

DOI: 10.7667/PSPC160754

考虑暂态稳定约束的电力系统最优潮流算法

卢锦玲, 张津

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 将模糊集理论应用于暂态稳定约束最优潮流问题, 结合电力系统实际特性, 对传统暂态稳定约束最优潮流模型进行改进, 将功角约束、电压约束及目标函数模糊化处理, 采用最大最小算子建立了以求解满意度最大化的暂态稳定约束最优潮流模糊新模型。构建了适于大规模非线性优化问题的协同进化粒子群算法, 用于 TSCOPF 模糊优化问题的求解。为提高算法求解效率, 结合模型特点采用提前终止暂态稳定仿真的加速策略。并利用 Matlab 并行工具箱对算法进行主从并行化改造, 显著提高了算法运行效率。最后利用新英格兰 10 机系统仿真测试, 证明了方法有效可行。

关键词: 电力系统; 最优潮流; 暂态稳定; 模糊集理论; 协同进化粒子群算法; 并行计算

Optimal power flow algorithm with transient stability constraints in power system

LU Jinling, ZHANG Jin

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: By applying fuzzy set theory to optimal power flow with transient stability constraints and considering the practical features of power system, the traditional transient stability constrained optimal power flow model is modified, the rotor angles constraint, voltage constraint and the objective function are fuzzily processed, and the TSCOPF fuzzy model is established by max-min methods. Besides, a collaborative evolutionary particle swarm optimization algorithm which is suitable for large-scale nonlinear optimization problem is established to solve the transient stability constrained optimal power flow. In order to enhance the efficiency of the optimization algorithm, considering the model's characteristics, a transient stability simulation early terminated strategy and a master-slave parallel technology are applied to the algorithm, and the algorithm is parallel processed using MATLAB toolbox. The test results on the New England 10-machine system demonstrate the proposed method is effective and feasible.

Key words: power system; optimal power flow; transient stability; fuzzy set theory; cooperative coevolutionary PSO algorithm; parallel computing

0 引言

在电力市场环境中, 电力系统预防控制被赋予了新的内涵。它不仅要使系统在特定的预想事故下能够维持暂态稳定, 同时还要满足某种经济利益最大化, 考虑了经济效益的预防控制可以描述为暂态稳定约束下的最优潮流问题, 即 TSCOPF 问题。

文献[1]基于数值离散差分法求解 TSCOPF, 将离散差分方法应用于求解暂态稳定约束的预防控制问题, 并提出了基于广义简化梯度(GRG)技术的求解方法。文献[2]基于函数空间约束转化法求解 TSCOPF, 在计算梯度矩阵时引入了伴随方程方法^[3-4], 有效提高了算法效率。文献[5]基于李雅普诺夫直接法求解 TSCOPF, 将表征系统稳定的暂态

能量裕度表达式加入 OPF 模型, 得到基于能量函数的非线性规划模型并采用了最速下降法进行求解。文献[6]采用 EEAC 法进行多预想故障的暂态稳定评估, 并通过轨迹灵敏度法得到稳定裕度关于控制变量的灵敏度, 由此构造最优潮流模型。文献[7]利用最优控制理论将 TSCOPF 问题建模成 OPF 问题和最优控制问题的交替迭代, 迭代过程中通过求解 OPF 运行点的相关机组的有功出力极限, 并利用有功出力极限的不等约束代替了系统功角微分方程约束, 很好地解决了问题规模过于庞大、计算负担过重的困难。

TSCOPF 涉及到大量微分方程的计算, 计算复杂度极高。智能优化算法在解决这类问题时优化效率普遍不足, 但随着智能算法的不断发展, 更高效

的算法相继被提出。如粒子群算法^[8]和蚁群算法^[9]均已应用于这类问题的求解, 文献[10]将有效集减空间逐次二次规划算法应用于 TSCOPF 优化问题。

在建模方面, 本文将模糊集理论应用于暂态稳定约束最优潮流问题, 对传统暂态稳定约束最优潮流模型进行改进。在求解算法方面, 结合协同进化算法全局探索能力强和粒子群算法原理简单、收敛速度快的优点, 构造了综合性能优越的协同进化粒子群算法, 用于 TSCOPF 模糊优化问题的求解。最后算例分析验证了所提方法的有效性和可行性。

