r 个输出变量 y' 模糊集的三角关系中心矩。

以上针对互联电网功率振荡特性设计了模糊控制器的模糊规则和推理机制，并建立了隶属度函数。通过分析可以发现输入-输出增益 K_i ($i=1, 2, 3$) 直接对输入量和输出量的隶属度产生影响，同时，在多控制器协调问题中，各控制器的 K_i 反映了该控制器对整个系统性能的影响度。因此本文选择输入-输出增益 K_i 作为关键参数加以优化。

2 基于遗传算法的参数协调优化

2.1 问题的模型

在交直流互联系统中，直流调制阻尼控制器必须和发电机励磁的附加阻尼控制器进行协调，以达到整体性能最优。设第 p 个直流调制模糊阻尼控制器的关键参数为 $Kd^p = [Kd_1^p \ Kd_2^p \ Kd_3^p]$ ，第 q 个发电机励磁系统的模糊阻尼控制器的关键参数为 $Kg^q = [Kg_1^q \ Kg_2^q \ Kg_3^q]$ ，其中每个参数都有一个取值区间 $[K_{\min} \ K_{\max}]$ ，以保证控制器输入输出在隶属函数设计范围之内。由于模糊控制器具有模糊、离散等复杂非线性，因此采用时域仿真作为评估工具。在常规阻尼控制器的性能评估中，为了验证其鲁棒性，通常需要对多种运行工况测试。而模糊控制器的控制机理并不依赖于工况，其自身具备鲁棒性。因此在这里只需把一种典型工况下发电机间摇摆总体情况作为评估度量。这里典型工况取为较严重的大扰动故障来激发振荡模式，具体选为直流逆变站母线三相金属性接地短路，故障期间直流闭锁，0.1s 后故障消失。具体优化目标函数设为最小化各台发电机功角 d_j 与平衡机功角 d_0 之差的总和 J ，其表达式为

$$\min J = \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |d_j(k) - d_0(k)| \quad (2)$$

式中： M 为系统中发电机组总数； N 为仿真总时步。

这就将模糊控制器协调优化归结为一个带不等式约束的多参数优化问题如下：

$$\begin{cases} \min J(Kd^p, \dots, Kg^q, \dots) \\ Kd_{\min}^p < Kd^p < Kd_{\max}^p, & p \in (1, 2, \dots, N_d) \\ Kg_{\min}^q < Kg^q < Kg_{\max}^q, & q \in (1, 2, \dots, N_g) \end{cases} \quad (3)$$

其中 N_d 、 N_g 分别为直流系统和发电机励磁系统的模糊控制器的个数。

2.2 采用遗传算法的参数优化

遗传算法对优化问题本身没有特别的限制,对于以上这种复杂的优化问题可以较有效地找到优化解。具体实现步骤如下:

(1) 在某一代群体中,称一组系数 $\{Kd^1, Kd^2, \dots, Kg^1, Kg^2, \dots\}$ 为一个染色体。使用浮点数字来描述系数 K , 以便快速编码、解码, 以获得较好的精度。根据每个输入输出信号量度对每个参数确定初始区间, 以保证控制器输入输出在隶属函数设计范围之内。

(2) 适应度函数设计为 $F = -J + J_{\max}$, 其中 J 由式(2)求得, J_{\max} 是 J 可能的最大正值。

(3) 交叉操作使用算术交叉(arith crossover), 如果交叉的父代为 v_1 和 v_2 , 则子代为

$$\begin{cases} v'_1 = r \cdot v_1 + (1-r) \cdot v_2 \\ v'_2 = (1-r) \cdot v_1 + r \cdot v_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中, r 为 $[0, 1]$ 间的随机数。

(4) 变异操作采用非均匀变异(non-uniform mutation)。若 Ran 为 $[0, 1]$ 间随机数, 定义父代 v_k 的变异为

$$v'_k = \begin{cases} v_k + (UB - v_k)f(t), & \text{Ran} < 0.5 \\ v_k - (v_k - LB)f(t), & \text{Ran} \geq 0.5 \end{cases} \quad (5)$$

式中: UB 和 LB 分别为变量 v_k 的上下限; t 为当前进化的代数。为了确保能在整个可行解空间内搜索, 定义 $f(t)$ 为 $(f(t) \in [0, 1])$:

$$f(t) = r \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right)^b \quad (6)$$

