

PSO 算法在互联电网 CPS 功率调节中的应用研究

刘斌¹, 王克英¹, 余涛¹, 刘奇²

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广东省电力调度中心, 广东 广州 510600)

摘要: 研究了电网中不同类型 AGC 机组在功率缺额下所应该承担的比例大小问题。采用标准 PSO 算法对 CPS 控制策略中 AGC 机组调节功率的分配进行机组种群优化。利用标准 PSO 算法, 可以避免平均分配法较难得到最优解的缺陷, 从而在经济性的条件下使 CPS 指标达到最优。通过算例进行仿真计算, 证明了该算法的有效性。

关键词: 粒子群优化算法; 控制性能标准 (CPS); 自动发电控制 (AGC); 功率调节

Study on the application of particle swarm optimization algorithm to power regulation of CPS in interconnected power grids

LIU Bin¹, WANG Ke-ying¹, YU Tao¹, LIU Qi²

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Guangdong Power Grid Dispatching Center, Guangzhou 510600, China)

Abstract: The proportion of different AGC unit under the shortfall of power in the grid is investigated. The paper adopts PSO algorithm to optimize units of AGC (automatic generation control) which regulate the distribution of power in the CPS controlling strategy. The optimal solution is hard to obtain by using average distribution but can be worked by using standard PSO algorithm, and then the CPS level can achieve the optimal one under economic conditions. The paper verifies the effectiveness of the algorithm by computing example simulation.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50807016).

Key words: particle swarm optimization algorithm; control performance standard; automatic generation control; regulation power

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)06-0036-04

0 引言

北美电力可靠性委员会 (NERC) 在 1996 年推出了控制性能标准 CPS (Control Performance Standard)^[1]。自 1998 年正式开始实施以来, 这种标准基于控制区域对整个电网频率的贡献进行评价, 以整个电网的电能质量和安全稳定运行成为控制目标, 从而使大多数区域的利益得到保证。在现有互联电网 CPS 标准下大多采用的是自动发电 (AGC) 控制策略, 利用 AGC 系统对电网频率和区域控制偏差 (ACE) 进行综合控制具有较好的发展潜力。电网内参与 AGC 功率调节的机组主要是水、火、气电机组 (LNG) 以及抽水蓄能水电机组, 通过深入研究分析发现, 各类机组所承担的功率调节任务即 CPS 分配因子的不同将会导致 AGC 调节特性有较大的差异。

传统的 AGC 调节功率在进行分配时是采取平均分配法, 在不管机组类型, 也不管机组容量与调节速率的情况下, 仅根据经验对各种 AGC 机组进行大概平均估计分配调节功率。这种分配方法在各种不同类型机组一起联合参与自动调节后, 将会导致某些快速调节机组 (如蓄能机组) 进入调节饱和区, 调节功率分配因子的不科学, 进而引起 CPS 合格率下降, 对机组安全运行也不利。因此, 如何根据实际运行条件选择合理的 AGC 机组调节功率的分配成为 CPS 控制中急需解决的一项重要内容。

标准粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 是 1995 年由 Kennedy 博士和 Eberhart 博士提出的一种模拟群体生物行为的启发式群体智能算法, 通过群体中粒子间的合作和竞争产生群体智能来指导优化搜索^[2, 3]。PSO 算法保留了基于种群的全局搜索策略, 采用速度-位移模型, 操作简单, 易于实现。因此 PSO 算法一经提出, 其在电力系统领域中的应用研究逐渐显示出优越性和广阔的应用

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (50807016)

前景^[4]。本文采用标准粒子群优化算法 PSO 对各类机组分配因子的优化进行仿真研究。将经典 PSO 算法引入互联电网 CPS 考核下 AGC 机组调节功率的优化组合中,使得在相同运行条件下,系统频率波动小, CPS 指标值更优。并将结果与现行的平均分配法进行了比较。仿真实例表明,该方法可以得到全局最优解,具有高效并行处理、可调整参数少、收敛速度快等优点。

1 CPS 数学模型

在同时满足系统功率平衡及各种安全稳定性约束的条件下,求以 AGC 机组发电量变化最小或 CPS1 指标最优为目标函数的最优 AGC 机组出力,即求以最小调节功率为目标函数的最优 AGC 机组出力,以利于调度运行人员合理安排 AGC 机组。

1.1 原理简介

CPS1 要求对于某区域电网在某一时间(如 10 min)内满足^[1]:

$$\frac{\sum(ACE_{AVE-\min} \cdot \Delta F_{AVE})}{10B_i \cdot n} \leq \varepsilon_1^2 \quad (1)$$

