

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.019

基于协同微粒子群算法的暂态 稳定约束最优潮流

叶琳¹, 肖谭南², 吕晓祥², 王建全², 王超¹, 杨逸³, 周丽华³

(1. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学 电气工程学院,
浙江 杭州 310027; 3. 浙江省湖州电力局, 浙江 湖州 313000)

摘要:针对电力系统预防控制的实现问题,提出了一种基于协同微粒子群算法的暂态稳定约束最优潮流计算方法。暂态稳定约束最优潮流问题是在最优潮流问题上加入暂态稳定约束,形成的高维非线性动态优化问题。微粒子群算法能够通过较少的粒子数搜索到全局最优解,有效地求解高维复杂优化问题。利用该方法,对存在失稳预想事故的新英格兰 10 机 39 节点系统进行了分析计算,并与多种智能算法的调度结果进行了比较。研究表明,使用协同微粒子群进化算法求解暂态稳定约束最优潮流是有效与准确的,其计算量小于已报道算法,优化结果更优,能够应用到电力系统的暂态稳定分析中,为电力系统预防控制提供了一种思路。

关键词:微粒子群算法;电力系统;预防控制;暂态稳定;最优潮流

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0101-06

Application of cooperative micro-particle swarm algorithm for transient stability constrained optimal power flow

YE Lin¹, XIAO Tan-nan², LV Xiao-xiang², WANG Jian-quan²,
WANG Chao¹, YANG Yi³, ZHOU Li-hua³

(1. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310027, China; 2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Zhejiang Huzhou Power Supply Company, Huzhou 313000, China)

Abstract: Aiming at solving transient stability constrained optimal power flow, a new and effective approach which is based on the Cooperative micro-particle swarm is proposed. The technique can be used as a preventive control scheme. The formulas of transient stability constrained optimal power flow were derived through the addition of rotor angle inequality constraints into optimal power flow relationships, which is a high-dimensional nonlinear dynamic optimization problem. Micro-evolutionary approaches employ very small populations of just a few individuals to provide solutions rapidly. It was proved to be useful in evolutionary computation due to the ability to solve high-dimensional complex problem. The optimal schedule for the New England ten-generator, 39-bus system, which has unstable contingencies, was obtained through this method. The method was proved to be effective and accurate by comparing the schedules solved by COMPSO and other reported intelligent algorithms. The results indicate that the proposed method can achieve better optimization through less calculation and be applied to the analysis of transient stability and rescheduling of power system.

Key words: micro-particle swarm; power system; preventive control; transient stability; optimal power flow

0 引 言

随着电网发展对安全稳定要求的日益提高,如何

能有效协调电网经济性与安全性成为亟待解决的问题。静态安全性一般通过节点电压水平、线路传输功率极限等指标描述,这些指标在最优潮流计算中均已

体现。暂态稳定约束最优潮流在静态最优潮流的基础上增加了暂态稳定性约束,成为一个动态优化问题,使计算的复杂性大大增加。暂态安全性暂态稳定约束最优潮流(transient stability constrained optimal power flow, TSCOPF)已成为电网安全稳定研究的热点问题^[1]。

关于暂态稳定约束最优潮流的求解,一类方法是通过将动态优化问题转换为静态优化问题来进行求解,常用的转换方法包括数值离散差分^[2-3]、单机无穷等效降维^[4]、动态灵敏度的伴随矩阵法^[5]、最优控制理论方法^[6-7]等,将动态复杂的非线性优化问题转换为常规的优化问题来进行求解,这类方法的优点是计算速度快,能够较好地利用数值方法求得最优解。另外一类方法是通过灵敏度来直接修正优化变量,通过功角与发电机的灵敏度关系来修正发电机出力^[8],这类方法简单易求解,但是忽略了电网的复杂性,不是严格意义上的最优解。在暂态稳定约束最优潮流的求解问题上,智能算法得到了较为普遍的关注,如粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)^[9]、遗传算法(genetic algorithm, GA)^[10]、差分进化算法(differential evolution, DE)^[11]、神经网络算法(artificial neural network, ANN)^[12]、人工蜂群算法(artificial bee colony, ABC)^[13]。智能算法的研究发展主要集中在两种思路:改善算法的性能,或者将某种智能算法与其他智能算法相结合,充分利用各自算法的优点来求解,提高优化的准确性和计算效率。文献[14]将差分进化技术和灵敏度技术相结合,充分利用了灵敏度法的快速收敛特性和微分进化算法的全局搜索能力;文献[15]将自适应进化规划技术与神经网络算法相结合,通过自适应进化技术提高计算效率,神经网络算法提高计算速度;文献[16]设计了一种将确定性规划技术和进化算法相结合的混合算法。标准粒子群算法具有适应性强、鲁棒性强的特点,并能与多种算法结合解决多种问题。文献[17]提出了一种基于模糊控制理论及模拟退火原理的改进粒子群算法;文献[18]将均值聚类与随机粒子群算法相结合,克服了粒子群算法的早熟现象;文献[19-20]将粒子群算法和神经网络算法相结合,获得了良好的效果。