式中: T 为最大代数; b 为反映非均匀程度的系统参数, 这里取为 3。

(5) 需要在新生成的一代中通过计算染色体的适应值进行比例选择淘汰, 以保证群体大小不变。当达到最大进化代数时, 整个进化过程结束。

应用遗传算法进行协调优化, 可以避开优化问题自身的复杂性, 以全局并行方式进行搜索。仿真结果表明该算法能达到良好的优化效果。

2.3 序优化遗传算法

遗传算法作为一种应用广泛的计算智能技术, 其自身仍存在一些缺陷, 例如缺乏算法终止准则和优化解的定量评估。理论上已证明具有可达性和保优性的遗传算法当遗传代数 $N_i \rightarrow \infty$ 时收敛到全局最优。但在实际应用时一般是: 当进行若干代就认为

得到一个次优解, 而确定需要的进化代数和最终解的质量并没有系统的方法。

此处引入序优化(ordinal optimization)^[14]的思想来为遗传算法的优化质量评估提供理论基础。序优化的基本思想是放松优化目标(goal soften)可使问题求解更容易。传统优化问题都是以寻找问题最优解为目标进行求解, 而序优化则以很高的概率寻找足够满意解为目标, 进而减小搜索量和难度。文献[16]中提出了序优化与遗传算法结合对“Flow Shop Schedule”问题进行了优化, 在概率意义上保证了优化解质量。

设 S 为具有 $|S|$ 个可行解的搜索空间, G 为由性能占前 $P_e\%$ 的解集合, 即 $P_e\% = |G|/|S|$ 。对于 $|S|$ 很大的优化问题, 很难求其最优解。因此这里将目标放松, 要以 P_{se} 的概率至少找到一个解在 G 内。设达到这一目标需要的采样数为 m , 则显然 $P_{se} = 1 - (1 - P_e)^m$, 从而有

$$m = \ln(1 - P_{se}) / \ln(1 - P_e) \quad (7)$$

可见, 采样数 m 与搜索空间的大小无关。必须指出, 式(7)是基于随机盲目搜索推导的, 若采用智能搜索算法如遗传算法而不是随机盲目搜索, 则算法最终取得的 P_{se} 或 P_e 将会更好。因此, 将式(7)应用到遗传算法中可对优化结果在概率意义上进行定量评估。

对于本文的优化问题, 具体算法流程如下:

(1) 设定种群规模为 $P_n = 100$, 交叉概率 $p_c = 1.0$, 变异概率 $p_m = 0.15$ 。由序优化理论知, 若要以 99.9% 的概率实现至少有 1 个解位于解空间中最优 0.1%, 则将 $P_{se} = 0.999$, $P_e = 0.001$ 代入式(7)中, 可得所需的随机采样次数 $m = 6905$ 。序优化遗传算法的进化最大代数取为 $G_{en\max} = m / P_n \approx 69$, 即可保证最终得出的优化解至少以 99.9% 的概率位于解空间中所有解中最优的 0.1%。

(2) 采取随机初始化采样形成初始种群, 做到初始解的分散性。

(3) 若遗传代数已达到 $G_{en\max}$, 则输出当前最优解, 算法终止。

(4) 为了更有效地搜索解空间, 只选出当前种群 $Pop(k)$ 中最好的 t 个(这里选取 $t=60$)个体参与以下的遗传操作。

(5) 选择操作采用基于序的选择算法, 即对于按从差到好排序的 t 个个体中, 第 i 位的个体被选

中的概率是 $2(t-i+1)/[t(t+1)]$ ，总共轮选出 P_n 个个体。

(6) 对这 P_n 个个体进行 $P_n/2$ 次交叉操作(算术交叉)，得出新的 P_n 个后代。再对其以 p_m 的概率进行变异操作(非均匀变异)，得出 P_n 个后代形成候选种群 $Pop(k)'$ 。

(7) 为了提高搜索效率,采用整体替换策略,即保留 $Pop(k)$ 和 $Pop(k)'$ 中最好的 P_n 个个体作为下一代种群。

(8) 更新存储当前全种群最优解，转向步骤(3)。

由以上算法可见,采用基于序的种群淘汰选择既省去了适配值函数的设计,又避免了常用比例选择对适配值函数的依赖性和个体优劣差异变化的缺点,充分保证了优良个体在种群进化中的作用。同时为了避免早熟收敛,适当加大了变异概率。