式中: $ACE_{AVE-\min}$ 为 1 min 内 ACE 的平均值; ΔF_{AVE} 为 1 min 频率偏差的平均值; B_i 为控制区域的频率偏差系数; ε_1 为互联电网对全年 1 min 频率平均偏差的均方根的控制目标值; n 为该时段内的分钟数。

则这一段时段 CPS1 的指标的统计公式为:

$$CPS1 = (2 - \frac{\sum(ACE_{AVE-\min} \cdot \Delta F_{AVE})}{10B_i \cdot \varepsilon_1^2}) \times 100\% \quad (2)$$

CPS1 的物理意义: 当 $ACE_{AVE-\min} \cdot \Delta F_{AVE} \leq 0$ 时,

$$\min f(\bullet) = \frac{1}{10 \times N} \sum_{n=1}^{10 \times N} \left[\left[\frac{1}{60/\Delta t} \sum_{t=(n-1) \times 60/\Delta t+1}^{n \times 60/\Delta t} (B \Delta f(t) + \Delta p t(t)) \right] \times \left[\frac{1}{60/\Delta t} \sum_{t=(n-1) \times 60/\Delta t+1}^{n \times 60/\Delta t} \Delta f(t) \right] \right] / (10B_i) / \varepsilon_1^2 \quad (4)$$

其中: $\Delta f(t)$ 为第 t 时刻的频率偏差值; $\Delta p t(t)$ 为第 t 时刻的联络线偏差量; Δt 为采样时间间隔; B 为控制区频率偏差系数; ε_1 为实际频率与标准频率偏差的一分钟平均值的均方差;

此目标函数为: 通过 AGC 机组的优化调节,使互联电网联络线功率偏差量和由控制区反映到频率变化的功率缺额变化最小,从而得出 CPS 值最优。本文在 CPS 标准下提出了以上两种目标函数,实质都是使 CPS 值最优。

CPS1 值大于 200%, 表示该控制区在这 1 min 是低频多送(或少用), 或高频少送(或多用), 显然对电网频率是有利的, 基于 CPS 的 AGC 控制一般不动作; 当 $ACE_{AVE-\min} \cdot \Delta F_{AVE} > 0$ 时, 则恰好相反, 此时需要启动 AGC 进行调节, 所有能够进行功率调节的 AGC 机组均进入调节模式, 迅速向 ACE 绝对值减少的方向调节。因此 CPS1 统计值的大小直接反映电网频率与联络线交换功率执行的优劣情况。

1.2 目标函数

(1) 机组调节电量变化最小(经济性)

$$\min f(\bullet) = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in S_G} c_i \sum_{k=1}^t \Delta p g_i(k) = \sum_{t=1}^T \sum_{i \in S_G} c_i \sum_{k=1}^t u(k) w_i(k) RPG_i \quad (3)$$

其中: S_G 为 AGC 机组的集会; $\Delta p g_i(k)$ 为第 i 台 AGC 机组第 k 时刻的加减发电量; c_i 为第 i 台 AGC 机组的线性经济系数; T 为计算的时间段; $u(k)$ 为第 k 时刻 AGC 机组加减速启停值; $w_i(k)$ 为第 i 台 AGC 机组第 k 时刻出力限制值; RPG_i 为第 i 台 AGC 机组线性调节速率。

此数学模型表示以 AGC 机组发电量变化最小为目标, 减少 AGC 调节量在一定程度上的超调或欠调, 避免给 AGC 机组频繁下发控制命令, 减少调节次数, 降低 AGC 机组的无故磨损, 同时提高 CPS 考核的合格率。

(2) CPS1 指标最佳(指标性)

CPS 指标目标函数可等价如下:

1.3 制约条件

(1) 旋转备用制约:

$$\sum_{i=1}^N u_i(t) p_{i\max} \geq L(t) + R(t) \quad (5)$$

(2) 机组出力制约:

$$p_{i\min} \leq p_i(t) \leq p_{i\max} \quad (6)$$

(3) 机组爬坡速率制约:

$$\Delta p_{i\min} \leq p_i(t) - p_i(t-1) \leq \Delta p_{i\max} \quad (7)$$

其中: $t=1,2,\dots,T$; $u_i(t)=1$ 表示机组运行, $u_i(t)=0$ 表示机组停运; $p_{i\max}$ 、 $p_{i\min}$ 分别为发电机组 i 的出力上限和下限; $L(t)$ 为 t 时刻系统总负荷; $R(t)$ 为 t 时段中系统总备用容量; $\Delta p_{i\max}$ 、 $\Delta p_{i\min}$ 分别为发电机组 i 的最大升负荷速率和降负荷速率。