本研究在研究标准粒子群优化算法的基础上,将协同微粒子群算法引入到求解暂态稳定约束最优潮流中,根据优化控制变量的数量,合理安排子优化问题的个数,通过子优化问题的最优解逼近全局最优解,减少计算量,提高优化精度。为检验计算方法的有效性,计算结果与已经报导的一些智能算法的优化结果进行比

较,通过比较分析证明算法在求解暂态稳定约束最优潮流中的准确性与有效性。

1 TSCOPF 模型的建立

暂态稳定约束最优潮流问题可以简洁地由下式表示:

$$\text{Min. } f(\mathbf{u}, y_0) \quad (1)$$

$$\text{S. t. } g(\mathbf{u}, y_0) = 0 \quad (2)$$

$$h(\mathbf{u}, y_0) \leq 0 \quad (3)$$

$$\bar{g}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, y) = 0 \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \bar{g}(\mathbf{u}, \mathbf{x}, y) \quad (5)$$

$$TSI_k \leq \varepsilon \quad (6)$$

式中: \mathbf{u} —描述系统的控制向量,主要指发电机的有功出力 and 发电机节点电压幅值; y_0, y —系统稳态和暂态运行时的运行变量,主要指各节点电压幅值与相角; \mathbf{x} —由系统中各发电机组的状态变量组成的向量。

其中:式(1)中的 f 表示系统中发电机燃料费用的目标函数:

$$f(\mathbf{u}, y_0) = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \quad (7)$$

式中: a_i, b_i, c_i —燃料费用系数; N_G —运行中的发电机台数; P_{Gi} —第 i 台发电机的有功输出。

式(2)为稳态运行时的潮流约束,其具体形式如下式:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_{Ri} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

$i \in S_N$

式中: S_N —所有节点构成的集合。

式(3)为不等式约束,具体形式如下式:

$$\begin{cases} \bar{P}_{Gi} \leq P_{Gi} \leq \bar{P}_{Gi}, i \in S_G \\ \bar{Q}_{Ri} \leq Q_{Ri} \leq \bar{Q}_{Ri}, i \in S_G \\ \bar{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i, i \in S_N \\ \bar{P}_{ij} \leq P_{ij} \leq \bar{P}_{ij}, (i, j) \in S_{CL} \end{cases} \quad (9)$$

式中: S_N —定义同上, S_G —所有发电机节点的集合, S_{CL} —所有输电线路的集合。

各式分别对应着发电机有功、无功上、下限约束,节点电压约束以及传输线路传输功率约束。

式(4,5)表示描述系统暂态过程的微分代数方程组约束。以经典发电机模型为例,描述发电机动态过程的微分方程为:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = (\omega_i - 1) \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{1}{T_{ji}} (P_{mi} - P_{ei}) \end{cases}, i \in S_G \quad (10)$$

式中: S_C —所有发电机节点的集合。

对于更复杂的发电机组模型,应用智能优化算法只是增加计算量,而不会增加计算的复杂性。

网络代数方程为:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -B_{11} & G_{11} \\ G_{11} & B_{11} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} -B_{1m} & G_{1m} \\ G_{1m} & B_{1m} \end{bmatrix} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \begin{bmatrix} -B_{m1} & G_{m1} \\ G_{m1} & B_{m1} \end{bmatrix} & \cdots & \begin{bmatrix} -B_{mm} & G_{mm} \\ G_{mm} & B_{mm} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{y1} \\ V_{x1} \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} V_{ym} \\ V_{xm} \end{bmatrix} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{x1} \\ I_{y1} \end{bmatrix} \\ \vdots \\ \begin{bmatrix} I_{xm} \\ I_{ym} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = 0 \quad (11)$$