应当指出:本文所提的序优化遗传算法,在优化计算中每一步迭代需进行一次全系统长达 10s 左右的数值积分,以计及其动态非线性,因而参数优化所需时间较长。虽然从离线计算角度可接受,但仍有待改进。

3 仿真结果

3.1 鲁棒性测试

采用图 4 所示的 4 机 2 区域互联系统^[1]来测试本文设计的模糊控制器的鲁棒性。使用 MATLAB 环境下的电力系统工具包(Power System Toolbox)编程。其中,发电机采用次暂态模型;励磁调速器采用 3 阶简化模型,装有常规 PSS,不考虑调速器的作用;负荷用恒阻抗模型。设定 2 种测试工况: Case 1 为 0.1s 时母线 3 发生三相瞬态接地短路, 0.2s 时故障消失, 稳态工况不变; Case 2 的故障与 Case1 相同,但稳态工况与 Case1 不同,交流联络线 3-101 传输功率增加 20%。在这 2 种工况下,对 HVDC 系统分别加入传统阻尼控制器(CDC)和本文设计的模糊控制器(FDC)进行仿真。

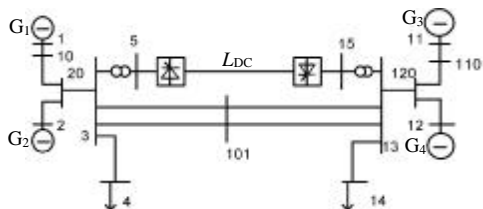


图 4 4 generators 2 areas test system

首先以 Case1 作为设计工况,对图 1(a)所示的传统阻尼控制采用相位补偿法设计,其具体参数为: $T_w = 3, K_A = 0.1667, T_1 = 0.02, T_2 = 0.26, T_3 = 0.02, T_4 = 0.26$ 。对模糊控制器采用提出的序优化遗传算法进行优化参数,这里要求以 90% 的概率实现至少有 1 个解位于解空间中最优 0.1% 中,由式(7)可得采样数 $m=2301$,设种群规模 $P_n = 100$, 则遗传代数 $G_{enmax} = m/P_n \approx 23$ 。优化结果为 $(Kd_1 Kd_2 Kd_3) = (0.401 0.528 0.424)$, 采用 MATLAB6.5 下的 Power System Toolbox 运行程序,计算机 CPU 为 P4 1.7G) 计算时间约为 3h50min。

仿真结果如图 5。由此可见,无论在设计工况 Case 1 还是非设计工况 Case 2 中,模糊阻尼控制器都比传统阻尼控制器具有更好的响应,体现出很好的鲁棒性。这是因为传统阻尼控制器是根据某一种工况下的线性化模型设计的,当运行工况有较大变化时,该控制器的性能不能保证,可能明显恶化。而模糊控制器是根据以一个在任何工况下都成立的旨在阻尼功率振荡的经验规律,即模糊控制规则表(见表 1)设计的,不管具体工况如何变化,控制器可以根据当前状态给出合理的控制信息以平息振荡,同时控制器中的模糊集合对一定范围内变化的变量不敏感,这就使得模糊阻尼控制器能更好地适应运行工况的变化。

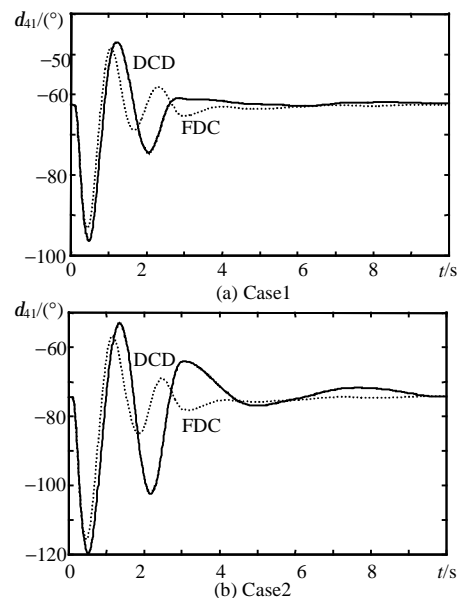


图 5 直流调制控制器的响应

Fig. 5 Responses of HVDC modulation controller

3.2 协调优化算法

采用如图 6 所示的由南方电网简化等值的一个大规模多馈入交直流输电系统来测试本文的协调优

化算法。

在与区间振荡模式强相关的发电机 g_2 、 g_4 、 g_6 和 2 条直流输电线路中装设模糊阻尼控制器。对这些控制器参数采用的序优化遗传算法进行协调优化。这里要求以 99% 的概率实现至少有 1 个解位于解空间中最优 0.1% 中，则由式(7)可得采样数 $m=4903$, 设种群规模 $P_n=100$ ，则遗传代数 $G_{enmax} = m/P_n \approx 49$ 。协调优化结果如下：