1 基于模糊理论的含暂态稳定约束最优潮流问题建模

1.1 约束条件及目标函数的模糊化

在常规非线性规划问题中, 变量约束一般都是“硬约束”, 必须在变量严格满足约束的前提下寻找问题的优化解。在很多情况下, 这种硬约束并不符合实际情况, 实际电力系统中允许某些变量在边界值附近轻微浮动以获得更高质量的解。

本文采用文献[2]构建的 TSCOPF 模型, 并应用模糊集理论^[11]对其目标函数和部分约束条件进行改进, 建立 TSCOPF 的模糊规划模型。模糊建模的关键在于隶属函数的确定。

(1) 目标函数的模糊化

TSCOPF 问题的目标是在相应约束条件下, 寻找系统总燃料费用最低的有功出力组合。因此目标函数值越小越好, 对应的隶属度值应该越大, 反之隶属度函数值应该越小, 因此选降半梯形分布作为隶属函数, 表达式为

$$\mu(F) = \begin{cases} 1, & F \leq F_M - \sigma_1 \\ \frac{F_M - F}{\sigma_1}, & F_M - \sigma_1 < F < F_M \\ 0, & F \geq F_M \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mu(F)$ 为目标函数系统总燃料费用的隶属度; F_M 为系统总燃料费用的最大可接受值, 一般取优化前的系统总燃料费用; σ_1 为期望下降的最大费用值。其隶属函数曲线如图 1 所示。

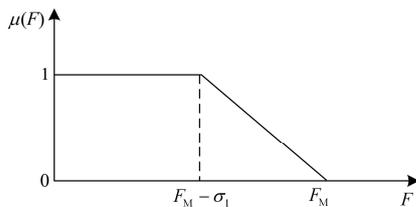


图 1 发电总燃料费用隶属函数

Fig. 1 Function of total fuel cost of generation

(2) 电压约束的模糊化

母线电压在系统正常运行时应处于一定的范围, 且在边界上下留有一定裕度, 该约束属于区间约束, 因此选梯形分布作为隶属函数, 表达式为

$$\mu(U_i) = \begin{cases} 1, & U_{i\min} + \sigma_2 \leq U_i \leq U_{i\max} - \sigma_2 \\ \frac{U_{i\max} - U_i}{\sigma_2}, & U_{i\max} - \sigma_2 < U_i < U_{i\max} \\ \frac{U_i - U_{i\min}}{\sigma_2}, & U_{i\min} < U_i < U_{i\min} + \sigma_2 \\ 0, & U_i \geq U_{i\max} \text{ 或 } U_i \leq U_{i\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i \in S_N$; $\mu(U_i)$ 为 i 节点电压值的隶属度; $U_{i\max}$ 和 $U_{i\min}$ 分别为 i 节点电压值的理想上限值和下限值; σ_2 为允许的电压最大偏移值。其隶属函数曲线如图 2 所示。

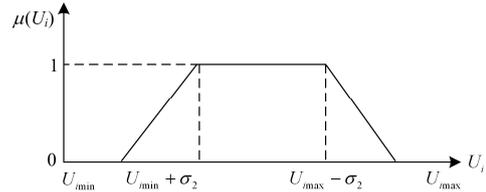


图 2 电压隶属函数

Fig. 2 Function of the voltage

(3) 功角约束的模糊化

为保障系统的暂态稳定性, 发电机各时刻转子角不应超出一定的范围, 而从经济性更优的角度考虑又希望范围更大, 边界取值具有一定模糊性, 选梯形分布作为隶属函数, 表达式为

$$\mu(\tilde{\delta}_j) = \begin{cases} 1, & \delta_{\min} \leq \tilde{\delta}_j \leq \delta_{\max} \\ \frac{\delta_{\max} + \sigma_3 - \tilde{\delta}_j}{\sigma_3}, & \delta_{\max} < \tilde{\delta}_j < \delta_{\max} + \sigma_3 \\ \frac{\tilde{\delta}_j - \delta_{\min} + \sigma_3}{\sigma_3}, & \delta_{\min} - \sigma_3 < \tilde{\delta}_j < \delta_{\min} \\ 0, & \tilde{\delta}_j \geq \delta_{\max} + \sigma_3 \text{ 或 } \tilde{\delta}_j \leq \delta_{\min} - \sigma_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $j \in S_G$; $\mu(\tilde{\delta}_j)$ 为第 j 台发电机功角的隶属度; δ_{\max} 和 δ_{\min} 分别为发电机功角的理想上限值和下限值; σ_3 为允许的发电机功角伸缩量。其隶属函数曲线如图 3 所示。