式(6)表示系统的暂态稳定约束,表示系统在 k 故障下能够保持稳定,具体表达式不同导致计算的结果也不同,本研究采用发电机相对于系统惯性中心的功角差来构造暂态稳定判据。首先定义惯性中心角(Center of Inertia):

$$\delta_{col} = \frac{1}{T_J} \sum_{i=1}^n T_{Ji} \delta_i \quad (12)$$

式中: T_{Ji} —第 i 台发电机的惯性时间常数, $T_J = \sum_{i=1}^n T_{Ji}$, s ; δ_i —第 i 台发电机的功角。

工程上认为发电机相对于惯性中心角的最大差值不超过 δ_{max} 时,系统能够保持暂态稳定。表达式为:

$$\begin{cases} |\delta_i - \delta_{col}|_{max} \leq \delta_{max} \\ i \in S_C, t \in [0, TE] \end{cases} \quad (13)$$

式中: δ_{max} —根据工程经验, δ_{max} 一般在 $100^\circ \sim 120^\circ$ 之间取值; TE —仿真终止时间。

对于 TSCOPF 问题的求解来说,主要难点集中在:

- ①如何将暂态稳定约束加到 OPF 模型中,即如何表达约束(6);
- ②暂态稳定约束加入后如何求解整个优化问题。

2 COMPSO 算法原理

PSO 算法由于其高效的搜索能力,在优化求解中得到广泛的应用^[21]。但对于像最优潮流这样优化变量较多的大规模优化问题,PSO 算法需要通过增加种群的粒子数以增加种群多样性,从而提高全局搜索能力,这将大大增加种群适应值计算的耗时,降低算法的计算效率。通过微粒子群算法可以较好地解决这个问题,微粒子群算法与标准的粒子群算法的区别在于粒子的规模上,微粒子群算法通过很少的粒子数比如 $N \leq 10$ 即可达到标准粒子的优化效果。粒子群算法的全局寻优结果与下式的比率有关:

$$D = \frac{n}{N} \quad (14)$$

式中: n —优化变量的维度, N —粒子数。

当 $D < 1$ 时表示粒子规模比优化变量的维度要大;当 $D > 1$ 时表示粒子规模小于优化变量的维度。通常情况下, D 越大越难以求得最优解。为确保求得最优解并提高计算效率,文献[22]提出一种微粒子系统进化算法,以较少的粒子数,实现粒子较好地寻优。假定:

$$n = \sum_{k=1}^K n_k \quad (15)$$

式中: k —正整数,即将原优化问题的维度分为 k 个子维度,即为 k 个子问题,分别为 S_1, S_2, \dots, S_k , 对应的子维度数目为 n_1, n_2, \dots, n_k , 对应的优化粒子数目为 N_1, N_2, \dots, N_k , 从而达到 D 小于 1 的目的,粒子的更新过程与标准粒子群优化算法相同,粒子的优化通过一个过渡向量更新,从而体现每个子优化问题对整个寻优问题的贡献,过渡向量 P 定义为:

$$P = (P_1, P_2, \dots, P_n)^T \quad (16)$$

如果向量 $z^{[k]} = (z_1^{[k]}, z_2^{[k]}, \dots, z_{n_k}^{[k]})$ 为第 k 个子优化问题 S_k 的优化结果为 n_k 维向量,那么过渡向量:

$$P = (\underbrace{z_1^{[1]}, \dots, z_{n_1}^{[1]}}_{S_1}, \underbrace{z_1^{[2]}, \dots, z_{n_2}^{[2]}}_{S_2}, \dots, \underbrace{z_1^{[K]}, \dots, z_{n_K}^{[K]}}_{S_K})^T \quad (17)$$

对优化变量第 i 个粒子第 j 次进化变量定义为:

$$x_i^{[j]} = (x_{i1}^{[j]}, x_{i2}^{[j]}, \dots, x_{inj}^{[j]})^T \quad (18)$$

在其适应值计算的时候,替换过渡向量相应的第 j 个部分:

$$P = (z_1^{[1]}, \dots, z_{n_1}^{[1]}, \dots, z_{i1}^{[k]}, \dots, z_{inj}^{[j]}, \dots, z_1^{[K]}, \dots, z_{n_K}^{[K]})^T \quad (19)$$