$$(Kg_2, Kg_4, Kg_6, Kdc_1, Kdc_2) = (0.647 \ 0.433 \ 0.821, \\ 0.887 \ 0.503 \ 0.690, \ 0.987 \ 0.703 \ 0.609, \\ 0.456 \ 0.503 \ 0.692, \ 0.502 \ 0.304 \ 0.542)$$

设置扰动为母线 18 发生三相短路, 0.1s 后线路 18-20 切除, 对应的时域仿真结果见图 7。图 7(a) 是在发电机和直流系统安装传统阻尼控制器(如图 1)时的发电机功角曲线; 图 7(b)是在发电机和直流系统安装协调优化后的模糊控制器时的发电机功角曲线。可见图 7(b)中各发电机的振荡模式均得到有效的阻尼, 说明本文的优化算法能有效地对大规模交直流系统的控制器进行协调优化。

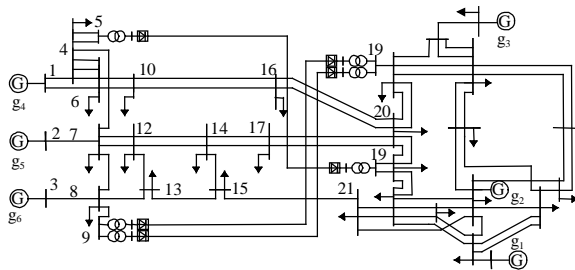


图 6 南方电网简化等值系统

Fig. 6 Simplified equivalent system of south china grid

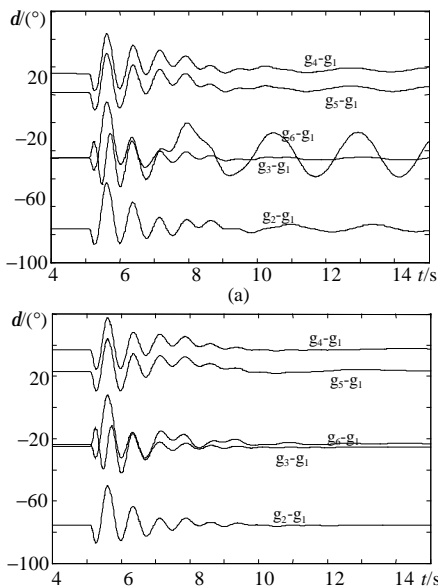


图 7 多模糊控制器协调优化结果

Fig. 7 Coordinate optimization of multiple fuzzy controller

为了体现序优化遗传算法的优势, 对于以上这一大规模优化问题分别采用常规遗传算法(GA)和序优化遗传算法(OGA)进行协调优化计算。2 种算法采用相同的交叉和变异操作, 分别单独运行 20 次。表 2 列出了 2 种算法的最终优化解的统计数据, 其中 Best 为最好的解, Worst 为最差的解, Average 为所有解平均值。

由表 2 可看出:

(1) 序优化理论在概率意义上保证解的质量, 因此 OGA 所求得解比 GA 的解来说平均性能较稳定, 这点在大规模优化问题中更为突出。

(2) OGA 采用基于序的种群淘汰选择, 避免了对适配度数值敏感性, 充分保证了优良个体在种群进化中得到更多机会, 有利于优化解的搜索。因此, 一般来说, 尤其对于具有大规模解空间的优化问题, OGA 比传统 GA 更具优势。

表 2 2 种算法结果对比

Tab. 2 Results comparison of two algorithms

性能指标 J	算法结果	
	GA	OGA
Best	659.31	681.14
Worst	619.40	642.79
Average	648.94	676.86

4 结论

本文设计了一套体现专家知识的模糊阻尼控制器, 比统阻尼控制器具有更好的非线性系统适应性和鲁棒性, 能有效地阻尼多馈入交直流输电系统的区间功率振荡。由于大规模交直流互联系统中多个模糊控制器的参数协调优化十分复杂, 这里将其归结为一个带不等式约束的多参数优化问题, 采用遗传算法搜索全局优化解。针对遗传算法的固有缺陷, 引入序优化理论与遗传算法结合, 为遗传算法提供定量的终止指标和优化解评估机制。仿真结果表明, 与传统遗传算法的优化解相比, 序优化遗传算法的优化解具有更稳定和良好的性能。由序优化理论可知: 当解空间越大, 该算法则越显示出优势, 同时由于遗传算法的通用性, 目前针对组合或函数优化问题设计的许多遗传操作均可被序优化遗传算法采用, 因此本文采用的优化算法在大规模系统的参数协调优化中很有发展前途。