1.2 模糊模型的建立

本文采用最常用的模糊决策, 即满意度 S 取所有隶属函数的最小值, 优化目标是使满意度 S 最大化。由此可得使满意度 S 最大化即 $-S$ 最小化的 TSCOPF 模糊规划模型。

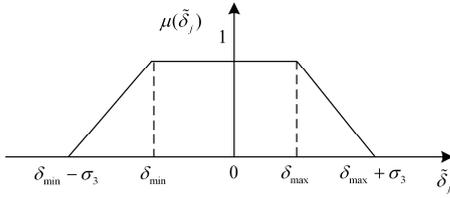


图3 功角隶属函数

Fig. 3 Function of the power angle

$$\begin{aligned}
 \min \quad & -S \\
 \text{s.t.} \quad & S \leq \mu(F) \\
 & S \leq \mu(U_i), \quad i \in S_N \\
 & S \leq \mu(\tilde{\delta}_j), \quad j \in S_G \\
 & 0 \leq S \leq 1
 \end{aligned} \quad (4)$$

模型中的其他约束条件参见文献[2]。

2 暂态稳定约束最优潮流协同进化粒子群算法的求解

电力系统优化问题通常具有多变量、多约束、强非线性的特点,粒子群算法因其全局搜索能力强、对模型复杂度要求低、简单易实现且易于并行化的优点得以广泛应用^[12-14]。随着系统规模的扩大,粒子群算法容易出现“早熟”且收敛速度下降的缺点。协同进化算法采用类似分解-协调的思想处理复杂系统的演化,能有效克服这样的缺陷^[15]。本文提出协同进化算法和粒子群算法相结合的协同进化粒子群算法(CEPSO)应用于 TSCOPF 优化问题,以增强收敛性能。为进一步提高算法的求解效率,采用了提前终止暂态稳定计算的加速策略,并对算法进行了主从并行化改造。

2.1 求解步骤

协同进化粒子群算法应用于 TSCOPF 模糊优化问题的求解步骤如下。

(1) 输入系统原始数据,包括节点信息、支路信息以及发电机参数等。

(2) 设置 TSCOPF 模糊模型参数,包括目标函数最大可接受值及伸缩量、电压上下限及伸缩量以及发电机功角上下限及伸缩量。

(3) 协同进化 PSO 参数的初始化。包括子种群的规模 m 、惯性权重、加速系数、进化轮数以及过度向量 \mathbf{P} 。为便于算法的并行化,适应值计算中过度向量 \mathbf{P} 的更新在每进化一轮后整体进行。

(4) 将系统 D 维控制变量进行合理地划分(比如按地区划分,按控制变量类型划分等),共划为 K 组,对应 K 个子优化问题,用 K 个粒子群分别优化。系

统控制变量去除平衡节点(设为 1 号发电机)以外的发电机节点有功出力和所有发电机节点电压量,记 $\mathbf{X} = [P_{G2}, P_{G3}, \dots, P_{GNg}, V_{G1}, V_{G2}, \dots, V_{GNg}]$, 其中 N_g 为发电机台数。假设划分后第 i ($1 \leq i \leq K$) 组控制变量可用向量 \mathbf{X}_i 来表示,则整个系统的控制变量可记为 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_i, \dots, \mathbf{X}_K]$ 。

(5) 对每个种群进行初始化,在粒子各维变量的取值范围内随机生成各个粒子的初始位置、初始速度。并令当前种群序号为 $s=1$ 。

(6) 在第 s 个种群内分别对 m 个粒子进行适应值评估。取相应粒子的位置向量 \mathbf{X}_s 替换掉过度向量 \mathbf{P} 与之对应的部分,得到整个系统的 D 维向量 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_i, \dots, \mathbf{X}_K]$ 。在该状态下对系统利用牛顿拉夫逊法进行潮流计算,利用隐式梯形积分法进行暂态稳定计算,根据潮流稳定计算结果由式(4)计算满意度 S ,并与不等式惩罚项一起作为粒子的适应值。这里不等式惩罚项由系统运行不等式约束中平衡节点有功约束、所有无功约束及线路热稳定约束组成。