2 标准 PSO 算法

2.1 算法的基本原理

PSO 初始化为一群随机粒子(随机解), 通过迭代找到最优解。在每次迭代中, 粒子通过跟踪个体极值 $pbest$ 与全局极值 $gbest$ 来更新自己。设在 N 维搜索空间中, 一个群体由 m 个粒子组成, 粒子以一定的速度飞行, 这个速度根据它本身的飞行经验以及同伴的飞行经验进行动态调整。对于第 i 个粒子在 N 维目标搜索空间中的位置向量记为: $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})^T$, 它迄今为止搜索到的最佳位置向量记为: $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iN})^T$, 也称为 $pbest$ (个体极值)。在整个群体中所搜索到的最佳位置向量记为: $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gN})^T$, 也称为 $gbest$ (全局极值)。而飞行速度向量则记为: $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN})^T$ 。则第 d 维 ($1 \leq d \leq N$) 根据方程 (8) 来更新粒子的速度和位置。

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2 (p_{gd}^k - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (8)$$

$$(i=1,2,\dots,m;d=1,2,\dots,N)$$

式中: k 表示迭代次数; m 表示粒子群规模; ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为加速常数; r_1 、 r_2 为区间 $[0, 1]$ 内的随机数; v_{id}^k 、 x_{id}^k 表示 v_{id} 、 x_{id} 的第 k 次迭代值; p_{id}^k 表示粒子 i 的个体极值点位置, p_{gd}^k 表示整个群体全局极值点位置。为防止粒子远离搜索空间, v_{id} 要限制在 $[-v_{d\max}, +v_{d\max}]$ 之间, 此外, 如果当前对粒子的加速导致它在某维的速度 v_{id} 超过该维的最大速度 $v_{d\max}$, 则该维的速度被限制为上限 $v_{d\max}$ 。粒子通过不断学习更新, 最终飞至解空间中最优解所在的位置, 搜索过程结束, 最后输出的 $gbest$ 就是全局最优解。

2.2 算法实现的流程

标准 PSO 的算法流程如下:

第一步: 初始化一群粒子, 包括速度和随机位

置; 第二步: 评价每个粒子的适应度; 第三步: 对每个粒子, 将其适应值与其经历过的最好位置 $pbest$ 作比较, 如果较好, 则将其更新为当前的最好位置 $pbest$; 第四步: 对每个粒子, 将其适应值与全局所经历的最好位置 $gbest$ 作比较, 如果较好, 则重新设置 $gbest$; 第五步: 根据方程 (8) 变化粒子的速度和位置; 第六步: 如未达到中止条件 (达到适应值或最大迭代次数 k_{\max}), 则返回第二步。

2.3 算法参数的设定

PSO 的优势之一是采用实数编码, 无太多需要调节的参数。算法公式中的基本参数有: 惯性因子 ω ; 权重因子 c_1 、 c_2 ; 最大迭代次数 k_{\max} 以及种群规模 m 。其中最主要的参数惯性因子 ω 满足函数关系式:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} \times k \quad (9)$$

式 (9) 中 ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为 ω 的最大和最小允许值; k 、 k_{\max} 分别代表当前和最大的迭代次数。由 ω 与迭代次数的线性关系可知 ω 对算法的收敛性和收敛速度有很大影响。经过多次试验验证取 $\omega_{\max} = 1$, $\omega_{\min} = 0.3$, $k_{\max} = 300$ 。 ω 从 1 到 0.3 线性下降, 使得 PSO 在开始时探索较大的区域, 较快地定位最优解的大致位置, 随着 ω 逐渐减小, 粒子速度减慢, 开始精细的局部搜索。该方法加快了收敛速度, 提高了 PSO 算法的性能。

加速常数 c_1 和 c_2 代表将每个微粒推向 $pbest$ 和 $gbest$ 位置的统计加速项的权重。根据测试经验一般 c_1 等于 c_2 并且范围在 0 和 4 之间。本文选取 $c_1 = c_2 = 1.5$ 。

3 算例分析

本文利用 Matlab 编写最基本的粒子群优化算法程序, 对某地区电网 AGC 运行机组进行 Matlab 分类建模。给定 PSO 种群规模 $m = 30$, 经过实验测试选取惯性权重 $\omega = 0.73$ 。参与 AGC 功率调节机组参数如表 1, 表 2 为不同 AGC 机组的分配因子。