相应粒子的适应值计算:

$$f(x_i^{[j]}) = f(P_i^{[j]}) \quad (20)$$

对每个子优化问题,最优的变量粒子为:

$$z^{[k]} = p_g^{[k]} = (p_{g1}^{[k]}, p_{g2}^{[k]}, \dots, p_{gn_k}^{[k]})^T \quad (21)$$

从而经过 K 个子问题的优化,过渡向量最后包含所有最优子问题的优化解,即:

$$P = (\underbrace{p_{g1}^{[1]}, \dots, p_{gn_1}^{[1]}}_{S_1 \text{的最优解}}, \underbrace{p_{g1}^{[2]}, \dots, p_{gn_2}^{[2]}}_{S_2 \text{的最优解}}, \dots, \underbrace{p_{g1}^{[K]}, \dots, p_{gn_K}^{[K]}}_{S_K \text{的最优解}})^T \quad (22)$$

最后的优化向量 P 接近于全局最小值。

3 基于协同微粒子群算法的 TSCOPF

3.1 COMPSO 算法的流程

根据 COMPSO 算法,本研究提出 COMPSO 求解 TSCOPF 问题的步骤为:

步骤 1:输入系统数据、故障集、变量上、下限,设定发电机有功出力 and 节点电压幅值作为控制变量,根据系统数据以及控制变量的个数,设置合适的子优化问题个数 K ,设置 COMPSO 算法参数后,启动优化算法;

步骤 2: 初始化种群的位置和速度, 并随机初始化过渡粒子向量。每个粒子在迭代过程中进行寻优, 对于潮流计算不收敛的粒子进行重新初始化;

步骤 3: 计算微粒子群中每个粒子的潮流和暂态稳定, 对于暂态稳定的评估使用 COI 坐标, 评估目标函数值, 计算对于每个微粒子的适应度;

步骤 4: 根据每个粒子的适应度函数值, 更新粒子个体最优和全局最优值;

步骤 5: 如果已经满足最大迭代次数, 则转到步骤 9, 否则转至步骤 6;

步骤 6: 根据全局最优值更新过渡粒子向量的子优化部分; 并且根据微粒子优化结果进行标准差检查, 如果标准差小于阈值, 则重新初始化以保持粒子最优位置;

步骤 7: 更新微粒子群的速度和速度, 并进行边界修正判断;

步骤 8: 返回步骤 3 重新计算粒子对应的潮流和暂态稳定, 计算适应度函数。

步骤 9: 根据微粒子群优化结果更新过渡粒子向量的子维度;