(7) 对第 s 个种群内粒子进行状态更新,得到新的全局极值点和个体极值点,并得到新的粒子位置和速度向量。

(8) 判断一轮完整的协同进化过程是否完成,若 $s < K$,表示尚未完成,令 $s=s+1$,返回步骤(6)继续进行。

(9) 更新协同进化过程中的过度向量 \mathbf{P} ,其由 K 个子种群中的种群代表构成,本文选取种群代表采用最优选取法^[16],即由各子种群中全局极值点的位置向量拼接而成。更新惯性权重 ω 、加速系数 c_1 、 c_2 以及进化轮数。

(10) 判断整个优化过程是否完成,若连续若干次进化目标函数值没有明显变化或已达到最大进化轮数,则停止并输出结果,否则从第一个种群开始完成新一轮的协同进化,令 $s=1$ 并转向步骤(6)。

2.2 提高仿真效率的加速策略

2.2.1 提前终止暂态稳定仿真计算

算法在每次适应值评估时都要进行暂态稳定计算,暂态稳定计算是其耗费机时的主要因素,为减少算法时间成本开销,本文采用提前终止暂态稳定仿真的加速策略。

暂态稳定计算的目的是为了获得发电机在各个时刻的功角值,进而由式(3)计算相应的隶属度。由隶属函数模型可知,在功角值大于某一临界值或小于某一临界值的情况下,其隶属度将为零。在算法初期将会产生大量使系统不稳定的运行状态,在这些运行状态下,发电机功角值在很短时间便会超

出该临界值, 此时相应隶属度已为零, 不必继续暂态稳定仿真直到结束。因此在暂态稳定计算中通过检测该临界值提前终止暂态稳定仿真将会有效提高计算效率。

2.2.2 算法的主从并行化改造

算法优化过程中要进行大量的潮流计算和暂态稳定计算来评估相应粒子的适应值, 这使得 TSCOPF 成为计算密集型问题。本文采用易于实现的主从并行结构对算法进行改造, 并行策略如图 4 所示。主进程负责系统原始数据的读入、参数的设置、变量分组以及协同过度向量的更新。从进程按照分组数平均分配给各子优化问题, 各子优化问题并行进行, 每一子优化问题采用 MPSO 算法优化, 其中各粒子的适应值评估是独立的, 可以根据分配得到的进程数并行实现。

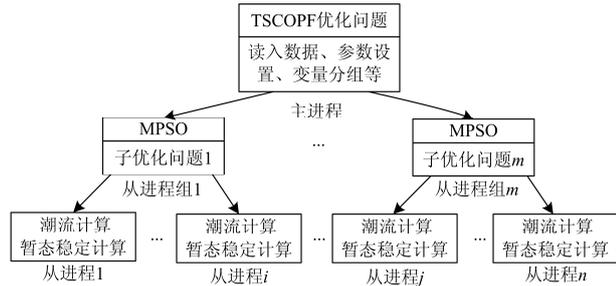


图 4 协同进化 PSO 算法并行策略

Fig. 4 Concurrent strategies of cooperative PSO algorithms

3 算例分析

算例采用新英格兰 10 机典型电力系统, 系统接线及线路参数见文献[17]。系统中发电机有功出力上下限、无功出力上下限及发电费用系数见表 1。算例采用暂态分析的一般假设^[18-19], 所有发电机采用经典二阶模型, 原动机功率恒定, 负荷采用恒阻抗模型。暂态稳定仿真时长设为 3 s, 步长为 0.01 s, 功率基准值为 100 MVA, 暂态稳定判据中 $\delta_{\max}=100^\circ$ 。所有母线电压上下限分别为 1.05、0.95。所有支路潮流上限为 10。模糊参数的取值: $F_M=62\ 800$, $\sigma_1=1880.84$, $\sigma_2=0.01$, $\sigma_3=120^\circ$ 。系统优化控制变量共 19 个, 先按控制变量类型将其划分为两部分, 再按区域进行划分(将 1~5 号发电机归为一区, 6~10 号归为一区), 由此得到 4 个子优化问题。协同进化 PSO 算法参数设置: 最大进化轮数为 100, 每个子粒子群规模为 8, 惯性权重 $\omega_0=0.9$ 、 $\omega_f=0.4$, 加速系数 $c_{10}=2.05$ 、 $c_{1f}=0.5$ 、 $c_{20}=0.5$ 、 $c_{2f}=2.05$ 。算例中潮流计算结合 Matpower4.0 软件包^[20]实现, 暂态稳定计算由 PST1.2 软件包^[21]改进实现。考虑以下两个预想故障。