表 1 与表 2 中代码说明如下: A-F 分别表示火电机组 (600 MW 以下)、火电机组 (600 MW 以上)、液化天然气 (LNG) 机组、水电机组 (大容量)、水电机组 (小容量)、抽水蓄能机组 (每台容量为 300 MW, 具有自动调节能力的上下限为 180/300 MW, 即调节容量为 120 MW, 其虽然可以处于水泵状态吸收电网过剩功率, 但这必须由运行人员按命令进行操作); W-Z 分别表示机组台数、装机容量 (MW)、爬坡速率

(MW/min)、可调容量 (MW)、而 1—6 表示不同分配系数下的试验方案。其中试验 1 至试验 5 为采用现有的平均分配法所得的结果,而试验 6 为通过 PSO 算法所得的优化分配计算结果。试验仿真结果如图 1 和图 2 所示。

表 1 AGC 机组参数

Tab.1 Parameters of AGC units

	W	x	y	z
A	15	4 500	45	960
B	25	13 500	200	5 700
C	8	3 900	180	1 500
D	2	200	70	180
E	2	120	30	100
F	3	900	180	360

表 2 不同分配因子的试验

Tab.2 Test of different distribution gene

	1	2	3	4	5	6
A	0.15	0.2	0.15	0.2	0.25	0.242
B	0.25	0.3	0.35	0.35	0.35	0.443
C	0.2	0.15	0.2	0.15	0.15	0.102
D	0.2	0.2	0.15	0.15	0.15	0.104
E	0.1	0.05	0.05	0.05	0.05	0.054
F	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.055

在仿真中采取不同的负荷扰动进行优化分配因子比较。选取单个大小为 300 MW、600 MW、1 000 MW 的突增负荷阶跃扰动(模拟甩机故障)进行仿真,并对各种情况进行了总结。通过多次试验对比可知,图 1 中运用 PSO 算法得到的结果使 CPS1 值高于 150%,而且收敛速度明显快于通过简单平均分配法所得结果。在图 2 中电网频率的波动周期要明显小于其它试验结果。所以在相同试验条件下,采用 PSO 算法对机组调节功率的优化分配结果在实际应用中是可行的,体现了算法的优越性,具有实际社会效益和经济效益。

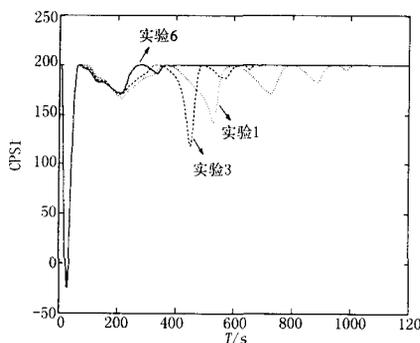


图 1 CPS1 的仿真比较结果

Fig.1 Simulation results of CPS1

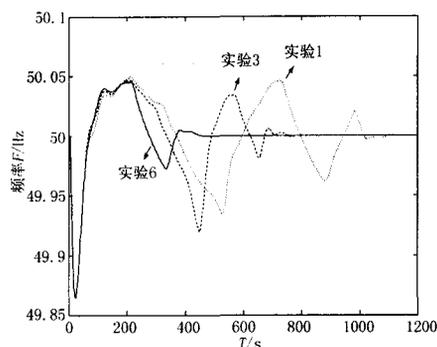


图 2 频率仿真结果

Fig.2 Simulation results of frequency

4 结论

本文将标准 PSO 算法应用于互联电网 CPS 评价下 AGC 机组调节功率的分配因子问题中,用 Matlab 进行算法编程以及搭建仿真模型。并将该方法应用于由火电、水电、气电以及抽水蓄能机组所组成的四类型电网系统中,算例结果表明,与单纯用平均分配方法相比,本文提出的方法有高质量的优化解,稳定的收敛性以及有效的计算效率。该算法操作简单,编程语句较少,在大多数情况下,可满足电网经济调度运行实时性要求,在实践中是行之有效的,具有较大的工程应用价值。

参考文献

- [1] 高宗和, 腾贤亮, 涂力群. 互联电网 AGC 分层控制与 CPS 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 78-81. GAO Zong-he, TENG Xian-liang, TU Li-qun. Hierarchical AGC Mode and CPS Control Strategy for Interconnected Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 78-81.
- [2] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Neural Networks[C]. Perth(Australia): 1995. 1942-1948.
- [3] Kennedy J. The Particle Swarm: Social Adaptation of Knowledge[A]. In: Proc IEEE Int Conf Evol Comput[C]. Indianapolis: 1997. 303-308.
- [4] 袁晓辉, 王乘, 张传勇, 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): 14-29. YUAN Xiao-hui, WANG Cheng, ZHANG Chuan-yong, et al. A Survey on Application to Electric Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-29.
- [5] Gaing Z L. Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1187-1195.