步骤 10: 判断是否达到最大优化维度, 即是否完成所有子问题的优化, 如果未到最大维度, 返回步骤 2 进行维度转换, 重新初始化下个子优化问题。

步骤 11: 更新过渡粒子向量, 将最终更新后的粒子作为 TSCOPF 的最优解, 输出计结果。

整个计算流程如图 1 所示。

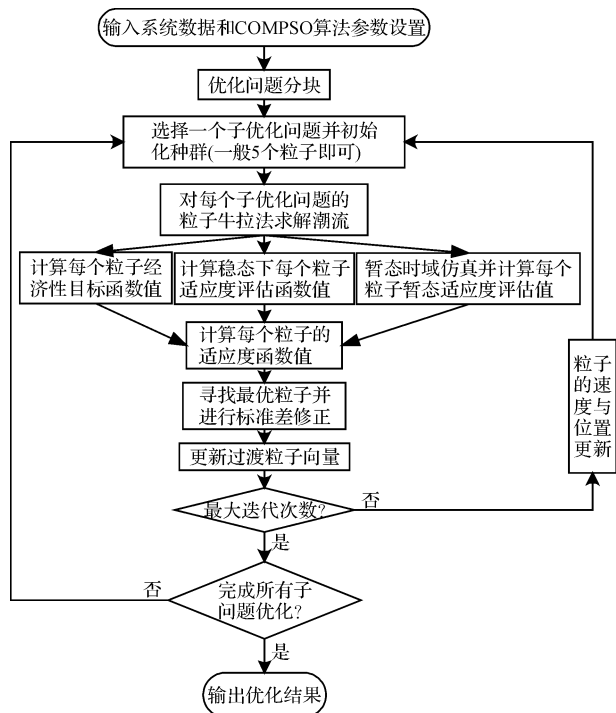


图 1 COMPSO 求解 TSCOPF 程序流程

3.2 仿真计算结果及分析

COMPSO 求解暂态稳定约束最优潮流的性能通过如图 2 所示的新英格兰 10 机 39 节点算例来验证。仿真采用 MATPOWER4.1^[23] 工具包改进进行仿真, 由于该方法并不涉及发电机具体模型, 针对复杂模型该方法可以简单套用, 所以算例中发电机模型采用经典二阶模型, 负荷采用恒定阻抗模型, 暂态时域仿真通过逐步积分法计算。该算例中 10 台发电机的燃料特性参数根据经验在合理范围内选取, 在整个算例测试中保持不变。暂态研究的时间长度为 5 s, 积分步长设为 0.01 s。暂态稳定判据中 $\delta_{\max} = 100^\circ$ 。

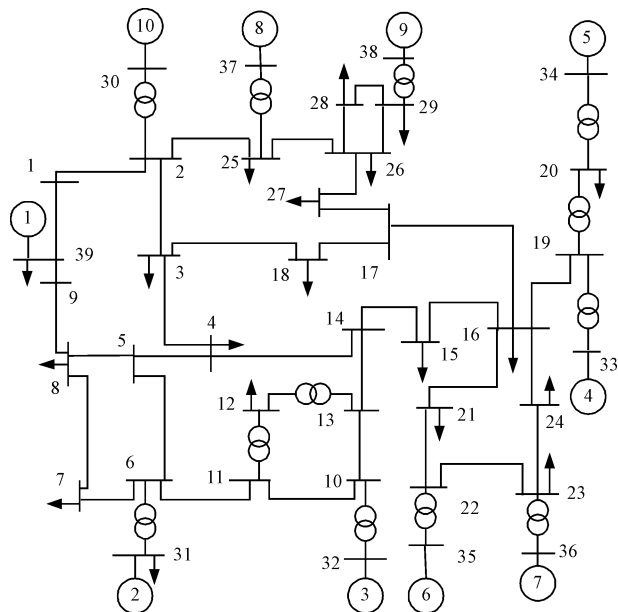


图 2 新英格兰 10 机 39 节点系统

可调发电机的电压幅值设定在 0.95 pu ~ 1.05 pu 之间, 对 10 机 39 节点系统而言, 有 19 个控制变量, 包括 9 个发电机的有功出力 and 10 个发电机的电压幅值。微粒子数设为 5, 将控制变量分为 7 个子优化问题, 即 $K=7$, 这样对每个子优化问题, 用 5 个粒子优化控制变量中的 3 个维度, 达到较好的优化效果, 最大迭代次数 100 次。给定的两个故障:

故障 C1: 节点 4 处发生三相短路故障 0.25 s 切除故障线路 4—5。

故障 C2: 节点 21 处发生三相短路故障 0.16 s 切除故障线路 21—22。

利用 COMPSO 算法求解 TSCOPF 问题得到的优化结果如表 1 所示。

根据发电机出力调整后的情况, 发电机在预想事故 C1, C2 下的功角曲线如图 3、图 4 所示。由图可以看出, 系统能够保持暂态稳定。

表 1 COMPSO 求解新英格兰系统 TSCOPF 最优解

	C1	C2		C1	C2
G1/MW	230.76	246.83	V1/(pu)	1.060	1.029
G2/MW	567.01	566.60	V2/(pu)	1.060	1.057
G3/MW	645.59	655.98	V3/(pu)	1.053	1.020
G4/MW	631.01	637.50	V4/(pu)	1.053	1.060
G5/MW	511.14	500.61	V5/(pu)	1.060	1.060
G6/MW	638.77	631.70	V6/(pu)	1.060	1.060
G7/MW	573.90	538.39	V7/(pu)	1.060	1.060
G8/MW	533.80	529.05	V8/(pu)	1.060	1.053
G9/MW	827.68	840.08	V9/(pu)	1.060	1.060
G10/MW	978.53	990.37	V10/(pu)	1.001	1.058
F/(\$ · h ⁻¹)	60 900.74	60 901.35			