故障 A: 0 s 时, 线路 16-17 靠近母线 16 侧发生三相短路, 0.17 s 后切除线路 17-18 消除故障。

故障 B: 0 s 时, 线路 21-22 靠近母线 21 侧发生三相短路, 0.17 s 后切除线路 21-22 消除故障。

表 1 10 机系统发电机数据

Table 1 Generator data of 10-machine power system

发电机 编号	有功	有功	无功	无功	发电费用系数		
	上限/ MW	下限/ MW	上限/ Mvar	下限/ Mvar	a	b	c
1	350	100	400	-140	50	6.9	0.0193
2	650	200	300	-100	90	3.7	0.0111
3	800	300	300	-150	130	2.8	0.0104
4	750	300	250	-100	130	4.7	0.0088
5	650	250	167	-150	100	2.8	0.0128
6	750	300	300	-100	130	3.7	0.0094
7	750	250	240	-100	120	4.8	0.0099
8	700	250	250	-100	110	3.6	0.0113
9	900	400	300	-150	130	3.7	0.0071
10	1200	600	300	-100	150	3.9	0.0064

3.1 优化结果分析

算例中应用协同进化 PSO 算法对 TSCOPF 模糊模型做仿真计算, 并与 OPF 优化结果作对比, 如表 2 所示。图 5、图 6 分别给出了系统在考虑暂态稳定约束前后仿真得到的不同故障下各发电机相对惯量中心的功角曲线。

表 2 10 机系统在 TSCOPF 模糊模型下的优化结果

Table 2 Optimization results of 10-machine system in TSCOPF fuzzy model

参数	OPF	TSCOPF 模糊模型	
		故障 A	故障 B
P_{G1}/MW	242.57	262.64	248.31
P_{G2}/MW	566.85	583.74	575.69
P_{G3}/MW	642.96	634.65	651.75
P_{G4}/MW	629.84	649.07	640.48
P_{G5}/MW	506.10	455.18	515.98
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
P_{G10}/MW	978.34	1040	1024.6
$V_{G1}/p.u.$	1.0045	1.0157	1.0001
$V_{G2}/p.u.$	1.05	1.0104	1.0222
$V_{G3}/p.u.$	1.016	1.0201	1.0122
$V_{G4}/p.u.$	0.9962	0.9818	0.9925
$V_{G5}/p.u.$	1.0099	1.0259	1.0059
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$V_{G10}/p.u.$	1.028	0.9947	1.0265
\bar{V}	1.05	1.0439	1.0437
L	0.9902	0.9933	0.9849
总费用/(\$/h)	60 919.16	61 069.39	60 990.38