参考文献

[1] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: MacGraw-Hill, 1994.
 [2] 黄莹, 徐政. 基于同步相量测量单元的直流附加控制器研究[J]. 中

- 国电机工程学报, 2004, 24(9): 7-12.
- Huang Ying, Xu Zheng. HVDC supplementary controller based on synchronized phasor measurement units[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 7-12(in Chinese).
- [3] Hiyama T, Ueki Y, Andou H. Integrated fuzzy logic generator controller for stability enhancement[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1997, 12(4): 400-406.
- [4] 程远楚, 漆为民, 叶鲁卿, 等. 发电机励磁的非线性解析模糊控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 121-125.
- Cheng Yuanchu, Qi Weiming, Ye Luqing, et al. A nonlinear analytical fuzzy logic excitation controller of generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 121-125(in Chinese).
- [5] 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 Dazhong, Yang Xiaodong, Song Wennan. 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(in Chinese).
- [6] 徐光虎, 孙衢, 陈陈. HVDC 模糊协调阻尼控制器的设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(12): 18-23.
- Xu Guanghu, Sun Qu, Chen Chen. Design of HVDC fuzzy coordinated damping controller[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12): 18-23(in Chinese).
- [7] 刘红超, 李兴源, 王路, 等. 多馈入直流输电系统中直流调制的协调优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 9-12.
- Liu Hongchao, Li Xingyuan, Wang Lu, et al. Coordination and optimization of HVDC modulations in multi-infeed HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 9-12(in Chinese).
- [8] Simoes Costa J A, Freitas F D. Design of decentralized controllers for large power systems considering sparsity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 144-152.
- [9] Khaldi M R, Sarkar A K, Lee K Y, et al. The modal performance measure for parameter optimization of power system stabilizers [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(4): 660-666.
- [10] 陈汉雄, 刘天琪, 刘群英. 多馈入交直流混合系统的智能模糊分散协调控制[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 9-12.
- Chen Hanxiong, Liu Tianqi, Liu Qunying. Intelligent fuzzy control and decentralized coordinated control for multi-infeed AC/DC systems [J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 9-12(in Chinese).
- [11] 江全元, 程时杰, 曹一家. 基于遗传算法的 HVDC 附加次同步阻尼控制器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 87-91
- Jiang Quanyuan, Cheng Shijie, Cao Yijia. Design of HVDC Supplementary subsynchronous damping controller using genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 87-91(in Chinese).
- [12] 夏长亮, 郭培健, 史婷娜, 等. 基于模糊遗传算法的无刷直流电机自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 129-133
- Xia Changliang, Guo Peijian, Shi Tingna, et al. Control of brushless DC motor using genetic algorithm based fuzzy controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 219-133(in Chinese).
- [13] 牛振勇, 杜正春, 方万良, 等. 基于进化策略的多机系统 PSS 参数优化中国电机工程学报[J], 2004, 24(2): 22-27
- Niu Zhenyong, Du Zhengchun, Fang Wanbang, et al. Parameter optimization of multi-machine power system stabilizers using evolutionary strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 22-27(in Chinese).
- [14] Ho Y C. An explanation of ordinal optimization: Soft computing for hard problems[J]. Information Science, 1999, 113(3/4): 169-192.
- [15] Wang L X. A course in fuzzy systems and control[M]. NJ: Prentice Hall; 1997.
- [16] Liang Zhang, Ling Wang, Fang Tang. Order-based genetic algorithm for flow shop scheduling[C]. Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Beijaing, 2002.

收稿日期: 2006-03-21。

作者简介:

朱浩骏(1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电系统, zhuhaojun@vip.sina.com;

蔡泽祥(1960—), 男, 教授, 博士生导师。研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力系统继电保护;

刘皓明(1977—), 男, 博士, 研究方向为电力系统稳定与控制;

倪以信(1946—), 女, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制、FACTS、人工智能技术应用以及电力市场。

(责任编辑 喻银凤)