系统预防控制优化结果如表 2 所示。从表 2 中结果可以看出,3 种情况下,COMPSO 算法结果分别比其他算法最优调度费用下降了 26.12 \$/h、27.43 \$/h、36.50 \$/h。3 种情况下均为最优,并且不存在无法得到优化结果的情况,收敛性质良好。相比于其他优化算法,该算例中 COMPSO 算法的计算量平均下降了约 20%。

表 2 不同方法下新英格兰系统预防控制优化结果

	C0	C1	C2
数值离散差分方法/(\$ · h ⁻¹)	60 972.00	—	62 263.00
单机无穷等效降维方法/(\$ · h ⁻¹)	60 918.66	60 934.82	60 937.85
灵敏度类方法/(\$ · h ⁻¹)	60 992.88	61 826.53	—
差分进化算法/(\$ · h ⁻¹)	60 936.51	61 021.04	60 988.25
确定性规划与差分进化混合算法/(\$ · h ⁻¹)	60 920.39	60 928.17	60 940.22
COMPSO 算法/(\$ · h ⁻¹)	60 892.54	60 900.74	60 901.35

故障 C1:4-5 相对摇摆角与时间的关系曲线

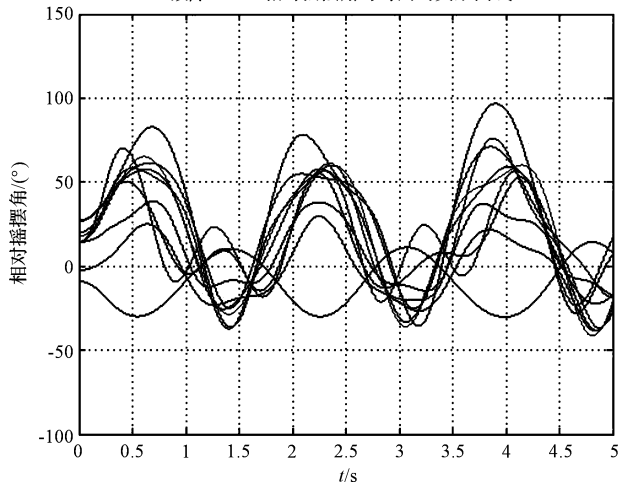


图 3 COMPSO 优化后 C1 故障下功角摇摆曲线

故障 C2:21-22 相对摇摆角与时间的关系曲线

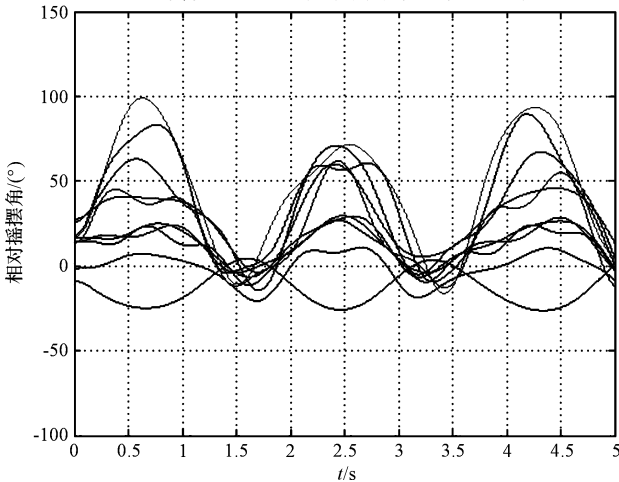


图 4 COMPSO 优化后 C2 故障下功角摇摆曲线

在无故障 C0 情况,以及故障 C1、故障 C2 情况下,分别将本研究所用的 COMPSO 算法与已报道文献的智能算法的优化结果进行比较,不同方法下新英格兰

4 结束语

本研究提出了一种的基于协同微粒子群算法的暂态稳定约束最优潮流计算方法,并在 10 机 39 节点系统上利用不同故障进行验证。通过将基本粒子群分解为子优化问题,降低了优化问题的维度,并用子优化问题的最优解逼近求得优化问题全局最优解,使得算法具有高精度的优点。

应用到电力系统预防控制后,本研究算法可以实现对优化问题较为精确求解,另外,并行计算技术的引入可以进一步提高算法的计算效率,是求解 TSCOPF 问题的一个发展方向。

参考文献 (References) :

- [1] MITHUN B M, MUTHYALA S, MAHESWARAPU S. Security constraint optimal power flow (scopf)-a comprehensive survey[J]. **International Journal of Computer Applications**,2010,6(8):42-52.
- [2] GAN D, THOMAS R J, ZIMMERMAN R D. stability constrained optimal power flow[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**,2000,15(2):535-540.
- [3] LAYDEN D, JEYASURYA B. Integrating Security Constraints in Optimal Power Flow Studies[C] // Proc IEEE Power Eng Soc General Meeting,2004:256-263.