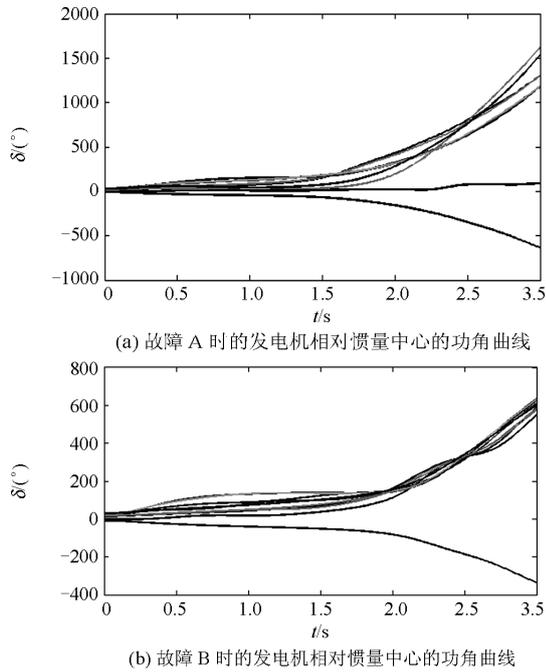


图 5 OPF 优化结果的发电机功角曲线

Fig. 5 Power angle curve of the OPF optimization

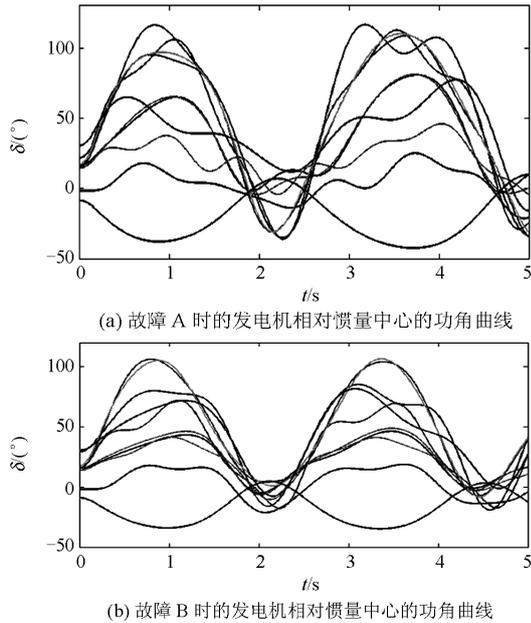


图 6 TSCOPF 模糊优化结果的发电机功角曲线

Fig. 6 Power angle curve of the TSCOPF fuzzy optimization

表 2 中 \bar{V} 为负荷母线电压最大值, \underline{V} 为负荷母线电压最小值, 可以看出, OPF 优化后的母线电压在发电机 2、6、7 处以及某些负荷节点处均达到了边界值, 而由 TSCOPF 模糊模型优化得到的所有母线电压均在要求的水平范围内, 且离边界值仍保留有一定的安全裕度。考虑故障情况下的优化费用值

要略高于 OPF 所得费用值, 这是为了保证系统的暂态稳定性不得不牺牲的最低成本。由此可以得出, 电压量、功角量以及发电总费用经模糊化处理后, 在最大满意度意义下, 获得最低发电费用的同时提高了系统的安全性。

图 5 表明, 系统若不考虑暂态稳定约束在故障 A 或 B 发生时都将暂态失稳。图 6 表明, 经暂态稳定约束优化后系统能保持暂态稳定运行。同时可以看出, 将功角模糊化处理后功角曲线的最大幅值在阈值 100° 的基础上略有超出, 但在满意度最大化的目标使然下, 能够保证系统暂态不失稳。

3.2 算法性能分析

3.2.1 优化结果对比

将协同进化 PSO 算法的优化结果与 PSO 算法及 MPSO 算法作对比, 将 3 种算法均应用于 TSCOPF 模糊模型下故障 A 的求解。如表 3, 结果显示, 用于同一模型求解时协同进化 PSO 算法的优化结果与其他两种优化算法无明显差异, 3 种算法均能实现优化结果暂态稳定, 且优化费用相当。

表 3 协调进化 PSO 与其他优化算法的结果比较

Table 3 Optimization results of CEPSO, PSO and MPSO

参数	PSO	MPSO	协同进化 PSO
P_{G1}/MW	262.57	262.88	262.64
P_{G2}/MW	582.85	583.44	583.74
P_{G3}/MW	634.96	634.33	634.65
P_{G4}/MW	649.84	649.57	649.07
P_{G5}/MW	455.10	455.18	455.18
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
P_{G10}/MW	1039.3	1038	1040
$V_{G1}/p.u.$	1.0145	1.0150	1.0157
$V_{G2}/p.u.$	1.0105	1.0104	1.0104
$V_{G3}/p.u.$	1.0206	1.0200	1.0201
$V_{G4}/p.u.$	0.9862	0.9838	0.9818
$V_{G5}/p.u.$	1.0249	1.0259	1.0259
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$V_{G10}/p.u.$	1.0001	0.9976	0.9947
\bar{V}	1.0440	1.0440	1.0439
\underline{V}	0.9932	0.9935	0.9933
总费用(\$/h)	61 068.16	61 069.3	61 069.39