(下转第 52 页 continued on page 52)

制,增强了系统的可靠性和稳定性,而且作为一种平衡式传输方式,传输效率和实时性能也较 101 有了更大提高。因此在我国铁路电力系统中推广采用 104 规约,对促进我国铁路电网安全、可靠的运行具有积极的意义。

参考文献

[1] 鞠阳,张惠刚. IEC60870-5-104远动规约的设计及其应用[J].继电器,2006,34(17):55-58,66.
JU Yang, ZHANG Hui-gang, IEC60870-5-104 Transmission Protocols's Design and Application[J]. Relay, 2006,34(17):55-58,66.

[2] 赵渊,沈智健.基于TCP/IP 的IEC60870-5-104 远动规约在电力系统中的应用[J]. 电网技术,2003,27(10):56-60,71.
ZHAO Yuan,SHEN Zhi-jian. The based on TCP/IP Transmission protocols IEC60870-5-104's Application in the Power Telecontrol System[J].Power System Technology, 2003,27:56-60,71.

[3] 远动设备及系统第5-104部分:传输规约采用标准传输协议子集的IEC60870-5-101网络访问[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
Telecontrol Equipment and Systems Part5-104: Transmission protocols-Network Access for IEC 60870-5-101 Using Standard Transport Profiles[M]. Beijing: China Electric Power Press,2002.

[4] IEC 60870-5-1, 远动设备及系统(第5部分:传输规约,第1篇:传输帧格式)[M]. 北京:中国标准出版社,2002.
IEC 60870-5-1, Telecontrol Equipment and Systems Part 5:Transmission Protocols,Section 1:Transmission Frame Formats[S]. Beijing: Standard Press of China,2002.

[5] IEC 60870-5-2, 远动设备及系统(第5部分:传输规约,第2篇:链路传输规则)[M]. 北京:中国标准出版社,2002.

IEC 60870-5-2, Telecontrol Equipment and Systems Part 5:Transmission Protocols Section 2:Link Transmission Procedures[M]. Beijing: Standard Press of China,2002.

[6] IEC 60870-5-3, 远动设备及系统(第5部分:传输规约,第3篇:应用数据的一般结构)[M]. 北京:中国标准出版社,2002.
IEC 60870-5-3,Telecontrol Equipment and Systems Part 5:Transmission Protocols,Section 3:General Structure of Application Data[M]. Beijing: Standard Press of China,2002.

[7] IEC 60870-5-4, 远动设备及系统(第5部分:传输规约,第4篇:应用数据的定义和编码)[M]. 北京:中国标准出版社,2002.
IEC 60870-5-4,Telecontrol Equipment and Systems Part 5:Transmission Protocols,Section 4:Definition and Coding of Application Information Elements[M]. Beijing:Standard Press of China,2002.

[8] IEC 60870-5-5, 远动设备及系统(第5部分:传输规约,第5篇:基本应用功能)[M]. 北京:中国标准出版社,2002.
IEC 60870-5-5, Telecontrol Equipment and Systems Part 5:Transmission Protocols,Section 5:Basic Application Function[M]. Beijing:Standard Press of China,2002.

收稿日期:2008-05-07; 修回日期:2008-07-20

作者简介:

闫亮亮(1983-),男,硕士研究生,从事电力运动和继电保护研究;E-mail: yll_19831227@yahoo.com.cn

陈剑云(1962-),男,博士,教授,从事电力运动和继电保护研究;

费远鹏(1981-),男,硕士,从事电力运动系统继电保护研究。

(上接第 39 页 continued from page 39)

[6] Sinha N, Chakrabarti R, Chattopadhyay P K. Evolutionary Programming Techniques for Economic Load Dispatch [J]. IEEE Trans, Evl Comput, 2003,7:83-94.

[7] 赵波,曹一家.电力系统机组组合问题的改进粒子群优化算法[J].电网技术,2004,28(21):6-10
ZHAO Bo, CAO Yi-jia. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Power System Unit Commitment[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 6-10.

收稿日期:2008-05-01; 修回日期:2008-09-10

作者简介:

刘斌(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护、控制与自动化;E-mail: liubin168168@163.com

王克英(1963-),男,教授,从事微型计算机在电力系统测量和控制中的应用研究。