- [4] ZÁRATE-MIÑANO R, CUTSEM T V, MILANO F, et al. Securing transient stability using time-domain simulations within an optimal power flow[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2010, 25(1):243-253.
- [5] 孙元章, 杨新林. 电力系统动态灵敏度计算的伴随方程方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(3):6-12.
- [6] 孙 闻, 房大中. 考虑暂态稳定约束的发电再调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9):12-16.
- [7] 罗明亮, 黄宇保, 王建全. 基于最优潮流法含暂态稳定约束的最大传输容量计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19):22-26, 32.
- [8] NGUYEN T B, PAI M A. Dynamic security-constrained re-scheduling of power systems using trajectory sensitivities[J]. **IEEE Transactions on Power System**, 2003, 18(2):848-854.
- [9] 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.
- [10] MO N, PONG G T Y, CHAN K W, et al. Multi-contingency transient stability constrained optimal power flow by genetic algorithm[C] // APSCOM 2006, CDROM, Hong Kong, 2006.
- [11] CAI H R, CHUNG C Y, WONG K P. Application of differential evolution algorithm for transient stability constrained optimal power flow[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2008, 23(2):719-728.
- [12] GUTIERREZ-MARTINEZ V J, CAZARES C A, FUERTE-ESQUIVEL C R, et al. Neural-network security-boundary constrained optimal power flow[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2011, 26(1):63-72.
- [13] KÜR AYANŞAT AYAN, UIAŞ KILIÇ. Solution of transient stability constrained optimal power flow using artificial bee colony algorithm[EB/OL][2010-02-23]. <http://online.journals.tubitak.gov.tr>.
- [14] 黄玉龙, 刘明波. 结合轨迹灵敏度和微分进化技术的暂态稳定约束最优潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10):18-26.
- [15] TANGPATIPHAN K, YOKOYAMA A. Adaptive Evolutionary Programming with Neural Network for Transient Stability Constrained Optimal Power Flow[C] // Proc15th International conference on Intelligent System Applications to Power System (ISAPPS), 2009.
- [16] XU Yan, DONG Zhao-yang, MENG Ke, et al. A hybrid method for transient stability-constrained optimal power flow computation[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2012, 27(4):1769-1777.
- [17] 李鑫滨, 朱庆军. 一种改进粒子群优化算法在多目标无功优化中的应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7):137-143.
- [18] 苏海峰, 张建华, 梁志瑞, 等. 基于改进均值聚类随机粒子群算法的变电站 LCC 规划[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4):209-215.
- [19] HOBALLAH A, ERLICH I. PSO-ANN Approach for Transient Stability Constrained Economic Power Generation[C] // IEEE Bucharest Power Tech Conference, 2009:1-6.
- [20] 何怡刚, 祝文姬, 周岩涛, 等. 基于粒子群算法的模拟电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6):163-171.
- [21] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle Swarm Optimization[C] // Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, Piscataway, NJ, 1995(IV):1942-1948.
- [22] PARSOPOULOS K E, Cooperative Micro-Particle Swarm Optimization[C] // ACM2009 World Summit on Genetic and Evolutionary Computation (2009 GEC Summit), Shanghai, China, 2009:467-474.
- [23] ZIMMERMAN RD, GAN D. MATPOWER: a MATLAB power system simulation package. Power System Engineering Research Center, Cornell Univ.: Ithaca, NY, 1997. [EB/OL][1997-12-17]. Available :<http://www.pserc.cornell.edu/Matpower>.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

叶 琳, 肖谭南, 吕晓祥, 等. 基于协同微粒子群算法的暂态稳定约束最优潮流[J]. 机电工程, 2015, 32(1):101-106.

YE Lin, XIAO Tan-nan, LV Xiao-xiang, et al. Application of cooperative micro-particle swarm algorithm for transient stability constrained optimal power flow [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(1):101-106.《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>