3.2.2 收敛性能对比

对比协调进化 PSO 算法与 PSO 及 MPSO 算法的收敛性能, 为保证总适应值评估次数的一致性, 协同进化 PSO 算法子种群规模设为 8, PSO 算法及 MPSO 算法种群规模设为 30。由于 3 种算法均为随机算法, 分别运行 20 次, 平均收敛特性如图 7。

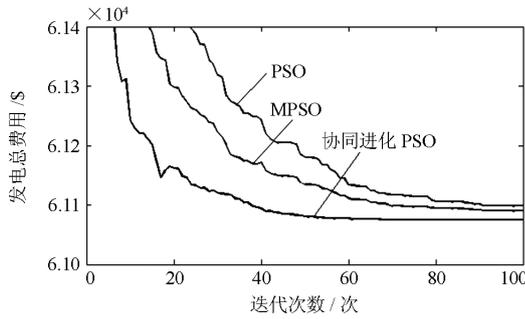


图 7 算法的收敛特性

Fig. 7 Convergence of the algorithm

可以看出, 协同进化 PSO 算法在迭代进行 40 次左右就能收敛到最优解, 其他两种算法需要分别迭代到 65 次左右和 80 次左右才能收敛到最优解。因此无论从收敛精度还是收敛速度上, 协同进化 PSO 算法均优于其他两种优化算法。

3.3 并行加速性能分析

在单机多核模式下对算法的并行性能进行测试, 测试环境为 Matlab r2012b, 计算机配置为 Intel Core i7 3.4GHz 四核 CPU 和 16GB DDR3 内存。两个并行性能指标加速比 S_n 和并行效率 E_n 定义为

$$S_n = t_1 / t_n \quad (5)$$

$$E_n = S_n / n \quad (6)$$

式中: t_1 为并程序在单个进程串行运行的时间; t_n 为同一程序在 n 个进程并行运行的时间; n 为计算机核心数。对故障 A 和故障 B 两个案例进行并行测试, 结果汇总于表 4。

结果表明, 随着并行进程数目的增加, 程序运行时间显著缩短, 运行速度不断加快。进程数为 1 时对应程序的串行运行, 其运行时间是显著的, 当进程数为 4 时, 加速比将分别达到 3.88 和 3.81, 加速效果非常乐观, 说明算法具有良好的并行性能, 通过并行改造能有效提高算法的计算效率。同时, 随着进程数的增加并行效率有所下降, 这是由于进程间通信时间的增加导致的。

表 4 并行加速性能测试结果

Table 4 Test results of the parallel acceleration

案例	进程数	运行时间/s	加速比 S_n	并行效率 E_n
故障 A	1	1590	1	1
	2	815	1.95	0.975
	4	410	3.88	0.97
故障 B	1	1620	1	1
	2	835	1.94	0.97
	4	425	3.81	0.953

4 结论

本文将模糊集理论应用于暂态稳定约束最优潮流建模, 建立了综合考虑电力系统安全性、稳定性和经济性的含暂态稳定约束最优潮流的模糊新模型, 并基于时域仿真应用协同进化 PSO 算法研究了 TSCOPF 模糊模型的求解过程, 仿真结果显示算法收敛性能佳, 优化解的质量高。在提高算法效率方面所提出的结合模型特点的提前终止暂态稳定计算加速策略以及在单机多核模式下对算法进行的主从并行化改造显著减少了仿真耗时, 有效提高了算法的运行效率, 使得所提方法应用于较大系统成为可能。本文所提方法在获得经济性最优的同时保证了系统的安全性和稳定性, 有效可行。

参考文献

- [1] SCALA M L, TROVATO M, ANTONELLI C. On-line dynamic preventive control: an algorithm for transient security dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 15(3): 601-610.
- [2] 杨新林, 孙元章, 王海风. 考虑暂态稳定性约束的最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 13-17. YANG Xinlin, SUN Yuanzhang, WANG Haifeng. A new approach for optimal power flow with transient stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 13-17.
- [3] BRAYTON R K, SPENCE R S. Sensitivity and optimization[J]. New York: Elsevier Scientific Publisher, 1980: 67-89.
- [4] LIDIA D, PAOLO G. Multi-parameter time domain sensitivity computation[J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems-I: Fundamental and Applications, 2001, 48(11): 1296-1307.
- [5] KITA H, NISHIYA K, HASEGAWA J. On-line preventive control for power systems based on energy function method[J]. Electrical Engineering in Japan, 1991, 111(7): 30-39.
- [6] 赵晋泉, 钱莉, 陈刚. 一种基于 EEAC 和轨迹灵敏度的暂态稳定约束最优潮流模型与方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 9-14. ZHAO Jinquan, QIAN Li, CHEN Gang. A novel EEAC and sensitivity based model and algorithm of transient stability constrained optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 9-14.
- [7] 孙景强, 房大中, 锺德成. 暂态稳定约束下的最优潮流[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 12-17. SUN Jingqiang, FANG Dazhong, ZHONG Decheng. Study on preventive control algorithm for dynamic

- security of power system based on trajectory sensitivity method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 12-17.
- [8] MO N, ZOU Z Y, CHAN K W, et al. Transient stability constrained optimal power flow using particle swarm optimization[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(3): 476-483.
- [9] 刘前进, 许慧铭, 施超. 基于人工蜂群算法的多目标最优潮流问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 1-7.
LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao. Research on power flow optimization based on multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 1-7.
- [10] 韩其国, 陈功洵, 肖宏飞. 基于有效集减空间逐次二次规划算法的电力系统暂态稳定约束最优潮流[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 126-131.
HAN Qiguo, CHEN Gongxun, XIAO Hongfei. Power system transient stability constrained optimal power flow based on active-set reduced-space sequential quadratic programming[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 126-131.
- [11] 陈好, 陈胜, 郭晓敏, 等. 基于模糊隶属度的电力系统抗差估计[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 13-19.
CHEN Yu, CHEN Sheng, GUO Xiaomin, et al. Power system robust estimation based on fuzzy membership[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 13-19.
- [12] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 15-19.
YUAN Xiaohui, WANG Cheng, ZHANG Yongchuan, et al. A survey on application of particle swarm optimization to electric power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 15-19.
- [13] 胡殿刚, 秦睿, 黄亭, 等. 基于免疫记忆粒子群优化算法的风火联合系统的多目标优化调度[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 20-26, 30.
HU Diangang, QIN Rui, HUANG Ting, et al. Wind power integrated with thermal system multi-objective optimal dispatch based on immune memory particle swarm optimization algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 20-26, 30.
- [14] 况达, 滕欢, 王博堃, 等. 基于改进遗传算法的蓄电池容量配置及充放电策略研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 90-96.
KUANG Da, TENG Huan, WANG Bokun, et al. Capacity allocation and charging-discharging strategies study of storage battery based on improved genetic algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 90-96.
- [15] 陈皓勇, 王锡凡, 别朝红, 等. 协同进化算法及其在电力系统中的应用前景[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 94-100.
CHEN Haoyong, WANG Xifan, BIE Zhaohong, et al. Cooperative coevolutionary approaches and their potential applications in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 94-100.
- [16] WIEGAND R P, LILES W C, DE JONG K A. An empirical analysis of collaboration methods in cooperative coevolutionary algorithms[C] // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001: 1235-1245.
- [17] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[M]. USA: Kluwer Academic Publisher, 1989.
- [18] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 203-204.
- [19] 白宪庆, 刘劭玮, 李宝昕. 自动重合闸重合于永久性故障对电力系统暂态稳定的影响[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 69-73.
BAI Xianqing, LIU Shaowei, LI Baoxin. The influence on automatic reclosing on permanent fault on the transient stability of power system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 69-73.
- [20] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SANCHEZ C E. MATPOWER: a Matlab power system simulation package[EB/OL]. [2011]. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>.
- [21] GRAHAM R, JOE C. Power system transients: a Matlab power system simulation package[EB/OL]. [1997]. <http://www.eagle.ca/~cherry/psf>.

收稿日期: 2016-05-25; 修回日期: 2016-08-25

作者简介:

卢锦玲(1971-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行、分析与控制; E-mail: lujinling@126.com

张津(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行、分析与控制。E-mail: jinzh_milan@live.com

(编辑 葛艳娜)